

第 47 回 天文・天体物理若手夏の学校
アブストラクト

横山 修一郎 氏 (立教大学)

7月26日 16:45 - 17:45 B会場

観測的インフレーション宇宙論

宇宙の極初期に加速膨張が起こったとするインフレーション宇宙論。このインフレーション理論は、標準ビッグバン宇宙論の初期条件に関する諸問題を自然に解決できる。特にこの宇宙の豊かな構造の種となる初期密度ゆらぎの生成は、インフレーション理論の重要な観測的帰結である。実際、近年の宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎや大スケールの銀河分布の観測といった、いわゆる宇宙論的なゆらぎの観測により、インフレーション理論は絶大な支持を得ている。一方、素粒子理論や重力理論の進展に伴い、より具体的なインフレーションモデルが膨大な数提唱されている。真のインフレーションモデルは何かという問いにどこまで観測的に迫ることができるか、近年の状況とともに将来の展望についても紹介したい。

中村 卓史 氏 (京都大学)

7月27日 11:00 - 12:00 B会場

タイトル未定

重力 a1 赤方偏移空間におけるハロークラスタリングのエミュレータ構築

小林洋祐 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M2)

宇宙の大規模構造は、物質の密度揺らぎの分布が宇宙に存在する様々なエネルギー成分の相互作用によって複雑に進化してきた過程を反映するものであり、そこに膨大な宇宙論的情報が含まれている。銀河分光サーベイは、大規模構造形成によって生成した銀河のクラスタリングを観測することで、その情報を抽出する手法である。

銀河は一般に、周囲のダークマターがつくる重力場に従い、特異速度をもって運動しているため、銀河分光サーベイで測定される銀河の赤方偏移は、Hubble 膨張の寄与と共に特異速度の視線方向成分の寄与も含む。そのため、観測で得られる赤方偏移空間上の銀河の分布は、実空間での分布と比べて視線方向に歪んだ形として現れる。赤方偏移歪みと呼ばれるこの効果は、銀河クラスタリングの情報を歪めてしまう一方で、宇宙の重力場を直接反映するプローブとして重要な役割を担っている [1]。

銀河分光サーベイで得られる銀河のクラスタリングは、赤方偏移歪みの効果を必ず受けるので、観測がもたらす銀河クラスタリングの情報を効果的に宇宙論に利用するためには、赤方偏移歪みを入れたクラスタリングの理論モデルの構築が必須である。ところが現状、銀河の形成過程が十分に解明されていないために、銀河の分布を第一原理的に予言することが不可能であることから、銀河形成の場であるハローのクラスタリングを調べる研究が広く行われている [2,3]。

本研究では、赤方偏移歪みの効果を取り入れたハローのクラスタリング統計量を多次元宇宙論パラメータ空間上で予言する理論モデルを構築している。6つのパラメータで指定される宇宙論に基づく N 体計算の結果から、ハローのクラスタリングを測定し、ガウス過程による回帰によって、ハローの赤方偏移空間におけるパワースペクトルの単極成分および四重極成分を予言する手法を開発した。発表においてその概要を述べ、構築した理論モデルの予言能力について報告する。

- 1 N. Kaiser, Mon. Not. R. Astron. Soc. 227, 1-21 (1987)
- 2 B. Reid and M. White, Mon. Not. R. Astron. Soc. 417, 1913-1927 (2011)
- 3 T. Nishimichi and A. Taruya, Phys. Rev. D 84 043526 (2011)

重力 a2 弱重力レンズ効果と intrinsic alignments

立石廉晟 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M1)

宇宙の構造形成の標準的シナリオである冷たいダークマター構造形成モデルは、膨張する宇宙のなかで、ダークマターの質量密度ゆらぎが自身の重力で成長し、現在観測される宇宙構造が形成したというシナリオである。遠方銀河から発せられた光

の経路は、このダークマター分布の非一様性による重力レンズ効果により曲げられ、結果としてその銀河像には系統的な歪み効果が引き起こされる。これは弱重力レンズ効果と呼ばれるが、逆に、遠方銀河像の統計的解析から重力レンズ効果が測定でき、ダークマターの空間分布を復元することができる。

しかし、重力レンズ効果の測定法は、異なる遠方銀河像には相関がない、つまり宇宙論的に十分離れた銀河間には物理的な相関がないという仮定に基づいている。しかしながら、銀河の形状は、宇宙の大規模構造の重力潮汐力場と銀河の質量分布の重力相互作用を起源とする可能性があり、つまり銀河の形状と宇宙の大規模構造の潮汐力場との間に物理的に相関がある可能性がある。この潮汐力場は、まさに背景の銀河像に重力レンズ効果を引き起こす。つまり、同じ赤方偏移に存在する宇宙構造の潮汐力場と銀河像の間には相関がある可能性があり、これは intrinsic alignments と呼ばれ、重力レンズ測定に系統誤差を引き起こす。

このように、重力レンズの精密測定から宇宙論を行うには、この intrinsic alignments の寄与を除去する必要がある。本発表では論文 [1] のレビューを行うが、論文 [1] ではまず背景にある物理の確認を行い、20 世紀における観測の進歩とその影響について概観した後、銀河や大規模構造のアラインメントについて議論する。特に、文献 [2] の研究にモチベーションを受け、この intrinsic alignments を測定することにより、大波長スケールの潮汐力場を制限する新たな手段になり得ることを議論する。

- 1 B. Joachimi et al., arXiv:1504.05456
- 2 K. Akitsu, M. Takada, Y. Li, Phys. Rev. D95, 083522

重力 a3 重力レンズ解析におけるバリオン効果の寄与

伊藤輝 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M1)

宇宙の大規模構造による弱重力レンズ効果は宇宙論パラメータを制限する強力な手段である。遠方銀河の発せられた光の経路は、手前の大規模構造の重力レンズ効果により曲げられ、結果として我々は形状が歪んだ銀河像を観測することになる。逆に、この歪んだ銀河像の統計解析することにより、宇宙論的弱重力レンズ効果を測定することができる。現在すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam サーベイが稼働中であり、宇宙論的弱重力レンズ効果が精密に測定されることが確実である。しかし、この重力レンズの精密測定から宇宙論パラメータを制限するためには、宇宙の構造形成の理論モデルも正確である必要がある。例えば、正確でない理論モデルと精密測定結果を比較した場合には、宇宙論パラメータの推定値を有意に間違える可能性がある (理論の不定性による系統誤差)。

理論モデルの構築の際の最大の不定性が、バリオンの物理 (星形成、銀河形成、また AGN などのフィードバック) の効果である。未だ第一原理的にガス物理をモデル化できないために、ガス物理が引き起こす宇宙の大規模構造の形成への影響は

正確には理解されていない。精密な重力レンズ効果の測定結果と理論モデルを比較する際にも、現象論的にガス物理の効果を考慮する必要がある必要がある。本講演では Zentner et al. (2012) をレビューする。また、バリオンの効果を取り入れる新たな手法を開発する研究を始めているので、その結果が得られていれば、それについて考察する。

- 1 Zentner, A. R., Semboloni, E., Dodelson, S., et al. 2013, Phys. Rev. D, 87, 043509
- 2 Zentner, A. R., Rudd, D. H., & Hu, W. 2008, Phys. Rev. D, 77, 043507
- 3 Oguri, M., & Takada, M. 2011, Phys. Rev. D, 83, 023008

重力 a4 SKA の観測による BAO を用いたダークエネルギーの制限

安藤梨花 (名古屋大学 C 研 M1)

現在の宇宙が加速膨張していることが観測から確認されているが、その要因はまだ解明されていない。加速膨張をもたらす有力な候補としてダークエネルギーが考えられており、数多くのモデルが存在する。ダークエネルギーのモデルを制限するためには、ダークエネルギーを特徴付けるパラメータに制限を与える必要がある。宇宙の膨張率の時間変化はパラメータの値に依存するので、宇宙の膨張率の時間変化から、ダークエネルギーのモデルに制限を与えることができる。

宇宙の膨張率を測る方法の一つに、バリオン音響振動 (BAO) を用いる方法が存在する。BAO の振動スケールは、宇宙マイクロ波背景放射の観測から精密に決まっている。このため、宇宙におけるものさしとして用いることができ、宇宙膨張の時間変化を知ることができる。

2020 年から初期科学運用が始まる大規模電波干渉計の Square Kilometre Array (SKA) がある。SKA では中性水素の超微細構造のエネルギー差に由来する電磁波である 21-cm 線の観測によって、BAO の情報を得ることができる。高感度かつ空間と周波数に対して高分解能の SKA が可能にする intensity mapping という観測方法では、これまでよく行われてきた galaxy redshift survey とは独立な情報を探索することができる。

先行研究ではフィッシャー解析を用いて、SKA の観測データを用いた場合のダークエネルギーのパラメータへの制限の予測を行なっている。しかし、この解析は中性水素バイアスのスケール依存性を考慮していない。本発表では、SKA の観測によりダークエネルギーのパラメータを制限するメカニズムについて説明し、先行研究を再現した結果について報告する。時間が許せば、中性水素バイアスのスケール依存性を考慮した赤方偏移空間におけるパワースペクトルのモデルについて、解析計算及びシミュレーションデータを用いた結果についても議論する。

- 1 Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array. 2015 by SKA organisation

重力 a5 スプラッシュバック・パラダイム

杉浦宏夢 (京都大学 天体核研究室 M2)

Diemer & Kravtsov (2014) はダークマターハロー外縁部で NFW プロファイルが破れ、狭い範囲で密度スロープが急に下がる現象を数値的に見出した [1]。彼らはこの領域がハローを構成するダークマターの「遠点」における caustics であると主張し、この遠点に対応する半径を splashback radius と命名した。彼らの主張はその後の研究で追認され [2]、観測的にも splashback radius を重力レンズ効果によって検出したという報告もある [3]。

splashback radius はダークマター粒子の遠点つまり軌道に基づいて導入された概念であるから、その解析は必然的にダークマターハローの空間分布と速度分布双方の情報 (つまり位相空間分布) を利用することになる。こうして導かれたダークマターハローの位相空間構造というパラダイムは、しかし現在までの多くの研究で見過ごされていたものである。これはダークマターハローに関して実測可能な物理量は密度プロファイルだけであるという考えによるものと思われる。だが splashback radius に基づくことで従来の overdensity $\Delta = 200$ によるよりも物理的根拠を持ったハロー半径が定義でき、ハロー質量関数といった物理量を解析する際に有益である可能性がある。さらに、ダークマターハロー形成そのものに関する物理的理解を深める上でも本質的であろうと私は考えている。

本講演では splashback radius の定義および宇宙論における有用性を簡単にレビューした後、私が現在進めているダークマターハローの位相空間構造の解析に関する現状を報告する。特に N 体シミュレーションにおいて splashback radius がどのように検出されるかに焦点を当てたい。

- 1 B. Diemer and A. V Kravtsov, Astrophys. J., 789, 1 (2014)
- 2 S. Adhikari, N. Dalal, and R. T. Chamberlain, J. Cosmol. Astropart. Phys., 11, 19 (2014)
- 3 S. More et al., Astrophys. J., 825, 39 (2016)

重力 a6 孤立系モデルによるボイドの形状進化の解析

簀口睦美 (名古屋大学 C 研 M2)

宇宙の大規模構造における低密度領域は、ボイドと呼ばれる。ボイドは、そのスケールが数百 Mpc にも及ぶものもあり、非常に巨大な構造であるため、宇宙論的スケールにおける宇宙論モデルの検証を行う上で格好のプロープである。近年の大規模な銀河サーベイによる観測や、大規模シミュレーションによる計算から、徐々にボイドの性質が明らかにされるとともに、実際にボイドを用いた宇宙論パラメータの制限も試みられてきた [1,2]。その一方で、ボイド自体の力学的性質を詳細に論じた研

究はほとんどない。本発表では、シミュレーションデータ中のボイドの進化傾向を理解するため、単体で存在するような単純化されたボイドモデルを考え、これによって大規模構造中のボイドの形状進化の説明を試みた結果について発表する。

- 1 S. Nadathur, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 461 no.1, 358-370 (2016).
- 2 N. Hamaus et al, Phys. Rev. Lett. 117, 091302 (2016).

重力 a7 長波長ゆらぎが宇宙の大規模構造に与える影響

秋津一之 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 D1)

現在の宇宙に存在するあらゆる構造の起源はインフレーション時に生み出された原始ゆらぎに遡る。原始ゆらぎが重力不安定性によって成長することで、豊かな階層構造が形成されてきたというのが標準的な構造形成シナリオである。すなわち、現在観測される銀河分布には原始ゆらぎの情報が刻まれており、原理的には大規模構造の観測からその情報を取り出すことができると思われる。

ところが、銀河サーベイを通じて初期宇宙の物理機構を探るためには、密度ゆらぎの非線形重力進化を理解する必要がある。この非線形重力進化を追う方法として、理論的には N 体シミュレーションと摂動論の二つがある。 N 体シミュレーションは密度ゆらぎの非線形成長を第一原理的に追えるものの、シミュレーションは有限体積で行われ、周期境界条件を課すことから、シミュレーション体積を超える長波長ゆらぎは無視されている。そのため、このような長波長ゆらぎが、重力によるモードカップリングによって短波長ゆらぎに与える影響については長年謎であった。

一方、標準的な摂動論は、小スケール領域では密度ゆらぎが $\mathcal{O}(1)$ 程度になり、摂動論が破綻してしまうものの、無限に長いゆらぎについても解析的に扱うことができる。そこで、摂動論が有効な準線形領域では、長波長ゆらぎが短波長ゆらぎに与える影響は調べられてきた [1,2]。しかし、先行研究は長波長ゆらぎの等方的な効果についての研究に限られているという問題があった。本研究では、長波長ゆらぎの非等方的な効果が短波長ゆらぎに与える影響を定式化し、赤方偏移空間パワースペクトルの covariance に与える影響を見積もった [3]。発表では、将来の大規模分光サーベイにおけるバリオン音響振動測定に対して長波長ゆらぎの非等方的な効果が与える影響についても議論する。

- 1 B. D. Sherwin, and M. Zaldarriaga, Phys. Rev. D 85, 103523 (2012).
- 2 M. Takada, and W. Hu, Phys. Rev. D 87, 123504 (2013).
- 3 K. Akitsu, M. Takada, and Y. Li, Phys. Rev. D 95, 083522 (2017).

重力 a8 CMB distortion を利用した初期密度揺らぎの非ガウス性の制限予測

加藤健太 (名古屋大学 C 研 M1)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) のスペクトルは約 2.73K の黒体放射スペクトルにほぼ完全に一致し、その存在はビックバン理論を支持する重要な証拠となっている。初期宇宙では、光子の黒体放射スペクトルは、ダブルコンプトン散乱、制動放射、コンプトン散乱等の過程によって維持される。しかし、宇宙膨張に伴い温度が低下することで、光子・バリオンの結合が徐々に弱まり、光子が熱浴から解放されていく。それ以後は光子にエネルギーの流入があった際、スペクトルに歪みが生じる [1]。本発表では、黒体放射スペクトルの歪みの非等方性を用いて、初期密度揺らぎの非ガウス性を制限する論文 [2] をレビューする。

初期宇宙では、光子とバリオンは強く結合し、共に音響振動している。しかし、光子の平均自由行程以下のスケールでは揺らぎは均されるので、小スケールの揺らぎの振動は減衰する。この現象は、温度揺らぎの 2 次成分を通してポルツマン方程式におけるエネルギー流入となり、黒体放射スペクトルからの歪みを引き起こす。

スペクトルの歪みは一般に、光子数の保存に伴う化学ポテンシャルに起因するもの (μ -type distortion) と光子が伝搬する間に電子からエネルギーを受け取るもの (y -type distortion) でパラメータ化でき、この 2 つの μ, y -パラメータは、初期宇宙での CMB 光子へのエネルギー流入で記述することができる。

μ, y -パラメータと温度揺らぎの相互相関は、温度の高次相関と見なすことができ、初期密度揺らぎの非ガウス性 (f_{NL} パラメータ) に制限を与えることができる。レビュー論文 [2] では、光子バリオン流体の相互作用の遍歴を考慮して、 μ, y -パラメータそれぞれへのエネルギー流入を現実在即した形で記述し、 $k \sim 740 Mpc^{-1}$ までの小スケールで、 $f_{NL} < \mathcal{O}(10^3)$ という制限予測を与えている。これは、Planck 衛星の温度揺らぎの三点相関から得られた制限 ($f_{NL} = 2.5 \pm 5.7k < \mathcal{O}(1) Mpc^{-1}$) に比べ遙かに小スケールまでをカバーし、また、類似した先行研究 [3] などに比べ、より一般化した表式により正確な結論を与えている。

- 1 Hiroyuki Tashiro, PTEP 2014 no.6, 06B107 (2014)
- 2 Chluba J., Dimastrogiovanni E., Amin M. A., Kamionkowski M., MNRAS, 466 (2017) 2390
- 3 Pajer E., Zaldarriaga M., Physical Review Letters, 109, 021302 (2012)

重力 a9 Beyond generalized Proca 理論における宇宙論

宇宙後期加速膨張を説明する試みとして、修正重力理論に基づく暗黒エネルギーモデルが数多く提唱されてきた。そのほとんどは、運動方程式を2階微分に保つ最も一般的なスカラー・テンソル理論であるホルンデスキ理論や、これを運動方程式が高階の空間微分を含むよう拡張したGLPV理論に内包される。しかし、これらの理論では観測から示唆されている宇宙論的スケールでの弱重力を不安定性なしに実現することが難しい。さらにGLPV理論では、一様等方な背景時空においてスカラー場の伝搬速度が物質場の伝搬速度と結合する非自明な性質を示すために、モデルによってはスカラー場の伝搬速度の2乗が負になる不安定性が現れる。このような背景のもとで、重力と結合する場をスカラー場からベクトル場へと拡張することは自然な着想であろう。

スカラー・テンソル理論の伝播自由度は、スカラー1つ、テンソル2つの計3つである。それに対しベクトル・テンソル理論の中でもホルンデスキ理論と同様な手続きで構成されたgeneralized Proca (GP)理論では、その伝搬自由度がスカラー1つ、ベクトル2つ、テンソル2つの計5つとなる。また、ホルンデスキ理論からGLPV理論への拡張と同様の手法を用いて、伝搬自由度を維持してゴースト自由度が出現しないようGP理論を拡張したbeyond generalized Proca (BGP)理論[1]がある。GP理論ではベクトルモードの自由度が存在するために不安定性なしに宇宙論的スケールでの弱重力を実現できるが、パラメータに強い制限を課す必要がある[2]。

本発表では文献[3]の成果報告として、BGP理論の枠組みで伝搬速度に付随する不安定性およびゴーストの現れない有効な暗黒エネルギーモデルを構築する。さらに、GP理論の場合よりも自然に大スケールでの弱重力を実現できることを数値計算によって示す。

- 1 L. Heisenberg, R. Kase and S. Tsujikawa, Phys. Lett. B 760, 617 (2016).
- 2 A. De Felice, L. Heisenberg, R. Kase, S. Mukohyama, S. Tsujikawa and Y. Zhang, Phys. Rev. D 94, 044024 (2016).
- 3 S. Nakamura, R. Kase and S. Tsujikawa, Phys. Rev. D 95, 104001 (2017).

重力 a10 Palatini f(R) 重力による宇宙論とダークエネルギー

嶋田圭吾 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

Einstein が一般相対性理論を提唱して以来、様々な実験の観測により、その正しさは検証されてきた。しかし一般相対性理論の枠組みで成功を収めているビッグバン宇宙論に大きな謎が現れた。宇宙は未明の構成物質、ダークエネルギーとダークマターで大部分を占められるというのである。前者は、1998年

に遠方にある Ia 型超新星の観測によりに発見された宇宙の加速膨張を説明するために導入された。この宇宙の加速膨張の問題解決には大きく分けて二つのアプローチがある。加速膨張を引き起こす奇妙な物質を考えるアプローチと宇宙論スケールでは重力相互作用が一般相対性理論とは異なる修正重力理論を用いるアプローチである。本研究では後者の修正重力理論の代表格の f(R) 重力理論を用いて、ダークエネルギーの説明ができる可能性を探る。この理論のうち、ダークエネルギーを説明する理論として、Hu-Sawicki 模型 [1] が推定されている。決まった質量スケールより十分大きい時に補正項は宇宙項のように振舞うが、宇宙項は仮定されていない。さてこれらの模型を考える際、二つの理論的形式がある。一つは計量のみを基本変数と考える通常の計量形式、もう一つは計量と接続を独立な基本変数とする Palatini 形式である [2]。一般相対性理論においては、接続が対称のとき、または計量条件が成り立つ時、計量形式と Palatini 形式は等価になるが、一般的には異なる理論を与える。例えば f(R) 重力において計量形式で基礎方程式を導出すると、新たな自由度としてスカラーモードが出現するが、Palatini 形式では自由度は増えない。本研究では Palatini 形式に基づく f(R) 重力、特に Hu-Sawicki 模型によりダークエネルギー問題解決の可能性を探る。発光性赤色銀河と Ia 型超新星の観測によりパラメータに制限を与えたあと、これらを用い、有効状態方程式変数の時間に対する振る舞いを解析する。最後に構造形成との整合性を確かめるため、銀河相関による観測を用い、 δ との対応を確認する。

- 1 W. Hu, I. Sawicki, Phys. Rev. D, 76, 064004, (2007)
- 2 A. Einstein, Sitzungber. Preuss. Akad. Wiss., 414 (1925)

重力 a11 3 階微分方程式に従うスカラー・テンソル理論の Ostrogradsky 不安定性 彌永亜矢 (立教大学 M2)

ニュートンの運動方程式に代表されるように、多くの物理法則は時間について2階もしくは1階の微分方程式で記述される。2階微分より高階の微分方程式がほとんど現れない理由は、Ostrogradsky 不安定性 [1] の存在によって説明できる。一般的に、高階微分方程式に従う理論はハミルトニアンに下限が存在しないことが知られている。このような理論にはエネルギー的に安定な状態がなく、非孤立系である場合にはエネルギーが際限なく落ちてしまう。運動方程式の高階微分に起因する、こういった不安定性を Ostrogradsky 不安定性という。

Ostrogradsky 不安定性は理論自体の不安定性であるため、理論構築の際に重要な役割を担う。特に一般相対論の拡張である修正重力理論を構築する時は、Ostrogradsky 不安定性を回避することが大きな方針となっている。例えば Horndeski 理論や beyond Horndeski 理論は、Ostrogradsky 不安定性を回避する目的で、運動方程式が時間について2階微分までに抑えられて

いる。しかし、場の理論において Ostrogradsky 不安定性の存在が確認されているのは 4 階微分以上の理論であり、3 階微分の場の理論における不安定性は証明されていない。そこで我々は、修正重力理論の 1 つであるスカラー・テンソル理論（一般相対論にスカラー場を加えた理論）を用いて、3 階微分の場の理論における不安定性を検証した。

本講演では、まず 3 階微分方程式に従う質点の理論 [2] を簡単にレビューする。その中で、3 階微分方程式を導く一般的なラグランジアンを提示する。次に我々の行った研究の成果を報告する。本研究では [2] で構成したラグランジアンを、任意の個数のスカラー場を持つ一般的なスカラー・テンソル理論 [3] に応用した。これによってスカラー場とテンソル場が 3 階微分方程式に従う一般的なスカラー・テンソル理論を構築し、この理論が Ostrogradsky 不安定性を持つかどうかを検証した。

- 1 M. Ostrogradsky, Mem. Acad. St. Petersburg f 6, no. 4, 385 (1850)
- 2 H. Motohashi and T. Suyama, Phys. Rev. D f 91, no. 8, 085009 (2015)
- 3 T. Kobayashi, N. Tanahashi and M. Yamaguchi, Phys. Rev. D f 88, no. 8, 083504 (2013)

重力 a12 修正重力理論による時空特異点回避の可能性

小林曜 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

現在、一般相対論は多くの実験・観測により、少なくとも太陽系スケールで正しいとされている。しかし、Penrose と Hawking の特異点定理によって、物質場が適切なエネルギー条件に従い、時空が一定の条件を満たせば、時間的あるいは光的な特異点が時空の対象性によらず普遍的に現れることが示された [1]。宇宙初期やブラックホール内部に現れる特異点では曲率が発散し、時空の構造が破綻するため、一般相対論は予測能力を失う。現実の宇宙にはこのような特異点は存在せず、一般相対論によると特異点が現れるような高エネルギー領域ではその修正が必要になると考えられる。量子重力の効果を考えることによってこのような修正が可能になる可能性があるが、量子重力はいまだに理論として完成していない。そこで、現象論的に高エネルギー領域における一般相対論の修正を取り込むため曲率制限仮説 (Limiting Curvature Hypothesis, LCH) を考える。LCH では、 $R, R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$ などの曲率から作られるスカラーに対して、 l_{Pl} を Planck 長として $l|R| \lesssim l_{\text{Pl}}^{-2}, l|R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}| \lesssim l_{\text{Pl}}^{-4}$ のように上限を仮定する。Brandenberger, mukhanov らの研究では、LCH により宇宙初期特異点の回避を議論しているが、制限されるスカラーとして Ricci テンソルのみから作られる量を用いており、Weyl テンソルが発散するブラックホールの特異点については具体的な議論がなかった [2, 3]。本研究では、宇宙初期特異点だけでなくブラックホール内部の特異点の回避も目指して、Riemann テンソルの全ての成分からなる不変量である Gauss-

Bonnet 曲率二乗項 ($R_{\text{GB}} = R_{\alpha\eta\mu\nu}R^{\alpha\eta\mu\nu} - 4R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} + R^2$) を制限した。その結果、宇宙初期特異点に関して空間の曲率が正の場合宇宙が収縮から膨張に転じて特異点を回避するバウンズ解を得た。また、ブラックホールのように非一様な時空を議論するために球対称静的な時空を考え、特異点のないソリトニックな解を得た。本講演ではこれらの解の性質について述べる。今後は地平線を持ち、外部からは一般相対論によるブラックホールに見えるが地平線内部に特異点を持たない解を構成できるか調べていく。

- 1 S. W. Hawking and G. F. R. Ellis, extitThe large scale structure of space-time, Cambridge University Press (1973)
- 2 V. Mukhanov and R. Brandenberger, extitPhys. Rev. Lett. extb68, 1969 (1992)
- 3 R. Bradenberger, V. Mukhanov and A. Sornborger, extitPhys. Rev. extb48, 1629 (1993)

重力 a13 Degravitation of the Cosmological Constant in Massive gravity and Bigravity 富川慶太郎 (立教大学 M1)

Ia 型超新星の観測により現在の宇宙が加速膨張していることが判明しており、この加速膨張を説明する代表的なものとして (Λ)CDM モデルがある。このモデルでは真空のエネルギーと解釈される正の宇宙定数を導入する必要があるが、場の量子論で真空のエネルギーを求めると観測から制限される宇宙定数の値と 60 桁以上もの差が生じてしまう。これは宇宙定数問題と呼ばれ、現代物理学の大きな謎の一つとなっている。本講演では、重力子が質量を持つ massive gravity と呼ばれる重力理論を用いて宇宙定数問題の解決を図る。

一般相対論は質量を持たないスピン 2 の場の理論で記述される。しかし、現段階では重力子の質量がゼロであるという明確な根拠は見つかっていない。そこで、一般相対論の素朴な拡張として、重力子が質量を持つスピン 2 の場の理論 (massive gravity) が構築された。だが、質量を持たせるとゴーストと呼ばれる負の運動エネルギーを持つ自由度が現れ系が不安定になる等の問題があった。近年、この問題が解決されたため、宇宙論への応用も盛んになっている。

本講演では論文 [1][2] をレビューする。massive gravity では degravitation という機構が働くことで宇宙定数の値が観測での制限を満たし、宇宙定数問題が解決される。しかし、ここで用いた理論には太陽系スケールでの観測結果と矛盾してしまうという問題がある。この問題は massive gravity をさらに拡張した bigravity によって解決できる可能性がある。そこで、この拡張された理論が、宇宙定数問題を解決し、さらに太陽系スケールでの観測と整合性のある予言を与えるかどうかを検証する。

- 1 C. de Rham, G. Gabadadze, L. Heisenberg and D. Pirt-

skhalava, Phys. Rev. D f 83, 103516 (2011)

- 2 M. Platscher and J. Smirnov, JCAP f 1703, no. 03, 051 (2017)

重力 a14 AdS/CFT 対応による宇宙初期特異点の解析

岡林一賢 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

一般相対性理論は数多くの実験や観測により検証されている。それに基づくビックバン宇宙論も観測的に正しいと信じられている。しかし、宇宙の膨張を過去に遡ると、時空という概念自体が破綻する宇宙初期特異点から宇宙が生まれたことを予言する。曲率が無限に大きくなる特異点は自然界には存在しないはずで、そのため理論を変更する必要がある。その最も自然な理論の一つとして時空を量子的に扱う量子重力理論が挙げられるが、まだ完成していない。そのため宇宙初期特異点に関しては未だに謎が多い。しかしこの特異点問題に対して、近年ゲージ/重力対応により何か手掛かりが得られないかと模索されている。ゲージ/重力対応は、4次元共形場の量子論と5次元の漸近的 AdS 時空での半古典的な重力理論に1対1の対応があると主張する AdS/CFT 対応をより一般的な場合に拡張したもので、特異点問題を対応する共形場の量子論に置き換えることができるため、解析が困難な特異点を扱う際に強力な道具として考えられる。特に興味深いのは、Engelhardt 達による研究で、彼らは時空が宇宙初期特異点を持つときに対応する共形場の量子論で相関関数が極を持つことを示している [1][2]。CFT 側でこの極の扱い方を調べることで特異点問題に対する解決策を探ろうというわけである。彼らの結果は特別な時空に対して特別な方向に関して示されたものであるため、一般の時空に対して同様な結果が得られるかどうかはわからない。そこで、本発表では先行研究の拡張及び一般の時空の解析結果を述べるとともに、対応する CFT 側での解釈についても議論したい。

- 1 N. Engelhardt, T. Hertog and G.T. Horowitz, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 121602
- 2 N. Engelhardt, T. Hertog and G.T. Horowitz, JHEP 07 (2015) 044

重力 a15 極限ブラックホールからの光子放出

南川朋輝 (近畿大学 一般相対論・宇宙論研究室 M1)

ブラックホール近傍から放射される様々な光(電磁波)の観測により、ブラックホールについて多くの情報が得られると期待されている。そのためにはブラックホール近傍から観測者の位置する遠方への光の測地線を解く必要があるが、一般に楕円積分となるため数値計算による以外、解析が極めて困難であることが知られている。しかし近年、回転角速度が大きい極限ブラックホールの場合には共形対称性と呼ばれる特別な対称性を

利用することで測地線方程式を初等関数を用いて解析的に解く方法が Strominger(2017) らにより提案された。この共形対称性を用いた新しい方法は、最近では、極限に近いブラックホールからの重力波波形の計算にも利用されている。本発表ではこの Strominger らによる極限ブラックホール時空での光的測地線方程式の新しい解法を紹介する。

- 1 A. Porfyriadis, Y. Shi, and A. Strominger Phys. Rev. D95 064009(2017)

重力 a16 AdS の等長沈め込みとブラックホール

松野阜 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M2)

一般にブラックホールとは非常に強い重力ゆえの時空構造であると認識されている。しかしその定義は重力の強さによるものではなく時空の因果構造により規定される。どの方向へ光を出しても無限の未来へ飛び去ることができないような領域があるときそのような領域の境界はイベントホライズンと呼ばれ、その時空はブラックホールと呼ばれる。定義の性質上は重力の作用が弱くてもブラックホール構造を持つ時空はありえることになる。かつて Banados らは AdS_3 において等長変換群の作用による軌道空間を考えた(軌道空間とは等長変換群によって写りあう点たちを同一視した空間のこと)。AdS は極大対称空間なのでワイルテンソルはないため重力の作用は存在せず、またその軌道空間は局所的には AdS_3 と同じ幾何を持つためやはり重力の作用は存在しない。ところがこの時空はブラックホール構造を持つことが示され衝撃を与えた。そこで我々は Banados らとは違った方法で AdS からブラックホール構造を持つ時空を作り出すことを試みた。Kaluza-Klein リダクションなど統一場理論においてよく用いられる手法である等長沈め込みを AdS に行いブラックホール構造を持つ時空を得た。本発表では AdS_3 においてブラックホール構造を持つ時空が現れる理由を幾何学的に理解できるように解説する。またより高次元の AdS_5 においてもブラックホール構造を持つ時空が得られており少し紹介する。

- 1 M.Banados, M.Henneaux, C.Teitelboim, J.Zanelli arXiv:gr-qc/9302012
- 2 S.Holst, P.Peldan arXiv:gr-qc/9705067

重力 a17 HSC 銀河団カタログと Fermi γ 線観測データをを用いたダークマター探査

橋本大輝 (名古屋大学 C 研 M1)

宇宙背景放射などの観測により、ダークマターは宇宙における物質密度の 85% ほどを担っていることが判明している。その一方で、その正体を解明することは困難を極めており、未だ明らかにされていない。従って宇宙の物質の主要な構成要素であるダークマターの正体を明らかにすることは現代の宇宙物

理学において大きな目標の一つである。ダークマターの性質として、対消滅 (Dark Matter Annihilation (DMA)) や崩壊 (Decaying Dark Matter (DDM)) を起こす場合に γ 線を放出するような過程が考えられる。従って、ダークマターを間接的に探査する手法の一つとして、 γ 線背景放射に対して、これらの γ 線の信号を探査する方法が挙げられる。

先行研究 [1] では、Fermi GRST によって観測された γ 線背景放射の強度分布と NFW プロファイルによって予測されるダークマターの密度分布から、上記のようなダークマター由来の信号を評価している。しかしこの手法では天球面上の 2 次元の情報からの評価しかできず、視線方向の情報を使えない。そこで本研究では、銀河団の観測から得られる個々の銀河団の赤方偏移を用いることで視線方向の情報を活用する。これによりダークマターの密度分布の赤方偏移依存性を評価できる。また銀河団の分布を観測から得ることにより、先行研究がシミュレーションによって評価しているダークマターハローの分布について観測からアプローチする。HSC による観測から得られた銀河団の分布と Fermi GRST の観測から得られた γ 線背景放射の強度分布の相互相関を取ることによって、相関信号の赤方偏移依存性を探査する。本発表では、相関信号と理論から予測されるダークマターの密度分布の赤方偏移依存性から DDM, DMA の性質について調査した結果について報告する。

1 S. Ando and E. Komatsu Phys. Rev. D87 123539 (2013)

重力 a18 銀河団のガンマ線観測による原始ブラックホールの密度パラメータへの制限 榊原日菜子 (名古屋大学 C 研 M1)

原始ブラックホール (PBH) は初期宇宙で高密度領域が重力崩壊して形成されるブラックホールである。PBH の存在を示す観測的証拠は未だ発見されていないが、PBH の存在量を制限することは、インフレーションモデルへの制限 [1] などの宇宙論的問題の解決への鍵となることが期待される。先行研究 [2] ではガンマ線背景放射を用いて、PBH の形成時 t_i での PBH の密度が宇宙のエネルギー密度に対して占める割合 $\eta \equiv h_{\text{PBH}}(t_i)/h_{\text{tot}}(t_i)$ を制限している。PBH から放出されるガンマ線の起源は二種類あり、一つめは Hawking 放射と呼ばれる熱的放射である。二つめは PBH から放出されたクォークとグルーオンから形成される不安定なハドロンの崩壊に由来する放射である。先行研究ではこれらの放射の寄与を考慮して、全ての PBH から放出されるガンマ線のフラックスを計算し、観測と比較することで η を制限している。

上述の先行研究 [2] ではガンマ線背景放射を用いて制限を課している。それに対し、本研究では PBH が豊富に存在すると予想される銀河団に着目し、銀河団の方向から飛来するガンマ線を観測することで、PBH の存在量をより強く制限できるかどうか検討した。本研究では PBH が形成される時の質量 M_{PBH} が単一であるという仮定の下で、銀河団のダークマターハロー

に含まれる PBH から放射されるガンマ線のフラックスを計算して、PBH の現在の密度パラメータの割合 $f \equiv \Omega_{\text{PBH}}/\Omega_{\text{CDM}}$ と M_{PBH} の関係へ制限を課した。本講演では、本研究で得られた制限を先行研究と比較した結果について説明する。

- 1 B.J.Carr and J.E.Lidsey, Phys. Rev. D48, 543 (1993)
- 2 B.J.Carr, K.Kohri, Y.Sendouda and J.Yokoyama, Phys. Rev. D81, 104019 (2010)

重力 a19 アクシオンのカーバトンモデルによる原始ブラックホール形成 安藤健太 (東京大学 宇宙線研究所 M2)

インフレーション理論は現在の宇宙が非常に一様等方平坦である理由を説明するとともに、構造形成の種となる初期ゆらぎを予言する。CMB の観測により、(波長が) 大スケールのゆらぎは精度よく測定され、インフレーション理論との整合性が確かめられてきた。一方、小スケールゆらぎの(振幅の) 大きさについては弱い制限があるのみで観測的に理解が進んでいない。小スケールに大きなゆらぎがあると、原始ブラックホール (Primordial Black Hole: PBH) などの特殊な天体が生成される。PBH は宇宙初期に密度ゆらぎの大きい領域が重力で崩壊してできるブラックホールであり、ダークマターの候補になっている。また、LIGO で重力波により $30M_{\odot}$ (M_{\odot} : 太陽質量) 程度のブラックホール連星の合体が観測されたが [1]、この正体が PBH であることも有力な可能性となっている。

小スケールに大きなゆらぎを作るモデルにアクシオンのカーバトンモデルがある。先行研究 [2] ではこのモデルで生成される PBH がダークマターとなり得ることが示唆されている。本研究では、PBH 生成に関連する密度ゆらぎのスケール依存性を正しく取り入れて質量スペクトルを計算し、HSC (Hyper Suprime-Cam) による最新の観測からの制限 [3] と合わせることで、このモデルで生成される PBH がダークマターの主成分となる可能性を排除した。さらに、曲率ゆらぎの 2 次の効果で生成される重力波を計算し、PTA (Pulsar Timing Array) の観測により課されている上限と比較した上で、このモデルで LIGO イベントが記述され得ることを示した。

- 1 B. P. Abbott et al. (Virgo, LIGO Scientific), Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016)
- 2 M. Kawasaki, N. Kitajima and T. T. Yanagida, Phys. Rev. D 87, 063519 (2013)
- 3 H. Niikura et al., arXiv:1701.02151 [astro-ph.CO] (2017)

重力 a20 原始ブラックホールと臨界現象 片桐拓弥 (立教大学 M1)

初期宇宙の理解は進みつつあるが、不明な部分も多い。インフレーションによる急激な加速膨張があったと考えられる初期宇宙には特徴的な物理が溢れており、CMB や重力波観測など

を通して様々な視点から検証が行われている。

初期宇宙を探るひとつの方法として、原始ブラックホール (PBH) の研究が挙げられる。PBH とは、インフレーション直後に初期揺らぎが重力崩壊を起こすことで形成されるブラックホールである。重力崩壊は揺らぎの大きさが臨界点を越えることで引き起こされ、時空構造が大きく変わる。この変化に伴って見られる特徴的な振る舞いを、臨界現象と呼ぶ。臨界現象に注目することで、PBH 形成に関する新たな理解が期待される。形成メカニズムが明らかになれば、その質量から初期揺らぎに制限を課すことが出来る。そのため PBH に注目することで、現在までに得られた CMB 等の観測結果と相補的に初期宇宙の描像を明らかに出来る。

本講演では [1] についてレビューし、まず放射優勢期における PBH 形成を議論する。次に、臨界現象に着目する。PBH における臨界現象では、揺らぎの大きさが臨界点に十分近いとき、その質量がスケール則に従う [2]。この領域における揺らぎが、流体の状態方程式のパラメーター $w(p = who)$ を変えることで見せる振る舞いについて調べた。放射優勢期では $w = 1/3$ であることは既知だが、 w 依存性を調べることで臨界現象を一般化された状態方程式の観点から見る事が可能になる。

結果としては、 $0.01 < w < 0.6$ の範囲でスケール則が見られた。また、 $w \rightarrow 0$ の振る舞いは物質優勢期を調べた先行研究 [3] と一致する。更に、 w を変えることで初期揺らぎのスペクトルは変更を受ける。今後の研究では、様々なインフレーションモデルとこの変更の間の相関を調べることで、PBH が初期宇宙に与えた影響を明らかにしていく。

- 1 I. Musco and J. C. Miller, Class. Quant. Grav. bf 30 (2013) 145009
- 2 I. Musco, J. C. Miller and A. G. Polnarev, Class. Quant. Grav. bf 26 (2009) 235001
- 3 M. Snajdr, Class. Quant. Grav. bf 23 (2006) 3333

重力 a21 カオティックインフレーションと reheating 温度の関係性

森祐子 (立教大学 M1)

インフレーション理論は、宇宙初期の急激な加速膨張期を記述する理論である。インフレーションの代表的なモデルとして、ポテンシャルが $V(\phi) \propto \phi^\alpha$ で表されるカオティックインフレーションがある。このうち、 ϕ^4 のモデルには Higgs インフレーション [1] が含まれている。これは、素粒子標準模型に含まれるスカラー場 (Higgs 場) が加速膨張を引き起こすモデルであり、未知のスカラー場を導入するモデルよりも自然と言える。

急激な加速膨張期が終わると宇宙は放射優勢期に入る。この急激な加速膨張期と放射優勢期を繋げるという重要な役割を持っているのが reheating と呼ばれる過程であるが、解明さ

れていない部分が多くある。例えば、インフレーションモデルに依存する量としてビッグバン開始時の温度を表す reheating 温度 T_{rh} がある。正確な T_{rh} の値を調べることができれば現在の宇宙を正しく記述する可能性のあるモデルを選出することができる [2]。これまでの研究では、 T_{rh} の取りうる値は $1\text{MeV} \leq T_{rh} \leq 10^{16}\text{GeV}$ と非常に範囲が広がった。しかし、近年では Planck 衛星による曲率ゆらぎのスペクトル指数 n_s やスカラー・テンソル比 r への制限に基づき、 T_{rh} に対してもより強く制限をつけることが可能になってきている。

本講演では論文 [3] をレビューし、 n_s と r からカオティックインフレーションでの T_{rh} に対する制限をより強くつけられることを説明する。そのために、まずインフレーション中の膨張指数 N と n_s, r がどのような関係で結びついているのかを述べる。そこから測定誤差に起因する N の許容範囲を求め、この結果から T_{rh} の取りうる範囲がどのように求められるかを説明する。ただし、 $\alpha = 4$ のポテンシャルの場合だとこれらの量に関係がつかなくなってしまう。 ϕ^4 のモデルは Higgs インフレーションを含んでいるため、この問題をどう解決するかが今後の課題となる。

- 1 F. Bezrukov, Class. Quant. Grav. bf 30, 214001 (2013) doi:10.1088/0264-9381/30/21/214001
- 2 L. Dai, M. Kamionkowski and J. Wang, Phys. Rev. Lett. bf 113, 041302 (2014) doi:10.1103/PhysRevLett.113.041302
- 3 J. O. Gong, S. Pi and G. Leung, JCAP bf 1505, no. 05, 027 (2015)

重力 a22 Higgs inflation と重力非最小結合

佐藤星雅 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

インフレーションは宇宙の初期揺らぎなどビッグバン宇宙論では説明困難な観測結果を自然に説明できる点から現在有力な理論である。宇宙の指数関数的膨張を引き起こすこの理論には、一般に宇宙を一様に満たすスカラー場 (インフラトン) が必要である。人類がこれまでに発見した素粒子は素粒子標準模型内の粒子のみであり、その中でスカラー場は Higgs 場だけである。そのため、この Higgs 場をインフラトンと仮定する Higgs inflation というモデルが提唱された。しかし単に一般相対論の枠組みで Higgs 場のダイナミクスを解析すると初期揺らぎが CMB の観測量より大きくなってしまふ。そこで Higgs 場が重力と非最小結合するモデルが考案された。最初に提案されたモデルは質量項と重力が非最小結合するモデルである [1]。この結合は結合定数が $1/6$ となるとときに場が共形対称になることから導出された。しかし CMB 観測と整合する重力非最小結合の結合定数は -10^4 となってしまう。また、この値は $O(1)$ 程度の他の結合定数に対し不自然である。次に考えられたのが運動項と重力が非最小結合するモデルである [2]。この結合は

Galilei 変換に対し不変であることから導入が考えられた。しかしこのモデルで生成される重力波の振幅は大きく、CMB の観測によって除外されかけている。これらのモデルは重力非最小結合を 1 種類ずつしか導入していないが一般的にこれは自明ではない。

以上のことを踏まえ、本講演では上記の 2 種類の非最小結合を両方とも導入したモデルとして "Hybrid Higgs inflation" を提唱し、時空と Higgs 場のダイナミクスの解析を行う。その後、摂動量の計算を行い観測との整合性を議論する。また、解析には Disformal 変換した後、高次の微分項を無視する近似を用いた。これにより Higgs 場の重力非最小結合の効果はポテンシャルに含まれ重力項は一般相対論と同様になり、解析が簡単になる。そこでこの近似の妥当性を検証する。

- 1 B.L.Spokoiny, Phys. Lett. B 147.1-3 (1984): 39-43.
- 2 C.Germani and A.Kehagias, Phys. Rev. Lett. 105, 011302 (2010)

重力 a23 Multi T-Model Inflation

戸塚良太 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

ビッグバン宇宙論の理論的困難を解決するアイデアとして、インフレーション理論が提唱されている。現在、インフレーションのモデルは数多く提唱されているが、インフレーション理論のエネルギースケールはプランク質量より少し低い程度と考えられており、従来これらのモデルに観測的制限を課すことは難しかった。しかし近年、PLANCK 衛星などの観測から、インフレーション理論の予言するゆらぎなどの観測を見積もり、モデルに観測的制限をつける事が可能になりつつある [1]。超弦理論は、現在高エネルギー領域における素粒子統一理論として有力視されている。この理論は、弦の性質から来る共形対称性を内在しており、この対称性は高エネルギー現象の鍵となることが予想され、インフレーション理論においても重要な役割を果たすことが予想される。Kallosh と Linde は、この共形対称性を考慮した T-model タイプのポテンシャルをもつ slow-roll インフレーションモデルを提唱している [2]。このモデルは、予言する密度ゆらぎが Starobinsky タイプのインフレーションモデルと一致しており、観測による制限を満たしている。ところで、超弦理論は、コンパクト化に伴い、理論の中に多数のスカラー場が存在することを予言している。なので、超弦理論由来のインフレーションモデルを考える場合には、インフラトンとして多数のスカラー場を考えるのが自然である。本発表では、Kallosh と Linde の T-model Inflation を、複数個のスカラー場が存在する場合について解析した。このモデルの特徴は、エネルギースケールの異なる指数膨張が段階的に起こり、その転移期にはエントロピー揺らぎを生じる。そこで、密度ゆらぎのスペクトル指数、テンソル-スカラー比、ランニングスペクトル指数などを詳細に解析し、観測による制限と矛盾

しない条件を明らかにした。

- 1 P. A. R. Ade et al. [Planck Collaboration], Astron.Astrophys. 594 (2016) A20
- 2 R. Kallosh and A. Linde, JCAP 1306, 028 (2013)

重力 a24 背景時空上におけるストカスティックアプローチの、理論的整合性の追求 徳田順生 (京都大学 天体核研究室 D1)

インフレーションの長波長モードのダイナミクスを、量子ゆらぎによる反作用を含めて取り扱う手法として、ストカスティックアプローチがある [1]。長波長モードとは、粗視化のスケール—ハッブルスケールより十分大きなスケール—よりも長いモードのことを指す。このアプローチでは、各空間点におけるスカラー場の時間発展はブラウン運動によって記述される。このインフレーション宇宙が古典的に確率的時間発展する描像は古くから注目され、研究されている [2]。近年では、観測量の計算にも応用されている [3]。しかし、本来スカラー場の時間発展は量子論的であり、長波長モードの従う有効運動方程式 (有効 EOM) が古典的確率過程とみなせるか否かは、非常に非自明である。現在のストカスティックアプローチの取り扱いでは、短波長モードは近似的に自由場として扱われており、この近似を外した際、長波長モードの従う有効 EOM の導出法は知られていない。ゆえに、その有効 EOM が古典的確率過程とみなせるか否かも知られていない。

上述の古典的確率的描像が破綻した場合、これまでのインフレーション宇宙の理解が大きく変更される可能性がある。一方、この描像の理論的整合性が保証された場合、これまでのインフレーション宇宙の描像に理論的基礎付けが初めて与えられたことになり、意義深い。

以上の背景から本研究では、ドジッター背景時空上における零質量スカラー場の理論において、その長波長モードのダイナミクスが古典的確率過程とみなせるか否かを議論した。その結果、非線形相互作用を通じて複数の短波長モードから長波長モードが生成されるような寄与が、古典的確率的描像の整合性の議論において肝となることが分かった。

- 1 A.A. Starobinsky. it Lect. Notes. Phys. f 117 (1986) 107
- 2 Y. Nambu et al. it Phys. Lett. B f 219 (1989) 240
- 3 T. Fujita et al. it JCAP f 1312 (2013) 036

重力 a25 CMB 温度の非等方性を用いた原始磁場の観測的検証 箕田鉄兵 (名古屋大学 C 研 M2)

宇宙における磁場の起源は未解明であり、その候補として初期宇宙での磁場生成があげられるが、観測的検証には至っていない。初期宇宙での磁場 (原始磁場) に対する現在の観測的

限値は、*Planck* 2015 によると Mpc スケールで 4 nG 程度である [1]。そこで、私は原始磁場の強度を観測的に検証する新たな手法を提案した。(Sethi & Subramanian, 2005) などによれば、宇宙の晴れ上がり以降に原始磁場が存在すると、磁場によって生じるローレンツ力や中性粒子と荷電粒子の力学的摩擦によって、バリオンの密度、温度、電離度の進化に影響を与えると考えられる [2]。よって、原始磁場に非一様性が存在すると、バリオンの密度、温度、電離度にも非一様性が生じるはずである。このようなバリオンの非一様な分布は、熱的 SZ 効果によって CMB 温度の非等方性を強めるのではないかと考えた。私はこのシナリオを検証するために、以下の研究を行った。原始磁場の強度をガウス分布であると仮定し、磁場の影響を考慮してバリオンの密度・温度・電離度の進化を解く。これらの物理量から、原始磁場が熱的 SZ 効果を通して CMB 温度の非等方性に与える影響を計算し、(Efstathiou & Migliaccio, 2012) によって銀河団分布から見積もられた熱的 SZ 効果 [3] と比較する。この結果、Mpc スケールで nG 以下の原始磁場についても、マルチポール $l > 10^5$ の小スケールでは、銀河団分布から示唆される熱的 SZ 効果の理論予測を大きく上回ることがわかった。本発表ではこれらの研究成果を発表する。

- 1 Planck Collaboration, 2016, A&A, 594, A19
- 2 S. K. Sethi, & K. Subramanian, 2005, MNRAS, 356, 778
- 3 G. Efstathiou, & M. Migliaccio, 2012, MNRAS, 423, 2492

重力 a26 重力波を用いた宇宙論パラメータへの制限 小粥一寛 (名古屋大学 C 研 M1)

重力波は一般相対論により予言されていた時空を光速で伝搬する波である。一般相対論が提唱された 100 年後の 2015 年にブラックホール連星 (BBH) 合体からの重力波が LIGO により直接観測された。これは今までの電磁波観測とは独立した観測手段として、重力波を用いた宇宙の観測が可能であることを実証した。重力波の宇宙論への応用の一つとして宇宙膨張率の測定がある。重力波の観測からは光度距離が決まり、電磁波の観測から赤方偏移が決まれば、宇宙膨張率を測定できる。これまで宇宙膨張率の時間変化を測定するのに Ia 型超新星での標準光源を用いて観測されてきたが、これと同じことが重力波で可能になる。

本発表では、重力波を用いて宇宙膨張率の測定精度を見積もった文献 [1][2] をレビューする。文献 [1] では、宇宙空間で重力波観測を行う LISA により大質量 BBH までの光度距離が決定される。加えて、電磁波対応天体の観測によって赤方偏移を決定することで、標準光源による観測とは独立してダークエネルギーの状態方程式に制限を与えられることが明らかにされている。文献 [2] では、BBH の赤方偏移をホスト銀河から得ることで赤方偏移を決定する。これにより、LIGO の設計感度ではハッブル定数が 10 個の BBH で 1.1%、30 個で 0.63%、

50 個で 0.49% の精度で決定できることが明らかにされており、CMB やセファイド変光星などの観測から得られたハッブル定数の不一致を解決する手段となりうることが示されている。文献 [1][2] を通じて、重力波による将来的な宇宙論パラメータへの制限を議論する。

- 1 Holz, Daniel E. et al. *Astrophys.J.* 629 (2005)
- 2 Nishizawa, Atsushi arXiv:1612.06060 (2016)

重力 a27 重力波による一般的なスカラー・テンソル理論の制限 那須千晃 (立教大学 M1)

これまでの観測により、現在の宇宙が加速膨張していることが判明している。この加速膨張を説明するために、ダークエネルギーと呼ばれる未知の物質を導入する試みがある。しかし現時点では、このような物質が実在することを示す観測事実は存在しない。そこで、ダークエネルギーを導入せずに一般相対論を修正することで宇宙の加速膨張を説明するという試み (修正重力理論) が注目されている。これに含まれるものとして、一般相対論にスカラー場を加えるスカラー・テンソル理論が盛んに研究されている。

一般相対論では重力波は光速で伝播するが、修正重力理論では重力波の伝播速度は必ずしも光速に等しいとは限らない。重力波の伝播速度 (c_g) は、例えば ($c_g < c$) の場合に宇宙線の観測から ($c_g/c - 1 \gtrsim -10^{-15}$) という制限がつけられている [1]。 (c_g) への制限は、理論を峻別する際に有用であるため、他の制限手段も模索されている。

そこで、本講演では論文 [2] をレビューする。まず “phase lag method” と呼ばれる観測テストを用いた手法によって、 (c_g) へ新たな制限をつける。次に、場の運動方程式が 2 階になる最も一般的な単一スカラー・テンソル理論 [3] において、 ($\phi \rightarrow \phi + const.$) というシフト対称性を課した場合に、伝播速度の光速からのずれを定式化する。この結果と今回つける (c_g) への制限から、修正重力理論の峻別が期待される。

- 1 G. D. Moore and A. E. Nelson, *JHEP* f 0109, 023 (2001)
- 2 D. Bettoni, J. M. Ezquiaga, K. Hinterbichler and M. Zumalacregui, *Phys. Rev. D* f 95, no. 8, 084029 (2017)
- 3 G. W. Horndeski, *Int. J. Theor. Phys.* f 10, 363 (1974).

重力 a28 背景重力波を用いた宇宙ひもの起源の探索 松井由佳 (名古屋大学 C 研 D1)

宇宙初期で起きた相転移によって、ひも状の高エネルギー領域である「宇宙ひも」の生成が示唆されている [1]。また、初期宇宙の理論モデルの一つである超弦理論からも、類似した性質の宇宙ひもの生成が予言されている [2]。各々の宇宙ひもは、その生成機構のエネルギースケールに依存した質量を持つ。宇宙ひもの性質として、宇宙ひもは宇宙空間を漂う中でひも同士

が衝突し、ひも同士が組み換わる。この組み換え確率はひもの起源ごとに異なる。これらの宇宙ひもの質量と組み換え確率を明らかにすることで、宇宙ひもの生成起源を探ることが可能となる。

宇宙ひもは、ひも同士の組み換え時にキンクと呼ばれる尖った構造をひも上に生成する。このキンクは、たわんだ宇宙ひもの上を移動して四重極運動をすることで重力波を放出し、それらが重なり合うことで多波長の背景重力波を形成すると考えられている。そのため、キンク由来の背景重力波はキンクの数と尖り具合(キンクの分布)に依存する。先行研究では、キンクの分布の時間発展を求めることで、相転移起源の宇宙ひも上のキンクから放出される背景重力波のスペクトルを明らかにしている [3]。

しかし、超弦理論起源の宇宙ひも上のキンクから放出される背景重力波のスペクトルは、未だ明らかとなっていない。この宇宙ひもには、Y ジャンクションと呼ばれる三叉路構造が存在し、それはキンクの分布を変化させると考えられている。そこで本研究では、Y ジャンクションがキンクの分布に与える影響を考慮した背景重力波のスペクトルを見積もった。これを元に、パルサータイミングを用いた重力波検出を行う電波干渉計の SKA や重力波干渉計の Advanced LIGO などを用いて、宇宙ひもの質量と組み換え確率に制限を与えたので、その報告を行う。

- 1 T.W.B. Kibble, J. Phys. A 9, 1387 (1976)
- 2 S. Sarangi and S.H.H. Tye, Phys. Lett. B 536, 185 (2002)
- 3 Y. Matsui et al. , JCAP, 11 (2016) 005

重力 a29 リングダウン重力波データ解析について 山本貴宏 (京都大学 天体核研究室 D1)

ブラックホールが何らかの要因で摂動をうけると、重力波を放出して定常状態に緩和していくことが知られている。この時に放出される重力波は減衰振動する波形で表され、これをリングダウン重力波と呼ぶ。一般相対性理論によると、リングダウン重力波を特徴付ける複素振動数は、ブラックホールの質量とスピンから一意に定まる。したがって、リングダウン重力波を観測して、そこから複素振動数を正しく推定することでできれば、その情報を用いて一般相対性理論をテストすることができる。そのためには、重力波データのパラメータ推定手法をリングダウン重力波に最適化する必要がある。

ここでは、連星ブラックホール合体時に放出される重力波からリングダウン重力波を解析することを考える。この時、リングダウン重力波の解析には、理論波形の励起時刻をどこに設定するかによって、統計誤差とバイアスとのトレードオフがある。つまり、合体時刻から十分後に設定するとバイアスは小さくなるが、検出器のノイズによる統計誤差が大きくなる。一方、統計誤差を小さくするために合体時刻に近づけると、重力の非線

形性などの影響を受けてバイアスがかかる。本研究では、このバイアスをできるだけ回避するような解析手法を提案する。

- 1 B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific and Virgo Collaborations) Phys. Rev. Lett. 116, 221101

重力 a30 重力波のリングダウンは事象の地平面の存在証拠か？

奥村貴司 (近畿大学 一般相対論・宇宙論研究室 M1)

一般的に、連星の合体からの重力波リングダウン信号は、合体で形成された天体が事象の地平面をもつこと、つまりブラックホールであることの証拠であると考えられている。この予想は、リングダウンの中間時点での波形が、合体後の天体の準固有振動によるものであるという仮定に基づいている。しかし、最近 Cardoso ら (2017) は、合体後の天体がライトリングを伴うとしてもコンパクトな天体であれば、事象の地平面を持たなくともリングダウン波形を生じること、そして準固有振動の最終段階を詳細に探査して初めて事象の地平面の存在がわかることを指摘した。本発表では、この Cardoso らの研究を紹介し、事象の地平面の検証方法を議論する。

- 1 Cardoso, Phys. Rev. Lett. 116(2016)

重力 a31 ブラックホール連星まわりの円軌道の安定性

安積伸幸 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M1)

一般的なブラックホール連星は厳密解を求めることが困難である。しかし Reissner-Nordstrom metric で記述されるブラックホールは最大電荷を持つ場合に限り、それが満たす Einstein 方程式の解は静的を仮定すれば線形解となり、任意の場所に任意の個数の最大電荷ブラックホールが存在する時空を厳密に記述することができる。この時空は厳密に記述できることから、一般的なブラックホール連星が作る時空の特徴を調べる足がかりとして多くの研究がなされている。

文献 [1] では、二つの最大電荷ブラックホールが作る時空中に、円軌道である測地線が現れる条件と場所を調べ、さらに動径方向の安定性について論じている。これらは二つのブラックホールの質量に依り、null な場合と timelike な場合でそれぞれ条件が異なる。

今回の発表では文献 [1] のレビューに加え動径方向とは垂直な方向の安定性を調べ、一定の領域に留まり続ける測地線が存在する条件を解析する。さらに静的と仮定できる程度のブラックホールの質量の変化に対してその測地線上に溜まった粒子たちが、どのようにその領域の外に出ていかも考える。

- 1 Andreas Wunsch arXiv[gr-qc]1301.7560

重力 a32 重力波を用いた非一様宇宙の検証 芦田尊 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M1)

現代宇宙論の標準モデルでは宇宙は非常に大きなスケールで一様等方と仮定している。一般相対論が正しいと仮定して、一様等方宇宙モデルを用いて観測データを説明するためには、ダークエネルギーが存在しなくてはならない。一方、我々の宇宙が非常に大きなスケールで非一様であると仮定すると、宇宙の加速膨張を示す観測データをダークエネルギーの導入や重力理論の修正なしに説明することができる。一様等方宇宙モデルと非一様宇宙モデルでは局所的な膨張率の値が異なる。そのため宇宙の膨張率を局所的に観測することで、一様等方宇宙モデルと非一様宇宙モデルを区別できる。膨張率を観測する手段として redshift drift が有用である。redshift drift とは redshift の時間変化である。距離 赤方偏移関係の観測データを説明することができる一様等方宇宙モデルと非一様宇宙モデルでは、 $z < 2$ の範囲で redshift drift の正負が異なる。重力波干渉計の DECIGO や BBO は $z < 2$ における redshift drift を観測し、2つの宇宙モデルを区別できる可能性を持つ。本発表では重力波源として中性子連星を考え、重力波干渉計での redshift drift の測定精度について議論する。本発表は [1] の論文のレビューである。

- 1 Kent Yagi and Atsushi Nishizawa, Chul-Moon Yoo, J.Phys.Conf.Ser. 363 (2012) (arXiv:1204.1670v1)

重力 c1 軸対称時空におけるカオス現象と重力波 南佳輝 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

2016年2月、LIGOで重力波の直接観測に成功したことが発表された。観測された重力波は連星ブラックホールからのものであった。これが断定できたことには、重力の波形やスペクトルの理論的予測がなされてきた背景がある。

既に多くの天体現象に関して重力波の波形やスペクトルが理論的に研究されており、それらのテンプレートと比較することで観測された重力波のソースを特定することができる。

しかしながら、これらの研究は規則正しい天体運動を中心に行われており、カオス現象を伴うような複雑な系を扱っているものは数少ない。一般的な力学系はその多くが非可積分系であるため、カオス現象を伴うような系は自然界に多く存在すると考えられる。

ニュートン重力場中のカオス現象については様々な研究が行われており、重力波放出についてもいくつかの研究がなされている。しかし、一般相対論で記述されるような強重力場中におけるカオス現象についてはほとんど研究されていない。特に、重力波の観測可能な情報から重力波源となる現象がカオスであるかどうかを判別する手段は確立されていない。

そこで、本研究ではカオス現象から放出される重力波の特徴を

調べた。重力波のモデルとしては、対称軸上に特異点が存在する時空を考え、その時空中を運動するテスト粒子から放出される重力波の解析を行った。まずテスト粒子の軌道を求め、各軌道について Lyapunov 指数を計算した。それにより軌道をカオス的であるものとそうでないものに分け、それぞれについて波形やスペクトルの計算を行った。次に、その重力波形・スペクトルからストークスパラメータの周波数特性を計算し、カオス現象からのものとそうでないものとで比較した。これらの解析結果から、Lyapunov 指数と重力波の関係を調べ、カオス現象から放出される重力波の特徴を議論していく。

- 1 S. Suzuki, K. Maeda, Phys. Rev. D 55.8 (1997): 4848
- 2 S. Suzuki, K. Maeda, Phys. Rev. D 61.2 (1999): 024005
- 3 Y. Sota, S. Suzuki, K. Maeda, Class. Quantum Grav. 13 (1996)

重力 c2 重力波を用いた Horndeski 理論由来の加速膨張への制限 新居舜 (名古屋大学 C 研 D1)

Ia型超新星の観測による宇宙の加速膨張の発見は、新物理の兆候を示唆する最も重要な成果の一つである。これまで、加速膨張の起源を説明するための主な理論として、未知のエネルギーであるダークエネルギーが修正重力理論により新たな物理的自由度を用いる2つが挙げられている。しかし、CMBや大規模構造などの宇宙論的な観測により2つの理論を区別する方法は未だに研究途上である。その一方で、昨年LIGOによる重力波の発見に続き、重力波を用いて宇宙の膨張率を測定する方法が提案されている [1]。さらに L.Lombriser and A.Taylor 2016 [2] による最新の研究では、修正重力理論特有の現象である self acceleration に対して重力波の観測から厳しい制限をつけられることが判明した。本ポスターでは、先行研究 [2] で用いられている [3] におけるパラメトリゼーションで Horndeski 理論における観測量をモデルに寄らない形式で書き下し、その表式と連星合体で放出される重力波の仮想データを比較し、将来観測から得られる Horndeski 理論に対する現実的な制限について報告する。

- 1 A. Nishizawa “Measurement of cosmic expansion rate with stellar-mass binary black holes
- 2 L. Lombriser and A. Taylor JCAP 03 031 (2016)
- 3 E. Bellini and I.Sawicki JCAP 07 050 (2014)

重力 c3 f(R) gravity 理論における Ernst 形式の利用と応用について 上田周 (東京学芸大学大学院 M1)

Ernst 形式を用いることで、場の方程式を複素スカラー関数を用いて1つの非線形微分方程式に変形することができ、それは、軸対称定常時空において、有用な表現であることが知られ

ている。Einstein eq より導かれる Ernst 形式は、修正重力理論である $f(R)$ gravity 理論へ一般化されている。 $f(R)$ gravity 理論とは、作用の曲率項に曲率 R の関数である $f(R)$ をおくことで、修正重力理論を一般化した理論である。 $f(R)$ gravity 理論において、定常時空における中性子星の作る重力場について、また、円筒対称時空における重力波の位相速度についての応用が考えられている。今後の展望としては、Ernst 形式を用いて、時空の離散化について考えていきたいと考えている。本発表では、[1] に基づいて $f(R)$ gravity 理論での Ernst 形式の導出、また、上で述べた応用例についてレビューを行う。

1 A.G.Suvorov and A.Melatos, arXiv:1608.03021 [gr-qc] (2016)

重力 c4 大型重力波干渉計 KAGRA における輻射圧キャリブレーションのためのレーザー位置評価システムの開発

穴戸高治 (総合研究大学院大学 M1)

アインシュタインの重力波の予言からちょうど 100 年が経ち昨年アメリカの大型重力波干渉計 LIGO が重力波信号を受信した。だが、まだ母天体の位置決定精度などには不確かなものがあるため、イタリアにある VIRGO、日本の KAGRA と合わせて 3 つの重力波干渉計が稼働することにより重力波源の位置決定精度の向上も期待されている。KAGRA は 2020 年にフルオペレーションを目指してそのための研究開発が日夜行われている。目標感度の達成のためにはキャリブレーションシステムを構築する必要があり光の輻射圧を利用した Photon calibrator を運用しようと考えている。このキャリブレーションシステムの中でも干渉計のメインビームや Photon calibrator のビームの位置成分に由来する系統誤差を減らすために、ビーム位置観測モニターを使用する。その位置観測モニターシステムにおける開発と各実証試験について報告をする。

重力 c5 Quadratic 修正重力における Quasi-Circular バイナリのインスパイラル

森彩乃 (東京理科大学 辻川研究室 M2)

コンパクト天体のバイナリから放出される重力波の情報は、その振幅の発展にエンコードされ、エネルギー比の運搬に依存する。一般相対論では、重力波によりエネルギーが運ばれる。修正重力理論中では、更なる自由度 (スカラー、ベクトル、テンソル量) によりエネルギーや角運動量を運搬できるようになる。作用に対し不変な 2 次の歪みにより特徴づけられた一般的な場合とし、comparable な質量の、弱い場でほとんど正円軌道の低速度で回転しているブラックホールを考える。Einstein-Dilaton-Gauss-Bonnet と Chern-Simons 理論においてのそのようなコンパクト天体を導入するのは不適当なため、[1] では十分遠方な地点での強い場での解が再現されるような有効なソースを考えている。すると、スカラーテンソル理論中とは反対に、

EDGB と CS 中の BH は hair を持つ事ができ、中性子星はスカラーモノポールのチャージを持たない。relaxed アインシュタイン方程式の直接積分と似たテクニックをスカラー場への表現、メトリックの微分、無限遠での重力波の強さを得るために使用する。[1] の論文をレビューし、スカラー場の放出は主にエネルギー流、偶パリティなダイポールのスカラー放射、奇パリティな quadrupole スカラー放射を支配することを示す。

1 Kent Yagi, Leo C. Stein, Nicol'as Yunes, and Takahiro Tanaka arXiv:1110.5950v3

重力 c6 輻射流体計算が予言する初代星周辺領域の 21-cm 線シグナル空間分布

田中俊行 (名古屋大学 C 研 M2)

Square Kilometre Array (SKA) 計画で建設が進みつつある世界最大の電波干渉計の観測が 2020 年から開始される。この観測によって初代星周囲に存在する中性水素から放射される 21-cm 線が観測されると期待されている。しかしながら、初代星の形成過程や星質量などの物理的性質は未だ謎に包まれており、数多くの理論モデルが存在する。SKA 計画の観測データ解析のためにも、初代星の各理論モデルがどのように観測されるかを予言することは喫緊の課題である。

先行研究 [1] では、輻射輸送シミュレーションを用いて、21-cm 線の観測量である輝度温度の空間分布を見積もっている。しかし、初代星周囲のガスを一樣静止流体として計算を行っている。一方、本研究では初代星を取り巻く高密度領域であるハローの密度プロファイルを考慮し、ガスの運動を解くことができる輻射流体シミュレーションを実施し、1pc-1Mpc の 6 桁に渡るダイナミックレンジを同時に計算した。さらに、異なる星質量を持つ初代星モデルで計算を行い、輝度温度分布の星質量依存性を調査した。

結果として、 $200M_{\odot}$ の星質量を持つ初代星に対する、星誕生から 10^7 年間の計算では、先行研究の結果とほぼ差はなく、一樣密度かつ静止したガスに対して輻射輸送シミュレーションを行うことは良い近似であることが示された。しかし、実際の初代星の寿命程度 ($\sim 10^6$ 年間) の計算では、先行研究の手法を用いるとシグナル領域を過大評価してしまうことがわかった。また、比較的輻射の弱い $50M_{\odot}$ 程の小さい星質量を持つ初代星の場合、ハロー内の高密度ガスの電離が十分進まず、輝度温度分布は内側の非常に狭い領域に限定されることが明らかになった。本発表では、21-cm 線シグナル分布の赤方偏移依存性についても議論を進める。

