

ILCの物理

東京大学 素粒子物理国際研究センター

田辺 友彦

tomohiko@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2014年3月1日

1 はじめに

国際リニアコライダー計画 (International Linear Collider: ILC) の技術設計書 (Technical Design Report: TDR) が、国際協力による研究開発を経て、2012年末に完成し、2013年6月に公開された [1, 2, 3, 4, 5]。次世代大型加速器計画として現在技術的に建設準備が整っているのは ILC のみである。今後、最終設計や政府間交渉などを経て、ILC 実現を目指すフェーズにきている。

ILC の物理的意義は、LHC によるヒッグス粒子¹発見でより確固たるものとなった。LHC での $h \rightarrow ZZ^*$ 崩壊の観測は、ILC での $e^+e^- \rightarrow Zh$ 随伴生成過程 (図 1 左) を保証している。ILC のマシン設計では、まず重心系エネルギー $\sqrt{s} = 250 - 500$ GeV をカバーし、その後 $\sqrt{s} = 1$ TeV へアップグレードすることを想定している。これは、ヒッグス質量が約 125 GeV に決まったことで明確となった物理ターゲット (図 2 にしめす生成断面積参照) と非常によくマッチングしている。すなわち、

- $\sqrt{s} = 250$ GeV における Zh 随伴生成過程の研究
- $\sqrt{s} = 350$ GeV 付近の $t\bar{t}$ 対生成、および WW 融合過程 (図 1 右) によるヒッグス生成の研究
- $\sqrt{s} = 500$ GeV でのヒッグス自己結合とトップ湯川結合の直接測定、高統計によるヒッグス精密測定
- $\sqrt{s} = 1$ TeV におけるヒッグス自己結合とトップ湯川結合の精密測定

これら重要な物理研究をワンパッケージでできる計画は ILC のみである。また新粒子直接探索という観点においても e^+e^- のフロンティアマシンとしてエネルギー拡張性の高い線形加速器が魅力的である。LHC では見つけにくいカラーを持たない粒子や縮退した質量スペクトルを持つような Higgsino などの粒子群に対しても、ILC はエネルギーが十分であれば発見できる大きな可能性を持っている。

¹ここではヒッグス粒子は小文字の h で表記する。超対称性など、標準模型を超える物理への期待を込めるものである。

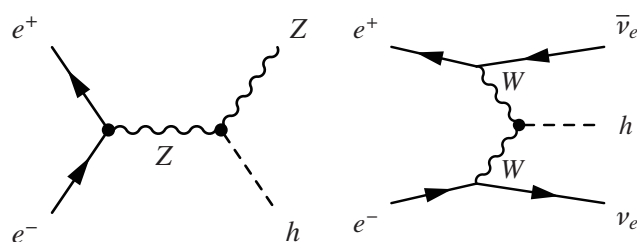


図 1: ILC におけるおもなヒッグス生成過程。(左) $e^+e^- \rightarrow Zh$ 随伴生成。(右) WW 融合による $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ 過程。

本稿ではまず ILC の基本性能を概観した上で、上記の ILC 物理のキーポイントを解説していく。詳細については TDR の第二巻 [2] や、2013 年に行われた米国 Snowmass Process に提出された ILC 物理に関するホワイトペーパー [6, 7, 8, 9] などを参照されたい。

また加速器設計や研究開発については既に高エネルギーニュースに掲載された記事を、測定器の詳細については次号掲載予定の記事を参照されたい。

2 ILC の基本性能

LHC などの pp 衝突実験では陽子加速の容易さから高エネルギーに到達できるものの、背景事象の多さがネックとなるため、みやすいシグナルを扱うのが解析の基幹となる。また断面積絶対値測定などにおいては初期状態のパートン運動量分布の不定性が常に伴う。これに対し、ILC など e^+e^- 衝突実験は基本粒子の対消滅反応をみるため、四元運動量の保存が適用可能であり、バックグラウンドの少ないクリーンな環境での解析ができる。シグナルはみやすいものに限らず、基本的にすべてのモードでの解析を行う。崩壊モードを限定せずに高い検出効率を持つので新粒子探索などにおいてとくにその威力を発揮する。また e^+e^- 反応は実験的にも理論的にもよく理解されており、グローバルな系統誤差は基本的に小さい。ビームエネルギー制御が可能で、精密測定など、断

