

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540246

研究課題名(和文)一般のスピンに対するヘリシティ振幅とLHCにおける標準理論を超える物理現象

研究課題名(英文)Helicity amplitudes for general spin and physics beyond the standard model at LHC

研究代表者

日笠 健一 (Hikasa, Ken-ichi)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：20208739

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ヘリシティ振幅は高エネルギーの素粒子反応の記述に有効である。標準理論には存在しないが標準理論を超える新物理において一般に現れる、スピンが1より大きい粒子までを含んだ、ヘリシティ振幅の新しい評価法を開発した。新物理として特に超対称性を持つ理論に対し、LHC加速器での実験において期待される過程を調べた。現在の実験データを用いて、スカラートップクォークの質量に対する制限を導いた。また、擬ゴールドストーンを含む超対称理論について、将来の高輝度LHCを用いて検証が可能であることを見いだした。

研究成果の概要(英文)：Helicity amplitudes are useful for processes in high energy physics, especially when parity-violating interactions are involved. We have developed a formalism to evaluate helicity amplitudes of processes including particles with spin higher than one in terms of Wigner's d functions. We examine new physics processes at the LHC collider in models including several scenarios in the supersymmetric standard model. Limits on the scalar top quark mass is derived using ATLAS data from LHC in the natural SUSY scenario. We also study models with pseudo-goldstinos and find that future high-luminosity LHC will be able to detect production of neutralinos/charginos decaying to pseudo-goldstinos emitting W, Z, or Higgs bosons.

研究分野：素粒子理論

キーワード：素粒子

1. 研究開始当初の背景

2010年に本格的な稼働を開始したLHC加速器は、従来の加速器実験で到達可能なエネルギーを一桁近く上げるといった画期的な性能を持った加速器であり、これにより素粒子実験のエネルギーフロンティアは20年ぶりに新しい領域に突入した。LHCで調べることのできるエネルギー領域は、弱い相互作用のゲージ対称性の破れにかかわる領域に相当しており、対称性の破れを直接引き起こすヒッグスボソンの発見が期待されるとともに、対称性の破れの起源に関連した新しい物理が見えてくると予想された。この新しい物理の候補としては、超対称理論、余剰次元理論などをはじめとしたさまざまな可能性が考えられ、これらに含まれる新しい素粒子の発見が期待された。

これらの理論の中には、標準理論には含まれない、スピンの大きさが1を超える粒子が存在している。局所的超対称性の自発的な破れに伴って現れる質量を持ったスピン3/2のグラヴィティーノや、余剰次元方向への励起に伴って質量を有するスピン2のグラヴィトンの励起状態などである。

LHC実験において標準理論からは理解できない現象が観測されたとすると、それがどのような新しい物理を起源としているのかを理論的に解析していく必要がある。この際に、新しい素粒子がどのようなスピンを持っているかがわかれば、大きな手がかりとなる。例えば超対称理論では、既知の素粒子とスピンの1/2だけ異なる超対称パートナーが存在しなければならない。一方で余剰次元理論では、スピンが同じであるが質量の大きな素粒子の存在が予想される。

2. 研究の目的

弱い相互作用は、他の相互作用と異なり、空間反転に対するパリティの対称性を持っていない。これは、素粒子のスピンの向きによってその相互作用が異なってくることを意味している。素粒子のスピン状態を表す量として、スピンの運動量方向の成分を用いるのが有用である。これをヘリシティと呼ぶ。反応の初期状態、終状態の素粒子をそれぞれヘリシティ固有状態としたときの振幅がヘリシティ振幅である。一般にこれを用いることにより複雑な過程の計算が容易になるとともに、物理的な意味も明確となる。

本研究では、高いスピンの粒子も含めたヘリシティ振幅の評価法を開発して、LHCにおける新物理のさまざまな過程の理論的分析を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