1 H. Yajima and Y. Li, MNRAS, 445 3674-3684 (2014)

重力 c7 磁場と輻射場における完全流体のエネルギー運動量テンソル

吉田康利 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

天体現象を理解していくうえで、磁場と輻射場は重要なものである。最近では、より広く宇宙物理のシナリオを記述するために、磁場と輻射場からのエネルギー運動量テンソルへの寄与について研究されている。ここでは磁場と輻射場の下での完全流体のエネルギー運動量テンソルについて、参考文献にあげた論文をレビューし、調べていく。

1 Oscar M.Pimentel,F.D.Lora-Clavijo,Guillermo A.Gonzalez arxiv:1612.03299(2017)

重力 c8 超新星爆発のメカニズムと多次元シミュレーションの現状

水口万結香 (福岡大学 M1)

太陽の約 8 倍以上の重さをもつ恒星は元素合成の最終段階において中心部に鉄のコアを形成する。この鉄コアが重力的に不安定になって急激に潰れ始め(重力崩壊) それによって生じる爆発が重力崩壊型超新星爆発である。この現象は、自然界の 4 つの相互作用がすべて関与し起こるといって非常に重要な現象である。さらに中性子星やブラックホール天体の生成現場であり、銀河の化学進化にも重要な役割を果たしていると考えられており、天文学や高エネルギー宇宙物理分野において最も注目される天体現象の一つである。しかし、重力崩壊型超新星爆発がどのような過程により起こっているのかは、長い研究の歴史を持ちつつも未だ解明されていない。この現象を解明するにあたって、まずは内部コアで起こっている現象を理解する必要がある。

重力崩壊が進み中心密度が核密度に達したとき、核力によって急激に圧力があがるため中心の超高密度領域(内部コア)が外側の物質をはじき返し、内部コア表面に衝撃波が形成される。しかしこの衝撃波は、その背面での鉄の光分解とニュートリノ冷却によりエネルギーを失い、およそ半径が 100-200km の地点で一度停止してしまう。停止した衝撃波が復活するにあたって重要になるシナリオが、ニュートリノ加熱メカニズムである。ニュートリノによって再加熱された衝撃波は再び外側に向かって動き出し、星の表面まで到達して超新星として観測されると考えられている。

今回の夏の学校では、超新星はどのようにして起こるのか、そしてニュートリノはどのように衝撃波を再加熱し復活に導くのかについて、最新の多次元シミュレーションの結果を交えながら詳しく議論していきたい。

重力 c9 銀河間空間の重元素線の吸収と物理的条件

田辺直人 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 M1)

今回の発表では、過去の 10 億年の銀河間空間の重元素線の吸収と物理的条件についての論文 (The intergalactic medium over the last 10 billion years II. metal-line absorption and

physical conditions) を取り上げる。

銀河間空間 (IGM) には、宇宙のバリオンの大部分が含まれている。最も利用しやすい IGM の観測対象は、クエーサースペクトルで観測される Ly α の森と呼ばれる中世水素の吸収線である。吸収の大きな Ly α 線に付随した重元素線は、少ないが銀河間空間の歴史を追溯するうえで重要となっている。重元素の吸収は星形成からは離れた場所であることが多いため、銀河から大規模な銀河流出により輸送されているのではないかと考えられている。

しかし、銀河間空間での重元素汚染に関する問題の多くは十分に理解されないままになっている。それらの問題の答えはハッブル望遠鏡に搭載された宇宙起源分光器 (COS) によりもたらされる可能性がある。これにより、銀河間空間の重元素量はどのようになっているのか、重元素汚染された銀河間空間ガスの温度はどれくらいなのか、銀河間空間の重元素の分布はどのようになっているのかなどの問題が観測によって探究されている。この論文では、積分された柱密度がどのように銀河間空間の重元素組成を反映しているか、COS で観測可能な様々なイオンが重元素汚染された銀河間空間のバリオンの温度・密度をどのように反映しているか、吸収体の整列度から銀河間空間の重元素分布の均質性にどのような制限がかけられるかなどを扱っている。この論文では、宇宙論的流体力学シミュレーションに基づきスペクトルを生成することで、 $z = 2, 0$ の間での重元素の物理的状態の進化を計算し、COS による重元素吸収体観測のシミュレーションを行い、物理的条件と関連付けて紫外線共鳴吸収により銀河間空間の重元素の一部が検出でき得ることを示す。最後にシミュレーションの成功・失敗について議論し、他のグループのシミュレーションと比較する。

1 Benjamin D,Romeel Dave,Neal Katz,Juna A.Kollmeier and David H.Weinberg

重力 c10 21cm-LAE 相互相関による宇宙再電離期の解明

金氏智也 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

宇宙誕生直後、宇宙空間は高温高密度のプラズマ状態である。やがて宇宙の膨張による温度低下により、陽子と電子が結合し中性水素が形成され、宇宙の晴れ上がりを迎える。その後、宇宙は中性化され、光を放つ天体が存在しない暗黒時代が約 1 億年続く。そして、ようやく星や銀河が形成されると、紫外線や X 線光子を放射し、周囲の中性水素を電離する。やがて、宇宙は再び電離した状態になる。この時代を再電離期と呼ぶ。再電離期は観測的証拠に乏しいため、その始まりや進化過程などの詳細について不明な点が多い。再電離期を探る有効な手段として中性水素の超微細構造によって生じる 21cm 線が挙げられる。実際には、21cm 線の観測量は宇宙マイクロ波背景放射に対する放射・吸収を考慮した温度である輝度温度とし

と与えられる。輝度温度は密度揺らぎ、中性率やスピン温度などの宇宙論的、あるいは天体物理学的な情報を含んでいる。しかし、21cm 線は銀河系シンクロトロンや系外電波といった強烈な前景放射に覆い隠されるため、その検出が困難である。そこで、前景放射の影響を軽減するために、21cm 線と Lyman-emitter(LAE) の空間的揺らぎの相互相関を扱うことが有効である。LAE とは電離源の一つと考えられている遠方銀河である。LAE のある領域では 21cm 線が弱いので、一般的に大スケールにおいて 21cm 線と LAE には負の相関があるとされている。一方で、21cm 線観測における前景放射は LAE 探査におけるシグナルやノイズと無相関であると考えられているので、21cm 線と LAE の相関をとることで前景放射の影響を軽減でき、21cm 線シグナルの検出が期待される。しかし、先行研究では、電離過程の計算などに単純なモデルを用いてシミュレーションを行っている。今回は、N 体計算や輻射流体計算を行った再電離のシミュレーション結果を用いる。そして、21cm 線と LAE との相互相関で初めに得られるクロスパワースペクトルの解析を行う。そこから得られる結果とその物理的解釈について議論し、今後の課題について報告する。

- 1 SKA-JP Science Book (2015)
- 2 Lidz, A., Zahn, O., Furlanetto, S.R., et al. 2009, *apj*, 690, 252
- 3 Sobacchi, E., Mesinger, A., & Greig, B. 2016, *mnras*, 459, 274

重力 c11 密度ゆらぎ形成における非線形ニュートリノの影響 上野智久 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

宇宙の密度ゆらぎの進化を計算する際、旧来はニュートリノの分布については線形項のみを考えることが多かった。しかしニュートリノの質量の影響を含めることを考えるとそれが非相対論的に運動することで重力的に収縮が起こり、摂動の高次の項を考える必要が生まれて計算が煩雑になる。宇宙膨張によって温度が下がると、ニュートリノの質量が $1.7 \times 10^{-4} \text{eV}$ 以下であるならば現在までに非相対論的に運動する [1]。現在の電子ニュートリノの質量の上限値 2eV [2] と比較しても massless で線形と扱うことは妥当な近似であるとは言えない。また、近年において、銀河クラスタリングや重力レンズの観測が進み、ニュートリノの質量にさらなる制限をかけることができるようになったことで、ニュートリノの高次の項を計算に含める機運が高まった。

そこで私は今回の研究において、ニュートリノが有限の質量をもつ効果を考慮して、ニュートリノの 2 次の項までの宇宙論的摂動論により、密度ゆらぎの形成を解析的に計算し、パワースペクトルを与える。それを数値シミュレーションにおける結果と比較する。また、ニュートリノ質量や赤方偏移 z を変化させてその性質を調べる。

- 1 松原隆彦 (2010). 現代宇宙論 東京大学出版会
- 2 C. Patrignani et al. (Particle Data Group), *Chin. Phys. C*, 40, 100001 (2016)

重力 c12 PBH を用いた原始重力波の制限 三浦大志 (京都大学 天体核研究室 M1)

初期宇宙では原始重力波が生成されたと考えられている。原始重力波のパワースペクトルは、ハッブルパラメータなどインフレーション中の情報を反映するため、原始重力波を観測することは宇宙論的に重要なことである。

これまで、ビッグバン元素合成 (BBN) や宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を用いて様々な波長領域の原始重力波が制限されてきた。これらの方法では、原始重力波の効果を、ニュートリノ有効世代数 N_{eff} の標準値 $N_{\text{eff}} = 3.046$ からの補正 ΔN_{eff} の一つとして取り入れて考える。この補正を ΔN_{GW} と呼ぶ。 ΔN_{eff} 内に含まれる原始重力波以外の物理的機構の補正が全て N_{eff} を増大させる補正であると仮定すると、BBN や CMB により ΔN_{eff} の上限が与えられれば ΔN_{GW} に同じ上限をつけることができる。しかし原理的には N_{eff} を減少させる機構も考えられ、その場合上記の方法を用いることが出来ない。したがって、原始重力波の制限を与える宇宙論的方法が別に必要になる。

本講演では、上記のような仮定を用いない新しい方法として primordial black holes (PBH) が多量に存在しない条件から原始重力波を制限するような方法を述べる。PBH とは初期宇宙で形成されたブラックホールの事で、主に考えられる形成機構として放射優勢期における密度ゆらぎの直接的な重力崩壊が挙げられる。もし原始重力波が非常に大きければ、密度ゆらぎが原始重力波の 2 次の効果により誘起される。その結果 PBH も大量に生成され、観測結果と矛盾してしまう。この制限方法により、様々な波長領域の原始重力波のパワースペクトルについて制限が得られ、特に波数領域 $k \geq 10^4, \text{Mpc}^{-1}$ について BBN や CMB より得られた結果よりも厳しい制限を与える。

なお、本講演は論文 [1] のレビューである。

- 1 T. Nakama and T. Suyama, *Phys. Rev. D* 92 (2015) 121304
- 2 T. Nakama and T. Suyama, *Phys. Rev. D* 94 (2016) 043507

重力 c13 インフレーションに伴う non-gaussianity 中塚洋佑 (東京大学 宇宙線研究所 M1)

私はインフレーションに伴って生成される量子ゆらぎの高次相関 (non-gaussianity) についての先駆的な論文の一つである J. M. Maldacena, *JHEP* 05 (2003) 013 の Review を行った。初期宇宙の時間発展を扱う際、一様等方宇宙の上で摂動的にゆらぎを計算する。ゆらぎの摂動計算を 1 次まで行うと得られる二点相関 C_l はゆらぎが異なる運動量ごとに独立で

あるという性質 (gaussianity) を満たすが、高次の摂動から得られる三点以上の高次相関では f non-gaussianity が現れる。non-gaussianity の大きさはインフレーションモデルに依存するため、観測からモデルを区別するための指標となる。特に、 f k -インフレーションと呼ばれるタイプのインフレーションモデルでは大きな non-gaussianity を持ちうるということが知られている。 k -インフレーションは弦理論の低エネルギー有効理論として現れることがあり、この種のモデルに対する指標として non-gaussianity は強力な制限になる。non-gaussianity は CMB の高次相関や物質ゆらぎの分布の Tail に効くが、観測的に未だ見つかっておらず、上からの制限を掛けるにとどまっている。non-gaussianity は重力作用とインフラトン作用の非線形性由来し、二点相関と同様にインフレーション中に生成される。non-gaussianity を場の理論の手法で計算するために S. Weinberg, Phys. Rev. D72 (2005) 043514 においてまとめられた f in-in formalism を用いる。私は Maldacena の論文に沿って f single scalar inflation に対して作用の高次展開、及び in-in formalism による三点関数の計算を行い、non-gaussianity を評価した。

- 1 J. M. Maldacena, "Non-Gaussian features of primordial fluctuations in single field inflationary models," JHEP 05 (2003) 013, arXiv:astro-ph/0210603 [a]
- 2 S. Weinberg, "Quantum contributions to cosmological correlations," Phys. Rev. D72 (2005) 043514, arXiv:hep-th/0506236 [hep-th]
- 3 N. Bartolo, E. Komatsu, S. Matarrese, and A. Riotto, "Non-Gaussianity from inflation: Theory and observations," Phys. Rept. 402 (2004) 103-266, arXiv:a

重力 c14 超対称アクシオンモデルにおける宇宙論的問題の検証

園元英祐 (東京大学 宇宙線研究所 M2)

本発表では、超対称アクシオンモデルにおけるドメインウォール問題と等曲率ゆらぎの問題について発表する。

素粒子標準理論では解決できない大きな問題として、強い CP 問題がある。強い CP 問題とは、強い相互作用において CP 対称性がほとんど保たれているのはなぜかという問題である。この問題を解決する最も有力な理論は、標準理論に新たに Peccei-Quinn 対称性 [1](PQ 対称性) を課したものである。この PQ 対称性が破れた結果、擬ゴールドストーンボゾンとしてアクシオン [2] が生成されるが、アクシオンは PQ 対称性の破れる時期に応じて以下の問題を引き起こす。

1 ドメインウォール問題

アクシオン場が質量を獲得するとき、その PQ 電荷に応じた周期的なポテンシャルが生じる。これにより、アクシオン場が空間的に異なる値を取ることでドメインウォールが生成される。PQ 対称性がインフレーション後に破れた

場合、アクシオンにより作り出されたドメインウォールによって、

- ・安定なドメインウォールのエネルギー密度が現在の宇宙のエネルギー密度を超えてしまう
 - ・不安定なドメインウォールの崩壊で放出されるアクシオンが現在の暗黒物質質量を超えてしまう
- というドメインウォール問題が生じる。

2 等曲率ゆらぎの問題

PQ 対称性がインフレーション中に破れた場合、アクシオン場の量子ゆらぎがインフレーションによって引き伸ばされる。これにより、宇宙マイクロ波背景放射の観測結果から禁止されている大きな等曲率ゆらぎが生じてしまう。これを等曲率ゆらぎの問題という。

これら 2 つの問題は、インフレーション中に PQ 場が 10^{19} GeV 程度の大きな値をとることで解決できるとされてきた。しかし、インフレーション後のレゾナンスによってこれら 2 つの問題が再び生じる可能性が指摘されている [3]。そこで本研究では、PQ 対称性と標準理論における階層性問題を解決できる超対称性を組み合わせた超対称アクシオンモデルにおいて、ドメインウォール問題と等曲率ゆらぎの問題が生じるのかを検証した。

- 1 R. D. Peccei, and H. R. Quinn, Phys. Rev. D 16, 1791 (1977)
- 2 S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 40, 223 (1978)
- 3 M. Kawasaki, T. T. Yanagida and K. Yoshino, JCAP 1311, 030 (2013)

重力 c15 非可換幾何学と Plank scale での時空の構造について

渡邊慧 (東京学芸大学 大学院 M1)

ごく初期の宇宙のような高エネルギー時空は、時空の座標同士の交換関係がゼロにならない非可換時空となる可能性がある。近年、このような量子重力の効果が顕著となると予想されている高エネルギー時空の構造が、スペクトル次元の解析から研究されている [1]。

[1] では そうした非可換時空の一例である κ -Minkowski 非可換時空における 2 つの点源間のポテンシャルのふるまいを調べ、Plank scale では 2 つの点源が近づいてもポテンシャルは発散することなく有限の値に収束することが示されている。また、このようなポテンシャルの振る舞いは有効的な次元の減少の兆候であることがわかっている。本発表では [1] に基づいて時空の非可換性とその影響についてレビューを行う。

- 1 M. Arzano and J.K. Glikman, arXiv:1704.02225v1 [hep-th](2017)
- 2 J. Lukierski, arXiv:1611.10213v1 [hep-th](2016)

重力 c16 Schwarzschild Black Hole の正準量子重力 長島正剛 (立教大学 M2)

今日までの研究から、物質の量子化はよく出来ている。物質の量子化をした時、アインシュタイン方程式をどう扱うべきかはまだわかっていない。エネルギー運動量テンソルが、状態の重ね合わせで表されていて、他方でアインシュタインテンソルが古典的でも良いのかどうかという問いに答えるのは非常に難しいが、アインシュタインテンソルの側も量子化したほうが自然である。あるいは修正重力理論の研究では、プランクスケールでの重力理論の変更を拠り所にし、その影響から宇宙項問題の解決を試みようとしているものもある。これらのことから重力を量子化した、量子重力理論の研究は今日の物理学を進めていくのに必要である。

数ある量子重力のアプローチのうち、正準量子化からのアプローチは 1950 年台から研究されている。今回私は、ADM 形式から始め、拘束条件から誘起される、Schwarzschild Black Hole のダイナミクスを正準量子化して記述した Kuchar[1] をレビューする。

[1] では正準変数として、Schwarzschild 質量 m と left infinity と right infinity での固有時によるパラメーターの差 p を採用する。この 2 変数は正準共役のペアで、これらは各空間的超曲面で同じ値を取る。また、ディラックの手続きによる拘束系の量子化から得られる状態汎関数は異なる質量の Black Hole の重ね合わせで表される。

重力の正準量子化の系譜のもので昨今代表的なものはループ量子重力理論である。[1] を引用している論文もループ量子重力理論のものが多く、私もまた、今後はループ量子化に [1] の結果を応用したいと考えている。

- 1 Karel V. Kuchar Phys.Rev.D (1994)
- 2 T.Regge and C.Teitelboim Ann.Phys 88(1974)

重力 c17 宇宙論とエンタングルメント 川大揮 (東京工業大学 基礎物理学専攻 山口研究室 M1)

従来までの観測方法では、情報伝達速度に光速という限界があるために観測できない領域が存在する。今回は、その見えない領域を見るための手段としてエンタングルメントを利用することを考え、その利用方法などについて議論する。

重力 c18 BHT Massive Gravity における重力の斥力的効果について 中司桂輔 (東京学芸大学大学院 M2)

近年、量子重力や宇宙の加速膨張の観点からアインシュタイン重力に修正を加えた修正重力理論が盛んに研究されている。その修正重力理論の中でも今回は、2+1 次元時空中におけるゴーストのない重力理論として知られている BHT Massive

Gravity(BHTMG)[1] におけるブラックホール時空での測地線を解析した。2+1 次元時空中のブラックホールはこれまで 1992 年に発見された負の宇宙項を持つ時空での BTZ ブラックホールしか存在しないと考えられてきたが、BHTMG ではこのほかにも球対称ブラックホールや、角度依存性を持ったブラックホール (Black Flower) などが発見されている。

これらのブラックホールの周りでの測地線を解析した結果、Massive 粒子には安定な周回軌道を発見し、Massless 粒子には重力が斥力的に働く場合があることを発見した。斥力重力に対しては、これまで Energy Condition からの解釈や、粒子-反粒子間の相互作用が斥力的になる可能性があることなどが指摘されてきたが、我々はこの斥力的な効果に対し、ニュートン重力からの類推により解釈を与え、3+1 次元時空でのシュバルツシルト解、AdS シュバルツシルト解、2+1 次元時空での BTZ 解との比較を行い、これらのブラックホールではこのような効果が現れないという結論に至った。今回はこの Massless 粒子に対する重力の斥力的な効果についての解釈を中心に発表する。

- 1 Eric A. Bergshoeff, Olaf Hohm and Paul K. Townsend, Phys. Rev. Lett. 102:201301 (2009)

重力 c19 宇宙定数問題への nonlocal approach 福田巧未 (名古屋大学 QG 研 M1)

重力の運動方程式から宇宙定数が消去されたモデルについての論文をレビューする。4-form の場を加えた任意の物質ラグランジアンを用いる。作用に対しては、その時空平均は 0 となることを仮定する。その条件は、時空全体での定数をラグランジアンにかけることで達成される。このようなモデルを考えると興味深いことに重力場の方程式から宇宙定数をとりのぞくことができる。修正された重力場の方程式は通常のエinstein 方程式に曲率、物質のラグランジアンの時空平均をとった項が含まれたものとなる。さらに、このような新たな場を加えることで宇宙定数を 0 とする理論は Weinberg の no-go theorem というもので排除されていたのだがこのモデルは nonlocal であるパラメータを作用にかけることで排除されていないということである。

- 1 Sean M. Carroll and Grant N. Remmen A Nonlocal Approach to the Cosmological Constant Problem

重力 c20 Sequestering Mechanism in Scalar-Tensor Theory 塚本拓真 (名古屋大学 QG 研 D1)

一般相対論では、アインシュタイン方程式によって、物質の分布と重力の間の関係が与えられる。この方程式を用いて、宇宙の大局的な運動を考えたとき、非相対論的な物質のみでは、現在の観測にみられる、宇宙膨張を再現する解を与えることができない。そこで、宇宙膨張を起こすための、負の圧力をもつ

たエネルギー量を導入した。これは暗黒エネルギーと呼ばれており、最もシンプルなものとして、宇宙定数がある。この宇宙定数と、暗黒物質を導入した模型として、Lambda CDM 模型があり、これは現在の宇宙をよく再現している。宇宙定数は真空エネルギーの寄与を含んでいると考えられている。この真空エネルギーの量子補正は場の理論から計算することができる。しかし、真空エネルギーの量子補正は、観測から得られる値と 120 桁以上の差が出てしまう。理論の値を観測の値にするために、相殺項を入れるとすると、120 桁以上小さい値を正確に残す必要があり、これは困難である。これは Fine-tuning 問題と呼ばれており、宇宙定数問題のひとつである。この問題の解決のために、Padilla と Kaloper によって、Sequestering 機構が提唱された。[1] この機構は、大局的な拘束条件を作用に与えることで、重力の方程式内で真空エネルギーの寄与を打ち消している。そのため、真空エネルギーの量子補正からくる大きな寄与が重力の方程式内に現れない。また、時空平均量という、時空積分量の時空体積平均された量が、方程式内に残る。この時空平均量は、現在の宇宙定数程度の大きさになる。しかし、この機構では膨張宇宙を再現することができない。本研究では、この機構を、修正重力のひとつであるスカラー・テンソル理論へ用いることで、Fine-tuning 問題へのアプローチが同様に為されるかをみる。また、具体的なスケール因子を用いて、現在の宇宙定数の値を再現するパラメータ領域についても議論する。

- 1 N. Kaloper and A. Padilla, "Sequestering the Standard Model Vacuum Energy," Phys. Rev. Lett. bf 112 (2014) no.9, 091304 doi:10.1103/PhysRev

重力 c21 Generalized multi-Galileons, covariantized new terms, and the no-go theorem for non-singular cosmologies

赤間進吾 (立教大学 M2)

初期宇宙にはインフレーションと呼ばれる急激な加速膨張が起きたと考えられているが、このシナリオでは、宇宙を遡ると初期特異点と呼ばれるエネルギー密度などの物理量が発散する点が予言される。そこで、初期特異点を回避するインフレーション以外のシナリオも研究されている。しかし、これらがまともに考えられるようになったのは最近である。この理由として時空が不安定になるという問題点があった。

初期特異点を回避するには、光的エネルギー条件と呼ばれるエネルギーの正值性に関する条件を破る必要がある。しかし実際にこの条件を破れるモデルを構築し宇宙全体のシナリオを調べてみると、必ず途中で時空が不安定になることが判明していた。近年では平坦な一様等方時空において、単一スカラー場と重力場の運動方程式が 2 階になる理論は、特異点のない宇宙のシナリオで必ず勾配不安定性が生じることが証明された (特異点のない宇宙禁止定理)[1]。

本研究では、この定理を複数のスカラー場の理論へ拡張した。

この時、個別のマルチスカラーモデルを扱うのではなく、包括的に議論をすることで「どのモデルでは不安定性を回避できるか」もしくは「モデルに依らず不安定性を回避できないのか」を効率的に調べるのが望ましい。そこでまず、任意の個数のスカラー場と重力場の運動方程式が 2 階になる既存のマルチスカラーモデルを全て網羅した包括的な理論を構築した。そしてこれに基づき、平坦な一様等方時空において、場の運動方程式が 2 階になる理論ではスカラー場の個数に依らず勾配不安定性は回避できないことを示した [2]。

これまでの研究では、スカラー場の個数に依らず、平坦な一様等方時空において場の運動方程式が 2 階になる理論では必ず勾配不安定性が生じるという「特異点のない宇宙禁止定理」が証明されている。そこで、禁止定理の条件を緩和して定理を拡張することが、今後の課題である。

- 1 T. Kobayashi Phys.Rev.D94 043511

- 2 S. Akama and T. Kobayashi Phys.Rev.D95 064011

重力 c22 Non-linear effect of higher-order scalar-tensor theory on cosmological perturbation 平野進一 (立教大学 D1)

宇宙論における諸問題の 1 つに宇宙項の問題がある。これは、宇宙の後期加速膨張を引き起こす源とされてる宇宙項が、場の理論における計算と観測値とで大きく異なるという問題である。この問題の解決に向け、一般相対論に新たな自由度を加え、重力理論を修正する修正重力理論が盛んに研究されている。宇宙論における観測量の多くがスカラー型揺らぎの観測であるため、重力場にスカラー場を加えたスカラー・テンソル理論がよく用いられる。特に、力学や電磁気学の方程式が 2 階の微分方程式で表されることから、場の方程式が 2 階微分になる最も一般的な理論であるホルンデスキー理論が提案され、広く知られている。この理論からの更なる拡張可能性も現在ではよく議論されている。

これらの修正重力理論は、宇宙論的な観測以外にも太陽系スケールでの実験や強重力場での観測を満たす必要がある。特に、高階微分を含むようなホルンデスキー理論では、太陽系スケールでのニュートン重力を再現するヴァインシュタイン機構が働く。この効果は、理論の非線形性から生じるため、密度揺らぎの 3 点相関のような非ガウス性を含む観測量をみることで、宇宙論の標準理論である Λ -CDM モデルや他の修正重力理論とのモデルの峻別が可能となると考えられる [1]。

本研究では、ホルンデスキー理論の自然な拡張である GLPV 理論 [2] における密度揺らぎの進化について解析を行った。ホルンデスキー理論の場合とは異なり、線形レベルから発展方程式が Λ -CDM モデルと大きくずれ、具体的なモデルにおいてその様子を確認した。また、文献 [3] の議論を参考に、標準的な線形密度揺らぎの発展方程式を conformal/disformal 変換により再現できることを示し、線形レベルでは Λ -CDM

モデルからずれず、非線形レベルから大きくずれるようなモデル空間を特定する。

- 1 Y. Takushima, et al. Phys. Rev. D f89 (2014) no.10, 104007
- 2 J. Gleyzes, et al. JCAP f1502 (2015) 018
- 3 D. Langlois, et al. JCAP f1705 (2017) no.05, 033

重力 c23 Vainshtein mechanism in Schwarzschild spacetime with matter 小川潤 (立教大学 D2)

宇宙の加速膨張を説明するひとつの手法として、一般相対論を修正・拡張することで加速膨張を説明する試み(修正重力理論)が近年注目されている。修正重力理論には、様々な修正の方法が考案されているが、重力を記述するテンソル場にスカラー場の自由度を追加したスカラー・テンソル理論によって有効的に記述できる。スカラー・テンソル理論においては、重力のほかにスカラー力がはたらくため一般相対論からの差異が生じる。そのため、スカラー・テンソル理論は、Vainshtein 機構 [1] と呼ばれるスカラー場の非線形な自己相互作用項によってスカラー力を抑制する機構を備えている必要がある。

スカラー・テンソル理論は、宇宙論的な現象だけではなく、ブラックホールといった重力がかかわる天体現象についても説明できなければならない。一般相対論では、ブラックホールの性質は質量・電荷・角運動量の3つの物理量(毛にたとえられる)だけで完全に特徴づけられる。これをブラックホールの無毛定理と呼ぶ。スカラー・テンソル理論においても、ブラックホールの無毛定理が成立するかは自明ではなく、スカラー場の非自明な配位(スカラー場の毛)を持つブラックホール解の存在の可能性が議論され続けている。

現実に存在するブラックホールの周りには物質、例えば降着円盤や連星が存在している場合が多い。ブラックホールの周りに物質が存在する場合、一般的にはスカラー場と物質が結合するため、スカラー場の毛が生える。しかしながら、ブラックホールといった強重力場領域や、非球対称な物質分布のときにおける Vainshtein 機構のはたらきはよくわかっておらず、スカラー場の毛がどの程度生えるかはよくわかっていない。

そこで、本発表ではブラックホールの周りに簡便化した降着円盤や星の物質配位を配置し、スカラー場の方程式を数値的に解くことで、Vainshtein 機構のはたらきを調べる。これにより、物質の形状や強重力場がスカラー場の配位にどの程度影響をおよぼすかがわかる。また、Chameleon 機構を持つ理論で同様な研究がなされており [2]、本研究とどのような違いが現れるかについても検討したい。

- 1 A. I. Vainshtein, "To the problem of nonvanishing gravitation mass," Phys. Lett. 39B, 393 (1972).
- 2 A. C. Davis, R. Gregory and R. Jha, "Black hole accretion discs and screened scalar hair," JCAP 1610, no. 10,

重力 c24 軸対称時空における Einstein-Vlasov 系 松本龍哉 (名古屋大学 QG 研 M1)

宇宙物理学において物質モデルとして dust を考える事が多い。そのため重力相互作用のみをする無衝突粒子の振る舞いを記述する self-gravitating Vlasov 系が有用である事は示されてきて、一般相対論において良い物質モデルである。その有用性のため、Vlasov 系と Newton 重力を組み合わせた Vlasov-Poisson(VP) 系と Einstein 重力を組み合わせた Einstein-Vlasov 系のそれぞれについて数値計算による解析が行われてきた。[1,2] これらのいずれも計算の困難さなどから球対称時空の下で考えられているが、実際の銀河などのモデルでは軸対称時空を考えるべきである。

[3] では軸対称時空の下での Einstein-Vlasov 系について、分布関数の形が Killing ベクトルに付随する保存量であるエネルギーと対称軸周りの角運動量で表されるという仮定を置くことで Vlasov 方程式が自明に解かれるようにしている。さらに、簡単化のために時間発展については考えず、求めるものを分布関数の static 解としている。そこから、Einstein 方程式を数値計算によって解いて得られる物質分布は様々な形や性質を持っている。形状はトーラス形、ディスク状、紡錘形などがある上に、これらを生み出す分布関数を組み合わせることも可能で spindle-torus といったものも解として存在する。また、特徴的な性質の一つに Einstein-Vlasov 系で初めて ergoregion を持つものがある。これは解が相対論的である示唆しており、非自明な性質を持っていて興味深い結果となっている。

本発表では先行研究 [3] のレビューを基本として、物質の分布関数の形によって特徴的な形状や性質を持つ物質分布が得られる事を示し、銀河の正確なモデル化などの様々な可能性のある事を示す。

- 1 Binney J and Tremaine S Galactic Dynamics (2011)
- 2 Andr'easson H ,Living Reviews in Relativity 14 (2011)
- 3 Ames.E,Andr'easson.H and Logg.A ,Classical and Quantum Gravity,33,15 (2016)

重力 c25 ネルソンの確率力学における量子跳ね返り 時間のシミュレーションと重力系の応用可能性 高木かんな (東京学芸大学大学院 M1)

量子論が支配するミクロな世界では、古典的概念を直接適用することはできない。例えば古典力学的な粒子は、自身の運動エネルギーよりも大きなエネルギーのポテンシャル障壁を越えることができないのに対し、量子力学的な粒子は障壁内に侵入あるいは通過することができる。この現象をトンネル効果といい、実証されている。しかしながら、ポテンシャル障壁内を通過している時間(トンネル時間)は、まだ理論的にも実験的にもよくわかっていない。一方で、先行研究により障壁内に侵

入している分だけ、量子力学的な粒子が古典力学的な粒子よりも跳ね返りに時間がかかることが分かっている。そこでこの差分を跳ね返り時間と呼び、本研究で扱うこととした。また先行研究では、箱型ポテンシャルの幅や高さを変化させると、跳ね返り時間も変化することが分かっている。

本研究では、透過側のポテンシャルの高さ（バイアス）を変化させてシミュレーションをし、跳ね返り時間への影響を調べていくことを目的とした。跳ね返り時間を求めるにはエーレンフェストの定理より、量子波束の重心の運動を粒子の軌道として考え、計算するアプローチがある。しかし本研究で扱うポテンシャルでは、ポテンシャル障壁内に反射波と透過波が混在する。そのため、反射波だけを取り出すことができず、正確な跳ね返り時間を計算することができない。そこで本研究ではネルソンの確率力学を用いて個々の粒子の軌道を計算し、反射する粒子のみを集めて平均をとることで、波束の軌道を求めた。そして、その波束の軌道と古典力学的な粒子の軌道を比較することで跳ね返り時間を求め、透過側のポテンシャルの高さとの関係をシミュレーションした。更にネルソンの確率力学をホーキング輻射の計算へ応用し、ブラックホールの蒸発過程を詳細に調べる手がかりを考えたい。

- 1 江沢洋, '物理学の視点 = 力学・確率・量子', 培風館, (1989)
- 2 Maulik K. Parikh and Frank Wilczek. Hawking Radiation As Tunneling. Phys.Rev.Lett.85(2000)

重力 c26 グラフェンと BTZ ブラックホールの Zermelo Optical メトリック 佐土原和隆 (東京学芸大学大学院 M1)

負の定曲率を持つ曲がったグラフェンシート上での電子のふるまいは、 $(2+1)$ 次元の質量を持たないフェルミ粒子が従うディラック方程式の解になることがよく知られている。さらに、そのグラフェンシートに外部から電磁場を加えることでゲージポテンシャルを与えることができる。このゲージポテンシャルをうまく調整することによって、グラフェンシートのメトリックと $(2+1)$ 次元 BTZ ブラックホールのメトリックとを共形にすることができる。

M. Cvetič と G.W Gibbons は、BTZ ブラックホールと共形なメトリックとして、Rander Optical メトリックと Zermelo Optical メトリックに注目した [1]。これらはそれぞれグラフェンシートに磁場および電場を加えることで実現される。本発表では論文 [1] に基づき、グラフェンシートを用いたブラックホールのモデル化についてレビューする。また、グラフェンシートを用いたブラックホール蒸発のモデル化についても言及したい。

- 1 M. Cvetič and G.W Gibbons, Graphene and the Zermelo Optical Metric of the BTZ Black Hole, [arXiv:1202.2938v2 [hep-th]].
- 2 Alfredo Iorio, Gaetano Lambiase and Maria A. H.

Vozmediano, The Hawking-Unruh phenomenon on graphene, [arXiv:1108.2340[cond-mat.mtrl-sci]].

- 3 G. W. Gibbons, C. A. R. Herdeiro, C. M. Warnick and M. C. Werner, Stationary Metrics and Optical Zermelo-Randers-Finsler Geometry, Phys. Rev. D 79 (20

重力 c27 ブラックホール時空の有質量ベクトル場 上田航大 (近畿大学 一般相対論・宇宙論研究室 M1)

シュワルツシルト計量の摂動研究は Regge と Wheeler によって始められ、ブラックホールの安定性問題、無毛定理、重力波ダイナミクスなど広い分野の理解へとつながった。2015年9月のブラックホール連星系からの重力波検出という大きな成果も、このようなブラックホール摂動論の発展の上にあるといってもよい。今後の重力波天文学の発展により、強重力領域での一般相対論やその他の様々な重力理論の検証が急進すると期待される。特に、超弦理論から予言されるアクシオンと呼ばれる様々な有質量ボソン場の存在検証は、暗黒物質の謎とも結びついて興味深い。このような動機から、最近ではブラックホール時空上での有質量のスカラー場、ベクトル場、テンソル場の引き起こす現象、その宇宙物理的帰結が盛んに研究されている。

そこで本発表では、有質量ベクトル場（プロカ場）のブラックホール時空上のダイナミクスに関する、Rosa と Dolan による基礎研究（2012）を紹介したい。この研究では、最も基本的なブラックホールとしてシュワルツシルト時空を考え、対称性を利用して場の変数分離とパリティの偶奇による分類を行う。次に、プロカ場の運動方程式が、Regge-Wheeler の解析例とは異なり、もはやパリティ偶奇のそれぞれで独立な一次元マスター方程式へと帰着できないことを示す。そして、それらの結合した連立微分方程式の解を数値的および解析的に求める技術が開発されている。本発表では、スカラー場と違ってベクトル場が有質量の場合には、そのダイナミクスを解く上でどのような技術的困難があるのか、またどうすれば物理的帰結が得られるのか、そうした議論の一端を紹介したい。

- 1 J. Rosa and S. Dolan Phys. Rev. D85 044043 (2012)

重力 c28 重力レンズ効果を用いた Ellis wormhole 観測の可能性 金沢瞭 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

本発表は [1] のレビューであり、重力レンズ効果を用いた wormhole (特に Ellis wormhole) の検出について議論する。

先行研究 [2] によると、幾何光学近似の下では、Ellis wormhole による重力マイクロレンズ効果では、光源が減光して観測される場合がある。普通の物質による重力マイクロレンズ効果では、光源は常に増光を受けるはずなので、両者は区別できる。しかし、この方法では増光率を求めるために光源の光度が何らかの方法で求まっている必要がある。

本発表では, まず幾何光学近似が成り立たない長波長の光に対しては, 光の回折が効くために, 増光率が幾何光学近似の下で求めたものから修正されることを見る. このことから, (i) スペクトラムが観測でき, (ii) レンズの効果がない場合のスペクトルの形がよく知られている光源の重力レンズ効果については, 光源の光度が分からなくとも, レンズ天体が Ellis wormhole であることを判別できることを議論する.

さらに, 上記理論の応用としてガンマ線バーストに対する重力レンズを考える. コンパクト天体による GRB への重力レンズ効果の影響を調べた研究 [3] によると, GRB に対するそのような重力レンズは確認されなかった. このことを踏まえて, コンパクトな Ellis wormhole に対しても数密度が $4 \times 10^{-10} \text{AU}^{-3}$ 以下という制限がつくことをみる.

- 1 C.M.Yoo, T.Harada, and N.Tsukamoto, Phys.Rev.D 87, 084045 (2013)
- 2 T.Kitamura, K.Nakajima, and H.Asada, Phys.Rev.D 87, 027501 (2013)
- 3 A.Barnacka, J.F.Glicenstein, and R.Moderski, Phys.Rev.D 86, 043001 (2012)

守屋 堯 氏 (国立天文台)

7月25日 18:15 - 19:15 B 会場

超新星爆発とその多様性

超新星爆発は星がその進化の最後に起こす爆発現象です。近年行われるようになった大規模な変光天体サーベイにより、非常に多様な状態で星が爆発を起こしていることが明らかにされています。標準的な恒星進化理論の枠組みでは説明が出来ないような超新星まで見つかри始めています。さらには、通常の超新星の10倍以上も明るくなり、その明るさの起源すらも不明な超新星が存在します。この講演ではまず、星がどうして爆発し、爆発するとどのように観測されるかなど、超新星爆発の基礎を理論と観測の両面から紹介します。その後、近年明らかになってきた超新星の多様性を紹介し、そこから分かってきた超新星爆発や恒星進化の研究の課題を議論します。

衣川 智弥 氏 (東京大学)

7月27日 16:45 - 17:45 B 会場

重力波：連星ブラックホールの合体からわかったこと

2015年9月14日、アメリカの重力波観測器 advanced LIGO は世界で初めて重力波 (GW150914) の直接観測に成功した。日本でも重力波観測器 KAGRA がテスト稼働を終え、本格的な観測に向け動き出している。今はまさに重力波天文学の黎明期に位置している。重力波観測のメインターゲットはコンパクト連星の合体である。コンパクト連星は重力波放出により軌道が縮まり、いずれ合体する。LIGO による重力波の初検出は約 30 太陽質量の連星ブラックホールの合体によるものであった。一方で従来観測されてきた X 線連星内にあるブラックホール候補天体は 10 太陽質量程度であり、30 太陽質量のブラックホールはほとんど存在しないだろうと思われていた。そのため、この GW150914 の連星ブラックホールの形成については謎が残り、様々な説が提唱されている。本講演ではこの重い連星ブラックホールの形成理論について紹介し、連星ブラックホール合体を重力波で観測することによってどのようなことがわかるのかを講演する。

1. Abbott B. P., et al. 2016 Phys. Rev. Lett. 116, 061102, Abbott B. P., et al. 2016 ApJL 818, L22
2. Kinugawa T., Inayoshi K., Hotokezaka K., Nakauchi D., Nakamura T., 2014, MNRAS, 442, 2963

コン a1 中性子星の状態方程式と質量

橋詰享亮 (首都大学東京 宇宙理論研究室 M1)

中性子星の内部を支えているのは主に中性子の縮退圧だが、そのみで中性子星の最大質量を計算すると約 $0.7, M_{\odot}$ となる。実際の観測による質量は約 $1.4, M_{\odot}$ となっているため、中性子星の内部状態を考えるには縮退圧だけではなく、核力などの影響も考慮に入れる必要がある。中性子星の内部に関してはまだ不明確な点が数多く存在するため、内部状態を考えるには仮定と原子核実験による具体的な値が必要となる。様々な仮定と実験による値から中性子星の内部の状態方程式 (EOS) は調べられてきており、今までにいくつもの予想された EOS が作られてきている。これらの EOS を、一般相対性理論における重力と圧力勾配のつり合いを表す TOV 方程式に代入して解くことにより、中心密度と半径、質量の関係を調べることができる。ただし、TOV 方程式は時間不変で球対称な計量のもとで Einstein 方程式を解いて導かれたものであるため、中性子星の自転や磁場は考慮されていない。この計算を行うと、それぞれの EOS において中性子星の最大質量が存在することが分かる。そのため、実際に観測されている中性子星の質量から EOS の制限を行うことが可能である。

本研究では、考慮された状態が異なる 3 つの EOS に関して実際に TOV 方程式を用いて計算を行った。TOV 方程式は圧力 P と密度 ρ が polytrope の関係 ($P \propto \rho^{\gamma}, \gamma = const.$) であれば数値的に解くことができる。しかし、実際の EOS では γ が一定ではないため、直接代入して計算を行うことは難しい。そこで、EOS を七つに区分化し、それぞれを polytrope に近似した EOS (piece-wise polytrope EOS) を使って計算を行った。そして、各 EOS のグラフと最大質量の関係性を調べた。

- 1 J.S.Read, B.D.Lackey, B.J.Owen, and J.L.Friedman, Physical Review D 79, 124032 (2009)
- 2 F. Douchin and P. Haensel, Astron. Astrophys. 380, 151 (2001), arXiv:astro-ph/0111092
- 3 Shapiro S.L., Teukolsky S.A., 1983, Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars, (Wiley, New York)

コン a2 スーパーチャンドラセカール超新星候補 SN Ia 2012dn の赤外線超過：星周ダストの空間分布と親星への示唆

長尾崇史 (京都大学宇宙物理学教室 D2)

近年、典型的なものより明るい Ia 型超新星が発見されてきた。これらの超新星の光度を ^{56}Ni などの放射性崩壊で説明するには、爆発した天体としてチャンドラセカール限界質量より重い白色矮星を考える必要がある。その為、これらはスーパーチャンドラセカール超新星 (SCSN) と呼ばれており、その起源が大きな注目を集めている。Ia 型超新星の親星として、二つの有力なモデルが提案されている。白色矮星と非縮退星の連星で

ある SD モデルと二つの白色矮星の連星である DD モデルである。しかし、このどちらが主な親星なのかは分かっていない。これらを観測的に区別する方法の一つに、星周物質を調べる方法がある。SD モデルでは、爆発前に伴星からの大きな質量放出が期待される為、比較的多くの星周物質を持つと予想されている。近年、SCSN 2012dn において、近赤外光度曲線の後期に超過が発見された (Yamanaka et al. 2016)。Yamanaka et al. (2016) と Nagao et al. (2017) では、超新星周囲のダストによる吸収/再放射がこの赤外線超過の起源であると、簡単なモデルを用いて提案した。本研究では、3 次元モンテカルロ放射輸送計算を用いて、この赤外線超過を説明できる星周ダストの空間分布を詳細に調べた。その結果、ダストの分布の形状は、開き角が $50[\text{度}]$ 程度、内側半径が $0.04[\text{pc}]$ 程度の円盤形状であることがわかった。得られたダスト質量から親星の質量放出率を推定すると、 $1.6 \times 10^{-5} [M_{\odot}/\text{yr}]$ であった。これらの結果は、SCSN 2012dn の親星として SD モデルを強く支持する。また、星周ダストによる散乱により偏光した可視散乱エコーが生じることが予想される。本研究では、赤外線超過から予想されるダスト円盤からの可視散乱エコーによる偏光も計算した。その結果、円盤を ~ 45 度以上の角度で見込むような系では $\sim 2[\%]$ 以上の偏光が観測されることを明らかにし、赤外線とはまた別の可視偏光の観測から Ia 型超新星の星周環境を探る方法を新たに提案した。

- 1 Yamanaka, M., et al., PASJ, 68, 68, 2016
- 2 Nagao, T., Maeda, K. & Yamanaka, M., ApJ, 835, 143, 2017

コン a3 コンパクト天体を含む 4 体系の相対論的軌道安定性

鈴木遼 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

観測技術が目覚ましい発展を遂げ、2017 年 5 月現在で 3000 以上もの系外惑星の存在が確認されている。多数の個性的な系外惑星の中でもとりわけ特異であるのが、パルサーを中心に複数の惑星が公転している系 (パルサー・プラネット) である。パルサーは超新星爆発を経て形成されるため、周りに惑星が存在しているのは驚くべきことである。このような系の軌道や形成過程は超新星爆発についても新たな情報を提供する可能性があり、非常に興味深い。

代表的なパルサー・プラネットである PSR B1257+12 は、パルサーを中心に惑星が 3 つ公転している 4 体系である。Chambers et al. (1996) は、4 体系では「惑星間距離」と「軌道が安定性を保っていられる時間」に相関関係があることを示した。しかし、この研究では「惑星の質量は木星以下」「離心率や軌道系射角は 0 とする」等様々な条件を課しており、さらに、ニュートン力学を用いて軌道を計算していた。PSR B1257+12 のようなパルサー・プラネットはこれらの条件を満たさず、また、惑星が水星軌道よりも中心天体に近い距離を公転していることから、

水星軌道との類推により一般相対性理論の考慮が必要である。そこで本研究では、軌道計算を一般相対論を考慮したものに拡張し、先行研究で課されていた条件を満たさないパルサー・プラネットに対して、「惑星間距離」と「軌道が安定性を保てられる時間」の相関関係を調べた。計算においては、1次のポストニュートン近似を用いた相対論的な運動方程式を採用し、それを Implicit Runge-Kutta 法を用いて直接数値積分した。「惑星が重い場合」「離心率をもつ場合」等先行研究から条件を1つ1つ変化させた場合における結果の違いを調べ、また、ニュートン力学による計算と相対論を考慮した計算の結果を比較し、相対論的效果がどのように見えるのか調べた。

- 1 J. E. Chambers, G. W. Wetherill and A. P. Boss Icarus 119 261 (1996)
- 2 A. N. Youdin, K. M. Kratter and S. J. Kenyon ApJ 755, 17 (2012)
- 3 M. Konacki and A. Wolszczan ApJ 591 L147 (2003)

コン a4 Suzaku/WAM 単独の到来方向決定によるガンマ線バーストのスペクトル解析 小高勝也 (埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験 田代・寺田研究室 M1)

ガンマ線バースト (gamma-ray Burst:GRB) とはビッグバン以降最大規模の爆発現象であり、初期宇宙というはるか遠方において数秒間に 10^{51-54} erg ものエネルギーが放出される。一日一回程度と高頻度で発生しているが、背景の物理現象は未だ明らかになっていない。その謎を解明しようと、近年では GRB 観測に特化した衛星も打ち上げられ、宇宙物理学の活発な研究分野の一つとなっている。GRB は全天で発生するため、スペクトル解析するためにその到来方向を特定することは検出器における重要な役割である。X 線天文衛星「すざく」に搭載されていた広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor:WAM)[1] は全天の半分の視野を持ち、硬 X 線の帯域で $800\text{cm}^2@100\text{keV}$ もの大きな有効面積を持つため、GRB のような突発的な天体現象の観測に適している。だが、到来方向の特定が行えないために、他衛星などで決定された到来方向を用いなければスペクトル解析が行えない。検出されていても、到来方向が不明なためにスペクトル解析が行えなかったイベントは約 1000 にも及ぶ。一昨年、埼玉大学修士課程を修了した藤沼洸の修士論文において、シミュレーションツールキットの Geant4 を用いた GRB の到来方向決定方法が開発された。この方法を用いることで過去に WAM で観測された GRB のスペクトル解析が可能になった。

本研究ではまず、WAM で到来方向決定を行った GRB のスペクトル解析で得られるパラメータの精度評価を行った。その方法として、他衛星の決定した到来方向を用いた解析結果と WAM で決定した到来方向を用いて解析した結果の比較を行った。精度は光子指数、 E_{peak} 、Fluence でそれぞれ 18%、

13%、40% と藤沼洸修士論文と矛盾しない値が得られた。次に、Tashiro et al.(2012)[2] で到来方向が不明なためにスペクトル変動の解析を行えなかった GRB のスペクトル解析を行った。その結果、放射のピークエネルギーの時間依存性が $E_{peak} \propto t^{-0.68^{+0.21}_{-0.22}}$ と求められた。これは slow cooling[3] のモデルを支持する結果であると考えられる。

- 1 Yamaoka, K., Endo, A., Enoto, T., et al. 2009, *itPASJ*, 61, S35
- 2 Tashiro, M.S., Onda, K., Yamaoka, K., et al. 2012, *itPASJ*, 64, 26
- 3 Sari, R., Piran, T., & Narayan, R. 1998, *itApJ*, 497, L17

コン a5 機械学習による High-z GRB の選定 杉山真也 (埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験 田代・寺田研究室 M1)

本研究では、Swift によって得られるガンマ線バースト (GRB) のデータとサポートベクターマシン (SVM) を用いて、赤方偏移の値 $z > 5$ となる高赤方偏移のガンマ線バースト (以後 High-z GRB と呼ぶこととする) の候補を迅速に選定できるようにすることを目標としている。SVM とは、観測されたデータ (訓練データと呼ぶ) から規則やルール、判断基準などを抽出し、その訓練データ自体や新たなデータ (評価データと呼ぶ) をカテゴリ別に分類できる、機械学習の手法の一つである。その手法で、高い信頼度で High-z GRB の候補の選定ができるようになれば、可視光残光が明るいうちにすばる望遠鏡等の大型望遠鏡で観測ができ、高赤方偏移の GRB 残光のスペクトルの観測が可能となる。このような High-z GRB のデータを多くとることで、宇宙再電離の時期やその様子、また様々な元素はいつ作られたのか、というような初期宇宙を探る手がかりになると考えられる。Swift によって 2015 年 11 月時点までに観測され、Swift チームによって解析された GRB のデータの中で、赤方偏移が決定され、機械学習で利用できるデータは 258 個あった。その中で $z > 5$ の GRB の数は 9 個であった。その 258 個の赤方偏移が決定されたデータから、1 個の High-z GRB を評価データとして残りのデータを全て訓練データとした。この訓練データで評価データを判定した結果、High-z GRB のデータを正しく判定できなかった。その原因の一つとして、それぞれのクラスに分類されるデータの数が偏ることで評価データを正しく評価できなくなる、不均衡データ問題が考えられた。この不均衡データ問題を改善するために、 $z > 3$ を高赤方偏移とし、High-z GRB を 56 個にした。そして、訓練データが High-z GRB 50 個、Low-z GRB 50 個の時の判別精度を確認したが、実際に利用できるほどの判別精度はなかった。これらの実験から、判別精度が良くない最たる原因を考察した。

コン a6 特殊相対論的流体力学を記述する高精度衝撃波捕獲数値計算法の開発

松本紘熙 (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)

天体物理学に現れる流体力学の問題の多くで、計算領域内の空隙 (密度が低く、物質がほとんど存在しない領域) が大きく、またその空隙の形が変形するような問題を取り扱う。例えば、ブラックホールによる潮汐破壊現象は空隙が大きく、その空隙が変形するような問題である。このときブラックホールの event horizon 近傍では落下物質の速度が光速に近い値になる。さらに、ブラックホールによって光速近くまで加速されたジェットが放出される。また、ジェットなどの超高速流では強い衝撃波が生じる。

流体力学のシミュレーション技法の一つに Smoothed Particle Hydrodynamics 法 (以下,SPH 法) がある。これはカーネル関数によって表される広がりをもった質量分布の粒子を用いて流体力学を記述する計算法である。SPH 法は、密度の高い領域に対して粒子をより多く注ぎ込む為、物理現象を見たい主な領域である高密度領域ほど空間分解能が高くなる。つまり、計算領域内の空隙が大きい場合に他の計算法に比べて SPH 法が有利である。しかし、標準的な SPH 法では強い衝撃波を精度良く記述出来ないという問題がある。そこで Inutsuka (2002) [3] は有限体積法で確立された Godunov 法を応用し、SPH 法で強い衝撃波を精度良く記述できる計算法 (以下,Godunov 的 SPH 法) を開発した。標準的な SPH 法で相対論的な問題を扱うことが出来る計算法を開発した研究は存在するが (Rosswog 2010[1], 2015[2]), 標準的な SPH 法では強い衝撃波を精度良く記述できない。そこで本研究では,Godunov 的 SPH 法で相対論的な問題を扱うことが出来る計算法を開発した。本講演ではテスト計算結果を通して、本研究で開発した計算法の有効性について議論する。

- 1 S,Rosswog JCP 229,8591 (2010)
- 2 S.Rosswog LRCA 1,1 109 (2015)
- 3 S.Inutsuka JCP 179,238 (2002)

コン a7 星雲 W50 と SS433 ジェット先端の相互作用 領域の磁場観測研究 酒見はる香 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M2)

宇宙ジェットの形成において、磁場が重要な役割を果たすことはよく知られている。ジェットは星間媒質を圧縮し、新たな分子雲を形成する。また、ジェットにより形成される衝撃波による圧縮で磁場が増幅されるため、宇宙線粒子加速サイトの有力な候補でもある。しかしジェット内部の磁場構造は観測的に明らかになっていない点が多く、ジェットの形成過程を明らかにする上で磁場構造を観測的に解明することが急務である。そこで我々は X 線連星 SS433 に注目した。SS433 は非常に近いところに存在し、ジェットの詳細な構造を知ることができる稀有な天体である。SS433 は電波星雲 W50 の中心に位置し、そのジェット先端と星雲が相互作用しているだろうと考えら

れている。しかし SS433 ジェットはその駆動領域である W50 中心領域ばかりが注目されており、相互作用領域であるジェット先端についてはこれまで見逃されてきた。ジェット先端領域は、ジェット自体や付随する現象を明らかにする上で重要な情報源である。我々はこの領域に注目し、磁場構造解析を行った。解析には、Australia Telescope Compact Array による広帯域・多周波数の観測データ [1] を使用した。天体での intrinsic な磁場の方向を見積もり、ジェット先端領域の磁場ベクトルマップを作成した。その結果、W50 の東端に存在するフィラメント構造や W50 表面に磁場が沿う様子を確認した。これらの構造はジェットの先端に見られる Terminal shock、Bow shock であろうと推測される。さらに Terminal shock 上の一部の領域に対してファラデーモグラフィを実行し、視線方向ないしはビーム内に磁場構造を持った成分が複数あることを明らかにし、その成分がジェット軸に対して対称であることを示した。また、X 線の観測 [2]、Very Large Array での観測 [3] との比較も行った。ここまでの結果を踏まえて、ジェット先端領域の構造の描像を作成した。本講演では、これらの結果を紹介する。

- 1 Farnes, J. S., Gaensler, B. M., Purcell, C., et al. 2017, MNRAS, 467, 4777
- 2 Brinkmann, W., Pratt, G. W., Rohr, S., Kawai, N., & Burwitz, V. 2007, A&A, 463, 611
- 3 Dubner, G. M., Holdaway, M., Goss, W. M., & Mirabel, I. F. 1998, AJ, 116, 1842

コン a8 Radio afterglow of binary neutron star merger

林浩翔 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻
M1)

Our research objective is to study the radio afterglow arising from the ejecta of binary neutron star (BNS) mergers. BNS mergers are one of the most promising targets of gravitational-wave (GW) detection. In addition to producing GW signals, they are also expected to eject mildly relativistic outflows (ejecta) and have various electromagnetic (EM) counterparts. Observation of an EM counterpart will not only increase the detection confidence of GW signals, but also provide invaluable information on the physics of the merger process. A good understanding of the expected EM signals is thus essential to detecting EM counterparts. In particular, Nakar & Piran (2011) predict a robust radio signal that would peak several weeks after the merger. They suggest a blast wave to be generated from the interaction of merger ejecta with the surrounding medium, in which the amplified magnetic field would accelerate electrons to emit synchrotron spectrum. Although such expected radio signals have been studied subsequently in some recent litera-

ture (e.g. Piran et al. 2013; Hotokezaka et al. 2016), they only give rough estimation without detailed consideration of the blast wave dynamics.

We follow the scenario of Nakar & Piran (2011), and aim to calculate a realistic radio afterglow light curve from BNS merger ejecta with quantitative modelling of the blast wave evolution. More specifically, we consider a blast wave not only interacting with the surrounding medium, but also powered persistently by ejecta supply from the BNS merger. With collaboration from Shibata group (University of Kyoto), we are using latest results of BNS merger numerical simulation to determine the density and velocity distribution of ejecta, with which we calculate the dynamical evolution of the blast wave, as well as its radio afterglow emission.

- 1 Nakar, E., & Piran, T. 2011, *Nature*, 478, 82
- 2 Piran, T., Nakar, E., & Rosswog, S. 2013, *MNRAS*, 430, 2121
- 3 Hotokezaka, K., Nissanke, S., Hallinan, G., et al. 2016, *ApJ*, 831, 190

コン a9 Failed Supernova におけるニュートリノ振動財前真理 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

Failed Supernova とは、大質量星が一度コアバウンスした後に次々と降着してくる物質に衝撃波が押しつぶされて丸ごとブラックホールが生成されるようなものである。このシナリオでは衝撃波による外へのエネルギー解放が起きないため明るく輝くことはない。従ってブラックホール形成理論を知る上ではこの大量に放出されるニュートリノが鍵となる。この中心部では原始中性子星が質量限界を越えてもまだ物質降着が続くため、普通の超新星よりも大量のニュートリノが発生する。またその分中心温度が高くなるため、ニュートリノの平均エネルギーも高くなる。以上のことから観測された場合には普通の超新星ニュートリノとは異なる性質が見られることになる。Super-Kamiokande などの現在稼働している検出器ならイベントが近くで発生すればスペクトルが得られると推定されているが、それらはニュートリノ振動による影響を受けているため全貌を把握するにはニュートリノ振動の詳細な理解が必要である。

星内部でのニュートリノ振動は真空振動、物質振動 (MSW 効果)、そして集団振動 (uu 相互作用) の 3 つに分けられる。前二つの振動は線型効果であるため解析的によく理解されているが、最後の集団振動は中心部の超高密度ニュートリノ同士の衝突による非線型効果であり、観測がなされていないため未だにわかっていないことが多い。本発表では集団振動の検証も兼ねて $40M_{\odot}$ の親星への 1 次元シミュレーションで得られた密度分布と初期スペクトルに対してこれらの振動効果を計算し、そ

こで見られる特徴について議論を行う。

- 1 Dasgupta et al. *Phys. Rev. D* 77, 113002 (2008)
- 2 Sumiyoshi et al. *Astrophys. J.* 667, 382 (2007)

コン a10 非軸対称角度分布ニュートリノのフレーバー安定性解析

森長大貴 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

恒星が進化の果てに起こす現象である超新星爆発の機構は未だ十分に解明されていない。重力崩壊を起こした恒星は原始中性子星 (PNS) コアを形成し、発生した外向き衝撃波が外層の表面に到達することで爆発が引き起こされると考えられている。この衝撃波は内部で一度停滞するので、停滞衝撃波にエネルギーを与える加熱機構が必須であり、その一つが PNS から放出された大量の u_e や ar_{u_e} の核子による吸収である。ところでニュートリノは u_e の他に u_{μ} , $u_{\alpha}u$ という異なるフレーバーを持ち、ニュートリノ振動によりフレーバー転換が起こりうる。加熱機構の理解にはニュートリノ振動の理解が不可欠である。

ニュートリノ振動には物質の密度が影響し、通常 PNS 付近のような高密度領域では振動は抑えられる。ところがニュートリノの密度も十分大きければニュートリノの自己相互作用が無視できなくなり、振動する可能性が示唆されている。自己相互作用まで含めた運動方程式は非線形な積分微分方程式となり、数値的に解くことすら困難を極める。そこでフレーバー固有状態の安定性を、そこからの微小摂動に対して運動方程式を線形化することで議論する試みが成されている [1,2]。また近年、非球対称性が与える爆発への影響が研究されており、同時にニュートリノの角度分布の非軸対称性も指摘されている [3]。

そこで本研究では非軸対称なものを含む様々なニュートリノ角度分布に対して、フレーバー安定性を系統的に調べ上げる。これによりフレーバー転換が発生しうる条件を詳細に炙り出す。一般の角度分布を完全に調べ上げるのは事実上不可能であるので、現実的な角度分布を球面調和関数展開し、低次の項で近似することを考える。得られた結果は超新星のみならず、コンパクト天体同士の合体など、大量のニュートリノが発生する一般の系に対して適用することができる。

- 1 A. Mirizzi and P. D. Serpico, *Phys. Rev. D* 86, 085010 (2012)
- 2 I. Izaguirre, G. Raffelt, and I. Tamborra, *Phys. Rev. Lett.* 118, 021101 (2017)
- 3 H. Nagakura et al., arXiv:1702.01752

コン a11 超新星コアにおける流体力学的不安定性の線形解析

杉浦健一 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

重力崩壊型超新星爆発は大質量星が最後に起こす爆発現象である。超新星爆発は星の重力崩壊後に形成される衝撃波がコアを突き抜けることによって起きると考えられているが、この衝撃波は降着流によって停滞することが知られている。この停滞衝撃波の復活が超新星爆発を起こすために必要だが、その機構について完全には解明されていない。

衝撃波復活の代表的な機構として考えられているのが、ニュートリノ加熱機構である。この機構は超新星コアで生成されたニュートリノにより衝撃波を復活させる機構であるが、一次元数値計算では爆発が再現されなかった。ところが、多次元の数値計算によって流体力学的な不安定性による衝撃波面の変形が爆発に寄与することが明らかにされ、SASI と呼ばれている。[1] Takahashi et al.(2016) では非球対称非定常な物質降着により誘引される SASI の線形解析が行われ、摂動を球面調和関数展開した時の $l = 1$ 等の低次モードほど励起されやすいことが明らかにされた。

しかし一方で、ニュートリノ加熱機構以外にも衝撃波復活の機構が提唱されており、その一つが原始中性子星の g-mode 振動によって発生する音波の散逸によって爆発のエネルギーが供給されるという機構である。[3] そこで本研究では、非球対称な物質降着に加えて原始中性子星の振動による音波発生を同時に考慮したモデルを用いて、停滞衝撃波の不安定性の線形解析を行った。線形化した系の解析は、Laplace 変換を用いて行う。この手法の利点は、偏微分方程式の初期値・境界値問題を常微分方程式の境界値問題として扱うことができ、かつ指数関数的に時間発展する不安定に対してもこの手法が使えることにある。本研究を通して超新星コアにおける不安定性の定性的な性質を、系統的に明らかにする。

- 1 W. Iwakami et al. ApJ, 678, 1207(2008)
- 2 K. Takahashi et al. ApJ, 831, 75(2016)
- 3 A. Burrows et al. ApJ, 640, 878(2006)

コン a12 マージャープロセスにおけるブラックホールへの質量降着

川口雄大 (鹿児島大学 M1)

銀河の衝突・合体がスターバースト核の発生をトリガーすると考えられている。合体する銀河の質量比が大きく (マインーマージャー)、母銀河と衛星銀河がともに大質量ブラックホール (SMBH) を持つ場合、連星ブラックホールが形成されることでガス円盤のダイナミクスに大きな影響を及ぼし、激しい星形成とブラックホール (BH) への質量降着を起こすことが指摘されている [1]。一方、高赤方偏移 quasar で SMBH がすでに形成されていることから、非常に大きな質量降着率が SMBH 形成に不可欠であると考えられている。しかし、銀河合体時に大きなガスの inflow が起こったとしても、すべてが BH にいく

わけではなく、降着円盤スケールでどれくらいガスが落ちるかも分かっていない。一部は星になり、一部は outflow で失われるであろう。このようなマージャープロセスは銀河形成シミュレーションには入っているが、これまでのシミュレーションでは銀河中心の分解能がなく、BH 近傍の降着プロセスを明らかにすることができていない。そこでマージャープロセスのみを取り出した高分解能計算で、マージャーにより銀河中心部に星 + ガス + BH が持ち込まれた時に銀河の BH の成長にそれらがどのように寄与するかを調べた。本講演では銀河の落とし方や BH やガスの質量により母銀河の BH へどのような影響を及ぼすのかについて議論する。

- 1 Taniguchi, Y., Wada, K., 1996, ApJ 469, 581
- 2 Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomosaka, K., Wada, K., & Yoshida, N. 2008, PASJ, 60, 667
- 3 Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomosaka, K., Wada, K., & Yoshida, N. 2009, PASJ, 61, 481

コン a13 超臨界降着流のスペクトル計算 北木孝明 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

中心天体へのガスの質量降着率がエディントン限界を超える、超臨界降着と呼ばれる現象がある。超臨界降着円盤は輻射圧優勢の光学的に厚い円盤で、そこからは非常に大量のアウトフローが吹き出すとされており、流体シミュレーションによる研究が行われている (Ohsuga+2005)。これは超高光度 X 線源 (Ultra-Luminous X-ray sources, ULXs) のようなエディントン光度以上の光度を持つコンパクトな天体現象を説明する有力なモデルとなっている。また、宇宙初期の超巨大ブラックホール形成にも不可欠と考えられている。

超臨界降着流のスペクトル計算は、共同研究者の川島朋尚氏 (国立天文台) によって行われた。川島氏の計算結果は ULXs のスペクトルを再現し、超臨界降着流が起きていることを支持する結果となった (Kawashima+2012)。しかしこの研究では ULXs が念頭に置かれていたため、中心ブラックホールの質量が十太陽質量に固定された計算しか行われていない。そこで超巨大ブラックホール形成を想定して、ブラックホール質量を変化させたスペクトル計算を行った。計算には Kawashima+2012 と同じコードを用いた。

その結果、軟 X 線は降着円盤からの寄与であり、円盤温度 $T_{\text{disk}} \propto M_{\text{BH}}^{-1/4}$ を反映したスペクトルとなるが、一方で硬 X 線はブラックホール質量に依存せず、10keV 付近に折れ曲がりをもつことがわかった。特に約 10keV 以上の X 線成分は、光速の約 20% の速度を持つファンネル壁でパルクコンプトンにより形成されることを明らかにした。さらに Wien 分布からの超過成分を確認し、それが光子指数 $\alpha \sim 3$ のべきをもつことを確認した。これは ULX の観測 ($\alpha = 3.1^{+0.3}_{-1.2}$) を再現する

(Walton+2015)。

本講演では、私が行ったこれらの研究結果を紹介する。

- 1 Kawashima, T., Ohsuga, K., Mineshige, S., et al. 2012, *Apj*, 752, 18-29
- 2 Ohsuga, K., Mori, M., Nakamoto, T., & Mineshige, S. 2005, *Apj*, 628, 368
- 3 Walton, D. J., Middleton, M. J., Rana, V., et al. 2015, *Apj*, 806, 65

コン a14 広エネルギー帯域観測から探る大マゼラン星雲の典型的ブラックホールの回転

村上爽太 (埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験 田代・寺田研究室 M1)

ブラックホールとは、太陽の 30 倍以上の質量をもった大質量星が重力崩壊型超新星爆発を起こし、外層を吹き飛ばして質量を失った後にできる天体である。そこには非常に強い重力場が存在しており、いかなる光も抜け出すことができない。したがってブラックホールそのものを観測することはできない。しかしそのまわりにはガスや塵が回転しながら形成した降着円盤があり、そこからブラックホールへ物質が落ち込む際に X 線が放射される。その X 線をとらえることによってブラックホールの研究が推し進められている。

本研究では大マゼラン星雲に存在する典型的なブラックホール LMC X-3 を対象天体とし、広いエネルギー帯域に対するスペクトル解析からその回転について明らかにした。それにあたって、軟 X 線を観測できる XMM-Newton 衛星及び硬 X 線を観測できる NuSTAR 衛星を観測衛星として使い、それらのデータを併用することによって広いエネルギー帯域に対する解析を実現した。結果として、まず降着円盤からの多温度黒体放射を表す diskbb モデルを用いてスペクトルフィットを行い、ブラックホールが回転していない場合の理論値よりも小さい内縁半径を算出した。これは LMC X-3 が回転していることの証拠であると判断した。また回転しているブラックホールまわりの多温度黒体放射を表す kerrbb モデルを用いてスペクトルフィットを行い、ブラックホールの角運動量を表すスピンパラメータの値を求めた。使用したデータを個別にフィットした際には大きく異なる値で求まるものがあったが、それらを同時フィットすることによって $0.699^{+0.005}_{-0.051}$ という 1 つの値に定まった。以上より、LMC X-3 は光速の約 70% の速さで降着円盤と同じ回転方向に回転しているという結論を得た。

- 1 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 小山勝二, 嶺重慎 [編] 日本評論社 2007
- 2 James F. Steiner, Jeffrey E. McClintock, Ronald A. Remillard, Lijun Gou, Shin 'ya Yamada, & Ramesh Narayan 2010, arXiv
- 3 High Energy Astrophysics Malcolm S. Longair CAMBRIDGE 2011

