

# 重力・宇宙論分科会

次世代観測に備えた重力理論・宇宙論研究の最先端

日時	7月29日 17:00 - 19:00 7月30日 9:00 - 11:15, 16:00 - 17:00 (招待講演: 黒柳 幸子 氏) 7月31日 11:30 - 12:30 (招待講演: 大内 正己 氏), 16:00 - 19:00 8月1日 11:30 - 13:30
招待講師	黒柳 幸子 氏 (東京理科大学) 「重力波で探る初期宇宙」 大内 正己 氏 (東京大学) 「銀河形成と宇宙再電離が織りなす初期の宇宙進化」
座長	山田 慧生 (弘前大学 D2)、岡 アキラ (東京大学 D1)、島袋 隼士 (名古屋大学 D1)、 根岸 宏行 (大阪市立大学 D1)、久木田 真吾 (名古屋大学 M2)、嵯峨 承平 (名古屋大学 M2)、 多田 祐一郎 (東京大学 M2)
概要	<p>我々の宇宙は一体どのようにして生まれ、どのような進化を経て、どのように終焉を迎えるだろうか？これら人類の普遍的な問いに対し、重力理論・宇宙論の発展は着実にその答えを明らかにしつつある。宇宙が初期にインフレーションを経験し、ビッグバン期を経て、大規模構造等の天体を形成したとするシナリオはCMB等の数々の観測から強く支持されている。一方で、現在の宇宙の加速膨張やインフレーションの機構、宇宙再電離等の未解決問題も多く残されている。これらの問題に対し、修正重力理論やより精密な理論テンプレートの構築・数値シミュレーションを用いた研究等が盛んに行われている。これら理論の発展と将来の21cm線電波観測、CMB偏光観測等の観測の発展により、我々の宇宙に対する理解は飛躍的に深まるだろう。Einstein重力は宇宙論に限らず、天体物理や力の統一理論等の様々な分野に登場する。Einstein重力ではブラックホール、重力波は多くの天体現象を説明するために必要だが、未だこれらの直接的証拠はない。現在その検証に関する実験・観測はKAGRAに代表されるように着々と進行しており、これらの結果を前にEinstein重力における基礎研究の重要性はますます高まっている。これらの現状を踏まえ、本分科会では重力理論・宇宙論の各分野から講師を招待し、研究分野の最新の研究結果についての講演を予定している。また、広く重力理論・宇宙論に関心のある学生を募り、各自の研究や勉学の成果発表と議論を行う。本分科会が今後の重力理論・宇宙論の発展を担う我々若手研究者間の活発な交流の場となり、新たな研究視点を見出す契機となることを願う。</p> <p>注) 宇宙線としてのニュートリノは宇宙素粒子分科会で扱います。</p>

黒柳 幸子 氏 (東京理科大学)

7月30日 16:00 - 17:00 B(エメラルド)

## 「重力波で探る初期宇宙」

日本の KAGRA を初めとする世界各地の次世代のレーザー干渉計重力波検出器が数年後の稼働を予定している今、これまで長年に渡って待ち望まれてきた重力波の初検出がいよいよ現実味を帯びてきている。重力波実験において、まず検出が期待されるのは天体現象を起源とする重力波であるが、重力波は宇宙論の検証においても非常に有用でユニークな観測手段となる。その強みは何と言っても透過性の強さにあり、電磁波と違って宇宙の晴れ上がり以前も物質との相互作用が弱い重力波は、CMB 以前の極初期宇宙の情報を直接我々に届けてくれる。将来的に eLISA や DECIGO といった宇宙衛星を用いた超高感度の重力波干渉計が実現すれば、重力波実験の宇宙論への応用の幅は大きく広がる。本講演では、新たな宇宙観測の窓として重力波検出実験が初期宇宙に関してどのような情報を提供してくれるのかを紹介し、さらに CMB を初めとする宇宙論的観測と組み合わせることで新しく探れる物理について展望を述べる。

大内 正己 氏 (東京大学)

7月31日 11:30 - 12:30 B(エメラルド)

## 「銀河形成と宇宙再電離が織りなす初期の宇宙進化」

赤方偏移  $z = 1100$  の晴れ上がり後、主に中性水素ガスに満たされた宇宙は暗黒時代を迎えた。一方で、QSO に現れる吸収線を用いて現在の宇宙を調べると銀河間の水素ガスはほぼ電離していることが分かっている。つまり、 $z = 1100$  で一旦中性になった水素が宇宙史のどこかの時点で電離されたことになる。これが宇宙再電離である。宇宙再電離の原因は未だ明らかになっていないが、第一世代星・銀河とそれに続く銀河形成がもたらす大量の紫外線が再電離を引き起こしたと考えられている。一方で、再電離された空間においては強い紫外線背景光があるため、ハロー内のガスが加熱され矮小銀河の形成が阻害される。このように宇宙再電離と銀河形成は強く結びついているため、これらを同時に理解しなくてはならない。QSO の Gunn-Peterson テストや CMB の偏光観測から水素の宇宙再電離は赤方偏移 6-11 程度の比較的初期の宇宙に起こったことが分かっている。しかし、宇宙再電離に関する本質的理解は殆ど進んでいない。例えば、宇宙再電離が比較的短時間で終了する sharp reionization だったのかその逆の extended reionization だったのかといった問題、さらには宇宙再電離の根本的な問題である電離プロセス（大規模構造の中での電離の伝播）に至っては、未だ解決の糸口は見つかっていない。

本講演では、銀河形成を含めて複眼的に宇宙再電離の問題を議論する。その上で未解決の課題を提示し、次世代の 21cm 輝線や CMB 偏光、可視光-近赤外線観測で明らかにされる事柄を概観する。特に、日本の研究者が主導し来春から大規模観測が予定されている可視光超広視野カメラすばる Hyper Suprime-Cam 探査と関連する大規模数値シミュレーションについて詳しく話し、今後進展が期待される初期の宇宙進化の研究について紹介する。

**重宇 01a 宇宙背景放射と銀河形成**  
(J.Silk. 1968ApJ, 151, 459S のレビュー)  
篠田 智大 (大阪大学 M1)

宇宙を支配する非相対論的成分がバリオンであると仮定した場合、ジーンズスケールの見積もりから、放射優勢期では銀河スケールのゆらぎは音響振動をして成長できないが、物質優勢期には銀河の形成が可能となる。しかし、放射優勢期から物質優勢期へ遷移する際に、光子が脱結合していく過程において、バリオンは光子と相互作用することで、光子の拡散スケール以下ではゆらぎがならされてしまうという現象が起こる。この現象は拡散減衰(またはシルク減衰)と呼ばれる。この現象によって、銀河スケールのバリオンのゆらぎはほとんど消え去ってしまう。このように、バリオン宇宙において銀河スケールの構造を形成することが困難になってしまう。このためシルク減衰は、光子と相互作用しないバリオン以外の物質、ダークマターの存在を予言する。また、最近発表された Planck の CMB 観測結果から、宇宙論パラメータを決めるためには、シルクスケールの見積もりが重要な役割を果たすと考えられる。

1. J.Silk. 1968ApJ, 151, 459S
2. C.W.Misner and D.H.Sharp. 1965, Phys. Letters. 15, 279

**重宇 02a 自己相似な重力凝縮による銀河・銀河団形成**  
辻 雄介 (大阪大学 M1)

本講演では W. H. Press と P. Schechter の論文 (ApJ, 187: 425-438) についてのレビューを行い、今後の研究計画についても触れていく。宇宙の進化により、銀河や銀河団がどれくらいの量だけ形成されるかは重要な問題である。ところが銀河団スケール以下の天体の形成には非線形成長が本質的であるため、解析的取り扱いの簡単な線形理論だけでこれを見積もることはできない。線形理論と非線形モデルを巧みに組合せることによって見積もろうとする試みが Press-Schechter 理論である。今後の展望として、Press-Schechter 理論は次世代観測や修正重力理論にも幅広く応用することが可能である。修正重力理論によって作り出されるボイド数を修正 Press-Schechter 質量関数によって予測し、次世代の弱重力レンズ効果の観測を想定した場合、修正重力理論をどの程度制限できるかを調べていきたい。

1. W.H. Press and P.Schechter. 1974. ApJ, 187: 425-438
2. Y.Higuchi, M.Oguri and T.Hamana. 2013. MNRAS accepted, arXiv: 1211.5966
3. B.Li, G.B.Zhao and K.Koyama. 2012. MNRAS, 421: 3481-3487

**重宇 03a 初期磁場による構造形成モデル**  
渋沢 雄希 (名古屋大学 M2)

宇宙空間には星や銀河、銀河団などの様々なスケールにおいて磁場が存在する。磁場は宇宙の構造形成において大きな影響を及ぼしていると考えられているが、その詳細は未だに十分な理解がなされていない。本研究では球対称崩壊モデルにローレンツ力を取り入れ、宇宙論的な磁場