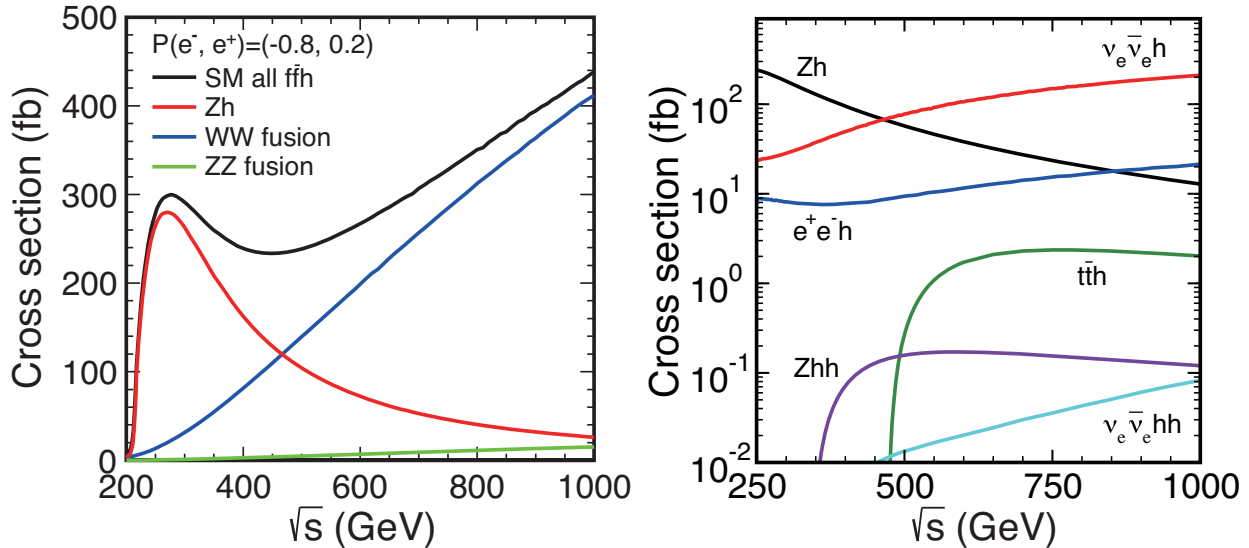


図 2: (左) 質量 125 GeV のヒッグス粒子生成過程の断面積。ビーム偏極は $P(e^-, e^+) = (-0.8, +0.2)$ を仮定。(右) $e^+e^- \rightarrow Zh$, $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-h$, $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}h$, $e^+e^- \rightarrow Zhh$, $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}hh$ の各過程の断面積。ビーム偏極はなし。いずれも文献 [6] より。

面積の閾値測定が可能である。また円形加速器ではできない ILC 特有の特徴として以下の点が挙げられる。

- ビーム構造が 5 Hz パルス運転、バンチ間隔が 554 ns であり、データレートが控えめであることからトリガーなしで全データ取得が可能。
- ビーム偏極がすべてのエネルギーで可能であり、ベースライン設計では電子偏極度 80%、陽電子偏極度 30%となっている。初期状態の helicity を選択できることで、測定できる物理量が増える。
- ビーム起因のバックグラウンドが小さいことから、野心的な測定器設計が可能である。バーテックス検出器の最内層はビームから約 15 mm に置き、ジェットフレーバー同定性能は b ジェット同定のみならず、 c ジェット同定も可能とする。また超前方検出器でビーム軸に対して約 7 mrad 以上の高エネルギー e^\pm が検出可能。

そして線形加速器としての最大の利点は前述のとおりエネルギー拡張性であり、将来への投資という観点においても非常に優れている。

3 ILC のヒッグス物理

3.1 測定精度の要求

LHC によるヒッグス粒子の発見を受けてヒッグスセクターの徹底解明が急務となった。既にスピンと CP の量子数や、 W/Z 粒子との結合定数やタウレプトンとの

湯川結合は測定精度の範囲内で標準模型ヒッグスと無矛盾であるという結果が得られている。

標準模型のヒッグスセクターはヒッグス二重項ひとつのみで記述される。これは W/Z 粒子と、物質フェルミオンの質量を同時に説明できる一番シンプルな方法である。なぜそのようにシンプルである必要があるかはわかっていない。拡張されたヒッグスセクターを考慮した場合、暗黒物質、宇宙のバリオン数非対称、ニュートリノ質量などの標準模型を超える現象を説明できる可能性がある。様々な模型がヒッグス結合定数のずれや、新粒子の存在を予想している。

ここでは、LHC の結果が示唆するように、標準模型からのずれが 10% 程度以内の場合を考える。重い新粒子が存在する場合、ヒッグス結合定数の標準模型からのずれは新粒子の質量の二乗に反比例する (decoupling limit)。Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM) を考えた場合ではヒッグス結合定数の標準模型からのずれは以下のように予想される [2]。

$$\frac{g_{hbb}}{g_{h_{SM}bb}} = \frac{g_{h\tau\tau}}{g_{h_{SM}\tau\tau}} \simeq 1 + 1.7\% \left(\frac{1 \text{ TeV}}{m_A} \right)^2 \quad (1)$$

重いヒッグスのスケール m_A が 1 TeV 程度ならヒッグス結合定数に数%のずれが示唆される。したがって、ヒッグス結合定数を 1% を切る精度で測定することがテラスケールの新物理がおよぼす影響を調べるためのひとつの目安となる。

ほかにも $\sqrt{s} = 14$ TeV の LHC で新粒子が見えない場合において、新物理がヒッグス結合定数に及ぼす影響を評価した研究 [10] では、新物理モデルによってヒッグス結合定数に数%から数十%ずれうるといこと

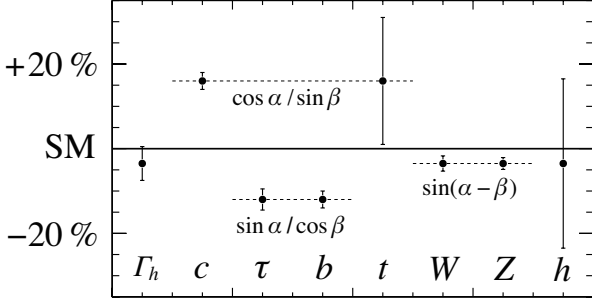


図 3: Two-Higgs Doublet Model におけるヒッグス結合定数の標準模型からのずれの一例 [11]。

を予想している。

実際にヒッグス結合定数に標準模型からのずれが発見された場合にはそのずれのパターンから、新物理モデルの特定を目指す。例として、MSSM に代表されるような Two-Higgs Doublet Model の場合は図 3 に示すように粒子グループをつくって反対方向にずれることが知られている。これはヒッグス場が複数あることの証拠であり、どの粒子がどのヒッグス場と結合するかでモデルを識別することができる。このようなモデルの「指紋照合」を可能とするのも ILC におけるヒッグス結合定数精密測定 の強みである。

