

素粒子原子核物理作業部会（第 1 回）資料 6

に関する質問への回答（駒宮委員）

素粒子原子核物理作業部会（第 1 回）資料 6 に関して追加質問が中野座長代理、山内委員、小磯委員、山中委員の 4 名からありました。本文書では、これらの質問に対し、ILC における物理的意義を以下の 3 つに分けて回答いたします。

1. ヒッグス粒子の精密測定、とくに既知のクォーク、レプトン、およびゲージ粒子とヒッグス粒子との結合の精密測定
2. トップクォークの精密測定、とくにトップクォークの質量と、W/Z 粒子との結合の精密測定
3. 新粒子探索、とくに電磁相互作用、および弱い相互作用のみが働く、LHC での検出が難しい新粒子の探索

これらについて総合的な質問がございました。

（中野座長代理）総合して、重要な測定として挙げられているのは以下の 4 点であるという理解でよいか。

1. ヒッグスの結合定数のずれの測定精度向上
2. ヒッグスの自己結合の検証
3. トップクォークの質量の測定精度向上
4. LHC では見えにくい SUSY 粒子探索

書かれている 4 点はその通りであると思いますが、もう一つ追加いたします。

5. ILC は e^+e^- 衝突のエネルギーフロンティアなので、様々な事象パターンを全て精査して、標準理論の予言からの離脱を系統的に探します。クリーンな実験環境下において理論で予測だにしなかった新粒子・新現象の探索も行います。

挙げられた 4 点に関して、コメントを書きます：

1. ヒッグス粒子とチャームクォークとの湯川結合が測れることは、第 3 世代以外の湯川結合の測定ができるという大きな意味があります。
2. ヒッグス自己結合は、それ自身の検証が重要であるだけでなく、とくに宇宙のバリオン生成が電弱スケールで起こるモデルにおいては、自己結合の値が標準理論の予言から大きくずれる可能性があるため、そのような新物理の探索が可能です（スライド p 27）。

3. トップクォークはその質量だけでなく、W や Z との結合も重要です。
4. LHC では見えにくい Colorless SUSY 粒子は暗黒物質とも関係するので、その探索は極めて重要なターゲットです。新粒子探索については SUSY を例として挙げるケースが多いですが、ILC では SUSY に限らず、電弱相互作用で生成される一般的な新粒子の探索が可能です。

精密測定はそれ自体重要であるとも言えますが、ILC における測定にはそれぞれに大きな物理的意義があります。標準理論を超える物理の可能性について、われわれは現在大きな分岐点に立っています。ILC は標準理論に近い方から挙げると、以下の 4 つのシナリオにおいて大きな知見を得ることができます。

シナリオ 1：標準理論が 10^{16} GeV か、それ以上のエネルギー領域までずっと有効である場合。標準理論における最小限のパラメータで既存の実験データを説明することは可能です。しかしながら、電弱対称性の破れ、クォークとレプトン（ニュートリノの含めて）の質量とそのパターン、CP の破れの起源など、素粒子物理の根幹に関わる問題に関して、標準模型においては任意のパラメータをもちいて現象的に説明するのみで、その理由を説明することができません。したがって、これらの問題の解明が、新しい粒子、新しい相互作用の探索の強い動機となります。

シナリオ 2：ヒッグス粒子が複数個あり、発見されたヒッグス粒子はそのひとつである場合。宇宙の物質反物質非対称性の起源が電弱スケールにあるとすると、複数個のヒッグス粒子の存在、ヒッグス場のポテンシャルの形のずれ、CP 対称性を破るヒッグス粒子の相互作用のすべてが必要となります。

シナリオ 3：ヒッグス粒子が超対称性などの新しい対称性を持つモデルにおける基本粒子である場合。新しい対称性を持つモデルがヒッグス場のポテンシャルの形を決めて、電弱対称性の破れを予言します。このカテゴリでは超対称性モデルがもっともよく研究されています。

シナリオ 4：ヒッグス粒子が新しい対称性を持つモデルにおける複合粒子である場合。ヒッグス粒子の質量(125 GeV)を説明するためには、ヒッグス粒子は南部ゴールドストーン粒子のように振る舞う必要があります。このような複合ヒッグスモデルも電弱対称性の破れを予言することができます。

ヒッグス粒子の精密測定

(山内委員) ヒッグスが質量の起源であることは LHC で確立されると考えますが、ILC によって質量の起源や真空の構造がわかるというのは何を指していますか。(21p)

(小磯委員) 真空の構造とは、具体的にはどのようなことか。どのような測定によっ

て、ILC では LHC 以上に真空の構造を解明できるのか。(21p)

LHC における $h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ lepton}$ でのスピン偏極の測定結果は、ヒッグス粒子に付随する場が真空期待値を持ち、Z 粒子に質量を与えていることの強い証拠です。ヒッグス場が自発的対称性破れと質量生成の機構を担っているということは既に極めて妥当であると言えます。今後の LHC の結果でこれに準ずるデータがさらに出てくるでしょう。

しかしながら、これらの証拠は、標準理論の教科書に書いてあるように、弱い相互作用の対称性がどのようにして破れたかという問いに対してのみ答えを与えるものであり、なぜ対称性が破れたか、あるいはなぜヒッグス場が真空期待値を持つのかという問いに対しては何も答えを与えていません。

