

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博士論文概要

論文題目

Cosmological and astrophysical aspects
of massive spin-2 field

申請者

Katsuki	AOKI
青木	勝輝

物理学及応用物理学専攻 理論宇宙物理学研究

2016年12月

現在の宇宙の標準理論であるビッグバン理論は一般相対論を基礎に構築されており、宇宙の背景放射などの様々な観測から支持を得ている。しかしタイプ Ia 型超新星の観測などから現在の宇宙が加速膨張していることが明らかにされ、これを一般相対論で説明するためにはダークエネルギーと呼ばれる、圧力が負の奇妙な物質を導入しなければならない。加えて、銀河の回転曲線などの観測からはダークマターと呼ばれる見えない物質が宇宙に大量に存在することが明らかにされた。これら宇宙の暗黒成分の正体は現代物理学に残された最大の謎の1つであり、正体を解明するためには標準理論を超えた新たな物理が必要であると考えられる。

重力の標準理論である一般相対論は素粒子物理の視点から見ると質量ゼロのスピン2粒子（重力子）の理論と言える。しかし、重力子が本当に質量ゼロかは明らかでなく、1939年の Fierz と Pauli による研究以降、重力子の質量の有無に対して理論と観測の両面から長く議論されている。我々は Bigravity 理論と呼ばれる質量ゼロの重力子と質量をもった重力子の2種類を含む理論に注目し研究を行った。このような理論に対しては、 $10^{-23} \text{ eV} < m < 10^{-4} \text{ eV}$ のような質量の重力子はすでに観測から棄却されている。そこで本研究では、現在の観測から許されているような重力子に対して、質量をもった重力子の存在がダークマター・ダークエネルギーに対してどのような示唆を与えるかを議論した。

Bigravity 理論に基づけばダークエネルギーを導入せずとも真空解として加速膨張解が得られることは我々の研究の前から知られていた。しかし、Bigravity 理論では真空解が唯一ではなく、加速膨張を起こす解と加速膨張を起こさない解の両方が存在する。我々は宇宙が膨張するにつれどちらの解に漸近していくかを議論した。その結果、どちらもアトラクタであり、どちらの解に漸近するかは初期条件によって決まることを明らかにした。加速膨張解では実効的な宇宙項の値は重力子の質量によって典型的に与えられる。したがって、現在の宇宙の加速膨張は 10^{-33} eV 程度の質量をもった重力子によって説明可能である。一方で、重力子の質量が 10^{-33} eV よりも重い場合は、宇宙が加速膨張解に漸近してしまった場合には現在の宇宙観測と矛盾してしまう。しかし、加速膨張を起こさない解も安定であるため、こちらに漸近する場合にはそのような重い重力子も観測と無矛盾である。この場合にはダークエネルギーを重力子によって説明することはできないが、下記にあるように質量をもった重力子はダークマターに対して示唆を与える。

我々は Bigravity 理論に基づくことで、以下の2つの方法でダークマターを説明することが可能であることを示した。1つ目の方法は、ダークセクターに物質場を導入することである。物質場の重力相互作用は、物質場と計量テンソルの結合によって記述される。Bigravity 理論では2種類の重力子が存在するために計量テンソルも2つ存在する。物質場は1つの計量テンソルとしか結合しないため、それぞれの計量テンソルの結合する2種類の物質場を導入することが可能である。一方は我々が知る標準理論の物質場であり、もう一方はダークセクターの物質場

である。ダークセクターの物質場は標準理論の物質場と直接の相互作用は存在しないが、計量テンソルの間の相互作用を通して重力的な相互作用は行う。したがって、ダークセクターの物質場はダークマターとして働くことが可能である。このシナリオが成功するためには重力子質量は 10^{-27} eV よりも重い必要がある。特に質量が 10^{-27} eV 程度である場合には、銀河スケールで一般相対論の予言よりも重力場が弱くなるため、銀河の回転曲線の観測といった銀河スケールの重力観測から我々のシナリオを検証可能である。

