
2021 年度 第 51 回 天文・天体物理 若手夏の学校
重力・宇宙論 アブストラクト集

石橋 明浩 (近畿大学 総合理工学研究科・理学専攻・教授)

8月23日 13:15–14:15 A会場

BMS対称性とメモリー効果

本講演では、重力波の「メモリー効果」と時空の「漸近対称性」についてお話します。メモリー効果は、輻射バーストの通過に伴う自由粒子系（例えば重力波検出装置）の配置変化が元に戻らずいつまでも残る現象をいいます。一般相対論では、ブラックホールのような孤立系は、時空の漸近平坦性により特徴づけることができます。特にペンローズによる「光的（共形）無限遠」の概念を用いると、時空の漸近平坦性を物理的にも数学的にも大変見通しよく記述することができるため、時空の大域的因果構造の理解や重力波物理学の進展において重要な役割を果たしてきました。光的無限遠は理想的な観測者、例えば天体からやってくる重力波をとらえる検出器の世界線の集合体と解釈してもよく、孤立天体の全エネルギーや重力波などの輻射のエネルギーを光的無限遠において厳密に評価することができます。これは、光的無限遠を時空幾何の一部ととらえたとき、時空の漸近対称性が明確に定義できるからです。特に興味深いのは、漸近対称性が「BMS対称性」と呼ばれる無限次元の対称性を有し、その対称性が重力波の非振動的現象であるメモリー効果と密接に結びつくことでしょう。本講演では、一般相対論における時空の大域構造の基礎からはじめて、BMS対称性と重力波のメモリー効果の関係について解説します。関連して、重力波のエントロピーについてもお話したいと思います。

川崎 雅裕 (東京大学 宇宙線研究所・教授)

8月25日 14:30–15:30 C会場

超対称性理論における物質・反物質非対称性の生成

超対称性理論は素粒子のボゾンとフェルミオンの対称性で、素粒子の階層性の問題を解決することから注目を浴びてきた。超対称性理論では標準モデルの素粒子に対してその超対称性パートナーが存在することが予言されそれらは超対称性粒子と呼ばれる。超対称性粒子のうち最も軽い粒子は安定であることからダークマターの有力な候補となっている。さらにクォークの超対称性パートナーであるスカラー・クォークは宇宙の物質・反物質の非対称性の生成に重要な役割を果たす可能性がある。

本講演では超対称性理論の基本的な事項と超対称性の破れについて説明をした後、インフレーション宇宙においてスカラー・クォーク（レプトン）のダイナミクスを用いてバリオン数を生成するメカニズムとして、アフleck・ダイn機構を説明し、さらにアフleck・ダイn機構に伴って生成されるノントポロジカル・ソリトンであるQボールについて解説する。

重宇 1

大域的磁場を持つ動的宇宙モデルと佐々木多様体
末藤 健介 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力
研究室 修士 1 年)

現在宇宙にはジェットや宇宙磁場のように磁場が関係ある現象が観察されています。しかしそれらの性質についてはまだ良くわかっていないことが多く、これらを解明することは現代物理学の大きな課題の 1 つと言えます。電場や磁場といった電磁気力は一般相対性理論において時空を曲げる源となりますが、Maxwell 方程式と Einstein 方程式の連立系は一般に解くことが非常に困難です。Einstein-Maxwell 系の解として Bertotti-Robinson 解や Melvin 解がよく知られていて、新たにこの困難な系を佐々木多様体を三次元空間として用いて厳密解を求めた研究を私の研究室の石原と松野が行いました。[1]

ここでは接触計量空間の接触形式 η に対する Reeb ベクトル ξ が重要な役割を果たします。 ξ は発散が無く、回転と平行で測地線の接線といった性質を持っていて、磁場と電流がこの ξ に比例する形で表現されこれが系を簡単にして Einstein-Maxwell-current 系の厳密解を与えます。

しかし [1] のこの解は定常的な磁場と時空の解であったのでこの拡張として、本研究ではこの定常的な時空を時間発展させる Einstein-Maxwell-current 系について考察します。

1. Hideki Ishihara, Satsuki Matsuno,
<https://arxiv.org/abs/2012.02432>

重宇 2

Universal 10^{20} Hz stochastic gravitational waves
from photon spheres of black holes
Kaishu Saito¹ (¹Department of Physics, Kobe
University, Kobe 657-8501, Japan)

We show that photon spheres of supermassive black holes generate high-frequency stochastic gravitational waves through the photon-graviton conversion. Remarkably, the frequency is universally determined as $m_e \sqrt{m_e/m_p} \simeq 10^{20}$ Hz in terms of the proton mass m_p and the electron mass m_e . It turns out that the density parameter of the stochastic gravitational waves Ω_{gw} could be 10^{-12} . Since the existence of the gravitational waves from photon spheres is robust, it is worth seeking methods of detecting high-frequency gravitational waves around 10^{20} Hz.

重宇 3

非線形電磁気の枠組みにおけるブラックホールの 準固有振動

野村 皇太 (神戸大学宇宙論研究室 D1)

近年、コンパクト天体から生じる重力波や電磁波などの複合的観測、及び理論的研究の発展が目覚ましい。中でも、ブラックホールから伝播する波は、それに固有の振動数を伴った特徴的な減衰振動をすることが知られている。この振動は準固有振動と呼ばれ、これを観測することで、ブラックホールの質量などの情報の取得や重力理論の検証が行えるため、その解析は重要視されている。

重力と電磁気を含む理論は、典型的には、Einstein-Hilbert ラグランジアンと、電磁場の強さからなる Maxwell ラグランジアンを足し合わせた 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の準固有振動については、過去に [1] などで調べられている。一方で、量子補正など高エネルギー由来の効果を加味すると、ラグランジアンには電磁場の強さ及びその双対からなる高次の補正が含まれると期待される。量子電磁力学からの補正や、時空特異点の解消など、高エネルギー領域におけるブラックホールの性質に迫る方法の一つとして、このような非線形電磁気の枠組みでのブラックホール解が精力的に研究されている。講演者は、[2] に基づき、この非線形電磁気の枠組みにおける荷電ブラックホールから生じる重力波・電磁波の準固有振動を算出した。Einstein-Maxwell 理論では、二つの準固有振動モードの振動数は一致することが知られているが、電磁場の非線形効果により、この一致性が破れることも確かめられた。将来的には、この理論的予言と観測を結び付けることにより、ブラックホールを手段として Einstein-Maxwell 理論を超えた物理を探索できるかもしれない。

1. E. W. Leaver, Phys.Rev.D 41 (1990) 2986-2997
2. K. Nomura, D. Yoshida, and J. Soda, Phys.Rev.D 101 (2020) 12, 124026

重宇 4

連星ブラックホール合体時に放射される重力波を用いた Hawking の面積定理の検証
度會 大貴 (東京大学 理学系研究科物理学専攻
M1)

面積定理「孤立系においてブラックホールの表面積の和は減少しない」を示したことは S.Hawking の偉大な業績の一つである。天体ブラックホールは電氣的に中性と考えられるため、表面積はその質量とスピンのみで決まる。よってこの定理は、連星ブラックホール合体からの重力波データを解析し合体前後のブラックホールの質量とスピンを推

定することで検証が可能である。

一般に連星ブラックホールの合体過程はそれらの質量やスピンに依らず普遍的であり順に、インスパイラル、合体、リングダウンの三段階から成る。この検証には、インスパイラル段階とリングダウン段階それぞれにおいて、質量とスピンを同定するのに十分な精度の理論重力波形を導出することが必要である。前者はポストニュートン展開を用いて、後者はブラックホール摂動論に基づいて計算される。一方で、観測で得られるのは時系列データである。それを合体前後で分割し、それぞれの時間領域において独立なパラメータ推定を行うことで、合体前後のブラックホールの質量とスピンの同定が可能となる。

本発表ではまず、理論波形の導出とデータ解析法の概要を述べ、GW150914 を用いて面積定理の検証を行った研究 [1] をレビューする。この論文では、連星を完全な孤立系と見なした場合の事象の地平面の面積を検証している。しかし、事象の地平面は現実の動的時空では扱いつらい。なぜなら、この概念はその定義により時空全体を把握しないと決められない大域的なものであり、そして我々は時空全体を把握できないためである。例えば、将来物質が地平面下に落ち込むことがあれば、合体過程における真の事象の地平面はこの仮定と異なる可能性は大いにある。以上から、ブラックホールの表面を特徴づける新たな(準)局所的な概念とそれらに対する法則への拡張が望まれる。これらの概念について議論された [2] についても紹介する。

1. M.Isi, W.Farr, M.Giesler, M.Scheel and S.Teukolsky, "Testing the black-hole area law with GW150914", Physical Review Letters 127,011103, 2021
2. A.Ashtekar and B.Krishnan, "Isolated and dynamical horizons and their applications", Living Reviews in Relativity 7:10, 2004

重宇 5

Analogue black hole における Hawking 放射 大澤 悠生 (名古屋大学理学研究科 博士前期課程 1 年)

1975 年に Hawking によりブラックホール (BH) が熱放射 (Hawking 放射) を出すことが理論的に示された [1] が、放射の温度は重力崩壊により形成される BH の場合には CMB の温度よりも数桁低く現在まで Hawking 放射の観測はされていない。

1981 年に Unruh により流体を伝わる音波の方程式と Schwarzschild 時空上の無質量スカラー場の方程式の構造が同じであり、実験室で BH の性質を持った系 (analogue BH)

を作り出し Hawking 放射を検証できる可能性が指摘された [2]。しかし実験で用いられる流体ではその粒子間距離が有限であることに起因して音波の分散関係は非線形となり、通常の BH の場合とは分散関係は異なる。分散関係の違いにより、mode 間の量子もつれ構造にも違いが出る。具体的には、通常の BH では mode 間の量子もつれは horizon の外側に放出される粒子 mode と horizon の内側に落ちる反粒子 mode の 2 つの mode 間にしか存在しないが、analogue BH では非線形な分散関係により 3 つ以上の mode の間で量子もつれを形成することが可能となる。この量子もつれ構造の違いが analogue BH と通常の BH の放射スペクトルの間に違いを生むことが予想される。

そこで本発表では場の mode 間の量子もつれ構造に着目して analogue BH の放射スペクトルと通常の BH の放射スペクトルの間に現れる差異について議論する [3]。

1. S.W.Hawking, Commun. Math. Phys., 43, 199, 1975
2. W.G.Unruh, Phys.Rev.Lett , 46, 1351, 1981
3. Y.Nambu, Y.Osawa, Phys.Rev.D, 103, 2021

重宇 6

超伝導体から見るブラックホール像 郭 優佳 (名古屋大学理学研究科 M2)

