

# 250 GeV ILC の物理の意義

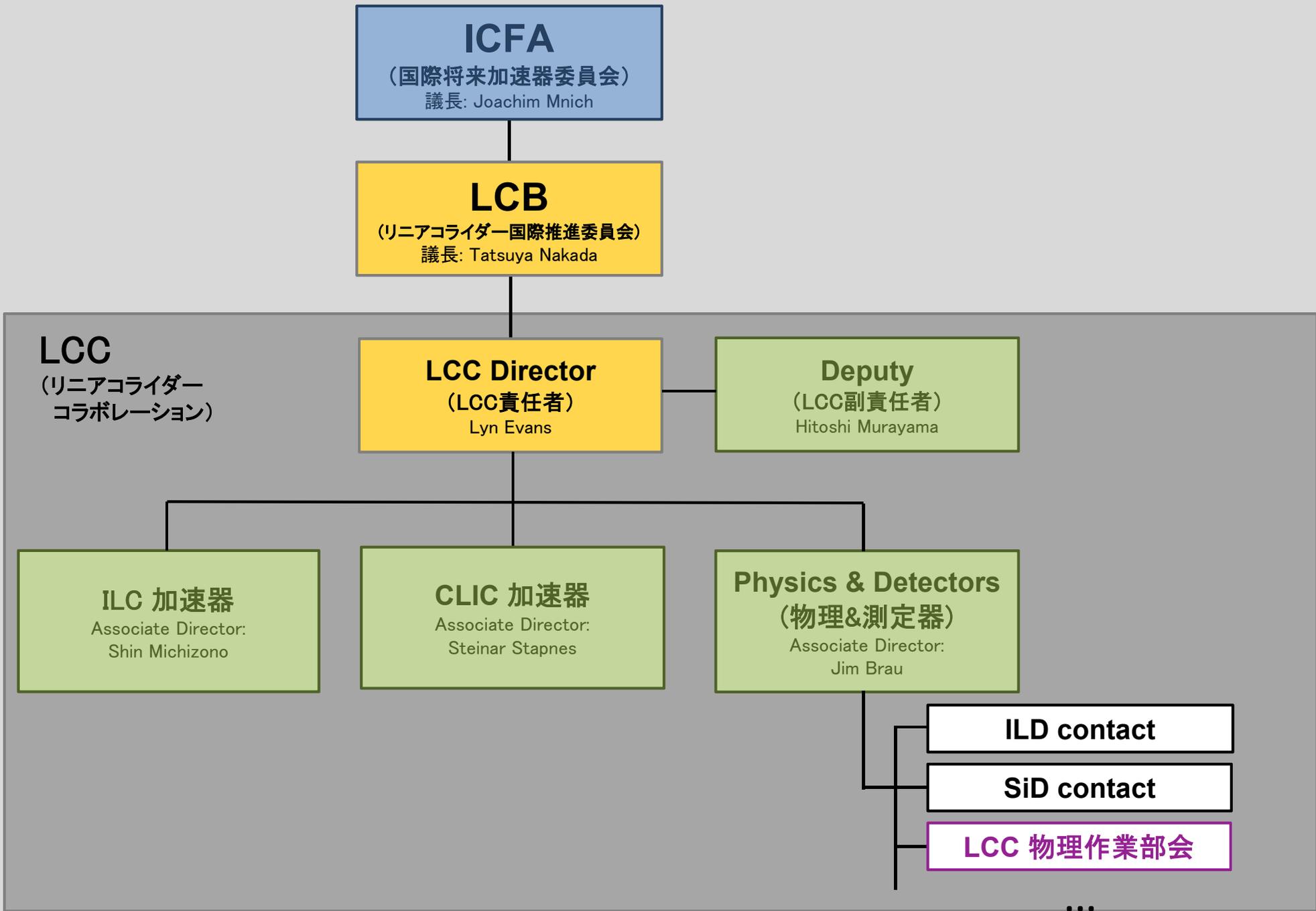
– LCC物理作業部会「250 GeV国際リニアコライダーの物理の意義」について –

リニアコライダーコラボレーション(LCC)物理作業部会共同議長

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

2018/01/18



## JAHEP (高エネルギー物理学研究者会議) 声明: 2017年7月

LHC RunII のこれまでの結果を踏まえて科学的な重要性を考慮すると、高エネルギー物理学研究者会議は、ILCを、重心系250GeVのヒッグスファクトリーとして、早期に建設することを提案する。

## LCB (リニアコライダー国際推進会議) 声明: 2017年11月

これらの理由から、リニアコライダー国際推進委員会(LCB) は、250GeV の ILC を日本に建設するという JAHEP の提案[4]を強く支持し、時宜を得た決定に向け、日本政府が当該提案を本格的に検討していただけるよう推奨します。

## ICFA (国際将来加速器委員会) 声明: 2017年11月

ICFAは、今回の委員会で示された、リニアコライダー計画推進委員会(LCB)の報告書の結論を支持しており、日本が、日本のイニシアチブによる国際プロジェクトとして、重心系エネルギー250GeVの「ヒッグス・ファクトリー」のILCを、時宜を得て実現することを強く奨励します。

これまでの所、LHC では標準理論を超える物理の兆候は見えていない

→ LHC 探索領域に新粒子がないか、  
あるとしても LHC の死角にある

→ ヒッグスの精密測定的重要度が高  
まった

# ヒッグスは特別！

真空中に充満している！

標準理論の中で唯一のスピンゼロの素粒子！

標準理論の全ての素粒子に質量を与える！  
(標準理論のパラメータのほとんど全てが  
ヒッグス関連の手で入れたパラメータ)

## ヒッグス＝謎の中心

そもそも標準理論では真空中に充満した理由が説明できない！  
(標準理論では、真空中に充満するように手でパラメータを調整しただけ)

# LHCで見つかったヒッグスは 標準理論のヒッグスとは限らない

というか、ヒッグス場が真空を満たした理由を説明できるような標準理論を超える物理理論では、真空を満たしたヒッグス場が標準理論のそれとは違っているはず

ヒッグスには、超対称性の場合のように、兄弟（ヒッグスが複数種類）や親戚（他のスピンの素粒子）がいるかも知れないし、複合ヒッグスの場合のように、そもそも素粒子ではないかも知れない

## ヒッグス＝謎の中心

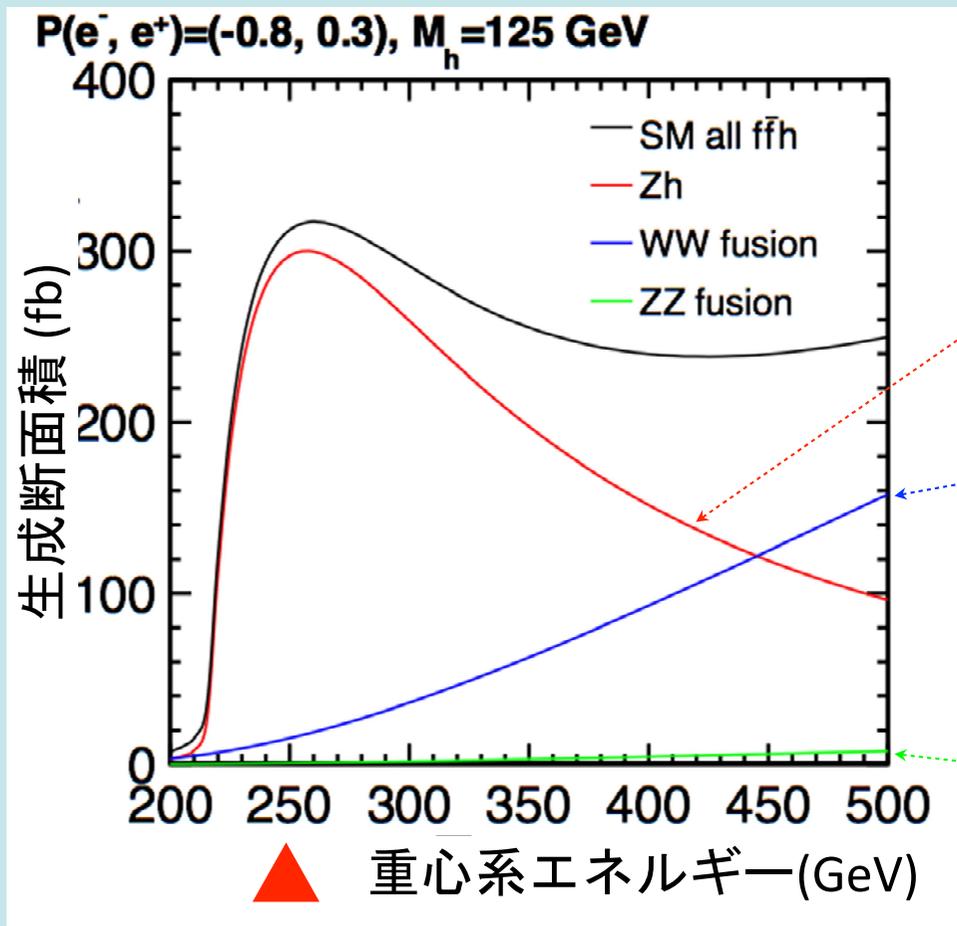
ヒッグス粒子を大量に作って調べる！

ヒッグス工場  
としての  
**250 GeV ILC**

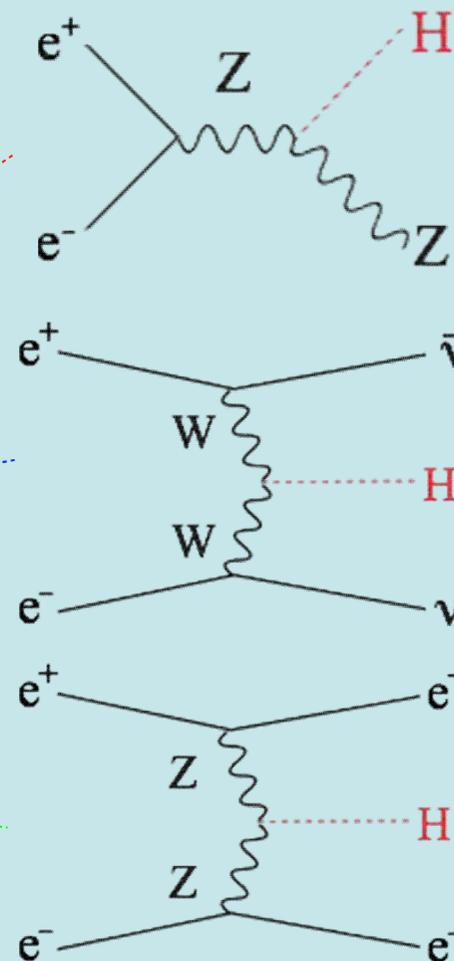
# 250 GeV は特別なエネルギー

1ヒッグス生成断面積が最大！

生成断面積 (=ヒッグスの出来やすさ)



