

ILC 250GeV Higgs Factory の物理意義を検証する委員会 報告書

平成 29 年 6 月 22 日

メンバー

浅井祥仁（委員長 東京大），田中純一（東京大 ICEPP），後田裕（KEK），
中尾幹彦（KEK），Tian Junping（東京大 ICEPP），兼村晋哉（大阪大），
松本重貴（東京大 IPMU），白井智（東京大 IPMU），遠藤基（KEK），
柿崎充（富山大）

2012年7月にLHCで質量125GeVのヒッグス粒子が発見された。**このヒッグス粒子を生む電弱対称性の破れを（自然に）説明する新しい現象・原理の発見が、素粒子研究の火急かつ最重要の研究テーマ**である。この目的のため、LHCは重心系エネルギーを13TeVに上げて新現象・原理の直接探索を行っているが、現在のところは発見に至っていない。この状況下で、「Higgs Factory」ILC250(重心系エネルギー250GeV)を建設した場合、ILCを建設しなかった場合やILC500を建設した3つの場合について、**新現象・原理のエネルギースケールを決める能力や物質・反物質非対称性の起源を解明する能力**などを比較・検討するのが、本委員会の目的である。本委員会は、ATLAS実験、Belle II実験、理論の研究者が中心となって、ILC250の物理意義を中立的な立場から検討を行った。

本報告書の構成は、以下の5章からなり詳細な数字や図は、付録の資料に示す。

1. イントロダクション
2. Higgs/SM過程の精密測定による新しい物理のエネルギースケールの決定
3. 電弱対称性の破れと物質・反物質非対称性の起源の解明
4. 「自然さ」に基づいた暗黒物質と新粒子直接探索
5. まとめ：ILC250をILC500などと比較

ILCは2, 3章で述べる異なる視点からの精密測定シナリオでヒッグス粒子の次の新現象のエネルギースケールをとらえるようになっていく。また4章では、暗黒物質の解明につながる探索能力や「自然さ」の検証について議論する。

1. イントロダクション

初めに実験時期や実験オペレーションの仮定をまとめる。

- 1) 2028-2030年に実験を開始する。High Luminosity LHC実験(HL-LHC)と同時期に実験を行い、相補的に成果を得る。
- 2) 重心系エネルギー250GeVで固定して、エネルギースキャンを行わず、年間 200fb^{-1} 、2040年までに 2ab^{-1} の積算ルミノシティを蓄積する。
- 3) 偏極(陽電子30% 電子80%)ビームによる実験を行う。

ILCだけでなく、HL-LHC、SuperKEKB、T2K、HyperKamiokande、電気双極子(EDM)探索実験、レプトンフレーバー破れの探索(LFV)、衛星を用いた重力波観測(LISAやDECIGO)などの重要な他の実験成果や、Lattice QCDや高次補正計算など理論的な発展などとの**相乗的な研究(Synergy)**が鍵であり、これらの成果とILCの成果とあわせて得られる物理像を考え、そこでILCの役割を検証する。

2. Higgs/SM過程の精密測定による新しい物理のエネルギースケールの決定

- 1) ヒッグス粒子と他の素粒子との結合定数の精密測定は、ILC250では、測定精度で0.6-1.8%の測定が可能である。測定精度を表1及び表2にまとめる。測定の鍵となるのは、

モデルに依存しない全崩壊幅の測定であるが、ILC250 では、HWW 結合を精度良く測定する Vector Boson Fusion 生成過程断面積が小さい。例えば HL-LHC でヒッグス粒子の崩壊過程の精密検証から、HWW と HZZ 結合の対称性(Custodial Symmetry)が 2% の精度で測定される。この対称性の下で、 $ee \rightarrow ZH$ 断面積(HZZ 結合)と $H \rightarrow WW$ 崩壊分岐比の測定から、モデルに依存せずに全崩壊幅を決めることができる。このような議論をさらに進めて有効場理論に 응용して、ILC250 と HL-LHC の測定結果をフィットしてモデルに依存せずに結合定数 (g) を決める。表 1 の精度は、モデルに依存せずに得られる結合定数 g の測定精度である。図 1 に示すように、ILC250 と ILC500 と較べてほとんど到達精度に違いがない。一方、HL-LHC だけでは、精度は 10%程度あるため、**HL-LHC と ILC250 の協力が鍵**となってくる。表 2 に ILC250 の直接測定から決定した結合定数の比の測定精度をまとめる。標準理論の予言と観測のズレを比較する時は、この結合定数の比を用いることで、実験に起因する系統誤差を抑制して高い精度での比較が可能になる。

表 1 Higgs 粒子との結合定数の測定精度(有効場理論) ILC250+HL-LHC

	$g(\text{HZZ})$	$g(\text{HWW})$	$g(\text{Hbb})$	$g(\text{H}\tau\tau)$	$g(\text{Htt})$	$g(\text{H}\mu\mu)$	$g(\text{Hcc})$
$\Delta g/g$	0.63%	0.63%	0.89%	1.0 %	7%(LHC)	6.2%	1.8%

表 2 Higgs 粒子との結合定数の比の測定精度(直接測定) ILC250

	$g(\text{HWW})/g(\text{HZZ})$	$g(\text{Hbb})/g(\text{HWW})$	$g(\text{H}\tau\tau)/g(\text{HWW})$	$g(\text{Hcc})/g(\text{HWW})$
Δ	1.9%	0.64%	0.84 %	1.7%

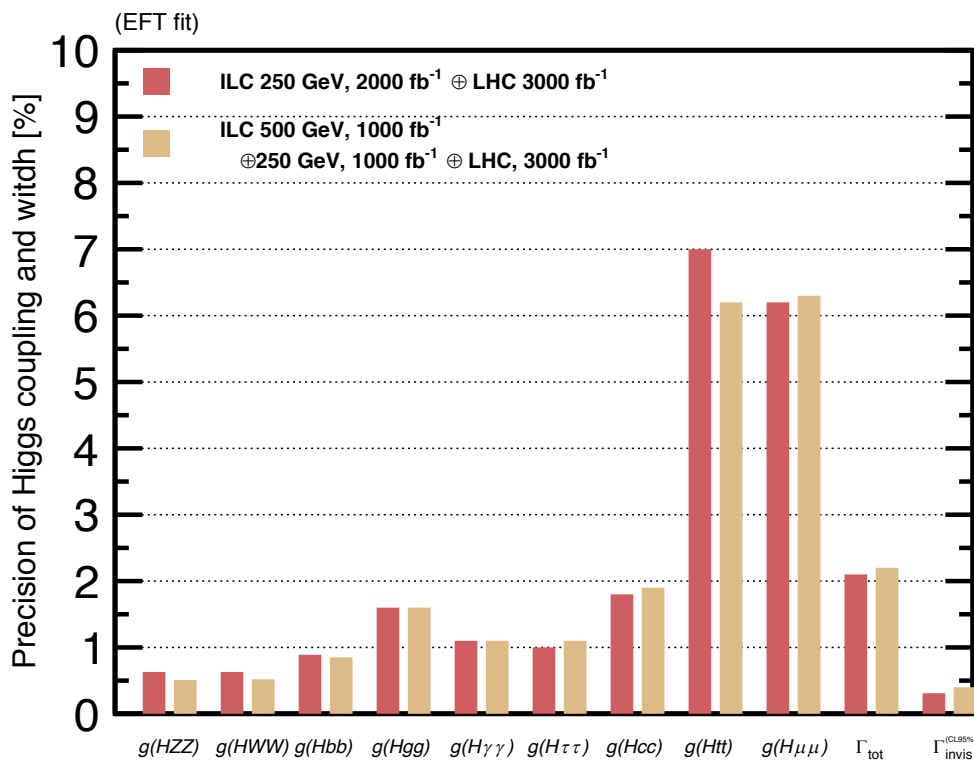


図 1 結合定数の測定精度

第2世代のレプトンやクォークとの湯川結合が2-6%程度で測定可能である。**ヒッグス粒子との結合の違いが「世代の起源」**であることが判明し、世代の解明に繋がる成果が期待できる。ヒッグス粒子とZ粒子との結合測定 (K_Z) や微分断面積から、新物理現象を **$\Lambda=2.5-3.9(\text{CP even-odd})\text{TeV}$** までモデルに依存せずに探ることが可能である。

新現象・原理の中で最も発見の期待が高いのが超対称性理論である。超対称性粒子を探索する以下の3つのアプローチが考えられる。いずれのアプローチが有力かは、モデルやパラメータに依存するため、3つを網羅することが重要である。

- (ア) スカラークォークやグルイーノなど色荷を持った超対称性パートナーを直接探索する。LHC が得意とするアプローチであり、**HL-LHC でおおよそ 3 TeV までの質量のスカラークォークやグルイーノ**の探索が可能である。
- (イ) 電弱ゲージノなどの弱い電荷をもった超対称性パートナーを探索する。(4章に述べるように) (ア) の場合と異なり、**質量スペクトラムが自然に縮退**している可能性が高く、ILC が重要な役割を果たす。
- (ウ) 超対称性理論では、ヒッグス場が最低でも2つあるため(2HD)、複数のヒッグス粒子が観測される。(ア) (イ) の超対称性パートナーの質量が重い時でも期待できる信号である。