AdS/CFT 対応とは、漸近 AdS 時空の古典的な重力理論と AdS 境界上の QFT が対応するという仮説である。これによれば、複雑な QFT を対応する古典重力理論に置き換えて、計算を簡単化することができる。AdS/CFT 対応の例として、「AdS-Schwarzschild (SAdS) 時空中の Einstein-Maxwell 理論」と「超伝導体の QFT」の対応が挙げられる。この重力理論は「ホログラフィック超伝導体」と呼ばれる [1]。ホログラフィック超伝導体の重力理論を解析することで、超伝導体の物理が解明されると期待されている。

本研究は、ホログラフィック超伝導体の重力理論における光子球の像を構築する [2]。具体的には、(3+1) 次元の SAdS 時空中の電磁場と複素スカラー場の運動を数値計算する。AdS/CFT 対応によれば、ブラックホールがスカラー場を纏っている/いない場合は、超伝導相/常伝導相をそれぞれ表す。超伝導相/常伝導相のそれぞれの場合に、AdS 境界から局所的に電磁場を発生し、対極の AdS 境界上で観測される光子球の像をシミュレーションする。また、常伝導相から超伝導相への 2 次相転移に応じた像の変化についても議論を行う。本研究によって、現実の超伝導体の測定から同じ手法で像を構築することで、超伝導体と重力理論の対応が可視化されると期待する。

1. S. Hartnoll, C. Herzog and G. Horowitz,

重宇 7

Complementarity と Firewall

脇 隆浩 (京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学
専攻 M1)

1976 年に Hawking によって提唱された「ブラックホール情報パラドックス」は既存の物理法則に大きな修正を要求する未解決問題である [1]。このパラドックスの主張は重力崩壊によってブラックホールが形成され、Hawking 放射によって蒸発する過程において情報が保存されないというものである。これを導く論理は非常に堅実であり反駁するのは容易ではない。

しかし、「妥当な仮定」(unitarity や等価原理など)の下で「ブラックホール情報パラドックス」を解決する Complementarity という仮説が 1990 年代に Susskind らによって提唱された [2]。Complementarity は二人の観測者が互いに矛盾する観測結果を持っていたとしても、その二人が通信できない限りは矛盾してもよいとする仮説である。この仮説により一度議論は収束した。

ところが、「妥当な仮定」の矛盾を単一の観測者が見てしまうため Complementary は十分でないという主張が 2013 年に Polchinski らによってなされた [3]。この主張の趣旨は自由落下する観測者は高エネルギーのモード (Firewall) に horizon 近傍で出会い、等価原理を破棄しなければならないというものである。矛盾を導く鍵となるのは量子纏れである。本発表では論文 [2][3] に基づき、Complementarity と Firewall についてレビューする。

1. Hawking, S. W, Phys. Rev. D, 14, 2460 (1976).
2. L. Susskind, L. Thorlacius, and J. Ugrum, arXiv:9306069v2 (1993).
3. A. Almheiri, D. Marolf, J. Polchinski, and J. Sully, arXiv:1207.3123v4 (2013).

重宇 8

ブラックホール熱力学と高階微分重力理論

鳥羽 修平 (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] をレビューする。一般相対性理論は多くの実験事実と一致する結果を導いているが、宇宙の加速膨張の起源等については説明仕切れていない。そこで、Einstein 方程式を導く Einstein-Hilbert 作用は計量の最低次の微分項しか持たないが、良い性質を保ちつつ高階微分項を含ま

せることでこれを拡張した修正重力理論を考えることができる。

一方、修正重力理論を熱力学的な要請から求めようとする試み [1] がある。その考え方に至るまでには以下のような背景がある。

まず一般相対性理論において、ブラックホール (BH) に対し熱力学に類似した法則が成り立つ。そのうちの一つに、BH のエントロピー、温度、エネルギーの関係を表す熱力学第一法則がある。BH のエントロピーと温度は BH の境界であるイベントホライズンに関する量で表される。さらにこの関係は一般相対性理論において定義される他の種類のホライズンでも成立する。

それとは逆に、エントロピーと温度の式、そして熱力学第一法則を仮定して Einstein 方程式を導くことができる。この導出は丁度熱力学における状態方程式の導出と類似しているため、Einstein 方程式を状態方程式と考えることができる [2]。また、この議論は重力理論の背後により基本的な理論として熱力学が存在する可能性を示唆する。

以上を踏まえ、[1] では良い重力理論は熱力学的な性質を満たすという立場を取り、熱力学から状態方程式として高階微分を含む重力場の方程式を導くことを試みる。そしてその結果として導かれた状態方程式から具体的に Lovelock 重力理論等が導かれることを見る。

1. R. Guedens, T. Jacobson and S. Sarkar, Horizon entropy and higher curvature equations of state, Phys. Rev. D 85 (2012) 064017, [1112.6215].
2. T. Jacobson, Thermodynamics of space-time: The Einstein equation of state, Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 1260-1263, [gr-qc/9504004].

重宇 9

潮汐変形現象に対する理論的解析: 一般相対論及びその拡張理論の観点から

沼尻 光太 (名古屋大学理学研究科 QG 研 M2)

修正重力理論は、一般相対性理論 (GR) に新たな物理的自由度を追加する等を行い理論を拡張するものであり、ダークエネルギーやインフレーションといった宇宙論的問題の解決や、量子重力理論への橋渡しを期待されている。今回扱う $f(R)$ 重力理論もこの一種であり、特に宇宙論的制限をクリア出来る可能性があるとして議論されている ([1] 他)。現在は強重力領域など他のエネルギースケールからくる制限を満たす関数 $f(R)$ の模索が課題となっている。

一方、観測サイドでは近年 LIGO, Virgo, KAGRA といった重力波観測器による、強重力天体の観測がスタートしている ([2] 他)。なかでも (連星合体重力波などで捉えられる)

中性子星は、その物理量が強く重力理論に依存し、なおかつこの物理量の情報は重力波の振幅や位相から読み取れる [3]。このことから中性子星は強重力領域の重力理論に対するプローブとして注目されている。

本発表では、観測による重力理論の決定を念頭に、中性子星の潮汐変形現象における修正重力理論の効果について議論する。まず GR における潮汐変形についてレビューを行い、‘星が歪む度合い’(潮汐変形率) を決定する観測可能なパラメータである Tidal Love number (TLN) を導入する。そして重力理論として $f(R)$ 重力理論を採用した際に、(Jordan frame の下で) 潮汐変形および TLN に現れる影響について検証する。

- [1] S. Capozziello, *Int. J. Mod. Phys. D* **11** (2002), 483-492
- [2] B. P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific, Virgo collaborations), *Phys. Rev. Lett.*, **119** (2017), no.16, 161101
- [3] E. E. Flanagan and T. Hinderer, *Phys. Rev. D* **77** (2008), 021502

重宇 10

宇宙論と非局所場理論

宮下 優一 (東京工業大学 宇宙論研究室 M2)

一般相対論は重力の古典的側面を記述する、最も優れた重力理論である。その予言能力は数多の実験で検証されており、特に最近では 2016 年に LIGO/Virgo によって重力波の存在が観測的に実証されている。これらの観測事実から、一般相対論は現代の物理学の根幹をなす理論として確固たる地位を確立している。その一方で、宇宙論における初期特異点やブラックホールにおける特異点の問題、量子論における摂動論的非くりこみ性などの未解決の問題もまた存在する。そのため、一般相対論は高エネルギー領域における予言能力に欠けているのもまた事実である。

これらの問題に対し、一般相対論を拡張することで、重力理論の量子補完を構成する試みが行われてきた。そのような修正重力理論の一つに、一般相対論を記述する作用に 2 次の曲率項を取り込む、Quadratic Gravity がある。これはくりこみ可能な重力理論となる一方で、系のハミルトニアンを不安定にさせるゴースト自由度を内包してしまうことも明らかになった。近年、Biswas らによって、無限次の微分項による非局所演算子を持つ二次曲率項によって、一般相対論の拡張としてゴーストフリーな重力理論 Infinite Derivative Gravity を構成された。加えて、この理論では弱重力場の下でニュートンポテンシャルの特異性が解消されることが示されている。

本発表では、まずスカラー場の場合に注目し、この非局所場理論の導入、及びその理論的性質についてレビューする。その後、非局所演算子を持つ重力理論について説明し、その理論的性質や弱重力場におけるダイナミクスを具体的に見る。

重宇 11

2次元ブラックホール時空中の偽の真空崩壊 宮地 大河 (神戸大学 M2)

スカラー場のポテンシャルに縮退していない 2 つの安定点がある場合を考える。スカラー場の値がエネルギーの高い方の安定点にある状態は偽の真空、低い方の安定点にある状態は真の真空と呼ばれている。スカラー場が偽の真空にある時、量子的な効果によって、スカラー場が偽の真空から真の真空へ遷移する。この遷移現象は偽の真空崩壊と呼ばれている [1]。特に、ブラックホールがある場合、この偽の真空崩壊の確率が大きくなることが指摘されている [2]。

本発表では、ブラックホールから離れた位置で偽の真空崩壊が起こる確率を、背景時空を固定した上で計算した我々の研究を紹介する [3]。ただし簡単のため、背景時空は 2 次元 Schwarzschild 時空を考えている。数値計算の結果、ブラックホールから離れている場合でも偽の真空崩壊が起こる確率は大きくなることがわかった。ブラックホールのホライゾンでこの確率は最も大きくなり、無限遠では平坦時空の場合と一致する。

- 1. S. R. Coleman, *Phys. Rev. D*, **15**, 2929-2936, 1977
- 2. R. Gregory *et al.*, *JHEP*, **03**, 081, 2014
- 3. T. Miyachi, J. Soda, *Phys. Rev. D*, **103**, 085009, 2021

重宇 12

回転ブラックホール時空中における真空崩壊

斎藤 大生 (名古屋大学理学研究科 QG 研 M2)

真空崩壊とは局所的に安定な状態 (偽真空) からより安定な状態 (真真空) へと遷移する現象である。この遷移は量子トンネル効果により確率的に引き起こされる。偽真空にある場で満たされた時空でこの現象を考えると、その中に真真空の場を持つ領域 (真空泡) が生じる描像が考えられる。生じた真空泡は膨張し、時空は真真空により埋め尽くされエネルギーの低い状態へ転移する [1]。

時空中に球対称ブラックホール (BH) が存在する場合はない場合に比べ真空崩壊を引き起こしやすいことが知られている [2]。この結果は BH の触媒効果として知られ、宇宙論・素粒子論的な観点での応用研究もなされている [3]。

講演者は回転している BH が引き起こす触媒効果を深く

理解することを目的に研究を進めている。本講演ではその第一歩として、回転をしながら球対称性を保つ 3 次元時空の BH(BTZ BH) の存在が及ぼす真空崩壊現象への影響について、特に角運動量の効果に着目して論じる。時間の余裕があればより現実的な 4 次元回転 BH(Kerr BH) についても議論する。

