

2016 年度 第 46 回
天文・天体物理若手夏の学校

講演予稿集
重力・宇宙論分科会

重力・宇宙論分科会

重力宇宙論の新世紀

日時	7月26日 15:15 - 16:15(招待講演：白水 徹也氏), 17:45 - 18:45, 20:15 - 21:15 7月27日 9:00 - 10:00(招待講演：向山 信治氏), 10:15 - 11:15, 14:45 - 15:45, 16:00 - 17:00(分科会別ポスター), 18:30 - 19:30 7月28日 10:15 - 11:15(分科会別ポスター), 13:30 - 14:30, 14:45 - 15:45, 16:00 - 17:00
招待講師	白水 徹也氏 (名古屋大学)「いまさら一般相対論」 向山 信治氏 (京都大学)「Massive gravity and cosmology」
座長	吉浦伸太郎 (熊本大学 D1)、秋田悠児 (立教大学 D1)、新居舜 (名古屋大学 M2)、 田原弘章 (東京大学 M2)、山本貴宏 (京都大学 M2)
概要	<p>これまでの天文学の飛躍的な進歩により、我々は標準宇宙モデルを確立するに至った。標準宇宙モデルは、宇宙がインフレーションから始まり、ビッグバン元素合成、暗黒時代、初代天体形成、銀河形成、宇宙再電離期と進み、現在の階層性豊かな宇宙へと発展していく様子を整合的に説明するだけでなく、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等によって支持される最も有望なシナリオであるといえる。しかし、インフレーションの直接的証拠や、宇宙の加速膨張の起源、暗黒物質の存在、そして初期の天体形成から宇宙再電離に至る過程など、標準モデルでは未解明の課題も多く残されている。今後 CMB 偏光観測、すばる望遠鏡の HSC を用いた SuMIRe プロジェクトによる分光観測、SKA に代表される 21cm 線電波観測などの次世代観測に基づいたボトムアップ的研究がますます期待されている。また基礎理論に基づいたトップダウン的な研究により、インフレーションモデルや宇宙の非ガウス性等に関する新しい理論モデルの開発、そして大規模シミュレーションを用いた構造形成の研究も同時になされている。その一方で、観測された宇宙の姿を通して基礎理論に迫る研究もなされている。その1つに重力理論の検証がある。標準宇宙モデルは一般相対性理論に基づいて記述されるが、暗黒エネルギーや暗黒物質を必要とする難点がある。その他にも、重力の量子補正、特異点の存在、ブラックホール情報喪失問題など、一般相対性理論には他の理論との整合性を欠く面がある。こうした点を解決すべく構築された修正重力理論が多数提唱され、このような重力理論を観測的に制限する試みは今まさに発展途上にある。こうした中、2016年2月、アメリカの重力波検出器 LIGO により重力波の直接検出が報告されたことは記憶に新しい。これにより重力波を観測することが重力理論の検証に有効であると実証された。現在、KAGRA や advanced VIRGO など、新たな重力波検出器が稼働に向けて動いている。重力波検出が日常的に報告される日も近いだろう。今後、宇宙論や重力理論をより高い精度で検証することができるかと期待は高まっている。重力波天文学の時代がいよいよ幕を開けたのである。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、最新の研究内容とその進展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広く募り、研究内容を発表・議論する場を設ける。重力宇宙理論の新世紀の幕開けである2016年、この研究会が各々の研究の発展のきっかけとなる事を期待している。</p>

白水 徹也 氏 (名古屋大学)

7月26日 15:15 - 16:15 B会場

「いまさら一般相対論」

宇宙の加速膨張の発見を契機にダークエネルギーや修正重力理論の研究が活発に行われている。一方でそれらを積極的にサポートをする観測的事実もない。今年に入ってブラックホール連星合体からの重力波の直接検出も報告されこちらも一般相対論からの予言とよい一致を見せ、いよいよ重力波天文学が本格的に開始されようとしている。そして、adS/CFT 対応を始めとし、一般相対論の””応用””は大きな広がりを見せている。本講演では様々な局面において応用可能な一般相対論の幾何 (解析) 学的側面について掘り下げたいと思う。具体的には高次元時空、ダークエネルギーモデルへの制限などの例を紹介しよう。また、最近の (重要な) 進展並びに課題についても触れたいと思う。

向山 信治 氏 (京都大学)

7月27日 9:00 - 10:00 B会場

「Massive gravity and cosmology」

重力子がゼロでない質量を持つ可能性、すなわち massive gravity についての研究は、1939年に Fierz と Pauli が線形理論を提唱して以来、長い歴史を持つ。しかし、1972年に Boulware と Deser が非線形レベルでの不安定性を指摘してからは、長い間、重力子は質量を持たないだろうと考えられてきた。約40年後の2010年になってやっと、この不安定性の問題を解決する理論が、de Rham と Gabadadze と Tolley によって提唱された。本講演では、1939年から現在に至るまでの massive gravity 理論の進展と、その宇宙論への応用について解説する。

1. 向山信治、「有質量グラビトンモデルと宇宙論」 日本物理学会誌、2016年7月号掲載予定

重宇 a1 赤方偏移空間歪みの解析とハローモデル

小林 祐祐 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 M1)

銀河が重力にしたがって固有運動をすることで生ずる赤方偏移空間歪み (redshift space distortion, RSD) の解析は、重力の効果を観測的に知る手段の一つであり、修正重力理論やダークエネルギーの性質に対する制限を観測的に得る研究に利用されている。

この赤方偏移空間歪みを BOSS などの銀河サーベイで得られた観測データの解析に用いるためには、宇宙の物質分布のモデルから、物質の密度揺らぎのパワースペクトルを得る必要がある。ところが、実際の銀河サーベイで観測できるのは銀河の分布であり、ダークマターハローの分布を直接得ることはできない。銀河分布とダークマター分布の間にはバイアスが存在し、両者のパワースペクトルは一致しない。そこで適切なダークマターハローのモデルを構成し [1]、そこから銀河とダークマターのパワースペクトル及び両者の相関を導出する方法が採られる。

Press-Schechter halo model をもとに改良を加えたモデルを用いて、ダークマター及び銀河の非線型パワースペクトルを計算、両者の相互相関パワースペクトルを求めると、この結果は Λ CDM モデルでの N 体シミュレーションの結果とよく合致し、バイアスがスケール依存であることを示唆している [2]。また、同様のハローモデルを用いたバイアスのスケール依存性の研究から、線型バイアスが大スケール ($k < 0.1h\text{Mpc}^{-1}$) においてのみよい近似を与え、スケールが小さくなるにしたがい銀河のビリアル運動によってパワースペクトルが小さく抑えられることが示されている [3]。

ハローモデルは、赤方偏移空間歪みの解析において銀河観測と宇宙の物質分布の理論をつなぐ上で重要な役割を有している。本発表では、このハローモデルの理論とそれが赤方偏移空間歪みの解析にもたらす効果について、これまでに得られた研究成果を紹介する。

1. M. White Mon. Not. R. Astron. Soc. 321, 1-3 (2001)
2. U. Seljak Mon. Not. R. Astron. Soc. 318, 203-213 (2000)
3. U. Seljak Mon. Not. R. Astron. Soc. 325, 1359-1364 (2001)

重宇 a2 弱重力レンズ効果による観測量-銀河団質量関係式の新しい較正手法の開発

村田 龍馬 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 M2)

銀河団とは、主にダークマターから構成される質量 $10^{14}M_{\odot}/h$ 程度の宇宙最大の自己重力束縛系である。シミュレーションから予言される質量と赤方偏移の関数である銀河団の質量関数とクラスタリングの観測から、宇宙論パラメータの制限や重力理論の検証ができる。例えば、銀河団の形成に影響する宇宙膨張速度を決めるダークエネルギーの状態方程式 w_{DE} (宇宙項の場合 -1) や宇宙の構造を平坦化し銀河団の形成を抑制するニュートリノの質量和 Σm_{ν} を観測的に調べることができる [1, 2]。

上を実行するには、実際の観測量 (銀河団のメンバー銀河数に対応する richness や、宇宙マイクロ波背景放射のスニャーエフ・ゼルドヴィッチ効果の度合い、X 線輝度の大きさなど) と銀河団質量の関係式を精密に得る必要がある。その観測手法として、銀河団の重力場による背景銀河像への弱重力レンズ効果が強力である。銀河団-銀河 (cluster-galaxy) レンズ解析によって、高いシグナルノイズ比で弱重力レンズ効果の信号を

得ることができる。現在進行中のすばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam (HSC) により、赤方偏移 $z \simeq 1.4$ までに渡り、銀河団周辺の質量分布の赤方偏移進化を探ることが可能になる。

本研究では、従来の弱重力レンズ解析方法に存在する問題点を克服する、新しい大規模 N 体シミュレーションを使った観測量-銀河団質量関係式の新しい較正手法を開発している。実際に、現在公開されている中で最も広域 (全天の 25%) のサーベイであるスローン・デジタル・スカイサーベイ (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) から構築された、均一 (volume limited) かつ銀河団のメンバー銀河数に対応する richness が推定されている銀河団カタログ [3] に適用し、検証結果を報告する。

1. M. Oguri and M. Takada, *Phys.Rev.D* 83, 023008 (2011)
2. K. Ichiki and M. Takada, *Phys.Rev.D* 85, 063521 (2012)
3. E. S. Rykoff *et al.*, *Astrophys.J.* 785, 2 (2014)

重宇 a3 CMB 観測を用いたスカラーテンソル理論への制限

大場 淳平 (名古屋大学 C 研 D1)

超弦理論が想定する高次元重力理論からは、一般相対性理論を極限に持つような様々な修正重力理論が示唆されており、観測からこれらの理論モデルを制限することは重力理論の解明のために非常に重要である。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で記述し、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 衛星による宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度揺らぎ、偏光、レンジング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は、観測される重力定数が時間発展するという特徴を持っているので、現在の重力定数 G_0 と CMB が放射された時代の重力定数 G_{rec} とのずれについてもモデルパラメータへの制限と同様にして制限を与えた。

結果として、現在における一般相対性理論とのずれを表すモデルパラメータ α_0^2 に対して $\alpha_0^2 < 2.5 \times 10^{-4-4.5\beta^2}$ (95.45% C.L.)、および $\alpha_0^2 < 6.3 \times 10^{-4-4.5\beta^2}$ (99.99% C.L.) という制限が $0 < \beta < 0.4$ の範囲で得られた。重力定数については、 $G_{\text{rec}}/G_0 < 1.0056$ (95.45% C.L.)、および $G_{\text{rec}}/G_0 < 1.0115$ (99.99% C.L.) という制限が得られた。本発表では加えて、制限に用いたマルコフ連鎖モンテカルロ法におけるパラメータの選び方が結果に与える影響についても議論する。

1. R. Nagata, T. Chiba and N. Sugiyama, *Phys. Rev. D* 66, 103510 (2002)

重宇 a4 231cm で見る宇宙

田中 俊行 (名古屋大学 C 研 M1)

今日、宇宙論で標準とされている Λ CDM モデルによると、初代天体 (初代星、初代銀河、初代クェーサー) が形成され、宇宙再電離を経て現在の複雑な構造を持つ宇宙へ発展してきた。その過程で初代天体は構造形成や熱史に大きな影響を与えるが、その形成や性質は未だ謎に包まれている。初代天体周囲に存在する中性水素は、超微細構造に由来する

21-cm 線を放射する。従って、21-cm 線は初代天体周囲の構造を探る手法として有効である。Square Kilometre Array (SKA) に代表される次世代の電波干渉計によって、高赤方偏移からの 21-cm 線が観測できる時代が到来するため、初代天体周囲の 21-cm 線シグナルの分布を理解することは喫緊の課題である。

本講演では、赤方偏移が 10 に存在する初代天体周囲の 21-cm 線シグナルの分布を調査した論文 [1] のレビューをする。ここで重要になる物理過程には Ly α 光子による Wouthuysen-Field effect (WF 効果) が挙げられる。WF 効果とは中性水素のスピンの温度とガス温度をカップルさせるプロセスで、天体周囲の 21-cm 線シグナルの分布に影響を与える。しかし、先行研究ではこの Ly α 光子に対して簡単なモデルを用いるか、または完全に無視して計算が行われてきた。一方で Ly α 光子を含む輻射輸送シミュレーションを用いた論文 [1] の結果によると、初代星と初代クェーサーの周囲にあるガスは電離された高温の状態から中性の冷たい状態へなめらかに空間遷移し、初代銀河の周囲ではガスの状態は空間的に鋭い遷移を示す。なぜなら初代星と初代クェーサーはエネルギーの高い光子を多く放射するが、初代銀河は放射する高エネルギー光子の割合が少なく WF 効果が強いことに起因する。こうした空間分布の解析から初代星と初代クェーサーは SKA で観測できることが示された。一方で、小さいシグナル分布を持つ初代星の観測は困難であるという結果となったが、初代星の観測可能性については議論の余地がある。本講演ではこの改善点を指摘し、今後すべき研究の提案をする。

1. H. Yajima and L. Yuexing MNRAS 445, 3674-3684 (2014)

.....

重宇 a5 宇宙論的 MHD シミュレーションで探る構造形成への宇宙磁場の影響

箕田 鉄兵 (名古屋大学 C 研 M1)

宇宙の構造には須く磁場が付随している。その強さは銀河内ではおよそ $10\mu G$ 程度、銀河団領域ではおよそ $1\mu G$ 程度と考えられている。これらの磁場の強度はファラデー回転やシンクロトロン放射などの観測によって見積もられている。中でも、銀河間領域・銀河団・大規模構造などの宇宙論的スケールに付随する磁場は「宇宙磁場」と呼ばれ、上記の観測などから存在が示唆されているが、その構造や起源は未だに謎に包まれている。本発表では、宇宙磁場が宇宙論的な観測量に与える効果を見積もった、文献 [1] をレビューする。文献 [1] では宇宙論的 MHD シミュレーションを行い、星形成率、星質量関数、星ハロー質量関係、平均磁場強度の時間発展、総銀河数について宇宙磁場の強度による影響を求めている。具体的には銀河団を超えるスケール (~数 Mpc) の宇宙磁場の大きさが $1nG$ を超えると、すべての赤方偏移において上記の物理量が観測による制限から著しくずれることを明らかにしている。本発表では宇宙磁場と宇宙論的観測量との関係に着目して、宇宙磁場の強度や構造が観測量に影響する過程を詳しく議論する。

1. F. Marinacci and M. Vogelsberger, MNRAS, 456, 69 (2016)

.....

