

重力・宇宙論分科会

一般相対論生誕100周年の今、我々はどれほど重力・宇宙論を解き明かしたか？

日時	7月27日 15:15 - 16:15(招待講演：大栗 真宗 氏), 16:30 - 17:30, 20:00 - 21:00 7月28日 9:00 - 10:00, 13:30 - 14:30, 16:00 - 17:00(招待講演：松原 隆彦 氏), 17:15 - 18:15 7月29日 9:00 - 10:00, 18:30 - 19:30
招待講師	大栗 真宗 氏 (東京大学)「サーベイ時代の宇宙論」 松原 隆彦 氏 (名古屋大学)「宇宙論における非線形構造形成」
座長	池田大志 (名古屋大学 D1) 矢久間司 (大阪市立大学 M2) 小笠原康太 (立教大学 M2) 吉浦伸太郎 (熊本大 M2) 大下翔誉 (東京大学 M2) 打田晴輝 (京都大学 M2)
概要	<p>現在の宇宙論によると、我々の宇宙はインフレーションから始まり、ビッグバン元素合成、初代天体形成、銀河形成、宇宙再電離期を経て、現在の色彩豊かな宇宙へと発展してきた。このシナリオは宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測や、宇宙の大規模構造の観測によって支持されつつある。一方でインフレーションを含めた初期宇宙や、現在の宇宙加速膨張、宇宙再電離など個々の問題には依然として謎が多い。これらの謎に挑むために、近年では、より精密な CMB 偏光観測、HSC(Hyper Suprime Cam) を用いた SuMIRe プロジェクト、SKA に代表される 21cm 線観測などの次世代の観測が期待されている。また理論的な側面でも、新しい理論モデルの開発や、数値計算を用いた研究なども進められている。</p> <p>一方、こうした宇宙の研究に欠かせない重力理論自体の研究も進められている。その中には、インフレーションや現在の宇宙加速膨張などを説明するために、従来の Einstein 重力理論に変更を加えた修正重力理論といった試みもある。こうした重力理論は、その非線形性ゆえ解析が難しく、現在でも様々なアプローチで研究されている。これらの重力理論の検証のために、ブラックホール周辺などの強重力場での天体現象の観測や、重力波の直接検出が必要である。重力波の直接観測はいまだ実現していないが、現在建設中の KAGRA などによる観測が期待されている。このような重力波観測が実現すると、重力波天文学が拓かれ、今まで知りえなかった初期宇宙の様子も明らかになる。</p> <p>これらを踏まえた上で、本研究会では宇宙論・重力理論の研究の最前線で活躍されている講師を招待し、最新の研究内容などについて講演していただく予定である。また宇宙論・修正重力理論に興味のある学生を募り、研究内容や勉強内容を発表・議論する場を設ける。この機会が、各々の研究をより深め、見識を広める助けとなることを期待する。</p> <p>注) 宇宙線としてのニュートリノは宇宙素粒子分科会で扱います。</p>

大栗 真宗 氏 (東京大学)

7月27日 15:15 - 16:15 B会場

「サーベイ時代の宇宙論」

現在の宇宙論研究は大型サーベイ計画を中心に進んでいる。特に日本でもすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) によるサーベイ観測がちょうどじまったところである。HSC サーベイは日本が主導する初の大規模撮像サーベイとあって、その意味でも日本の天文学、宇宙論研究の一つの転機となるのではないかとと思われる。これらサーベイデータを用いた研究のアプローチは実は非常に多様でありアイデアや頑張り次第で予想外の大きな成果をあげることもできるだろう。本講演では宇宙論の現状と重要問題をごく簡単にレビューしたあと、サーベイ観測を利用した研究を紹介しその可能性を議論する。私自身 SDSS から HSC にいたるまでサーベイデータを使った研究を断続的に行ってきたがその面白さが若手の皆さんに少しでも伝われば幸いである。

松原 隆彦 氏 (名古屋大学)

7月28日 16:00 - 17:00 B会場

「宇宙論における非線形構造形成」

宇宙初期に生成された初期ゆらぎの振幅は十分に小さく、初期段階におけるその力学進化は線形近似によって十分に記述できる。線形近似ではゆらぎの発展がフーリエ・モードごとに独立に進化するため、理論的な解析も比較的容易である。ところが、現在の宇宙は小さな波長スケールほど極度な非線形性を持っているし、また、精密なレベルでの観測が可能な現代の宇宙論では、初期宇宙や大きな波長スケールにおいても非線形性の効果が重要な情報源として用いられている。現在の宇宙で我々に観測可能な量には多かれ少なかれ非線形性の影響が入り込むため、精密な宇宙論的解析には非線形効果の理解が欠かせない。本講演では、宇宙論における非線形構造形成の基礎的事項の解説から始め、最近の関連するトピックなどについて解説する予定である。

重宇 a1 21cmFAST による再電離期の様子の再現と輝度温度揺らぎの高次解析

久保田 賢志 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

初期の宇宙はインフレーションによる誕生後、ビッグバン元素合成を経て、高温高密度でプラズマ状態にある。その後再結合により中性水素が形成され、宇宙は中性化し、暗黒時代と呼ばれる中性水素で満たされた天体の存在しない時代がしばらく続く。その時代にダークマターとバリオンが重力不安定性により崩壊し、ハローを形成する。やがてハロー内で天体形成が始まり、放射を起こすようになる。この放射によって周りの中性水素がイオン化され、宇宙は再びイオン化した状態になる。これが宇宙の再イオン化であり、この時代を再電離期と呼ぶ。この再電離期を探るのに有効なものとして中性水素の超微細構造由来の 21cm 線がある。21cm 線の観測は輝度温度という量で与えられる。輝度温度には、密度揺らぎや中性率、スピン温度などの情報が含まれるので、観測からこの輝度温度を通して再電離期のこれらの情報を得ることができる。そこで統計量であるパワースペクトルなどを扱うことで再電離期の様子を知ることができる。しかし、この時代の物理は非常に複雑であり、これをシミュレーションで扱うのはかなりの時間的コストがかかる。そこで開発されたのが準数値シミュレーションの 21cmFAST であり、これはいくつかの近似を用いることで比較的簡単に再電離期の様子を再現することができる。今回は、21cmFAST を使って再電離期の様子を再現するとともに、計算して得られた輝度温度をもとにパワースペクトルとより高次の統計量であるバイスペクトルを用いて再電離期を解析する。ここでバイスペクトルを用いるのは、パワースペクトルでは輝度温度揺らぎの非ガウス分布を解析するには不十分であるためである。そしてそこから得られる結果と今後の課題について報告する。

1. SKA-JP Science Book(2015)
2. A. Mesinger, S. Furlanetto, R. Cen, 2011, MNRAS, 411, 955
3. H. Shimabukuro, et al., arXiv1412.3332v1[astro-ph.CO] 10 Dec 2014

重宇 a2 Large gauged Q-balls with regular potential

吉持 祐佳里 (大阪市立大学 素粒子論研究室 M1)

大域的な $U(1)$ 対称性を含むスカラー場のモデルでは、Q-balls と呼ばれる球状の非位相的なソリトン解が存在することが知られている。またバリオン数非保存の問題を解決しうるモデルとして、超対称性を課した素粒子標準模型からなる Affleck-Dine 機構があり、スカラー場のゆらぎによって Q-balls が生じる。Q-balls 自身はダークマターの候補であり、Q-balls は宇宙におけるダークマターの正体とバリオン数非保存の問題を解決する糸口として大いに期待されている。

超対称性粒子は電荷や色荷を持つので、Q-balls の拡張例としてスカラー場に局所的 $U(1)$ 対称性を持ったゲージ場を入れた研究がなされた。その結果クーロン斥力によってその電荷の大きさは上限が生じるということが知られている。電荷に上限のないモデルとしてよく知られているものに、 V の形をした線形のポテンシャルのモデルがあるが、それは $=0$ が特異点となってしまう。また先行研究によって、特異点のないポテンシャルとして特殊な形のポテンシャルを考えることで、電荷に上限がなくなることがわかっている。

今回紹介する論文では、特異点のないシンプルなものとして、 $V = (\mu^2/2)\phi^2[1 + K \ln(\phi/M^2)]$ というポテンシャルを持つモデルを考え、そ

のソリトン解について調べた。その結果、電荷が大きくなるにつれてクーロン斥力によって電荷を持ったスカラー場は表面上に集まり、配位は殻型になるだけで Q-balls の球の形環さないことが分かった。これは Q-shells と呼ばれ、殻上に電荷が分布する性質は V の形をした線形のポテンシャルのモデルのものと類似している。また Q-balls はスカラー場が安定になっている配位だが、ポテンシャルのパラメータ K に依存しており、不安定解の配位があるという結果も得た。 $|K|$ が大きくなると、安定解と不安定解が漸近し、最終的に $-1.07 < K < -1.06$ の領域で 2 つの解の再結合が起こることも分かった。

1. T. Tamaki and N. Sakai Phys. Rev. D90 85022 (2014)
2. N. Sakai, H. Ishihara and K. Nakao arXiv:1011.4828v2 (2011)
3. S. Coleman Nucl. Phys. B262 (1985)

重宇 a3 銀河系内超新星爆発候補天体からの重力波について

福田 隼大 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ M1)

アインシュタイン方程式によると、質量をもった物質が存在すると、それだけで時空にゆがみができる。その物質が運動すると、時空のゆがみは光速で伝搬する。これが重力波である。そのような重力波が観測できる可能性のある現象として、超新星爆発や、中性子星の連星合体などがある。本研究では、銀河系内の超新星爆発候補天体について超新星爆発を起こした場合に発生する重力波信号が、KAGRA, LIGO, Virgo といった地上レーザー干渉計検出器によって、どのような強度で検出されるかについて調べた。強度の計算ではシグナルノイズ比を計算した。それぞれの超新星からのシグナルノイズ比は時間と検出器の位置と検出器のノイズとそれぞれの星の位置に依存する。候補天体としては、銀河系内の赤色巨星や、ウォルフライエ星を対象とした。シグナルノイズ比が 10 程度であれば、検出できる強度がある。それぞれの星の強度の時間平均を計算すると、数 10kpc の星で 10 のオーダーとなった。本講演では、結果についても議論する。

1. P. Jaranowski, A. Krolak, and B. F. Schutz, Phys. Rev. D68 063001
2. H. Dimmelmeier, C. D. Ott, A. Marek, and H. T. Janka, Phys. Rev. D78 064056 (2008)

重宇 a4 cosmic string の kink による重力波の生成

松井 由佳 (名古屋大学 C 研 M1)

本発表では、宇宙に存在する cosmic string の kink から放出される重力波について詳しく説明する。[1] のレビューとその問題点の指摘をし、これからすべき研究の提案をする。

宇宙初期の真空の相転移によって、位相欠陥の一種である cosmic string が生成され、1 次元のひも状の高エネルギー領域が宇宙空間を漂う。String が複数本存在する場合、String 同士は互いに衝突する時がある。その際、ある確率で組み換わり、kink と呼ばれる尖った構造を作る。この kink は消えることなく string 上を伝播していく。String には loop 状のものも存在し、その上に伝播する波の重ね合わせにより、突発的に極めて大きな振幅を持つ構造を作る場合がある。これを cusp と呼ぶ。

kink や cusp は string に四重極の運動を与えるので重力波を放出するが、その放射のエネルギーは string の振動により生じる重力波のエネルギーよりも大きいことが知られている [2]。今回我々は infinite string 上の kink から放出される重力波に注目する。Kink から放出される重力波は、string や kink の分布を考慮することで背景重力波を形成する。[1] では kink から放出される背景重力波のパワースペクトルを計算して、SKA や LISA などの重力波の将来観測での観測可能性を示している。

しかし、[1] での重力波の見積もりには、string が衝突した際に組み換わる確率 (組み換え確率) や、string を生成する機構によっては存在する三本繋がったような構造 (Y-junction) は考慮されていない。例えば、string の組み換え確率を変えると、string と kink の分布が変わり、背景重力波のパワースペクトルも変化することが期待される。今後我々はそのような構造や特質を持った string による背景重力波の計算とその観測可能性について議論を進めていく。

1. M. Kawasaki, K. Minamoto and K. Nakayama, Phys. Rev. D81, 103523 (2010)
2. T. Damour and A. Vilenkin, Phys. Rev. D64, 064008 (2001)

重宇 a5 背景重力波の非等方性

米丸 直之 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

重力波検出方法の一つに Pulsar Timing Array (PTA) がある。パルサーとは、安定した周期でパルスを放射する中性子星で、周期の正確性から重力波の検出に利用できると考えられる。重力波により地球とパルサー間の時空が摂動を受けると、パルスの ToA (Time of Arrival ; 到来時刻) が変化する。重力波の signal は小さいが、複数のパルサーで ToA のずれ (timing residual) の相関をとることでノイズから分離することができる。

PTA により検出される重力波の周波数帯は $10^{-9} \sim 10^{-7}$ Hz である。その周波数帯で検出される signal の大部分は、背景放射を作り出す Super Massive Black Hole Binary (SMBHB) 系からの放射のインコヒーレントな重ね合わせであると考えられている。背景放射が等方的な場合、timing residual の相関は、パルサーの angular separation のみに依存した関数 (Hellings and Downs curve) となる。もし波源が遠方に多く分布しているなら等方的だと考えられるが、波源数は有限で個々の signal の強さも異なるので、非等方性が生じる可能性がある。

波源の分布に非等方性がある場合、その非等方性が signal にどのように影響を与えるかをシミュレーション、考察する。

1. Taylor S. R., Gair J. R., 2013, Phys. Rev. D, 88, 084001
2. Mingarelli C. M. F., Sidery T., Mandel I., Vecchio A., 2013, Phys. Rev. D, 88, 062005

重宇 a6 構造成長率を赤方偏移歪みから無バイアスに導く方法論の構築

越前 大輔 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

現在の標準的宇宙理論である Λ CDM 模型は観測されている宇宙膨張を良く再現するが、加速膨張をもたらすと考えられるダークエネルギーの性質については全く分かっていない。また同様の宇宙膨張を予言する修正重力理論も提唱されており、これらを区別するためには一様等方

