

重力・宇宙論分科会

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 f 85, 103523 (2012).
- 2 M. Takada, and W. Hu, Phys. Rev. D f 87, 123504 (2013).
- 3 K. Akitsu, M. Takada, and Y. Li, Phys. Rev. D f 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态の進化を計算し、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中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中での 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 次元時空中のシュバルツシルト解、AdS シュバルツシルト解、2+1 次元時空中の 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 *f*89 (2014) no.10, 104007
- 2 J. Gleyzes, et al. JCAP *f*1502 (2015) 018
- 3 D. Langlois, et al. JCAP *f*1705 (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 であるか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)