1. Coleman, De Luccia, *Phys.Rev.D* **21,3305** (1980).
2. Gregory, Moss, and Withers, *JHEP* **03,081** (2014).
3. Dai, Gregory and Stojkovic, *Phys.Rev.D* **12,125012**

重宇 13

Stable cosmology in generalized massive gravity 高寺 俊希 (立教大学 理論物理学研究室 M1)

現在 Ia 型超新星の観測から我々の宇宙では後期加速膨張が起こっているということが分かっている。この加速膨張は一般相対論を用いた Λ CDM モデルによって説明されるが、一般相対論が宇宙論的長距離でも成立するかはまだ観測で確かめられていない。そこで加速膨張を説明する方法として重力理論を修正するという試みも盛んに行われており、その内の一つとして massive gravity がある。

一般相対論はスピン 2 の質量のないゲージ理論と考えられ、ここに質量項を加えたものを massive gravity と呼ぶ。質量項を加えたことにより理論のゲージ対称性は失われるが、Stückelberg 場という新たな場を導入することでゲージ対称性を回復することができる。長年 massive gravity には質量項の非線形性に由来するゴーストの自由度が生まれてしまい系が不安定になるという問題があったが、近年 de Rham, Gabadadze, Tolley らの研究によりゴースト自由度を排除した理論 (dRGT 理論) が作られた [1,2]。しかし dRGT 理論の FLRW 解を考えると closed 解と flat 解を作ることができず [3]、open 解にも不安定性が現れてしまう [4]。これを解決するために dRGT 理論を拡張するという試みがなされた。その中でも dRGT 理論の持つ Stückelberg 場の並進対称性を破り、元々定数であった質量パラメーターも Stückelberg 場の関数であるような形で拡張した massive gravity を generalized massive gravity (GMG) と呼ぶ [5]。

本講演では [6] をレビューする。この論文では GMG を用いた一様等方膨張宇宙における計量の摂動を計算し、加速膨張解の安定性条件を調べた。また GMG の中でも元の dRGT 理論からの拡張を最小限に抑えた理論を導入し、その理論の中で後期加速膨張を再現できることがわかった。しかし GMG の枠組みで観測と整合的な膨張を再現できるかはわかっていないため、その解明が今後の展望となる。

1. C. de Rham and G. Gabadadze, *Phys. Rev. D* **82,**

0044020 , (2010)

2. C. de Rham, G. Gabadadze, and A. J. Tolley, *Phys. Rev. Lett.* **106, 231101** , (2011)
3. D' Amico, G., de Rham, C., Dubovsky, S., Gabadadze, G., Pirtskhalava, D. and Tolley, A. J., *Phys. Rev. D*, **84, 124046** (2011)
4. Gümürükçüoğlu A. E., Lin, C. and Mukohyama, S., *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, **2011(11), 030** (2011).
5. C. de Rham, L. Kelter, A. J. Tolley, *Phys. Rev. D* **90, 024050** (2014)
6. Michael Kenna-Allison, A. Emir Gümürükçüoğlu, and Kazuya Koyama *Phys. Rev. D* **101, 084014** (2020)

重宇 14

ひも模型と揺らぎのスペクトル解析 七條 友哉 (九州大学 理学府物理学専攻 M1)

自然界には 4 つの力が存在し、電磁気力、強い力および弱い力は量子力学に従うが、重力が量子力学に従っていることが検証されていない。もし重力が量子的であるならば、重力の量子力学的重ね合わせ状態が観測できるはずである。重力は他の力に比べ非常に弱い力であり、重力の効果を大きくするために物体を巨視化してしまうと環境との相互作用により、物体を量子力学的状態に保つことが難しくなる。光学機械振動子は、重力波の検出にも応用されている、光共振器と振動子とを組み合わせた力学系で、[1] では重力の量子性の検証に向けて、7mg の振動子についてエネルギー散逸を大きく低減することに成功している。これにより、従来の限界より 5 桁も重い巨視的振動子の量子制御が可能にするものである。

この研究では、光共振器の片側の鏡を固定し、もう片側の鏡をひもでつるした振動子とする光学機械振動子の理論模型を構築し、その量子制御に向けた理論解析を行った。ひもの影響を考えていない文献 [2] の解析を応用し、本研究ではひもの影響を含めて鏡の振動子の揺らぎを考える。初めに、ひもを考慮した光学機械振動子の模型を導入し、ひもの熱的な揺らぎが、ひもの端についた鏡振動子の揺らぎにどう影響するのか明らかにする。鏡の揺らぎを考えるために、[2] の研究を応用し、定常状態における鏡振動子の揺らぎの 2 乗期待値を計算し、揺らぎの振幅のスペクトル解析を行った。また、鏡の揺らぎがひもの影響を考えることでどのように変化したかについて議論する。

1. Seth B. Cataño-Lopez , Jordy G. Santiago-Condori, Keiichi Edamatsu, and Nobuyuki Matsumoto, *Phys. Rev. Lett.* **124, 221102** (2020)
2. C. Genes, D. Vitali, P. Tombesi, S. Gigan, and

重宇 15

光学振動子系における非ガウス状態の量子もつれ 三木 大輔 (九州大学 M2)

重力と量子力学を統一する量子重力理論は盛んに研究されてきたが、確立した理論は存在しない。また、重力が量子力学に従うことが自明ではないとの指摘もあり [1]、重ね合わせ状態の物体がどのような重力を生じるかは明らかになっていない。これらは実験による検証の欠如が要因となっているが、近年の量子技術の発展を契機に、重力が量子力学に従うかを量子もつれにより検証する模型が提案されてきた。量子もつれは非局所的な量子操作によってのみ生成される量子力学特有の相関であり、重力による量子もつれの生成は重力が量子力学に従うことを意味する。

量子もつれを用いた検証模型の一つとして光学振動子系 [2,3] が提案されている。この模型では光子と相互作用する2つの鏡を重ね合わせ状態にし、重力相互作用させる。先行研究では鏡を介して光子間に生成される量子もつれが議論されているが、鏡間に生成される量子もつれは評価されていない。これは鏡の状態を導出すると、波動関数がガウス型の状態 (ガウス状態) になっていないことが1つの要因となっている。ガウス状態の量子もつれについては評価法が確立しているが、非ガウス状態に対する評価法はいくつか提案されているが、一般的な評価は難しい。

私たちは非ガウス状態を特徴づけるキュムラントに着目し、量子もつれの評価法を構築した。本講演では、この評価法により鏡間に生成される量子もつれを評価し、非ガウス性とキュムラントの関係について議論する。また、この評価法で検出可能な量子もつれについても議論する。

1. R. Penrose, Gen. Rel. Grav. **28**, 581 (1996)
2. A. A. Balushi et al., Phys. Rev. A **98**, 043811 (2018)
3. A. Matsumura and K. Yamamoto, Phys. Rev. D **102**, 106021 (2020)

重宇 16

非ガウス性による重力の量子性の検証 前田 新也 (名古屋大学理学研究科重力・素粒子的宇宙論研究室 修士2年)

重力のミクروسケールにおける振る舞いを説明する理論は量子重力理論と呼ばれており、その実験による検証の困難さから、未だ確定した理論は存在しているとは言えない。近年、非相対論、弱重力極限での重力の量子性を記述する理

論の考察が活発になっており、それらは実験系での検証可能性をもたらす期待が持たれている。

量子制御技術は飛躍的に発展してきており、それに伴い、非相対論、弱重力極限での量子重力理論の実験による検証についての方法の探索が行われている。そのうちの一つとしてエンタングルメントを用いた検証が考えられてきたが、問題点があることが指摘され、新たな指標として波動関数の非ガウス性が提案された [1]。筆者らは fully quantum gravity と呼ばれるモデルと semi-classical gravity と呼ばれるモデルを実験によって区別する方法について考察をした。

また筆者らは既存の光学による手法ではなく、Bose-Einstein 凝縮と呼ばれる一粒子状態を用いての検証を提案し、量子重力による相互作用と電磁気相互作用による観測系への影響を区別する方法を提示した。

本発表では、筆者らの提案した波動関数の非ガウス性が生み出される理論的側面と、波動関数の非ガウス性の検証の指標となる量などの実験的側面についてレビューを行う。

1. Richard Howl, Vlatko Vedral, Devang Naik, Marios Christodoulou, Carlo Rovelli, and Aditya Iyer, journal, PRX QUANTUM 2, 010325 (2021)

重宇 17

回転ブラックホール周辺のアクシオン電磁気学 砂川 浩諒 (神戸大学大学院理学研究科物理学専攻 M1)

中心にカー・ブラックホール (Kerr BH) をもつと考えられる活動銀河核 (AGN) から毎秒 10^{44-47} erg のエネルギーが放出される仕組みはまだ謎である。だがこの仕組みを説明するための候補モデルとして、Blandford & Znajek 機構 (BZ 機構) というものがある [1]。BZ 機構とは、Kerr BH のエルゴ領域から磁場のエネルギーが取り出されることを予言する理論である。このことを説明するためには、BH 周辺に存在するプラズマの慣性が電磁場のエネルギーに比べて無視できる仮定 (force-free 条件) を用いる。この条件下で考える電磁気学を FFE (force-free electrodynamics) という [2]。つまり、上述の BZ 機構は FFE と一般相対論のみから導かれる理論である。

我々は 銀河中心の回転ブラックホール周辺にアクシオンダークマターが存在する可能性があることを踏まえて、アクシオンと電磁場の結合が BZ 機構に影響を与える可能性を考えた。その結果、アクシオンと電磁場はそれぞれ独立に解けることが分かった。つまり、アクシオンと電磁場の相互作用を考慮すると、force-free 条件下で電磁場を支配する方程式は、FFE を支配する方程式と全く同じものになるということである。したがって、アクシオンと電磁場の

相互作用を考慮すると、従来から知られている BZ 機構に帰着することが結論づけられる。これは驚くべき結果であり、アクションと電磁場の相互作用と BH の関係は、将来的に様々な観点から探求しがいのある開拓分野であると考えられる。本発表では、この結果を微分形式を用いて最小作用の原理から導出する。

1. Blandford R. D., Znajek R. L., MNRAS, 179, 433, 1977
2. Gralla S. E., Jacobson T., MNRAS, 445, 2500-2534, 2014

S

重宇 18

膨張宇宙における Black Hole Shadow

松田 大輝 (名古屋大学 重力・素粒子的宇宙論研究室 (QG 研) M1)

2019 年、the Event Horizon Telescope によりおとめ座銀河団の楕円銀河 M 87 の中心に位置する super-massive black hole の姿を画像で捉えることに成功した。画像から black hole を囲む明るいリング構造とその中心にある暗い領域が存在することが分かる。この暗い領域は black hole shadow と呼ばれている。この shadow の大きさや輪郭により black hole のパラメータを決定することが出来る。

今回レビューする [1] では、宇宙論的距離にある black hole に対する black hole shadow の見た目の大きさについて解析したものである。膨張宇宙での shadow の大きさを計算する手法は厳密解である Schwarzschild-deSitter の場合以外に知られていない。そのため [1] では新たな計算手法として、angular size redshift relation を用いて近似的に一般的な場合での shadow のサイズを求める方法を提案した。この計算から shadow の angular size は black hole redshift に依存した関数として得られる。結果として、大きな宇宙論的距離にある black hole の shadow のサイズが、我々の住む銀河の中心にある black hole の shadow に近いサイズになり得ることがわかった。また最後に、このような shadow の観測の可能性について議論する。

1. Gennady S. Bisnovatyi-Kogan and Oleg Yu. Tsupko, Phys. Rev. D 98,084020(2018)
2. Event Horizon Telescope, Astrophys. J. Lett. 875, L1 (2019) doi:10.3847/2041-8213/ab0ec7 [arXiv:1906.11238 [astro-ph.GA]].