コン a15 X 線衛星「すざく」を用いたガンマ線衛星 LS5039 の X 線周期探索

松元崇弘 (東京大学 馬場・中澤研究室 M1)

ガンマ線連星は全天でたった 6 つしか見つかっていない稀有な天体である。大質量星の周りを伴星として高密度のコンパクト天体が回っていて、TeV 帯域にまでおよぶ超高エネルギーガンマ線や X 線を放射している。伴星の公転に同期して幅広い帯域で放射強度が変動するため、公転による周辺環境の周期的な変化と非熱的放射の比較が容易である。コンパクト天体の正体が分かっているものは 1 つだけであり、他の 5 つについてはブラックホール (BH) が中性子星 (NS) か論争が続いている。非熱的放射の起源は、伴星が BH の場合と NS の場合の 2 つのシナリオが考えられている。前者では BH の降着円盤から吹き出す相対論的ジェットが作る衝撃波から、後者では NS からのパルサー風と大質量星からの星風がぶつかることで衝撃波からガンマ線が発生する。天体について理解を深めるには、伴星のコンパクト天体の正体を見極めることが必須である。NS からの X 線放射には自転に同期した数十 ms ~ 数十 s の周期的変動 (パルス) があることが多いため、NS と BH を区別するには放射周期の有無を調べるのが良い。そこで我々は、X 線衛星「すざく」の硬 X 線検出器 HXD が時間分解能と感度に秀でていることに着目して時間変動解析を行った。具体的には、伴星の正体が分かっていないガンマ線連星の HXD による観測データのうち、一公転周期以上を一観測でカバーしている LS5039 に対して Z_m^2 テストという手法で周期探索を行った。 Z_m^2 テストとはイベントの時刻をある周期での位相に変換し、位相分布の偏りを見る手法である。この手法は、従来の周期解析手法に比べ偽検出の可能性が低く感度も良い。様々な周期を試した結果、周期 8.96 s 付近でパルス周期の兆候を発見した。これは伴星が BH でなく、さらに強磁場 NS である可能性を示唆している。

- 1 Casares, J., *mathrm{Ribacuteo}*, M., Ribas, I., et al. *MNRAS*, 364, 899 (2005)
- 2 de Jager, O. C., Raubenheimer, B. C., & Swanepoel, J. W. H. *A&A*, 221, 180 (1989)
- 3 Takahashi, T., Kishishita, T., Uchiyama, Y., et al. *ApJ*, 697, 592 (2009)

コン a16 銀河系内の孤立ブラックホールの検出可能性について

津名大地 (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)

大質量星の最終段階として生まれると考えられるブラックホール (BH) は、X 線観測によりこれまでに数十の候補が発見されてきた (e.g. Remillard & McClintock 2006)。また最近では重力波干渉計 LIGO が連星 BH からの重力波の直接検出に

成功する (Abbott et al. 2016) など、BH の存在は確実なものになっている。

現在までに X 線観測によって見つけれられてきた BH は全て恒星と連星系 (X 線連星) を形成し、その強い重力で恒星から物質を降着することで明るく輝いている。しかしこのような BH の他に、伴星を持たないような孤立ブラックホール (IBH) と呼ばれるものも存在すると考えられている。これらは銀河系内の星間空間のガスを降着することで輝くと考えられていて、X 線連星と比べてかなり暗いため今のところ検出されていないが、将来の望遠鏡での検出が期待されている。

本研究では銀河系内に存在する IBH について、現在および次世代の X 線望遠鏡による検出可能性を考察した。まず IBH の分布について、過去の研究 (e.g. Agol & Kamionkowski 2002) よりも正確なものを得るために銀河系のポテンシャルを用いて IBH の軌道を計算した。またガス密度の分布の最近の観測結果を用いてこれらの IBH の降着率を推定し、radiatively inefficient accretion flow (RIAF) という降着円盤モデルを仮定することで光度およびフラックスの計算を行った。

本研究での計算には、2 種類の大きな不定性が存在する。一つはこのような BH が誕生するときのキックの大きさで、もう一つは実際の降着率と球対称降着を仮定したボンディ降着率の比である。本研究ではこの 2 つについて幅広いパラメータ領域で計算した結果から、過去の観測結果によるこれらのパラメータの制限についても議論を行う。

- 1 Remillard R. A., McClintock J. E., 2006, ARA&A, 44, 49
- 2 Abbott B. P., et al., 2016b, Physical Review Letters, 116, 061102
- 3 Agol E., Kamionkowski M., 2002, MNRAS, 334, 553

コン a17 「すざく」衛星による MAXI J1659-152 の X 線スペクトル解析

早川亮大 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

ブラックホール (BH) 連星は、伴星からの物質供給が起こることで、降着物質が重力エネルギーを獲得し、X 線として解放される。このときに起こる放射は、主に降着円盤からの熱的な放射成分と、BH 周辺のコロナからのコンプトン放射による連続成分で構成され、前者が優勢の場合をソフト状態、後者が優勢の場合をハード状態と呼ぶ。

MAXI J1659-152 は、国際宇宙ステーションに設置された全天 X 線監視装置 (MAXI) によって 2010 年 9 月 25 日に発見された BH 候補天体である。その後次々と追観測が行われ、「すざく」衛星では、2010 年 9 月 29 日から 2010 年 10 月 1 日までの間に 3 回観測が行われた。この天体の軌道周期が約 0.1 日であり、現在発見されている BH 連星では最短である。さらに、これまでの研究で伴星は $0.15\text{-}0.25M_{\odot}$ の M5 矮星であることが示唆されている。また、発見当初は BH 連星に似た時間変動が

見られることからハード状態であったが、「すざく」衛星での観測時はハード状態からソフト状態へ向かいつつある過渡期であったことがわかった。

今回、この天体についての「すざく」衛星のデータ解析を行った。観測 1 日目においてエネルギースペクトル、ライトカーブ、パワースペクトルの取得を行った。また、11-70keV の Low-Frequency QPO (準周期的振動) の周波数が 2.3Hz と求まった。本発表では、研究の進捗を報告する。

コン a18 X 線天文衛星 NuSTAR と XMM-Newton による狭輝線セイファート 1 型銀河 SWIFT J2127.4+5654 の観測

井戸垣洋志 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

狭輝線セイファート 1 型銀河 (NLS1) は活動銀河核 (AGN) の中でも質量が $\sim 10^6 M_{\odot}$ と小さい一方で、光度は $10^{43\text{-}46}$ erg/s と高く、大きな質量降着率を持つ [1]。NLS1 の X 線スペクトルは、べき $\gamma \sim 2$ で伸び 30-40 keV 付近に折れ曲がりをもつべき関数成分と、2 keV 以下にピークをもつ超過成分からなる。これは、後者の低温で光学的に厚い放射が、熱的な電子コロナによって逆コンプトン散乱されるモデルでよく再現される。このモデルでは、電子コロナは外側から落ちてくる陽子とクーロン衝突することでエネルギーを得る (heating) 一方で、逆コンプトン散乱によって光子にエネルギーを奪われる (cooling)。これらの釣り合いが折れ曲がりとして現れており、電子温度 kT_e に対応している。NLS1 は降着率が小さい広輝線セイファート 1 型銀河 (BLS1) と比べて kT_e が小さいことが知られている (Malizia et al. 2008[2]) が、その理由はあまり議論されてこなかった。Ohmura et al. (2017) はこの heating と cooling の釣り合いから、 kT_e とエディントン比 $\eta = L/L_{\text{Edd}}$ の関係式 $kT_e \propto \eta^{-\frac{2}{3}}$ を導き出した [3]。この相関係係が正しければ、NLS1 は η が大きいために kT_e が小さくなると自然に説明できる。Ohmura et al. (2017) は「すざく」のデータを解析し相関の兆候を見ることはできた。しかしデータ数が少ない上、硬 X 線検出器 (HXD) では折れ曲がりの検出は容易ではなく、大きな不定性があった。そこで本研究では、2012 年に打ち上げられ 5-80 keV で 2 桁以上の感度をもつ NuSTAR と、0.3-10 keV で大きな有効面積をもつ XMM-Newton を用いてこの相関を検証する。これによって折れ曲がり検出できればより多くの天体で kT_e を求められる。今回は両衛星での同時観測が 3 回行われ、データが豊富で変動の激しい SWIFT J2127.4+5654 に着目した。本講演ではこの観測データの解析結果について報告する。

- 1 Boller, Th. et al. 1996, A&A, 305, 53
- 2 Malizia, A. et al. 2008, MNRAS, 389, 1360
- 3 大村峻一, 京都大学, 2017, 修士論文

コン a19 活動銀河核からの FeK $_{\alpha}$ 輝線スペクトル解析による放射領域の速度構造の推定

今井悠喜 (埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験 田代・寺田研究室 M1)

宇宙に数多ある銀河の中には、中心部から電波から γ 線に広く渡って電磁波を放射しているものがある。その領域は活動銀河核と呼ばれ、正体は太陽質量の 10^6 から 10^9 倍の超巨大ブラックホールと考えられている。活動銀河核の可視光スペクトルには広幅輝線と狭幅輝線が見られるもの、狭幅輝線のみ見られるものがあるが、この違いは「トラスモデル」によって説明される。これはトラス状の吸収体が囲む中心ブラックホールを、我々がトラス越しに観測する場合、中心からの生のスペクトルに吸収がかかり、トラスの穴方向から観測する場合と異なって見えるとするものである。活動銀河核からの X 線スペクトルに見られる中性鉄 K_{α} 輝線は比較的吸収による影響が小さく、活動銀河核の重要な探針である。Minezaki&Matsushita (2015) は、この鉄輝線の線幅広がり放射領域の運動によるドップラーシフトとして利用したブラックホール質量測定法を提案した。伊藤由裕修士論文 (東京理科大学 2016) は X 線衛星 Chandra HETG で線幅を調べたが、エネルギー分解能に優れる一方で観測エネルギー帯域が狭く、エネルギーの冪乗で表される成分の減少が不自然に緩やかで、輝線幅の決定に影響を与えている問題があった。そこで本研究では伊藤修論で解析された内、特に鉄輝線が卓越している天体 NGC4151 について、冪乗成分が支配的な硬 X 線領域で高精度観測が可能な X 線衛星 NuSTAR を用いて冪乗成分を決定した上で輝線幅を調べ、放射領域の速度構造及び場所を議論した。その際複数のモデルを比較して輝線がブラックホールによる重力赤方偏移を受けたか調べたが、結論できなかった。また鉄輝線は幅が広い成分、幅が狭い成分の 2 成分でよく表され、既に放射領域の場所が調べられている H_{η} 輝線幅との比較で放射領域の場所を推定した。結果、幅の狭い成分の起源はトラス吸収体内縁部が候補として示唆された。

- 1 Minezaki, T., and Matsushita, K. 2015, ApJ, 802, 98
- 2 Shu, X. W., Yaqoob, T., and Wang, J. X. 2010, ApJS, 187, 581

コン b1 FDPS によって並列化された SPH コードの GPU による高速化

山内俊典 (東京大学 鈴木・蜂巢研究室 M1)

流体計算に用いられる微分方程式の数値解析手法の 1 つに SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) がある。これは対象とする物体を粒子の集まりとして表現し、ラグランジュ的に粒子を移動させながら解析する粒子法の 1 つであり、様々な天体現象を解析する手法として用いられている。一般に粒子法を用いたシミュレーションは膨大な数の粒子を扱うため並列化が必須である。しかし並列化コードの作成は容易ではなく時間もかかる。FDPS (Framework for Developing Particle simulators) はこのような問題を解決するために作成されたフ

レームワークである。ユーザーは FDPS を使うことでプログラムの並列化を意識せずに、並列化されたプログラムを書くことができる。FDPS を用いたシミュレーションの手順は、次のような流れになっている。(1) ドメイン分割、(2) プロセス間での粒子の入れ替え、(3) 粒子の加速度の計算に必要な情報の収集、(4) 粒子間の相互作用計算、(5) 粒子データのアップデート。(1)(2)(3) はプロセス間通信が必要であり、FDPS のライブラリが適切に実行する。(4)(5) はプロセス間通信を必要としないため、実際の計算式などはユーザー自身が書く。シミュレーション全体で最も計算量が重い部分が (4) の相互作用の計算であり、現段階での FDPS では CPU 上で SIMD 命令を用いて計算している。本研究ではこの計算を、GPU (Graphi Processing Unit) を用いて並列化することによってコードの高速化を目的としている。このコードを使った SPH シミュレーションで、白色矮星同士の合体計算や中性子星による白色矮星の潮汐破壊計算などができる。今回の発表ではコードの開発方針、状況と今後の展望について発表する。

コン b2 X 線新星 V404 Cyg の多波長タイムラグ解析 木邑真理子 (京都大学宇宙物理学教室 D1)

一般的に、天文学の時系列データはスパースである。天候や天体の位置、衛星姿勢など様々な制限により、観測で得られるデータは穴あきかつ不等間隔な時系列を持つようになる。また、同じ天体を異なる波長域で観測する場合、観測機器の違いなどにより、完全に同じサンプリング間隔を持つ同時観測データを得ることは困難である。

X 線新星は、主星がブラックホールまたは中性子星、伴星が低質量の主系列星からなる近接連星系である。主星の周囲には伴星から流れ込むガスによって降着円盤が形成されている。この降着円盤の熱不安定性により、突発的に主星に降着するガスの量が増え、様々な波長域で急激な増光現象 (アウトバースト) を起こすことが特徴である [1]。アウトバースト中、しばしば短時間の光度変動が観測されるが、その原因はよくわかっていない。そこで、各波長域での短時間光度変動の放射機構を探るため、多波長光度曲線間のタイムラグ解析が良く用いられてきた。しかし、そのような解析は相互相関関数を計算するなどの古典的手法に則っていたため、完全に同じサンプリング間隔を持つ等間隔の時系列データに限られていた。そのようなデータでない場合には、物理的機構を考慮せずに補間がなされていた。

私達は、状態空間モデルとベイズ推定を用いた手法 [2] を X 線新星 V404 Cyg の時系列データに適用し、異なるまばらなサンプリング間隔を持つ X 線と可視光の光度曲線間のタイムラグを補間せずに求めることに成功した。この解析から、X 線変動が可視光に対して 30–50 s 遅れていることがわかった。この結果は、これまで可視短時間変動の原因としてよく考えられてきたシンクロトロン放射や X 線照射では説明できない。そこで私達は、この X 線の遅れが、質量降着流の変動が降着円盤内を外側から内側へ伝わる時間に対応するのではないかと提案した

[3]. 本発表では、この結果を紹介し、[2] の手法の応用についても議論する。

- 1 Tanaka & Shibazaki, 1996, extitARA&A, 34, 607
- 2 Tak et al., 2016, preprint, (arXiv:1602.01462)
- 3 Kimura et al., 2016, extitMNRAS, submitted

コン b3 活動銀河核ジェットの加速モデル 萩原大樹 (東北大学天文学専攻 M2)

活動銀河核から相対論的速度で吹き出すジェットには未解決問題が多数ある。駆動機構、加速機構、収束機構、質量注入、安定性について多くの研究がなされているが、未だ謎が多い。本研究では加速機構問題に着目する。近年の電波観測により明らかになってきたジェットの詳細な放射強度分布を理論的に再現することで加速に必要な状況・物理量を制限し、この問題の解決を図る。

ジェット加速モデルの一つに電磁的加速モデルがある。活動銀河核中心部にあるブラックホール自体やその周辺の降着円盤の回転エネルギーを磁場を介してポインティング流速を作り、それを粒子の運動エネルギーに変換するモデルである。しかし、この理論モデルに対する観測的証拠は未だ無い。

M87 銀河に付随するジェットでは縁部分が明るく光る構造が知られている。この特徴的な放射構造はジェットの磁場構造に重要な示唆を与えるにも関わらず、これまで考えられてきたどの理論予測でも考慮されていなかった。最新の電波 VLBI 観測によりブラックホールから数千シュバルツシルト半径の距離でジェットが三叉のフォークのような放射構造を持っていることが明らかになった (Asada, Nakamura & Pu 2016, Hada 2017)。

本研究では電磁場加速モデルを用いてこの特徴的な三叉フォーク放射構造を再現することにより、モデルの観測的検証を行った。定常軸対称、磁場のエネルギー密度が粒子の持つエネルギー密度よりも十分に大きいという force free 条件のもとでブラックホール近傍の磁場・密度場の構造をパラメーター化し、この三叉フォーク放射構造を矛盾なく説明する条件を調べた。この結果について議論する。

- 1 Avery E. Broderick and Abraham Loeb 2009. ApJ.679:1164
- 2 Keiichi Asada, Masanori Nakamura, and Hung-Yi Pu 2016. ApJ,833:56
- 3 Hada, K. 2016, Galaxies, 5, 2

コン c1 定常流を用いた衝撃波下流のジェットの構造解析

渡邊玲央人 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

宇宙には様々なダイナミックな現象があり、その一つとして宇宙ジェットがある。現在、宇宙ジェットは様々なスケールで重力天体の周辺で発見されている。中心に大質量ブラックホールを持つ AGN からは、数百 kpc もの長さにわたって銀河間の虚空を貫いていて、光速に近い値で噴出されるプラズマガスが電波として観測されている。このような宇宙ジェットには未だ解明されていない様々な問題がある。ジェットはどのような機構によって光速に近い値まで加速されているのかという加速機構の問題、なぜジェットが拡散せずに細いまま進んでいくのかという収束問題、ジェットの構造や安定性問題などが挙げられる。重力天体の成長や周辺の星間空間を深く知るために、私たちにこれらの問題を解明していくことが望まれる。

先行研究では数値シミュレーションによってジェットの時間発展の様子を描写した研究が数多くあり、未解決問題が研究されている。本研究では、少し違ったアプローチを考え時間発展ではなくジェットが定常流になっていることを使いその形状を求めることを考える。今回ジェットはどのような状況下で安定し、崩れるのかということ解析することを目指し、ジェットの先端に生じるバウショック下流の流れについて着目し、細かい物理現象やジェットの構造を理解することを目指して定常解を求めることを試みた。

- 1 Christian Fromm, Spectral Evolution in Blazars(2014)
- 2 H.Nagakura, Gamma-Ray Bursts from Explosive Death of Massive Stars(2011)

コン c2 プラズマ粒子シミュレーションによる無衝突衝撃波遷移層での波動励起機構について 篠田理人 (青山学院大学大学院 理工学研究科 M1)

地球には、高エネルギー荷電粒子である宇宙線が飛来している。観測されている宇宙線のスペクトルには、宇宙線のエネルギーが $10^{15.5}$ eV 付近で Knee という特徴的な曲がり存在する。それ以下のエネルギー帯の宇宙線は、超新星残骸の無衝突衝撃波によって加速されていると考えられている。その加速の方法は、Fermi 加速理論が考えられている。Fermi 加速理論は、粒子が選択的に衝撃波遷移層を往復することで、正味のエネルギーを得るものである。

しかし、Fermi 加速理論には問題点がある。それは、インジェクション問題と呼ばれる。粒子が衝撃波遷移層を往復するためには、衝撃波遷移層を超えるためのエネルギーをあらかじめ持っていることが必要であるというものであり、遷移層を超える最低エネルギーを持つに至る運動論的物理過程が未解明のままである。

本研究では、プラズマ粒子シミュレーションを用いて低マッハ数の無衝突衝撃波遷移層での粒子、電磁場の挙動を調べ、インジェクション問題の解明の一助になることが目的である。そ

の為、本研究では、イオンの温度非等方不安定により励起される電磁波動について着目してシミュレーションデータを解析を行った。

講演では、研究の結果とその考察について掲載する予定です。

- 1 坂下 士郎/池内 了 共著:「宇宙流体力学」(培風館)
- 2 高原 文郎 :「天体高エネルギー現象」(岩波)
- 3 Francis F.Chen 内田 岱二郎訳:「プラズマ物理入門」(丸善)

コン c3 2次元効果を考慮した、ブラックホールへの超臨界降着

竹尾英俊 (京都大学宇宙物理学教室 D1)

宇宙初期 (赤方偏移 $z \sim 6-7$, 宇宙年齢 $\sim 1\text{Gyr}$) において、超巨大ブラックホール ($> 10^9 M_\odot$) が観測されているが (Mortlock et al. 2011)、その形成過程は不明である。一説として、宇宙初期 ($z \sim 20$, 宇宙年齢 $\sim 0.2\text{Gyr}$) にできた初代星由来のブラックホール ($\sim 10^{1-3} M_\odot$) が、ガス降着で急成長したとするものがある。この説に従うと、エディントン限界を上回る、超臨界降着による成長が不可避である。なぜなら、このブラックホールがエディントン限界で降着し続けても、観測された時期までに、 $> 10^9 M_\odot$ へと成長できないためだ。しかし、球対称的な輻射場を仮定する限り、超臨界降着は困難である。中心部からの輻射が、周囲のガスを電離加熱し、降着を抑制するためだ (Park & Ricotti 2011)。

そこで我々は、2次元 (非球対称) 効果を考慮することで、超臨界降着が実現する可能性に着目した。なぜなら、輻射は本来、降着円盤由来で、非等方性を有するためである。我々は、原始ガス (水素・ヘリウム) の電離・再結合を考慮した、2次元輻射流体計算を行った。結果、輻射場の強い極方向では、電離されたアウトフローが噴出する一方、輻射の弱い赤道面方向から超臨界降着が実現することを明らかにした。また、 $\gtrsim 5 \times 10^5 M_\odot$ 程度の大質量ブラックホールの場合、電離領域は消滅し、全系が中性化すること、さらに、2次元効果により、極方向に 8000mK の中性アウトフローが噴出することを明らかにした。本講演では、上記の降着解の発生プロセスと、観測的示唆を解説する予定である。

- 1 Mortlock D. J. et al., 2011, Nature, 474, 616
- 2 Park K., Ricotti M., 2011, ApJ, 739, 2

コン c4 超臨界降着ブラックホールのスペクトル

五十嵐太一 (千葉大学 宇宙物理学研究室 M1)

Ultraluminous X-ray sources (ULXs) の X 線の典型的な光度が $10^{39} - 10^{41} \text{erg ms}^{-1}$ であり、中性子星やブラックホールのエディントン光度を超えることが知られている。ULX のスペクトルには大きく 2つの状態があり、 5keV 付近でロールオーバーする山形のスペクトルと 10keV 以上まで伸びるべき

関数型のスペクトルに分類できる。これらのことを説明するためには、恒星質量ブラックホールへの超臨界降着と太陽質量の $100-1000$ 倍のブラックホールへの亜臨界降着の 2つが考えられていて、どちらが正しいかはわかっていない。

今回紹介する論文 (Kawashima et al. 2012) ではコンプトン散乱、自由-自由吸収、フォントラッピングを含めた超臨界降着の輻射流体計算から、NGC 1313 X-2 に非常によく似たスペクトルを得られていることから、超臨界降着による説明を支持する。

- 1 T. Kawashima et al. 2012 ApJ 752 18

コン c5 Fast Radio Burst の起源について

米川信哉 (東北大学天文学専攻 M1)

E. Waxman (2017, arXiv:1703.06723) をレビューする。Fast Radio Burst (FRB) とは、1 ミリ秒程度の非常に短い時間に、強度 $0.1-10\text{Jy}$ もの電波が放射される天体現象であり、距離の指標となる Dispersion Measure が大きく、またコヒーレントな放射であることが知られているが、起源やメカニズムについては不明である。本発表では、同じ場所で繰り返し起こる FRB 121102 について議論する。FRB はこれまで 20 例程度観測されているが、この FRB 121102 のみ定常電波源が付随して検出されている。本論文では、その定常電波源について詳細に考察し、サイズや放射電子のエネルギー、これまでの 4 年間で放出された総エネルギーなどを推定した。個々の電子のエネルギーが高くないことから、今まで議論されてきた「マグネター星雲モデル」では説明できない。むしろ weak stellar expansion で生じる mildly-relativistic な噴出物が衝撃波を作り、それが定常電波源となっていることが示唆される。一方、FRB の起源としては、highly-relativistic な噴出物による衝撃波でのシンクロトロンメーザーであることを提案する。

- 1 E. Waxman. arXiv:1703.06723 (2017)

コン c6 電波銀河の形成過程の解明

津久井崇史 (国立天文台三鷹 M1)

電波銀河はジェットの形状や電波強度によって FR type 1 (FR1)/ type 2 (FR2) に大別できることが古くから知られており、FR1 はコアとジェットに沿って高い輝度を示し FR2 は電波ローブを形成しローブの端に高い輝度を示す。FR1 はパワーの弱いジェットを持つのにに対し、FR2 はパワーの強いジェットを持つ。

一方で可視のスペクトルでは高階電離輝線を持つもの (HERG) と低階電離輝線を持つもの (LERG) の二つに分類できる。HERG は中心部からの多量の電離光子が周囲のガスを高階まで電離することができていて、LERG は周囲のガスを高階まで電離するほど光子が生成されていないと考えられる。FR2 には HERG が多く存在するが FR1 ではほとんどが LERG に分類

されている。この分類は降着円盤のモードを本質的に表しており、前者は放射効率が高い標準降着円盤に対応し、後者は降着円盤の放射効率が低い移流優勢降着 (ADAF) モードに対応していると考えられている。これは降着円盤とジェットの結びつきを示す強い証拠である。

FR1 と FR2 に分岐する詳細な物理メカニズムは解明されていないが、ジェットのパワー (降着円盤モード、降着率、BH スピン、BH 質量に依存すると考えられている) に依存するだけでなく、ジェットの片方が FR1 もう片方が FR2 の形をしている Hybrid source も存在するため、周辺環境も大きな影響を与えていると考えられている。環境効果や BH 質量などの影響を取り除けばより本質的な電波銀河の分類、ジェット形成のメカニズムそのものにも迫れるのではないかと考えている。またジェットの形による分類とスペクトルの形による分類とを比較することで降着円盤とジェットの物理的な結びつきの理解を得られると考えられる。

本発表は観測と理論の両面から FR1/2 分類の問題点を紹介し、降着率や BH 質量の測定に加え、環境とジェットの相互作用や、ガスの降着の直接撮像観測を可能にする ALMA 望遠鏡を用いて今後どのような研究をしていくか発表する。

- 1 Gendre, M. A., Best, P. N., Wall, J. V. (2010)
- 2 P. N. Best, and T. M. Heckman (2011)
- 3 Active Galactic Nuclei Beckmann, and Shrader (2012)

コン c7 次世代ガンマ線天文台 CTA でみるガンマ線バースト

野崎誠也 (京都大学 宇宙線研究室 M2)

ガンマ線バースト (gamma ray Burst, GRB) は、等方仮定で 10^{53} erg ものエネルギーを数ミリ秒から数百秒の間に放出する、宇宙最大の爆発現象である。GRB から放出する超相対論的ジェットの時間発展に応じて、まず MeV ガンマ線を中心とした即時放射が起こり、その後、電波から X 線、ガンマ線にも渡る広いエネルギー帯で徐々に減光していく残光放射が起こる。この GRB の中心駆動天体の正体、放射機構などの基本的なことも未だに謎であり、多波長での GRB 観測により、この謎の解明に取り組まれている。GRB からの放射は少なくとも GeV 領域まで伸びており、GeV ガンマ線放射の性質は、特に近年のフェルミ衛星での観測により明らかになってきた。しかし、限られた検出面積のために光子統計が少なく、その放射機構を特定するには至っていない。

その中で、GRB からの放射機構の特定への貢献が期待されているのが、Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画である。CTA 計画は 32 か国が参加している国際共同計画であり、北サイト (スペイン・ラパルマ) と南サイト (チリ・パラナル) に大きさの異なる 3 種類の望遠鏡を計約百台建設する。CTA では、現行のチェレンコフ望遠鏡よりも 10 倍良い感度で、20 GeV か

ら 300 TeV という広いエネルギー帯のガンマ線を観測することができる。CTA を用いることで、その圧倒的な有効面積により、20 GeV 以上のガンマ線放射を高統計で検出ことができ、ガンマ線放射の時間発展を研究するのに最適である。これによって、即時放射、残光放射における高エネルギーガンマ線の放射機構の特定だけでなく、相対論的ジェットの物理の理解、最高エネルギー宇宙線の起源であるかの検証にも貢献することができる。本講演では、CTA における GRB 観測の展望について発表する。

コン c8 Event Horizon Telescope による銀河系中心核 Sgr A* の超巨大ブラックホールの観測 津田修一朗 (国立天文台三鷹 M1)

ブラックホールのごく近傍の領域は降着する物質の重力エネルギーが最も大きく解放されるため、多様な高エネルギー天体現象の現場であると考えられている。また、この領域は事象の地平面の存在により生じるブラックホールの影 (シャドウ) の存在など、アインシュタインの一般相対性理論が予測する強重力場特有の物理的現象が見られることが期待される。このような領域の撮像は天文学における長年の目標の一つである。

この目標の実現に最も適した天体の一つが、天の川銀河の中心 Sgr A* に存在する超巨大ブラックホールである。Sgr A* のシュバルツシルド半径 (R_s) はおよそ 10 マイクロ秒角であり、全天のブラックホール候補天体の中で最大である。この視直径に匹敵する空間分解能の観測が、超長基線電波干渉計 (VLBI) という手法によって実現されようとしている。VLBI は地球上に点在する複数の電波望遠鏡の開口を合成することで地球規模の仮想的な望遠鏡を構成する技術で、現存する観測装置を圧倒する空間分解能を達成することができる。VLBI 観測を約 1 mm の波長で実現することができれば、その空間分解能は Sgr A* の 2-3 R_s に到達する。

Event Horizon Telescope (EHT) は 1.3 mm 帯で VLBI 観測網を構築し、ブラックホール近傍の撮像を目標とする国際プロジェクトである。これまで EHT は 10 年近くに渡り観測装置の性能を向上させながら試験観測を行い、ブラックホール近傍の事象の地平面スケールの放射構造の空間分解に成功している。また EHT の観測性能を大幅に向上させる大型電波干渉計 ALMA が加わった初の本観測が 2017 年 4 月に行われ、ブラックホール近傍のイメージが今後数年の間に初めて得られることが期待されている。本講演では、EHT による Sgr A* の 10 年にわたる初期観測成果を紹介したのち、今後の将来展望を講演者の研究計画と合わせて紹介する。

コン c9 超高光度 X 線源

森田貴士 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

超高光度 X 線源 (ultraluminous X-ray source, ULX) は、 10^{39} [erg/s] を超える高い X 線光度を持ち、銀河中心以外の場所で観測される X 線源である。ULX の光度を説明するために

は、恒星質量ブラックホールに超臨界降着（質量降着率がエディントン降着率以上）が起きている、もしくは中間質量ブラックホール（ $10^2 - 10^5$ 太陽質量）に垂臨界降着が起きていると考える必要がある。超臨界降着と中間質量ブラックホールはどちらも大質量ブラックホールの起源や進化に深く関係しているため、ULX の性質を解明することは非常に重要である。

超臨界降着円盤は輻射圧優勢で光学的に厚い円盤であり、高速のガスが噴き出る現象（アウトフロー）が起こる。近年、X 線だけでなく可視光や電波を使った多波長での観測により、このアウトフローの存在を示唆する証拠が見つかった（Fabrika et al. 2015）。また、いくつかの ULX は中心天体として中性子星を持つことが分かった（Bachetti et al. 2014）。中性子星の質量には上限があるため、このことは、超臨界降着が実際の天体で起きていることを示す事実である。一方、中心天体の質量を直接求められないために、中間質量ブラックホールである可能性も残っており、議論が続いている。本講演では、Kaaret et al. (2017) をもとに観測的な視点から、ULX 研究の現状とその課題についてレビューする。加えて、ULX IC342 X-1 に関する自身の研究についても紹介する。現在、すばる望遠鏡と X 線衛星 *XMM-Newton*、*NuSTAR* による同時観測データを用いた多波長での解析を進めている。

- 1 Fabrika, S., Ueda, Y., Vinokurov, A., Sholukhova, O., & Shidatsu, M. 2015, *Nature Physics*, 11, 551
- 2 Bachetti, M., Harrison, F. A., Walton, D. J., et al. 2014, *nat*, 514, 202
- 3 Kaaret, P., Feng, H., & Roberts, T. P. 2017, arXiv:1703.10728

コン c10 全天 X 線監視装置 MAXI による LMC 領域のモニター観測 下向怜歩 (宇宙科学研究所 M1)

LMC (Large Magellanic Cloud : 大マゼラン雲) 領域には、4 つの明るい X 線天体 LMC X-1、X-2、X-3、X-4 が存在し、これらはどれも連星系である。X-1 と X-3 はブラックホール連星系、X-2 は磁場の弱い中性子星と低質量の伴星からなる X 線連星系、X-4 は強い磁場を持つ中性子星を含む連星 X 線パルサーで、いずれも伴星から中心天体への質量降着によって強い X 線を放出している。

本研究では、MAXI が 2009 年に国際宇宙ステーション (ISS) に設置されてから現在までの LMC 領域のデータ解析を行った。ISS は約 92 分で地球を一周し、MAXI はそれに合わせて全天のスキャンを行っている。MAXI に取り付けられた GSC (Gas Slit Camera) 検出器を用いて、4 天体の 2009 年 10 月 ~ 2017 年 3 月における 2-20keV 帯域のエネルギースペクトル変化、イメージ、ライトカーブを詳細に調べた。この期間において、LMC 領域を X 線で継続的にモニターを行ってきたのは MAXI だけである。

本講演では、MAXI の結果と過去の X 線観測の結果の比較からわかってきた LMC X-1, X-2, X-3, X-4 の X 線放射機構とこれらブラックホール / 中性子星周辺の物理状態について報告する。

コン c11 KEPLER モデルを用いた熱核 X 線バーストに降着率と金属量が与える影響の解析 山田龍王 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M1)

X 線バースト (XRB) は、天体から放出される X 線の強度が 1 - 10 s 程で通常の 10 倍近くに増加し、数 10 - 100s 程の減衰時間で元に戻る現象である。バースト時のピーク光度はエディントン光度 $\approx 10^{38}$ erg s⁻¹ 近くにまで達する。X 線バーストは中性子星と低質量星 ($\sim 1M_{\odot}$) との連星系で起こり、そのメカニズムの違いから I 型と II 型に分類される。多数の観測例がある I 型 X 線バーストは、伴星から中性子星表面に降着した物質の不安定核燃焼によって引き起こされる。核燃焼のプロセスは伴星からの物質の降着率に依存して変化する。通常は H/He の混合バーストが起きるが、降着率が低くなると、He のみを燃料とするバーストが発生する。このバーストは混合燃焼と比べて光度が大きく、持続時間は短い急激な光度曲線の変化を見せる。これらのバーストの挙動を説明するための様々なモデルが提案されてきた。観測をよく説明するシミュレーションモデルを得ることで、核物質の状態方程式を制限することが期待される。将来的には、中性子星の $M - R$ 関係に厳しい制限を加えることが可能になるかもしれない。

今回紹介する論文では、1D 流体力学コード KEPLER を用いて、金属量、降着率に対して広くパラメータを振った 464 のモデルについてシミュレーションを行い、モデル毎の光度曲線の変化に関する性質を解析した。その結果、バースト間の再起時間は降着率に対する冪乗則を持ち、その冪は金属量によって $-(1.1 - 1.24)$ で変化すること、H/He 混合燃焼から純粋 He 燃焼へ移行するためには、太陽系組成比の場合バーストの再起時間が hot CNO cycle を経て H が使い果たされる時間と一致することを発見した。また、バーストの持続時間、光度曲線の凸性、バースト時に対する休止時のフラックスの比などの観測可能な現象と比較することでモデルの妥当性を検証している。

- 1 Lampe, N., Heger, A., Galloway, D.K. 2016, *ApJ*, 819, 46
- 2 Heger, A., Cumming, A., Galloway, D. K., Woosley, S. E. 2007a, *ApJL*, 671, L141

コン c12 元素合成から探る重力崩壊型超新星の爆発機構 澤田涼 (京都大学宇宙物理学教室 D1)

重力崩壊型超新星爆発とは、大質量星が恒星進化の最後に起こす爆発現象である。そして、重力崩壊型超新星が爆発成功するか否かという問題は、ブラックホール形成に直結しており、

宇宙の物理的進化を考える上で重要な現象である。しかし、特に「中心での爆発ダイナミクスを第一原理から計算した数値流体シミュレーション」では観測量を説明できる爆発に未だ至っていない。これは計算精度や近似にも課題が残されているが、なによりも現在の超新星爆発の物理への理解が不十分である可能性が大きい。この問題に対して本研究では、公開コード「FLASH」を用いて流体計算および元素合成反応計算を行うことで、観測量を再現するためにはその爆発メカニズムにどのような制約が与えられるのかを調べた。爆発的要素合成で作られる元素の生成量や分布は、爆発ダイナミクスの影響を多分に受ける。そのため生成される元素を通じて、爆発中心領域でどのような現象が起きているのか理解することができる。具体的には、近年の第一原理計算で示唆されている「長時間かけて爆発エネルギーが観測値まで成長する」という結果に注目した。そして、「成長時間をパラメーターに爆発エネルギーの成長時間は、現実的に観測される重力崩壊型超新星が再現されるためにはどの程度まで許されるのか」を調べた。その結果、現状の第一原理計算での爆発エネルギーの数値計算での現実的再現性の条件として、200[ms]程度以内で 10^{51} [erg]へ到達する必要を要求できた。本研究により、重力崩壊型超新星爆発の爆発メカニズムの探求において強い制約がかけることに成功した。

- 1 Suwa Y, Tominaga N, Maeda K. arXiv:1704.04780
- 2 Nakamura K, Kuroda T, Takiwaki T, Kotake K. *Astrophys.J.*793 45 (2014)
- 3 Woosley, S. E. & Weaver, T. A. 1995, *ApJS*, 101, 181

コン c13 天体物理学における $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応の重要性和現状

森寛治 (国立天文台三鷹 M2)

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応は、Ia 型超新星や X 線バーストにおいて鍵となる反応である。

超新星爆発のうち、スペクトルに水素の吸収線が見られず、かつケイ素の吸収線が強いものを Ia 型超新星と呼ぶ。Ia 型超新星の親星はいまだ明らかとなっていない。しかし、有力なシナリオとして、白色矮星に伴星から質量が降着しチャンドラセカール質量近くまで成長すると超新星爆発に至る Single Degenerate (SD) シナリオと、白色矮星連星が重力波を放出しつつエネルギーを失い合体に至り、超新星として爆発を起こすという Double Degenerate (DD) シナリオがある。SD シナリオでは、超新星爆発の直前に白色矮星の内部で $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応が開始し、対流が発生することが知られている。この進化段階は carbon simmering と呼ばれており、電子捕獲反応を通して親星の中性子度を変化させ、超新星爆発の元素合成に影響を及ぼす可能性がある。DD シナリオでは、連星合体後の進化の様子は $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応の反応率に敏感に依存する。

一方、X 線バーストは、中性子星に降着した水素やヘリウムが核爆発を起こす現象である。通常の X 線バーストの持続時

間は数分程度であるが、ごくまれに数時間もの長時間持続するものが観測されている。この現象をスーパーバーストと呼ぶ。スーパーバーストでは中性子星表面で炭素が燃えているものと考えられており、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応が重要な役割を担っている。

このように $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応は普遍的に重要な素過程であるが、その反応断面積を実験的に測定することは難しい。これは、天体物理的な環境では熱的に分布するプラズマ中で反応が起こるため、低エネルギー領域における反応断面積が重要になるためである。ところが近年、Trojan Horse Method のような間接的手法の発展や、実験装置の進歩によって、その測定の試みが始まっている。本発表では、この反応にまつわる実験の現状と、我々の研究の予備的な結果を紹介する。

- 1 Spillane et al. *PRL* 98 122501 (2007)
- 2 Chamulak et al. *ApJ* 677 160 (2008)
- 3 Sato et al. *ApJ* 807 105 (2015)

コン c14 IIb 型超新星親星の半径と質量放出率

大内竜馬 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

重力崩壊型超新星は大質量星が進化の最期に起こす爆発現象である。爆発時の親星 (爆発直前の星) が持つ外層の構造や親星近傍にある星周物質の性質に応じて、超新星は異なった観測的特徴を示す。特に、爆発直後には水素の吸収線が見られるが、徐々にそれが弱まり次第にヘリウムの吸収線が卓越するスペクトル進化を示すものを IIb 型超新星という。II b 型超新星の親星は水素外層の大部分が剥ぎ取られ、少量の外層を残した星だと考えられている。このような外層の剥ぎ取りの原因としては、単独大質量星 ($\gtrsim 25M_{\odot}$) が持つ強力な恒星風か、あるいは伴星への質量輸送の二説が考えられる。まだ議論に決着はついていないが、近年の観測事実は後者の説をより強く支持している [1]。4 つの IIb 型超新星について、爆発直前の親星の撮像観測データに加え、爆発の詳細な多波長観測データが得られている。これらの観測は、半径の比較的大きい親星が爆発直前に持つ質量放出率は、半径が小さい親星のそれより一桁程度高いことを示唆する [2]。このような高い質量放出率は単独星恒星風では説明ができない。

本研究はこの観測事実の原因を明らかにすることを目的とした。そのために私は公開コード MESA を用いて、様々な値の初期パラメータを持つ多数の連星について進化計算を行った。計算は主系列段階から主星の爆発直前まで行った。本計算により、半径が大きい親星ほど爆発直前により高い連星間質量輸送率を持つため、それに伴ってより高い質量放出率を持つことが明らかになった。さらに、それらの半径が大きい親星モデルのいくつかは、爆発直前にきわめて高い質量放出率とそれに伴う濃い星周物質を持つために、IIc 型超新星という別の分類の超新星として観測される可能性があることを示した。またそのような超新星の発生頻度を見積もった。本研究会では以上の成果を発表する。

- 1 Benvenuto, et al. ApJ, 762, 74 (2013)
- 2 Maeda, et al. ApJ, 807, 35 (2015)

コン c15 コンパクト天体におけるニュートリノ輻射 輸送の研究

西野裕基 (京都大学 天体核研究室 D2)

高密度天体におけるニュートリノ輻射輸送の数値計算結果について報告する。大質量星の崩壊あるいは中性子星を含む連星の合体衝突の際には、大量のエネルギーがニュートリノを介して放出される。放出された莫大なエネルギーは、ごく一部が周囲の物質に受け渡され、相対論的なジェットを形成しうる。相対論的なジェットが形成されたのならば、ガンマ線バーストと呼ばれる突発的な電磁放射が起きる可能性が高い。このガンマ線バーストのシナリオは広く受け入れられているが、ジェットの形成機構については数値計算によって十分に確かめられてはいない。なぜなら、輻射輸送計算は一般に数値計算コストが大きいので近似的な取り扱いしか行われてこなかったからである。数値計算コストの少ない近似計算手法は数多く提案されているが、それらの近似の有効性は検証が必要である。本講演では、それらの近似手法による計算結果について検証する。

- 1 Meszaros&Rees, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 257.1 (1992): 29.
- 2 Zalamea&Beloborodov, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 410.4 (2011): 2302-23.

コン c16 連星中性子星合体 (BNS) における数値シ ミュレーションの現状と今後の展望

岡本和範 (大阪大学 宇宙進化研究室 M1)

中性子星 (NS) は大質量星の進化の最後に残された高密度天体である。大質量星の内部では核融合が起こり、それによる圧力で星の重力を支えている。核融合は最も安定な鉄まで合成する。その後核融合は進まず圧力と重力のバランスが崩れ、圧力が重力に対抗出来なくなり重力崩壊を起こす。多くの星では重力崩壊を起こす前に縮退圧によって支えられており、特に中性子の縮退圧によって支えられる星を NS という。

最近、重力波の直接観測により、その発生源の一つである連星中性子星 (BNS) が注目されている。BNS は二つの主系列星の連星が中性子星の連星になった状態である。BNS の最後の過程に合体があり、BNS 合体が引き起こす物理現象の一つに重力波の放射がある。ブラックホール連星から放射される重力波の直接観測の成功により今後 BNS 合体から放射される重力波が観測される事が期待されている。BNS 合体を起源とする重力波を観測すれば、一般相対論的な光速に近い速さで運動する状態での NS を調べられる。この恩恵により NS 内部の高密度な極限物質の状態方程式を獲得できる。BNS 合体はショートガンマ線バースト (SGRBs) の起源の候補の一つとされている。宇宙での高エネルギー天体の一つにガンマ線バース

ト (GRB) があり、宇宙最大の爆発とも言われる巨大で激しい爆発現象の事で数秒から数十秒の間、明るく輝く事が分かっている。GRB には短時間に明るく輝く SGRBs があるが SGRBs の起源については良く分かっていない。最近では BNS 合体を良く表している数値コードが多く開発されており、それらを用いて BNS 合体の数値シミュレーションが盛んに使われている。この様に BNS は NS の研究において重要である。

BNS のダイナミクスを得る為に高度な三次元数値シミュレーションを使うと、BNS 合体を再現する事が出来る。本発表では BNS 合体における数値コードとシミュレーション研究の現状を紹介し、今後の展望について述べる。[1]

- 1 Luca Baiotti, Luciano Rezzolla, 2016, preprint (arXiv:1607.03540)

コン c17 超新星爆発における重力波放射過程 日永田琴音 (福岡大学 M1)

重力崩壊型超新星爆発 (以下単に超新星と呼ぶ) とは、太陽の約 8 倍以上の質量を持つ重い恒星が、その進化の最終段階に迎える大爆発現象である。超新星は一天体現象でありながら、極めて多彩な天体現象の謎を解き明かす鍵を握っている。例えば超新星は爆発後に残される中性子星・ブラックホールといった高密度天体の形成過程そのものであり、また爆発時に合成される元素恒星は銀河の科学的進化・物資循環を担っている。このような多面性から、超新星は宇宙・天文分野において最も注目される天体現象の一つである。ところがこのような重要性にも関わらず、その根本となる爆発の物理的な機構は、60 年以上にわたる研究の歴史を持ちつつも、未だに完全には理解されていない。

超新星の爆発機構を解明する鍵となるのが、ニュートリノと重力波である。両者は超新星の外層を通過する際に物質とほとんど相互作用せず観測者に到達するので、超新星の中心の情報を直接運んでくる。この信号を解析することで、超新星中心における物質の状態や運動を知ることが可能となり、爆発機構に迫ることができると期待されている。現在、世界中に多くのニュートリノ・重力波検出器が存在しており、日本国内でも Super-Kamiokande や KAGRA が稼働している。

今回の夏の学校では、アインシュタイン方程式から出発して重力波の 4 重極公式を導出し、超新星を源とする重力波の特徴を最新の数値シミュレーションの結果を交えながら詳しく議論していきたい。

コン c18 重力波から考えるブラックホール連星の 起源

和田知己 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

LIGO O1 run ではブラックホール連星 (binary black hole, BBH) の合体から生じる重力波を 3 イベント観測した。この重力波の解析結果から、合体する前のブラックホール (black hole,

BH)の質量、有効スピン、BBH合体のevent rateといった量が明らかになったが[1]、これらの観測を説明するBBHの起源については諸説あり、はっきりとわかっていない。その説の1つに連星系が重力崩壊をおこしBBHができるというシナリオがある。このシナリオではBBHの有効スピンの重力崩壊する直前の星の種類に大きく依存する。そして、今回の3イベントでは有効スピンは非常に小さかった(例えばGW150914では $\chi_{\text{eff}} = -0.06^{+0.14}_{-0.14}$)。このことから、今回観測されたBBHが連星起源であるとする、その連星の種類を考えることができる。

本講演ではHotokezaka & Piran [2]に沿って以下の内容をレビューし、BBHの起源となりうる星の種類を調べ、将来見つかるであろう重力波の特徴を考察する。まず、連星起源のBBHに対して、有効スピンの小さくかつハッブル時間内に合体するという(我々が重力波を観測するのに必要な)条件は、その起源となる連星がWolf Rayet連星(WR星)と(今はまだ観測はされていない)種族III連星であれば満たしうることをみる。それらの連星に対してBBH形成率と合体時間分布を仮定し、有効スピン分布および、赤方偏移によるevent rateの変化を計算すると、今回の観測に一致する。またこの計算結果から、有効スピンの大きいBBH合体のevent rateがredshift($z \sim 2-3$) (WR星)や($z \sim 5$) (種族III)にピークをもつことがわかる。これにより、将来的に大きいredshiftの重力波まで観測できるようになれば、このピークの有無によりBBHの起源に制限を与えることができる。

また、6月に終了予定であるLIGO O2 runの解析結果と本論文の結果との比較も、LIGO O2 runの解析結果が出ていれば紹介したい。

- 1 Abbott, B. P., et al. 2016, Physical. Review. X, 6, 041015
- 2 Hotokezaka, K. & Piran, T., arXiv:astro-ph/1702.03952

コンc19 MAXIの長期データを用いた大質量X線連星系の周期性の研究

酒巻愛(日本大学 宇宙・数理解析研究室 M1)

SFXT (Supergiant Fast X-ray Transient) はINTEGRAL衛星によって20天体ほど発見された大質量X線連星系HMXBs (high mass X-ray binaries) の一種であり、コンパクト天体の中性子星とOB型超巨星で構成されている。通常のHMXBsは数百秒から数千秒で平均の10-50倍の明るさになるが、SFXTは数時間に及ぶX線の増光が起こる。暗い時はX線光度が $L \sim 10^{32}$ [erg/s]であるのに対し、増光時には短時間で $L \sim 10^{36} - 10^{37}$ [erg/s]に達する。まだ解明されていないこれらSFXT特有のふるまいの原因を、全天X線監視装置MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image)の観測データを用いて明らかにすることが本研究の目的である。

MAXIは国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の船

外実験プラットフォームに搭載され、2009年8月15日より7年以上、約92分で全天からのX線をスキャン観測し続けている。SFXT周辺に明るい天体がなく、MAXIが検出したことがある5天体を選び、MAXIにより得られた時系列データを用いてパワースペクトル解析を行い、周期変動の有無を調べた。そこでは、MAXIから得られるデータは離散的でかつ、データ欠損が含まれているため、これらを考慮したプログラムを作成した。

解析結果より、IGR J08408-4503とIGR J18483-0311でそれぞれ35日と18日の周期が検出された。それらはSwift衛星のBAT検出器から得られた周期(Romano et al. 2014)とINTEGRAL衛星から得られた周期(Levine et al. 2011)と一致することを確認した。これら周期解析の結果に加え、得られた周期でX線の光度曲線を重ね合わせ、その周期内でのエネルギー強度分布を調べる畳み込み解析の結果も発表する。

- 1 Romano et al. 2014, A&A, 562, A2
- 2 Levine et al. 2011, ApJS 196, 6

コンc20 大質量ブラックホール連星周りの星の確率的分岐を伴う離心率の進化 岩佐真生(京都大学 天体核研究室 D3)

大質量ブラックホール(以下MBHと略記)連星は銀河の合体に際して形成されると考えられている。この連星は最終的に重力波放出をして合体する可能性があり、将来の観測の宇宙重力波干渉計eLISAの重要な観測対象となっている。またMBHの周囲には星が多く存在すると考えられており、この星はMBHへと落下すると重力波や電磁波を放射すると考えられている。このような事象はMBHの強重力場の情報を引き出す可能性があるため重要である。近年、単独のMBHの場合に比べてMBH連星の場合の方がこのような事象の割合が増加することが示唆されている。なぜなら、MBH連星の場合には離心率が大きく振動するKozai-Lidov(KL) mechanism[1,2]が働くと考えられているからである。しかし、KL mechanismによる離心率の振動は短距離力(一般相対論的效果や星団が形成するポテンシャル)により抑制されることが示唆されている。この短距離力の効果はMBH連星間の距離が大きいほど優位に働く。本研究では軌道収縮するMBH連星におけるKL mechanismと短距離力との関係について調べた。具体的には永年摂動論のもと位相空間の構造の進化を調べることでMBH連星周りの星の軌道の進化を明らかにした。その結果、MBH連星の軌道収縮に伴い位相空間の不動点で特徴的な分岐が起こることがわかった。また離心率の進化は初期条件にセンシティブであり、確率的な分岐を起こすことがわかった[3]。本発表ではこの確率的分岐について報告する。

- 1 Y. Kozai, Astron. J. 67, 591 (1962)
- 2 M. L. Lidov, Planet. 562 Space Sci. 9, 719 (1962).
- 3 Iwasa and Seto, in prep

コン c21 Schwarzschild 特異点の安定性について 坂井佑輔 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

約2年前に LIGO でブラックホール連星からの重力波を検出し、重力波天文学への一歩を切り開いた。しかし、ブラックホールには特異点と言う重大な問題を孕んでいる。現在のところ LIGO が検出した波形データによれば、いずれも自転の小さいブラックホールだと考えられるが、それにはやはり特異点が存在する。今回は、回転のない球対称ブラックホールの摂動を考え、その結果特異点が摂動によらず安定である事を発表する。これは重力波によるブラックホール研究の中で、今一度深刻な問題であると考え、これからの研究へと繋げるのが動機である。

- 1 B.S. Sathyaprakash and Bernard F. Schutz Living Rev. Relativity, 12, (2009), 2
- 2 JoHN A. WHKKLKR, Palmer Physical Laboratory, Princeton University, Princeton, Nm Jersey (Received July 15, 1957)

松田 有一 氏 (国立天文台)

7月25日 15:45 - 16:45 B会場

「天文学者と海賊」

まずはクイズです。天文学者と海賊の共通点は何でしょうか？答えはどちらも望遠鏡を覗くです。では何のために望遠鏡を覗くのでしょうか？おそらくどちらも宝探しのためと答えると思います。とは言え、現在の望遠鏡（すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡など）には覗くところはないので、望遠鏡は天文学者にとっての海賊船と言えるかもしれません。

私はこれまでいろいろな望遠鏡を使って銀河形成の観測的研究を進めて来ました。小さい頃からなぜか望遠鏡に惹かれて、宇宙の図鑑の望遠鏡ランキングをずっと飽きずに見ていた記憶があります。講演では、これまでの研究で使ってきた望遠鏡の話を紹介して、さらにこれから使えるようになる望遠鏡でどのようなことが見えて来そうかをみんなと一緒に考える機会にできればと思います。

田中 賢幸 (国立天文台)

7月26日 17:15 - 18:15 B会場

「巨大銀河の形成と進化」

遠方宇宙における巨大銀河の形成と進化に関する理解は近年急速に深まった。同時にいくつかの謎も出てきている。講演では私自身の研究を紹介しつつ、近年の発展をレビューし現状をまとめてみたい。また、若手研究者の今後を見越して、現在進行中/計画中の大規模サーベイ観測についても簡単に触れたいと思う。

銀河 a1 棒渦巻銀河の棒部における星形成の抑制メカニズム

前田郁弥 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

渦巻銀河の腕部では、顕著なダストレーンが見られその部分に分子ガスが存在しそこで星形成が起こり、腕に沿って HII 領域が形成されている。しかし、棒渦巻銀河の棒部では顕著なダストレーンが見られ星形成の母胎となる分子ガスが豊富にあると思われるが、重い星の形成は見られない。何が棒部での星形成を抑制しているのか長年の謎となっている。最近の高空間分解能シミュレーションによって、腕部では分子雲同士が衝突し、星形成が誘発され重い星が形成されるが、棒部では分子雲衝突の相対速度が大きく、衝突している期間が短いため、重い星が形成されない可能性が指摘されている。このシナリオを検証するためには、棒部で重い星の形成が見られず腕部では星形成が見られる棒渦巻銀河を対象に、腕部と棒部での分子雲の相対速度を明らかにすることが必要である。

そこで本研究では、このような特徴を顕著に示すプロトタイプ的棒渦巻銀河 NGC1300(距離 20Mpc)、NGC5383(距離 35Mpc) の CO(1-0) 観測を野辺山 45m で行なった。その結果、棒部腕部共に CO 輝線を検出することができた。これまで HII 領域が見られない棒部での CO 検出はなかったが、本観測により棒部にも分子ガスが存在することが明らかになった。ビーム内の CO 輝線の速度幅は、棒部の方が腕部に比べて有意に大きかった。ビーム内での速度場が反映されている可能性もあるが、この結果は棒部での分子ガス雲の相対速度が大きい可能性を示唆していると考えられる。今後は ALMA によって個別の分子ガス雲を分解することによって、相対速度分布を明らかにできればシナリオの当否が検証されると期待される。このような知見は、高赤方偏移における銀河内での星形成を理解する上でも重要な鍵を与えることになるであろう。

- 1 Fujimoto et al. 2014, MNRAS, 439, 936
- 2 Fujimoto et al. 2014, MNRAS, 445, L65

銀河 a2 2つの核を持つ超高光度赤外線銀河 Mrk 463の広帯域 X 線スペクトル解析

山田智史 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

銀河中心には超巨大ブラックホール (Supermassive Black Hole; SMBH) が普遍的に存在する。銀河バルジと SMBH の質量には強い相関があり (Magorrian et al. 1998)、これは、銀河とその中心の SMBH が互いに影響を与えながら「共進化」してきたことを示唆している。この共進化を解明する為に、赤外線で見ると輝く ($L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$) 超高光度赤外線銀河 (Ultraluminous Infrared Galaxy; ULIRG) に着目する。この天体は合体途中の銀河だと考えられ、大量のガスとダストの中に強力なエネルギー源が埋もれている。エネルギー源は主に、濃いガスによる激しい星生成と、SMBH が大量のガスを吸い

込むことで明るく輝く活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) が考えられる。星生成は銀河進化の現場であり、AGN は SMBH の成長の現場である。ゆえに、銀河と SMBH の共進化を解明する為には、ULIRG を理解することが非常に重要である。しかし、ULIRG は厚いガスとダストに覆われており、内部を調べることは容易ではない。そこで、我々は透過力の高い硬 X 線 ($> 10 \text{ keV}$) を用いることにした。

本研究では、3つの X 線衛星 (*NuSTAR*, *XMM-Newton*, *Chandra*) を用いて、近傍 ULIRG であり中心に 2つの AGN を持つ Mrk 463 (Mrk 463e, Mrk 463w) の広帯域 X 線スペクトル (0.6–70 keV) を取得した。SMBH、降着円盤、ダストトラスから成る AGN モデル (Ikeda et al. 2009) を用いた輻射輸送計算結果と観測スペクトルを比較することで、それぞれの AGN について、正確な X 線光度を求めた。さらに、Mrk463e については SMBH の成長度合いの指標 (Vasudevan et al. 2007) である、 $[\text{O IV}](26\mu\text{m})$ に対する X 線光度の比を調べることができた。その結果、Mrk463e が通常の AGN に比べて急激な成長段階にあることが示唆された。今後は、これらの AGN の急成長と激しい星生成の関係を調べていくことで、銀河と SMBH の共進化の解明を目指す。

- 1 Magorrian, J., Tremaine, S., Richstone, D., et al. 1998, AJ, 115, 2285
- 2 Ikeda, S., Awaki, H., & Terashima, Y. 2009, APJ, 692, 608
- 3 Vasudevan, R. V., & Fabian, A. C. 2007, MNRAS, 381, 1235

銀河 a3 近傍 LIRG の空間分解された星形成活動 大橋宗史 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M2)

特定の赤方偏移における銀河の大規模サンプルを構築し、統計的な議論を行うことで銀河の普遍的な性質を探ることは極めて重要な研究手法の 1つである。このような研究の中で発見された性質の 1つとして、銀河の質量と星形成率の間の相関である Star Forming Main-Sequence (SFMS) がある。SFMS はこれまでに様々な波長、様々な赤方偏移で調べられてきた。そもそも星形成活動とは様々なスケールの物理の組み合わせである。そこで近年、星形成を担う物理機構の解明に向けた近傍銀河の観測から、1kpc 以下のスケールにおいても空間分解された SFMS が存在していることが明らかになってきた。しかし近傍で最も激しい星形成活動を行っている Luminous Infrared Galaxy (LIRG) では大量のダストが存在するために減光が激しく可視光での観測が困難であり、一方で減光に強い波長帯では空間分解能を稼げないため、空間分解された SFMS についての研究が無かった。そこで我々は水素再結合線の $\text{Pa}\alpha(\lambda 1.875\mu\text{m})$ を用いることでそれらの課題を克服し、LIRG における空間分解された星形成活動を調べた。

結果、LIRG は global な性質として近傍 SFMS よりも SFR の高い側に offset しているだけでなく、空間分解された SFMS も近傍のものよりも SFR の高い側に offset していることが明らかになった。さらに LIRG のサンプルを interacting/isolated に分類したときに interacting LIRG は isolated LIRG よりも 0.3dex 程度高い specific SFR ($=\Sigma_{\text{SFR}}/\Sigma_{M_*}$) を有していることが明らかになった。本講演ではその原因について、分子ガス面密度について触れながら議論する。

- 1 Cano-Diaz et al., ApJL, 821, 2, L26 (2016)
- 2 Maragkoudakis et al., 466, 1192 (2017)
- 3 Pereira-Santaella et al., 587, A44 (2016)

銀河 a4 Plane of Satellites の力学安定性について 宮川銀次郎 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 M1)

The Pan-Andromeda Archaeological Survey によって M31 に付随するいくつかの衛星銀河が特定の平面上に分布する特殊な構造 (Plane of Satellites; PoS) が存在し、それを構成する衛星銀河は PoS 面上を一定方向に軌道運動していることが示唆された (Conn et al., 2013, ApJ, 766, 120; Ibata et al., 2013, Nature, 493, 62). 多数の衛星銀河が母銀河の周りの平面上を軌道運動している場合、衛星銀河同士の合体や変形が起きる可能性がある。したがって、PoS 上での衛星銀河間相互作用や力学的安定性が重要となる。そこで本研究では、PoS を構成する衛星銀河の軌道運動を見積もるとともに、2 つの衛星銀河の近接相互作用に注目し、また PoS 上で衛星銀河同士が合体する距離についての条件を明らかにした。

本研究では PoS 母銀河である M31 に付随する Dark Matter Halo (DMH) には外場として NFW profile (Navarro et al., 1996, ApJ, 462, 563) の密度分布を仮定し、衛星銀河には N 体粒子で構成した 2 つの Plummer モデルを準備した。さらに DMH 内に配置した Plummer 球には DMH から受ける重力と釣り合う回転速度を与え、銀河中心からの距離と衛星銀河間の距離を変えながら粒子分布の時間変化を調べた。また、初期の衛星銀河の位置と銀河の 2 体相互作用に関する条件を解析的に求めたうえで、それを N 体シミュレーションによって確認した。PoS を構成する衛星銀河の回転速度は DMH のスケール長 (34.6kpc) 付近で最も大きく ($\sim 200\text{km/s}$)、10Gyr までの回転回数は 200kpc 以内で 1 回以上となった。また、銀河中心からの距離と衛星銀河間の距離に対する Plummer 球の合体条件は衛星銀河間の最小距離が 7.5~12.5kpc 以下であることがわかった。さらに、このような合体条件をもつ衛星銀河同士の遭遇回数が最低 1 回となるには 12.5Gyr 程度必要であり、宇宙年齢のタイムスケールで PoS 上で衛星銀河同士の合体が起きることを示唆した。

- 1 Conn et al., 2013, ApJ, 766, 120
- 2 Ibata et al., 2013, Nature, 493, 62

銀河 a5 Lagrange 的手法を用いたシミュレーションにおける resolution 制限

山本泰義 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

銀河進化の理論研究において、観測では実際に得ることのできない銀河の長時間進化を調べることが可能であるという点で宇宙流体シミュレーションは重要な役割を果たす。Lagrange 的手法を用いたシミュレーションでは、流体は粒子分布によって表現される。各流体粒子は質量、速度、内部エネルギーの他に決まった近傍粒子数 N_{NEIB} を含む最小距離である kernel size を持っている。また、物理量は kernel function と呼ばれる kernel size に依存する関数によって重み付けされ表現される。この手法を用いる際、対象とする現象を描写するために十分な粒子数を用いなかった場合、物理的に正しい計算結果が得られていない可能性がある。このことを検証するために様々なテスト方法が考案されてきた。その一つとして、重力収縮による構造形成シミュレーションを行う上で必要な resolution を評価する Jeans test (Hubber et al. 2006) が挙げられる。このテスト法には、初期条件における密度揺らぎのスケールと Jeans 波長の比に応じて振動と重力収縮の 2 つのモードの解析解が存在する。複数の resolution におけるシミュレーション結果の振る舞いを解析解と比較することにより、正しい計算を行うために必要な resolution を評価することができる。

本研究では、GIZMO (Hopkins et al. 2015) という一般公開されているコードで Jeans test を行なった。GIZMO には複数の異なる Lagrange 的流体手法が内装されており、それらの流体手法に起因する Jeans test の解析解への収束性を比較した。また、kernel function の表式を変化させた場合に Jeans test の結果にどのような違いが生じるのかを検証した。その結果、以下に示す 3 つが判明した。

1. resolution ($=$ 流体粒子の平均直径/密度ゆらぎのスケール) は少なくとも 0.25 以下である必要がある。
2. kernel function が高次であるほど解析解によく収束する。
3. Traditional SPH (TSPH), Pressure SPH (PSPH), Meshless Finite Mass (MFM), Meshless Finite Volume (MFV) を用いた結果を比較すると TSPH と PSPH の結果に差は無く、MFM や MFV に比べて解析解によく収束しているように見えるが別の値に収束している可能性がある。MFV より MFM の方が解析解に近い値となる。

- 1 Hubber, D. A., Goodwin, S. P., & Whitworth, A. P. 2006, A&A, 450, 881
- 2 Hopkins P. F., 2015, MNRAS, 450, 53

銀河 a6 すざく衛星と Chandra 衛星を用いた M31 中心領域の高温 ISM 中に存在する重元素の空間分布解析

田頭政輝 (東京理科大学 松下研究室 M1)

銀河は恒星や星間物質や暗黒物質等が重力によって拘束された天体であり、銀河内は X 線を放射する数百万度の高温ガス (ISM) で満たされている。この ISM 中の重元素由来の特性 X 線放射に着目することで、銀河中に存在する元素量やその分布等を測定することが可能である。宇宙空間の重元素はビッグバン後の星形成過程の中で生成されるものであるため、ISM 中の元素組成を測定することは銀河における星形成史に知見をもたらす。特に O, Mg や Si, Fe のアバンダンスは、それぞれ過去の II 型や Ia 型超新星爆発からの寄与を説明する。

アンドロメダ銀河 (M31) は我々の天の川銀河近くに存在し、また天の川銀河と同じく渦巻銀河であるという特徴を持つ。すなわち天の川銀河の仮想観測サンプルとして M31 は大きなアドバンテージを持つのだが、過去の調査では中心数分領域の ISM からの X 線放射の存在が確認されたものの、元素の空間分布を求めるまでには至らなかった。

本研究では、M31 中心領域を銀河中心から外側へ 4 つの楕円領域に分割することで ISM 中に存在する重元素に焦点を当て、空間分布解析を行った。ISM からの X 線スペクトルを解析するにあたり、低エネルギー側で X 線検出精度の良い「すざく」衛星の観測データを用いて得られたスペクトルに、空間分解能の良い「Chandra」衛星の観測データを用いて測定された X 線連星系等の点源からの影響を加味することで、ISM 本来の X 線スペクトルを精度良く解析した。本講演では M31 中心のそれぞれの領域における重元素のアバンダンスから推定される星形成史について議論する。また M31 中心領域における ISM の放射モデルについて示唆された複数の有意なモデルについて議論する。

銀河 a7 赤外線銀河群 Arp 318 の広帯域 X 線スペクトル解析と隠された活動銀河核の発見

小田紗映子 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

銀河バルジと中心にある超巨大ブラックホール (Super Massive Black Hole; SMBH) の質量には強い相関があることが知られており、銀河と SMBH は互いに影響しあって「共進化」してきたことが示唆されてきた。共進化を説明するシナリオとして、ガスの豊富な銀河同士が衝突・合体して楕円銀河まで進化するというメジャーマージャー仮説がある。合体によって銀河中 (\sim 数 kpc) に存在する大量のガスが中心のコンパクトな領域 (\sim 数 pc) まで落ち込み、SMBH への急激な質量降着現象である活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) が引き起こされる。同時に、衝突によるガス密度の増加で爆発的な星形成が進み、SMBH を宿主母銀河もまた急速に成長する。したがって、銀河と SMBH の共進化を考えるうえで、合体前後における銀河の性質を理解することは非常に重要である (Ricci et al. 2017)。合体前後の銀河は大量のガスやダストに覆われ、可視光観測では中心を見通すことは難しい。そこで、透過力の強い硬 X 線 (>10 keV) を用いた観測により、ダストに隠され

た AGN を見つけ出しその性質を明らかにする。

本研究では、主に 4 つの銀河からなる近傍銀河群 Arp 318 を対象として、X 線観測による AGN 探査を行った。Arp 318 はガスやダストが豊富に存在することによって赤外線では明るく輝き、その一部は銀河合体の初期段階にあたと考えられている。我々は X 線衛星 *NuSTAR*, *Chandra*, *XMM-Newton* の観測データを用いて広帯域 X 線スペクトル (0.3–49 keV) を取得し、4 つの構成銀河のうち少なくとも 2 つに隠された AGN が存在することを裏付けた。さらに、数値トラスモデル (Ikeda et al. 2009) と比較することによって過去最高精度で AGN 光度とトラスの柱密度を推定し、ダストトラスの厚みが 15 年間で変動しているという興味深い結果を得た。本講演では解析の詳細に言及するとともに、多波長観測間の比較を通して AGN の性質についても議論する予定である。

- 1 Ricci, C., Bauer, F. E., Treister, E., et al. 2017, MNRAS, 468, 1273
- 2 Ikeda, S., Awaki, H., & Terashima, Y. 2009, ApJ, 692, 608

銀河 a8 ファラデーモグラフィを用いた銀河磁場解析

江口開哉 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

多くの天体は磁場を伴っている。例えば、渦巻銀河にはその渦の形に沿った大局的な構造を持つ磁場が存在していることが観測から明らかになっている。そして、天体に付随する磁場を解析することにより、その天体の進化の過程や構造を解き明かすことができると言われている。磁場の解析手法として近年ファラデーモグラフィと呼ばれる手法が注目されている。この手法は、観測量である偏波スペクトルから視線方向の磁場および偏波源の分布の情報を持ったファラデースペクトルを構築する手法である。この手法が確立されることによって磁場の三次元構造を手に入れることが可能になる。

