

論文内容の要旨

論文題目 Probing Cosmological Models with Current and Future Cosmic Microwave Background
(現在および将来の宇宙マイクロ波背景放射観測による宇宙モデルの探求)

氏名 関口 豊和

近年、宇宙論的観測は目覚ましい発展を遂げてきた。特に、Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) を初めとする宇宙背景放射 (CMB) の非等方性の観測は、我々の宇宙が初期にどのようにして始まり、どのような構成要素からなるかという問題に対し、精密な議論を可能とした。これまでの CMB の観測から、我々の宇宙は Λ CDM モデルと呼ばれるエネルギー組成とスケール不変に近い断熱的な初期揺らぎでよく説明されることが知られており、他の宇宙論的観測とも矛盾しない標準的な模型が確立したと言える。またモデルを記述するパラメータは数パーセントの精度で決定されている。その一方で、CMB はインフレーションモデルやニュートリノ質量、ダークエネルギーといった地上の実験では探査が困難な物理の検証を可能にしている。さらに、Planck 衛星を初め数多くの CMB 観測が現在進行・計画中であり、より高精度・高統計のデータが近い将来利用可能であると期待される。これらの観測で、どのような物理がどの程度探査可能であるか、未知の物理の証拠を見つけるにはどのような観測を行うべきかは十分に議論される必要がある。

本学位論文では、宇宙・素粒子論的に興味深い物理に対する現在・将来の CMB 観測による探査可能性について議論を行った。特に、ニュートリノを初めとする宇宙初期に作られたと考えられる質量の軽い残存粒子やインフレーションモデルに対する探査可能性に焦点をおいた。これらに注目した理由は、将来の観測で制限の大きな向上が期待されることにある。

まず Planck 衛星は、CMB の温度非等方性を WMAP の 3 倍程度の分解能で観測する。そのため、小さなスケールの温度揺らぎに影響を与えるヘリウム残存量や相対論的粒子の存在量に対する制限は、大きな向上が期待できる。また小さな角度スケールの温度非等方性が

精度よく観測されることで、CMBの重力レンズ効果を精確に測定でき、レンズポテンシャルの再構築が可能となる。再構築されたレンズポテンシャルは宇宙の大規模構造を反映しており、ニュートリノなど軽い粒子の質量の制限に貢献することが期待される。その一方で、Planck衛星および同時期の地上観測は、CMBの偏光成分に対し現在よりも1桁以上感度が向上する予定であり、B偏光モードを通じて初期テンソル揺らぎに感度を持つことが期待できる。特に幾つかの主要なインフレーションモデルはこれらの観測で検出可能な始原重力波の生成を予言するため、これらを観測から区別できる可能性がある。一方で、地上実験においては、高分解能あるいは偏光に対する高感度それぞれに重点をおいた様々な観測が計画・進行中であり、更なる発展が見込まれる。

まずビッグバン元素合成(BBN)で作られる ${}^4\text{He}$ の始原存在量 Y_p について研究を行った。 Y_p は元来低金属量のHII領域からの輝線によって制限されてきたが、大きな系統誤差がある可能性が議論されていた。その一方で近年、 Y_p の変化が小角度スケールのCMB非等方性に影響することを利用し、 Y_p をCMBから制限することが幾つかのグループにより研究されていた。我々は、WMAPと小角度スケールのCMBの観測を組み合わせた最新データから、 Y_p が95%信頼度で有限に制限されることを示した。さらにPlanck衛星による制限の向上を、これまでの研究で用いられてきたフィッシャー行列解析に代わりマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて詳細に議論した。 Y_p の量の決定に付随する不定性が他の宇宙論パラメータの制限に与える影響を精確に見積もり、将来の宇宙論パラメータ決定において影響が無視できないことを警告した。