重宇 19

インフレーション宇宙論におけるブラックホールのダイナミクス

諏訪 みづき (近畿大学 M1)

2019 年 4 月 10 日に EHT 国際共同研究グループが楕円銀河 M87 の中心にある巨大ブラックホールの撮影に成功したと発表した。その結果は、ブラックホール時空における光の振る舞いについて一般相対性理論が予言する通りであった。ブラックホール時空を記述する上で最も簡単な解は、Schwarzschild 時空である。Schwarzschild 時空は、十分遠方では Minkowski 時空になる漸近平坦時空である。しかし、我々の宇宙は、現在ダークエネルギーにより加速膨張しており、初期にはインフレーションという加速膨張を経験している。こうした加速膨張宇宙は漸近平坦ではなく、de Sitter (ドジッター) 時空に漸近することが分かっている。そのため、宇宙論におけるブラックホールのダイナミクスを理解する上では、背景時空がインフレーションを表すような漸近的 de Sitter 時空上のブラックホールが重要である。そこで、本発表では、スカラー場のポテンシャルがゆっくり進化する slow-roll インフレーション宇宙論におけるブラックホールについて考察する。そのようなブラックホールは、宇宙定数が時間とともにゆっくり進化する quasi-Schwarzschild-de Sitter 時空によって記述できる。本発表では、初めに静的 Schwarzschild-de Sitter 時空の基本を説明する。その後、Gregory-Kastor-Traschen の研究 [1] にしたがって、Schwarzschild-de Sitter での slow-roll するスカラー場の波動方程式を分析して、ポテンシャルが時間座標 T のみに依存する新しい座標を導入する。そして、slow-roll インフレーション宇宙論における動的ブラックホールを記述する、スカラー場を用いた Einstein 方程式の解析摂動解を示す。

1. R.Gregory, D.Kastor, J.Traschen, Classical and Quantum Gravity **35**, 155008, (2018)

重宇 20

大気チェレンコフ望遠鏡を用いた原始ブラックホールの探索

金森 翔太郎 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

現代宇宙論の興味深いテーマの一つに原始ブラックホール (Primordial Black Hole, PBH) がある。PBH とは、インフレーションの時に生じた密度揺らぎが、重力崩壊して形成すると考えられているブラックホールである。PBH は、現在観測されている大質量ブラックホールの起源を自然に説明できるだけでなく、ダークマターの正体である可能性もあることから注目されている。

PBH を探索する方法の一つとして、ブラックホールが起こすとされているホーキング放射によるガンマ線を観測す

る方法がある。ブラックホールによるホーキング放射は、時間と共に放出する光子のエネルギーが上昇する。特にガンマ線領域は、エネルギーの増加の様子が顕著であることから、エネルギーが上昇してゆくガンマ線を検出することでPBHを検出することが考えられてきた。この方法によるPBHの探索はこれまで、100 TeV 付近のエネルギーに最高感度を持つ水チェレンコフ検出器の HAWC[1]、1 GeV 付近のエネルギーに最高感度を持つガンマ線天文衛星 *Fermi-LAT*[2] などを用いて行われてきたが、検出には至っていない。

そこで、本発表では HAWC や *Fermi-LAT* などと異なる 1 TeV 付近のエネルギーに最高感度を持つ大気チェレンコフ望遠鏡の MAGIC と H.E.S.S. を用いて、PBH の探索を行った文献 [3][4] のレビューを行う。また、次世代大気チェレンコフ望遠鏡である CTA が現在建設中である。CTA は従来の大気チェレンコフ望遠鏡の 10 倍以上の感度を持つことから、PBH の探索が飛躍的に進むことが期待されている。そこで、私は CTA のデータを解析することによって、PBH の探索に貢献したいと考えている。本発表では MAGIC、H.E.S.S. の結果だけでなく、CTA を用いた将来展望についても議論する。

1. A. Albert et al. Constraining the Local Burst Rate Density of Primordial Black Holes with HAWC(2020), JCAP, 2020, 26
2. M. Ackermann et al. Search for Gamma-Ray Emission from Local Primordial Black Holes with the *Fermi* Large Area Telescope, *The Astrophysical Journal*(2018), 857,49
3. Miquel Cassanyes, Master thesis (2015), Universitat Autònoma de Barcelona
4. T.Tavernier et al, proceeding (2019) 36th ICRC 2019

重宇 21

原始ブラックホールを生成するインフレーション 笠井 健太郎 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

本発表では、原始ブラックホールについて扱う。原始ブラックホールは未だ正体のわかっていない暗黒物質の有力な候補の一つであり、その質量によっては、全ての暗黒物質を説明できる可能性が残されている。原始ブラックホールを生成するには、波長が小さく振幅の大きな宇宙の初期密度揺らぎが必要である。そのような揺らぎを作る有力で自然なメカニズムとして、インフレーションの機構が考えられる。

本発表では、まず文献 [1] に基づいて、原始ブラックホールの質量と abundance の制限がどのように行われているかを概観し、また、宇宙の初期揺らぎに基づいてどのようにして原始ブラックホールが作られるかを議論する。

その上で、そのような初期揺らぎを作るインフレーションのシナリオとして現在考えられているものを紹介する。[2] では、インフラトン場のポテンシャルの関数に inflection point と呼ばれる特徴的な領域を作ることによって、波長の小さな初期揺らぎを作ることができる。また、[3] では、インフレーションが起きる段階を 2 つに分けることにより、CMB で観測される波長領域の密度揺らぎと原始ブラックホールを生成する密度揺らぎの両方を説明できるシナリオになっている。[1] [2] [3]

1. Misao Sasaki, Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, and Shuichiro Yokoyama(2018), arXiv: 1801.05235
2. J. Garcia-Bellido and E. Ruiz Morales, *Phys. Dark Univ.* 18, 47(2017), 1705.04861
3. R. Saito, J. Yokoyama, and R. Nagata, 052(2008), 0804.3470

重宇 22

曲率ピークの形状が原始ブラックホール形成においてサイズに及ぼす影響 上原 晃一郎 (名古屋大学 重力・素粒子的宇宙論研究室 (QG 研) M1)

本発表では論文 [1,2] をレビューする。原始ブラックホール (Primordial Black Hole, PBH) は初期宇宙において形成されるブラックホールの総称で、典型的にはインフレーションの際に生じた密度ゆらぎの初期分布において、稀な高い非線形ピークによって PBH 生成が起こるとされる。これらは暗黒物質候補の一つとされ、暗黒物質が PBH の形である程度の割合で存在するシナリオが考えられている。

密度ゆらぎの重力崩壊に起因する PBH 形成の数値計算は以前からなされており、そこで得られるブラックホール形成に必要な初期振幅の閾値や形成されるブラックホール質量は、理論モデルから PBH 量の見積もりを行う上で欠かせない要素となっている。これまでに PBH 形成の閾値付近では PBH の質量が自己相似スケーリング則に従うことが示されているが、apparent horizon 形成時の PBH のサイズと質量降着の影響について複数の初期プロファイルを用いた系統的な数値解析は行われていなかった。

論文 [1] では PBH 形成の閾値が主に compaction function (所与の体積内での質量超過を表す) のピーク付近の形状と状態方程式に依存することが示され、宇宙論的に十分

精度の良い解析的な公式の構築がなされた。これらに加え、始質量や終質量に対する曲率プロファイルの形状や閾値に対する依存性、質量降着の推定などについて PBH 形成を数値的に計算することで調べたのが [2] である。これらの初期曲率ゆらぎは主に球対称性を仮定して解析されているが、今後の発展として非球対称での摂動からなる PBH 形成における数値計算などで調べることも期待される。本発表では主に PBH 形成の数値計算の初期条件と計算手法、閾値や apparent horizon の条件、並びに降着プロセスの解析について紹介する。

1. A. Escrivà, C. Germani, and R. K. Sheth, JCAP 01, (2021) 030
2. A. Escrivà and A. E. Romano, JCAP 05, (2021) 066

重宇 23

Cosmic No-hair Conjecture and Inflation with an SU(3) Gauge Field Pengyuan Gao (Kobe University D3)

We study inflationary universes with an SU(3) gauge field coupled to an inflaton through a gauge kinetic function. Although the SU(3) gauge field grows at the initial stage of inflation due to the interaction with the inflaton, nonlinear self-couplings in the kinetic term of the gauge field become significant and cause nontrivial dynamics after sufficient growth. We investigate the evolution of the SU(3) gauge field numerically and reveal attractor solutions in the Bianchi type I spacetime. In general cases where all the components of the SU(3) gauge field have the same magnitude initially, they all tend to decay eventually because of the nonlinear self-couplings. Therefore, the cosmic no-hair conjecture generically holds in a mathematical sense. Practically, however, the anisotropy can be generated transiently in the early universe, even for an isotropic initial condition. Moreover, we find particular cases for which several components of the SU(3) gauge field survive against the nonlinear self-couplings. It occurs due to flat directions in the potential of a gauge field for Lie groups whose rank is higher than one. Thus, an SU(2) gauge field has a specialty among general non-Abelian gauge fields.

