

これまでの研究

向山信治

2024年5月7日

宇宙における様々な現象を普遍的な物理法則によって理解すること、そして、豊富な観測データから、その背後にある基礎理論についての知見を得ること、それが宇宙物理学の醍醐味であり、私が目指してきたものです。私はこれまで、ブレーン宇宙論、弦理論的宇宙論、Hořava-Lifshitz理論に基づく宇宙論、ダークエネルギー・ダークマター、長距離・長時間での重力の変更、重力の有効場の理論、宇宙項問題、ブラックホールのエントロピーについての研究を中心に、宇宙論及び重力理論分野での研究をしてきました。以下では、私のこれまでの主要研究をいくつか説明したいと思います。尚、[数字]は、業績リストの番号に対応します。

ブレーン宇宙論

宇宙論は、私たちが住む宇宙について理解したいという、素朴で重要な問題に挑むという意味にとどまらず、高エネルギー物理学の究極の実験場としても、近年、その重要性を益々増しています。特に、究極の理論の候補と考えられる超弦理論の予言を、宇宙論を通じてテストする試みは、今後も続けていくべきであると考えます。このような観点において、ブレーン宇宙論は、超弦理論の予言する余剰次元をテストする、重要な試みの1つと言えるでしょう。

私は、RandallとSundrumによって提唱された5次元ブレーン宇宙のシナリオにおいて、一様等方宇宙を表す一般的な厳密解を発見し、余剰次元の存在による効果を、具体的な項として書き下す事に成功しました [233]。この項をdark radiationと名付けたのは私ですが、現在では業界での標準的な用語となっています。一様等方宇宙解を発見して次に行なうべきは、その周りの摂動を調べることです。そこで私は、摂動の解析に必要な定式化を行いました [230]。5次元ブレーン宇宙論での時空計量の摂動は、通常の4次元宇宙論に比べて成分の数が多く、それらの成分の満たす偏微分方程式を同時に解く必要があります。私は、それらの成分が全て、たった1つのマスター変数を微分していくことで得られることを発見しました。さらに、このマスター変数が満たすべきマスター方程式を導くことで、完全な定式化を与えることに成功しました。私の発見した厳密解とマスター方程式は、ブレーン宇宙論の基礎となるもので、宇宙背景輻射を通して理論と観測を比較するための有効な手法を与えます。今までに、多くの研究グループによる計算で実際に使用され、宇宙背景輻射のスペクトル等の、観測と比較可能な結果が出ています。

他にも、上述の厳密解の大局的時空構造の解析 [232]、線形重力のゲージ不変な解析 [221, 222]、量子効果を含む解の発見 [227, 225]、さらなる高次元への拡張 [209, 207, 205, 202]、弦理論におけるタキオン凝縮に基づくブレーン宇宙模型 [220, 218]等、ブレーン宇宙論についての様々な研究をしてきました。

これら一連の研究によって、第一回日本物理学会若手奨励賞（題目「ブレーン宇宙の厳密解と摂動論の研究」）を受賞しました。最近では、ブレーン宇宙論を使って、宇宙論と理論物理学における最難問の一つと言われる宇宙項問題にも取り組んでいます [36]。

弦理論的宇宙論

超弦理論の考え方は、弦の様々な振動によって宇宙のすべてを記述しようという、シンプルかつ野心的なものです。そのため、究極の理論の最有力候補と考えられています。しかし、2002年までの超弦理論には、宇宙を記述する上で致命的な問題がありました。加速膨張する4次元宇宙の解が見つからず、no-go定理まであったのです。観測的には宇宙の膨張が加速していることに殆ど疑いはありませんから、もしもこの no-go 定理が物理として正しいのであれば、超弦理論は窮地に立たされることとなります。幸いにして、2003年にKachru-Kalosh-

Linde-Trivedi (KKLT) の4人により、このno-go定理を回避して、4次元加速膨張宇宙解が発見されました。このブレークスルーを知った時、私は、これから弦理論的に基づく現実的な宇宙論が可能になると確信しました。

そこで私は、超弦理論に基づいて、インフレーションを中心として初期宇宙論の研究を始めました。宇宙はなぜこれだけ大きいのか？その大部分を説明し、銀河などの宇宙の豊かな構造の種となる宇宙初期揺らぎの起源をも説明できるのがインフレーションです。しかし、インフレーションを起こし、そして終わらせるために必要な、インフラトンと呼ばれる場の正体は全く分かっていません。弦理論には端のない閉じた弦と、端のある開いた弦とがありますが、開いた弦の端が固定される面はDブレーンと呼ばれ、一種のソリトンと考えることができます。近年、このDブレーンがインフラトンの正体である可能性が注目を集めています。余剰次元内に存在する様々な構造(反対称場の流束によってワープした領域、他のDブレーンやその反物質に対応する反Dブレーン、ひもの境界条件を規定する面等)により、Dブレーンは非自明な運動をします。そのポテンシャルエネルギーが緩やかな時間変化を示すとき、私たちの住む4次元宇宙はインフレーションを起こすでしょう。

Dブレーンによるインフレーションの模型で問題となるのは、インフラトンが時空の曲率と共計不変な(あるいはそれに近い)相互作用を持つことです。これは、背景となる時空の幾何が近似的に反ドジッター時空となっていることに起因するため、かなりユニバーサルであると言えます。このような相互作用は、微調整によって別の相互作用とキャンセルさせる必要があると考えられてきました。しかし、私はL.Kofmanとの共同研究により、そのような不自然な微調整をしなくても、一定の条件の下ではインフレーションを起こせることを世界で初めて示しました(Conformal rapid-rollインフレーション) [199, 196, 188]。この模型において、初期宇宙揺らぎの生成は、インフラトンとは別の、カーバトンと呼ばれる場が担います。そこで、ワープした余剰次元内の別のブレーンによるカーバトンの模型も提唱し、観測データと整合的なパラメータ領域が存在することを示しました [189]。また、カーバトンの起源が、インフラトンを担うDブレーン上の自由度か、それともその外の高次元時空内や別のブレーン上の自由度かによって、観測量に違いが生じることを示しました [122]。

また、共同研究者とともに、Dブレーンが余剰次元の一部に巻き付いた状態で運動するインフレーション模型(Wrapped DBIインフレーション)を、世界で最初に提唱しました [200]。(私たちの直後に、M. Beckerとその共同研究者も同様の模型を提唱しています。)さらに、この模型において、曲率揺らぎの非ガウス性とCalabi-Yau多様体のオイラー数との間の関係を導くことに成功しました。これは、インフレーションの模型を弦理論の枠内で構築するというだけでなく、宇宙の観測からCalabi-Yau多様体の性質に制限をつけられる可能性も示しています。他にも、反Dブレーンによるダークマター候補 [210]、ブレーンの運動による宇宙再加熱のシナリオ [201]等を提唱してきました。

最近では、超弦理論における Swampland 予想と Trans-Planckian 予想についても研究しました。例えば、de Sitter swampland 予想を、非線形の運動項を持つスカラー場の作用に適用可能な形に拡張することに成功しました [86]。超弦理論における D-brane を記述する作用が非線形の運動項を持ち、そのような作用が様々な宇宙シナリオで使われていることから、このような拡張は、最小スケールの物理(超弦理論)と最大スケールの物理(宇宙論)をつなぐために、本質的に重要であると考えられます。また、Trans-Planckian 予想に基づき、モデルの詳細に依らないインフレーションスケールの上限を与え、超弦理論に基づくインフレーション起源の重力波の観測可能性について議論しました [81]。他にも、超弦理論における $O(D, D)$ 対称性 (D は時空次元)を場の理論のレベルで保つ、Double field theoryに基づく宇宙論についても研究しています [87]。

Hořava-Lifshitz理論に基づく宇宙論

宇宙創世のような重力と量子論の両方が本質的となる状況では、重力現象を記述する一般相対性理論も、素粒子の世界を記述する場の量子論も破綻してしまいます。したがって、真に宇宙創生を論ずるには、この理論的破綻を回避して重力と量子論とを調和させる、量子重力理論が必要です。

私はこれまで、量子重力理論の最有力候補である、超弦理論に基づく宇宙論の研究をしてきました。しかし、量子重力理論の候補は超弦理論だけではありません。2009年にHořavaによって提唱された重力理論

(Hořava-Lifshitz理論)は、最近になって繰り込み可能性が証明されました。アインシュタインの相対性理論が量子論と相容れないと考えられている最大の理由の一つは、相対性理論が繰り込み可能でないことです。一方、Hořava-Lifshitz理論は繰り込み可能なので、重力の量子効果を矛盾なく取り扱える可能性があり、超弦理論によらない量子重力理論の有力な候補と考えられています。

私は、この理論を初めて知ったとき、それまでにはない新しい宇宙論ができると直感しました。私が注目したのは anisotropic scaling と呼ばれる性質で、これはまさに、この理論が繰り込み可能となっている理由の本質です。この性質により、超短波長での揺らぎのスペクトルは、スケール不変になるということが分かったので、これは宇宙揺らぎの生成に使えると、直ぐに気づきました。少し試行錯誤した後、この理論に基づいて、地平性問題を解決してスケール不変な宇宙揺らぎを生成する、全く新しい初期宇宙シナリオを提唱することができました [191]。2009年以降、Hořava-Lifshitz理論にはいくつかのバージョンが提案されましたが、私の提唱したこの初期宇宙シナリオは anisotropic scaling だけに依存するため、その全てのバージョンに適用することができます。

また、ダークマターがなくても銀河の回転曲線などを説明するシナリオ [190, 186]、背景重力波の振幅を大きくするシナリオ [187]、インフレーションなしで平坦性問題を解決するシナリオ [109]、等を提唱しました。

2010年には、Classical and Quantum Gravity誌から、Hořava-Lifshitz理論に基づく宇宙論についてのレビュー論文の執筆を依頼されました。このレビュー論文には、Hořava-Lifshitz理論の構築や上述のいくつかの新しい宇宙シナリオだけでなく、低エネルギーでのLorentz対称性の回復やスカラー自由度の問題とその解決策等についても、その時点での最新の状況をまとめました [176]。このレビュー論文は、Classical and Quantum Gravity誌のHighlights of 2010-2011 に選出されました。一連の研究がきっかけとなって、2010年1月に Classical and Quantum Gravity 誌のEditorial board member に任命され、2018年1月からはAdvisory panel memberを務めています。

最近では、Hořava-Lifshitz理論に基づく量子宇宙論を研究しています。まず、宇宙の波動関数に対する有名な3種類の境界条件のうち DeWitt 境界条件について、一様等方宇宙だけでなくテンソル摂動を考慮し、一般相対論では整合的な波動関数を得られないという no-go 定理を証明しました [40]。そして、Hořava-Lifshitz 量子重力理論においては、DeWitt 境界条件を満たす一様等方宇宙とテンソル摂動を記述する波動関数を実際に構成することで、この問題を回避できることを世界で初めて示しました [27]。残り2種類の (no-boundaryと tunneling) 境界条件についても、Lorentzian経路積分に基づく研究 [9]により理解が進んでいます。

さらに、Hořava-Lifshitz 理論における Lorentz 対称性の回復 [101]、Hořava-Lifshitz 理論の低エネルギー有効理論におけるブラックホール no-hair の摂動的証明 [115]、Lifshitz scalar のボルツマン方程式の導出 [90]、Hořava-Lifshitz 理論におけるブラックホール摂動 [54]、等の研究もしました。また、Hořava-Lifshitz 量子重力理論の低エネルギー極限と深い関係のある Einstein-Aether 理論において、数値シミュレーションにより、重力崩壊によるブラックホール生成の解析に成功しています [100]。さらに、重力波イベント GW170817の観測等を受けて、Einstein-Aether 理論についての観測的制限の精査をしました [106]。

以上で述べてきた研究は、主に短距離での重力理論の進展から新しい宇宙像を得られた例になっています。重力は0.01mm程度以下の距離で正確に測られたことがなく、そのため、それよりも短距離で一般相対性理論と大きくずれていても実験・観測とは矛盾しません。理論的にも、重力を量子論的に整合的に扱うためには、多くの研究者が何らかの形で一般相対性理論を変更する必要があると考えています。その意味で、短距離での重力は、理論物理学のフロンティアの一つと言えます。

重力の有効場の理論

一方、宇宙論スケールの長距離の重力も、もうひとつのフロンティアと考えています。そのような長距離の重

方も、直接測られたことがないからです。

最新の観測データは、現在の宇宙の大部分が私たちの知らないエネルギーと物質で満たされていると示唆しています。これらのエネルギーと物質は、それぞれダークエネルギー、ダークマターと呼ばれていますが、正体は分かっていません。宇宙の9割以上を占めていると考えられているのにもかかわらず、、、。そこで私は、N. Arkani-Hamed, H. C. Cheng, M. Lutyと共に、「本当にダークエネルギーとダークマターは必要なのか？」と考え直してみました。19世紀に水星の近日点移動が発見された時、人々は見えない惑星、言わばダークプラネット、を導入して説明しようとしていました。発見したと主張する人もいたそうですが、実際の答えはダークプラネットではなく、“重力理論を変える”ということでした。つまり、“ニュートン力学から一般相対論へ”重力理論の新しい幕開けです。私たちは、「宇宙の加速膨張や銀河の回転曲線の謎も、もしかすると同じかもしれない」と考えました。つまり、「ダークエネルギーやダークマターを導入する代わりに、一般相対論を長距離または長時間で変更することはできないだろうか？」と考えたのです。最終的に私たちは、素粒子の標準模型で重要な役割を果たす、ヒッグス機構という考え方を重力に適用し、ゴースト凝縮という全く新しい考えにたどり着きました [213]。ゴースト凝縮では、低エネルギー有効理論の構造が対称性の破れのパターンによって決定されるため、理論的整合性を失うことなく一般相対論を長距離で変更できます。

