

重力・宇宙論分科会

理論と最新観測で探る重力理論・宇宙理論

日時	7月29日 15:15 - 17:30 7月29日 16:00 - 17:00(招待講演：高橋 慶太郎 氏), 17:15 - 19:30 7月30日 9:00 - 11:15, 14:45 - 15:45(招待講演：田中 貴浩 氏), 16:00 - 19:00
招待講師	高橋 慶太郎 氏 (熊本大学)「次世代電波望遠鏡による宇宙論の新展開」 田中 貴浩 氏 (京都大学)「修正重力と重力波」
座長	北村隆雄 (弘前大 D2)、小幡一平 (京都大 M2)、小川達也 (大阪市立大 M2)、西咲音 (立教大 M2)、鈴木享昇 (名古屋大 M2)、島袋隼士 (名古屋大 D2)
概要	<p>インフレーションによって始まった宇宙は、ビッグバン元素合成の後、初代天体・銀河の形成、宇宙再電離期を経て、現在の色彩豊かな宇宙へと発展してきたというシナリオは、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測や宇宙の大規模構造の観測によって指示されつつある。また、宇宙論的観測の近年の発達が目覚ましく、最近では、BICEP2 の CMB 偏光観測によるインフレーションシナリオへの制限や PLANCK による宇宙の初期揺らぎの non-gaussianity への制限が記憶に新しい。しかし依然として、インフレーションや宇宙加速膨張の機構や、宇宙再電離の物理的性質には謎が多い。これらの謎に挑むために、数値計算やシミュレーションを用いた理論的研究や、より精密な CMB 偏光観測、さらに HSC (Hyper Supreme Cam) を SuMIRe を用いた大規模撮像・分光サーベイ、21cm 線観測などの次世代型観測の発展が期待されている。</p> <p>宇宙加速膨張を説明するために従来の Einstein 重力とは別に提唱されたモデルとして修正重力理論がある。修正重力理論は、宇宙論のみならず、強い重力場での天体物理現象や力の統一理論を考える上でも重要な位置を占めている。また、修正重力理論のみならず Einstein 重力理論も数値相対論の発展により、国際的に研究が進められている。</p> <p>重力理論の検証としてはブラックホールや重力波の直接検証が必要となるが、未だにこれらの観測はなされていない。しかし、現在進行中の KAGRA などの観測装置により、近い将来、重力理論の検証が可能になるものと考えられる。これらを踏まえた上で、本分科会では、研究の最前線で活躍される重力理論・宇宙理論の講師を招待し、最新の研究内容などについて講演していただく予定である。また、重力理論・宇宙理論に興味のある学生を募り、各々の研究内容や勉強内容を発表、議論することにより、本分科会が、今後の研究へとつなげていくことのできる場となることを願う。</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>

高橋 慶太郎 氏 (熊本大学)

7月29日 16:00 - 17:00 B(大コンベンションホール)

「次世代電波望遠鏡による宇宙論の新展開」

宇宙論はこれまでマイクロ波宇宙背景放射や光赤外による銀河サーベイによって進歩してきた。この流れは大型低周波電波望遠鏡が登場する今後数年間で大きな転換点を迎える。特に次世代電波望遠鏡 Square Kilometre Array は宇宙再電離や密度揺らぎの非ガウス性、暗黒エネルギーなど宇宙論の大きな謎を解決できる可能性がある。本講演では宇宙論の現状と将来の電波望遠鏡による展望について述べる

田中 貴浩 氏 (京都大学)

7月30日 14:45 - 15:45 B(大コンベンションホール)

「修正重力と重力波」

一般相対論を修正することに対する観測的制限は長い歴史の中で積み上げられてきているものであり、様々な制限がつけられている。しかしながら、ダークエネルギーやダークマターの問題の解決を目指し宇宙論的な観点から様々な修正重力理論が提案されている。それらの中には非常に巧妙な方法でこれまでの観測的制限を回避しているものもあるように思われる。いくつかの代表的なモデルを紹介する。一方で、重力波観測のような新しい観測手段が質的に新しい制限をつける可能性を秘めているということも、いくつかの例を挙げて紹介する。

1. S. F. Hassan and R. A. Rosen, JHEP **1202** (2012) 126
2. K. Yagi, L. C. Stein, N. Yunes and T. Tanaka, Phys. Rev. D **87**, 084058 (2013)
3. C. M. Will, arXiv:1403.7377 [gr-qc].

重宇 a1 強重力場における光の曲がり角

鈴木 聡人 (弘前大学 浅田研究室 M1)

一般相対性理論から導かれる光の湾曲は重力レンズ効果と呼ばれる。この曲がり角を求める微分方程式は厳密に解析解を求めることができない。そのため、一般的には弱重力場での近似を用いて曲がり角の計算が行われている。太陽のような一般的な天体において、この近似式は非常に良く観測結果と一致することが歴史的にも知られており、現在では宇宙における重要な観測手段として広く利用されている。

一般相対論特有の現象として、光は重力源の周りで不安定円軌道 (光球:poton sphere) を持つことが知られている。このことから重力源の近くでは、曲がり角が 2π を超えるような軌道が考えられる。そして、さらに光球の近傍では重力源の周りを何周回もする軌道があると考えられるが、この検証には上述の弱重力場での近似計算を用いることができない。

そこで、本研究では Schwarzschild 時空中における光の曲がり角を強重力場で近似的に求めた S. V. Iyer, A. O. Petters[1] と V. Bozza[2] についてレビューを行う。さらに Maxima を用いた数値計算も独自で行い、それらについて評価した。

Schwarzschild 時空中における V. Bozza[2] の結果はよく知られている C. Darwin[3] の式と一致し、曲がり角を対数関数で表すことができることがわかった。しかし、この結果は光球のごく近傍のみでしか一致しない。

そこで S. V. Iyer, A. O. Petters[1] では第一種楕円積分の級数展開から、衝突径数 b で表されるパラメータ $b' = 1 - b_c/b$ (b_c :臨界衝突径数) を用いて曲がり角を $O(b')^4$ まで計算すると、全範囲を数値計算との誤差が 2% 以内で表すことができた。

1. S. V. Iyer, A. O. Petters, Gen. Relativ. Gravit. 39, 1563-1582 (2007)
2. V. Bozza, Phys. Rev. D. 66, 103001 (2002)
3. C. Darwin, Proc. R. Soc. London A249, 180 (1959)

重宇 a2 N 体シミュレーションで探る弱重力レンズ効果に対するバリオンの影響

大里 健 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

遠方銀河からの光は、前景に銀河団などの重い天体が存在すると、地球に届くまでに軌道が湾曲する。この現象は一般相対論でも予言される重力レンズ効果である。以前より重力レンズ観測は直接観測することのできないダークマターやダークエネルギーの情報を引き出せる有力な手段であると示唆されてきた。(Hu & Tegmark 1999) 重力レンズ効果の信号自体は微弱で観測は困難であったが、近年の観測精度の向上と統計的手法の開発によって、宇宙論的な情報を引き出すことが可能になった。すばる望遠鏡に搭載される Hyper Suprime-Cam を初めとした将来観測が重力レンズ効果を利用した宇宙論の精密化を目指している。

本研究では上述の HSC 計画を念頭に置き、重力と比較して副次的な効果、特にバリオンが重力レンズにもたらす影響について議論する。以前からバリオンが重力レンズ効果に与える変化は議論されてきたものの (Yang et al. 2013)、先行研究では通常の NFW プロファイルに人為的な微調整を加えるに留まっている。そこで、我々はこのバリオンの効果を定量的に見積もるため、バリオンによる圧力を考慮した宇宙論的 N 体シミュレーションを行った。重力レンズ観測において得られる重要な物理量である convergence に関する統計量を調べ、既存の Halomodel の

拡張で対応できるか検討する。また、convergence は視線方向に投影した質量と強く相関している。N 体シミュレーションで得られたデータから convergence がピークとして現れる場所に実際にハローが存在するか (Hamana et al. 2004) を調べ、宇宙の物質が全てダークマターであった場合とバリオンが含まれている場合とで、ピークの統計性がどのように変化するか考察する。

1. Hu, W., and Tegmark, M., 1999, ApJL, 514, L65
2. Yang, X. et al., 2013, Phys. Rev. D, 87, 023511
3. Hamana, T. et al., 2004, MNRAS, 350, 893

重宇 a3 弱い重力レンズ効果の 3 点統計による宇宙論解析

橋本 一彦 (京都大学 基礎物理学研究所 M2)

弱い重力レンズ効果を用いた宇宙大規模構造の 3 点統計による宇宙論解析の手法とその利点について発表する。

銀河や銀河団の分布が示す構造である宇宙の大規模構造には、初期宇宙の物理や、宇宙の構成成分でできるパターンが含まれている。統計量からこのパターンを読み取れば、ダークマターやダークエネルギーの正体、一般相対論は正しいのか、といった宇宙の標準モデルが内包する謎に迫る手がかりとなる。また、すばる望遠鏡を用いた SuMIRe (Subaru Measurement of Image and Redshifts) プロジェクトなど、広視野サーベイの観測が進むことで、今後の大規模構造の宇宙論解析は、より豊富なデータで、より高精度な結果を得られるようになるだろう。

そのような状況のもとで、銀河の弱い重力レンズ効果は重要性を増していく。銀河の弱い重力レンズ効果とは、銀河から放出された光が観測者に届くまでに、その間の物質が作る重力場によって曲げられ、光源となる銀河の像が歪んで観測される現象である。弱い重力レンズ効果は、大規模構造の情報を読み取る上で、次の 3 つの利点がある。1. ダークマターなども含めた全質量に対して感度を持つこと。2. その幾何学的構造が宇宙膨張に対して感度を持つこと。3. 複数の赤方偏移で行った観測を組み合わせるトモグラフィという方法で、感度を向上できること。これらの利点を最大限活かすためには、将来観測による大規模なデータに加え、新たな解析手法を確立する必要がある。

弱い重力レンズ効果と、銀河の密度分布の 3 点統計は、弱い重力レンズ効果の持つ利点を活かしながら、従来の主流であった 2 点統計と独立な宇宙論的情報が得られる新しい手法として期待できる。この統計量を実際の観測データを用いた宇宙論解析に応用していくための理論計算や、期待される成果について説明する。

1. Jeong and Komatsu Phys. Rev. D80.123527(2009)
2. Yokoyama, Matsubara and Taruya Phys. Rev. D.89.043524(2014)

重宇 a4 WORMHOLE SOLUTIONS IN KGB FRAMEWORK

Rotondo Marcello (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M1)

In the so-called Kinetic Gravity Braiding (KGB) framework, the presence of interactions containing the second derivatives of the scalar field does not lead to additional degrees of freedom in the equations

of motion. The resulting mixing of scalar and tensor kinetic terms (kinetic braiding) results in the deviation of the scalar stress tensor from the perfect fluid form. We have tried to solve Einstein field equations for a wormhole-like solution, focusing on the simplest case of spherical symmetry and staticity. Both general and special solutions will be discussed.

1. C. Deffayet, O. Pujolas, I. Sawicki and A. Vikman, JCAP 1010, 026 (2010)

.....

重宇 a5 Cylindrical Thin-Shell Wormhole の安定性に 関する考察

矢久間 司 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M1)

ワームホールというのは或る時空と別の或る時空が切り替わる領域である。

時空中にあるワームホールに接近すると、最終的に別の時空に移ってしまう。

形状別に研究状況を眺めると、解析的容易さから球対称を前提にした研究がなされてきた。

一方で軸対称の研究はほとんどされていない。

しかし実際に起きている運動は、回転など特定の方向への対称性の破れを持つものがほとんどである。

ワームホールについても、アインシュタイン方程式の興味深い解の一つとして、より対称性の低いものを考慮した研究をする。

本発表ではワームホールの安定性について、半径方向の線形摂動を用いて議論する。

また著者らは今回取り上げる論文で、ワームホールを質量またはエネルギーが高密度で分布する超曲面であるとしている。

これをシェルという。

この軸対称の超曲面を境に時空が切り替わっている。

1. S. Habib Mazharimousavi, M. Halilsoy, Z. Amirabi ,arXiv:1403.2861 v1 [gr-qc] 12 Mar 2014
2. General Relativity ,Robert M.Wald ,The University of Chicago Press

.....

重宇 a6 高赤方偏移クェーサーが 21cm 線パワースペクトルに与える影響

前田 康太郎 (名古屋大学 C 研 M1)

宇宙はビッグバンから現在までの間に再結合と再電離という 2 回の相転移を経験してきたことが観測的事実として知られている。再結合期に関しては宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) などの観測により理解が進んでいるが、再電離期の詳細については観測的に確かめられるに至っておらず、多くの観測計画によって今後明らかになることが期待されている。

再電離期の情報を得る手段として、再電離期以前の宇宙に大量に存在した中性水素原子が持つ超微細構造のエネルギー準位間の遷移に伴って放出される 21cm 線の観測がある [1]。その 21cm 線観測の手法は主にふたつある。ひとつは、中性水素ガスから放射される 21cm 線と CMB の強度差である輝度温度の観測。もうひとつは、クェーサーなどの電波

で明るい高赤方偏移天体からの放射光が中性水素ガスを通る際に現れる吸収線 (21cm forest) の観測である。

21cm forest の観測は高赤方偏移にある強い電波源の分布に大きく依存している。理論的には、赤方偏移 $z \sim 10$ 以前で 900 平方度に数百個程度存在することが示唆されているが、これらの電波源の観測には次世代観測機器で 1 年もの期間を要すると推定されるため、電波源分布に関する過去の研究では赤方偏移 $z \sim 4$ 以下までしか観測的制限が得られていない [2]。そのため、高赤方偏移天体を効率よく観測するためには、より多くの高赤方偏移天体が存在するであろう領域を特定することが望まれる。

今回の発表では、高赤方偏移天体分布が輝度温度のパワースペクトルに与える影響を準解析的・数値的に考察し、直近の観測計画によって高赤方偏移天体分布を探った論文 [3] をレビューする。

1. J. Pritchard & A. Loeb (2012) arXiv 1109.6012
2. De Zotti et al (2010) The Astronomy and Astrophysics Review, 18, 1
3. A. Ewall-Wice et al (2013) arXiv 1310.7936

.....

