

Linear Collider —to—> Relic Density

— as My First Approach to High-Energy Physics and Cosmology —

岩本 祥*

Dept. of Physics, the University of Tokyo
Senior Grade (ID: 61508)

Feb. 12, 2008

☆ 共同実験者：本橋 隼人 ☆

Abstract

What is dark matter? — This question remains a mystery. However, We have some candidates, and most hopeful one is 'lightest supersymmetric particle (LSP).' If dark matter consists only of LSP, we can estimate its density (relic density) through some experiments at future linear colliders.

The estimation is already done by Feng, J. L. et al., without considering some effects of detectors. On this paper, we included the detector effects, and tried to calculate "more realistic" uncertainty of relic density.

暗黒物質の正体が何であるかについては、これまでに様々な議論が為されてきた。その有力な候補の1つに、「最も軽い超対称粒子」がある。もし暗黒物質の全てがこれによって出来ているならば、次世代の線型加速器での素粒子実験によって、暗黒物質の密度を推定することができる。

その推定は、既に Feng らにより行われている。彼らの推定は測定器の影響を考慮しない形で行われたものであった。我々は今回、更に測定器の影響を考慮に入れることによって、実際の実験によって得られる「より現実的な」不確かさを求めようと試みた。

* Sho IWAMOTO / みしよ

Contents

Chapter 1	Introduction	3
1.1	Preface	3
1.2	Introduction	4
1.3	What is Out World Made of?	4
Chapter 2	Theory	11
2.1	Dark Matter and Super Symmetry	11
2.2	Scattering Simulation	12
Chapter 3	Method	15
3.1	Mass Determination	15
3.2	Accelerator Simulation	15
3.3	Mass Uncertainty	17
3.4	SUSY Parameters and Relic Density	18
Chapter 4	Result	21
4.1	Mass Determination	21
4.2	Accelerator Simulation	22
4.3	Mass Dependency	27
4.4	SUSY Parameter Expectation	31
Chapter 5	Conclusion	39
5.1	Mass Spectrum	39
5.2	Accelerator Simulation	39
5.3	Mass Uncertainty	40
5.4	SUSY Parameters and Relic Density	41
5.5	Then What?	42
Appendix A	Acknowledgments	45
Appendix B	Bibliography	47

Chapter 1

Introduction

SECTION 1.1 PREFACE

この文章は、私（岩本 祥 / みしょ^{*1}）が、東京大学理学部物理学科の 4 年次特別実験として行った実験の結果報告である。

通常であればこのような実験報告書は、普通の term paper の様式、或いは普通の投稿論文の様式で書くのであろうが、今回は「一般の人にも理解できるような論文」という形で執筆した。

これは特に、素粒子物理学の「再・象牙の塔」化を危惧しているためである。私はこれから本学の大学院において素粒子物理学（理論）を専門とする訳であるが、そもそも素粒子物理学は、その成果を社会に直接的に還元することを目的としていない。寧ろ人類全体の文化の発展に貢献することを目的とした学問である。しかも加速器には莫大なお金がかかる。

或いはこの国の情報 literacy が問題となっていることもある。科学者の発言が mass media によって微妙にゆがめられて発信されることも多く、更に似非科学も mass media により発展している。^{*2}

「道路整備費と gasoline 代の 2 者択一」を迫られるこの国では、あらゆる機会を見つけてあらゆる形で情報発信をしていかないと色々な意味で大変なことになりそうな気がするのである。

勿論、修士論文や博士論文などの「本当の論文」は、簡潔を旨とする。しかし、今回はまあ実験報告書なので、敢えて冗長さを含めた形で書くことにした。

というわけで、この報告書は専門家の人だけではなく、一般の人々にも是非読んでもらいたい。一般の人々は、まず Section 1.3 から読んでいただきたい。そうすれば、何となーくこの実験の意味が分かっていただけだと思う。

※ちなみにこの報告書は後日私の web site (<http://www.misho-web.com/>) にも掲載する予定である。

^{*1} 連絡先は <http://www.misho-web.com/> および <mailto:phys@misho-web.com>。

^{*2} Mass media については色々思うことがあるが、ここでは省くことにする。

SECTION 1.2 INTRODUCTION

◆ 1.2.1 What is the Target?

宇宙空間の暗黒物質密度 (Relic Density) は、次世代の線型加速器 (Next Linear Collider : NLC) による実験でも推定することが出来る。その上では、どのような実験をどれだけの期間行えば、どの程度の不確かさで relic density が推定できるのか、が問題となる。本実験ではこれについて扱った。

本実験では、まず SUSY-GUT model として mSUGRA / LCC1 を用いた。この時 lightest super particle (LSP) は neutralino $\tilde{\chi}_0$ となる。その上で $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ の衝突反応を simulate し、その実験から selectron \tilde{e}_R^- および neutralino の質量を見積もった。それらの質量の不確かさから、mSUGRA の SUSY parameters の不確かさを推定し、そこから relic density の不確かさを推定した。

◆ 1.2.2 What is Done by Others?

この実験は、既に J. L. Feng および M. E. Peskin によって 2001 年に行われている [1, 2]。

Feng および Peskin は、文献 [1] において $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ および $e^- e^+ \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^+$ の simulation を行い、 \tilde{e}_R^- , \tilde{e}_R^+ および $\tilde{\chi}_0$ の質量の不確かさを求めた。更に Feng は、文献 [2] において、その不確かさ、およびその他の simulation によって求められた他の SUSY parameter を用いて、relic density の値 (の不確かさ) を見積もった。

◆ 1.2.3 Then What's New in This Approach?

Feng および Peskin の最初の論文 [1] においては、理想的な検出器を用いたものとして、検出器の影響を無視している。本実験ではその点に着目し、検出器の振る舞いを simulate することで (detector simulation) より「現実的な」不確かさの見積もりを試みた。

ただし、本実験はまだまだ未熟なものであることにも注意していただきたい。Feng らの実験とは異なり、今回は $e^- e^+ \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^+$ の実験は行っていない。また、 \tilde{e}_R^- および $\tilde{\chi}_0$ の質量推定は、一方が確定しているときの他方の不確かさのみしか調べることが出来なかった (→ See: Section 3.3.2 and 4.3)。

SECTION 1.3 この世は何から出来ているのか

— “WHAT IS OUR WORLD MADE OF?”

AS THE INTRODUCTION FOR ORDINARY PEOPLE —

◆ 1.3.1 Standard Model

これまで、物理学は「この世の中は何によって出来ているのか」という問題を解決しようと、努力と進歩を続けてきた。最初は原子だった。「物質は全て原子から出来ている！」19世紀の物理学者はそう考えた。そしてそれで満足した。^{*3}

しかしまもなく、「原子には構造があるのでは？」という声が上がった。そしてそれは正しくて、実は原子は原子核と電子から出来ている、ということが分かった。そして更に、原子核は陽子と中性子から出来ている、ということも分

^{*3} この考えは、紀元前 400 年頃の哲学者 Δημόκριτος (デモクリトス) に遡る。「この世の中は何によって出来ているのか」という問いは、人類における普遍的な疑問なのだろう。

かった。「これで大丈夫だ。物質は電子と中性子と陽子から出来ている！」として満足した。1930 年ごろの話である。

しかし、それだけでは説明出来ない現象 (β 崩壊) があった。そして、「**neutrino**」^{ニュートリノ} という、他の物質とほとんど相互作用しない⁴粒子があればその現象は問題なく説明できる。Pauli は 1930 年にそう主張した。果たしてその主張は正しく、**neutrino** は 1950 年代に確かに発見された。⁵

そして、これだけではなかった。1 個しかないとおもっていた **neutrino** は、本当は 3 種類あった。そして実は、陽子と中性子は **quark**^{クォーク} と呼ばれる粒子から出来ていることがわかった。⁶ また、『光は粒子 (光子: **photon**) とみなすこともできる』ということは 1920 年代に知られていたが、この光子によって電気・磁気の力が媒介されている、ということもわかった。

他にも沢山の粒子が理論的に予言され、その後確かに実験により観測された。或いは実験してみたら偶然見つかったという粒子も沢山ある。結局、現在のところ、この世界は

- 6 種類の **quark** と、それに対をなす 6 種類の反 **quark**。
- 6 種類の **lepton**⁷ と、それに対をなす 6 種類の反 **lepton**。
- 5 種類の、「力を伝えるための粒子」(**gauge boson**)。
- **Higgs** 粒子 (未発見)。

から出来ている、ということになっている。これが「標準模型」である。

◆ 1.3.2 Dark Matter

しかし、標準模型では上手く説明できない現象もある (あの頃と同じだ!)。例えば、銀河の回転速度。銀河は、理論的に予言される速さよりもだいぶ速く回転している。このことは、銀河に「見えない何か」がどっさりくっついていれば説明がつく。或いは、銀河団⁸の質量。銀河団を観測して理論に当てはめると、銀河団の質量が、「銀河団にある光っている物体」の 100 倍近い値になる。つまり「光らない物体」が宇宙空間にどっさりあることになる。[3]

ということは、この世の中には見えない物質「暗黒物質: **dark matter**」がどっさりある、ということになる。実際、最近の研究では、宇宙の物質の 85% が暗黒物質であり、我々の知っている「見える」物質は僅か 15% に過ぎない、ということになっている。⁹

では、暗黒物質とは何だろうか。これは目下研究が進められている話題である。一昔前までは、**neutrino** がその候補だった。何てったって **neutrino** はほとんど相互作用しない。だから「見えない物質」の候補となる。しかし、**neutrino** は暗黒物質としては軽すぎた。暗黒物質はもっと重くなければならぬ。

最近では **neutralino**^{ニュートラリーノ} がその候補の筆頭となっている。**Neutralino** とは何か? それを説明するには、まず超対称理論を説明しなければならない。ちなみに最初に注意しておくが、**neutralino** と **neutrino** との間には何の関係もない。ただ名前が似ているだけだ。

⁴ 他の物質と相互作用しないということは、即ち「見えない」ということである。相互作用しないのだから、そこに有るのか無いのかわからない。

⁵ 岐阜県の Kamiokande で小柴名譽教授が観測したのは、この **neutrino** である。当初 **neutrino** の質量は 0 であると思われていたが、最近の研究 (Kamiokande でも行われている) によって、僅かながら質量を持っていることがわかった。

⁶ 陽子は up quark 2 個と down quark 1 個から出来ており (uud)、中性子は up quark 1 個と down quark 2 個から出来ている (udd)。

⁷ 軽い粒子、というほどの意味で、電子 e^- や **neutrino** (ν_e, ν_μ, ν_τ の 3 種類) もここに含まれる。

⁸ 銀河は宇宙空間にばらばらに存在するのではなく、ある程度まとまって存在している。そのまとまりを銀河群・銀河団という。

⁹ そして更に、実は宇宙の 73% は暗黒 energy であり、物質は (暗黒物質を含めても!) 全体の 27% でしかない、ということになっている。

◆ 1.3.3 Super Symmetry

先ほど、標準模型では説明できない現象がある、という話をした。実は、標準模型そのものにも色々問題がある。

まず、標準模型では neutrino の質量は 0 である。しかし実際には 0 ではない。他にも、Weinberg 角の不定性から電弱統一が十分ではない、電荷の量子化が説明できない、Higgs 粒子の質量が無限大になってしまう、などの難しい問題が山積している。

これを解決するために持ち出されたのが、「超対称理論：supersymmetric theory」である。先ほど、標準理論の説明の時に

- 6 種類の quark と、それに対をなす 6 種類の反 quark。

のような話をしたが、超対称理論では、この「quark と反 quark」に対をなす「超対称粒子」がある、ということ（超対称性）を仮定する。即ち、超対称理論では

- 12 種類の「quark&反 quark」と、それに対をなす 12 種類の超対称粒子 (squark)。
- 12 種類の「lepton&反 lepton」と、それに対をなす 12 種類の超対称粒子 (slepton)。
- 「力を媒介する粒子」に対をなす超対称粒子。
- その他いくつかの新しい粒子。

の粒子が存在することを仮定するのである。

超対称理論は、現在は「仮説」の段階であり、実験的には全く検証されていない。しかしこれから ^{ジュネーブ}Geneve 郊外にある “LHC”(Large Hadron Collider) でその実験的検証が始まることになる。恐らく数年後には、何らかの回答が得られるだろう。肯定的であることを期待するが、否定的なものでもそれはそれで面白い。

えーっと……素粒子はこれで結局何種類あるんだ。12×4+… って多すぎだろ常識的に考えて。というわけで、もっと綺麗な枠組みとして「超弦理論」を考えている物理学者もいる。ここはまさに物理学の最前線である。

超対称理論、或いは超対称性は、“supersymmetry” を略して ^{スージー}SUSY と呼ばれる。今回の我々の擬製実験 (simulation) では、電子 e⁻ の SUSY partner “selectron” \tilde{e}_R^- 、および、「力を伝える粒子」に対する超対称粒子 “neutralino” $\tilde{\chi}_0$ が登場する*10。また、標準模型からは、電子 e⁻ と反電子 e⁺、neutrino ν と反 neutrino $\bar{\nu}$ 、そして「力を媒介する粒子」のうち 4 種類 γ (photon) · W[±] · Z⁰ が登場する。

◆ 1.3.4 Neutralino

これまでに、

- この世界は標準模型によって大体説明ができる……ような気がした。
- でもやっぱりダメで、他に暗黒物質が無いと、観測結果と矛盾しちゃう。
- っていうかそもそも標準模型自体が微妙で、ここは SUSY が必要だ。

ということを見てきた。そして、その暗黒物質の筆頭候補として、SUSY の中にある “neutralino” という粒子が挙がっている、ことももう御承知いただけであろう*11。実験の説明に入る前に、もう少し説明をしておこう。

*10 正確に言うなら、neutralino は、gauge boson の SUSY partner “gaugino” の混合状態である。

*11 そして出来れば「SUSY の正しさを調べるためにこれから LHC で実験するんだ。」ということも覚えておいて欲しい。

実は、SUSY にも沢山の種類がある。いや、SUSY は SUSY なのだけれど、では「なぜ超対称粒子がこんなにまで発見されていないのか」（なぜ超対称性が破れているか）が問題となる。超対称理論を現実に近づけてやらねばならない。

その「超対称性の破り方」の中で最も単純なものが、“mSUGRA” (minimal supergravity) である。単純すぎてあまり面白くない、との噂も耳にするが、それはともかくとして、mSUGRA では自由な変数 (parameter) が 5 個しかない！^{*12}それらは

$$\text{“SUSY parameters”} \quad (m_0, M_{1/2}, A_0, \tan \beta, \mu \text{の符号}) \quad (1.1)$$

のように表される。この 5 個の値を勝手に決めてやれば、超対称粒子全ての質量が決まる。その質量は、普通の粒子に比べて非常に重い。だからこの普通の世界には存在しなくて、そしてこれまで観測されていないのだ。これで万事解決である！

今回の実験では、この mSUGRA 模型を用いて、更に SUSY parameters として

$$\text{LCC1} : (m_0, M_{1/2}, A_0, \tan \beta, \mu \text{の符号}) = (100 \text{ GeV}, 250 \text{ GeV}, -100 \text{ GeV}, 10, +) \quad (1.2)$$

を用いた^{*13}。実はこの値は時代遅れの、既に間違っていることが分かっている値なのだけれども、キリがいいので良く用いられてる。これを用いると、例えば selectron の質量は $m_{\tilde{e}_R} \sim 140 \text{ GeV}$ 、neutralino の質量は $m_{\tilde{\chi}_0} \sim 100 \text{ GeV}$ となる。これは陽子の 100 倍程度の重さであり、あまりに重過ぎるので、まだ観測されていないのである。