ILC250 でのヒッグス粒子の結合定数の精密測定は、このアプローチ (ウ) に重要な役割を果たす。2HD のうち、一番シンプルな MSSM (Minimal Supersymmetric Standard Model) モデルをまず考える。 $\tan\beta$ が大きな領域は HL-LHC の発見感度が高い。一方ヒッグス粒子とゲージ粒子との結合定数 ($K_V=K_Z$ または K_W) は $\tan\beta$ が小さいほどズレやすく、ILC での発見感度が高くなる。このように **LHC での直接探索の発見感度と ILC の発見感度は相補的である**。ILC と HL-LHC を合わせると、上で述べたシナリオで、超対称性パートナーの質量が十分に重いときでも、**重いヒッグス粒子質量(SUSY breaking scale) を 1.5-2TeV 付近**まで大部分をカバーすることができる。MSSM でなく、NMSSM (Next MSSM) などに拡張された場合 (Neutral Higgs と Charged Higgs の関係がモデルに依存するようになる) でも、 $\tan\beta$ の大きい領域は、Neutral Higgs は HL-LHC と、Charged Higgs は Belle II の二つがカバーし、 $\tan\beta$ が小さい領域は ILC250 がカバーすることになる。

更に、超対称性理論のような 2HD モデルばかりでなく、**一般的な 2HD モデルの場合にも、新しい現象のスケール $\Lambda \sim 2\text{TeV}$** までズレが検証出来き、ズレのパターンから**背後の物理現象の解明**が可能である。余剰次元モデルの KK-gluon も質量 10-20TeV (**KK スケールで 3-7TeV**) までも探ることができる。これらの感度は、ヒッグス粒子の結合定数の精密測定精度にのみ依存し、重心系エネルギーが 250GeV、500GeV のいずれの場合でも関係なく、系統誤差 (実験の誤差や、クォーク質量や α_s の不定性など) を抑えるための、実験・理論の協働が重要である。

2) ヒッグス粒子自身の性質の精密測定

ILC と LHC の結果を、有効場理論を用いてフィットすると Total decay width Γ_H が 2.1%の精度で決定できる。これにより、**未知粒子への崩壊の可能性を分岐比で 0.3% 程度まで探ることができる** (4章参照)。またフェルミ粒子との結合の **CP 位相を 3.8度の精度**での測定ができ、物質の非対称性の起源が、バリオンなのか、レプトンなのかの判断に大きな役割を果たす (3章参照)。**CP の破れの発見は、標準理論のヒッグス場 (1HD)ではなく、2HD モデルより更に複雑であること(例えば 2HD+Singlet)を意味する非常に重要な成果である。崩壊粒子の角度分布から、ヒッグス粒子が素粒子なのか構造をもった粒子 (composite) なのかが 2.2TeV まで分かる。**

3) $M_W/M_{top}/\sin^2 \theta_{\text{eff}}$ 標準理論の精密検証

ILC250 では、W 質量(M_W)の測定精度は 3MeV、 $\sin^2 \theta_{\text{eff}}$ の測定精度は 3×10^{-5} である。トップクォークの質量(M_{top})を直接決めることができなくなるが、HL-LHC での **M_{top} 測定精度は 0.2~0.3GeV** 程度だと期待されている。 ΔM_Z や $\Delta \alpha_s$ など他の系統誤差と M_{top} 測定精度 0.3GeV は同じ程度の寄与であり、標準理論の精密検証という観点では、HL-LHC での測定精度 0.3GeV で十分である。現在の M_W 、 M_{top} 、 $\sin^2 \theta_{\text{eff}}$ の中心値がそのままであると仮定して、誤差が ILC250、HL-LHC での精度まで向上する仮定すると、観測値と標準理論との**乖離が 3~4 σ 程度**に確定する。これは **TeV 付近の超対称性などの示唆**になる。何らかのエクセスが、HL-LHC で観測されたときや ILC でヒッグス粒子との結合の強さにズレが観測された時、この乖離の検証は、エクセスの背後の原理を決める上でも不可欠であり、ILC250 で期待できる重要な成果の一つである。

ヒッグス質量 (M_h) と M_{top} から現在の真空の安定性と新物理のエネルギースケールの上限をきめることができる。ILC で $\Delta M_h=14\text{MeV}$ 、HL-LHC での $\Delta M_{top}=0.3\text{GeV}$ とあわせて、現在の宇宙は準安定であるか、**新しい物理の存在が 10^{12}GeV までに存在するか**などが判明する。これは宇宙誕生の解明につながる成果であり、3章にのべるレプトジェネシスの可能性の示唆に通じる成果である。

- 4) このように ILC250 での精密測定に加えて、HL-LHC や SuperKEKB などの成果と合わせて、 **$\Lambda=2\sim 3\text{TeV}$ 程度までの新現象の確実な発見**が可能になる。HL-LHC でカバー出来ない領域($\tan \beta$ が小さい 2HD)に大きな感度があり、相補的な役割を果たしている。これにより、**アプローチ(ア) (イ) ばかりでなく、(ウ) まで含めて3つのパターン全てで $\Lambda=2-3\text{TeV}$ の現象を探ることができる (探索の完全性)**。また HL-LHC でエクセスなどが観測された場合に、背後にある物理を決める上でも重要な役割を果たすことが期待出来る。図2にフローチャートをしめす。標準理論からの乖離が観測された場合、**新しい現象や原理のエネルギースケール Λ が決定され、それを探るための次世代加速器の重心系エネルギーや技術が定まる**。FCC(Future Circulate Collider)などの将来計画のエネルギーや ILC のアップグレードすべきエネルギースケールや、実現するための加速

器技術が決定される。

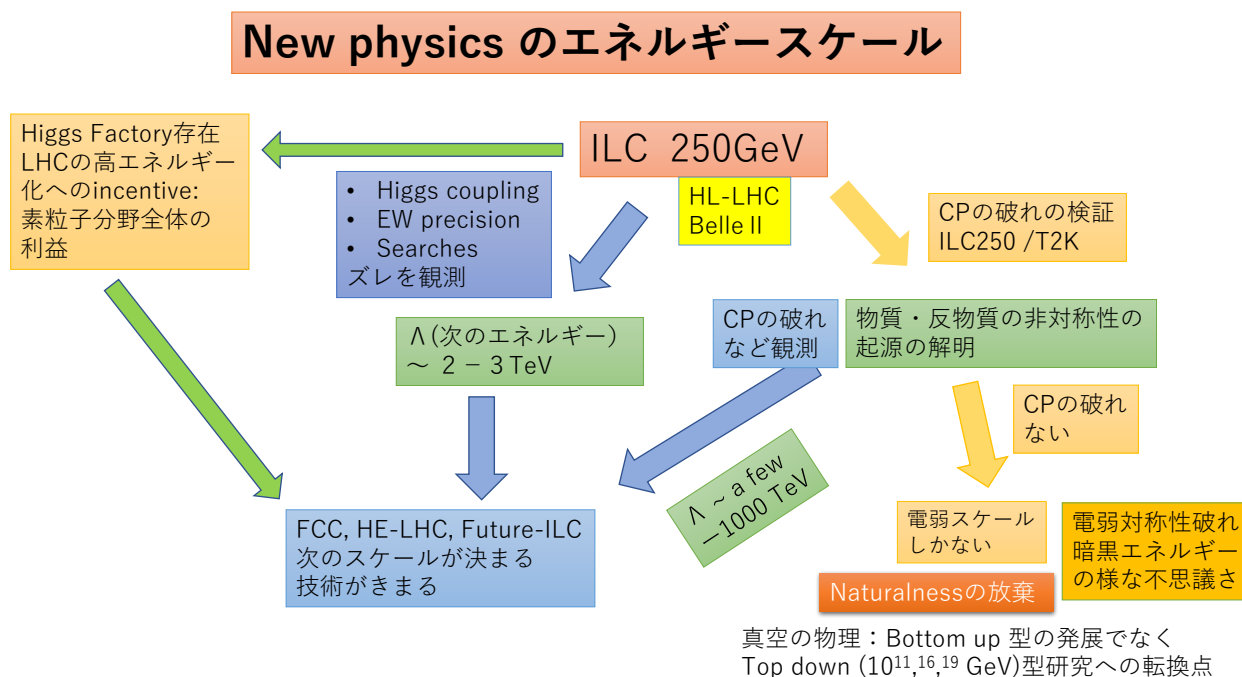


図2 精密測定とエネルギースケール Λ

また ILC250 が Higgs Factory の役割を直接果たすことにより、HL-LHC の重点が新現象の直接探索に移り、HE-LHC(LHC の重心系エネルギーの増強)への動機付けになるなど、エネルギーフロンティア研究全体の大きな利益となる。

図2 右側に示すように、物質・反物質の非対称性の起源の解明から次の新しい現象 (Λ : エネルギースケール) を探るアプローチも可能である。3章に述べるが、CP の破れの観測 (ヒッグス粒子やニュートリノ) やヒッグス粒子の精密測定、宇宙空間での重力波観測から物質の起源が、電弱バリオジェネシス ($\Lambda=10-1000\text{TeV}$) 又はレプトジェネシス ($\Lambda<10\text{TeV}$) のどちらかが判明する。

