

2020 年度 第 50 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

小林 努 (立教大学 理学部物理学科 教授)

8月24日 11:15–12:15 room 2

一般相対論の拡張と検証

重力の「標準理論」はもちろん一般相対論である。太陽系における実験や重力波観測の結果を見ても、一般相対論の予言に反する兆候は何ひとつ存在しない。それにも関わらず、現在の宇宙の加速膨張の起源が不明であるという大きな問題に動機づけられて、一般相対論を拡張する試みはさかんにおこなわれている。また、量子重力理論の構築を念頭に置けば、一般相対論が「究極の完成品」でないことは明らかである。(そして、そのような大義名分・タテマエを忘れても、純粋に理論的な観点からきわめて面白い研究が数多く出現している。)このような背景のもと、本講演では重力理論研究の最近のトレンドを紹介する。

Reference

”Horndeski theory and beyond: a review” Tsutomu Kobayashi Rept.Prog.Phys. 82 (2019) no.8, 086901 e-Print: arXiv:1901.07183 gr-qc

小松 英一郎 (マックス・プランク宇宙物理学研究所 所長)

8月24日 17:00–18:00 room 2

原始重力波

宇宙における構造（銀河、星、惑星、そして生命）の究極的な起源は、宇宙初期の加速膨張「インフレーション」中に生成された量子力学的な揺らぎだと考えられている。この大胆な仮説を観測的に検証するには、インフレーション中に生成された原始重力波を測定すれば良いとされる。本講演では、原始重力波生成の物理と、それを宇宙マイクロ波背景放射の偏光を用いて測定する方法を紹介する。そして最新の話題として、原始重力波の起源がアインシュタイン方程式の左辺（真空の量子揺らぎ）か、右辺（物質場によるエネルギー・運動量テンソル）かによって生じる違いを述べる。

重宇 1 波動光学で見るブラックホール

渡邊 勇輝 (立教大学大学院 理学研究科物理学専攻 M1)

この発表は [1] のレビューである。ブラックホールまわりで波がどのように散乱されるかは、長きにわたって調べられてきた。カーブラックホールに周辺では特定の条件のもとで super radience と呼ばれる波の増幅現象や、後方散乱波の回折効果が顕著になるとブラックホールグロリーなる現象が起こることが知られている。これらのブラックホールによる波の散乱に関する研究の主な目的は曲がった時空で波がどう伝播するかを明らかにすることであった。

今回レビューする [1] ではブラックホールによる波の散乱をブラックホールの「姿」をとらえるために、画像構成の観点から再考する。幾何光学的には、ブラックホールの「姿」とはヌル測地線方程式をブラックホールの時空で解くことにより得られ、光源の視野角がブラックホールの視野角より大きい場合、ブラックホールの「姿」は、光源中央に暗点として現れる。これに対し [1] ではブラックホールにより散乱された波が作る回折パターンを解析することによって「姿」を再構成することを目指す。このために凸レンズによる波の散乱とのアナロジーを導入し、シュワルツシルトブラックホールによる無質量スカラー波の散乱を解析する。光源としてブラックホール背後に点光源がある状況を想定し、無質量スカラー場の波動方程式を数値的に解き、ブラックホールの「姿」を再構築し、ブラックホールの特質を調べる。

参考文献

[1] K.Kanai and Y.Nambu, "Viewing Black Holes by Waves", *Class.Quant.Grav.*30,175002(2013).

重宇 2 4次元 Einstein-Gauss-Bonnet 理論における静的球対称ブラックホールの周りの性質

天羽 将也 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

本発表では、[1] 及び [2] をレビューする。Einstein-Gauss-Bonnet (EGB) 理論とは、一般相対論のいくつかの性質を保ちつつ、ラグランジアンが曲率の2次まで含むように拡張した理論であり、弦理論の低エネルギー極限としても得られることが知られている。この理論は、Einstein-Hilbert 作用に Gauss-Bonnet 項という項を付け加えた作用で記述される。D次元 Gauss-Bonnet 項は、従来は D=4 において運動方程式に寄与しない。

これを踏まえ、Glavan と Lin [1] は、Gauss-Bonnet 項が4次元で運動方程式に寄与する新しい理論を提唱した。この理論は一般相対論と大きく異なる性質を持ち、特異点を回避することが期待される。以降、[2] をはじめとしてこの新しい重力

理論に基づいた研究が活発になされてきた。

[2] では、静的球対称ブラックホールの event horizon、photon sphere、shadow、ISCO の半径に着目し、[1] の理論と一般相対論の違いを確認した。photon sphere と ISCO は、ブラックホールなどの周りを回る粒子の軌道の特徴づけるものであり、shadow は無限遠方からブラックホールを見た時に暗く見える領域の大きさを表すものであることから、ブラックホールの観測と併せた [1] の理論の検証が期待される。また、一般相対論で静的球対称な場合について示された event horizon などの半径の間の不等式 [3] が、[1] で提唱された4次元 EGB 理論で成り立つための条件について議論する。

[1] D. Glavan and C. Lin, arXiv:1905.03601 (2019).

[2] M. Guo and P. C. Li, arXiv: 2003.02523 (2020).

[3] H. Lu and H. D. Lyu, arXiv: 1911.02019 (2019).

重宇 3 AdS background の4次元 Gauss Bonnet 時空における球対称ブラックホールの熱力学、相転移、Joule Thomson 効果について

郭 優佳 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

(3+1) 次元時空での重力場の運動方程式は唯一 Einstein-Hilbert 作用から導出される Einstein 方程式であるというのが Lovelock 定理である。また (3+1) 次元以上の重力理論は Gauss Bonnet 作用を加えることで記述され、Einstein Gauss Bonnet gravity と呼ばれている。EGB gravity において、Gauss Bonnet 作用は Einstein 方程式に (D-4) に比例する形で寄与を与えるため4次元時空では寄与が効かないとされていた。しかし coupling constant を $\alpha \rightarrow \alpha/(D-4)$ と rescale すれば4次元時空でも寄与を与えることが発表され、Lovelock 定理をバイパスできる novel Einstein Gauss Bonnet gravity として注目を集めている。 [1]

今回は AdS 背景時空における 4D novel Einstein Gauss Bonnet gravity の球対称なブラックホールについて、その熱力学的特性をまとめた論文をレビューする。 [2] はじめに宇宙項 Λ を圧力と対応させる extended phase space でのブラックホール熱力学を考える。また、4D EGB ブラックホールの状態方程式は van der Waals 状態方程式によく似た構造を持つため、液体-気体間の相転移と同じようにブラックホールの相転移が考えられる。相転移が起こる様子を P-v (specific volume) グラフでの等温線や、Gibbs エネルギー、比熱を通して確認する。さらに、同じく熱力学との対応を見ることでブラックホールにおける Joule Thomson 効果についても考えることができる。

4D charged AdS ブラックホールでは van der Waals 相転移の臨界温度は電荷に反比例するため、電荷が相転移において重要な役割をもつと期待されていた。 [3] しかし、今回の論

文 [2] では電荷に依らず van der Waals 相転移が起こることが分かった。さらに、4D novel EGB gravity の球対称ブラックホール解は特異点がないことも大きな特徴である。今後このようなブラックホールの熱力学現象を通して、詳細なブラックホールの熱力学的性質やその微視的構造が解明されることが期待されている。

[1] D. Glavan and C. Lin, Einstein-Gauss-Bonnet gravity in 4-dimensional space-time, Phys. Rev. Lett. 124 (2020) 081301 arXiv:1905.03601[gr-qc].

[2] K. Hegde, A. Naveena Kumara, C. A. Rizwan, A. K. M. and M. S. Ali, Thermodynamics, Phase Transition and Joule Thomson Expansion of novel 4-D Gauss Bonnet AdS Black Hole, arXiv:2003.08778 [gr-qc].

[3] D. Kubiznak and R. B. Mann, P-V criticality of charged AdS black holes, JHEP 07 (2012) 033 arXiv:1205.0559[hep-th].

重宇 4 一般的な非線形電磁気の枠組みにおけるブラックホールの安定性

野村 皇太 (神戸大学 理学研究科物理学専攻 M2)

ブラックホールは Einstein の一般相対論からその存在が予言されたのち、強重力場における物理を理解する場として精力的な研究対象となってきた。特に、様々な理論におけるブラックホールの安定性を調べることは、理論の検証を行う上で意義深い課題である。摂動に対して安定なブラックホールは、その安定化の際に特徴的な重力波を放出することが知られている。ブラックホールの安定性を解析し、理論から予言される重力波を観測と照合することで、理論の検証を進めることができると期待されている。

電磁場を含む重力理論は、典型的には電磁場の強さ $F_{\mu\nu}$ からなるスカラーの線形項 $F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ を取り入れた Einstein-Maxwell 理論で記述される。この理論で構成される荷電ブラックホールは、摂動に対して安定であることが [1] などで示されている。それでは、 $F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ だけでなく、 $F_{\mu\nu}$ とその双対 $\tilde{F}_{\mu\nu}$ から構成される一般の関数を含む理論におけるブラックホールは安定だろうか？ 例えば、電磁場による量子効果は $F_{\mu\nu}$ と $\tilde{F}_{\mu\nu}$ を組み合わせた非線形項によって有効的に記述されることが知られている。このような非線形な電磁気的効果がブラックホールの安定性にどのような影響を及ぼすかは非自明な問題である。