ダークマターを説明するもう一方の方法は、質量をもった重力子自体がダークマターとなることである。ダークマターは、光との相互作用が非常に弱い質量をもった粒子である必要がある。重力子は物質場と重力相互作用しか行わないが、重力相互作用は他の相互作用に比べて非常に弱い。そして Bigravity 理論では重力子が質量をもつため、重力子自体がダークマター候補となることができる。我々は質量をもった重力子が重力場に与える影響を計算することで、重力子質量が 10^{-23} eV よりも重く、かつ 10^7 eV よりも軽い場合には確かにダークマター候補となることを示した。本シナリオの興味深い点は重力波観測によって間接的にダークマターの性質を調べることが可能であるという点である。Bigravity 理論では質量ゼロと有質量の2つの重力子が存在し、本シナリオでは質量ゼロのものは重力波として、有質量のものはダークマターとして観測される。この2つの重力子は一般には宇宙初期に同時に生成されるため、宇宙初期に生成された重力波を観測できれば、通常は観測できない暗黒物質生成の情報を知ることが可能である。特に我々が仮定した初期宇宙シナリオでは、重力子質量が 10^7 eV 程度である場合には現在稼働中である LIGO が将来観測可能な領域に重力波が存在することを予言し、数年後の観測結果によって検証可能である。

これらのシナリオは Bigravity 理論が正しく一般相対論極限をもつことを仮定している。実際、重力子の質量が 10^{-4} eV よりも重い場合には、我々が重力場を観測しているスケールでは重力は実効的に質量ゼロモードのみにより伝えられるため、現在の重力場観測と無矛盾となる。一方で重力子質量が 10^{-23} eV よりも軽い場合も観測的に許されている。これは、太陽系スケールといった重力子のコンプトン波長よりも小さいスケールでは有質量モードも質量ゼロと近似できると考えられるためである。しかし、質量をもった重力子の質量ゼロ極限が正しく存在するかは実は非自明な問題である。事実、線形の質量をもった重力子を記述する理論は、質量ゼロ極限をとっても質量ゼロの理論と一致しないことが1970年に示された。しかし、1972年に Vainshtein が質量ゼロ極限では線形理論が破たんしており、非線形理論では正しく質量ゼロ極限をもつであろうと指摘した。そこで我々は、今考えている Bigravity 理論が非線形効果まで考えたときに正しく一般相対論極限をもつかを議論した。

まず我々は、 10^{-23} eV よりも軽い重力子を想定して、天体が作る重力場が非線形

効果によって正しく一般相対論的振る舞いを回復するかを議論した（質量が 10^{-4} eV よりも重い場合には天体スケールで非線形効果は重要とならない）。天体の重力場が弱い場合には解が知られていたが、我々は中性子星といった強重力場天体に対しての解析を行った。その結果、弱重力場天体に対しては一般相対論的振る舞いを回復する解が存在するが、強重力場天体では回復しない可能性があることを示した。これは強重力場では問題が残るが、弱重力場では一般相対論極限を正しく持つように見える。しかし、我々は次に弱重力場の解の安定性を議論し、摂動に対して不安定であることを示した。すなわち弱重力天体においても安定に一般相対論を回復することができない。この不安定性は重力子のベクトルの自由度が存在しない場合には真空領域で一般に存在してしまう。したがって、天体の周りで安定に一般相対論的極限を持つためには、重力子のベクトルの自由度を取り入れる必要があると考えられるが、現在のところそのような解は見つかっていない。そのため、例えば重力子が 10^{-23} eV よりも軽いとしても、太陽系スケールの重力場観測と無矛盾であるかは未だに非自明な問題である。

一方で、我々は初期宇宙のような高エネルギー領域において **Bigravity** 理論が一般相対論的振る舞いを回復するかも議論した。宇宙のエネルギースケールが重力子質量より高くなると線形な質量をもった重力子が不安定であることは 1987 年に Higuchi により指摘されていた。しかし我々は非線形効果を考慮することで、重力子が凝縮したような安定でかつ一般相対論的振る舞いを回復する解を見つけることに成功した。これは非線形効果を考慮するために非常に単純化したシステムで行った解析ではあるが、一般相対論的でかつ安定な解の存在は **Bigravity** 理論における宇宙論がビッグバン理論の成功と無矛盾であることを意味する。

以上のように、本研究では **Bigravity** 理論が与える宇宙論や天体物理に対しての示唆を議論した。その結果、宇宙論に対してはダークマターやダークエネルギーを説明することができ、さらにビッグバン理論とも無矛盾であるという興味深い結果を得ることができた。しかし、 10^{-23} eV よりも軽い重力子に対しては太陽系スケールの重力場観測と無矛盾であるかという問題や、そもそも天体を記述する安定な解が存在するのかという問題があることを明らかにした。

今後は、まず天体を記述する安定な解の構築が必要である。もし構築が不可能であるならば、軽い重力子は理論的に棄却されることになる。また他の課題としては、重力子の質量の値を決める背後にある物理の解明や、重力子質量の有無の観測方法が挙げられる。後者に対しては、例えば重力子の質量が重い場合には重力場の観測から制限を与えることは非常に難しい。しかしもし重力子がダークマターであるならば、ダークマター観測の手法を用いることで重力子の質量に対して何らかの制限を与えることが可能となるかもしれない。これらは今後の課題である。

