

1. はじめに

今回の講義では、限られた時間の中でリニアコライダーでの物理の概略を述べる。物理学会誌に掲載された解説記事を拡張して講義録としてまとめてみようと思う。

素粒子物理学は大きな飛躍を遂げようとしている。まず探るべき鍵は、質量の起源「ヒッグス粒子」そして、TeV (1兆電子ボルト) スケールで開くであろう新しい物理である。この鍵へ向けての大きな一歩は 2007 年から始まる欧州 CERN 研究所での LHC であり、ここではヒッグス粒子を始めとする新しい粒子・現象が見つかると考えられている。陽子・陽子コライダーである LHC では素粒子反応のエネルギーで数 TeV 領域まで生成・観測することが可能である。一方、その素粒子反応のエネルギー・運動量や偏極をコントロールできず、また強い相互作用から来るバックグラウンド事象が多いため、情報に限りがある。LHC で開く扉の先を見るには新しい装置、電子・陽電子リニアコライダーが必要である (Fig.1 参照)。

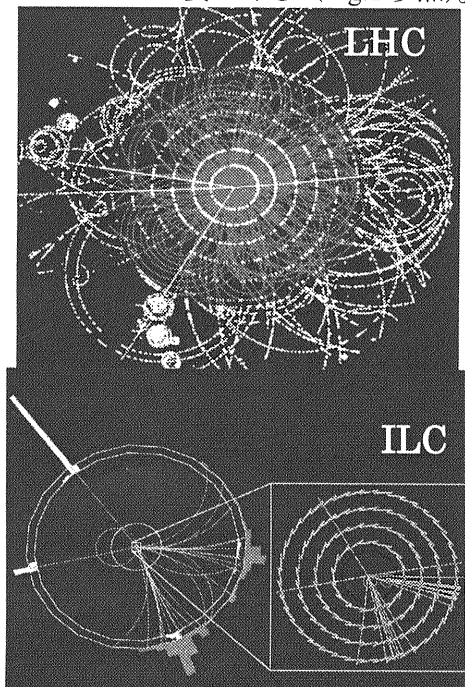


Fig.1 モンテカルロシミュレーションによる LHC (上図) と ILC (下図) の典型的なイベントディスプレイ。

これは宇宙の背景放射のわずかな揺らぎをはじめて捕らえた COBE とその後続いてそれを詳細に捕らえることで「ダークエネルギー」やインフレーション宇宙の研究などを飛躍させている WMAP の関係に似ている (Fig.2 参照)。

リニアコライダー ILC (International Linear Collider) は、電子・陽電子加速器の特性により圧倒的な感度で新しい粒子・現象を探り、詳細にその性質を捕らえ、背後に潜む物理原理を決定づけることを目的に、世界の研究者が協力して設計作業を進めている。そのときを目指して準備を万全にしておくことが我々の使命だと思っている。

加速器の具体的な技術仕様は他の講義によるので、ここでは述べない。ただし、物理を議論する上で加速器の性能要求は以下に記す。この要求は物理の国際グループの長年の検討を専門の委員会がまとめたもので、ILC への基本的な要請となっている。

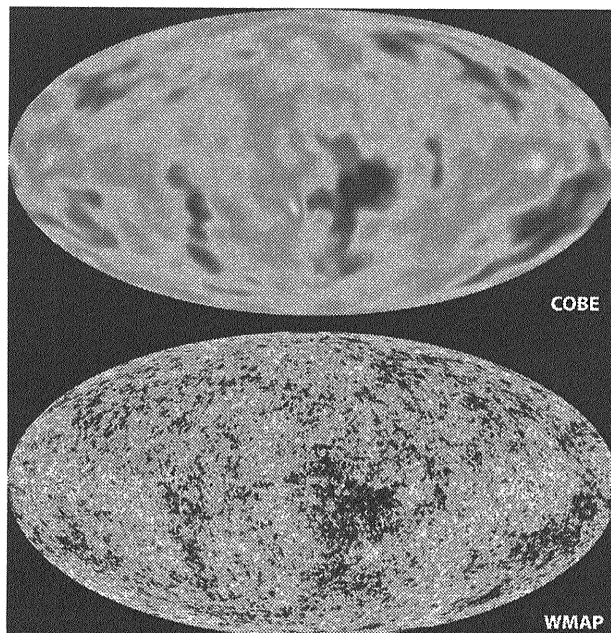


Fig.2 COBE (上図) と WMAP (下図) の観測結果。精密測定は我々に多くの情報を与えてくれる。

1.1 ILC 加速器仕様

超伝導の ILC 計画は第一期、アップグレード期に分かれる。

1. 最高エネルギーは 500GeV。
エネルギーは可変であり、90GeV 付近、210GeV から 500GeV をフルにカバーする。積分ルミノシティは最初の 4 年で 500/fb を目指す。これは年間 100 日フル運転とした場合、TESLA デザインでのデザイン値の 1/3 程度に相当する。電子ビームは 80%以上の偏極率をもつ。
2. 約 1TeV までのアップグレードを行う。

他の可能性) 第一期の成果と LHC での結果を合わせることで、1TeV へ行くよりも high luminosity 化が重要となればそちらを優先する。更に、陽電子の偏極、電子・電子衝突、 γ コライダーモードなどのオプションがあり得る。

