

assembly bias とハロー特徴量の関係性の探求

石川 慶太郎 (名古屋大学 理学研究科 M2)

銀河は暗黒物質の密集領域である暗黒物質ハロー (以下、ハロー) の中で形成されると考えられている。従来、ハローの空間分布およびハロー内の銀河の空間分布や数はハローの質量のみに依存すると考えられてきたが、シミュレーションの性能向上に伴い、ハローや銀河の空間分布はハローの形成史にも依存することが示唆された [1]。このような銀河分布のハロー形成史依存性を assembly bias と呼ぶ。

近年の観測データの急速な増加および観測領域の拡大により統計精度が飛躍的に向上したことで、実観測に対する解析では assembly bias の考慮の有無で標準宇宙論パラメータの制限に大きな影響を与えることが判明している [2]。それゆえにこの系統誤差の影響を最小化して標準宇宙論を徹底検証する必要がある。

本研究では、物理量と結び付けた先行研究のないこの assembly bias を調査するため、Dark Quest[3] などのシミュレーションデータを用いて、ハローの中心集中度、ハロー周辺の物質密度、ハローのスプラッシュバック半径の 3 つのパラメータに着目した解析を行う。本発表ではそれぞれのパラメータと assembly bias との関係の特徴付ける本研究の進行状況を述べるとともに、将来的に assembly bias 効果を実装する宇宙論エミュレータの有用性およびこれを用いた宇宙論解析の展望について議論する。

1. Wechsler et al., ApJ 652 71W (2006)
2. Miyatake et al., PhRvD.106h3520M (2022)
3. Nishimichi et al., ApJ 884 29N (2019)

Multidimensional Vlasov–Poisson Simulations with High-order Monotonicity- and Positivity-preserving Schemes の紹介

伊藤 圭汰 (筑波大学 M1)

本発表は、自己重力系や宇宙プラズマの運動論の数値シミュレーションにおける Vlasov 方程式の新しい数値シミュレーション手法を提案したものである。

この手法は有限体積法における数値解の空間的な単調性 (Monotonicity) と正值性 (Positivity) を同時に保証する空間 5 次及び 7 次精度の手法である。また時間積分において、従来の多段 TVD Runge-Kutta 法に替えて、semi-Lagrangian 時間積分を採用しており、より精度が高く、同時に計算コストも低い手法となっている。

具体的には、数値シミュレーション手法のテストとして、無衝突自己重力系の重力コラプス問題や静電プラズマにおける空間 1 次元の線形ランダウ減衰、非線形ランダウ減衰を空間 5 次および 7 次精度のスキームを用いて計算した。その結果、どのテストにおいても、従来の同種の数値シミュレー

ションで用いられてきた空間 3 次精度の PFC(Positive Flux Conservation) スキームに比べて著しく精度が向上している。また semi-Lagrangian 時間積分を採用したことのメリットとして、従来の TVD Runge-Kutta 法による空間高次精度のスキームと比較しても大幅に計算コストを削減できている。

1. Satoshi Tanaka, ApJ, 849:76, 2017

重力波観測で探る一般相対論を超える偏極モード 今福 隼斗 (東京大学 M1)

重力の標準理論である一般相対性理論 (General Relativity, GR) は、これまでの実験および観測の結果を良く説明する。しかし、宇宙の後期加速膨張を説明できない、量子論としてくりこみが不可能である、既存の物理法則が破綻する特異点を予見する、など理論として困難を抱えている。このような状況の中、2015 年にアメリカの検出器 LIGO により重力波が初検出された。重力波の観測により、今まで満足に行われていなかった強重力領域での GR の検証が可能となった。

GR では重力波は 2 つのテンソル自由度のみを持つ。しかし、実際の重力波信号は複数の偏光モードが混ざったものとなるのが一般的である。例えば、スカラーテンソル理論や $f(R)$ 重力理論ではスカラー場を介して重力波にスカラー自由度が導入される。したがって、スカラー偏極モードは一般相対性理論には存在しないため、重力理論の拡張に関する研究において重要な役割を果たす。本発表ではスカラー偏極モードの検出可能性を様々な観点から検証した [1] をレビューする。この論文では、コンパクト連星合体からの重力波を扱い、発生、伝播、観測の全ての過程を考慮している。スカラー偏極モードの検出可能性について具体的にどのような観点から検証していくのかを議論し、今後の展望について述べる。

1. Hiroki Takeda et al., arXiv:2304.14430, 2023

5次元回転ワームホールの解析 上道 恵也 (名古屋大学 QG 研 M2)

ワームホールとは時空の 2 つの領域を直接つなぐトンネルのような時空構造であり、アインシュタイン方程式の解である。また、ワームホールのいちばんくびれている部分を「喉」と呼ぶ。この喉を広げるためにありふれた古典的な物質に備わっている条件 (エネルギー条件) を破る物質が必要になるので、喉が広がった通過可能なワームホール解を構成するのは難しい [1]。本研究では喉を広げるために回転の効果を用いて、エネルギー条件の破れ方を軽減するようなワームホール解の構成を試みる。

しかし、任意の角速度の効果を入れると非球対称となり、この低い対称性からアインシュタイン方程式は偏微分方程式を解かなければいけないことになる。そこで、[2] では角運動量が等しい 5 次元空間における定常回転ワームホール解を構成し、

4次元時空ワームホール解の構成のときと同じ自由度を保ちながらアインシュタイン方程式を常微分方程式にすることができた。本研究では漸近平坦な境界条件を課し、[2]では考えられてなかったワームホールの喉付近における「非対称性」の自由度を考慮し、より一般的な解を構成する。そして、任意の角速度の効果について議論する。

1. M. S. Morris, K. S. Thorne, Am.J.Phys., 56, 395, 1988
2. V.Dzhunushaliev et al., Phys.Rev.D, 88, 124028, 2019

パルサー・タイミング・アレイによる背景重力波検出

大城 斗輝 (熊本大学 自然科学教育部 M1)

1918年、アインシュタインは相対性理論で重力波の存在を予言した。[1]そして2015年にはアメリカのレーザー干渉計重力波望遠鏡LIGOにより初めて検出された。[2]重力波は時空間の歪みとして光速で伝搬する波であり、巨大質量の天体の運動により生じる。重力波の中でもnHz~ μ Hzの低周波重力波はPulsar Timing Array(PTA)という手法を用いて検出が可能である。

PTAでは周期の安定したパルス放射するパルサーという天体を用いており、特にパルス周期が短く安定しているミリ秒パルサーからは信号が地球に到着する時刻を予測できる。しかし、地球とパルサーの間に重力波が存在すると、時空の歪みによりパルス到着時刻が変化する。その予測された到着時刻と、変化した実際の到着時刻とのずれを観測して重力波の検出を行う。この時刻のずれはタイミング残差と呼ばれている。

タイミング残差はパルサーの周期変化など重力波以外の要因によって生じる可能性がある。複数のパルサーのタイミング残差を相関をとると、重力波による効果を確認することができる。PTAが最初に検出すると言われている背景重力波の場合、そのタイミング残差の相関はHellings and Downs curveに従う。[3]背景重力波は銀河中心に位置する超大質量ブラックホール連星から発する重力波を重ね合わせたものであり、等方性を持つ。背景重力波の検出により、波源となるブラックホール形成について核心に迫ることが期待されている。本研究では、2つのパルサーのタイミング残差の相関関係を示したHellings and Downs curveについて紹介を行う。

1. A.Einstein, SPAW(Berlin), Seite 154-167. ,2019
2. Abbott, Benjamin P, Phys. Rev. Lett. 116, 061102 ,2016
3. Hellings, R.W. , Downs, G.S., Astrophysical Journal, Vol. 265, p. L39-L42 ,1983

コンパクト連星からの重力波による宇宙論パラメータの推定

大西 翔太 (大阪公立大学 M1)

アインシュタインの一般相対性理論から予言された重力波は2015年に初めてその存在が観測によって確認され、現在では検出器の向上から数多く検出されることとなり、また重力波源の同定に至ることも少なくない状況にある。

今回レビューを行う先行研究[1]とそのレビュー論文[2]では、コンパクト連星からの重力波を観測することによって波源までの光度距離 d_L を直接推定できると同時に、波源の赤方偏移パラメータ z を同定することができれば、宇宙膨張パラメータであるハッブル定数 H_0 を測定することが可能であることを見る。 z を決定するものとしては、電磁波対応天体(EM)、それが無い場合にも銀河カタログや、重力波のみの情報から中性子星の状態方程式を用いるものであったり、質量-赤方偏移のmerger rateを用いるといった方法が考えられている。

以上の手法による測定は従来のハッブル定数推定の2種類の方法とは独立なものかつ直接的であり、現在2種の測定値が誤差の範囲を超えて大きく異なっているという宇宙論におけるハッブル定数問題の、新たな解決策になることが期待される。また、現在のLIGO・Virgo・KAGRAといった第二世代検出器よりも高性能な次世代検出器では、上記のハッブル定数推定の決定誤差を数十%から、 $z \gtrsim 2$ の領域で1%以内までに縮めることが可能であることも述べる。

1. Jose María Ezquiaga and Daniel E. Holz, "Spectral Sirens: Cosmology from the Full Mass Distribution of Compact Binaries", Phys. Rev. Lett. 129, 061102, 2022
2. Simone Mastrogiovanni et al. , "Cosmology with Gravitational Waves: A Review", annalen der phisik, 2022

ブラックホール準固有振動における質量降着の影響

大橋 陸人 (名古屋大学大学院 理学研究科 M2)

一般相対性理論(GR)は、様々な実験や観測によってその正確性が確かめられている重力理論であるが、初期宇宙のような量子論が本質的となる状況では破綻してしまうことが知られており、これを超越する物理が必要とされている。そのため、今後さらなる精度の向上が見込まれる重力波の直接観測によって、GRを用いて予言される理論波形からのずれが見つかることが期待されている。

上記をふまえ、理論波形からのずれが確認された際に、それがGRでは説明できないものであるかを確認するために、その他に考えられるずれの要因をあらかじめ考慮しておくことは有益である。本研究では特に、ブラックホール(BH)連星合体の最終段階であるリングダウン段階において、質量降着があった場合にどのように波形が変化するかを検証する。