この模型によれば、最も軽い超対称粒子は neutralino である。SUSY によると、最も軽い超対称粒子は安定である^{*14}ので、暗黒物質の筆頭候補となる。更に論理を飛躍させて、今回の模型では、話を簡単にするため、暗黒物質は全て neutralino でできている、とした。

◆ 1.3.5 Relic Density

ところで、先ほど p. 5 において、「物質は（暗黒物質を含めても！）宇宙全体の 27%」と述べたが、実は、暗黒物質の密度は“残存密度 (relic density)” Ωh^2 と呼ばれ、SUSY parameter を定めればこいつも決まってしまう。例えば LCC1 を用いた場合、（暗黒物質が neutralino だけでできているという仮定の下では）

$$\Omega h^2 = 19.502\% \quad (1.3)$$

ということになり、見える物質（約 4%）と合わせて 24%、となる。（さっきの値とちょっと違うけど、大体は同じだ。）

◆ 1.3.6 Expectation of SUSY Parameter

では逆に考えよう。SUSY parameter を決めれば selectron や neutralino など、超対称粒子の質量が決まる。ということは、neutralino や selectron の質量が分かれば、逆に SUSY parameter を決めることが出来る。ということは、（暗黒物質が neutralino だけから成っているとの仮定の下では）relic density、つまり宇宙の暗黒物質の割合が検証できるのである！

ところが、質量なんてものはそう簡単には決まらない。どうしても「不確かさ（誤差）」が生じてしまう。質量に不確かさが生じてしまえば、SUSY parameter にも不確かさが生じて、relic density にも不確かさが生じる。

不確かさを減らすには、実験を長時間することが重要である。じっくり測定すればそれだけ精度は増す。しかし最近の実験はとてもお金がかかるので、そんなにやたらめったらするわけにはいかない。そこで、「どれだけ実験をすれば、どれだけ不確かさを絞り込めるか」という点が問題となる。今回の実験ではこれについて扱った。

^{*12} ここを「5 個も」と思うのが普通の人の発想だけれど、理論屋にとっては「5 個しか」となる。だって他の model だと、parameter が 100 個とかあるもん。

^{*13} GeV とは energy の単位である。この辺りからは物理学の知識が結構必要となりそう……。

^{*14} R-parity が破れる可能性、という問題もあるが……。

◆ 1.3.7 Our Simulation

もう少し詳しく、我々の実験について説明しよう。

まず、SUGRA model として先ほどの mSUGRA / LCC1 を用いる。そうすると（先ほど述べた通り）selectron と neutralino の質量 $m_{\tilde{e}_R} \cdot m_{\tilde{\chi}_0}$ も定まる。定まるのだけど、ちょっとその値がキリが悪いので、多少のことには目をつぶって、とりあえず $m_{\tilde{e}_R} = 150 \text{ GeV}$, $m_{\tilde{\chi}_0} = 100 \text{ GeV}$ とする。

その模型の下で、linear collider（線状の衝突型加速器）で電子 e^- をものすごく加速させる。150 GeV まで加速させる。なんと光速の 99.9999999994% とかいう速度だ。もちろん現在地球上にそんな加速ができる加速器は無い。あくまでも計算機上での擬製実験だ。^{*15}そして、その 2 つの電子（正確には電子の beam）を正面衝突させる。するとものすごい反応が起きる。正面衝突なのだから、合計した energy E_{CM} は単純にその和、300 GeV とかになる。

それだけ激しい反応が起きれば、流石に超対称粒子 \tilde{e}_R も発生する。先ほど $m_{\tilde{e}_R} = 150 \text{ GeV}$ とすることにしたが、それを 2 つ作るだけの energy があるからだ。超対称粒子は「重すぎるから現実の世界には無い」だけで、発生させてしまえば（間接的に）観測できる。そうして、質量が若干の不確かさ込みで測定できる。

問題なのは質量ではない。（だって質量は勝手に我々が決めちゃったんだから。）それよりもこの「若干の不確かさ」というのが問題だ。我々が勝手に決めた質量は真の質量と大体近い値だから、この「若干の不確かさ」はそっちに適用できるんじゃない？……と考える。そして質量には目をつぶって、不確かさに注目する。

Selectron \tilde{e}_R と neutralino $\tilde{\chi}_0$ の質量の不確かさが分かった！ となると、これを満たすような SUSY parameter にも若干の幅（＝不確かさ）が生じる。そうすると、relic density^{暗黒物質密度}の不確かさも決まる！ 宇宙の正体にまた一歩^{*16}近づけるのだ。

ちなみにこの実験自体は、2000 年に J. L. Feng と M. E. Peskin によって為されている [1] ののだが、今回は測定器の都合とかをもうちょっと色々考えて、不確かさをもう少し現実的なものにした。つまり若干不確かさを悪化させ……ようとしたのであるが……。詳しくはまた終わりのほうで。

^{*15} 現在計画中の ILC (国際線状衝突型加速器: International Linear Collider) ではこのような実験が可能である。詳しくは <http://www.linear-collider.org/> を参照して欲しい。「計画中」ってことは……つまりお金がちょっと十分ではないのだ。何せものすごく加速するんだから……。あまり大きな声ではいえないが、そろそろこの「実験にお金がかかりすぎる」という問題が本当に問題になってくるのではないかと考えている。いや、もちろんそういう問題はだいぶ前から提唱されてるんだけど。

^{*16} これだけのことをしてまだ「一歩」ってのも……アレだけど。

Chapter 2

Theory

SECTION 2.1 DARK MATTER AND SUPER SYMMETRY

現在, 暗黒物質の候補としては, 超対称粒子の中で最も軽い粒子 (LSP) がその筆頭に挙がっている。それは, R -parity が保存する, という仮定の下では, LSP は何の粒子にも崩壊しないからである。

◆ 2.1.1 R -Parity

R -parity は,

$$R := (-1)^{2S+3B-L} \quad (S \text{ は spin, } B \cdot L \text{ はそれぞれ quark 数と lepton 数}) \quad (2.1)$$

で定義される量である。とは言ってもこの定義は重要ではなく, 問題は標準理論の中の粒子は $R = +1$ で, 超対称粒子は $R = -1$ ということだ。

そうなる, $R = -1$ のものは $R = +1$ には崩壊できない。言い換えれば, $R = +1$ のものを幾つくっつけても $R = -1$ にはならない。そのため, もしも崩壊反応によって R -parity が保存するならば, $R = -1$ の最も軽い粒子……即ち LSP は永遠に崩壊できない! ということでこいつは暗黒物質になりうる。

今回用いた mSUGRA 模型では R -parity は保存するということになっている。また今回は, 暗黒物質は全て LSP でできている, という仮定の下で議論を進めた。

◆ 2.1.2 mSUGRA model

mSUGRA 模型 (minimal supergravity) では, 先述の通り $(m_0, M_{1/2}, A_0, \tan\beta, \mu$ の符号) の 5 つの parameter を決めれば超対称粒子の質量が定まる。ここに,

- m_0 : Chiral scalar の質量
- $M_{1/2}$: Gaugino の質量
- A : Higgs 粒子と超対称 fermion との結合の強さ
- $\tan\beta$: Higgs 場の真空期待値に関する係数
- μ : Higgsino の質量

である。

この parameter の選び方によって LSP は変わることになるが, 特に今回は現在では既に obsolete な模型

$$\text{LCC1} : (m_0, M_{1/2}, A_0, \tan\beta, \mu \text{ の符号}) = (100 \text{ GeV}, 250 \text{ GeV}, -100 \text{ GeV}, 10, +) \quad (2.2)$$

を用いた。その結果 LSP は neutralino $\tilde{\chi}_0$ となる。

SECTION 2.2 SCATTERING SIMULATION

◆ 2.2.1 Cross Section and Luminosity

散乱断面積 σ とは、散乱反応の起こりやすさに比例する量である。また、輝度 (Luminosity) \mathcal{L} とは加速器ごとに決まっている定数であり、単位時間当たりの散乱事象生成能力である。

Luminosity \mathcal{L} の加速器を時間 t だけ稼働させた時、ある反応の起きる回数 N は

$$N = \sigma \mathcal{L} t \quad (2.3)$$

となる。

◆ 2.2.2 Target Reaction and Backgrounds

今回の擬製実験では、計算する「対象反応」は、

$$e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^- \implies \tilde{e}_R^- \rightarrow e^- \tilde{\chi}_0 \quad \dots[\text{Target Reaction}] \quad (2.4)$$

という反応である。即ち、電子 beam 2 本をぶつけて、検出器で終状態として $e^- e^-$ を観測するものである。(ただし $\tilde{\chi}_0$ やその崩壊後の粒子は検出器にかからない。)

しかし、これを実際に実験すると、検出器による観測結果は、その殆どが

$$e^- e^- \rightarrow e^- e^- \quad \dots[\text{Background A}] \quad (2.5)$$

という“ただ衝突しただけ”の反応に起因するものとなる。或いは、initial state radiation (ISR) により生じた光子 γ による反応

$$e \gamma \rightarrow e Z^0 \implies Z^0 \rightarrow e^- e^+ \quad \dots[\text{Background B}] \quad (2.6)$$

および

$$\gamma \gamma \rightarrow W^+ W^- \implies W^- \rightarrow e^- \bar{\nu} \quad \dots[\text{Background C}] \quad (2.7)$$

という反応も比較的多く生じてしまう。ゆえに検出器で $e^- e^-$ を観測したとしても、それが対象反応 $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ によるものである保証は無く、むしろその殆どがこれら 3 つの「背景反応 (background reaction)」の産物なのである。

そこで、対象反応と背景反応との間にある違いを用いて、測定結果から上手に背景反応を取り除かなければならない。この詳細は、Section 3.2.2 に記す。

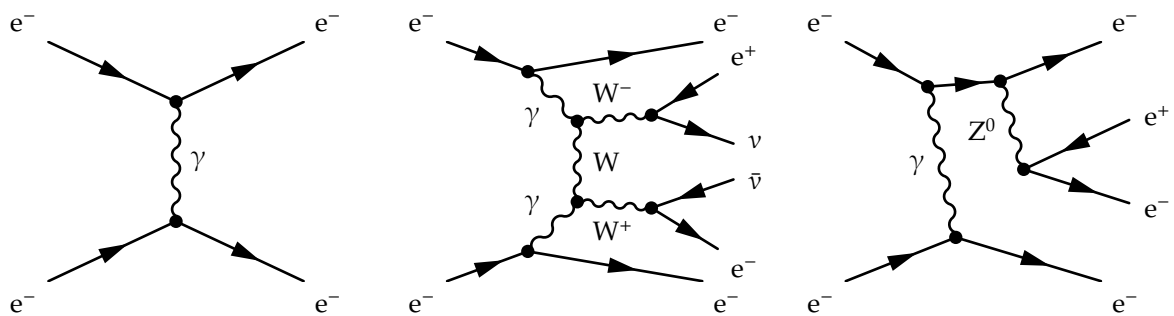


図 2.1 背景反応の Feynman diagrams。これらの終状態に e^- が 2 つ以上含まれているため、もしもその他の粒子が検出器にかからなかったら、標的反応と見間違えることになる。

◆ 2.2.3 Radiations and Beam Effects

電子と電子をぶつけると、何が起るか。まず第 1 には、衝突が起ると考えられる。しかし、衝突の前後にも、色々なことが起っているのである。

■ISR / FSR

Energy の高い電子 beam は、走っている間に energy を若干失って僅かに減速する。それは電子が光子を放出する (radiation を起こす) ためである。特に衝突が起る前の減速を “initial state radiation (ISR)”, 衝突が起きた後の粒子についてのものを “final state radiation (FSR)” という。

■Beamstrahlung & Beam Design

また、電子と電子をぶつけるとは言っても、1 個と 1 個をぶつけるわけではない。ぶつけるのは、電子を沢山含んだ beam である。そのため、1 対 1 の場合とは違った相互作用が生じてしまう。それを “Beamstrahlung” という。

◆ 2.2.4 Detectors

これで散乱現象が起きるところまでは整った。次は、散乱の結果を観測しなければならない。そのための測定器としては幾つかあるが、大体の実験では

- Tracking Chamber
- Electromagnetic Calorimeter / Hadron Calorimeter
- Muon Chamber

などを用いる。

■Tracking Chamber

ここでは、電荷を持っている粒子がそこを通過したときに輝線が残る。つまり、電子 e^- や陽電子 e^+ など、電荷を持っている粒子の数を数えることが出来る。一方、光子 γ は電荷を持っていないため引かからない。

よってこの装置では、電荷を持っている粒子の数を “track 数” という形で測定できる。

■Calorimeter

Electromagnetic calorimeter では、電子・陽電子・光子の数を数える。Hadron calorimeter では、陽子や中性子、pion などを検出する。この装置で検出されたこれらの粒子の数を “cluster 数” という。

■Muon Chamber

Muon chamber は、muon の数を数えることが出来る。本実験では用いていないので、詳しくは省略する。

◆ 2.2.5 Detector Simulation

しかし検出器は万能ではない。そりゃあ track 数を数え間違えたりすることはないだろうけど、検出器で energy や運動量を測定しようと思うと、どうしても測定に誤りが生じてしまう。これも考慮に入れたのが我々の実験の特長だ!

