

論文解説

千葉商科大学 神保 雅人

本稿では、文献[1]及び[2]で扱っているトピックのうち、衝突エネルギーが 250GeV の電子・陽電子衝突で、 Z ボソンとヒッグス粒子とが生成する反応 ($e^-e^+ \rightarrow Zh$) に関して解説します。これは ILC 計画で注目されている生成反応です。

1. はじめに

素粒子の相互作用は量子場の理論で記述され、その生成反応は確率事象となります。或る素粒子の生成反応がどれだけの頻度で起こるかの確率は、関係する素粒子の質量と相互作用の強さ及び衝突エネルギーで決まりますが、量子場の理論からその確率を効率良く計算するための手法として、ファインマンダイアグラムというものをを用いる処方箋が確立しています。

ファインマンダイアグラムを用いる計算では、ベースとなる最も大きな寄与を与えるものが、関係する粒子を線で繋いだ図形から得られるもので、この場合のファインマンダイアグラムはその形から、トゥリー (tree: 木) ダイアグラムと呼ばれます (図 1)。このベースの補正として位置づけられるものが、トゥリーダイアグラムの 2 点を線で繋いだ図形から得られるもので、この場合のファインマンダイアグラムはその形から、ループ (loop: 閉線) ダイアグラムと呼ばれます (図 2)。

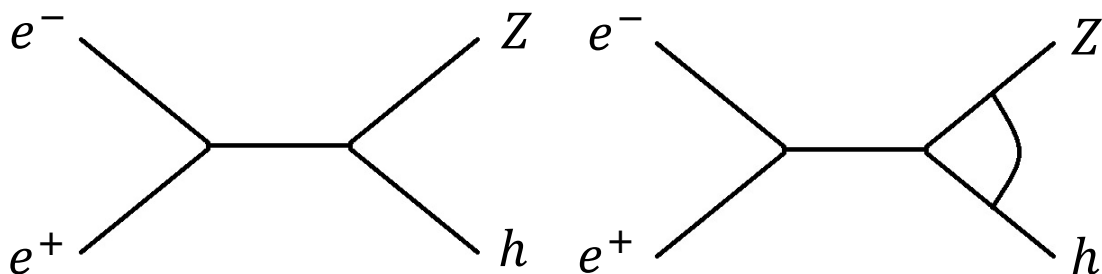


図 1. トゥリーダイアグラム

図 2. ループダイアグラム

ループダイアグラムはトゥリーダイアグラムのどの 2 点を結ぶかで複数の形状があり、また、ループの中に様々な粒子を当てはめられるので、数多く存在します。我々の研究グループでは、ファインマンダイアグラムから得られる寄与を漏らさず計算する為に、GRACE システムという自動計算ソフトウェアを開発して利用しています。GRACE システムは用途別に幾つかの種類がありますが、最小超対称標準模型 (MSSM: Minimal Supersymmetric Standard Model) の相互作用を一通り扱え、トゥリーダイアグラムとループダイアグラムとに対応したものを GRACE/SUSY-loop と名付けています。

文献[1]及び[2]では、ループダイアグラムのループの箇所に超対称性粒子が関係する場合の補正と、ループの箇所に標準模型の粒子しか関係しない場合の補正とを比較して、両者の差が統計的な誤差に比べて有意な大きさかどうかを検討しています。

2. 衝突エネルギー250GeV の意義

$e^-e^+ \rightarrow Zh$ の生成反応が起こるのは、衝突エネルギーが Z ボソンの質量 91GeV とヒッグス粒子の質量 125GeV との合計値 216GeV を上回るときですが、衝突エネルギーが 250GeV の付近で生成確率（専門用語では生成断面積）へのトゥリーダイアグラムからの寄与が最大になります（図3）。ここで、 \sqrt{s} は衝突エネルギーを表します。