ファラデーモグラフィによる磁場解析には大きく分けて 2 つの課題がある。1 つ目は観測された偏波強度からファラデースペクトルをいかに正確に構築するかという課題で、2 つ目は得られたファラデースペクトルからいかにして磁場の情報を抽出するかという課題である。ファラデースペクトルは磁場の情報を持っているが、直接的に実空間における磁場の空間分布の情報を表しているわけではないため 2 つ目の課題が発生する。本研究は 2 つ目の問題に焦点を当てている。

ファラデースペクトルの解釈を行う先行研究として、face-on の現実的な渦巻銀河のモデルから解析的にファラデースペクトルを計算し、その形を特徴付ける統計量である幅、歪度、尖度から磁場の情報を引き出す研究がある。今回は先行研究を拡張した研究を行い、銀河面に垂直な方向だけでなくあらゆる視線方向に関して、また、ファラデースペクトルの位相である偏波角の影響を考慮して解析的にファラデースペクトルの計算を

行い、先行研究との違いを調べた。

- 1 Brentjens, M. A., & de Bruyn, A. G. 2005, A&A, 441,1217
- 2 Akahori, T., Ryu, D., Kim, J., & Gaensler, B. M. 2013, ApJ, 767, 150
- 3 Ideguchi et al. 2017

銀河 a9 Blue horizontal-branch stars を用いた銀河系ハロー構造の解明

福島徹也 (東北大学天文学専攻 M1)

円盤銀河は一般的にバルジ・ディスク・ハローにより構成されている。この中でもハローには古い星が多く、それらの星は銀河系形成から間もない力学情報を保存しており、これらの星の空間分布・力学情報を得ることは銀河形成の研究において非常に重要である。現在、ハローの空間分布を明らかにするために RR-Lyrae, blue horizontal-branch (BHB), red-giant-branch (RGB) といった明るい星がトレーサーとして使われるが、本研究では Subaru Strategic Program (SSP) により Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いて得られた遠くの BHB (<300kpc) を用いて研究を進める。この距離は銀河系の降着史に関わる星ハローの端に達している可能性があり、銀河系の形成史を知る上で大きな手がかりになる。

BHB の選択は $u-g$ vs $g-r$ の 2 色図を用いてバルマー線の違いにより行うのが一般的であるが、今回用いた HSC のデータには u -band が無いため、代わりに Vickers et al. 2012 を参考にして z -band におけるパッシェン系列の違いにより BHB を選択する。しかし、Vickers et al. 2012 では SDSS のデータを用いているため、SDSS と HSC のフィルターの違いを考慮する必要がある。そこで今回用いた HSC のデータと SDSS のクロスマッチして一致した天体を基準として HSC のフィルターシステムを用いた新たな BHB の選択条件を決めた。

ハローの構造はよく軸比を考慮したべき乗でフィットするため、新たな選択方法により選ばれた 2282 個の BHB に対して最尤法を用いてべき乗におけるパラメータを推定した。その結果得られたパラメータを用いて銀河系星ハローの構造・形成過程について議論する。

- 1 Deason, A. J., Belokurov, V., & Evans, N. W. 2011, MNRAS, 416, 2903
- 2 Vickers, J. J., Grebel, E. K., & Huxor, A. P. 2012, AJ, 143, 86
- 3 Xue, X.-X., Rix, H.-W., Yanny, B., et al. 2011, ApJ, 738, 79

銀河 a10 主成分分析を用いた矮小銀河サイズのサブハローの性質解析

金城和樹 (千葉大学院融合理工学府数学情報科学専攻情報科学コース石山研究室 M1)

現在、我々の銀河系において約 40 個の矮小銀河が観測されているが、これらの形成進化や銀河系形成史との関係は十分に解明されていない。矮小銀河は、サブハローと呼ばれるダークマターの局所密度が高いシステムに所属する。そのため、銀河の形成や進化がそれらをホストするハローの性質に依存するのと同様に、矮小銀河の形成にはサブハローの性質が重要であると考えられる。

そこで、本研究では矮小銀河の形成や進化を理解するために、銀河系サイズハローに存在するサブハローの性質を統計的に調べた。まず、ボックスサイズ $32\text{Mpc}/h$ 、質量分解能 $3.28 \times 10^5 M_\odot/h$ の高分解能宇宙論的 N 体シミュレーションから $z=0$ において銀河系程度の質量を持つハローの中に存在するサブハローを抽出し、質量、質量の中心集中度、真球度、スピンパラメータ、親ハローの半径内に入った時の赤方偏移、親ハローに対する動径方向速度、接線方向速度、相対距離などの多数の特徴をそれぞれパラメータ化した。そして、これらのパラメータを基に主成分分析法により導出した主成分軸と各パラメータ間の相関を調べた。

その結果、寄与率の大きい 2 つの主要な主成分軸が存在した。第一主成分軸は全体の約 3 割程度の情報を保有し、質量の中心集中度、真球度、スピンパラメータなどのハローの内部構造を記述するパラメータと比較的相関が強い。一方、約 2 割程度の情報を保有する第二主成分軸は親ハローの半径内に入った時の赤方偏移、親ハローに対する接線方向速度、相対距離などのサブハローの進化を記述するパラメータと比較的強い相関を示す。この第二主成分軸は親ハローのみの主成分分析を行った Jeason-Daniel et al. (2011) では見られなかった特徴を持つ軸で、サブハローに特有の性質をよく表現している。本講演では解析の詳細やサブハローの性質の傾向を報告するとともに、矮小銀河や銀河系の銀河形成との関連について議論する。

- 1 Ramin A. Skibba et al. MNRAS, 416, 2388 (2011)
- 2 Akila Jeason-Daniel et al. MNRAS, 415, L69 (2011)
- 3 Miguel Rocha et al. MNRAS, 425, 231 (2012)

銀河 a11 DIOS 衛星によるミッシングバリオン検出可能性の検討

泊口万里子 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙の組成のうちバリオン (通常物質) が約 4% を占めるが、近傍宇宙ではその半分程度がまだ見つからない。これはミッシングバリオン問題と呼ばれ、その解決は宇宙の構造形成の歴史や化学進化の理解に繋がるため重要である。 Λ -CDM モデルに基づいた宇宙論的シミュレーションによって、ミッシングバリオンの多くが温度 $10^5 - 10^7$ K の銀河間中高温物質 (Warm-Hot Intergalactic Medium; WHIM) として大規模構造のフィラメントに沿って存在することが予言

されている。また、WHIM は高階電離した酸素を多く含むと考えられ、実際に紫外線や軟 X 線領域で酸素の吸収線や輝線の観測が試みられている。しかし、WHIM は淡く広がったプラズマであるため、現行の X 線衛星による確実な検出は難しい。

本研究は、将来のミッシングバリオン探査に向けて、高分解能軟 X 線スペクトルの解析手法を開発し、WHIM の検出可能性を検討することを目的とする。DIOS 衛星は広い視野と有効面積を持つ X 線望遠鏡と、優れたエネルギー分解能 ($\Delta E \sim 3 \text{ eV}$) を持つ TES 型マイクロカロリメータを搭載する計画である。詳細な化学進化モデルを考慮した宇宙論的流体計算 (Osato, K.) に基づいて、DIOS の輝線観測シミュレーションを実行し、エネルギースペクトルのモデルフィットから赤方偏移や温度、重元素量、水素密度を求めた。観測視野内に複数の WHIM 成分が視線方向に重なる可能性があるため、この解析においては、特に強い輝線である OVII、OVIII 輝線を手がかりとし、多成分モデルを用いた。その結果、ある $36 \times 36 \text{ arcmin}^2$ 領域の 25 ksec の観測から、水素の overdensity $\Delta = 100$ の WHIM を 5σ の有意性で検出できることが分かった。今後は、バックグラウンドの影響も考慮したより現実的な観測シミュレーションを行い、広域のデータを系統的に解析することで、WHIM の検出可能性や温度、密度などの定量評価を進める。

1 Cen, R., and Ostriker, J., APJ 514:1-6 (1999)

銀河 a12 IRSF 望遠鏡を用いた SgrA * のガス雲降着現象の観測

高橋美月 (東北大学天文学専攻 M1)

我々の住む銀河系の中心には、いて座 A*(Sagittarius A*; Sgr A *) と呼ばれる超大質量ブラックホールが存在している。ブラックホールそのものを観測することはできないが、ブラックホールの重力を受けて周囲を運動している天体や、ブラックホール近傍の降着現象による放射などからその存在を証明することができる。Sgr A*にも周囲を運動する天体があり、そのうち「G2」と呼ばれるガス雲が、2013 年に Sgr A*に最接近すると予測されていた [1]。このガス降着により Sgr A*が大きく増光する可能性があり、これはダスト吸収を受けにくい近赤外線観測で検出可能である。

我々は、南アフリカ天文台サザーランド観測所にある InfraRed Survey Facility (IRSF) において、2013 年 2 月~2015 年 4 月の期間で断続的に Sgr A*の近赤外線撮像観測を行った。Sgr A*の明るさの時間変動を調査したところ、G2 による明確な増光は発見されなかった。本当に増光していない可能性もあれば、増光していても観測に用いた IRSF1.4 m 望遠鏡がそれを検出できていない可能性もある。

本研究では、IRSF 望遠鏡における Sgr A*の検出限界を得ることを目的とする。また、観測画像の Sgr A*に対して検出限界の超過の有無を検証する。各画像データに対し典型的な Point Spread Function (PSF) を作成し、様々な等級を仮定して Sgr

A*の位置に人工的な点源 (artificial star) を埋め込むことで、Sgr A*の明るさを変化させた。そのシミュレーション画像から基準の画像を差し引き、点源が 3 以上の等級で残っている場合を検出可能な等級とした。シーイングを 0.1 ピクセルごとに区切り、シーイングごとに検出限界を得た。その結果、Sgr A*の明るさが検出限界を超えているものはないという結果を得た。

1 Takayuki R.Saitoh et al. arXiv:1212.0349 (2013)

銀河 a13 COSMOS 領域における low-redshift 強輝線天体サーベイ

平野 洸 (東北大学天文学専攻 M1)

銀河が形成されてから今に至るまで、どのような進化過程を辿ったか解明することは現代天文学の課題の一つとなっている。銀河進化初期を知るためのアプローチとして私は矮小銀河の観測に注目した。矮小銀河の進化タイムスケールは長く、銀河形成初期時代に近い姿をしていると考えられているためである。そのため矮小銀河の観測・研究を行うことで銀河進化初期を知る手がかりが得ることができると考えられる。現在、近傍宇宙において矮小銀河が多数見つかっている。しかしこのような銀河は非常に暗いため観測が難しく、特に遠方宇宙においてはまだまだあまり見つかっていない。そこで本研究では星形成矮小銀河の特徴の一つである強輝線に注目し、矮小銀河の選出を行った。

本研究では COSMOS プロジェクトの一環として、すばる望遠鏡 Suprime-Cam の中帯域フィルターを用いて COSMOS 領域中の強輝線天体サーベイを行なった。このサーベイの結果、3097 個の強輝線天体を選出することができた。これらの天体について多波長測光データを用いて spectral energy distribution (SED) fitting 解析を行い、強輝線の同定と強輝線天体の物理量の算出を行なった。これらの天体の主な物理量は $0.01 \leq z_{\text{phot}} \leq 1.22$ 、 EW_0 の中央値は 181AA、星質量の中央値は $1.5 \times 10^8 M_{\odot}$ 、星形成率の中央値は $0.8 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ と算出された。このうちの 87 天体は分光観測がされており、スペクトルデータの z_{spec} から、今回の SED フィッティングから得られた z_{phot} は精度よく算出されていたことがわかった。また今回得られたサンプルは、低質量かつ高い星形成率を示すような Blue Compact Dwarf (BCD) や高い EW_0 を示す extreme Emission Line Galaxy (EELG) が多数含まれていることがわかった。

1 Taniguchi, Y., Scoville, N., Murayama, T., et al. 2007, ApJS, 172, 9

2 Ilbert O. et al., 2009, ApJ, 690, 1236

3 Lilly S. J. et al., 2007, ApJS, 172, 70

銀河 a14 $z_{\text{phot}} \leq 1.0$ における銀河の軸比分布とその進化

銀河の軸比を統計的に見ることで、銀河の三次元での形の分布を推定することが出来る。銀河の見かけの形を楕円としたとき、楕円の長軸を A、短軸を B とする。銀河の軸比とは長軸と短軸の比 B/A のことである。先行研究により、円盤銀河をランダムな方向から見た時の軸比分布は平坦な形をとり、楕円体状の銀河をランダムな方向から見たときは $B/A \sim 0.8$ をピークとする山型をとることが分かっている (Padilla & Strauss, 2008)。この原理を利用すれば、様々な銀河の軸比分布を調べモデルの分布と比較することで、その銀河集団の三次元での形状を推定することが出来る。Takeuchi et al. (2015) では、この方法を用いて $0.5 \leq z_{phot} \leq 2.5$ の銀河の軸比分布を測定し、丸い円盤銀河が $z_{phot} \sim 0.85$ 付近で出現し始めることを明らかにしている。しかし、 $z_{phot} \leq 1.0$ における銀河の軸比分布の進化については詳しく調べられていない。また、星形成活動や星質量別の軸比分布の進化についても同様である。本研究は、 $z_{phot} \leq 1.0$ における銀河の見かけの軸比分布を星形成活動や星質量別に求めることで、星形成史や星質量集積史と銀河形状の関係性を明らかにすることを目的としたものである。

本研究では、COSMOS 領域の、 $0.2 \leq z_{phot} \leq 1.0$, $M_V \leq -20$, $M_{star} > 10^9 M_\odot$ の銀河をサンプル天体とし、その軸比を HST/ACS データを用いて測定した。また、 $sSFR > -10$ を star-forming 銀河、 $sSFR < -10$ を passive 銀河と定義しそれぞれについて軸比分布の進化を調べた。その結果、星形成別に軸比分布を見てみると passive 銀河は $B/A \sim 0.8$ をピークとする山型の分布が確認され、star-formation 銀河は平坦な分布が確認された。さらにそれぞれの進化を見てみると、star-forming 銀河の軸比分布はほとんど変化を示さないのに対して、passive 銀河では $0.6 \leq z_{phot} \leq 1.0$ から $0.2 \leq z_{phot} \leq 0.6$ になるとよりフラットな銀河の割合が大きく増加することが分かった。さらに passive 銀河を質量別に見てみると、 $M_{star} > 10^{11} M_\odot$ の銀河集団では軸比分布はほとんど変化せず、 $10^{10} M_\odot \leq M_{star} \leq 10^{11} M_\odot$ の範囲で軸比分布が大きく変化していることが分かった。

- 1 Padilla & Strauss, 2008, MNRAS, 388, 1321
- 2 Takeuchi et al. 2015, ApJ, 801, 2
- 3 Binney & Vaucouleurs, 1981, MNRAS, 194, 679

銀河 a15 ダスト進化を取り入れた銀河スペクトルエネルギー分布モデルの構築

西田和樹 (名古屋大学、銀河進化学研究室 (研 D1))

銀河のエネルギースペクトル分布 (SED) からは、星間塵 (ダスト) 質量や、星形成率などの重要な物理量を引き出すことができる。従来の SED モデル (e.g. Noll et al. 2009) の多くでは、銀河系や近傍銀河で観測されたダストモデルを用いている。しかし、ダストは OB 型星から放射される紫外線や可視光

を吸収し、赤外線を再放射するだけにとどまらず、ダスト表面で水素分子を形成することで、ガスを冷却し、星形成を促進するなど、銀河の形成や進化に対し大きな影響を与える。そのため、ダストの空間分布、サイズ、組成を考慮しなければ、現実的に即した銀河の SED モデルを構築することはできない。近年、銀河スケールにおけるダスト進化モデルが確立されてきており (e.g. Asano et al. 2013a, 2013b, 2014) ダストの進化を取り入れた SED モデルの構築が急務である。

本研究では、ダスト進化を理論的に解いた Asano モデルを組み入れて、 $0.1 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$ (紫外線から遠赤外線まで) の波長域に対応した銀河進化 SED モデルを構築した。ダストの種類は炭素系ダスト、シリケート、多環芳香族炭化水素を考えている。ダスト温度は非平衡として、モンテカルロシミュレーションにより温度分布を計算した (Draine & Anderson 1985)。また、散乱についてダストの高密度領域を 1 つの巨大なダストと仮定するメガグレイン近似と、一次元円盤銀河の輻射輸送方程式 (Inoue 2005) を解く方法により、空間構造を直接解く場合に比べ計算コストの大幅な削減に成功した。これにより、赤外放射に注目した場合、銀河年齢 1–3 Gyr 程度で放射量のピークを持ち、その後は徐々に放射量が減少していくという特徴を持つことがわかった。本公演では本モデルについて詳しく紹介する。

- 1 Asano, R. S., Takeuchi, T. T., Hirashita, H., and Nozawa, T. MNRAS 440 134 (2014)
- 2 Inoue, A. K. MNRAS 359 171 (2005)
- 3 Draine, B. T. and Anderson, N. 292 494 (1985)

銀河 a16 クエーサーのカラーの光度依存性 和田一馬 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

クエーサーは活動銀河核の中でも最も明るく遠方でも観測できる天体である。クエーサーの紫外・可視光放射は、基本的には降着円盤からの放射であるため、標準降着円盤モデル (Shakura & Sunyaev, 1973) で説明できるはずだと考えられているが、母銀河や輝線、もしくはダスト放射の影響により標準降着円盤モデルによる観測 SED (spectral energy distribution, 多波長測光による広帯域エネルギー分布) の再現には未だ至っておらず、モデル予想よりもカラーが赤くなるということが知られている。Xie et al. (2016) では、分光スペクトルの解析により、この赤化の主な原因はダストだと主張している。しかし、ファイバー分光のスペクトルにより求めたカラーは、大気分散の影響のため、信頼性が低いという問題がある。

本研究では、スローン・デジタル・スカイ・サーベイの Stripe82 領域の多数回の測光データを用いて、カラーの明るさに対する依存性を確かめることを目標とする。測光データには、降着円盤、輝線、母銀河の放射などが含まれているが、主に変光するのは降着円盤成分なので、変光成分を抽出すれば良い。そこで、紫外・可視光 5 バンド SED の変光構造関数を取ることで、

変光 SED を得た。ダストの内縁半径はダスト主成分の昇華温度で決まっているため、明るいクエーサーほどダストが破壊され、カラーは青くなると予想できる。この SED に対しパワーローでフィッティングを行い、カラーを求めた。また SMC ダスト (Gordon et al.2003) を用いたモデルフィッティングも行い、減光量を求めた。その結果、明るいクエーサーのカラーは青く、減光量も少ないことが分かり、分光スペクトルのカラーよりも信頼度の高い測光データの変光 SED の解析でも Xie et al.(2016) と同様の結果を得た。

- 1 Shakura & Sunyaev 1973, A&A, 24, 337
- 2 Gordon et al. 2003, Apj, 594, 279
- 3 Xie et al. 2016, Apj, 824, 38

銀河 a17 Radio-loud AGN を持つ重力レンズ・サブミリ波銀河 MMJ0107 の CO 輝線エネルギー分布 李建鋒 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

近傍銀河における巨大ブラックホール (SMBH) の質量測定等から、銀河と SMBH は共に進化をしていることが示唆されているが、そのような共進化を引き起こす具体的な物理過程は未だに解明されていない。SMBH への質量降着率は宇宙における星形成活動 (宇宙星形成率密度) と同様に赤方偏移が 2-3 の時代に peak を迎えていることが知られている。従って、この時代における活動銀河核 (AGN) とその母銀河の星形成活動を調べることは、銀河と SMBH の共進化を理解する上で重要である。

最近、Herschel、Planck、SPT 等でミリ波サブミリ波帯広視野 survey が行われ、強い重力レンズにより増光されたサブミリ波銀河が続々と検出されている一方で、このうちに AGN を持つもの、特に radio-loud な AGN を有するものは、まだ殆ど知られていない。我々は、ASTE 望遠鏡での survey 観測で偶然発見された、重力レンズ・サブミリ波銀河 MM J01071-7302 に着目し、ALMA cycle 5 での観測提案を行っている。この天体は $z = 2.766$ 、即ち宇宙における星形成率密度や質量降着率が peak を迎えている時期の銀河である。energy 分布 (SED) を調べた結果、radio excess を示す AGN が示唆されているため、極めて独特なターゲットである。

我々は、分解能 0.5 秒程度の 4 つの CO 輝線 (J=3-2, 5-4, 8-7, 及び 11-10) の観測によって、CO 輝線の energy 分布 (SLED) を測定することを提案している。これにより、高励起 CO 輝線で追跡される密度の高い星間物質が、AGN からの影響を受けているかどうかを確認すると共に空間的に分解した CO 輝線及びミリ波連続波の分布から、重力レンズの model を得ることができる。CO outflow を探査し、冷たい分子ガスに対する radio-mode feedback の影響を調べることもできる。講演では、重力レンズを受けたサブミリ波銀河や、爆発的星形成と AGN の共進化に関する最近の研究を概観した上で、提案し

ている ALMA を使った研究内容と期待される成果について報告・議論を行う。

- 1 M. J. F. Rosenberg et al. ApJ 801 72 (2015)
- 2 D. R. G. Schleicher et al. A&A 513 A7 (2010)
- 3 T. Takekoshi et al. ApJ 744 L30 (2013)

銀河 a18 Calculation of the Lyman-Continuum Photon Production Efficiency ξ_{ion} of $z \sim 3.8-4.7$ Galaxies Based on the IRAC H α Fluxes HilmiMiftahul (東京大学 宇宙線研究所 M1)

Cosmic reionization is the transition from the neutral hydrogen in the IGM to the ionized state that we observed today, caused by the ionizing photons which have a wavelength shorter than 91.2 nm. There are still many uncertainties regarding the cosmic reionization, for example how was the mechanism and which source drives the reionization. One of the candidates of reionization source is star-forming galaxies. In order to verify that such galaxies are responsible for the reionization, we need some information about the ionizing photons emissivity, which can be determined by three parameters: the Lyman-continuum photon production efficiency ξ_{ion} , escape fraction f_{esc} , and UV luminosity density h_{UV} . We can derive the first one by comparing the H α fluxes and the UV-continuum luminosities, in a similar way as (Bouwens et al. 2016).

We used the spec- z dropout galaxies from GOLDRUSH (Great Optically Luminous Dropout Research Using Subaru HSC) catalog (Ono et al. 2017) and select the data with $z \sim 3.8-4.7$, where the H α emission line falls into the IRAC channel 1 band (3.6 μm). We used the SPLASH (Spitzer Large Area Survey with Hyper-Suprime-Cam, PI: P. Capak) data to derive the H α fluxes by comparing the observed magnitudes in the IRAC channel 1 and channel 2 (4.5 μm), assuming that the continuum fluxes in both bands are same. By adopting the Calzetti dust law (Calzetti et al. 2000) to correct the measured H α fluxes and UV-continuum luminosities, we derived the ξ_{ion} values and compared it with the Bouwens et al. 2016.

- 1 R. J. Bouwens et al. ApJ 831 176 (2016)
- 2 Y. Ono et al. PASJ (2017) arXiv:1704.06004
- 3 D. Calzetti et al. ApJ 533 682 (2000)

銀河 a19 ALMA で探る high- z 超 Eddington 降着クエーサーでの AGN フィードバック

山下祐依 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

近傍宇宙では、SMBH 質量とその母銀河のバルジ質量の間には強い相関 ($M_{\text{BH}} - \Sigma$ 関係) が観測されており、SMBH とその母銀河の共進化を示唆している。しかし、スケールの大きく異なる両者が互いに影響を及ぼし合いながら共に成長する過程は未だ解明されていない。

この問題を解く上で、高赤方偏移クエーサーは大変興味深い。近年の PdBI/NOEMA や ALMA を用いたミリ波/サブミリ波観測は、high- z クエーサーの多くが、SMBH とその母銀河が共に急速に成長している、進化における重要な段階にあることを示唆している。また、high- z クエーサーは近傍のクエーサーに比べて高い質量降着率をもつ傾向にあり (Jiang et al. 2007, De Rosa et al. 2011)、理論的にも、BH の進化において、Eddington 限界を超える激しい質量降着の重要性が示唆されている (Kawaguchi et al. 2004)。

本研究では、ALMA Cycle5 と ACA Cycle4 において、radio loud なクエーサーとしては最も遠方にある天体の一つ、J0131-0321 ($z=5.18$) に対して、Band7 受信機を用いた [CII]158 μm 輝線と $\lambda_{\text{obs}} \sim 1\text{mm}$ の連続光放射の観測を提案した。このクエーサーは、SDSS・WISE および JVLA で検出されており、極めて明るい ($L_{\text{bol}} = 2.9 \times 10^{14} L_{\odot}$)。MgII 輝線の分光から推定される SMBH 質量は $2.7 \times 10^9 M_{\odot}$ に達し、Eddington 限界を超える ($L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} = 3.1$) 激しい質量降着が示唆されている (Yi et al. 2014)。ALMA での観測によって、極めて激しい質量降着をみせる SMBH がその母銀河に及ぼす影響を明らかにしたり、また、電波で強い連続光放射を背景光源とした吸収線を探査し、激しい質量降着をみせる SMBH 近傍の ISM の詳細な構造も探ることができると期待される。

本講演では、近年の高赤方偏移クエーサーの研究を議論した上で、今後の研究計画について述べる。

- 1 Jiang, L., et al. 2007, AJ, 134, 1150
- 2 Kawaguchi, T., et al. 2004, A&A, 420, L23
- 3 Yi, W.-M., et al. 2014, ApJ, 795, L29

銀河 a20 ずばる HSC による宇宙再電離期の LAE 密度超過領域探査

樋口諒 (東京大学 宇宙線研究所 M2)

宇宙誕生数十万年後の宇宙の晴れ上がり後、赤方偏移 $z \sim 6 - 10$ の間に銀河間の水素が再び電離を起こしたことが知られている。これを宇宙再電離 (以後再電離) という。再電離に関する問題の一つに、再電離の進み方のモデルの判定が挙げられる。

再電離の主要な電離源の候補に星形成銀河と活動銀河核 (AGN) の2つが知られる。どちらの電離源の再電離への寄与が大きいかにより、2つの再電離の進み方のモデルが予想される。星形成銀河は放出するエネルギーが低く、近傍の銀河の

高密度領域の水素のみ電離する。そのため星形成銀河の寄与が大きい場合は銀河の高密度領域で優先的に電離が進行する (Inside-Out モデル)。AGN は放出するエネルギーが高く、遠方の低密度領域まで電離光子を放出できる。よって AGN の寄与が大きい場合は電離水素の再結合率のより低い低密度領域で優先的に電離が進行する (Outside-In モデル)。

再電離モデルの判定に、我々は強い $\text{Ly}\alpha$ 輝線を発する星形成銀河である $\text{Ly}\alpha$ emitter (LAE) のサンプルを用いた。 $\text{Ly}\alpha$ 線が中性水素の散乱を受けやすいので、LAE は周囲の銀河間水素の電離比率を知ることに役立つ。

Inside-Out モデルにおいて、密集した LAE は電離バブルを形成し、 $\text{Ly}\alpha$ 輝線の等価幅が増大すると考えられる。よって再電離期の $\text{Ly}\alpha$ 等価幅と LAE 密度超過 (周囲の LAE 密度と平均密度のずれ) の相関は強くなると予想される。我々はすばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ (Hyper-Suprime Cam, HSC) の約 14 (21) 平方度の狭帯域撮像データによる $z = 5.7$ (6.6) の 594 (164) 個の LAE サンプルから $\text{Ly}\alpha$ 等価幅と LAE 密度超過の相関を調べた。その結果、この相関に有意な赤方偏移進化は見られず、Inside-Out/Outside-In モデルの判定はできなかった。原因に、現在の HSC の $z \sim 6$ の LAE サンプルは $\text{Ly}\alpha$ 光度で明るいものに偏っており等価幅の不定性が大きいこと、または $z \sim 6$ で再電離はほぼ完了しており、モデルの判定にはより高赤方偏移の LAE サンプルが必要であることが考えられる。今後 HSC により得られる $z = 7.3$ の LAE サンプルで、再電離モデルの判定ができる可能性がある。

銀河 a21 RELICS 銀河団の質量モデリングと $z \gtrsim 6$ dropouts の星形成活動

菊地原正太郎 (東京大学 宇宙線研究所 M1)

本研究では El Gordo 銀河団領域において $z \gtrsim 6$ 銀河のサンプルを構築し、それらの星形成活動を考察する。

大質量銀河団による重力レンズ効果は、望遠鏡だけでは観測できないような高赤方偏移にある暗い銀河の観測を可能にする。 $z \gtrsim 6$ の遠方銀河を探査することは、まだ解明の進んでいない初期の銀河形成史や宇宙史を解明する上で大きな価値をもつ (Ishigaki et al. 2017)。RELICS プロジェクト (REionization Lensing Cluster Survey; PI: Coe & Bradave) は、重力レンズ効果を強く受けている 41 個の大質量銀河団領域を HST と *Spitzer* で深く撮像し、銀河団の背後にある $z \sim (6-12)$ の高赤方偏移銀河を探査した。

本研究では HST の可視光・近赤外データを元に、El Gordo の領域に含まれる $z \gtrsim 6$ dropout 銀河のサンプルを構築した。また重力レンズ効果解析ソフトウェアの glafic (Oguri 2010) を用い、RELICS に属する El Gordo 銀河団の質量分布モデルを決定した。モデルを元に、dropout 銀河の重力レンズ効果を受ける前の明るさが求められた。Dropout 銀河の星形成活動をより正確に見積もるためには、上記の解析に加えてより長波長での解析が必要になる。そこで HST に加えて、dropout 銀河の

ミリ波における対応天体を ALMA データを元に解析した。その結果 dropout 銀河の星形成活動の指標として、星形成率および IRX- η 関係が求められた。

El Gordo に対して上記のような多波長解析を行い、星形成活動を議論したのは本研究が初めてである。本研究の手法は将来の JWST データへの応用も期待される。発表では、他の RELICS 銀河団に対する質量モデリングおよび dropout 銀河サンプル構築の結果も併せて示す。

- 1 Ishigaki et al. 2017, arXiv:1702.04867
- 2 Ouchi, M. et al. 2010, ApJ, 778, 102
- 3 Zitrin, A. et al. 2013, ApJ, 770, L15

銀河 a22 直接温度法で解明する Ly α 輝線銀河の高電離状態

小島崇史 (東京大学 宇宙線研究所 D1)

銀河の星形成活動と銀河進化を理解する上で、星間ガスの金属量と電離パラメータ (単位ガスあたりの電離光子量を表す指標) は鍵となる物理量である。文献 [1] によると、 $z = 2$ の Ly α 輝線銀河 (LAE) はライマンブレイク銀河 (LBG) よりも高い電離パラメータを持つ可能性が指摘されている。この結果が正しければ、初期宇宙の主要な銀河種族である LAE が、多くの大質量星を形成し、多量の電離光子を放射していた可能性を示唆する (文献 [2])。しかし、文献 [1] の測定方法には電離パラメータを過大評価する可能性があったため (例: 文献 [3])、文献 [1] は LAE の電離パラメータ増加を結論づけることまではできなかった。決定的な結論を得るためには、信頼性の高い測定手法である直接温度法による調査が必要であった。そこで我々は世界に先駆け、直接温度法による LAE/LBG 電離パラメータの調査を行なった。我々は、合わせて 35 個の典型的な $z = 2$ の LAE/LBG からなるサンプルを構築した。これらの LAE/LBG に直接温度法を適用した結果、金属量 $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.05\text{--}8.14$ 、電離パラメータ $\log_{10} q_{\text{ion}} = 7.67\text{--}8.23$ cm/s の値を得た。LAE と LBG の電離パラメータを比較すると、LAE は LBG よりも ~ 3 倍高い電離パラメータを示した。次に、LAE/LBG を $z = 0$ 銀河と比較したところ、LBG は $z = 0$ の電離パラメータと金属量の関係に従うが、LAE はこの関係から逸脱していることが明らかになった。このことは、LAE の電離状態が高いことだけでなく、LAE と $z = 0$ 銀河/LBG の電離状態との間に本質的な違いが存在することを示している。大質量星の増加や電離ガス構造の変化と関係があると考えられる。本研究は、信頼性の高い直接温度法を用いることにより、LAE が系統的に高い電離状態にあることを初めて裏付けた。

- 1 Nakajima, K., & Ouchi, M., 2014, MNRAS, 442, 900
- 2 Izotov, Y. I., Schaerer, D., Thuan, T. X., et al. 2016, MNRAS, 461, 3683
- 3 Kewley, L. J., & Ellison, S. L. 2008, ApJ, 681, 1183

銀河 a23 AKARI FIS データのスタック解析を用いた AGN 母銀河の星形成率の推定

森脇可奈 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

銀河とその中心にある超大質量ブラックホール (SMBH) との物理量の間には強い相関が見られることが観測的にわかっている。例えば、母銀河の星形成率とクエーサーの数密度の赤方偏移依存性は非常に似ており、これらが互いに相互作用を及ぼしながら進化してきたという共進化シナリオの強い証拠となっている。SMBH と母銀河との相互作用の一つに活動銀河核 (AGN) による母銀河の星形成率の抑制がある。銀河形成シミュレーションでは超新星爆発などによるフィードバックに加えて AGN フィードバックを考えないと、観測される星形成率を再現することができないことが知られている。シミュレーションにおけるフィードバックの寄与の大きさは光度関数等の観測に合うように決められることが多く、AGN の母銀河において直接星形成率を調べることが重要である。星形成は一般に可視光から紫外光の観測を元に見積もられるが、クエーサーを含む AGN の母銀河については、核の非常に大きな光度に紛れて可視光では観測が難しい。そこで母銀河の星形成率の見積もりには、遠赤外線におけるダスト放射が使われることが多い。ダスト放射は星形成率と強い相関があることが知られており、なおかつクエーサーは遠赤外線では比較的暗いためである。本研究では、SDSS によって得られた 10 万個に及ぶクエーサーカタログと赤外線天文衛星 AKARI による全天サーベイデータを用いて、母銀河における星形成率の推定を行った。赤外線では一般に個々の銀河は暗く観測することは難しいため、スタック解析を用いることで統計的にはあるが、クエーサー母銀河からのダスト放射を捉えることに成功した。本講演では得られた星形成率とクエーサー光度、SMBH の質量の関係を赤方偏移ごとに調べることで AGN と母銀河の AGN フィードバックの星形成率への影響に関して議論する。

- 1 Schneider et al. 2010, AJ, 139, 2360
- 2 Okabe et al. 2016, PASJ, 68, 17

銀河 a24 SDSS クエーサー吸収線系と広天域すばる銀河カタログを用いた銀河-MgII ガス関係の統計的研究

野沢朋広 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M2)

近年の N 体シミュレーションの発達によりダークマターが支配的な領域に関してはその進化・発展が詳細にわかってきている。しかし、銀河はダークマターのみならず、星や銀河内外のガス、すなわちバリオン成分も進化・発展に大きく寄与する天体であり、その形成史を第一原理的に解くには、膨大な計算コストが必要となる。また、様々な物理が複雑に絡み合っていることから理論的解明も非常に困難である。従って、このバリオン成分の描像を観測的に明らかにすることが銀河形成の理解に

において肝要である。特に銀河を一つの単位としてみたとき、銀河と銀河系外ガスの関係を解明することが議論の焦点となる

ガス雲は可視光を発しない非常に暗い天体である。従って、直接観測が難しい。そのため、ガス雲の背景クエーサーのスペクトルに現れる吸収線系を用いて間接的に観測するのが有力な手法である。本研究はクエーサーの吸収線系のカタログと、吸収線系と同じ赤方偏移にある候補銀河のカタログを用いて、ガス雲と銀河の相関を調べ、前景銀河のハロー領域におけるガス雲の分布や、ガス雲と銀河の物理量の関係を統計的に探るものである。

この研究では、候補銀河のカタログが重要となる。[1][2]では、Sloan Digital Sky Survey(SDSS)のデータを用いて銀河とMgII吸収線系の相関を計算し、冷たいガス($T \sim 10^4\text{K}$)の分布や性質を議論している。しかし、SDSSの銀河サンプルは浅いため、 $z \sim 0.5$ のような赤方偏移が小さい領域の議論しかできない。赤方偏移が大きな領域に議論を拡張するためには、広視野に渡る $z > 1$ の銀河を大量に含むサーベイが必要であり、SDSSの銀河サンプルは十分ではない。そこで、本研究ではすばるHyper Suprime-Cam(HSC)による深い銀河の撮像データを用いてガス雲と銀河の相関関係を調べる。そうすることで、SDSSのデータでは成し得なかった赤方偏移が大きい領域での議論が可能となる。本講演では、この結果について発表する。

1 Ting-wen Lan et al., 2014, ApJ, 795, 31

2 Guangtun Zhu et al., MNRAS, 2014, 439, 31393155

銀河 a25 suzaku 衛星による近傍銀河団外縁部の元素分布

平井真一 (東京理科大学 松下研究室 M1)

銀河団は数十から数千個もの銀河が重力的に束縛されている宇宙で最大の天体である。銀河団は宇宙年齢と比較しても十分長い時間をかけて形成されているため、宇宙の進化を調査する上で非常に有用な天体である。また、宇宙初期には重元素は存在しておらず、銀河内の恒星によって合成され超新星爆発によって銀河団ガス内に供給される。超新星爆発には主に白色矮星による炭素爆燃型の爆発と大質量星による重力崩壊型の爆発の2種類があり、鉄、ケイ素は白色矮星と大質量星の爆発の両方から生成されるのに対して、酸素やマグネシウムのほとんどは大質量星から供給される。このように爆発の種類によって供給する元素の種類が異なるため、銀河団ガス内の重元素についての解析は宇宙の元素合成史及び星形成史の解明にとっても重要である。その際に、重元素と構成銀河の光度の比(重元素質量銀河光度比)は、銀河光度が銀河の生成する重元素量と関係があることから、2種類の超新星爆発の寄与の評価をするときの良い指標となる。

すざく衛星はバックグラウンドが低いいため、銀河団外縁部のような比較的暗い領域の観測に適している。そこで、本研究ではすざく衛星の観測データを用いてケンタウルス座銀河団、ろ

座銀河団を始めとする複数銀河団に対する銀河団外縁部までの鉄やケイ素の空間分布の調査を統計的に行い、静水圧平衡を仮定した銀河団の勢力範囲(以下銀河団半径)の0.5倍程度までの鉄・ケイ素の分布、鉄・ケイ素質量銀河光度比を得ることができた。鉄、ケイ素の水素に対する比は外縁部に向かうにつれて減少し、外縁部でおおよそ一定となった。また、ケイ素と鉄の比は半径に依存せず一定で、それぞれの超新星爆発のみを仮定した比の間の値となったことより、現在の重元素分布は2つの超新星爆発からの寄与によるものであると推定できた。また、初期質量関数と呼ばれる星の質量と個数密度を表す式(初期質量関数:IMF)を用いて、渦巻銀河である天の川銀河と銀河団の主な構成銀河である楕円銀河の星形成の違いを調査し、2つの異なる銀河でも星形成に大きな違いはないという結果を得ることができた。

銀河 a26 合体シミュレーションによるダークマターハロー内部構造の進化の研究

佐々木拓洋 (千葉大学融合理工学府数学情報科学専攻情報科学コース 石山研究室 M1)

ダークマターハローの構造は銀河の形成、進化に影響を与える。更にダークマター検出の手がかりである地球近傍を通過するダークマターのフラックスは局所密度に比例するため、ハローの構造の解明は重要な課題である。

これまでハローはその質量スケールに関わらず密度構造が中心部では半径の-1乗、外側では-3乗程度に比例すると考えられていた。しかし、解像度が向上した最近のシミュレーションに基づくと、物理的な最小スケール付近のハローの密度構造は密度カスプが-1.5乗から-1.3乗と大スケールのハローに比べて鋭く、合体を繰り返すことによって-1の冪に近づいていくことが分かってきた。

本研究では、このような進化が起こる物理的なメカニズムを明らかにするために、宇宙論的 N 体シミュレーションで生成されたハローを初期条件として合体の N 体シミュレーションを行い、ハローの構造の進化を追った。合体前のハローの位置関係や初期速度を系統的に変えたシミュレーションを行い、密度構造や速度構造の進化を調べた。その結果、最小スケール付近で中心密度の高い構造を持つハローは、合体によって中心部の密度が合体前のハローの2倍にならず、結果として密度カスプが緩やかになるという結果が得られた。これは大スケールのハローは合体を経験しても構造が保存されるという結果と対照的である。また、合体の軌道パラメータによって中心部の密度は約1.4倍程度異なり、密度カスプの冪にも違いが見られた。本講演では、これらのシミュレーション結果の詳細について報告し、構造進化の物理的メカニズムについて議論する。

1 Tomoaki Ishiyama, 2014, ApJ, 788, 27

2 Go Ogiya, Daisuke Nagai, Tomoaki Ishiyama, MNRAS 461, 3385-3396 (2016)

3 Raul E. Angulo, Oliver Hahn, Aaron Ludlow, Silvia

銀河 a27 近傍銀河団 Abell2319 内に存在するサブハローのガス質量比の測定 大谷花絵 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

コールドダークマターモデルによると、銀河団のような巨大な天体は、より小型の天体が衝突合体を繰り返して形成されたと考えられている。その名残として銀河団内にはダークマターのサブハローが複数存在していると予想される。よって、サブハローの質量関数やガス質量比を測定することは、宇宙の構造形成史やダークマター粒子の性質の理解につながるため重要である。サブハローのガス質量比を求めるには、重力レンズと X 線観測を組み合わせることが有効である。弱い重力レンズ効果の解析からは銀河団スケールのハローと銀河団内のサブハローの両方について質量分布を測ることができる (Okabe et al. 2014 など)。一方、X 線観測からは高温ガスからの熱的放射を捉えることで、ダークマターとガスの空間分布の比較やガス質量比の推定が可能である。ただし、現状では上記の方法でサブハローのガス質量比を求めたサンプル数は少なく、より系統的な解析が望まれている。

本研究の目的は、近傍銀河団 A2319 に注目し、銀河団内に存在するサブハローのガス質量比を精度良く求めることである。A2319 は $z = 0.0557$ に位置する衝突銀河団であり、見かけのサイズが大きいためサブハローの構造を分解しやすいという利点がある。また、既にすばる望遠鏡により弱い重力レンズ効果の観測が行われ、中心領域に見られるコールドフロント (接触不連続面) 付近にサブハローが検出されている。今回は X 線天文衛星 XMM-Newton の観測データを使用し、A2319 内の銀河団スケールおよびサブハロースケールのガスの質量分布の測定を行う。これと、重力レンズ効果によるダークマターの質量分布と比較することでサブハローのガス質量比を見積もる。本講演ではガスの質量分布の解析結果を報告し、得られたサブハローのガス質量比を同規模の銀河群の値などと比較し、A2319 の進化過程について議論を行う。

1 Okabe et al. 2014, ApJ, 784, 90

銀河 a28 COSMOS 領域における $z = 0.2 - 1.2$ の銀河の性質とクラスタリングの関係 坂東卓弥 (愛媛大学 D1)

現在の銀河形成モデルでは、宇宙初期のわずかな密度のムラを持って分布していたダークマター (DM) が重力不安定性によって、その粗密の度合いが時間発展することで DM ハローが形成され、そのハロー内部で銀河が形成・進化すると考えられている。これまでの観測的研究から銀河がどのように進化してきたのが調べられており、また DM ハローの進化についても N 体シミュレーションなどの結果から詳しく調べられている。しかし、どのような DM ハローの中でどのように銀河が形成され

るのか、また DM ハローの成長とその内部の銀河の成長がどのように関係しているのかについて、まだ明らかになっていないのが現状である。そこで本研究では、銀河の星質量成長と DM ハローの関係を調べるため、COSMOS 領域の $z = 0.2 - 1.2$ の銀河を星形成銀河と passive 銀河に分けて、二点角度相関関数 (two-point Angular Correlation Function: ACF) を用いてそれぞれのクラスタリング強度を星質量別に測定した。解析の結果、赤方偏移依存性は見られず、星形成銀河は星質量とともにクラスタリングが強くなるのに対して、passive 銀河は全体的に強いクラスタリングを示しているが、その星質量依存性は弱く、低質量 passive 銀河 ($\log M_{\text{star}} = 9.0 - 9.5$) の方がより強いクラスタリングを示した。大質量 passive 銀河 ($\log M_{\text{star}} = 11.0 - 11.5$) のクラスタリング強度は星形成銀河の星質量とクラスタリング強度の相関の延長線上に位置していた。また、 $\log M_{\text{star}} = 10 - 11$ の post-starburst 銀河は低質量 passive 銀河と同程度の強いクラスタリングを示した。本講演では、他の研究結果と比較しながら、今回得られた結果の解釈について議論する。

1 Mostek et al. 2013, ApJ, 767, 89

2 Bielby et al. 2014, A&A, 568, A24

銀河 a29 銀河形成進化と、超高エネルギー宇宙ニュートリノの起源

須藤貴弘 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M2)

IceCube 実験により、TeV-PeV 程度と非常に高いエネルギーを持つニュートリノ事象が検出されているが、その起源は未だに謎に包まれている。起源天体の候補に星形成銀河やスターバースト銀河がある。超新星残骸で加速された宇宙線が銀河内で星間物質と衝突し、中間子を生成、それが崩壊しニュートリノになるというシナリオである。このシナリオで観測データが説明できるか、盛んに研究がされているが、意見は一致していない。これは過去の研究が、比較的単純な見積もりしか行っていなかったり、不定性の大きな仮定に基づいているためである。そこで本研究では、銀河形成の準解析のモデルに銀河からの高エネルギー放射 (ガンマ線/ニュートリノ) の生成過程を組み込むことにより、信頼性が高いニュートリノフラックスの計算を行った。準解析のモデルは階層的構造形成の理論に基づく宇宙論的な銀河の形成進化のモデルであり、これを利用することで、ガス冷却や星形成、銀河合体とそれによるスターバーストなどを整合的に取り扱いながら計算を行うことができる。利用したモデルは高赤方偏移まで含め観測をよく再現し、研究では様々な赤方偏移からの個々の星形成銀河/スターバースト銀河からのニュートリノ放射への寄与を、現実的な銀河進化モデルのもと計算することを可能にする。また、本研究ではガンマ線で観測されている銀河のデータを用いることでモデルの較正を行った。よくわかっている個々の銀河の性質を用いた点も

本研究の特徴で、これにより信頼できる結論を出すことができると考えている。講演では、まず銀河からの高エネルギー放射について説明する。続いて銀河形成の準解析的モデルを紹介する。本研究で用いたモデルは「三鷹モデル」と呼ばれ、銀河形成進化に関わる様々な研究で利用されている。その後、本研究の結果とその示唆について発表する。

- 1 Aartsen, M. G., et al. (IceCube Collaboration), 2015, ApJ, 809, 98
- 2 Nagashima, M., Yoshii, Y., 2004, ApJ, 610, 23

銀河 a30 Multiwavelength study of X-ray Luminous Clusters in the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program

宮岡敬太 (広島大学 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 M2)

本研究の目的は、すばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program(HSC SSP) 領域にある銀河団を、*XMM-Newton* 衛星を用いて、静水圧平衡を仮定した質量を導出し、弱い重力レンズにより求めた質量および光学観測量との比較を行うことである。超広視野主焦点カメラ HSC を用いた大規模サーベイである HSC SSP は、1400 平方度の領域を観測し、 $z \sim 1.1$ までの銀河団を 10^4 個も発見する。銀河団は可視光において、銀河の集合体として観測され、背景銀河に対する弱い重力レンズ効果を利用して、銀河団の力学状態を仮定せずに質量を直接測定できる。一方 X 線では広がった高温ガスとして観測され、ガスの静水圧平衡を仮定して質量を測定する。後者の方法は、乱流・バルク運動に起因する非熱的な圧力が存在すると、静水圧平衡の仮定が厳密に成り立っておらず、過小評価する可能性がある。また遠方もしくは暗い銀河団では、上記の方法では質量が測定できないため、観測量と質量の相関関係(スケール関係)を介して、間接的に質量を推定するしかない。これらの多波長研究には、質の良い可視光データと深い X 線データの両者が必要不可欠である。そのためサンプルは *ROSAT* 衛星の X 線全天カタログから、低赤方偏移 ($z < 0.4$) かつ重量級 ($M_{500} > 2 \times 10^{14} M_{\odot}$) の銀河団 22 個を選定し、20 ks 以上の観測データを集めた。そのうち現時点で、サーベイが完了した 4 つの銀河団において両者の質量を比較した結果、 2σ の範囲で両者は一致した。また全質量とリッチネス(メンバー銀河の個数の指標)においては、べき関数的相関が強く見られた。本口演では 22 個の銀河団のうち、解析の終了した銀河団の結果を述べる。

銀河 b1 近傍棒渦巻銀河における分子ガスの性質と星形成の観測的研究

黒田麻友 (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する。これら銀河の多様性を理解する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。銀河における星形成を特徴付ける量として「単位ガス質量あたりの星形成率」で定義される星形成効率が知られており、多くの研究が行われてきた。近年、棒渦巻銀河において領域ごとに星形成効率が異なることが注目されており、特に棒状構造では、中心領域や渦状腕などのほかの領域に比べて星形成効率が低いといわれている。さらに数値シミュレーションによると棒状構造での分子雲同士の相対速度が大きすぎると、分子雲衝突時に星形成が促進されないということがわかってきた。そこで本研究は、先行研究で示唆された「銀河の棒状構造で、分子雲の相対速度が大きすぎることにより星形成が抑制されるのか」を検証することを研究目的とした。そのために銀河中の分子雲の相対速度の指標として分子ガスの速度分散を導出し、星形成効率との関係を調べた。本研究では近傍棒渦巻銀河である NGC2903、NGC4303、NGC5248 をサンプル天体とし、解析を行った。銀河の領域ごとの性質を調べるために bar、bar-end(near-arm)、arm と領域分けを行い、stacking という手法を用いて領域平均の ^{12}CO ($J = 1-0$) 積分強度、速度場、速度分散、分子ガス質量、星形成率、星形成効率を求めた。領域ごとの速度分散と星形成効率の関係を調べた結果、分子ガスの速度分散が大きい棒状構造では星形成効率が低く、速度分散が小さい渦状腕では星形成効率が低いという傾向を得た。この結果は「分子雲同士の相対速度が大きすぎると星形成が促進されない」という理論的な予測を支持する。

銀河 b2 COSMOS 領域の HST データを用いた $z = 0.7 - 0.9$ の合体銀河探査とその性質に関する研究

樋本一晴 (愛媛大学 M1)

銀河の合体は星形成活動の誘発など物理現象に影響を及ぼすことが知られているため、合体銀河について理解することは銀河進化を理解する上で非常に重要である。合体銀河の分類方法の 1 つとして、撮像データを用いた定量的分類方法がある。先行研究では中心集中度 C ・非対称度 A ・凝集度 S からなる CAS パラメータ (Abraham et al. 1996, Conselice 2003) や、銀河の明るさがどれだけ特定のピクセルに集中しているかを示す Gini 係数と、銀河の輝度全体の 2 次モーメントと明るい方のピクセルから積算して全体の 20% 分の明るさを含む部分の 2 次モーメントの比である M20 などの指標が用いられてきた (Lotz et al. 2004)。しかし、合体銀河の選出方法や、合体ステージの分類方法は確立されていない。本研究では合体銀河分類に特化し、かつ合体ステージも分類できる指標の開発を目指した。

新たに開発した指標は、中心表面輝度比 (Central Surface Brightness ratio : CSB) である。これは、輝度分布重心の表面輝度と、明るい方のピクセルから積算して全体の 20% 分の明るさを含む部分の平均表面輝度との比である。これにより、銀河の明るい部分が一つに集中しているのか、複数に分かれて存在するのかを判別できると期待できる。本研究では、COSMOS 領域で $z = 0.7 - 0.9$ における $M_V < -20$ (mag) の銀河 11,150

天体に対して HST/ACS 撮像データを用いて解析を行った。CSB と従来用いられてきた非対称度 $A \cdot M20$ を組み合わせることで銀河形態を分類し、分類された銀河と星形成活動の活発さを表す比星形成率 (specific Star Formation Rate : sSFR) との関係性を調べた。その結果、合体中と思われる形態の銀河は、sSFR が普通の星形成銀河よりも高いことがわかった。さらに、明るい部分が複数存在する合体中と思われる銀河において、明るい部分が互いに近づくにつれて sSFR が上昇し、さらに近づくると普通の星形成銀河の sSFR と同じような値をとることがわかった。

1 Abraham et al. 1996 , MNRAS ,279 ,L47

2 Conselice 2003 , ApJS , 147 , 1

3 Lotz et al. 2004 , AJ , 128 , 163

銀河 b3 ダークマターモデルの違いによる宇宙構造形成の変化

市橋洋基 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

Cold Dark Matter (CDM) モデルは観測結果に広いスケールでよく一致する標準的なモデルである。CDM モデルにおいてダークマター (DM) 粒子は生成時に非相対論的な速度を持ち、他粒子と重力相互作用以外行わない。等密度時を過ぎると CDM は重力収縮を行う。その後光子と脱結合したバリオンが DM によって作られた重力ポテンシャル内に落ち込み構造が形成される。

しかしながら、従来の CDM モデルには諸問題が存在する。例えば、銀河スケール以下の構造が多く形成されすぎてしまうサブハロー問題などが挙げられる。これらの問題を解決するために DM モデル固有の性質が考えられるようになった。

本研究では固有の性質の一つとして DM がバリオンと重力相互作用以外に弱く電磁的相互作用を行う DM モデルを仮定した。具体的には衝突によるバリオンと DM 粒子間の相対速度の変化による効果と、2 粒子間相対速度変化分の運動エネルギーからくるバリオン粒子の内部エネルギーの増加を考慮した。衝突によりバリオン粒子の内部エネルギー増加しバリオンの温度が上昇し Jeans 長が増大する。この効果により小さいスケールでの構造が圧力に阻まれて成長できず、抑制されることを予想される。このような予想からサブハロー問題が解決できる可能性が考えられる。

そこで発表者は上述した DM モデルを宇宙論的流体シミュレーションに実装し、DM の性質の違いが構造形成にどのような影響を及ぼすのか調べた。使用した宇宙論的流体シミュレーションコードはラグランジュ法を用いた流体法の一つである GIZMO (Hopkins et al. 2014) である。

本研究ではそれぞれの DM モデルを仮定した際の DM ハローの質量に対する数密度である質量関数から、DM モデルの違いによって宇宙大規模構造形成に関してどのような変化がもたらされるのかについて議論する。

1 Julian B. Muoz, Ely D. Kovetz, Yacine Ali-Hamoud
Phys. Rev. D 92, 083528 (2015)

2 L.Chuzhoy and A. Nusser, Astrophys. J. 645, 950(2006)

3 Philip F. Hopkins MNRAS, 450, 53, (2015)

銀河 b4 銀河の色で探る銀河団のダイナミクス 浜端亮成 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)

銀河団は宇宙で最大の自己重力系であり、典型的には半径 1Mpc、質量 $10^{14}M_{\odot}$ 程度である。この銀河団は宇宙論、あるいは重力理論のプローブとして非常に重要であるが、銀河団の質量の大半はダークマターによって占められており、このため銀河団の測定は困難である。銀河団の観測手法としては、重力レンズ効果を用いたものや X 線によるものが知られているが、近年、銀河団周辺の銀河の運動を測定することによって銀河団の質量を測定しようという試みがなされている。銀河団周辺の銀河は、ハローと呼ばれる重力によって束縛された構造の中心に存在していると考えられており、従って銀河の運動はハローの運動を示している。銀河団は、このハローを複数持っており、銀河の運動を測定することによって、ハローの運動を測程し、その情報から銀河団の質量を測定する [1]。しかし、この試みは、ハローの運動と銀河団の質量の関係が十分には明らかになっていないため成功していない。

このハローの運動と銀河団の質量の関係性に対して、銀河の種類が大きなヒントになることが期待されている。銀河の色や形状などの性質は、銀河団による影響を受けていることが過去の研究によって示唆されている [2]。このことは、銀河の性質が、銀河と銀河団の関係性、ひいては銀河をホストしているハローと銀河団の関係性への手がかりとなることを示唆している。

今回、大規模サーベイ観測である SDSS のデータ、及び銀河団カタログ CAMIRA [3] を用いて、銀河の選択方法にどのように銀河団周辺の銀河の速度場が影響を受けるかを統計的に解析し、これらの間に明らかな相関があることを発見した。この結果を紹介した後、N 体シミュレーションの解析と比較し、この結果が示すハローと銀河団の関係性の解釈について議論する。

1 Farahi A., et al. 2016, MNRAS, 460 ,3900

2 Bayliss B. M., et al. 2017, ApJ, 837, 88

3 Oguri M. 2014, MNRAS, 444, 147

銀河 b5 特性 X 線の輝線形状の評価方法についての研究

木下佑哉 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

銀河団は数十から数千の銀河が重力的に束縛された宇宙最大の天体であり、衝突・合体を繰り返すことでより大きな構造へと進化する。銀河団は銀河団ガス (ICM) と呼ばれる温度数千万 K の高温プラズマで満たされており、その中に存在する重元素からは元素ごとに決まったエネルギーを持つ特性 X 線が放射される。銀河団ガスの視線方向の運動は、特性 X 線のエネルギー

ギーと幅を測定することで捉えることが可能である。しかし、CCD 検出器を用いた従来の X 線天文衛星による観測では、検出器自身のエネルギー分解能 ($\sigma \sim 3000$ km/s 相当) によって制限され、有意な測定は困難であった。

2016 年に打ち上げられたひとみ衛星に搭載された精密軟 X 線分光検出器 (SXS) は、X 線マイクロカロリメータを用いた極低温動作の撮像分光装置で、6 keV の輝線に対して半値全幅 5 eV ($\sigma \sim 100$ km/s 相当) という非常に高いエネルギー分解能を誇る。ひとみ衛星は打ち上げ 1 か月後に観測不能に陥ったが、正常に稼働している期間にペルセウス銀河団の中心部を観測し、銀河団ガスの運動を正確に捉えることに成功した。観測した中心付近の 60 kpc \times 60 kpc の領域では視線方向の速度分散は 164 ± 10 km/s であり、乱流による圧力は熱運動による圧力のためだか 4

ひとみ衛星 SXS で得られた輝線の形状は銀河団ガスの運動 (速度分散) によって決まっているので、その形状を調べることでガスの運動の分布についてさらなる情報が得られる可能性がある。そこで私は、輝線の形状がガウス関数からずれているかどうかを輝線の歪度 (skewness) と尖度 (kurtosis) を使って評価する方法について検討した。

1 Hitomi collaboration, 2016, Nature, 535, 117

銀河 b6 赤い渦巻き銀河から探る銀河進化 植村千尋 (宇宙科学研究所 M1)

本発表では、Galaxy Zoo プロジェクトにおいて発見された赤い渦巻き銀河の諸性質について調べた論文についてレビューし、今後行う解析について述べる。一般的に、渦巻き銀河は青く、星形成を活発に行っている。一方、楕円銀河は赤く、星形成は活発ではない。渦巻き銀河は若い銀河、楕円銀河は年老いた銀河と一般的には言われており、渦巻き銀河から楕円銀河に変化すると言われている。しかし、両者の関係や進化経路、形態や性質の変化については未だわかっていないことも多い。これを解明する上で「赤い渦巻き銀河」という両者の中間的な性質を持つ銀河に注目した。

以下赤い渦巻き銀河の諸性質を調べた Masters et al.2010 について述べる。赤い渦巻き銀河は SDSS のデータから選ばれている。これらのサンプルは円盤部分に古い星が多く存在し、楕円銀河と同程度に赤い銀河である。このサンプルに対して、諸性質を調べたところ、以下のことがわかった。

1. 赤い渦巻き銀河と、その存在する環境との間には顕著な相関は見られなかった。

2. 赤い渦巻き銀河は古い星が多いものの、渦巻き構造があることから、最近まで星形成をしていたと考えられる。

3. セイファート銀河・ライナーの割合が通常の渦巻き銀河の 4 倍多かった。

4. 赤い渦巻き銀河のうち、7 割程度が可視光で棒構造が見られた。一般的な青い渦巻き銀河ではこの割合は 3 割程度であ

り、明らかに赤い渦巻き銀河における割合が高いと言える。

これらの結果を踏まえ、本論文では赤い渦巻き銀河は銀河内のガスをすでに使い切った、とても古い銀河ではないかと提案している。

今後は、「あかり」の赤外線データや GALEX の紫外線データを加えて、赤い渦巻き銀河の物理量を求める。星形成率、ダスト減光やダスト量を青い渦巻き銀河や楕円銀河とも比較し、その起源を議論する。

1 K.L.Masters et al. 2010

銀河 c1 近赤外分光観測で探る、赤方偏移 1.52 の成熟した銀河団とその周辺環境 竝木茂朗 (国立天文台三鷹 M1)

銀河形成・進化のピークと言われる赤方偏移 1 ~ 3 にある銀河団は近年発見が多数報告されている。しかしその中に存在する個々の銀河の性質についての調査、理解は十分進んでいるとは言えない。例えば、この時代における銀河の金属量-星質量関係の環境依存性についてはいくつか研究があるものの結論がそれぞれ異なっており、確かなことが分かっていない。今回の私の研究では赤方偏移 1.52 の宇宙に発見された銀河団候補領域をすばる望遠鏡/MOIRCS 及び LBT/LUCI で分光観測して得られた近赤外分光データを用いて解析を行う。この領域については今までに Koyama. et al. 2014 においてすばる望遠鏡で広帯域および狭帯域 (H) フィルターを用いた撮像観測が行われ、以下のようなことが分かっている。

- この銀河団候補領域の中心付近に位置する電波銀河 (4C 65.22) の周辺領域に、一般的な領域に比べて 10 倍以上の明らかな密度超過が測光的に観測されている。
- その密度超過の中心領域は赤い星形成の不活発な銀河で占められている一方、その領域を取り囲むように H 輝線銀河 (星形成銀河) が分布している様子から、この時代としては非常に成熟した銀河団である可能性が高い。

以上のことを踏まえ、今回の解析ではまずこれらの銀河が本当に銀河団のメンバーなのかを分光して得られた赤方偏移を用いて確認する。また、速度分散を調べることで、銀河団全体の質量を求める。その上で、メンバー銀河について輝線比からそれぞれの銀河の金属量を求めて金属量の周辺密度との関係を調べ、同時代の一般的な領域の銀河や、これより近傍の、赤方偏移の小さな似たような銀河団と比較して、高密度領域下で銀河がどのように進化するのかを調べる。今回の夏の学校では、本研究の概要とその進捗状況を発表する。

1 Koyama. et al. 2014, ApJ, 789, 18

2 Hayashi. et al. 2011, MNRAS, 415, 2670-2687

3 Tadaki. et al. 2012, MNRAS, 423, 2617-2626

銀河 c2 VLBI 観測による高赤方偏移クェーサーの構造研究

古谷庸介 (山口大学創成科学研究科 電磁宇宙物理学研究室 M2)

高赤方偏移クェーサーはビッグバンから 1 Gyr のうちに形成されており、その性質は低赤方偏移クェーサーとよく似ていることがわかっている (De Rosa et al. 2011)。一方、高赤方偏移において強電波クェーサーやレーザー的天体の検出数が減少することが知られており、活動銀河核 (AGN) への質量降着や中心ブラックホールのスピン状態が初期状態から変化していることを意味している (dotti et al. 2013)。これらの宇宙史におけるクェーサーの進化について考察するためには高赤方偏移クェーサーの詳細な構造を知る必要がある。

クェーサーの構造を空間分解するために超長基線電波干渉計 (VLBI) による高感度な観測を行う必要がある。VLBI 観測は通常の観測より 1000 倍良い空間分解能を持つため、高感度な観測を行うことで VLBI 電波画像 (VLBI 観測で得られた天体の天球面上での輝度分布図) を得ることができ、クェーサーの広がった電波構造を見ることができる。

しかし、現状で VLBI 観測された高赤方偏移クェーサーの数は 60 天体 (e.g. Coppejans et al. 2016) ほどしか無く、高赤方偏移クェーサーの広がった電波構造について十分な議論をすることができない。そこで我々は高赤方偏移クェーサーに対し日本の VLBI 観測網 (JVN) を使った観測を行い、高赤方偏移における VLBI 電波画像の増加を図る。

現在、赤方偏移 $z > 4$ にある 9 天体に対して JVN 観測が行われ、5 天体の VLBI 電波画像を得ることができた。得られた VLBI 電波画像は全てアンテナビームに対して点源であり、高赤方偏移クェーサーの構造に関する議論はできなかった。天体サイズは 43.2 pc 以下と見積もられ、そこから推定される輝度温度は全て $\sim 10^8$ K であり、コンパクトな構造で非熱的放射をしていることがわかった。

今後はより高い感度・空間分解能を持つ観測網による観測が必要である。そこで期待されるのが東アジアの VLBI 包囲網 (EAVN) による観測である。EAVN は JVN よりも感度が 10 倍良く、空間分解能も 3 倍高いためクェーサーの広がった構造を見ることができると期待される。

- 1 De Rosa et al. ApJ, 739, 56 (2011)
- 2 Dotti et al. ApJ, 762, 68 (2013)
- 3 Coppejans et al. MNRAS, 463, 3260 (2016)

銀河 c3 空間分解した銀河のケニカット-シュミット則

依田萌 (名古屋大学、銀河進化学研究室 (研) M1)

銀河進化を考える上で星形成活動を理解することは重要である。単位時間に形成される星の総質量を星形成率といい、

星形成の活発さを表す 1 つの指標として知られている。星形成率と銀河円盤の主要な構成物質であるガスの面密度の間には、べき乗則が成り立ち、Kennicutt-Schmidt 則 (K-S 則, e.g., Kennicutt & Evans 2012) と呼ばれている。K-S 則のべきは星形成メカニズムの指標と考えられている。また、近年の研究によって爆発的な星形成をしている銀河と平均的な円盤銀河では K-S 則に異なるオフセットを持つことが明らかになった。K-S 則は銀河の星形成活動を反映されていると考えられているので、星形成活動を理解するために長年研究されてきた。

K-S 則は異なる銀河の間だけでなく、空間分解した単一の銀河内でも成り立つことが知られている。しかし、K-S 則は観測から明らかになった経験則に過ぎず、それが生じる物理的な起源は未だに明らかになっていない。加えて空間分解した K-S 則については、電波のマッピング観測に時間がかかるためサンプル数が少なく、統計的な議論がされていない。空間分解した K-S 則を物理的に理解するためにはサンプル数を増やした更なる研究が必要である。

本研究の目的は、空間分解した K-S 則を統計的・物理的に理解することである。その第一歩として、銀河の形態や物理量と空間分解した K-S 則の相関を調べた。サンプル天体は Nobeyama CO Atlas (Kuno, N., et al. 2007) から選んだ。Nobeyama CO Atlas では近傍の 40 天体について ^{12}CO ($J = 1 - 0$) 輝線のマッピング観測を行っており、サンプル天体の多くが他の波長でも観測されているため、多数の天体について K-S 則を調べることができた。また、星形成率を正確に評価するために、多波長にわたるアーカイブデータをフィッティングした SED から星形成率を算出したことも本研究の特徴である。本講演ではその最新の結果について報告する。

- 1 Robert C. Kennicutt, Jr., & Neal J. Evans II., 2012, A&A, 50, 531
- 2 Kuno, N., et al. 2007, PASJ, 117, 166

銀河 c4 銀河計数を用いて探る銀河の光度進化 河野海 (名古屋大学、銀河進化学研究室 (研) M1)

銀河が発する電磁波から我々はその銀河の状態を探ることができる。これは、銀河が各波長域において異なる物理過程に基づく放射をしており、それらの放射強度が星形成率などの物理量に換算できるためである。従って、各赤方偏移における銀河光度を調べることで広い時間スケールに対する銀河の活動性を知ることができる。本研究で用いる銀河計数は、シンプルかつ基本的な観測量であるが、銀河進化を定量的に研究するよい指標になる。これまでに遠赤外線と電波における銀河の光度進化を個別に扱った研究はみられるが、それらの進化モデルが異なる波長域に対して適応できるものであるかは検証の余地がある。複数の波長を用いた光度進化のモデルを構築することで、銀河進化に統計的な制限を付けることができると期待される。

本研究では、赤外線の観測により得られた Takeuchi et

al.(2001)による光度進化モデルを用いて他の波長での銀河計数を計算した。遠赤外線 ($60\mu\text{m}$) では、 $z < 1$ の近傍宇宙からの寄与が大きいのに対し、サブミリ波 ($850\mu\text{m}$) では、負の K 補正により $z \sim 5$ の光度進化からの影響を十分に受ける。 1.4GHz の光度関数 (Sadler et al. 2002) にみられるように電波の光度関数には、星形成銀河と活動銀河核の 2 成分がみられる。個別に光度進化を評価したところ、AGN では、 $z < 1$ にかけて $L_{1.4\text{GHz}}(z) = L_{1.4\text{GHz}}(0)(1+z)^{-3.9}$ である事が分かった。これは、赤方偏移の増加に対して、AGN の光度が減少する負の光度進化をすることを意味している。銀河計数により得られた光度進化を説明する銀河における星形成史、物理過程について議論をする。

- 1 Takeuchi, T.T., et al. PASJ 53, 37 (2001)
- 2 Sadler, E. M., et al. MNRAS, 329, 227 (2002)

銀河 c5 CO 吸収の赤外分光で見る IRAS 08572+3915 AGN の構造 大西崇介 (宇宙科学研究所 M1)

Active Galactic Nucleus (AGN) 統一モデルにおいて Molecular Torus による吸収が鍵となっている。しかし、その存在、形状、大きさについて直接的観測がなされてこなかった。そこで、今回は近赤外領域で CO の振動回転遷移 ($\Delta v = 1, \Delta J = 1$) 吸収線の時間変動を調べるという新しい手法によってトーラスの大きさを直接的に求めることを試みた。

本発表では、IRAS 08572+3915 の CO 吸収を 2004 年に観測し、AGN の中心付近の速度構造を示した論文 (Shirahata et al. 2013) のレビューと共に、2010 年の追観測の結果を発表する。

