

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 5日現在

機関番号：13901

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2011

課題番号：18072004

研究課題名（和文）

銀河分布を用いたダークエネルギーの研究

研究課題名（英文）Study of Dark Energy by Utilizing Galaxy Distributions

研究代表者

杉山 直 (SUGIYAMA NAOSHI)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：70222057

研究成果の概要（和文）：銀河分布を用いて、現代宇宙論にとって最大の謎であるダークエネルギーの正体に迫ることを目的に、大規模数値計算を遂行した。その結果、世界最大規模の銀河分布のサンプルを得ることに成功し、また、得られた銀河サンプルをもちいて、宇宙での光の伝播を解くことで、遠方の銀河に生じる重力レンズ効果を見積もった。これによって、ダークエネルギーの推定に対する将来の観測誤差を推定し、また、最適な観測計画を立案した。これらのデータは、web 上で公開している。

研究成果の概要（英文）：We utilize galaxy distributions to reveal the time evolution of dark energy, which is the biggest mystery of modern cosmology. For that, we carried out huge numerical simulations and obtained one of the biggest galaxy samples in the world. Using our galaxy sample, we solve trajectories of the light ray in the simulation box, which are suffered from the gravitational lensing effect caused by dark matter distributions. We could estimate future observational errors of parameters to determine dark energy time evolution by these ray-tracing simulations, and propose an optimal observational strategy. These data are open for public.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	13,600,000	0	13,600,000
2007年度	13,600,000	0	13,600,000
2008年度	13,600,000	0	13,600,000
2009年度	13,600,000	0	13,600,000
2010年度	13,600,000	0	13,600,000
2011年度	13,600,000	0	13,600,000
総計	81,600,000	0	81,600,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：ダークエネルギー、構造形成、密度ゆらぎ、宇宙大規模構造

1. 研究開始当初の背景

宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎや遠方の Ia 型超新星探査などにより、宇宙論的観測の進展に伴って、現在の宇宙は、73%のダークエネルギーと 22%のダークマターに支配されていて、通常の物質はわずか 5%

しかないことが明らかになっていた。なかでもダークエネルギーは、負の圧力を持ち、斥力、すなわち反重力を生じるという、とてつもなく奇妙な存在であり、その正体については、謎に包まれていた。

ダークエネルギーは、宇宙全体では莫大な

量だが、きわめて希薄なため、直接測定はほとんど不可能である。一方で、宇宙の膨張の時間進化を司るという役割を担っている。そこで、宇宙膨張速度の時間変化を詳細に測定すれば、その正体に迫ることができる可能性がある。膨張速度の時間変化は、例えば、遠方の天体までの距離を測定することで知ることができる。速度に応じて、赤方偏移に対する距離が変わってくるからである。距離を測る方法としては、例えば、前述の超新星を使う方法や、さらに、バリオン音響振動という銀河分布の群がり方に現れる固有なサイズの構造が提案されていた。

また、距離以外にも、重力によって物質が集まるはやさが、ダークエネルギーによって遅くなることを用いることで、ダークエネルギーの時間進化の情報を得る可能性も指摘されていた。具体的には、銀河が群がることで、その場所の重力が強くなり、空間がレンズとして働くようになり、遠方の銀河などの像をゆがめるといふ重力レンズ効果を用いる方法が考案されていた。

そこで、研究開始当初の頃、世界中で競って銀河分布のサーベイを行なう研究がたてられて、準備が進められつつあった。このような背景の中、我が国の誇る口径 8m 望遠鏡「すばる」を用いて、ダークエネルギーの測定を行なうため、本特定領域が提案されたのである。

2. 研究の目的

これから行われるすばる望遠鏡による超広域銀河探査によって得られる銀河の空間分布から、宇宙のエネルギー密度の大部分を占めているダークエネルギーに関する情報がどれだけ詳細に得られるのかを理論的に調べ、実際の観測へ向けた準備を行うことを目的としている。宇宙の膨張速度を赤方偏移ごとに求めることができれば、そこでの膨張を支配しているダークエネルギー自身の時間進化を決定することができるのである。

