

重力・宇宙論

1 スニヤエフ・ゼルドビッチ効果を用いた原始ブラックホールの密度パラメータへの制限

阿部 克哉 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C研) M1)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) などの観測により、宇宙に存在する物質のうちおよそ 85% が暗黒物質であることが判明している。しかし未だその実態は明らかにされておらず、暗黒物質の解明は宇宙論における重要課題の 1 つとなっている。その暗黒物質の候補の 1 つに原始ブラックホール (PBH) がある。PBH とは、宇宙初期に高密度領域が重力崩壊して形成されるブラックホールである。未だに観測例がなく、現在様々な観測によってその存在量に制限を与える取り組みがされている。

今回はスニヤエフ・ゼルドビッチ効果 (SZ 効果) と呼ばれる現象の観測により、PBH の密度パラメータに制限をつけることを考えた。SZ 効果とは CMB 光子が高温プラズマを通過した時に、逆コンプトン散乱を通じて電子からエネルギーを受け取る現象である。PBH 周辺のガスは、降着時の重力エネルギー解放により温度が上昇するため高温プラズマとなり、SZ 効果を引き起こす。

本発表ではまず、初代星の超新星爆発が引き起こす SZ 効果の観測可能性を議論した文献 [1] をレビューする。文献 [1] では、初代星の超新星爆発により宇宙へ注入される全エネルギー量を計算することで、超新星爆発が起こす SZ 効果の角度パワースペクトルを見積もっている。その結果、WMAP 衛星による観測と矛盾しない範囲で最大のエネルギー量を考慮しない限り、初代星の超新星爆発の SZ 効果は銀河団の SZ 効果に埋もれて観測が難しいことがわかった。さらに独自の研究として文献 [1] の手法を応用し、PBH の質量や存在量などを媒介変数にして PBH による SZ 効果を定式化した。この媒介変数を変えることにより様々な PBH のモデルを再現できる。それらのモデルにおける SZ 効果の計算結果を Planck の観測結果と比べることにより、PBH の密度パラメータに対して上限をつけることを試みた。本発表後半では、その結果について議論を進める。

1. Oh, S. P., Cooray, A., & Kamionkowski, M. 2003, *mnras*, 342, L20

2 regular black hole の不安定性と蒸発のタイムスケールの考察

西村 和也 (立教大学 M1)

一般相対論とは、理論と観測の両面から正当性が支持されている重力に関する理論である。ブラックホール (BH) は Einstein 方程式の解であり、内部に特異点を持つ。特異点では曲率が発散するため、一般相対論は予言能力を失う。ところが、BH は Hawking 輻射によって蒸発するため、最終的に特異点が露出してしまうと考えられる。この問題を解決し、BH の蒸発する過

程を説明できるモデルとして Regular BH (RBH) というものが考えられる。このモデルでは特異点が存在しないため、蒸発過程に関する完全な説明を与えることができると言われている [1]。RBH の蒸発が終わるまで安定して存在するのであれば、最終過程を含め BH が蒸発する全ての過程を説明できることが期待される。しかし、蒸発が完了する前に RBH が崩壊してしまつたら、蒸発の過程を説明できないことになってしまう。

私は本講演で、論文 [2] をレビューする。この論文では、初めて RBH の崩壊と蒸発が完了するタイムスケールを比較している。実際これらのタイムスケールを比較すると次の問題が生じる。ひとつは RBH に存在する内部地平面が不安定であるため、一般に有限の時間で特異点になってしまうことである。ふたつめは、RBH が完全に蒸発するためには無限の時間が必要になるということである。以上から RBH が不安定であることがわかり、内部地平面が壊れる時間の方が蒸発が完了するよりも早いため、RBH を用いて BH の完全な蒸発過程を説明できないということがわかる。

1. S. A. Hayward, *Phys. Rev. Lett.* 96, 031103 (2006) doi:10.1103/PhysRevLett.96.031103 [gr-qc/0506126].
2. R. Carballo-Rubio, F. Di Filippo, S. Liberati, C. Pacilio and M. Visser, arXiv:1805.02675 [gr-qc].

3 ボースアインシュタイン凝縮体による超大質量ブラックホール形成

高橋 さくら (お茶の水女子大学人 理学専攻物理科学コース 宇宙物理研究室 M1)

銀河中心に偏在する超大質量ブラックホール (SMBH) は、赤方偏移 6 程度の早期宇宙にも既に存在していたという観測事実がある。この観測事実は、SMBH が赤方偏移 6 の早期宇宙よりもさらに前に形成されたということを示唆している。この早期宇宙に形成された SMBH を説明するために様々な理論が考えられている。しかし、従来のバリオン性物質の成長から SMBH を形成する理論では、エディントン降着率を維持し続けたとしても、赤方偏移 45 で 10^3 の種ブラックホールが必要になる [1]。そのどちらも実現するのは難しい。

そこで本発表では、バリオン性物質ではなく、ダークマター (DM) がボーズアインシュタイン凝縮体 (BEC) である場合 (典型的にはアクシオン) を考え、それが自己重力によって崩壊し、SMBH を形成するというシナリオを詳述する。これによると、凝縮体は赤方偏移 10 程度の宇宙初期に自然に重力崩壊し一気に SMBH を形成する。非相対論的な仮定のもと、BEC の運動を記述するグロスピタ・エフスキー方程式をガウス近似した場で解くことにより、系の大きさの時間発展が求められた。文献 [2] ではガウス近似した場を用いたが、本研究ではより一般的に場を仮定した。本来であれば、ラグール倍関数と球面調和関数を用いて完全直交な一般的な場を用いることが正当であるが、急激な動径方向の崩壊や極度な非等方性を表現するために

動径方向のガウス近似と球面調和関数の組み合わせで場を仮定した。また、典型的な物理量を代入することにより、ボゾンの自己相互作用や自己重力によってつぶれる効果と、角運動量によるそれを阻害する効果のつり合いで決まってくる、SMBHの質量関数が求められた。それらを数値計算で追った過程を紹介する。

1. Eduardo Banados et al. arXiv:1712.01860v1 (2017)
2. P Gupta and E Thareja. arXiv:1512.08623v3 (2016)
3. Pierre-Henri Chavanis. arXiv:1604.05904v1 (2016)

4 ブラックホール合体におけるイベントホライズンの構造の解析

金沢 瞭 (京都大学 基礎物理学研究所 M2)

重力波の観測により、ブラックホール連星を観測できるようになった。ブラックホール連星は強重力での一般相対論を検証する上で理想的な天体であり、特にイベントホライズンはブラックホールを特徴づけるものであるため、ブラックホールの合体に伴うイベントホライズンの進化を知ることは興味深い問題である。しかし、イベントホライズンは無限の未来での時空の振る舞いが分かって始めて計算できるものであるため、数値的に解くことは困難である。

Empanan ら [1] は2つの異なる質量 $m, M (m \ll M)$ を持つブラックホールの合体において、 $M \rightarrow \infty$ の極限を取り、小さい方のブラックホール m の周りに注目することで、イベントホライズンがどう時間発展するのかを解析的に求めた。彼らのアイデアは $M \rightarrow \infty$ の極限を取ったことで、ブラックホール m がブラックホール M の作るホライズンの外にある限り、大きいブラックホール M の重力の効果を消してしまったことにある。そのためブラックホールの摂動を解くことなく、合体するブラックホールのホライズンの構造を求めることが出来た。

この研究では、合体するブラックホール m, M の計量の発展を $m/M \ll 1$ のべきで展開することで摂動的に求め、そこから合体するブラックホールのイベントホライズンの構造を求める。その際 Empanan ら [1] のアイデアを参考にし、通常 Extreme Mass Ratio を考えるときの $m \rightarrow 0$ の極限ではなく $M \rightarrow \infty$ の極限を取ることで小さい方のブラックホールの周りの時空の構造を調べることができる。

講演では、まず Empanan ら [1] の研究を紹介した後に、背景が Schwarzschild 時空上の計量の時間発展の定式化を Zerilli[2] に基づき導入し、私の研究の計算の流れと、現状を報告する。

1. R. Emparan and M. Martinez, Class. Quant. Grav. 33, no.15, 155003 (2016)
2. F. J. Zerilli, Phys.Rev. D, 2, 2141-2160 (1970)

5 事象の地平面上に生える光子の毛

古郡 秀雄 (名古屋大学 重力・素粒子的宇宙論研究室 (Qg 研) M1)

B.Carter の B.H. の無毛定理によれば、4次元時空における定常 B.H. 時空は質量 M , 角運動量 J のみによって特徴付けられる Kerr B.H. に微分同相である。これは電磁場を考慮すると、電荷 Q もパラメーターとして現れ、Kerr-Newman B.H. に微分同相という定理になる。このように、3種類のパラメーターで B.H. は記述されるので、B.H. はその構成物個別の情報や、構成の仕方といった情報の一切を失っている、もしくは、地平面の内側に隠しているように思える。どちらにせよ、我々が B.H. 形成の情報を知ることはできない。

また、S.Hawking の 1974 年の論文によれば、B.H. は量子効果を考慮すると、地平面近傍での粒子対生成により熱的な放射を起こす。無毛定理を思い出すと、この放射は B.H. について3種類の保存量 M, J, Q についてしか知らないもので、B.H. を形成した粒子達と相関を持つことはできない。宇宙背景放射などによって B.H. の質量が増えることを無視すれば、B.H. は Hawking 放射によっていずれ完全に蒸発してしまうと考えられる。今、地平面はもはや存在しないので B.H. 形成の情報を保持する場所はどこにもなく、放射もその情報を持ち出し得ないので情報は完全に破壊されてしまったことになる。

この情報損失の問題は B.H. の情報パラドックスとして広く知られ、議論されてきた。本講演では、Minkowski 時空での電磁気理論に対し無限個の漸近的対称性と、それに対応する拡張された電荷の存在を示した後、その議論を漸近的平坦性を持つ B.H. 時空に応用することで、B.H. の地平面がその拡張された電荷を持ち得ることを論じ、また、その電荷が B.H. 形成の情報の一部を保持できることを、Vaidya B.H. に中性ヌルの非球対称カレントを打ち込むモデルについて示す。地平面上の保存量が B.H. 形成の情報を持つことは、Hawking 放射がその情報を持ち出すことを可能にすると期待できるので、この考察は B.H. の情報パラドックスを考える上での重要で有効な視点となるだろう。

1. A. Strominger, "Lectures on the Infrared Structure of Gravity and Gauge Theory," arXiv:1703.05448 [hep-th]
2. B. Carter, "Axisymmetric black hole has only two degrees of freedom," Phys. Rev. Lett. 26 (Feb, 1971) 331-333. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.26.331>.
3. S. W. Hawking, "Particle Creation by Black Holes," Commun. Math. Phys. 43 (1975) 199-220. [167(1975)].

6 non-singular ブラックホールからの量子的輻射

中司 桂輔 (立教大学 D1)

ブラックホールは一般相対性理論から存在が予言され、2015

年に LIGO で重力波が観測されたことによりその存在が直接的に証明された。一般相対性理論から予言されるブラックホールの中心には特異点と呼ばれる、ブラックホールを構成する物質のエネルギー密度が発散する点が存在する。一般相対性理論は特異点で予言能力を失ってしまうというジレンマを含んでいる。これを受けて特異点を回避するために様々な試みがなされており、その中の 1 つとして内部に特異点が存在しない non-singular ブラックホールがある。non-singular ブラックホールが特異点の問題を解決する現実的なモデルになりうるかを判定するため、その性質が盛んに調べられている。本講演では [1] をレビューする。[1] では 2 タイプの non-singular ブラックホールから放射される量子的輻射のフラックスを評価している。その特徴的な振る舞いとして、[1] では non-singular ブラックホールのインナーホライズンからのフラックスが指数関数的に増大することが指摘された。この振る舞いは、インナーホライズンの不安定性に伴う急激なブラックホールの質量増加現象 (質量インフレーション) の帰結であると考えられている。non-singular ブラックホールのインナーホライズンの不安定性は [2] でも指摘され、non-singular ブラックホールが特異点の問題を解決する現実的なモデルになり得ない可能性が指摘された。しかし、[1] で調べられた 2 タイプの non-singular ブラックホールのうち 1 つでは、インナーホライズンからの量子的輻射がもう 1 方の non-singular ブラックホールと比較して抑制されている。本講演では、この結果が non-singular ブラックホールの持つ不安定性を解決するモデルを構築する手がかりになるかという観点から考察を行う。

1. V. P. Frolov and A. Zelnikov, Phys. Rev. D95, 124028(2017).
2. R. Carballo-Rubio *et al.*, arXiv:1805.02675[gr-qc].
3. V. P. Frolov and A. Zelnikov, Phys. Rev. D95, 044042(2017).

