



Future Lepton Colliders for Energy Frontier Studies

Taikan Suehara (Kyushu Univ.)

Contents

前半:

エネルギーフロンティア
レプトンコライダーの物理

後半:

エネルギーフロンティア
レプトンコライダーの技術と将来計画

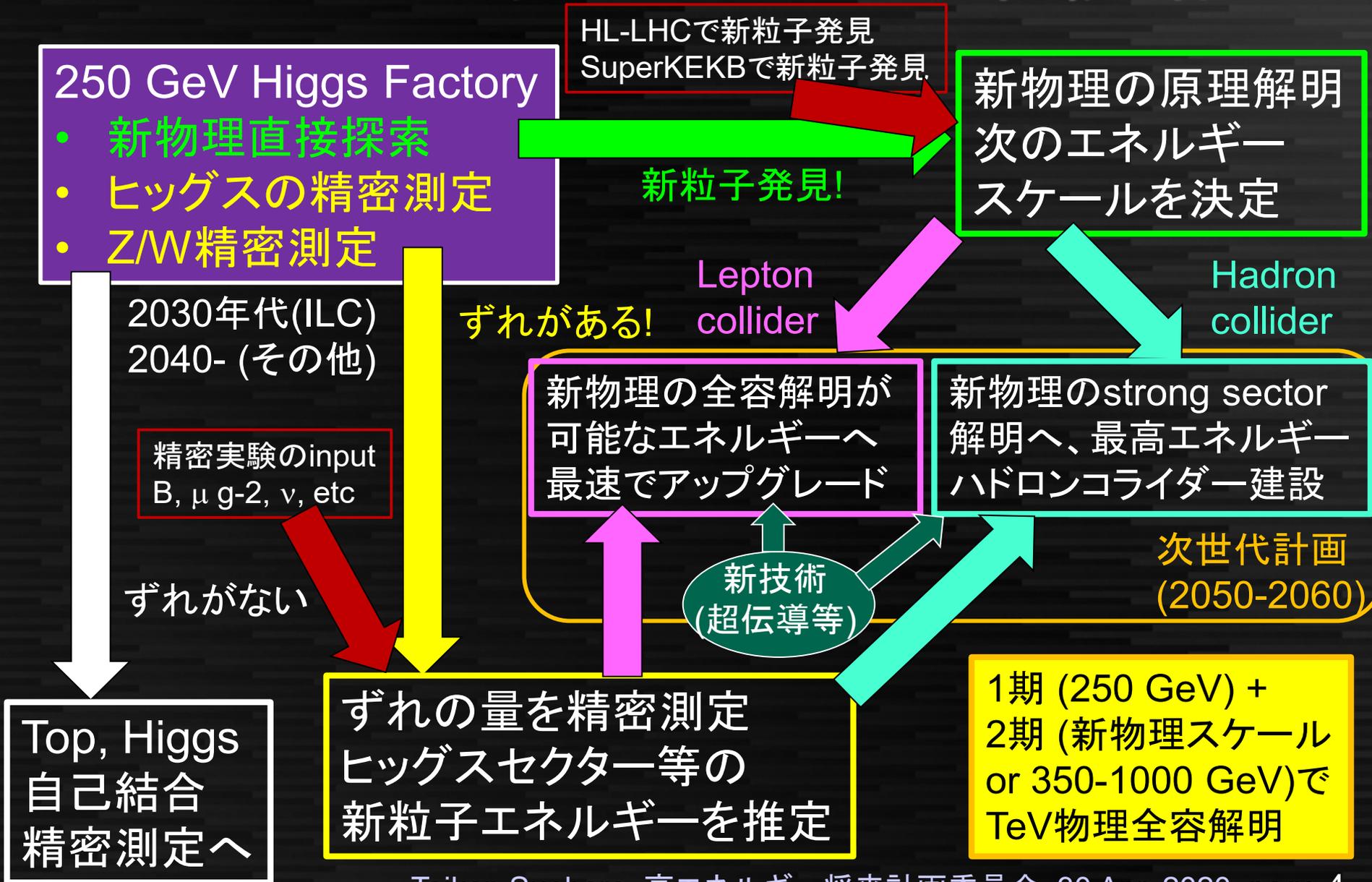
エネルギーフロンティア レプトンコライダーの物理 (ハドロンコライダーとのシナジーを含む)

前提条件:

- Higgs factory (~ 250 GeV) @ 2030-2040s
- (Multi-)TeV e^+e^- collider @ >2050

プロジェクトの現状・構想等は後半で議論します

レプトンコライダーの基本戦略



$\Omega_M \sim \Omega_{DE}$
暗黒エネルギー

用例
期待される描像 直接証拠 状況証拠

マルチユニバース

量子重力

インフレーション

ステライルニュートリノ 複合ヒッグス, 余剰次元他もろもろ
暗黒物質

素粒子と相互作用の起源

B lepton universality
 μ g-
2

ヒッグズ場と真空の安定性

TeV SUSY

大統一

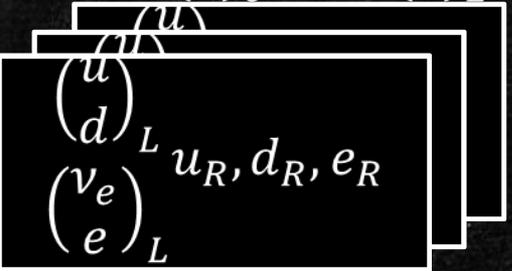
ヒッグス粒子質量の微調整
running coupling constant

Yukawa結合の起源

バリオジェネシス/レプトジェネシス

$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

重い右巻きν



qとνの混合行列とCPの破れ
質量のパターン 物質優勢宇宙
クォークとレプトンのパターン

10⁰ 10³ 10⁶ 10⁹ 10¹² 10¹⁵ 10¹⁸

TeV

エネルギースケール(GeV)

Planck



科学
知る

理学・工学分野の科学・夢ロードマップ

素粒子物理学

2010年代

2020～2030年代

エネルギースケール
宇宙開闢からの時間

テラ(10^{12})電子ボルト
 10^{-10} 秒～ 10^{-12} 秒

10^{25} 電子ボルト
 10^{-34} 秒

10^{27} 電子ボルト
 10^{-43} 秒 0?

発展から新しい展開へ

質量・新物理

量子重力・
ビッグバンの起
源

物質・宇宙・
時空の起源

「ヒッグス粒子」の発見

「質量の起源」機構の決定

大統一理論の完成
クォークとレプトンの統一的理解
三つの力の統一と進化

究極理論完成へ

「新粒子・新現象」の発見
希崩壊現象・TeVスケールでの新現象?

「新物理」原理決定
超対称性? 余剰次元?

「物質と時空の統一」
超弦理論
ワープする宇宙

「陽子崩壊」の発見

「ニュートリノ振動」全貌解明
混合角「 θ_{13} 」の発見

「ニュートリノのCP破れ」発見

何故、宇宙から反物質は消えたのか?

ニュートリノは自身の反粒子か?

インフレーション宇宙の微視的理解

暗黒物質粒子の直接検出

暗黒物質の正体の決定

暗黒エネルギーの正体解明

宇宙観測の新展開

2010年代

2020～2030年代

LHC

⇒ LHC大強度化

電子・陽電子リニアコライダー

KEKB/Belle ⇒ SuperKEKB/Belle II

T2K

⇒ J-PARC 大強度化

⇒ 次世代ニュートリノ(ν)検出器

次世代 ν ビーム

新たな展開

新加速原理の加速器
新原理の量子センサー

インターネットWeb

創薬・癌検診・治療

次世代の最先端加速器・計測装置

未来型装置

放射光・中性子・材料

超高速データ処理

次世代量子セン
サー

加速器駆動原子炉・核変換

未来社会

かつての半導体・IT・超伝導のような
基礎物理からの技術革命の再現

技術
生きる

粒子線治療

医療・生命・物質・天文科学

日本学術会議に2011年に提出

エネルギーフロンティアの意義

- < 10 TeV 新物理をfavorする問題 **TeV新物理**



- TeVエネルギーフロンティアの**3つの武器**

1. Higgs粒子

- ほとんどのTeV物理はHiggsと密接な関係がある
- a few% → < 1%の測定精度へ、桁が変われば世界が変わる

2. 新粒子(新物理)直接探索

- 新粒子の生成、直接測定で背後の物理を直接理解
- エネルギーの範囲内で、より広く、よりモデル非依存に探索したい

3. Top/電弱精密測定

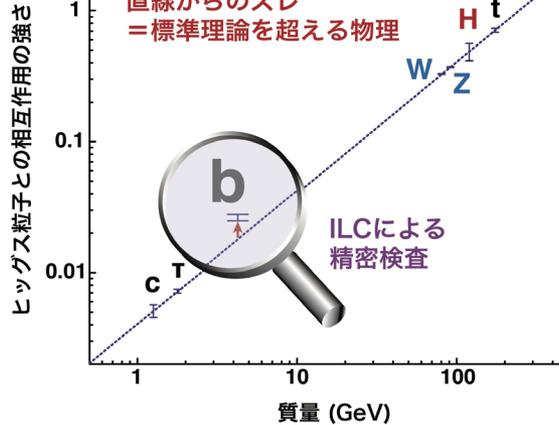
- Top, W/Zを通して新物理を探索

ILCにおける物理解析

ヒッグス精密測定

- ILCで確実にできる測定
- ヒッグス粒子は特別

包含断面積: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow e^+e^-)$
 包含断面積: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 包含断面積: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow q\bar{q})$
 Zボソンの角分布: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow e^+e^-)$
 Zボソンの角分布: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 Zボソンの角分布: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow q\bar{q})$
 部分生成断面積:
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow b\bar{b}) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow c\bar{c}) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow g\bar{g}) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow W W) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow Z Z) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{"exotic"}) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow b\bar{b}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow c\bar{c}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow g\bar{g}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow W W) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow Z Z) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{"exotic"}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow b\bar{b}) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow c\bar{c}) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow g\bar{g}) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow W W) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow Z Z) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{"exotic"}) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 包含断面積: $e^+e^- \rightarrow \gamma H$
 光子の角分布: $e^+e^- \rightarrow \gamma H$
 CP効果
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow \nu\nu)$
 $H \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow q\bar{q})$
 $H \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow l\bar{\nu})$
 $H \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $H \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow l\bar{l})$
 $H \rightarrow (Z \rightarrow l\bar{l}) (Z \rightarrow l\bar{l})$



電弱相互作用精密検証

- ILCで確実にできる測定
- LEPの3桁上の統計量
- ヒッグス精密測定と密接に関係
- 偏極が非常に重要

断面積: $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow q\bar{q})$
 断面積: $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow l\bar{\nu})$
 断面積: $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow l\bar{\nu}) (W \rightarrow l\bar{\nu})$
 Wボソンの崩壊分岐比、質量、幅:
 $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow l\bar{\nu})$
 3重ゲージ結合のCP保存測定:
 $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow l\bar{\nu})$
 3重ゲージ結合のCPの破れ測定:
 $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow l\bar{\nu})$
 断面積: $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 断面積: $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow l\bar{l})$
 断面積: $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow l\bar{l}) (Z \rightarrow l\bar{l})$
 異常3重ゲージ結合のCP保存測定:
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow l\bar{l})$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow l\bar{l}) (Z \rightarrow l\bar{l})$
 異常3重ゲージ結合のCPの破れ測定:
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow l\bar{l})$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow l\bar{l}) (Z \rightarrow l\bar{l})$
 断面積: $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$
 光子の角分布: $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$
 断面積: $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
 角分布: $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

新粒子探索

- 新物理の直接的証拠の発見可能性

新たなヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow e^+e^-) + X$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow \mu^+\mu^-) + X$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) + X$
 $e^+e^- \rightarrow A H$

1荷電ヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow H^+ H^0 H \rightarrow \tau^+ \nu, c s, c b$
 $e^+e^- \rightarrow W^+ H^+$

2荷電ヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow W^+ W^+ + X$
 $e^+e^- \rightarrow e^+e^+ + X$ $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^+ + X$
 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^+ + X$

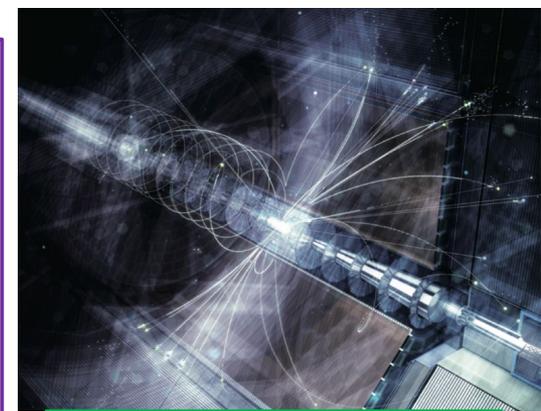
励起レプトン探索

長寿命粒子探索

重イオン粒子探索

新粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow e e + X$ $e^+e^- \rightarrow \mu \mu + X$
 $e^+e^- \rightarrow \tau \tau + X$ $e^+e^- \rightarrow e \mu + X$
 $e^+e^- \rightarrow e \tau + X$ $e^+e^- \rightarrow \mu \tau + X$
 $e^+e^- \rightarrow b \bar{b} + X$ $e^+e^- \rightarrow c \bar{c} + X$
 $e^+e^- \rightarrow q \bar{q} + X$ $e^+e^- \rightarrow b c + X$
 $e^+e^- \rightarrow b q + X$ $e^+e^- \rightarrow c q + X$
 $e^+e^- \rightarrow g \bar{g} + X$ $e^+e^- \rightarrow e q + X$
 $e^+e^- \rightarrow \mu q + X$ $e^+e^- \rightarrow \tau q + X$
 $e^+e^- \rightarrow W + X$ $e^+e^- \rightarrow Z + X$
 $e^+e^- \rightarrow \gamma + X$