そこで本研究 [2] では、ラグランジアンに $F_{\mu\nu}$ と $\tilde{F}_{\mu\nu}$ の任意関数が含まれるような一般的な非線形電磁気の枠組みにおけるブラックホールの安定性条件を導出した。本講演では、研究 [2] で得た安定性条件を示した上で、様々な非線形電磁気理論におけるブラックホールの安定性について議論する。

[1] F. J. Zerilli, Phys. Rev. D9 (1974) 860-868

[2] K. Nomura, D. Yoshida, and J. Soda, Phys. Rev. D101 (2020) 12, 124026

重宇 5 宇宙初期のクエーサーによる 21 cm 線シグナルへ影響

秋葉 健志 (筑波大学 数理物質科学研究科物理学学位プログラム M1)

インフレーション後、宇宙は膨張によって冷え、約 38 万年後に原子核に電子が取り込まれて宇宙の晴れ上がりをもくめる。そこから約 4 億年後に初代星ができるまで、宇宙で光り輝く星はなく暗黒時代と呼ばれている。その間ガスは中性であり、宇宙を隈無く満たしている。その後、初代星、初代銀河形成が進むと、それらの紫外線によって、銀河間ガスは再び電離した状態となる。これは宇宙再電離と呼ばれ、遠方銀河クエーサーの Gunn-Peterson 効果や宇宙背景放射の観測により、赤方偏移 10 頃 (宇宙誕生 5 億年後) に始まり赤方偏移 6 (宇宙誕生 10 億年後) までに完了したことがわかっている。中性水素は星や銀河の周りから徐々に電離し始め、電離領域は宇宙全体に広がっていったと考えられる。この中性水素ガスの時間的空間的発展は、水素原子から発せられる超微細構造線 (21 cm 線) によって直接観測することができる。そこで 21 cm 線が観測でどのように見えるかを調べるため、宇宙初期の天体形成や電離構造のモデルが必要になる。近年、Ross et al. (2019) では大規模な数値シミュレーションを用いて、宇宙大規模構造とともに 21 cm シグナルの構造をモデル化した。本講演では Ross et al. (2019) の論文についてのレビューを行う。Ross et al. (2019) の計算によると、暗黒時代から初代星が生まれる宇宙の夜明けの時期では、中性水素の温度が、クエーサーなどの X 線放射天体の数、分布に依存し、21 cm 線の非等方性に強く寄与することがわかった。一方で、宇宙再電離期のクエーサーの観測は非常に少ないため、Ross et al. (2019) のクエーサーのモデル化には大きな不定性がある。本講演では、これらの問題点について議論するとともに、我々が取り組み始めた研究についても紹介する。

重宇 6 初代星が再電離に与える影響と 将来観測機器での観測可能性

坂本 陽菜 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

銀河間物質 (IGM) は宇宙の密度ゆらぎの成長の結果誕生した天体からの電離光子により、赤方偏移 $z \sim 6$ より前までに電離が行われたことが観測的に示唆されている。この IGM が電離される過程を宇宙の再電離という。電離光子源の有力な候補は若い銀河である。この時代の若い銀河は、星形成において水素分子が必要であるミニハロー (MH) と原子冷却ハロー (ACH) で形成される。ところが再電離の一般的なシミュレーションで

は MH からの寄与は無視されることが多い。なぜなら LW band の光により水素分子が解離され MH での星形成が抑制される (LW feedback) ため、初代星の寄与が大きくなるはずと予想されていたからだ。しかし寄与が無視できるほど小さいかは明らかではない。

本研究ではまず宇宙論的スケールでの輻射流体シミュレーションを行う。モデルは電離光子源に ACH のみを考慮する場合と ACH と MH 両方を考慮したものを考え、MH が再電離史に与える影響を見積もる。この電離史の違いが宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の E-mode 偏光のパワースペクトルの大角度スケールに現れると期待される。そのため CMB を主成分分析 (PCA) と呼ばれる統計手法を用い解析することで、MH の影響を調査する。

手法は Ahn et al. (2012) [1] のものを用い、観測器は次世代の CMB 偏光観測衛星である LiteBIRD を想定する。

MH を考慮した場合 $z \sim 35$ から電離が始まるが、徐々に LW feedback により MH による星形成が抑制され電離度の上昇が抑えられるため、 $z \sim 10$ 頃までは再電離が進行せず電離度が数 % のまま推移する。 $z < 10$ 以降では ACH からの電離光子が支配的になるため二つのモデルでの違いは見られなくなる。

本発表ではまず MH が電離史に与える影響を議論する。次に PCA 解析を利用した電離史への制限の方法を紹介する。更に実際に PCA 解析した結果をもとに、LiteBIRD による MH 有無の判別可能性を議論する。

1. Ahn, K., Iliev, I. T., Shapiro, P. R., et al. 2012, APJ, 756, L16

重宇 7 銀河団での散乱によって生じる CMB の偏光を用いた密度ゆらぎの再構築

角谷 健斗 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

宇宙論を精査するために、宇宙の大規模構造の進化、ひいては密度ゆらぎの発展を知ることは非常に重要である。しかし、宇宙空間の構造を観測した場合、観測点が遠く離れるほど過去の姿を観測することになり、同じ地点の構造を異なる時刻で観測することができない。そのため異なる地点の構造から推定される物質ゆらぎの成長率は不定性を大きく含んでいる。この問題の解決策として、同じ地点の構造を異なる時刻で観測する新しい手法を確立し揺らぎの成長率を直接測定することがあげられる。

今回は異なる時刻における構造を測定する方法として銀河団によって散乱される宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) の偏光を観測し、最終散乱面から我々の間の領域の晴れ上がり時での CMB 温度ゆらぎを再現することを考えた。先行研究 [1] では、CMB 光子が銀河団を通過する際に、銀河団内部の自由電子に散乱され、銀河団まわりの最終散乱面上での CMB 温度ゆらぎの四重極成分に由

来する偏光を生じることが示されている。多数の銀河団に対してこの偏光を観測することで、最終散乱面から我々の間の領域の、晴れ上がり時での CMB 温度ゆらぎを再構築することが期待できる。

本研究ではシミュレーションにより様々な位置にある銀河団で散乱された CMB 光子の偏光の情報から、我々の光円錐内における再結合時の温度揺らぎを推定した。また、与えた再結合時のゆらぎと CMB 偏光により再現したゆらぎを比較することで手法の検証を行い、さらに再現率と用いる銀河団の関係性を検証した。

本発表では実際に行った数値計算の結果を報告し、また時間があれば実際の観測と理想的なシミュレーションでの状況の違いについても議論する。

[1] Portsmouth, J. 2004, PRD, 70, 063504

重宇 9 重力波信号の検出に用いる Matched Filter について

日下 公亨 (新潟大学 自然科学研究科数理物質科学専攻 M1)

約 100 年前にアインシュタインによって予言された重力波は、2015 年に初めて直接検出された。現在アメリカの LIGO、イタリアの Virgo、日本の KAGRA 等の重力波検出器が稼動中であり、電波や X 線等さまざまな観測手段との連携によるマルチメッセンジャー天文学が開花しようとしている。重力波観測から得られるのは重力波信号と観測機器のノイズが合わさったものであり、大きなノイズの中から非常に微弱な重力波信号を取り出すために Matched Filter という手法が用いられる。これは理論的に予想される重力波波形のテンプレートを用いて、信号対雑音比 (SNR) を最大にするフィルターである。本発表では、Matched Filter の原理を紹介する。

1. Michele Maggiore (2008) "Gravitational Waves VOLUME 1: THEORY AND EXPERIMENTS" OXFORD UNIVERSITY PRESS

重宇 10 バースト重力波のデータ解析

豊島 弥洋 (新潟大学 自然科学研究科数理物質科学専攻 M1)

アインシュタインの一般相対性理論によって予言されてきた重力波が、2015 年に世界で初めて LIGO にて検出された。ここで検出された重力波は連星ブラックホールの合体によるものであった。その後、2017 年にも連星中性子星の合体による重力波も検出された。これらの大質量連星の合体や、超新星爆発では、非常に短い時間で大量のエネルギーの重力波、つまりバースト的な重力波が発生することが実際の観測やシミュレーションなどから知られている。しかし、検出する重力波信号は検出器のノイズに比べて非常に微弱であるため、重力波検出におい

てフィルタリング技術が重要になる。このフィルタリングでは、Matched Filter という理論的に予想された重力波の波形を用いて、信号対雑音比 (SNR) を最大にする手法がよく用いられている。

本発表では、この Matched Filter を用いて、重力波バーストのデータ解析について紹介する。

1. Michele Maggiore (2008) "Gravitational Waves VOLUME 1: THEORY AND EXPERIMENTS" OXFORD UNIVERSITY PRESS

重宇 11 Effective-one-body 形式

窪田 圭一郎 (京都大学 理学研究科 M1)

2015 年に Advanced LIGO によって初めて連星ブラックホールからの重力波が観測された。連星ブラックホール合体時に放出される重力波のデータ解析において、重力波源の質量やスピンを測定するためには正確な重力波波形が必要である。数値相対論による重力波波形の高精度の計算には巨大な計算機資源が必要となるため、ブラックホールの質量やスピンを事細かに変化させて調べ尽くすことは難しい。そのため数値計算結果から解析的モデルを構築する手法が取られている。解析的モデルが得られると連星ブラックホールのダイナミクスや重力波放射の物理的な理解を深めることができる。そのような波形モデルを構築する方法として effective-one-body (EOB) 形式がある。この発表では EOB 形式を [1] を参考にレビューする。