重宇 24

閉じた宇宙における axion-SU(2) モデル

村田 知瞭 (立教大学 理学研究科物理学専攻 M2)

インフレーションとは、ビッグバンの前にあったとされる急激な加速膨張のことである。この機構により、宇宙が一様等方かつ平坦という状況を自然に作り出すことができ、標準ビッグバン理論の初期条件に関する問題を解決することができる。その一方で、インフレーション自体の初期条件に関する問題はあまり研究されていない。特にベクトル場を含むモデルでは、インフレーション前の非等方性が残り続けてしまう可能性が指摘されている [1]。つまり、ベクトル場を含むインフレーションモデルは初期条件に対して非自明な依存性を持っている可能性があり、十分に調査する必要がある。

今回はベクトル場を含むモデルの中でも、原始重力波の予言に特徴が見られることで注目される axion-SU(2) モデルを考える。このモデルの初期条件に関する研究として、非等方性に対する振る舞いが既に調べられている [2]。その結果として、Bianchi type-I 計量の下では、全ての非等方な初期条件に対して短時間で等方化されることが分かった。

この結果を発展させる方向として、他の Bianchi type 計量における振る舞いを調べることが挙げられる。本講演では Bianchi type-IX 計量における axion-SU(2) モデルの振る舞いを議論する。Bianchi type-IX 計量は一様等方時空において正の空間曲率を持った場合 (閉じた宇宙) に相当する。閉じた宇宙において、単一スカラー場モデルではインフレーションが起こりにくくなり、短時間で宇宙が潰れてしまう可能性がある。しかし、axion-SU(2) モデルではこの結果と異なり、閉じた宇宙において潰れにくくなるという性質があることが分かった。本講演ではこの理由について詳しく議論する。

1. M. Watanabe, S. Kanno and J. Soda, Phys. Rev. Lett. **102**, 191302 (2009)
2. I. Wolfson, A. Maleknejad, T. Murata, E. Komatsu and T. Kobayashi, [arXiv:2105.06259 [gr-qc]].

重宇 25

ultra-light axion-like particle の oscillon による 21cm 異方性の効果 宮崎一慶 (東京大学修士 2 年)

Ultra-light Axion-like particle (ULAP) は、その質量が $m \sim 10^{-20} \text{eV}$ の領域では、 ΛCDM における small scale crisis を解決しうる粒子として、近年注目を浴びている [1]。ULAP は、ポテンシャルの冪が 2 乗よりも緩やかであれば、oscillon(I-ball) と呼ばれる局所的なオブジェクトを作ることが知られている [2]。この oscillon は、断熱不変量の近似的な保存から、生成されてから赤方偏移が $z \sim 10$ 程

度まで存在し続けることが可能であり、ゆらぎを増幅することによって構造形成に影響を与える。oscillon の power spectrum を用いて、minihalo がどの程度生成されるかを計算できる [3]。この minihalo は中性水素からできていると考えられているので、背景光 (CMB) が通ることによって、超微細構造に由来する 21cm 線のゆらぎが生成される。本研究では、oscillon が存在することによって、21cm 線のシグナルへどのような影響を与えるかを調べ、それらの観測可能性について調べた。

1. L. Hui, J. P. Ostriker, S. Tremaine and E. Witten, Phys. Rev. D 95 (2017) 043541
2. M. A. Amin, R. Easther and H. Finkel, JCAP 12 (2010) 001
3. M.Kawasaki, W. Nakano, H.Nakatsuka, and E. Sonomoto 2010.09311

重宇 26

21 cm forest による暗い銀河の検出可能性

中島 光一郎 (名古屋大学 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 宇宙論研究室 修士 1 年)

宇宙の構造形成初期の天体から放射される電離光子は、宇宙の中性ガスを電離し、再電離期を引き起こした。数々の観測やシミュレーションにより、再電離期は赤方偏移 $z \sim 20$ で始まり $z \sim 6$ で終わると示唆されているが、完全な理解には至っていない。再電離期解明への大きな課題として、電離光子源の特定がある。銀河は $z > 6$ でもなお多く観測されており、主要な電離光子源として考えられている。しかしながら、現在観測されている銀河のみでは電離を維持できない可能性が示唆されている [1]。もし銀河が主要な電離光子源ならば、まだ観測されていない暗い銀河の存在が期待される。

本研究では、21cm forest による暗い銀河の検出可能性を探ることを目的とする。21cm 線は、中性水素の超微細構造に由来する電磁波である。クエーサー等の明るい背景光源と我々の間に中性水素ガスがあると、スペクトルに 21cm 線の吸収線が刻まれる。赤方偏移を考えると、観測スペクトルには異なる周波数に吸収線が刻まれていく。吸収線が連続的に刻まれた観測スペクトルは、全体として森のように見えることから 21cm forest と呼ばれる。これは Square Kilometre Array (SKA) などの大規模電波干渉計による将来観測により、高赤方偏移クエーサーを用いて観測される見込みである。暗い銀河中の中性水素ガスも例外ではなく、吸収線を刻むはずである。暗い銀河による吸収線の特徴がわかれば、こういった観測で暗い銀河が検出されることが期待できる。本講演では、暗い銀河の中性水素ガスをモデル化し、21cm forest による暗い銀河の検出可能性について議論する。併せ

て他の吸収線源モデル (銀河間物質, ミニハロー) に対しても吸収の強さを計算し、さらに SKA の感度を考慮することで、吸収線源の識別可能性についても議論する。

1. Robertson B. E., et al., 2013, ApJ, 768, 71. doi:10.1088/0004-637X/768/1/71

重宇 27

ガウス過程回帰をもちいた前景放射除去 伊東 拓実 (熊本大学 M1)

宇宙で最初の天体が誕生した後、天体が発する紫外線によって宇宙全体にある中性水素ガスが電離される時期を宇宙再電離期と呼ぶ。宇宙再電離期の 21cm 線の検出は当時の中性水素および電離源の分布や性質の解明につながることから、初代星や宇宙初期における銀河やブラックホール、銀河間物質などの研究において非常に重要である。しかしながら再電離期からのシグナルは銀河系のシンクロトロン放射など、21cm 線自身より 3 桁以上も明るい前景放射の中に埋もれており、シグナル検出のためにはこの前景を回避するか正確に除去する必要がある。前景の回避および除去については様々な研究が行われている。[1] の論文においてはガウス過程回帰 (Gaussian Process Regression, 以下 GPR) を LOw Frequency ARray (LOFAR) のシミュレーションデータに適用することで効果的に前景が除去できることを示している。今回は [1] の論文で紹介されている GPR のプログラムを Murchison Widefield Array (MWA) のデータ用に最適化し、実際に前景除去をおこなったため、その結果を報告する。

1. Mertens F. G., Ghosh A., Koopmans L. V. E., MNRAS, 478, 3640, 2018

重宇 28

銀河形成シミュレーションを用いた銀河の特異速度の推定法の開発 阿部 祐大 (弘前大学 理工学研究科 M2)

2017 年の連星中性子星合体からの重力波検出により、銀河までの距離が精度良く測定された事でハッブル定数が約 15% の精度で決定された [1]。しかし、銀河の後退速度に関しては宇宙膨張に起因する成分であるハッブル流と個々の銀河の特異運動に起因する特異速度が合わさったものであるため、特異速度の不定性が残っている。

そのため、より精度よくハッブル定数を求めるには、銀河の特異速度の正確な推定が必要になる。本研究では最新の銀河形成シミュレーション (IllustrisTNG[2]) を用いて、銀河の空間分布から特異速度による不定性を除去する手法の

開発を行なっている。TNG シミュレーションの銀河カタログは公開されており、一辺が $205h^{-1}\text{Mpc}$ の立方体内に約二百万個の銀河が分布している。

銀河の特異速度の推定法としては線形摂動論 (ZA: the Zel'dovich approximation) と 2 次の摂動論 (2LPT: 2nd order Lagrangian perturbation theory) を用いる [3]。ZA によると速度場と密度場はフーリエ空間を介して比例関係にある。また、2LPT は ZA に対して重力の潮汐効果による補正を行なった 2 次の解である。

ここで推定した特異速度で補正を行う事により、TNG の銀河カタログにおいてフィールド銀河に関しては速度の標準偏差を実空間では約 45%、赤方偏移空間では約 37% 減らすことに成功した。

1. LIGO Scientific Collaboration, et al, Nature, 551, 85-87, 2017
2. Nelson D., et al, Computational Astrophysics and Cosmology, 6,2,2019
3. Scoccimarro, MNRAS, 299, 1097-1118, 1998

重宇 29

a new approach to model baryonic effects on future cosmological surveys : the baryonification method

SeongWhan Yoon (Nagoya University M1)

For decades, cosmologists have uncovered evolution and formation of large scale structure of the Universe. On the other hand, for the small scale structure, due to complicated baryonic physics our understanding is under developed. considering that data from the small scale structure allows us to break degeneracy of cosmological models and parameters, understanding baryonic physics will be crucial for future survey projects. For this goal, likelihood analysis with simulations to study potential baryonic effects on future survey projects like Erosita and Euclid[1] may be a good choice. To approach the physics in this scale, a unique technique is developed, the ‘baryonification method’. In this method, the matter profile is modeled by displacement of particles in N-body simulations through parametrization to account for baryonic effects of stars and gas, instead of running full hydrodynamical simulations. this approach allows us to deal with baryonic uncertainty and high computational cost. Also, an emulator is constructed. Based on the relation between limited known exact results and corresponding parameters, the authors find a function of parameters for

power spectra. Power spectra can be calculated for any parameters without additional simulations. Combining these two tools with mock data, the authors perform the likelihood analysis to evaluate baryonic effects on cosmological constraints. Especially, I focus on the interesting methodology and introduce the result for the Massive neutrino LambdaCDM model. We show how cosmological constants are constrained when we use the baryonification method.