2. 物理の背景

素粒子物理学の発展は、原子、原子核、核子（陽子・中性子）、クォークと、物質の内部構造を次々と明らかにし、粒子間の相互作用の究明により素粒子の統一的描像を与えてきた。これらは特に加速器技術の発展を背景として構築されてきたものである。現在ではクォークとレプトンからなるフェルミオンを基本粒子とし(1)ゲージ粒子(グルーオン、光子、W、Z など)がそれらの間の力を媒介するという、(2)フェルミオンにはもともと右巻きと左巻きの2種類が存在し、それぞれ違う結合をすること、(3)フェルミオンには質量は異なるが性質が極めて似ている3つの世代があること、(4)クォークの3つの世代は小林・益川行列の示すように混ざり合うこと、などがわかっている。ゲージ粒子とフェルミオンの相互作用、更にゲージ場同士の相互作用(ゲージ結合)は、とくに LEP (Large Electron Positron Collider、CERN 研究所、ジュネーブ。LEP はこれまでの最高エネルギー電子陽電子コライダー(重心系エネルギーで最高~2009GeV)であり、2000

年に運転を終えた。)での実験で精査され、 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ のゲージ相互作用が確立した。しかし、このゲージ原理からもともとは質量のないはずの W ボソンと Z ボソン、そしてクォークやレプトンといったフェルミオンに質量を与える肝心な部分は未踏の領域である。よく学生から LEP などの実験で「標準理論が検証」されたというような誤解を聞くが、全く違う。わかっているのはこのゲージ結合の部分だけである。

ゲージ原理により本来は質量がないはずの素粒子に質量を持たせるには $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 対称性を破る「真空の自発的対称性の破れ」が必要である。その瞬間に真空には何か(標準理論ではヒッグス場)が満ちあふれるようになり、新しい真空と素粒子の間の結合で真空が粘性のようなものを持ち、これによって質量を得るというシナリオである。ビッグバン以降 100 億分の 1 秒程度で起こったであろうこの真空の相転移で、宇宙の空間各点でのエネルギーの基底状態が急激にかわり宇宙はまさに劇的に変化したはずである。問題は真空には何が詰まっているのか、本当にこのような真空への凝縮が起こっているか、なぜ起こるのか、なぜいろいろな質量があるのか、ということだ。特にフェルミオンに関しては、真空に潜むものはなぜか世代を区別し、もともとゲージ結合だけでは永久に独立な右巻きの世界と左巻きの世界を新しい結合(湯川結合)で結びつけ、様々な素粒子の質量スペクトラムを生じ、3つの世代を作っていることになる。素粒子の教科書にあるように、標準理論ではひとつのヒッグス場が真空に凝縮することによって全ての素粒子の質量を作り出すが、このひとつの場が素粒子を区別し、ひとつひとつのフェルミオンの質量に対応して違う結合定数を持つとした大変身勝手なモデルでもある。これが本当であるならそれこそ素粒子界の化け物のような存在である。

更に問題なのは、このヒッグス粒子を導入すると、さまざまな量子補正の効果がそれぞれ非常に大きいため、素粒子は容易にプランクスケール程度の質量を持ってしまうことである。それを自然

にキャンセルするような新しい物理が TeV 領域までに行かないと、自然がパラメータを極めて「上手に」調整していたことになるといういわゆる「階層性問題」あるいは「不自然さの問題」が生じる。このため、TeV スケールの超対称性理論(SUSY)や四次元時空以外の次元があるとする余剰次元(Extra dimensions)理論、Little Higgs モデル、テクニカラーといった新しい物理が提案されている。これらに共通しているのは 100GeV から TeV スケールまでに新しい素粒子群を予言していることである。超対称性理論の場合、普通の粒子とスピンの 1/2 だけ異なった超対称性パートナーが存在し、余剰次元の場合は重力子の放出や標準理論の粒子が余剰次元方向に振動することで現れる励起状態などが予言される。また、小林・益川行列によるクォークの混合とそこからくる粒子・反粒子対称性(CP 対称性)の破れは日本の誇る B-ファクトリー加速器実験などで確立したが、宇宙に反粒子がほとんどいないことの原因は未だわからない。神岡での実験に代表されるニュートリノ研究からは、ニュートリノ振動が発見され、いわゆる標準理論では質量がないとされてきたニュートリノが小さいながら有限の質量を持つことがわかったが、なぜニュートリノだけ極端に小さい質量を持つのかはわかっていない。重力の素粒子的な理解(量子重力)もまだ得られていない。更に、宇宙観測と宇宙論からは、この我々の住む宇宙の組成は正体不明の「ダークマター」と「ダークエネルギー」がほとんどを占める、ということがわかってきた。これまでの素粒子物理でわかっている部分は宇宙のわずか数%だけということになる (Fig.3 参照)。

