

2019 年度 第 49 回 天文・天体物理 若手夏の学校
重力・宇宙論分科会 アブストラクト

須山 輝明 (東京工業大学理学院)

7月30日 17:00–18:00 B会場

原始ブラックホールは暗黒物質を説明できるか？

宇宙には暗黒物質が存在することが分かっている。存在することは分かっているが、その正体はまだ分かっていない。これまでに様々な暗黒物質の候補が提案され、実験・観測により検証されてきた。本講演では、暗黒物質の候補の一つである原始ブラックホール研究の現状について紹介したい。

菅野 優美 (大阪大学 素粒子論グループ)

8月1日 11:15–12:15 B会場

エンタングルする宇宙と精密観測

最近、私たちの宇宙は因果的に離れた多くの宇宙の中の1つにすぎず、宇宙初期には他の宇宙と互いに量子論的にエンタングルしていたことが、ストリング理論によって示唆されています。また、初期宇宙の理論であるインフレーション理論は、宇宙の構造や宇宙背景放射の温度揺らぎを、量子揺らぎから説明することに成功しました。この講演では、初期の宇宙が本当に量子揺らぎから始まったのか、その際、他の宇宙とエンタングルしていたのか、その痕跡を宇宙における精密観測から探ります。

1. J. Maldacena and G. Pimentel JHEP 1302 (2013) 038
2. S. Kanno Phys.Lett. B751 (2015) 316-320
3. S. Kanno and J. Soda Phys.Rev. D99 (2019) no.8, 084010

重力 a1 BlackHole まわりのアクシオン雲による重力波放射

物部 武瑠 (立教大学 M1)

本発表は [1] のレビューである。2015 年に連星 BlackHole による重力波が観測されて以来、重力波を主題とした研究がより盛んに行われてきた。ひとえに重力波といっても連星系からのもの、BlackHole 由来のもの、インフレーション由来のものなどさまざまである。近年の技術の進歩により、LIGO や Virgo などの検出器の精度が高まってきたこともあり、以前観測されたものとは異なる由来の重力波の検出を目指して研究が進められている。

弦理論や M 理論では次元のコンパクト化により、小さいが幅広いレンジの質量を持ったアクシオン場の存在が提唱されている。[2] そのアクシオンを通して、多くの宇宙論的現象についての新しい見方が考えられている。

その中の一つとして、本発表では BlackHole まわりのアクシオン雲による重力波の放射を考えた [1] をレビューする。回転する BlackHole では BlackHole 近傍のポテンシャルにより、あるモードの波動が散乱され、振幅が増幅し回転エネルギーが取り出される現象が起こる。この現象を superradiance と呼ぶ。superradiance は繰り返しにより不安定になり superradiance instability を引き起こすが、それによりアクシオン雲はどんどん成長し、非線形相互作用と重力波の放出が現れるようになる。superradiance instability の終状態 (bosenova) では重力波が放出される。[3]

[1] では bosenova の起こる前の状態での重力波の放出を解析していて、その計算結果として backreaction (ここではアクシオン雲からの重力波の放出) はとても小さいことが確かめられた。これにより [3] で bosenova の間の重力波の放出について計算する際に考慮した、bosenova の描写が適切であると確認できた。

1. H. Yoshino and H. Kodama, PTEP **2014**, 043E02 (2014)
2. H. Kodama and H. Yoshino, Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. **7**, 84 (2012)
3. H. Yoshino and H. Kodama, arXiv1203.5070

重力 a2 クォーク・ハドロン相転移による背景重力波への影響

植田 郁海 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) M1)

宇宙が誕生して間もない頃にクォーク・ハドロン相転移 (QCD 相転移) が生じたことは広くいけ入れられている。QCD 相転移とは、それまで自由粒子として存在していたクォークとグルーオンが、宇宙が冷えていくにつれて陽子などのハドロンを形成し始めることである。しかし、宇宙の進化の過程で相転移が起きたことを示す直接的な証拠は未だ得られておらず、その詳細も十分に理解されていない。QCD 相転移が生じたのは

宇宙の晴れ上がり以前なので、重力波でのみ直接観測することができる。そのため、QCD 相転移中に生み出された重力波を観測することは宇宙の進化の過程で相転移が生じた証拠になるとともに、基礎物理学に対する理解を深める上でも重要である。

格子 QCD を用いた相転移の非摂動的な解析により [1]、QCD 相転移中では状態方程式パラメータが時間とともに変化することが明らかになっている [2]。この状態方程式パラメータの時間変化は重力ポテンシャルの振る舞いを変化させる。その結果、重力ポテンシャルの空間的な揺らぎによって 2 次的に生み出される重力波もその影響を受けるため、QCD 相転移が生じた痕跡を求めることができる。そこで、本研究では放射優勢期の重力波について数値計算を行なった [3] の手法を応用して、[1][2] から導かれる状態方程式パラメータの時間変化が重力波のシグナルに与える影響を計算する。これにより将来的な観測に対する制限をつけることに加え、QCD 相転移に対する検証可能性を与えることが期待される。

本発表では、今回行なった重力波の数値計算の結果を報告し、将来的な検出可能性について議論する。

1. S. Borsanyi et al., Nature **539** (2016) 69-71, [1606.07494]
2. Christian T. Brynes, Mark Hindmarsh, Sam Young, Michael R. S. Hawkins JCAP Vol 2018 [1801.06138]
3. D. Baumann, P. J. Steinhardt, K. Takahashi and K. Ichiki, Phys. Rev. D **76**, 084019 (2007) [0703290]

重力 a3 アクシオンにおける共鳴不安定性

福永 颯斗 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) M2)

宇宙論において共鳴不安定性は、主にインフレーションからホットビッグバン宇宙への遷移期間である再加熱期に考えられてきた [1]。再加熱期はインフレーションを担うスカラー場であるインフラトンの振動により、共鳴的に他の粒子が生成されると考えられている。一方で、一方でダークマターの候補の一つであるアクシオンを考えると、再加熱期以降の輻射優勢期にも共鳴不安定がおきることが示唆されている [2]。共鳴不安定によって様な場から非様な場へ、効率よくエネルギーが輸送されることから、共鳴不安定は重力波の放出を生み出すための優れた機構とされている。しかし、背景の場が非調和振動をしている場合においては未だ詳しい解析がなされていない。

本研究では、まず背景の場が非調和振動をする場合におきる共鳴不安定である Flapping resonance について述べた後に、背景の場の振動の形式に依存せず共鳴不安定を特徴付けるパラメータを導入する [3]。この新しいパラメータを用いて最も効率の良い共鳴不安定について述べる。

1. L. Kofman, A. D. Linde and A. A. Starobinsky, Phys. Rev. Lett. **73**, 3195(94)
2. N. Kitajima, J. Soda and Y. Urakawa, JCAP **1810**, no. 10, 008(18)
3. H. Fukunaga, N. Kitajima and Y. Urakawa,

重力 a4 Pulsar Timing Array による M87 からの低周波重力波の制限

喜久永 智之介 (熊本大学 自然科学教育部 M1)

2017 年の Event Horizon Telescope の観測で、楕円銀河 M87 の中心に存在し太陽の 6.6×10^9 倍の質量を持つ超大質量ブラックホール (以下、SMBH) が撮像された [1]。このような SMBH は銀河の中心に存在しており、銀河の衝突により SMBH 連星を形成して合体する。この SMBH 連星からは nHz- μ Hz の低周波重力波が放射されると考えられており、これはレーザー干渉計型重力波検出器の観測周波数帯に対応していない。SMBH の形成過程については未だ謎が多いため、これらから放射される低周波重力波の検出により、SMBH の進化に関する情報が得られると期待されている。この低周波重力波の検出法として、Pulsar Timing Array (PTA) という手法が存在する。

パルサーとは、非常に安定した周期でパルスを放射する中性子星である。この周期の安定性を利用して、パルスの到着時刻を精密に予測できる。地球とパルサーの間に重力波が存在すると、時空が歪むことでパルスの伝播経路が変化し、パルスの到着時刻も変化する。実際のパルスの到着時刻と予測された到着時刻の差はタイミング残差と呼ばれる。PTA では、数年～十数年に渡りタイミング残差を測定することで重力波を検出する。この観測期間は nHz 帯の重力波 1 周期に対応する。今のところ低周波重力波の検出には至ってはいないが、ベイズ統計学を用いたデータ解析の手法を使って、数 nHz の重力波の強度に制限をつけている [2]。この制限から SMBH 連星の質量への制限が得られる。また、論文 [3] では M87 には複数の SMBH が存在し、0.1nHz の重力波を放射していることが示唆されており、現在の PTA の制限から M87 の SMBH 質量への制限を得ることができる。本発表では論文 [2] のレビューを行い、0.1nHz の重力波による M87 の SMBH 質量への制限について議論する。

1. K. Akiyama et al. (Event Horizon Telescope), *Astrophys. J.* 875, L1 (2019).
2. K. Aggarwal et al., (2018), arXiv:1812.11585 [astro-ph.GA].
3. Yonemaru et al. 2016, PASJ, 68, 106

重力 a5 インフレーション中の量子ゆらぎと原始ブラックホール

高橋 卓弥 (京都大学 天体核研究室 M1)

本発表は論文 [1] のレビューである。インフレーションは、初期宇宙に指数関数的な加速膨張が起きる時期である。この時期にできたゆらぎの振幅が十分大きければ、崩壊し原始ブラックホール (PBH) を形成すると考えられている。この PBH の存在量 β は、ハッブル半径内のスケールで粗視化された曲率ゆらぎの確率分布関数 (PDF) を積分することによって計算され

る。 β については、観測から制限がかけられており、PBH の存在量 β はゆらぎの情報をもつので、インフレーションの情報を得るために重要である。

PBH が形成されるのはゆらぎが十分大きい場合であり、摂動展開で扱えない。そこで曲率ゆらぎの PDF を計算する方法として、背景のダイナミクスに対する量子ゆらぎの反作用が大きい場合でも使えるストカスティック形式を用いる必要がある。この形式は、ハッブルスケールより十分大きい長波長モードについての有効理論であり、短波長モードを近似的に自由場として扱うことで、長波長モードの時間発展がブラウン運動によって記述されるものである。さらに、曲率ゆらぎを摂動計量での e-folding 数と背景時空の e-folding 数の差で表す δN 形式を用いて、曲率ゆらぎで表される β とインフレーションのモデルを結びつける。

これらを合わせたストカスティック δN 形式を用いて PDF を二つの相補的な方法で求める。1 つは PDF の特性関数に関する微分方程式を解く方法で、もう 1 つは PDF に関する熱伝導方程式を直接解く方法である。これにより、ゆらぎの拡散が支配的な極限、あるいは小さい古典的な極限での PDF を求める。この結果を PBH の存在量 β の計算に適用し、PBH の観測的な制限と比較することで、インフレーションのポテンシャルにおいてゆらぎの拡散が支配的な時期の長さを見積もった。さらにこの見積もりから、ある具体的な 2 つのインフレーションモデルに対する制限について議論した。

1. C. Pattison, V. Vennin, H. Assadullahi and D. Wands, *JCAP* 1710 (2017) 046, [1707.00537]
2. S. Young, C. T. Byrnes and M. Sasaki, *JCAP* 1407 (2014) 045 [1405.7023]

重力 a6 宇宙の加速器の物理

間仁田 侑典 (京都大学 天体核研究室 M1)

宇宙初期にはインフレーションとよばれる、宇宙の準指数関数的膨張があったと考えられている。インフレーションは 10^{14} GeV を超える可能性がある、地上では到底到達しえない超高エネルギーの物理現象である。そのため、インフレーション由来の初期密度揺らぎは我々の知らない超高エネルギーの物理の情報を含んでいると思われる。そこで、本講演では、初期密度揺らぎから高エネルギーの物理を抽出する方法を議論する。まず、インフレーション中にインフラトンとは別のスカラー場が存在する場合の有効理論を構築する。次に、得られた理論を用いて曲率揺らぎの相関関数を計算し、特に、相関関数の Squeezed limit に着目する。squeezed limit とは、運動量空間での 3 点相関関数を与える波数ベクトルの三角形に対し、非常に長い 1 辺と短い 2 辺を取る極限であり、新粒子に関する直接的な情報を与える。squeezed limit における 3 点相関関数の運動量依存性は粒子の質量を与え、角運動量依存性は粒子のスピンを与える。特に、インフレーションと同程度のエネルギース