■Loss of Front Scattering

ところで、これらの装置群は beam を囲むように配置されており、beam の通り道は確保されている。ということは、beam の方向にとっても近い部分には検出器が存在しないのである。

今回は、検出限界 θ を $\cos \theta = 0.99$ とした。つまり $\theta \sim 8.1^\circ$ である。

◆ 2.2.6 Uncertainty

さて、検出が終わった。とすると、その測定の不確かさを見積もらなければならない。^{*1}ここでは、「統計的不確かさの見積もり」について説明する。

対象反応が N_{target} 回、背景反応が N_{BG} 回生じたとしよう。つまり検出器では $N_{\text{tot}} := N_{\text{target}} + N_{\text{BG}}$ 回の観測が成されたことになる。すると N_{target} およびその不確かさ ΔN_{target} は

$$N_{\text{target}} = N_{\text{tot}} - N_{\text{BG}} \quad \therefore \Delta N_{\text{target}} = \sqrt{(\Delta N_{\text{tot}})^2 + (\Delta N_{\text{BG}})^2} = \sqrt{N_{\text{target}} + 2N_{\text{BG}}} \quad (2.8)$$

となる。

特に、今回の対象反応は超対称粒子が絡んでいるため、とても起こりにくい。よって上手に対象反応のみを選別してやらないと、不確かさがものすごく大きくなってしまう。選別が非常に重要なのである。

^{*1} 何故なら、特にこのような素粒子実験の場合には、同じ実験を繰り返したところで同じ結果になるはずが無い。統計的に考えて。

Chapter 3

Method

SECTION 3.1 MASS DETERMINATION

何はともあれ、まずは超対称粒子の質量を決めねばならない。今回は（先ほどからも何度も繰り返している通り）mSUGRA / LCC1 に基づいて質量を決定した。また、top quark の質量 $m_t = 178 \text{ GeV}$ 、及び gravitino が LSP でないことも仮定した。

$$(m_0, M_{1/2}, A_0, \tan\beta, \mu \text{の符号}) = (100 \text{ GeV}, 250 \text{ GeV}, -100 \text{ GeV}, 10, +) \quad ; \quad m_t = 178 \text{ GeV}, m_{3/2} > m_{\text{LSP}} \quad (3.1)$$

この値を用いて、ISAJET [4] によって計算を行った。（ISAJET の version は不明であるが、7.54 以上であることは間違いない。）

SECTION 3.2 ACCELERATOR SIMULATION

さて、次は粒子の質量の不確かさを調べるために、先に述べた散乱の simulation を行った。

◆ 3.2.1 Event Generation

まず、Pandora Pythia [5] を用いて、対象反応および背景反応

- [Target] $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$
- [Background A] $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$
- [Background B] $e^- \gamma \rightarrow e^- Z^0$
- [Background C] $\gamma \gamma \rightarrow W^+ W^-$

の各 event を生成した。このとき、各種 parameter は以下のように設定した：

- Detection Limit : $\cos\theta = 0.99$
- Beam Polarization : 0.8 (for all electron and photon beams)
- Mass of \tilde{e}_R^- : 150.0 GeV
- Mass of $\tilde{\chi}_0$: 100.0 GeV
- ISR, FSR & Beamstrahlung : ALL Considered
- $\tilde{\chi}_0$ Decay : Considered
- Beam Design : NLC500H \rightarrow Luminosity $\mathcal{L} = 78 (\text{fb} \cdot \text{年})^{-1}$

Event の回数は、対象反応と背景反応 A については 100 万回、背景反応 B・C については 10 万回とした。

ISR, FSR, Beamstrahlung については先に Section 2.2.3 で説明した通りである。また, detection limit については Section 2.2.5 を参照のこと。

それ以外の parameter は次のような意味を持つ。

■Beam polarization

粒子の spin を beam の進行方向に関して測定すると, 電子の場合は $\pm 1/2$ のどちらか, 光子の場合は ± 1 のどちらかの値になる。それぞれの方向を向いている粒子の割合を n_{\pm} とする。Beam polarization は $n_{+} - n_{-}$ として定義される。

■Beam Design

反応には, その beam がどのような形をしているかも影響する。今回の実験では, Feng らと同様の NLC500H という design を用いた。NLC500H は Next Linear Collider (NLC) の high luminosity の場合のものであり, Thompson [6] による。Beam は平らな形状をしている。

◆3.2.2 Fast Monte-Carlo Simulation & Cut Off

以上の方法で計算された散乱事象に対し, StdHep [7](version 4.09) および LCDRoot [8, 9](version 3.5) を用いて, detector simulation を行った。

その後, 対象反応と背景反応とを上手に区別する方法を模索した。今回は,

1. Track の数が 2 本。
2. その track 2 本がどちらとも電子のもの。
3. Cluster の数が 5 個以下。
4. Transverse vector sum の大きさが 10 GeV 以上。
5. 観測された電子の energy の和が, $E_{CM} - 200 \text{ GeV}$ 未満。

という条件のうちどれか 1 つでも満たさないものがあれば, 「ゴミ」として無視することにした。

■Track / Cluster

Track の数については, 先ほどの Section 2.2.4 より自然な制限であろう。

一方, cluster の数の制限はあまり適切ではない。『cluster の数が 2 個』という条件の方が適切である。上述の条件は殆ど意味を為さない, ゆるすぎる条件である。

■Transverse Vector Sum

観測された 2 個の電子^{*1}の運動量をそれぞれ p_1, p_2 とし, energy を E_1, E_2 とする。また, beam の方向を z 軸にとる。この時, transverse vector の大きさは

$$\|P_{tr}\| := \sqrt{(p_{1x} + p_{2x})^2 + (p_{1y} + p_{2y})^2} \quad (3.2)$$

として定義される。いわば, 「電子の, 最初の方向からのずれ具合」である。

例えば, 背景反応のうちの 1 つ, $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$ では, 超高速の電子同士がお互いを弾き飛ばすのだから, 弾き飛んだ後の進行方向は最初と殆ど変わらない。(このような散乱を前方散乱という。) 一方, 対象反応 $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ では, 観測される電子は selectron \tilde{e}_R^- の崩壊によって生じるものである。崩壊は等方的に起こるので, transverse vector sum はそれなりの値をもつはずである。

というわけで, 今回は, $\|P_{tr}\| < 10 \text{ GeV}$ の反応 (前方散乱) を全て切り捨てた。

^{*1} Track 数の制限のため, ここではもう電子の数は 2 個に決まっていることに注意。

■Energy

Energy の和 E_{sum} は $E_1 + E_2$ で定義される。Energy 保存則を考えれば分かります。何も変わったことが無ければ、 E_{sum} は、最初の energy E_{CM} に等しいはずである。実際、背景反応 $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$ では、 E_{sum} は大体 E_{CM} に等しい。

ところが、対象反応の場合は事情が異なってくる。何故なら、selectron \tilde{e}_R^- は電子 e^- と neutralino $\tilde{\chi}_0$ に崩壊するが、neutralino は測定器に引っかからないまま飛んでいってしまう。そのため、neutralino の質量分だけ、energy が奪われてしまうのだ。

今回は neutralino は 100 GeV としているので、 $E_{\text{sum}} > E_{\text{CM}} - 200 \text{ GeV}$ のものは除去してよい。

◆ 3.2.3 Cross Section and its Uncertainty

以上の結果を用いれば、散乱断面積とその不確かさを計算することができる。

まず、散乱断面積については Pandora Pythia が計算してくれる。Luminosity \mathcal{L} は、加速器として NLC500 を用いたので、 $\mathcal{L} = 78 (\text{fb} \cdot \text{年})^{-1}$ [1] である。そして、今回、散乱時間は $\frac{1}{78}$ 年とした。

さて、それぞれの反応について、理論上の散乱断面積を

$$\sigma_{\text{target}}, \sigma_A, \sigma_B, \sigma_C \quad (3.3)$$

としよう。ここで、 $A \cdot B \cdot C$ は、Section 2.2 の背景反応のそれぞれに対応する。すると、式 (2.3) より、各反応は

$$N = \sigma \times 1 \text{ fb}^{-1} \quad (3.4)$$

回起きることになる。

ところが、ここで先ほどの「対象反応と散乱反応の区別」の話が関わってくる。あの段階で、例えば背景反応 A について、1000000 個のうち 10 個が除去できなかったとしよう。 $\sigma_A \approx 3000000 \text{ fb}$ なので、

$$N_A^{(\text{example})} = 3000000 \times 1 \text{ fb} \times \frac{10}{1000000} = 30 \quad (3.5)$$

となる。このような計算と式 (2.8) により、散乱断面積の不確かさが計算できる。

SECTION 3.3 MASS UNCERTAINTY

これで散乱断面積の不確かさは求まる。ではここから \tilde{e}_R^- および $\tilde{\chi}_0$ の質量の不確かさはどうやって計算すればよいだろうか。

◆ 3.3.1 The Best Scenario

最も良い方法は、energy が E_{CM} であるときの散乱断面積が、其々の質量 $m_{\tilde{e}_R^-} \cdot m_{\tilde{\chi}_0}$ の関数

$$\sigma = \sigma(E_{\text{CM}}, m_{\tilde{e}_R^-}, m_{\tilde{\chi}_0}) \quad (3.6)$$

として分かっているならば、最尤法によって σ の不確かさから $m_{\tilde{e}_R^-}$ および $m_{\tilde{\chi}_0}$ の不確かさを導き出すことができる。Feng らの文献 [1] では、このような方法で導出している (FIG. 7) し、Pandora Pythia もこのような計算をして散乱断面積を導出している。

◆ 3.3.2 Our Method

しかし、この関数の形を我々は計算することが出来なかった。(勿論我々の知識が不足しているためである。)そこで、現象論的 approach として、Pandora Pythia の計算結果から関数の形を推定することを試みた。

最終的に、今回は、どちらか一方の質量を固定したときの関数系

$$\sigma = \sigma(E_{\text{CM}}, m_{\tilde{e}_R}, 100 \text{ GeV}) \quad (3.7)$$

$$\sigma = \sigma(E_{\text{CM}}, 150.0 \text{ GeV}, m_{\tilde{\chi}_0}) \quad (3.8)$$

までは求めたが、3変数関数としての式(3.6)を得ることは出来なかった(→ See: Section 4.3)。これは Feng らの結果と比べて致命的に劣っている点である。

なぜなら、これによって求まる結果は

- $m_{\tilde{\chi}_0}$ が厳密に 100 GeV の時の、 $m_{\tilde{e}_R}$ の不確かさ。
- $m_{\tilde{e}_R}$ が厳密に 150 GeV の時の、 $m_{\tilde{\chi}_0}$ の不確かさ。

でしかないからだ。現実にはもちろん両方の値が分かっていないので、両方の値を同時に動かさなければならない。しかしそのためには、Section 3.3.1 “Best Scenario” での関数が必要となる。

しかしながら、半ば言い訳になるが、実はこれでもあまり問題ない。何故なら、Feng らの結果 [1, Fig. 7] を見ると、両方を動かした時の不確かさは、一方を固定したときの不確かさから僅かに悪化する程度にとどまるからである。

SECTION 3.4 SUSY PARAMETERS AND RELIC DENSITY

さて。超対称粒子 selectron \tilde{e}_R · neutralino $\tilde{\chi}_0$ の質量の不確かさが求めた。これから、この不確かさを SUSY parameter の不確かさへと反映させ、更にそこから relic density の不確かさを求める。

$$\Delta m \implies \Delta(\text{SUSY Parameters}) \implies \Delta(\Omega h^2)$$

まず、どの SUSY parameter の不確かさを求めればいいのか確認しておこう。Section 3.1 を見ると、変数として

$$(m_0, M_{1/2}, A_0, \tan \beta, \mu \text{ の符号}); m_t \quad (3.9)$$

を与えていることが分かる。ところが μ の符号には“不確かさ”は無いので、今回我々が扱う“SUSY parameters”は

$$(m_0, M_{1/2}, A_0, \tan \beta, m_t) \quad (3.10)$$

の5つである。ここで m_t は、top quark の質量である。

なお、以下では、質量の計算は、最初と同様、ISAJET を用いて行った(→ Section 3.1)。Relic density の計算は、micrOMEGAs [10] (version 1.3.7) によって行った。

— First Approach

まず第1に、これらの parameters を 1つずつ動かした。即ち、他の4つを固定して、残る1つを動かしたのである。こうして、先述の質量のずれを再現するような値を求めた。

そしてそれらの各結果に対する relic density Ωh^2 の範囲を見た。

— Next Approach

ところが、これでは relic density がほとんどマトモに決まらなかった。誤差が大きすぎたのである（詳細は Section 4.4.2）。

というわけで、仕方が無いのでいくつかの SUSY parameters については、他の実験で既に得られている結果を用いることにした。

このようにすることで、ある程度 relic density の不確かさも小さくなった。

— Last Step

ここで注意しなければいけないのは、今までの他の 4 つを固定して 1 つを動かしたときの値であるということだ。実際には、5 つの parameters 全部がわからない。だからその全部を動かしてやらねばならない。

そうすれば、relic density の不確かさがきちんと求まる。これで本実験は全て終了となる。

Chapter 4

Result

SECTION 4.1 MASS DETERMINATION

Section 3.1 によって計算した結果, 質量は図 4.1 のようになった。ここで LSP は $\tilde{\chi}_0$ であり, 質量 95.34 GeV。また, \tilde{e}_R の質量は 144.1 GeV であった。

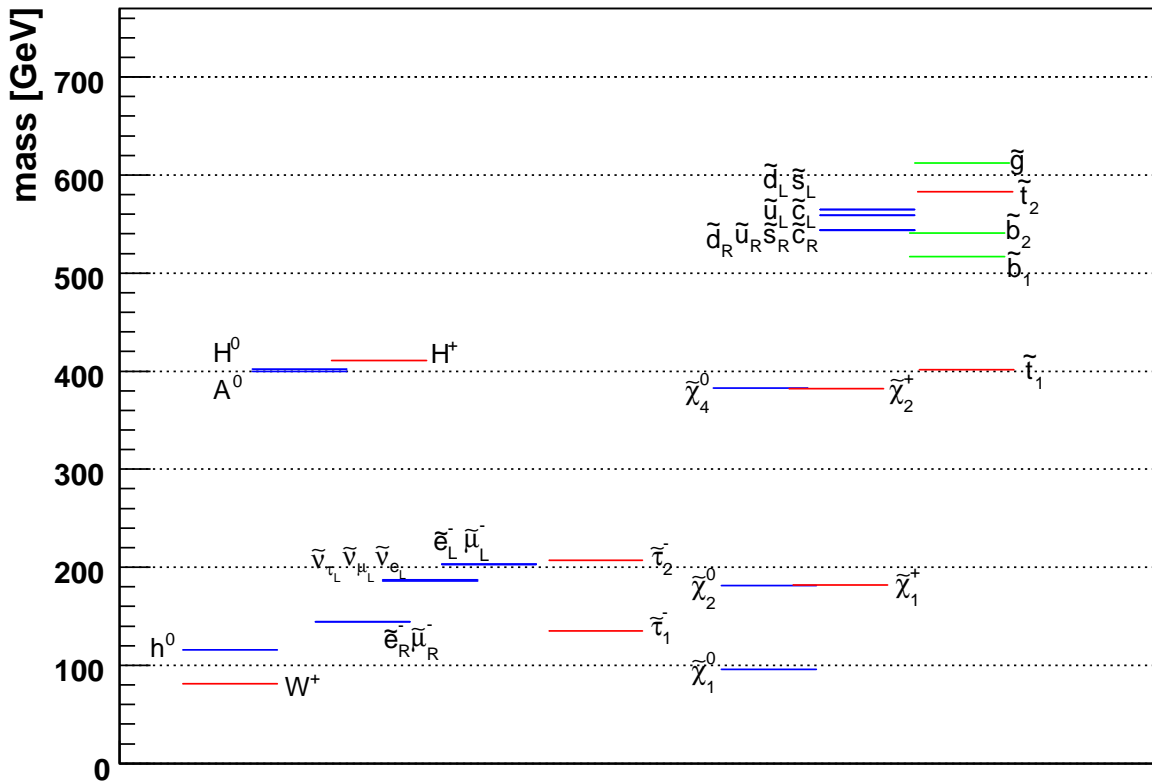


図 4.1 ISAJET / mSUGRA / LCC1 による, 粒子の質量 spectrum。超対称粒子の中では, $\tilde{\chi}_0$ が最も軽い (95.3 GeV)。

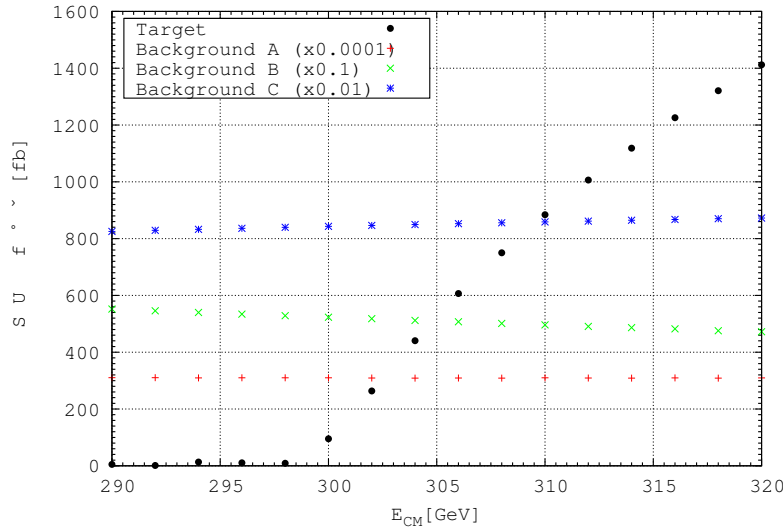


図 4.2 それぞれの反応の散乱断面積。ただし背景反応については尺度を変更している。反応の詳細については Section 3.1 を参照。対象反応 (Target) の散乱断面積の energy 依存性、および背景反応の散乱断面積が対象反応に比べ非常に大きいことに注目されたい。

