

氏 名	池本 順平
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	自博甲第9号
学位授与年月日	令和7年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
文部科学省報告番号	甲第845号
専攻名	創成理工学専攻
学位論文題目	ヒッグスポータルを持つマヨラナフェルミオン暗黒物質模型の Freeze-in 生成機構と検出実験による制限 (Freeze-in Mechanism in Majorana Fermion Dark Matter Model with Higgs Portal and its Constraints from Detection Experiments)
論文審査委員	主査 島根大学教授 山田 拓身 島根大学教授 田中 宏志 島根大学教授 影島 博之 大阪公立大学教授 波場 直之

論文内容の要旨

素粒子の標準模型 (Standard Model: SM) は現在の観測・実験を非常に精度よく予言している。しかし、SM では説明できない観測・実験事実が存在し、その未解決問題を解決するために素粒子の標準模型を超える物理 (Beyond Standard Model: BSM) を考える必要がある。SM の未解決問題のひとつである暗黒物質 (Dark Matter: DM) の存在は天体物理学的・宇宙論的観測によって強く支持されている。DM は宇宙の豊富な構造 (銀河、銀河系など) 形成において非常に大きな役割をもち、初期宇宙から現代宇宙の物理の理論構築に欠かせないものであり、現在の宇宙の DM 残存量もわかっている。しかし、現在まで高エネルギーの加速実験において DM 粒子の発見はまだされていない。そこで SM の粒子セクターと DM 粒子セクターには現在の高エネルギー実験のエネルギースケールよりも大きなエネルギー・スケール (カットオフ・スケール Λ) が存在し DM 粒子のセクターが隠れているようにみえると考えることができる。

初期宇宙における DM 粒子の生成は、熱的生成か非熱的生成、あるいはその両方によって進行する可能性がある。前者は Freeze-out 機構と呼ばれ、宇宙初期に大量の DM が存在し、SM 粒子との熱平衡によって現在観測されている量まで減少するというものである。後者は Freeze-in 機構と呼ばれ、非熱平衡粒子 (ここでは DM 粒子) が SM 粒子の熱浴から生成される。

本研究では、マヨラナ・フェルミオン χ と SM のヒッグス場 H との次元 5 の有効相互作用 $L \supset HH^\dagger \bar{\chi}\chi/\Lambda$ (Λ はカットオフ・スケール) を導入する。 Λ が十分大きいと、DM は宇宙の熱史において SM 粒子と熱平衡状態になることはない。したがって DM は Freeze-in 機構によってのみ生成される。ただし、本模型は繰り込み不可能な理論であるので、有効理論が破綻しないように、初期宇宙のインフレーション終了後の輻射優勢宇宙の温度 (再加熱温度) T_{RH} を、 $\Lambda \gg$

T_{RH} のように設定した。また、現在の宇宙のバリオン数を生成できるように、 T_{RH} はスファレロン温度 100 GeV よりも大きいとした。以上の仮定の下、Freeze-in 機構の数値解析を行い、さまざまな DM 質量(m_χ)、 T_{RH} 、 Λ について DM 残存量を計算した。そして、DM 残存量の観測値を正しく再現できる(m_χ , T_{RH} , Λ)のパラメータ領域を求めた。さらに、このパラメータ領域における、DM とキセノン原子核のスピン非依存散乱断面積を計算した。その結果、現在の DM 直接観測実験の散乱断面積の上限値を下回ることがわかった。そのため、同実験により、Freeze-in 機構から評価した DM 残存量を満たすパラメータ領域を排除することはできなかった。

そこで、DM 対消滅から生じる DM シグナルを観測する実験 (DM 間接観測実験) に注目した。本模型の H は SM のヒッグス二重項なので、DM 対消滅によって対生成された H は、非物理的状態($A^0, H^\pm$)が Z -boson と $W^\pm$ -boson の縦波成分を生成し、物理的状態(ϕ)が実験で観測された中性ヒッグス粒子 h を生成する。これらの粒子がさらにカスケイド崩壊し最終的に (陽)電子や (反)陽子、(反)ニュートリノ、光子といった安定な粒子が生成される。これら安定粒子が DM シグナルとして観測される可能性がある。光子は電荷をもたないので銀河磁場の影響は受けず、DM シグナルの指向性を保持することができる。ニュートリノも同様に電荷をもたないが、光子のほうがより観測しやすいので、光子 (ガンマ線) のみを観測対象とする。