ケールを持つ重い粒子が加えられた場合は、非自明な3点相関関数が得られる。最後にこれらの結果を用いて、インフレーションの加速器としての可能性を議論する。

1. N. Arkani-Hamed and J. Maldacena, arXiv:1503.08043v1
2. T. Noumi, M. Yamaguchi and D. Yokoyama, JHEP06(2013)051

重力 a7 Non Bunch-Davies 真空における単一スカラー場インフレーションモデルの観測量の推定 村上 広椰 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C研) M1)

インフレーション理論はビッグバン理論の抱える問題を解決するために生まれた理論であり、多様なモデルが存在する。その中でも最も単純なモデルとして、単一スカラー場インフレーションモデルがある。インフレーションモデルを特徴付ける観測量として、テンソル・スカラー比 r と非ガウス性パラメータ f_{NL} に着目する。ここでテンソル・スカラー比とは、テンソル型の揺らぎ (初期重力波を生む時空の揺らぎ) とスカラー型の揺らぎ (曲率揺らぎと呼ばれる揺らぎで、密度揺らぎの起源となる) それぞれの二点相関関数の大きさの比に対応する量で、非ガウス性パラメータ f_{NL} はインフレーション期につくられる初期揺らぎの三点相関の大きさを表す量である。このモデルでは r はスローロールパラメーター ϵ を用いて理論的に $r = 16\epsilon$ で表され、実際の CMB 観測では、その値は $r < 0.07 (\Rightarrow \epsilon < 0.07/16)$ に制限されている。また、 f_{NL} は無視できるほど小さな値となる。

上述のテンソル・スカラー比とスローロールパラメーターの関係や f_{NL} の大きさを求める際には、曲がった時空において不定性を持つ真空について、Bunch-Davies 真空と呼ばれる小スケール極限で平坦時空の真空と一致するよう定義された真空が仮定されているが、今回はそれとは異なった真空を考える。本発表では参考文献 [1] 及び [2] のレビューとして、真空の変更がテンソル・スカラー比や f_{NL} に与える影響について議論する。さらに近年の Planck による制限との比較を行い、string swampland conjecture と呼ばれる弦理論の予言との整合性についても紹介する。

1. Brahma, S., & Hossain, M. W. 2019, Journal of High Energy Physics, 2019, 6.
2. Ashoorioon, A. 2019, Physics Letters B, 790, 568.
3. Chen, X. 2010, Advances in Astronomy, 2010, 638979.

重力 a8 Blue gravitational waves from slow-roll inflation

三嶋 洋介 (立教大学 M2)

インフレーションは、標準ビッグバン理論の初期条件に関する問題を解決し、宇宙の大規模構造の種となる密度ゆらぎを生

成できる有用なシナリオとして、様々な模型が考えられてきた。その中で、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度ゆらぎの観測と整合する模型として、多くのスローロール・インフレーション模型が提案されている。更に具体的に模型を同定するためには、インフレーション模型のテンソル型摂動である原始重力波を探ることが不可欠である。

先行研究 [1] では、どのスローロール・インフレーション模型でも原始重力波のスペクトル指数が負となる標準的な理論が構成されていた。この標準的な理論を前提に、CMB の B モード偏光の観測で、原始重力波の大きさによって具体的な模型を峻別することが考えられている。ところが、ガウス・ボンネ項との相互作用で実現されるスローロール・インフレーション模型では、原始重力波のスペクトル指数が正となることが確認された [2]。これは、既存の標準的な理論で扱えない模型では、原始重力波のスペクトル指数が負とは限らないことを示唆する。

標準的な理論は、枠組を構成するための要請が厳しく、ガウス・ボンネ項を含めることができなかった。しかし、その要請を工夫の元で緩めると、ガウス・ボンネ項以外の相互作用候補も含む形で理論を拡張できることが分かった。この点に着目し、本研究は、原始重力波のスペクトル指数が正となる個別のスローロール・インフレーション模型を包含する形で、標準的な理論を拡張した。この拡張された標準的な理論を用いると、具体的な模型によらず、正のスペクトル指数を持つ原始重力波の普遍的な性質を理解できる。本講演では、この結果を紹介する。

1. K. Kamada, T. Kobayashi, T. Takahashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, Phys. Rev. **D86** (2012) 023504.
2. S. Koh, B.-H. Lee and G. Tumurtushaa, Phys. Rev. **D98** (2018) 103511.
3. T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, Prog. Theor. Phys. **126** (2011) 511.

重力 a9 $R + R^2$ モデルに対する高階微分項による補正 佐藤 靖 (立教大学 M1)

宇宙の膨張を説明する標準ビッグバン理論は、平坦性問題や地平線問題という宇宙の初期条件の微調整に関する問題を含んでいる。それらを解決するために、宇宙が初期に加速膨張をするインフレーションシナリオが提唱されている。インフレーションモデルには様々なものがあるが、その一つとして、 $R + R^2$ モデルがある。

一般相対論は量子化の困難から量子重力理論の低エネルギー有効理論であると考えられている。そのため、初期宇宙のような高エネルギー領域では質量の次元が高い項が作用に加えられることが予想される。中でも、シンプルな拡張として、一般相対論の作用にリッチスカラーの二乗を加えた $R + R^2$ モデルが考えられた [1]。このモデルはスカラー場を必要とせずにイン

フレーションを起こすことが可能であり、宇宙マイクロ波背景放射の観測結果とも整合的であることが魅力である。

$R + R^2$ モデルに対しても、より質量の次元が高い項が作用に加えられることが予想される。そのような項の可能性としてリッチスカラーの微分を含む項がある。一般に、高階微分項を作用に加えるとゴーストが現れてしまう。しかし、高階微分項を摂動として加える場合ゴーストを回避できることが知られている [2]。[3] では高階微分項の一つである $R \square R$ を摂動として $R + R^2$ モデルに加える。本講演では、[3] をレビューし、このモデルにおけるテンソル・スカラー比と曲率ゆらぎのスペクトル指数を求め、観測と整合的なインフレーションモデルとなることを示す。

1. A. A. Starobinsky, Phys. Lett. B **91**, 99 (1980)
2. J. Z. Simon, Phys. Rev. D **41**, 3720 (1990)
3. A. R. R. Castellanos, F. Sobreira, I. L. Shapiro and A. A. Starobinsky, JCAP **1812**, no. 12, 007 (2018)

重力 a_{10} 漸減する宇宙項と間欠的加速膨張

新井 幸 (お茶の水女子大学理学専攻物理学コース
宇宙物理研究室 M1)

宇宙定数のエネルギー密度は観測によると $\rho_\Lambda \sim 10^{-47} \text{GeV}^4$ である。これは場の量子論による理論的な予測より 120 桁小さく、宇宙項問題と呼ばれる宇宙論の未解決問題の一つである [1]。これに関連して、長い宇宙の歴史の中で宇宙定数、物質のエネルギー密度が、現在ほぼ一致しており、 $\rho_\Lambda \sim \rho_M$ となる。なぜ宇宙が始まって 138 億年の現在にエネルギー密度がほぼ一致するのかわからず、Why now? problem と呼ばれている [2]。これらの問題を解決すべく、ダークエネルギー (DE) とダークマター (DM) をボゾン場の異なる相として、初期の急激な加速膨張と現在の緩やかな加速膨張を同一機構によって実現しよう、というメカニズムが提案されている。本来宇宙が加速するためには強い負の圧力を持った特別な場が必要であるので、インフレーションなどを記述する場合は未知の古典スカラー場や標準理論で唯一のスカラー場である Higgs 場を仮定していた。このような未知の場の凝縮相としてポーズ・アインシュタイン凝縮体 (BEC) が用いられる (BEC 宇宙論)[3]。本講演では、この BEC による宇宙論での議論を実在の宇宙に適用可能かどうかを考える。まず [3] をレビューし、BEC の相を DE、非凝縮のボゾンを DM であるとしてそれらの寄与を取り入れたアインシュタイン方程式により、BEC 宇宙論におけるインフレーションのメカニズムの計算を示し、それが宇宙項にどのような影響を与えるかを紹介する。さらにその結果を論文では WMAP のデータによるテンソルスカラー比と CMB の温度揺らぎを上記モデルから計算したものと比較しているが、今回は最新の観測データと比較して、いくつかある宇宙の相転移に付随した真空エネルギーの変遷を上記モデルと考え合わせる。さらに宇宙項問題にどのような解決方法を与えるかも議論

する。

1. Yousef Bisabr, arXiv:1711.06582[gr-qc](2018)
2. Nima Arkani-Hamed, Lawrence J. Hall, Christopher Kolda, and Hitoshi Murayama, Phys.Rev.Lett. **85** (Nov,2000) 4434-4437
3. Takeshi Fukuyama and Morikawa Masahiro, Phys.Rev. D **80**, 063520 (2009)

重力 a11cubic-order Horndeski 理論においてスケーリング解を持つ最も一般的なラグランジアン 竹村 希心 (東京理科大学 理学研究科 物理学専攻 辻川研究室 M2)

本講演は [1] のレビューである。

宇宙の後期加速膨張は現在までに様々な観測によって独立に示されている。それを説明する試みとして、ダイナミカルなスカラー場を導入した数多くの理論が提唱されてきた。中でも運動方程式を 2 階微分に保つように構成された最も一般的なスカラー・テンソル理論は、Horndeski 理論という名前で知られている。近年の、連星中性子星を重力波源とするイベント GW170817 によって、重力波の速度が 10^{-15} 程度の範囲で光速に近いことを示された為、もし Horndeski 理論に対して重力波の速度が光速と等価であるという条件を課すならば、そのラグランジアンは $L = G_2(\phi, X) + G_3(\phi, X)\square\phi + G_4(\phi)R$ (ただし $X = -\partial_\mu\phi\partial^\mu\phi/2$) という形に制限される。

重力理論にスカラー場を導入すると、スケーリング解と呼ばれる、スカラー場と物質のエネルギー密度の比が宇宙膨張史の中で一定になる解を持つ場合がある。このような解が存在する場合、初期値に依らず、スケーリング期に宇宙論的パラメータが一定の値を持つようになるため、現在の物質とスカラー場のエネルギー密度が同オーダーとなる問題 (偶然性問題) を緩和することが可能である。

cubic-order Horndeski 理論においては、先行研究によってスケーリング解を持つ一般的なラグランジアンが示された [2]。しかし最近の研究で、同様の理論においてそのラグランジアンに含まれないスケーリング解が示された [3]。本講演ではこの結果を踏まえ、このスケーリング解を含むように [2] を拡張した最も一般的なラグランジアンを導出し、固定点解析を行うことによって、系の発展を観測的制限を踏まえて議論する。更に具体的な模型を使い、理論の安定性などからパラメータに対して制限を課し、そのダイナミクスについて議論する。

1. N.Frusciante, R.Kase, N.J.Nunes and S.Tsujikawa, Phys. Rev. D **98**, no. 12, 123517 (2018) [arXiv:1810.07957 [gr-qc]].
2. A.R.Gomes and L.Amendola, JCAP **1403**, 041 (2014) [arXiv:1306.3593 [astro-ph.CO]].
3. I.S.Albuquerque, N.Frusciante, N.J.Nunes and S.Tsujikawa, Phys. Rev. D **98**, no. 6, 064038

重力 a12 Infinite Derivative Gravity 理論におけるブラックホールの内部構造に対するスカラー場の影響について

小池 貴博 (東京学芸大学 M2)

一般相対性理論におけるブラックホールの一般的な性質の1つは、その中心に時空特異点が存在することである。そこではブラックホールを構成する物質の密度や曲率が発散し、一般相対性理論は予言力を失う。この特異点を回避するために、これまで多くの研究がなされてきたが、未だ解決には至っていない。

特異点近傍の強重力領域における振る舞いを正しく記述するために、一般相対性理論を拡張した様々な理論が考えられており、これらは修正重力理論と呼ばれている。これらの中に Einstein-Hilbert 作用に曲率の高次の補正項を導入することによって理論を構築し、強重力場領域での振る舞いをよく記述できるものがあることが知られている。しかし、これらの理論は一般的に高階微分の項から来る不安定性（ゴースト）が生じてしまうといった問題を抱えている。

これに対し、Infinite Derivative Gravity (IDG) 理論は、無限次の共変微分からなる微分演算子を導入し、作用を修正することによってこの不安定性の問題を解消した理論である。この理論の枠組みにおいて、Biswas らは 4 次元時空の静的球対称真空解を Minkowski バックグラウンドにおいて弱場近似を用いることで解を構築した [1]。この解は、物質として大きさを持たない点源を仮定しているにもかかわらず、ブラックホールの中心において特異点が回避される時空構造を持つ。

そこで本発表では、一般に曲率特異点を発生させる性質があるスカラー場を IDG 理論に導入し、この場合においても特異点が回避されるかどうかについて議論する。

本研究は同研究室の太田との共同研究であり、太田が IDG 理論における特異点回避の機構について概説する。

1. T. Biswas et al., “Towards singularity and ghost free theories of gravity,” *Phys. Rev. Lett.* 108, 031101 (2012).
2. T. Biswas et al., “Generalized ghost-free quadratic curvature gravity,” *Class.Quant. Grav.* 31, 015022 (2014).
3. M. Cadoni and E. Franzin, “Asymptotically flat black holes sourced by a massless scalar field,” *Phys. Rev. D* 91, 104011 (2015).

