

論文の内容の要旨

論文題目：

Probing Signatures of New Physics in the Cosmic Microwave Background

(宇宙背景放射による新たな基礎物理学の探求)

氏名： 中島 正裕

本博士論文では、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, 以下、CMB) 観測から、既存の基礎物理理論、もしくはそれを土台とした宇宙論、を超えた新たな理論の痕跡を探ることを試みた。新たな理論は通常、(特定の結合を持った) 新たな場 (自由度) を伴う。これらの自由度が宇宙論的な揺らぎに与える特徴的効果を探るのが本論文の主題である。

CMB は宇宙全体を満たす黒体放射であり、宇宙開闢直後の高温状態の名残であるが、その発見以来、宇宙論の進展に多大な影響を与えてきた。特に 2002 年よりそのデータ公開が開始された Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (以下、WMAP) による観測結果は、いわゆる標準宇宙論を確立する上で重要な役割を果たしてきた。さらに近年の観測技術の進展に伴って現在進行形で「精細宇宙論」が展開され、従来は無視されていた詳細な理論予言を精密観測で検証できるようになりつつある。

CMB は黒体放射と見なせる為に温度が定義できるが、その温度には天球面上の各方向によって違いが存在する。また、CMB 光子は最終散乱以前に電子とトムソン散乱を通じて結びついていたが、その際、温度の四重極揺らぎを起源として CMB 光子に偏光が生じる。温度揺らぎと偏光は合わせて「CMB 非等方性」と呼ばれるが、この非等方性は元を正せば、宇宙の極初期に起こったと考えられるインフレーションと呼ばれる宇宙の加速膨張期に生成された量子的な密度揺らぎを起源としており、その後の進化で銀河や星等の宇宙の構造の種となっていったと考えられるものである。インフレーション実現のメカニズムは未だ確定しておらず、多くのモデルが提唱されているが、いずれにしても、地上の加速器では到達不可能なエネルギースケールの物理が背後にあることは確実である。CMB は晴れ上がり直後の宇宙か

ら到来した光であり、現時点で人類が観測可能な最古の信号であるため、CMB 温度揺らぎは初期宇宙で実現していたインフレーションモデルを判定する上で欠かせない情報となる。揺らぎの起源が量子的なものであるため、その性質はパワースペクトル（もしくは、より高次のスペクトル）によって議論されるが、インフレーション理論は一般にほぼスケール不変なパワースペクトルを予言する。この予言は、最新の CMB 観測からも支持されており、標準宇宙論の一角を為している。しかし、近年の精密観測によって、スケール不変な関数形からの微小なずれ、とりわけ波数空間で局在したずれ、が報告され始めている。このような「局在化した」ずれは、従来のインフレーションモデルの単純な拡張では生成できないと考えられている。

CMB 非等方性は、このように宇宙初期の量子揺らぎの性質を受け継いでいるが、加えて、その後の宇宙の進化史の情報も含んでいる。実際、WMAP の観測によって、ビッグバン元素合成以後の宇宙史と、現在の宇宙の構成要素、その組成比が大枠で明らかになった。標準宇宙論、いわゆる Λ CDM モデルである。しかしこのモデルは同時に宇宙の約 96% が正体不明の暗黒成分で満たされていることを主張している。とりわけ 70% 以上を占める暗黒エネルギーは大きな謎であるが、超新星やバリオン音響振動等の相補的な観測と合わせてほぼ確定的となっている現在の宇宙の加速膨張を引き起こしていると考えられる。その説明には何らかのスカラ場（クインテッセンス）を導入するか、もしくは重力理論を宇宙論的スケールで変更する（修正重力理論）方法が主流であり、活発に研究が進められている。

上記のような現状を踏まえ、本論文では主に以下の 4 つの観点から、新たな基礎物理理論を、観測からいかに、どの程度検証できるかを議論した。

まず、CMB 非等方性が、再結合過程とその後の宇宙進化に大きく影響を受けることを踏まえ、CMB によって物理定数の時間変化を制限できること、さらに高エネルギー物理理論に基づく特定のモデルに対しては特に厳しい制限が与えられること、を指摘した。物理定数の時間変化はクインテッセンスとゲージ場に結合があった場合には自然であり、また観測的にも遠方クエーサーの観測から微細構造定数（以下、 α ）の時間変化を検出したとする報告もあり、大きな注目を集めている。CMB のスペクトル形は、主に再結合過程を通じて α と電子質量に大きく依存するが、さらに本論文では、バリオン密度の依存性を通じて CMB スペクトルが陽子質量にも大きく依存することを指摘した。バリオン密度と陽子質量は酷似した影響を CMB に与えるため、両パラメータ間の縮退が非常に強いことが示唆されるが、実際には、再結合等の効果を考慮するとその縮退は完全ではなく、将来的な小スケールの観測がさらに進めば、陽子質量の時間変化に対して現在より有用な制限が得られることを特異値分解の手法を駆使して明らかにした。また、 α 、電子質量、陽子質量の三つの定数の時間変化がディラトンと呼ばれるスカラ場のみで統一的に記述される特定のモデルにおいては、現時点の WMAP のデータを用いた解析によって、その時間変化に対してある程度厳しい制限が与えられることも示した。この制限は、モデル依存性はあるものの、陽子質量の時間変化も考慮したことによって、従来知られていた CMB 観測からの α の制限に比べて一桁厳しいものとなっている。