250 GeV でヒッグスの断面積最大: (約50万個:  $2 \text{ ab}^{-1}$ )



大量のヒッグス粒子を生成し、精密測定する！

# LCC 物理作業部会による最新報告(LCB、I CFA会合への入力として準備):

arXiv:1710.07621v1 [hep-ex] 20 Oct 2017

## Physics Case for the 250 GeV Stage of the International Linear Collider

LCC PHYSICS WORKING GROUP

KEISUKE FUJII<sup>1</sup>, CHRISTOPHE GROJEAN<sup>2,3</sup>, MICHAEL E. PESKIN<sup>4</sup>  
(CONVENERS); TIM BARKLOW<sup>4</sup>, YUANNING GAO<sup>5</sup>, SHINYA KANEMURA<sup>6</sup>,  
HYUNGDO KIM<sup>7</sup>, JENNY LIST<sup>2</sup>, MIHOKO NOJIRI<sup>1,8</sup>, MAXIM PERELSTEIN<sup>9</sup>,  
ROMAN PÖSCHL<sup>10</sup>, JÜRGEN REUTER<sup>2</sup>, FRANK SIMON<sup>11</sup>, TOMOHIKO TANABE<sup>12</sup>,  
JAMES D. WELLS<sup>13</sup>, JAEHOON YU<sup>14</sup>; MIKAEL BERGGREN<sup>2</sup>,  
MORITZ HABERMEHL<sup>2</sup>, SUNGHOON JUNG<sup>7</sup>, ROBERT KARL<sup>2</sup>,  
TOMOHISA OGAWA<sup>1</sup>, JUNPING TIAN<sup>12</sup>; JAMES BRAU<sup>15</sup>,  
HITOSHI MURAYAMA<sup>8,16,17</sup> (EX OFFICIO)

### ABSTRACT

The International Linear Collider is now proposed with a staged machine design, with the first stage at 250 GeV with a luminosity goal of  $2 \text{ ab}^{-1}$ . In this paper, we review the physics expectations for this machine. These include precision measurements of Higgs boson couplings, searches for exotic Higgs decays, other searches for particles that decay with zero or small visible energy, and measurements of  $e^+e^-$  annihilation to  $W^+W^-$  and 2-fermion states with improved sensitivity. A summary table gives projections for the achievable levels of precision based on the latest full simulation studies.

我々の見解では、ヒッグス粒子の精密研究こそが、現在まだ利用されていない、標準理論を超える新しい物理の発見を可能とする最も重要なプローブである。

# ヒッグス精密測定

標準理論を超える(BSM※<sup>1</sup>)物理  
をテストするため、  
ヒッグス結合※<sup>2</sup>の(相対値でなく)  
絶対値を知りたい！

※1: **BSM** = **B**eyond the **S**tandard **M**odel

※2: **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

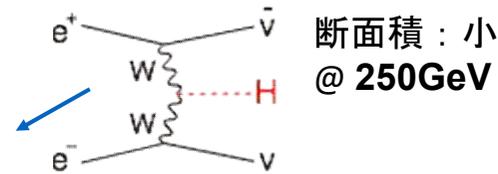
# 新しい展開：有効場理論(EFT)による解析

## 250 GeV ILCの潜在的な問題:

ヒッグス結合の絶対値測定に必要な  $\Gamma_h$  (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: **E**ffective**F**ield**T**heory (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  $\sigma$  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)

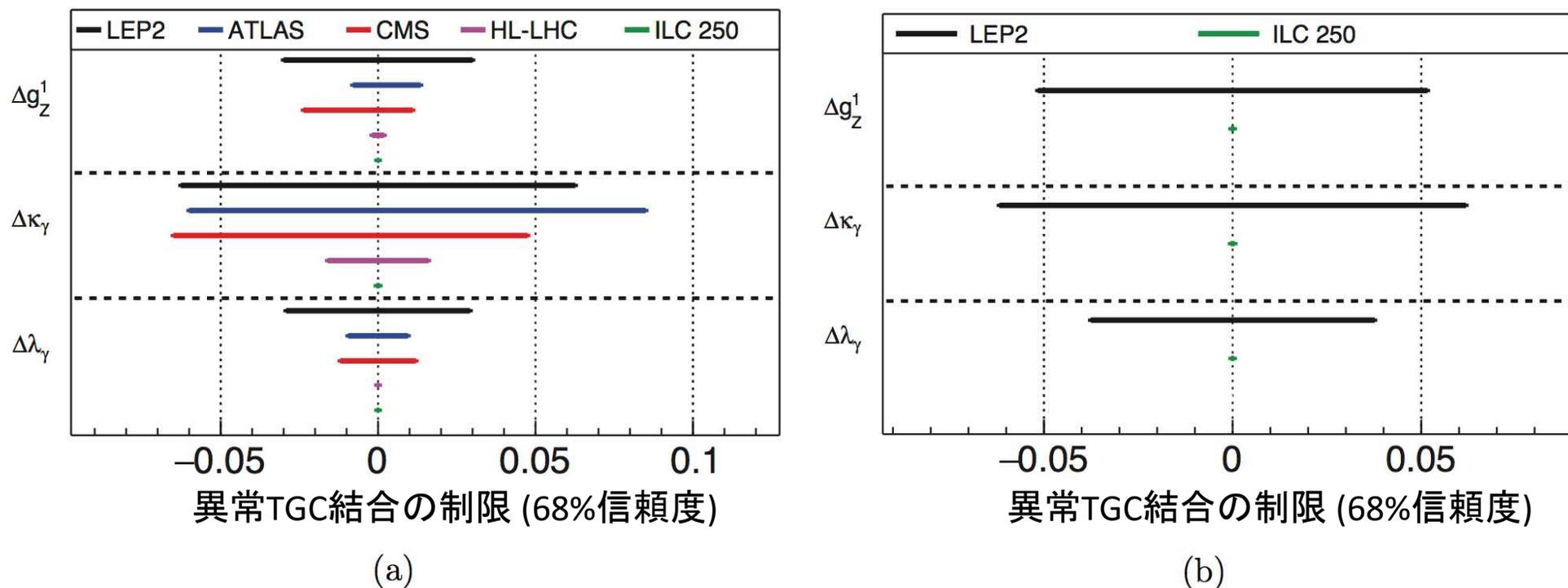


図 11: LEP 2、LHC Run1、HL-LHC および ILC 250 ( $\sqrt{s} = 250$  GeV、積分ルミノシティ  $2000 \text{ fb}^{-1}$ ) における、1パラメータフィットと3パラメータフィットによるTGCの精度。

**HL-LHC, LEP2 からの大幅な精度改善!**

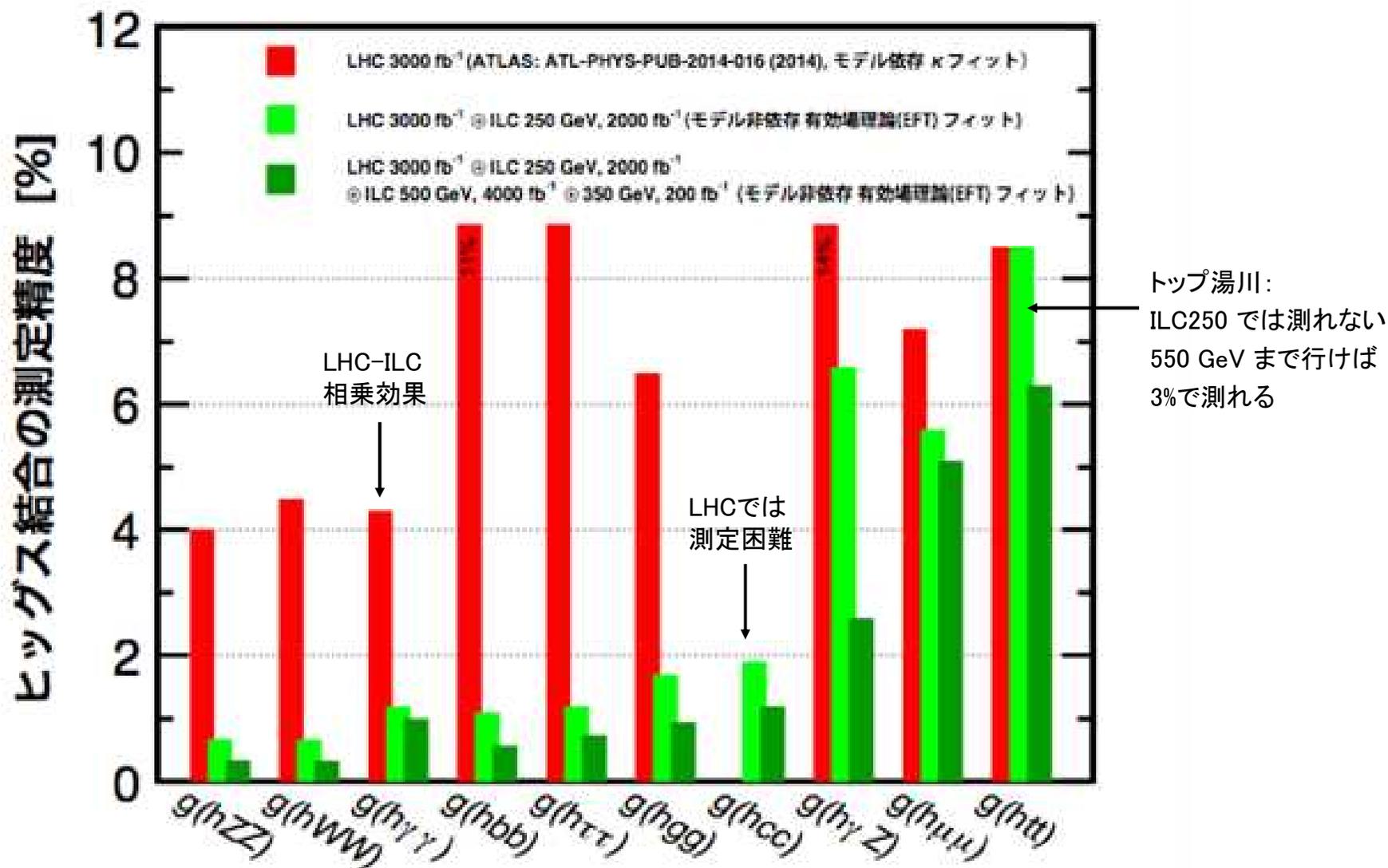


図 5: 表 1 に示した EFT 形式によるヒッグス結合の測定精度と ATLAS 共同実験グループによる HL-LHC のモデル依存フィットによるヒッグス結合の予想精度 [23] の比較。それ以前の HL-LHC 予想値については文献 [28] にまとめられている。