重力 a13 Gauss-Bonnet 作用における metric 形式と metric-affine 形式の非等価性

池田 拓人 (立教大学 M1)

通常、一般相対論は (重力以外の場を無視すれば) 計量だけを独立変数として持つ理論である。ここで接続は Levi-Civita 接続で与えられることを要請している。しかしこの要請を外し、

一般の接続を考えることも可能で、実際にそのような形式も存在する。この形式を Levi-Civita 接続を仮定する形式 (metric 形式) に対して、metric-affine 形式と呼ぶ。metric-affine 形式では、計量と接続のそれぞれを独立変数として導入する。この場合、接続の運動方程式が接続の満たすべき拘束条件式となる。つまり、接続の表式を要請せずとも、作用を変分して得られる運動方程式の解として接続を決定できる。ただし、これら二つの形式が等価な物理を記述する理論になっているかどうかは全く自明な問題ではない。

ここで、 $D(> 2)$ 次元の Einstein-Hilbert 作用で metric-affine 形式を考えた場合、接続の解を用いて作用を計量で書き下してしまえば、その表式は metric 形式での作用の表式と一致することが知られていた。さらに [1] により、二つの形式の測地線方程式も等しくなることが示された。この意味で、Einstein-Hilbert 作用については二つの形式が物理的に等価だといえる。

また、metric-affine 形式での Gauss-Bonnet 作用が解として Levi-Civita 接続を含むことは知られていたが、metric 形式と等価か否かは判明していなかった。本講演でレビューする [2] では、実際には Gauss-Bonnet 作用での二つの形式が等価でないことを見る。特に 4 次元の Gauss-Bonnet 作用で metric-affine 形式を考えると、接続の解として Levi-Civita 接続だけでなく Weyl 接続も存在することがわかる。この Weyl 接続と Levi-Civita 接続とを比べると、これらを用いて書き下した作用の表式は等しいにも関わらず、測地線方程式はそれぞれ異なっている。つまり、このとき二つの形式は全く同じ作用を有しているが、等価な物理を記述する理論にはなっていないことが示せる。

1. A. N. Bernal, B. Janssen, A. Jimenez-Cano, J. A. Orejuela, M. Sanchez and P. Sanchez-Moreno, *Phys. Lett. B* 768, 280 (2017)
2. B. Janssen, A. Jimenez-Cano and J. A. Orejuela, arXiv:1903.00280 [gr-qc].

重力 a14 水面波メタマテリアルの実装とその宇宙論的応用について

楠見 蛍 (東京学芸大学 M2)

メタマテリアルとは自然界の物質にはない振る舞いを示す人工媒体の総称である。1999 年、Pendry らは小さな金属の構造体を配列することで、比誘電率と比透磁率を操作し、有効的に負の屈折率を実現するメタマテリアルの存在を理論的に示した。これを皮切りに現在盛んに研究されているが、その中でも宇宙論的応用の可能性が注目されている。

膨張している現在の宇宙から過去へさかのぼると、宇宙は密度と曲率が発散する特異点から始まったことになる。その特異点を回避するために、Hawking らは「虚時間」という数学的概念を導入した [1]。虚時間から実時間に変化するとき、時空構造は $(4+0)$ 次元 Euclidean 空間から $(3+1)$ 次元 Minkowski 時空

へと変化するが、そこでどのような現象が起きるかは明らかにはなっていない。

2010年、Smolyaninovらは比誘電率を正から負に変化させることが可能なメタマテリアルを用いて、(3+0)次元 Euclidean 空間から (2+1)次元 Minkowski 時空への低次元時間符号変化をモデル化できると考えた [2]。その結果、虚時間から実時間に切り替わった瞬間、粒子が生成されることが示唆された。これは次元を上げて同様に成り立つ。しかし、この研究はまだ理論的な予想に留まっている。

そこで我々は、この時間符号変化の水面波によるモデル実験の実装を目指した。[2]では光による実験を想定していたが、水の波で実験を行うことは比較的容易に可視化できるという利点がある。水面波に対して負の屈折率を示すメタマテリアルは、2019年飯田によって理論的および数値的に示されている [3]。本研究ではそれを実装し、その結果、負の屈折率を示す水面波の振る舞いを観測することができた。

本発表では、その実験結果の報告と、時間符号変化をはじめとする水面波メタマテリアルの宇宙論への応用の可能性について議論する。

1. S.W.Hawking et al. , Phys. Rev. D28 (1983) 2960
2. I.Smolyaninov et al. , Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 067402
3. T.Iida, M.Kashiwagi, Journal of Hydrodynamics. (2019)1-8

重力 a15 Hawking-like radiation

神原 亮介 (大阪市立大学 宇宙物理・重力研究室 M1)

一般相対性理論によれば光でさえもその内側から外部に出ることができないブラックホールという存在を予言する。その定義から、ブラックホールに粒子が吸収されることはあっても、そこから粒子が古典的に放出されることはない。しかし、曲がった時空上で場の量子論を考えると、無限遠の過去と未来における真空の定義が一般には異なるため、粒子生成が起きることが知られている。この考えに基づき、ブラックホールからの熱的放射が存在することが1974年に Hawking によって見出され、のちに Hawking 輻射と呼ばれている。通常、蒸発しない事象の地平面の存在および外部の幾何が静的であることを仮定することによって Hawking 輻射は見出される。しかし、蒸発しないブラックホールは、実際の天文学的なブラックホールの形成や進化を反映していない。したがって、今までの仮定を緩めることを考える。そうすると、蒸発しているブラックホールやより急激に重力崩壊するブラックホール、さらには事象の地平面がまだ形成されていないブラックホールでも輻射が起こることがわかる。

今回のレビューでは、無限遠の過去と未来における null のアフィンパラメーターの間の関係が指数関数的で、適切な断熱条

件が満たされている限り、Hawking 輻射に相当する粒子生成が起きることを検証し、時間依存する Bogoliubov 係数を計算する方法を文献 [1] に基づいて考える。

1. Carlos Barcelo, Stefano Liberati, Sebastiano Sonego and Matt Visser arXiv:1011.5911 [gr-qc]

重力 a16 ブラックホールの無毛定理、地平面の安定性、および熱力学

松本 怜 (近畿大学大学院総合理工学研究科理学専攻 M1)

No-hair 定理により一般相対論におけるブラックホールは、理論上は質量、角運動量、電荷以外の物理量を持ち得ないことが証明されている。しかし今後、現実宇宙のブラックホール観測を通して一般相対論が精密に検証されることを鑑みると、様々な重力理論における No-hair 定理を吟味しておくことが望まれる。例えば、重力を含む最も先進的な理論である弦理論では、単純な形式の No-hair 定理はもはや成り立たないことが分かっている。実際、低エネルギー弦理論での静的球対称荷電ブラックホールを表す解は質量、電荷に加えて、ディラトンの漸近値もその特徴付けに必要となる。

一般相対論での非荷電静的ブラックホールを表す Schwarzschild 解は、質量がプランク質量に比べて大きければ、その時空は特異点近傍を除いて弦理論の良い近似である。それは弦理論の古典的な運動方程式が、(Einstein 方程式) + (プランクスケールの補正項) の形になっているからである。曲率が大きい特異点近くでは弦理論の解は Einstein 方程式では近似できないが、巨大ブラックホールに関しては地平面とその外側では曲率が小さいので、その領域では近似解とすることができる。

本発表では、弦理論におけるブラックホールについて、D. Garfinkle, G. T. Horowitz, A. Strominger らの論文 (1991) を紹介する。特に弦理論の有効理論においては、ディラトンの存在がブラックホールの特徴を大きく変えることを見る。さらに内部地平面の安定性とブラックホールの熱力学についても議論する。

1. D. Garfinkle, G. T. Horowitz and A. Strominger, Phys. Rev. D 43, 1340 (1991)

重力 a17 発散方程式と静的ブラックホールの唯一性定理

何 俊逸 (立教大学 M1)

ブラックホール (BH) とは、強重力により光さえ脱出することができない時空領域である。シュワルツシルト解はアインシュタイン方程式の解であり、4次元漸近的平坦な真空時空における静的球対称 BH 解である [1]。そして、シュワルツシルト解がこの時空における唯一の BH 解である (唯一性定理)。ま

た、漸近的平坦な静的 BH 解に関する唯一性定理は、高次元においても成り立つことが示されている。唯一性定理は宇宙に存在する BH を記述する解に対して強い制限を与えるため、非常に重要である。

4次元シュワルツシルト解の唯一性定理の証明には、発散方程式が重要な役割を果たす [2]。発散方程式とは、時空の球対称性からのずれを表すベクトルの発散が従う方程式である。[2]の方法は [1] が用いた仮定を緩めたものだが、次の二つの点で不十分である:(1) 発散方程式の物理的意味が明らかでない (2) 4次元で漸近的平坦な時空に限って成り立つ積分公式を用いている。これにより、高次元の場合や、漸近的平坦でない BH の場合に拡張できない。実際、高次元の場合の唯一性定理は [2]とは全く異なる手法で示されており、静的 BH の唯一性に関する次元に依らない系統的な理解は得られていない。また、漸近的平坦な場合以外の BH の唯一性は知られていない。ここで、[2]の方法を見直すことによって、次元や時空の漸近構造に依らない系統的な証明法が得られると期待できる。

本講演では [3] のレビューを行う。[3] は [2] の証明を拡張し、漸近的平坦な静的 BH の唯一性定理を証明した。発表では最初に証明に必要な数学を紹介する。次に、[2] が用いた発散方程式について説明する。最後に、上記 (1)、(2) を解決する証明法を与え、一般次元における漸近的平坦な静的 BH 解の唯一性を証明する。

1. W. Israel, Pys. Rev. 164, 1776(1967)
2. D. C. Robinson, Gen. Rel. Grav. 8, 696(1977)
3. M. Nozawa, T. Shiromizu, K. Izumi, and S. Yamada, arXiv preprint arXiv:1805.11385 (2018).