具体的には、バリオン音響振動と呼ばれる物理過程によって特定のスケールの構造が選択的に多く形成されるという現象や、重力レンズ効果、さらには宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎに構造の進化が及ぼす影響を用いることで、宇宙の膨張速度、ひいてはダークエネルギーのエネルギー密度の時間進化の情報を得ることを目指してきた。現実の観測データが手に入る前に、数値実験によって理想的な銀河分布を再現し、ダークエネルギーの情報を最も効率よく引き出す手法を見つけ出すことを目標として研究をすすめる。

3. 研究の方法

(1) 数値実験によって銀河分布を求める

膨張宇宙での密度揺らぎの成長を線形、非線形段階を通じて、世界最高精度、規模での計算を行い、銀河分布を数値実験により求める。

具体的には、まず世界最高精度を達成する線形密度揺らぎの計算を行う。音波モードの振動、水素原子形成過程などに関わるすべての物理過程について今一度見直し、線形ボルツマンコードに組み入れる。このボルツマンコードは現時点ですでに世界最高精度のものである。ボルツマンコードによって、この後の非線形 N 体計算の初期条件となる密度揺らぎを計算するのである。この計算を様々な宇宙モデルについて行うためには、PC クラスタが必須となる。また、ここではバリオンとダークマターの密度揺らぎの進化を別々に解くことが可能であり、その違いを詳細に調べる。さらにこのボルツマンコードによって、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎについても同時に求める。温度揺らぎのパワースペクトルを得ることができるので、それを基に、通常行われているようにランダムなガウス分布を仮定することで、全天温度マップを作成する。

次に、計算結果を基に N 体シミュレーションによって、非線形成長を計算する。広域探査のための理論計算であるので、シミュレーションの領域を非常に大きくとることが必要となる。さらに銀河の分布を知るためには、ガスの進化も計算する必要がある。計算は、PC クラスタシステムを用いて行なう。

(2) 最適な観測量を決定する

シミュレーションによって求めたバリオン音響振動を含んだ銀河の分布を用いて、どのような観測量によってダークエネルギーの情報が最も正確に、かつ効率よく得られるのかについて調べる。バリオン音響振動に関しては、その振動を見つけるのに、これまでは密度揺らぎの二乗平均のフーリエ成分であるパワースペクトルが通常用いられてきた。しかし、パワースペクトルと数学的には同じ情報を持つものに分布の二点相関関数がある。実際の観測において、どちらの量が多い統計誤差、系統誤差の少ない結果を与えるのかは、自明ではない。また、さらに高次の相関、例えば三点相関関数や、同じく高次の相関と関係しガウス統計からのずれの指標を与えてくれる歪度や劣度などの量からもダークエネルギーの情報が得られる可能性がある。

バリオン音響振動以外にも銀河の分布からダークエネルギーの情報を得ることが可能である。銀河が分布している場所では、ダークエネルギーの量によってその分布の進化が変化する。重力ポテンシャルが変化している場所を宇宙マイクロ波背景放射が通過すると、重力による赤方偏移効果によって温

度を変えることとなる (ISW 効果)。そこで温度揺らぎと銀河分布の相関を取ることで、ダークエネルギーの量を決定できるのである。そこで、これまで同時に計算してあった宇宙マイクロ波背景放射温度揺らぎの高精度計算とシミュレーションによる銀河分布からこの方法の有為性を検証する。この方法と、バリオン音響振動を用いた方法のどちらがよりよいダークエネルギーの検証方法になるのか、またその違いについても研究を進める。また、さらに重力レンズ効果についての検討を進める。

(3) 観測への提言を行う

シミュレーションを用いて、バリオン音響振動、ISW 効果各々について、どれだけの赤方偏移の範囲をどれだけ細かく分割し、どれだけ広範囲に銀河分布の赤方偏移を決定すれば、どれだけの精度でダークエネルギーが決定できるかについて詳細に分析する。この研究に基づいて、将来の観測計画を立案する。

4. 研究成果

まず、数値計算の初期条件を詳細に検討した。続いて、大規模数値シミュレーションの実行を開始し、PC クラスタを占有することで、世界最大規模の数値シミュレーションを実行した。結果、1 万個を超える世界最大の銀河分布サンプルを得ることができた。