宙の膨張だけでは不十分で、そこからのゆらぎに目を向ける必要がある。こうした宇宙論におけるモチベーションのもと SDSS などの大規模サーベイが行われ、日本でもすばる望遠鏡を用いた SuMIRe/PFS などが計画中である。観測から直接わかる銀河の数密度ゆらぎが宇宙論的な物質密度ゆらぎとどう結びついているのかは自明でなく、このバイアスはダークマターハローの質量などに依存することが判明している。一方で密度ゆらぎの成長速度である線形成長率 f はバイアスの影響が比較的小さいことが期待され (Linder 2008)、修正重力理論の制限に適していると考えられる。ここで f を推定する有力な手段として、赤方偏移歪みを利用する方法が挙げられる。SDSS などの赤方偏移サーベイにおいては銀河の視線方向の運動によって赤方偏移歪みと呼ばれる空間分布のずれが生じることが知られているが、その異方性から線形理論のもとで密度ゆらぎの線形成長率 f を導くことができる (Kaiser 1987)。最近の Okumura, Jing (2010) の研究によってこの方法で求めた f が非線形領域でバイアスに依存するものの、大スケール・大ハロー質量の線形領域ではほぼ無バイアスであることが数値的に示された。本研究は赤方偏移歪みから f を推定する際に生じる系統誤差について考察することを目的とし、具体的には Okumura, Jing が考慮したハロー質量依存性に加えてハロー形状もたらず影響を調べるとともに、非線形領域でも銀河バイアスの不定性によらない統計量を探す予定である。

1. T. Okumura and Y. P. Jing ApJ 726 5 (2011)
2. T. Ishikawa et al MNRAS 443 3359I (2014)

重宇 a7 Sunyaev-Zel'dovich 効果で見える宇宙論

堀井 俊宏 (名古屋大学 C 研 M1)

銀河団は、宇宙の構造形成において、自己重力系をなす最大のオブジェクトである。銀河団は、バリオンとダークマターで構成されており、その中のバリオンの大部分が高温プラズマになっている。高温プラズマの観測では、基本的に X 線観測が用いられている。しかし、X 線以外の観測方法もあり、これらの観測を組み合わせたさらなる宇宙論への応用が期待されている。

銀河団の高温プラズマは、Sunyaev-Zel'dovich 効果 (SZ 効果) と呼ばれる効果により観測できる。SZ 効果は、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の光子が銀河団を通る際に、高エネルギーの電子による逆コンプトン散乱によってエネルギーを受け取り、CMB の各波長に対する光子数が変化する効果である。SZ 効果により、銀河団がある方向とその他の方向で CMB のスペクトルが異なる。理論的に、CMB の各波長に対する光子数は、電波領域の中でも短波長側 (サブミリ波) では増加するが、長波長側 (ミリ波、マイクロ波) では減少するという興味深い性質がある。また、光子数の増加、減少があるため、光子数の変化しない波長が存在すると考えられる。このような CMB の光子数の変化は、Planck の観測 [1] で確かめられている。

SZ 効果の観測と X 線観測を組み合わせることにより、銀河団の質量を求めることができる。さらに、距離-赤方偏移関係などの様々な物理量を求めることができる。

今回の発表では、まず、SZ 効果の概要について紹介する [2]。SZ 効果の観測と他の観測を組み合わせることにより、銀河団に関する様々な物理量を求めることができる。求めた物理量を用いて、宇宙論へどのように応用できるのかをいくつか紹介する。

1. Planck Collaboration, (2011) arXiv 1101.2024

2. T. Kitayama (2012) arXiv 1404.0870

重宇 a8 弱重力レンズ解析で探る dark matter halo の splashback radius

村田 龍馬 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 M1)

弱重力レンズ効果とは、一般相対論の線形近似から導かれる現象である。質量 $O(10^{14} M_{\odot}/h)$ の dark matter halo (以下 halo) が視線方向前景にある場合、後景の銀河からの光の測地線が曲がる。その結果、天球面上の銀河の形が本来の形から少し歪む。stack 解析をすることで弱重力レンズ効果のシグナルを得ることができ、halo の質量密度分布が引き出せる (Miyatake et al.)。

本研究では、弱重力レンズ解析から、halo の物理的半径である "splashback(跳ね返り) radius" を議論する。構造形成に従い、halo の重力ポテンシャルが深くなることで dark matter 粒子は halo を脱出できず、粒子の軌道は halo の中心周りで減衰振動する。splashback radius とは、最近降着した dark matter 粒子が最初の跳ね返りで到達する halo 中心からの典型的な最大半径であり、重力ポテンシャルの深くなる速度を支配する質量降着率 Γ と赤方偏移 z に主に依存する (Adhikari et al.)。splashback radius 周辺では質量密度の変化率が大きいため、弱重力レンズ解析が効果的である。

今回は、質量が近い銀河団のデータを銀河の中心集中度で2つのグループに分け、splashback radius の位置が2つのグループ間で有意に異なるか調べる。従来の stack 解析の方法に加え、最新研究の scaled-stack 解析の手法も使う (Niikura et al.)。halo の密度分布の universality、CDM モデルの定性的描像に合うか、また assembly bias の視点で考察する予定である。

1. Miyatake, H. et al., 2013, arXiv:1311.1480
2. Adhikari, S. et al., 2014, JCAP 1411, 11, 019
3. Niikura, H. et al., 2015, arXiv:1504.01413

重宇 a9 ブラックホールが見かけの Luminosity に及ぼす影響

大橋 洋平 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

一般相対論は光の軌道が重力場によって曲げられることを予言している。代表的な強重力場源としてブラックホールがある。ブラックホールは光を発することはないため、他の天体のように電磁波による観測を行うことは出来なかった。しかし、ブラックホールの「影」を観測することは原理的に可能である。ブラックホールが観測者と光源に挟まれた位置にある場合、光の一部がブラックホールに吸収されることにより影が発生する。この影の形状とブラックホールの持つ物理量(質量、電荷、自転)の関係が詳しく調べられている。[1]

ブラックホールの直接撮像を実現するには、ブラックホールシャドウを観測することが重要である。撮像の期待がかけられているのは VLBI(超長基線電波干渉法)による観測である。VLBI は、我々の地球の各地に建設された電波観測施設の観測データを総合することによって、地球スケールの基線長を用いた観測を行う。VLBI の解像度は日々進歩しており、ブラックホール候補の中で最も影スケールが大きいと見積もられている、いて座 A*の観測が可能になると考えられている。い

て座 A*は降着円盤やジェットなどを伴っていると予想されており、さまざまな光源モデルが提案され、それによってどのような像が観測されるであろうかについて活発に議論が行われている。[2]

私の研究では、ブラックホールシャドウ周辺の見かけの Luminosity が重力場からどのような影響を受けるかについて調べている。簡単のため、光源は無遠に分布していると仮定した。光子がヌル測地線に沿って運動すると仮定し、光源を出発し観測者に到達した測地線束の、観測球面上における密度を調べることにことごとくによって、観測される見かけの Luminosity の視線方向依存性を数値的に解析した [3]。その結果、ブラックホールシャドウと同程度のスケールの解像度で観測した場合でも、見かけの Luminosity の変化が検出できる可能性を示唆する結果を得た。

1. K. Hioki and K. Maeda, Phys. Rev. D80 024042 (2009)
2. R. Takahashi, Astrophys. J. 611 996 (2004)
3. V. Perlick, Living Rev. Relativity 7 (2004), 9

重宇 a10 強重力場周りの円軌道の安定性

鈴木 聡人 (弘前大学 浅田研究室 M2)

timelike 粒子の円軌道はその軌道半径に最内安定円軌道 (ISCO:innermost stable circular orbit) と呼ばれる下限がある。この ISCO は天体力学において重要な役割を担っている。例えば重力波天文学では inspiralling phase と merging phase との境界が ISCO とされている。またブラックホールの降着円盤の内側の縁が ISCO と関係していると考えられている。さらに、ISCO 半径はブラックホールの質量や電荷などのパラメータによって変化するため、ブラックホールの無毛定理の検証に有用である。

Schwarzschild 時空では ISCO が存在することがよく知られているが、その他の時空では最外安定円軌道 (OSCO:outer most stable circular orbit) を持つ場合がある。そこで本研究ではこれらのような軌道を marginal stable circular orbits(MSCO) と呼ぶ。Einstein 方程式の厳密解について MSCO が調べられているが、系統立てられた理解は未だに十分ではない。そこで本研究では MSCO を体系的に調べるために、MSCO の半径を導出する方程式を得た。この方程式に Sturm の定理を用いることで、Schwarzschild 以外の時空でもパラメータの変化に応じた MSCO の個数の変化を系統的に調べることができる。

1. T. Ono, T. Suzuki, N. Fushimi, K. Yamada, and H. Asada, arXiv:1410.6265 [gr-qc] (2014)
2. L. Rezzolla, and A. Zhidenko, Phys. Rev. D 90, 084009 (2014)

重宇 a11 原始ブラックホールと、LTB 解を用いた重力崩壊の解析

古賀 泰敬 (立教大学 M2)

宇宙初期に形成されたブラックホールを原始ブラックホールという。原始ブラックホールは、強い重力源や量子的な放射源として初期から現在までの宇宙の歴史に影響を与えてきたとされ、その存在量を考えることが高エネルギー物理や量子重力などの間接的な検証につながる期待されている。特に現在、さまざまなインフレーションモデルに制限をかけることができる点が注目されている。[1]

インフレーション中に生成されたゆらぎは宇宙のホライズンを出て長波長ゆらぎとなり、インフレーション終了後ホライズンに入る。このとき、振幅の大きいゆらぎは重力相互作用により収縮し、崩壊して原始ブラックホールを形成する。このようにして原始ブラックホールを形成するゆらぎのスケールは当時のホライズンスケール程度であるが、これは現在 CMB 観測によって調べられているゆらぎよりとても短い。つまり、宇宙の原始ブラックホールの質量分布とゆらぎの小スケールのスペクトルが対応を持つ。この対応を導くための研究がこれまでに数多くなされてきた。

原始ブラックホールの質量分布を調べるには、宇宙論的背景におけるブラックホール形成メカニズムの理解が必要不可欠である。しかし、一般に重力崩壊は解析的に扱うことが難しく、現状では数値相対論による研究がほとんどである [2]。一方で、ある特殊な条件においては重力崩壊を記述するアインシュタイン方程式の厳密解があることが知られており、球対称・塵状物質における解、LTB 解はそのひとつである。

この発表では、今日までの原始ブラックホール研究の進展をレビューし、LTB 解を用いてゆらぎの重力崩壊による原始ブラックホール形成を解析する方法について議論する。

1. B. J. Carr, in *Inflating Horizons in Particle Astrophysics and Cosmology*, pp. 119-149, arXiv:astro-ph/0511743.
2. T. Harada, C. M. Yoo, T. Nakama and Y. Koga, *Phys. Rev. D* 91 (2015), 084057

.....

重宇 a12 漸近的 AdS モノポールブラックホールとその熱力学的性質

宮下 翔一郎 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

ブラックホール唯一性定理が提唱された後、それが Einstein-Maxwell 系以外でも成り立つのかを調べるために非可換ゲージ場を導入した系におけるブラックホール解の探究が行われ、実際に非自明なブラックホール解が見つけれられていった。このようなブラックホールを非可換ブラックホールと呼ぶ。その中でも SO(3) ゲージ場を導入した Einstein-Yang-Mills-Higgs 系における非可換ブラックホールはその形成過程まで考慮した、唯一性の反例となる初めてのブラックホールであった。このブラックホールの描像としては、t'Hooft-Polyakov モノポールの内部に事象の地平線が存在する状況で、それ故にこれをモノポールブラックホールと呼ぶ。漸近的平坦な時空におけるモノポールブラックホールは他の非可換ブラックホールと比べると振る舞いが複雑でかつ複数ある結合定数の値によって振る舞いが変わる等の困難があり、当初は結合定数のある極限を取るなどして限定的な解析に限られていたが、後に詳細な解析が成された。[1]

本発表では 4 次元漸近的 AdS 時空におけるモノポールブラックホール解を数値的に示し、宇宙項を導入したことによる影響について言及する。またその熱力学的性質からブラックホール解の安定性について考察する。AdS/CFT の観点からも漸近的 AdS 時空におけるブラックホールの解析は有意義である。

1. T. Tachizawa, K. Maeda, and T. Torii, *Phys. Rev. D* 51 4054 (1995)
-

重宇 a13 ブラックホールによる宇宙のリサイクルは可能か？

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

inflation の機構は、scalar 場 ϕ が有限の真空のエネルギーを持つ不安定な状態から、安定な真空状態へ slow-roll することで生じると考えられている。この時、安定な真空状態がわずかにでも 0 でない真空のエネルギーを持つ場合 (つまり、de Sitter 時空の場合)、scalar 場 ϕ はある確率で再び、エネルギーの高い不安定な状態に相転移することが J. Garriga と A. Vilenkin らによって指摘された [1]。この機構によって、宇宙はたとえ加速膨張によっていずれはビッグリップを起こすとしても、いつかは必ず inflation 期に相転移し宇宙は新しく生まれ変わるようになるため、彼らはこの描像を recycling universe と呼んだ。相転移確率は black hole 周辺ではより大きくなるのが W. A. Hiscock[2] や Ruth Gregory[3] らによって示されている。しかし、black hole を種とした宇宙の生成が起きる前に、black hole が蒸発してしまう場合もあり得る。本研究は、black hole を種とした宇宙の相転移確率と black hole の蒸発率を比較し、black hole による宇宙のリサイクルが果たして可能か否かを議論する。

1. J. Garriga and A. Vilenkin *Phys. Rev. D* 57 2230 (1998)
 2. W. A. Hiscock *Phys. Rev. D* 35 1161 (1987)
 3. Ruth Gregory et al. *JHEP* 03 (2014) 081
-

重宇 a14 宇宙大規模構造の 3 点統計を用いた原始非ガウス性の制限

橋本 一彦 (京都大学 基礎物理学研究所 D1)

近年、インフレーションにより生成される原始密度ゆらぎの統計性により、銀河・銀河団の空間分布に強いスケール依存性が現れることが示された [1]。この効果を用いれば、数多あるインフレーションモデルを検証するための数少ない手がかりである原始密度ゆらぎのガウス統計からのずれ (原始非ガウス性) を制限できる。

実際、最低次の原始非ガウス性を表すパラメータは、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を用いた方法よりも将来的に強く制限されることが知られている。最低次のみでなく、高次の非ガウス性のパラメータも組み合わせると同時に強く制限できれば、原始密度ゆらぎの起源が単一スカラー場によるものか否かを解明する手がかりとなる [2]。ところが、従来の銀河・銀河団の空間分布の 2 点統計を用いた方法では、パラメータ間に縮退が生じ、同時制限が難しかった。

現在、世界中で大規模な観測計画が実行されており、これまで大スケールで検出が難しかった 3 点統計の宇宙論への応用が現実的となりつつある。3 点統計は 2 点統計とは独立な情報を持つので、原始非ガウス性の制限に用いることでパラメータ間の縮退を解くことができると予想される。よって、本研究では 2 点統計と 3 点統計を組み合わせることで、複数の原始非ガウス性のパラメータを将来観測計画からどれだけ強く同時制限できるか見積もった。銀河・銀河団の空間分布の統計量を求める際には、重力による密度ゆらぎの非線形成長やダークマターの空間分布との非自明な関係を取り入れた計算が必要となる。本研究では、これらの効果に加え、統計量に現れる原始非ガウス性の影響を系統的に計算できる統合摂動論 [3] と呼ばれる手法を用いた精密な理論計算から 2 点・3 点統計による制限を求めた。その結果、将来的には高次の非ガウス性

のパラメータを CMB よりも数 10 倍強く制限できることがわかった。

1. N. Dalal, O. Dore, D. Huterer and A. Shirokov, Phys.Rev. D 77, 123514 (2008).
2. T. Suyama and M. Yamaguchi, Phys. Rev. D 77, 023505 (2008).
3. T. Matsubara, Phys.Rev. D 83, 083518 (2011).