新物理のモデルにおいて、ヒッグスポテンシャルの形を予言し、電弱対称性の破れを説明するものは必ず、ヒッグス場と相互作用を持つ新粒子の存在も予言します。これらの新粒子は高エネルギーにおける直接生成を探索することができますが、ヒッグス粒子の発見により、ヒッグス粒子をプローブとする探索が可能になります。これらの新粒子の存在は、ヒッグス場とクォーク、レプトン、ゲージ粒子（質量ゼロのゲージ粒子も含む）の結合定数の標準理論の予言からのずれを生みます。代表的な例では、結合定数のずれは数パーセント程度と小さいですが、これらは新物理の兆候であり、結合定数のずれのパターンはモデルによって変化します。これらは上記のシナリオ 2, 3, 4 の場合に現れます。

真空の構造に関するもうひとつの重要な問題は電弱相転移の性質です。宇宙がビッグバン後に冷えていくにつれ、電弱対称性が破れていない状態から破れている状態に相転移が起きたと考えられます。標準理論では電弱相転移は二次相転移であったことが予言されます。しかし、新物理の影響で一次相転移であった場合には、宇宙は非均衡状態になり、さらにヒッグスセクターに CP 対称性の破れがあれば、バリオン数の非対称を生成することができます。これは上記のシナリオ 2 の場合です。これは数あるバリオン数生成のモデルの中で、加速器実験で検証できる可能性のある唯一のシナリオです。検証の第一歩は相転移の性質の検証です。電弱相転移が一次であるモデルはヒッグス自己結合の標準理論からの大きなずれを予言します。HL-LHC における自己結合の測定精度の評価は不完全ですが、およそ 50%の精度が示唆されます。ILC における測定器詳細シミュレーションは鋭意研究されつつありますが、現在既に 500 GeV でこの精度が達成できることが確認できており、1 TeV で 2500 fb^{-1} の積分ルミノシティの仮定で 13%の精度に改善されます。

(山内委員) 反跳質量分布でヒッグスを見る場合、年間何イベントが期待されるでしょうか。このページの図からは年 400 イベント程度に見えますが正しいでしょうか。もしそうなら、これでできる測定は非常に限られるのではないのでしょうか。これを使って 5 年間で何ができるのか実例を挙げてほしい。(18p)

p.18 の反跳質量分布の図は ILC 250 GeV において 250 fb^{-1} の積分ルミノシティを仮定しており、 $e^+e^- \rightarrow \text{Zh}$, $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ 事象はおよそ 1300 個が期待されます（従って年間 400 事象程度というのは正しいです）。これら以外にも $Z \rightarrow e^+e^-$ 事象もあり、あわせるとヒッグス質量は 32 MeV (0.026%) の精度、Zh 断面積は 2.6% の精度の測定が期待されます。これらの事象はヒッグス反跳質量測定のための選りすぐりの事象であり、ヒッグス結合定数測定のためには、これらの事象に加えて $Z \rightarrow \text{qq}$, $Z \rightarrow \nu\nu$ 事象も解析にもちいることができます。250 GeV、 250 fb^{-1} においてヒッグス生成事象は合計 80,000 個期待されます。（これに検出効率・イベント選別効率がかかります。）

TDR 記載の設計ルミノシティ (ILC 250 GeV, $0.75 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) では、積分ルミノシティ 250 fb^{-1} は連続運転で 1.1 yr に相当します。実際には年間稼働率と年次運転効率 (ramp up) を考慮する必要があり、現在 Linear Collider Collaboration 内でさまざまな角度から運転シナリオを検討しています。

想定されるシナリオのひとつとして、最初の 3 年間の運転効率は TDR ルミノシティの 10%、30%、60% になるとし、4 年目以降は 100% とし、年間稼働率は毎年 50% を想定しています。このシナリオにおいては、最初の 5 年間ですべて 250 GeV 運転に費やすとすると、積分ルミノシティは 360 fb^{-1} が期待されます。これをもとに上記の結果をスケールすると、ヒッグス質量は 26 MeV、Zh 断面積は 2.1% の精度となります。

しかしながら、ヒッグス結合定数の測定精度を上げるためには、高エネルギーにおける $e^+e^- \rightarrow \nu\nu h$ 事象の測定が不可欠であるため、ヒッグス結合定数のみを考慮する場合には 250 GeV での運転を早期に切り上げて、350 GeV あるいは 500 GeV での運転を目指すほうが有効です。

ILC で model independent に Higgs Boson の結合定数及び崩壊幅の絶対測定が可能な方法の一例を示します。

次の Y1, Y2, Y3, Y4 の物理量を測ります。

$$Y1 = \sigma(\text{Zh}) = F1 \cdot g^2(\text{hZZ})$$

$$Y2 = \sigma(\text{Zh}) \cdot \text{Br}(\text{h} \rightarrow \text{bb}) = F2 \cdot g^2(\text{hZZ}) g^2(\text{hbb}) / \Gamma$$

$$Y3 = \sigma(\nu\nu h) \cdot \text{Br}(\text{h} \rightarrow \text{bb}) = F3 \cdot g^2(\text{hWW}) g^2(\text{hbb}) / \Gamma$$

$$Y4 = \sigma(\nu\nu h) \cdot \text{Br}(\text{h} \rightarrow \text{WW}) = F4 \cdot g^4(\text{hWW}) / \Gamma$$

