

ILC の物理と測定器

1. ILC の概要と現状

国際リニアコライダー (International Linear Collider: ILC) 計画 (図 1) は、国際協力で日本での実現を目指す次世代エネルギーフロンティア電子陽電子衝突型加速器である。ILC の前身の一つであり日本の計画であった JLC (Japan Linear Collider) は 1980 年代より構想が始まり、欧米の計画と統合して一つの国際計画として ILC が誕生したのが 2004 年である。その後 2013 年の加速器 TDR (技術設計書)の発表[1]、研究者による国内候補地の選定 (東北・北上山地) などを経て、2019 年には日本政府 (文部科学省) より公式に ILC 計画への関心と、国際的な対話を継続する意志表明がなされた。その間、2012 年に現存する唯一のエネルギーフロンティア加速器であるスイス・CERN の Large Hadron Collider (LHC) においてヒッグス粒子が発見され、ヒッグス粒子の精密測定に適した ILC 実現への大きな後押しとなった。

2020 年には、これまで計画を推進していた LCB/LCC (Linear Collider Board / Linear Collider Collaboration) を発展的に解消し、ICFA (国際将来加速器委員会)により ILC 国際推進チーム (IDT) が設立された。IDT のホストは KEK であり、(コロナ渦で実際の活動はオンラインが中心となっているが、) IDT 議長には中田達也氏 (スイス・スイス工科大学ローザンヌ校)が就き、3つ

のワーキンググループ(プロジェクト推進・加速器・物理/測定器)に分かれて活動を行っている。2021 年 6 月には、ILC 準備研究所の提案書が IDT により公開された。世界の主要研究所の合意と日本政府の一定の予算措置のもと ILC 準備研究所が開始できれば、準備研究所の 4 年間に、ILC 建設に必要な加速器の開発、詳細な土木設計や環境アセスメント等を行い、政府間合意とともに国際プロジェクトとしての ILC がスタートする。ILC 国際研究所のもと、建設期間を 9 年間、その後 20 年以上の運転期間を想定する。初期の重心系エネルギーは 250 GeV である。その後加速器の技術革新等によりさらなるエネルギーアップグレードも視野に入れ、合計で 50 年を越える長期計画として、日本のみならず世界の素粒子物理研究の一大拠点となることが期待されている。

本稿では、ILC の物理的意義および物理現象を観測する測定器技術について解説する。

2. ILC の物理

本章では、ILC が解き明かす物理の諸課題を解説し、ILC の物理的意義を考える。

2.1. 宇宙の謎と加速器

標準宇宙論によれば、宇宙は約 138 億年前に誕生し、宇宙の初期にはビッグバンと呼ばれる高温高密度状態にあり、それが膨張しながら冷却されていく中で、現在宇宙に存在する物質が形作られてきた。ビッグバン宇宙の名残が、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background:



図 1: ILC の全体図[2]

CMB)と呼ばれるほぼ全宇宙から等方的に飛来する絶対温度 2.7K のマイクロ波輻射(光子流)である。宇宙は非常に速く膨張しているため、ビッグバン宇宙から放出された光子は光速に近い速度で遠ざかる空間から放出されたように見え、光子はドップラー効果を受け波長が長く(エネルギーが低く)なる。ビッグバンの高温の放射がドップラー効果により冷却された結果が、現在我々が観測できる 2.7K という低温の輻射となっている。

この CMB は宇宙空間からほぼ等方的に検出されるが、ごくわずかに非等方性がある。このうち小角度スケールで見られる 10^{-5} 程度の非等方性は、初期宇宙の密度ゆらぎに起因するもので、これを精密に測定することで、標準宇宙論のパラメータとして、宇宙の膨張速度パラメータであるハッブル定数や宇宙の物質質量などを決定することができる。CMBは大気を透過できないため、CMBの観測は宇宙空間で行う必要がある。2013年に発表された Planck 衛星の観測結果(図2)[3]によれば、宇宙の組成は通常の物質が 4.9%、暗黒物質(Dark Matter)が 26.8%、暗黒エネルギー(Dark Energy)が 68.3%である。暗黒物質および暗黒エネルギーの正体はわかっておらず、宇宙論上の大きな謎となっている。このうち暗黒物質は、現在のところ CMB を含む重力観測のみで観測しうる物質で、後述の素粒子標準模型に含まれない粒子である可能性が有力である。(コンパクト天体等の観測しにくい通常物質である可能性は完全に棄却されてはいないが、様々な観測との整合性を取るのが難しくなっている。)この場合、暗黒物質は標準模型を越える新たな理論(我々は一般に新物理と呼ぶ)と直結しており、暗黒物質の検

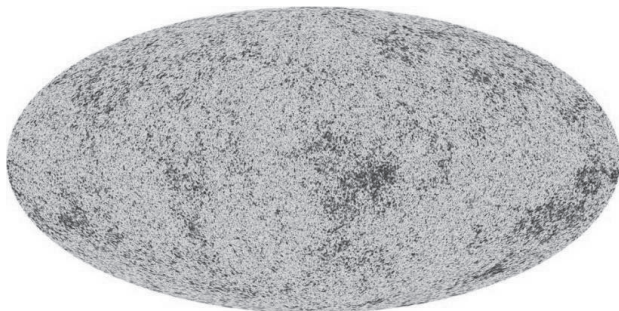


図 2: Planck による宇宙の密度ゆらぎ測定
(Credit: ESA and Planck Collaboration)

出は宇宙を貫く物理法則の真の理解へ大きく前進することとなる。暗黒物質およびそれを含む新物理の検出・測定は、ILC を含む加速器実験の大きな目的の一つである。

宇宙のもう一つの大きな謎として、物質優勢の宇宙がある。標準宇宙論では、物質はビッグバンの高温高密度状態において粒子と反粒子の対として真空より生み出される。このため、粒子と反粒子の生成数は等しくなり、粒子と反粒子が再度衝突すると対消滅するため、本来粒子と反粒子の数は等しくなるはずである。現在の宇宙は物質優勢(粒子が反粒子より多い)であり、粒子と反粒子の反応に非対称性がなければこれは起こりえない。宇宙が物質優勢でなければ、粒子はすべて反粒子と対消滅してしまい我々を含むすべての物質はほとんど存在しえないため、この謎は本源的に重要である。素粒子標準模型における粒子と反粒子の反応にはわずかな非対称性(CP非対称性と呼ぶ)が存在しており、実験的にも証明されているが、宇宙の物質優勢を説明するには不十分であることがわかっているため、これも新物理を必要とする大きな動機となっている。

これらの宇宙の謎を解く新物理について考える前に、まずはその基礎となる素粒子標準模型を概観する。

2.2. 素粒子標準模型

素粒子標準模型は、現在知られている素粒子およびその間に働く相互作用を記述する理論である。図3のように標準模型に含まれる素粒子は全部で 17 種類あり、クォークとレプトンが各 6 種類、ゲージ粒子 4 種類とヒッグス粒子がある。クォークとレプトンは物質を司るスピン 1/2 のフェルミオンであり、それぞれ反粒子を持つ。クォークとレプトンはそれぞれ 3 つの世代を持ち、各世代の粒子は前の世代の粒子と電荷等が同じで近い性質を持つが、第 2、第 3 世代の粒子は第 1 世代の粒子より重く、弱い力により低い世代の粒子に崩壊する。グルーオン・光子・W/Z ボソンは相互作用を司るスピン 1 のボソンで、ヒッグス粒子はスピン 0 のスカラーボソンである。粒子間の相

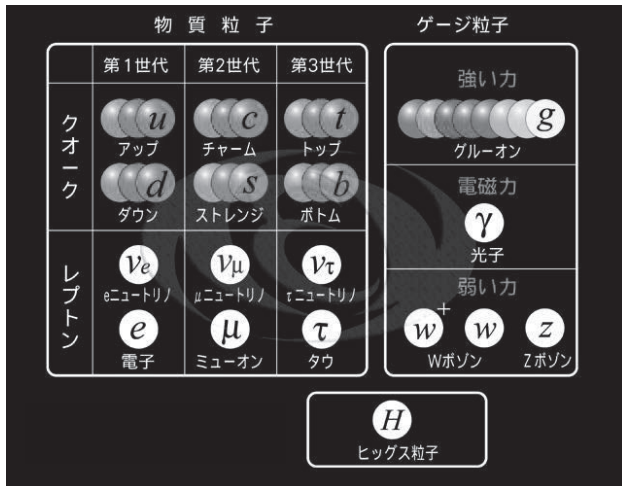


図 3: 素粒子標準模型

相互作用としては、強い力、電磁(気)力、弱い力の3つがあり、強い力は量子色力学 (Quantum Chromodynamics: QCD)、電磁力および弱い力は統一して電弱統一理論 (Electroweak unified theory) により取り扱われる。これ以外に重力の相互作用があるが、標準模型では扱われない。重力は他の相互作用より 30 桁以上も弱いので、素粒子間の反応を考える場合は特殊なケースを除いて無視できる。

ここで重力を除く3つの相互作用について簡単に述べておく。電磁力は日常的にもよく顕れる相互作用である。通常イメージする電気や磁気の力に加え、例えば化学結合は電子と原子核のクーロン力に起因するため全ての化学反応はクーロン力である。人間が取り出して利用する力のほとんどは(原子力を除いて)電磁力による。標準模型においては、電磁力は荷電粒子と光子の間の相互作用であり、光子を介してすべての反応が起こる。

強い力はクォークとグルーオンの相互作用である。クォークは単体では存在できず、3種類の「カラー」すべてを1つずつ含む「バリオン」状態、もしくは1つの「カラー」と対となる反粒子の「反カラー」の2つを含む「中間子」の状態のみ存在しうる。この異なるカラー間の相互作用は2つのカラーを持つ8種類のグルーオンにより行われる。原子核を構成する陽子および中性子は、それぞれ uud, udd の3つのクォークから成る。強い力は電磁力や弱い力よりも強い結合定数