.....

重宇 a15 宇宙の大規模構造を用いたインフレーションモデルの制限

平川 拓実 (広島大学 宇宙物理学研究室 M2)

宇宙の平坦性問題や地平線問題を解決する方法として、初期宇宙でインフレーションという指数関数的な宇宙の加速膨張が考えられている。これは WMAP や Planck 衛星で観測された宇宙背景放射 (CMB) の異方性をうまく説明している理論モデルである。しかしながら、その理論モデルは未だに決定しておらず現在も様々なインフレーションモデルが研究されている。

そのようなインフレーションモデルの中の一つに False Vacuum Eternal Inflation(FVEI) というものがある。このモデルでは負の曲率を持った宇宙が生じる。また Λ CDM モデルとインフレーションを組み合わせた宇宙論の標準モデルで作られる理論曲線と CMB の温度揺らぎの観測との大スケール ($\ell < 100$) で σ_8 の問題を解決できる可能性がある。

本研究では FVEI で考えられるような具体的なインフレーションのポテンシャルの形を与えてやることで生じる CMB の温度揺らぎの理論曲線と Planck による観測データなどを MCMC 法を用いて比較することでインフレーションのポテンシャルに制限を与える。

1. Raphael Bousso, Daniel Harlow, and Leonardo Senatore Phys. Rev. D 91, 083527(2015)
2. Jonathan White, Ying-li Zhang, and Misao Sasaki Phys. Rev. D 90, 083517 (2014)

.....

重宇 a16 エネルギー輸送を伴うダークエネルギーとその応用

遠藤 隆夫 (名古屋大学 C 研 M1)

現在の宇宙は加速膨張していることが複数の観測から明らかとなっている。宇宙の加速膨張を説明する試みとして二つのアプローチがある。一つは一般相対性理論に変更を加える修正重力理論であり、もう一つは一般相対性理論の枠組みのもとで加速膨張を引き起こすような物質を導入するものである。加速膨張を引き起こす物質は一般にダークエネルギーと呼ばれ、本発表ではダークエネルギーを導入するモデルに注目する。ダークエネルギーに宇宙項 Λ を対応させた Λ CDM モデルは宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度非等方性や大規模構造といった観測結果を良く再現している。しかしながら、 Λ CDM モデルには CMB 観測から得られるハッブルパラメータ (H_0) の値よりもハッブル宇宙望遠鏡 (HST) の Ia 型超新星の直接観測による H_0 の値の方が大きいという違いがある。さらに CMB 観測と赤方偏移空間歪み (RSD) 観測による構造の成長率に対する制限にも不一致が存在する。

任意のダークエネルギーは interacting dark energy (IDE)+matter に分離することができる [2]。本発表では、上記のダークエネルギーモ

デルの分離をパラメータ α で特徴付けられる generalized Chaplygin gas(GCG) に適用した論文 [1] のレビューを行う。GCG は $\alpha \rightarrow 0$ の極限で Λ CDM モデルに一致し、 $\alpha \neq 0$ の時はスケールファクター a が、 $a \rightarrow 0$ で物質のように振る舞い、 $a \rightarrow 1$ で宇宙項のように振る舞うという性質を持つ。IDE と相互作用する物質を dark matter(DM) のみとして IDE+DM によって GCG を取り扱おうと、パラメータ α が正の値では DM から IDE へのエネルギー輸送を表し、この時 CMB と Ia 型超新星の間の H_0 の値の不一致は解消される。 α が負の時には IDE から DM へのエネルギーの輸送を表し、この時には CMB 観測と RSD 観測による構造の成長率の違いを解消する。CMB、Ia 型超新星、バリオン音響振動、RSD の観測を組み合わせた α の制限は $-0.083 < \alpha < -0.006$ (95% C.L.) である。

[1] では IDE モデルを GCG のみに応用している。しかし IDE モデルは任意のダークエネルギーモデルに応用可能である。そこで本発表ではスカラー場が引き起こすダークエネルギーモデルへ IDE モデルを応用することについても議論する。

1. Yuting Wang et al., [1404.5706], Phys. Rev. D 90, no. 2, 023502 (2014)
2. David Wands et al., [1203.6776], Class. Quant. Grav. 29, 145017 (2012)

.....

重宇 a17 インフレーション中の QED における非摂動効果の研究と原始磁場形成理論への応用

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

宇宙観測の進展によって、宇宙磁場の性質が明らかにされつつある。星や銀河などの天体に付随する磁場だけではなく、銀河間領域のような宇宙論的スケールにおいても非常に弱い磁場が存在することや、そのような大規模磁場の強度の下限 ($B \gtrsim 10^{-15} \sim -20$ Gauss) が知られている。しかし、このような大規模磁場の起源についてはよく知られておらず、天体の活動や構造形成によるもの、初期宇宙における物理的過程によるものなどの説がある。特に、インフレーション中の電磁場の量子論的なゆらぎから、大規模磁場の種となる磁場を作るとする原始磁場形成理論には、大スケールにわたって、コヒーレントな磁場を作り得るという特徴がある。初期宇宙で生成され、ポイド領域に残された磁場は、他の観測では調べることの難しい、初期宇宙に関する貴重な情報をそのまま残していると考えられるため、このアプローチには、他にはない重要な価値がある。しかしながら、原始磁場形成理論では、磁場ではなく電場が急激に成長し、問題を引き起こすことが知られており、十分な種磁場を作ることは理論的に困難であるとされてきた。そこで本研究では、強い背景場が存在する状況下で QED を考え、Schwinger 効果 (荷電粒子の対生成) を取り入れることによって、強い電場を消し去り、原始磁場形成理論の困難を取り除く可能性に着目した。Schwinger 効果は、場の理論における代表的な非摂動的な効果の一つで、通常の摂動論に基づく解析では得ることのできない効果である。近年、パラメータや空間の次元を制限し、解析的になる場合の Schwinger 効果が調べられているが、この結果をそのまま原始磁場形成に適用することは問題がある。本研究では、Laplace-Borel 変換を用いて非調和振動子を解析的に調べた A. Volos のアプローチに着想を得て、これまでよりも一般的な背景場の下での QED 有効作用 (特にその虚部) を計算し、原始磁場形成理論における帰結を探る。

1. A. Neronov, I. Vovk, Science, 328, 73 (2010)
2. J. Martin, J. Yokoyama, JCAP 01 025 (2008)
3. A. Volos, Ann. Inst. Henri Poincare, sec. A 39 3 (1983), p. 211-338

.....

重宇 a18 インフレーション理論による原子揺らぎの生成と新しいモデルの提案

寺内 晴輝 (東京工業大学宇宙物理学理論グループ M1)

イントロダクション

インフレーション理論により、宇宙の構造、CMB の非等方性などの観測的事実が説明されるので、宇宙初期にインフレーションがあったことは広く信じられている。しかし、未だインフレーションのメカニズムは分かっていない。そこで、メカニズムによって異なる、生成される原始揺らぎのスペクトルの傾きなどの統計量についての予言と、CMB での観測量を比べることで、正しいメカニズムの峻別ができる。本発表では、インフレーションで原始揺らぎがどのように生成、進化するかを示し、予言する観測可能な統計量を導出する。さらに、新しいモデルを提案し、その予言が Planck2015 の $n_s - r$ 平面の 1σ 領域内に入ることを示す。そして、我々のモデルの素粒子論的起源について議論する。

我々のモデルでの原始揺らぎの生成メカニズム

宇宙の加速膨張のことをインフレーション、インフレーションを引き起こすスカラー場をインフラトンと呼ぶ。我々が考案したモデルは以下のようなポテンシャルをもつ。

$$V(\phi) = M^3 \left[\phi \exp\left(-\frac{\phi^2}{2m^2}\right) + \frac{m}{\sqrt{e}} \right] \quad (1)$$

我々のモデルではスカラー場は単一で、重力と minimal-cupple する。このモデルはヒルトップ型に分類されるモデルで、従来のモデルとの違いは、左側に無限に広い平らな丘をもつことである。

これから大まかなメカニズムを説明する。インフラトンが左側から右側に向かって、ゆっくり転がることによって、インフレーションが起こる。このときのインフラトンの転がり方はモデルのポテンシャルに依存するので、生成される揺らぎもモデルのポテンシャルの特徴を反映する。さらにインフラトンが右に向かって転がっていくと、ポテンシャルが急になっていくのでインフラトンが速く転がるようになり、インフレーションが終わる。

観測量と観測的制限

パラメータを調節することで、Planck2015 の $n_s - r$ 平面の 1σ 領域内に入ることが示せる。さらに、本発表では我々のモデルの素粒子論的起源について議論する。

1. D.Baumann, "TASI Lectures on Inflation," arXiv:0907.5424 [hep-th].

.....

重宇 a19 gauge 場と 2-form 場が在るときのインフレーション宇宙の厳密解

伊藤 飛鳥 (神戸大学 素粒子宇宙理論研究室 M1)

gauge 場と 2-form 場が exponential 型の関数でインフラトンとカップリングしている時のインフレーション宇宙について考察します。このような exponential 型の関数は高次元理論におけるコンパクト化において

よく現れることが知られています。

gauge 場と 2-form 場を含まない場合は isotropic power-law solution が存在することが知られており、gauge 場のみの場合は anisotropic power-law solution の存在が示されています。(参考文献 1)

本研究では、2-form 場のみを含む場合についても厳密解 (anisotropic power-law solution) が存在することを見た後、両方の場を含む場合にも厳密解 (power-law solution) が在ることを示し、さらにそのときは等方的な宇宙をつくるのが可能なことを説明します。

さらに解の周りの安定性について議論します。具体的には、fixed point が 4 つ存在することを見て、そのそれぞれが上述の 4 つの厳密解に対応することを示します。次にそれぞれの解の近傍での安定性をみることで、4 つの fixed point のうち安定となるのはただ 1 つだけであり、他の 3 つは鞍点となることが明らかになります。

最後に、どの解が安定点となるかはインフラトンのパラメーターと 2 つの結合定数によって決定されることを説明し、そのパラメーター領域を 3 次元図に描くことによって視覚的に明らかにします。

1. S.Kanno, J.Soda and M.Watanabe arXiv:1010.5307 (2010)
2. J.Ohashi, J.Soda and S.Tsujikawa arXiv:1303.7340 (2013)
3. M.Watanabe, S.Kanno and J.Soda arXiv:0902.2833 (2009)

.....

重宇 a20 真空エネルギーの繰り込みと宇宙定数

塚本 拓真 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M1)

宇宙定数を真空のエネルギーとみなすとき、場の量子論を用いた理論値と観測から得られる実験値との間には大きな差があることが知られている。これは宇宙定数問題と呼ばれ、なぜ観測値が小さくなるのかはわかっていない。

今回の発表では、近年提唱された、宇宙定数問題を解決する新たなモデルについて紹介する。このモデルでは、Einstein-Hilbert 作用に、物質場からの真空エネルギーへの寄与を打ち消す global constraint を与える場を導入することで、宇宙定数の値を観測値に近づけることが可能になる [1][2]。このモデルに基づき計算することで、宇宙定数のオーダーは観測結果と近いものになることが示されるが、framework 自体についての研究は不十分であり、今回の発表ではそれらの問題点についても述べる。

1. Kaloper, Nemanja arXiv:1505.01492(2015)
2. Kaloper, Nemanja, Padilla, Phys.Rev. D90.8(2014):084023

.....