7 Exotic Compact Object における Echo の理論的性質と Template 作成

木村 和貴 (京都大学 基礎物理学研究所 M1) Black Hole(BH) の事象の地平線は一般相対性理論から出てくる概念の 1 つである。しかし、未だ地平線の存在を決定付ける観測は行われておらず、また地平線は BH 情報問題の原因にもなっているため、解決策として地平線近傍に壁があるような BH の代替物 (firewall, gravastar etc) が考えられている。これを Exotic Compact Object(ECO) という。

この BH と ECO を区別する有力な手段が重力波観測である。一般の BH を考えると、BH に向かって落ち込む重力波は地平線に入り込み我々には観測できない。しかし BH と思われていた物が ECO だったとすると、本来地平線内に入り込み観測できないはずであった重力波は地平線近傍の壁に反射され我々にも観測できる。この現象は Echo と呼ばれている。

本講演は Mark, Zachary, et al.[1] に沿って、Schwarzschild BH が ECO に置き換わるとどのような Echo が発生するかを議論する。BH 連星合体等の重力波イベントの最終段階では、重力波の満たす波動方程式の解は BH 固有の振動数を持つリングダウン重力波で記述される。そこでまず、ECO の場合に解がどのような変更を受けるかについて説明し、波動方程式の解を Green 関数を用いて記述する。求めた Green 関数の形から、ECO の場合は確かに Echo が発生すること、さらにその Echo がどのような性質を持っているかを見る。その後、例として ECO に落ち込む粒子をソースとして発生する波を数値的に解くことによって Echo 波形を求め、得られた結果が Green 関数の理論と一致することを確認する。また、実際に重力波観測において Echo を観測するためには、波形の Template を作る必要があるが、ここでは Echo 波形の性質を利用した Template の作成法についても述べる。

1. Z. Mark, A. Zimmerman, S. M. Du, and Y. Chen, Phys. Rev. D96, 084002 (2017), 1706.06155.

8 重力波データ解析で用いるベイズ統計の有用性の検討

武田 芽依 (新潟大学 宇宙物理学研究室 M1) 統計学の代表格として、頻度論的統計 (Frequentist) とベイズ統計 (Bayesian) が挙げられる。一般的に統計学というと頻度論のことを指し、古典的統計学とも言われる。一方、ベイズ統計は比較的新しい統計学である。頻度論は、ある仮説をもとに実験を行い、得られたデータはその仮説においてどの程度の確率で得られる値なのかと考える。ベイズ統計は、実験を行なって得られたデータをもとに、そのデータを出す確率が高い仮説は何かと考える。そこで、データを得る前の事前確率と、データを得た後の事後確率というベイズ統計独特の概念を導入する。両者のアプローチの違いは、一般に同じ実験に対して異なる結論を生じることがある。重力波を始め、突発的な天体現象の観測では、その現象が起こる頻度やそれを起こす天体の質量などのパラメータの推定では、ベイズ統計に基づく解析が有用である。本発表では、頻度論とベイズ統計を比較しながらその性質、有用性をおおていくと共に、それぞれを用いた過去の実験結果について、さらに重力波データ解析においてベイズ統計を用いることについて評価する。

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

9 重力波 GW170817 の検出データに対する独立成分分析

糸 潤哉 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター M1)

多くの重力波データ解析手法は、検出器雑音が定常ガウス雑音という性質の良い雑音であるという仮定に基づくものである。しかし実際の検出器にはグリッチ雑音をはじめとした性質の悪い非ガウス雑音が存在し、従来の解析手法の多くは非ガウス雑音を適切に扱えていなかった。この問題の解決策として、非ガウス雑音を除去することができる独立成分分析と呼ばれる解析手法がある。この手法により重力波信号の信号対雑音比が増加することが数値シミュレーションによって明らかにされた [1]。しかし、この手法を実際に検出されたデータに適用したという例はこれまで存在していなかった。

2017年8月17日、LIGOとVIRGOで中性子星連星の合体による重力波GW170817が検出され、LIGOのLivingstonで検出された生のデータには特徴的なグリッチ雑音に乗っていた [2]。中性子星の質量や潮汐変形率といった各種パラメータを精度よく推定するためにはこのようなノイズを取り除く必要がある。しかし [2] ではこの雑音を統計的手法で除去するのではなく、雑音の形を具体的に仮定した上での解析を行っていた。一方、独立成分分析はそのような仮定を置かないロバストな方法であるため、ここに独立成分分析を用いる余地があると考えられる。そこで本研究ではGW170817のデータに対し、上述のグリッチ雑音を取り除くことを目的とした独立成分分析を行った。この解析によって得られた結果を報告するとともに、[2]での解析結果との比較を行う。

1. S. Morisaki, J. Yokoyama, K. Eda and Y. Itoh, “Toward the detection of gravitational waves under non-Gaussian noises II. Independent component analysis,” Proceedings of the Japan Academy, Series B, Vol. 92, Issue 8, p. 336-345 (2016)
2. B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) Phys. Rev. Lett. 119, 161101 (2017)

10 宇宙ひもからの重力波：これまでの成果と今後の展望

津名 大地 (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)

2015年9月二つのブラックホール (BH) の合体からの重力波が重力波検出器 Advanced LIGO によって観測され、この大発見は重力波天文学という新たな分野を確立した。一方で、重力波を放出すると考えられ、LIGOのターゲットとなっている現象は上のようなコンパクト天体以外にも存在する。そのうちのひとつとして仮説上の「宇宙ひも」というものがある。

宇宙ひもは、1970年代から存在が予言されている [1]、初期宇宙で起こったとされる相転移に伴い生じる位相欠陥である。2本の宇宙ひもが交差したり、1本のひもが自身と交差したりすると、ある確率で独立したループが生まれる。このループの振動や、ループに存在するカusp、キックといった尖りのようなフィーチャーが重力波源となると考えられている。

宇宙ひもを重力波で探る上で重要になってくるパラメータは二つあり、「ひもの張力」と「ループ生成確率」である。前者はループからの重力波の強さを決め、後者は重力波源となるループのできやすさを決めるパラメータである。さらには宇宙ひもが時間・空間的にどのように分布しているかも複数の研究で結果が異なっていて、観測によるモデルの制限が必要になっている。これまでの重力波による探査では宇宙ひもからの重力波は見つかっておらず、上記のパラメータ・モデルへの制限が行われてきた。一例として、最近のLIGO O1 (第一次観測) での観測結果は [2] に述べられている。

講演者はLIGO Scientific Collaborationに所属し、O2の最新のデータを解析して宇宙ひもの探査を行っている。そこで本講演では、これまでの宇宙ひもからの重力波の観測の成果を紹介する。さらに、発表者が中心に行っている、[3] で使われている手法を応用した宇宙ひも探査コードの改良とその成果を述べる。時間の許す限り、今後LIGOが感度を上げて観測する予定のO3以降の展望についても述べる。

1. T. W. B. Kibble, 1976, J. Phys A 9, 138
2. Abbott B. P., et al., 2018, Physical Review D, 97, 102002
3. Messick C., et al., 2017, Physical Review D, 95, 042001

11 BBO と前景ノイズとしての NS-NS 連星重力波の差引問題

加藤 文弥 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

現在、宇宙重力波望遠鏡 (LISA) の後継機として、ビッグバンオブザーバー (Big Bang Observer, BBO) が開発中である。BBOは、 $10^{-1} \sim 1$ Hz帯にあるインフレーションによって生成された重力波を検出するという目的をもった重力波検出器である。LIGOやKAGRAといった地上の重力波検出器は、地球が球形であるために基線長に限度があり、また地盤の振動によるノイズも多いため、主には高周波数帯の重力波しか検出できない。しかし、BBOはspace-basedな検出器として開発中であり、検出器を宇宙にもっていくことで地上よりも基線長を長くすることができノイズも少なくなるため、インフレーション由来の重力波のような低周波の波も検出可能となる。しかし、この検出には困難が伴う。重力波の生のデータには、宇宙に存在する多くの連星系からの重力波が重ね合わさって混じっており、これらは容易には分離できない。その結果、これらの前景ノイズにより、データのうちどれがインフレーション由来の重力波なのか特定することが困難になる。インフレーション由来の重力波の検出のためには、データの中から連星合体重力波を

同定し、その合体波形を元データから差し引かねばならない。宇宙にはさまざまな重力波源が存在し、BH-BH 連星や BH-NS 連星による重力波も主な前景ノイズではあるが、これらは信号雑音比が大きく比較的差し引きしやすい対象であるため、ここでは NS-NS 連星による重力波を差し引くという問題について考えることにする。

1. Curt Cutler and Jan Harms arXiv:gr-qc/0511092v4

12 lensing 解析における baryon physics の寄与

伊藤 輝 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M2) 宇宙の大規模構造のよる弱重力レンズ効果は宇宙論パラメータを制限する強力な手段である。遠方銀河の発せられた光の経路は、手前の大規模構造の重力レンズ効果により曲げられ、結果として我々は形状が歪んだ銀河像を観測することになる。逆に、この歪んだ銀河像の統計解析することにより、宇宙論的弱重力レンズ効果を測定することができる。現在すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam サーベイが稼働中であり、宇宙論的弱重力レンズ効果が精密に測定されることが確実である。しかし、この重力レンズの精密測定から宇宙論パラメータを制限するためには、宇宙の構造形成の理論モデルも正確である必要がある。例えば、正確でない理論モデルと精密測定結果を比較した場合には、宇宙論パラメータの推定値を有意に間違える可能性がある

理論モデルの構築の際の最大の不定性が、バリオンの物理の効果である。未だ第一原理的にガス物理をモデル化できないために、ガス物理が引き起こす宇宙の大規模構造の形成への影響は正確には理解されていない。精密な重力レンズ効果の測定結果と理論モデルを比較する際にも、現象論的にガス物理の効果を検討する必要がある必要がある。本公演ではこれまでの先行研究からバリオン物理を考慮したモデルに関する紹介を行う。また、バリオンの効果を取り入れる新たな手法を開発する研究を始めているので、その結果が得られていれば、それについて考察する。

1. Schneider, A., and Teyssier, R. 2015, JCAP, 12, 049
2. Oguri, M., and Takada, M. 2011, Phys. Rev. D, 83, 023008
3. Takada, M., and Jain, B. 2003, Mon. Not. R. Astron. Soc, 340, 580

13 大規模構造による潮汐力場と銀河ハロー形状の相関

立石 廉晟 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M2)

宇宙の構造形成の標準的シナリオである冷たいダークマター構造形成モデルは、膨張する宇宙のなかで、ダークマターの質量密度ゆらぎが自身の重力で成長し、現在観測される宇宙構造が

形成したというシナリオである。遠方銀河から発せられた光の経路は、このダークマター分布の非一様性による重力レンズ効果により曲げられ、結果としてその銀河像には系統的な歪み効果が引き起こされる。これは弱重力レンズ効果と呼ばれるが、逆に、遠方銀河像の統計的解析から重力レンズ効果が測定でき、ダークマターの空間分布を復元することができる。[1]

しかし、重力レンズ効果の測定法は、異なる遠方銀河像には相関がない、つまり宇宙論的に十分離れた銀河間には物理的な相関がないという仮定に基づいている。しかしながら、銀河の形状は、宇宙の大規模構造の重力潮汐力場と銀河の質量分布の重力相互作用を起源とする可能性があり、つまり銀河の形状と宇宙の大規模構造の潮汐力場との間に物理的に相関がある可能性がある。この潮汐力場は、背景の銀河像の歪みを引き起こす。つまり、同じ赤方偏移に存在する宇宙構造の潮汐力場と銀河像の間には相関がある可能性があり、これは intrinsic alignments と呼ばれ、重力レンズ測定に系統誤差を引き起こす。そのため、重力レンズ効果の精密測定から宇宙論を行うには、この intrinsic alignments の寄与を除去する必要がある。[2,3]

本研究では intrinsic alignments による重力レンズ効果への寄与を調べるため、N 体シミュレーションの結果を用いて、大規模構造による潮汐力場と銀河ハローの慣性モーメントをそれぞれ計算し、両者の間の相関について調べた。発表においてはその概要と得られた結果について述べ、さらに今後の展望についても報告する。

1. M.Bartelmann and P.Schneider, arXiv:astro-ph/9912508(1999)
2. B. Joachimi et al., arXiv:1504.05456(2015)
3. A.Kiessling et al.,arXiv:1504.05546(2016)

14 弱い重力レンズからの銀河バイアス推定

近藤 寛人 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) M1)

宇宙の階層的構造形成によって銀河の分布はダークマターの分布をある程度トレースすることがわかっている。しかし実際には分布間に違いがあり、その差異を銀河バイアスと呼ぶ。銀河形成モデルに応じて予測される銀河バイアスが異なるため、観測から銀河バイアスを詳細に決めることは銀河形成シナリオの検証につながる。本発表では、弱い重力レンズ効果から銀河バイアスの赤方偏移依存性を調査した論文 [1] をレビューする。

観測される銀河と観測装置までの間にダークマターが存在すると、重力により観測される銀河の見かけの形状が歪む。この現象は弱い重力レンズ効果と呼ばれ、ダークマターの分布を反映した銀河像の歪みからシアと呼ばれる物理量が観測される。シア分布と銀河の個数密度分布の相関をとることで、線形な銀河バイアスを調べる手法が先行研究 [2] で示され、Cosmic Evolution Survey のデータを用いて銀河バイアスを推定している。また別の先行研究 [3] で赤方偏移依存性の解析が

追加され、シミュレーションテストが行われているが、観測データは解析されていない。

レビューする論文の中では、先行研究 [3] の手法を用いてより広域な銀河探索である Dark Energy Survey 科学的評価データを解析することで、統計的不確かさを抑えて赤方偏移依存性を推定している。銀河バイアスを推定する他の方法には、銀河分布の 2 点相関を用いる手法と宇宙マイクロ波背景放射の重力レンズ効果を用いる手法がある。弱い重力レンズからの結果は、これらの結果と一致しており、他と比べて宇宙論パラメータの影響が小さい点で優れている。また解析に並行してシミュレーションテストを行うことで、広域銀河探索における本手法を精査している。今後他の広域銀河探索へ本手法を適用して各観測から独立した結果を得ることで、銀河バイアスの更なる解明が期待される。本発表では重力レンズを用いた手法を他の手法と比較し、違いについて議論する。