私たちが考案した低エネルギー有効理論の構成方法はユニバーサルなため、様々な応用がされています。たとえば、Cheung-Cremine-Fitzpatrick-Kaplan-Senatore の5人によってインフレーション中の揺らぎを記述するために応用されました。この定式化はEffective field theory (EFT) of inflationと呼ばれていますが、ESA の Planck team にも採用され、揺らぎの非ガウス性の解析に役立ちました。（これについては、宇宙揺らぎの相関関数をユニバーサルに与える手法として、日本物理学会誌の解説でも紹介しました [260]。）また、同様にして現在の加速膨張宇宙に応用したものが EFT of dark energy であり、これは、観測と理論をつなぐ架け橋として、ダークエネルギーや長距離で重力を変更する理論研究の主流の一つとなっています。さらに、Dubovskyによって新しいタイプのmassive gravityの理論を構築するためにも使われました。

私は、ゴースト凝縮の性質とその応用について今まで、ダークエネルギーとダークマターの代わりになる可能性 [213]、新しいインフレーションモデル [214]、ブラックホール解の発見 [211]、シフト対称性をゲージ化したゴースト凝縮シナリオ [206]、超弦理論におけるゴースト凝縮の可能性についての考察 [203]、ブラックホール熱力学やド・ジッター熱力学との整合性 [193, 185, 131]等の研究をしてきました。また、宇宙論的摂動論の定式化 [204]もしました。

最近では、若手研究者とともに、これらの有効場の理論（ゴースト凝縮の有効場の理論、EFT of inflation、EFT of dark energy）を、スカラー場の微分が時間的な任意の背景に拡張することに世界で初めて成功しました [35]。そして、Scalar-tensor 理論におけるブラックホールに応用し、背景解の調査および odd-parity 摂動を記述する Generalized Regge-Wheeler 方程式の導出に世界で初めて成功しました [25]。そして、その応用として、スカラー場の微分が時間的なブラックホール解の準固有振動数を計算しました [15]。今後、ブラックホールのtidal Love numberの定式化および計算、even-parity 摂動への拡張、回転しているブラックホールへの拡張、ブラックホールへの膠着、重力崩壊によるブラックホール形成過程への応用など、有効場の理論の持つ、普遍性という利点を最大限に活用する多くの研究プロジェクトへと繋がると思います。この有効場の理論は、重力波の観測と宇宙論スケールの観測と、重力理論をつなぐ架け橋の役割を果たすと期待しています。また、上述のゴースト凝縮のシフト対称性をゲージ化した理論 [206]を平坦な時空から膨張宇宙に拡張することで、宇宙論backgroundにおいて全ての vector-tensor 理論を普遍的に記述できる有効場の理論を構成することにも成功しました [39, 7]。これらの有効場の理論は、ベクトル場に基づくダークエネルギー理論を、宇宙論および重力波の観測から制限するのに有用と考えられます。

Massive gravity

粒子を特徴づける固有のパラメーターに、スピンと質量があります。スピン0の粒子に質量を与えるのは簡単で、スカラー場の作用に質量項を加えるだけです。スピン1の場合には、ヒッグス機構があります。理論の持つゲージ対称性を自発的に破る状態を考えることで、ベクトル場に質量項を与えられます。しかし、スピン2の粒子、特に単独のスピン2の粒子に質量を与えられるのかどうかは、つい最近まで、理論的に分かっていませんでした。

Massive gravity、つまりスピン2の重力子がゼロでない質量を持つ可能性についての研究は、1939年に Fierz と Pauli が線形理論を提唱して以来、長い歴史を持ちます。しかし、1972年に Boulware と Deser が非線形レベルでの不安定性を指摘してからは、長い間、単一の重力子はゼロでない質量を持ってないだろうと考えられてきました。約40年後の2010年になってやっと、この不安定性の問題を解決する理論が、de Rham と Gabadadze と Tolley によって提唱されました。そして、massive gravityは急速に注目を集めるようになりました。この理論は、3人のイニシャルをとって、dRGT理論と呼ばれています。

理論的整合性を持つ massive gravity 理論の候補が見つかったので、それを宇宙論に応用して、加速膨張などの宇宙の謎に挑戦したいと思うのは自然です。なぜなら、ダークエネルギーやダークマターは、一般相対性理論が正しければ必要ですが、重力の振る舞いが長距離で一般相対性理論から変更を受けなければならないかもしれないからです。そこで、私は共同研究者と共に、この理論における宇宙論解とその安定性を系統的に研究しました。具体的には、dRGT理論における世界最初の一様等方加速膨張解の発見 [170]、その周りのゲージ不変な線形摂動の解析 [168]、新しい非線形不安定性の発見 [165]、摂動の統計的非等方性が期待される新たな解の発見 [166]とその安定性の解析 [156]等です。また、dRGT理論の拡張についての研究も進めました。2013年には、Classical and Quantum Gravity誌において、この分野の進展をまとめた特集号「CQG Focus Issue on Massive Gravity」の編集をしました。

これら一連の研究および重力に関する他の研究によって、Institut Lagrange de Paris より、Lagrange Award を受賞しました。

その後、A. de Feliceとの共同研究により、minimal theory of massive gravity という、新しい理論を提唱しました [137, 134]。このmassive gravity理論は、上述の一様等方加速膨張宇宙を解として持ちますが、dRGT理論と違って局所的物理的自由度の数が一般相対性理論と同じ2のため、完全に安定です。これらの進展については、日本物理学会誌から依頼され、解説記事を執筆しました [256]。また最近では、Massive gravity の観測データからの制限 [46, 6]、Massive gravity における背景重力波の解析 [163]、Massive gravity に基づいて観測可能なインフレーション起源の重力波を生成するシナリオの提唱 [95, 82]、カメレオン場の導入によって適用範囲を広げた bimetric gravity理論の発見および安定性の解析 [117, 108]等の研究もしました。さらに、あらゆる致命的な不安定性を排除した bigravity 理論、minimal theory of bigravity (MTBG)を世界で初めて発見しました [55]。MTBG は、初期宇宙を含めた様々な状況に適用可能で、重力子の質量項がダークエネルギーの代わりになって宇宙膨張を加速させることもできます。さらに、MTBG は、重力波観測によって massive gravity をテストする理論的土台や、spin-2 ダークマターの理論的基盤を与えてくれます [112, 21]。

宇宙項問題

「宇宙項は何故小さいのか？」という宇宙項問題は、現代の理論物理学と宇宙論における最難問の一つと考えられています。観測からの宇宙項に対する上限値は、量子論的にナイーブに予想される値に比べて、約 10^{-120} という非常に小さなものです。現時点で、このような小さな値を自然に説明できる理論はありません。そのため、研究者の間では、人間原理に頼ってしまうという傾向が見受けられます。私は、それは早計だと思っています。基本原理によって宇宙項問題を解決できる理論があるはずだと信じています。難問への挑戦は、諦めるべきではありません。

そこで私は、L. Randallと共に、宇宙項問題の解決に向けて、新しい宇宙モデルを提唱しました [216, 217]。

このモデルにおいて、私たちは宇宙項を十分小さな値にすることに成功しました。残された課題は、再加熱のシナリオです。宇宙項を小さくできて、再加熱なしでは物質や輻射のない空っぽの宇宙になってしまいます。宇宙項を小さく抑えつつ十分な再加熱が得られるシナリオに拡張する必要があります。もし成功すれば、宇宙項問題の解決に向けて大きな進展となります。幸いにして、最近の研究により、宇宙項を小さく抑えつつ十分な再加熱が得られるように、この宇宙モデルを拡張することに成功しました [28]。この拡張モデルでは、再加熱プロセスが周期的に繰り返し起こり、再加熱が起こる度に少しずつ宇宙項の値が小さくなっていきます。それを何度も繰り返すことにより、観測と矛盾しない、十分小さな宇宙項を備えた熱いビッグバン宇宙が実現することになります。

また最近では、ブレーン宇宙論を使った宇宙項問題への取り組みとして、全く別の宇宙シナリオも研究しています [36]。

ブラックホールのエントロピー

ブラックホールの理論には熱力学と類似の性質が多くあり、それらは全体としてブラックホールの熱力学と呼ばれています。私は、ブラックホールの熱力学、その中でも特に、ブラックホールのエントロピーの起源に興味を持って研究をしてきました。

私は、W. Israelと共に、ブラックホールのエントロピーの起源を説明するbrick wall模型について、長年論議的になってきた問題を再考察しました [240]。この模型において、ブラックホールのエントロピーの起源は、ブラックホールの地平線近傍の熱浴であると考えます。しかし、提唱したG. 'tHooft本人を含めた多くの研究者が、この模型には重大な欠陥があると考えてきました。なぜなら、地平線近傍の熱浴は大きなエネルギーを持っており、それによる背景時空への反作用は非常に強いと考えられてきたからです。私たちは、brick wall模型における系の真空を正しく同定し、真空が負のエネルギーを持っていること、そしてそれが熱浴の持っている大きな正のエネルギーを殆どキャンセルすることを初めて指摘しました。結果として、背景時空への反作用が十分弱く無視できることを示すことができ、それまで信じられてきた欠陥は存在しないことが分かりました。

他にも、ブラックホールのエントロピーについての様々な研究をしてきました。その中には、一般化された第二法則についての考察 [248, 235]、超弦理論におけるDブレーンのエントロピー [247]や量子エンタングルメントのエントロピー [246, 242, 241, 237]等によってブラックホールのエントロピーの起源を解明する試み、ブラックホール第一法則の一般の共変重力理論 [239]や動的過程 [238, 236]への拡張、等があります。

最近では、Covariant entropy bound の一般相対論を超える重力理論への拡張 [67]や、情報喪失問題の再考察 [48, 12, 8]等の研究もしています。

その他

- ガンマ線バーストの観測データにより、プランクスケールを超えるような高エネルギー物理現象を探る研究をしました。量子重力の効果により光子の分散関係が修正を受けると、光子の伝播が影響を受けます。たとえばCPT対称性が高エネルギーで破れているとすると、ガンマ線バーストからの光子の偏光度が、伝播途中でキャンセルしてしまうという現象が起こります。これは、局所的には無視できるほど小さな効果ですが、宇宙スケールの距離を伝播するうちに積算され、観測可能な程の大きさとなる場合があります。逆に、偏光度がキャンセルせずに観測されたのであれば、CPT対称性は（観測の精度の範囲で）保たれていたということになります。このことから、私と共同研究者は、プランクスケールよりも15桁以上高いスケールまでCPT対称性が保たれていることを示しました [162]。これは、CPT対称性の破れに対する制限として当時世界で最も厳しいもので、ループ量子重力理論などに強い制限を与えました。
- 宇宙では、様々なスケールで磁場が観測されています。最近、TeV領域とGeV領域のガンマ線の観測によ

り、ボイド領域でMpcスケールの磁場の強さに下限が与えられました。そこで私は、大学院生とともに、インフレーション中に宇宙初期磁場を生成するシナリオを考察しました。その結果、観測による磁場の下限から、理論の詳細に依らずにインフレーションスケールに上限を与えることに成功しました [167]。また、負の空間局率を持つインフレーション模型において、局率半径よりも大きなスケールの磁場のモードが磁場生成を助ける可能性が指摘されていましたが、そのようなモードが存在しないことを証明しました [148]。以上の結果は、今後、磁場生成の初期宇宙模型を構築する上で考慮すべき条件を与えることになります。また、ゲージ場の非線形相互作用や重力との相互作用等を考慮することにより、インフレーション中に有限の磁場を持つ一様宇宙を表す厳密解を発見し [123]、その安定性 [93]およびインフレーション後の時間発展 [72]を調べました。

- 銀河や銀河団などの宇宙の豊かな構造は、インフレーション中に生じた量子揺らぎが、重力不安定性によって成長してできたと考えられています。私はこれまで、摂動論的 [183, 188, 196]および非摂動論的 (gradient expansion) [195, 178]アプローチの両方を相補的に採用して、インフレーション中の揺らぎの解析をしてきました。
- 宇宙論には、ダークエネルギー・ダークマター・インフレーションを始めとして、初期特異点、宇宙初期磁場などの、多くの謎があります。これらの謎のいくつかは、重力理論を修正することで解決できるかもしれません。一方、重力の修正は、実験・観測と矛盾しない範囲でおこなう必要があります、厳しいテストを通過しなくてはなりません。PPN形式は、様々な重力理論に適用することができ、太陽系スケールでの重力のテストの結果をユニバーサルにパラメータ化するのに役立ってきました。私と共同研究者は、これまでのPPN形式は、そのままではHořava-Lifshitz理論に適用できないことを指摘し、新たなパラメータを導入することで、この理論と太陽系スケールでの重力のテストを直接比較することを可能にしました [150, 164]。
- 宇宙論スケールの長距離において一般相対論を修正する試みの多くは、太陽系スケールでの重力のテストによって強い制限を受けています。これらの制限を避ける方法として、非線形効果などによって余分な物理的自由度を遮蔽する機構が知られています。私と共同研究者は、これとは異なる方向性として、余分な物理的自由度がない、すなわち局所的物理的自由度が2の理論minimally modified gravity (MMG)を構築し [111, 75]、理論および解の性質を調べました [92, 88, 61, 60, 41, 31, 11]。そして、太陽系スケールでの重力のテストを回避しつつ、宇宙論スケールの長距離で一般相対論を修正する可能性を研究しました [70, 59]。
- 量子重力において、時間の概念は絶対的なものではなく、複数の観測量の間の相関の中に埋め込まれているという意味で間接的、創発的なものです。私は、重力を含む系における時間の起源を理解するため、共同研究者とともに、Riemannianつまり局所的にEuclideanで時間の概念のない理論から、Lorentzianの理論が創発する機構を提唱しました [158, 146]。また、この考えに基づいて、次数勘定の意味で繰り込み可能な、新しい重力理論を提唱しました [157]。この理論が繰り込み可能であることは、後にN. Ohtaらによって示されています。
- 超弦理論は、宇宙のすべてを記述する究極の理論の候補であるだけでなく、ゲージ理論を解析するツールとしても注目されています。AdS/CFT対応により、ゲージ理論の難問を、次元高い時空における重力の問題に置き換えることができるからです。私は共同研究者と共に、AdS/CFT対応を用いて、実際のQGP実験に近い状況に双対なブラックホール時空を構成しました [197, 194]。これは、時間に依存する状況でのAdS/CFT対応の具体例となっています。
- 前述のように、ダークマターの起源について、超弦理論に基づくシナリオ [210]や、有質量重力子に基づくシナリオ [128, 112, 21]等を提唱してきました。他にも、ダークマターの起源や生成機構について、研究をしてきました。例えば、ベクトル場からなるダークマター、すなわちdark photon dark matterを、インフレーション中に生成する新しいシナリオを提案しました [63, 58]。また、エントロピー揺らぎか