上記、シミュレーションの解析を進める過程で、数値計算によって求めた、密度分布の相関関数の時間進化が、線形成長から期待されるものと大きくずれる現象を見つけた。線形の次の次数の密度揺らぎの成長を考慮することで、この奇妙な揺らぎの成長が、シミュレーションの箱が有限であることに起因していることを突き止めた。この成長は、これまで世界中で行われていたすべての数値シミュレーションに共通に見られる問題点であることもわかった。この問題の対処法も見つけ出すことができ、シミュレーションの精度を上げることに貢献できた。

次に、大規模シミュレーションで得られた銀河サンプルをもちいて、その計算ボックス中の光の伝播を解くことで、遠方の銀河に生じる重力レンズ効果を見積もる研究を遂行した。この研究によって、重力レンズ効果によるダークエネルギーの推定に対する将来の観測誤差を推定でき、また、最適な観測計画を立案できる。これら重力レンズのデータは、web 上で公開を行なった。

さらに、大規模銀河サンプルを用いて、観測結果とモデルを比較する際に重要となる、誤差の評価を与えてくれる共分散行列について、調べた。特に、揺らぎの統計的性質がガウス分布からずれる効果について詳細に検討を行った。また、実際の観測を模倣するために、先の遠方の銀河に生じる重力レンズ

効果を用いて、その共分散行列を計算した。

また、数値シミュレーションの結果から、密度分布の空間揺らぎのパワースペクトル (フーリエ成分の振幅の 2 乗平均) を計算し、それを用いて、ダークエネルギーなど、宇宙の進化を決定づけるパラメータ、いわゆる宇宙論パラメータを推定する際の、非ガウス誤差の影響を調べた。その結果、フィットする宇宙パラメータが 1 つのときは、非ガウス成分により誤差が 4 倍ほど大きくなるが、複数個の場合は非ガウス成分の影響は十分小さいことを明らかにした。

数値実験だけでなく、解析的に取り扱える、非線形摂動論を大幅に拡張して、実際の観測可能量を予言するための統合摂動論の基礎的な土台を完成させた。この新しい理論的方法を数値シミュレーションと比較して、赤方偏移空間変形効果、ハローバイアスの効果などの非線形領域の振る舞いの理解を大きく広げた。

将来観測によって、ダークエネルギーの情報どれだけ取り出せるか、その具体的な例として、ダークエネルギーの指標となるバリオン音響振動スケールでの大規模構造シミュレーションの精度に対する評価を、解析的手法と比較し検定を行なった。

その他、ダークエネルギーの理論的研究として、クインテッセンスモデルという、特殊なタイプのダークエネルギーが支配的な宇宙での構造形成の研究や、ゴーストダークマターというダークエネルギーとしても働く可能性のあるモデル、崩壊するダークマターがダークエネルギーが支配する宇宙に存在する場合などについての構造形成の研究を行い、モデルの検定を行なった。

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 41 件)

1. S. Aoyama, K. Ichiki, D. Nitta, N. Sugiyama, “Formulation and constraints on decaying dark matter with finite mass daughter particles”, JCAP, 09, 2011, 025 査読あり

2. M. Sato, M. Takada, T. Hamana, T. Matsubara, “Simulations of Wide-field Weak-lensing Surveys. II. Covariance Matrix of Real-space Correlation Function”, Astrophysical Journal., 734, 2011, id 76(1-12), 査読あり

3. R. Takahashi, “Probability Distribution Functions of Cosmological Lensing: Convergence, Shear, and Magnification”, Astrophysical Journal, 742 (2011) id 15(1-15), 査読あり

