

---

素粒子・重力・宇宙 アブストラクト集  
2022年度 第52回 天文・天体物理若手夏の学校

---

---

向山信治（京都大学 基礎物理学研究所 教授）

## EFT of scalar-tensor gravity with timelike scalar profile

This is an introductory talk on the effective field theory (EFT) of scalar-tensor gravity with timelike scalar profile. This EFT is motivated by many cosmological models such as inflation and dark energy (DE), where a scalar field has timelike gradient. Moreover, if one hopes to learn something about scalar field DE from astrophysical black holes (BHs) then one needs to consider BH solutions with timelike scalar profile. We begin with the systematic construction of such an EFT on the Minkowski background and then extend it to homogeneous and isotropic cosmological backgrounds and finally to arbitrary backgrounds. The resulting EFT can in principle be applied to any BH background with a timelike scalar field responsible for DE. We also show concrete examples of such BH backgrounds.

---

二間瀬敏史（京都産業大学 理学部 宇宙物理・気象学科 教授）

## 観測的宇宙論研究の発展と展望

講演者が体験してきた日本における観測的宇宙論の発展とその折々での話題、今後の展望について述べる。

## photon sphere の一般化「dark horizon」 天羽 将也 (京都大学基礎物理学研究所 D1)

過去数年間、ブラックホールの観測がめざましい発展を遂げてきた。加えて、数理的側面からも、過去何十年にも渡って、ブラックホールの豊富な性質が明らかにされてきた。本発表では、この「ブラックホール (以下 BH)」にまつわる概念について再考する。

数理的に厳密には、BH は「未来光的無限遠と因果的曲線で結べない領域」として定義され、BH の外から BH の中を観測することはできない。一方、現実的には、わずかに BH の外の領域についても、そこからの光などを遠方で観測することはほとんど不可能である。例えば、(典型的な) 静的球対称 BH において、シャドウとして暗く見える領域の境界は、事象の地平面ではなく、それよりいくらか外側にある photon sphere と呼ばれる面で記述される。より一般に、静的球対称な時空においては、シャドウとして暗く見える領域の境界は photon sphere で与えられることが分かっており、また photon sphere に関する数理的に豊富な性質も明らかにされている [1]。一方、対称性がない時空においては、photon sphere の定義は機能しない。対応する概念をどう定式化すべきか、まだ研究者の間で合意に達していない。

そこで本発表では、未来光的無限遠への光の到達条件 [2] をもとに、photon sphere を対称性を課さない時空に一般化した dark horizon を導入する。そして、現実の BH を良い近似で記述する Kerr BH において、dark horizon の形状を明らかにし、シャドウとの関係について議論する。

1. C. M. Claudel, K. S. Virbhadra, and G. F. R. Ellis, *J. Math. Phys.* **42**, 818 (2001).
2. M. Amo, K. Izumi, Y. Tomikawa, H. Yoshino, and T. Shiromizu, *Physical Review D*, **104**, 6 (2021).

## 膨張宇宙における重力メモリー効果 橋本 祥吾 (近畿大学総合理工学研究科 M1)

一般相対論の物理的帰結として代表的な現象の一つとして重力波がある。重力波はコンパクトな天体の連星衝突や超新星爆発などによって発生する。重力波が干渉計を通過すると、時空が伸縮することによって干渉計の相対位置が振動するということがよく知られている。重力波の通過後、しばらく時間が経過すると、その振動が落ち着き元の位置に戻るはずである。しかし、それらの干渉計は元の位置に戻らず、重力波が通過した後でも形が変化したままの状態となる。これを重力メモリーという。このメモリー効果は、漸近平坦な時空のみの現象ではなく、膨張宇宙における重力波に対しても起こりうる。宇宙膨張の効果が通常重力メモリー効果にどのような影響を与え得るのかは宇宙論の観点からも重力波天文学の観点からも興味深い問題である。本発表では A. Kehagias と A. Riotto の論文 [1] を元に、膨張宇宙における重力メモリー効果を解説し、BMS 対称性との対応について紹介する。

1. A. Kehagias and A. Riotto, *BMS in cosmology*, *JCAP* **05**, (2016) 059

## Null Energy Condition を満たすバウンス宇宙モデル

橋本 勇輝 (福島大学 M1)

近年提唱されている宇宙論の1つに、バウンス宇宙論がある。バウンス宇宙論とは、宇宙が膨張後収縮し、再び膨張するという理論である。このバウンス宇宙モデルによって、初期特異点を回避し、宇宙の平坦性・地平性問題などの解決が見込まれている。

バウンスを起こすモデルとして、Ekpyrotic モデルや、Matter Bounce モデルなど、これまで様々なモデルが提案されてきた [1]。そのほとんどが、ヌル・エネルギー条件 (Null Energy Condition, NEC) の破れを必要とするモデルであったが、NEC の破れには解の不安定性を引き起こすなどの問題があり、いかにして解の不安定性を取り除くかが重要な研究テーマだった。2012 年には、Ekpyrotic モデルと Matter Bounce モデルの特性を融合させ、NEC の破れによる不安定性を取り除いた新たなモデルが発表された [2]。しかし最近、空間曲率が正であるという条件下であれば、NEC を破ることなくバウンスが実現可能である事が示された [3]。これにより、安定したバウンスモデルの構築が可能になるのではないかと期待されている。

本発表では、先行研究 [4,5] に基づき、バウンスの条件やその不安定性についてのレビューを行うと共に、[3] に基づき NEC を満たすバウンスモデルの数値解析を行い、その結果について考察する。

1. Jean-Luc Lehners, Ekpyrotic and Cyclic Cosmology, Phys. Rept., 465:223–263, 2008. 4
2. Yi-Fu Cai, Damien A. Easson, and Robert Brandenberger, Towards a Nonsingular Bouncing Cosmology, JCAP, 08:020, 2012.
3. Ozen, Gungor and Glenn D. Starkman, A classical, non-singular, bouncing universe, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2021(04):003, 2021.
4. M. Novello and S. E. Perez Bergliaffa, Bouncing Cosmologies, Phys. Rept., 463: 127–213, 2008.
5. D. Battefeld and Patrick Peter, A Critical Review of Classical Bouncing Cosmologies, Phys. Rept., 571:1–66, 2015.

## The 21 cm hydrogen emission line during the epoch of reionization

Hidayat Wildan (Kumamoto University)

After the recombination era ( $\sim 340,000$  years after the Big Bang), neutral hydrogen and helium dominated the components of our universe. It became the starting point of the dark age when neutral matter took time to evolve to form the first stars and galaxies under the influence of gravity. Fortunately, the 21 cm hydrogen emissions line produced from the recombination due to the hyperfine structure helped this development and lead us to the epoch of reionization (EoR) [1][2]. Furthermore, the emissions are affected by some evolution mechanisms, for example, the Wouthuysen-Field effect, X-ray heating, and reionization. Therefore, this signal carried the ionization fraction, baryon density distribution, spin temperature, and peculiar velocity information, which could lead us to understand

the physical processes of the structure evolution during EoR [3]. It will link our understanding of the evolution from smooth matter distribution in the early universe to the complex distribution of stars and galaxies at redshift  $< 6$ .

The 21 cm hydrogen emission line is hard to observe because of the weak signal detected by the interferometer. Specifically, the emission signal buried by foreground contaminants came from smooth continuum spectra of the cosmological distant galaxy's faint emission, diffuse synchrotron emission, radio recombination line, free-free emission, etc [2]. Fortunately, the most problematic foreground emission spectra are smooth in frequency. It partially mimics the spherical symmetry of the EoR signal [4]. Therefore, some of the possible methods to remove the foreground signal are the correlation of visibilities in widely separated frequency channels or spectral fitting techniques [5].

1. Georgiev, et al., MNRAS, 513, 1-16, 2022
2. Shimabukuro, et al., Publ. Astron. Soc. Japan, 1-30, 2022
3. Mesinger, et al., MNRAS, 411, 955-972, 2011
4. Morales, et al., ApJ, 615, 7-18, 2004
5. Zaldarriaga, et al., ApJ, 608, 622-635, 2004

## massive Brans-Dicke 理論と parameterized post-Einstein 形式を用いた重力波解析

東野 優里香 (早稲田大学 M2)

一般相対論は、太陽系や連星パルサー等の多くの観測により裏付けられている。しかし、その多くは、静的で弱い線形な重力場を前提としており、動的な強い非線形な重力場での検証が必要である [1]。強い重力場における理論を検証する方法として、重力波が注目されている。2015 年に、重力波の直接観測に成功して以来、重力波の地上観測基地として LIGO(米)、VIRGO(仏・伊)、KAGRA(日) が利用されているほか、宇宙観測基地として LISA や DECIGO の建設計画も進められている。

重力波の波形を解析し、重力理論を検証する方法の一つに parameterized post-Einstein (ppE) 形式 [2] がある。ppE 形式は、観測に基づいたボトムアップ式の検証方法で、一般相対論で予想される周波数表示の重力波からのずれを理論を特徴づけるパラメータ (ppE パラメータ) で展開したものである。この形式を用いると、各 ppE パラメータに対して観測結果から制限をつけることが容易であり、ppE パラメータを構成する各種重力理論特有の定数に観測制限を与えることができる。

スカラーテンソル重力理論の代表例である massive Brans-Dicke 理論 [3] に対し、ppE 形式を用いて観測制限を与えることが目的である。今回は、先行研究 [4] を参照し、レビューする。

ppE 形式を考える場合の多くは、スカラー場によって時空構造が影響を受けないようなブラックホール連星を想定しているが、中性子星・ブラックホール連星から放出された可能性のある重力波 (GW190814, GW200210\_092254) も観測されている。ブラックホール連星を想定する場合は、ス