BH連星が合体によって最終的に定常BHを形成する場合、その直前の段階では、BH背景時空(今回はSchwarzschild)に

おける摂動を考えるブラックホール摂動論が有効となる。摂動の減衰振動の(複素)振動数は合体後のBHの質量のみによって特徴付けられ、準固有振動(quasinormal mode, QNM)と呼ばれる。QNMは合体過程における軌道などの影響を受けないため、GRの検証に適していると考えられる。

本発表では、背景時空としてSchwarzschild BHに球対称かつ一定の質量降着がある場合を考えた先行研究[1]についてレビューするとともに、私自身の研究で行いたいと思っている(もしくは行った)内容を解説したいと考えている。ただし、本研究は現在計画段階であるため、発表内容はその進行具合によって左右される可能性がある。

1. Jamie Bamber, et al., Phys. Rev. D 103, 124013, 2021

タイトル

小野 瑞季 (北海道大学 M2)

ダークマターの正体を突き止めることは、宇宙論における中心的な未解決問題の1つである。数々の証拠からダークマター(DM)が非バリオン素粒子であることが示唆されるようになった[1]が、具体的にどのような素粒子が関与しているかは未解明である。現在、熱速度を全く持たない冷たいDM(Cold Dark Matter, CDM)が最有力で、ニュートラリーノやアクシオンなどの素粒子が候補に上がっている。CDMによる宇宙論モデル(CDMモデル)では、1 Mpc以上のスケールでは観測結果をよく説明できるのだが、それよりも小さいスケールでは、観測結果との様々な矛盾点がある(missing satellite[2]、core-cusp[3]、too-big-to-fail[4]など)。このCDMに代わる候補が、宇宙初期に有意な熱速度を持つ暖かいダークマター(Warm Dark Matter, WDM)で、ステライルニュートリノなどが挙げられている。WDMモデルは、大スケールではCDMと同じ振る舞いをするが、小スケールでは構造形成を抑制する。本発表では、Lovell et al. 2020の式(2)で示されているWDMとCDMの天の川銀河(MW)サイズのサブハロー mass function 比に対する fitting function[5]で mass function をうまく記述できるかどうか、Semi-Analytical SubHalo Inference Modeling (SASHIMI) [6]の予言とどう違うか、違うとしたら何が原因だったかについて述べる。

1. Larson et al., ApJS, 192, 16, 2011
2. Klypin et al., Astrophys. J., 552, 82, 1999
3. Flores et al., The Astrophysical Journal, 427, L1, 1994
4. Boylan-Kolchin et al., MNRAS., 415, L40, 2011
5. Lovell, The Astrophysical Journal, 897, 147, 2020
6. Dekker et al., astro-ph.CO

背景重力波の円偏極モード検出に着目した重力波ラジオメトリ解析の開発

覚 依珠美 (大阪公立大学理学研究科 重力波実験物理学研究室 M2)

重力波とは時空の歪みが横波として光速で伝播する波動現象であり、様々な起源をもつ微弱な重力波の重ね合わせが「背景重力波」となる。その中でも宇宙初期のインフレーション等を起源とする宇宙論的背景重力波は、重力波が物質との相互作用が極めて小さく脱結合以前の宇宙から到来することから、宇宙誕生後の様子を知るための重要な手掛かりの1つである。

近年、宇宙論的背景重力波の円偏極モードが全天で右回りまたは左回りのどちらかに偏る非対称性の存在が注目されている。この円偏極モードは弦理論に従うChern-Simons項によって生成されると考えられているため、円偏極モードを空の各点で観測することができれば、重力波の生成機構でパリティ対称性が破れていることの証拠になると考えられている[1][2]。

一方で、遠方でのブラックホール連星合体などによる天体起源背景重力波にも円偏極モードが存在するが、重力波源が一樣に分布している場合は無偏極になると考えられてきた。しかし、波源分布に異方性がある場合、今後の検出感度の向上によって無視できない振幅で円偏極が存在する可能性があることがわかった[3]。よって、観測の際に天体起源背景重力波による影響を除去することができれば、より根源的な宇宙論的背景重力波の円偏極モードが検出できる可能性があり、天体起源背景重力波円偏極モード観測のための解析手法が必要となる。

上記のような空の各点におけるパワーを全天マッピングする手法の1つが「重力波ラジオメトリ」である[4]。この手法は複数の検出器を用いて連続的に到来する重力波を解析することができ、天体起源背景重力波の解析に利点がある。本発表では、重力波ラジオメトリに電磁波の偏極を特徴づけるストークスパラメータを導入し、円偏極を示すVパラメータの全天探索を行う解析手法の開発について述べる。

1. N.Seto, Phys. Rev. Lett. 97, 151101
2. N.Seto and A.Taruya, Phys. Rev. D 77, 103001
3. L.Valbusa Dall'Armi et al., Phys. Rev. D 80, 122002
4. S.Mitra et al., Phys. Rev. D 77, 042002

ポアンカレ対称性を持つ有質量場の量子マスター方程式

柏木 海翔 (九州大学理学府物理学専攻 修士1年)

現代物理学における2つの支柱として量子力学と一般相対性理論がある。量子力学は原子や分子などミクロなスケールの物理現象を記述する。一般相対性理論は惑星運動や宇宙の膨張などマクロなスケールでの物理現象を記述する。両者はそれぞれのスケールで成功している物理理論である。現代物理学において、これら両理論の統合は未完であり、そもそも重力が量子力学に従うかどうかすら分かっていない。現状「重力が量子力学に従う」という立場[1]と「重力が量子力学に従わない」という立場[2]がある。興味深いことに、近年の量子実験の発展に

よってどちらの立場が正しいか明らかになるかもしれない。両者の立場を含めた大きな理論的枠組みを提案し、実験によって検証することで、重力がどのような理論に従うか分かると期待される。

その理論的な枠組みの1つとして、「ポアンカレ対称性を持つ量子マスター方程式」の理論を提案する。ポアンカレ対称性は特殊相対性理論にある対称性で、摂動的量子重力理論や場の理論が持つ性質である。量子マスター方程式は、2つの立場を包含した記述が可能である。

本研究では、重力相互作用を持つ広い理論を提案する前段階として、まずは相互作用のないポアンカレを持つ量子マスター方程式の理論を考える。その理論から予言されるスピンレスな有質量場の力学的挙動について調べた。本発表では、上の有質量場の従う方程式やその場に対する微視的因果律に関して得られた結果を紹介する。この理論を拡張することで、重力相互作用を含めた理論を提案できると期待される。

1. J. F. Donoghue, arXiv:1209.3511
2. D. Carney, P. C. E. Stamp, J. M. Taylor, arXiv:1807.11494

段差モデルインフレーションによる曲率ゆらぎの非対称的確率分布の生成

川口 遼大 (早稲田大学 M2)

近年、原始ブラックホール (PBH)[1][2] に関連するインフレーションモデルが盛んに研究されている。PBH とは初期宇宙の高密度領域が重力崩壊し形成されるブラックホールのことであり、その質量に応じて、宇宙の歴史上で異なる役割 (例えばダークマターなど) を果たし得る仮想的な天体である。密度ゆらぎの起源はインフレーション中に生成される曲率ゆらぎにあるため、十分な量の PBH 形成を引き起こすためには曲率ゆらぎの小スケールでの増幅が必要となる。その増幅メカニズムとして、インフラトンポテンシャル中に平坦な領域 [3] や段差 [4] がある特別なインフレーションモデルがこれまでに研究されてきた。

本発表では研究 [5] に基づき、インフラトンポテンシャル中に有限幅の上向き段差が存在するインフレーションモデルを紹介する。PBH 形成を引き起こすような大きくてレアなゆらぎは摂動的計算手法では正確に捉えきれないことが知られている。そこで本研究 [5] では、非摂動的な手法である δN フォーマリズムを用いて曲率ゆらぎの確率分布関数 (PDF) の計算及び解析を行なった。以下の2つの新たな結果を得た。

1. PDF に段差幅に依存する exponential-tail が現れることを示し、原始ブラックホール (PBH) の存在量の見積もり段差幅が大きく依存することを明らかにした。
2. 段差よりも手前でハッブルホライズンを出た特定のスケールにおいて、PDF が高い非対称性を有することを示し、こ

れが大規模構造に特徴的なシグナルを残す可能性を指摘した。

本発表では上記の2つの結果とその物理的な解釈についての詳細を説明をする。

1. Y. B. Zel'dovich and I. D. Novikov, Soviet Astronomy 10, 602 (1967)
2. S. Hawking, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 152, 75 (1971)
3. J. Garcia-Bellido and E. Ruiz Morales, Phys. Dark Univ. 18, 47 (2017), arXiv:1702.03901
4. Y.-F. Cai, X.-H. Ma, M. Sasaki, D.-G. Wang, and Z. Zhou, JCAP 12, 034 (2022), arXiv:2207.11910
5. R. Kawaguchi, T. Fujita, and M. Sasaki, arXiv:2305.18140

velocity-dependent Self-Interacting Dark Matter による宇宙論諸問題の解決

木原 健司 (大阪大学 宇宙進化グループ M1)

現在、ダークマター (以下 DM) は宇宙全体のエネルギーの約3割を占めていると考えられている。宇宙論的シミュレーションにおいて仮定される DM は CDM であり、これは重力相互作用以外に力は働かない。この CDM によるシミュレーションは、1 Mpc 以上のスケールにおいて観測結果をよく説明している。ところが、これより小さなスケールでは観測との不一致も見つかっている。

不一致の一つに、「core-cusp 問題」というものがある。これは、シミュレーションにおける CDM のハローの中心密度のスロープが、観測で求められるよりも急峻になってしまう問題である。これを解決するために提案されたのが、Self-Interacting Dark Matter (SIDM) である。SIDM 粒子は $\frac{\sigma}{m} \approx 1 \text{ cm}^2/\text{g}$ という非常に大きな断面積で散乱することで、中心密度が大きくなるのを防ぐことができる。

ところが近年、中心密度が非常に大きい銀河も観測されている。これは、DM の量が少ないため、束縛できるバリオン量も少なく、暗くなった銀河に見られる特徴で、観測技術の向上とともに見つかってきている。ここで私は、SIDM が gravothermal catastrophe[1] と呼ばれる重力崩壊を起こすことに着目した。中心密度の高さは、この重力崩壊現象が原因であると考えた。ところが計算の結果、DM ハロー形成から、SIDM 粒子が少なくとも1回ずつ散乱する時間は、DM ハローの年齢よりも長く、重力崩壊は実現し得ないことが分かった。

