

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740186

研究課題名(和文)数値宇宙論に基づく密度揺らぎの非線形進化

研究課題名(英文)Non-linear evolution of density fluctuations in numerical cosmology

研究代表者

平松 尚志(Hiramatsu, Takashi)

京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員

研究者番号：50456175

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：数値宇宙論の基盤構築の第一歩として、汎用の三次元の場の理論シミュレーターを開発し、宇宙の大規模構造の種である密度揺らぎの非線形進化、後天的な密度揺らぎの生成要因の一つである宇宙論的位相欠陥のシミュレーションを行ないました。特に後者については、宇宙ひも、ドメインウォールを中心に、重力波とアクシオンの動的生成率の計算から、超対称性理論への制限に関する問題まで、数値宇宙論の特性を生かして分野を横断した研究を行ないました。また、揺らぎの初期条件を作るためのボルツマンソルバーの開発も合わせて行い、修正重力理論については「スカラー重力」の働きについて、および観測からの制限に関する研究を行ないました。

研究成果の概要(英文)：As a first step of establishing the foundations of Numerical Cosmology, we developed a general-purpose three-dimensional hyperbolic equation solver for classical field theory, and studied the non-linear evolution of primordial density fluctuations and the topological defects appeared as a result of phase transition of the vacuum states. As for the latter project, we addressed a variety of issues lying across cosmology by virtue of the ubiquitous property of Numerical Cosmology, from the gravitational waves and axions from domain walls, to the dynamical constraints on the model building of supersymmetric models from the colliding meta-stable strings. In addition, we developed a Boltzmann solver for the photons in the early Universe to impose the initial conditions of the density fluctuations. As for the modified gravity theories, we investigated the details of the scalar gravity hidden in the theories, and the possibility of the observational constraints on their theoretical parameters.

研究分野：数物系科学

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：宇宙論 密度揺らぎ 宇宙論的位相欠陥 宇宙論的摂動論 宇宙紐 修正重力理論 数値宇宙論

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙観測技術の向上により、誕生間もない頃の極めて深い宇宙の姿を捉えられるようになりました。それに伴い、これまでの理論では説明できない事象に多く直面するようになりました。現在の宇宙論の中で、もっとも謎に包まれた事象は「宇宙の加速膨張」です。宇宙の膨張速度が徐々に加速しているという事実は、遠くの超新星爆発の観測や、宇宙マイクロ波背景放射の観測などによって明らかになりました。

加速膨張を実現する一つの可能性が、負の圧力のエネルギー（ダークエネルギー）の存在です。その正体の候補として、未知のスカラー場などが挙げられます。もう一つの可能性は、重力理論の修正です。少なくとも我々の太陽系周辺の重力は、一般相対性理論によって非常に良く記述されていることが分かっていますが、これが100億年後年に及ぶ宇宙論的スケールまで正しいとは限りません。よって宇宙の加速膨張自体が、一般相対性理論の破れ、さらにはより基本となる重力理論の存在を示唆しているという考え方がありあます。こういった背景から、様々な宇宙モデルが提唱され、それらを理論的・観測的の両面から検証され続けています。

このような深い宇宙を探る手がかりになるのが、インフレーション起源の様々な「揺らぎ」です。揺らぎは大まかに、ダークマターやバリオンの密度の揺らぎ（密度揺らぎ）と重力場そのものの揺らぎ（背景重力波）とに分けられます。特に密度揺らぎは、銀河・銀河団といった宇宙の大規模構造を創る種となります。

密度揺らぎの時間進化をコンピュータ上で実現するために、ダークマターを粒子に置き換え、それらの重力相互作用を計算する重力多体系シミュレーションが広く用いられています。ところが、この手法に対抗する数値計算の手段が他にないため、重力多体系シミュレーションそのものの、どこまで正しい結果を出力できるのかという点はあまり明らかになっていません。

そこで別方面からのアプローチとして、流体近似を元にした見方があります。ここではダークマターやバリオンなどを流体として取扱います。粒子近似である重力多体系シミュレーションと、流体近似の元での議論をつき合わせることで、互いの有効範囲が明らかになることが期待されます。流体近似を使ったフレームワークとして、宇宙論的摂動論が広く用いられてきましたが、これまで流体としての宇宙の非摂動的な取扱いはなされてきませんでした。