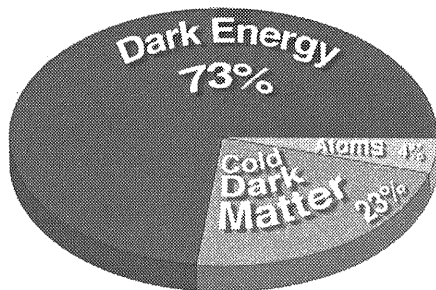


Fig.3 宇宙の組成の内訳

このように、素粒子の世界はわからないことだらけである。しかし、これまで積み重ねられてきた素粒子実験の結果、素粒子理論の飛躍的な進展、そして加速器技術の進歩により、ここに来て我々はこれら大きな謎の少なくともいくつかに近い将来ははっきりとした答えを見いだせると確信するようになった。

ひとつの重要なマイルストーンはヒッグス粒子の質量範囲への制限である。LEP, SLC, Tevatron などで行われてきたこれまでの電弱相互作用に関する精密実験と直接探索の結果により、標準理論で予言されるヒッグス粒子が存在すればその質量は 114GeV 以上、250GeV 以下(最新の解析では 95%の信頼度で 215GeV 以下)であることがわかった (Fig.4 参照)。

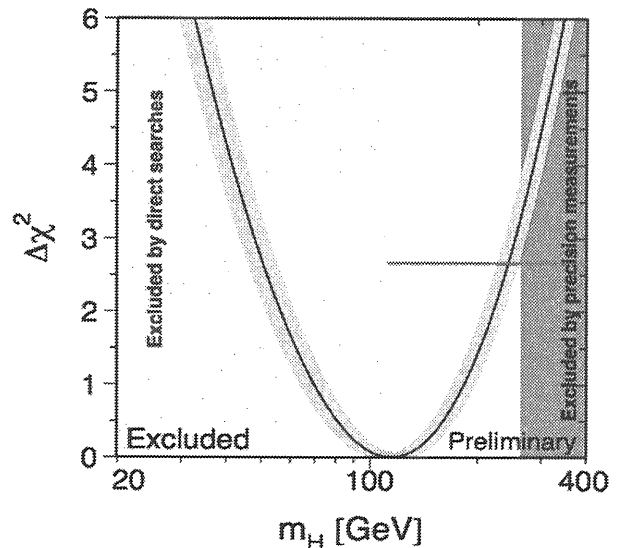


Fig.4 標準理論で予言されるヒッグス粒子の質量範囲への制限。

さらに、LEP 実験等で測定された $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ の 3つの結合定数が TeV スケールの超対称性粒子を仮定することで 10^{16} GeV 付近でほぼ一点に交わることが示されている (Fig.5 参照)。このため、階層性問題を解くために提案されている様々な理論の中でも特に超対称性理論は有力である。最も軽い超対称性パートナー粒子は宇宙に満ちるダークマターの有力な候補となる。超対称性理論では複数のヒッグス粒子が出現するが、

この内最も軽いものに関しては更に理論からの制限が付き、最も単純な MSSM(Minimal Supersymmetric extension of Standard Model)では

140GeV 以下、もっと拡張しても一般的に 200GeV 以下程度に制限される。実験から支持される軽いヒッグス粒子は超対称性の可能性を更に高めている。もしヒッグス粒子が標準理論の予言する粒子あるいはこれに近い性質をもつ場合は、確実にまず Tevatron か LHC でその新しい粒子は観測されるはずである。更に、超対称性理論の場合は LHC でエネルギー欠損を伴った事象が大量に発見されるはずである。逆にもし LHC でも現象が見えなければ、標準理論や MSSM を超えた更に新しい世界があることになる。LHC で何が見出されるかに関わらず、ここから先はリニアコライダー ILC が新しい物理に挑戦することになる。

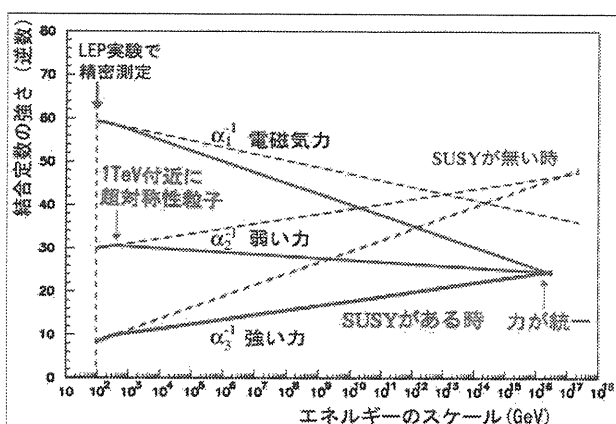


Fig.5. 結合定数の強さをエネルギースケールの関数として表した図。TeV スケールの超対称性粒子を仮定することで $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ の3つの結合定数が 10^{16} GeV 付近でほぼ一点に交わる。

3. リニアコライダーの物理：概観

電子陽電子コライダー ILC では信号がクリーンであるだけでなく、衝突エネルギーを連続的に変えることができ、更に偏極ビームを用いることができるため、一旦十分な生成事象数を蓄積できればそこから得られる物理情報は遥かに大きい。紙面の都合で全体を網羅することはできないが、以下、ILC での研究の一端を述べる。