重力 a18 回転 BH による真空崩壊の触媒作用 上田 和茂 (広島大学 宇宙物理学研究室 M2)

近年の LHC における Higgs 粒子の観測によって完成した標準理論のパラメータによると、Higgs 場の凝縮度が現在の値よりも非常に大きい場合、エネルギーが現在の電弱真空よりも下がるのが予言され、電弱真空は準安定状態である可能性が指摘されている。つまり、現在の電弱真空は偽真空状態であり、量子トンネル効果によって、より安定な真真空状態へ相転移する可能性がある。このような相転移現象を偽真空崩壊と呼ぶが、標準理論から算出される偽真空崩壊による真空の寿命は現在の宇宙年齢を遥かに凌駕しており、真空の相転移が標準理論の正当性を脅かすことは無い。ところが近年、Ruth Gregory らは、Planck 質量程度の原始ブラックホール (以下 PBH と表記) は真空崩壊を誘起する触媒として作用し、真空の寿命を著しく縮めることを指摘した。この主張が正しければ、観測宇宙の内部に真空崩壊を誘起するような PBH は 1 つも存在し得ない、という現象論的推察が可能となる。この様な推察には厳密な理論予言が不可欠であるが、先行研究では BH の回転の影響は考慮されていない。考慮する場の種類 (スピン) によって

は、Hawking 放射によって蒸発する PBH は最終的に回転状態に帰着する可能性が指摘されており、厳密な理論を得るには BH の回転による効果を議論する必要がある。また、PBH は Hawking 放射によって蒸発するため、もし PBH が真空崩壊を触発することで真空の寿命を宇宙年齢以下に短縮するという計算結果が得られても、真空が相転移を起こすよりも前に PBH が Hawking 放射で消滅してしまえば、PBH が真空崩壊の触媒として作用しない。つまり、Hawking 放射による PBH の寿命が、相転移による真空の寿命を上回るような PBH は存在し得ない [10]、というのが正しい現象論的推察である。本講演では、回転効果が Hawking 放射と真空の触媒作用に及ぼす寄与を適切な近似とゲージ変換、そして数値計算により定量的に解析した結果を用いて回転 BH の真空崩壊の触媒効果について議論する。

1. Ruth Gregory, Ian G. Moss, Benjamin Withers, Journal of High Energy Physics:1-27 (2014)
2. P.E. Kashargin, S.V. Suskov, Grav. Cosmol. 17:119-125. (2011)
3. K. Mukaida, M. Yamada, Phys. Rev. D 96, 103514 (2017)

重力 a19 すばる HSC の銀河サーベイデータを使った宇宙論パラメータ推定手法の開発 杉山 素直 (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、インフレーションなどの初期条件、ダークマターの重力、ダークエネルギーの加速膨張の物理で進化してきた構造である。したがって、大規模構造の特性と時間進化を調べることで宇宙論パラメータの制限を行うことができる。中でも、弱い重力レンズと銀河分布を組み合わせた解析は、銀河バイアス不定性を除去するため宇宙論パラメータを制限する非常に強力な手法である。本研究の最終的なゴールはすばる HSC の銀河サーベイデータを用いて宇宙論パラメータを制限することである。観測と理論を比較して宇宙論パラメータの制限を行うには、理論を正確に計算する必要がある。理論の計算方法として標準的に使われている大規模構造の摂動論は小スケールのシグナルを正しく計算できない上に、観測されるシグナルは小スケールと大スケールが混ざった状態にあるため、摂動論にもとづいて計算された理論を観測と比較する際には、解析に使えるスケールが大スケールに限られるという問題がある。使用できるシグナルスケールが限られることは、統計誤差の増加につながるため宇宙論パラメータの制限を弱くすることにつながる。そこで本研究では、すばる HSC の銀河サーベイデータ解析に先立ち、宇宙論パラメータを強く制限できる新しい解析手法を開発する。上のような問題を解決するために、数値宇宙論にもとづいた理論の計算方法 [1] と観測シグナルのスケールマスキング手法 [2] を組み合わせる。新しい解析手法では小スケールのシグナルを正確に計算できることに加え、観測シグナ

ルのスケールを分離するため、従来の解析手法に比較して使用できるスケール範囲が広がり統計誤差が小さくなると期待される。新しい解析手法で得られた宇宙論パラメタの統計誤差を従来の解析手法の結果と比較し、その有効性を検証する。

1. Nishimichi T., et al., 2018, arXiv:1811.09504
2. Baldauf T. et al., Phys. Rev. D, 81, 063531 (2010)

重力 a20 宇宙の大規模構造とダークマターハローの形状の相関 栗田 智貴 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M2)

宇宙構造形成の標準シナリオである冷たいダークマターモデル (CDM モデル) では、CDM が密集した自己重力系であるダークマターハローの中に銀河が形成される。銀河の形状やその周囲を包むダークマターハローの形状は、それらを構成する物質と大規模構造による宇宙広域の重力場との重力相互作用の結果を反映すると考えられる。このような形状と大規模構造の相関は Intrinsic Alignment (IA) と呼ばれ、現在理論と観測の両面から研究が進展している [1,2]。

IA の理論的な研究手法として、摂動論によって理論模型を構築する方法と N 体シミュレーションを用いる手法の二つがある。摂動論は物理的な描像を理解しやすいなどの利点も多いが、重力による非線形成長に起因して小スケール (短波長) 領域では破綻することが知られている。一方 N 体シミュレーションは、運動方程式とポアソン方程式を数値的に解くものであり、非線形領域における構造形成を第一原理的に追うことができる。この点においてこれらは相補的な研究手法である。

現状では IA の摂動論は N 体シミュレーションを用いて十分に検証されていない。本研究では N 体シミュレーションを用いて IA の測定、すなわちダークマターハローの形状と大規模構造 (ダークマターの空間分布) の相関の測定を行なった。その後、摂動論による理論計算と比較をすることで、摂動論の小スケールにおける適用限界や摂動論が含むモデルパラメタのハロー質量、赤方偏移、宇宙論モデルへの各種依存性を調べた。発表では、これらの結果から示唆される、重力レンズ効果の解析に与える影響や IA 自身に含まれる宇宙論的な情報の抽出可能性についても議論する。

1. A. Kiessling, et al. Space Sci. Rev. 193, 67 (2015)
2. S. Singh, R. Mandelbaum, and S. More, MNRAS 450, 2195 (2015)

重力 a21 ハッブル定数の不一致問題に対する cosmological backreaction による説明の問題点 三浦 大志 (京都大学 天体核研究室 D1)

宇宙の膨張率を記述する速度と距離の間の比例係数 H_0 はハッブル定数と呼ばれ、宇宙論モデルを制限する重要なパラメータである。現在の標準的な宇宙論モデルである Λ CDM モデルは様々な観測とほぼ矛盾がない。しかしながら Planck 衛星で観測された宇宙マイクロ波背景放射の非等方性と、標準光源の赤方偏移と光度距離を用いる直接観測で求められた 2 つのハッブル定数の値の間には 4σ 以上の不一致がある。この不一致は標準宇宙論モデルが不十分であることを示唆している可能性があり、重大な問題である。

この問題に対して、小スケールでの宇宙の非一様性により背景時空の時間発展が変更される効果 (cosmological backreaction) により直接観測によって測定されたハッブル定数が変更され、ハッブル定数の不一致問題が解決できる可能性があるという主張がある [1][2]。しかしながら、基本的に cosmological backreaction は計量に対する摂動の 2 次のオーダーで影響し、ホライズンより十分内側で Newtonian cosmology に一致する Newtonian gauge ではその backreaction の効果は十分無視できるという主張もある [3]。

したがって本講演では、宇宙の非一様性を考慮し、直接観測で測定されるハッブル定数を光の測地線方程式を解く方法である ray-tracing 法を用いて求め、cosmological backreaction がハッブル定数の不一致問題を説明できるかどうかを検証する。その際 Newtonian cosmology で物理量を計算した Newtonian gauge を用いる。その結果、cosmological backreaction の直接観測で測定されるハッブル定数への影響は十分小さく、ハッブル定数の不一致問題を説明できるほどではないことを示す。また、ある重力崩壊領域に対する近似や平均化の手法を用いると、Newtonian cosmology を用いても、先行研究で示唆されるような cosmological backreaction のハッブル定数への誤った影響が得られてしまうことを示す。

1. K. Bolejko, Physical Review D97, 103529 (2018)
2. K. Tomita, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2018, 021E01 (2018)
3. S. Green and R. Wald, Physical Review D83, 084020 (2011)

重力 a22 銀河形状を用いた初期三点相関の検証 小粥 一寛 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) D1)

宇宙初期には急激な加速膨張 (インフレーション) があり、これはスカラー場であるインフラトンにより引き起こされたとされる。インフレーションモデルは数多く提唱されているが、その重要な予言として、インフラトンの量子的ゆらぎにより空間曲

率のゆらぎが生じ構造形成のもととなる密度ゆらぎが生成されることが挙げられる。一方で、高エネルギー物理では、自然界の四つの力を統一的に記述する超弦理論が提案されている。超弦理論は特有の性質として2より大きなスピンをもつ粒子(高スピン粒子)の存在を预言する。この高スピン粒子とインフラトンが相互作用した場合には、曲率ゆらぎの統計的性質に、非ガウス性が生じ、その波長間の角度や粒子の質量に依存する固有の特徴が表れることが示されている [1]。以上のことから、宇宙論的観測により、このような非ガウス性に迫ることで超弦理論の観測的な検証につながることを期待できる。ゆらぎの分布の非ガウス性は、三点以上の高次相関によって特徴づけられる。先行研究では、銀河形状の観測を用いた初期三点相関の検出可能性が検証された。早期に形成が始まり十分に時間が経過したと考えられる楕円銀河の形状は、その周囲のダークマターハローの潮汐場と相関することから、宇宙初期の曲率ゆらぎの情報が含まれるからである。このことから、銀河形状の観測は角度依存する初期非ガウス性の検証に有用であることが示された [2,3]。本研究では、これを応用し高スピン粒子が生成する非ガウス性のうち、初期三点相関が銀河形状に与える影響を調べ、その検出可能性を検証した。銀河形状モーメントは、初期三点相関に表れるスピンと関係し、4次モーメントでは初期三点相関におけるスピン4粒子の痕跡を検出できる可能性があることがわかった。この発見は今後の初期非ガウス性の探査において重要な指針を与える。

1. Arkani-Hamed, N. and Maldacena, J. (2015). Cosmological Collider Physics.
2. Schmidt, F., Chisari, N. E., Dvorkin, C. (2015). Imprint of inflation on galaxy shape correlations. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2015(10), 032–032.
3. Kogai, K., Matsubara, T., Nishizawa, A. J., Urakawa, Y. (2018). Intrinsic galaxy alignment from angular dependent primordial non-Gaussianity. *Cosmology and Astroparticle Physics An IOP and SISSA Journal J*, 08.

重力 a23 CMB レンズングを用いた銀河団の質量推定

山本 菜々花 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C研) M1)

銀河団は宇宙の中で最も大きな質量を持つ天体であり、宇宙の大規模構造の進化を調べる上で重要な研究対象である。銀河団の質量と数の関係は、原始密度揺らぎや暗黒エネルギーの性質に強く依存する。そのため、観測によって多くの銀河団を発見し、その質量を正しく推定する事は、宇宙論モデルの制限において非常に重要である [1]。これまで、赤方偏移 $z \sim 0.6$ 程度の近傍宇宙においては Sloan Digital Sky Survey (SDSS) などの観測により数多くの銀河団が発見された。また、近年すばる

望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) などの観測により $z \sim 1$ 程度の遠方銀河団が数多く見つかっており、銀河団を用いた精密宇宙論が期待される。

銀河団の質量の大部分は暗黒物質が占めているため、可視光観測によって得られるメンバー銀河の数から推定される銀河団の質量は不定性が大きい。そこで、暗黒物質の空間分布を直接的に測定できる弱重力レンズ効果と組み合わせることで高精度の質量推定が可能となる。一般に、弱重力レンズ効果を用いた質量推定は背景光源として銀河を用いる。しかし、レンズ天体が高赤方偏移であるほど背景銀河の数が少なくなるため、高赤方偏移の質量分布の情報を引き出すことが困難になるという問題がある。一方、 $z \sim 1100$ の最終散乱面から放射される宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を背景光とする弱重力レンズ効果を用いると、遠方宇宙における質量分布の情報を手に入れることが可能となる。

本発表では、Planck の CMB レンズマップ [2] と HSC の銀河団カタログ (CAMIRA) [3] を組み合わせて銀河団の周囲における CMB レンズ信号のスタッキング解析を行った結果を報告する。また、時間があれば CMB レンズ信号を用いた銀河団の質量推定についても議論する。

1. David H. Weinberg et al., *Phys. Reports*, Volume 530(2013)
2. Planck 2015 results XV. Gravitational lensing
3. Oguri, M., et al. 2018, *PASJ*, 70, S20

重力 a24 21cm 線と CMB 弱重力レンズ効果の相互相関による中性水素存在量の推定

迫田 康暉 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C研) M1)