ブラックホールからの重力波波形はブラックホールが共通重心の周りを公転しながら近づく inspiral phase、ブラックホールが合体する merger phase、合体後に形成されたブラックホールの準固有振動によって重力波が生成される ringdown phase の 3 つの phase からなる。EOB [2,3] ではポストニュートン展開を活用し inspiral phase の重力波を EOB approach で表し、ringdown phase の重力波をブラックホール摂動論で表し、適切に結合することで十分精度のよい近似的な重力波波形を記述する。

1. T. Damour, arXiv:0802.4047
2. A. Buonanno and T. Damour, arXiv:gr-qc/9811091
3. A. Buonanno and T. Damour, arXiv:gr-qc/0005034

重宇 12 ブラックホール周囲の光子球と重力波の準固有振動

中村 拓人 (近畿大学 総合理工学研究科理学専攻 M1)

2015 年に LIGO によってブラックホール連星の合体に伴う重力波が初観測された [1]。その後も次々と重力波イベントが観測されている。これによって本格的に重力波天文学の幕開けとなった。今、ブラックホールから放出される重力波について理解する重要性が高まってきている。

重力波の理論研究は、近年では数値計算によるものが大きく発展したが、様々な近似を用いた解析的研究も進められてきた。後者に関して、例えば、重力波は振動数が十分大きな極限 (eikonal 極限) において、幾何光学近似を用いることで光子のような無質量粒子の軌道として考えることができる。一方、ブラックホールの周囲の幾何学は光子の円軌道の集合である光子球 (photon sphere) により特徴付けられる。一般的に光子の円軌道は不安定である。2019 年に Event Horizon Telescope によってブラックホールの影が撮影されたが [2]、この影の輪郭は photon sphere から漏れ出た光子である。実は、この photon sphere 近傍の光子円軌道の不安定性がブラックホールからの重力波の準固有振動 (QNMs) と関連していることがわかっている。特に、カオスを議論する際に、カオスの強さを評価する量である Lyapunov 指数を用いて QNMs と光子軌道の不安定との関係を定量的に評価する方法が提案された [3]。

しかし、この Lyapunov 指数を用いた方法は現在のところ静的時空の場合に限定されている。そこで、今後ブラックホール連星の合体のような興味のある動的な時空の解析に備えて、この Lyapunov 指数の方法を拡張できないかを議論したい。観測されている重力波が連星系によることから、今後、この議論の重要性はますます大きくなると考えられる。以上の動機に基づいて本発表ではブラックホールの合体を記述する厳密解の 1 つである Kastor-Traschen 解 [4] についても解説したい。

- [1] B.P. Abbott, et al.: Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).
- [2] The Event Horizon Telescope Collaboration: Astrophys. J. 875, L1 (2019).
- [3] V. Cardoso, A.S. Miranda, E. Berti, H. Witek and V.T. Zanchin: Phys. Rev. D 79, 064016 (2009).
- [4] D. Kastor and J. Traschen: Phys. Rev. D 47, 5370 (1993).

重宇 13 銀河中心領域での MeV ガンマ線探査から探る暗黒物質

荻尾 真吾 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

暗黒物質の正体は物理学における大きな謎である。暗黒物質の有効な候補として、3 MeV [1] ~ 120 TeV [2] の質量を持つ Weakly-Interacting Massive Particles (WIMP) がある。WIMP が消滅すると、その質量より小さい MeV 帯域で連続的成分と 511 keV のピークを持つ構造が得られる可能性が指摘されている [3]。Fermi-LAT の銀河中心領域の観測によれば、GeV 帯域の観測されるガンマ線の殆どは π 中間子の崩壊由来である [4]。一方で、MeV 帯域では、その起源の殆どが未解明で、暗黒物質起源かもしれない。WIMP を狙った地上実験は暗黒物質と原子核の衝突を捉えるもの [5] が主流で、GeV-TeV 帯域での上限は更新されているが、発見に至っていない。もし WIMP が MeV 領域にあれば、質量の大きい原子核

の反跳で観測するのは困難である。以上より、MeV 帯域での新たな探索手段が待たれる。我々は MeV 領域における新たなコンプトンカメラ (ETCC) の開発を進めている。2018 年には SMILE-2+ として銀河中心領域の観測を行った。銀河における暗黒物質の分布モデルとしてハロー構造モデルが提案されており [6]、我々の観測から電子・陽電子消滅線源がモデルと同様に銀河面より離れた領域まで広がって存在する可能性が浮上している。これは以前に MeV 帯域で観測を行った COMPTEL 及び INTEGRAL の結果 [7] と矛盾しない。発表では、SMILE-2+ の結果を踏まえて、今後の MeV 帯域観測と暗黒物質探索の展望について詳述する。

参考文献

- [1] Ho, C. M., & Scherrer, R. J. 2013, Phys. Rev., D87, 023505
- [2] Griest, K., & Kamionkowski, M. 1990, Phys. Rev. Lett., 64, 615
- [3] Kyungjin Ahn and Eiichiro Komatsu. 2005, Phys. Rev., D72, 061301(R)
- [4] S. Abdollahi, F. Acero, et al. 2020, Astrophys. J., Suppl. Ser., 247:33 (37pp)
- [5] E. Aprile, J. Aalbers, et al. 2018, Phys. Rev. Lett., 121, 111302
- [6] Julio F. Navarro, Carlos S. Frenk, Simon D. M. White. 1997, Astrophys. J., 490:493-508
- [7] A. W. Strong. 7 Jan 2011. arXiv:1101.1381

重宇 14 ダークマター探索の現状と将来

阿部 正太郎 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

現代物理学最大の謎の 1 つにダークマターがある。ダークマター探索の手法として、直接探索・間接探索・加速器実験の主に 3 つがあるが、間接探索のこれまでの成果として、Fermi 衛星や AMS-02 実験により判明した 10 GeV 以上のエネルギー領域における陽電子過剰問題がダークマター由来である可能性が指摘されている。さらに、H.E.S.S 望遠鏡の観測によって 1 TeV 付近のエネルギー領域における対消滅断面積に最も強い上限値 $\langle \sigma v \rangle \sim 10^{-25} \text{ cm}^3/\text{s}$ が与えられている。しかしこれまでの観測では発見まで至っていない。

これに対して、次世代型ガンマ線望遠鏡 CTA は、これまでダークマターの様々なモデルに対して感度曲線が研究され、以下に述べる理由からダークマター発見の可能性が高いことが予想されている。

- 1) Fermi 衛星では捉えられなかった数 100 GeV 以上のエネルギー領域に感度がある。理論的に期待されるダークマター質量範囲が 100 GeV から数 TeV であるため効果が大きい。
- 2) H.E.S.S と比較して 10 倍程度高い感度を持つ。
- 3) 視野角が従来の 5° から 10° 程度に向上し、銀河団のよう

な広いソースに対応できる。

4) エネルギー分解能が改善する。以下に述べるスペクトル分離に貢献する。

解析過程では、ダークマター由来のガンマ線と天体由来のガンマ線とのスペクトルの違いを利用したスペクトル分離を行う。CTA によるダークマター探索の感度をさらに向上させるためには、その解析最適化が課題となってくる。そこで私は、既存の MAGIC 望遠鏡などのデータと理論予測から機械学習を用いて特に感度の点でそれに貢献したいと考えている。今回の発表では、これまでのダークマター探索の成果と CTA によるダークマター検出可能性について俯瞰して先行研究のレビューを行いつつ、将来的な研究構想をまとめる。

重宇 15 擬似スペクトル法を用いた cosmic shear パワースペクトルの測定手法

谷口 貴紀 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

遠方銀河から我々へ届く光の経路は、途中に存在する物質の重力場によって曲げられるため、観測される銀河の形状には歪みが生じる (弱い重力レンズ効果)。したがって、弱い重力レンズ効果を利用して、多数の銀河の観測から系統的な銀河形状の歪み (cosmic shear) を測定することで、宇宙の大規模構造の物質分布を再構成することができる。また、cosmic shear の大きさは物質の密度パラメータ Ω_m と密度ゆらぎの振幅パラメータ σ_8 に対して敏感であるため、cosmic shear の観測はこれらの宇宙論パラメータを制限するための強力な手法である。

cosmic shear の解析には 2 点相関関数や、相関関数を波数空間へ変換したパワースペクトルが用いられているが、互いに波数の異なるパワースペクトル間の共分散は、対応する 2 点相関関数の共分散よりも扱いやすいため、誤差の評価という観点からはパワースペクトルを用いることが望ましい。しかし実際の観測においては、観測領域は明るい星などの影響で一部がマスクされた形状をしているため、cosmic shear の波数空間への変換は自明ではない。すなわち、相関関数を直接的に変換すると、マスクされた領域とデータのある領域で畳み込みが生じ、正しいパワースペクトルが得られないという問題がある。

文献 [1] では、CMB 解析で用いられてきた擬似スペクトル法を cosmic shear 解析に応用することで、上記の観測的影響を取り除いて cosmic shear パワースペクトルを得る手法が開発されている。この手法により、観測領域の約 25% がマスクされている場合でも、1% 以下の精度で真のパワースペクトルが復元できる。

発表者は、文献 [1] の手法をもとにして、cosmic shear の観測からより高次の統計量であるバイスペクトルを測定する手法の開発研究を行っており、本発表では文献 [1] のレビューを行う。

1. C. Hikage, M. Takada, T. Hamana and D. Spergel, Mon.

重宇 16 機械学習を用いた暗黒物質質量への制限

村上 広椰 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M2)