リニアコライダー ILC を用いて我々がまず挑戦するのは、

- 質量の起源と真空の構造の関係の解明、つまりは電弱相互作用の対称性の破れの仕組みの解明。

- TeV スケールで開くであろう新しい物理の原理の発見と物理モデルの決定、これによるエネルギースケールの階層性問題の解決。
- 宇宙を満たすダークマターの正体や真空の相転移などの解明により宇宙初期の進化を解き明かす。
- そして、電弱相互作用の対称性の破れのメカニズムと新物理の原理、そしてそのモデルの実験的な同定から、上記の実験結果を GUT スケールやプランクスケールにまで外そうすることで重力を含めた大統一理論構築へ迫る。

上記の電弱相互作用の対称性の破れの仕組みと階層性問題の解決は表裏一体の関係にあり、さまざまなモデル理論が提案され、それに応じて多くの新現象、新粒子が予想されている。どのエネルギースケールにあるか、見える現象の予想も様々であり、それに応じて LHC と ILC でどのようなことが見いだされるか、いくつものシナリオがありうる。

ILC の挑戦はまずトップクォークとヒッグス粒子（あるいはそれに対応した粒子）をバックグラウンドの少ない状況で大量に生成し、観測することから始まる。トップクォークの質量は、特に 350GeV 付近（トップクォークと反クォークの対生成閾値付近）で衝突エネルギーを変えて測定することで、精度を 100MeV (LHC などの 1/10 以下) まで上げられる。この精度は量子補正による重いヒッグスの質量予言、電弱相互作用のループ効果の計算などに非常に重要であり、これだけでも真空の自発的対称性の破れのモデルを強く制限できる。標準理論であれ MSSM であれ、もっと一般の超対称性理論であれ、素粒子としてヒッグス粒子が存在すれば、500GeV 以下のエネルギーで必ずヒッグス粒子（またはその一部）を十分な生成頻度で生成できる (Fig.6 参照)。

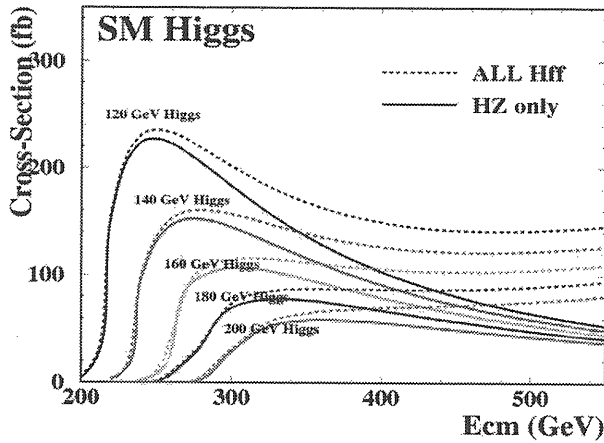


Fig.6 標準理論が予想するヒッグス粒子のエネルギーによる生成頻度。

そして、モデル理論の仮定に依存することなくその詳細な性質を明らかにできる。まず、スピンおよびその他の量子数を同定し、真空と同じ量子数を持つか調べる。ILC ではエネルギーを変える、角度分布を測る、ビームの偏極率を変えるなどによりこれらを決定することは容易である。その後いよいよ未知の力である湯川結合、更に最も謎の大きい真空へ凝縮させる力（自己結合力）を研究することになる。W, Z へのゲージ結合は生成断面積から直接に 1~2% 以下の精度で決まり、湯川結合に関しては崩壊比と生成断面積から絶対値を決められる (Fig.7-A,B 参照)。

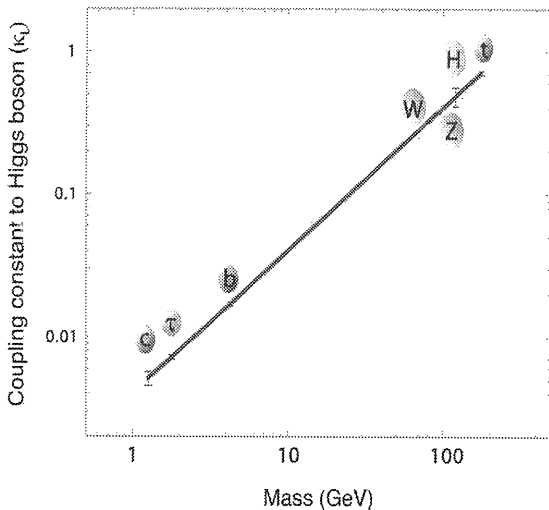
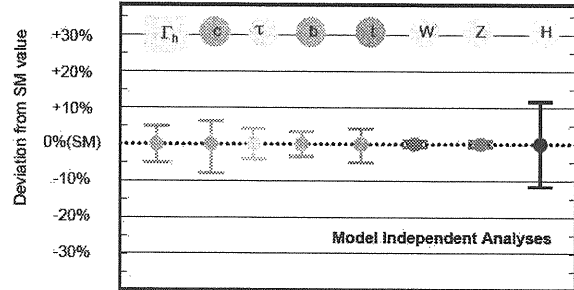


Fig.7-A 積分ルミノシティ 500/fb (設計値で 2 年程度の実験) での素粒子とヒッグス粒子の間の測定される結合定数 (とその決定精度) と質量の関係。120GeV 標準理論 higgs の場合。TeV スケール

