

# 論文審査の結果の要旨

氏名 羅 焜東

本論文は、宇宙初期のビッグバン元素合成、および恒星内部の高密度環境における電子捕獲や爆発的要素合成において、強い磁場が存在していたらどうなるかを系統的に調べたものである。

本論文は4章からなる。第1章は序章であり、本論文の背景や研究動機などがまとめられている。元素合成の基礎物理過程である原子核反応、弱い相互作用の粒子反応について述べられ、さらにビッグバン元素合成と、高密度星の中で起きると考えられている  $r$  過程元素合成について述べられている。ビッグバン元素合成における磁場の影響は、これまでの研究では、磁場のエネルギー密度が宇宙膨張の速度を変えることしか考慮されていなかったが、本研究では、磁場によって弱い相互作用の遮蔽効果に変更を受けることで、弱い相互作用の反応率も変更されることを初めて考慮した。さらに、磁場に非一様性がある場合を調べたことも本研究の新しい点である。また、恒星内部の強磁場によって、重力崩壊を起こす直前の大質量星の鉄コアにおける電子捕獲反応がどのような影響を受けるか、初めて調べた。これは恒星の爆発現象における元素合成に影響があると考えられる。

第2章は、ビッグバン元素合成における宇宙原始磁場の影響を詳しく調べた結果がまとめられている。まず、弱い相互作用の遮蔽効果が磁場によって変更され、また、ランダウ準位が現れることで電子捕獲反応率が変わることに関して定式化を行った。それを応用し、まず一様磁場の場合について、重水素とヘリウム4の宇宙における存在量を理論計算し、観測データと比較することで原始磁場強度への上限值を求めることに成功した。さらに、磁場に非一様性があり、場所によって元素合成への影響が異なる場合の理論計算を行った。この場合、ベリリウム7の存在量は磁場によって減少するが、重水素の生成は逆に増加することがわかった。さらに、宇宙における軽元素存在量の観測データと合致する磁場の平均強度および分散のパラメータスペースを求めた。その結果、理論が予想するリチウム7の存在量が観測値に比べて大きすぎるという「宇宙リチウム問題」が、原始磁場の影響で軽減される可能性を見出した。

第3章は、恒星内部の高密度領域における強磁場が元素合成に与える影響について詳しく調べた結果がまとめられている。まず磁化された非縮退プラズマにおけるクーロン遮蔽と弱い相互作用を調べた。強い磁場によって、電子と陽電子がランダウ準位に入ることによって、ベータ崩壊の速度が増大することがわかった。この結果の  $r$  過程元素合成への影響を、簡単なモデルを用いて調べたところ、相対論的なクーロン遮蔽は  $r$  過程元素合成に大きな影響を与えることはないことが判明した。弱い相互作用の反応率の変化は、 $r$  過程元素合成に重大な影響を与える可能性があるが、それには  $10^{14}$  ガウスという強い磁場がなければならぬこともわかった。さらに、磁化された縮退プラズマについても影響を調べた。15太陽質量の恒星内部の鉄コアを想定し、鉄グループ元素の電子捕獲反応率への影響を調べた。電子捕獲反応は、鉄コアの質量や陽子/中性子比を決定する重要な反応であり、超新星爆発

に大きな影響を与える。磁場が強く、最低のランダウ準位のみが許される状況では、電子捕獲率が百倍も減少することがわかった。

第4章は論文のまとめである。

本論文で議論されているビッグバン元素合成や恒星内部での爆発的要素合成は、宇宙におけるさまざまな元素の起源を理解する上で極めて重要な研究対象であり、それらについて、素粒子反応の素過程レベルで磁場の影響を詳しく調べた本研究の学術的価値は十分に認められる。宇宙論における重要な未解決問題の一つである「宇宙リチウム問題」についても、本研究で完全に解決したわけではないが、ある程度軽減する可能性を示せたことは興味深い。より精密な理論モデルを構築することで、この方向を追求する価値はある。恒星内部での元素合成に対する磁場の影響については、大きな影響が出るためには、超新星爆発や中性子星で典型的に予想される磁場強度よりはかなり大きなものが必要である。そのため今回の結果がただちに大きなインパクトを持つわけではないが、物理的素過程に基づいて磁場の影響を定量的に明らかにしたことは重要な成果である。

なお、本研究は梶野敏貴、日下部元彦、森寛治、**Baha Balantekin**、**Michael Famiano**、**Grant Mathews** との共同研究であるが、論文提出者が主体となって行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。