を含めた構造形成モデルを構築した。さらに、先行研究 [3] に基づいて初期磁場による構造形成について計算を行った。このモデルから求められる臨界過密度  $\delta_c$  とパワースペクトルを用いて、Press-Schechter 質量関数を計算した。その結果、初期磁場による構造形成モデルでは重力のみによる構造形成モデルよりも  $\delta_c$  が増大し、質量関数において大スケールでの構造の形成を抑制することがわかった。このモデルをさらに発展させ、Sunyaev-Zel'dovich 効果や cosmic shear の観測を組み合わせることで、宇宙磁場の起源に対してより強い制限を与えることができると期待される [1]。

1. Fedeli C., Moscardini L., 2012, JCAP
2. Gopal R., Roychowdhury S., 2010, JCAP
3. Tashiro H., Sugiyama N., 2011, MNRAS

**重宇 04a ハローの力学的性質を考慮した非線形摂動論の拡張**

櫻井 祐也 (東京大学 M1)

宇宙の大規模構造から宇宙に関する情報を取り出すためには、大規模構造を特徴付ける統計量の精密な理論テンプレートが必要である。さらに、大規模構造は直接観測できず、銀河などのトレーサーを用いて間接的に観測しなければならない。そのため、理論と観測を比較する際には、密度ゆらぎの重力進化、赤方偏移変形、銀河バイアスの3つの効果を取り入れたモデルが必要である。この3つを整合的に計算することのできる統合摂動論を用いれば、観測量を直接得ることができる。しかし、銀河の力学的な性質を無視できなくなるような非線形性が強い小スケール領域では、統合摂動論は破綻する。一方、ハローモデルは小スケールで密度ゆらぎの統計分布を与える現象論モデルで、摂動論の破綻するような小スケールでも適用出来る。ただし、観測量を直接得ることはできない。そこで、本研究では、この統合摂動論とハローモデルを組み合わせることで、小スケールまで観測量を直接・精密に予言することのできるモデルを構築する。

1. T. Matsubara (2011). *Phys.Rev.D*, 83, 083518
2. C. Hikage and K.Yamamoto (2013). *arXiv:1303.3380v1*

**重宇 05a Sub Halo abundance matting を用いた Subhalo-銀河関係の考察**

山本 幹人 (名古屋大学 M1)

SubHalo Abundance Matching (SHAM) は、バリオンなしの N 体シミュレーションから銀河カタログを得る解析手法である。SHAM はフィッティングパラメータの少ない、シンプルなモデルではあるが、観測とよく合致する結果を得られることが確認されている [3]。本講演では主として “Modeling color-dependent galaxy clustering in cosmological simulations” [1] をレビューする。この研究では、WMAP のデータを用いた DM シミュレーション結果の解析として、Subhalo の年齢 (Subhalo age) を取り入れた SHAM を行った結果、Slone Digital Sky Survey (SDSS) にて得られた観測結果 [2] とよく合致する色ごとの銀河カタログを得ることができた。また、フィッティングの結果、観測された銀河がおおよそどれほどの年齢であるかを推定できた。本講演の

最後には、レビューの結果を踏まえ、SHAM の手法をどのように活用・発展させるのかを議論する。

1. Masaki et al. 2013. arXiv:1301.1217v1 [astro-ph.CO]
2. Zehavi et al. 2011. ApJ,736,59
3. Conroy et al. 2006. ApJ,647,201

.....

## 重宇 06a Mixed Dark Matter and Substructure Problem

原田 了 (東京大学 M1)

構造形成の理論は密度などの平均からのずれの量 (密度ゆらぎなど) を線型化したものについては解析的に取り扱えて比較的良好にわかっている [1] が、ゆらぎが大きくなって線型化した取り扱いができない場合はシミュレーションなどを用いることになる。しかしながら、現在標準的な仮定である  $\Lambda$ CDM モデルにおけるシミュレーションでは、小スケールの構造について累積回転速度関数や質量関数を考えると、観測から得られるものと食い違ってしまうという Substructure 問題が指摘されている [2]。それに対する解の一つとして Warm Dark Matter [3] モデルが提案されている。本講演ではその拡張として Mixed Dark Matter (Cold + Warm Dark Matter) モデルを取り上げ、シミュレーションを実行して Substructure 問題の解として妥当なのは Dark Matter 全体に対して Warm Dark Matter が何割の場合なのかを議論する。

1. 松原隆彦.2010. 「現代宇宙論 時空と物質の共進化」(東京大学出版会)
2. Kravtsov, A. 2010, Advances in Astronomy, 2010,
3. Bode, P., Ostriker, J. P., & Turok, N. 2001, ApJ, 556, 93

.....

## 重宇 07b 弱い重力レンズ効果を用いた 2 点相関関数の解析

小島 由嗣 (弘前大学 M1)

我々が住んでいるこの宇宙はクォークなどの素粒子や我々生命体等の小さなスケールから、銀河や銀河団の巨大なスケールに至るまで、様々なスケールに渡る階層に構造が存在している。これらの構造は宇宙が進化していく過程で形成されたと考えられている。もし、宇宙の初期が全くの均一であったなら、我々は存在してなかっただろう。なぜなら、今日の構造ができるためには、なんらかの非一様性が初期に必要なからである。初期の段階で宇宙の密度の空間分布に少しでもゆらぎがあるとシナリオは、現在の宇宙論では、最も自然なシナリオである。このシナリオが現在の宇宙で正しいか否かを決めるには、観測事実と矛盾がないかどうかをチェックしなければならない。そこですばる望遠鏡を用いた HSC 計画に向けてシミュレーションをし、そのデータを解析した。

今年度から試験運用が始まっている HSC 計画は今後 5 年間で従来の望遠鏡の Suprime-Cam に比較して 7 倍の観測視野、カメラ部には計 8 億 7000 万画素の巨大なデジタルカメラ HSC(Hyper Suprime-Cam) をすばる望遠鏡に設置し大規模な銀河サーベイをする。主な目的は、弱い重力レンズを用いてダークマター分布やダークエネルギーの性質を直接調べるといったものである。

重力レンズとは強い重力レンズ (strong gravitational lens) ・弱い重力レンズ (weak gravitational lens) ・重力マイクロレンズ (microlensing

effect) の 3 つに分類される。そのうち本研究で用いた弱い重力レンズは、銀河 (光源) のゆがみを測定する。本来の銀河の形はわからないが、1 個の銀河を観測しただけでは重力レンズ効果による変形度合いを抜き出すことはできない。そこで今、光源が遠方の銀河にあり、レンズとなる手前の 3 次元密度ゆらぎ、観測量を遠方銀河の形のゆがみを考える。私はこの状況下で銀河の形のゆがみ (コンバージェンス) のパワースペクトルと 2 点相関をシミュレーションデータから調べた。なおコンバージェンスとは銀河のゆがみの程度を表す。

本研究では以下の式を用いて 2 点相関関数  $w(\theta)$  を求めた。ここで  $l$  は多重極モーメント、 $C_l$  は角度パワースペクトル、 $P_l(\cos \theta)$  はルジャンドル多項式である。

$$w(\theta) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{2l+1}{4\pi} C_l P_l(\cos \theta)$$

計算の結果、シミュレーションの値と theoretical-model を比較してみると一致した。これから観測事実と矛盾がなくシミュレーションに用いた値が正しいことがわかり 2 次元球面のデータを正しく解析することに成功した。}

1. L.Fu et al.2008,A&A,479,9 Very Weak lensing in the CFHTLS wide:cosmology from cosmis shear in the linear regime

.....

## 重宇 08b 弱い重力レンズ効果による相関関数の計算

伊勢田 竜也 (弘前大学 M1)

天体などから放出された光は、我々のところへ届くまでに途中にある天体などの重力によってその進路が曲げられ、天体の像を歪ませたり、光が集まるため増光する。これを重力レンズ効果と呼ぶ。重力レンズ現象には 2 種類あり、強い重力レンズ (strong gravitational lens) と、弱い重力レンズ (weak gravitational lens) とに分けられる。強い重力レンズ効果は、天体像が 2 つ以上の像に分離して見えたり、あるいは像が変形しているのをはっきりと識別できるなど、個々の天体像のレンズ効果が明らかかな場合を指す。それに対し、弱い重力レンズ効果は像の歪みや増光はわずかなので、1 つの光源天体を調べても本来持っている明るさや形と区別することはできない。だが、光源天体固有の形やその向きなどの特徴は、多数の天体を平均化することで小さくできる。重力レンズ効果は光源に対して系統的に作用するため、多数の銀河で平均してもその効果が消えることがない。光源天体の手前にある構造が弱い重力レンズ効果を生むことで、複数の光源天体が同じ方向に歪んで見え、また全体的に見かけの明るさが変化する。

ここで本研究に関わりのある HSC 計画について述べる。HSC 計画とは HSC(Hyper Suprime-Cam) を搭載しているすばる望遠鏡を用いた大規模銀河サーベイの計画である。今年度から試験観測を始めており、今後 5 年間で 1500 平方度の面積を観測する。主な目的は、遠方銀河の弱い重力レンズサーベイからダークマターやダークエネルギーの性質を探ることである。