に標準理論を超える物理がある場合はこのパターンが変化する。

Coupling Precision

ILC



SUSY or 2HDM

ILC

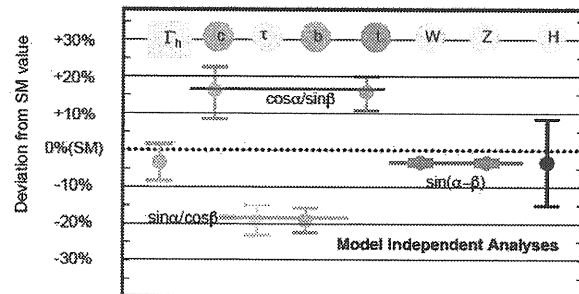


Fig.7-B 積分ルミノシティ 500/fb (設計値で 2 年程度の実験) での素粒子とヒッグス粒子の間の結合定数の決定精度。質量 120GeV の Higgs の場合を示す。標準理論の場合 (上図) と TeV スケールに SUSY がある場合の一例。この場合 SUSY の重要係数も決まる。

自己結合力はヒッグス粒子が複数同時に生成される現象を観測することで調べることができる。更に 1TeV までエネルギーを拡張することで、断面積の増加などにより、ヒッグスとトップクォークの結合、真空の構造の決め手となるヒッグスの自己結合の測定精度は更に 1/2~1/3 に向上する。これらの研究により、ひとつの場が原因かそれとも複数か、世代と関係あるのか、他の粒子との混合状態か、CP 対称性はどうか、そして本当に自己結合によって真空に凝縮しているのかどうか、これら全ての根源的な疑問に ILC は答える。逆にもヒッグスが ILC でも生成されないときは、根本的に新しい物理が電弱対称性の破れ、質量の起源を担っていることがはっきりする。この場合、一般的に新たな粒子 (Z' やテクニカラー粒子など) が存在することになる。これらについても量子補正の効果により ILC は LHC よりも探索領域が広

い。エネルギーが不足なく新しい共鳴状態などの新物理現象を直接に作り出すことができなくても、ILC 実験は新しい現象をはっきりととらえることができ、更に、現象からどのモデルか、例えばどの Z' モデルかを決定することができる。

超対称性粒子や余剰次元の理論など TeV スケールの新物理では、いくつもの理論モデルで同じような現象が予想されている。例えば大きなエネルギー欠損を持つのは超対称性でも余剰次元でも同じである。またそれぞれの理論の中にも様々な模型がある。LHC 実験では、エネルギー欠損を伴う事象を大量に生成しこの新しい物理の存在を明確にできる。一方、これら新しい現象がいずれも同様のエネルギー欠損を伴ったカスケード事象であるため、それらを解き明かすことは極めて難しい (Fig.8 参照)。

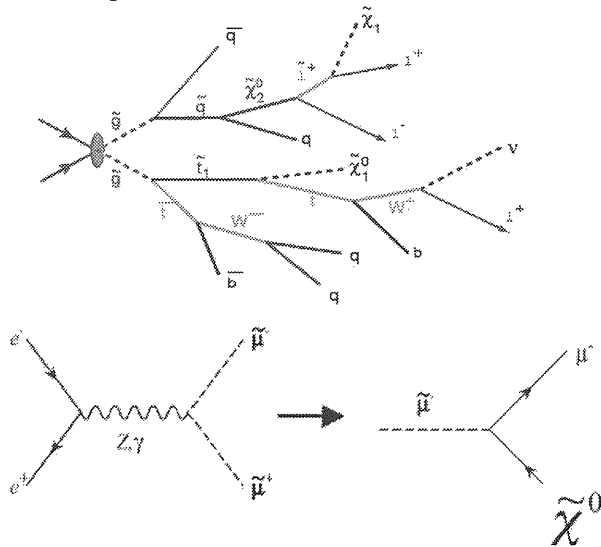


Fig.8 LHC 実験 (上図) と ILC 実験 (下図) で予想されるエネルギー欠損を伴う事象。

ILC ではビームエネルギーと偏極のコントロールにより新粒子・新粒子対をひとつひとつ作り出すことが可能である。予想される数百 GeV の新しい粒子群の一部は 500GeV から 1TeV の ILC 加速器で生成し詳細に研究できると大いに期待されている。

超対称性理論では超対称性粒子のペアが作られ (R-parity 保存の場合)、その崩壊を観測することになり、余剰次元では重力子や標準理論の粒子の励起状態の生成や、それらが中間状態として飛ぶ場合の量子効果を直接観測することになる。これら新しい粒子や現象をひとつでも研究できれ

ば、物理原理とモデルを同定でき、一挙にいろいろなことがわかることになる。最終的に、LHC 実験と ILC 実験との双方で得られた実験データを突き合わせた解析が行われると、更に大きなスケールでの物理が解明できると期待される。例えば、超対称性の破れの仕組みが解明できる。GUT のエネルギースケールでの物理が決まる可能性も持っている。