宇宙の大規模構造形成の際、主な重力源となるのは暗黒物質であるとされている。暗黒物質は重力相互作用のみを介在する物質であり、その性質について不明な点も多いが、その質量が大規模構造に影響する。そのため現在までに、銀河分布の二点相関関数を用いた解析によって暗黒物質質量は数 keV 以上という制限を与える研究は行われている。しかし、暗黒物質の有力なモデルについて、例えばステライルニュートリノモデルで数 keV~MeV、WIMPs モデルで GeV~TeV という質量域が考えられており、大規模構造解析が現在与える制限は暗黒物質モデル制限のためには未だ不十分である。

問題点として、暗黒物質質量が影響を及ぼすのは大規模構造の小スケールの構造だが、このスケールでは既存研究で用いられている二点相関関数よりも高次の統計量に情報が流出してしまう。従ってより強力な制限のためにはこの高次統計の情報が不可欠であるが、三点以上の多点の相関を計算することは計算コストの面で非常に難しい。

そこで本研究では、新たな解析の手法として機械学習の一種である畳み込みニューラルネットワーク (CNN) に注目する。CNN は画像解析の分野で用いられる手法で、フィルターを用いて画像中の多くの点の相関から情報を抽出する。フィルターは画像の学習を通じて解析において重要な相関のみを取り出せるよう最適化されていくため、全ての点同士の計算を行わず、現実的な計算量で解析を行うことができる。

本研究では N 体シミュレーションデータから得られた暗黒物質分布のデータを用いて CNN の訓練および評価を行った。本講演では CNN および二点相関関数を用いたシミュレーションデータの解析結果を比較し、CNN が既存手法を超えた制限を得られるかを検証した結果について報告する。

重宇 17 複数場に拡張したインフレーションモデルの検証

森下 薫能 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

標準ビックバン理論の諸問題の解決策としてインフレーション理論が有力視されている。インフレーションの物理はインフラトンによって決定され、数多くあるモデルは実際の観測結果との整合性を要する。近年であれば Planck の観測によるモデルの制限は広く知られているものであろう [1]。Planck の観測では、スカラーのパワースペクトルの傾き n_s と、スカラーとテンソルのパワースペクトルの比である r の値に制限が課されている。その観測結果により、単一場の ϕ^n のモデルは r の観点から否定的なものと考えられている。ただ、こ

れらの ϕ^n のモデルを複数場へと拡張したのも単一場モデル同様に否定されるとは限らない。単一場のモデルと比べ、複数場のモデルは r の値を下げる可能性がある。そのため、本研究では $V = \phi^n + \sigma^n$ という単純な複数場のモデルを用いて r の値を観測で許される値に下げること考える。

ϕ 、 σ が共にインフラトンとして振る舞う場合は以前計算したが、期待した結果は得られなかった。そこで、本発表では ϕ がインフラトン、 σ がカーバトンとして振る舞うモデルを考える。カーバトンはインフラトンと異なり、インフレーションの物理には関与しない。また、曲率ゆらぎに非ガウス性が見られることも特徴の 1 つであり、この非ガウス性も実際の観測から制限が課されるものである [2]。

本発表では、カーバトンを用いた複数場の n_s 、 r の値の数値計算結果に加え、カーバトンの非ガウス性についても紹介する。前者は [3]、後者は [2] のレビューとなる。また、複数場において r を下げるのはどのような機構であるかも議論する。

[1] Planck 2018 result. X. Constraints on inflation

[2] Misao Sasaki, Jussi Valiviita and David Wands Phys.Rev.D74:103003,2006 [arXiv: astro - ph/0607627v3]

[3] M. Sasaki and E. D. Stewart, Prog. Theor. Phys. 95 (1996) 71 [arXiv:astro-ph/9507001]

重宇 18 Inflation in the Palatini formalism

三倉 祐輔 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

ビックバン宇宙論の初期条件に関する微調整問題を解決するためにインフレーション理論は導入された。インフレーション理論にはたくさんのモデルが存在するが、それらの予言と CMB の観測結果を比較することにより、そのモデルが観測と整合的に判断することが可能である。例えば、 ϕ^n のポテンシャルを持つ Chaotic inflation は Planck の観測結果と整合的ではないが、ポテンシャルの他に重力とインフレーションを引き起こすスカラー場が結合した項を持つ場合好ましいパラメータ領域に予言を与える。このようなスカラー場と重力が結合したモデルは幅広く研究されている。

通常の Einstein-Hilbert 作用のみを考える一般相対論では計量のみが独立変数として扱われるが、計量と接続を独立変数として扱った場合でも接続が Levi-Civita 接続であるという拘束条件が与えられる。計量のみを独立変数とする形式 (metric formalism) と計量と接続を独立な変数とする形式 (Palatini formalism) は Einstein-Hilbert 作用においては同じ物理を記述するが、スカラー場と重力が非最小結合するような状況においてそれら二つの形式では接続の書式が異なる。よく知る摂動の解析を用いるために共形変換と呼ばれる非最小結合を持つ系から結合を持たない系への変換を施す。接続の違いは共形変換を通して場のポテンシャル

に影響し、インフレーションの観測に違いを生む。

本発表では [1] をレビューし、重力とスカラー場が $\phi \sim 2R$ の形で結合し、ポテンシャルが ϕ^n で書かれる時にインフレーション理論でよく扱うスペクトル指数 n_s とテンソル・スカラー比 r がどうなるかを将来の観測も絡めて Palatini formalism を用いて議論する。

[1] Tomo Takahashi, Tommi Tenkanen arXiv:1812.08492

重宇 19 インフレーションにおける原始揺らぎの非ガウス性について

柄本 耀介 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

宇宙の最初期においてはインフレーションと呼ばれる宇宙が指数関数的な膨張をしていた時期があると考えられている。インフレーションはかつてのビッグバン宇宙モデルが抱えていた一様性問題や平坦性問題を一挙に解決しただけでなく、初期宇宙における量子揺らぎの存在も予言しその有用性を示した。現在、最も基本的なインフレーションの理論的なモデルはインフラトンと呼ばれる単一のスカラー場によって記述されるものであり、このモデルは原始揺らぎが高い精度でガウス的であることを予測する。これは、観測によって CMB (宇宙マイクロ波背景放射) の揺らぎが高いガウス性を持つことと合致している。その一方で、単一のスカラー場によるインフレーションのモデル以外にも多くのモデルが原始揺らぎのガウス性を再現するため、一般に原始揺らぎのガウス性についての議論だけではインフレーションのモデルを制限することが出来ない。従って、数多あるモデルの中から正しいモデルを選定するためには、揺らぎのガウス性だけでなく、ガウス性からのずれである非ガウス性について議論することが必要になる。

非ガウス性を議論するためには曲率揺らぎの三点相関関数を計算する必要があり、その正確な計算手法は [1] において初めて与えられた。

本講演では主に [1] のレビューを行う。単一のインフラトンによるインフレーションのスローロール極限における二点相関関数について紹介したのち、その議論を拡張し三点相関関数の導出を行う。また、三点相関関数の squeezed limit として得られる consistency relation の重要性について [2] に沿って解説する。

[1] J. M. Maldacena, JHEP 05, 013 (2003), astro-ph/0210603.

[2] P. Creminelli and M. Zaldarriaga, JCAP 0410, 006 (2004), astro-ph/0407059.

重宇 20 背景重力波の非ガウス性の直接観測可能性

岡野 創 (東京工業大学 理学院 D1)

原始重力波は初期宇宙の時空構造に依存する物理量であり、現

在も背景重力波として宇宙に残存すると考えられている。LIGO や Virgo により、ブラックホール連星合体時の重力波など天体起源のものは既に直接観測されているが、背景重力波については未発見であり、特に宇宙論的起源の背景重力波は 2034 年に打ち上げ予定の LISA によって直接観測されると期待されている。この重力波はインフレーションなどの初期宇宙に関する情報を含んでおり、例えばインフラトンが非線形相互作用を持っていたり、重力波をソースする場が存在したりすれば、その情報は背景重力波の非ガウス性として 3 点以上の高次の相関として現れる。真空の量子揺らぎ起源の重力波がランダムガウス場であることから、非ガウス性の検証は初期宇宙のダイナミクスの特定に関わる重要な観測である。しかし、こと直接観測に関しては背景重力波の非ガウス性がほとんどの場合で失われる (正確には 3 点相関=バースペクトルはほとんど 0 になる) と指摘されている。この理由は 3 つあり、1. 宇宙初期のハッブルホライズンが小さく、長距離相関を持たない場合、背景重力波は無数の独立な揺らぎとして観測されることとなり、中心極限定理により高い精度でガウス的になる、2. 重力波の放出から観測に至るまでの時間と比べて観測期間が短いため、放出時のわずかな位相の違いがランダムな分布を与えること、3. 小スケールで宇宙が非一様であるため、伝播過程で位相がランダムにずらされてしまうこと、が各々重力波をガウス化させている。本発表では、非ガウス重力波をガウス的にする上記の 3 つの効果について定量的に評価し、特に Equilateral 型と呼ばれる配位のバースペクトルはほとんど 0 になることを示す。また、4 点関数についても同様に評価を行い、上記の効果をすり抜けるような配位が存在するかを定量的に検証する。

重宇 21 重力相互作用による量子もつれの生成

三木 大輔 (九州大学 理学府物理学専攻 M1)

重力が量子性を持つのかということは物理学において大きな問題になっている。重力を記述する一般相対性理論と量子力学の統一に対して、様々な理論が提案されてきたが、実験的な検証は行えておらず、理論の確立には至っていない。しかし近年、量子情報の分野の量子もつれを用いて、重力の量子性を検証するデスクトップの実験模型がいくつか提案された。これは量子もつれが、量子的な操作によってのみ生成される性質を利用している。従って、重力により量子もつれが生成されるなら、重力は量子的であると言える。