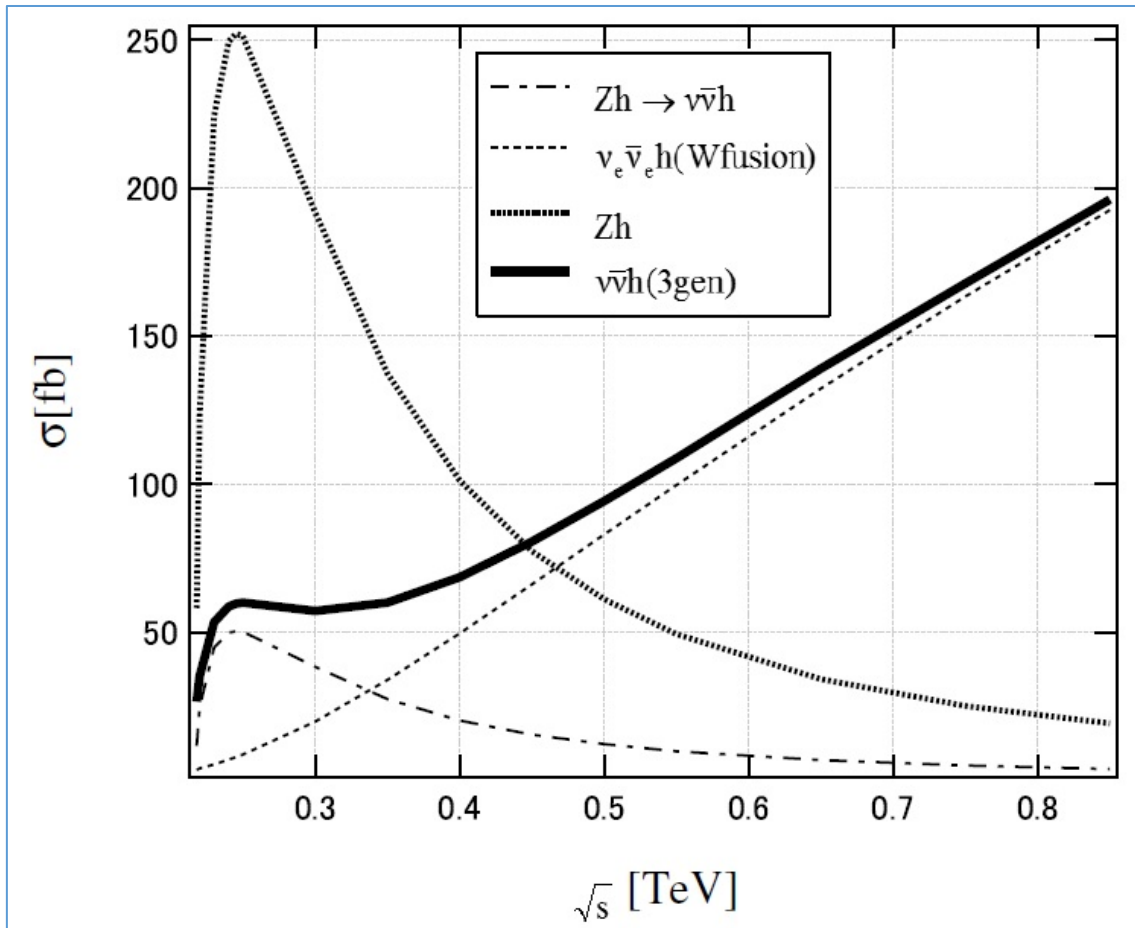


図3. 電子・陽電子衝突によるヒッグス粒子生成反応が起こる確率の \sqrt{s} 依存性
(出典：文献[1] Figure 1 より引用)

Z ボソンやヒッグス粒子は生成された後に崩壊して他の複数の粒子に変わりますが、電子や陽電子は消滅して余分な粒子を生じないので、非常に観測し易いという特徴があります。LHCでのヒッグス粒子探索は、ヒッグス粒子がごく稀にしか生成されない上に、余分な粒子を沢山伴うので、困難を極めました。ILCでは衝突エネルギーが 250GeV のとき、頻繁にヒッグス粒子が生成されて、観測される粒子群が見易いということが、ヒッグスファクトリーと呼ばれる所以です。