3.2 ヒッグス生成過程

e^+e^- におけるヒッグス生成過程は図 1 に示す Zh 随伴生成と WW 融合反応のふたつがおもなモードである。図 2 からわかるように、 Zh 随伴生成の断面積は 250 GeV 付近で最大になりその後 \sqrt{s} の増大とともに減っていくのに対し、 WW 融合反応の断面積は \sqrt{s} とともに増えていき、 $\sqrt{s} = 500$ GeV 付近で Zh 随伴生成を追い抜き優勢となる。

どの重心系エネルギーでどのくらいデータを貯めるかは、予算状況の加速器増強計画への影響を考慮しつつ、現在検討が進められている。以降で紹介する ILC のヒッグス結合定数の精度は表 1 に示すとおり、 $\sqrt{s} = 250$ GeV、

500 GeV、1 TeV と順にデータを取得し、組み合わせることを想定している。

3.3 ヒッグス質量精密測定

ILC では $e^+e^- \rightarrow Zh$ 過程から生成断面積とヒッグス質量を同時に測定できる。 Z のフェルミオン対への崩壊を再構成し、四元運動量保存をもちいることで、以下の式のようにヒッグス反跳質量 M_{recoil} を求められる。

$$M_{\text{recoil}}^2 = (\sqrt{s} - E_{ff})^2 - |\vec{p}_{ff}|^2 \quad (2)$$

E_{ff} と \vec{p}_{ff} はそれぞれフェルミオン対のエネルギーと運動量をあらわす。とくに運動量分解能の高いミュオン対で $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ を再構成できる事象がヒッグス質量の測定精度が一番よい。 $Z \rightarrow e^+e^-$ の場合は制動輻射があるため精度は若干劣る。重心系エネルギー $\sqrt{s} = 250$ GeV のとき実験室系のヒッグスはほぼ静止状態であることから運動量分解能が一番よいが、 $\sigma(e^+e^- \rightarrow Zh)$ の測定は重心系エネルギーが少し高くても可能である。図 4 にヒッグス反跳質量の分布を示す。重心系エネルギー $\sqrt{s} = 250$ GeV で積分ルミノシティ $\mathcal{L} = 250 \text{ fb}^{-1}$ の条件においてヒッグス質量の精度は $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ の場合で $\Delta m_h = 40$ MeV、 $Z \rightarrow e^+e^-$ の場合で $\Delta m_h = 80$ MeV、あわせて 32 MeV と見積もられている。同条件で $\sigma(e^+e^- \rightarrow Zh)$ の測定精度は $\Delta\sigma/\sigma = 2.6\%$ となっている。そこから結合定数に焼き直した精度は $\Delta g_{hZZ}/g_{hZZ} = 1.3\%$ と見積もられている。またヒッグス崩壊を再構成せずにできる測定であることから Higgs Portal シナリオなど、ヒッグスが暗黒物質に崩壊するようなケースでもヒッグスを同定できる。このような invisible 崩壊の分岐比は 95% C.L. で 0.9% 以上は排除できる感度となっている。

3.4 ヒッグス結合定数精密測定

ヒッグス物理を研究する上で物理量として実際に測定されるのは前述の $\sigma(e^+e^- \rightarrow Zh)$ をのぞいては基本的に $\sigma \cdot BR$ のように断面積と崩壊分岐比の積である。ある粒子 X に対して、 hXX 結合を測定するにあたり、まず

表 1: ルミノシティの定義。文献 [6] に準拠。電子偏極度はすべて -80% 、陽電子偏極度は $\sqrt{s} = 500$ GeV 以下では 30% 、 $\sqrt{s} = 1$ TeV では 20% を仮定。

Nickname	Int. Lumi. at 250 GeV	Int. Lumi. at 500 GeV	Int. Lumi. at 1 TeV	Runtime (yr)	Wall Plug E (MW-yr)
ILC(250)	250 fb ⁻¹			1.1	130
ILC(500)	250 fb ⁻¹	+ 500 fb ⁻¹		2.0	270
ILC(1000)	250 fb ⁻¹	+ 500 fb ⁻¹	+ 1000 fb ⁻¹	2.9	540
ILC(LumiUp)	1150 fb ⁻¹	+ 1600 fb ⁻¹	+ 2500 fb ⁻¹	5.8	1220

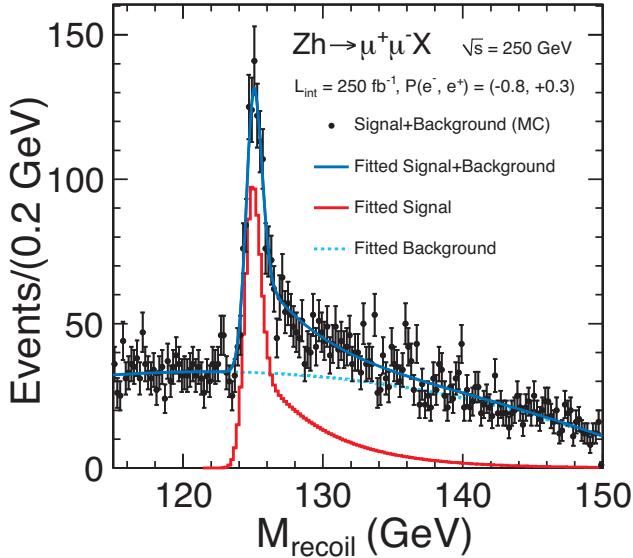


図 4: $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ をもちいた $e^+e^- \rightarrow Zh$ 断面積測定とヒッグス質量測定。(提供:東北大・綿貫氏)