カラー場による補正が小さいが、重力波源に中性子星が含まれる場合、自発的スカラー化などによりスカラー場の影響が強く反映され、従来とは異なった制限が期待できる。

1. Nicolás Yunes and Xavier Siemens, Living Reviews in Relativity, 16, 2013
2. Nicolás Yunes and Frans Pretorius, Physical Review D, 80, 2009
3. Justin Alsing and Emanuele Berti and Clifford M. Will and Helmut Zaglauer, Physical Review D, 85, 2012
4. Tan Liu and Wen Zhao and Yan Wang, Physical Review D, 102, 2020

## Review: Incorporating galaxy cluster triaxiality in stacked cluster weak lensing analyses

廣畑 秀秋 (広島大学 M1)

数多くの銀河団を観測するで宇宙論をより精密に精査することができるが、系統誤差をうまくコントロールしなければならない。この論文 [1] では、Buzzard シミュレーションを用いて、redMaPPer アルゴリズムで特定された銀河団の triaxiality という系統誤差を定量化する。まず銀河団の形状と主軸向きについて redMaPPer のセクションバイアスを検証すると、redMaPPer は主軸向きのみバイアスがあり、主軸が視線方向に沿っている銀河団を優先的にセレクトしていた。また銀河団のリッチネスと質量の関係をモデル化すると、主軸が視線方向に沿っているほど観測されるリッチネスが大きくなることが分かった。

次に銀河団観測で出てくる miscentering と projection というすでによくモデル化された系統誤差と triaxiality の各々の関係を調べると、いずれも独立な系統誤差であると確認できた。最後に triaxiality が弱い重力レンズ効果にどのぐらい影響を及ぼすかを質量のバイアスで見積もった。

今回この論文をレビューをするにあたって表式の間違いを訂正し、また疑問に思った箇所をまとめています。

1. Zhuowen Z et al., arXiv:2022.08211,

## D 次元時空に対する摂動と Tidel Love Number の関係

飯塚 颯見 (立教大学 理学研究科 物理学専攻 M1)

連星系を成す星は各々に潮汐力が働いて歪む。星が歪む度合いは Tidel Love Number (TLN) と呼ばれるパラメータで記述でき、重力波を用いて評価することができる。この量は 4 次元時空において、ブラックホール以外の星では  $TLN \neq 0$  であるが、ブラックホールでは  $TLN = 0$  となることが知られている。従って、重力波観測から TLN を読み取ることで天体を区別することができる。また、高次元時空において TLN を調べた先行研究では、 $D (D \geq 4)$  次元のシュヴァルツシルトブラックホール周りにスピン  $S = 2$  の静的な場を摂動として加えた状況で TLN を解析すると、 $D > 4$  のスカラーモードとテンソルモードでは、 $TLN \neq 0$  であることが示された。一方、 $D = 4$  の場合、全てのモードで  $TLN = 0$  になることが示された。このことから、 $TLN = 0$  となるのは  $D = 4$  の時のみ起

こる現象であると予想され、時空の次元と TLN の関係は理論的な側面からも興味深い対象となる。

本発表では、時空の次元と TLN の関係について紹介する。まず、すでに計算されていた  $D$  次元シュヴァルツシルト (アンチ) ド・ジッター時空に  $S = 0$  のスカラー摂動を加えた場合を考え、TLN と同じオーダーの量 (TLN') と時空の次元の関係について再検証する。結果として、 $D = 4$  の時に TLN' = 0 となることが示された。すなわち、 $S = 0$  の場合も  $D = 4$  であることが TLN' = 0 となることに寄与していると考えられる。そこで、 $D$  次元かつ  $S = 2$  の摂動を加えた場合を考え、まだ未検証だったベクトルモードを含む全てのモードについて TLN を調べる。そして  $D = 4$  でのみ TLN = 0 となるのか検証する。

1. L. Hui, A. Joyce, R. Penco, L. Santoni and A. R. Solomon, JCAP **04**, 052 (2021)

## 静的および動的時空における Ryu-Takayanagi 公式と量子情報

井上 直人 (近畿大学大学院 M1)

ブラックホールは星が重力崩壊したことによって生じた天体であることを考慮すると、星内部の情報はブラックホールの内部に隠されてしまっていると考えられる。しかし Bekenstein-Hawking 公式によって示されたブラックホールの隠し持つ情報量 (エントロピー) は熱力学のエントロピーと異なる性質を持つものであった。そこで 't Hooft と Susskind は、この違いが次元の違いから生じていると考えホログラフィ原理を提唱し、1997 年には Maldacena が「 $d+1$  次元の反ド・ジッター空間の量子重力理論は、その境界上における  $d$  次元共形場理論と等価である」という AdS/CFT 対応を発表した。

AdS/CFT 対応の発展として Ryu と Takayanagi は時刻一定面において  $(d+2)$  次元の AdS 時空における  $d$  次元の極小曲面の面積から、 $(d+1)$  次元共形場理論におけるエンタングルメント・エントロピーが導出できると提唱した [2][3]。さらに Ryu-Takayanagi 公式は静的な AdS 時空における考察であったが、最近になって Tsujimura と Nambu はこの極小曲面をヌル超曲面と解釈することで静的時空から動的時空へとこれを拡張した [4]。

本発表では Ryu-Takayanagi の論文 [2][3] と Tsujimura-Nambu の論文 [4] の解説を行う。

1. S. Ryu and T. Takayanagi, Physical Review Letters, **96**, 181602, 2006
2. S. Ryu and T. Takayanagi, Journal of High Energy Physics, **8**, 45, 2006
3. J. Tsujimura and Y. Nambu, Entropy **2020**, **22**, 1297, 2020

## 三次元二点相関を用いた測光観測による BAO の測定

石川 慶太郎 (名古屋大学大学院 理学研究科 宇宙論研究室 M1)

銀河観測の手法は大きく分けて、分光観測と測光観測がある。分光観測は銀河までの正確な赤方偏移は分かるが明るい銀河しか観測できない。一方、測光観測は暗い銀河もまとめて撮像できるというメリットがあり、サンプル数を十分確保出来るので統計的精度も期待できる。しかし測光観測は銀河までの赤方偏移推定の不定性が大きい。そのため、これまでの測光観測による銀河のクラス

リング解析では視線方向の情報に依らない統計量を用いて解析が行われてきた。[1]

銀河分布の二点統計量には、銀河間距離約 100 Mpc/h で特徴的な相関の増大が確認できる。これは宇宙年齢約 38 万年頃にバリオンと光子が脱結合するまでの音響振動 (BAO) の痕跡である。BAO ピークの位置は共同座標系において時間進化しないため、この BAO スケールは線形理論で精密に予測可能な量であり、宇宙の標準ものさしとして宇宙論検証に用いることができる。

本研究では、三次元の情報を保持したまま測光観測による BAO の測定を目指す。そのために、銀河の三次元分布に対する二点相関のモデルに測光的赤方偏移の不定性の効果を取り入れた。このモデルの正当性を確かめるために、1 Gpc 立方の銀河の模擬観測データを作成して測光観測を再現し、BAO スケールを見積もった。そして仮定した宇宙論からのズレを測定することで、実観測データで許容できる測光赤方偏移不定性の大きさを示す。

本研究の結果、HSC などの現行の測光観測で到達可能な赤方偏移  $z \sim 1$  では測光的赤方偏移不定性が 1 % までなら許容できる可能性を示した。また、本講演では将来の測光観測で期待される赤方偏移不定性の大きさとも照らし合わせて議論する。

1. Abbott, T. M. C. et al., Physical Review D, Volume 105, 2022

## Starobinsky model vs. Higgs inflation model

鄭 玄 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 修士課程一年)

アインシュタインの一般相対性理論は、太陽光の屈折や近日点移動など、様々な実験事実と整合のとれた素晴らしい理論であるが、地平線問題や平坦性問題など、その範疇では解決しきれていない問題を抱えている。我々の欲しいシナリオとは、これらの問題を解決するのに十分な加速膨張期を実現したのちに、とある時点で加速膨張を終わらせてフリードマン宇宙に移り、ビッグバン元素合成等をおこなってくれるようなものである。

このシナリオを実現するインフレーションモデルの候補は多岐にわたる。その中でも、WMAP や Planck の観測結果との相性が良いとされているモデルというのが、Starobinski model と Higgs inflation model である。前者はアインシュタインヒルベルト作用に曲率二乗項  $R^2$  を付け加えたモデルであるのに対し、後者は、曲率項と標準模型のヒッグス場  $H$  との非最小結合項  $\xi |H|^2 R$  を付け加えることで、ヒッグス場にインフラトンの役割を担わせたモデルである。これらをとあるフレーム (Einstein frame) で見ると、両者とも同じ形のインフラトンのポテンシャルを持つことがわかり [1]、このポテンシャルが加速膨張期と再加熱期を実現することが明らかとなる。

両者とも同じ形のインフラトンのポテンシャルを与えるにも関わらず、それらの再加熱期の様子は大きく異なっており、とても興味深い。Starobinsky model の場合は、インフラトンの摂動論的な崩壊が主要に起こるのに対し、Higgs inflation model の場合は、その非最小結合項の結合定数が大きいことが原因で、より効率的な崩壊 (preheating) が主要に起こることとなる [2]。特にインフラトンのエネルギーが、ゲージボソンの縦波成分へと激しく流入し、爆発的な粒子生成が引き起こされる。この時、生成されたゲージボソンの運動量がカットオフスケールを超える可能性があるため、紫外問題も抱えている [3]。

本発表では、以上のことについて詳細に議論し、再加熱機構になぜこのような相違が生じたかについて明らかにしたのち、今後の展望について議論する。

1. K. Maeda, "Towards the Einstein-Hilbert action via conformal transformation", *Phys. Rev. D* 39 (1989) 3159-3162.
2. F. Bezrukov, D. Gorbunov and M. Shaposhnikov, "On initial conditions for the Big Bang", *JCAP* 06 (2009) 029, arXiv:0812.3622 [hep-th]
3. Y. Ema, R. Jinno, K. Mukaida and K. Nakayama, "Violent preheating in inflation with nonminimal coupling", *JCAP* 02 (2017) 045, arXiv:1609.05209 [hep-th].

