

ILC 250 ヒッグスファクトリーの 物理意義を検証する委員会

7/22 高エネルギーコミュニティーの皆様へ報告

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

イントロダクション

- 1) 時期： **HL-LHCと同時期**に走る 2030 スタート → HL-LHC **相補的な効果**
- 2) $L=120-240 \text{ fb}^{-1} / \text{year}$ (TDR & 2 bunch) で Maximum $360 \text{ fb}^{-1} / \text{year}$
→ **10年で 2 ab^{-1}** LCの利点: 偏極 **陽電子30% 電子 80%**
- 3) ILC以外の成果も大事 → ILC250が加わることで何が言えるか？

2040年頃に
期待されている
物理を総動員

Synergy

HL-LHC (top mass, Higgs coupling, direct search)
SuperKEKB (rare decay, charged Higgs, CP phase)
T2K (CPがあった場合 → レプトジェネシス シナリオ)
double β 崩壊 (→ レプトジェネシス シナリオ)
EDM (→ 電弱バリオジェネシス)
LFV (→ レプトジェネシスシナリオ)
宇宙空間での重力波測定 (→ 電弱バリオジェネシス)
Lattice QCD (α_s , m_c , m_b)、理論の高次補正

目次：3方面から検証

1章 精密測定による新しい物理のエネルギースケールの決定

2章 EWSB の解明と物質・反物質非対称性の起源の解明

3章 ナチュラルネス・シナリオと暗黒物質に基づいた新粒子探索

4章 結論

LHCやSuperKEKB、ニュートリノ実験などとのシナジーのまとめ
ILCの重心系エネルギーを250GeVにして出来なくなったことへの対応
アップグレードシナリオについて

1. 精密測定による

新しい物理のエネルギースケールの決定

- 1) Higgs Coupling の精密測定
- 2) Higgs Propertyの精密測定
- 3) SM 精密測定

1) 結合定数の測定精度

Kappa HLC custodial ①
→ 0.5%の精度を仮定
有効場理論 (LHC,ILC,LEP fit)

HZZ couplingの
精密測定
 $\Lambda = 2.5-3.9\text{TeV}$

$\Delta g/g$	kappa fit	EFT fit
κ_Z	0.38%	0.63%
κ_W	1.9%	0.63%
κ_b	2.0%	0.89%
κ_τ	2.1%	1.0%
κ_c	2.5%	1.8%
κ_g	2.4%	1.6%
Γ_H	4.2%	2.1%
κ_γ	1%(+LHC)	1%(+LHC)
κ_t	7%(+LHC)	7%(+LHC)
κ_μ	7%(+LHC)	6.2%

微分断面積
まで ④

4つの
注目点

②

③



結合定数の比の測定精度 (ILC250)
Model independent: 直接測定

ratio of couplings

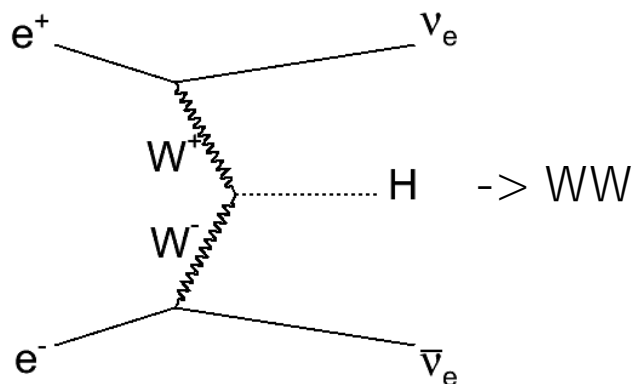
κ_W/κ_Z	1.9%
κ_b/κ_W	0.64%
κ_τ/κ_W	0.84%
κ_c/κ_W	1.7%

実験で直接きまるRatio
→ 1-2%の精度が決まる。
→ **New Physics のスケール**
P.7

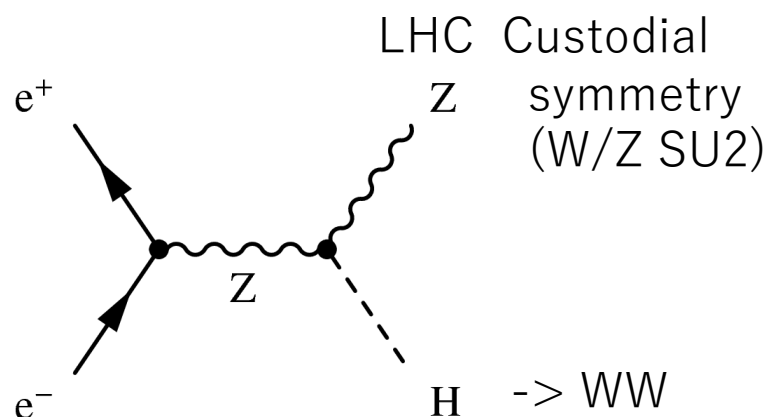
- 1) Coupling to Fermion : 1.5%程度 (top: 7%程度)
- 2) Coupling to Z/W : 0.6% 程度
- 3) Coupling to γ/g : 1-2% 程度
- 4) Coupling to 第2世代 : 2-7 % **世代の理解へ**

LHCが得意なモノはLHCに任せる

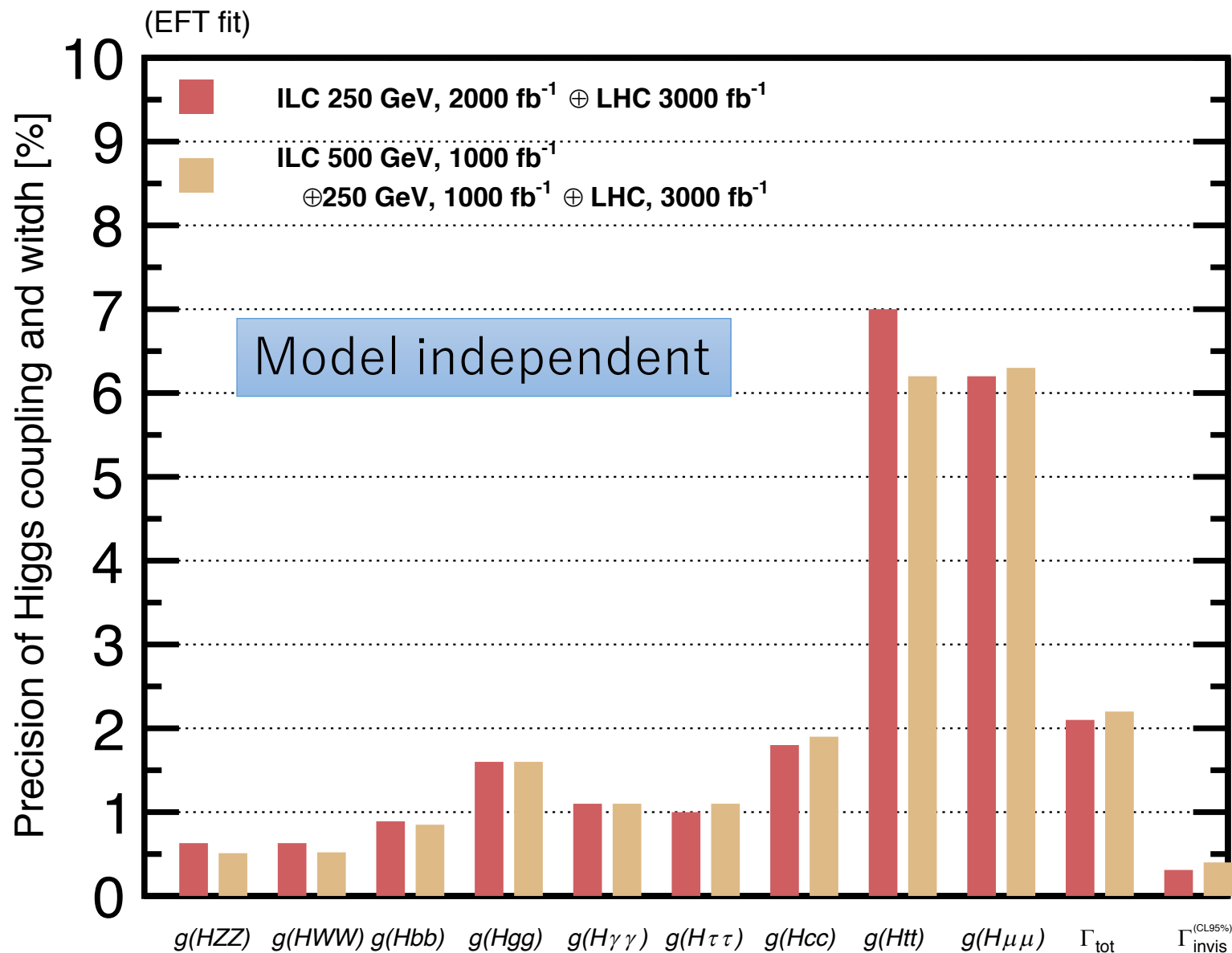
もともと
VBF WWHがILC500の動機



$$\Gamma = \sigma(WWH)/\text{Br}(H \rightarrow WW) \\ \sim \sigma(ZZH)/\text{Br}(H \rightarrow WW)$$