以上の内容では、SIDM の断面積は定数で考えられてきた。湯川ポテンシャルで記述される力が働くとき、散乱断面積は速度の減少関数になるはずである。近年、速度依存性をもつモデル (vdSIDM) がシミュレーションに導入されたり、論じられたりしている [2]。vdSIDM モデルは、DM ハローの密度分布の多様性や、超大質量ブラックホールの形成を説明できる可能性

がある [3] ため、本発表ではそのレビューを行う。

1. Balberg, et al., ApJ, 568, 475, 2002
2. Turner, Hannah C, et al., MNRAS, 505, 5327, 2021
3. Feng, Wei-Xiang, et al., ApJL, 914, id.L26, 9 pp., 2021

Robin 境界条件を持つ AdS ブラックホールの QNM スペクトル

小塚 友裕 (日本大学 M2)

本発表は自身の研究である「Quasinormal mode spectrum of the AdS black hole with the Robin boundary condition」についてのものである。[1] 無限遠で Robin 境界条件を持つ漸近的 AdS ブラックホールの Quasinormal mode(QNM) スペクトルについて研究した。平坦な事象の地平面を背景時空とする Schwarzschild-AdS₄ を考え、そのスカラー場の摂動について研究した。無限遠におけるスカラー場の slow decay モードと fast decay モードの係数をそれぞれ ϕ_1 と ϕ_2 とし、両者の間に $\phi_2 = \cot(\theta/2)\phi_1$ という線形関係を仮定する。ここで θ は Robin パラメータという定数で $\theta \sim \theta + 2\pi$ で周期を表す。Robin パラメータの特定の範囲では、境界条件によって駆動される不安定性が存在する。また、境界条件のパラメータサイクル ($\theta = 0 \rightarrow 2\pi$) の下で QNM スペクトルのホロノミーが発見される。さらに、1 サイクルの後、QNM の n 番目の overtone は $(n - 1)$ 番目の overtrone に移動し、QNM の fundamental tone は複素平面上で無限大に振り切られる。

1. Shunichiro Kinoshita, Tomohiro Kozuka, Keiiju Murata and Keita Sugawara, "Quasinormal mode spectrum of the AdS black hole with the Robin boundary condition", arXiv:2305.17942[gr-qc], 2023

ダークエネルギーを説明する低エネルギー有効理論の強重力領域における検証可能性

小林 元 (京都大学基礎物理学研究所 M2)

現在の宇宙は加速膨張していることが知られているが、一般相対論の範疇でこの加速膨張を説明するにはダークエネルギー (DE) と呼ばれる未知の要素を導入する必要がある。DE の正体は未だ理解されていないため、多くのモデルを統一的に扱う方法を構築し、観測結果を用いてモデルを峻別することが重要である。[1] で提案された「DE の低エネルギー有効理論」により、単一のスカラー場により加速膨張を駆動するモデルを普遍的に扱うことができる。低エネルギー有効理論 (EFT) のアプローチでは、対称性とその自発的破れのパターンに基づいて長距離で有効な作用の形を系統的に決定できる。「DE の低エネルギー有効理論」では、一様等方宇宙背景の下で、スカラー場に時間的な勾配を持たせ時間方向の一般座標変換を自発的に破る状況を考える。

近年 [2] において、時間方向の座標変換不変性を破る EFT が、任意の背景時空へ拡張された。ブラックホール (BH) 時空を背景とする EFT における重力摂動を、一般相対論の場合と比較することで、DE を説明するスカラー場の配位がどのように実現されているか、実際の BH からの重力波を用いて検証することが期待される。本講演では、まず、前半では [2]、[3] に基づき任意の背景時空における EFT の構築法と、EFT における静的・球対称 BH 解周りのパリティ奇成分のブラックホール摂動論の定式化についてレビューする。さらに、自身の研究として、BH 連星合体からの重力波に影響する物理量として潮汐応答及び準固有振動数における一般相対論からのずれとその検出可能性について議論する。

参考文献

- [1] G. Gubitosi, F. Piazza and F. Vernizzi, JCAP **02**, 032 (2013)
- [2] S. Mukohyama and V. Yingcharoenrat, JCAP **09**, 010 (2022)
- [3] S. Mukohyama, K. Takahashi and V. Yingcharoenrat, JCAP **10**, 050 (2022)

ループ量子重力理論へのシンプルな道

佐野 大志 (早稲田大学 修士一年)

本ポスター発表では、ループ量子重力理論が何に重きをおいてどのように導かれたか、またそこからどんな帰結が得られるかを一般相対論から始めて簡潔に紹介する。

ループ量子重力理論は、超弦理論に並ぶ量子重力理論の最有力候補として盛んに研究されており [1]、またその宇宙論への応用 (ループ量子宇宙論) も活発に研究されている [2]。

ループ量子重力理論は、時空の離散化を初め、我々の世界に対する認識を根底から変えるような興味深い帰結を導く [3]。一方で、時折そのような帰結から不可思議な理論と誤認されることもあるが、ループ量子重力理論は“背景独立な量子重力理論”の構築という明確な目標の下出来上がった非常に建設的な理論である。

背景独立性とは、時空間の構造が仮定として置かれずに理論が特定の座標に依らない性質であり、一般相対性理論の持つ大きな特徴の一つでもある。

本発表では、背景独立性に重きをおいて重力の正準量子化を目指す過程を一般相対論から始めて紹介し、ループ量子重力理論が如何にしてそれを可能とするかを簡潔に説明する。また、このようにして導かれたループ量子重力理論から“時空の離散化”や“バウンス宇宙 (宇宙初期の特異点の回避)”といった特徴的な帰結が自然と示唆されることも紹介する [2,3]。

1. Abhay Ashtekar and Jerzy Lewandowski 2004 Class. Quantum Grav. 21 R53
2. Abhay Ashtekar and Parampreet Singh 2011 Class.

3. Carlo Rovelli, Lee Smolin, NuclearPhys. B442 (1995) 593.

すばる望遠鏡 HSC データを用いた弱重力レンズ質量マップで確認されたトラフ領域の視線構造 島末 匠 (東京大学大学院理学系研究科附属ビックバン宇宙国際センター M1)

ボイドとは宇宙の大規模構造を構成する要素であり、銀河やダークマターが分布しない低密度領域を指す。ボイドの形成と進化は重力によってのみ駆動されると考えられ、バリオン物理の影響を受けにくく、重力理論や標準宇宙論の検証に有用と考えられる。従来、ボイドは分光サーベイによって得られた銀河数密度分布に基づき探索された (例えば、[4])。しかし、銀河とダークマターの分布の相違に起因する不確実性や系統誤差が伴う。一方、弱重力レンズはソース銀河から発せられた光が途中の質量分布を反映して、わずかに歪曲する効果を示す。これを用いる場合、バイアスなしに直接的に質量密度ゆらぎを知ることができる。

弱重力レンズによるボイド探索では、単一の巨大なボイドは発見しづらいとされていた。私たちはすばる望遠鏡 HSC S19A の internal data を用いて球面質量マップを再構築し、ボイド由来の可能性があるトラフ領域 (マップにおける極小領域) を探索した。ただし、質量マップは視線方向に密度ゆらぎを積分した値を示したものであり、トラフ領域の 3次元密度構造を把握することはできない。視線方向の情報を知るために CAMIRA algorithm [2,3] に基づく luminous red galaxy (LRG) カタログと SDSS Data Release 12 の LOWZ & CMASS の分光銀河カタログを用いて、トラフ領域が単一の巨大な低密度領域か否かを識別した。

結果、私たちは従来の期待に反して、単一の巨大なボイドと思われる領域を複数発見した。発見したボイドの半径は $10 h^{-1} \text{Mpc}$ 程度である。観測されたボイドをゆらぎが最小値 -1 で半径 $10 h^{-1} \text{Mpc}$ の一様球と仮定した場合、密度ゆらぎの積分値に相当するコンバージェンスの観測値は計算値より数倍大きくなった。この事実は、視線方向に伸びたボイドを考えることで説明がつく。

1. Douglass K. A. et al., ApJS, 265, 7, 2023
2. Oguri M., MNRAS, 444, 147, 2014
3. Oguri M. et al., PASJ, 70, S26, 2018

type II 原始ブラックホール 島田 正顕 (名古屋大学 M1)

これは [1] のレビューである。Carr と Hawking は平坦 FLRW に囲まれた球対称過密領域の固有サイズは大きくなりすぎると、閉じてちぎれた宇宙になるため、任意の大きさになることはできないと示した。この結果からちぎれた宇宙になる条件を導い

た。さらに Carr はこの条件を用いて密度揺らぎ振幅の上限を導いた。それは小さい振幅では原始ブラックホール (PBH) 形成は可能で、大きい振幅ではちぎれた宇宙になるというものであった。しかし、振幅の最大値はそのようなちぎれた宇宙を回避した結果からではなく、選んだスライスの幾何学的な形状から自然に発生することを示す。さらに、密度揺らぎの代わりに体積揺らぎを用いて、体積揺らぎが発散した場合に super-horizon スケールでちぎれた宇宙を表すことを示す。したがって Carr と Hawking の導いた条件は密度揺らぎに物理的な制約を与えるものではない。これまで初期曲率揺らぎが最大曲率揺らぎより大きいものは深く考えられてこなかった。そこで埋め込みと共形図を用いてこれまでのよく知られた結果と比較する。

1. M. Kopp, S. Hofmann, and J. Weller, Phys.Rev.D 83,124025 (2011)

正則ブラックホールと情報損失問題 末藤 健介 (大阪公立大学 博士 1 年)

情報損失問題はブラックホール (BH) の蒸発と量子論を考えた時、整合制が取れなくなる理論的問題である。詳細に言うと、蒸発する BH 時空の Penrose diagram を書くと、特異点の影響により時間発展がユニタリー変換で記述できなくなる。

特異点の存在こそ情報損失問題が生じる原因だと考え、情報損失問題を解決するアプローチとして、曲率特異点を持たない BH (正則 BH) を用いる手法がある。曲率特異点とは、時空の曲率が発散し既存の物理法則が破綻する領域である。しかし現実の宇宙にはこのような発散は生じないと考えられているので、量子重力理論では情報損失問題が生じるような BH は解とならず、正則 BH が解になると期待される。

球対称 BH の特異点を解消するため計量に課される条件は明らかになっており、Schwarzschild BH や Reissner-Nordström BH の特異点を解消した BH もすでに知られている。また先行研究ではこれら BH が完全に蒸発しきるモデルを考えたところ、情報損失問題が生じない時空構造になることが明らかになっている [1][2],[3]。

現実の BH は自転の影響で軸対称だと考えられているため、Kerr BH が現実のモデルとして利用されている。情報損失問題を解決するためには Kerr BH の特異点も解消する必要があるが、現時点では一般的な軸対称時空において特異点を解消するための条件は知られていない。

本講演では球対称正則 BH、軸対称正則 BH の満たす条件や時空の性質について、申請者が行った研究 [3] を中心とした発表を行う。

参考文献

- [1] S. A. Hayward, Phys. Rev. Lett. 96, 031103 (2006).
- [2] V. P. Frolov, J. High Energ. Phys. 2014, 49 (2014).
- [3] K. Sueto and H. Yoshino, arXiv:2301.10456.