本研究では、HSC 計画へ向けて国立天文台の浜名さんが作成したシミュレーションを用いた。そのシミュレーションは光源を遠方銀河、レンズを手前の 3 次元密度ゆらぎ、観測量を銀河の形の歪み (コンバージェンス) として作成したものである。それを使い、弱い重力レンズ効果によるコンバージェンス  $\kappa$  の 2 点相関関数を計算した。その関数は、観測者を中心に極座標  $(\theta, \phi)$  をとるとき

$$w(\theta_{12}) = \langle \kappa(\theta_1, \phi_1) \kappa(\theta_2, \phi_2) \rangle$$

で表されるものである。ここで  $\theta_{12}$  は天球面上の 2 点  $(\theta_1, \phi_1), (\theta_2, \phi_2)$  の間の角度である。

計算の結果,theoretical model とよく一致していると言える。

1. L.Fu et al. 2008. ,A&A,479,9  
Very Weak lensing in the CFHTLS wide:cosmology from cosmic shear in the linear regime

**重宇 09b すばる HSC サーベイによる暗黒物質モデルの制限に向けたサブハロー質量関数の決定**

黒川 拓真 (東京大学 D1)

現在宇宙論の標準モデルでは、暗黒物質は質量の重い冷たい暗黒物質であると考えられている。しかし標準モデルの予言は大スケールの観測と非常に良く一致する一方で、小スケールにおいては観測との不一致が指摘されている。この問題を冷たい暗黒物質よりも質量の軽い暗黒物質で解決しようとする試みも行われており、暗黒物質が本当に冷たい暗黒物質かどうかは未だ決着していない問題である。

そこで暗黒物質質量に対する新たな制限として、サブハロー質量関数が有効である。サブハロー質量関数はすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam(HSC) による重力レンズ観測によって正確な測定が期待され、重力レンズという理論的な不定性の少ない手法を用いて測定できるためである。

本研究ではこれに対する理論予言として複数の質量の暗黒物質モデルに対して N 体シミュレーションを行い、サブハロー質量関数を求めた。その結果、HSC によって暗黒物質の質量に対して新たな制限が得られることを示した。

1. N. Okabe, T. Futamase, M. Kajisawa and R. Kuroshima. 2013. arXiv:1304.2399 [astro-ph.CO]
2. A. Schneider, R. E. Smith, A. V. Maccio, B. Moore. 2012. MNRAS 424, 684-698

**重宇 10b Bi-Galileon Gravity Theory and Accelerating Solution**

水島 高志 (早稲田大学 M2)

宇宙論の分野において、2 つの時期の加速膨張に関して盛んに議論されている。宇宙初期 (インフレーション) と現在 (ダークエネルギー) である。

これらの宇宙の加速膨張を説明する試みに、Generalized Galileon Gravity Theory という理論がある。本研究では、まず従来の Generalized Galileon Gravity Theory を拡張し、2 つの独立なスカラー場を考え、宇宙の加速膨張が説明可能かどうか解析した。具体的には、「Inflation Driven by the Galileon Field」 [1] において、安定な加速膨張解があるとわかっている作用を 2 スカラー場に拡張して解析をした。結果として安定な加速膨張解を得ることが出来たが、2 つのスカラー場が相互作用している場合が特に興味深いので、今後も解析を続けていく。特に、高次元理論から導かれる結合定数には制限があるので、得られる理論にどのような特徴が現れるかを解析する。

1. T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. ' i. Yokoyama, Phys. Rev. Lett. 105, 231302 (2010) [arXiv:1008.0603 [hep-th]].

**重宇 11b 主成分分析を用いた修正重力理論への制限**

浅羽 信介 (名古屋大学 M2)

超新星の観測から宇宙は加速膨張をしていることがわかった。しかし、加速膨張の原因については未だわかっていない。加速膨張の理論を決める方法は、銀河分布と重力レンズ効果を観測し宇宙論スケールでの重力テストを行うことである。私は加速膨張の原因として考えられている修正重力理論に対して、欧州で計画されている Euclid[1] という将来の銀河の撮像・分光観測からどの程度制限できるかの予測を行ってきた。本研究では修正重力の理論モデルを仮定せずに、主成分分析を行い S/N 比の高いモードを求めるという方法を用いた [2]。この方法を用いることで観測情報を損なうことなく効率良く解析をすることができる。また、修正重力理論を制限する上で、赤方偏移変形 [3] の重要性を定量的に示した。

1. Amendola, L., Appleby, S., Bacon, D., et al. 2012, arXiv:1206.1225
2. A., Zhao, G.-B., Pogosian, L., et al. 2012, Phys. Rev. D, 85, 043508
3. Kaiser, N. 1987, MNRAS, 227, 1

**重宇 12a Wave optics and image formation in gravitational lensing**

長谷川 創一 (大阪市立大学 M1)

重力レンズはアインシュタインの一般相対論による予言の一つであり、観測による多くのサンプルが得られている。弱い重力による重力レンズでは、その効果が薄いレンズと同じとする近似により光線の経路がレンズ方程式に従うものとして扱われる。しかし、光の波長が重力源となる物体のサイズよりも十分に小さくない場合には経路だけでなく波自体への効果も重要になる。重力源となる物体による散乱波に対して Fresnel-Kilchihoff の回折定理を用いることによってレンズ方程式を使うことなく光の波動関数から直接的に光源の像を得ることができる。この発表は Yasusada.Nambu の論文、Wave optics and image formation in gravitational lensing の review である。

1. Yasusada Nambu,Wave optics and image formation in gravitational lensing arXiv:1207.6846v1 [gr-qc] 30 Jul 2012
2. Sharma K K, Optics: principles and applications (Academic Press, 2006)

**重宇 13a 距離の逆 n 乗項をもつ一般化した静的球対称計量から求める重力レンズの曲がり角**

中島 昂己 (弘前大学 M2)

私は北村隆雄氏と浅田秀樹氏との共同研究である、距離依存性について

て一般化された弱場の静的球対称時空における光の曲がり角について議論する [1]。近年重力マイクロレンズ観測による「負質量」のエキゾチック物質で構成される Eliss ワームホールの探査法が提案された。理論的にその存在が提案されているのみだったエキゾチック物質の存在を検証することは宇宙の構成要素を解明する上でも重要である。そのためにエキゾチック物質が起こす現象について理論予測を行うことは重要であり、重力レンズの基本的な物理量として光の曲がり角が必要である。

そこで我々は重力レンズによる光の曲がり角において、代表的な時空である Schwarzschild ブラックホール (SBH) と Ellis ワームホール (EWH) における光とレンズ天体との距離  $r$  の次数 (距離依存性) がそれぞれ  $1/r$ ,  $1/r^2$  と異なることから、球対称かつ弱重力場な時空において  $r$  の逆  $n$  乗項 ( $n$  は正の実数) によって時空構造が表されるより一般化された光の曲がり角を導出した。この距離依存性についてより一般化された光の曲がり角によって、SBH や EWH などの既に知られている球対称時空の曲がり角を再現することが可能になったと共に、光の曲がり角についてより一般的な議論が可能になった。

1. T. Kitamura, K. Nakajima, and H. Asada, Phys. Rev. D 87, 027501(2013).

### 重宇 14a 重力レンズを用いたエキゾチック物質及びエネルギーの探査法

北村 隆雄 (弘前大学 D1)

現在、重力レンズを用いた天体探査が盛んに行われている。本研究では重力レンズの中でも重力マイクロレンズについて特に議論する。重力マイクロレンズは、通常増光現象しか起こらない (増光率  $A \geq 1$ ) とされていたが、2010 年に、重力マイクロレンズにおいて、エキゾチックなレンズ天体であるエリスワームホールの場合、光源が減光して観測される場合がある事が発見された [1][2]。そこで我々は、レンズ天体がエキゾチックな場合の重力マイクロレンズについてより一般的に議論するために、計量が距離の逆  $n$  べき乗の項を持つような修正時空を仮定し、その時空での光の曲がり角及び増光率について、解析的及び数値的に調べた。この時空は、 $n = 1$  の時シュバルツシルト時空、 $n = 2$  の時エリスワームホール時空を再現する。その結果、減光の起こりうる条件が、光源の位置を  $\beta$  として、 $\beta > 2/(n-1)$  であるという事が、近似的にわかった。さらに数値計算によって様々な  $n$  について光度曲線を得た [3]。これによって、 $n = 2$  (エリスワームホール時空) の場合以外でも減光する可能性があることがわかった。この結果を用いれば、エリスワームホール時空の場合だけでなく、一般的にエキゾチック物質及びエネルギーについて議論することが可能で、エキゾチック天体探査の一助となると考えられる。

1. T.K. and K. Nakajima and H. Asada 2013. Phys. Rev. D 87, 027501
2. Fumio Abe 2010. Astrophysical Journal 725. 787
3. Yukiharu Toki. and Takao Kitamura. and Hideki Asada. and Fumio Abe 2011. Astrophysical Journal 740. 121

### 重宇 15a エキゾチックな物質・エネルギーによる重力レンズの像の歪み

泉 洸次 (弘前大学 D2)