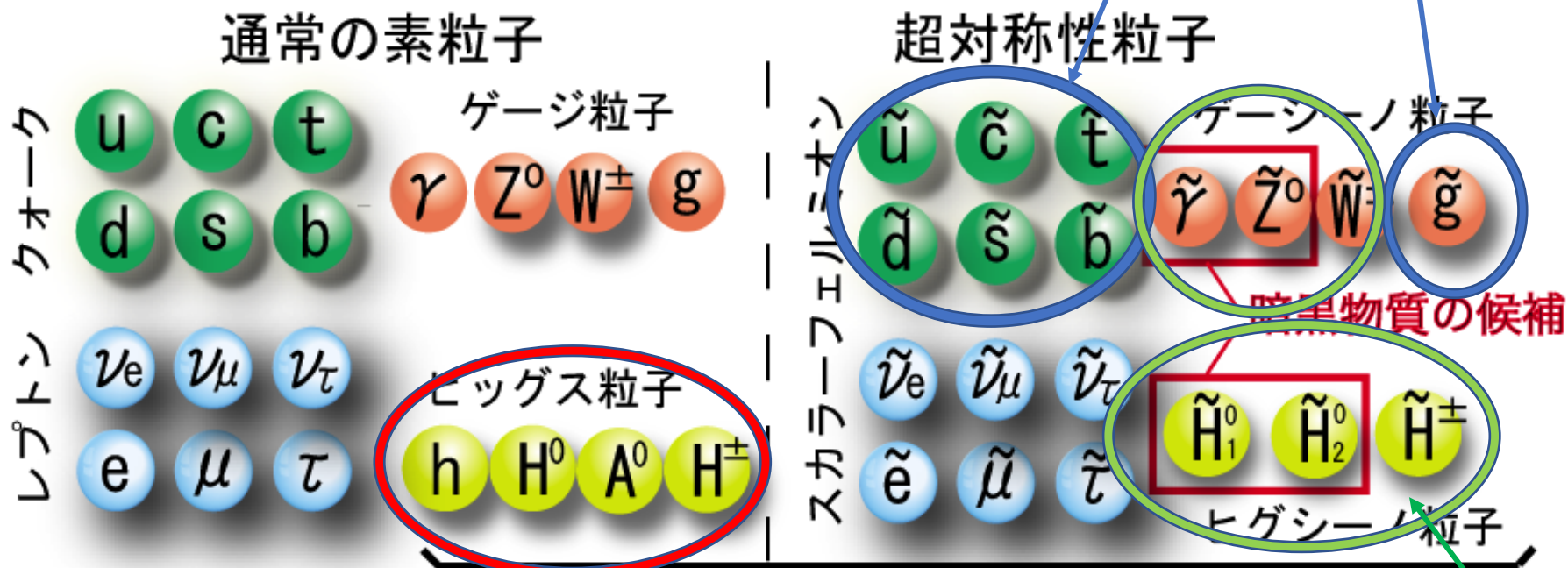


ILC250とILC500同程度 鍵は、LHCとのsynergy



精密測定からのSUSY 探索

3つのアプローチが必要



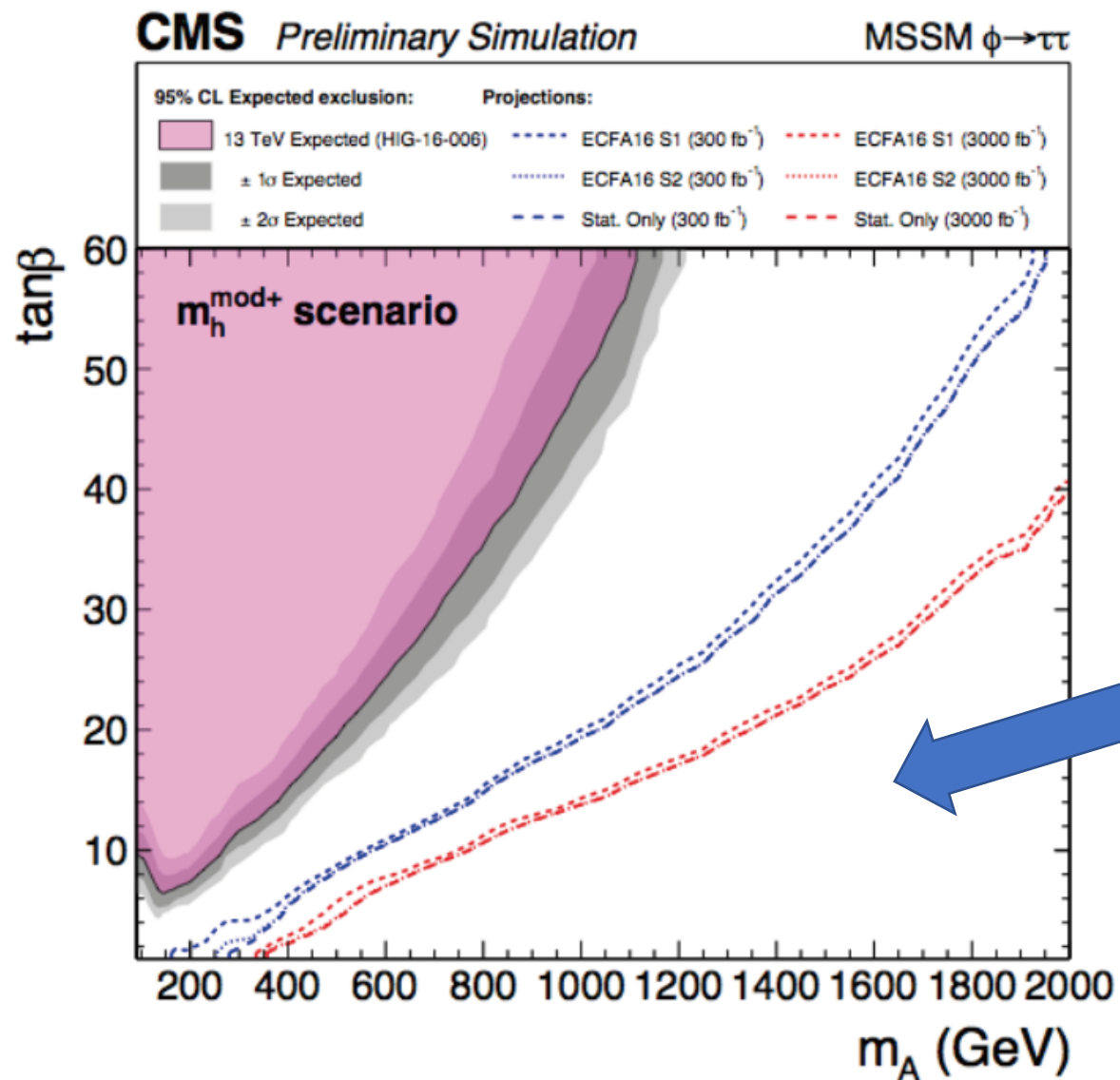
ア) scalar quark / gluino 探索 (LHC direct)

ウ) 2HDモデル (ILC/LHC/KEKB)

イ) 電弱ゲージノ探索 (ILC/LHC)

縮退する
積極的な
理由

ウ) 2HDモデルへの感度

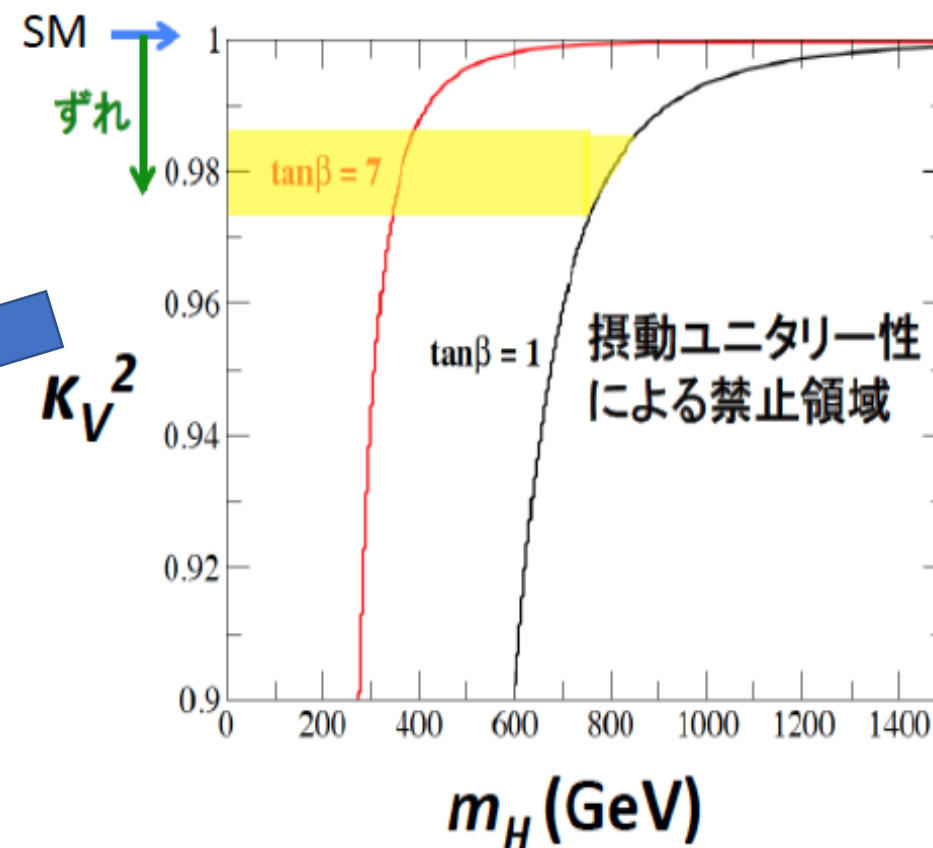


Small $\tan\beta$ では、 $H \rightarrow \tau\tau$ / bb が Suppressされて LHCでのdirect search が 難しくなる。