Shirahata et al. (2013) では、波長 $4.9 \sim 5.13 \mu\text{m}$ 、 $J_{16}17$ の CO 吸収の形状から、各励起レベルの柱密度を求め、 $-160\text{kms}^{-1}, +100\text{kms}^{-1}, 0\text{kms}^{-1}$ 成分の励起温度をそれぞれ $\sim 270\text{K}, \sim 700\text{K}, \sim 20\text{K}$ と見積もった。励起温度から求められる CO 分子の柱密度の全励起レベルでの合計と、観測された遷移が起きるための分子密度の制約 (Kramer et al. 2004) から、吸収層の厚さが $\Delta d < 4 \times 10^{-4}\text{pc}$ であり、Wada & Tomisaka (2005) 等での AGN トーラスの厚さよりもオーダーで 4 つ小さいことを示した。以上から、高速度の成分が AGN 中心の近くで速度ごとにシート状に独立して分布し、それが高密度の温かいガスからの噴出と、そこへの流入を示していると結論付けている。

- 1 M. Shirahata et al., PASJ 65 (2013)
- 2 C. Kramer et al., A&A 424, 887 (2004)
- 3 K. Wada & K. Tomisaka ApJ 619, 93 (2005)

銀河 c6 NB973 を用いた $z=7$ の Ly α 輝線銀河の探査と Ly α 光度関数

伊藤凌平 (東京大学 宇宙線研究所 M1)

宇宙は $z \sim 1100$ で陽子と電子が再結合して中性水素で満たされるが、 $z \sim 6-10$ で再び電離することが知られている。この宇宙再電離が、何によって引き起こされたのか、どのように時間変化したのか、そしてどのように伝搬したのかについてはまだ明らかになっていない。Ly α 輝線銀河 (LAE) は、Ly α 光子が中性水素によって容易に散乱されることから、宇宙再電離期の IGM の中性水素の割合を調べるのに役立つ。過去の研究では、 $z=5.7-7.0$ の Ly α 光度関数の明るい側で Schechter 関数に対して超過が見られる (Konno et al. 2017, Zheng et al. 2017)。この超過の原因として LAE の周りに生じた電離バブルにより引き起こされた可能性が挙げられており、明るい側の超過は宇宙再電離を探る上で重要な課題の一つである。本研究では、CHORUS (Cosmic HydrOgen Reionization Unveiled with Subaru; PI Inoue) で得られた NB973 の観測データをもとに COSMOS 領域 (2deg^2 , 5σ 限界等級 24.5mag) の LAE を探査し、Ly α 光度関数を導出して $z=7$ における Ly α 光度関数の明るい側での超過について議論する。

- 1 A. Konno et al. 2017, arXiv:1705.01222
- 2 Z. Zheng et al. 2017, arXiv:1703.02985
- 3 K. Ota et al. 2017, arXiv:1703.02501

銀河 c7 すばる望遠鏡広視野撮像観測に基づく原始銀河団の研究 伊藤慧 (国立天文台三鷹 M1)

銀河団は宇宙において最大の天体であり、特に原始銀河団は宇宙初期の構造形成を理解する上で重要である。ここで原始銀河団は高赤方偏移に存在し $z \sim 0$ において銀河団になる程度の質量を持つがビリアル平衡に達していないものを指す。近傍銀河団中の銀河は Field 中の銀河に比べ星形成率が低く赤くて古い年齢を持つが、原始銀河団中の銀河 $z \sim 1-4$ においては星形成率が高い銀河が多い。この様に原始銀河団を観測する事で銀河進化の環境依存性を知る事ができる。また電波銀河 (RG) の周りは高密度領域である事例は報告されている。参考文献 [1] では $z \sim 2.9, z \sim 3.1, z \sim 4.1, z \sim 5.2$ にある RG 周辺には LAEs の高密度領域が存在し、これらは現在の大質量銀河団の祖先であろうと結論づけている。以上のように銀河形成、構造形成の謎を解明しようと試みられているが、原始銀河団は宇宙における個数密度が小さく現時点で十分なサンプル数が得られず、統計的に扱う為にはより多くのサンプル数が必要とされる。本研究においては、すばる望遠鏡主焦点カメラ Hyper-Suprime-Cam の戦略枠の観測データと Canada-France-Hawaii Telescope の U-band データを用いて得た u ドロップアウト銀河サンプルから $z \sim 3$ の原始銀河団探査を予定している。 $z \sim 3$ は、高密度領域が形成途中のより高赤方偏移の時期に比べ、銀河団の銀河が Field に対し大きく変化する時期だと考えられる。例を挙げると参考文献 [2] にお

いて red-sequence の銀河が $z \sim 2-3$ で原始銀河団中に存在し始めていると主張されている。つまりこの時期の原始銀河団の銀河を理解する事は、銀河形成プロセスの重要な転換期を説明する事に繋がる。また本研究で用いるデータの観測範囲が $27deg^2$ と広範囲である為、多くのサンプルが得られると予想され、銀河の環境効果をより統計的に理解する事が可能になると考えられる。本発表では原始銀河団研究の過程を紹介し、本研究での研究計画、進捗状況を発表する。

- 1 Venemans et al. 2007; Averbuch & A., 461, 823-845
- 2 Kodama et al. 2007; MNRAS, 377, 177-1725

銀河 c8 太陽近傍ダークマター量測定の実況 柏田祐樹 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

我々の天の川銀河をはじめとする銀河は、数千億個の星と水素を主成分とする星間ガス、そしてこれらを広く取り囲むように分布するダークハローから構成されている。ダークハローは銀河の質量の約 90% を占めるが、その構成物質 (以下、ダークマター; DM) の素粒子物理学的な正体は未だに不明である。現在の宇宙構造形成論によると、銀河は小さなダークハローが階層的な合体を繰り返すことにより成長してきたと考えられている。数値シミュレーションから、ダークハローの合体形成史の違いは、最終的なダークハローの形状の違いとして現れることが知られている (Read 2014)。

天の川銀河では、高精度位置天文観測により銀河を構成する星の詳細な位置や運動が得られ、太陽近傍の DM 量を測定できる (Local measures; e.g. Silverwood et al. 2016)。これは DM の地上直接検出実験への有用な情報となる。さらに、銀河系の回転曲線の外挿から得られる独立な DM 量の測定値 (Global measures; e.g. McMillan 2017) と比較することで、天の川銀河のダークハローの形状が、単純に球対称なのか、円盤状に扁平しているのか、もっと複雑に 3 軸非対称なのかを推定することができる。今後は、2013 年に打ち上げられた位置天文衛星 Gaia (欧州宇宙機関 ESA) の観測により、天の川銀河の広範囲かつ精密な DM 量測定が進むと期待される。

このような科学的背景のもと、本講演では太陽近傍 DM 量測定の現状についてレビューを行う。太陽近傍 DM 量測定には主に 2 つの手法がある (Read 2014)。1 つは太陽近傍星の鉛直方向の運動学を用いた Local measures であり、もう 1 つは回転曲線から外挿する Global measures である。また、使用するデータの仮定にも様々な方法が用いられている。これらの解析手法や観測データに着目し、Gaia 時代に期待される展望を議論する。

- 1 J. I. Read, 2014, JPhG, 41, 063101
- 2 H. Silverwood et al. 2016, MNRAS, 459, 4191
- 3 P. J. McMillan, 2017, MNRAS, 466, 174

銀河 c9 次世代メニーコアプロセッサに向けたツリー法の高速化 児玉哲史 (千葉大学 融合理工学府 数学情報科学専攻 情報科学コース 石山研究室 M1)

重力多体系とは、質点 (以下、粒子と表現) 同士が相互にニュートンの万有引力を及ぼしあう系である。重力多体系の N 体シミュレーションでは、各粒子の運動方程式を数値的に解くことで、その時間発展を追う。 N 体シミュレーションは、球状星団や銀河、銀河団などの天体や、宇宙の大規模構造を理解するのに有用な手段である。

ツリー法 [1] は、計算量が $O(N^2)$ の直接計算法よりも劇的に少ない計算量、 $O(N \log N)$ で重力を近似的に計算するアルゴリズムの 1 つであり、広く用いられている手法である。ツリー法では、近傍の粒子からの重力は直接計算して、遠方の粒子群からの重力は、多重極展開による近似計算で求める。ツリー法はシミュレーションコードの並列化によって高速化される。並列化の方式は大きく、CPU 内部での SIMD 並列化、ノード内の共有メモリ並列化、ノード間の分散メモリ並列化の 3 つに分けられる。本研究の目的は、これらの並列化をすべて取り入れ、高度にチューニングされたツリー法のコードを開発することで、より粒子数が多く、高分解能なシミュレーションを可能にすることである。

これまで報告されている高性能なコードでは、CPU の SIMD 命令を最大限利用し、粒子間の重力計算を大幅に高速化する Phantom-GRAPe [2] (<http://code.google.com/p/phantom-grape/>) という高度にチューニングされたライブラリが用いられることが多かった。我々のコードでは Phantom-GRAPe を拡張し、四重極モーメントを含めた重力相互作用を SIMD 並列化した。単極子モーメントのみを用いる場合に比べ、より近くの粒子群からの重力も高速に近似計算できるようになり、従来の高性能なコードより高い性能を発揮できるようになった。本講演では、我々のコードの詳細について報告すると共に、疑似粒子法や他のコードとの比較を行う。

- 1 J. Barnes and P. Hut, 1986, Nature, vol.324, pp.446-449
- 2 Ataru Tanikawa, Kohji Yoshikawa, Keigo Nitadori, Takashi Okamoto, 2012, New Astronomy, vol.19, pp.74-88

銀河 c10 原始銀河団 SSA22 における多波長測光サーベイとそのスペクトル分布 (SED) 鈴木向陽 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

サブミリ波銀河 (SMG) は宇宙論的遠方に多く見つかかり、非常に高い星形成率 ($100 - 1000 m M_{\odot} / yr$) を示す。この値は近傍の一般的銀河と比べ桁違いに大きく、その星形成の物理について解明することは銀河進化を論じる上で大きな意義がある。

$z = 3.1$ (115 億年前)の銀河高密度領域である SSA22 においてもそれは同様であり、この領域はサブミリ波に加えて X 線から電波に至る豊富な多波長データを有することから、SMG の性質や進化を調べる上で適した領域の一つである。

Tamura et al. (2010) はその中でも極めてミリ波で明るい SSA22-AzTEC 1 に注目し、その調査を行った。Submillimeter Array(SMA) と多波長観測によると、可視-近赤外線では確認できない、電波-中間赤外線における放射の存在が検出されており、その測光的な赤方偏移度が原始銀河団のものと同じであることが示された。他にも、X 線領域で硬いスペクトルが確認でき、これにより SSA22-AzTEC1 が活動銀河核を隠し持つことが考えられ、原始銀河団領域 SSA22 の重力ポテンシャル中における原始クエーサーの存在が確認された初めての例となった。

本講演では、Tamura et al.(2010) のレビューを行い、最新の ALMA データを多波長解析の結果との比較を踏まえて紹介する。

1 Tamura et al. 2010, ApJ, 724, 1270

2 Yun & Carilli 2002, ApJ, 568, 88

銀河 c11 多波長データを用いた新たな原始銀河団の探査手法

入倉和志 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M2)

現状の原始銀河団探査は、QSO/電波銀河に着目する方法や、単純に LBGs の密度超過に着目する方法によってなされてきた。しかし、近傍の銀河団の中心部、“コア”となっている領域では、銀河進化の環境依存性が顕著に現れており、遠方についてもこの領域にある銀河を見出すことで、銀河進化の環境依存性や銀河団の進化についての手掛かりを得ることが期待できる。COSMOS field において、この遠方の原始銀河団における‘コア’の領域を見出す方法として、high-SFR 銀河や massive な銀河に注目し、その密度超過を、現状の原始銀河団探査で採用されている探査半径よりも 1 桁程度小さい半径で測ることを試みた。また、その発見した原始銀河団の‘コア’と、従来の原始銀河団探査の比較を行った。見つかった原始銀河団のコアは近傍銀河団の数密度と一致しており、また従来の方法が原始銀河団探査を行う上でコンプリートでないことも明らかになった。

銀河 c12 高赤方偏移 HSC 銀河団サンプルを用いた X 線スケールリング則の調査

渡邊翔子 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙の進化を支配する暗黒物質、暗黒エネルギーの解明は現代の宇宙物理学の大きな課題である。X 線観測によって高精度に宇宙論パラメータを推定する代表的な手法として、銀河団の質量関数の赤方偏移に対する進化の測定がある。従って遠方銀河団のサンプルを増やし、質量を正確に測定して信頼性の高い

質量関数を構築することが課題となる。しかし、 $z \sim 1$ の銀河団は見た目のサイズが小さく、内部の質量分布を詳細に測ることは難しいため、温度質量関係などの簡便なスケール則を用いざるを得ない。

そこで本研究は、 $z > 0.8$ の銀河団の X 線観測から、遠方宇宙における銀河団スケール則を確立することを目的とする。可視光観測において高い撮像能力をもつ Subaru 望遠鏡の Hyper Suprime-Cam を用いた広範囲なサーベイ観測により $z \sim 1$ の銀河団の探査が行われている (Oguri et al. 2017)。今回この HSC サーベイにより検出された、高い可視光 richness をもつ $z > 0.8$ の銀河団数個を解析対象とした。中でも HSC J0850-0009 銀河団は、HSC サーベイで新たに発見され、2017 年 4 月に X 線天文衛星 XMM-Newton により初めて X 線観測が行われた天体である。XMM 衛星の広い有効面積と高い空間分解能を活かして、スケール半径 R_{500} 内の銀河団のガスの温度や光度を測定する。本講演では、その結果を報告し、遠方銀河団の温度光度関係や richness との比較について議論する。

1 Oguri, M., et al. 2017, PASJ, in press (arXiv:1701.00818)

銀河 c13 COSMOS 領域における EELG の環境効果及びクラスタリング特性

西塚拓馬 (東北大学天文学専攻 M2)

Low-mass 銀河は宇宙誕生から各時代において最も数多く存在する天体であり、銀河進化を解明する上で重要な手掛かりになると考えられている。そのような天体の中で、Emission line galaxies(EELG) は非常に興味深い天体であり、low-mass で非常に高い sSFG を持つことで知られている。 $z \sim 1$ のような近傍の宇宙における星形成銀河の環境効果なども先行研究で研究されているが、BCD や dwarf galaxies の EELG などの環境効果はどの程度に解明されていない。今回、HST の基幹プログラムである ‘COSMOS20 project’ の観測で得られた 3097 天体の EELG を選別した。この EELG は、Subaru Suprime-Cam の 6 枚の広帯域フィルターと 12 枚の中帯域フィルター (IA band) を用いて非常に大規模なサーベイ領域から選択的に選出されている。その EELG の中で最も多く選出された 2340 [OIII] EELGs に特に着目し、環境効果及び大規模構造を評価する為に表面密度及び Auto correlation function(ACF) の評価を行った。クラスタリングの特徴として、10 arcsec 以下の局所的なスケールで [OIII] EELG の ACF がべき型の近似曲線から乖離が見られる特徴があった。IAband での EELG と Non-emitter とで表面密度の結果に対して顕著な相違は見られなかった。同様に EELG の等価毎に分類し表面密度に対する依存性を調べたが大差は存在しなかった。

1 Kajisawa, M. Shioya, other 2013, 768,51 (2013)

銀河 c14 活動銀河核における狭輝線領域の赤方偏移進化

仁田裕介 (愛媛大学 M2)

銀河における星間物質 (ISM) が宇宙の歴史の中でどのようにその性質を変えてきたのかを明らかにすることは、銀河進化の全貌を理解するために極めて重要である。Kewley et al. (2013) では、星形成銀河と活動銀河核 (AGN) 母銀河において赤方偏移とともに ISM の物理状態が変化すると BPT 図とよばれる輝線診断図上で輝線強度比がどう変化するかを求めた理論モデルを示している。星形成銀河に関してはこの理論モデルに一致するような観測的結果が報告されているが、AGN 母銀河に関しては high- z における観測的な調査がほとんど行われていないため、ISM の進化の有無は確かめられていない。Araki et al. (2012) では $itz \sim 3$ の 1 型クエーサー SDSS J1707+6443 の近赤外線分光観測を行い、得られたスペクトルから狭輝線領域 (NLR) における $[OII]\lambda 3727/[OIII]\lambda 5007$ 、 $[NeIII]\lambda 3869/[OIII]\lambda 5007$ の輝線強度比の測定を行なっている。その結果、近傍 ($z \sim 0.7$) の 1 型クエーサーと比べて、 $[NeIII]/[OIII]$ が高く、 $[OII]/[OIII]$ は低いことが分かった。この結果は SDSS J1707+6443 において、典型的なガス密度が low- z クエーサーよりも顕著に高いと解釈できる。しかし、high- z クエーサーで NLR の輝線強度比を測定した例はまだ少なく、high- z クエーサーの母銀河のガス密度が low- z に比べて系統的に高いのかどうかは不明である。そこで我々は $z \sim 3$ に存在する 1 型クエーサー 5 天体の近赤外線分光観測を行い、得られたスペクトルから輝線強度比を測定し、光電離モデル計算の結果との比較を行った。その結果、Araki et al. (2012) と同様に、low- z クエーサーのガス密度よりも high- z クエーサーのガス密度が約 1 桁高いことが分かり、またこの高密度なガスが kpc スケールで広がっていることが分かった。講演では、得られた結果を踏まえて high- z クエーサー母銀河における星形成活動についても議論する。

1 Araki et al. 2012, A&A, 543, A143

2 Kewley et al. 2013, ApJ, 774, 100

銀河 c15 Lyman α フィードバックによる direct collapse black hole 形成の促進

阿左美進也 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 M1)

今回の発表では、2017 年の "Enhanced direct collapse due to Lyman α feedback" Jarrett L. Johnson and Mark Dijkstra の論文をレビューする。初期の宇宙では原始ガス雲が収縮する過程で、内部で元素の核融合を起こさずに、重力により直接ブラックホールに崩壊する可能性が示されている。これを direct collapse black hole (DCBH) と呼ぶ。direct collapse が起こるためには、ガス雲が十分に冷却されずに高温を保つことが条件とされる。原始ガス雲の冷却に重要な役割を果たすものとし

て、 H_2 の分子冷却があげられる。原始ガス雲の中で H_2 を生成する媒介物として H^- が大きな割合を占めている。また、先行研究により、近傍銀河からの背景放射によってガス雲中の H_2 および、 H^- が壊されることが分かっている。この論文では、近傍銀河からの背景放射を受ける状況のなかで、原始ガス雲の収縮過程で発生すると考えられている Lyman α 線がこの H^- を脱離する効果を入れたときに、ガス雲の温度が密度とともにどのように変化するかを、one-zone モデルを用いて調べている。

結果として、背景放射の光源の温度が比較的高い (今回の研究では $T_{\text{rad}} = 10^4$ K と $T_{\text{rad}} = 10^5$ K を比較している) 場合において Lyman α 放射の影響が大きく現れることが示された。Lyman α のフィードバックを入れた場合では、入れない場合に比べて、水素分子を破壊し高温を保つために必要な背景放射の放射率が $10^2 \sim 10^3$ 程度小さくなる。このことから、宇宙初期での若く熱い星の近傍において、今まで考えられてきたよりも多くの DCBH が形成されている可能性が高くなった。

1 Jarrett L. Johnson and Mark Dijkstra Astronomy & Astrophysics, (2017)

銀河 c16 隠された活動銀河核の「すざく」広帯域 X 線スペクトル系統解析

谷本敦 (京都大学宇宙物理学教室 D1)

銀河中心には、約 1 億太陽室質量の超巨大ブラックホール (SuperMassive Black Hole: SMBH) が普遍的に存在し、SMBH 質量と銀河質量には強い相関関係がある。この事実は、母銀河と SMBH が互いに影響を与えながら、共進化してきたことを示唆している。しかし、銀河中心の極めてコンパクトな領域に存在する SMBH が、何故母銀河の質量と強く相関しているのかは謎に包まれている。そこで私達は、ダストやガスにより隠された活動銀河核 (Compton-thick Active Galactic Nucleus: CTAGN) に着目した。この天体は、銀河合体後における SMBH の急激な成長段階であると考えられており、SMBH と母銀河の共進化を調べる上で非常に重要である。その中心核構造を解明する為には、透過力の優れた X 線による観測が必要不可欠である。

近年、Swift/BAT による硬 X 線掃天観測は、吸収に対するバイアスを最小限に抑えた近傍 AGN サンプルを提供している。そこで私達は、Swift/BAT 70-month catalog の追及観測で見えられた CTAGN 候補 (Ricci et al. 2015) に着目した。特に X 線天文衛星「すざく」により観測されている 11 天体について、広帯域 X 線スペクトルの系統的な解析を行った。解析の際には、モンテカルロシミュレーションに基づいた部分球対称トラスモデル (Ikeda et al. 2009) を適用した。本講演では、今回得られた結果と Compton-thin AGN の結果 (Kawamuro et al. 2016a) を比較し、CTAGN とそれ以外の AGN が本質的に異なる種族なのかどうかについて議論する。

- 1 Ikeda et al. 2009, ApJ, 692, 608
- 2 Ricci et al. 2015, ApJ, 815, L13
- 3 Kawamuro et al. 2016, ApJS, 225, 14

銀河 c17 近傍銀河の大局的磁場ベクトルの構造 藏原昂平 (鹿児島大学 M2)

渦巻き銀河には腕に沿うような形で渦巻き状の磁場構造が見られることが分かっている (Fletcher et al.2011)。磁場構造には磁場の向きや形状による種類があり、軸対称構造の「Axis-Symmetric Spiral (ASS)」や双対称構造の「Bi-Symmetric Spiral (BSS)」、 「Quadri-Symmetric Spiral (QSS)」及び「Ring」の構造があると考えられているが (Stepanov et al.2008)、多数のサンプルでの統一的な手法による分類はまだ不十分である。また、磁場構造の分類は磁場の起源や進化を理解する上で重要である。

今回、我々は安楽ら (2015) の手法を用いて近傍棒渦巻き銀河に対して偏波解析を行なうことで棒渦巻き銀河の磁場ベクトルマップを作成した。この結果、磁場の方向について 180° の不定性がなくなり、磁場ベクトルを $0^\circ - 360^\circ$ の範囲で決定することができる。データは VLA のアーカイブデータを用い、3 天体について解析を行なった。その結果、これら 3 銀河の磁場構造は、磁場ベクトルが渦状腕に沿っていることを確認した。また、磁場ベクトルの向きを考えると arm-inter arm の磁場の折り返しが見つかり、QSS 構造を持っていることが分かった。

- 1 Fletcher et al.(2011) MNRAS. 412. 2396
- 2 Stepanov et al.(2008) A&A. 480. 45S
- 3 安楽修士論文 鹿児島大学, 2015

銀河 c18 ALMA で探る棒渦巻銀河 M100 における巨大分子雲複合体の多様性 早瀬夏子 (慶應義塾大学 M1)

渦巻銀河 M100 (NGC4321) は SABbc に分類される近傍 ($D \sim 14.3$ Mpc) の face-on 銀河である。可視光スペクトル線観測から中心に低光度活動銀河核を有する可能性が示唆されており (Ho et al. 1997)、また、中心核から 1 kpc 以内の領域 circumnuclear ring (CNR) では活発な星形成が起きていると考えられている。その近隣性および小さな傾斜角から、M100 は通常銀河内の分子ガスの物理状態や星形成活動の環境依存性を広い空間的ダイナミックレンジで調査する上で適したターゲットであるといえる。

Pan & Kuno (2017) は、M100 における巨大分子雲複合体 (giant molecular cloud association; GMA) の多様な物理状態を調べる目的で、ALMA Science Verification で取得された CO $J=1-0$ 輝線データの解析を行った。用いたデータの合成ビームサイズは $3.8'' \times 2.5''$ ($\sim 267 \times 174$ pc²) である。雲自動同定アルゴリズム CPROPS (Rosolowsky & Leroy 2006) により計 165 の GMA が検出され、それぞれのサイズ、速度分

散、分子ガス質量、ピリアル質量、星形成率が評価された。その結果、M100 内の GMA は、銀河系内の分子雲一般に見られるサイズ-線幅関係 (Larson 則) には従わないことがわかった。CNR に属する GMA は比較的高い星形成率を示し、重くコンパクトかつ速度幅が広い傾向にあった。また、渦状腕に属する GMA の多くは自己重力的に束縛されていることがわかった。加えて、星形成率面密度と分子ガス質量面密度の間に見られる相関関係 (Kennicutt-Schmidt 則) において、M100 内の GMA は、CNR、渦状腕、棒領域でそれぞれ異なるべき指数を示すことがわかった。これは、各領域における星形成は単一のメカニズムではなく、複合的な要因で誘発されることを示唆している。本講演では以上の結果をまとめた論文 Pan & Kuno (2017) のレビューを行い、M100 における分子ガスの物理状態および大局的な星形成メカニズムについて議論する。

- 1 Pan, H.-A., & Kuno, N. 2017, ApJ, 839, 133
- 2 Ho, L. C., Filippenko, A. V., & Sargent, W. L. W. 1997, ApJS, 112, 315
- 3 Rosolowsky, E., & Leroy, A. 2006, PASP, 118, 590

銀河 c19 すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam を用いた $z \sim 1$ における AGN-Red Galaxy のクラスタリング 探査 佐藤真帆 (東北大学天文学専攻 M1)

銀河の形成・進化を理解することが天文学における一つの大きな目標である。銀河の多くがその中心に大質量ブラックホール (super massive black hole; SMBH) を持っており、そのうちの 1 割程に活動銀河核 (active galactic nuclei; AGN) が存在しているとされる。AGN は SMBH へのガスの降着であると考えられており、SMBH 質量と母銀河のバルジ質量の間には強い相関関係があることが観測的に知られている。故に、SMBH は銀河と“共進化”してきたということが示唆された。また、銀河はダークマターハロー (dark matter halo; DMH) 中に存在し、小規模なものから大規模なものへと合体を繰り返し成長してきたとされる。そのため、銀河の進化を知る上でハローの質量分布および銀河の周辺環境の理解が不可欠となる。銀河の DMH 質量は、観測による AGN のクラスタリングと N 体シミュレーションを用いた DMH の理論モデルを比較することによって見積もられる。AGN がどのような環境に住んでいるのかということが、銀河の進化、さらには SMBH の成長と密接に関わっていると考えられるため、AGN のクラスタリング測定が重要な意義を持つとして盛んに研究が行われている。そこで本研究では 1400deg^2 という広視野を持つ HSC-SSP Wide の大規模サンプルを生かすことにより、 $z \sim 1$ における QSO と Red Galaxy のクラスタリング解析を行う。QSO については SDSS DR12 のデータの Wide の領域内のものを用いた。銀河サンプルの選択手法としては、Kodama & Arimoto 1997 の種族合成モデルに基づいた楕円銀河の色進化トラックにより色選

扱を行った。本講演では、詳細な解析方法やその結果について発表する。

1 Kodama, T., Arimoto, N., 1997, *A&A*, 320, 41

2 Shen, Y., et al., 2013, *ApJ*, 778, 98

銀河 c20 低金属度環境における星の輻射による分子雲からのダスト排出

福島肇 (京都大学 天体核研究室 D2)

初代星は重元素を含まない始原ガスによって形成され、典型的には数十 M_{\odot} 以上の大質量星となることが理論的に予測されている。これら初代星は超新星爆発により周りに金属やダストを放出し、その後形成される初代銀河はこの低金属度のガスを取り込んで形成される。この際、ガスに含まれるダスト粒子が冷却材として機能するため、高密度コアの分裂が起こり、小質量星が多く形成されると予想されている (Schneider & Omukai 2010)。

低金属度環境において星形成が始まると、分子雲内部に含まれるダスト粒子は輻射圧を受けることでガスと相対速度を持つようになり (Johnson 2015)、やがて外部へ放出される可能性がある。また、分子雲からダスト粒子が排出されると、その後の星形成において高密度コアは分裂することなく、初代星形成と同様に大質量星が多く形成される環境が実現すると考えられる。

本研究では、分子雲の数密度 n_{H} と半径 R_{cl} 、星形成効率 ϵ_{cl} に対して、上記のようにダスト粒子を含まない分子雲が形成可能であるかを調べた。今回は、分子雲内部は低金属度であり、星からの直接光に対して光学的に薄いことを仮定した。ダストなし分子雲の形成条件として、ダスト粒子が分子雲から排出されるのに要する時間が、大質量星が寿命となり超新星爆発を起こす、もしくは HII 領域が広がり分子雲全体が電離される時間よりも短くなる必要がある。結果として、金属度が $Z < 10^{-3} Z_{\odot}$ 、星形成効率が $\epsilon_{\text{cl}} > 0.03$ を満たす際に、ダストなし分子雲が形成可能であることがわかった。また、ダストなし分子雲中で形成される星の化学組成や典型的な質量についても議論する。

1 Schneider, R., & Omukai, K. 2010, *MNRAS*, 402, 429

2 Johnson J. L., 2015, *MNRAS*, 453, 2771

銀河 c21 コールドダークマターハロー中の等温銀河風の遷音速解析

永野裕太 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 M1)

本発表では、コールドダークマターハロー中の等温銀河風の遷音速解について研究した T. Tsuchiya, M. Mori, S. Nitta (2013) をレビューする。

銀河風はエネルギーや質量の輸送、銀河内での重元素循環や銀河間領域の重元素汚染等、銀河や銀河間空間の進化に重要な

役割を担っている。ここでは、コールドダークマター (CDM) シナリオに基づいた重力ポテンシャルモデル中の等温球対称の定常銀河風の基本的な性質及び遷音速銀河風における CDM ハローの質量密度分布の影響について考えていく。本研究では、銀河風の遷音速解に 2 つのタイプが存在することを明らかにした：(1) 銀河の中心領域から急激に加速される流れ、(2) 有限の半径を持った銀河中心から離れた領域からゆっくりと加速される流れ。いずれの解に対しても、流れの加速の様子が CDM ハローの密度分布に強く依存していることが明らかとなった。また、(1) の遷音速解が存在するためには、中心付近の密度勾配が Navarro, Frenk & White (1996) や Moore et al. (1999) がシミュレーションから得た CDM ハローの中心密度勾配よりも急である必要性を示した。この結果は、中心領域からの遷音速流を理解するためには、中心の大質量ブラックホールや星の構成要素のようなバリオン系によって生じる密度勾配が必要であることを示唆している。一方、(2) で見られるような銀河中心から離れた領域から始まる流れでは、スターバースト現象のような猛烈なエネルギー注入がなくても、ハロー全体でゆっくりと加速されるような流れの存在を世界で初めて予言した。このような遷音速流は銀河間空間の重元素汚染に恒常的に寄与しているかもしれない。今後は恒星系やブラックホールといった CDM 以外の重力ポテンシャル源や流れに沿った質量やエネルギーの流入を含んだモデルについて考えていく。

1 M. Tsuchia, M. Mori, S. Nita, 2013, *MNRAS*, 432, 2837

銀河 c22 ALMA データを用いたサブミリ波銀河の解析

片野未優 (明星大学 M1)

我々の存在する銀河がどのように誕生し、進化してきたのかわかることは重要なことである。本研究では、サブミリ波望遠鏡 ASTE によってサブミリ波銀河が多数検出された、AKARI Deep Field South (ADFS) と呼ばれる領域を、より高い感度と解像度を持つ ALMA 望遠鏡で観測したデータを用いて解析を行った。この解析の目的は、サブミリ波で明るく輝く遠方銀河の赤方偏移を導出し、水素分子ガス質量を求めることである。今回 57 個のサブミリ波銀河を解析し、そのうち 2 個の銀河から有意なガス輝線候補が検出された。そして、計算の結果、赤方偏移の値を $z=0.3 \sim 3.5$ と導出した。そのため、今回検出されたサブミリ波銀河は、宇宙の星形成率がピークを迎えた時期 ($z=2 \sim 3$) に存在している銀河の可能性が考えられる。また、求められたガス質量の値から、今回検出されたサブミリ波銀河は、これから天の川銀河クラスに成長する可能性があること示唆され、あと 28 万 ~ 4500 万年でガスが使い果たされると見積もった。

銀河 c23 棒渦巻銀河のリング構造の解析

望月知里 (日本女子大学 理学研究科 数理・物性構造科学専攻 M1)

棒渦巻銀河の周囲にしばしば形成されるリング状構造について、可視光画像を用いて観測的に解析を行った。現在は宇宙大規模構造などに目を向けている研究者が多く、1980年代に盛んに行われていた銀河構造についての研究はあまり活発でない。そのため、ring 形成のメカニズムについては解析がほとんどなされておらず、未だに理論的な論争にも決着がつかない。本研究で観測的に ring を解析することは、ring のでき方を議論する上での重要な一歩となると思われる。

SDSS の第 12 次公開データ (DR12) から 33 個の銀河の *R*-band で撮影された画像を対象として解析を行った。本研究では解析を行うにあたり、IRAF(天体画像解析用ソフトウェア集合体)、および Fortran 言語で作成したプログラムを使用した。まずは、すべての画像に対して、半径方向の輝度分布 (profile) を調べ、銀河から ring 成分のみを抽出した。次に、具体的な解析として、ring 成分の基本的情報 (最大輝度等級やその半径、その等級と銀河全体の絶対等級の関係)、などを解析的に求めた。

ring の最大輝度は 22 から 23 等に密集しているという結果が得られた。また、解析した銀河の中では、最も early-type であることを表す 0^- は存在せず、 0^0 から a タイプに集中するということが分かった。また、ring の幅と半径は比例関係にあり、ring の幅が広いほど、ring の半径も大きい傾向があった。幅と半径の比例関係は、RB タイプと RAB タイプでは傾きが異なり、RAB タイプのほうが緩やかな関係を持っていた。解析の中で profile から ring が二重になっているものが見つかり、内部 ring が大きいだけなのか、外部 ring が二重に形成されることがあるのか別の解析の仕方でも検討する必要がある。

- 1 P. Erwin et al. *Astron. J.* 135 20-54 (2008)
- 2 E. Athanassoula et al. *MNRAS* 400 4 1706-1720 (2009)
- 3 R. D. Grouchy, et al. *Astron. J.* 139 6 (2010)

銀河 c24 AGN と銀河の共進化 田中悠太郎 (東北大学天文学専攻 M1)

多くの銀河の中心には超巨大ブラックホールがあることが知られています。質量にして太陽の質量の 100 万倍から 10 億倍の質量をもつ超巨大ブラックホールが一体どのようにしてそこまで巨大に成長したのか、依然謎は多く、活発な議論の対象になっています。かつて活動銀河核や銀河中心のブラックホールは、中心のごく小さな領域の中で起こる局所的な現象として、銀河全体の進化とは切り離されて考えられてきました。しかし近年、大質量ブラックホールの質量は銀河の回転楕円体成分 (スフェロイドやバルジ) の質量と非常に良い比例関係を示すことが明らかにされ、両者のサイズは 10 桁ほど異なっているためなぜこのような関係があるのかが大きな問題としてクローズアップされました。この相関関係はまさにブラックホールと銀河が共に進化してきたこと、お互いにフィードバックを与え

つつ進化してきたことを示唆する証拠であり、それを説明するための銀河と大質量ブラックホールのフィードバックモデルが複数提案されています。そしてそのモデルの一つに中心の活動銀河核やブラックホールが周囲の環境に対して放射圧を与えることにより、そこに含まれるダストやガスを吹き飛ばし、銀河の進化にフィードバックを与えるという radiative feedback model があります。ここではすでに示したようなブラックホールの影響がキロパーセクスケールで起き、星生成を抑制することで再びブラックホールに影響を与え、銀河の進化に大きく関わるフィードバック機構を考察する。

銀河 c25 電離光子脱出率と銀河の特徴との関係 角田匠 (名古屋大学 C 研 M2)

現在の標準宇宙論によれば、初期に高温、高密度であった宇宙は宇宙膨張とともに冷え、宇宙年齢約 38 万年に自由電子と陽子が結合することにより宇宙空間は中性化する。その後、宇宙に初代の天体が形成されると、それらが放射する電離光子によって宇宙空間を満たすガスが再び電離される。この期間のことを宇宙再電離期と呼ぶ。観測による制限から宇宙再電離は $z \sim 7$ までにほぼ完了したと考えられている。しかしながら、再電離を引き起こした電離光子源がなんであったかは明らかでない。再電離期に多くの銀河が存在することは既に観測で確認されており、これら高赤方偏移銀河は電離光子源の有力な候補であると期待される。電離光子脱出率 (f_{esc}) は銀河内で生成された電離光子が銀河間空間に供給される割合を表しており、銀河がどの程度再電離に寄与したのかを理解する上で重要な量である。しかし、その平均的な値は理論的にも観測的にもコンセンサスは得られておらず、数値シミュレーション結果は多様な値を示すことが知られている。

本研究では、単純化した銀河モデルについて Ray-Tracing 法による電離構造計算を行うことで銀河の内部構造が f_{esc} に与える影響を調査した。その結果、多様性を生み出す一番大きな要因は銀河内の光源の位置であり、これは f_{esc} に 2 桁程度のばらつきをもたらすことを示した。また、銀河内部構造が非常に非一様で高密度なガスの塊 (clump) が多数存在する場合、clump の総質量が銀河ガス質量の 10% を超えると f_{esc} が高くなる事、clump の質量、大きさなどによって f_{esc} が 5 倍程度の変化することも明らかにした。本発表では、これらの結果を踏まえ、 f_{esc} を決める重要な要素は何か議論する。

- 1 Fernandez E. R., Shull J. M., 2011, *ApJ*, 731, 20
- 2 Yajima H., Choi J.-H., Nagamine K., 2011, *MNRAS*, 412, 411

銀河 c26 三次元流体シミュレーションの non-LTE 法による [CII] の解析

村颯太 (鹿児島大学 M1)

分子線、原子線観測は活動銀河核 (AGN) 周辺の構造を解明するのに有効な手段のひとつである。近年、ALMA などによるミリ波、サブミリ波領域での高分解能観測技術の発達により、分子ガスから放射される輝線を用いて AGN 周辺の分子ガスの詳細な構造が明らかになりつつある。原子にはエネルギー準位の微細構造の遷移による中間赤外から遠赤外にかけて微細構造禁制線と呼ばれる禁制線が存在する。これらの輝線は赤外領域にあるため星間ダストによる減光を受けにくく、今日では赤外線観測の重要な分野となっている。

本研究では AGN の 3 次元輻射流体シミュレーションデータ (Wada 2012) を基に、モンテカルロ法と non-LTE 法を用いて輻射輸送方程式を解き [CI] の微細構造禁制線の輝線強度図を再現した。モンテカルロ法とは乱数を用いて擬似光子の伝搬シミュレーションを行う方法であり今回は Wada Tomisaka(2005) の手法を用いた。[CI] には 3 準位の微細構造が存在する。これらの輝線強度比や X-factor の分布の特徴について議論する。

1 Wada K., Schartmann.M., Mejerink R. 2016, arxiv:1511.08815

銀河 c27 宇宙再電離期におけるライマン 輝線銀河の遠赤外線 [OIII]88 μ m 輝線の ALMA 高分解能観測 浦田裕樹 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

宇宙再電離の時代 ($z \sim 11-6$) における若い星形成銀河の星間物質の物理的情報や重元素量を観測的に理解することは、銀河がどのように再電離に寄与したかを知るうえで、きわめて重要である。

Inoue et al.(2016) は、 $z=7.2$ におけるライマン 輝線銀河 SXDF-NB1006-2 に対し、ALMA を用いて遠赤外線 [OIII]88 μ m 輝線、[CII]158 μ m 輝線、およびダストからの遠赤外放射の探査を実施した。その結果、[OIII]88 μ m 輝線の検出に成功した。しかし、その一方で [CII]158 μ m 輝線とダストからの遠赤外線放射は検出されなかった。そして、この [OIII] 輝線とすばる望遠鏡の観測から得られたライマン 輝線との相対速度 v_{Ly} は比較的小さい (~ 110 km/s) ことがわかった。このことは、銀河内の HI の柱密度が、 Ly 輝線で明るい (紫外線で明るい) 低赤方偏移 ($z \sim 2-3$) 銀河に比べて小さいことを示す。

また、金属量や星形成率 (SFR) 等の物理量を求めるため、静止系紫外線から遠赤外線にわたるスペクトルエネルギー分布モデルを行った。その結果、この銀河は太陽組成のおよそ $1/10$ 程度の金属を保有している若い ($\sim 10^6$ yr) 星形成銀河 (SFR $\sim 340 M_{sun}/yr$) であることがわかった。また、銀河間空間への電離光子の脱出率が、約 50% と比較的高いことが示唆される。これらの結果から、この銀河の星間物質は、同規模の

星形成率をもつ低赤方偏移の星形成銀河と比較して、ダストや HI ガスが欠乏しており、星間物質が非一様で多孔性のある分布をなしているものと推定される。

本講演では、Inoue et al.(2016), Science, 352, 1559 をレビューし、同天体に対して追加で実施した ALMA の高分解能観測の結果を報告する。

1 Inoue et al.(2016), Science, 352, 1559

銀河 c28 VVV アーカイブデータを用いた銀河系中心領域近赤外減光則の導出 長友峻 (京都大学宇宙物理学教室 D3)

星間空間には炭素やケイ素、鉄などから成る固体微粒子が存在する。これらの星間微粒子による減光は、星の明るさからその星までの距離を推測する際に問題となる。減光量を見積もる方法の 1 つは減光の波長依存性、つまり減光則と赤化量を用いる方法である。減光則は「どれだけ赤くなったらどれだけ減光されているか」を表す。一方、赤化量はその星が真の色からどれだけ赤くなったかを表す。減光則は空間的に変化する可能性が示唆されており、さまざまな観測方向について研究が行われている。

近赤外サーベイデータとして、Vista Variables in the V_{ia} L_’actea (VVV) サーベイのアーカイブデータがある。VVV の等級較正には 2MASS が用いられているため、VVV を用いた研究では 2MASS データから求めた減光則である Nishiyama et al. (2009; 以下 N09) を変換したものが使用されている (例 D’ek’any et al. 2015)。しかし、それらの結果の一部は IRSF 望遠鏡で求められた Nishiyama et al. (2006; 以下 N06) の減光則を用いた研究結果と一致しない (Matsunaga et al. 2016)。そこで N06 と全く同じ解析を VVV のアーカイブデータで行い、VVV で使える減光則を導出した。

N06 では銀河系中心部 $3^\circ \times 2^\circ$ の領域を用いて、レッドクランプ (RC) メソッドで減光則を求めていた。N06 と同様の解析を VVV データで行い、RC の平均等級・平均色指数が精度よく求められた小領域から各バンドの減光則を求めたところ、 $A_{K_S}/E(H-K_S) = 1.2$, $A_{K_S}/E(J-K_S) = 0.475$, $A_H/E(J-H) = 1.48$ という結果を得た。N06 の値 $A_{K_S}/E(H-K_S) = 1.44$, $A_{K_S}/E(J-K_S) = 0.494$, $A_H/E(J-H) = 1.42$ と比較すると、 H, K_S や J, K_S については今回の値の方が小さくなっている。

なぜ N06 より傾きが小さくなったかを考察するために、VVV と IRSF の等級、色を比較したところ、 J, H, K_S バンドの等級には ~ 0.2 等程度の systematic な違いがあることが明らかになった。したがって、この減光則の違いは観測装置由来であると推測される。本講演ではこれらに加え、今回求めた減光則の値が VVV を用いた研究に与えるインパクトについても言及する。

1 Nishiyama, S. et al. 2006, ApJ, 638, 839.

堀田 英之 氏 (千葉大学)

7月25日 14:30 - 15:30 B 会場

「大規模計算による太陽ダイナモ問題への挑戦」

太陽には、黒点という強磁場領域があり、その黒点数は11年の周期を持って変動している。この太陽活動11年周期の問題は未だ解かれていない太陽物理学最大の問題である。太陽11年周期の問題を理解するためには、太陽内部の乱流状況を正確に理解する必要がある。太陽内部はその低い粘性度と大きなスケールのために高い自由度を持つ高度な乱流で満たされている。そのため、太陽内部の乱流を正確に記述することは現在のスーパーコンピュータを持っても非常に難しい。本講演では、これまでの太陽磁場研究の発展、これからの方向性について特にスーパーコンピュータを用いた研究について議論する。

1. H. Hotta, M. Rempel, T. Yokoyama, Science, 351, 1427

坪井 陽子 氏 (中央大学)

7月26日 08:30 - 09:30 B 会場

「X線で探る星の一生で見る太陽の姿」

星の研究は古来から行われ、その理解は他の天体に比べ進んでいるとされる。しかし、自らの母体となる塵に包まれた原始星や、自らが噴出した塵に覆われた大質量星の最終段階では、星の本体をX線以外で観測することはできず、理解は著しく立ち遅れている。それでは、このような進化段階で起こっているプロセス、星の誕生や星の終焉は、いかに理解を進めることができるだろうか。本講演では、これらに対する我々のアプローチや、関連する研究についてレビューを行う。

太陽 a1 温度と視線速度の位相差から探る、プロミネンス中の波動の性質

町田亜希 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

太陽は 100 万度の高温で希薄なプラズマ (コロナ) に覆われており、コロナの加熱機構は未解明である。一つの仮説として、コロナ中の波動のエネルギーが散逸してコロナが加熱されるという考えがある。この波動現象の理解は、宇宙プラズマ中の磁気流体波の一般的性質の理解につながり重要である。しかし、コロナは希薄であり、観測で波動をとらえることは難しい。そこで、プロミネンスと呼ばれる、コロナ中で磁場の力に支えられて浮かぶ低温 (1 万度) 高密度なプラズマの雲に注目する。実際、プロミネンス中には波動が観測されており、その波動現象を理解することで、コロナ加熱問題への示唆が得られると期待される。

その鍵となるのは、視線速度に加えて温度の時間変化も同時に観測することである。これにより、温度の周期性の有無からは、その波動が圧縮性を持つかどうか分かり、温度と視線速度の位相差からは、その波が伝搬波か定在波かもわかる。さらには、温度の時間変化から、波が減衰して熱エネルギーに変換される過程をとらえることもできる。先行研究 [1] では、衛星観測による高空間分解能の観測データに基づき波動の運動と温度の同時測定を行ったが、温度情報については撮像データに基づいた粗いものであった ($\Delta T \sim 10000\text{K}$)。また [2] では、プロミネンスの分光観測による視線速度と温度変動の同時測定はしているものの、フィルムを用いていたため、両者の位相差を議論できるほど温度推定に精度はなかった ($\Delta T \sim 600\text{K}$)。波動の性質を議論するには、過去の研究よりも精度の高い温度推定が求められる。

我々は、2016 年 10 月 16 日、京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡の水平分光器を用いてプロミネンスを観測した。この観測では、長時間・高波長分解能で、 $\text{H}\alpha$ (6563AA)、 $\text{H}\eta$ (4861AA)、 Ca II (8542AA) の 3 波長で CCD による同時観測を行い、温度と視線速度の時間変化を求めた ($\Delta T \sim 200\text{K}$)。本発表では、観測データの解析結果について述べる。

- 1 Okamoto, T., P. Antolin et al., 2015, ApJ, 809, 71
- 2 Suematsu, Y., et al., 1990, PASJ, 42, 187-203

太陽 a2 X 線望遠鏡観測による太陽マイクロフレアの研究

石塚典義 (国立天文台三鷹 M1)

フレアとは、主にコロナ領域において、太陽内部で発生した磁気エネルギーが解放され、別の形態のエネルギーに変換される過程である。太陽の光球は約 6000 度なのにも関わらず、その上空に存在するコロナは 100 万度に達する。すなわち、コロナが何らかの方法で加熱される必要がある。コロナを加熱する方法の説としては大きく分けて、波動加熱とマイクロフレア加

熱の 2 つある。マイクロフレア加熱説は、観測の難しい、通常のフレアに比べて小さい爆発がたくさん起き、その結果コロナを加熱する膨大なエネルギーが運ばれているという考え方である。2018 年夏に予定されている FOXSI-3 ロケット観測では、X 線光子計測により太陽軟 X 線の撮像分光観測が行われる。これは観測が行われる時間が 5 分程度であり、ちょうどそのタイミングでフレアが発生するとは限らず、フレアを観測することは難しいと考えられるため、活動領域中のマイクロフレア・ナノフレアなどの、小さいものの数が多く起こっている現象が観測できるものと考えられる。これらの観測結果によっては、マイクロフレア仮説に対して何らかの制限を与えることになるかもしれない。最近のマイクロフレアに関する研究としては、マイクロフレアと光球面の磁場の関連について調べたものがある。([1])。今回の講演では、ひので衛星の X 線望遠鏡 (XRT) などによって観測されたマイクロフレアの解析を行った結果を発表する。

- 1 Kano, R., Shimizu, T., & Tarbell, T. D. 2010, ApJ, 720, 1136

太陽 a3 ひのでで探る太陽大気プラズマ加熱 阿部仁 (東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻 M1)

太陽の上層大気の色層・コロナは下層大気的光球よりも高温であるが、太陽の熱源は内部にあるためこの温度構造は単純な熱伝導では達成されず、非熱的なメカニズムによって維持されているはずである。このメカニズムの有力な説として「波動による加熱」が考えられている。この説の観測的証拠を得るためには、太陽大気中の波動によるエネルギーフラックスの推定が重要である。

本研究では「ひので」の偏光データを用いて、光球において磁場の活動が活発な領域で波動観測を行い、3 つの物理量 (ドップラー速度・視線方向磁場・放射強度) の時間変動を測定した。それらの位相関係を調べ、太陽大気中の波動モードの特定からエネルギーフラックスの推定を目指した。

結果として、いずれの物理量においても約 5 分の周期的な振動を発見した。物理量の位相差は、ドップラー速度と放射強度が 90° 、ドップラー速度と磁場強度が 90° 、放射強度と磁場強度が 0° であった。今回発見した振動は、過去の類似研究 (Kano et al.2016) で報告されたものとは異なる fast-mode の定常波であることを示唆する。この結果は、上空へのエネルギーフラックスが従来考えられていたものと異なる可能性を示している。

- 1 Fujimura, D., and Tsuneta, S. ApJ 702 1443(2009)
- 2 Kanoh, R., and Shimizu, T., and Imada, S. Apj 831 1(2016)
- 3 Moreels M. G., and Van Doorselaere, T. A&A 97 310(2013)

太陽 a4 太陽や恒星フレアからの軟 X 線と $H\alpha$ 線エネルギーの関係の拡張 河合広樹 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M1)

恒星からの突発的な増光現象であるフレアは、増光時に様々な波長の光を放射する。軟 X 線の増光はフレアループ内のプラズマからの熱的放射、 $H\alpha$ 線の増光はフレアの足元の黒点からの放射である。フレアを軟 X 線と $H\alpha$ 線で同時に観測すると、ループ内プラズマの放射エネルギーと黒点からの放射エネルギーの関係がわかる。このように、同時多波長観測は複数のパラメータを結びつけて考えられるメリットがある。一方で、フレアは突発的現象で予測が難しいため同時多波長観測の報告は少ない。数少ない同時多波長観測の成果の 1 つに、フレア時の軟 X 線エネルギー (E_X) と $H\alpha$ 線エネルギー ($E_{H\alpha}$) に $E_X = 10.66E_{H\alpha}$ の関係がある (Butler et al. 1993)。この関係は太陽を含む恒星フレアをもとにした $E_X = 10^{29} - 10^{35}$ erg での関係である。現在確認されている最大 E_X は $E_X = 3.5 \times 10^{38}$ erg (Tsuboi et al. 2016) であるのでこの比例関係は全フレアには適応していない。そこで我々は、より高エネルギーのフレアを観測し、この関係の拡張を目指した。

そして、今回我々は 2016 年 11 月 22 日に全天 X 線監視装置 MAXI が検出した RS CVn 型星の UX Ari からのフレアを、地上の可視光望遠鏡の CAT (Chuo-university Astronomical Telescope) で測光観測し、SCAT (Spectroscopic Chuo-university Astronomical Telescope) で分光観測することで、X 線と可視光の同時観測に成功した。このフレアのエネルギーは $E_X = 6.5 \times 10^{36}$ erg、 $E_{H\alpha} = 1.3 \times 10^{36}$ erg であった。今回のフレアは、先行研究の比例関係に用いられているサンプルよりも 1 桁大きなエネルギーである。そのため、軟 X 線と $H\alpha$ 線エネルギーの比例関係を 1 桁拡張することができた。

太陽 a5 MAXI を用いた X 線帯域における近傍 G 型星のフレア調査 塚田晃大 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M1)

これまでに可視光によって 1549 発のスーパーフレアが太陽型星から発見された (Maehara et al. 2012)。一方 X 線では、太陽型星からのスーパーフレア検出数が 2 発とサンプル数が非常に少ない (Schaefer et al. 2000)。X 線で発見された 2 発のスーパーフレアはとりわけ大きなフレアであった。従って、X 線でのサンプル数を増やすことで太陽のスーパーフレアの有無に新たな視点で迫ることができる。

我々は、全天 X 線監視装置 MAXI を用いて、X 線によるスーパーフレア探査を行った。データは、MAXI on-demand の 2009 年 8 月 15 日から 2017 年 4 月 14 日までの 7 年 8 ヶ月である。MAXI での検出限界は 10mCrab であることから、6.47 pc 以上離れた天体からのフレアを MAXI で検出でき

ば、スーパーフレアであると考えられる (Tsuboi et al. 2016)。MAXI の先行研究によって、定常 X 線光度 (L_{xq}) が大きいほどフレア最大エネルギーが大きいことがわかった (Sasaki et al. 2017)。そこで、10 pc 以内の G 型星で L_{xq} が大きい天体を ROSAT All-Sky Survey Bright Source Catalogue で抽出し、11 天体に絞りフレアサーチを行った。その結果、バックグラウンドイベントの統計的なゆらぎに対して、ソース領域のカウントが 6.71 の有意な増光を 1 天体から検出した。本講演では、その天体の詳細な解析結果について報告する。

太陽 a6 XMM-Newton を用いた 20 pc 以内の太陽型星のフレア調査 杉田龍斗 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

現在までの太陽フレア最大エネルギーは $\sim 10^{32}$ erg であり太陽最大フレアに比べ桁違いに大きなエネルギーのフレアをスーパーフレアと呼ぶ。スーパーフレアは可視光で多数の太陽型星から発見された。一方 X 線では太陽型星からのスーパーフレア検出数が 2 発とサンプル数が少なく近傍 G 型星の統計的なフレア調査は未だに行われていない。

我々は 20pc 以内の単独 G 型主系列星 52 天体に対し X 線でフレア調査を行った。52 天体中 ROSAT All-Sky Survey Bright Source Catalogue (ROSAT 1RXS) にある天体は 15 天体であり定常 X 線光度 (L_{xq}) が $\sim 10^{28}$ erg/s であった。その内 6 天体が XMM-Newton 視野内にあり 6 天体全てが検出された。この 6 天体を解析した所、4 天体から $\sim 10^{32}$ erg のフレア 6 発を確認した。フレア 6 発中、最大フレアエネルギーは 7.7×10^{32} erg でスーパーフレアに準ずるエネルギーであった。一方 ROSAT 1RXS にない 37 天体の内 6 天体が XMM-Newton の視野内に存在し 5 天体が検出された。そしてこの 5 天体はフレアを起こしておらず L_{xq} が太陽程度の $\sim 10^{27}$ erg/s であった。つまり ROSAT 1RXS 天体は L_{xq} が高くフレア活動性も高いことが分かった。

先行研究で太陽は約 1 年に 1 回の頻度で最大クラスのフレア ($\sim 10^{32}$ erg) を起こすことが知られている。そこで ROSAT 1RXS にある 6 天体に対し XMM-Newton 全観測時間 (約 2.7 日) 内のフレア発生頻度を求めた。すると約半日に $\sim 10^{32}$ erg のフレアが 1 発起こることが示唆された。そして太陽フレア発生頻度分布を外挿すると ROSAT 1RXS にある 6 天体は約 5 日に 1 発のスーパーフレアが起こることが示唆される。今後 ROSAT 1RXS 近傍天体をモニターしていくことでスーパーフレアサンプル数拡大が期待される。

太陽 a7 「すざく」衛星による地球近傍からの太陽風電荷交換 X 線イベントの系統探査

伊師大貴 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

近年、X線天文衛星「すざく」などによって、地球近傍からの電荷交換放射 (Solar Wind Charge eXchange, SWCX) が確立してきた (Fujimoto et al. 2007 PASJ, Ezoe et al. 2010 PASJ など)。太陽風に含まれる酸素などの多価イオンが、地球近傍の中性大気に含まれる水素原子などの電子を剥ぎ取り、軟X線 (0.2–1 keV) の輝線を出すというものである。SWCX放射は、ROSAT all sky survey により数日単位の時間変動を示す軟X線バックグラウンドとして発見され (Snowden et al. 1994 ApJ)、地球周回衛星による全てのX線観測で前景放射となる。地球近傍の放射は太陽活動に依存するため、太陽観測衛星のデータを併用することで、地球の超高層大気である外圏や磁気圏内のプラズマ輸送過程の情報を得ることができる。

我々は「すざく」の公開データから SWCX イベントの系統探査を行った。軟X線バックグラウンドの有意な時間変動を探し、太陽風と有意な相関があるものを SWCX イベントとみなす (Ezoe et al. 2011 PASJ, Ishikawa et al. 2013 PASJ)。我々はこれまでに 2005 年 8 月から 2011 年 9 月の 2031 データを解析し、38 の SWCX イベントを検出した (石川 天文学会 春季年会 2012)。同様の手法を 2011 年 10 月から 2015 年 5 月の 1024 データに適用し、新たに 52 の SWCX イベントを発見した (伊師 天文学会 春季年会 2017)。太陽活動と同期した検出数の変動が見られたが、磁気圏構造に依存した検出イベントの特徴的な分布は見られなかった。本発表では、「すざく」による系統探査の結果をまとめ、太陽活動や磁気圏構造との相関、軟X線背景放射への寄与について議論する。

太陽 a8 紫外線撮像・分光観測によって明らかになったコロナルレインの時空間スケール

石川遼太郎 (東北大学理学研究科地球物理学専攻 M1)

太陽の活動領域上空ではコロナルレインという現象がしばしば観測される。コロナルレインは熱的不安定性によってコロナで生成された低温高密度のガス塊が、生成後短時間で太陽表面へと落下する現象と考えられている (Müller et al. 2005)。そしてコロナルレインが微細構造を有することが知られているが、その具体的なスケールやその形成過程は明らかになっていない。また、落下したコロナルレインが黒点上空の彩層・遷移層を加熱することが最近の研究で明らかになった (Kleint et al. 2014)。しかしながら、コロナルレインが持つ運動エネルギーを熱化する物理過程の候補である断熱圧縮と衝撃波加熱のうちどちらが支配的かは分かっていない。本研究では SDO 衛星 AIA のコロナ画像と IRIS 衛星の分光データ及びスリットジョー画像とを組み合わせることで、遷移層・彩層温度におけるコロナルレインのガスの追跡とその速度や明るさの解析を行った。その結果、IRIS 衛星の 1400 Å スリットジョー画像においてコロナループに沿った下降流が見え、さらにそれに対応した増光・ドップラーシフトが分光データにおいて確認できた。また

その下降速度の視線方向成分は約 85 km/s であり、音速よりも十分に速いことが分かった。これによりコロナルレインが下層大気と超音速で衝突・加熱したことで、大気の発光が発生しているという因果関係の存在を示すことができた。さらに IRIS の Mg II 2796 Å, Si IV 1394 Å, C II 1336 Å のスペクトル線では、その明るさが約 25 秒の時間スケールで変動していた。これは落下した際のコロナルレインが有している微細構造の空間的スケールや、コロナ領域でガス塊が生成される時間スケールを反映していると考えられる。本講演ではコロナルレインによる彩層加熱過程とコロナルレインの微細構造形成過程について議論する。

- 1 L. Kleint et al., ApJL, 789, L42 (2014)
- 2 P. Antolin et al., ApJ, 806, 81 (2015)
- 3 H. Tian et al., ApJL, 790, L29 (2014)

太陽 a9 惑星食を用いた星表面上での granulation の大きさ・明るさの検出

林利憲 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

太陽のような 7000 K よりも低有効温度をもつ恒星外層では、対流層が形成されており、時間スケール数十分、空間スケール数千 km の、granulation と呼ばれる、粒状斑の生滅現象が生じていると考えられている。

粒状斑の情報は恒星のパラメータと密接に関係し、宇宙望遠鏡による観測からは、粒状斑に起因する表面輝度変動の二乗和 Σ と、太陽様振動のピーク周波数 u_{\max} との間に、 $\Sigma \propto u_{\max}^{\frac{1}{2}}$ のスケーリング関係があることが確認されている。また、粒状斑に起因すると考えられる光度曲線の変動情報を用いて、恒星の表面重力を決定することに成功している (F.A. Bastien et al, 2016)。このように、粒状斑の情報は、恒星物理に置いて非常に重要なものとなっている。

さて、星表面全体での粒状斑の情報を引き出すことに成功している一方で、パワースペクトルを用いる従来の手法は、星表面全体での積分値を反映するため、星表面の特定の場所での性質を引き出すことはできない。そのため、星の各点での粒状斑がどのような性質をもつのかは明らかになっていない。粒状斑の大きさを星表面の各点で測定するためには、惑星食の情報を用いるのが有効である。輻射流体コードを用いた星表面粒状斑シミュレーションによって、典型的な系外惑星を仮定して、粒状斑がトランジット光度曲線に与える影響を調べると、例えば、太陽のような G 型星の周りでの木星型惑星の場合、光度変化は 15.9 ppm 程度の大きさであることがわかった (A. Chiavassa et al, 2017)。この値は、検出精度の観点から、Kepler 等の宇宙望遠鏡で得られる光度曲線観測データによって検出できる可能性を示唆している。

そこで、本発表では、シミュレーションによって、粒状斑がトランジット観測に与える影響を調べ、Kepler によるトランジット光度曲線観測データと比較して、系外惑星観測を用いた

恒星表面の粒状斑の検出、及び各点における粒状斑の情報について議論した結果を報告する。

- 1 Bastien, F. A., Stassun, K. G., Basri, G., & Pepper, J. *ApJ*, 818, 43 (2016)
- 2 Chiavassa, A., Caldas, A., Selsis, F., et al., *A&A*, 597, A94 (2017)

太陽 a10 Line-depth Ratios and Teff Relation of Red Giants in APOGEE H-band Spectra: the Metallicity Effect

Jian Mingjie (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

Stellar parameter such as effective temperature (Teff) and metallicity abundances, are of vital importance in unveiling the condition of our galaxy.

Line depth ratio, which divide the line depth of two lines with a discrepancy in excitation potential, is sensitive to Teff. Beside the sensitivity, it can also avoid the correction of reddening compared to the Teff derived from color index, which directly connect spectra with Teff in a simple way compared with synthetic spectra fitting. Previous result mostly focus on optical spectra, such as Strassmeier & Schordan (2000) and Kovtyukh (2006). Recently Fukue et al. (2015) found 9 line pairs in the H-band, for the first time for this wavelength. Uncertainty of Teff can be reduced to around 50 K or even smaller. However, Fukue et al. (2015) also implied the overall metallicity as well as abundance of each element used may affect the relation. To confirm this, we selected around 20000 APOGEE spectra and search for possible new line pairs in H-band.

Temperatures derived by LDR is consistent with those derived from APOGEE with scatter around 60 K. Both internal and external uncertainty are also consistent. Further inspect into the spectra discovered the lines are mostly saturated. This is also confirmed by synthetic spectra from MOOG, and may be the reason of effect by metallicity.

If time permitted and enough information is achieved, I will also introduce MOOG, the software used for generating synthetic spectra.