重宇 a7 21cmFAST:再電離期の準数値シミュレーション

吉浦 伸太郎 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

インフレーションに始まる宇宙の劇的な誕生ののち、宇宙のほとんどが中性水素で満たされた暗黒時代が訪れる。その時代ダークマターやバリオンが重力によってハローを形成する。やがてハローは輝く天体となって、電磁波を放射する。放射された電磁波は周囲に残る中性水素をイオン化する。これが宇宙の再イオン化であり、この時代を再電離期と言う。この時代を探るものとして最も有効だと考えられているものが、中性水素の超微細構造線である 21cm 線である。21cm 線を通してこの時代の情報は輝度温度にまとまる。輝度温度に含まれる情報には、密度場や中性度、スピン温度などがある。観測から輝度温度を通してそれらの情報を得る。そこから統計量であるパワースペクトルを扱うことで、この時代の様子を探ることができる。ただし、この時代の物理は複雑であり、シミュレーションで扱うためにはかなりの時間と労力が必要である。そこで、いくつかの近似を用いて比較的簡単にこの時代の様子を再現することのできる 21cmFAST が開発された。今回は 21cmFAST についての概要と得ることのできる結果について見る。

1. A.Mesinger ,S.Furlanetto,R.Cen.2011MNRAS,411,1403

.....

重宇 a8 真空の量子揺らぎと相互作用する粒子のランダム運動における熱的性質

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

Unruh 効果とは Minkowski 真空中を加速度運動する観測者は熱的励起を観測するという効果で、曲がった時空での場の量子論から予言される効果であり [1]、Hawking 放射と根深い関係がある。しかしこの Unruh 効果は未だ実験的には観測されていない。この Unruh 効果を検証するために Chen Tajima によって考案された方法が知られている [2]。加速した荷電粒子は Unruh 効果由来の量子場の熱的励起を感じて平衡状態

に達するとその荷電粒子は放射 (Unruh 放射) を出すと考えられるのでこれを観測するというのが彼らの主張である。しかし、その放射がどのような性質を持つかまで知るには励起した真空の量子場と相互作用する荷電粒子がどのように平衡状態を迎えるのかを知る必要がある。

先行研究 [3] によれば、この荷電粒子は加速する方向と垂直な向きにはエネルギー等分配則が成り立つことが荷電粒子の速度分散の期待値の近似計算 (速度分散の計算の際に量子場のノイズを近似的にホワイトノイズとして扱う) から分かっている。しかし、速度分散の加速方向の成分の期待値に対する計算には先行研究で用いられていた近似が適用できず、結局加速度運動する荷電粒子の量子揺らぎによるブラウン運動の様子は明らかになっていないのである。これが明らかになれば真空中を加速度運動する荷電粒子からの量子的放射 (Unruh 放射) がどのくらいの強度で現れるかということに対して理論的予言を与えることも可能になる。

本研究の目的はこの先行研究での問題点に取り組み、真空の量子場のゆらぎと相互作用した荷電粒子のブラウン運動の様子を完全に明らかにすることである。私は先行研究において行われた速度分散の計算は実は近似計算を用いなくても厳密に実行できることを明らかにした。その結果、真空の量子場と相互作用して加速度運動する荷電粒子は進行方向に垂直な成分には励起した量子場からエネルギーが等分配され、進行方向には全くエネルギーが分配されないという描像が見えてきた。

1. W. G. Unruh, Phys. Rev. D 14 (1976) 870
2. P. Chen and T. Tajima, Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 256.
3. S. Iso, Y. Yamamoto, and S. Zhang, PRD 84, 025005 (2011)

重宇 a9 Unruh de Witt detector を用いた量子場の解析

久木田 真吾 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D1) Hawking[1] を端緒とする重力理論と熱力学、また量子論との関連についての研究は今多様な形で花開いている。その中でもとりわけ、量子情報の分野からの重力に対するアプローチが現在、だんだんとはやってきている。それらの研究はいずれも非常に抽象的で、理解が難しい。そこで本研究では、より直感的な立場から量子情報の分野と重力をつなぐ足がかりとして、簡単な量子系 (典型的には 2 level system) を時空上の量子場などと相互作用させることで解析を行う Unruh de Witt detector の手法を用いてアプローチを行った。

このような 2 level system を用いるモデルに対して従来から知られている計算手法は通常の摂動計算、およびマスター方程式 [2] によるものがあるが、その関係性についてはあまり議論されておらず、明白でない。これに対し、最近提案された時間粗視化近似の上でのマスター方程式 [3] がある種の特異摂動計算であることを示し、通常の摂動計算との対応を明らかにした。また、その近似によって得られる長時間のダイナミクスは従来の計算手法の元での近似からは素朴には予想できない形をしていたので、その結果について報告する。

更に、現在このような簡単な量子系を用いた解析を量子宇宙論に適用するという試みも行っているので、もし面白い結果が出たならばこれについても発表する予定である。

1. S. W. Hawking Phys. Rev. Lett. 26, 1344
2. F. Benatti, R. Floreanini Phys. Rev. A 70, 012112
3. G. Schaller, T. Brandes Phys. Rev. A.78.022106

重宇 a10

寺前 柊斗 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M1)

重力場中の粒子は、重力場が十分弱く、粒子がゆっくり運動している場合、電磁場の下で運動する荷電粒子とよく似た運動方程式に従う。そのような効果をもたらす重力場のことを、gravitomagnetic field と呼ぶ。一般相対論に基づく、gravitomagnetic field による粒子への影響は、gravity probe B の実験などで実際に確認されている。一方でニュートンの重力場の下での量子系に関しても、原子干渉計に挙げられるように、多くの研究がなされている。ところが、量子系に gravitomagnetic field の及ぼす効果についてはあまり研究されていない。将来実験精度が向上されれば、そのような効果を観測する可能性があり、基礎理論の構築が必要である。本発表では Ronald J. Adler と Pisin Chen の論文 Gravitomagnetism in Quantum Mechanics を review し、gravitomagnetic field と電磁場が存在する系における量子力学的粒子の運動を取り扱う。

1. Ronald J. Adler & Pisin Chen, Gravitomagnetism in Quantum Mechanics arXiv:0912.2814v2[gr-qc] 19 May 2010

重宇 a11 Thawing 模型の観測からの制限

田中 淳一郎 (東京理科大学 辻川研究室 M1) 1998 年の Ia 型超新星の観測データにより、現在の宇宙は加速膨張していることが示された。現在の宇宙全体のエネルギーの 70% 程度を占め、加速膨張を引き起こす未知のエネルギーは暗黒エネルギーと呼ばれている。超新星の観測以外にも、宇宙年齢、宇宙背景輻射、バリオン音響振動、大規模構造から暗黒エネルギーの存在が支持されている。暗黒エネルギーの起源として様々な模型が考えられているが、そのうちの 1 つとして、クインテッセンスと呼ばれるスカラー場を考えるものがある。その中でも、場が最初はほとんど静止しているが、やがて動き出し、 w_{DE} が増加していくようなものを Thawing 模型と呼ぶ。Thawing 模型の w_{DE} は 3 つのパラメータを用いて表される [2] [3]。

本発表では、観測データから Thawing 模型に制限を付けた [1] についてのレビューを行う。Thawing 模型に観測からの制限は、3 つのパラメータを変えたときに、SNIa、CMB、BAO のデータに基づく統合解析による χ^2 を最小化する統計解析を行うことで付けられる。現状では、Thawing 模型が Λ CDM 模型よりも特に好まれるという統計的証拠は見つかっていない。しかし、Thawing 模型の w_{DE} の変化を観測から精度良く制限することによって、 Λ CDM 模型との区別が将来的に可能になると期待されている。

1. T. Chiba, A. De Felice and S. Tsujikawa, Phys. Rev. D 87, 083505 (2013).
2. T. Chiba, Phys. Rev. D 79, 083517 (2009).
3. S. Dutta and R. J. Scherrer, Phys. Rev. D 78, 123523 (2008).

重宇 a12 ミリメートル距離での重力の逆二乗則検証

桑原 祐也 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻 安東研究室 M1)

4つの基本的な相互作用の中で重力相互作用の大きさは他の3つと比べて非常に小さい。WS理論によって電磁相互作用と弱い相互作用の統合されるエネルギースケールが1 TeVに対して、超弦理論によって重力相互作用も統合されるスケールは 10^{16} TeVと桁違いに大きく、相互作用の階層問題と呼ばれている。その弱さの起源として4次元時空以外の余剰次元へ重力が逃げている可能性が指摘されており、そうであれば次元の数に対応して重力法則は逆二乗則からずれることになる。ただし超弦理論ではコンパクト化という概念があり、余剰次元はこのコンパクト化のスケールに以下に閉じ込められてしまっている。中にはミリメートル領域にコンパクト化のスケールがあるとする理論もあり、この領域において重力の逆二乗則を検証することによりコンパクト化のスケールに制限をつけることができる。

重力の逆二乗則を検証するのにねじれ振り子を用いる。アトラクタと呼ばれるソースマスを回転させることによって変調重力場を発生させ、それがねじれ振り子を励起する振動の大きさを測定する。この方法は他のグループでもしばしば用いられているが、今回私たちは逆二乗則が正しいならば信号がゼロとなるようなアトラクタを考案した。このような方法はヌル測定と呼ばれ、系統誤差が効きにくい点で有利である。

本講演では逆二乗則検証の導入から現在の進行状況までを報告する。

1. E.G. Adelberger, B.R. Heckel, and A.E. Nelson, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 53, 77 (2003)
2. C.D. Hoyle et al, *Phys. Rev. D* 70, 042004 (2004)
3. K. Shibata, *Andolab Master thesis* (2012)

重宇 a13 反ドジッター時空における非線形ダイナミクスと AdS/CFT 対応

星野 悠一郎 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)
AdS/CFT 対応とは、1997年に Maldacena が4次元の $\mathcal{N} = 4$ $SU(N_c)$ Super Yang-Mills 理論と $AdS_5 \times S^5$ 上の Type IIB 超重力理論が等価であることを主張したものである [1]。この対応関係を用いれば、 $N_c \rightarrow \infty$ の下で CFT (conformal field theory) 側での強結合領域の物理を重力側で反ドジッターに漸近する時空での古典論で解析することが可能となる。その応用範囲は物性物理、流体力学、非平衡系に至るまで様々であるが、ここでは非線形物理学において重要な概念の一つであるカオスを伴う系に着目する。

5次元の Kerr AdS BH において、この時空の対称性を用いて閉弦の埋め込みを考えると、系はある軌道空間上の測地線方程式に帰着され、特別なパラメータを選ぶことでこの系は可積分となるが知られている [2]。

本発表では、別のパラメータの選択においては一般にカオスが現れると予想されるので、ポアンカレ断面や Lyapunov 指数を求め、この系の特徴について述べたい。さらに、CFT 側での解釈についても議論したい。

1. J. M. Maldacena, *Adv. Theor. Math. Phys.* 2, 1998.
2. T. Igata and H. Ishihara, *Phys. Rev. D* 81 044024, 2010.

重宇 a14 Chern-Simons 重力理論における相対論的 Sagnac 効果

菊池 大貴 (弘前大学 浅田研究室 M1)

Einstein の一般相対性理論を修正する重力理論の一つとして、Chern-Simons (CS) 重力理論がある。この修正理論は超弦理論から示唆されるもので、Einstein-Hilbert 作用に補正項を加えることでパリティの破れを考慮している。

CS 理論のパラメータは、Okawara らによって、CS 重力における量子干渉効果から制限を与えられる可能性が示唆されている [1]。彼らは、中性子干渉計による地上実験を想定し、Alexander と Yunes によって提案された理論モデル (AY モデル) [2] を用いて計算している。なお、AY モデルでは重力源である回転天体を質点と見なしている。

本研究は彼らの研究を発展させたものである。改良点の1つとしては、カリフォルニア工科大の Smith らによって提案された、より一般的化された理論モデル [3] を用いたことである。このモデルでは、重力源を質点ではなく広がりを持ったものと考え、天体の内部と外部の重力場の両方が考慮されているため、地球重力場を記述するのにより適切である。また、中心天体の動径方向に沿って補正重力ポテンシャルが振動的であるという点で、AY モデルとは大きく異なっている。2つ目の改良点として、光を用いた Sagnac 干渉計を考えた。光干渉計のメリットは、原子炉を必要とする中性子干渉計と比較して、様々な観測地に設置できることである。

本研究では、Smith らのモデルにおいて、干渉計を置く緯度、干渉計が向く方位角、そして高度に対する依存性を調べた。

1. H. Okawara, K. Yamada, and H. Asada, *Phys. Rev. Lett.* 109, 231101 (2012)
2. S. Alexander and N. Yunes, *Phys. Rev. D* 75, 124022 (2007)
3. T. L. Smith et al, *Phys. Rev. D* 77, 024015 (2008)

重宇 a15 非最小結合するアインシュタイン・マックスウェル理論の安定性解析

森 友紀 (名古屋大学 C 研 M1)

現在の宇宙は加速膨張しているということが、近年の観測から示されている。アインシュタイン重力では加速膨張を説明できなかったが、新たにダークエネルギーを導入することで説明した。一方で、重力理論そのものを書き換えることで加速膨張を説明する修正重力理論も提唱されている。現在では様々な修正重力のモデルが存在している。これらの修正重力理論が物理的に可能であるためには、タキオンやゴースト場が存在してはならない。その有無を判断するためには、場の摂動に対して安定性解析を行う必要がある。

[1] の論文では、高次元の重力理論から導かれる Horndeski vector-tensor 理論において、de Sitter 時空や Schwarzschild 時空などを背景として、ベクトル場のゴースト不安定性等を議論している。この理論の特徴は、ベクトル場と重力が結合しているという点である。この結合があるため、ゴースト場等が存在する不安定なパラメータ領域がある。本発表では、まず [1] の論文をレビューし、さらに [1] の拡張として、より一般のベクトル重力結合を考えこの理論の安定性解析を行ったので、この結果について議論する。

1. Jose Beltran Jimenez et al. *JCAP* 1310. (2013) 064

重宇 a16 Astrophysical black holes in screened modified gravity

小川 潤 (立教大学 M1)

ダークエネルギーの源を説明するために、修正重力理論が盛んに研究されている。そのなかでも特に初期段階から研究されている理論が、スカラー場と物質とが non-minimal coupling するスカラー・テンソル理論である。しかし、スカラー場がダークエネルギーの源とすると、スカラー場の質量がハッブル定数 $H_0 \sim 10^{-33} \text{eV}$ と、大変小さくなる。さらに、物質とスカラー場が結合し第 5 の力が空間を伝播するので観測と合致しない。