Small $\tan\beta$ (~ 10)をどうカバーするか？

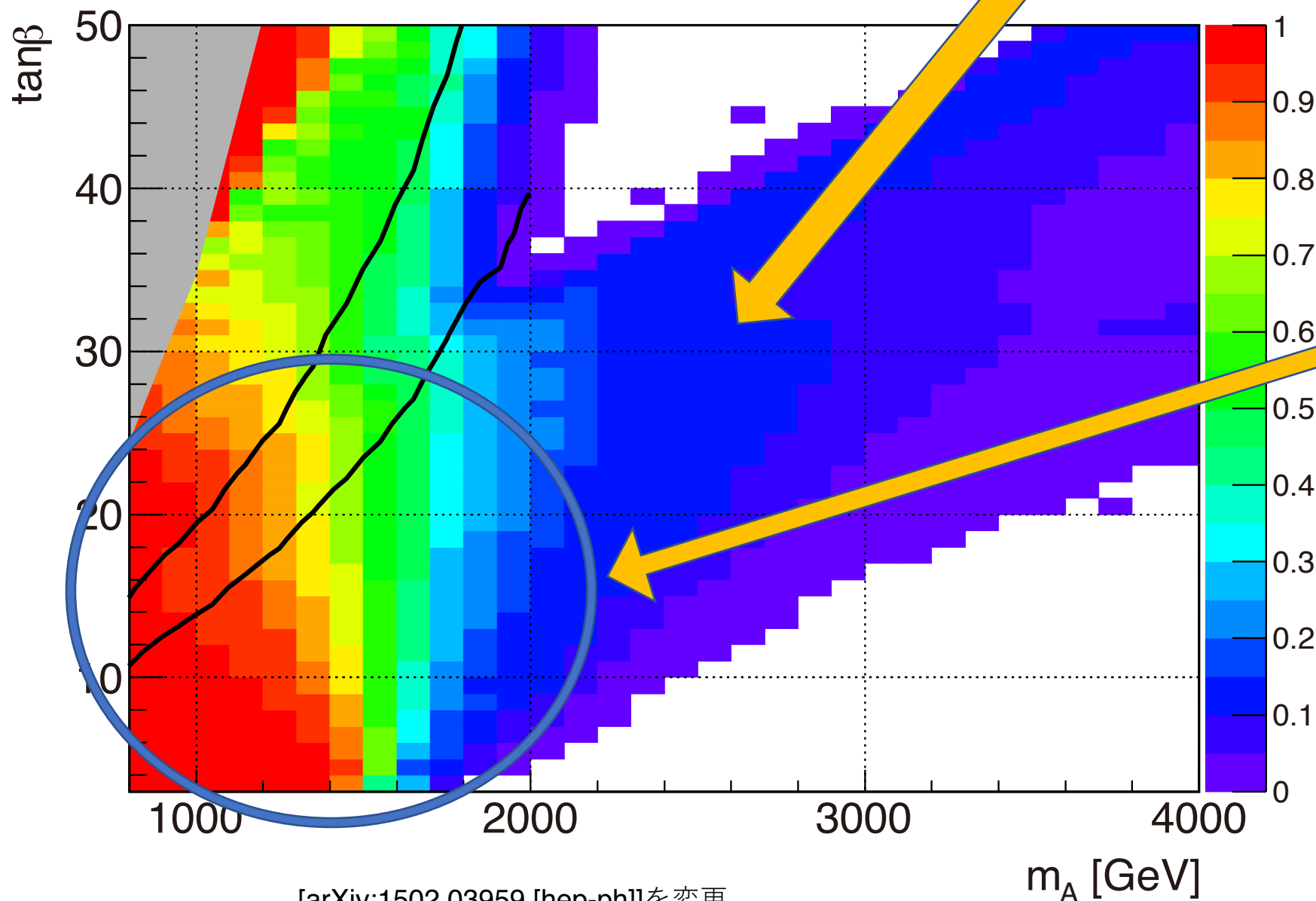
ILC250とHL-LHC/SuperKEKBのsynergy

$$\kappa_V^2 = \sin^2(\beta - \alpha)$$



LHC300 HL-LHC

A(Trilinear)が効くところは、高いところも



分母：MSSMで真空の
安定性や現在の
フレーバー測定で許される
分子：ILC 250でずれが
検証可能

MSSM Higgsで
Gluinoなどの
SUSY粒子が重い時
でも、重いHiggs粒子
の効果をILCでさぐることが
できる。

$M_A \sim$ SUSY breaking scale

1.5 ~ 2TeVまで

Higgs << SUSY

電弱スケールで0(10)倍
まで完全にさぐること
が可能になる

[arXiv:1502.03959 [hep-ph]]を変更

SUSY以外の一般的な 2 HDモデルへの感度

ゲージ場との結合
 hVV
 湯川結合
 $h\tau\tau$ hbb hcc

2 HDの質量
与え方パターン

$\kappa_v \sim 0.4\%$
 τ, b, c (topの代わり)
 3つのセクターへの
 精度 1-2%程度

	K_V	K_τ	K_b	K_c	代表的なモデル
Type-I	↓	↓	↓	↓	ν フィリックモデル (H1:SM H2: ν へ)
Type-II	↓	↑	↑	↓	SUSY型
Type-X	↓	↑	↓	↓	輻射シーソーモデル ($\mu g-2$ を説明)
Type-Y	↓	↓	↑	↓	論理的に残された パターン

どのパターンの
時も1%でずれが
わかる (完全性)



②

③

3つの
注目点

MSSM, NMSSM H/A ~ 1.6 TeV
 General X, Y, II 型 3 TeV
 Composite Model 3 TeV
 (arXiv:1705.05399より)
 余剰次元 KK=3-7 TeV

①



$\Lambda = 2-3$ TeV



LHCで何らかの新現象
 が観測された時の
 背後の物理の吟味にもなる

2) Higgs Propertyの精密測定

	500 fb-1	1000 fb-1	2000 fb-1
Δm_H	28 MeV	20 MeV	14 MeV
$\Delta \Phi_{CP}$	7.6°	5.4°	3.8°

	500 fb-1	1000 fb-1	2000 fb-1
$\delta \Gamma_H$			
kappa fit	8.3%	5.9%	4.2%
EFT fit	4.1%	2.9%	2.1%

HL-LHCと協働して
3つの重要な結果がILC250から得られる

(1)

$$\mathcal{L} \sim g \bar{f} (\cos \psi_{CP} + i \gamma^5 \sin \psi_{CP}) f H$$

CP conserving coupling: $\psi_{CP}=0$

maximally violating $\psi_{CP}=\pi/2$



**Higgsが2HD+Singletなどのように
複雑な構造** 物質の起源は2章で

(2) custodial symmetry ($K_W/K_Z = 1$) LHCで吟味できる
 $\Gamma_W(\leftarrow \Gamma_Z) / \text{Br}(WW)$ で width が 2% ($2ab^{-1}$)

(3)

Composite vs elementary $\Lambda > 2.2\text{TeV}$ ($r_H < 0.082 \text{ am}$)

Invisible decay
3章で

3) 標準理論パラメータ精密測定 ($M_W, M_t, \sin^2 \theta_{\text{eff}}$)

A) M_W

SMの精密検証は
重心系は関係ない
(Stat.
Sys. $\rightarrow$ Pol, が大事 LCの技)

ΔM_W [MeV]	LEP2	ILC	ILC	ILC
$\sqrt{s}$ [GeV]	172-209	250	350	500
$\mathcal{L}$ [fb $^{-1}$]	3.0	500	350	1000
$P(e^-)$ [%]	0	80	80	80
$P(e^+)$ [%]	0	30	30	30
beam energy	9	0.8	1.1	1.6
luminosity spectrum	N/A	1.0	1.4	2.0
hadronization	13	1.3	1.3	1.3
radiative corrections	8	1.2	1.5	1.8
detector effects	10	1.0	1.0	1.0
other systematics	3	0.3	0.3	0.3
total systematics	21	2.4	2.9	3.5
statistical	30	1.5	2.1	1.8
total	36	2.8	3.6	3.9

WW $\rightarrow$ l ν qq (Semi leptonic process)
Experimental error $\sim$ 3MeV (systematic dominate)

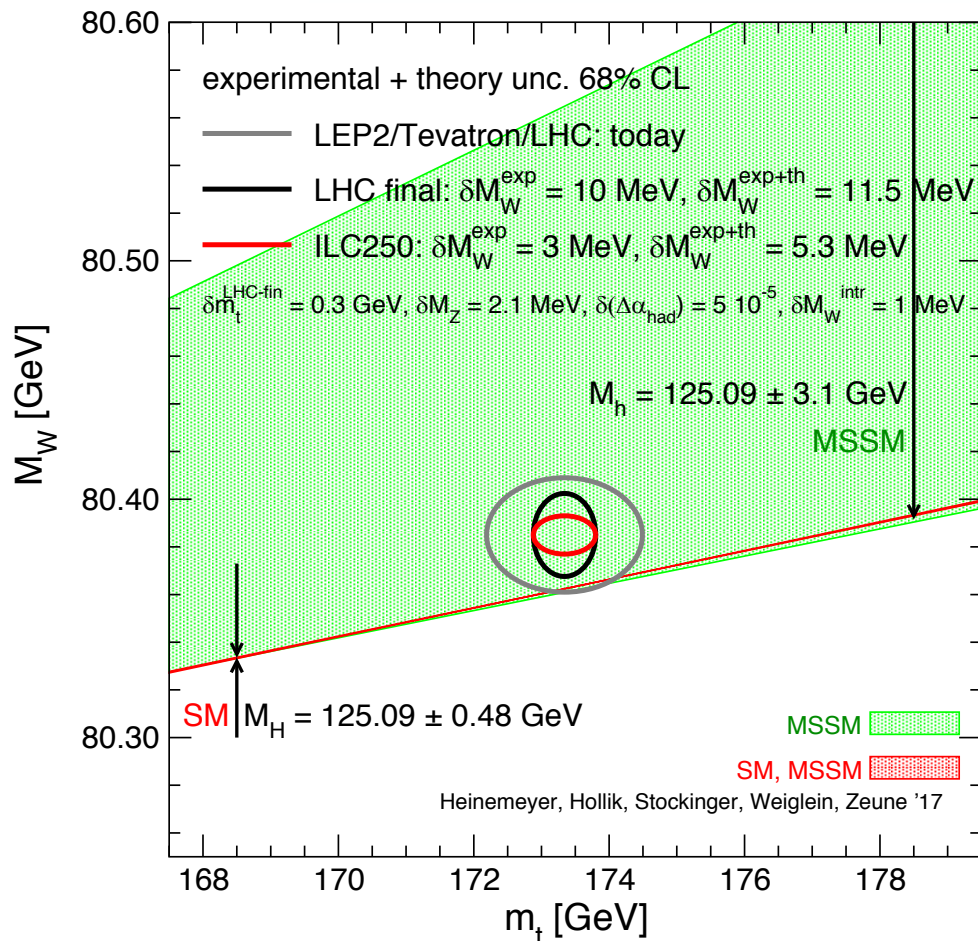
Hadronization/ISR/FSR の不定性が主

Mw vs Mtop

$\Delta M_{\text{top}} = 0.2 - 0.3 \text{ GeV}$ (HL-LHC)

今：
0.5 GeV + X?