この収録では、シュバルツシルト、またはエリスワームホール等のエキゾチックな物質・エネルギーを持つ天体・時空構造を含んだ、一般的な計量により生ずる重力レンズと、負の質量を持った天体のように光を斥ける重力レンズによる像の歪みを議論した。

結果、上記の一般的な重力レンズでは像は方位角方向 (tangential) に、負の質量等による重力レンズでは像は動径方向 (radial) に、それぞれ歪むことが判明した。

1. F.Abe. 2010. Astrophys.J.725, 787 (2010).
2. T.Kitamura et all. 2010. Phys. Rev. D 87, 027501 (2013).
3. K.Izumi et all. arXiv.1305.5037

### 重宇 16a bi-gravity から予言される重力波振動

小幡 一平 (京都大学 M1)

本発表は以下の論文のレビューである。この論文では ghost-free な bi-gravity 理論に基づき、そこからどのような重力波振動が生じるのかを実際の観測に絡めて議論している。元来この理論からは一般相対論 (以下、GR と略称) が予言する場合にとっても似た宇宙論的解を導くことができ、宇宙論的背景を説明する自然なモデルにもなっている。そして massive なグラビトンによる重力波振動は GR が予言するものとは大きく異なることがわかり、その振動が KAGRA や LIGO、Virgo や GEO の検出の対象になると期待される。

1. Antonio De Felice, Takashi Nakamura, and Takahiro Tanaka. April 16, 2013. Phys.Rev

### 重宇 17a 重力波地上観測の chirp time(合体までの時間)

若松 剛司 (新潟大学 M1)

重力波は間接的には存在を証明されているが、今直接観測されていない。では、直接観測されると何がわかるのか?例えば連星中性子星が接近し合体するまでの時間で重力波が検出された場合を考えてみる。まず、軌道周期と軌道周期の変化率から chirp mass と呼ばれる連星の質量に関係する量が決り、観測された振幅から重力波源までの距離が決る。この距離の決定は天文学的な距離の決定とは独立である。宇宙物理学では天文学の対象までの距離がわかることは重要である。

重力波は時空の動的な揺らぎを表している。4重極式で表現でき、重力波源のエネルギー放出率が導き出せる。重力波の物理を解いて、様子を詳しく記述することは重力波データ解析のテンプレートを作る上で重要な意味を持つ。連星系は重力波のエネルギー損失があるので、軌道は縮小し、最後には合体する。それでは、合体するまでの時間は観測とどのような関係があるのか?重力波を観測する場合、横軸は時間スケールとなる。合体するまでの時間は連星系の初期半径、質量、離心率に依存しているが、ここでは連星の合体するまで

の時間 chirp time( $t_c$ ) を観測するまでに要するとして、まずは 1yr を基準と考え、地上で観測できる範囲を重ね、観測時間のオーダーを示し、そして、その考察を考える。これは、B.S. Sathyaprakash, Bernard F. Schutz, “Physics, Astrophysics and Cosmology with Gravitational Waves”, Living Reviews in Relativity, 12, lrr-2009-2, (2009) のレビューである。

1. 重力波をとらえる 存在の証明から検出へ 著者中村 卓史 and 著者大橋 正健 and 著者三尾 典克 (1998). 発行元 京都大学学術出版会
2. B.S. Sathyaprakash, Bernard F. Schutz “Physics, Astrophysics and Cosmology with Gravitational Waves”, Living Rev. Relativity, 12, lrr-2009-2, (2009)

**重宇 18a NLSM に従うスカラー場から放出される重力波**

堀口 晃一郎 (名古屋大学 M1)

宇宙初期に起きた宇宙の加速度的膨張であるインフレーションの証拠の一つとして scale invariant な重力波があげられる。しかし、実際にはインフレーション以外にも scale invariant な重力波を放出する過程がある。この研究のモチベーションは scale invariant な重力波がインフレーションによるものかそれ以外によるものかを区別するというものである。インフレーション由来の重力波は、インフレーションが空間の歪みを引き延ばしたものである。別の過程で scale invariant な重力波が放出される現象としては、一様等方な宇宙で Non Linear Sigma Model(NLSM) に従う N 個のスカラー場の dynamics が挙げられる。NLSM とはスカラー場の数 N が十分大きい場合に、相転移を起こし真空中に落ちた後の場の運動を記述するモデルである。NLSM ではスカラー場がホライズンに入ると field space 上で配位をそろえ始める。その過程で各時刻のホライズンスケールに対応する波数の重力波を放出する。本研究では NLSM に従うスカラー場と、それに伴って放出される重力波の特性を調べた。結果として NLSM に従うスカラー場が放出する重力波のスペクトルを得た。また NLSM は場の数 N が十分大きいときに正確なモデルなので、場の数が有限の場合についてはスカラー場の dynamics をシミュレーションして場の振る舞いを確かめた。これにより場の数が少ない場合でも NLSM の特性は失われず、さらに場の数が少ない場合の重力波のスペクトルも NLSM の重力波に対して定数倍の関係になることがわかった。

1. E.Fenu, D.Figueroa, R.Durrer, J.Garcia-Bellido, JCAP 10 005 (2009); arXiv:0908.0425
2. L.M.Krauss, K.Jones-Smith, H.Mathur, J.Dent, PhysRevD. 82. 044001 (2010); arXiv1003.1735

**重宇 19a 21-cm 線の重力レンズ効果を用いた原始重力波の検出**

橋本 一彦 (京都大学 M1)

インフレーション理論は、インフレーションにより原始重力波

(IGW: Inflationary Gravitational-Wave) が発生することを予言している。インフレーションの発生機構に関しては様々なモデルが提唱されているが、IGW を検出することができればそれらのモデルに制限を加える可能性があり、大変注目されている。現在、宇宙背景放射 (CMB) の B モード偏光を用いてこの IGW の検出を目指す研究が進んでいるものの、そもそもこの方法では IGW を検出できるほどの感度がない可能性がある。21cm 線の IGW による重力レンズ効果を用いれば、上の方法ではノイズに埋もれてしまうような弱い IGW のシグナルであっても、原理的には検出可能であることが指摘されている。本講演ではこの手法について紹介する。

1. Laura Book, Mark Kamionkowski and Fabian Schmidt, Phys.Rev. Lett.108, 211301 (2011)
2. L.G.Book, M.Kamionkowski and T.Souradeep, Phys.Rev. D, in press (2011)

**重宇 20a CMB と 21cm 線が再電離パラメーターに与える制限について**

星野 華子 (名古屋大学 M1)

本発表では CMB と 21cm 線が再電離を記述するパラメーターに与える制限について 2 本の論文 ([1], [2]) を読み、レビューする。再電離とは水素原子が非一様に電離されていく過程であり、再電離期の光学的厚みは方向に依存するものとなる。光学的厚みが揺らぐことにより CMB がいくつかのメカニズムを通して偏光する。ここでは CMB の揺らぎを作るシグナルの中で再電離によるものだけを取り出すことを考える。それを用いて偏光のパワースペクトルから光学的厚みを見積もる。また、再電離期まで存在していた中性水素が要因となって放射される 21cm 線電波があるが、21cm 線と CMB を組み合わせることにより、CMB 単独の場合より再電離を記述するパラメーターに強い制限を与えらえることが分かっている。ここでは再電離の進みの様子が光学的厚みによってどのように変わるかを調べた。その結果、光学的厚みが小さいほど再電離が緩やかに進むということがわかった。

1. C. Dvorkin and K. M. Smith, Phys.Rev. D79, 043003 (2009), 0812.1566
2. P. D. Meerburg, C. Dvorkin, and D. N. Spergel, 2013, 1303.3887
3. J. R. Pritchard and Abraham Loeb, 2012, 1109.6012v2

**重宇 21a High-z QSOs の性質から探る宇宙再電離**

尾上 匡房 (総合研究大学院大学 M1)

Quasar (QSO) は活動銀河核の一種であり、中心の大質量ブラックホールからの強い放射により輝く非常に明るい天体である。また、スペクトルを見るとそれより前に存在する IGM の物理状態を調べることができるので、quasar は遠方の宇宙を探る上で非常に大事なツールになっている。近年の SDSS に代表される観測による  $z > 6$  quasar の発見から  $z \sim 6$  の前後で宇宙空間の中性水素の割合が大きく変化したことがわかり、宇宙再電離がいつ完了したのかについて重要な示唆を与えた。今回の発表では high-z quasar の性質 [1]、現在見つかった最遠方の  $z \sim 7$  の quasar [2]、そしてそこから推定される宇宙再電離の描像



[3]について述べ、さらに来年から始まる HSC survey における high-z quasar の研究計画についても言及する。

1. Xiahoui Fan 2006. *New Astron. Rev.* 50:665-671
2. Daniel J. Mortlock et al. 2011. *Nature* vol.474:616-619
3. Xiahoui Fan, C.L. Carilli and B. Keating 2006. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 44:415-62

.....