1. C. Chang et al. Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 459 (2016) no.3, 3203-3216
2. A. Amara et al. Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 424 (2012) no.1, 553-563
3. A. Pujol et al. Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 462 (2016) no.1, 35-47

15 ハローの赤方偏移空間パワースペクトルの精密エミュレータ構築

小林 洋祐 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 D1)

分光観測を用いて銀河の 3 次元分布を探索する銀河分光サーベイは大規模構造の宇宙論的情報を取り出す有力な観測手法であり、すばる望遠鏡 Prime Focus Spectrograph (PFS) などの大規模銀河分光サーベイ計画が世界中で推進されている。これらのサーベイが供給する大量のデータの有効な宇宙論解析を行うため、観測データと比較する宇宙論統計量の正確な理論模型の確立が重要な課題である。

分光観測による銀河の赤方偏移の観測値は、宇宙の一樣等方膨張による寄与に加え、銀河の特異速度によるドップラーシフトも含む。この結果、銀河分光サーベイで得られる銀河分布(銀河クラスタリング)は視線方向への角度依存性をもつ非等方分布となる。Redshift-Space Distortion (RSD) [1] と呼ばれるこの効果は、銀河の従う速度場とそれを誘起する重力場の情報をクラスタリング情報に付与するため、加速膨張の物理を探るプローブとして重要視されている。

現在、銀河形成過程の解明が不十分であるため、銀河クラスタリングの第一原理的なモデル化が困難である。銀河はダークマターの自己重力系であるハローの内部で形成されると考えられていることから、 N 体シミュレーションで理論的に生成できるハローのクラスタリングの理論模型を構成するアプローチがしばしば用いられてきた [2,3]。

本研究では、多数の宇宙論と赤方偏移において生成されたシミュレーションデータから、統計的機械学習によってハローの RSD による非等方パワースペクトルの理論予言 (=エミュレータ) を構成した。このエミュレータは、6 つの宇宙論パラメータと赤方偏移の関数として、非線形スケールにおけるハローのパワースペクトルを正確に予言できる。また、このエミュレータを用いてハローの非線形スケールのクラスタリングにいかなる宇宙論情報が含まれているかを調べ、Fisher 解析によって宇宙論パラメータ推定の予測を行った。本講演において以上の成果について報告し、サーベイに向けた今後の展望について述べる。

1. N. Kaiser, Mon. Not. R. Astron. Soc. 227, 1-21 (1987)
2. B. Reid and M. White, Mon. Not. R. Astron. Soc. 417, 1913-1927 (2011)
3. T. Nishimichi and A. Taruya, Phys. Rev. D 84 043526 (2011)

16 BAO 復元アルゴリズムの提案と評価

杉山 素直 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M1)

宇宙の晴れ上がり以前に強く結合していた光子とバリオンは一つの流体として振動していたが (BAO)、結合が切れると位相が固定され宇宙に刻み込まれ大規模構造として観測される。BAO の振動スケールは CMB の観測から精密に測定されているので大規模構造の観測から精密な宇宙論パラメータの測定が出来ることを意味する。

密度場がガウス揺らぎから始まり発展が線形成長だけであれば本質的な情報は 2 点相関関数のみであるが、実際に観測される大規模構造は重力的相互作用を通じて非線形成長をするので精密な宇宙論パラメータ測定には 3 点以上相関関数も考慮する必要がある。このために観測される非線形成長した大規模構造から線形成長の密度を復元する手法を BAO 復元という。

BAO 復元のアルゴリズムとして Lagrangian Growth-Shift(LGS) が広く使われてきたが、ベストな方法か否かということと Lagrangian 描像であるこの復元方法では 3 点、4 点相関関数が復元後のシグナルへの寄与の仕方を明に表せず不明瞭であるということが問題としてあった。本講演では、この点について議論している論文 [1] のレビューを行う。論文 [1] では Lagrangian, Eulerian 描像それぞれに対して 3 つの復元アルゴリズムの計 6 アルゴリズムを提案し、 N 体シミュレーションで作ったカタログをデータにして性能を評価する。Eulerian 描像のアルゴリズムの利点は、復元後の 2 点相関関数が復元前の 2,3,4 点相関関数の線形結合で書けるということにある。線形パワースペクトルの復元という観点からすると LGS が最もよく、対応する Eulerian Growth-Shift(EGS) も同等の復元が出来ることがわかった。さらに復元された密度場を Lagrangian と Eulerian で比較すると大きな違いはないと

ということがわかったが、これはつまり Lagrangian と Eulerian は計算方法が違うものの根底にある物理的復元の原理は共通であるということを示す結果であり、LGS アルゴリズムは Eulerian 描像と同様に 3,4 点相関関数の寄与を自動的に引き出して復元を行なっていると結論できる。

1. Marcel Schmittfull, Yu Feng, Florian Beutler, Blake Sherwin, and Man Yat Chu Phys. Rev. D 92, 123522(2015)

17 CMB の弱い重力レンズ効果と中性水素の相互相関による 21cm 線の検出可能性

田中 章一郎 (熊本大学 自然科学教育部 M1)

宇宙再電離期や再電離後の遠方の宇宙は観測が困難であり、未だ観測的に理解されていない部分が多い。そこで、当時の物質の分布を探る直接の観測量として、中性水素 (HI) の超微細構造によって生じる 21cm 線が有用である。しかし、遠方 ($z > 1$) の 21cm 線の観測は銀河系シンクロトロン放射をはじめとする前景放射によって妨げられている。この影響を軽減するためには、21cm 線と相関があり、前景放射との相関がない別の観測量が必要となる。本研究では、先行研究 [1] で提案された、21cm 線と CMB への弱い重力レンズ効果 (WGL) の相互相関を考える。

一般に WGL とは、銀河や銀河団などの大規模構造の持つ重力場の影響を受けて光路が曲げられる現象をさす。CMB の場合は、CMB の輝度温度マップにおいて二次的な非等方性として現れる。この WGL の影響は視線方向の密度ゆらぎの積分である収束場として表される。一方、再電離後の宇宙において、HI は主に銀河に付随して存在しており、観測される 21cm 線には物質ゆらぎの分布の情報が含まれている。同時に、この物質のゆらぎは CMB 分布に WGL の影響を及ぼしており、CMB の収束場には密度ゆらぎを通して 21cm 線との相関が生まれる。また、ゆらぎの分布は宇宙論パラメータに強く依存しているので、21cm 線の観測によりわずかに残った HI の量を表すパラメータ Ω_{HI} の制限が可能である。

本研究では、電波干渉望遠鏡 MWA や大型電波望遠鏡 SKA による 21cm 線の観測を想定し、Planck 観測によって得られた収束場との相互相関を考え、将来の 21cm 線の観測可能性を詳細に議論する。特に、現在得られている銀河系シンクロトロン放射の分布を用いて、前景放射の相互相関への影響を明らかにする。最後に、この相互相関の将来の観測によって得られる宇宙論パラメータや Ω_{HI} への制限の予測をする。

1. Tapomoy Guha Sarkar, 2009, Journal of Cosmology and Astrophysics, Issue 02, pp.002(2010)

18 21-cm 線グローバルシグナルに残された初代星の痕跡

田中 俊行 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) D1)

宇宙初期に形成された密度ゆらぎが成長し、ハローと呼ばれる暗黒物質の構造が形成される。そのハロー内にて、宇宙で最初の世代の恒星である初代星が形成される。初代星から供給される重元素は後の星形成を促進し、電離光子は宇宙の熱史に直接影響する。その影響度合を決定づけるのは初代星の星質量である。故に多くの理論研究が初代星の星質量関数の解明を試みてきた。しかし、各研究間で異なる形の星質量関数が示唆されており、未だ合意形成に至っていない。

この現状の打開策となり得るのが 21-cm 線観測である。21-cm 線とは中性水素の超微細構造由来の電磁波であり、そのシグナル強度は水素の状態 (e.g. 密度、温度、電離度) に依存する。先行研究 [1] では輻射輸送シミュレーションを用い、初代星周囲の中性水素の状態を計算することで、21-cm 線シグナル分布を見積もっている。しかし、水素の電離度や温度に強く影響する、電離光子脱出率 (初代星から放射された電離光子のうちハローから脱出する割合) の時間進化を考慮していない。

本研究では、ガスの運動を考慮することで電離光子脱出率の時間進化を計算できる輻射流体シミュレーションを実施し、初代星周囲の 21-cm 線シグナル分布を見積もった。その結果、先行研究では見落とされていた、深い吸収線領域が形成されることを初めて発見した。また、シミュレーション結果を応用し、電波望遠鏡 EDGES の観測報告 [2] により昨今注目を集めている 21-cm 線の全天平均シグナル (21-cm 線グローバルシグナル) を調査した。結果として、時間進化する電離光子脱出率に起因する、21-cm 線グローバルシグナルの初代星質量依存性を明らかにした。本講演では、これらの結果について、EDGES 観測の結果を紹介しつつ議論する。

1. H. Yajima and Y. Li, MNRAS, 445, 3674 (2014)
2. J. Bowman et al., Nature, 555, 67 (2018)

19 ライマン α 線を用いた小スケールの等曲率ゆらぎへの制限

吉田 貴一 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) M1)

現在観測される宇宙の大規模構造は、宇宙初期に存在した密度ゆらぎが時間とともに成長して形成されたものである。初期のゆらぎには、断熱ゆらぎと等曲率ゆらぎの二つがある。インフレーションにより生成されるゆらぎは断熱ゆらぎであるため、多くの研究でこのゆらぎが用いられている。実際、Planck 衛星による宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度ゆらぎの観測結果は、大スケール $k \sim O(0.1) h/\text{Mpc}$ において断熱ゆらぎのみを考慮した場合とよく一致している [1]。一方、等曲率ゆらぎも

様々な宇宙の構造形成シナリオで生まれる。このゆらぎは例えば、原始ブラックホール (PBH) があると小スケールで卓越すると予想されており [2]、本研究ではこのような小スケールにおける等曲率ゆらぎに着目した。

CMB や物質の密度ゆらぎのパワースペクトルは、断熱ゆらぎと等曲率ゆらぎの重ね合わせで与えられる。従って、観測から得られるデータと理論計算を比較することで、初期条件に制限を与えることができる。

しかし、上で述べたような等曲率ゆらぎは Planck 衛星の観測領域よりも小さなスケールに痕跡を残す。このモードを制限するためには、Planck 衛星のデータよりも小さなスケールの情報が必要である。このような小スケールの情報を得るために、ライマン α 線を用いることができる。ライマン α 線は高分解能で観測できており、この吸収線は小スケールの密度ゆらぎの情報を含んでいる。本発表ではクエーサーからのライマン α 線のデータと Planck 衛星のデータを合わせることで、小スケール $k \sim 1 \text{ h/Mpc}$ における等曲率ゆらぎに与えた制限について報告をする。

1. Planck Collaboration (Ade, P.A.R. et al.) *Astron. Astrophys.* 594 (2016)
2. Jinn-Ouk Gong and Naoya Kitajima *JCAP* 08 (2017)

20 アクシオンの自己相互作用による宇宙の構造進化

福永 颯斗 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C研) M1)

アクシオンとはカイラル U(1) 対称性が破れたときに位相方向の自由度として出現する、擬スカラー粒子である。Peccei と Quinn らによって強い CP 問題を解決するために QCD アクシオンが導入されて以降、超弦理論などの素粒子標準模型を超えた理論からアクシオンの生成が予想されている。多くの場合アクシオンの質量は軽く、持ちうる質量の範囲は広いと考えられている。一方で、宇宙論においてアクシオンのようなスカラー場が宇宙に存在すれば、インフレーションやダークマターといった、宇宙論における未解明の物理を解決することができる。以上のことからアクシオンの宇宙論的な性質について調べ、観測的に制限をつけることは有意義である。

本講演では、まず論文 [1] で述べられている、アクシオンのダークマターとしての振る舞いについてレビューをする。宇宙論において理論と観測量を比較する際にはダークマターの密度ゆらぎの進化を調べるのが重要である。そこでアクシオンの密度ゆらぎを定式化し、その時間発展について説明する。

次に、論文 [2], [3] で用いられている解析手法を用いて、アクシオンの密度ゆらぎの成長について議論する。論文 [1] ではアクシオンは質量を持つ自由場として振る舞いと仮定した上で、密度ゆらぎの時間発展が導かれている。しかし、一般にはアクシオンの非線形な自己相互作用が存在するため、重力不安定性

に加えて新たな不安定性が現れうる。そこで、自己相互作用を考慮したアクシオンのポテンシャルを与えて、その場合の密度ゆらぎの進化について調べる。

1. David J. E. Marsh *Phys. Rept.* 643(2016)
2. Matthew C. Johnson, Marc Kamionkowski *Phys. Rev D* 78(2008) 063010
3. Swagat S. Mishra, Varun Sahni, Yuri Shtanov *JCAP* 1706(2017) no.06,045

21 Fluctuations of Primordial Magnetic Field and Its Effect on Big bang Li Problem

LUO Yudong (国立天文台 M2)

Cosmological theory of Big Bang nucleosynthesis (BBN) predicts the right amount of production of the light elements ^2H , ^3He , ^4He , and ^7Li in the early universe to constrain several cosmological parameters. In this talk, I will show that the abundance of these elements can be affected strongly by a stochastic primordial magnetic field (PMF) whose strength is spatially inhomogeneous. In this model, we assume a large-scale stochastic PMF with a power law (PL) correlation function and strength that follows a Gaussian distribution, while the total energy density is uniform. The distribution function of particles deviates from the Maxwell-Boltzmann (MB) distribution with the stochastic PMF fluctuations being taken into account in this model. This deviation is related to ρ_λ and σ which are scale invariant (SI) strength of PMF energy density and fluctuation parameter. We perform a BBN network calculation by taking account of non-MB distribution generated by PMF strength distribution, and show the elemental abundances as a function of baryon to photon ratio η , ρ_λ , and σ . The fluctuation of PMF strength reduces ^7Be production and enhances ^2H production, thermonuclear reaction rates are compared with classical MB framework, the charged particles reaction rates are very different from each other due to the Coulomb penetration effects. On the other hand, neutron induced reaction rates almost maintain the same amplitudes as those in the MB distribution. Finally, constraints of the parameters ρ_{Bc} and σ for our fluctuated PMF model from observed abundances of ^4He and ^2H is presented. In this model, ^7Li abundance is significantly reduced.