	$\Delta m_t = 0.5(0.1) \text{ GeV}$	$\Delta(\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}) = 5 \times 10^{-5}$	$\Delta M_Z = 2.1 \text{ MeV}$	missing h.o.	total
$\Delta M_W [\text{MeV}]$	3.0 (0.6)	1.0	2.6	1.0	4.2 (3.0)
$\Delta \sin^2 \theta_{\text{eff}}^\ell [10^{-5}]$	1.6 (0.3)	1.8	1.5	1.0	3.0 (2.6)



$\delta M_{\text{top}} = 0.3 \text{ GeV} \rightarrow \delta M_W \sim 2 \text{ MeV}$
(M_{top} の精度はこれで十分)

ILC350のモチベーションには
ならない

If the center values do not change
inconsistent with SM $\rightarrow$ Probability
 $3 \sim 4 \sigma$

$\rightarrow$ 0(1) TeV の電弱ゲージノの示唆?

LEP SLD問題 ワンバーグ角の矛盾

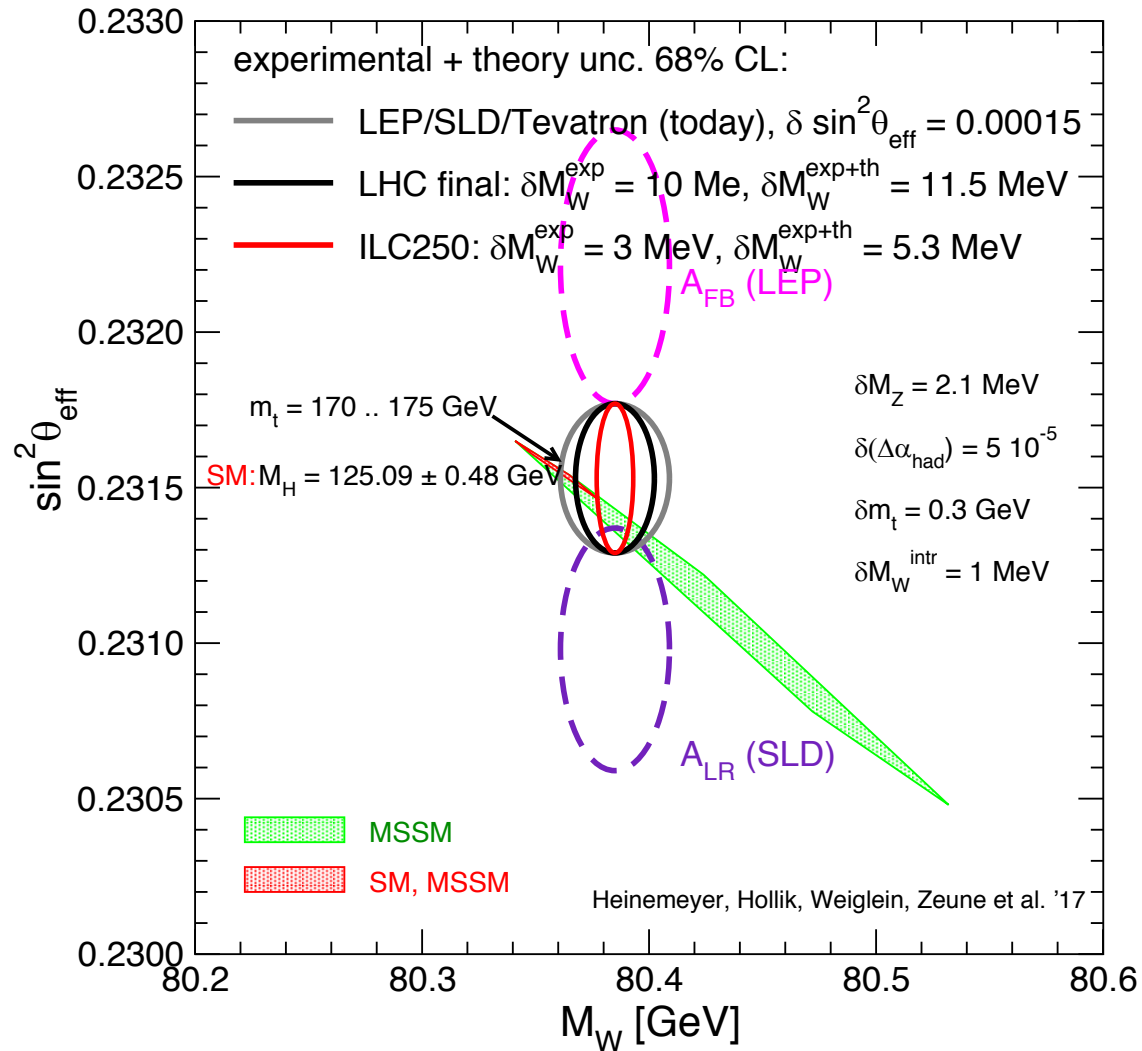
$\delta \sin^2 \theta_{\text{eff}} = 3 \times 10^{-5}$ 、
 $\delta M_W \sim 3 \text{ MeV}$

SMの預言が図の赤線

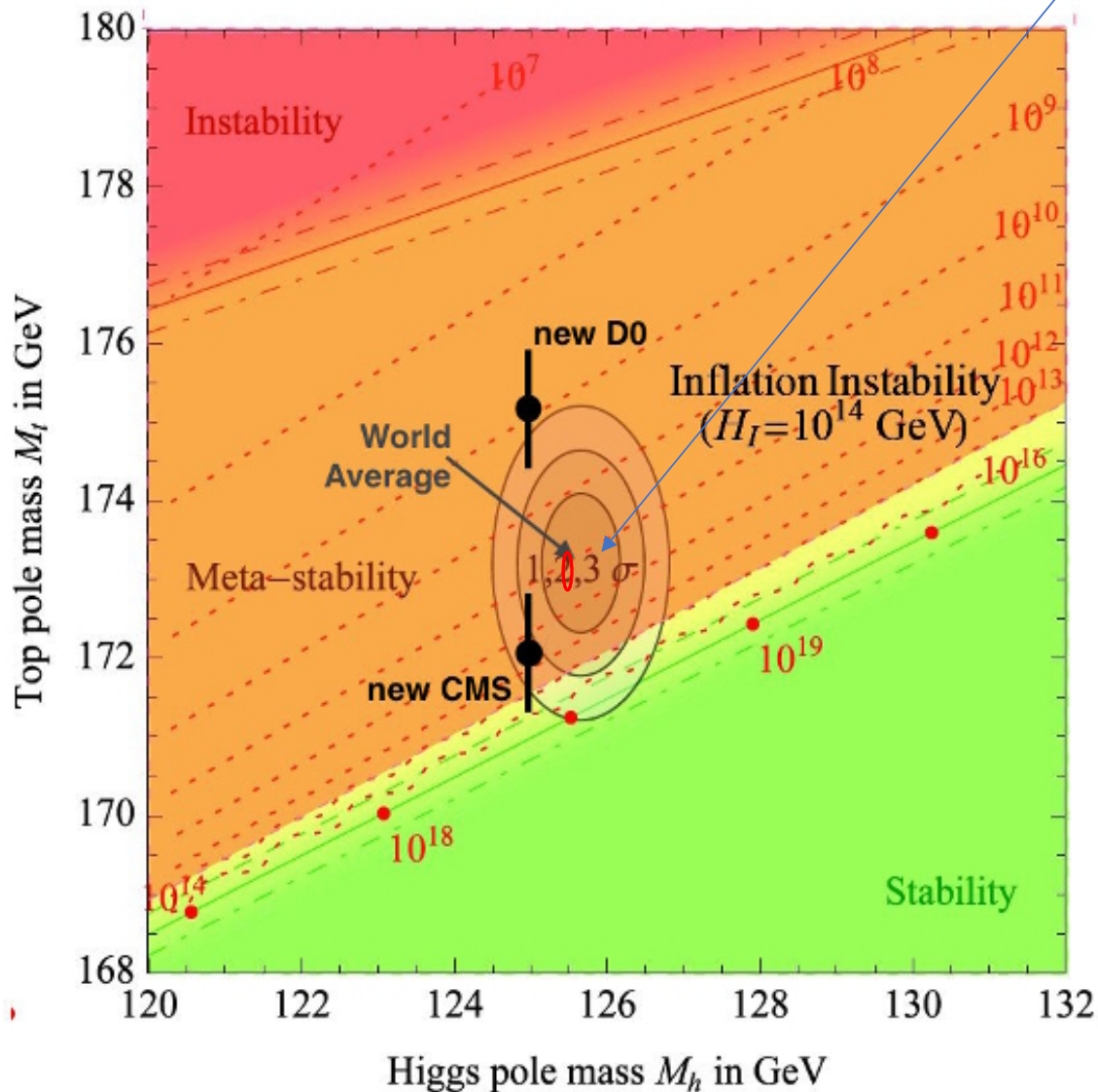
If the center values do not change
 inconsistent with SM $\rightarrow$ Probability
 2σ (SLD) or 3σ (LEP)

中心値だったら SMとconsistent
 $\sin^2 \theta_{\text{eff}}$ は重要なテーマ
 精度は、LEP,SLDと同程度であるが
 この乖離問題の結論を得られる。

$\rightarrow$ 偏極オプションが重要
 線形コライダーの利点



真空の安定性



$\delta M_{\text{top}} = 0.3 \text{ GeV (HL-LHC)}$
 $\delta M_h = 14 \text{ MeV (ILC250)}$

Meta stable であることが確定：
宇宙の将来に大きなインパクト

または、

真空が安定であるためには、
中心値がいまの値なら 10^{12} GeV までに
新しい物理が存在
非常に高い所に何か新しい物理が
存在することの示唆

レプトジェネシス
GUTの示唆？

$\Delta M_{\text{top}} 0.3 \text{ GeV}$ Stability scale 1桁くらいで
おさえることができる。
かなりイケテル。