このような観測との不整合を修正する理論が、物質の密度によってスカラー場の寄与が「隠される」という Screened modified gravity である。この理論では、地球のような高密度領域においてスカラー場の寄与が実効的に減衰することで、観測との整合性を保っている。一方では、宇宙のような超低密度領域ではスカラー場の寄与が隠されず、これがダークエネルギーのように振る舞う。

本発表では、Screened modified gravity におけるパラメータの制限をするために、球対称ブラックホールを用いる。Screened modified gravity の代表的な例である Chameleon, Dilation と Symmetron 機構における、ブラックホール近傍の非一様な物質分布によるスカラープロファイルを求める。スカラープロファイルは、数値解析によって詳細な振る舞いを解析する。これを求めることによって、それぞれの機構の区別をより詳細につけることができる。この結果は、ブラックホール近傍から放出される重力波によって観測的制限を付けることができる。修正重力理論の強重力場におけるパラメータの制限については、ほとんどが未開拓のためこれを求めることは大変意義深い。

1. J. Khoury, A. Weltman, Phys. Rev. D, 69, 044026,(2004)
2. A. -C. Davis, R. Gregory, R. Jha, J. Muir, astro-ph/1402.4737

重宇 a17 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赤方偏移空間でのパワースペクトル

宅 嶋 祐一郎 (広島大学 宇宙物理学研究室 D1)

様々な観測から現在の宇宙は加速膨張していることが示唆されている。この加速膨張を説明する理論として、一般相対性理論に宇宙項を加えた宇宙項模型が標準模型として考えられており、これは観測をよく再現している。

宇宙項模型以外の加速膨張を説明する理論として、一般相対論を修正した修正重力理論が研究されている。本研究ではその中でも最も一般的なスカラーテンソル理論に着目した。この理論はスカラー場を 1 つ導入し、運動方程式が 2 階の微分方程式になるという条件の下で、最も一般的な理論である。また Vainshtein 機構が働きうるため、局所スケールでは一般相対論に帰着できる。この理論の作用はスカラー場とその運動項に関する 4 つの任意関数を含むため、これらの関数を適当な形に選ぶことによって、様々な修正重力理論を再現することが出来る。すなわち最も一般的なスカラーテンソル理論を調べることで多くの修正重力理論の一般的な性質を知ることが出来る。

本研究ではこの理論における宇宙論的密度揺らぎについて調べた。宇

宙論的密度揺らぎとは宇宙の平均密度からのずれとして定義され、大規模構造を特徴付ける物理量の一つである。標準摂動理論の手法を用いて密度揺らぎの 3 次までの解を求め、さらにこの解を用いて計算できる密度-密度、密度-速度、速度-速度パワースペクトルを導出した。

本発表では標準摂動理論を用いた宇宙論的密度揺らぎとパワースペクトル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)
3. Yuichiro Takushima et al. Phys. Rev. D89 104007 (2014)

重宇 a18 銀河団の多波長観測を用いた一般化されたガリレオン重力模型の制限

照喜名 歩 (広島大学 宇宙物理学研究室 D2)

現在の宇宙の加速膨張を解明するため、一般相対論を宇宙論的な長距離スケールで修正する修正重力理論がよく研究されている。一般に重力理論の修正は新たな自由度 (スカラー場) を生み出し、それにより重力ポテンシャルは変更を受けて一般相対論とのズレが生じる。ガリレオン重力模型は太陽系のような局所スケールでヴァインシュタイン機構によりスカラー場が隠され、一般相対論が回復する模型である。ここではガリレオン模型を一般化したモデルについて考察する。一般化されたガリレオン重力模型は銀河団外縁部でヴァインシュタイン機構が十分には働かず、一般相対論が回復しない可能性がある。このとき、銀河団中のガス分布は重力ポテンシャルの修正により変更され [1]、さらに、重力場中の光の軌道も修正されるために重力レンズシアー分布も変更を受ける [2]。両者の変更は独立なモデルパラメータの依存性を含んでいる。本講演ではかみのけ座銀河団の X 線温度・表面輝度、SZ 効果、重力レンズ効果の観測と理論模型を比較し、多波長観測を組み合わせることで得られるモデルパラメータの制限について議論する。

1. A. Terukina et al., JCAP 04 (2014) 013
2. T. Narikawa and K. Yamamoto, JCAP 05 (2012) 016

重宇 a19 Gravitational Baryogenesis によるバリオン数生成問題への取り組み

福島 光博 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

本講演では H.Davoudiasl et al. によって提案された重力的効果によるバリオン数生成機構のアイデア [1] を紹介し、観測量との比較やグラビティノー問題からの制限等を通じてこのモデルの可能性について発表する。バリオン数生成問題は初期宇宙の未解決問題の一つであり、様々なモデルの検証が行われている現状である。一般的なバリオン数生成機構は Sakharov が指摘したように熱平衡状態からの離脱を必要とするが、宇宙膨張のダイナミカルな効果による実効的な CPT 対称性の破れを考慮することで熱平衡中でのバリオン数生成の可能性が示されている [2]。この中でも超重力理論を背景とした相互作用 (バリオン数カレント J^μ と Ricci スカラー曲率の微分 $\partial_\mu R$ 間の相互作用) を考慮したモデルから予想されるバリオン数非対称の大きさを議論する。本モデルでは熱平衡中におけるバリオン数破れの反応を必要とするが、この反応の脱結合時刻における温度 T 及び曲率の時間微分 \dot{R} の値によって生成されるバリオン/エントロピー比が決定される。宇宙の支配的物質によって各時期

を分類し上記のバリオン数破れの反応の脱結合時刻と比較することで、得られるバリオン非対称性の大きさを議論する。

1. H.Davoudiasl, R.Kiyano, G.D.Kribs, H.Murayama and P.J.Steinhardt, Phys. Rev. Lett. **93**, 201301 (2004).
2. A.G.Cohen and D.B.Kaplan, Nucl. Phys. **B 308** 913 (1988).

.....

重宇 a20 超弦理論に基づくインフレーションとゲージ場

渡邊 健人 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)
 宇宙が一様かつ等方で、物理法則がどこでも同じであるとする自然な仮定による Big Bang 宇宙論は、Hubble の法則、CMB、宇宙初期の軽元素合成といった観測事実をよく説明するが、地平線問題や平坦性問題といった理論上の困難を抱えている。それを解決する理論として提唱されているインフレーション理論は、平坦なポテンシャルを持つスカラー場 (インフラトン) がポテンシャルの坂をゆっくりと転がることで加速膨張を十分持続させ、上記の困難を解決するというものであり、観測的にも支持される初期宇宙の標準モデルになっている。また、ポテンシャルの坂を下りた後は Big Bang 宇宙の初期状態につなげるために再加熱も必要である。これまで多くのインフレーションモデルが提唱され、近年の観測からそれらのモデルに対する制限が与えられつつあるが、素粒子基礎理論から導かれる自然なモデルはまだ存在しない。素粒子基礎理論の候補として提唱されている超弦理論や M 理論が基礎理論として正しいのであれば、その理論の下で自然なインフレーションモデルが存在すると予想されるが、超弦理論の低エネルギー有効理論である超重力理論において、ある仮定のもと宇宙の加速膨張が実現できないという禁止定理がある。[1] これを回避する方法として内部空間にブレインを導入するモデルなどが考えられている。[2] また、素粒子基礎理論にはスカラー場とゲージ場が含まれ、ゲージ場がインフラトンと結合する場合にはインフラトンの運動に影響が出る。ポテンシャルの傾きが急であっても、それを平坦にするような項を加えられればスローロール条件を満たすことができ、インフレーションを起こりやすくなる。[3] 本発表では、KKLMMT モデルにスカラー場とゲージ場が結合した項が付加された場合にスカラー場の運動がどう変わるかについて議論する。その結果、インフレーションが起りやすくなり、KKLMMT モデルの初期値の微調整の問題を解決できる。

1. J. Maldacena and C. Nunez, Int. J. Mod. Phys. A **16**, 822 (2001)
2. S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde, J.M. Maldacena, L. McAllister, and S.P. Trivedi, J. Cosmol. Astropart. Phys. **10** (2003) 013
3. K. Maeda, K. Yamamoto, Phys. Rev. D **87**, 023528 (2013)

.....

重宇 a21 SUSY によるハイブリッドインフレーションモデルを用いた BICEP2 の観測結果の解析

打田 晴輝 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)
 本発表では論文 [1] のレビューを行う。テンソルゆらぎと密度ゆらぎのパワースペクトルの比であるテンソル・スカラー比 r_T はインフレーション理論に対して大きな制限を与える。Planck での観測結果では $r_T < 0.11$ であったのに対し、BICEP2 では $r_T \sim 0.2$ であった。これは BICEP2 の観測したスケールではテンソルゆらぎが非常に大きく、ま

た Planck での観測結果と整合するためには r_T のスケール依存性 (ランニング) α_s が負の大きな値を持つ必要があることを示している。

従来の単スカラー場によるモデルでは e-fold Number $N \sim 50$ の元でこの結果を再現するためにはインフレーション中は場が超プランクスケールのエネルギーを持っていなくてはならない。(laege field model)

しかし 2 回インフレーションが発生したモデル (double inflation scenario) を考え、さらに一回目のインフレーションを超対称性理論 (SUSY) から予言される複数スカラー場による短いハイブリッドインフレーションを考えることでこの問題は解決される。つまり最初にハイブリッドインフレーションが発生し強いテンソルゆらぎが作られ、しかしすぐに ($N \sim 10$) インフレーションが終了することでその強さは保たれる。次に二回目のインフレーションが発生して古典ビッグバン理論での地平線、平坦性問題が解決されるまで膨張したと考える。

ここでは一回目のインフレーションに焦点を当て、超対称性の崩壊から r_T 及び n_s が様々な N に対しどのような値を取るかを考察し、ある N のもとではプランクスケールでのインフレーションであっても BICEP2 と Planck との観測結果の整合性が取れることを見る。

1. K.Tatsuo and S.Osamu. 2014.arXiv:1404.3102 [hep-ph]
2. 佐藤勝彦、二間瀬敏史 (2008) 『宇宙論 1-宇宙の始まり』(シリーズ <現代の天文学> 2) 日本評論社
3. Andrew,R,L and David,H,L.(2000).*Cosmological inflation and large-scale structure*.University Press.

.....

重宇 a22 Wiggly Whipped Inflation

森 太朗 (総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究所 M1)

インフレーション理論とは地平線問題や平坦性問題などを解決するために、極めて初期の宇宙が急速な加速膨張をしたと仮定する理論である。この理論により従来の膨張宇宙論の問題点は解決されるが、現在ではインフレーションを起こすための具体的なモデルが数多く提唱され、どのモデルが現在の宇宙論そして観測に最も整合的であるのかは、はっきりとした決着がついていない。

今回の発表では、Dhiraj Kumar Hazra らによって提唱された Wiggly Whipepd Inflation と呼ばれる、インフレーション中にある種の転移が生じるようなモデルを紹介する。このモデルではインフレーションが大統一理論のエネルギースケールで起こり、その理論の対称性の破れに起因する転移を起こすようなポテンシャルを仮定する。具体的には最初は比較的大きな勾配 (faster-roll) で始まり、その後小さな勾配 (slow-roll) へと転移するようなポテンシャルを考えていく。

Planck や WMAP による観測から、CMB の温度揺らぎは、大角度において単純なインフレーションモデルで予言される初期曲率揺らぎからの寄与との間にわずかにズレがあると示唆されているが、このモデルではそのズレを自然に説明できる可能性がある。さらに最近の BICEP2 によって観測されたと言われる比較的大きなインフレーション起源の重力波がある場合にも、観測と整合的な予言をすることができる。またこのモデルは、初期曲率揺らぎのパワースペクトルに振動するような特徴的な波数依存性を生じさせ、この特徴は将来的に銀河の大規模構造の観測によって測定できると期待される。

今回の発表では、Dhiraj Kumar Hazra らの論文 “Wiggly Whipped Inflation” (arXiv:1405.2012) の概要の紹介、及び観測結果との比較や将来の観測による制限の可能性についても触れたいと思う。

1. Dhiraj Kumar Hazra, et al. “Wiggly Whipped inflation”; arXiv:1405.2012
2. Dhiraj Kumar Hazra, et al. “Whipped inflation”; arXiv:1404.0360

重宇 a23 PLANCK と BICEP2 の観測結果による single field inflation モデルへの制限

大石 直矢 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

今年南極のアムンゼン-スコット基地にある望遠鏡 BICEP2 (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) で宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を観測してきた研究チームが CMB の偏光を解析した結果、インフレーション由来の原始重力波が時空を歪めることにより生じるとされる B モードのパワースペクトルが発見された。そしてその観測によると、B モードのパワースペクトルは 1σ のレベルで $r = 0.20^{+0.07}_{-0.05}$ のテンソル・スカラー比を与え、さらに $r = 0$ は 7σ のレベルで棄却されることが分かった。これは原始重力波の存在を強く支持する結果を示している。これらの結果を受けて、今回の発表では、主に [1] の論文を参考にして、chaotic inflation、natural inflation の 2 つの single field inflation モデルについて slow-roll 近似を用いて、テンソルスカラー比とランニングを理論計算し、PLANCK と BICEP2 の観測結果からそれぞれどのような制限を受けるのかを考察する。また観測結果によるとテンソル・スカラー比とランニングは大きいので、single field inflation モデルを考えるにあたって課題を与える。そのことについても考察する。

1. Qing Gao and Yungui Gong (2014) arXiv:1403.5716v2[gr-qc]
2. Kazumori Kohri, C.S.Lim, and Chia-Min Lin (2014) arXiv:1405.0772v1[hep-ph]

重宇 a24 インフレーション理論を検証する POLARBEAR-2 実験

瀬川 優子 (総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究所 M1)

POLARBEAR-2 はインフレーション理論の精密検証を目的とした実験である。宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) を高精度で測定し、インフレーション重力波から発生する B モードと呼ばれる CMB 偏光パターンを見つけようとする地上実験である。観測装置は標高 5200m のチリ・アタカマ高原に設置する。POLARBEAR-2 では、7588 個の TES (transition edge sensor) ボロメータを搭載し統計感度を向上させるとともに、95GHz、150GHz の同時計測により背景放射に強い観測を実現する。これらは世界随一の挑戦であり、加えて、大型の光学系を冷却することにより熱的ノイズを抑制するという特徴も備えている。CMB の精密測定では、赤外線からの輻射を抑えることが重要である。7588 個の TES を配置するためには大きな窓を設計しなければならないが、窓が大きくなればなるほど窓からの

