

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月12日現在

機関番号：58001

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21740199

研究課題名（和文） 非線形・非平衡物理的視点からの宇宙のダークエネルギー問題

研究課題名（英文） Dark energy problem from aspects of nonlinear and non-equilibrium physics

研究代表者

森田 正亮（MORITA MASA AKI）

沖縄工業高等専門学校・総合科学科・准教授

研究者番号：50390563

研究成果の概要（和文）： 遠方の Ia 型超新星と呼ばれる天体の観測から、宇宙にはダークエネルギーと呼ばれる、宇宙膨張を加速させる未知の成分が存在すると考えられ、「現代宇宙論最大の謎」と言われている。このダークエネルギーの物理的実体を明らかにするために、非線形・非平衡物理の視点から宇宙の非一様性の進化を考察し、非一様性に由来するエントロピーを提案した。このエントロピーが一般的な条件の下で宇宙の進化とともに増大することを示し、この増大性と宇宙の加速的膨張との関係を明らかにした。

研究成果の概要（英文）： From observations of distant type Ia supernovae, the universe is considered to contain an unknown component called 'dark energy', which accelerates cosmic expansion. In order to find out physical substance of dark energy, the evolution of cosmic inhomogeneities is considered from aspects of nonlinear and non-equilibrium physics. Some entropy formulae are proposed, which result from cosmic inhomogeneities, and their properties are studied. In particular, the relation between the temporal increase of the entropy and the accelerated cosmic expansion is clarified.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理, 理論天文学

## 1. 研究開始当初の背景

現在の標準的宇宙論では、宇宙の物質分布は大域的に一様・等方であり、いわゆる **FLRW** 宇宙モデルによって良く記述されると考えられている。この **FLRW** 宇宙モデルを特徴づける宇宙パラメータは近年の高精度な宇宙論的観測により、かなり精密に測定されるようになってきた。その結果、宇宙に含まれる物質の大半は、ダークエネルギーと呼ばれる、宇宙膨張を加速させる「負の圧力」を持つ成分と、ダークマターと呼ばれる重力でのみ相互作用し光を發しない物質で構成される、とされている。

しかし、これらダークエネルギーもダークマターも、その物理的実体は分かっていない。つまり、**FLRW** 宇宙モデルでは高々数個の宇宙パラメータでほとんどの観測結果をうまく説明できるものの、宇宙を構成する物質の大半は正体不明のままなのである。さらに、ダークエネルギーとダークマターの密度はその時間的進化が全く異なるにも関わらず、現在は同じオーダーであるという謎がある。このオーダーの一致問題を通じてダークエネルギー・ダークマターの物理的実体を解明することが、現在の宇宙論の最も重要な研究テーマの一つであると言える。

以上の議論は、宇宙の大域的な一様・等方性という仮定に基づいているが、現実の宇宙は様々なスケールでの非一様性を有している。この非一様性を考慮すると問題の状況は大きく変わる可能性があり、その効果については研究者の間で様々な議論がある。あるいは、非一様性の効果を差し引いてもなおダークエネルギー・ダークマターは存在する、という可能性もあるが、その場合、非一様性の進化やパターンがダークエネルギー・ダークマターに関する何らかの情報をもたらしていると考えられる。このような背景から、宇宙の非一様性とダークエネルギー・ダークマター問題の関連について取り組むに至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、宇宙のダークエネルギー・ダークマターの物理的実体やオーダーの一致問題を解明する上で、宇宙の非一様構造の進化がいかに寄与するかを、非線形・非平衡物理的な視点から考察する。標準的宇宙論では宇宙の大域的な一様・等方性を仮定し、その結果ダークエネルギー・ダークマターの存在が示唆されるが、現実の宇宙は銀河団もしくはそれ以上のスケールに至るまで非一様で

ある。仮に大域的には一様だとしても、小さいスケールの非一様構造をならして平均化した宇宙が **FLRW** 宇宙モデルと一致するとは限らない。したがって、現実的な非一様宇宙において測定された宇宙パラメータに相当する物理量は一般に **FLRW** 宇宙モデルのそれとは異なると考えられる。その差はどの程度なのか、それはどのようなスケール依存性を持つのか、またダークエネルギー・ダークマターの物理的実体やオーダーの一致を非一様性に求めることは可能なかどうかを解明することが当初の目的である。