ここで、F1, F2, F3, F4 は理論+simulation によって計算できる値です。g(hxx) は Higgs Boson と素粒子 x (x = Z, W, b) の結合定数です。

g(hZZ) は Y1 から求まります。Y2/Y3 によって g(hZZ)/g(hWW) の比が求まります。

これらから g(hWW) が直ちに求まります。g(hWW) が求まれば Y4 から Γ が求まり、Y3/Y4 によって g(hbb)/g(hWW) が求まり、g(hbb) が求まります。Y1, Y2 は主に 250 GeV で測ります。Y3, Y4 は主に 350 GeV 若しくは 500 GeV の高いエネルギーで測ります。ここでは測定の一例を示しましたが、実際には多くの測定値を総動員して maximum likelihood の方法を用いてグローバルフィットを行い結合定数や崩壊幅を決定します。

従って、既に述べたように高いエネルギーでの実験も重要であり、すぐに高いエネルギーに行くか、まずは 250 GeV で十分な Luminosity を得るかの energy staging strategy が重要であり、これは物理や実験時間だけでなく、超伝導加速空洞の建設計画や全体の予算にも関係するため、これらも考慮に入れて現在検討しています。

(山中委員) 相乗効果というような説明があったが、図の意味することは、ILC さえ作れば、LHC は不要であるということか。(16p)

1 TeV 程度まで拡張できる ILC が LHC よりも先に建設されていれば、LHC の役割は低かったと思います。しかしながら、加速器技術が陽子・陽子衝突の円形コライダーのほうが簡単なので、実際は LHC が先に建設されました。ここでは、クリアなシグナルであれば高エネルギースケールまで探索可能なので、ILC の稼働前に物理の目星を付けるという点で重要です。特にヒッグス粒子の発見は、サイエンスにおける歴史的なエポックであり、ILC の物理的意義を確固たるものにしました。

基本的には ILC におけるヒッグス質量とヒッグス結合定数の測定精度は早い段階で LHC のそれを凌駕します。ILC は電子陽電子衝突における系統誤差の小ささが本質的な精密測定を可能とし、データを貯めるほど統計誤差が小さくなり測定精度が上がります。LHC における結合定数測定は素過程の初期状態の不定性などにより、最終的には 5% 程度の系統誤差で制限されます。

ILC と LHC の相乗効果として次の重要な例が挙げられます。ヒッグス粒子と光子との結合測定に関して、LHC では $BR(h \rightarrow \gamma\gamma)/BR(h \rightarrow ZZ^*)$ の比の測定は生成過程の不定性等の系統誤差をキャンセルできるため、高精度の測定が期待できます。ILC 単独の場合、 $h \rightarrow \gamma\gamma$ の崩壊分岐比が小さいため、 $h\gamma\gamma$ 結合定数の精密測定が難しくなります。ただし、 hZZ 結合定数は上記の反跳質量測定により精度良く決定できます。ILC と LHC の測定を組み合わせることで、 $h\gamma\gamma$ 結合定数を 1% に近い精度での測定を可能にします。

(小磯委員) ILC においては、ヒッグス粒子をプローブとする精密測定によって標準理論を越える新しい物理を探究するということが、クォークやレプトンの精密測定(フレーバー物理)と、どのように本質的な違いがあるのか。(14p)

そもそもヒッグス粒子は発見されたばかりの粒子で、その詳細が分かっていません。フレーバー物理ではフェルミオン(クォーク、レプトン)に関しては、ゲージボソンの相互作用とともに詳細が長年の研究で分かっています。

ヒッグス粒子の結合定数などの詳細測定は、tree level の基本的なものであり、これに対応するクォーク、レプトンの tree level の結合定数は既に良くわかっています。勿論、湯川結合はヒッグス粒子が関与するのでヒッグス粒子の測定に依存します。

Belle II などの測定での新現象の探索は tree level でなく、loop 効果 (SUSY など) や virtual 効果の測定 (charged Higgs など) を利用したものであり、ILC でのヒッグス粒子の生成・崩壊という直接的な測定とは異なり、間接的なものです。ここに本質的な違いがあります。 $\mu \rightarrow e \gamma$ や $\tau \rightarrow \mu \gamma$ なども、SUSY などの loop 効果によって生ずる過程です。

電弱対称性の破れを説明するモデル (上記シナリオ 3 と 4 など) では、TeV スケールの質量を持つ新粒子を预言します。ヒッグス粒子と相互作用をもち、ヒッグスポテンシャルの形に影響を与えるような新粒子は、LHC や ILC で検証可能な質量と結合定数 (生成断面積) を预言します。

