

平成 28 年 5 月 12 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540287

研究課題名(和文)重力定数と宇宙物理学

研究課題名(英文)Gravitational Constant and Astrophysics

研究代表者

千葉 剛 (CHIBA, Takeshi)

日本大学・文理学部・教授

研究者番号：40324602

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：重力定数 G は、重力の強さを決める基本的な物理定数である。しかしながら近年、統一理論や重力理論の変更の可能性の観点から、その時間変化の可能性が考えられている。他の3つの相互作用(電磁気力、弱い力、強い力)と比べて、重力は極端に弱く、長距離・大質量の場合に効果が顕著になる力である。星や宇宙の構造・進化においては重力が決定的に重要な役割を果たす。

本研究では、プランク衛星による宇宙背景放射の揺らぎの最新の観測データを用いて、重力定数の変化に対して我々が以前WMAP衛星によるデータで与えた制限より一桁強い制限をつけることができた。

研究成果の概要(英文)：We put constraints on the time variation of the gravitational constant from the analysis of the temperature and polarization spectra of the fluctuation of the cosmic microwave background measured by the Planck satellite. The time variation of the gravitational constant between the recombination epoch and the present time is constrained to be less than 0.48%, which is order-of-magnitude improvement over our previous result using the WMAP data.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：重力理論 宇宙背景放射

1. 研究開始当初の背景

古くは Dirac の巨大数仮説(1937)に始まり、重力定数 G の時間変化の可能性が指摘されてきた。

G を含めた基本定数の時間変化の可能性を考える現代的な動機の引金となるのは、重力を含む統一理論として有望なひも理論である。時空次元 10 次元で定式化されているひも理論においては、ディラトンと呼ばれる重力の担い手となるスカラー場が必然的に現れる。また、時空次元を 10 次元から 6 次元空間を縮めて(コンパクト化)4次元にする際に、モジュライと呼ばれるスカラー場も現れる。これらのスカラー場は重力の運動項やゲージ場の運動項にあらわに結合しているため、重力定数や微細構造定数を含む結合定数の値はディラトンやモジュライの(真空)期待値で決まることになる。したがって、基本「定数」が時間的空間的に変化している可能性がある。さらには、スカラー場は物質ともあらわに結合しているため、等価原理(自由落下の普遍性)も破れうる。時空のみならず物理法則も可変なものになったのである。実際にどの程度の変化になるのかは、低エネルギーでのディラトンやモジュライのダイナミクスの詳細に依存し、理論的な不定性が大きい。さらには、変更された重力理論では一般的に重力定数が変化しうる。そこで、様々な観測による基本定数の時間変化への制限が理論構築・棄却に大きな役割を果たしうる。

これまでの G の時間変化の制限としては、宇宙論的な制限としてはビッグバン元素合成(特にヘリウム合成)の観測との整合性からの制限、連星中性子星の軌道周期の観測からの制限、太陽系での惑星の運動の観測からの制限、などが知られてきた。最近になって申請者を含むグループが宇宙背景放射(CMB)の温度揺らぎのデータを用いた制限を世界で初めて与えた(5%以下)。

2. 研究の目的

宇宙背景放射(CMB)の温度揺らぎは、バリオンと相互作用している光子中を伝わる音波(疎密波)によるものである。 G が大きくなると宇宙の膨張率が早くなるので、膨張の時間スケール、さらにはその間に光が進む距離も短くなる。したがって、宇宙の中性化が起こる時期が早まり、その間に音波として伝播していたバリオンの進む距離も短くなる。観測される揺らぎの空間的パターン(波長)は小さくなる。本研究は、主に宇宙背景放射に焦点を絞り、重力定数 G の変化(主に時間変化)に対する最新の観測データに基づいた制限を与えることを目的とする。

3. 研究の方法

G が変化する理論として、本研究ではスカラーテンソル重力理論を考える。物質とスカラー場との結合の強さを決めるプランスディ

ック結合関数の現在の値と微分値に相当する2つのパラメータで特長づけた理論で考える。

G 以外にも様々な宇宙論パラメータ(空間曲率、密度揺らぎのスペクトル指数、ハッブル定数、ニュートリノ質量)を変えた場合のCMBの揺らぎのパワースペクトルの計算をおこない、Planck 衛星によるCMBの観測データを解析して、 G の変化への制限を与える。

4. 研究成果

Planck 衛星によるCMBの観測データを解析により、WMAP 衛星による観測データを用いた以前の制限(5%以下)より一桁小さい強い制限(0.48%以下)が得られた。また、この制限を宇宙の空間曲率を導入してもほとんど変わらないことも明らかになった。これは、Planck 衛星の観測で初めて明らかになった小角度スケールでの温度揺らぎの散逸効果によるものである。小スケールでは光子は電子と散乱を繰り返し揺らぎを消滅させてしまう。このスケールと温度揺らぎのパターンのスケールでは重力定数の依存性が異なるので、曲率の効果との縮退が解けるのである。