4. R. Takahashi, N. Yoshida, M. Takada, T. Matsubara, N. Sugiyama 他, “Non-Gaussian Error Contribution to Likelihood Analysis of the Matter Power Spectrum”, *Astrophysical Journal*, 726, 2011, id 7(1-10), 査読あり
5. M. Sato, T. Hamana, R. Takahashi, M. Takada, N. Yoshida 他, “Simulations of Wide-Field Weak Lensing Surveys. I. Basic Statistics and Non-Gaussian Effects”, *Astrophysical Journal*, 701. 2009, 945-954, 査読あり
6. R. Takahashi, N. Yoshida, M. Takada, T. Matsubara, N. Sugiyama 他, “Simulations of Baryon Acoustic Oscillations. II. Covariance Matrix of the Matter Power Spectrum”, *Astrophysical Journal* 700, 2009, 479-490, 査読あり
7. R. Takahashi, “Third Order Density Perturbation and One-loop Power Spectrum in a Dark Energy Dominated Universe”, *Progress of Theoretical Physics*, 120, 2008, 549-559, 査読あり
8. R. Takahashi, N. Yoshida, M. Takada, T. Matsubara, N. Sugiyama 他, “Simulations of Baryon Acoustic Oscillations. I. Growth of large-scale density fluctuations”, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 389, 2008, 1675-1682, 査読あり
9. A. J. Nishizawa, E. Komatsu, N. Yoshida, R. Takahashi, N. Sugiyama, “Cosmic Microwave Background-Weak Lensing Correlation, Analytical and Numerical Study of Non-linearity and Implications for Dark Energy”, *Astrophysical. J. Letters*, 676, 2008, L93-L96, 査読あり
10. T. Okumura, T. Matsubara, D. J. Eisenstein 他, “Large-scale Anisotropic Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies”, *Astrophysical Journal*, 676, 2008, 889-898, 査読あり

[学会発表] (計 44 件)

1. 松原隆彦, “バリオン音響振動で探るダークエネルギー”, 日本物理学会素粒子論領域合同シンポジウム: 加速膨張を続ける宇宙論 (招待講演), 2012年3月14日, 関西学院大学
2. 杉山直, “Structure of the Universe and Dark Components”, Workshop on Particle Physics of the Dark Universe (招待講演), 2012年3月2日, 東京大学数物連携宇宙研究機構、東京大学柏キャンパス
3. 杉山直, “Contents of the Universe”, Fundamental Physics using Atoms -Towards better understanding of our matter universe- (招待講演), 2011年10月8日, 岡

山大学理学部、岡山市

4. 吉田直紀, “Cosmological simulations for next-generation surveys”, DENET/IAP Conference, The Accelerating Universe (招待講演), 2011年10月24日, Institut d’Astrophysique de Paris, France
5. 高橋龍一, “深宇宙銀河サーベイに向けた重力レンズによる増光率分布”, 日本天文学会秋季年会, 2010年9月24日, 金沢大学
6. 吉田直紀, “ダークマターと構造形成”, 第38回 COSPAR 国際会議 (招待講演), 2010年7月21日, ドイツ・ブレーメン
7. 杉山直, “Cosmic Microwave Background: A New & Ultimate Tool for Cosmology and Particle Physics”, Extended Workshop on DM, LHC and Cosmology (招待講演), 2009年9月4日, KIAS, ソウル, 大韓民国
8. 松原隆彦, “Theoretical developments for BAO surveys”, FMOS Science Workshop (招待講演), 2009年6月22日, オックスフォード大学
9. 高橋龍一, “Covariance Matrix for Baryon Acoustic Oscillation from Numerical Simulations”, 日本天文学会, 2008年9月11日, 岡山理科大学
10. 吉田直紀, “Simulations of Baryon Acoustic Oscillations”, Cosmology Near and Far : Science with WFMOS-A Joint Workshop of Subaru, Gemini, NOAO, JSPS and UK STFC (招待講演), 2008年5月20日, 米国ハワイ州コナ市
11. 高橋龍一, “HSC に向けた宇宙大規模構造の数値シミュレーション”, 日本天文学会, 2008年3月25日, 国立オリンピック記念青少年総合センター

[図書] (計 7 件)

1. 松原隆彦, 東京大学出版会, 現代宇宙論-時空と物質の共進化, 2010年, 388 ページ
2. 吉田直紀, 宇宙 137 億年解説, 東京大学出版会, 2009年, 156 ページ
3. 杉山直, 松原隆彦 他, 現代の天文学第3巻「宇宙論」, 2007年, 177-233 (杉山), 113-176 (松原)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 出願年月日 :

国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ta.phys.nagoya-u.ac.jp/c-lab/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山 直 (SUGIYAMA NAOSHI)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：70222057

(2) 研究分担者

松原 隆彦 (MATSUBARA TAKAHIKO)

名古屋大学・基礎理論研究センター・准教授

授

研究者番号：00282715

吉田 直紀 (YOSHIDA NAOKI)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・准教授

研究者番号：90377961

高橋 龍一 (TAKAHASHI RYUICHI)

弘前大学大学院・理工学研究科・助教

研究者番号：60413960