SECTION 4.2 ACCELERATOR SIMULATION

◆ 4.2.1 Scattering Cross Sections

Pandora Pythia による散乱断面積の計算結果は、図 4.2 となった。対象反応の散乱断面積は、Feng らの結果 [1, Fig. 2] と若干異なっており、[彼らの結果よりも 100 fb 程度小さい値となった](#)。この相違の原因は不明である。

図 4.2 より、以下のことがわかる：

- 対象反応は $E_{CM} = 300 \text{ GeV}$ を閾値としてそれ以上では増加する。
- 背景反応は対象反応に比べて 10–10000 倍多く生じる。
- 背景反応は、この範囲では E_{CM} に殆ど依存しない。

◆ 4.2.2 Details of Scatterings and Cut-off

— Number of Tracks

まず、各反応で観測された track の数 N_{tr} 、および電子による track の数 $N_{tr}^{(e^-)}$ を、図 4.3・4.4 に示す。これらは $E_{CM} = 310 \text{ GeV}$ のものである。

この結果から、

- 対象反応 $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ では殆どが $N_{tr} = N_{tr}^{(e^-)} = 2$ となっている。
- 背景反応 A ($e^- e^- \rightarrow e^- e^-$) では殆どが $N_{tr} < 2$ 、 $N_{tr}^{(e^-)} < 2$ となっている。これは、この散乱反応が極前方散乱であることを示している。
- それ以外の背景反応では、殆どが $N_{tr} > 2$ となっている。

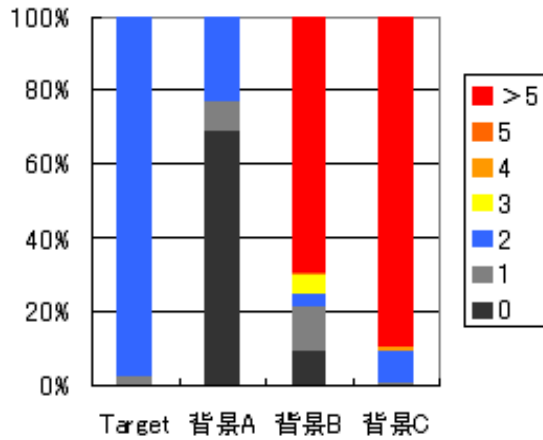


図 4.3 $E_{CM} = 310\text{GeV}$ での track 数。

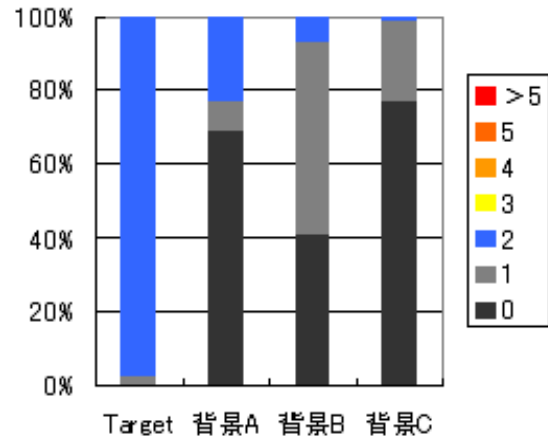


図 4.4 $E_{CM} = 310\text{GeV}$ での電子に起因する track 数。

ということが分かり、 $N_{tr} = N_{tr}^{(e^-)} = 2$ の cut off がとても有効であることがわかる。実際、この cut off, 即ち $N_{tr} = N_{tr}^{(e^-)} = 2$ の反応のみを取り出すと、其々の反応は

- Target : 1000000 events → 980007 events (98% 残存)
- Background A : 1000000 events → 233896 events (77% 除去)
- Background B : 100000 events → 52 events (99.95% 除去)
- Background C : 100000 events → 0 events (完全に除去)

にまで制限され、背景反応のみを上手く除去できた。

以下では、この制限を満たした反応についてのみ考える。

— Number of Clusters

Cluster に関しては、cluster の数 N_{cls} が 6 以上のものを除去するようにしていたが、実際の反応を見ると、どの反応も $N_{cls} < 6$ であり、この cut off は全く意味のないものであった。Section 3.2.2 で述べた通り、 $N_{cls} = 2$ のもの以外を除去、という制限にすべきであった。

— Energy Cut-Off

次に、それぞれの散乱事象について見ていく。 $E_{CM} = 310\text{GeV}$ において、各反応で観測された電子の energy の和 E_{sum} は、図 4.5 の通りである。この結果から

- 対象反応はほぼ全て $E_{sum} < 110\text{GeV}$ となっている。これは先述の通り、質量 100GeV の $\tilde{\chi}_0$ が 2 つ、測定器にかからないまま飛び去ってしまったからだと考えられる。
- 背景反応 $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$ ではこのような “missing” な粒子がないため、観測された電子の energy は高い。

ということが分かる。即ち、 $E_{sum} > E_{CM} - 200\text{GeV}$ の反応を除去することにより確かに対象反応のみを選別できることが確認できた。

なお、対象反応において E_{sum} が初期 energy E_{CM} より大きくなっている部分があるのは、detector simulation の結果、即ち測定時に生じる統計的不確かさのためであろう。

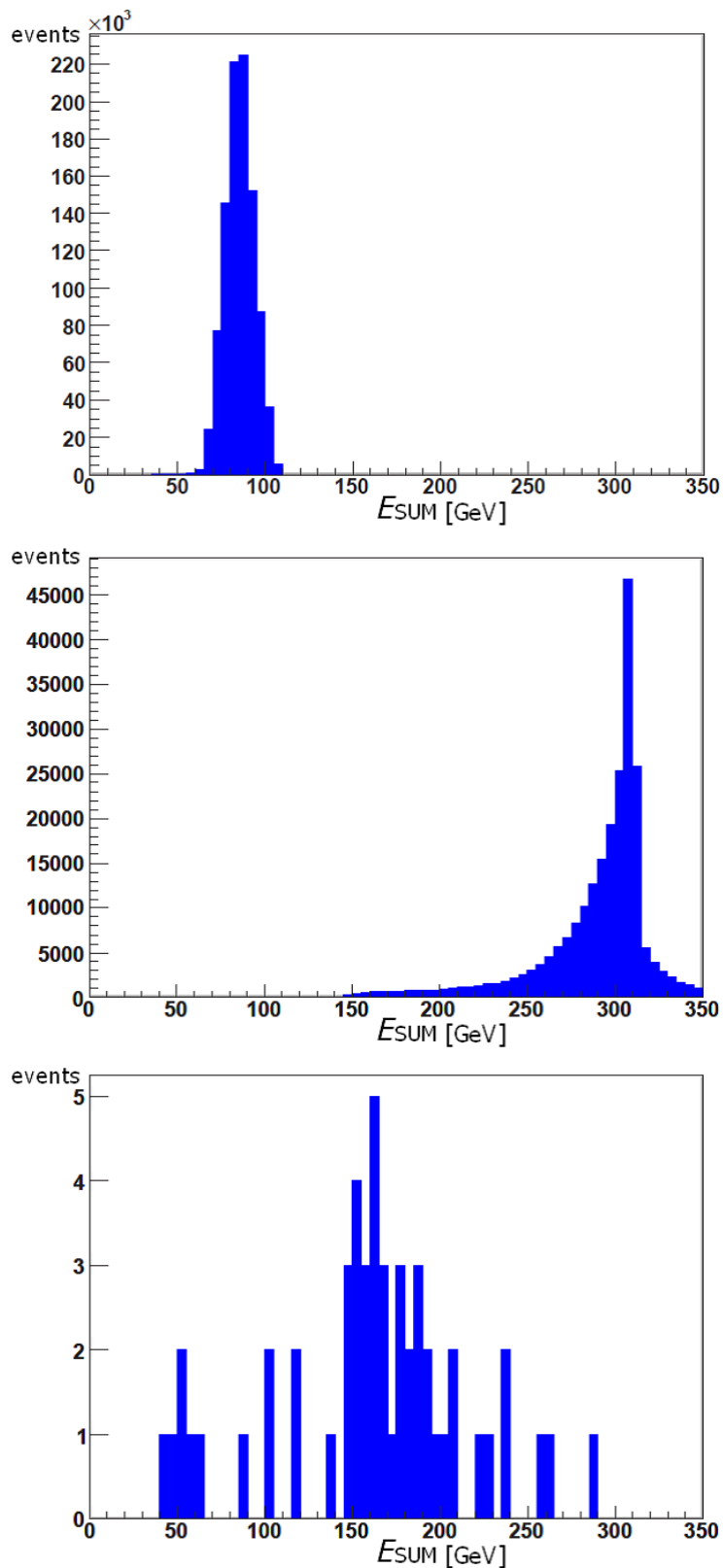


図 4.5 Track 数の条件を満たした散乱反応 ($E_{CM} = 310\text{GeV}$) において、観測された電子の energy の和。上から順に、対象反応 $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$, 背景反応 $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$ および $e^- \gamma \rightarrow e^- Z^0$ 。

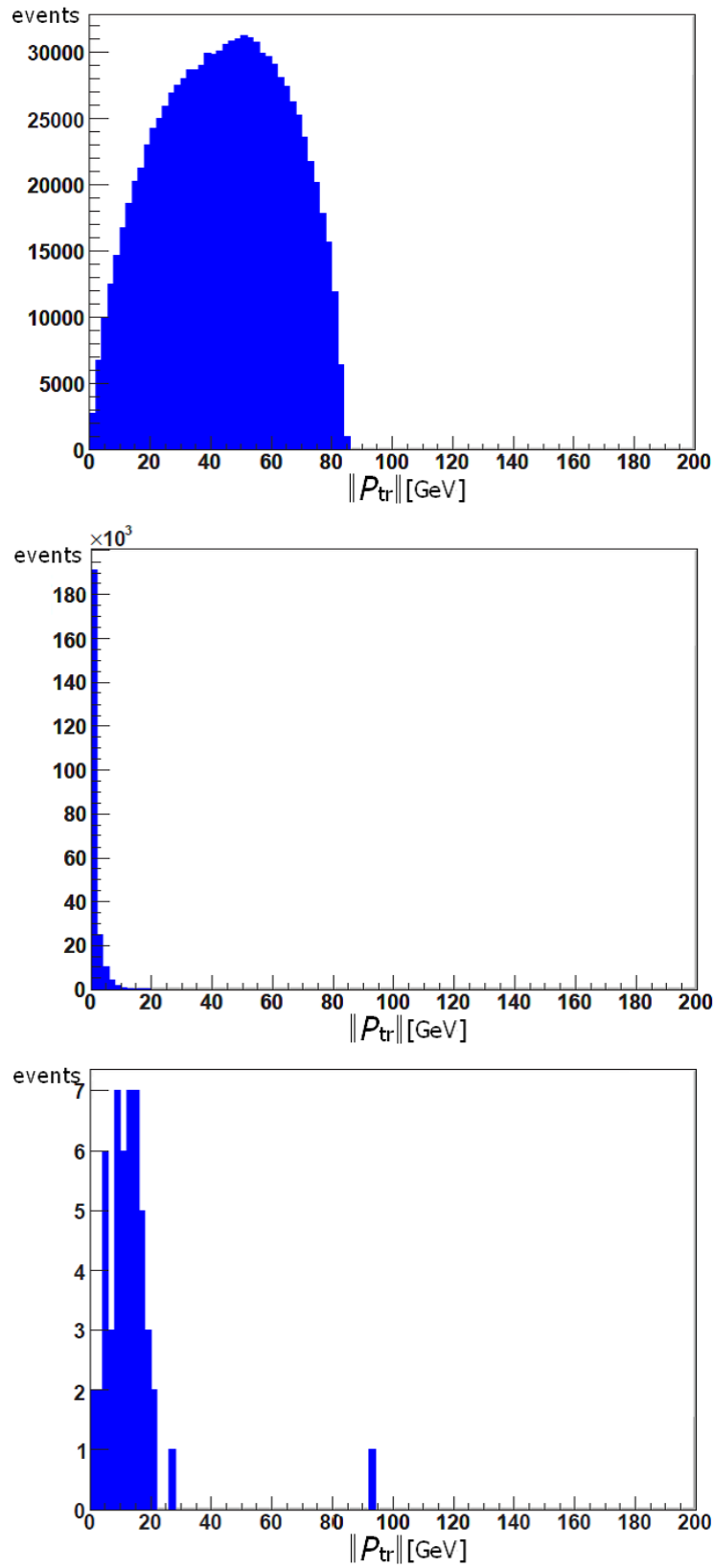


図 4.6 Track 数の条件を満たした散乱反応 ($E_{CM} = 310\text{GeV}$) における transverse vector sum の大きさ。上から順に、対象反応 $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$, 背景反応 $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$ および $e^- \gamma \rightarrow e^- Z^0$ 。

— Transverse Vector Cut-Off

次に、各 event での transverse vector sum の大きさ $\|\mathbf{P}_{\text{tr}}\|$ について見てみよう。

$E_{\text{CM}} = 310 \text{ GeV}$ において、各反応で観測された電子の transverse vector sum の大きさ

$$\|\mathbf{P}_{\text{tr}}\| := \sqrt{(p_{1x} + p_{2x})^2 + (p_{1y} + p_{2y})^2} \quad (\text{Beam の方向を } z \text{ 軸としてある}) \quad (4.1)$$

は、図 4.6 の通りである。(Track の数による除去が為されていることに注意。)

これを見て明らかなおおり、 $\|\mathbf{P}_{\text{tr}}\|$ の小さい反応を除去すれば、対象反応を傷つけることなく背景反応のみを除去することができる。特に今回は、 $\|\mathbf{P}_{\text{tr}}\| < 10 \text{ GeV}$ のものを除去した。

◆ 4.2.3 Result of Cut-Off

以上の、track 数・energy・transverse vector という 3 つの cut-off の結果、それぞれの反応は

- Target : 980007 events → 933440 events (93% 残存) ※ $E_{\text{CM}} = 310 \text{ GeV}$ の場合。以下同じ。
- Background A : 1000000 events → 0 event (完全除去)
- Background B : 100000 events → 6 events (99.99% 除去)
- Background C : 100000 events → 0 event (完全除去)

まで除去することができた。Background B の反応 $e^- \gamma \rightarrow e^- Z^0$ は完全には除去できなかった。

これは 310 GeV のときの結果であるが、 $E_{\text{CM}} = 300\text{--}310 \text{ GeV}$ についても同様の cut-off を用いて「選別」を行った。その結果は表 4.1 の通りである。どの energy の場合についても、

- Track 数が 2 で、しかもその両方が電子 e^- に起因する。
- $E_{\text{sum}} < E_{\text{CM}} - 200 \text{ GeV}$ 。
- $\|\mathbf{P}_{\text{tr}}\| > 10 \text{ GeV}$