1. Aurel Schneider, Alexandre Refregier, Nicola Stoira, Mischa Knabenhans, Sebastian Grandis, Dominique Eckert, Joachim Stadel, and Romain Teyssier. 2019, arXiv e-prints, p. arXiv:1910.08494

重宇 30

CMB スペクトルの黒体からのズレの詳細測定で拓く初期宇宙探査

室越 琳生 (東北大学理学研究科天文学専攻 M1)

1965年のペンジアスとウィルソンによる宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) の発見以降、CMB は初期宇宙の理解において重要な役割を果たしてきた。現在はインフレーションの証拠である、原始重力波起源の CMB 偏光 B モード観測を目指した研究が盛んに行われているが、本発表では次世代の CMB 研究の主要な分野となるであろう、CMB スペクトルの黒体放射からのずれについて議論を行う。

1989年に打ち上げられた COBE(COsmic Background Explorer) の FIRAS(Far InfraRed Absolute Spectrophotometer) によって、CMB は温度 2.725K の黒体放射であり、黒体からのずれは 10 万分の 1 以下であることが示された。ビッグバン直後、光子とバリオンは頻りに相互作用をしており熱平衡状態にあった。しかし、赤方偏移 z が 100 万を切ると宇宙膨張によって相互作用の頻度が下がり、黒体からのずれが生じると考えられている。これは CMB のスペクトルに黒体放射からの歪みが生じることを示唆する。この歪みを検出するために PIXIE や PRISM といったミッションが計画されており、観測されればインフレーションや Λ CDM などの宇宙論モデルの理解に大きな貢献をすることが期待される [1]。本発表では、CMB スペクトルの歪みがどのような物理機構で刻印されるか、また、どのように初期宇宙に関する情報をもたらすのかについてレビューする [2][3]。

私は、現在 CMB shadow と名付けられた CMB モノポール成分の星間塵による吸収で刻印される偏光シグナルが CMB 偏光観測データに持ち込む系統誤差の評価とその除去の手

重宇 33

Early Dark Energy による Hubble Tension の解決 林 慎太郎 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) M1)

標準宇宙論モデル(Λ CDM モデル)は、“Hubble Tension” という問題が指摘されている。これは現在の宇宙膨張率を表すハッブル定数、 H_0 の観測による見積もりが、モデルに依存しないものは高い H_0 を、モデルに依存するものは低い H_0 を示しているという問題である。また、バリオン音響振動の観測は、標準モデルにおける CMB 最終散乱面での音響ホライズン r_s^* の見積もりが大きすぎることが Hubble Tension と関係していることを示唆している。そのため、Hubble Tension を解決するモデルは、 r_s^* を標準モデルより小さくするような、新しい物理を要請すると考えられる。[1]

その一つとして提案されているのが Early Dark Energy (EDE) である。EDE は再結合前のエネルギー密度を増やすことで、標準モデルよりも r_s^* を小さくし、 H_0 を大きくする。

本発表では従来の EDE モデル [2] による Hubble Tension 解決に対する問題点と改善策を議論する。それを踏まえ、EDE がどのくらいの時期に、どのくらいの量存在するのが Hubble Tension を解決するために最も有効であるか調べた結果を紹介し、[2] とは異なる EDE モデルとして、再結合前に短寿命の偽真空崩壊を連続して起こすという Chain EDE モデル [3] に関するレビューを行うとともに、このモデルによる Hubble Tension 解決の可能性について議論する。

1. L. Knox and M. Millea, Phys. Rev. D 101, 043533 (2020)
2. T. L. Smith, V. Poulin, M. A. Amin, Phys. Rev. D 101, 063523 (2020)
3. Katherine Freese and Martin Wolfgang Winkler, (2021), arXiv:2102.13655 [astro-ph.CO]

重宇 34

後期宇宙での暗黒物質崩壊によるハッブルテンションの緩和 井上 直樹 (富山大学 理工学教育部物理学専攻 M1)

宇宙論パラメータの一つであるハッブル定数 H_0 は現在の宇宙の膨張率をあらわすが、初期宇宙の観測からの推定値と局所宇宙の直接的な測定値の間に違いが生じており、この問題をハッブルテンションと呼ぶ。前者では宇宙論の標準モデルである Λ CDM モデルを仮定し、宇宙マイクロ波背

景放射の観測から H_0 が推測されている。後者は Ia 型超新星などを使った距離はしごの観測から H_0 が測定されており、二つの値のズレは 4.4σ になる [1]。宇宙論的立場からのハッブルテンション解消へのアプローチとしては、ダークエネルギーの状態方程式やダイナミクス、また暗黒物質のモデルの修正などが提案されている。本講演では、暗黒物質の二体崩壊がハッブルパラメーターへ与える影響についての論文 [2] をレビューする。暗黒物質から質量ゼロの粒子と質量のある重い粒子が生成される場合、特に生成された重い粒子が温かい暗黒物質であれば、ハッブルテンションを緩和することができる。

1. A. G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, L. M. Macri, and D. Scolnic, *Astrophys. J.*, 876, 85, 2019
2. K. Vattis, S. M. Koushiappas, and A. Loeb, *Phys. Rev. D*, 99, 121302, 2019

重宇 35

観測的効果を考慮したコズミックシアバイ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 修士 2 年)

宇宙の大規模構造の弱重力レンズ効果による遠方銀河像の系統的な歪み(コズミックシア)は、暗黒物質を含むあらゆる質量に対して感度を持つため、宇宙論研究における強力な観測対象の一つである。先行研究では、コズミックシアの 2 点相関関数やパワースペクトルの測定を通じた宇宙論パラメータの制限がなされてきた [1][2]。現在の宇宙の大規模構造は非線型な重力効果を受けて形成されたため、コズミックシアの揺らぎは非ガウス分布となっており、3 点相関関数やバイスペクトルといったより高次の統計量にも宇宙論的情報が含まれている。したがって、従来の統計量に加えて高次統計量を測定することで、より精密な宇宙論パラメータの制限が可能になると考えられている [3]。パワースペクトルやバイスペクトルを測定するにはコズミックシアをフーリエ変換する必要があるが、実際の観測領域は整った形状をしておらず明るい天体によるマスクも存在するため、その変換は非自明なものとなる。本発表では、そのような観測的効果を考慮し、観測されたコズミックシアバイスペクトルと理論テンプレートを比較する手法について取り扱う。

1. T. Hamana et al., *PASJ*, 72, 16, 2020.
2. C. Hikage et al., *PASJ*, 71, 43, 2019
3. I. Kayo, M. Takada, B. Jain, *MNRAS*, 429, 344-371, 2013

重宇 36

separate universe simulation を用いた長波長密度揺らぎへの応答の測定

寺澤 凌 (東京大学大学院 理学系研究科 修士 1年)

後期宇宙の宇宙構造形成では、重力の非線形性により、異なる波長の密度揺らぎは互いに影響を与え合う (モードカップリング)。実際の観測領域や数値宇宙論シミュレーションの体積は有限だが、この有限体積を超える超長波長の密度揺らぎ (super-survey mode) は、有限体積内の密度揺らぎに影響を与える。この超長波長モードとのモードカップリングによる共分散を Super sample covariance (SSC) という。超長波長モードは直接測定できない量であるが、近年の研究の指摘により SSC の重要性が認識され、SSC の効果を考慮した物理解析が通例になっている。超長波長モードの共分散への寄与を測定する手法として、separate universe simulation (以下 SU シミュレーション) という数値的手法が開発された。この手法では超長波長モードの影響を背景宇宙の変化に取り入れることで、構造形成への影響を非線形領域まで正しく評価できる。SU シミュレーションを用いると、物理量の超長波長モードへの応答を測定することができる。SSC はパワースペクトルの応答で記述できる。Baldauf et al.(2016) では、SU シミュレーションを行って SSC だけでなくハローの数密度の応答である、一次と二次のハローバイアスも測定した。また、ハロー数密度の密度揺らぎの分散に対する応答も測定した。発表者は、多数回の SU シミュレーションを行い、任意の宇宙論パラメータに対してパワースペクトルの応答を出力するエミュレータの開発を進めている。本発表では Baldauf et al.(2016) のレビューを行う。発表者がシミュレーションで得た結果も併せて紹介する。

重宇 37

大スケール非一様性を持つ宇宙での構造形成について

山下 晃毅 (九州大学 理学府物理学専攻 M2)

標準宇宙モデルでは背景時空の空間的一様等方性 (宇宙原理) を仮定しており、宇宙初期の CMB パワースペクトル等の様々な観測を概ね再現している。しかし一方で、CMB パワースペクトルの半球非対称性 (Eriksen et al) や、宇宙膨張率の方向依存性 (K.migkas et al.2020) 等、大スケールでの一様等方性の破れを指摘する報告もある。Aoki らによって提案された暗黒エネルギーの理論モデルは、超曲率スケールのダイナミカルなスカラー場に基づいた暗黒エネルギーモデルである (Aoki et al 2018, Nan, et al 2019)。この研究

を動機として、暗黒エネルギーが超ホライズン大スケールの非一様等方性を持つ宇宙模型の研究が行われている (Nan Yamamoto 2021)。この模型では、現在のホライズンスケールより十分大きなスケールで暗黒エネルギー密度が $O(1)$ の非一様性を持つランダムスカラー場のポテンシャルエネルギーが、加速膨張を説明する模型である。この模型は、一般に大スケールで非一様性を持ち、宇宙原理を破る模型であるが、スカラー場の非一様性のスケールは、現在のホライズンスケールより十分大きいいため観測からの制限を回避できる可能性がある。本発表では、この理論模型における暗黒エネルギーと物質密度の非一様性の進化を摂動論により調べた結果について述べる。次に、暗黒エネルギーの非一様性が、大規模構造の形成に与える影響について解析を行った結果を報告する。

- [1] H. K. Eriksen, A. J. Banday, K. M. Gorski, F. K. Hansen, P. B. Lilje, *Astrophys. J.* 660, L81 (2007)
- [2] K. Migkas, G. Schellenberger, T. H. Reiprich, F. Pacaud, M. E. Ramos-Ceja, L. Lovisari, arXiv:2004.03305
- [3] Y. Nan, K. Yamamoto, H. Aoki, S. Iso, and D. Yamauchi, *Phys. Rev. D* 99, 103512 (2019).
- [4] C.P. Singh, *Brazilian J. Phys.* 41, 323 (2011)
- [5] Y.Nan,K. Yamamoto (2021)

重宇 38

Dispersion Measure による宇宙論的距離の推定 中沢 准昭 (名古屋大学 M1)

宇宙論全般の議論において距離の指標について議論することは重要である。本講演では、宇宙論で用いる距離指標の一つとして dispersion measure (DM) を取り上げる。天体から放射された電波が自由電子と相互作用することによって、電波の周波数に依存した観測時間の遅延が生じることが知られている。DM はこの観測量に比例する量として定義され、したがってこれは観測者と天体との間にある自由電子の存在量に比例する。これまで観測の分野において DM は距離の観測と併せることで、視線方向の電子の平均密度を推定するために用いられてきた。一方で宇宙論において DM は自由電子密度がよくモデルされる状況で電波の放射源までの距離を推定する手法として使用できる。しかし大きい赤方偏移において、DM を用いた距離の推定が有効ではなくなる。これは再電離時期よりも過去の領域には中性気体しか存在せず DM が再電離完了以前の高赤方偏移では変化しなくなることに起因している。一方で、この性質から再電離時期の推定に利用できる。本講演では、DM を使った赤方偏移の推定方法とその有効性を [1] を中心に議論す

る。また、高赤方偏移での DM の振る舞いに着目して、再電離時期の推定についても議論する予定である。DM に関してハローや天の川銀河からの寄与など様々考えられるが、今回は IGM からの寄与のみを考えていく。

1. Zhang et al, The Astrophysical Journal, Volume 906, 7, 2020

重宇 39

ボソン星の動的発展

村上 由三 (大阪市立大学大学院理学研究科数物系専攻 前期博士課程 1 年)