量子もつれを評価するためには、着目系の状態を表す密度行列を求める必要がある。密度行列の時間発展はマスター方程式に従い、系のハミルトニアンと量子デコヒーレンスの模型が与えられると求められる [1]。量子デコヒーレンスとは、着目系が周りの環境と相互作用することにより、着目系の量子性が崩壊する現象である。これにより、着目系間の量子もつれは、時間発展とともに生じにくくなる。

本発表では、2 つの粒子間の量子もつれについて議論した文

献 [2] をレビューする。粒子はそれぞれ離れた位置の重ね合わせ状態に用意され、それらは重力により相互作用する。また、各粒子は環境とも相互作用し、量子デコヒーレンスを起こす。この時、マスター方程式から密度行列を求め、粒子間に量子もつれが生じるための条件について議論する。

1. Maximilian Schlosshauer, arXiv:1911.06282 (2019)
2. H.Chau.Nguyen and Fabian Bernards, arXiv:1906.11184 (2019)

重宇 22 量子ビット回路での Hawking 輻射のモデル化によるファイアウォールの再現

吉田 萌生 (立教大学 理学研究科物理学専攻 M1)

本発表は [1] のレビューである。

まずブラックホール (BH) の情報喪失問題について述べる。量子論を考慮すると BH は熱輻射により蒸発することが知られている。初期状態を純粋状態とすればユニタリ発展では混合状態に変わり得ない。これは、BH の蒸発過程はユニタリ発展せず BH の情報が失われることを意味する。これを情報喪失問題と呼ぶ。この問題を解決するために、BH を別の量子系と併せて純粋化することを考える。この別の量子系を Hawking 輻射とする。BH が萎んでいき最後に輻射のみが残る描像では、BH と Hawking 輻射のエンタングルメントは 0 から増え、途中 (Page 時間) で最大値をとって再び 0 に戻るはずである。この Page の描像では Page 時間以前と以後の Hawking 輻射との間に強いエンタングルメントが生じる。しかし、Hawking 輻射は放出された瞬間 BH と強くエンタングルするため、両者は量子論のモノガミーという性質から成立しえない。そこで、BH と Hawking 輻射との間の相関が断ち切られているとするのがファイアウォール仮説である。

[1] では、Page の描像に則り、Hawking 輻射による BH の蒸発過程を量子ビット回路を用いて再現し、相互情報量やネガティブリティなどの相関を特徴づける量を計算する。その結果として、振動数の小さい Hawking 輻射に対しては、ファイアウォールのような構造が現れることを見る。

- [1] T.Tokusumi, A.Matsumura and Y.Nambu “Quantum circuit model of black hole evaporation”, Class. Quantum Grav. 35 235013(2018)

重宇 23 ブラックホール近傍の漸近的対称性

佐藤 琢磨 (立教大学 理学研究科物理学専攻 M1)

ブラックホール (BH) はホライズン面積に比例した巨大なエントロピーを持つ事が知られているが、その微視的起源の理解は未だ不十分な状況にある。また BH がエントロピーをもつ事は、時空の内部がさまざまな微視的状态の重ね合わせとして記述される事を意味し、入射粒子の情報は何らかの形で保持される。しかし BH はホーキング放射と呼ばれる、入射粒子に依存

しない形でエネルギーを放出し、いずれは消滅するので入射粒子の情報は完全に失ってしまう。これは今日では情報パラドックスと言われている。この問題の解決は量子重力理論の構築に向けて重要な手がかりだと考えられていて、これまで多くのアプローチがされてきたが根本的な理解にまでは及んでいない。論文 [1] でホーキングはホライズン近傍での supertranslation を考える事によって情報パラドックスが解決し得る事を提唱した。supertranslation とは無数の対称性を与える変換の生成子の事で、これは角度依存性を持つことに起因する。またさらに [2] では無数の保存カレントに情報が蓄えられるとも提唱される。supertranslation に関連するエネルギーを持たない輻射 (保存カレント) を soft hair と呼ぶ。supertranslation はエントロピーの起源である可能性がこれまで議論されてきたが、ホライズン近傍の対称性はこれらの議論により近年再び注目を浴びている。

今回レビューする論文 [2] は、非極限的 BH のホライズン近傍での漸近的なキリングベクトルを求める事により漸近的対称性を調べ、その生成子と代数を具体的に求める。そこでこの生成子が supertranslation である事をみて、soft hair までを導出する。soft hair をホライズン全体で積分した量は保存量として与えられる。またこれらの量をカー時空に適用すると、保存量がエントロピーとして表せるのを導出し、supertranslation とエントロピーの関連性を考察する。しかしこれらの論文では結果は正しいものの、導出過程で若干の不備があり、その点についても考察をしていく。

- [1] L.Donnay, G.Giribet, H.A.Gonzalez, M. Pino “Supertranslations and Superrotations at the Black Hole Horizon” Phys. Rev. Lett. 116, 091101 (2016), arXiv:1511.08687 [hep-th]
- [2] S.W.Hawking, “The Information Paradox for Black Holes”, arXiv:1509.01147 [hep-th]

重宇 24 場の理論のドレス状態から探る BMS 漸近対称性

古郡 秀雄 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 D1)

BMS 漸近対称性は 4 次元漸近平坦時空が無限遠方で持つ無限自由度の対称性である。この対称性は並進変換を関数自由度分拡張した超並進と呼ばれる変換と、ローレンツ変換に対する対称性であり、平坦時空の持つ対称性の拡張となっている。

近年、赤外の三角関係と呼ばれる一見非自明な、漸近対称性とその他の物理の結びつきが発見された。これによると BMS 漸近対称性は重力波の通過によって引き起こされる検出器などの相対距離の永続的な変化：重力メモリー効果を記述できる。また、これらはさらに場の理論における赤外発散の問題とも結びつくことがわかっている。

場の理論の赤外発散とは、低エネルギーの無質量粒子 (これ

は軟粒子と呼ばれる。)の量子補正が時間発展を記述する S 行列を ill-defined にしてしまい、さらには遷移確率を 0 にしてしまう問題である。この問題を解決する方法は大別して 2 通りある。1 つ目は、終状態は検出できないほどの低エネルギー粒子が無数に存在したとしても区別ができないので、そのような状態を全て考慮するという方法である。この方法では軟粒子を放出する過程を放出しない元の過程を結びつける軟粒子定理の存在が重要である。2 つ目は、軟粒子は長波長のためその相互作用がいつまでも切れることはなく、始状態と終状態は軟粒子がまわりついた状態(これはドレス状態と呼ばれる。)であると考える方法である。

赤外三角関係では軟重力子定理と BMS 対称性の結びつきが発見された。その一方、ドレス状態と漸近対称性の関連についての理解は不十分である。それはドレス状態自体の理解に未だ議論が残っているからである。我々は先行研究とは異なるドレス状態の定式化を行い、量子電磁気学においてドレス状態から QED の漸近対称性を導き出すことに成功した。本講演ではこの方法を線形重力場の理論に応用して BMS 漸近対称性を探ることを議論する。

重宇 25 アクシオンと天体進化

佐藤 崇永 (東北大学 理学研究科物理学専攻 M1)

アクシオンは強い CP 問題を解決する未発見の素粒子であり、同時に暗黒物質の候補として知られている。アクシオンはフェルミオン、電子、光子などと相互作用するが、このうち天体の進化からの制限によって axion-electron-electron 相互作用の強さには上限が与えられる。

先日、暗黒物質探査実験 XENON1T において axion-like-particle による影響とみられる痕跡が発見された。しかし、XENON1T の結果を太陽で生成されたアクシオンで説明する場合には、その上限よりも大きな結合定数が必要である。つまり、この実験結果がもっともらしいかを知るためには、天体進化を深く理解することが重要である。本講演では、天体の進化を加速させる stellar cooling と呼ばれる現象がアクシオンの質量や相互作用の強さにどのように制限を与えるのかについて述べる。

重宇 26 初期宇宙における Primordial BlackHole の放射

物部 武瑠 (立教大学 理学研究科物理学専攻 M2)

Primordial Black Hole (PBH) とは、宇宙初期に形成される Black Hole (BH) のことを指す。PBH は 50 年ほど前に Zeldovich や Novikov、Hawking によって提唱され、主な形成過程として密度ゆらぎの重力崩壊などが考えられている。天体物理学由来(星の崩壊や終状態として)の BH 質量が太陽質量ほどであるのに対し、PBH の質量は、プラ

ンク質量ほどに軽いものから超大質量 BH ほどに重いものまで、幅広い質量を持つことができる。比較的軽い PBH は Hawking radiation による蒸発にその痕跡を残し、重いものは重力源として dark matter の候補になりうる。近年では、2015 年に LIGO によって観測された重力波が PBH 連星によるものと考えられることなど、初期宇宙を読み解くためのツールとして PBH の形成過程やその放射の観測可能性が注目されている。[B. Carr (2005)], [M. Sasaki, et al.(2018)]

本講演では [D. Hooper, et al.(2020)] のレビューに加え、near extremal Kerr BH における Hawking radiation との差異を議論する。PBH の放射過程として、次のようなシナリオを考える。まず初期宇宙の密度揺らぎから PBH が生じ (BH formation)、それらが連星を形成するとする (binary capture)。そして連星が重力波を放出しながら合体し (mergers)、生じた BH が Hawking radiation によって蒸発していく (Hawking radiation)。このシナリオのもとで重力波の放出や、Hawking radiation による graviton の放出量の計算を行い、その結果として将来の観測が期待されるほどのエネルギー密度を持った重力波や、合体後の PBH の持つ spin parameter が大きいものほど graviton の放射量が多いことが確認された。