を持っており、原子核は一般に複数の陽子と中性子が結合しているが、これも電磁力で反発する陽子間を、強い力でより強力に結合しているためである。

弱い力は W, Z ボゾンにより媒介される。電磁力や強い力を媒介する光子とグルーオンが質量を持つのに対し、W, Z ボゾンはそれぞれ $80.4 \text{ GeV}/c^2$, $91.2 \text{ GeV}/c^2$ という大きな質量を持っている。(なお、陽子や中性子の質量は約 $1 \text{ GeV}/c^2$ 、電子の質量は $0.511 \text{ MeV}/c^2$ である。) 弱い相互作用は粒子の種類を変える効果があり、例えば放射性元素の崩壊は弱い力によるものである。量子力学の不確定性原理によれば、エネルギーと時刻の不確定性には

$$\Delta E \Delta t \lesssim \hbar$$

という関係性がある。 \hbar は換算プランク定数である。W/Z のような質量の大きな粒子は非常に短い時間だけ存在することができる。例えばミュオンは $2.2 \mu\text{s}$ の寿命で電子と2つのニュートリノに崩壊するが、ミュオン (質量 $0.105 \text{ GeV}/c^2$) は崩壊を媒介する W 粒子よりもずっと軽いため、W を介して崩壊できる確率が大きく低下し、長寿命となる。(素粒子の世界では $2.2 \mu\text{s}$ の寿命は非常に長い。) このように、低エネルギーの世界では、弱い力は実質的に非常に弱い結合定数として顕れる(弱い力の語源である)が、ILC における電子陽電子衝突のような W/Z 粒子の質量を超えるエネルギーでは W/Z の結合定数は光子の結合定数と一致し、中性の Z 粒子は光子と混合して相互作用に寄与する。これが電弱統一理論の概観となる。

これらの相互作用を直感的に記述する方法として、「ファインマン図」がある。ファインマン図の一例を図4に示す。これは上述のミュオン崩壊に関するファインマン図である。ファインマン図は横軸が時間であり、左から右へと時間が進む。左にある負のミュオンが始状態(反応前の状態)である。時間軸に沿って進むと、ミュオンが W ボゾンを放出してミュオンニュートリノに変化している。複数の線(粒子)が交わる点を頂点

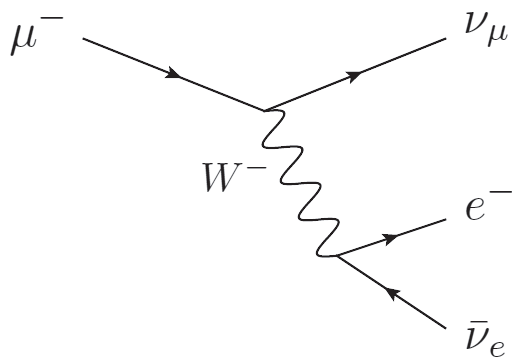


図 4: ミューオン崩壊のファインマン図

と呼ぶ。頂点では標準模型に含まれる保存則を満たす必要がある。ここでは電荷の保存(負ミューオンの負電荷が W ボゾンに引き継がれた)およびミューオン数(負ミューオンおよびミューオンニュートリノは 1, W ボゾンは 0)が保存されている。ミューオンは W ボゾンより軽いので W ボゾンは中間状態としてしか存在できず、図下部の頂点において電子と反電子ニュートリノに崩壊する。この頂点では再び電荷と電子数(反粒子では -1 となる)の保存則が成立している。この図では 2 つの頂点はいずれも弱い力であり、弱い力の結合定数が反応確率に寄与する。また、上述のように W ボゾンの質量が大きい効果でこの反応は抑制され、長い寿命(崩壊確率は低い)が実現している。以降の議論ではファインマン図を用いて反応を表現する。

これらの相互作用は、標準模型の枠内で素粒子に働く力のすべてで、その理論的予測はほとんどの実験結果と極めてよく整合する。しかし、前述のように標準模型では暗黒物質や暗黒エネルギー、物質優勢の宇宙の謎が解明されず、また 17 種類の素粒子がなぜ存在するのか、なぜクォークとレプトンには 3 つの世代が存在するかななどの根本的な疑問にも答えられない。このため、標準模型は、より高エネルギーの本源的な理論の低エネルギーの近似表現と考えられている。究極的には重力も含めた 4 つの力の統一理論が存在し、またその前段階で重力以外の 3 つの力に対する大統一理論が存在すると信じられている。これらは 10^{19} GeV, 10^{16} GeV と非常に高いエネルギーの理論で

あり、人類が直接到達することは困難である。しかし大統一理論による間接的な証拠や、大統一に繋がる中間エネルギーの新物理が存在する場合、これを実験的に観測することが可能かもしれない。

このように、標準模型を精密に検証し、実験との不一致を見つけそれを新物理発見の足がかりとすることを目的とし、大小さまざまな実験が行われている。ILC を含むエネルギーフロンティアのコライダー実験は、特に高いエネルギーの反応を調べることで新物理を直接・間接の両面から探す。物質・反物質非対称性や暗黒物質の生成は宇宙初期の高エネルギー状態で起きたと考えられるため、高エネルギー事象の探索はこれらの宇宙の謎の探求にも直接的につながる。

2.3. ヒッグス粒子

ここまでの議論に含まれなかったのが、唯一のスカラー粒子であるヒッグス粒子である。ヒッグス粒子に関する物理の詳細は素粒子物理の教科書、例えば参考文献[4]を参照いただきたい。ここでは概略のみを述べる。

弱い力を媒介するゲージボゾン(W/Z)は大きな質量を持つが、素粒子物理の根幹となるゲージ対称性によれば、ゲージボゾンは本来質量を持つことができない。ゲージボゾンに質量を与えるためにヒッグス機構が考えられた。ヒッグス機構では、真空中にスカラー場を与え、下記のようなポテンシャル構造をとる。

$$V(\phi) = \mu^2 \phi^2 + \lambda \phi^4 \quad (\mu^2 < 0, \lambda > 0)$$

このポテンシャルは $\phi = 0$ では不安定であり、 $\phi \neq 0$ において安定解を持つ。この、 $\phi \neq 0$ の解を中心に真空を定義し直す(真空の相転移)と、このスカラーポテンシャルとの相互作用によりゲージボゾンが質量を持つことが知られている。これは、比喩的に言えば、相転移した真空にはヒッグス粒子が詰まっていて、それによりゲージボゾンが抵抗を受け、質量を持つことになる。このとき、質量の 2 乗はヒッグス粒子とゲージボゾンの結合定数に比例する。同様に、ヒッグス粒子とフェルミ

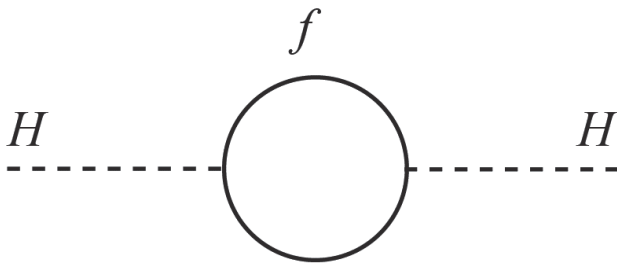


図 5: ヒッグスの輻射補正。内線は任意のフェルミオンだが重いトップの寄与が大きい

オンが結合すれば、フェルミオンも質量を持つことができる。

ヒッグス機構およびその帰結としてのヒッグス粒子の存在は 1964 年頃に Peter Higgs や François Englert を含む研究者グループ等により独立に提唱され、長年コライダー実験により探索されてきたが、最終的に LHC により提唱から 50 年近くを経て発見され、Higgs と Englert は 2013 年にノーベル物理学賞を受賞した。その後 LHC の測定によりヒッグス粒子とゲージボゾンや重いフェルミオンとの結合が明らかになり、ヒッグス機構の正しさが証明されつつある。

ヒッグス粒子の質量は LHC により約 $125 \text{ GeV}/c^2$ と測定されているが、ここに一つ大きな問題がある。ヒッグスの質量は図 5 のファインマン図で表される輻射補正を受ける。この輻射補正は内線の運動量を任意に取れるため内線のエネルギーを大きくしていくと発散する。重力の影響を無視できなくなり重力を含む新しい理論が少なくとも必要になるプランクエネルギー (10^{19} GeV) まで新物理がないと仮定すると、この輻射補正はプランクエネルギーと同程度になってしまう。この補正を受けた後の質量が $125 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス質量とすると、この補正前の裸のヒッグス質量はこの補正量と数十桁に及び「偶然に」一致し、「偶然」数十桁目にずれがあって現在のヒッグス質量が実現したというほとんどあり得ない状況が生まれる。これを「階層性問題」と呼んでいる。この問題を回避するには、標準模型で一番重いトップ粒子(質量は約 $175 \text{ GeV}/c^2$)よりあまり重くないエネルギー領域に新物理の存在が存在し、この輻射補正をキャンセルすることが強く望まれる。

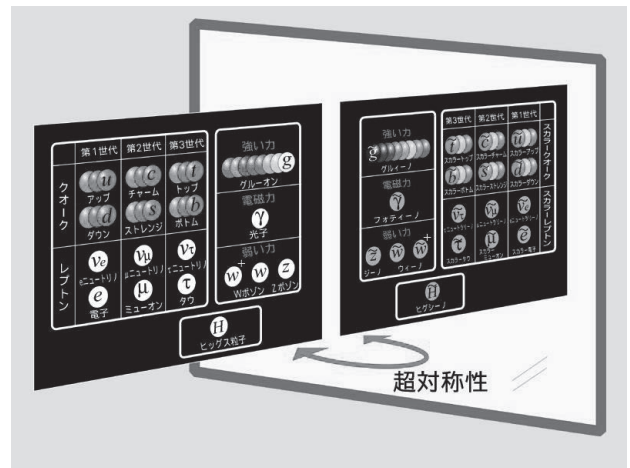


図 6: 超対称性理論の概念図

ただしこの「あまり重くない」をどの程度許容するかは主観によるため、厳密な制限ではない。しかしこれを信じるならば 1 TeV 付近の新物理が強く期待されるため、ILC 等のエネルギーフロンティアのコライダー計画には大きなモチベーションとなっている。

2.4. 新物理仮説

ここまで見てきたように、ヒッグスの階層性問題、暗黒物質、物質優勢の宇宙など、未解決の謎を解決するため、様々な新物理模型が提案、研究されている。ここでは、特に ILC に関係するいくつかの新物理について議論する。

2.4.1. 超対称性理論

超対称性理論 (Supersymmetry: SUSY) は、ヒッグスの階層性問題と暗黒物質の問題を一度に解決できる理論で、長年にわたり最有力の新物理模型と考えられてきた。SUSY では標準模型の粒子すべてにスピンが $1/2$ だけ異なる超対称性パートナー(図 6)を考える。SUSY では通常 R パリティという対称性を考える。R パリティは超対称性粒子に対して -1 、通常の粒子に対して 1 をとり、通常、反応前後で全粒子の R パリティの積が保存すると仮定する。つまり標準模型粒子からは超対称性粒子はペアでしか生成することができず、消滅して通常の粒子に戻る際も超対称性粒子のペアでしか消滅できない。超対称性粒子はパートナー