重宇 a6 銀河-ガス相互相関で探る銀河周辺ガス雲

野沢 朋広 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 M1)

銀河周辺にはガス雲が存在する。ガス雲の分布や物理状態を知ること、大規模構造形成におけるダークマターとバリオンの分布の解明に欠かせない。また、ガス雲と銀河の関係からバリオンの循環、つまり中性ガス、星形成、超新星残骸の重元素ガスの分布を包括的に理解することができる。このようにガス雲を理解することは宇宙論的意義が大きい。

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

この研究では、候補銀河のカタログが重要となる。[1][2] では、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) のデータを用いて $z \sim 0.5$ の銀河と MgII 吸収線系の相関を計算し、冷たいガス ($T \sim 10^4 K$) の分布や性質を議論している。しかし、SDSS の銀河サンプルは浅すぎるため、 $z \sim 0.5$ のような赤方偏移が小さい領域の議論しかできない。Lyman- α 、SiIV、CIV などのクェーサーの吸収線系は赤方偏移が大きいいため、これらの吸収線系と銀河の相互相関を調べるには、広視野に渡り $z > 1$ の銀河を大量に含むサーベイが必要であり、SDSS の銀河サンプルは十分ではない。そこで、我々はすばる Hyper Suprime-Cam (HSC) による深い銀河の撮像データを用いてガス雲と銀河の相関関係を調べる。そうすることで、SDSS のデータだけでは成し得なかった赤方偏移が大きい領域や異なるガス雲の分布の様子の議論が可能となる。これが本研究の新規性である。

本講演では、銀河-ガス相関関数を用いてガス雲の分布などに対して観測的制限を加えられることを、まず SDSS のデータを使って示し、その後 HSC データを用いた場合どのような結果が期待されるか考察する。

1. GUANGTUN ZHU, BRICE MENARD, et al., arXiv1309.7660v1[astro-ph.CO] 29 Sep 2013
2. TING-WEN LAN, BRICE MENARD, & GUANGTUN ZHU, arXiv1404.5301v2[astro-ph.GA] 10 Oct 2014

.....

重宇 a7 数値シミュレーションによるポイド形状の進化の解析

箕田 睦美 (名古屋大学 C 研 M1)

現在の宇宙論では、宇宙の加速膨張を説明するために数多くの理論が提案されている。これらを制限するために、これまで銀河など高密度領域を用いたデータ解析が精力的に進められてきたものの、未だに宇宙論パラメータの自由度は大きい。宇宙モデルをより制限するためには、観測精度の向上に加え、これまで用いられてきたデータとは独立な、新たな観測情報が必要である。そのような観測情報源として、ポイドと呼ばれる構造が注目を集めつつある。ポイドとは宇宙の大規模構造における低密度領域であり、近年の大規模な銀河観測によって統計的に十分な数のポイドが観測されるようになった [1]。また、ポイドは一般に高密度領域よりも大きなスケールを持ち、かつ極端に密度が低いいため、我々のよく知る物理とは異なった物理が効いている可能性もある。

このように、ポイドは観測情報源として格好の候補であるが、あまり議論が進んでいない。この理由の一つとしては、ポイドの大きさや形状などの厳密な定義が難しく、定量的な議論が難しいことがあげられる。

実際、ボイドの定義にダークマター粒子を用いるか、ダークマターハローを用いるかで統計的な性質は異なる。もしボイドの持つ物理量を的確に取り出す手法が確立できれば、理論の制限に対し大きな貢献が期待できる。

先行研究 Nadathur 2016[2] では、観測データ SDSS BOSS DR11 (赤方偏移 0.15~0.7) からボイドカタログを作成し、有効半径 $8\sim 60h^{-1}\text{Mpc}$ のボイドのサイズ分布について、 ΛCDM モデルを仮定したシミュレーションからのずれが 6% 以内に収まることを報告している。この論文では他に、ボイドの形状を決定する際の系統誤差に関しても言及しているが、形状の理論との比較は特に行われていない。そこで本発表では先行研究の検証に加え、改めてボイド形状の時間発展を数値シミュレーションによって解析し、その特徴についても議論する。

1. SDSS-III Collaboration (Shadab Alam et al.) (2015) arXiv:1501.00963v3 [astro-ph.IM]
2. S. Nadathur (2016) arXiv:1602.04752v1 [astro-ph.CO]

重宇 a8 Thermodynamics of charged Black Holes in Einstein-Horndeski-Maxwell Theory

宮田 大輝 (立教大学 M1)

ブラックホール (BH) は一般相対性理論 (GR) から予言される最も興味深い研究対象の 1 つである。BH は質量、角運動量、電荷という少数のパラメータで記述でき (no-hair theorem)、さらに熱力学的な性質を持つということが知られている。

その一方で宇宙の加速膨張の発見により GR を修正する研究 (修正重力理論) も注目されている。修正重力理論としてスカラー自由度を加えて重力理論を拡張する研究も行われている。スカラー場を含む理論でスカラー・テンソル理論がある。スカラー・テンソル理論を用いて BH を考えると scalar-hair という新しい自由度が現れることが明らかになった。このように BH をスカラー・テンソル理論を用いて考えると GR では現れないスカラー場の影響が現れる。

本講演では論文 [1] をレビューする。Horndeski 理論のサブクラスを用いて電荷を持つ静的 BH を考え、その熱力学的性質を議論する。Horndeski 理論とはスカラー場を 1 つ含み、運動方程式が 2 階の微分方程式になる一般的なスカラー・テンソル理論である。ラグランジアンは Horndeski 理論に Maxwell 場が最小結合し、スカラー場のシフト変換に対して不変である。このような作用で与えられる BH の熱力学的性質を Wald formula[2] を用いて解析することで BH 熱力学第 1 法則にスカラー場に関する項 (scalar-charge) が入ることが明らかになった。

Horndeski 理論のサブクラスを用いて BH 熱力学を解析した結果、BH 熱力学第 1 法則が修正されスカラー場の影響が現れることがわかった。今後は Horndeski 理論のより広いクラスについての解析を行い、スカラー場の影響がどのように現れるか研究を行う。

1. Xing-Hui Feng, Hai-Shan Liu, H. Lu, C.N. Pope Phys.Rev.D 93,044030 (2016) [arXiv:1512.02659[hep-th]]
2. R.M Wald Phys.Rev. D48 (1993) 3427-3431[arXiv:gr-qc/9307038]

重宇 a9 $F(R)$ 重力理論における暗黒物質候補の研究

桂川 大志 (名古屋大学 QG 研 D3)

$F(R)$ 重力理論とは、作用をリッチスカラー R の関数 $F(R)$ に拡張した修正重力理論である。この理論は、ワイル変換と呼ばれる計量の変換により、一般相対性理論にスカラー場が結合したものへと書き換えることができ、質量をもったスカラー場が自然に導入される。宇宙のバルクのような大スケールにおいて、このスカラー場の質量が十分小さければ、宇宙の加速膨張を説明できることが広く知られている。一方、カメレオン機構と呼ばれる機構により、密度の大きい物体の周辺においては、スカラー場の質量が大きくなり、小スケールでの重力理論に対する制限を回避することができる。ここで、このスカラー場の性質に着目する。素粒子物理における標準模型を修正することなく、重力理論の変更によりスカラー場が導入され、さらに、標準模型粒子との相互作用は、プランク質量によって抑制されるため小さくなる。そして、銀河系周辺では、カメレオン機構によりスカラー場の質量は重くなる。これらの性質は、この新たなスカラー場が暗黒物質になりうるということを示唆している。本発表では、このスカラー場が暗黒物質の候補となる可能性を検討する。また、暗黒エネルギーを同時に解決できるかどうかについても評価する。

1. S. Nojiri and S. D. Odintsov, arXiv:0801.4843
2. S. Choudhury, M. Sen and S. Sadhukhan, arXiv:1512.08176

重宇 a10 修正重力理論における相対論的天体

山崎 雅史 (名古屋大学 QG 研 M2)

本講演では修正重力理論の一種である「Masive Gravity 理論」を天体物理に適用した場合に、相対論的天体の構造がどのように変化するか説明する。

「Massive Gravity 理論」とは有質量重力子のダイナミクスを表す理論であり、修正重力理論の一種として用いられている。「Massive Gravity 理論」では重力子質量を宇宙定数程度にした場合に、現在の宇宙の加速膨張を説明できることが知られており、暗黒エネルギーを説明する理論として研究が進められている。一方で「Massive Gravity 理論」の強重力場・短距離スケールにおける性質はあまり研究されておらず、天体物理などの現象に与える影響を調べる必要がある。

特にこの重力理論の変化によって、重い相対論的天体の存在が説明できる可能性が存在する。現在見つかっている太陽質量の 2 倍ほどの中性子星などは、一般相対性理論と通常のハドロン物理では説明ができないという問題を抱えている。天体の密度分布などは、自重と内部物質の圧力の釣り合いである静水圧平衡により決定される。このため修正重力理論を用いた場合、自重の構造が変わることで天体の質量上限が変化することが存在する。

本講演では「Massive Gravity 理論」において最小模型と呼ばれる場合に行った解析と、数値計算結果を説明する。この結果より質量上限が減少することで観測結果と矛盾すること示し、その原因について説明する。また現在の研究において「Bigravity 理論」で同様の解析を進めているため、その経過についても報告する。

1. T. Katuragawa, S. Nojiri, S. D. Odintsov, M. Yamazaki, arXiv:1512.00660 [gr-qc]

2. A. V. Astashenok, S. Capozziello, S. D. Odintsov, JCAP 1312 (2013) 040

重宇 a11 修正重力理論による時空特異点回避の可能性

小林 曜 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

一般相対論は多くの実験的証拠により裏付けられているが, Hawking, Penrose らの特異点定理により, 一般相対論では普遍的に特異点が生じることが示された [1]. 特異点とは, 時間的およびヌル測地線が不完備になる点であり, ブラックホール内部や宇宙初期に現れるとされている. 特異点では時空の構造が破綻するため物理量を定義できず, 予測可能性が失われる. よって, 特異点は一般相対論の限界を示しており, 特異点のない重力理論に向けて様々なアプローチがなされている.

このようなアプローチの一つに, Limiting Curvature Hypothesis (LCH) がある [2, 3]. 一般相対論では多くの特異点で曲率が発散するが, Planck 長以下の長さに対応する極端に大きな曲率は量子論を考慮すると現実には存在せず, そのような領域では量子重力が必要と考えられる. Brandenberger, Mukhanov, Sornborger らはこの考えに基づき, 量子効果により曲率が $|R| \leq l_{\text{Pl}}^2, |R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}| \leq l_{\text{Pl}}^4$ のような制限を越えないと仮定して特異点を回避する機構を提唱した. 彼らは制限される不変量として $[I = R - \sqrt{3(4R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} - R^2)}]$ を採用し, 宇宙初期特異点を回避した [2, 3]. しかし, ブラックホールのような真空解では Weyl テンソルが自明でない一方, 特異点以外で Ricci テンソルが 0 になるため常に $I = 0$ となり, このモデルでは曲率が制限されない, 大きな曲率を制限する量子効果を適切に取りこんだ修正重力理論は宇宙初期だけでなくブラックホール内部などあらゆる状況で特異点を回避すべきである. そこで, 本研究では Riemann テンソルの全ての成分を含む不変量である Gauss-Bonnet 曲率二乗項 $[R_{\text{GB}}^2 = R_{\alpha\beta\mu\nu}R^{\alpha\beta\mu\nu} - 4R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} + R^2]$ を制限し, 宇宙初期特異点だけでなくブラックホール特異点に応用できる手法を探った. その結果, 宇宙初期特異点に関しては, 空間の曲率が正の場合宇宙が収縮から膨張に転じて特異点を回避するバウンス解を得た. また, 球対称静的な時空についても議論する.

1. S. W. Hawking and G. F. R. Ellis, The large scale structure of space-time, Cambridge University Press (1973)
2. V. Mukhanov and R. Brandenberger, Phys. Rev. Lett. 68, 1969 (1992)
3. R. Brandenberger, V. Mukhanov and A. Sornborger, Phys. Rev. D48, 1629 (1993)

重宇 a12 Gravitational origin of Dark Matter

赤間 進吾 (立教大学 M1)

一般相対論は太陽系スケールでの観測と高い精度で一致しているが, 異なるスケールでは未だ説明できないものもある. その中の一つであるダークマターを説明するために, 素粒子論的なアプローチや重力理論を修正するというアプローチがある. 本講演は後者に基づき, 修正重力理論を用いてダークマターの起源を説明できないか探る.

本講演では, bigravity という修正重力理論に着目する. これは mass-

less graviton と massive graviton を二つの計量を用いて記述する. graviton に質量を持たせるという拡張 [1] は古くから研究されていたものの, ghost が出るという問題があった. しかし近年この問題を回避する bigravity モデル [2] が提唱された. 以上を踏まえ本講演では, ghost free bigravity における massive graviton がダークマターの候補となり得るかを検証する.

本講演は論文 [3] をレビューし, 最大対称時空を background とした時, massive graviton が重く安定で, 物質との相互作用が重力相互作用のみというダークマターの性質を満たすことを述べる. このことからダークマターの候補となり得ることがわかる. またこれらの性質を満たしていれば, このモデルは太陽系スケールでの一般相対論の観測と矛盾しない予言を与えることを述べる.

このモデルでは少なくとも平坦な時空では, massive graviton と standard matter は同じ重力相互作用をする, ということがわかっている. そこで曲がった時空でこの massive graviton がどう振る舞うのかを調べることは重要である. もし平坦時空と曲がった時空で異なるなら, 曲がった時空での massive graviton の振る舞いを調べ, 観測的に検証可能かどうか議論していく必要がある.