PBH の形成時に spin を持っていた場合など、シナリオの初期条件を変えていくことで、さらなる議論が考えられる。

重宇 27 $f(R)=R+\alpha R^2$ gravity における中性子星の質量-半径関係 : purely metric formulation と torsion formulation の比較

沼尻 光太 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻素粒子宇宙物理系 M1)

本発表は [1] の review である。中性子星 (NS) のような高密度の極限的環境では、状態方程式 (EoS) がそのミクロな振る舞いだけでなく、質量-半径関係など NS のマクロな物理量も支配する。このことを用いて、近年 LIGO などの観測によって取り得る EoS に制限が付けられている。一方この様な環境においては重力も支配的となるが、NS 連星系に対する観測などにより、一般相対論 (GR) に基づいた NS 質量の上限は破られていることが観測されている ([2] 他)。そこで GR を拡張する様々な修正重力理論において NS formation について議論されている。中でも $f(R)$ gravity は新たな自由度を scalar 場として導入し、これが non-baryonic dark matter 等に頼らない新たな重力のソースとなることから近年注目を集めている。

本研究では $f(R)=R+\alpha R^2$ で与えられる修正重力理論において、NS の質量-半径関係について議論する。物質場として完全流体を考え、EoS として LIGO の観測と整合している APR4, MPA1, SLy, WFF1 [3] を仮定した。 $f(R)$ に対しては、場として metric のみを考

える metric formalism と torsion の自由度を導入する torsion formalism の 2 パターンについて考え、それぞれについて修正された Tolman-Oppenheimer-Volkoff 方程式を導出し、これを仮定した EoS と境界条件 (外部 Schwarzschild 解への接続) に基づいて数値積分を実行した。

結果、metric formalism に対しては解の安定性に対する条件から $\alpha > 0$ が要請され、 α の増加に従って NS の全質量及び compactness (質量/半径比) が GR と比べて増加していく事が分かった。一方、torsion formalism に対しては真逆の結果が得られた。解の安定性条件から $\alpha < 0$ が要請され、 $|\alpha|$ が増加するほど全質量、compactness が減少した。これは torsion 自由度が repulsive な場の役割をしていると考えられる。

以上の結果より、 $f(R) = R + \alpha R^{-2}$ においては中性子星の質量上限が GR から変更されうる事が示唆される。また将来的にはより高精細な観測によって、どちらの formalism がより適切か決定できると考えられる。

- [1] P. Feola et al. Phys. Rev. D 101 (2020) 4, 044037
- [2] O. Barziv et al., A&A 377, 925 (2001).
- [3] B. Abbott et al. (Virgo, LIGO Scientific), Phys. Rev. Lett. 119, 161101 (2017).

重宇 29 すばる HSC のデータを用いた銀河のクラスタリングと弱重力レンズ効果の二点相関による重力理論の検証法

大河内 雄志 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

一般相対論は太陽系スケールでの観測とは高い精度で一致している。一方で、宇宙の加速膨張が観測されている現状を考えると、宇宙論的スケールでの重力が一般相対論で正しく記述できているかは確かではない。本研究では、暗黒物質分布を高赤方偏移まで高解像度で測定できるすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) による撮像銀河サーベイのデータを用いて大スケールでの重力理論を検証する。

重力レンズ効果は、遠方銀河からの光が手前にある物質の重力場により曲げられることで生じる。重力理論を変更すると物質と重力場の関係が変わるため、物質分布と重力レンズ効果から重力理論の情報を推定できる。本研究では、物質分布の統計的性質を測定するため、重力レンズ効果による歪みの自己相関 (cosmic shear) を用いる。また、銀河は重力相互作用により物質の密度が大きい領域に形成されるため、銀河分布は物質分布を反映する。ここで問題となるのは、銀河分布が物質分布を直接表すわけではないという点である。しかし、銀河の周りの重力レンズ効果を測定すれば、銀河分布と物質分布の関係を推定し、銀河分布を物質分布に焼き直すことができる。

多くの重力理論では、非相対論的物質と相対論的物

質で受ける重力の強さが異なる。本研究では、この性質を特徴付ける二つの現象論的なパラメータを導入して、重力理論を一般相対論から修正する。本研究の目標は、cosmic shear、銀河自己相関、銀河弱重力レンズ効果について理論と観測を比較し、これらのパラメータの値の範囲に制限をつけることである。理論と比較するデータとして、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) で得られた分光銀河の分布 [1] と HSC による銀河の形状カタログから推定した重力レンズ信号 [2] を用いる。

[1] Alam et al. APJS, Vol. 219, No. 1, 2015

[2] Hikage et al. PASJ, Vol. 71, No. 2, 2019

重宇 31 深層学習を用いた重力レンズマップのノイズ除去

河合 宏紀 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

重力レンズ効果による遠方銀河像の形状の変化を観測することによって、宇宙の物質分布が得られる。重力レンズ効果を定量的に扱うために用いられるパラメータには κ と γ があり、それぞれ元の形状からの拡大率、歪みを表す。原理的には、重力レンズマップの解析によって様々な情報を得られるが、実際の観測データにはノイズが含まれているため、正確な情報を引き出すことは容易ではない。そこで、深層学習を用いてノイズを除去する手法が提案された [1]。ここではまず、N 体シミュレーションにより宇宙の 3 次元物質分布を求め、これを利用して 2 次元重力レンズマップを作成した。さらに背景銀河の元の形に起因する現実的なノイズを加えることで模擬観測データを作った。そして、条件付き敵対的生成モデル (Conditional Generative Adversarial Networks, cGAN) と呼ばれる深層学習ネットワークの一つを用いて、重力レンズマップのノイズ除去を試みた。cGAN によりノイズを除去されたマップ (Reconstructed map) を、ノイズを加えていないマップ (Ground Truth) と比較した結果、統計量の再現は十分にできた。しかし、詳細な構造は異なっていたので、さらなる改善が必要である。

本発表では、宇宙論における弱重力レンズ効果の基礎を述べ、その後文献 [1] のレビューをするとともに、改善策を述べる。具体的には、深層学習モデルの潜在空間を解析することで、深層学習が重力レンズマップのいかなる特徴を捉えているか、ということに注目する。またこの手法を用いた今後の展望についても議論する。大規模構造の低密度領域 (ボイド) に注目し、その周辺の密度分布を観測することで、温かい暗黒物質 (Warm Dark Matter, WDM) の制限が得られる可能性がある。先行研究 [2] を交えながら紹介する。

[1] Shirasaki M. et al., 2019, Phys. Rev. D, 100, 4

[2] Yang L. F. et al., 2015, Mon. Not. R. Astron. Soc., 000,

重宇 33 非等方時空における Spectator axion-SU(2) モデルの等方化についての解析

村田 知瞭 (立教大学 理学研究科物理学専攻 M1)

インフレーションは標準ビッグバン理論の諸問題を解決し、CMB や大規模構造などの様々な観測結果を説明することができ、現在では有力なシナリオとなっている。その中でも、原始重力波の予言に特徴が見られることで注目を集める、アクシオン場と SU(2) ゲージ場が相互作用している Chromo-Natural (CN) モデルを考える。アクシオン場とは、強い CP 対称性問題の解決のために導入された擬スカラー場で、超弦理論などからもその存在が予言されている。このモデルはベクトル場を含んでいるが、非等方な初期条件に対し等方解がアトラクターになっていることが先行研究 [A. Maleknejad, and E. Erfani(2014)] で確認されている。しかし、この初期条件空間には見過ごされている領域があることが指摘され、そのことも考慮して再検討した結果、等方解がアトラクターにならないパラメータ領域が存在することも示された [I. Wolfson, et al.(2020)]。

更に、ここまではアクシオン場でインフレーションを起こすモデルを考えましたが、ここでは CN モデルを spectator sector とし、インフラトンが最小結合しているモデルも調べられている。spectator とは、モデルに良い性質を与えることを目的とした自身ではインフレーションを起こさない補助的な場のことである。CN モデルがインフラトンと最小結合する場合、初期条件がインフラトン優勢であるほど等方解がアトラクターとなるパラメータ領域が広がることも同研究で確認されている。これは、非等方状況下におけるインフラトンの膨張が影響し、ゲージ場のエネルギー密度が薄まるためであると考えられる。

このことを受け、本研究ではインフラトンのダイナミクスによる非等方性への影響に注目し、インフラトンが非最小結合をしているモデルについて議論する。

重宇 34 原始重力波のスペクトル指数が正となるスローロール・インフレーションモデルにおける再加熱機構

三嶋 洋介 (立教大学 理学研究科物理学専攻 D1)

宇宙が初期に指数関数的な膨張をしていたと考えるインフレーションは、現代宇宙論の標準的なシナリオとして広く受け入れられている。それは、標準ビッグバン理論の抱える初期条件の微調整に関する問題を解決するだけでなく、宇宙の大規模構造の種となる原始密度ゆらぎの生成も自然に説明できるからである。そして現在では、インフレーションが予言する原始密度ゆらぎのパワースペクトルが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、ということも判明している。インフレーションが起きた証拠となる原始重力波はまだ検出されていないため、そのパワースペクトルがインフレーションモデ

