

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	Paul Martens
論文題目	Challenging mysteries of the Universe with gravity beyond general relativity (一般相対性理論を超える重力による宇宙の謎への挑戦)		
(論文内容の要旨)			
<p>While general relativity (GR) has certainly proven a formidable framework via which to understand our Universe past history and current dynamics, modern observations are also suggesting there could exist a more complete theory of gravity. First, GR is infamously non-renormalizable, and there is currently no accepted extension of GR in the high energy regimes. Furthermore, modern cosmology faces the mysteries of dark matter as well as dark energy, both of which could be framed as limitation of GR. Last but not least, probing beyond GR also helps us gain a deeper insight into the theory itself.</p> <p>In a first part, we briefly review GR along the common tools invoked in cosmology, before painting an overview of some modified gravity theories, with a focus on the one used thereafter. This work indeed aims at demonstrating how these alternative theories can help us answer the aforementioned puzzles.</p> <p>In a second part, we first establish the Wheeler-DeWitt equation in the formalism of Hořava-Lifshitz (HL) gravity in $d+1$ dimensions. We also show that the DeWitt wave function for tensor perturbation is indeed well-defined around the classical Big Bang singularity. HL gravity is a recent quantum gravity candidate that aims at addressing the non-renormalizability of GR by treating time and space separately at higher energies. Incidentally, this theory also incorporates dark matter as an integration constant. Subsequently, we consider a previously proposed relaxation mechanism for the cosmological constant (CC) that provides a mechanical explanation to the small value of the CC. This would address the CC problem, and thus dark energy as well, but this process simultaneously empties the Universe of its content. Using a Horndeski class model, we then build a proof-of-concept model that incorporates a reheating phase to resolve this last issue.</p> <p>In a last part, the focus is put on a type-II minimally modified gravity denominated as “VCDM”. Similarly to HL gravity, this class of theory is not invariant under four dimensional diffeomorphism as time is treated as physically different than space, and, like GR, only propagates two degrees of freedom. We first investigate numerically the collapse of a scalar field in VCDM and verify the same creation of an apparent horizon, thusly bringing an extra validation of the theory. Finally, we construct a bouncing Universe scenario by exploiting the specificities of VCDM. Such a scenario has the advantage of avoiding any initial singularity altogether, but has often proven difficult to implement in a stable way. The setup built here satisfies the near scale invariant scalar perturbation power spectrum and the small tensor-to-scalar ratio. Additionally, a possibly observable signature of the model is found in its blue-tilted tensor perturbation power spectrum.</p> <p>Throughout this work, all analytical computations are supplemented by numerical simulations that produce a qualitative and perhaps more instinctive understanding of this work.</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

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、一般相対論も場の量子論も破綻してしまう。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を調和させる、量子重力理論が必要である。そして、量子重力理論の構築のためには、一般相対論を短距離で修正する必要があると考えられている。また、現在の宇宙の加速膨張は、一般相対論に基づいて説明しようとすると、ダークエネルギーの存在を示唆するが、その正体は全く分かっていない。さらに、最近の赤方偏移空間歪みの観測などからは、一般相対論と通常考えられているダークエネルギーでは説明するのが難しいデータも出始めている。そのため、少なからぬ研究者が「ダークエネルギーを導入する代わりに、一般相対論を変更する事はできないか?」と考えている。もしも一般相対論が宇宙論スケールの長距離で変更を受けるのなら、ダークエネルギーを導入せずに観測データを矛盾なく説明できるかもしれない。申請論文は、以上のような動機づけにより申請者がこれまで行ってきた修正重力理論についての研究をまとめたもので、既に出版された3編の学術論文に基づいている。

JCAP04(2023)060では、物理的自由度が2である重力理論に基づいて、摂動の不安定性や接続条件の不定性の全くないbouncing宇宙シナリオを構築することに成功した。さらに、スカラー摂動とテンソル摂動の2点相関関数についての予言が、宇宙背景輻射の観測による制限を満たすことを示した。本研究は、bouncing宇宙シナリオを、計算・予言可能で観測と比較可能なものとし、インフレーション宇宙シナリオと対抗し得るものに格上げしたと言うこともできる。

JCAP11(2022)031では、繰り込み可能な重力理論であるHorava-Lifshitz理論に基づく量子宇宙論において、DeWitt境界条件を課した宇宙の波動関数を数値的に解析した。一様等方宇宙にテンソル摂動を加えた場合、一般相対論ではこのような波動関数を整合的に構成できないことが先行研究で示されたが、Horava-Lifshitz理論では問題なく構成できることが本研究で示された。DeWitt境界条件は、量子宇宙の初期条件を決める境界条件の有力な3つの候補の一つであり、この結果は宇宙創成の謎を解明するうえで重要な意味を持つ。

JCAP11(2022)047では、宇宙項問題に取り組んだ。先行研究では、宇宙項をゼロに限りなく近づけることに成功しているが、宇宙が空っぽになってしまうという問題があった。本研究では、この問題を解消するため、宇宙項が十分小さくなった後に宇宙が再加熱し、標準宇宙論に移行するモデルを構築した。そして、このような時間発展が系のアトラクターになっていること、非一様な摂動が安定であることを示した。宇宙項問題は、理論物理学および宇宙論における最難問の一つと考えられており、本研究はその解決に向けた確かな一歩と言える。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年7月7日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降