**重宇 22a Inflation model による CMB 温度ゆらぎの理論値の補正**

鈴木 亨昇 (名古屋大学 M1)

inflation 理論は標準宇宙モデルの抱える問題を解決する有力な理論であると考えられており、様々なモデルが提案されている。また、inflation 時に生成された初期ゆらぎはその後の構造形成の種になると考えられている。inflation 時に、ホライズンの中では量子的なゆらぎだったが、inflation による加速膨張によりゆらぎがホライズンの外に出ると、古典化し凍結する。その後ホライズンが拡大し凍結したゆらぎが再びホライズンの内側に入ると、凍結したゆらぎは宇宙の密度ゆらぎの初期条件となる。

また、観測できる最も古い電磁波である Cosmic Microwave Background (CMB) は初期の宇宙の情報と伝搬した経路の情報を含んでおり、その温度ゆらぎを調べる事で宇宙の状況を知る事が出来る。しかし、現在考えられている CMB の温度ゆらぎの理論値と観測値の間には large scale でのずれが存在する。inflation はゆらぎに対する初期条件を与えるため、large scale でのずれを補正するような色々な inflation モデルが考えられている。

本発表では、そのずれの補正を目的としたいくつかの inflation モデルについてレビューした。その中の一例として [1] をレビューする。[1] は inflation 前に宇宙が収縮する contracting phase が存在するような bouncing inflation モデルである。この phase は inflation のパワースペクトルの形を変え、CMB の温度ゆらぎの large scale に影響を与える。また、その他のモデルについても考察し、inflation モデルが CMB に与える影響を考える。

1. Z.-G. Liu, Z.-K. Guo and Y.-S. Piao, arXiv:1304.6527 [astro-ph.CO].
2. Y.-S.Piao, B.Feng and X.-m. Zhang, *Phys. Rev. D* **69**, 13520 (2004) [hep-th/0310206].

.....

**重宇 23a k-インフレーションにおける観測的制限**

小林 由規 (東京理科大学 M2)

宇宙は熱い火の玉のような状態から始まったとする標準ビッグバン宇宙論が考えられたが、地平線問題や平坦性問題など多くの問題を抱えていた。これらの問題を解決する為に 1980 年代に宇宙初期に加速膨張期が存在したというインフレーション理論が考えられ、様々な観測からインフレーションの存在を示唆されている。しかし、インフレーションを引き起こす起源は完全に明らかになっていない。インフレーションの起源として考えているものは、スカラー場であり、そのポテンシャルエネルギーによって加速膨張が引き起こされることが標準的なシナリオに

なっている。その一方で、スカラー場が運動エネルギーの非線形項を持つような k-インフレーション模型 [1] でも、加速膨張を起こすことが可能である。

インフレーション中には、量子ゆらぎが急激な膨張により引き延ばされ、それが宇宙背景放射 (CMB) で観測される温度ゆらぎの種となる。Planck の最新の CMB の温度ゆらぎの観測は、インフレーション理論によって予言されるほぼスケール不変な温度ゆらぎのパワースペクトルと整合的である。このパワースペクトルは、インフレーションの模型によって、スケール普遍からのずれの程度が異なる事から、それによって模型の間の選別が可能になる。また、3 点相関関数に関連する曲率ゆらぎの非ガウス性からも、インフレーションの模型に制限を与える事が出来る。非ガウス性は、特に k-インフレーション模型で大きくなりうることから、標準的なスローロールインフレーション模型との区別が可能である。

今回、私は Planck グループ [2] により公表された、CMB の温度ゆらぎの新しい観測データを用いて、k-インフレーション模型の間の選別 [3] を行う。

1. C. Armendariz-Picon, T. Damour and V. F. Mukhanov, *Phys. Lett. B* 458, 209 (1999) [hep-th/9904075].
2. P. A. R. Ade et al. [Planck Collaboration], arXiv:1303.5082 [astro-ph.CO].
3. Shinji Tsujikawa, Junko Ohashi, Sachiko Kuroyanagi, Antonio De Felice, arXiv:1305.3044 [astro-ph.CO]

.....

**重宇 24a Hawking 輻射とブラックホールの蒸発**

山内 健太 (東京理科大学 M1)

J.D.Bekenstein は熱力学でのエントロピー増大の法則との類似から、ブラックホールもエントロピーをもち、その値はブラックホールの表面積に比例するのではないかと考えた。ブラックホールの熱力学系を考えると、温度や内部エネルギー等の熱力学量が定義されなければならない。一般相対性理論ではブラックホールは何も物質を放出せず吸収するだけであり、ブラックホールが温度を持っているとは考えにくい。もしブラックホールが温度を持つならば、ブラックホールから物質へのエネルギーやエントロピーの移動が起こる。これは事象の地平面で囲まれたものがブラックホールであるという定義やブラックホールの面積定理に反する。しかし Hawking はブラックホールの事象の地平面近傍の量子論を考えることによりブラックホールが周りの空間に黒体輻射をすることを示した。座標中心でブラックホールが生成されるとする。その直前に massless 粒子が侵入して中心を通って反対側に抜け無限遠方まで行くとする。この粒子は、場の理論では、クライン-ゴルドン方程式の解が示す量子場として表される。これを解くことによりブラックホールが温度  $\kappa/2\pi$  の黒体輻射をしていることが示される。Schwarzschild ブラックホールの温度は  $T = \frac{hc^3}{8\pi k_B M G}$  となり、これよりブラックホールが蒸発するまでの時間はブラックホールの質量の三乗に比例することが導ける。

1. S.W.Hawking, "Particle Creation By Black Holes". *Commun. Math. Phys.* 43, 199 (1975)
2. S.W.Hawking, "Black hole explosions ?". *Nature* 248,(1974)

.....  
**重宇 25a** Kerr spacetime での scalar 場の不安定性と black-hole bomb の解析

米倉 良一 (大阪市立大学 M1)

Kerr ブラックホールに入射するスカラー場を考えると、反射波はある条件下で、入射波よりも増幅される。この現象は superradiant scattering といい、反射波はブラックホールから回転エネルギーを得る。スカラー場の質量は有効ポテンシャルのように働いて、束縛状態を作り出す。ポテンシャルに跳ね返されて再反射されたスカラー場はブラックホールに入射する。再反射と再入射を繰り返すと、スカラー場は不安定になり、振幅は growth rate を持つようになる。このような現象は black-hole bomb として知られている。

Shahar Hod と Oded Hod は解析手法を用いて、Kerr 時空の元での Klein-Gordon 方程式を調べることで、growth rate を求めた。本発表はこの論文のレビューを行う。

1. Shahar Hod, Oded Hod, arXiv:0910.0734 [grqc], Phys. Rev. D 81, 061502 (2010)
2. Dolan, S.R., Phys. Rev. D 76, 084001 (2007)
3. Press, William H.; Teukolsky, Saul A. Nature 238(5368) 211-212 (1972)

.....  
**重宇 26a** Bigravity 理論におけるブラックホール解とエントロピー

桂川 大志 (名古屋大学 M2)

現代の理論物理学の1つの目標として、量子力学と一般相対性理論の統一という問題がある。この問題には、マイクロなスケールでの重力理論が必要となり、この理論は量子重力理論と呼ばれる。

量子重力理論の研究の1つとして、ブラックホールの研究がある。ブラックホールと熱力学の間には対応関係があり、エントロピーという概念が存在するが、このエントロピーの統計的な起源は、超弦理論やループ量子重力理論などの研究から、時空のマイクロな状態数に関係することが知られている。

今回の発表では、Bigravity 理論と呼ばれる重力理論を用いて、ブラックホール解を求め、このブラックホールのエントロピーを評価する。Bigravity 理論とは、2つのテンソル場を含み、massive spin-2 の場と重力の相互作用を記述する理論である。Bigravity 理論の minimal な模型において、2つのテンソル場が比例する場合を調べた結果、静的球対称なブラックホール解を持ち、そのときのエントロピーは、通常の2倍のエントロピーを持つことが分かった。

1. T. Katuragawa and S. Nojiri. 2013. arXiv:1304.3181 [hep-th]

.....  
**重宇 27a** bigravity に対する高次元重力理論の埋め込みによるアプローチ

山下 泰穂 (京都大学 M2)

現在、重力理論そのものを修正する修正重力理論が盛んに研究されている。特に近年、これまでは ghost が現れると考えられていた bigravity と呼ばれる理論において ghost free な action が得られ、多くの研究者から注目されている。しかし、この ghost-free bigravity の特殊な相互作用のみが選ばれる機構は明らかになっていない。本発表は、高次元重力理論の四次元への埋め込みによってこの問題を解決する一つの機構を与えることを目標とし、特に DGP model と呼ばれる高次元モデルを考えることにより bigravity を再現し得ることを示す。

1. S. F. Hassan and R. A. Rosen. 2012. JHEP 1202, 126
2. G. R. Dvali, G. Gabadadze and M. Porrati. 2001. Phys. Lett. B485, 208

.....  
**重宇 28a** Hořava-Lifshitz gravity で考える重力崩壊

池田 大志 (名古屋大学 M1)