重宇 a21 修正 Teleparallel 重力によるインフレーションの導出

中谷 侑司 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

本発表は論文 [1] の review である。Teleparallel 重力とは時空の並進変換に関するゲージ理論により重力を記述しようとするもので、他のゲージ場との統一理論の構築に使える可能性が示唆されている。この理論における時空には曲率が無く代わりに捩率が存在し、重力は幾何的な性質ではなく単なる力として記述される。基本変数はゲージ原理によって現れる四脚場となるが、局所ローレンツ変換対称性があるため自由度が 16 個から 10 個に落ちている。これは計量の自由度と一致しており Teleparallel 重力が本質的に計量を記述する理論であることを表しており、実際に一般相対性理論と完全に等価であることが示されている。そ

ここでこの四脚場を本質的な量と捉える修正重力理論を考える。具体的には Teleparallel 重力におけるラグランジアンに Born-Infeld モデル [2] を適用することで局所ローレンツ変換対称性を破り 6 個の自由度を復活させるということを行う。この修正 Teleparallel 重力の正当性の検証として空間的に平坦な一様等方宇宙がインフラトンを導入せずにインフレーションを起こすかどうかを考える。結果として宇宙初期において加速膨張が実現できることが分かった。しかしこのインフレーションモデルにおけるゆらぎはまだ計算されていないため今後の課題として自分で試みる予定である。

1. Rafael Ferraro and Franco Fiorini Phys.Rev.D75:084031,2007
2. Barton Zwiebach "A First Course in String Theory" Cambridge University Press

重宇 a22 Horava Lifshitz 重力理論における Lorentz 非対称性の観測的制限

新居 舜 (名古屋大学 C 研 M1)

一般相対性理論はこれまで、太陽系の重力異常のテストや重力レンズ効果など、観測と整合的な予測をすることに成功してきた。しかし、一般相対性理論を量子論的に取り扱うことは深刻な問題をはらんでいる。一般相対性理論は、量子効果が支配的になる高エネルギー領域においてくりこみ不可能であるため、重力の量子補正を有限な値として得ることが出来ないのである。それ故、くりこみ可能な量子重力理論の建設が不可欠となったが、そうした量子重力理論の候補の 1 つに、2009 年に P.Horava によって提案された Horava Lifshitz 重力理論がある [?]。Horava Lifshitz 重力理論は、空間と時間が非対称なスケール則を満たすことで power-counting renormalizable となる [?]。しかし、時間と空間の等価性が失われるため、Lorentz 対称性が破れてしまう。本研究では、Horava Lifshitz 重力理論において重力と結合したスカラー場でインフレーションを起こし、インフレーション中に生成する初期ゆらぎのパワースペクトルに対して Lorentz 対称性の破れが与える影響を調査する。今後は CMB や大規模構造の観測結果から、Lorentz 対称性が破れるスケールに対して新たな制限がつけられるのか議論を進めていく。

1. P. Horava, Phys. Rev. D 79, 084008 (2009) [arXiv:0901.3775 [hep-th]]
2. S.Mukohyama, Class.Quant.Grav.27:223101,2010[arXiv:1007.5199 [hep-th]]

重宇 a23 高階微分重力理論におけるインフレーション：安定化機構と観測に対する予言

秋田 悠児 (立教大学 M2)

ニュートンの運動方程式を初めとして、時間発展を記述する物理法則は、通常、時間について二階の微分方程式の形に書かれる。宇宙膨張などを記述する際の一般相対論も二階の微分方程式により記述されている。一方で、量子重力理論などの基礎物理学から、高階の微分を含む重力理論(高階微分重力理論)が強く動機づけられている。しかし、このような理論は、高階微分項の存在に起因した不安定性(Ostrogradski 不安定性)を示すことが知られている。この不安定性が要因となり、現在まで、高階微分理論から観測に対して物理的に意味のある予言を与えることは出

来ないと考えられていた。

このような背景の下、我々は、「高階微分を含む非常に一般的な形の重力理論が、宇宙論的背景時空の上で安定化可能である」ということを示した。これは、先行研究(特定のモデルにおける、最大対称背景時空上での Ostrogradski 不安定性の除去方法に関する研究)を拡張し、インフレーションやダークエネルギーなど、宇宙論の様々な分野への応用を可能にしたものである。本研究により、高階微分理論による「観測に対する物理的に意味のある予言」を多様な場面で導出することが可能になった。

また、本研究は、高階微分理論の安定化という基礎物理学全般に関わる根幹的な問題に対する「純理論的な研究」と、観測量へ意味のある予言を与えるような「観測との比較に耐えうる研究」とが融合した研究であるという点において独創的であり、種々の分野に利用できる包括的な枠組みを構築するという点を特徴とする。

本講演では、まず、高階微分理論が内在する不安定性という問題を簡単な例を通じて理解する。続いて、理論の安定化の手法をハミルトニアン解析を用いて述べ、先行研究がどのように拡張されたのかを具体的に明らかにしつつ、本研究の結果をまとめる。

1. M. Ostrogradski, *Mem. Ac. St. Petersburg* VI(1850)385
2. T. j. Chen and E. A. Lim, *JCAP* 1405, 010 (2014) [arXiv:1311.3189 [hep-th]]

重宇 a24 プレーンワールドシナリオにおけるインフレーション

徳田 順生 (京都大学 天体核研究室 M1)

Theory of everything の有力候補である string/M theory によれば高次元時空の存在が示唆され、この観点では一般相対論 (GR) は低エネルギー極限の "有効理論" と考えられる。インフレーションは高エネルギー現象であるので、GR からの補正が観測される可能性がある。DECIGO などのスペース重力波観測計画によるインフレーション由来の初期重力波の直接観測が期待されている。従って、高次元時空の存在を考慮に入れて観測量 (テンソルスカラー比など) を計算することは非常に重要である。今回の発表では主に論文 [1][2] のレビューを行い、高次元時空の存在が観測的にどの程度制限されるか、また高次元の存在により観測値が GR の時とどう異なるかについて考察する。ここでは 5 次元 Anti de Sitter (AdS_5) 時空上に 1 枚の 4 次元 de Sitter (dS_4) プレーンが埋め込まれている状況を考える。また、作用には高エネルギーにおいて無視できないと考えられる高階微分を含まない最も一般的なものと、グラビトンと物質場の量子 1-loop 補正の項を導入する。

このセットアップの下、観測量の計算を行ったところ、インフレーション時のハッブル半径が AdS_5 の曲率半径よりも小さい領域において GR の場合と異なる値が得られた。

一方で、5 次元時空を Schwarzschild-AdS 時空に拡張した時に観測量の値がどう変化するかということは興味深い問題である。特にインフレーション時のハッブル半径が AdS_5 バルクの曲率半径よりも大きな領域において Schwarzschild-AdS ブラックホール質量が観測値に影響を与えることが修正されたフリードマン方程式の形から示唆される。従ってこの一般化は今後研究すべき課題であり、今回の発表ではこの点についても議論する。

1. M.B.López, Y.W.Liu, K.Izumi, P.Chen Phys.Rev.D

89,063501(2014)

2. M.B.López, P.Chen, Y.W.Liu Phys.Rev.D 86,083531(2012)

重宇 a25 Bigravity 理論におけるテンソルモード

山本 久司 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

近年、ダークエネルギーの謎を説明するなどのモチベーションから一般相対論の修正について盛んに研究されている。bigravity 理論 [1] は 2 つの計量を含む修正重力理論であり、一様等方かつ宇宙定数なしで加速膨張をする安定な宇宙論解があることがわかっている [2]。

本発表では [3] のレビューを行い、この解に対してテンソル摂動を計算して宇宙背景放射の温度揺らぎ非等方性とインフレーション起源の原始重力波のエネルギー密度を求めた。その結果としてこれらの観測量に対する波数、bigravity の理論パラメータ、そして 2 つの計量に関する摂動の初期値の依存性を示した。またこの初期値がある条件を満たす場合に宇宙背景放射や原始重力波は一般相対論のものと同じであることが分かった。更にインフレーションモデルにおける bigravity 理論について議論し、この初期条件がインフレーションによって自然に満たされることを示した。レビューを行う論文ではテンソル摂動のみについて考えたが、スカラー摂動やベクトル摂動に対して議論することで初期条件について更に詳しく知ることができると思われる

1. S. F. Hassan and R. A. Rosen, Journal of High Energy Physics 2, 126(2012), arXiv:1109.3515 [hep-th].
2. F. Koennig, Y. Akrami, L. Amendola, and M. Motta, and A. R. Solomon, Phys.Rev. D90, 124014 (2014), arXiv:1407.4331 [astro-ph.CO].
3. M. Johnson and A. Terrana, (2015), arXiv:1503.05560 [astro-ph.CO].

重宇 a26 Lovelock Black Hole 上のスカラー場の Quasi-Normal Modes

吉田 大祐 (神戸大学大学院理学研究科物理学専攻素粒子宇宙理論研究室 M1)

現在研究を進めているのは、修正重力理論の一つである Lovelock 理論の静的球対称 BH(ブラックホール) が背景時空である場合のスカラー場の QNFs を WKB 近似を用いて計算することである。一般に BH の周囲の重力場は、質量中心の動径方向について、準基準振動と呼ばれる離散的な振動数(Quasi-Normal Frequencies)をもった固有振動(Quasi-Normal Modes) の重ね合わせからなる振動を行う。この時、これらの各固有振動は減衰振動であり、BH の質量や角速度、電荷にのみ依存することが知られる。この振動は主に超重力天体の連星や、超新星爆発などによって BH が生成された時に生じる。この振動の方程式は、適切な座標で Schrödinger タイプの二階の線形微分方程式となり、一般にマスター方程式と呼ばれる。これは重力場について二つの境界条件を課すことによって、離散的な振動をすることがわかる。この離散振動数はマスター方程式の形から WKB 近似を使用することができ、任意の精度で QNFs を計算することができる。これは重力場の場合であるが、BH の背景時空において、スカラー場のクライン-ゴルドン方程式の動径方向は、適切な座標系の下でマスター方程式となっており、同様に QNMs をとる。一

方、高次元時空のダイナミクスを決める作用について、その中に含める幾何学の修正のアプローチを取るものが Lovelock 理論である。この理論には二つの特徴がある。一つは、一般座標変換に対し不変である点。二つ目は、修正された作用の変分により、計量の二階微分の運動方程式を与える点。以上の特徴を持つ修正重力理論である。この理論の中には asymptotic flat な静的球対称解 (以下 Lovelock BH) が存在し、スカラー場のマスター方程式を得る。しかし、次元が大きくなると、そのままでは BH 計量の成分を近似的にしか決定することができない。今回の研究ではその問題を回避し、任意次元の Lovelock BH 計量を決定せずに QNFs を WKB 近似を用いて計算する手法を与えた。また 3 次の WKB 近似による任意次元のスカラー場の QNFs を得た。

1. Phys.Rev.108.1063
2. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL,291:L33-L36,1985 April 15
3. Phys.Rev.D.79.104025

重宇 b1 宇宙大規模構造形成シミュレーション

佐々木 さゆり (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

宇宙の質量分布は大規模構造と呼ばれる巨大な構造をもっていることが知られているが、この宇宙構造形成の時間発展を調べるには一様密度からの密度揺らぎを摂動として扱う摂動理論や、質量分布を粒子分布で表し重力多体系として扱う N 体シミュレーションがある。摂動理論は解析的な取り扱いが可能であるが、適用範囲が線形領域・準線形領域に限られる。一方、N 体シミュレーションは密度揺らぎが非線形な領域も扱うことができるため、非常に強力な手法である。しかしながら N 体シミュレーションにおける粒子間の重力計算は計算コストが非常に大きい。そのため、計算コストを軽減するため様々な計算手法 (Particle-Mesh 法・Tree 法・TreePM 法など) が使われてきた。

本発表では、これら宇宙大規模構造形成の N 体シミュレーション手法とそれらの長所・短所をまとめ、レビューするポスター発表を行う。

1. E.Bertschinger, 2001, Multiscale Gaussian Random Fields for Cosmological Simulations
2. R.W. Hockney and J.W. Eastwood1988, Computer simulation using particles, 1988
3. E. Bertschinger, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1998. 36:599-654

重宇 b2 Kerr 時空上における波動光学とブラックホールシャドウ

野田 宗佑 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D1)

ブラックホールの存在を観測的に示す方法の一つとしてブラックホールシャドウの撮像が挙げられる。ブラックホールシャドウとは、ブラックホールが外部の光源に照らされた影のことである。まだ観測されていないが、サブミリ波での観測が進められており近い将来の撮像が期待されている。

シャドウの輪郭はブラックホールに光が巻きつく光の不安定円軌道に対応する。しかし、この不安定円軌道はホライズンの外側に位置しており、シャドウの撮像ができたとしてもホライズンの有無は確かめられない。そこで、より波長の長い波による観測を考える。波長の長い波を用いる

利点は次の2つである。

1. 不安定円軌道内部の情報（ホライズンの有無）が得られる。

サブミリ波のように波長がブラックホールのスケールに比べて短い波は光線として扱うことができる（幾何光学近似）が、光線の計算では不安定円軌道の内部を調べることができない。一方、本研究で用いる波に対してはそのような近似を用いることはできず、ブラックホールによる波の散乱問題を考える必要がある（波動光学）。波動方程式の境界条件として不安定円軌道内部のホライズン上の条件を用いることで不安定円軌道の内部にホライズンがあるか否かが判別できるのである。

2. 散乱波の干渉パターンなどの波動効果が得られる。

ブラックホールによる散乱波には散乱体であるブラックホールの情報が含まれる。散乱波の干渉パターンや、位相の情報からブラックホールの質量、角運動量などの情報を調べられる。

さらに、散乱波を2次元フーリエ変換（イメージング）することにより、ブラックホールシャドウのイメージが得られる。

本発表では、Kerr 時空による波の散乱問題の記述、散乱波の干渉パターンとそこから得られる情報、また波動光学を用いたブラックホールシャドウの撮像方法について紹介する。

1. Y.Nambu and S.Noda, arXiv:gr-qc/1502.05468
2. K.Glampedakis and N.Andersson, Class.Quant.Grav. 18 (2001) 1939-1966
3. M. Miyoshi, K. Ishituska, S. Kamenon, and Z.-Q. Shen, Prog. Theor. Phys. Suppl. 155, (2004) 186-189.