輻射は大きくなる。POLARBEAR-2 実験開始に向けて、現在我々は、特に影響の大きい 300K 層からの輻射を抑制するという課題に取り組んでいる。目標温度まで下げるためには現状より赤外輻射を低減する必要がある。そのために新しい方式の赤外輻射フィルターを導入し、冷却性能と光学性能を評価した。本講演では POLARBEAR-2 実験の概要と、300K 層の熱設計と光学性能について報告する。

1. P.A.R. Ade et al. (POLARBEAR Collaboration) PhysRevLett.112.131302 (2014)
2. Yuki Inoue et al. Appl. Opt. 53, 1727-1733 (2014)
3. Takayuki Tomaru et al. Proc. SPIE 8452, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI, 84521H (2012)

重宇 a25 インフレーション宇宙における原始磁場形成

林中 貴宏 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター M2)

ボイド領域に存在する大スケール磁場の起源は、これから解明されるべき課題の一つである。本公演では、インフレーション中における磁場形成を議論する。特に、強い電場による Schwinger 効果が磁場形成論で果たす役割を調べた。

1. A. Neronov, I. Vovk, Science, 328, 73 (2010)
2. J. Schwinger, Phys. Rev. 82, 664 (1951)
3. J. Martin, J. Yokoyama, JCAP 01 025 (2008)

重宇 a26 Generalized Galilean Genesis

西 咲音 (立教大学 M2)

初期宇宙では一般的にはインフレーションが起きていたと考えられているが、現在様々なインフレーションの代替モデルが考えられている。その一つに Galilean Genesis というモデルがあり、このモデルは Horndeski 理論から与えられるものである。Horndeski 理論は単一スカラー場で記述されるスカラーテンソル理論を一般化したものであるため、今までモデルにより個別に行われてきた研究を包括的に行うことができるという特徴がある。Genesis モデルのシナリオでは、ミンコフスキー時空から始まる宇宙膨張が放射優勢期へとつながるため、宇宙のはじまりに特異点が存在しない。このモデルでは、Null Energy Condition を安定のまま破ることが知られている。本研究ではこの Genesis モデルの一般化を行い、インフレーションで解決される平坦性問題などの諸問題が Genesis モデルにおいても同等に解決されるかどうかを調べた。さらに、この時期に生じる一次ゆらぎについての振る舞いを調べた。

1. P. Creminelli, A. Nicolis and E. Trincherini, JCAP 1011, 021 (2010) [arXiv:1007.0027 [hep-th]]
2. G. W. Horndeski, Int. J. Theor. Phys. 10 (1974) 363-384.

重宇 a27 **ストカスティック- δN 形式による曲率ゆらぎへの非摂動的アプローチ**

多田 祐一郎 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 D1)
我々は前回の論文 (JCAP 1312,036(2013)) で、ストカスティック形式でインフレーション中に作られる曲率ゆらぎのパワースペクトルを計算する手法を提唱した。この手法はスーパーホライズンスケールでインフラトン場についての摂動展開を必要としないので、例えば曲率ゆらぎが非常に大きかったり、非ガウス性が無視できなかつたりする場合などにも適用可能だ。今回我々はこの手法をカオティックインフレーションとハイブリッドインフレーションに適用した。特にハイブリッドインフレーションでは、臨界点付近でポテンシャルが非常に平らで標準的な摂動計算がうまく行かないが、我々は曲率ゆらぎを計算するのに成功した。

1. T. Fujita, M. Kawasaki and Y. Tada, arXiv:1405.2187 [astro-ph.CO]
2. T. Fujita, M. Kawasaki, Y. Tada and T. Takesako, JCAP 1312, 036 (2013)

重宇 a28 **講演キャンセル**

重宇 a29 **原始重力波と B-mode 偏光の生成**

大場 淳平 (名古屋大学 C 研 M1)

ビッグバンモデルは数多くの観測との一致により標準宇宙モデルとして広く受け入れられているが、同時にいくつかの宇宙論的問題を生み出す。その解決案の 1 つとして、宇宙初期に加速的な膨張が起こったとされるインフレーション理論が提唱されている。インフレーション理論は現在までに様々な観測的証拠が見つかっており、強く支持されている。さらなる観測的証拠を得るためにも、インフレーション理論の重要な帰結として生成される原始重力波の検出が強く待ち望まれている。重力波は CMB の B-mode 偏光として痕跡を残すため、世界的に CMB の B-mode 偏光の観測が精力的に進められている。

このような状況の中、2014 年 3 月に BICEP2 により CMB の B-mode 偏光が観測されたと発表され、インフレーション理論の強い証拠として注目された。しかし、観測された B-mode が重力波由来であるとする、その結果から予想される温度揺らぎの値はこれまで行われてきた観測の結果に矛盾する。

今回の発表では、並進対称性という宇宙原理を見直すことにより重力波が B-mode のみを生成し、温度揺らぎを作り出さないことを示した論文 [1] をレビューする。論文 [1] では並進対称性を破った場合に B-mode のみが生成される機構を導入することで、これまで観測されてきた温度揺らぎの値を変更することなく、今回の BICEP2 の観測結果を説明することについて議論している。この論文は現在の宇宙論の根本原理である宇宙原理を破ることで観測結果を説明する非常に野心的な研究である。

1. M. Kamionkowski, L. Dai and D. Jeong, (2014); arXiv:1404.3730
2. L. Dai, M. Kamionkowski and D. Jeong, Phys. Rev. D 86, 125013 (2012)

重宇 a30 **重力波検出器が量子重力を明らかにする!?**

小森 健太郎 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻 安東研究室 M1)

重力波とは、一般相対論から予言される時空の変動が光速で伝播することである。1974 年、ハルスとテイラーにより連星中性子星が発見され、その公転周期の変化が重力波によって放出されるエネルギーから計算される値と一致していることから、重力波の存在は揺るぎないものとなっている。また、今年の 3 月には BICEP2 による原始重力波の存在証明というビッグニュースがあった。銀河系内ダストの影響を考慮していないという指摘がありプランク等による追試が待たれるところではあるが、重力波という分野は大きな盛り上がりを見せており、アメリカ、日本、ヨーロッパでの次世代重力波検出器による直接観測も目前に迫ってきた。

さて、実は宇宙で最も激しい現象 (インフレーション、コンパクト連星合体、超新星爆発) を捕まえようとする重力波検出器の開発に伴って発達してきた技術を用いることで、量子の世界の根本を明らかにできるかもしれないという話がある。

重力波検出器の開発とは、重力波振幅の微小さゆえに極限的な感度を追い求めることと等価であり、古典な究極の壁である熱雑音を超えた先には量子雑音が残っている。この量子雑音、検出器にとってみれば beat すべき雑音なのだが、ミラーが量子雑音に制限されるということは、レーザー光の量子性がダイレクトに巨視的な物体に焼かれているということであり、巨視的量子状態の実現が可能となる。本発表では、いかにして巨視的量子現象が達成されるか、さらにはその先にある、巨視的エンタングルの生成、重力デコヒーレンスの観測等について発表する。

1. N Matsumoto et al 'Classical Pendulum Feels Quantum Back-Action' arXiv:1312.5031
2. Helge Mller-Ebhardt et al 'Entanglement of Macroscopic Test Masses and the Standard Quantum Limit in Laser Interferometry' Phys. Rev. Lett. 100, 013601 (2008)

重宇 a31 **クラスタリング解析で探る初期銀河形成**

播金 優一 (東京大学宇宙線研究所 M1)

銀河のダークハロー質量を観測的に明らかにすることは、銀河の形成や進化を解明する上で重要である。直接観測できないダークハローの質量を測定することは一般に困難であるが、銀河のクラスタリング解析によって推定できる。これは銀河のクラスタリング強度を構造形成モデルの予言と比較することでダークマター質量を推定するという方法であり、これまでに近傍だけでなく、赤方偏移 z が 3 を超えるような遠方の銀河に対してもこの方法でダークハロー質量が見積もられてきた。しかし $z > 5$ については、統計数が足りないためにダークハロー質量を精度よく求めることは出来ていない。

我々は現在、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) によって新しく取られた撮像データの解析を進めている。これらのデータは限界等級が 29 と非常に深く、 $z \sim 5$ を超える遠方の暗い銀河が大量に検出されると期待される。一方、この春から本格的な探査が始まった Subaru/Hyper Prime-Cam(HSC) の撮像データは空間的に非常に広範囲領域をカバーしており、遠方の明るい銀河のサンプルを大量にもたらすと期待される。HST と HSC のデータを組み合わせることで、幅広い明るさの銀河をカバーすることができ、銀河のクラスタリング強度を精度よく決め

ることが出来る。本講演では、これらの研究手法や現在の研究状況を紹介・報告し、遠方銀河の形成・進化やダークマター質量について議論する。

123526 (2013)

重宇 a32 ALTB 宇宙における非一様性の観測的制限

徳竹 真人 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M1)

宇宙モデルを考える上では、「宇宙は大域的に一様等方である」とする宇宙原理を仮定し、一様等方な宇宙として Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) モデルを考えるのが一般的であり、実際に FLRW モデルはこれまでに多くの観測事実を説明することに成功している。特に、宇宙マイクロ背景放射の観測によって、宇宙の等方性については高い精度で確かめられている。

しかし、球対称な非一様性の観測的制限については十分に研究されていない。この制限を与えるためには、球対称で非一様な宇宙モデルを仮定し、実際の観測量と宇宙の非一様性との間にどのような関係があるのか知ることが必要となる。

ここでは、宇宙項入りの球対称非一様ダスト宇宙モデルである ALTB モデルを考える。観測量としては距離-赤方偏移関係を与え、その距離-赤方偏移関係を再現するような ALTB の非一様性を表すパラメータ $k(z), m(z)$ を得る手法を与える。また、それを用いて距離-赤方偏移関係と球対称な非一様性の関係について調べた。

1. Chul-Moon Yoo Prog. Theor. Phys. 124 (2010), 645-665

重宇 a33 標準光源の観測に対する局所的な非一様性の影響

岩田 健吾 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M1)

我々の宇宙は 100Mpc 以上のスケールでは一様等方的であるとされ、Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) model によって良く記述できる。しかし、それ以下のスケールでは非一様な構造が存在し、距離と赤方偏移の関係はそのような局所的な非一様性の影響を受ける。局所的な非一様性を観測から直接的に評価することは難しいが、超新星の観測から得られる距離と赤方偏移の関係には非一様性の情報が含まれており、非一様性を考慮した理論と比較することで、その情報を得ることができる。

ここでは、非一様性の影響を考慮に入れるための最も簡単な方法として Dyer-Roeder (DR) 近似を用いた。DR 近似では角直径距離に対する非一様性の影響を表すパラメータとして、赤方偏移 z の関数 $\alpha(z)$ を導入する。小さいスケールでの非一様性が主に銀河などの構造に起因することから、 $\alpha(z)$ は構造形成の歴史を表していると考えられる。宇宙マイクロ背景放射 (CMB) の観測は局所的な非一様性の影響を受けにくいので、その観測から得られる宇宙論パラメータの値を用いて、超新星の観測から得られる角直径距離を再現するように $\alpha(z)$ を決定した。

特定の条件の下では、構造形成の歴史を表すような $\alpha(z)$ が得られたので、DR 近似を用いることで超新星の観測データから局所的な非一様性を評価できることが分かった。この結果は CMB の観測と超新星の観測から決定された宇宙論パラメータの値が異なる場合には、そのずれを局所的な非一様性の影響により説明出来るということを示している。

1. C. C. Dyer and R. C. Roeder, ApJ, **180**, L31 (1973)
2. P. Fleury, H. Dupuy and J. Uzan, Phys. Rev. D **87**, no. 12,

重宇 a34 FRB を用いた宇宙論モデルの検証手法

廣島 渚 (東京大学宇宙線研究所 M1)

FRB (Fast Radio Burst) は系外に由来するとみられている突発的な電波放出現象である。観測される電波の継続時間がミリ秒オーダーと短く、かつ非常に明るいという特徴を持つ。現在確認されているものは数個と少ないが、今後さらなる観測の報告が期待されている。

プラズマ中での電磁波の伝播速度が周波数の二乗に反比例するという性質を用いると、パルスの多周波観測から dispersion measure (DM) と呼ばれる量が決定できる。DM は視線にそって積分した自由電子柱密度であり、光学観測とは異なった手段で観測者と天体の間にある物質の量を決定する。電波域かつパルスのという FRB の性質は DM を求めるのに適している。

多数の FRB から DM の分布を決定し、宇宙論的なモデルから計算される DM の分布と比較することでモデルの妥当性を検討できる。本講演では McQuinn の論文 [1] のレビューを行い、100 個程度の DM 値から DM の分布を決定すれば、光学的には観測出来ない外縁部についても銀河 halo ガスの広がりが制限できることを示す。また、まだなじみの薄い現象である FRB の概説を行い、将来的に FRB が遠方宇宙の探索に寄与する可能性について議論する。

1. McQuinn, M., 2014, ApJL, 780: L33 (5pp)

重宇 b1 Anti-evaporation in massive/bi-gravity

桂川 大志 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D1)

曲がった時空上の場の量子論の研究から、ブラックホールは、ホーキング輻射と呼ばれる熱的な放射を持つことが知られている。このホーキング輻射により、ブラックホールのホライズン半径は通常減少するが、Bousso と Hawking により、Nariai ブラックホールと呼ばれる特殊なブラックホールにおいては、量子補正により半径が増加することが示された。ここで、Nariai ブラックホールとは、de Sitter-Schwarzschild 解において、ブラックホールホライズンとコスモロジカルホライズンの半径が一致する場合の解であり、このブラックホールの半径が増加する現象を Anti-evaporation と呼ぶ。本講演では、まず、Anti-evaporation の概要をレビューし、その後、massive gravity 理論と bigravity 理論と呼ばれる重力理論における、Anti-evaporation の可能性について発表する。Massive gravity 理論、および bigravity 理論とは、近年提唱された重力理論であり、前者は massive graviton と呼ばれる有質量スピン 2 の場を、後者は重力と massive graviton の相互作用を記述する理論として知られている。

1. R. Bousso and S. Hawking, Phys. Rev. D **57**, 2436 (1998)
2. C. de Rham, G. Gabadadze and A. Tolley, Phys. Rev. Lett. **106**, 231101 (2011)
3. S. Hassan and R. Rosen, JHEP **1202**, 126 (2012)

重宇 b2 Bigravity 理論の線形及び非線形解析と宇宙論的応用

青木 勝輝 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)
本発表では発表者と前田恵一氏との共同研究である Phys. Rev. D 89, 064051 (2014) と、その後の発展について述べる。一般相対論は素粒子論的立場から見た場合、質量ゼロのスピン 2 粒子 (重力子) の理論と言える。しかし重力子が本当に質量を持たないのかは明らかにされておらず、理論と観測の両面から質量の有無を調べなければならない。特にダークマターやダークエネルギーの発見は重力の修正といった新たな物理を示唆している可能性があり、これらと関連して massive な重力理論の関心は高い。我々は Hassan, Rosen により提案された bigravity 理論に注目する [2]。これは massive gravity の拡張の 1 つとして提案されたものであり、ダークエネルギーを導入しなくても、加速膨張解が存在することが知られている。特に我々は加速膨張解がアトラクターとして得られることを示している [1]。

Bigravity 理論は摂動を非線形まで解析すると、Vainstein 機構により一般相対論を回復すると言われている。しかし時間依存する系などにおいて Vainstein 機構が働くかは調べられていない。我々はいくつかの時空において非線形解析を考えた。球対称静的時空においてはある半径の内側で一般相対論を回復する。一方で宇宙膨張の効果を考え、宇宙の地平線スケールが massive graviton の Compton 波長より大きい時代には一般相対論を回復する。

次に線形摂動に基づくことにより bigravity 理論を用いて我々の宇宙のダークマターを説明できることを示す。上記の論文においては宇宙論スケールでのみダークマターを説明できることを示した [1]。これを発展させ、銀河スケールや大規模構造スケールにおいてもダークマターを説明できることを示す。

1. K. Aoki and K. Maeda, Phys. Rev. D **89**, 064051 (2014).
2. S. F. Hassan and R. A. Rosen, J. High Energy Phys. **02** (2012) 126.