宇宙の再電離以降、宇宙空間に存在する水素のほとんどは電離されており、残された H_I の大部分は銀河などの高密度領域に存在する。従って H_I を探ることは銀河などの高密度領域の中を見るということに他ならない。高密度領域では星形成が行われており、 H_I はその苗床である。したがって H_I の存在量の時間変化を探ることは宇宙論的な星形成の理解につながる。 H_I は波長 21cm の電磁波 (21cm 線) を放出する。従って 21cm 線を観測すれば、 H_I の存在量の時間発展を得ることができる。しかし、21cm 線のシグナルは前景放射によって汚染されてしまう。この問題を解決するために、21cm 線と、大規模構造が宇宙マイクロ波背景放射に及ぼす重力レンズ効果から得られるコンバージェンスマップとの相互相関をとるという手法を採用する [1]。先行研究 [2] では、今後観測が始まる望遠鏡である Square Kilometre Array (SKA) を想定した場合に、 H_I の存在量の推定精度を Fisher 解析により予測している。その結果、SKA 観測による [1] の手法を用いた H_I の存在量の推定は、従来の望遠鏡による他の手法を用いた制限よりも、高赤方偏移まで精度よく H_I の存在量を推定できる可能性を示している。しかし、[1] の手法により、存在量そのものを正しく推定できるかはわかっ

ていないため、それを検証する必要がある。従って本研究では、[1] の手法による H_I 存在量推定の妥当性を以下の手順によって明らかにする。N 体シミュレーションにより得られたハローの分布と暗黒物質ハロー質量- H_I 質量関係から得られる H_I 分布に基づき、21cm 線強度マップを作成する。これと同時に、N 体シミュレーションからコンバージェンスマップを作成する。2つのマップの相互相関を取り、 H_I の存在量を推定する。推定した H_I 存在量が、作成した H_I のマップにおける存在量を正しく復元するか確認する。本発表では、その結果について議論を行う。時間が許せば、21cm 線と銀河の相互相関による H_I の存在量推定についても検討する。

1. Guha Sarkar T., (2010), Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2, 2
2. Tanaka, Shoichiro, and Yoshiura, Shintaro, and Kubota, Kenji, and Takahashi, Keitaro, and Nishizawa, Atsushi J. and Sugiyama, Naoshi, (2019), arXiv:1904.10363 [astro-ph.CO]

重力 a25 Ultracompact minihalo の 21cm 線観測による初期パワースペクトルの制限 古郡 国彦 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) M1)

ビッグバン理論の宇宙初期に関する諸問題の解決策としてインフレーション理論がある。インフレーションモデルは無数に存在するため、そのモデルを制限する必要がある。その方法の一つに初期パワースペクトルによる制限がある。初期パワースペクトルの制限は宇宙マイクロ波背景放射の観測などから得られてきたが、小スケール側 (波数 $k \geq 1\text{Mpc}^{-1}$) は不定性が大きい。近年注目されている Ultracompact minihalo (UCMH) という天体を用いることで小スケール側に制限を課せる可能性がある [1]。UCMH は、赤方偏移 $z \sim 1000$ に形成される高密度天体であり、密度揺らぎの大きさが $10^{-3}z \leq \delta \leq 0.3$ を満たす時に構造形成されうる。高赤方偏移において形成される UCMH は、空間的にコンパクトであり、初期パワースペクトルの短波長側の波数範囲に制限をつけることが期待される。

本研究では、21-cm 線を用いて UCMH の存在量に制限を課し、小スケール側の初期パワースペクトルに制限をつけることを目的とする。21-cm 線とは、中性水素の超微細構造由来の電磁波である。2020 年代前半に観測を開始する Square Kilometre Array (SKA) によって $z \sim 30$ 程度までの観測が期待される見込みである。宇宙再電離より十分以前であるから、UCMH も中性水素ガスを持つと考えられる。そのため UCMH 内部の中性水素に由来する 21cm 線が観測できると期待される。

本講演では、UCMH の中性水素密度分布および温度分布をモデル化することで、個別の UCMH の 21-cm 線シグナル分布を導出する手法を紹介する。[2] そして、SKA の感度を考慮することにより、UCMH の存在量に制限を与える可能性につい

て議論する。また、その結果から、 $k \geq 1\text{Mpc}^{-1}$ の小スケール側の初期パワースペクトルの制限について議論する。

1. M. Ricotti & A. Gould, ApJ. 707, 2, 979 (2009)
2. E. Komatsu & U. Seljak, MNRAS, 327, 1353 (2001)

重力 a26 21cm-LAE cross-correlation を用いた 21cm 線シグナルの検出可能性 口ノ町 瑛 (熊本大学自然科学教育部 M1)

誕生して間もない宇宙は、高温高密度のプラズマ状態で存在していた。やがて宇宙膨張による温度の低下によって陽子と電子が再結合し、中性水素が生成される。その後、初代星や初代銀河の形成に伴って、宇宙に存在するほとんどの中性水素が電離される。この時期を宇宙再電離期と呼ぶ。

しかし宇宙再電離期について、電離開始時期を始め、電離源や電離プロセスはまだ観測的に未解明である。この宇宙再電離期を捉えるには、当時の宇宙を満たしていた中性水素が放射する電磁波である 21cm 線の観測が有効である。しかし、宇宙再電離期の 21cm 線は非常に微弱であるのに加え、21cm 線の観測は銀河系シンクロトロン放射や系外電波などの強烈な前景放射によって妨げられている。そのため、前景放射の影響を軽減、回避することが求められる。その方法の一つである 21cm 線の放射強度と銀河分布の相互相関 (cross-correlation) を取る方法が先行研究で行われている。21cm 線の放射強度と銀河分布には負の相関関係があると考えられているが、前景放射と銀河分布には相関関係が無いと考えられている。そのため、21cm 線の放射強度と銀河の位置の相互相関を取ることで前景放射の影響を低減することができ、21cm 線の検出が期待される。

そこで本研究では、21cm 線の放射強度と銀河分布の相互相関に着目した。21cm 線の放射強度と銀河分布はそれぞれ、現在行われているオーストラリアの Murchison Widefield Array (MWA) による観測とハワイのすばる望遠鏡の Hyper Supreme Cam (HSC) による Lyman- α emitter (LAE) と呼ばれる高赤方偏移銀河の観測を想定した。この MWA-HSC 観測の想定のもとで得られる 21cm-LAE 相互相関を計算し、21cm 線シグナルの感度を見積もり、検出可能性を示した。

1. Kubota, K., Yoshiura, S., Takahashi, K., et al. 2018, MNRAS, 479, 2754

重力 b1 F(R)gravity での Schwarzschild-de Sitter black holes の anti- evaporation 木太久 稜 (名古屋大学 重力・素粒子的宇宙論研究室 (Qg 研) M1)

宇宙項を含めた真空の Einstein 方程式の解に Schwarzschild-de Sitter black hole がある。このブラックホールは 2つのホライズンを持ち一つは通常のブラックホールホライズン、もう一つは cosmological ホライズンである。この

2つのホライズンの大きさがほぼ等しい場合を考え2つのホライズン間の領域を張る座標系を考えると Nariai 時空が得られる。R.Bousso and S.Hawking は s 波と one-loop 近似を使ってこの時空に量子補正をした [1]。そのあとある形の摂動をかけ初期のホライズンの振る舞いを見ると初期条件によっては evaporation つまりホライズンの大きさが減少する、しかし一方で anti-evaporation、つまりホライズンの大きさが増加することが見られた。今回レビューする論文 [2] は F(R) gravity では量子効果を考慮しなくても上の2つのホライズンがほぼ同じ大きさであるブラックホールで anti-evaporation が起こる可能性を示している。F(R)gravity とは修正重力理論の一つで Einstein Hilbert 作用の Lagrangian 密度の曲率 R を R の関数 F(R) に置き換えて得られるものである。この F(R) の形によっては現在の加速する宇宙、また宇宙初期のインフレーションを表すことができる。上の論文ではまず初めに真空の場の方程式の解に Nariai 時空が存在するための F(R) の条件を得る。その後、その時空にある形の摂動をかけ F(R) の形とその曲率での値によってはホライズンの大きさが初期では時間とともに増加することが示されている。最後にいくつかの具体的な F(R) の形で anti-evaporation が生じるかを見る。

1. R. Bousso and S.W. Hawking, (Anti)evaporation of Schwarzschild-de Sitter black holes, Phys. Rev. D 57, 2436 (1998)
2. S. Nojiri and S.D. Odintsov, Anti evaporation of Schwarzschild-de Sitter black holes in f(R)gravity, Classical Quantum Gravity 30, 125003 (2013)

重力 b2 Q-balls

遠藤 洋太 (大阪市立大学 宇宙物理・重力研究室 M2)

波が局在するような解を soliton 解と呼ぶ。その中で non-topological soliton と呼ばれる soliton 解が存在する。ある特定のポテンシャルをしたスカラー場は重力の効果なしに non-topological soliton 解をなすことが分かっている。これが Q-ball である。

先行研究 [?] では、Q-ball の存在性や安定性について議論されており、特定の条件を満たすようなポテンシャルで抽象的に議論を進めている。また、この Q-ball の励起状態についても言及している。

本発表では先行研究 [?] のレビューに加え、実際に具体的なポテンシャルを仮定して、Q-ball 解を数値的に導出し、その結果がどのような物理現象に対応しているかを考察する。加えて、ゲージ場を入れた場合解がどのように変更されるか、また、スカラー場の場合と比較して、物理現象としてどのようなものがあげられるか考察する。

1. Sidney Coleman, Nuclear Physics B262 (1985) 263-283

重力 b3 スカラーダークマターとブラックホールヘア

野村 皇太 (神戸大学 宇宙論研究室 M1)

Schwarzschild 計量を背景とする Klein-Gordon 方程式は、時間に依存する非自明な解をもつことが Jacobson によって指摘された [1]。「ブラックホールは3本の毛、すなわちその質量、スピン、電荷で完全に特徴付けられる」と主張する無毛定理になぞらえて、このようなスカラー場解はブラックホールの「スカラーヘア(毛)」と呼ばれる。Jacobson の結果は、宇宙論的なスケールで線形に時間発展するスカラー場であった。一方、近年注目されているのは、宇宙に存在するダークマターがスカラー場からなり、ブラックホールがこのスカラーダークマターをまとっているとするモデルである。この場合、スカラーヘアの時間依存性は質量をもつダークマターの振動に由来する。Hui らは、スカラー場の質量に応じて、ブラックホールを取り巻くスカラー場の配位がどのように変わるかを解析した [2]。その結果、ブラックホールから十分離れた距離 r において、小さな質量をもつスカラー場は $1/r$ に伴って減衰する一方で、大きな質量をもつスカラー場は $1/r^{3/4}$ の振る舞いを見せることが示された。スカラー場は時空計量に影響を与え、物体の運動や重力波にその配位の情報を残すと考えられることから、それらの観測を通してスカラーダークマターの質量に関する手がかりをつかめる可能性がある。本発表では、おもに [2] の解析手法と結果についてレビューを行う。

1. Ted Jacobson, Primordial Black Hole Evolution in Tensor-Scalar Cosmology, Phys. Rev. Lett. 83 (1999), 2699
2. Lam Hui, Daniel Kabat, Xinyu Li, Luca Santoni and Sam S. C. Wong, Black Hole Hair from Scalar Dark Matter, arXiv:1904.12803 [gr-qc]

重力 b4 Infinite Derivative Gravity 理論における特異点解消の構造について

太田 溪介 (東京学芸大学 M1)

一般相対性理論は重力場を記述する理論として最も有力なものの一つである。これは、重力波をはじめとして、主に IR 領域での観測によってその有効性が確認されている。一方で、UV 領域では Einstein-Hilbert 作用により、ブラックホールの真空解などの特異点を持つ解が必ず導かれる。自然界は古典的な特異点を避けることが期待されている。そこで、この問題に対して Einstein-Hilbert 作用に補正項を加えることで、UV 領域で特異点を解消し、IR 領域では一般相対性理論の結果と一致するような修正重力理論が盛んに研究されている。

修正重力理論の一つである Infinite Derivative Gravity (IDG)

理論は、重力源の分布はデルタ関数型として、Einstein-Hilbert 作用の中にリーマンテンソルの無限階の微分を補正

項として導入する理論である。2011年に Biswas らは IDG 理論の完全な作用を初めて定式化し、4次元静的球対称真空解を弱場近似として求めた [1,2]。この解はゴーストフリーであり、また IR 領域では $1/r$ ポテンシャルのように振る舞う。一方で、UV 領域においては、メトリックが定数になる。つまり、重力源をデルタ関数分布に設定していたとしても、原点における特異点が解消される。しかし、無限階微分を導入したことによる特異点の回避の物理的機構については十分に議論されていない。

本発表では、まず IDG 理論における定式化について紹介する。次に、特異点回避の物理的機構について議論する。本研究では IDG 理論における特異点の回避は、重力源としてガウシアン型の物質分布をおくことによる特異点の回避と、同じ構造を持つと仮定する。その下で、IDG 理論で得られた線形の弱場解について、重力源としてガウシアン型を仮定して物質分布を逆算する。それを踏まえて、ガウシアンをソースとするブラックホールと IDG 理論から得られるブラックホールとの関連性について考察する。

1. Biswas, Tirthabir, et al. Physical review letters 108.3 (2012): 031101.
2. Biswas, Tirthabir, et al. Classical and Quantum Gravity 31.1 (2013): 015022.