**LHC の精度を大幅改善 → BSM に対するより高い感度 !**

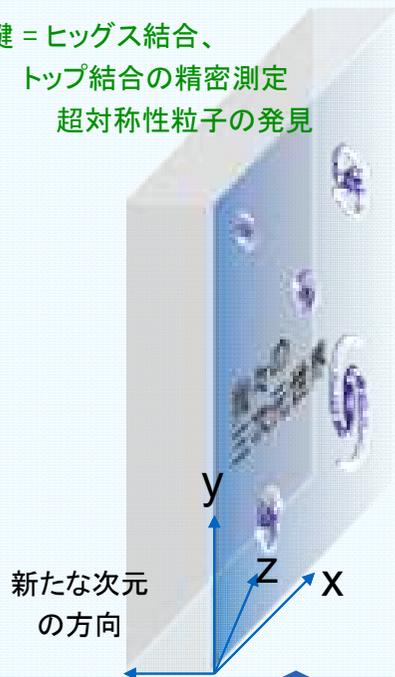
なぜヒッグス結合の  
精密測定は重要か？

# 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

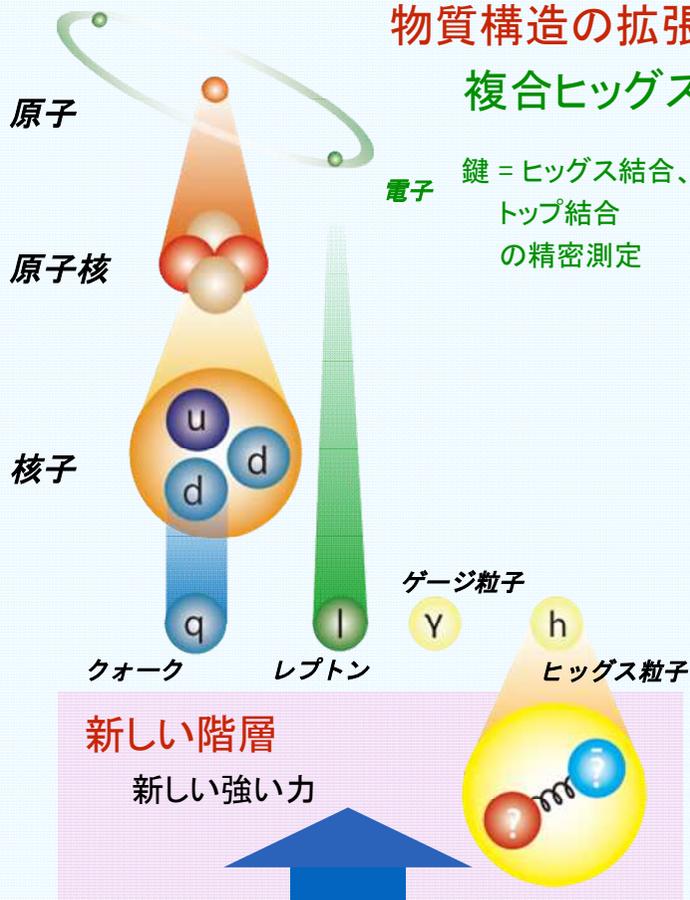
鍵 = ヒッグス結合、  
トップ結合の精密測定  
超対称性粒子の発見



## 物質構造の拡張

### 複合ヒッグス

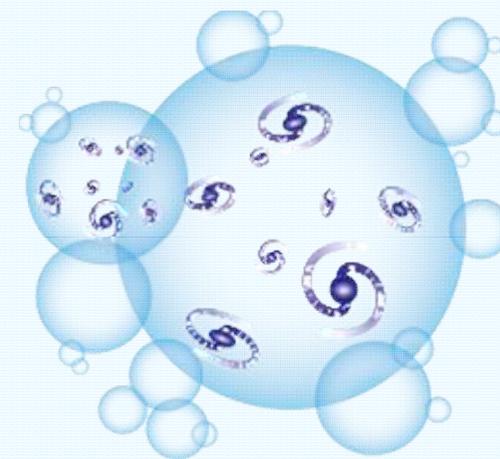
鍵 = ヒッグス結合、  
トップ結合  
の精密測定



## 全く新しい原理？

### 複数字宇宙 + 人間原理？

鍵 =  $m_t$  と  $m_h$  の精密測定



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」

第二の道: 「より深い階層」

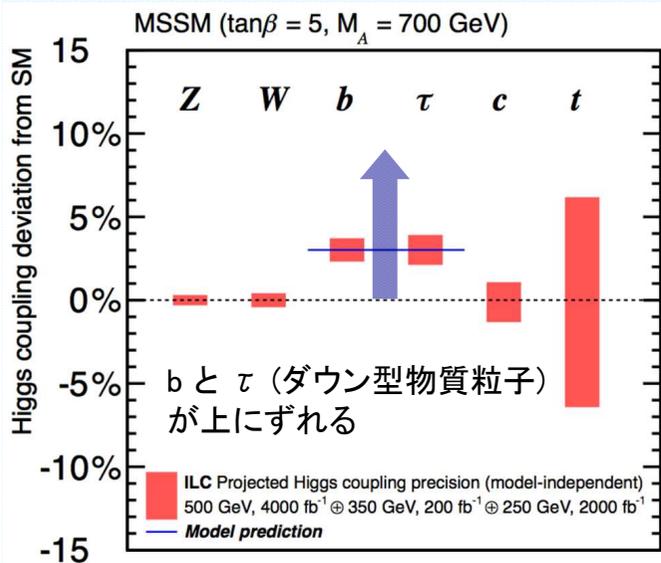
第三の道: 「複数字宇宙？」

ILC

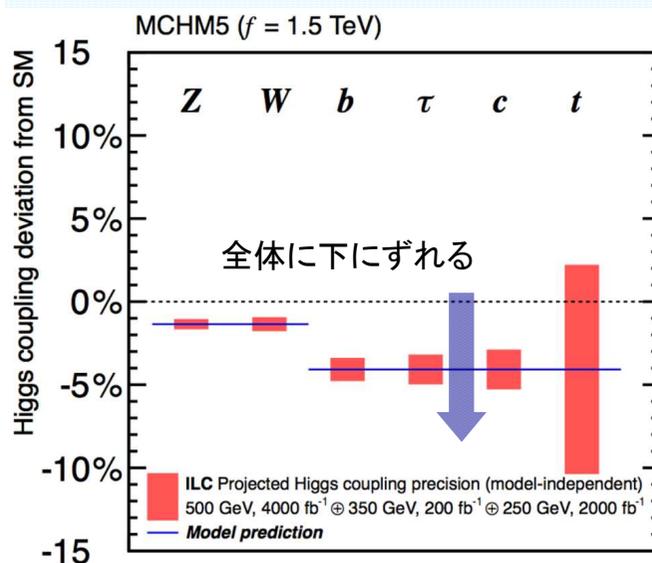
# どの道に進むのか？

ILC の測定精度があると三つの道に対するヒッグス結合定数のずれのパターンの違いを指紋照合できる！

## 超対称性

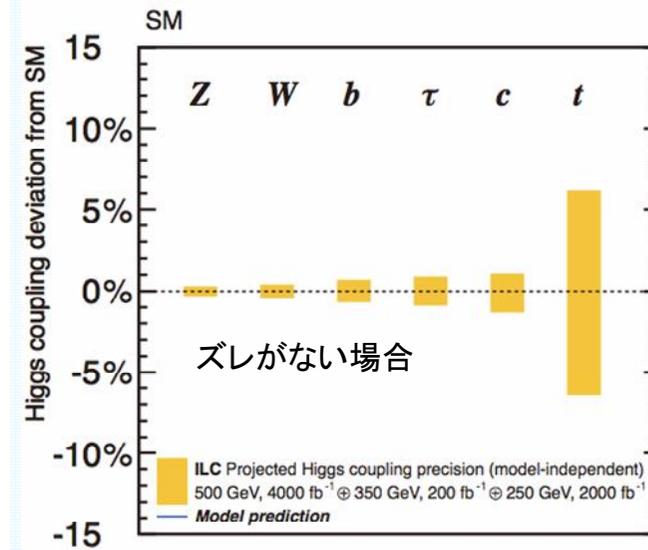


## 複合ヒッグス



## 複数字宙？

(標準理論)



ヒッグス粒子と他の標準理論の粒子との相互作用の強さ (=結合定数) を精密測定  
→ ずれのパターンから進路が決まる！

LHCでの新粒子直接探索と相補的：パラメータによってはLHCを大きく超える感度！

# 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

BSM = Beyond the Standard Model

## 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-ラディオオン [42]	-1.5	-1.5	+10.0	-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

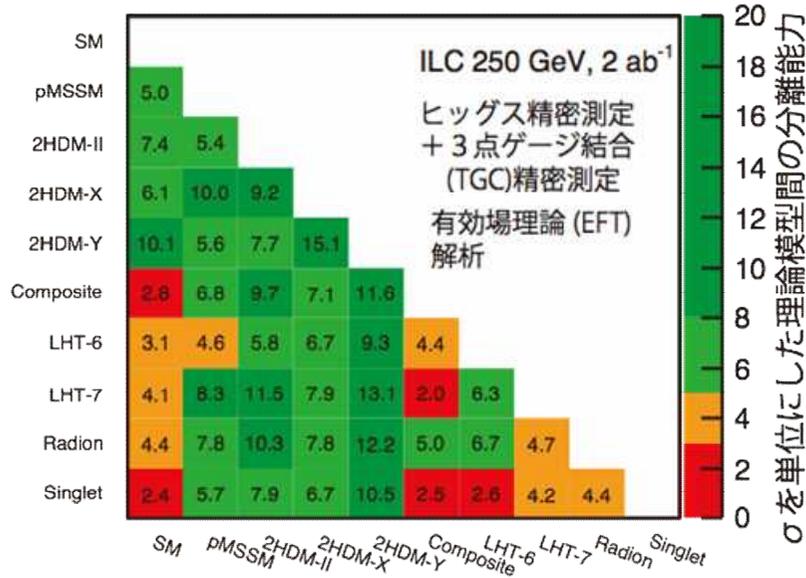
期待されるずれの大きさは高々10%程度

→ ずれを見るには高い精度が必要

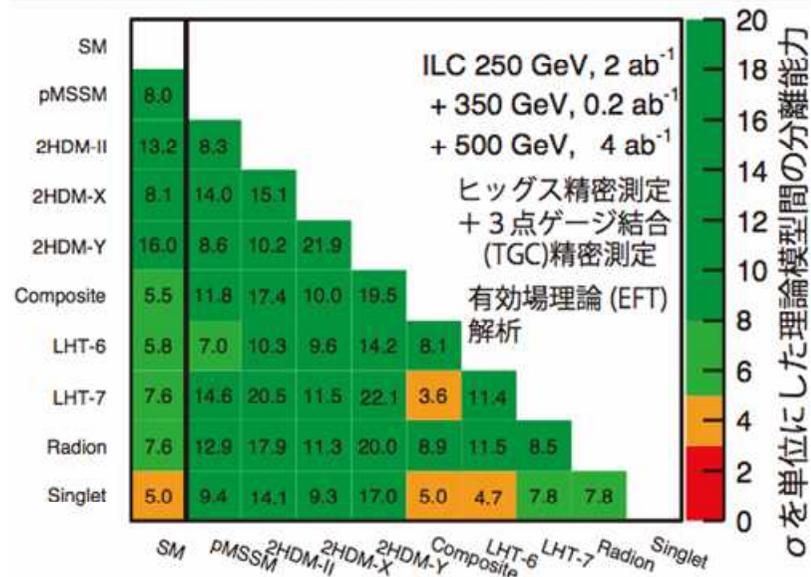
異なる新物理は異なるずれのパターンを示す

→ パターンから新物理の方向性が分かる

## $\sigma$ を単位に表した BSM 模型間の分離能力



ほとんどの理論模型について3 $\sigma$ 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 $\sigma$ 以上の感度で区別可能@500 GeV

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

どの方向性の標準理論を超える物理が選ばれるかにより、他の大きな謎(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、…)の答えも変わる！

