

令和 2 年 4 月 7 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 30 年度

受付番号 201860247

氏 名 太田 敦久

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： ケンブリッジ （国名： イギリス ）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。
宇宙マイクロ波背景放射の非平衡現象
3. 派遣期間：平成 30 年 4 月 1 日 ～ 令和 2 年 3 月 31 日
4. 受入機関名及び部局名
ケンブリッジ大学 応用数学理論物理学部
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)
(注)「6. 研究発表」以降については様式 10－別紙 1～4 に記入の上、併せて提出すること。

5. 所期の目的の遂行状況及び成果

太田敦久（平成 30 年度受付：受付番号 201860247）

2020 年 4 月 9 日

採用者はこれまで、宇宙マイクロ波背景放射（cosmic microwave background, 以下 CMB）のスペクトル歪みと、初期宇宙のインフレーション中に生成された密度ゆらぎの関係について調べてきた。CMB のスペクトル歪みは密度ゆらぎの 2 次摂動論で記述されるため、従来の線型理論と比較して複雑であり、場当たりの処方も多く用いられてきた。一方で、近年の目覚ましい観測技術の発展により、二次摂動の効果を実際に観測できる時代も近づいている。そこで採用者は、この現象の理解を深めることは喫緊の課題であると考え、研究題目を「宇宙マイクロ波背景放射の非平衡現象」とし、本派遣事業に申請・採用された。本稿では、平成 30 年 4 月より令和 2 年 3 月までオランダのユトレヒト大学およびイギリスのケンブリッジ大学にて研究を行った報告を行う。

1 申請書に記載した課題の研究状況

まず、本派遣事業の研究計画に記載した研究計画の進行状況と成果について報告する。

1.1 電子がエネルギー輸送を担える場合への拡張

採用者は以前、CMB が Thomson 散乱に支配されている宇宙で高次摂動の入った Boltzmann 方程式を機械的に解く手法を提案した。より初期の宇宙は Thomson 散乱を相対論的に一般化した Compton 散乱によって平衡化しており、その過渡期の宇宙では上記の方法は適用できなかった。採用者は上記の枠組みを Compton 散乱から Thomson 散乱の過渡期にまで拡張することを考え、その方法を考察した。まず、解析的にこれを実現する方法について模索したが、残念ながらそのような方法を発見することはできなかった。そこで、摂動の 0 次では既に上記の問題が数値的に解かれていることに注目し、この結果をゆらぎを含めた場合に拡張できないか考えた。実は、Compton 散乱から Thomson 散乱の過渡期に生じるスペクトル歪みは、「それが生成される時点では十分大きなスケール」で生じたものしか現在の宇宙の観測に反映されない。このため、摂動の 0 次の結果をうまく外挿することで、微分展開の最低次の近似で目的の計算ができることに気がついた。採用者は実際にこれを数値的に評価し、Compton 散乱から Thomson 散乱の過渡期に生じる CMB のスペクトル歪みのゆらぎを計算することに成功した。ところが、Compton 散乱から Thomson 散乱の過渡期に生じるスペクトル歪みの振幅はその前後に生じる y 型ゆがみと μ 型ゆがみと比較して $1/10$ 程度しかなく、現実の観測に役立つかは微妙な問題であることもわかった。このため、実際に論文として発表するかどうか躊躇しており、その他に発表に値する興味深い発見がないかどうか注意深く考察している。

1.2 線型スペクトル歪みとバリオン等曲率ゆらぎの関係

採用者は、初期宇宙においてバリオンのゆらぎが非断熱的である場合、これを起源としたエネルギーの輸送が発生し、CMB のエネルギースペクトルに y 型のスペクトル歪みが生じると考えた。本研究ではこのアイディアの検証を行い、実際に y 型のスペクトル歪みが生じることを示した。また、通常の CMB 非等方性を用いた解析では、バリオンと冷たい暗黒物質のゆらぎが縮退して区別できないという問題が以前から指摘されていた。採用者は本研究のアイディアをこの縮退を解くことに用いれることに気づき、実際に y 型のスペクトル歪みの非等方性を見積もった。またフィッシャー解析を行い、将来の観測計画でどの程度の精度でこの信号を観測可能であるか調べた。本成果は、“Exploring compensated isocurvature perturbations with CMB spectral distortion anisotropies,” JCAP 1808, no. 08, 036 (2018) doi:10.1088/1475-7516/2018/08/036 [arXiv:1805.08773 [astro-ph.CO]] にて発表した。

1.3 スペクトル歪みへの局所観測者効果

本研究については、派遣事業開始時点で、受け入れ研究者の Enrico Pajer が同等の研究を独立に進めていることが判明した。すでに研究の大部分が完了していたことから、申請者自身が同研究を行うことは断念した。