ヘリシティ振幅の計算法としては、数値計算を用いる方法が高度に発達しているが、ブ

ラックボックスであり物理的な描像は得ることが難しい。終状態が2体までの場合、あるいは2体の過程の組合せとして構築できるような反応の場合、過程の角分布はそれが角運動量のどのような状態で起こるかを直接反映するものとなる。解析的に振幅を求める方法として、3次元球ベクトルを使用すると、角運動量状態を反映したウィグナーのd関数によって振幅を表現することが直接的に可能となる。スピン1までの粒子についてはこの方法をすでに開発しているが、これを高いスピンの粒子に拡張することにより、新物理で期待される粒子を含めた計算を可能とする。

LHCにおいては、初期状態をクォーク、グルオンとしてさまざまな新過程が起こりうる。新物理の有力候補の一つは超対称理論であるが、超対称性の破れの起源としてさまざまな可能性が存在し、それぞれ異なるパターンの粒子スペクトルを導く。LHCで予想される現象はそれに応じて多彩である。それぞれの模型のパラメータ空間の各点に対し、各超対称粒子の質量、相互作用定数のセットが対応する。過去のさまざまな実験からの情報により、模型のパラメータ空間に対して許される領域をあらかじめ決めることができる。これよりLHCにおいて観測しうる過程の断面積等を評価し、どのような過程を探索すれば発見が容易であるかを見極め、あるいは新しく得られた実験結果を用いて模型に対する制限を得、あるいは特定の可能性を否定することが可能となる。

4. 研究成果

(1) 超対称理論や余剰次元理論などの標準模型を超える物理を記述することを目指したモデルには、標準模型には存在しないタイプの素粒子である、スピン3/2およびスピン2を持つ粒子、すなわち具体的にはグラヴィトン、その超対称パートナーであるグラヴィティーノ、また、それらのカウジャークライン励起である多数の質量を持った粒子が含まれる。これらの高スピンの粒子を含むような、2体までの始状態、終状態をもつ過程に対するヘリシティ振幅を解析的に計算するための定式化を行った。このために、高スピン粒子の波動関数の具体的な表示を、既知のスピン1/2およびスピン1の粒子の波動関数から、クレブシューゴールドン係数を用いた積表現によって構成した。この際、3次元空間ベクトルに対して球ベクトルの基底を用いることにより、振幅の計算を効率的に行うことができ、その結果として、微分散乱断面積の持つ角分布を導出する際に、物理的な意味を明確にすることができた。

(2) 素粒子標準理論では事実上禁止され、標準理論を超える新物理によって初めて可能となる過程として、レプトンフレーバーの保

存則を破る過程がある。このような崩壊過程の一つとして、現在実験から非常に強い上限が得られているミューオンの希崩壊モード $\mu \rightarrow e\gamma$ がある。超対称理論には、レプトンフレーバー非保存を導くような相互作用が一般に含まれている。そのうち、ニュートリノの湯川結合からのくりこみ効果によってレプトンフレーバー非保存が生ずるが、この枠組において、 $\mu \rightarrow e\gamma$ を含むいくつかの過程に対して、その期待される分岐比の評価を行った。その際、ニュートリノの混合行列のパラメータが重要なインプットとなる。最近初めて測定がなされたニュートリノ混合角 θ_{13} のデータによって、分岐比の期待される値がどのような制約を受けるかを調べ、新しく MEG 実験から得られた分岐比の上限と比較して、モデルの許されるパラメータ領域を求めた。

(3) LHC における第 3 世代のスカラークォーク探索実験の結果により、いわゆる Natural SUSY と呼ばれる超対称模型に対してどのような制限が課されるかを調べた。この模型のパラメータ空間に対する既存の制限として、ヒッグスボソンの質量、電弱精密測定、B ファクトリーによる希崩壊の情報を用い、これらと矛盾しないパラメータを用いて、LHC におけるスカラートップおよびスカラーボトムクォーク対生成断面積を評価した。LHC の ATLAS 実験において超対称粒子の探索がなされているので、その結果を用いて解析すると、この模型では 600 GeV より軽いスカラートップは排除されることがわかった。