ILC250 や他の実験で得られた結果がすべて標準理論と無矛盾だった場合、新たな CP の破れなどが無い場合は、電弱機構を説明するエネルギースケールが電弱機構と $O(10)$ 倍以上乖離していることが判明する。直接、間接の両方でもれなく調べられており (完全性)、 $O(10)$ 倍以上「不自然」であることが確定する。電弱相転移は、暗黒エネルギー同様に、不自然な自然現象であることが示唆する。インフレーション、暗黒エネルギー、電弱相転移は真空に関わる現象であり、真空に関わる現象の特異性 (スケールが自然に説明できない) を普遍化することになる、これまでの「ボトムアップ型」の研究から「トップダウン型」への研究方針の転換を示唆する。

3. 電弱対称性の破れと物質・反物質非対称性の起源の解明

物質・反物質の非対称性の起源の代表的なシナリオは、レプトジェネシスか、電弱バ

リオジェネシスの二つである。図3にこの研究のフローチャートを示す。電弱バリオジェネシスは、ILC250で2段階の研究が可能である。

2-2)で述べたヒッグス粒子とフェルミ粒子との結合の位相が精度3.8度で測定可能である。これらとHZZ結合や湯川結合の精密測定から、ヒッグス粒子が、**物質・反物質の非対称性の起源**となり得るのが決定出来る。これらは、中性子や電子のEDM実験で追試が可能である。これらが1段階目の研究である。

物質・反物質非対称性の起源

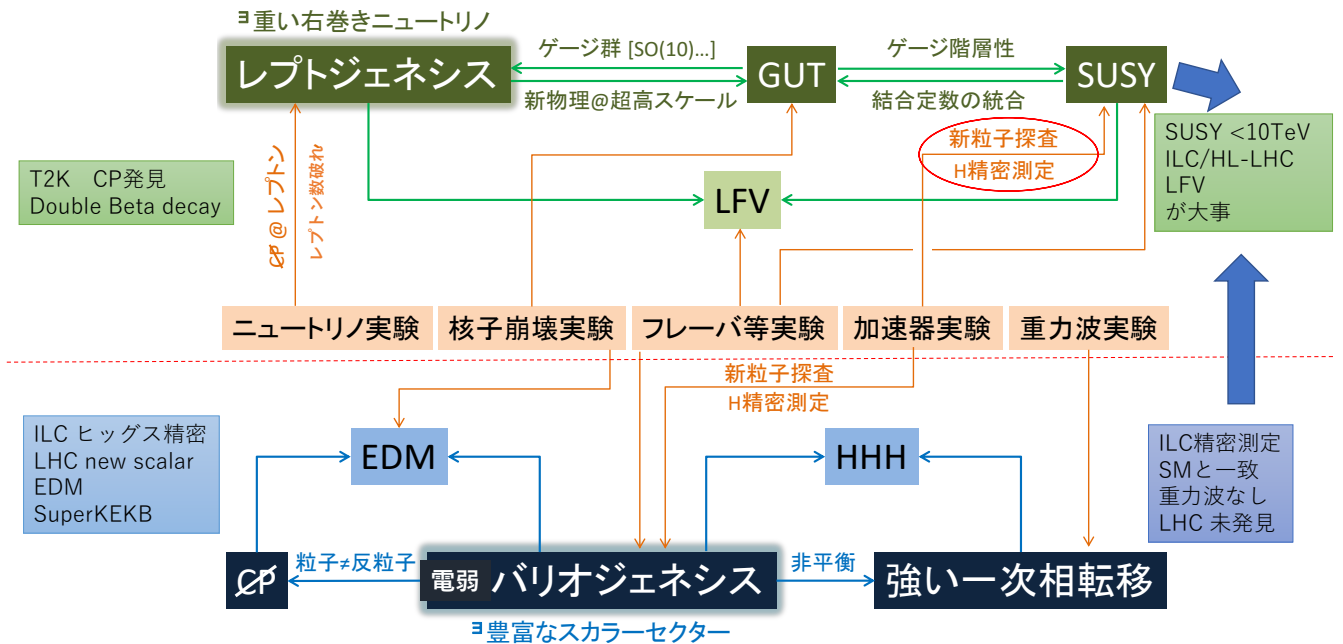


図3 物質・反物質の非対称性の起源

こうして出来た非対称性が残るために、反応が非平衡である必要があり、**電弱相転移が強い1次の相転移である必要**がある。強い1次の相転移を起こすため、2HDやシンレット場が多数付加されるなどの変更が必要である。このような新しいスカラー場は、ヒッグスの3点結合に大きな変化(~20%)をあたえるが、同時に**ゲージ粒子との結合にも数%程度の影響をあたえる**。ILC250は十分な精度でこれを吟味できる。また、このような場合には、相転移の際に重力波が放出される。2040年頃に稼働している衛星を用いた重力波観測(LISAやDECIGO)で観測が可能になる。これらが2段階目の研究である。電弱バリオジェネシスの場合、**ヒッグスポテンシャルの性質より、 $\Lambda=10\sim 1000\text{TeV}$ までに新しい現象が必ず起こることが期待出来る**。次のエネルギーフロンティア実験の重心系エネルギーやその技術を決定することができる。

このようにILC250を軸に多層的に、多方面から、電弱バリオジェネシスの可能性を調べることができる。バリオジェネシスシナリオを検証する上で鍵となるのは、CPの破れの測定と、ゲージ粒子との結合、並びに湯川結合の精密測定である。これはILC250とILC500で測定能力に違いはない。ヒッグスの三点結合(HHH結合)が測定できなくなるのは残念ではあるが、かわりにヒッグス粒子とゲージ粒子との結合の精密測定や、

重力波での観測により多角的にとらえることができるため、物質の起源の解明には大きな影響はない。一方、**ILC250 は、電弱バリオジェネシスのクルーシャルなテストに不可欠である。**

T2K でニュートリノの CP 破れが観測された場合や double β 崩壊が発見された場合や ILC250 により電弱バリオジェネシスの可能性が否定された場合は、レプトジェネシスシナリオが有力となる。この場合、**非常に高いエネルギースケールに右巻きニュートリノが存在することや、大統一などの示唆**になる。大統一が起きる最も有力なシナリオは、**10TeV 以下のゲージノの存在を予言する超対称性理論**である。レプトン数の破れやハイパーカミオカンデによる陽子崩壊の探索とならんで、10TeV 以下のゲージノ探索が可能になる次世代のハドロンコライダー(FCC や HE-LHC)やより高いエネルギーを実現できるレプトンコライダーなどが必要となる。**次世代の加速技術や重心系エネルギーを検討する上で重要な結果**が得られる。これが図2の「 $\Lambda \sim \text{a few} - 1000\text{TeV}$ 」で示したパスである。この可能性も高いため、**次世代技術を容易に導入できる線形加速器を日本に建設することが長期戦略において重要である。**

4. 「自然さ」に基づいた暗黒物質と新粒子直接探索について

「自然さ」(Naturalness)はこれまでの素粒子研究で重要な役割を果たしてきた。しかし 125GeV のヒッグス粒子の発見により自然さに疑問が投げかけられている。超対称性理論の枠組みで 125GeV のヒッグス粒子を説明しようとする、すでに $O(100) \sim O(1000)$ のチューニングが必要となる。しかし、Focus Point のように**自然に重いスカラーフォークが出てくる可能性や、MSSM でなく、シングレットなどの付加的な粒子の効果でヒッグス粒子が重くなる可能性**もある。自然さを放棄するまえに、これらの可能性を検証する必要がある。またこれらの可能性は、暗黒物質を説明するシナリオとしても有力である。図4に WIMP 暗黒物質の候補と探索方法をまとめる。

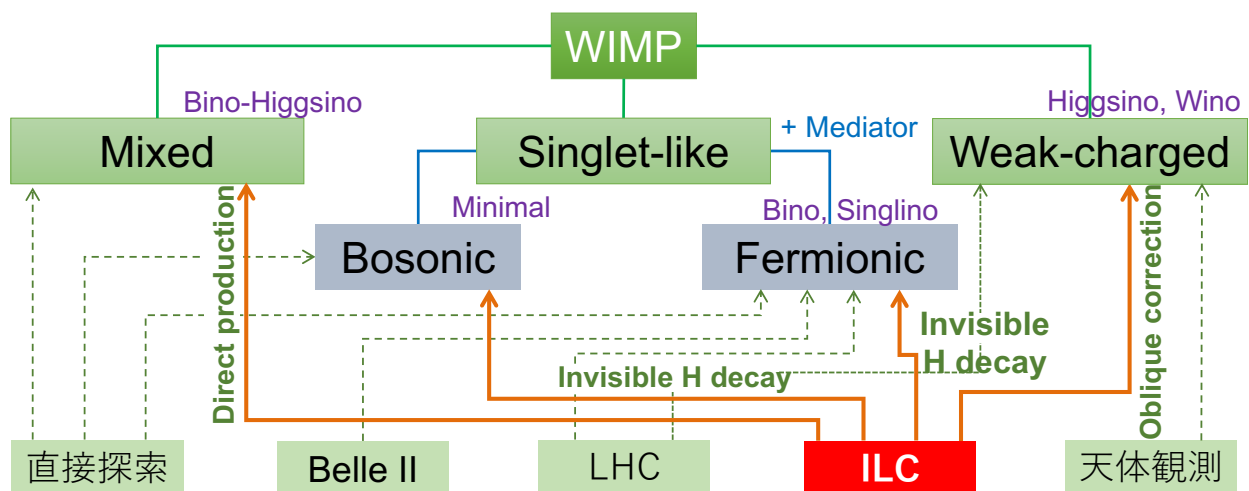


図4 WIMP 暗黒物質の候補と探索方法

2章で述べたアプローチ（イ）の電弱ゲージノ探索は、HL-LHC で質量 1 TeV 程度までの探索が可能である。ところが、電弱ゲージノ粒子は一番軽いゲージノ粒子と質量が縮退する可能性が高く (Wino, Higgsino)、縮退した領域は、HL-LHC での探索が困難である。また、シングレットがあるために、ゲージ粒子への結合が抑制される可能性もあり、**これら二つの場合を調べることが重要である。HL-LHC の結果(Bino)とあわせて、アプローチ（イ）の電弱ゲージノ探索は完全になる。**ヒグシーノはヒッグス粒子と同程度の質量であることが自然なので軽いヒグシーノ探索は重要である。