4. リニアコライダの物理：もうすこし詳しく

これらの ILC の物理の成果を決めるのはまずは加速器のエネルギーとルミノシティである。Fig.9 にエネルギー、ルミノシティと物理に関してまとめてある。

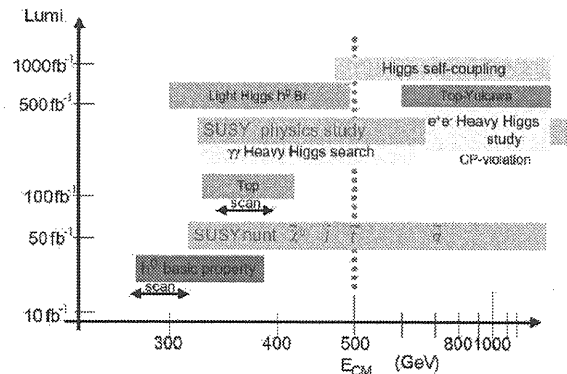


Fig.9 エネルギー・積分ルミノシティに対応する ILC で目指す物理。

次に、500GeV ILC が目指す物理と 1TeV ILC が目指す物理をまとめる。

1. 500GeV ILCが目指す物理

- 電弱相互作用の対称性の破れを解明する： LHCでヒッグスを超える超対称性理論などの新物理が見つからないときでも、ILC実験ではヒッグス粒子の結合定数の詳細な決定からこの宇宙が標準理論によりなりたっているのか、あるいはその他の理論によって成り立っているのかを測定精度により区別できる。
- LHCの結果如何にかかわらず、上記の最重要ミッションは結果が「約束」されているものである。物理成果はいずれもLHCを大きく超えている。

一般的に、500GeVではLHCと比べて新物理の生成閾値が低いため、LHCでヒッグスを超える新しい物理現象が見えたときにILC第一期でこれを研究できるかは定かではない。ただし、500GeVまででも既に新粒子や新物理を生成できる可能性はもちろんある。LHCは常にカスケード事象を観測することになるため、同じような事象をもたらす様々なモデルの中から物理モデルを確定するのは難しいとされているが、ILCでは新粒子群の中の一つでも生成可能であれば、そこからその背後に潜む物理をはっきりさせることができる。特に、ダークマターに関しては、500GeVで既に生成できるかもしれない。

2. 1TeV ILCが目指す物理

- ヒッグスとトップクォークの結合、真空の構造の決め手となるヒッグスの自己結合の測定精度は1TeVアップグレードにより1/2~1/3に向上する。
- もしヒッグスが見つからないときは、まったく新しい物理が電弱対称性の破れ、質量の起源を担っていることになる。一般的にこの場合、Z'やテクニカラー粒子などの粒子が存在することになるが、量子補正の効果によりILCはLHCよりも探索領域が広く、エネルギーが足らなくて新しい共鳴状態などの新物理現象を直接に作り出すことができなくても、ILC実験は新しい現象をとらえることができる。更に、現象からどのモデルか、例えばどのZ'モデル化を決定することができる。
- 超対称性粒子や余剰次元、Z'など様々なモデルが考えられているが、余剰次元とZ'に関しては1TeVのILCが物理のリーチでも凌駕している。
- 超対称性モデルではモデルによりカラーをもつ粒子群(グルイーノやスカラークォーク：LHCで直接生成・観測)とカラーを持たない粒子群の質量(ニュートラリーノやスカラーレプトンなど)のプロファイルが異なるため、モデルにより生成・研究可能領域が異なる。ダークマターの有力候補のニュートラリーノの生成は多くのモデルパラメーター領域で生成されることを予言している。
- 一旦、ILCで新粒子群の一部でも観測され

れば、スピン、結合定数、質量、ミキシングなどを決定できる。ILCの結果とLHCの結果を合わせることで、その物理モデルを確定し、階層性問題の解決、更に新しい物理の可能性の探求が行える。プランクエネルギーまで質量、結合定数を理論的に外そうすることで、大統一領域での物理とモデルの同定ができることが大いに期待されている。

以下では前章に述べたリニアコライダーの物理に関して、より詳細に見ていくことにする。

1) 電弱相互作用の対称性の破れに関して：
最も重要なことは、それがどんな仕組みで起きていようと電弱相互作用における対称性の破れの構造をILC実験は明らかにできること。電弱相互作用に関する精密実験結果により、ヒッグス粒子の質量は300GeVより軽いことが示唆されている。標準理論を拡張した超対称性理論もやはり軽いヒッグス粒子の存在を予言している。

- もしヒッグス粒子が標準理論の予言する粒子であった場合は、まずTevatron実験かLHC実験がそれを発見しているはずである。LHCでは粒子との結合を測定することも行われる。そして500GeVでのILC実験では理論に依存することなくその詳細な性質を明らかにできる。ILCでは、スピン、CP同定とミキシング、生成過程の同定から始まり、未知の力である湯川結合、自己結合を精度良くしかもモデルを仮定することなく直接決めることができる。W、Zへのゲージ結合は生成断面積から直接に2%以下の精度で決まり、湯川結合に関しては崩壊比と生成から絶対値を決めることができる。更にILC実験ではヒッグス粒子の結合定数の詳細な決定からこの宇宙が標準理論によりなりたっているのか、あるいはその他の理論によって成り立っているのかを区別できる。特にヒッグス粒子と物質を構成している素粒子であるクォークやレプトンとの、あるいはW/Zゲージ粒子との結合力を精密測定できる。また衝突エネルギーを連続的に変えて行う実験によりヒッグス粒子の性質、各種量子数(CP等)をも詳しく測定することができる。こうした測定により電弱相互作用の対

