

論文審査の結果の要旨

氏名 高橋 一史

本論文は5つの章及び4つのAppendixからなる。まず第1章では、一般相対性理論から導かれ、重力理論として現在「標準理論」となっているEinsteinの重力理論 (GR) の一般化を考察することが、初期宇宙や重力波源となる極めて強い重力場の物理などの研究において必要であることの背景が述べられる。その上で、一般化の最も簡単な試みとして、特にscalar-tensor理論と呼ばれるGRにスカラー場の自由度を加え、かつその高階微分を許す理論についての従来の研究の概要が述べられている。一般に高階微分のある理論で縮退が無い場合には不安定モードが存在する (Ostrogradskyの定理) ことから、これを避けるためには縮退のある理論を対象とすることが求められる。そのような「健全な (healthy)」理論としては、従来よりHorndeski理論と呼ばれるクラスの理論が知られてきたが、最近になってこれを内包する、より一般的なDHOST (degenerate higher-order scalar-tensor) 理論のクラスが発見された。本学位論文は、このDHOST理論のクラスをさらに一般化する新しい方法を提唱するものである。

続く第2章では、上記の事柄に関する諸概念のレビューが与えられている。特に、健全な理論としてのHorndeskiクラスと2次及び3次項を含むDHOST理論、及びそれらの関係について詳しく論じられ、さらに後の章において用いられる宇宙論的摂動 (cosmological perturbations) について、その応用例とともに説明されている。この宇宙論的摂動は、平坦なFriedmann-Lemaitre-Robertson-Walker計量に対する摂動の安定性であるが、この要件は、先に述べた理論の「健全性」とともに、考察すべき重力理論の条件として重要な視点を与えるものである。

第3章と第4章は、本学位論文の根幹を成す部分であり、ここに本研究の結果得られた新知見と提出者の貢献が提示されている。まず第3章では、可逆な変換を用いて与えられた理論から別の理論を構成する場合に成立する、一般的な数理的性質が論じられる。ここで重要な結果は、可逆な変換によっては本質的な新しい運動法的式を導くことができないという事実であり、提出者はこれを高階微分まで含む一般的なスカラー場の変換に対して厳密な形で議論し、定理として提示している。その上で、本論文で重要な道具となるdisformal変換 (共形conformal変換にスカラー場の微分を含む項を附加した変換) を含む

2種類の変換に対して、この定理から導かれる種々の性質を明確にしている。この結果から、Horndeski理論からの可逆な変換では、従来より知られたDHOST理論の枠組の中では、新たな重力理論を構成することが不可能であることが明らかにされている。

そこで次の第4章では、非可逆な変換を用いて、従来より知られた2次及び3次項を含むDHOST理論の枠組を越えた新しい重力理論の構成が試みられ、実際、これが可能であることが示される。具体的には、縮退のある「健全でない」種 (seed) 理論から出発し、これにdisformal変換と関連する非可逆な変換を行うことにより、目的とした新たな理論を構成することに成功している。このseed理論から変換によって得られた理論は、従来知られたmimetic重力理論の拡張版になっており、確かに2次及び3次項を含むDHOST理論の枠組には収まらない、「健全な」理論となっていることが示される。但し、これらの新しい理論では、上記の宇宙論的摂動の下での安定性については必ずしも保証されるものではないことも、同時に明らかにされている。

最後の第5章ではこれらの結果がまとめて俯瞰されており、さらに4つのAppendixでは、Ostrogradskyの定理やdisformal変換、微分代数方程式の解の唯一性、計量やスカラー場の高階微分を含むような場合のNoetherの定理など、本文で援用した数理的な技法に関する補足が与えられている。

本論文の目的は、上述のように初期宇宙や極めて強い重力場のある場合の宇宙物理の考察に有用な重力理論の枠組を拡大することにあった。この目的は、提出者の創案による縮退した理論に対する非可逆な変換に基づいた構成法によって見事に達成されている。また、宇宙論的摂動の下での構成された新理論の性質の吟味なども詳細になされており、ダークマターやダークエネルギーの所在、重力波現象の物理的源泉など、今後の宇宙物理学の種々の問題を考察するための有用な理論構成への道筋をつける上で、本論文の研究は十分な貢献を行ったものと評価できる。

なお、本論文の第3章及び第4章の内容の主な部分は既に専門誌に発表されたものであり、それらは提出者と須山輝明、小林努、本橋隼人の各氏との共同研究の成果であるが、新しい重力理論の構想を含めてその根幹部分は論文提出者が主体となって確立したものであることから、全体として論文提出者の寄与が十分であると判断する。また、本学位論文は宇宙物理学の理論的研究として十分に高いレベルにあるものと評価される。

以上の理由により、論文提出者に博士（理学）の学位を授与できるものと認める。