2 その他の本研究題目に関連した成果

採用者は、申請書の研究計画に加え、本派遣事業の研究題目と関連した研究を新たにいくつか行ったので報告する。

2.1 3 次の CMB スペクトル歪みと非ガウス性

採用者が以前提案した「高次摂動入りの Boltzmann 方程式を解く方法」を適用し、宇宙論的摂動論の 3 次の Boltzmann 方程式を世界で初めて解き、3 次のスペクトル歪みが小スケールの初期ゆらぎの非ガウス性と直接関係づけられることを示した。さらに、3 次のスペクトル歪みは、これまでに知られているどの型のスペクトル歪みとも形が異なり、他のスペクトル歪みと区別できることを示した。また、記述する座標の選び方によらないゲージ不変な表式を導き、「Planck 分布の重ね合わせによって生じる非物理的な歪み」と「初期宇宙のプラズマの散逸によって生じる物理的な歪み」との分離にも成功し、素朴な物理的解釈を与えることにも成功した。本研究の成果は、A. Ota and N. Bartolo, “CMB spectroscopy at third-order in cosmological perturbations,” Phys. Rev. D 100, no. 4, 043521 (2019) doi:10.1103/PhysRevD.100.043521 [arXiv:1808.10517 [astro-ph.CO]] にて発表した。

2.2 初期ゆらぎの統計的非等方性と CMB スペクトル歪み

インフレーション宇宙の背景時空が特定の方向に偏りを持つ場合、インフレーション中に生成された密度ゆらぎの統計量（パワースペクトルやバイスペクトルなど）が非等方的になることが知られている。採用者はこの非等方性の検証に CMB スペクトル歪みを用いる方法につい

て世界で初めて考察し、統計的非等方性がある場合に CMB スペクトル歪みの全天平均もまた非等方的になることを示し、具体的にその大きさを数値的に見積もった。本研究の成果は、A. Ota, “Statistical anisotropy in CMB spectral distortions,” Phys. Lett. B 790, 243 (2019) doi:10.1016/j.physletb.2019.01.030 [arXiv:1810.03928 [astro-ph.CO]] にて発表した。

2.3 原始磁場を起源とした音響再加熱の非等方性

原始磁場が存在すると、宇宙論的プラズマに磁気音波が励起し、これらが散逸することによって CMB が僅かに再加熱されることが知られていた。採用者らは、原始磁場が非一様に存在した場合、磁気音波の散逸もまた非一様となり、CMB の再加熱が非等方的になることを指摘し、CMB の非等方性の観測から初期宇宙の原始磁場の配位を調査できることを示した。本研究の成果は、S. Saga, A. Ota, H. Tashiro and S. Yokoyama, “Secondary CMB temperature anisotropies from magnetic reheating,” Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 490, no. 3, 4419 (2019) doi:10.1093/mnras/stz2882 [arXiv:1904.09121 [astro-ph.CO]] にて発表した。

2.4 熱的かつ運動学的 Sunyaev Zel'dovich 効果を用いた宇宙論

銀河団に含まれるイオン化した高温の電子ガスが CMB と散乱すると、CMB のエネルギー Spektrum に歪みが生じる。この歪みには、電子雲の光学的深さと運動速度に依存する型と、電子雲の熱力学的な圧力に依存する型があり、それぞれ運動学的 Sunyaev-Zel'dovich 効果および熱的 Sunyaev-Zel'dovich 効果と呼ばれている。これらは、Compton 散乱の衝突項を相対論的補正の最低次まで展開した場合に現れる効果であり、Sunyaev-Zel'dovich 効果によって銀河団の温度を調べたり、固有速度を調べることができる。また、全天に渡ってこのスペクトル歪みを観測し、そのパワースペクトルなどを見れば、初期ゆらぎの性質を調査できることもわかっている。通常の CMB 温度非等方性よりも小さな信号であるが、近年の観測技術の向上から、その有用性が期待されている。一方、相対論的補正の高次項は上記の 2 つの効果とは異なった関数形になり区別可能であることから、これらの補正項も観測できればより沢山の宇宙の情報を得ることができることも知られている。ところが、これまでは上記の補正項は小さすぎて実際に観測することは極めて困難であると考えられてきた。そこで採用者らは、新たな補正項は運動学的 Sunyaev-Zel'dovich 効果と似た角度依存性がある一方異なる関数形をもつという特徴に注目し、kSZ-tomography と呼ばれる、運動学的 Sunyaev-Zel'dovich 効果を高精度で観測できる新しい理論を応用することを考えた。その結果我々は、この方法を用いれば、Sunyaev-Zel'dovich 効果の高次補正も近い将来の観測計画 (例えば、Dark energy spectroscopic instrument や Probe of Inflation and Cosmic Origins) で十分観測可能であることを示すことに成功した。本研究成果は W. R. Coulton, A. Ota and A. van Engelen, “Cosmology with the thermal-kinetic Sunyaev-Zel'dovich effect,” arXiv:1910.10152 [astro-ph.CO] にて発表し、原稿は Physical Review Letters に投稿され審査中である。

3 その他

採用者は上記の研究に加え、広く宇宙論に関連したその他の研究も行い、数本の論文を発表した。具体的には、初期宇宙のみならずより一般的な非平衡系に焦点をあてた、開放系の有効場理論に関する研究や、CMB のスペクトルゆらぎの高次摂動論の手法を密度ゆらぎを起源とする原始重

力波の計算に応用した研究などを行った。これらについては、別紙の「学会誌等への発表」を参照されたい。