ILC は、200GeV 程度の質量をもつヒグシーノの効果を間接的に観測でき、10%程度の自然さまでの検証が可能になる。これが図4の Higgsino である。HL-LHC では、ヒグシーノ探索が困難であるため、ILC での探索が不可欠である。

図4の中央の Singlet-like な場合は、NMSSM などの付加的な Bosonic の場合と超対称性粒子である Bino などの可能性がある。Bino の場合は HL-LHC のゲージノ探索でカバーされるが、Bosonic の場合や Singlino の場合は、ヒッグス粒子の未知粒子への崩壊分岐 0.3%から探索できる。これらが 62 GeV より軽い場合に、暗黒物質に厳しい制限をあたえることができる。これらが軽い場合は、反跳によるエネルギーが小さくなるため、地下実験での直接探索が難しくなるが、ILC でカバーでき、完全な探索が可能になる。

Bino と Higgsino が混合した場合(図4左)、これらが重い場合は HL-LHC のゲージノ探索や直接探索でカバーされる。軽い場合は、HL-LHC や直接探索が困難になるが、ILC250 により暗黒物質の可能性のある領域をほぼカバー出来る。

暗黒物質の可能性のある新粒子の探索で、ILC250 は、HL-LHC や地下実験（暗黒物質直接探索）でカバー出来ない軽い質量領域(<200GeV Higgsino case, <62GeV Singlet-like)をカバーし、これらの実験とあわせてアプローチ（イ）の完全な探索と WIMP 暗黒物質の完全なカバーを可能とする。

この様に、「自然さ」や暗黒物質に起因した電弱ゲージノ粒子探索や、シングレット粒子探索で、**ILC はクルーシャルな役割を果たす。HL-LHC や暗黒物質直接探索と相補的な役割を果たし、3つがあわさってアプローチ（イ）での探索が完全になる。**自然さをどこまで許すかで必要となる ILC の重心系エネルギーが決まる。ヒグシーノの質量がヒッグス粒子程度なら、250GeV で十分であり、一方 5 倍程度までを許すなら 1TeV が必要となる。

5. まとめ

各プロジェクトが果たす役割を表3にまとめる。2章で述べたように ILC250 は、HL-LHC や Belle II だけではカバーできない領域をカバーし、次の新現象のエネルギースケールを確実に探ることが可能になる。特に ILC250 は、アプローチ（ウ）の 2 HD の重い

ヒッグス粒子に対して感度がある。また ILC250 は自然さに立脚したアプローチ (イ) や暗黒物質の解明でも重要である。ILC250 と HL-LHC のアプローチ (ア) (イ) とあわせて確実な探索網が確立することになり、新しい現象・原理のエネルギースケール ($\Lambda=2\sim 3\text{TeV}$) を、確実に探ることが可能になる。この様に ILC250 は重要な役割を果たす。

さらに、ILC250 では、物質の起源の解明することが可能である。電弱バリオジェネシスのクルーシャルなテストが可能であり、この研究からも、新しい現象・原理のエネルギースケールを推測 ($\Lambda=a\text{ few} \sim 1000\text{TeV}$) することが出来る 2 重の構造になっている。

表3 各プロジェクトの役割

ILC	Higgs 精密測定、標準理論精密測定、電弱バリオジェネシス 探索シナリオ(イ: Higgsino, 62GeV より軽い暗黒物質、ウ: $\tan\beta$ が小さい場合)
HL-LHC	Higgs coupling 測定、新現象直接探索, トップクォーク質量 探索シナリオ(ア、イ: Bino, Wino ウ: $\tan\beta$ が大きい場合)
Belle II	付加的な CP の破れの探索、ボトムクォーク質量、tau LFV(GUT) 探索シナリオ(ウ: $\tan\beta$ が大きい場合 NMSSM)
T2K, HK	CP の破れ、レプトジェネシス、GUT
LFV	レプトジェネシス、右巻きニュートリノ、GUT
EDM	フレーバー破れてない場合の付加的な CP の破れ、電弱バリオジェネシス
LISA DECIGO	電弱バリオジェネシスの強い一次相転移: HHH 結合測定の代替
地下実験	暗黒物質の直接探索 探索シナリオ(イ: 重い領域)

表4 ILC の重心系エネルギーを 250GeV としたことの問題点

250GeVで難しくなる点	Synergyで解決をめざす
HiggsのFull Width測定	HL-LHC: custodial symmetry ($K_W/K_Z = 1$) Γ_{HZZ} 測定を Γ_{HWW} に置換して $\Gamma_{\text{total}} = \Gamma_{HWW} / \text{Br}(H \rightarrow WW) \rightarrow$ ILC500 と差はない
Self-coupling HHH (500GeVでも難しい)	バリオン数の破れ \rightarrow 電弱BG or LG (T2K, double β 崩壊) 電弱バリオジェネシス HL-LHC, ILC250, SuperKEKB, LISAでカバー ILC250で可能
Higgs coupling	HL-LHC (Y_t) Lattice (mb, mc, α_s の不定性) \rightarrow ILC500 と差はない SuperKEKB (Lattice examination)
探索	Naturalnessをあきらめない電弱ゲージノ探索 Higgsino mass $< \sim 200\text{GeV}$ 暗黒物質探索 ($< 62\text{GeV}$)
Top mass	HL-LHC(0.2~0.3GeV) SM 精密測定では十分 真空の安定性の議論の時 もだいたい十分 (高いスケールの物理の詳細な検証が必要になったら ILC350)

表4に ILC の重心エネルギーを 250GeV にしたために、難しくなる可能性のあるトピックスをまとめた。ヒッグス粒子や標準理論の精密測定では、HL-LHC や SuperKEKB 実験

などと協働で、ILC250 も ILC500 も大差はなく十分な役割を果たすことができる。

ILC の重心系エネルギー350GeV、500GeV やそれ以上が重要な役割を果たすのは以下の3点である。

- ① ILC250 と HL-LHC の成果で、次の新しい現象や原理のエネルギースケールが分かった場合。
- ② トップクォークの質量精度：標準理論の検証や真空の安定性の研究では、LHC での測定精度 0.2~0.3GeV で十分である。将来 HL-LHC や ILC250 の結果を踏まえて、GUT などの超高エネルギーの物理の研究が主となり真空の安定性などを詳細に調べる必要が高くなった場合は ILC350 が重要になる。
- ③ 図2の右側のシナリオ（「電弱スケールしかない」可能性が高い場合）、電弱対称性の破れやヒッグスポテンシャルの破れを詳細に研究することが重要である。この場合、重力波ばかりでなく、ヒッグス粒子の自己結合 HHH の測定が必要となり、重心系エネルギー500GeV(正の干渉)と 1 TeV（負の干渉）での精密測定が重要になる。

将来のエネルギーアップグレードのシナリオは、①の新しい現象や原理のエネルギースケールが決まった場合や他の二点についての結果を基にして、どのエネルギーまでどのような段階を経て上げていくかを検討すべきである。

本委員会の結論は、

- HL-LHC の物理成果をより実りあるものするためにも、ILC250 の同時期の実験が望ましい。
- 新しい物理のスケールが分かっていない現状では、ヒッグス粒子や標準理論の精密検証において、ILC250 は、ILC500 に十分比肩できる物理成果が期待出来る。
- HL-LHC や SuperKEKB などの成果と合わせて、 $\Lambda=2\sim 3$ TeV 程度までの新現象の確実な発見や、また物質の非対称性の起源の解明に、ILC250 「Higgs Factory」は、不可欠な役割を果たす。
- エネルギーアップグレードはリニアコライダーの先天的な長所であることから、ILC250 は自身で出す結果で示唆される新物理のエネルギースケールに見合ったアップグレードを実行する可能性を持っている。

以上の4点である。

Report by the Committee on the Scientific Case of the ILC Operating at 250 GeV as a Higgs Factory

July 22, 2017

Committee Members:

Shoji Asai^{1,2,*}, Junichi Tanaka², Yutaka Ushiroda³, Mikihiro Nakao³,
Junping Tian², Shinya Kanemura⁴, Shigeki Matsumoto⁵, Satoshi Shirai⁵,
Motoi Endo³, Mitsuru Kakizaki⁶

* Chair

¹ The University of Tokyo

² ICEPP, The University of Tokyo

³ High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

⁴ Osaka University

⁵ Kavli IPMU, The University of Tokyo

⁶ University of Toyama

Commissioned by the Japan Association of High Energy Physicists

Preface

In July 2012, a Higgs boson with 125 GeV mass was discovered at the LHC. The discovery of new phenomena and new principles that can (naturally) explain the electroweak symmetry breaking (EWSB) including the existence of this Higgs boson is now the most important and urgent target of research. In order to attain this goal, the LHC is performing direct searches for new phenomena and new principles with a center-of-mass (CM) energy increased to 13 TeV. So far, there is no evidence of new physics beyond the Standard Model (SM). The purpose of this committee is to investigate and compare, under the current circumstances, the capability to determine the energy scale of new phenomena and new principles and the capability to uncover the origin of matter-antimatter asymmetry for the following three cases: (i) an ILC operating at 250 GeV as a “Higgs Factory” (ILC250); (ii) an ILC operating up to 500 GeV (ILC500); and (iii) the case of no ILC construction. The committee members consist primarily of members of the ATLAS collaboration, the Belle II collaboration, and theorists. The committee aimed to give an assessment on the physics case of the ILC250 in a way that is independent from the ILC community.

This report consists of the following five chapters:

1. Introduction
2. Precise measurements of Higgs and other SM processes: Determination of the energy scale of new phenomena via precise measurements.
3. EWSB and the origin of matter-antimatter asymmetry.
4. Direct search for dark matter and new particles based on “Naturalness”.
5. Summary: Comparison of the ILC operating at 250 GeV and 500 GeV

Different approaches are summarized in Chapters 2 and 3 to probe the next energy scale beyond EWSB through precise measurements. Chapter 4 discusses searches to elucidate dark matter (DM) and probes to test the idea of “naturalness”.

1. Introduction

For the purpose of this discussion, the following points are assumed for the timeline and the conditions of the ILC operation.

1. The operation will start around 2028-2030. It will run concurrently with the High-Luminosity LHC (HL-LHC) experiment and produce complementary results.
2. The CM energy is fixed at 250 GeV. No energy scan is performed. The integrated luminosity is 200 fb⁻¹ per year, accumulating 2 ab⁻¹ by 2040.

3. Beam polarization is used (30% for positrons, 80% for electrons).

The key is the synergy with other experiments, including the HL-LHC, SuperKEKB, Hyper-Kamiokande, electric dipole moment (EDM) searches, lepton flavor violation (LFV) searches, and satellite probes to detect gravitational waves (LISA, DECIGO, etc.), as well as theory development in Lattice QCD and higher-order corrections. Various implications are considered combining rich outputs from these experiments with the ILC results, and we elucidate the role of the ILC with respect to the other experiments.

2. Higgs and Other Standard Model Processes: Determination of the New Energy Scale via Precision Measurements

2.1. Precise measurements of Higgs couplings

The precise measurements of the couplings between Higgs boson and other elementary particles can be performed at the 0.6-1.8% level at the ILC250. The measurement precisions are summarized in Tables 1 and 2. It is the important task of ILC to measure the total decay width model-independently. The previous strategy is as follows, the HWW coupling is measured using the vector boson fusion process, and decay branching fraction $\text{Br}(H \rightarrow WW)$ can be measured precisely. Then total decay can be determined model-independently. The vector boson fusion process enables the precise measurement of the HWW coupling at higher energies. At the ILC250, however, this cross section is small. It was one of motivations for higher center of mass at ILC.

As an alternative approach, we can measure Higgs decay branching fraction at the HL-LHC to examine the symmetry between the HWW and HZZ couplings (custodial symmetry) at the 2% level. By taking this symmetry as an assumption, the $ee \rightarrow ZH$ cross section (HZZ coupling) and the $H \rightarrow WW$ decay branching ratio measurements can be combined for the model-independent determination of the total decay width. This idea can be further extended in the framework of effective field theories to determine the coupling (denoted as g), in a model-independent way (Ref. arXiv 1708.09079).

The estimated precisions of various Higgs boson couplings are shown in Table 1, combining ILC250 and HL-LHC results. The precisions are at the 10% level with the HL-LHC alone, less than 1% accuracies can be obtained as shown in Table 1. The comparison between ILC250 and ILC500 shown in Fig.1 shows that the differences in the achievable precisions are small for the same total integrated luminosity of 2 ab^{-1} . This illustrates the importance of the combination of the HL-LHC and the ILC250 results. These combined results are comparable to those at ILC500 (combined with HL-LHC). Table 2 summarizes the precision of the coupling ratios from the direct

determination at ILC250. Many experimental systematic uncertainties cancel by taking the ratios. These ratios are useful for the precise comparison between the SM predictions and the experimentally observed values.

Table 1: Precision of Higgs boson couplings in the effective field theory framework. Combination of the ILC250 and the HL-LHC measurements

	$g(\text{HZZ})$	$g(\text{HWW})$	$g(\text{Hbb})$	$g(\text{H}\tau\tau)$	$g(\text{Htt})$	$g(\text{H}\mu\mu)$	$g(\text{Hcc})$
$\Delta g/g$	0.63%	0.63%	0.89%	1.0%	7% (LHC)	6.2%	1.8%

Table 2: Precision of Higgs coupling ratios from the direct measurements at the ILC250.

	$g(\text{HWW})/g(\text{HZZ})$	$g(\text{Hbb})/g(\text{HWW})$	$g(\text{H}\tau\tau)/g(\text{HWW})$	$g(\text{Hcc})/g(\text{HWW})$
Δ	1.9%	0.64%	0.84%	1.7%

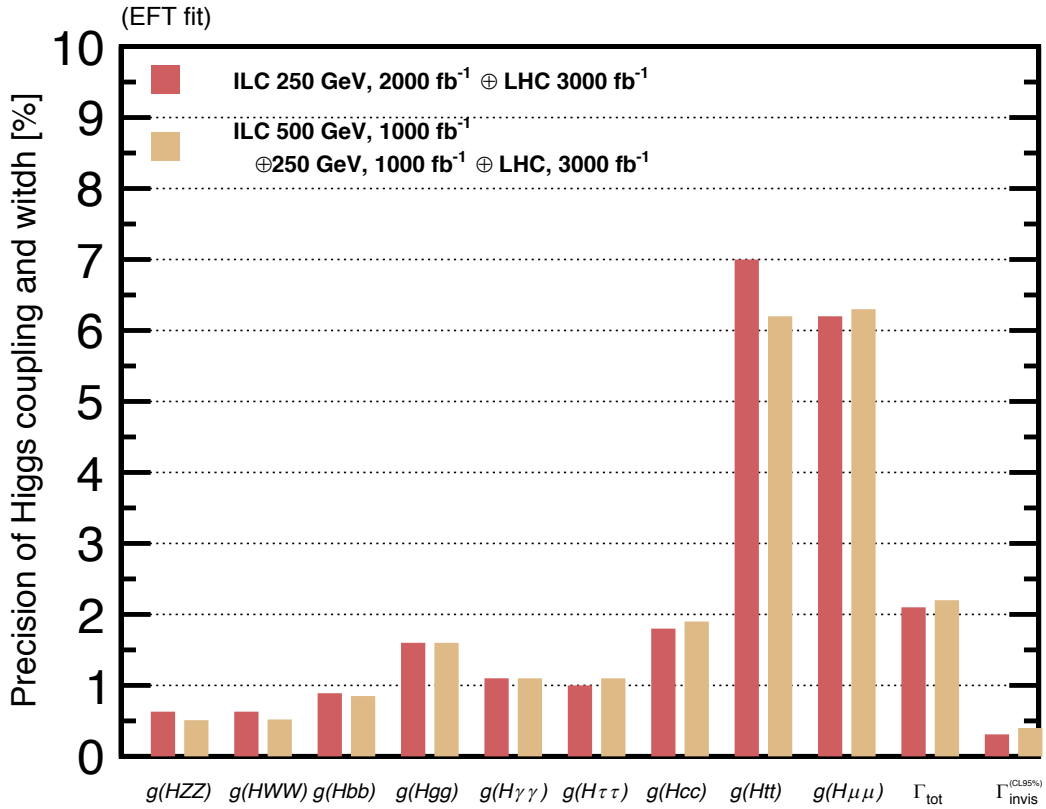


Figure 1: Precision of coupling measurements.

It will be possible to measure the Yukawa couplings of the second-generation leptons and quarks with about 2-6% precision. This will show that the differences in the Higgs boson couplings give rise to the generations, providing insight into our understanding of generations. Furthermore, the measurement of the Higgs boson coupling with the Z boson and the differential cross section can be

done model-independently and provides sensitivity to new phenomena with a mass scale of up to 2.5 TeV for CP-even states and 3.9 TeV for CP-odd states using the effective Lagrangian approach.

