

現代の素粒子論における重要な課題の一つに超対称性理論の予言する粒子（超対称性粒子）の実験的検証がある。本論文の最も重要な結果は ILC の $\sqrt{s}=250$ GeV において、その実験的検証が間接的にはあるが可能であるという結果である。

標準模型を超える物理の中で、階層性問題に対する解決になり、暗黒物質残存量を説明でき、低エネルギー実験の標準模型予言値からのずれを説明できるモデルとして注目されているのが超対称性理論である。このような様々な実験及び観測事実を説明するためには、超対称モデルの理論が持つ数値パラメーターは限られてくる。このような現状を踏まえたうえで、数値パラメーターを実際を選択した。

LHC においては超対称性粒子の直接生成が行われ 1TeV 領域までその可能性が排除されつつある。一方 ILC は衝突エネルギーが限られているため、重い超対称粒子の直接生成は不可能である。このために本研究では ILC における既知粒子の生成過程における間接検証の可能性に注目した。間接検証の上では特定の粒子の効果が特に強く見えてくるのが予想されるので、その粒子の質量を段階的に変えたパラメータ設定を行った。この結果として ILC の $\sqrt{s}=250$ GeV での Higgs 粒子の Z との随伴生成において、パラメータセット間の差が検証可能であることが示された。

具体的には、本研究では ILC における Z 粒子を伴った Higgs 粒子の随伴生成の他、fermion 粒子対生成、neutrino 対を伴った Higgs 粒子の単独生成の、1-loop level での超対称性粒子のシグナルの大きさも統計的に検証した。パラメーターを同じにとることにより先行研究との一致も確認されている。

特に Higgs 粒子の単独生成においては W boson の分布関数を用いた近似、LHeC の電子、陽子散乱においては、陽子の内部構造に関する実験値をもとに構成された分布関数である Parton Distribution Function(PDF) を用いた近似を行った。これらの計算は全て GRACE という散乱断面積の自動計算ソフトウェアを用いて計算した。世界には 1-loop level で断面積が計算できるソフトウェアはいくつかある。GRACE は繰り込みの方法として、on-shell スキームを用いているほか、非線形ゲージを導入して強力なシステムチェックができる。

本論文の構成は、

序章では Higgs 粒子の発見により標準模型には矛盾がないことが理解されたが、いくつかの問題点が指摘される事を述べ、これを解決するモデルとして超対称性理論があることを述べる。具体的にはここでは階層性問題について述べられ、電弱対称性が破れるスケールと Plank スケールの間の大きな隔たりを理論に含まれる数値パラメーターを極端に微調整することによって相殺することにより、Higgs 粒子の観測質量が説明される「不自然さ」に対して超対称性理論が一つの解決を与えることについて述べられる。

第 2 章では標準模型の理論的背景について Abelian $U(1)$ gauge 理論における Higgs Mechanism を例に挙げて説明する。その上で階層性問題がどのように問題なのかについて述べる。また超対称性理論の理論的側面について、超対称性粒子の質量がどう記述されるかを例に挙げて述べる。第 2 章の後半では ILC と LHeC の実験の概要が簡潔に述べられる。

第3章では GRACE を用いて具体的に 1-loop 効果を検証するためにどのような量を定義したのか、および、GRACE の用いている繰り込みの手法とゲージ固定について簡潔に示される。GRACE では非線形ゲージと呼ばれる、以下のようなゲージを用いることにより強力なシステムチェックができる。

$$\mathcal{L}_{\text{MSSM}} = \mathcal{L}_{\text{SUSY}} + \mathcal{L}_{\text{soft}} + \mathcal{L}_{\text{gf}} \quad (0.1)$$

$$\mathcal{L}_{\text{gf}} = -\frac{1}{\xi_W} |F_W^+|^2 + \frac{1}{\xi_Z} |F_Z|^2 + \frac{1}{\xi_\gamma} |F_\gamma|^2 \quad (0.2)$$