DM 対消滅に由来するガンマ線は、現在、フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡 (Fermi Gamma-ray Space Telescope: Fermi) の大面積望遠鏡 (Large Area Telescope: LAT) により探索されている。DM シグナルの源としては、天の川銀河にある矮小球状衛星銀河 (Dwarf spheroidal satellite galaxies: dSphs) は、DM 密度が高く、バックグラウンドとなるバリオンが比較的少ないため有望である。本研究では十分な量の統計データが得られている 16 個の dSphs の 14 年間分の Fermi-LAT データを用いて、DM の平均散乱断面積の上限値を評価した。DM 質量は、ヒッグス粒子の質量 125 GeV から Fermi-LAT の高感度観測エネルギーの上限 100 TeV までの区間を考えた。そして、Fermi-LAT データにより、DM 残存量の観測値が正しく再現されるパラメータ領域が排除されるのかを評価した。ただし、銀河内の DM は銀河重力ポテンシャルによって束縛される形で分布し、DM の速度はおよそ 220 km/s と非相対論的速度であることを考慮した。その結果、

DM 間接観測実験からは DM 残存量を満たすパラメータ領域は排除することはできなかった。しかし、 $T_{RH} = 100$ GeV の場合、DM 質量が 100 GeV を超えると、現在の宇宙の DM 残存量を再現するためには Λ を小さくする必要がある、平均散乱断面積は大きくなる。特に、 $T_{RH} = 100$ GeV、 $m_\chi = 2.1$ TeV のとき Fermi-LAT の精度が 10^5 倍に向上すれば、この模型の DM シグナルを発見できる可能性があることを評価した。

論文審査結果の要旨

本論文は、ヒッグスポータルを持つマヨラナフェルミオン暗黒物質 (Dark Matter: DM) 模型における DM の生成機構と検出実験に関する研究をまとめたものであり、素粒子の標準模型 (Standard Model: SM) を超える物理のエネルギースケール (カットオフスケール Λ) や DM シグナルに関する新しい知見を与えるものである。本論文は 5 章から構成されており、第 1 章では、本研究の背景と目的について述べる。

第 2 章では、SM の物理史を概観し、有効場理論の有用性を明らかにする。さらに、DM の存在が強く支持されている根拠の一例を挙げ、DM の存在意義を示す。その後、SM 粒子セクターと DM 粒子セクターの相互作用を記述するために、次元 5 のヒッグスポータルを持つマヨラナフェルミオン DM 模型を導入する。

第 3 章では、初期宇宙における DM 生成機構のレビューを行う。本模型の散乱断面積が発散しないよう適切な境界条件を設定すると、 Λ が十分大きい場合、DM 粒子は宇宙の熱史において SM 粒子と熱平衡状態になることはない。このとき、DM 粒子は非熱的過程の Freeze-in 機構によってのみ生成される。Freeze-in 機構の数値解析を行い、DM 残存量の観測値を正しく再現するパラメータ領域を評価した。

第 4 章では、DM の直接・間接検出実験について議論する。本模型では、DM-キセノン原子核との相互作用はスピン非依存散乱断面積のみが寄与する。DM シグナルの指向性と観測しやすさを考慮し、光子シグナルのみに注目する。第 3 章で得られたパラメータ領域が DM の直接・間接検出実験によって制限されるかを評価した。

第 5 章では、本博論の総括を行う。本模型の次元 5 の相互作用を用いた DM 生成機構の解析を行い、再加熱温度 (TRH) を固定した場合、カットオフスケール、 Λ や DM 質量、 m_χ に上限値が存在することを明らかにした。特に $T_{RH} = 100 \text{ GeV}$ の場合には、 Λ と m_χ の上限値はそれぞれ 10^{13} GeV 、 2.1 TeV 程度となる。このとき、DM の直接探索における断面積が最大になるが、将来の XENONnT 実験での観測は困難であることが分かった。また、本模型による DM 対消滅から生じる DM シグナルは、本研究特有のものであり、先行研究にはみられない。DM 間接観測実験では、DM 残存量の観測値を正しく再現するパラメータ領域を制限することはできなかった。しかし、 $T_{RH} = 100 \text{ GeV}$ の場合における Λ と m_χ の上限値 10^{13} GeV 、 2.1 TeV のとき、Fermi-LAT の統計データの精度が 10^5 倍向上すれば DM シグナルを発見できる可能性がある。

以上のように本論文は新規性の高い研究成果を多数含んでおり、その学術的インパクトは高い水準にあると判断できる。得られた成果の一部は、申請者を筆頭または責任著者とする 2 編の関連論文として査読付きで Q1 ランクの英字学術誌で発表されており、公聴会における発表と質疑応答でもその内容の新規性と重要性が認められた。以上に鑑みて、申請者の論文は博士の学位授与に値するものと審査委員が全員一致し判定した。