Among the various new phenomena and new principles, the supersymmetry is the most promising theory. There are three approaches to discover supersymmetric particles, as described below. The capability of these three approaches depends on the model and the parameter space. Thus it is crucial to be able to cover all three approaches.

- (a) Direct search for supersymmetric partners with SU(3) color charge, such as the squarks and the gluino. The HL-LHC has good sensitivities to search for the squarks and gluino up to about 3 TeV.
- (b) Search for supersymmetric partners with SU(2) and U(1) charge, such as the electroweak gauginos and higgsinos. In contrast to (a), the mass spectrum can be naturally highly compressed. The ILC will play an important role as described in Chapter 4.
- (c) There are at least two Higgs doublets (2HD) in all supersymmetric models, in which multiple Higgs bosons exist. These signatures can be accessed even if the supersymmetric partners as described in (a) and (b) are beyond the reach of the experiments.

The precise measurement of the Higgs couplings at the ILC250 provides an important input to the approach (c) above. The Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM) is considered first among the 2HD models. The HL-LHC has a high discovery potential for parameter regions with large $\tan\beta$. In contrast, the deviation of the Higgs boson coupling with the gauge bosons, $g(HZZ)$ or $g(HWW)$, becomes larger for smaller $\tan\beta$, which is favorable for the ILC. The sensitivity of direct searches at the LHC and the ILC250 sensitivity are thus complementary. Heavy Higgs bosons (or SUSY breaking scale Λ) can be discovered almost up to 1.5–2 TeV by combining the ILC250 and the HL-LHC results, even if the supersymmetric partners are heavy. In the extended models such as the Next-to-Minimal Supersymmetric Standard Model (NMSSM), in which the relation between the neutral and charged Higgs bosons become model-dependent, the large $\tan\beta$ region is covered by neutral Higgs boson searches at the HL-LHC and the charged Higgs boson searches at Belle II; the small $\tan\beta$ region is covered by the ILC250.

The energy scale of new phenomena can be probed up to $\Lambda \sim 2$ TeV in more general 2HD models not restricted to supersymmetry, through coupling deviations. The Kaluza-Klein (KK) gluon can be probed up to a mass of 10–20 TeV (corresponding to a KK scale of 3–7 TeV).

Furthermore, a physics model behind the discovered new phenomena at Λ_{c} can be identified through the deviation pattern. These sensitivities are determined by the precision of the Higgs couplings, and do not depend highly on the CM energy (250 GeV or 500 GeV). It will be crucial to reduce the systematic uncertainties (coming from experimental uncertainties, and determining the quark mass and α_s) through the collaboration between the experimental and theory communities.

2.2. Precision measurement of the Higgs boson properties

The total decay width Γ_H can be determined with an accuracy of 2.1% by fitting the both results at ILC250 and HL-LHC in the effective field theory framework as mentioned in Section 2.1. This will allow for the search for decays to unknown particles with decay branching ratios down to 0.3%. Detail is discussed in Chapter 4. The CP phase in the coupling between the Higgs boson and fermions can be measured to 3.8 degree precision, which provides an important clue to the origin of the matter-antimatter asymmetry, whether it is baryogenesis or leptogenesis (See Chapter 3). The discovery of CP violation in the Higgs sector will be an important achievement, as it implies that the SM Higgs field (1HD) is not the correct description of nature, and that the Higgs sector must be more complicated (such as general 2HD models or addition of singlet fields).

From the angular distribution of the decay particles, the compositeness of the Higgs boson can be probed up to a scale of 2.2 TeV.

2.3. Precision observables in the Standard Model: $M_W / M_t / \sin\theta_{\text{eff}}$

At ILC250, the W boson mass (M_W) and weak mixing angle ($\sin\theta_{\text{eff}}$) can be measured with accuracies of 3 MeV and 3×10^{-5} (relative precision), respectively. Although the top quark mass (M_t) cannot be measured directly at the ILC250, the HL-LHC is expected to determine the top quark mass with an accuracy of 0.2–0.3 GeV. The contribution of various systematic uncertainties such as ΔM_Z and $\Delta\alpha_s$ and a top quark mass precision of 0.3 GeV are roughly equal to check the Standard Model precisely. Thus, from the point of view of precise observables in the SM, the HL-LHC precision of 0.3 GeV is sufficient. Supposing that the current central values for M_W , M_t , and $\sin\theta_{\text{eff}}$ remain fixed, the improved precision from the ILC250 and the HL-LHC will yield a $3\text{--}4\sigma$ deviation from the SM. This will indicate that new physics such as supersymmetry exists around the TeV scale. If an excess is seen at the HL-LHC or if deviations of Higgs couplings are seen at the ILC, it will be crucial to identify the principles behind these anomalies. This will be one of the important achievements expected from the ILC250.

The stability of our vacuum can be computed from the Higgs boson mass (M_h) and M_t . An upper limit on the energy scale of new physics can be also determined with the assumption that our vacuum is stable. Combining the ILC precision of $\Delta M_h=14$ MeV and the HL-LHC precision of $\Delta M_t=0.3$ GeV will determine that our universe is metastable or that new physics should exist at a scale below 10^{12} GeV to make our universe stable, if the central values are the same as the current values. These results are crucial to understand the early universe, including implications about the possibility of leptogenesis, as described in Chapter 3.

2.4. New phenomena can be discovered up to $\Lambda=2-3$ TeV with synergy among the ILC250, HL-LHC and the SuperKEKB. The ILC250 has high sensitivity in the region that cannot be covered with the HL-LHC (heavy higgs boson in the 2HD models with small $\tan\beta$ and the electroweak gaugino). The ILC is therefore complementary to the HL-LHC. If an excess is found at the HL-LHC, ILC can play an important role to reveal the physics behind it.

Figure 2 shows a flowchart of overview. If a deviation from the Standard Model prediction is observed in the Higgs coupling, the EW precise measurements or searches, the new energy scale Λ for the new phenomena and new principles is determined. It also fixes the technology and the CM energy of the next-generation accelerators, such as Future Circular Colliders (FCC, HE-LHC) and the energy upgrade of the ILC.

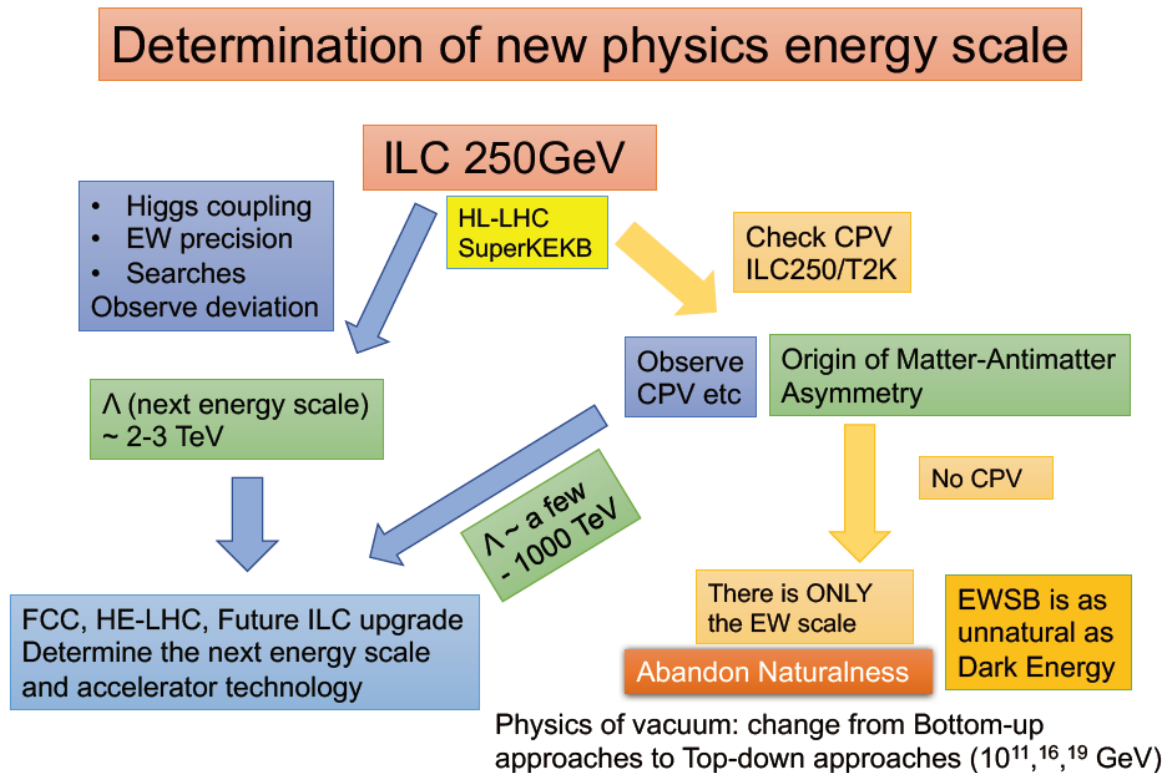


Figure 2: Precision measurements and the energy scale Λ .