$$F_W^\pm = (\partial_\mu \pm ie\tilde{\alpha}A_\mu igc_W\tilde{\beta}Z_\mu)W^{\pm\mu} \pm i\xi_W\frac{g}{2}(v + \tilde{\delta}_H H^0 + \delta_h h^0 \pm i\tilde{\kappa}G^0)G^\pm$$

$$F_Z = \partial_\mu Z^\mu + \xi_Z\frac{g_Z}{2}(v + \epsilon_H H^0 \pm \epsilon_h h^0)G^0$$

$$F_\gamma = \partial_\mu A^\mu \quad (0.3)$$

$$(0.4)$$

この後各プロセスの断面積の結果の前に、計算結果が常にこの中の NLG パラメーター $\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{\delta}_h, \tilde{\delta}_H, \tilde{\epsilon}_H, \tilde{\epsilon}_H, \tilde{\kappa}$ へ依存しているかどうかのチェックが示される。また、GRACE では具体的に on-shell スキームが用いられていることおよび、その中に新たに定義されている繰り込み定数についての言及がある。そして最後に 1-loop 効果の検証に有用な量は、どのように定義されるかについて述べられる。

第4章ではパラメータ設定の際に実際に考慮に入れたことの詳細が述べられる。ここで特筆すべきは LHC の SUSY 粒子の直接探索結果で、

$$m_{\tilde{\chi}_1^\pm}, m_{\tilde{\chi}_2^0}, m_{\tilde{t}} \gtrsim \mathcal{O}(100) \text{ GeV} \quad (0.5)$$

である。ここで、ILC の初期計画の重心系エネルギーに注目すると、LSP として neutralino を仮定した時、ILC の重心系エネルギーよりも重い場合直接生成は難しい。生成できたとしてもこの粒子は signal としては missing(つまり検出器にかからない)である。という事は、より重い超対称粒子一般を ILC で直接生成することは難しく、ILC の間接検証が有用である事が示される。

第5章では実際の 1-loop 断面積の計算結果が示される。また 1-loop 補正の大きさが素朴な統計誤差と比較され、MSSM の効果が検証可能かどうかを示される。検証結果として注目されるべき結果は ILC の Higgs 粒子の Z 粒子との随伴生成の際に、パラメーターセット間の相違が見えてくる可能性が示されたことであり、標準模型の quark の超対称パートナー「squark」の質量の違いを検証できる可能性が示された。その部分の結果を図 1 に示した。左の図が $e^+e^- \rightarrow Zh$ の過程における微分断面積であり、Z 粒子の生成角に対する 1-loop 断面積の分布である。右の図が、補正比 δ_{susy} の分布で、set 間の差が統計誤

差の大きさを上回っていることが解る。また $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ の exact な断面積を計算するにあたり、有効 Vector boson 近似が tree level で有効であることを以下の図2に示した。積分方法を変えて計算されたもので、少なくとも台形公式を用いれば十分な精度が実現できることを示している。

