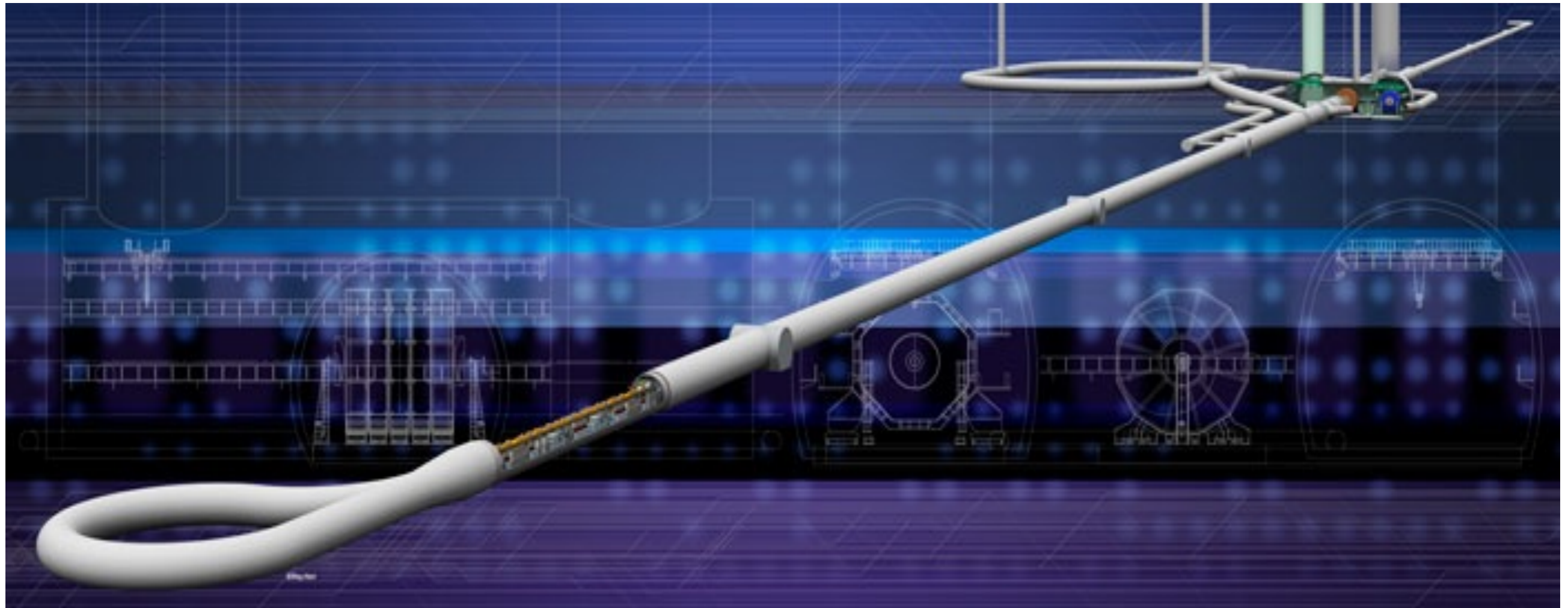




ILC の物理の意義

- 究極の統一を求めて -



高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

藤井恵介

2019/06/07 メカワークショップ

素粒子物理学とは

自然の究極の構成要素を探求し
その間の相互作用を解明することを目的とする学問

最終目標

物質、力、そして時空
の全てを一つの原理にまとめる
究極の統一

統一の系譜

これまでの成功の例

ニュートンの
運動方程式

地上の法則と天上の法則の統一
(りんご) (天体)

マックスウェル
方程式

電気と磁気の統一 → 電磁気学

アンシュタインの
相対性理論

特殊相対論：**時間と空間**の統一 → 時空
一般相対論：**時空と重力**の統一
(重力を時空の幾何学に)

変形し運動する時空：時空は空っぽの入れ物ではない！

他の力も時空の幾何学に統一しようとするも成功を見ずに他界

場の量子論

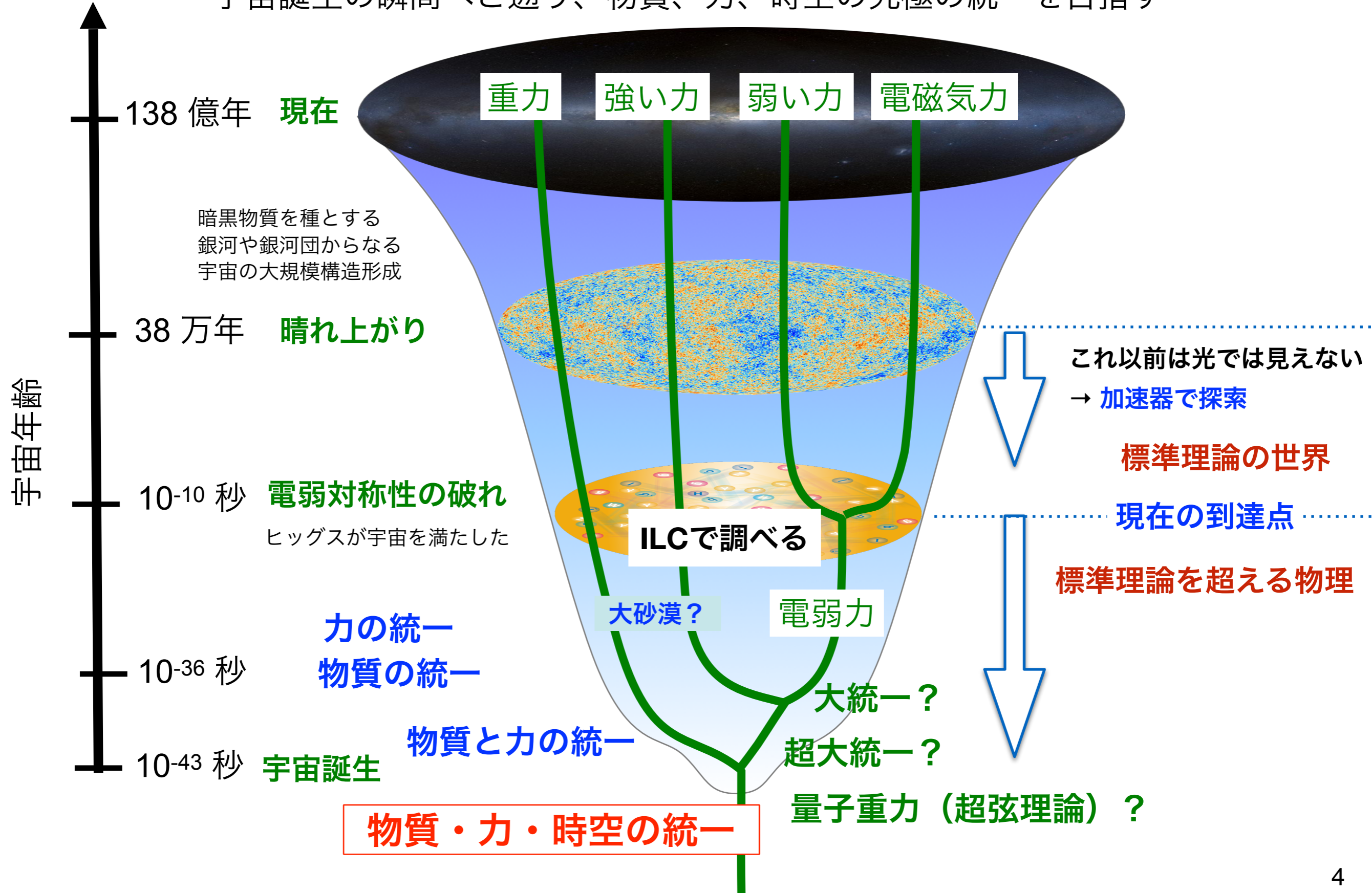
粒子性と波動性の統一

時空は粒子を作ったり消したりする能力を持つ：時空は空っぽの入れ物ではない！

その後の歩み：量子力学を受け入れ、先に重力以外の3つの力の統一を目指す

究極の統一を求めて

宇宙誕生の瞬間へと遡り、物質、力、時空の究極の統一を目指す



現在の到達点＝標準理論

物質粒子、力の粒子、ヒッグス粒子からなる世界像

物質粒子 (クォークとレプトン)

ゲージ粒子 ($\gamma, W/Z, g$)

電磁気力も弱い力も強い力も

ゲージ対称性で決まるゲージ粒子
で伝達される

質量を生む粒子 (H: ヒッグス粒子)

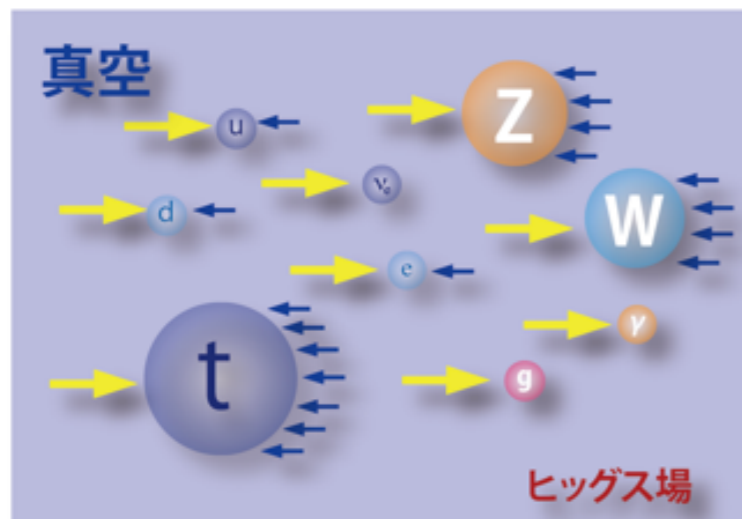
宇宙をヒッグスが遍く満たすことで
素粒子が質量を持つ

1995年 FNAL Tevatron によるトップ (t) 発見
→ 3 世代全ての物質粒子が完結

1983年 CERN (欧州) SPPS によるW/Z発見
→ 電/弱/強全てのゲージ粒子が完結
→ CERN LEP、SLAC (米国) SLC により
ゲージ原理確立

→ 2012年 LHCで発見: 標準理論完成

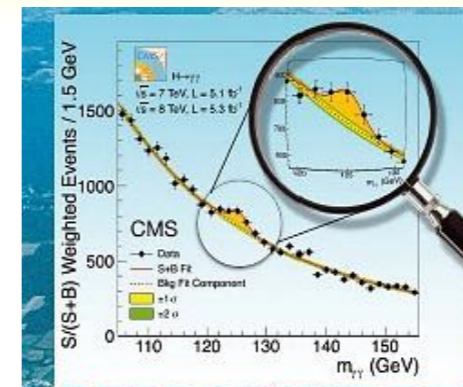
※ 質量＝動かしにくさ



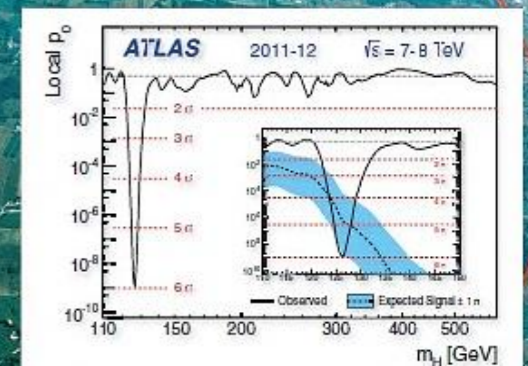
→ 力 ← ヒッグスの海からの力

真空中に充満したヒッグスとぶつ
かりやすい粒子ほど動かしにく
い＝重い

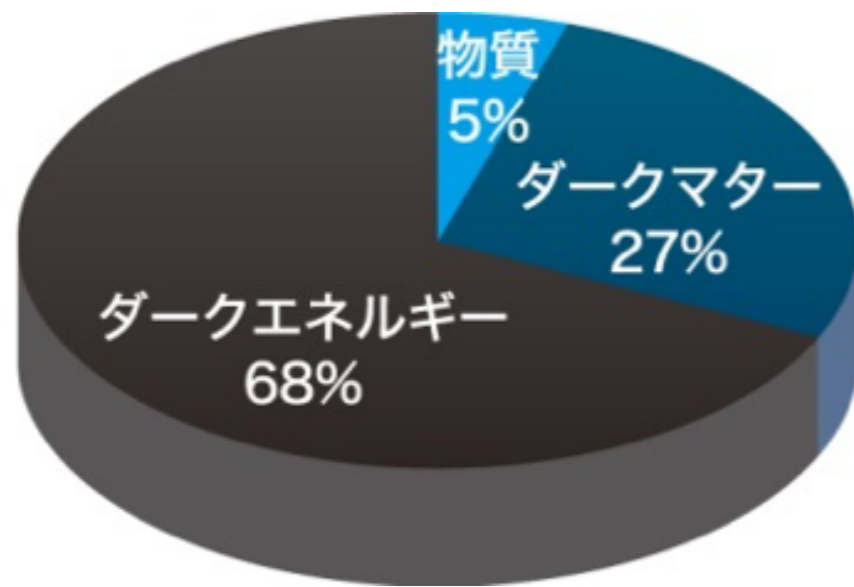
- ※ 真空＝エネルギー最低の状態
- ※ LHC = Large Hadron Collider (大型ハドロンコライダー)



2012年7月4日
CERN がLHCでの
ヒッグス発見を発表



残された多くの謎



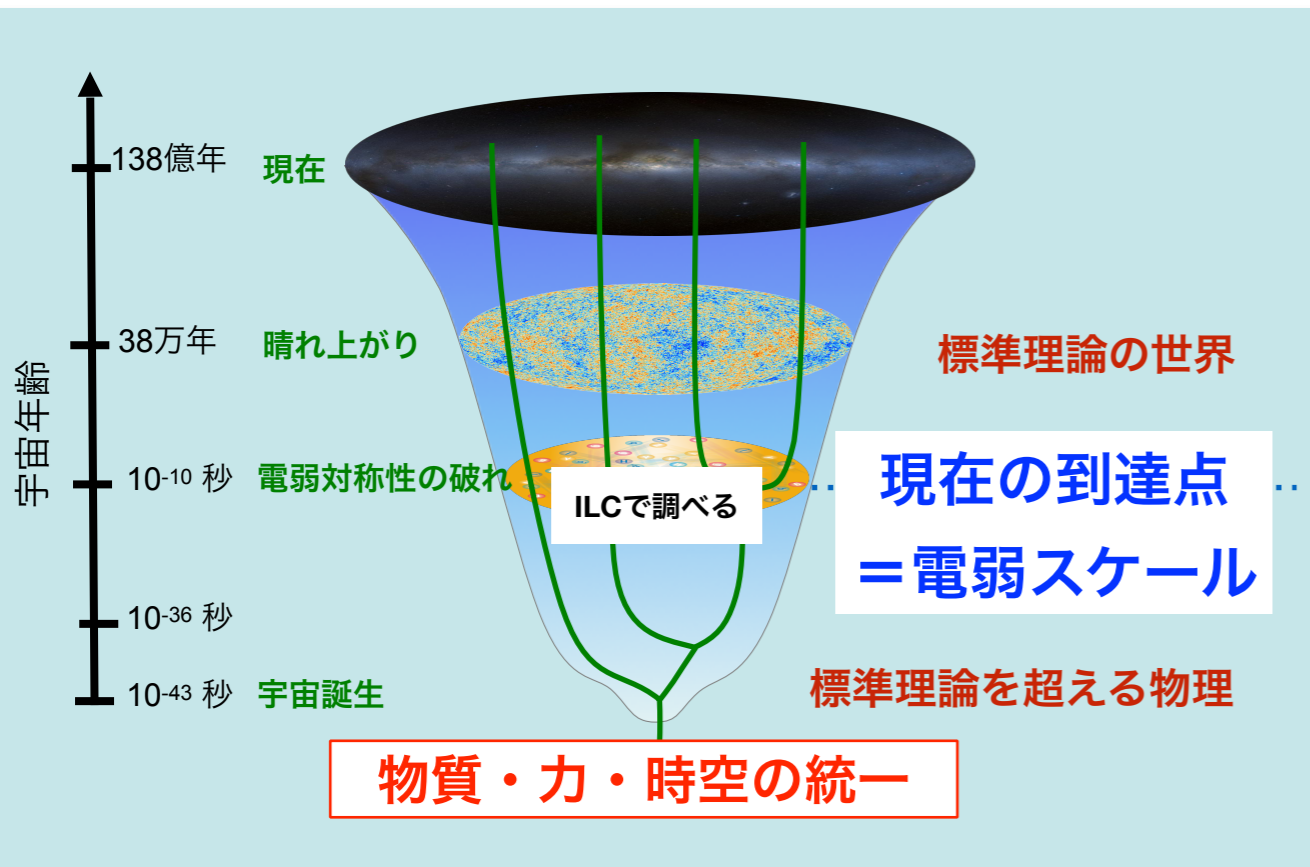
標準理論が説明できるのは宇宙の5%

- 暗黒物質
- 消えた反物質の謎
- ニュートリノ質量/混合
- 暗黒エネルギー
- ...

標準理論の（一応の）完成
= 宇宙創成の瞬間に向けた
新たな旅の始まり

→ **電弱スケール** (=ヒッグスが宇宙を満たしたエネルギースケール) は道半ば

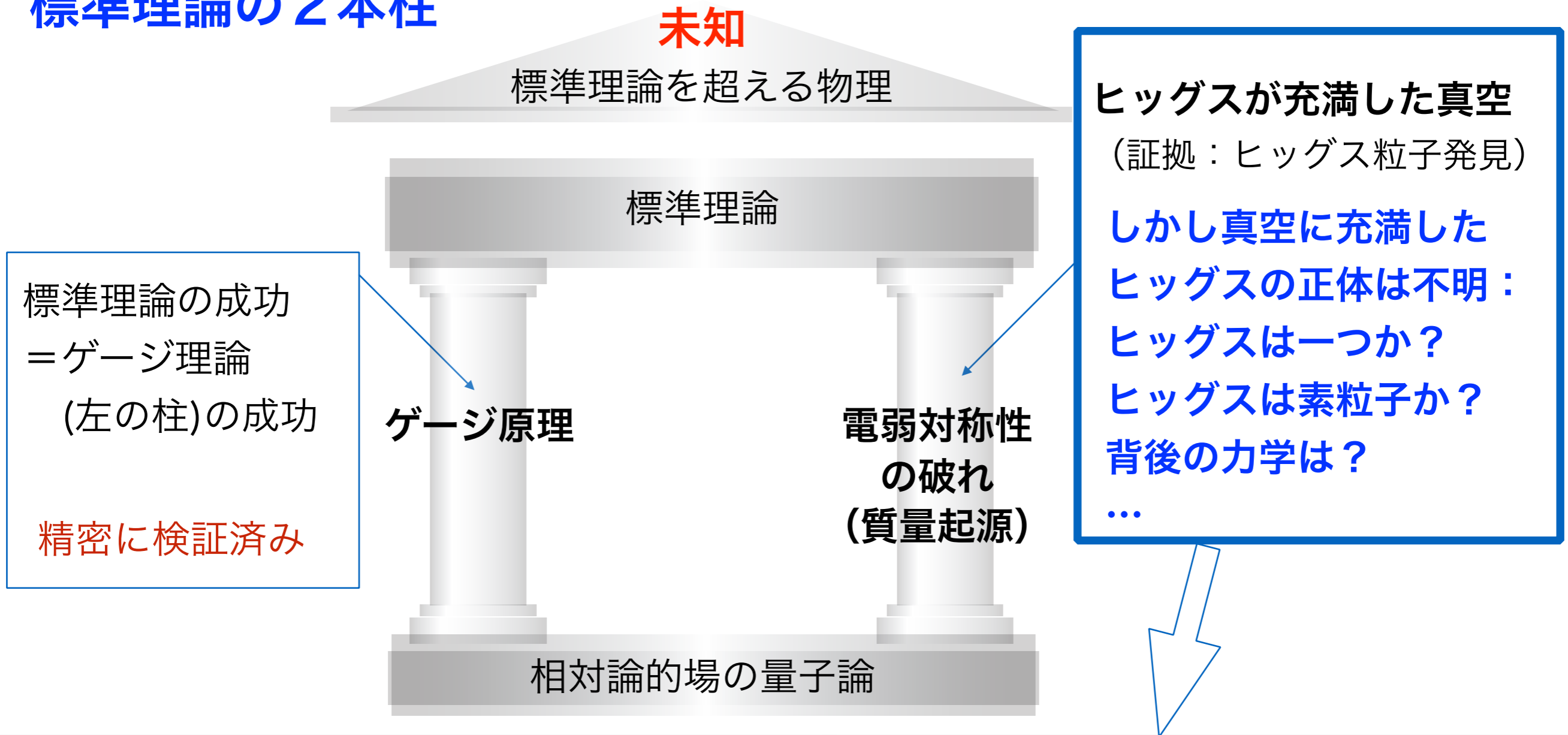
→ **なぜ電弱スケールは重要か？**



なぜ電弱スケールは重要か？

真空に充満したヒッグスの謎

標準理論の2本柱



とりわけ、「なぜヒッグスが宇宙を満たしたのか？」の答えは標準理論の枠外

ヒッグスが宇宙を満たした

電弱スケールが謎を解く鍵

**なぜヒッグスが宇宙を
満たしたのか？**

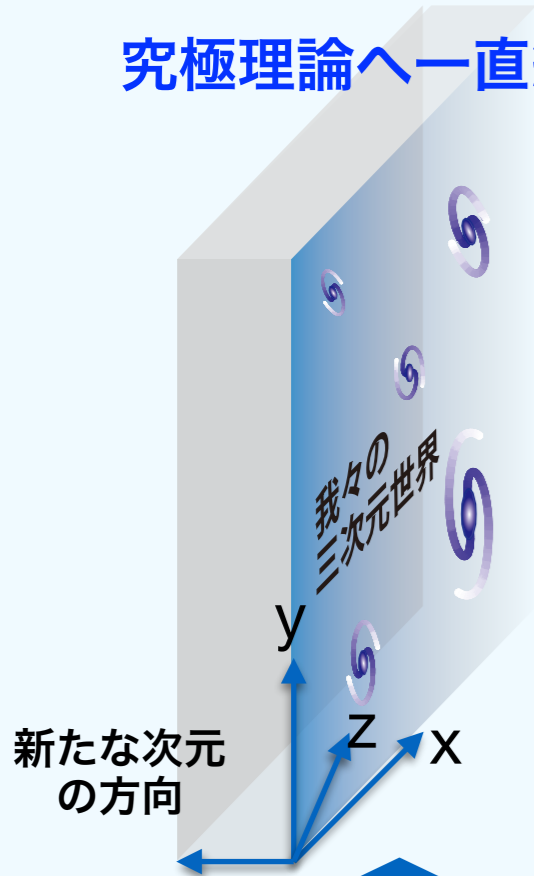
答えによって

**素粒子物理学の将来
(究極の統一への道) は
大きく分岐**

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

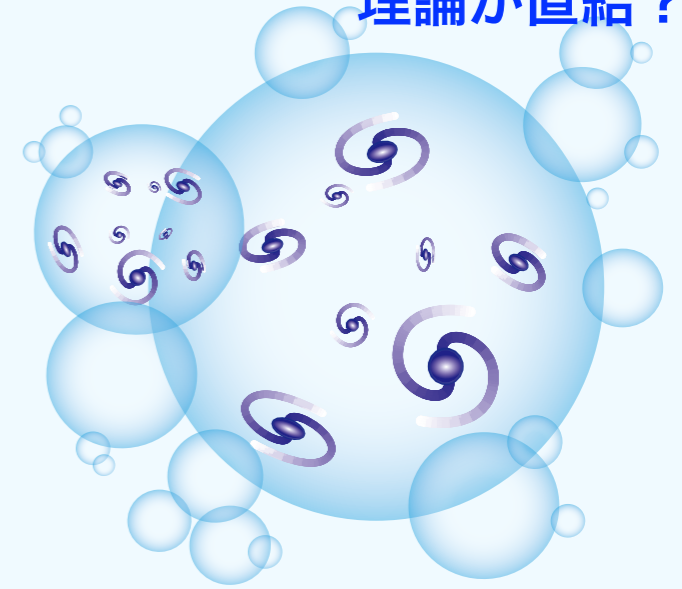


物質構造の拡張
複合ヒッグス



全く新しい原理？
複数宇宙+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」

第三の道：「複数宇宙？」

ILC

※: 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

ILC が進路を決める

250 GeV ILC の物理 - 5つのノーベル賞級発見の例 -

✓ ヒッグスから**超対称性**

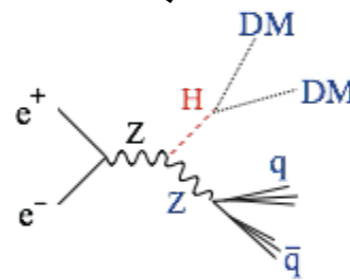
ヒッグス結合定数のズレが発見され、そのパターンが超対称模型の特徴を示す

✓ **複合ヒッグス**

ヒッグス結合定数のズレが発見され、そのパターンが複合ヒッグス模型の特徴を示す

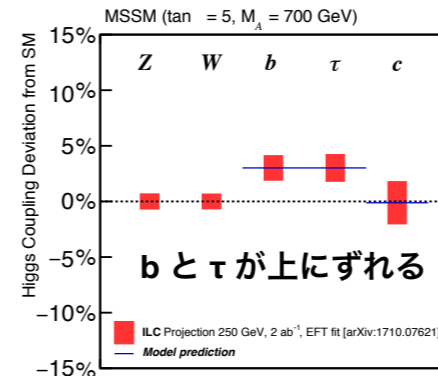
✓ **暗黒物質**の発見 (間接的手法による)