らダークマターを生成するシナリオも提案しました [43]。最近では、質量の軽いダークマターのスピンを、重力波干渉計を用いて観測的に区別する可能性を研究しました [5]。他にも、ダークマター候補としてのQCDアクシオンについて、インフレーション中の確率論的分布関数の非平衡発展を正しく考慮することで、観測的制限を再考察しました [3]。

- 重力波は相互作用が非常に弱いため、水素の再結合以前の初期宇宙を直接探るプローブとして、重要な役割を果たすことが期待されています。多くの重力波観測プロジェクトが進行中または計画中で、理論面でも様々なアイデアが生まれています。私は、擬スカラー場によるインフレーション模型 [161]や擬スカラー場の振動による粒子生成 [68]、重力子の質量 [163]を背景重力波で探査する試み、等について研究しました。また、anisotropic scalingによって背景重力波の振幅を大きくするシナリオの提唱 [187]や、前述のように、Massive gravity に基づいて観測可能なインフレーション起源の重力波を生成するシナリオの提唱 [95, 82]等もおこなってきました。
- 重力波は、ブラックホール誕生などの天体現象の解明や初期宇宙の探査だけでなく、強い重力場中での一般相対論の検証という物理学の基礎に直結する役割も期待されています。私は、重力波の物理とその応用について研究してきました。最近では、ブラックホール摂動の有効場の理論の構築 [35]とそれに基づく解析 [25, 15]の他に、例えばスカラーテンソル理論における重力波の伝搬 [24]やメモリー効果 [30]、一般相対論における重力波の重力レンズ [10]、ポテンシャルの修正に対する準固有振動数の安定性 [29]、ブラックホールのリングダウンによるローレンツ対称性の検証 [1]などの研究をしました。

今後の研究

向山信治

2024年5月7日

最大スケールの物理である宇宙論は、精密な観測データを背景に飛躍的に発展してきました。今や、宇宙を記述するパラメータの多くはかなりの精度で決まった、少なくとも決まりつつあると言えるでしょう。しかし、それらのパラメータの値が何を意味するのか、その多くは未だベールに包まれたままです。実際、現在の宇宙の殆どを占めていると考えられている、ダークエネルギーとダークマターの正体を私たちは知りません。また、宇宙がこれだけ大きいのは何故か？その大部分を説明すると考えられているのがインフレーションですが、その原動力となる場および真空エネルギーの起源は未だ分かっていません。豊富な精密観測データを誇る宇宙論の前には、ダークエネルギー・ダークマター・インフレーションという、3つの大きな謎が立ちまわっているのです。私は、一般相対性理論、統計物理学、素粒子物理学、超弦理論など、あらゆる手段を用いて宇宙の3大謎に挑戦し続けたいと思います。

一方、理論物理学における大きな目標の一つに、量子重力理論の構築、すなわち量子論と相対論の融合があります。私は、その過程において、宇宙論とブラックホールの研究が重要になると考えています。したがって、私は、宇宙の起源とブラックホールについてのあらゆる題材に興味を持って、研究をしていくつもりです。量子重力理論の最有力候補である超弦理論が全体像を少しずつあらわにしつつある現状と、量子論の発展の歴史において黒体輻射と水素原子が果たした役割を鑑みれば、宇宙論とブラックホールという具体的な題材に取り組むのは、有効な戦略であると思われる。量子論の発展における黒体輻射と水素原子の役割を、この2つが果たすはずです。

宇宙論および理論物理学において揺るぎない予言をするには、(少なくとも)2つの立場があります。1つは、低エネルギー有効理論における対称性または対称性の破れのパターンを用いて、量子論的に安定な議論を展開することです。もう1つの立場は、基礎理論に立ち返って、そこから帰結される予言を引き出すことです。私は、この2つを相補的に用いて研究を進めていきます。

以下では、4つのテーマに絞って、今後の研究について簡潔に説明したいと思います。

量子重力理論に基づく宇宙論

宇宙では、様々なスケールの物理現象が互いに影響を及ぼしながら絶えず起こっています。私は、最大スケールの物理すなわち宇宙論は、最小スケールの物理と繋がらなければならないと考えています。生まれたばかりの宇宙は超高エネルギーの極限的状态にあるため、ミクロの物理が本質的になるからです。特に、宇宙創世のような重力と量子効果の両方が本質的となる状況では、重力現象を記述する一般相対性理論も、素粒子の世界を記述する場の量子論も破綻してしまいます。従って、宇宙創世を論ずるには、この理論的破綻を回避して重力と量子論とを調和させる、量子重力理論が必要になります。その候補として最も有力なのが超弦理論ですが、それ以外にも、Hořava-Lifshitz 理論等の候補があります。私は、宇宙論における様々な謎を解くヒントを、量子重力理論が与えてくれると期待しています。これまでの研究を進展させ、超弦理論等の量子重力理論に基づいた、観測と矛盾のない宇宙シナリオの構築を目指します。宇宙背景輻射等の観測と直接結びつけることにより、最大スケールの観測が、最小スケールの物理を解明する可能性を突き詰めたいと思います。

宇宙項問題とダークエネルギー

現代の理論物理学と宇宙論における最難問の一つである宇宙項問題には、2つの側面があります。第一は、「何故小さいのか？」という問題です。私がL. Randallと共に提唱した宇宙シナリオは、宇宙項を十分小さな値にす

ることができ、さらに最近の研究では、宇宙項を小さく抑えつつ十分な再加熱が得られるように拡張することにも成功しています。今後は、このシナリオにおける原始揺らぎ等、観測可能な予言を引き出したいと考えています。第二の側面は、「何故ゼロでないのか？」そして「何故今この値なのか？」という問題です。これは、ダークエネルギーの謎そのものです。私が提唱したゴースト凝縮や、それを発展させたダークエネルギーの有効場の理論を駆使し、解明に取り組みたいと思います。本来、第二の問題すなわちダークエネルギーの謎は、第一の問題「何故小さいのか？」が解決された後で議論されるべきものかもしれませんが。しかし一方、ダークエネルギーに関する観測の進展には目を見張るものがあります。したがって、2つの問題を並行して研究していくのが有効な戦略であると考えます。相補的に研究を進め、最終的な解決を目指します。

ブラックホールのエントロピーと情報喪失問題

初期宇宙に作られたマイクロのブラックホールは、ホーキング放射によって質量を失い、蒸発する可能性があると言われます。ブラックホールに取り込まれた情報は、蒸発後どこに行くのか？これが情報喪失問題です。もしも情報が本当に喪失してしまうとすると、重力効果によって、量子論的ユニタリ発展が破綻することになります。ですからこの問題は、量子論と重力理論を融合する上で、本質的な問題と言えます。私を含め、多くの研究者は、情報は喪失せずに回復すると考えています。しかし、どのようにして回復するのかは解明されていません。私は、ブラックホールのエントロピーの研究を通じて、情報喪失の問題に取り組みたいと思います。ブラックホールのエントロピーは微視的自由度の数を反映しているはずであり、ブラックホールに取り込まれた情報量とも深く関係すると期待されます。したがって、私が研究してきたブラックホールのエントロピーは、情報喪失問題の解決に向けて重要な鍵となるはずです。

重力理論の検証

2015年にAdvanced LIGOによって初めて直接検出された重力波は、一般相対論の検証という役割も期待されています。2019年に発表されたEvent Horizon Telescopeによるブラックホール・シャドウの画像も、一般相対論の予言するKerrブラックホールの検証に使われています。また、実験や観測を重ねるうちに、どうしても一般相対論では説明できない現象が発見され、新たな重力理論が必要になる可能性もあります。最近活発に議論されている、 H_0 テンションや S_8 テンションと呼ばれる観測データと宇宙論の標準理論とのずれは、もしかするとそのような兆候なのかもしれません。私は最近の研究で、若手研究者とともに、「ゴースト凝縮の有効場の理論」「インフレーションの有効場の理論」「ダークエネルギーの有効場の理論」を、スカラー場の微分が時間的な任意の背景、例えば宇宙論だけでなくブラックホール、に拡張することに成功しました。これらの最近の研究を発展させることで、重力波とブラックホール、そして宇宙論の観測データを駆使して、一般相対論からのずれを検証する枠組みを構築したいと考えています。

その他

上述の4つのテーマの他にも、これまで研究してきた様々なテーマを発展させ、新しいテーマにも躊躇なく取り組みたいと思います。理論と観測の進展に応じて、臨機応変に研究を進めていきます。

さいごに

私の今までの研究スタイルを自己分析すると、基礎理論における新しい進展を受けて、それを宇宙に適用して新しい宇宙像を導くというパターンが多いように思います。今後も、基礎理論の観点から新しい宇宙象を探っていきたいと思います。また、このスタイルを発展させることで、宇宙の謎への挑戦を通じて、基礎理論についての新しい知見を得られるように努力していきます。以上を常に意識して、周囲の関連分野の研究者と協力しながら、宇宙のより深い理解へ向けて研究を続けていきます。

業績リスト

向山信治

2024年5月7日

学術雑誌に投稿した論文

- [1] V. Cardoso, S. Mukohyama, N. Oshita and K. Takahashi, “Black holes, multiple propagation speeds and energy extraction,” [arXiv:2404.05790 [gr-qc]].

査読付き学術雑誌に掲載が決定した論文

- [2] M. Minamitsuji, S. Mukohyama and S. Tsujikawa, “Angular and radial stabilities of spontaneously scalarized black holes in the presence of scalar-Gauss-Bonnet couplings,” [arXiv:2403.10048 [gr-qc]], accepted for publication in Phys. Rev. D.
- [3] V. Briaud, K. Kadota, S. Mukohyama, A. Talebian and V. Vennin, “Revisiting the stochastic QCD axion window: departure from equilibrium during inflation,” [arXiv:2312.08231 [astro-ph.CO]], accepted for publication in JCAP.
- [4] O. Lacombe, S. Mukohyama and J. Seitz, “Are $f(R, \text{Matter})$ theories really relevant to cosmology?,” [arXiv:2311.12925 [gr-qc]], accepted for publication in JCAP.
- [5] Y. Manita, H. Takeda, K. Aoki, T. Fujita and S. Mukohyama, “Exploring spin of ultralight dark matter with gravitational wave detectors,” [arXiv:2310.10646 [hep-ph]], accepted for publication in Phys. Rev. D.

査読付き学術雑誌に掲載された論文

- [6] A. De Felice, S. Kumar, S. Mukohyama and R. C. Nunes, “Observational bounds on extended minimal theories of massive gravity: new limits on the graviton mass,” JCAP **04**, 013 (2024) doi:10.1088/1475-7516/2024/04/013 [arXiv:2311.10530 [astro-ph.CO]].
- [7] K. Aoki, M. A. Gorji, S. Mukohyama, K. Takahashi and V. Yingcharoenrat, “Effective field theory of black hole perturbations in vector-tensor gravity,” JCAP **03**, 012 (2024) doi:10.1088/1475-7516/2024/03/012 [arXiv:2311.06767 [hep-th]].
- [8] J. C. Feng, S. Mukohyama and S. Carloni, “Singularity at the demise of a black hole,” Phys. Rev. D **109**, no.2, 024040 (2024) doi:10.1103/PhysRevD.109.024040 [arXiv:2310.17266 [gr-qc]].
- [9] H. Matsui and S. Mukohyama, “Hartle-Hawking no-boundary proposal and Hořava-Lifshitz gravity,” Phys. Rev. D **109**, no.2, 023504 (2024) doi:10.1103/PhysRevD.109.023504 [arXiv:2310.00210 [gr-qc]].
- [10] K. i. Kubota, S. Arai and S. Mukohyama, “Spin optics for gravitational waves lensed by a rotating object,” Phys. Rev. D **109**, no.4, 14 (2024) doi:10.1103/PhysRevD.109.044027 [arXiv:2309.11024 [gr-qc]].
- [11] A. F. Jalali, P. Martens and S. Mukohyama, “Spherical scalar collapse in a type-II minimally modified gravity,” Phys. Rev. D **109**, no.4, 044053 (2024) doi:10.1103/PhysRevD.109.044053 [arXiv:2306.10672 [gr-qc]].
- [12] F. Di Filippo, N. Ogawa, S. Mukohyama and T. Waki, “Soft hair, dressed coordinates, and infor-