1. Y. Luo, et al., submitted to the *Astrophysical Journal*

22 S 行列による低エネルギー有効理論の制限

大宮 英俊 (京都大学 天体核研究室 M1)

本発表は A.Adams et.al.(2006)[1] のレビューである。

標準的なビッグバン宇宙論には様々な問題点があり、これらを解決するためにインフレーションや修正重力理論などの素粒子標準模型や一般相対論を超える枠組みを作ろうという試みがなされている。こういった模型の多くは、低エネルギー有効理論として現れる、とされている。低エネルギー有効理論とは、性質の良い基本的な理論の低エネルギー極限として得られる有効理論のことである。また、ここで言う「性質の良い理論」とは、理論の S 行列が物理的にもっともらしい、いくつかの性質（ユニタリ性、ローレンツ不変性など）を満たすことである。我々が信頼を置いている素粒子標準模型や、もっとも基本的な理論の候補であるひも理論はこれらの性質を満たす。

さて、現在に至るまでいろいろな模型が提案されているが、これらは本当に基本的な理論の低エネルギー有効理論なのだろうか。実は、このことは模型の相互作用を見ることで判定できる。そして、この判定条件は基本的な理論の S 行列の性質から決まり、さらに、模型の持つ因果律の破れとも関係することが示される [1]。重要なのは、基本的な理論が高エネルギー側で性質の良い S 行列を持つことしか仮定していない、という点である。つまり、高エネルギー側でも我々が期待するような物理が成り立っているという仮定のもとでは、ある種の模型は許されない。逆に言えば、もし観測や実験などでこの判定条件を満たさない現象が見つかったのであれば、高エネルギーの物理では我々の期待することが破れていることになる。

本発表では、 S 行列に対する条件から、低エネルギー有効な理論に加わる制限について説明し、これをブレンワールド模型の一つである DGP 模型に適用することで、この模型が高エネルギー側の性質の良い理論から得られないことについて議論する。

1. Allan Adams, Nima Arkani-Hamed, Sergei Dubovsky, Alberto Nicolis, Riccardo Rattazzi, Causality, Analyticity and an IR Obstruction to UV Completion, JHEP 0610:014, 2006 (arXiv:hep-th/0602178)

23 真空エネルギーと余剰次元を用いた宇宙定数問題の解決

田中 ペドロ (神戸大学素粒子理論研究室 M1)
Hendrik Casimir によって真空エネルギーから力を取り出せることが 1948 年に理論的に発表された [1]。それから今までの 70 年間、真空エネルギーについて、また真空エネルギーを使って多くの研究がなされた。そのうちのひとつとして宇宙定数について真空エネルギーを用いて説明しようとする試みが行われている。

宇宙定数とは、宇宙の加速膨張を説明するためにアインシュタイン方程式に取り入れられたものである。宇宙定数はエネルギーの次元を持っていて、ダークエネルギーとも呼ばれる。そのダークエネルギーを取り入れた Λ CDM モデルでは、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。真空エネルギーを用いて宇宙定数を説明しようとするモデルはいくつか提唱されてきたが、例えばプランクスケールでカットオフを入れた理論では実験値と 120 桁もの差が出てしまっている。

今回、この宇宙定数問題を解決すべく考えられた一つの方法として、余剰次元を用いる方法を紹介したい。本発表では、先行研究 [2][3] のレビューとして、 $M^4 \times S^N$ の余剰次元空間を考え、 $N=\text{odd, even}$ のそれぞれから宇宙定数を説明するのにふさわしい次元を決定する方法を述べる。最終的な結果は余剰次元の半径を $10\mu\text{m}$ にすると現在観測されている宇宙定数の値と一致するのだが、余剰次元の半径として $10\mu\text{m}$ は大きすぎる。この結果から、今回の方法では適切な宇宙定数を与えるものとは言えなかったが、この理論は、余剰次元の半径を変えるゆとりが残されている点で宇宙定数の実験値と一致させる値を得るのに十分な可能性を持った理論と言える。

1. H.B.G. Casimir Proc. K. Ned. Akad. Wet. 51, 793 (1948)
2. K. A. Milton The Casimir Effect, World Scientific Pub Co Inc; 1st edition (2001)
3. R. Kantowski and K. A. Milton Phys. Rev. D, 36:3712, (1987)

24 曲率ゆらぎの長波長 - 短波長カップリングによるインフレーション中のデコヒーレンス

福田 飛鋭 (京都大学 天体核研究室 M1)

本発表は文献 [1] のレビューである。

ビッグバン宇宙論は観測事実をよく説明するが、平坦性問題や地平線問題を孕んでいた。これらの問題を解決するために宇宙の加速膨張期を与えるインフレーション理論は提唱された。よってインフレーション理論は初期宇宙を記述する理論として有望視されている。さらにこの理論は CMB の温度ゆらぎや大規模構造の種となる初期密度ゆらぎが量子ゆらぎから生成されるという描像も備えている。しかし、現在観測される宇宙において密度ゆらぎは古典的なゆらぎであると考えられているので、量子ゆらぎが宇宙の構造の起源ならばどこかで古典化する必要がある。量子ゆらぎが古典化するプロセスとして量子デコヒーレンスが挙げられる。これは量子的重ね合わせの状態であった系が環境と相互作用することで重ね合わせの状態が壊れてしまい、確率密度関数の非対角成分が失われるというものである。インフレーション中に生成される曲率ゆらぎの波長が宇宙の加速膨張に伴ってハッブルスケールを大きく超えるまで引き延ばされた時、長波長ゆらぎは量子的な性質を失い統計的には古典的ゆらぎと区別がつかなくなる。これがインフレーション起源の量子ゆらぎの古典化である。各モードの量子状態がスクイーズすることで観測量の非可換性を無視することができ、量子論的期待値と同じ結果が得られるような古典的確率分布によって量子ゆらぎの振舞いを扱うことができる。しかしゆらぎ

の古典性を言うには量子デコヒーレンスなどを考える必要がある。このため、デコヒーレンスを起こすような長波長ゆらぎと環境のカップリングが必要である。これまでに長波長モードと環境のカップリングとして様々なモデルが考案されてきた。本文献 [1] は Lagrangian 中の曲率ゆらぎの非線形項を長波長・短波長成分に分解することで長波長 - 短波長カップリングをあらわにし、短波長モードを環境として扱う。このモデルの相互作用は重力の非線形項のみに由来し、インフレーション中の曲率ゆらぎ以外の環境を仮定しないデコヒーレンスの最小モデルを与える。

1. Elliot, Nelson arXiv:1601.03734 [gr-qc]

25 Higgs G インフレーションにおける Goldstone mode の影響

森 祐子 (立教大学 M2)

インフレーション理論は、宇宙初期の急激な加速膨張期を記述する理論である。インフレーションには様々なモデルが存在し、中でもインフラトンと呼ばれるスカラー場がインフレーションを引き起こすモデルがよく考えられている。そのモデルもスカラー場が単一か複数かどうかなど様々な場合がある。素粒子標準模型の中で唯一のスカラー場である Higgs 場をインフラトンとする場合を Higgs インフレーションといい、未知のスカラー場を導入するモデルよりも自然であると言える。

Higgs インフレーションでは 2 つの複素スカラー場を導入するため、スカラー場には 4 つの自由度が存在する。その自由度のうち 3 つはゲージ自由度 (Goldstone mode) であり消せるため、通常はスカラー場が単一な場合がよく研究されている。しかし、繰り込み可能なゲージに移ると Goldstone mode を消せないため、[1] のように Goldstone mode を考慮した複数場のモデルを考える必要がある。ところが、複数場の寄与を計算するとその寄与はインフレーション開始後すぐに弱まり、単一場を考えている場合と同じになってしまうことが知られている。

本講演では、[1] で行われている議論を [2]、[3] をもとに提唱した複数場での Higgs G インフレーションの場合で行い、一般的な Higgs インフレーションモデルでの複数場の寄与を調べる。まず [1] をレビューし、複数場の寄与が失われ単一場を考えている場合と同一になることを説明する。そして、提唱した Higgs G インフレーションにおいても同様の議論を行い、複数場の寄与が残るかどうかを精査する。これにより、Higgs インフレーションが単一スカラー場で十分かどうかを検討する。

1. R. N. Greenwood, D. I. Kaiser and E. I. Sfakianakis, “Multifield Dynamics of Higgs Inflation,” Phys. Rev. D **87**, 064021 (2013), [arXiv:1210.8190 [hep-ph]]
2. K. Kamada, T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, “Higgs G-inflation,” Phys. Rev. D **83**, 083515 (2011), [arXiv:1012.4238 [astro-ph.CO]]
3. T. Kobayashi, N. Tanahashi and M. Yamaguchi, “Mul-

tifield extension of G inflation,” Phys. Rev. D **88**, no. 8, 083504 (2013), [arXiv:1308.4798 [hep-th]]

26 α -attractor インフレーションモデルと超重力理論

松田 泰亮 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

本講演は文献 [1] のレビューである。初期宇宙の状態を記述すると考えられているインフレーション理論は様々なモデルが考えられている。その一つである α -attractor モデルは一つのパラメータ α を含む運動項により定義され、十分小さい α においては導き出される観測量がポテンシャルに依存しない。また、ポテンシャルの形を変えることで既存の多くのモデルを包摂することができる。このため多くのモデルを横断した議論が可能である。

初期宇宙は非常に高温、高密度であったとされており、インフレーションのモデルを高エネルギーを記述する理論と結びつけようとするのは宇宙の根本的な理解を得る試みとして重要である。 α -attractor は高エネルギーを記述する超重力理論の枠組みで構成することが可能である。この構成において α は超重力理論のラグランジアンを特徴付ける幾何学量と関係する。文献 [1] ではこの関係について考察しており、 α によって超重力理論が構成される多様体を定めることができることを示している。 α は観測量に現れるため観測から α を決定することで初期宇宙を記述する高エネルギー理論を理解することができるのではないかと考えられている。本講演では α -attractor を紹介し、その超重力理論との関係について説明する。

1. R. Kallosh and A. Linde, Comptes Rendus Physique **16** (2015) 914 [arXiv:1503.06785 [hep-th]].

27 Gravitational Reheating Constraints on Quintessential Inflation

三嶋 洋介 (立教大学 M1)

現在の宇宙の加速膨張は観測的に確認されているが、その機構は未解明である。また、宇宙の進化をよく記述する標準宇宙論でも、その初期に平坦性問題などの不自然さが残る。その不自然さは初期宇宙に指数関数的な加速膨張を考えるインフレーション理論で解消され、この理論は観測事実との整合性からも支持されている。通常、前者は宇宙項を用いて議論され、後者はスカラー場を用いたモデルが提案される。しかし、両者とも指数関数的に加速膨張をするのであれば、同一のスカラー場によるものと考えの方が自然といえるだろう。このシナリオは、Quintessence モデルを用いて説明される。

インフレーション理論では、加速膨張が終わる際に再加熱という機構を考える。これは加速膨張期から放射優勢期に移行する際にビッグバン宇宙を再現するために必要であり、通常はスカラー場と物質場の相互作用を通してすべてのエネルギーを移す。一方、Quintessence モデルではスカラー場のエネルギーが

現在まで残存しなければならない。それは重力相互作用だけでエネルギーを移す Gravitational reheating という機構で実現できる。

Gravitational reheating は再加熱中もスカラー場 (ダークインフラトン) 優勢期が続く。インフレーション起源の重力波がこの時期にホライズンの内側に入ることから、通常の機構とは異なる特徴が見られる。この時期のダークインフラトンが、状態方程式パラメータ w の完全流体で満たされているものを考えることで、一般的なモデルで議論できる。加えて、LISA や DECIGO で観測し得る物理量を計算でき、妥当なダークインフラトンモデルを見出させる。更に、このダークインフラトンを用いた Quintessence モデルについても議論する。なお、本講演は [1-3] に基づく。

1. M. Artymowski, O. Czerwinska, Z. Lalak and M. Lewicki, JCAP **1804**, no. 04, 046 (2018).
2. K. Dimopoulos and C. Owen, JCAP **1706**, no. 06, 027 (2017).
3. K. Dimopoulos and T. Markkanen, arXiv:1803.07399 [gr-qc].

b 講演 (b1-4)

28 Gravitational redshift in void-galaxy cross-correlation function in redshift space

南岳 (広島大学 宇宙物理学研究室 D1)

We construct an analytic model for the void-galaxy cross-correlation function that enables theoretical predictions of the dipole signal produced dominantly by the gravitational redshift within voids for the first time. By extending a theoretical formulation for the redshift-space distortion of galaxies to include the second order terms of the galaxy peculiar velocity \vec{v} and the gravitational potential, we formulate the void-galaxy cross-correlation function multipoles in the redshift space, the monopole $\xi_0^{(s)}$, dipole $\xi_1^{(s)}$ and quadrupole $\xi_2^{(s)}$. We find that the dipole $\xi_1^{(s)}$ is dominated by the gravitational redshift, which provides a unique opportunity to detect the gravitational potential of voids. Thus, for the dipole $\xi_1^{(s)}$, the higher order effect is crucial. Although this effect is negligible on the monopole $\xi_0^{(s)}$, it has an influence on the quadrupole $\xi_2^{(s)}$. The effects from the random velocity of galaxies and the definition of the void center on the dipole signal are also discussed. Our model offers a new theoretical probe for detecting gravitational redshift within voids, and further tests on cosmology and gravity.