ヒッグスが暗黒物質に崩壊
単一光子過程での暗黒物質生成

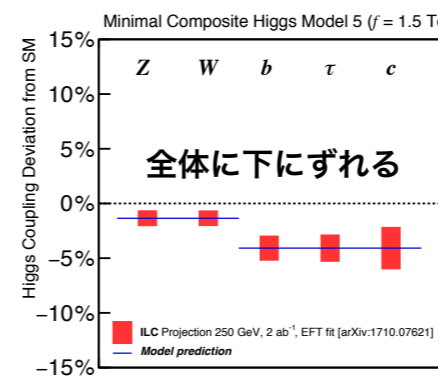


✓ **超対称性粒子**の直接生成

ヒグシーノ(ヒッグス粒子の超対称パートナー) が暗黒物質の場合、LHCの超対称性探索の死角に入りやすい



⇒ 大統一、超弦理論



⇒ 新しい力

⇒ 新しいタイプの

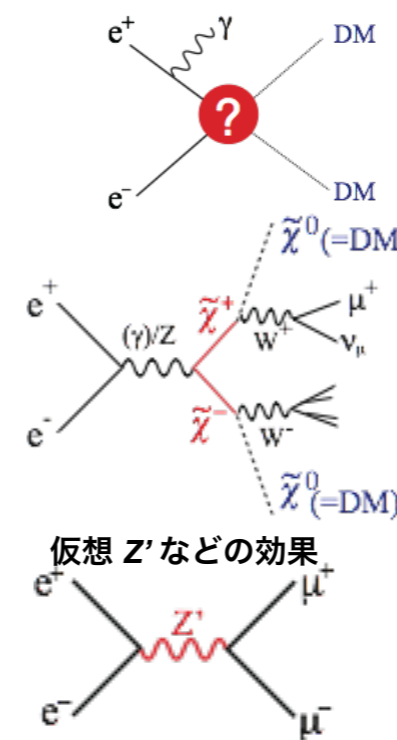
暗黒物質模型

ヒッグスポータル等

⇒ 超対称模型の特定

✓ **余剰次元** (間接的手法による)

物質粒子対生成の生成頻度のズレが余剰次元の存在を示す



⇒ 重力とゲージ力の統一

250 GeV ILC の物理 - 5つのノーベル賞級発見の例 -

✓ ヒッグスから超対称性

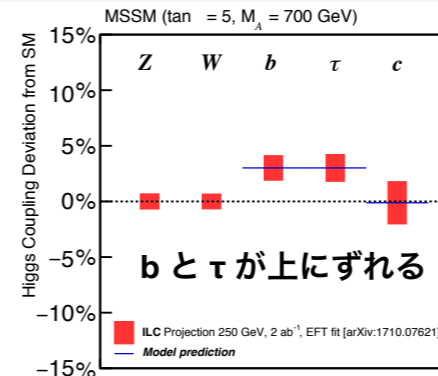
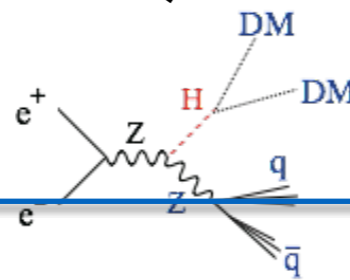
ヒッグス結合定数のズレが発見され、そのパターンが超対称模型の特徴を示す

✓ 複合ヒッグス

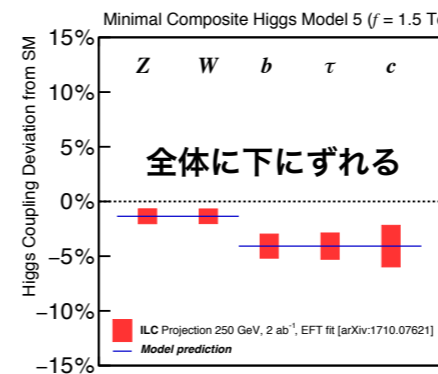
ヒッグス結合定数のズレが発見され、そのパターンが複合ヒッグス模型の特徴を示す

✓ 暗黒物質の発見 (間接的手法による)

ヒッグスが暗黒物質に崩壊
単一光子過程での暗黒物質生成



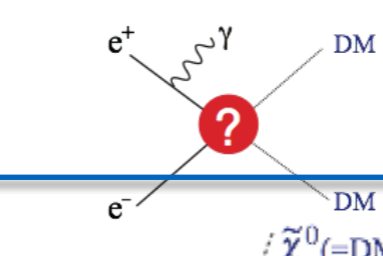
⇒ 大統一、超弦理論



⇒ 新しい力

✓ 超対称性粒子の直接生成

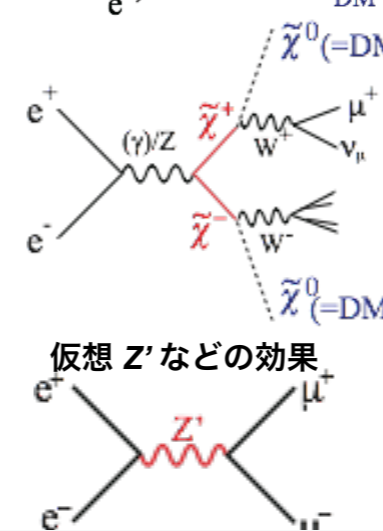
ヒグシーノ(ヒッグス粒子の超対称パートナー)が暗黒物質の場合、LHCの超対称性探索の死角に入りやすい



⇒ 新しいタイプの暗黒物質模型
ヒッグスポータル等

✓ 余剰次元 (間接的手法による)

物質粒子対生成の生成頻度のズレが余剰次元の存在を示す



⇒ 超対称模型の特定

⇒ 重力とゲージ力の統一

どの場合も、TeV以上の新物理と宇宙初期のシナリオに大きく影響

インフレーション、バリオン数生成、ニュートリノ質量生成、暗黒物質の正体...

どの道が正しいかにより
他の大きな謎（暗黒物質、消
えた反物質、ニュートリノの質
量／混合、暗黒エネルギー等）
の答えも変わる

第一の道：「新たな次元」

第二の道：「より深い階層」

第三の道：「複数宇宙？」

究極の統一への正しい道
はどれか？

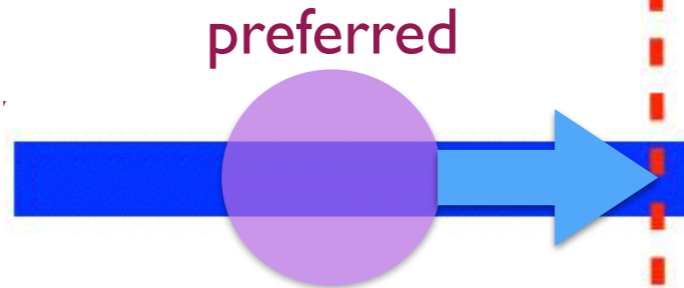
ヒッグス発見以前は、ヒッグスが見つければその質量からどの道に進むべきかが分かると期待していた

Higgs mass range

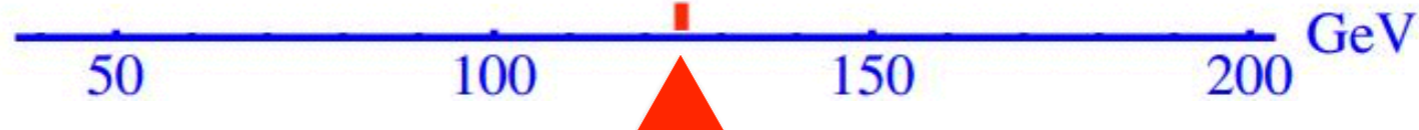
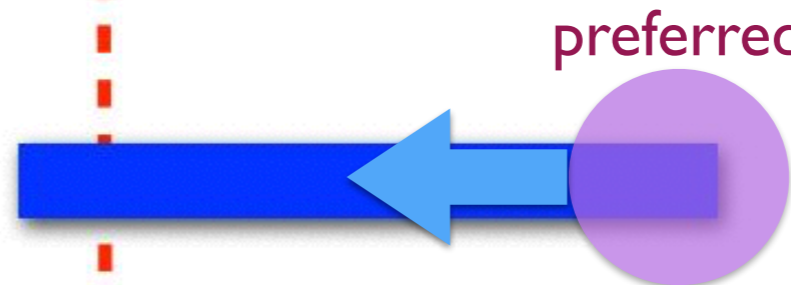
ずっと標準理論のまま



超対称性



複合ヒッグス



125 GeV

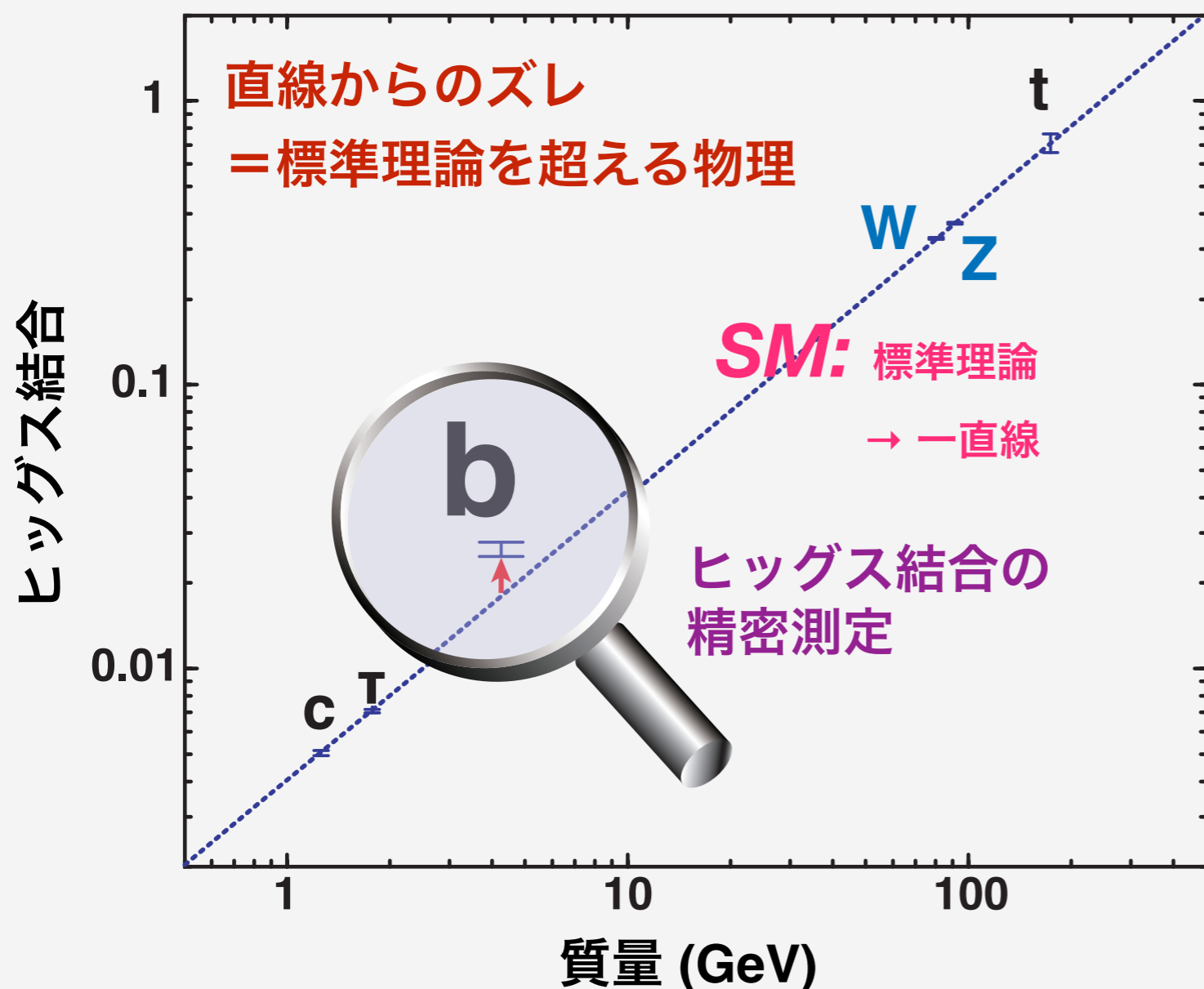
Hyung Do Kim

By A Pomarol

ヒッグスはどれとも言えない微妙な所に見つかった！

質量だけでなく

ヒッグス結合を測る必要あり



※: **ヒッグス結合** = ヒッグス粒子と他の粒子の間の相互作用の強さを表す定数

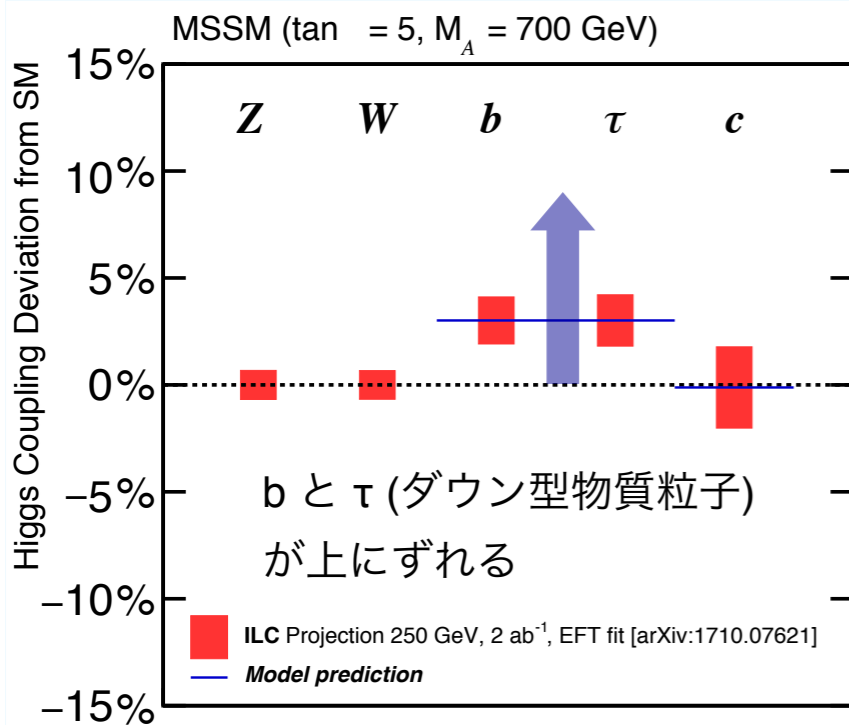
※: **BSM 物理** = **B**eyond the **S**tandard **M**odel
(標準理論を超える物理)

※: **HL-LHC** = **H**igh **L**uminosity **LHC**
(高度化後のLHC)

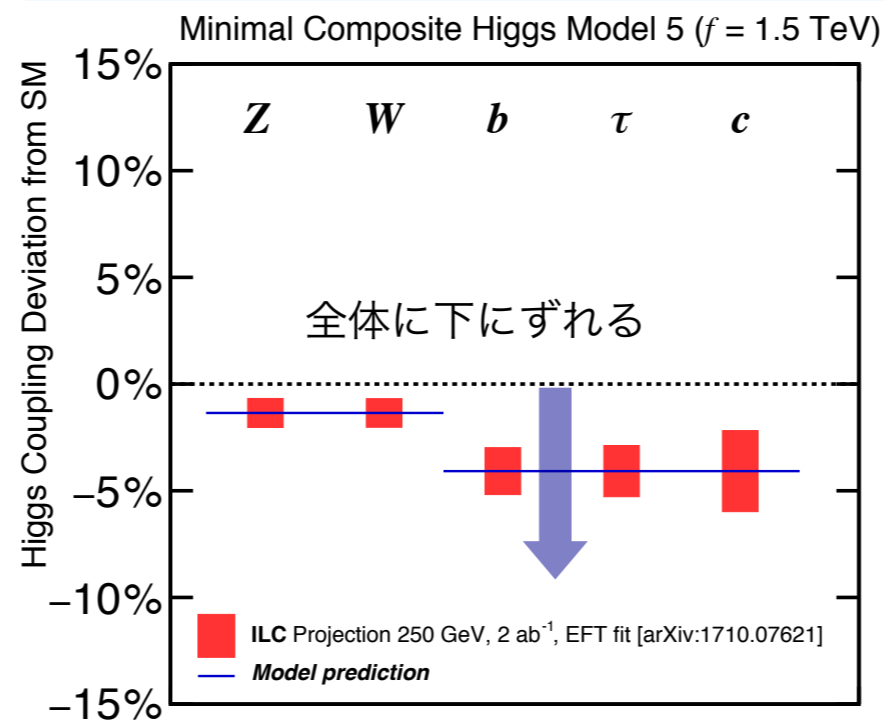
標準理論を超える物理の効果はヒッグス結合の標準理論の予想からのズレとして現れる

3つの道の違いは ズレのパターンの違いとして現れる

超対称性

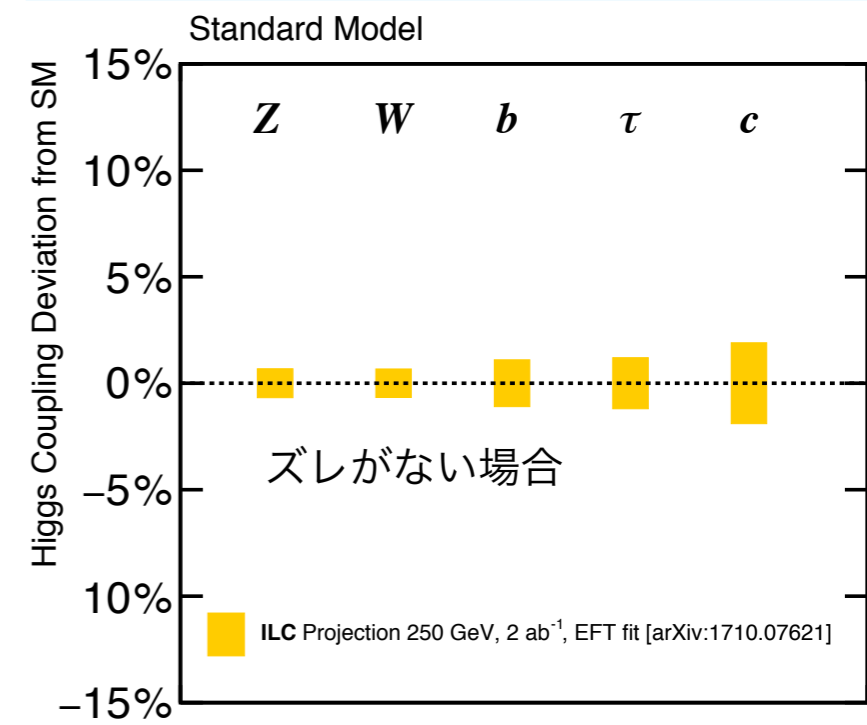


複合ヒッグス



複数字宙?

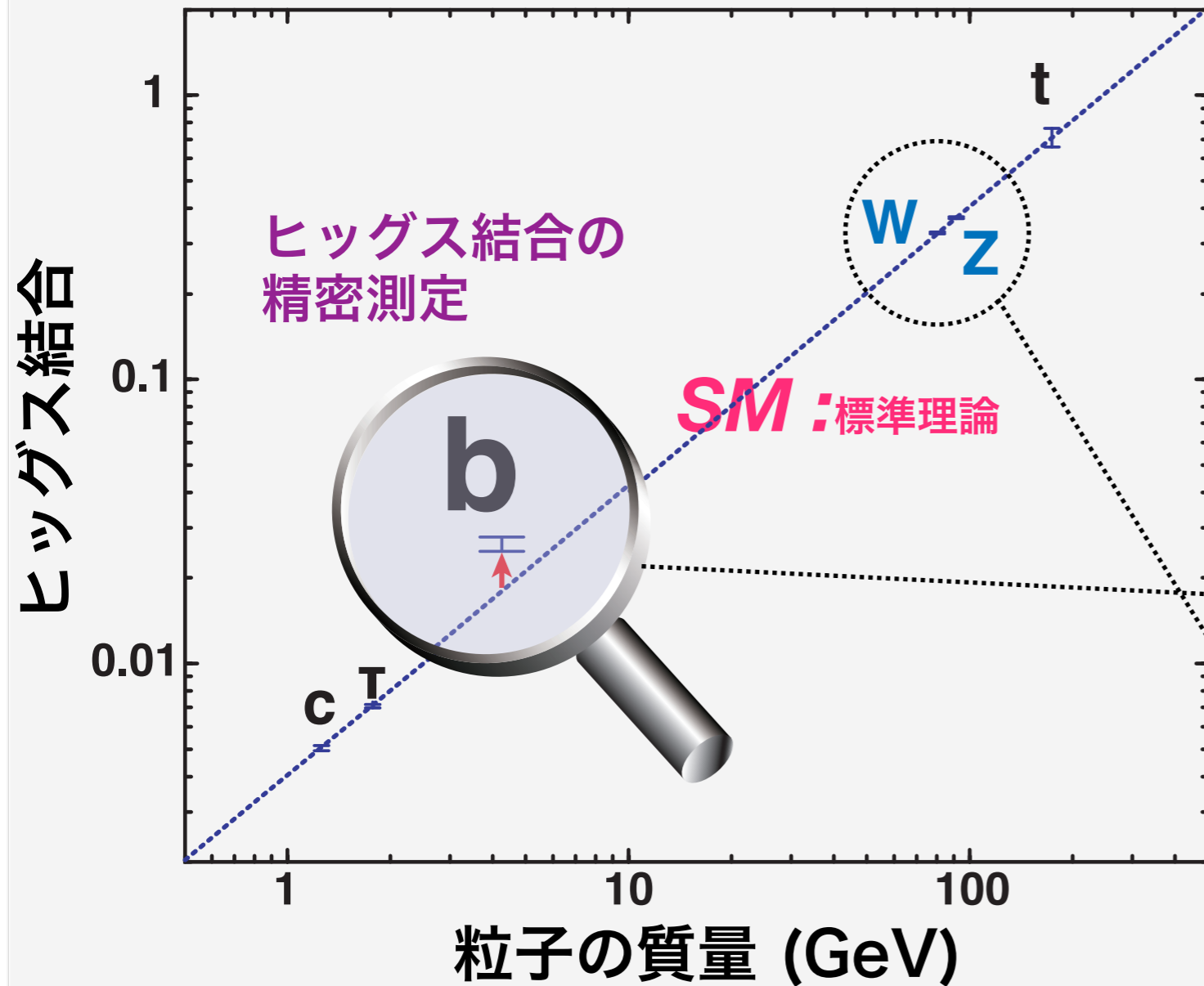
(標準理論)



ズレのパターンから進路が決まる

しかし、これには高い精度が必要

ヒッグス結合と質量の関係



ズレの大きさは新しい物理のエネルギースケール(Λ)による

脱結合定理

$$\Lambda \uparrow \rightarrow SM$$

例 1: 最小超対称性模型

(MSSM : $\tan\beta=5$, radiative correction factor ≈ 1)

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

重いヒッグスの質量

例 2: 最小複合ヒッグス模型

$$\frac{g_{hVV}}{g_{SMVV}} \simeq 1 - 8.3\% \left(\frac{1 \text{ TeV}}{f} \right)^2$$

$V=W/Z$ 複合スケール

新しい物理のエネルギースケール=1 TeV → ズレは高々 ~10%
ズレを見るには 1%-レベルの精度が必要

ヒッグス粒子を大量に作って測る！

ヒッグス工場

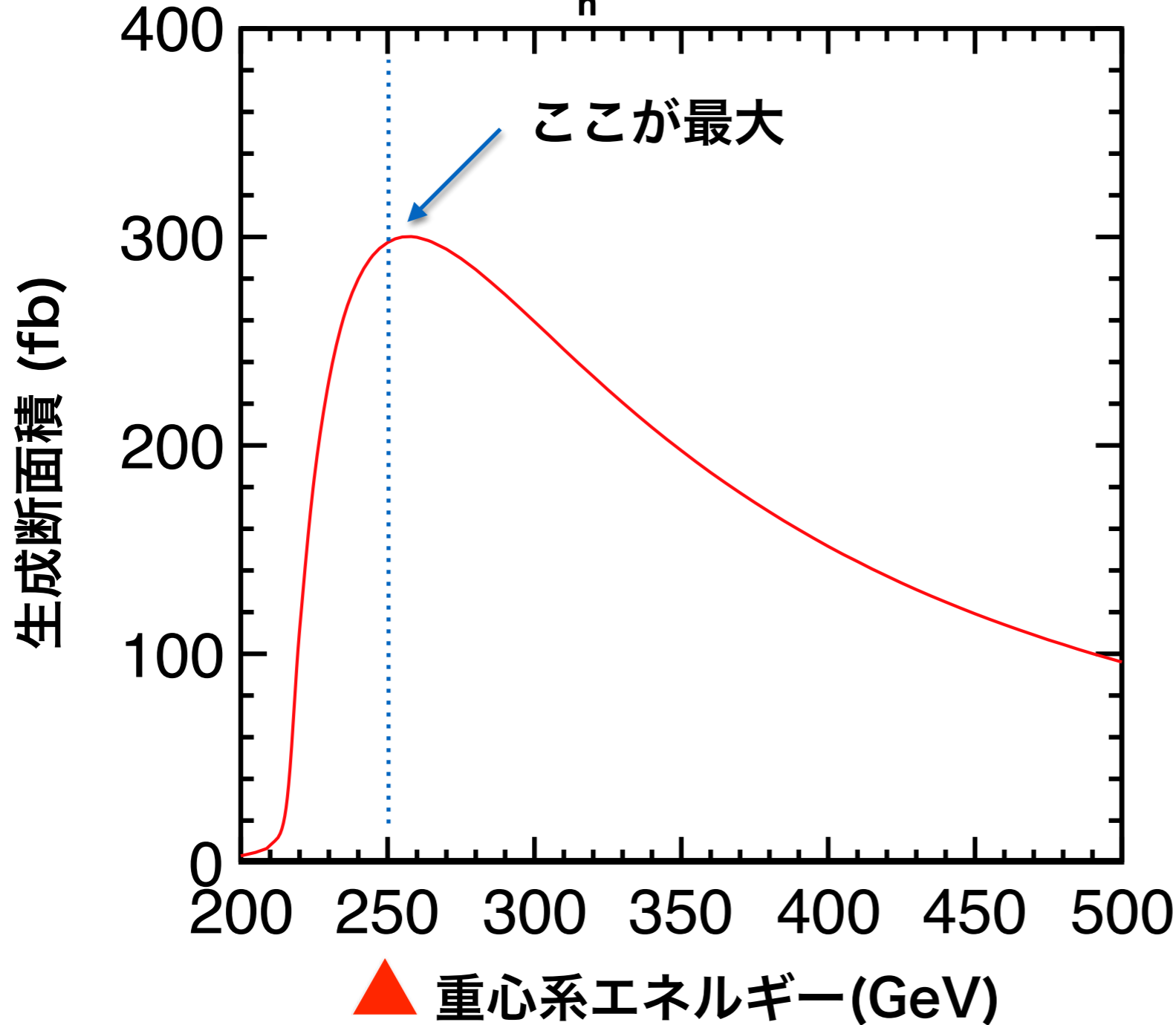
としての

250 GeV ILC

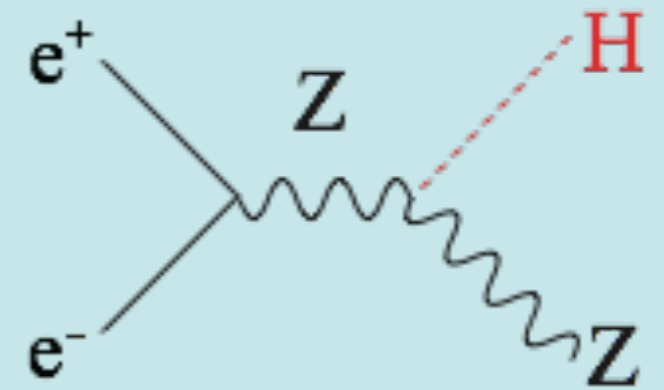
250 GeV は特別なエネルギー

ヒッグス生成断面積が最大！

$P(e^-, e^+) = (-0.8, 0.3)$, $M_h = 125 \text{ GeV}$



※: 生成断面積 = ヒッグスの出来やすさ



ILC での
1 ヒッグス生成で
最も重要な反応過程

(約50万個: 2 ab^{-1})