$\sigma(e^+e^- \rightarrow Zh) \cdot BR(h \rightarrow XX)$ を測定し、上記の断面積で割り算し、崩壊分岐比 $BR(h \rightarrow XX)$ の絶対値を得る。ここから結合定数を求めるにはヒッグスの全巾 Γ_h が独立に必要なことになる。質量 125 GeV のヒッグス粒子の全巾は約 4 MeV なので、narrow-width approximation を適用すると次の式が成り立つ。

$$\Gamma_h = \Gamma(h \rightarrow XX)/BR(h \rightarrow XX) \quad (3)$$

$\Gamma(h \rightarrow ZZ)$ は先述の $\sigma(e^+e^- \rightarrow Zh)$ 測定から得られるので、独立に $BR(h \rightarrow ZZ^*)$ を測定して全巾は得られるが、 $BR(h \rightarrow ZZ^*)$ は 2.6% と値が小さいため、ILC ではこの測定の統計誤差が支配的になってしまう。そこでもちいるのが $\Gamma(h \rightarrow WW)$ の測定と、十分な統計が得られる $BR(h \rightarrow WW^*)$ の測定である。前者は WW 融合プロセスと Zh 随伴生成について $h \rightarrow b\bar{b}$ に限定して比を取り、先の g_{hZZ} 絶対値測定と組み合わせることで求めることができる。

$$\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h) \cdot BR(h \rightarrow b\bar{b})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow Zh) \cdot BR(h \rightarrow b\bar{b})} = \frac{\Gamma(h \rightarrow WW)}{\Gamma(h \rightarrow ZZ)} \quad (4)$$

この方法で $\sqrt{s} = 250$ GeV, $\mathcal{L} = 250$ fb $^{-1}$ の場合に求められるヒッグス全巾の精度は $\Delta\Gamma_h/\Gamma_h = 12\%$ 、これに $\sqrt{s} = 500$ GeV, $\mathcal{L} = 500$ fb $^{-1}$ をあわせると $\Delta\Gamma_h/\Gamma_h = 5.0\%$ となる。したがって、全巾の精密測定、ひいては結合定数の精密測定においては $\sigma(e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h)$ の統計を確保するため $\sqrt{s} = 250$ GeV よりも上のエネルギーでデータ取得をすることが大事である。以上のやり方をもとに、ヒッグス結合定数はさまざまな $\sigma \cdot BR$ 測定に対してグローバルフィットを行い決定する。以上から見積もった結合定数の測定精度について $\gamma, g, W, Z, b,$

表 2: モデル非依存のヒッグス結合定数の精度 $\Delta g_i/g_i$ のまとめ [6]。系統誤差は一律に 0.5% と仮定して含める。ルミノシティの仮定は表 1 を参照のこと。

Mode	ILC(250)	ILC(500)	ILC(1000)	ILC(LumiUp)
$\gamma\gamma$	18%	8.4%	4.0%	2.4%
gg	6.4%	2.3%	1.6%	0.9%
WW	4.9%	1.2%	1.1%	0.6%
ZZ	1.3%	1.0%	1.0%	0.5%
$t\bar{t}$	-	14%	3.2%	2.0%
$b\bar{b}$	5.3%	1.7%	1.3%	0.8%
$\tau^+\tau^-$	5.8%	2.4%	1.8%	1.0%
$c\bar{c}$	6.8%	2.8%	1.8%	1.1%
$\mu^+\mu^-$	91%	91%	16%	10%
Γ_h	12%	5.0%	4.6%	2.5%

τ, c, μ の各粒子とヒッグスの結合定数および全巾 Γ_h について表 2 にまとめる。ヒッグスと t の結合定数については、後述のとおり、 $\sqrt{s} = 500$ GeV 以上で行うトップ湯川結合の直接測定の精度である。

ここまでの ILC のヒッグス結合定数の精度はモデルに依存しない絶対値測定のものであり、LHC には不可能である。LHC の測定精度と比較するためには LHC の見積もりの際にもちいられる仮定と同じものを ILC の数字にも適用する必要がある。仮定をいれることで、測定精度は当然よくなる。LHC Higgs Cross Section Working Group の提唱するフレームワークでは 7 つのフリーパラメータ $\kappa_g, \kappa_\gamma, \kappa_W, \kappa_Z, \kappa_b, \kappa_t, \kappa_\tau$ と 1 つの依存パラメータ κ_H を定義する。ここでもちいる仮定はふたつあり、ひとつめは第二世代フェルミオンと第三世代フェルミオンの結合定数が $\kappa_c = \kappa_s, \kappa_\mu = \kappa_\tau$ などのように関係していること、ふたつめはヒッグス全巾が標準模型ヒッグスの崩壊モードの和で飽和するというのである。測定される物理量と誤差を以上の枠組みでフィットを行い、得られる結果を表 3 にまとめる。この比較から ILC はほとんどのヒッグス結合定数で HL-LHC を凌駕する精度を得られることがわかる。崩壊分岐比の小さい $h \rightarrow \gamma\gamma$ は ILC は統計が少ないため相応の精度となっているが、LHC と ILC を組み合わせることで精度の向上

表 3: LHC と ILC のヒッグス結合定数の精度比較。Snowmass Higgs Working Group Report [12] より抜粋。HL-LHC は $\sqrt{s} = 14$ TeV, 3000 fb $^{-1}$ を仮定する実験ひとつの精度。ILC のルミノシティは表 1 を参照のこと。