1. Y. Nan and K. Yamamoto, arXiv:1805.05708
2. S. Nadathur and W. Percival, arXiv:1712.07575
3. N. Hamaus et al, JCAP07(2017)014

29 曲がった時空における真空と量子纏れ

上田 和茂 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

一様加速度運動する観測者は、ミンコフスキー時空の真空を加速度に比例する温度で特徴付けられる熱的励起状態として観測するという理論予言がある。このような現象はウンルー効果と呼ばれており、曲がった時空の場の理論から導かれる基本的な理論予言である。ウンルー効果は、等価原理により加速度を重力に置き換えると、ブラックホールからの熱的放射を予言するホーキング効果とのアナロジーとして解釈することが出来る。

ミンコフスキー真空は、リンドラー時空の状態の量子纏れ状態として記述され、その記述からウンルー効果に伴う熱的性質を導出することが出来る [1]。ウンルー効果に伴う粒子や検出器の熱的励起が、エネルギー放射をするかどうかの問題となっていた。文献 [2] によって、量子場の非局所的な相関が起源となって、ウンルー効果に伴う量子放射が存在することが示された。この研究では、そこで重要な役割を果たす、ミンコフスキー真空の量子纏れについて報告する。

左右リンドラー時空の状態の纏れによるミンコフスキー真空状態の記述では、リンドラー時空がミンコフスキー時空の半分しか覆ってため、F(未来)領域やP(過去)領域の状態との関連が明確でないことが問題であった。そこで我々は、リンドラー領域とカスナー領域のモード関数を運動方程式に基づいた解析接続をすることにより、従来のミンコフスキー真空状態の記述をF領域とP領域を含む表式に拡張した [2]、[3]。これにより、各領域のモードが他の領域にどのように伝播していくのかが明らかとなり、一定加速運動する検出器が作り出すスカラー場の量子放射を量子纏れから理解することができた。

文献 [3] では、スカラー場のみを扱っていたが、より一般的な議論をするためディラック場で同様の解析を行い、ディラック場のモード関数と量子もつれについての解析を行っている。本発表では、リンドラー時空の状態とカスナー時空の状態による2次元と4次元のスカラー場の解析の結果に加え、ディラック場の解析について報告を行う。

1. W. G. Unruh, R. M. Wald, Phys. Rev. D **29**, 1047 (1984)
2. S. Iso, R. Tatsukawa, K. Ueda, K. Yamamoto, Phys. Rev. D **96**, 045001(2017)
3. A. Higuchi, S. Iso, K. Ueda, K. Yamamoto, Phys. Rev. D **96**, 083531(2017)

30 AdS に沈め込まれた余剰次元 1 の時空たち

松野 皐 (大阪市立大学 宇宙物理・重力研究室 D1)

Anti-de Sitter space(AdS) とは負の宇宙項を持つ Einstein 方程式の厳密解であり、定曲率空間である。AdS は豊富な対称性を持ち、構造は単純である。ところが、それらの対称性を一つ

選び、AdS を”射影”(沈め込み)して得られる余剰次元 1 の時空は多種多様である。対称性の選び方によってブラックホールや裸の特異点を持つ時空、対称性の高い時空、低い時空など、いろいろな時空が生み出される。本講演では、AdS における沈め込みの幾何学を紹介する。

沈め込み：空間のある方向をつぶして低次元の空間を作り出す操作。

31 超低周波重力波の検出とその制限

久野 晋之介 (熊本大学 M1)

nHz \sim μ Hz の低周波重力波はパルサー・タイミング・アレイ (PTA) という手法を用いて検出が可能である。PTA とは周期の安定したパルスを放射するパルサーという天体を用いて、予測されるパルスの到着時刻と重力波により伝播経路を歪められたパルスの到着時刻とのずれを観測する重力波の検出方法である。PTA では 10 年周期程度の重力波を観測し、その周期は軌道半径が mili-pc スケールの連星の公転周期に相当する。

軌道半径が mili-pc の超大質量ブラックホール連星は、連星の進化段階としては後期に当たる。初期段階の超大質量ブラックホール連星の軌道は、星の散乱や周りのガスの摩擦によって軌道角運動量が輸送されるにつれて縮む。軌道半径が数 pc になると、軌道角運動量の輸送は効果的でなくなる。しかし、2 つの超大質量ブラックホールが、重力波放射のみで合体するのはハッブル時間を超える。これは”the final parsec problem”と言われているが、既存の PTA では \ll nHz の重力波は検出できない。

PTA の観測周波数帯を大きく下回る超低周波重力波に対する新しい検出方法が参考文献 [1] によって提唱された。これまでは、時間に対して直線的に変化する重力波はパルサーのスピンダウン率の補正として吸収されてしまうので従来の PTA では検出できないと考えられてきた。しかし、新検出方法によると、そうした重力波の場合、スピンダウン率は重力波の影響を含んでおり、パルサーの位置によって異なる性質を持つ。そこで、そのスピンダウン率の統計的な性質を比較することで超低周波重力波の検出が可能となる。

新検出方法では周波数によって重力波の影響が異なる。先行研究では比較的高周波について議論したが、本研究では 10^{-15} Hz 程度のさらに低周波の感度を見積もる。

1. N.Yonemaru et al.2017 arXiv:1705.04733v1
2. ”Gravitational waves from an SMBH binary in M87”, Yonemaru et al. 2016, PASJ, 68, 106
3. ”Sensitivity of new detection method for ultra-low-frequency gravitational waves with pulsar spin-down rate statistics”, Yonemaru et al, 2018, MNRAS, accepted

c 講演 (c1-31)

32 21-cm 線観測における中性水素バイアスのモデル化

安藤 梨花 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研)

M2)

宇宙の加速膨張をもたらす有力な候補としてダークエネルギーが考えられている。ダークエネルギーの状態方程式パラメータの値を制限することで、ダークエネルギーの性質に制限を与えることができる。そのためにバリオン音響振動 (BAO) や赤方偏移空間歪みを用いる方法がある。BAO や RSD を用いることでダークエネルギーを特徴づけるパラメータを推定することができるため、ダークエネルギーを制限することが可能となる。

次世代の電波望遠鏡の Square Kilometre Array (SKA) は、中性水素から放射される波長 21-cm の電波を観測する。SKA では個々の銀河を分解せずに 21-cm 強度を観測する intensity mapping survey によって、遠方宇宙の中性水素の 3 次元分布を得ることができる。これによって、これまでによく行われてきた大規模銀河赤方偏移サーベイとは異なるパラメータ空間を探索することができる。

先行研究では SKA によって観測した場合のダークエネルギーのパラメータへの制限の予測を行なっているが、中性水素バイアスのスケール依存性を考慮していない。そこで本研究では、宇宙流体シミュレーションを用いて赤方偏移 1 から 5 における中性水素バイアスのスケール依存性を測定した。

1. 中性水素バイアス
2. シミュレーション
3. 加速膨張

33 Stacking を用いた宇宙再電離期からの 21cm 線の検出可能性

中島 大佑 (熊本大学 自然科学教育部 M1)

宇宙初期に形成された星や銀河の放射により周囲の中性水素は電離され、やがて宇宙は完全電離した状態となる。この時代のことを宇宙再電離期と呼ぶ。近年のすばる望遠鏡や PLANCK の観測により、再電離期の理解は進んだが、まだ全貌解明には至っていない。再電離期を探る有効な手段として中性水素の超微細構造によって生じる 21cm 線の観測が挙げられる。しかし、21cm 線のシグナルは非常に弱く、銀河系のシンクロトロン放射や系外電波といった強烈な前景放射に覆い隠されるため、未だ検出に至っていない。宇宙再電離期の 21cm 線を検出するためには、遠方の銀河周辺の 21cm 線のスペクトルを重ね合わせる”stacking”という方法がある。再電離期やそれ以前において、銀河周囲の 21cm 線スペクトルは銀河の電離への寄与や放射の特徴を反映している。しかし、前述のように、21cm 線は非常に微弱であり、一つの銀河周囲のスペクトルの検出には非常に高い感度の観測が必要である。そこで、高赤方偏移で見られている複数の銀河についてスペクトルを足し上げるこ

で、観測のノイズを軽減する。先行研究 [1] では、現在見つまっている遠方銀河の一つである GN-z11 に注目し、シミュレーションを用いて、GN-z11 のような遠方銀河の特徴的な 21cm 線スペクトルについて議論した。さらに、大型電波望遠鏡である Square Kilometre Array (SKA) の観測を想定した場合、100 個以上の銀河周囲のスペクトルを足し上げれば観測可能であることを明らかにした。今回は、この研究を元に、SKA だけではなく Murchison Widefield Array (MWA) などの現行の望遠鏡や、より low- z の状況を想定して、stacking による 21cm 線の観測可能性について議論する。

1. Geil P. M., Mutch S. J., Poole G. B. et al 2017 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 472, Issue 2, p.1324-1335

34 N 体シミュレーションを用いたボイド進化の解析

簗口 睦美 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) D1)

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が、これと相補的な観測情報源の一つとして、大規模構造における低密度領域 (ボイド) が有用であることが報告されている。ボイドのサイズは典型的には超銀河団スケールであり、銀河などのように、超新星爆発など、局所的現象による影響を受けにくいのが特徴である。これまでの研究では、宇宙論モデルの制限や、重力波でも排除されていない重力理論の検証にボイドのサイズ分布や形状分布が応用されてきた [1,2]。

一方、ボイドの物理量を決定する主要因に関しては、未だ統一的な理解が得られていない。1986 年、Icke は一様楕円体モデルを用いて、ボイドが自己重力によってより丸く、より膨張することを解析的に導いている [3]。しかし、N 体シミュレーションにおける個数分布の最頻値からは、ボイドは時間進化に伴いむしろ歪むことが示唆されており、Icke のモデルでは明らかに記述できない。ただし、後者は全体としての性質であり、個々のボイドの振る舞いは明らかでない。このため、现阶段では、こうした傾向が、合体や分裂、また系統誤差など、個々のボイドの重力進化以外の効果によって得られている可能性も否定できない。そこで、本研究では、合体や分裂の影響を極力排除し、N 体シミュレーション中の個々のボイドの進化を追うことで、現実的な状況下における、ボイドの重力進化傾向を調査した。その結果、合体や分裂を経ないボイドの中でも、球に近づくものと歪むものの両方が存在することがわかった。本ポスターでは、これらのボイドの特徴について、さらに詳細を報告する。

1. N. Hamaus et al, Phys. Rev. Lett. 117, 091302, 2016.
2. P. Zivick et al., Mon. Not. R. Astron. Soc., 451, 4215-

4222, 2015.

3. J. Icke. Mon. Not. R. Astron. Soc., 206, 1-3, 1986.

35 ダークマターハロー内部の位相構造について

杉浦 宏夢 (京都大学 天体核研究室 D1)

Λ CDM モデルに基づく宇宙論的構造形成は、宇宙の構造の進化が主にコールドダークマター (CDM) によって導かれることを示している。CDM は (バリオンの寄与を無視すると) 無衝突自己重力系とみなせ、従ってその進化は Vlasov-Poisson 方程式によって記述される。その位相空間上の進化は分布の交差 (shell-crossing) を伴うという点で特徴的であり、ダークハローは交差の集積としてその構造が決定される。本発表ではこのような位相空間上の無衝突系の進化という観点からダークハローの構造を論じ、関連する発表者の研究成果を提示する。

1. Fillmore & Goldreich, ApJ, 281, 1 (1984)
2. Mohayaee & Shandarin, MNRAS, 366, 1217 (2006)

36 γ 線背景放射の銀河団との相互相関解析を用いた赤方偏移特性の探査

橋本 大輝 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) M2)

Fermi 衛星による掃天観測によって全天でほぼ一様な γ 線背景放射 (EGB) が観測されてきた。同時に EGB の構成要素として起源天体の不明な γ 線背景放射 (UGRB) が全天で存在することがわかってきた。UGRB の性質や起源についてはまだ十分には理解されていないが、blazar や star-forming galaxy、radio galaxy などの天体を起源とする場合とダークマターの対消滅や崩壊などのエキゾチックな物質を起源とする場合が考えられている。これらの γ 線源はハローに集中的に分布していると考えられる。そのため、ハローの分布と UGRB の相互相関解析を行うことで γ 線源の正体にアプローチすることが期待できる。ただし、これまでの研究では相互相関の赤方偏移特性に着目した解析は行われていなかった。実際には、それぞれの γ 線源候補は、 γ 線強度について異なった赤方偏移依存性を持っている。よって、幅広い赤方偏移の銀河団カタログを用いて相互相関の赤方偏移特性を明らかにすることができれば、それぞれの γ 線源の赤方偏移依存性を比較することでその起源に迫ることができると期待される。

本研究では、*Fermi* 衛星の掃天観測を基にして得られた UGRB と Hyper Suprime-Cam (HSC) の観測データから作成された銀河団カタログから得られる銀河団分布の相互相関を 2 点相互相関解析とスタッキング解析から評価した。さらに銀河団の赤方偏移 ($0.1 < z < 1.1$) をビンニングした上で同様の解析を行い、相関の赤方偏移特性についても評価を行った。本講演ではそれらの解析の手法と結果について報告する。