大量のヒッグス粒子を生成し、精密測定する！

ヒッグス結合の測定精度[%]

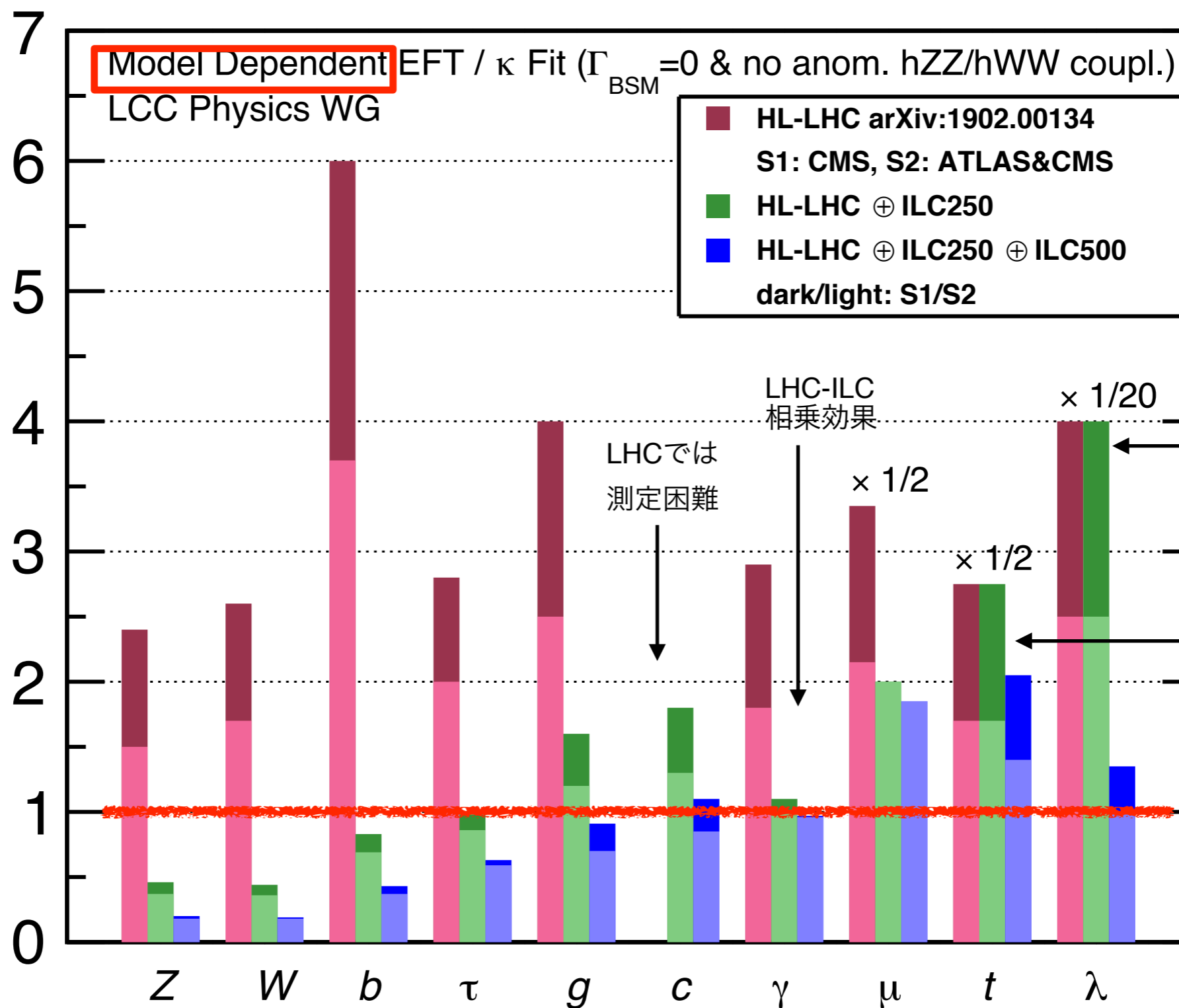


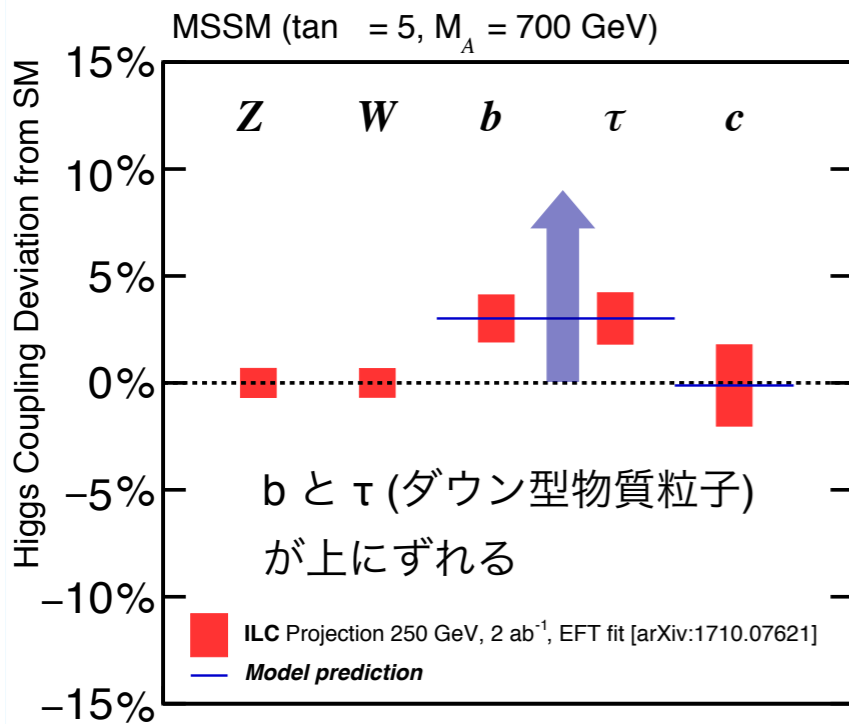
FIG. 1. Projected Higgs boson coupling uncertainties for the LHC and ILC using the model-dependent assumptions appropriate to the LHC Higgs coupling fit. The dark- and light-red bars represent the projections in the scenarios S1 and S2 presented in [9, 10]. The scenario S1 refers to analyses with our current understanding; the scenario S2 refers to more optimistic assumptions in which experimental errors decrease with experience. The dark- and light-green bars represent the projections in the ILC scenarios in similar S1 and S2 scenarios defined in [6]. The dark- and light-blue bars show the projections for scenarios S1 and S2 when data from the 500 GeV run of the ILC is included. The same integrated luminosities are assumed as for Figure 2. The projected uncertainties in the Higgs couplings to $\mu\mu$, tt , and the self-coupling are divided by the indicated factors to fit on the scale of this plot.

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

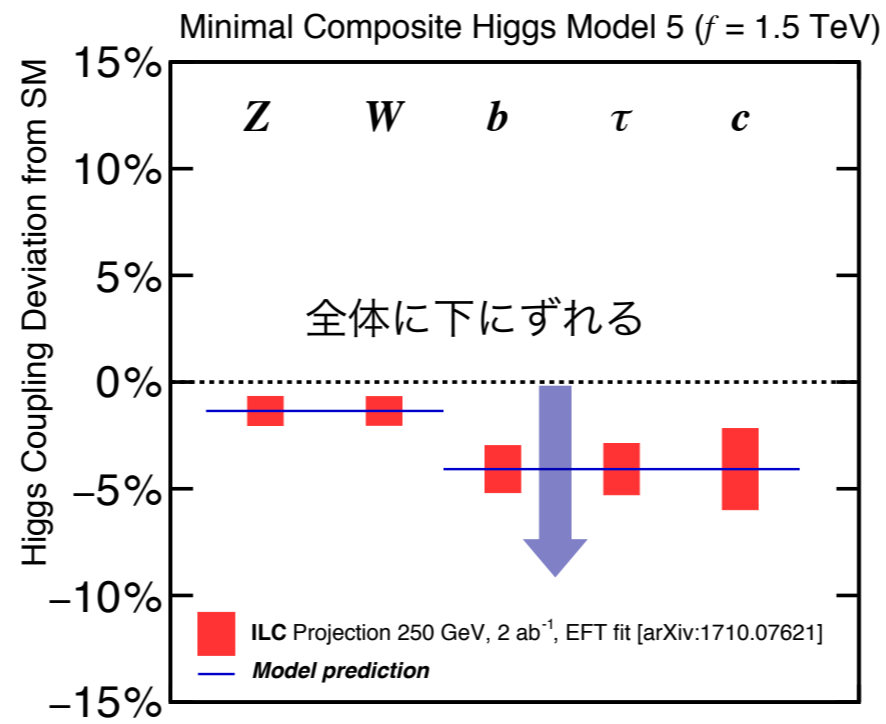
どの道に進むのか？

3つの道の違いはズレのパターンの違いとして現れる

超対称性

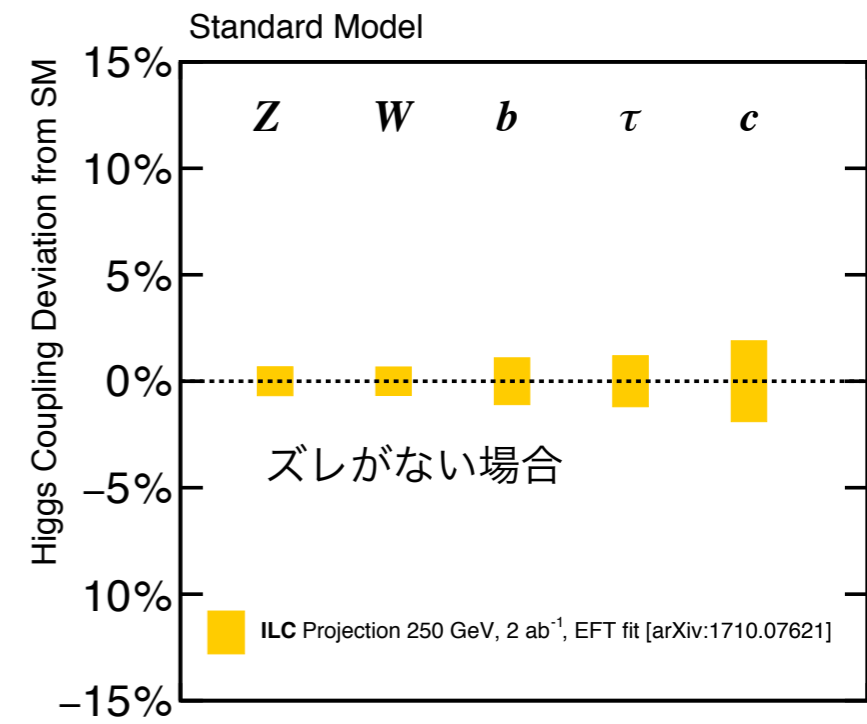


複合ヒッグス



複数字宙？

(標準理論)



ILC の精度があれば、ズレのパターンから進路が決まる

ヒッグス結合測定の新物理への感度

大雑把な方向だけでなくもっと細かいところまで分かる

9つのサンプル BSM 模型の場合の期待されるずれ (%)

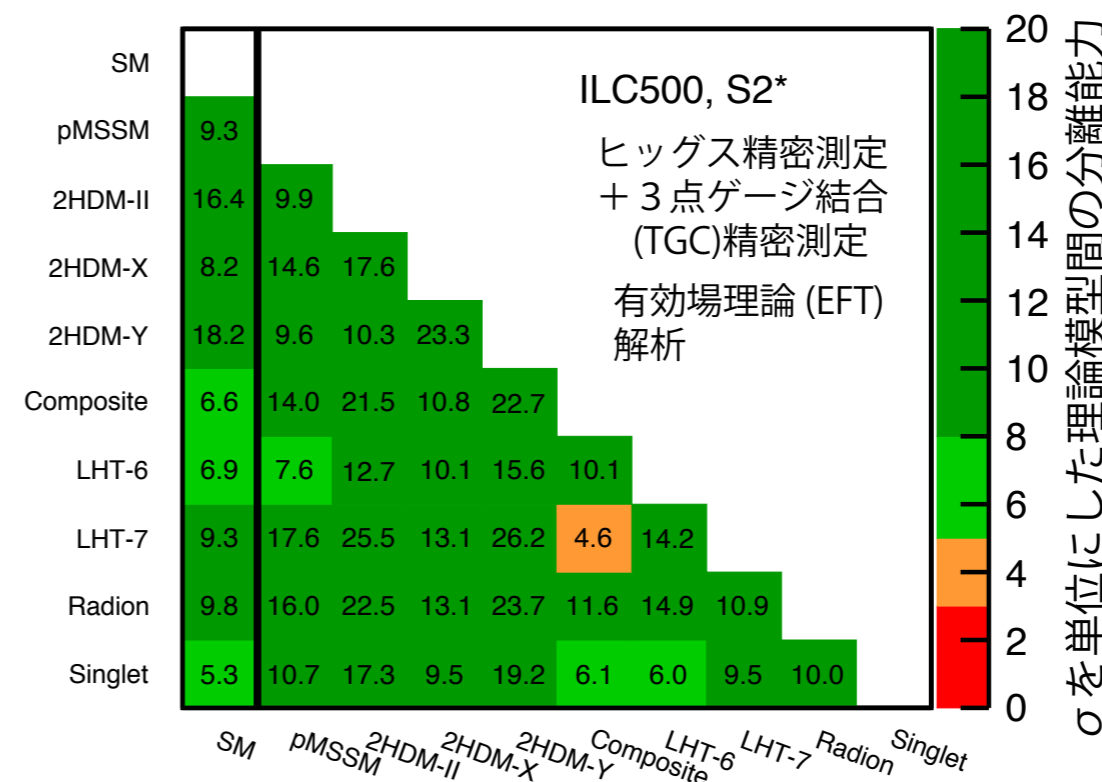
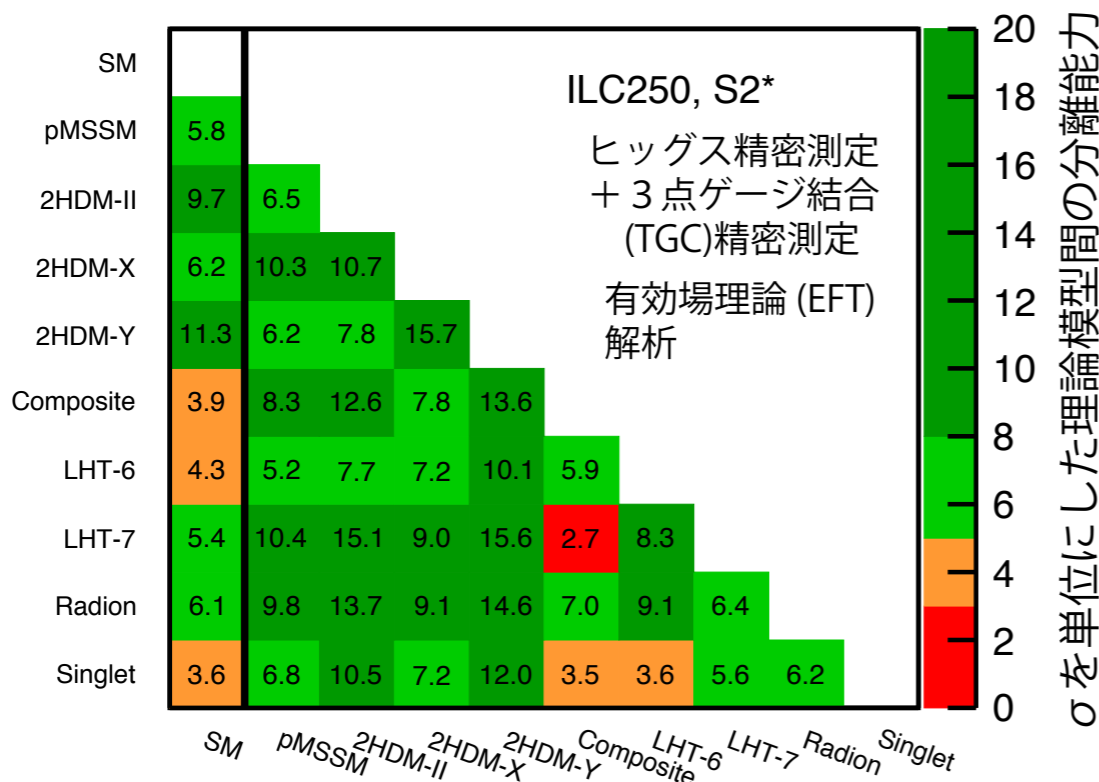
arXiv: 1710.07621

Model	$b\bar{b}$	$c\bar{c}$	gg	WW	$\tau\tau$	ZZ	$\gamma\gamma$	$\mu\mu$
1 MSSM [37]	+4.8	-0.8	-0.8	-0.2	+0.4	-0.5	+0.1	+0.3
2 Type II 2HD [38]	+10.1	-0.2	-0.2	0.0	+9.8	0.0	+0.1	+9.8
3 Type X 2HD [38]	-0.2	-0.2	-0.2	0.0	+7.8	0.0	0.0	+7.8
4 Type Y 2HD [38]	+10.1	-0.2	-0.2	0.0	-0.2	0.0	0.1	-0.2
5 Composite Higgs [39]	-6.4	-6.4	-6.4	-2.1	-6.4	-2.1	-2.1	-6.4
6 Little Higgs w. T-parity [40]	0.0	0.0	-6.1	-2.5	0.0	-2.5	-1.5	0.0
7 Little Higgs w. T-parity [41]	-7.8	-4.6	-3.5	-1.5	-7.8	-1.5	-1.0	-7.8
8 Higgs-Radion [42]	-1.5	-1.5	+10.	-1.5	-1.5	-1.5	-1.0	-1.5
9 Higgs Singlet [43]	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5

いずれの模型の場合も新粒子は HL-LHC の探索範囲外にある
→ ヒッグス結合測定が唯一のプローブ

期待されるずれの大きさは高々10%程度
→ ずれを見るには高い精度が必要
異なる新物理は異なるずれのパターンを示す
→ パターンから新物理の方向性が分かる

σ を単位に表した BSM 模型間の分離能力



$$n \approx \sqrt{\chi^2}$$

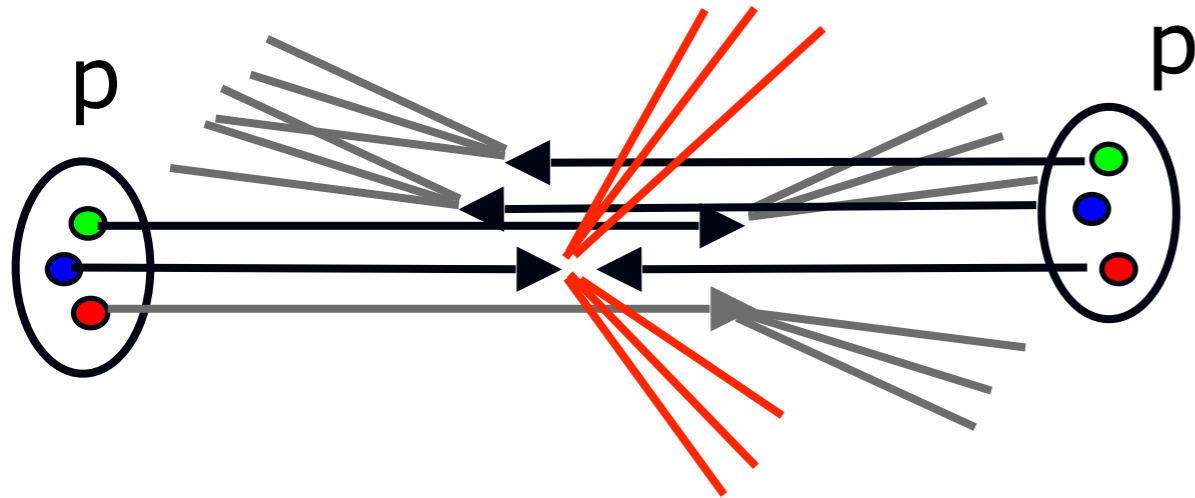
ほとんどの理論模型について3 σ 以上の感度で区別可能@250 GeV

ほぼ全ての理論模型について4 σ 以上の感度で区別可能@500 GeV

**なぜ ILC では
精密測定が可能なのか？**

ILCのクリーンな環境

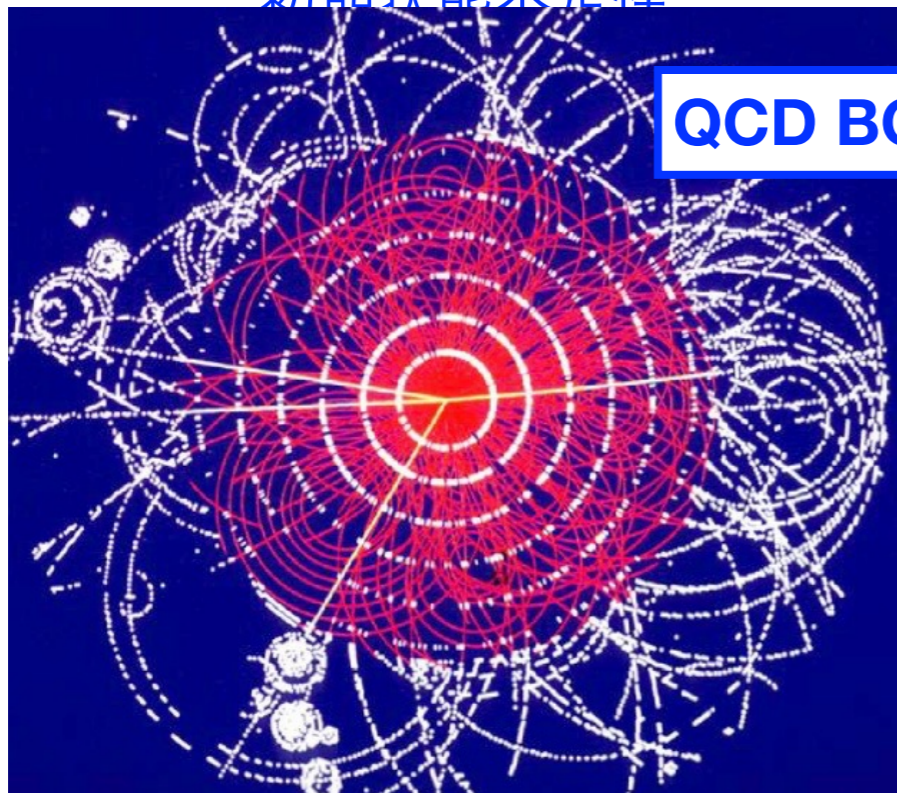
LHC: 複合粒子同士の衝突



重心系エネルギー 7-14 TeV

衝突毎に複数回反応

初期状態不定性

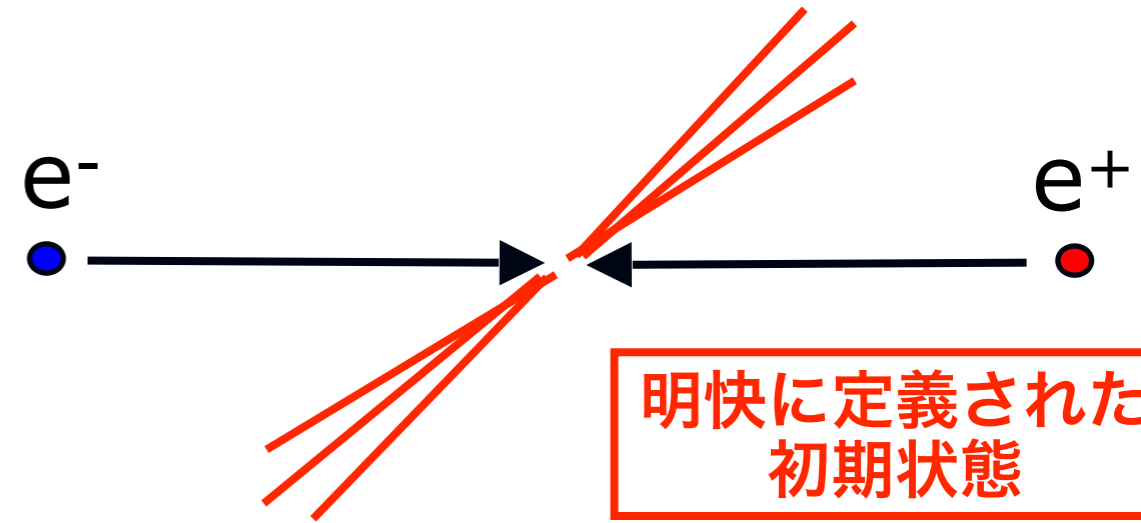


QCD BG : 大

- ※: BG = Back Ground (背景事象)
- ※: QCD = Quantum Chromo-Dynamics (標準理論の中の強い力を表す部分)