- 1 Fukue, K., Matsunaga, N., Yamamoto, R., et al. 2015, *apj*, 812, 64
- 2 Strassmeier K.G., Schordan P. 2000, *Astron. Nachr.*, 321, 277
- 3 Kovtyukh, V. V., Soubiran, C., Bienayme, O., Mishenina, T. V., Belik, S. I. 2006, *mnras*, 371, 879

太陽 a11 種族 II 候補の矮新星 OV Boo の観測的研究

大西隆平 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

矮新星とは、白色矮星を主星にもつ近接連星系である。伴星からの質量輸送によって主星の周囲に形成された降着円盤内の物質が、円盤内の熱的不安定性によって急激に主星に降着すると、突発的増光 (アウトバースト) が起こる。矮新星の中には、降着円盤内の物質の回転運動と伴星の軌道運動の共鳴によって引き起こされる潮汐不安定性が原因で、より大規模な増光であるスーパーアウトバーストを起こすものもある。OV Boo もまたスーパーアウトバーストを起こすだろうと考えられていた天体であるが、これまでその観測事例はなかった。

OV Boo は、静穏状態の測光観測と分光観測から、主に 2 つの点で他の矮新星とは異なる性質を持つことが知られている。1 つ目は、軌道周期 (66 分) が極めて短い点である。伴星の体積は周期が短いほど小さいという関係があり、OV Boo の質量比 (静穏状態の観測値 0.0647 ± 0.0018) [1] を考えると、伴星は高密度の天体でなければならない。2 つ目は、この天体が大きな固有速度を持つ点である。これは、宇宙初期に作られた星が多く存在する銀河ハローに起源を持つことを意味し、金属量の少ない種族 II の天体であることを示唆している [2]。他にそのような矮新星はほとんど見つかっておらず、連星進化を知る新たな手がかりとして注目されていた。

2017 年 3 月、OV Boo のスーパーアウトバーストが初めて捉えられた。これに対し、我々が主導する国際変光星ネットワークを通じた可視連続測光観測を行った。スーパーアウトバースト中の微小な光度変動の周期からも質量比を求める方法が知られており [3]、これを用いると質量比は 0.053 ± 0.001 であった。これは静穏状態の観測から求められた結果とは異なる。本講演では、この結果を踏まえて、スーパーアウトバーストの解析結果について議論する。

- 1 Savoury, C. D. J., et al. 2011, *it MNRAS*, 415, 3
- 2 Patterson, J., et al. 2008, *it PASP* 120, 510
- 3 Kato, T., & Osaki, Y. 2013, *it PASJ* 65, 50

太陽 b1 食を起こす SU UMa 型矮新星 HT Cas の観測的研究

若松恭行 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

矮新星とは、白色矮星の主星と伴星からなる近接連星系であり、伴星から輸送された物質が主星の周りに降着円盤を形成している。この降着円盤が熱的な不安定性により、突発的な増光 (アウトバースト) を起こす。さらに、矮新星の中には、アウトバーストよりも大規模な増光 (スーパーアウトバースト) を起こすものがあり、これらは SU UMa 型矮新星と呼ばれている。また、連星系を公転面方向から見る場合、伴星によって主星や円盤が隠される食を起こす矮新星となる。HT Cas は食を起こす SU UMa 型矮新星である [1]。

矮新星の質量比 (主星に対する伴星の質量の比) は、静穏時の食の観測から求められる。しかし、全ての矮新星が食を起こ

すわけではないので、それに代わる質量比推定法として、スーパーアウトバースト初期の観測的特徴を理論的に解釈した推定法が提案されている [2]。[2] の推定法の正当性を検証するには、これを、食を起す矮新星に適用し、両手法で推定した質量比を比較すればよい。しかし、スーパーアウトバーストが初期段階から捉えられている食を起す矮新星は 10 天体程度しかなく、[2] による推定法の検証は十分でない。

2017 年 1 月、HT Cas が 7 年ぶりにスーパーアウトバーストを起こした。我々は、我々のグループが主動する国際変光星ネットワーク VSNET を通じて共同観測を呼びかけ、国際的な可視連続測光観測を行った。その結果、スーパーアウトバーストを増光初期段階から捉えることに成功した。このデータに対して [2] の推定法を適用し、質量比を 0.171 ± 0.002 と得た。これは食から求められた質量比 0.15 ± 0.03 [3] と誤差の範囲内で一致した。これは [2] の推定法の正当性を示すだけでなく、[2] の推定法で用いられている理論の正確さを支持するものである。本講演では、これらの解析結果について紹介する。

- 1 Kato, T., et al. 2012, *itPASJ*, 64, 21
- 2 Kato, T., & Osaki, Y. 2013, *itPASJ*, 65, 115
- 3 Horne, K., et al. 1991, *itApJ*, 378, 271

太陽 b2 太陽フレアにおけるコロナ質量放出の統計的解析

河村聡人 (京都大学宇宙物理学教室 D3)

昨今の宇宙天気へのニーズの高まりもあり、太陽から惑星間空間へと噴出するコロナ質量放出 (CME) と呼ばれる現象は注目されている太陽現象のひとつである。太陽大気中でおこる大規模な磁気エネルギーの解放現象に伴う増光現象 (フレア) にはコロナ質量放出を伴うものも少なくない。このフレアとコロナ質量放出の関係の研究から、太陽活動のみならず惑星間空間の基礎的な理解も深まることが期待される。

フレアの理解において重要な観測値に X 線強度と黒点面積がある。太陽内部で蓄積された磁気エネルギーは磁束管として浮上し、光球にて黒点として現れ、その上空で解放される。この時に放出される X 線の強度は解放されたエネルギー量の指標とされる。黒点面積が大きいほど蓄積された磁気エネルギーは増え、X 線強度の上限が高くなることが知られている [1]。即ち、エネルギーの観点からフレアを理解するうえで X 線強度と黒点面積を指標として扱うことができる。

強いフレアほどコロナ質量放出を伴う割合が大きいことは既に知られている。コロナ質量放出の観測は SOHO 太陽観測衛星の LASCO 望遠鏡によって、人工日食を用いて行われおり、このような研究では主に太陽周縁部での現象を取り扱う。非常に強い (X クラス) フレアでは 8 割ほど、強い (M クラス) フレアでは 5 割ほどのケースでコロナ質量放出を伴うことが統計的解析により確認されている [2]。

今回、我々は 1996 年から 2007 年のデータをもとに、異なる

黒点面積や X 線強度において、フレア発生時のコロナ質量放出の発生確率を導出した。当解析は、黒点やコロナ質量放出の観測における位置依存性を統計的に評価したうえで行った。発表では、これら観測の特性とともにフレアとコロナ質量放出の関係性について統計的に議論する。

- 1 K. Shibata et al., *PASJ*, Vol.65, No.3, 49 (2003)
- 2 S. Yashiro et al., *JGR: Sp. Phys.*, Vol. 110, Issue A12, A12S05 (2005)

太陽 c1 すばる望遠鏡の近赤外分光装置 IRD による惑星サーベイに向けた、M 型矮星の組成解析 石川裕之 (国立天文台三鷹 M2)

国立天文台では 2018 秋から、すばる望遠鏡の新しい近赤外高分散分光装置 IRD を用いた、近傍 M 型矮星周りの惑星サーベイを計画している。この IRD サーベイを含め、世界中で複数の惑星探査計画が、M 型矮星を主なターゲットに選んでおり、これらの計画によって見つかる系外惑星の特徴や形成過程を議論するに当たって、中心星としての M 型矮星を詳しく理解することが重要である。しかし恒星パラメータの中でも特に化学組成の決定方法は、M 型矮星において確立されていない。これは M 型矮星の可視光スペクトルは分子の吸収が強いいため、より高温の星では有効だった可視光高分散スペクトルを用いた方法が適用できなかったためである。この問題は近赤外波長領域では軽減されるので、今後 IRD で取得できるような近赤外高分散スペクトルを用いて M 型矮星の化学組成を決める方法が有望である。

本講演の前半では、IRD データの解析に先立って行った、VLT の分光装置 CRIRES のアーカイブデータを用いた解析について報告する。IRD で取得される波長域では FeH 分子の吸収が顕著であることがわかったため、この吸収線の等価幅を 1 本ずつ測り、大気モデルとラインリストから計算したモデルスペクトルと比較した結果、これらの吸収線の温度依存性と大気モデルの問題を示唆する結果を得た。

本講演の後半では、今年 1 月に IRD を 20cm 望遠鏡に接続して行った試験観測データの一次処理について報告する。現在 IRD のデータに対し、主に IRAF を用いて最適な一次処理・解析方法を模索している段階にある。また、IRD は今年 5 月にすばる望遠鏡へのインストールを終え、6 月にはファーストライトを迎える予定である。

- 1 Kotani T. et al., *Proceedings of the SPIE*, 9147, 12 (2014)
- 2 Lindgren S. et al., *A&A* 586, A100 (2016)
- 3 Mann A. et al., *Astron. J.* 147, 160 (2014)

太陽 c2 全天 X 線監視装置 MAXI によって得られた RSCVn 型星のフレア発生頻度

佐々木亮 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M2)

星表面で起こるフレア現象はいつ起きるかわからない。発生の予測が困難な現象の観測には、サーベイ観測が有効である。MAXI は国際宇宙ステーションに搭載され、92 分で地球を 1 周し全天をサーベイする高感度全天 X 線モニター (Gas Slit State Camera:2 – 30 keV, Solid-state Slit Camera:0.5 – 12 keV) である。

この能力を用いて、我々は MAXI を用いて星フレアの無バイアスサーベイを行なった。7.25 年間で RSCVn (Algol) 型星 14 天体から 60 発のフレアを検出した。それらのフレアエネルギー (E) は $5e35 - 9e38$ erg であった。特にフレア星として知られる HR1099, Algol, II Peg, UX Ari, GT mus からは各々 5 – 16 発のフレアを検出した。

先行研究により、フレアの発生頻度 (N) は $N \propto E^{-\alpha}$ に従うことがわかっている。RS CVn 型星における冪は 0.6 と、太陽や M 型主系列星の冪と同程度である (Osten & Brown 1999)。我々は、これら 5 天体それぞれのフレア発生頻度分布を作成した。このような大きなエネルギーに対する天体毎の頻度分布の作成は、今回が初めての試みである。本研究の結果、II Peg, UX Ari の冪はそれぞれ 0.44, 0.63 と先行研究とよく一致した。一方で Algol, GT mus の冪は 1.10, 2.25 と先行研究に比べて急であることがわかった。HR1099 については、先行研究の冪に乗る成分 ($\alpha=0.55$) と、高エネルギー側で急激に落ち込む成分 ($\alpha=4.66$) があることを発見した。先行研究に比べて急な冪からは、その天体における最大フレアに近いエネルギーが MAXI で得られていることが示唆される。本講演では、これらの詳細な解釈について述べる。

太陽 c3 太陽の白色光フレアの統計的研究と恒星フレアとの比較

行方宏介 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

フレアは恒星表面で起こる爆発現象であり、突発的な増光が様々な波長帯で観測される。特に、可視連続光で観測されるフレアのことを白色光フレアという。近年、最大級の太陽フレアの 10 倍以上のエネルギーを持つスーパーフレアが、太陽型星 (G 型主系列星) において白色光フレアとして多数発見された。そして、統計的な研究により、太陽型星の白色光スーパーフレアのエネルギー (E) と継続時間 (t) の間の関係に $t \propto E^{0.39}$ という関係があることがわかった [1]。この冪乗則が、太陽フレアの硬 X 線 (6-12keV)[2]・軟 X 線の観測 ($t \propto E^{0.2-0.4}$)[3] と対応していることから、フレアのエネルギー解放過程において統一的な機構が示唆される (リコネクションによる磁気エネルギーの解放)。太陽型星スーパーフレアと太陽フレアと比較し、統一的に説明できることを観測的に示すには、この関係を太陽の「白色光」フレアでも検証することが必要である。今回、SDO 衛星の HMI(可視連続光) のデータを用いて約 50 個の白色光フレアの統計解析を行った。白色光フレアの放射は、先行研究をもとに 10,000K の黒体放射を仮定して計算した。その

結果、太陽の白色光フレアの冪乗則は、太陽型星スーパーフレア及び太陽の硬・軟 X 線での観測と矛盾しないことがわかった。一方で、太陽型星でのスーパーフレアの継続時間は、太陽フレアの冪乗則から外挿したものより、約一桁小さいということが分かった。本発表では、以上の結果の物理的解釈を行う。

- 1 Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, Y., et al. 2015, Earth, Planets, and Space, 67, 59
- 2 Veronig, A., Temmer, M., Hanslmeier, A., Otruba, W., and Messerotti, M. 2002, A&A, 382, 1070
- 3 Christe, S., Hannah, I.G., Krucker, S., McTiernan, J., and Lin, R.P. 2008, ApJ, 677, 1385-1394

太陽 c4 太陽フレアループ内のエネルギー輸送に対する電子-イオン 2 流体効果

横澤謙介 (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)

太陽フレアは太陽系最大級の爆発現象であり、宇宙の様々な環境における爆発現象の典型例としてこれまで幅広く研究されてきた。太陽フレアは磁気リコネクションという物理機構によってコロナの磁気エネルギーが突発的に解放され、熱伝導や高エネルギー電子によるエネルギー輸送によって下層大気が急加熱を受け爆発的に応答し、彩層蒸発という物理現象を引き起こす。このような太陽フレアの物理を理解する為、熱伝導や彩層蒸発の効果を考慮した磁気流体力学的 (MHD) シミュレーションが行われ (Yokoyama & Shibata 2001, Takasao et al. 2015 など)、その結果に基づいて太陽・恒星フレアの理論が発展してきた (Shibata & Yokoyama 2002)。こうした過去の太陽フレアのシミュレーション研究のほとんどは、電子とイオンが単一流体として運動し、両者の温度は常に等しくなる 1 流体近似が置かれている。しかし、実際のフレア現象では、コロナのガスは無衝突プラズマに近い状態であり、何らかの原因によりイオンが加熱されると、電子はイオンとの衝突を介して加熱されると考えられる。ここで注意すべき点は、イオンと電子が衝突して緩和する時間スケールはフレアの力学的な運動の時間スケールと同程度、あるいはそれよりも長い点である。すなわち、2 流体系では電子加熱はゆるやかに行われる為フレアのエネルギー輸送で重要な熱伝導フラックスも 1 流体近似の時に比べて小さくなる (Longcope & Bradshaw 2010)。そこで、我々は電子温度の時間発展を正しく取り扱うべく電子-イオンの 2 流体方程式に基づいてフレアの時間発展を再考する。本研究ではフレア領域の磁力線に沿ったプラズマの運動を追う為に数値拡散の少ないラグランジュスキームを用いた 1 次元 2 流体方程式を解き、太陽・恒星フレアを含む幅広いパラメータのシミュレーションを行った。本講演ではシミュレーション結果に基づき 2 流体効果の重要性について議論する。

- 1 Yokoyama, T., & Shibata, K. 2001, ApJ, 549, 1160
- 2 Shibata, K., & Yokoyama, T. 2002, ApJ, 577, 422

太陽 c5 大規模フレアと黒点の逆回転 長谷川隆祥 (宇宙科学研究所 M2)

太陽フレアは、コロナに磁力線の複雑さとして蓄えられたエネルギーが、磁気リコネクションによって急速に解放される現象である。しかし、観測からは光球面の磁場しかわからない上、エネルギーはコロナ中で散逸してしまうため、磁場のエネルギー状態を観測から直接評価することはできない。この評価のためには、磁気ヘリシティ (Berger & Field 1984) を用いるのが最適である。これは、磁力線の複雑さを定量化した、保存性の良い量で、エネルギー状態の代替となる。コロナ磁場のヘリシティも観測から直接求めることはできないが、光球磁場からコロナへのヘリシティ入射量を測定することで、磁場の活動性を探ることができる (Kusano et al. 2002)。この測定によって、フレアが [A]「ヘリシティが閾値を超えて発生」するものと、[B]「ヘリシティが飽和あるいは減少する過程で発生」するものがあることが分かった。これは、フレアにはエネルギー蓄積だけでなく、トリガーとなる機構が必要であることを示しているが、この機構は現在でも解明されていない。[B]に関しては、フレア前に逆極のヘリシティをもった構造が現れる場合がある (Park et al. 2010)。しかし、[課題] この逆極のヘリシティ入射の正体やフレアへの寄与を突き止めた例はほとんどない。我々は、[課題] について探るために、[B] のフレアを起こした活動領域を解析した。結果、フレア発生前に黒点が逆回転を始め、逆極のヘリシティを入射したことを発見した。そこでさらに、黒点の逆回転の原因と、フレアに対する影響を解析した。結果、磁気浮上に伴う磁場の結びつきの変化と浮上磁場の運動によって、黒点磁場が強くなじり直され、黒点の逆回転として現れたことがわかった。このねじれ構造では大きな電流が流れ、フレアの発生につながったと考えられる。黒点の回転とフレアとの関係を調べた例はあるが、本研究は、黒点の逆回転に伴う磁場のねじり直しがフレアに寄与していることを初めて解明した。

- 1 Berger, M. A., & Field, G. B., J. Fluid Mech., 147, 133 (1984)
- 2 Kusano, K., Maeshiro, T., Yokoyama, T., & Sakurai, T., ApJ, 577, 501 (2002)
- 3 Park, S.-H., Chae, J., Jing, J., Tan, C., & Wang, H., ApJ, 720, 1102 (2010)

太陽 c6 太陽観測衛星「ひので」を用いた光球磁束管形成過程の統計的研究 二宮翔太 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

太陽表面の光球では、黒点近傍の領域の数 kG(ガウス) 程度の磁場強度がある。一方、磁気的活動が活発ではない領域

(静穏領域) では、平均磁場強度は数 G 程度であるが、静穏領域の中に局所的に (100km 程度の大きさ) 磁場が強い磁束管 (1-2kG) が静穏領域内の至る所にあることが観測的に知られている ([1])。磁束管は、対流・磁場・輻射の相互作用によって形成される。こういった相互作用の素過程を理解することは、太陽物理学、天文学的に重要である。

磁束管形成のモデルは、数値計算によって明らかとなっている ([2])。分光観測によって視線方向のガスの速度が、偏光観測によって磁場の強度や方向が理解される。磁束管を偏光分光観測した主な例として、太陽観測衛星「ひので」での観測がある。「ひので」による高空間分解の偏光分光観測を用いて、磁束管形成の時間変化を観測し、磁束管の形成がモデル通りに起きていることが確認された ([3])。しかし、こうした観測は、選別されたごく一部の磁束管のみで解析が行われている。また、高空間分解の観測を用いた磁束管形成過程の統計的な解析は少ない。

本研究では「ひので」の偏光データを用いて、どの状態の磁束管が多いのかを統計的に解析することで、磁束管の状態分布が形成モデルの時間発展と整合しているかを検証する。解析を行った結果、磁場が強い磁束管は、対流の沈み込みで作られるという従来の磁束管形成モデルに当てはまる状態の磁束管が多く見つかった。一方で、上昇流が発生しているところに位置する 1kG 程度の磁場が強い磁束管も見られた。本講演では、この解析結果について考察する。

- 1 Stenflo, J. O. 1973, Sol.Phys., 32, 41.
- 2 Parker, E. N. 1978, ApJ, 221, 368.
- 3 Nagata, S., Tsuneta, S., Suematsu, Y., Ichimoto, K. et al. 2008, ApJ, 677, 145.

瀬田 益道 氏 (関西学院大学)

7月25日 17:00 - 18:00 B会場

「サブミリ波で探る分子雲の姿」

星間物質の中で、比較的密度が高く低温な領域は分子雲と呼ばれている。分子雲は星形成の母胎であり、活動銀河核においては燃料としても働くなど、天文学において重要な要素である。分子雲はダストとガスから成るが、主成分である水素分子は直接見る事が困難なため、一酸化炭素等のプローブを用いて、分子雲の分布や質量等が調べられてきた。分子雲の物理状態(温度や密度)や形成過程を調べるには、サブミリ波帯での観測が重要であるが、観測装置とサイトの問題で十分な観測が行われていない。近年の技術発展でサブミリ波帯の観測装置は実用域に入っている。ところが、観測サイトとしては、最良の環境と言われている ALMA サイトでさえ、満足な条件は得られていない。南極大陸の内陸部には寒冷な高地があり、水蒸気が少なく、地上で最良のサブミリ波観測サイトである。分子雲観測の基礎から、サブミリ波の重要性、南極でのサブミリ波帯観測計画までを紹介する。

井上 剛志 氏 (名古屋大学)

7月27日 13:00 - 14:00 B会場

「星間衝撃波の物理とその天文学的応用」

The interstellar medium (ISM) is an interesting astrophysical fluid where a lot of physical processes (such as radiative cooling/heating, compressibility, magnetic field and so on) play important role. In this seminar I shall start from the review of basics physical properties of the ISM and then discuss its dynamical evolution triggered by shock compression based on our recent MHD simulations. I shall particularly focus on the ISM evolution from warm neutral medium to cold HI cloud, cold HI cloud to molecular cloud, and molecular cloud to dense star forming filaments.

星間 a1 Planck・AKARI・IRAS 衛星による銀河系ダスト放射のモデル構築

西原智佳子 (名古屋大学、銀河進化学研究室 (研 M2))

我々の住む銀河系には固体微粒子 (ダスト) が多く存在している。ダストは炭素やケイ素化合物から成ると考えられているが、その詳細な組成や結晶の状態は分かっていない。本研究の目的は Planck・AKARI・IRAS 衛星の観測データから、ダスト放射の精密なモデルを構築し、ダストの詳細な性質を求めることである。また銀河系内のダスト放射によって隠されてしまう宇宙マイクロ波背景放射などの情報を得るためにも、ダスト放射の精密なモデル化は急務である。

本研究ではダストの中でも輻射場と熱平衡になり熱的放射をする large grain に着目した。そのエネルギースペクトル (SED) は $I_u \propto u^\eta B_u(T)$ (η は定数、 $B_u(T)$ は黒体放射の放射強度) で表される modified blackbody (MBB) で近似するのが現在の主流であるが、このモデルでダスト放射を正確に記述できるかは分かっていない。そこでダストの熱的放射の近似として MBB が本当に「良い」モデルなのかを判定することを目指した。そのためにダストの放射モデルを $I_u \propto u^\eta B_u(T)$ とし、MBB: $\eta = \eta_0$ 及び 新モデル: $\eta = \eta_1 + \eta_2 \log u$ (ただし η_0, η_1, η_2 は定数) の 2 つを考え、どちらの方が「良い」モデルかを検証した。モデルの「良さ」は赤池の情報量規準 (AIC) を用いて判断している。また、ダストの密度による SED の違いを考慮するために 353 GHz での光学的深さで全天を分類して SED フィッティングを行った。その結果から η に u の依存性が入ったモデルの方が「良い」モデルであるという示唆が得られた。本講演では観測データの処理や、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) を用いた SED フィッティングの方法、考察なども含めた研究内容と今後の展望について述べる。

- 1 Akaike, H, IEEE Transaction on Automatic Control 19(6): 716-723 (1974)

星間 a2 偏波観測で見る、NGC1333 領域の磁場構造と星形成、及びフィラメント構造との関係性

金盛祥大 (東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系 M1)

ペルセウス座の中に位置する NGC1333 領域は、太陽系近傍で最も活発に星形成が行われている領域の一つである。Hacar et al.(2016) は、この領域 (N_2H^+) 分子輝線の観測から、空間分布及び視線速度の情報を基に 14 個のフィラメントの三次元構造を決定し、さらに、その構造中に 50 個の星形成コアの候補天体を同定した。加えて、この領域内では、9 個の IRAS 天体 (Jennings et al.1987)、277 個もの YSO (Rebull 2015) が観測されており、YSO の年齢分布から、領域北部から南部に向かって星形成活動の中心が推移している様子が見られている。

以上から、NGC1333 領域には多数のフィラメントが存在し、付随する YSO や内部での星形成活動が確認できる。従ってこの領域から、フィラメント構造と星形成の関係性を、分子雲のスケールで観測的に理解することができると期待できる。

一般に、フィラメント構造の形成と維持には、星間磁場が強く関係していると考えられている。しかし、この NGC1333 領域における磁場の分布はよくわかっていない。

そこで、我々は NGC1333 領域の磁場構造を、サブミリ波の偏波観測を通してより明らかにすることを計画している (BISTRO:B-fields In STar forming RegiOns; Ward-Thompson et al.,2017)。NGC1333 領域の観測は早ければ 8 月の後半に行われる。この領域内の磁場は大局的にはフィラメント構造と垂直に分布すると期待されるが、領域内で視線方向に重なり合い、あるいは相互に衝突するフィラメントの内部では磁場はより複雑な分布を示すと考えられる。また、フィラメント内で形成された星からの輻射や、特に領域内で複数観測される原始星からの双極流によっても、磁場構造は大きく影響を受けると考えられる。これらの相互作用を領域全体に亘り解析することで、磁場が星形成及び星形成前後のフィラメントに与える影響を、分子雲スケールで明らかにすることができると期待される。

今回の講演では、NGC1333 領域のこれまでの観測から分かることを踏まえたうえで、われわれの観測により明確になると期待される、フィラメント構造と磁場の相関、及び磁場と星形成活動との相互作用について議論する。

- 1 Hacar et al. arXiv:1703.07029 (2017)
- 2 Bieging et al. APJS Vol226 Issue 1, article id. 13, 24 pp. (2016)
- 3 Walawender et al. Handbook of Star Forming Regions, Volume I: The Northern Sky ASP Monograph Publications, Vol. 4, p.346 (2008)

星間 a3 銀河系中心領域における Molecular-bubble 候補天体の検出

辻本志保 (慶應義塾大学 M2)

銀河系中心核から数百パーセクにわたって広がる Central Molecular Zone (CMZ) と呼ばれる領域は、高温高密度な分子ガスが集中する特異な領域である。CMZ 内のガスは非常に複雑な運動状態にあり、広い速度幅を持っている。CMZ の広域マッピング観測によって、特に $l = -1.3^\circ, 0^\circ, -0.4^\circ, -1.2^\circ$ においては CO $J=3-2/J=1-0$ 輝線強度比が極だつて高いことが明らかになっている (e.g., Oka et al. 2012)。中でも $l = +1.3^\circ$ 領域は非常に大きな運動エネルギーを伴う多重シェル構造を有し、それらの高速度端には SiO 輝線で明るいクランプが確認されている。このことから、同領域には分子雲中に深く埋もれた大質量星団が存在し、複数回の超新星爆発によって superbubble を形成する過程にあるものと解釈されてい

る (Tanaka et al. 2007)。

この $L = +1.3^\circ$ 領域と対称的な位置にある $L = -1.2^\circ$ 領域については、その高い輝線強度比に加えて、シェル構造の存在など、 $L = +1.3^\circ$ 領域との類似性が報告されていた。今回、私たちは JCMT 及び野辺山 45m 望遠鏡で取得した CO, CS 輝線データを解析し、 $L = -1.2^\circ$ 領域に新たに 4 つの膨張シェルを検出した。これらのシェルは 10^{52} 程度の運動エネルギーを持ち、その年齢は 10^5 年程度と評価できた。この運動エネルギーは数十～数百回の超新星爆発に相当し、 $10^{5-6} M_\odot$ の星団の存在を示唆するものであった。またこれらのシェルの年齢は西から東に向けて若くなっており、分子ガスと星団が異なる速度で運動していると考えられた。本講演では $L = -1.2^\circ$ 領域の多重膨張シェルの物理状態及び起源について議論する。

- 1 T., Oka, et al. ApJS, 118, 455 (1998)
- 2 T., Oka, et al. ApJS, 201, 14 (2012)
- 3 K., Tanaka, et al. PASJ, 59, 323 (2007)

星間 a4 脈動型変光星の偏光観測による銀河系中心方向の磁場構造解析 善光哲哉 (京都大学宇宙物理学教室 D1)

星間磁場は星間物質と密接に関わっている。例えば、星形成において磁場は、物質の流入を促進したり阻害する。また、銀河間の重力的な相互作用により、非対称アウトフローやガス圧縮によって銀河の構造が変化すると、合わせて磁場構造も変化すると考えられる。そのため、磁場構造の理解が銀河の構造形成史に関係してくる。しかし、磁場は理論的にも観測的にも十分に調べられていない。星間偏光は、磁場によって整列した非球形なダストに星の光が当たると、選択的吸収を受けて生じる。そのため、星間偏光は星間磁場の方向を求める有力な観測方法である。星間偏光によって磁場構造を調べる上で 1 番の問題になっているのが、距離の関数として偏光が求まらないことである。特に銀河系中心方向はダストの減光が強いため、可視光で年周視差を求める位置天文衛星ガイアですら調べることはできない。今回我々は、ダストの減光を強く受けない近赤外で、脈動型変光星の偏光観測を行った。脈動型変光星は、周期光度関係と減光則を使うことで距離が求められる。これを利用して、銀河系中心方向の磁場構造について調べた。今回の発表は、昨年度南アフリカのサザーランド観測所にある 1.4m 望遠鏡 IRSF で行った観測結果について話す。観測を行った 21 個の古典セファイドは D'ek'any et al.(2015) で発見されたものである。これらは銀経 ± 10 度、銀緯 ± 1 度以内に存在する。観測を行った領域には渦状腕があり、その磁場を反映した偏光が見られると考えられた。しかし、1 部の領域は銀河面に対して大きく傾いた磁場構造が見られた。それらについての議論を行う。

- 1 D'ek'any et al. 2015, ApJL, 812, L29
- 2 Matsunaga et al. 2016, MNRAS, 462, 414

3 Pavel, M. D. 2014, AJ, 148, 49

星間 a5 High-mass star formation in Orion possibly triggered by Cloud-Cloud Collision 堤大陸 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M2)

太陽質量の 8 倍を超える大質量星は星間空間へ重元素やエネルギーを供給し銀河の進化に大きく影響するため、その形成を理解することは非常に重要である。大質量星の形成には、小質量星の場合と比較しておよそ 100 倍程度の質量降着率 ($10^{-4} - 10^{-3} M_\odot \text{yr}^{-1}$) が必要とされる。これを実現する方法として連鎖的な星形成の理論が考えられてきた。これらの理論は、一度できた星によるフィードバックによって次世代の大質量星が作られるというものであるが、近年の数値計算でそのフィードバックは必ずしも星形成 (効) 率を上げないことが指摘された。

一方で、大質量星の形成機構として分子雲衝突 (Cloud - Cloud Collision ; CCC) モデルが注目されている。これは、2 つの分子雲の超音速衝突によるガス圧縮によって質量降着率が大幅に上昇し大質量星が形成されるモデルであり、これまでに観測的な検証が進んでいる (e.g., Fukui et al. 2014)。そこで我々は、典型的な連鎖的な星形成領域である Orion 領域に着目した。この領域では M42 / M43 (以降 Ori A)、NGC2023 / NGC2024 (以降 Ori BS)、NGC2068 / NGC2071 (以降 Ori BN) で大質量星が形成されている。これまでに Ori A や Ori BS では CCC が大質量星形成をトリガーした可能性が観測的に示されている (Fukui et al. 2017 ; Ohama et al. 2017 in prep)。

本研究では Ori BN でも CCC が大質量星形成をトリガーしたのかを検証するため、これらの星団に付随する分子雲全体をカバーする観測を NANTEN2 で行った。その $\text{CO}(J_m = 2 - 1)$ の観測データを用いて速度ごとの空間構造の解析を行い、 8.25 km s^{-1} と 11.5 km s^{-1} の異なる速度を持つ 2 つの分子雲を同定し、位置関係からそれぞれが NGC2068 と NGC2071 に付随していると考えた。この 2 つの分子雲は空間的に型を抜いたような相補的な分布を示し、さらに両者を繋ぐ速度成分も発見された。この結果は、Ori A や Ori BS で見られた特徴と一致している。さらに衝突のタイムスケールと星の年齢もおおむね一致しており、この Ori BN でも CCC が星形成をトリガーしたと考えて矛盾しない。以上の結果を踏まえて、本講演では Orion 領域全体の CCC による大質量星形成について論じる。

- 1 Fukui et al 2014, ApJ, 780, 36
- 2 Fukui et al. 2017, arXiv:1701.04669

星間 a6 複合 H_{II} 領域 Sh 254 - 258 における分子雲衝突による大質量星形成

佐伯駿 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

太陽の 8 倍以上の質量を持つ大質量星は超新星爆発を通して周囲の星間空間に影響を与えているため、大質量星の誕生や死を理解することは銀河の進化を知る上で非常に重要な要素であるが、この大質量星の形成のメカニズムは未だ十分には解明されていない。大質量星形成の問題の一つとして大きな質量降着率が必要となることが挙げられる。現在提案されている自発的な形成モデルとして core accretion と competitive accretion の 2 つの理論モデルが存在し、どちらも非常に高密度なコアを初期条件としている。一方で、近年分子雲同士の衝突が大質量星形成で大きな役割を果たしていることが観測的にわかってきた。

複合 H_{II} 領域 Sh2 - 254, Sh2 - 255, Sh2 - 256, Sh2 - 257, Sh2 - 258 は約 10 pc の範囲に 5 つの H_{II} 領域が存在する活発な星形成領域である。それぞれの H_{II} 領域は B1 型、O9.5 型、B0.9 型、B0.5 型、B1.5 型のスペクトル型を持つ大質量星を有している。また隣接した H_{II} 領域である Sh2 - 255 と Sh2 - 257 に挟まれた領域では、分子ガスが多く存在し、現在星形成が進行している。以上のような特徴的な描像を示すため、古くから関心を持たれている。

今回我々は Submillimeter Telescope (SMT) ¹²CO ($J = 2 - 1$) 輝線、Five College Radio Astronomy Observatory (FCRAO) ¹²CO ($J = 1 - 0$) 輝線を用いて複合 H_{II} 領域に付随する巨大分子雲ガスの速度構造の詳細な検証を行い、両方の輝線において異なる視線速度の 2 つの分子雲を発見した。2 つの分子雲の空間的な分布の比較を行い相補的な構造を発見した。また 2 つの分子雲の空間的距離と速度の差から衝突したタイムスケールと大質量星の年齢が一致することから衝突によって形成されたと考えられる。

- 1 Torii, K., et al. 2015, ApJ, 806, 7
- 2 LUIS, A., CHAVARRIA, et al. 2008, ApJ, 682, 445
- 3 JOHN, H., BIEGING, et al. 2009, ApJ, 138, 975

星間 a7 電波観測で探る大質量星形成領域 Orion KL の化学組成

源治弥 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

オリオン座の Kleinmann-Low 領域 (以下 "Orion KL") はオリオン大星雲内に位置する大質量星形成領域である。太陽系から最も近い (距離 418 ± 6 pc; Kim et al. 2008) 大質量星形成領域であり、これまで近赤外線からミリ波まで様々な波長域で dust や gas の観測がなされてきた。

Orion KL では、先行研究により Hot core, Compact ridge 等といった複数の領域が発見されており、それぞれの領域によって存在する分子種やその物理状態が異なることが指摘されている。例えば N を含む分子は Hot core、O を含む分子は Com-

pact ridge に多く存在する傾向が見られる。しかし存在量が少ない有機分子については、観測技術の限界のため分子雲内の化学的性質が依然として明らかになっていなかった。それらの分布や物理状態を探るためには電波による高感度、高解像度での観測が必要である。

これまで Orion KL においては、単一鏡と干渉計のどちらか単独のみの電波観測は多く行われてきた。しかしそれぞれの望遠鏡の特性により、観測で得られるデータに制限があった。単一鏡観測の場合は空間分解能に制限があるため、多くの分子の空間分布を分解することが難しい。一方干渉計は小さな構造の観測には適しているが、空間的に広がった構造を検出することはできない。また従来の電波干渉計では感度が不足するため、存在量が少ない分子を同定することも困難であった。

今回紹介する論文では、干渉計である Submillimeter Array(SMA) と単一鏡 IRAM 30m 望遠鏡の観測データを合わせて用いることで、様々な空間スケールの構造について解析を行っている。その結果 dust の詳細な空間構造及び輝度温度の低い複雑な有機分子 (e.g., CH₃COCH₃, CH₃CH₂OH) の分布が明らかになった。本講演ではその結果をレビューするとともに、最新の電波望遠鏡である ALMA 望遠鏡を用いた自身の研究計画についても述べる。ALMA 望遠鏡では従来よりも高感度かつ高解像度の観測が可能になるため、天体の化学構造に関する理解がより深まると期待される。

- 1 Feng, S., Beuther, H., Henning, Th., et al. 2015, A&A, 581, 71
- 2 Kim, M. K., Hirota, T., Homma, M., et al. 2008, PASJ, 60, 991

星間 a8 Chandra 衛星による超新星残骸 RX J1713.7-3946 の非熱的放射の空間分布観測 奥野智行 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

RX J1713.7-3946 (以下、RX J1713) は、年齢が ~ 2000 年と推定されている若い超新星残骸であり、TeV ガンマ線で明るく輝くことから、宇宙線加速の研究において最も注目を浴びている天体の一つである。X 線帯域では、熱的放射はほとんど見えず、TeV 程度のエネルギーにまで加速された電子からのシンクロトロン放射が支配的であるという特徴を持つ。超新星残骸の衝撃波における粒子加速を研究する上で、シンクロトロン X 線放射の空間分布や場所ごとのスペクトルの違いを調べることは、衝撃波周辺の磁場強度や電子の最高加速エネルギー、さらには、分子雲との相互作用を明らかにするための有効な手段である。Kishishita et al.(2013) は、RX J1713 と似た SNR である Vela Jr. の北西部を衝撃波面に沿って内側に層状の領域に分けてスペクトルの解析を行っている。その結果、衝撃波面に近づくほどスペクトルが硬くなり、磁場や電子の最高加速エネルギーに依存する X 線シンクロトロン放射のカットオフエネルギーが大きくなることを示した [1]。同様

の手法を RX J1713 にも用いることで、磁場や電子の最高加速エネルギーの空間依存性が得られることが期待できる。また、Sano et al.(2015) は、RX J1713 の北西部の観測でスペクトルの光子指数の空間分布を、分子雲の分布と比較することにより、磁場が分子雲との相互作用によって増幅されていることを示唆した [2]。しかし、この解析は「すざく」衛星を用いており、2 arcmin 以上の構造にとどまる。そこで我々は ~ 0.5 arcsec の空間分解能を持つ Chandra 衛星を用いて、さらに細かい領域に分けてスペクトル解析を行った。本発表では、その結果について報告し、上で述べた先行研究との比較・検討を行う。

- 1 Kishishita, T., Hiraga, J., & Uchiyama, Y. 2013, A&A, 551, A132
- 2 Sano, H., Fukuda, T., Yoshiike, S., et al. 2015, ApJ, 799, 175

星間 a9 超新星残骸 IC 443 のスペクトルの空間構造の探査

平山ありさ (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

超新星残骸は質量の大きな星が進化の最後を起こす大爆発によって形成される天体である。超新星残骸は観測される形態によって分類され、その中でも X 線で中心集中、電波でシェルのように見える形態を複合形態型と呼ぶ。複合形態型の超新星残骸からは熱的な X 線放射が観測され、どうして中心集中する熱的な放射を持つのか分かっていない。また、複合形態型の中には過電離プラズマという特異なプラズマを持つ超新星残骸が発見されている。このプラズマは他の形態では見られないため、複合形態型の形成シナリオを解く鍵になると考えられる。

今回解析を行った超新星残骸 IC 443 は、先行研究より複合形態型で過電離プラズマを持つことが知られている。不規則な形態をした IC 443 のプラズマを空間分割して調べることは、複合形態型や過電離プラズマの形成過程を解明する手がかりになるだろう。

IC 443 はすざく衛星によって北東、北西、南東の 3 カ所の観測が行われている。周囲の物質の分布に照らし合わせて分割し、各領域のスペクトルの解析を行った。ここでは特に 5 keV 以上のバンドに注目した解析結果を報告する。先行研究でも見られていた 6.68 keV と 6.97 keV の鉄輝線は熱的プラズマ起源のため、熱的放射をする超新星残骸ではよく観測される。6.68 keV はどの領域でも検出され、北側で特に強い放射を持つことが分かった。6.97 keV の輝線は西側以外では検出された。加えて 6.4 keV に中心エネルギーをもつ中性鉄輝線が IC 443 では初めて発見された。この輝線は熱的プラズマ以外の起源をもち、周囲の物質の影響と考えられる。6.4 keV は北側と西側で検出されたが南側では見られなかったため、局所的な放射をしていることが分かった。そこで、IC 443 の周りにある分子雲やダストの分布と 6.4 keV の検出域の比較を行い、中性の冷たい鉄とプラズマ中で電離した鉄からの輝線放射の起源について議

論する。

- 1 H. Yamaguchi et al. The Astrophysical Journal, 705 (2009)
- 2 T. Ohnishi et al. The Astrophysical Journal, 784 (2014)

星間 a10 X 線天文衛星「すざく」による超新星残骸 Sgr A East の過電離プラズマの探査 小野彰子 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

複合形態型 (MM) 超新星残骸 (SNR) に見られる中心集中した X 線放射は、高温の電離気体 (プラズマ) からの熱的放射であるが、どのように形成されたのか未だ詳しく解明されていない。SNR のプラズマは、通常、電離優勢状態から電離平衡状態へと進化する。しかしながら MM SNR にだけ、電離よりも再結合が優勢な再結合優勢プラズマ (RP) という、通常は見られない特殊なプラズマが発見されている。この MM SNR に見られる RP の形成過程を解明することが課題となっており、これは MM SNR の進化過程を解明することにつながる。Sgr A East は銀河中心 (GC) 領域に位置する、爆発して数千年程度の比較的若い MM SNR である。そのスペクトルには年齢から期待されるよりも高階電離した鉄からの輝線が見つかり、再結合優勢プラズマを持つ可能性を示している。また、Sgr A East は GC 領域という高温・高密度・強磁場の特異な環境や、超巨大ブラックホール Sgr A* との相互作用も示唆されており、周囲の環境が Sgr A East の進化過程に影響を与えていると考えられる。本研究は、Sgr A East のプラズマ状態とその形成過程を明らかにすることを目的とし、「すざく」アーカイブデータを用いて Sgr A East のスペクトル解析を行った。スペクトルの光子統計を上げるため解析可能なデータを積算し、Sgr A East の主なバックグラウンド (BGD) となる銀河中心 X 線放射 (GCXE) を丁寧に評価した。Sgr A East のスペクトル解析の結果、Sgr A East の放射から、RP に特有の放射性再結合連続 X 線 (RRC) を発見し、Sgr A East が RP をもつ SNR であるということを明らかにした。また、低電離鉄からの 6.4 keV 輝線を初めて発見した。Cr、Mn の元素組成比が太陽組成比より大きいという兆候も見られた。講演では、Sgr A East のスペクトル解析の結果から RP の発見について、さらに、考えられる Sgr A East のプラズマの形成過程について報告する。

- 1 K. Koyama et al, Publ. Astron. Soc. Japan, 59 (2007)
- 2 Y. Maeda et al, The Astrophysical Journal, 570 (2002)
- 3 H. Uchiyama et al, Publ. Astron. Soc. Japan 65 (2013)

星間 a11 特性 X 線のドップラー広がりを利用した Kepler 超新星残骸の膨張速度測定 春日知明 (東京大学 馬場・中澤研究室 M1)

Ia 型超新星は爆発時の白色矮星質量が $1.4 M_{\odot}$ にそろうため最大光度が一定とされ、距離の指標としても使われてきた。

しかし近年の研究で、超新星は天体ごとに構造が様々であることが分かってきており、その爆発過程がみな同じだとは考えにくい。親星の核融合で生成された元素が超新星爆発の残骸 (Supernova Remnant; SNR) の中でどのように膨張しているか調べることは、爆発の構造を知る手がかりとなる。膨張速度はスペクトル中の輝線のドップラー広がりから推定できる。SNR の膨張により、我々に近づく成分からの放射は青方偏移を受け、遠ざかる成分からの放射は赤方偏移を受ける。SNR 中央で視線方向の速度差は最大になるので、中央ほど輝線が広がると期待され、その幅から SNR の膨張速度を推定できる。典型的な Ia 型 SNR として知られる “Tycho” では Fe よりも Si の膨張速度が速いことが分かり、爆発が球対称的であり、星の中の核融合で作られた重元素の「玉ねぎ構造」が現在も保たれていることが示唆された [1]。

Kepler も Tycho と同程度の年齢の Ia 型超新星であるが、SNR の熱的プラズマの解析から、重元素量が Ia 型の典型量より有意に多く [2]、Fe の比率が高い [3] などの特異性がある。したがって Kepler は Tycho とは異なる構造を持つ可能性がある。

そこで我々は X 線衛星「すざく」による Kepler 観測の公開データを解析し、輝線の広がりから元素ごとの膨張速度を推定した。我々の注目する元素の K 輝線は X 線帯域に存在する。「すざく」は同世代の X 線衛星に比べて広帯域にわたりエネルギー決定精度が高く、輝線幅を細かく議論する本研究に適している。今回は 2008 年 2 月に行われた exposure 117 ksec の観測を用い、X 線 CCD カメラ XIS で撮像された Kepler の領域を同心円状に区切りスペクトルを得た。そのうち Si の K 輝線 (~ 1.8 keV) と Fe の K 輝線 (~ 6.4 keV) を評価した。その結果いずれの輝線も SNR 中央ほど広がっている傾向が見られた。得られた膨張速度は、系統誤差の推定が不十分であるものの、Si と Fe で同程度であった。

- 1 Hayato, A., Yamaguchi, H., Tamagawa, T., et al. 2010, ApJ, 725, 894
- 2 Park, S., Badenes, C., Mori, K., et al. 2013, ApJL, 767, L10
- 3 Katsuda, S., Mori, K., Maeda, K., et al. 2015, ApJ, 808, 49

星間 b1 特異電波天体 Tornado と相互作用する分子雲の観測的研究

田邊恭介 (慶應義塾大学 M1)

Tornado(G357.7-0.1) とは、連続波で見ると竜巻状の形態を示し、明るいヘッドと暗いテールの構造をもつという銀河系内でも特異な天体である。その起源については種々の説が提唱され長らく不明であったが、近年、X 線観測によって双極構造であることが明らかにされたことから、中心コンパクト天体からの宇宙ジェットによって形成されたとする説が有力になった。

さらに、 $^{13}\text{CO} J=1-0$ 輝線観測と 1720 MHz OH メーザーの分析によって、Tornado の領域に -14kms^{-1} 雲と $+5\text{kms}^{-1}$ 雲という速度の異なる二つの分子雲が確認された。これらと OH メーザーとの対応から、二つの分子雲同士の衝突を発端として宇宙ジェットが生じ Tornado 形成に至ったとする「分子雲衝突仮説」が提唱された。なお、OH メーザーは分子雲が他天体と衝突などの激しい相互作用をした痕跡と考えられている。

本研究では、1720 MHz OH メーザーの VLA アーカイブデータを解析するとともに、 $^{13}\text{CO} J=1-0$ 輝線観測データと照合することで分子雲の運動をより詳細に議論し、分子雲衝突仮説の整合性を検証した。以上の解析と、速度チャンネル図及び位置速度図による議論の結果、次のような結論を得た。OH メーザーは Tornado 領域内に空間的に拡散して分布しており、Tornado の連続波で特に明るい領域 (コア) に広い速度範囲で分布していることを確認した。また、OH メーザーと ^{13}CO のクランプの分布は、空間的にも速度的にも非常によく対応していた。この対応から、 -14kms^{-1} 雲と $+5\text{kms}^{-1}$ 雲は Tornado と相互作用していることを再確認した。これらから、Tornado と分子雲の相互作用の中心は、Tornado のコアであったと考えられる。また、二つの分子雲の空間的分布が、Tornado のコア付近で非常によく反相関していることを再確認した。以上の特徴から、本研究では分子雲衝突仮説を支持する。

- 1 D. Sakai et al. ApJ 791 49 (2014)
- 2 M. Sawada et al. PASJ 63 S849 (2011)
- 3 D. A. Frail et al. AJ 111 1651F (1996)

星間 b2 VERA を用いた H_2O 359.616-0.248 の距離測定

加藤榛華 (慶應義塾大学 M1)

銀河系の中心核から数百 pc にわたって、星の強い集中と大量の星間物質によって特徴づけられる特異な領域がある。この領域は銀河系中心分子層 (Central Molecular Zone; CMZ) と呼ばれ、CMZ 内のガスは銀河系円盤部に比べて高温・高密度・広速度幅という特徴を持つ。CMZ 内には極めて広い速度幅 ($\Delta V > 50\text{kms}^{-1}$) を持つ空間的にコンパクト ($d < 5$ pc) な分子雲である高速度コンパクト雲 (High-velocity Compact Cloud; HVCC) が多数発見されている [1]。代表的な HVCC の一つに CO-0.40-0.22 があり、これはこれまでに発見された HVCC の中でも特に速度幅が広く ($\Delta V \sim 100\text{kms}^{-1}$)、高い CO $J=3-2/J=1-0$ 輝線強度比を示す。我々の研究グループによる詳細な分子スペクトル線観測から、CO-0.40-0.22 は $10^5 M_\odot$ の中質量ブラックホールによる重力散乱起源と解釈されている [2]。しかし、同方向には $V_{\text{LSR}} = +20\text{kms}^{-1}$ の速度に別の分子雲が重なっており、CO-0.40-0.22 と $+20\text{kms}^{-1}$ 分子雲は分子雲衝突をして広い速度幅を形成した可能性がある。我々は $+20\text{kms}^{-1}$ 分子雲内にあるメーザー源 H_2O 359.616-0.248 の距離を測定し、CO-0.40-0.22 と物理的関係があるの

かどうか調べた。

超長基線電波干渉計 VERA を用いて 2015 年 11 月から約 1 年間 H_2O 359.616–0.248 を観測し、距離と固有運動を測定した。その結果、年周視差は $pi = 0.33 \pm 0.14$ mas となり、太陽系からの距離は $r = 3.07_{-0.91}^{+2.22}$ kpc と求められた [3]。銀河系中心までの距離は約 8 kpc であるため、 $+20\text{kms}^{-1}$ 分子雲は CMZ よりも手前にあることが分かり、これらは物理的関係はないと考えられる。したがって CO–0.40–0.22 が分子雲衝突起源であることを棄却でき、中質量ブラックホールによる重力散乱起源がより確からしいものとなった。

- 1 Oka, T., Hasegawa, T., Sato, F., Tsuboi, M., & Miyazaki, A. ApJS, 118, 455 (1998)
- 2 Oka, T., Mizuno, R., Miura, K., & Takekawa, S. ApJL, 816, L7 (2016)
- 3 Iwata, Y., Kato, H., Sakai, D., & Oka, T. ApJ, 840, 18 (2017)

星間 b3 MHD 数値計算から探る銀河系中心領域における磁気活動

柿内健佑 (東京大学 鈴木・蜂巢研究室 D1)

銀河系中心領域における分子雲には銀河回転に沿った回転速度成分だけでは説明できないような複雑な速度構造を内包されていることが観測から分かっている。しかし、この速度構造についてのメカニズムや形成過程については未だ明らかにされていない。そこで我々が注目しているのが、これまであまり議論されてこなかった銀河系中心領域における磁気活動の影響である。銀河系中心近傍数 100pc 以内における磁場強度は局所的に 0.1–1mG (Yusef-Zadeh et al. 1984), 大局的に少なくとも $50\mu\text{G}$ 以上であると観測的に示唆されている (Crocker et al. 2010)。この値は平均的な星間磁場強度の数 μG を大きく上回り、十分に磁気活動が星間ガスの力学構造に影響を与えたと考えられる。これを理論的に検証するために、Suzuki et al.(2015) は銀河系中心領域における磁気流体の 3 次元グローバル計算を行った。

本研究ではこの数値計算結果を用いて、Suzuki et al.(2015) では未解析であった鉛直方向の運動、特に磁場の鉛直構造に沿って落下するガスの下降流について詳細な解析を行い、鉛直方向のガス運動が観測的な速度構造に与える影響について調べた。銀河系中心から数 100pc 離れた位置では、磁力線の滑り台構造に沿ってガスが上空から銀河面に向かうに従って重力エネルギーを解放することで、下降流の速度が約 100 km s^{-1} 程度まで加速する。本研究は、実際の分子雲中においても磁気活動によってガスの鉛直方向へ運動が励起され、複雑な速度構造の一因となりうることを示すものである。本講演では、主に鉛直構造に焦点を当て、磁気活動と速度構造との関連性について議論する。

- 1 Suzuki, T. K., Fukui, Y., Torii, K., Machida, M., &

Matsumoto, R. 2015, MNRAS, 454, 3049

- 2 Yusef-Zadeh, F., Morris, M., & Chance, D. 1984, Nature, 310, 557
- 3 Crocker, R. M., Jones, D. I., Melia, F., Ott, J., & Protheroe, R. J. 2010, Nature, 463, 65

星間 c1 ミリ波帯におけるダスト偏光の研究 梨本真志 (東北大学天文学専攻 D1)

原始重力波起源である宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) B モード偏光の観測によってインフレーションモデルの立証を目指し、世界中の研究機関がしのぎを削っている。観測対象の信号は非常に微弱なため、前景放射であるダスト熱放射と CMB を精度良く分離することが必要だ。その実現のために、ダストの物性に基づいた放射強度や偏光を考えることが重要となる。本研究ではダスト偏光度の周波数依存性に注目し、ダスト物性に基づいた偏光モデルの構築と、観測データとの比較によってダストの物性に対して新たな知見を得ることを目指す。

ミリ波帯での楕円体ダストによる放射強度はダストの複素誘電率の実部と虚部の両方に依存するが、偏光度は実部にしか依らないことを示した。この結果は、観測される放射強度と偏光度の周波数依存性はダスト複素誘電率の周波数依存性に依存していることを意味する。本講演では様々なダストの物性に対してダストの吸収効率や偏光度を計算した結果について紹介する。またこの結果をもとに、ダストの物性について議論する。

星間 c2 大質量星形成領域 Sgr B2 における分子雲衝突の痕跡

渋谷幸大 (慶應義塾大学大学院 理工学研究科 基礎理工学専攻 物理学専修 岡研究室 M1)

恒星は、星間分子雲中でガスが重力収縮することで誕生する。中小質量星の形成過程については現在までに理解が大きく進んできたが、大質量星の形成過程については未だ十分な理解が得られていない。一般に大質量星は集団で誕生すると考えられており、そのような大質量星を含む巨大な星団を形成するメカニズムとして、分子雲同士の衝突過程が近年注目されてきている。銀河系の中心核から約 120 pc の位置にある電波源 Sgr B2 は、分子雲衝突による星形成誘引が起きたとされる活動的な大質量星形成領域の一つである。長谷川ら (1994) による先行研究によれば、Sgr B2 周辺の分子雲内に三つの特徴的な構造 (Shell, Hole, Clump) があり、これらの相補的空間構造は分子雲衝突に起因するものと解釈された。しかしながら、先行研究は一酸化炭素 (^{13}CO) の $J=1-0$ 回転遷移スペクトル線データのみによっており、分子ガス分布の形態と運動以外の証拠は提示されていない。

本研究では、近年取得されたミリ波サブミリ波分子スペクトル線データを総合して、先行研究で見出された分子雲衝突の痕跡を再確認するとともに、物理状態・化学組成を反映するスペクトル輝線強度比に新たな痕跡についての調査を行っ

た。使用したデータは、野辺山 45m 電波望遠鏡、JCMT 望遠鏡、Mopra 望遠鏡によって取得された 5 種類の分子スペクトル線 CO $J=1-0$, $^{13}\text{CO } J=1-0$, CO $J=3-2$, $\text{N}_2\text{H}^+ J=1-0$, SiO $J=2-1$ のデータである。まず、CO $J=1-0$, $^{13}\text{CO } J=1-0$ データにおいては、先行研究で発見された特徴的構造を再確認した。さらに、CO $J=3-2/J=1-0$, $\text{N}_2\text{H}^+/^{13}\text{CO}$, SiO/ ^{13}CO 強度比の分析から、Clump 周囲において密度・温度上昇と衝撃波の痕跡が見出された。これは先行研究で提唱された分子雲衝突説を支持するものである。分子スペクトル線の銀経-速度図上において、Sgr B2 領域は銀経方向に連続した二本の構造（軌道）が交わる位置に見られる。分子雲衝突は、これら二本の軌道が交差した結果と考えられる。

- 1 Hasegawa, T., Sato, F., Whiteoak, J. B., & Miyawaki, R. 1994, ApJ, 429, L77
- 2 Sofue Y., 1995, PASJ, 47, 527
- 3 Morris, M., & Serabyn, E. 1996, ARA&A, 34, 645

星間 c3 M8 における分子雲衝突による大質量星形成 大河一貴 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

大質量星形成の理解は天文学の重要な課題の一つである。大質量星形成をトリガーするメカニズムとして注目されているものの一つが分子雲衝突 (Cloud-Cloud Collision, CCC) である。

H_{II} 領域のうち若いものは、周囲の残存分子ガスに大質量星を形成した痕跡が残っていると考えられ、大質量星形成を調べる上で重要な天体である。そこで、我々は M8 に注目した。M8 は干潟星雲とも呼ばれ、1 - 3 Myr の O/B 型星が多数付随する H_{II} 領域である。我々はこの領域の大質量星が CCC によって形成したと仮説を立て、観測・解析をおこなった。

観測は NANTEN2 望遠鏡 (口径 4m, アタカマ高地) を用いて CO ($J=2-1$) 輝線に対して行なった。観測期間は 2016 年 12 月、M8 をほぼカバーする $1^\circ \times 1^\circ$ の観測範囲を 4 つのマッピングに分割して OTF 観測した。

解析の結果、分子雲が視線速度ごとに異なる空間分布を示し、O 型星が複数分布する Her 36 周辺では 9 km/s と 13 km/s の分子雲が空間的に相補分布していた。相補的な分布は衝突した分子雲に見られる特徴のひとつである。また、位置速度図は CCC の数値シミュレーションによる結果 (Takahira et al. 2014) と一致した。我々は、かつて CCC が起こり、それが M8 の大質量星形成を誘発したと考えた。本公演では、M8 での CCC による大質量星形成の可能性について議論する。

- 1 Tothill, N. F. H., Gagn'e, M., Stecklum, B., & Kenworthy, M. A. 2008, Handbook of Star Forming Regions, Volume II, 5, 533
- 2 Takahira, K., Tasker, E. J., & Habe, A. 2014, apj, 792, 63

星間 c4 野辺山 45m 望遠鏡による銀河系外縁部星形成領域 WB886 の観測的研究 小出凧人 (鹿児島大学 D1)

星形成を誘発する原因として、分子雲衝突が近年注目されている。これまでは、衝突頻度の高い銀河系内縁部の分子雲衝突の観測について精力的に観測的研究が進められてきた。しかし、Haschick & Ho (1985) では、銀河系外縁部のコンパクト HII 領域に付随する分子雲が衝突の証拠を示唆しており、銀河系外縁部においても分子雲衝突による星形成の可能性が期待される。

今回我々は、野辺山 45m 望遠鏡による銀河系レガシーサーベイ計画”FUGIN (FOREST Unbiased Galactic plane Imaging survey with Nobeyama 45-m telescope)”による銀河系外縁部 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ サーベイデータの解析を行い、WB886 (Wouterloot & Brand 1989) に付随する分子雲を検出した。WB886 は銀河系外縁部に属する H_2O メーザーを放射する大質量星形成領域である。運動学的距離 4.93kpc を使用して分子雲の物理量を求めたところ、サイズは 16pc、光度は $767\text{Kpc}^2\text{kms}^{-1}$ 、質量は $3145M_\odot$ となった。検出した分子雲の形状について、積分強度 $I_{\text{CO}} \geq 40\text{Kkms}^{-1}$ の成分に着目したところ、WB886 には円弧状の分子雲が存在し、その位置から北東に約 0.2° 離れた近傍赤外線源 IRAS 06454+0020 を橋渡す分子雲が見られた。本研究ではこのような形状の分子雲が、分子雲衝突によって形成された可能性について議論する。

- 1 Haschick, A. D., & Ho, P. T. P. 1985, ApJ, 292, 200
- 2 Takahira, K., Tasker, E. J., & Habe, A. 2014, ApJ, 792, 63
- 3 Wouterloot, J. G. A., & Brand, J. 1989, A&AS, 80, 149

星間 c5 フィードバックによる分子雲の破壊 猪口睦子 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

星は巨大分子雲 (Giant Molecular Cloud; GMC) の中で誕生する。星が誕生すると、自身の輻射・恒星風・超新星爆発などの“フィードバック”により、母体となった分子雲に大きく影響を与える。フィードバックは GMC の形成・進化・破壊に密接に関わるため、これらそれぞれの働きを調べることは非常に重要である。

フィードバックが関わる問題の一つに、星形成効率 (Star Formation Efficiency; SFE) がどのようにして決まるかという問題である。なお、SFE とは GMC の中で生涯のうちに誕生した星の質量の割合のことである。観測から SFE はおよそ数 % 程度という低い値であることが知られており、このことを理論的に説明しようという試みがこれまでに多くなされてきた。ここで鍵となるのが輻射フィードバックである。GMC 内で誕生した星の輻射によって電離水素領域が生じ、その電離領域のもつガス圧及び輻射圧によって境界に衝撃波を形成し、周りの

分子ガスを掃きながら膨張した結果、分子雲が破壊されるというのが輻射フィードバックの大まかな流れである。本講演では、フィードバック計算に関する最近の論文として Kim et al. (2016) をレビューし、それを踏まえて今後の課題を議論する。

- 1 J. G. Kim, W. T. Kim, E. C. Ostriker, 2016, ApJ, 819,137

星間 c6 星形成領域における輻射圧によるダストサイズ分布の変化

一色翔平 (北海道大学 宇宙物理学研究室 D1)

Paladini et al. 2012 は星形成領域において、輻射圧が特定のサイズのダストを選択的に電離領域から飛ばす事により、ダストのサイズ分布に影響を与えうる事を観測的に示した。しかし、理論的にはダスト形成やガスの冷却降着によるダストサイズ進化を追う数値計算は行われてはいるが (e.g. Aoyama et al. 2017), そうした計算ではダストとガスを別々の運動として解かず、カップルするものと仮定して計算している。

故に、本研究では、大小 2 サイズのダストとガスの三流体方程式を計算する手法を開発した。そして、この新たな手法を用いて大質量星からの輻射によって HII 領域内のダストサイズ分布がどのように変化するかを追った。この時、ダスト抗力としては、ダストとガスの衝突による抗力とダストチャージによる抗力の影響を考慮している。また、ダストチャージについては、大小それぞれのダストについてダストチャージを解いている。シミュレーションの初期条件としては、中心に光源を置き、球対称にガスとダストを分布させた。ガスの成分としては H, He とした。ダストについては、0.1 micron と 0.01 micron のグラフィットを用いた。光源は O 星を模した黒体放射をする星、もしくは星団を用いた。初期条件としておいたガス雲の質量は $10^5 M_{\text{sun}}$, 半径は 17 pc である。

数値シミュレーションの結果、大きいダストは小さいダストと比較してガスからの抗力が弱いために、選択的に HII 領域の中心部から輻射圧によって追い出されることを示した。また光源の光度を大きくした場合、ダストチャージが強くなるために、ダストとガスの分離が進みにくくなり、ダストサイズ分布は変化しなくなることも判明した。

- 1 Paladini R., et al., 2012, ApJ, 760, 149
- 2 Aoyama S., Hou K.-C., Shimizu I., Hirashita H., Todoroki K., Choi J.-H., Nagamine K., 2017, MNRAS, 466, 105

星間 c7 パルサー星雲の 1 次元定常モデル

石崎渉 (東京大学 宇宙線研究所 D2)

パルサーは、その回転エネルギーをパルサー風と呼ばれる相対論的な電子・陽電子プラズマ流に転換している。この流れが周囲の超新星残骸に衝撃波を形成し、粒子加速過程によって非

熱的な電子・陽電子を生成する。これらの非熱的粒子が、パルサー風の磁場および星間空間の光子と相互作用し、シンクロトロン放射・逆コンプトン散乱しながら広がっている天体がパルサー星雲である。我々は以上の描像に基づいて、星雲の 1 次元モデルを構築し、非熱的粒子のエネルギー分布の発展を解くことで、定常なパルサー星雲における放射分布を求める手法を確立した。これを実際のパルサー星雲に適用した結果、標準的な理論モデルで考慮されている過程だけでは、観測事実を再現できないということが明らかになった。本講演では、以上の結果とその解釈について議論する。さらに、1 次元定常モデルの改良案として粒子の空間拡散過程について、論文発表に向けて準備中であるいくつかの結果について発表し、議論する。

- 1 Kennel, C. F., & Coroniti, F. V. 1984, ApJ, 283, 694
- 2 Slane, P., Helfand, D. J., van der Swaluw, E., & Murray, S. S. 2004, ApJ, 616,403
- 3 W. Ishizaki, S. J. Tanaka, K. Asano & T. Terasawa, 2017, ApJ, 838, 142

星間 c8 超新星残骸 SN 1987A の X 線スペクトル解析

梅田真衣 (関西学院大学 M2)

超新星残骸 SN 1987A は、1987 年 2 月 23 日に約 50 kpc 離れた Large Magellanic Cloud (LMC) に発見された超新星の残骸である。ハッブル宇宙望遠鏡による観測で、超新星を取り巻く明るいうりリング構造 (Equatorial Ring:ER) が確認されており、爆発前の親星の質量放出によって形成された密度の高い領域と考えられている (Chevalier et al. 1995)。

我々は、「すざく」による観測データの中で最も新しい、2012 年 11 月の観測データに着目して解析を行った。データの統計を良くするために「すざく」に搭載された CCD の FI(Frontside Illuminated) である XIS0 と XIS3 の観測データを足し合わせた。モデル fitting は Dewey et al. (2012) に基づき三温度から成る電離非平衡プラズマモデルで行ったが、中間温度のモデルの影響がほぼ見受けられなかったため、二温度モデルとして結論づけた。

$kT_e = 0.7, \text{keV}$ と $kT_e = 3.6, \text{keV}$ の二温度から成る電離非平衡プラズマモデルの Emission Measure から算出した電子密度は、低温成分が $2.9 \times 10^4, \text{cm}^{-3}$ 、高温成分が $2.7 \times 10^2, \text{cm}^{-3}$ となった。これは Chandra, XMM-Newton の結果 (Dewey et al. 2012; Kari et al. 2016) と比較しても矛盾の無い結論である。このことから、低温成分が ER、高温成分が HII 領域からの放射であると考えられ、また ejecta からの X 線放射は単独成分のモデルで再現できないことがわかった。

- 1 Chevalier, R. A. and Dwarkadas, V. V. 1995, ApJ, 452, L45
- 2 D.Dewey, V.V.Dwarkadas, F.Haberl, R.Sturm and C.R.Canizares 2012, ApJ, 752, 103

星間 c9 超新星残骸 HB 21 からの過電離プラズマの発見と宇宙線の逃亡シナリオの検証 鈴木寛大 (東京大学 馬場・中澤研究室 M2)

宇宙を満たす高エネルギー荷電粒子である宇宙線は、宇宙プラズマやマイクロ波背景放射と並ぶ高いエネルギー密度を持ち、銀河の進化を担う重要な要素である。宇宙線のエネルギーの $\sim 90\%$ は陽子が占めている。 10^{15} eV 以下のエネルギーの宇宙線は主に超新星残骸 (Supernova Remnant; SNR) の衝撃波面で加速されていると考えられており、実際に SNR には TeV (10^{12} eV) 以上まで加速された陽子が存在する [1]。しかし、加速陽子は増幅された SNR の磁場に閉じ込められるため、星間空間へ逃亡することが極めて困難であるという大問題が残っている。近年、分子雲と衝突している SNR の多くから、分子雲中に逃亡した加速陽子が pi^0 粒子の崩壊を起こして放射する GeV ガンマ線が検出された。一方で、分子雲と衝突し、かつ GeV ガンマ線を放射する SNR の多くが、電離温度より電子温度が異常に低い「過電離」状態のプラズマをもつことが明らかになってきた [2]。これは加速陽子の逃亡とプラズマの過電離が共通の物理現象から起こることを示唆し、加速陽子の逃亡シナリオとして「分子雲と衝突することで SNR の磁場が減衰して加速陽子が逃亡し、同時に分子雲との熱伝導で電子が急冷却したプラズマが過電離状態になる」という仮説が提唱されている。

我々はこの仮説を検証するため、分子雲と衝突している SNR HB 21 に着目した。HB 21 の最大の特徴は、ガンマ線放射が他の GeV ガンマ線 SNR より 1 桁程度弱いことであり [3]、この特殊な天体でもプラズマの過電離という共通性質が見られるかを調べた。SNR プラズマは X 線帯域で光るため、広がった熱的プラズマの観測に優れた X 線衛星「すざく」により観測を行った。プラズマの熱的 X 線スペクトルには Si の強い再結合放射が見られ、電離平衡プラズマ (電子温度 0.78 ± 0.01 keV) に加えて過電離プラズマ (電子温度 0.16 ± 0.01 keV) も存在することを、我々は明らかにした。これは上記の仮説が SNR の間で普遍的に成立することを示唆する重要な結果である。さらに本講演では、他の GeV ガンマ線 SNR も含めた様々な加速環境の比較により定量的に仮説を検証した結果についても議論する。

- 1 Abdo et al. 2010, ApJ, 722, 1303
- 2 Yamaguchi et al. 2009, ApJ, 705, L6
- 3 Pivato et al. 2013 for the Fermi LAT collaboration 2013, arXiv:1303.2091

星間 c10 TeV- 線超新星残骸における星間分子及び原子ガスを用いた宇宙線陽子の起源の探究

長屋拓郎 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

宇宙線の起源解明は、銀河の物質循環や宇宙そのものの進化を考える上で欠かせない。銀河系内については、超新星残骸 (SNR) の衝撃波面における加速理論が有望視されている。宇宙線電子については、SNR からのシンクロトロン X 線放射の検出により確認されている。目下最大の課題は、宇宙線の主成分である陽子の起源を探ることにある。鍵を握るのはガンマ線で明るい SNR である。ガンマ線は陽子・電子どちらかも放射されるが、陽子起源を確立できれば、SNR における陽子の加速を捉えたことになる。本講演では SNR からのガンマ線放射の起源について議論している論文 Fukui (2012) を紹介する。本論文のポイントは、ガンマ線が陽子起源の場合、ガンマ線と星間ガス分布が一致することに着目した点にある。これは、宇宙線陽子が周辺の星間ガス中の陽子と衝突して、ガンマ線を放射することに起因する。著者らはまず、RX J1713.7-3946 という TeV ガンマ線で明るい SNR に付随する星間ガスを特定し、全星間水素柱密度を定量した。このとき、分子ガス (CO) のみならず原子ガス (HI) も考慮したことが特徴である。分子ガス (CO) とガンマ線の分布を比べると空間的に一致しない領域が見られたが、冷たい原子ガス (HI) の自己吸収を考慮することでガンマ線の分布をよく説明することができる。また定量の結果として、ガンマ線と全星間水素柱密度の方位角方向の分布が良い相関を示した。これは、少なくとも RX J1713.7-3946 で、宇宙線陽子が加速されていることを示唆している。

- 1 Fukui, Y., Sano, H., Sato, J., et al. ApJ 746 82 (2012)
- 2 Koyama, K., Petre, R., Gotthelf, E. V., et al. Natur 378 255 (1995)
- 3 Blandford, R. D., & Ostriker, J. P., ApJ 211 L29 (1978)

星間 c11 大型レーザーを用いた磁化プラズマ中の無衝突衝撃波の生成実験における光学計測について 遠田裕史 (青山学院大学大学院 M1)

地球には絶えず宇宙から宇宙線と呼ばれる高エネルギーの粒子が飛来している。 $10^{15.5}$ eV までの高エネルギー宇宙線は、我々がいる天の川銀河内で加速されていると考えられていて、その加速起源として最も有力視されているのが、超新星爆発のときの噴出物である超新星残骸による無衝突衝撃波である。しかし、未だ理論的な解明には至っていない。超新星残骸の無衝突衝撃波における粒子の加速機構には、衝撃波面を行き来することでエネルギーを得るフェルミ加速があるが、粒子の注入問題など未解決問題が多い。無衝突衝撃波による粒子加速については、観測研究やシミュレーションによる研究が行われているが、計算機の性能の限界により実際とは違うパラメータで計算が行われているなど、完全な解明には至っていない。そこで本研究では、観測研究、シミュレーション研究に次ぐ第三の研究方法として、地上の実験室で無衝突衝撃波を生成し、その精密

測定を通じて粒子加速の理解に迫ることをめざす。本実験は一昨年度から継続し3年目となる。昨年度の実験条件を見直し、ターゲットの厚さや枚数、レーザービーム数等を変更した。現在の目標は、実験室内でのアルフベンマッハ数が3以上の磁化プラズマ中を伝搬する無衝突衝撃波の生成である。本発表では、研究背景および今年度得られた実験データの解析結果についての報告をする。

星間 c12 磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験における協同トムソン散乱計測について 宮田親 (青山学院大学 山崎研究室 M1)

地球には絶えず宇宙から宇宙線と呼ばれる高エネルギーの粒子が飛来している。 $10^{15.5}$ eV までの高エネルギー宇宙線は、我々がいる天の川銀河内で加速されていると考えられていて、その加速起源として最も有力視されているのが、超新星爆発のときの噴出物である超新星残骸による無衝突衝撃波である。しかし、未だ理論的な解明には至っていない。超新星残骸の無衝突衝撃波における粒子の加速機構には、衝撃波面を行き来することでエネルギーを得るフェルミ加速があるが、粒子の注入問題など未解決問題が多い。

無衝突衝撃波による粒子加速については、観測研究やシミュレーションによる研究が行われているが、計算機の性能の限界により実際とは違うパラメータで計算が行われているなど、完全な解明には至っていない。そこで本研究では、観測研究、シミュレーション研究に次ぐ第三の研究方法として、地上の実験室で無衝突衝撃波を生成し、その精密測定を通じて粒子加速の理解に迫ることをめざす。

本実験は一昨年度から継続し3年目となる。昨年度の実験条件を見直し、ターゲットの厚さや枚数、レーザービーム数等を変更した。現在の目標は、実験室内でのアルフベンマッハ数が3以上の磁化プラズマ中を伝搬する無衝突衝撃波の生成である。本発表では、研究背景および協同トムソン散乱計測によりえられた実験データの解析結果について発表する。

松本 倫明 氏 (法政大学)

7月27日 09:45 - 10:45 B 会場

「観測も理論も高解像時代の星・惑星形成の研究」

ALMA 望遠鏡をはじめ最近の望遠鏡は高い空間分解能を持つようになった。これらの望遠鏡によって精緻な天体像が得られるようになった。一方、理論のシミュレーションにおいても、適合格子細分化法 (AMR 法) をはじめとする数値計算技術によってシミュレーションは高い空間分解能を持つようになった。従来の数値シミュレーションでは天体の一部だけを取り出して単純化したシミュレーションが行われていたが、AMR 法を用いると天体全体を解きつつ局所的に高解像度を得ることができる。このように、今日は観測と理論の両方が高い空間分解能を持つ。そして観測と理論を比較することが可能になった。星・惑星形成 (とくに星形成) の分野では、観測と理論を比較して天体の物理学を理解するという方法論が流行しつつある。本講演では観測と理論を直接した研究事例をいくつか取り上げて、観測・理論の比較研究のシナジー効果について検証する。とくに講演者が関わった研究プロジェクトの事例を中心に紹介する。取り上げる主な事例は、高密度分子雲コア MC27 (または L1521F) (Matsumoto et al. 2015a)、原始連星系 L1551 NE (Takakuwa et al. 2014)、そして大質量星形成領域 Cygnus OB 7 分子雲 (Matsumoto et al. 2015b) の予定である。なお、修士課程の大学院生が聴講することを考慮して、星形成の初歩的な物理学の内容から講演をはじめ。しかし講演のゴールは最先端の話題なので、博士課程の大学院生にも満足できる内容である。また最近の数値計算法の動向にも触れ、これから数値シミュレーションをはじめめる若手へのアドバイスも示す。とくに最近の数値計算法は大変複雑であるが、これらを用いて研究を行う上での考え方についても触れる。

1. Matsumoto, T., Onishi, T., Tokuda, K., Inutsuka, S.-i. 2015a, MNRAS, 449, L123
2. Takakuwa, S., Saito, M., Saigo, K., et al. 2014, ApJ, 796, 1
3. Matsumoto, T., Dobashi, K., Shimoikura, T. 2015,b ApJ, 801, 77

松尾 太郎 氏 (大阪大学)