## 3. 研究の方法

本研究の特色の一つとして、重力の非線形・非平衡性を宇宙論的状況において取り扱うことが挙げられる。重力に対する非線形アプローチはこれまで多くの人によって成されてきたが、それぞれに一長一短がある。例えば、その一つとして行われてきた一様・等方宇宙モデルの摂動論では、摂動が時間的に成長し、摂動が摂動ではなくなってしまう、適切ではない場合がある。線形摂動を含め、これら宇宙の非一様性の進化に対するアプローチの整理・検討を行った。

また、重力の非平衡性を取り扱うという目標のために、過去になされている重力に対する平衡熱力学的な視点によるアプローチについても検討し、それらのアプローチを基に重力の非平衡性を取り扱うための方法を考察した。その結果として、重力と関係するエントロピーが重要な鍵となることが分かったので、その定義のしかたや性質について詳細に調べた。

この種の研究は、日本では東京工業大学の細谷暁夫氏のグループ、お茶の水女子大学の森川雅博氏のグループなど東京近郊の研究グループで先駆的な研究が行われている。また、日本女子体育大学の牧塚弥氏、山梨英和大学の高橋弘毅氏もこの話題に詳しい。欧州では、フランス・リヨン第一大学の **Thomas Buchert** 氏がこのテーマに関して随一の研究者であり、ドイツ・ハイデルベルク大学の **Luca Amendola** 氏のグループでも精力的に行われている。このため、夏季休業期間等を利用して主に東京近郊と欧州に数週間から一ヶ月程度滞在し、集中的に議論・意見交換を行った。また、上記テーマに関連した国際会議やセミナーに参加し、それらを通じて議論・意見交換・情報収集を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 宇宙の非一様性を記述する「相対エントロピー」について

宇宙の非一様性の進化を定量的に表す上で有用な「相対（情報）エントロピー」を提案し、その性質、特に時間発展について詳しく調査した。

宇宙の非一様性を定量的に調べるためには、非一様性の度合いを表すパラメータが必要である。そこで、情報理論においてよく用いられる Kullback-Leibler 情報量をヒントにして、宇宙論における「相対（情報）エントロピー」を提案した。この量は性質上、時間的に増大することが期待されるが、そのことは必ずしも明らかではないため、いくつかの例示計算により、その時間的増大性を示した。特に、物質優勢な宇宙において非一様性が進化しブラックホールを形成しつつある状況では、エントロピーは必ず増大することを明らかにした。

また、宇宙の加速的膨張との関連について、「もし非一様性の存在が宇宙膨張を実効的に加速させるならば、エントロピーは（十分な時間の後には）増大する」ことを示した。このことは、宇宙の加速的膨張とエントロピー増大則を、非一様性の進化を介して関係づけている点で興味深い。

これらの点に関して、東京工業大学の細谷 曉夫氏、フランス・リヨン第一大学の Thomas Buchert 氏と議論・意見交換を行った。また、これらの研究成果を、2009 年 6 月にフランス・パリで開催された国際会議 ‘Invisible Universe’ 及び 2011 年 12 月にベトナム・クイニョンで開催された国際会議 ICGAC10 において口頭発表し、東京工業大学および琉球大学においてセミナー講演した。以上の成果を現在論文にまとめており、学術雑誌への投稿を準備中である。

##### (2) ワイル曲率を用いた「重力場のエントロピー」について

上記(1)で考察したエントロピーは宇宙の物質分布から定義されるものであるが、ブラックホール・エントロピーの存在から、重力場そのものもエントロピーを持っていると考えられる。このことは、ペンローズによる、いわゆる「ワイル曲率仮説」によっても示唆されている。

そこで、重力場のエントロピーを構成するために、ペンローズの仮説に基づきワイル曲率を用いてエントロピーを記述することを

試みた。特にブラックホール・エントロピーとの関係に注意しながら検討した結果、Ted Jacobson により提案された「時空の熱力学」の方法が有用であることが分かり、これに基づいてエントロピーを構成した。従来の「時空の熱力学」では、光的測地線に沿った展開の最低次のみを考慮し、これによりアインシュタイン方程式を導出するが、これを次のオーダーにまで拡張することで、自然にワイル曲率が現れることが明らかになった。