ルごとにどのような特徴を持つのかは興味深い対象となっている。

インフレーションを起こすスカラー場の正準運動項とポテンシャル項で記述される単純なモデルでは、原始重力波のパワースペクトルのスペクトル指数は負になる。ところが、現代の CMB の観測に整合するスローロール・インフレーションモデルを最も一般的なスカラー・テンソル理論の下で検討すると、原始重力波のスペクトル指数は正となるモデルが多く存在していることが確認された [Y. Mishima and T. Kobayashi(2019)]。こうしたモデルが再加熱期を経て放射優勢期へと接続し得るか検証することは興味深い。

最も一般的なスカラー・テンソル理論は、ラグランジアンの中にスカラー場の非線形相互作用項を含む。この非線形相互作用項が不適切な形で含まれていると、スカラー場は振動しないことが指摘されており [J. Ohashi and S. Tsujikawa(2012)]、この解は物質場へエネルギーを移すことができないため、インフレーションモデルとして不適切である。この観点から、原始重力波のスペクトル指数が正となる先述のモデルにおいて、再加熱期に遷移可能なモデルを探索する。

重宇 35 Barrow entropy と時空の熱力学を用いた修正宇宙論

斎藤 大生 (名古屋大学 素粒子宇宙物理学専攻 (素粒子宇宙物理系) M1)

本講演は [1] に基づいた review 発表である。Black Hole (BH) 熱力学を宇宙の horizon に応用することで Friedman 方程式を導出する方法は以前から指摘されている。その際には宇宙の見かけの大きさ (面積) を古典的な BH の entropy とされている Bekenstein-Hawking entropy と関連づけるという操作がなされていた。

一方、Hawking radiation 等の BH の量子的な効果を説明するには Bekenstein-Hawking entropy を用いた記述は適切ではなく、何らかの補正が必要と考えられている。補正を取り入れた entropy としては様々なモデルが考察されてきたが、本講演で着目するのは [2] にて Barrow によって導入された形のもの (Barrow entropy) である。Barrow entropy は、BH の horizon の面積ではなくそのべきに比例する形で書かれる。すなわち、量子補正は面積依存性の指数として取り入れられている。

本講演では Barrow entropy と宇宙の horizon を関連づけることで得られる宇宙論的方程式と、それが描く宇宙像について説明する。Bekenstein-Hawking entropy を用いた場合と比較すると、Barrow entropy の面積のべき依存性が Friedman 方程式に対する補正として加わる。その補正項を Dark Energy (DE) 項とみなし、dust matter との共存系においてその density parameter 及び EoS parameter の時間発展を計算した。density parameter の計算から

は、当初は matter dominant であったが現在の時刻に近づくと DE dominant となる宇宙を得ることができた。また EoS の解析からは、DE が redshift の変化に従って quintessence-like や phantom-like 等の複数の状態を変化することがわかった。このように一つの起源から DE として複数種類を担うことができるのがこのモデルの利点である。また、未来への極限をとると補正の大小に関わらず EoS は宇宙項の値に漸近し、de-Sitter 宇宙になるという結果が得られた。

今後の展望としては、Barrow entropy の補正項の大きさについての制限を観測から得ることでこの宇宙論モデルの妥当性を検証することが挙げられる。

[1] E.Saridakis, “Modified cosmology through space-time thermodynamics and Barrow horizon entropy” arXiv:2006.01105. (2020)

[2] J. D. Barrow, “The Area of a Rough Black Hole”, arXiv:2004.09444. (2020)

重宇 36 “空間方向”の一般座標変換に対する不変性を破るダークエネルギーの低エネルギー有効場理論

間仁田 侑典 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M2)

現在の宇宙の加速膨張の源はダークエネルギーと呼ばれており、その正体は未だ不明である。ダークエネルギーは負の圧力を持つという点でバリオンや放射といった通常の物質と大きく異なるため、従来の素粒子標準模型からのアプローチは難しい。ダークエネルギーの正体探るのは今世紀の物理学の最重要課題だ。ダークエネルギーの正体はほとんど理解できていないため、多くのモデルを統一的に扱う手法を構築し、観測結果を用いてモデルを峻別することが重要である。文献 [1] で提案されたダークエネルギーの低エネルギー有効理論は、単一スカラー場が加速膨張を駆動するダークエネルギーモデルを統一的に扱う手法である。文献 [1] で提案されたダークエネルギーの低エネルギー有効場理論は”時間方向の”一般座標変換に対する対称性が自発的に破れることを前提としている。本講演では、ダークエネルギーが”空間方向の”一般座標変換に対する不変性を自発的に破る可能性を提示する。

“空間方向”の一般座標変換に対する不変性を破るダークエネルギーの有効場理論を考える理由は 2 つある。1 つ目は、ダークエネルギーが駆動する加速膨張にはクロック場が必要ないためである。一般に “空間方向”の対称性を破る有効場理論にはクロック場が存在しないため、加速膨張を自然に終わらせることができない。この点で、空間方向の対称性を破るインフレーションモデルは不自然である。しかし、後期の加速膨張は終わるとは限らないため、考慮する必要がある。2 つ目の理由は、“空間方向”の対称性を破る有効場理論が持つ内部対称性が重力波の速度を光速に一致させる可能性があることだ。重力波の

観測結果から、重力波の速度は 15 桁の精度で光速と一致することがわかったが、修正重力理論では一般に、高階微分が原因で重力波の速度が光速からずれる。背後で何らかの対称性が働いていると考えるのは自然だ。

[1] G. Gubitosi, F. Piazza and F. Vernizzi, JCAP 02 (2013) 032.

重宇 37 5 次元宇宙と膜宇宙 ブレーンワールドの重力

高島 智昭 (近畿大学 総合理工学研究科理学専攻物理学分野 M1)

ブレーンワールドモデルは我々の 4 次元宇宙が高次元時空の内部または境界の膜であるとする宇宙モデルである。1999 年にランドールとサンドラムによって余剰次元が指数関数的に歪曲している 5 次元反ド・ジッター時空を用いたブレーンワールドモデルが発表された。

膜宇宙モデルは今から 20 年前にランドールとサンドラムの 2 人によって発表されたモデルであるが、決して実験や観測によって否定されたわけではなく、未だ研究は完成していない。余剰次元のコンパクト化に関して、古典的なカルツァ・クライン型モデルとは際立って対照的な膜宇宙モデルは、ブラックホールの構造や宇宙誕生のしくみなど極限領域に関する今後の研究を通して、重力の理解に重要な示唆を与えてくれる可能性がある。本講演では、まず、5 次元方向が歪曲しているときの 5 次元反ド・ジッター時空の計量を示す。次にイスラエルの接続条件と Z2 対称性によって 5 次元曲率半径とブレーンの張力の関係を定める。さらに、ランドール・サンドラム模型についての重力摂動の振る舞いを考え、非相対論的な球体の線形化された重力場について述べる。そして、反対の張力を持つ 2 枚のブレーンがあるときに線形化されたブレーン・ディスク (BD) の重力についても説明して、最後に、5 次元のシュバルツシルト・反ド・ジッター時空中のドメインウォールの運動によるブレーンワールドの宇宙論的解がどのように表されるかも紹介する。

重宇 38 真空崩壊におけるバブル時空の生成と触媒効果による宇宙定数の決定

古賀 一成 (九州大学 理学府物理学専攻 D1)

本研究が提案する宇宙定数問題に対する解決策では、5 次元時空が真空崩壊を起こす崩壊の境界面上に我々の 4 次元時空が存在する状況を考えている。この崩壊する 5 次元時空に静的ブラックホール (BH) とストリングクラウド (SC) が存在する場合に、境界面上の時空に物質と放射を実現し、さらにそこでの 4 次元宇宙定数が正の値となることが明らかにされている [1]。しかし BH や SC の触媒効果が考慮されてはいなかったため、本

研究は触媒効果を考慮することで、最も崩壊率が大きくなる場合に実現される宇宙定数の値を決定することができた [2]。

触媒効果とは、真空崩壊する時空に BH や SC が存在していることにより、真空崩壊の崩壊率が触媒の存在しない時空の崩壊率より大きくなることである [3]。触媒となる BH と SC は 4 次元での物質と放射に対応しているため、物質と放射が現在の観測値を再現するように、BH と SC の値を固定することができる。このように 5 次元の崩壊によって我々の 4 次元の物質と放射を実現する場合に、真空の崩壊率が最も大きくなる崩壊を触媒効果から調べた。その結果、崩壊率が最も大きくなる崩壊で生成されるバブル時空での 4 次元宇宙定数は、宇宙定数問題で我々が直面する量子論からの予想と実際の値との間に存在する 120 桁もの差と一致する値を導くことができた。このバブル時空上での 4 次元宇宙定数の導出過程において、我々の宇宙の物質と放射の値を再現するように触媒の値を固定し、真空の崩壊率を評価することのみで非常に小さな宇宙定数を説明しているため、本研究では真空のエネルギーに関する変数を微調整することなく、宇宙定数問題に対する 1 つの説明を提案することができている。

[1] S. Banerjee, U. Danielsson, G. Dibitetto, S. Giri and M. Schillo, “de Sitter Cosmology on an expanding bubble,” JHEP 1910, 164 (2019)

[2] I. Koga and Y. Ookouchi, “Catalytic Creation of Baby Bubble Universe with Small Positive Cosmological Constant,” JHEP 1910, 281 (2019)

[3] R. Gregory, I. G. Moss and B. Withers, “Black holes as bubble nucleation sites,” JHEP 1403, 081 (2014)

重宇 39 宇宙の真空泡のダイナミクスと不安定性

田中 海 (近畿大学 総合理工学研究科理学専攻 M1)