重宇 b3 QCD 相転移が及ぼす原始重力波スペクトルへの影響について

長谷川 拓哉（総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究所 M1）

今回の発表では初期宇宙における QCD(quark-hadron) 相転移がインフレーション時に生成された原始重力波へ及ぼす影響について議論した S.Schettler らの論文 [1] (“Imprints of the QCD Phase Transition on Spectrum of Gravitational Waves”) を取り上げてレビューを行う。

QCD 相転移は、標準的な素粒子論において宇宙初期の GUT 相転移、EW 相転移に次いで起こるとされる初期宇宙で最後の相転移である。それゆえ、QCD 相転移の特徴や性質は、現在の宇宙の構造や様々な宇宙論パラメータの値と密接に関連していると考えられている。そこで QCD 相転移が crossover 転移である場合と一次相転移である場合について、それぞれの場合に起こる原始重力波スペクトルへの影響を理論予測することは、将来の重力波観測から QCD 相転移の性質に関する知見を得るために重要である。

近年の原子核物理における格子 QCD 計算と宇宙の熱的進化の考察から宇宙初期の QCD 相転移 crossover 転移である可能性が高まっている。一方で、初期宇宙におけるバリオン生成のモデルについては未だ不明確なところが多く、そのモデルによっては QCD 相転移が一次相転移となる可能性も指摘されている [2,3]。特に、“little inflation”と呼ばれる宇宙の急膨張を伴った QCD 相転移 (“inflationary QCD transition”) が起こる場合、このようなバリオン生成モデルに基づく宇宙の熱的進化は、CMB や宇宙の大規模構造の観測から得られているバリオンの非対称性と矛盾しない [3]。[1] ではこの “little inflation” を伴う QCD 相転移が原始重力波へ及ぼす影響についても議論されている。

最後に、近い将来に始まる LISA , SKA , PPTA などの重力波検出器

を用いた観測により、[1] で得られた QCD 相転移による原始重力波スペクトルの変化が検証されるかどうかについても触れる。

1. T.Boeckel , J. Schaffner-Bielich , arXiv : 1010.4857v2 [astro-ph] (2011)
2. D.J.Schwarz , M.Stuke , J.Cosmol. Astropart. Phys. , 25(2009)
3. T.Boeckel , J. Schaffner-Bielich , Phys. Rev. Lett. 105,041301(2010)

重宇 b4 Gravitational Baryogenesis after Anisotropic Inflation

福島 光博（早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2）
初期宇宙において物質 (baryon) と反物質 (anti-baryon) の対称性を破り、baryon 優勢宇宙の実現を説明する研究は baryogenesis と呼ばれている。この baryogenesis 機構は少なくとも標準模型を超えた素粒子理論が必要であることがわかっているが、実験や観測による決定的な制限を課すことができないため、未だに決着がついていない。その中でも私は重力的な相互作用を介した Gravitational Baryogenesis[1] と呼ばれるモデルに注目して検証を行っている。Gravitational Baryogenesis は膨張宇宙における実効的な CPT 対称性の破れを考慮することで、従来のモデルでは実現できなかった熱平衡中での baryon 数生成という新たな可能性を提案した利点がある。しかし本モデルは、標準宇宙史と合致しないという問題を抱えている。具体的には、圧力とエネルギー密度の比 w が $w > 1/3$ となるような特殊な物質で宇宙が満たされている場合のみ、再加熱温度の理論的制限を回避して十分な baryon 量を得ることができると示されている。しかしこの問題は、背景時空を一樣等方宇宙から一般化することで回避できる可能性がある。

実際に一樣等方宇宙からの拡張として、背景時空が平坦で非等方的である Bianchi Type I の宇宙を仮定した場合における Gravitational Baryogenesis の変更点が議論されている [2]。しかし、この先行研究では非等方性の起源やその大きさは言及されていないし、非等方効果が Gravitational Baryogenesis に及ぼす影響も具体的に評価されていない。そこで我々は非等方性の起源を与える具体的なモデルとして非等方インフレーション [3] を考え、得られる baryon 生成量を評価してモデルの妥当性を議論した。時空の非等方性が非等方インフレーションの初期条件からインフレーション終了時までどの程度成長可能であるか解析し、更に従来の等方的インフレーションモデルから得られる baryon 生成量との比較も行った。

1. H.Davoudiasl, R.Kiyano, G.D.Kribs, H.Murayama, and P.J.Steinhardt, Phys. Rev. Lett. **93**, 201301, (2004).
2. Kh.Saaidi, and H.Hossienkhani, Astrophys. Space Sci. **333**, 305, (2011).
3. M.Watanabe, S.Kanno, and j.Soda, Phys. Lev. Lett. **102**, 191302, (2009).

重宇 b5 Bianchi I 型時空での Einstein-Weyl 重力の摂動運動方程式

古谷 有（弘前大学 仙洞田研究室 M2）
最近、インフレーション機構の解明のために、インフレーション中の等

方化過程の検出が議論されるようになってきている。等方化の過程とは、大きな非等方性を持つ宇宙がインフレーション中に均されるという過程である。これについて Wald の「宇宙の無毛定理」[1] が知られている。

この等方化過程に影響を与える得る要素として、物質と重力理論が考えられるが、本研究は後者に着目し、Lagrange 関数がスカラー曲率と Weyl テンソルの 2 乗項 ($R + \alpha C^{\mu\nu\rho\sigma} C_{\mu\nu\rho\sigma}$) で表される Einstein-Weyl 重力を考察していく。

非等方性を持つ初期宇宙においては Weyl テンソルが大きな値を持ち、非等方性の進化に影響を与え得る。先行研究として、Lagrange 関数が $R + \alpha C^{\mu\nu\rho\sigma} C_{\mu\nu\rho\sigma} + \beta R^2$ の重力理論における数値計算では、初期条件によって宇宙が等方化もしくは再収縮するという結果が出ている [2]。しかし、より一般の結論を得るためには解析的な手法が望ましい。

また、宇宙初期の非等方性がインフレーションを経た現在でも残されている可能性もある。例を挙げれば、同じ重力理論 (+ 宇宙項) において Bianchi 型の時空で非等方性を保ったまま指数関数的宇宙膨張をする厳密解が発見されている [3]。

上述の背景の下で Einstein-Weyl 重力による等方化への影響を明らかにすることが本研究の目的である。厳密解に摂動を与え、どのように非等方性の進化が修正されるかに着目する。本発表では、その第一ステップとして Bianchi I 型時空での Einstein-Weyl 重力による補正項である Bach テンソル ($B_{\mu\nu}$) を含めた摂動運動方程式を導く。

1. Robert M. Wald. Phys. Rev. D 28, 2118(R) (1983)
2. Andrew L. Berkin. Phys. Rev. D 42, 1016 (1990)
3. John D. Barrow and Sigbjørn Hervik. Phys. Rev. D 73, 023007 (2006)

.....

重宇 b6 Chaotic string dynamics in AdS black hole

星野 悠一郎 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

Recently, integrability of string has gathered much attention in the context of AdS/CFT correspondence. It provides us very powerful tools to check its correspondence. Therefore, the integrability is investigated in various backgrounds.

In our work, we focus on the classical string dynamics in asymptotical AdS geometry. Then we quantize the system canonically and consider its level distribution. In general, if the classical system is integrable in the sense of Liouville, the level distribution becomes Poisson distribution. On the other hand, for the chaotic system, it might be Wigner one. When we consider a system which includes the both cases, we can expect a kind of the transition from Poisson to Wigner or vice versa.

Then we can ask what its interpretation on the dual gage side is. As a first step to tackle this question, we discuss whether such system exists or not. The answer is yes. A special string configuration like a winding string on 5 dimensional Schwarzschild AdS black hole realizes such system.

1. T. Igata and H. Ishihara, Phys. Rev. D 81 044024, 2010.
 2. P. Basu and A. Ghosh, Phys. Lett. B 729 5055 2014.
-

重宇 b7 ケーラー多様体の量子変形

原 健太郎 (東京理科大学理学部 4 年 その他)

重力の量子化は (私の知る限り) 困難と言われている。

量子化の方法には初期の正準量子化、その拡張である変形量子化や幾何学的量子化、ファインマンによる経路積分量子化や確率過程量子化などがある。

その間に物理学を記述するための数学構造である斜交多様体の研究は進み、斜交多様体を含むポアソン多様体の変形量子化の存在が示された。その中で具体的に計算することの容易なケーラー多様体の量子変形をレビューする。

この変形量子化ではゲージ理論の位相不変量が複素射影空間では影響を受けないことがわかっていて。今後はその他の局所対称ケーラー多様体への拡張、作用素環論をベースにした非可換幾何学との関係や量子重力理論への応用が期待される。

1. A. V. Karabegov, "An explicit formula for a star product with separation of variables," [arXiv:1106.4112 [math.QA]].
2. A. Sako, T. Suzuki and H. Umetsu, "Explicit Formulas for Non-commutative Deformations of CP^N and CH^N ," J. Math. Phys. 53, 073502 (

.....

重宇 b8 ブレインインフレーションにおけるゲージ場の効果

渡邊 健人 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

インフレーション理論は宇宙マイクロ波背景放射が極めて等方的であり、また現在の宇宙の曲率が極めて小さいことを整合的に記述することから、初期宇宙の標準モデルとして確立している。近年の観測からインフレーションを支持する結果が得られ、また各モデルに対する制限も与えられつつある。素粒子基礎理論の候補として提唱されている超弦理論に基づくインフレーションモデルに、内部空間にブレインを導入するモデルが考えられている。[1,2] ブレイン間の距離をインフラトンとみなし、ブレインがゆっくり近づくことによってスローロールさせようというものであるが、理論のパラメーターを微調整しないと十分な e-folds が得られないという問題がある。超弦理論にはスカラー場とゲージ場が自然に含まれ、ゲージ場がインフラトンと結合する場合にはインフラトンの運動に影響が出る。それによりスローロール条件を満たしインフレーションを助ける効果が期待できる。[3] 本発表では、KKLMMT モデルにスカラー場とゲージ場が結合した項が付加された場合にスカラー場の運動がどう変わり、インフレーションに影響を与えるかについて議論する。

1. G. Dvali and S. H. Tye Phys. Lett. B 450(1999)72-82
 2. S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde, J. Maldacena, L. McAllister and S. P. Trivedi JCAP 10(2003)013
 3. K. Maeda and K. Yamamoto Phys. Rev. D87,023528(2013)
-

重宇 b9 Palatini 形式の Born-Infeld gravity と重力崩壊

駒田 翔 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D1)

一般相対性理論は、現在まで非常に成功した理論であるが、いくつかの

問題点も存在する。それらを解決するため、数多くの修正重力理論が提案されているが、本講演では Palatini 形式の Born-Infeld gravity という理論とそれが引き起こす特異な現象について述べる。Palatini 形式とは、重力理論の定式化の方法の一つである。通常、重力理論は計量のみをその自由度として持つが、Palatini 形式では、計量と接続を独立な自由度として取り扱う。また、Born-Infeld gravity とは、電磁気理論の非線形拡張である Born-Infeld electromagnetism の重力理論における類似物であり、重力場が大きくなりすぎないように構造をしている。したがって、一般相対性理論における特異点の出現を回避する可能性がある。私は、これを確かめるためにこの理論で球対称ダスト崩壊を考察した。一般相対性理論では、この重力崩壊は必ず 1 点まで崩壊し black hole と特異点を形成する。しかしこの理論では、重力崩壊は反跳し、特異点や black hole の形成に制限がつくことが明らかになった。また、black hole が形成される場合でも、horizon 内部でダスト球は通常と異なり、特異点に崩壊しない。black hole の内部で反跳したダストは black hole の horizon に内側から近付き、black hole の蒸発後、このダストの残留物が出現ことが示唆されている。このような現象は量子重力の効果を取り入れた重力崩壊でも現れており、これらとも関連させて本講演ではこの特異な現象についても述べる。

1. D. N. Vollick, Phys. Rev. D69 (2004)
2. J. R. Oppenheimer and H. Snyder, Phys. Rev. 56, 455 (1939)
3. M. Komada and S. Nojiri, [arXiv:1409.1663]

重宇 c1 降着円盤を形成するブラックホールのスピンの測定

林 峰至 (立教大学 M1)

典型的な銀河は、大質量星の超新星爆発の残骸である恒星質量ブラックホール (BH) や、超巨大 BH を数千個含むと考えられている。両者は周囲からガスを降着させている。周囲のガスが BH に落ち込み降着円盤を形成する。近年、降着円盤からの X 線放射を理論的に予言することにより、両者のスピンを測定することができるようになってきた。スピンの測定は、BH の形成や相対論的ジェットなどの天体現象を解き明かす鍵となる。1980 年代より、連続 X 線による BH のスピンの測定の研究がなされていた。今は DISKBB として知られているシンプルな nonrelativistic multicolor disk model を適用し、内縁半径 R_{in} での color temperature T_{in} が分かっている [1]。Zhang は relativistic disk model と放射輸送の効果の補正を使い、内縁半径による BH のスピンの観測を明らかにした [2]。熱状態における一定の内縁半径の証拠が熱成分の bolometric 流束がおおよそ T^4 に比例することを示す観測によって提示された。

本発表では [3] についてのレビューを行う。スピンの測定には Fe K α method と continuum-fitting (CF) method の二つの方法が用いられているが、両方とも半径が質量と BH のスピんにしか依存しない降着円盤の内縁半径が重要だ。Fe K α method は、恒星質量 BH と超巨大 BH の両方に適用し、相対論的に広がった鉄輝線のプロファイルモデル化し、重力赤方偏移した鉄輝線の red wing をみる。continuum-fitting (CF) method は、これまで恒星質量 BH のみに適用されていて、降着円盤の X 線の連続スペクトルをモデル化する手法である。発表では、CF method とその恒星質量 BH への適用を強調しながら、両者の方法を議論する。BH のスピンを求める他の方法を調べる基礎として、これらの手法をレビューした。

1. Mitsuda.K Publ.Astron.Soc.Japan 36 741 (1984)
2. Zhang.S.N, Cui.W and Chen.W Astrophis.J.482L155(1997)
3. J.E.McClintock (2011) arxiv:1101.0811

重宇 c2 曲がった時空中での光線におけるフェルマーの原理の一般化

安西 悠 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M1)

フェルマーの原理は幾何光学において基礎となる原理である。その内容とは、ある点 1 から点 2 まで光が伝播するとき、その所要時間が最小となるような経路に沿って光は伝播するというものである。形式は解析力学でよく知られている最小作用の原理と同一であり、光はヌル測地線に沿って運動すると考えられる。

フェルマーの原理の重力場中への拡張は様々な人の手によって行われてきた。定常時空中の一般化はランダウとリフシッツによってなされ、コフナーは任意の時空中で成り立つフェルマーの原理の一般化を行った [1]。

(n+1) 次元時空間は n-パラメータ族の時間的曲線で foliate される。n 次元空間での 2 点を結ぶ曲線はその時間的曲線に沿って (n+1) 次元時空間へユニークに持ち上げることが可能である。よって光線の終点への到達時間はこの 2 点間の空間距離の関数として書かれる。フェルマーの原理とはこの関数の最小値を見つけることに等しい。

本発表ではフロロフの論文 [2] のレビューとして、(n+1) 次元時空中でのフェルマーの原理の定式化を行う。そして、得られた結果からヌル測地線方程式を具体的に書き下す。制御工学における最適制御理論で用いられるポントリヤギンの最小原理の観点から、曲がった時空中のヌル測地線における有効ハミルトニアンが従うハミルトン方程式と比較し、その無矛盾性を議論する。