陽子は複合粒子 ⇒ 相互作用が複雑
到達可能なエネルギーは高い

ILC: 素粒子同士の衝突

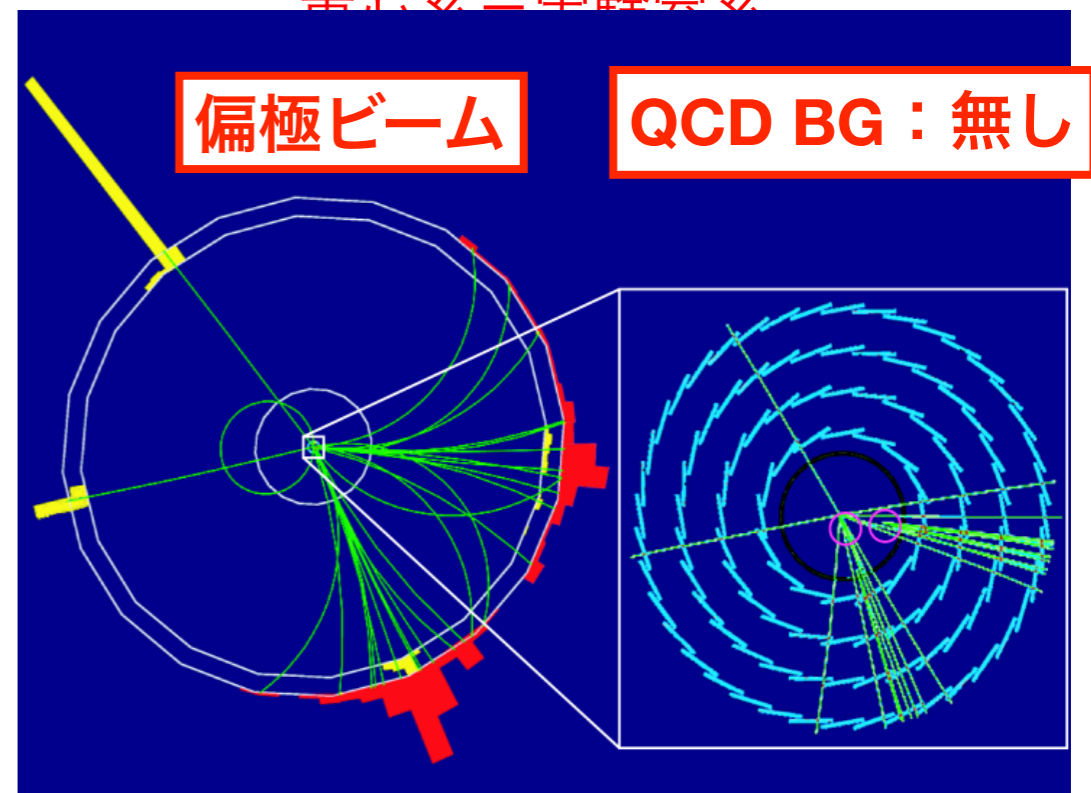


明快に定義された初期状態

重心系エネルギー 250 GeV

1 衝突 1 反応

重心系 = 実験室系



偏極ビーム

QCD BG : 無し

素粒子同士の衝突であり、余分な粒子が出てこない

高性能測定器

技術設計報告書 (TDR) に記載されている2つの測定器提案 (国際的に設計開発が進行中)

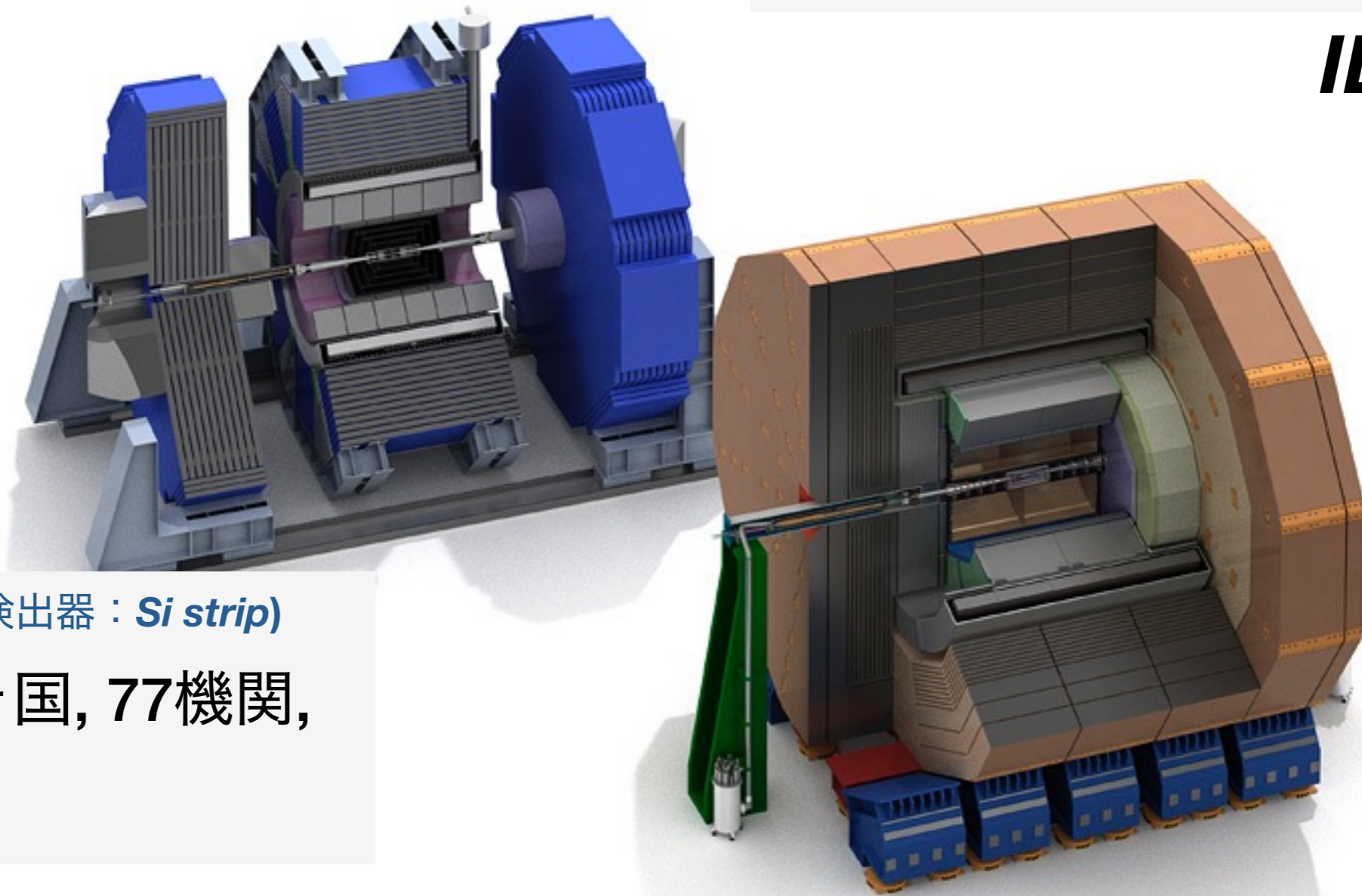
- ILC 測定器の性能は、LHC と比較して運動量分解能で~10倍、細密度で100~1000倍程度。
- これはILCのクリーンな環境があって初めて可能。同じことは LHC 環境では不可能。

- **大きな半径** (中央飛跡検出器 : **TPC**)
- **LOI 署名者: 32ヶ国, 151機関, ~700人**

ILD

SiD

- **高磁場** (中央飛跡検出器 : **Si strip**)
- **LOI 署名者: 18ヶ国, 77機関, ~240人**



250 GeV ILCでの

新粒子発見の可能性

- 過去の最高エネルギー電子陽電子コライダー（CERNの LEP2）に比べて 10^3 倍高いルミノシティ
- ビーム偏極
- より高性能な測定器
- トリガー無し事象収集

により、**微弱な信号に対する感度が大きく向上**する。

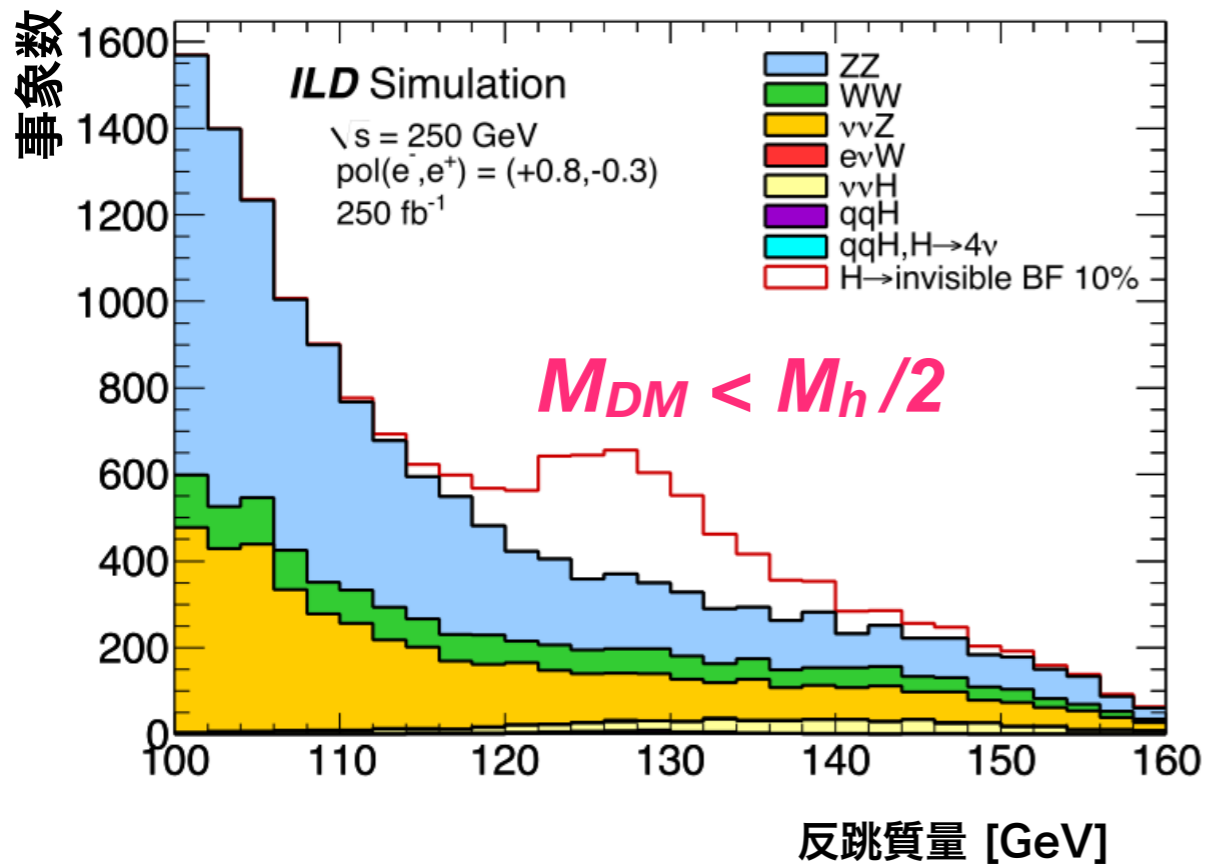
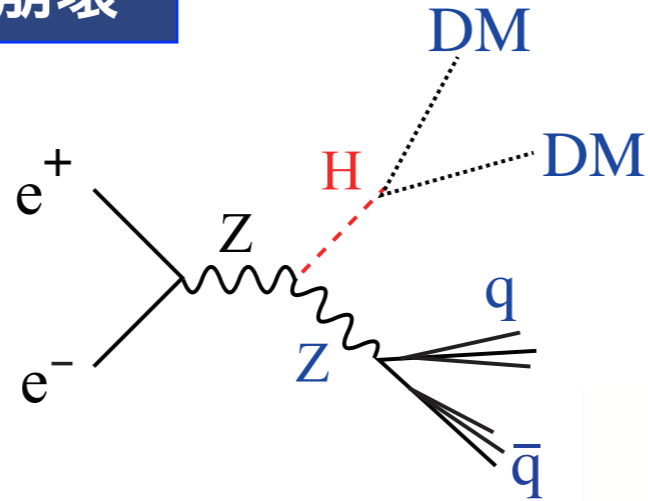
※ ルミノシティ = ビーム強度の単位
反応頻度 = ルミノシティ × 反応断面積

暗黒物質 (WIMP) 探索 @ 250 GeV ILC

Weakly Interacting Massive Particle

1. ヒッグスの不可視崩壊

暗黒物質 (Dark Matter) がヒッグスとのみ相互作用する場合に有効



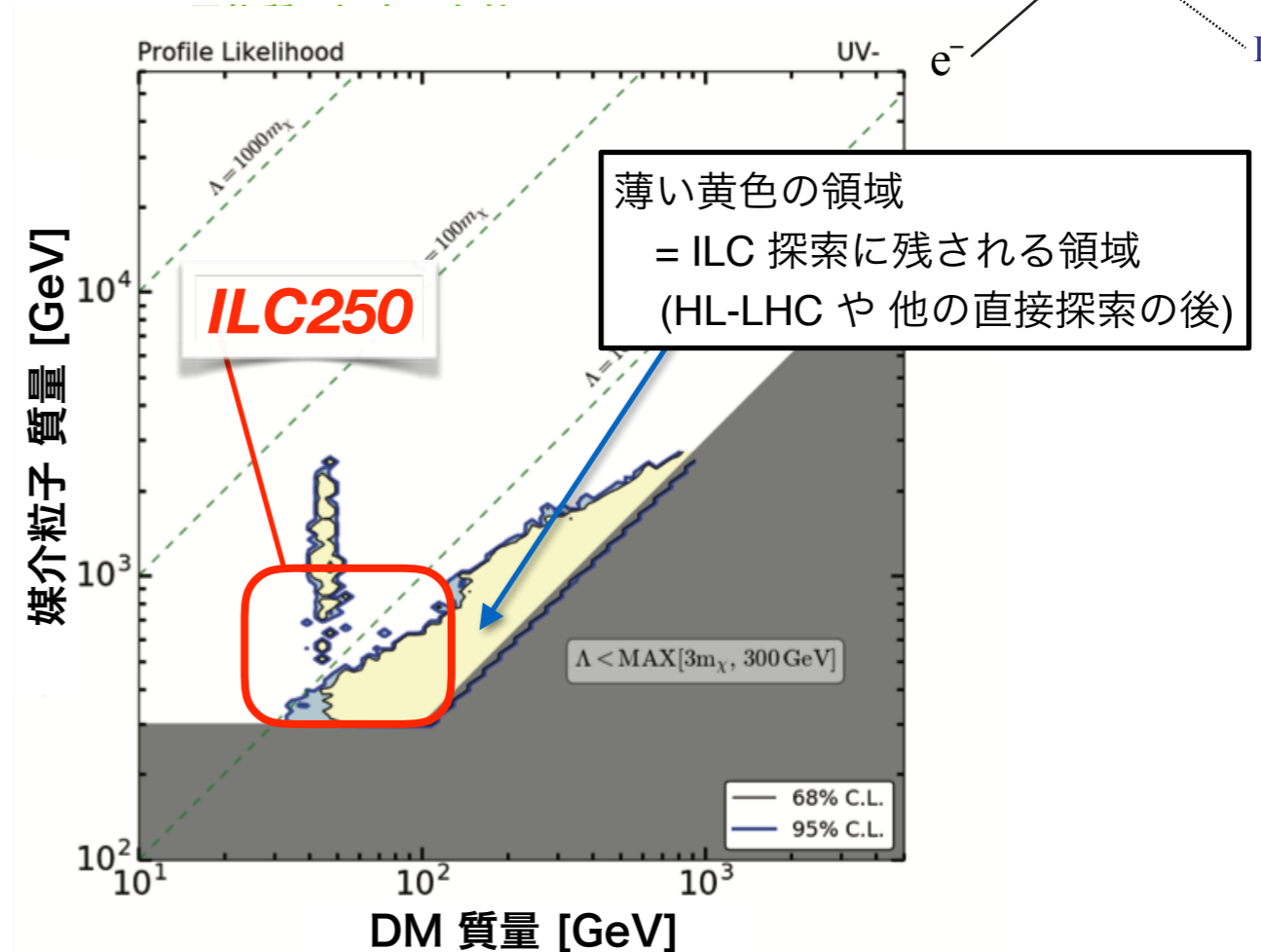
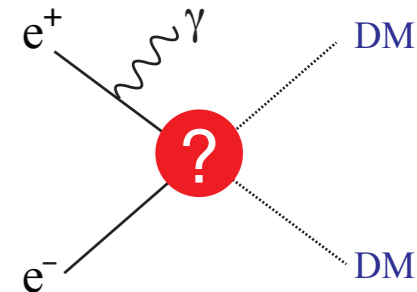
探索可能不可視崩壊の分岐比：0.3% まで

HL-LHC の 20倍の感度

2. 単光子生成探索

様々なタイプの暗黒物質に感度を持つ探索

特に直接探索や、LHC での探索では発見が難しいレプトンや電弱ゲージボソンに結合する暗



250 GeV でもかなり発見の可能性はある

※: HL-LHC = High Luminosity LHC (高度化された LHC)

**250 GeV ILCでできることは
非常にたくさんある！**

非常に多くの研究対象

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

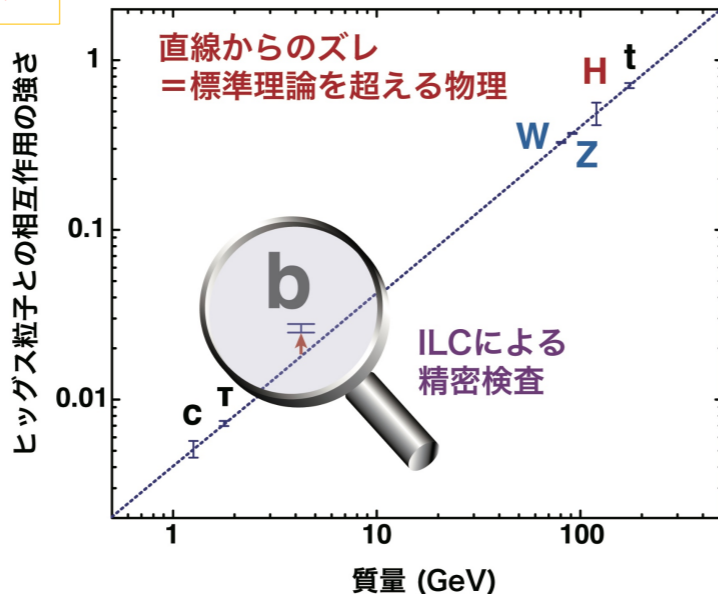
包含断面積: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow e^+e^-)$
 包含断面積: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 包含断面積: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow q\bar{q})$
 Zボソンの角分布: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow e^+e^-)$
 Zボソンの角分布: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 Zボソンの角分布: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow q\bar{q})$
 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

$e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow \nu\nu)$
 $H \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow q\bar{q})$
 $H \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow l\nu)$
 $H \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $H \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow ll)$
 $H \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$



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: $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow l\nu)$
 断面積: $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow l\nu) (W \rightarrow l\nu)$
 Wボソンの崩壊分岐比、質量、幅:

$e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow l\nu)$
 3重ゲージ結合のCP保存測定:

$e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow l\nu)$
 3重ゲージ結合のCPの破れ測定:

$e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow l\nu)$
 断面積: $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow q\bar{q})$

断面積: $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow ll)$

断面積: $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$
 異常3重ゲージ結合のCP保存測定:

$e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow ll)$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$
 異常3重ゲージ結合のCPの破れ測定:

$e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow q\bar{q})$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow ll)$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$
 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:

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

1荷電ヒッグス粒子探索:

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

2荷電ヒッグス粒子探索:

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

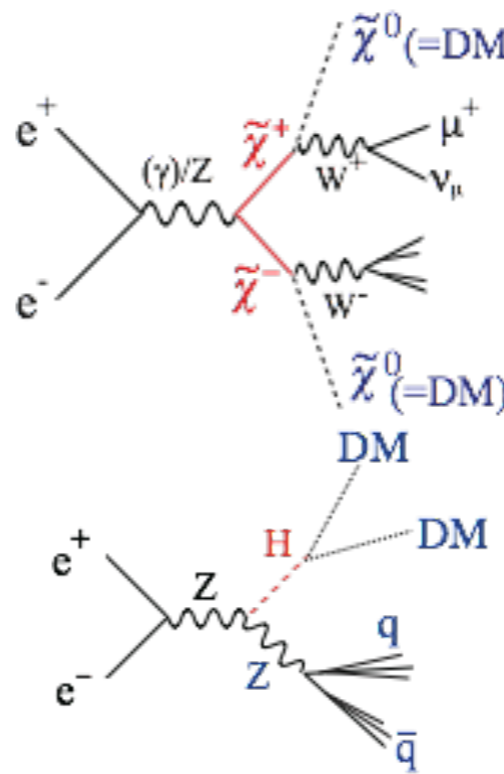
励起レプトン探索

長寿命粒子探索

重イオン粒子探索

新粒子探索:

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



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:

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

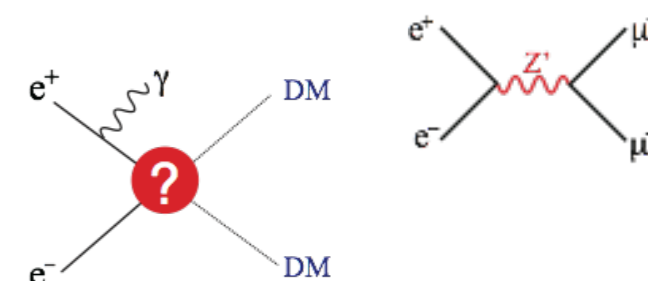
τ の崩壊分岐比

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

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

フラグメンテーション関数測定

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、メソンの生成と崩壊

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、メソンの生成と崩壊

2光子衝突におけるレプトン生成

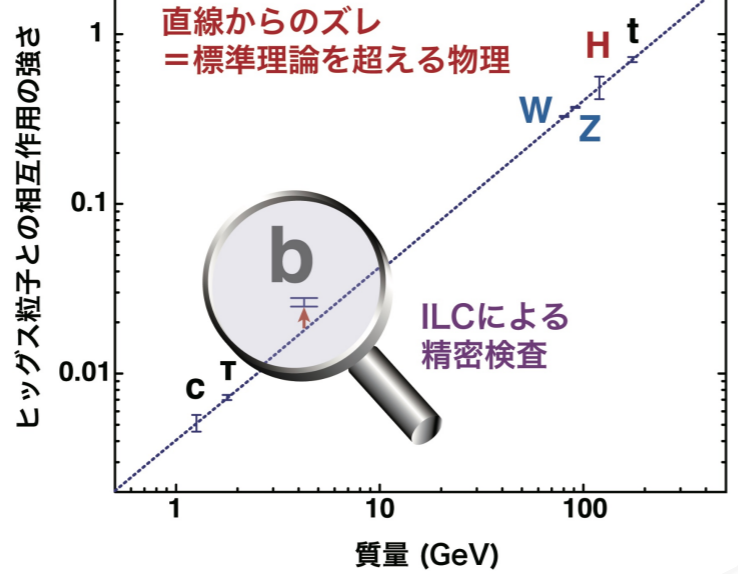
非常に多くの研究対象

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: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow q q)$
 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: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow q q)$
 部分生成断面積:

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



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
- 偏極が重要な測定

断面積: $e^+e^- \rightarrow \gamma \gamma$
 $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q q) (Z \rightarrow q q)$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q q) (Z \rightarrow ll)$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$
 異常3重ゲージ結合のCP保存測定:
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q q) (Z \rightarrow q q)$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q q) (Z \rightarrow ll)$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$
 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:

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

1荷電ヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow H^\pm H^0, H^0 H^0 \rightarrow \tau^+ \nu, c \bar{s}$
 $e^+e^- \rightarrow W^\pm H^\pm$
 2荷電ヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow W^+ W^+$
 $e^+e^- \rightarrow W^+ Z$
 $e^+e^- \rightarrow Z Z$

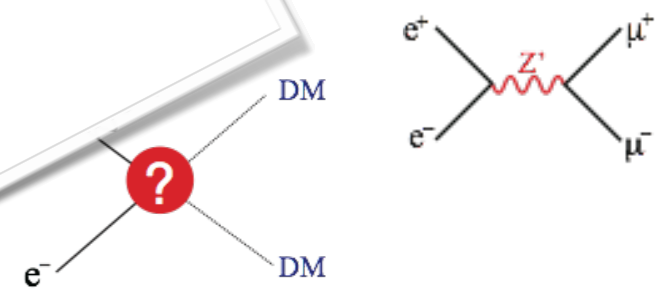
2-フェルミオン過程

- 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

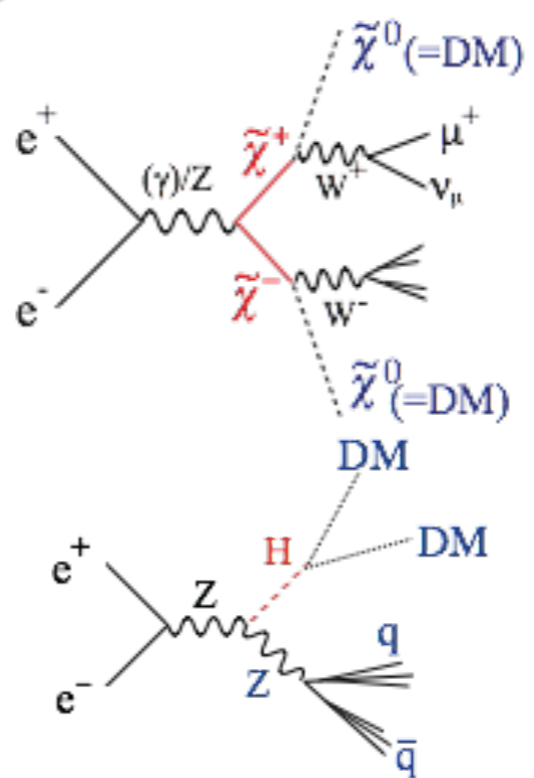
断面積と角分布:

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

プロトンの複合粒子可能性



たくさんの論文、たくさんのPh.D
 LHC ATLAS実験の例: 大学院学生数 = 約1200人
 毎年約200人の博士号取得者



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

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

フラグメンテーション関数測定

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、メソンの生成と崩壊
 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、メソンの生成と崩壊

2光子衝突におけるレプトン生成

まとめ

将来の素粒子物理学の拠点としての ILC

我々は電弱スケールを越え、宇宙創成の瞬間に向けた新たな道に踏み出す段階に来ている。**時空概念の拡張の道に進むのか、物質構造の拡張（より深い階層）の道に進むのか、それとも全く新しい原理が必要になるのか、我々は今この分岐点に立っている。**

250 GeV ILC は、最高エネルギーの電子・陽電子衝突によるヒッグス粒子の精密測定や新粒子発見（暗黒物質や超対称性粒子）を通して素粒子物理学の進路を決め、**宇宙創成の瞬間に向けた道を切り開く加速器**である。ここで得られた結果によっては、自然のより統一的な理解を求め、さらにエネルギー・フロンティアを押し広げる必要が生じるかもしれない。しかし、それを見極めることこそが宇宙創成の瞬間への道であり、素粒子物理学の王道である。

250 GeV の ILC 計画は、電子・陽電子リニアコライダーとして、250 GeV をはるかに超える高いエネルギーへと展開する将来性を備え、将来の長きに渡って国際的に魅力的な施設であり続ける。

Backup

トップクォークについて

- **トップクォークの電弱結合の精密測定**

ヒッグス結合のズレを見てから

(複合ヒッグスの場合のモデルのさらなる絞り込み)

- **トップクォーク質量の精密測定**

LHCでの質量測定の精度向上 ($\Delta m_t < 300 \text{ MeV}$)

BSM 理論計算による予測のための入力の精度としては当面十分 (ILC 250 の結果によってはさらなる精度が必要になる可能性はある)

ヒッグスの精密測定が優先度 1

トップの精密測定の緊急性は下がった

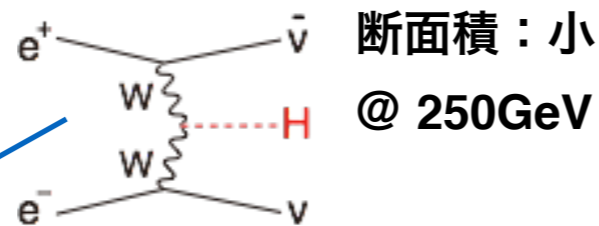
新しい展開：有効場理論(EFT)による解析

250 GeV ILCの潜在的問題:

ヒッグス結合の絶対値測定に必要な Γ_h (ヒッグス全崩壊幅) 決定には $>350\text{GeV}$ が必要と言われていた.

$$\Gamma_h = \frac{\Gamma(h \rightarrow WW^*)}{BR(h \rightarrow WW^*)}$$

$$\Gamma(h \rightarrow WW^*) \propto \sigma(\nu\bar{\nu}h)$$



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

**SU(2)xU(1) 不変
次元6演算子**

決めるべき多数の **EFT** 係数:
~50 個 @ LHC、17 個 @ ILC

解: **Effective Field Theory (有効場理論)**

hZZ 結合と hWW 結合を関係付ける

EFT: BSM物理の効果は、重いBSM場 (質量 M) を積分してしまうことで (q^2/M^2) のべき級数展開で表現できる.
→ エネルギースケール対し M が十分大きければ、標準理論のラグランジアンに SU(2)xU(1) 不変な次元6演算子を加えることで一般的に表現できる.