1. A. Cuoco, M. Bilicki, J.-Q. Xia, E. Branchini, 2017,

2. J.-Q. Xia, A. Cuoco, E. Branchini, M. Viel, 2015, ApJS, 217, 15

37 ベクトル・テンソル理論に基づいた暗黒エネルギーモデルに対する観測的制限

中村 進太郎 (東京理科大学 理学研究科 物理学専攻 辻川研究室 D1)

宇宙後期加速膨張を説明する試みとして、修正重力理論に基づく暗黒エネルギーモデルが数多く提唱されてきた。そのほとんどは、運動方程式を2階微分に保つ最も一般的なスカラー・テンソル理論である Horndeski 理論や、これを運動方程式が高階の空間微分を含むよう拡張した GLPV 理論に内包される。しかし、これらの理論では観測から示唆されているような Λ -CDM 模型よりも低い密度ゆらぎの成長率を不安定性なしに実現することが難しい。

一般相対論に対して新たな自由度を導入する際、スカラー場以外にもベクトル場を考えることもできる。重力場とベクトル場が結合した理論 (ベクトル・テンソル理論) では、理論的に有効かつ現在付近で実効重力定数が万有引力定数よりも小さな値となるモデルが存在することが先行研究によって示されている [1]。これにより、 Λ -CDM 模型よりも低い密度ゆらぎの成長率がベクトル・テンソル理論ならば実現できる。

さらに、運動方程式を2階微分に保つ一般的なベクトル・テンソル理論である generalized Proca (GP) 理論では、 Λ -CDM 模型で生じる Ia 型超新星のような低い赤方偏移での観測結果と CMB の観測結果との間の食い違いを解消でき、統計解析の結果はむしろ前者の理論モデルを好む傾向を示している [2]。本研究では、GP 理論を伝搬自由度の数を保ちながら拡張した beyond generalized Proca (BGP) 理論 [3] について議論する。具体的には、BGP 理論に基づく暗黒エネルギーモデルに対して、宇宙マイクロ波背景放射や Ia 型超新星の観測などの複数の独立な観測結果を用いた統計解析を行うことで、理論モデルに観測的制限を課す。

1. S. Nakamura, R. Kase and S. Tsujikawa, Phys. Rev. D 95, 104001 (2017).
2. A. De Felice, L. Heisenberg and S. Tsujikawa, Phys. Rev. D 95, 123540 (2017).
3. L. Heisenberg, R. Kase and S. Tsujikawa, Phys. Lett. B 760, 617 (2016).

38 宇宙の大規模構造による弱重力レンズ効果への Intrinsic Alignments の影響

栗田 智貴 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M1)

天体 (銀河) から放射された光が伝播途中の重力場のゆらぎによって曲がった経路を進むと、観測される銀河の形状は歪んで

見える (weak lensing)。この効果を銀河サーベイで見つかった大量の背景銀河に適用し、統計的に解析することで、宇宙広域の歪み場 (cosmic shear) を測定できる。この cosmic shear の精密測定は、(逆を辿れば) 我々と背景銀河の間に存在する重力場の情報を完全に含むため、ダークマター分布の再構成や宇宙論パラメータの推定を可能にする強力な手法の一つとなっている。

しかし銀河形状の歪みを引き起こす要因は weak lensing だけではない。大規模構造の物質分布の非一様性に起因して存在する潮汐力場は、ダークマターハローあるいは原始銀河ガス雲と重力相互作用をするため、同じ赤方偏移にある銀河の形状はこの潮汐力場と相関を持って歪む。この効果は Intrinsic Alignment (IA) と呼ばれる。一方、潮汐力場はより遠方の銀河に対しては前述の通り weak lensing を及ぼすので、cosmic shear の相関の中には潮汐力場に媒介される2つの別の効果が混在する。物質分布を推定する際には、weak lensing の寄与のみに注目したいため、IA による寄与は正確に除去したい成分である。

IA の物理機構は極めて非線形であり、またガス物理など銀河形成の物理も関与するので、解析的に計算することは不可能であり、むしろ IA の寄与を実際の観測データから制限し、現象論的に整合するモデルを構築する必要がある。今回レビューする論文 [1] では、銀河の様々な個性 (光度、ハローの質量、色、赤方偏移、周囲の環境) に対して、IA の依存性を調べている。発表ではその解析方法と結果について述べ、銀河の性質も考慮した柔軟な IA モデルが求められることを概観する。

1. Sukhdeep Singh, Rachel Mandelbaum, Surhud More, MNRAS, 450, (2015), 2195

39 銀河形状による初期三点相関の非等方性の検証

小粥 一寛 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C研) M2)

インフレーション中に何らかの非線形な物理過程があることで、初期ゆらぎに非線形効果が生じる。超弦理論においてその存在が示唆されているスピン2以上の場がインフレーション中に存在する場合には、背景宇宙は等方的であるが、初期三点相関には (1) スピンに依存する冪をもつ二つの波数との間の角度依存性と (2) 質量とスピンに依存する冪を持つ二つの波数比と振動項をもった非等方性が現れることが知られている [1]。この非等方性のうちスピン2の場による (1) は、銀河形状の観測により検証可能であることが [2] によって示された。本研究 [3] では、スピン2粒子による (2) も考慮した銀河形状の観測による検証可能性を調べた。その結果、[1] では大スケールで見られていたスピン2以上の痕跡が、小スケールで見られることがわかった。また、背景が大域的に等方的である場合は一般に、スピン1のベクトル場がインフレーション中に存在しても、その揺らぎは減衰してしまうため、初期三点相関の非等方性の起源

はスピン 2 以上の場によるものとなる。一方、インフレーション中に、背景宇宙の等方性を破るベクトル場が存在する場合 (e.g. 非等方宇宙) には、ベクトル場の揺らぎは減衰することなく観測可能な非等方性を生じる可能性がある。この場合には、初期三点相関に、ベクトル場の方向依存性に由来する大域的等方性を破る寄与が現れる。本研究 [3] では、銀河形状の観測を通じて、これら 2 つのモデルが区別できるかどうかを検証した。その結果、後者のモデルでは、銀河の intrinsic alignment として、前者では見られなかった B モード及び多重モーメント ell の非対角成分が生成されることがわかった。これらの結果を報告する。

1. Arkani-Hamed et al., arXiv:1503.08043 (2015)
2. Schmidt et al., JCAP 1510 (2015) no.10, 032
3. Kogai et al., arXiv:1804.06284 (2018)

40 宇宙マイクロ波背景放射の非等方性を用いた原始磁場の観測的解明

箕田 鉄兵 (名古屋大学 宇宙論研究室 (C 研) D1)

現在、宇宙のあらゆる天体に磁場が付随することが確認されている。これらの天体に付随する磁場の起源として、初期宇宙で生成された微弱な磁場 (以下、原始磁場と呼ぶ) の存在が示唆されている。インフレーションや宇宙の相転移などによって、原始磁場を生成する理論が数多く提唱されているが、観測的な検証が不十分であり、原始磁場の存在は未解明である。ここで、天体形成以前の初期宇宙に存在する磁場を検証するための観測量として、我々は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) に着目した。CMB はほぼ完全な黒体分布かつ空間的に一様な電波であるが、実際には $\delta T/T \sim 10^{-5}$ 程度の小さな温度揺らぎが存在している。原始磁場が存在し、磁場の強度分布に非一様性があつた場合、磁場のローレンツ力が宇宙論的なガスの密度および温度の分布に影響を与えるということが先行研究で指摘されている。すなわち、原始磁場の持っている情報は、ガスの密度や温度の揺らぎに反映されるはずである。また、一般に CMB 光子は高温・高密度のガスによって逆コンプトン散乱を受けることが知られている。したがって、原始磁場の強度分布の持つ性質が CMB 温度の非等方性に与える影響を見積もることが、実際の CMB の観測から原始磁場の存在を検証する上で有用である。我々はこれまでに原始磁場の存在を考慮してガスの密度進化と温度進化の式を矛盾なく統一し、数値計算を用いてガスの密度と温度の空間分布を計算した。加えて、ガスと光子の逆コンプトン散乱を通じた CMB の温度揺らぎの見積もりも行った [1]。今回、これらの計算結果と CMB の観測データによる原始磁場の分布の性質について得られた情報を報告する。

1. Minoda et al., 2017, PRD, 96, 123525

41 回転する天体による重力波の干渉

森田 拓弥 (神戸大学 宇宙論研究室 M1)
アインシュタインの一般相対性理論は、観測されている天体現象の多くを説明できる基本的な理論となっている。そこから導かれる興味深い現象のひとつに重力レンズがある。ある天体と観測者の間に重い天体がある場合、本来とは異なる像が観測されるという現象である。これを駆使することでレンズ源となる天体の質量などを間接的に得ることができると、ブラックホールやダークマターハローなどの探索に有用な理論となっている。また、もう一つ面白い現象として重力波がある。この波は、ほとんど相互作用しないために長い距離を coherence に伝わるという性質を持つ。

本発表では、これらの現象を用いて重い天体周りの Kerr metric の回転について調べた論文 [1] についてレビューする。レンジング効果で捉えた二つの image から現れる重力波の位相差が干渉縞として現れ、これが回転に影響されてズレることを見る。

1. Christian Baraldo, Akio Hosoya, Takahiro T. Nakamura, Phys. Rev. D59 (1999) 083001

42 超ハッブルスケールで成長する曲率ゆらぎから 2 次的に誘起される重力波

富川 慶太郎 (立教大学 M2)

2015 年、重力波干渉計 aLIGO によって人類史上初めて重力波が観測され、ついに重力波天文学の時代が到来した。重力波は晴れ上がり以前の宇宙の姿を直接捉えることができるので、初期宇宙を探る上でも重要な役割を果たす。

宇宙初期にはスカラー型ゆらぎ (密度ゆらぎ) とテンソル型ゆらぎ (重力波) が生成される。線形ゆらぎでは計量の量子ゆらぎが 1 次の重力波となって伝播する。一方、ゆらぎの 2 次ではスカラー型ゆらぎによって 2 次の重力波が誘起される [1][2]。これまでの研究では、2 次の重力波はゆらぎの 2 次のオーダーなので 1 次より小さく考えられていた。ゆえに、これまでの研究では 1 次の重力波の寄与のみを計算しており、2 次の重力波が観測される可能性については議論されてこなかった。しかし、インフレーションモデルの中には超ハッブルスケールでスカラー型ゆらぎが増幅するモデルが存在する [3]。これは 2 次の重力波が 1 次よりも大きくなり得るモデルが存在することを示唆する。この場合はこれまで予言されてきた 1 次の重力波よりも先に、2 次の重力波が観測される。本発表では 2 次の重力波が増幅されるインフレーションモデルを取り扱い、パワースペクトルを求めることで 2 次の重力波の観測可能性を予言し、インフレーションモデルを制限する手段として 2 次の重力波が妥当かどうかを検証する。

1. K. N. Ananda, C. Clarkson and D. Wands, Phys. Rev. D bf 75, 123518 (2007)

2. D. Baumann, P. J. Steinhardt, K. Takahashi and K. Ichiki, Phys. Rev. D bf 76, 084019 (2007)
3. S. Hirano, T. Kobayashi and S. Yokoyama, Phys. Rev. D bf 94, no. 10, 103515 (2016)

43 重力波のパラメータ推定

根岸 諒 (新潟大学 宇宙物理学研究室 M1)
 アインシュタインによって約 100 年前に予言された重力波は 2015 年, 世界で初めて検出に成功した. 重力波信号は非常に微弱であるため, 大きなノイズの中から重力波信号を取り出すことが必要である. そのためには, 信号対雑音比 (SNR) を最大化する Matched Filter が最も効率的な手法と言われている. Matched Filter では, 観測データと重力波波形の相関を取るため, 予想される重力波波形データのテンプレートが必要であるが, 波形は重力波を出す天体の質量, スピン, 軌道など複数のパラメータに依存しており, そのテンプレートは膨大なものとなる. また, 観測データに重力波信号が含まれていることが分かったとしても, その天体のパラメータを精度良く推定することは単純ではない. 本研究では, 重力波観測データから重力波天体のパラメータを推定する方法として, ベイズ推定について紹介する.

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

44 重力波解析における Matched Filter について

松崎 和紘 (新潟大学 宇宙物理学研究室 M1)
 2015 年, LIGO によりはじめて重力波が直接観測され, 重力波天文学の幕開けとなった. 重力波の観測は, 一般相対性理論の検証などに利用されることが期待されている. しかし, 重力波の信号は観測装置のノイズに比べてはるかに小さく, その検出は非常に困難である. このような小さな信号を大きなノイズの中から見つけ出す手法として良く用いられるのが, Matched Filter である. これは, 理論的に予想された重力波の波形を用いて, 信号対雑音比 (SNR) を最大にするフィルターである. 本発表では, Matched Filter の原理を紹介する.

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

45 インフレーションと原始ゆらぎの non-Gaussianity

Takeuchi Keito (神戸大学宇宙論研究室 M1)
 宇宙初期の加速度膨張であるインフレーションのエネルギースケールは GUT スケールにもなると予想されており, インフレーション中の相互作用などの情報を詳細に知ることができ

ば, 高エネルギーの検出器として利用できる. この相互作用などの情報は non-gaussianity と呼ばれる, ガウス分布からのずれとして現れる. 現在の観測では non-gaussianity は未だ検出されていないが, 将来的に観測精度が上げればその詳細なデータが得られると期待されている.

