

シミュレーションによる超対称性粒子探索方法の検討

可児 知之* 瀧原 諒* 吉田 拓生*

Simulation for Supersymmetric Particle Searches

Tomoyuki KANI*, Ryo TAKIHARA* and Takuo YOSHIDA*

(Received January 30, 2018)

In elementary particle physics, supersymmetry (SUSY) is a theory beyond the Standard Model. Supersymmetry would be an attractive solution to some of major concerns such as dark matter, the hierarchy problem, the grand unified theory problem, and so on. However, none of the SUSY particles have been discovered yet, although much experimental effort has been made so far using high-energy particle accelerators in the world. We carried out a theoretical simulation (PYTHIA) to search for SUSY particles by the Large Hadron Collider (LHC) at CERN, and found that there is a possibility of discovering the gluino, i.e. the supersymmetric partner of a gluon, if the gluino mass is below 3.4 TeV.

Key Words : Supersymmetric particles, Simulation, PYTHIA, Standard Model, LHC

1. はじめに

2012年に欧州原子核研究機構 CERN の大型陽子・陽子衝突型加速器 (Large Hadron Collider, 通称 LHC) によってヒッグス粒子が発見された。この発見によって、現在の素粒子の標準理論が予言している粒子は全て発見されたことになる。しかし、標準理論だけでは理解不可能なことが自然界には数多く存在する。力の大統一の問題や宇宙に存在する暗黒物質の正体、ヒッグス粒子における階層性の問題などである。標準理論では解決できないこれらの問題を解決するために、現在最も注目されている理論の一つが“超対称性理論”である。

超対称性理論の超対称性とは、フェルミ粒子とボーズ粒子の入れ替えに対応する対称性のことで、この理論は、標準理論におけるフェルミ粒子には、それと対をなすボーズ粒子が存在し、一方、標準理論のボーズ粒子には、それと対をなすフェルミ粒子が存在するはずだと主張する。

一般に、超対称性理論で新たに予言される粒子は「超対称性粒子」と呼ばれる。現在、超対称性粒子は発見されていないことから、その質量は従来の加速器では生成できないくらい大きいことが分かっているが、その質量の値は分かっていない。超対称性粒子のエネルギースケールが弱・電磁相互作用統一のエネルギースケールの約 10 倍あれば、力の大統一は達成され、超対称性粒子が暗黒物質の候補となり、階層性の問題も解決されることが示されている。このエネルギースケールは現在の LHC で到達できるエネルギースケールの範囲内にあり、今後 LHC で超対称性粒子が発見される可能性は十分にあると言える。

本研究では、CERN の LHC で超対称性粒子を探索するためには、どのような実験を行えばよいか、「PYTHIA プログラム」と呼ばれるシミュレーションプログラムを用いて調べた。特に、超対称性粒子の質量は理論でも完全には予言できないため、それらの質量を様々に仮定した上でシミュレーションを行い、超対称性粒子が標準理論中の普通の粒子と区別できるか、詳しく調べた。

* 大学院工学研究科物理工学専攻

* Applied Physics Course, Graduate School of Engineering

2. 研究の方法

2.1 LHC 実験

本研究では、LHC に注目して超対称性粒子探索のためのシミュレーションを行った。LHC は、最大の衝突エネルギーが 14 TeV を想定して作られた加速器であるが、加速器の性能を表す指標には、衝突エネルギーの他に、ルミノシティと呼ばれる量がある。加速器を用いた素粒子実験では、加速された粒子ビーム同士の衝突によって注目する素粒子反応が起こる単位時間当たりの回数 Y は、その反応の反応断面積 σ [b] に比例する。この時の比例定数がルミノシティ L [$\text{b}^{-1}\text{s}^{-1}$] と呼われ、

$$Y = L \times \sigma \tag{1}$$

で表せる。この式から、同じ反応断面積を持つ素粒子反応でも、ルミノシティが大きいほど反応が起きる回数も多くなることが分かる。ルミノシティを大きくするためには、衝突するビーム中の粒子の数を増やし、かつ、ビームを極力絞って狭い断面積の中に粒子を密集させることが有効となる。また、加速器を用いて一定期間実験を行った際に得られる素粒子反応の合計の数は、(1)式の両辺を時間で積分した式

$$\int Y dt = \sigma \times \int L dt \tag{2}$$

で表される。右辺の $\int L dt$ は、積分ルミノシティ [b^{-1}] と呼ばれる量である。

現在 LHC は、衝突エネルギーが 13 TeV、最大のルミノシティ $1.2 \times 10^{10} \text{b}^{-1}\text{s}^{-1}$ で稼働しており、公表されている今後の LHC の稼働計画 (図 1) では、衝突エネルギーを最大の 14 TeV に上げ、加速器のルミノシティを現在の 10 倍以上にする計画が立てられている^[4]。この計画によって、2037 年頃には積分ルミノシティが 3000fb^{-1} まで到達するといわれている。