の 3 つの条件による選別で、対象反応の減少を 7% 程度にとどめつつ背景反応をほぼ完全に除去することができた。

◆ 4.2.4 Experimental Cross Sections with Uncertainty

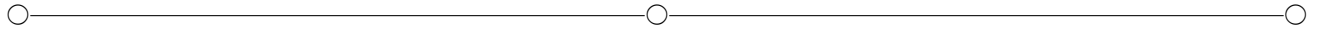
以上の結果を用いると、実際に実験を行ったときの散乱断面積の誤差を評価することができる。その結果が表 4.2 である。1 fb⁻¹ が、大体 $t \sim 4.6$ 日の実験に対応する。一応 10 fb⁻¹ や 20 fb⁻¹ の時の値も記したが、これらはそれぞれ

E_{CM}	Target	Background A	Background B	Background C
300 GeV	934073 / 1000000	0 / 1000000	4 / 100000	0 / 100000
302 GeV	933111 / 1000000	0 / 1000000	5 / 100000	0 / 100000
304 GeV	933312 / 1000000	0 / 1000000	4 / 100000	0 / 100000
306 GeV	933152 / 1000000	0 / 1000000	5 / 100000	0 / 100000
308 GeV	933689 / 1000000	0 / 1000000	5 / 100000	0 / 100000
310 GeV	933440 / 1000000	0 / 1000000	6 / 100000	0 / 100000

表 4.1 様々な energy での各散乱反応に対して、track 数・energy・transverse vector の 3 つの cut-off を施した結果。標的反応のみを上手く識別できた。

E_{CM}	σ for 1 fb^{-1}	for 10 fb^{-1}	for 20 fb^{-1}
300 GeV	$94.98 \pm 10.11 \text{ fb}$	$\pm 3.20 \text{ fb}$	$\pm 2.26 \text{ fb}$
302 GeV	$263.67 \pm 16.83 \text{ fb}$	$\pm 5.32 \text{ fb}$	$\pm 3.76 \text{ fb}$
304 GeV	$440.36 \pm 21.73 \text{ fb}$	$\pm 6.87 \text{ fb}$	$\pm 4.86 \text{ fb}$
306 GeV	$606.57 \pm 25.51 \text{ fb}$	$\pm 8.07 \text{ fb}$	$\pm 5.70 \text{ fb}$
308 GeV	$750.10 \pm 28.35 \text{ fb}$	$\pm 8.97 \text{ fb}$	$\pm 6.34 \text{ fb}$
310 GeV	$884.09 \pm 30.79 \text{ fb}$	$\pm 9.74 \text{ fb}$	$\pm 6.88 \text{ fb}$

表 4.2 各 E_{CM} における対象反応 $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ の散乱断面積と、それらの統計的不確かさ。不確かさの程度は 1σ である。ISR, FSR, Beamstrahlung, beam design effect, 背景反応, および測定時の統計的不確かさの全てを考慮してある。



1.5 ヶ月・3 ヶ月に対応するので、実際の実験は困難であろう。

SECTION 4.3 MASS DEPENDENCY

次に, selectron \tilde{e}_R^- および neutralino $\tilde{\chi}_0$ の質量 $m_{\tilde{e}_R^-} \cdot m_{\tilde{\chi}_0}$ への, cross sections の依存性を調べた。Cross section は Pandora Pythia によって計算した。

◆ 4.3.1 On Selectron Mass

Neutralino の質量を 100 GeV に固定して, selectron の質量を様々に変えて cross section を調べた。

まず, $m_{\tilde{e}_R^-} = 100 \pm 0.1 \text{ GeV}$ の時の結果を図 4.7 に示す。この結果は, section 4.2.1 で述べた“100fb のずれ”を除けば, Feng らのもの [1, Fig. 5] とよく一致する。

次に, cross section σ の $m_{\tilde{e}_R^-}$ に対する依存性を見るため,

$$\Delta_{\tilde{e}_R^-} \sigma := \left(m_{\tilde{e}_R^-} \text{ を変化させたときの断面積} \right) - \left(m_{\tilde{e}_R^-} = 150.0 \text{ GeV のときの断面積} \right) \quad (4.2)$$

を求めた。これが図 4.8 である。

この結果より私は

- $E_{CM} = 298 \text{ GeV}$ 付近の振る舞いは現象論的には理解しがたい。
- $E_{CM} = 302\text{--}310 \text{ GeV}$ の範囲はほぼ直線で近似できる。

と判断し, $E_{CM} = 302\text{--}310 \text{ GeV}$ の範囲について 1 次関数

$$\Delta\sigma(E_{CM}; m_{\tilde{e}_R^-}, 100 \text{ GeV}) = A_1(m_{\tilde{e}_R^-})(E_{CM} - 300) + A_0(m_{\tilde{e}_R^-}) \quad (4.3)$$

で近似した。(ここで E_{CM} の単位は [GeV], σ の単位は [fb] である。以下混乱の虞の無い場合は単位を省く。) その結果

$$\begin{aligned} \Delta\sigma(E_{CM}; 149.6 \text{ GeV}, 100 \text{ GeV}) &= -2.3(E_{CM} - 300) + 81.8 \\ \Delta\sigma(E_{CM}; 149.7 \text{ GeV}, 100 \text{ GeV}) &= -1.6(E_{CM} - 300) + 60.6 \\ &\vdots \end{aligned}$$

という式が得られた。

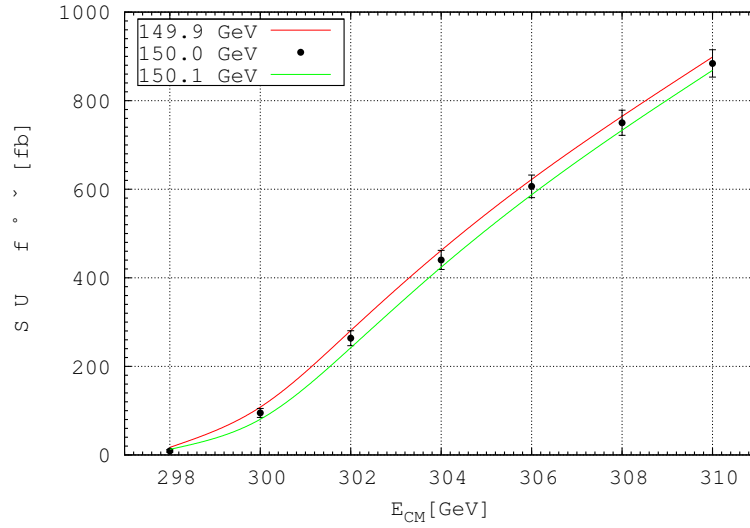


図 4.7 $e^-e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ の反応の散乱断面積。 $\tilde{\chi}_0$ の質量を 100GeV に固定して、 \tilde{e}_R^- の質量を変化させている。 150.0GeV のときのものには、前節で求めた統計誤差を付け加えている。また、 $\pm 0.1\text{GeV}$ の値は実線になっているが、その値は $E_{\text{CM}} = 298, 300, 302, \dots, 310\text{GeV}$ の点しか意味を持たないことに注意。

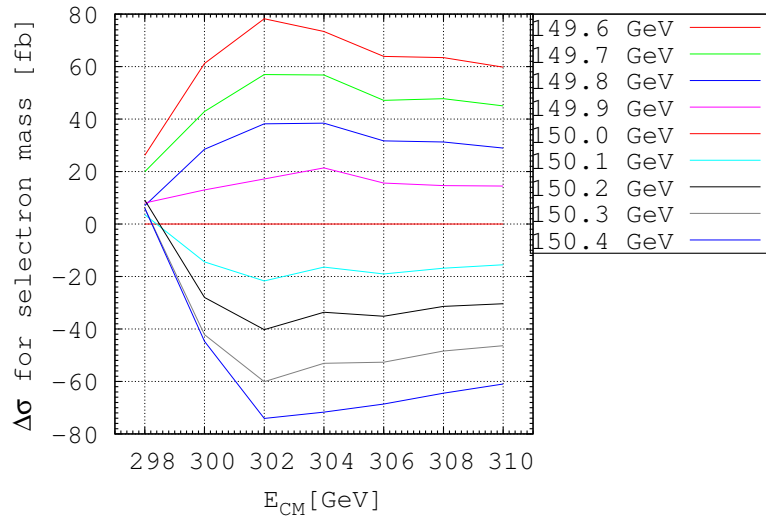


図 4.8 \tilde{e}_R^- の質量を 150GeV から僅かに変化させた時の、 $e^-e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ の反応の散乱断面積の変化量。 $\tilde{\chi}_0$ の質量は 100GeV に固定してある。 Graph は実線となっているが、その値は $E_{\text{CM}} = 298, 300, 302, \dots, 310\text{GeV}$ の点しか意味を持たない。

この係数 $A_1(m_{\tilde{e}_R^-})$ および $A_0(m_{\tilde{e}_R^-})$ の、 $m_{\tilde{e}_R^-}$ に対する依存性は、図 4.9 のようにほぼ 1 次関数の形で依存している。よって、 A_1 および A_0 を $m_{\tilde{e}_R^-} = 149.6\text{--}150.3\text{GeV}$ の範囲で、1 次関数で近似し、最終的に

$$\Delta\sigma(E_{\text{CM}}; m_{\tilde{e}_R^-}, 100\text{GeV}) = [5.67(m_{\tilde{e}_R^-} - 150) - 0.0387](E_{\text{CM}} - 300) - 202(m_{\tilde{e}_R^-} - 150) + 0.239 \quad (4.4)$$

という、現象論的な式を得た。ここで $m_{\tilde{e}_R^-} = 150.4\text{GeV}$ の結果は切り捨てているが、今問題としているのは図 4.7 の通り、 $m_{\tilde{e}_R^-} \approx 150 \pm 0.1\text{GeV}$ の程度の部分なので構わない。

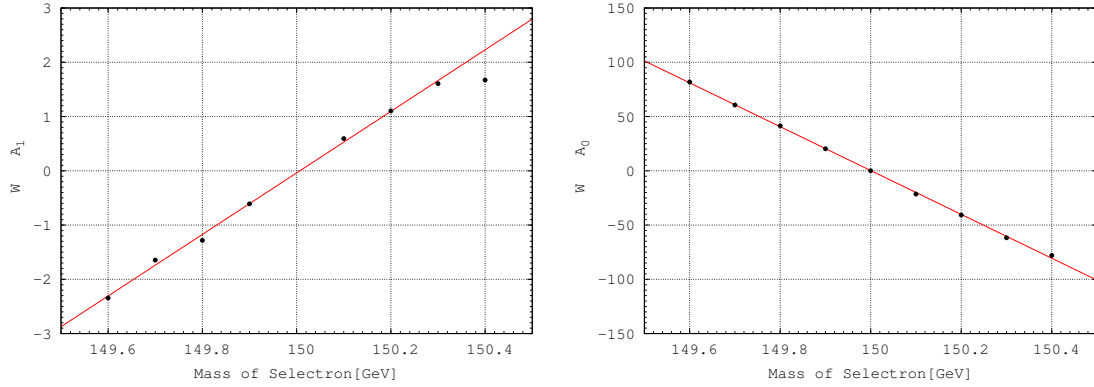


図 4.9 係数 $A_1(m_{\tilde{e}_R^-})$ と $A_0(m_{\tilde{e}_R^-})$ の, $m_{\tilde{e}_R^-}$ に対する依存性。実線は近似式 (1 次関数) である。

この近似式に対し, cross section とその統計誤差 (表 4.2 および図 4.7 を参照) を代入したところ,

$$\Delta m_{\tilde{e}_R^-} = 0.0584 \text{ GeV} \quad (\text{for fixed } m_{\tilde{\chi}_0^-} : 1\sigma \text{ uncertainty}) \quad (4.5)$$

という結果が得られた。

◆ 4.3.2 On Neutralino Mass

以上のことを, 今度は selectron \tilde{e}_R^- の質量を固定して, neutralino $\tilde{\chi}_0^-$ に対して行った。

まず, $m_{\tilde{e}_R^-}$ を 150.0 GeV とし, $m_{\tilde{\chi}_0^-}$ を 100 ± 10 GeV としたときの散乱断面積は図 4.10 のようになった。Feng らの結果 [1, Fig. 6] と比べると, やはり “100fb のずれ” はあるものの, それ以外はほぼ同じ結果である。

次に, cross section σ の $m_{\tilde{\chi}_0^-}$ に対する依存性を見るため,

$$\Delta_{\tilde{\chi}_0^-} \sigma := (m_{\tilde{\chi}_0^-} \text{ を変化させたときの断面積}) - (m_{\tilde{\chi}_0^-} = 100 \text{ GeV のときの断面積}) \quad (4.6)$$

を求めた。これが図 4.11 である。先ほどと同様に直線で近似できると考え, $E_{\text{CM}} = 302\text{--}310$ GeV の範囲について 1 次関数

$$\Delta\sigma(E_{\text{CM}}; m_{\tilde{e}_R^-}, 100 \text{ GeV}) = B_1(m_{\tilde{\chi}_0^-})(E_{\text{CM}} - 300) + B_0(m_{\tilde{\chi}_0^-}) \quad (4.7)$$

で近似し, 更にその係数 $B_1(m_{\tilde{\chi}_0^-})$ および $B_0(m_{\tilde{\chi}_0^-})$ の $m_{\tilde{\chi}_0^-}$ に対する依存性を見た (図 4.12)。

すると, 今度は 2 次関数 (放物線) 的な振る舞いをしているので, $m_{\tilde{e}_R^-} = 149.6\text{--}150.4$ GeV の範囲で 2 次関数で近似し, 最終的に

$$\begin{aligned} \Delta\sigma(E_{\text{CM}}; 150 \text{ GeV}, m_{\tilde{\chi}_0^-}) = & \left[-0.00994(m_{\tilde{\chi}_0^-} - 100)^2 + 0.555(m_{\tilde{\chi}_0^-} - 100) - 0.360 \right] (E_{\text{CM}} - 300) \\ & - 0.00625(m_{\tilde{\chi}_0^-} - 100)^2 + 0.636(m_{\tilde{\chi}_0^-} - 100) - 0.217 \quad (4.8) \end{aligned}$$

という近似式を得た。

この近似式に対し, cross section とその統計誤差 (表 4.2 および図 4.10 を参照) を代入したところ,

$$\Delta m_{\tilde{\chi}_0^-} = 2.58 \text{ GeV} \quad (\text{for fixed } m_{\tilde{e}_R^-} : 1\sigma \text{ uncertainty}) \quad (4.9)$$

という結果が得られた。

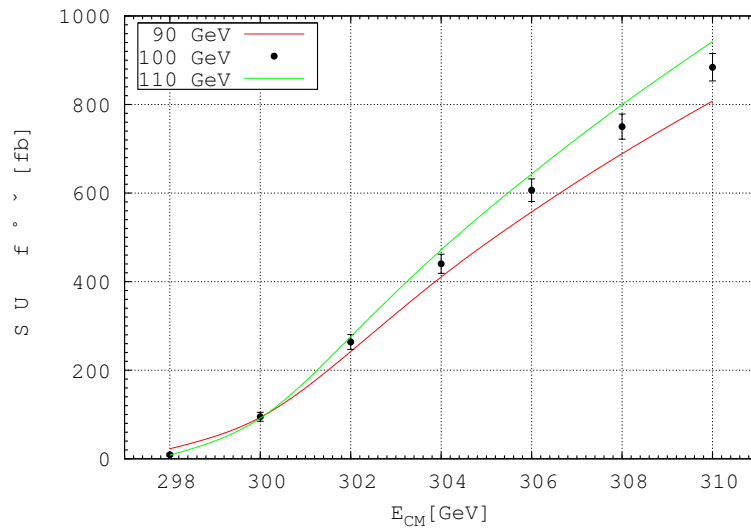


図 4.10 $e^-e^- \rightarrow \tilde{e}_R\tilde{e}_R$ の反応の散乱断面積。 \tilde{e}_R の質量を 150.0GeV に固定して、 $\tilde{\chi}_0$ の質量を変化させている。 100GeV のときのものには、 前節で求めた統計誤差を付け加えている。 また、 $\pm 10\text{GeV}$ の値は実線になっているが、 その値は $E_{\text{CM}} = 298, 300, 302, \dots, 310\text{GeV}$ の点しか意味を持たないことに注意。