2-フェルミオン過程

- 新たな力の発見可能性
- LEPの3桁上の統計量
- 偏極が非常に重要

断面積と角分布:

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$
 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$
 $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$ $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$
 $e^+e^- \rightarrow s\bar{s}$ $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

τ の崩壊分岐比

τ の偏極

τ の寿命

クォークとレプトンの複合粒子可能性

余剰次元探索

量子色力学・核物理

- ILCで確実にできる測定
- 背景事象の詳細な理解
- 新粒子発見に重要

$\alpha_s(q^2)$ 測定

$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}, b\bar{b}g, b\bar{b}gg$

$e^+e^- \rightarrow c\bar{c}, c\bar{c}g, c\bar{c}gg$

$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}, q\bar{q}g, q\bar{q}gg$

破砕関数測定

b, c, s, q, gluon

ハドロン内およびハドロン系での粒子相関
 b, c, s, u, d バリオンの、メソンの排他的生成及び崩壊

エキゾチックハドロン探索:

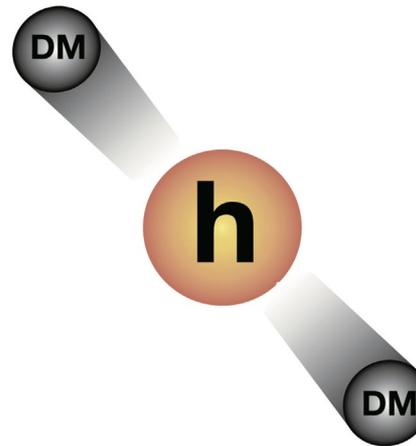
テトラクォーク、ペンタクォークグルーボール、等

2光子衝突におけるジェット生成

2光子衝突における b, c, s, u, d バリオンの、

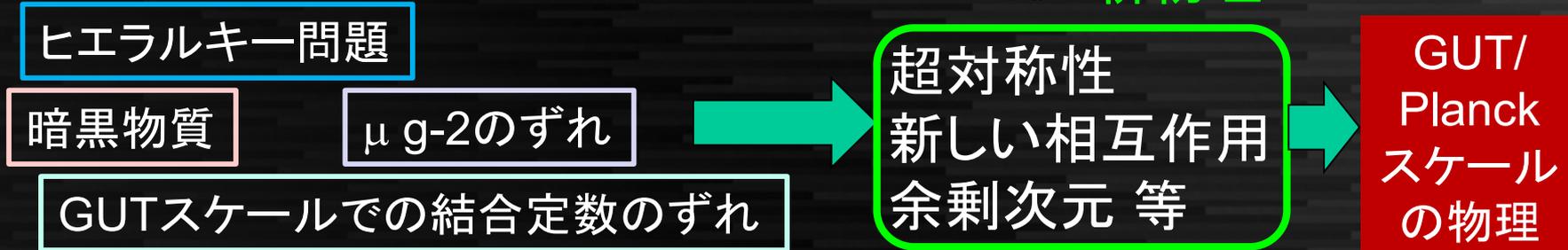
メソンの排他的生成及び崩壊

2光子衝突におけるレプトン生成



エネルギーフロンティアの意義

- < 10 TeV 新物理をfavorする問題 **TeV新物理**



- TeVエネルギーフロンティアの **3つの武器**

1. Higgs粒子

- ほとんどのTeV物理はHiggsと密接な関係がある
- a few% → < 1%の測定精度へ、桁が変われば世界が変わる

2. 新粒子(新物理)直接探索

- 新粒子の生成、直接測定で背後の物理を直接理解
- エネルギーの範囲内で、より広く、よりモデル非依存に探索したい

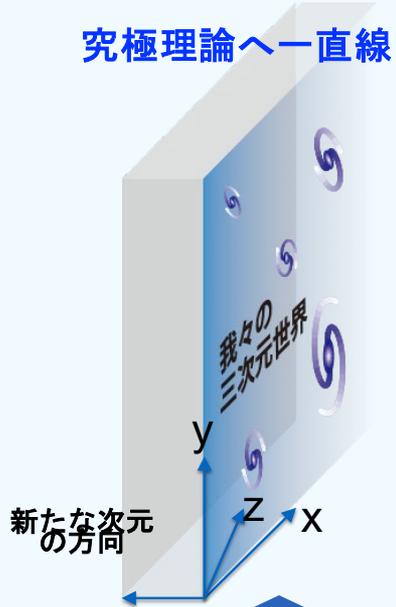
3. Top/電弱精密測定

- Top, W/Zを通して新物理を探索

岐路に立つ素粒子物理学

時空概念の拡張
超対称性または余剰次元

究極理論へ一直線



物質構造の拡張
複合ヒッグス



全く新しい原理？
複数字宙+人間原理？

標準理論と究極理論が直結？



第二の道：「より深い階層」

標準理論からのズレが見られなかった場合

第一の道：「新たな次元」

現在地
(電弱スケール)

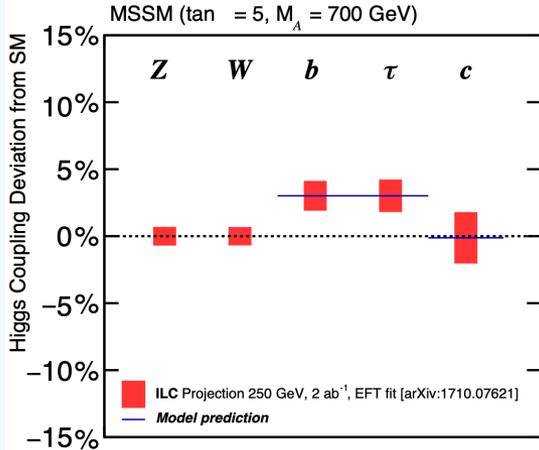
第三の道：「複数字宙？」

※: 超対称性 = 物質粒子と力の粒子を入れ換える新しいタイプの次元

ヒッグスの結合定数で見ると

時空概念の拡張
超対称性または余剰次元

SUSYの場合:
b と τ が上にずれる

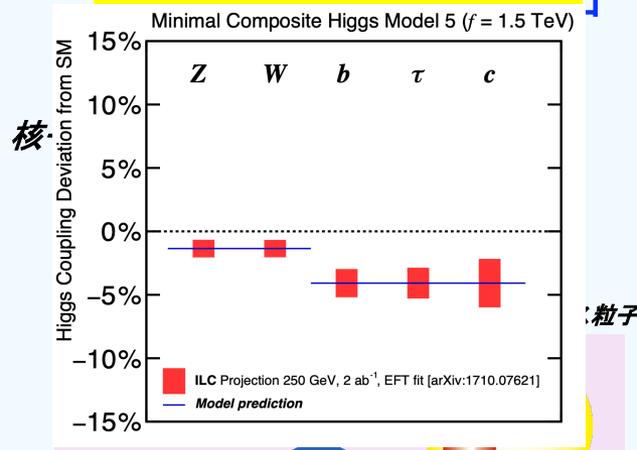


物質構造の拡張
複合ヒッグス



原子核

複合ヒッグスの場合:
全体が下にずれる



全く新しい原理?
複数字宙+人間原理?

標準理論と究極
理論が直結?



ずれない

第二の道: 「より深い階層」

標準理論からの
ズレが見られな
かった場合

第一の道: 「新たな次元」

現在地
(電弱スケール)

第三の道: 「複数字宙?」

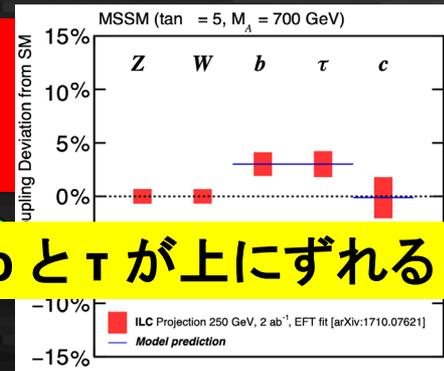
※: 超対称性 = 物質粒子と力の粒子を入れ換える新しいタイプの次元

ヒッグスと新物理

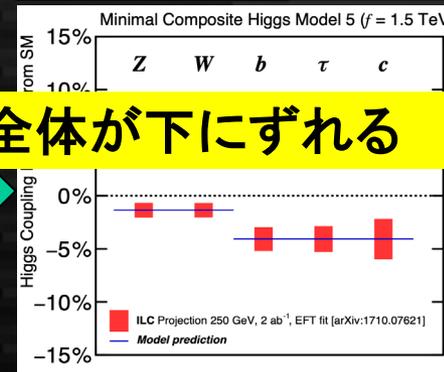
ヒッグスは、大統一への橋渡しとなるTeV新物理の強力なプローブである

TeV新物理の有力候補

1. SUSY
(Two Higgs doublet model)
2. New dynamics
(Composite Higgs)
3. ずっとSM
4. それ以外



bと τ が上にずれる

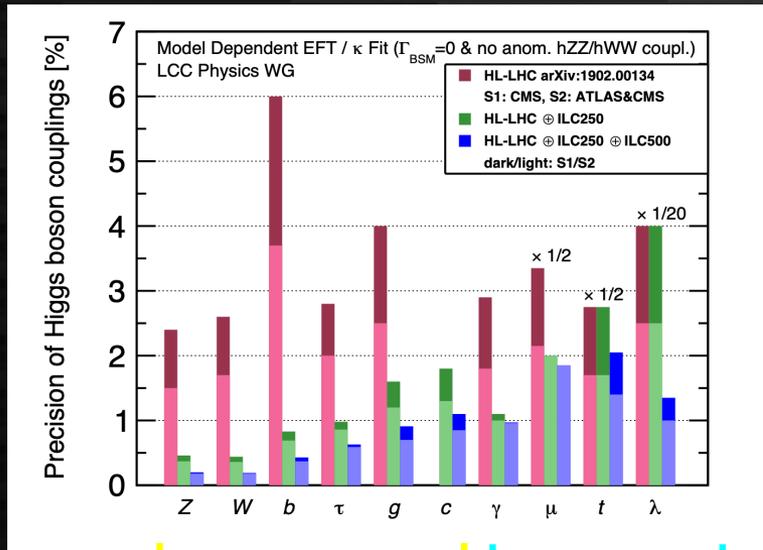
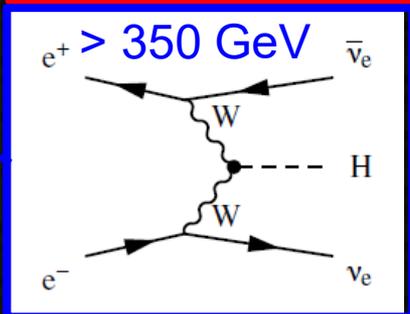
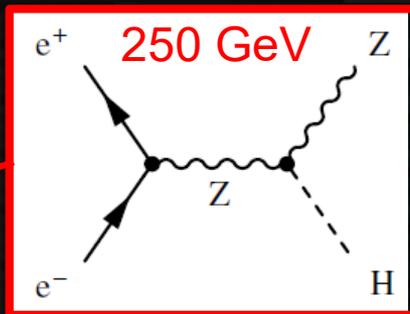
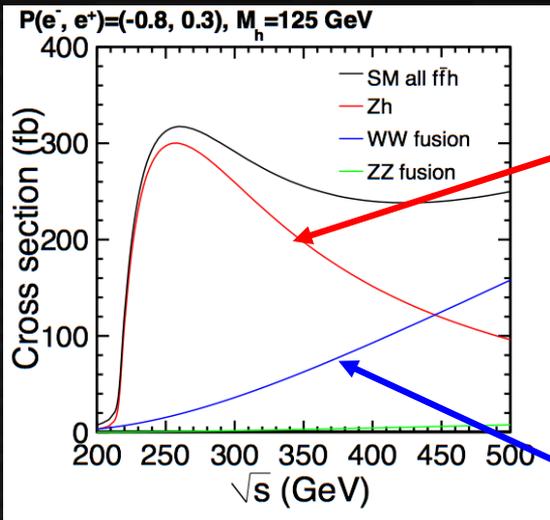


全体が下にずれる

ヒッグス結合のずれはない。
Top, ヒッグス自己結合測定等を通し真空の構造研究へ

Higgsのexotic decay, invisible decay等、直接新物理発見に繋がる可能性も。

ヒッグス測定@レプトンコライダー



arXiv: 1710.07621

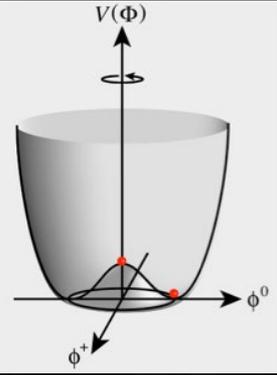
理論モデル	$b\bar{b}$	$c\bar{c}$	gg	WW	$\tau\tau$	ZZ	$\gamma\gamma$	$\mu\mu$
1 最小超対称性 (pMSSM) [37]	+4.8	-0.8	-0.8	-0.2	+0.4	-0.5	+0.1	+0.3
2 タイプ II 2HD [38]	+10.1	-0.2	-0.2	0.0	+9.8	0.0	+0.1	+9.8
3 タイプ X 2HD [38]	-0.2	-0.2	-0.2	0.0	+7.8	0.0	0.0	+7.8
4 タイプ Y 2HD [38]	+10.1	-0.2	-0.2	0.0	-0.2	0.0	0.1	-0.2
5 複合ヒッグス [39]	-6.4	-6.4	-6.4	-2.1	-6.4	-2.1	-2.1	-6.4
6 リトルヒッグス (T-パリティ有) [40]	0.0	0.0	-6.1	-2.5	0.0	-2.5	-1.5	0.0
7 リトルヒッグス (T-パリティ有) [41]	-7.8	-4.6	-3.5	-1.5	-7.8	-1.5	-1.0	-7.8
8 ヒッグス-ラディオオン [42]	-1.5	-1.5	+10.	-1.5	-1.5	-1.5	-1.0	-1.5
9 ヒッグス一重項 [43]	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5