1. I. Kovner, Astrophys. J. 351, 114 (1990)
2. Valeri P. Frolov, arXiv:1307.3291v1 [gr-qc] 11 Jul 2013

重宇 c3 パルサータイミングによるダークマター探索

井上 輝 (神戸大学 理学研究科物理学専攻 素粒子宇宙理論研究室 M1)

アインシュタインの一般相対性理論によると、銀河を形成するためには現在知られているバリオン以外の物質が必要となる。その未知の物質のことをダークマターと呼ぶが、ダークマターは電磁波と相互作用しないので観測することが難しい。そこで、パルサータイミングを用いて間接的にダークマターを探索する方法がある。

今回考えるのは、質量が $10^{-23} \sim 10^{-22}$ eV のスカラー粒子で、その振幅は 10^{-15} 程度、振動数は nHz 程度となる。現在はまだそのような領域までパルサータイミングを測定する電波望遠鏡は存在しないが、近い将来 SKA という電波望遠鏡ができるので、将来的に観測が期待される。

1. A.Khmelnitsky and V.Rubakov JCAP 02 (2014) 019

重宇 c4 パルサータイミングによる背景重力波の検出理論

加藤 亮 (神戸大学 素粒子宇宙論研究室 M1)
PTA(Pulsar Timing Array) プロジェクトは、重力波の直接検出が期待されるプロジェクトの一つである。パルサーから放出されるパルスは、極めて安定した周期をもつという特徴があり、重力波によるパルスの到着時間の遅れを検出できると考えられている。現在、PTA プロジェクトが対象としている重力波は、大質量ブラックホールの連星から放出される重力波、宇宙ひもが予言する重力波、インフレーション由来の重力波の三つである。これらの重力波は背景重力波に分類されるものであり、統計的に扱われる。

背景重力波の理論モデルは、定常性・ガウス性・等方性・無偏光を仮定することが一般的である。しかし、これらの仮定はあくまで理想化であり、背景重力波の四つの仮定を満たさないものも考えるべきである。例えば、CMBの偏光を観測することによりインフレーションの検証ができることと同様にして、背景重力波自体の偏光を考えることは自然であり、インフレーションモデルに制限を与えることができる可能性がある。

今後の自分の研究目標は、ストークスパラメータを用いて、背景重力波の円偏光をパルサータイミングで評価することである。本発表ではその準備段階として、パルサータイミングによって、定常性・ガウス性・等方性・無偏光を仮定した背景重力波の検出理論についてのレビューをする。

1. B. Allen and J.D. Romano, Phys. Rev. D 59 (1999)
2. P. Adshead and E. Lim, Phys. Rev. D 82, 024023 (2010)

重宇 c5 Blandford-Znajek 機構の起電力について

赤井 祐美 (大阪市立大学大学院 素粒子論研究室 M1)
活動銀河中心での相対論的ジェットや γ 線バーストを説明するメカニズムの 1 つとして、Blandford-Znajek 機構がある。これは Black hole(BH) の回転エネルギーを磁場によって引き抜く機構であるが、この機構での起電力の起源は議論されている。

Kenji Toma と Fumio Takahara の論文 [1] ではプラズマで満たされた Kerr BH の磁気圏内の単極誘導により生じることを示した。またその起電力の起源はエルゴ領域にて電場が磁場に対して卓越することであることを明らかにした。

本発表では論文 [1] のレビューを行う。

1. K. Toma and F. Takahara, Mon. Not. R. Astron. Soc. 442, 2855 (2014).

重宇 c6 回転ブラックホール近傍での粒子衝突におけるエネルギー引き抜き過程

小笠原 康太 (立教大学 M2)

我々は回転ブラックホール近傍での粒子衝突における、エネルギー引き抜き過程及びエネルギー引き抜き効率について議論する。

回転ブラックホールには、エルゴ領域と呼ばれる負のエネルギー状態が可能な領域が存在し、この領域で 2 つの粒子の衝突過程を考えると、負のエネルギー状態とエネルギー保存則により、衝突後の粒子は衝突前

の粒子より大きなエネルギーを持つことが可能になる。これは、回転ブラックホールからのエネルギー引き抜き過程であり、collisional Penrose process と呼ばれている。Banados, Silk, West らは、角運動量が適当に制限されている 2 つの粒子の重心系エネルギーが、回転ブラックホール近傍で発散することを示した [1]。これは B.S.W. 効果 (B.S.W. 衝突) と呼ばれ、重心系エネルギーが発散ということは、衝突後に高エネルギー粒子が生成される可能性を示唆する。collisional Penrose process は、現在観測されている高エネルギー宇宙線の生成メカニズムの候補の 1 つとして研究が行われており、より詳細なエネルギー引き抜き過程の解明により、観測される宇宙線に対して理論的な予言を与えることが期待される。

本研究では、エネルギー引き抜き効率を解析的な手法を用いて導出した。数値計算で行われてきた先行研究 [2,3] との比較を行い、エネルギー引き抜き効率をどこまで高められるかについて議論する。また、我々は B.S.W. 効果がエネルギー引き抜き効率を高める効果があることを明らかにした。これらの関連性についても議論したい。

1. M. Banados, J. Silk, and S. M. West, (2009), arXiv:0909.0169
2. J. D. Schnittman, (2014), arXiv:1410.6446
3. E. Berti, R. Brito, and V. Cardoso, (2014), arXiv:1410.8534

重宇 c7 シフト対称性をもつスカラー・テンソル理論におけるブラックホール摂動

小川 潤 (立教大学 M2)

一般相対論 (GR) はこれまで多くの観測的検証をパスしてきており、現在の重力の標準理論として支持されている。一方で、GR では説明できない現象も発見されつつある。例えば、Ia 型超新星の観測により発見された宇宙の加速膨張はその好例である。GR を宇宙論的長距離スケールでも成り立つように拡張した修正重力理論の構築が近年盛んに行われている。

ブラックホール (BH) のような強重力場における修正重力理論の研究にも注目が高まっている。強重力場における重力理論の妥当性は、重力波を観測することで決定できる。そこで、BH が重力波源として考えられるかを事前に検討する必要がある。これは、BH が摂動 (重力波) に対して安定的かどうかを判定することで可能である。ホルンデスキー理論のサブクラスにおける、静的なスカラー場の配位をもつ球対称 BH 解について、安定性を判別する条件が得られている [1]。しかし、スカラー場が静的な場合は、多くの場合スカラー場の配位が自明となってしまう、BH 解が GR の場合と区別がつかないことが大半であった [2]。

本発表では、スカラー場が時間依存すると仮定し、シフト対称性を持つホルンデスキー理論のサブクラスにおける、球対称 BH の安定条件について述べる。スカラー場が時間依存性をもつ場合は、非自明なスカラー場の配位をもつ BH 解が構成されることが知られている。この BH 解は宇宙論的な境界条件に従う解と解釈できる。このような解は、既存の BH 摂動の一般論が使えないため、安定性が不明であった。BH の安定条件は、摂動の従う波動方程式を導出することなく、作用を摂動の二次で展開することで得られる。これにより、サブクラスに含まれるすべてのスカラー・テンソル理論における BH の安定性が判断することが可能となる。今回の発表では、奇パリティモードの摂動に対する BH の安定性について発表を行う。

1. T. Kobayashi, H. Motohashi, T. Suyama, Phys. Rev. D 85 (2012)

084025

2. E. Babichev, C. Charmousis, JHEP 1408 (2014) 106

重宇 c8 バリオンの超音速相対速度が宇宙論的観測に与える影響

浅羽 信介 (名古屋大学 C 研 D2)

通常の物質に加えて冷たい暗黒物質と負の圧力を持つエネルギーを考えるモデルは Λ CDM モデルと呼ばれ、宇宙マイクロ波背景放射や宇宙大規模構造の観測を説明することに成功した。しかし、どのように初代天体が形成され宇宙再電離が起きたかということが宇宙論の問題として残されている。

現在計画中の次世代電波干渉計の目的の一つとして、宇宙再電離以前の高赤方偏移中性水素の空間分布を観測することがある。この中性水素の空間分布から、初代天体の形成や宇宙再電離についての情報を得ることができる。さらに高赤方偏移では非線形効果が小さいため、より小スケールでの揺らぎを使った宇宙論の議論ができると考えられている。

その一方で、宇宙の晴れ上がり以前にバリオンと光子がトムソン散乱によって強く結合していたことにより、バリオンはダークマターに対して超音速の相対速度を持っていることが知られている。この相対速度はバリオンの密度揺らぎの成長を抑制する。線形理論において、相対速度による項は圧力のように見なすことができ、スケール長を大きくする。そのため、初代天体の形成や小スケールでの揺らぎを考える上で重要であり、さらに、非線形成長に与える影響を見積もる必要がある。

本研究では、宇宙論的 N 体シミュレーションを用いてバリオンが持つ超音速の相対速度がダークマターの構造形成に与える影響を計算した。特に球対称崩壊モデルを応用することで相対速度がダークマターの非線形成長に与える影響を準解析的に理解することができることを示した。また、ダークマターハローの形成が遅れることやハロー内のバリオンの割合が減少することが観測量にどの程度影響するのかを見積もったので発表する。

1. Tsaliakhovich, D., & Hirata, C. 2010, Phys. Rev. D, 82, 083520
2. Naoz, S., Yoshida, N., & Gnedin, N. Y. 2012, Astrophys. J., 747, 128
3. Naoz, S., Yoshida, N., & Gnedin, N. Y. 2013, Astrophys. J., 763, 27

重宇 c9 ボイドの進化と観測的特徴

石原 誠也 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙にはボイド (超空洞) と呼ばれる低密度の領域が無数に存在している。ボイドは宇宙物理学において興味深い構造をしている。例えば、宇宙マイクロ波背景放射のコールドスポットを巨大なボイドによる積分ザックス・ヴォルフ効果によって説明できる可能性が示されている。積分ザックス・ヴォルフ効果とは、宇宙マイクロ波背景放射の特性に影響する宇宙論的な効果であり、CMB 光子が観測者に至るまでの経路で、重力ポテンシャルの時間変化を反映して CMB 光子の温度が変化する効果である。本研究では、ボイドによる積分ザックス・ヴォルフ効果による温度変化を実際に計算し、観測と比較することでボイドの特徴を見ていく。

重宇 c10 観測によるダークエネルギーの密度パラメータ・状態方程式の制限付けに必要な宇宙論的摂動論と観測結果

石丸 晴海 (神戸大学 素粒子宇宙理論研究室 M1)

遠方にある Ia 型超新星の距離-赤方偏移関係の観測により、宇宙が一様等方と仮定すると、宇宙が加速膨張していることがわかった。その起源を説明するための理論として大きく分けダークエネルギー仮説と修正重力理論仮説 (銀河や銀河団スケールになると距離の逆二乗則が破れており、アインシュタインの重力理論を修正する) がある。ダークエネルギーが宇宙のどの程度占めているのかを示す密度パラメータや、ダークエネルギーの性質を示す状態方程式に制限を付けるために様々な観測がなされている。その観測は宇宙年齢や超新星観測、CMB 観測、BAO (バリオン音響振動) の観測などである。それらにより制限をつけるために用いられるものが CMB の温度揺らぎなどであり、宇宙論的摂動論の理解が不可欠である。従って本発表では宇宙論的摂動論について説明し、宇宙年齢や超新星観測、CMB 観測、BAO 観測などによりダークエネルギーの密度パラメータや状態方程式がどの程度制限付けられているか説明する。

1. L. Amendola and S. Tsujikawa Dark Energy (2010).

重宇 c11 重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

池田 詠甚 (福岡大学 理学研究科 M1)

重力崩壊型超新星爆発とは、太陽のおよそ 8 倍以上の質量を持つ重い恒星がその進化の終盤を迎えると考えられている大爆発現象である。この爆発は自然界の 4 つの相互作用がすべて関与する稀な現象で様々な天体現象の謎を解き明かすために有力だと考えられており、天文学や高エネルギー宇宙物理学分野において最も注目される天体現象のひとつである。また爆発後に残される中性子星、ブラックホールといった最終的な高密度天体の形成過程そのものであり、爆発時に合成される元素組成は銀河の化学進化を決め、膨張する衝撃波は宇宙線加速の要因となっている。重力崩壊型超新星爆発がどのような過程で引き起こされるのか、極めて長い歴史を持ちつつも未だ解明には至っていない。この爆発現象を解明するために最も重要とされるのがコア内部で起きている現象を理解することである。そのために星の進化の過程について議論していきたい。

星は核融合反応で元素合成を行いながら進化していき、それぞれの進化の過程によって星の最終段階が決まっていく。進化の段階で 8 太陽質量以下の星は白色矮星になり、これ以上の星は核合成などによって重い元素ができていき、最も重い元素の鉄まで元素合成が進むと、最も安定になり核融合が進まなくなる。この結果コアの熱的なエネルギーが減少し、重力収縮と電子捕獲反応が進み、内部の圧力と自己重力の平衡状態が崩れて重力崩壊が開始される。鉄コアから放出されるニュートリノだが、原子核との散乱により「ニュートリノの閉じ込め」という現象が起こる。フェルミ縮退も起きていき、ニュートリノの化学ポテンシャルも上昇するため、電子捕獲の逆反応も起こっていく。このように電子捕獲率を決定することが重要であるが、これは同時に原子核物理を解明していかなければならない。今回の夏の学校ではこのような星の進化に注目を当てながら、重力崩壊型超新星爆発とはどのような現象なのか詳細なレビューを行いたいと考えている。

1. K kotake Rep. Prog. Phys. 69 (2006) 9711143

重宇 c12 膨張宇宙背景における重力崩壊の臨界現象

池田 大志 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D1)

原始ブラックホール (PBH) は宇宙の初期ゆらぎの重力崩壊で形成されるブラックホールである。PBH の数密度は初期宇宙のゆらぎを反映しているため、PBH 形成の普遍的な性質の研究は宇宙論において重要な位置を占めている。本研究ではその普遍的な性質として近年注目されている重力崩壊の臨界現象に注目する。重力崩壊の臨界現象は massless スカラー場の球対称重力崩壊 (1993, Choptuik) で発見されて以降、様々な系で発見された。

本研究では原始重力波による PBH 形成を念頭に置き、膨張宇宙背景での重力崩壊の臨界現象を扱う。

1. Mon.Not.R.astr.(1971)152,75-78,Stephen.Hawking
2. Phys.Rev.Lett.(1993)70,9-12,Choptuik,Matthew W.

重宇 c13 PBH bias

多田 祐一郎 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 D2)