宇宙の内容物を流体としての捉え、さらにこれらの進化を非摂動的に取り扱うには高度な数値計算技術が必要です。そういった立場から、密度揺らぎの進化だけでなく、それを含む宇宙論全体を見直すことで、宇宙論の

新たな時代に踏み込めるのではないかとこの考えに至りました。申請者はこれを「数値宇宙論」と呼び、数値的な非摂動計算を基盤に、宇宙論分野を見直すという大きな目論見があります。

本研究は、この「数値宇宙論」の基盤構築の出発点として位置づけています。

## 2. 研究の目的

(1)数値宇宙論の一つの例として、ダークマターの密度揺らぎの非線形進化を取り上げます。ダークマターを流体として考えた場合、密度揺らぎとそれに付随する速度場の揺らぎは、連続の式とオイラー方程式に従います。また、ダークマターは重力源となるので、重力ポテンシャルが従うポアソン方程式も同時に取扱います。これらの揺らぎが小さいものとして、そのオーダーに従って展開するのが宇宙論的摂動論ですが、ここではこれらの方程式を、3次元の格子の中でそのまま解くことを目指します。

(2) (1)の計算の初期条件となる密度揺らぎや重力ポテンシャルの計算を行います。非常に初期の宇宙では、ダークマターやバリオンのような物質場だけでなく、光子の揺らぎ（温度揺らぎ）の寄与が無視できません。そこで、光子の揺らぎの時間発展を追うためにボルツマン方程式を解くコードを開発し、ダークマター・バリオンの揺らぎとの共進化過程を調べます。

(3) 修正重力理論への応用を考えます。代表的な修正重力理論として、 $f(R)$ 重力理論、Dvali-Gabadadze-Porrati(DGP)モデルが挙げられます。これらの理論には、重力を媒介する力として「スカラー重力」というものが存在します。通常の重力に加えて、このような追加的な力が加わることで、質点間の重力の強さが一般相対性理論で予言するものと異なってきます。揺らぎの進化についても同様で、進化の過程で揺らぎ同士の重力相互作用が変化するので、できあがる構造の特徴も一般相対性理論からずれます。そういった観点から、加速膨張を実現する修正重力理論のうち、どういった修正が正しい修正なのかを観測から同定するのが究極の目標になります。本研究では、その準備として、DGPモデルにおける「スカラー重力」の働き方について、 $f(R)$ 重力理論における揺らぎの特徴的なシグナルについて考察します。

(4)宇宙を占める密度場の大半を担うダークマターの候補の一つとして、アクシオンという擬スカラー粒子が考えられています。アクシオンは、真空の相転移に伴って宇宙空間に放出されるため、真空の相転移現象を詳細に調べる必要があります。さらに、相転移の際には宇宙論的位相欠陥と呼ばれる構造物(宇

宙ひももドメインウォールなど)が現れるため、その構造の理解が重要になります。数値宇宙論の可能性を探るため、(1)で作成した格子シミュレーションコードを真空の相転移現象へ応用させます。また、相転移の際、重力波も同時に放出されます。観測的な立場から見ると、これはインフレーション起源の背景重力波に対する「ノイズ」となり得ます。重力波の解析も行うことで、相転移現象そのものだけでなく、密度揺らぎの起源であるインフレーションシナリオに対する理解も深めることを目的とします。

### 3. 研究の方法

本研究を遂行する上でもっとも不可欠なものは、3次元格子を用いた場の理論的シミュレーションのコードです。まずはこの基盤となるシミュレーションエンジンの整備を行います。そして、これを流体やスカラー場・ゲージ場・重力場などに応用することで、上記の(1)(4)の研究目的を果たします。

(2)では流体方程式の他にボルツマン方程式を並列させます。ここではすべての揺らぎを線形理論の範囲で扱います。光子の揺らぎについては球面調和関数で展開することによって、光子のボルツマン方程式は各モードが結合する連立常微分方程式に落ちます。流体方程式と重力場方程式もフーリエ変換を行うことで、波数に対する常微分方程式として記述されます。これらを陰的ルンゲ・クッタ法で解くコードを作成します。

(3)では、(1)の発展研究であることに加えて、ここで取り上げる修正重力理論の各モデルの詳細研究のため、二次元の非線形楕円型方程式を解くコードを作成します。また、比較のため、密度揺らぎのパワースペクトルを摂動論で計算するためのコードの作成も行います。

