

論文審査の結果の要旨

氏名 竹田 敦

本論文は 10 章からなっており、宇宙に存在するとみられる暗黒物質の探索実験研究が記述されている。

第 1 章は宇宙における暗黒物質存在の根拠と、暗黒物質粒子が宇宙空間に存在する密度や速度について議論している。暗黒物質の正体としてバリオン的な物質と、軽い質量を持つニュートリノ、アキシオン、ウインプ（WIMP：他の粒子とは弱く相互作用をし、質量を持つ粒子）等の非バリオン的な物質の可能性について検討を行っている。

第 2 章は暗黒物質の有力な候補として WIMP を取り上げ、さらにこの WIMP として、超対称性理論からその存在が予想されているニュートラリーノという素粒子を当てはめて、その特性について議論した後、これまでに行われた世界各地のニュートラリーノ探索実験と、研究の現状について議論を行っている。

第 3 章はニュートラリーノの直接的検出方法を検討するために、ニュートラリーノと検出器の物質との間の反応について詳細な検討を行っている。ニュートラリーノと原子核との間の弾性散乱の運動学を取り扱った後、ゼロ運動量移行時の断面積について議論している。ニュートラリーノは電氣的に中性で、この粒子と物質の間にはスカラー相互作用のスピンの依存しない反応(SI) と、軸性ベクター相互作用のスピンの依存する反応(SD)とがある。SD に於いては、検出器物質が大きな原子核スピンを持つ原子核を選択することによって、感度のよい測定ができるので、フッ化ナトリウムが検出器として最善の選択であることを提案している。

第 4 章は暗黒物質探索測定器として開発した熱量計の詳細を取り扱っている。この研究で用いた検出器物質フッ化ナトリウムの熱量計としての特徴を議論し、さらに、この実験のために開発したゲルマニウム温度計（NTD Ge）について議論している。この温度計は原子炉の熱中性子をゲルマニウムに照射することにより核変換したドーパントを一様に分布させて製作されたもので、15 マイクロ度の温度上昇検出が可能であることを示している。

第 5 章は探索実験に悪影響を及ぼすバックグラウンドを評価している。宇宙線ミュー粒子、環境大気ガンマ線・ベータ線、環境大気中性子や、装置に内在する ^{222}Rn および、無酸素銅製のフッ化ナトリウム結晶ホルダーと鉛シールドから発生するバックグラウン

ド実測値を基にして詳細な評価を行っている。

第 6 章はフッ化ナトリウム熱量計による暗黒物質探索を議論している。熱量計を構成する各装置（外部放射線に対するシールド部、環境大気に含まれるラドン除去部と残留ラドンモニター部、結晶ホルダー部、極低温冷凍機部、信号処理およびデータ収集部）の詳細、探索実験とエネルギー較正・安定性に関する議論を行っている。

第 7 章は実験データの解析と実験結果を議論している。測定で得られたシグナルは、バックグラウンドの雑音と識別するために、波形処理解析がなされ、エネルギー・スペクトルを導出した。その上で、ニュートラリーノと原子核の反応断面積の上限値を算出している。さらに、他の実験(UKDMC)との比較検討を行っている。

第 8 章は探索実験で出現したバックグラウンドについて詳細な議論を、第 9 章は暗黒物質探索の将来の展望を、第 10 章で結論を記述している。

この実験研究は、宇宙空間の暗黒物質探索という非常に興味ある重要なテーマを取り扱っている。探索実験は、神岡鉱山の中の放射線低バックグラウンドの環境下で、フッ化ナトリウムを 10–20mk の極低温状態にして 2002 年 11 月–12 月の期間行われた。論文提出者は WIMP を検出するために、検出器中で WIMP が弾性散乱し反跳核子が引き起こす微小な温度上昇を検出するという、芸術的なレベルの測定技術を開発して WIMP の直接測定を行った。実験成果として次の 3 点を挙げることができる。

- 1) ニュートラリーノと陽子との間の SI と SD の断面積の上限値が測定された
- 2) ニュートラリーノと核子との間の SD の断面積の上限値が新たに設定された
- 3) ニュートラリーノと核子との間の SD の相互作用の結合係数 (A_p と A_n) の 2 次元平面上で新たな上限値を与えた

これらの実験結果は、UKDMC グループのヨウ化ナトリウム・シンチレータによる結果と相補的な物理情報を与えると同時に、さらに新しい除外領域を付け加えることに成功した。これらの研究成果に対して高い評価が与えられる。

なお、本論文の第 4 章、第 5 章の検出器開発や第 6 章、第 7 章の探索実験・解析については、蓑輪眞・大塚洋一・井上慶純・大谷航・身内賢太郎・関谷洋之・清水雄輝との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験準備、探索実験と物理解析を行ったもので、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。