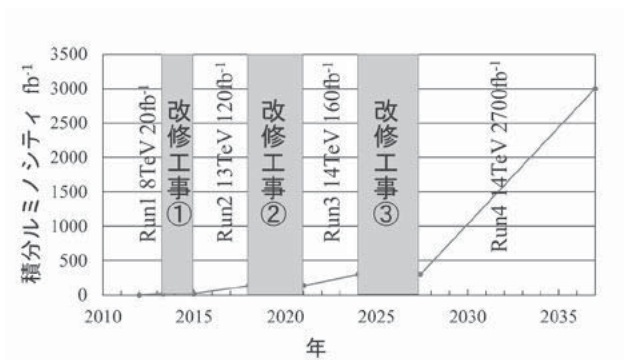


図 1 LHC の稼働計画

本研究では、図 1 のそれぞれの期間 (Run 1~Run 4) での衝突エネルギーと積分ルミノシティで LHC が

実際に稼働するとして、超対称性粒子の探索のシミュレーションを行った。

2.2 超対称性粒子

標準理論は、スピン 0 のヒッグス粒子、スピン 1/2 のクォーク、レプトン、スピン 1 の光子、グルーオン、 W^\pm 粒子、 Z^0 粒子で構成されている (図 2)。また、これらの粒子の中で、クォークとレプトン (q, l) には、電荷の正負のみが異なる反粒子と呼ばれる粒子 (\bar{q}, \bar{l}) が存在する。超対称性粒子とは、標準理論にフェルミ粒子とボーズ粒子の入れ替えに対する対称性を持ち込んだ理論である。そのため、各超対称性粒子は、対になる標準理論の粒子とスピンの 1/2 だけ異なる (図 3)。また、超対称性粒子は、対になる標準理論の粒子と同じ質量領域には見つかっていないことから、超対称性は必ず破れていなければならないとされ、この超対称性の破れによって超対称性粒子の質量は、標準理論の構成粒子より大きくてもよいとされる。しかし、超対称性粒子がどの質量領域に存在するかは、理論的にも分かっていない^{[2],[3]}。

クォーク スピン 1/2	u c t d s b	ゲージ粒子 スピン 1	γ Z^0 W^\pm g
レプトン スピン 1/2	e μ τ ν_e ν_μ ν_τ	ヒッグス粒子 スピン 0	H

図 2 標準理論を構成する粒子

スクォーク スピン 0	\tilde{u} \tilde{c} \tilde{t} \tilde{d} \tilde{s} \tilde{b}	ゲージノ スピン 1/2	$\tilde{\gamma}$ \tilde{Z}^0 \tilde{W}^\pm \tilde{g}
スレプトン スピン 0	\tilde{e} $\tilde{\mu}$ $\tilde{\tau}$ $\tilde{\nu}_e$ $\tilde{\nu}_\mu$ $\tilde{\nu}_\tau$	ヒグシーノ スピン 1/2	\tilde{H}_1^0 \tilde{H}_1^- \tilde{H}_1^+ \tilde{H}_2^0

図 3 超対称性理論を構成する粒子

超対称性理論では、図 3 の中の性質の似通った 4 種類の中性超対称性粒子、すなわち、光子のパートナーであるフォティーノ $\tilde{\gamma}$ 、 Z^0 粒子のパートナーであるジーノ \tilde{Z}^0 、中性のヒッグス粒子のパートナーである 2 種類の中性ヒグシーノ \tilde{H}_1^0 、 \tilde{H}_2^0 を混合させ、4 種類のニュートラリーノ ($\tilde{\chi}_i^0, i = 1, 2, 3, 4$) という粒子の形で表現することもできる。その中の $\tilde{\chi}_1^0$ は、最も質量が小さいため、崩壊する先がなく、安定となる。また、この $\tilde{\chi}_1^0$ は、弱い相互作用と重力相互作用でし