原始ブラックホール (primordial black hole: PBH) は放射優勢期に過密度領域が重力崩壊することで形成され得る理論的ブラックホールである。一方構造形成の文脈で、そのような崩壊天体は背景密度ゆらぎに沿うように分布することが知られており、これをバイアス効果という。我々はこのバイアスの描像を PBH に適用し、特に初期曲率ゆらぎにわずかでも非ガウス性があると、大スケールに PBH 分布のゆらぎができることを示した。さらに、そのような PBH 密度ゆらぎは物質の等曲率ゆらぎとして寄与することから、 $|f_{NL}| \sim \mathcal{O}(0.01)$ の非常に小さな非ガウス性においても、PBH が暗黒物質の主成分である可能性が棄却されることを明らかにした。

1. Y. Tada and S. Yokoyama, arXiv:1502.01124 [astro-ph.CO].

重宇 c14 インフレーションモデルにおける初期揺らぎと再加熱の制限

植野 良紀 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

古典ビッグバンモデルは、一様等方性、CMB の存在そしてヘリウム等の軽元素比という 3 つの観測事実を上手く説明する優れた理論である一方、1) モノポール問題 2) 平坦性問題 3) 地平線問題という困難を抱えていた。佐藤勝彦とグースらは、これらの問題を解決する宇宙論模型としてインフレーションモデルを提唱した。

そこでまず、インフレーションの物理を考えていく。最初に、背景時空とインフラトン場に対する運動方程式を導出し、そのまわりに線形摂動を与える。次に重力場の正準形式を用いて、スカラー揺らぎとテンソル揺らぎの 2 次の作用を導出する。得られた作用に対して場の量子論を用いると、直接観測量と結びつくスペクトル指数 n_s とテンソル・スカラー比 r が得られる。

次に再加熱過程を考えていく。再加熱とは、インフラトン場の振動に

より放射に崩壊する過程である。宇宙膨張の歴史は 1) インフレーション期 2) 再加熱期 3) 放射優勢期 4) 物質優勢期から構成される。そこで各時期における e-fold number N と再加熱の状態方程式パラメータ r_e を導入する。そして再加熱期の持続時間 N_{re} と温度 T_{re} を導出し、 n_s に対してプロットする。さらにプランク衛星の観測から得られた n_s の値を考慮することで、再加熱過程に制限を与えていく。

1. Liang Dai, Marc Kamionkowski, and Junpu Wang, Phys. Rev. Lett. 113, 041302 (2014)
2. Julian B. Munoz, Marc Kamionkowski, arXiv:1412.0656
3. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters ,arXiv:1502.01589

重宇 c15 インフレーション中の磁場生成

北脇 理帆 (神戸大学 理学研究科物理学専攻 素粒子宇宙理論研究室 M1)

近年、観測によって様々な天体のもつ磁場が明らかになってきた。その中でも銀河間で観測された磁場は、数 nG の強度で数 Mpc ほどの非常に大きな波長を持っている。しかし、これまで波長の大きい磁場がどのように形成されたのかは明らかにされていない。

大きな波長をもつ磁場を説明するために、Demozzi et al.(2009) の内容を考察する。論文中で用いられた、インフレーション中では電磁場の結合定数が時間依存するというモデルから、現在 1Mpc の波長をもつ磁場の強度を再計算する。再計算の結果、強結合問題や反作用問題があるため 10^{-30} G ほどの強度になった。このモデルで大きな波長をもつ磁場の説明はできるが、再計算した現在の磁場の強度が観測値よりもたいへん小さくなるので、今後は更に磁場の強度が上がるようなモデルを考えていく必要がある。

1. V.Demozzi,V.Mukhanov and H.Rubinstein,JCAP 08(2009)025
2. D.Kanno,J.Soda and M.Watanabe,JCAP 12(2009)009
3. T.Venumadhav,A.OKlopčić,V.Gluscevic,A.Mishra and C.M.Hirata,ArXiv e-prints(2014)

重宇 c16 大規模構造から探るインフレーション

秋津 一之 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 M1)

現在の宇宙の構造形成シナリオは、初期のインフレーションによって引き伸ばされた量子ゆらぎを種として重力不安定性によって現在の形へと成長したというものである。現在観測されるゆらぎの中でも長波長モードは、量子ゆらぎからインフレーションにより最初の方に古典化されたゆらぎであり、インフレーションの物理をよりクリーンに残している可能性がある。観測範囲を超えるような長波長モードのゆらぎを直接観測することはもちろんできないが、重力の非線形性の影響を利用すると、この長波長モードが如何に我々が観測できる小波長モードと非線形モードカップリングを起こすかを調べることができる。この重力非線形性の影響を詳しく調べ、重力レンズや銀河クラスタリング解析から小波長スケールのモードの観測をすることにより、間接的に長波長モードの情報を復元する新しい方法について紹介する。

1. L. Dai, E. Pajer, and F. Schmidt (2015) arXiv 1504.00351

2. C. Wagner, F. Schmidt, C-T. Chiang, and E. Komatsu (2015)
arXiv 1503.03487
3. Y. Li, W. Hu, and M. Takada Phys. Rev. D 90, 103530 (2014)

.....

重宇 c17 Starobinsky Inflation 模型における複数場の
場合の非ガウス性への影響

森 太郎 (総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科 M2)

今回の発表では Starobinsky inflation 模型にさらにスカラー場を 1 つ追加したような Two-field inflation 模型において、Non-Gaussianity がどのように計算されるかを議論し、これを評価する。

Inflation とは極めて初期の宇宙で時空が指数的に膨張したと考える理論である。このように考えることで、地平線問題や平坦性問題などの標準ビッグバン理論がもつ問題点は解決される。現在ではこの指数的膨張を実現するような模型は非常に数多く提唱されている。しかし曲率ゆらぎ及び Non-Gaussianity と呼ばれる量を計算し、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) の観測から得られる CMB の温度ゆらぎを比較することで、模型を選別することができる。

近年の Planck-BICEP2-Keck Array の合同発表の結果によれば、テンソル/スカラー比、スペクトル指数などの量が観測と整合的であり有力視されている模型として、Ricci スカラーとその二乗を足した作用を用いるいわゆる Starobinsky 模型が挙げられる。本研究ではこの模型を拡張した場合を解析していく。¥ ¥

Starobinsky 模型では、共形変換と呼ばれる変換によってインフラトンの運動項とポテンシャル項をあらわに書き下すことが出来る。しかしここで重力場以外の他の場を考えると、各々の場が重力と非最小結合している場合、共形変換によってそれらの場とインフラトン場との結合があらわになる。従ってこの場合、Inflation 及び指数的膨張時に生成される曲率ゆらぎに対し、インフラトン場のみならず複数の場が寄与すると考えなければならない。

本研究では上記のような場合を解析するための第一歩として、Starobinsky inflation 模型にさらにスカラー場を 1 つ追加したような Two-field inflation 模型を考える。特に複数場模型の場合は曲率ゆらぎのほかに等曲率ゆらぎ (isocurvature) も生成される。今回の発表では、曲率ゆらぎと等曲率ゆらぎの間の相互相関 (cross correlation) も考慮にいれた Non-Gaussianity の計算法を紹介し、得られた結果と観測との整合性についても議論したい。

.....

重宇 c18 Matter Creation in Generalized Galilean
Genesis

西 咲音 (立教大学 D1)

初期宇宙の標準的なモデルとしてインフレーションが広く考えられているが、その代替モデルの一つとして Galilean Genesis というものがある。このモデルには宇宙がミンコフスキー時空から始まるという興味深い特徴がある。これまでの研究では、Galileon 理論を用いて記述されていた様々ある Genesis モデルの Horndeski 理論を用いた一般化と拡張を行った。Horndeski 理論は単一のスカラー場を用いたスカラーテンソル理論を一般化したものである。インフレーションの解決した平坦性問題などの諸問題はこれまでの研究で解決されることがわかったが、次段階としてこの時期が正常に次の時期へと繋がるかについての検討が必

要であると考えられる。そこで、この一般化されたモデルについてさらに Genesis 期から正常に次の時期へ繋がるような拡張を行った。ここで Genesis の次の時期では宇宙がド・ジッター膨張をしている。このうえで Genesis 期から次の時期への相転移において物質がどのように生成されるかの検討を行った。Genesis を引き起こすスカラー場と物質のあいだの相互作用は直接相互作用をするものと重力場を介して相互作用をするものが考えられるが、まずはより単純なものとして重力場を介して相互作用が行われる場合について考える。本発表では以上の内容について現在得られた結果を報告する。

1. S. Nishi and T. Kobayashi, JCAP 1503, no. 03, 057 (2015)
[arXiv:1501.02553 [hep-th]]
2. G. W. Horndeski, Int. J. Theor. Phys. 10 (1974) 363-384

.....

重宇 c19 Brane induced gravity in $d = 6$

平野 進一 (立教大学 M1)

観測技術の進歩により、一般相対論 (GR) の検証を宇宙論的長距離スケールで行うことが可能になりつつある。また、宇宙の加速膨張など GR のほころびが現れた。これを機に Λ -CDM 理論の修正、宇宙項問題のような重力理論の修正が活発に試みられている。Brane induced gravity (BIG) [1] はそのモデルの一つである。BIG は d 次元時空 (bulk) 上に我々の 4 次元時空 (brane) や万物が局在していると考えられるモデルである。 d は無限次元であるが brane 上の十分短い距離スケールでは GR の振る舞いを再現する。これはあるスケール r_c によって特徴づけられる修正重力理論を導く。一方で、線形レベルの有効 4 D graviton は共鳴してしまう、つまり massive graviton の重ねあわせの状態である。BIG のような余剰次元モデルの構築は、massive graviton における ghostfree な例を考案できる領域を提供できる。また、宇宙定数問題への degravitation approach になっている。

BIG の最もよく知られている例が $d = 5$ の DGP (Dvali-Gabadadze-Porrati) モデル [2] である。DGP の設定は宇宙論では修正フリードマン方程式にあたり、この方程式の解は、重力の弱体化により特徴づけられ摂動的に安定な normal branch と摂動的 ghost 不安定性をもつ self-accelerating branch の 2 つである。宇宙論的観測から DGP の r_c には強い制限がかけられる。

本講演では [3] に基づくさらに高次元に拡張した $d = 6$ の BIG モデルのレビューを行う。Regularization の入れ方や bulk から生じる重力波の存在により、解析的手法には困難が伴う。数値解析により、定量的に異なる 2 つの解が顕になる。degravitating 解は系が静的宇宙ひもの解に近づく解で、source が存在するにも関わらず 4 D ハッブルパラメータ H が 0 になる。これは、後の議論で現象論的に不適となる。もう一つは superaccelerating 解で無限に成長を続ける。また、これらの解では 6 D 重力の source となるエネルギー密度が負に変わり、DGP の self-accelerating branch に強く類似するので、 $d = 6$ での BIG はうまくいかないと考えられる。簡単のため bulk の宇宙項のない場合が調べられているが、より詳細に調べるには宇宙項を入れて振る舞いを調べることが必要となる。

1. G. Dvali and G. Gabadadze Phys. Rev. D 63, 065007 (2001)
2. G. Dvali, G. Gabadadze, and M. Porrati, Phys. Lett. B 485, 208 (2000).
3. F. Niedermann, R. Schneider, S. Hofmann, and J. Khoury Phys.

Rev. D 91, 024002 (2015)

重宇 c20 宇宙論的ベクトル型 2 次摂動論

嵯峨 承平 (名古屋大学 C 研 D2)

宇宙論的摂動論で取り扱うゆらぎは、スカラー型摂動、ベクトル型摂動、テンソル型摂動の各モードに分解される。線形摂動を考えた場合には、各モードは混ざり合わないことが知られており、単純なインフレーションモデルにおいてはスカラー型摂動とテンソル型摂動が量子的なゆらぎから生成されると考えられている。一方で、ベクトル型摂動は線形摂動論では減衰モードしか存在しないために標準的な線形摂動論では無視される。

しかし、摂動を高次まで展開した際には各モードはもはや独立ではなく、2 次ベクトル型摂動が自然と生成される。ベクトル型摂動は、宇宙論的観測に興味深いシグナルを残すことが知られている。私は、この 2 次ベクトル型摂動が宇宙論の対象に与える影響について解析を行った。

重宇 c21 CMB における原始重力波起源の B-mode 偏光

林田 友利 (東北大学天文学専攻 M1)

今回の発表では CMB の B-mode 偏光が原始重力波によってどのように生成されるかを簡単に説明する。そして BICEP2 や Planck による最近の観測結果を紹介する。

インフレーション理論では、インフラトン場の量子ゆらぎが重力波を生成すると考えられている。この初期宇宙に存在する重力波のことを「原始重力波」と呼ぶ。原始重力波はトムソン散乱を通じて CMB の偏光を引き起こす。偏光には 2 つのモードが存在し、E-mode と B-mode に分けられる。初期宇宙での密度ゆらぎは基本的に E-mode のみを生成するが、原始重力波は E-mode と B-mode の両方を生成する。よって原始重力波起源の B-mode 偏光の存在は、インフレーション理論を裏付ける証拠となりうる。その上この偏光観測から、インフレーション中のエネルギースケールを直接的に求めることができる。

2015 年 6 月現在、CMB 中の原始重力波起源の B-mode 偏光は未だに発見されていない。去年の 3 月に BICEP2 グループが原始重力波起源の B-mode 偏光の発見を発表したが、その後の Planck の観測結果から棄却されてしまった。前景放射であるダストの放射の影響が大きく、「原始重力波起源の B-mode」と判断するのが難しいとされたからだ。この BICEP2 グループは 150GHz 帯で観測を行っていたが、Planck(2015)の結果から、前景放射の影響が最も小さいのは約 80-90Hz の間とわかった。これに近い周波数帯での観測によって、更に精度の高い観測が期待されている。

1. The BICEP2/Keck and Planck Collaborations, Phys. Rev. Lett. 114, 101301, 2015
2. Planck Collaboration XX. 2015, A&A, submitted, arXiv:1502.02114v1 [astro-ph.CO]
3. Planck Collaboration Int. XXX. 2014, A&A, accepted, arXiv:1409.5738v2 [astro-ph.CO]