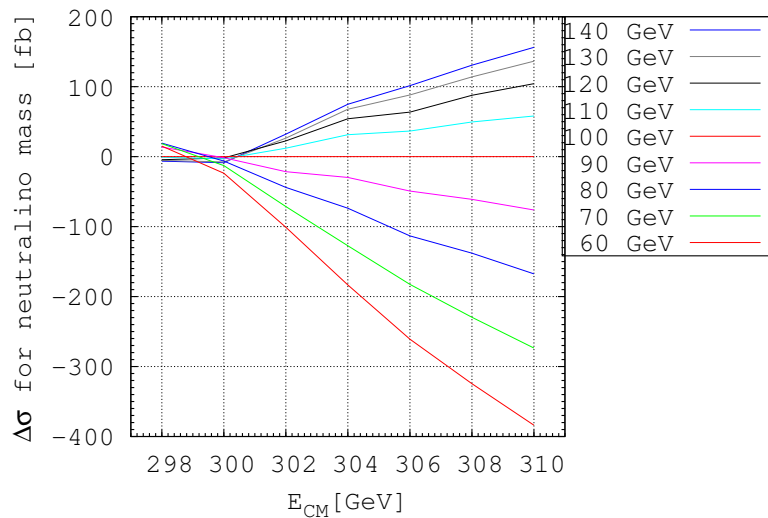


図 4.11 $\tilde{\chi}_0$ の質量を 100GeV から変化させた時の、 $e^-e^- \rightarrow \tilde{e}_R\tilde{e}_R$ の反応の散乱断面積の変化量。 \tilde{e}_R は 150.0GeV に固定してある。 Graph は実線であるが、 その値は $E_{\text{CM}} = 298, 300, 302, \dots, 310\text{GeV}$ の点しか意味を持たない。

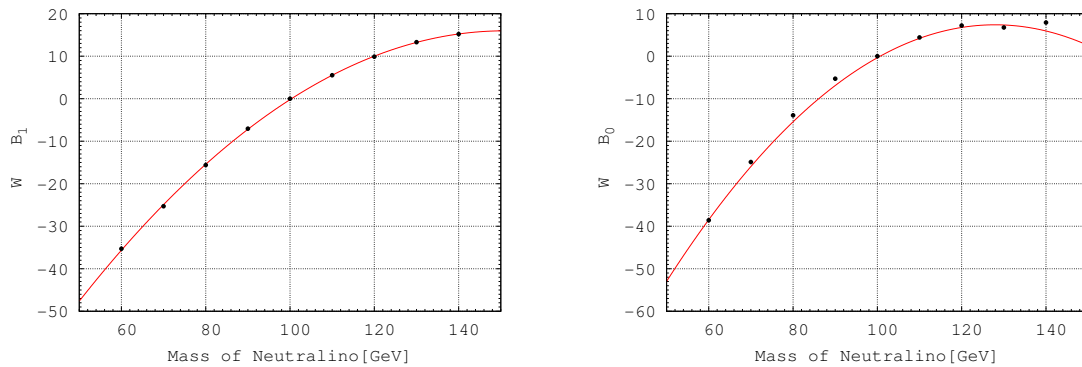


図 4.12 係数 $B_1(m_{\tilde{\chi}_0})$ と $B_0(m_{\tilde{\chi}_0})$ の、 $m_{\tilde{\chi}_0}$ に対する依存性。 実線は近似式（2 次関数）である。

◆ 4.3.3 Summary

以上より、最終的な結果は

$$\Delta m_{\tilde{\chi}_0^-} = 2.58 \text{ GeV} \quad (\text{for fixed } m_{\tilde{e}_R^-}) \quad (4.10)$$

$$\Delta m_{\tilde{e}_R^-} = 0.0584 \text{ GeV} \quad (\text{for fixed } m_{\tilde{\chi}_0^-}) \quad (4.11)$$

(both for 1σ error)

となった。これらは現象論的な式 (4.5)・(4.8) より導出した値であるので、

- Δm が、他方の値を固定したという仮定の下での値でしかない。
- そもそもの現象論的式が、完全に正確とは言い切れない。

という点で問題がある。今後はここを改善していかなばならない。

SECTION 4.4 SUSY PARAMETER EXPECTATION

というわけで、あとは求めた質量の不確かさを SUSY parameters の不確かさ、ひいては relic density の不確かさに反映させれば良いだけである。

◆ 4.4.1 First Approach

まず、Section 3.4 の通り、parameter を 1 つずつ動かして調べた。

各 parameter の変化に対する selectron \tilde{e}_R^- の質量の振る舞いを図 4.13 に、neutralino $\tilde{\chi}_0$ の質量の振る舞いを図 4.14 に示した。

これらの結果、前述の質量の条件を満たす parameters は次のようになった：

$$\begin{aligned} m_0 &= 100 \pm 0.9 \text{ GeV} & M_{1/2} &= 250 \pm 0.24 \text{ GeV} & A_0 &= \text{from } -280 \text{ to } 70 \\ \tan \beta &= 10^{+3.2}_{-1.6} & M_t &= 178^{+12}_{-28} \text{ GeV} \end{aligned} \quad (4.12)$$

これらは全て selectron の質量の不確かさから決まったものである。neutralino の質量の不確かさはあまりに大きすぎたため、事実上用いていない。^{*1}

また、図 4.13 の左下、 Ωh^2 の変化を見てみると、この段階での relic density の不確かさは

$$\Omega h^2 = 0.195^{+0.006}_{-0.009} \quad (4.13)$$

となるのがわかる。これではあまりに不確かすぎる。

ここでその変化の様子を良く見ると、ある 1 つの parameter が Ωh^2 を大きくばらつかせていることがわかる。その parameter は、 $\tan \beta$ である。この $\tan \beta$ の範囲が狭まれば、もう少し不確かさがマトモになる。

^{*1} μ の符号を -1 に変化させたときは、neutralino の質量が、その不確かさを上回って変化した。このため、 μ の符号は neutralino によって制限されている、とも言うことができるが、今回の実験では μ の符号の変化は考えていないので、これは意味を為さない。

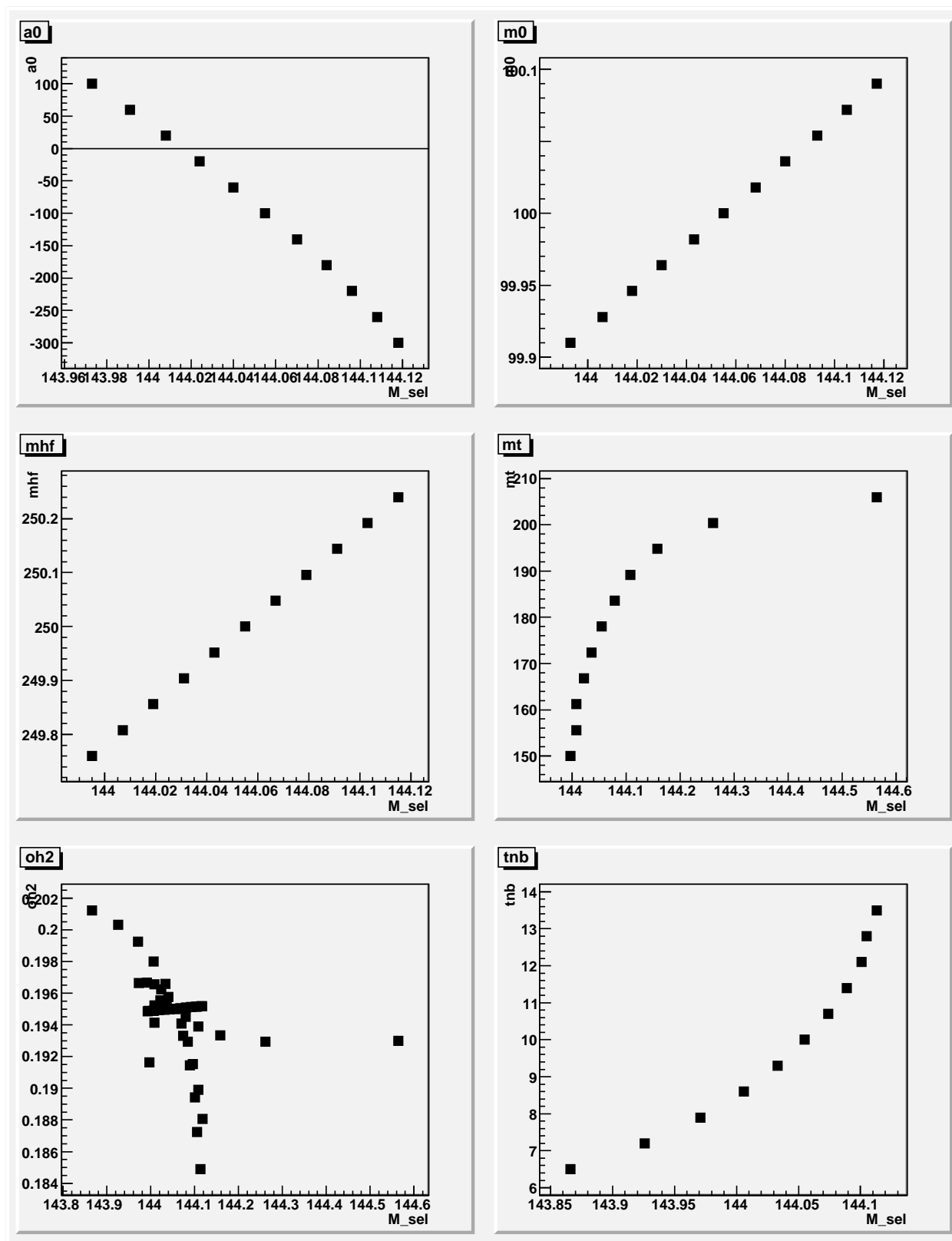


図 4.13 SUSY parameter (縦軸) を変化させた時の, selectron \tilde{e}_R^- の質量 (横軸) の振る舞い, および, その各場合の relic density Ωh^2 の振る舞い (左下)。SUSY parameter は, 各 graph ごとに 11 点とっており, その全て (計 55 点) が Ωh^2 の graph に反映されている。(本来この図は横軸と縦軸を逆にすべきであった。)

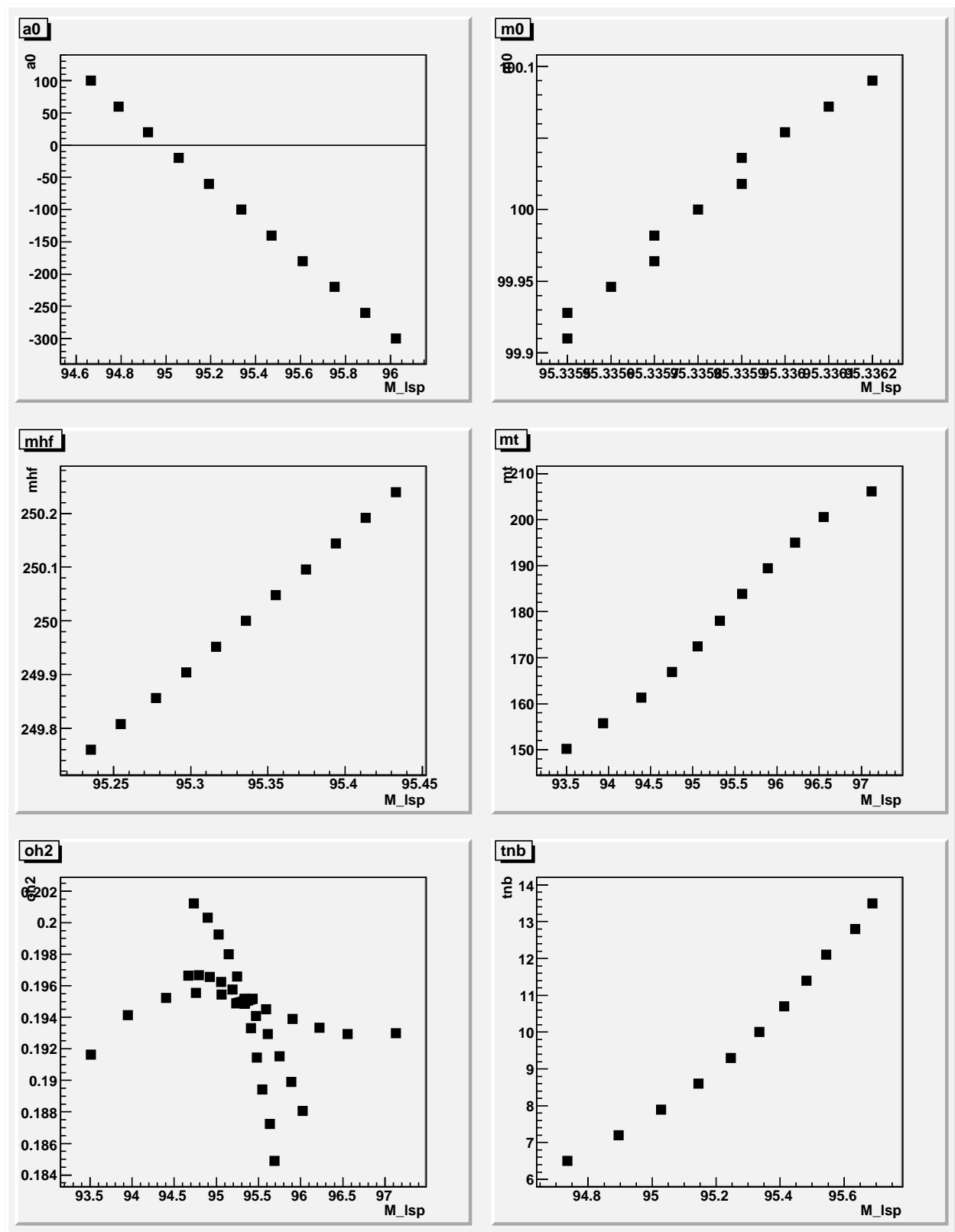


図 4.14 SUSY parameter (縦軸) を変化させた時の, neutralino $\tilde{\chi}_0$ の質量 (横軸) の振る舞い, および, その各場合の relic density $\Omega_{\tilde{\chi}_0} h^2$ の振る舞い (左下)。詳細は図 4.13 と同じである。

◆ 4.4.2 Next Approach

Relic density の不確かさがあまりに大きすぎるとどうしようもないので、今までは我々がやった実験から全ての parameter を決めようとしていたわけだが、それを諦めて、既存の結果を一部流用することにした。

■ Top Quark Mass

Top quark の質量 m_t の不確かさは、Tevatron によって $\pm 3.3 \text{ GeV}$ [11] と見積もられているので、その値を使用することにした。^{*2}