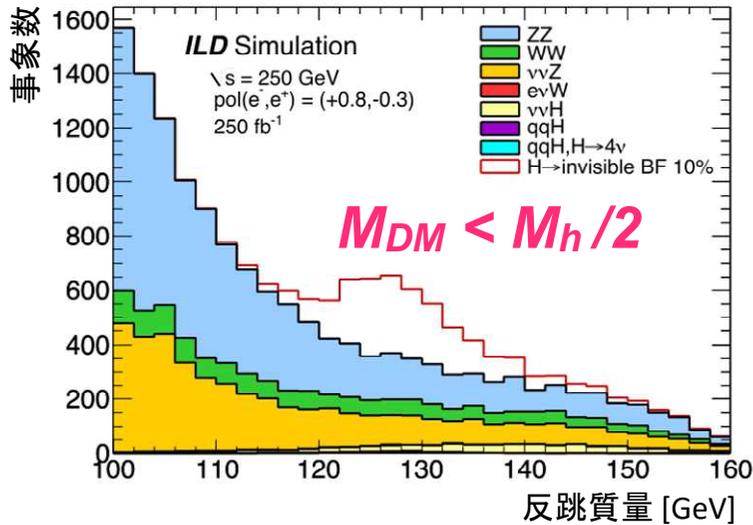
**素粒子物理学の進路を示す！**

# ヒッグスの不可視／エキゾチック崩壊※1

反跳質量法でタグづけされたヒッグス粒子を使って  
ありとあらゆるエキゾチック崩壊の探索が可能

## ヒッグスの不可視崩壊

※1: エキゾチック崩壊＝標準理論にはない崩壊



H→不可視状態の分岐比 (BR) < 0.3%  
95%信頼度  $2ab^{-1}$  @ 250GeV

暗黒物質(ダークマター:DM)のモデル構築の有望な方法  
＝隠れたセクターの存在の仮定

ヒッグスポータル

ニュートリノポータル

$$\epsilon |\varphi|^2 |\hat{S}|^2$$

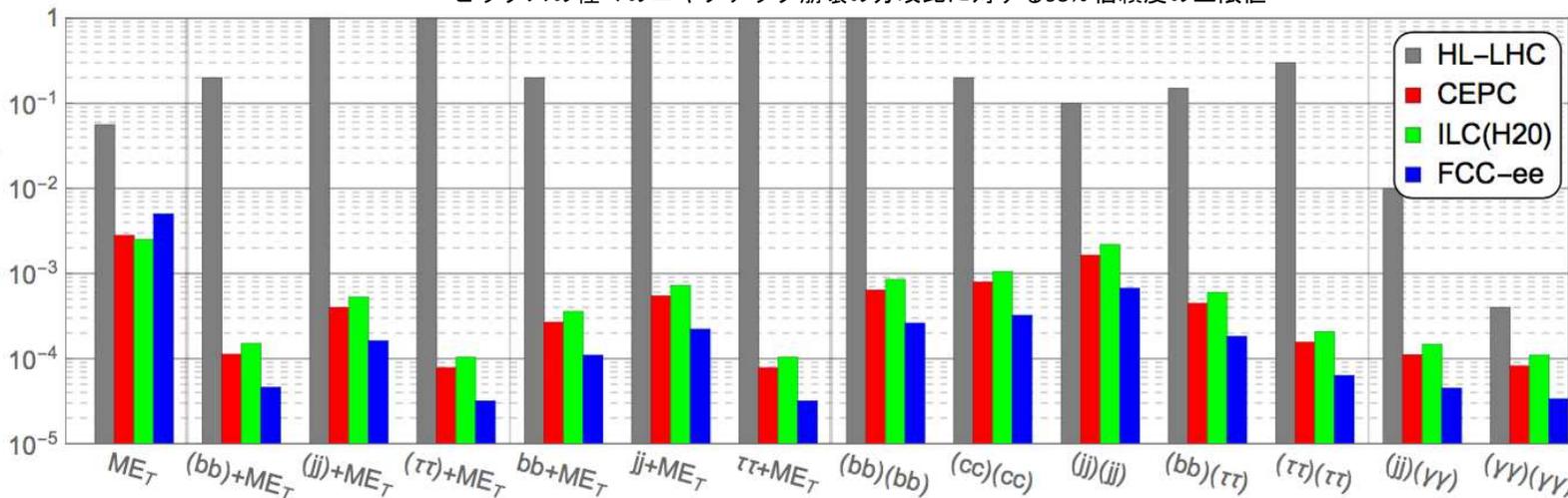
$$\epsilon L^\dagger \cdot \varphi \hat{N}$$

の場合の格好の探索場所

## ヒッグスのエキゾチック崩壊

ヒッグスの種々のエキゾチック崩壊の分岐比に対する95%信頼度の上限值

エキゾチック崩壊の分岐比  
に対する制限



Liu, Wang, Zhang  
arXiv: 1612.09284

分岐比(BR)= 0.1%  
→ 500 事象  
 $2ab^{-1}$  @ 250GeV

# 新粒子直接探索

- ・ LEP2 に比べて  $10^3$  高いルミノシティ
- ・ ビーム偏極
- ・ より高性能な測定器

により、断面積の小さい領域、圧縮質量スペクトルの場合に対する感度が大きく上昇する。

# 暗黒物質 (WIMP) 探索 @ ILC

Weakly Interacting Massive Particle

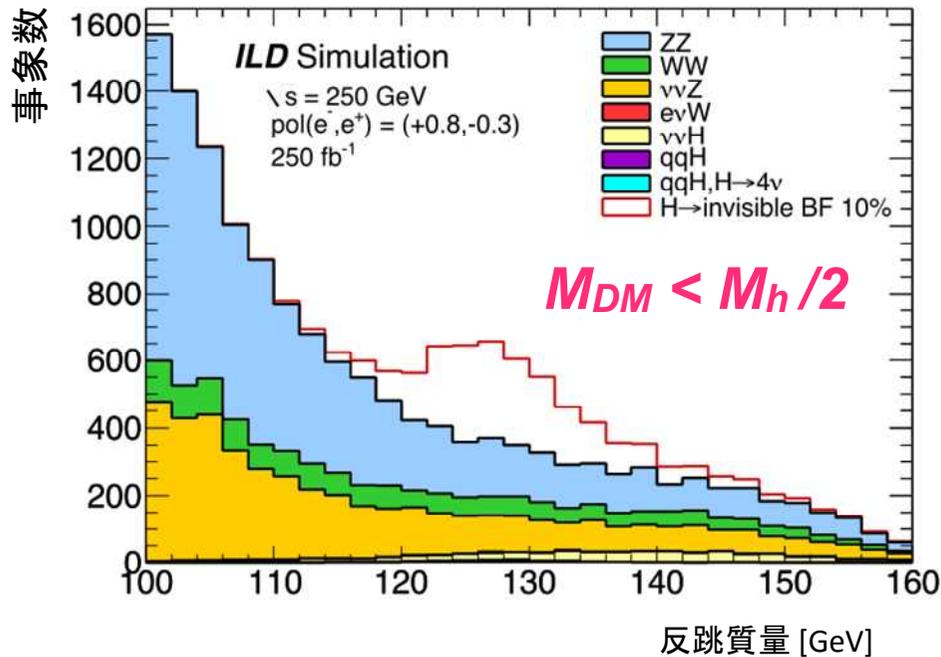
## 1. 新粒子の暗黒物質への崩壊

多くの標準理論を超える理論で暗黒物質(ダークマター:DM)には、荷電を持った相棒がいる。

超対称性: The Lightest SUSY Particle (LSP) = DM → 相棒は DM に崩壊。

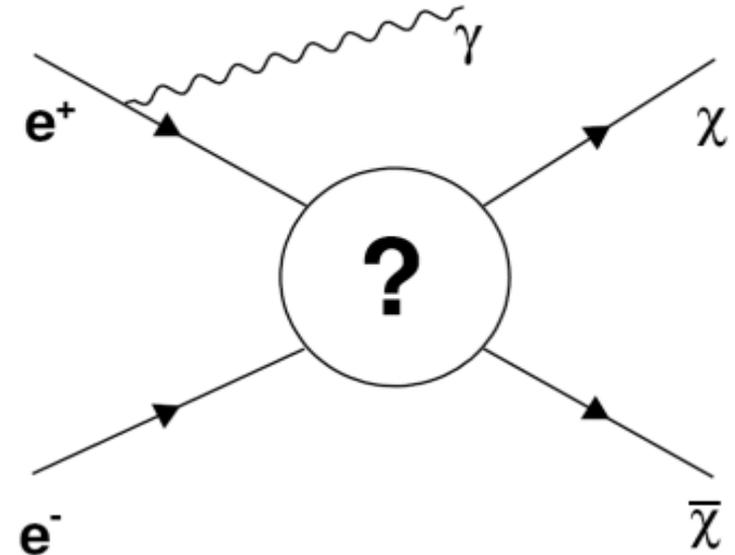
- 横運動量欠損を伴う事象(例: 軽いチャージーノ: 質量差が小さいとLHCでは発見困難)

## 2. ヒッグスの不可視崩壊



探索可能不可視崩壊の分岐比: 0.3% まで!

## 3. 単光子生成探索



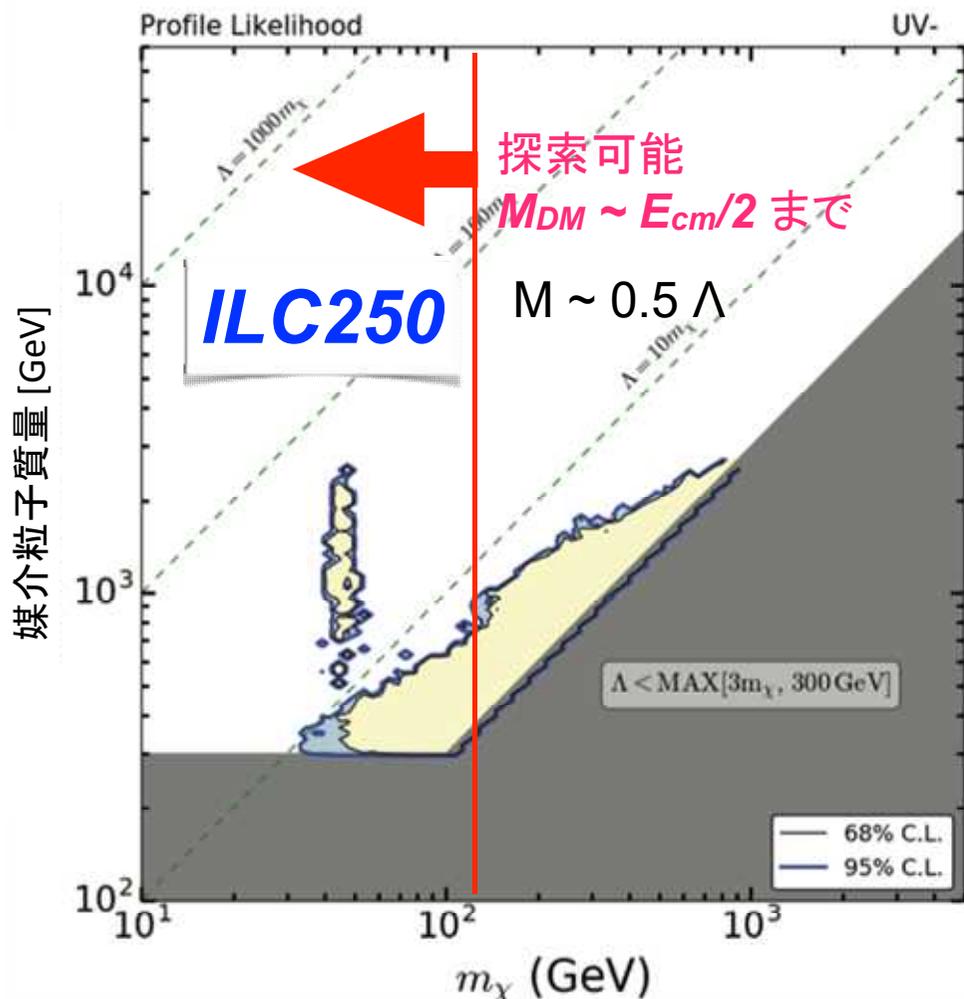
探索可能暗黒物質質量:  $M_{DM} \sim E_{cm}/2$  まで!