- mation loss paradox,” *Phys. Rev. D* **108**, no.4, 044034 (2023) doi:10.1103/PhysRevD.108.044034 [arXiv:2305.15800 [hep-th]].
- [13] C. Deffayet, A. Held, S. Mukohyama and A. Vikman, “Global and local stability for ghosts coupled to positive energy degrees of freedom,” *JCAP* **11**, 031 (2023) doi:10.1088/1475-7516/2023/11/031 [arXiv:2305.09631 [gr-qc]].
- [14] M. Minamitsuji and S. Mukohyama, “Instability of scalarized compact objects in Einstein-scalar-Gauss-Bonnet theories,” *Phys. Rev. D* **108**, no.2, 024029 (2023) doi:10.1103/PhysRevD.108.024029 [arXiv:2305.05185 [gr-qc]].
- [15] S. Mukohyama, K. Takahashi, K. Tomikawa and V. Yingcharoenrat, “Quasinormal modes from EFT of black hole perturbations with timelike scalar profile,” *JCAP* **07**, 050 (2023) doi:10.1088/1475-7516/2023/07/050 [arXiv:2304.14304 [gr-qc]].
- [16] O. Lacombe and S. Mukohyama, “Multi-scalar theories of gravity with direct matter couplings and their parametrized post-Newtonian parameters,” *JCAP* **08**, 054 (2023) doi:10.1088/1475-7516/2023/08/054 [arXiv:2302.08941 [gr-qc]].
- [17] Z. B. Yao, M. Oliosi, X. Gao and S. Mukohyama, “Minimally modified gravity with auxiliary constraints formalism,” *Phys. Rev. D* **107**, no.10, 104052 (2023) doi:10.1103/PhysRevD.107.104052 [arXiv:2302.02090 [gr-qc]].
- [18] M. Minamitsuji, A. De Felice, S. Mukohyama and M. Oliosi, “Gravitational collapse and odd-parity black hole perturbations in minimal theory of bigravity,” *Phys. Rev. D* **107**, no.6, 064070 (2023) doi:10.1103/PhysRevD.107.064070 [arXiv:2301.00498 [gr-qc]].
- [19] A. Ganz, P. Martens, S. Mukohyama and R. Namba, “Bouncing cosmology in Λ CDM,” *JCAP* **04**, 060 (2023) doi:10.1088/1475-7516/2023/04/060 [arXiv:2212.13561 [gr-qc]].
- [20] A. De Felice, S. Mukohyama and K. Takahashi, “Approximately stealth black hole in higher-order scalar-tensor theories,” *JCAP* **03**, 050 (2023) doi:10.1088/1475-7516/2023/03/050 [arXiv:2212.13031 [gr-qc]].
- [21] Y. Manita, K. Aoki, T. Fujita and S. Mukohyama, “Spin-2 dark matter from an anisotropic universe in bigravity,” *Phys. Rev. D* **107**, no.10, 104007 (2023) doi:10.1103/PhysRevD.107.104007 [arXiv:2211.15873 [gr-qc]].
- [22] A. De Felice, K. i. Maeda, S. Mukohyama and M. C. Pookkillath, “Gravitational collapse and formation of a black hole in a type II minimally modified gravity theory,” *JCAP* **03**, 030 (2023) doi:10.1088/1475-7516/2023/03/030 [arXiv:2211.14760 [gr-qc]].
- [23] H. Matsui, S. Mukohyama and A. Naruko, “No smooth spacetime in Lorentzian quantum cosmology and trans-Planckian physics,” *Phys. Rev. D* **107**, no.4, 043511 (2023) doi:10.1103/PhysRevD.107.043511 [arXiv:2211.05306 [gr-qc]].
- [24] K. i. Kubota, S. Arai and S. Mukohyama, “Propagation of scalar and tensor gravitational waves in Horndeski theory,” *Phys. Rev. D* **107**, no.6, 064002 (2023) doi:10.1103/PhysRevD.107.064002 [arXiv:2209.00795 [gr-qc]].
- [25] S. Mukohyama, K. Takahashi and V. Yingcharoenrat, “Generalized Regge-Wheeler equation from Effective Field Theory of black hole perturbations with a timelike scalar profile,” *JCAP* **10**, 050 (2022) doi:10.1088/1475-7516/2022/10/050 [arXiv:2208.02943 [gr-qc]].
- [26] A. De Felice, S. Mukohyama and M. C. Pookkillath, “Extended minimal theories of massive gravity,” *Phys. Rev. D* **106**, no.8, 084050 (2022) doi:10.1103/PhysRevD.106.084050 [arXiv:2206.03338 [gr-qc]].
- [27] P. Martens, H. Matsui and S. Mukohyama, “DeWitt wave function in Hořava-Lifshitz cosmology with

- tensor perturbation,” JCAP **11**, 031 (2022) doi:10.1088/1475-7516/2022/11/031 [arXiv:2205.11746 [gr-qc]].
- [28] P. Martens, S. Mukohyama and R. Namba, “Reheating after relaxation of large cosmological constant,” JCAP **11**, 047 (2022) doi:10.1088/1475-7516/2022/11/047 [arXiv:2205.11754 [hep-th]].
- [29] E. Berti, V. Cardoso, M. H. Y. Cheung, F. Di Filippo, F. Duque, P. Martens and S. Mukohyama, “Stability of the fundamental quasinormal mode in time-domain observations against small perturbations,” Phys. Rev. D **106**, no.8, 084011 (2022) doi:10.1103/PhysRevD.106.084011 [arXiv:2205.08547 [gr-qc]].
- [30] M. A. Gorji, T. Matsuda and S. Mukohyama, “Cosmological memory effect in scalar-tensor theories,” Phys. Rev. D **106**, no.2, 024013 (2022) doi:10.1103/PhysRevD.106.024013 [arXiv:2204.09182 [gr-qc]].
- [31] A. De Felice, K. i. Maeda, S. Mukohyama and M. C. Pookkillath, “Comparison of two theories of Type-IIa minimally modified gravity,” Phys. Rev. D **106**, no.2, 024028 (2022) doi:10.1103/PhysRevD.106.024028 [arXiv:2204.08294 [gr-qc]].
- [32] M. Minamitsuji, A. De Felice, S. Mukohyama and M. Oliosi, “Static and spherically symmetric general relativity solutions in minimal theory of bigravity,” Phys. Rev. D **105**, no.12, 123026 (2022) doi:10.1103/PhysRevD.105.123026 [arXiv:2204.08217 [gr-qc]].
- [33] K. Aoki, M. A. Gorji, S. Mukohyama and K. Takahashi, “Effective field theory of gravitating continuum: solids, fluids, and aether unified,” JCAP **08**, 072 (2022) doi:10.1088/1475-7516/2022/08/072 [arXiv:2204.06672 [hep-th]].
- [34] A. De Felice, S. Mukohyama and K. Takahashi, “Avoidance of Strong Coupling in General Relativity Solutions with a Timelike Scalar Profile in a Class of Ghost-Free Scalar-Tensor Theories,” Phys. Rev. Lett. **129**, no.3, 031103 (2022) doi:10.1103/PhysRevLett.129.031103 [arXiv:2204.02032 [gr-qc]].
- [35] S. Mukohyama and V. Yingcharoenrat, “Effective field theory of black hole perturbations with timelike scalar profile: formulation,” JCAP **09**, 010 (2022) doi:10.1088/1475-7516/2022/09/010 [arXiv:2204.00228 [hep-th]].
- [36] O. Lacombe and S. Mukohyama, “Self-tuning of the cosmological constant in brane-worlds with $P(X, \phi)$,” JCAP **10**, 014 (2022) doi:10.1088/1475-7516/2022/10/014 [arXiv:2203.16322 [hep-th]].
- [37] J. C. Feng, S. Mukohyama and S. Carloni, “Junction conditions and sharp gradients in generalized coupling theories,” Phys. Rev. D **105**, no.10, 104036 (2022) doi:10.1103/PhysRevD.105.104036 [arXiv:2203.00011 [gr-qc]].
- [38] J. Ben Achour, E. R. Livine, S. Mukohyama and J. P. Uzan, “Hidden symmetry of the static response of black holes: applications to Love numbers,” JHEP **07**, 112 (2022) doi:10.1007/JHEP07(2022)112 [arXiv:2202.12828 [gr-qc]].
- [39] K. Aoki, M. A. Gorji, S. Mukohyama and K. Takahashi, “The effective field theory of vector-tensor theories,” JCAP **01**, no.01, 059 (2022) doi:10.1088/1475-7516/2022/01/059 [arXiv:2111.08119 [hep-th]].
- [40] H. Matsui, S. Mukohyama and A. Naruko, “DeWitt boundary condition is consistent in Hořava-Lifshitz quantum gravity,” Phys. Lett. B **833**, 137340 (2022) doi:10.1016/j.physletb.2022.137340 [arXiv:2111.00665 [gr-qc]].
- [41] A. De Felice, S. Mukohyama and M. C. Pookkillath, “Static, spherically symmetric objects in type-II minimally modified gravity,” Phys. Rev. D **105**, no.10, 104013 (2022) doi:10.1103/PhysRevD.105.104013 [arXiv:2110.14496 [gr-qc]].
- [42] M. A. Gorji, H. Motohashi and S. Mukohyama, “Inflation with $0 \leq c_s \leq 1$,” JCAP **02**, no.02, 030 (2022) doi:10.1088/1475-7516/2022/02/030 [arXiv:2110.10731 [hep-th]].

- [43] H. Firouzjahi, M. A. Gorji, S. Mukohyama and A. Talebian, “Dark matter from entropy perturbations in curved field space,” *Phys. Rev. D* **105**, no.4, 043501 (2022) doi:10.1103/PhysRevD.105.043501 [arXiv:2110.09538 [gr-qc]].
- [44] K. Aoki, Y. Manita and S. Mukohyama, “Shift-symmetric $SO(N)$ multi-Galileon,” *JCAP* **12**, no.12, 045 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/12/045 [arXiv:2110.05510 [gr-qc]].
- [45] A. De Felice, S. Mukohyama and K. Takahashi, “Nonlinear definition of the shadowy mode in higher-order scalar-tensor theories,” *JCAP* **12**, no.12, 020 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/12/020 [arXiv:2110.03194 [gr-qc]].
- [46] A. De Felice, S. Mukohyama and M. C. Pookkillath, “Minimal theory of massive gravity and constraints on the graviton mass,” *JCAP* **12**, no.12, 011 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/12/011 [arXiv:2110.01237 [astro-ph.CO]].
- [47] C. Deffayet, S. Mukohyama and A. Vikman, “Ghosts without Runaway Instabilities,” *Phys. Rev. Lett.* **128**, no.4, 041301 (2022) doi:10.1103/PhysRevLett.128.041301 [arXiv:2108.06294 [gr-qc]].
- [48] L. Buoninfante, F. Di Filippo and S. Mukohyama, “On the assumptions leading to the information loss paradox,” *JHEP* **10**, 081 (2021) doi:10.1007/JHEP10(2021)081 [arXiv:2107.05662 [hep-th]].
- [49] J. B. Achour, A. De Felice, M. A. Gorji, S. Mukohyama and M. C. Pookkillath, “Disformal map and Petrov classification in modified gravity,” *JCAP* **10**, 067 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/10/067 [arXiv:2107.02386 [gr-qc]].
- [50] K. Aoki, S. Mukohyama and R. Namba, “Positivity vs. Lorentz-violation: an explicit example,” *JCAP* **10**, 079 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/10/079 [arXiv:2107.01755 [hep-th]].
- [51] J. Oost, S. Mukohyama and A. Wang, “Spherically Symmetric Exact Vacuum Solutions in Einstein-Aether Theory,” *Universe* **7**, no.8, 272 (2021) doi:10.3390/universe7080272 [arXiv:2106.09044 [gr-qc]].
- [52] K. Aoki, F. Di Filippo and S. Mukohyama, “Non-uniqueness of massless transverse-traceless graviton,” *JCAP* **05**, 071 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/05/071 [arXiv:2103.15044 [gr-qc]].
- [53] J. Fier, X. Fang, B. Li, S. Mukohyama, A. Wang and T. Zhu, “Gravitational wave cosmology: High frequency approximation,” *Phys. Rev. D* **103**, no.12, 123021 (2021) doi:10.1103/PhysRevD.103.123021 [arXiv:2102.08968 [astro-ph.CO]].
- [54] N. Oshita, N. Afshordi and S. Mukohyama, “Lifshitz scaling, ringing black holes, and superradiance,” *JCAP* **05**, 005 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/05/005 [arXiv:2102.01741 [gr-qc]].
- [55] A. De Felice, F. Larrouturou, S. Mukohyama and M. Oliosi, “Minimal Theory of Bigravity: construction and cosmology,” *JCAP* **04**, 015 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/04/015 [arXiv:2012.01073 [gr-qc]].
- [56] R. Hagala, A. D. Felice, D. F. Mota and S. Mukohyama, “Non-linear dynamics of the minimal theory of massive gravity,” *Astron. Astrophys.* **653**, A148 (2021) doi:10.1051/0004-6361/202040018 [arXiv:2011.14697 [astro-ph.CO]].
- [57] J. C. Feng, S. Mukohyama and S. Carloni, “Minimal exponential measure model in the post-Newtonian limit,” *Phys. Rev. D* **103**, no.8, 084055 (2021) doi:10.1103/PhysRevD.103.084055 [arXiv:2011.12305 [gr-qc]].
- [58] H. Firouzjahi, M. A. Gorji, S. Mukohyama and B. Salehian, “Dark photon dark matter from charged inflaton,” *JHEP* **06**, 050 (2021) doi:10.1007/JHEP06(2021)050 [arXiv:2011.06324 [hep-ph]].
- [59] A. De Felice and S. Mukohyama, “Weakening gravity for dark matter in a type-II minimally modified gravity,” *JCAP* **04**, 018 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/04/018 [arXiv:2011.04188 [astro-ph.CO]].
- [60] Z. B. Yao, M. Oliosi, X. Gao and S. Mukohyama, “Minimally modified gravity with an auxiliary constraint: A Hamiltonian construction,” *Phys. Rev. D* **103**, no.2, 024032 (2021)