■ A_0 and $\tan\beta$

Ωh^2 は $\tan\beta$ に敏感に反応して大きくばらついている。また、 A_0 の値は $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ の反応からはほとんど決めることが出来なかった。この 2 つの値の不確かさを何とか狭めれば、より結果が良くなる。

ここで、Feng の論文で用いられている結果 [2, FIG. 7] を使うことにする。Feng は、 $\tilde{\tau}_1$ の質量として、

$$m_{\tilde{\tau}_1}^{(\text{Feng})} = 133.2 \pm 0.3 \text{ GeV} \quad (4.14)$$

という値を用いている。我々は、LCC1 での $m_{\tilde{\tau}_1}$ の値にこの不確かさを導入した

$$m_{\tilde{\tau}_1}^{(\text{ours})} = 134.6 \pm 0.3 \text{ GeV} \quad (4.15)$$

という制限を導入することにした。

この制限の下で、先ほどのように他の値は LCC1 の値に固定して A_0 のみを動かしたところ、 A_0 は -117 から -81 の範囲にあることが分かった。同様に $\tan\beta$ についても考察したところ、 9.81 から 10.17 の間にあることが分かった。 A_0 と $\tan\beta$ の値の不確かさとして、これらを用いることにした。

以上より、

$$\begin{aligned} m_0 &= 100 \pm 0.9 \text{ GeV} & M_{1/2} &= 250 \pm 0.24 \text{ GeV} & A_0 &= -100 \pm 19 \\ \tan\beta &= 10 \pm 0.19 & M_t &= 178 \pm 3.3 \text{ GeV} \end{aligned} \quad (4.16)$$

として再び計算した。その結果が図 4.15 および図 4.16 である。

◆ 4.4.3 Last Step

そして、更に式 (4.16) を用いて、5 つ全部を動かした時について調べた。具体的には、各 parameter が (4.16) の値を正規分布に従ってとる、と仮定し、Gauss 関数の重みをつけて各変数について 11 点をとった。そして、その 5 変数 11 点 (計 $11^5 = 161051$ 点) に対する relic density Ωh^2 を計算した。その結果、図 4.17 のような histogram が得られた。この

$$\Omega h^2 = 0.19502 \pm 0.00042 \quad (4.17)$$

が最終結果である。

^{*2} 最新の結果では $\pm 2.6 \text{ GeV}$ となっている [12] が、実験では 3.3 GeV の結果を用いた。

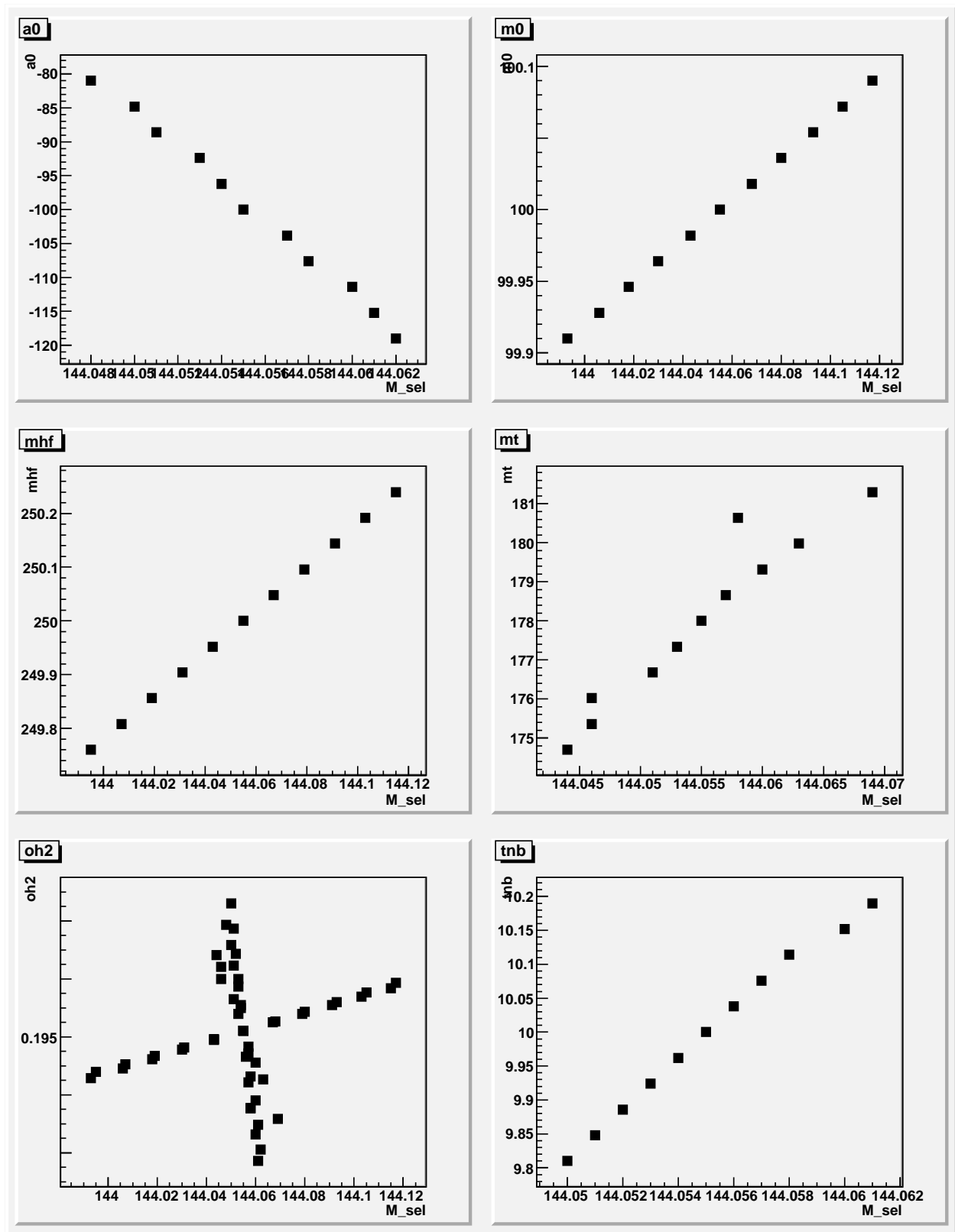


図 4.15 SUSY parameters の不確かさを式 (4.16) として、1つずつ変化させたときの、selectron \tilde{e}_R の質量（横軸）の振る舞い、および、その各場合の relic density Ωh^2 の振る舞い（左下）。

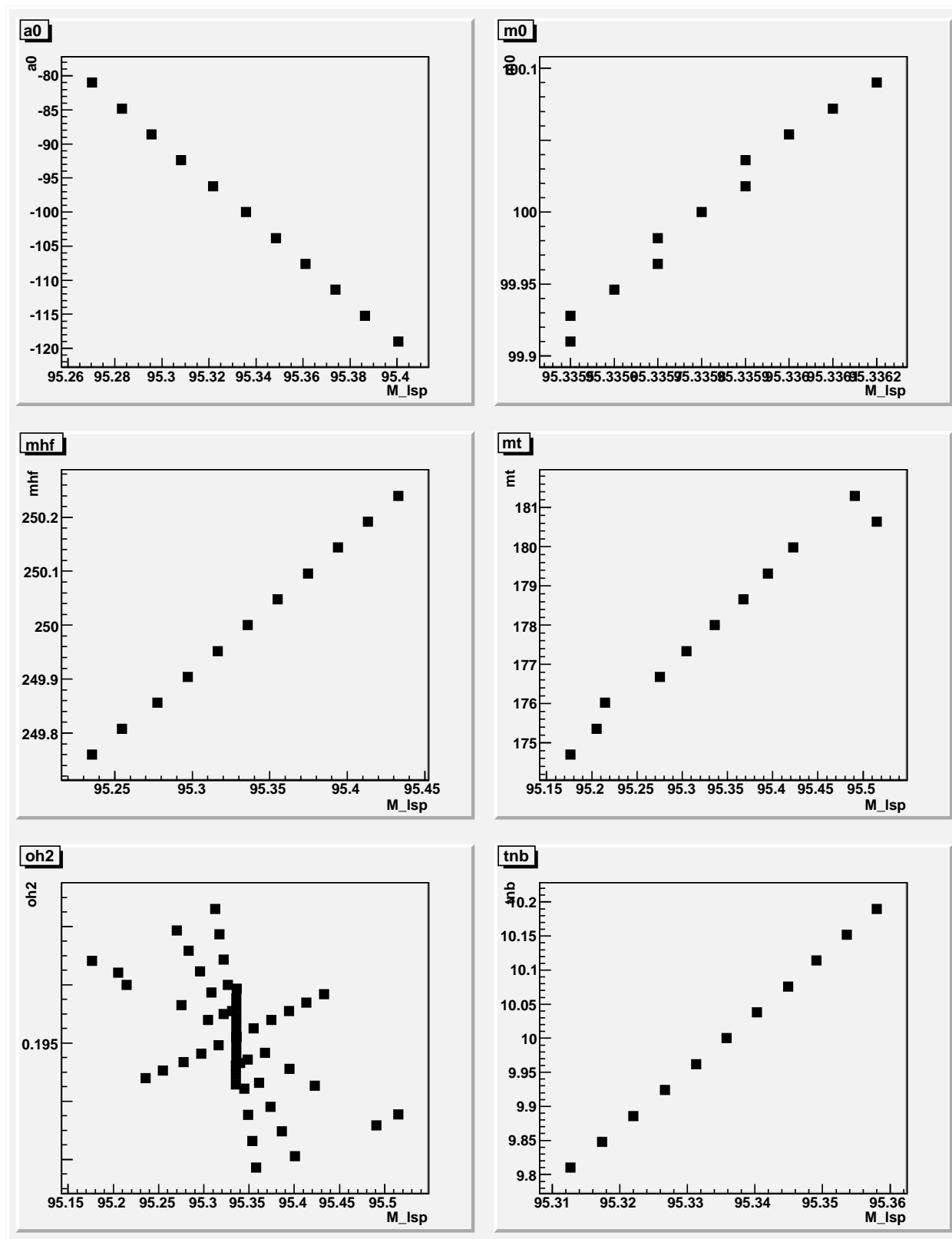


図 4.16 SUSY parameters の不確かさを式 (4.16) として、1 つずつ変化させたときの、neutralino $\tilde{\chi}_0$ の質量（横軸）の振る舞い、および、その各場合の relic density Ωh^2 の振る舞い（左下）。

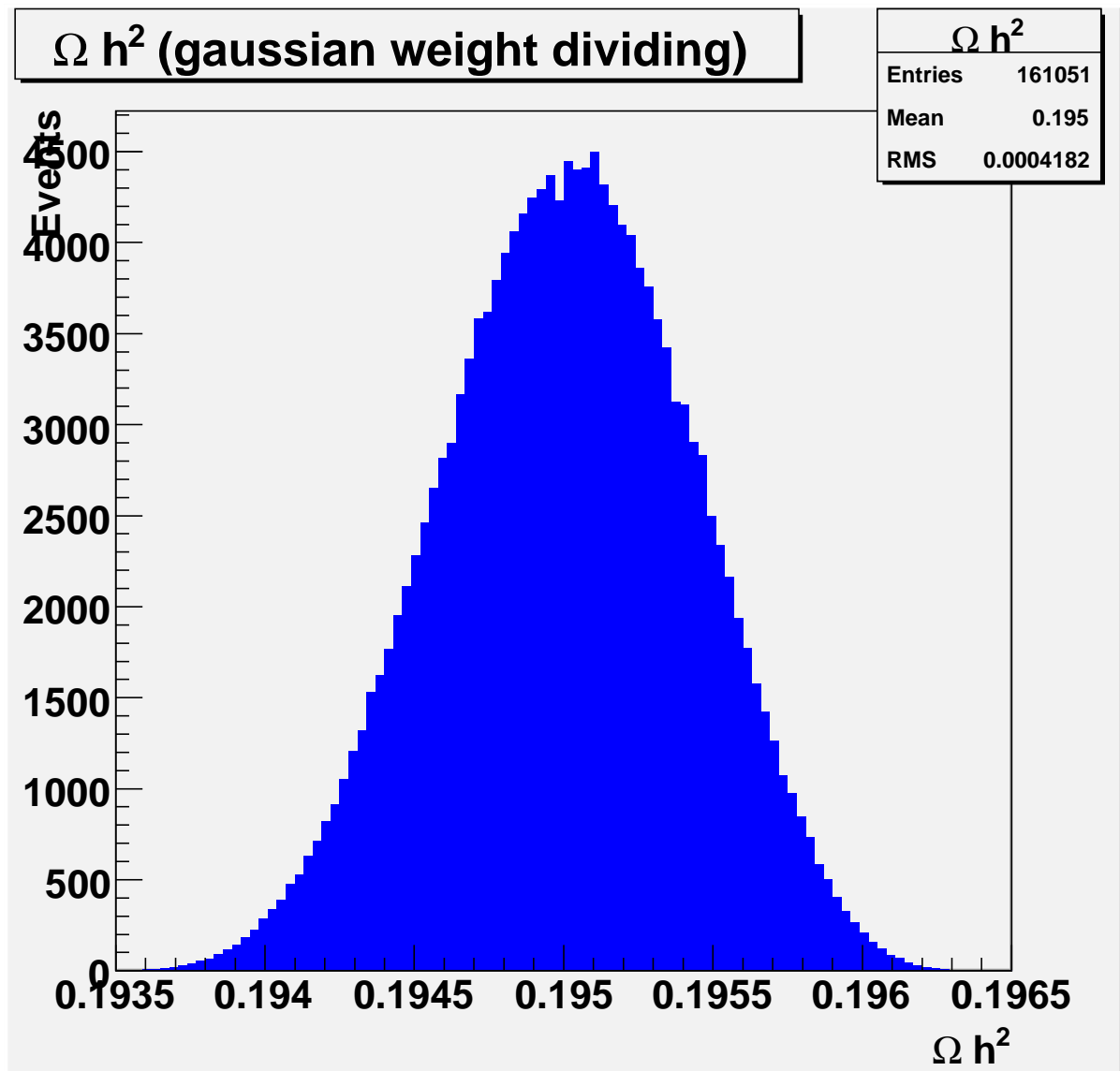


図 4.17 Relic density の統計的ばらつきを表した histogram。

Chapter 5

Conclusion

SECTION 5.1 MASS SPECTRUM

Section 4.1 で得られた超対称粒子の質量 (図 4.1) については, Feng らのものと全く同じであった。

SECTION 5.2 ACCELERATOR SIMULATION

次に散乱実験の部分についての考察を述べる。

◆ 5.2.1 Difference of Cross Section from Feng's Result

まず, 既に何度か述べたとおり, cross section が Feng らの結果と異なっている。我々の結果のうち, 図 4.2, 図 4.7, 図 4.10 はそれぞれ Feng らの論文 [2] の FIG. 2, FIG. 5, FIG. 6 に対応するものであるが, これらを見比べると, 肝心の $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ の散乱断面積が 100 fb ほど異なるのが分かる。 $m_{\tilde{e}_R^-}$ や $m_{\tilde{\chi}_0}$ への依存性は似ているのだが……。

この原因は全く不明であるが, 可能性としては

- Pandora Pythia の計算が誤っている。
- 我々あるいは Feng らの書いた code が間違っている。

のいずれかがぐらいしか考えられない。この散乱断面積はもちろん自分達で計算できるはずなので, 今後理論的計算を行うことえ原因を追究したい。

◆ 5.2.2 Cut-Off

我々は

- Track 数が 2 で, しかもその両方が電子 e^- に起因する。
- $E_{\text{sum}} < E_{\text{CM}} - 200 \text{ GeV}$ 。
- $\|P_{\text{tr}}\| > 10 \text{ GeV}$ 。