CMB 非等方性に関して、現在、最もその観測が待ち望まれているのは、偏光のうち特にパリティが奇の成分として定義される B モード偏光成分である。これは通常のシナリオにおいては B モードがインフレーション起源の原始重力波（テンソルモード）によってのみ生成されるからであり、B モード観測によって、インフレーションのエネルギースケールもしくはそのモデルの詳細を決定することが出来ると考えられているからである。ところで、仮に宇宙初期にテンソルモードと同じ振幅のベクトルモードが

生成されていれば、そのベクトルモードはテンソルモードより効率よく、より大きな振幅の B モード偏光が生成されることが知られている。通常のインフレーションモデルではベクトルモードはインフレーション中に減衰するのみであるため観測可能ではないが、本論文ではダイナミカルなベクトルモード（エーテル）を含むような修正重力理論（アインシュタイン＝エーテル理論）に着目し、どの程度の B モード偏光が生成されうるかを議論した。インフレーション中に量子的に生成されるエーテル揺らぎは、超ホライズンスケールスケールで成長し得るという特異な性質を持つ。この揺らぎはニュートリノ等の物質揺らぎと相互作用しながら発展するが、本論文では初期条件を注意深く特定し、数値計算を実行することで、アインシュタイン＝エーテル理論においては既存の観測的制限を克服しつつテンソルモード起源のものを越えた振幅の B モードが生成されうることを示した。また、複雑な連立微分方程式系を強結合展開の手法を用いることで単純化し、数値的に計算された CMB スペクトル形が妥当なものであることを解析的に確認した。

インフレーションモデルの構築に関して、近年、ストリング理論に基づいたブレーンインフレーションと呼ばれる模型が注目を集めているが、こういった模型の大きな特徴として、作用が正準形でない運動項を含む点が挙げられる。このような非正準運動項は、揺らぎの解析において音速と呼ばれる新たなパラメータを生み出すことが知られている。従来の揺らぎの計算においては音速がほとんど変化しない極限が扱われていたが、現実的にはインフレーションを引き起こす場（インフラトン場）は複雑な関数形もしくは他の場との結合を保有しており、従って音速も時間とともに変化することが考えられる。本論文では特に音速が急激に変化する極限を考察し、量子力学で良く知られた接続条件を音速の転移時刻に適用することで解析的に解を求め、パワースペクトルに振動やうなりが発生することを明らかにした。この振動は、通常の計算では初期条件の適切な選択により排除されていた解とのモード混合の効果であり、音速が変化する模型では一般に現れる兆候であると考えられる。本論文ではこのような振動が現在の観測結果においてどの程度顕在化しているか、もしくは将来観測でどの程度確認されうるかを定量的に評価した。

最後に、上述したような、既存の観測結果で明らかになりつつある初期揺らぎスペクトルの「局在化したずれ」に関して、本論文では音速が振動的に変化する場合に、共鳴の効果によってそのような特徴的なずれが生成されるというシナリオを提唱した。多くの高エネルギー理論においては、インフラトン場以外に非常に大きな質量をもった場がしばしば登場する。この重たい場はインフレーション中に振動しているが、仮にインフラトン場と微分結合していれば、背景時空のインフレーションを壊すことなく揺らぎの運動方程式に音速の振動として影響が表れ、特定の波数の揺らぎのみが共鳴的に増幅される。この機構によって、従来のモデルでは不可能だった非常に局在化した突起上のずれを生み出すことができた。さらに、この機構は近年注目を集めているモノドロミーインフレーションと呼ばれるブレーンインフレーションモデルに自然に組み込まれており、許容されるパラメータ範囲で有意な「ずれ」が発生しうることを指摘した。このモデルは、インフレーションのスケールより高いエネルギースケールを CMB 観測で検証できる点を明らかにした点でも非常に興味深いものである。

以上、本論文では新たな基礎理論の枠内で登場する新たな場（自由度）と CMB 非等方性との関係を理論・観測の両面から議論した。