称性の破れにひそむ力学を実験的に検証することができる。

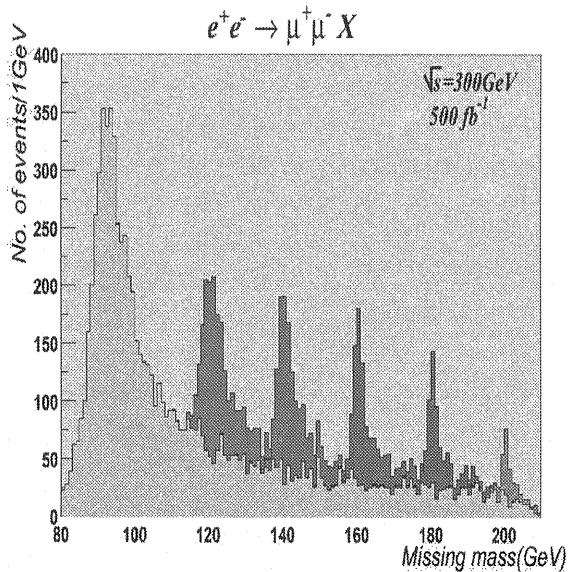


Fig.10 理論に依存しないヒッグス粒子の探索。

- 湯川結合測定の精度は質量範囲で異なるが、150GeV程度までのヒッグスであれば、 c, b, τ との結合を数%~10%程度で測定できる。真空との関係を解明する上で最も本質的な「自己結合」は20%程度の精度でILCではじめて測定できることになる。150GeVを超える質量では c, τ の結合は困難となるが、 W/Z への結合、 b 、自己結合測定など常にLHCを圧倒している。ただし、トップクォークとの結合は第一期ではトップクォーク対の断面積から求めることになるため、QCDの補正のため精度が20%程度とLHCで予想されている精度と同程度になる。精度を上げるには第二期での700GeVから1TeVでの測定が必要となる。
- もしヒッグス粒子が電弱相互作用の観測データから予測される質量より大きくはずれ、400GeVより重たい場合は、1TeVのILC実験を行うことによりその性質を詳しく決めることができる。そして電弱相互作用の精密な観測データと矛盾しないために、1TeV以下で新素粒子を発見することも予想されている。
- 理論によっては、軽いヒッグス粒子が測定器で観測されない粒子に崩壊をすることを予言している。その場合LHC実験ではヒッグス粒子を観測することができない。

ILC実験ではその場合でも $e^+e^- \rightarrow ZH$ 反応を用いることで観測される粒子の情報から理論に依存することなくヒッグス粒子の質量を構成することができる (Fig.10参照)。

- もちろんヒッグス粒子が存在していないこともありえる。この場合は新しい物理構造が存在しなければ1TeVへアップグレードしたILC第二期で W 粒子と W 粒子の散乱断面積が発散し、いわゆる「ユニタリティーの破れ」を観測するであろう。一般的にこの場合、新しい物理による粒子 (Z' やテクニカラー粒子) が存在する。この質量領域は1TeV付近から10TeV領域まで考えられるが、軽ければ直接生成で、新しい共鳴状態などの新物理現象を直接に作り出すことができなくても、量子効果の影響を直接観測できます。1TeVにアップグレードしたILCでは、この到達領域はLHCを超えている。ILCでは更にこの物理を確定できる。

2) 階層性の問題

標準理論の大きな欠点としてエネルギーレベルが大きく異なる物理構造が階層的に存在し、そのために生じる不安定性がある。(たとえば、TeVエネルギー領域に新しい物理構造が存在しないならヒッグス粒子の質量は量子効果により不安定で、その質量は容易にプランクスケールの 10^{19} GeVまではねあがってしまう) 以下にこの階層性の問題を解決するために提案されているいくつかの仮説と ILC 実験の関係をまとめる。

- 弱い相互作用を媒介する W や Z といったゲージ粒子の質量程度のエネルギーで実現されている超対称性による解決

もっとも軽い超対称性粒子は500GeVから1TeVのILC実験で検証可能である。また電子・陽電子ビームを偏極させることができ、衝突エネルギーを連続的に変えることができるILC実験ではそうした超対称性粒子の質量や性質を精密に決定することができる。LHC実験とILC実験との双方で得られた実験データを突き合わせた解析が行われて初めて超対称性の破れの仕組みが解明でき、ひいてはすべての力が統一されているエネルギー状態での物理を見ることができるようになる。

ii) 余剰空間次元による解決

この場合 1TeV の ILC 実験により重力子や標準理論での粒子が余剰次元方向に振動することで現れるカルツァークライン励起状態の直接生成や、量子効果を観測することになる。優れたエネルギー分解能を用いた ILC 実験では理論を特徴づける狭い共鳴状態を観測することが可能である。また量子効果を観測することで 1TeV の ILC 実験にもかかわらず 6 から 20TeV で実現される励起状態からの影響を観測することができるので、LHC を超えて階層性の問題を解決する各種パラメタの探索をすることができる。この物理の場合、更に ILC では次元数を決定することもできる。

iii) 「リトルヒッグス」理論による解決

この理論は 10TeV エネルギー領域に新しい強い相互作用や、新しいスカラー素粒子、ゲージ粒子、フェルミ粒子の存在を预言する。ILC 実験ではこれらの新粒子を直接生成することはできないが、新粒子とヒッグス粒子との結合力を量子効果により観測することにより物理構造を明らかにする。