Hořava-Lifshitz(HL) 重力理論で星の重力崩壊を考える。[1] 今回考えるのは projectability と任意の結合定数  $\lambda$  を持つ理論である。この理論が持つ対称性は  $U(1)$  と  $Diff(M,F)$  である。はじめに HL 重力の運動方程式と拘束条件を求める。その後球対称な場合に方程式を書き換える。そして星表面での接続 (junction) 条件を一般的な形で導入する。ここでは重力崩壊の計算の際に ill-defined な項が出てこないように各関数の C 級を決定する。その後一様等方な完全流体を用意して重力崩壊を計算する。流体の外部は静的球対称とする。宇宙項  $\Lambda$  と  $\lambda$  の値で場合分けをする。各場合において junction 条件と運動方程式、拘束条件は 6 つの条件にまとめられる。さらに簡単のため、完全流体に圧力がないときを考える。 $\lambda = 1$  の場合のみ拘束条件等が矛盾なく満たされることがわかる。そのとき、外部解は Painlevé-Gullstrand 座標での Schwarzschild (anti)de Sitter 解と一致することが示される。今回使う junction 条件の処方はほかの重力の理論でも応用することができる。

1. Jared Greenwald, Jonatan Lenells, V.H.Satheeshkumar, Anzhong Wang 2013 arXiv:1304/1167v1[hep-th]
2. P.Hořava, Phys. Rev.D79,084008(2009)

.....  
**重宇 29a** Bigravity 理論における加速膨張宇宙解

岡崎 智久 (京都大学 M1)

本発表では論文 [1] のレビューを行う。観測から現在宇宙は膨張していることが知られている。この事実を説明する試みに、一般相対論に宇宙項を導入する代わりに重力理論そのものを修正しようとするものがある。その一つである ghost-free な bigravity 理論に着目し、可能な宇宙モデルについて述べる。四脚場を用いて理論を定式化し、一様等方な物質分布の下で方程式を解くことで、宇宙論的な解が得られる。この解は graviton の質量に由来する有効的な宇宙項によって加速膨張が起こり、観測結果を自然に説明できる可能性がある。

1. M. S. Volkov, Phys. Rev. D86 (2012) 061502.

**重宇 30a**    **bigravity 理論に基づく宇宙論とダークエネルギー問題**

青木 勝輝 (早稲田大学 M1)

本研究では bigravity 理論 [1] を用いて、時空がどちらも Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) 計量で表される場合の宇宙論を考える。物質としてはダストを考え、どちらの計量も物質と相互作用する。解析の結果、真空解は最大4つのブランチをもつが、2つの物質の密度比が宇宙が膨張するにつれどの真空解に漸近するかを決定する。また宇宙膨張の途中で特異点をもつような解も発見された。

1. S. F. Hassan and R. A. Rosen, JHEP 02 (2012) 126.

**重宇 31a**    **Lagrange multipliers を用いたスカラー・テンソル理論による宇宙定数問題の理解**

小川 達也 (大阪市立大学 M1)

アインシュタインの導入した宇宙項はエネルギー運動量テンソルへの寄与とみなすことができる。この宇宙項から導き出される、真空のエネルギー密度は一定値を持つ。このとき、宇宙定数は空間の持つ体積そのものが持つエネルギー、つまり真空のエネルギーとみなすことができるが、単純に量子場の真空エネルギー密度を宇宙定数の起源であるとする、観測値との間に 1-2 桁以上の食い違いが現れてしまう。これが宇宙定数問題である。

この宇宙定数問題を理解するための一つの方法が、Lagrange multipliers を用いたものである。本発表ではこの方法について論じた、Diego Saez-Gomes の論文のレビューを行う。

1. Diego Saez-Gomez arXiv:1110.6033v2 [hep-th] 9 jan 2012
2. S.Nojiri and D.Odintsov, Phys. Rept. 505 59(2011) [arXiv:1011.0544[gr-qc]]
3. 松原隆彦. 2012. 東京大学出版会 「現代宇宙論-時空と物質の共進化」

**重宇 32a**    **f(R) 理論における加速膨張を与えるモデルの解析**

小川 茂樹 (東京理科大学 M1)

Ia 型超新星の観測によって、現在の宇宙は加速膨張をしていることが分かった。この加速膨張の源は暗黒エネルギーと呼ばれている。暗黒エネルギーの起源を解明するために様々なモデルが提唱されている。その一つとして、長距離において重力理論が一般相対性理論から変更される修正重力理論がある。その代表的な例としては、Lagrangian がスカラー曲率 R の非線形関数で与えられる f(R) 理論、スカラー場が曲率と直接結合をもつような Brans-Dicke 理論などがある。

今回の研究では f(R) 理論における暗黒エネルギーのモデルを考える。これが満たすべき条件を無次元量を導入し、それらの固定点の安定性から導出する。その後具体的なモデルを考えそれらが条件を満たす有効な f(R) モデルかを調べた。

1. Antonio De Felice and Shinji Tsujikawa, Living Rev. Rel. 13

(2010) 3

2. Amendola, L., Gannouji, R., Polarski, D., and Tsujikawa, S., "Conditions for the cosmological viability of f(R) dark energy models", Phys. Rev. D, 75, 083504, (2007)

**重宇 33a**    **修正重力理論におけるカメレオン機構の解析**

伊藤 仁力 (東京理科大学 M2)

近年の観測により宇宙は加速膨張していることが示されており、その源は暗黒エネルギーと呼ばれている。しかしその起源は未だに解明されていない。最も一般的なモデルとして観測との良い整合性を持つ  $\Lambda$  CDM 模型が挙げられるが、宇宙項  $\Lambda$  の起源を真空のエネルギーとすると、この模型は理論値と観測値に 121 桁もの差が生じてしまう。そのため、 $\Lambda$  CDM 模型以外にも多くの代替案が考えられており、その一つとして重力項を修正することにより加速膨張宇宙の記述を行う修正重力理論が挙げられる。暗黒エネルギーの起源がスカラー場とする模型では、スカラー場は非相対論的物質と結合するために発生する第5の力の伝搬が起こることが分かっている。しかし、自然界において確認されている力は4つであり、この理論上で発生する第5の力は観測からは確認されていないため、この力を宇宙の局所領域で抑制する機構を考える必要がある。そのような機構の一つとして、場の有効質量が周囲の物質の密度に依存して異なることを利用したカメレオン機構が挙げられる。今回はこのカメレオン機構がどのような模型に適用し、場の有効質量の違いにより第5の力を抑えるのか見ていく。またそのときのカメレオン機構が働く条件と太陽系での重力実験における解析していく。

1. J. Khoury and A. Weltman, Phys. Rev. D 69, 044026 (2004)
2. Radouane Gannouji, Bruno Moraes, David F. Mota, David Polarski, Shinji Tsujikawa, Hans A. Winther, Phys. Rev. D 82:124006, (2010) [arXiv:1010.3769]
3. T. Tamaki and S. Tsujikawa, Phys. Rev. D 78, 084028 [arXiv:0808.2284]

**重宇 34a**    **標準ビッグバン宇宙における軽元素合成理論とその問題点 (Alpher, Follin & Herman 1953 のレビュー)**

佐塚 達哉 (大阪大学 M1)

現代の宇宙論は精密科学として発展を遂げ、宇宙マイクロ波背景放射の存在やヘリウム、重水素などの軽元素の存在比を見事に説明する。我々は軽元素合成理論に注目し、Alpher, Follin & Herman (1953) をレビューする。この論文は宇宙論における史上最初の定量的な議論であるとされ (ワインバーグ「宇宙の最初の3分間」)、現代宇宙論を学ぶ上で非常に重要である。

現在の軽元素の存在比は、宇宙初期の陽子・中性子の存在比によって決められる。林 (1950) は、それまで曖昧に仮定されていた陽子・中性子比を見直し、物質と放射の相互転換を考慮したモデルを立てこの比を得た。レビューする論文では、その考えを基にして、より定量的に正確な計算を行ない、現代において広く支持されている軽元素合成理論を確立した。

この理論はヘリウム、重水素の軽元素比をうまく説明するが、リチウム7の量は期待されるよりも少なく、理論あるいは観測に対する問題点として残されている。その問題の解決策についても議論する。

1. R. A. Alpher, J. W. Follin, & R. C. Herman, Phys.Rev., 92, 1347 (1953)
2. C. Hayashi, Prog. Teoret. Phys., 5, (1950)

**重宇 35a PBH Baryogenesis**

藤田 智弘 (東京大学 D2)

何故、この宇宙は物質で満たされており、反物質はほとんど見つからないのか？この問題はバリオジェネシスと呼ばれ、宇宙論における最重要未解決問題の1つである。我々は新しいアプローチとして、初期宇宙で作られるブラックホール (PBH) を通じたバリオジェネシスのモデルを議論する。このシナリオでは、インフレーションによって作られたPBHがホーキング輻射で素粒子を放出し、その粒子が崩壊することでバリオン数が作られる。従って、初期宇宙論・相対論・素粒子論にまたがる研究対象として面白い。さらに、PBHバリオジェネシスは既存のモデルでは難しいGUT(大統一理論) エネルギースケールでのレプトジェネシスを達成でき、非常に魅力的なモデルと言える。我々は宇宙論からの制限を包括的に考慮し、シナリオの実現可能性を検証する。