一の標準模型粒子より一般に重いことが想定されており、一番軽い超対称性粒子 (Lightest Supersymmetric Particle : LSP)は R パリティ保存下で安定になるため、暗黒物質の有力候補となる。

超対称性理論にもいくつかの種類があるが、最も一般的なのは中性電弱ボゾン(光子、Z ボゾン、ヒッグス)の超対称性粒子の混合状態(質量固有状態)である neutralino が LSP であるケースである。neutralino は 4 つ存在し、そのうち一番軽いものが LSP となる。LSP の主な成分がヒッグスの超対称性パートナーである higgsino である場合と、光子と Z ボゾンの超対称性パートナーである bino, wino が主な成分の場合で、それぞれ振る舞いが異なる。LSP の質量は約 100 GeV 以上で、階層性問題の要請から TeV より軽いことが期待されているが、LHC では未だ発見されていない。LHC は様々な neutralino を探すことができるが、電子陽電子コライダーに比べると網羅的な探索は難しく、パラメータ空間によっては発見が難しい。ILC を含む次世代電子陽電子コライダー(およびそのアップグレード)はエネルギーが SUSY 粒子の生成エネルギーをわずかでも越えればほぼ網羅的な探索が可能であり、SUSY の発見が期待される。また、100 GeV 程度の相互作用の小さい暗黒物質は WIMP (Weakly-Interacting Massive Particle)と呼ばれ、宇宙から飛来する暗黒物質と物質粒子の微弱な散乱反応を地下に設置した大量の物質(低エネルギーの散乱反応を背景事象が少なく観測できるよう工夫されている)を用いて検出する直接探索実験も盛んに行われている。

2.4.2. 複合ヒッグス

もう一つの有力なモデルとして、ヒッグスが TeV 領域で複合粒子として振る舞うものが提唱されている。これは SUSY と比べて幅広い可能性があるが、TeV~10 TeV 付近においてヒッグスが複合粒子として振る舞い、より細かい構造が現れると考えるものが多い。これらはヒッグス粒子の精密測定により内部構造を探る方法と、より細かい構

造に由来する新粒子を直接探索する方法がある。また暗黒物質を含むモデルもあり、その場合、SUSY 同様 100 GeV~1 TeV の暗黒物質が期待され、WIMP として直接探索実験での検出も可能となる可能性がある。

2.4.3. その他の新物理

この他に、余剰次元に関するモデル等、WIMP 暗黒物質と関連する新物理や、1 GeV 程度以下の軽い暗黒物質を持つモデルなども注目されている。ヒッグス粒子の質量の半分以下の軽い暗黒物質では、ヒッグス粒子が暗黒物質や関係する新物理の粒子に崩壊する可能性がある。また、軽い暗黒物質は既存の実験で未発見であることから結合が小さいことが予想される。結合が極端に小さいとコライダー実験での観測は困難であるが、同じ電子・陽電子ビームを固定標的に衝突させ、その反応を観測するサブ実験(固定標的実験)で見つけられる可能性もある。

2.5. ILC における新物理探索

ILC における直接・間接の新物理探索について概観する。

2.5.1. ヒッグス・電弱精密測定による新物理探索

ILC の初期の最大目標は、ヒッグス粒子の精密測定とそれを通じた新物理の探索である。前述のように、新物理探索の動機の一つにヒッグスの階層性問題があり、この問題を解決する動機の元に生まれた新物理である前述の SUSY や複合ヒッグスモデルなど、多くの新物理が複数のヒッグス粒子等、標準模型から拡張したヒッグスセクターを持つ。この場合、標準模型のヒッグスと他の標準模型粒子の結合定数は標準模型の予測からずれることになる。ヒッグス粒子と他の粒子の結合定数を精密に測定し、このずれを検出することは、新物理探索の非常に有力な手法となる。

ヒッグス粒子と他の粒子の結合定数を測定するには、ヒッグス粒子を大量に生成し、その崩壊過程を精密に測定する必要がある。ILC はヒッグ

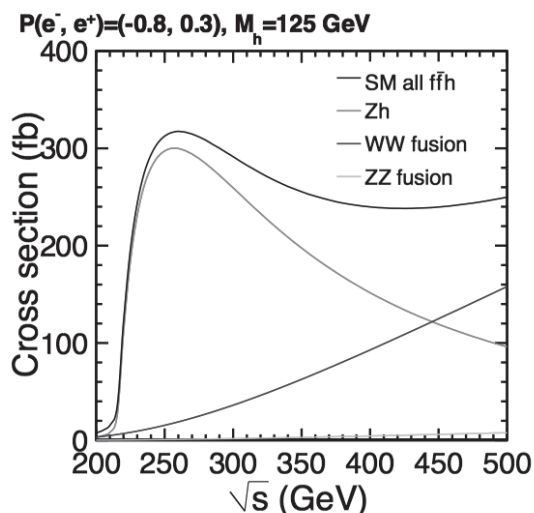


図 7: ILC におけるヒッグス生成断面積

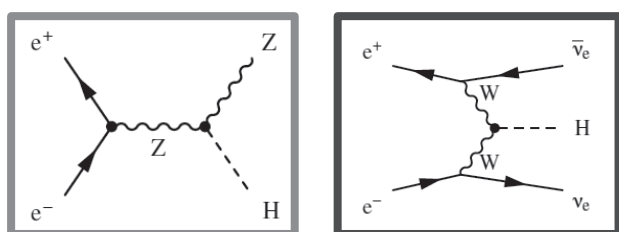


図 8: Zh(左)および WW fusion(右)による ILC におけるヒッグス生成過程

ス粒子の大量生成・測定に最適な「ヒッグスファクトリー」である。コライダー実験における検出粒子数は以下の式で表される。

$$N_{\text{detected}} = \epsilon \sigma \mathcal{L}_{\text{int}}$$

ここで右辺の 3つの項は左から検出効率、断面積、積分ルミノシティを指す。検出効率は生成された事象が実際に検出できる割合を示すもので、後述する測定器はこの割合を出来るだけ高くするように設計される。断面積は、その反応の生成率を示す変数であり、面積の次元を持つ。直感的には、反応させるために粒子をぶつける的の大きさと考えると面積の次元であることが理解しやすい。図 7 には ILC でのヒッグス生成断面積を示している。横軸は ILC の衝突エネルギーである。縦軸の単位 fb となっているのは、フェムトバーン = 10^{-15} バーン = 10^{-43} m² である。250 GeV 付近で最大となっているのは図 8 の左のファインマン図で示す Zh 生成過程であり、500 GeV に向けて断面

積が上昇しているのは右の図に示す WW fusion の断面積である。積分ルミノシティの詳細は加速器の講義に譲るが、加速器の「明るさ=統計量」を示すもので、単位は断面積の逆数をとる。図 7 の上部に $P(e^+, e^-) = (-0.8, 0.3)$ とあるのは衝突させる電子、陽電子の偏極を表している。電子、陽電子には左巻き、右巻きの二つの偏極があり、線形加速器である ILC は衝突させる電子・陽電子を偏極させることができる。ここでは電子を左巻き、陽電子を右巻きに偏極させている。加速器の技術的な制限から、電子では偏極 80% (ここでは左巻き電子が 90%、右巻き電子が 10%)、陽電子では偏極 30% (ここでは左巻き陽電子が 35%、右巻き陽電子が 65%) を達成可能な偏極度としている。ただし、陽電子の偏極は陽電子生成方法により、固体標的型の陽電子源の場合は偏極はできない。左巻きと右巻きでは反応の断面積が変わり、偏極を用いて特定の反応を増やしたり減らしたりすることができる。ILC の初期の運転は、衝突エネルギーが 250 GeV で積分ルミノシティ 2000 fb⁻¹ の統計量が予定されており、このうち $P(e^+, e^-) = (-0.8, 0.3)$ の偏極では 900 fb⁻¹ が予定されている。よって、これによるヒッグスの検出数は検出効率を無視すると、 $900 \times 300 = 27$ 万事象程度となる。実際には、逆の偏極でも断面積はやや下がるがヒッグスの生成は可能であるため、50 万程度のヒッグス事象が 250 GeV ILC で得られると考えられる。

生成されたヒッグス粒子は不安定であり、直ちに崩壊する。ヒッグスは通常 2つの粒子に崩壊し、その崩壊確率は崩壊先の粒子の質量の 2 乗に比例する。ただし、崩壊先の粒子の質量がヒッグス粒子の質量の半分より大きい場合は崩壊は抑制される。(その粒子が更に軽い粒子に崩壊する場合は、不確定性原理の範囲内で重い粒子を経由するため崩壊確率は 0 にはならない。これによりヒッグスは W ボゾン対、Z ボゾン対に崩壊できる。) 標準模型から期待されるヒッグスの崩壊分岐比 (全崩壊を 100% とする) は表 1 のようになる。各崩壊モードの検出数は、生成数に崩壊モードをか

崩壊モード	崩壊分岐比	ILC 事象数
bb	58.1%	290,000
WW	21.5%	110,000
gg	8.2%	41,000
$\tau\tau$	6.3%	32,000
cc	2.9%	15,000
ZZ	2.6%	13,000
$\gamma\gamma$	0.2%	1,000

表 1: 標準模型のヒッグス崩壊分岐比と ILC での生成事象数(概算)

けて、その崩壊モードの検出効率をかけたものになる。また各崩壊分岐比の測定精度は、検出数を S 、背景事象(ヒッグス粒子を含まない事象等、注目していない事象が偶然ヒッグス粒子の事象と同等の信号を測定器に残し、誤検出した事象)を N とすると、

$$\frac{S}{\sqrt{S+N}}$$

で表される。背景事象が小さい場合、信号 1 万事象で 1%、10 万事象で 0.3%の精度が得られる。背景事象の影響を十分に低減できれば、表 1 の各崩壊モードについては、 $\gamma\gamma$ 終状態を除いて 1%程度以下の測定が期待できる。実際には、背景事象数の低減は測定器の性能、事象解析手法の双方にわたる困難な課題であり、また背景事象数を強く低減することで信号事象も失ってしまうため、統計的価値を最大化するためには高度な最適化が必要となる。これらの技術的な側面は後半で解説する。

ヒッグスと各粒子の結合定数を新物理モデルに依存しない形で測定するには、崩壊分岐比の他に、ヒッグスの全断面積や全崩壊幅などが必要となる。このうち、 Zh 生成過程を用いたヒッグスの全断面積測定について解説する。 Zh 生成過程は図 8 の左の図で表されている。このとき、始状態の電子と陽電子は同じエネルギーで正面衝突するため、始状態の合計運動量は 0、合計エネルギーは衝突エネルギーである 250 GeV である。(実際には二つの粒子は衝突角度 14 mrad 程度を持