1. M. Fierz and W. Pauli, Proc. Roy. Soc. Lond. A173, 211 (1939)
2. S. F. Hassan and R. A. Rosen, JHEP 02, 126 (2012), arXiv:1109.3515 [hep-th]
3. E. Babichev, L. Marzola, M. Raidal, A. Schmidt-May, F. Urban, H. Veermae and M. von Strauss, arXiv:1604.08564 [hep-ph]

重宇 a13 インフレーション機構によるブラックホールの情報喪失問題の解決

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 D1)

2012 年, Almheiri, Marolf, Polchinski, Sully (AMSP) らは, ブラックホール (BH) の蒸発過程が, 量子論と無矛盾に完結するためには, 一般相対性理論の基本原理解である「等価原理」が破れていなければならないことを指摘した [1]. これは, BH の蒸発過程が「量子繚れ」の基本的な性質であるモノガミー (一つの系が, 2つ以上の系と強く量子繚れを起こすことはできないという性質) に抵触しているように見えることによる. ある物質 (系 A) が重力崩壊によって BH に潰れたとしよう. すると, BH は Hawking 放射によって蒸発する. Hawking 放射とは, 事象の地平面付近で生じる粒子の対生成であり, この時に対生成した粒子は量子繚れを伴う. BH の蒸発が完了し, 放射だけが残った状況 (系 B) では, (量子論が正しいとすれば) 放射全体が系 A の情報を含んでいなければならない. 量子繚れはエントロピー (物質の量子的な情報) を伴うため, これは, Hawking 放射全体で強く量子繚れを起こしていることを要求することになる. つまり, Hawking 放射の粒子は, 対生成した相手の粒子, および既に放射された多粒子系の両方と繚れている必要がある. これが AMPS が指摘したパラドックスである. AMPS は, 地平面上で対生成した粒子の量子繚れを断ち切るような高エネルギーの壁 (ファイアウォール:FW) が必要であると結論した. 等価原理が正しければ, BH に向かって自由落下する観測者は, 自らが事象の地平面を横断した瞬間にも, その事実を認識しない. つまり地平面上で, 特別な境界である FW を導入するには, 等価原理の大きな破れを認めなければならない. FW の導入には賛否両論ある [2] のが現状であり, 混乱の中にある. 本研究

では、インフレーション中でも生じる、「量子揺らぎの古典化」[3] というプロセスによって、地平面を跨いで対生成した粒子同士の相関が消滅することを示した。この成果は AMPS 論文で示されたパラドックスを、FW の存在を仮定することなく、既知の物理で自然に解決できることを意味する。2012 年、Almheiri, Marolf, Polchinski, Sully (AMSP) らは、ブラックホール (BH) の蒸発過程が、量子論と無矛盾に完結するためには、一般相対性理論の基本原則である「等価原理」が破れていなければならないことを指摘した [1]。これは、BH の蒸発過程が「量子纏れ」の基本的な性質であるモノガミー (一つの系が、2 つ以上の系と強く量子纏れを起こすことはできないという性質) に抵触しているように見えることによる。ある物質 (系 A) が重力崩壊によって BH に潰れたとしよう。すると、BH は Hawking 放射によって蒸発する。Hawking 放射とは、事象の地平面付近で生じる粒子の対生成であり、この時に対生成した粒子は量子纏れを伴う。BH の蒸発が完了し、放射だけが残った状況 (系 B) では、(量子論が正しいとすれば) 放射全体が系 A の情報を含んでいなければならない。量子纏れはエントロピー (物質の量子的な情報) を伴うため、これは、Hawking 放射全体で強く量子纏れを起こしていることを要求することになる。つまり、Hawking 放射の粒子は、対生成した相手の粒子、および既に放射された多粒子系の両方と纏れている必要がある。これが AMPS が指摘したパラドックスである。AMPS は、地平面上で対生成した粒子の量子纏れを断ち切るような高エネルギーの壁 (ファイアウォール:FW) が必要であると結論した。等価原理が正しければ、BH に向かって自由落下する観測者は、自らが事象の地平面を横断した瞬間にも、その事実を認識しない。つまり地平面上で、特別な境界である FW を導入するには、等価原理の大きな破れを認めなければならない。FW の導入には賛否両論ある [2] のが現状であり、混乱の中にある。本研究では、インフレーション中でも生じる、「量子揺らぎの古典化」[3] というプロセスによって、地平面を跨いで対生成した粒子同士の相関が消滅することを示した。この成果は AMPS 論文で示されたパラドックスを、FW の存在を仮定することなく、既知の物理で自然に解決できることを意味する。

1. A. Almheiri, D. Marolf, J. Polchinski and J. Sully, JHEP f 1302, 062 (2013) [arXiv:1207.3123 [hep-th]].
2. L. Susskind, arXiv:1604.02589 [hep-th].
3. D. Polarski and A. A. Starobinsky, Class. Quant. Grav. f 13, 377 (1996) [gr-qc/9504030].

.....

重宇 a14 宇宙論的に有効なガリレオン重力理論に対する制限

中村 進太郎 (東京理科大学 辻川研究室 M1)

超新星や宇宙背景放射などの多くの観測によって、現在の宇宙は加速膨張をしていることが示されている。この加速膨張の源は暗黒エネルギーと名付けられており、その起源は未だ説明されていない。これを明らかにすることは現在の宇宙論の重要な課題のひとつである。

暗黒エネルギーの最も単純な候補となるモデルは、一般相対論の枠組みで、負の圧力を持つ宇宙項を取り入れたモデルである。宇宙項は素粒子物理学において真空のエネルギーに対応するが、その理論値と観測から得られる真空のエネルギー密度とを比較すると後者が小さすぎるという大きな問題を孕んでいる。さらに最新の観測結果によると、この宇宙項モデルが必ずしも最適なモデルではなく、むしろ大スケールで重力理論を変更

したシナリオを好むと考えられる兆候も存在する。このようなシナリオを記述する理論を修正重力理論という。

そのひとつに、ガリレオン重力理論がある。この理論はガリレイ対称性をミンコフスキー時空で満たすように構成された 5 つのラグランジアン [1] を共変形式に拡張した理論 [2] である。このモデルでは一般に、運動方程式を 2 次のオーダーに保つために場の運動項と曲率の相互作用項が存在し第 5 の力を発生させる。しかし、スカラー場の非線形な自己相互作用項によりヴァインシュタイン機構と呼ばれる第 5 の力の遮蔽機構が働き、局所領域においてモデルが一般相対論に近い振る舞いを回復することが知られている。すなわち、このモデルは局所重力実験と整合性があることを示している。

本発表では、先行研究 [3] のレビューとして、ガリレオン重力理論において加速膨張を引き起こし、かつゴーストやラブラシアン不安定性を避けることができる条件を明らかにする。さらに、その条件を満たすモデルに対して、輻射、物質、暗黒エネルギーの組成比の時間変化を数値計算によって示す。

1. A. Nicolis, R. Rattazzi and E. Trincherini, Phys. Rev. D 79, 064036 (2009).
2. C. Deffayet, G. Esposito-Farese and A. Vikman, Phys. Rev. D 79, 084003 (2009).
3. A. De Felice and S. Tsujikawa, Phys. Rev. Lett. 105, 111301 (2010).

.....

重宇 a15 Double screening

長島 正剛 (立教大学 M1)

Ia 型超新星の観測により、現在の宇宙は加速膨張していることが知られている。加速膨張を説明する 1 つの方法として、宇宙項を重力理論に導入することが考えられる。しかし、宇宙項の起源を自然に説明することは難しく、他の方法で宇宙の加速膨張を説明する試みもある。その試みの内、一般相対論を拡張し、宇宙の加速膨張を説明しようとする修正重力理論 (MG) が盛んに研究されてきた。

一般相対論は、水星の近日点移動などの太陽系スケールにおける観測により実証されている。このことから、MG には太陽系スケールで一般相対論に帰着する機構、Screening 機構 (SM) が備わっている必要がある。よく研究されている SM として kinetic screening[1] と Vainshtein screening[2] と呼ばれる 2 つのタイプが知られている。前者は、重力ポテンシャルの一階微分が、後者は重力ポテンシャルの二階微分が screening する。

これまで提唱されてきたモデルは 1 つのタイプの SM のみに着目したものがほとんどで、複数のタイプの SM が理論に同時に備わっている場合、どのように機能するのか調べられていなかった。そこで今回は 2 つ以上のタイプの SM が機能するモデルを模索した [3] をレビューする。[3] では、ガリレオン理論に $P(X)$ を加えたモデルで kinetic と Vainshtein の 2 種類が機能するようなモデルを考え、宇宙論に適用した。

その結果 kinetic screening が効く範囲の目安となる kinetic 半径は $M^{1/2}$ に、Vainshtein screening が効いてくる Vainshtein 半径は $M^{1/3}$ にそれぞれ比例し、同じ質量に対して異なった振る舞いをするのがわかった。このことから軽い物質には Vainshtein screening が支配的になり、重い物質には kinetic screening が重要になることが判明した。特に、太陽系スケールでは Vainshtein screening が効き、kinetic screening

は銀河団スケールで効く。[3] で取り扱った理論は単純なもので、かつ限られた現象しか取り扱っていない。今後は理論を拡張し、さらに大規模構造など他のスケールの宇宙の現象に着目した研究を行いたい。

1. E.Babichev, C.Deffayet and R.Ziour, Int. J. Mod. Phys. D 18, 2147 (2009)
2. A.I.Vainshtein, Phys. Lett. B 39, 393 (1972).
3. P.Gratia, W.Hu, A.Joyce and R.H.Ribeiro, arXiv:1604.00395 [hep-th].

.....

重宇 a16 超高エネルギースケールで一般相対論を検証する方法論

田原 弘章 (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)

一般相対論は、現在までのあらゆる観測と矛盾しない。これを踏まえ初期宇宙の諸相は、多くのばあい一般相対論に基づいて議論される。しかし、その高エネルギースケールにおいてもなお一般相対論が有効である観測的証拠はなく、これを検証する枠組みが必要である。

そこで我々は、原始重力波の相関を用いて、インフレーション時の重力理論を弁別する方法を開発する。インフレーション (初期宇宙の加速膨張) によって、重力場の量子ゆらぎの波長がハッブル長よりじゅうぶん大きくなると、その量子ゆらぎは統計的なゆらぎへと古典化する。これが原始重力波である。原始重力波の統計的性質 (相関) は、インフレーションモデルの不定性としてハッブルパラメータのみに依存する [1] ので、重力理論を精査するためのクリーンなプローブとなる。

原始重力波は、宇宙マイクロ波背景放射に B モード偏光をつくる。計画されている偏光の精密測定によって、原始重力波の相関が初めて明らかになると期待される。我々は、ホルンデスキー理論に基づいた単一場インフレーションの原始重力波 [2] がつくる B モード偏光の角度相関を計算した。この結果をもちいて、一般相対論とその他の重力理論との弁別可能性について議論する。

1. A. Starobinskii, JETP Lett., 30, 682 (1979)
2. X. Gao, T. Kobayashi, M. Yamaguchi, and J. Yokoyama, Phys. Rev. Lett., 107, 211301 (2011)

.....

重宇 a17 Horndeski 理論を超えた、その先へ

彌永 亜矢 (立教大学 M1)

一般相対論は、太陽系スケールや弱重力場での物理現象を矛盾なく説明できる理論である。例えば、ニュートン力学では水星の近日点移動の説明に未知の天体を導入しなくてはならなかった。しかし重力理論をニュートン力学から一般相対論に拡張することで、未知の天体を仮定せずにこの現象を説明できるようになった。一方、Ia 型超新星の観測から現在の宇宙は加速膨張していることが証明されている。これを一般相対論で説明するには dark energy という未知のエネルギーを導入しなくてはならず、水星の近日点移動でのニュートン力学と似たような状況にある。この解決法の一つとして、重力理論を一般相対論から拡張する修正重力理論が現在盛んに研究されている。

一般相対論の拡張は古くは約 40 年前、場が二階微分方程式に従うような最も一般的なスカラテンソル理論が Horndeski によって提唱されていた [1]。一般相対論では重力波の運動方程式が二階微分方程式で表されている。重力波の自由度は 2 であるが、Horndeski 理論ではここにスカラ場を追加しているため自由度は 3 となっている。この段階では、運動方程式に高階微分項が含まれると Ostrogradsky 不安定性と呼ばれる ghost が出現するために微分は二階までに留めていた。しかし近年、Ostrogradsky 不安定性を回避できるように Horndeski 理論を拡張した理論が構築された。これは GLPV 理論 [2] と呼ばれるもので、運動方程式は一般に高階となるが自由度は Horndeski 理論と変わらないため、不安定性が現れない。同様の方針で GLPV 理論をさらに拡張したものが Gao 理論 [3] である。これによって幾つかの修正重力理論を包括的に扱えるようになった。

今回の発表では GLPV 理論および Gao 理論に注目し、修正重力理論がどのように拡張されてきたのかをレビューする。それを踏まえて、最も一般的な修正重力理論への道を模索していきたい。

1. G.W.Horndeski, Int. J. Theor. Phys. 10, 363 (1974)
2. J.Gleyzes, D.Langlois, F.Piazza and F.Vernizzi, Phys. Rev. Lett. 114, 211101 (2015)
3. X.Gao, Phys. Rev. D 90, 081501 (2014)

.....

重宇 a18 機械学習の手法を用いた未知の重力波源探索

山本 貴宏 (京都大学 天体核研究室 M2)

GW150914 の観測により、重力波を観測することで宇宙の様々な現象を観測・検証することができると実証された [1]。今後、ブラックホールや中性子星からなるコンパクト天体連星系の合体、超新星爆発、インフレーション由来の原始重力波など、これまで電磁波では観測できなかったような天体・現象を、重力波を通じて観測することができるようになり、宇宙の理解がこれまで以上に大きく進展すると期待されている。

特に、重力波観測を続けていくうちに、未知の重力波源からの重力波を捉えることができれば、物理として非常に面白いターゲットになると考えられる。未知の天体・現象からの信号を捉えることは、これまでの電磁波での観測では何度も起きたことである。私はこうしたことが重力波観測で起こっても不思議ではないと考えている。

これまでの重力波検出では、ターゲットとなる信号の波形が予測できる場合は matched filter と呼ばれる手法が用いられてきた。しかし、これは今回のように未知の重力波源をターゲットとする場合には適切ではない。そこで私は、重力波信号を入力すると自動的にその信号の特徴を抽出して分類するアルゴリズムを開発することを目標とした。

本講演では、機械学習の概要を述べたのち、先行研究の紹介として論文 [2] をレビューする。最後に、未知の重力波源探索への応用可能性について議論する。

1. B.P.Abbott, et al. (2016) Phys.Rev.Lett 116, 06112
2. J.Powell, et al. (2015) Class.Quantum.Grav 32, 215012

重宇 a19 infinite string 上の kink から放出される重力波

松井 由佳 (名古屋大学 C 研 M2)

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。先行研究 [1] の問題点とそれに対する解決方法を提示し、問題解決によって得た結果について議論し、今後の課題を提示する。

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、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、cosmic string の中でも無限に長い infinite string 上に存在する 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、infinite string 上の kink の分布を表す時間発展方程式を解き、kink から放出される背景重力波を求めていた。しかし、その発展方程式を計算する際に解析的近似を用いたため、輻射優勢期で kink の数を過小評価していた。よって、kink 由来の背景重力波のスペクトルが十分な見積もりではなかった。そこで我々は数値計算を用いて kink の分布の正確な見積もりを行い、背景重力波のスペクトルを見積もり直した。そして、将来観測計画のある重力波干渉計の eLISA や DECIGO、電波干渉計の SKA での観測可能性を示唆した。

今回、infinite string 上の kink 由来の背景重力波のスペクトルを求めることができたが、今後取り組む課題として、infinite string 上の kink 由来の背景重力波には、非等方性が期待されることを述べる。非等方性の検証により、スペクトル以外の情報を用いて重力波の起源を同定することが可能であると期待できる。

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 a20 軸対称時空におけるカオス現象と重力波

南 佳輝 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

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

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

しかしながら、これらの研究は規則正しい天体運動を中心に行われており、カオス現象を伴うような複雑な系を扱っているものは数少ない。

一般的な力学系はその多くが非可積分系であるため、カオス現象を伴うような系は自然界に多く存在すると考えられる。

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

本研究では重力波のモデルとして対称軸上に特異点が存在する時空を考え、その時空中を運動するテスト粒子から放出される重力波の解析を行った。まずテスト粒子の軌道を求め、軌道がカオス的であるものとそうでないものそれぞれについて、波形やスペクトルの計算を行った。次に、その重力波形・スペクトルから各周波数毎にストークスパラメータを計算し、重力波の偏極をカオスとそうでないものとで比較した。これらの解析結果から、カオス現象から放出される重力波の特徴を議論していく。

1. S. Suzuki, K. Maeda, Phys. Rev. D 55.8 (1997): 4848
2. S. Suzuki, K. Maeda, Phys. Rev. D 61.2 (1999): 024005
3. Y. Sota, S. Suzuki, K. Maeda, Class. Quantum Grav. 13 (1996) 1241