主としてレプトンや電弱ゲージボソンに結合するDM探索

# WIMP 探索

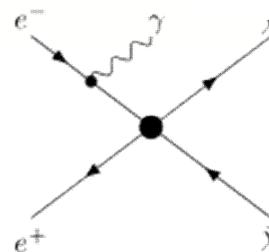
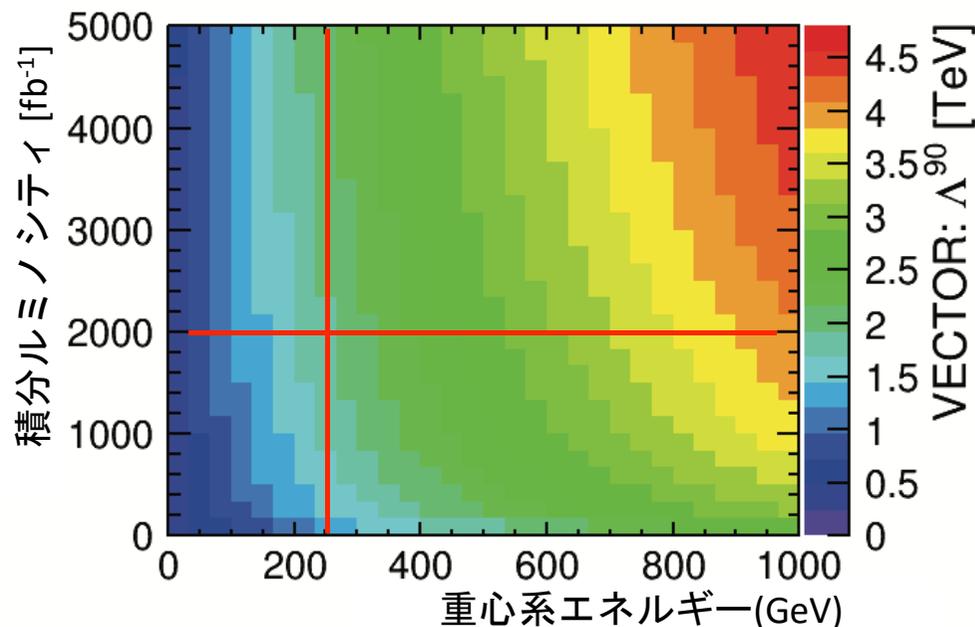
arXiv: 1702.05377

## 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 他の直接探索の後に残される領域)

250 GeV でも探索可能な領域がかなり残る！



$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \frac{1}{\Lambda^2} \mathcal{O}_i$$

- LHC: 大きい質量  $m_{\text{DM}}$  に感度
- ILC: 大きい  $\Lambda$  に感度

**LHC-ILC 相乗効果!**

# 250 GeV を超えて

より高いエネルギーで可能になること

トップクォークの電弱結合の精密測定

トップクォーク質量の精密測定

トップ湯川結合の直接測定

ヒッグスの3点自己結合の測定

新粒子探索の質量リーチの拡大

# 各エネルギーでの主な物理

ILC 物理の目標		250 GeV	350 GeV	500 GeV
ヒッグス 精密測定	ヒッグス結合精密測定	✓	✓	✓
	ヒッグス質量精密測定	✓		
	ヒッグス全崩壊幅精密測定とヒッグス結合の規格化	✓	✓	✓
	ヒッグス不可視崩壊／エキゾチック崩壊※1	✓	✓	✓
	ヒッグス3点自己結合※2直接測定			✓
トップ クォーク の物理	トップ湯川結合※3の直接測定			✓
	トップ質量の精密測定		✓	
	トップクォークの電弱結合※4の精密測定			✓
その他の 精密測定	ボトムクォークの電弱結合の精密測定	✓	✓	✓
	W精密測定 (mw, TGCを含む)	✓	✓	✓
	2 フェルミオン過程による重い共鳴の間接探索	○	○	○
新粒子 直接探索	暗黒物質その他の不可視粒子探索	○	○	○
	超対称性粒子探索	○	○	○
	拡張ヒッグス探索	○	○	○

例えば 500 GeV 加速器であれば 350 GeV、250 GeV での実験が可能である。ここでは、特定のエネルギーでしかできない測定をはっきりさせるため、各エネルギーでできる物理をエネルギー毎に個別に示した

- ✓ : 高精度測定が可能
- ✓ : ある程度の精度の測定が可能
- ✓ : 最近の進展

※1: エキゾチック崩壊  
= 標準理論にはない崩壊

※2: ヒッグス3点自己結合  
= ヒッグス粒子3つの自己相互作用

※3: トップ湯川結合  
= ヒッグスとトップの相互作用

※4: トップクォークは標準理論の中で最も重い粒子で、ヒッグス凝縮の物理と深く関係: Z粒子との結合に新物理の影響が見えると期待される



## 新粒子探索

○ の大きさは探索可能質量上限に比例

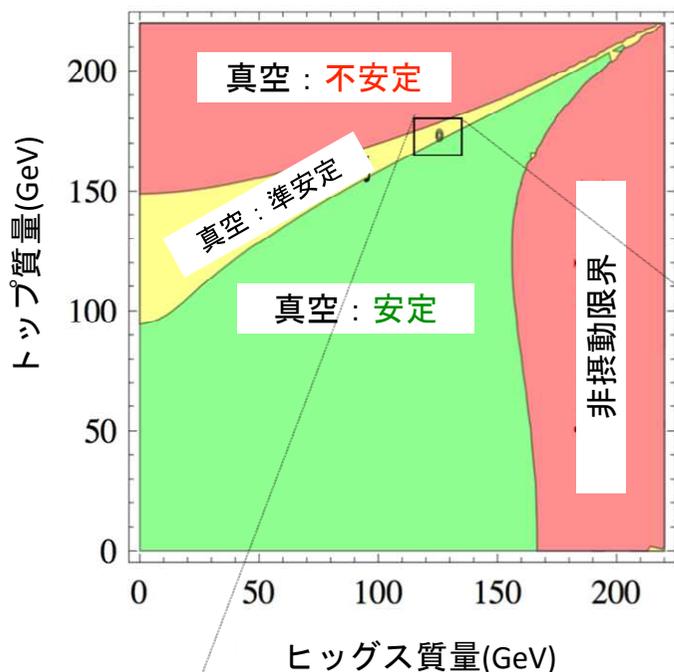
直接探索の場合:

$$M_{\text{新粒子}} \sim E_{\text{cm}}/2$$

ILCの精度を持ってしても  
標準理論からのずれが  
全く見えなかったら

# 標準理論の適用限界の見極め

## 標準理論の真空の安定性



ヒッグス・トップ結合(トップ湯川結合)の効果で、ヒッグス4点自己結合( $\lambda$ )が高エネルギーで負になる可能性がある！

→ 本当の真空は別にある？

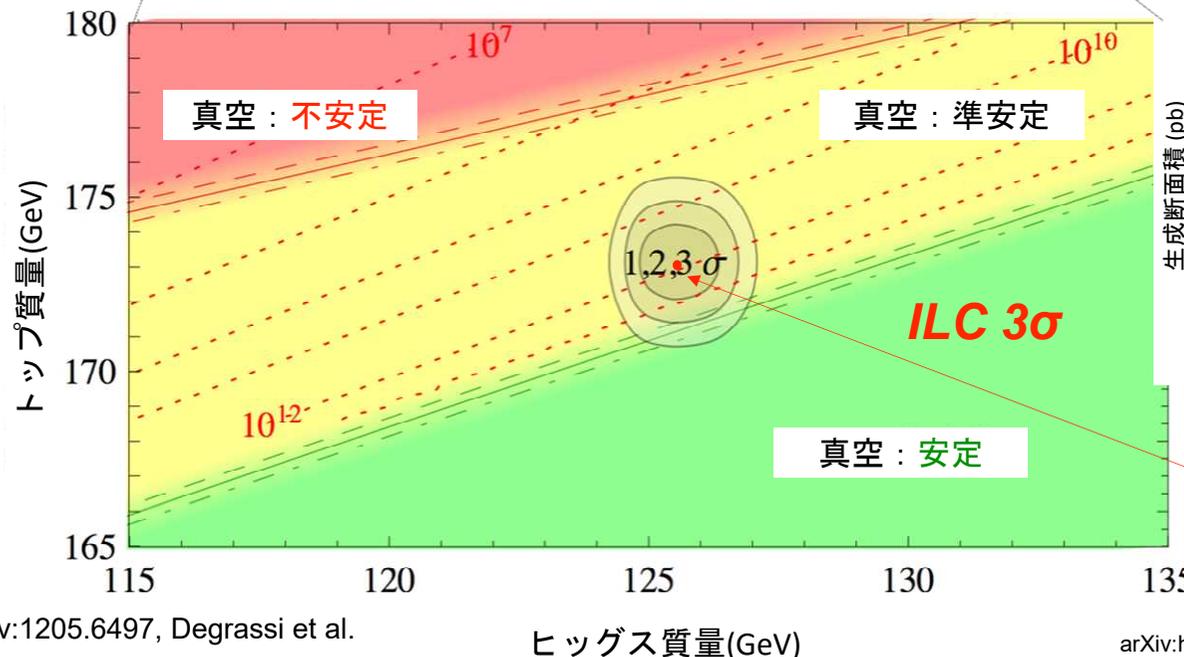
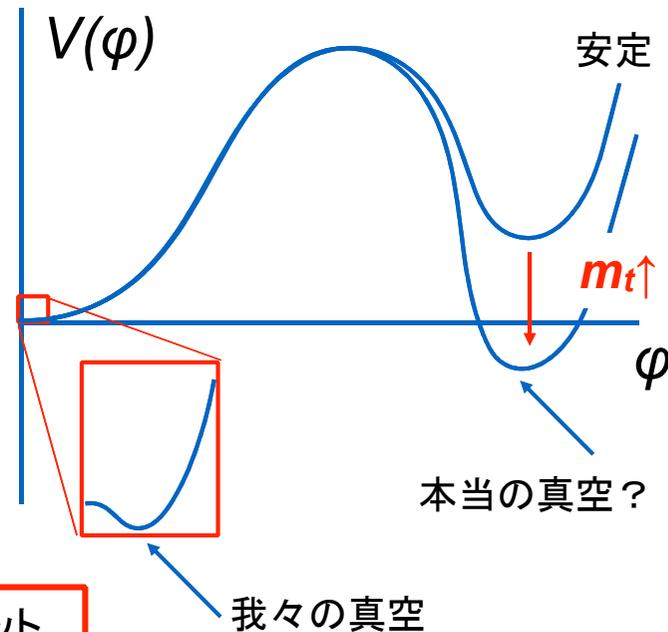
現在のトップとヒッグスの質量測定値：