## 背景重力波エネルギースペクトルの上限値の推定について

覚 依珠美 (大阪公立大学理学研究科 重力波実験物理学研究室 M1)

背景重力波 (stochastic gravitational wave background, SGWB) とは、宇宙初期のインフレーションや連星合体、超新星爆発などの様々な起源による数多くの弱い重力波のインコヒーレントな重ね合わせであり、もし直接観測することができれば、初期宇宙の詳細な様子の解明やそれぞれの天体現象の理解に大きな貢献をもたらすと期待されてきた。現在重力波観測の主流は地上のレーザー干渉計を用いた観測である。背景重力波の特徴は、その振幅が重力波検出器雑音に比べて極めて小さいことと、予測のできない確率論的な波形を持っていることである。このため、2台以上の干渉計を用いて、得られた信号の相関を取ることで解析を行うという手法が取られている。

これまで第1次観測 ("O1", 2015年11月-2016年1月), "O2"(2016年11月-2017年8月), "O3"(2019年4月-2020年3月)と3度に渡る国際共同観測が行われてきており、O1,O2ではアメリカにあるレーザー干渉計 LIGO で [1][2], O3では LIGO とイタリアにあるレーザー干渉計 Virgo[3] で観測されたデータを用いて背景重力波の探索がそれぞれ行われてきた。しかし、これまでの解析では、各観測において背景重力波存在の証拠の発見には至らず、背景重力波の上限値が推定された。これによると、臨界密度で規格化した重力波のエネルギー  $\Omega_{\text{GW}}(f)$  について上限値  $5.8 \times 10^{-9}$  (信頼度 95%, 周波数に依存しない場合) と求められている。

本発表では、地上での背景重力波の観測方法に触れた後、これまで行われてきた観測での upper limit の推定方法について紹介する。

1. B.P.Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* 118, 121101, 2017
2. B.P.Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), *Phys. Rev. D* 100, 061101(R), 2019
3. R. Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, and KAGRA Collaboration), *Phys. Rev. D* 104, 022004, 2021

## Affleck-Dine 機構による原始ブラックホール形成モデル

笠井 健太郎 (東京大学理学系研究科 修士2年)

近年、LIGO 重力波干渉計で 30 太陽質量程度の BH の連星合体が数多く観測されている。また  $10^5$  太陽質量程度以上の超大質量の BH はほぼ全ての銀河中心に存在すると考えられている。上記の BH が初期宇宙論的な起源を持つと考えると自然に説明可能であり、これは原始ブラックホール (PBH) と呼ばれる。[1]

宇宙の密度揺らぎは宇宙初期のインフレーションにおけるスカラー場の揺らぎに由来すると考えられている。密度揺らぎは、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) で観測されるスケールでほぼガウス統計性に従うことが確認されており、それより小さなスケールでもガウス統計性から大きくずれないとの見方が一般的である。従来、PBH はこの小スケールの密度揺らぎが重力崩壊してできるというモデルが典型的であったが、現在では CMB の黒体放射スペクトル歪曲や密度揺らぎの 2 次摂動による重力波による制限と矛盾する。 $0.1M_{\odot} \lesssim M \lesssim 10M_{\odot}$  及び  $10^5 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 10^9 M_{\odot}$  の PBH を形成する密度揺らぎは既に禁止されている。[2]

以上を踏まえ、我々は超対称性理論に基づいた PBH 形成モデルを構成し、上記の観測制限と矛盾せずに大質量 BH の起源を説明するパラメータ領域があることをそれぞれ示した [3]。本モデルでは、Affleck-Dine 機構と呼ばれるメカニズムで宇宙初期に局所的なレプトン数生成が起きる。これによって形成された高密度領域が重力崩壊し、PBH が形成される。本発表では、モデルの概略と、その帰結である PBH 同士の位置相関について議論する。

1. P. D. Serpico, V. Paulin, D. Inman, K. Kohri, Phys. Rev. Res. 2 (2020) 2, 023204
2. B. Carr, K. Kohri, Y. Sendouda, J. Yokoyama, Rept. Prog. Phys. 84 (2021) 11, 116902
3. K. Kasai, M. Kawasaki, and K. Murai, arXiv: 2205.10148 [astro-ph. CO]
4. F. Hasegawa, M. Kawasaki, JCAP 01 (2019) 027
5. M. Kawasaki, K. Murai, H. Nakatsuka, JCAP 10 (2021) 025

## 統合摂動論の基礎と物質優勢期における原始ブラックホールの形成

片山 友貴 (総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科素粒子原子核専攻 M2)

本発表は統合摂動論 [1] の基礎とその一例として物質優勢期の原始ブラックホール形成 [2] について簡単に紹介するレビュー発表を行う。

統合摂動論とはラグランジュ描像における摂動論をもとに、バイアスや赤方偏移空間変形の効果を含めて観測量の予言を統合的かつ一般的に行う手法で 2011 年に松原隆彦氏によって開発された。空間に固定された座標がオイラー座標で、流体の物理的状態をこの座標で定義された変数で表現することをオイラー描像と呼ぶ。一方、ある物質素片が初期時刻に存在していた座標がラグランジュ座標で、この座標で定義された変数で表現することをラグランジュ描像と呼ぶ。標準摂動論ではオイラー描像によって記述されているが、天体形成は初期揺らぎの状態によって決定されているため

にラグランジュ描像で処理することが自然である。また標準摂動論を拡張するために、多点伝播関数を用いて摂動項の一部を部分的に無限次数まで足し上げる事を考える。さらにくり込まれたバイアス関数を導入し、バイアス関数の概念を拡張できる。[1]

次に統合摂動論を用いた比較的最近の一例として原始ブラックホールを考える。今日ではさまざまな観点から非常に強く注目されている原始ブラックホールの形成は主に放射優勢期になされると考えられている。しかし、初期宇宙においてインフラトン場やカーバトン場などの非相対論的有質量スカラー場が崩壊するまで、エネルギー密度は  $\rho \propto a^{-3}$  が支配的になる。実際に標準モデルを超えた理論で予言されているモジュライ場やディラトン場の寿命は長い。そのことから放射優勢期よりも前の物質優勢期で原始ブラックホール形成が実現されうる。このことを統合摂動論を用いて議論していく。[2]

1. T.Matsubara, PhysicsRevD, 83, 8-15, 2011
2. T.Matsubara,T.Terada,K.Kohri,S.Yokoyama, PhysicsRevD, 100, 12-15, 2019

## 背景磁場によるアクシオン-光子変換とアクシオン雲の減衰 勝又彰仁 (立教大学 M1)

本発表は [1] のレビューである。回転ブラックホール近傍でスカラー場の波を考えると、ブラックホールの回転エネルギーが引き抜かれ、反射波の振幅が増大する場合がある(超放射)。さらに、スカラー場が質量をもっている場合には、増幅された波が質量によって閉じ込められ、超放射を繰り返して指数関数的に増大することがある。これを超放射不安定性という [2]。

有質量スカラー場として QCD アクシオンに似た性質をもつ Axion-like Particles (ALPs) を考えた場合、この超放射不安定性によって ALPs は指数関数的に成長し、アクシオン雲を形成する。ところが、ALPs は背景磁場と相互作用して光子に変換されるという性質をもつ(アクシオン-光子変換)。したがって、背景磁場を考えると、回転ブラックホール近傍のアクシオン雲に対して、アクシオン-光子変換による減衰と超放射不安定性による成長が競合する可能性がある。そこで、本発表ではアクシオン-光子変換がアクシオン雲の成長率および減衰率に与える影響について考える。まず、背景磁場としてモノポール磁場と一様磁場をそれぞれ仮定し、アクシオン-光子変換によるアクシオン雲の減衰率を求める。さらに、得られた減衰率を成長率と比較し、どちらが優勢であるかを議論する。

1. C. M. Yoo, A. Naruko, Y. Sakurai, K. Takahashi, Y. Takamori and D. Yamauchi, Publ. Astron. Soc. Jap. **74**, no.1, 64-72-72 (2022) doi:10.1093/pasj/psab110 [arXiv:2103.13227[hep-ph]].
2. S. L. Detweiler, Phys. Rev. D **22**, 2323-2326 (1980) doi:10.1103/PhysRevD.22.2323

## Gauss-Bonnet 項を含むインフレーションモデルでの PBH 形成

川口 遼大 (早稲田大学 M1)

現在の宇宙にはダークマター (以下 DM) と呼ばれる未知の成分が宇宙全体の約 27% を占めていることが分かっている。DM の候補としては素粒子論起源のアクシオンや超対称性粒子などが理論的に考えられているが、未だに発見されてはいない。別の DM 候補として、原始ブラックホール (以下 PBH) は近年盛んに研究の対象となっている。本講演ではダークマター候補としての PBH 形成について説明をする。