7月27日 14:15 - 15:15 B 会場

「太陽系外惑星科学の現在と未来」

これまでに 3000 を超える系外惑星が発見され、その多様性が明らかになってきた。私は、視線速度法で発見されている恒星を公転する 700 の伴星を選択し、惑星系の力学的、化学的パラメータに着目して統計的解析を行った結果、伴星が質量に関して 4 領域に分類されることが分かった。この 4 領域を惑星形成論と比較した結果、この 4 領域は多様な惑星の形成過程を反映していると考えられる。一方、系外惑星科学におけるゴールのひとつに、生命を育む環境の調査、究極的には生命の探査がある。私は、トランジットによる大気分光によって、その目的に迫ることを目指している。その鍵になるのが数時間にわたって高精度に分光測光を行うことである。前半では、これまでの太陽系外惑星の発見から分かってきた多様性とその理解について私の研究を中心に紹介を行い、後半では現在取り組んでいる 2020 年代のアメリカの Decadal Survey の提案へ向けた NASA との共同研究についてお話しします。

星惑 a1 フィラメント状分子雲における分子雲コア質量関数の理論の数値実験による検証

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

星は分子雲の中で形成される。近年の Herschel 宇宙望遠鏡による Gould Belt 領域のサーベイ観測では、星の初期質量関数と分子雲コア質量関数の形がよく似ていることが明らかになった (Andracuteme et al. 2010)。したがって、星形成を理解するためには、分子雲コア質量関数の形成機構を解明することが必要であるといえる。また同じ観測で、分子雲中には周囲よりも密度が高い領域が幅 0.1mpc 程度で細長く伸びたフィラメント状の構造 (以下、フィラメント状分子雲) が多数存在していることも示された。分子雲コアや原始星はこのフィラメント状分子雲に沿って分布している。この分布から、星形成においてフィラメント状分子雲の分裂が重要であることが示唆される。

フィラメント状分子雲における分子雲コア質量関数の理論はすでに Inutsuka(2001) で提案されている。Inutsuka(2001) では、宇宙論において銀河ハロー形成過程の研究で用いられる Press-Schechter 理論を応用し、フィラメント状分子雲の線密度ゆらぎのパワースペクトルから分子雲コア質量関数を解析的に求めている。例として、パワースペクトルが波数の -1.5 乗に比例する形の場合、観測結果と整合する質量関数が得られることが示されていた。そして近年の観測で、パワースペクトルは波数の -1.6 ± 0.3 乗に比例しているという結果が報告された (Roy et al. 2015)。この観測結果は、Inutsuka(2001) の理論で分子雲コア質量関数を説明できることを期待させる。しかし、一般に Press-Schechter 理論は幾つかの仮定を含んでおり、理論の正当性について検討する余地が残っていた。

そこで、本研究では数値実験により、Inutsuka(2001) の理論の正当性を検証する。計算機上にフィラメント状分子雲の線密度ゆらぎを作成して観測的にコアを同定する数値実験を行い、Inutsuka(2001) との対応を調べた。本講演では、その結果を紹介し、Inutsuka(2001) を観測に応用する際の制限について議論する。

- 1 Andracuteme, Ph., Men^{prime}shchikov, A., Bontemps, S., et al. 2010, A&A, 518, L102
- 2 Inutsuka, S. 2001, ApJ, 559, L149
- 3 Roy, A., et al. 2015, A&A, 584, A111

星惑 a2 分子雲コアの質量関数と連星の統計的性質の関係について

三杉佳明 (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)

星は分子雲コアから生まれることが様々な研究から示されている。さらに近年、星形成領域の観測によりこの分子雲コアの

質量関数 (CMF) は星の初期質量関数 (IMF) ととても似通った形を持つことが明らかになった (ex., K^{onyves} et al. 2015)。この結果は IMF が CMF により決まっていることを示唆している。一方で分子雲コアは重力収縮の際に複数の星に分裂することが数値計算により示されている。この結果と宇宙に存在する太陽質量程度の星の約半数は連星として存在しているという事実から、CMF の IMF への進化を考える際に連星を考慮することの重要性が理解できる。

本研究は CMF から IMF と連星の分布を同時に再現するような星形成理論を求めることを目的としている。そこで研究の第一段階として分子雲コアのさまざまな進化モデルを考え、そのモデルの違いによって IMF がどのように変化するかを統計的に計算した。ここでの進化モデルとは、1 つのコアが最終的に何個の星にどのように質量を分け与えるかということの意味している。この研究の結果として、分子雲コアの分裂による複数の星の形成は CMF から計算した IMF の形を大きく変えないことがわかった。その一方で CMF と IMF の形からコアの進化モデルを特定することは困難であると言わざるを得ない。

ゆえに本研究の二段階目では連星の頻度分布および質量比分布関数を考慮することにより、1 つのコアから生まれる星の数などに制限をかけることを試みた。その結果としてコアの分裂の仕方が自己相似的である場合、観測されている質量比分布を再現できないことがわかった。この結果と、コアの分裂による連星の形成理論は周期が 10^8 日を超えるような連星の存在を説明できないという事実を基に、我々は分子雲コア同士の相互作用による連星形成メカニズムの重要性を示す。

- 1 K^{mdotonyves} et al. A&A, 584, A91 (2015)

星惑 a3 初代星の形成と生存可能性

佐伯優 (九州大学 惑星系形成進化学研究分野 M1)

宇宙初期に形成された初代星の研究は、初期宇宙の構造がどのように進化してきたかを理解する上で、必要不可欠である。これまで初代星は大質量であると考えられていたが、最近の研究では低質量の初代星が形成される可能性も示唆された。もし初代星の質量が 0.8 太陽質量以下なら、寿命は宇宙年齢よりも長くなるので、現在まで生き残る可能性がある。このような初代星を探すための観測が行われた結果、初代星の候補、あるいはその次世代星と見られる天体が発見された (Placco et al. 2014 他)。しかし、初代星が形成されている現場を観測することは非常に難しく、その様子は未だ解明されていない。

Greif et al. (2012) では、低質量の初代星がどのように形成されるかを流体シミュレーションを用いて計算した。その結果、ガス雲の中心に位置する原始星 (以下一次原始星) 周りの円盤から新たにいくつかの原始星 (以下二次原始星) が誕生した。二次原始星は一次原始星に落下する場合もあるが、他の二次原始星との相互作用により、シミュレーション終了時まで生き残る場合があることが分かった。これは二次原始星が他の二次原

始星と角運動量のやりとりをすることで、軌道半径がより大きくなる位置に移ることができ、一次原始星への落下をまぬがれたためである。二次原始星の形成数は、シミュレーションの時間が進むにつれて単調増加し、それに伴い二次原始星の生存数も単調増加した。この関係は、シミュレーション時間を超えてもなお維持されると考えているが、計算時間が 10yr と短いため、本当に二次原始星が生き残っていくかは定かではない。したがって、さらなる時間進化の計算を行う必要があるとともに、二次原始星が現在まで生き残るかを議論するためには質量の考慮も必要である。

本講演では、Greif et al. (2012) のレビューを行う。さらにこの研究で解決すべき問題点と初代星の生き残りの可能性について議論し、今後の展望について述べる。

- 1 Greif, T. H., Bromm, V., Clark, P. C., et al. 2012, American Institute of Physics Conference Series, 1480, 51
- 2 Placco, V. M., Frebel, A., Beers, T. C., et al. 2014, ApJ, 781, 40

星惑 a4 超大質量形成における円盤の安定性 松木場亮喜 (東北大学天文学専攻 M2)

観測により、赤方偏移 $z \sim 7$ の初期宇宙に質量 $\sim 10^9 M_{\odot}$ の超大質量ブラックホールが存在することが示唆されている。この観測事実から、初期宇宙環境下で巨大な質量を持つ天体を迅速に形成するシナリオが求められている。その形成シナリオとして有力視されているのがダイレクトコラプスシナリオである。ダイレクトコラプスシナリオとは、超大質量星と呼ばれる $\sim 10^5 M_{\odot}$ の星がその死後に残す同程度の質量を持つブラックホールを種として、超大質量ブラックホールを形成するシナリオである。超大質量星を形成するためには、その原始星周囲の円盤からの降着率が高いことが必要である。高い降着率の下では、原始星からの輻射によるフィードバックを抑えることができるため、原始星は高い降着率を保持して成長し超大質量星になると期待される。しかし、高い降着率をもつ円盤は自己重力的に不安定化しやすく、分裂を起こす可能性がある。円盤が分裂することで、原始星への降着率は時間変動するようになり、原始星の成長に影響を及ぼすと推察される。円盤は高い降着率の他にも温度が低いほど分裂しやすく、その冷却過程は円盤中のガスの化学進化に依存する。先行研究となる Latif and Schleicher 2015 において、始原ガス円盤における安定性について論じられている。しかし化学進化に関して簡単なモデル化をしており、化学進化の取り扱いに課題を残していた。

そこで本研究は、一次元定常降着円盤中の始原ガスの化学進化及び冷却過程を詳細に追うことで、降着流の進化を調査した。この結果に基づき、円盤の安定性と原始星から超大質量星への成長について議論する。

- 1 M. A. Latif, D. R. Schleicher., A&A, 578, A118 (2015)

- 2 Hosokawa T., Omukai K., Yorke H. W., ApJ, 756, 98 (2012)
- 3 Sakurai Y., Hosokawa T., Yoshida N., Yorke H. W., MNRAS, 452, 755 (2015)

星惑 a5 ALMA の観測により解明される原始星エンベロープの角運動量の変換効率 寺澤祥子 (国立天文台三鷹 M1)

半径が数百 AU であるケプラー円盤を持つ原始星からは、分子線を用いた観測によって周囲に若い恒星物質が確認されている。例えば T Tauri や Herbig Ae/Be 星でみられており、これらは惑星形成の跡であると考えられている。クラス 0 と 1 の原始星では、円盤の半径や原始星の質量が大きく異なっており、クラス 0 から 1 の原始星へと進化していくにつれ原始星の質量と円盤の半径が小さくなっていく。

ここ数年の観測結果では、(1) 半径が数百 AU 規模のケプラー回転を行うクラス 0 や 1 の原始星の進化の傾向は、始めは遅いが徐々に早くなってゆく (Yen et al. 2013) ことや、(2) 高質量の原始星はより大きなケプラー円盤を示す傾向がある (Harsono et al. 2014; Aso et al. 2015) ことが明らかになった。これらの結果から原始星のエンベロープ回転の角運動量の多くは角運動量保存則より、円盤形成領域へと変換される。よって、ケプラー円盤はサイズの成長と共に自己崩壊を起こしていくシナリオを支持している。だが、この角運動量の変換の効率は未だに不透明のままであった。

そこで ALMA の 1.3mm の連続波の ^{12}CO 、 C^{18}O そして SO をクラス 0 の原始星に対して行った観測データに、運動モデルをフィッティングすることで原始星の質量とディスクの半径を推測する。そして、特定の角度の角運動量をそれぞれクラス 0 から 1 の原始星で複数比較を行って、どの程度の割合でエンベロープ回転の角運動量がケプラー円盤へ変換されたかを述べた論文のレビューを行い、今後の原始星惑星系円盤の研究の展望を示していく。

- 1 Yen et al. 2017, ApJ, 834, 178

星惑 a6 対流平衡下における前主系列星の安定性 井上裕貴 (首都大学東京宇宙理論研究室 M1)

恒星 (以下星と呼ぶ) の性質で最も測りやすいものは (L) と表面有効温度 (T_e) であり、これをプロットしたものが HR 図と呼ばれる。その HR 図上で大部分の星が分布する帯状の分布を主系列と呼び、水素燃焼の核融合反応をエネルギー源として輝く。この主系列に達する前の星を前主系列星と呼び、重力収縮により解放される重力ポテンシャルエネルギーをエネルギー源として輝く。この前主系列星が重力収縮し、中心温度が水素燃焼可能な温度に達すると主系列星となる。星はその生涯のほとんどを主系列上で過ごし、中心の水素が枯渇すると主系列から外れて壮年期を迎えるというのが一般的な星の進化過程であ

る。

上で挙げた各エネルギーは主に星の中心付近で生成され、星表面へと輸送されていく。その際の星内部におけるエネルギー輸送は対流と放射の2つが存在し、効率の良い方が優勢となる。前主系列星の進化過程の前半は Hayashi トラックと呼ばれ、対流によるエネルギー輸送が優勢となっている。それに対し前主系列星の進化過程の後半は Henyey トラックと呼ばれ、放射によるエネルギー輸送が優勢となっている。この変化は、星内部が温度上昇につれ光学的に透明化することに依るものである。Hayashi トラックよりも低温側の領域は Hayashi の禁止領域と呼ばれ、この領域の星は力学平衡状態にあり得ないことが知られている。

本研究ではこの星の表面温度の下限値を調べるために静水圧平衡にある星のモデルを考え、対流平衡を課す。表面での条件を記述するパラメーターを初期条件として与え、星表面から中心に向かって微分方程式を解くことで、各初期条件に対する星の解を求めた。そしてそれらの解の安定性と表面有効温度との関連性を調べることで、対流平衡にある星には表面有効温度の下限値が存在し、その下限値よりも低い表面有効温度を持つ星の解は不安定であることを示した。

- 1 Hayashi, C., Hoshi, R., and Sugimoto, D., *Progr. Theoret. Phys. Suppl.*(Kyoto),22,1(1962)

星惑 a7 原始惑星系円盤に与える Hall effect の影響 古賀駿大 (九州大学 惑星系形成進化学研究分野 M1)

原始惑星系円盤（以後、円盤）は、重力収縮する分子雲コアにおいて原始星の周りに形成される。円盤は、原始星の重力に対し遠心力によって支えられているため、そのサイズは持っている角運動量に依存する。よって、初めに同じ角運動量をもつ分子雲コアでも、重力収縮中に中心部から外部へ輸送される角運動量が異なれば形成される円盤のサイズが変化すると考えられる。角運動量輸送において重要な役割を果たしているのが磁場である。なぜなら、分子雲コアを貫く磁場と、コアの回転により、磁気制動が働くことで、角運動量を外部へ輸送することが可能になるためである (Tomisaka 2002)。角運動量の輸送効率は、非理想磁気流体力学の効果である Hall effect を考慮すると変化することが示された (Krasnopolsky et al. 2011 他)。Hall effect は磁力線を分子雲コアの回転方向または回転と逆方向に捻じ曲げる効果であるため、磁気制動を強めたり弱めたりすることができる。Hall effect による磁場の変形の度合と向きは、拡散係数というパラメータで表せるため、Hall effect の拡散係数を調べることは角運動量の輸送効率の変化を調べるうえで重要である。

Braiding & Wardle (2012) では、Hall effect を考慮した回転する等温の分子雲コアの半解析的な重力収縮のモデルを用いて、収縮のダイナミクスに Hall effect が与える影響を調べた。そ

の結果、角運動量の輸送効率が変化し、円盤のサイズが変わった。しかし、実際には、拡散係数は、分子雲コアに含まれるダストや、起こっている化学反応に依存するため複雑である。したがってダストや化学反応を考慮に入れた計算が必要である。本発表では Braiding & Wardle (2012) の紹介をしたうえで、Hall effect の拡散係数について議論し、今後の研究の展望について述べる。

- 1 Braiding and Wardle j.1365-2966.2012.20601.x (2012)

星惑 a8 原始惑星系円盤における永年重力不安定性の非線形発展

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

原始惑星系円盤（以下、円盤）は惑星の母体となる天体である。円盤は主に水素分子からなるガスと固体微粒子（ダスト）から構成される。このダストが衝突合体を繰り返すことで惑星の素となる微惑星が形成されたと考えられているが、未だその詳細は明らかになっていない。

近年のアルマ望遠鏡による高解像度観測によって様々な円盤に多重のリング構造が発見された。ALMA Partnership et al. (2015) によって報告された HL Tau のリング構造はその代表例である。観測されたリングの形成機構の候補のひとつとして永年重力不安定性が考えられている。永年重力不安定性はダストとガスの摩擦によって自己重力的に安定な円盤においても成長する不安定性であり、もともと微惑星形成機構として提唱された (e.g., Takahashi & Inutsuka 2014)。Takahashi & Inutsuka (2016) は HL Tau の多重リング構造が永年重力不安定性によって形成されるということを局所線形解析に基づいて示した。しかし永年重力不安定性によるリング形成と微惑星形成をより詳細に解析するためには永年重力不安定性の非線形発展を調べる必要がある。

本研究では永年重力不安定性の非線形数値計算を行った。永年重力不安定性の長時間発展を調べるために、Symplectic 法を流体計算法に応用した新たな長時間流体計算法を開発した。この計算法を用いて、初期に大域的な圧力勾配のない円盤で永年重力不安定性の非線形発展を調べた。その結果、ダストの面密度が初期の 100 倍程度まで上昇し、ダスト-ガス比が 10 程度のリングが形成された。このダストリングの線密度は等温フィラメントの重力収縮を考えた際の臨界線密度程度であることがわかった。この結果は永年重力不安定性が微惑星形成にとって有力な機構となり得ることを示唆している。さらに形成されたダストリングは自己重力により 10^{-4} au/yr 程度で徐々に円盤内側に落下することがわかった。この落下速度を半解析モデルによって再現することに成功した。

- 1 ALMA Partnership, Brogan, C. L., P'erez, L. M., et al. 2015, *ApJL*, 808, L3
- 2 Takahashi, S. Z., & Inutsuka, S.-i. 2014, *ApJ*, 794, 55

星惑 a9 原始惑星系円盤の化学構造と、分光観測を用いた H₂O スノーラインの検出可能性 野津翔太 (京都大学宇宙物理学教室 D2)

太陽質量程度の前主系列星周りの原始惑星系円盤 (以後、"円盤") の場合、円盤赤道面における H₂O スノーラインは、中心星から数 AU の位置に存在する。しかし、撮像観測によって H₂O スノーラインを検出する事は、空間分解能が足りない為に困難である。

一方で円盤はほぼケプラー回転している為、円盤から放射される輝線はドップラーシフトを受け広がっている。この輝線のプロファイル形状の解析から、輝線放射領域の中心星からの距離の情報が得られる。そこで我々はこれまでに、数値計算の結果に基づき、H₂O 輝線プロファイルの観測から円盤内の H₂O 分布、特に H₂O スノーラインを同定する方法を提案してきた ([1],[2])。具体的にはまず円盤の化学反応ネットワーク計算 (e.g., [3]) を行い、H₂O を含む様々な分子種の存在量とその分布を調べた。すると H₂O スノーラインの内側の円盤赤道面付近だけでなく、円盤外側の上層部高温領域や光解離領域でも H₂O ガスの存在量が多い事が分かった。またその計算結果を元に、円盤から放出される H₂O 輝線のプロファイルを多数の輝線について計算した。その結果、アインシュタイン A 係数 (放射係数) が小さく、励起エネルギーが比較的高い輝線のプロファイルを高分散分光観測で調べる事で、H₂O スノーラインを同定できる可能性がある事が分かった。そして、この様な特徴を持つ H₂O 輝線が、中間赤外線からサブミリ波までの幅広い波長帯に多数存在し、その強度は波長が短い程大きい事が分かった。

また最近では、モデル計算の範囲を広げ、新たに ALMA band 5 領域の H₂O 輝線や H₂¹⁸O 輝線を用いた H₂O スノーライン同定可能性の調査も行なっている。更に円盤からの H₂O 輝線検出を目指した ALMA 観測も提案しており、一部のデータが取得済みである。本発表では、これまでの解析結果の紹介と今後の高分散分光観測 (ALMA, SPICA など) での H₂O スノーラインの同定可能性の議論、更に可能な範囲で観測結果の一部を紹介する。

- 1 Notsu, S., Nomura, H., Ishimoto, D., Walsh, C., Honda, M., Hirota, T., Millar, T. J., ApJ, 836, 118 (2017)
- 2 Notsu, S., Nomura, H., Ishimoto, D., Walsh, C., Honda, M., Hirota, T., Millar, T. J., ApJ, 827, 113 (2016)
- 3 Walsh, C., Millar, T. J., Nomura, H., ApJ, 722, 1607 (2010)

星惑 a10 原始惑星系円盤内のガス・ダスト進化に対する光蒸発の影響

山川暁久 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M2)

惑星は、星形成の結果として星の周りに形成される原始惑星系円盤 (以下、円盤) と呼ばれるガスと塵 (ダスト) からなる天体で形成されると考えられている。円盤から惑星に至る過程を解明する上で、円盤内のガスとダストの物理状態を理論的・観測的に明らかにすることは重要である。特に、大型電波干渉計 ALMA などの観測機器の発展によって、様々な円盤のガス・ダスト分布が明らかになっていることから、観測結果を理論的に解釈することが求められている。円盤内のガスは、中心星への乱流粘性降着や中心星からの紫外線による光蒸発、ガス惑星による捕獲などの過程を経て散逸する。特に、太陽系を含め多くの星・惑星系の母胎と考えられている若い星団内では、近傍の大質量星からの紫外線による光蒸発の効果を無視できないと考えられる。

そこで本研究では、Takeuchi & Lin (2005) の孤立系における計算手法をもとに、近傍の大質量星からの輻射による光蒸発の効果を取り入れた円盤内ガス・ダストの面密度進化を計算する。ここで、ダストの特徴的なサイズや粘性降着率、星からの紫外線量などをパラメータとして計算し、光蒸発がガス・ダストの面密度進化におよぼす影響を調べる。さらに、太陽系から最も近い若い星団であるトラペジウム星団における、ALMA とハッブルによる円盤観測 (e.g., Vicente et al. 2005, Mann et al. 2014) と計算結果を比較し、円盤のガス・ダスト分布およびダストの性質を定める各物理パラメータが観測結果と整合的となる値の範囲を調べる。本講演では、外部からの輻射による光蒸発を考慮したガス・ダストの面密度進化と、若い星団内の円盤の観測とを比較することで、本研究の理論計算の妥当性を評価し、観測されている円盤内ガス・ダストの物理状態について議論する。

- 1 Takeuchi, T. & Lin, D. N. C. 2005, ApJ, 623, 482
- 2 Vicente, S. M. & Alves, J. 2005, A&A, 441, 195
- 3 Mann, R. K., Di Francesco, J., Johnstone, D. et al. 2014, ApJ, 784, 82

星惑 a11 原始惑星系円盤中の塵粒子の大規模循環 桑原滉 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

星の誕生とともに形成される原始惑星系円盤はダストとガスにより構成されている。惑星はその円盤内のダストの合体、成長により形成されていくと考えられている。この原始惑星系円盤で完全に解明されていないことの一つにガス及びダスト円盤の散逸機構がある。原始惑星系円盤の散逸時間は、近赤外線観測により 10⁶ ~ 10⁷ 年であると推察されているが、理論的にはその構造は未だ解決されていない。円盤の散逸機構に関して、中心星からの紫外線や X 線放射による光蒸発や、乱流ガスの角運動量輸送による中心星への質量降着が研究されている。

一方、磁気回転不安定性 (MRI) 起源の磁気乱流による円盤風についても、光蒸発と同等以上に円盤散逸の効果があるとの指摘が、Suzuki & Inutsuka (2009) により報告されている。原始惑星系円盤のガスの散逸はダストの運動に影響を与えるが、円盤風を考慮したダストの動力学はあまり調べられていなかった。Miyake et al.(2016) では磁気乱流駆動型の円盤風を考慮した原始惑星系円盤中のダスト密度の鉛直方向分布時間進化を、単純化した1次元数値シミュレーションの手法で調べて、さまざまなサイズのダストの動力学について研究を行なった。ダストのサイズに依存して、円盤風で巻き上げられたダストが円盤外に流れ出る、またはある高さで留まる、あるいは円盤内に留まるという結果だった。しかし実際には円盤上空に連れてガス密度が薄くなり、ダストとガスのカップリングが弱まる。そして大局的に見ると巻き上げられたダストは磁気遠心力により円盤の動径方向外側へ輸送されると考えられる。そこで本研究では、Miyake et al.(2016) では考慮できていなかった、円盤の時間進化とダストの大局的な循環の効果を原始惑星系円盤の進化に取り入れた。鉛直方向への質量損失、動径方向の動きを考慮し、ダストの時間進化をガスと同時に解いた。そして粒径比別でダスト/ガス比の動径分布の時間変化を調べた。その上で観測結果との比較を議論する。

- 1 三宅智也 (2016)
- 2 Suzuki, T., Ogihara, M., Morbidelli, A., Crida, A., & Guillot, T. (2016)

星惑 a12 ダストから暴走成長までを包括的に扱える数値計算コードの開発 西川花 (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)

星形成の副産物である原始惑星系円盤の中で、 $0.1, \mu\text{m}$ 程度の固体微粒子 (ダスト) は衝突合体を繰り返し、 1万 km サイズの惑星にまで成長する。ダストから惑星までのサイズの変化は13桁と非常に幅広く、その詳細な過程は未だに明らかにされていない。ダストは円盤ガスから抵抗を受けて角運動量を失い、中心星に向かって動径移動する。衝突合体の過程でダストが空隙の多い構造になることで、中心星まで落下してしまうことなく微惑星が形成される [1]。ダストの成長が進み微惑星が数 km 以上の大きさにまで成長すると、微惑星間の重力相互作用が効き始めて暴走成長が起こり、原始惑星が形成される [2]。

これまでの惑星形成過程の研究は、 $0.1, \mu\text{m}$ のダストから 1m 以上の小石まで、または数 km の微惑星から暴走成長まで、あるいは 10km 以上の微惑星から惑星までといったように、サイズ空間に対して部分的に行われてきた。しかし、衝突合体や動径移動を繰り返すことで、微惑星が形成された後のサイズ分布と動径方向の面密度分布は、初期の分布とは全く異なったものとなる。また近年では、原始惑星が円盤外縁部から落下してきた小石を集積して成長する効果も脚光を浴びている。そのた

め、幅広いサイズ分布を考慮し、それぞれの過程をまたがるような惑星形成を考える重要性が高まっている。

そこで本研究では、ダストから惑星への成長過程を一連の流れとして調べることを試みる。その第一歩として、ダストが成長し暴走成長が起こるまでを一貫して扱うことのできる数値計算コードを開発する。数値計算ではダストの内部密度進化、乱流によるかき乱しを考慮し、固体天体 (ダスト, 小石, 微惑星) の衝突合体による成長とガス抵抗による動径移動を、同時に計算する。本講演では、固体天体のサイズ分布と動径方向の面密度分布の時間発展を計算した結果を紹介する。また、太陽系の惑星を再現するために必要な円盤の初期条件についても議論する。

- 1 Okuzumi, S., Tanaka, H., Kobayashi, H., & Wada, K. 2012, ApJ, 752, 106
- 2 Kobayashi, H., Tanaka, H., & Okuzumi, S. 2016, ApJ, 817, 105

星惑 a13 SPH 法におけるシア問題の解決策 稲吉勇人 (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)

流体力学をラグランジュ的に数値計算する方法として、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法がある。流体をオイラー的に記述するメッシュ法と比べ、SPH 法はラグランジュ的に記述するので、高密度の領域を高精度に記述できる点や、流体が大きく変形する場合の計算に有利である点などで優れていると言える。しかし、シア流が存在する流体の計算を SPH 法で行うと、非物理的な密度エラーが発生し、精度良く計算できないことが分かっている。特に低温の場合は、密度エラーが 150% を超えるほどであり、シア問題が顕著に現れる (Imaeda & Inutsuka 2002)。実際の原始惑星系円盤や円盤銀河は低温であり、さらに差動回転をしているため、シア流が存在する。したがって、これらの形成や進化を SPH 法を用いて数値計算することは極めて困難である。このシア問題を解決するために様々な方法が提案されているが、円盤の形成や進化のタイムスケールに相当する回転数に達している方法は存在しない。例えば、Imaeda et al. (2007) では隣り合う SPH 粒子間で質量を交換することによって粒子を再配置するという Particle Rezoning (PR) 法が提案されており、密度エラーを 10% 以内に抑えることに成功しているが、100 回転を超えるような長時間の計算では 10% を超える無視できない密度エラーが生じてしまい、円盤進化の長時間数値計算をするには不十分である。そこで、本研究では SPH 粒子内部の流れ場という全く新しい発想を導入し、シア問題の解決を目指す。本講演ではシア問題を紹介した後に、我々の新しい計算法の概念や定式化、さらにその有用性について議論する。

- 1 Imaeda, Y., Inutsuka, S., *Astrophys. J.*, 569 (2002) 501
- 2 Imaeda, Y., Tsuribe, T., Inutsuka, S., *SPHERIC Inter-*

星惑 a14 周連星惑星の軌道と連星物理量の関係について

山中陽裕 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

今日までに約 3500 個の太陽系外惑星が発見され、惑星形成についての様々な研究がなされている。一方、観測されている系外惑星のほとんどは単独星周りの惑星で、周連星惑星は未だ 20 個ほどしか発見されておらず、その形成過程の議論は単独星周りのものほど進んでいない。

中心連星周りでは重力場が時間変化するために惑星が安定な軌道を保てない領域が存在することが知られていて、Kepler によって観測されている周連星惑星のほとんどはこの不安定領域のすぐ外側に位置している (Bromley et al. 2015)。見つかった周連星惑星はどれもホットジュピター系のガス惑星で、現在の位置でその場形成したとは考えにくく、遠方で形成した惑星がマイグレーションしてきたと考えられる。一方で、中心連星の重力場によって周連星原始惑星系円盤ガスに inner cavity を生じることがシミュレーションによりわかっている (Artymowicz et al. 1994) が、その大きさは軌道の不安定領域よりも小さく、惑星のマイグレーションが不安定領域付近で止まる理由は定かではない。

我々は惑星の軌道位置が中心連星の物理量 (軌道離心率、質量比) で特徴付けられると考え、ガス抵抗を加えた重力 N 体計算を用いて不安定領域内における惑星の振る舞いから、軌道と連星物理量の関係性を調べた。本講演では、計算結果の報告をし、観測との比較について議論する。

- 1 Bromley B. C., Kenyon S. J., 2015, ApJ, 806, A98
- 2 Artymowicz, P., & Lubow, S. H. 1994, ApJ, 421, 651

星惑 a15 氷天体衝突による蒸発過程の解明に向けた 3 次元 SPH シミュレーション

伊藤広大 (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)

惑星は大小様々なサイズの天体同士が衝突をくりかえして形成された。その際の衝突にともなう温度上昇により、物質の蒸発が生じる。特に氷天体は比較的蒸発に必要なエネルギーが小さいため、氷惑星の形成にとって衝突に伴う蒸発は非常に重要な物理過程である。また地球に彗星のような氷天体が衝突し水が供給される場合にも大きな影響を及ぼすだろう。衝突現象の解明のために地上でも衝突実験は行われているが、地上で天体スケールの衝突を行うことは難しい。そのため数値計算によるシミュレーションは衝突現象を理解するのに非常に重要な手段である。先行研究ではメッシュ法を用いた流体シミュレーションにより氷天体の衝突が調べられている (O'Keefe et al. 1982)。彼らは固体物質を扱うために一般的に知られている状態方程式として Tillotson の状態方程式 (Tillotson

1962) を導入した。これにより氷天体を表現し、衝突による蒸発を取り扱うことが可能になった。シミュレーションの結果から 9.1m/s 以上の衝突速度で蒸発が起こり、蒸発が起こると衝突エネルギーの 22% ところで本研究では 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用いて、3 次元の衝突シミュレーションを行う。また、この SPH シミュレーションにおいても Tillotson の状態方程式を用いて、蒸発を取り扱う。シミュレーションの結果から衝突時に起きる水の蒸発量を求め、衝突パラメータ (衝突速度、衝突角度など) と蒸発量との関係性について議論する。

- 1 O'Keefe et al. Journal of Geophysical Research, 87, 6668
- 2 Tillotson, J.H. 1962. Rep. GA-3216, July 18, Gen. At., San Diego.

星惑 a16 巨大衝突ステージにおける衝突破壊の重要性: N 体計算・統計的手法のハイブリッドコードの開発

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

太陽系の地球型惑星は、最終段階で火星サイズの原始惑星同士が衝突合体を繰り返し形成される。この巨大衝突ステージにおいて地球や地球-月系が形成される。一方、太陽系外で起こる巨大衝突ステージは、衝突に伴い放出される破片によりデブリ円盤が形成され、観測されている暖かいデブリ円盤 (すなわち地球形成領域のデブリ円盤) を説明することができる [1]。

巨大衝突ステージに形成されるデブリ円盤について調べるためには、原始惑星の長期的軌道進化と、破壊を扱うことができる計算が必要である。しかし衝突により放出される破片の数は 10^{35} 個以上にもなり、 N 体計算ではとても扱うことはできない。このような多数の粒子を取り扱うには、一つ一つの粒子を取り扱うのではなく、統計力学に基づいた統計的手法が有効であるが、統計的手法では、破片が重力的に集積する際にサイズ分布が非軸対称になることや、原始惑星による軌道共鳴のような、重力相互作用の取り扱いができない。すなわち N 体計算と統計的手法を同時に用いると、軌道進化と破壊を同時に考慮した計算を行うことができる。

そこで本研究では、 N 体計算と統計的手法を組み合わせた、衝突破壊を扱うことができるハイブリッドコードの開発を行う。多数の破片を少数のトレーサーと呼ばれるスーパー粒子に近似することで N 体計算のコストを抑える。またそれぞれのトレーサーの周りに扇形領域 [2] を考え、その領域に入った他のトレーサーを用いて表面数密度と平均相対速度を計算し、破壊による天体の減少 [3] を取り扱う。さらに本講演では、ハイブリッドコードにより得られる、巨大衝突ステージにおけるデブリ円盤の明るさの空間分布進化についても議論する。

- 1 Genda, H., Kobayashi, H., & Kokubo, E. 2015, ApJ, 810, 136

- 2 Morishima, R. 2015, *Icarus*, 260, 368
- 3 Kobayashi, H., & Tanaka, H. 2010, *Icarus*, 206, 735

星惑 a17 巨大衝突による広いデブリ円盤からの天王星の衛星形成

石澤祐弥 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

天王星は他の太陽系内惑星と異なり、自転軸が約 90 度と大きく傾いている。また天王星の主な衛星も同様に傾いた赤道面を周回している。何らかの原因で天王星が傾き、その後衛星が形成されたと考えられる。これらを説明するシナリオとして、ジャイアントインパクト (GI) モデルが考えられる (Slattery et al., 1992)。形成段階の惑星同士の衝突により周囲に衛星の材料となる破片 (デブリ) が散らばってデブリ円盤が形成され、円盤中でデブリが重力によって集められ衛星になるという説である。GI モデルならば天王星の大きな傾きと現在の衛星分布を同時に説明できる可能性がある。それを論じるためには、まずデブリ円盤からの天王星の衛星形成を説明できる必要があるが、その検証は未だ成されていない。この形成過程を数値計算によって検証し、現在の衛星分布を説明することを目指す。

また Ueta et al. (in prep.) によって、天王星の GI について新たな高解像度の衝突計算が行われ、GI 後のデブリ円盤は考えられていたよりも広く分布していた可能性があることがわかった。その結果を元にした広い円盤を初期条件にして重力 N 体計算を行った。数値計算を行うにあたって、大規模並列粒子計算のためのフレームワーク、FDPS (Iwasawa et al., 2016) を実装した N 体計算コードを開発した。本講演では、得られた計算結果の議論を行うとともに、新しく提案した天王星衛星形成シナリオについて報告する。

- 1 Benz, W., Slattery, W. L. & Cameron, A. G. W. 1992, *Icarus*, 99, 167
- 2 Iwasawa, M., Tanikawa, A., Hosono, N., et al. 2016, *PASJ*, 68, 54

星惑 a18 地球型惑星大気の進化に対する惑星表層での元素分配の寄与

櫻庭遥 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

地球型惑星の大気に含まれる希ガスは、大気や海洋、生命のもととなる揮発性元素の起源を知る手がかりである。地球型惑星の大気は、隕石重爆撃期における天体衝突による衝突脱ガスという共通の起源を持つと考えられている (de Niem et al. 2012 など)。しかし、金星・地球・火星の希ガス量はこの順で約 2 桁ずつ少なくなっており、その原因は未だ解明されていない。そこで、惑星表層環境の違い (金星：暴走温室状態、地球：炭素循環、火星：CO₂ 氷の形成) によって元素分配過程が異なるという、従来考えられていなかった過程を考慮し、希ガス存在量の違いを再現する条件を調べた。

本研究では、隕石重爆撃機の大気量・組成の進化の理論計算を行った。個々の天体衝突による大気の供給とはざとりについては、流体シミュレーションに基づくスケールリング則 (Shuvalov 2009, Svetsov 2000) を用いた。そして、表層環境の違いによる元素分配の効果は以下のように考慮した：金星ではすべての元素を大気に分配し、地球では海洋形成と炭素循環による H₂O・CO₂ 分圧上限、火星では氷の形成による H₂O・CO₂ 分圧上限を設けた。

計算の結果、地球と火星において、元素分配の効果によって最終的に獲得する N₂+ 希ガス量が減少することが分かった。これは、元素分配により、CO₂ や H₂O の大部分が大気から取り除かれると、大気中の N₂+ 希ガス濃度が高くなり、天体衝突の大気はざとりによって失う N₂+ 希ガス量が増加するためである。講演では、獲得する N₂+ 希ガス量の衝突天体サイズ分布・揮発性元素含有量・分圧上限などのパラメータ依存性を示し、揮発性元素を瀾した衝突天体や各惑星の初期表層環境について議論する。

- 1 de Niem, D., et al. 2012, *Icarus* 221, 495-507.
- 2 Shuvalov, V. 2009, *Meteor. Planet. Sci.*, 44, Nr 8, 1095-1105.
- 3 Svetsov, V.V. 2000, *Solar Syst. Res.*, 34(5), 398-410.

星惑 a19 オリオン星形成領域における近赤外線トランジット探査

谷本悠太 (国立天文台三鷹 M1)

NASA EXOPLANET ARCHIVE によれば、5 月現在 3000 個を超える系外惑星が発見され、その多様性についても明らかになっている。しかし、系外惑星の形成と進化に関してはいまだわかっていないことが多く、それを明らかにするためには形成直後、ないしは形成中の惑星の情報が重要である。若い星の周りに惑星が見つければ、惑星の形成時期を制限できるだけでなく、追加観測から惑星の内部構造や大気について調べることが可能となり、惑星形成過程のさらなる理解につながると考えられる。

系外惑星の検出手法としては、惑星の重力による主星のふらつきを観測するドップラー法、惑星が主星の前を横切ることによる減光を捉えるトランジット法、惑星の重力レンズ効果による背景天体の増光を観測するマイクロレンズ法などが挙げられる。このうちトランジット法は、広視野で観測すれば同時に多天体について探査することが可能となり、系外惑星の発見には有利な手法である。

トランジット法によって発見されている若い星周りでの系外惑星候補としては、van Eyken et al.(2012) による発見が挙げられる。彼らはオリオン OB1a 領域において変光星調査を行った際に年齢が 2.7Myr 程度の T タウリ型星周りを回る系外惑星候補を発見した。また、David et al.(2016) や Mann et al.(2016) は Upper Scorpius OB 領域において年齢が 5-10Myr

程度の M 型星の周りを回る系外惑星候補を発見している。

これに対し、本研究ではさらに若い星周りで惑星候補発見を目指し、Orion Nebula Cluster という年齢が 1Myr 程度の非常に若い星形成領域をターゲットとして、岡山天体物理観測所 91cm 反射望遠鏡に搭載された OAOWFC (岡山天体物理観測所広視野カメラ) による K バンドモニター観測データを用いて系外惑星トランジット探査を行った。本発表では、2015 年 10 月 14 日から 2016 年 1 月 16 日までの約 3 ヶ月分のライトカーブから、トランジット探査の結果及びその他検出された変光現象と合わせて、今後の観測方針や検出可能性について報告したい。

- 1 van Eyken, J. C., et al. 2012, ApJ, 755, 42
- 2 David, T. J., et al. 2016, Nature, 534, 658
- 3 Mann, A. W., et al. 2016, AJ, 152, 61

星惑 b1 オリオントラペジウム星団における星同士の遭遇による星周円盤の破壊 長谷川大空 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

本発表では Portegies Zwart(2015) についてのレビューを行う。

若い星の星周円盤の状態を調べることは、星や惑星の形成を理解するのに重要である。星周円盤は中心星からの輻射などにより、数 Myr のタイムスケールで失われることが観測から示唆されている。他にも近くの大質量星による光蒸発や星同士の近接遭遇によっても円盤が破壊されると考えられている。実際、観測によって、密度の高い星団では星周円盤を持つ星の割合が低いことが示唆されている。

オリオン星雲のトラペジウム星団は半径 3 pc、年齢 0.3 Myr ほどの若い星団である。Portegies Zwart(2015) は、トラペジウム星団の現在の星周円盤の状態が、星同士の遭遇による円盤の破壊により形成されたものかを調べるために、星同士の近接遭遇による星周円盤の破壊と質量降着を考慮した N 体シミュレーションを行い、トラペジウム星団の星周円盤のサイズの分布の再現を試みた。具体的には、近接遭遇によって円盤が乱されたことにより 2 つの星へその一部が降着し、円盤のサイズ及び質量が失われていくという効果を入れている。

その結果、初期条件が星の数 $N = 2500 \pm 500$ 、半質量半径 $R = 0.5$ pc、初期ビリアル比 Q が 0.3 または $Q = 0.5$ 、フラクタル次元 F が 1.6 の時に 0.2-0.5 Myr の時刻でトラペジウム星団を良く再現することに成功した。

ALMA により、星団内の円盤について多くのサンプルが観測されることが期待されている。また、円盤の破壊の効果や星団のモデルについても更なる改良の余地があり、今後より詳しく検討する予定である。

- 1 Portegies Zwart, S. F. 2016, MNRAS, 457, 313

星惑 b2 焼結の効果を入れたダストアグリゲイトの 3 次元衝突シミュレーション 長尾整道 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

ダストアグリゲイトは、粒子の衝突合体によって作られる粒子の集合体であり、微惑星の材料になる。ダストアグリゲイトが形成されるには、アグリゲイト同士がぶつかっても壊れないことが必要であり、破壊が起こる衝突速度に関して、いくつかの 3 次元衝突シミュレーションが行われてきた。しかし、これまでの 3 次元衝突シミュレーションでは焼結の効果は考慮されていなかった。

焼結とは、融点より少し低い温度で物質を温めることによりその物質の表面分子が移動する現象のことである。焼結が進むと、その物質は硬化する一方、塑性は失われて脆くなる。アグリゲイトの焼結を考慮した場合、粒子同士の接触面が大きくなり、アグリゲイト同士をぶつけた時の挙動も変わってくる。現在、2 次元での焼結の効果を入れたアグリゲイト衝突シミュレーションはすでに行われている。その研究結果は、焼結がおこるとアグリゲイトは壊れやすくなることを示している。

本研究では、焼結の効果を入れた 3 次元衝突シミュレーションを行った。その目的は、焼結がダストアグリゲイトの衝突に与える影響に関して、2 次元と 3 次元での比較を行うことである。まず、先行研究ですすでに行われた焼結の効果を入れた 2 次元衝突シミュレーションをもとに、3 次元に適用できるモデルをたてた。ここで、2 次元シミュレーションでは考慮されない、接触している 2 粒子がねじれる際にかかる力を導入した。シミュレーションでは、破壊が起こる速度、衝突により生じた破片の分布について調べた。

3 次元のシミュレーションの結果、2 次元シミュレーションと定性的な傾向は似ているが、破壊が起こる速度や跳ね返りの有無、破片の分布の違いが確認された。

本研究によって、2 次元シミュレーションと 3 次元シミュレーションの違いを示すことができた。今後は、ダストアグリゲイトの粒子数依存性や、衝突による圧縮の度合いについてさらに研究する必要がある。

- 1 Sin-iti Sirono, Haruta Ueno. arXiv:1705.04778(2017)
- 2 Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., & Yamamoto, T. 2008, ApJ, 677, 1296

星惑 b3 火星衛星の捕獲説の再検討：火星原始大気の回転の影響について 鈴木智浩 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

火星には二つの小さな衛星、Phobos と Deimos が存在している。火星衛星の起源としては主に捕獲説と衝突説が議論されてきたが、決着はついていない。Phobos と Deimos の反射ス

ベクトルが C 型や D 型の小惑星のそれに類似しているという点は、捕獲説を支持する。一方で、火星に飛来する小天体の方向はランダムであることが期待されるので、二つの火星衛星が小さな軌道傾斜角（つまり、ほぼ火星赤道面上を公転している）を持っているということを自然には説明できない。火星衛星の捕獲説に関する先行研究 (Hunten, 1979; Sasaki, 1990; Burns, 1992) でも、火星との潮汐相互作用や火星周りの静止した原始大気の影響によって衛星の離心率が現在のようにほぼ 0 になることがわかっているが、軌道傾斜角の問題は全く解決されていない。そこで、本研究では、火星周りの原始大気が静止しているのではなく、火星の自転方向に回転運動をしているような場合を考慮すれば、捕獲された小天体の軌道傾斜角も変化するのではないかと考えた。本研究では、回転速度をパラメータとして、Sasaki (1990) で用いられた原始大気の影響を考慮して、捕獲後の衛星の軌道傾斜角の変化を数値的に計算した。その結果、ガスの回転速度によって軌道傾斜角の落ち方にかなりの差が出て、ガスの回転速度がケプラー速度の 50% 以下ではあまり変化がないことがわかった。原始惑星系円盤ガス中で成長する原始惑星が捕獲する大気の運動に関して、Ormel et al. (2015) は等温で非粘性な流れを二次元系で計算している。彼らの計算結果によると、火星質量の天体が捕獲する原始大気の回転速度は、ケプラー速度の 10% 程度であることが示されているので、本研究で得られた結果を適用すると、小天体が火星に捕獲された後に現在の軌道になる確率は従来の確率からわずかにしか上がらない。そのため、現段階での我々の知見では捕獲説で現在の火星衛星系を作ることは困難であると言える。

- 1 Craddock, R. A. (2011). *Icarus* 211, 1150-1161
- 2 Ormel, C. W. et al. (2015). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 446, 1026-1040
- 3 Sasaki, S. (1990). Abstract of the Lunar and Planetary Science Conference, volume 21, page 1069

星惑星 c1 OMC-2, FIR3/4/5 領域の多輝線観測 小山田朱里 (国立天文台三鷹 M2)

銀河系内の星の多くは星団で生まれる。したがって、銀河系内の星形成過程を理解するためには、星団が形成される環境での星形成過程を解明する必要がある。特に、星団形成領域ではすでに誕生した星からのフィードバックが次世代の星形成に多大な影響を及ぼすと考えられているが、その影響についてはまだよくわかっていない。そこで我々は、太陽近傍の星団形成領域であるオリオン座 A 分子雲 OMC-2 中の FIR3/4/5 領域を野辺山 45m 電波望遠鏡に搭載された FOREST と T70 受信機を用いて、 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$, $^{13}\text{CO}(J=1-0)$, $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$, $\text{N}_2\text{H}^+(J_{F_1,F}=1_{1,2}-0_{1,2})$, $\text{CCS}(J_N=8_7-7_6)$, $\text{HN}^{13}\text{C}(J=1-0)$, $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=1-0)$, $\text{H}^{13}\text{CN}(J=1-0)$, $\text{HCO}^+(J=1-0)$, $\text{N}_2\text{D}^+(J_{F_1,F}=1_{2,3}-0_{1,2})$, $\text{DNC}(J=1-0)$, $\text{DC}_3\text{N}(J=9-8)$ のマッピング観測を行った。FIR3/4/5

領域は、島尻らによる NMA 観測から、原始星 FIR3 からのアウトフローが FIR4 に衝突し、小さなガスの塊に分裂している様子が報告されている (Shimajiri et al. 2008)。本研究の目的は、多輝線データから、この領域の物理状態を調べ、この領域で進む星形成過程の理解をさらに進めることである。取得データから N_2H^+ のコアが FIR4/5 付近で同定できた。そのコアから南西付近にかけて比較的強い DNC が検出され、冷たいガスが広がっていることが示唆された。また、その付近全体に弱い CCS 輝線が分布していることが発見された。先行観測では、OMC2/3 領域では、CCS 輝線は検出されておらず (Tatematsu et al. 2008)、今回の高感度 FOREST 観測により、OMC-2 領域でも CCS が存在することが明らかになった。講演では、柱密度、アバundance等の物理量の分布をより正確に求め、FIR3 からのアウトフローが FIR4/5 領域に及ぼす影響について報告する予定である。

星惑星 c2 近赤外撮像データにおける MonR2 IRS3 の測光方法の検証 儀間博考 (鹿児島大学 M1)

星形成領域 MonR2 では、電波観測で周期約 30 日程度のメタノールメーザーの周期変動が見つかっており、その変動と中心天体の赤外線強度の変光に関係があるのではないかと示唆されている。そこで、近赤外線での中心星の変光を調べ、MonR2 からのメタノールメーザーと中心星からの赤外線との関係を明らかにしたいと考えている。通常、ネビュラに覆われている星では、アパーチャー測光をすることはできないが、MonR2 では、中心星に対してネビュラが暗いため影響は小さい。そこで、アパーチャー測光をしたところ、J,H バンドで約 0.3 等程度の変光があることが確認できている。この方法では、ネビュラが変光していたり、中心天体のに対してネビュラが明るい領域ではその影響を受けるため、精度良く測光することができない。そのため、ネビュラの影響の少ない測光方法を模索している。現在は、異なるシーイング環境での赤外線撮像画像をデコンボリューションなどを用いてシーイングサイズを揃えて比較をし、ネビュラの変光の有無を調べることで測光の精度を上げることができると考えている。今回は、その進捗状況について報告する。

星惑星 c3 野辺山 45m 望遠鏡による CH_3OH メー ザー源の分子輝線観測 石川果奈 (茨城大学 電波天文観測研究室 M2)

大質量星形成領域中の Hot molecular core(HMCs) と呼ばれる領域では、 H_2O , CH_3OH , OH メーザーが観測されることがある。 CH_3OH の class II メーザーは早期段階の大質量原始星との相関が高いと言われている。これまでの観測研究の結果、そのうち 10

茨城大学では日立-高萩 32m 電波望遠鏡を運用しており、 CH_3OH と H_2O のメーザー源について定期観測を行なってい

る。我々は日立 32m 電波望遠鏡で観測された CH₃OH class II メーザー源を周期性の有無により分類し、野辺山 45m 電波望遠鏡により観測を行うことになった。本観測では、大質量星形成領域の観測として一般的な C¹⁸O(1-0)、¹³CO(1-0)、N₂H⁺(1-0)、CH₃CN(5-4) を用いる。C¹⁸O(1-0)、¹³CO(1-0) により低密度なガスの分布をトレースし、分子ガスの全量を求める。また、低温高密度領域のトレーサーとして *rm*N₂H⁺(1-0)、高音高密度領域のトレーサーとして CH₃CN(5-4) を使用し、N₂H⁺ と CH₃CN の分布割合から大質量星の進化段階について明らかにすることができる。

今回の発表では、CH₃OH メーザーと CH₃CN 輝線について述べた先行研究 (purcell 2006) についてのレビューを行うほか、研究の進展状態報告を行う。

星惑星 c4 赤外線による大質量星形成過程へのアプローチ

吉田泰 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

小中質量の星形成過程は大方解明されつつあるが、大質量の星形成過程はそもそも大質量の星の数が多くないことと星形成のタイムスケールも短いことから、解明が低質量星に比べて遅れている。星の形成過程において、星の周囲の現象を見るのに変光を見るのが有効である。低質量星では変光によって最近傍の構造や運動が調べられているが、大質量星では変光が存在するかどうかもわかっていなかった。

近年メーザーによるモニタ観測で変光が見つかり、注目が集まっていた。加えて昨年、赤外線に変光する大質量の YSO (Young Stellar Object) が発見された。赤外線観測は光度などの物理パラメータを直接得られるため、今後の研究が大いに期待される。

本講演では昨年発見された大質量の VYSO (Variable Young Stellar Object) の論文を紹介しつつ、大質量 VYSO の赤外線での観測の展望について述べる。

1 THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 833:24, 2016 December 10

星惑星 c5 NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN): ホットコアの無バイアスサーベイ 佐藤一樹 (国立天文台三鷹 M1)

ホットコアは大質量星形成領域で観測される天体であり、分子雲が収縮し中心で原始星が誕生した段階にあたる。分子雲内で原始星が誕生した際に周りの分子が暖められ励起するため、それらの励起輝線が観測される。大質量星の形成メカニズムは未だ解明されておらず、大質量星の形成段階にあたるホットコアを統計的に研究することは重要である。

FUGIN (FOREST Unbiased Galactic Plane Imaging survey with Nobeyama 45m telescope) プロジェクトでは、野辺山

宇宙電波観測所の 45m 電波望遠鏡を用いて銀河面において ¹²CO、¹³CO、C¹⁸O の輝線同時観測を行った。この観測帯域に含まれる HNC、CH₃CN、SO₂ 等の輝線も解析し、銀河面内でホットコアを無バイアスサーベイすることが本研究の目的である。これらの分子はホットコアの良いトレーサーとなる。本研究は、ダスト連続波のサーベイに依存しない、分子スペクトル線のみによる初の系統的なサーベイを目指している。これらの輝線が検出され解析が可能か検証するために、すでに知られているホットコア領域の存在する W33 領域で解析を行ったところ、W33 Main および W33 A の HNC(109.906GHz)、CH₃CN(110.364GHz) の輝線の検出に成功した。本講演ではこれらの結果を報告するとともに、今後の他領域での分子の検出およびホットコアサーベイの実現性について議論する。

星惑星 c6 ALMA のための原始惑星系円盤とアウトフローの観測的可視化

北亦裕晴 (大阪大学 宇宙進化研究グループ M2)

2013 年、チリはアタカマ砂漠にて大型電波干渉計 Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) が稼働を開始した。従来の観測機器では成し得なかった超高感度・高分解能な観測により、宇宙物理学の諸分野における観測的研究は急速に発展している。星形成過程の研究も例外ではなく ALMA の恩恵を受けている。原始星は密度の濃い分子雲の中で誕生するため、従来の観測機器では直接観測することは困難であった。現在は ALMA により、原始星に付随する原始惑星系円盤の回転などが詳細に観測できる。

原始惑星系円盤中のガスは角運動量を持っており、円盤の形成と進化において角運動量の輸送が重要である。円盤の角運動量を輸送する物理機構の一つとして磁場により駆動されるアウトフローがある。アウトフローの理論的研究は古くから為されているが、観測的研究は ALMA の登場によって進展し始めたばかりである。既にアウトフローの観測に関する論文が報告されており (e.g. Bjerkeli et al. 2016, Zapata et al., 2015)、今後はアウトフローをはじめ原始惑星系円盤の観測的研究はより推進されると予想される。

ALMA による観測の進展に対し、観測と直接比較できる精密な理論モデルが強く求められている。この需要に応える手法の一つが流体力学シミュレーションの結果から輻射輸送計算により観測的性質を計算する、観測的可視化である。我々はこの手法により現実的な物理過程を含む磁気流体シミュレーションの結果から観測的性質を予言し、観測された天体の物理的状态を推定する系統的な手法を確立することを目指している (Tomida et al., 2017)。本発表では観測的可視化の方法を紹介すると共に、この方法を用いて理論・観測の両面から原始惑星系円盤の物理を解明する研究について最近の進展を報告する。

1 Bjerkeli et al., 2016, Nature, 540, 406

2 Zapata et al., 2015, ApJ, 798, 131

3 Tomida et al., 2017, ApJL, 835, L11

星惑星 c7 原始惑星系円盤中でのシアア不安定性 小野智弘 (京都大学宇宙物理学教室 D3)

原始惑星系円盤は惑星形成の現場であり、その構造・進化は形成される惑星の性質に影響を与える。近年の ALMA 望遠鏡による観測によって、三日月状構造を持つ原始惑星系円盤の存在が明らかにされており、円盤進化・惑星形成への影響に注目が集まっている。三日月状構造は差動回転円盤中でのシアア不安定性によって形成される巨大渦によって説明され得る。形成される巨大渦について知るためには、シアア不安定性に対する深い理解が必要となると考えられる。しかし、天文分野ではシアア不安定性について十分な理解が成されてこなかった

一方、地球大気分野では非圧縮流体ではあるが、シアア不安定性について深く理解されている。特に、その物理機構は 2 本のロスビー波同士の相互作用によって説明される。本講演の前半では、地球大気分野で培われたシアア不安定性の物理機構について紹介する。後半は、系を差動回転円盤まで拡張することで、原始惑星系円盤中でのシアア不安定について概観する。これらは、降着円盤や銀河円盤など、多様な天体上の物理現象を理解する上でも役立つことが期待される。

1 Ono et al. 2016, ApJ, 823, 84

星惑星 c8 原始惑星系円盤において磁気流体構造に依存するスノーライン 森昇志 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 D2)

原始惑星系円盤において、氷ダストは固体物質の質量の大部分を占め、微惑星形成において重要な役割を果たしている。それに加え、氷ダストは岩石型惑星の海の起源とも関連しており、惑星形成過程において氷ダストの分布を知ることは、惑星形成のみならず生命の起源を考える上でも欠かせない。氷ダストは、氷の昇華境界 (スノーライン) 以遠で存在することができ、スノーラインの位置を決定している円盤の温度構造を理解することが特に重要である。円盤が散逸するまでは、スノーラインが存在する円盤内側は光学的に厚いので、降着ガスの重力エネルギーが乱流粘性によって変換された熱が円盤に蓄積し、円盤内側の温度構造を決定すると考えられている。すなわち、この粘性加熱によって、円盤赤道面付近のスノーラインの位置が支配されている (Oka et al. 2011)。粘性加熱を考慮する際、加熱率が赤道面に集中する分布がよく仮定される。しかし、このような仮定は必ずしも現実的であるわけではない。原始惑星系円盤内における乱流の駆動源の 1 つは、磁場と円盤ガスとの相互作用によって引き起こる磁気回転不安定である。しかしこの機構は、ガスの電離度が比較的高い円盤の表面部でのみ起こると考えられている。このような場合、円盤内部での熱の蓄積が十分に起こらず、赤道面の温度上昇が起こりにくいことが輻射磁気流体シミュレーションによって示されている (Hirose

& Turner 2011)。本研究では、この事実に着目し、磁気乱流構造に基づいた円盤の温度構造を求め、スノーラインの位置を調べる。具体的には、成層構造と電離度分布を考慮した 3 次元の磁気流体計算を行い、得られたエネルギー散逸率の分布から動径方向の赤道面温度構造とスノーラインの位置を求める。ポスターでは、円盤の温度構造が磁気流体状態の空間分布によって大きく変わりうることを示す。

1 S. Hirose and N. J. Turner *apjl* 732:L30 (2011)

2 A. Oka, T. Nakamoto, and S. Ida *apj* 738:141 (2011)

星惑星 c9 原始惑星系円盤内における惑星軌道の変化 柳沼優太 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

この講演は参考文献 [1] についてのレビューである。現在、惑星形成の標準モデルでは原始惑星系円盤内においてダストが衝突・合体し成長することで惑星が形成されると考えられている。地球などの太陽系の惑星は太陽を中心とした楕円軌道を描いて公転していることがわかっているが、どのようにして惑星の軌道が楕円軌道へ変化したのかを考える。ダストの衝突などによって形成された惑星は円盤にトルクを及ぼし、惑星・円盤間において角運動量とエネルギーが円盤外向きに輸送される。このトルクは一定ではなく惑星の軌道によって変化する。円軌道の場合はリンドブラッド共鳴、離心軌道の場合は共回転共鳴によって惑星が円盤にトルクを及ぼす。リンドブラッド共鳴によるトルクは惑星軌道の離心率を増大させ、共回転共鳴によるトルクは惑星軌道の離心率を減少させる。このようにして惑星軌道は変化する。ここでは木星と原始惑星系円盤間の相互作用から惑星軌道の変化について示す。

1 P. Goldreich, S. Tremaine, *ApJ* 241, 425 (1980)

星惑星 c10 連星系周りの惑星についての Habitable Zone

奥谷彩香 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

1995 年以降の相次ぐ系外惑星の発見より、生命が居住可能 (habitable) な惑星についての議論は近年盛んに行われている。地球とはまったく異なる惑星でも条件をみれば habitable 惑星になりうる。

そこで、二重連星まわりの habitable zone (HZ) の条件を定式化する Jaime et al. (2014) の論文について、レビューを行う。この論文では、以下の二つの独立な条件を HZ の条件として用いる。

A. 中心星からの放射: HZ は中心星放射によって定義されるが (たとえば Kopparapu et al. 2013)、一つの中心星まわりの放射条件を二つの放射源がある場合に拡張する。連星系ではこの条件をみえず範囲 “radiative Habitable Zone (rHZ)” が、各星のまわり、または連星系まわりにあらわれる。rHZ の内側の

境界と外側の境界の位置によって、rHZ のタイプは三種類に分けられる。各タイプについて全軌道が rHZ 内に入るような惑星の円形軌道を定める。軌道離心率をもつ連星系の場合は、近星点と遠星点についての rHZ をみたく惑星の円軌道を求め、より厳しい条件を採用した。

B. 惑星軌道の安定性：生命が出現するまでに十分な時間、惑星が安定にとどまるような軌道は、一方の恒星に十分近い軌道と連星両方から十分離れた軌道の二種類が存在する (Pichardo 2005)。

この二つの条件を同時に満たすような軌道範囲を連星系の HZ とし、太陽系近傍の 64 個の連星系についてこれを適用した。その結果、56% の連星系が HZ をもつことが分かった。

連星系は宇宙では希少な存在ではなく、恒星のうち約四分の 1 が連星系をなしていると考えられている。それゆえ、連星系についての HZ を考えることは、将来 habitable 惑星発見の可能性をひろげることにつながる。

- 1 Jaime L., Aguilar L., and Pichardo B., *Astron. Soc.*, 431, 1 (2014)
- 2 Kopparapu R.K., Ramirez R., Kasting J.F., and et al., *Astrophys. Journal*, 765, 131 (2013)
- 3 Pichardo B, Sparke S.L., and Aguilar L., *Astron. Soc.* 359, 521 (2005)

星惑星 c11 「第二の地球」の地図作り: 3 次元大気モデルを用いた模擬観測と光度曲線解析 中川雄太 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)

系外地球型惑星の直接撮像は、主星との空間的分離やコントラスト補正などの数多の問題を乗り越えて、近い将来に達成されると考えられている。その中から「第二の地球」と呼べるような、液体の水が存在して生命を宿しうる惑星、あるいは生命の存在する惑星を探索することは、荒唐無稽にも思えるが、天文学的に興味深いのみならず、人類の世界観・宇宙観を揺るがしうる重要なテーマである。実際このような「第二の地球」に関する研究は、その探索方法論だけでなく居住可能性 (“ハビタビリティ”) や、「生命」の汎惑星的定義付けまで、多岐にわたって行われている (e.g., Seager 2013)。

系外地球型惑星の環境を知る手段として、惑星表面で散乱した恒星光を用いることが提案されている。Kawahara (2016) は、理論的に構成した散乱光の光度曲線を周波数解析することにより、自転軸傾斜角 (「地軸の傾き」に相当する) が推定できることを予言した。しかしながら上で用いた理論光度曲線は地球の雲分布の観測データをそのまま使っているため、自転軸傾斜角の異なる惑星において適当な雲分布であるとは考えにくい。惑星気候力学の観点からも、自転軸傾斜角の異なる惑星では、熱循環構造が変化し雲分布は大きく異なると予想される。

以上の状況を踏まえ、本研究では 3 次元惑星大気モデルを用いて任意の自転軸傾斜角に対して雲分布を計算し、地球と同様

の雲分布であるという仮定をはさまない散乱光の光度曲線を作成する。加えて、作成した光度曲線を逆解析し、自転軸傾斜角が推定可能であるかについても議論する。

- 1 Seager S., *Science*, 340 (2013) 577
- 2 Kawahara H., *Astrophysical Journal*, 822 (2016) 112

星惑星 c12 トランジット法による系外惑星大気観測の今後の展望 寺田由佳 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

系外惑星はこれまで、直接観測法、視線速度法、トランジット法、重力マイクロレンズ法など様々な手法で探査、観測が行われてきた。その中でも、最も多くの系外惑星を発見した手法がトランジット法である。トランジット法は、系外惑星の公転面が観測者に沿う場合に見られる、主星を公転する惑星による食に伴う明るさやスペクトルの変化を観測するものである。この手法は系外惑星の間接的な観測法であるが、惑星大気についての情報を得ることが可能である。トランジットが起こっている間、恒星の光の一部が惑星の大気中を通過し、大気に一部が吸収される。この吸収が波長依存性を持つことを利用して、惑星の大気を透過してくる主星の光を分光することで惑星の大気を調べることが出来る。

現在、TESS、JWST、CHEOPS といったトランジット法を用いた系外惑星の探査や分光を行う望遠鏡や衛星の打ち上げが計画されており、今後、ますますトランジット法による系外惑星の大気の観測が盛んになることが予想される。

今回の発表では、トランジットによる大気観測の現状と打ち上げ予定の観測装置によって近い将来、どのような観測ができるかについて述べる。

- 1 Kevin B. Stevenson et al. arXiv:1602.08389
- 2 Eliza M.-R. Kempton, Jacob L. Bean2 arXiv:1705.05847
- 3 A. Wyttenbach et al. arXiv:1702.00448

星惑星 c13 木星の内部構造における未解決問題と木星学的手法への期待 芋生真子 (東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 M1)

木星の内部構造は、惑星系形成の起源や進化を理解する上で極めて重要であるが、よく理解されていない。主な問題の一つが、惑星系形成に制約を与えられる精度でコア質量やエンベロープの重元素量を求められない点だ。これは、超高压下での水素とヘリウムなどの状態方程式に大きな不確実性が残っているためである。Miguel et al. (2016) では、最新の状態方程式を用いて、内部構造の不確実性が定量的に示されている。

従来は、重力モーメントの観測値と整合的な内部の密度分布を決定することで、内部構造の推定が行われてきた。近年の木

星探査機 Juno の観測により、以前よりも高精度な重力モーメントが得られている。しかし、重力モーメントはエンベロープの浅い部分に感度があり、エンベロープの深部構造を推定するためには有用ではないため、この手法に代わる新たな方法が必要とされていた。

そこで、現在提案されているのは日震学・星震学を応用した方法(木震学)だ。つまり、木星の表面自由振動から内部構造の知見を得る手法である。例えば、Jackiewicz et al. (2012) では、木星で期待される密度不連続の位置・強度を推測することは、観測される振動モードで十分であることを数値計算で示した。これにより、木星のコアのサイズや質量に制限を与えられることが期待される。本ポスターでは、Miguel et al. (2016) と Jackiewicz et al. (2012) をレビューし、木星の内部構造に関する問題とその解決方法について議論する。

- 1 Jackiewicz J., et al., 2012, *Icarus* 220 (2) , 844
- 2 Miguel Y., Guillot T., Fayon L., 2016, *A&A* 596, A114

星惑星 c14 AKARI and Spinning Dust Emission A look at microwave dust emission via the Infrared Bell Aaron (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 D3)

The microwave emission from our Milky Way galaxy has several components that can be very difficult to distinguish: free-free emission, synchrotron emission, thermal dust emission as well as the more recently discovered "anomalous microwave emission" (AME) which likely comes arises from spinning small dust grains. Likewise, the infrared emission profile of interstellar dust emission has several overlapping constituents that we cannot yet completely identify the sources of. We are attempting to investigate one of the major characteristic sources of 6 to 12 micron dust emission-nanoscale carbonaceous dust (like polycyclic aromatic hydrocarbons or PAHs), to the yet unexplained anomalous microwave emission. We do this by comparing microwave data from the Planck Observatory with IR dust emission mapped by the AKARI space telescope. We focus on the AKARI Infrared Camera (IRC) which traces the PAH emission features very well. Our work supports that AME comes from dust, but does not support a situation where AME is exclusively caused by PAHs or similar molecules. There may be several contributors, and environmental factors (like the interstellar radiation field) may play a larger role than previously thought in producing the AME portion of the galactic microwave foreground.