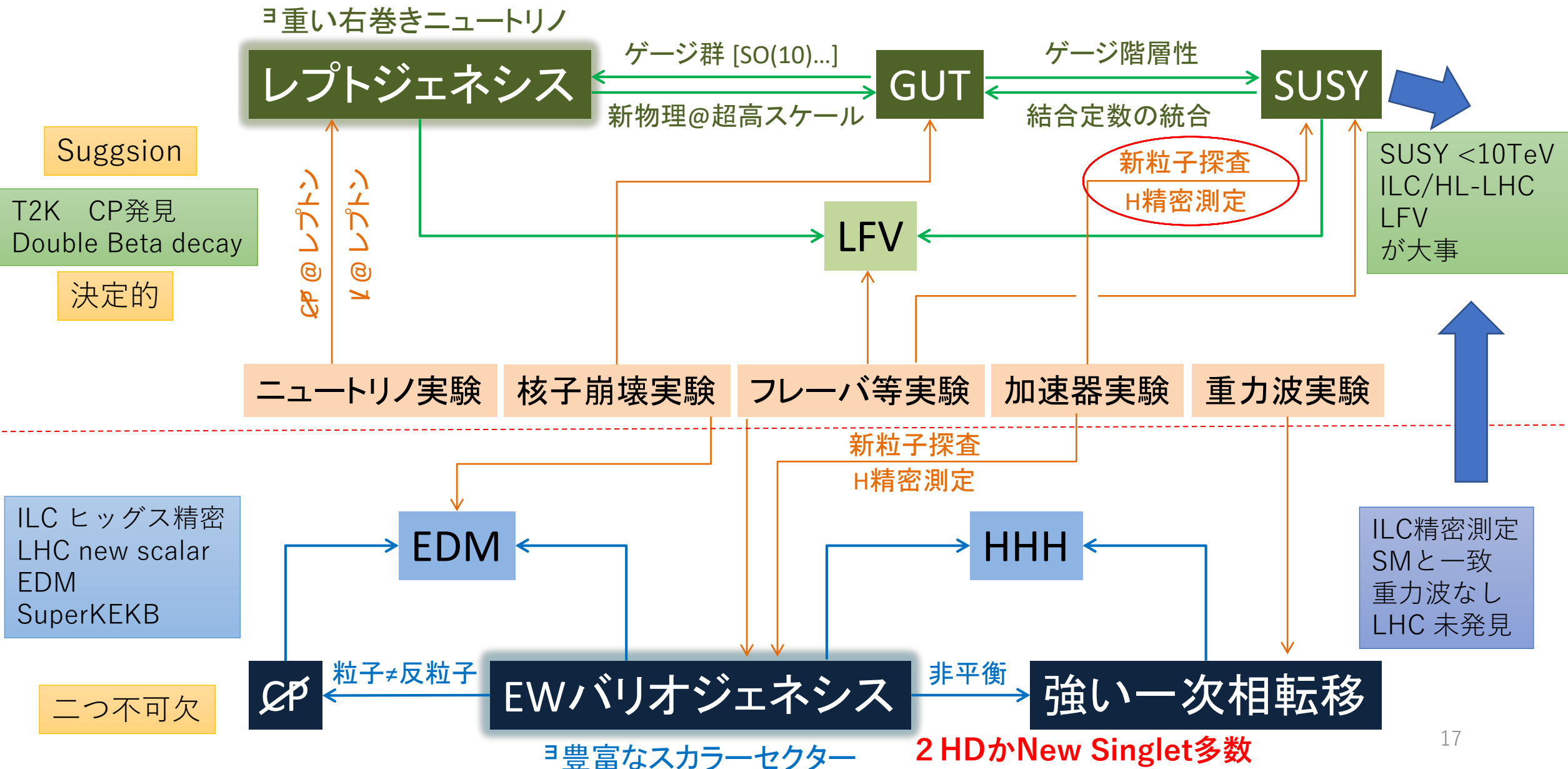
2. EWSB の解明と物質の起源の解明

アフレック・ダイン機構などの第3の可能性もあるが、物質・反物質の起源は、二つのどちらかである可能性が高い。ILC250では、電弱バリオン生成の吟味が2段階で可能

電弱バリオジェネシス A) CPの破れ
 B)強い一次相転移

レプトジェネシス

物質・反物質非対称性の起源



EWバリオジェネシス A) CP 破れ

Table 1 Input parameters for the BAU estimate.			
$T_C = 99.2 \text{ GeV}$	$v_C = 214.9 \text{ GeV}$	$v_W = 0.1$	$\Delta\beta = 0.05$
$m_{\tau_L} = 0.21T$	$m_{\mu_R} = 0.12T$	$\Gamma_{\tau_L} = 0.034T$	$\Gamma_{\mu_R} = 0.015T$
$D_q = 8.9/T$	$D_h = 101.9/T$	$D_L = 101.9/T$	$D_R = 377.1/T$

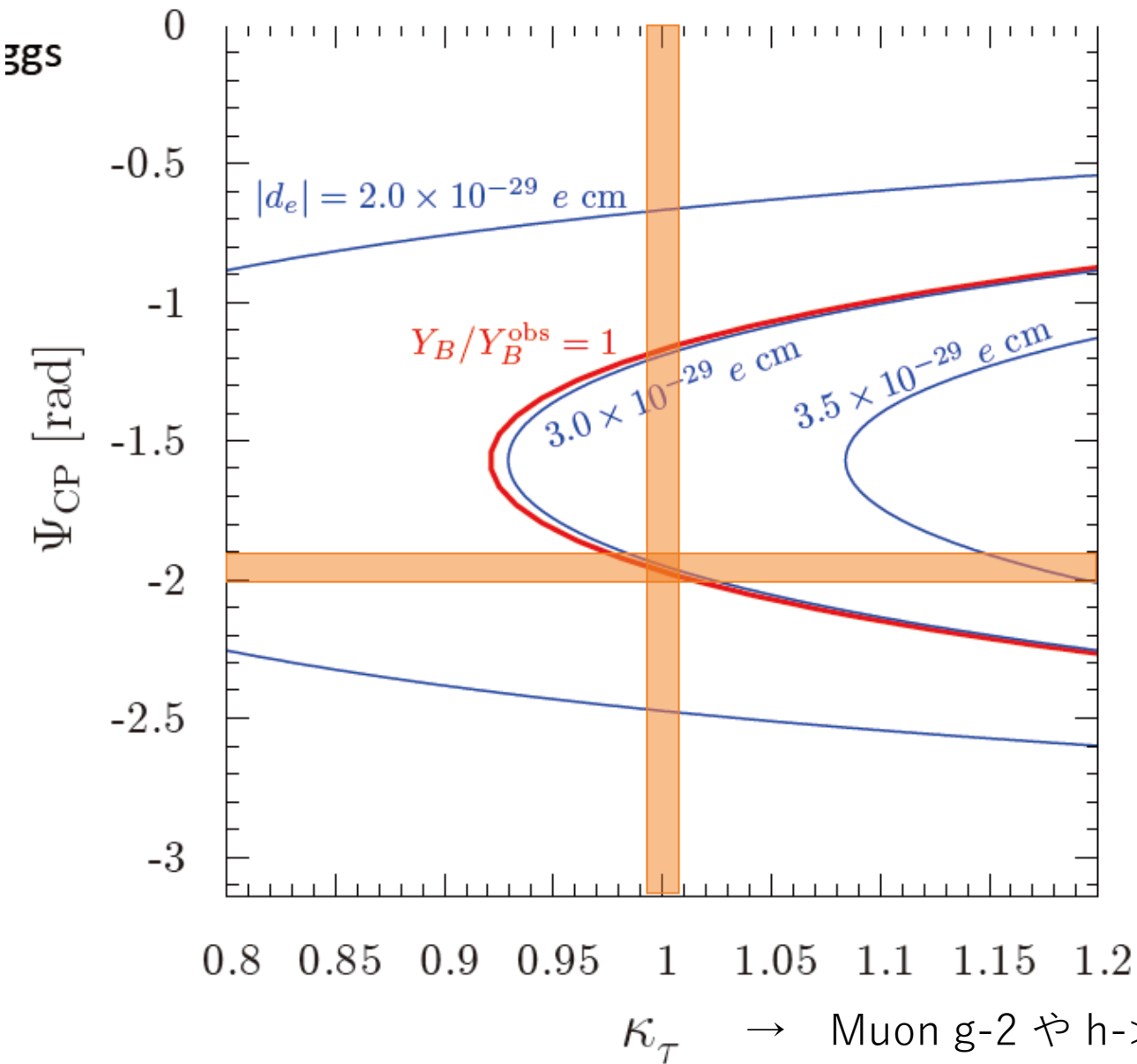
ILC250の精度
 CP位相 3.8度
 κ_τ / κ_V の比 0.84%

- 例として、2HDで2つのHDから同時にMassをもらう
- * Higgs mediated FC 残すように基底
- * CPのやぶれ

バリオン生成数:
 説明できる 赤：

4つの測定：CP,g-2,H-LFV
 EDM(mu, e)

Current bound
 $|d_e| < 8.7 \times 10^{-29} \text{ e cm}$



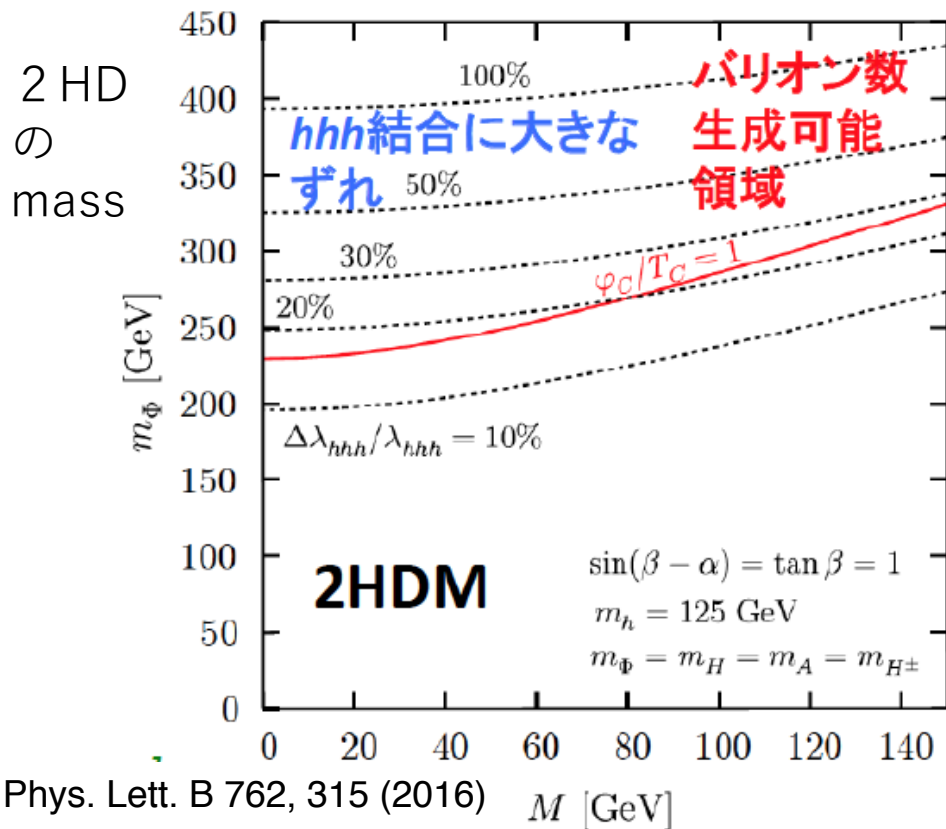
Phys. Lett. B 762,
 315 (2016)を變更

仮定
 相轉移の前後
 $\Delta\beta = 0.05 \text{ fix}$
 (β は、
 真空期待値 $\tan\beta$)