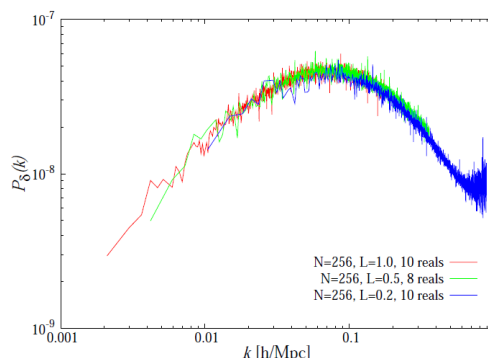
### 4. 研究成果

#### (1)密度揺らぎの非線形進化

ダークマターの密度揺らぎと速度場の揺らぎ、さらに重力ポテンシャルの揺らぎを3次元格子上に分布させ、その上でオイラー方程式、連続の式、ポアソン方程式を連立させて解くコードを開発しました。揺らぎは確率的な量なので、シミュレーションは複数回実行し、そのパワースペクトルを計算することで物理的な意味を成します。

研究開始当初は、このコードで計算した結果と、同じく流体近似に基づく宇宙論的摂動論との結果を比較し、よく用いられる摂動論がどこまで正しいのかを定量的に評価するのが一つの目的でした。しかし、3次元格子を用いた計算が非常に重く、加えて試行ごとの揺らぎの分散がかなり大きいことが明らかになり、そのまま比較を行なっても有意な結果は得られないと判断しました。コード本体についても、当初は標準的な差分法を用い

たコードを作成しましたが、精度向上を目指し、スペクトル法(コロケーション法)を用いたコードに作り変えました。しかしそれでも小さいスケールにおけるエラーが大きくなり、結果の定量的考察の段階まで進むことができませんでした。次の図は、密度揺らぎのパワースペクトルの一例で、3種類の異なるサイズの箱を使用した際のスペクトルを示しています。



#### (2)初期条件コードの構築

密度揺らぎの非線形進化が始まる前の時代の、ダークマター・バリオン・光子の結合系の方程式を解くコードを開発しました。当初は、流体方程式・重力場方程式・ボルツマン方程式を線形レベルでしか考慮していませんでしたが、このコードが最新のCMBの研究へも応用が可能であることが分かり、現在、それぞれの方程式に揺らぎの二次摂動までを取り入れて再定式化し、新たなコードとして開発を続けています。

#### (3)修正重力理論

修正重力理論の代表的なものとして  $f(R)$  重力理論と DGP モデルに着目しました。そして、(1)の予備的研究という位置づけで、

DGP モデルにおける一般相対性理論への回復機構である Vainshtein 機構が、二体の場合にどのように働くか、赤方偏移空間のパワースペクトルから  $f(R)$  重力理論の理論パラメータをどの程度推定できるか、の二点について研究を行ないました。

DGP モデルに現れるスカラー重力は、非常に非線形性の高い楕円型方程式で記述されます。これを、月と地球を想定した二つの物体に適用し、そこでのスカラー重力場の方程式を解くコードを開発しました。これを用いた結果、二体の間で、一般相対性理論への回復がどのような形で行なわれるかが明らかになり、DGP モデルで予想される「近日点移動の一般相対論からのずれ」に対して、さらなる補正が加わることを指摘しました。これにより、修正重力理論において重力多体系シミュレーションを行なう場合、それぞれの質点の間でスカラー重力がどのような影響を与えるかという問題に対して、一定の回答を

行なったこととなります。

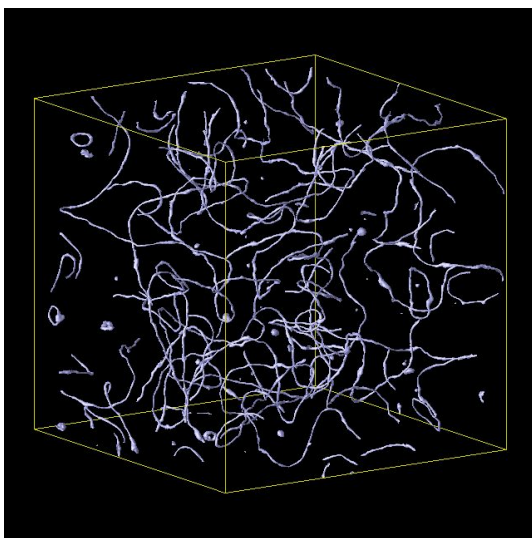
f(R)重力理論における密度揺らぎの非線形進化を計算するコードを開発しました。これを用いて、赤方偏移空間における密度揺らぎのパワースペクトルの計算を行いました。その結果、銀河サーベイからf(R)重力理論に現れる唯一の理論パラメータに対して、これまででもっとも強い制限を与えられることを示しました。