宇宙初期に関する有力な理論によれば、宇宙は量子ゆらぎから誕生し、インフレーションにより急激に膨張し、そして熱いビッグバン宇宙へつながったと考えられている。インフレーションとその終了からビッグバンへのつながりは一種の真空の相転移と考えられる。また、ビッグバン後の宇宙進化の過程においても宇宙は様々な相転移をしてきたと考えられている。

相転移はしばしば位相欠陥とよばれる不連続な層を生み出す。我々の知る世界にも不連続層は多く存在しており、固相と液相の境界面 (異なる相を繋ぐ境界面) はその一例である。膨張宇宙の相転移に伴って生成され得る位相欠陥には、モノポール、宇宙紐 (コズミック・ストリング)、真空泡 (ドメインウォール) などがあり、もし存在すれば宇宙に大きな影響を与えたと考えられる。

本発表では、膨張宇宙における相転移の結果生成される位相欠陥のうち、真空泡のダイナミクスについて考察する。まず文献 [1] に基づき一般的に成り立つ公式として一般相

対論における接続公式の導出について紹介する。そしてその応用として、文献 [2] に基づき、偽の真空領域として泡の内部にインフレーション宇宙に対応する de Sitter 時空を設定し、それを取り巻くように泡の外部に真の真空領域として Schwarzschild de Sitter 時空を設定したモデルを考える。この時空におけるエネルギー障壁の高さと宇宙の半径の関係をもとに、真空泡の古典的ダイナミクスを系統的に分類し、真空泡を含む時空全体を含む大域構造を図示する。またこの真空泡の古典的ダイナミクスから、宇宙の無からの量子論的な誕生を記述するトンネル効果の可能性について議論したい。

参考文献 [1] S.K.Blau, E.I.Guendeman, A.H.Guth Phys.Rev.D35, 1747 (1987)

[2]A.Aguirre, M.C.Johnson Phys.Rev.D72, 103525 (2005)

重宇 40 マイクロレンズ効果による宇宙ひもパラメータの制限

時 聡志 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M2)

初期宇宙での対称性の破れや超弦理論から、宇宙ひもという一次元のひもが存在する可能性が示唆されている。宇宙ひもの張力を μ としたとき $G\mu$ は宇宙ひもを特徴付ける無次元パラメータで、これは宇宙ひもが生成された時の初期宇宙の情報を含んでいることが知られている。従って、このパラメータの値を制限することは初期宇宙に関する理解に繋がる可能性がある。

ブラックホールなどの天体が光源の前を横切ると、強い重力レンズによって光の強度が増幅されるマイクロレンズ効果が引き起こされる。これと同様に、宇宙ひもはその周囲に円錐状の時空を作り、宇宙ひもの両側の 2 点を結ぶ測地線がちょうど 2 つ存在するため、光や重力波の強度が 2 倍に増幅されるマイクロレンズ効果を引き起こす。このことと、宇宙ひも進化の理論で予言される宇宙ひもの存在密度から計算されるマイクロレンズ効果の期待数は無次元パラメータ $G\mu$ に依存するので、これを観測データと比較することでパラメータに制限を与えることができる。本研究ではまず、M31 のマイクロレンズ効果の観測データを用いてこのパラメータを制限することを試みた。さらに、宇宙ひものマイクロレンズ効果における、光の波動性による干渉効果や、有限の光源サイズによる影響について議論する。

加えて、近年 LIGO と Virgo によって重力波のシグナルが観測されているが、そのシグナルの中からレンジングの痕跡を探す研究が行われている。本発表では、これらの重力波のシグナルを用いた宇宙ひもパラメータの制限の可能性についても議論する。

重宇 41 漸近 AdS 時空における Einstein-Vlasov 系の熱的安定性

浅見 拓紀 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 D1)

近年、負の宇宙項を持つ Einstein 方程式の解である AdS 時空が、非線形な摂動に対する不安定を持つことが示された。この不安定性は、AdS 時空の漸近構造と系の非線形性により時空中に生じた摂動が乱流を引き起こすことに起因しており、この性質から短波長高周波数モードが卓越するために最終状態を具体的に解いて求めることは困難である。そこで本講演では、AdS 時空において高周波数モードが卓越した状態を相対論的自己重力多体系 (Einstein-Vlasov 系) によりモデル化することを考える。Einstein-Vlasov 系とは粒子の分布関数が Vlasov 方程式を満たし、かつその平均的密度と時空曲率が Einstein 方程式を満たす系である。ここでは特に、その球対称解の熱力学的安定性に注目する。

自己重力多体系については Newton 重力の範疇では古くから盛んに研究が行われており、重力熱的不安定性と呼ばれる不安定性を持つことが示唆されている。本講演ではこの重力熱的不安定性の観点から Einstein-Vlasov 系の熱的な安定性について議論する。

重宇 42 (1+1) 次元 Infinite Derivative Gravity における厳密解と時空特異点の回避について

櫻井 優介 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

ブラックホールの存在は 2015 年に、重力波の直接的な観測によって確認された。その性質については一般相対論を用いてよく説明できる。しかし全く問題がないわけではなく、その内の一つは「ブラックホール内部の特異点問題」として知られている。

一般相対論では特異点の発生は不可避だが、重力の量子効果まで考えると、このような点は現実には存在しないだろうと考えられている。そのため様々な面から特異点の発生を回避する理論の研究が進められている。主な指針としては、一般相対論に量子力学を取り入れ、その量子論的效果によって特異点は現れないとする量子重力理論に基づく考え方や、一般相対論に修正を加えて特異点を回避しようとする修正重力理論の考え方などがある。

そのような修正重力理論の一つに Biswas らによって提唱された「IDG (Infinite Derivative Gravity)」がある。IDG は一般相対論で通常用いられるアインシュタイン-ヒルベルト作用に無限階までの微分項を含んだ曲率の二次の項を加えることで、特異点の回避を目指したものである。IDG を用いた様々なタイプの解が弱場近似の範囲で得られており、実際に重力ポテンシャルや曲率が原点で発散しないことが確かめられている

[1,2]。しかし、IDG において強重力場を記述する厳密な解は未だに見つかっていない。

そこで本発表ではまず IDG の特徴と先行研究について紹介する。その後本研究で行った、(3+1) 次元に比べて自由度が少なく、方程式が単純化されると期待できる、(1+1) 次元における IDG の厳密解構築の試みについて議論する。本研究では物質はどこにも存在しない ($T_{\mu\nu}=0$) として厳密解を探した。今後は、本研究で用いた計算のメソッドや結果を生かし物質が存在する場合について厳密解を求め、IDG における厳密なブラックホール解の構築に取り組み、特異点の発生が回避されているかを調べていこうと考えている。

[1] T. Biswas et al., arXiv:1110.5249

[2] B. Luca et al., arXiv:1804.09624

重宇 43 Janis-Newman Algorithm とその拡張について

太田 溪介 (東京学芸大学 教育学研究科物理学教室 M2)

アインシュタイン方程式は非線形微分方程式であり、一般的に解くことは事実上不可能である。そこで、解にあらかじめ対称性を課すことによって方程式を単純化することで、いくつかのケースに対して解が得られる。しかし、この場合でも厳密解を得ることは依然として難しい問題である。例えば、現実的なブラックホールとして重要な Kerr 解は、一般相対性理論の登場から解が得られるまでにおよそ 50 年もの月日を要している。

しかし、より簡単に Kerr 解を“導出”できることが知られている。Janis と Newman は座標の複素化と複素座標変換によって Schwarzschild 解から Kerr 解を“導出”できることを示した [1]。この一連の処方を Janis-Newman Algorithm (JNA) と呼ぶ。また、JNA の別の定式化を Giampieri が提案している [2]。この定式化は、より複雑な解について Algorithm を適用するために有用である。JNA によってシードメトリックから生成した解は、一般に運動方程式を満たしているとは限らないが、一から解くよりも簡単に新しい解を生成できるため、より複雑な構成の解を得ることができると期待される。

JNA の拡張はこれまでに広く議論されてきた。例えば、JNA を任意次元の時空に対しても適用できるようにする定式化が Erbin らによって提案された [3]。これによって、複数の角運動量を持つ d 次元の Myers-Perry 解が“導出”されることが確認された。この他、様々なチャージを持つ場合についても拡張に成功している。しかし、宇宙定数を含む場合については JNA の適用について議論があるなど、はっきりしていないことも多い。

このように、JNA は簡単に解を生成できるため非常に有用である反面、議論の曖昧さから様々な主張が乱立している。そこで、本発表では JNA とその拡張について今まで報告されてきた成果を総括する。最終的には JNA では得られなかった解を“導出”

することを旨して、さらなる拡張の可能性について議論する。

1. E. T. Newman and A. I. Janis. *Journal of Mathematical Physics* 6.6 (1965), pp. 915-917.
2. G. Giampieri. *Gravity Research Foundation* (1990).
3. H. Erbin and H. Lucien. *Classical and Quantum Gravity*, 32.16 (2015): 165004.

重宇 44 アインシュタイン計量からインスタントンを作る

原 健太郎 (東京理科大学 理学研究科科学教育専攻 PD)

我々は"Gravitational instantons from gauge theory," H. S. Yang and M. Salizzoni, *Phys. Rev. Lett.* (2006) 201602, [hep-th/0512215] の一般化として、アインシュタイン計量がユークリッド空間上の反自己双対 2-形式から対称 2-形式への写像によって局所的に構築することができることを示した。またこの逆としてアインシュタイン計量に少しの条件を課すことで反自己双対 2-形式を局所的に構築することができることを示した。この物理学的意味についても議論する。