標準理論を超える理論のほとんど全てが電弱対称性を破るセクター (ヒッグスセクター) の拡張をとまいません。ヒッグスを使いその拡張ヒッグスセクターの構造/力学に焦点をあてて新しい物理に迫るといふ点に違いがあります。電弱対称性の破れのスケールは TeV スケール近辺にあることが分かっており、また、新物理の効果は単にループ効果ではなく、ツリーレベルでの拡張ヒッグスセクターとの混合の形で現れ、125GeV ヒッグスと種々の標準理論の粒子との結合の標準理論の预言からのずれのパターンから拡張ヒッグスの構造やダイナミクスが見えると期待されます。

(中野座長代理からの質問)

発表スライドの 15 ページで、超対称性と複合模型の区別がつくとしているが、23 ページにある精密測定を通して区別する方法以外にどのような方法があるか。

LHC での直接探索では SUSY 粒子はまだ発見されていませんが、ヒッグス粒子が比較的軽いことが超対称性モデルにとって favor であり、先ずはこれが大きな鍵となっています。

複合模型では大きな質量のベクトル複合粒子などが存在する可能性が高く、ILC では標準理論の過程を精査することで、重い複合粒子のテールや、Z ボゾンとの干渉が見える可能性があります。

他にはトップクォークと Z ボゾンとの精密測定によって、複合粒子の様々なモデルを識別でき、超対称性とも区別できます (スライド p27)。

勿論、新粒子が ILC で直接発見できればそれを精査することでこれらの区別はつきます。

(山内委員) このページの SUSY と複合模型の例は標準模型を何%CL で排除していることになるのでしょうか。またこれは積分ルミノシティ 2750/fb を仮定していますが、この蓄積に要する実験期間は何年でしょうか。最初の 5 年間ではどこまで行けるのでしょうか。 (p.23)

SUSY モデル (MSSM, $M_A=700$ GeV, $\tan\beta=5$) の場合、 hbb 、 $h\tau\tau$ 結合定数のずれは約 3%、

各測定精度は約 0.7%で、これには共通な誤差があるので 4.5σ が期待されます。複合ヒッグス模型 (MCHM5, $f=1.5$ TeV) の場合は、様々なモードでずれがあるので、 11σ が期待されます。

Luminosity の内訳は、年間正味半年走るとして (1.6×10^7 秒)、baseline luminosity で 2 年間プラス upgraded luminosity で 2 年間で 250 GeV で走ると 1150fb^{-1} が得られます。500 GeV の場合も baseline luminosity で 2 年間、upgraded luminosity で 2 年間走ると 1600fb^{-1} が得られます。ただしこの数字は commissioning や ramp up などは含まれていませんので 10 年以上のプログラムです。

最初の 5 年で 250 GeV だけで走ると、先に述べたシナリオでは、SUSY の標準理論の予言からのずれは hbb 、 $h\tau\tau$ ともに 3%だとすると、 1σ 程度のずれしか見えませんが、これでも LHC 究極の値を凌駕するものです。複合ヒッグスの場合は 4.5σ 程度です。

(山内委員) 積分ルミノシティとして $4600/\text{fb}$ が仮定されています。23 ページで仮定される積分ルミノシティと一致させるとどうなるでしょうか。最初の 5 年間でどこまでカバーできるでしょうか。(p.24)

24 ページ記載の積分ルミノシティには誤りがありました。正しくは 23 ページ記載のルミノシティと全く同じで値を仮定しています。(申し訳ございません。) 以下のテーブルで重いヒッグス質量に対する感度が積分ルミノシティに応じてどのように変化するかをまとめます。

Lumi @ 250 GeV	Lumi @ 500 GeV	M_A discovery reach ($\tan\beta=20$)
250fb^{-1}	500fb^{-1}	560 GeV
1150fb^{-1}	1600fb^{-1}	780 GeV
1920fb^{-1}	2670fb^{-1}	900 GeV

最初の 5 年間でどこまでカバーできるかは Running Scenario に依存しますが、ランプアップを考慮して、かつ 250GeV だけで走れば(360fb^{-1})、discovery reach は 350 GeV 程度です。

トップクォークの精密測定

(山内委員) トップクォークの質量が SUSY や複合模型のスケールを決めるとのことですが、LHC で決まる精度を 5 倍改善することでスケールはどの程度よく決まることになるのか。理論的不定性も含めて定量的に示してください。(p. 26)

標準理論ではヒッグス粒子の輻射補正の二次発散ではトップクォークの質量が最も効いてきます。このために、電弱相互作用の破れを预言するモデルでは、トップクォークが新たな物理のスケールを決定すると言われていています。しかしながら、この関係は **order-of-magnitude** の関係であって、精度のある预言ではありません。ご存知のように、トップクォークの質量だけが詳しく決まったからと言って SUSY のスケールは決まりません。トップクォークの超対称性パートナー(stop)の **mixing** のパラメータ (A-term) や SUSY の预言する2つのヒッグス粒子の真空期待値の比 ($\tan \beta$) を仮定する必要があります。例えば、 $\tan \beta = 20$ として、2つの stop が縮退して **mixing** がないと仮定したとき、LHC で測定された **Higgs Boson** の質量から、SUSY のスケール(stop mass)を決めるときに、現在 3 loops の計算までされており $\text{stop mass} \sim 3.8 \pm 0.8 \text{ TeV}$ との estimate がされておりましたが、ここで最も効いてくるのがトップクォークの質量です。Top quark mass を 5 倍改善すると $3.8 \pm 0.16 \text{ TeV}$ になるかは分かりませんが、**order-of-magnitude** ではあっていると思われる。