	HL-LHC	ILC(500)	ILC(1000)	ILC(LumiUp)
κ_γ	2-5%	8.3%	3.8%	2.3%
κ_g	3-5%	2.0%	1.1%	0.67%
κ_W	2-5%	0.39%	0.21%	0.2%
κ_Z	2-4%	0.49%	0.50%	0.3%
κ_ℓ	2-5%	1.9%	1.3%	0.72%
$\kappa_d = \kappa_b$	4-7%	0.93%	0.51%	0.4%
$\kappa_u = \kappa_t$	7-10%	2.5%	1.3%	0.9%

が期待される。モデル非依存の測定においても、LHCでは結合定数の比がモデル非依存に決定できるので、LHCの $g_{h\gamma\gamma}/g_{hZZ}$ と、ILCの g_{hZZ} を組み合わせることで、1%の測定精度を達成できる [13] という LHC と ILC の素晴らしいシナジー効果がある。

3.5 トップ湯川結合とヒッグス自己結合

重心系エネルギーおよそ $\sqrt{s} = 500$ GeV からトップ湯川結合とヒッグス自己結合の測定が可能となる。トップ湯川結合はトップ対生成の $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ 反応から量子ループ効果で間接的にみることも可能だが、新粒子がループをまわる効果と、トップ湯川結合自体に異常がある場合とが区別できない。 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}h$ 反応でトップ湯川結合を直接測定すればそれらが区別可能となる。また Composite Higgs モデルなど、強結合の物理がテラスケールにあるモデルにおいてトップ湯川結合は大きくずれる可能性がある。湯川結合の中でもトップのそれが唯一 $O(1)$ であることも興味深い。ILC におけるトップ湯川結合の測定精度は $\sqrt{s} = 500$ GeV, $\mathcal{L} = 500 \text{ fb}^{-1}$ で $\Delta g_{htt}/g_{htt} = 14\%$ となっている。ただし、 $\sqrt{s} = 500$ GeV では図 2 右にしめすとおり、 $t\bar{t}h$ の断面積が完全に上がりきっていないため、少しエネルギーをあげるだけで測定精度の大幅な改善が可能である。たとえば $\sqrt{s} = 520$ GeV では断面積がほぼ二倍になる。また $\sqrt{s} = 1$ TeV では統計増加とバックグラウンド低下のふたつの効果で、表 2 にしめすとおり、数%の精密測定が可能である。

ヒッグス自己結合は $e^+e^- \rightarrow Zh\bar{h}$ 反応の断面積測定から得られる。最初からスカラー三点結合を含むラグランジアンはゲージ不変には記述できず、四点結合の足のひとつが真空凝縮を起こしてはじめて三点結合が得られる。したがってヒッグス自己結合測定を通して三点結合の存在を確認することは真空凝縮の直接検証となる。自己結合 λ はヒッグスポテンシャルの形を決める重要なパラメータでもあり、標準模型から予想される値 $\lambda = 2m_h^2/v^2$ ($v \approx 246$ GeV は真空期待値) になるか検証が必要である。ILC の $\sqrt{s} = 500$ GeV におけるヒッグス自己結合測定は $\sigma(e^+e^- \rightarrow Zh\bar{h})$ が 0.2 fb 程度と小さいことと、 $Zh\bar{h}$ 終状態に自己結合を含まない過程が存在する効果で、断面積と自己結合のそれぞれの精度の関係が $\Delta\lambda/\lambda = 1.8 \times \Delta\sigma/\sigma$ となることから、高統計を要する難しい解析となっている。自己結合の精度は、表 4 にまとめる通り、 $\sqrt{s} = 500$ GeV, $\mathcal{L} = 1600 \text{ fb}^{-1}$ で $\Delta\lambda/\lambda = 46\%$ となっている。 $\sqrt{s} = 1$ TeV では $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h\bar{h}$ 過程が利用でき、また断面積と自己結合の精度の関係が $\Delta\lambda/\lambda = 0.85 \times \Delta\sigma/\sigma$ と改善することから、 $\sqrt{s} = 1$ TeV, $\mathcal{L} = 2500 \text{ fb}^{-1}$ の結果に $\sqrt{s} = 500$ GeV の結果をあわせることで自己結合の精度

表 4: ILC のヒッグス自己結合測定精度のまとめ [6]。

\sqrt{s} (GeV)	500	500	500/1000	500/1000
\mathcal{L} (fb ⁻¹)	500	1600	500+1000	1600+2500
$\sigma(Zhh)$	42.7%	23.7%	42.7%	23.7%
$\sigma(\nu\bar{\nu}hh)$	-	-	26.3%	16.7%
λ	83%	46%	21%	13%

は $\Delta\lambda/\lambda = 13\%$ となり、ILC における自己結合測定は究極的には約 10% に達する。

4 ILC のトップ物理

トップクォークは物質フェルミオンの中でも質量が $m_t = 173$ GeV と一番大きく、また電弱スケールに近いいため、電弱対称性の破れに深く関与している可能性がある。トップクォークはハドロンコライダーで発見され、長く研究されてきた。ILC ではトップの質量や電弱結合などの精密測定を通じて新物理に関する知見を得ることができる。

4.1 トップ質量精密測定

トップ質量の精密測定の動機は電弱精密測定と真空の安定性への影響とがある。電弱精密測定の理論値は新物理の量子効果による寄与は小さいため、実験側は高精度な測定が求められるが、この際、インプットとなるのがトップ質量や W 質量である。また MSSM を考えた場合にはヒッグス質量項の量子補正が m_t の四乗で効くため、stop セクターのスケールを決める上で m_h の精密測定とあわせて重要となる。