Gravitational duals to the grand canonical ensemble abhor Cauchy horizons

菅原 啓太 (日本大学 M1)

本講演では、[arXiv:2006.10056] のレビューを行う [1]。対称性の高い holography 理論では、共形場理論 (CFT) におけるグランドカノニカル分布は荷電ブラックホールに対応することが知られている。Reissner-Nordström 反ド・ジッター (RN-AdS) 時空では、事象の地平線以外に Cauchy horizon を持つ。Cauchy horizon はブラックホール内部にあり、内部の古典的な重力のダイナミクスを予測不可能にすることがある。RN-AdS 時空の boundary にスカラー場の歪みを与えると、ブラックホール内部の Cauchy horizon が形成されなくなることを示す。Cauchy horizon の消失は、Kasner 特異点が存在することに対応する。これにより Einstein-Rosen bridge は崩壊する。一方で、特定の歪みを与えたとき、Cauchy horizon はある特定の温度で存在することがある。特異点では、低温限界における Kasner 指数が固定指数となり、一種のアトラクターのメカニズムを示す。Kasner 指数を用いて、荷電 dilatonic ブラックホール内部の様子について議論する。

1. Hartnoll, Sean A. and Horowitz, Gary T. and Kruthoff, Jorrit and Santos, Jorge E., JHEP, 10, 102, 2020

正則ブラックホールは本当に正則か？

田中 亜花音 (近畿大学総合理工学研究科 M1)

Penrose の特異点定理 [1] によると、ブラックホール内部には一般に時空特異点が存在し、物理法則が破綻する。特異点の解消は、量子重力など一般相対論を超える重力理論を構築する大きな動機となっている。

1968 年に Bardeen によって特異点が存在しない正則ブラックホールが提唱されて以降、様々な種類の正則ブラックホールが考案されている。正則ブラックホールは、情報損失問題の解消へ向かう手掛かりを得る模型 [2] としても期待されており、近年盛んに研究されるようになった。

しかし、正則ブラックホールはアインシュタイン方程式から導かれた解ではなく人為的に計量を与えたものであるため、エネルギー運動量テンソルが現実に存在する物質を示しているかが問題視されている。実際、正則ブラックホールはいくつかのエネルギー条件を破ってしまうことが指摘されている。またこの時空が完全に正則かどうかについても議論の余地がある。

特異点が存在するかを知るためには Kretsumann scalar などの曲率不変量が発散していないかを調べるだけでは不十分である。本当の意味で時空が正則であることを示すためには、最大拡張された時空で測地線が完備であることを証明する必要がある。そこで拡張された正則ブラックホール時空における測地線の振舞いについて議論した結果、正則ブラックホールとして提案されたいくつかの時空で測地線が不完備であり特異点が存

在することが示された [3]。

本発表では文献 [3] に基づいて、正則ブラックホールにおける測地線の不完備性について紹介する。

1. R. Penrose, Phys. Rev. Lett. 14, 57-59 (1965).
2. S. A. Hayward, Phys. Rev. Lett. 96, 031103 (2006).
3. T. Zhou and L. Modesto, Phys. Rev. D107, 044016 (2023).

連続変数に対する擬確率関数の定式化と応用

谷 将樹 (九州大学 理学府 M1)

古典力学は、測定の有無にかかわらず物理量は一意に確定しているという実在性を前提として成立している。一方で量子力学においては、測定するまで物理量は確定しておらずこの実在性が成り立っていない。レゲットガウゲ不等式は、量子力学における実在性の破れを検証する道具として用いられており、例えば超伝導磁束量子ビットといった巨視的量子系で実在性の破れが実証されている [1]。重力の量子性を検証する方法の一つとしてもレゲットガウゲ不等式を用いた研究がなされている [2]。また、調和振動子に対するレゲットガウゲ不等式による実在性の破れに関する研究も報告されている [3,4]。私たちは、連続変数に対して擬確率関数の新しい計算手法の定式化とレゲットガウゲ不等式の破れへの応用について報告する。

1. G. C. Knee, K. et al., Nature Communications, 13253 (2016)
2. A. Matsumura, Y. Nambu, K. Yamamoto, Phys. Rev. A 106 012214 (2022)
3. S. Bose, D. Home, and S. Mal, Phys. Rev. Lett. 120, 210402 (2018)
4. J. J. Halliwell, A. Bhatnagar, H. Nadeem, V. Wimalaweera, Phys. Rev. A 103, 032218 (2021)

アクシオンドメインウォールを通過する重力波に生じる円偏光

谷口 彰 (九州大学 M1)

近年、重力波天文学は目覚ましく発展しており、重力波観測によって新しい物理が見出されることが期待されている。そこで私たちは、重力波観測を用いて、axion-like-particles (ALPs, 以下アクシオンと呼ぶ) について新しい知見を得るための研究を行なった [1]。アクシオンは、暗黒物質の有力な候補の 1 つである。さらに、超弦理論からもアクシオンの存在が予言されている。このような背景から、アクシオンについての理解を深めることは、物理学における重要課題であると言える。

アクシオンは Chern-Simons (CS) 項を通して重力と結合することが知られている。そして、この CS 項は、重力波に円偏光を生じさせる。そのため、重力波の円偏光を観測することは、アクシオンや CS 重力についての新しい情報を得るために有意

義である。先行研究では、一様なアキシオンダークマター背景を伝搬する重力波に生じる円偏光についての研究が行われてきた。しかし、この場合に生じる円偏光の大きさは観測可能な大きさにならないことが、先行研究によって判明した [2,3,4]。そこで、私たちは異なる背景を考え、アキシオンドメインウォール背景を通過する重力波に生じる円偏光について調べた。

その結果、アキシオンドメインウォール背景を通過する重力波には十分大きな円偏光が生じることを見出した。さらに、円偏光の観測を行うことで、アキシオンと CS 重力の結合定数に対して、現在よりも強い制限を与える方法を構築することに成功した。本発表では、この研究結果 [1] を説明する。

1. S. Kanno, J. Soda, A. Taniguchi, (2023), arXiv:2304.03944.
2. S. Jung, T. Kim, J. Soda, Y. Urakawa, Phys. Rev. D 102.5, p.055013, (2020).
3. T. Fujita, I. Obata, T. Tanaka, K. Yamada, Class. Quant. Grav. 38.4, p.045010, (2021).
4. T. Tsutsui and Atsushi Nishizawa, Phys. Rev. D 107.10, p.103516, (2023).

HSC 3 年目と BOSS のデータを用いた一般相対性理論の検証

谷田 幸貴 (名古屋大学 M2)

現在、重力を記述する理論としては、一般相対性理論が広く支持されている。実際に、一般相対性理論からの予言は太陽系スケール程度の観測においてはよく一致することがわかっている。その一方で、宇宙論的な大スケールにおいては、一般相対性理論で正しく重力を説明できるかは定かではない。特に、宇宙の加速膨張の発見により宇宙論スケールでの重力理論の修正に関する研究が盛んに行われており、一般相対性理論の代替となる修正重力モデルが多く提唱されている。

本研究では、Redshift-space distortion(RSD) と大規模構造に基づく 3 つの 2 点相関関数 ($3 \times 2pt$) を組み合わせて、修正重力モデルの検証を行う。 $3 \times 2pt$ は、宇宙論的弱重力レンズ、銀河弱重力レンズ、銀河クラスターリングから成る。また解析の際、我々は特定の重力理論を用いるのではなく、一般相対性理論を現象論的に変更する、より具体的には、非相対論的物質が感じる重力と相対論的物質が感じる重力を変更する理論モデル (μ - Σ パラメータ) を用いる。

本発表では、まず、上記の 4 つの観測量の理論モデルを構築し、それらに基づく擬似データの解析により、入力された宇宙論パラメータが再現されるかを確認する。

重力波観測における赤方偏移の取り扱いと観測量からの宇宙論パラメータ決定の可能性

中馬 史博 (千葉大学大学院融合理工学附 M1)

重力波イベント GW150914 の初観測以来、電磁波やニュートリノの観測では捉え切れない宇宙の姿を明らかにすべく、重力波天文学の確立に向け様々な試みが観測と理論の両面から行われてきた。去る 2023 年 5 月 24 日には LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration による重力波共同観測運転 (O4) が開始され、グレードアップした観測器によるデータに期待が高まっており、重力波天文学の確立が現実のものとなりつつある。そのような今、重力波天文学の現状と課題を再認識することは重力波観測の確立に重要である。重力波観測の課題の一つとして、非常に精度良く光度距離を計測できる一方で、多くのイベントで電磁波カウンターパートを伴わないため赤方偏移に不確定性があることが挙げられる。これを克服する様々な手法がこれまで研究されてきたが、その中でも重力波源と赤方偏移が既知である銀河との分布の相互相関をとることによって重力波源の光度距離と赤方偏移の関係を明らかにする手法 [1] と、赤方偏移は使用せずに弱い重力レンズ効果が重力波源までの光度距離に与える異方性によって宇宙の大規模構造を推定する手法 [2] を紹介するとともに、その手法の改良とこれを用いた宇宙論パラメータ決定の可能性について議論したい。

1. Oguri Masamune, Measuring the distance-redshift relation with the cross-correlation of gravitational wave standard sirens and galaxies, Physical Review D, Volume 93, Issue 8, id.083511, April 5, 2016
2. Toshiya Namikawa, Atsushi Nishizawa, and Atsushi Taruya, Anisotropies of Gravitational-Wave Standard Sirens as a New Cosmological Probe without Redshift Information, Physical Review Letters, Volume 116, Issue 12, id.121302, March 8, 2016

