

要旨

素粒子標準理論 (Standard Model, 以下、SM と呼ぶ) は重力相互作用以外の 3 つの相互作用の下での素粒子の振る舞いと、質量を与える機構であるヒッグス機構について記述するものである。追検証や独立な実験グループでの確認を伴うような信頼度の高い実験において、これまでに SM との深刻な差異は見つかっていない。一方で SM の枠組みでは説明に限りがあり、解かれていない問題や現象がある。本研究では、それらのうち、ゲージ階層性問題に焦点をあて、その解決策となる余剰次元模型に着目する。さらに暗黒物質を含むように拡張した余剰次元模型にも着目する。

SM において電磁相互作用と弱い相互作用は電弱相互作用として統一的に記述される。ゲージ階層性問題とは、古典論ではこの電弱相互作用のエネルギースケールである TeV スケールと、重力相互作用を特徴付ける 10^{18} GeV のスケールとの間に大きな隔たりがある事、量子論としてはその大きな隔たりを原因として SM の枠組みでヒッグス・ボソンの質量の量子補正を考えた時に不自然な微調整が必要とされる事を指す。余剰次元模型はゲージ階層性問題を余分な空間次元 (余剰次元) の導入により説明する。電弱相互作用に対する重力の弱さは、重力のみが余剰次元方向に伝搬することで説明される。また SM のカットオフスケールが電弱相互作用と同じ TeV スケールとなるため、ヒッグス・ボソンの質量の微調整問題がなくなる。余剰次元模型では余剰次元方向にグラビトンが伝搬することに起因し、質量を持つスピン 2 の粒子であるカルーツァ＝クライン・グラビトン (Kaluza-Klein graviton, 以下、KK グラビトンと呼ぶ) の存在を予言する。

暗黒物質とは、重力相互作用はするが光学的に観測されない物質であり、銀河の回転曲線をはじめとする観測事実からその存在が認められている。暗黒物質の探索はされているものの、未だに発見に至っていない。暗黒物質が未発見である理由の 1 つとして、SM 粒子と暗黒物質が媒介粒子を介してのみ相互作用するため、それらの素粒子反応過程における散乱断面積は抑制されていると考えることができる。暗黒物質の性質として確かなことは重力相互作用をすることであるため、KK グラビトンを暗黒物質とも相互作用すると考えることは自然である。本研究では、KK グラビトンを SM 粒子のみではなく、暗黒物質とも相互作用すると拡張した模型に着目した。この場合、暗黒物質は KK グラビトンを媒介として SM 粒子と相互作用をする。

本学位論文は大きく分けて 2 つの部分から成る。始めに、大型ハドロン衝突型加速

器 (Large Hadron Collider。以下、LHC と呼ぶ) への設置が検討されている前方検出器を用いた、KK グラビトンの探索可能性を調べた。前方検出器は LHC において始状態に光子を含む散乱過程の取り扱いを可能とする。余剰次元模型として大きな余剰次元模型 (Arkani-Hamed-Dimopoulos-Dvali 模型。以下、ADD 模型と呼ぶ) とランドール・サンドラム模型 (Randall-Sundrum 模型。以下、RS 模型と呼ぶ) に注目した。次に RS 模型を暗黒物質模型へと拡張した模型に対し、LHC 実験の結果を用いてモデルパラメータへの制限を求めた。

将来計画の前方検出器を用いた散乱過程として $pp \rightarrow p\gamma p \rightarrow p\gamma q/gX$ に着目した。ここで p は陽子、 γ は光子、 q はクォーク、反クォーク、 g はグルーオン、 X は観測しない粒子群を指す。LHC の重心系エネルギー 14 TeV、積分ルミノシティ 200/fb の場合を想定した。ADD 模型のモデルパラメータであるカットオフ Λ_T に対する下限は 6.3 TeV となった。一方で、CMS 実験の研究グループによる最近 (2017 年 3 月) の解析結果 (LHC の重心系エネルギー 13 TeV、積分ルミノシティ 2.6/fb) では $\Lambda_T = 9.4$ TeV もの強い下限を与えている。RS 模型は 2 つモデルパラメータがあり、KK グラビトンの質量 m_Y とスケールパラメータ Λ である。 $m_Y = 2.0$ (0.5) TeV に対し $\Lambda = 5.2$ (13) TeV の下限となった。

次に、RS 模型における KK グラビトンを媒介とした暗黒物質模型へ着目し、本模型への制限を求めた。RS 模型における KK グラビトンを媒介とした暗黒物質模型へはシグナル、1) KK グラビトンの共鳴状態、2) KK グラビトンが暗黒物質ならびにニュートリノへ崩壊する、横方向消失エネルギー + モノジェット/マルチジェットの 2 種類の散乱過程に注目しモデルパラメータへの制限を調べた。1) の共鳴探索では光子対、レプトン対を崩壊先とした場合の制限が最も強く、重心系エネルギー 8 TeV、13 TeV の LHC における ATLAS 実験、CMS 実験の結果を用いて $m_Y = 100$ GeV~1 TeV では Λ はおよそ 100 TeV 以上、 $m_Y = 2$ TeV では $\Lambda = 54$ TeV、 $m_Y = 4$ (4.5) TeV では $\Lambda = 10$ (6) TeV もの強い下限を得た。2) の横方向消失エネルギー + モノジェット/マルチジェットからのモデルパラメータへの制限はこれらの制限よりも弱いことを明らかにした。

前方検出器を用いた RS 模型のモデルパラメータへの制限は、上述 1) の共鳴状態をシグナルとした場合での制限よりも弱い。本研究で注目した散乱過程では、前方検出器による ADD 模型や RS 模型の KK グラビトン探索は有効ではない。多重衝突事象によるバックグラウンドの増加が 1 つの要因として考えられる。また KK グラビトンを中間状態とした t チャンネル散乱過程に着目したが、TeV スケール質量の KK グラビト

ンを包含する RS 模型においては、KK グラビトンの共鳴状態 (s チャンネル) をシグナルとする方が散乱断面積は大きい。実際、項目 1) の共鳴状態をシグナルとした場合の RS 模型へのモデルパラメータへの制限が強いことを確認した。また、暗黒物質模型へと拡張した RS 模型では、KK グラビトンの光子やレプトンへの相互作用が抑制された場合のみ、それらへ崩壊する共鳴シグナルがなくなるため、横方向消失エネルギー + モノジェット/マルチジェット過程が、KK グラビトンの低質量領域で有効な制限を与える。