

別紙 4

報告番 -	※ 甲 第 号
----------	---------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Electroweakly Interacting Spin-1 Dark Matter and
Its Phenomenology
(電弱相互作用するスピン 1 暗黒物質の現象論)

氏 名 藤原 素子
学位関係

論 文 内 容 の 要 旨

暗黒物質は、重力による銀河の構造形成に不可欠な要素であり、宇宙に存在する物質成分の 85% を占める。銀河の回転曲線など、複数の独立な観測から存在が示唆される一方、その正体はいまだに解明されていない。暗黒物質の正体解明は素粒子、および宇宙物理にまたがる最大の未解決問題の一つである。

暗黒物質の最有力候補が **Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)** である。この候補は標準模型粒子と相互作用する暗黒物質候補で、初期宇宙で熱平衡状態にあると仮定される。特に、電弱相互作用する暗黒物質は標準模型の問題を解決する理論的枠組みに自然に現れる。この候補は最有力候補の一つで、数 TeV 質量を持つ場合は現在の宇宙のエネルギー密度とも適合する。実験的に暗黒物質候補の量子数を特定できれば、暗黒物質の背後の理論を特定するための手がかりが得られる。そのためには、各候補のシグナルの識別可能性を調べる必要がある。

本博士論文では、電弱相互作用する暗黒物質のスピン特定のため、暗黒物質の対消滅過程を解析した。まず、電弱相互作用するスピン 1 の暗黒物質について非相対論的有効理論を構築し、暗黒物質二体の有効作用を導出した。暗黒物質が電弱電荷を持つ場合、非相対論的極限において長距離力的なポテンシャルの影響が有効的にはたらく。導出した有効作用から求めたシュレディンガー方程式を数値的に評価し、ポテンシャルの影響を取り込んだ暗黒物質の対消滅断面積の予言値を求めた。

構築した有効理論の具体的な応用例として、初期宇宙における暗黒物質の対消滅過程を調べた。電弱相互作用のポテンシャルの影響も含めて、膨張宇宙における暗黒物質数密度の時間発展を解き、最終的に予言されるエネルギー密度の予言値を導

出した。スピン 1/2 とスピン 1 の予言を比較した結果、スピンの違いにより総電荷が 1 の二体状態の有効ポテンシャルに違いが生じることが判明した。特に、スピン 1 の暗黒物質の間に斥力ポテンシャルがはたらくことがわかり、ポテンシャルによる対消滅断面積の増大効果がスピン 1/2 の場合よりも抑えられる結果になった。最終的にそれぞれのスピンの場合について、適切なエネルギー密度を予言する暗黒物質の質量を特定した。

二つ目の応用例として、現在の宇宙での暗黒物質の対消滅シグナルの探索可能性を調べた。特に、銀河中心領域から飛来する単色ガンマ線探索に注目し、対消滅断面積の予言値のスピン依存性を調べた。比較の結果、スピン 1 の暗黒物質は、スピンの自由度が大きいため、スピン 1/2 の場合に比べて約 4 倍大きな対消滅断面積を予言することがわかった。次世代のガンマ線探索実験で探索可能な領域が明らかになった。さらに、スピン 1 の暗黒物質の理論的枠組みには、暗黒物質よりも重い中性ベクトルが含まれる。暗黒物質二体から、この中性ベクトルと光子への対消滅が起きると、ガンマ線のエネルギースペクトルに二つの識別可能な単色ピークが予言される。ピークの位置は対消滅に関わる粒子の質量で決まるため、この特有のシグナルが見つかれば理論のスペクトルを再構築することができる。将来のガンマ線観測におけるエネルギー分解能を考慮することで、二つの単色ピークが観測される理論のパラメータ領域を特定した。

電弱相互作用をする暗黒物質は、次世代の暗黒物質探索実験で探索が期待される。特に、暗黒物質の対消滅過程由来のシグナル探索は WIMP 仮説を直接的に検証する重要な探索手段である。本研究では、スピン 1 暗黒物質について電弱ポテンシャルを取り込んだ解析を行うことで、スピン依存性の体型的な比較を行う理論的な枠組みを整えた。今後は余剰次元理論で予言されるスピン 1 暗黒物質に本論文で体系化した手法を適用し、暗黒物質の正体解明の理論的研究を進める。