つが、簡単のため無視する。) 運動量およびエネルギー保存から、終状態の Z と h の合計エネルギーも同じである。(運動量とエネルギーを合わせて 4 次元表示で書くのが通常で、これを 4 元運動量と言う。) Z の終状態の 4 元運動量は、 Z が崩壊して生成する 2 つのレプトン (電子・ミューオン) または 2 つのクォークの測定結果から得られる。(レプトンの運動量測定精度は高く、より精密な結果が得られる。) このため、始状態の 4 元運動量から Z の 4 元運動量を引くと、ヒッグスの 4 元運動量が得られる。ヒッグスの質量は 4 元運動量から以下の式で得られる。

$$m_h = \sqrt{E_h^2 - p_h^2}$$

これを反跳質量と呼ぶ。測定器シミュレーションを用いた反跳質量分布は図 9 のようになる。

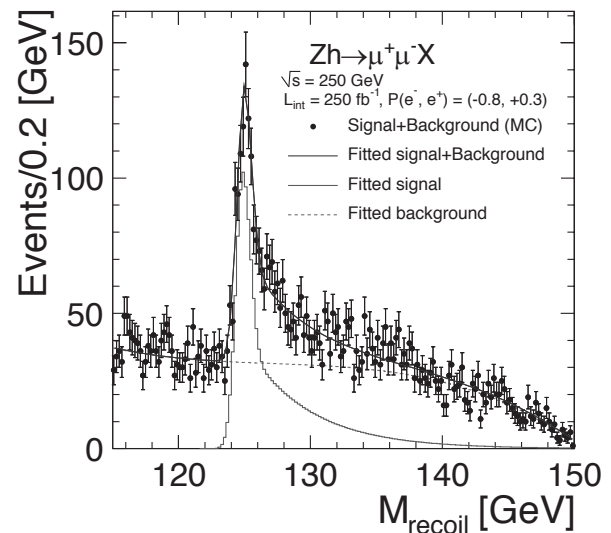


図 9: Z がミューオン対に崩壊する事象を用いたヒッグス反跳質量分布

この分布は背景事象を含むが、ヒッグスの質量である 125 GeV 付近に鋭いピークを持つ。この分布をフィッティングすることでヒッグスの質量を高精度で求めることができ、その (背景事象を引いた後の)面積からヒッグスの生成断面積も求めることができる。ここで特徴的なのは、この測定はヒッグス粒子の崩壊生成物を一切見ていないため、ヒッグス粒子の崩壊モードに依存せず

に全断面積の測定ができることである。一方、LHC では複合粒子である陽子同士の衝突であるため始状態のビーム軸方向の運動量が不定であり、また背景事象も大きいことからこのような測定は不可能で全断面積の測定は困難になっている。この点で、特に電子陽電子コライダーのヒッグス測定における優位性がある。

ヒッグスと粒子の結合定数から新物理への感度を一般的に求めるには、ここで述べた測定に加え、ヒッグス以外の標準模型の様々な精密測定も加えた結果に対し、有効場理論 (Effective Field Theory: EFT) というものを用いる。EFT の詳細はここでは解説できないが、新物理の反応の次元数などに一定の条件を課すと、可能な反応の項を書き下すことができ、各項の係数をさまざまな測定結果を基に最適化することができる。この各項の係数が 0 から有意にずれれば、新物理の影響が観測されたことになる。図 10 に、ILC で現在得られている EFT の精度と LHC のアップグレード後の予測される最終結果 (2038 年頃に得られる見込み) を比較したものを示す。[5]

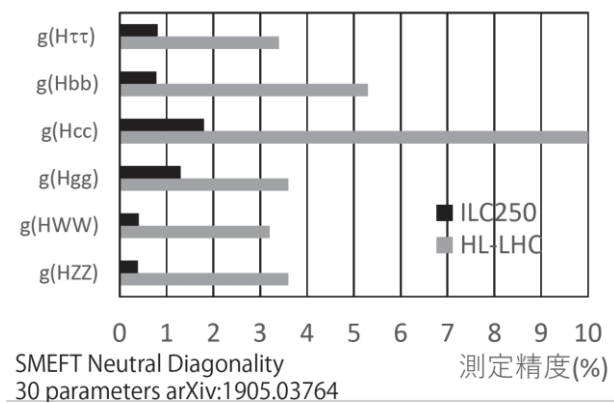


図 10: EFT を用いた ILC と HL-LHC (LHC アップグレード) の予測精度の比較

ヒッグス粒子と主な標準模型粒子の結合定数測定において、ILC は HL-LHC よりも一桁程度よい精度で測定できることがわかる。

この測定精度を用いて、TeV スケールの新物理に対する感度を求めることができる。図 11 には SUSY, 複合ヒッグスの代表的なパラメータにおいて期待されるヒッグス結合のずれと ILC の測定精度を比較したものを示す。

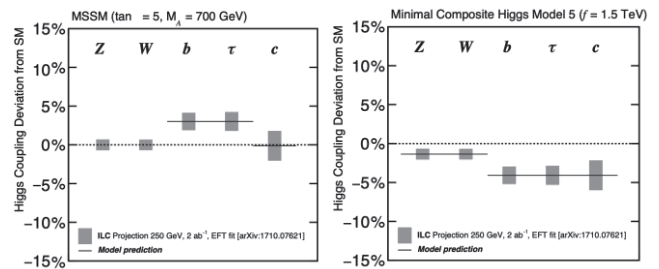


図 11: SUSY (左)と複合ヒッグス(右)の場合のヒッグス結合定数のずれ

SUSY では b, τ とヒッグスの結合が標準模型より数%大きくなり、逆に複合ヒッグスでは b, τ, c のヒッグス結合が小さくなっている。ILC で可能な約 1%精度の結合定数測定により、これらの模型を検出・識別することが可能となる。

これ以外に、ヒッグスの崩壊をプローブとして新物理を直接探索することもできる。先述のように、SUSY などの有力な新物理仮説が LHC で発見されていないことから、軽い暗黒物質を含む新物理にも注目が集まっている。暗黒物質の質量がヒッグス粒子の質量の半分以下の場合、ヒッグスが暗黒物質対に崩壊することができる。この測定は、ILC においては先に述べた反跳質量測定に、余分な粒子の存在がないという条件を加えることで容易に可能である。図 9 では Z がミュオンに崩壊する過程 (Z 全体の約 3%)を用いたが、Z がクォーク対に崩壊する事象 (Z 全体の約 70%)を用いると統計精度を大幅に向上できる。ILC では 0.3%以下の崩壊分岐比までヒッグスの暗黒物質への崩壊を探索することができる。

もう一つのプローブとして、ヒッグスが新粒子の中間状態を介して 4 つの標準模型粒子や 2 つの標準模型粒子と 2 つの暗黒物質に崩壊するプロセスの探索も可能である。暗黒物質対に崩壊するケースよりも背景事象が少ないため、終状態にもよるが、0.1~0.01%程度の崩壊分岐比まで探索が可能となる。

さらに、ILC のエネルギーアップグレード後に可能となるヒッグスの物理として、ヒッグスの自己結合定数測定がある。これはヒッグスポテンシャルの λ を直接測定することができる極めて重要な測定であるが、終状態にヒッグスを 2 つ生成す

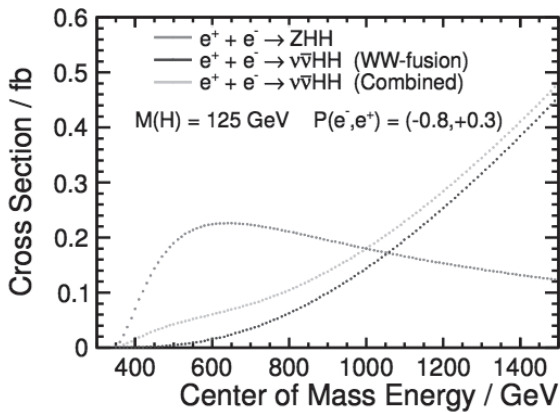


図 12: ヒッグス自己結合に関わる断面積

必要があるため、最低でも 500 GeV の衝突エネルギーが必要となる。図 12 にヒッグス自己結合に関わる ZHH, $\nu\nu$ HH プロセスの断面積を示す。図 7 の断面積と比べて 2 桁断面積が小さく、500 GeV や 1 TeV の衝突エネルギーでも困難な測定であることがわかる。現在のところ期待される精度は 500 GeV で 27%、1 TeV で 10%程度である。この性能を改善させるべく、様々な解析手法の向上に取り組んでいる。

2.5.2. トップ質量の精密測定と時空の安定性

ILC の衝突エネルギーを 350 GeV まで上げることができれば、ILC はトップクォークの精密測定に最も適した環境となる。LHC においてもトップクォークの質量は測定されているが、終状態の粒子の運動量から質量を再構成する通常の方法では、理論的な不定性により真のトップ質量を精密に再構成することはできず、裸の質量に対して 1 GeV を下回る精度で質量を得ることは困難と考えられている。一方、ILC では線形加速器であることを活かして、トップの質量の 2 倍付近で衝突エネルギーを変えながらトップの生成率を調べる (threshold scan と呼ばれる) ことで、理論不定性の少ないトップ質量の再構成が可能となる。図 13 に ILC におけるトップ質量測定の例を示す。この方法で理論計算に用いられる \overline{MS} 質量の精度として 50 MeV 程度が得られると期待される。

トップ質量およびヒッグス質量は、真空の安定性に関して重要なパラメータである。先述のヒッ

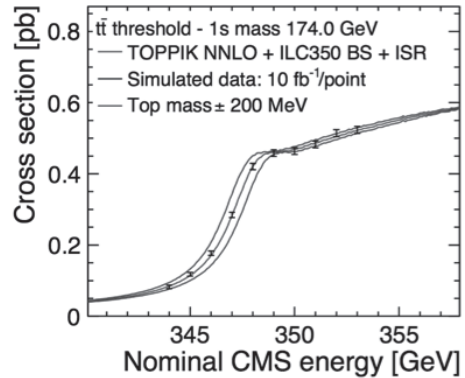


図 13: threshold scan によるトップ質量測定

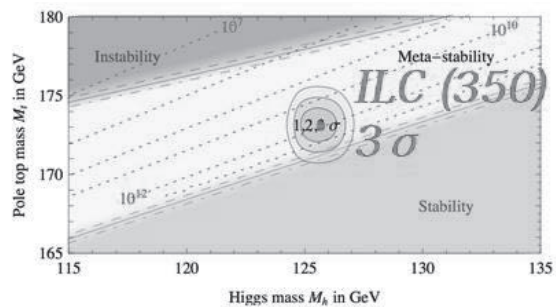


図 14: 真空の安定性とヒッグス・トップ質量の関係。等高線が現在の結果、赤点が ILC の精度を含めた予測。[6]