本発表では、参考文献 [1] のレビューを行う。素粒子物理学による宇宙論への重要な示唆の 1 つに、ボソンが宇宙の形成に重要な役割を果たす、というものがある。多くの素粒子理論は、初期宇宙で弱い相互作用をするボソンが大量に作られたと予測している。また、銀河形成や原始元素合成の研究によると、ダークマターはバリオンよりも多く、ダークマターはボソン粒子で作られていると言われている。したがって、ボソンで出来た天体であるボソン星を研究することは、宇宙物理、天文学において重要だといえる。

参考文献 [1] では、自己重力相互作用をする複素スカラー場としてボソン星を考え、基底状態に摂動を加えたときの動的な発展を数値計算によって調べている。主な結果は以下の 3 つである。

- (1) 総質量 M と粒子数 N に有限の摂動を加えたとき、基底状態の形状は、安定な場合と不安定な場合に分かれ、その転換点は、critical mass ($M = 0.633M_{Planck}^2/m$, m はスカラー場の質量) に対応する。
- (2) 安定な場合に摂動を加えると、星の形状が振動し、固有振動数を持つスカラー場を放射して新しい形状へと安定化する。
- (3) 不安定な場合に摂動を加えると、崩壊してブラックホールに落ち込むか、安定した状態に移る。

上記 3 つの結果についてのレビューを行う。

1. E. Seidel, W. Suen, Phy. Rev. D 42, 384, 1990

重宇 40

Post-Newtonian 効果を考慮した Eccentric

Kozai-Lidov 時間

稲熊 穂乃里 (東京大学理学系研究科物理学専攻 M1)

ブラックホールの連星が、他の少し遠方にある天体 (3 体目と呼ぶ) に束縛されており、系が階層的 3 体系となっている場合を考える。このとき、Eccentric-Kozai-Lidov メカニ

ズムによって、連星の軌道離心率や、連星の軌道平面と 3 体目の軌道平面のなす角度 (inclination) がある時間で振動的に変化する。この振動の時間を EKL 時間と呼ぶ。現在では、様々な場合に EKL 時間が見積もられており、例えば、Antognini, J. M. O は一般相対性理論を考慮しない場合について、最低次の近似で EKL 時間は連星と 3 体目の質量比や三体目の軌道の離心率に依存していることを明らかにした ([1])。

本研究では、最低次とその次の項まで取り入れ、さらに 2.5 Post-Newtonian (PN) の効果、すなわち重力波の効果までとり入れた Secular コードと直接 N 体計算コードを用いて、3 体目の質量を変化させた場合に EKL 時間がどのように変化するか調べた。そして Secular コードと直接 N 体計算で結果を定量的に比較した。また、一般相対論的效果を考慮しない場合と、1PN まで入れた場合、2.5PN まで入れた場合では EKL 時間がどのように異なるかを確かめた。

本講演では、3 体目の質量を変化させた場合の EKL 時間の変化について発表する。はじめに、3 つのコードの結果を比較し、その精度を確かめた。また、2.5PN の効果まで取り入れた場合、Secular コードでも直接 N 体計算でも、3 体目の質量増加に伴って EKL 時間は短くなる場合があることがわかった。3 体目が連星に比べ軽い場合についても計算を行った。また、ブラックホール連星が合体する場合、合体付近では EKL 時間が徐々に短くなっていることがわかった。これに加え、講演では EKL 時間の連星と 3 体目の質量比や三体目の軌道の離心率への依存性についても議論する。

1. Antognini, J. M. O., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 452, Issue4, page 3610-3619, 2015

重宇 poster1

重力波を用いたダークエネルギー探索

窪田 圭一郎 (京都大学基礎物理学研究所 M2)

2015 年に LIGO によって初めて観測された重力波は、強重力場や高密度天体の研究のみならず宇宙論研究においても重要である。重力波は伝搬中に加速膨張の影響を受けるため、ダークエネルギーや重力の性質を調べるための新しい道具として使うことができる [1]。そのうちの 1 つとして標準音源と呼ばれるものがある。真の明るさが分かっている標準光源 (Standard Candle) では、観測された標準光源の見かけの明るさと真の明るさを比較することで光源までの光度距離が見積もることができる。この標準光源と相補的になるものが標準音源である。中性子星やブラックホールの連星によって生成された重力波は、波源までの光度距離が見積もることができる。そのため光度距離が分かる標

準光源になぞらえて、この重力波源を標準音源 (Standard Siren) と呼んでいる。

標準光源 (電磁波) と標準音源 (重力波) から見積もられた光度距離は、一般相対性理論を拡張したダークエネルギーモデルを調べる上で重要である。一般相対性理論では、同じ赤方偏移にある標準光源と標準音源から見積もられた光度距離は等しい。しかし一般相対論を拡張したダークエネルギーモデルでは一般に等しくならないため、この差を用いることでダークエネルギーの性質を調べることができる [2]。

さらに標準音源を用いると、宇宙はしごとは独立に近傍のハッブル定数を測定することができる。宇宙はしごに独立なハッブル定数の測定は、近年問題になっている近傍の観測から測定されたハッブル定数と、遠方の観測 (CMB) と Λ CDM モデルを使って測定された現在のハッブル定数が一致しないという問題 (Hubble tension) を解決するためにとっても重要である。

本講演では標準音源の現状や将来の展望、また他の重力波を用いたダークエネルギー探索も紹介する。

1. J. M. Ezquiaga & M. Zumalacárregui, *Front. Astron. Space Sci.* **5**, 44 (2018).
2. M. Lagos, M. Fishbach, P. Landry & D. E. Holz, *Phys. Rev. D* **99**, 083504 (2019).

重宇 poster2

Analogue Gravity

佐田 彩夏 (大阪市立大学大学院理学研究科 M2)

一般相対論やその拡張理論 (修正重力・量子化) の検証のために Black hole の存在を確認したいがそれ自身を直接観測することは原理的に不可能であるため、代わりに Black hole に関連して起こると予想される現象を観測する必要がある。しかし、そのような現象の一つである Hawking radiation は宇宙背景放射に比べて非常に微弱なため観測は殆ど不可能だと考えられている。そこで 1980 年に Unruh が地球上の流体でつくった Black hole に類似した環境 (Analogue Black hole) によって観測することを提案した。[1]

このように Hawking radiation の類似現象の観測を目的として誕生した Analogue Black hole だが、現在ではその限りでなく superradiance や重力波の類似現象も研究されている。[2][3]

本研究では本学の超低温研究室で実現されている超流動の吸い込み渦 [4] を定常回転する Black hole (Kerr Black hole) の類似として考え、実現可能性のある興味深い現象について考察する。

1. W. G. Unruh, *Phys.Rev.Lett.* **46** 1351-1353, 1981

2. Torres, T., Patrick, S., Coutant, A. et al., *Nature Physics* volume 13, pages833–836, 2017
3. Satadal Datta and Uwe R. Fischer, arXiv:2011.05837, 2020
4. H Yano et al, *J. Phys.:* Conf. Ser. 969 012002, 2018

重宇 poster3

非線形 teleparallel gravity における GR との等価性

齋藤 仁 (立教大学理学研究科 物理学専攻 M1)

本発表は、論文.1 のレビューである。重力のもっとも標準的な理論は、振率と non-metricity を 0 にして曲率で重力を記述する一般相対性理論 (GR) である。一方で、曲率を 0 にして異なる幾何学量を用いて重力を記述する理論も存在していて、例えば non-metricity を 0 にし振率で重力を表す Teleparallel Equivalent of GR (TEGR) が存在する。振率で表される teleparallel スカラーの作用は表面項を除いて Einstein-Hilbert 作用と等しいので GR と等価であることが知られている。一方で、teleparallel スカラーについて非線形の拡張をした $f(\mathbb{T})$ 理論が GR と等価であるかは自明ではない。また、 $f(\mathbb{T})$ 理論は局所 Lorentz 対称性が破れてしまうことがわかっている。よってこの非線形な理論には問題がないのか、さらには GR と等価であるのかがここで知りたいことである。

引き続き $f(\mathbb{T})$ 理論を考える。作用に共形変換を施し Einstein frame に移すと、Einstein-Hilbert 項と共形モード、局所 Lorentz 対称性の破れる項に分かれる。しかし、Minkowski 時空周りで摂動の 2 次まで考慮すると、今まで破れていた局所 Lorentz 対称性が回復する。さらに、ゲージ変換と場の再定義を行うことによって共形モードの運動項を取り去ることができ、この自由度は dynamical でないことがわかる。これにより、 $f(\mathbb{T})$ 理論の摂動の 2 次の範囲では GR と同じ自由度になる。また、論文.1 では、non-metricity を用いる $f(\mathbb{Q})$, $f(\mathbb{G})$ 理論でも同じ結果になることを示している。今回の計算では余分な自由度が消え、GR と等価になったが、他の teleparallel 理論などを考えた時には Minkowski 時空周りで自由度が残る可能性があるもので、これらについて何を表しているのかがこれからの展望である。

1. J. B. Jiménez, T. S. Koivisto, *Universe* **7**, no.5, 143 (2021) [arXiv:2104.05566 [gr-qc]].

重宇 poster4

静的な二体ブラックホール時空中の円軌道の解析

田村 悠陽 (大阪市立大学大学院理学研究科数物系 専攻 宇宙物理・重力研究室 修士1年)

重力波による天体の観測が可能になってから、一つの天文学的な観測対象に対して複数の信号で観測することが非常に重要となっている。重力波により観測された連星ブラックホールの合体は、連星ブラックホールが宇宙の中に存在することを示唆したが、ブラックホールの定義より、ブラックホールそのものの電磁波による観測は困難である。

本研究では Innermost stable circular orbits in the Majumder-Papapetrou dihole spacetime[1] の論文をもとに、アインシュタイン方程式の特殊な厳密解である静的な最大電荷の二体ブラックホール解を用いて、等質量の連星ブラックホール時空を表す計量を構築し、その時空中の null 測地線を解析した。

連星ブラックホール間の null 円軌道の安定性について解析し、それらの円軌道がブラックホール間の距離によってどのように変化するかを調べた。

1. Keisuke Nakashi and Takahisa Igata, Physical Review, D99, 124033, 2019

重宇 poster5

ゴーストスカラー場を用いたワームホールの安定性解析

加藤 翠 (立教大学大学院 M1)

本発表では [1] についてレビューする。ワームホールとは、ある時空と別の時空がスロートと呼ばれる部分で結合された時空構造を指す。ワームホールの存在は一般相対論では説明できないエキゾチックな物質を導くため、非常に興味深い研究対象として注目されている。しかしワームホールは理論的に予言されるが、現実的に存在しうるのは分からない。近年の観測技術の進歩によってその存在に関する示唆を得られるかもしれない。