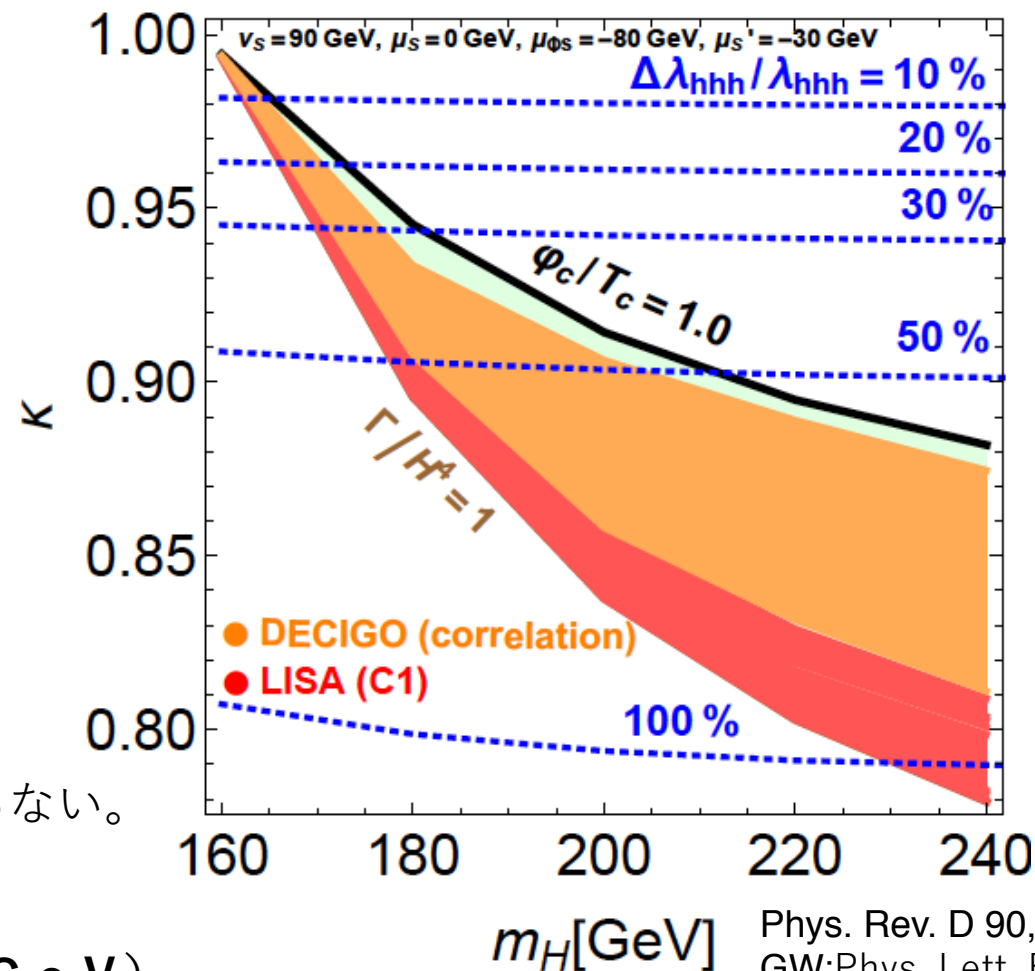
泡の膨張速度
 Wall velocity 0.1 fix

EWバリオジェネシス B) 非平衡 一次相転移

ILC Kvがずれる
宇宙空間でのGW
でも観測可能



より強い1次相転移を実現するために
Singletなどの効果をいれるモデルが有効



もし、CPのやぶれなどがConsistentでも、
EWスケールのバリオン数生成を
残す非平衡：標準理論では相転移は1次にはならない。
2HDでは、強い1次相転移になる可能性があり
左図に示す様に、hhh結合に20~30%のズレ
を生む。→ **2HDだけだとかなりきつい (250 GeV)**

レプトジェネシスの場合

- 1) **ヒッグスCPの測定** (ILC250)
- 2) κ の精密測定 (ILC250+HL-LHC)
- 3) 他のCPの吟味 (SuperKEKB)
- 4) EDM・LFV測定と1) 2) 3) とのconsistency
- 5) SingletのLH-LHCでの発見
- 6) 宇宙空間での重力波検出

全部がうまくいくと
EWバリオジェネシスシナリオ

強い結合の複数ヒッグス場
→ ランダウポール

10-1000TeVにあたらしい現象

- 1) **ニュートリノCPの発見**
- 2) マヨラナ (ダブル β decay) の発見

高いエネルギースケール(GUT or 10^{11}GeV)の存在の示唆

ゲージ階層性 (SUSY) / GUT

SUSY探索(**<10TeV**)

陽子崩壊

LFV

FCC, CLICなど

HK

SuperKEKB、 $\mu \rightarrow e \gamma \cdot \text{conv.}$

No CP

自然さ

New physics のエネルギースケールの戦略

①

Higgs Factory存在
LHCの高エネルギー
化へのincentive:
素粒子分野全体の
利益



- Higgs coupling
- SM precision
- Searches
ズレを観測

ILC 250GeV

HL-LHC
Belle II

CPの破れの検証
ILC250 / T2K



② Λ (次のエネルギー)
~ 2 - 3 TeV

完全に



FCC, HE-LHC, Future-ILC
次のスケールが決まる
技術がきまる

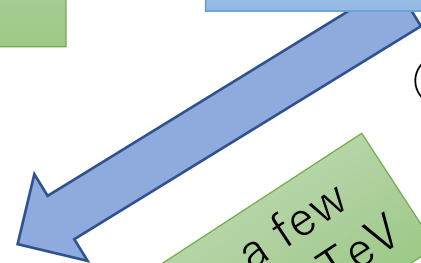


注意点
4つ

CPの破れ
など観測

物質・反物質の非対称性の
起源の解明

③



$\Lambda \sim \text{a few}$
~ 1000 TeV

CPの破れ
ない

④



電弱スケール
しかない

電弱対称性破れ
暗黒エネルギー
の様な不思議さ

Naturalnessの放棄

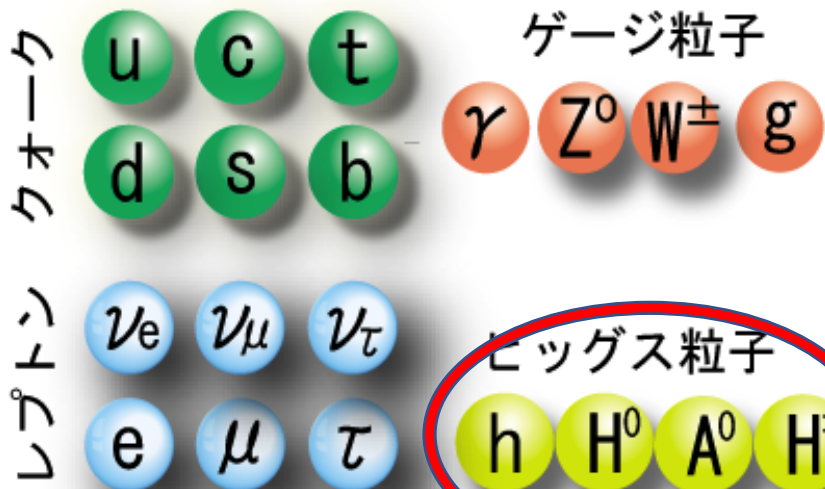
真空の物理：Bottom up 型の発展でなく
Top down ($10^{11,16,19}$ GeV)型研究への転換点

疑り深い君へ

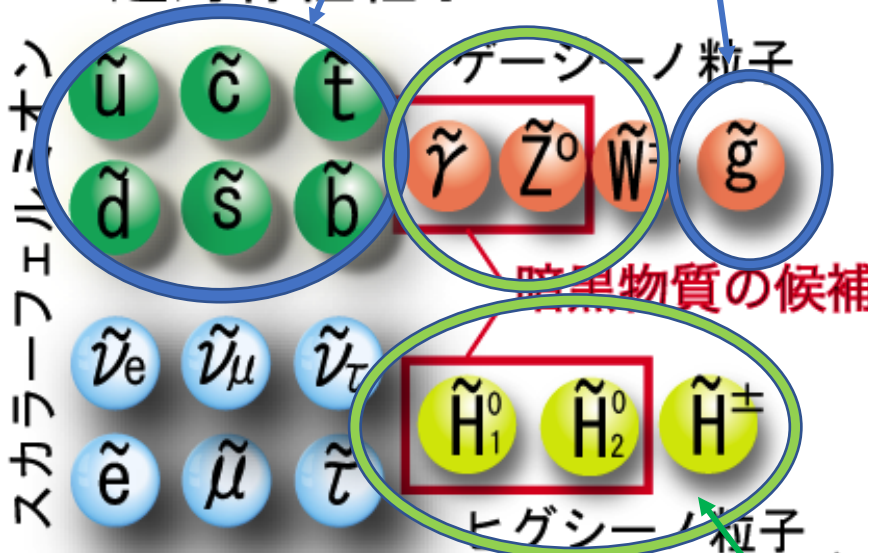
~3TeV

ア) scalar quark / gluino 探索 (LHC direct)