また、修正重力理論については、スカラーテンソル重力理論と呼ばれる理論は計量の共形変換により、物質場がスカラー場と結合したアインシュタイン重力理論と等価であることが知られている。しかしながら、どちらの計量で計算した物理量が観測量と対応するのかについては、議論が分かれていた。この問題に関して、宇宙論に関係した物理量を注意深く計算し、どちらの計量を用いても同じ観測量を与えることを初めて明確に示すことができ、積年の問題に解決を与えることに成功した。スカラー場によるダークエネルギーモデルについて、スカラー場の運動エネルギーが増大するか減少するかの違いでモデルを分類し、現在の観測データによるモデルパラメータの観測的制限を付けた。現在までのデータは宇宙定数と整合的であることが明らかになった。さらに、さまざまなインフレーションモデルについて、密度揺らぎのスペクトル指数とスペクトル指数の波数依存性(running spectral index)と重力波揺らぎのスペクトルと密度揺らぎのスペクトルとの比(tensor to scalar ratio)との間の関係式を導出し、将来の観測によりモデルの峻別の可能性を議論した。また、宇宙背景放射の偏光観測による原始重力波検出の可能性の観測結果を受け、将来の衛星による重力波の直接観測の観測可能性を予測した。

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 9 件)
すべて査読有

Takeshi Chiba,

``Reconstructing the inflaton potential from the spectral index,"

PTEP, 査読有, 2015, no. 7, 073E02 (2015)
doi:10.1093/ptep/ptv090

Takeshi Chiba and K. Kohri,

``Consistency Relations for Large Field Inflation: Non-minimal Coupling,"

PTEP, 査読有, 2015, no. 2, 023E01 (2015)
doi:10.1093/ptep/ptv007

R. Shiose, M. Kimura and Takeshi Chiba,

``Motion of Charged Particles around a Weakly Magnetized Rotating Black Hole,"

Phys. Rev. D, 査読有, 90, no. 12, 124016 (2014)
doi:10.1103/PhysRevD.90.124016

Takeshi Chiba and K. Kohri,

``Consistency Relations for Large Field Inflation,"

PTEP, 査読有, 2014, no. 9, 093E01 (2014)
doi:10.1093/ptep/ptu123

S. Kuroyanagi, S. Tsujikawa, Takeshi Chiba and N. Sugiyama,

``Implications of the B-mode Polarization Measurement for Direct Detection of Inflationary Gravitational Waves,"

Phys. Rev. D, 査読有, 90, no. 6, 063513 (2014)
doi:10.1103/PhysRevD.90.063513

Takeshi Chiba, A. De Felice and S. Tsujikawa,

``Cosmological Scaling Solutions for Multiple Scalar Fields,"

Phys. Rev. D, 査読有, 90, no. 2, 023516 (2014)
doi:10.1103/PhysRevD.90.023516

Takeshi Chiba and M. Yamaguchi,

``Conformal-Frame (In)dependence of Cosmological Observations in Scalar-Tensor Theory,"

JCAP, 査読有, 1310, 040 (2013)
doi:10.1088/1475-7516/2013/10/040

Takeshi Chiba, A. De Felice and S. Tsujikawa,

``Observational constraints on quintessence: thawing, tracker, and scaling models,"

Phys.Rev. D, 査読有, 87, no. 8, 083505 (2013)
doi:10.1103/PhysRevD.87.083505

A. Yumoto, D. Nitta, Takeshi Chiba and N. Sugiyama,

``Shadows of Multi-Black Holes: Analytic Exploration,"

Phys. Rev. D, 査読有, 86, 103001 (2012)
doi:10.1103/PhysRevD.86.103001

[学会発表](計 6 件)

Takeshi Chiba,

"Redshift Drift", 名古屋大学大学院理学研究科コロキウム (名古屋大学、2016年2月16日)

Takeshi Chiba,

"Constancy of the constants of nature", invited talk at FPUA 2015 (Riken, Nov 30, 2015).

Takeshi Chiba,

"Reconstructing the Inflaton Potential from the Spectral Index", invited talk at the 2nd APCTP-TUS workshop on Dark Energy (Tokyo University of Science, August 4, 2015)

Takeshi Chiba,

"Reconstructing the Inflaton Potential from the Spectral Index", talk at the 14th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity (Rome, Italy, July 14, 2015)

Takeshi Chiba,

"Consistency relations for large field inflation", 東京工業大学宇宙理論グループセミナー (東京工業大学、2014年11月21日)

Takeshi Chiba,

"Shadows of multi black holes", invited talk at Japan/Thai workshop in cosmology (Pattaya, Thailand, December 25, 2012)

[図書](計 6 件)

千葉 剛,

ニュートン別冊、「宇宙の7大テーマ」(編集協力)、ニュートンプレス、160ページ (2015年10月)。

千葉 剛,

ニュートン別冊、「無と有の物理学」(編集協力)、ニュートンプレス、160ページ (2015年9月)。

千葉 剛,

桜門春秋(日本大学) 特集「これからの宇宙利用」(編集協力) 日本大学広報部、40ページ (2014年6月)

千葉 剛,

ニュートン別冊、「宇宙、無からの創生」(編

集協力) 、ニュートンプレス、160 ページ
(2014 年 1 月) .

千葉 剛
ニュートン別冊、「ダークマタ ・ダークエ
ネルギー」(編集協力) 、ニュートンプレス、
160 ページ (2013 年 4 月) .

千葉 剛
ニュートン 2012 年 10 月号 特集「ダークエ
ネルギー」(取材協力) ニュートンプレス、
144 ページ .

〔産業財産権〕
出願状況 (計 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 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

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

千葉 剛 (CHIBA, Takeshi)
日本大学・文理学部・教授
研究者番号 : 40324602