グスポテンシャルに現れる λ は、高いエネルギースケールで徐々に小さくなり 0 に近づく。ヒッグス質量とトップ質量の値によっては、これは 0 を下回り、真空が不安定化する。真空が不安定である場合、これが準安定 (真空は不安定だがその寿命は宇宙寿命より長い) または不安定 (真空の寿命が宇宙寿命より短い) となり、これもヒッグス質量とトップ質量の値による。図 14 に真空の安定性とヒッグス・トップ質量の関係を示す。現在では真空は準安定と安定にまたがる位置にヒッグス・トップ質量は存在し、350 GeV の ILC によりどちらが正しいかが明確になると期待される。

トップクォークは標準模型で最も重い粒子であり、これ以外にもトップの角度分布や偏極による断面積の依存性を調べることで新物理を探索できる。ILC を 350 GeV にアップグレードできれば、ILC の物理的意義は更に高まることになる。

2.5.3. 新物理直接探索

ここまで、標準模型粒子の精密測定を通じた新物理探索について議論してきた。ILC では新物理に属する粒子を直接生成して検出する直接探索も可能である。ILC はハドロンコライダーより衝突エネルギーは低いが、信号のクリーンさや背景事象の少なさを活かして、ハドロンコライダーでは探索しにくい種類の TeV 新物理を探ることができる。新物理直接探索は新物理の種類だけ多岐にわたるが、ここでは特に注目されている2つの直接探索例を取り上げる。

一つは SUSY 等で一般的に見られる LSP と次に軽い超対称性粒子 (NLSP) の質量が縮退しているケースである。LSP についてはすでに 2.4.1 節で議論した。SUSY の直接探索は、LHC ではグルーオンの超対称性パートナーである *gluino* 等強い相互作用をする粒子では数 TeV まですでに探索されており、電子陽電子コライダーで新たに探索できる領域はあまりない。ただし強い相互作用をする粒子と電弱ゲージ粒子のパートナー (*neutralino*, *chargino*) の質量パラメータは独立であるため、*neutralino*, *chargino* のみが軽い (その他の粒子は重い) シナリオは不自然ではない。このような場合においても LHC において *neutralino*, *chargino* の直接生成の探索が行われているが、LSP と NLSP の質量差が小さい場合は、終状態に出てくる標準模型の粒子のエネルギーが低くなり、背景事象の多い LHC で探索するのは困難になる。LSP が *higgsino* や *wino* を主成分とする場合には、*higgsino* や *wino* が複数ありその質量が近いことが予想されるため、LSP と NLSP の質量が近いことは自然な仮定となる。

図 15 には *higgsino-like* LSP について将来実験での探索感度の比較を示している。横軸は NLSP の質量、縦軸は LSP と NLSP の質量差である。HL-LHC の予測からは、ハドロンコライダーでは質量差が数 GeV の場合に検出が特に困難であることがわかる。ILC は衝突エネルギーの半分以下であれば、質量差によらずに検出が可能である。階層性問題の要請から、*higgsino* は軽いこ

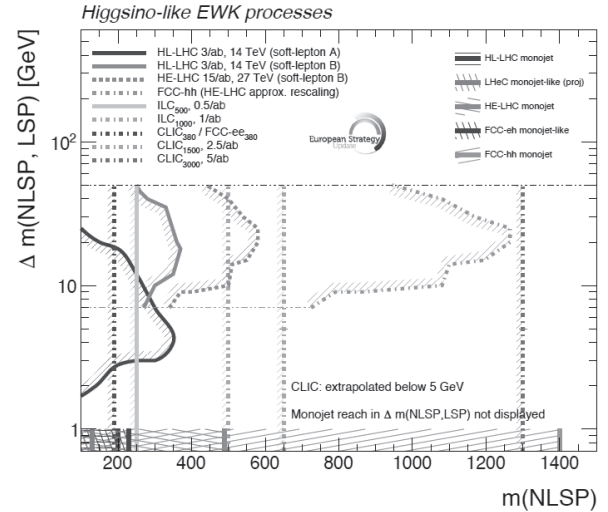


図 15: 将来コライダーにおける *higgsino-like* LSP の探索感度の比較。[5]

とが要請されており、質量差が数 GeV と小さい場合でも ILC が実現すれば *higgsino* LSP が発見できることは大いに期待される。なお、宇宙論の観点からは *wino* が数 TeV 以下にあることが期待されており、10 TeV クラスの ILC が実現すれば、SUSY の好ましい領域はほとんどカバーできると期待される。

もう一つの例は、暗黒物質対の直接生成の探索である。この場合暗黒物質は測定器と反応を起こさないため検出ができないが、図 16 のファインマン図のように、始状態から出る光子を検出することで暗黒物質の生成過程を探索することができる。終状態がニュートリノ対となる背景事象が大量に存在するが、そのような標準模型の断面積は正確に予測できるため、単光子事象の事象数や光子の角度、エネルギー分布を比較することで、暗黒物質生成過程を特定することができる。

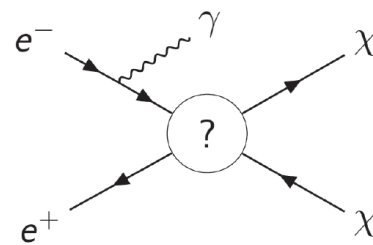


図 16: 単光子事象による暗黒物質生成過程

2.5.4. 固定標的実験

ここまでは ILC のコライダー実験としての物理について解説してきた。これ以外に、現在 ILC のビームを固定標的実験に用いることも検討されている。固定標的実験はビームを金属等の固定標的に照射して反応を観測する実験で、コライダー実験より実効エネルギーが大きく下がるが、断面積は非常に大きいため、低エネルギーの極めて稀な反応を探索することに優れている。具体的には通常の光子とごくわずかに混合するダークフォトンの探索や、強い力の CP 問題と言われる問題を解決するために提案された axion や axion-like particle (ALP) の探索実験が検討されている。

2.5.5. まとめ

ここまで、ILC の物理的意義を概観してきた。ILC が実現すれば、本章の主題としたヒッグスを通じた新物理探索や特にエネルギーアップグレード時には重要になる新物理直接探索などにおいて、宇宙の謎に迫る大きな発見が期待できる。ILC 以外にもヒッグス粒子の精密測定のための電子陽電子コライダーの計画はある。特に CERN の FCC 計画は、周長 100 km の円形コライダー計画で、主計画は 100 TeV のハドロンコライダーだが、その前段階として電子陽電子コライダーによるヒッグスファクトリーが検討されている。FCC は ILC よりもさらに巨大な計画でその実現性はまだ不透明であるが、電子陽電子コライダーとしてエネルギー拡張が可能な大きな利点を持つ ILC が早期実現し、FCC の主計画のハドロンコライダーとともに世界の素粒子研究を牽引していくことが望ましい。なお、欧州の素粒子コミュニティは ILC がタイムリーに実現した場合は協働する意思を表明しており、米国も政府の強力なサポートがあることから、ILC は日本でホストする国際プロジェクトとして世界で協力して建設することが期待されている。

3. ILC の測定器

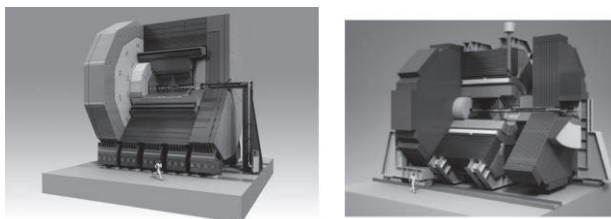


図 17: ILD(左)および SiD(右)測定器の設計概観

測定器は電子と陽電子の衝突点に設置され、衝突点から発生した粒子一つ一つの運動量やエネルギー、粒子種などをできるだけ正確かつ高速に記録する装置である。測定器の各要素からの情報は計算機上で解析され、測定器内を通過した粒子が再構成される。その情報を元に、ヒッグスや他の粒子が存在するかどうか、またどのような特徴を持っているか、事象ごとに解析され、多数の事象の解析結果から物理に繋がる結果を導く。ILC の測定器は現在 ILD と SiD の二つの設計がある。(図 17) それぞれ大きさは 10 m 程度に及ぶ巨大なもので、多数・多種の測定器要素が組み合わさって構成されている。各測定器要素は、ほとんどは独自に開発された最先端のセンサー技術、電子回路および読み出し技術を組み合わせて用いられており、測定器に課される高度な要求に対応している。

本章では、まず測定器の基礎となる素粒子の反応および放射線と物質の反応、検出器や電子回路技術を概観し、各測定器要素の要素技術、物理情報を取り出すための解析技術について解説する。

3.1. 測定器入射前の相互作用

電子陽電子衝突により生成された粒子のうち、ヒッグスや W/Z などの重いボソンは即座に崩壊してクォーク、レプトン、光子のいずれかになる。このうちクォークは単体では存在できず、真空からクォーク対を生成して多数のハドロン(バリオンおよびメソン)を生成する。測定器に入射するのはこれらのハドロンの粒子束であり、これをジェットと呼ぶ。また、レプトンのうちタウは短寿命で他のレプトンまたはいくつかのハドロン、光子に崩壊する。またニュートリノは測定器と反応せ

ず測定器を通り抜けるため検出できない(4元運動量保存を用いて、損失運動量として特定することは可能な場合もある)。よって、測定器で検出するのはハドロンジェット、レプトン(ミュオンおよび電子)、光子である。ハドロンのうちボトムやチャームクォークを含むものは、短距離(mm以下程度の飛程)移動した後に崩壊し、衝突点からややずれた位置から崩壊粒子の飛跡を発生させる。このずれた飛跡はボトム、チャームクォークを同定する重要な証拠となる。

3.2. 物質と粒子の相互作用

本節では荷電粒子(ハドロン、レプトン)および光子、中性ハドロンの物質中での相互作用を概観する。この相互作用は粒子の検出に利用される。

3.2.1. 荷電粒子と物質の相互作用

荷電粒子が物質を通過すると、物質中の電子を電離・励起してエネルギーを失う。電離によるエネルギー損失は、重い荷電粒子の場合(測定器中においては電子以外のすべてが該当)、エネルギー損失は Bethe-Bloch の式に従う。この式は複雑でありここでは議論しないが、図 18 に関係を載せている。