また、軽い残存粒子に対する宇宙論的制限について複数の点から研究を行った。

まず、上記の Y_p に関する解析を進展させ、宇宙に存在する相対論的粒子の量 N_ν に対するCMBを用いた制限について研究を行った。BBN時の N_ν の変化は Y_p を変更する可能性があるが、熱史により変化分の詳細は異なる。それを踏まえ、我々は N_ν と Y_p の関係に異なる複数の仮定を用意し、現在・将来のCMBデータから与えられる N_ν への制限について別個に導出・見積もりを行った。特に重要な結論として、現在の観測では Y_p の変化は N_ν や他の宇宙論パラメータの制限に影響が小さく安全に無視できことを示すとともに、Planckなど将来の観測では影響が無視できず、考慮が必要であることを警告した。また得られた制限を適用し、CMBのみから宇宙初期の再加熱温度に対し下限を与えた。

グラビティーノは素粒子理論で重力を含む超対称性模型において必要となる粒子であり、超対称性の破れと密接な関係がある。特に質量が1eV程度と軽い場合は、宇宙論的な問題を回避でき、多くのバリオン生成機構と両立し得るため興味深い。軽いグラビティーノはこれまでライマン α 線の吸収スペクトルから制限されているが、天体物理やシミュレーションによる大きな系統誤差があると言われている。我々は、代わりにCMBの観測を用い、軽いグラビティーノの質量・残存量に対する制限について研究を行った。Planckなど近い将来のCMBの観測で得られる重力レンズポテンシャルを用いて、グラビティーノが制限可能で

あることを示した。さらに理論的な下限質量と併せて、CMB 観測による軽いグラビティーノの検出可能性をベイズモデル選択と呼ばれる統計学手法に基づき考察し、ニュートリノ質量が無視できる範囲では、将来観測計画により軽いグラビティーノが探査可能であることを示した。

上記二つの研究は、CMB のみを観測データとして用いている。その一方で、バリオン音響振動 (BAO) スケールや Ia 型超新星の観測といった宇宙論的な距離観測は、現在に近い宇宙の膨張の歴史を決められるため、CMB のみでは精度よく決定できないパラメータの制限に役立つことが知られている。我々は、現在および将来の BAO 観測とハッブル定数 H_0 の直接観測に注目し、ニュートリノ質量 m_ν の宇宙論的制限について研究を行った。 m_ν と H_0 間の強いパラメータ縮退をそれぞれの観測が効率よく解消すること示し、将来の Planck 衛星でも有用であることを明らかにした。また、ダークエネルギーの状態方程式や宇宙の曲率の不定性が与える影響についても詳細に議論し、宇宙論的距離観測の有用性を議論した。

単一場スローロールインフレーションは観測に合う初期揺らぎの生成を预言する単純で魅力的なインフレーションモデルである。その一方、単一場スローロールインフレーションは等曲率揺らぎや非ガウス性をほとんど生成せず、種々のモデルを観測から区別するには、曲率揺らぎ・テンソル揺らぎのパワースペクトルへの制限と理論の预言を比較するしかない。だが、観測からの制限は、スカラー・テンソル比 r を考慮するか、スペクトルインデックス n_s のランニング $dn_s/d\ln k$ を考慮するかなどに影響され、不必要なパラメータを含むことで観測を説明する上で好ましいモデルが大きく変わってしまう。私は、現在の CMB および宇宙論適距離の観測を組み合わせ、観測を説明する上で最適なパワースペクトルの制限の導出、及び異なる単一場スローロールインフレーションモデルの比較を、ベイズモデル選択を用いて行った。最新のデータから、スケール不変な Harrison-Zel'dovich パワースペクトルが観測から強く否定されることを示す一方、現在の観測は異なる単一場スローロールインフレーションモデルを区別できないことを詳細に議論した。偏光の精密な観測が可能となる Planck 衛星以降の観測ではこの手法により幾つかの主要なモデルが区別可能であると期待される。

なお本論文ではベイズ統計に基づく宇宙論パラメータの推定・モデル選択について積極的な応用を行っている。特にモデル選択は近年宇宙論においてその有用性が注目されている。我々は、未知の物理に対する有意性の評価、異なる理論モデルの観測的区別、理論量に対する最適化された制限の導出など、ベイズ的モデル選択の様々な応用を実践し、その有用性を議論した。