レプトン ハドロンコライダー
コライダーとシナジーで測定
でO(1桁)
性能向上

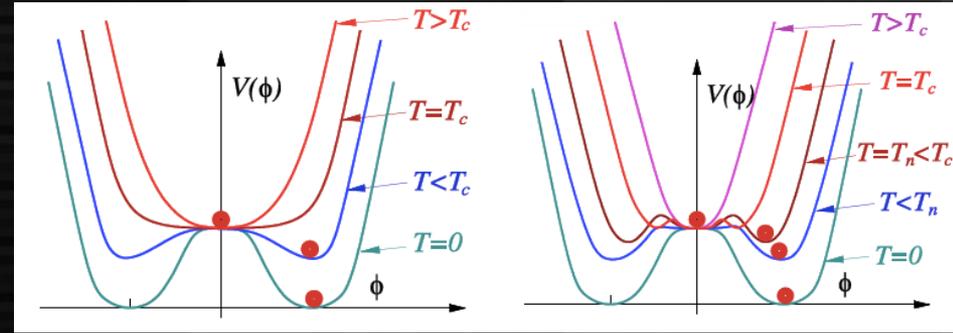
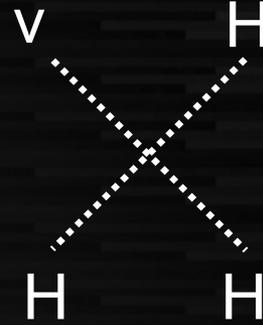
加えて、4元運動量保存を用いた全断面積測定等によりヒッグス結合の絶対値や全崩壊幅を精度よく決められる。

O(1%)精度で様々な物理モデルに感度

ヒッグス自己結合



ヒッグス
ポテンシャル
の4次の項
真空の構造
を決める



真空の2次相転移

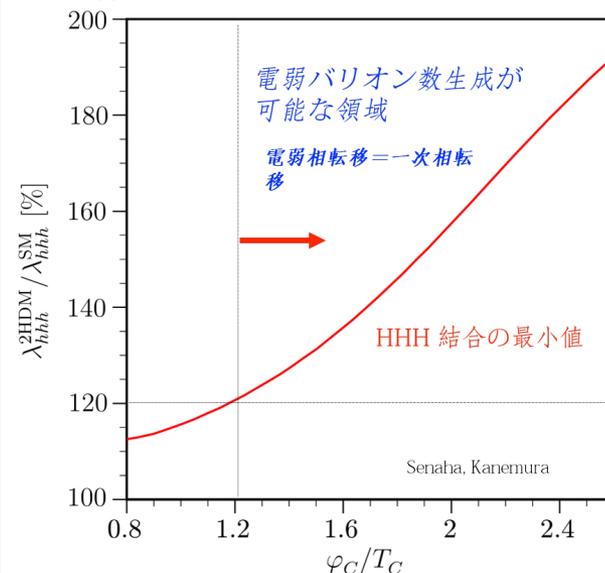
真空の1次相転移
スファロンによる
電弱バリोजェネシス
に必要

$$V(\eta_H) = \frac{1}{2} m_H^2 \eta_H^2 + \lambda v \eta_H^3 + \frac{1}{4} \lambda \eta_H^4$$

宇宙の物質生成を解き明かす
二つのプローブ

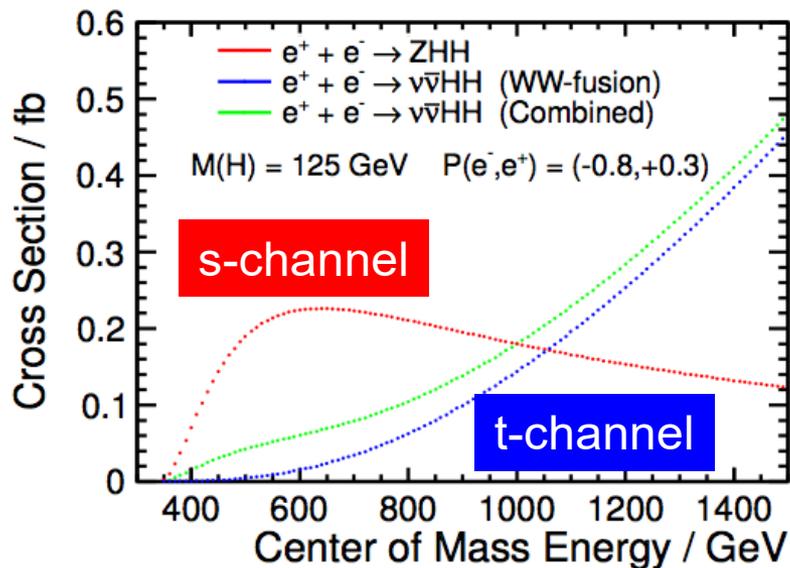
- ヒッグスと電弱バリोजェネシス
 - 真空の一次相転移
- ニュートリノとレプトジェネシス
 - 重いレプトン崩壊のCP破れ

例: 2 Higgs Doublet Model (2HDM)



電弱バリオ
ジェネシスなら
λの値は
O(10%)以上
増加する

ヒッグス自己結合@レプトンコライダー

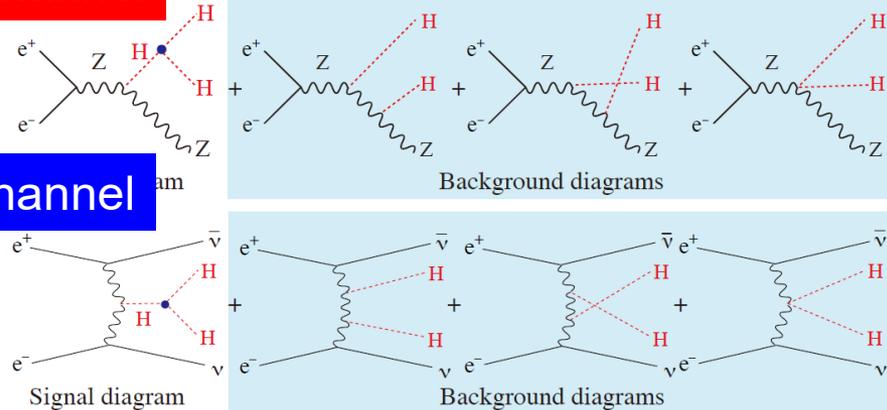


s-channel

t-channel

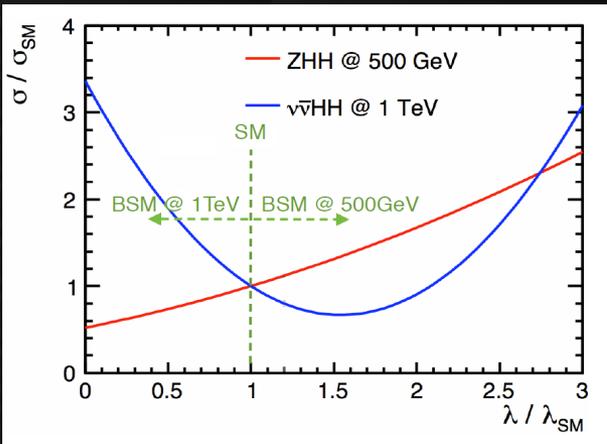
s-channel

t-channel



干渉項の効果でさらに実質断面積低下

断面積が小さく困難。1 ab⁻¹でO(100)事象



干渉項が3点結合の測定精度に影響

s-channelは正の干渉,
t-channelは負の干渉
(LHCは負の干渉)

channel	\sqrt{s} [GeV]	λ 精度
s (正の干渉)	500-600	~20%
t (負の干渉)	>1000	<10%

深層学習によるジェット再構成性能の抜本的な改善に取り組んでいる

エネルギーフロンティアの意義

- < 10 TeV 新物理をfavorする問題 **TeV新物理**



- TeVエネルギーフロンティアの **3つの武器**

1. Higgs粒子

- ほとんどのTeV物理はHiggsと密接な関係がある
- a few% → < 1%の測定精度へ、桁が変われば世界が変わる

2. 新粒子(新物理)直接探索

- 新粒子の生成、直接測定で背後の物理を直接理解
- エネルギーの範囲内で、より広く、よりモデル非依存に探索したい

3. Top/電弱精密測定

- Top, W/Zを通して新物理を探索

新物理直接探索

Q: sub-TeV e^+e^- コライダーの探索領域はLHCで調べ尽くされた？

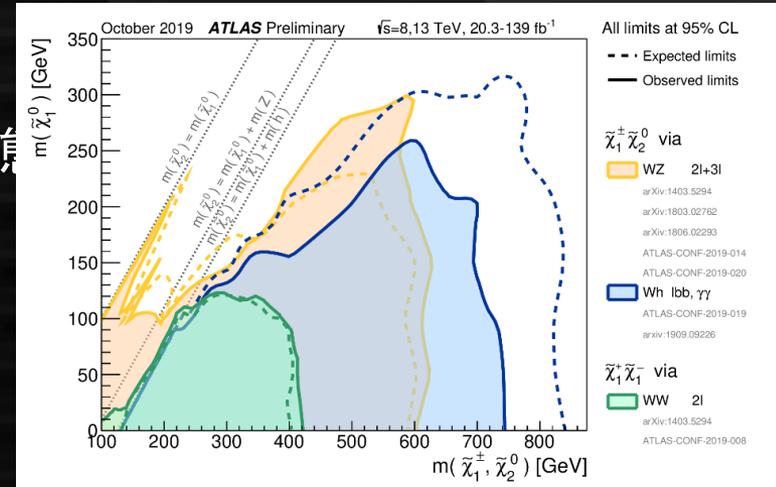
A: e^+e^- でしか見えないところに motivateされた物理がある

1. Compressed SUSY

LSP(DM候補)とNLSPが縮退 \rightarrow visibleな終状態 softでハドロンではトリガーが困難

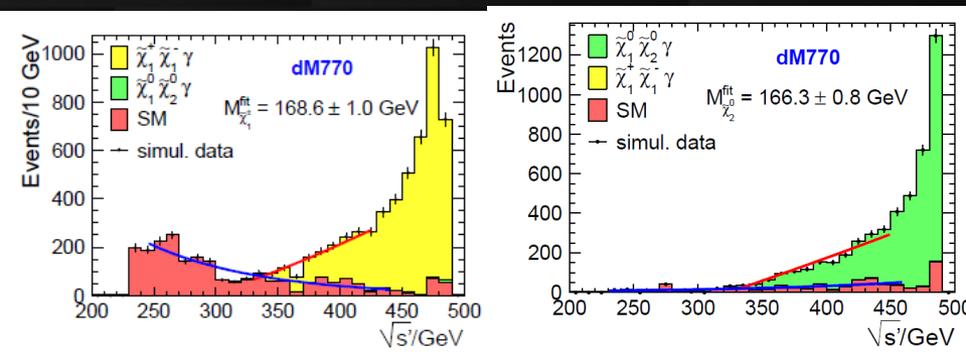
$m(\tilde{\chi}_1^0)$	$m(\tilde{\chi}^\pm)$	$m(\tilde{\chi}_2^0)$	δm
166.59 GeV	167.36 GeV	167.63 GeV	0.77 GeV

ISR photonを用いてO(1 GeV)の信号をtagできる



ATLASのW/Z/Hを介したEWkino探索

Hadron colliderでは困難な Pure Higgsinoの場合でもエネルギーさえ届けばILCでは十分見える Winoとの混合があれば混合パラメータからさらに多くのモデル情報が得られる

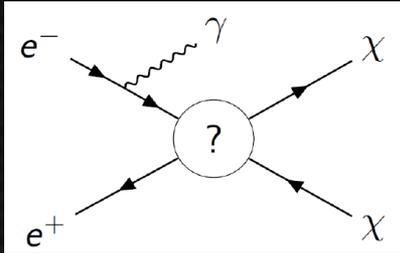


新物理直接探索 (cont.)

arXiv:2001.03011

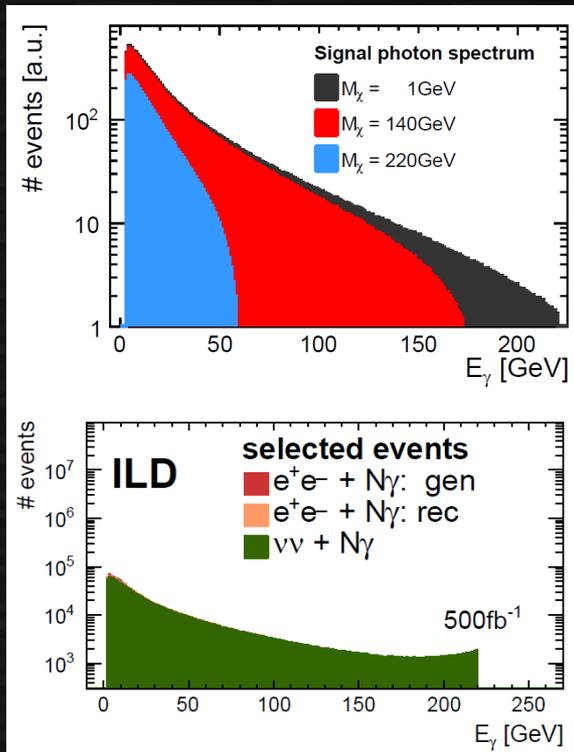
2. mono-photon search

モデル非依存に $m < \sqrt{s}/2$ の暗黒物質を直接探索

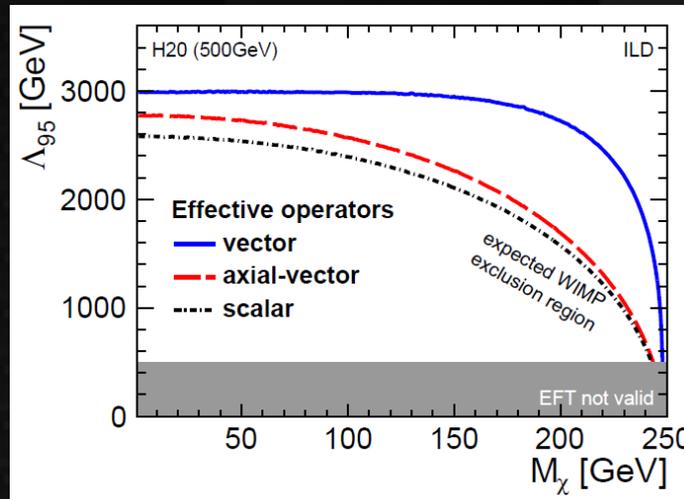


偏極を用いて暗黒物質のスピンの情報が得られる

	four-fermion operator	$\sigma(e_L^-, e_R^+) = \sigma(e_R^-, e_L^+)$	$\sigma(e_L^-, e_L^+) = \sigma(e_R^-, e_R^+)$
vector	$(\bar{f}\gamma^\mu f)(\bar{\chi}\gamma_\mu \chi)$	$\sigma \propto 1/\Lambda^4$	0
axial-vector	$(\bar{f}\gamma^\mu \gamma^5 f)(\bar{\chi}\gamma_\mu \gamma_5 \chi)$	0	$\sigma \propto 1/\Lambda^4$
scalar	$(\bar{\chi}\chi)(\bar{f}f)$	0	$\sigma \propto 1/\Lambda^4$