準安定の微妙な位置にある！

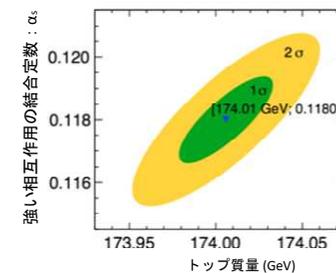
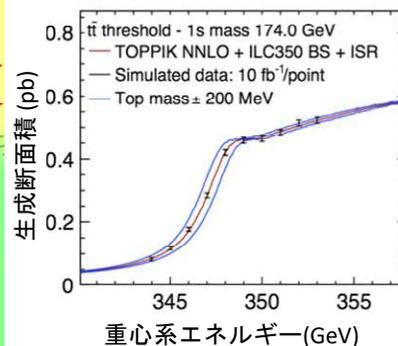
$\lambda$  は  $\Lambda_{PI}$  以下で負になる？  
それとも  $\lambda(\Lambda_{PI}) = 0$  (新しい原理)？

この質問に答えるには  $m_t$  の精密測定が必要！

**LHCでは理論誤差~500MeVでリミット**



ILC ではトップ対しきい値スキャンで理論的に明快に定義されたトップ質量測定が可能



**$\Delta m_t(\overline{MS}) \lesssim 50 \text{ MeV}$**   
 **$\Delta m_H = 14 \text{ MeV}$**   
**ILC で真空の位置を正確に決定**

まとめ

- LHC で新粒子の兆候が見られない現状では、ヒッグスの精密測定による新物理探索の重要度がより大きくなった。
- 最近の進展により、250 GeV だけでヒッグス結合の絶対値の精密測定が可能になった。
- 250 GeV ILCは、ヒッグス結合の絶対値の精密測定により、ヒッグス結合のずれのパターンの違いを明らかにし、素粒子物理学の進路を示す。
- 250 GeV の結果を踏まえ、250 GeV を超えるエネルギーでの実験を加えることで、トップクォークの精密測定やヒッグスの3点自己結合の測定が可能になり、新しい物理の可能性をさらに絞り込むことが可能になる。
- こうして、自然の統一的理解への道をさらに強力に切り開くことができる。250 GeV ILCはその基盤となる。

**Backup**

# 有識者会議の中間まとめ以降の LCC 物理作業部会の検討の経緯

## **Physics Case for the ILC**

*arXiv: 1506.05992, Jun.19, 2015*

技術設計報告書 (TDR)、米国のスノーマス夏季研究以降の ILC 物理プログラム全般についてのアップデート報告

## **The Potential of the ILC for Discovering New Particles**

*arXiv: 1702.05333, Feb. 17, 2017*

技術設計報告書 (TDR)、米国のスノーマス夏季研究以降の特に新粒子の直接探索に関するアップデート報告

## **LCWS** 2016 年 11 月 盛岡

リニアコライダーの国際コミュニティとして ILC の 250 GeV からの段階的実施の検討を行うことを決定  
LCC 物理作業部会として 250 GeV ILC の物理の再検討を開始 並行して加速器の検討も開始

## **ICFA** 会合 2017 年 2 月 バレンシア

ICFA へ 2 ページの短い最初の報告

## **AWLC** 2017 年 6 月 スタンフォード

～

## **LCWS** 2017 年 10 月 ストラスブール

モデル非依存なヒッグス 3 点自己結合の解析手法の開発から派生した有効場理論を用いたヒッグス結合解析手法の進展を踏まえ、2017 年 11 月のオタワでの LCB/ICFA 会合に向け、LCC 物理作業部会として 250 GeV ILC 物理についての最近の進展を中心とするアップデート報告(本報告)を作成

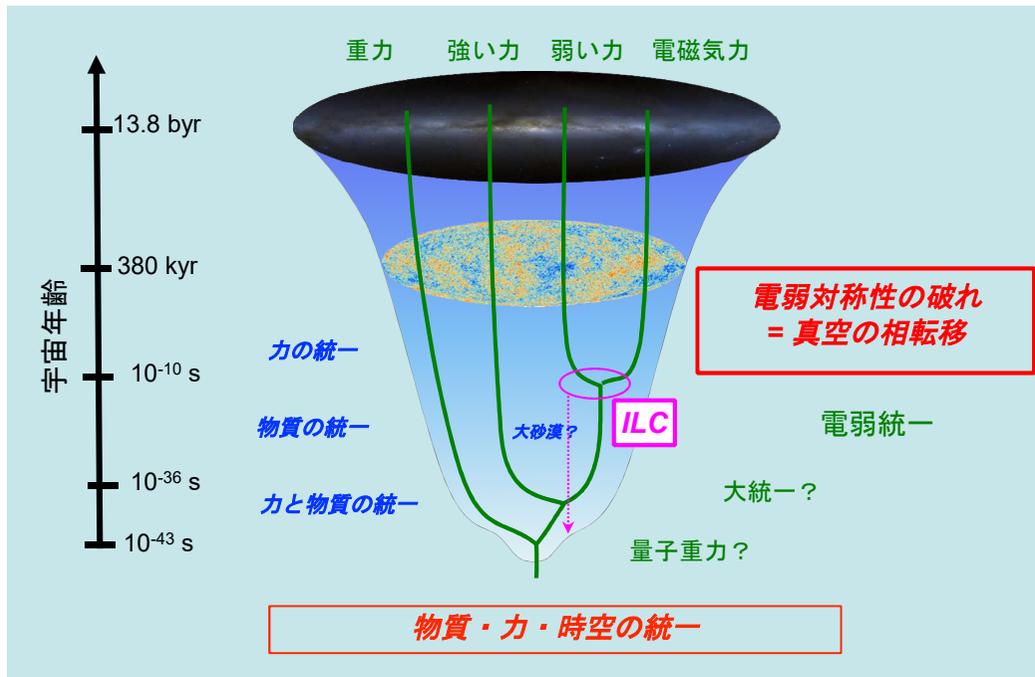
## **LCB/ICFA** 会合 2017 年 11 月 オタワ

*arXiv: 1710.07621, Oct., 2017 (物理)*

*arXiv: 171100568, Oct., 2017 (加速器)*

LCB/ICFA 声明

# 高エネルギー物理学＝物質、力、時空の統一的理解を目指す営み



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！

現在の理解の集大成：標準理論

ゲージ対称性 =  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

物質場 = クォークとレプトン (3世代)

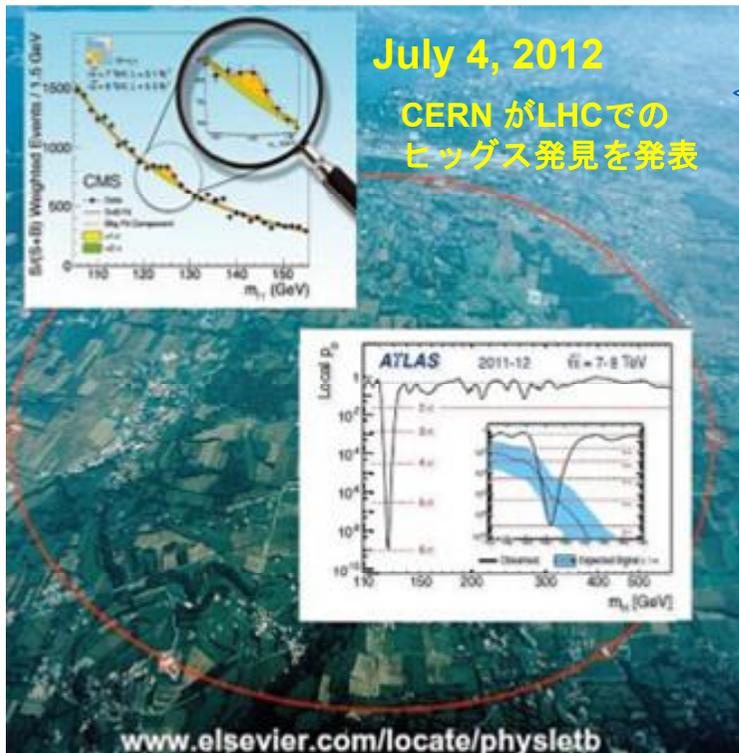
1995年 FNAL Tevatron によるトップ発見  
→ 3世代全ての物質粒子が完結

力の場 = ゲージ場 ( $\gamma, W/Z, g$ )

1983年 CERN SPPS によるW/Z発見  
→ 電/弱/強全てのゲージ粒子が完結

対称性を破る場 = ヒッグス場 (H)

→ 2012年 LHCで発見: 標準理論完成



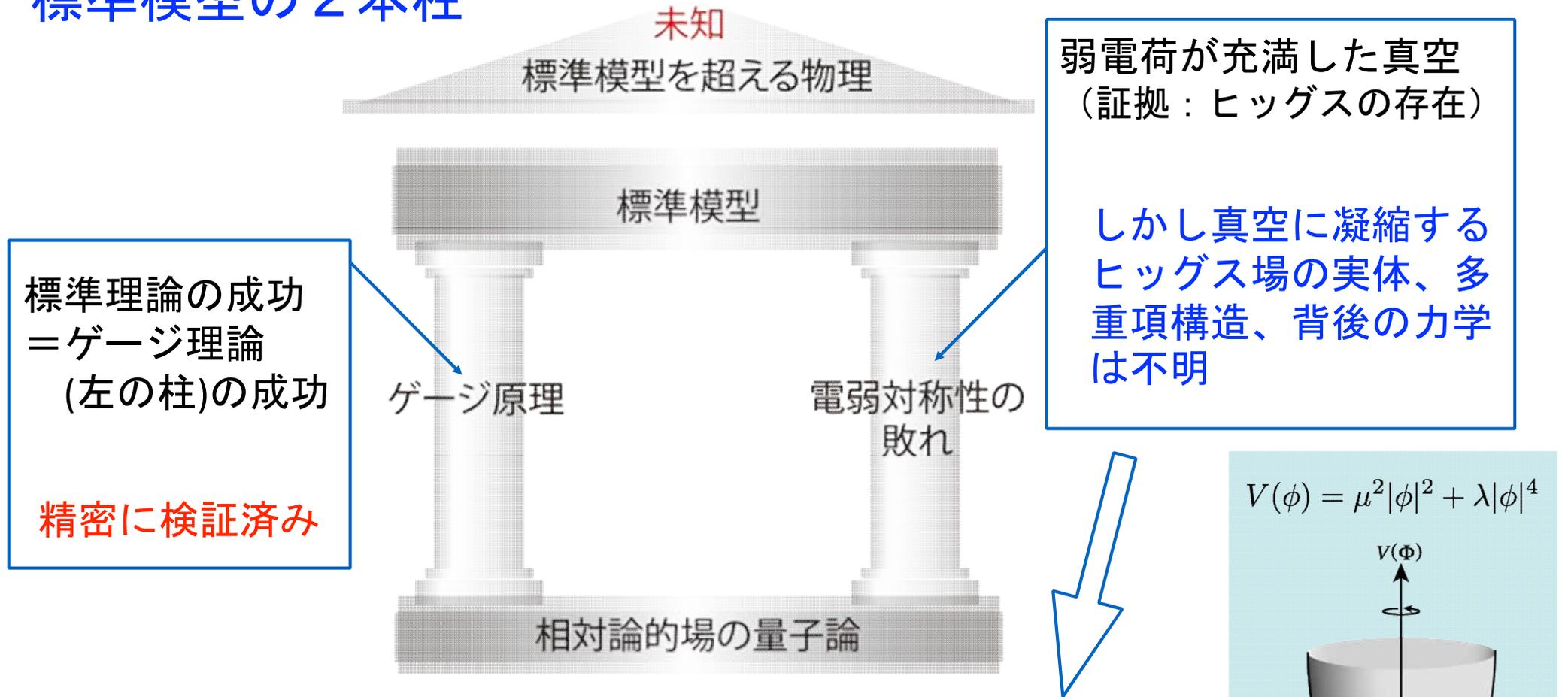
標準理論を超えて

- 残された多くの謎 (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..)
- 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(=電弱対称性が破れたエネルギースケール)は道半ば
- 道は遠い？