重宇 b3 Probing EoR information using 21cm bispectrum

島袋 隼士 (名古屋大学 C 研 D2)

インフレーションに始まる宇宙が、現在の彩り豊かな宇宙へと進化してくる過程で、初期天体や銀河からの紫外光によって宇宙に広がっている中性水素が徐々に電離させられていく時期が存在する。この時期のことを宇宙再電離と呼び、現在の宇宙論のトピックの中でもホットな分野の一つとなっている。現在、再電離期中の宇宙まで観測が届いていないが、今後の大型電波望遠鏡の発展により近い将来、観測が可能になるものと考えられている。この宇宙再電離期に存在する中性水素から発せられる 21cm 線を用いて、再電離期を特徴付ける物理的パラメータについて調べる方法についての発表を行う。再電離期の 21cm 線の揺らぎは非ガウス分布になるため、従来用いられる、21cm 線の揺らぎのパワースペクトル以外にも、バイスペクトルを考えることができる。本研究では特に、この 21cm 線バイスペクトルに注目して、その再電離期の物理的パラメータへの依存性や時間発展、パワースペクトルとの比較について現在得られた結果を報告する。

重宇 b4 Higgs Inflation による原始宇宙磁場生成

小幡 一平 (京都大学 天体核研究室 M2)

インフレーションを引き起こすスカラー場「インフラトン」の正体は未だに確かめられていない。これまで様々なインフレーションモデルが提案されてきたが、その中でもインフレーションを素粒子の標準模型の枠組みで与える「ヒッグスインフレーション」は非常に魅力的なモデルである。

今回我々は、ヒッグスインフレーションのもとの電弱理論のゲージ場の振る舞いに着目した。本研究では $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ゲージ場のヒッグスインフレーションにおける宇宙論的進化を追った。その結果、インフレーション終了後にゲージ場はヒッグス場との結合を介して共鳴を起こし、振幅が増大することが確かめられた。更に、この過程で生じた磁場は宇宙初期の原始磁場として、現在観測などから指摘されている銀河間磁場の起源になる可能性があることを指摘した。

1. F.L.Bezrukov and M.Shaposhnikov, Phys.Lett.B 659, 703 (2008) [arXiv:0710.3755 [hep-th]]
2. H.Emoto, Y.Hosotani and T.Kubota, Prog. Theor. Phys. 108, 157 (2002) [hep-th/0201141]
3. I.Obata, T.Miura and J.Soda [arXiv:1405.3091 [hep-th]]

重宇 b5 宇宙論的位相欠陥による初期磁場生成

堀口 晃一郎 (名古屋大学 C 研 M2)

宇宙は現在までに四つの力の分離などの様々な相転移を経験してきたと考えられている。加えて、大統一理論から初期宇宙には様々なスカラー場が存在していたことが示唆されている。これらのスカラー場の大半は相転移を起こしたと考えられている。相転移を起こしたスカラー場にはその数に応じて対称性を回復する領域が現れる。これが宇宙論的位相欠陥である [1]。スカラー場が一つのときはドメインウォール、二つのときは宇宙ひも、四つ以上のときはテクスチャーという位相欠陥が現れる。

初期磁場は現在銀河間などの大スケールで観測されている種磁場を説明する有力なモデルの一つである。初期磁場生成のモデルの一つとして宇宙初期の光子速度とバリオン速度の間に相対速度を生み出す [2] というモデルがある。テクスチャーはこれを通して初期磁場を生成することができる。本研究ではテクスチャーに対応するスカラー場のモデル、Non-Linear Sigma Model (NLSM) による初期磁場生成を議論する。NLSM に起因する初期磁場のスペクトルを解析的手法とシミュレーションの双方を用いて求めた。本発表ではその結果を紹介する。

1. Alejandro Gangui arXiv:astro-ph/0110285
2. K.Ichiki et al Phys.Rev D85,043009

重宇 b6 講演キャンセル

重宇 b7 Instability of Black Holes immersed in magnetic fields

野田 宗佑 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M2)

外部磁場中でのブラックホールのスカラー摂動に対する不安定性について議論する。

1957 年の Regge-Wheeler 方程式の発見以来、ブラックホールの摂動に対する安定・不安定性については多くの議論がなされてきたが、今のところブラックホールの周辺環境を考慮した議論はあまりされていない。磁場などの外部変数も含めたブラックホールのスカラー摂動の計算には次の 2 つの意義があると思われる。

1. ジェットなどの高エネルギー現象の発生機構の解明。
 2. ゲージ重力対応の場の理論側で外部変数を扱うこと。
- しかし、外部磁場がある場合には解くべき方程式が変数分離不可能な形となり、動径方向の方程式には落ちない為にこれまでに確立している方法では安定・不安定性の計算を行うことができない。そこで、本発表ではブラックホール摂動の方程式が変数分離不可能な場合の安定・不安定性の計算方法を提案する。

1. R. M. Wald, Phys. Rev. D 10, 1680 (1974).
2. Richard Brito, Vitor Cardoso, Paolo Pani arXiv:1405.2098

重宇 b8 講演キャンセル

重宇 b9 インフレーション中に崩壊を伴う重い場による密度ゆらぎへの影響

佐藤 正憲 (東京工業大学宇宙物理学理論グループ M2)

本発表では、インフレーション中に崩壊を伴う重い場による密度揺らぎへの影響を考察する。

最も単純なインフレーション理論のモデルは、1 つの軽いスカラー場 (インフラトン) がゆっくりとポテンシャルを転がることによって引き起こされる slow-roll インフレーションモデルである。このようなモデルでは、断熱的でスケール不変な密度揺らぎが予言され、得られるパワースペクトルは宇宙マイクロ波背景放射の観測とよく一致している。

一方、超弦理論や超重力理論などの高エネルギー物理理論は、インフラトンを含む複数のスカラー場の存在を予言している。これらが整合するために、通常他の重い場の効果は無視され、インフラトンとして振舞う一つの軽い場の効果だけが考えられている。しかしながら、重い場の質量がハッブルパラメータと同程度以上のときには、インフラトンと重い場の相互作用を必ずしも無視することができない。その例として、軽い場の軌跡の急激なターンを引き起こすポテンシャル (sudden turning potential) が存在する場合や、重い場の方向への相転移がある場合が考えられ、これらは実際に超弦理論や超重力理論でしばしば起こる。重い場がパワースペクトルに影響を与えることから、初期宇宙の観測を用いて高エネルギー物理の情報 (重い場の質量や崩壊幅など) を引き出すことができる。

本発表では sudden turning potential が存在した場合について考察を行う。先行研究によると、sudden turning potential が存在した場合、重い場の影響によってパワースペクトルは特徴的な振舞いを持つことが明らかになっている。しかしながら、ほぼ全ての先行研究では、重い場

の崩壊の効果が考慮されていない。一般に重い場は寿命が短く崩壊するので、この効果を取り入れて密度揺らぎへの重い場の影響を調べる必要があった。

1. Gao, X., Langlois, D., & Mizuno, S. (2012). Influence of heavy modes on perturbations in multiple field inflation. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2012(10), 040.

重宇 b10 domain wall cosmology

樋口 将文 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D1)

2 種のスカラー場を用いて任意の scale factor と warp factor を解に持つ 5 次元宇宙模型を構成することができる。この方法は再構築と呼ばれる。この方法を用いて 5 次元時空に 4 次元 domain wall 宇宙が埋め込まれた模型を構成することができる。一般に再構築による domain wall 解には ghost 場が現れるが scale factor と warp factor を適切に選べば ghost 場が現れない模型を作ることができる。

本公演では 4 次元 domain wall 上で一般の FLRW 宇宙が再現されるような模型における 4 次元重力子の局所化可能性について説明する。つづいて scale factor と warp factor を上手く選んで ghost 場が現れない特別な時間発展をする模型を構成し、さらに共形変換を行うことで任意の時間発展を記述する ghost が現れない Brans-Dicke 型の模型を構成できることを示す。

重宇 c1 Simulating Anisotropic Clustering of LRGs with Subhalos

岡 アキラ (東京大学 宇宙理論研究室 D2)

銀河クラスタリングに観測されるバリオン音響振動 (BAO; 100[Mpc/h]) は、視線方向とそれに垂直な方向での距離測定が異なる宇宙論パラメータに依存するため、宇宙論の仮定の誤りにより非等方性が生まれる (AP 効果; e.g., [1])。また、分光サーベイにより得られる銀河のパワースペクトルは、銀河自身の持つ特異速度場の影響で非等方性を帯びる (Redshift-Space Distortion(RSD); e.g., [2])。その非等方性の強さは、大スケールでは密度ゆらぎの重力的な成長率と密接に関係しており、BAO の観測を組み合わせることで宇宙論的スケールでの重力理論の検証が可能となる。ただし、銀河サンプルから宇宙論的な情報を得るためには、理論で予言されるダークマター (DM) と観測される銀河の間の関係の理解が不可欠である。

そこで、本研究 [3] では、DM 粒子の N 体シミュレーションから作られたハロー・サブハローカタログをもとに、Sloan Digital Sky Survey II DR7 Luminous Red Galaxy (LRG) の非等方パワースペクトルの多重極成分 (P0,P2,P4) を再現するカタログを得るための条件を調べた。

1. Alcock and Paczynski (1979)
2. Kaiser (1987)
3. Nishimichi and Oka (2013) arXiv:1310.2672

重宇 c2 Expanding universe with non-linear gravitational waves

池田 大志 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M2)

Issacson の短波長重力波の研究によると、短波長重力波の有効的なエネルギー運動量テンソルはトレースレスになり、その結果短波長重力波のみで満たされた宇宙の膨張則は放射成分で満たされた宇宙と同じになることが示される。しかし、この先行研究では重力波の振幅が小さい等の仮定や短波長重力波の平均化が入っており、これらの計算がどこまで妥当かどうかは再確認が必要である。

そうした中で本発表では、重力波だけで満たされた宇宙 (重力波宇宙) の膨張則について議論する。重力波宇宙の時間発展は数値相対論を用いて、フルな Einstein 方程式を解くことで得る。この膨張則を調べること、Issacson の研究結果を再確認するとともに、Issacson の計算では追うことのできない長波長領域での宇宙の膨張則を明らかにする。

1. R.A.Isaacson, Phys.Rev.166,1263(1968)
2. R.A.Issacson, Phys.Rev.166,1272(1968)

重宇 c3 DI-SPH を用いた宇宙論的シミュレーション

小野間 章友 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M2)

宇宙物理学で用いられる流体力学のシミュレーションの手法としては、メッシュ法の他に、粒子をベースとした Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) という手法がある。これは、ガリレイ変換に対して不変であることや、同じ粒子を扱う N 体の重力計算と相性がいいという利点がある。しかし、体積要素の見積もりとして質量密度を用いているので、接触不連続面での計算がうまくいかないという欠点があった。そこで、Saitoh & Makino (2013) によって、体積要素の見積もりとして質量密度を陽に用いない、Density Independent SPH (DI-SPH) が提案された。そこで、今までの SPH (Standard SPH) と、DI-SPH の計算結果の比較を行った結果を示す。

(ただし、本研究で用いた formulation は、Hopkins(2013) のものである)

さらに、この DI-SPH を用いて、宇宙の再結合時に、バリオンとダークマターの間に数 Mpc 程度の規模で超音速の相対速度があった場合に、バリオンガスを含んだハローの形成がどの程度抑制されるかを示した、Naoz et al.(2012) の論文の再検証を行った結果を示す。

1. Saitoh, T. R. and Makino, J. ApJ, 768, 44-. (2013)
2. Philip F. Hopkins. MNRAS 428, 28402856 (2013)
3. Naoy, S. et al. ApJ, 747, 128 (2012)

重宇 c4 重力波データ解析における Short time fourier 変換の可能性

若松 剛司 (新潟大学宇宙物理学研究室 M2)

重力波は今まで直接検出されていない。重力波は一般相対性理論によりその存在を予言され、The Hulse-Taylor binary pulsar (PSR B1913+16) の観測により間接的に示されている。

レーザー干渉型重力波観測装置において出力は時間スケールで変化

する。そこで時間周波数解析が要求される。重力波の波形は、主に連星合体 (Compact Binary Coalescence: CBC) と重力崩壊型超新星爆発 (Supernova: SN) で区別される。連星合体の場合は周波数が増大していき、合体後に減衰するような波形である。SN はバースト的な波形である。さらに、出力にはノイズが含まれるので、その影響もある。今回の発表の内容は Short time fourier 変換である。この解析法は現信号に窓をかけ、その窓を移動することによって、周波数の成分の度合いを三次元的に表すことができる。この解析法の特徴を考慮し、様々な波形でテストしてみる。そして、重力波の実際の波形に近いものではどのようになるか考察してみる。

