

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 若手研究(スタートアップ)
研究期間： 2008 ~ 2009
課題番号： 20840021
研究課題名(和文) LHC実験におけるリトルヒッグス模型の理論的解析
研究課題名(英文) Phenomenological study of Little Higgs model at the Large Hadron Collider.

研究代表者
戸部 和弘 (Kazuhiro Tobe)
名古屋大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：20451510

研究成果の概要(和文)：

素粒子の標準模型は非常に成功を収めた理論であるが、そこで存在が予言されるヒッグス粒子は未だに実験的には発見されていない。さらに標準模型でのヒッグス粒子に関わる部分はさまざまな不満な点がある。リトルヒッグス模型は、そのような不満な点を解決するために考えだされた理論であり、現在の標準模型を超える理論の有力な候補の一つである。本研究では、このリトルヒッグス模型が存在を予言する粒子を世界最高エネルギーを作り出す LHC 実験でどのように発見できるか、そしてそのような粒子の質量や結合定数を LHC 実験でどのように測定できるか、を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

The standard model of elementary particles (SM) has been very successful so far. However, Higgs boson, whose existence is predicted in the SM, has not been discovered yet. Furthermore, there are problems in the Higgs sector of the SM. Little Higgs models have been proposed to solve the problems in the SM, and therefore, they are interesting candidates of physics beyond the SM. In this research, we studied little Higgs model to find out how one can discover particles that are predicted in the little Higgs model, and how one can measure the masses and couplings of these particles at the Large Hadron Collider.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,320,000	396,000	1,716,000
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,520,000	756,000	3,276,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：リトルヒッグス、加速器物理

1. 研究開始当初の背景

CERN での LEP 実験が終わり、素粒子の標準理論が、電弱エネルギースケールの物理を非常によく記述していることが明らかになった一方で、標準理論で予言されるヒッグス粒子ははまだ発見されていない、というのが素粒子物理学の現状である。このような状況で、標準理論のヒッグスセクターに存在する“自然さ”の問題を考慮して、標準理論を超える理論が幾つか提唱されていて、リトルヒッグス模型はそのなかの非常に興味深い模型の一つである。リトルヒッグス模型では標準理論のヒッグス粒子が軽いのは、ヒッグス粒子はもとは南部・ゴールドストーンボソンであるため (QCD におけるパイ中間子のようなもの) という明白な理由があり、このアイデアを如何に検証するか、は素粒子の次なる標準模型を明らかにするために非常に重要な課題である。さらに Large Hadron Collider (LHC) 実験が稼働をはじめたために、リトルヒッグス模型で予言される粒子が、数年のうちに直接発見される可能性もある。そのため、リトルヒッグス模型で存在が予言される粒子の発見は LHC 実験で可能なのか、さらに発見された時にリトルヒッグス模型を他の模型と区別することはできるのか、を明らかにすることが重要になる。

2. 研究の目的

標準模型ヒッグス粒子の質量項への量子補正を考えた時に、特にトップクォークの寄与が非常に大きく、不自然であることが指摘されている (“自然さ”の問題)。リトルヒッグス模型では、トップクォークのパートナーのフェルミオン (以下では重いトップクォークと呼ぶ) を導入し、この大きな量子補正を、collective symmetry breaking の考えを使って、キャンセルさせるのが特徴である。さらに LEP など電弱スケールでの観測量の精密測定がなされ、標準模型以外の粒子によるそれらに対する量子補正に強い制限が付けられている。そのような量子補正を抑制するために、リトルヒッグス模型では新たな離散的対称性、 T -parity を導入することが考えられている。この T -parity が理論に存在すると、もっとも軽い T -parity odd な粒子は安定となるため、暗黒物質の候補となることも非常に興味深いことである。このように T -parity をもつリトルヒッグス模型の特徴である、重いトップクォークの存在、さらに T -parity odd 粒子の存在、を実験によって検証することは、 T -parity のあるリトルヒッグス模型が自然を記述している真の素粒子理論か、を理解する上で非常に重要である。特にスイスの CERN 研究所の陽子-陽子衝突実験で世界最高エ

ネルギーを達成する LHC 実験が稼働を開始し、今まで生成が不可能だったこのようなリトルヒッグス模型で存在が予言される粒子達も、LHC 実験では直接生成が可能になる可能性もある。そのことから、LHC 実験の早い段階でも、これらの粒子の発見は可能なのか、を研究することが重要である。特に、リトルヒッグス模型で“自然さ”の問題を解くために導入される、重いトップクォークの LHC 実験での検証は、真の理論がリトルヒッグス模型なのかを知る上で、極めて重要である。さらに理論に T -parity のような対称性があり、それが暗黒物質の存在を説明しているのかを検証することも極めて重要である。よってこの研究では、重いトップクォークの発見が LHC 実験で可能なのか、 T -parity を持つリトルヒッグス模型で予言される T -parity に対して odd な粒子を発見することは可能なのか、最も軽い T -parity odd の粒子は安定になるが、それが暗黒物質となっているのかを検証できるのか、を研究するのが目的である。