- doi:10.1103/PhysRevD.103.024032 [arXiv:2011.00805 [gr-qc]].
- [61] A. De Felice, A. Doll, F. Larrouturou and S. Mukohyama, “Black holes in a type-II minimally modified gravity,” JCAP **03**, 004 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/03/004 [arXiv:2010.13067 [gr-qc]].
- [62] S. Mukohyama and R. Namba, “Partial UV Completion of $P(X)$ from a Curved Field Space,” JCAP **02**, 001 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/02/001 [arXiv:2010.09184 [hep-th]].
- [63] B. Salehian, M. A. Gorji, H. Firouzjahi and S. Mukohyama, “Vector dark matter production from inflation with symmetry breaking,” Phys. Rev. D **103**, no.6, 063526 (2021) doi:10.1103/PhysRevD.103.063526 [arXiv:2010.04491 [hep-ph]].
- [64] K. Aoki, M. A. Gorji, S. Mizuno and S. Mukohyama, “Inflationary gravitational waves in consistent $D \rightarrow 4$ Einstein-Gauss-Bonnet gravity,” JCAP **01**, 054 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/01/054 [arXiv:2010.03973 [gr-qc]].
- [65] M. A. Gorji, H. Motohashi and S. Mukohyama, “Stealth dark energy in scordatura DHOST theory,” JCAP **03**, 081 (2021) doi:10.1088/1475-7516/2021/03/081 [arXiv:2009.11606 [gr-qc]].
- [66] A. De Felice, S. Mukohyama and M. C. Pookkillath, “Addressing H_0 tension by means of Λ CDM,” Phys. Lett. B **816**, 136201 (2021) [erratum: Phys. Lett. B **818**, 136364 (2021)] doi:10.1016/j.physletb.2021.136201 [arXiv:2009.08718 [astro-ph.CO]].
- [67] T. Matsuda and S. Mukohyama, “Covariant entropy bound beyond general relativity,” Phys. Rev. D **103**, no.2, 024002 (2021) doi:10.1103/PhysRevD.103.024002 [arXiv:2007.14015 [hep-th]].
- [68] B. Salehian, M. A. Gorji, S. Mukohyama and H. Firouzjahi, “Analytic study of dark photon and gravitational wave production from axion,” JHEP **05**, 043 (2021) doi:10.1007/JHEP05(2021)043 [arXiv:2007.08148 [hep-ph]].
- [69] J. Ben Achour, H. Liu, H. Motohashi, S. Mukohyama and K. Noui, “On rotating black holes in DHOST theories,” JCAP **11**, 001 (2020) doi:10.1088/1475-7516/2020/11/001 [arXiv:2006.07245 [gr-qc]].
- [70] K. Aoki, A. De Felice, S. Mukohyama, K. Noui, M. Oliosi and M. C. Pookkillath, “Minimally modified gravity fitting Planck data better than Λ CDM,” Eur. Phys. J. C **80**, no.8, 708 (2020) doi:10.1140/epjc/s10052-020-8291-1 [arXiv:2005.13972 [astro-ph.CO]].
- [71] K. Aoki, M. A. Gorji and S. Mukohyama, “Cosmology and gravitational waves in consistent $D \rightarrow 4$ Einstein-Gauss-Bonnet gravity,” JCAP **09**, 014 (2020) [erratum: JCAP **05**, E01 (2021)] doi:10.1088/1475-7516/2020/09/014 [arXiv:2005.08428 [gr-qc]].
- [72] A. Brandenburg, R. Durrer, Y. Huang, T. Kahniashvili, S. Mandal and S. Mukohyama, “Primordial magnetic helicity evolution with a homogeneous magnetic field from inflation,” Phys. Rev. D **102**, no.2, 023536 (2020) doi:10.1103/PhysRevD.102.023536 [arXiv:2005.06449 [astro-ph.CO]].
- [73] K. Aoki, M. A. Gorji and S. Mukohyama, “A consistent theory of $D \rightarrow 4$ Einstein-Gauss-Bonnet gravity,” Phys. Lett. B **810**, 135843 (2020) doi:10.1016/j.physletb.2020.135843 [arXiv:2005.03859 [gr-qc]].
- [74] J. Ben Achour, S. Brahma, S. Mukohyama and J. P. Uzan, “Towards consistent black-to-white hole bounces from matter collapse,” JCAP **09**, 020 (2020) doi:10.1088/1475-7516/2020/09/020 [arXiv:2004.12977 [gr-qc]].
- [75] A. De Felice, A. Doll and S. Mukohyama, “A theory of type-II minimally modified gravity,” JCAP **09**, 034 (2020) doi:10.1088/1475-7516/2020/09/034 [arXiv:2004.12549 [gr-qc]].
- [76] K. Aoki and S. Mukohyama, “Consistent inflationary cosmology from quadratic gravity with dynamical torsion,” JCAP **06**, 004 (2020) doi:10.1088/1475-7516/2020/06/004 [arXiv:2003.00664 [hep-th]].
- [77] A. Allahyari, M. A. Gorji and S. Mukohyama, “Bounds on the Horndeski Gauge-Gravity Cou-

- pling,” JCAP **05**, 013 (2020) [erratum: JCAP **05**, E02 (2021)] doi:10.1088/1475-7516/2020/05/013 [arXiv:2002.11932 [astro-ph.CO]].
- [78] J. Ben Achour, H. Liu and S. Mukohyama, “Hairy black holes in DHOST theories: Exploring disformal transformation as a solution-generating method,” JCAP **02**, 023 (2020) doi:10.1088/1475-7516/2020/02/023 [arXiv:1910.11017 [gr-qc]].
- [79] H. Motohashi and S. Mukohyama, “Weakly-coupled stealth solution in scordatura degenerate theory,” JCAP **01**, 030 (2020) doi:10.1088/1475-7516/2020/01/030 [arXiv:1912.00378 [gr-qc]].
- [80] H. Motohashi, S. Mukohyama and M. Oliosi, “Constant Roll and Primordial Black Holes,” JCAP **03**, 002 (2020) doi:10.1088/1475-7516/2020/03/002 [arXiv:1910.13235 [gr-qc]].
- [81] S. Mizuno, S. Mukohyama, S. Pi and Y. L. Zhang, “Universal Upper Bound on the Inflationary Energy Scale from the Trans-Planckian Censorship Conjecture,” Phys. Rev. D **102**, no.2, 021301 (2020) doi:10.1103/PhysRevD.102.021301 [arXiv:1910.02979 [astro-ph.CO]].
- [82] T. Fujita, S. Mizuno and S. Mukohyama, “Primordial Tensor Non-Gaussianity from Massive Gravity,” JCAP **01**, 023 (2020) doi:10.1088/1475-7516/2020/01/023 [arXiv:1909.07563 [astro-ph.CO]].
- [83] A. De Felice, F. Larrouturou, S. Mukohyama and M. Oliosi, “On the absence of conformally flat slicings of the Kerr spacetime,” Phys. Rev. D **100**, no.12, 124044 (2019) doi:10.1103/PhysRevD.100.124044 [arXiv:1908.03456 [gr-qc]].
- [84] K. Aoki and S. Mukohyama, “Ghostfree quadratic curvature theories with massive spin-2 and spin-0 particles,” Phys. Rev. D **100**, no.6, 064061 (2019) doi:10.1103/PhysRevD.100.064061 [arXiv:1907.09690 [hep-th]].
- [85] M. C. Pookkillath, A. De Felice and S. Mukohyama, “Baryon Physics and Tight Coupling Approximation in Boltzmann Codes,” Universe **6**, no.1, 6 (2019) doi:10.3390/universe6010006 [arXiv:1906.06831 [astro-ph.CO]].
- [86] S. Mizuno, S. Mukohyama, S. Pi and Y. L. Zhang, “Hyperbolic field space and swampland conjecture for DBI scalar,” JCAP **09**, 072 (2019) doi:10.1088/1475-7516/2019/09/072 [arXiv:1905.10950 [hep-th]].
- [87] S. Angus, K. Cho, G. Franzmann, S. Mukohyama and J. H. Park, “ $\mathbf{O}(D, D)$ completion of the Friedmann equations,” Eur. Phys. J. C **80**, no.9, 830 (2020) doi:10.1140/epjc/s10052-020-8379-7 [arXiv:1905.03620 [hep-th]].
- [88] S. Mukohyama and K. Noui, “Minimally Modified Gravity: a Hamiltonian Construction,” JCAP **07**, 049 (2019) doi:10.1088/1475-7516/2019/07/049 [arXiv:1905.02000 [gr-qc]].
- [89] M. A. Gorji, S. Mukohyama and H. Firouzjahi, “Cosmology in Mimetic SU(2) Gauge Theory,” JCAP **05**, 019 (2019) doi:10.1088/1475-7516/2019/05/019 [arXiv:1903.04845 [gr-qc]].
- [90] S. Mukohyama and Y. Watanabe, “Kinetic equation for Lifshitz scalar,” Phys. Rev. D **99**, no.6, 065003 (2019) doi:10.1103/PhysRevD.99.065003 [arXiv:1812.10983 [hep-th]].
- [91] H. Motohashi and S. Mukohyama, “Shape dependence of spontaneous scalarization,” Phys. Rev. D **99**, no.4, 044030 (2019) doi:10.1103/PhysRevD.99.044030 [arXiv:1810.12691 [gr-qc]].
- [92] K. Aoki, A. De Felice, C. Lin, S. Mukohyama and M. Oliosi, “Phenomenology in type-I minimally modified gravity,” JCAP **01**, 017 (2019) doi:10.1088/1475-7516/2019/01/017 [arXiv:1810.01047 [gr-qc]].
- [93] S. Mukohyama, “Stability of stealth magnetic field in de Sitter spacetime,” Phys. Rev. D **98**, no.10, 104053 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.98.104053 [arXiv:1808.09000 [hep-th]].
- [94] S. Mukohyama and M. S. Volkov, “The Ogjevetsky-Polubarinov massive gravity and the benign Boulware-Deser mode,” JCAP **10**, 037 (2018) doi:10.1088/1475-7516/2018/10/037 [arXiv:1808.04292

- [hep-th]].
- [95] T. Fujita, S. Kuroyanagi, S. Mizuno and S. Mukohyama, “Blue-tilted Primordial Gravitational Waves from Massive Gravity,” *Phys. Lett. B* **789**, 215-219 (2019) doi:10.1016/j.physletb.2018.12.025 [arXiv:1808.02381 [gr-qc]].
 - [96] A. De Felice, F. Larrouturou, S. Mukohyama and M. Oliosi, “Black holes and stars in the minimal theory of massive gravity,” *Phys. Rev. D* **98**, no.10, 104031 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.98.104031 [arXiv:1808.01403 [gr-qc]].
 - [97] M. A. Gorji, S. Mukohyama, H. Firouzjahi and S. A. Hosseini Mansoori, “Gauge Field Mimetic Cosmology,” *JCAP* **08**, 047 (2018) doi:10.1088/1475-7516/2018/08/047 [arXiv:1807.06335 [hep-th]].
 - [98] G. Domènech, S. Mukohyama, R. Namba and V. Papadopoulos, “Vector disformal transformation of generalized Proca theory,” *Phys. Rev. D* **98**, no.6, 064037 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.98.064037 [arXiv:1807.06048 [gr-qc]].
 - [99] A. De Felice, S. Mukohyama and M. Oliosi, “Phenomenology of minimal theory of quasidilaton massive gravity,” *Phys. Rev. D* **99**, no.4, 044055 (2019) doi:10.1103/PhysRevD.99.044055 [arXiv:1806.00602 [hep-th]].
 - [100] M. Bhattacharjee, S. Mukohyama, M. B. Wan and A. Wang, “Gravitational collapse and formation of universal horizons in Einstein-æther theory,” *Phys. Rev. D* **98**, no.6, 064010 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.98.064010 [arXiv:1806.00142 [gr-qc]].
 - [101] A. Coates, C. Melby-Thompson and S. Mukohyama, “Revisiting Lorentz violation in Hořava gravity,” *Phys. Rev. D* **100**, no.6, 064046 (2019) doi:10.1103/PhysRevD.100.064046 [arXiv:1805.10299 [hep-th]].
 - [102] N. Bolis, T. Fujita, S. Mizuno and S. Mukohyama, “Quantum Entanglement in Multi-field Inflation,” *JCAP* **09**, 004 (2018) doi:10.1088/1475-7516/2018/09/004 [arXiv:1805.09448 [astro-ph.CO]].
 - [103] K. Aoki, C. Lin and S. Mukohyama, “Novel matter coupling in general relativity via canonical transformation,” *Phys. Rev. D* **98**, no.4, 044022 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.98.044022 [arXiv:1804.03902 [gr-qc]].
 - [104] N. Bolis, A. De Felice and S. Mukohyama, “Integrated Sachs-Wolfe-galaxy cross-correlation bounds on the two branches of the minimal theory of massive gravity,” *Phys. Rev. D* **98**, no.2, 024010 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.98.024010 [arXiv:1804.01790 [astro-ph.CO]].
 - [105] A. De Felice, D. Langlois, S. Mukohyama, K. Noui and A. Wang, “Generalized instantaneous modes in higher-order scalar-tensor theories,” *Phys. Rev. D* **98**, no.8, 084024 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.98.084024 [arXiv:1803.06241 [hep-th]].
 - [106] J. Oost, S. Mukohyama and A. Wang, “Constraints on Einstein-aether theory after GW170817,” *Phys. Rev. D* **97**, no.12, 124023 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.97.124023 [arXiv:1802.04303 [gr-qc]].
 - [107] V. Papadopoulos, M. Zarei, H. Firouzjahi and S. Mukohyama, “Vector disformal transformation of cosmological perturbations,” *Phys. Rev. D* **97**, no.6, 063521 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.97.063521 [arXiv:1801.00227 [hep-th]].
 - [108] A. De Felice, S. Mukohyama, M. Oliosi and Y. Watanabe, “Stable cosmology in chameleon bigravity,” *Phys. Rev. D* **97**, no.2, 024050 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.97.024050 [arXiv:1711.04655 [hep-th]].
 - [109] S. F. Bramberger, A. Coates, J. Magueijo, S. Mukohyama, R. Namba and Y. Watanabe, “Solving the flatness problem with an anisotropic instanton in Hořava-Lifshitz gravity,” *Phys. Rev. D* **97**, no.4, 043512 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.97.043512 [arXiv:1709.07084 [hep-th]].
 - [110] A. De Felice, S. Mukohyama and M. Oliosi, “Horndeski extension of the minimal theory of quasidilaton massive gravity,” *Phys. Rev. D* **96**, no.10, 104036 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.96.104036