LHC Run II の結果は、**M:大**を示唆.
250 GeV では、**EFT** の有効性がより確からしい

ILCでは決めるべき**EFT**係数がずっと少ない!

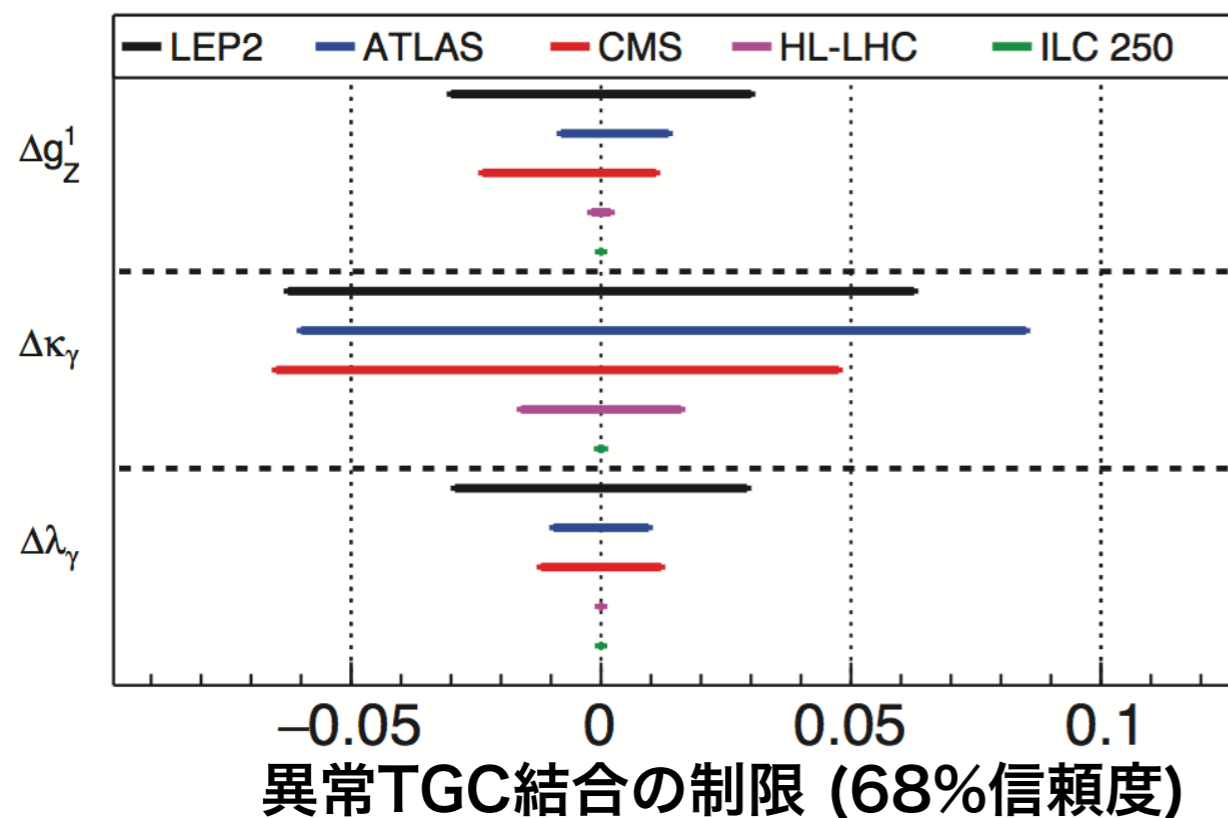
W_L, Z_L はヒッグスセクターからの **NGB (南部ゴールドストーンボソン)**. W/Z を含むあらゆる標準理論過程を使える → **ILC250** でヒッグス結合の**モデル非依存な精密測定が可能**. (反跳質量法による σ 測定が鍵であることはこれまで通り!)

ビーム偏極により使える物理量が2倍に.
→ **EFT** の有効性のテストも可能.

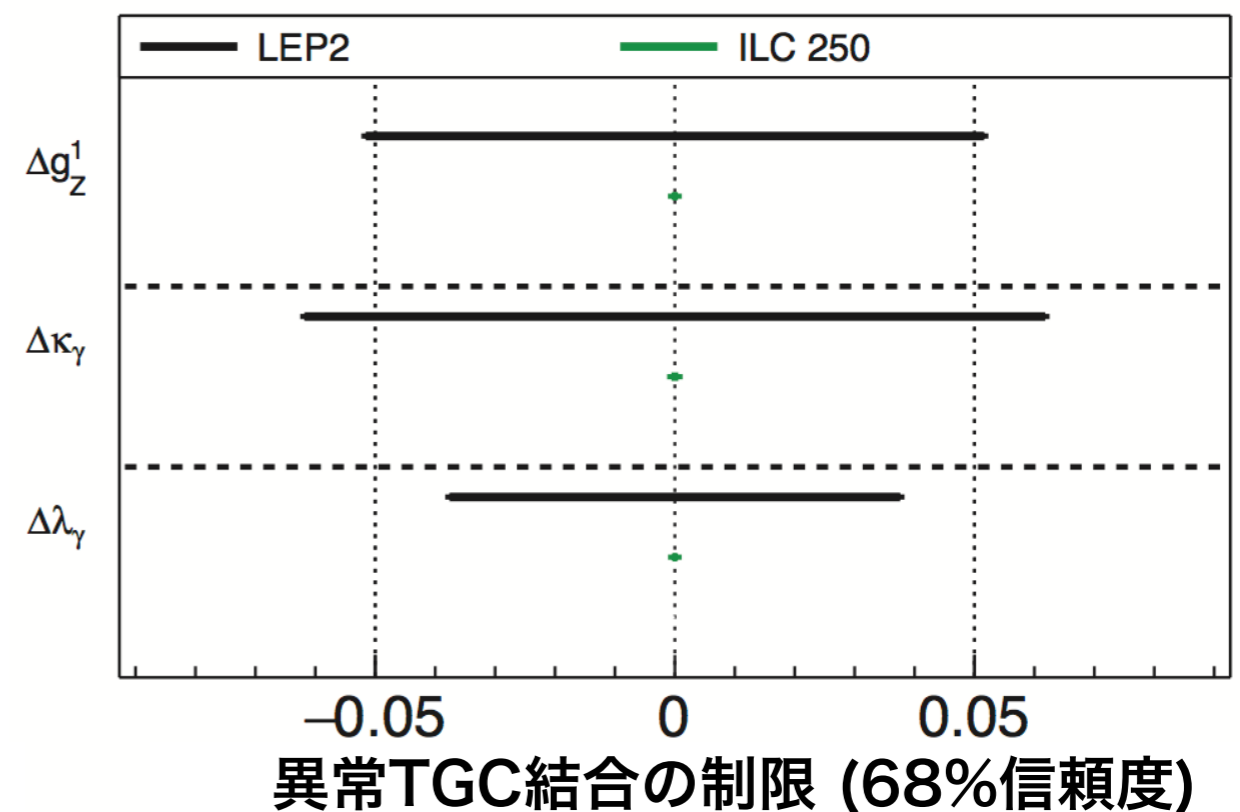
250 GeV だけでヒッグス結合の絶対測定が可能!

ヒッグス結合の有効場理論による解析で活躍する ヒッグス以外の反応の例

$e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ (3点ゲージ結合 : Triple Gauge Couplings)



(a)



(b)

図 11: LEP 2、LHC Run1、HL-LHC および ILC 250 ($\sqrt{s} = 250$ GeV、積分ルミノシティ 2000 fb^{-1}) における、1パラメータフィットと3パラメータフィットによるTGCの精度。

HL-LHC, LEP2 からの大幅な精度改善!

ヒッグス結合に現れる新物理の効果

いくつかの典型的な BSM 模型を例にして

arXiv: 1710.07621

9 つのサンプル BSM 模型の場合の期待されるずれ (%)

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-パリテイ有) [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-パリテイ有) [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

これら 9 つの理論模型は以下のように大きく分類できる：

時空概念の拡張

超対称性 (1)

余剰次元 (8)

物質構造の拡張 (複合ヒッグス模型)

複合ヒッグス模型 (5)

リトルヒッグス (6、7)

期待されるずれの大きさは高々10%程度

→ ずれを見るには高い精度が必要

異なる新物理は異なるずれのパターンを示す

→ パターンから新物理の方向性が分かる

これらの分類とは直交する分類: ヒッグス多重項構造が拡張された拡張ヒッグス模型

の例として (二重項二つを含む拡張ヒッグス模型: 2、3、4) (一重項を含む拡張ヒッグス模型: 9)

いずれの模型の場合も新粒子は HL-LHC の探索範囲外にある

→ ヒッグス結合測定が唯一のプローブ

ヒッグス結合測定の新物理への感度

いくつかの典型的な BSM 模型を例にして

9つのサンプル BSM 模型の場合の期待されるずれ (%)

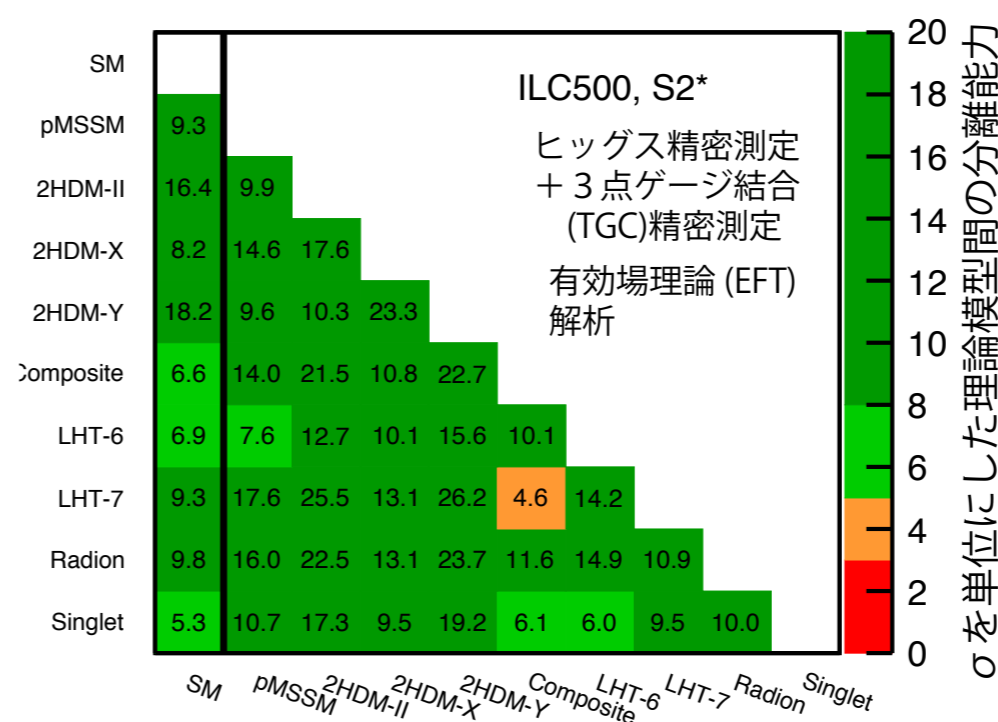
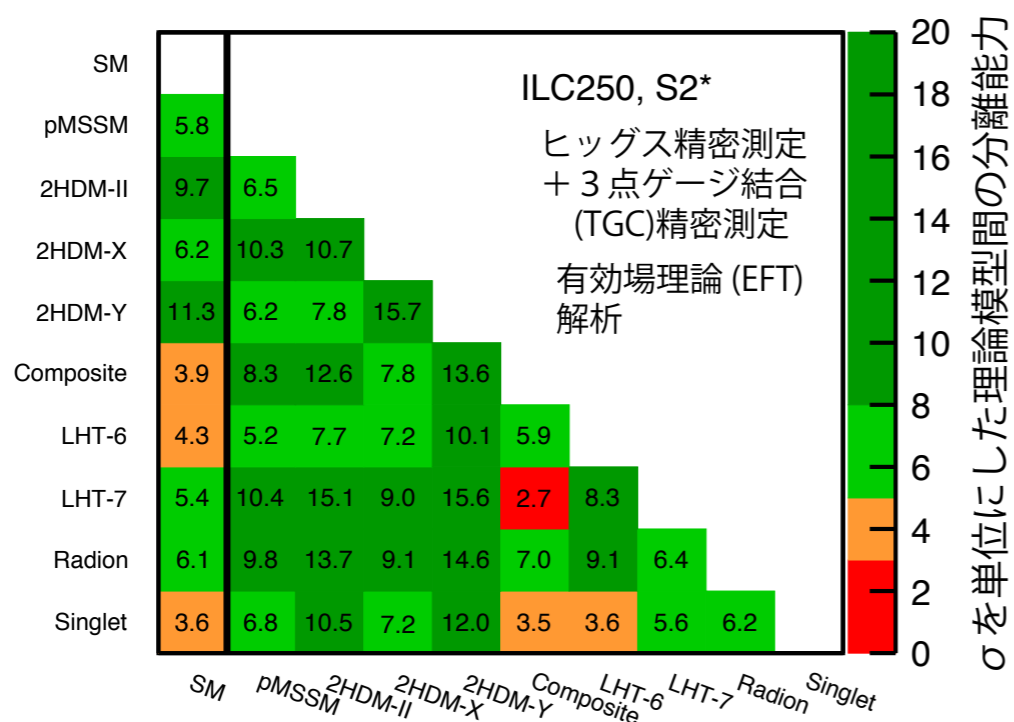
arXiv: 1710.07621

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

いずれの模型の場合も新粒子は HL-LHC の探索範囲外にある
→ ヒッグス結合測定が唯一のプローブ

期待されるずれの大きさは高々10%程度
→ ずれを見るには高い精度が必要
異なる新物理は異なるずれのパターンを示す
→ パターンから新物理の方向性が分かる

σ を単位に表した BSM 模型間の分離能力



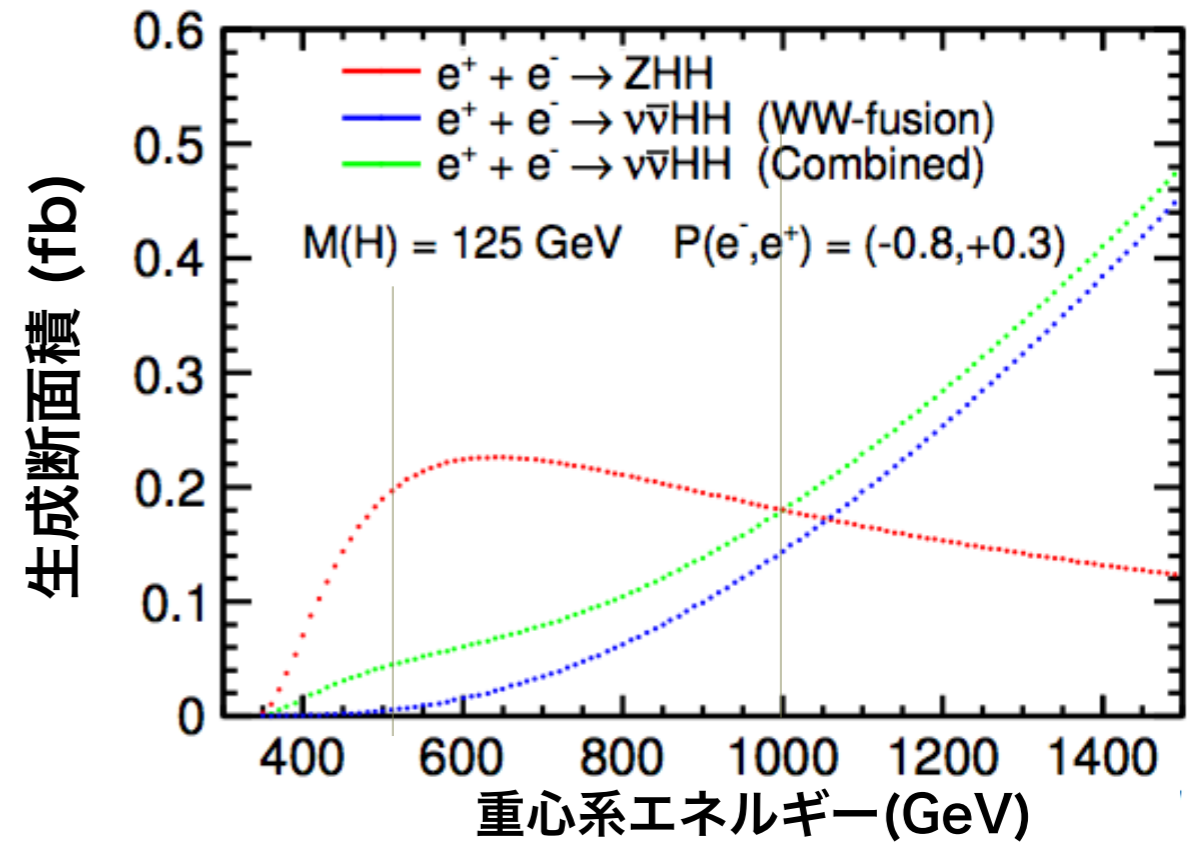
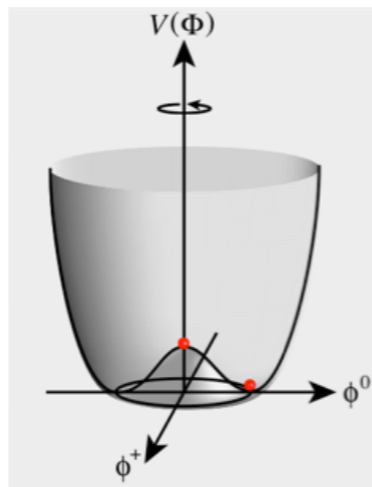
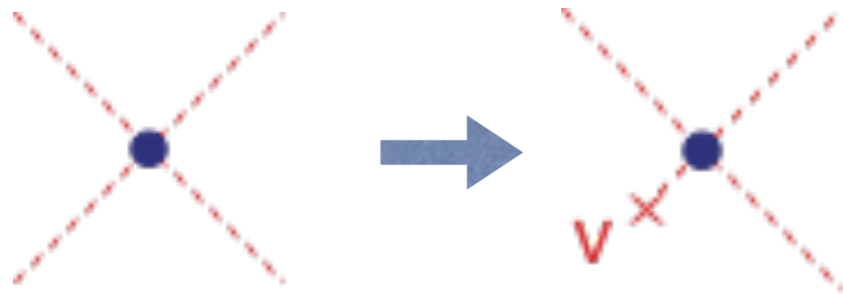
$$n \simeq \sqrt{\chi^2}$$

ほとんどの理論模型について3 σ 以上の感度で
区別可能@250 GeV

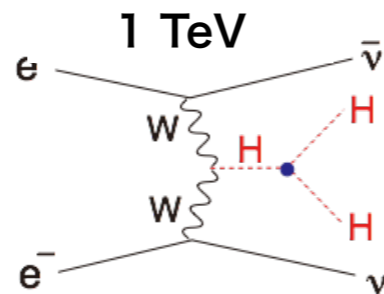
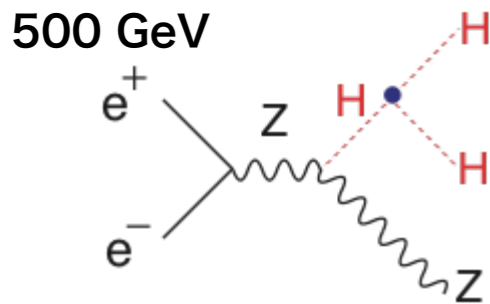
ほぼ全ての理論模型について5 σ 以上の感度で
区別可能@500 GeV

ヒッグスの3点自己結合

ヒッグスの3点自己結合は電弱対称性の破れの中心にある。それ自体重要！



ILC では2通りの測り方がある:



ILCでも難しい測定

- 非常に小さい断面積
- 自己結合を含まない散乱振幅の希釈効果による感度の低下
- 自己結合以外に現れるBSM効果の分離 (EFTで可能: 同じことはLHCでは難しい)

ILC

CLIC

	500 GeV	+ 1 TeV
Snowmass	46%	13%
H20	26%	10%

1.4 TeV (1.5 ab ⁻¹)	+3 TeV (2 ab ⁻¹)
21%	10%

(arXiv: 1307.5288)

H20 arXiv: 1506.07870

J. Tian, LC-REP-2013-003

C. Dürig @ ALCW16

M. Kurata, LC-REP-2014-025

O(10)% 測定に向け努力継続中

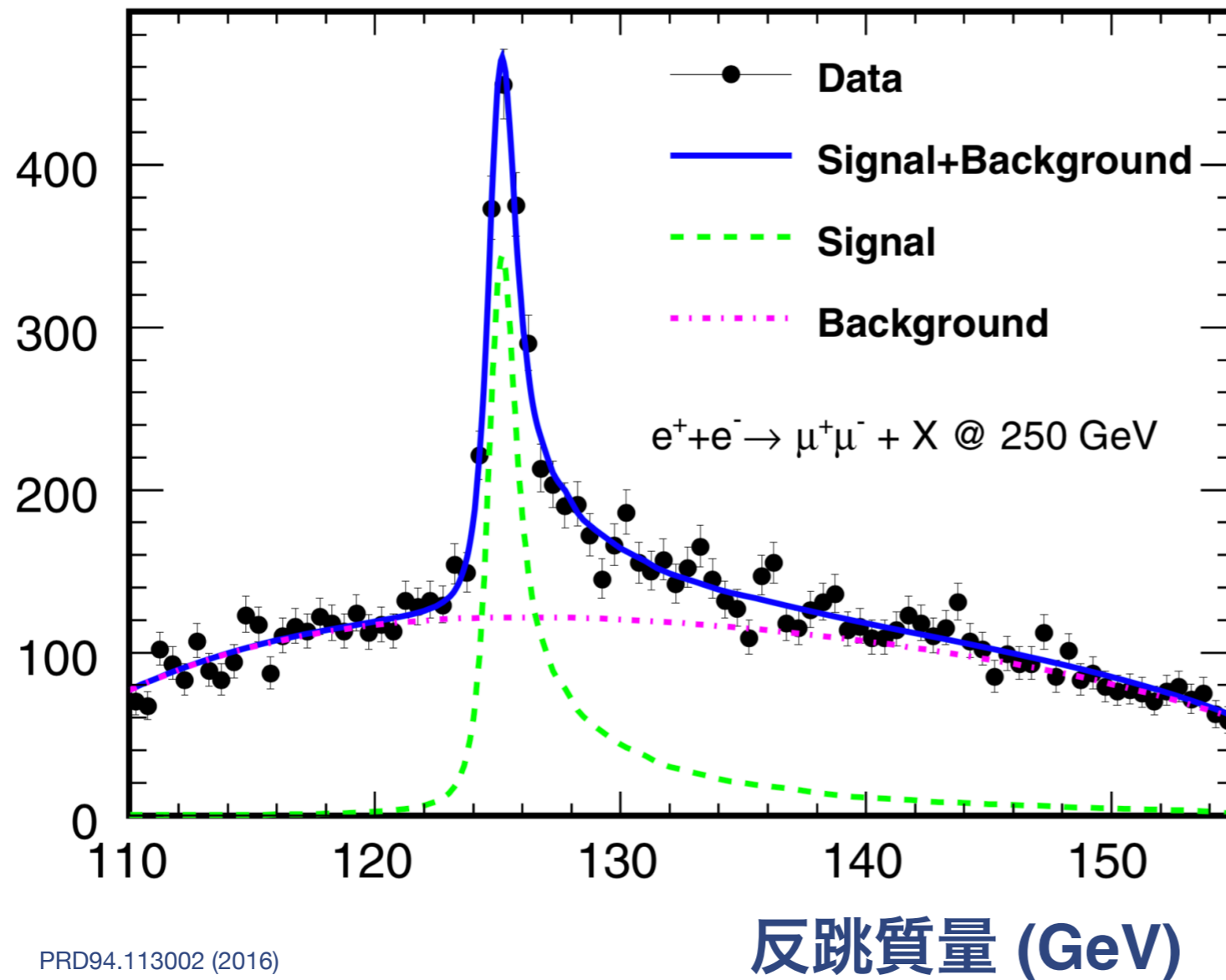
電弱バリオン数生成のシナリオでは、大きなずれが期待される→ もし+100%のずれなら $\Delta\lambda/\lambda=14\%$