重力 b5 原始ブラックホールによる非等方的な Kinetic Sunyaev-Zeldovich 効果 阿部 克哉 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) M2)

宇宙論における重要課題の1つにダークマター (DM) の解明が挙げられる。宇宙初期に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、原始ブラックホール (PBH) はその候補の一つである。それゆえ、現在様々な観測によってその存在量に制限を与える取り組みがされている。本研究では Kinetic Sunyaev-Zeldovich 効果 (kSZ 効果) と呼ばれる現象の観測により、PBH の密度パラメータに制限を与える。PBH 近く近傍のガスは、降着時の重力エネルギー解放により温度が上昇し熱制動放射を引き起こす。そのため、PBH は紫外線や X 線の放射源となり、周囲のガスを電離する。これらの電離されたガスが kSZ 効果を引き起こす。本研究ではまず、PBH 周辺のガスの電離構造を明らかにするため、PBH の放射光度を仮定し輻射輸送シミュレーションを実施した。こうして得られたガスの電離構造をもとに、PBH の kSZ 効果による CMB の温度ゆらぎの角度パワースペクトルを見積もった。この結果、得られたスペクトルの形がシルクスケールよりも小さなスケールにて平坦になるため、小スケールにて支配的な寄与をもたらす可能性が明らかになった。また、これらの結果と South Pole Telescope (SPT) の観測結果 [1] を比較することにより PBH の密度パラメータに対する制限についても議論を行う。

1. J. W. Henning, et al., ApJ, 852, 97 (2018)

重力 b6 21cm 線-CMB Lensing 相互相関の検出可能性と宇宙論パラメータの制限

田中 章一郎 (熊本大学自然科学教育部 M2)

宇宙晴れ上がり後、中性水素に満たされていた宇宙は初代星や銀河の形成に伴い放出される紫外線光子により電離が行われる。最終的に宇宙全体の中性水素が電離されるまでの時代を宇宙再電離期という。再電離期後、ほとんどの中性水素は電離されてしまうが、ごく一部は高密度領域の中 (主に銀河内部) に残る [1]。そのため、中性水素の分布は銀河分布とその背景にあるダークマター分布をトレースする。また、宇宙全体の中性水素の量を表すパラメータ Ω_{HI} がある。 Ω_{HI} の測定は宇宙のバリオンのほとんどを占める水素の物理状態を知る上で重要である。特に Ω_{HI} の赤方偏移進化は宇宙の三次元物質密度分布の再構築において欠かすことができない。宇宙論的スケールの物質分布は宇宙論の精度を上げるために非常に重要である。この Ω_{HI} を求めるために中性水素の超微細構造に由来する 21cm 線に着目する。

宇宙膨張に伴う赤方偏移の効果によって、遠方宇宙からの 21cm 線はより低周波な電波として観測される。つまり、赤方偏移した 21cm 線を広い周波数帯で観測することにより、各赤方偏移ごとの階層的な宇宙の探査が可能となる。従って、 Ω_{HI} の赤方偏移進化を探る上で 21cm 線観測は不可欠である。

しかし、21cm 線観測は銀河系内外からの強力な前景放射により、未だ宇宙論的スケールでの観測には至っていない。また、 Ω_{HI} の制限を行う研究はライマンアルファの吸収性質を用いた推定や HI 分布と銀河分布の相互相関による推定など多くなされてきた。しかし、誤差が大きいことに加えて各赤方偏移ごとの制限にばらつきがみられる。そこで本研究では、前景放射の影響を減らすことができる相互相関という手法を用いた 21cm 線-CMB Lensing 相互相関 [2] に着目し、検出可能性を議論した。これに加えて Fisher 解析を行い Ω_{HI} の制限について将来の精密観測によってどの程度制限が向上するか予測した。

1. Zwaan M. A., Briggs F. H., Sprayberry D., Sorar E., 1997, ApJ, 490, 173
2. Tapomoy Guha Sarkar, 2009, Journal of Cosmology and Astrophysics, Issue 02, pp.002(2010)

重力 b7 HSC データを用いたフィラメント構造の弱重力レンズ効果測定

近藤 寛人 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) M2)

現在最も支持されている宇宙論モデルとして、宇宙膨張を促進する宇宙項 Λ と冷たいダークマターを含む Λ CDM モデルがある。 Λ CDM モデルに基づいた N 体シミュレーションでは、ダークマターの構造として球状のハローとその間をつなぐ線状のフィラメント構造が形成される。実際の観測では、ダークマターは光を放射しないためダークマターの構造を直接観測する

ことはできず、内部で形成された銀河の空間分布を通して観測されてきた。

しかし、相対論的效果を考えると、ダークマター構造の背後に存在する銀河の形状は、重力場による光の経路の歪みから若干の変化が生じる。これを弱重力レンズ効果と呼び、膨大な数の銀河像を平均することで、微小な銀河像の変化を取り出し、ダークマター構造を直接的に測定することが可能になる。ハロー内のダークマター分布は、弱重力レンズ効果によって広く研究されているが、ハローと比較して質量が小さく、弱重力レンズ効果の小さいフィラメント構造においては、まだ十分に研究されていない。先行研究として、SDSS LRG 間のフィラメント構造の弱重力レンズ効果の測定 [1] があり、 $z \leq 0.5$ のフィラメント構造を測定している。

私たちは、より高赤方偏移の銀河である SDSS-BOSS の隣接するペアの間に存在するフィラメント構造 ($z \leq 0.7$) を Subaru Hyper Supreme-Cam (HSC) の初年度データを用いて測定した。また HSC コラボレーションにて、 Λ CDM モデルを仮定した N 体シミュレーションに基づいて作成された擬似銀河カタログにおいても同様の測定を行い、現実のダークマターフィラメント構造が Λ CDM モデルの予言と一致していることを確認した。

本公演では、HSC データを用いた $z \sim 0.5$ のフィラメント構造の弱重力レンズ効果解析の結果について発表する。

1. J. Clampitt et al., MNRAS, 457, 2391 (2016)

重力 b8 ヘリカルな磁場生成モデルにおける重力波生成

岡野 創 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

我々の宇宙には、中性子星や銀河をはじめとした、磁場をもつ物体が多数存在する。磁場の強さは磁場の相関長 (スケール) が小さいほど大きくなり、中性子星では $10^{12} G$ を超え、銀河団では $10^{-3} G$ であるなど多岐にわたる。そして、2010 年の TeV Blazar の観測から Void の宇宙にも磁場が存在し、100Mpc あたりに $10^{-16} G$ を超える磁場があることがわかった。これは種磁場とよばれ、この磁場がプラズマの運動などで銀河の磁場程度まで増幅されたと言われている。種磁場の起源は初期宇宙、特にインフレーションにあると考えられ、2010 年の観測後、様々な磁場生成モデルが考えられてきた。ところが 2014 年にインフレーションのみで観測を満たす磁場は生成できないことが証明され、以降はインフレーションだけでなく、再加熱も利用した磁場生成が議論されるようになった。また、観測結果とシミュレーションとの比較から、宇宙磁場はヘリカルであることが示唆されている。そこで私は、初期宇宙磁場の生成機構としてインフレーション期から再加熱期にかけてヘリカルな磁場を生成するモデルに着目する。このモデルでは、宇宙磁場の観測下限 $> 10^{-16} G$ を上回るスケール不変な磁場の生成が可能であり、同時に作られた電場は再加熱時に十分弱められる。本講

演では、宇宙初期に増幅された電磁場から作られる重力波のパワースペクトルを計算し、重力波干渉計による直接観測の可能性を検討する。

1. Tomohiro Fujita and Ruth Durrer, arXiv:1904.11428
2. Chiara Caprini and Lorenzo Sorbo, JCAP1410(2014)

重力 c1 Weyl クラス

松野 阜 (大阪市立大学 宇宙物理・重力研究室 D2)

軸対称静的時空の Einstein 方程式の真空解に関して次の定理が知られている。

平坦な 2 次元ユークリッド空間 (ρ, z) 上の微分方程式

$$\Delta U = 0, \partial_\rho k = \rho[(\partial_\rho U)^2 - (\partial_z U)^2], \partial_z k = 2\rho \partial_z U \partial_\rho U$$

の解 $U(\rho, z)$, $k(\rho, z)$ を用いて、軸対称静的な真空の Einstein 方程式の計量は

$$ds^2 = e^{-2U} [e^{2k} (d\rho^2 + dz^2) + \rho^2 d\phi^2] - e^{2U} dt^2$$

と表される。この定理をレビューする。

1. 佐藤, 小玉 '一般相対論'

重力 c2 Modeling scalar fields consistent with positive mass

片桐 拓弥 (立教大学 D1)

一般相対論における正エネルギー定理は、物質場が適切なエネルギー条件を満たす時空の非線形レベルの安定性を保証する [1]。正エネルギー定理によると、漸近的に平坦な時空の空間的無限遠において定義される Arnowitt-Deser-Misner (ADM) エネルギーは非負であり、Minkowski 時空において 0 となる。ADM エネルギーに下限を定める正エネルギー定理の成立は、宇宙の後期加速膨張を説明する試みのひとつである修正重力理論の構築における指導原理となり得るだろう。

[2] は、修正重力理論のひとつであるスカラー・テンソル理論において正エネルギー定理が成立するために、理論が満たすべき条件を与えた。ただし、[2] が調べた理論は非常に特別なクラスである点で、議論に拡張の余地がある。

本講演では、[2] をレビューしたのち、与える結論の拡張をおこなう。

1. E. Witten, Commun. Math. Phys. **80** (1981) 381.
2. M. Nozawa and T. Shiromizu, Phys. Rev. D **89**, no. 2, 023011 (2014)
3. M. Nozawa and T. Shiromizu, Nucl. Phys. B **887**, 380 (2014)

重力 c3 軸対称時空における時間的閉曲線

林 航大 (京都大学 基礎物理学研究所 M2)

本発表ではある軸対称時空に注目し、その時空に時間的閉曲線 (Closed Timelike Curve, CTC) が存在することを確認

する。

一般相対性理論は今から約 100 年ほど前にアインシュタインが提唱した理論であり、重力を時空連続体の歪みとして説明するものである。この一般相対性理論の興味深い示唆として、時間的閉曲線の存在がある [1-3]。時間的閉曲線とは時間的な曲線でありながら全く同一の時空点 (時間、空間 ともに全く同一の点) に戻ってくるものである。この時間的閉曲線の存在は、一般相対性理論の枠組みにおいて、過去の世界への時間旅行が禁止されていないことを意味している。

本発表ではまず、文献 [1] に従って、回転する無限に長い円柱形状のダストによって形成される円柱対称時空において時間的閉曲線が存在することを確認する。また文献 [2] に従って、質量を持たない回転する二つの粒子によって形成される軸対称時空においても同様に時間的閉曲線の存在を確認する。後者の時空については、質量を持たない回転する棒によって形成されるものに近似することができることも確認する。ただし、注意すべき点として、ここで述べた二つの解はいずれも非現実的な性質を持っていることが挙げられる。

1. W.B. Bonnor, J. Phys. A: Math. Gen. 13, 2121 (1980)
2. W.B. Bonnor, Class. Quantum Grav. 19, 5951 (2002)
3. S.V. Bolokhov (preprint 1904.06727) (2019)

重力 c4 修正重力理論におけるスカラー波の遮蔽機構とその破れ

平野 進一 (立教大学 D3)

1998 年の加速膨張の発見以来、その起源としての修正重力理論の研究が盛んに行われている。宇宙論的大スケールにおいて、重力理論の拡張から加速膨張の起源を説明し、太陽系のような小スケールではその拡張効果は遮蔽され、一般相対論の予言を再現する。近年、重力波の観測技術の進歩から、ブラックホールや中性子星のような強重力場での重力理論の検証が可能になりつつある。本ポスターでは、修正重力理論におけるパルサーバイナリーでの重力波生成を考える。特に、重力理論拡張の効果によって生じる新たな偏極モードとして生じるスカラー波が伝搬せずに遮蔽されるのか、また、遮蔽されずに破れを生じるのはどのような状況かを議論する。さらに、スカラー波が飛来した際の地球近傍での振る舞いについても同様に議論を行う。

1. C. de Rham, et al., Phys. Rev. D 87 (2013) no.4, 044025
2. F. Dar, et al., Class. Quant. Grav. 36, no. 2, 025008 (2019)
3. T. Katsuragawa, et al., arXiv:1902.02494 [gr-qc].