- [arXiv:1709.03108 [hep-th]].
- [111] C. Lin and S. Mukohyama, “A Class of Minimally Modified Gravity Theories,” *JCAP* **10**, 033 (2017) doi:10.1088/1475-7516/2017/10/033 [arXiv:1708.03757 [gr-qc]].
- [112] K. Aoki and S. Mukohyama, “Massive graviton dark matter with environment dependent mass: A natural explanation of the dark matter-baryon ratio,” *Phys. Rev. D* **96**, no.10, 104039 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.96.104039 [arXiv:1708.01969 [gr-qc]].
- [113] S. Mizuno and S. Mukohyama, “Primordial perturbations from inflation with a hyperbolic field-space,” *Phys. Rev. D* **96**, no.10, 103533 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.96.103533 [arXiv:1707.05125 [hep-th]].
- [114] A. E. Gumrukcuoglu, K. Koyama and S. Mukohyama, “Stable cosmology in ghost-free quasidilaton theory,” *Phys. Rev. D* **96**, no.4, 044041 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.96.044041 [arXiv:1707.02004 [hep-th]].
- [115] K. Lin, S. Mukohyama, A. Wang and T. Zhu, “No static black hole hairs in gravitational theories with broken Lorentz invariance,” *Phys. Rev. D* **95**, no.12, 124053 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.95.124053 [arXiv:1704.02990 [gr-qc]].
- [116] C. Deffayet, S. Garcia-Saenz, S. Mukohyama and V. Sivanesan, “Classifying Galileon p -form theories,” *Phys. Rev. D* **96**, no.4, 045014 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.96.045014 [arXiv:1704.02980 [hep-th]].
- [117] A. De Felice, S. Mukohyama and J. P. Uzan, “Extending applicability of bimetric theory: chameleon bigravity,” *Gen. Rel. Grav.* **50**, no.2, 21 (2018) doi:10.1007/s10714-018-2342-z [arXiv:1702.04490 [hep-th]].
- [118] C. Mazuet, S. Mukohyama and M. S. Volkov, “Anisotropic deformations of spatially open cosmology in massive gravity theory,” *JCAP* **04**, 039 (2017) doi:10.1088/1475-7516/2017/04/039 [arXiv:1702.04205 [hep-th]].
- [119] A. De Felice, S. Mukohyama and M. Oliosi, “Minimal theory of quasidilaton massive gravity,” *Phys. Rev. D* **96**, no.2, 024032 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.96.024032 [arXiv:1701.01581 [hep-th]].
- [120] R. Emami, S. Mukohyama, R. Namba and Y. I. Zhang, “Stable solutions of inflation driven by vector fields,” *JCAP* **03**, 058 (2017) doi:10.1088/1475-7516/2017/03/058 [arXiv:1612.09581 [hep-th]].
- [121] A. E. Gumrukcuoglu, K. Koyama and S. Mukohyama, “Role of matter in extended quasidilaton massive gravity,” *Phys. Rev. D* **94**, no.12, 123510 (2016) doi:10.1103/PhysRevD.94.123510 [arXiv:1610.03562 [hep-th]].
- [122] F. Larrouturou, S. Mukohyama, R. Namba and Y. Watanabe, “Where does curvaton reside? Differences between bulk and brane frames,” *Phys. Rev. D* **95**, no.6, 063509 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.95.063509 [arXiv:1609.06191 [hep-th]].
- [123] S. Mukohyama, “Stealth magnetic field in de Sitter spacetime,” *Phys. Rev. D* **94**, no.12, 121302 (2016) doi:10.1103/PhysRevD.94.121302 [arXiv:1607.07041 [hep-th]].
- [124] A. De Felice and S. Mukohyama, “Graviton mass might reduce tension between early and late time cosmological data,” *Phys. Rev. Lett.* **118**, no.9, 091104 (2017) doi:10.1103/PhysRevLett.118.091104 [arXiv:1607.03368 [astro-ph.CO]].
- [125] A. E. Gümrükçüoğlu, S. Mukohyama and T. P. Sotiriou, “Low energy ghosts and the Jeans’ instability,” *Phys. Rev. D* **94**, no.6, 064001 (2016) doi:10.1103/PhysRevD.94.064001 [arXiv:1606.00618 [hep-th]].
- [126] S. Mukohyama, R. Namba and Y. Watanabe, “Is the DBI scalar field as fragile as other k -essence fields?,” *Phys. Rev. D* **94**, no.2, 023514 (2016) doi:10.1103/PhysRevD.94.023514 [arXiv:1605.06418 [hep-th]].

- [127] A. De Felice, L. Heisenberg, R. Kase, S. Mukohyama, S. Tsujikawa and Y. I. Zhang, “Effective gravitational couplings for cosmological perturbations in generalized Proca theories,” *Phys. Rev. D* **94**, no.4, 044024 (2016) doi:10.1103/PhysRevD.94.044024 [arXiv:1605.05066 [gr-qc]].
- [128] K. Aoki and S. Mukohyama, “Massive gravitons as dark matter and gravitational waves,” *Phys. Rev. D* **94**, no.2, 024001 (2016) doi:10.1103/PhysRevD.94.024001 [arXiv:1604.06704 [hep-th]].
- [129] A. De Felice, L. Heisenberg, R. Kase, S. Mukohyama, S. Tsujikawa and Y. I. Zhang, “Cosmology in generalized Proca theories,” *JCAP* **06**, 048 (2016) doi:10.1088/1475-7516/2016/06/048 [arXiv:1603.05806 [gr-qc]].
- [130] A. De Felice, A. E. Gümrükçüoğlu, L. Heisenberg, S. Mukohyama and N. Tanahashi, “New Quasidilaton theory in Partially Constrained Vielbein Formalism,” *JCAP* **05**, 061 (2016) doi:10.1088/1475-7516/2016/05/061 [arXiv:1603.02165 [hep-th]].
- [131] S. Jazayeri, S. Mukohyama, R. Saitou and Y. Watanabe, “Ghost inflation and de Sitter entropy,” *JCAP* **08**, 002 (2016) doi:10.1088/1475-7516/2016/08/002 [arXiv:1602.06511 [hep-th]].
- [132] C. Deffayet, S. Mukohyama and V. Sivanesan, “On p-form theories with gauge invariant second order field equations,” *Phys. Rev. D* **93**, no.8, 085027 (2016) doi:10.1103/PhysRevD.93.085027 [arXiv:1601.01287 [hep-th]].
- [133] A. Naruko, D. Yoshida and S. Mukohyama, “Gravitational scalar–tensor theory,” *Class. Quant. Grav.* **33**, no.9, 09LT01 (2016) doi:10.1088/0264-9381/33/9/09LT01 [arXiv:1512.06977 [gr-qc]].
- [134] A. De Felice and S. Mukohyama, “Phenomenology in minimal theory of massive gravity,” *JCAP* **04**, 028 (2016) doi:10.1088/1475-7516/2016/04/028 [arXiv:1512.04008 [hep-th]].
- [135] A. De Felice, A. E. Gümrükçüoğlu, L. Heisenberg and S. Mukohyama, “Matter coupling in partially constrained vielbein formulation of massive gravity,” *JCAP* **01**, 003 (2016) doi:10.1088/1475-7516/2016/01/003 [arXiv:1509.05978 [hep-th]].
- [136] G. Domènech, S. Mukohyama, R. Namba, A. Naruko, R. Saitou and Y. Watanabe, “Derivative-dependent metric transformation and physical degrees of freedom,” *Phys. Rev. D* **92**, no.8, 084027 (2015) doi:10.1103/PhysRevD.92.084027 [arXiv:1507.05390 [hep-th]].
- [137] A. De Felice and S. Mukohyama, “Minimal theory of massive gravity,” *Phys. Lett. B* **752**, 302-305 (2016) doi:10.1016/j.physletb.2015.11.050 [arXiv:1506.01594 [hep-th]].
- [138] S. Mukohyama, R. Namba, R. Saitou and Y. Watanabe, “Hamiltonian analysis of nonprojectable Hořava-Lifshitz gravity with $U(1)$ symmetry,” *Phys. Rev. D* **92**, no.2, 024005 (2015) doi:10.1103/PhysRevD.92.024005 [arXiv:1504.07357 [hep-th]].
- [139] A. E. Gumrukcuoglu, L. Heisenberg, S. Mukohyama and N. Tanahashi, “Cosmology in bimetric theory with an effective composite coupling to matter,” *JCAP* **04**, 008 (2015) doi:10.1088/1475-7516/2015/04/008 [arXiv:1501.02790 [hep-th]].
- [140] S. Mukohyama, “A new quasidilaton theory of massive gravity,” *JCAP* **12**, 011 (2014) doi:10.1088/1475-7516/2014/12/011 [arXiv:1410.1996 [hep-th]].
- [141] A. Emir Gümrükçüoğlu, L. Heisenberg and S. Mukohyama, “Cosmological perturbations in massive gravity with doubly coupled matter,” *JCAP* **02**, 022 (2015) doi:10.1088/1475-7516/2015/02/022 [arXiv:1409.7260 [hep-th]].
- [142] C. Lin, S. Mukohyama, R. Namba and R. Saitou, “Hamiltonian structure of scalar-tensor theories beyond Horndeski,” *JCAP* **10**, 071 (2014) doi:10.1088/1475-7516/2014/10/071 [arXiv:1408.0670 [hep-th]].
- [143] S. Mukohyama, R. Namba, M. Peloso and G. Shiu, “Blue Tensor Spectrum from Particle Production

- during Inflation,” JCAP **08**, 036 (2014) doi:10.1088/1475-7516/2014/08/036 [arXiv:1405.0346 [astro-ph.CO]].
- [144] D. Langlois, S. Mukohyama, R. Namba and A. Naruko, “Cosmology in rotation-invariant massive gravity with non-trivial fiducial metric,” *Class. Quant. Grav.* **31**, 175003 (2014) doi:10.1088/0264-9381/31/17/175003 [arXiv:1405.0358 [hep-th]].
- [145] A. De Felice, A. E. Gümrükçüoğlu, S. Mukohyama, N. Tanahashi and T. Tanaka, “Viable cosmology in bimetric theory,” JCAP **06**, 037 (2014) doi:10.1088/1475-7516/2014/06/037 [arXiv:1404.0008 [hep-th]].
- [146] J. Kehayias, S. Mukohyama and J. P. Uzan, “Emergent Lorentz Signature, Fermions, and the Standard Model,” *Phys. Rev. D* **89**, no.10, 105017 (2014) doi:10.1103/PhysRevD.89.105017 [arXiv:1403.0580 [hep-th]].
- [147] G. Goon, A. E. Gümrükçüoğlu, K. Hinterbichler, S. Mukohyama and M. Trodden, “Galileons Coupled to Massive Gravity: General Analysis and Cosmological Solutions,” JCAP **08**, 008 (2014) doi:10.1088/1475-7516/2014/08/008 [arXiv:1402.5424 [hep-th]].
- [148] D. Yamauchi, T. Fujita and S. Mukohyama, “Is there supercurvature mode of massive vector field in open inflation?,” JCAP **03**, 031 (2014) doi:10.1088/1475-7516/2014/03/031 [arXiv:1402.2784 [astro-ph.CO]].
- [149] C. Deffayet, A. E. Gümrükçüoğlu, S. Mukohyama and Y. Wang, “A no-go theorem for generalized vector Galileons on flat spacetime,” *JHEP* **04**, 082 (2014) doi:10.1007/JHEP04(2014)082 [arXiv:1312.6690 [hep-th]].
- [150] K. Lin, S. Mukohyama, A. Wang and T. Zhu, “Post-Newtonian approximations in the Hořava-Lifshitz gravity with extra U(1) symmetry,” *Phys. Rev. D* **89**, no.8, 084022 (2014) doi:10.1103/PhysRevD.89.084022 [arXiv:1310.6666 [hep-ph]].
- [151] A. De Felice, A. Emir Gümrükçüoğlu and S. Mukohyama, “Generalized quasidilaton theory,” *Phys. Rev. D* **88**, no.12, 124006 (2013) doi:10.1103/PhysRevD.88.124006 [arXiv:1309.3162 [hep-th]].
- [152] S. Mukohyama, “Boulware-Deser ghost in extended quasidilaton massive gravity,” *Phys. Rev. D* **96**, no.4, 044029 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.96.044029 [arXiv:1309.2146 [hep-th]].
- [153] A. De Felice and S. Mukohyama, “Towards consistent extension of quasidilaton massive gravity,” *Phys. Lett. B* **728**, 622-625 (2014) doi:10.1016/j.physletb.2013.12.041 [arXiv:1306.5502 [hep-th]].
- [154] A. De Felice, A. E. Gümrükçüoğlu, C. Lin and S. Mukohyama, “On the cosmology of massive gravity,” *Class. Quant. Grav.* **30**, 184004 (2013) doi:10.1088/0264-9381/30/18/184004 [arXiv:1304.0484 [hep-th]].
- [155] A. E. Gümrükçüoğlu, K. Hinterbichler, C. Lin, S. Mukohyama and M. Trodden, “Cosmological Perturbations in Extended Massive Gravity,” *Phys. Rev. D* **88**, no.2, 024023 (2013) doi:10.1103/PhysRevD.88.024023 [arXiv:1304.0449 [hep-th]].
- [156] A. De Felice, A. E. Gümrükçüoğlu, C. Lin and S. Mukohyama, “Nonlinear stability of cosmological solutions in massive gravity,” JCAP **05**, 035 (2013) doi:10.1088/1475-7516/2013/05/035 [arXiv:1303.4154 [hep-th]].
- [157] S. Mukohyama, “Emergence of time in power-counting renormalizable Riemannian theory of gravity,” *Phys. Rev. D* **87**, no.8, 085030 (2013) doi:10.1103/PhysRevD.87.085030 [arXiv:1303.1409 [hep-th]].
- [158] S. Mukohyama and J. P. Uzan, “From configuration to dynamics: Emergence of Lorentz signature in classical field theory,” *Phys. Rev. D* **87**, no.6, 065020 (2013) doi:10.1103/PhysRevD.87.065020 [arXiv:1301.1361 [hep-th]].