The right side of Figure 2 illustrates the different approach, in which the probing for the origin of the matter-antimatter asymmetry will lead to the next new phenomena (where Λ is the new energy scale). As discussed in Chapter 3, it can be determined that the origin of matter is either electroweak baryogenesis ($\Lambda=10-1000$ TeV) or leptogenesis ($\Lambda<10$ TeV) with the observation of CP violation (in Higgs or neutrino sectors), the precise measurement of the Higgs boson, and measurements of gravitational waves in space.

If the results from the ILC250 and other experiments are found to be consistent with the SM, and no new sources of CP violation are found, it will be determined that the energy scale for the physics behind the EWSB mechanism is $O(10)$ times higher than the EWSB scale itself. It will be found to be at least $O(10)$ times “unnatural”, and the electroweak phase transition (EWPT) will be an as unnatural phenomenon as dark energy. The EWPT is related to the vacuum physics, as the same as the inflation and dark energy, whose scales are also not naturally explained. This will lead to a paradigm shift in our research direction, from the traditional bottom-up approach to the top-down approach.

3. Electroweak Symmetry Breaking and the Origin of Matter-Antimatter Asymmetry

There are two promising scenarios for the origin of matter-antimatter asymmetry; leptogenesis and electroweak baryogenesis (EWBG). Figure 3 shows a flowchart for approaching these scenarios. EWBG can be probed at the ILC250 in two phases as discussed below.

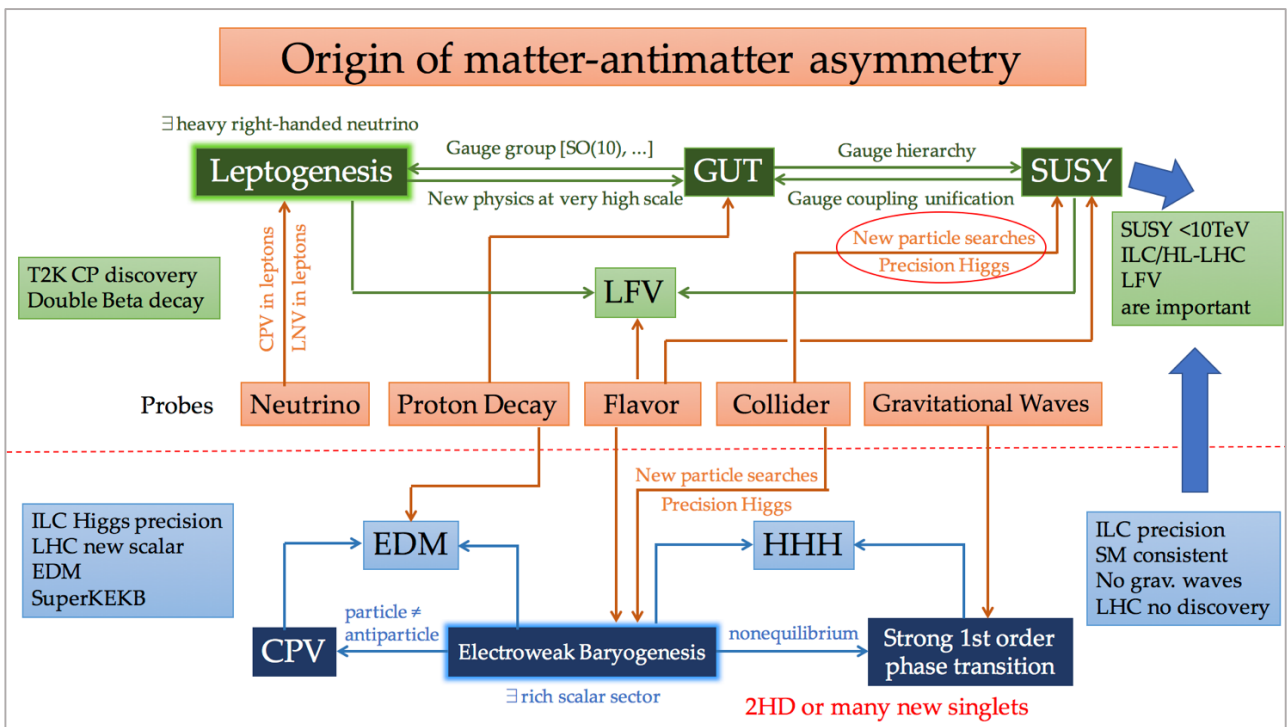


Figure 3: Origin of matter-antimatter asymmetry.

As described in Section 2.2, the phase of the couplings between the Higgs boson and fermions can be measured to 3.8-degree precision. Together with the precise measurements of the HZZ coupling and Yukawa couplings, it can be determined whether or not the Higgs boson is responsible for the origin of matter-antimatter asymmetry. These results can be cross-checked with experiments searching for the electric dipole moment of the neutron and the electron. This is the first step to examine EWBG (left-lower side of Figure 3) .

Furthermore, the electroweak symmetry breaking should be a strong first-order phase transition and in non-equilibrium in order to retain the asymmetry produced by the Higgs sector. For this to occur, it is necessary to introduce additional Higgs fields as in 2HD models or an additional singlet. These new scalar fields result in large deviations ($>20\%$) in the trilinear Higgs coupling and most probably a few-percent deviation in Higgs couplings with gauge bosons as well (right-lower side of Figure.3). The ILC250 can investigate these couplings at sufficient precision. Gravitational waves are also emitted during the EWPT in Strong 1st order transition. They can be detected at satellite probes (such as LISA and DECIGO) which are expected to begin operation around 2040. This is the second step to examine EWBG. The Higgs potential demands that new phenomena must be present in the range up to Λ =a few–1000 TeV in the case of EWBG. The energy of the next energy frontier experiment and its accelerator technology can be also determined in this case (as shown in Fig.2)

The ILC250 can examine EWBG scenarios from many sides. The key to probe EWBG scenarios is the precise measurement of CP violation, the Higgs couplings with the gauge bosons, and the Yukawa couplings. The precisions of these measurements are largely similar between the ILC250 and the ILC500 results. Although the Higgs trilinear coupling (HHH coupling) cannot be measured at the ILC250, the precise measurement of the Higgs boson couplings with the gauge bosons and the gravitational wave probes can be used to elucidate the origin of matter. The crucial test of EWBG can be performed at the ILC250.

If the EWBG scenarios are disfavored at the ILC250, or if CP violation is observed in neutrino sector at the T2K experiment and neutrino-less double-beta decay is discovered, the leptogenesis scenario becomes favorable. This implies the existence of a right-handed neutrino at a very high energy scale as well as grand unification (GUT). The most attractive scenario for GUT is supersymmetry with gauginos and higgsinos under 10 TeV. This scenario can be examined with the search for lepton number violation, the search for proton decays at the HyperKamiokande experiment, and the search for gauginos and higgsinos under 10 TeV at the next hadron collider (FCC, HE-LHC, etc.) or at a higher energy lepton collider. The favorability of the leptogenesis scenario is important input for the discussion of the accelerator technology and the CM energy of the next-generation facility. This is the path labeled “ Λ ~ a few–1000 TeV” in Figure 2. Since this is

an important scenario, it is in the interest of Japan’s long-term strategy to construct a linear collider which can easily accommodate the next-generation technology.

4. Direct Search for Dark Matter and New Particles Based on Naturalness

Naturalness has played an important role in the history of particle physics. The discovery of the 125 GeV Higgs boson has started to cast some doubt to this idea in the current situation that no new physics is found. The claim is that using supersymmetry to explain a 125 GeV Higgs boson nominally requires fine-tuning on the order of around $O(100)$ – $O(1000)$. However, there are possibilities where squarks become naturally heavy like focus point models. The Higgs boson becomes also naturally heavy in extensions of the MSSM, with additional singlets for example. Before giving up on the idea of naturalness, these possibilities (Higgsino/Wino/Singlet-like) must be probed. They are also scenarios that provide natural candidates of dark matter (DM). Figure 4 summarizes the candidates of WIMP DM and their searches.

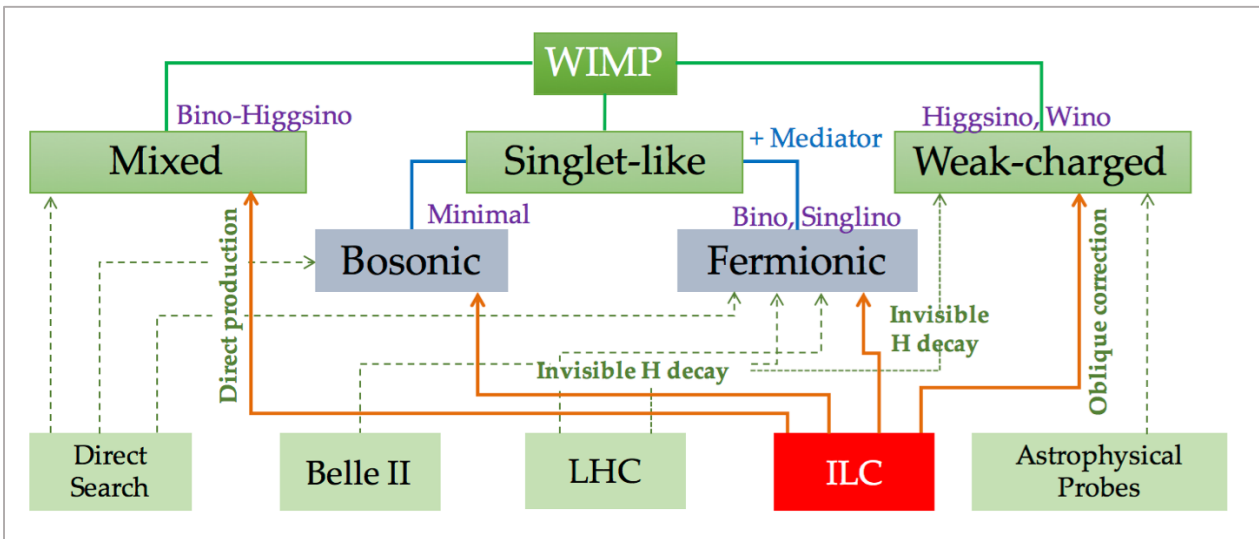


Figure 4: WIMP dark matter candidates and searches.