# 何故 電弱スケールは重要か？

真空中に凝縮した何かの謎

## 標準模型の2本柱



とりわけ、何故ヒッグス凝縮が起こったか (何故  $\mu^2 < 0$ ?) の答えは標準模型の枠外！ 答えによって進路が大きく分岐！

# $\kappa$ -形式 対 $EFT$ -形式

相対誤差 (%) の比較

	ILC250		+ILC500	
	$\kappa$ fit	EFT fit	$\kappa$ fit	EFT fit
$g(hbb)$	1.8	1.1	0.60	0.58
$g(hcc)$	2.4	1.9	1.2	1.2
$g(hgg)$	2.2	1.7	0.97	0.95
$g(hWW)$	1.8	0.67	0.40	0.34
$g(h\tau\tau)$	1.9	1.2	0.80	0.74
$g(hZZ)$	0.38	0.68	0.30	0.35
$g(h\gamma\gamma)$	1.1	1.2	1.0	1.0
$g(h\mu\mu)$	5.6	5.6	5.1	5.1
$g(h\gamma Z)$	16	6.6	16	2.6
$g(hbb)/g(hWW)$	0.88	0.86	0.47	0.46
$g(h\tau\tau)/g(hWW)$	1.0	1.0	0.65	0.65
$g(hWW)/g(hZZ)$	1.7	0.07	0.26	0.05
$\Gamma_h$	3.9	2.5	1.7	1.6
$BR(h \rightarrow inv)$	0.32	0.32	0.29	0.29
$BR(h \rightarrow other)$	1.6	1.6	1.3	1.2

## Improved Formalism for Precision Higgs Coupling Fits

TIM BARKLOW<sup>a</sup>, KEISUKE FUJII<sup>b</sup>, SUNGHOON JUNG<sup>ac</sup>, ROBERT KARL<sup>d</sup>, JENNY LIST<sup>d</sup>, TOMOHISA OGAWA<sup>b</sup>, MICHAEL E. PESKIN<sup>a</sup>, AND JUNPING TIAN<sup>e</sup>

<sup>a</sup> *SLAC, Stanford University, Menlo Park, CA 94025, USA*

<sup>b</sup> *High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki, JAPAN*

<sup>c</sup> *Dept. of Physics and Astronomy, Seoul National Univ., Seoul 08826, KOREA*

<sup>d</sup> *DESY, Notkestrasse 85, 22607 Hamburg, GERMANY*

<sup>e</sup> *ICEPP, University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, JAPAN*

# ILC 250 vs 他の加速器

arXiv: 1708.08912

	2 ab <sup>-1</sup> w. pol.	2 ab <sup>-1</sup> 350 GeV	5 ab <sup>-1</sup> no pol.	+ 1.5 ab <sup>-1</sup> at 350 GeV	full ILC 250+500 GeV
$g(hbb)$	1.04	1.08	0.98	0.66	0.55
$g(hc\bar{c})$	1.79	2.27	1.42	1.15	1.09
$g(hgg)$	1.60	1.65	1.31	0.99	0.89
$g(hWW)$	0.65	0.56	0.80	0.42	0.34
$g(h\tau\tau)$	1.16	1.35	1.06	0.75	0.71
$g(hZZ)$	0.66	0.57	0.80	0.42	0.34
$g(h\gamma\gamma)$	1.20	1.15	1.26	1.04	1.01
$g(h\mu\mu)$	5.53	5.71	5.10	4.87	4.95
$g(hbb)/g(hWW)$	0.82	0.90	0.58	0.51	0.43
$g(hWW)/g(hZZ)$	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05
$\Gamma_h$	2.38	2.50	2.11	1.49	1.50
$\sigma(e^+e^- \rightarrow Zh)$	0.70	0.77	0.50	0.22	0.61
$BR(h \rightarrow inv)$	0.30	0.56	0.30	0.27	0.28
$BR(h \rightarrow other)$	1.50	1.63	1.09	0.94	1.15

Table 3: Projected relative errors for Higgs boson couplings and other Higgs observables, in %, comparing the full EFT fit described in Section 4 to other possible  $e^+e^-$  collider scenarios. The second column shows a fit with 2 ab<sup>-1</sup>, with 80% electron and zero positron polarization, and with a higher energy of 350 GeV. The third and fourth columns show scenarios with no polarization but higher integrated luminosity, 5 ab<sup>-1</sup> at 250 GeV in the third column and 5 ab<sup>-1</sup> at 250 GeV plus 1.5 ab<sup>-1</sup> at 350 GeV in the fourth column. The fifth column gives the result of the fit described in Section 6 including data from 250 and 500 GeV. The notation is as in Table 1.

# ビーム偏極

no polarization	100 %
e- polarization only, distributed	50 % / 50 %
e-, e+ polarization distributed	5% / 45% / 45% / 5% to (++) (+-) (-+) (—)

## 250 GeV におけるヒッグス結合測定精度の ビーム偏極依存性

	no pol.	80%/0%	80%/30%
$g(hbb)$	1.3	1.1	1.1
$g(hcc)$	2.1	2.0	1.9
$g(hgg)$	1.9	1.8	1.7
$g(hWW)$	0.98	0.68	0.67
$g(h\tau\tau)$	1.5	1.3	1.2
$g(hZZ)$	0.97	0.69	0.68
$g(h\gamma\gamma)$	1.4	1.2	1.2
$g(h\mu\mu)$	5.7	5.6	5.6
$g(h\gamma Z)$	14	6.7	6.6
$g(hbb)/g(hWW)$	0.91	0.91	0.86
$g(h\tau\tau)/g(hWW)$	1.1	1.1	1.0
$g(hWW)/g(hZZ)$	0.07	0.07	0.07
$\Gamma_h$	2.9	2.6	2.5
$BRh \rightarrow inv$	0.36	0.33	0.32
$BRh \rightarrow other$	1.7	1.7	1.6

250 GeV ILC,  $2ab^{-1}$

# 有効場理論 (EFT) の詳細は以下の論文を参照

KEK Preprint 2017–23  
SLAC–PUB–17130  
August, 2017

## Model-Independent Determination of the Triple Higgs Coupling at $e^+e^-$ Colliders

TIM BARKLOW<sup>a</sup>, KEISUKE FUJII<sup>b</sup>, SUNGHOON JUNG<sup>ac</sup>,  
MICHAEL E. PESKIN<sup>a</sup>, AND JUNPING TIAN<sup>d</sup>

<sup>a</sup> *SLAC, Stanford University, Menlo Park, CA 94025, USA*

<sup>b</sup> *High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki, JAPAN*

<sup>c</sup> *Dept. of Physics and Astronomy, Seoul National Univ., Seoul 08826, KOREA*

<sup>d</sup> *ICEPP, University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, JAPAN*

**arXiv: 1708.09079**

# 電弱対称性が破れる前の有効場理論 (EFT) ラグランジアン

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

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

明白に SU(2)xU(1) ゲージ不変

**10** パラメータ (上記、うち  $c_6$  はヒッグス 3 点自己結合のみに影響) .

**5** パラメータ :  $b, c, \tau, \mu, g$  への結合のずれに対応.

+ **2** パラメータ : ヒッグスの不可視及びエキゾチック崩壊に対応.

+ **4** パラメータ : 標準理論のパラメータ :  $g, g', v$ , および  $\lambda$  のずれに対応

+ **2** パラメータ : W/Z の幅のずれに対応する CHL-型 係数.

## 電弱対称性が破れた後の有効場理論 (EFT) ラグランジアン

$$\begin{aligned}
 \Delta\mathcal{L}_h = & -\eta_h\lambda_0v_0h^3 + \frac{\theta_h}{v_0}h\partial_\mu h\partial^\mu h + \eta_Z\frac{m_Z^2}{v_0}Z_\mu Z^\mu h + \frac{1}{2}\eta_{2Z}\frac{m_Z^2}{v_0^2}Z_\mu Z^\mu h^2 \\
 & + \eta_W\frac{2m_W^2}{v_0}W_\mu^+W^{-\mu}h + \eta_{2W}\frac{m_W^2}{v_0^2}W_\mu^+W^{-\mu}h^2 \\
 & + \frac{1}{2}\left(\zeta_Z\frac{h}{v_0} + \frac{1}{2}\zeta_{2Z}\frac{h^2}{v_0^2}\right)\hat{Z}_{\mu\nu}\hat{Z}^{\mu\nu} + \left(\zeta_W\frac{h}{v_0} + \frac{1}{2}\zeta_{2W}\frac{h^2}{v_0^2}\right)\hat{W}_{\mu\nu}^+\hat{W}^{-\mu\nu} \\
 & + \frac{1}{2}\left(\zeta_A\frac{h}{v_0} + \frac{1}{2}\zeta_{2A}\frac{h^2}{v_0^2}\right)\hat{A}_{\mu\nu}\hat{A}^{\mu\nu} + \left(\zeta_{AZ}\frac{h}{v_0} + \zeta_{2AZ}\frac{h^2}{v_0^2}\right)\hat{A}_{\mu\nu}\hat{Z}^{\mu\nu} .
 \end{aligned}$$

係数:  $\eta$ 's,  $\zeta$ 's,  $\theta_h$  は有効場理論の係数  $C_i$  で書ける. よってお互いに関係している. 例えば

$$\eta_W = -\frac{1}{2}c_H$$

$$\eta_Z = -\frac{1}{2}c_H - c_T$$

カストディアル  
SU(2) 対称性:  $C_T$  小

この関係のおかげで、 $WW$ 融合反応によるヒッグス生成断面積の小さい **250 GeV** でもヒッグスの全崩壊幅 ( $\Gamma_h$ ) を決めることができ、モデル非依存なヒッグス結合の絶対値の測定が可能になる.

全ての標準理論の反応がヒッグス関連のこれまであまり注目されていなかった反応も含め重要になった！

## ヒッグス

- $e^+e^- \rightarrow H\gamma$
- $H \rightarrow Z\gamma$
- ...

## ゲージ粒子生成過程

- $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  (Triple Gauge Couplings)
- $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$  ( $A_{LR}$ )
- ...

