学位審査報告書

（ふりがな） 氏 名	（まえだ さとし） 前田 悟志
学位（専攻分野）	博 士 （ 理 学 ）
学位記番号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学 専攻
（学位論文題目） Primordial magnetic fields generated by the non-adiabatic fluctuations at pre-recombination era (再結合時期前における非断熱揺らぎからの原始磁場生成)	
論文調査委員	（主査） 白水徹也 准教授 青山秀明 教授 小林達夫 准教授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京都大学	博士 (理 学)	氏名	前田 悟志
論文題目	Primordial magnetic fields generated by the non-adiabatic fluctuations at pre-recombination era (再結合時期前における非断熱揺らぎからの原始磁場生成)		
(論文内容の要旨)			
<p>現在の観測に従えば銀河等に付随した磁場が存在することがわかっているが、その起源解明は宇宙論において重要な課題の一つと考えられている。その起源には諸説考えられているが、本論文では宇宙の再結合時期 (電子が陽子に取り込まれ、宇宙の中性化が起こる時期) において必然的に生じる磁場生成について、特に宇宙初期に生成された非断熱揺らぎと呼ばれる密度揺らぎによる影響を調べた。その結果、短波長スケールで強い磁場が生成される可能性があることを世界で初めて示した。この磁場はその後の銀河形成後にダイナモ機構で十分現在の磁場を説明できる。</p> <p>現在の標準的な宇宙論モデルでは、宇宙誕生直後に指数関数的膨張 (インフレーション) 期間があったと考えられ、その期間中に宇宙の大規模構造の種が生成される。そしてインフレーション終了後に熱い火の玉宇宙が誕生し、膨張と共に温度は下がってゆく。その過程の中で電子が陽子と「再結合」する時期が存在する。この再結合時期において、電子と陽子は互いに作用するクーロン相互作用でほぼ1流体としてみなせるが、電子と陽子の約1000倍の質量差のために光子との散乱から受ける影響の差から電流が生じ、オームの法則により電場が発生、さらにマクスウェル方程式から磁場が必然的に誘導される。正味の磁場は、電子/陽子の密度分布の空間勾配とそれらの速度揺らぎの勾配の外積で決まるようなものであることが知られていた。密度や速度の揺らぎは宇宙の大規模構造や宇宙背景放射の存在が観測で検証されていることから、ここで生成される磁場はモデルの詳細に依らず必ず存在するものであるが、これまでの研究では最も単純なインフレーション模型が予言する断熱揺らぎ且つスケール不変なスペクトラムの場合に焦点が当てられ、磁場生成の物理素過程の解析、スペクトル評価などが行われてきた。しかし、実際にはインフレーション模型は多様であり、特に超弦理論などが予言するものでは複数のスカラー場によるものが自然であると考えられている。その結果として、一般にはインフレーションが生成する揺らぎには断熱揺らぎの主要部分に加え、非断熱揺らぎが存在することを予言する。この非断熱揺らぎは宇宙背景輻射などの観測と矛盾はしない。</p> <p>本論文では世界で初めて行われた非断熱揺らぎによって生成される磁場の評価をまとめたものである。第2章では背景となる標準宇宙模型の概観を紹介している。特に、複数スカラー場によるインフレーションから生成される密度揺らぎの解説箇所が、主要部分である磁場生成の評価の際に重要となってくる。第3章の前半では宇宙論スケールの磁場に対する観測的制限の現状についてまとめられている。後半部分では今回焦点を当てている再結合時期のものを含めて、これまで提案されてきた磁場生成機構についてまとめている。第4章が今回のオリジナル部分である。そこでは、再結合時期における非断熱揺らぎ起源の磁場を、トムソン散乱について強結合展開を行うことで評価した。その結果、断熱揺らぎ起源のみの場合では、強結合展開の2次で初めて磁場が生成されるのに対して、非断熱揺らぎの場合は1次で生成されることを示し、生成される磁場のスペクトルが短波長側でこれまで予測されたものよりも強くなる可能性があることを指摘した。よって、銀河などの天体に付随する磁場をダイナモ機構によって容易に説明できることになることを示している。</p> <p>本論文の主たる成果は、非断熱揺らぎによって天体スケールでより強い磁場が再結合時期に自然に生成されることを示したことである。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

観測から様々なスケールで磁場が存在することが確認されており、またそれらの磁場が天体形成などに大きな影響を与えることが知られている。一方、宇宙論的なスケールでは磁場の存在は確認されておらず、観測からは上限があるのみである。このような状況下で、これまで数多くの磁場の起源についての研究が行われてきたが、宇宙論的なスケールで生成される磁場の機構が宇宙の再結合と呼ばれる時期に起きることが提案されていた。そこでは確立した物理法則と、検証された粒子のみによっているため、宇宙論的な磁場が生成されることは宇宙の歴史の中で必然であることが重要である。ただし、生成される磁場は宇宙の大規模構造の種であった密度揺らぎにも依存する。密度揺らぎ自身が存在することは検証済であるが、その性質について大まかにはスケール不変な断熱揺らぎであることが分かっている程度で、それとは独立な成分である非断熱揺らぎについては粗い観測的な制限があるのみである。これらの密度揺らぎは標準的な宇宙論においてはインフレーションと呼ばれる指数関数的に宇宙が膨張した時期に生成されると考えられており、簡単なモデルでは密度揺らぎの主要成分がスケール不変な断熱揺らぎであることが示されている。しかし、モデルによっては非断熱揺らぎ成分も自然に持つ。実際に、超弦理論はインフレーションに関わるような場が複数存在することを示唆しており、そのような場合は非断熱揺らぎが自然に現れることになる。

本論文ではこの非断熱揺らぎの再結合時期の磁場生成機構への影響の重要性を世界で初めて指摘したものである。本論文では特にその物理的な素過程に着目し、光子と荷電粒子（電子、陽子）間のトムソン散乱のタイムスケールが系の進化のタイムスケールよりも十分短いとする近似、いわゆる強結合近似を採用し、近似のどの次数で磁場生成が可能か詳細に吟味を行っている。また、宇宙論的なスケールの磁場生成を扱うために、宇宙論的摂動論を適用している。その結果、これまで断熱揺らぎのみが存在した場合には強結合近似の2次、宇宙論的摂動論の2次のオーダーで初めて磁場が生成されていたのに対して、非断熱揺らぎが存在する場合は強結合近似の1次のオーダーから生成されることを指摘している。また、断熱揺らぎと比べ、非断熱揺らぎのスペクトラムは短波長側で大きな傾向があり（ブルースペクトラム）、それらの影響により天体スケールで大きな磁場が生成されることを示し、銀河形成後のダイナモ機構により十分磁場が観測されている値まで増幅されることを示すことに成功している。

以上のように本論文は、宇宙論的な磁場の不可避的な生成について、特に非断熱揺らぎによる天体スケールの磁場の起源について重要な指摘を行った。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。