すばる HSC3 年間データの弱重力レンズ効果の精密測定による平坦な Λ CDM モデルの検証

手良脇 大誠 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

宇宙の標準模型である平坦な Λ CDM モデルは、後期宇宙の加速膨張、ビッグバン元素合成、宇宙の大規模構造の観測など、多様な現象をよく記述する宇宙論モデルとしてその地位を築き上げてきた。しかし、宇宙の精密観測が進んだ近年、このモデルと観測結果に不一致が見られるようになった。こうした不一致の生じているパラメータの一つに、宇宙の構造形成の進行度を表す物理量 S_8 が挙げられる。従って、 S_8 の値を正確に測定しておくことが、宇宙の標準理論の検証にとって重要となる。

地球から観測される遠方銀河の形は、弱重力レンズ効果によって歪められている。こうした現象は cosmic shear と呼ばれ、 S_8 の影響が反映される事象である。[1] は、すばる HSC の観測結果をもとに cosmic shear の解析を行い、 S_8 の値を求めた。この際、客観性・正確性を高めるために、ブラインド解析

を行った。この手法では、HSC の真の銀河カタログの他に、二つの偽の銀河カタログを用意する。解析者は、どれが真のカタログか知らないまま三つのデータを並行して解析する。これにより、都合の良い結果が出た段階で意図的に解析を止める、などといった確証バイアスを取り除いた。平坦な Λ CDM モデルに基づくと、観測手法によらず同じ S_8 の値が得られる筈だが、[1] はこの解析を経て、Planck-2018 の CMB 観測から得られた結果との間に 2σ の tension が存在すると結論づけ、平坦な Λ CDM モデルの綻びの存在を示唆した。本発表では、この [1] をレビューする。

1. Li, X. et al., arXiv:2304.00702

Large misalignment mechanism による axion のコンパクト構造の形成

富塚 祥伍 (京都大学大学院理学研究科 M1)

今回の発表では、[1] に関してレビューをする。銀河の回転曲線の観測などから、宇宙には既知の物質に加え、正体不明の dark matter(DM) が必要であることが分かっている。DM に対する様々なモデルの内、有力な候補として axion がある。axion は QCD における強い CP 問題を解決するために導入された粒子であり、非摂動効果に伴い、崩壊定数 f で決まる周期的な有効ポテンシャルを持つ。

axion の場 ϕ は axion の質量 m とハッブル定数 H に対して、 $m \lesssim H$ が成り立つ間ほとんど変化せず、従ってこのときの ϕ の値は初期値として well-defined である。 ϕ/f はポテンシャルの周期を決める角度に対応し、このときの初期角度を misalignment angle と呼ぶ。この値がポテンシャルの底にある必然性はなく、従って axion は有限のエネルギー密度を持つ。こうした axion の生成機構を misalignment mechanism と呼ぶ。通常この ϕ/f が $O(1)$ であるとして解析を行うことが多い。そして $H \lesssim m$ となると場は振動し始め、axion は DM として振る舞うようになる。

しかし初期角度 ϕ/f が大きい ($\sim \pi$) 場合、場の運動方程式の非線形項 (自己相互作用) が効き、resonance による密度揺らぎの大幅な増加が起こる。この場合の axion の生成機構を特に、large misalignment mechanism とよぶ。

この論文では、これまであまり調べられていなかった large misalignment mechanism による axion のコンパクト構造の形成について調べている。そして、resonance がないときに比べてコンパクトなハローが形成されることが分かった。また、こうしたハローが銀河中の星に対して観測可能な大きさの散乱などを引き起こすことを調べている。このような現象を観測で探すことで、large misalignment mechanism による axion に対して制限をつけることができる。

1. A. Arvanitaki et al., Phys. Rev. D 101, 2020

銀河赤方偏移サーベイ BOSS のバイスペクトルを用いた複数場インフレーションモデルの制限

中野 新太郎 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

現在の宇宙に存在する星や銀河、銀河団や大規模構造 (LSS) などの様々なスケールの非一様性は、初期宇宙の場の量子揺らぎに起因し、それがインフレーションによって宇宙論的スケールまで引き伸ばされて生じたと考えられている。しかし、その理論的自由度から具体的な場の性質や個数は未だ定まっておらず、観測事実から理論モデルに制限をかけていくことが不可欠である。

インフレーションモデルの検証に有用な観測量として、局所的原始非ガウシアン性 (LPNG) を表す $f_{\text{NL}}^{\text{local}}$ がある。これはインフレーション期に生成された場の揺らぎがガウシアン性からどの程度ずれているか表す量で、整合性関係によりインフレーションを起こす場が 2 つ以上あるときのみ観測可能なシグナルが生じる可能性がある。すなわち、 $f_{\text{NL}}^{\text{local}}$ の値には場の性質が埋め込まれていて、仮に $f_{\text{NL}}^{\text{local}} \gtrsim O(1)$ なら全ての単一場モデルを棄却することができ、初期宇宙の物理の解明に向けた大きな指針となるのである。

揺らぎを生成する場の統計的性質や個数は、現在 LSS のような大スケールにおいて見ることができる。本発表では [1] を元に、銀河クラスタリングのデータを用いた LPNG の解析方法について議論する。LPNG の特徴は密度揺らぎを通して銀河分布に影響を与え、それはパワースペクトルやバイスペクトルと呼ばれる LSS の観測量に反映される。これら両方を解析することで、銀河バイアスに現れる LPNG 由来の先天的効果と非線形構造形成に由来する後天的効果の縮退を解き、前者のみを抽出することができる。さらに、LPNG によって生じる、非線形項も含めた全ての 1-loop パワースペクトル補正項を考慮して計算を行った結果、 $f_{\text{NL}}^{\text{local}} = -33 \pm 28$ (68% CL) が得られた。これは LPNG が存在すると言える証拠は得られなかったことを意味する。

1. G. Cabass et al, Physical Review D, Volume 106, Issue 4, 2022

Creation of Fluctuations during Inflation and δN Formula

中野 貴臣 (名古屋大学理学研究科 QG 研 M2)

標準ビッグバン理論は、様々な観測結果を統合的に説明したが、その中で平坦性問題や地平線問題など解決しきれない問題を抱えていた。これらを解決するためにインフレーション理論が考えられた。

インフレーション期において、インフラトンが持つ量子ゆらぎが“古典化”することによって曲率ゆらぎが生成される。生成された曲率ゆらぎの標準的な計算方法は、空間一様な古典インフラトン場のまわりで量子ゆらぎに関して摂動展開するとい

うものである。これはゆらぎが十分小さければ良い近似であるが、ゆらぎの非線形効果が大きいと計算結果が大きく変わる可能性がある。

そこで古典インフラトン場と量子ゆらぎを統合して扱うストカスティック形式が提唱された。ストカスティック形式では、スーパーホライズンモードを足しあげた場を古典化された背景場とし、背景場の運動方程式に古典化した量子ゆらぎとして白色雑音に比例した揺動項を入れる。このように量子ゆらぎを古典ゆらぎとして簡略的に扱うことで計算の幅が広がる。

本発表では、ストカスティック形式についてはあまり立ち入らず、インフレーションにおける”ゆらぎの生成” [1] について扱う。また、インフレーションで作られる曲率ゆらぎを計算する簡潔かつ強力な手法である δN 形式 [2] についても議論する。

1. D. Polarski and A. A. Starobinsky, “Semiclassicality and decoherence of cosmological perturbations,” *Class. Quant. Grav.* 13, 377 (1996)
2. D. H. Lyth, K. A. Malik and M. Sasaki, “A General proof of the conservation of the curvature perturbation,” *JCAP* 0505, 004 (2005)

Horndeski 理論におけるブラックホール準固有振動と観測可能性

西野 翔 (京都大学大学院理学研究科 M1)

一般相対性理論 (GR) は様々な検証実験をパスしており、現在重力の標準的な理論となっている。一方でくりこみが不可能であることや、宇宙の加速膨張を説明するダークエネルギーの起源といった問題があり、重力を修正することでこれらを解決しようとする試みが行われている。基本的な修正重力理論であるスカラー・テンソル理論は GR の計量の自由度にスカラーの自由度を加えるものであり、その中で運動方程式が 2 回微分になる一般的な理論は Horndeski 理論と呼ばれる。

修正重力理論には GR を検証する際の比較相手になるという動機もあり、検証を提供する現象としてブラックホール準固有振動 (QNM) がある。QNM とはブラックホールに摂動が与えられたときに起きる減衰振動のことであり、コンパクト連星合体などから生じる重力波では合体後の波形 (リングダウン) に対応する。そのような振動数はブラックホールのパラメータに依存して離散的な値を取るが、GR では無毛定理から (電荷を持たないブラックホールを仮定すると) スピンと質量によって決定される。一方で修正重力理論では他のパラメータにも依存するため GR の QNM からズレが生じることが期待される。このような性質から複数の QNM の観測を GR の検証や修正重力理論への制限に用いることが提案されている。

本発表では [2] をレビューする。まず Schwarzschild や回転の違い Kerr ブラックホール上の摂動を Horndeski 理論の枠組みで解析し、GR とは異なる QNM がスカラー場の”有効質量”を新たなパラメータとして現れることを確認する。その後観測

からの有効質量への制限について、Fisher Matrix 解析に基づいて議論し、必要な信号雑音比を推定する。

1. Tattersall, O. J., Ferreira, P. G. (2018). In *Physical Review D* (Vol. 97, Issue 10).
2. Tattersall, O. J., Ferreira, P. G. (2019). In *Physical Review D* (Vol. 99, Issue 10).