重力 c5 逆散乱法によるアインシュタイン方程式の厳密解の構成

大倉 靖央 (大阪市立大学 宇宙物理・重力研究室 M1)

次のようなメトリック

$$-ds^2 = f(-dt^2 + dz^2) + g_{ab}dx^a dx^b$$

$$(x^0, x^1, x^2, x^3) = (t, x, y, z), (a, b = 1, 2)$$

を考える (ここで f, g_{ab} は t, z のみに依存する)。このメトリックは比較的シンプルであるにもかかわらず重力理論において多くの応用がなされており、今までにこのメトリックに対する方程式の非自明な解が数多く得られている。したがってこのメトリックに対する Einstein 方程式を積分する手法があれば厳密解がシステムティックに求まり、われわれの重力理論のさまざまな側面の理解を大きく進めることができる。そこで Belinskii と Zakharov は文献 [1] において逆散乱法を用いた、このメトリックに対する Einstein 方程式の新たな解を構成する手法を示した。この手法は Einstein 方程式をの既知の特解が少なくとも 1 つあったとき、その特解から新しい非自明な解を得るというものである。これにより未だに知られていない Einstein 方程式の厳密解の発見が期待され、もしそれが実現すれば物理的に非常に大きな意味をもつ。本講演はこの文献 [1] のレビュー講演でありこの手法を導出から説明する。さらにそれを用いてもシンプルな場合のソリトン解と 2-ソリトン解の構成を行う。

1. V. A. Belinski and V. E. Zakharov, Sov. Phys. JETP 48 (1978) 985

重力 c6 重力の熱力学的側面

渡慶次 孝気 (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)

近年、重力の熱力学的性質が盛んに研究されている。ブラックホール (BH) を熱力学的対象とみなしたとき、エントロピーや温度によって BH が特徴付けられることや、エントロピーが BH ホライズンの表面積に比例することはよく知られている。

本講演では、まず [1] および [2] に基づいて、重力の熱力学的側面に関するトピックスを紹介する。この review が本講演の中心であり、熱力学的な要請の下でアインシュタイン方程式が導かれることや、通常的作用汎関数から出発して表面と境界の情報が結びつくことなどを含む。後者の関係式をホログラフィック関係式と呼ぶ。

熱力学的に重力を考えることは量子重力理論への有力な歩みを与えるが、本講演ではこの点にも触れておきたい。一方で観測との整合性についてはどうであろうか。例えば、重力を熱力学的に考えるとダークマターを導入すること無しに観測事実を説明できるように思われたことがあった ([3])。しかしこの解釈は種々の問題点を孕んでいることにも触れておく。

1. Dimitris Moustos, Gravity as a thermodynamic phenomenon, [arXiv: 1701.08967]
2. T Padmanabhan, Thermodynamical aspects of gravity: new insights, Rep. Prog. Phys. 73, 046901
3. Erik Verlinde, Emergent Gravity and the Dark Universe, [arXiv: 1611.02269]

重力 c7 ブラックホール内部の質量パラメータ・インフレーションと宇宙検閲官仮説

竹林 蒼真 (近畿大学大学院 総合理工学研究科理学専攻 M1)

重力波天文学を筆頭とする様々な宇宙観測により、今後ブラックホール時空の詳細な構造が明らかにされると期待される。古典的な一般相対論における最も根本的な未解決問題の一つは、ブラックホール (BH) と密接な関係がある「宇宙検閲官仮説」である。一般相対論では、重力崩壊の終点は BH であり、時空特異点は BH の外部 (イベント) ホライズンに隠されるという主張を「弱い宇宙検閲官仮説」という。つまり遠方の観測者から見えるような裸の特異点は存在しないという主張である。一方、一般相対論の無毛定理によれば、重力崩壊でできる BH は質量、角運動量、電荷の3つのパラメータのみで記述される Kerr-Newman BH に限られる。Kerr-Newman BH は一般に2つのホライズンを持ち、BH 内部にあるホライズンは「コーシー・ホライズン」と呼ばれる。コーシー・ホライズンは、そこを越えると物理の初期値問題 (コーシー問題) が解けなくなる境界であり、現実の宇宙にはコーシー・ホライズンは存在しないという主張を「強い宇宙検閲官仮説」という。これについて最初の重要な考察は、Poisson と Israel(1989年) によるもので、BH 内部のコーシー・ホライズンが、「質量パラメータのインフレーション」と呼ばれる現象により不安定になることが示された。BH 時空で光の放射を考えると、無限遠に飛んでいく光と BH に落ち込んでいく光がある。BH に落ちていく方の光は、コーシー・ホライズンでそのエネルギー密度が無限大に青方偏移する。しかし、この効果は BH の外部にいる観測者からは外部ホライズンにより因果的に切り離されているので、BH 外部のエネルギー密度は有限なままになる。今発表では、Kerr-Newman 解と似た構造をもつ Reissner-Nordstrom 解の質量パラメータ・インフレーションについて、Poisson-Israel (1990年) の研究を紹介し、今後の宇宙観測による宇宙検閲官仮説の検証方法について議論したい。

1. E.Poisson and W.Israel Phys.Rev.D41 1796 (1990)

重力 c8 球形ブラックホールが及ぼす質量インフレーション

村島 崇矩 (近畿大学大学院 総合理工学研究科・理学専攻 M1)

一般相対論では、定常ブラックホールは一般に質量、電荷、角運動量という3つの特徴しか持たないことが理論的に証明されている。質量のみをもつシュヴァルツシルト・ブラックホールは単純であるが、電荷や角運動量をもつカー・ニューマン・ブラックホールは一般にイベント・ホライズン内部にコーシー・ホライズンと呼ばれる2つ目のホライズンを持つことが分かっている。そこで、回転や電荷を伴うブラックホールの内部構造を考えよう。重力崩壊の過程で発生された重力放射の一部は後方散乱され、コーシー・ホライズンでエネルギー密度が無限に青方偏移することが知られている。その青方偏移の時空への反作用効果を取り入れるため、コーシー・ホライズンの近傍で外向きの重力放射も考慮すると、その放射は、コーシー・ホライズンを横切り、質量パラメータを無限に増大させることが分かる。この現象は「質量インフレーション」と呼ばれており、コーシー・ホライズンの不安定性を意味するため、「現実の宇宙には、物理学の初期値問題 (コーシー問題) が破綻するようなコーシー・ホライズンは存在しない」とする「強い宇宙検閲官仮説」を支持するものである。本発表では「質量インフレーション」現象を最初に簡単なモデルで解析した、ポアソンとイスラエル (1989、1990年) の論文に基づき、回転ブラックホールと良く似た構造を持つ帯電した球形ブラックホールのモデルにおける質量インフレーションのメカニズムを解説する。

1. E.Poisson and W.Israel Phys.Rev.D41 1796(1990)

重力 c9 A new derivation of string-string interactions

藤倉 浩平 (東京工業大学 理工学研究科 基礎物理学専攻 山口研究室 D2)

初期宇宙で、対称性が自発的に破れると位相欠陥が生成される。特に、高エネルギー領域がひも状のときは宇宙ひもと呼ばれる。宇宙ひもは巨材なエネルギーを持つので、そのエネルギー密度 (数密度) の時間発展を説明することは素粒子論的な観点からも非常に興味深い。宇宙ひもの数密度の時間発展は宇宙ひも同士の相互作用に強く依存している。この講演では、宇宙ひもの相互作用を説明する系統的な手法を紹介する。

重力 c10 スカラー型ゆらぎから誘起される重力波のゲージ依存性

富川 慶太郎 (立教大学 D1)

宇宙論的摂動論を2次まで考慮するとスカラー型ゆらぎから2次の重力波が誘起される [1][2]。2次重力波は1次とは異なりゲージ依存性がある。しかし、2次重力波は主に Newtonian

gauge でのみ計算されており他の gauge ではあまり計算されていなかった。本発表では状態方程式 $p = w\rho$ の完全流体で占められている宇宙において、スカラー型ゆらぎから誘起される重力波を comoving gauge と Uniform curvature gauge で計算し、2次重力波のゲージ依存性を定量的に評価する。

1. K. N. Ananda, C. Clarkson and D. Wands, Phys. Rev. D **75**, 123518 (2007)
2. D. Baumann, P. J. Steinhardt, K. Takahashi and K. Ichiki, Phys. Rev. D **76**, 084019 (2007)

重力 c11 宇宙論における相転移由来の重力波

石川 純也 (東京工業大学 理工学研究科 基礎物理学専攻 山口研究室 M2)

初期宇宙においては、標準模型を超えた物理に関する対称性が実在していたと考えられている。ツリーレベルポテンシャルに、他の場からの量子効果を加えた有効ポテンシャルを熱化することで相転移のダイナミクスを調べることができる。本講演では、宇宙論における相転移から生じる重力波について述べる。

重力 c12 Reheating after the hybrid Higgs inflation

佐藤 星雅 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 D2)

ビッグバン宇宙論は現在の宇宙の標準理論となっているが初期ゆらぎの起源など自然な説明が不可能な課題がある。これを解決する理論としてインフレーション理論が提唱され、これまでに多くの研究がなされてきた。インフレーション理論では宇宙の指数関数的膨張が引き起こされる。これは断熱膨張を意味し、宇宙の温度が絶対零度付近まで下がることを意味する。しかし初期の元素合成のためにはビッグバン初期は火の玉宇宙と呼ばれるほど高温が必要である。その為インフレーションを引き起こす粒子 (インフラトン) の崩壊によってこの加熱が達成されると考えられている。

一方でインフレーションのモデルは数多くあるが、素粒子標準模型内の粒子によって引き起こされるモデルは Higgs inflation のみである。しかし、宇宙背景放射 (CMB) の観測結果と整合するには重力との非最小結合が必要である。非最小結合には質量項タイプと運動項タイプの結合があり、これら2つが同時に存在するインフレーションモデルが Hybrid Higgs inflation である [1]。このモデルは CMB の観測に整合するが、一般に運動項タイプの結合はインフレーション後の加熱期に Higgs 場の音速の2乗が負になる問題 (gradient instability) がある [2]。これは摂動の急激な成長を引き起こし、摂動論による解析の破綻を意味する。

本講演では Hybrid Higgs inflation 後の粒子生成による加熱機構の解析を行う。運動項タイプによって引き起こされた gradient instability が質量項タイプの導入によって回避可能か議論しその条件を求めた。また、粒子の生成量についての議論

には真空の定義が必要である。しかし一般に、曲がった時空上での粒子の真空の定義は困難である。これまで重力と非最小結合した状態での加熱期の真空について議論はあまりなされていない。そこで非最小結合が存在する場合の真空の定義についての議論を行い、粒子生成の解析も行う。