宇宙初期にある一定以上の密度を持つ領域が存在した場合、その領域が圧力に打ち勝って重力崩壊しブラックホールとなることが考えられている。このように形成されたブラックホールを PBH と呼ぶ。PBH は恒星の進化の最終段階として形成されるブラックホールとは異なり、様々な質量を持つことが可能である。特に  $10^{-15}M_{\odot} \sim 10^{-12}M_{\odot}$  程度の非常に軽い質量を持つ PBH には観測的な制限は無く、全てのダークマターを PBH のみで説明し得る可能性が残されている。

PBH が形成されるほど高密度な領域が存在するためには、宇宙初期に大きなゆらぎが必要となる。このゆらぎはインフレーション期に仕込まれたものと考えことにすると、これはつまり、大きな曲率ゆらぎを生じさせるインフレーションモデルを考えることに相当する。最も標準的なスローロールインフレーションでは PBH 形成は望めないため、別のインフレーションモデルが必要となる。そこで本講演では Gauss-Bonnet 項の存在が決定的な役割を果たす PBH 形成インフレーションモデル [1] をレビューする。

1. Primordial black holes from Gauss-Bonnet-corrected single field inflation, Shinsuke Kawai and Jinsu Kim, Phys. Rev. D 104, 083545 (2021)

## soft hair を帯びたブラックホールの熱力学

小林 元 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

本発表では [1] をレビューする。

ブラックホール (BH) 熱力学の研究は一般相対論による重力の定式化と熱力学が密接な関係にあることを示してきた。[2] では、一般座標変換不変性に対する保存電荷として BH のエントロピーを定式化し、熱力学第一法則を導出した。このことにより、対称性を通じた重力理論のミクロな自由度とマクロな熱力学変数との対応が示唆された。

[3] では、漸近的な境界条件から導かれる対称性に付随して、BH の事象の地平面に零エネルギーの重力子や光子 (soft hair) が生じていることが提案された。この新たなミクロ自由度により、BH のエントロピーの起源や BH 蒸発過程の量子状態のユニタリー発展性を説明し、情報喪失問題の解決が試みられたが、soft hair の量子論的な取り扱いについては議論の余地がある。

今回は別の方向性として、soft hair を伴い真空を非自明に遷移させる漸近対称性に対して [2] の方法を拡張することで、soft hair の持つ熱力学的意味について議論する。本発表では [1] に基づき、漸近対称性に伴い光的無限遠で生じる自由度と地平面に生じる自由度の関係を系統的に扱う方法を

導入し、保存則から各天球方向における熱力学第一法則を導出する。結果として soft hair の存在により地平面上に熱流が生じることが分かる。この結果は動的な BH の熱力学的性質の理解につながり、BH の形成と蒸発過程の精査や現実的な BH への適用が考えられる。さらに soft hair という境界の新たな自由度が時空の動的性質に寄与する本質的な役割を明らかにすることで、holography 原理の理解につながるとともに、幅広く非平衡現象や熱平衡化の理解にも役立つことが期待される。

## 参考文献

- [1] J. Kirklín, *Class. Quant. Grav.* **35**, no.17, 175010 (2018).
- [2] R. M. Wald, *Phys. Rev. D* **48**, no.8, R3427-R3431 (1993).
- [3] S. W. Hawking, M. J. Perry and A. Strominger, *Phys. Rev. Lett.* **116**, no.23, 231301 (2016).

## ミンコフスキー空洞内の荷電ブラックホール爆弾

小塚 友裕 (日本大学大学院総合基礎科学研究科相関理化学専攻 M 1)

40年以上前にプレスとトイコルスキーは、ブラックホール爆弾系という概念を構想した。これは、ミラー内に閉じ込められたカー・ブラックホールを散乱するスカラー場は、ミラーでの反射境界条件によって繰り返される超放射増幅を受けるといったものである。また、ボックス内に閉じ込められたライスナー・ノルドシュトロムブラックホール内を伝播する荷電スカラー場がある場合、同様の荷電ブラックホール爆弾システムが存在する。このような背景を伝搬するスカラー場は、超放射だけでなく、地平線近くのスカラー凝縮の不安定性と呼ばれるメカニズムに対しても不安定となる。この2つの不安定性は通常絡み合っているが、一方のみが存在する位相空間を想定し数値解析を行うことで、不安定性を持つために必要なブラックホールとスカラー場のパラメータを正確に特定することができる。この結果は、不安定性の時間発展に関するコーシー問題においてその初期データを選択するために有用なものとなる。また、最後に、運動方程式を使用しない簡単な熱力学モデルを用いて、毛状ブラックホールの熱力学的特性を予測する。本講演では以上の内容についてのレビューを行う。

1. Authors1, journal1, vol1, pages1, year1
2. Authors2, journal2, vol2, pages2, year2
3. Authors3, journal3, vol3, pages3, year3

## 複数場の $\alpha$ -attractors におけるインフレーション

松井 悠真 (名古屋大学大学院 理学研究科 M1)

本発表は [1] に基づいたレビューを行うものである。標準ビッグバン理論は宇宙の初期条件に対して、ホライズン問題や平坦性問題を抱えている。これらの解決策として、初期宇宙の加速膨張を論ずるインフレーション理論が議論されてきた。インフレーション理論は様々なモデルが考案されてきたが、典型的なモデルとしてスカラー場がゆっくりと変化するスローロールインフレーションが

挙げられる。一方で、標準模型を超える物理の枠組みとして超重力理論が有力視されている。この超重力理論に対応するようなインフレーションモデルとして、 $\alpha$ -attractors が考案されている。特にひも理論より、 $\alpha$ -attractors が複数の相互作用するスカラー場を持つことが示唆されている。インフレーションはスカラーゆらぎのパワースペクトルの波数依存性  $n_s$  を用いて、現在の標準宇宙モデルである  $\Lambda$  CDM から制限を付けることが出来る。しかし、 $\Lambda$  CDM はハッブル定数の近傍観測による観測値と CMB による観測値に齟齬が存在する問題点を抱えている。そこで、 $\Lambda$  CDM に代わる新しい宇宙モデルを考えると、 $n_s$  が  $\Lambda$  CDM の制限を超える値を取りうる可能性が考えられている。そのため、この可能性に合致するようなインフレーションモデルの構築が課題として挙げられる。本発表ではその候補として、複数場の  $\alpha$ -attractors を考える。インフレーションモデルでは、ポテンシャルの高さやインフレーション終了時のスカラー場の値によって、インフレーションの持続する長さが変わりうる。よって、これらのパラメータを変化させることで  $n_s$  の値を操作して、上の観測結果に合致する結果が得られるか確認することが今回の目的である。

1. Renata Kallosh and Andrei Linde, (2022), arXiv:2204.02425

## ブラックホールまわりの磁場構造

松尾 賢汰 (大阪公立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M1)

ブラックホールは光さえ抜け出すことのできない強重力天体ですが、その周りには降着しているガスがプラズマとなって磁場構造を作っています。そして、ブラックホール周りの磁場を解析するための方法としてグラド-シャフラノフ方程式 (GSE) を数値計算で解くことが知られています。しかし、ブラックホール周りの磁場を解析するためには force-free 近似や磁場の形状を予め決めておくなどの条件が多く、それらが現実を再現する良い近似なのかどうかも分かっていません。さらに、Light Surface(LS) では GSE が発散して一般に解くことが非常に困難となります。そこで、発散している場所を除いてそれぞれの領域で数値計算を行い、領域どうしを滑らかにつなぐような条件を課し、求めた結果が妥当かを考察します。さらに、ガンマ線バーストによる研究などで注目されている回転しているブラックホールのエネルギーを抜き出すブランドフォード-ナエク過程 (BZ 過程) について GSE で求めた磁場を使いそのエネルギーを推定して、最後にこれからの課題についてを議論していきます。なお、本発表では、参考文献 [1] をレビューします。

1. J.F.Mahlmann,P.Cerda-Duran,M.A.Aloy, arXiv:1802.00815v2,(2018)

## $\alpha$ -attractor と超重力理論

道信 祐吏 (京都大学基礎物理学研究所 M1)

インフレーションはインフラトンと呼ばれるスカラー場を用いて宇宙開闢の加速膨張を記述する理論である。弦理論などの基礎理論がインフレーションを通して観測的に検証可能であることから、そのモデルの確立は初期宇宙論の重要な課題である。これまで数多のモデルが提唱されてきたが、最新の BICEP/Keck の観測によりテンソル/スカラー比が Planck2018 の観測よりも強く制限され、

多くのモデルはその観測値から外れた。最も基本的な場の冪型のポテンシャルも観測から大きくずれたモデルの一つである。

しかし、パラメータ  $\alpha$  を用いてインフラトンの運動項を適当に変更することでテンソル・スカラー比を観測に合致させることができる。そして、その結果はほとんどポテンシャルの詳細に依らずに決まり、このことからこのモデルは  $\alpha$ -attractor と呼ばれる。本発表では、そのうち最も単純な T-model と E-model について、なぜそれらが現象論的に優れているのかを [1] に基づいてレビューする。