次世代の銀河サーベイに向けた新しい銀河クラスタリング解析手法の確立

野瀬 観見 (東京大学理学系研究科物理学専攻 M2)

ダークエネルギー (Λ) と冷たいダークマター (CDM) を主な構成要素とする標準宇宙 (Λ CDM) モデルは、わずか 6 つのパラメータを指定するだけで現在までの宇宙の各構成要素の密度の揺らぎの時間進化を記述できる理論モデルである。 Λ CDM は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) などの観測結果を非常によく再現している。しかし、CMB から推定されるパラメータと宇宙後期の物質密度揺らぎから推定されるパラメータが違う可能性が指摘されており、新しい物理の兆候として期待されている。より良い精度をもつ後期宇宙の物質密度揺らぎの解析手法の開発が求められている。

宇宙後期の物質密度揺らぎからパラメータ推定する手法の一つとして、銀河分布の統計量を理論予測し、それを観測結果と比較する銀河クラスタリング解析がある。これは、二点相関関数や、それをフーリエ変換した統計量であるパワースペクトルの赤方偏移空間での非等方性が Λ CDM パラメータに依存することを利用する手法である。赤方偏移空間ではこれらの統計量は視線方向に依存してしまうが、[1] はそのような状況下での非等方パワースペクトルの推定式を導出し、広天域銀河サーベイデータからの統計量の低コストな測定を可能にした。

本発表ではまず、[1] についてレビューする。また自身の研究に関連して、奥行方向の銀河数密度の変化に関する近似がパワースペクトルに及ぼす可能性のある影響についても議論する予定である。

1. Roman Scoccimarro, arXiv:1506.02729v2, 2015

重力波観測器を用いた暗黒物質検出のためのデータ解析

藤森 匠 (大阪公立大学大学院理学研究科 重力波実験物理学研究室 M2)

暗黒物質とは理論や宇宙の観測から存在は期待されているものの実際にはまだ見つかっていない物質のことである。これまで検出に向けて様々なアプローチがなされてきたが発見された例は未だ無い。しかし暗黒物質を実際に検出することができれば、物理学にもたらす影響は大きい。

そこで現在、新たなアプローチとして重力波観測に用いられるレーザー干渉計を利用する手法が研究されている。LIGO や

Virgo、KAGRA などの重力波観測器は微小な変位に対して大きな感度を持っており、その感度を用いて暗黒物質が観測器内の鏡と相互作用したときに生まれる変位信号を検出しようというものだ。

超軽量ボソン粒子はその大きな数密度のために、宇宙空間において古典的な波のように振る舞う。その角振動数は超軽量ボソン粒子自身の質量によって決まり、ほとんど一定の単色波である。しかし、振幅や位相は時間とともに確率的に変化する。[1] 重力波観測器から得られた信号を処理するにあたってそれらの影響を考慮する必要があり、影響の大きさは観測時間や仮定する暗黒物質の種類によっても変化する。[2]

本発表では重力波観測器からの暗黒物質による信号を解析する際における確率的な効果の影響について議論し、それを考慮した上での解析手法について述べる。

1. Gary P. Centers et al. arXiv:1905.13650 [astro-ph.CO]
2. H Nakatsuka et al. arXiv:2205.02960 [astro-ph.CO]

重力波を用いた高赤方偏移 $z = 6$ での $M_{\text{BH}}-M_{\text{halo}}$ 関係の制限

古澤 和也 (名古屋大学理学研究科 修士 1 年)

ほとんどの銀河は、その中心に $10^6 M_{\odot}-10^{10} M_{\odot}$ 程度の質量を持つ超巨大ブラックホール (SMBH) を持っており、観測からこれらは共進化してきたことが示唆されている [1]。しかし、SMBH の形成・進化を説明するシナリオは決定しておらず、高赤方偏移での十分な観測もなされていない。

高赤方偏移の SMBH に対し、重力波観測は、クェーサーの観測結果 [2] とは異なる領域 $M_{\text{halo}} \lesssim 10^{12} M_{\odot}$ について示唆を与える可能性がある。本研究では、[3] に基づき、ハローと SMBH の共進化モデルを構築する。初期条件として、 $z = 6$ での $M_{\text{BH}}-M_{\text{halo}}$ 関係に単純なべき乗則関係を課し、 $0 \leq z \leq 6$ での SMBH の質量成長を計算する。実際の SMBH は合体とガス降着により質量成長していると考えられているが、このモデルは合体による成長のみを考慮するため、近傍での観測との比較から、ガス降着による成長を制約することができる。また SMBH の合体から発生する重力波放射を計算し、パルサータイミングアレイ (PTA) と LISA による検出可能性を議論する。結果として、PTA から得られる確率的重力波背景放射の上限から、 $z = 6$ における $M_{\text{BH}}-M_{\text{halo}}$ 関係に対する制限 $n \geq 1.2$ を導いた。一方で、LISA による重力波検出数が、 $z = 6$ において SMBH をもつハローの最低質量 M_{lim} に対し下限を課すことがわかった。

これらのパラメータに対する制限から、重力波観測が将来的に SMBH の形成・進化の解明に与える影響を議論する。

1. McConnell N.J. et al., ApJ, 764, 184, 2013.
2. Shimasaku, K. et al., ApJL, 872, L29, 2019.
3. Bansal A. et al., MNRA, stad1608 2023.

4 次の共形 Weyl 重力とワームホール 牧田 悠輔 (名古屋大学 QG 研 M1)

本発表では主に論文 [1] のレビューを行う。この論文では、Weyl 作用に基づく 4 次の共形 Weyl 重力 (以下、共形重力とよぶ) について議論されている。

時空の局所的なスケール変換 $g_{\mu\nu} \rightarrow \hat{g}_{\mu\nu} = e^{2\alpha(x)} g_{\mu\nu}$ を共形変換といい、共形重力は共形変換のもとで作用が変化しない共形場である。これまで、Einstein の一般相対論に代わる様々な重力場の理論が提案されてきた。共形重力はそのうちの一つであり、プランクスケールの物理を理解する鍵になることが期待されている。共形重力の場の方程式は、4 階の微分を含む連立微分方程式である。このために 4 次の共形重力とよばれる。

一般相対論において、2 つの時空領域を結びつける構造をワームホールとよぶ。さまざまな時空構造が提案されてきたが、その多くはエネルギー条件 (エネルギー密度や圧力に関する制約) を破ってしまうために、通常物質では実現できないことや不安定であることなどがわかっている。

本発表は、共形重力場の方程式を導出することから始まる。次いで標準的なワームホールがエネルギー条件を破ることを確認した上で、共形重力の場合について議論を進める。結果として、共形重力に基づけばこの問題を回避することが可能であることを紹介する。

1. Gabriele U. Variaschi & Kellie L. Ault, arXiv:1510.05054 [gr-qc], 2016.

エネルギー条件から見る正則ブラックホールの妥当性 牧野 耕輔 (近畿大学総合理工学研究科理学専攻 1 年)

アインシュタインが提唱した一般相対性理論の自然な帰結として、極端に強い重力天体であるブラックホールの存在が予測された。現在では、重力波やブラックホール・シャドウなど様々な宇宙観測により、ブラックホールの存在が確認されるとともに、その時空構造が急速に解明されつつある。

この天体を理解するには内部構造を理解する必要がある。ブラックホールは通常、光の脱出限界である事象の地平面とさらにその内部に特異点を持つ。そこでは一般に物理量が発散するため、物理法則の予言能力の観点からは好ましくない。このような特異点を回避するブラックホールモデルとしてバーデン (Bardeen) が提唱したのが正則ブラックホールモデルである [1]。Bardeen の正則ブラックホールは内部に特異点がなく、そのため全時空領域が正則であるとともに、物理的に妥当な弱いエネルギー条件も満たされている。一方で、ブラックホール内部領域において時空のトポロジー変化が起きている。このような Bardeen の正則ブラックホールの特徴から、一般に時空のトポロジー変化を認めない場合には弱いエネルギー条件が破られないなければならないことが、先行研究 [1] で示されている。

本発表では, Bardeen の正則ブラックホールを電荷がある状況へ一般化した正則ブラックホールの構造, およびエネルギー条件についての, Rodrigues and Marcos de Silva. 2018 [2] の研究を紹介する.

1. Arvind Borde, PhRvD, 55, 7615B, 1997
2. Manuel E. Rodrigues and Marcos V. de S. Silva, JCAP, 06, 025R, 2018

ブラックホールの帯電と BZ 過程 松尾 賢汰 (大阪公立大学大学院 宇宙物理研究室 M2)

一般相対性理論の予言する強重力天体であるブラックホールのまわりには電離したガスであるプラズマが磁場構造を作っていることが知られている。しかし、一般的に曲がった時空でのプラズマの運動から磁場構造を求めることは非常に困難である。そこで、時空に対称性が存在するときのキリングベクトルをマクスウェル方程式の真空解とする Wald 解 [1] を使ってブラックホールまわりの磁場を議論していく。Wald によると Kerr ブラックホールでの Wald 解で回転軸上の静電ポテンシャルがホライズンと無限遠方で異なるため、無限遠方から荷電粒子を落とすとブラックホールが帯電することが示され、この現象はポテンシャルの差がなくなるまで続くと考えられる。この帯電によって電場が消失し、Kerr ブラックホールの回転エネルギーを磁力線が引き抜くブランドフォード - ナエク過程 (BZ 過程) が起こらないことが Komissarov[2] によって主張されている。BZ 過程は相対論的ジェットの生成機構の有力な候補として期待され、ブラックホール磁気圏の非常に重要な研究テーマである。なお、本発表では [2],[3] の内容について考察する。

1. Wald R M., Phys. Rev. D, 10, 1680, 1974
2. Serguei S. Komissarov, MNRAS, 512, 2798-2805, 2022
3. A.R.King and J.E.Pringle, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 918:L22, 2021

確率格子シミュレーション 水口 由莉乃 (名古屋大学理学研究科 M2)

インフレーションはビッグバン理論が抱える問題を解決し、指数関数的に膨張によって、宇宙の構造の種となるゆらぎを生成する機構である。この存在は、Planck 衛星の宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測からも強く示唆されている。CMB 観測は大スケールにおける小さなゆらぎを意味しているが、大きなゆらぎは小スケールで実現され、その重力崩壊により原始ブラックホール (原始 BH) が生成される可能性がある。近年、原始 BH は暗黒物質の候補として注目されており、宇宙重力波望遠鏡 LISA での将来観測が期待されている。しかし、インフレーションから原始 BH 形成への詳細な解析には、特に初期の曲率ゆらぎの統計において、多くの仮定が必要とされている [1]

本講演では、確率的インフレーション [2] の数値格子シミュ

レーションについて紹介する。これにより、曲率ゆらぎの真の統計量を得ることができ、各インフレーションモデルにおける正確な原始 BH の存在量の推定が可能となる。今回は、chaotic inflation[3] と inflection[4] を取り上げる。また、原始 BH 形成に関する大きなゆらぎを効率的にサンプリングするための重点サンプリング [5] を用いて確率的格子シミュレーションも行う。今後は、大規模サンプリングを実装し、原始 BH 形成における仮定の妥当性やモデルの詳細な決定等の議論に繋げる。