- [159] S. Mukohyama, “Nonlinear massive gravity and cosmology,” *Int. J. Mod. Phys. D* **22**, 1330007 (2013) doi:10.1142/S0218271813300073
- [160] A. E. Gumrukcuoglu, C. Lin and S. Mukohyama, “Self-accelerating universe in nonlinear massive gravity,” *Mod. Phys. Lett. A* **28**, 1340016 (2013) doi:10.1142/S0217732313400166
- [161] S. G. Crowder, R. Namba, V. Mandic, S. Mukohyama and M. Peloso, “Measurement of Parity Violation in the Early Universe using Gravitational-wave Detectors,” *Phys. Lett. B* **726**, 66-71 (2013) doi:10.1016/j.physletb.2013.08.077 [arXiv:1212.4165 [astro-ph.CO]].
- [162] K. Toma, S. Mukohyama, D. Yonetoku, T. Murakami, S. Gunji, T. Mihara, Y. Morihara, T. Sakashita, T. Takahashi and Y. Wakashima, *et al.* “Strict Limit on CPT Violation from Polarization of Gamma-Ray Burst,” *Phys. Rev. Lett.* **109**, 241104 (2012) doi:10.1103/PhysRevLett.109.241104 [arXiv:1208.5288 [astro-ph.HE]].
- [163] A. E. Gumrukcuoglu, S. Kuroyanagi, C. Lin, S. Mukohyama and N. Tanahashi, “Gravitational wave signal from massive gravity,” *Class. Quant. Grav.* **29**, 235026 (2012) doi:10.1088/0264-9381/29/23/235026 [arXiv:1208.5975 [hep-th]].
- [164] K. Lin, S. Mukohyama and A. Wang, “Solar system tests and interpretation of gauge field and Newtonian prepotential in general covariant Hořava-Lifshitz gravity,” *Phys. Rev. D* **86**, 104024 (2012) doi:10.1103/PhysRevD.86.104024 [arXiv:1206.1338 [hep-th]].
- [165] A. De Felice, A. E. Gumrukcuoglu and S. Mukohyama, “Massive gravity: nonlinear instability of the homogeneous and isotropic universe,” *Phys. Rev. Lett.* **109**, 171101 (2012) doi:10.1103/PhysRevLett.109.171101 [arXiv:1206.2080 [hep-th]].
- [166] A. E. Gumrukcuoglu, C. Lin and S. Mukohyama, “Anisotropic Friedmann-Robertson-Walker universe from nonlinear massive gravity,” *Phys. Lett. B* **717**, 295-298 (2012) doi:10.1016/j.physletb.2012.09.049 [arXiv:1206.2723 [hep-th]].
- [167] T. Fujita and S. Mukohyama, “Universal upper limit on inflation energy scale from cosmic magnetic field,” *JCAP* **10**, 034 (2012) doi:10.1088/1475-7516/2012/10/034 [arXiv:1205.5031 [astro-ph.CO]].
- [168] A. E. Gumrukcuoglu, C. Lin and S. Mukohyama, “Cosmological perturbations of self-accelerating universe in nonlinear massive gravity,” *JCAP* **03**, 006 (2012) doi:10.1088/1475-7516/2012/03/006 [arXiv:1111.4107 [hep-th]].
- [169] A. E. Gumrukcuoglu, S. Mukohyama and A. Wang, “General relativity limit of Horava-Lifshitz gravity with a scalar field in gradient expansion,” *Phys. Rev. D* **85**, 064042 (2012) doi:10.1103/PhysRevD.85.064042 [arXiv:1109.2609 [hep-th]].
- [170] A. E. Gumrukcuoglu, C. Lin and S. Mukohyama, “Open FRW universes and self-acceleration from nonlinear massive gravity,” *JCAP* **11**, 030 (2011) doi:10.1088/1475-7516/2011/11/030 [arXiv:1109.3845 [hep-th]].
- [171] K. Izumi and S. Mukohyama, “Nonlinear superhorizon perturbations in Horava-Lifshitz gravity,” *Phys. Rev. D* **84**, 064025 (2011) doi:10.1103/PhysRevD.84.064025 [arXiv:1105.0246 [hep-th]].
- [172] A. E. Gumrukcuoglu and S. Mukohyama, “Horava-Lifshitz gravity with $\lambda \rightarrow \infty$,” *Phys. Rev. D* **83**, 124033 (2011) doi:10.1103/PhysRevD.83.124033 [arXiv:1104.2087 [hep-th]].
- [173] V. P. Frolov and S. Mukohyama, “Brane Holes,” *Phys. Rev. D* **83**, 044052 (2011) doi:10.1103/PhysRevD.83.044052 [arXiv:1012.4541 [hep-th]].
- [174] S. Mukohyama and S. C. Park, “Ghost condensation and CPT violation in neutrino sector,” *Phys. Lett. B* **696**, 505-508 (2011) doi:10.1016/j.physletb.2011.01.014 [arXiv:1009.1251 [hep-ph]].
- [175] K. Izumi, T. Kobayashi and S. Mukohyama, “Non-Gaussianity from Lifshitz Scalar,” *JCAP* **10**, 031

- (2010) doi:10.1088/1475-7516/2010/10/031 [arXiv:1008.1406 [hep-th]].
- [176] S. Mukohyama, “Horava-Lifshitz Cosmology: A Review,” *Class. Quant. Grav.* **27**, 223101 (2010) doi:10.1088/0264-9381/27/22/223101 [arXiv:1007.5199 [hep-th]].
- [177] A. De Felice, S. Mukohyama and S. Tsujikawa, “Density perturbations in general modified gravitational theories,” *Phys. Rev. D* **82**, 023524 (2010) doi:10.1103/PhysRevD.82.023524 [arXiv:1006.0281 [astro-ph.CO]].
- [178] Y. i. Takamizu, S. Mukohyama, M. Sasaki and Y. Tanaka, “Non-Gaussianity of superhorizon curvature perturbations beyond δN formalism,” *JCAP* **06**, 019 (2010) doi:10.1088/1475-7516/2010/06/019 [arXiv:1004.1870 [astro-ph.CO]].
- [179] K. Izumi and S. Mukohyama, “Trispectrum from Ghost Inflation,” *JCAP* **06**, 016 (2010) doi:10.1088/1475-7516/2010/06/016 [arXiv:1004.1776 [hep-th]].
- [180] T. Kobayashi and S. Mukohyama, “Effects of Light Fields During Inflation,” *Phys. Rev. D* **81**, 103504 (2010) doi:10.1103/PhysRevD.81.103504 [arXiv:1003.0076 [astro-ph.CO]].
- [181] T. Furukawa, S. Yokoyama, K. Ichiki, N. Sugiyama and S. Mukohyama, “Ghost Dark Matter,” *JCAP* **05**, 007 (2010) doi:10.1088/1475-7516/2010/05/007 [arXiv:1001.4634 [astro-ph.CO]].
- [182] K. Izumi and S. Mukohyama, “Stellar center is dynamical in Horava-Lifshitz gravity,” *Phys. Rev. D* **81**, 044008 (2010) doi:10.1103/PhysRevD.81.044008 [arXiv:0911.1814 [hep-th]].
- [183] D. A. Easson, S. Mukohyama and B. A. Powell, “Observational Signatures of Gravitational Couplings in DBI Inflation,” *Phys. Rev. D* **81**, 023512 (2010) doi:10.1103/PhysRevD.81.023512 [arXiv:0910.1353 [astro-ph.CO]].
- [184] S. Maeda, S. Mukohyama and T. Shiromizu, “Primordial magnetic field from non-inflationary cosmic expansion in Horava-Lifshitz gravity,” *Phys. Rev. D* **80**, 123538 (2009) doi:10.1103/PhysRevD.80.123538 [arXiv:0909.2149 [astro-ph.CO]].
- [185] S. Mukohyama, “Can ghost condensate decrease entropy?,” *Open Astron. J.* **3**, 30-36 (2010) doi:10.2174/1874381101003020030 [arXiv:0908.4123 [hep-th]].
- [186] S. Mukohyama, “Caustic avoidance in Horava-Lifshitz gravity,” *JCAP* **09**, 005 (2009) doi:10.1088/1475-7516/2009/09/005 [arXiv:0906.5069 [hep-th]].
- [187] S. Mukohyama, K. Nakayama, F. Takahashi and S. Yokoyama, “Phenomenological Aspects of Horava-Lifshitz Cosmology,” *Phys. Lett. B* **679**, 6-9 (2009) doi:10.1016/j.physletb.2009.07.005 [arXiv:0905.0055 [hep-th]].
- [188] T. Kobayashi, S. Mukohyama and B. A. Powell, “Cosmological Constraints on Rapid Roll Inflation,” *JCAP* **09**, 023 (2009) doi:10.1088/1475-7516/2009/09/023 [arXiv:0905.1752 [astro-ph.CO]].
- [189] T. Kobayashi and S. Mukohyama, “Curvatons in Warped Throats,” *JCAP* **07**, 032 (2009) doi:10.1088/1475-7516/2009/07/032 [arXiv:0905.2835 [hep-th]].
- [190] S. Mukohyama, “Dark matter as integration constant in Horava-Lifshitz gravity,” *Phys. Rev. D* **80**, 064005 (2009) doi:10.1103/PhysRevD.80.064005 [arXiv:0905.3563 [hep-th]].
- [191] S. Mukohyama, “Scale-invariant cosmological perturbations from Horava-Lifshitz gravity without inflation,” *JCAP* **06**, 001 (2009) doi:10.1088/1475-7516/2009/06/001 [arXiv:0904.2190 [hep-th]].
- [192] S. Kinoshita and S. Mukohyama, “Thermodynamic and dynamical stability of Freund-Rubin compactification,” *JCAP* **06**, 020 (2009) doi:10.1088/1475-7516/2009/06/020 [arXiv:0903.4782 [hep-th]].
- [193] S. Mukohyama, “Ghost condensate and generalized second law,” *JHEP* **09**, 070 (2009) doi:10.1088/1126-6708/2009/09/070 [arXiv:0901.3595 [hep-th]].
- [194] S. Kinoshita, S. Mukohyama, S. Nakamura and K. y. Oda, “Consistent Anti-de Sitter-

- Space/Conformal-Field-Theory Dual for a Time-Dependent Finite Temperature System,” *Phys. Rev. Lett.* **102**, 031601 (2009) doi:10.1103/PhysRevLett.102.031601 [arXiv:0901.4834 [hep-th]].
- [195] Y. i. Takamizu and S. Mukohyama, “Nonlinear superhorizon perturbations of non-canonical scalar field,” *JCAP* **01**, 013 (2009) doi:10.1088/1475-7516/2009/01/013 [arXiv:0810.0746 [gr-qc]].
- [196] T. Kobayashi and S. Mukohyama, “Conformal Inflation, Modulated Reheating, and WMAP5,” *Phys. Rev. D* **79**, 083501 (2009) doi:10.1103/PhysRevD.79.083501 [arXiv:0810.0810 [hep-th]].
- [197] S. Kinoshita, S. Mukohyama, S. Nakamura and K. y. Oda, “A Holographic Dual of Bjorken Flow,” *Prog. Theor. Phys.* **121**, 121-164 (2009) doi:10.1143/PTP.121.121 [arXiv:0807.3797 [hep-th]].
- [198] T. Hirata, S. Mukohyama and T. Takayanagi, “Decaying D-branes and Moving Mirrors,” *JHEP* **05**, 089 (2008) doi:10.1088/1126-6708/2008/05/089 [arXiv:0804.1176 [hep-th]].
- [199] L. Kofman and S. Mukohyama, “Rapid roll Inflation with Conformal Coupling,” *Phys. Rev. D* **77**, 043519 (2008) doi:10.1103/PhysRevD.77.043519 [arXiv:0709.1952 [hep-th]].
- [200] T. Kobayashi, S. Mukohyama and S. Kinoshita, “Constraints on Wrapped DBI Inflation in a Warped Throat,” *JCAP* **01**, 028 (2008) doi:10.1088/1475-7516/2008/01/028 [arXiv:0708.4285 [hep-th]].
- [201] S. Mukohyama, “Reheating a multi-throat universe by brane motion,” *Gen. Rel. Grav.* **41**, 1151-1163 (2009) doi:10.1007/s10714-008-0696-3 [arXiv:0706.3214 [hep-th]].
- [202] S. Kinoshita, Y. Sendouda and S. Mukohyama, “Instability of de Sitter brane and horizon entropy in 6D braneworld,” *JCAP* **05**, 018 (2007) doi:10.1088/1475-7516/2007/05/018 [arXiv:hep-th/0703271 [hep-th]].
- [203] S. Mukohyama, “Towards a Higgs phase of gravity in string theory,” *JHEP* **05**, 048 (2007) doi:10.1088/1126-6708/2007/05/048 [arXiv:hep-th/0610254 [hep-th]].
- [204] S. Mukohyama, “Accelerating Universe and Cosmological Perturbation in the Ghost Condensate,” *JCAP* **10**, 011 (2006) doi:10.1088/1475-7516/2006/10/011 [arXiv:hep-th/0607181 [hep-th]].
- [205] Y. Sendouda, S. Kinoshita and S. Mukohyama, “Doubly covariant formula of deficit angle and its application to six-dimensional braneworld,” *Class. Quant. Grav.* **23**, 7199-7228 (2006) doi:10.1088/0264-9381/23/24/002 [arXiv:hep-th/0607189 [hep-th]].
- [206] H. C. Cheng, M. A. Luty, S. Mukohyama and J. Thaler, “Spontaneous Lorentz breaking at high energies,” *JHEP* **05**, 076 (2006) doi:10.1088/1126-6708/2006/05/076 [arXiv:hep-th/0603010 [hep-th]].
- [207] H. Yoshiguchi, S. Mukohyama, Y. Sendouda and S. Kinoshita, “Dynamical stability of six-dimensional warped flux compactification,” *JCAP* **03**, 018 (2006) doi:10.1088/1475-7516/2006/03/018 [arXiv:hep-th/0512212 [hep-th]].
- [208] N. Arkani-Hamed, H. C. Cheng, M. A. Luty, S. Mukohyama and T. Wiseman, “Dynamics of gravity in a Higgs phase,” *JHEP* **01**, 036 (2007) doi:10.1088/1126-6708/2007/01/036 [arXiv:hep-ph/0507120 [hep-ph]].
- [209] S. Mukohyama, Y. Sendouda, H. Yoshiguchi and S. Kinoshita, “Warped flux compactification and brane gravity,” *JCAP* **07**, 013 (2005) doi:10.1088/1475-7516/2005/07/013 [arXiv:hep-th/0506050 [hep-th]].
- [210] S. Mukohyama, “Anti-D-brane as dark matter in warped string compactification,” *Phys. Rev. D* **72**, 061901 (2005) doi:10.1103/PhysRevD.72.061901 [arXiv:hep-th/0505042 [hep-th]].
- [211] S. Mukohyama, “Black holes in the ghost condensate,” *Phys. Rev. D* **71**, 104019 (2005) doi:10.1103/PhysRevD.71.104019 [arXiv:hep-th/0502189 [hep-th]].
- [212] T. Shiromizu, S. Tomizawa, Y. Uchida and S. Mukohyama, “Kaluza-Klein bubble and celestial sphere in inflationary universe,” *Gen. Rel. Grav.* **37**, 1823-1831 (2005) doi:10.1007/s10714-005-0162-4