真空の安定性については、ヒッグス自己結合をくりこみ群方程式で高エネルギーにもっていったときに自己結合の符号が正を保つ場合 (stable)、負になるが絶対値で小さい場合 (metastable)、大きく負になる場合 (unstable) と分けることができ、unstable の場合は宇宙が蒸発することのないよう、そのスケールに新物理があらわれることを示唆する。トップ質量の測定精度として $\Delta m_t \approx 0.7$ GeV、ヒッグス質量の精度を $\Delta m_h \approx 1$ GeV ととると、ヒッグス自己結合が負に転じるスケールは 10^{10} – 10^{14} GeV の間と大きな誤差が伴う [14]。ILC におけるヒッグス質量とトップ質量の両方の精密測定で標準模型の適用限界を調べることができる。

ILC の $\sqrt{s} = 350$ GeV 付近で生成されたトップ対は非摂動 QCD が適用される前に崩壊するため、断面積の計算は摂動論をもちいて精度よく計算できる。断面積の形から $\overline{\text{MS}}$ スキームのトップ質量など、理論的によく理解された値を抽出することができる。ILC でのトップ質量の決定精度は図 5 にしめすとおり、統計誤差のみで

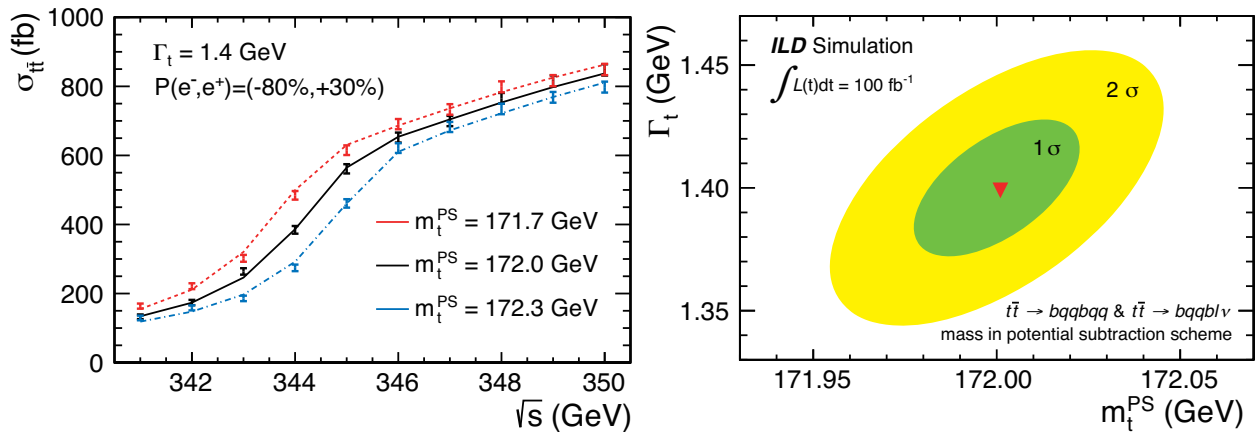


図 5: (左) $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ 断面積とトップ質量の関係。(右) トップ質量と巾の測定精度の相関。(提供: 東北大・堀口氏)。

およそ 20 MeV となっており、理論誤差もふくめると $\Delta m_t \approx 100$ MeV と見積もられる。またここまでいくと電弱精密測定では W 質量の誤差が支配的になり、 WW 反応など低い重心系エネルギーでやり直すモチベーションが生まれる。

4.2 トップ電弱結合精密測定

トップ結合のうち W 粒子との弱結合は Tevatron と LHC でトップの崩壊をみることでよく測られている。一方でトップと Z 粒子、または光子との電弱結合はハドロンコライダーでは $t\bar{t}Z$ または $t\bar{t}\gamma$ などの断面積が小さい生成をみる必要があり、トップ電弱結合は未だ測定されていない。トップ電弱結合が標準模型からずれることを予言する模型は多々あり、Randall-Sundrum 模型、複合トップ模型、Little Higgs Model などがある。これらは文献 [7] で紹介されている。HL-LHC でのトップ電弱結合の測定精度は数%–10% レベルに達すると見積もられている。一方で、ILC では s -channel 過程の $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ をもちい、中間状態の Z と γ はビーム偏極をもちいて成分を分離することでトップ電弱結合は 0.1%–数% レベルの精密測定を可能とする。上記は $\sqrt{s} = 500$ GeV, $\mathcal{L} = 500 \text{ fb}^{-1}$ の統計を仮定しており、 $\sqrt{s} = 500$ GeV における高統計のトップ対生成をもちいた精密測定となっている。

4.3 トップ対生成の非対称性

トップ対生成に関する非対称性の標準模型からのずれが報告されており、ILC での精密検証が待たれる。直近では Tevatron における forward backward asymmetry が標準模型からずれていると CDF と D0 の両実験から報告されており、それぞれの測定値は標準模型から 2–3 σ 大きい値となっている。LHC は $p\bar{p}$ 衝突ではなく pp 衝

突のため、残念ながらこの測定結果を直接検証することは難しい。また SLC/LEP がボトムクォークに関する非対称性について約 3 σ のずれを報告しており、これが本当だとすると、トップクォークについても大きくずれる可能性がある。