Λ は新物理のエネルギースケール



複数の衝突エネルギーでの測定によりスピン・質量をさらに感度よく決定できる

単一光子信号 ~3 TeVスケールの新物理に感度とバックグラウンド

新物理直接探索 (cont.)

arXiv:1912.06643

3. 見つかった場合

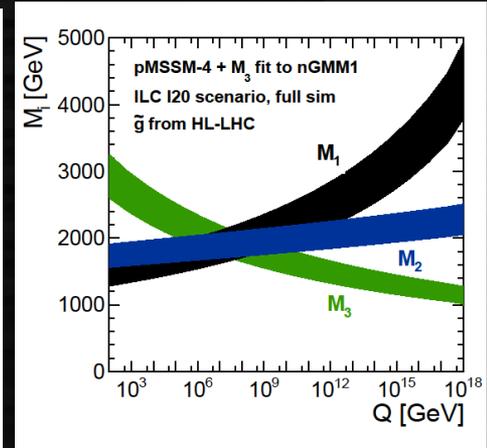
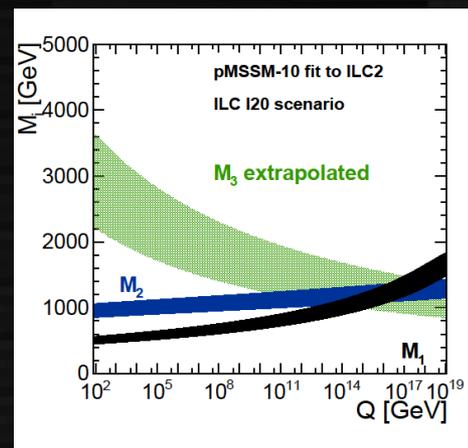
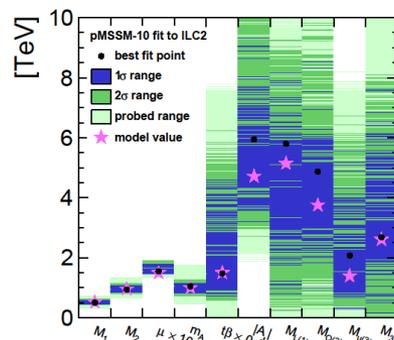
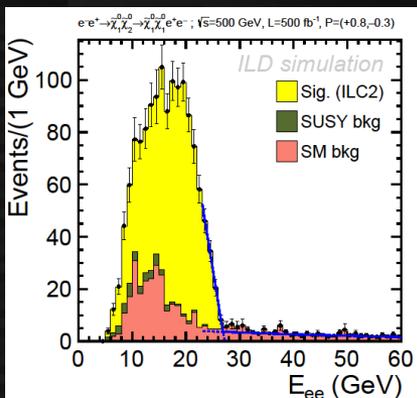
- 新粒子の質量精密測定 (kinematic edgeを利用)
- Threshold scan (断面積の \sqrt{s} 依存性から新粒子のスピンを決定)
- 各偏極における結合の精密測定からモデルの詳細を明らかにし、High scaleの謎に迫る

Kinematic edgeから
chargino/neutralinoの質量を導出し、
SUSYパラメータを導出

ハドロンコライダーでのgluino測定と合わせ
SUSYによる大統一スケールの決定

GMM: Generalized
Mirage Mediation

$\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$ only		ILC1	ILC2	nGMM1
Model mass [GeV]	$m_{\tilde{\chi}_1^0}$	102.7	148.1	151.4
	$m_{\tilde{\chi}_2^0}$	124.0	157.8	155.8
	$m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$	117.3	158.3	158.7
Precision	$\delta m_{\tilde{\chi}_1^0}/m_{\tilde{\chi}_1^0}$	0.5 %	0.7 %	1.0 %
$(\mathcal{P}_{-+}, \mathcal{L} = 500 \text{ fb}^{-1})$	$\delta m_{\tilde{\chi}_2^0}/m_{\tilde{\chi}_2^0}$	0.5 %	0.7 %	1.0 %
$\oplus (\mathcal{P}_{+-}, \mathcal{L} = 500 \text{ fb}^{-1})$	$\delta m_{\tilde{\chi}_1^\pm}/m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$	0.5 %	0.7 %	1.0 %
Scaled precision	$\delta m_{\tilde{\chi}_1^0}/m_{\tilde{\chi}_1^0}$	0.3 %	0.4 %	0.5 %
$(\mathcal{P}_{-+}, \mathcal{L} = 1600 \text{ fb}^{-1})$	$\delta m_{\tilde{\chi}_2^0}/m_{\tilde{\chi}_2^0}$	0.3 %	0.4 %	0.5 %
$\oplus (\mathcal{P}_{+-}, \mathcal{L} = 1600 \text{ fb}^{-1})$	$\delta m_{\tilde{\chi}_1^\pm}/m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$	0.3 %	0.4 %	0.5 %



エネルギーフロンティアの意義

- < 10 TeV 新物理をfavorする問題 **TeV新物理**



- TeVエネルギーフロンティアの **3つの武器**

1. Higgs粒子

- ほとんどのTeV物理はHiggsと密接な関係がある
- a few% \rightarrow < 1%の測定精度へ、桁が変われば世界が変わる

2. 新粒子(新物理)直接探索

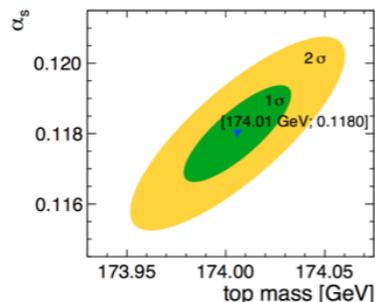
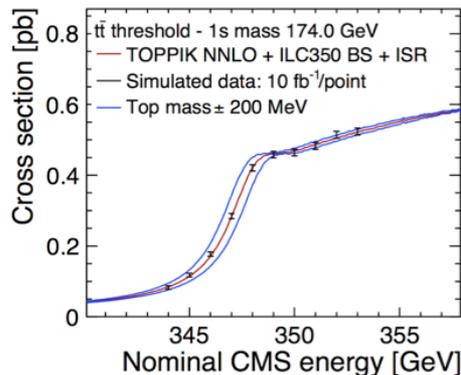
- 新粒子の生成、直接測定で背後の物理を直接理解
- エネルギーの範囲内で、より広く、よりモデル非依存に探索したい

3. Top/電弱精密測定

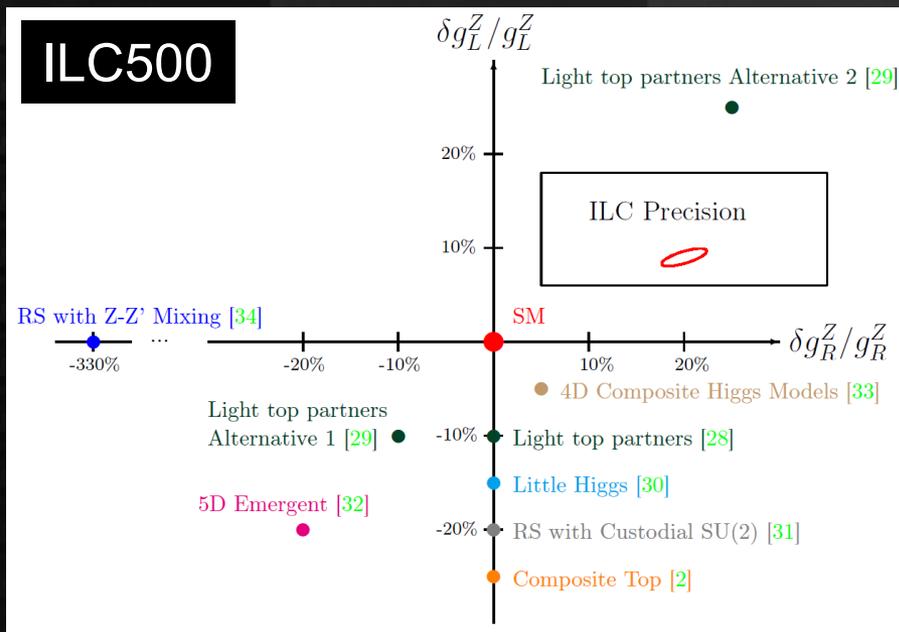
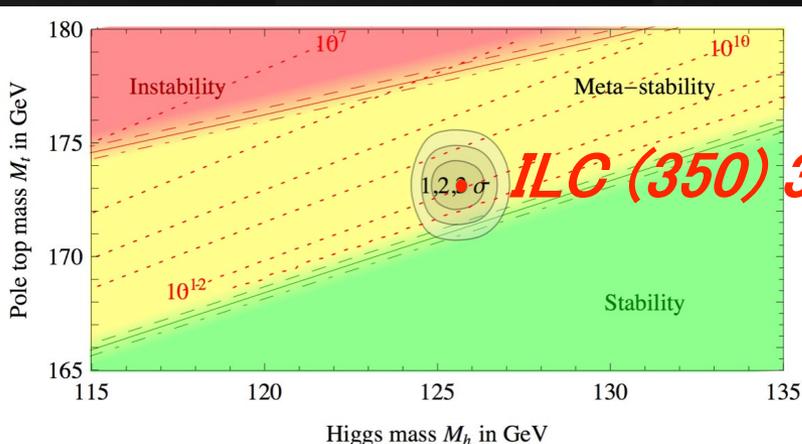
- Top, W/Zを通して新物理を探索

Top/電弱精密測定 of 物理

topの精密測定



Threshold scanによるtopの精密測定
MSbarに直接変換できる「理論的に
扱いやすい」質量を直接求められる



偏極を用いて左巻き、右巻きの結合
定数を求め、Topが関係する新物理の
探索・モデル識別が可能

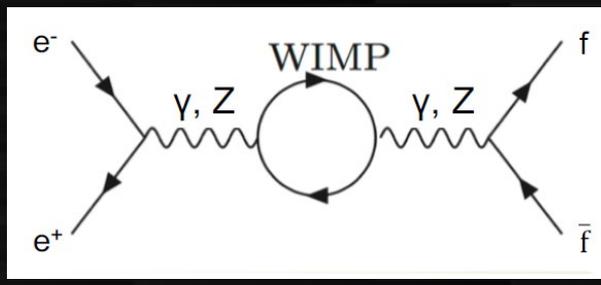
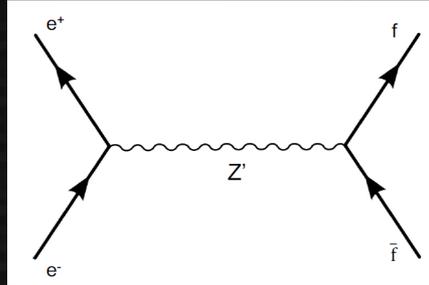
$$\Delta m_t(\overline{MS}) \lesssim 50 \text{ MeV}$$

$$\Delta m_h \simeq 14 \text{ MeV}$$

ILCで真空の位置を正確に決定

Top/電弱精密測定 of 物理 (cont.)