一般に、複合模型のスケールの大きさ自身とトップクォークの質量のかね合いで、複合粒子のスケールの測定精度は決まります。まずは、兆候が出たらビーム偏極などを用いて Ztt や Wtb などの結合定数を測定して、複合粒子のモデルを同定しなければなりません。Minimal Composite Higgs Model を例にとると、SO(5)から SO(4)に群が **dynamically** に壊れるときにヒッグス粒子が **Pseudo-Goldstone Boson** としてでてきます。このときにヒッグス粒子の質量がわかっているならば、複合模型のスケールはトップクォークの質量に依存します。

理論的不定性は、理論をどこまで確定できるかということにかかっております。P26 で言っていることは、従って、模型が決まれば **Higgs Boson mass** より精度の悪い **Top quark mass** への依存が大きいので、スケールがこれによって決まるということです。

(山内委員) 我々の宇宙が安定であるかどうかという誤解を招くのではないですか? (p.26)

万が一、標準理論を超える一切の兆候が見られなかった時、標準理論が加速器で到達可能なエネルギーを遥かに超えて成立すると仮定した場合に、標準理論の真空が **Planck** スケールまで完全に安定なのか($\lambda > 0$)、それとも準安定であるに過ぎない可能性があるのかに答えることになります。Planck スケールでちょうど $\lambda = 0$ となる場合は、Planck スケールにある種の新しい対称性があることを示唆し、それはそれで非常に興味深いと思います。準安定の場合、Planck スケール以下のスケールで $\lambda < 0$ となりますが、その場合、それ以上のスケールでは、新しい物理の効果が現れて、結果的に真空のエネルギーが下からバウンドされると考えられ、我々の真空より低いエネルギーを持った本当の真空が存在する事になります。この場合は、我々の宇宙は、非常に長いが有限の寿命を持った準安定状態だということになります。もちろん、標準理論が加速器で到達可能なエネルギーを超えてはいるが $\lambda = 0$ となるスケールの手前で破綻する場合はその限りではないので、どうしてより深い

本当の真空が存在するのに準安定な状態が選ばれたかという根本的な問題を投げかけます。

(山内委員) 具体的に ttZ の何を測定するのでしょうか。それが系統誤差を含めて 1% 以下の精度で測れるとする理由を教えてください。(p.27)

ttZ の結合の精密測定は、ヒッグス粒子の複合粒子モデル(複合ヒッグスモデル)を研究する上で非常に重要です。このタイプのモデルではトップクォークとヒッグスセクターの強い結合が関与します。複合ヒッグスモデルでは ttZ 結合の標準理論の予言からのずれが、典型的には 10%程度期待できます。

ILC での ttZ 結合の測定は、実際には、オープン・トップ対生成の微分断面積のビーム偏極依存性を測定する事になります。ビーム偏極により、 s -channel の γ と Z の寄与を分離して測ります。ILC ではトップ対生成は断面積が大きく S/B も非常に良いので、統計誤差は最終的には完全に無視でき、また、クリーンにトップと反トップの区別も含めて再構成ができます。500 GeV で 500fb^{-1} のデータを得れば、1%のレベルで生成断面積、前後非対称性、トップクォークの偏極の測定が、例えば 4-jets +レプトンの事象の詳しい再構成をすることで、得られます。

これらの測定は LHC では困難です。 ttZ の結合定数は、 $gg \rightarrow ttZ$ 反応の終状態角分布を測定する事になります。LHC では、この過程の事象数が少なく、他のトップクォークの過程からくるバックグラウンドが大きく、トップクォークのスピン偏極を見るためには事象の完全な再構成が必要なので、極めて困難となります。

新粒子探索

(山中委員) SUSY も様々なモデルがあり、パラメータの範囲も広い。種々のモデルについて、どのパラメータの範囲ならば発見できるのか、LHC と ILC で比較するような図が欲しい。(23p)

p24 はその一例。基本的には decoupling theorem により、一般に large m_A では、ずれの効果はどんどん小さくなります。SUSY の直接探索に関しては、次の山内委員の質問と合わせてお答えいたします。

(山内委員) この 3 種類の比較をもって LHC と ILC は SUSY に対して同等以上の感度があると結論してよいのでしょうか。もっとさまざまなモデルではどうなりますか。(p.33)