いずれにせよ偏極ビームを用いた ILC 実験による標準理論の精密測定が量子効果を通してより高いエネルギーでの物理現象を捉えることを可能とするため、以上に述べたどの仮説が正しいかを決定する重要な鍵を与える。

3) 暗黒物質

宇宙の暗黒物質、すなわち銀河集団の質量の 80% を占めるといわれる「見えない物質」の解釈のひとつに、それが弱い相互作用をする新しい安定粒子であるというものがある。天文学での観測によると、そのような粒子の質量は 100GeV 近辺であろうということがあり、そうであるならば ILC 実験で生成されることが予測される。もし生成されれば ILC 実験は暗黒物質候補の物質の量子数を確定するために最も適した実験と言えるだろう。

4) 標準理論の精密測定

500GeV の ILC 実験は以下のように標準理論の範囲内で重要な精密測定を行う。

i) トップクォークの質量を 100MeV 以下の精度で決定する。そしてその光子や Z ゲージボソンとの結合定数をパーセントの精度で決定する。現在の

ところトップクォークの質量の不定性が電弱相互作用に関する総括的理解に限界をつけている。その質量を 100MeV の精度で決定することは、LHC 実験によって得られる W ゲージボソンの質量測定と合わせることで（あるいは ILC 実験において W ゲージボソンが対生成され始めるエネルギーの実験をすればよりよい精度で W ゲージボソンの質量が決定できる。）標準理論の精密な検証が可能となり、それは 1TeV のエネルギー領域に存在するかもしれない未知の物理を観測することになる。

ii) ILC 実験では WW 光子や WWZ といったゲージボソンの 3 点結合を含む反応過程を数万個観測することができる。一方標準理論における高次の量子補正効果は 0.1% の精度で理解できている。未知の物理は標準理論からのずれとして見えるから、上記の測定により非常に高い精度でそのずれを見出すことが可能である。また同測定はヒッグス粒子が関係する新しい強い相互作用をも検証する。

iii) ILC 実験は強い相互作用の結合定数を 1% の精度以内で測定することができる。そのため大統一理論の重要な現象である結合定数がエネルギーとともに変化することをより精密に検証できる。

iv) ILC 実験では、衝突のエネルギーを Z ゲージボソンの質量に合わせることで大量の Z ゲージボソンを生成したり、W ゲージボソンの対生成のエネルギーに合わせて大量の W ゲージボソンを生成することができる。ILC はとても高い輝度を持つので 10^9 個（1 ギガ）におよぶ Z ゲージボソンを生成することになる。この「ギガ Z」オプションにより標準理論の基本パラメタであるワインバーグ角を、現時点での測定精度を一桁上回る 0.001% の精度で決定することができる。また W ゲージボソンの質量に関しては 6~7MeV で、また強い相互作用の結合定数に関しては 0.4% の精度で測定可能である。100MeV 以下の精度で得られるトップクォークの質量と合わせることで標準理論の各種パラメタを 1% 以下の精度で決定することになる。このことは LHC で新しい発見が全くなくても ILC 実験が確実に達成できる成果のひとつである。

5. まとめ

以上見てきたように LHC 実験の結果の如何にかかわらず、500GeV を第一期、1TeV を第二期とした ILC 実験の重要性が見て取れると思う。

電弱相互作用の破れ、トップクォーク、結合定数の精密測定は LHC の結果如何にかかわらず、ILC が圧倒しているところである。これらは第一期 500GeV の ILC の中心課題である。

- ILC 実験による粒子発見・精密測定は、LHC 実験で観測された新物理の様々な解釈から真の理論を区別することを可能にする。
- ILC 実験では LHC 実験で捕らえられなかった新粒子を発見する可能性が大いにある。仮に、LHC 実験で粒子が発見さなかったとしても必ずしも新粒子が存在しないとは言い切れない。それはその新粒子が生成される断面積が小さかったり (MSSM を超えるヒッグスなど)、他の反応過程 (バックグラウンド過程) に埋もれていた (ダークマターから予言されるニュートラリーノなど) するからである。更に量子効果を利用した ILC 実験による探索可能なエネルギー領域は LHC 実験による直接生成によりカバーされるエネルギー領域を凌駕する。ヒッグスなど電弱相互作用の破れに関係する粒子以外の超対称性粒子などの場合、第二期 ILC での 1TeV のエネルギーは extra-dimension や Z' では質量領域が LHC を超える。ただし、超対称性粒子の場合は R-Parity の保存があれば量子効果による発見は困難である。超対称性に関しては、1TeV の ILC でも LHC の領域をフルカバーすることはできない。しかし、最近の宇宙論での計算によれば、ダークマター候補であるニュートラリーノに関しては、ILC でのみ発見できる可能性も指摘されている。

以上まとめると LHC 実験は「新粒子発見の実験」であることに對し、ILC 実験は「物質と力の構造を解明し確定する実験」と言える。