か物質と相互作用しないので、検出器で検出される可能性はほとんどない。

現在、超対称性粒子はまだ一つも発見されておらず、その質量も特定されていないが、これまでの加速器による実験から、超対称性粒子がもし存在するならば、超対称性粒子の中の1つであるグルイーノの質量は、1900 GeV以上となることが分かっている^[4]。

2.3 超対称性粒子の生成・崩壊

LHCのような高エネルギーのハドロン同士を衝突させる実験では、ハドロンの中のクォークやグルーオンが衝突し、散乱するところから衝突反応が始まる。このクォークやグルーオンのような強い相互作用をする粒子が衝突すると、始めに強い相互作用をする粒子が生成される確率が高くなる。超対称性粒子の中では、グルイーノ \tilde{g} やスクォーク \tilde{q} が生成されることになる。これらの粒子が生成される反応過程（プロセス）の例を図4に示す。

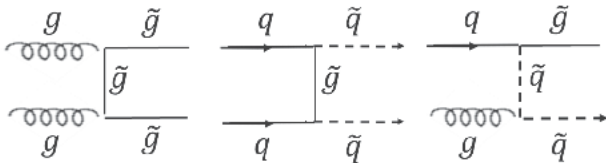


図4 LHCで起こる超対称性粒子生成反応の例

超対称性粒子がより軽い粒子に崩壊する時、その娘粒子には、標準理論の粒子以外に必ず別の超対称性粒子が含まれ、崩壊の途中で超対称性粒子がなくなることはない。娘粒子の中の超対称性粒子もまた同様の崩壊を繰り返し、最終的にこれ以上崩壊しない粒子 $\tilde{\chi}_1^0$ が残る。

グルーオンは、真空中からクォークと反クォーク対($g \rightarrow q, \bar{q}$)を叩き出すのに対して、グルイーノは、クォークと反スクォーク、又は、反クォークとスクォーク($\tilde{g} \rightarrow q, \bar{q}$, $\tilde{g} \rightarrow \bar{q}, q$)に崩壊する。この時、質量がゼロのゲージ粒子であるグルーオンにとって、6種類のクォークのうち比較的軽い u, d, c, s, b クォーク対(≤ 10 GeV)を叩き出すことは容易であるが、重たい t クォーク対(≥ 300 GeV)を叩き出すことは容易ではなく、その確率は低くなる。それに対して、グルイーノは、標準理論のどの粒子よりも質量が大きい(≥ 1900 GeV)ことから、6種類すべてのクォークとスクォーク対に容易に崩壊することができる^[5]。

この特徴から、超対称性粒子が発生している場合と発生していない場合では、クォークの中で最も重

い粒子である t クォークの発生数に違いがあると考え、 t クォークの発生数に着目してシミュレーションを行うことにした。

しかし、 t クォークの同定は、実際の実験では100%の確率でできるわけではなく、 t クォークの様々な崩壊パターンのような娘粒子のうち、どの粒子のどの物理量に注目するか、どのような検出器を使うか、などによって同定できる確率が異なってくる。今回のシミュレーションでは、 t クォークは100%の確率で同定できるものとし、その確率の詳しい検討は、今後の課題とした。

2.4 PYTHIA プログラム

PYTHIA プログラムとは、高エネルギーの粒子と粒子の衝突反応を素粒子の標準理論や超対称性理論などに基づいてシミュレートすることができるプログラムであり、イベント生成プログラムと呼ばれている。PYTHIA プログラムを用いることで実際の衝突実験で起きるような粒子の生成や生成された粒子の崩壊の様子をシミュレートすることができる^[6]。

PYTHIA プログラムでシミュレーションを行うには、衝突する粒子の種類、衝突エネルギーの大きさ、衝突時起きるプロセス(QCDプロセス、ヒッグスプロセス、超対称性プロセスなど)、そのプロセスの中の詳細なプロセス(サブプロセス)、イベント数(発生させる衝突反応の数)などを最初に指定する必要がある。さらに、超対称性粒子を発生させる超対称性プロセスを選択した場合は、各超対称性粒子の質量も入力する必要がある。

本研究では、LHCの実験に沿ってシミュレーションを行うため、衝突させる粒子として陽子を選び、図1で示したLHCの稼働計画に沿って、8 TeVで20 fb⁻¹分のイベント数、13 TeVで120 fb⁻¹分のイベント数、14 TeVで160 fb⁻¹分のイベント数、14 TeVで2700 fb⁻¹分のイベント数の合計3000 fb⁻¹分のイベント数のシミュレーションを行った。