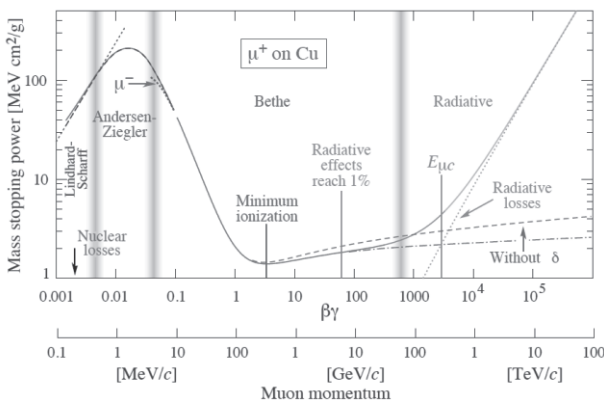


図 18: 重い荷電粒子のエネルギー損失[7]

図の縦軸に物質の密度をかけると MeV/cm を単位とするエネルギー損失となる。横軸は速度でローレンツ因子 $\beta\gamma$ で書かれている。基本的に粒子の静止質量の何倍のエネルギーを持つかを示す量と考えてよい。測定器中に飛来する荷電粒子の

質量は(電子を除くと)概ね $0.1 \sim 1 \text{ GeV}/c^2$ なので、通過する粒子のエネルギーを $1 \sim 100 \text{ GeV}$ 程度とするとほとんどの場合 $\beta\gamma$ は $1 \sim 1000$ の範囲内に入る。この領域の粒子の電離損失は小さく、最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle: MIP) と呼ばれる。MIP のエネルギー損失はあまりエネルギーによらず一定と考えてよい。荷電粒子を測定する各測定器は MIP の通過を想定し、それを検出できるような装置にする必要がある。

なお、電離(または励起)された電子は電流または光として取り出すことができる。これが測定器の基本原理であり、測定器はすべて電離による電子を直接・間接に観測していることになる。

電子は他の粒子と比べ非常に軽いため、 $\beta\gamma$ は大きくなり、図 18 で radiative と書かれている領域で測定器中を通過する。(ただし図 18 は重い粒子に対して正確であり、電子に対してはややずれる) この場合、電子は光子を放出して(制動輻射と呼ぶ)急速にエネルギーを失う。この制動輻射によりエネルギーが $1/e$ になる物質量を radiation length とよび X_0 と表す。ただし、この光子の放出は確率的な離散現象(電子が物質の原子核近傍の強電場をたまたま通過した時に光子を放出する)であるので、物質量が少ない(飛跡検出器内等)の場合は連続現象である電離が引き続き重要である。電子は他の重い粒子と比べ電離中に他の電子の電場の影響を受けやすいため、multiple scattering と呼ばれる小角度の散乱を受けながら進む。荷電粒子の運動量は通常磁場中での曲率半径を求めることで行うが、この散乱により運動量測定の精度が他の粒子に比べやや低下する。

3.2.2. 光子と物質の相互作用

中性粒子である光子は電離を起こさず、よって連続的に飛跡を検出することはできない。光子の相互作用としては光電効果、コンプトン散乱、(物質の電磁場による)電子陽電子対生成の 3 つが主に上げられるが、高エネルギーに於いては電子陽電子対生成が重要である。電子陽電子対生成は約 10 MeV 以上の光子において主要なプロセスであり、物質中で電子陽電子対を生成する。光子は測

定器で直接検出出来ないが、このプロセスにより電子陽電子に変換することで、上述の電離により検出ができるようになる。物質中での光子の飛程は前述の X_0 を用いると、約 $9/7 X_0$ である。重い物質中に入射した光子は、電子陽電子に変換し、それらが制動輻射で光子を発生させ、このプロセスが繰り返されることで電子・光子数が爆発的に増加していく。これを電磁シャワーと呼ぶ。電磁シャワーが進展するにつれ各粒子のエネルギーは低下していき、10 MeV を下回り電子陽電子生成が不可能になるとシャワーは収束する。シャワー中に生成する電子・陽電子の数は元の光子のエネルギーに概ね比例するため、これらを MIP と見なしてシャワー中に設置したセンサーの電離エネルギーの総和をとることで元の粒子のエネルギーを測定できる。電子も同様に電磁シャワーを起こし、同様に測定可能である。このような測定器をカロリメータと呼ぶ。カロリメータによるエネルギー測定はシャワーの統計ゆらぎの影響を受けるため、磁場による運動量測定よりも一般に精度が悪い。このため、光子のエネルギー精度は荷電粒子のそれよりも一般に悪くなる。

3.2.3. ハドロンと物質の相互作用

ハドロン(荷電、中性問わず)は、原子核と衝突して非弾性散乱することで複数のハドロンを生成する。これが連鎖的に起きると電磁シャワーと同様のシャワーが起きる。これをハドロンシャワーと呼ぶ。ハドロンの相互作用長は電子や光子のそれと比べ非常に長く、ハドロンをカロリメータで測定するには多くの物質が必要となる。また非弾性散乱では破碎された物質の質量も反応に寄与するためシャワーの統計ゆらぎは更に大きくなる。従ってハドロンシャワーのエネルギー分解能は非常に悪い。

また、ハドロンの反応では π^0 粒子が多数生成する。この粒子は即座に光子 2 つに崩壊するため、カロリメータ中ではハドロンシャワーの中に電磁シャワーが混じることになる。測定器のエネルギー応答の違いから、これもハドロンのエネルギー分解能を悪化させる要因となる。

3.3. 検出器の原理

本節では、ILC 測定器で広く使われている検出器の原理について概説する。

3.3.1. シリコン半導体検出器

シリコン半導体検出器は飛跡検出器に広く使われる技術であるが、ILC では中性粒子を検出するカロリメータにも使われている。基本構造として、板状のシリコン半導体の片面に P 型半導体、もう片面に N 型半導体を形成し、逆バイアス電圧をかけることで、内部に空乏層と呼ばれる伝導体にキャリアがない層を形成する。ここに荷電粒子が通過すると電離により価電子帯の電子を伝導帯に励起し、これが電流となって検出できる。シリコンでは 1 つの電子ホール対を生成するのに約 3.6 eV のエネルギー損失が必要であり、センサーの有効厚を約 300 μm とすると、MIP の通過により生成される電子対は約 24000、電荷にして 3.8 fC 程度となる。

このように MIP による信号は非常に微弱であるため、シリコン検出器にはセンサー近傍に高性能の増幅器(アンプ)が必要となる。この増幅回路について、ILC のような大規模の測定器においては 2 つの方法がある。一つはセンサーのシリコン基板上に増幅器を形成してしまう方法で(モノリシックと呼ばれる)、ILC の崩壊点検出器では主にこの方法が用いられる。増幅器に加えてデジタル変換機能もセンサー基板に持たせることでデジタル信号のみを外部に取り出せばよく、ノイズ性能も非常によいものができるが、センサーに空乏層を作りつつ上層の回路部を正常に動作させることの困難さや、崩壊点検出器の微少な各ピクセルに複雑な回路を載せることの面積的な制約、大面積のセンサーを作る困難さがある。もう一つの方法は信号処理用の ASIC(カスタム集積回路)を別途用意し接続する方法で、こちらは過去の実験でも広く使われている。日本グループが共同開発する ILD のシリコン電磁カロリメータではこちらの方法が使われている。信号を一旦 ASIC に集約することで回路部の面積を小さくしコストダウンとなること、またセンサーと回路開発を分離

できるメリットがあるが、センサーから ASIC までの配線によるノイズの増大があり、信号伝送に注意が必要となる。

3.3.2. ガス飛跡検出器

これは ILD の主飛跡検出器に用いられる方法で、大きな円筒容器にガスを充填し、電場を印加して、ガス中を通過した荷電粒子の電離による電子を電場でドリフトさせ端部の電極で検出する方法である。SiD ではガスは用いず前述のシリコン検出器を複数層並べる方法をとっているが、それに比べ連続的な飛跡検出ができるのが強みである。ただし、電子のガス中の散乱による影響で各点の位置分解能はシリコンと比べ劣るため、シリコン飛跡検出器を補助的に用いて位置精度を回復する仕様となっている。

端部の電極付近には、ガス増幅を行う機構が必要となる。ILD では Micro-pattern gas detector (MPGD) を用いる。いくつかの候補があり、研究開発が進められている。

3.3.3. シンチレーション検出器

シンチレータは荷電粒子による励起により発光する検出器で、高精度光検出器と組み合わせて用いる。ILD では電磁・ハドロンカロリメータに短冊状、または小型の板状のプラスチックシンチレータと小型シリコン光検出器の MPPC を用いた方式が提案されている。プラスチックシンチレータは発光による光子数はシリコン検出器の電子ホール対と比べて 1 桁以上小さく、MPPC への集光率も高くすることが難しいが、シンチレータ自体は安価で加工しやすく、コストに優れた検出器を作ることができる。MPPC は光子数カウントが可能な高速応答デバイスで、小型かつ増倍率が高く ($10^5 \sim 6$)、外部の回路にかかる性能要件が小さい。ただし印加電圧によるゲインの変動が大きいため、それを補正する機構が必要となる。信号の読み出しには、シリコンと同様外部に ASIC を用いる。

3.4. ILD 検出器の概要

ILD 検出器は、日本と欧州が主導する ILC のための検出器コンセプトで、内側から崩壊点検出器、中央飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、3.5 テスラの超伝導電磁石、リターンヨークおよびミュオン検出器から構成されている。本章ではそれぞれの測定器要素の主な仕様と開發現状について述べる。

3.4.1. シリコン崩壊点検出器

崩壊点検出器は、測定器の最内層に設置される測定器要素で、荷電粒子の生成点を精密に測定することがその目的である。先述のように、クォークは多数のハドロンからなるジェットを形成するが、そのうちボトム・チャームハドロンは短距離飛行したのち崩壊する。寿命は生成されるハドロンの種類によって異なるが、ボトムクォークの場合は約 $500 \mu\text{m}$ 、チャームの場合は $40 \sim 300 \mu\text{m}$ の固有飛程 $c\tau$ を持つ (c は光速)。寿命に直すと $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 秒となる。ボトムハドロンは通常チャームを含むハドロンに崩壊する(弱い相互作用により W ボソンを放出して b から c に変化するため、ボトムハドロンの崩壊は 2 つの 2 次崩壊点を持つ (図 19 を参照)。