1. 時間-周波数解析 著者 L. コーエン (1998) 発行元朝倉書店

重宇 c5 重力凹レンズを起こす球対称モデルにおける光の伝播時間の遅れ

中島 昂己 (弘前大学 浅田研究室 D1)

我々は重力レンズの研究において従来の凸レンズ型重力レンズだけでなく凹レンズ型重力レンズを起こす球対称モデルを考察した。このモデルは時空の歪みが ϵ と距離の逆 n べき乗に依存していて、Schwarzschild ブラックホール以外にも Ellis ワームホール等、様々なモデルを再現することが可能である。

我々はこれまでこのモデルにおける重力レンズによる光の曲がり角、像の歪み、マイクロレンズによる像の増光率、光中心について計算し、 ϵ と n の依存性を調べ、観測によって ϵ の正負と n の値が判別可能かどうか理論的に予測してきた。

今回我々はこのモデルにおける光の伝播時間の遅れと一定間隔で放射されるパルス波の frequency shift を計算した。天体の重力場によって光の伝播時間が平坦時空を通る場合より遅れることは太陽系の観測で確かめられている。連星パルサーの伴星の重力場によってパルサーからのパルス波の間隔が変化することも確かめられている。

今回の研究で我々は光の伝播時間の遅れが n の値に依存することを示し、凹レンズ型のモデル ($\epsilon < 0$) では、重力レンズにおける光の曲がり角が負になるのと同様に光の伝播時間の遅れが負になることを示した [1]。さらにパルサータイミング観測において frequency shift が観測可能になるパラメータの範囲を求めた。光の伝播時間の遅れは異なるモデルでも研究されている [2],[3]。

1. K. Nakajima, K. Izumi, and H. Asada, arXiv:1404.2720 [gr-qc]
2. J. P. DeAndrea and K. M. Alexander, arXiv:1402.5630 [gr-qc]
3. K. S. Virbhadra and G. F. R. Ellis, Phys. Rev. D 62, 084003 (2000)

重宇 c6 Brans-Dicke 理論における重力波の解析

小川 茂樹 (東京理科大学 辻川研究室 M2)

重力波は一般相対性理論から予言される時空の歪みが空間を伝播する現象である。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が、未だ直接的な観測はされていない。しかし、近年、重力波の観測技術は著しく発展し、衛生型レーザー干渉計 DECIGO などの直接観測の計画が進められている。もし重力波を直接観測する事が出来れば、スカラー・テンソル理論などの修正重力理論では重力波の位

相が一般相対論からずれるため、重力理論の検証及びモデルの制限が可能となる。

スカラー・テンソル理論とは重力が Einstein の計量テンソル場だけでなくスカラー場によっても媒介されると考えるものであり、現在の宇宙の加速膨張を説明することが出来ることから活発に研究されている。

今回は代表的なスカラー・テンソル理論の 1 つである Brans-Dicke 理論における重力波に注目し、波形の解析及び Brans-Dicke パラメータなどの程度の制限を与える事が出来るか解析した。

1. Kent Yagi. Int.J.Mod.Phys. D22 (2013) 1341013
2. Michele Maggiore and Alberto Nicolis. Phys.Rev. D62 (2000) 024004

重宇 c7 宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル歪みと原始重力波

太田 敦久 (東京工業大学宇宙物理学理論グループ D1) テンソル由来の密度ゆらぎを μ -distortion のソースとして考えた場合の寄与を計算した。CMB の μ 歪みの主な寄与は、密度ゆらぎに蓄えられていた光子が、音響減衰で散逸し、それが Compton 散乱によって熱平衡化されたものだと考えられており、典型的な宇宙論的パラメータのもとで $\mu \sim 10^{-8}$ の寄与があるということが既に知られている。この文脈では、音響減衰のスケールにおいてテンソルゆらぎは既に減衰してしまっているという事情から、テンソルゆらぎをソースとした μ -distortion は注目されなかった。しかし、このことは音響減衰のスケールよりも大きなスケールでテンソルゆらぎがならされているということであり、エネルギー保存則の観点から言えば、これもまた歪みのソースとなりうる。その大小はともあれ、テンソル由来の光子のゆらぎは必ず存在すると考えられるから、テンソル由来の μ を知っておくことは重要であると考え、与えられたテンソルスカラー比 r とテンソルスペクトル指数 n_T に対して、生成される μ -distortion の値を計算した。その結果、 $r = 0.1$ 、 $n_T = 0$ の場合には $\mu^T \sim 10^{-13}$ であることがわかり、ブルーなスペクトルに対しては、より寄与が大きい事がわかった。

重宇 c8 原始ベクトルモードの性質と CMB からの制限

嵯峨 承平 (名古屋大学 C 研 D1)

宇宙論摂動論を考えた場合、摂動のモードがスカラー、ベクトル、テンソルモードと分解される。完全流体を仮定したアインシュタイン重力のもとで、ベクトルモードは膨張とともに薄まっていく減衰解しか存在せず、標準的な宇宙論を考える場合は無視される。ところが非等方圧を持つ、例えば無質量ニュートリノなどが存在するとベクトルモードに成長解が現れる。一般的にベクトルモードが存在すると、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の B-mode 偏光を作ることが知られており B-mode 観測によって原始ベクトルモードを制限することが可能となる。本研究では、このベクトルモードが作る CMB のゆらぎからどのような制限がなされるかを示したためその一連の結果を発表する。

1. S. Saga, M. Shiraishi and K. Ichiki, arXiv:1405.4810
2. BICEP2 Collaboration Collaboration, P. Ade et. al, arXiv:1403.3985

重宇 c9 世界の重力波望遠鏡

加藤 準平 (東京工業大学 宗宮研究室 M2)

重力波は一般相対性理論から予言される時空のさざなみであり、大規模な天体現象に伴い、重力場が変動すると放射される。重力波は未発見であるが、この発見により、これまで電磁波などではわからなかった新たな宇宙物理学、天文学が切り拓かれると期待される。

現在、世界で大型の干渉計型望遠鏡が建設中であり、数年内に観測開始を予定している。本発表では世界の重力波望遠鏡の紹介をし、特に日本の KAGRA について説明する。

重宇 c10 光学浮上鏡を用いた重力デコヒーレンスの観測実験

牛場 崇文 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻 安東研究室 D2)

宇宙物理学において量子論と重力論の統一は非常に重要な未解決問題である。初期宇宙に置いては重力も他の三つの力と同様に量子化されていたと考えられており、量子論と重力論の統一は初期宇宙の減少に対して非常に大きな示唆を与えてくれる可能性を持つ。また、ブラックホールの内部では一般相対性理論が破れており、内部状態の記述に量子重力理論が必要となる可能性が示唆されている。

しかしながら、量子重力理論の検証実験・観測は非常に困難で、あまりなされていないのが現状である。この原因は重力相互作用が他の相互作用に比べて非常に小さいために、観測系の量子状態が重力相互作用以外の相互作用によって崩壊してしまうからである。しかし、近年の技術的な進歩によって、重力相互作用の影響の強い巨視的な系での量子エンタングルメント生成が現実味を帯びてきた。これにより、テーブルトップの実験系で量子重力理論の検証が可能になることが期待されている。

当日のポスターでは重力でコヒーレンスの観測のための先行研究の紹介を交えながら、現在私たちが計画している重力デコヒーレンスの観測のための実験に関して説明する。

1. Roger Penrose: General Relativity and Gravitation Volume 28, Issue 5, pp 581-600 (1996)
2. G. Guccione, et al.: Phys. Rev. Lett. 111, 183001(2013)
3. Rainer Kaltenbaek, et al.: Experimental Astronomy Volume 34, Issue 2, pp 123-164(2012)

重宇 c11 RXJ1131-1231 の重力レンズモデル

高橋 誠 (近畿大学 宇宙論研究室 M1)

重力レンズから光の経路の重力ポテンシャルとその重力を作る質量分布を知ることができるが重力レンズを記述する方程式はパラメータが多いため解析的に解くことができない。そこで重力レンズをモデル化してパラメータを数値的に決定しなければならない。

重力レンズでフィットする物理量は、フラックス、像の位置、時間遅延である。そのうち位置がよくフィットする重力レンズモデルでもフラックス比が合わない場合をフラックス比異常と呼ぶ。本研究のターゲット天体は 4 重像クエーサー RXJ1131-1231 である。このクエーサーは像の位置は求められているが輝度分布が未だ不明である。フラックス比異

常の有無を確かめるにはクエーサーのコア部分のフラックスが必要だがコア部分の光とホスト銀河の光が混ざってしまうので分離する必要がある。

今回は HST で観測されているレンズ像とレンズ銀河の光重心から求められた SIE(Singular Isothermal Ellipsoid) に ES(External Shear) を足したレンズ銀河モデルを用いてソースプレーン上の輝度分布を求めた。その結果について報告する。

.....
重宇 c12 Stabilization of higher derivative gravity with constraints

秋田 悠児 (立教大学 M1)

Linear instability in non-degenerate higher derivative theories, which is known as Ostrogradski's instability, can be removed by the addition of constraints. These constraints must reduce the dimension of original phase space. In other words, instabilities are removed only if constraints reduce the dynamical degrees of freedom(d.o.f) from original ones. Also, theories with curvature invariants such as $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$, $R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}$, $C_{\mu\nu\rho\sigma}C^{\mu\nu\rho\sigma}$, have the Ostrogradski's instability because they contain higher derivatives of the metric with respect to time.

I will start with a review about the stabilization of higher derivative gravity models. I consider the Lagrangian of the form $\mathcal{L} = \sqrt{-g}(R - 2\Lambda + \alpha R^2 + \beta R_{\mu\nu}R^{\mu\nu})$. First, I give the second-order action for metric perturbations on a general background. Then, I focus on the Minkowski background, and demonstrate how the instabilities appear in each type of perturbations (i.e. scalar, vector, and tensor modes.) by constructing the Hamiltonian. I show that those instabilities can be removed by imposing constraints on the theory. Finally, I will give some comments on cosmological implications of the constrained theory.

1. T. -j. Chen and E. A. Lim, JCAP **1405**, 010 (2014) [arXiv:1311.3189 [hep-th]].
2. T. -j. Chen, M. Fasiello, E. A. Lim and A. J. Tolley, JCAP **1302**, 042 (2013) [arXiv:1209.0583 [hep-th]].

.....
重宇 c13 HSC の観測領域内における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 高橋研究室 M2)

本研究の目的は、HSC-Wide による観測領域内での弱い重力レンズ効果による 2 点相関関数から宇宙論パラメータ Ω_m, σ_8 がどれだけ制限できるかを求める事である。

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 (コンパー

ジェンス) として作成したものである。それを使い、HSC-Wide の観測領域内における弱い重力レンズ効果によるコンパージェンス κ のパワースペクトルの 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 (θ, ϕ) 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 θ_{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。

1. HSC Science White Paper (2012)
2. L.Fu et al.A&A,479,9(2008)
3. The HSC collaboration team. Wide-field imaging with Hyper Suprime-Cam:Cosmology and Galaxy Evolution

.....
重宇 c14 6次元位相空間における無衝突ボルツマン方程式による自己重力系の数値シミュレーション

土屋 将太郎 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

DIRECT INTEGRATION OF THE COLLISIONLESS BOLZMANN EQUATION IN SIX-DIMENSIONAL PHASE SPACE;SELF-GRAVITATING SYSTEM のレビューを行う。6次元位相空間における無衝突ボルツマン方程式を数値的に解くことで自己重力系の数値シミュレーションコードを開発し、重力不安定性、ランダウダンピング、キング球の安定性を含むいくつかのシミュレーションを行い、線形予測理論と比較することでそのコードの精度を確かめた。更に、N体シミュレーションと比較することでN体シミュレーションに対する長所・短所を調べ、宇宙の大規模構造形成の数値シミュレーションにおいてのN体シミュレーションとの妥当性を調べる。

1. K. Yoshikawa, N. Yoshida and M. Umemura ApJ, 762, 116 (2013)

.....
重宇 c15 Large tensor mode and sub-Planckian excursion in generalized Galileon

國光 太郎 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター D2)

宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測から初期宇宙におけるゆらぎのテンソル・スカラー比 $r \simeq 0.2$ という結果が報告された [1]。このような大きなテンソル・スカラー比をインフレーションでつくるためには、インフレーション中のスカラー場の場の値の変位がプランクスケールよりも大きい必要がある。この制限は Lyth bound とよばれる [2]。

一方、非正準運動項や高階微分相互作用を許せば、大きなテンソル・スカラー比を実現しながら場の値の変位をプランクスケールよりも小さい値に抑えることは可能である。この発表では Generalized G-inflation の枠組み [3] を用いて、どのような場合に Lyth bound から逃れることができるのか、分類の上、明らかにする。

ただしそのような非自明な運動項や相互作用項を持つ場合、有効ポテンシャルに対する量子補正が低エネルギーで効いてきて、プランクスケールよりもはるかに低いスケールで有効ポテンシャルが大きな変更を受ける可能性もある。実際 Lyth bound が問題とされるのは、プランク

スケールで有効ポテンシャルに対する大きな補正が期待されるからである。そのような補正がどのような場合に抑えられるのかについても議論する。

1. P. A. R. Ade *et al.* [BICEP2 Collaboration], arXiv:1403.3985 [astro-ph.CO]
2. D. H. Lyth, Phys. Rev. Lett. **78**, 1861 (1997) [hep-ph/9606387]
3. T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, Prog. Theor. Phys. **126**, 511 (2011) [arXiv:1105.5723 [hep-th]]

重宇 c16 Spacetime approach to force-free magnetospheres

小笠原 康太 (立教大学 M1)

force-free 電気力学 (Force-Free Electrodynamics, FFE) は、磁気圏の相対論的プラズマを記述し、パルサーやブラックホールを扱う際に重要な役割を担っている。扱う主な式は Maxwell 方程式、及び force-free 条件 $F_{\nu\mu}\nu_{\nu}j^{\mu} = 0$ である。FFE は ADM 形式で扱われることが多いが、今回は wedge 積、外微分を用いて、FFE を記述する。これによって計量に依らず式を記述する事が可能になる。

1. Gralla, Samuel E., and Ted Jacobson. arXiv:1401.6159 (2014)

重宇 c17 反 de Sitter 時空の不安定性

古賀 泰敬 (立教大学 M1)