#### (4)宇宙論的位相欠陥のシミュレーション

インフレーションの後、密度揺らぎや背景重力波を後天的に作る可能性があるものとして、宇宙ひもとドメインウォールを取り上げました。

まずは、(1)で作成した3次元の格子シミュレータで初期宇宙のスカラー場を再現し、相転移に伴って現れるドメインウォールからアクシオンと呼ばれるダークマター候補粒子がどの程度放出されるかを定量的に評価しました。加えて、同様の系から発生する背景重力波のパワースペクトルも定量的に評価しました。さらに、宇宙ひもと共生する系においても同様の考察を行ないました。

続いて、同じく3次元格子シミュレータを用いて、Abelian-Higgsモデルに基づいた、局所U(1)ゲージ変換に対して不変な系に生じる宇宙ひものうち、一型と呼ばれるやや特殊な宇宙ひもについて、そのネットワーク構造を調査しました。一型はひも同士の結合系を構成してしまうため、いわゆる「スケールリング則」に乗らない可能性がありましたが、本研究によって一型でもスケールリング則に乗って進化し、現在の宇宙でも存在可能であることが示されました。これは、一型宇宙ひもも各種揺らぎの発生源としての可能性があることを意味しています。



最後に、ある種の超対称標準模型に現れ

る宇宙ひもを取り上げました。この宇宙ひもには内部構造があり、ひもの内側には超対称性が回復している真空が、外側には超対称性が破れた真空、すなわち我々の住んでいる宇宙が取るべき真空が存在します。この宇宙ひもは準安定的であることが知られていますが、衝突などの動的現象でその安定性が保たれるかは不明でした。本研究で、理論パラメータの大部分では安定的に存在し得るが、高速衝突や平行に近い形での衝突においては、超対称性が回復した真空が宇宙を覆ってしまい、実際の宇宙と矛盾することを明らかにしました。この研究は、動的現象から超対称性理論に対して制限を与えるという、新たな可能性を示唆しています。

#### 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7件)

樽家 篤史、小山 和哉、平松 尚志、岡 アキラ, "Beyond consistency test of gravity with redshift-space distortions at quasi-linear scales", *Physical Review D* 89 (2014) 043509, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.89.043509

平松 尚志、川崎 雅裕、齋川 賢一, "On the estimation of gravitational wave spectrum from cosmic domain walls", *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 1402 (2014) 031, 査読有, DOI: 10.1088/1475-7516/2014/02/031

平松 尚志、仙洞田 雄一、高橋 慶太郎、山内 大介、柳 哲文, "Type-I cosmic string network", *Physical Review D* 88 (2013) 085021, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.88.085021

平松 尚志、衛藤 稔、鎌田 耕平、小林 達夫、大河内 豊, "Instability of colliding metastable strings", *Journal of High Energy Physics* 01 (2014) 165, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP01(2014)165

平松 尚志、Wayne Hu、小山 和哉、Fabian Schmidt, "Equivalence Principle Violation in Vainshtein Screened Two-Body Systems", *Physical Review D* 87 (2013) 063525, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.87.063525

平松 尚志、川崎 雅裕、齋川 賢一、関口 豊和, "Axion cosmology with long-lived domain walls", *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 1301 (2013) 001, 査読有, DOI: 10.1088/1475-7516/2013/01/001

平松 尚志、川崎 雅裕、齋川 賢一、関口 豊和, " Production of dark matter axions from collapse of string-wall systems ", Physical Review D 85 (2012) 105020, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.85.105020

〔学会発表〕(計 11 件)

平松 尚志, " Instability of colliding metastable strings ", 日本物理学会秋季大会, 2013 年 9 月 20-23 日, 高知大学

平松 尚志, " Type-I cosmic string network ", 日本物理学会秋季大会, 2012 年 9 月 11-14 日, 京都産業大学

平松 尚志, " On the Vainshtein mechanism for two body system in DGP model ", COSM011, 2011 年 8 月 22 日, ポルト大学(ポルトガル)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平松 尚志(HIRAMATSU, Takashi)  
京都大学 基礎物理学研究所 特定研究員

研究者番号 : 50456175