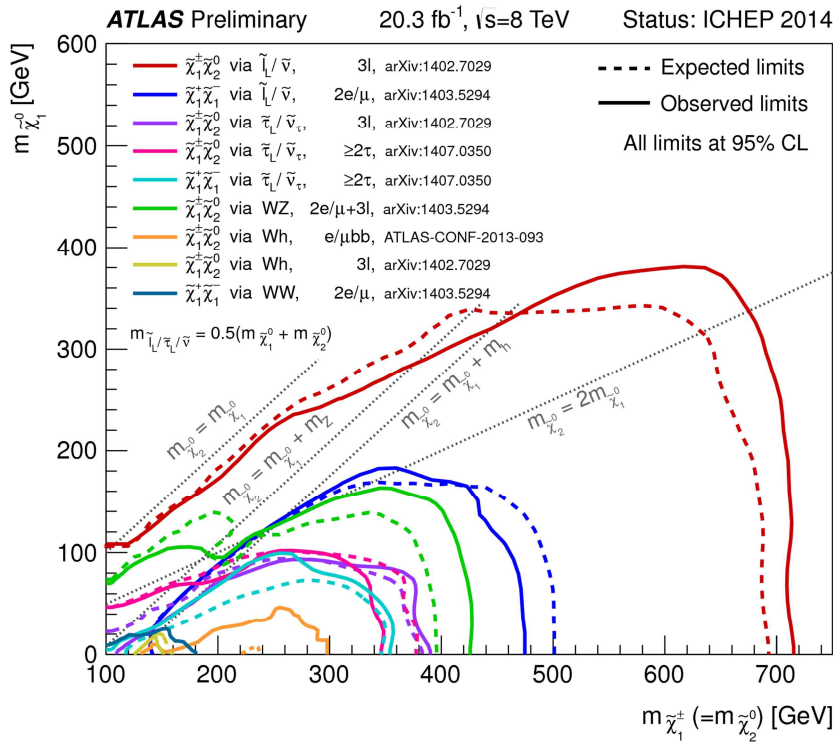
異なるコライダーにおける SUSY の発見の感度を直接的に比較することは簡単ではありません。SUSY モデルの性質は様々な SUSY-breaking-mass terms の値に依ります。これらの terms は標準理論の様々な素粒子群に対応して値が異なる可能性があります。LHC 実験以前では、SUSY の多くのパラメータの数を人為的に減らしていました。例えば、MSUGRA や cMSSM と言われるモデルでは大統一スケールで多くのパラメータを同じ値にセットして、パラメータの数を 4 個に減らしていました。パラメータの数が少ないので、これらは非常に予言能力の高いモデルです。とりわけ、ヒッグス粒子の質量、暗黒物質密度、フレーバーの測定（たとえばミューオンの $g-2$ や $b \rightarrow s \gamma$ ）などからの制限でパラメータ空間が絞られていました。残念なことに、LHC での SUSY 探索が進み、この制限されていたパラメータ領域は広い範囲で棄却されてしまいました。理論のコミュニティー(の多く)は SUSY に愛想を尽かすのではなく、もっと一般的なパラメータの取り方を選択するようになりました。

LSP が何であるかという分類、また、LSP が暗黒物質の少なくとも一部となりうるという前提に立つと、SUSY の LSP は、一般的にスライドの挙げた三通りの場合に集約されると言っても良いと思います。モデルの違いにより、LSP 以外の mass spectrum に違いが現れます。特に、Bino LSP の場合、MSUGRA の gaugino mass relation (通称、ゲージノ GUT 関係式)を仮定しないモデルも最近ではしばしば見られます(例えばミューオン $g-2$ の標準理論からのずれを説明するため軽めのスカラーレプトンとそれ以外は全て重いと仮定するモデル)、その場合は、むしろ ILC の重要性は増します。Wino LSP、Higgsino LSP の場合は、LSP にはほぼ質量の縮退した荷電パートナーが必ず存在することになりますが、この場合、LHC でのこれらの粒子の探索は困難となります。そこで、この図では、ILC での LSP/NLSP 探索を LHC が得意とする gluino 探索の場合に翻訳して比較しています。Higgsino LSP の場合、LSP 質量と gluino 質量に関係はありません。

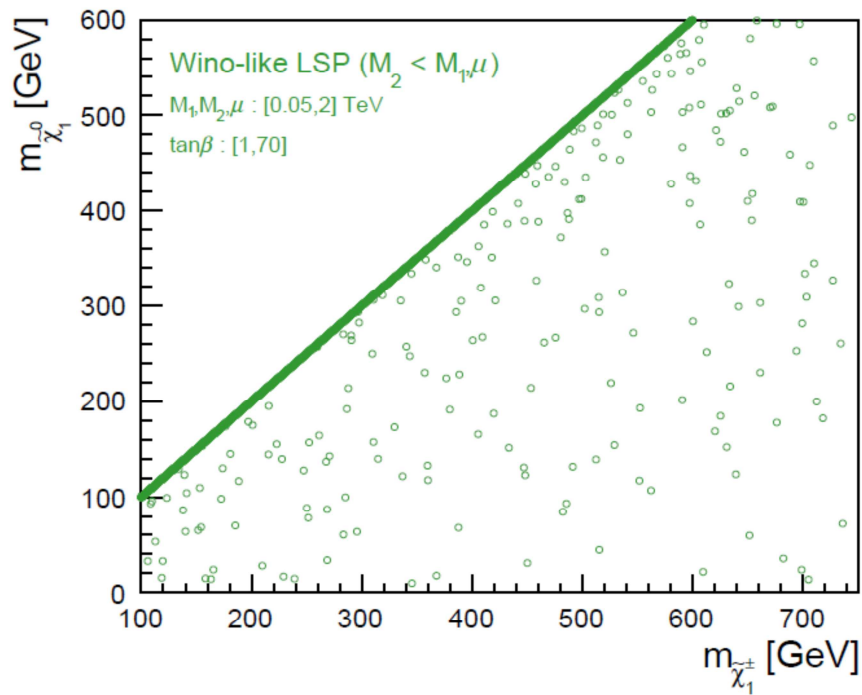
これらの 3 つの場合に関して、SUSY のパラメータ空間でランダムにパラメータを振って LSP(この場合は neutralino)の質量と最も軽い chargino の質量の相関図をプロットしました。パラメータは電弱スケールにおいて評価した Bino mass (M_1), Wino mass (M_2), Higgs mixing parameter (μ), $\tan \beta$ です。 M_1 , M_2 , μ は 50 GeV から 2 TeV まで、 $\tan \beta$ は 1 から 70 までランダムに振りました。3 つの場合は、Bino-like ($M_1 < M_2, \mu$)、Wino-like($M_2 < M_1, \mu$)、Higgsino-like($\mu < M_1, M_2$) とカテゴリズしました。まず、現在の ATLAS 実験による探索で棄却したとされる質量領域の図を示します。次の 2 つの図をみれば明らかなように、Wino-like と Higgsino-like の場合は、LSP と chargino の質量が近い領域に分布が集中しております。この領域では LHC での探索は困難です。LHC で探索された領域にはほとんどサンプル点が分布していません。従って、LHC ではパラメータ領域の広い範囲で探索が不可能と考えられます。一方、Bino-like の場合は分布が質量の 2 次元プロットで均一になっており、LHC では SUSY のパラメータ空間でにおいて広い範囲で探