本発表では [1] についてレビューし、ワームホールの線形安定性に関して議論する。安定性はワームホールの観測可能性を議論する上で重要な要素である。不安定なワームホールの場合、摂動の時間発展によってスロートが大きく変形し、ワームホールの崩壊を導くことになる。[2] ではそのような不安定なワームホールが最終的にブラックホールに成長することが示されている。

[1] では静的球対称なワームホールの解に注目し、摂動に対する線形安定性について議論する。安定性はワームホール時空を作り出す物質モデルに依存するが、[1] では質量ゼロのゴーストスカラー場を採用する。本発表では摂動の時間発展が指数関数的に成長するモードを持っていることを導き、ゴーストスカラー場を用いた静的球対称なワームホー

ルの解が線形摂動に対して不安定であることを示す。また不安定性に関連する時間スケールがワームホールのスロートの面積半径を光速で割ったオーダーに等しいことを示す。これは宇宙年齢よりも短い時間でワームホールが崩壊することを示唆する。今後の展望としては [1] で想定したモデルとは別のワームホールモデルとして回転ワームホールに注目し、線形摂動に対する安定性を考察していこうと考えている。

1. J.A.Gonzalez, F.S.Guzman and O.Sarbach, Class. Quant. Grav. 26, 015010 (2009)
2. J.A.Gonzalez, F.S.Guzman and O.Sarbach, Class. Quant. Grav. 26, 015011 (2009)

重宇 poster6

CMB 観測を説明する Quartic Hilltop Inflation モデルの研究

乾 玲冬 (名古屋大学 M1)

ビッグバン宇宙論は地平線問題や平坦性問題等の諸問題を内包しているが、これらを解決する理論としてインフレーション理論が有力視されている。この理論では、宇宙最初期において、宇宙が加速膨張したとされている。インフレーションを引き起こす最も単純な機構は、インフラトンと呼ばれる単一のスカラー場 ϕ によって記述される。単一のスカラー場によって記述されるインフレーションモデルは数多く存在するが、それらは観測結果と整合性がなければならぬ。代表的な観測結果としてプランクによる CMB の観測結果があり、スペクトル指数とテンソル・スカラー比に制限が課されている。ポテンシャルの勾配が十分緩やかで、インフラトンがゆっくりとポテンシャルを転がり落ちる、という「スローロール・インフレーション」は CMB の観測結果と一致する。本発表では、スローロール・インフレーションモデルの中でも、ポテンシャルが記述されるヒルトップ・インフレーションに注目する。ただし、 p は定数、 q はプランク質量、 n は正の整数である。特に、 $q=4$ とした場合は数値計算結果は観測結果と整合性があり注目されている。一方で、「インフラトンがスローロールする期間は非常に短い」という仮定から導かれる従来の解析解は、数値計算の結果と異なり、観測結果を再現できていない。[2] そこで本発表では従来の仮定を取り除いて本モデルの解析解を再構築する。そして、この新たな解析解による予言が観測結果と一致していることを確認する。本発表内容は [2] のレビューである。

1. Planck 2018 result. X. Constraints on inflation
2. Konstantinos Dimopoulos, arXiv:2006.06029v2

重宇 poster7

チェレンコフ放射状の重力波探索

桑原聡一郎 (東京大学理学系研究科物理学専攻修士1年)

バーストと呼ばれる比較的 duration の短い重力波の探索を過去の LIGO, Virgo のデータを利用して行う。質点が超光速で媒質を進んだ際にチェレンコフ放射や衝撃波のような重力波が発生すると仮定し、理論波形を生成する。本研究では、チェレンコフ放射の波形やスペクトルの特徴を持った波形を生成する。この重力波の存在自体が不確定であり、当然質点の移動速度や媒質の種類も確定していないため、パラメータを設定し一定の特徴は保ちながらも、数多くの波形生成を行う。複数波形の生成にあたってはパラメーター空間内なるべく偏りがなく、パラメーターを決定し、見逃しがなく注意を払う。それぞれの波形について実際の時系列データと比較し、Matched Filtering を用いて近い波形を持った重力波がないか探索する。この重力波探索の pipeline には GStreamer を用いることで、計算のスリム化を図る。該当する重力波が発見されなかった場合には、対象重力波の存在領域について制限をつける。

重宇 poster8

アクシオン暗黒物質によるナノヘルツ帯の重力波の痕跡

村越 悠太 (福島大学 M1)

アクシオンは強い CP 問題を解決するために導入された未知の素粒子で、暗黒物質の候補としても考えられている。ハッブルパラメータがアクシオンの質量に匹敵するようになると、ゼロ以外の初期のずれを持つアクシオンが振動し始め、暗黒物質として振る舞う。振動の開始前後で、U(1) ゲージ場はアクシオンとの結合によって爆発的に生成され、かなりの量の確率論的重力波の放出につながる。このゲージ場の爆発的な生成により、すぐに線形解析の適用が難しくなるため、非線形な解析が必要になる。

本発表では、ゲージ場とアクシオンの非線形ダイナミクスを適切に解く数値格子シミュレーションを用いて、正確な暗黒物質の存在量を与える減衰定数 f のアクシオンが次世代電波望遠鏡 SKA によって検出可能と考えられるナノヘルツ帯の重力波を生成することや、結果として得られる重力波スペクトルが、アメリカとカナダの研究グループ NANOGrav の 12.5 年のデータによる、過去のアクシオン密度を大幅に低減する必要がある問題を説明する可能性があることも紹介する。[1]

1. N. Kitajima, J. Soda, and Y. Urakawa, Nano-Hz Gravitational-Wave Signature from Axion Dark Mat-

ter, Phys. Rev. Lett. 126, 121301 (2021)

重宇 poster9

主成分分析による前景放射除去 宮元 龍之介 (熊本大学 M1)

宇宙の大規模構造を探る有効な手法として 21cm 線の強度マッピングがある。21cm 線とは中性水素が超微細構造の準位間において遷移する際に生じる電磁波のことである。しかし、21cm 線のシグナルは非常に弱く、宇宙再電離期以降の電波放射、主に銀河系内のシンクロトロン放射や系外電波源由来の前景放射などの強烈な前景放射に覆い隠されるため 21cm 線の検出は非常に困難である。そのため前景放射の除去もしくは回避が必要となってくる。

前景放射除去としては様々な方法が存在する。[1] の論文では 3 つの手法 (主成分分析、独立成分分析、多項式近似) を考へて。そこで今回は [1] の論文を元に、主成分分析について説明する。この手法は FAST や SKA などの将来的な観測でも用いられる可能性があり、すでいくつかシミュレーションで実験が行われている。[2] の論文では FAST で主成分分析を用いた前景放射除去における最近の進展を紹介する。

1. David A., Philip B., Pedro G. F., Mario G. S., MNRAS, 447, 400-416, 2015
2. Elimboto Y., Yin Z. M., Di L., Xuelei C., Wei M. D., MNRAS, 000, 1-13, 2018

重宇 poster10

初代星の星質量・SFRD と宇宙論的 21-cm 線シグナルの関係

伊元 聖也 (名古屋大学 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 宇宙論研究室 博士前期課程 1 年)

初代星は宇宙で初めに生まれた星々で、 $z=30$ から $z=20$ の間に形成されたと考えられている。宇宙で初代星が果たす役割は電離源、重元素合成、BH seed と多様で、それぞれが関連する宇宙再電離や星形成、構造形成といった研究のためにも、初代星の理解は重要である。現状で初代星の観測はなされておらず、理論やシミュレーション先行で研究が進んでいる。しかし IMF などの詳細な性質について一致した結果はなく、将来観測によって検証する必要がある。

初代星の観測手段として、中性水素の超微細構造に由来する 21-cm 線が有望視される。初代星は電離光子を発生し、周囲のガスを電離・加熱することで、ハローや IGM の 21-cm 線シグナル分布を変化させる。この変化は初代星の物理的性質、特に星質量を反映することが予想される [1]。よって初代星形成時期の 21-cm 線分布を観測することで、初代星

の持つ典型的な星質量を検証できる可能性がある。

本研究の目的は、初代星形成期の 21-cm 線分布とその統計量が、初代星の星質量や SFRD にどう対応するか、それは観測によって識別可能か否かを、宇宙論的シミュレーションから探ることである。

先行研究 [2] では、21-cm 線分布のシミュレーションにこれまで考慮されていなかった LW フィードバックと UV 加熱を導入し、初代星の星質量と 21-cm 線分布、統計量の対応関係を計算している。これによると初代星の電離への寄与が小さい場合、星質量による違いはわずかで区別は難しいことが示されている。

しかし、初代星の電離への寄与については再考の余地がある。本講演では [2] を発展させ、より現実的な電離光子脱出率の下、初代星の星質量・SFRD が 21-cm 線分布、統計量へ与える影響について計算し、その観測可能性について議論する。

1. T. Tanaka and K. Hasegawa et al., MNRAS, vol 480, pages 1925–1937, 2018
2. T. Tanaka and K. Hasegawa, MNRAS, vol 502, pages 463–471, 2021

重宇 poster11

重力レプトジェネシスによる物質の起源の研究及び理論の検証

平 啓輔 (福島大学 M1)

バリオン数生成の中で C 対称性や CP 対称性が破れていてもまだ不備が存在し、これを解消するとされる仮説がレプトン数生成である。レプトン数生成とは、右巻きマヨラナニュートリノが崩壊する際に CP の破れがあることで、左巻きニュートリノがその反粒子よりも多く生成されるという理論である。右巻きニュートリノは、熱的に生成されると考えられ、これが減衰することで非対称性が生じるとされる。非対称性は、カイラル重力波の生成による膨張中のレプトンのカレントの重力異常により生成されるという理論が、重力レプトジェネシスである。[1]

量子ループレベルでの重力潮汐効果は、湾曲した時空のレプトンの力学を変更し、低エネルギーの有効作用 S_{eff} で別の形に変換される場合がある。これまでに大規模な BSM 理論で、 S_{eff} の CP の奇数曲率によって引き起こされる相互作用が、膨張宇宙でレプトンと反レプトンの分散関係を異なる方法で変更することで、非対称性が示されている。私が研究に用いる論文では、CP の曲率の偶数相互作用がレプトン数のカレント保存を破り、宇宙が拡大につれてレプトン数密度の進化を変更することが示されている。これらの効果は、一般化されたボルツマン方程式で実装され、さまざま

な宇宙論的シナリオでのレプトン数密度の動的進化を追うために使用される。この理論は、宇宙の進化の非常に早い時期に、重力によって引き起こされる可能性のある重大な非対称性を予測している。[2]

1. Kohei Kamada, Jun'ya Kume, Yusuke Yamada and Jun'ichi Yokoyama, JCAP, 1911.02657v3, 1-2, 2019
2. Jamie I. McDonald and Graham M. Shore, JHEP, 2006.09425v2, 2020