1. Naoya Kitajima et al, JCAP10(2021)053
2. A. A. Starobinsky, Lect.Notes Phys. 246 (1986) 107
3. Linde, A. D., Phys.Lett.B 129 (1983) 177-181
4. M. Biagetti, JCAP 07 (2018) 032
5. Jackson, Joseph H. P. et al, JCAP10(2022)067

Dynamical Chern-Simons 重力における曲率ゆらぎ の 4 点関数とパリティの破れ 道脇 元紀 (立教大学 理学研究科 物理学専攻 M1)

宇宙における銀河団の分布は網目のような構造をしている。これを宇宙の大規模構造 (以下 LSS) という。LSS の起源は、インフレーション期に存在した量子的な曲率ゆらぎであり、そのゆらぎが空間の加速膨張によって引き延ばされ、LSS の種を作り出したと考えられている。

最近、銀河団の分布の 4 点関数にパリティの破れが観測されたという報告があった [1]。この結果をインフレーションで説明するためには、パリティの破れを引き起こす相互作用が必要である。

パリティを破る重力理論として dynamical Chern-Simons 重力 (以下 dCS 重力) が知られている。これはインフレーションを引き起こすスカラー場と、パリティの破れを含む Chern-Simons 項が結合した理論である。パリティの破れは曲率ゆらぎの 4 点関数から現れるため、本発表では dCS 重力における曲率ゆらぎの 4 点関数に着目する。

本発表は [2] のレビューである。はじめに、インフレーションの文脈における dCS 重力を紹介し、原始パワースペクトルを計算する。次に、dCS 重力における曲率ゆらぎの 4 点関数を計算する。最後に、dCS 重力ではパリティの破れに関する観測量がどのように評価されているのかについて議論する。

1. O. Philcox, Phys. Rev. D **106**, 063501 (2022)
2. C. Creque-Sarbinowski, S. Alexander, M. Kamionkowski, and O. Philcox, arXiv:2303.04815[astro-ph.CO]

BipoSH を用いた宇宙の大規模構造における等方性の破れの検証

湊 恵太 (京都大学理学研究科 M2)

宇宙論の標準モデルである Λ CDM モデルは、ダークマターやダークエネルギーと呼ばれる未知の物質やエネルギーの存在を仮定することで、数少ないパラメータで宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) や宇宙の大規模構造などの宇宙論の観測データを精度よく説明する。ところが、高精度な観測が進むにつれて、テンション (観測対象ごとのパラメータの推定値の差) [1] や CMB アノマリ (CMB のパワースペクトルに見られるパリティや一様等方性の破れなどの Λ CDM の予言しないシグナル [2]、宇宙複屈折現象 (CMB の偏光面に存在するパリティ非対称性) [3] などの問題が見えるようになってきた。そこで、徹底検証を進めることでこれらの系統誤差によるものか未知の物理によるものかを明らかにするとともに、そこから未知の物理に関する情報を抽出することが喫緊の課題となる。もしこれらの観測シグナルが系統誤差でなく未知の物理に由来するものだとすれば、宇宙の構造形成を通じて CMB に見られたのと同様のアノマリが大規模構造にも存在すると考えられる。このような考えのもと、[4] では密度揺らぎの 2 点相関関数を用いた解析が行われ、BipoSH と呼ばれる手法を用いた宇宙の大規模構造の非等方性の検証可能性が調べられた。そこで、本発表ではまず、[4] に基づき宇宙の大規模構造における密度揺らぎの 2 点相関関数を用いた非等方性の評価方法、およびその結果について紹介する。加えて、密度揺らぎに加えて銀河の向きの情報も利用する拡張を行い、これにより宇宙の非等方性の検証精度がどのくらい改善するかについても議論する。

1. E. Abdalla *et al.*, JHEAp **34**, 49 (2022)
2. D. J. Schwarz *et al.*, Class.Quant.Grav. **33**, 18, 184001 (2016)
3. E. Komatsu, Nature Rev.Phys. **4**, 452-468 (2022)
4. M. Shiraishi *et al.*, Phys.Rev.D **95** 6, 063508 (2017)

コンパクトなボゾンスターをどうやって作るか 宮内 侑 (京都大学理学研究科 M2)

2015 年の重力波の初検出以降、強い重力での物理を調べる様々なテストが活発に研究されている。そのうちの一つのテーマとして、コンパクトなボゾンスター (BS) の存在の検証がある。BS とは、ボゾン場が自己重力によって基底状態に凝縮されることで形成される天体である。今までに検出されたスカラー粒子はヒッグス粒子のみであるが、初期宇宙で生成された未知のスカラー場が構造形成の過程で重力不安定性によりコンパクトな BS が形成されれば、通常の観測では検出できなかった未知のスカラー場が重力波によって検出できると期待されている [1]。

BS を構成するスカラー場として、アクシオンと呼ばれる未知の粒子が考えられている。アクシオンは超弦理論から予言されダークマター (DM) の有力な候補でもあるため、この BS の観測はアクシオン DM の探査としても大きな意義がある。ま

た、アクシオン・ガスから構成される DM ハローの中心にアクシオンが凝縮した銀河サイズの BS が形成・成長することが示されている [2]。

ただし、この銀河サイズの BS が宇宙時間内にコンパクト天体にまで成長することは現実的でない。申請者は、銀河サイズの BS は宇宙時間内にコンパクトにならないことを、BS 及びその周辺を構成するアクシオンの重力や自己相互作用による二体散乱の散乱振幅から BS の成長率を評価することによって示した。この原因は、アクシオンの相互作用の大きさが弱すぎることにある。したがって、既存のモデルに修正を加えて、コンパクトな BS の形成条件を調べる必要がある。

本発表では上述したコンパクトな BS の形成シナリオの問題点をレビューしつつ、自身の研究の進捗具合によっては、モデルの修正による新たな形成シナリオを提示する。

1. Cardoso *et al.*, Phys. Rev. D, **95**, 084014, 2017
2. Schive *et al.*, Nature Phys., **10**, 496-499, 2014

Lite BIRD、CMB-S4 の観測によるパラメータへの制限可能性 三輪 拓真 (名古屋大学大学院 理学研究科 M1)

本発表は [1] についてのレビューである。

インフレーション理論は標準ビッグバン理論が抱える初期条件の問題点を解決できる。インフレーションの存在は CMB の観測結果からも支持されている。宇宙はインフレーション後、再加熱期を経る。再加熱期は、インフレーションを引き起こすスカラー場のエネルギーから標準模型粒子を生成する過程である。しかし、再加熱の機構については終了時の温度などに不定性がある。本研究の目的は、Lite BIRD、CMB-S4 などの次世代 CMB 観測から、注目するモデルでの、再加熱終了時の温度などの制限可能性を考えることである。本研究ではインフレーションが単一のスカラー場によって描けるスローロールインフレーションモデルの一つである、mutated hilltop inflation というモデルに着目する。まず、モデルパラメータと CMB 観測量の関係を調べた。そして、前述の次世代観測を想定した疑似データを作成し、マルコフ連鎖モンテカルロ法によってモデルパラメータを推定した。それによって、Lite BIRD と CMB-S4 が再加熱温度などを制限できることが分かった。これによって、素粒子標準模型について新たな知見を得ることが期待できる。

1. M.Drewes,L.Ming,I.Oldengott,LiteBIRD and CMB-S4 Sensitivities to Reheating in Plateau Models of Inflation, 2303.13503v1,79,2023

原始宇宙磁場によって生成される原始重力波のスペクトル

向野 杏 (神戸大学 修士 1 年)

将来の原始重力波探査を考える上で、環境による原始重力波の変化を知ることが非常に重要である。近年のガンマ線観測により、現在の宇宙には 10^{-16} ガウスから 10^{-9} ガウス程度の大きさで、コヒーレンス長がメガパーセクを超える磁場の存在が示唆されている。磁場の構造のスケールはおおよそ磁場を発生する物体の大きさに比例するため、このような大スケールの磁場を生成する機構としては、インフレーションに関わるものが有力であると思われる。もしインフレーション期に背景磁場が存在した場合、重力波と電磁場の間には背景磁場を介した相互作用 (graviton – photon conversion) が生じると考えられる。本講演では、上記の相互作用に関する最近の研究 [1] について紹介し、原始宇宙磁場による原始重力波のスペクトルについて議論する。

1. Sugumi Kanno, Ann Mukuno, Jiro Soda, Kazushige Ueda, JCAP05, 05, 052, 2023

重力波による原始ブラックホールの探索

村上 靖洋 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻 修士課程二年)

本発表は、現在の課題を克服した解析ソフトウェアを作り、LIGO O4 のデータを解析し世界最高感度で太陽質量未満の連星ブラックホールの探索を行い、原始ブラックホール (以下、PBH) の発見を目指す研究についての議論や現在の進行状況を述べる予定である。

2015 年 9 月アメリカの重力波観測施設 LIGO は、時空の歪みが光速で伝播する重力波の直接検出に成功した。重力波は電磁波に比べて物質透過性が非常に高いという特異な性質を有することから、これまでに電磁波でしか宇宙を見てこなかった我々にとって予想外のイベントが多く発見されている。そのイベントの中には、既存の標準的な星形成理論が禁止する質量を持つ重力波天体が確認され、重力波の台頭は我々がこれまでに知り得ていなかった宇宙の一面を垣間見るとともに、これまでの常識にとらわれない探索をすることの重要性を浮き彫りにした。そこで近年、いまだに存在が確認されていない太陽質量未満の探索に注目が集まってきた。

太陽質量未満の探索は、理論上存在が予言され宇宙誕生直後に生成される PBH を発見できる可能性がある。最近になって太陽質量未満の探索が行われているが、計算コスト削減のために信号の前半部分である低周波帯のデータを削除して解析をしていたり [1]、重力波波形のテンプレートを作る際に天体のスピンを無視してリポスト・ニュートン近似の最低次までしか考慮しないテンプレート波形を用いて観測された重力波を比較する [2] など、いささか簡略化しすぎている節がある。

そこで本研究はこれら先行研究の近似によって SNR がどれほど低下するかを調べ、計算コストを考慮した上でどこまでの近似を取るかを考察していく。また、太陽質量未満の天体によ

る重力波は、一般に信号がとてつもなく長くなるため、計算速度を高速化する Focused Reduced Order Quadrature(FROQ) という手法 [3] を用いた実装も試みて、太陽質量未満の探索を行う。