索が可能です。ILCにおけるcharginoの探索は、chargino mass が重心系エネルギーのほ
 ぼ1/2まで生成できるので、この質量領域では確実に探索可能です。さらに $e^+e^- \rightarrow \chi^0_1 \chi^0_1$
 γ のプロセスで、ある程度エネルギーの高いsingle γ の探索を行うことで、 $2M(\chi^0_1) <$
 $E_{cm} - 10\text{GeV}$ までの領域を確実にカバーすることができます。また、この図には載せる
 ことは出来ませんでした。ILCでは $e^+e^- \rightarrow \chi^0_2 \chi^0_1$ のプロセスで $M(\chi^0_2) + M(\chi^0_1) <$
 E_{cm} の領域をカバーできます。注意しておかねばならないのは、LHCでの探索の棄却領域の計
 算に当たり、モデルに対して様々な仮定をしております。一つの重要な仮定は $M(\text{slepton}_L) =$
 $M(\text{stau}_L) = M(\text{sneutrino}_L) = (M(\chi^0_2) + M(\chi^0_1))/2$ です。この仮定は崩壊過程で比較的軽い
 leptonic SUSY粒子を介するためleptonic branching fractionが増えると思われま
 す。また、ATLASの、図には載っていませんが、charginoとLSPが殆ど縮退してcharginoの
 lifetimeが非常に長くなった場合はATLAS実験でのstable heavy charged particle search
 で棄却されていることを付記します。