重宇 a21 AdS 時空における killing ベクトルとその軌道空間

松野 阜 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M1)

4次元時空において、Einstein 方程式の厳密解として得られる計量は唯一性定理により、定常軸対称かつ真空の仮定では Kerr 解に限られることが知られている。しかし、高次元時空では Einstein 方程式の厳密解として得られるブラックホール解は唯一性がなく、ブラックリングなどの様々なトポロジーをもつ解が見つっている。このように様々な次元でのブラックホール構造をもつ時空をみつめることは非常に興味のある問題である。

ブラックホール構造をもつ時空を得る方法として軌道空間を利用する方法がある。軌道空間とは多様体上の正則なベクトル場の一つの積分曲線上の点に同値関係を定め、その多様体をその同値類で類別した位相空間に自然な微分構造と誘導計量を入れることで得られるものである。特に擬リーマン多様体に対してこのようにして得られた軌道空間の計量に射影に使ったベクトルのノルムを乗じた計量をもつ多様体を考える（この操作を reduction と呼ぶことにする）と、そのベクトルがヌルになる点に対応する reduction された多様体の点が曲率特異点になる。特に対称性の高い時空の Killing ベクトル場から reduction によって得られる時空を考えると、曲率特異点をもつだけでなく event horizon をもつ場合がある。

本研究では AdS_3 に焦点を絞って、 AdS_3 の特定の Killing ベクトル場から reduction によって得られる 2次元時空の因果構造を調べることによってブラックホール構造を持ちうるということがわかった。どの Killing ベクトル場から得られる時空がブラックホール構造を持ちうるかを考察し、さらにより高次元の AdS に対してもその reduction 時空がブラックホール構造をもつような Killing ベクトルが存在することがわかった。

重宇 a22 銀河形成理論と、宇宙定数項問題の人間原理解釈

須藤 貴弘 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

ダークエネルギーは現代宇宙論における最大の謎である。観測されている宇宙定数の値は場の量子論の予言する真空のエネルギーの寄与より 55 桁以上も小さく、この問題の解決の見込みは立っていない。この問題へのアプローチの一つに「人間原理」によるものがある。宇宙定数が様々に異なるマルチバースが存在した時、宇宙定数が大きすぎるマルチバースでは、宇宙膨張の加速により構造形成が妨げられ、生命体が誕生する確率は低いことが予想される。従ってこうした大きな宇宙定数が生命体により「観測される」確率は低くなる。宇宙定数の値を現在我々が観測する値より小さく観測するような確率 $P(<\Lambda_{\text{obs}})$ が十分に大きければ、宇宙定数の小ささは選択効果により自然に説明できる。宇宙定数の人間原理解釈の可能性は Weinberg(1987) や Efstathiou(1995) などにより議論されてきた。これらの先行研究では、生命体が誕生する確率を天体の質量などに比例すると仮定して計算していた。先行研究では天体の量を見積もる際にダークハローの重力崩壊のみが考慮されており、 $P(<\Lambda_{\text{obs}}) = 5 - 10\%$ と得られていた。しかしその際に生命の誕生する銀河に条件として閾値(銀河系程度の質量など)を課しており、その正当性は不明である。実際、 $10^8 M_{\odot}$ 程度の銀河にも星は数多く、それらの銀河に生命が生まれることを考慮すると先行研究の方法では $P(<\Lambda_{\text{obs}}) = 0.6\%$ まで下がる。本研究では、準解析的モデルを利用し、バリオン物理を含めた銀河形成の要素を取り入れることで、生命誕生可能性をより合理的に議論した。その結果として生命誕生の閾値など恣意的な仮定をすることなく、 $P(<\Lambda_{\text{obs}}) = 6.7\%$ と比較的高い値を得た。人間原理は宇宙定数問題の解決策の一つとなりうると言える。

1. Weinberg S., 1987, Phys. Rev. Lett., 59, 2607
2. Martel H., Shapiro P.R., Weinberg S., 1998, ApJ, 492, 29
3. Efstathiou G., 1995, MNRAS, 274, L73

重宇 a23 Acoustic superradiance for MHD waves

野田 宗佑 (名古屋大学 QG 研 D2)

superradiance は Kerr ブラックホールによる波の増幅散乱である。また、ergoregion の中に、horizon の代わりに星表面などの mirror がある場合には、superradiance によって系が不安定になることが知られており、この不安定性は ergoregion instability と呼ばれている。本発表では、これらの現象の類似物を MHD flow 上に作り出すことを考える。背景時空が flat であっても、磁場が無い場合には流体上の音波方程式が acoustic metric と呼ばれる擬似的な metric 上の Klein Gordon 方程式の形にまとまること知られている。また bathtub model と呼ばれるバックグラウンド流を選ぶと acoustic metric は Kerr metric のような形をとり、音波に対する effective な horizon と ergoregion が現れる。この流体上の音波に対するブラックホール的な構造を流体ブラックホールという。本発表ではまず、磁場が無い場合の流体ブラックホールについてのレビューをし、次に bathtub model を MHD に拡張した model を紹介する。さらに、バックグラウンド流の形状によって、MHD wave

の散乱が superradiance、ergoregion instability、通常の散乱の 3 タイプの分類されることを見る。

1. C. Barcelo, S. Liberati, and M. Visser, Living Rev. Relativ. 14 (2011)
2. A. Vilenkin, Phys. Lett. B bf78, 301 (1978)

重宇 a24 インフレーション中の QED における量子異常輸送

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 D2)

インフレーション理論は、ビッグバン理論に内在する平坦性問題や地平線問題を解決し、さらに、後の宇宙の構造の起源となる原始ゆらぎの存在を予言する。これらの原始ゆらぎのうち、スカラー型のゆらぎについては CMB の精密観測によって、その存在だけでなく、性質までもがわかるようになった。テンソルゆらぎ(原始重力波)についても、将来の観測がまたれている。ベクトル型のゆらぎは、通常、インフレーション中には減衰するため、あまり重要視されてこなかった。しかし、近年、衛星によるガンマ線観測によって、銀河間領域に、非常に弱いが大スケールにわたる磁場が存在することが示唆されるようになった。もし大きな原始磁場(ベクトルポテンシャルのゆらぎ)が生成できるならば、こうした宇宙磁場の起源を説明することができる。

本研究では、インフレーションを記述する de Sitter 時空の電磁気的応答について、spinor QED の場合の振る舞いを調べたのでこれを報告する。特に、3次元と4次元の de Sitter 時空の場合に特徴的な負の電気伝導度(輸送係数の異常)を発見したので、これとトレースアノマリーとの関係について述べる。

さらに異常輸送の効果が、インフレーション原始磁場形成の文脈でどのような役割を果たすかについても述べる。

1. T. Hayashinaka, T. Fujita, and J. Yokoyama, arXiv:1603.0416.
2. T. Hayashinaka and J. Yokoyama, arXiv:1603.0617.

重宇 a25 ダークエネルギーの揺らぎがポイド形成に与える影響

遠藤 隆夫 (名古屋大学 C 研 M2)

宇宙の加速膨張の原因としてダークエネルギーの存在が提唱され、ダークエネルギーの正体の解明は現在の宇宙論において重要な課題の一つとなっている。現在標準モデルとされている、宇宙項をダークエネルギーとする Λ CDM モデルでは、空間的に一様なダークエネルギーを仮定しており、宇宙マイクロ波背景放射やバリオン音響振動といった宇宙論的な観測結果をよく再現している。宇宙項の正体として真空のエネルギーが有力な候補とされているが、理論的に予言される値と実際の観測から得られる値には 100 桁を超える隔たりがあり、この不一致は未だ解消されていない。

本研究ではダークエネルギーのモデルを一般化し、宇宙大規模構造において天体の少ないポイド領域の形成過程を調べることににより、ダークエネルギーの性質に迫ることを目的とした。ポイドは宇宙全体の体積の

うち大部分を占めているため統計量が得やすく、形成過程には重力が大きな寄与をしている。また、Goldberg, Vogeley (2004) はボイド内部の構造の成長はダークエネルギーに大きく左右されることをシミュレーションによって示している。

先行研究において Besse et al. (2011) はダークエネルギーのモデルを一般化し、ダークエネルギーの密度・圧力が空間的に揺らいでいるときに、球対称崩壊モデルを用いてダークエネルギーの揺らぎがハローと呼ばれる銀河団スケールの高密度領域の形成に与える影響を報告している。本講演ではこの方法を応用し、ダークエネルギーの揺らぎが球対称なボイドの形成に与える影響を報告する。さらに Sheth, Weygaert (2004) で提案されたボイドのサイズ分布へ応用した結果を報告する。

1. T. Basse et al., JCAP, Issue 10, id. 038 (2011)
2. R. Sheth and R. v.d. Weygaert, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 350 (2004) 517

重宇 a26 Mimetic XG3

平野 進一 (立教大学 M2)

我々の宇宙は、 Λ CDM モデルによってほぼ記述されることが確かめられている。しかし、Dark Energy と Dark Matter (DM) に関しては大きな未解決問題を有している。特に DM は、その起源についても問題であるが、現在の Cold Dark Matter (CDM) モデルで説明のできていない観測との矛盾 (missing satellites problem 等) を抱えており、問題解決への糸口が模索されている。

近年、DM モデルとして、Mimetic Dark Matter (MDM) が注目をされている。このモデルでは、特異な disformal 変換により導入されるスカラー自由度が CDM の役割を担う。さらに、その高階微分した項が導入されることで、僅かに音速を有する不完全流体として振る舞うため、sub-galaxy スケールの密度揺らぎを抑制し、missing satellites problem を解決できる [1]。このようなモデルの正当性は、標準的な素粒子論的 DM モデルからは現れない CDM を超えるシナリオへの示唆を与える。その一方で、理論の安定性の観点からは、MDM 特有の拘束条件を導入するために、他の項の寄与と複合的に ghost/gradient instability を出してしまうことが知られている。先行研究 [2] では、[1] で導入された高階微分項を入れることで、ghost instability のみを取り除けることが明らかとなった。したがって、[1] で解析された MDM の振る舞いは、gradient instability の起こる時間スケールが宇宙年齢よりも十分大きい場合にのみ有効であり、理論の安定性の立場からは、信頼性のある結果とは言えない。

上記の事情を踏まえ、本講演では、MDM の拘束条件を持つような安定な理論の枠組みを構築し、それを一般的な理論に拡張することを試みる。最も一般的なスカラー・テンソル理論の枠組み XG3[3] に MDM の拘束条件を導入し、不安定性を取り除くことができるのか検証し、安定性の条件を導出していく。また、新たに加えられる項からの寄与も含めた宇宙論を展開し、理論の安定性から導かれる DM の振る舞いの妥当性を検証する。

1. F. Capela and S. Ramazanov, JCAP 1504 (2015) 051
2. A. Ijjas, et al., arXiv:1604.08586 [gr-qc]
3. X. Gao, Phys. Rev. D 90 (2014) 081501

重宇 a27 Multi-Field Conformal Inflation のダイナミクスと観測的制限

戸塚 良太 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

ビッグバン宇宙論の理論的困難を解決するアイデアとして、インフレーション理論が提唱されている。現在、インフレーションのモデルは数多く提唱されているが、インフレーション理論のエネルギースケールはプランク質量より少し低い程度と考えられており、従来これらのモデルに観測的制限を課すことは難しかった。しかし近年、PLANCK などの観測から、インフレーション理論の予言するゆらぎなどの観測量を見積もり、モデルに観測的制限をつける事が可能になりつつある。[1] 超弦理論は、現在高エネルギー領域における素粒子統一理論として有力視されている。この理論は、弦の性質から来る共形対称性を内在しており、この対称性は高エネルギー現象の鍵となることが予想され、インフレーション理論においても重要な役割を果たすことが予想される。この共形対称性を持つ作用から始め、インフレーションモデルを構築するアプローチ (Conformal Inflation) がある [2]。インフレーションを引き起こすスカラー場であるインフラトンが一つの場合は、ある程度の任意性を持つポテンシャルに対して、上記の観測的制限を満たすインフレーションシナリオが考えられている。

ところで、超弦理論を 4 次元にコンパクト化すると、理論の中に多数のスカラー場が存在することが知られている。このような理由から、超弦理論由来のインフレーションモデルを考える場合には、インフラトンとして多数のスカラー場を考えるのが自然である。

本発表では、スカラー場が複数の場合の Conformal Inflation のダイナミクスを解析し、インフレーションを引き起こしていることを見た後、観測量である密度ゆらぎ、スペクトル指数などを解析して、このモデルにどのような制限がかかるかを考察する。

1. P. A. R. Ade et al. [Planck Collaboration], "Planck 2015 results. XX. Constraints on inflation," arXiv:1502.02114 [astro-ph.CO].
2. R. Kallosh and A. Linde, "Superconformal generalizations of the Starobinsky model," JCAP bf 1306, 028 (2013)

重宇 a28 Beyond Horndeski 理論における原始重力波の非ガウス性

秋田 悠児 (立教大学 その他)

初期宇宙にはインフレーションと呼ばれる加速膨張期があったと考えられており、これはインフラトンと呼ばれる一つないしは複数のスカラー場によって引き起こされる。この宇宙の加速膨張というシナリオは、現代の宇宙論において重要な一部を担う。例えば、宇宙がインフレーション期を経ると、標準ビッグバン宇宙論の抱える諸問題が自然に解決されるばかりか、銀河や星といった宇宙の大規模構造の“種”をインフラトンの量子ゆらぎから作ることができる。

現在までに、インフレーションを引き起こすような多くの初期宇宙モデルが考案され、モデルの多様化が進んできた。これらのモデルは典型的にスカラー場とテンソル場 (重力) によって記述されているため、総称してスカラーテンソル理論と呼ばれる。モデルの多様化に伴い、多く

のモデルを包括的に取り扱う手法が注目を浴びている。

初期宇宙モデルを決定するために有用な物理量は、インフレーションによって生成されるゆらぎのパワースペクトルや非ガウス性である。例えば将来的にインフレーション起源の原始重力波の直接検出に成功すれば、インフレーションが起こったエネルギースケールがわかる。

本講演では、まず、広く知られている一般的な枠組みである Horndeski 理論 (場が二階微分方程式に従うような最も一般的なスカラーテンソル理論) と、現状で最も一般的な理論である Gao 理論との簡単な比較を行う。続いて、Gao 理論の下でインフレーションモデルの決定にむけた物理用の導出を行う。特に、宇宙マイクロ波背景放射におけるゆらぎの偏光 B モードを狙った Lite-BIRD 衛星などの観測をひかえた今、原始重力波の非ガウス性を用いたモデル峻別に着目し、その特徴を明らかにする。本講演は、論文 [1] に基づき構成される。

1. Y. Akita and T. Kobayashi, Phys. Rev. D 93, 043519

重宇 a29 ビッグバン元素合成から見る小スケールゆらぎ

猪又 敬介 (東京大学宇宙線研究所 M2)

インフレーション理論は、銀河や銀河団といった宇宙の構造の種となる密度ゆらぎを生成する。したがって、密度ゆらぎを観測から調べることがインフレーション理論の検証につながる。しかし、小スケール ($\lesssim 1\text{Mpc}$) 密度ゆらぎはシルク減衰などのために調べるのが難しい。

これまでの小スケール密度ゆらぎの先行研究では、原始ブラックホール (Primordial Black Hole: PBH) や超コンパクトミニハロー (Ultra Compact Mini Halo: UCMH) といった特殊な天体を仮定して小スケール密度ゆらぎに対して制限をかけるのが主流であった。

近年、ビッグバン元素合成によって決まる軽元素の存在量を使って小スケール密度ゆらぎに対して制限をかけられることが示唆された [1,2]。私は、特にビッグバン元素合成中に決まる陽子中性子比を小スケール密度ゆらぎ中で計算することによって、小スケール密度ゆらぎが陽子中性子比に与える影響を調べた。その際、先行研究 [1] では考慮されていなかった陽子中性子比が温度の異なる場所ごとに決まることによる効果を考慮した結果、先行研究 [1] とは定性的に異なる結果を得た。さらに、その結果を軽元素の観測と比較することで小スケール密度ゆらぎに対して制限をかけることに成功した。

この結果は、PBH や UCMH といった特殊な天体の生成条件を使わずに小スケール密度ゆらぎに対して制限をかけられたという意味で大きな意義がある。

本講演では、私がこれまで行ってきたこの研究の結果 [3] について発表する。

1. D. Jeong, J. Pradler, J. Chluba and M. Kamionkowski, Phys. Rev. Lett. 113, 061301 (2014)
2. T. Nakama, T. Suyama and J. Yokoyama, Phys. Rev. Lett. 113, 061302 (2014)
3. K. Inomata, M. Kawasaki and Y. Tada, arXiv:1605.04646 [astro-ph.CO].