超対称性粒子の探索を効率よく行うためには、衝突反応によって超対称性粒子が生成されたイベントを超対称性粒子が生成されないイベントから容易に区別できるような特徴的な超対称性粒子生成・崩壊過程に注目する必要がある。

2.5 超対称性粒子の質量

前述の通り、PYTHIA プログラムで超対称性プロセスを選択する場合、各超対称性粒子の質量の値を指定する必要がある。現在のところ、超対称性粒子の質量は全く分かっていないが、どれか1つの超対称性粒子の質量を仮定すれば、他の超対称性粒子の

質量は、超対称性理論に基づいて決定することができる。そこで、本研究では、LHC による超対称性粒子を探索する際に重要な役割を果たすグルイーノの質量をはじめに仮定し、その質量の関数としてシミュレーションを行った。グルイーノ以外の超対称性粒子の質量は、超対称性粒子の中の mSUGRA モデル^[3]に従って計算した。下の図 5 は、このようにして計算したニュートラリーノ $\tilde{\chi}_1^0$ の質量を、グルイーノの質量の関数で表した結果である。

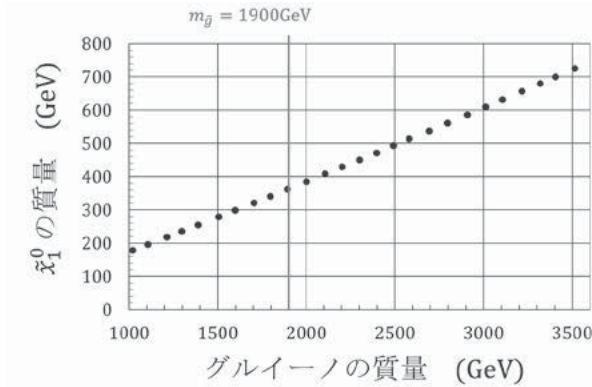


図 5 シミュレーションで使用した超対称性粒子の質量

図 5 からグルイーノの質量とニュートラリーノ $\tilde{\chi}_1^0$ の質量は直線的な関係にあることが分かる。また、図 5 中の実線は過去の実験から分かっているグルイーノの質量下限値 1900 GeV を示している。

2.6 超対称性粒子発生イベント

LHC による陽子・陽子衝突反応では、超対称性粒子が生成されない場合でも、図 6 のように標準理論による反応によって、1 個または 2 個の t クォークが生成される。それに対して、超対称性粒子のグルイーノが 2 個生成される場合には、図 7 のように 2 個のグルイーノの崩壊によって最大 4 個の t クォークが生成される。

このことから、3 個以上の t クォークが発生しているイベントは、標準理論では発生することがないグルイーノ由来の反応であり、超対称性粒子が発生している証拠となるイベントと見なすことができる。

2.6.1 メインイベント

本研究では、 t クォークが 3 個以上発生している時、超対称性粒子が必ず発生していることをシミュレーションによって確かめ、 t クォークの発生数から超対称性粒子の探索が可能かどうか検証を行った。ここで、衝突反応によって生成された 2 個のグルイーノから 3 個以上の t クォークが生成されるイベントをメインイベントと呼ぶことにする。

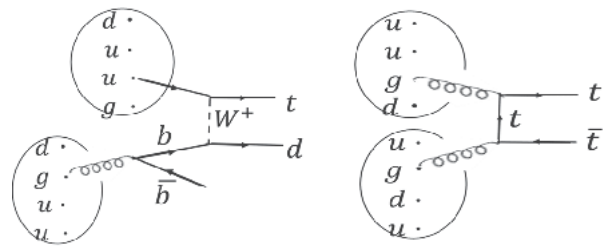


図 6 標準理論による t クォークの生成過程の例

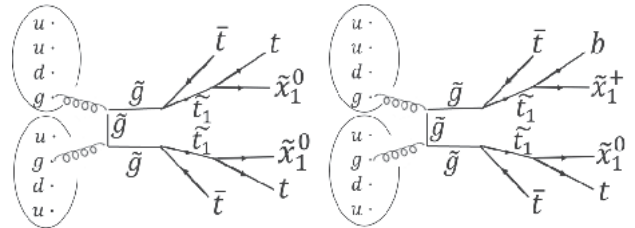


図 7 超対称性理論による t クォークの生成過程の例

メインイベントを PYTHIA プログラムで発生させる時、衝突時に起きるプロセスとして超対称性プロセスを選択し、グルーオン・グルーオンの衝突反応によって 2 個のグルイーノが生成されるサブプロセスとクォーク・反クォークによって 2 個のグルイーノが生成されるサブプロセスを選択した。この反応で発生したイベントの内、3 個以上の t クォークが生成されたイベントがメインイベントである。