1. S.Sato and K.Maeda, Phys. Rev. D **97** 083512(2018)
2. Y.Ema, R.Jinno, K.Mukaida and K.Nakayama, JCAP **1510** (2015)

重力 c13 Time crystal とその初期宇宙への影響の可能性

佐野 有里紗 (東京学芸大学 M2)

我々の住んでいる宇宙は138億年前にビッグバンから始まったと考えられている。しかし、宇宙はビッグバンから始まったとするビッグバン理論を考えると、地平線問題や平坦性問題などの問題が生じてしまう。そこで、これらの問題を解決するために、ビッグバンより以前に指数関数的加速膨張であったと仮定する。それは、inflation と呼ばれ、あるスカラー場 (inflaton) が引き起こしたと仮定している。inflaton が激しく振動する際にエネルギーが放出され、別の物質へと転移する。それにより、inflation によって冷やされた宇宙が再び加熱され、ビッグバンとなる。この過程を reheating と呼ぶ。

Time crystal とは、時間並進対称性を自発に破った物質であり、非平衡状態においては実験的にすでに実現されている [1]。また、time crystal は時間に対して周期的なパターンをもつ物質であり、与えられた外力に対して2倍などの周期で振動することがわかっている。

本発表では、量子重力理論から示唆される時間の離散性が time crystal とみなせる可能性について考えた。また、そのパラメータ共振などが inflation やその後の reheating など初期宇宙に影響を与える可能性について議論する。

1. J.Zhang et al., Nature **543**, 217-220(2017).

重力 c14 ダークマターの性質の制限: LSBG を用いたダークマター対消滅の探査

橋本 大輝 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C研) D1)

宇宙のごく初期に熱的に生成されたダークマター (代表例は Weakly Interacting Massive Particle) は、その当時標準モデルの粒子と熱平衡状態にあったと考えられる。したがって、ダークマターが対消滅して標準モデルの粒子が生成されるような反応過程が存在することが期待される。それに伴い、ガンマ線が生成されることが予測されており、このガンマ線放射を探査することがダークマターの性質の解明に繋がる。これまでの研究では [1] や [2] において、銀河系中心方向や銀河系近傍の矮小銀河をターゲットにして対消滅ガンマ線シグナルの研究が行われており、ダークマター対消滅に関連する性質 (と

りわけ対消滅断面積)が制限されてきた。本研究では、Low Surface Brightness Galaxy (LSBG)に着目し、同様の研究を行う。LSBGを扱う利点は、通常の銀河(銀河系規模)に比べダークマターにより支配された系であること、天体由来のガンマ線が比較的少ないと期待されることが挙げられる。本研究では、Subaru Hyper Suprime-Camの観測データから構築されたLSBGカタログに収録されている8個のLSBGを用いている。この8個のLSBGについて、ダークマター対消滅ガンマ線のフラックスをモデリングし、ガンマ線観測と比較することで、10 GeVの質量のダークマターについて対消滅断面積に $\sim 10^{-23}$ [cm³/s]の制限を与えた。この制限は現在銀河系近傍の矮小銀河によって与えられている制限よりも10³倍程度弱い制限となるが、将来観測ではLSBGの観測数が爆発的に大きくなることが期待され、矮小銀河などの他の天体を用いた制限よりも強い制限を与えることができる。

1. M. Ackermann et al. ApJ 840 (2017) 43
2. A. Albert et al. ApJ 834 (2017) 110

重力 c15 右巻きニュートリノの重力的生成によるバリオン数と暗黒物質の生成 羽柴 聡一郎 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター D1)

我々はクインテッセンシャル・インフレーション理論に基づき、3世代の右巻きニュートリノが重力的に生成するようなモデルを考えた。我々のモデルに於いて、3世代の右巻きニュートリノ N_i ($i = 1, 2, 3$) はそれぞれ、重い方から順に $M_3 \sim 10^{13}$ GeV、 $M_2 \sim 10^{11}$ GeV、 $M_1 \sim 10$ keV という質量を持っており、最も重い N_3 は再加熱過程を実現し、 N_2 は N_3 との混合によってバリオン数を生成し [1]、 N_1 は暗黒物質として振る舞う。我々は種々の観測的制限から許されるパラメータ領域を求めた結果、ブレーンワールドシナリオ [2] を採用することで、ファインチューニングを要さない範囲でこのモデルが上手くいくことを示した。

1. M. Fukugita and T. Yanagida, Phys. Lett. B174, 45 (1986)
2. L. Randall and R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. 83, 3370 (1999)

重力 c16 Constraints on asteroid-mass primordial black holes (PBHs) as dark matter candidates Qiu Tian (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M1)

Primordial Black Holes (PBHs) have received increasing attention recently, including claims that black hole binaries for LIGO gravitational wave might be originated from PBHs. PBHs are a viable candidate of cold dark matter that does not require to introduce any new elementary particles be-

yond the Standard Model (SM). So far, various observations have been used to put constraints on the abundance of PBHs over a wide range of the mass scales. Here I would like to review constraints on PBHs of asteroid-mass scales in the range $3.5 \times 10^{-17} < M_{\text{PBH}}/M_{\odot} < 4 \times 10^{-12}$ following the recent paper by Montero-Camacho et al. (will appear soon in arXiv). The paper focused on three phenomena: (1) optical microlensing, (2) dynamical capture of PBHs in stars, and (3) destruction of white dwarfs by PBHs. The paper shows that it is difficult to constrain PBHs of asteroid-mass window, and the window is still open in the sense that all dark matter is made up by such tiny PBHs.

1. Montero-Camacho et al. 2019 (will appear in arXiv soon)
2. H. Niikura et al. Nature Astronomy (Apr, 2019) 238.
3. P. W. Graham et al. Phys. Rev. D 92 (Sept., 2015) 063007, [1505.04444]

重力 c17 ボイドの形状進化と潮汐場の系統的調査 簗口 睦美 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C研) D2)

SDSSを始めとする近年の銀河の掃天観測によって、宇宙には超銀河団スケールの大規模構造(泡構造)が存在することが明らかになった。周囲に比べて密度の低い構造はボイドと呼ばれ、その形状により重力理論の違いが区別できる可能性が報告される(Zivick et al. 2015 [1])など、銀河団と相補的な理論モデルのプロープとして期待されている。一方、重力多体系であるボイドの形状が何によって決定されているかは自明な問題ではない。Icke 1984 [2]は、低密度領域は自然な初期条件の下で球に近づくことを指摘したが、Park & Lee 2007 [3]によって、大規模構造中でのボイドは平均的に歪むこと、これは周囲の環境による潮汐力による可能性が指摘されている。分散の大きなボイド形状は、未知の系統誤差が潜む可能性もあり、このモデル化を行うことは重要な課題である。本研究ではN体シミュレーションを用いて、大規模構造中のボイドの形状及び長軸の向きとボイド周囲の潮汐場の相関を調べた。個々のボイドを追跡するにあたって、本研究では粒子IDを用い、元の粒子をどれだけ保持するかを指標として合体分裂の効果を取り除こうと考えた。その結果、粒子保持率の高いボイドには期待通りの相関が見られたが、低い粒子保持率のものも含めるとその相関がほぼ失われてしまった。こうしたボイドを詳しく調べた結果、ボイドよりも小スケールの密度進化がボイドの形状に及ぼす影響が大きく、これがノイズのように作用している可能性を見出した。手法及び結果の詳細についてはポスターにて述べる。

1. Zivick P, Sutter P. M., Wandelt B. D., Li B., Lam T. Y., 2015, MNRAS, 451, 4215
2. J. Icke, 1984, MNRAS, 206, 1-3
3. Park D., Lee J., 2007, Physical Review Letters, 98

重力 c18 ガウス過程を用いた宇宙の大規模構造の復元

吉田 貴一 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C研) M2)

宇宙の進化を記述する現代宇宙論は現在観測されている現象をよく説明することができている。特に、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測は我々のビッグバン理論を支持する重要な証拠である。また、Planck 衛星などによる CMB 温度ゆらぎの観測によって宇宙の成分や密度ゆらぎの初期条件などが高い精度で分かってきた。我々が予測する理論と CMB の観測は「パワースペクトル」という統計量を用いて比較を行う。しかし、我々は宇宙を一つしか観測することができないためそこから生じる誤差 (宇宙分散) を避けることができず、統計量を扱う限りこの誤差が宇宙論の不定性を決めてしまう。そこで本研究では、統計量に頼らず密度ゆらぎの時間発展を直接調べることで宇宙分散を超える新たな精密宇宙論を開拓することに着目した。

光は相対性理論に従って運動を行うため、実際の観測から得られるものは光円錐上の情報のみである。つまり、我々が遠方宇宙を観測するとそれだけ「過去」のゆらぎを観測することになる。一方で、何らかの方法で遠方宇宙の「現在」のゆらぎを予測することができれば、観測量と比較することでゆらぎの時間発展を知ることができる。異なる時刻のゆらぎは線形成長因子 D を介して結びつき、 D を知ることで宇宙論のモデルに制限を与えることが可能になる。

本発表では回帰モデルの予測方法の一つである「ガウス過程」を用いてゆらぎの再構築を行い、暗黒物質の密度パラメータに与えた制限について報告をするとともに、その問題点についても議論する。

重力 c19 すばる HSC を用いた弱重力レンズの観測による宇宙論

時 聡志 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M1)

本発表は文献 [1] のレビューである。遠方銀河から発せられた光の経路は、途中の宇宙の大規模構造の重力により曲げられ、結果としてその銀河像に歪み効果を引き起こす (cosmic shear と呼ばれる)。多数の銀河像を統計解析することで、この cosmic shear 効果を引き出すことができる。cosmic shear は物質密度パラメータ Ω_m と密度揺らぎの振幅を特徴づける σ_8 に強く依存し、cosmic shear を観測することでこれらの宇宙論パラメータに対する制限を与えることができる。また、重力レンズ効果を用いることで、自ら光を発さないダークマターの分布を調べることもできる。

今回レビューする文献 [1] では、すばる HSC (Hyper Supreme-Cam) による cosmic shear の観測結果の解析から、 Λ CDM モデルにおける σ_8 、 Ω_m の値に対して強い制限を与えている。個々の銀河では、固有の形状の歪みの方が weak lensing による歪みよりも大きいため、cosmic shear の測定には大量の

銀河を観測して統計を取る必要があり、すばる HSC の広天域銀河サーベイが威力を発揮する。また、[1] では weak lensing による銀河の形状の歪みを複数の redshift bin に分けて観測する手法である tomography を用いている。redshift は時間のパラメータとなるので、tomography は物質分布の時間発展を追うこともできる観測手法である。本発表では [1] における cosmic shear の観測手法とその解析手法を概観する。

1. C. Hikage et al., Pub. Ast. Soc. Japan 71, 43 (2019) [arXiv: 1809.09148]

重力 c20 宇宙マイクロ波背景放射とザックス・ヴォルフ効果

石倉 来実 (新潟大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) とは、全天でほぼ等方的に観測される電磁波であり、そのスペクトルは絶対温度 2.7K のプランク分布と非常によく一致している。ビッグバン理論によると、宇宙初期は高温・高密度の電離状態にあり、宇宙膨張と共にその温度は低下する。温度が 3000K 程度まで下がると、宇宙は急速に中性化 (再結合) し、この時物質との熱平衡から切り離された光子が現在、CMB として観測されている。近年、精密な観測により CMB の非等方性の存在が明らかになった。特に、中性化期の地平線スケール (1 角度程度) よりも大きな角度での非等方性は、宇宙誕生直後の姿を我々に教えてくれる宇宙の化石である。

本発表では、CMB を質量を持たない光子の集団とみなし、その分布関数の性質を無衝突ボルツマン方程式に基づき考察する。はじめに、一様等方宇宙における厳密解の導出手順を復習し、併せて分布関数の温度の正確な意味を確認する。次に、密度揺らぎに起因する計量揺らぎが温度揺らぎに影響する様子を紹介する。具体的には、曲率定数が 0、かつダスト優勢の宇宙における計量揺らぎの式を用いて、光子の分布関数を求める。温度揺らぎ (ザックス・ヴォルフ効果) は重力項と重力に起因する速度項からなる。中性化期の地平線よりも大きなスケールでは重力項が、小さなスケールでは速度項が、それぞれ優勢であることが示される。