For the electroweak gauginos and higgsinos, the mass differences from the lightest particle among them (wino, higgsino) are generally small as described in Section 2.1(b). Such compressed spectra are challenging to search for at the LHC. It is also possible that the existence of a singlet particle could suppress the couplings with the gauge bosons. The investigation of these two possibilities are important. Taking together the HL-LHC searches (having a sensitivity for the bino) and the approach of 2.1(b) will make the search strategy complete.

It should be noted that the higgsino mass should be naturally around the Higgs mass; thus the search for the higgsino is particularly important. The ILC250 can probe higgsinos indirectly up to about 200 GeV, corresponding to the test of naturalness of about 10%. This is the higgsino path

shown in Figure 4. Since it is challenging to search for higgsinos at the HL-LHC, the ILC searches are indispensable.

In the case of a singlet-like DM as in the middle of Figure 4, there are bosonic and fermionic DM (bino-like or singlino-like). A bino-like DM can be covered by gaugino searches at the HL-LHC. For singlino-like DM or for bosonic DM, the Higgs invisible decays to unknown particles is important. The ILC250 is sensitive to Higgs invisible decays with a branching ratio of 0.3%. This will be a tight constraint for DM candidates lighter than 62 GeV. Such light DM is challenging for underground direct detection experiments because the recoiling energy is small. The ILC will provide coverage for such particles, which makes the search strategy for DM complete.

In the case of a mixed bino and higgsino (Figure 4, left), the strategy depends on its mass. For a heavy mixed bino-higgsino, it can be covered through the gaugino search at the HL-LHC as well as at direct DM detection experiments. If it is light, it will become challenging for the HL-LHC (due to the compressed spectrum) and direct detection experiments (small recoil energy). The ILC250 is able to cover most of the remaining parameter space for these particles by the direct search.

For DM searches based on the “naturalness”, the ILC250 will be able to cover regions that cannot be covered by the HL-LHC and direct detection experiments (up to 200 GeV higgsinos and up to 62 GeV singlet-like DM). The ILC250 together with these experiments make the approach of 2.1(b) and the search strategy for WIMP DM complete.

The ILC will play a crucial role in the search for electroweak gauginos and higgsinos and singlet particles motivated by naturalness and dark matter. It plays a complementary role to the HL-LHC and the DM direct detection experiments. Combining these three approaches makes the search strategy complete. The necessary CM energy of the ILC depends on how much fine-tuning one can test for the naturalness.

5. Summary

The contributions of each project are summarized in Table 3. As discussed in Chapter 2, the ILC250 will be able to explore the phase space of new physics that cannot be covered by the HL-LHC or the Belle II experiments. It will be able to probe the new phenomena in a robust way. In particular, the ILC250 has an excellent sensitivity to the heavy Higgs bosons in 2HD models, which is the 3rd approach as mentioned in Section 2.1(c). The ILC250 has also a good sensitivity to search for dark matter based on naturalness described in Section 2.1(b). Combining three approaches ((a)-(c)) by the ILC250 and the HL-LHC will establish a comprehensive search network, capable of probing the energy scale of new phenomena and new principles (up to $\Lambda \sim 2-3$ TeV). Thus the ILC250 will play an important role.

Table 3: The role of each project.

ILC	Higgs & other SM precision measurements; electroweak baryogenesis; 2.1(b): higgsinos, and DM lighter than 62 GeV; 2.1(c): small $\tan\beta$.
HL-LHC	Higgs couplings; direct search of new phenomena; top quark mass; 2.1(a),(b): bino, wino; 2.1(c): large $\tan\beta$.
SuperKEKB	Additional CP violation in quark-sector; bottom quark mass; tau LFV (GUT); 2.1(c): large $\tan\beta$.
T2K, HK	CPV in neutrino-sector; leptogenesis; GUT.
LFV	Leptogenesis; right-handed neutrinos; GUT.
EDM	Flavor-conserving additional CP violation; electroweak baryogenesis.
LISA, DECIGO	First-order phase transition for electroweak baryogenesis: an alternative to the HHH coupling measurement.
Underground experiments	DM direct search; 2.1(b): heavy regions.

The ILC250 will also be able to elucidate the origin of matter. It can perform a crucial test of the electroweak baryogenesis models, and probe the energy scale of new phenomena and new principles (up to $\Lambda \sim$ a few–1000 TeV).

Table 4 summarizes the list of measurements that become challenging by lowering the ILC starting energy to 250 GeV. As far as the precision measurements of the Higgs and other SM observables are considered, the ILC250 operating together with the HL-LHC and the SuperKEKB experiments will be able to play a sufficient role, with precisions not too far from the ILC500.

Table 4: List of measurements that become challenging
by making the ILC starting energy 250 GeV.

Observable	Solutions with synergy
Higgs Full Width	From HL-LHC, use custodial symmetry ($K_W/K_Z = 1$) to replace Γ_{HZZ} with Γ_{HWW} in $\Gamma_{\text{total}} = \Gamma_{HWW} / \text{Br}(H \rightarrow WW)$ → becomes comparable to ILC500 precision
Self-coupling HHH (also challenging for ILC500)	Baryon number violation → EWBG or leptogenesis (T2K, neutrino-less double beta decay). EWBG covered by HL-LHC, ILC250, SuperKEKB, LISA . Although direct measurement of self-coupling is not possible, ILC250 can contribute to examine EWBG through CPV in Higgs sector and the precise measurements of Higgs couplings.
Higgs couplings	HL-LHC (Top Yukawa coupling) Lattice (m_b, m_c, α_s uncertainty) → comparable to ILC500 SuperKEKB (Lattice examination)
Searches	Electroweak gauginos/higgsinos based on naturalness: higgsino ($< \sim 200$ GeV); dark matter (< 62 GeV).
Top mass	HL-LHC (0.2–0.3 GeV) sufficient precision for test of SM; roughly sufficient for vacuum stability; (if a detailed study of high scale physics becomes necessary, upgrade to 350 GeV)

Some of the main merits of the ILC operating at 350 GeV, 500 GeV, or above are

- (a) When the energy scale of the new phenomena and new principles is discovered by the combined results of the ILC250 and HL-LHC, this energy scale becomes the next target for an energy upgrade of ILC.
- (b) Top quark mass precise measurement: The HL-LHC precision of 0.2–0.3 GeV is sufficient for the test of the SM and the vacuum stability. If the results from the HL-LHC and ILC250 point to physics at very high energy scales such as GUT and the necessity to study the vacuum stability in further detail, then the ILC350 becomes important.
- (c) When only the electroweak scale seems to exist (the scenario in Figure 2 (right)), it becomes important to directly study the breaking of the electroweak symmetry and the Higgs potential in detail. In this case, the measurement of the Higgs self-coupling (HHH) becomes important, irrespective to the indirect measurement by gravitational waves. The precise measurement at CM energy of 500 GeV (positive interference) and 1 TeV (negative interference) will be both important.

Future energy upgrade scenarios should be discussed based on the findings of the energy scale of new phenomena and new principles as in point (a) above, or the CM energy will be upgraded, as before, upto 350, 500 GeV or 1TeV based on points (b) and (c).

Conclusions

The conclusions of this committee are the following four points:

- In order to maximally exploit the potential of the HL-LHC measurements, concurrent running of the ILC250 is crucial.
- LHC has not yet discovered new phenomena beyond the Standard Model. The ILC250 operating as a Higgs Factory will play an indispensable role to fully cover new phenomena up to $\Lambda \sim 2\text{--}3$ TeV and uncover the origin of matter-antimatter asymmetry, combining all the results of ILC250, HL-LHC, the SuperKEKB, and other experiments. Synergy is a key.
- Given that a new physics scale is yet to be found, ILC250 is expected to deliver physics outcomes, combined with those at HL-LHC, SuperKEKB and other experiments, that are nearly comparable to those previously estimated for ILC500 in precise examinations of the Higgs boson and the Standard Model.
- The inherent advantage of a linear collider is its energy upgradability. The ILC250 has the potential, through an energy upgrade, to reach the energy scale of the new physics discovered by its own physics program.

Many thanks to T.Tanabe (ICEPP, U.Tokyo), T.Nakada (EPFL) , H.Aihara (U.Tokyo) and S.Komamiya (U.Tokyo) for useful discussions and suggestions to translate the original document into English.