インフレーションの物理的な起源を知るためには、現象論的に観測に合致するモデルを構成するだけでは不十分である。従って、インフレーションが基礎理論からどのようにして自然に現れるのかが問題となる。 $\alpha$ -attractor の大きな特徴は、KKLT を通して超重力理論や弦理論においてそれが実現できるという点にあり、 $\eta$  問題を自然に解決できる利点がある。KKLT は、6次元に丸まった Calabi-Yau 多様体に  $\overline{D3}$ -brane を加え、それらの相互作用を通してインフレーションを引き起こす機構をもつ。本発表では、 $\overline{D3}$ -brane の幾何とインフラトンのポテンシャルが密接に対応することと、T-model および E-model がどのように実現されるかを [2] に基づき簡単に述べる。

1. R. Kallosh and A. Linde, JCAP 12, 008, 2021
2. R. Kallosh, A. Linde, D. Roest and Y. Yamada, JHEP, 07, 057, 2017

## 漸近的平坦な時空での量子重力理論に対するホログラフィック双対な場の理論の対称性

湊 恵太 (京都大学大学院理学研究科 M1)

本発表では [1] をレビューする。

量子重力理論の完成が物理学の長年の課題である。近年では、ホログラフィー原理 [2] をもちいて量子重力理論を境界の場の理論の言葉で記述しようという試みがなされている。ここでホログラフィー原理とは、ある時空の内部の情報はその境界の情報で記述されるという予想である。もっとも有名な例として、AdS/CFT 対応がある。これは、 $d+1$  次元の AdS 時空での量子重力理論が境界での  $d$  次元共形場理論 (CFT) と等価であるというものである。一方、宇宙論スケールより十分小さいスケールでは、我々の時空は漸近的平坦な時空として近似できる。そこで、漸近的平坦な時空にホログラフィー原理を適用しようという試みが行われている。そこでは、 $d+2$  次元の漸近的平坦な時空での量子重力理論と  $d$  次元の場の理論の対応関係が調べられている。

そこで、漸近的平坦な時空に対応する境界の場の理論の詳細を知るため、重力の散乱行列の対称性について議論する。一般に、散乱に対称性があるとき、それに対応した保存電荷と散乱行列の交換子の期待値は零となる (Ward Identity)。本発表では、2次元の CFT の持つ対称性である Virasoro 対称性に対応する保存電荷と tree-level の散乱行列の交換子の期待値を計算し、Ward Identity が成立していることを示す。この結果から、バルクでの散乱振幅の対称性が Virasoro 対称性を含んでいることが分かる。このことから、4次元の量子重力理論に対応する境界での場の理論が2次元の CFT であることが示唆される。

1. D. Kapec, V. Lysov, S. Pasterski, et al. "Semiclassical Virasoro symmetry of the quantum gravity S-matrix," J. High Energ. Phys. 2014, 58 (2014).
2. G. t'Hooft, "Dimensional Reduction in Quantum Gravity," arXiv:gr-qc/9310026v2.

## 再加熱期の予測と重力波によるポテンシャルの区別 水口 由莉乃 (名古屋大学大学院理学研究科 C 研 M1)

広く知られているビッグバン理論は平坦性問題やホライズン問題などの問題を抱えており、それらの問題を解決するためにインフレーション理論が考えられた。インフレーションの有力なモデルとして、スローロールインフレーションがある。このインフレーション中のポテンシャルの形には様々あるが、宇宙マイクロ波背景放射線の観測結果との整合性や高エネルギー領域における理論構築で共形対称性などが重要となりうる。本発表ではこれを尊重し、ポテンシャルの形が異なる T モデルと E モデルに注目する。

インフレーション理論により、現在見られる構造の種となる初期密度揺らぎが作られたと考えられている。初期密度揺らぎの情報は、スペクトル指数とテンソル・スカラー比 (以下  $\{n_s, r\}$ ) という観測量に現れ、モデルを評価する。T モデルと E モデルのポテンシャルは、モデルパラメータによって異なるポテンシャルを描像するが、 $\{n_s, r\}$  はモデルパラメータに顕に依存しないので、区別することができない。もし区別することができれば、T モデルや E モデルに対するポテンシャルと初期密度ゆらぎの特徴を結びつけ、モデルの正確な確立に貢献する。

ここでは、次の 2 つの方法で区別することを考える。1 つ目は宇宙マイクロ波背景放射線の観測結果に加え、再加熱期の起こるべき時期を考慮することで、 $\{n_s, r\}$  の取りうる範囲を定める方法である。2 つ目の方法では、観測量である重力波の原始スペクトルから、直接モデルパラメータを制限する。なお、本発表では実際に縮退が破れることを確認し、これらのモデルの妥当性を議論する。[1]

1. Swagat S. Mishra et al., JCAP, 40, 2021

## FRW 宇宙における BMS 対称性 中村 真 (近畿大学 M1)

時空の理想的な観測点である無限遠を表す光的無限遠における観測者の集団に重力波が到達すると、通常の振動的な振る舞いの他に、観測者同士の相対的な位置が重力波の通過前後で永続的に変化するという非振動的なメモリー効果が得られる。最近、このメモリー効果は、無限次元の漸近的な対称性である BMS(Bondi-Metzner-Sachs) 対称性と深く関係していることが明らかになった。時空の対称性は時空計量を不変に保つ一方で、漸近的な対称性は十分遠方のみにおける対称性であり、時空内部においては必ずしも計量の不変性を要請しない。そのため BMS 対称性は時空内部の対称性とは大きく異なる様相を示す。

また漸近平坦な時空のみでなく、開いた膨張宇宙においてもメモリー効果の可能性が議論されている。本発表では論文 [1] に基づいて、減速膨張する平坦な Friedmann-Robertson-Walker(FRW) 宇

宙モデルにおける計量摂動のゲージ変換の振る舞いを詳しく調べることで FRW 宇宙モデルにおける重力メモリー効果と BMS 対称性について解説する。

1. A.Kehagias, A.Riotto, BMS in cosmology, JCAP05(2016)059

## 重力波による Affleck-Dine 機構の検出可能性

中野 貴臣 (名古屋大学理学研究科 QG 研 M1)

現在の我々の宇宙は物質からできており、人間や星、銀河などあらゆるものが物質から構成され、反物質はほとんどないことが分かっている。この物質・反物質の非対称性 (バリオン数生成) は、素粒子標準模型では説明できないため、現代の素粒子的宇宙論の主要な問題点の 1 つである。

この物質と反物質の非対称性を説明するためのアイデアの 1 つとして、Affleck-Dine 機構 [1] がある。Affleck-Dine 機構は、I. Affleck と M. Dine によって提唱されたモデルであり、超対称性理論 (SUSY) に基づくバリオン数生成機構である。この機構によると、スカラー凝縮体の真空期待値 (VEV) の進化を通じて、宇宙のバリオン非対称性が生成される。このスカラー凝縮は、一般にノンポロジカルソリトン (Q-ball) に分裂すると考えられている。しかし、Affleck-Dine 機構は一般に高エネルギースケールの現象で、大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) を用いても、観測的に検証することは困難である。そのため、異なる観測手法が求められている。

今回レビューする論文 [2] では、Affleck-Dine 機構で生成されると考えられる Q-ball が重力波のピークを生むほどに速く崩壊し、このピークがどのような重力波検出器ならば検出できるかを議論する。これにより、Affleck-Dine 機構を検証するためのメカニズムを提示する。

1. I. Affleck and M. Dine, Nucl. Phys. B 249, 361 (1985)
2. G. White, L. Pearce, D. Vagie and A. Kusenko, Phys. Rev. Lett. 127, no.18, 18 (2021)

## Axion と光子の結合による CMB の偏光面回転について

中須 崇文 (早稲田大学 修士 2 年)

2020 年、プランク 2018 のデータを解析したところ CMB の偏光面が全天にわたって  $0.35 \pm 0.15$  度回転しているという論文が南雄人氏と小松英一郎氏によって発表された。[1] これは、これは宇宙全体でパリティ対称性が破れているということを示唆している。

CMB(宇宙マイクロ波背景放射) とは、最終散乱面上で電子によってトムソン散乱されて我々の元へ届く電磁波のことであり、宇宙初期の様々な情報が含まれている。宇宙初期の量子揺らぎがインフレーションによって引き伸ばされて生成された温度揺らぎなどが実際に観測されている。電子から見た光子の四重極異方性により直線偏光が生成され、それはパリティ変換によって値を変えない E モードと符号が逆転する B モードの 2 成分に分けることができ、それら二つのモードの相関は宇宙全体でパリティ対称性が成り立っていれば 0 になるはずである。

このパリティ対称性を破る原因として考えられたのが Axion である。[2] Axion は元々強い CP 問題を解決するために Peccei-Quinn 理論によって導入された未発見の素粒子であり、宇宙の加速

膨張の原因となっているダークエネルギーの候補ともなっている。Axion は光子と結合することによりその偏光面を回転させるので、観測された回転量から Axion の質量や光子との結合定数に制限をつけられるというのがこの研究の要旨である。

1. Yuto Minami and Eiichiro Komatsu, Phys. Rev. Lett. 125, 221301, (2020)
2. Tomohiro Fujita, Kai Murai, Hiromasa Nakatsuka, and Shinji Tsujikawa, Phys. Rev. D 103, 043509, (2021)

## 宇宙マイクロ波背景放射の複屈折の精密な理論予言に向けた研究 直川 史寛 (東京大学理学系研究科物理学専攻 M2)

太古の宇宙から放射された光である宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は、その発見以来詳細な観測が続けられてきた。例えば WMAP や Planck といった観測衛星は、天球上の CMB 強度のわずかな揺らぎを詳細に測定し、宇宙論パラメータの精密な決定につながった。現在では、CMB の偏光分布も重要な観測量となり世界中で次世代の観測プロジェクトが進められている。