1. R. Abbott *et al.*, arXiv:2212.01477
2. Andrew L. Miller *et al.*, Physics of the Dark Universe, 32,100836 (2021)
3. Soichiro Morisaki, Vivien Raymond, Phys. Rev. D, 102, 104020 (2020)

原始ブラックホールからの Hawking 放射のモンテカルロシミュレーション

八木 大地 (弘前大学大学院理工学研究科 修士 1 年)

原始ブラックホールとは、インフレーション期に初期揺らぎが重力崩壊してできると考えられているブラックホールのことである。原始ブラックホールは重力以外の相互作用をほとんどしない点で暗黒物質の有力な候補とされている。ブラックホールは量子力学的な効果によって質量に反比例する温度を持ち、その温度に対応する Planck 分布のエネルギーを持つ素粒子を放射する Hawking 放射が起こるとされ、徐々に放射するエネルギーを増加させながら最終的には消滅する。[1] 現在観測されているような恒星質量以上のブラックホールは質量が十分に重いので温度が低くなり、観測可能なエネルギーを持つ Hawking 放射はほとんど起こらない。しかし、原始ブラックホールは様々な質量を持ち得ると考えられており、インフレーション期に $4 - 5 * 10^{14}g$ 程度の原始ブラックホールはインフレーションから現在まで Hawking 放射によって質量を減少させ、消滅する瞬間及び直前の原始ブラックホールとなっており、十分高温のため観測可能であると考えられている。本研究では、MacGibbon-Webber のモデル [2] に基づき、LHC 等の高エネルギー素粒子実験の結果に基づくデータを反映した Pythia8.3[3]を用いて計算し、初期質量が $4 - 5 * 10^{14}g$ 程度の原始ブラックホールからの Hawking 放射によって出てくる粒子のガンマ線等のスペクトルを計算し、ブラックホールの数密度の制限について考察する。

1. S.W.Hawking, Nature, 248, 30-31, 1974
2. J.H.MacGibbon and B.R.Webber, Phys.Rev,D41, 3052-3079, 1990
3. Christian Bierlich *et al.*, arXiv:2203.11601 [hep-ph], 2022

カー時空上におけるプラズマ中の光の伝播：ハミルトン・ヤコビ方程式の変数分離とブラックホールシャドウ

山崎 幹太 (大阪公立大学 M1)

太陽周りのプラズマである太陽コロナは光、特に波長の長い電波の光路に影響を与えることが知られている。ブラックホー

ル周りにおいても、太陽と同様にプラズマが分布していると考えられ、光路が変化することでブラックホールシャドウの形が変化すると考えられる。そこで、カーブラックホール周りにおける非磁性かつ無圧のプラズマ中の光の伝播について調べることで、ブラックホールシャドウがどのような影響を受けるかを見る。ここでは、ブラックホールシャドウの境界曲線の解析解を導出する。解析解を導出するためにプラズマの電子密度が満たす必要十分条件は、光のハミルトニアン・ヤコビ方程式が変数分離可能であること、すなわちカーター定数が存在することである。この条件を満たすプラズマ中で光が存在する範囲を求めることで、ブラックホールシャドウの境界曲線を導く。その後、希薄なプラズマなど、いくつかの例を示す。また、本発表は [1] のレビューである。

1. Volker Perlick and Oleg Yu. Tsupko, PHYSICAL REVIEW D 95, 104003 (2017)

原子重力波が干渉計に与えるノイズとその検出可能性の推定

山崎 優樹 (九州大学 量子宇宙物理理論研究室 M1)

一般相対性理論は、重力を記述する理論であり、ブラックホールの存在や宇宙の進化においてよく観測と一致している。一般相対性理論から予言される重力波は、2015年にLIGO, Virgoが初めて検出してから、多くのイベントが観測されており、現時点で一般相対論と観測とに明確な矛盾はない。一方で、一般相対性理論で記述される重力が量子力学に従うか否かは、現在に至るまで全く検証がなされていない。DECIGO計画といった将来計画も進んでいる原始重力波の性質を探ることは、量子力学と重力理論を統一的に理解するうえで重要だといえる。

本発表は [1] をもとにレビューし、原始重力波の質点系への影響を推定し、その検出可能性を議論する。Feynmann-Vernon influence functional を用いると、量子開放系において、環境がシステムに与える影響を、確率的な有効作用として記述することができる。今回は干渉計をシステム、重力波を環境にとることで、質点が従う Langevin equation を有効作用から導出し、さらにそこから質点系の相対位置の分散を導出した。最後に、この分散を様々な量子状態で計算し、原始重力波の検出可能性を議論した。

1. H. T. Cho, B. L. Hu, Phys. Rev. D 105, 086004, 2022

初期宇宙における原始磁場の減衰機構

山下由莉 (名古屋大学大学院 理学研究科 宇宙論研究室 M1)

宇宙にはいたるところに磁場が存在しており、例えば銀河や銀河団には 10^{-6} G 程度の磁場が、ボイドと呼ばれる低密度の銀河間領域では $10^{-15} \sim 10^{-20}$ G 程度の磁場が存在することが知られている。この宇宙に広く存在する磁場の起源を説明す

る理論はいくつか提唱されており、その中の一つに宇宙の晴れ上がり以前の初期宇宙で生成された磁場（以下原始磁場）に起源を求めるものがある。

原始磁場の生成はインフレーション由来のものや密度揺らぎ由来のものなど様々であるが、生成後磁力線は宇宙プラズマ流体と動きを共にし $B \propto a^{-2}$ で減衰する。しかしこの減衰を説明するシナリオは従来、磁場中のプラズマ流体で発生する種々の波による減衰効果が無視されていた。磁場中のプラズマ流体では Magneto-Hydro-Dynamics モード (MHD モード) と呼ばれる縦波・横波の様々な波が発生する。そのため、それら波の減衰を考慮することでより高い精度で原始磁場の減衰を説明できる。

そこで本発表では論文 [1] をレビューする。この論文では初期宇宙 (赤方偏移 $z \sim 1100$ 以前) において、宇宙プラズマ流体からニュートリノと光子が脱結合する際、両粒子の平均自由行程以下の波長の MHD モードが減衰する機構を議論した。解析手段として、線形化された相対論的 MHD 方程式をフーリエ変換することで、分散関係式を導出し、MHD モードの伝播速度と減衰率を計算した。その結果、従来予想されていた $B \propto a^{-2}$ に比べて非常に大きく減衰する可能性が示唆された。本発表では MHD モードの伝播速度と減衰率の計算結果、さらに相対論的 MHD 方程式の線形化の妥当性を議論する。

1. Karsten Jedamzik, Višnja Katalinić, and Angela V. Olinto, Phys. Rev. D, VOLUME 57, 3264, 1998

球面重力波に対するパルサータイミング公式の導出に関するレビュー

山本 峻 (弘前大学 理工学研究科 1年)

1915年に発表されたアインシュタインの一般相対性理論にて重力波の存在が予言された。重力波は時空を歪めながら伝搬する波である。1950年代以降に観測に向けて世界中で研究が行われ、2015年にアメリカのレーザー干渉計重力波検出器 LIGO によって重力波の直接観測が成し遂げられた。重力波は強い透過力を持つなどの電磁波にはない特徴が多くあり、宇宙観測の可能性がより広がると考えられている。今回はこの重力波の検出方法の一つとなるパルサーを用いた重力波検出にとって新たな理論を構築する論文のレビューを行う。

高速で電磁波を放出する中性子星はパルサーとよばれ、地球上でも観測できるそのパルスは極めて規則正しい周期を持っている。観測できるパルスを発しているパルサーと地球の間に重力波がある時、時空の歪みが生じることによってパルスの伝搬する時間に変動が発生して、観測されるパルスの周期が乱れる。今回議論する重力波の検出方法はこの周期変動を利用したものである。先行研究により、パルスの振動数変化と重力波の関係を表すための定式化がなされてきた。一般的に知られているその式は平面重力波を仮定した場合のものであった。そのため、非常に遠方の天体から到来する重力波に対しては有効である。

今回は近傍に存在するコンパクト天体から放射される重力波を仮定して、球面重力波に対する振動数変化の数式を導出した。球面波特有の効果として、地球から重力波源までの距離と地球からパルサーまでの距離に比例した項が表れた。この項によって地球から重力波源までの距離が小さいまたは、地球からパルサーまでの距離が大きいほど周波数の変化が大きくなることがわかった

1. Ryouyusuke Kubo, Kakeru Yamahira, and Hideki Asada, The Astrophysical Journal, 946:76 (6pp), 2023
2. Maggiore, M., "Gravitational Waves: Astrophysics and Cosmology" Oxford Univ. Press, UK, 2018.

SQLS からのエリスワームホールと負質量コンパクト天体の存在量に対する観測的な上限 吉崎 允泰 (名古屋大学宇宙論研究室 M1)

一般相対性理論では重力は時空の歪みと解釈される。その時空の中に特異点が含まれることがある。そこで特異点を避け時空を滑らかに繋ぐ候補としてワームホールと負の質量の2つが考えられる。ワームホールは Einstein 方程式の球対称解として現れ、時空の離れた2点を繋ぐトンネルのような構造を持つ仮説的な概念である。今回考えるワームホールは質量がゼロのワームホールであるエリスワームホール (EWH)[1] とする。一方で、負の質量は通常の物質とは異なる符号の質量を持つ物質の仮説的な概念であり斥力重力を生む。負の質量は19世紀から議論されてきたがそれを示す証拠は全く掴めていない。

本研究では EWH と負質量コンパクト天体が存在すると仮定し、SDSS のクエーサー・レンズ・サーベイ (SQLS) の重力レンズ探査により存在量を推定する。EWH と負質量コンパクト天体のレンズ効果によってクエーサーの複像が作られる。そこで複像から EWH の大きさや負質量コンパクト天体の質量とレンズ効果を受ける確率から存在量の上限を推定した結果、負質量コンパクト天体の存在量の上限は銀河や銀河団より少ないことが分かった。また EWH の存在量についての上限は星よりも少ないという結果が得られた。更なる観測精度の向上によって、多くのレンズ効果を受けたクエーサーの発見に至れば、EWH や負質量コンパクト天体に対する強い制限が期待される。本講演は [2] に基づいたレビューである。

1. H.G. Ellis, J. Math. Phys. 14 (1973) 104
2. R. Takahashi, H. Asada, Astrophys.J.Lett. 768 (2013)

L16