このシミュレーションで発生させるイベントの数は、上述のサブプロセスの反応断面積と積分ルミノシティを(2)式に代入することで求めることができる。ただし、超対称性粒子の質量が異なれば、プロセスの反応断面積も異なるので、シミュレーションで使用する質量ごとにイベント数を求めなければならない。例として、グルイーノの質量が 1149 GeV の時の LHC の稼働期間ごとのイベント数を表 1 に示す。

表 1 グルーイーノの質量が 1149 GeV の時に PYTHIA で発生させるサブプロセスのイベント数。

期間	衝突エネルギー (TeV)	反応断面積 ($\times 10^{-12}$ mb)	積分ルミノシティ (fb^{-1})	イベント数
Run 1	8	1.896	20	38
Run 2	13	53.49	120	6419
Run 3	14	78.76	160	12602
Run 4	14	78.76	2700	212652

これだけの数のイベントを PYTHIA で発生させ、その中に 3 個以上の t クォークが生成されるメイン

イベントがどれだけあるか調べた。表 2 は、グルイーノの質量が表 1 と同じ 1149 GeV の時の結果で、表 1 に示した数のイベントを PYTHIA プログラムで発生させ、それを 1 イベント当たり生成される t クォークの数で分類した表である。ここでは、 t クォークが i 個発生するイベントの数を $n_i (i = 0 \sim 4)$ としている。なお、5 個以上の t クォークが生成されるイベントは発生しなかった。

表 2 グルイーノの質量を 1149 GeV としたときの PYTHIA の結果。 n_i は 1 イベント当たり t クォークが i 個発生するイベントの数。

期間	イベント数	n_0	n_1	n_2	n_3	n_4
Run 1	38	15	8	13	2	0
Run 2	6419	1976	2475	1442	460	66
Run 3	12602	3967	4760	2817	925	133
Run 4	212652	64505	81149	49824	14971	2203
Run 1~Run 4	231711	70463	88392	54096	16358	2402

表 2 から、Run 1~Run 4 の期間で発生すると予測されるメインイベントの数は、Run 1~Run 4 の期間の n_3 と n_4 を合計して、18760 イベントとなる。

このようなシミュレーションを、図 5 に示されたグルイーノの各質量に対して行えば、超対称性粒子の質量におけるメインイベントの発生数を予測することができる。

2.6.2 バックグラウンドイベント

次に、超対称性粒子が発生しない標準理論の反応によってメインイベントと同じように t クォークが 3 個以上発生するイベントをバックグラウンドイベントと呼ぶことにする。

このバックグラウンドイベントを PYTHIA プログラムで発生させる際には、標準理論で t クォークが生成されるプロセス(トッププロセス)を選択した。イベント数はメインイベントのシミュレーションと同様に、トッププロセスの反応断面積と積分ルミノシティから求めることができる。下の表 3 は LHC の稼働期間ごとのトッププロセスのイベント数である。

表 3 PYTHIA で発生させるトッププロセスのイベント数。

期間	衝突エネルギー (TeV)	反応断面積 ($\times 10^{-12}$ mb)	積分ルミノシティ (fb^{-1})	イベント数 ($\times 10^7$)
Run 1	8	2.376	20	1.399
Run 2	13	69.95	120	8.394
Run 3	14	83.81	160	13.41
Run 4	14	83.81	2700	226.3

ここで、表 3 の Run 4 の期間はイベント数が多く、現在の計算機の環境 (CPU : Intel® Core™ i7-6700K, 4.00GHz, OS : Scientific Linux CERN 6) では、シミュレーションの実行に 1 年以上の月日を要するので、バックグラウンドイベントのシミュレーションは、Run 1~Run 3 までを対象として行った。

このシミュレーションで、あるグルイーノの質量に対してメインイベントだけが発生し、バックグラウンドイベントが発生していない場合、実際の実験でもシミュレーションの通りにメインイベントが観測されれば、超対称性粒子の存在が確認できたことになり、逆に、シミュレーションのようなメインイベントが観測されなかったときは、元々そのような質量の超対称性粒子は存在しないことになる。