LHCの実験結果からは、衝突エネルギーが 250GeV では、直接生成される様な軽い超対称性粒子は存在しないことが判ってきました。しかし、直接探索は出来なくても、ループダイアグラムからの寄与による間接探索を行うという道が残されています。その場合、トゥリーダイアグラムには超対称性粒子が関係しない生成反応なので、生成確率へのトゥリーダ

イアグラムからの寄与が大きいことが有用となります。その理由は、素粒子の生成反応が確率事象なので、確率が大きければ、一定期間加速器を稼働させたときの粒子の生成数が大きく、統計誤差が小さくなるからです。

3. 計算結果

超対称性を採り入れた模型の中でも MSSM は標準模型を最小限拡張したものですが、それでも理論的には決定出来ないパラメータがあります。我々の計算では、勝手なパラメータをベンチマークポイントとして設けるのではなく、LHC で測定されたヒッグス粒子の質量や超対称性粒子の質量の下限、ダークマターの残存密度等から得られる制限を用いた膨大なパラメータスキャンに基づいて幾つかのパラメータセットについて検討を行っています。

式(1)は MSSM のループダイアグラムからの補正と標準模型 (SM: Standard Model) のループダイアグラムからの補正との差をトゥリーダイアグラムからの寄与で割った量で、この値が統計誤差による値よりも大きければ、超対称性粒子による効果が表れていると言えるものです。

$$\delta_{\text{susy}} \equiv \frac{d\sigma_{\text{1loop}}^{\text{MSSM}} - d\sigma_{\text{1loop}}^{\text{SM}}}{d\sigma_{\text{tree}}} \quad (1)$$

図 4 は、衝突エネルギーが 250GeV のときの $e^-e^+ \rightarrow Zh$ の生成反応に対して、 Z ボソンが生じる角度 (電子のビーム方向から測る) 毎に δ_{susy} を計算した結果です。set1, set2, set3 とあるのは上述の方法で選んだ 3 種類のパラメータセットのことですが、何れも δ_{susy} は 1% を上回っており、ILC の設計値にある分、この生成反応のデータを貯めれば、統計誤差はこの差よりも小さくなり、充分観測に掛かることが判ります。

4. おわりに

我々の論文で示した研究結果からは、衝突エネルギーが 250GeV の電子・陽電子衝突で、 Z ボソンとヒッグス粒子とが生成する反応 ($e^-e^+ \rightarrow Zh$) に関して、実験データを充分貯めることで、この衝突エネルギーでは直接生成出来ない、重い超対称性粒子が存在する場合には、標準模型から得られるループダイアグラムによる補正とは異なる実験結果が得られる という結論に達しました。