3. 研究の方法

リトルヒッグス模型で、ヒッグス粒子の質量項への大きな輻射補正を抑制する役割を果たす重いトップクォークは強い相互作用をするので、LHC 実験で直接生成される可能性がある。さらにその重いトップクォークの特徴的なことは、標準模型のトップクォークと混合することである。このことは、 R -parity を持つ超対称性理論での超対称性粒子は標準模型粒子とは混合できないという特徴と大きく異なる。そのため、この重いトップクォークは LHC では強い相互作用によって対生成されるばかりでなく、弱い相互作用によってシングル生成されることも可能である。さらに、 T -parity をもつリトルヒッグス模型では、トップクォークやこの重いトップクォークの T -odd パートナーであるフェルミオン (以下では T -odd トップクォークと呼ぶ) が存在する。この T -odd トップクォークは、トップクォーク同様強い相互作用をし、 T -parity に対して odd であるため、LHC 実験では必ず対生成される。よって我々はこの研究で以下のようなトップセクターの粒子の LHC での生成過程を解析した：

$$(1). pp \rightarrow T_+ \bar{T}_+ \rightarrow b\bar{b} W^+ W^-$$

$$(2). pp \rightarrow jets + T_+ \rightarrow jets + bW^+$$

$$(3). pp \rightarrow T_- \bar{T}_- \rightarrow t\bar{t} A_H A_H$$

ここで T_+ , T_- , A_H はそれぞれ重いトップクォーク、 T -odd トップクォーク、光子の T -odd パートナー (以下重い光子と呼ぶ。これは暗

黒物質の候補となる粒子である) である。このような過程を **Calchep** や **Madgraph** といったイベント生成の数値計算プログラムを使って計算し、LHC 実験での発見の可能性、およびこれらの粒子に関係した物理量の測定の可能性を解析した。

4. 研究成果

T-parity をもつトリプルヒッグス模型は、LEP 実験などで得られた精密測定の結果とは矛盾せずに比較的軽い新粒子が可能であることが指摘されている。そのため精密測定と矛盾しないが、比較的軽粒子が軽くなるようなパラメーター領域は、LHC 実験の早い段階でそれらの軽い粒子が発見できる可能性がある。そのため、そのようなパラメーター領域をサンプルポイントとして何点か選び解析した。

上であげた(1)の重いトップクォークの対生成の過程では、この過程の特徴を調べ、標準模型からのバックグラウンドを取り除くカットをかけて、シグナルイベントを取り出せることが分かった。図1はあるサンプルポイントでシグナルを生成させて、重いトップクォークの質量を再構成し、その分布を表したものである。青色で表された標準模型のイベントからのバックグラウンドの分布とシグナルイベントもあわせた実線で表された分布は明らかに区別が出来る、ちょうど重いトップクォークの質量の値(この場合は840GeV)で分布にピークが現れ、この質量が測定できる可能性が明らかになった。

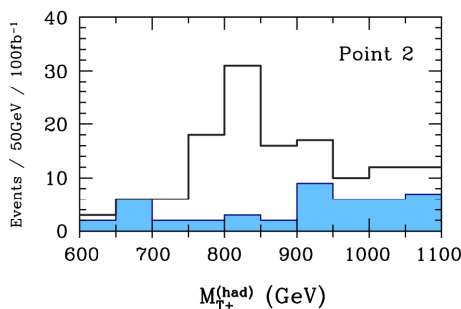


図 1: 重いトップクォークの再構成された不変質量の分布

さらに(2)であげた重いトップクォークのシングル生成でも、このイベントの特徴を理解することによって標準模型からのバックグラウンドのイベントを排除することができ、シグナルを取り出せることが分かった。これによりこのシングル生成の生成率を測ることができ、重いトップクォークの相互作用の強さ ($\sin\beta$) を測定できる可能性が分かった。

(3)の T-odd トップクォークの対生成の過程では終状態に(このモデルで暗黒物質の候補となる)重い光子が生成され、大きなミッシングエネルギーを持つことが特徴的である。この時、この過程でのいわゆる M_{T2} 変数の分布のエンドポイント ($M_{T2}^{(max)}$) が T-odd トップクォークの質量に関係することからこの測定からも、(1)や(2)の過程から得られる情報とは独立な情報を得る事ができる。

このような(1)から(3)の過程の解析から M_{T+} , $\sin\beta$, $M_{T2}^{(max)}$ のような量が測定でき、これによって理論のパラメーターを決めることが可能になる。