通常の素粒子



超対称性粒子

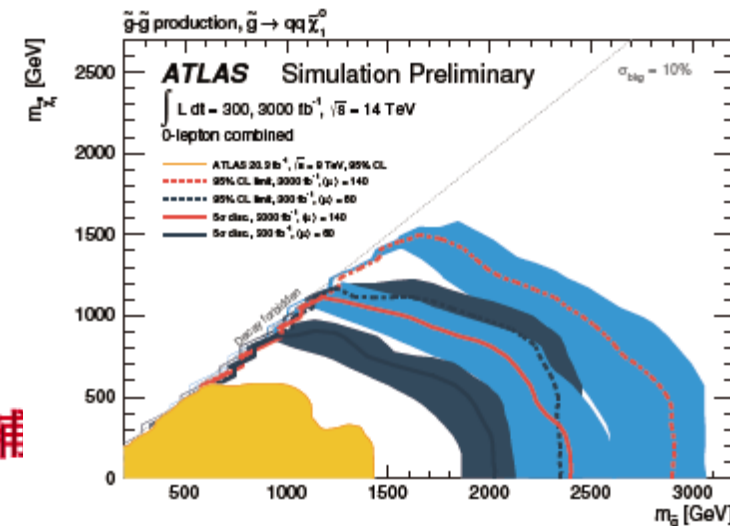


ヒッグス、超対称性粒子は未発見

ウ) 2HDモデル (ILC/LHC/KEKB)

イ) 電弱ゲージーノ探索 (ILC/LHC)

~2TeV くらい



軽い: ILC 直接
重い: SM: 精密測定
縮退してない: LHC

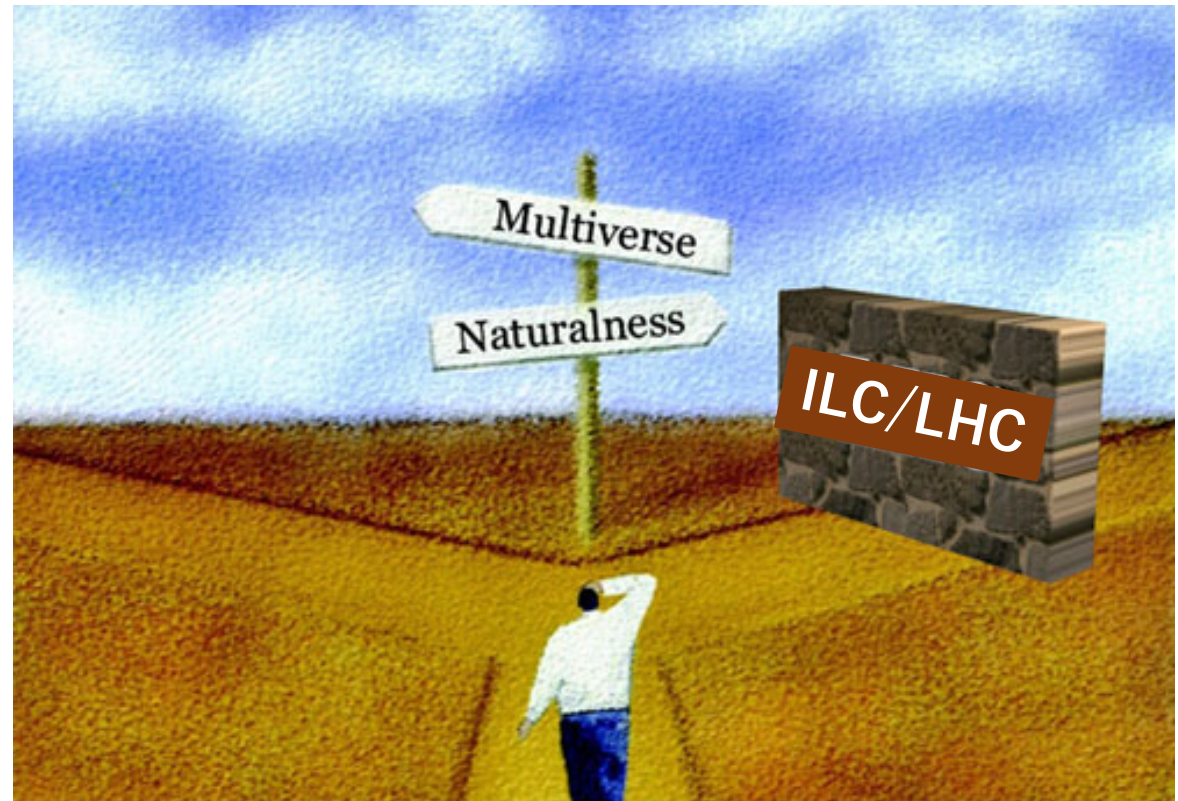
0(1)TeV くらい

SUSYが一番影響が弱い → SUSY以外も確実に

負け惜しみで言ってるんじゃない

悪夢ではない
大きな進歩

電弱相転移は、暗黒エネルギー同様に、不自然な自然現象であることが確定する。インフレーション、暗黒エネルギー、電弱相転移は真空に関わる現象であり、真空に関わる現象の特異性（スケールが自然に説明できない）を普遍化することになる、これまでの「ボトムアップ型」の研究から「トップダウン型」への研究方針の転換を示唆する。



3. ナチュラルネスシナリオと 暗黒物質に基づいた新粒子直接探索

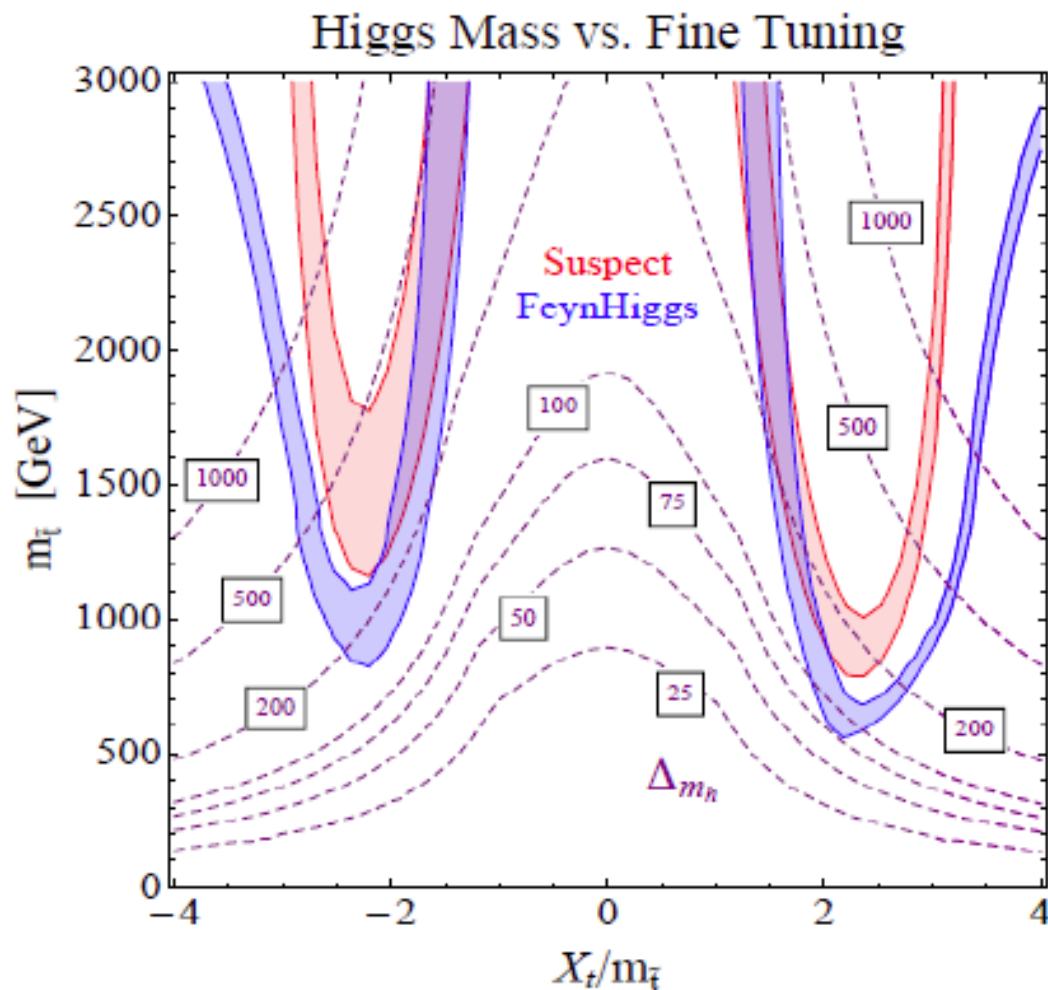
- 1 自然さとHiggsinoの可能性
- 2 WIMP暗黒物質の3つの可能性
 - Higgsino 探索
 - Singlet探索
 - Higgsino-Bino mixing 探索