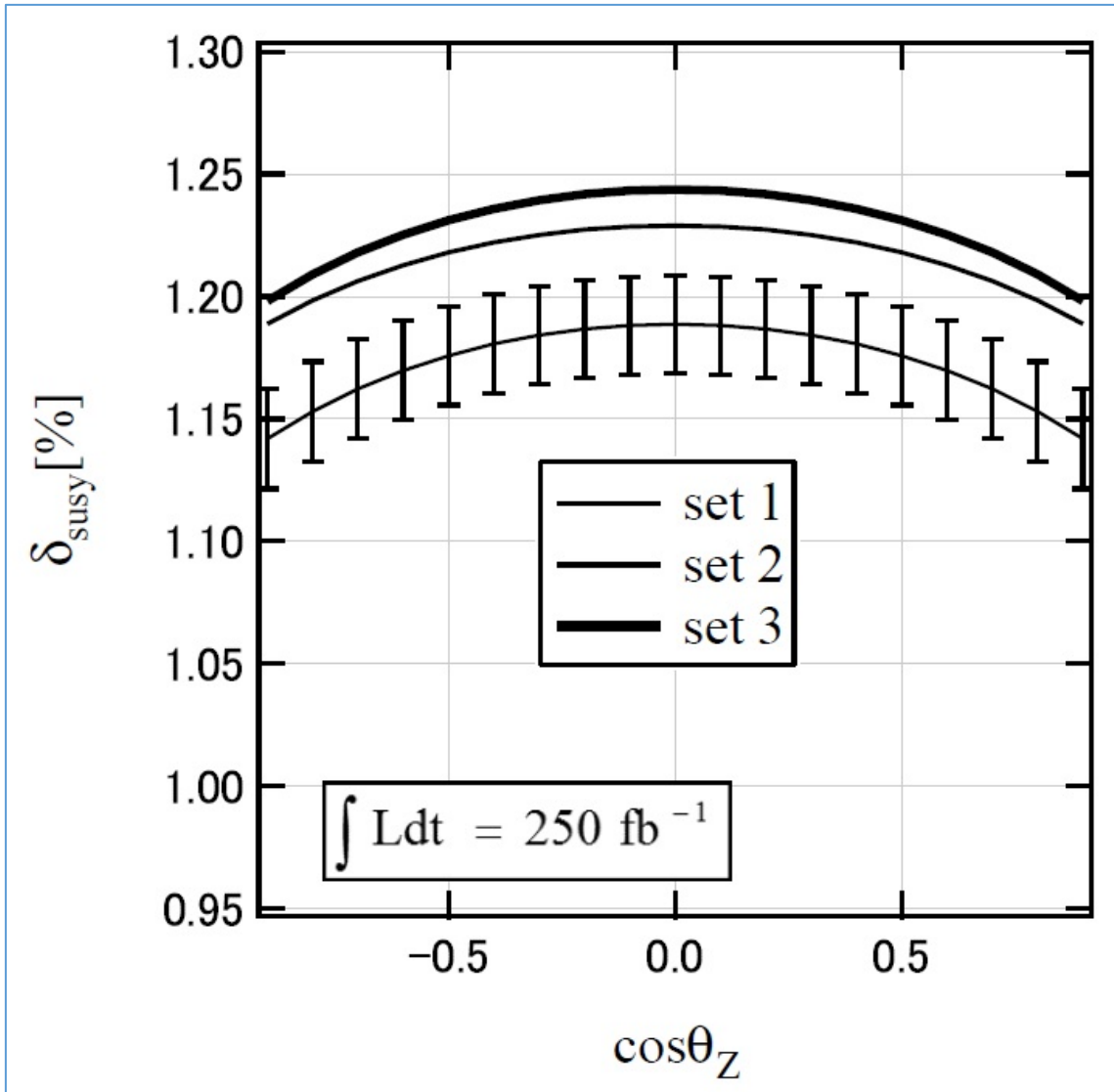


図 4. 衝突エネルギーが 250GeV のときの $e^-e^+ \rightarrow Zh$ に於ける δ_{susy} の Z の角分布
 (出典：文献[2] Figure 4 より引用)

文献

- [1] Yusaku Kouda, Tadashi Kon, Masato Jimbo, Yoshimasa Kurihara, Tadashi Ishikawa, Kiyoshi Kato and Masaaki Kuroda, "1-loop effects of MSSM particles in Higgs productions at the ILC", Journal of Physics: Conference Series 920 (2017) 012010.
http://inspirehep.net/record/1636001/files/10.1088_1742-6596_920_1_012010.pdf
- [2] Yusaku Kouda, Tadashi Kon, Yoshimasa Kurihara, Tadashi Ishikawa, Masato Jimbo, Kiyoshi Kato and Masaaki Kuroda, "One-loop effects of Minimal Supersymmetric Standard Model particles in $e^-e^+ \rightarrow Zh$ and $e^-e^+ \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ at the International Linear Collider", Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2018, Issue 8, 1 August 2018, 083B03. <https://doi.org/10.1093/ptep/pty084>