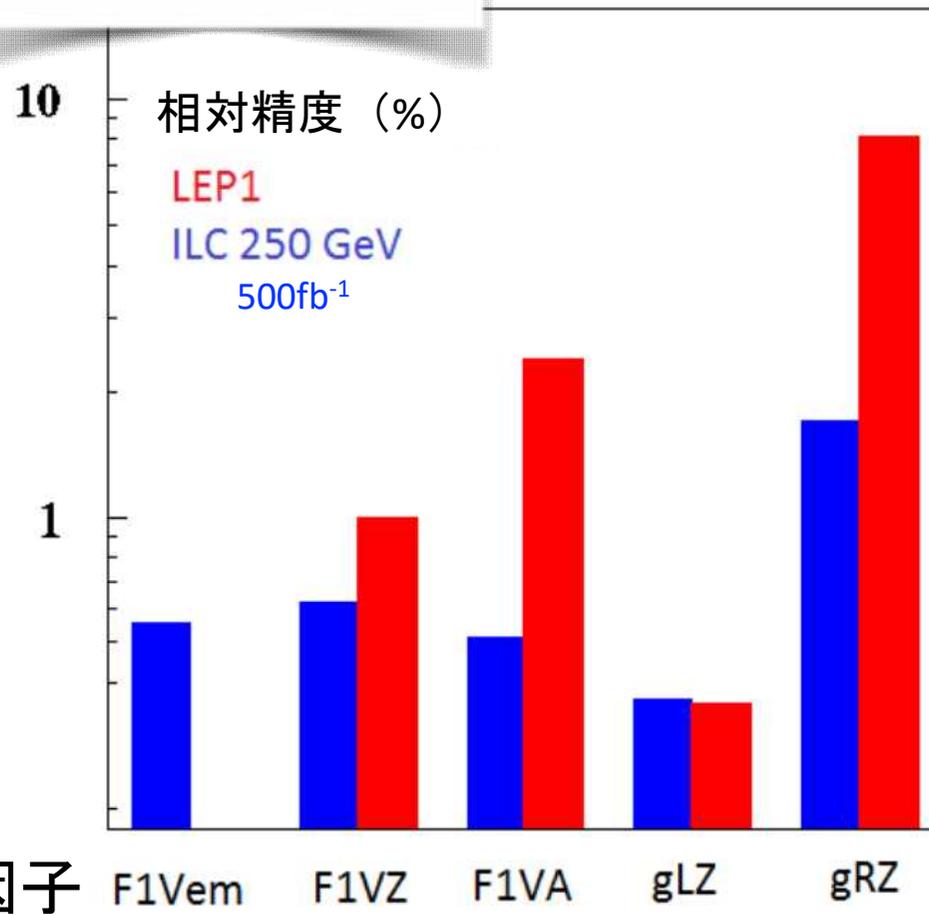
**250 GeV は、 $t\bar{t}$  しきい値以下.**  
**→bb 生成を代わりに使う.**  
**→arXiv: 1709.04289**

# b クォークの電弱形状因子の精密測定 @250 GeV

$$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$$

arXiv: 1709.04289

ILD フルシミュレーション



Bilokhin, Poeschl,  
Richard,

LEP 時代に比べて大幅に性能アップした測定器により、b-クォークの前後方非対称度の測定精度が約5倍改善する

ILC は長く未解決のままだった LEP の  $A_{FB}(b)$  異常に決着をつける

**250 GeV を超えて**

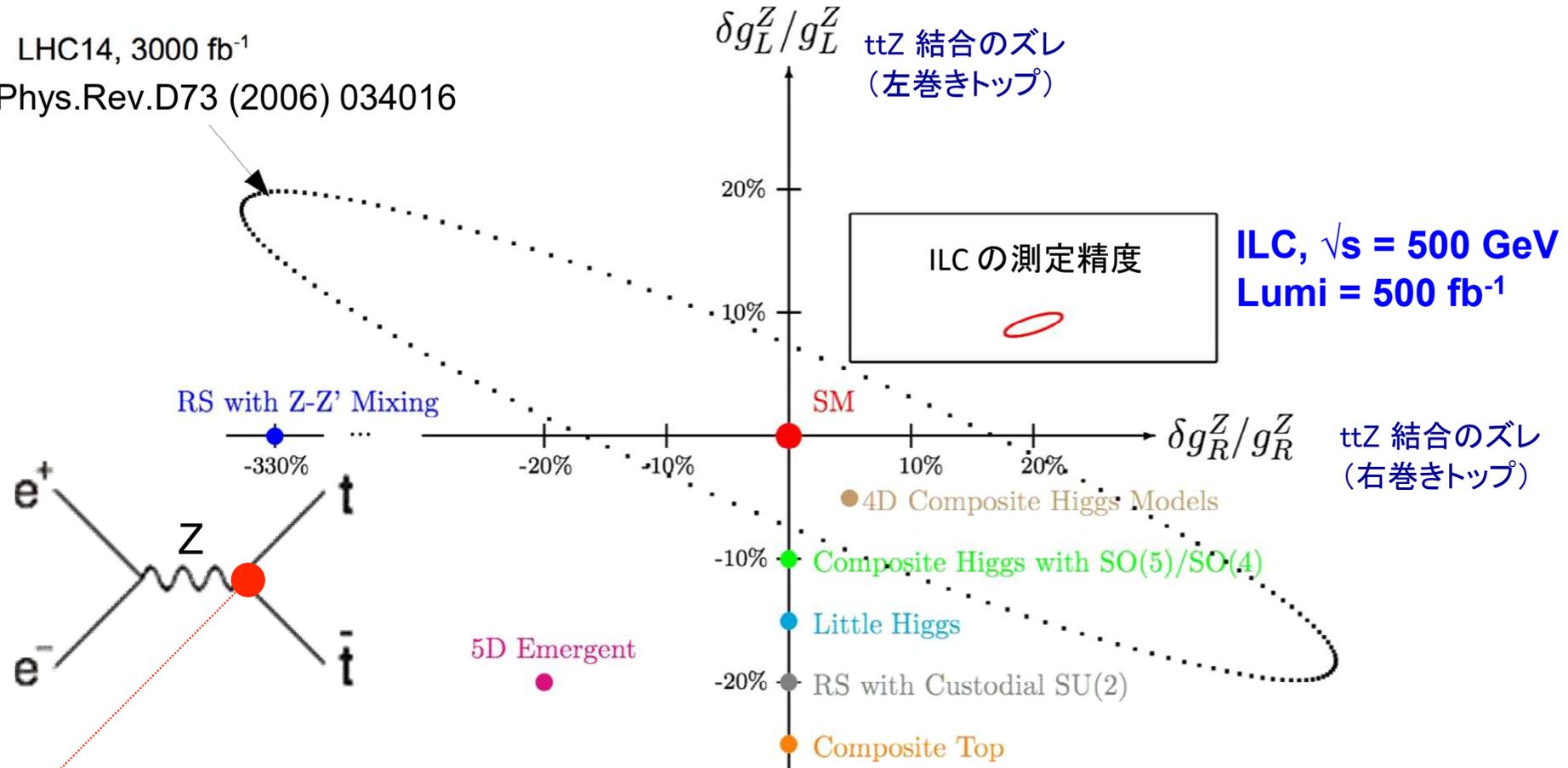
# トップの異常結合探索

トップ: 標準理論で最も重い→ヒッグスの真空凝縮の物理に強く結合!

→ ttZ 結合の構造因子に新物理に特徴的なパターンのズレが見えると期待される!

→ 左巻き結合と右巻き結合の分離に**ビーム偏極がエッセンシャル** (ILCの強み)

LHC14, 3000 fb<sup>-1</sup>  
Phys.Rev.D73 (2006) 034016



$$\Gamma_{\mu}^{ttX}(k^2, q, \bar{q}) = ie \left\{ \gamma_{\mu} \left( \tilde{F}_{1V}^X(k^2) + \gamma_5 \tilde{F}_{1A}^X(k^2) \right) + \frac{(q - \bar{q})_{\mu}}{2m_t} \left( \tilde{F}_{2V}^X(k^2) + \gamma_5 \tilde{F}_{2A}^X(k^2) \right) \right\}$$

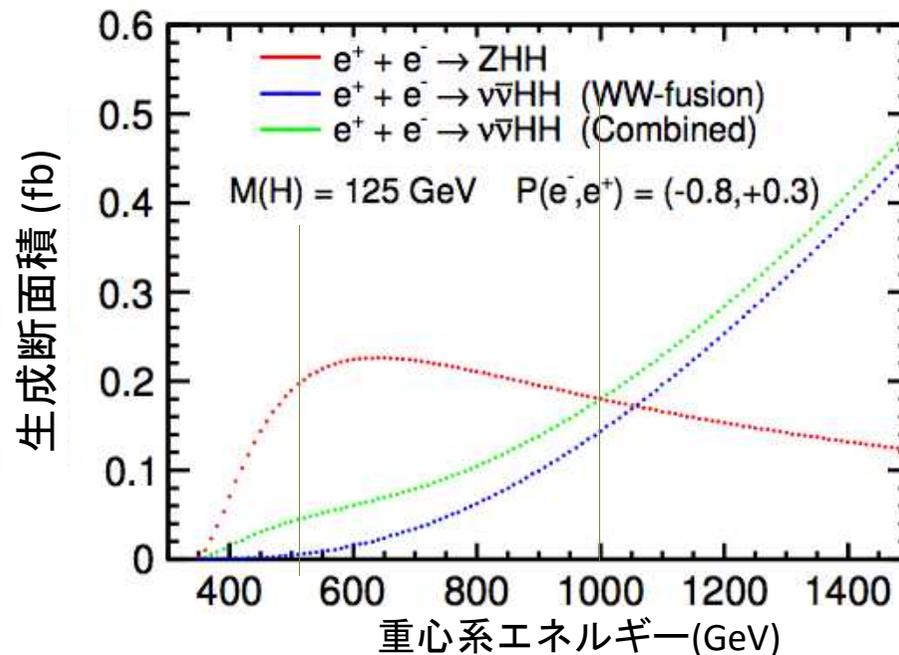
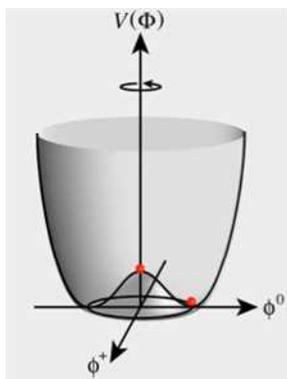
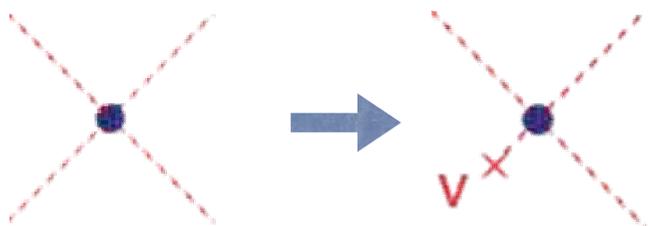
様々な新物理モデルでのトップ異常結合 (新物理スケール: ~1 TeV)

arXiv:1505.06020

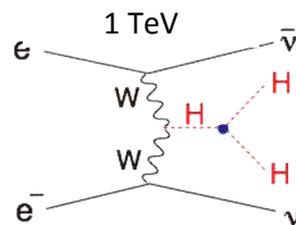
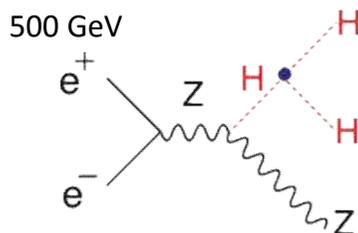
ILC500 では典型的な余剰次元モデルで  
カルツァクライン共鳴質量:  
 **$M_{KK} \sim 25\text{TeV}$  まで感度あり!**

# 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 <sup>-1</sup> )	+3 TeV (2 ab <sup>-1</sup> )
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

# 同じ積分ルミノシティなら