2fの精密測定



Effective Field Theory

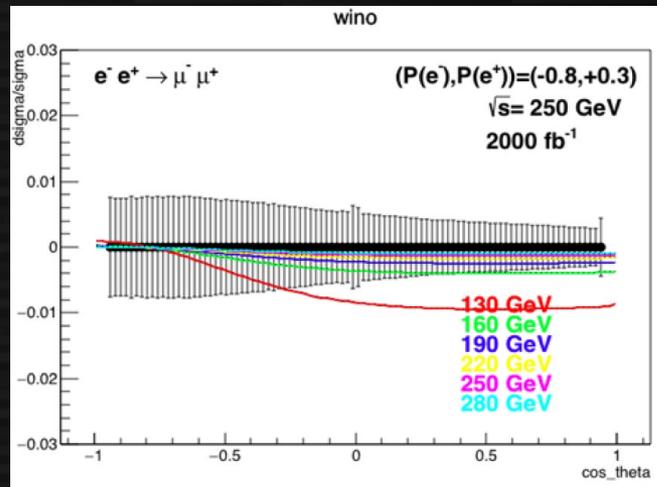
$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \Delta\mathcal{L}$$

$$= \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \frac{c_i}{\Lambda^{d_i-4}} O_i$$

$$\begin{aligned} \Delta\mathcal{L} = & \frac{c_H}{2v^2} \partial^\mu (\Phi^\dagger \Phi) \partial_\mu (\Phi^\dagger \Phi) + \frac{c_T}{2v^2} (\Phi^\dagger \overleftrightarrow{D}^\mu \Phi) (\Phi^\dagger \overleftrightarrow{D}_\mu \Phi) - \frac{c_6 \lambda}{v^2} (\Phi^\dagger \Phi)^3 \\ & + \frac{g^2 c_{WW}}{m_W^2} \Phi^\dagger \Phi W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} + \frac{4gg' c_{WB}}{m_W^2} \Phi^\dagger t^a \Phi W_{\mu\nu}^a B^{\mu\nu} \\ & + \frac{g^2 c_{BB}}{m_W^2} \Phi^\dagger \Phi B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} + \frac{g^3 c_{3W}}{m_W^2} \epsilon_{abc} W_{\mu\nu}^a W^{b\nu\rho} W^{c\rho\mu} \\ & + i \frac{c_{HL}}{v^2} (\Phi^\dagger \overleftrightarrow{D}^\mu \Phi) (\bar{L} \gamma_\mu L) + 4i \frac{c'_{HL}}{v^2} (\Phi^\dagger t^a \overleftrightarrow{D}^\mu \Phi) (\bar{L} \gamma_\mu t^a L) \\ & + i \frac{c_{HE}}{v^2} (\Phi^\dagger \overleftrightarrow{D}^\mu \Phi) (\bar{e} \gamma_\mu e). \end{aligned}$$

23 parameters

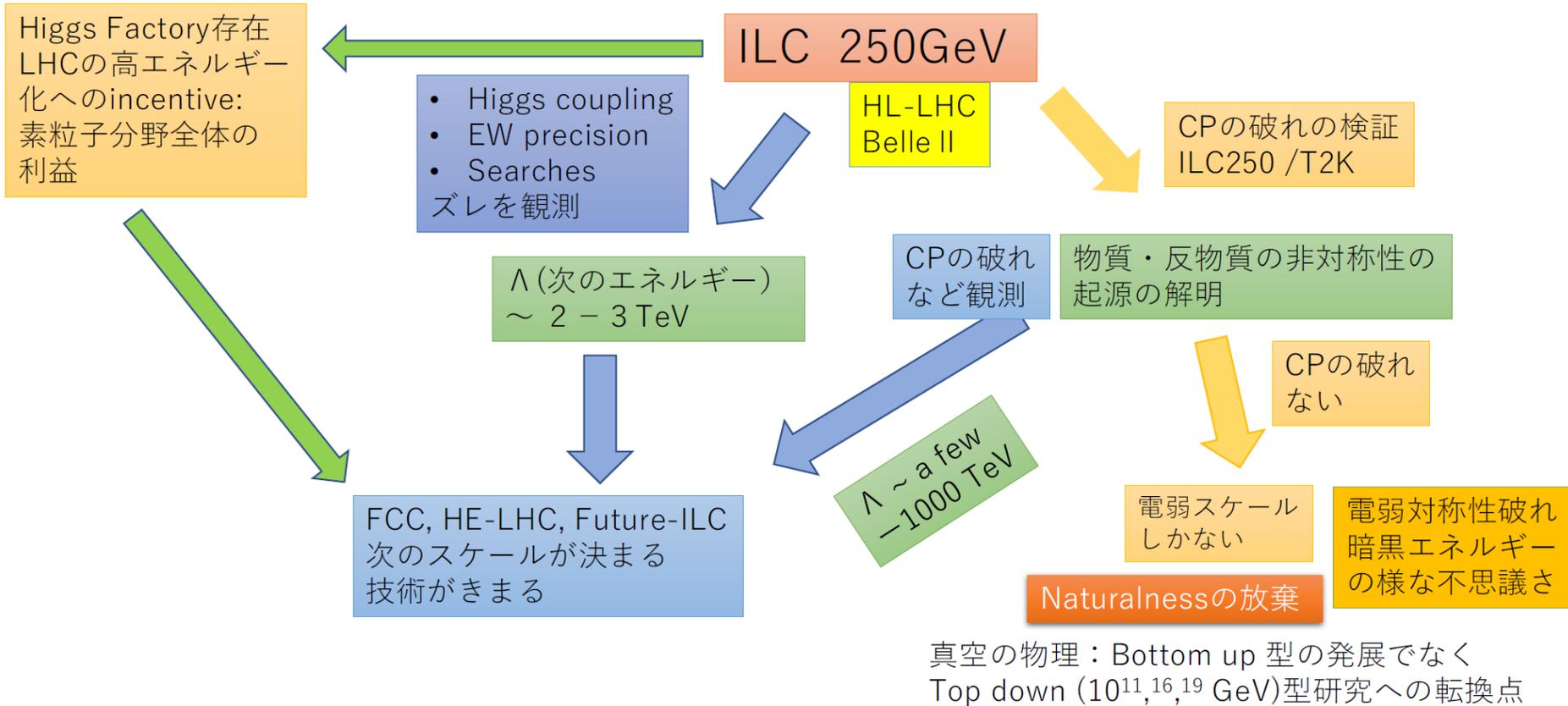
2f終状態の断面積、角度分布を~0.1%精度で測定し、heavy Z' やWIMP(暗黒物質)のループの効果を測定する



SMラグランジアンに保存則を満たす dimension 6のBSM項を加え、Higgs, top, 電弱精密測定の結果を代入して各項へのconstraintを調べる

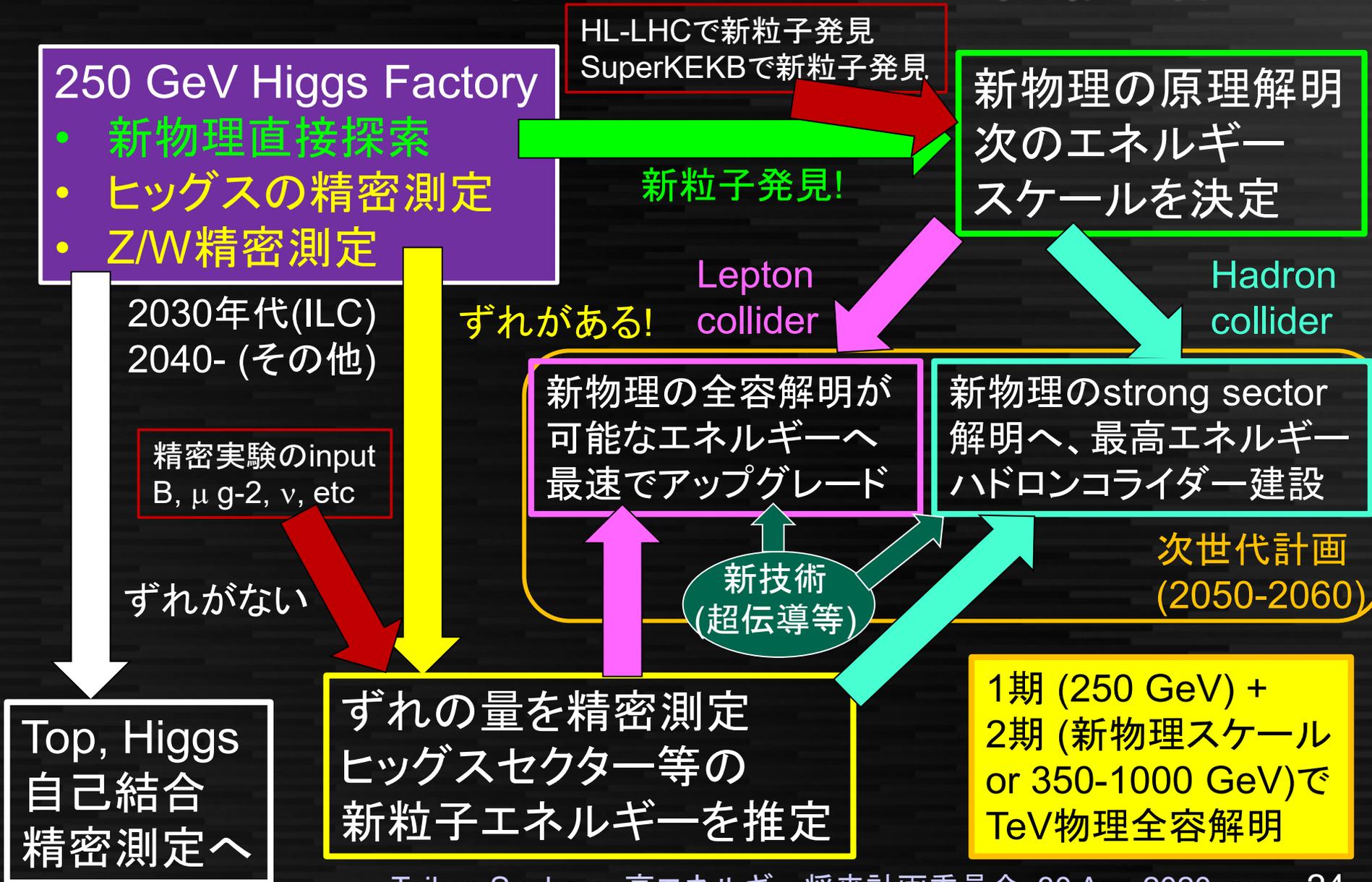
多数の精密測定を総合して
モデル非依存な新物理探索が可能

New physics のエネルギースケール



2017年 ILC 250 GeVの意義を検証する委員会(「浅井委員会」)
<http://www.jahep.org/files/ILC250GeVReport0622Final.pdf>

レプトンコライダーの基本戦略



エネルギーフロンティア レプトンコライダーの 技術と将来計画

ターゲット:

- Higgs factory (~ 250 GeV) @ 2030-2040s
- (Multi-)TeV e^+e^- collider @ >2050

レプトンコライダーの技術

1. e^+e^- リニアコライダー

– 超伝導方式



- 電力効率がよい。臨界磁場でリミット。実績が多い。

– 常伝導方式



- 高周波(eg. 11GHz)が必要で技術的難易度が高い。実証されている加速勾配が超伝導より高い。

2. e^+e^- リングコライダー



- 500 GeV以上は事実上不可能
- 低エネルギー(Z-pole)で有利

3. 将来技術(プラズマ加速、 μ コライダー)

- 将来ブレークスルーになり得るが予測困難。

ヒッグスファクトリーの概要

	ILC250	CLIC380	FCCee	CEPC
方式	線形・超伝導	線形・常伝導	円形	円形
サイト	日本	CERN	CERN	中国
エネルギー	250 GeV	380 GeV	240 GeV	240 GeV
長さ	20 km	12 km	100 km	100 km
現状	TDR	CDR	CDR	CDR
完成時期	2030年台前半	?	?	2030年台前半?
目下の課題	国際分担 政府の決断	CERN将来計画 技術設計	トンネル費用	技術的完成度 中国政府の意思決定

Higgs factoryとしての物理性能は概ね同等

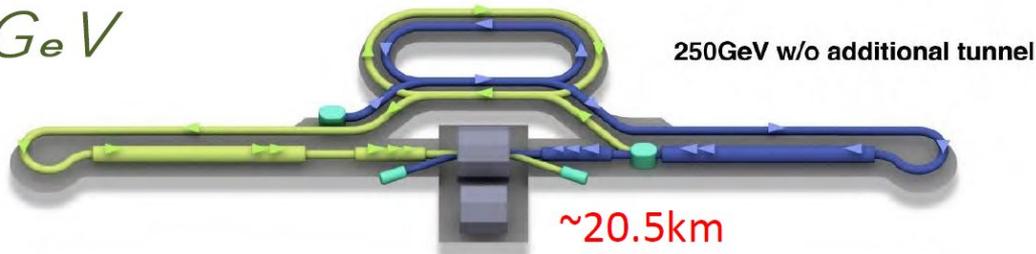
(線形は偏極可能、円形はルミノシティが多少高い)

“As Higgs factories, all the four contenders have a similar reach, as established during the Open Symposium.” (Physics Briefing book)

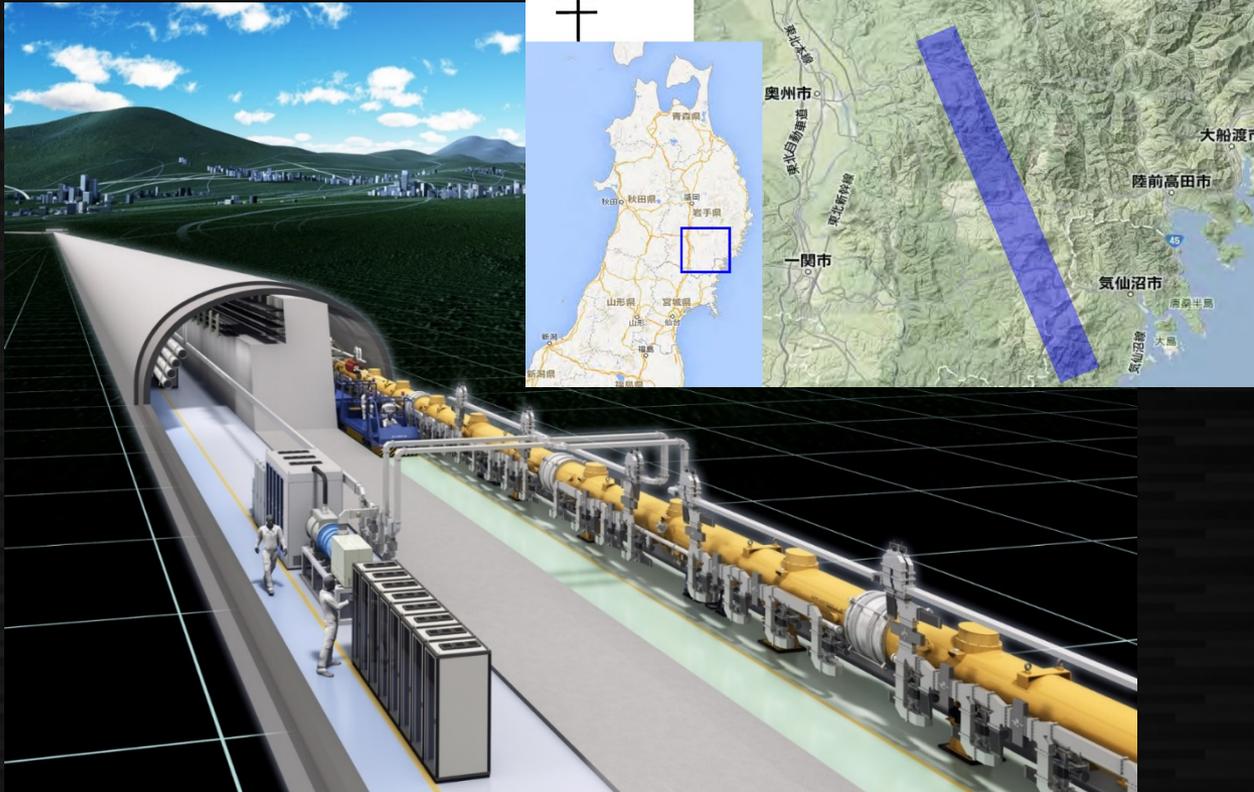
- ILC250はTDRが完成し、すぐ建設可能な唯一のプロジェクト
- コスト面、アップグレード可能性も考慮すべき