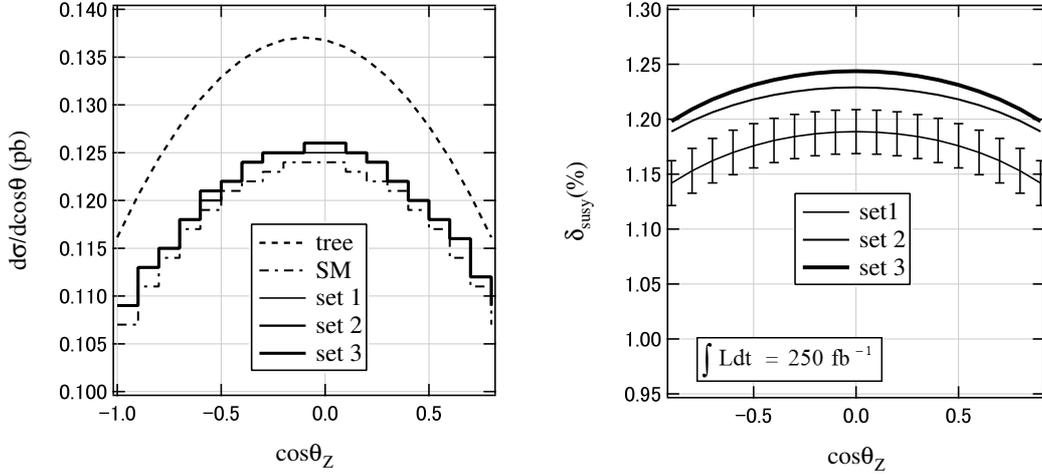


図 1: $e^-e^+ \rightarrow Zh$ の $\sqrt{s}=250$ GeV における断面積および MSSM の 1-loop 補正比 δ_{SUSY} 。

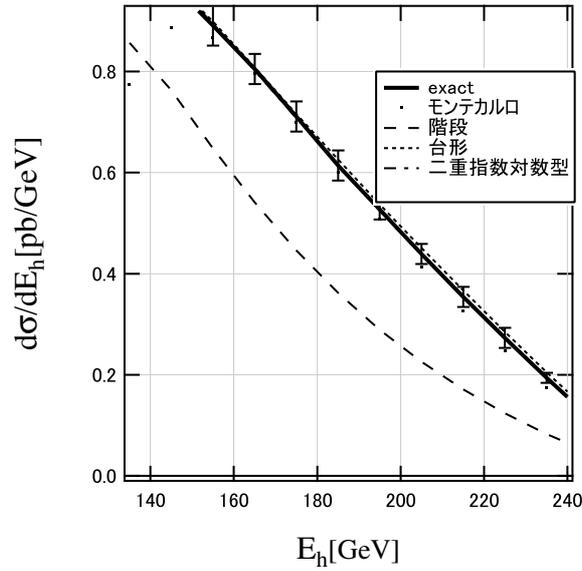


図 2: EWA を用いた $e^-e^+ \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ の tree level の断面積の計算における、積分手法の比較。exact は近似を用いない場合の断面積。

これを用いて、実際に 1-loop の断面積を計算した結果を以下の図 3 に示す。右の図から、MSSM の効果自体は検証可能であるものの。セット間の区別は難しいことが示されている。

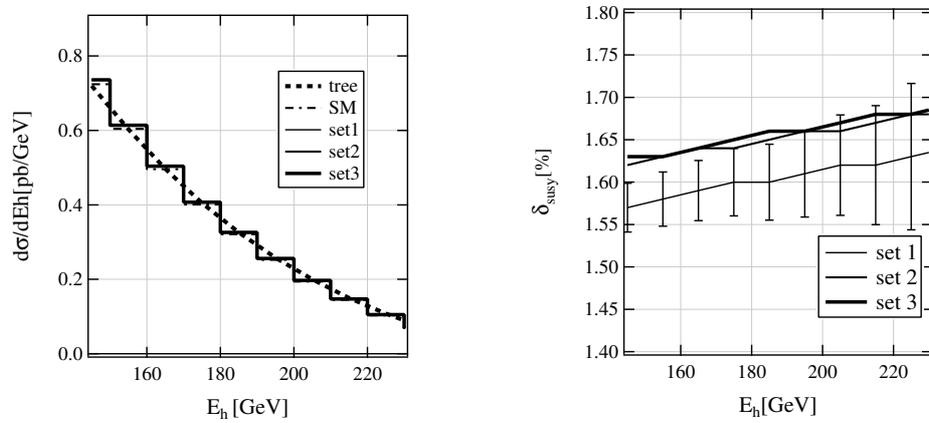


図 3: $e^-e^+ \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ の $\sqrt{s}=500$ GeV における断面積および補正比 δ_{SUSY} 。