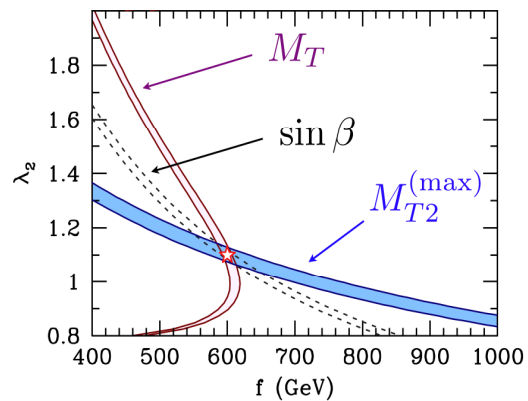


図 2: 3つの測定量から決定される理論のパラメーター f と λ_2 。

図2で示したように、これらの3つの測定量 M_{T+} , $\sin\beta$, $M_{T2}^{(max)}$ は理論のパラメーター f と λ_2 の関数であることから、これらの測定量から理論のパラメーターを決定することができる。図2で示されるように、3つの測定量が示す理論の許される領域が決定されることは、この理論の非自明な検証になるだろう。

さらにこのように理論のパラメーターが決定されると、この理論の暗黒物質候補である重い光子の質量とその相互作用が決定されることになる。これはまた非常に重要なことである。なぜならこの情報を使うことによって我々は、この重い光子の宇宙での熱的残存量 ($\Omega_{A_H} h^2$) を計算することができるからである。

図3で示したように、重い光子の宇宙での熱的残存量はヒッグス粒子を中間状態に媒介した対消滅過程によって決まる。よってその残存量 $\Omega_{A_H} h^2$ は重い光子の質量(言い換えれば f) とヒッグス粒子質量 m_h に依存していて、LHC 実験でそれが決定されれば、重い光子が宇宙の暗黒物質であるのか、を検証することが可能となる。このことは、LHC 実験

がこのモデルが標準模型を超えるモデルであるのかの検証となるばかりではなく、宇宙の未知の主要成分の一つである暗黒物質の起源を明らかにできる可能性があることを示唆している。

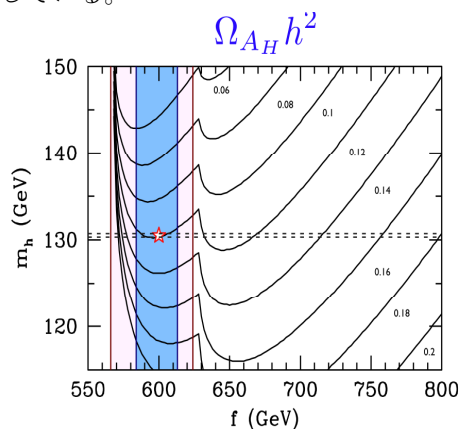


図 3: f とヒッグス粒子質量 (m_h) の関数としての重い光子の残存量 $\Omega_{A_H} h^2$ 、と LHC から決定されるその領域。

このように我々のこの研究から、LHC 実験で T-parity を持つリトルヒッグス模型の非常に重要な検証が成され得ることが明らかになった。

その他にも、この T-parity を持つリトルヒッグス模型には標準模型のクォークの T-parity パートナークォークが存在し、それらは強い相互作用をするので、LHC 実験で対生成される可能性がある。そのような生成過程も解析した。このような過程での標準模型からのバックグラウンドの解析が今後の課題である。さらにリトルヒッグス模型と超対称性模型の大きな違いはヒッグスセクターの構造の違いにある。超対称性模型はヒッグス 2 重項が 2 つ存在する理論であるため、最も軽いヒッグス粒子と標準模型の粒子との相互作用が、標準模型ヒッグス粒子のものとは大きく異なる可能性がある。このため超対称性模型では軽いヒッグス粒子が標準模型のものより軽い可能性がまだ排除されていない。そのことから、超対称性模型で軽いヒッグス粒子が存在する可能性の精細を調べ標準模型やリトル模型との違いを明らかにした。このようにさまざまなモデルで、どの

ような特徴的な違いが存在するのか、を明らかにすることはこれからも重要な課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) 戸部 和弘, “LEP でのヒッグス粒子探索の再検討と軽い超対称性ヒッグス粒子の可能性”, 日本物理学会誌, 第 64 巻第 9 号, 691-695, 2009. (査読無し)

(2) S. Matsumoto, T. Moroi, K. Tobe, “Testing the Littlest Higgs model with T-parity at the Large Hadron Collider”, Physical Review D 78, 055018 (2008) [13 ページ]. (査読有り)

[学会発表] (計 1 件)

(1) 戸部 和弘, “Testing the Littlest Higgs model with T-parity at the Large Hadron Collider”, 実験・理論合同研究会「LHC が切り拓く新しい物理」, 2009 年 4 月 2 日, 東京大学理学部.

[図書] (計 0 件)

特になし

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

特になし

○取得状況 (計 0 件)

特になし

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

戸部 和弘 (Kazuhiro Tobe)

名古屋大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 20451510