重宇 a30 CMB anomaly から探る新物理の可能性

飯田 遼 (名古屋大学 C 研 M1)

現在では WMAP や Planck 衛星による宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の非等方性の精密観測と、Ia 型超新星の観測などによって、標準宇宙モデルが確立されている。標準宇宙モデルは、宇宙項 (Λ) と重力相互作用ししない冷たい暗黒物質 (CDM) を含んだ Λ CDM モデルと、初期揺らぎのパワースペクトルがスケールによらない冪 (n_s) を持つという 2 つの仮定のモデルである。CMB の観測は標準宇宙モデルとほぼ整合的であるが、WMAP と Planck 衛星の観測による CMB 温度揺らぎの角度パワースペクトルを見ると、多重極モーメント (l) が $1\sim 20\text{-}40$ の大スケールで、標準宇宙モデルの理論線から $2\text{-}3\sigma$ で外れていることが指摘されてきた。このような観測点は CMB anomaly と言われる。現在 CMB anomaly は主に 2 つの立場から議論が試みられている。1 つ目は、CMB の最終散乱面から CMB 光子が現在に来るまでの前景の影響ではないかというもので、2 つ目は初期パワースペクトルがスケールに依存した冪を持っていたためではないかというものである。本発表では、後者の立場から、CMB anomaly を説明しようとする論文 [1]、[2] を紹介する。論文 [1] では、初期宇宙モデルによらない解析を行うため、 n_s のスケール依存性をパラメーターを用いて表現し、そのパラメーターに対する観測的制限が議論された。そして、論文 [2] では、初期パワースペクトルによって CMB anomaly を説明しようとする具体的なインフレーションモデルについて議論された。加えて、将来の CMB 偏光の観測によるインフレーションモデルの制限について議論する。

1. Vin'cius Miranda et al. PhysRevD.91.063514 (2015)
2. Michael J. Mortonson et al. PhysRevD.79.103519(2009)

重宇 a31 真空の初期条件を変えた場合のインフレーション

興石 めぐみ (お茶の水女子大学 宇宙物理研究室 M1)

量子力学によると、一度測定を行うと状態は一般に変化する。量子測定により対象系を観測によって確定しようとする、測定器の測定器... という無限循環に陥ってしまう。私たちが宇宙、特に初期宇宙の量子論の名残をとどめた状態を測定する場合、一度限りの宇宙にも関わらず、正しく測定することは可能なのだろうか。また、多世界理論による分岐した宇宙の記述があるが、これら分岐した後の宇宙の間の相関が消える機構があるのだろうか。近年、量子揺らぎから古典化されるプロセスとして negativity の時間発展を用いた研究が発表されている。特有の量子相関の強さを表す指標である negativity の時間発展を計算することにより量子ゆらぎが古典化される時間変化が明快に分かる。一般にインフレーションによって量子揺らぎの古典化していく場合その初期条件として Bunch-Davies 真空が用いられているが、曲がった時空では無数に可能な真空を選ぶ原理は一般にない。真空の初期条件が違った場合、古典化へのプロセスは変わるのだろうか。今回の研究では、インフレーション時代の真空とは違った真空であった場合、新たな量子揺らぎの古典化が現れるかどうかを吟味する。更に真空の選択により宇宙の相転移の過程はどのように記述され、現在の宇宙とは違ったものになるのかを議論する。

1. 堀田昌寛 『数理学 量子情報と時空の物理』 サイエンス社 2014
2. Yasusada Nambu arXiv:0805.1471
3. D.Bouwmeester A.Ekert A.Zeilinger 『量子情報の物理』 共立出版 2007

重宇 b1 局所対称ケーラー多様体の変形量子化

原 健太郎 (東京理科大学理学部第二部 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 Yang-Mills 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る。今後は行列模型への応用、作用素環論をベースにした非可換幾何学との関係、重力理論への応用が期待される。

1. A. V. Karabegov, 1996, "Deformation quantizations with separation of variables on a Kähler manifold," Commun. Math. Phys. bf 180, 745 (1996) [a]
2. A. Sako, T. Suzuki and H. Umetsu, "Explicit Formulas for Non-commutative Deformations of CP^N and CH^N ," J. Math. Phys. bf 53, 073502 (2012)

重宇 b2 Calculation of the curvature perturbation in stochastic inflation

Kim Suro (神戸大学 理学研究科物理学専攻 宇宙論研究室 M1)

Stochastic inflation における曲率揺らぎの計算法に関する論文 Ref[1]を紹介する。このアプローチでは、Inflaton 場を摂動展開することなく、直接 δN formalism によって曲率揺らぎを計算する事ができる。運動方程式を非摂動的に解いたため、自動的に高いオーダーの摂動の寄与が結果に含まれている。本講演ではこのアプローチにおける計算結果が single field の slow-roll inflation の標準的な結果と一致することを示す。

1. T. Fujita and M. Kawasaki, "A new algorithm for calculating the curvature perturbations in stochastic inflation," JCAP 1312 (2013) 036

重宇 b3 アンドロメダ銀河の広域モニター観測による原始ブラックホール探索

新倉 広子 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 D1)

原始ブラックホール (PBH) は初期宇宙での生成が提唱されており、ダークマターの有力候補の一つである [1]。本研究では、近傍巨大銀河であるアンドロメダ銀河 (M31) のすばる望遠鏡の広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) 観測を用いて、PBH ダークマター仮説を検証した。

本研究では $10^{25}g$ 程度の質量の PBH をターゲットとし、検証手法としては重力マイクロレンズ効果を用いた。重力マイクロレンズ効果とは、観測者、PBH と背景の点源 (星) が一直線上に並ぶ稀な現象が起こった場合、重力レンズにより背景の星が増光を受ける効果である [2]。本研究のターゲット質量の PBH によるマイクロレンズ現象のタイムスケールは典型的に数 10 分から数時間のものが考えられる。そこで、近傍巨大銀河であるアンドロメダ銀河 (M31) の星をモニターすることにより、時間変動する M31 内の星の探査を行い、天の川銀河と M31 のダークハローを構成する PBH によるマイクロレンズ現象を探査した。

HSC の 1 視野は M31 のディスク、バルジ領域を一度に撮ることを可能にし、集光力、高い解像度は微少な時間変動星の探査を可能にする。本観測では約 2 分間隔で約 7 時間に渡り、約 170 枚の画像データから時間変動天体の探査を行った。非常に星密度の高い領域での天体検出と測光を行うため、HSC のデータ解析パイプラインを用いた解析手法 (差分画像法) を改良した。また、マイクロレンズ現象の検出手法を評価し、独自の変光イベントの分類手法を確立した。

本観測の短時間サンプリングにより、恒星フレア、変光星などの稀少な短時間激変動天体を多数見つけた。一方、マイクロレンズ現象の選択手法をデータに適用したが、本観測では検出されなかった。本観測でのイベント検出感度をシミュレーションにより評価した結果、PBH の存在量に対して、ケプラー衛星の 2 年間データ [3] よりも強い、今までで最も厳しい上限を課すことができた。講演では、解析結果の報告、また得られた PBH の存在量の制限について議論する。

1. S. W. Hawking, Nature, 248, 30 (1974)
2. B. Paczynski ApJ, 304, 1 (1986)
3. K. Griest, A. M. Cieplak, and M. J. Lehner ApJ, 786, 158 (2014)

重宇 b4 Affleck-Dine Baryogenesis (Review)

森竹 貫人 (総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科 M1)

我々が住む宇宙は、Baryon で満たされ、Anti-Baryon で満たされていない。インフレーション終了直後の宇宙では、Baryon と Anti-Baryon は同等に存在されていたと考えられている。しかし、ビッグバン元素合成が起こる時期には、Baryon と Anti-Baryon の差の数密度とエンターピーの比は $n_B/s \approx 6 \times 10^{-10}$ であることが必要である。この Baryon asymmetry が宇宙初期にどのように生成されたか (Baryogenesis) という問題は、宇宙論における未解決問題の一つである。標準模型の枠組みでは、Baryogenesis を説明する試みはあったが、現在では棄却されている。従って、Baryogenesis を説明するには、標準模型を超えた物理が必要である。Baryogenesis の 1 つの候補として、超対称性を課した素粒

子標準模型からなる Affleck-Dine Baryogenesis(以下、ADB)がある。超対称化された標準模型では、スカラー場のポテンシャルに数多くの flat direction が存在する。その flat direction の存在のため、Baryon 数を持つスカラー場がインフレーション終了後に、flat direction に沿って非常に大きな期待値を持つことが可能になる。このスカラー場は、ハップルパラメータが有効質量程度になった時に、原点まわりの振動を開始する。この時、Baryon 数を破る効果が存在し、これらのスカラー場に位相方向のトルクを与えることが出来れば、Baryon asymmetry をもたすことが可能である。これが ADB の概要である。本発表では、ADB について詳しく説明し、その問題点についても議論する。

1. K.Enqvist and A.Mazumdar, Phys.Rept. 380 (2003) 99-234,
2. M.Dine, L.Randall, and S.Thomas, Phys.Rev.Lett.75 (1995) 398,
3. I.Affleck, M.Dine, Nucl.Phys. B 249 (1985) 361.

重宇 c1 球対称ドメインウォールの重力崩壊

池田 大志 (名古屋大学 QG 研 D2)

現代の素粒子標準模型を超えた高エネルギー物理理論のいくつかは初期宇宙における位相欠陥を予言する。本研究ではこの位相欠陥の中でもドメインウォールに注目する。ドメインウォールは量子色力学の強い CP 問題にまつわる PQ 機構や、ナチュラルインフレーションモデルで予言されており、これまで宇宙における役割が議論されてきた。その役割の一つがドメインウォールの重力崩壊による原始ブラックホール形成である。先行研究においてドメインウォール由来の原始ブラックホールの数密度が見積もられているが、ブラックホール形成の詳細な解析がなされていないためおおまかな見積りとなっている。そこで本研究では原始ブラックホール形成を見据えて、ドメインウォールの重力崩壊の詳細な解析を行う。

1. S.Hawking, Mon.Not.Roy.Astron.Soc.152(1971)75.
2. S.G.Rubin et al [hep-ph/0005271]
3. K.Clough and E.A.Lim arXiv:1602.02568[gr-qc]

重宇 c2 長波長ゆらぎが宇宙の構造形成に与える影響

秋津 一之 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 M2)

現在の宇宙に存在する銀河・銀河団・大規模構造という豊かな階層構造の起源は、初期宇宙に生み出された原始ゆらぎに遡る。この原始ゆらぎは、インフラトンの量子ゆらぎが加速膨張で引き延ばされることによって生成されたと考えられており、原始ゆらぎにはインフラトンの性質が刻まれていると言える。

インフレーションではあらゆるスケールにゆらぎがつくられるため、銀河サーベイ等の観測領域を超えるような波長のゆらぎも存在すると考えられる。このような超長波長ゆらぎは、小スケールのダークマター密度ゆらぎの成長に対し、非線形モードカップリングを通じて影響を与える。

そこで、観測量から原始ゆらぎの情報を引き出すためには、短波長同士の非線形モードカップリングの影響を評価するのはもちろんだが、長波長ゆらぎが短波長ゆらぎの成長にどのような影響を与えるかについて

も見積もる必要がある。

この長波長ゆらぎの影響を宇宙論的 N 体シミュレーションに取り入れる新たな手法として、理論的、観測的に見ることのできる範囲の宇宙を周りの宇宙から切り離して扱う“separate universe”と呼ばれる方法が提案されている [1]。この手法を用いることで、長波長ゆらぎが短波長ゆらぎの成長に与える影響を見積もり、小スケールの観測量から、超長波長ゆらぎの情報を復元できるようになると考えられる。

本研究では、先行研究をさらに推し進め、 Λ -CDM 以外の成分が宇宙に存在する場合にも separate universe の手法が使えるように拡張した。また、先行研究では長波長ゆらぎの等方的効果しか扱えていなかったが、本研究では非等方的な効果(潮汐力モード)も N 体シミュレーションに取り入れるための手法を開発した。さらに、長波長ゆらぎからの非等方的効果によって、赤方偏移空間におけるパワースペクトルの covariance がどのような影響を受けるかについても議論する。

1. T. Baldauf, U. Seljak, L. Senatore, and M. Zaldarriaga, JCAP f 1110, 031 (2011).
2. L. Dai, E. Pajer, and F. Schmidt, JCAP f 1510, 059 (2015).
3. W. Hu, C-T. Chiang, Y. Li, and M. LoVerde arXiv:1605.01412 [astro-ph.CO].