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

氏名 青木 勝輝 印

(2016年 12月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文	著者：Katsuki Aoki and Kei-ichi Maeda 題名：Cosmology in ghost-free bigravity theory with twin matter fluids: The origin of dark matter 掲載誌名：Physical Review D 86, 064051 発表年月：2014年3月
○論文	著者：Katsuki Aoki and Kei-ichi Maeda 題名：Dark matter in ghost-free bigravity theory: From a galaxy scale to the universe 掲載誌名：Physical Review D 90, 124089 発表年月：2014年12月
○論文	著者：Katsuki Aoki, Kei-ichi Maeda, and Ryo Namba 題名：Stability of the early Universe in bigravity 掲載誌名：Physical Review D 92, 044054 発表年月：2015年8月
○論文	著者：Katsuki Aoki, Kei-ichi Maeda, and Makoto Tanabe 題名：Relativistic stars in bigravity theory 掲載誌名：Physical Review D 93, 064054 発表年月：2016年3月
○論文	著者：Katsuki Aoki and Shinji Mukohyama 題名：Massive gravitons as dark matter and gravitational waves 掲載誌名：Physical Review D 94, 024001 発表年月：2016年7月
○論文	著者：Katsuki Aoki and Shuntaro Mizno 題名：Vainshtein mechanism in massive gravity nonlinear sigma models 掲載誌名：Physical Review D 94, 064054 発表年月：2016年9月

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	<p>講演者：青木勝輝、前田恵一 題目：bigravity 理論に基づく宇宙論とダークエネルギー問題 会議名：日本物理学会年次大会 開催場所：高知大学 開催年月：2013年9月</p>
講演	<p>講演者：青木勝輝、前田恵一 題目：Cosmology in ghost-free bigravity theory with twin matter fluid 会議名：The 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan 開催場所：弘前大学 開催年月：2013年11月</p>
講演	<p>講演者：青木勝輝、前田恵一 題目：Bigravity 理論とダークマター問題への応用 会議名：日本物理学会年次大会 開催場所：東海大学 開催年月：2014年3月</p>
講演	<p>講演者：青木勝輝、前田恵一 題目：Dark matter in ghost-free bigravity theory 会議名：The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan 開催場所：Kavli IPMU 開催年月：2014年11月</p>
講演	<p>講演者：青木勝輝、前田恵一、難波亮 題目：Time-dependent screening and stability around FLRW background in bigravity 会議名：日本物理学会年次大会 開催場所：早稲田大学 開催年月：2015年3月</p>
講演	<p>講演者：青木勝輝、前田恵一、難波亮、田邊誠 題目：Cosmological and Astrophysical Vainshtein mechanism in bigravity 会議名：Fourteenth Marcel Grossmann Meeting 開催場所：University of Rome La Sapienza 開催年月：2015年7月</p>
講演	<p>講演者：青木勝輝、前田恵一、難波亮、田邊誠 題目：Cosmological and Astrophysical Vainshtein mechanism in bigravity 会議名：2nd APCTP-TUS workshop on Dark Energy 開催場所：東京理科大学 開催年月：2015年8月</p>

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	<p>講演者：青木勝輝、前田恵一、田邊誠 題目：Relativistic stars in bigravity 会議名：日本物理学会年次大会 開催場所：大阪市立大学 開催年月：2015年9月</p>
講演	<p>講演者：青木勝輝、前田恵一、田邊誠 題目：Relativistic stars in the bigravity theory 会議名：The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan 開催場所：京都大学 開催年月：2015年12月</p>
講演	<p>講演者：青木勝輝、水野俊太郎 題目：修正重力理論における Vainshtein 機構の安定性解析 会議名：日本物理学会年次大会 開催場所：東北学院大学 開催年月：2016年3月</p>
講演	<p>講演者：青木勝輝、向山信治 題目：Bigravitons as dark matter and gravitational waves 会議名：21st International Conference and General Relativity and Gravitation 開催場所：Columbia University 開催年月：2016年7月</p>
講演	<p>講演者：青木勝輝、向山信治 題目：Bigravitons as dark matter and gravitational waves 会議名：日本物理学会年次大会 開催場所：宮崎大学 開催年月：2016年9月</p>
講演	<p>講演者：青木勝輝、水野俊太郎 題目：Vainshtein mechanism in massive gravity nonlinear sigma models 会議名：The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan 開催場所：大阪市立大学 開催年月：2016年10月</p>