1. D.Baumann et al. 2007. arXiv:hep-th/0703250

**重宇 36c かにパルサーから放出される重力波**

井関 洸太 (弘前大学 M1)

本研究では有力な重力波源である「かにパルサー」について詳しく調べた。その結果、かにパルサーの重力波の振幅は  $10^{-24}$  のオーダー、エネルギー損失は  $10^{31}$  のオーダーであり、それに伴って1秒間に振動数が  $10^{-10}$  のオーダーで減少している事が分かった。今後の課題としては放出される重力波の振幅が大きい星の理論的予測である。ワームホールやエキゾチックな質量を持った星などがもしあれば、そういった天体からも重力波が放出されているかもしれず、加えて新たな発見を人類にもたらしてくれるかもしれない。

1. 重力波をとらえる, 中村卓史, 三尾典克, 大橋正健, 1998, 京都大学学術出版会
2. 相対論入門, BERNARD.F.SCHUTZ, 1988, 丸善株式会社

**重宇 37c ハローモデルにおける銀河の多重極パワースペクトル  $P_\ell(k)$**

金丸 達郎 (広島大学 M1)

宇宙の大規模構造を調べる理論モデルとして、ダークマターハローからアプローチをする、ハローモデルがある [1]。始めに、ハローモデルに基づいた、赤方編移空間における銀河の多重極パワースペクトル  $P_\ell(k)$

をレビューし、 $P_4(k)$  では、サテライト銀河からの寄与が重要であることについて述べる。そして、銀河の多重極パワースペクトルを用いた発展として、 $P_4(k)$  を調べることで、修正重力理論やサテライトフラクションに対し制限をつけることの可能性について議論する。

1. A.Cooray, R.Sheth, Phys. Rep., 372,1 (2002)
2. C.Hikage, K.Yamamoto, arXiv:1303.3380 (2013)

**重宇 38c 修正重力理論で迫る宇宙磁場の起源**

嵯峨 承平 (名古屋大学 M2)

近年、宇宙のさまざまなスケールにおいて磁場が観測されている。例えば銀河や銀河団スケールの領域においては、およそ  $10^{-6}$  ガウスの磁場が確認されている。また、宇宙で銀河がほとんど存在しない領域における銀河間磁場も観測されている。このように、宇宙には多様なスケールの磁場が存在しており、特に銀河以上のスケールの磁場を「宇宙磁場」と呼ぶ。一般的に考えられているシナリオとして、初期宇宙に存在した「種磁場」がダイナモ機構により増幅されたと考えられている。この種磁場の大きさとして、再結合期に  $10^{-30} \sim 10^{-20}$  ガウスの種磁場が存在していると現在観測されている宇宙磁場の候補となりうるという先行研究がある。この種磁場を作ることが非常に困難であることが問題である。

そして今回注目する候補は、初期宇宙のプラズマ中において強結合している光子とバリオンにわずかなズレがありこの効果によって磁場が生成されるという方法である。この手法は宇宙が発展する中で自然に生成されるためよい候補といえる。ところが線形摂動論のもとで、このズレから引き起こされる磁場のソースとなるのはベクトル型摂動である。ベクトル型摂動は、標準的な宇宙論において膨張に従い減少する解しか持たず通常無視されるため磁場は生成されない。

しかし、修正重力理論の候補である Einstein-Aether 理論ではベクトル場である“エーテル場”が導入されており、この新しい場によってベクトル型摂動が存在する。今回は、このベクトル型摂動における磁場の生成に注目し解析を行った。その結果、種磁場の大きさとして最大で  $10^{-22}$  ガウスの磁場が生成されることがわかり、これは種磁場として十分な大きさであると言える。

1. S. Saga et al., Phys. Rev. D87, 104025 (2013), 1302.4189.
2. M. Nakashima and T. Kobayashi, Phys. Rev. D84, 084051 (2011), 1103.2197.
3. T. Jacobson and D. Mattingly, Phys. Rev. D64, 024028 (2001), gr-qc/0007031.

**重宇 39c Relative velocity of dark matter and varionic fluids and the formation of the first structures**

小野間 章友 (筑波大学 M1)

同論文のレビューとなる。宇宙の再結合時、バリオンと光子は脱結合し、この時にバリオンの音速は、相対論的速度から水素原子の熱運動速度まで落ちる。これは、ゆらぎの線形理論におけるバリオンとダークマターの間の相対速度を下回るものである。この相対速度を考慮すると、移流による項に影響を及ぼす。これにより、小スケールでのゆらぎの成長の抑制されることがわかった他、線形理論とは異なるいくつかの結果が出た、という内容の論文のレビューと、その結果を元にしたシミュ

レーション結果のレビューを行う。

1. D. Tsaliakhovich , C. Hirata. Phys.Rev.D82:083520,2010.
2. 松原隆彦. 『現代宇宙論 ——時空と物質の共進化』東京大学出版会 (2010)

## 重宇 40c 銀河団の多波長観測を用いた修正重力模型の検証

照喜名 歩 (広島大学 D1)

宇宙の加速膨張を再現する修正重力模型では、一般に重力以外に第5の力が物質に作用する。この第5の力が銀河団で現れると、銀河団ガスに作用し、その分布観測に影響を与える可能性がある [1]。一方、静水圧平衡を仮定すると銀河団ガスの分布観測を組み合わせて銀河団質量の質量プロファイルを予測することができる。我々は第5の力が存在するとニュートン重力に比べてこの質量プロファイルの見積もりが小さくなることを示した。また、実際にかみのけ座銀河団 [2] の X 線温度、表面輝度観測から質量プロファイルを見積もり、これを重力レンズ観測による質量予測と比較した。その結果、重力レンズ観測の誤差の範囲で修正重力模型のモデルパラメータに制限を与える事が可能であることを示した。本講演では上記の制限について議論する。

1. A. Terukina and K. Yamamoto. 2012. PRD. **86**, 103503.
2. R. Fusco-Femiano, et al. 2013. ApJL. **763**, L3.

## 重宇 41c 連星パルサーから放出される重力波

原田 尚也 (弘前大学 M1)

本研究では二体系のダイナミクスに対する重力波放出の影響を調べた。具体的には楕円運動する2体系の四重極モーメントから、連星系の単位時間あたりのエネルギー損失やそれに伴う軌道周期の減少を求め、その結果から離心率や軌道長半径の時間変化を求めた。また、連星が合体するまでに要する時間を求め、連星パルサー PSR1913+16 の場合で評価した。その結果、参考文献の結果と一致することが確認された。

1. BERNARD F.SCHUTZ (江里口良治・二間瀬敏史 共訳)「シュツツ 相対論入門 I 特殊相対論」丸善株式会社 (1988) 著者 A and 著者 B. 2012. 発行元 1
2. BERNARD F.SCHUTZ (江里口良治・二間瀬敏史 共訳)「シュツツ 相対論入門 II 一般相対論」丸善株式会社 (1988)
3. 中村卓史・三尾典克・大橋正健編著「重力波をとらえる—存在の検出から証明へ」、京都大学学術出版会 (1998)
4. Michele Maggiore「Gravitational Waves Volume1 Theory and Experiments」OXFORD UNIVERSITY PRESS(2008)
5. J. M. Weisberg and J. H. Taylor. Pub. in Binary Radio Pulsars, Proc. (2004).

## 重宇 42c Stable traversable wormholes

国分 隆文 (立教大学 M2)

ワームホールとは我々の宇宙の異なる2点間、又は異なる宇宙同士を繋ぐ時空のトンネルである。通行可能なワームホールの存在は Morris と Thorne によってはじめて提唱された (Morris-Thorne wormhole)[1]。ワームホールが自然界に存在できるかどうかを考えるときには、その安定性を考えればよい。Kuhfittig は Morris-Thorne wormhole (MS-wh) の安定性を調べるため、MS-wh の内部と Schwarzschild BH の外部との接続面を調べ、MS-wh が動径方向の線形摂動に対して安定であるための条件を導いた [2]。本発表では、通行可能なワームホールが動径方向の線形摂動に対して安定である、という Peter K.F.Kuhfittig の仕事のレビューと拡張をする。

1. M.S.Morris and K.S.Thorne,Am.J.Phys.56,395(1988)
2. Peter K.F.Kuhfittig,Cent.Eur.Phys.8(3),364-368(2010)

## 重宇 43c 連星中性子星の合体シミュレーション

諏訪部 宙 (新潟大学 M1)

重力波は物質とほとんど相互作用しない。そのため放射された重力波は、その時の状態を保って地球まで伝わってくる。また、強重力場が激しく変動した時に効率よく放射されるので、検出される重力場の情報が豊富に含まれているはずである。しかしながら、重力波が観測されても、それから直接わかるのは、振幅、振動数及びそれらの時間変化までである。その波源、すなわち強重力天体について知るためには、あらかじめ波源を予想し、放射される重力波の波形を理論的に調べ、観測結果と比べる必要がある。今回は本論文をレビューし、中性子連星が合体するときの数値相対論的シミュレーションにより、予想される重力波とニュートリノ光度を紹介する。それが現在及び次世代の検出器で、どの程度検出可能性を持っているか報告する。