重宇 c3 暗黒物質候補としての重力子

青木 勝輝 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 D2)

暗黒物質や暗黒エネルギーの正体は現代物理学に残された最大の課題の 1 つであり、これらの解明には標準理論を超えた物理が必要であると考えられる。ここで重力理論に注目すると、その標準理論である一般相対論は素粒子物理の視点からは質量ゼロのスピン 2 粒子(重力子)の理論と言える。しかし、重力が質量ゼロの重力子のみによって媒介されているかはわかっておらず、他のゲージボソンのように複数の種類の重力子が存在する可能性も考えられる。そこで本発表では Bigravity 理論と呼ばれる 2 つの重力子が存在する理論に注目し、暗黒物質への示唆を述べる。Bigravity 理論では重力子の間の相互作用により一方の重力子が質量をもち、もう一方の重力子は質量ゼロである。我々は質量をもった重力子が重力場に与える影響を計算することによって、有質量の重力子が暗黒物質として振る舞うことを示した。本シナリオでは質量ゼロの重力子は重力波として、有質量の重力子は暗黒物質として観測される。これらは一般には宇宙初期に同時に生成されるため、背景重力波を観測することにより暗黒物質の情報を調べることが可能である。例えば LIGO が preheating 由来の重力波を観測した場合、0.01 GeV 程度の質量の重力子が暗黒物質候補となる。

1. S. F. Hassan and R. A. Rosen, JHEP 02, 126 (2012)
2. K. Aoki and S. Mukohyama, arXiv:1604.06704
3. E. Babichev, L. Marzola, M. Raidal, A. Schmidt-May, F. Urban, H. Veermae, and M. von Strauss, arXiv:1604.08564

重宇 c4 ローレンツ対称性の破れから探る高エネルギーの重力法則

新居 舜 (名古屋大学 C 研 M2)

ローレンツ対称性は、重力を含まないミクロな世界を記述する素粒子理論の基本的対称性であると考えられている。しかし、重力理論がローレンツ対称性を保つかどうかは非自明である。一般相対性理論はローレンツ対称性を保っているが、その観測的な検証はほとんどない。さらに、一般相対性理論はプランクスケール近傍で量子論的な予言能力を失うため、重力の量子性を記述できない。こうした状況から、高エネルギーでは重力法則が変更されると考えることが自然である。その可能性の1つにローレンツ対称性を破る重力理論が考えられる。本ポスターでは、CMBの非等方性、宇宙の構造形成、そして重力波などを通して時空に関する高精度の情報から、重力理論においてローレンツ対称性が破れているかを検証する方法について総説する。

1. S. Mirshekari, N. Yunes and C. M. Will, Phys. Rev. D 85, 024041 (2012)
2. A. Hees et al Phys. Rev. D 90, 124064 (2014)
3. P. Horava, Phys. Rev. D 79, 084008 (2009)

重宇 c5 宇宙再電離と銀河・活動銀河核

吉浦 伸太郎 (熊本大学 自然科学研究科 D1)

赤方偏移 $z \sim 6$ の銀河間物質中の中性水素が初代の天体から放射された紫外線光子によって電離される時代を、宇宙再電離期と呼ぶ。再電離期の直接的な観測は少ないが、高赤方偏移クエーサーのスペクトル観測から水素の電離が $z \sim 6$ で終了したことが分かっている。また、同様の観測からヘリウムの電離が $z \sim 3$ で終了したという事も示唆されている。すでに遠くの宇宙で銀河がいくつか見ついているため、再電離を引き起こすのは電離源の第一候補は宇宙の初期に生まれた星形成銀河だと考えられている。一方で、活動銀河核の電離への寄与はよくわかっていない。最近の観測で遠方で暗い活動銀河核が観測され、その寄与を考えれば活動銀河核だけの再電離の説明も可能であるという研究もある。今回、我々は活動銀河核と星形成銀河の観測に基づいたモデルを用いて水素やヘリウムの電離を解く。さらに観測で得られている再電離への制限と比較する事によって、星形成銀河の光子脱出率や高赤方偏移での AGN の光度関数への制限を行ったので、それを報告する。

1. Yoshiura, S., Hasegawa, K., Ichiki, K., et al. 2016, ArXiv 1602.04407
2. Madau P., Haardt F., 2015, ApJ, 813, L8

重宇 c6 Hawking Radiation

Fujikura Kohei (東京工業大学宇宙物理学理論グループ M1)

(特殊) 相対論的量子力学は名前の通り、ポアンカレ群の対称性を満たす量子論である。理論の枠組みでは Special Covariance を仮定し

ており、高エネルギーの多体系を量子力学的に扱える学問であり、物理学で重要な役割を担っている。これはもちろん、量子の波長が時空の曲率と比べて十分短いという仮定に基づく結果であり、地球上の高エネルギー現象はこれを満たしている。この夏の学校では重力の影響が無視できないような状況の場の理論、つまり、(一般) 相対論的量子力学に着目する。このような理論は現在において体系化されておらず、非常に興味深い分野になっている。今回は Hawking 放射をこのような曲がった時空上の場の理論から導出する。特に今回は背景時空を Schwarzschild 時空にとっている。

1. S.Hawking, Commun. Math/ Phys. 43, 199 (1975)

重宇 c7 Oscillations in the CMB angular power spectra at $\ell \sim 120$

堀口 晃一郎 (名古屋大学 C 研 D2)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は WMAP 衛星の観測で温度揺らぎのスペクトルが観測されて以来、初期宇宙に迫る観測として標準宇宙論の枠組みでは多くの成功をおさめてきた。しかし、WMAP 衛星の時代から multipole: $\ell \sim 120$ 付近に標準宇宙論では説明できない振動があることが示唆されてきた [1]。

近年では Planck 衛星等により、より精密な CMB 観測が進められているが、Planck2015 の観測にも WMAP で示唆されていた multipole: $\ell \sim 120$ 付近で CMB 角度パワースペクトルの振動が表れていることが判明した。これらの振動は温度揺らぎのみならず、偏光モードの角度パワースペクトルにも存在している。本発表では、Planck2015 の観測に現れる振動の位置や大きさなどの解析結果を WMAP の場合と比較して紹介する。

1. K.Ichiki, R.Nagata and J.Yokoyama Phys.Rev.D81 083010 (2010)

重宇 c8 (2+1) 次元 massive gravity における漸近的平坦なブラックホール解について

中司 桂輔 (東京学芸大学大学院 M1)

(2+1) 次元時空では、負の宇宙定数を持つ (2+1) 次元時空でのブラックホール解 (BTZ) しか非自明な解は存在しないと考えられていた。しかし、量子重力との関わりから、一般相対性理論の拡張として考えられた massive gravity 理論においては、(2+1) 次元の空間における asymptotically flat なブラックホール解 (black flower) が得られることが発表された。この black flower は、これまでの (2+1) 次元ブラックホールとは異なり、角度に依存した形状を持つブラックホール解となっている。本発表では、massive gravity 理論の概要と、この black flower 解について、[1] に基づいてレビューを行う。

1. Gokhan Alkac, Ercan Kilicarslan and Bayram Tekin, Phys. Rev. D 93, 084003 (2016)
2. Eric A. Bergshoeff, Olaf Hohm and Paul K. Townsend, Phys.Rev.Lett.102:201301 (2009)

.....

重宇 c9 $f(R)$ 重力理論における inflationary dynamics と dark energy

家舗 真衣 (立命館大学 素粒子論研究室 M2)

修正重力理論の1つである $f(R)$ 理論において、宇宙初期の加速膨張である inflation と、現在の加速膨張を引き起こすと考えられている dark energy を統一し、1つのモデルで説明できるかを検証する。

1. A. De Felica and S. Tsujikawa Living Rev. Relativity 13 (2010), 3
2. M. Artymowski and Z. Lalak J. Cosmol. Astrpart. Phys 09 (2014) 036

.....

重宇 c10 super-Penrose 過程について

小笠原 康太 (立教大学 D1)

2009年, Bañados・Silk・Westの3人は回転ブラックホール近傍での粒子衝突において、重心系エネルギーを任意に大きく出来ることを発見した。大きな重心系エネルギーは高エネルギー粒子の生成を可能にし、これにブラックホールからのエネルギー引き抜き過程である super-Penrose 過程と合わせて考えることで、回転ブラックホールを天然の粒子加速器として考えることが可能になる。本講演では、生成された高エネルギー粒子の脱出確率を評価し、宇宙の高エネルギー粒子の起源としての可能性を議論する。

1. M. Bañados, J. Silk, and S. M. West, Phys. Rev. Lett. **103** (2009)
2. K. Ogasawara, T. Harada and U. Miyamoto, Phys. Rev. D **93** (2016)

.....

重宇 c11 重力波や短 γ 線バーストでの重力パリティ対称性の破れ

森 彩乃 (東京理科大学 辻川研究室 M1)

重力波は、一般相対性理論 (GR) からその存在が予言され、時空の小さな歪みが波動として伝搬する現象である。2016年2月12日に米国の観測装置 LIGO が、重力波を初めて直接検出したと発表した。

GR は太陽系における重力実験と整合的であるが、宇宙膨張が関係するような巨視的なスケールにおいて重力理論が変更されている可能性もある。そのような修正重力理論の一つとして、Chern-Simons (CS) 重力理論という超弦理論に動機づけられたものがある。CS 理論は、重力のパリティ対称性の破れを予言し、回転体から生成される重力波の円偏波によってその破れを検証することが可能である。特に、重力波の左右に巻かれた円偏波が同じスピードで、かつ違う振幅展開をしながら伝播するときに生じる振幅複屈折という現象がその検証に用いられる。

文献[1]において、CS 重力理論における重力のパリティ対称性の破れが見積もられており、さらに、中性子星連星系の合体により放出された

γ 線バースト現象などを用いて、重力波観測装置による重力波の実際の観測データからその破れの程度を評価する試みが行われている。今回は文献[1]のレビューを行い、重力波の観測によって CS 重力理論が GR とどのように選別が可能であるかについて示す。

1. Nicol'as Yunes, Richard O' Shaughnessy, Benjamin J. Owen, and Stephon Alexander Phys.Rev.D82.064017 (2010)

.....

重宇 c12 Thermodynamics of non-Abelian BH in asymptotically spacetime

宮下 翔一郎 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

4次元 Einstein-Maxwell 系において存在できる定常な BH 解は Kerr-Newman 族に属するものに限られ、大域的積分量である質量、電荷、角運動量を指定すれば対応する BH 解は唯一に定まる (BH 唯一性定理)。BH 自体を孤立系だと見做したとき、この唯一性定理を熱力学的に解釈すると大域的積分量は示量変数に対応し、単純な熱力学系であることを示唆しているように思われる。示量変数を決めても対応する状態が一意に決まらないような複雑系を表す孤立系 BH 熱力学は大きく分けて次の2つの場合に実現される；(i) 高次元時空への拡張。(ii) 物質場の拡張。このような場合は様々な相が存在することになり、BH 相転移が起こることが期待される。また、孤立系に限らず熱浴系においても複数の相の出現が期待され、同様に BH の相転移、又は一般に時空の相転移が起こる可能性がある。本講演では「(ii) 物質場の拡張」に焦点を当てて、特に漸近的 AdS 時空における Yang-Mills 場の存在する時空の熱力学について考察する。様々な相の存在する系の熱力学を考察することは単に BH 熱力学的な興味に留まらず、ホログラフィの観点からも有用であることが期待される。

1. R. B. Mann, E. Radu, and D.H. Tchrakian Phys.Rev. D74 (2006) 064015
2. O. Kichakova, J. Kunz, E. Radu, and Y. Shnir Phys.Lett. B747 (2015) 205

.....

重宇 c13 mimetic waves

林 峰至 (立教大学 M2)

一般相対論の枠組みで宇宙の加速膨張を説明するには、我々の住む宇宙の組成の約7割をダークエネルギーが占めていなければならない。また、様々な観測から、間接的にダークマターの存在も示唆されている。しかしながらもう一つの考え方として、現実の重力が一般相対論ではない別の重力理論に従っているという可能性がある。これらの謎を説明するモチベーションから、一般相対論の修正・拡張について盛んに研究されてきた。そこで私は、一般相対論に変わる新しい重力理論として、mimetic gravity という重力理論について注目した [1]。この理論では、運動方程式に重力場の余分な自由度が現れ、コールドダークマターの源としての機能を果たすことが示されている。

本研究の目的は、mimetic gravity における連星からの重力波を明らかにすることである。本発表では、その手始めとして、この理論におい

で線形化された波のスペクトルを調べ、モードについて議論する。

1. A.H.chamseddine and V.Mukhanov, arXiv:1308.5410

重宇 c14 曲がった時空の場の理論と粒子生成

芳賀 拓 (東京工業大学宇宙物理学理論グループ M1)

Minkowski 時空の下で構成された場の理論においては, Lorentz 不変かつ Hamiltonian の最低エネルギー状態であることを要請することにより真空は一意に定まる.

しかし一般の時空に対してはグローバルな真空を一意に定めることはできない. 真空が一意に定められないことにより, Bogoliubov 変換は非自明なものとなり異なる真空を結びつける. この Bogoliubov 変換により正 (負) エネルギーモードは異なる真空での正エネルギーモードと負エネルギーモードが交じり合う線形結合で表される. これはある真空から見ると別の真空は粒子が生成されている多粒子状態に見えることに対応している.

本講演では Unruh の論文をレビューする. 具体的に Schwarzschild 時空に適用することで, Horizon 近傍の Schwarzschild 観測者から Horizon 近傍の Kruskal 観測者にとっての真空を見ると多粒子系と見えることを示した. この際に生成される粒子の数密度は Planck 分布関数になり, ここで Planck 分布に現れる温度パラメータはブラックホールの質量に依存する量として現れることを示す.

1. W. G. Unruh. Phys. Rev. D 14, 870 (1976)

重宇 c15 Cosmological quantum channel

ROTONDO MARCELLO (名古屋大学 QG D1)

It is known that the evolution of a quantum field in an expanding universe results in the creation of entangled particle states, even if the initial state is a vacuum. The purpose of our work is to consider the evolution of such initial vacuum state (with a particular choice of the scale factor) from the point of view of quantum information theory, treating the universe as a quantum channel and expressing some of the parameters of this channel in terms of its cosmological properties.

1. Jieci Wang, Zehua Tian, Jiliang Jing, Heng Fan, Nuclear Physics B, 892:390–399 (2015)
2. J.L.Ball, I.Fuentes-Schuller, F.P.Schuller, Phys. Lett. A 359 (6), 550–554 (2006)
3. M.G.A. Paris, Int. J. Quantum Inf. 07 (supp01), 125–137 (2009)

重宇 c16 What does the Bullet Cluster tell us about Self-Interacting Dark Matter?