5 ILC での新物理発見への期待

5.1 LHC 新物理探索との相補的關係

ILC における新物理の研究の方向性は今後の LHC などでの研究の展開によって決まる。LHC で新粒子の発見がない場合でも、暗黒物質をはじめとしたカラーを持たない粒子など、ILC で探れる領域に新粒子が存在する可能性は大に残るため、これらの相補的探索を行う。今後 LHC で新粒子が発見され、その質量が ILC のエネルギーで届くところであれば、 e^+e^- のクリーンな環境でそれを徹底的に研究する。届かない場合においても、暗黒物質など、付随する新粒子の発見の期待が高まる。もし LHC で発見された粒子の質量が 500 GeV よりも大きく、かつそれが暗黒物質であることが確定した場合には—これはレアケースであろうが—1 TeV までの ILC では研究不可能となるため、ILC 計画の再検討が必要となるだろう。ヒッグスやトップなどの精密測定は LHC での新粒子発見の有無に関わらず、前述の通り新物理の間接的探索・研究として確実に成果をあげられる。

5.2 暗黒物質粒子発見への期待

コライダー実験などでの暗黒物質粒子の探索はおもに Weakly-Interacting Massive Particle (WIMP) が対象となる。その抛り所となっているのが暗黒物質の残存密度が電弱スケールの対消滅断面積と丁度よくマッチするという、いわゆる WIMP Miracle である。

さまざまな標準模型をこえる物理のモデルで暗黒物質の候補となる電弱スケールの質量を持つ新粒子をつくれることから、これらが探索対象となる。たとえば超対称性理論で R パリティが保存する場合において、一番軽い超対称性粒子 (Lightest Supersymmetric Particle: LSP) が暗黒物質の候補となる。暗黒物質への崩壊に伴う消失エネルギーを持つ事象が探索のターゲットとなるが、そのレートはモデルの詳細に依存する。

モデル依存度が少ないアプローチとしてフェルミオン粒子 f と暗黒物質 χ との有効相互作用 $f\bar{f}\chi\bar{\chi}$ をみる方法がある。LHC や地下実験での直接探索は暗黒物質とクォークの相互作用をみるのに対し、ILC での電子との相互作用探索は相補的なアプローチとなる。ILC でのバックグラウンドの小ささを生かし、 $e^+e^- \rightarrow \gamma\chi\bar{\chi}$ 過程で暗黒物質の対生成に伴う初期状態輻射の単光子を検出することで、 \sqrt{s} のおよそ半分までの質量の暗黒物質についてモデルに依存しない探索を可能とする。

発見された暗黒物質候補について、質量や相互作用など、ILC での精密測定を通して対消滅断面積を決定し、前述の暗黒物質残存密度から予言される値と一致するかどうかの検証が可能となり、宇宙の歴史の理解が深まることとなる。

5.3 電弱生成による新粒子発見への期待

LHC はカラーを持つ粒子に対しては高い感度を持っており、HL-LHC では 3–4 TeV の gluino や squark に対する感度を持つ [15]。一旦 gluino や squark が生成されれば、カスケード崩壊によってカラーを持たない粒子も発見可能となるが、その感度は質量スペクトルや崩壊分岐比などによるところが大きく、モデル依存性が高い。そこで、slepton, chargino, neutralino など、カラーを持たない粒子の直接生成をみることになるが、LHC では生成断面積が小さい上に、崩壊モードのモデル依存性が残ってしまう。とくに LSP と縮退した質量スペクトルを持つ場合は検出対象の粒子のエネルギーが小さく、バックグラウンドに埋もれやすいため感度が落ちる。ILC では e^+e^- のクリーンな環境でエネルギーの小さい粒子もとらえられ、 \sqrt{s} の約半分までの質量の粒子に対し、LHC と相補的な感度がある。

縮退したスペクトルは以下のような場合にあらわれる。質量固有状態の neutralino ($\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0$) と chargino ($\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^\pm$) はゲージ固有状態の bino (\tilde{B}^0), wino ($\tilde{W}^0, \tilde{W}^\pm$), Higgsino ($\tilde{H}_u^0, \tilde{H}_d^0, \tilde{H}_u^\pm, \tilde{H}_d^\pm$) が混合したものである。このなかで、Higgsino だけが軽いパラメータにおいては、 $\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^\pm$ の縮退により、消失エネルギーとソフトな粒子という信号になり、LHC での発見が非常に難しくなるが、ILC の場合は縮退による質量差が 1 GeV

程度でも Higgsino の発見・研究が可能である [16]。

Higgsino だけが軽い状況は naturalness の観点では十分ありえる。MSSM の質量関係式に直接関与する Higgsino は他の粒子と比べて fine-tuning の要求がより厳しい制限となる。同程度の fine-tuning ($\sim 3\%$) に収めるためには、Higgsino に対して $|\mu| \sim 100\text{--}300$ GeV の要求であるのに対し、stop の場合は $m(\tilde{t}_1) \sim 1\text{--}2$ TeV, gluino の場合は $m(\tilde{g}) \sim 1\text{--}5$ TeV という要求になる [17]。LHC の $\sqrt{s} = 13\text{--}14$ TeV で stop や gluino の発見が大いに期待されるが、発見されない場合においても、ILC で軽い Higgsino が発見される大きな可能性が残っている。

6 他計画との関係

LHC 実験でのヒッグス粒子の発見をうけ、次のコライダーはヒッグス精密測定をする能力を有すること (Higgs Factory であること) が必須条件となった。この条件をクリアできるのは e^+e^- 衝突のクリーンな環境下のみであるのは明白である。

次世代 e^+e^- 実験計画は線形加速と円形加速の二種類に分けられる。線形加速の利点は円形加速のようにシンクロトロン輻射によるエネルギーロスがないことと、トンネル延伸および加速空洞増強により重心系エネルギーのエネルギー拡張性があることである。円形加速はシンクロトロン輻射があるため到達できるエネルギーは周長で決定されるが、将来高エネルギーの pp 衝突実験にトンネルの再利用が可能である。