反 de Sitter (AdS) 時空は曲率が負の極大対称な時空であり、宇宙項が負の Einstein 方程式の真空解である。AdS 時空が、同じく極大対称時空である Minkowski 時空と de Sitter 時空 (それぞれ曲率が 0, 正) と大きく異なるのは、空間的な無限遠が時間的な面になっている点である。この性質により、無限遠からのフラックスがないとする境界条件における AdS 時空は漸近的に不安定である。この発表では、漸近的に AdS 時空である時空の不安定性を、球対称、負の宇宙定数のゼロ質量スカラー場の Einstein 方程式の数値シミュレーションによって調べた、Piotr Bizon と Andrzej Rostworowski の研究 [1] をレビューする。

ここで与える仮定により、ゼロ質量スカラー場の Einstein 方程式は一次元の波動方程式に帰着する。モデルは、初期値として原点にガウス型波束のスカラー場を置いて時間発展させるものを考え、これをさまざまな振幅でシミュレーションする。このシミュレーションにおいて、原点の曲率は一定の大きさの振動ののちに指数関数的に成長する、この振る舞いは、スカラー場の初期値の振幅を任意に小さくしても保たれ、任意に小さい摂動に対する AdS 時空の不安定性を示唆する。

ゼロ質量スカラー場の Einstein 方程式を、真の AdS 時空をバックグラウンドとした非線形な摂動方程式として解くと、スカラー場の各振動モードのエネルギーがより高振動数のモードへと移行することがわかる。この研究における AdS 時空の不安定性はこの振る舞いによって引き起こされる。

1. P. Bizon and A. Rostworowski, Phys. Rev. Lett. **107**, 031102 (2011)

重宇 c18 コンパクト天体の存在下におけるカメレオン場の宇宙論的進化

高橋 一史 (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)

修正重力理論の一つに、 $f(R)$ 重力理論という枠組みがある。これは一般相対論の Einstein-Hilbert 作用に含まれるリッチスカラー R を、 R の一般の関数 $f(R)$ に置き換えるというものである。 $f(R)$ 重力理論は、共形変換によって Einstein-Hilbert 作用にスカラー場を含んだ理論の形に書き換えることができる [1]。このとき、スカラー場 ϕ のポテンシャル $V(\phi)$ は関数 $f(R)$ から決まる。さらに、 ϕ は通常の物質とも相互作用するため、実効的には物質密度 ρ の寄与が加わったポテンシャル $V_{\text{eff}}(\phi)$ 中で運動することになる。物質密度の時間変化に伴って $V_{\text{eff}}(\phi)$ も変化し、 ϕ は基本的にはその極小を追って時間発展する。この新しい系は Einstein フレーム、元の系は Jordan フレームと呼ばれ、数学的には等価である。

Einstein フレームで見ると、このスカラー場 ϕ がスローロールすることにより宇宙の加速膨張が説明される。しかし、 ϕ と物質とが結合しているため、物質に働く力は逆 2 乗則からずれてしまう (「第 5 の力」)。この問題は、スカラー場にカメレオン機構が働くことにより解決される [2]。カメレオン機構とは、周囲の物質の密度が大きいほど ϕ の実効的な質量が大きくなり、第 5 の力の到達距離が小さくなるため、これまで行われてきた地球スケールでの一般相対論の検証実験には抵触しなくなるというものである。関数 $f(R)$ の形は、カメレオン機構が機能するように選ばれる。

本研究では、結合した Einstein, Klein-Gordon 方程式に対し、天体の外側で宇宙論的な解と問題なく接続するような解を構成した。ここで得られる結果は $f(R)$ 理論だけにとどまらず、一般にカメレオン機構が実現するような、物質場と非最小結合したスカラー・テンソル理論においても成り立つものである。

1. K. Maeda, Phys. Rev. D **39**, 3159 (1988)
2. J. Khoury and A. Weltman, Phys. Rev. D **69**, 044026 (2004)

重宇 c19 スカラー場ゆらぎが作る初期重力波

藤田 智弘 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 D3)

インフレーションを起源とする背景重力波は、その測定を目的とした観測が多数運用中又は計画中であることに加え、今年 4 月に BICEP2 実験が初めての検出を発表したことで非常に注目を集めている。今後、重力波を詳細に観測できる時代がやってくることを鑑みると、理論面でもこれまで以上に精密に重力波を解析することが求められる。

スカラー・ベクトル・テンソルの 3 種類の宇宙論的ゆらぎは、ゆらぎを摂動として扱ったとき、摂動の 1 次ではお互いに独立である。つまり 1 次のオーダーでは重力波は他のゆらぎと無関係に生成し、進化していく。しかし、摂動の 2 次オーダーでは 3 種のゆらぎはお互いにカップルする。具体的には、スカラーゆらぎ・ベクトルゆらぎの寄与は重力波の運動方程式にソースターム、すなわち重力波生成を誘起する項として入ることが知られている。

他の場の効果を見捨てた場合、重力波の大きさ (正確にはパワースペクトル) はインフレーションのエネルギースケールに比例するため、重力波を観測することでインフレーションエネルギースケールが決まると考えられてきた (BICEP2 の報告から約 10^{16}GeV と求まる)。ところが

インフレーション時空によって生成されるのは重力波だけでなく、スカラー・ベクトルゆらぎも作られる。そして、それらが重力波を誘起するという効果が常に存在する。他のゆらぎによる重力波生成が無視できない場合、重力波の大きさとインフレーションとの関係は大きく変更され、 10^{16}GeV という値は変わりうる。

本発表では、インフレーション中にインフラトン以外のスカラー場のゆらぎによって生成される重力波を見積もり、その影響を議論する。特に、超弦理論や超重力理論から予想されるように、スカラー場の作用が変更を受けた場合、スカラー場が誘起する重力波振幅は非常に大きくなり得る。その場合、観測から何が言えるのかを説明する。

1. M. Biagetti et al., Phys. Rev.D88 103518 (2013) [1305.7241]
2. P. Adshead et al., Phys. Rev.D80 083521 (2009) [0904.4207]

.....

重宇 c20 Fisher 行列解析を用いた宇宙論パラメータの制限の推定

平川 拓実 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙の平坦性問題や地平線問題を解決する方法として、初期宇宙でインフレーションという指数関数的な宇宙の加速膨張が考えられている。これは WMAP や Planck 衛星で観測された宇宙背景放射 (CMB) の異方性についてうまく説明している理論モデルである。しかしながら、その理論モデルは未だに決定しておらず現在も様々なインフレーションモデルが研究されている。インフレーションモデルを決定するためにはインフレーションを引き起こすポテンシャルを決める必要があり、CMB や銀河大規模構造 (LSS) の大規模サーベイ観測はこれに制限を与える。また、これらの観測については Fisher 行列解析を用いて、将来のサーベイ観測によってインフレーションに関わる宇宙論パラメータをどの程度制限することができるか見積もることができ、それによってインフレーションのポテンシャルの形をどの程度制限できるか予想することができる。

Fisher 行列解析を用いると実際に観測実験を行う前に、その観測実験によって得られる宇宙論パラメータの誤差を推定することができる。そのため、将来の観測実験のセットアップを探索することができ、観測を最大限に利用することができる。その上、全く異なり、独立で、無関係な観測での補完性についても同様に探索することができる。このような有用性から Fisher 行列解析は宇宙論パラメータを推定するために幅広く利用されている。今回は Fisher 行列解析の理論と宇宙論への応用についてレビューする。

1. Z.Huang ,L.Velde and F.Vernizzi arXiv:1201.5955v2(2012)
2. L.Velde arXiv:0911.3105v1(2009)
3. K.Yamamoto ApJ 595:577-588(2003)

.....

重宇 c21 量子場の真空について-アンルー効果-

清田 哲史 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

ブラックホール時空上の場の量子論は、ホーキング放射と呼ばれる熱的放射の存在を预言する。一般相対性理論の等価原理によると、ブラックホールにおける重力による加速度と、ミンコフスキー時空中の加速度運動を結びつけることができる。アンルー効果とは一様な加速度で運動する観測者が、場が真空状態であったとしても有限温度 (ウンルー温度)

の放射を見ると预言する効果である。本発表ではアンルー効果について説明する。まずミンコフスキー時空において静止している観測者 a と、一様な加速度で運動している観測者 b について考える。観測者 a には実験室系 (t, x) 、また観測者 b には固有座標系 (τ, ξ) (加速度運動する観測者 b が周りに張る座標系) を用いる。ミンコフスキー計量を固有座標系で表すことで得られる新たな計量をリンドラー計量と呼ぶ。次に、質量 0 のスカラー場を考え、それぞれの座標系において量子化を行うことで、ミンコフスキー時空であらわれる生成消滅演算子と、リンドラー時空の量子場にあらわれる生成消滅演算子がボゴリューボフ変換で結びつくことを見る。それぞれの量子場の真空状態は異なった状態であると示すことができる。そして、一様な加速度で運動する観測者がミンコフスキー時空の真空状態を観測すると、励起された状態として観測することが示される。この励起は加速度を α として、温度 $T = \alpha/2\pi$ の熱的ボーズ・アインシュタイン分布と同じ励起スペクトルを持つことがわかる。最新の研究として、超高強度レーザーの電磁場を用いることでアンルー効果を検証する試みが議論されている。

.....

重宇 c22 修正重力の可否性を問う新たな手法

松原 元気 (立教大学 M1)

概要

1. レビューを發表します。
2. 内容は『修正重力の可否性を問う新たな手法について』です。

修正重力理論によって宇宙の第二次加速膨張、つまりダークエネルギーの問題を解決しようとする際、そのような理論では、例えば太陽系のような小さい領域でおかしな事が起きないか、などを調べる必要もある。たいていの重力理論では gravitational ghost が発生しないようにすることが、修正重力理論が生き残るための最低条件としている。

ghost とは、端的には負の運動エネルギーを持つ場である。このような場合は、エネルギー的安定を求めて無限の負の運動エネルギーを得ようとするため安定しないことから、その修正重力理論が安定な理論でないことの証拠として扱われてきた。

しかし、今回レビューする論文では、ghost が発生しても、物理的に意味を持たない ghost ならば修正重力理論として生き残る可能性はある、と考える。

ghost が物理的に意味を持たないとは、ここでは、ghost の質量が M_{cutoff} という質量よりも大きくなることを指す。これはプランク mass ではないが、ある観測スケールから見出される閾値のようなものである。

今回の論文では、簡単のために以下の場合に考察の範囲を限定する。

- 修正重力を与えるラグランジアンは

$$S = \frac{M_{Pl}^2}{2} \int d^4x \sqrt{-g} f(R, G) \tag{1}$$

という形に限定する。ただし、 f は任意関数であり R は Ricch S-calar、 $G = R^2 - 4R_{\alpha\beta}R^{\alpha\beta} + R_{\alpha\beta\mu\nu}R^{\alpha\beta\mu\nu}$ は Gauss-Bonnet Combination を表す。

- 背景時空となるメトリックは

$$ds^2 = -A(r)dt^2 + \frac{dr^2}{B(r)} + \frac{r^2 dz^2}{1-z^2} + r^2(1-z^2)d\phi^2 \tag{2}$$

$$z = \cos \theta \tag{3}$$

という、一般球対称時空の場合を考える。

これらの限定の下、修正重力を与える $f(R;G)$ から現れる ghost の質量が M_{cutoff} を超えるか否かを考察していく。

1. Rev.D83:104035,2011

重宇 c23 3.5 keV X 線輝線が示唆する Mixed Dark Matter モデルにおける Substructure 問題

原田 了 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)
 Λ CDM モデルは銀河団程度以上の大規模構造の観測結果を説明するが、銀河程度以下の小規模構造の観測との間には矛盾が生じている。そのような矛盾として、天の川銀河周辺に存在する矮小銀河の最大回転速度に対する分布が食い違う Substructure 問題や、中心密度が食い違う Too Big To Fail 問題が知られている。

これを Warm Dark Matter (WDM) の自由流減衰により小規模構造を均すことで解決しようとする、Lyman- α の森の観測結果から加わる WDM モデルへの制限と矛盾する。ところが、WDM と CDM を混ぜた Mixed Dark Matter (MDM) モデルなら Lyman- α の森からの制限を緩和し、この矛盾を解消できる可能性がある。また、最近 Andromeda 銀河や Perseus 銀河団などから起源が不明な 3.5 keV の X 線輝線が検出された。これは Dark Matter 粒子の崩壊した信号である可能性がある。我々は、この信号を説明できる素粒子モデルは自然に MDM モデルとなることに注目した。

我々は、この 3.5 keV 輝線を説明できる MDM モデルにおける構造形成について調べた。N 体シミュレーションを実行すると、MDM モデルでの天の川銀河サイズ ($\sim 10^{12} M_{\odot}$) のハロー中のサブハローの数は CDM モデルの場合より $\sim 30\%$ から $\sim 50\%$ 程度減少した。特に最大回転速度に対する分布を調べると、MDM モデルの方が CDM モデルよりも観測をよく説明し、Substructure 問題の解決に近づくことを発見した。

1. A. Kravtsov *Advances in Astronomy* (2010)
2. A. Schneider, D. Anderhalden, A. V. Macciò & J. Diemand *MNRAS*, 441, L6 (2014)
3. A. Boyarsky, O. Ruchayskiy, D. Iakubovskiy & J. Franse *arXiv:1402.4119* (2014)

重宇 c24 FastSound 計画: $H\alpha$ 輝線の同定方法について

岡田 裕行 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 D1)

FastSound 計画は、すばる望遠鏡 FMOS を用いた大規模銀河赤方偏移サーベイで、 $1.2 \lesssim z \lesssim 1.5$ における銀河の 3 次元分布を用いて構造形成の成長率を表す $f(z)\sigma_8(z)$ を測定することで、重力理論に制限を与えることが最終目標である。

FastSound の分光候補天体は CFHTLS による測光カタログの photo-z, color および輝線フラックスの推定値から適切な条件により選択される (Tonegawa *et al.* 2013). FMOS により分光観測された銀河から、自動輝線検出ソフト FIELD (Tonegawa *et al.* 2014) によって $H\alpha$ 輝線

を検出し、約 3,500 天体の赤方偏移などの物理量の推定した。

FIELD による自動検出で得られた銀河カタログのなかでも複数の輝線が検出されている天体については輝線波長比から $H\alpha$ 輝線の確実な同定が可能であり、カタログの信頼度を検証することができる。上記の複数輝線天体の解析により全カタログ中の非 $H\alpha$ 輝線の混入率の推定結果を発表する。すなわち $f(z)\sigma_8(z)$ の測定にも非 $H\alpha$ の混入率と同じだけの系統誤差を生じることになるが、これは FastSound 計画の統計誤差に比べて十分に小さいことが示される。