酒井 史裕 (筑波大学 宇宙観測研究室 M1)

本発表では、What does the Bullet Cluster tell us about Self-Interacting Dark Matter?, Robertson, Andrew; Massey, Richard; Eke, Vincent, 2016, eprint arXiv:1605.04307 をレビューする。弾丸銀河団 (りゅうこつ座, 1E 0657-76) では銀河団同士の衝突が起きているが、質量分布を調べるとガスの分布よりも前方に質量が集中していることがわかる。これは、ダークマターが他の物質と重力以外の相互作用をしないために起きていると考えられている。つまり、銀河団衝突の際ガスなどの見える物質は抵抗を受け減速するがダークマターはほぼ減速することなくすり抜けるということである。衝突における数値シミュレーションを行い挙動を調べると、銀河団のさまざまな構成物質の位置を計算する方が衝突の初期条件を変えるよりもダークマターの自己相互作用の散乱断面積で得られる束縛状態に大きな影響があることがわかった。特に、今までの研究において散乱断面積の強い束縛状態を考えていたものは観測によって得られたものを反映してはならず、弾丸銀河団がダークマターを束縛する能力を大きく見積もっていた。そこで、ダークマターとガスの両方の自己相互作用を考慮してシミュレーションを行うと、ガスが引き剥がされるにつれて物質やダークマターの動径方向の分布に非対称性が生ずることがわかった。このダークマターや銀河の位置を決める方法では、動径方向のスケールの違いに敏感であり、この非対称性はダークマターと銀河における計算の誤差は打ち消されている。

重宇 c17 一般化されたスカラーテンソル理論におけるブラックホールのスカラーヘア

三浦 真 (東京理科大学 辻川研究室 M2)

現在の宇宙の加速膨張の原因とされるダークエネルギーを説明するために、宇宙論的な大スケールにおいて一般相対性理論を修正する研究が盛んに行われている。この修正重力理論のうちの 하나가 Brans-Dicke 理論というものであり、これはスカラー場と重力場が非最小結合している理論である。一方、ブラックホールは一般相対論の枠組みにおいて質量、電荷、角運動量の3つの物理量しかもち得ないということがわかっており、これを無毛定理 (No-hair theorem) という。Hawking は、Brans-Dicke 理論においてブラックホールにスカラーヘアは生えないことを示し、この結果はより一般的なスカラーテンソル理論に拡張された。これらの証明では、ブラックホール時空中でスカラー場が定数になるということが示された。その一方で、基礎方程式を2階微分までに保つ最も一般的なスカラーテンソル理論である Horndeski 理論では、スカラー場が定数とならないような解が存在することが示されている。本発表では、Horndeski 理論で並進対称性を考えることでスカラー場はブラックホール時空において非自明な振る舞いをみせ、ブラックホールはスカラーヘアを持つ可能性があることに関して、レビューを行う。

1. Black hole hair in generalized scalar-tensor gravity Thomas P. Sotiriou

重宇 c18 oct-tree 構造を用いた輻射輸送計算の加速化

油井 夏城 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

今回、2011年9月29日に掲載された論文、accelerated radiative transfer on grids using oct-tree をを題材とする。著者は Takashi Okamoto, Kouji Yoshikawa and Masayuki Umemura である。光子の

輻射輸送は銀河や星、ブラックホールといった天文学的な物質の構成を理解するうえで大変重要である。しかし輻射輸送は6次元の光子の相の時間発展を解かなければならないため正確に解くのは困難である。輻射輸送の計算は様々な方法があるが大きな計算コストがかかるなど問題は多い。そこで本論文では、三次元格子内に分布している放射源の輻射輸送計算を oct-tree 構造を用いて計算のタイムスケールを短縮する方法を二通り与えている。一つ目は Supermesh approximation で二つ目は Point source approximation である。前者は supermesh を導入する。supermesh とは、 8^n の mesh で構成されており、supermesh 内にある mesh の化学種の平均密度で characterize されるものである。遠くにある放射源をクリティカルな角度である θ_{crit} よりも小さい値である θ_s の範囲にある広がった放射源とみなしそれを supermesh 内でグループ化し、さらに輻射輸送もグループ化して計算する。この方法では計算のタイムスケールが $N_m \log(N_m) \log(N_s)$ になる。 N_m と N_s はそれぞれ mesh の数と放射源の数である。Supermesh approximation の欠点は放射源をグループ化しているために optical depth を過大評価してしまう点である。後者の計算方法はターゲットの mesh から十分遠くにあるいくつかの放射源を空間を無視して一点の光源としてみなして計算するものである。そして輻射輸送も先ほどのようにグループ化せず一つの mesh 上で計算する。この方法では計算コストは前者の計算方法より大きくなってしまいが前者よりよりいい精度で計算できる。本論文では oct-tree アルゴリズムを用いて、上記の計算方法の advantage と disadvantage を研究している。

1. Hasegawa K., Umemura M., 2010, MNRAS, 407, 2632
2. Pawlik A.H., Schaye J., 2008, MNRAS, 389, 651

重宇 c19 物質と結合するクインテッセンス場が与える中性子星への影響

小川 潤 (立教大学 D1)

近年の観測によって発見された宇宙の加速膨張により、一般相対論は綻びを見せ始めている。観測されている宇宙の加速膨張を物質場により説明するひとつの方法は、ダークエネルギーと呼ばれる圧力が負となる物質の導入であるが、そのような物質の存在を肯定する積極的な根拠は見つかっていない。そのため、そのような正体不明の物質に頼らずに一般相対論を拡張することで加速膨張を説明する試みが盛んに行われてきた。それらは修正重力理論と呼ばれる。

修正重力理論には、様々な拡張の方法が考案されているが、重力を記述するテンソル場にスカラー場の自由度を追加することによって有効的に記述できる(スカラー・テンソル理論)。スカラー場と物質が結合するスカラー・テンソル理論において、物質の密度がある臨界密度以上で自発的スカラー化(spontaneous scalarization)が起きることが知られていた [1]。[1]ではスカラー場の質量がゼロであることを仮定していたが、近年これをスカラー場が質量を持つ場合に拡張する研究がなされた [2]。[1]では自発的スカラー化が起こっている領域(特に中性子星のような高密度領域)で重力定数に変化するなど、重力法則が一般相対論から変更されることが示されている。[2]では、これらのような変更に加えて、スカラー場が有質量のためスカラー場の振動成分が暗黒物質として振る舞い、観測から要求される値と対応が付くことが判明している。

本発表では、現在の重力実験と無矛盾だが、強重力場、特に中性子星の内部構造に物質とスカラー場(クインテッセンス場)の結合が与える

影響を調べ、一般相対性理論からの差異を精査する。中性子星の半径-質量関係が一般相対論から変更されることが分かっており重力波などを与える影響や、そもそもこのような中性子星が安定に存在できるかということも評価したい。

1. T. Damour and G. Esposito-Farese, "Nonperturbative strong field effects in tensor - scalar theories of gravitation," Phys. Rev. Lett. f 70, 2220 (1)
2. P. Chen, T. Suyama and J. Yokoyama, "Spontaneous scalarization: asymmetron as dark matter," Phys. Rev. Df 92, 124016 (2015).

重宇 c20 修正重力理論によるインフレーションモデル
園元 英祐 (東京大学宇宙線研究所 M1)

宇宙初期には、地平線問題や平坦性問題などを解決する手段として、インフレーションが起こったとされている。しかし、その具体的なメカニズムは未だ解明されておらず、観測的事実に合致するようなモデルが多く存在している。その中の一つに、古くから考えられおり、かつ物理的に妥当なモデルとして、Starobinsky inflation モデルがある。重力を考える際、一般に用いられるのは、アインシュタイン・ヒルベルト作用 [$S = -\frac{1}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} R$] であるが、被積分関数はリッチスカラー R の1次である必要はなく、本来はより高次の補正 [$S = -\frac{1}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} (R + aR^2 + bR_{\mu\nu}R^{\mu\nu} + cR^3 + \dots)$] を考慮することが可能である。そこで、2次の補正項までを考えた、 [$S = -\frac{1}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} (R - \frac{1}{6M^2} R^2)$] の作用に従うインフレーションモデルを Starobinsky inflation モデルと呼び、2次の補正項を考えることによって、インフラトン場などを導入することなくインフレーション機構を説明することを可能にした。しかし、単純にこれだけでは、インフレーションを終わらせるメカニズムなどが組み込まれておらず、物理的に妥当なモデルになっているとは言えない。そこで、現在では、このモデルをもとにした様々なモデルが提唱され、研究されている。

1. V. Mukhanov,
2. A. A. Starobinsky, Phys. Lett. 91B, 99 (1980).

重宇 c21 重力波を用いた一般相対性理論の検証

山本 峻 (大阪工業大学大学院情報科学研究科情報科学専攻 M1)

重力波イベント GW150914 が報告され、強い重力場での一般相対性理論の検証が可能な時代になった。LIGO のグループはこのイベントは、一般相対性理論と無矛盾であると報告している [1]。このことは、一方で、他の重力理論に対する制限も与えることになった [2]。この2報告についてまとめるとともに今後の展望について述べる。

1. The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, Phys. Rev. Lett. 116, 221101 (2016)
2. Nicolas Yunes, Kent Yagi, and Frans Pretorius, arXiv:1603.08955

重宇 c22 Entanglement Structure in Expanding Universes

徳田 順生 (京都大学 天体核研究室 M2)

本発表では、主に [1][2] のレビューを行う。具体的にはドジッター時空上における minimally massless coupled scalar 場、conformally coupled scalar 場のエンタングルメント構造について考察する。インフレーション中の量子場のゆらぎが準指数関数的膨張により超ハッブルスケールに引き伸ばされ、時空の古典的ゆらぎとなるというインフレーションパラダイムは、観測される CMB 温度ゆらぎを典型的によく説明する。一方で、超ハッブルスケールに引き伸ばされたゆらぎがどのように古典化したのかということは現在も未解決問題である。

ゆらぎの古典性・量子性を表す指標の一つにエンタングルメントがある。今回は長波長ゆらぎの古典化の問題へのアプローチとして、ドジッター時空上において、空間的に超ハッブルスケール離れた 2 点 AB 間におけるスカラー場のエンタングルメントの構造を調べる。その結果、ドジッター時空上において超ハッブルスケール離れた 2 点間のエンタングルメントは、minimally coupled scalar 場の場合失われ、conformally coupled scalar 場の場合は失われないことが分かる。

1. Yasusada Nambu arXiv:1305.4193
2. Yasusada Nambu and Yuji Ohsumi Phys. Rev. D 80, 124031(2009)

重宇 c23 ビッグバン元素合成のリチウム問題における New Physics Scenario

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 M2)

現在の宇宙に存在する様々な元素の内、幾つかの軽元素についてはその大部分が宇宙初期のビッグバン元素合成の際に生成されたことが分かっている。また、ビッグバン元素合成の理論と観測から得られるバリオン非対称性の値は最新の CMB 観測から得られているものと非常に良い一致を見せており、標準的なビッグバン宇宙論を支持する礎にもなっている。そのような中で唯一、リチウム 7 については理論と観測の結果が一致しない。この問題はリチウム 7 問題と呼ばれここ 10 年、様々な分野で解決を目指した研究がなされてきた。今回の発表では、素粒子標準模型を超える理論を仮定することでリチウム 7 問題の解決を目指す New Physics シナリオについて近年の研究を詳しく紹介する。

重宇 c24 Schrödinger Method における密度ゆらぎの発展

福田 晋久 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

宇宙の構造は宇宙初期に存在した微小な密度の空間的なゆらぎが重力の作用によって成長することで形成される、というのが現在の標準的な考え方だ。密度ゆらぎの宇宙初期での大きさには、CMB(宇宙マイクロ波背景放射)の観測から上限が付き、バリオン物質のみを考えた場合、ゆらぎの大きさは大規模構造を形成するには小さすぎると考えられた。

しかし、ダークマターを主な重力源と考えることで、この問題は解決できる。ダークマターが集まっている場所に、重力によってバリオン物質が引き寄せられる。集まったバリオン物質によって天体や銀河が形成される、というのが現在の構造形成のシナリオだ。宇宙の物質を圧力の無視できる非相対論的 Newton 流体と考え、連続の式や Euler 方程式、Poisson 方程式で密度ゆらぎの発展を記述するのが一般的である。しかし、宇宙の物質の大半がダークマターであると考えた場合、流体近似が破綻するような状況が生じる。これを回避する、Schrödinger 方程式と Poisson 方程式を用いてその発展を記述する Schrödinger Method がある [1]。本研究ではこの Schrödinger Method でいくつかのポテンシャル中での密度ゆらぎの発展を記述し、流体近似の場合との違いを議論し報告する。

1. Widrow L. M., Kaiser N., 1993, ApJ, 416, L71
2. Coles P., Spencer K., 2002, MNRAS, 342, 176

重宇 c25 ブラックホールの蒸発を制御できるか

徳住 友稔 (名古屋大学 QG 研 M1)

古典的には black hole の horizon 半径は減少しない。しかし量子補正を考慮すると hawking radiation によりエネルギーを放出し、horizon 半径を減少させ black hole は蒸発していくことが予想されている [1]。これは自発的に起り、time scale が一般的に非常に長いので蒸発しているか確かめるのは容易ではない。

そこで、量子情報的な方法を用いて hawking radiation を制御する方法が調べられている [3]。これは、entangle した ground state の場を二つ用意し、一方の場を観測し、観測結果をもう一方に伝えた後で観測結果に依存した操作を行うことでエネルギー輸送が行われる QET(Quantum Energy Teleportation) protocol[2] を利用したものである。

今回の発表では [3] の review を行い、QET で発生したエネルギーは負であり、black hole がそのエネルギーを吸収することで horizon 半径が減少することを紹介する。また、実際に操作論的に制御はでき得るが元々の hawking radiation とは発生機構が違うので QET protocol を用いた方法と hawking radiation との対応関係についても述べたい。

1. S. W. Hawking, Commun. Math. Phys. 43, 199 (1975).
2. M. Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. 78, 034001 (2009).
3. M. Hotta, Phys. Rev. D 81, 044025 (2010).