重宇 c22 CMB 温度揺らぎ観測から探るスカラーテンソル理論への制限と重力定数の進化

大場 淳平 (名古屋大学 C 研 M2)

ビッグバン理論の帰結として存在する宇宙マイクロ波背景放射の精密観測は、現代宇宙論を大きく進展させた。その結果として現在の宇宙の組成は、宇宙の加速膨張を引き起こす暗黒エネルギーが 68%、重力相互作用しにくい冷たい暗黒物質が 27%、通常物質 (バリオン) が 5% であると考えられている。しかし、宇宙の組成の大半を占めていると考えられる暗黒エネルギーや暗黒物質は未だにその正体が分かっておらず、世界中で盛んに研究されている。その一方で、未知の暗黒エネルギーや暗黒物質の振る舞いを、重力理論を修正することで理解しようとする立場もある。このような理論を修正重力理論という。修正重力理論は一般相対性理論を拡張することで、暗黒エネルギーを導入することなく現在の宇宙組成の観測結果を説明できる理論として期待されているが、修正重力理論のモデルは数多く存在し、現実に即したモデルを決定することは大変困難である。

修正重力理論のモデルを決めるには様々な観測結果を用いてモデルに制限を与えることが必要不可欠である。そこで、修正重力理論と一般相対性理論とのずれをモデルパラメータを用いて記述し、観測結果を用いて制限を与える。

本研究では、修正重力理論のモデルとしてスカラーテンソル理論 [1] に着目し、Planck による宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎの観測データを用いて、モデルパラメータへの制限を行った。また、スカラーテンソル理論の大きな特徴として、観測される重力定数が時間発展することにも着目し、現在の重力定数と宇宙マイクロ波背景放射が放射された時代の重力定数との差についても制限を与える。

1. R. Nagata et al., Phys. Rev. D 66, 103510 (2002).

重宇 c23 宇宙マイクロ波背景輻射を用いた宇宙のトポロジーの探索方法

小西 翔太 (近畿大学大学院 宇宙論研究室 M1)

2013 年に観測を終えた Planck 衛星による宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB) の観測から宇宙の空間成分はほぼ平坦であるという結果が出ている。しかし宇宙が平坦であるからといって宇宙が無限に広がっているということは必ずしも言えない。

立方体の向かい合う面を平行移動で同一視することで、3 次元トラスが得られる。3 次元トラスの宇宙では、観測者が宇宙を観測すると異なる方向からやってくる同じ天体の光を観測したり、過去に観測者自身が前方に発した光が観測者の後方からやってくる。観測者が有限の大きさを持つ空間の周期的構造のために「宇宙が果てしなく続いている」と錯覚している可能性がある。

宇宙が 3 次元トラスであるかを探るための手法として「空の円」がある。「空の円」は、立方体の境界面と CMB 光子の最終散乱面の交線となる円上で温度揺らぎが同一視できるかを調べる手法である。宇宙が 3 次元トラスであった場合、「空の円」の手法を用いることで同じ温度揺らぎのパターンが観測されるかもしれない。

本ポスターでは 2 次元のモデルを用いて有限性を持つ宇宙モデルを簡単に説明し、3 次元のモデルに拡張して「空の円」の解析方法について述べる。またこれまでに行われてきた過去の研究成果と現在行っている自身の研究について報告する。

1. M. Lachieze-Rey and J.P.Luminet Physics Reports v.254 135 (1995)
2. Inoue, Kaiki Taro PhD Thesis (2001)

重宇 c24 線電荷による電場を遮蔽する宇宙ひも

小川 達也 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 D1)

本研究では、宇宙ひも [1] と Q-ボール [2] の配位を融合させ [3]、複素スカラー場の位相が時間的に回転しているような宇宙ひもを考える。この時、ネーターチャージが消えないため、スカラー場がチャージを持つ宇宙ひもとなる。具体的に、スカラー場とゲージ場に円筒対称性と定常性を課し、適切な境界条件の下で場の方程式を解くことを考える。この方程式は非線形連立偏微分方程式から非線形連立常微分方程式に帰着し、解析的に解くのは困難であるが数値的に解くことが容易となる。この位相が回転する宇宙ひもに関して、局所的宇宙ひもを考える。動径方向に変化する時間成分を持ったゲージ場で局所化された、位相が回転する局所的宇宙ひもでは、遠方でスカラー場の位相回転をゲージモードに吸収するような境界条件を課す。これにより、エネルギーが局在化された、位相が回転する宇宙ひもを構成することができる。このとき、ゲージ場の時間成分の発散が消えず、磁場だけでなく、磁場に直交する方向に電場も持った宇宙ひもの解となる。さらに、スカラー場により、この電場もまた宇宙ひも内部で閉じ込められる。この電場の寄与により、エネルギー・運動量テンソルはエネルギー線密度と張力の間にずれが生じ、新たに角度方向のエネルギーフラックスが生じる事になる。本発表では、この位相が回転する宇宙ひもの性質について論じる。

1. H.B.Nielsen and P.Olesen; "VORTEX-LINE MODELS FOR DUAL STRINGS"; Nucl.Phys. B61 (1973) 45.
2. S.Coleman; "Q-Balls"; Nucl.Phys.B262,263 (1985)
3. N.Sakai, H.Ishihara, K.Nakao; "Q-tubes,Q-rings and Q-crusts" (2010)

重宇 c25 Cosmic string による初期磁場生成

堀口 晃一郎 (名古屋大学 C 研 D1)

本講演では宇宙論的位相欠陥の一種である cosmic string による初期磁場生成について述べる。

cosmic string は宇宙初期に起きた場の相転移によって形作られる位相欠陥であり、ひも状の高エネルギー領域として宇宙空間に存在することが期待される。string の運動は密度揺らぎの形成や重力波の生成など様々な物理に影響を与える。本研究では位相欠陥の一種である texture からの磁場生成を見積もった [1] に倣い、string が宇宙初期の光子、バリオン流体に与える影響を見積もることで string が宇宙初期に生成しうる磁場を評価する。string による初期磁場生成は以下の過程で行われる。

まず、初期宇宙での string の運動により空間の渦度が生成される。次に、空間の渦度に引きずられて光子流体とバリオン流体が運動を始める。この際、光子と電子がトムソン散乱で、電子とバリオンが電磁気力で結びつき、一つの流体として運動している。ここでは光子がバリオンから電子を引き離し、それに追従するようにバリオンが運動するので、光子流体とバリオン流体の間に電場が誘起される。誘起された電場は

Maxwell 方程式を通して磁場を生成する [2]。この過程を string の分布や速度の時間進化を考慮して解くことで、string によって生成される初期磁場を求めることができる。

本研究により、string が生成しうる初期磁場は $\sim 1\text{Mpc}$ 程度のスケールで 10^{-20}Gauss 程度であることが分かった。本講演では string によって生成される磁場の特徴や進化などについても言及する。

1. K.H, K.Ichiki, T.Sekiguchi, N.Sugiyama, JCAP 04,007 (2015)
2. K. Takahashi, K. Ichiki, H. Ohno, and H. Hanayama, Phys.Rev.Lett. 95 (2005) 121301

重宇 c26 $AdS_5 \times M_5$ 時空におけるストリングの運動方程式の可積分性

矢久間 司 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M2)

p 次元の広がりを持つ物体は、それが存在する D 次元の時空に $p+1$ 次元の軌跡を描く。

この軌跡に関して適当な作用を定義したとき、作用が最小となる条件が運動方程式であるが、変分を取る方向が複数なので偏微分方程式となる。

これは一般的には積分不可能な方程式で、広がりを持った物体の振る舞いを解析する際に問題となる。

しかし時空が対称性を持つ場合は、そこに存在するキリングベクトル ξ^a やキリングテンソル K^{ab} を用いてハミルトニアンを書き換え、今考えている運動方程式をより低い次元の運動方程式へと reduce することができる。特に対称性が高い場合、運動方程式は常微分方程式に変わり積分可能なものとなる。

本発表では AdS_5 時空の対称性についてレビューした後、そこに生えるストリングの解の具体的な導出、及び解の性質について議論する。更に $AdS_5 \times S^5$ のような、他の 5 次元多様体 M_5 が AdS_5 に掛かった場合について、ストリングの解析的な解が導かれるために M_5 が満たすべき性質についても議論をする。

1. Hideki Ishihara and Hiroshi Kozaki arXiv:gr-qc 0506018v2 (2005)
2. Tatsuhiko Koike, Hiroshi Kozaki and Hideki Ishihara arXiv:gr-qc 0804.0084v1 (2008)

重宇 c27 電波干渉計による画像作製と CLEAN

杉江 剛典 (近畿大学 宇宙論研究室 M1)

複数の電波望遠鏡からなる電波干渉計は天体から発せられる電波を受信し、相関器から作られたデータを元にビジビリティを求め、逆フーリエ変換することで画像を得る。画像の分解能を決める空間周波数はアンテナ間の距離に比例するので、位置を変更できる電波干渉計は天体の細部を見るのに役立つ。観測されたビジビリティの uv 面における面密度は一律でないため分解能が悪くなる傾向がある。そのため重み付けを行い面密度を調整する必要がある。この調整を行うと合成ビームが変化する。ビジビリティを逆フーリエ変換して出した画像 (ダーティマップ) は真の強度分布と合成ビームの畳み込みであるため、デコンボリューションを行い合成ビームの影響を取り除き真の強度分布を求める。その一つに CLEAN という方法があり、ダーティマップの強度のピークを見

つけ、その位置を中心とする合成ビームを適当にスケールリングしてダーティマップから差し引く。これを行うことでより正確な強度分布を求める。

本ポスターでは、まず電波干渉計で受信した電波から画像を得るまでの過程を大まかに説明する。その後、実際の観測データを用いてシミュレーションソフト CASA で解析を行った結果について報告する。さらに現在行っている観測データの CLEAN についても触れる。

.....
重宇 c28 遠赤外線天文衛星 AKARI によるデータを用いたダストマップ作成

梨本 真志 (東北大学天文学専攻 M1)

BICEP2 による原始重力波起源である宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) B モード偏光の発見が騒がれたが、これはダストによるものだという決着に落ち着いたのは記憶に新しい。このことから銀河系内のダストについて理解を深め、前景放射を正確に除去していくことが CMB の観測、ひいては初期宇宙の理解において重要な役割を担うことは言うまでもない。

時期を同じくして、昨年末、日本の遠赤外線天文衛星「AKARI」が観測した全天の遠赤外線データが公開された。IRAS 以来 21 年ぶりに刷新される遠赤外線での全天観測画像は、IRAS に比べ十倍以上の解像度を誇り、また IRAS では観測されなかった $100\mu\text{m}$ より長い波長帯を観測することで、ダストについてより詳細な情報が得られることとなった。AKARI 全天データを利用し、銀河系内に広く分布するダストの全天マップを作成をする。銀河系内のダストマップとして Schlegel、Finkbeiner、Davis (SFD) によって 1998 年に発表されてきたものや、Compiègne による DustEM などが広く知られているが、これらモデルのような既存モデルとの差別化のため、ダスト粒子サイズごとの温度進化をスタカスティックに追って調べることにより、新たなダストモデルとして改良した。現行モデルとの比較によりどのような違いが出てくるかを議論する。

以上のように作られたダストマップを宇宙論に繋げることが本研究の目指すところである。

.....
重宇 c29 重力チェレンコフ放射による重力波の速度と分散関係への制限

清田 哲史 (広島大学 宇宙物理学研究室 M2)

重力波の伝搬速度 (音速) は、一般対性理論においては光速であると考えられているが、最も一般的な 2 階のスカラーテンソル理論を宇宙論に応用した模型のように、重力波の速度が光速からずれる理論モデルも存在する。重力波の音速が光速よりも遅くなる場合には、重力チェレンコフ放射と呼ばれる重力波放射が発生する可能性がある。超高エネルギー宇宙線の存在から重力チェレンコフ放射を用いて重力波の速度に制限を与えることが可能であり、重力理論のテストにも有用である。本発表では、初めに重力チェレンコフ放射を用いた重力波の制限についてレビューする。応用として、有質量の重力波模型を含む一般化された分散関係に対して、重力チェレンコフ放射から課される制限を明らかにする。

.....
重宇 c30 quantum optimization in estimates for the universe expansion

ROTOND Marcello (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M2)

We study the optimization of the parameter estimation for an expanding Robertson-Walker universe by use of quantum information considerations. Because of the information that neutrinos can provide us about fundamental epochs in the history of our universe, we will focus especially on Dirac particles. The universe expansion results in the evolution of an initial pure state into a final entangled state and the precision of our estimation of the expansion depends sensitively on the dimensionless mass and dimensionless momentum of the Dirac particles.

1. "Parameter estimation for an expanding universe" J.Wang, Z.Tian, J.Jing, H.Fan, Nucl. Phys. B, 892, pp.390-399

.....
重宇 c31 Unruh detector model を用いた「情報」の考察

久木田 真吾 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D2)

ブラックホールが温度とエントロピーを持つということが理論的に示されて以降 [1]、ブラックホールの統計力学的、更には情報理論的側面に注目が集まるようになってきた。それに端を発して生じた問題のひとつが、「ブラックホールによる情報損失問題」である。これは、ブラックホールがその温度による熱輻射によって蒸発してしまうときに情報を持ち去ってしまうのが量子論的なユニタリ性と反する、という問題だ。この問題を考察するときには「情報とは何か」という問題を真剣に考えなくてはならないのだが、これをまじめに考察した研究はおそらくないといっていい。そこで、今回は「情報」の意味をより直感的かつ測定理論的立場から考え直してみたい。まず、「情報」は最低何らかの観測操作によって直接的あるいは間接的に取り出されるべきものである、ということに着目する。従来の研究では量子場のエンタングルなどを情報と読み替えていたが、量子場は単独で測定可能な存在ではない。そこで測定器のモデルである Unruh detector を用いて、量子場の情報を測定するような状況を考えてみる。detector 系という測定可能な系の情報から、我々はどのような「情報」を得るのだろうか？ このように得られた「情報」の概念を用いて、ブラックホールの情報損失問題を再解釈してみたい。とりあえず今回は detector 系からどのような情報が得られるのかまでを発表する予定である。

1. Hawking, Stephen, "Particle Creation by Black Holes," Commun. Math. Phys. 43 (3):199-220