- 1 Kogut, A., Banday, A. J., Bennett, C. L., Gorski, K. M., Hinshaw, G., & Reach, W. T. 1996, *ApJ*, 460, 1
- 2 Draine, B. T., & Lazarian, A. 1998, *ApJ*, 508, 157, 1999,

ApJ, 512, 740

- 3 Ishihara, D., et al. 2010, *A&A*, 514, A1

小川 英夫 氏 (大阪府立大学)

7月26日 13:00 - 14:00 B 会場

「天文学のための装置開発 -電波望遠鏡と私-」

天文学における開発研究を担っている若手は多くはいないと思います。しかしながら、現代のように高精度の観測装置が次々と開発されているなかに関心を持っている人が多くいるのではないかと想像します。

私は主に電波天文学に関係した開発を数十年にわたって行ってきました。開発を持続させるモチベーションは何か。私の場合、現状において何ができるのか、何が求められているのか等について観測系研究者と徹底的に議論を行い、これから行う、行いたい開発を整理し、自分なりのストーリーを組み立てるというものでした。関係者と納得するまで話し合うなかで構想が次々と湧いてきた感じがします。

そこで本日は、開発系研究者に求められるもの、新しい観測装置が欲しいと思っている観測系研究者に求められるものは何か等、忌憚のないお話が出来ればと思います。

さらに、私が経験した色々な電波望遠鏡や観測装置 (NANTEN, ALMA, 45 m 鏡, VSOPII, 1.85m 鏡 etc.) を例にして具体的な開発過程等を紹介したいと思います。

1. 宇宙の観測 II 電波天文学 (シリーズ現代の天文学 第16巻)

涌井 伸二 氏 (東京農工大学)

7月28日 14:45 - 15:45 B 会場

「国立天文台の装置開発と若い研究者の参加」

精密装置の振動対策、精密位置決め装置に振動問題が発生したとき、まず振動源が何処に在るのかを探し出し、次に振動モードの特定をおして有効な対策が施せる。振動モードの特定に関しては、実験モーダル解析に代表される組織だった方法論は存在するが、現場においては「感性」を使って有効な対策を立案し実施することができる。対策を施す場合、まず機械的な対策を講じるべきである。具体的には剛性向上あるいはダンピングの付与である。機械的な対応ができない場合に限って、制御を要する制振装置の導入を行う。このような事例を数多く紹介したい。

涌井さまの体調不良により、氏の講演はキャンセルされました。

講演資料についてはポスター会場に掲示予定です。

観測 a1 X 線天文衛星「ひとみ」搭載波形処理装置における波形信号の弁別検証

高橋海斗 (埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験 田代・寺田研究室 M1)

ASTRO-H「ひとみ」は、2016年2月17日に打ち上げられた日本で6番目のX線天文衛星である。「ひとみ」に搭載された観測機器の一つである軟X線分光検出器SXS(Soft X-ray Spectrometer)は、受光部がX線マイクロカロリメータであり、X線光子が入射することで生じるミリケルビン程度の温度変化を計測し、その光子の持つエネルギーを7 eV(FWHM at 6 keV)以下の高い精度で決定できる分光撮像装置である。温度変化は波形として取得され、波形全体を最適フィルタ処理して、入射光子のエネルギーを評価する。しかし実際に検出された波形データの全てが解析に有用な光子イベントではない。時間的に近接した光子波形が重畳することによって波形処理に適さないものや、宇宙線や電気的クロストークなど様々な原因によるノイズなどが入り得る。このようなイベントデータの弁別は、高精度のスペクトルを得るために必須であり、その最初の識別は、SXSの搭載デジタル波形処理部であるPSP(Pulse Shape Processor)によってなされ、様々なパラメータやフラグの形でイベントデータに付与される。今回の発表では、2015年6月につくばの宇宙センターで行われた衛星の熱真空試験時のデータを用いて、実際にイベント弁別が機能していることを検証し、非正規イベント群が以下のように分類出来ることを確認した。(1) 電気的・熱的なクロストークによるもの。(2) 複数のイベントが重畳しているために波形がゆがんでいるもの。(3) 近接した波形イベントの影響を受けて精度が下がっているもの。そしてPSPのパラメータを用いてこれらのイベントを除去することで、全イベントから高い分解能を実現するイベントを抽出できることを確認した。

観測 a2 裏面照射型 X 線 SOI ピクセル検出器の軟 X 線性能評価

原田颯大 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

我々は、次世代のX線天文衛星計画「FORCE」に搭載予定であるX線観測用ピクセル検出器「XRPIX」を開発している[1]。XRPIXは、SOI(Silicon On Insulator)技術を用いた検出部・読み出し回路一体型の検出器である[2]。現行のX線天文衛星の主力検出器であるX線CCD(Charge Coupled Device)の時間分解能は数sである。それに対しXRPIXは各ピクセルにヒットタイミングを出力させるイベントトリガー機能を実装しているため、ヒットのあったピクセルのみを読み出すことで、10 μ sの高時間分解能を実現できる。この時間分解能の向上により、高エネルギー粒子起源の非X線バックグラウンドを除去する反同時計数処理を採用でき、X線CCDの10 keVをはるかに上回る40 keVまでの硬X線撮像が実現する。超新星爆発の機構の解明などには0.5 keV程度の軟X線観測も

必要となるが、XRPIXの表面側(回路層側)には8 μ m程度の回路層が存在する。軟X線を表面側から照射すると、回路層で2 keV以下の軟X線が吸収され検出するのは困難である。そのため不感層の薄い裏面照射型素子の開発が必須となる。FORCEの不感層厚の要求性能は1 μ mで、最終目標は0.1 μ mである。我々はこれまで様々な裏面処理を行った素子を開発し、不感層0.5 μ mを達成している[3]。今回発表する最新のXRPIX6bDは裏面にレーザーアニールとイオンインプラント処理を行っている。前回作成したものと処理は同じだが不感層をより薄くするためレーザー出力等のパラメータを変更している。また軟X線の検出効率を上げるため、読み出しノイズを低く、分光性能を高くする改良も施している。このXRPIX6bDを計測し評価した結果を発表する。

- 1 T.G. Tsuru, et al., Development and performance of Kyoto Xray astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor, Proc. SPIE9144 (2014) 914412.
- 2 Y. Arai, et al., Development of SOI pixel process technology, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 636 (2011) S31.
- 3 伊藤真音, 京都大学, 2017, 修士論文.

観測 a3 積層配線 TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発

布村光児 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

我々の研究グループでは、中高温銀河間物質を含むダークバリオン探査を目的とする小型科学衛星DIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)への搭載を目指したTES(Transition Edge Sensor)型X線マイクロカロリメータ(以下TESと表記)を開発している。TESは超伝導金属と常伝導金属の二層薄膜構造をしており、超伝導金属の相転移時の急峻な抵抗変化を利用することによって、1eV台の優れたエネルギー分解能を実現できる検出器である。我々はこれまでにTi/Auの4 \times 4アレイを用いて5.9 keVにおいて2.8 eV(FWHM)のエネルギー分解能を達成した(Akamatsu et al. 2009 AICP)。

DIOSでは、有効面積を大きくするため非常に大きな検出器アレイが必要となるが、アレイを大型化すると基板上的配線スペース不足や、配線クロストークの問題が生じる。そこで、我々はこれらの問題を克服することができる積層配線(積層構造)のTESアレイを産総研と共同でインハウス製作している(Ezoe et al. 2015 IEEE TAS)。

我々は20 \times 20ピクセルの積層配線TESアレイの開発を行ってきたが、正常な超伝導転移をしないという問題があった。そこで、我々はTESの表面粗さが転移の有無に影響を与えていると考え、新たに化学機械研磨を用いた配線を考案し、Si基板とほぼ同等の表面粗さ0.4 nm rms(5 μ mスケール)を達成した(Kuromaru et al. 2016 JLTD)。さらに、TES成膜時の

逆スパッタの条件を緩和し 150 W, 3 min から 100 W, 1 min へ緩和し、基板へのダメージを低減させた。その結果、我々のグループではじめて 20 × 20 ピクセルの積層配線 TES アレイの正常な超伝導転移を確認した。TES 膜厚は Ti/Au=100/20 nm であり、転移温度は 360 mK、臨界電流 >1 mA と良好である。

本研究で目標としているエネルギー分解能を達成するためには転移温度を 100mK 程度にすることが必要である。転移温度は基本的に Ti と Au の膜厚比で決定されるが、Ti の膜厚が大きすぎると近接効果が効きにくくなり転移温度を下げるのが難しい。そこで、Ti/Au=100/20 nm で TES の転移が確認できたため次のステップとして Ti の膜厚を薄くすることによって転移温度の調整を行っている。そのため、現在は Ti/Au=60/120 nm の基板を作成し TES 転移するか確かめる予定である。

観測 a4 ガンマ線バースト偏光観測衛星 SPHiNX 計画

内田和海 (広島大学 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 M2)

ガンマ線バーストは、約 1 日に 1 回の頻度で数秒間に 10^{45} J ものガンマ線が突発的に観測される天体現象である。その起源は、星の最後の超新星爆発、ブラックホールや中性子星連星の合体と考えられているが、どのようにして光速に近い速さをもつジェットが形成されるのかは不明である。これまでのエネルギースペクトルの研究からは、ジェットからガンマ線が放射されるメカニズムに 2 つのモデルが提唱されている。そこで我々は日本とスウェーデンが共同で開発し 2021 年打ち上げ予定の SphiNX 衛星により、1 年間で約 30 個のガンマ線バーストの偏光度を決定し、その偏光度の頻度分布から放射メカニズムを切り分ける計画である。これまでに GAP 検出器により、数例のガンマ線偏光が報告されているが、SphiNX では検出数を 10 倍程度に増やし、統計的な議論を目指す。

2 つの放射モデルとは、ジェット中で、密度が高く光学的に厚い領域の表面から放射される「光球面モデル」と、物質が磁場に巻き付いてシンクロトロン放射をしていると考える「シンクロトロンモデル」である。偏光に着目すると、「光球面モデル」は無偏光に近いのに対し、「シンクロトロンモデル」では最大 70% 近い偏光が予想される。よって偏光度の頻度分布が、無偏光に近ければ「光球面モデル」、平均で 40% 近い偏光度があれば「シンクロトロンモデル」と区別されるのである。

私はこれまで、SphiNX 衛星のガンマ線偏光計で利用予定である GAGG シンチレータの特性評価を行ってきた。この結果、ガンマ線に対する放射線耐性が軌道上の数年の運用で問題ないレベルであること、数 cm 程度の大型サイズになるとシンチレーション光は減少するもののエネルギー分解能は 7%(662keV) と十分な性能が発揮できることが分かった。

本講演では、SphiNX 衛星の紹介と私が行った検出器開発の状況について発表する。

1 M. Axelsson et al. 2012, ApJ 757,L31

観測 a5 X 線望遠鏡用受動型熱制御素子サーマルシールドの開発

二村泰介 (名古屋大学 Ux 研 M1)

X 線望遠鏡は直接宇宙をみるため望遠鏡からの輻射によって熱が奪われ低温になる。X 線望遠鏡に用いられる反射鏡は複合材料であるためにバイメタル効果によってその形状に温度依存性が現れる。そのため望遠鏡内の温度を地上試験時の温度を含めた動作温度内に制御する必要がある。この要求を満たすための熱計装として受動型熱制御素子サーマルシールドの開発が進められた。サーマルシールドの主な構成要素は、プラスチックフィルム、フィルム支持材としての金属メッシュ、機械強度部材としての金属フレームである。フィルムに数十 nm 程度の厚さのアルミニウムを蒸着し、低い太陽光吸収率と赤外線放射率を持たせることで熱の流入を防ぎ受動型熱制御の機能を果たす。

名古屋大学はこれまでにあすか、すざく、ひとみ用にサーマルシールドの開発を行ってきた。そして現在では NASA が主導で開発を行い 2020 年に打ち上げが予定されている X 線偏光観測衛星 IXPE 搭載用のサーマルシールドの開発を行っている。IXPE ではその観測エネルギー帯やロケット打ち上げ時の空力加熱等を考慮し、フィルムには $1 \mu\text{m}$ 程度のポリイミドフィルムを用いる予定である。

現在、IXPE 用メッシュ、フレームの設計検討を終え、厚さ 0.25 mm、線幅 0.1 mm のステンレスメッシュ、厚さ 4 mm、直径 300 mm のアルミフレームを採用することにした。また可視光にてフィルムに蒸着されているアルミの厚さを定量的に評価したところ目標値の 30 nm に対し 15 nm 程度であったが、厚みムラとしては 1 nm 程度でひとみ HXT 搭載品と同等である事を確認した。今後は本設計とほぼ同等のサンプルを試作し、打ち上げ時の振動を想定した振動試験や音響試験を見据えての静加圧試験を行い機械強度を評価する。また打ち上げ時の熱環境に対しても熱シミュレーションの結果を元に加熱試験を行い耐熱性を評価し、加熱後のサーマルシールドを用いて加圧試験を行うことで機械強度の変動をみる予定である。

観測 a6 超小型衛星 HaloSat の性能評価とサイエンス検討

石原雅士 (名古屋大学 Ux 研 M1)

宇宙組成に占める baryon の割合は 5% ほどと言われている。中でも半数近くが未検出であり、これらは missing baryon と呼ばれている。missing baryon の多くは温度百万度程度のガスとして、銀河間や銀河内に存在すると考えられている。HaloSat は Iowa 大学と NASA が主導で進めている 6U サイズ

(100×200×300mm)の超小型観測衛星であり、2018年打ち上げ予定である。本衛星は世界初の銀河系内高温ガスの温度・強度の全天マップの作成を目的としている。本衛星は結像系は搭載せず、約12度の視野で3台のシリコンドリフト検出器を用い、1年をかけて全天観測を遂行する。

本ミッションにて、名古屋大学は散乱測定及び環境試験を担当する。まず我々は、散乱測定にて検出器筐体内で散乱して入射する迷光成分の入射角・方位角依存性を調べるため、自動スキャンが可能な治具を設計した。迷光評価は高温ガスの温度および強度の正確な見積りに必須となる。熱真空試験では、衛星運用時の温度を再現した環境で実際にX線を当て、検出器性能の変化を評価する。評価にはフッ素の輝線を用いる予定であり、カーボンナノ構造体を電子源として利用する、200mm角程度のコンパクトな独自の評価システムの構築を進めている。

また、本ミッションのサイエンス実現性の検討および観測時間の最適化を図るため、実データに基づいたシミュレーションを行った。例えば典型的な輝度を仮定した場合、観測時間10ksでは、地球近傍(<100 pc)を取り囲む100万度程度の高温プラズマ成分の温度および強度はどちらも10%程度、銀河系X線ハロー成分は各々20, 50%程度の決定精度であることを示した。今後は様々な輝度を仮定した場合の決定精度の観測時間依存性や、North Polar SpurやCygnus superbubbleなどの観測を想定したシミュレーションも実施予定である。

観測 a7 広視野 X 線撮像検出器に実装するバースト判定システムの開発と評価 太田海一 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

高密度天体同士の衝突・合体の際には強力な重力波放射が発生する。2015年にLIGOにより初の直接観測がなされ重力波天文学の幕開けとなった。2018年度よりVirgoとKAGRAを加え本格的な重力波観測ネットワークが稼働するが、重力波干渉計による発生源の方向決定精度は10 - 100平方度と非常に粗いため母銀河を特定するには至らない。一方ブラックホール・中性子星連星や中性子星連星の衝突・合体の際には重力波放射と同時にX線やガンマ線による強力な電磁波放射(Short gamma ray Burst: SGRB)が起こるとされ、重力波源の特定を電磁波による同時観測でフォローすることが可能である。また重力波放射と電磁波放射の時間差を10 msec以上の精度で観測できれば、SGRBのジェット駆動源を解明することも期待される。

金沢大学では重力波観測が本格化する2018年度末の打ち上げを目指して独自の超小型衛星を開発しており、我々は重力波源の特定を目指した広視野X線撮像検出器(T-LEX)の開発を進めている。SGRBに付随して起こる軟X線超過成分の放射(extended Emission: EE)やその他様々なX線突発天体の観測も可能な1 - 20 keVに観測帯域を設定し、方向決定は1次元コードマスクとシリコンストリップセンサーを用いて1 sr以上の視野と15分角の精度での観測を目指す。パー

スト検知は、デジタル回路の処理によって複数の時間スケールにbinningされたライトカーブを用いてCPUが処理する。本講演ではライトカーブを用いたバースト検知のアルゴリズムの振る舞いに加え、BATSEの観測データによるバースト本体の検知能力の評価と、Swift/BATの観測データを長時間binningして行ったEEによるバースト検知能力の評価について報告する。

- 1 B.P. Abbott et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. Phys. Rev. Lett., Vol. 116, p. 061102, February 2016.
- 2 Norris JP, Bonnell JT. 2006. ApJ 643:266-275

観測 a8 大気チェレンコフ望遠鏡 CTA のモンテカルロシミュレーションによる評価 三浦智佳 (茨城大学理工学研究科理学専攻物理系 M1)

高エネルギーのガンマ線は大気との相互作用で電子対生成を起こし、その電子は大気中で制動放射を起こしてガンマ線を放出する。この電磁シャワーに伴うチェレンコフ光を観測するのがチェレンコフ望遠鏡である。一方、陽子などのハドロン由来の高エネルギー宇宙線もまた、大気中に入射すると核カスケードによりハドロンシャワーを起こし、チェレンコフ光を放つ。大気チェレンコフ望遠鏡を用いたガンマ線観測において、このハドロンシャワーが主要なバックグラウンドとなる。ハドロン由来の2次粒子は大きな横方向の運動量をもつため、ハドロンシャワーは電磁シャワーと比べてより広がりをもった形状となる。このシャワーの形状の差に伴って、チェレンコフ光を反射望遠鏡でとらえたときに焦点面でつくられるイメージの形状もガンマ線とハドロンで異なる。このイメージの形状の差を利用してガンマ線とハドロンを識別する。このようにしてガンマ線によるチェレンコフ光を観測する方法がImaging Atmospheric Cherenkov Technique(IACT)である。

Cherenkov Telescope Array(CTA)計画は、大中小の口径を持つチェレンコフ望遠鏡を複数台配置し、現行のチェレンコフ望遠鏡と比較し観測可能なエネルギー領域を20 GeV-300 TeVに広げ、10倍の感度の向上を目指すガンマ線観測計画である。北半球はスペイン領カナリア諸島のLa Palma島、南半球はチリのParanalに建設される予定である。大中小のチェレンコフ望遠鏡のうち大口径望遠鏡(LST)は20 GeV-1 TeVの低エネルギー領域を観測し、現在La Palma島に1号機の建設が開始している。本講演ではLa Palma島に設置される大口径の大気チェレンコフ望遠鏡4台について、配置や検出器の特性値などより現実に近いパラメータ設定を取り込んだシミュレーションを行い、ガンマ線点源と広がった天体に対する感度を評価する。

- 1 K. Bernlohr et al. Astropart. Phys. 43 (2013)
- 2 M. Actis et al. Exper. Astron. 32 (2011)

観測 a9 CTA 大口径望遠鏡に用いる PMT の性能評価

砂田裕志 (埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験 田代・寺田研究室 M1)

エネルギーが数 10GeV を超える高エネルギーガンマ線が地球大気に侵入すると大気中の原子核と相互作用によって電子・陽電子対生成を起こし二次粒子を生成する。この二次粒子が制動放射によってガンマ線を生成し、このガンマ線が再度対生成を起こす。この過程を繰り返すことで電子のシャワーが生じる。電子シャワーからのチェレンコフ光を捉えることで高エネルギーガンマ線の観測する望遠鏡を大気チェレンコフ望遠鏡という。大気チェレンコフ望遠鏡は、チェレンコフ光を鏡で反射・集光し焦点面検出器で検出する。Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は大口径望遠鏡 (LST), 中口径望遠鏡 (MST), 小口径望遠鏡 (SST) の三種類の大気チェレンコフ望遠鏡を複数台組み合わせた望遠鏡群を北半球のラパルマ島、南半球のパラナルに建設し、高エネルギーガンマ線を観測する計画である。各望遠鏡は異なるエネルギー範囲に感度を持ち、全体で 20 GeV ~ 300 TeV のエネルギー幅を持ちつつ現行の大気チェレンコフ望遠鏡よりも一桁高い感度での観測を行う。LST は 20 GeV ~ 1 TeV の低エネルギー側に感度を持つ。LST の開発は日本チームが中心となって開発を進めており、現在 1 号機の建設が始まり 2 号機以降の開発が開始している。LST の焦点面検出器には光電子増倍管 (PMT) が使用されている。光量が微弱で発光時間の短いチェレンコフ光を検出するために LST 用の PMT には厳しい性能要求が課せられる。LST 1 号機と 2 号機の間で使用される PMT に設計変更を行ったため、2 号機以降用の PMT が性能要求を満たしていることを確認する必要がある。今回の講演では 2 号機以降用 PMT の諸特性の測定方法及び、その測定結果を報告する。

観測 a10 CTA 大口径チェレンコフ望遠鏡に搭載する読み出し回路の性能評価

平子丈 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

宇宙では、天体活動により様々な波長の宇宙線が放射されている。ガンマ線は波長により性質が異なるが、地球に入射した高エネルギーガンマ線は大気との間で電子対生成を起こす。作られた電子は制動放射によって二次ガンマ線を放射し、再び電子対生成が起きる。ガンマ線と電子はエネルギーを失うまで連鎖的に生成され、その結果生じた電子シャワーから出てくるチェレンコフ光により高エネルギーガンマ線を観測するのが大気チェレンコフ望遠鏡である。CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は、LST (直径 23 m)、MST (直径 12 m)、SST (直径 4 m) の異なるエネルギー観測範囲を持つ大気チェレンコフ望遠鏡を並べる計画であり、北半球のラパルマ島、南半球のチリ・パラナルに建設される予定で、全体で 20 GeV~300 TeV のレンジを持つ。その中でも、LST は 20 GeV~1 TeV の低エ

ネルギー側のレンジを受け持ち、京都大学は LST に搭載される検出器の読み出し回路を開発してきた。低エネルギー側では大気チェレンコフにより生じる光子数が少ないため、夜光によるバックグラウンドノイズの除去が重要な課題の一つになってくる。夜光は 200 MHz 程度の割合で光子として検出され、観測するガンマ線は数 ns 程度の広がりを持つ。ゆえに時間分解能への要請として、サンプリングは ~ GHz 程度で行われる必要がある、そのための回路素子が DRS4 である。DRS4 は 4096 個のキャパシタを 1 ns ごとに切り替える Domino Ring Sampler と呼ばれる構造を持つが、実際にはキャパシタごとに 1 ns からのずれが存在している。そのずれを較正するために、北サイトの 2 号機以降に搭載される基板 (Dragon version 7) には、1 号機に搭載される version 5 に、DRS4 チップのタイミングキャリブレーションのための sin 波生成回路と温湿度センサー、電圧モニター回路が追加されたものとなっている。本講演では光子を一つずつ検出器に入射させ、基板 (Dragon version 7) でピークの広がりを測定することで、タイミングキャリブレーション前と後において観測精度がどのように向上するかを示す。

1 George B. Rybicki and Alan P. Lightman Radiative Processes in Astrophysics

観測 a11 サブミリ波帯の集積回路型超広帯域分光装置 DESHIMA のシミュレータ開発

陳家偉 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

サブミリ波帯で観測されるサブミリ波銀河は、きわめて爆発的な星形成を行っている銀河である。また、赤方偏移がおよそ $z=1$ から $z=6-7$ にわたって分布しており、その明るさはサブミリ波帯では大きく変化しないという特徴的な性質をもつ。このため、サブミリ波銀河をサーベイすることにより、宇宙再電離の時期まで遡って宇宙の星形成史を調べることが可能となる。

我々の研究グループでは、サブミリ波銀河の赤方偏移サーベイを行うために、サブミリ波帯の超広帯域分光観測を可能とする DESHIMA (Deep Spectroscopic High-z Mapper/Delft SRON High-z Mapper) の開発を行っている。DESHIMA には特徴的な技術がいくつか用いられている。そのうちの一つは電波を検出し、検出したエネルギーを単一の配線で読み出す超伝導検出器 MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector) と呼ばれる技術である。この技術は、多ピクセルの読み出しの配線を一つにし、電波カメラの多ピクセル化を可能にした。また、超広帯域の分光を可能にするため、我々は集積回路型分光器 (on-chip filter bank) を開発した。これらの技術によって、非常にコンパクトなサブミリ波帯の分光器を実現した。

DESHIMA は本年度、試験観測を行う予定だ。その際、大気のゆらぎなどの影響から、 $1/f$ ノイズが生じることが予想される。このため、 $1/f$ ノイズを補正するようなキャリブレーションを行う必要がある。私は、このキャリブレーションプラン

を計画するために DESHIMA のシミュレータの開発を行っている。

本講演ではまず、MKID と集積回路型分光器を中心にして DESHIMA の紹介を行う。その後、DESHIMA のシミュレータの開発の報告も行う。

観測 a12 CMB 偏光 B モード観測における前景放射成分分離の高精度化を目的としたフーリエ分光器の開発

官野史靖 (東北大学天文学専攻 M1)

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) の B モードと呼ばれる特殊な偏光シグナルは、インフレーション理論の重要な証拠である、原始重力波の情報を刻んでいる。そのため、CMB の B モード偏光初検出に向けて、現在様々な研究チームが観測実験を行っている。観測データには、CMB に加え、シンクロトロン放射や銀河系内星間ダストからの熱放射といった、前景放射も含まれている。よって、観測データから前景放射に埋もれた CMB の B モード偏光を抽出するには、これら前景放射と CMB とを精度よく分離することが必要不可欠であり、これは現在の CMB 偏光実験における最大の課題の一つだといえる。

CMB と前景放射とは、スペクトルに顕著な違いがあることが分かっている。したがって、それらの分離精度は、検出器における周波数特性の較正精度に大きく左右される。また、検出器の特性は環境の違いや検出器の経年劣化等により変化すると考えられるため、観測サイトにおける定期的な較正が必要である。これらを踏まえると、高精度の成分分離を達成するためには、観測サイトにて定期的に高分解能の周波数観測を行える、画期的なシステムの構築が求められる。

これらの要請を満たすため、我々は観測サイトでの定期的な周波数特性の較正を目的とした、高周波数分解能フーリエ分光器の開発研究を行っている。このフーリエ分光器の設計において、我々は可動鏡の移動距離に対して、約 20 倍もの光路差をつけることができる、革新的な光学系を考案した。これは、一般的なフーリエ分光器に比べ、約 10 倍の効率である。この光学系によって、可動鏡 20 mm の移動のみで、1 GHz 以上の周波数分解能を達成できる。

本発表では、光学設計・評価プログラムソフトウェア CODE V を用いた光学設計の結果を中心に、フーリエ分光器の概要を紹介する。また、この分光器による成分分離精度の向上について議論する。

観測 a13 NANTEN2 新制御システム NECST の開発進捗

近藤高志 (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、NANTEN2 望遠鏡を用いて CO 輝線の超広域サーベイを行う NASCO (NANTEN2 Super CO Survey as

Legacy) を推進している。NASCO は全天の約 70 % を数年で観測することを目的としており、この計画を達成するために観測効率の向上が要求される。そこで、マルチビーム受信機の開発や広域観測に対応した新たな望遠鏡制御システム NECST (New Control System on the NANTEN2 Telescope) の開発を行っている。NECST では観測効率を上げるためにマルチビームへの対応とスキャンスピードの向上を目的とし、加えて膨大なデータを扱うためのデータ輸送方法の検討と観測者の負担軽減のための自動観測の実装も行う。

これまでの NECST の開発では、マルチビーム化に伴う 120 倍ものデータレートの増加に対応するため計算機のリプレースを行った。さらに NANTEN2 の旧制御システム (n2control) は多数の言語で構築されており更新や改修が困難であったため、今後の更新と開発のしやすさを考慮し python でのシステムの再構築を行った。その結果、システムの再構築後である 2016 年のシングルビーム観測では n2control と同様に科学観測を行い天体のデータを取得することができた。

現在は、マルチビーム化に向けた開発を行っている。具体的には、1.5 TB / day にもなる観測データのチリ-名古屋間の輸送方法の検討や、膨大なデータを扱うことによる人為的ミスや観測者の負担を軽減するための自動観測の実装を進めている。さらに、クラウドサービスを使い現地と名古屋の計算機を同期することや、ROS (Robot Operating System) を使った望遠鏡の駆動装置の操作やシミュレータの導入も考えている。

今後は 6 月のシングルビームでの観測開始後に、開発と並行して高速スキャンの確認試験などを行い、2017 年秋のマルチビームの観測システムの稼働に向けた開発を行っていく予定である。

本公演ではこれまでの進捗と今後の開発について報告する。

観測 a14 近赤外面分光装置 SWIMS/IFU の開発 河野志洋 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

我々は、東京大学アタカマ天文台 (TAO) プロジェクトがチリのチャノートル山に建設、計画中の 6.5m 赤外線望遠鏡に、第 1 期装置として搭載する近赤外撮像分光装置 SWIMS を開発している。SWIMS は $\phi 9$ 角の広い視野を持つ上、0.9 ~ 1.4 μm 、1.4 ~ 2.5 μm の二つの波長帯について同時に撮像、多天体分光を行うことができるユニークな観測装置である。また、SWIMS は十数種類の多天体分光用のマスクをカラーセル内に格納しており、マスクを切り替えることで様々な観測天体に対応することができる。我々は、このカラーセル内に面分光観測を行うモジュールを格納することで、多天体分光モードと面分光モードの切り替えを可能にすることを計画している。

通常のスリット分光装置では 1 回の露出で観測天体のスペクトルと 1 次元の空間情報が得られるのに対し、面分光装置ではスペクトルとともに 2 次元の空間情報を得ることができる。これにより、効率的に観測が行えることや銀河の空間的な物理状

態を均質に捉えることができるなど大きな利点が得られる。しかし、面分光装置は光学系が複雑になるため、用いる光学部品に高い精度が要求され、作製に技術的困難が生じる。この技術面の問題を克服し、要求精度を満たした装置を開発することが我々の目的である。本講演では、開発中の SWIMS 用面分光装置の特徴や性能、現在の開発状況を報告する。

観測 a15 FOXSI ロケット実験に向けた両面ストリップ CdTe 検出器の開発

古川健人 (東京大学高橋研究室 M1)

太陽コロナは太陽を取り巻く薄い高温大気であるが、その温度 (10^6K) を維持するための加熱機構は現在にいたるまで謎のままである。我々は現在、NASA、ミネソタ大学、カリフォルニア大学バークレー校と共同で、ロケット搭載検出器によって太陽からの硬 X 線放射の直接撮像を行い、太陽コロナ、特に静穏領域におけるエネルギー解放の研究を進めている。静穏領域におけるエネルギー解放現象は、太陽コロナ加熱に大きく寄与している可能性があり、その研究はコロナ加熱機構の解明に大きな手がかりを与えるものである。このロケット実験は FOXSI (Focusing Optics X-ray Solar Imager) 実験と呼ばれ、太陽からの $\sim 15\text{keV}$ までの硬 X 線を世界ではじめて、斜入射望遠鏡で撮像分光観測を行おうとするものである。望遠鏡は 7 台搭載され、その内の 6 台の望遠鏡の焦点面検出器を我々のグループが提供することになっている。FOXSI 実験で使用する硬 X 線望遠鏡は、2m の焦点距離をもち、高いエネルギー領域で 25 秒角 (HPD: Half Power Diameter) という高角度分解能を有することが特徴である。したがって検出器もまた、望遠鏡に見合うだけの位置分解能を硬エネルギー領域において要求される。我々の開発している CdTe 検出器の特徴は Si 検出器よりも高いエネルギー領域に大きな感度を持ち、FOXSI 実験に適した検出器といえる。特に、FOXSI 用に開発された CdTe-DSD はストリップのピッチが $60\mu\text{m}$ とこれまで、我々が開発してきたものの中で最も微細な構造を持つ。この二つの特徴のため、FOXSI ロケットの硬 X 線望遠鏡が持つ、硬 X 線領域 ($4\text{--}15\text{keV}$) における高い角度分解能を十分生かすことができる。本講演では検出器や読み出し機器の構成、狭ピッチ CdTe-DSD の応答関数のキャリブレーションの現状の他、FOXSI 実験から期待できる科学的知見について発表する

観測 a16 新手法「ハイブリッド法」による多重薄板型 X 線望遠鏡の

反射鏡形状精度向上への取り組み

大塚康司 (名古屋大学 Ux 研 M1)

日本の X 線天文学では、軽量大面積の望遠鏡を実現するため、アルミ薄板を基板とする多重薄板型の X 線望遠鏡を採用し、レプリカ法によって表面粗度の小さな鏡面を実現してきた。レプリカ法とは、表面の滑らかなガラス母型に X 線を反射させる鏡面物質を成膜後、アルミ基板に鏡面物質を転写し反射鏡を

製作する方法である。しかしこの手法では、母型からの離型時に基板が歪み、角度分解能の劣化が生じる。

この形状劣化を抑えるために新たな手法として「ハイブリッド法」を考案した。ハイブリッド法では鏡面物質を成膜した薄板ガラスをアルミ基板に貼り付け反射鏡とする。これにより鏡面物質の転写工程をなくし、形状劣化の抑制を図った。本研究ではサンプルを実際に製作し、問題点の洗い出しや、サンプル形状評価を行った。

厚さ 0.1 mm の平面薄板ガラスに、厚さ 1000 Å のプラチナを成膜し反射面とした。これを高さ 36 mm、厚さ 0.3 mm のアルミ基板にエポキシ接着剤で貼り付けてサンプルを製作した。エポキシの厚さは約 $10\mu\text{m}$ である。可視光を用いて性能評価を行うと、母線方向の形状誤差は角度分解能にして 2.8 分角であった。この値は、従来法で製作したものと比べ優れているとは言えない。表面形状を測定すると、約 $70\mu\text{m}$ の鏡面側が山となる構造が見られた。解析の結果、この変形は、熱膨張率の異なる材料を張り合わせたために起こるバイメタル効果で説明出来ることがわかった。

バイメタル効果について簡単なモデルを考え母線方向の形状誤差を見積もると、製作時から 1°C 温度が変化するだけでも、角度分解能は数分角劣化することがわかった。今後は、熱膨張率がガラスに近く剛性が高い CFRP 等の利用や、構造を持ち変形し辛いと考えられる一周鏡の製作等を検討する。

1 高木任之「図解でわかる構造力学」2002 株式会社日本実業出版社

観測 a17 SMILE で切り拓く MeV ガンマ線天文学 齋藤要 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

MeV ガンマ線は元素合成や、活動銀河核やガンマ線バーストにおける粒子加速、ブラックホール近傍の強い重力場、宇宙線と星間物質との相互作用といった様々な現象に対して新しいプローブになることが期待されている。 ^{26}Al は半減期が 10^6 年と比較的長く、寿命が銀河内の物質拡散のタイムスケール程度であるため、崩壊に伴う 1.8MeV のガンマ線放射は物質循環のトレーサーとなることが期待されている。

MeV ガンマ線により様々な現象の解明が期待される一方で、観測はほとんど進んでいない。1991-2000 年に全天観測を行った COMPTEL は 30 程しか定常天体を発見できず、2003 年より観測を続けている INTEGRAL は 4 天体しか検出できていない。気球実験もいくつか行われてはきたが、地上較正実験から予想される感度を達成した検出器は一つもない。これはガンマ線は集光が困難で、また衛星や検出器が宇宙線との相互作用によりガンマ線放射源となってしまうなど雑音が多いためである。MeV ガンマ線領域での高感度観測には根本的な雑音対策が必要不可欠である。

MeV ガンマ線天文学の停滞を打破すべく、我々は独自で開発した電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron-tracking

Compton camera:ETCC)を用いた気球実験(Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-ballon Experiment:SMILE)計画を進めている。2006年に行われたSMILE-I気球実験では、宇宙環境下でガンマ線観測が可能であることを実証し、ガンマ線背景放射のスペクトルの観測に成功した。2018年4月にはSMILE-II+として気球実験を行うことが決定しており、銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線の撮像観測を行い、MeVガンマ線科学観測の実現を目指す。

本講演では、現在進行中のSMILE-II+、そして今後の計画としてのSMILE-III, SMILE衛星の概要と、それぞれに搭載される装置がもたらす結果について報告する。

観測 a18 衛星による全天観測に向けた気球実験で用いる次世代型 MeV ガンマ線検出器の性能評価と予想検出感度

小野坂健 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

宇宙 MeV ガンマ線観測を行うことで元素合成プロセスの解明や粒子加速の機構の解明などに繋がると期待されている。しかし、MeV ガンマ線の衛星による全天観測は、1991年のCOMPTELによるもの以上の検出感度を実現した観測はほとんど行われておらず、未開拓な部分が多い領域である。それにも関わらず現在までに十分な観測が行われていないのは、MeVガンマ線観測には様々な困難が存在するからである。その困難を克服すべく、様々な観測手法が考えられた。その一つがコンプトンカメラである。これは検出器内で起きたコンプトン散乱の散乱角からイメージングをするものである。しかし、従来のコンプトンカメラでは1事象で散乱の到来方向を表す2角度の内一方しか測定できない為、統計的手法で到来方向を推測する他なく、数十度の平均散乱角程度に広がったPSF(Point Spread Function)内に存在する観測対象以外の天体の影響を排除できないという問題点があった。この問題点を解決すべく、我々は従来では測定できなかった反跳電子の方向も検出し、コンプトン散乱事象毎に入射光子の運動量を得る電子飛跡検出型コンプトンカメラ(Electron-Tracking Compton Camera:ETCC)の開発を進めており、従来よりも優れたPSFや雑音除去能力等を実現している。現在我々は将来的に衛星によるCOMPTELの100倍の検出感度での全天観測を目標に、気球実験や地上実験により段階的に実証を進めている。2018年4月には、銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線を観測ターゲットとして、気球を用いたETCCによる天体観測実証実験SMILE-II+をオーストラリアで行う。本講演では、SMILE-II+のフライトモデルETCCの有効面積・角度分解能の評価、及びこれらから予想される検出感度について報告する。

観測 a19 系外惑星観測のための補償光学装置に用いる干渉型波面センサ

西岡秀樹 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

国内最大となる岡山3.8m望遠鏡で、私たちは太陽系外にある木星型惑星の直接撮像観測を目指している。1995年の惑星発見から現在まで3,000個以上の惑星候補が報告されているが、これらの候補の大半は主星に対する惑星の影響を捉えたドブラー法やトランジット法などの間接法で発見されてきた。これに対して私たちは惑星の光を直接捉え、惑星大気の組成や表面状態を測定できる直接撮像法による惑星観測を狙っている。惑星の光は主星に対してとても暗く、主星の散乱光によって埋もれてしまうため、惑星の直接撮像が難しくなる。そこで私たちは大気ゆらぎを解消する補償光学と主星の光を消すコロナグラフを組み合わせた惑星撮像装置SEICA(Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraph Adaptive optics)の開発を行っている。補償光学は波面センサ・制御装置・可変形鏡の3つの装置で構成され、大気ゆらぎによる波面の乱れの測定・補正を行う。主星と惑星との間のコントラスト比が $10^5 - 10^6$ と非常に大きく、天体からくる光の波面を補償光学で観測波長(1.2 μm)の20分の1の非常に小さい波面誤差に抑えないといけない。そのため補償光学用波面センサの測定点数を500まで増やして8.5kHzの高い頻度で波面の測定を行う。これは今までの補償光学装置と比べ、測定点の数も測定頻度も一桁上の仕様になっている。そしてこのSEICAの波面センサには点回折干渉波面センサを採用している。一般に波面の傾きを測定するシャックハルトマン型波面センサとは異なり、点回折干渉波面センサは波面の位相そのものを測定して、波面形状を高速かつ高精度に計測することを可能にする。講演ではこの点回折干渉波面センサの詳細について述べる。

観測 a20 超大型光赤外望遠鏡の鏡計測

今西萌仁加 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

より回折限界に近い星像を得るためには、望遠鏡の鏡が理想形状となっていることが重要であり、一般に観測波長の $\frac{1}{10}$ 以下の形状精度が求められる。これまで鏡形状の高精度な計測手法として、干渉法が用いられてきた。これは、基準となる高精度な参照面を用いることによって、原理的に波長の数十分の1以上の精度での計測が可能となるものである。しかし、近年の望遠鏡の超大型化や非球面化によって、装置の巨大化や参照面の複雑化が進み、様々な困難が生じてきた。これに対してCGHコモンパス干渉計(Kino et al.2012)や軸外非球面干渉計(J.Burge et al.2008)のような手法が解決されてきたが、本研究はこれらとは全く異なるアプローチでの超大型非球面鏡の高精度形状計測を目標としている。本研究では、廉価な近似参照面を用いることができるほど計測面を分割し、小型干渉計で形状データを得たのちにステッチングする手法を開発している。この手法によって以下3つの利点が挙げられる。1)空気揺らぎの影響を受けやすい、参照面と被検面間の光路をこれまでより2桁以上短縮、2)計測範囲が無制限、3)廉価な参照面を差し替えることによって任意の形状が計測可能。これに

よって複数の異なる大型非球面鏡をこの小型干渉計ひとつで形状計測を可能にするだけでなく、これまで行うことができなかった凸面鏡の干渉法による形状計測が可能となる。現在この小型干渉計を開発しており、計測視野は ϕ 30 mm、1 ショットの計測時間は 80 ms、10 nm 以下の計測再現性を有している。この手法の開発により、鏡計測のコスト・時間が軽減されるだけでなく、より高次の非球面鏡の製作も可能になることが期待される。本公演では、超大型望遠鏡の鏡計測についての導入と私たちの研究の現状について述べる。

- 1 J. H. Burge, W. Davison, C. Zhao, and H. M. Martin,
- 2 Kino M, Kurita M,

観測 a21 木曽超広視野高速カメラ Tomo-e Gozen の開発

小島悠人 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

超新星や変光星などの時間変動天体の検出には、モニタリング観測が必要となる。この”Time domain 天文学”は、多くの天文分野において重要なアプローチになることが期待されている。これまでのモニタリング観測では、すばる望遠鏡の HSC(Hyper Suprime-Cam) や東京大学木曽観測所の KWFC(Kiso Wide Field Camera) は突発天体の検出に大きく貢献してきた。しかし、これらの装置は検出器に CCD センサを用いており、読み出し時間の制約により 10 分以下で変動する天体現象を検知することが難しかった。例えば、FRB(Fast Radio Burst) や超新星ショックブレイクアウトの検出には 10 秒以下の時間分解能をもつモニタリング観測が必要となる。そこで、我々は超広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen の開発を進めている。Tomo-e Gozen は東京大学木曽観測所のシュミット望遠鏡の ϕ 9 度の視野を 84 チップの CMOS センサで覆う構造となっており、計 20 平方度の非常に広い視野を持つ。CMOS センサは従来の CCD センサに比べて読み出し時間が極めて短いため、10 秒以下の時間分解能で観測が可能である。また、常温駆動時の CMOS センサの暗電流が木曽のバックグラウンドを下回るため、冷却装置を必要としない。そのため、Tomo-e Gozen は 50cm \times 50cm、重さ約 80kg の非常にコンパクトな装置となっている。Tomo-e Gozen は 2 時間で全天サーベイが可能である。これにより、FRB や超新星ショックブレイクアウトの検出だけでなく、重力波可視光対応天体の探査、地球近くの高速移動天体の検出など数多くの科学的成果が期待される。なお、Tomo-e Gozen で検出された突発天体は、京都大学 3.8m 望遠鏡でのフォローアップ観測も予定されている。

本講演では、Tomo-e Gozen の観測計画と期待される科学的成果、他の広視野サーベイ観測装置との比較について紹介する。

- 1 sako et al.

観測 a22 新分光方式による、高効率で空間分解能を持つ高分散分光器の開発

細川晃 (国立天文台三鷹 M2)

現在のところ可視赤外線観測用の望遠鏡に搭載されている分光器は、回折格子を用いて波長毎に光を分散させる方法が主流である。しかし、分散による分光法ではより詳細なスペクトルを得るために高分散化すると光の効率が悪くなるという欠点があり、現行の分光器では数%程度の効率に留まっている。本研究では光の干渉縞模様を逆フーリエ変換を施すことで波長ごとの強度を得る、フーリエ分光法を基にした分光器の開発を行っている。この分光法は波長分解能を高めても効率数十%を達成するという利点があり、また先行研究によって鏡の位置を動かす必要のない静的フーリエ分光法 (StFT) が提案されたことで、この分光法の欠点であった鏡の位置制御の必要性や分光に時間がかかる点が解消され、分散分光に比べて干渉による分光法の有用性が高まった。これを踏まえ、試作中の分光器では静的フーリエ分光法に光学素子を追加することで、高い効率を維持しつつ、新たに大まかな空間分解能をもつ高分散分光器を目指している。これにより太陽系外惑星の研究分野では、直接撮像が可能な天体について大気組成などを詳しく探ることが可能となる。

本発表では、光学系の組み立て段階にある新分光器の現況、及び将来展望について紹介する。

- 1 E V Ivanov 2000 J.Opt.

観測 b1 金沢大断熱消磁冷凍機における読み出し系ノイズ低減を目指した研究

中山健太 (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 X 線の光子 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、6 keV の X 線に対して $E/\Delta E \geq 1000$ 高いエネルギー分解能を実現する。その中でも超伝導遷移端における抵抗変化を温度計として利用する 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さらなる向上が見込まれている。DIOS 衛星などの計画では、TES 型 X 線マイクロカロリメータを用いることで、これまでの X 線天文衛星よりも優れた撮像分光性能を目指している。

金沢大学では TES 型 X 線マイクロカロリメータに必要な 100 mK 以下の極低温を無重力状態でも実現できる断熱消磁冷凍機の動作環境の開発を進めている。先行研究では、5.9 keV の X 線に対してエネルギー分解能 $\Delta E = 3.8 \pm 0.4$ eV(FWHM) を実現している。さらなる性能向上を目指し、我々は今回、TES の信号を読み出す回路のノイズに注目した。先述の通り、TES は超伝導遷移端における抵抗変化を温度計として利用する。その抵抗変化は TES の動作回路の電流変化として SQUID

(Superconducting QUantum Interference Device) で読み出している。我々の使用する SQUID 駆動装置は SQUID の動作点を決定する際に使用する 23 Hz の正弦波を発生させる IC から電源をとっており、SQUID 動作時にもその 23 Hz とその高調波がノイズとして漏れ込み、分光性能に影響していた。そこで私は新たにレギュレータで電源を作り、正弦波を外部導入できるように SQUID 駆動装置を作り直した。実際に SQUID を動作させたところ、駆動装置としての正常な動作と、期待通りのノイズ特性を確認した。これにより、今後の X 線パルス取得実験のさらなる分光性能の向上が期待される。

観測 b2 ひとみ衛星搭載 SXS のエネルギー分解能に及ぼす宇宙線の影響に関する研究 甲斐優 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

2016年2月に打ち上げられた X 線天文衛星ひとみ (ASTRO-H) に搭載された軟 X 線精密分光装置 (SXS) は、X 線マイクロカロリメータを用いて、6 keV の X 線に対して 5 eV (半値全幅) という画期的なエネルギー分解能を実現した。X 線マイクロカロリメータとは、入射 X 線光子の 1 個 1 個のエネルギーを素子の温度上昇として検出し、極低温下動作させることで非常に高い分解能を実現することができる X 線分光装置である。SXS は従来の半導体検出器と比べて 30 倍程度優れた性能を持ち、これにより高温ガスのバルクな運動や乱流を ~ 100 km/s の精度で測定することが可能になった。衛星による天体観測では、目標天体からの光子以外の不必要な信号も存在する。その 1 つは宇宙線と呼ばれる荷電粒子であり、検出器の性能に影響を及ぼす。SXS にはゲイン変動をモニタするために、 ^{55}Fe 線源の特性 X 線を常時照射している較正用ピクセルが存在する。私は、荷電粒子の分光性能への影響を評価するために、地磁気の cut-off rigidity (COR) とエネルギー分解能の関係を調べた。その結果、検出器のエネルギー分解能は、COR の値によって 0.5 eV 程度変化することがわかった。本公演ではその解析結果について詳しく報告する。

観測 b3 ハイブリッド CMOS イメージセンサの X 線検出器としての性能評価 下井建生 (東京工業大学 宇宙科学研究所 堂谷研究室 M1)

天体から放射される X 線を観測するための望遠鏡の焦点面検出器としては、CCD イメージセンサという固体撮像素子が標準的に使われている。CCD は他の X 線検出器に比べて高い検出効率と大面積、中程度のエネルギー分解能を兼ね備えているからである。

しかし、CCD には時間分解能が悪く、そのため明るい天体では X 線光子のエネルギーを正しく観測できないなどといったデメリットも持っている。近年では CMOS イメージセンサという CCD とは信号の読み出し方法の異なる撮像素子の高性能化が進んでおり、上記 X 線 CCD の欠点を克服できることが

ら、CCD に替わって X 線望遠鏡の焦点面検出器に使われることが期待され始めている。

私は、ADVACAM 社から販売されているハイブリッド CMOS イメージセンサ MiniPIX で X 線照射実験を行い、そのエネルギー分解能や電化分割の状況を調べ、CCD と比較し現時点での CMOS イメージセンサの性能を評価してみた。実験結果から CMOS が将来 X 線天文学において有用となるかを考察する。

観測 b4 近赤外線高分散分光器 WINERED : short time scale での波長安定性の調査 渡瀬彩華 (京都産業大学理学研究科 M1)

WINERED は京都産業大学神山天文台赤外線高分散ラボ (=LiH) で開発された近赤外線高分散分光器である。波長 0.9-1.35 μm (z,Y,J bands) において高分散 ($R_{max}=28,000$ および 80,000) でありながら、これまでにない超高スループット ($> 50\%$ for Wide mode, $> 35\%$ for Hires mode) を達成している [1]。現在、WINERED はチリ・La Silla 天文台にある口径 3.58m の New Technology Telescope (NTT) に搭載され、星間物理学や恒星物理学を中心とする幅広いサイエンスにおいて多くの成果を生み出しつつある。

WINERED はいわゆるドップラーサーチを目的とした高分散分光器ではないため、長期的な波長決定精度の安定性は求められない。よって、一般的な高分散分光器に求められる以上の格別な配慮をした設計ではないが、赤外線観測においては観測中の数分~数時間の短いタイムスケールの安定性は、高 S/N 比 (> 200) のスペクトルを得るためには重要になってくる。例えば、異なるフレーム間で波長のドリフトが生じた場合、わずかな波長分解能の劣化が発生するだけでなく、スカイスペクトル差し引き後の夜光輝線の引き残しや標準星を用いて大気吸収線補正の際の割り残しが発生し S/N 比が劣化する。実際、初期の WINERED では実際に $\sim 0.25\text{pix/K}$ のドリフトが発生し、最終スペクトルの精度に影響を与えていた。これは、ハニカム構造を使用した光学定盤内部の非均一な熱伝導に起因していることが詳細解析によって判明したので、断熱材を用いて実効的な比熱を大きくし、温度変化を緩やかにすることで波長ドリフトの軽減を試みている。

本発表では、上記対策後の NTT の環境下での波長安定性の解析結果及び、最終解析スペクトルに与える影響について議論する。

- 1 Ikeda, Yuji; Kobayashi, Naoto; Kondo, Sohei; et al. "High sensitivity, wide coverage, and high-resolution NIR non-cryogenic spectrograph, WINERED" Pro

観測 b5 1.85 m 電波望遠鏡による多輝線観測のための受信機開発

上田翔汰 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

星間分子雲の凝縮から恒星誕生までの星形成過程を解明する上で、分子雲の温度や密度同位体比などの物理状態を知ることが非常に重要である。分子雲の主な構成要素は水素分子であるが、これは 10 K 程度と非常に低温である上に無極性分子であるため、電磁波を放射しない。そこで、水素分子の存在量をはじめとする主要な物理量を精度よく推定することができる一酸化炭素の同位体 ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O の分子輝線の観測を行うことがたいへん重要になる。

我々大阪府立大学宇宙物理学研究室はこれら 3 つの CO 分子輝線 ($J = 2 - 1$, 220 ~ 230 GHz) の同時観測を実現する口径 1.85 m の電波望遠鏡を開発し CO の広域マップを作成してきた。本望遠鏡の従来の受信機システムは円偏波分離 2SB-Mixer 方式で、両偏波ともに同じ周波数領域を観測するものであった。

さらに、近年は星形成過程を解明する上で、一酸化炭素分子だけでなく様々な分子輝線の観測を行い、分子進化などの議論を行うことが重要視されるようになった。しかし、多様な分子輝線の広域観測はあまり進められていない。そこで本研究では、220 ~ 240 GHz 帯に存在する CO, SO₂, CH₃OH, HNCO などの多様な分子の輝線の広域マップを作成するために、右旋偏波と左旋偏波で異なる観測周波数領域を設定した新たな受信機システムを開発した。本開発で主に行なったことは、「225 GHz, 235 GHz の LO に対応した 2 種類の SIS Mixer の製作と評価」および「常温 IF 信号伝送系の設計と評価」で、SIS 評価系専用の IF 系の改良も行なった。その評価系を用いて SIS Mixer の評価を行なった結果、225 GHz, 235 GHz の LO それぞれに最適な SIS Mixer を各 2 個用意することができた。さらに 常温 IF 信号伝送系のコンパクト化にも成功した。そして現在、1.85 m 電波望遠鏡にこれらを搭載し、試験観測を行っている。

観測 c1 NANTEN2 マルチビーム受信機システムの開発

稲葉哲大 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M2)

我々は、チリ・アタカマ砂漠の 4m ミリ波/サブミリ波望遠鏡 NANTEN2 を用いて一酸化炭素分子 CO($J=2-1,1-0$) 輝線の観測を行い、その観測データを用いて大質量星形成や超新星残骸など様々な星間現象を個々の領域において解明を進めてきた。その一方で、他波長とは異なり、現在に至るまで高分解能で全天をカバーした CO の観測データは未だに存在しないことが大きな課題となっている。

その現状を受けて、我々は NANTEN2 で南半球から観測可能な全天の約 70% をカバーする超広域 CO 観測を行う NASCO(NANTEN Super-CO Survey as Legacy) プロジェクトを推進している。この計画の主要な領域 (全天の約 37%) をおよそ 2 年で実現するために、旧来のシングルビームとは異なる

る、高分解能での広域サーベイの可能な新型のマルチビーム受信機を開発を行なっている。

NASCO 計画では 115GHz 帯両偏波 SSB 受信機 4 ビームと 230GHz 帯両偏波 2SB 受信機 1 ビームを組み合わせたマルチビーム受信機を搭載予定であり、ビーム数の増加に伴い制御機器の台数が桁違いに増加する。この問題を解決するために、CompactPCI 規格の D/A ボードや A/D ボードを使用し、その CompactPCI ボードを複数枚搭載できる計算機を使用することで、1 台の計算機で全ての機器を一括して制御することが可能になる。これまでに、実験室において 1 ビームにおける測定系は完成しており、現在は実際に NANTEN2 に搭載する 5 ビーム同時制御用の計算機類のセットアップと受信機システムの開発を行っている。本公演では、新型のマルチビーム受信機のシステム概要と開発の現状、今後の計画について述べる。

観測 c2 NASCO 受信機に用いる超伝導 SIS 素子の評価

鈴木雅浩 (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、NASCO (underlineNANTEN2 underline Super underline CO survey as legacy) を進めている。この観測は全天の 70% 我々は現在、NASCO 用受信機を開発を行っている。この受信機の特徴は、115 GHz 帯 4 ビームと 230 GHz 帯 1 ビームの計 5 ビーム受信機であり、かつ 2 周波同時観測が可能である。観測効率の向上により、現在の受信機では数十年かかると言われている NASCO を約 4 年で達成することができる。また、天体からの RF 信号 (Radio Frequency) と、局部発振器からの LO 信号 (Local Oscillator) を混ぜることにより周波数を変換するヘテロダイン方式を採用している。ヘテロダイン受信機には SIS 素子 (Superconductor Insulator Superconductor) という受信機の性能を大きく左右する超伝導素子が搭載されている。素子によるノイズが小さければ、より微弱な信号も短時間で検出できるようになる。また、広い周波数帯域の受信ができる素子を用いれば、一回の観測で得られる観測輝線を増やすことが可能になる。NASCO 受信機用素子は IF 信号の周波数帯域 4-12GHz 内で受信機雑音温度 (TRX)50K 以下が要求されている。これまで使用してきた素子は TRX が 50K 以下のものはあったが、周波数帯域は 4-8GHz と狭く、要求性能を満たせたものは見つかっていなかった。しかし、大阪府立大学の上月さんが設計した素子 上月素子は周波数帯域が 4-12GHz 内で TRX も 50K 以下のものが確認されている。私は上月素子を評価し、NASCO 受信機用の素子を確保する必要があった。今回上月素子の評価を行ったところ、要求性能を満たす素子が見つかった。TRX は LO 信号の周波数が 90-115GHz の間で IF 信号の周波数帯域が 4-12GHz 内で 50K 程度という良質な素子が得られた。本公演では NASCO 受信機用 SIS 素子の評価に用いたデュワなどの評価系の構成、評価に用いたシステム、詳細な結果について報告する。

観測 c3 フーリエ分光器を用いた中間赤外線アレイ 検出器の波長感度特性の評価 土川拓朗 (名古屋大学 赤外線グループ (UIR 研) M1)

次世代赤外線天文衛星 SPICA の中間赤外線分光器 SMI では、 1026×1026 ; ピクセルの Impurity Band Conduction (IBC) 型 Si:Sb 検出器を用いた観測が行われる。この 2 次元アレイ検出器の全ピクセルに対して波長感度特性の高精度化を要求することで、より高精度な天体スペクトルを得ることが期待されている。しかし、これまで赤外線 2 次元アレイ検出器の波長感度を効率的に評価する方法は確立されてこなかった。そこで、本研究では、赤外線天文衛星「あかり」の Backup 品である IBC 型 Si:As 検出器 (256×256 ; ピクセル) を利用して、中間赤外線 2 次元アレイ検出器の波長感度特性の評価方法を確立する。

波長感度の測定には、複数ピクセルを同時に分光可能で、かつ検出光の S/N が高いフーリエ赤外線分光器を用いた。中間赤外線検出器は極低温でのみ動作可能であるため、クライオスタットを用いて冷却する必要があり、常温のフーリエ分光器の干渉光はクライオスタット内に入射させる必要がある。そのため、クライオスタット内に光を取り入れるための低温光学系と構造体を設計した。

結果として、分光器からの干渉光が当たった 27 ピクセルについて、約 3% (波長 $24 \mu\text{m}$) の精度で、同時に素子の波長感度特性を測定することができた。今後、より S/N を上げ、測定できるピクセル数を増やすことで、次世代赤外線天文衛星 SPICA に用いる IBC 型 Si:Sb 検出器の評価にも応用する予定である。また、波長感度特性を得ることができた 27 ピクセルについて、それぞれ検出素子に加える印加バイアスを上げると、波長感度特性のカットオフ波長が有意に伸びたことを確認できた。このことは、現在、良好な感度を持つ検出器が存在しない波長 $30 - 50 \mu\text{m}$ の観測にも応用が期待される。

観測 c4 新しい遠赤外線分光装置の構造物に塗布する 黒色塗料の特性評価 前田浩希 (名古屋大学 赤外線グループ (UIR 研) M1)

我々は、インドと共同で気球観測実験を行っている。一階電離炭素の微細構造禁制線である、 $[\text{CII}]158 \mu\text{m}$ を用いて、星形成領域の観測をしている。現在は、遠赤外線アレイ検出器を用いたファブリ・ペロー分光器を開発し、観測性能をより向上させた観測を目指している。この分光装置を、インドの 1、望遠鏡に搭載して観測を行う。

このうち、分光装置内の構造物には、散乱、迷光を抑えるために黒色塗装を施す必要がある。また、分光装置自身の熱放射を低減するために、分光装置全体を極低温で使用する必要がある。よって、黒色塗料に求められる特性は以下である。1) 検出器が感度を有する、遠赤外線波長域において反射率が $\sim 1\%$ 未満である。2) 極低温-室温を繰り返す熱サイクルで剥離が起

こらない。そこで、遠赤外線黒いことが知られている特殊な黒色塗料を二種類入手し、1) 2) を満たすか調べた。

測定試料は、膜厚を定量的に制御できる塗布方法を確立して作成した。反射率測定は、赤外線フーリエ分光器を用いて行った。高い設置再現性を得られる治具、複数の角度を測定できる $h\eta$ ステージを用いた補助光学系を取り入れ、反射率の膜厚の違い、入射波長、入射角度依存性を調べた。一方、熱サイクルは、試料を液体窒素に浸して 2) の状況下で剥離の様子を観察した。

反射率測定の結果から、同じ膜厚で比較した場合、二種類の黒色塗料で反射率に有意に差があることが分かった。さらに、反射率が低い方の黒色塗料では、膜厚 $400 \mu\text{m}$ まで塗布することで、1) をおおよそ満たすことが分かった。その時の反射率の最大値は入射角度 10° 、 50° でそれぞれ 0.6% 、 3% となった。一方、熱サイクルは黒色塗料の種類、膜厚に依らず、10 回以上は剥離しない結果となった。測定で得られた結果を、物理モデルを用いて考察する。

観測 c5 トモグラフィー技術を用いたすばる望遠鏡 における次世代補償光学装置の波面センサーユニットの 開発 櫻井大樹 (東北大学天文学専攻 M1)

地上望遠鏡でサイエンス観測を行う際、天体からの光は地球大気の影響によってその位相が変位し、波面が乱れた状態で地上望遠鏡に届く。補償光学はこの波面の乱れを測定して補正することで、大気の影響を受けない仮想的な波面を再構成することができ、大型地上望遠鏡にとって補償光学は必要不可欠な技術となっているが、従来の補償光学では、視野のわずかな部分のみ補償することができなかった。すばる望遠鏡に搭載されている補償光学装置もこのような従来型であり、広い視野で補償光学を効かせられるような装置の開発が求められている。我々のグループでは広視野多天体補償光学 (MOAO) 装置の開発を行い、すばる望遠鏡の補償光学装置のアップグレードを目指している。MOAO はトモグラフィー技術という技術を用いることで、複数のガイド星を用いて波面情報を高さ方向に 3 次元的に推定することができ、すばる望遠鏡や将来的には TMT のような大型地上望遠鏡でも広視野での補償を行うことができる。しかし、複数のレーザーガイド星を使用するため無限遠にある天体とは合焦位置が異なり点や、またナスミス焦点に設置するため追尾中に天体を写野に固定するためのイメージローターが必要であるが、レーザーガイド星は主鏡に対して固定されているため、検出器は独立に回転させる必要がある。これらハードウェア面での問題点や、波面測定と補正をリアルタイムで行うための計算速度やエラーやノイズを最小限に抑えるソフトウェア面での精度の課題がある。本発表では、これらの問題や課題をクリアするためのハードウェア面での開発状況、ソフトウェア面での開発状況と、すばる望遠鏡での補償光学装置のアップグレードの将来的な展望を紹介する。

観測 c6 JAXA 宇宙科学研究所標準平行 X 線光源室 用可視光平行光源の立ち上げと平行度評価 浅井龍太 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

宇宙科学研究所の特殊実験棟 1 階には 30m の長さの X 線ビームラインが設置されており、首都大やその他研究グループが検出器の性能評価に用いている。しかし、X 線を発生させ測定を行うには真空層に入れる必要があるため時間がかかり、そのため測定中に検出器の異常がわかった場合ビームラインからすぐに取り出し対応することもできない。

そこで真空槽に入れる前に X 線観測装置の性能を簡易的に測定できるよう、可視光の平行光源を設置する。

本実験ではドブソニアン望遠鏡を組み立て横に倒し、接眼部からピンホールを通して光を出すことで平行光源として利用している。望遠鏡は安価、熱伝導率が 0 に近い、大口径が得やすいなどの理由から、Sky Watcher ドブソニアン望遠鏡「DOB 18」を採用した。望遠鏡を標準平行 X 線光源室に設置し光軸を調整した後、セオドライト (方位角と仰角の傾きを計測するため角度計測器) を 2 台用いて焦点距離の調節を行った。具体的には、光源と主鏡の距離を変えることで望遠鏡から射出される光の elevation が変わるので、焦点距離を変えながら 2 台のセオドライトで同じ elevation で測定する距離を平行光を出す位置として求めた。さらに今回の実験では性能評価として、平行光源の平行度を評価した。具体的には、平行光の領域ごとの光線方向 (elevation と azimuth) の分布を測定することで平行光源全体の平行度を得た。平行度を求めるために、セオドライトを動かしそれぞれの測定点で平行度の測定と、ペンタプリズムに反射させた平行光をセオドライトで測定する 2 通の方法で測定を行った。前者の測定では平行光全体の elevation がおよそ 5 秒角以内で得られたが、azimuth は足場の影響でセオドライトの水準が正確に定まらなかったため適切な結果は得られなかった。後者の測定では平行光全体の azimuth が 5 秒角以内、elevation は 15 秒角以内として得られた。また、得られた結果から azimuth と elevation の差がわかる 2 次元マップを作成した。

観測 c7 Gaia 計画の科学的ゴールと Gaia 探査機について 南祥平 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

Gaia は、世界初の位置天文衛星で 10 万個以上の恒星を観測しカタログを作った Hipparcos(1989-1993 年) の後継として、ESA(European Space Agency) によって、2013 年 12 月 19 日に打ち上げられた位置天文衛星である。Gaia の名前の由来は、Global Astrometric Interferometer for Astrophysics の頭文字をとったものである。これは、独自の干渉計の光学技術を利用する計画だったことに由来するが、後に観測方法は 2 つの光学望遠鏡によって天体が集められた光を調べるといった直接的な方法に変わった。そのため、頭文字としての意味はなさなくなっ

たが、プロジェクトの継続を示すため名前はそのままとなっている。Gaia のデータ処理と校正を担当する機関として、2007 年に DPAC(Data Processing and Analysis Consortium) が選ばれた。打ち上げをしてから数週間後、太陽-地球系の L_2 ラグランジュ点に到達し、2014 年 7 月 19 日から科学観測を開始した。それから Gaia は 5 年間に渡り、20.7 等級以下のすべての天体についての位置、固有運動、年周視差、G バンド (Gaia の観測波長) での広帯域測光、BP(Blue Photometry) と RP(Red Photometry) を観測している。2016 年 9 月 14 日に最初のデータがリリースされ (DR1)、そのデータには 11 億個以上の天体の位置、固有運動、年周視差、明るさが含まれている。このデータは、Gaia のホームページを通して Gaia Archive から検索できる。DR2 では、BP/RP と、このドップラー効果の観測に基づく視線速度のデータも含まれる予定となっている。今回は、この Gaia 計画の科学的ゴールと、Gaia 探査機とその搭載物についてまとめる。

1 Gaia Collaboration The Gaia mission (2016)

観測 c8 マイクロマシン技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発 藤谷麻衣子 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

我々は、地球磁気圏探査衛星 GEO-X やバイナリーブラックホール探査衛星 ORBIS などへの搭載を目指して、マイクロマシン (MEMS) 技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発を行っている。数百 μm のシリコン基板にドライエッチングにより数万個の数十 μm 幅の高アスペクト比の曲面穴を形成し、側壁を反射鏡として用いる。高温アニールにより反射面を nm レベルに平滑化し、さらに平行 X 線を集光するために高温塑性変形で基板を球面に曲げる。さらに反射率向上のため重金属 (Pt, Ir) を膜付けし、最後に 2 枚の基板を重ねて Wolter I 型光学系を完成する。我々はこれまで、インハウスで試作した光学系サンプルを用いて、本手法での X 線反射結像を世界で初めて実証してきた。

MEMS X 線望遠鏡の角度分解能の理論限界は、穴幅と X 線のエネルギーに依存する X 線回折で決まる。1 keV の X 線に対して、20 μm の穴幅では約 13 秒角が限界となる。これは従来の日本の X 線天文衛星に搭載された望遠鏡に比べて 5-10 倍優れる。そこで、我々は回折限界を目指して開発を進めている。角度分解能を制限するのは主に、反射面の揺らぎによる形状精度と、鏡の位置誤差による配置精度である。形状精度はドライエッチング時の表面粗さとうねり、アニールの条件が関係する。配置精度はドライエッチングでの穴の垂直性と、変形時の理想球面からのずれが影響する。反射面の表面粗さや形状、配置の揺らぎは有効面積にも影響を及ぼす。そこで、形状の悪い反射鏡の端、すなわち基板の表面と裏面を、ドライエッチング後に削る化学研磨プロセスの導入も試している。

観測 c9 電子飛跡検出器を用いたガンマ線望遠鏡における充填ガスの改良

中村優太 (京都大学 宇宙線研究室 M2)

数 MeV の低エネルギーガンマ線の帯域は原子核壊変によるガンマ線が観測されるため、元素合成を直接観測可能な数少ないプローブである。しかし、その観測技術は他の帯域に比べ非常に遅れており、MeV 帯域で最高の感度を誇る COMPTEL をもってしても GeV 帯域の Fermi 衛星との間には 2 桁の「感度ギャップ」が存在する。レンズや鏡といった光学系が使用できないため特殊なイメージング法を用いる必要があり、従来のコンプトン法やコーデッドマスク法ではイメージングに必要な 2 次元情報に欠落があるため十分なイメージ性能が得られなかったのがその要因である。我々は MeV 帯域において 1mCrab の感度を達成することで、この状況を打開することを目的に新しいイメージング手法を用いたガンマ線カメラである電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) を開発している。ETCC はガスを用いた電子飛跡検出器とコンプトン散乱ガンマ線を検出するためのシンチレーション検出器アレイから構成される。ガスを散乱体とすることで電子の反跳方向が検出できるようになった点が従来のコンプトン法との大きな違いであり、これにより入射ガンマ線情報を計算機上で再構成することが可能となり光学と同様のイメージングが可能となる。2018 年 4 月には豪州 Alice Springs において大気球を用いた観測技術実証試験 : SMILE-II+ を予定している。従来、充填ガスとしてメインに使用していたアルゴンは原子番号 Z が大きいことからコンプトンカメラにとって雑音となる X 線光電吸収の断面積が大きいという問題があった。本研究では低 Z の原子からなり、かつ電子を多く持つ CF_4 を主成分とするガスへの変更による雑音削減・コンプトン断面積の拡大を主目的に充填ガス変更試験を行った。 CF_4 の W 値が 54 eV と高いことからエネルギー分解能の低下が懸念されたが Ne-Ar 間で起きるペニング効果を利用することでこの問題を解決した。以上の成果と ETCC 性能の改善について紹介する。

1 H.Sipil. NIM, 133, 251 (1976)

観測 c10 ニュートリノ・核子崩壊実験の高精度化研究

竹中彰 (東京大学 宇宙線研究所 M2)

講演者は世界最大の水チェレンコフ検出器であるスーパーカミオカンデ (SK) 実験、および、将来計画のハイパーカミオカンデ (HK) 計画に参加している。本講演ではこれらの水チェレンコフ検出器におけるニュートリノ・核子崩壊実験の高精度化について述べる。

HK 計画における高感度光センサー開発

HK 計画は、高統計化のため、解析使用領域は SK の約 17 倍を計画している。また、高精度化のため、光子検出感度を SK

のものより倍増、更に、時間分解能を約半減させた光センサー (50cm 径光電子増倍管) を開発中である。太陽ニュートリノの観測精度向上のためダークノイズ低減は必須であり、ダークノイズ低減 (目標値 4kHz) に向けた光センサーの長期安定性の試験を開発の最終段階として行っている。

SK の高精度、高統計に向けた光センサーの理解、および、ソフトウェア開発

講演者は、現在運用中の SK においても光センサー (50cm 径光電子増倍管) の詳細な理解を基にして、ソフトウェア開発を行い、高精度、高統計化に向けた研究を行っている。SK では光子の光電面に当たる位置による光センサーの応答 (Gain、光子検出感度、信号伝達時間、時間分解能) の違い (位置依存性) は大まかな理解に留まっており [1]、シミュレーション、解析においては応答を一様に近似している [2][3]。そこで、講演者は光センサーの応答の位置依存性を詳細かつ高精度に測定し、その効果を実装したシミュレーションを開発した。そして、実装による既存の解析手法 (事象再構成) への影響評価を行った。今後、光センサーの応答位置依存性を考慮した解析手法の開発により、SK の測定精度の向上、更に、解析使用領域の増大によるデータ統計量の増加が期待される。

HK 計画の実現、SK の高精度化により、太陽ニュートリノ、超新星爆発時に観測されるニュートリノの測定精度、統計量の向上だけでなく、暗黒物質由来のニュートリノや核子崩壊の発見感度に対して飛躍的な向上が期待される。本講演では光センサーの開発状況、測定結果を主に、それに基づくソフトウェア開発の見通し、および、最新の状況を述べる。

- 1 A. Suzuki, et al., Nuclear Instruments and Methods A 329, (1993) 299
- 2 K. Abe et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 737 253 (2014).
- 3 M. Shiozawa, Nuclear Instruments and Methods A 433, (1999) 240