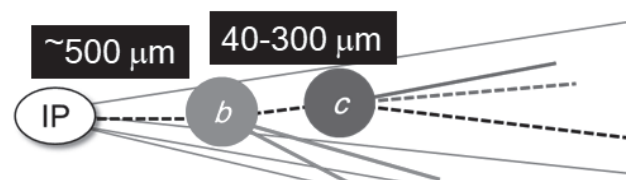


図 19: ボトムクォークの崩壊系列

このボトム・チャームクォーク同定のためには、2 次崩壊点から放出される荷電粒子を捉え、それが衝突点から来ているかどうかを判別する必要がある。荷電粒子の飛跡と衝突点との最小距離を衝突パラメータと呼ぶ。この量は 2 次崩壊点から発生する粒子に対し 0 ~ 固有飛程程度の範囲に分布するため、固有飛程より十分小さい衝突パラメータの精度が必要となる。

ILD の設計では、崩壊点検出器は 6 層あり、特に最内層では $3 \mu\text{m}$ の位置精度を要求仕様としている。これにより衝突パラメータ精度 $2 \mu\text{m}$ を達

成できる。また、崩壊点検出器には大量の粒子が入射するため、高速に読み出す（20 μs 程度の間隔での高繰り返しの読み出し）かピクセルを小さくするかにより信号の占有率を抑える必要がある。これらを解決するためにいくつかの方式の崩壊点検出器が提案されている。ここでは国内で開発が進む FPCCD と SOI の 2 方式について解説する。

FPCCD (Fine Pixel CCD) (図 20)は微細ピクセルの CCD デバイスによりこれを実現する。通常カメラに使われる CCD は可視光を検出するが、ILD の FPCCD はシリコン基板部分をセンサーとして用いて荷電粒子を直接検出する。CCD は電荷をバケツリレーの要領で端部に送りシーケンシャルに読み出しを行うため、大型のセンサーでは読み出し時間が遅くなる。しかし各ピクセルの機能は電荷を転送するだけの単純なものであるため、ピクセルの小型化は容易であり、すでに 6 μm ピクセルのテストセンサーの読み出しに成功している。ILD の仕様は 5 μm であり、微細ピクセルにより占有率を減らすとともに、位置分解能の向上にも成功している。位置分解能としては 1 μm に迫るものがすでに得られており、ILD の要求仕様を大きく越えている。これにより特にチャーム識別性能の向上が期待できる。ただし小ピクセル化によりデータ量が増大するため、オンラインで信号の選別を行いデータ量を減らすことが必須

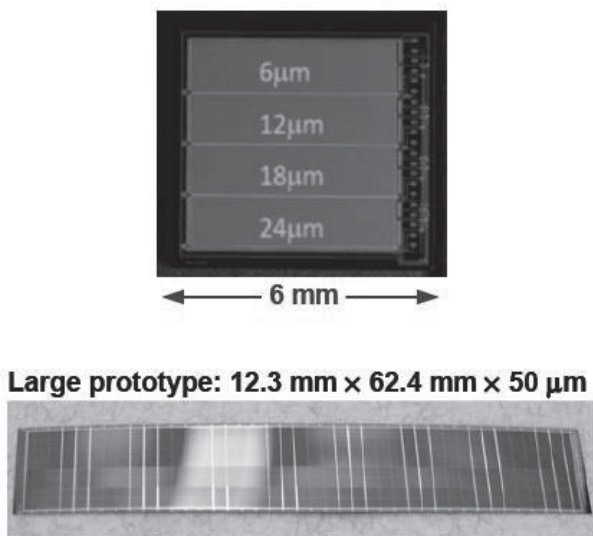


図 20: FPCCD プロトタイプ

である。また、FPCCD は放射線耐性を得るために -40 度に冷却する必要があり、ガス CO_2 を用いた効率的な冷却機構の開発を行っている。

SOI (Silicon-On-Insulator)(図 21)はシリコン基板上に絶縁層を形成し、その上に回路層を置くことでセンサー部と回路部を分離して検出器として動作させるモノリシック型のセンサーである。SOI 技術自体は民生用途に広く用いられている。KEK では長年 SOI を用いたセンサー開発を行っており、特別な工夫によりセンサー層のバイアス電圧の影響を回路層から排除することに成功している。SOI は回路層に FPCCD と比べ複雑な回路を設置できるため、各セルで増幅とデジタル化を行う。ピクセルサイズは FPCCD より大きくなるが、読み出し速度を上げることで占有率の問題に対応している。また常温での動作が可能である。ILD のために開発されている SOFIST というデバイスは、30 μm のピクセルサイズですでに 1.4 μm の位置分解能が得られており、3D 積層技術によりピクセルサイズを 25 μm にしたデバイスを現在試験中である。

他にも欧州で開発されている CMOS や DEPFET 等のデバイスもあり、今後技術選択を行い ILD に採用するデバイスを決定する。崩壊点検出器は ILD 測定器に最後にインストールするため、技術決定は ILC 建設後でも生産が間に合う。新たな技術も含め、今後さらに最適なセンサー技術を開発していくことになる。

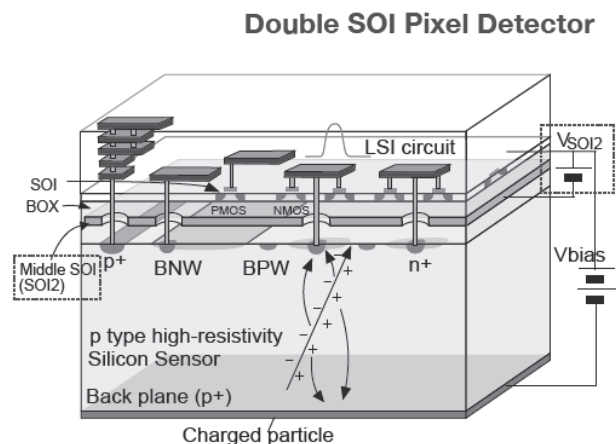


図 21: SOI 検出器の内部構造

3.4.2. 中央飛跡検出器

崩壊点検出器の外側には、荷電粒子の運動量を精密に測定する飛跡検出器が設置される。ILD の飛跡検出器は、ガス TPC (Time Projection Chamber) を用いた中央飛跡検出器とシリコン半導体(ピクセルまたはストリップ)の飛跡検出器を両方用いる。本項では中央飛跡検出器について述べる。

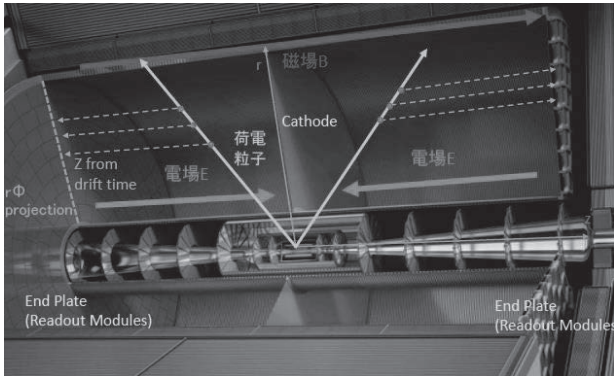


図 22: TPC の概念図

中央飛跡検出器の概念は図 22 に示してある。TPC は大型の円筒ガスチェンバーで、荷電粒子が通過すると、内部のガスが電離によりイオン化される。中央のカソードプレーンと端部のアノードの間には高電圧がかかっており、発生したイオンは電場により端部に導かれる。端部にはMPGDが設置されており、電子がなだれ増幅を起こす。MPGD の後方には細分化された電極が設置され、増幅された電子を電流として取り出す。

日本では MPGD の一種である GEM の開発を行っている。GEM にはガス増幅を起こす増幅 GEM の他に、ガス増幅により生じたイオンがチェンバー本体に戻るのを防ぐゲート GEM が必要で、高い開口率が求められているが、日本グループは企業との共同研究でこれまでにない高い開口率の GEM を開発し、十分な電子透過率が得られることを示した。

TPC は飛跡の運動量測定に加え、エネルギー損失から粒子識別を行う役割がある。先述したエネルギー損失の速度依存性を用いると、粒子の運動量とエネルギー損失の関係は粒子ごとに異なり、これを用いて粒子識別を行うことができる(図

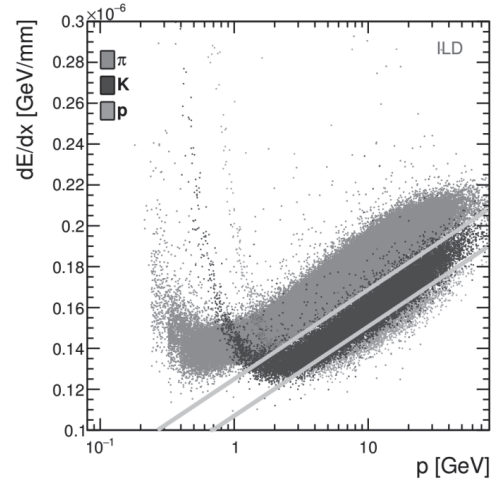


図 23: 粒子ごとのエネルギー損失の違い (ILD 測定器シミュレーションによる)

23)。ただし現状では分離性能は十分ではなく、さらなる性能向上が期待される。その方法の一つとして、増幅後の読み出し電極にモノリシックシリコンセンサーを用いることで、細かいピクセルで読み出しを行う方法である。この方法を用いると運動量分解能とエネルギー損失の分解能を両方向向上できる可能性が高いことがシミュレーションで示されており、現在開発が進められている。

3.4.3. カロリメータの概要

カロリメータは飛跡検出器の外側に設置され、ジェットおよび中性粒子のエネルギー測定が主目的である。電磁シャワーを主に測定する電磁カロリメータが内側に設置され、ハドロンシャワーを主に測定するハドロンカロリメータが外側に設置される。

ILD のカロリメータの基本コンセプトは「Particle Flow Algorithm (PFA)」による高精度ジェットエネルギー測定である。ジェット中の粒子の 6 割程度は荷電粒子であり、そのほとんどはハドロンである。3 割程度は光子、1 割程度が中性ハドロンである。ジェット中の粒子を分離しないで一括して測定する場合、カロリメータの情報を用いるしかないため、6 割を占める荷電ハドロンはハドロンカロリメータの情報を用いることになるが、ハドロンカロリメータのエネルギー分解能は特に悪いため、これによりジェットエネルギー

ギー分解能は大幅に低下する。PFA ではジェット中の粒子をカロリメータ中で一つ一つ分解して、飛跡検出器で検出される荷電粒子に由来するクラスターはエネルギー測定に用いず、対応する荷電粒子がない中性粒子のクラスターのエネルギーのみを用いることで、大幅にエネルギー分解能が向上する。(100 GeV 以下のジェットでは約半分になる。)

