

論文要旨

学位論文題目：ベクトル型媒介粒子模型による暗黒物質探索の研究

氏名：米村 美紀

素粒子標準模型は、電弱スケール $\mathcal{O}(100 \text{ GeV})$ 以下の現象を非常に良く説明する優れた理論として知られる。2012年の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) 実験でのヒッグス粒子の発見により一応の完成をみた標準模型であったが、ニュートリノ質量の起源や18個ものパラメータの存在、暗黒物質の候補粒子の不在など、理論的不備、及び観測結果との不一致をいくつか内包している。これらの問題の中でも、特に暗黒物質に注目する。暗黒物質とは、他の物質との相互作用が極めて弱い、質量を持つ長寿命な物質である。現時点でその正体に関する詳細は不明であるが、暗黒物質の存在を示す観測事実は銀河の回転曲線や宇宙マイクロ波背景放射など、複数報告されている。

本学位論文では、標準模型の最小限の拡張として、必要最小限の新しい粒子と相互作用を構成された Simplified 暗黒物質模型に焦点を当てた。Simplified 模型は暗黒物質と媒介粒子のスピンによって分類される。その中でもスピン1のベクトル型媒介粒子模型に着目して行った研究について報告する。特に、大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) 実験における陽子・光子衝突過程での暗黒物質探索可能性を調べた。

模型および暗黒物質の探索を現象論的に研究解析するにあたって、前方陽子検出器を用いた LHC 実験での陽子・光子衝突過程に注目した。前方検出器とは、従来の検出器から数百メートル離れた距離に設置される、準実光子を放出してエネルギーを失った陽子を検出するものである。前方陽子検出器を用いる利点は、従来の LHC 実験で観測されてきた陽子・陽子衝突実験におけるクォークやグルーオンの反応過程ではなく、光子を始状態とする過程について調べることを可能とすることにある。ATLAS、CMSなどの陽子・陽子衝突点に設置された検出器で行われてきた暗黒物質模型への解析に対して、前方検出器における新たな反応過程で解析を行うことにより、前方検出器の効果や影響を研究することが本研究の動機の一つである。

Simplified 暗黒物質模型におけるスピン1のベクトル型の媒介粒子 Z' とフェルミオン ψ との相互作用ラグランジアンは、

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{Z'} = \bar{\psi} \gamma^\mu (g_\psi^V + g_\psi^A \gamma_5) \psi Z'_\mu,$$

で与えられる。 g_ψ^V と g_ψ^A は、それぞれ ψ と Z' のベクトル型及び軸性ベクトル型相互作用の結合定数であり、 ψ はフェルミオン暗黒物質 χ とクォーク q ($= u, d, c, s, b, t$) を表す。本

模型の独立なパラメータは、暗黒物質質量 m_χ 、媒介粒子質量 $m_{Z'}$ 、結合定数 g_ψ^V と g_ψ^A の4つである。したがって、観測可能な物理量から模型の評価を行うことが比較的容易であり、実験のシグナルを他の理論模型に照らし合わせる際の重要な橋渡しとなる。

本研究では、フェルミオン暗黒物質 χ の生成過程 $pp \rightarrow p\gamma p \rightarrow pj\chi\bar{\chi}X$ (ここで、 j はジェットを、 X は崩壊した陽子の残骸を表す) をスピン1を持つ媒介粒子 Z' がクォーク q や暗黒物質 χ と相互作用する3つのベンチマークシナリオに対してそれぞれ解析した。

(i) ベクトル結合のみを持つ場合 (ベクトル・シナリオ)

$$g_\chi^V = 1.0, g_\chi^A = 0.0, g_q^V = 0.25, g_q^A = 0.0;$$

(ii) 軸性ベクトル結合のみを持つ場合 (軸性ベクトル・シナリオ)

$$g_\chi^V = 0.0, g_\chi^A = 1.0, g_q^V = 0.0, g_q^A = 0.25;$$

(iii) ベクトル結合と軸性ベクトル結合が混合する場合 (混合シナリオ)

$$g_\chi^V = \frac{1}{\sqrt{2}}, g_\chi^A = \frac{1}{\sqrt{2}}, g_q^V = \frac{1}{4\sqrt{2}}, g_q^A = \frac{1}{4\sqrt{2}}.$$

シナリオ (i) から (iii) のそれぞれに対して、重心系エネルギー $\sqrt{s} = 14$ TeV、積分ルミノシティ $L_{\text{int}} = 3000 \text{ fb}^{-1}$ として解析を行い、スピン1媒介粒子 Z' と暗黒物質 χ の質量について探索可能な下限値を調べた。解析の結果、得られた媒介粒子質量 $m_{Z'}$ に対する95% C.L. の下限は約1.4 TeVであり、(i)、(ii)、(iii) の間で下限の違いは高々50 GeV程度であった。ATLASとCMSでのダイジェット不変質量探索からは、 Z' の質量は $m_{Z'} \gtrsim 5$ TeV という下限が与えられており、これは我々の結果よりも強い制限となっている。このように Z' の探索に対しては準光子-陽子衝突過程の利点は見られない。一方、暗黒物質探索においては次に示すように同衝突過程を前方検出器を用いて測定することによる利点が見られる。ベクトルシナリオ (i) と軸性ベクトルシナリオ (ii) における暗黒物質の質量 m_χ の下限は、それぞれ95% C.L.で

ベクトル・シナリオ： $m_{Z'} = 1.2$ TeV で $m_\chi \gtrsim 550$ GeV

軸ベクトル・シナリオ： $m_{Z'} = 1.1$ TeV で $m_\chi \gtrsim 400$ GeV

が得られた。この解析により、ATLAS実験の強いエネルギーを持つジェットを終状態とするイベントから与えられた既存の制限よりも、わずかに強い制限を m_χ に与えることを明らかにした。一方、混合シナリオにおける m_χ の制限については、これまでLHCでは研究さ

れておらず、新しい結果として、媒介粒子の質量が $m_{Z'} = 1.1 \text{ TeV}$ のとき $m_\chi \gtrsim 500 \text{ GeV}$ という制限が得られた。以上のように、本研究によって、準光子-陽子衝突過程を用いたベクトル型媒介粒子による暗黒物質探索の特徴と利点が示された。