- [arXiv:hep-th/0406181 [hep-th]].
- [213] N. Arkani-Hamed, H. C. Cheng, M. A. Luty and S. Mukohyama, “Ghost condensation and a consistent infrared modification of gravity,” *JHEP* **05**, 074 (2004) doi:10.1088/1126-6708/2004/05/074 [arXiv:hep-th/0312099 [hep-th]].
- [214] N. Arkani-Hamed, P. Creminelli, S. Mukohyama and M. Zaldarriaga, “Ghost inflation,” *JCAP* **04**, 001 (2004) doi:10.1088/1475-7516/2004/04/001 [arXiv:hep-th/0312100 [hep-th]].
- [215] S. Mukohyama and A. Coley, “Scaling solution, radion stabilization, and initial condition for brane world cosmology,” *Phys. Rev. D* **69**, 064029 (2004) doi:10.1103/PhysRevD.69.064029 [arXiv:hep-th/0310140 [hep-th]].
- [216] S. Mukohyama and L. Randall, “A Dynamical approach to the cosmological constant,” *Phys. Rev. Lett.* **92**, 211302 (2004) doi:10.1103/PhysRevLett.92.211302 [arXiv:hep-th/0306108 [hep-th]].
- [217] S. Mukohyama, “Gravity in the dynamical approach to the cosmological constant,” *Phys. Rev. D* **70**, 063505 (2004) doi:10.1103/PhysRevD.70.063505 [arXiv:hep-th/0306208 [hep-th]].
- [218] S. Mukohyama, “Inhomogeneous tachyon decay, light cone structure and D-brane network problem in tachyon cosmology,” *Phys. Rev. D* **66**, 123512 (2002) doi:10.1103/PhysRevD.66.123512 [arXiv:hep-th/0208094 [hep-th]].
- [219] S. Mukohyama, “Nonlocality as an essential feature of brane worlds,” *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **148**, 121-127 (2003) doi:10.1143/PTPS.148.121 [arXiv:hep-th/0205231 [hep-th]].
- [220] S. Mukohyama, “Brane cosmology driven by the rolling tachyon,” *Phys. Rev. D* **66**, 024009 (2002) doi:10.1103/PhysRevD.66.024009 [arXiv:hep-th/0204084 [hep-th]].
- [221] S. Mukohyama and L. Kofman, “Brane gravity at low-energy,” *Phys. Rev. D* **65**, 124025 (2002) doi:10.1103/PhysRevD.65.124025 [arXiv:hep-th/0112115 [hep-th]].
- [222] S. Mukohyama, “Brane gravity, higher derivative terms and nonlocality,” *Phys. Rev. D* **65**, 084036 (2002) doi:10.1103/PhysRevD.65.084036 [arXiv:hep-th/0112205 [hep-th]].
- [223] S. Mukohyama, “Doubly covariant action principle of singular hypersurfaces in general relativity and scalar tensor theories,” *Phys. Rev. D* **65**, 024028 (2002) doi:10.1103/PhysRevD.65.024028 [arXiv:gr-qc/0108048 [gr-qc]].
- [224] S. Mukohyama, “Integrodifferential equation for brane world cosmological perturbations,” *Phys. Rev. D* **64**, 064006 (2001) [erratum: *Phys. Rev. D* **66**, 049902 (2002)] doi:10.1103/PhysRevD.64.064006 [arXiv:hep-th/0104185 [hep-th]].
- [225] S. Mukohyama, “Static solutions in the R^{*4} brane world,” *Phys. Rev. D* **63**, 104025 (2001) doi:10.1103/PhysRevD.63.104025 [arXiv:hep-th/0101038 [hep-th]].
- [226] S. Mukohyama and W. Israel, “Moving mirror entropy,” *Phys. Rev. D* **62**, 121501 (2000) doi:10.1103/PhysRevD.62.121501 [arXiv:gr-qc/0009014 [gr-qc]].
- [227] S. Mukohyama, “Quantum effects, brane tension and large hierarchy in the brane world,” *Phys. Rev. D* **63**, 044008 (2001) doi:10.1103/PhysRevD.63.044008 [arXiv:hep-th/0007239 [hep-th]].
- [228] S. Mukohyama, “Perturbation of junction condition and doubly gauge invariant variables,” *Class. Quant. Grav.* **17**, 4777-4798 (2000) doi:10.1088/0264-9381/17/23/301 [arXiv:hep-th/0006146 [hep-th]].
- [229] Y. Morisawa, K. Uzawa and S. Mukohyama, “Excitation of Kaluza-Klein modes of U(1) field by parametric resonance,” *Phys. Rev. D* **62**, 104019 (2000) doi:10.1103/PhysRevD.62.104019 [arXiv:gr-qc/0005029 [gr-qc]].
- [230] S. Mukohyama, “Gauge invariant gravitational perturbations of maximally symmetric space-times,” *Phys. Rev. D* **62**, 084015 (2000) doi:10.1103/PhysRevD.62.084015 [arXiv:hep-th/0004067 [hep-th]].

- [231] K. Uzawa, Y. Morisawa and S. Mukohyama, “Excitation of Kaluza-Klein gravitational mode,” *Phys. Rev. D* **62**, 064011 (2000) doi:10.1103/PhysRevD.62.064011 [arXiv:gr-qc/9912108 [gr-qc]].
- [232] S. Mukohyama, T. Shiromizu and K. i. Maeda, “Global structure of exact cosmological solutions in the brane world,” *Phys. Rev. D* **62**, 024028 (2000) [erratum: *Phys. Rev. D* **63**, 029901 (2001)] doi:10.1103/PhysRevD.63.029901 [arXiv:hep-th/9912287 [hep-th]].
- [233] S. Mukohyama, “Brane world solutions, standard cosmology, and dark radiation,” *Phys. Lett. B* **473**, 241-245 (2000) doi:10.1016/S0370-2693(99)01505-1 [arXiv:hep-th/9911165 [hep-th]].
- [234] S. Mukohyama, “Is the brick wall model unstable for a rotating background?,” *Phys. Rev. D* **61**, 124021 (2000) doi:10.1103/PhysRevD.61.124021 [arXiv:gr-qc/9910013 [gr-qc]].
- [235] T. Shimomura and S. Mukohyama, “Does the generalized second law require entropy bounds for a charged system?,” *Phys. Rev. D* **61**, 064020 (2000) doi:10.1103/PhysRevD.61.064020 [arXiv:gr-qc/9906047 [gr-qc]].
- [236] S. Mukohyama and S. A. Hayward, “Quasilocal first law of black hole dynamics,” *Class. Quant. Grav.* **17**, 2153 (2000) doi:10.1088/0264-9381/17/10/310 [arXiv:gr-qc/9905085 [gr-qc]].
- [237] S. Mukohyama, “The Hartle-Hawking state is a maximum of entanglement entropy,” *Phys. Rev. D* **61**, 064015 (2000) doi:10.1103/PhysRevD.61.064015 [arXiv:gr-qc/9904005 [gr-qc]].
- [238] S. A. Hayward, S. Mukohyama and M. C. Ashworth, “Dynamic black hole entropy,” *Phys. Lett. A* **256**, 347-350 (1999) doi:10.1016/S0375-9601(99)00225-X [arXiv:gr-qc/9810006 [gr-qc]].
- [239] S. Mukohyama, “On the Noether charge form of the first law of black hole mechanics,” *Phys. Rev. D* **59**, 064009 (1999) doi:10.1103/PhysRevD.59.064009 [arXiv:gr-qc/9809050 [gr-qc]].
- [240] S. Mukohyama and W. Israel, “Black holes, brick walls and the Boulware state,” *Phys. Rev. D* **58**, 104005 (1998) doi:10.1103/PhysRevD.58.104005 [arXiv:gr-qc/9806012 [gr-qc]].
- [241] S. Mukohyama, “Comments on entanglement entropy,” *Phys. Rev. D* **58**, 104023 (1998) doi:10.1103/PhysRevD.58.104023 [arXiv:gr-qc/9805039 [gr-qc]].
- [242] S. Mukohyama, M. Seriu and H. Kodama, “Thermodynamics of entanglement in Schwarzschild space-time,” *Phys. Rev. D* **58**, 064001 (1998) doi:10.1103/PhysRevD.58.064001 [arXiv:gr-qc/9712018 [gr-qc]].
- [243] S. Mukohyama, “Excitation of a Kaluza-Klein mode by parametric resonance,” *Phys. Rev. D* **57**, 6191-6205 (1998) doi:10.1103/PhysRevD.57.6191 [arXiv:gr-qc/9711058 [gr-qc]].
- [244] S. Mukohyama, “State after quantum tunneling with gravity,” *Phys. Rev. D* **56**, 7638-7649 (1997) doi:10.1103/PhysRevD.56.7638 [arXiv:gr-qc/9709040 [gr-qc]].
- [245] T. Chiba, S. Mukohyama and T. Nakamura, “Anisotropy of the cosmic background radiation implies the violation of the strong energy condition in Bianchi type I universe,” *Phys. Lett. B* **408**, 47-51 (1997) doi:10.1016/S0370-2693(97)00782-X [arXiv:gr-qc/9707043 [gr-qc]].
- [246] S. Mukohyama, M. Seriu and H. Kodama, “Can the entanglement entropy be the origin of black hole entropy?,” *Phys. Rev. D* **55**, 7666-7679 (1997) doi:10.1103/PhysRevD.55.7666 [arXiv:gr-qc/9701059 [gr-qc]].
- [247] S. Mukohyama, “D-brane configuration and black hole thermodynamics,” *Mod. Phys. Lett. A* **11**, 3035-3040 (1996) doi:10.1142/S0217732396003003 [arXiv:hep-th/9611052 [hep-th]].
- [248] S. Mukohyama, “New proof of the generalized second law,” *Phys. Rev. D* **56**, 2192-2201 (1997) doi:10.1103/PhysRevD.56.2192 [arXiv:gr-qc/9611017 [gr-qc]].

著書

- [249] “一般相対論を超える重力理論と宇宙論”, 向山信治、ISBN 978-4781915173, 2021年7月サイエンス社より出版。
- [250] “ダークマターと恐竜絶滅”, L. Randall著書“Dark matter and the dinosaurs”の監訳、ISBN 978-4140816950, 2016年3月NHK出版より出版。
- [251] “宇宙の扉をノックする”, L. Randall著書“Knocking on Heaven’s Door: How Physics and Scientific Thinking Illuminate the Universe and the Modern World”の監訳、ISBN 978-4140816219, 2013年11月NHK出版より出版。
- [252] “ワープする宇宙～5次元時空の謎を解く”, L. Randall著書“Warped Passages—Unraveling the mysteries of the universe’s hidden dimensions”の監訳、ISBN 978-4140812396, 2007年6月NHK出版より出版。

解説等

- [253] “量子論と宇宙論”、数理科学2023年12月号(サイエンス社、JAN 4910054691238)掲載。
- [254] “電磁気学と宇宙”、数理科学2022年10月号(サイエンス社、JAN 4910054691023)掲載。
- [255] “ひも理論ランドスケープ”、相対論と宇宙の事典(朝倉書店、2020年、ISBN 978-4254131284)に掲載。
- [256] “有質量グラビトン模型と宇宙論”、DOI 10.11316/butsuri.71.7.452, 日本物理学会誌2016年7月号掲載。
- [257] “宇宙論と場の理論”、数理科学 2016年3月号(サイエンス社、JAN 4910054690361)掲載。
- [258] “インフレーション宇宙と超弦理論”、パリティ2015年11月号(丸善出版、ISBN 4910175191150)掲載。
- [259] “宇宙論からみた重力”、数理科学 2014年9月号(サイエンス社、JAN 4910054690941)掲載。
- [260] “宇宙揺らぎの非ガウス性とインフレーション”、DOI 10.11316/butsuri.67.2.85, 日本物理学会誌2012年2月号掲載。
- [261] “ダークエネルギー”、数理科学2013年8月号(サイエンス社、JAN 4910054690835)掲載。
- [262] “L’enso”、J.-P. Uzan編“Variations sur un même ciel”(ISBN 9782360120314)中の一節、英語で執筆したものを出版社が仏訳して掲載、2012年11月 La Ville Brule より出版。
- [263] “隠れていた場 ゴースト場の凝縮機構”、数理科学2011年7月号(サイエンス社、JAN 4910054690712)掲載。
- [264] “宇宙の暗黒成分と量子重力”、別冊・数理科学『量子重力理論』2009年10月(サイエンス社、JAN 4910054701098)掲載。
- [265] “4次元を超える世界”、東京大学理学系研究科・理学部編“現代科学用語ナビ”(化学同人、2009年9月、ISBN 9784759812787)中の一節。
- [266] “宇宙の始まりと終わり”、日本機械学会誌2008年9月号掲載。
- [267] “超弦理論で挑む宇宙の謎”、パリティ2008年8月号(丸善出版)掲載。
- [268] “宇宙の暗黒成分は本当に必要か?—長距離・長時間での重力の変更—”、日本物理学会誌2007年7月号掲載。
- [269] “「未来への提言」理論物理学者リサ・ランドール～異次元を語る～”(NHK出版、2007年5月、ISBN 978-4140812167)の解説部分(81～93ページ)。
- [270] “一般相対論を長距離で変更できるか?”、パリティ2006年10月号(丸善出版)掲載。
- [271] “アインシュタインの間違い”、S. Weinberg による原題”Einstein’s Mistake”の翻訳、パリティ2006年6月号(丸善出版)掲載。
- [272] “M理論が宇宙論の謎を解く”、月刊天文ガイド2005年12月号掲載。
- [273] ニュートン誌(月刊および別冊)取材および編集協力多数。