その偏光観測に関して、近年非常に興味深い研究結果が報告された [1]。CMB の光子が太古の宇宙で解き放たれてから我々に届くまでの間に、その直線偏光の偏光面が回転していることを示唆する報告である。この現象は「宇宙複屈折 (Cosmic Birefringence)」として知られる現象である (以下、単に複屈折と称す)。複屈折はパリティ対称性を破っており、その起源を既存の物理に求めることは難しい。すなわちこの現象の存在は、新物理の存在を示唆する。複屈折を引き起こすメカニズムとして、アクシオンと呼ばれる未知の素粒子が着目されている。これは暗黒物質や暗黒エネルギーの候補とされる粒子でもある。

複屈折の効果を詳しく測定すれば、アクシオンの性質に対する制限が得られ、素粒子論や宇宙論の謎に迫ることができると期待される。そのためには、アクシオン場による複屈折の効果が CMB のパワースペクトルにどのように現れるかを理論的に計算し、観測データと比較することが必要となる。先行研究 [2] では、複屈折の効果を反映させて CMB パワースペクトルの計算を行うコードが開発され、将来の観測プロジェクトがどのパラメータ帯域のアクシオンに感度を持つかの予言が試みられた。

しかし [2] では、種々の宇宙論的な効果が無視されており、実用に耐うる精密な計算ツールは未だ存在しない。本研究では、より精密な理論予言に向けて、上記のコードに弱重力レンズの効果をとり入れたコード開発を行っている。本発表ではその進行状況について述べるとともに、複屈折を用いた素粒子論・宇宙論研究の展望についても議論する予定である。

1. Y. Minami and E. Komatsu, Phys. Rev. Lett, 125, 221301, (2020)
2. H. Nakatsuka et al., Phys. Rev. D, 105, 123509, (2022)

## 銀河と活動銀河核による再電離への寄与

成瀬 元希 (名古屋大学理学研究科 C 研 M1)

宇宙誕生から約 2 億年後、それまで中性化していた宇宙空間中のガスが電離光子によって電離されていき (宇宙再電離期)、現在の水素やヘリウムがほぼ電離された状態になったと考えられている。しかし、その電離過程の詳細は未だ分かっていない。星形成銀河が主要な電離源として考えられているが、ヘリウムの 2 階電離には活動銀河核 (AGN) から放射される X 線のような、約 54.4eV より高いエネルギーの電離光子が必要であることや、暗い AGN の存在が示唆 [1] されていることによって、AGN も電離源の候補として挙げられている。この星形成銀河と AGN それぞれがどれだけ再電離に寄与するかは依然議論されている。

本発表ではまず Yoshiura et al. (2017)[2] をレビューする。この論文は星形成銀河と AGN 両方の宇宙再電離と熱史への寄与を、銀河からの電離光子の割合 (escape fraction) と暗い AGN の数量 (faint-end slope) をパラメータとして用いることで表した後、観測データと比較しパラメータの値を制限することで評価した。その結果、escape fraction は 0.5 未満、faint-end slope は -1.5 より大きいこということを明らかにした。

本発表の後半ではこれらの結果を再現した上で、Planck Collaboration VI (2020)[3] による CMB の光学的厚みのような、新しい観測データを用いて再検討した結果を議論する。

1. Giallongo E. et al., 2015, A&A, 578, A83
2. Yoshiura, S., Hasegawa, K., Ichiki, K., et al. 2017, MNRAS, 471, 3713
3. Planck Collaboration, 2020, A&A, 641, A6

## 重力波による修正重力理論の検証：エコーとゆがみ

野瀬 観見 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

一般相対性理論 (GR) は、水星の近日点移動を始め、近年の発見では LIGO や VIRGO による重力波の観測など、物理現象を極めてよく記述する。しかし、ダークエネルギーや宇宙の加速膨張などの大きな問題が未解決であり、これを動機として宇宙・素粒子の両方の観点から GR を修正しようという試みがなされている。従って、その修正の真偽を確かめる枠組みが必要である。

連星合体からの重力波はそのような理論モデルをテストするのに優れており、[1] は、どのように GR で予想される波形が変化するかを特定の修正重力理論のモデルに立脚せずに議論している。本発表では [1] をレビューする。GR によれば、一様等方な back ground を伝播する重力波  $h$  の時間発展は一本の二階線型微分方程式で記述される。しかし、いくつかの修正重力理論では新しいテンソル場  $s$  の存在を预言するため、この二階線型微分方程式は  $2 \times 2$  行列を係数とする方程式に修正される。[1] はこの方程式を (行列に時間依存がある場合には) WKB 近似を用いて解析的に解き、その解がまずガウシアン波束を初期条件として数値的に解いた結果と矛盾がないことを示し、最終的に連星合体の場合に応用している。GR との大きな違いは固有振動数の個数が 2 倍になることで、GR で 1 つの波束として伝わるはずだった波は時間発展とともに複数の波束に次第に分離して

いく。これが発表の主題の一つである「エコー」である。これに加え、波束の形がどのようにゆがめられるのかも議論する。

1. J. M. Ezquiaga et al, arXiv:2108.10872v2

## 一般相対論における数値シミュレーション手法 大橋 陸人 (名古屋大学 理学研究科 M1)

本発表では、一般相対性理論 (GR) における様々な数値シミュレーションの方法について説明した論文 [1, 2, 3, 4] のレビューを行う。(ただし、時間の都合によりいくつかの論文は概説にとどめるか、言及できない場合もある。)

論文 [1] では、高解像度流体力学シミュレーションの MassiveBlack-II (MBII) を用いて、 $z=0$  までのハロー、銀河、ブラックホールなどの性質を調べている。

論文 [2] では、任意の 3+1 分割時空における時間的 (有質量粒子) およびヌル (光子) 測地線の数値積分のための一般化されたアルゴリズムについて説明される。正確にエネルギーを保存する陰解法スキームを導入し、その特性を、標準的な 4 次のルンゲクッタ陽解法スキームおよび陰的中点スキームと比較している。

論文 [3] では、Friedman-Robertson-Walker 宇宙における球対称ブラックホール形成の数値シミュレーションに、初めて擬スペクトル法を用いることに成功している。

論文 [4] では、物質と時空を自己無撞着に進化させるラグランジュ流体力学コード SPHINCS BSSN ( “Smoothed Particle Hydrodynamics In Curved Spacetime using BSSN” ) について説明される。流体は一般相対論的滑らかな粒子流体力学 (SPH) 定式化の枠組みの中でラグランジュ粒子によってモデル化され、時空はオイラー GR 流体力学でも頻繁に使用されている BSSN 定式化に従ってメッシュ上で発展させる。

1. Nishikanta Khandai et al. The MassiveBlack-II Simulation: The Evolution of Halos and Galaxies to  $z = 0$ , 2014
2. F. Bacchini et al. Generalized, energy-conserving numerical simulations of particles in general relativity. I. Time-like and null geodesics, 2018
3. Albert Escrivà, Simulation of primordial black hole formation using pseudo-spectral methods, 2020
4. S. Rosswog and P. Diener, SPHINCS BSSN: A general relativistic Smooth Particle Hydrodynamics code for dynamical spacetimes, 2021

## 最小限に修正された重力理論におけるブラックホールから伝播する重力波

齋藤 仁 (立教大学理学研究科物理学専攻 修士 2 年)

現在、重力の標準理論は一般相対性理論である。水星の近日点移動や重力による光の曲がりなどいくつかの重力現象は、一般相対論により説明できている。一方で、くりこみが不可能であることや、宇宙の後期加速膨張を説明するのにダークエネルギーという正体不明の重力源が必要になるなど、未解決な問題も残っている。これらの問題に対し、重力を修正することで解決しようとする試みがある。最も基本的な修正重力理論は、一般相対論の持つテンソル場の自由度に加え、スカラー場の自由度を増やすといったもので、「スカラー・テンソル理論」と呼ばれる。一方で、空間三次元の共変性のみを保ち、ある条件を課す事で、伝播する自由度を増やすことなく重力を修正することができる。このような重力理論は「最小限に修正した重力理論」と呼ばれる。そして近年、この種の重力理論で最も一般的な重力理論が提唱された [1]。この理論の大きな課題は、「自由度の等しい重力理論は実験的・観測的に区別可能であるか?」ということである。この理論について、いくつかの現象においては調べられており、静的球対称ブラックホール解や、宇宙論的摂動論の短波長極限と長波長極限からは一般相対論と区別が不可能であることが示されている [2]。

本発表では、前半に [1] の理論について簡単なレビューをする。また、後半では自身の研究である、[1] の理論を用いたブラックホール起源の重力波の解析について発表する。本研究では、シュワルツシルトブラックホール周りに摂動を加えることで生じる重力波について、パリティ偶モードとパリティ奇モードをそれぞれ計算をする。また、これらの結果を一般相対論による結果と比較することで、この理論が実験的・観測的に区別可能であるかについて議論する。

1. X. Gao and Z. B. Yao, Phys. Rev. D **101**, no.6, 064018 (2020)
2. A. Iyonaga and T. Kobayashi, Phys. Rev. D **104**, no.12, 124020 (2021)

## PTA による重力波の検出

齋藤 俊之 (熊本大学大学院 M 1)