本発表では, 原始ゆらぎの non-G を用いてインフレーションを引き起こすインフラトンと呼ばれる粒子と相互作用している高エネルギーの粒子の質量などの情報が, どのようにして読み取れるかをレビューする.

1. arXiv:1303.1523v3 [Inflation, Cosmic Perturbations and Non-Gaussianity]

46 インフレーション宇宙の赤外発散の確率解釈可能性

徳田 順生 (京都大学 天体核研究室 D2)
 インフレーションパラダイムにおいて, 断熱ゆらぎの量子相関関数が観測量となる. しかし一般に, インフレーション時空上において軽いスカラー場由来のループ補正は赤外において発散, 或いはツリーレベルの寄与よりも遥かに大きくなることが知られている. したがって観測量の定量的評価を行うには, この赤外発散問題を解決する必要がある.

零質量スカラー場である断熱ゆらぎ由来の赤外発散の問題に関しては [1] で解決策が提案された. しかし, インフレーション中に等曲率ゆらぎが存在した場合に, 等曲率ゆらぎ由来の赤外発散の問題には, [1] の議論が適用できない.

そこで我々は, インフレーション宇宙の確率的描像に基づく観測量の定義には赤外発散の問題が表れないことに注目した. この確率的描像が赤外発散の問題の 1 つの解決法の鍵となることを期待して, この描像の理論的整合性を議論する [2].

1. T. Tanaka and Y. Urakawa it Prog. Theor. Phys bf 122 (2009) 779-803
2. J. Tokuda and T. Tanaka it JCAP bf 1802 (2018) 014

47 ブラックホール熱力学と Wald のエントロピー公式

佐竹 響 (神戸大学大学院理学研究科物理学専攻宇宙論研究室 M1)

ブラックホールは熱力学的性質を持つことが知られている. 特に Einstein 重力におけるエントロピーはブラックホールのホライズンの面積と関係しており, これを Bekenstein-Hawking エントロピーと呼ぶ. Wald は高階微分補正を含むような一般の重力理論に対してエントロピーの公式を与えた. さらに, ブラックホール熱力学は量子重力理論への有力なアプローチの一つであることが期待されていて, 実際, 超弦理論によるブラックホールの統計的エントロピーは Bekenstein-Hawking エントロピーと一致することが示された.

本発表ではブラックホール熱力学および Wald によるブラックホールエントロピーの公式をレビューする。

1. R. M. Wald, “Black Hole Entropy is Noether Charge,” arXiv:9307038 [gr-qc]

48 正則な球対称ブラックホールの量子放射

浅見 拓紀 (名古屋大学 重力・素粒子的宇宙論研究室 (Qg 研) M1)

一般相対論を取り入れた、曲がった時空での場の量子論を考えると、Black hole は Hawking radiation によりエネルギーを放出し、最終的には蒸発してしまうと考えられている。

本講演では、Valeri P. Frolov と Andrei Zelnikov による論文 [1] のレビューを行う。[1] では、一般の正則な球対称時空上を伝搬する光線の性質を解析手法について議論する。その際、時空の正則性により、BH 中心を通過するような光線の振る舞いも考えることができる。また、共形場理論に基づいて構成した「観測量」を導入することにより、方程式が簡略化されること、および各量と現実の物理量が対応することを見る。

最後に、具体的なモデルとして Hayward metric を修正したモデルを与え、時空上の光線の軌道、および先述した観測量を数値的に解くことでその時空の性質について考察する。またその際、metric に赤方偏移因子に相当する関数を加えることで光線の軌道などにどのような変化が生じるかについても議論する。

1. Valeri P. Frolov, Andrei Zelnikov arXiv:1704.03043 [hep-th]
2. Valeri P. Frolov, Andrei Zelnikov arXiv:1612.05319

49 初期物質優勢期における Primordial Black Holes

三浦 大志 (京都大学 天体核研究室 M2)

ダークマターの正体は謎に包まれている。その一つの候補として Primordial Black Hole (PBH) が考えられている。PBH とは初期宇宙に形成されたブラックホールである。主に宇宙初期の放射優勢期で小スケールの密度ゆらぎが直接重力崩壊することで形成されると考えられる。しかし、もし初期密度ゆらぎのパワースペクトルがスケール不変であるとする、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) などの大スケールの観測によれば形成される PBH の量は非常に少なく、ダークマターを説明することはできない。そこで初期物質優勢期を考える。初期物質優勢期とは、インフレーション期と放射優勢期の間に位置する物質優勢期であり、宇宙再加熱がゆっくり起こった場合などに存在している可能性がある。もし初期物質優勢期が存在すると、その時密度ゆらぎは放射優勢期と比べて重力崩壊しやすくなり、形成される PBH の量は増える。

本講演では、初期物質優勢期における PBH の形成において

二つの場合を考える。一つはインフラトンが走るスペクトル指数を持つ場合である。もう一つは spectator 場のスペクトル指数が 1 より大きい時である。spectator 場とはインフラトンとは別の場で、宇宙の全エネルギー密度への寄与が無視できるような場である。これらの場合において、PBH の量への観測的制限を考慮した上でダークマターの量を全て説明できるパラメータ領域を調べた。さらに PBH の量への観測的制限から、初期ゆらぎのスペクトルの形を制限した。spectator 場のスペクトル指数が 1 より大きい場合は、再加熱温度の関数として spectator 場の振幅とスペクトル指数を制限した。また、インフラトンが走るスペクトル指数を持つ場合には、インフラトンのスペクトル指数 n について $dn/dlnk \lesssim 0.001$ という制限が得られた。ここで k は共動波数である。これは spectator が存在しない場合の、Planck 衛星による CMB の非等方性からの制限と同程度である。本講演は [1] のレビューである。

1. B. Carr, T. Tenkanen and V. Vaskonen, Phys. Rev. D96, no.6, 063507 (2017)

50 ホワイトホールを考慮したブラックホールのライフサイクルのモデル化

小池 貴博 (東京学芸大学 M1)

ブラックホールには熱力学的な性質があり、ブラックホールはその表面積に比例するエントロピーをもつ。統計力学の立場ではブラックホールがエントロピーをもつことは、ブラックホールがさまざまな微視的状態の重ね合わせとして記述されることを意味する。そのためブラックホールが物質を吸い込んでも、その情報は失われることなく、内側で何らかの形で蓄えられているはずである。もしブラックホールの微視的な状態が量子力学で記述されるなら、内側で蓄えられた情報はユニタリな時間発展によって、外側に取り出すことができるはずである。

しかし、量子力学の効果を部分的に取り入れると、ブラックホールはホーキング放射によって、中に吸い込まれた物質に依存しない形でエネルギーを放出し、いずれは消滅すると考えられている。量子力学の効果を取り入れたにもかかわらず、ブラックホールに吸い込まれた情報が失われるように見えるこの問題を情報喪失問題と言い、未だ解決には至っていない。

この情報喪失問題を解決する方法として、これまでに様々なアイデアが考えられている。その中の 1 つにブラックホールは蒸発の最期に Remnant を残し、そこに情報が保存されるというものがある。論文 [1] で Bianchi らは、その Remnant がホワイトホールであるというモデルを考えた。これにより、一般相対論の枠組みの中でブラックホールのライフサイクルを考えることが出来ると主張している。本発表では論文 [1] の詳細についてレビューする。

1. E. Bianchi et al. arXiv:1802.04264

51 スカラー場による裸の特異点とブラックホール時空

佐土原 和隆 (東京学芸大学大学院 M2)

一般相対論におけるブラックホールの一般的な性質の一つは、時空特異点が存在することである。特異点では時空が破綻しており、その点の物理を記述することができなくなってしまう。この特異点を回避するために、これまで多くの研究がなされてきたが、未だに解決には至っていない。その原因は、ホライゾン内部の情報が外に出てこないからである。つまり、ブラックホールは内部を直接観測することができない。そのため、この問題を解決するには、内部構造の影響を受けながら、無限遠まで到達する物理量を発見し、その観測から間接的に内部構造を判断する必要がある。しかし、一般相対論では、ブラックホールは質量、電荷、角運動量以外に情報を持たないため、ブラックホールの内部構造を観測から明らかにすることはできない。一方、質量を持たないスカラー場が存在する時空では、ホライゾンに隠されていない特異点の存在が知られており、これを裸の特異点という。これに対し [1] では、この時空でスカラー場にポテンシャルを与えることで、裸の特異点ではなく、ホライゾンを持つブラックホール解を生成した。つまり、ポテンシャルを変化させることで、ブラックホールのホライゾンの有無を変化させることができるようになった。このことは、ブラックホール時空でスカラー場のポテンシャルを変化させることにより、ブラックホールの内部構造を無限遠から見るができる可能性を示唆している。[1] のブラックホール解の物理については、未だに分かっていないことが多い。本講演では、このブラックホール時空の性質や、我々が構成した他次元の解の性質について説明をする。

1. M. Cadoni and E. Franzin, Phys. Rev. D91, 104011 (2015)

52 Multifractional theories の宇宙論的応用に向けて

高木 かな (東京学芸大学 M2)

ビッグバン宇宙論での諸問題を解決する理論として、インフレーションが提唱されている。インフレーションとは、ビッグバンより前に起こったとされる、宇宙の指数関数的膨張である。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、決定的なものはなく、初期宇宙は未だに解明されていない。

近年、量子重力の観点から宇宙初期は実質 $(1+1)$ 次元だった可能性が示唆されている。従って、 $(1+1)$ 次元だった宇宙は、インフレーションを経て $(3+1)$ 次元に成長したと考えることができる。このような次元の変化を実現するために、本研究では Multifractional theories に注目した。Multifractional theories とは、スケールが変わると次元も変わるような幾何学の理論であり、この理論をもとに描かれた時空を Multifractional

時空という [1]。この時空を用いることで、宇宙が指数関数的に膨張するインフレーション中に、次元が変化する様子を表すことができる可能性がある [2]。q 微分や fractional 微分等の数学的手法を用いることで、この時空は実現できる。

本発表では、Multifractional theories を宇宙論や他の現象に応用する方法を考察する。本研究は同研究室の佐野との共同研究であり、佐野が Multifractional theories の概要を説明する。

1. G. Calcagni, Multifractional theories: an unconventional review, JHEP 1703 (2017) 138.
2. G. Calcagni, et al., Cosmic microwave background and inflation in multi-fractional spacetimes, JCAP 08, 039 (2016).

53 Multifractional theories と時空次元の実質的な変化

佐野 有里紗 (東京学芸大学 M1)

現在の宇宙は $(3+1)$ 次元時空だと考えられている。しかし、宇宙初期の実質的な次元は、 $(1+1)$ 次元時空だという可能性が量子重力理論から示唆されてきた [2]。このような可能性を考慮すると、実質的に $(1+1)$ 次元時空であった宇宙がインフレーション期に $(3+1)$ 次元時空になったというモデルが提唱されている。このような非等方インフレーションモデルもあるが、それ以外にも時空の有効次元が変化する Multifractional 時空を利用するインフレーションモデルもある [3]。Multifractional 時空は、q 微分などを用いることによって、スケール変化に伴って次元も変化する時空であり、その時空を記述する理論を Multifractional theories と呼んでいる。

本発表では、Multifractional theories の概要について説明する。本研究は、同研究室の高木との共同研究であり、高木は Multifractional theories の宇宙論的応用について説明する。

1. G. Calcagni, JHEP 1703 (2017) 138.
2. S. Carlip, Quantum Grav. 34 (2017) 193001.
3. G. Calcagni et al., JCAP 08 (2016) 039.

54 計量アフィン幾何におけるスカラーテンソル重力理論

嶋田 圭吾 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

本講演では、計量と接続を独立に扱う計量アフィン幾何において、射影変換不変性をもつスカラーテンソル重力理論の構築を行った。アインシュタインの一般相対性理論の構築にあたっての快挙は、時空の記述を(擬)リーマン幾何に当てはめたことである。曲がった幾何において、真髄をなすのは長さや角度を定める計量と平行移動のズレを表す接続であり、リーマン幾何はそこにさらに非捩率と計量仮説を課していおり、この特別な接続をレビチビタ接続という。ここで接続に掛けた条件を緩め、

接続を任意にした幾何を計量アフィン幾何と呼ぶ。[1] この計量アフィン幾何に基づいてアインシュタインヒルベルト作用を考えると、レビチビタ接続を解にもつ。すなわちこの作用において幾何を拡張したのに関わらずリーマン幾何に落ち着くのである。しかしながら、重力がアインシュタインヒルベルト作用から離れた拡張された理論においてはこの等価性はない。よって計量アフィン幾何の拡張された重力理論は一考の余地がある。さて本講演では計量アフィン幾何におけるスカラーテンソル理論を考える。まずアインシュタインヒルベルト作用において内包されている接続に関する射影変換が、スカラーテンソル理論でも存在すると仮定する。その仮定の元、一般的なガリレオン項やスカラー場と曲率との非最小結合は射影変換の下で不変であることを見つけた。また、この作用を Riemann 幾何に有効的に書き直すと DHOST 理論 [2] の一部となっていることを明らかにした。これにより、DHOST 理論は幾何的な描像を持ち得ると言える。以上に加え、計量アフィン幾何と Riemann 幾何における物質の振る舞いの違いについても議論する。

1. T. P. Sotiriou and S. Liberati, *Annals Phys.* 322 (2007) 935-966
2. D. Langlois and K. Noui, *JCAP* 1602 (2016) 034
- 3.