その他

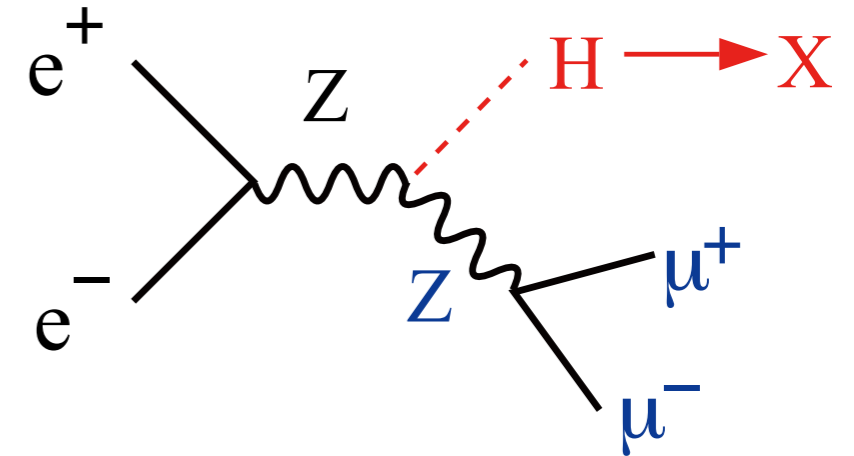
反跳質量測定

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

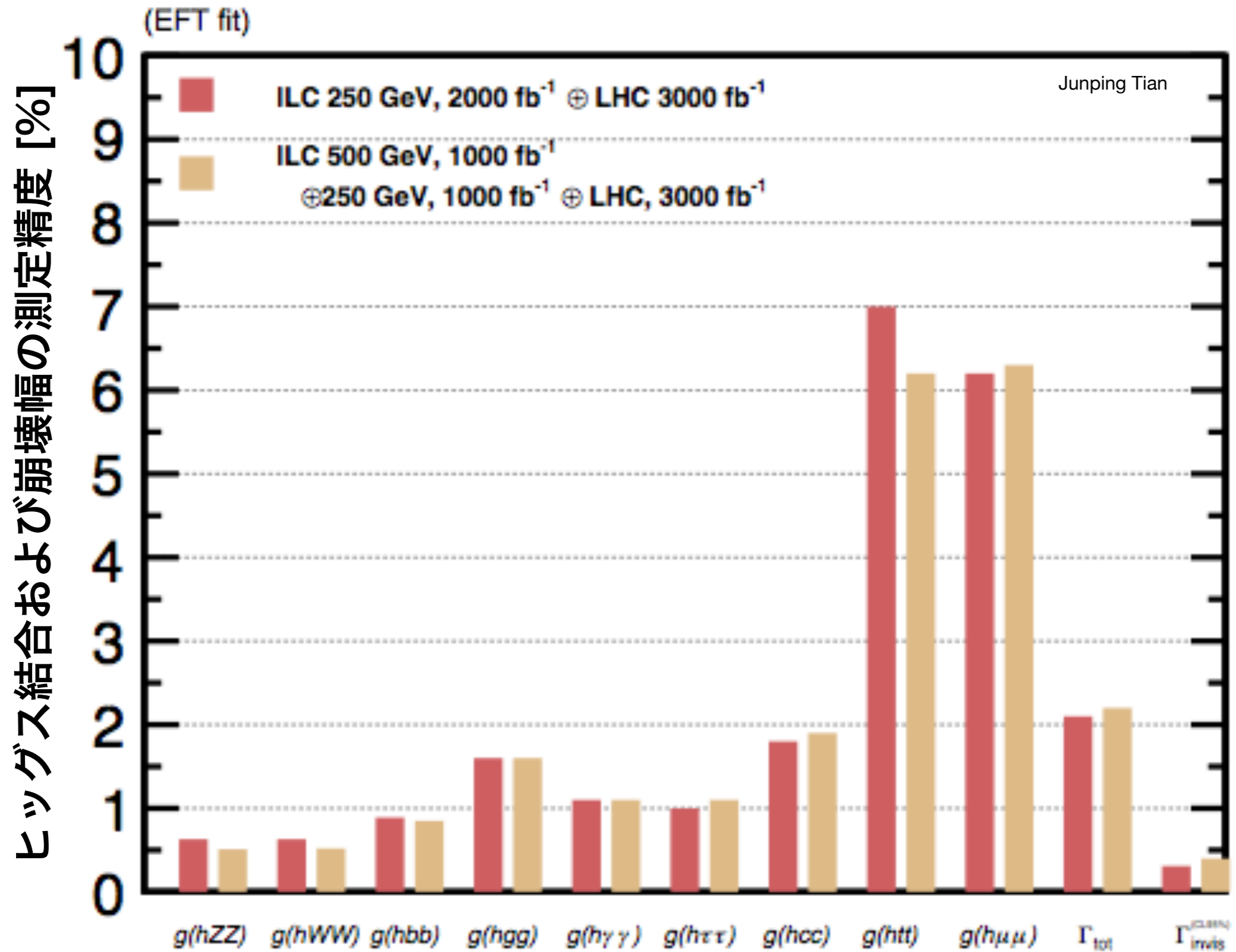
→ ヒッグスの崩壊モードに依らず
ヒッグス生成断面積の絶対測定が可能

→ ヒッグスの不可視崩壊も検出可能

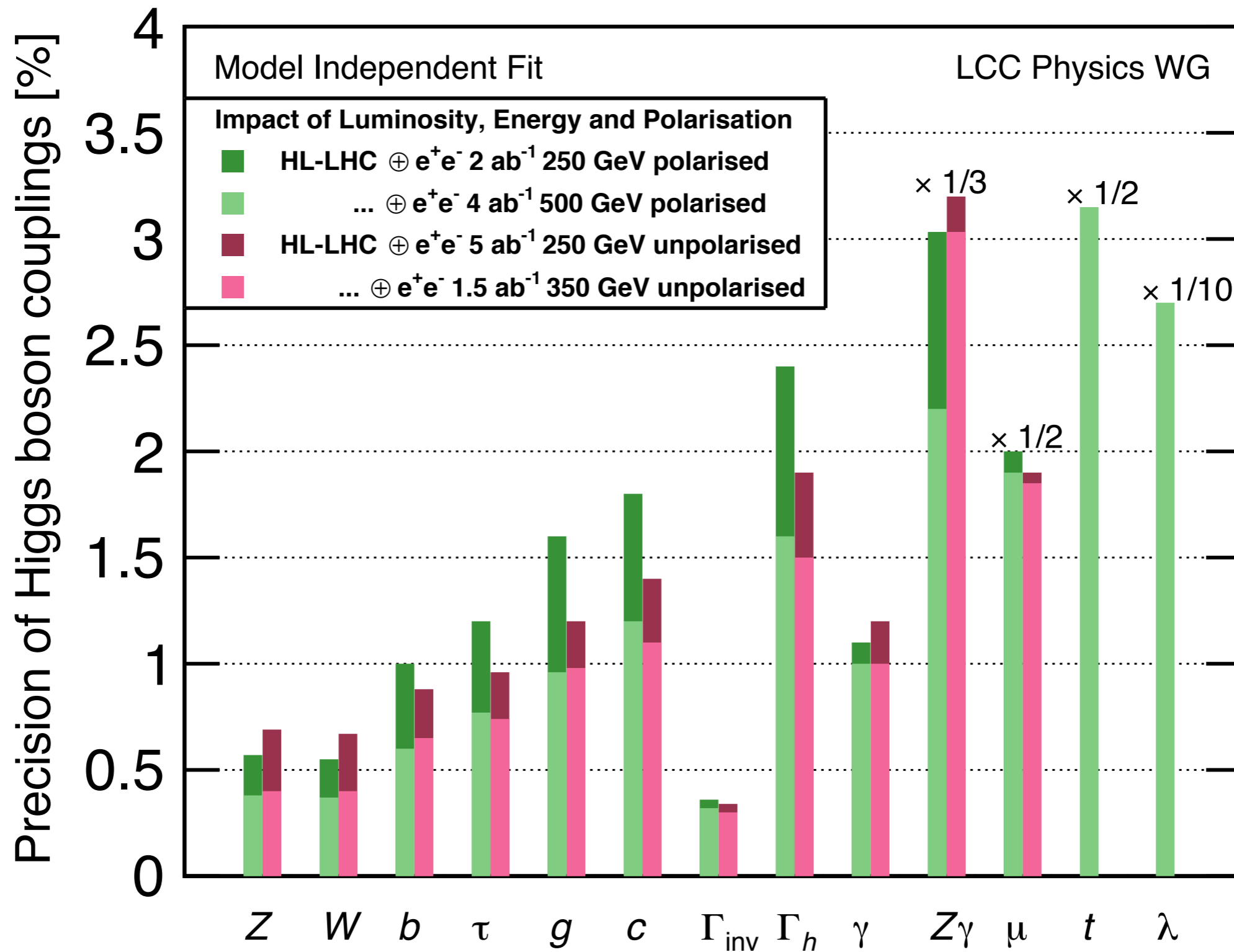
250 GeV は反跳質量測定に最適

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

同じ積分ルミノシティなら



Power of Polarization

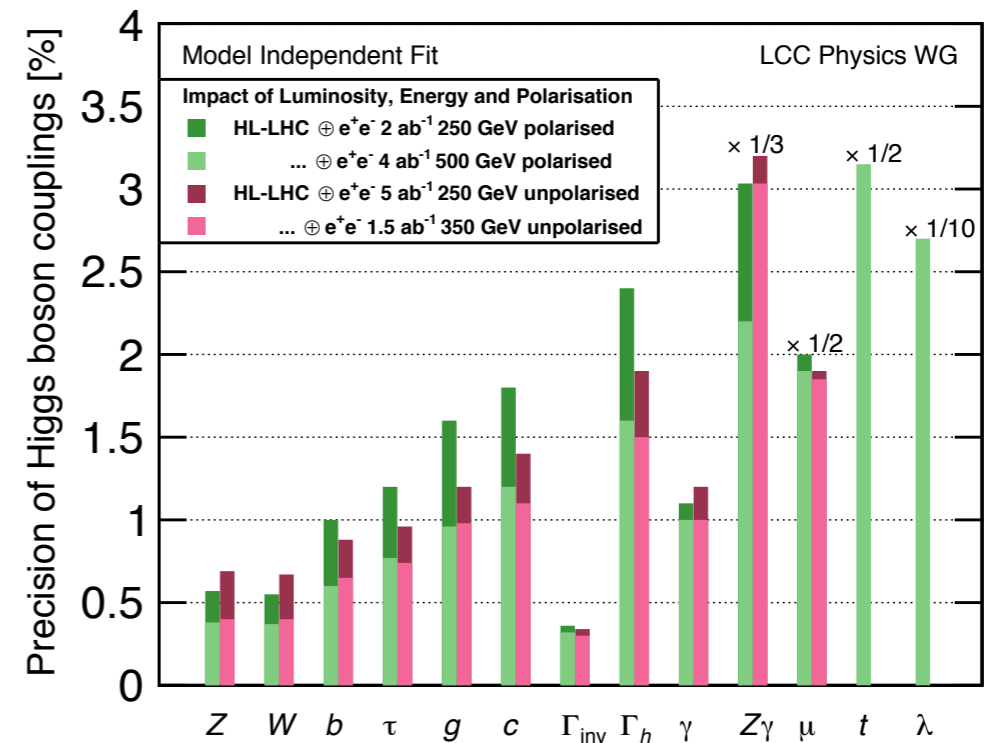
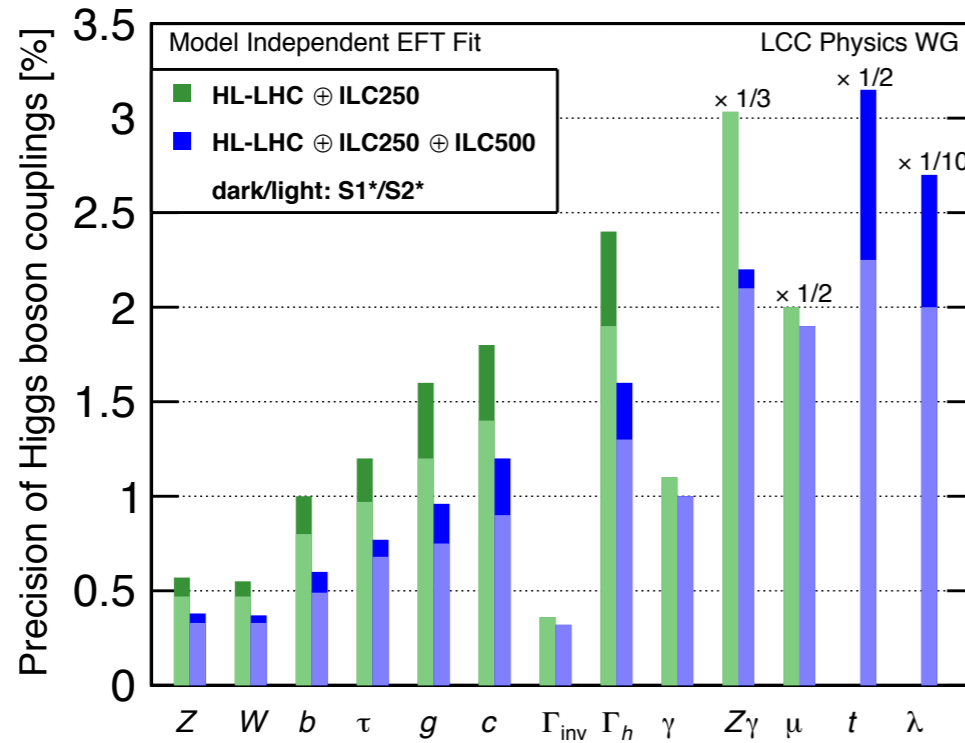


Polarized 2 ab^{-1} is roughly equivalent to unpolarized 5 ab^{-1} !

New Manhattan Plots

w/ (S2*) and w/o (S1*) foreseen improvements

Unpol. 5ab⁻¹ ~ Pol. 2ab⁻¹



<1% level precision for most couplings

Significant improvement from HL-LHC

systematic errors included in the global fit

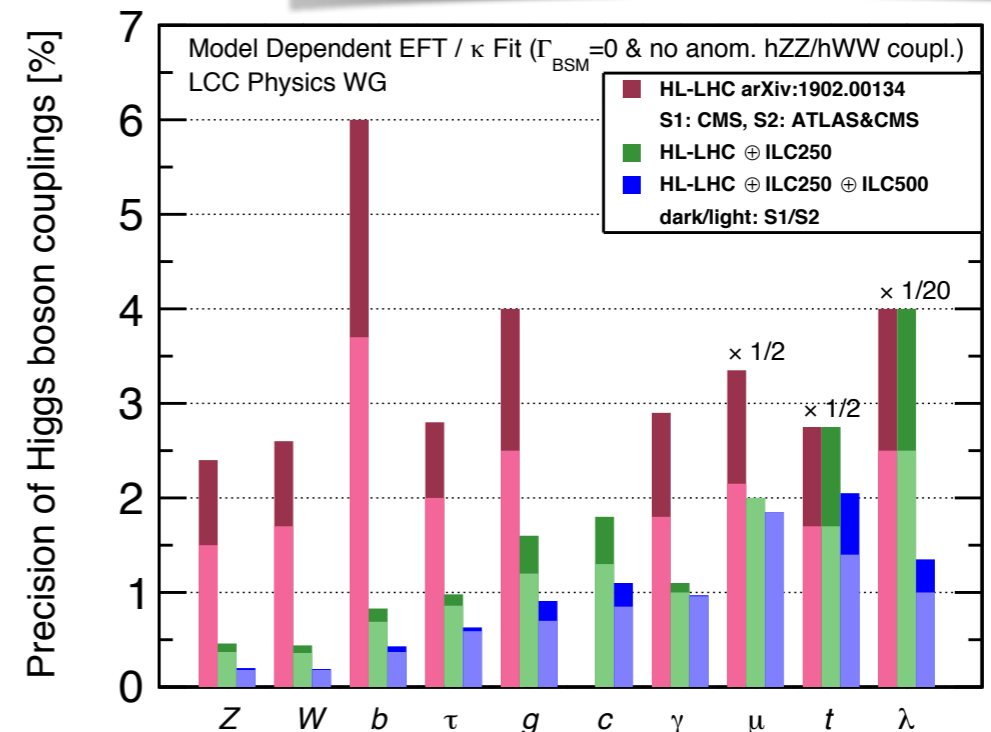
for every σ and α_{BR} measurement

- 0.1% from theory computations
- 0.1% from luminosity
- 0.1% from beam polarizations
- 0.1% ⊕ 0.3%/sqrt(L/250) from b-tagging and analysis



newly added a limit of 0.1% systematic errors from experimental analysis

same systematic errors are used for unpolarized case, except without item 3



EW Baryogenesis?

The answer is no in the Standard Model.

Strong 1st order EW phase transition

to bring the universe out of equilibrium

→ Large deviation of Higgs cubic self-coupling

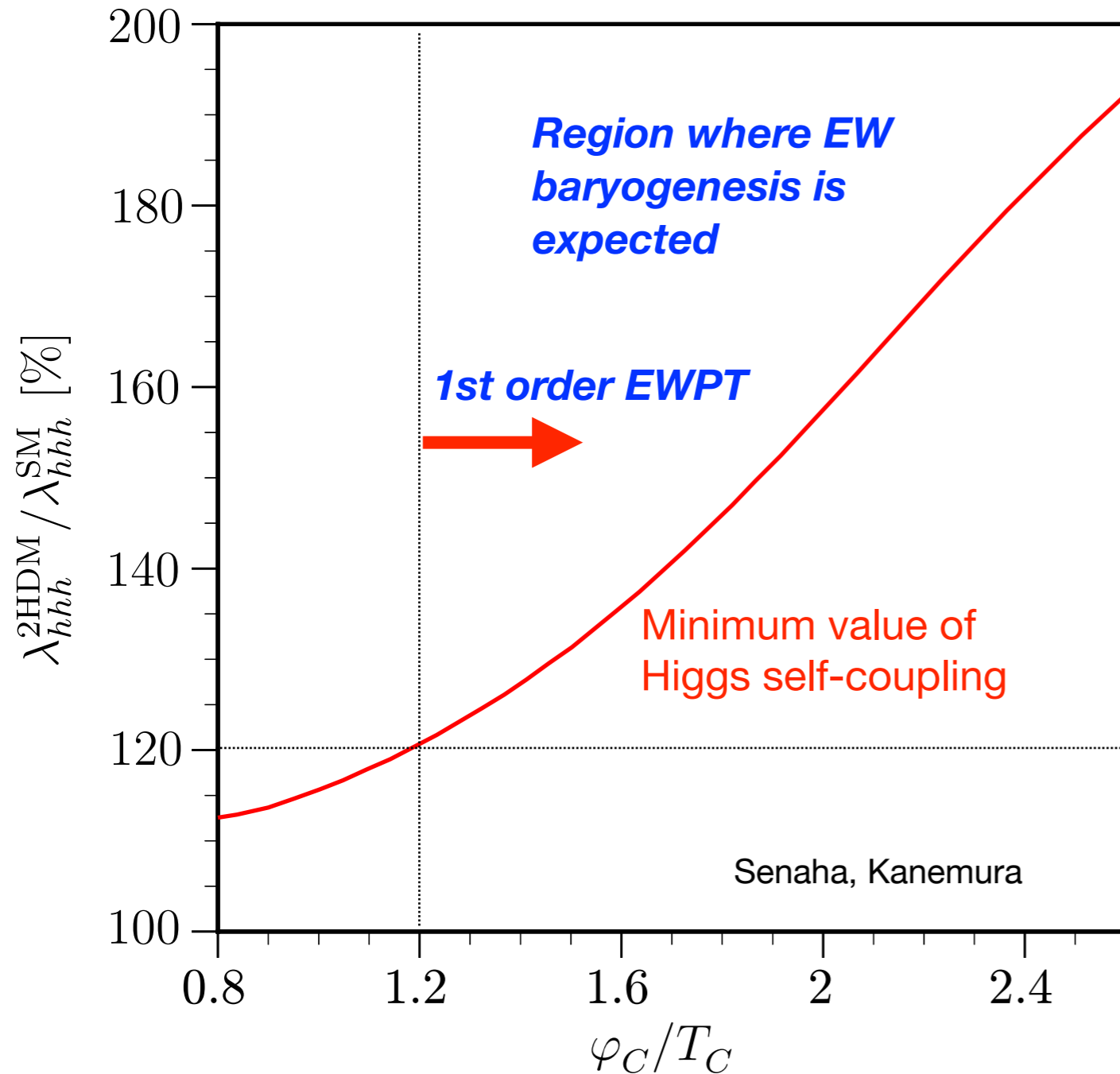
Enough CPV (δ_{KM} too small)

→ CPV source in Higgs sector

→ Extended Higgs sector

Electroweak Baryogenesis?

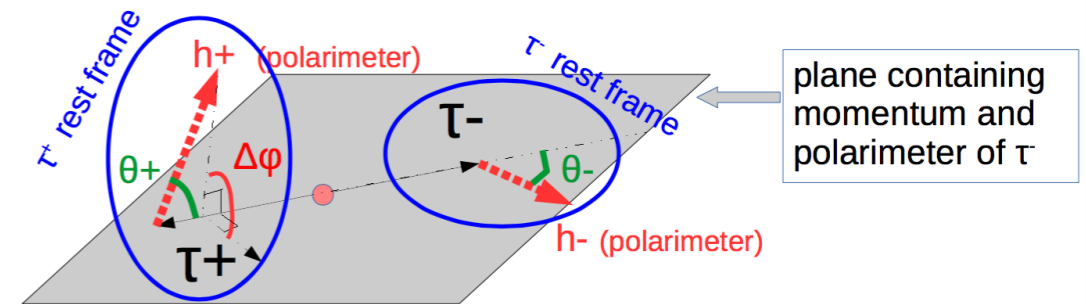
Example: **2 Higgs Doublet Model (2HDM)**



Measuring CP in $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ at ILC

$$\mathcal{L}_{h\tau\tau} = g\bar{\tau} (\cos \Psi_{CP} + i\gamma_5 \sin \Psi_{CP}) \tau h$$

CP from polarimeters : taus from spin 0 parent

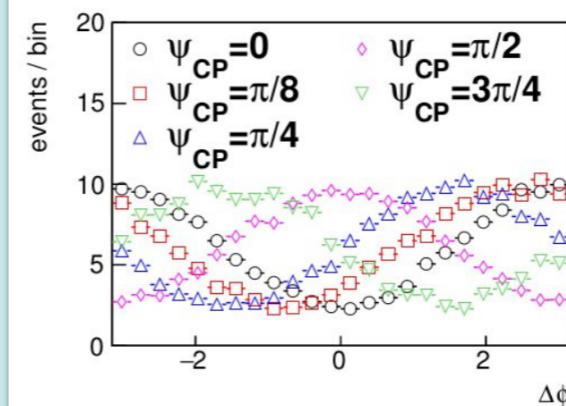


$\theta_{\pm}, \varphi_{\pm}$ direction of h_{\pm} with respect to τ - boost in τ_{\pm} rest frame

$\Delta\varphi$ angle between polarimeter planes

Ψ_{CP} CP mixing angle we want to measure

$\Delta\varphi$ at different Ψ_{CP}



$\Delta\varphi$ distribution shifts by $2\Psi_{CP}$

$2ab^{-1}$ @ 250 GeV

$$\langle \delta\Psi_{CP} \rangle \simeq 3.8^\circ$$

(preliminary)