現在、技術成熟度が一番高い計画は ILC で、既に TDR が完成している。ILC の次世代の線形加速計画として Linear Collider Collaboration (LCC) 内で ILC とともに国際協力のもと研究開発が進んでいる Compact Linear Collider (CLIC) があり、 $\sqrt{s} = 3$ TeV まで到達できるとされており、概念設計書 (Conceptual Design Report) が完成している。

円形加速器による Higgs Factory は、ヒッグス質量が約 125 GeV と比較的軽く、円形加速でもなんとか届くことから最近さまざまな検討が始まった。なかでもある程度の実現性があるのが CERN 付近に置く周長 80–100 km の TLEP 計画 (“Triple LEP”) と、中国独自計画である周長 50–70 km の Circular Electron Positron Collider (CEPC) 計画である。TLEP は最大で $\sqrt{s} = 350$ GeV に到達し、トップ対生成まで手が届くとしている。また将来 pp 衝突にしたときには $\sqrt{s} = 100$ TeV に到達できるとしている。CEPC の場合は周長が短いことから e^+e^- 衝突は $\sqrt{s} = 240\text{--}250$ GeV までで、将来の pp 衝突では $\sqrt{s} = 50\text{--}70$ TeV としている。どちらも e^+e^- 衝突を行う上で必要な研究開発をこれから進めていかねばならない。また pp 衝突を行うためには 16–20 T の

強磁場磁石の開発成功が条件となっている。TLEP は CERN での立地を仮定しており、HL-LHC 計画が終了するまでは実験開始できない。CEPC については、研究開発が済み次第であるが、中国経済の発展の状況を見ると、早期建設が可能かもしれない。

両計画はいずれもヒッグスセクターの全容解明のために必要な $\sqrt{s} = 250\text{--}500$ GeV の領域をカバーできない。円形加速器の真骨頂は低エネルギー領域 $\sqrt{s} = 90\text{--}250$ でのルミノシティの高さであり、Super-Z/W/Higgs Factory としての性能は申し分ない。今後の展開で想定されるシナリオとして、 $\sqrt{s} = 250\text{--}500$ GeV でのヒッグスとトップの研究をひととおりやったあとで、エネルギーを下げて e^+e^- 実験をする動機が生まれる可能性はある。たとえば新物理の兆候が何もない場合の方向性として、電弱精密測定でがんばるためには 4.1 節で述べたように W 質量の精度をあげる必要が出てくる。

7 おわりに

ILC 計画のため世界中の研究者が長年にわたり研究開発を進めてきた。ILC の準備状況がこれだけ進んでいるのは多くの人に計画の重要性を認識していただいているおかげであろう。ヒッグス粒子が発見された今、これを徹底的に調べるのがコライダー実験分野でやらねばならないことであり、本稿で示したとおり、ILC は決定的な役割を果たすことができる。まだ e^+e^- で詳細を調べられていないトップクォークや、 e^+e^- のエネルギーフロンティアでの新物理探索などにも大きく貢献できる。将来の拡張性という観点からも線形加速器が明白な進路である。今後、ILC 実現に向けてさまざまな課題を克服していかなければならない。重要な物理研究を進めていくために、ILC をどのように実現していくか、研究者コミュニティだけで閉じた議論でなく、さまざまな方面で考えていかなければならない。

参考文献

- [1] T. Behnke *et al.*, “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary,” arXiv:1306.6327 [physics.acc-ph].
- [2] H. Baer *et al.*, “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 2: Physics,” arXiv:1306.6352 [hep-ph].
- [3] C. Adolphsen *et al.*, “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 3.I: Accelerator R&D in the Technical Design Phase,” arXiv:1306.6353 [physics.acc-ph].
- [4] C. Adolphsen *et al.*, “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 3.II: Accelerator Baseline Design,” arXiv:1306.6328 [physics.acc-ph].
- [5] T. Behnke *et al.*, “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 4: Detectors,” arXiv:1306.6329 [physics.ins-det].
- [6] D. M. Asner *et al.*, “ILC Higgs White Paper,” arXiv:1310.0763 [hep-ph].
- [7] D. Asner *et al.*, “Top quark precision physics at the International Linear Collider,” arXiv:1307.8265 [hep-ex].
- [8] A. Freitas *et al.*, “Exploring Quantum Physics at the ILC,” arXiv:1307.3962 [hep-ph].
- [9] H. Baer *et al.*, “Physics Case for the ILC Project: Perspective from Beyond the Standard Model,” arXiv:1307.5248 [hep-ph].
- [10] R. S. Gupta, H. Rzehak and J. D. Wells, Phys. Rev. D **86**, 095001 (2012).
- [11] J. E. Brau *et al.*, “The Physics Case for an e^+e^- Linear Collider,” arXiv:1210.0202 [hep-ex].
- [12] S. Dawson *et al.*, “Higgs Working Group Report of the Snowmass 2013 Community Planning Study,” arXiv:1310.8361 [hep-ex].
- [13] M. E. Peskin, “Estimation of LHC and ILC Capabilities for Precision Higgs Boson Coupling Measurements,” arXiv:1312.4974 [hep-ph].
- [14] G. Degrossi *et al.*, JHEP **1208**, 098 (2012).
- [15] ATLAS Collaboration, “Physics at a High-Luminosity LHC with ATLAS,” arXiv:1307.7292 [hep-ex].
- [16] M. Berggren *et al.*, Eur. Phys. J. C **73**, 2660 (2013).
- [17] H. Baer *et al.*, Phys. Rev. D **87**, 115028 (2013).