パルサーは非常に安定した周期でパルスを放射する中性子星である。パルサーの安定した周期を利用し、重力波を検出するパルサータイミングアレイ (PTA) と呼ばれる試みがなされている。地球とパルサーの間を重力波が通過するとパルスの伝搬経路が歪み、到着時刻が変化する。観測したパルスの到着時刻と予測されたパルスの到着時刻の差はタイミング残差と呼ばれ、これを精密に測定し複数のパルサーを用いて重力波を検出する方法をパルサータイミングアレイと言う。[1] PTA で観測できる重力波として背景重力波がある。背景重力波とは宇宙インフレーションなどの幅広い宇宙現象からの重力波や、大質量ブラックホールの合体などの天体現象からの重力波が含まれる。背景重力波は宇宙に普遍的に存在する大質量ブラックホールの連星によるナノヘルツ帯の重力波が主な成分であると予想されている。PTA には観測できる角度分解能があまり良くないという問題がある。角度分解能を向上させるため、個々のパルサーと地球の距離をより正確に測り分解能を上げる研究を行っている。[2] 本発表では PTA の基本事項を説明した上で PTA の今後の課題や研究に

ついて議論する。

1. Searching for and Identifying Pulsars Ryan S. Lynch rlynch@physics.mcgill.ca Department of Physics, McGill University 3600 University Street, Montreal, Quebec, H3A 2T8, Canada
2. Maggiore, M., Gravitational Waves: Volume 1: Theory and Experiments 2006

## 宇宙論的ゆらぎの非ガウス性に現れるスピン 1/2 粒子の痕跡 佐野 文哉 (東京工業大学理学院物理学系 M2)

インフレーションが予測する宇宙論的ゆらぎは線形近似のレベルで観測によく一致し、インフレーション理論の有効性は広く受け入れられている。非線形効果（非ガウス性）に関しては、インフラトン単体の効果については今日までに様々なモデルで理論予測が行われ、精密な観測が待たれる状態である。この非ガウス性には、線形近似とは異なり、インフラトンと他粒子との相互作用の効果が含まれるという特徴がある。特に近年では、様々なスピンの粒子とインフラトンとの相互作用が非ガウス性に与える影響に関する研究が盛んであり、未知の粒子を検出する加速器としての役割が期待されている。非ガウス性に現れる新粒子の痕跡を探る研究分野は Cosmological Collider と総称されている。[1]

本発表ではまず、文献 [2] に沿って、複数のスピン 1/2 粒子が存在する場合に、宇宙論的ゆらぎの 3 点相関関数（バイスペクトル）のスクイーズ極限に現れる波形について述べる。フェルミオンの効果は、ローレンツ不変性から必ずループとして現れる。文献 [2] では有効場理論的にインフラトンとフェルミオンの相互作用を取り入れ、3 点相関関数に現れる 1 ループ効果を計算している。そのバイスペクトル波形からは、フェルミオンの質量と、マヨラナ粒子であるかディラック粒子であるかを判別することが可能である。またそれに関連して、進行中の研究として、インフレーション中にフェルミオンが獲得する質量を超対称性理論によって見積もり、そこから考えられるバイスペクトル波形の制限についても述べる予定である。

1. Nima Arkani-Hamed and Juan Maldacena, arXiv:1503.08043 [hep-th], 2015.
2. Yanou Cui and Zhong-Zhi Xianyu, arXiv:2112.10793 [hep-ph], 2021.

## 光学機械振動子系のビーム模型の定式化と揺らぎの推定 七條 友哉 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M2)

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

成功し、従来の限界より5桁も重い巨視的振動子の量子制御が可能になっている。この光学機械振動子を用いた重力の量子性の検証は、将来有望な方法と考えられている。

この研究では、光共振器の片側の鏡を固定し、もう片側の鏡をひもでつるした振動子とする光学機械振動子の理論モデルを beam モデルへ拡張し、その量子制御に向けた理論解析を行った。beam モデルは、振動子をつるすひもや鏡が有限の大きさを持つ際に変形まで考慮したモデルであり、実際の実験により近い理論モデルである。beam モデルに基づいた光学機械振動子の理論モデルの作用積分から出発し、beam モデルを導入すると鏡の運動が複雑化するため、周波数が小さい領域だけを考え、近似を行うことで、鏡の重心運動と回転運動に帰着することを示す。また時間があれば、測定した光から鏡の揺らぎを推定する方法として、Wiener filter を用いた推定方法についても議論する。

1. Seth B. Cataño-Lopez , Jordy G. Santiago-Condori, Keiichi Edamatsu, Nobuyuki Matsumoto, Phys. Rev. Lett. 124, 221102 (2020)

## 曲率特異点を解消した Reissner Nordstrom ブラックホールの蒸発と情報損失問題

末藤 健介 (大阪市立大学大学院 M2)

一般相対性理論の予言する最も興味深い対象はブラックホール (BH) であろう。BH とは、重力が強すぎて一度入ると光ですら逃げ出すことができない時空領域であり、理論物理学における議論の中心的存在である。しかし BH には未だ解決していない問題も存在する。

BH の未解決な問題として蒸発に伴う情報損失問題と、曲率特異点の存在が挙げられる。このどちらも一般相対性理論に量子効果が含まれていない事に起因していると考えられているが、完全な理解には至っていない。

本発表の先行研究 [1] は、Schwarzschild 時空の計量に Planck 長程度の補正項を入れて曲率特異点を解消し BH の蒸発を行った。補正項を加え、蒸発を行ったことで情報損失問題が生じない Minkowski 時空型の時空構造となった。これは補正項を加えたことで中心である  $r = 0$  が spacelike から timelike に変化したことに起因していると考えられる。

本研究では、電荷を持った BH である Reissner-Nordstrom BH において、同様に曲率特異点を解消したモデルを考え蒸発を行うと、情報損失問題が生じない Minkowski 時空型になることを示した。

Reissner-Nordstrom BH は、最も現実的な BH と考えられている Kerr BH と時空構造が酷似しているため、この結果は、Kerr BH においても曲率特異点を解消すると情報損失問題は解決できることを示唆する。

1. V. P. Frolov, JHEP 1405 (2014) 049 doi:10.1007/JHEP 05(2014)049

## Spherical collapse in Generalized massive gravity

高寺 俊希 (立教大学 理論物理学研究室 M2)

現在標準的な重力理論は一般相対論であり、太陽系スケールでの観測結果を高い精度で説明している。しかし、宇宙論的長距離では、重力が一般相対論の予言からずれる可能性もある。実際、Ia型超新星の観測から明らかになった宇宙の加速膨張は、重力理論を修正することで説明することができ、近年修正重力理論の研究が盛んに行われている。

重力理論の修正は、観測と整合するように行う必要がある。太陽系スケールの観測結果は一般相対論を支持するため、少なくとも、短距離での重力のはたらきは一般相対論に一致しなければならない。一般に、重力を修正すると新たな自由度が生まれる。太陽系スケールで、修正重力理論が一般相対論の結果を再現するためには、この新たな自由度を遮蔽する必要がある。一部の修正重力理論には、非線形効果によってこれを自動的に遮蔽する仕組みがある（遮蔽機構）。

近年、遮蔽機構を持つ重力理論の一つとして、Generalized massive gravity (GMG 理論) が提案された [1]。「重力子は質量を持つのか？」という疑問の解決に向けて、重力を伝える重力子が質量を持つ重力理論の研究が長年行われていたが、安定な理論を構築することは困難であった。しかし、近年の修正重力理論の進展によって、安定な理論がいくつか提案されており、その一つが GMG 理論だ。GMG 理論は宇宙の後期加速膨張を説明し [2]、かつ遮蔽機構の存在が確認されている [3]。

本発表では、GMG 理論が持つ Vainshtein 機構を調べるために、GMG 理論の非線形効果の取り扱い方を定式化する。一般に重力の非線形効果の解析は困難を伴うが、物質の分布として球対称崩壊モデルを考えることで、非線形効果を保ちつつ解析的に取り扱うことができる。具体的には、流体の基礎方程式と修正ポアソン方程式を用いて、密度揺らぎの非線形な発展方程式を導出し、数値的に解くことでその時間発展を調べる。

1. C. De Rham, et al., PRD 90, 024050 (2014).
2. M. Kenna-Allison, et al., PRD 101, 084014 (2020).
3. A. E. Gümrükçüoğlu, et al., JCAP 09, 023 (2021).