D. Jeans, LCWS16

Self-coupling Measurement at ILC

Constructive interference between signal and BG diagrams @500GeV

→ **if +100% deviation, then $\Delta\lambda/\lambda=14\%$ expected!**

ILC can address the idea of **baryogenesis occurring at the electroweak scale.**

Strong 1st Order Phase Transition

Example: **Doublet-Singlet Mixing Model (HSM)**

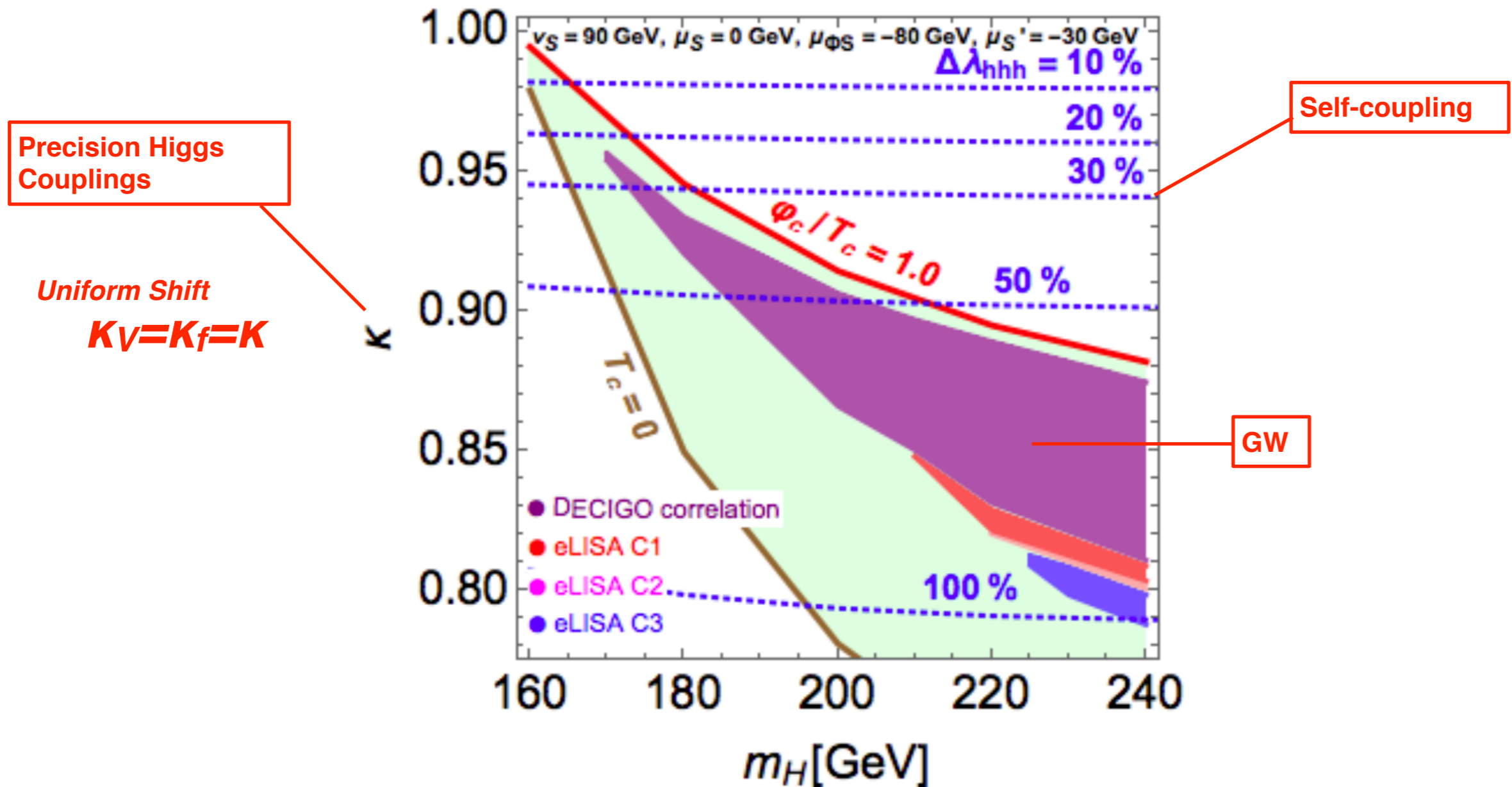


FIG. 2: The detectability of GWs and the contours of the deviations in the hhh coupling $\Delta\lambda_{hhh}$ in the m_H - κ plane. The projected region of a higher sensitive detector design is overlaid with that of weaker one. The region which satisfies both $\varphi_c/T_c > 1$ and $T_c > 0$ is also shown for a reference. The input parameters and legends are same as in Fig. 1

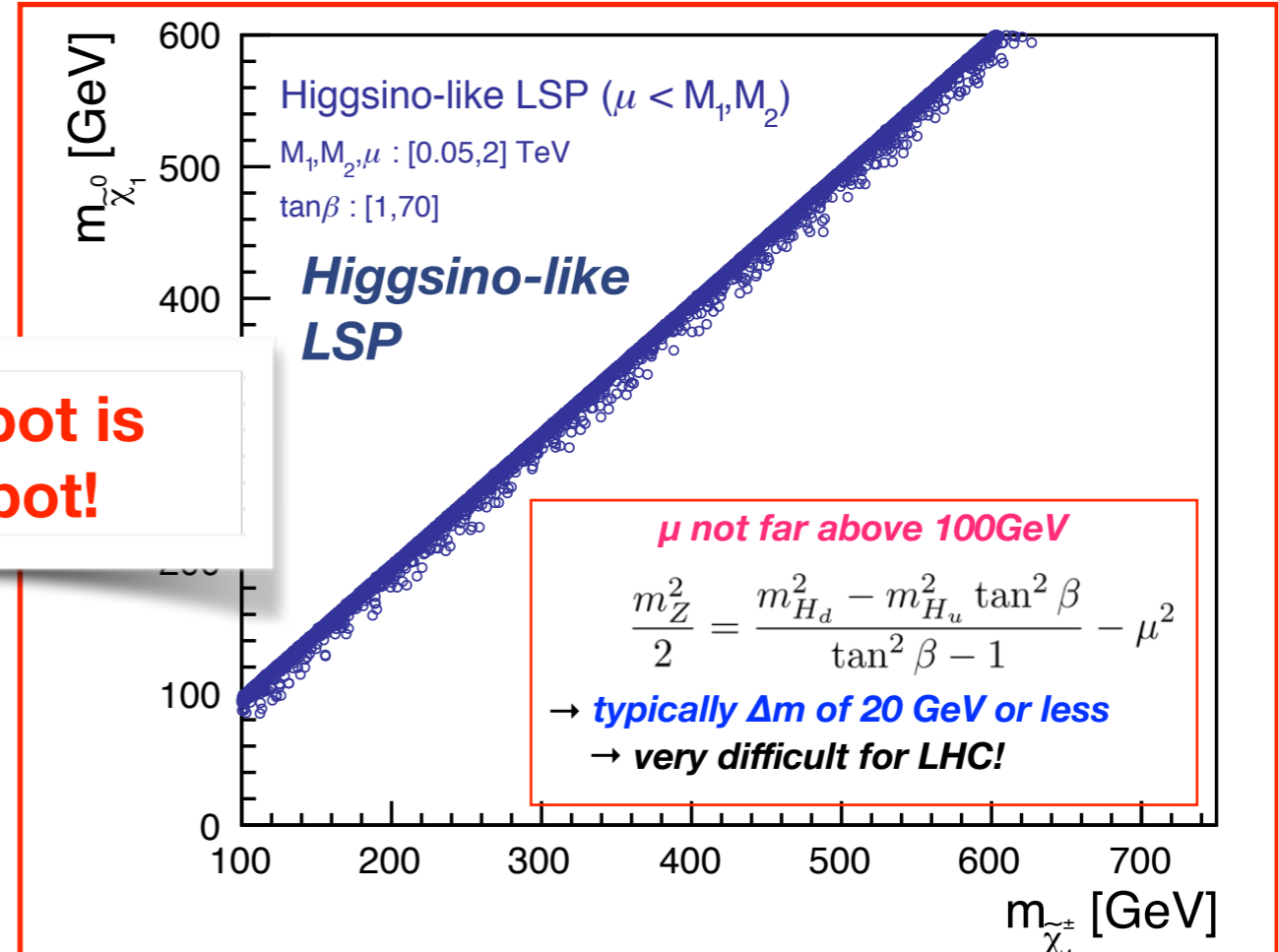
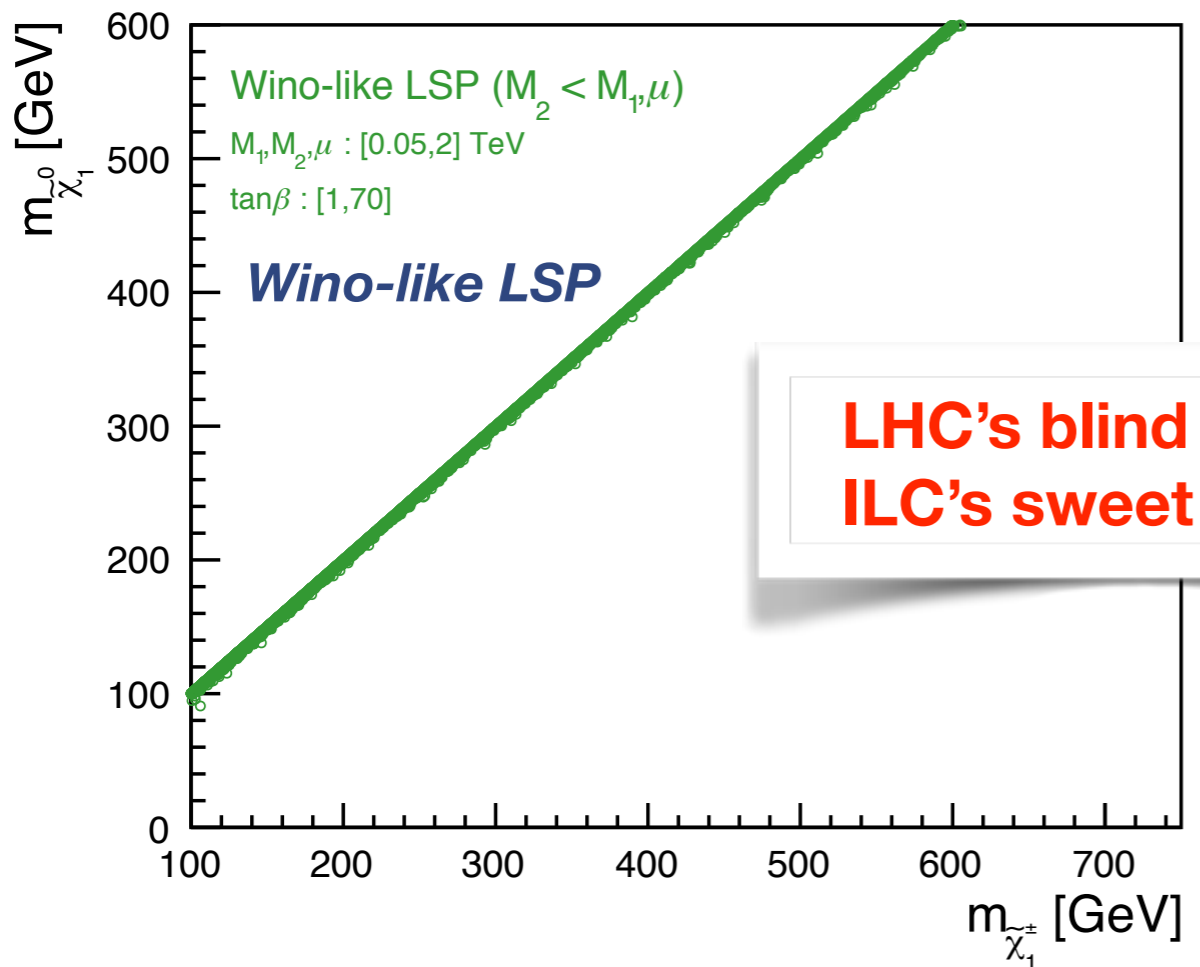
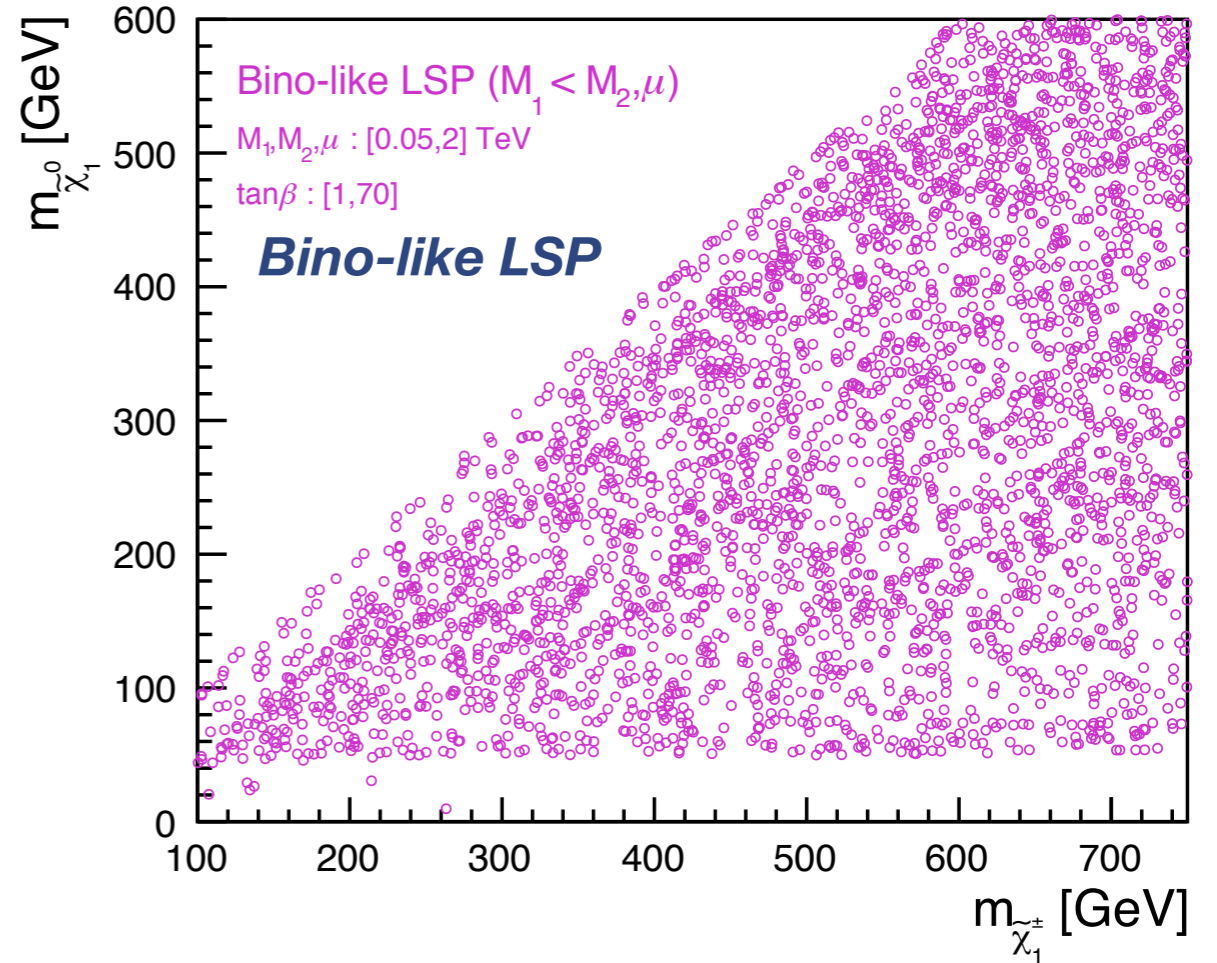
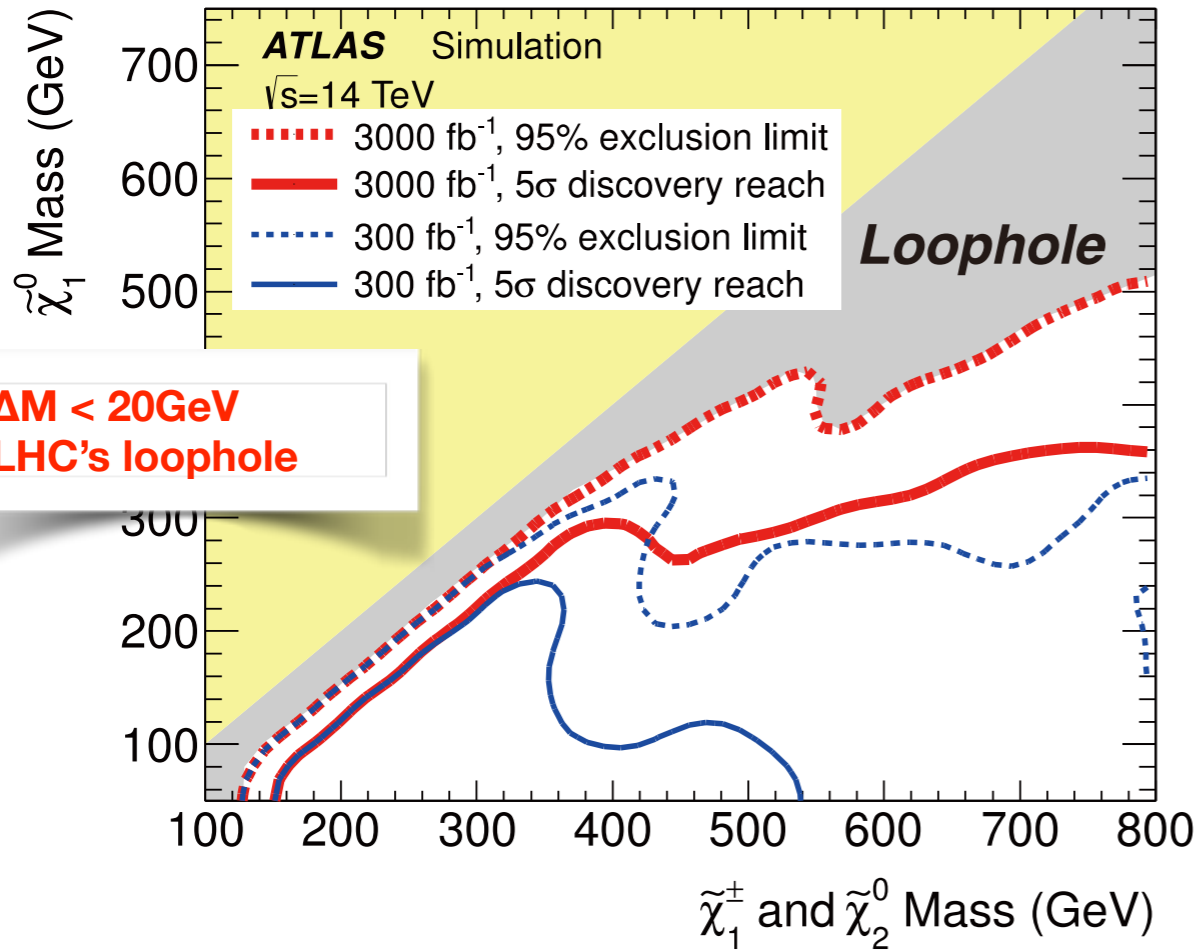
Direct Searches
for
New Particles

ILC, too, is an energy frontier machine!

*It will enter **uncharted waters of e^+e^- collisions***

Thanks to well-defined initial states,
clean environment w/o QCD BG, and polarized beams
ILC can cover blind spots of LHC

Chargino / Neutralino Searches



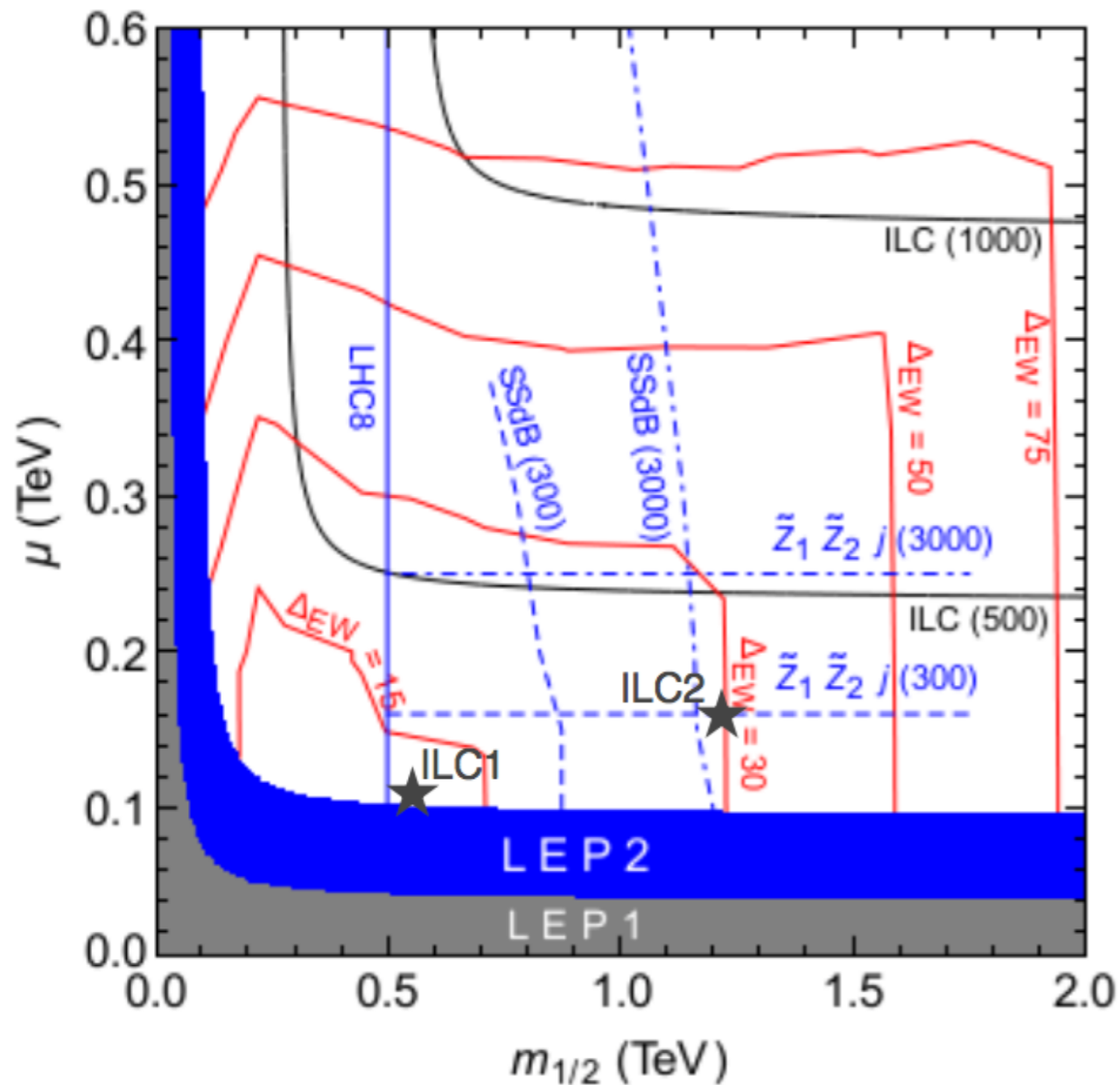
LHC's blind spot is ILC's sweet spot!

Higgsinos

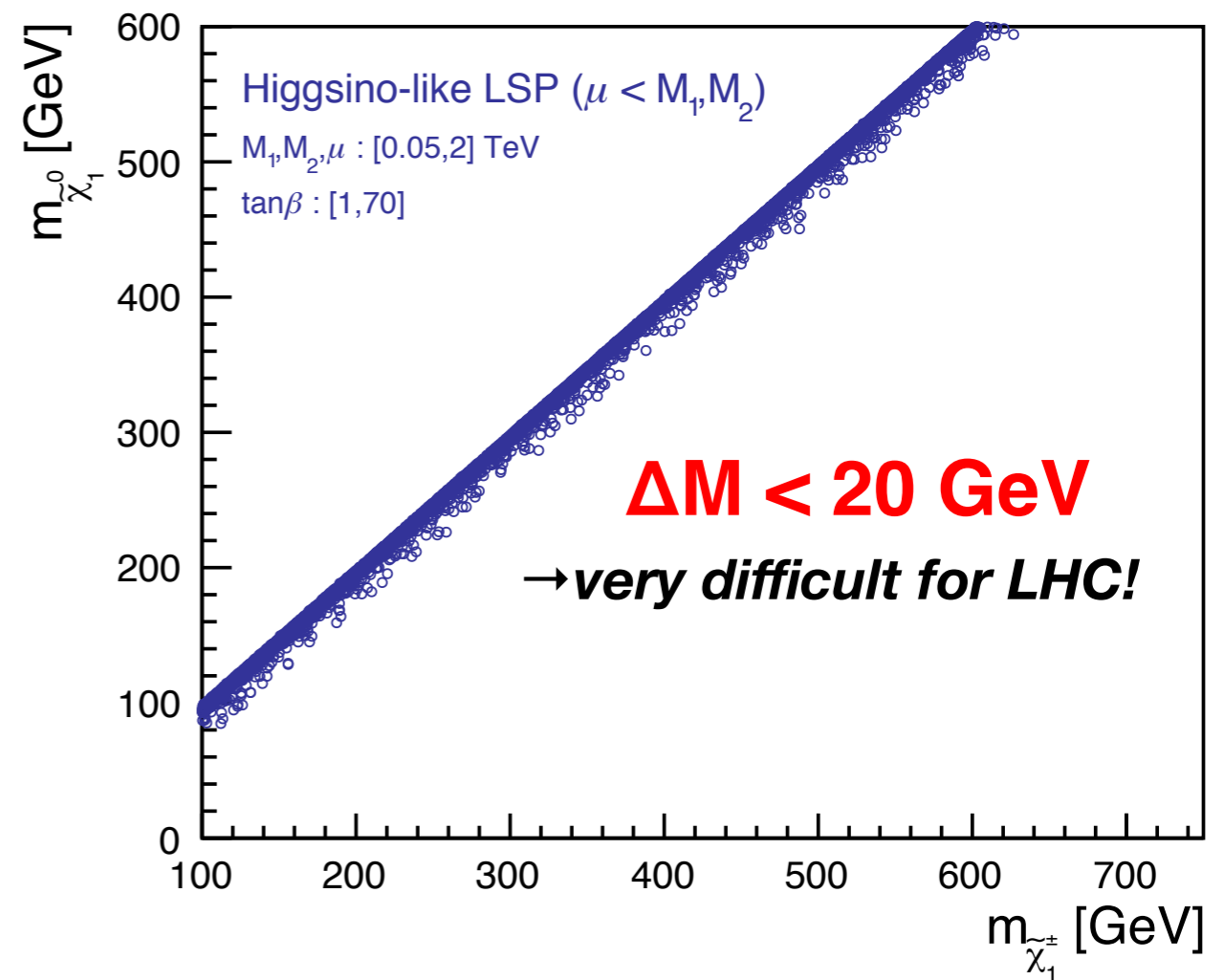
Radiatively driven Natural SUSY

μ not far above 100 GeV

$$\frac{m_Z^2}{2} = \frac{m_{H_d}^2 - m_{H_u}^2 \tan^2 \beta}{\tan^2 \beta - 1} - \mu^2$$