これらの点に関して、日本女子体育大学の牧塚弥氏と議論・意見交換を行った。この成果を現在論文にまとめており、学術雑誌への投稿を準備中である。また、2012 年 9 月にポルトガルで開催予定の国際会議 Spanish Relativity Meeting ERE2012 において発表される予定である。

##### (3) $f(R)$ 型修正重力理論における背景重力波について

宇宙の加速的膨張に対する理論的な裏付けを検討する際に、可能性の一つとして、真の重力理論が宇宙論的なスケールでアインシュタイン重力からずれていることが考えられる。つまり、アインシュタイン重力に対する補正項があつて、これが重力の働き方を弱めるために宇宙膨張が加速的になる、という可能性である。このような重力理論を「修正重力理論」といい、ラグランジアンがスカラー曲率  $R$  の関数で表される  $f(R)$  型のモデルが最近よく研究されている。

このモデルが観測的に妥当であるかどうかは、様々な宇宙論的観測の結果と照合することにより検証されなければならない。中でも重力波による検証は、重力波検出のための巨大プロジェクトが複数進行中であることを考えると、特に重要である。そこで、 $f(R)$  型修正重力理論に基づいて宇宙モデルを構築し、このモデルの中で重力波がどのように伝播するかを調べた。

その結果、ダークエネルギーの状態方程式パラメータが  $-1$  より大きい場合には、アインシュタイン重力の場合とほとんど区別がつかないが、状態方程式パラメータが  $-1$  より小さい場合には、高振動数のモードがアインシュタイン重力の場合に比べて振幅が抑えられることが分かった。

これらの点に関して、山梨英和大学の高橋 弘毅氏と議論・意見交換を行った。また、これらの研究成果を、2009 年から 2011 年にかけてスペイン各地で開催された国際会議 Spanish Relativity Meeting において計三回口頭発表し、国内の研究会とドイツで開催

された国際会議でそれぞれ一回ずつポスター発表を行った。以上の成果を現在論文にまとめており、学術雑誌への投稿を準備中である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① M. Morita, T. Buchert, A. Hosoya, N. Li, Relative information entropy of an inhomogeneous universe, AIP Conf. Proc. 1241, pp. 1074-1082 (2010), 査読有  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3462602>

② Masaaki Morita, Hirotaka Takahashi, Sendarily-induced gravitational wave background in modified gravity, J. Phys.: Conf. Ser. 229, 012054 (2010), 査読有  
DOI:10.1088/1742-6596/229/1/012054

[学会発表] (計8件)

① 森田正亮, 宇宙の非一様性を測る KL 情報量, 基研研究会「情報統計力学の最前線-情報と揺らぎの制御の物理学を目指して-」(京都) 2012年3月22日

② Masaaki Morita, Characterizing the average properties of an inhomogeneous universe, Xth International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (Quy-Nhon, Vietnam) 2011年12月21日

③ Masaaki Morita, Hirotaka Takahashi, Effect of gravity modification on cosmological gravitational waves, Spanish Relativity Meeting E.R.E. 2011 (Madrid, Spain) 2011年9月1日

④ Masaaki Morita, Hirotaka Takahashi, Gravitational wave background in modified-gravity dark energy models, The 25th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics (Heidelberg, Germany) 2010年12月6日

⑤ Masaaki Morita, Hirotaka Takahashi, Gravitational wave background in modified-gravity dark energy models, The 20th Workshop on General Relativity and Gravitation (京都) 2010年9月22日

⑥ Masaaki Morita, Hirotaka Takahashi, Gravitational wave background in modified gravity dark energy models, Spanish Relativity Meeting E.R.E. 2010 (Granada, Spain) 2010年9月8日

⑦ Masaaki Morita, Hirotaka Takahashi, Sendarily-induced gravitational wave background in modified gravity, Spanish Relativity Meeting E.R.E. 2009 (Bilbao, Spain) 2009年9月8日

⑧ M. Morita, T. Buchert, A. Hosoya, N. Li, Relative information entropy of an inhomogeneous universe, Invisible Universe International Conference (Paris, France) 2009年7月1日

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 正亮 (MORITA MASA AKI)

沖縄工業高等専門学校・総合科学科・准教授

研究者番号: 50390563