

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	高橋 隼也
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 ①・② 項該当		
論文題目			
Analysis of Model with Vector-like Quark through Standard Model Effective Field Theory (標準模型有効理論による Vector-like クォーク模型の解析)			
論文審査担当者			
主 査	准教授	両角 卓也	
審査委員	教 授	稲垣 知宏 (情報メディア教育研究センター)	
審査委員	教 授	小嶋 康史	
審査委員	教 授	志垣 賢太	
〔論文審査の要旨〕			
<p>素粒子の標準模型に対して、様々な動機に基づいた拡張が試みられている。これら標準模型を超える理論の兆候を理論、実験に基づいて探索していくことが標準模型確立後の素粒子研究の一つの流れである。特に、標準模型のエネルギースケールよりも重い粒子をこれらの理論が含む場合、新粒子を探す方法として直接探索の方法と間接探索の方法がある。</p> <p>直接探索の方法は加速器による衝突実験で新粒子を直接作るが、衝突エネルギーが新粒子を生成するために必要な閾値を上回る必要がある。一方、間接探索では標準模型とのずれを探すことになる。このような間接探索は、標準模型を確立する過程で、B 中間子や K 中間子の物理において成果を上げてきた。標準模型を超える理論の効果の間接探索に密接にかかわる場の量子論の方法として有効場の理論と呼ばれる方法がある。有効場の理論を標準理論を超える模型に適応した理論を標準模型有効理論と呼んでいる。間接探索の方法では探索する粒子の質量 (エネルギー) スケールに比べて低いエネルギーでの効果を見るために、対応する有効場の理論には、重い粒子の力学的自由度は、あらわには含まれない。その代わりに重い粒子の効果は積分されて有効相互作用と呼ばれる標準模型には含まれていない新たな相互作用が生じる。</p> <p>有効相互作用は一般に繰り込み不可能な質量次元が高い演算子で書かれるため、その係数は重い粒子の質量の逆べきで抑制される。有効相互作用の係数はウィルソン係数と呼ばれ、拡張された模型ごとに異なる係数を取り、標準模型を超える理論に含まれる新粒子の質量や結合定数の組み合わせで書くことができる。間接探索によって標準模型を超える理論を検証するためには、有効相互作用が予想するような、物理プロセスを実験的に探索しその係数を観測量から決め、理論の予言と比較する必要がある。</p> <p>本論文では標準模型の拡張としてベクターライククォークを含む模型を研究している。ベクターライククォークは強い相互作用の基本表現 3 に属しカラーを持つ点で標準模型のクォークと共通しているが、ヒッグス場の真空期待値に比例しない質量項を持つ点でこれらのクォークと異なっている。またベクターライクという名前が示すとおり、標準模型の相互作用に関して、左右のカイラルクォークが同じ表現に属する点でも異なっている。</p> <p>本論文ではベクターライククォークの質量が標準模型のエネルギースケール</p>			

(100GeV 程度)よりはるかに高いところにあると仮定して、このベクターライククォークの効果を積分することで有効相互作用を導き、その係数をきめている。特にダウン型ベクターライククォークによって引き起こされるフレーバーを変える中性カレントに着目し、この効果が顕著に現れる B 中間子の稀崩壊過程を研究している。

このモデルでは、新たに導入したベクターライククォークによって $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 過程が樹木近似で起きる。また $b \rightarrow s \gamma$ 過程は標準模型と同じ 1 ループの過程で起きる。

上記の過程に密接にかかわる、標準模型有効理論の有効相互作用とその係数をベクターライククォークの理論に基づいて導いている。特に $b \rightarrow s \gamma$ に関する有効相互作用はベクターライククォークの量子効果を 1 ループの近似に基づいて求めており、本論文で、はじめて導かれたものである。

このようにして標準模型有効理論の相互作用と係数を導いたのち、さらに B 中間子のエネルギースケールでの有効理論をトップクォークや W, Z, ヒッグスボゾンの効果を積分することで求めている。得られた有効理論に基づいて、上記の 2 つの B 中間子稀崩壊の分岐比や B 中間子混合を予言し、実験値と比較することによって、ベクターライククォークの質量と他のクォークとの結合乗数を組み合わせた定数に関して制限を導いている。

以上のように本論文はベクターライククォークの効果を、標準模型有効理論の枠組みで研究し、主に B 中間子稀崩壊の分岐比と比べることで、ベクターライククォークの質量やその結合に関して制限を得た。結合乗数の虚部はこのモデルに含まれる新たな CP 対称性の破れの情報も含んでいることから、ここで得られた有効理論を B 中間子の他の過程 ($B \rightarrow K^* l^+ l^-$) や $b \rightarrow s \gamma$ の CP の対称性の破れなどにも適応することで、より詳しくモデルのパラメーターに制限をかけることが可能になる。

本論文の研究結果は Belle II 実験や LHCb 実験など、高精度化し、多様な観測量 (角度分布など) をはかることが可能になっている間接探索による新物理の効果の検証に関して重要な貢献をしたと考えられる。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士 (理学) の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

1. Effective theory analysis for vector-like quark model.
T. Morozumi, Y. Shimizu, S. Takahashi, H. Umeeda
PTEP **2018** (2018) no.4, 043B10
参考論文
2. Sign of CP Violating Phase in Quarks and Leptons.
Y. Shimizu, K. Takagi, S. Takahashi, M. Tanimoto
JHEP **1904** (2019) 074.
3. Revisiting A_4 model for leptons in light of NuFIT 3.2.
S. K. Kang, Y. Shimizu, K. Takagi, S. Takahashi and M. Tanimoto
PTEP **2018** (2018) no.8, 083B01.