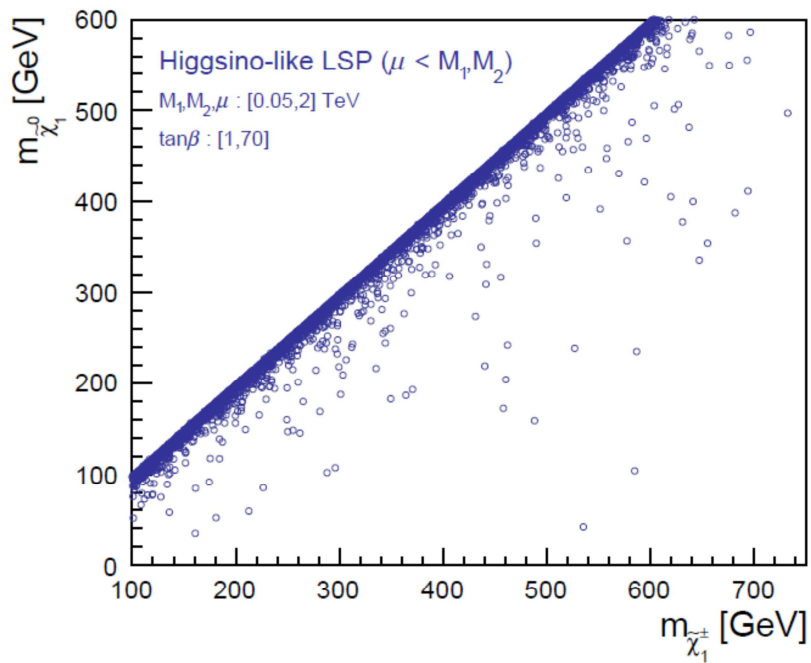
従って、SUSY探索では、LHCとILCではモデルによって一長一短です。



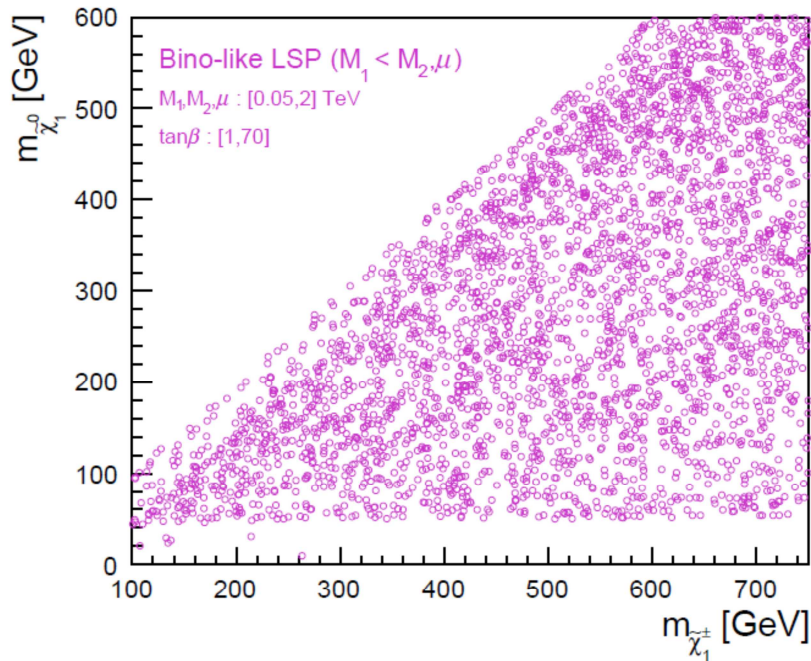
LHCで現在棄却された領域：解析の上での様々な仮定は図に載っています。



Wino LSP の場合：殆どのポイントが質量がほぼ縮退したところに来ています。



Higgsino-LSP の場合：質量が縮退に近いところにポイントが集中しています。



Bino-LSP の場合：ほぼ質量空間でも均一に分布しています。

(中野座長代理) 発表スライド 32 ページに関連して、SUSY 以外の暗黒物質の探索は可能か。

暗黒物質には、WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) と non-WIMP に分かります。

WIMP とは約 100GeV から 1TeV 程度の質量を持つカラーや電荷を持たない安定な粒子のことです。SUSY の予言する暗黒物質 (スピン 1/2 のフェルミ粒子) が代表的です。このほかに WIMP の例として、複合ヒッグスモデルが予言するリトルヒッグス暗黒物質 (スピン1のベクトル粒子)、余剰次元モデルの一つである UED (Universal Extra-Dimensions) が予言する KK 暗黒物質 (スピン1のベクトル粒子)、拡張ヒッグスモデルの予言する Inert Higgs 暗黒物質などが、挙げられます。ILC では閾値さえ達成できれば、全ての WIMP について探索可能です。

一方、non-WIMP の具体例としては axion 等が挙げられます。しかしながら、non-WIMP 暗黒物質の多くは標準理論粒子との相互作用が非常に抑制されていて、ILC や LHC での実験ではともに検出が困難です。

(小磯委員) ILC で暗黒物質の解明ができるというのは、到達可能なエネルギー範囲に暗黒物質を形成する素粒子(中性の超対称性粒子等)が存在すれば発見できるということのみを言っているのか。あるいは、それ以外にも暗黒物質を探索できる方法を想定しているのか。暗黒物質の候補は超対称性粒子以外にも考えられているのか。
(15、29、30p)

基本的には、暗黒物質の直接生成(到達可能エネルギー範囲にあることを想定)を目指しています。到達エネルギーまでに暗黒物質を形成する粒子がいれば発見しその詳細を研究するという事です。つまり、宇宙に存在する暗黒物質と同一のものであるかを判断します。間接的にはヒッグス粒子の結合定数の詳細研究から、超対称性の証拠などがあがれば、暗黒物質が超対称性粒子であるかの見当はつくでしょう。

超対称性以外の暗黒物質の候補は、すぐ前の中野座長代理からの質問の回答をご覧ください。

(中野座長代理) 発表スライド 33 ページに関連して、もし ILC 以前に LHC で SUSY が発見されていた場合は、どのような戦略になっていたか。

SUSY 粒子群の質量や SUSY breaking mechanism によって戦略が変わります。

大きく分けると以下ようになります。

(A) SUSY 粒子の性質から ILC500GeV で軽い SUSY 粒子が発見される可能性が高い場合: できるだけ早い時期に 500GeV までエネルギーを上げて、発見されるであろう SUSY 粒子の詳細を研究して、LHC の結果とも合わせて SUSY の破れを解明します。この場合でも Higgs 粒子の崩壊分岐率などの詳細研究を行い、SUSY との無矛盾性を確かめます。LHC で発見されたものが本当に SUSY なのかの判断は LHC だけでは困難と思われます。特に新粒子のスピンや量子数の決定、崩壊パターンと結合定数の決定、新粒子がヒッグス粒子と関係しヒッグスポテンシャルの生成に関与しているか、などはハドロンコライダーでは困難と思われます。

(B) ILC 500GeV では閾値に届く可能性がない場合: まずは Higgs の詳細研究から始めて、Higgs の崩壊パターンが SUSY で説明できるかを見ます。しかる後に 1TeV にアップグレードすることを考えます。ここでは LHC でカバーできる殆どのパラメータ領域と、LHC では到達できない領域もカバーできます。

LHC はエネルギーを倍近くに上げるので、SUSY 粒子群の発見を期待しています。