ILC (250 GeV)

ILC 250GeV



国際協力で日本に
建設を目指す超伝導
 e^+e^- 線形加速器
候補地: 北上山地



主な技術要素:

- 電子・陽電子源
- 前段加速
- ダンピングリング
- 主線形加速器
- 最終収束系
- 測定器
- ビームダンプ

ILC: 超伝導加速空洞

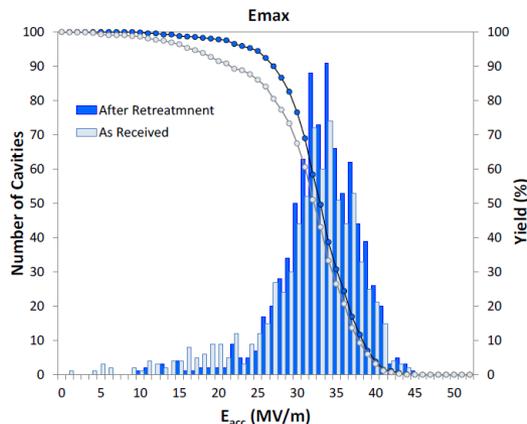
ILC加速空洞の目標性能: 単体35 MV/m, 平均31.5 MV/m
 Q (蓄積効率のようなもの) > 1×10^{10}

ILCとほぼ同じ構造の空洞が
 Euro-XFEL (800台, DESY, 2017-),
 LCLS-II (300台, SLAC, 2020秋-)
 ですすでに製作されている。



ILC 9セル空洞

- 欧州XFEL超伝導加速空洞実績:
 - 量産実績2 x 400台
 - 最高電界 (A社: 400): 34.7 MV/m
 (B社: 400): 31.5MV/m
 (全体): 33.0 MV/m



空洞製造 内面研磨 回数	E-XFEL-A 実績 電界: [MV/m] 率: [%] (Q値達成含)	ILC 計画 電界: [MV/m] 率: [%] (Q値達成含)
1回目	33 MV/m 63%	35 MV/m 75%
2,3 回目	33 MV/m 82%, 91% (2, 3 回表面処理)	35 MV/m 90%

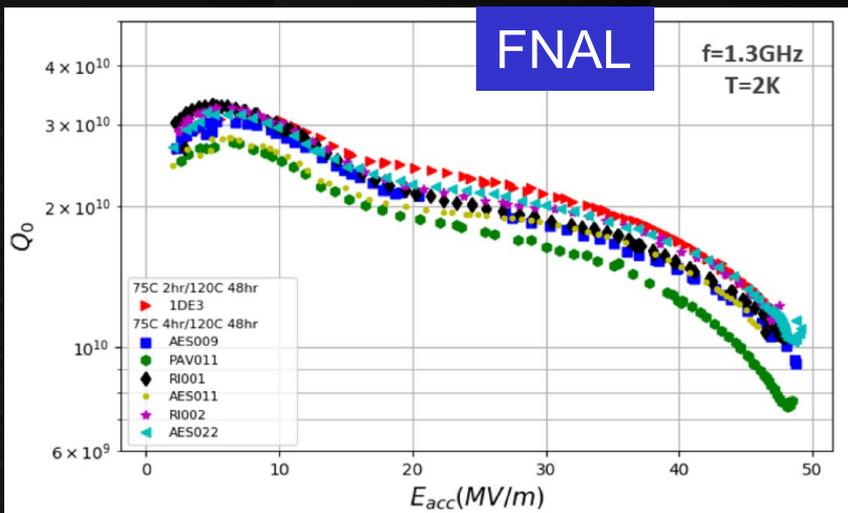
• E-XFEL実績: ILC 計画目標に対して、電界、Q値を総合し、約90%の技術レベルを達成。

EU, FNAL, KEK
 それぞれでILCに
 近い性能を達成

ILCのコスト評価は
 Euro-XFELの
 実績による。
 大幅なコスト、納期
 超過のリスクが
 少ない。

ILC: 高加速勾配化への取り組み

空洞プロセス



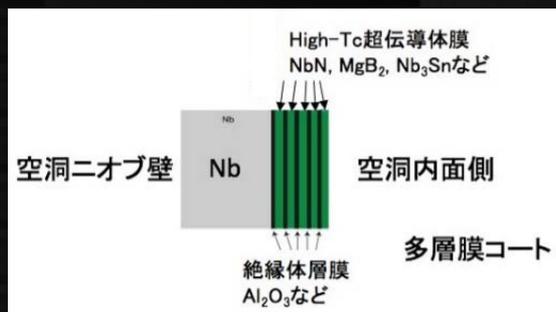
75度/120度の2段階プロセスで真空bakingを行った空洞で**49 MV/m**を達成 (空洞7台) KEKで再現実験中別にN-dopingでHigh Q cavityも

日米政府主導の共同開発Gによる研究が進んでいる。

超伝導薄膜

Nb₃Sn等のH_cの高い超伝導材料をNb上に薄膜形成することで、原理的に高い加速勾配が得られる。

Material	T _c	H _c (0)	H _{c1} (0)	H _{c2} (0)	λ (nm)
Nb	9.2 K	0.20 T	0.18 T	0.28 T	40
NbN	16.2 K	0.23 T	0.02 T	15 T	~350
Nb ₃ Sn	18 K	0.54 T	0.05 T	28 T	~100
MgB ₂	40 K	0.43 T	0.03 T	3~60 T	140

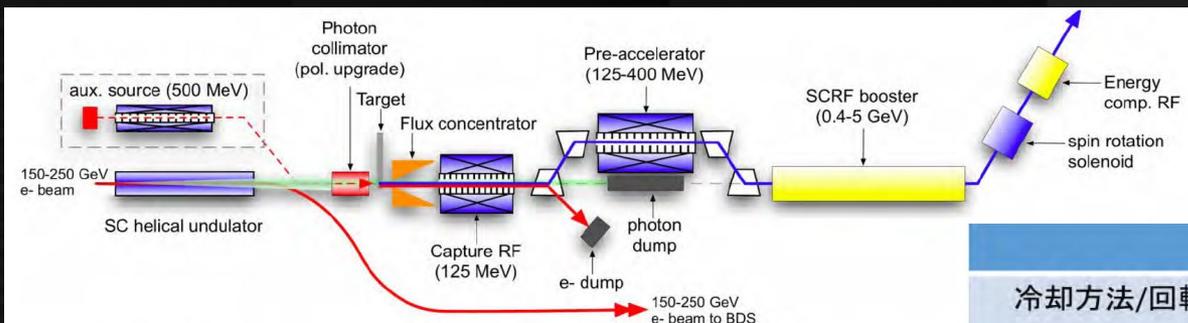


空洞の製作には成功している性能を出すには10年単位の時間が必要?

50 MV/mで1-2 TeV e⁺e⁻ colliderに手が届く

陽電子源

ILC: 陽電子源/最終収束系



両方式ともターゲットが主要課題。準備期間に実証。

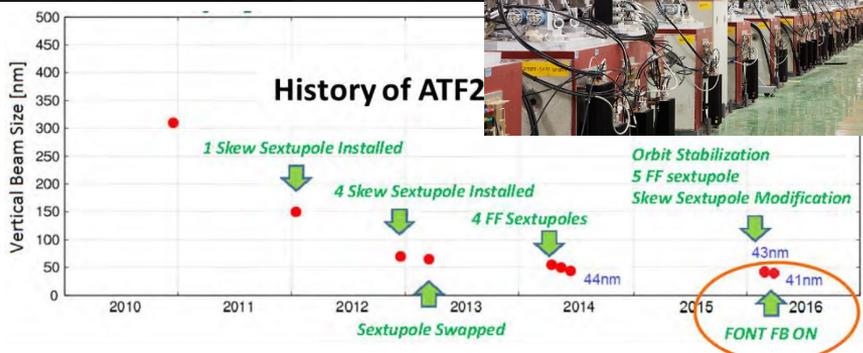
アンジュレータによる偏極陽電子生成
従来方式(大電流Linac)も併せて検討中
(ただし非偏極)

	電子駆動	アンジュレータ
冷却方法/回転シール	水冷/磁性流体	放射・磁気浮上
半径(mm)	250	500
重量(kg)	65	50*
接線速度(m/s)	5	100
回転速度(rpm)	200	2,000
ビーム熱負荷(kW)	12	2
真空圧力(Pa)	10^{-6}	10^{-6}

最終収束系



ATF2

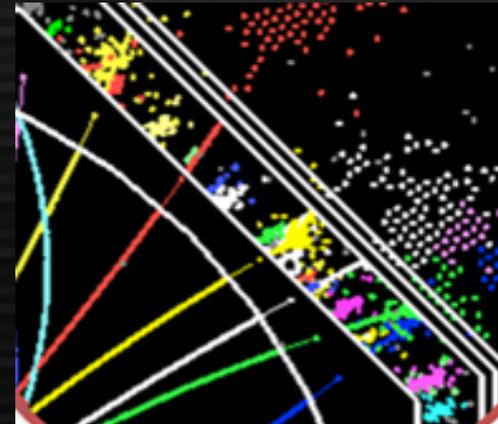
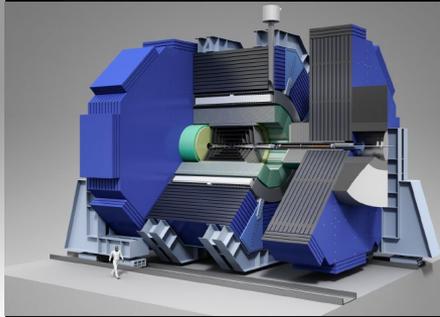
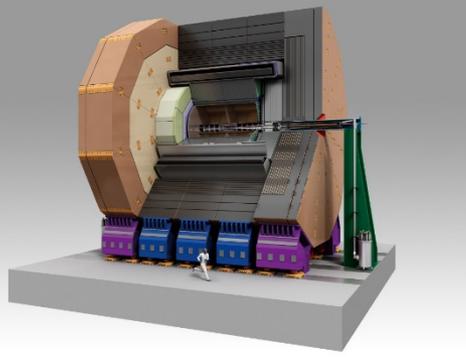


基盤技術は確立されている
いくつかの項目で国際分担
により今後数年で開発を行い
技術的懸念を払拭すると共に
図面レベルの最終設計を完成

KEK ATF2にて1.3 GeVのビームで
41 nmビームサイズを達成 (goal: 37nm)

ILC: 測定器開発

2つの汎用測定器構想



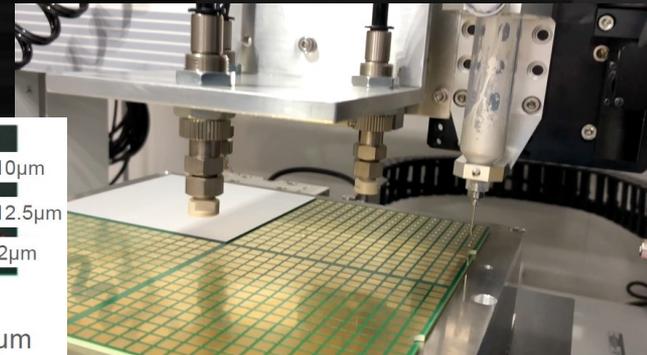
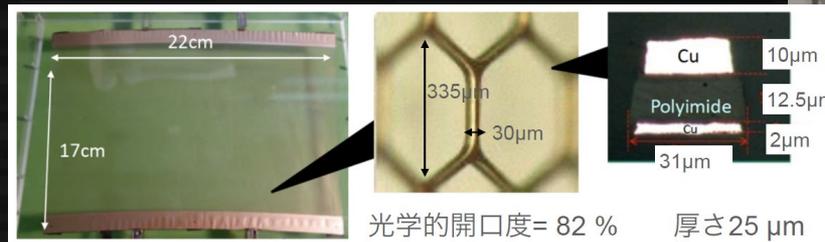
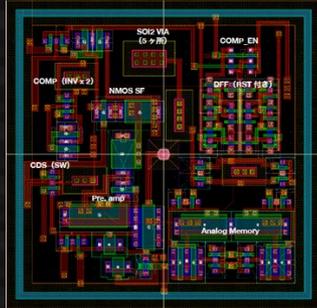
ILD (日欧中心)

SiD (米中心)

線形加速器の衝突点は1つ。“Push-pull”方式、もしくはどちらか一つを選ぶ?

“Particle flow” 5次元カロリメータにより
Jet energy分解能を大幅に向上
深層学習による発展も期待できる
「ビッグデータ」測定器

日本はILD開発中心拠点の一つとして様々な先進・微細技術を開発。新技術による改良も進む。



TPC用広開口度GEMの試作

シリコンECALの組み立て

ILC: 最近の状況

LCWS2019@仙台

2019年

- 3/8 政府見解「国際的な意見交換を継続」
- 国際分担等に関する検討 (KEK国際WG)
- 日米欧政府間・議員間の議論進展
(米国国務省からの支援表明)

2020年

- 日本学術会議マスタープラン(1月)
- 政府見解 (2月、SLAC), ICFA見解
- 欧州戦略 (5月→延期)
- ILC推進国際組織改編 (7月?)
→ KEKを中心に「移行組織」



Melinda Pavek,
Director of
Science,
Innovation and
Development,
US Embassy,
Tokyo

“the U.S. Department of State has done **our initial due diligence**, and we are ready to assist our partner agencies in moving forward with the next major particle physics facility in Japan —the International Linear Collider, also known as the ILC.”