3. シミュレーションの結果

3.1 バックグラウンドイベントの有無

表 3 の Run 1~Run 3 の期間に対してバックグラウンドイベントの有無を調べるシミュレーションを行ったところ、下の表 4 のような結果になった。ここでも 1 イベント当たり t クォークが i 個発生するイベント数を n_i としている。このシミュレーションでは、はじめから PYTHIA プログラムの中で 1 個以上の t クォークが生成されるプロセスのみを選択しているため、 n_0 の値は 0 である。

表 4 PYTHIA によるバックグラウンドイベントのシミュレーション結果。 n_i は 1 イベント当たり t クォークが i 個発生するイベントの数。

期間	イベント数 ($\times 10^7$)	n_0	n_1	n_2	n_3	n_4
Run 1	1.399	0	3928727	10061273	0	0
Run 2	8.394	0	19076204	64863796	0	0
Run 3	134.096	0	29526610	104569390	0	0

この表から、1 つのイベント中で t クォークが 3 個以上発生するイベントは発生していないことが分かる。よって、バックグラウンドイベントは Run 1~Run 3 までの期間では発生していないことが分かる。

3.2 メインイベントの発生数

PYTHIA プログラムを用いて 2.6.1 節で述べた方法でメインイベントの数を調べたところ、次の図 8 のような結果になった。この図はメインイベントの発生数をグルイーノの質量の関数でプロットしたものである。

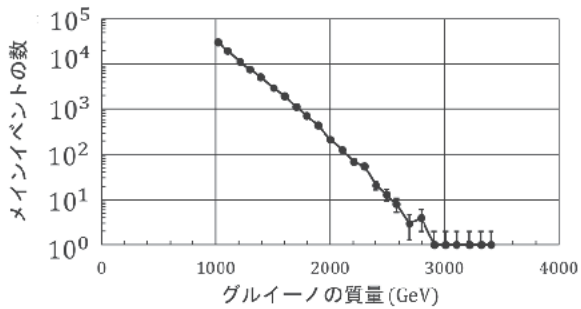


図 8 PYTHIA で求めたメインイベントの発生数

このシミュレーションではグルイーノの質量が 3500 GeV 以上の時には、メインイベントは発生しなかった。図 8 より、グルイーノの質量が 2100 GeV より小さい時、メインイベントの数は 100 イベント以上発生し、グルイーノの質量が 2500 GeV より小さい時、メインイベントの数は 10 イベント以上発生していることが分かる。

4. まとめ

本研究の目的は、CERN の LHC で計画されている積分ルミノシティ 3000 fb⁻¹分の陽子・陽子衝突実験で超対称性粒子は探索できるのか、できるとするならば、どのような方法で、どのような質量の領域を探索できるのか、PYTHIA プログラムを用いて調べることであった。その結果、1 イベント当たり 3 個以上の *t* クォークが生成されることを要求することで、バックグラウンドとなるイベントを排除することができ、超対称性粒子発生イベントを効率良く探索できることが分かった。生成された *t* クォークを 100% 同定できると仮定すると、この方法で質量 3.4 TeV までのグルイーノを探索できる可能性があることが分かった。

本研究では、陽子・陽子衝突で生成される 1 イベント当たりの *t* クォークの数を見ることで超対称性粒子の探索が可能になることを示したが、*t* クォークはすぐに崩壊するので、実際の実験では、*t* クォークの娘粒子の物理量を検出器で測定することによって、*t* クォークを同定しなければならない。今後の課題は、超対称性粒子発生イベント（メインイベント）で生成された 3 個以上の *t* クォークを全て十分高い確率で検出するにはどのようにすればよいかを探るために、実際の実験装置まで含めたより現実的なシミュレーションを行うことである。

参考文献

[1] The HL-LHC Project, The High Luminosity Large

Hadron Collider,

<http://hilumilhc.web.cern.ch/>.

[2] 小林富雄：超対称性粒子とは何か，講談社，p.130 (2016).

[3] A Supersymmetry Primer,

<https://arxiv.org/pdf/hep-ph/9709356v7.pdf>.

[4] Nuclear and Particle Physics Proceedings 267-269 (2015) 277-286.

[5] 堺井義秀，山田憲和，野尻美保子：KEK 物理学シリーズ，素粒子物理学，共立出版，p.169 (2012).

[6] PYTHIA8 online manual,

<http://home.thep.lu.se/~torbjorn/pythia82html/Welcome.html>.