重宇 c25 一般の基準計量の dRGT massive gravity における Stückelberg 解析

吉田 大介 (東京工業大学宇宙物理学理論グループ D1)
 現在の宇宙の加速膨張を説明する候補として、グラビトンが質量を持っている可能性 (massive gravity) が盛んに研究されている。massive gravity の理論は BD ゴーストと呼ばれる非物理的な自由度が生じてしまい、長年の間問題となってきたが、近年 BD ゴーストの現れないグラビトンの質量ポテンシャルが明らかになった (dRGT 理論)。dRGT 理論は初め、平坦な基準計量が用いられてきたが、Hassan,Rosen はこれを一般の基準計量に拡張し、この理論でも BD ゴーストは現れないことを、ADM-正準解析によって証明した。しかしながら、この証明はとても形式的で、BD ゴーストが消える物理的な背景はあまり明らかとならない。

BD ゴーストが消える物理的なメカニズムは、Stückelberg 解析により明らかになる。この方法では理論の持つ自由度を helicity 分解するのだが、BD ゴーストは helicity-0 モードの高階微分運動方程式が原因で生じていることが知られている。平坦な基準計量の dRGT 理論の場合、helicity-0 モードの作用は Galileon 型と呼ばれる特殊な形となり、運動方程式は 2 階の微分方程式となり、BD ゴーストは現れないことが理解されている。

このような状況の中、私はこの Stückelberg 解析を一般の基準計量の場合に適応した。平坦な場合との大きな違いは、helicity 分解を共変な方法で行わなければならないことである。私は共変な方法で helicity-0、helicity-2 モードの作用を 4 次まで計算した。結果、平坦な基準計量の作用で偏微分を共変微分に置き換えた項だけでなく、基準計量の曲率による補正項が現れることが明らかになった。特に、helicity-0 モードの運動項に曲率の補正項が現れ、helicity-0 モードの正準規格化ができず、基準計量が平坦な場合に行われてきた脱結合極限が取れないという問題が明らかになった。

1. C. de Rham, G. Gabadadze and A. J. Tolley, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 231101 (2011)
2. S. F. Hassan, R. A. Rosen and A. Schmidt-May, *JHEP* **1202**, 026 (2012)
3. C. de Rham and S. Renaux-Petel, *JCAP* **1301**, 035 (2013)

重宇 c26 連続重力波のデータ解析手法

枝 和成 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター D1)

非軸対称に回転する中性子星は、周波数がほぼ一定の重力波を放出すると予想されており、日本の重力波検出器 KAGRA の有望な重力波源の

一つと期待されている。連続重力波の周波数はほぼ一定であるので、出力データ中の連続波信号を雑音の中から抜き取るには、ただ単にフーリエ変換を利用すればよいと思うかもしれない。しかし、事態はそう単純ではなく、地球の運動によるドップラー変調の補正や、感度を稼ぐための1年以上にも及ぶ長時間積分を必要とする。さらに連続波源が連星中に存在する場合には、軌道運動によるドップラー変調も考慮しなければならない。このとき、重力波検出器を用いて全天にわたって電磁波で観測されないダークなパルサーを探索する場合には、計算資源の問題が生じる。本講演ではそのような困難を解決するために考案された連続波のデータ解析手法の紹介を行う。

1. P. Jaranowski, A.Krolak, and B.F.Shutz, Phys. Rev. D 58, 063001 (1998)
2. E. Goetz and K. Riles, Classical and Quantum Gravity 28, 215006 (2011)
3. L. Sammut, C. Messenger, A. Melatos and B. J. Owen arXiv:1311.1379 (2013)

重宇 c27 超巨大ブラックホールと恒星質量ブラックホールの比較

本田 扶紀 (日本大学大学院理工学研究科物理学専攻宇宙物理学研究室 M1)

超巨大質量ブラックホールや恒星質量ブラックホールなど、様々な質量のブラックホールが存在すると考えられている。この研究の目的は、それらブラックホール天体が示す観測の特徴が、ブラックホールの質量にどのように依存するのかを明らかにすることである。そこで、強度変化とそれに伴うスペクトル変化に着目し、それらの関係を相互相関関数を用いて定量的に評価する。現在、相互相関関数のプログラムと shot-noise などのシミュレーションのデータを作成し、プログラムとその結果を検証している。しかし、実際に観測されるデータは非周期的で離散的であるので、離散相関関 (Discrete Correlation Function, Edelson & Krolik 1988) を用いて、解析を行う。今後は、ISS の日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに設置された X 線観測装置である MAXI や NASA の X 線天文衛星 RXTE で観測された非周期的で離散的な実際のデータを使い、質量依存性を明らかにしていく。

1. S.Shapro & S.Teukolsky 『Black holes, White Dwarfs, and Neutron Stars』, A Wiley-Interscience Pub.(1983) Shakura & Sunyaev
2. H.Negoro 『Hard X-ray Time Lags in Accreting Black-Hole Systems』
3. 福江純 『輝くブラックホール降着円盤』 プレアデス出版

重宇 c28 FastSound 計画：サーベイの進展状況

舎川 元成 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 D1)

FastSound 計画は、すばる望遠鏡の近赤外分光装置 FMOS を用いた宇宙論を目的とした大規模銀河サーベイである。本サーベイは地球上の合計約 30 平方度の領域で、赤方偏移 $z=1.2-1.5$ の約 5,000 の星形成銀河を分光観測し、H α 輝線により赤方偏移を測定することで、銀河の三次元地図を作成する。この銀河三次元分布から赤方偏移空間歪み (RSD)

効果を検出し、大規模構造の形成のスピード $f\sigma_8$ を測定することで、加速膨張の起源の可能性である修正重力理論を観測的に検証することが最大の科学目標である。

本講演では、FastSound 計画の進展状況を報告する。本計画では、CFHTLS Wide の可視 5 バンドを用いた photometric redshift および H α flux 推定を基にした分光ターゲット選択を行い、35 夜の観測を行った。観測は 2014 年 7 月をもって完了し、FIBRE-pac(Iwamuro et al. 2012), FIELD(Tonegawa et al., 2014) によるデータ処理を行った結果、 $S/N > 4.5$ の輝線天体を約 4,000、 $S/N > 3.0$ の輝線天体を約 6,000 得ることができた。起こりうる系統誤差の可能性を検討し、現在最終的な $f\sigma_8$ 測定結果に向けて精密な統計解析を行っている。本講演では、最終的に得られた輝線銀河カタログの詳細と、可能であればパワースペクトルや二点相関関数についての preliminary な解析結果などを報告する予定である。

重宇 c29 Langevin description of gauged scalar fields in a thermal bath

宮本 裕平 (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 D3)

We study the dynamics of the oscillating gauged scalar field in a thermal bath. A Langevin type equation of motion of the scalar field, which contains both dissipation and fluctuation terms, is derived by using the real-time finite temperature effective action approach. The existence of the quantum fluctuation-dissipation relation between the non-local dissipation term and the Gaussian stochastic noise terms is verified. We find the noise variables are anti-correlated at equal-time. The dissipation rate for the each mode is also studied.

1. Y. Miyamoto, H. Motohashi, T. Suyama and J. Yokoyama, Phys. Rev. D 89, 085037 (2014)

重宇 c30 ブラックホールからのエネルギー抽出について

中川 智希 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

非常に明るい活動的銀河中心核には大質量ブラックホールが存在すると考えられている。その活動性のエネルギー源の一つの可能性としてブラックホールの回転エネルギーを電磁的に抽出するという考えが提出されて久しい。Brandford と Znajek (1977) は特殊な状況でブラックホールの地平面に向かい側のエネルギーが流れる、つまり、ブラックホールから外向きにエネルギーが流れるモデルを示した。現在ではその過程を調べるために、そのブラックホール磁気圏を相対論的MHD数値計算コードを用いて調べられている。相対論的な重力のもとでの電磁気学の基本方程式とプラズマの運動を数値的に取り扱うことが可能になった現在でも不明な点が多い。Brandford-Znajek過程はブラックホールの磁気圏がプラズマで満たされ、電磁場が優勢である場合、ポインティングフラックスが生成される過程である。さらにパルサー (回転する中性子星) と似たふるまいの数学的モデルとして議論されるが、ブラックホールの地平面と星の表面との境界で物理的条件が異なる。そのため、Brandford-Znajek (あるいはそれを発展的に論じたMacdonald & Thorne (1982)) の状況設定を疑問視する考えがある。(例えば、Punsly & C

oroniti (1990))。これらの点を明らかにすることが数値計算の物理的状況設定(境界条件)においても重要となる。本研究発表ポスターでは軸対象で定常的な過程で起こると仮定する。一般相対論で記述される曲がった空間での電磁気学をまとめたうえで、Brandford-Znajekのモデルとその不都合な点を紹介する。さらにその問題点を克服するために現在進行中の我々の研究の目標とその手法を述べる。これらの理論的解析はBrandford-Znajek過程がいかなる状況で働くのかの考察として役立てたい。

重宇 c31 位相欠陥を源とする重力源

小川 達也 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M2)

我々の宇宙には基本的な相互作用が4つあることが知られている。その4つとは、「強い相互作用」「弱い相互作用」「電磁相互作用」「重力相互作用」である。現在の素粒子標準模型では、これらの相互作用の内、弱い相互作用と電磁相互作用はSU(2) × U(1)の対称性を持つゲージ理論であるワインバーグ・サラム理論によって統一されており、強い相互作用はSU(3)対称性を持つゲージ理論である量子色力学によって記述される。残る重力相互作用を記述するためには、量子論的に重力を取り扱う理論、すなわち量子重力理論が必要となるがこれは未完成の理論である。重力相互作用を除く、3つの相互作用を、より高い対称性を持つゲージ理論により統一しようとする試みは盛んにおこなわれている。この理論が大統一理論(GUT)である。初期宇宙のような非常に高温な状態では、大統一理論で考えられているような相互作用の統一が起こり、真空は高い対称性を持っていたと考えられる。この高い対称性を持つ真空は、宇宙が進化し、温度が下がるにつれて、ある種の相転移を起こし、より低い対称性を持つ真空に変化したと考えられる。この、真空の相転移が起きる際に、位相欠陥と呼ばれるソリトンがヒッグス機構に伴い生成される。位相欠陥は未だに観測されていないが、特徴を持った重力場のソースとなることが知られている。この重力場によって起こされる重力レンズの効果は理論的に予言することが出来、観測結果がこの予言と一致するならば、位相欠陥が存在する、と言うことが出来る。例えば、宇宙ひもについて考えたとき、我々が頭に思い浮かべる「ひも」の形以外にも、ひも内部に構造を持った様々な宇宙ひもを考えることが出来る。この宇宙ひもにより生成される重力場は、通常の形状の宇宙ひもにより生成される重力場とは異なる。このようにして考えた、修士論文の研究である「位相欠陥を源とする重力場」について、経過報告を行う。

1. Cosmic Strings and Other Topological Defects

重宇 c32 一般相対論的な三体問題に対する三角解の線形安定性

山田 慧生 (弘前大学 浅田研究室 D3)

我々は、一般相対論的な任意質量の三体問題に対する三角解の線形安定性を議論する。

現在、日本のKAGRAをはじめとして世界中で次世代の地上重力波検出計画が盛んである。これらの重力波検出器では、重力波の波形を予測していなければ実際の検出が困難であり、そのため、重力波の源となる天体ダイナミクスの理解は必要不可欠である。実際、有望な重力波源である連星ブラックホール等の軌道運動や合体によって放出される重力波の理論予測が活発に行われている。

他方で、一般相対論的な三体系ダイナミクスの理解の重要性が増している。最近、重力波源となり得る一般相対論的な三体系が発見され、また、連星の外側に第三体が存在する場合、それによる三体相互作用が連星のダイナミクスや重力波放出に強く影響することが指摘されている(Ransom *et al.* 2014; Wen 2003; Seto 2013)。

本研究では、Newton 重力におけるLagrangeの正三角解に対応する、一般相対論的な任意質量の三体問題に対する三角解(Yamada & Asada 2012)の線形安定性を調べた。Lagrangeの正三角解が線形安定であるための条件は天体の質量比に対するそれとして与えられる。今回、三体のうち一つを質量ゼロのテスト粒子とする制限三体問題における先行研究(Douskos & Perdios 2002)と比較し、一般相対論的な三体相互作用がこの条件に如何に影響するかを議論する。

1. S. M. Ransom *et al.*, Nature **505**, 520 (2014); L. Wen, ApJ **598**, 419 (2003); N. Seto, PRL **111**, 061106 (2013).
2. K. Yamada & H. Asada, PRD **86**, 124029 (2012).
3. C. N. Douskos & E. A. Perdios, Celest. Mech. Dyn. Astron. **82**, 317 (2002).

重宇 c33 ダークマターハローの速度分散の非等方性に関する考察

浅羽 信介 (名古屋大学 C研 D1)

超新星の観測より現在の宇宙は加速膨張していることがわかっている。この加速膨張を説明する理論としてダークエネルギーモデルと修正重力理論がある。両者の理論では、物質の密度揺らぎや速度の発展が違うことが知られている。よって、観測から銀河の空間分布の情報を得ることで両者の理論を区別することができる。特に、分光観測から得られる赤方偏移空間の銀河分布が銀河の固有速度によって歪む効果(赤方偏移変形)の情報が修正重力理論の制限において有用であることが知られている[1]。その一方で、銀河の固有速度を直接観測することで密度揺らぎの線形成長率のスケール依存性を測定することができるようになってきた[2]。線形成長率がスケールによって変化することは修正重力理論の一つの特徴であり、固有速度の直接観測は修正重力理論の制限において重要である。しかし、固有速度の測定において非線形効果の理解は完全ではなく、大きな不定性となっている。宇宙論的N体シミュレーションから銀河の固有速度の方向の並び方と大規模構造には相関があることが確かめられており[3]、これは固有速度の非線形性の理解の手助けになると考えられる。今回は、ダークマターハローの速度分散の非等方性に着目する。ダークマターハローの速度分散も修正重力理論の影響を受けるため、修正重力理論の制限に使える。また、速度分散の非等方性と大規模構造の相関を調べることで銀河の固有速度の非線形効果を理解することができ、更なる重力のテストをすることができる可能性がある。

1. S. Asaba, C. Hikage, K. Koyama, et al. 2013, jcap, 8, 29
2. A. Johnson, C. Blake, J. Koda, et al. 2014, arXiv:1404.3799
3. J. E. Forero-Romero, S. Contreras, & N. Padilla, 2014, arXiv:1406.0508