1年～1年半程度の移行期間を経て、本格準備期間を開始
諸課題に取り組んでいる

● ICFAは、ILC研究所の設立および日本でのILCの建設に先立って準備段階が必要であることを注意する。

● ICFAは、準備段階への移行を促進するための国際推進チームの設立を推奨する。
○ 国際推進チームはKEKがホストすべきであり、そのリーダーはICFAの支援のもと選出される。

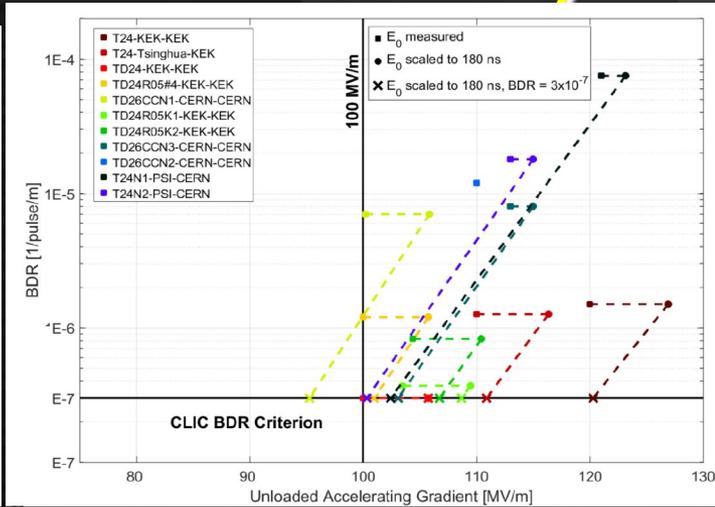
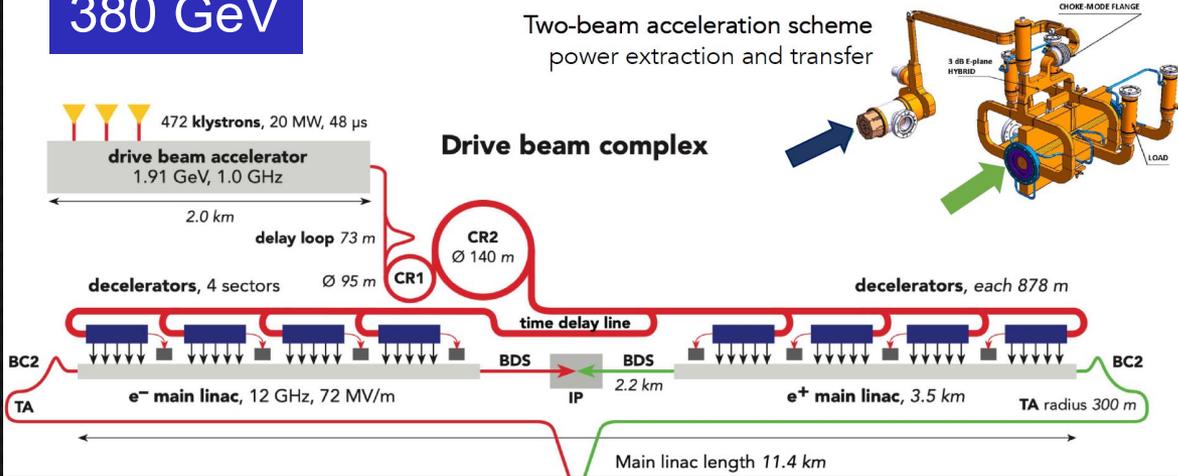
○ チームは、技術、組織、およびガバナンスに関する課題を含む、ILC建設準備段階の計画を策定する。また、準備段階で必要となる活動とリソースを明らかにすることも任務である。計画策定プロセスには、関心を持つ研究所及びコミュニティが関与すべきだろう。

○ ICFAは、これらの推進活動がおおよそ1年で完了すると見込んでいる。その時点で、日本が準備段階へ進むとの意思表示を行い、国際パートナーも同意すれば、準備段階を開始することが可能になるだろう。

CLIC (Compact Linear Collider)

380 GeV

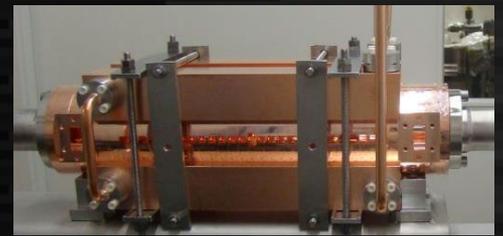
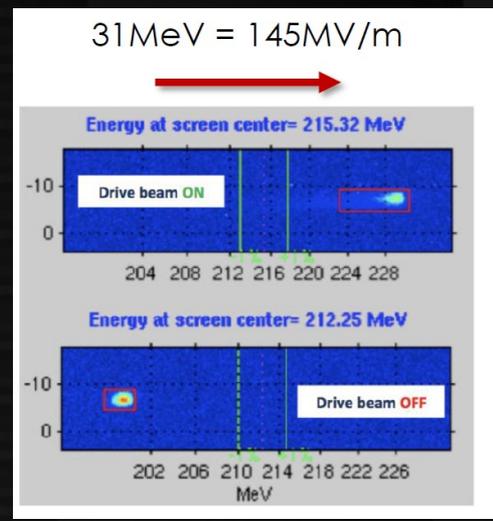
Two-beam acceleration scheme
power extraction and transfer



2ビーム常伝導加速 (従来型もオプション), 72 MV/m

100 MV/mで現実的な
放電レートが得られる予想

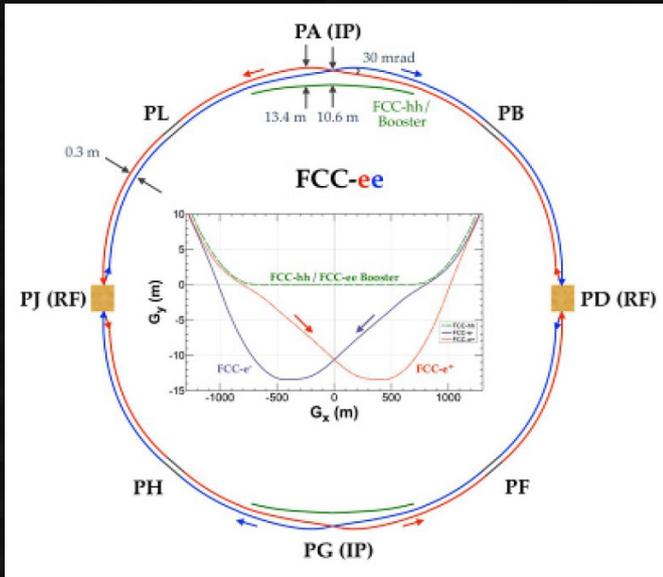
CTF3@CERN (2003-2016)



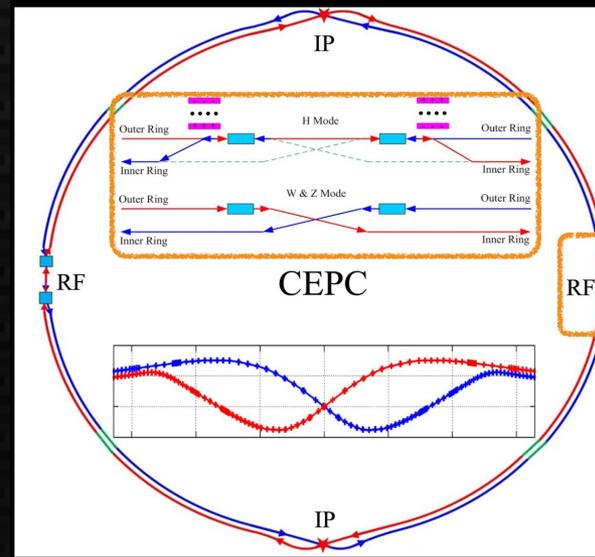
技術的には、2026年
建設開始、2035年
運転開始可能との見解
3 TeVまでupgrade可能

FCCee/CEPC

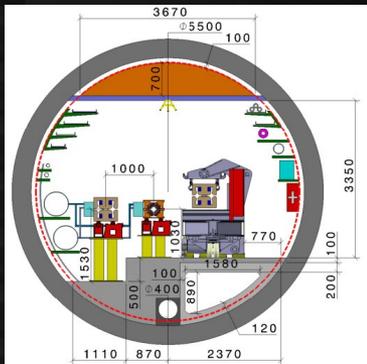
FCCee



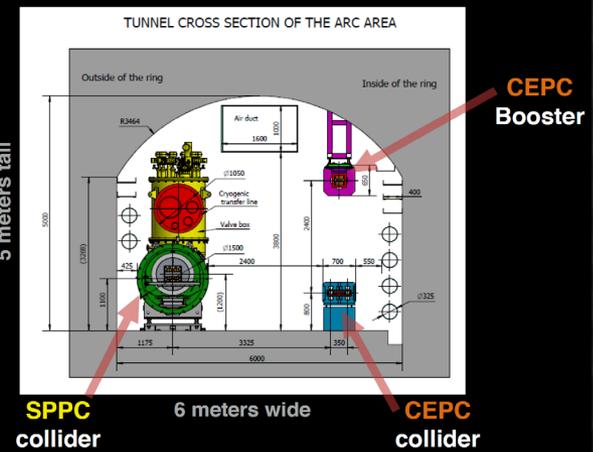
CEPC



周長 ~ 100 km, 2 IP, エネルギー 91-350 GeV (CEPCは240 GeV)



LEPよりルミノシティが遙かに高く、ビーム収束(O(10nm))やビーム不安定性の対策等に詳細な検討と技術が必要。現在はほぼシミュレーションによる検討のみ。



FCCTunnel: $\phi 5500$

CEPCTunnel: 6 x 5 m

ヒッグスファクトリーの概要

	ILC250	CLIC380	FCCee	CEPC
方式	線形・超伝導	線形・常伝導	円形	円形
サイト	日本	CERN	CERN	中国
エネルギー	250 GeV	380 GeV	250 GeV	250 GeV
長さ	20 km	12 km	100 km	100 km
現状	TDR	CDR	CDR	CDR
完成時期	2030年台前半	?	?	2030年台前半?
課題	国際分担 政府の決断	CERN将来計画 技術設計	トンネル費用	技術的完成度 中国政府の意思決定

- Higgs factoryとしての物理性能は概ね同等
(線形は偏極可能、円形はルミノシティが多少高い)
- ILC250はTDRが完成し、すぐ建設可能な唯一のプロジェクト
- コスト面、アップグレード可能性も考慮すべき

ILCへの道筋

※タイムスケールは目安

2020

2021~2024

2025~2033

2034~

建設準備期間

建設期間

運転期間

政府間交渉の進展

政府間
合意

ILC理事会

ラボ間合意

理事会とDG・
執行部による意志決定

準備G
(2020.7-)

LCB/LCC
を改組

ICFA/LCB
とKEKの
主導で
設置

ILC準備研究所

(100人規模へ徐々に拡張)

- KEK内に設置
→サイトへ移転?
- 土木・施設詳細設計
- 加速器諸課題解決の指揮
(各国の開発機関と分担)
- 政府間交渉の材料を提供
(詳細コストの見積もり等)
- 測定器の公募・決定

ILC国際研究所

(最終的に500~1000人規模)

- ILC建設・運転の指揮
- 土木・施設の建設・管理
- 各国の現物貢献の監督・受入
- 測定器国際実験グループ
との調整 (設置・運転)
- アップグレードの開発研究

加速器開発・建設・運転は
欧米アジア中心に分担



ILC中央研究所のスケッチ

ILCを中心とした、

- 電子・陽電子ビーム活用
- 加速器・測定器技術開発

- 物理 (理論・実験) 研究
- 将来計画のための開発・他実験への応用を含む総合的な研究所の建設を想定

250 GeV ILC → 次のステップへ

ILC 250 GeV

- 新物理直接探索
- ヒッグスの精密測定
- Z/W精密測定

~550 GeV

- top湯川直接測定
- Higgs自己結合測定 (s-channel)

1000 GeV

- Higgs自己結合測定 (t-channel)

350 GeV

- top精密測定

新物理のエネルギースケール

- 新粒子直接測定・モデル詳細決定

250 GeV ILCで何が見えるか?

- 新粒子発見・精密測定のずれ発見
→ ずれのエネルギースケールへ
最高エネルギーハドロンコライダーへ
- ずれが見えない
→ 350, 500, 1000 GeVで時空の構造解明へ