55 K-Mouflage タイプのスカラー場が与える星の内部への影響

那須 千晃 (立教大学 M2)

これまでの観測により、現在の宇宙が加速膨張していることが判明している。この加速膨張を説明するために、ダークエネルギーと呼ばれる未知の物質を導入する試みがある。しかし現時点では、このような物質が実在することを示す観測事実は存在しない。そこで、ダークエネルギーを導入せずに一般相対論を修正することで宇宙の加速膨張を説明するという試み（修正重力理論）が注目されている。これに含まれるものとして、一般相対論にスカラー場を加えるスカラー・テンソル理論が盛んに研究されている。

スカラー・テンソル理論においては、重力のほかにスカラー場によって引き起こされる力（スカラー力）がはたらくため一般相対論からの差異が生じる。このような差異は太陽系といった局所領域では発見されておらず、スカラー・テンソル理論はスクリーニング機構と呼ばれるスカラー力を局所的に遮蔽する機構を備えている必要がある。

いくつかの機構がこれまでに研究されており、本講演ではスカラー場の一階微分によって局所領域において一般相対論の振る舞いを取り戻す K-Mouflage Gravity に着目した発表を行う。この理論は、太陽と同程度の質量を持つ星を考えたとき、星からおよそ 3500AU 離れたところまでは Fifth force が抑制され、一般相対論と一致することがわかっている。ところが、K-Mouflage Gravity 理論において中性子星のような高密度領

域での振る舞いは明らかでない。そこで、本講演では星の内部におけるスカラー場の運動方程式を数値的に解き、観測・実験と比較することで K-Mouflage Gravity 理論に含まれる未知のパラメータに対する新しい制限をかけられるかについて報告する。

1. E. Babichev, C. Deffayet and R. Ziour *Int. J. Mod. Phys. D* 18, 2147 (2009)
2. P. Brax and P. Valageas *Phys. Rev. D* 90, no. 2, 023507 (2014)
3. A. Barreira, P. Brax, S. Clesse, B. Li and P. Valageas *Phys. Rev. D* 91, no. 12, 123522 (2015)

56 Positivity bound in modified gravity

平野 進一 (立教大学 D2)

宇宙項問題の回避や後期加速膨張の起源の 1 つとして、重力理論の修正を考える研究が盛んになされている。そのような重力理論では、微分結合を含むような”繰り込み不可能な”相互作用が、宇宙論的な示唆を示したり、小スケールでの重力修正による効果を抑えるスクリーニング機構を働かせる。場の理論の描像ではこのような理論は、低エネルギーの有効場理論として扱われる。修正重力理論は、高エネルギー領域における理論との整合性を問わない場合が多く、それらは現象論的な側面に重きが置かれがちである。本公演では、高エネルギー側の理論において慣習的に仮定されるいくつかの条件から、有効場理論としての修正重力理論に条件を課せることをレビューし [1,2]、あまたある修正重力理論の場の理論的な整合性を議論する。

1. A. Adams, et al., *JHEP* 0610 (2006) 014
2. C. de Rham, et al., *Phys. Rev. D* 96 (2017) no.8, 081702

57 一般化された境界条件を用いた反ドジッター時空の不安定性解析

片桐 拓弥 (立教大学 M2)

反ドジッター (AdS) 時空は負の宇宙項を持つアインシュタイン方程式の厳密解であり、空間的無限遠に時間的な境界を持つ。そして、AdS/CFT 対応の提唱により、AdS 時空の理解が重要視されている。AdS/CFT 対応は、AdS 時空における一般相対性理論と AdS 時空の境界における共形場理論 (CFT) は等価であると主張する。その具体的な対応として、摂動を与えた AdS 時空と量子多体系の非平衡状態が挙げられる。非平衡状態の解析は技術的に困難である一方で、摂動を与えた AdS 時空は厳密に解析できる。特に、摂動によって異なる時空へ変化する AdS 時空の不安定性の解析は、非平衡状態とその後に至る状態の理解を与える点で注目されている。AdS 時空の不安定性の解析には、AdS 時空の境界に課す境界条件が必要である。境界条件は AdS 時空の境界におけるエネルギーの散逸を無くすものであることが要求され、先行研究が用いたディリクレ境界条件

とノイマン境界条件はこの要求を満たす。これらの境界条件のもとで、AdS 時空は線形摂動に対して安定であり、非線形摂動に対して不安定である。[1] そして、それぞれの不安定性の振る舞いは異なる。このように、境界条件は AdS 時空の物理と密接に関連しているため、その関連の理解が重要である。[2] は先行研究と異なる境界条件のもとで線形摂動に対する 3 次元 AdS 時空の不安定性を指摘した。更に、[3] は 4 次元 AdS 時空においても同様の不安定性が存在することを示唆するが、その詳細な理解は得られていない。本講演では、ディリクレ境界条件とノイマン境界条件を包括する一般化された境界条件を用いた 4 次元 AdS 時空の不安定性の解析結果を報告する。はじめに、境界条件を 1 つのパラメーターによって一般化し、一般化された境界条件のもとで境界におけるエネルギーの散逸が無いことを示す。次に、摂動が成長するパラメーターを特定することで、AdS 時空を不安定にする境界条件を精査する。最後に、不安定な時空が行き着く時空について議論する。

1. P. Bizon and A. Rostworowski, Phys. Rev. Lett. bf 107, 031102 (2011)
2. C. Dappiaggi, H. R. C. Ferreira and C. A. R. Herdeiro, Phys. Lett. B bf 778, 146 (2018)
3. H. R. C. Ferreira and C. A. R. Herdeiro, Phys. Rev. D bf 97, no. 8, 084003 (2018)

58 Holographic entanglement negativity conjecture

辻村 潤 (名古屋大学 重力・素粒子的宇宙論研究室 (Qg 研) M1)

本講演は P.Jain, V.Malvimat, S.Mondal, and G.Sengupta(2018) ”Holographic entanglement negativity conjecture for adjacent intervals in AdS₃/CFT₂” のレビュー講演で、その概要は以下である。Quantum entanglement は物性物理から AdS/CFT 対応まで様々な分野に影響を与えている概念で、これをある程度定量化する物理量として entanglement entropy が知られている。特に CFT の entanglement entropy を AdS 時空で計算する公式が笠高柳によって予想されており、これを Holographic entanglement entropy という。しかしながら entanglement entropy は混合状態の entanglement をうまく定量化できないので、その代わりの量として entanglement negativity という量が Vidal と Werner によって提案されている。その holographic な対応物として holographic entanglement negativity を AdS₃/CFT₂ の特別な系に対し定式化する。

59 Proca star

遠藤 洋太 (大阪市立大学 宇宙物理・重力研究室 M1)

一般によく知られているベクトル場は Maxwell 場であるが、Maxwell 場は質量をもたない。ベクトル場に質量を仮定して、

質量を持つ複素ベクトル場を考える。そのようなベクトル場は Proca 場と呼ばれ、その Proca 場から構成される重力理論を考える。このような条件の下で Maxwell 方程式を Proca 方程式に修正し、Einstein 方程式と共に時空構造を調べていく。

文献 [1] では時空を球対称、軸対称とそれぞれ仮定することで Einstein-Proca 方程式を数値的に解き、スカラーボゾン場の場合と比較しながら、星とみなせる集合体が形成される条件を示す。また、その時空の安定性を得られた時空のメトリックに摂動的な効果を加えることで数値的に論じている。

本発表では文献 [1] のレビューに加えて、Einstein-Proca 方程式の数値解を Mathematica を用いて導出し、その解が持つ意味を解析する。さらにこのモデルはダークマターやブラックホールの候補としても考えてられており、そのことについても簡単に述べる。

1. R.Brito, V.Cardoso, C.Herdeiro, E.Radu Phys.Lett. B752 (2016) 291-295

60 時空の離散化に向けた非線形微分方程式の差分化について

上田 周 (東京学芸大学 M2)

一般相対論では、時空を多様体としてとらえている。これにより、物理現象は微分方程式を用いて記述される。では時空は実際に多様体でなければいけないのだろうか、我々の観測できる波長帯では連続的に見えるが実は離散的な時空になってもかまわないのではないだろうか。また、このことは量子重力の観点からも示唆されている。しかし、量子重力はいまだ未完成であり、どのような量子化が適当であるかもわかっていない。そこで本研究では、重力の量子化の足掛りとするために、古典的に量子化された離散的な時空を考える。では、離散的な時空では物理現象はどのように記述されるのだろうか。離散的な時空では、微分が定義できないため差分が用いられる。差分幾何学はすでに多く研究されており、次の 2 つのことが期待されている。ひとつは連続系よりも離散系のほうがより根源的で豊富な数学的構造をもつであろうこと、もうひとつは、コンピュータでの数値計算等の理論の構築である [1]。差分での離散化の先に従属変数を離散化する超離散とよばれるものがある。これらの操作により離散化された時空では、もとの差分方程式の持つ性質の大部分を引き継ぐことが知られている。このことより、時空を離散的なものとしてとらえ、一般相対論を書き換えることで、これまでとは異なる性質の発見や、背景に隠れる代数構造をより明確にすることができると考えられる。本講演では、時空の離散化の前段階として、非線形微分方程式の差分化を行い、そこから離散系の性質を考察する。

1. 広田良吾・高橋大輔, 『差分と超離散』, 共立出版,(2003)

61 負の屈折率を持つ Metamaterial の物理的基礎と重力系への応用可能性について

渡邊 慧 (東京学芸大学 大学院 M2)

Metamaterial とは自然界に存在する物質が持つことのない性質を持つ人工的な物質の総称であり、その性質のひとつに負の屈折率がある。1968 年に Veselago によって負の屈折率を持つ物質が存在可能であることが理論的に示されたが、当時は実際にそういった物質が発見されなかったため、負の屈折率についての議論は行われなくなっていた。しかし、1999 年に Pendry が金属を用いた人工的な物質によって負の屈折率が実現可能であると発表し、2000 年には Smith らが世界初の負の屈折率を持つ Metamaterial の作製に成功した。初めに作られた Metamaterial は電磁波に対して負の屈折率を持つもの (Electro magnetic Metamaterial) であったが、現在では音波に対して負の屈折率を持つ Acoustic Metamaterial や、力に対して自然界にはないような反応をする Mechanical Metamaterial など、様々な Metamaterial が作製され研究されている。

この中で、2010 年に Smolyaninov は、負の屈折率を持つ Electro magnetic Metamaterial のうち Hyperbolic Metamaterial (HMM, 双曲線メタマテリアル) を用いると Metric Signature Transition (MST, メトリック符号変化) をモデル化できるという論文を発表した [1]。宇宙は虚時間から実時間に切り替わったときに発生するという Hawking らのアイデアに対し、Smolyaninov は HMM による MST のモデル化によって、虚時間から実時間への時間の切り替わりの際に粒子が生成される可能性があることを示した。

このように、Metamaterial の研究を進めていくことは物理学のさらなる発展につながると期待できる。本発表では Metamaterial の物理的基礎を説明するとともに、負の屈折率を可視化し直観的理解の補助とするため、論文 [2] を参考に我々が作製している、水面波における負の屈折に対する実験モデルについてふれたい。

1. I.Smolyaninov et al., Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 067402
2. Garcia-Chocano et al., Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 144301

62 Variable Hyperbolic Metamaterial による符号変化問題のモデル化

楠見 蛍 (東京学芸大学 大学院 M1)

Metamaterial とは自然界の物質にはない性質を示す人工媒体である。1999 年、Pendry は、小さな金属の構造体を配列することで、比誘電率と比透磁率を操作し、有効的な負の屈折率を実現する Metamaterial の存在を理論的に示した [1]。現在、Metamaterial は様々な分野で応用されているが、そのひとつに宇宙に関するトイモデルがある。2010 年、Smolyaninov ら

は宇宙初期に起こったと考えられる現象を Metamaterial でモデル化できると考えた [2]。

膨張している現在の宇宙から過去へさかのぼると、宇宙は密度が無限に大きく、大きさを持たない特異点から始まったことになる。その特異点を回避するために、Hawking らは「虚時間」という数学的概念を導入した [3]。虚時間から実時間に変化するとき、時空構造は (4+0)Euclidean 空間から (3+1)Minkowski 時空へと変化するが、そこでどのような現象が起きるか明らかにはなっていない。Smolyaninov は、Variable Hyperbolic Metamaterial (VHMM) という比誘電率の符号変化を引き起こす 1 軸性 (誘電率が 1 方向のみ異なるような) Metamaterial を用いて、(3+0)Euclidean 空間から (2+1)Minkowski 時空への低次元時間符号変化をモデル化した。比誘電率の符号変化の際、VHMM 中の波数分散関係が楕円型から一葉双曲線型に変化することで、VHMM がとりうる状態密度が増え、エントロピーが増大する。本研究では、この VHMM を用いて宇宙初期の時間符号変化に伴う物理現象への応用を考えた。宇宙初期の時間符号変化が、VHMM でのモデル化と対応すれば、虚時間から実時間に切り替わった瞬間、粒子が生成されたことになる。そこで我々は、VHMM での誘電率符号変化の計算を宇宙初期での次元に拡張し、粒子生成の有無を調べるために (4+0)Euclidean 空間から (3+1)Minkowski 時空への状態密度の増減を計算した。宇宙初期での現象は、実験的に同じ条件で再現されることは極めて困難だが、本研究のようなモデル実験は宇宙初期の解明の一助となるだろう。

1. J.B.Pendry et al., IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 47 (1999) 2075.
2. I.Smolyaninov et al., Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 067402.
3. S.W.Hawking et al., Phys. Rev. D28 (1983) 2960