という条件により背景反応と対象反応を選別した。 $e^- \gamma \rightarrow e^- Z^0$ の反応は若干除去できなかったが, この散乱断面積は $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ の数十倍程度であり, 殆ど問題とならない。実際, 表 5.1 を見ると, 散乱断面積の不確かさには背景反応の影響は殆ど顕れていない。

しかし, cluster 数の制限がゆるすぎたということは問題であった。今後の擬製実験では改善したい。

E_{CM}	BG / DS	DS Only	Neither
300 GeV	± 10.11 fb	± 10.08 fb	± 9.75 fb
302 GeV	± 16.83 fb	± 16.81 fb	± 16.24 fb
304 GeV	± 21.73 fb	± 21.72 fb	± 20.98 fb
306 GeV	± 25.51 fb	± 25.50 fb	± 24.63 fb
308 GeV	± 28.35 fb	± 28.34 fb	± 27.39 fb
310 GeV	± 30.79 fb	± 30.78 fb	± 29.73 fb

表 5.1 各 E_{CM} における対象反応 $e^-e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ の散乱断面積の、 1fb^{-1} に対する 1σ 統計的不確かさ。まず、“BG / DS” は背景反応 (background) と測定器の不確かさ (detector simulation) を考慮してある値で、表 4.2 のものである。“DS only” では、除去し切れなかった背景反応を無視している。“Neither” は detector simulation を行わない場合の値であり、即ち ISR, FSR, Beamstrahlung, beam design effect のみを考慮してある。

SECTION 5.3 MASS UNCERTAINTY

◆ 5.3.1 Critical Weak-point

ここが我々の実験の致命的な弱点である。先述したとおり、通常であればここで

$$\sigma = \sigma(E_{CM}; m_{\tilde{e}_R^-}, m_{\tilde{\chi}_0}) \quad (5.1)$$

を用いて、質量の不確かさを瞬時に計算するところである。しかし我々の知識が不足していたため、Section 4.3 で長々と述べたような議論をせざるを得なかった。

結果として、 $m_{\tilde{\chi}_0}$ と $m_{\tilde{e}_R^-}$ の両方の不確かさを調べることは出来ず、「 $m_{\tilde{\chi}_0}$ が 100 GeV だと分かっているときの $m_{\tilde{e}_R^-}$ の不確かさ」を得るにとどまった。もちろんこの不確かさは本来的には意味の無い値である。今後の実験では、まずここからカイゼンしなければならない。

◆ 5.3.2 Comparison to Feng's Result

ところで、我々は

$$\Delta m_{\tilde{e}_R^-} = 0.584 \text{ GeV}, \quad \Delta m_{\tilde{\chi}_0} = 2.58 \text{ GeV} \quad \text{for } 1 \text{ fb}^{-1} \quad (5.2)$$

という結果を得たわけであるが、実はこれは Feng らの結果 [2, FIG. 7] と微妙に異なっている^{*1}。もちろんそれは散乱断面積の違いにも原因があるが、更にもう 2 つ大きな理由がある。

まず第一に、実験時間 (total luminosity) の表現の違いである。我々は、 $E_{CM} = 300, 302, \dots, 310$ GeV のそれぞれについて 1fb^{-1} ずつ実験を行ったものを、「結果」とした。ところが Feng らの論文では、FIG. 5–6 はそのようにして描かれているものの、FIG. 7 は “The luminosity is divided equally between $E_{CM} = 300\text{GeV}$ and 310 GeV ” と書かれていることから、恐らくそれぞれの場合について 0.2fb^{-1} ずつ実験を行ったものとして質量の不確かさを計算したのであろう。

また、現象論的近似式を用いたことにより、 $E_{CM} \sim 300$ GeV の閾値付近の振る舞いを質量推定に利用することができなかった。Feng の論文 [2] には、閾値付近の振る舞いが質量の誤差範囲を厳しく制限する、ということを示唆する記述がある (FIG. 7) ので、我々の誤差範囲は Feng らのものよりも本質的にはゆるいものとなっている。

^{*1} 異なっていることに気づいたのがこの報告書の締め切りの前日だったので、どうしようもなかった。

なお, relic density を求める時には, Feng は $\Delta m_{\tilde{e}_R} = 0.05 \text{ GeV}$ を用いているが, これは (我々の表現の下での) 2 fb^{-1} の時の結果である。我々の 0.058 GeV という誤差が 1 fb^{-1} に対応するものであるから, 似通った (そして紛らわしい) 値となったのであろう。

まあ仕方が無いので, とりあえずこの報告書はこのまま出すことにする。

SECTION 5.4 SUSY PARAMETERS AND RELIC DENSITY

◆ 5.4.1 SUSY parameters

まず, $e^- e^- \rightarrow \tilde{e}_R^- \tilde{e}_R^-$ の実験のみから求めた SUSY parameters (式 4.12) は非常に範囲の広いものであった。もちろん単独の実験から SUSY parameters を全て決定するのは困難であろうから, これは当然の結果である。

そこで Feng の $m_{\tilde{\tau}_1}$ の不確かさを導入したわけであるが, これはやや ad hoc な措置であった。本来ならば, この $m_{\tilde{\tau}_1}$ の不確かさを導いた実験を参照すべきであろう。我々の議論が循環論法になっている可能性も否定できない。これは今後しなければならない点である。

◆ 5.4.2 Relic Density

我々は最終的な結果として

$$\Omega h^2 = 0.19502 \pm 0.00042 \quad (\text{our result}) \quad (5.3)$$

という値を得た。一方 Feng らの結果 [2] は

$$\Delta(\Omega h^2) = 0.0042 \quad (\text{Feng's result for LCC1}) \quad (5.4)$$

である。我々の, 測定器の不確かさを考慮に入れた結果が, Feng の結果を上回ってしまった!!

いやもちろんそんなはずは無い。そんなはずは無いのだけれども, しかしこうなってしまった。また, 今年の学生実験で米倉氏らが行った結果 [13] では

$$\Omega h^2 = 0.1950 \pm 0.0009 \quad (\text{Yonekura et al.}) \quad (5.5)$$

となっている。この結果も考慮すると, 考えられる原因としては

- 我々や米倉氏らの「不確かさ」の導出方法が, Feng のものと異なっている

というのが有力である。まあとりあえず今日のところは, Feng の方法の仔細が分からないのでどうしようもない。今回は「このような形で relic density の不確かさを求めることができた」という形で結論としたい。

◆ 5.4.3 Comparison to WMAP Survey

ところで, この relic density は, WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) という人工衛星によって, cosmic microwave background (CMB) の微小なゆらぎを観測することでも測定されている。その結果は

$$\Omega h^2 = 0.1277^{+0.0080}_{-0.0079} \quad (5.6)$$

である [14]。

まず, 値自体が大きく異なっている。この原因については私には分からないが, SUSY の模型として mSUGRA / LCC1 という naive かつ obsolete なものを使ったという点が大きいのではないかと思う。しかしそれよりも, ここで注目すべきは不確かさであり, 我々の結果はこの WMAP の結果よりも 20 倍も優れている!

ちなみに、現在我々が本当に知っている暗黒物質密度は、WMAP という人工衛星が観測した結果

$$\Omega h^2 = 0.1277^{+0.0080}_{-0.0079} \quad (5.8)$$

だ。“0.1277”の部分についてはあまり気にしないでもらいたい（宇宙が平坦かどうか、とかの問題も絡んでくるので）。それよりも重要なのは、

- 不確かさが半分になる！
- 素粒子実験での測定と、人工衛星での測定とを比べることで、値の信頼性が高まる！

という 2 点だ。これで暗黒物質密度の値にまた 1 歩近づくことができる。

— それでこれからどうなるの？

何にも考えないでいいならば、「もっとすごい加速器が欲しい」と言いたいところである。実際、どうして我々がこのような computer を使った “simulation” を行うのかというと、実際に実験できる道具が無いからだ。

だから、もうすぐ実験が始まる（とされている）Large Hadron Collider を、我々はとても楽しみにしている。そして、その次に作られることになっている “International Linear Collider (ILC)” はもっともっと楽しみだ。

実験物理学者は実験装置が何も出来ないし、理論物理学者も実験結果が無ければすべて机上の空論になってしまう。だから実験装置は必要なのだ。

とは言っても、少々実験装置は高価になりすぎた。LHC を作るには数百億円かかったらしい^{*3}し、ILC を作るには数千億円ぐらいかかるらしい。さすがにここまで来ると、このまま突っ走って良いのかという気もする。実際、米国政府は当初本年度の ILC 関連予算を大幅に減額したらしいし、英国政府は ILC 計画からちょっと手を引きかけているような感じがする。ILC は資金集めが難航しているらしいのだ。

加速器の建造費とかの問題は、生物学の倫理的側面についての問題と同様、これからの科学の課題となっていくだろう。21 世紀になって「あれ、やっぱ 20 世紀と何も変わって無いじゃん」とか思ったけど、やっぱり世界は 20 世紀とは変わってきているようだ。

^{*3} 調べても確かな情報がない。その辺りの「負の情報公開」もしっかりすべきだと思うのだけれど……

Appendix A

Acknowledgments

謝辞を述べるべき相手はとてたくさんいるのですが、まずは我々の実験を指導してくださった、岩崎昌子 講師に感謝いたします。実験課題を与えてくださり、実験用の program 群やら code 群やら何から何まで用意していただき、その上我々のしつこい質問に付き合ってくださいました。もう感謝というよりは半分申し訳ないような感じです。しかもなんと我々はこの実験をもう少し続ける気です。一体どこまで迷惑をかけるつもりなのかと……ww。まあ今後はあまり迷惑をかけないようにこっそりやっていきますので……。

共同実験者の本橋氏にも大変お世話になりました。大体僕はめんどくさがりなので、なんかめんどくさいことは全部彼に任せちゃったような気がします。しかも僕は元来こういう報告書の類はギリギリにならないとやらないタイプなので、僕が担当した実験について、彼に説明するのもだいぶギリギリになってしまいました。許してくださいw。なお、本報告書のうち、宇宙論に関係する部分についてはかなりの部分を彼の説明に負っています。

それから、相原博昭 教授を初めとする相原研のみなさんにも大変お世話になりました。忘年会、および（学生だけで行った）新年会にも参加させていただきましたし、相原研のお菓子もだいぶ食べてしまいました。（だって僕の席の真後ろにお菓子置き場があるんだもん！）最後に残っていた黒豆だんご3つも、2月9-11日の連休で全部食べちゃいました。ごめんなさい。1日1個には抑えたんですが……。

SUSY の概要は、素粒子論研究室の柳田勉教授による lecture を参考にしました。また、mSUGRA および R-parity の詳細 (?) については同研究室の渡利泰山 助教から御教授いただきました。これから数年間色々御迷惑をかけるとは思いますが、何かとよろしく願います。

後は……2007年2月から Peskin の分厚い本 [16] を輪講した “Peskinians” への謝辞は……まあいいか。今更改まって謝辞を述べるのも何だしね。

それから pLATEX + Babel。これやばいね。なんでも出来ちゃうし、どんな言語でも書けちゃう。これ開発した人とか移植した人とか package 群整備した人とかすごい。すごすぎる。尊敬。この文書は、Cygwin + Meadow / YaTeX / RefTeX を用いて、AMS-pLATEX + Babel によって記述しました。開発に携わった方々にはいつも感謝しています。

そして最後に、これを大学4年間の集大成とするなら、4年間の学費と生活費を支払ってくれた、そしてここまで育ててくれた両親に謝辞を述べておくのがいいかな。いつもいつもありがとうございます。とても感謝しています。これからもよろしく願います。……金銭的な意味でもww。

.....

それにしても、これだけ書くと疲れますな。まあ他の課題とかがあったせいで1週間で書き上げざるを得なかったのがとても大きいとは思うけど。でもこれから素粒子論研究室では大量に論文を書くことになるのだろうし、しかも英語だからなあ……。これくらいでグダグダ言ってちゃだめだろうねw。

いずれにしても、この報告書はこれでおしまい。あとは参考文献です。

Appendix B

Bibliography

- [1] J. L. Feng and M. E. Peskin. *Selectron Studies at $e^- e^-$ and $e^+ e^-$ Colliders*. Phys. Rev., **D64**, 115002 (2001) [hep-ph/0105100].
- [2] J. L. Feng. *ILC Cosmology*. :hep-ph/0509309.
- [3] 長島順清. 『高エネルギー物理学の発展』, 朝倉物理学体系, 第 6 卷. 朝倉書店, Jun. 1999.
- [4] H. Baer, F.E. Paige, S.D. Protopopescu, et al. *Isajet*. <http://www.hep.fsu.edu/~isajet/>.
- [5] 岩崎昌子. *Pandora pythia*. http://www-sldnt.slac.stanford.edu/nld/New/Docs/Generators/PANDORA_PYTHIA.htm.
- [6] K. A. Thompson. *Optimization of NLC Luminosity for $e^- e^-$ Running*. Int. J. Mod. Phys. A, **15**, 2485–2493 (2000)
- [7] L. Garren. *Stdhep*. <http://cepa.fnal.gov/psm/stdhep/>.
- [8] M. Iwasaki and T. Abe. *LCD ROOT Simulation and Analysis Tools*. :hep-ex/0102015.
- [9] T. Abe and M. Iwasaki. *The LCDROOT analysis package*. :hep-ex/0110068.
- [10] G. Bélanger, F. Boudjema, A. Pukhov, et al. *micrOMEGAs: Version 1.3*. Computer Physics Communications, **174**, 577–604 (Apr. 2006) [hep-ph/0405253].
- [11] Tevatron Electroweak Working Group. *Combination of CDF and D0 Results on the Mass of the Top Quark*. :hep-ex/0603039.
- [12] Tevatron Electroweak Working Group. *Combination of CDF and D0 Results on the Mass of the Top Quark*. :hep-ex/0703034.
- [13] K. Yonekura. *Lc-cosmology simulation study*. http://tkybel1.phys.s.u-tokyo.ac.jp/publish/theses/bachelor/bac2007_yonekura.pdf.
- [14] D. N. Spergel, R. Bean, O. Dore, et al. *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology*. Astrophysical Journal Supplement Series, **170**, 377 (2007) [astro-ph/0603449].
- [15] D.G. Gibson, G.A. Benders, C. Andrews-Pfannkoch, et al. *Complete Chemical Synthesis, Assembly, and Cloning of a Mycoplasma genitalium Genome*. Science, 1151721v1 (2008)
- [16] M. E. Peskin and D. V. Schroeder. *An Introduction to Quantum Field Theory*. Westview Press, Jun. 1995.
- [17] R. M. Barnett, H. Muehry, and H. R. Quinn. *The Charm of Strange Quarks : Mysteries and Revolutions of Particle Physics*. American Institute of Physics, 2000.
- [18] 長島順清. 『素粒子物理学の基礎 I』, 朝倉物理学体系, 第 3 卷. 朝倉書店, Dec. 1998.
- [19] 長島順清. 『素粒子物理学の基礎 II』, 朝倉物理学体系, 第 4 卷. 朝倉書店, Dec. 1998.
- [20] B. R. Martin and G. Shaw. *Particle Physics*. John Wiley & Sons, 2nd edition, 1997.
- [21] Donald H. Perkins. *Introduction to High Energy Physics*. Cambridge University Press, 4th edition, 2000.