(4) 超対称性は現実世界では破れている必要があるが、その破れの機構は未解明である。超対称性を自発的に破るセクターが複数存在するとすれば、それぞれのセクターにおいて質量 0 の南部・ゴールドストーン・フェルミオン（ゴールドスティーン）が出現する。このうち 1 つはスーパーヒッグス機構によりグラヴィティーノに吸収されるが、それ以外は一般に小さな質量を獲得し、物理的な粒子である擬ゴールドスティーンとして質量スペクトルに現れる。この粒子は標準理論の素粒子と比較的強い相互作用をすることが許される。

このような場合、標準理論の粒子の超対称パートナーであるニュートラリノやチャージノは Z, W ボソンあるいはヒッグスボソンを放出して擬ゴールドスティーンに崩壊できる。この過程が LHC 加速器における実験で検出可能かどうかを調べるため、ニュートラリノやチャージノの直接生成を想定し、モンテカルロ法を用いたシミュレーションを行った。その結果、将来計画されている高輝度の LHC 実験においては、信号背景比が 6% から 25% となり、統計的に十分な信頼度で検出可能となることが見いだされた。

(5) LHC 実験をはじめとする加速器における実験、地下における非加速器実験、宇宙線観測、人工衛星を用いた観測などに関して新たに公表されている素粒子データのうち、ヒッグス粒子の性質の測定、第 2, 第 3 のヒッグス粒子の探索、暗黒物質粒子の探索、ブラックホール生成の探索、他の新粒子探索などの最新の結果の評価を行った。これを従来存在するデータベースに追加し、そのデータを過去のものと比較して現在の時点で最善の数値・誤差を導いた。これを公開し全世界の研究者に提供した。

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 4 件)

- ① K. A. Olive, K. Agashe, C. Amsler, M. Antonelli, J.-F. Arguin, D. M. Asner, H. Baer, H. R. Band, R. M. Barnett, T. Basaglia, C. W. Bauer, J. J. Beatty, V. I. Belousov, J. Beringer, G. Bernardi, S. Bethke, H. Bichsel, O. Biebel, E. Blucher, K. Hikasa *et al.* (206 人中 79 番目), Review of Particle Physics, Chinese Physics C **38**, 090001 (2014), 査読無, doi:10.1088/1674-1137/38/9/090001
- ② C. Han, K. Hikasa, T. Liu, L. Wang, and J. M. Yang, Pseudo-goldstino and electroweak gauginos at the LHC, Journal of High Energy Physics **1407**, 065 (2014), 査読有, doi:10.1007/JHEP07(2014)065
- ③ K. Hikasa, C. Han, K. Hikasa, L. Wu, J. M. Yang, and Y. Zhang, Current experimental bounds on stop mass in natural SUSY, Journal of High Energy Physics **1310**, 216 (2013), 査読有, doi:10.1007/JHEP10(2013)216
- ④ J. Beringer, J.-F. Arguin, R. M. Barnett, K. Copic, O. Dahl, D. E. Groom, C.-J. Lin, J. Lys, H. Murayama, C. G. Wohl, W.-M. Yao, P. A. Zyla, C. Amsler, M. Antonelli, D. M. Asner, H. Baer, K. Hikasa *et al.* (192 人中 78 番目), Review of Particle Physics, Physical Review D **86**, 010001 (2012), 査読無, doi:10.1103/PhysRevD.86.010001

[図書] (計 1 件)

日笠健一, ディラック方程式: 相対論的量子力学と量子場理論 (SGC ライブラリ 105), サイエンス社, 2014, 161

[その他]

<http://www.tuhep.phys.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日笠 健一 (HIKASA, Ken-ichi)
東北大学 大学院理学研究科 教授
研究者番号：20208739

(2) 研究協力者

高橋 史宜 (TAKAHASHI, Fuminobu)
東北大学 大学院理学研究科 准教授
研究者番号：60503878