## Splashback 半径による重力理論の制限可能性

谷田 幸貴 (名古屋大学 M1)

現在、重力を記述する理論として一般相対性理論が用いられている。しかし、この理論は太陽系スケールなどの観測事実を矛盾なく説明する一方で、宇宙論的スケールにおいても成り立つかについては未だ良い精度で検証されていない。これを受けて、一般相対性理論を宇宙論的スケールで拡張した修正重力理論のモデルが多く考えられている。

修正重力理論の制限のための観測量として考えられているものの1つとして splashback 半径がある。splashback 半径とは銀河や銀河団の物理的境界を特徴づける量であり、観測的には密度勾配の値が急激に落ち込み、それが最小となる位置として見る事ができる。

本発表では、[1]をもとに銀河団スケール（数 Mpc 程度）を特徴付ける splashback 半径について議論する。この論文では、修正重力理論の一つである  $f(R)$  重力理論と一般相対性理論それぞれにおける splashback 半径をシミュレーションで計算した。具体的には、銀河団に降着する物質の質量の関数として、それぞれの重力理論で splashback 半径の位置変化の挙動にどのような違いが出るのかを調べた。その結果、銀河団に落下する物質の質量の違いまで考慮すれば、実際に LSST などの将来観測を用いて splashback 半径を観測することにより、その挙動の違いから重力理論を制限できる見込みが十分にあることがわかった。

1. S. Adhikari, J. Sakstein, B. Jain et al., J. Cosmo. Astropart. Phys., 2018

## 曲率を持つ宇宙のパワースペクトルの計算法の開発 寺澤 凌 (東京大学大学院 理学系研究科 修士2年)

サーベイ領域を超える長い波長の密度揺らぎは、重力の非線形性に起因するモードカップリングによって短い波長の揺らぎに影響を与える。この影響はパワースペクトルの超長波長揺らぎへの応答で特徴づけられ、応答を用いることで超長波長揺らぎの効果も含めたサーベイ領域のパワースペクトルを計算することができる。超長波長揺らぎが構造形成に与える影響は曲率と等価であるため、曲率を持つ宇宙のパワースペクトルも同様に応答を用いて記述できる。

物質パワースペクトルの超長波長揺らぎへの応答は現在の宇宙膨張の速度を表すハッブルパラメータへの応答と等価である [1,2]。本研究ではこのことを用いて、超長波長揺らぎへの応答をハッブルパラメータへの応答で置き換えることで、曲率を持つ宇宙の物質パワースペクトルを平坦な宇宙の物質パワースペクトルのみを用いて計算する手法を開発した [2]。現在はハロー・物質パワースペクトル、ハローパワースペクトルについても超長波長揺らぎへの応答とハッブルパラメータへの応答が一致するかどうかを調べており、同様の手法で曲率を持つ宇宙のハロー・物質、ハローパワースペクトルの計算法の開発に取り組んでいる。

本発表では、パワースペクトルの応答を用いた曲率を持つ宇宙のパワースペクトルの計算手法を提案し、我々が行った  $N$  体シミュレーションの結果を用いてその精度について議論する。また、パワースペクトルの超長波長揺らぎへの応答とハッブルパラメータへの応答が一致する理由についても理論的に考察する。

1. Y. Li, W. Hu, and M. Takada, Phys. Rev. D, 90, 103530, 2014
2. R. Terasawa, R. Takahashi, T. Nishimichi and M. Takada, arXiv:2205.10339, 2022

## インフレーション宇宙における原子ブラックホールの形成 外岡 沙恵 (福島大学 M1)

原子ブラックホール (PBH) とは暗黒物質の候補として最も有力であると言われている。暗黒物質は天文学的現象を説明するために考え出された言葉で「質量を持つが、光学的に直接観測できない」とされている。言い換えると「そこに存在していることは確かなのに、姿が見えない物質」と

いう事だ。暗黒物質は宇宙全体で通常物質の約5倍もの質量を持っていると言われている。1930年の「かみのけ座銀河団」内部の運動を測定したのをきっかけに暗黒物質は肯定されるようになり、多くの研究がされて来た。この暗黒物質は宇宙の約27%を占めていて、2001年に打ち上げられたアメリカの人工衛星、WMAP衛星が記録したデータが一番有力であると言われている。暗黒物質は電磁相互作用をしないため、望遠鏡の光を使った観測では直接見つけられず「暗黒」という言葉が使われているが、重力作用はするため銀河の回転に影響を及ぼしている。原子ブラックホールはビッグバン直後(～0.1m秒)に形成されたブラックホールで、ビッグバン直後の高温で高密度の中、密度の揺らぎによって形成された。現在は主に $10^{15} \sim 10^{17}g, 10^{20} \sim 10^{24}g$ の範囲のPBHが研究されている。比較的軽い( $\leq 10^{15}g$ )は蒸発して無くなり、それより重いPBH( $\geq 10^{15}g$ )は蒸発せずに暗黒物質として振る舞う。現在ダークマターの質量を調べる方法は大きく分けて二つあるとされている。1つはX線観測を利用するもの、もう1つは銀河のエネルギーを要するものである。私は後者の「エネルギーを利用した研究」を進めた。本研究ではなぜ原子ブラックホールが暗黒物質の候補として最も有力とされているのかという根拠を研究し、文献を参考に初期宇宙に関する微分方程式を解き、グラフで表しその結果について評価している。微分方程式を解く際にはpythonを活用している。

1. Jun'ichi Yokoyama, Formation of Primordial Black Holes in Inflationary Cosmology, Prog. Theor. Phys. Suppl. 136 (1999) 338-352
2. Jun'ichi, Chaotic New Inflation and Formation of Primordial Black Holes. Phys. Rev. D 58 (1998) 083510
3. Anirudh Gundhi, Primordial black hole dark matter in dilaton-extended two-field Starobinsky inflation, Phys. Rev. D 103 (2021) 8, 083518

## AdS instability

### 上道 恵也 (名古屋大学院 QG 研 M1)

一般相対論の基礎方程式である Einstein 方程式の解の内、最も対称性の高いものを極大対称時空と呼ぶ。極大対称時空は定数の宇宙項で特徴づけられ、負の宇宙項を持つものを AdS 時空と呼ぶ。空間の遠方で AdS 時空に漸近する時空 (漸近 AdS 時空) の性質は、AdS/CFT 対応の文脈からも興味の対象となっている。また、AdS 時空の境界には実効的な障壁が存在し、それに起因する不安定性 (AdS instability) からブラックホールが形成されるという指摘もある。この点も漸近 AdS 時空に対する関心を与えている。

本講演ではスカラー場を用いた漸近 AdS 時空の安定性解析について議論する。スカラー場の初期条件をガウス分布で与え、その振幅を変えるとどうなるかを数値的に解析した結果を紹介する。またその後この不安定性の原因を探るため非線形摂動解析も行い、スカラー場のエネルギーの低いモードから高いモードに移ることを見る [1]。最近の論文として nonminimal coupled scalar 場を用いたモデルも紹介する [2]。

1. P. Bizon, A. Rostworowski, Phys. Rev. Lett. 107 031102 (2011)
2. A. Pandya, J. Ripley, arXiv:2206.08854 (2022)

## $f(Q)$ 重力理論と BH

山越 蒔士 (名古屋大学理学研究科 QG 研 M1)

一般相対性理論 (GR) は古典重力を記述する理論であり、予測される内容が宇宙的なスケールで多くの観測結果と一致していることから、最も優れているとされている。しかし量子理論との非互換性や Hubble Tension、ダークエネルギーの起源といった問題も同時に抱えている。そこで GR 自体を拡張することで問題を解決しようとする修正重力が行われてきている。

このような修正重力理論の一種として、Symmetric Teleparallelism (ST) という GR とは異なる時空の幾何構造を扱う理論が存在する。これは metric-compatibility ( $\nabla g = 0$ ) を課さない代わりに捩れと曲率がゼロになることを仮定しており、計量と接続を独立な量として考えている。この際に生じる非自明なスカラーから (境界項を除き) GR での Einstein-Hilbert 作用と等価な作用 (STTEGR) を作る事が可能であることが知られている [1]。このスカラー量を non-metricity scalar と呼び、 $Q$  で表される。しかしこの STTEGR では接続が単なるゲージ量になっており非物理的であることから、GR と異なる結果を得るためには何らかの拡張が必要とされている。

今回レビューする論文 [2] では接続がゲージでない物理的自由度を持つような非線形拡張である  $f(Q)$  重力理論を扱い、球対称且つ静的な時空における計量及び接続の取り得る最も一般的な形を構築した上で、解に関して議論する。その中で任意の関数  $f$  に対して Schwarzschild 解が存在し、それと同時に Schwarzschild 解でないような近似/厳密解も存在することを示す。

1. J. Beltrán Jiménez, L. Heisenberg, and T. Koivisto, Phys. Rev. D 98 (2018) 4, 044048
2. F. D'Ambrosio et al., Phys. Rev. D 105 (2022) 2, 024042

## 時間依存する時空におけるホログラフィックなエンタングルメント・エントロピー

米尾 雄一郎 (近畿大学 総合理工学研究科理学専攻物理学分野 M1)

1997年に J.Maldacena によって超弦理論の分野で発見された AdS/CFT 対応は、一般相対論で現れる反ド・ジッター時空 (AdS) と場の理論である共形場理論 (CFT) との間に双対性があることを示しており、重力理論を含む宇宙全体と量子論との間につながりがあることが判明した。この AdS/CFT 対応に基づいた研究の中で重要なものの一つが「笠-高柳公式」である [1]。近年、量子情報理論、物性理論、量子コンピューターといった量子通信等の様々な分野で重要とされている概念に量子エンタングルメント (量子もつれ) があり、そのもつれの強さを測る量はエンタングルメント・エントロピー (以下、EE) と呼ばれる。笠-高柳公式は、この量子論側で定義された EE が反ド・ジッター時空中で妥当な条件を課した曲面の面積すなわち重力理論側の幾何学量で与えられることを主張しており、このようにして求めた EE は、ホログラフィックな EE と呼ばれる。笠-高柳公式は、場の理論では計算が複雑な強く相互作用する量子系の EE の計算を容易にし、量子エンタ

ングルメントによる時空の創発等の派生研究が行われており、今後も我々に豊かな示唆を与えてくれると期待されている。

そこで本発表では、EE や笠-高柳公式を適用する際の反ド・ジッター時空での曲面の条件付けについて簡潔に触れた後、文献 [2] に基づいて、重力理論側の時空が時間依存する場合の笠-高柳公式を用いたホログラフィックな EE の計算について紹介する。

1. S.Ryu and T.Takayanagi, Phys.Rev.Lett. **96** 181602 (2006); JHEP **0608** 045 (2006)
2. V.E.Hubeny, M.Rangamani and T.Takayanagi: JHEP **0707** 062 (2007)