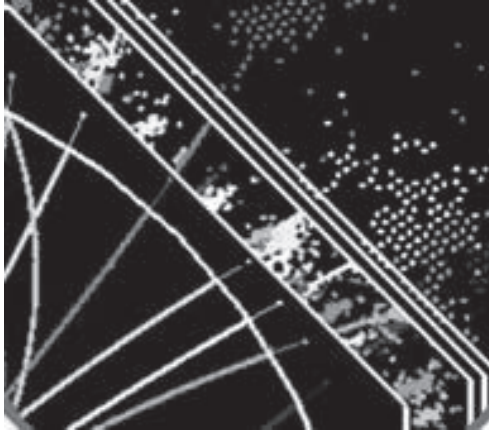


図 24: Particle Flow の概念図。中央部の電磁カロリメータが細分化され粒子分離を実現

PFA を実現するためには粒子分離のためカロリメータは微細に分割されている必要がある(図 24)。以下に述べるカロリメータはいずれも PFA に最適化されているため、細かい要素に分割されており、従って多数の読み出しチャンネルを持つ大規模な読み出しシステムが必要となる。

3.4.4. シリコン電磁カロリメータ

ILD の電磁カロリメータには 3 種類の技術候補があるが、日本が関わっているのはシリコンとシ

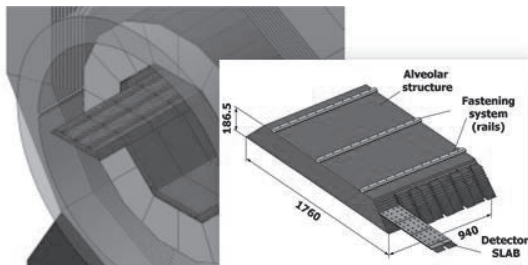


図 25: 電磁カロリメータの構造

ンチレータを用いる 2 タイプである。まずシリコン電磁カロリメータについて述べる。

シリコン電磁カロリメータはタングステンの吸収層とシリコンパッドセンサーの検出層がサンドイッチ状になったカロリメータで、この層を 20~30 レイヤ設置する。図 25 の手前に引き出さ

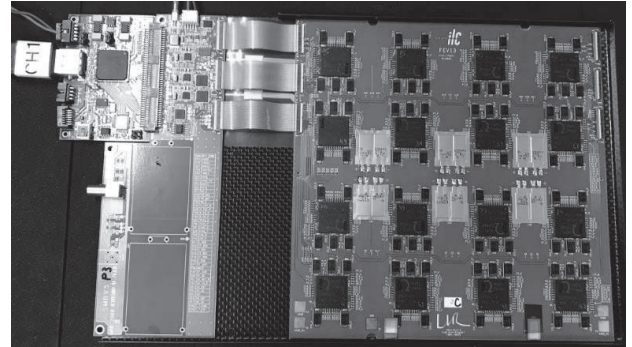


図 26: 日本で組み立てたシリコン電磁カロリメータのサブモジュール

れている 1 モジュールは 10 程度のサブモジュールに分かれ、各サブモジュールに 4 枚のセンサーが貼り付けられている。センサーは約 9cm 角で、5.5 mm 角のセルが 16x16=256 あり、サブモジュールあたり 1024 の読み出しチャンネルがある。パッドセンサーで収集された電荷は、センサーに貼り付けられた基板を通じて基板に取り付けられた ASIC に送られる。ASIC で 2 段の増幅、トリガ処理やデジタル化を行い、デジタル信号のみを外部へ取り出す。センサーと基板の貼り付けは常温硬化型導電性接着剤と塗布ロボットを用いて、接着剤の塗布、センサーの設置を自動で行っている(図 26)。ILD シリコン電磁カロリメータの開発はフランスと日本を中心とした国際協力で行っており、センサーは浜松ホトニクス製、ASIC はフランス製で、国内でもモジュールの生産・組立が可能である。

なお、電磁カロリメータにて高精度タイミング測定を行い、先述の TPC におけるエネルギー損失による粒子識別に加えて、飛行時間法により粒子識別を行う試みがある。ジェット中の高エネルギー粒子の飛来時間の粒子種による差はわずかであるため、これを行うには数 10 ピコ秒という高い時間分解能が求められる。これを実現するた

め、シリコンセンサーを部分的に LGAD (Low Gain Avalanche Detector) というアバランシェ増幅層を内部に備えたセンサーと置き換える方式の検討を国内を中心に進めている。LGAD は LHC の研究では時間分解能 30 ピコ秒を達成しており、これが大規模カロリメータで実現すれば 5 次元カロリメータとして、粒子識別に加えて PFA の性能向上や新物理探索等多くの用途が期待できる。

3.4.5. シンチレータ電磁/ハドロンカロリメータ

電磁カロリメータのもう一つの案として、シリコンではなく短冊型のシンチレータと MPPC を用いたシンチレータ電磁カロリメータ(図 27)がある。この方式はもともと日本が開発してきた方式で、シリコン電磁カロリメータと比べシンチレータが安価で費用が安いという点がある。(シリコンセンサーは非常に高価で、シリコン電磁カロリメータは ILD 全体の 4 割近い高コストとなっている。)ただし、シリコン同様正方形のセルを用いると読み出しにもちいる MPPC のコストが高くメリットがないため、短冊型(5x45 mm²)のセンサーを層ごとに縦横入れ替えて、実質的に 5 mm 角に近い位置分解能を出す設計となっている。

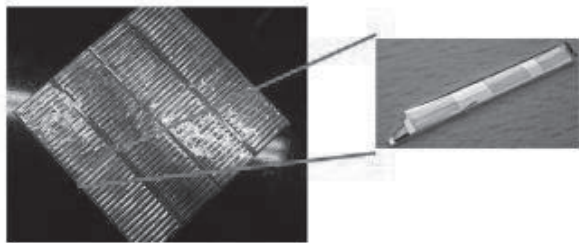


図 27: シンチレータストリップ

MPPC は先述のように増倍率が高いメリットがあるが、温度コントロールや増倍率の定期的な校正が必要となる点でシステムが複雑になる。また短冊型のシンチレータに MPPC を正確に取り付け、セルごとに反射材でラッピングして固定する必要があるため、大量生産およびクオリティコントロールは大きな課題である。読み出し回路については、同じ方式を使ったハドロンカロリメータと共通化することで開発コストの低減と運用

の最適化を図っている。ハドロンカロリメータは 3x3cm² のセルサイズで、センサーの厚みに関する制限も厳しくないため、電磁カロリメータに比べ技術的困難は少ないが、MPPC に関わる課題は同様に解決する必要がある。ドイツの DESY 研究所が読み出し回路を中心的に開発しており、ドイツの各大学と日本の大学が協力してセンサーの設計・製作、性能評価などを行っている。また電磁カロリメータについては、中国の CEPC 計画向けのカリメータと協力して開発を行っている。

3.5. ILD 検出器のシミュレーション・解析技術

ここまで紹介してきた測定器の性能評価・最適化およびそれによる ILD および ILC の物理性能を知るためには、シミュレーションおよび解析技術が不可能である。

物理解析のためには、ヒッグスや新物理の粒子を生成し崩壊させるイベントジェネレータが必要である。ILC では whizard というイベントジェネレータを用いており、スクリプトを用いて比較的簡単に目的のイベントを生成できる。また、背景事象の解析等に使う標準模型のサンプルに関してはグループ共通で利用できるイベントが用意され、国際的に共有されている。ここで生成されたイベントは測定器シミュレーションにより各測定器要素での信号を擬似的に作り出す。このシミュレーションは素粒子実験で標準的に使われている Geant4 というパッケージをベースにしている。測定器の詳細は設定ファイルに記載され、測定器の最適化等のためパラメータを変更できる。

シミュレーションにより生成された測定器の疑似信号に対して、(もとのイベント情報は使わず)その信号だけを用いて元の粒子の飛跡、エネルギーなどを推定する事象再構成が行われる。ここでは信号のパターンから飛跡再構成や先日の PFA などを高度なパターン認識を行う必要があり、深層学習などの最新技術も用いてアルゴリズムの改良に各地で取り組まれている。事象が再構成されれば、再構成された粒子の情報を用いて興味のある物理事象(ヒッグス、新粒子など)が存在

するかどうかを調べる解析プログラムを用いて、性能評価を行うことができる。

このようなシミュレーション・再構成には膨大な計算機資源が必要となる。ILCでは、他の大規模実験と同様、世界の計算機資源を共有して用いるGRIDシステムを用いており、KEKも計算機資源を提供している。また、ILCが実現した場合にも、収集されたデータの再構成とシミュレーションの比較等のために多くの計算機資源が必要となる。そのための計算機の配置、データ転送とネットワーク、ソフトウェアなど、様々な検討のもと、ILCで必要な計算機環境についても見積もりが行われている。特に最近では深層学習が急速に進展し、事象再構成や物理解析において大幅な性能向上が期待されている。深層学習は従来のCPU資源ではなくGPU等のベクトル計算を多用するため、求められる計算機資源も異なる。このことから、深層学習による事象再構成の可能性について、急速に検討を進め、深層学習の活用の可能性を明らかにする必要がある。

4. まとめ

本稿では、ILCの物理的意義と測定器技術を概観した。ILCの物理的意義については、ヒッグスファクトリーが次世代の最優先課題であることはすでに国際コミュニティのコンセンサスとなっており、エネルギー拡張性も合わせればILCへの長期にわたる期待は非常に大きい。ILCを武器に、世界の素粒子研究者、加速器研究者の総力を挙げて宇宙の謎に迫る成果をあげていきたい。

測定器においても、様々な先進技術が開発されており、その多くは、宇宙観測・放射線医療・環境計測等広く活用できる可能性を持っている。測定器開発に携わる一人として、本稿をきっかけに、加速器技術に加え測定器技術にも興味を持っていただければ幸いである。ILCの測定器の最終仕様はまだ決定しておらず、新しいアイデアを導入する余地もたぶんにある。意欲のある方の挑戦をお待ちしたい。

参考文献

- [1] “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary,” arXiv:1306.6327.
- [2] KEK 素核研 web サイトより引用
<https://www2.kek.jp/ipns/en/research/ilc/>
- [3] Planck Collaboration, A&A 641, A1 (2020)
- [4] マーティン/ショー 素粒子物理学 原著第4版, 講談社サイエンティフィック, 2020年
- [5] (European Strategy) Physics Briefing Book, arXiv:1910.11775.
- [6] Degrassi, G., Di Vita, S., Elias-Miró, J. et al. Higgs mass and vacuum stability in the Standard Model at NNLO. J. High Energ. Phys. 2012, 98 (2012).
- [7] The Review of Particle Physics, P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020)