1. Y. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku, M. Shibata, Phy. Rev. Lett. 107, 051102(2011)

## 重宇 44c 修正重力理論での短波長重力摂動

西 咲音 (立教大学 M1)

修正重力理論は一般相対性理論で説明のできないダークエネルギーなどを説明する理論であり、様々なものが存在している。ここで挙げる  $f(R)$  重力理論や scalar-tensor 理論はその一種である。[1] 一般相対性理論では Isaacson による手法 [2] でエネルギー運動量テンソルを求めることができるが、修正重力理論ではこれを応用させることでエネルギー運動量テンソルを求めることができる。

1. Keiki Saito and Akihiro Ishibashi, (2013) arXiv:1209.5159.
2. R.A.Isaacson, (1968) Phys. Rev., 166, 1263

**重宇 45c** stochastic inflation における curvature perturbation

多田 祐一郎 (東京大学 M2)

我々の宇宙は大きな scale では非常に一様等方であるが、小さな scale で見れば銀河や銀河団など、実に豊かな構造を持っている。そしてこれらの構造は inflation を引き起こす inflaton 場の量子ゆらぎを起源とすると考えられている。こうしたゆらぎ (curvature perturbation) は通常 inflaton 場を、空間一様な古典場と摂動的量子場にわけて計算されるが、stochastic formalism によれば、量子場の効果を統計的白色雑音として古典場に取り入れることで、完全に古典論として理論を展開できる。我々はこの formalism を用い、inflaton 場に対し非摂動的なゆらぎの計算方法を提唱する。

1. M. Sasaki, Y. Nambu, and K. Nakao, Phys. Lett. **B209**, 197 (1988)
2. K.E. Kunze, JCAP 0607 (2006) 014

**重宇 46c** Massive spin2 粒子に対する ghost-free 微分相互作用について

大原 悠一 (名古屋大学 M2)

零質量の spin2 粒子に質量を与えた場合に、安定な理論が構築できるかという試みは古くから行われている。一般に、スピン 2 の理論に質量を与えると、線形なレベルでも ghost が現れることが知られている。Fierz と Pauli は質量項を適切に組むことで、線形なレベルで ghost を排除することに成功した。その後、理論の安定性を保ちつつ非線形な理論へ拡張する事が試みられたが成功していなかった。しかし、近年、de Rham らが、その拡張の手法が確立した (dRGT 理論)。dRGT 理論では、微分を含まない高次の自己相互作用を導入し、各項の係数を調整することで、ghost を排除する事に成功している。本論文では、線形のレベルで、これらの自己相互作用に、ghost を生じない微分自己相互作用を加える事ができる事を示している。また、その微分相互作用に対応する非線形項が存在し、dRGT 理論を一般化した理論の存在を予想している。

1. Hinterbichler arXiv:1305.7227
2. Hinterbichler arXiv:1105.3735v2

**重宇 47c** 負の質量天体による重力レンズ効果

萩原 千祥 (弘前大学 M1)

重力レンズは現在、系外惑星探査やブラックホールなどの直接検出が難しい天体を観測するうえで重要な役割を果たしている。本研究では特に重力マイクロレンズに注目し、Schwarzschild 時空において、レンズ天体が負の質量を持つ場合について、弱場近似を用いて曲がり角と増光率を導出した。結果、歪められた像がレンズ天体に対して光源側に 2 つ観測され、レンズ天体の近くを光源が横切るときに増光率は発散することがわかった。さらにレンズ方程式から、Caustics を横切ったあとで像

が現れないことも判明した。

1. Frittelli and T.P.Kling and E.T.Newman. 2000. Phys.Rev.D 61,064021
2. K.S.Virbhadra and G.F.R.Ellis. 2000. Phys.Rev.D 62,084003
3. T.Kitamura and K.Nakajima and H.Asada. 2013. Phys.Rev.D 87,027501

**重宇 48c** 宇宙定数問題：人間原理によるアプローチ

表 尚平 (東京大学 M1)

宇宙定数問題とはアインシュタイン方程式の中に現れる定数  $\Lambda$  の観測から得られる値が、量子論から予言される値よりも 120 桁ほど小さいという問題である。この食い違いの原因を基礎物理の立場から説明しようとする試みは現在のところうまくいっていない。一方で、本講演で扱う Weinberg(1987) の論文では宇宙定数の値を「人間原理の考え方」を使って制限することを考えている。人間原理から、重力的に束縛された構造の形成を妨げるくらいに宇宙定数は大きすぎるべきではないという条件を課すことで宇宙定数の上限値を求める。本講演では現代の新しいデータを使った新しい制限も合わせて紹介する。

1. S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 59, 2607 (1987)

**重宇 49c** BigBang 元素合成

佐藤 正憲 (東京工業大学 M1)

通常は数値計算によって扱われる元素合成について、近似を駆逐することで解析的に取り扱った、V. Mukhanov. 2005. Nucleosynthesis Without a Computer についてのレビューを行う。解析的に取り扱うことで数値計算ではブラックボックスであった内容を身近に理解することができる。また、近似の精度についても数値計算の結果と比較することによって確かめる。

1. V. Mukhanov. 2005. Nucleosynthesis Without a Computer

**重宇 50c** 宇宙の非一様性がダークエネルギーの状態方程式の測定結果に与える影響

根岸 宏行 (大阪市立大学 D1)

宇宙は非常に複雑な対象であり、素粒子のスケールから宇宙の大規模構造にいたるまで様々なスケールの構造を含むが、宇宙の大局的な構造を調べる場合には細かな構造をすべて考慮する必要は無い。宇宙の大局的な構造を知るのには宇宙を理解する上で非常に重要である。しかし、宇宙の大局的な構造を知る為には観測的制限が少ないため、作業仮説が必要となる。現代の宇宙論の標準宇宙モデルでは一般相対性理論が宇宙に適用できることと「我々は宇宙の中で特別な場所にはいない」というコペルニクス原理を作業仮説として採用している。宇宙背景放射の観測より宇宙は等方であることが強く示唆されている。このこととコペルニクス原

理を合わせると宇宙の大局的構造は一様等方と結論付けられる。超新星の距離-赤方偏移関係の観測より、宇宙が一様等方な場合、宇宙が加速膨張していることがわかった (ApJ.517:565-586,(1999))。この観測結果より、我々の宇宙には加速膨張を引き起こす物質であるダークエネルギーが満ちていることになる。ダークエネルギーの状態方程式 ( $p = w\rho$ ) について、近年の観測より  $w = -1.013^{+0.068}_{-0.073}$  と制限されている (ApJ 746, 85 (2012))。この観測結果は  $w$  が  $-1$  より小さい可能性を示唆している。相対性理論が宇宙に適用できる場合、 $w$  が  $-1$  より小さいダークエネルギーは因果律が破れているように振る舞う。我々の宇宙で因果律を保つためには、異なる方法で観測を説明する必要がある。本研究では、宇宙定数がある一様等方宇宙モデルが大スケールで一様等方からわずかにずれている場合に、非一様性がダークエネルギーの状態方程式に与える影響を調べ、因果律の問題を非一様性を用いて回避した。

1. Valkenburg(arXiv:1302.6588)

### 重宇 51c Clustering of quintessence on horizon scales and its imprint on HI intensity mapping

舟田 成登 (立教大学 M2)

ダークエネルギーは宇宙ダークエネルギーは宇宙全体に広がって負の圧力を持ち実質的に「反発」する重力」としての効果とを及ぼしているエネルギーである。ダークエネルギーは主に2種類考えられており、その2つが宇宙項とクインテッセンスである。宇宙項は時間に対して一定のダークエネルギーである。クインテッセンスは時間変化する動的なダークエネルギーである。クインテッセンスはホライズンスケールではクラスターを形成するという点で宇宙項とは異なっているそれをこの論文ではそのことを考慮して、宇宙項とクインテッセンスの異なる3つのポテンシャルを用いて、理論的に物質密度のパワースペクトルを計算している。また、HI Intensity という観測方法で得られたデータを角度パワースペクトルで計算している。この論文の目的は、観測と理論値を合わせることでなく、宇宙項と3つクインテッセンスのモデルでどう違うのかということを示すことである。

### 重宇 52c 最も一般的なスカラーテンソル理論における宇宙論的密度揺らぎのバイスペクトル

宅島 祐一郎 (広島大学 M2)

多くの修正重力理論を包括する理論として、最も一般的なスカラーテンソル理論がある。この理論において、宇宙論的密度揺らぎの進化の過程で生じるバイスペクトルの一般的な表式について議論した。摂動理論の手法により、密度揺らぎの2次のカーネルを用いることにより表式を得られ、また2次のカーネルは3つのパラメータを用いて表されることが分かった。本講演では、バイスペクトルの一般的な表式の導出方法と具体的なモデルへの応用について議論する。

1. G.W.Horndeski .Int. J. Theor. Phys. 10 363-384 (1974)
2. Rampei Kimura et al. Phys. Rev. D85 024023 (2012)