重宇 c26 axion-photon conversion の宇宙物理的効果

正木 愛美 (神戸大学 宇宙論研究室 M1)

観測から銀河や銀河団には $mmuG$ 程度の、それより大きいスケールでは mnG 程度の磁場が存在していると分かっている。axion と電磁場とが磁場でカップルすれば photon と mixing するので、この現象が宇宙空間でどのような影響を及ぼすかを考えることは重要である。

ひとつの例として、axion-photon conversion によって超新星の減光がもたらされると考えられないだろうか。[2] ではこの考え方でパラメータを適切に選べば、宇宙が加速膨張していると考えたときと全く同じ結果が得られると主張している。本発表では [2] の主張に対して、考慮す

べき条件を丁寧に精査した [1] の論文をレビューする。論理的に考える全ての状況を尽くしたところ、余程都合の良い状況を考えない限り、axion-photon conversion で超新星の観測結果を説明することは不可能であるということが分かった。しかし減光の要因を加速膨張に求めた時によく考えられる、宇宙定数やクインテッセンスも観測から大きくずれていたたり、現在のハッブルパラメータ $H_0 \sim 10^{-33} meV$ よりも小さい質量の粒子を考えなければならない等という不自然さを持っている。

超新星を減光させる要因として、宇宙の加速膨張以外の可能性を探る余地はある。

1. Cedric Deffayet, Diego Harari, Jean-Philippe Uzan, and Matias Zaldarriaga, Phys. Rev. D66, 043517 (2002)
2. Csaba Csaki, Nemanja Kaloper, and John Terning, Phys. Rev. Lett. 88, 161302 (2002)

重宇 c27 Hybrid Higgs Inflation

佐藤 星雅 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

素粒子標準モデルの範囲でインフレーションを考える場合、インフラトンに唯一のスカラー場である Higgs 場だと考えられる。しかし、Einstein-Hilbert 作用に Higgs の作用を加えるだけでは生成される密度揺らぎが大きくなりすぎてしまう問題がある。そのため、以下のような重力相互作用を考えたモデルが考えられた。一つ目は Non-minimal coupling 項 $\xi\phi^2 R$ を加えた Higgs Inflation である [1]。このモデルの場合 Cosmic Microwave Background (CMB) の観測から結合定数を不自然なほど大きくしなければならぬことがわかっている。二つ目は、Higgs 場の運動項が曲率と結合する項 $G_{\mu\nu} D^\mu \phi D^\nu \phi$ を加えた new Higgs Inflation である [2]。しかしこの場合も CMB の観測に対し重力波揺らぎが比較的大きくなるという問題がある。そこで、本講演では、両方もモデルを融合した Hybrid Higgs Inflation を提案し、上記の問題が解決可能かどうかを検討した。その際、計量を Disformal 変換することで実質的に Einstein 重力に帰着し、変形されたポテンシャルを用いて Higgs 場のダイナミクスの解析を行った。その際 Higgs 場の高次の微分項を Inflation の Slow-roll 中では無視できると考えたので変換前の系と比較を行いその妥当性を検証した。

1. Toshifumi Futamase and Kei-ichi Maeda. Chaotic inflationary scenario of the universe with a nonminimally coupled “inflaton” field. Physical Review
2. Cristiano Germani and Alex Kehagias. New model of inflation with nonminimal derivative coupling of standard model higgs boson to gravity. Physical rev

重宇 c28 Mimetic dark matter

松井 一真 (名古屋大学 QG 研 M1)

近年、ダークマターの導入方法として mimetic dark matter の方法が盛んに研究されている。[1] これは従来の物質や相互作用に変更を加える事無く、一般相対性理論に変更を加えることによって重力以外の相互作用をしないダークマターのように振る舞う項を導入するものである。

具体的には計量を新たに補助計量とスカラー場の一階微分で再定義し、その変分から得られる運動方程式から mimetic dark matter を導出する。今回の発表では実際にこれらを紹介した後、この手法を用いた物理を議論していく。

1. A.H.Chamseddine and V.Mukhanov, Mimetic Dark Matter, arXiv:1308.5410.

重宇 c29 21cm 線と CMB 偏光を用いたニュートリノの性質への制限

石原 陽平 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

現在ニュートリノ振動の観測によりニュートリノに質量があることが判明し、それらの世代間の質量差が測定されている。しかし、ニュートリノの全世代の総質量はまだ知られていない。一方で、宇宙の密度ゆらぎの統計性からニュートリノの総質量などに制限をかけることができる。これまでに宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) や銀河、銀河団の分布の観測によって宇宙の密度ゆらぎが測定されてきた。さらに、将来予定されている Square kilometer Array などにより観測が期待されている宇宙初期の 21cm 線を用いると、これまでの観測と独立した情報を得ることができる。宇宙初期の 21cm 線とは、宇宙の晴れ上がりから最初の星ができる頃までの間に中性水素から放射された電波であり、この期間の宇宙の密度ゆらぎについての情報を持っている。ニュートリノの総質量は密度ゆらぎの成長に影響しているため、異なる時期の密度ゆらぎの情報を持つ 21cm 線と CMB を組み合わせることでニュートリノの総質量などにこれまでより強い制限をかけることができる。本発表では論文 [1] をレビューし、21cm 線と CMB を組み合わせてニュートリノの総質量などにどのように制限をかけるのかを説明する。

1. Y.Oyama, K.Kohri and M.Hazumi, J. Cosmol. Astropart. Phys. f 2016, 008 (2016).

重宇 c30 原子干渉計を用いた chameleon 場への制限

中村 智広 (名古屋大学 QG 研 M1)

宇宙の加速膨張を引き起こすダークエネルギーの候補として screening mechanism をもつ新しいスカラー場を導入するようなモデルが考えられる。そういったものの 1 つとして chameleon 場というものが提唱されている [1]。この理論ではスカラー場の質量が周囲の質量密度に依存して変わるような機構を考えることで地球上における重力の観測と矛盾が生じないことを保証している。さらにこの場と物質の結合を介して働いてしまう物質間の”5 番目の”相互作用の大きさは物質の大きさや密度が高いほど小さくなることが示せ [2]、太陽系スケールでの観測結果とも整合性が取れる。一方でそのような性質から原子のようなミクロのスケールでは既存の重力理論からのずれが見える可能性が高いと期待される。

そこで本発表では原子干渉計を用いて chameleon 場による 5 番目の力を測定する方法 [3] について review し、測定結果から場の screening のスケールを決めるようなパラメーターに大きく制限がつくのを見る。このようなミクロなスケールの観測からの制限は chameleon 場以外の

他のモデルに対しても適用可能だと思われるので、その可能性についても議論したい。

1. J. Khoury and A. Weltman, Phys. Rev. Lett. 93, 171104 (2004)
2. Clare Burrage, Edmund J. Copeland, E. A. Hinds, arXiv:1408.1409
3. P. Hamilton, M. Jaffe, P. Haslinger, Q. Simmons, H. Mdotuller and J. Khoury, arXiv:1502.03888.

.....

重宇 c31 photon sphere を持った静的 Einstein-Maxwell 時空の唯一性

穴瀬 信 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M1)

photon sphere とは一般相対性理論のよく知られた予言であり、black hole や中性子星、wormhole、裸の特異点などの ultracompact object が持つ 4 次元時空の中の超曲面として知られている。photon sphere 上で運動する光はこの超曲面上の閉じた軌道に制限される。4 次元時空内のこの領域は重力レンズとも深い関わり合いがあり、観測天文学などの分野では重要な概念である。

Schwarzschild Black Hole や Reissner-Nordstrom Black Hole などの black hole 解の唯一性定理が示されているのはよく知られているが、photon sphere をもった時空を考えた場合も black hole 解の唯一性があることが示されている。最近 Cederbaum によって、photon sphere をもった、漸近的に平坦な真空静的時空の Einstein equations の解は Schwarzschild 解と isometric になることが示された [1]。

今回の発表では Stoytcho Yazadjiev と Boian Lazov の論文 [2] のレビューとして、電場と直交する photon sphere をもった、静的で漸近的に平坦な Einstein-Maxwell 時空は Reissner-Nordstrom 解と isometric になることを示す。ただし質量 M と電荷 Q が $\frac{Q^2}{M^2} \leq \frac{9}{8}$ を満たすことが前提となる。

1. C.Cederbaum, arXiv:1406.5475[math.DG]
2. S.Yazadjiev and B.Lazov, arXiv:1503.0628v1 [gr-qc] 23 Mar 2015

.....

重宇 c32 修正された Schwarzschild 時空における通過可能なワームホールの動的安定性

高橋 一麻 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M1)

ブラックホールのような構造を始め、Einstein 方程式を満たす解の一つとして、「喉」のようなもので時空を繋ぐ数学的構造物が見いだされた。後に John Wheeler によって「虫食い穴」のような構造であるために「ワームホール」と命名されたその数学的構造物は、宇宙(時空)の離れた二点間を繋ぎ、それを通過することが可能であるならば二地点が天文学的に離れていようととも短時間でその地点へと移動できることを示している。ところが、制約を課さないワームホールは通常、非常に不安定であるため無事にそこを通過することはほぼ不可能である。

ワームホールが潰れず安定で、通過する宇宙飛行士が無事に生還を果たす事ができるには条件として、二つの時空間を繋ぐ喉に負の質量、

エネルギーを持つ物質、所謂「エキゾチック物質」が必要であることが Thorne-Morris らによって示唆されている。[1]

本発表では、二つの Schwarzschild 時空を事象の地平線を持たないように切り貼りして接合し、それら二つの漸近的平坦な時空の境界を成す 3 次元多様体上にゼロでないエネルギー運動量を集中させることによって形成される通過可能なワームホールを考える。そのように時空を接合して作られたワームホールの喉における、時空の境界を含む「エキゾチック物質」が動的である場合、その状態方程式にどのような制約が課せられるのか議論した論文 [2] のレビューを行う。

1. M. S. Morris and K. S. Thorne, “Wormholes in space-time and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity”, Am. J. Phys. 5
2. Matt Visser,

.....

重宇 c33 ブラックホール連星の形成プロセス

今里 祐也 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

今年 2 月、アメリカの重力波干渉計 LIGO が重力波の直接検出を報告し大きな話題となった。今回の重力波検出はアメリカのハンフォードとリヴィングストンにある二台のレーザー干渉計を用いて行われた。LIGO が観測した重力波は太陽のおよそ 36 倍と 29 倍の質量を持つ二つのブラックホールのインスパイラル運動と合体、合体後のブラックホールのリングダウンによるものである。合体後のブラックホールの質量は太陽のおよそ 60 倍で、この時、太陽の質量の 3 倍と同等のエネルギーが重力波として放出されたことがわかった。また、観測された重力波の周波数は 35~250Hz である。今回、LIGO により観測された重力波の波源である太陽質量の 30 倍のブラックホールやブラックホール連星の形成のプロセスはいくつか考えられているが、まだはつきりとわかっていない。また、Pulsar Timing Array(PTA) が観測する重力波(周波数 10^{-6} ~ 10^{-9} Hz) の波源である超巨大ブラックホール(太陽質量の 10^6 ~ 10^9 倍) 連星の形成のプロセスとしては、まず超巨大ブラックホールを中心に持つ銀河同士が衝突し、力学的摩擦によりブラックホールが中心に沈んでいき、超巨大ブラックホール連星が形成され、周りの星との相互作用と重力波放出により連星の軌道半径を縮めていき最終的に合体する、というものが考えられている。今回、LIGO により観測されたブラックホール連星の形成が、この超巨大ブラックホール連星の形成のプロセスと同じかどうかはまだわかっていない。今回の発表では、このようなブラックホール連星の形成のプロセスがどのようになるのかを考察する。

1. B.P.Abbott et al. 10.1103/PhysRevLett.116.061102(2016)
2. A Sesana arXiv:1307.2600v1 [astro-ph.CO](2013)

.....

重宇 c34 CGHS 模型と情報問題

植谷 将隆 (名古屋大学 QG 研 M1)

1+1 次元時空は共形場理論において重要な考察対象であるが、Gauss-Bonnet の定理より、作用が時空の位相に一意に依ってしまうという事実がある。これについて、ディラトンを導入することで物理的に豊かな理論を構築したのが Callan-Gibbins-Harvey-Strominger (CGHS) 模

型である。高次元時空は対称性を課すことでしばしば低次元に落とし込むことができ、逆に CGHS 模型も 1+1 次元でありながら様々な物理想象を再現する。

ブラックホールは熱的輻射を伴って蒸発するが、その際に波動関数のユリタリ性が一見失われている (情報喪失問題)。この問題について情報は失われることはないという結論が得られると期待され、その根拠は AdS/CFT 対応を用いた情報喪失のないシナリオが構築されたことにある。しかしながら負の宇宙項を仮定するという制限がついており、さらに、ブラックホールの蒸発過程があらわに記述されない。将来の展望としては量子重力理論が完璧な解答を与えるといわれているが、発展途上である。

上の理由を以てブラックホールの蒸発過程に焦点を当てたのが [1] であり、解析が実行可能な CGHS 模型を用いている。本発表では CGHS 模型と情報喪失問題を概観し、さらに CGHS ブラックホールの蒸発の前後で情報が保存することを結論づける。その結論はブラックホールの量子的側面への知見を深め量子重力を構築する上で非常に役立つだろう。

1. A. Ashtekar, V. Taveras, and M. Varadarajan, Phys. Rev. Lett. **100**, 211302 (2008).
2. A. Ashtekar, F. Pretorius, and F. M. Ramazanoğlu, Phys. Rev. D **83**, 044040 (2011).

重宇 c35 Sequestering Mechanism in Scalar-Tensor Theory

塚本 拓真 (名古屋大学 QG 研 M2)

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、宇宙項問題を解決するモデルとして近年提唱された Sequestering Mechanism に Scalar-Tensor Theory を導入したモデルを用いて宇宙定数が現在の値をとり得るかを見る。このモデルでは、物質場からくる真空の寄与を、Einstein 重力の action の中に global constraint を導入することで打ち消している。そうすることで、観測の値に近い値となることが期待される。だが、このモデルでは宇宙の発展を予想する必要があり、今回の発表では、幾つかの簡単な宇宙の発展のモデルを用いて宇宙項が現在の値をとり得るかを見る。

1. Nemanja Kaloper, Antonio Padilla " Sequestering the Standard Model Vacuum Energy" [arXiv:1309.6562v2 [hep-th]]

重宇 c36 Massive gravity 理論における 2 次元ブラックホールの解析

森 大作 (名古屋大学 QG 研 M2)

2 次元へ reduction された重力理論は 4 次元重力理論の有効理論として盛んに研究が行われてきた。例として、4 次元ブラックホールのダイナミクスや、ホーキング放射などが 2 次元 reduction 模型において調べられている。特に今回の発表では、2 次元の有効理論として、CGHS 模型を用いて、Massive gravity 理論における古典解、及びその安定性を

調べる研究を行った。Massive gravity 理論では一般相対論における無質量スピン 2 のモードが有質量スピン 2 になることから、この変更による新たな影響が理論的に検証できると考えられる。

- 1 C. de Rham, G. Gabadadze, A. J. Tolley, Phys.Rev.Lett. 106 (2011) 231101
1. Curtis G. Callan, Jr., Steven B. Giddings, Jeffrey A. Harvey, and Andrew Strominger Phys. Rev. D 45, R1005(R)

重宇 c37 Hybrid Higgs Inflation

佐藤 星雅 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

素粒子標準モデルの範囲でインフレーションを考える場合、インフラトンとは唯一のスカラー場である Higgs 場だと考えられる。しかし、Einstein-Hilbert 作用に Higgs の作用を加えるだけでは生成される密度揺らぎが大きくなりすぎてしまう問題がある。そのため、以下のような重力相互作用を考えたモデルが考えられた。一つ目は Non-minimal coupling 項 $\xi\phi^2 R$ を加えた Higgs Inflation である [1]。このモデルの場合 Cosmic Microwave Background(CMB) の観測から結合定数を不自然なほど大きくしなければならぬことがわかっている。二つ目は、Higgs 場の運動項が曲率と結合する項 $G_{\mu\nu}D^\mu\phi D^\nu\phi$ を加えた new Higgs Inflation である [2]。しかしこの場合も CMB の観測に対し重力波揺らぎが比較的大きくなるという問題がある。そこで、本講演では、両方もモデルを融合した Hybrid Higgs Inflation を提案し、上記の問題が解決可能かどうかを検討した。その際、計量を Disformal 変換することで実質的に Einstein 重力に帰着し、変形されたポテンシャルを用いて Higgs 場のダイナミクスの解析を行った。その際 Higgs 場の高次の微分項を Inflation の Slow-roll 中では無視できると考えたので変換前の系と比較を行いその妥当性を検証した。

1. Toshifumi Futamase and Kei-ichi Maeda. Chaotic inflationary scenario of the universe with a nonminimally coupled "inflaton" field. Physical Review
2. Cristiano Germani and Alex Kehagias. New model of inflation with nonminimal derivative coupling of standard model higgs boson to gravity. Physical rev