>TeVコライダーを可能にする 加速器技術

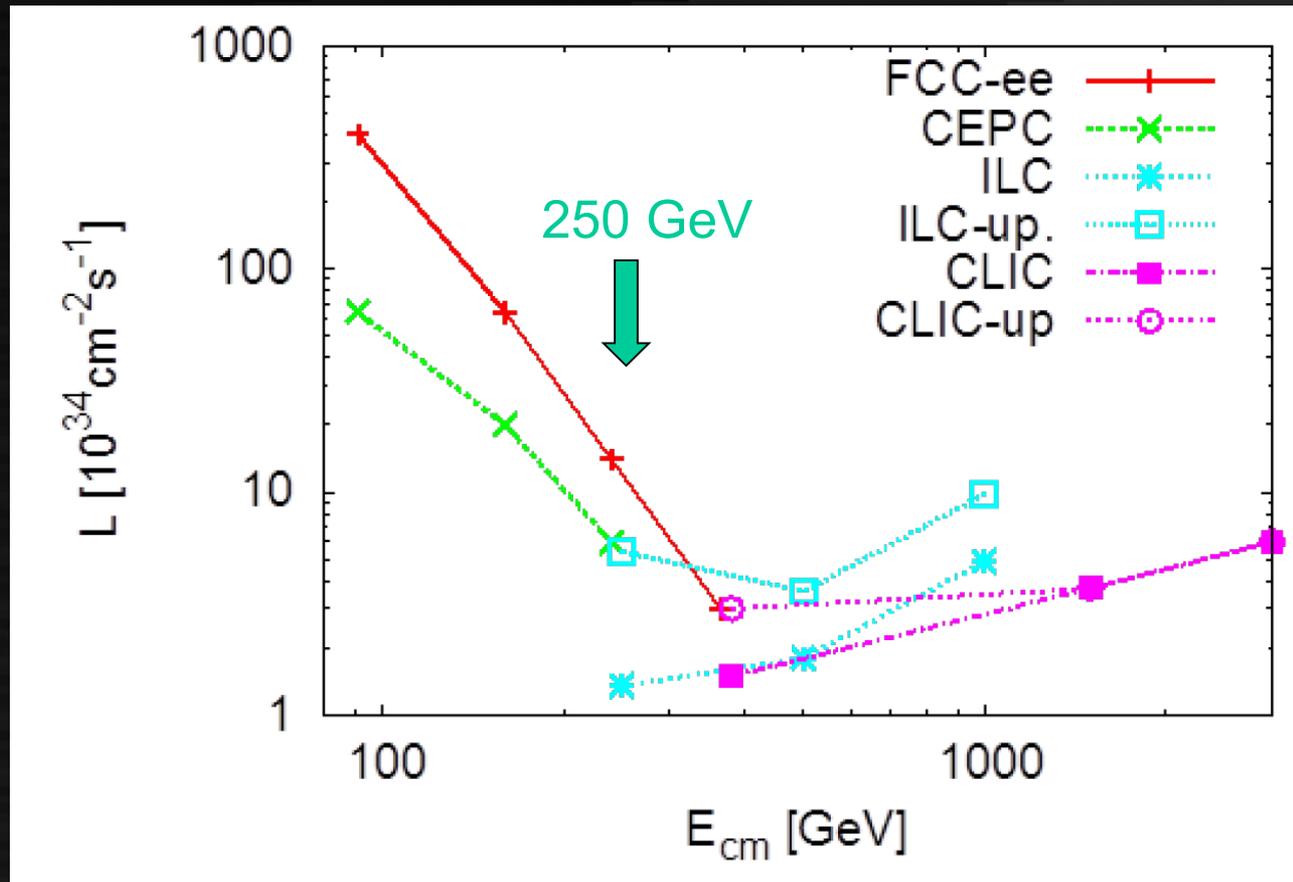
(50 MV/mで1-2 TeVへ)

- 空洞プロセス技術
- High Tc/Hc 超伝導
- 常伝導への置き換え?

2050-2060年代に
次世代レプトン・ハドロンコライダーへ

>10 TeV コライダーへ
プラズマ・μコライダー

ルミノシティの比較

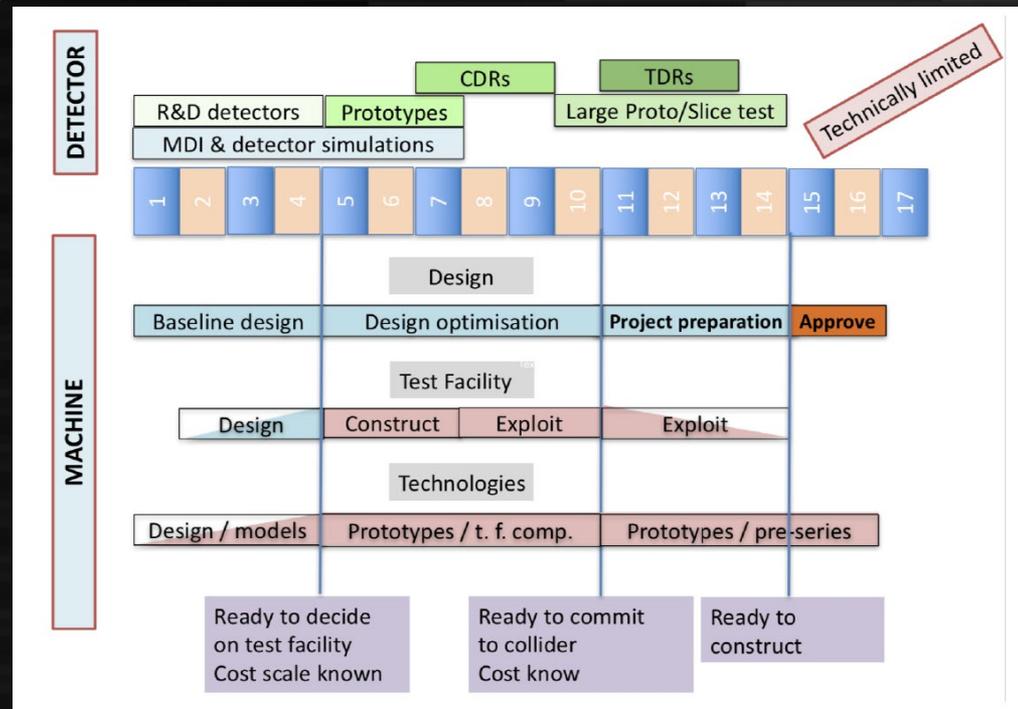


LCは偏極が使える、実質的なルミノシティが2-3倍増加
FCC, CEPCは2IP合計

ミュオンコライダー

- リングコライダー of O(10 TeV)
- ミュオン生成に二つの方式 (proton, positron)
- 限られたactivity (protonは5年前にstop, positronは継続中)
- 二つの問題
 - 崩壊電子のバックグラウンド
 - 環境中へのニュートリノ放出による放射線

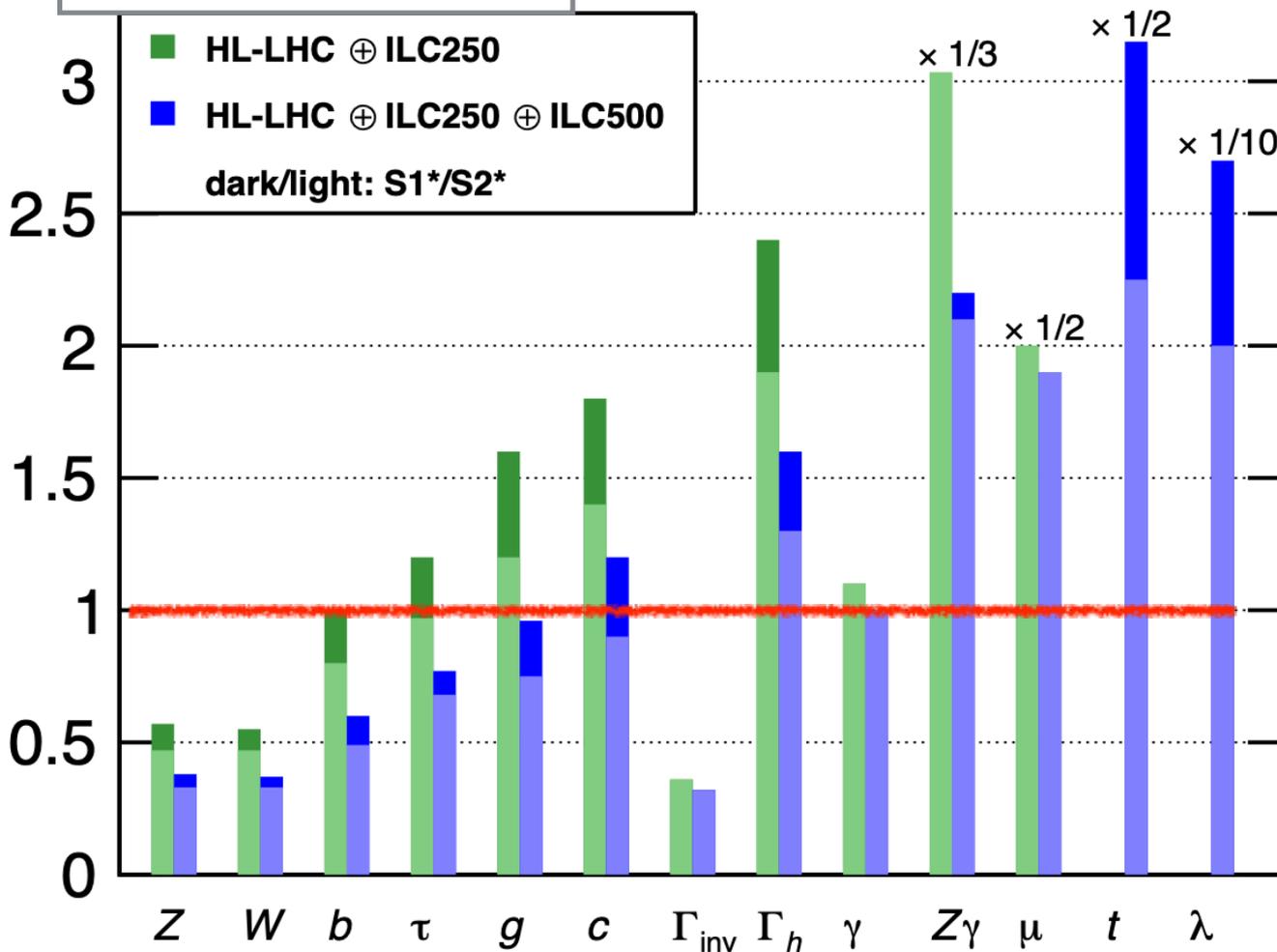
- 実現には長期の集中的な開発研究が必要
- 最短で30年で完成



プラズマ加速

- Target: 2035-40年にMulti-TeV colliderのTDR
- 3つの方式
 - Laser driven
 - Electron driven
 - Proton driven
- GeVまでの電子加速は実証されている
- 様々な課題
 - 安定した加速
 - エミッタンス保持
 - 大電流、高エネルギー

3.5 モデル非依存フィット

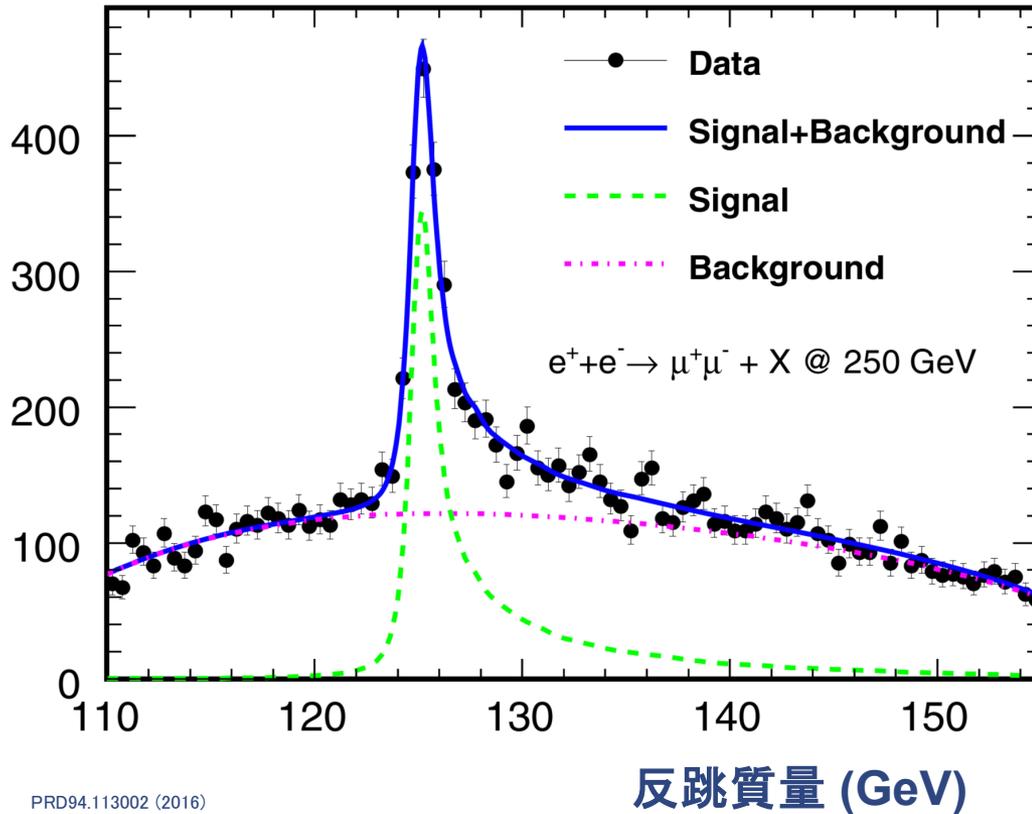


ILC なら目標の 1%-レベルの精度が主要なヒッグス結合の全てについて達成可能

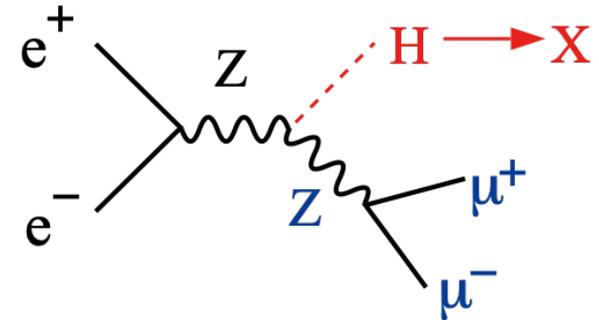
反跳質量測定

ヒッグスの様々な分岐比、結合定数、全幅のモデル非依存な決定への鍵

250 GeV ILC での反跳質量分布



PRD94.113002 (2016)



$$M_X^2 = (p_{CM} - (p_{\mu^+} + p_{\mu^-}))^2$$

ヒッグスを直接見なくても
ヒッグス生成の検出が可能

→ ヒッグスの崩壊モードに依らず
ヒッグス生成断面積の絶対測定が可能

→ ヒッグスの不可視崩壊も検出可能

250 GeV は反跳質量測定に最適

$\sigma(HZ)$ のモデル非依存な絶対測定 → ヒッグス結合の絶対測定