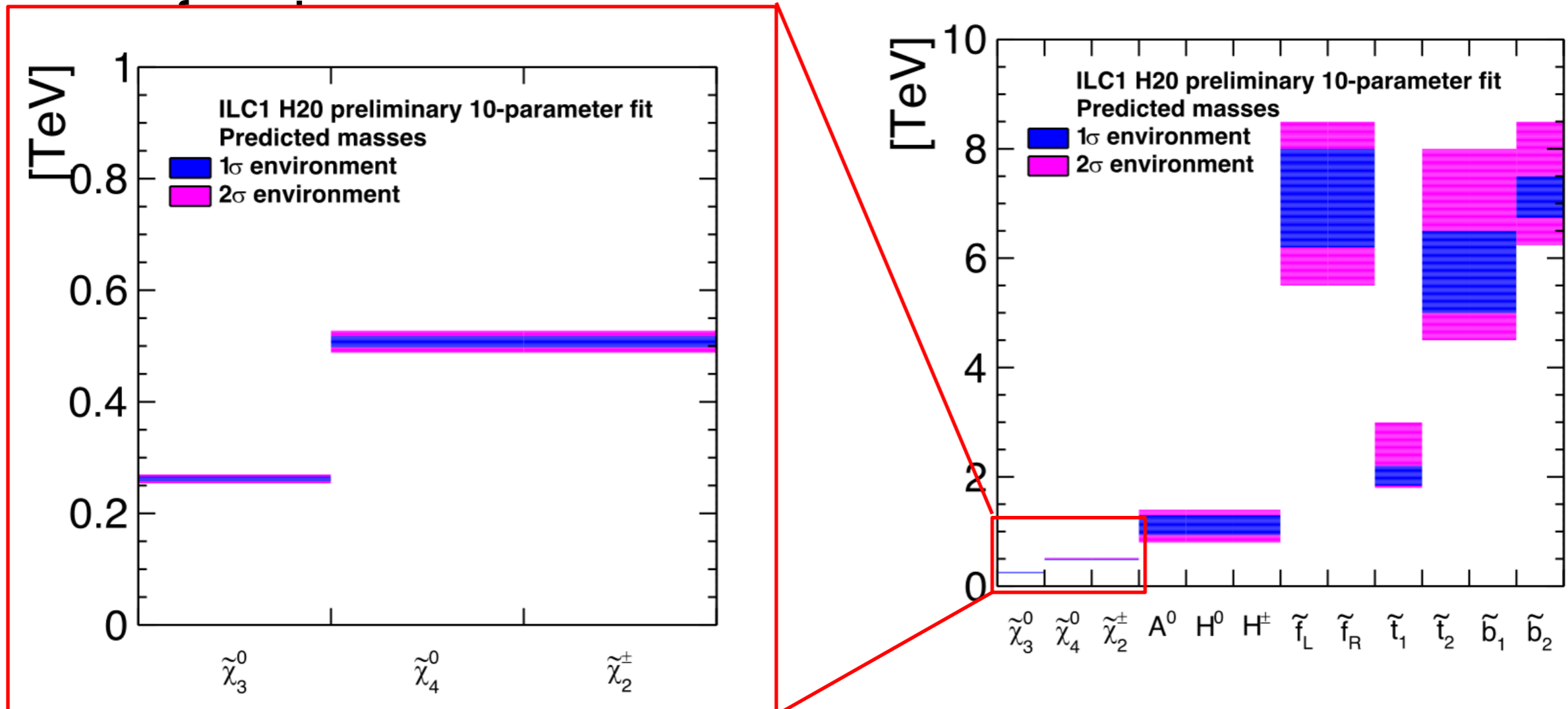
Higgsino-like LSP



Prediction of heavy states

Example: ILC1

- Heavier neutralino/chargino masses predicted to $\sim 2\%$
→ Sets the energy scale of ILC Upgrade, e.g. $\sqrt{s} = 1$ TeV
- Rough predictions for heavy Higgs, stop, heavy



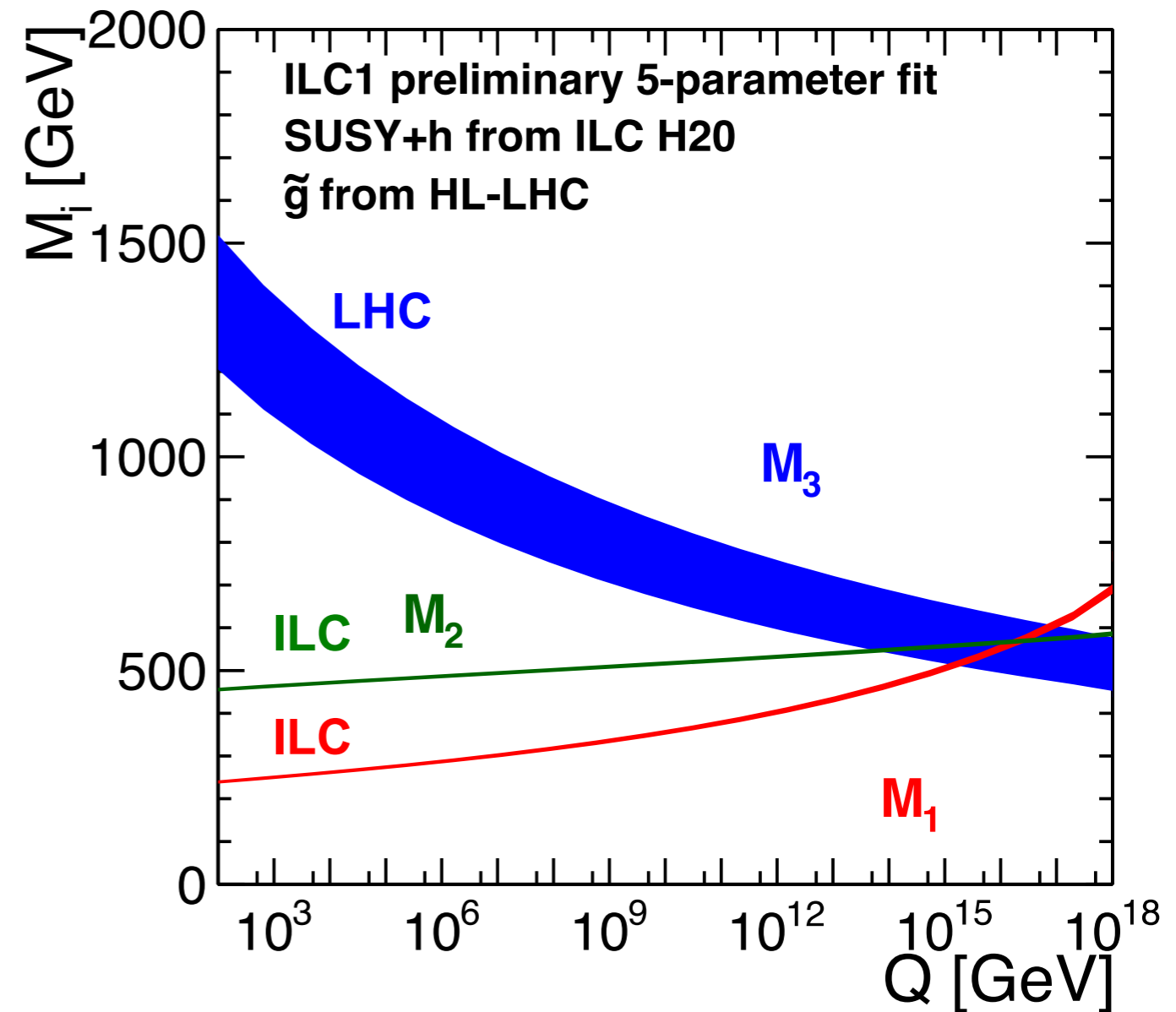
Test of GUT-scale Physics (1)

To be updated (S.-L. Lehtinen)

Example: ILC1 [20 year run]

In this scenario, the LHC sees the gluino ($M=1.4$ TeV), assume mass precision of 10% at LHC

- Take determined parameters at 1 TeV
- Run up to GUT scale with two-loop RGEs
- Other parameters fixed to model values



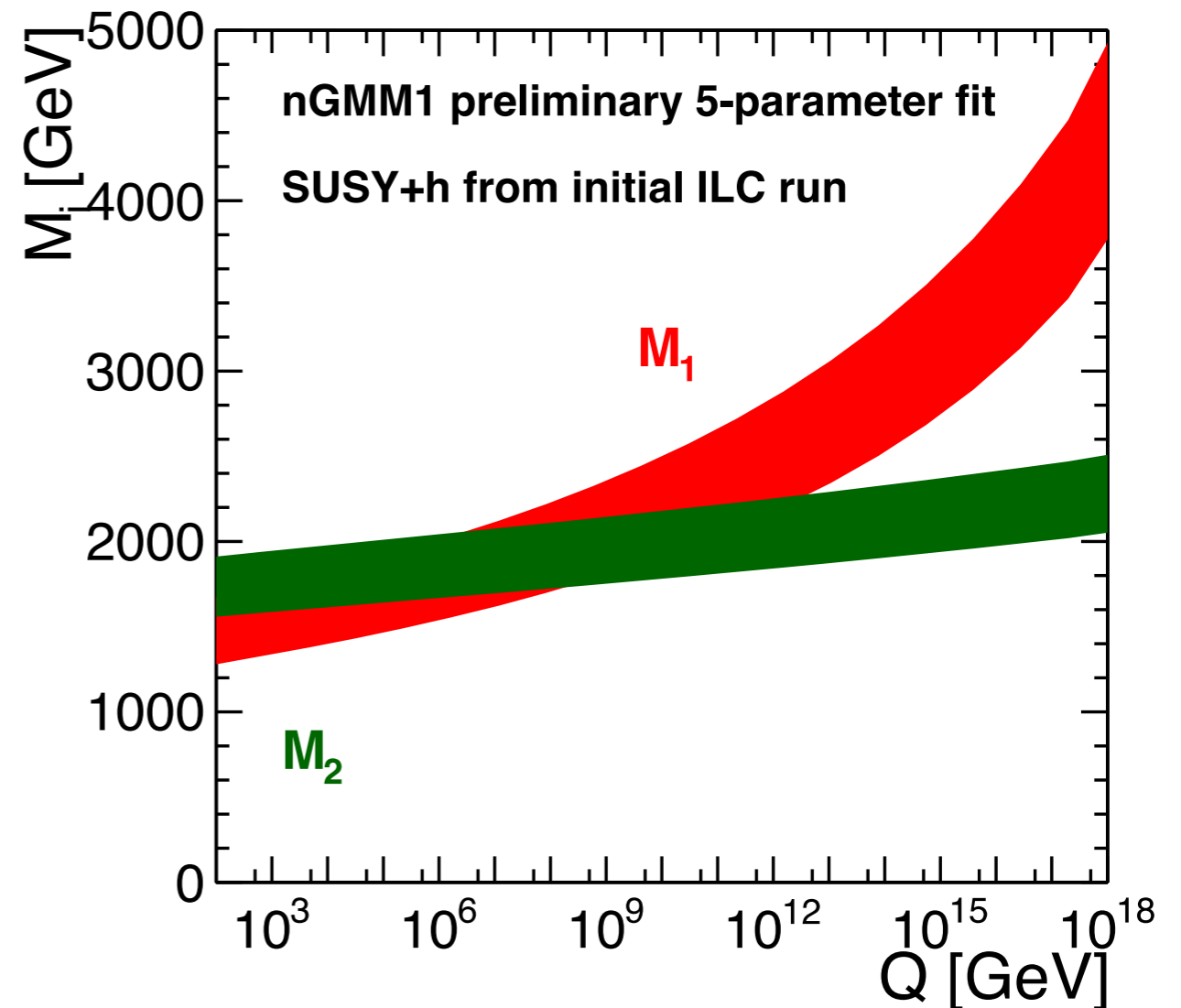
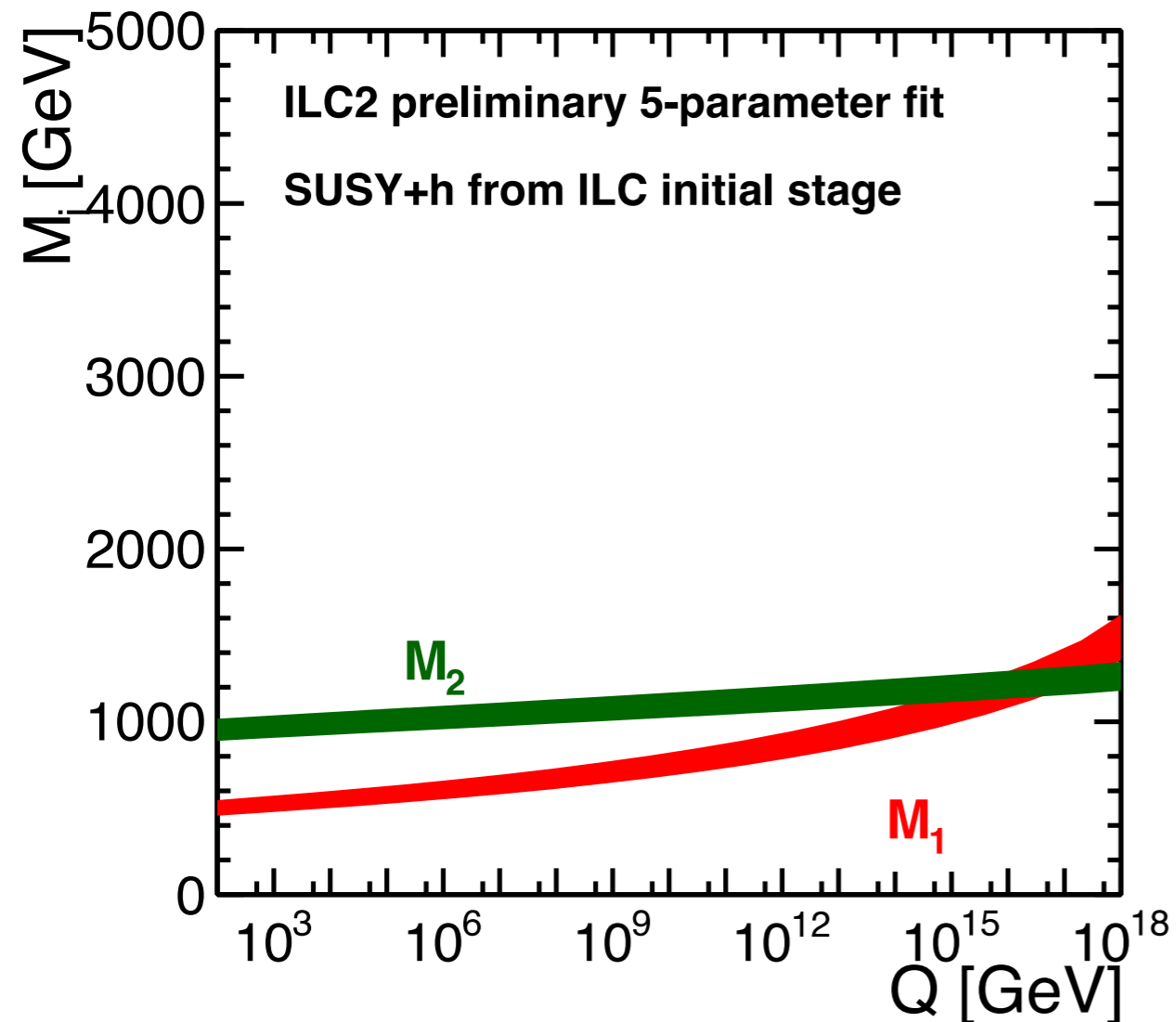
Test of Gaugino Mass Unification

LHC + ILC Synergy

Test of GUT-scale Physics (2)

To be updated (S.-L. Lehtinen)

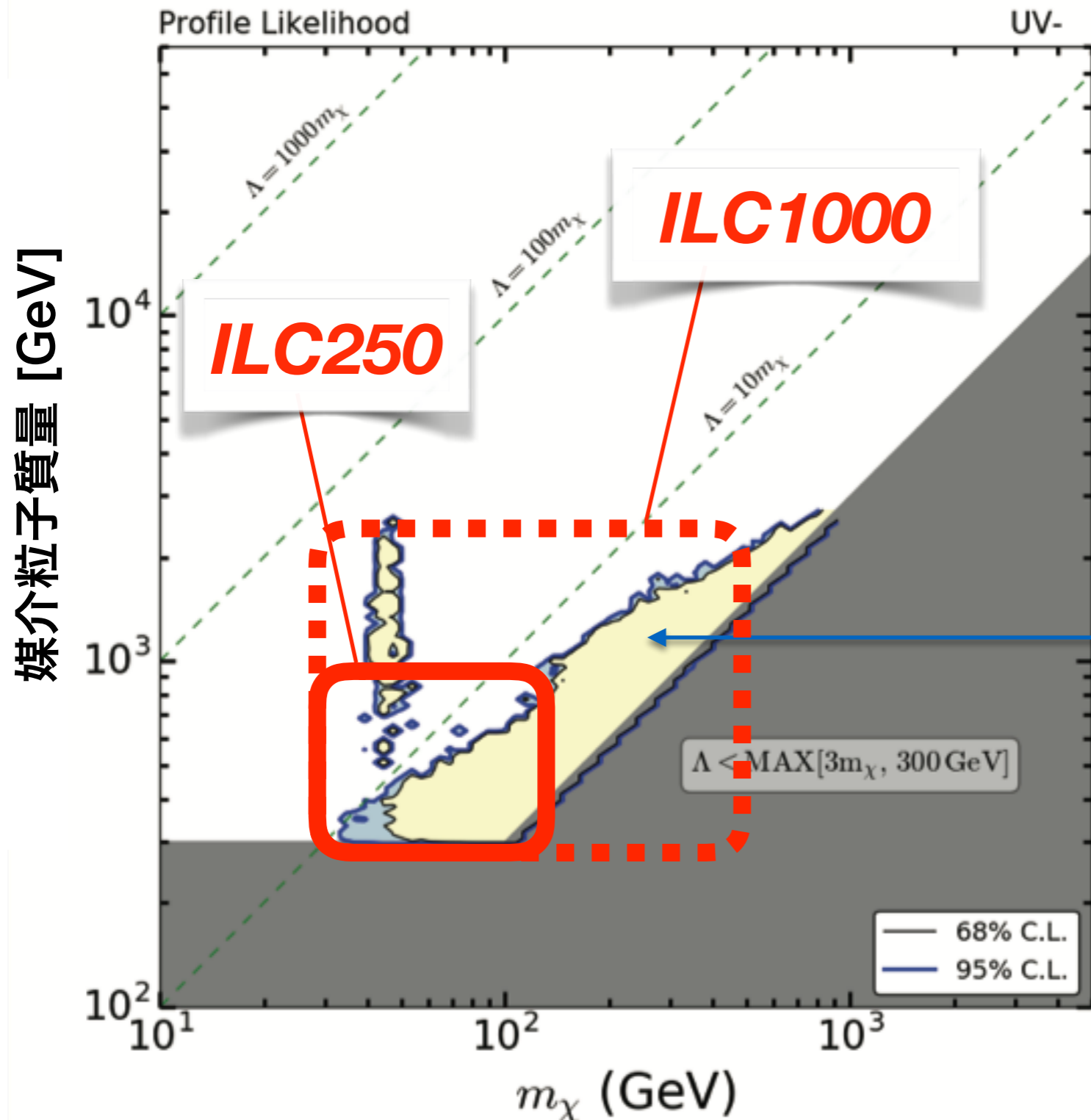
Example: ILC2 vs. nGMM1



Two scenarios with similar higgsino masses are distinguishable with ILC precision

WIMP 探索

単光子生成探索



薄い黄色の領域

= ILC 探索に残される領域

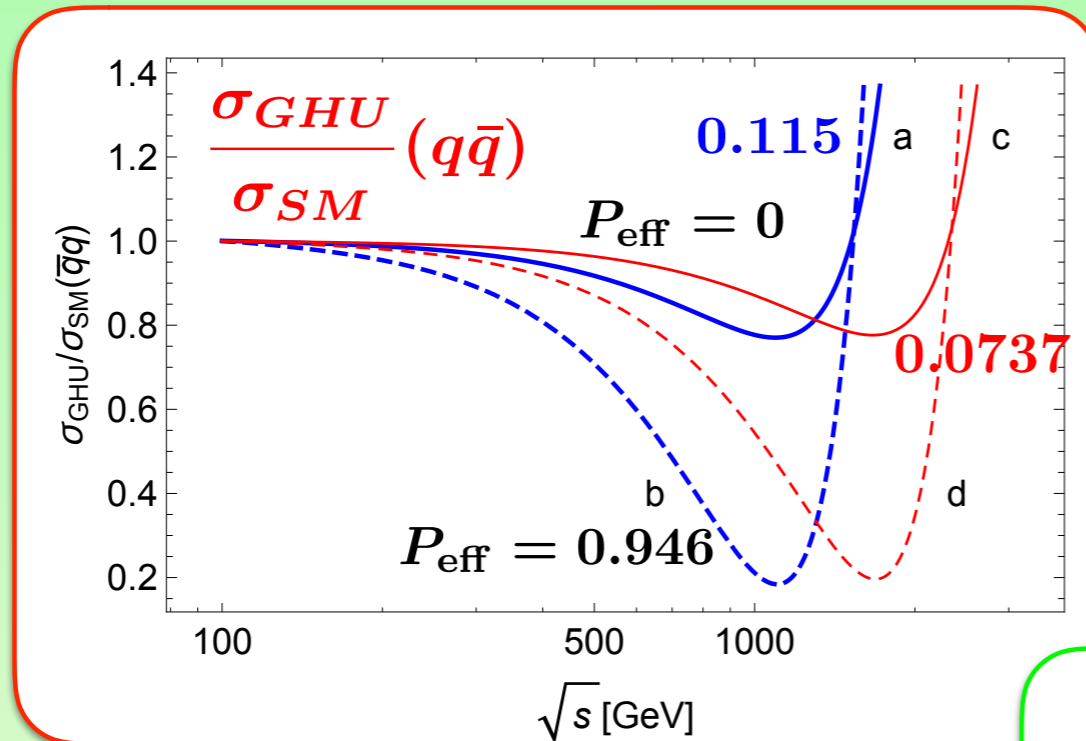
(HL-LHC や 他の直接探索の後)

**250 GeV ILC で
発見の可能性がある**



Gauge Higgs Unification

PL B 775 (2017) 297 (arXiv:1705.05282) : Funatsu, Hatanaka, **Hosotani**, Orikasa

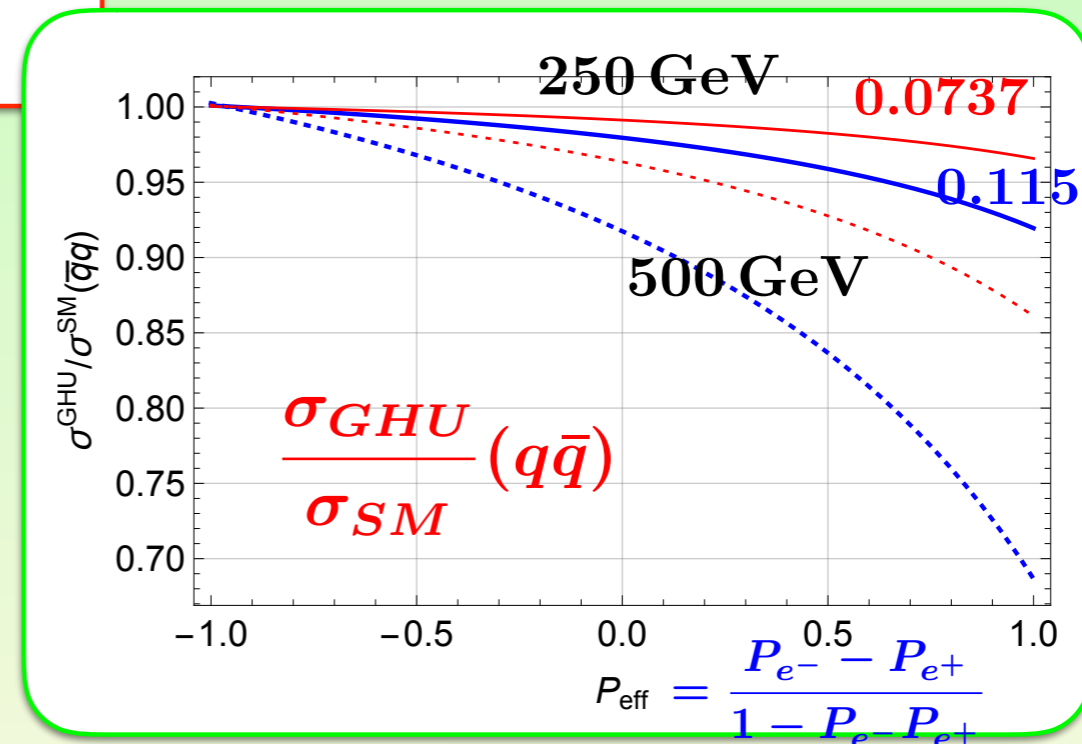


ILC

$$\frac{\sigma^{\text{GHU}}}{\sigma^{\text{SM}}}(\bar{q}q)$$

$$q = u, d, s, c, b$$

**Measurable
deviations
even at 250GeV**



Linear vs Circular Discussion

Political support: ILC has been considered in depth over a number of years by the government of Japan, which, **for the first time, officially showed its interest in the ILC.**

Politicians, governments, and funding agencies in Japan have been discussing the ILC with their counterparts in Europe and the US for a number of years, and have been encouraged by these discussions.

Other large collider projects have not yet reached a similar stage.

Technical maturity:

The RDR (CDR equivalent) for the ILC was published in 2007 and the **TDR in 2013.**

Circular collider projects have only recently published their CDRs.

The ILC's quoted performance and costs are deeply understood and thus reliable.

Timeline: Given a go-ahead, the ILC will very soon be ready to start construction. First collisions can occur within around 15 years from now.

According to current run plans, the ILC will complete its 2 ab⁻¹ 250 GeV run at about the time FCCee begins its ZH run.

Physics: Beam polarization is a powerful tool not available at high energy circular colliders.

When measuring Higgs couplings, **polarization compensates for the lower integrated luminosity at 250 GeV compared to FCCee (2 vs 5 ab⁻¹)** not just by the increased rates but also by its power to remove some correlations among different EFT operators.

In the case that ILC observes new phenomena other than in the Higgs couplings, polarization will play an essential role in determining their chiral properties.

Polarization will also allow **systematic uncertainties** on many measurements **to be significantly reduced.**

Upgradeability: The ILC's collision energy can be readily upgraded to 500 GeV and above.

A technical design for a 500 GeV stage exists.

Likewise, **a technical design exists for upgrading the luminosity:**

- **by a factor 2 by doubling the number of bunches per pulse,**
- **another factor 2 by doubling the repetition rate.**

The ILC250 infrastructure is reusable. It provides long-term perspectives beyond current technologies (e.g. a plasma-based accelerator).

CepC, FCC, ILC, CLIC

luminosity comparison

Single IP

e^+e^- Collider Luminosities