自然さ

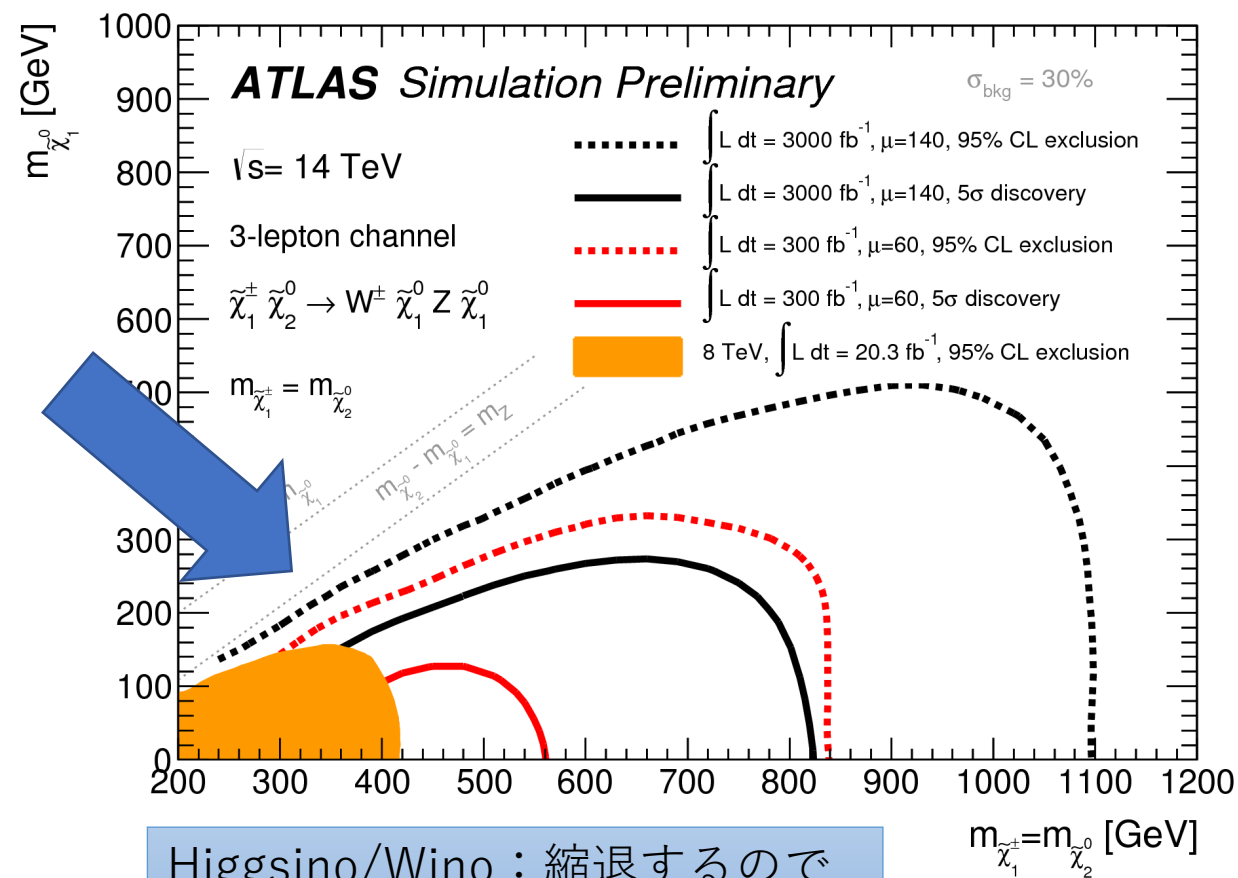
Traditionalな Naturalnessは
Higgs mass
→ Stop mass $\sim 1 - 100$ TeV
 $\Delta > 200 - 1000$

Focus Point
自然にスカラーは重い
最後のNaturalness
Higgsino Mass $\sim$ Higgs

3つのNaturalness
(Gluino/Stop/Higgsino)



自然さを放棄する前に Higgsinoの徹底探索



Higgsino/Wino：縮退するので
ILC250 → **200GeV (10%)**まで

WIMP暗黒物質の候補

直接探索 + ILC + LHC でカバー

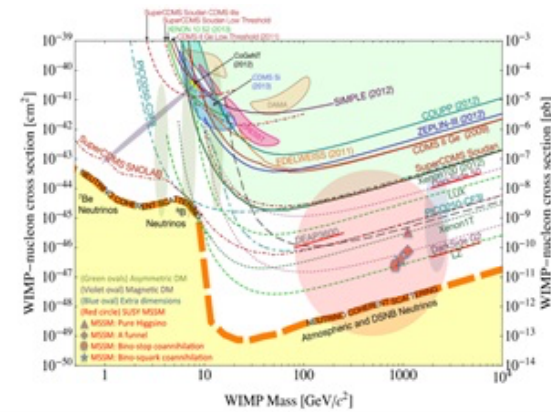
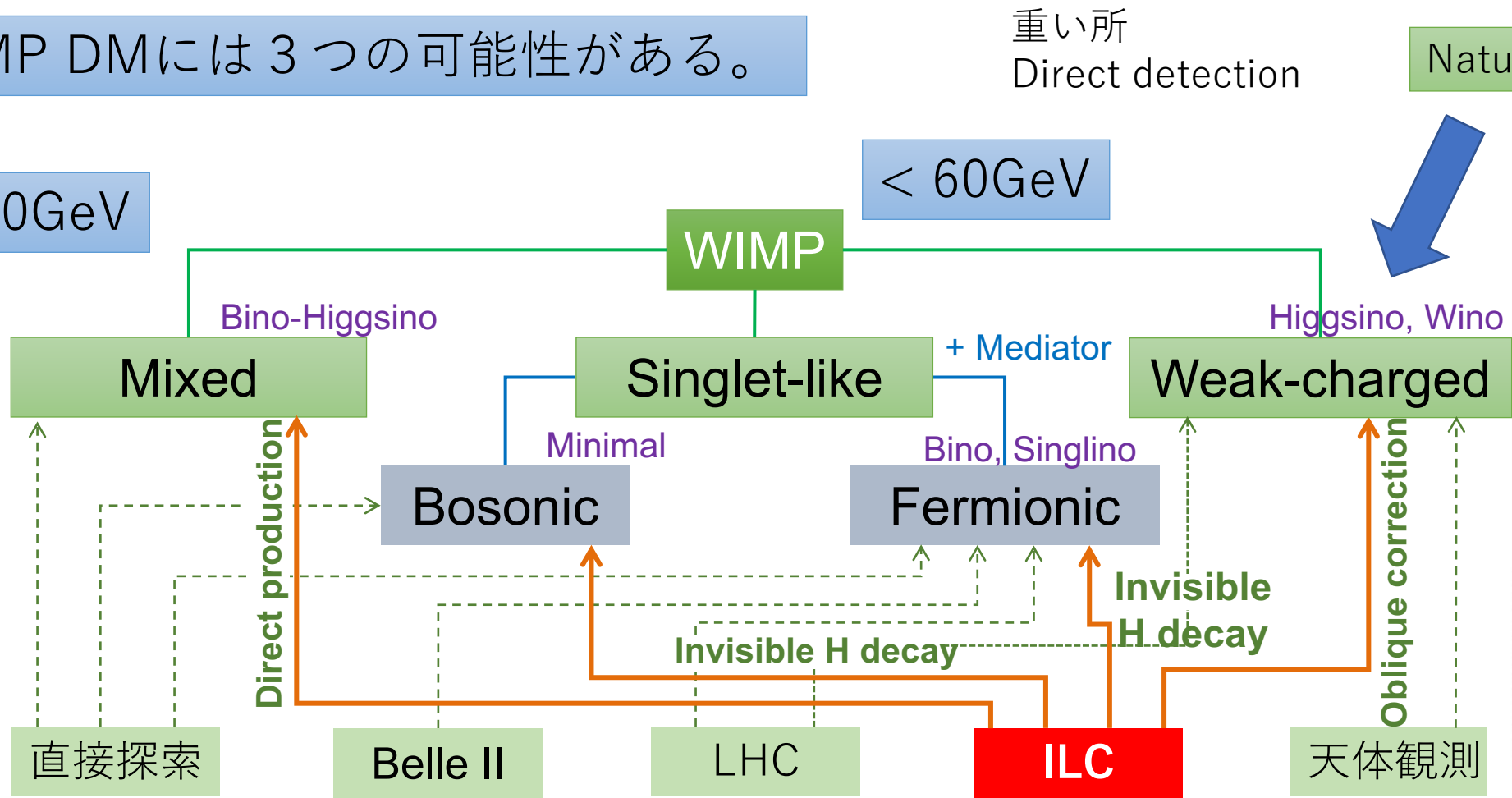
WIMP DMには 3つの可能性がある。

<100GeV

< 60GeV

Naturalness

< 200GeV



4. 本委員会の結論

- HL-LHCの物理成果をより実りあるものするためにも、ILC250の同時期の実験が望ましい。(P.28)
- 新しい物理のスケールが分かっていない現状では、ヒッグス粒子や標準理論の精密検証において、ILC250は、ILC500に十分比肩できる物理成果が期待出来る。(P.29)
- HL-LHCやSuperKEKBなどの成果と合わせて、 $\Lambda=2\sim3$ TeV程度までの新現象の確実な発見や、また物質の非対称性の起源の解明に、ILC250「Higgs Factory」は、不可欠な役割を果たす。
- エネルギーアップグレードはリニアコライダーの先天的な長所であることから、ILC250は自身で出す結果で示唆される新物理のエネルギースケールに見合ったアップグレードを実行する可能性を持っている。(P.30)

ILC250 は、HL-LHC やBelle II だけではカバーできない領域をカバーし、次の新現象のエネルギースケールを確実に探ることが可能になる。特にILC250は、アプローチ（ウ）の2HDの重いヒッグス粒子に対して感度がある。またILC250は「自然さ」や「暗黒物質」に立脚したアプローチ（イ）でも重要である。

ILC250とHL-LHCのアプローチ（ア）（イ）とあわせて確実な探索網が確立することになり、新しい現象・原理のエネルギースケール（ $\Lambda=2\sim 3\text{TeV}$ ）を、確実に探ることが可能になる。この様にILC250は重要な役割を果たす。

さらに、ILC250では、物質の起源の解明することが可能である。電弱バリオジェネシスのクルーシャルなテストが可能であり、この研究からも、新しい現象・原理のエネルギースケールを推測することが出来る2重の構造になっている。電弱バリオジェネシス $\Lambda=10\sim 1000\text{TeV}$ レプトジェネシス $\Lambda<10\text{TeV}$

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

鍵は synergy

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

将来のエネルギーアップグレードのシナリオ

- ① ILC250とHL-LHCの成果で、**次の新しい現象や原理のエネルギースケール**が分かった場合。
- ② トップクォークの質量精度：標準理論の検証や真空の安定性の研究では、LHCでの測定精度0.2～0.3GeVで十分である。将来HL-LHCやILC250の結果を踏まえて、**GUTなどの超高エネルギーの物理の研究**が主となり真空の安定性などを詳細に調べる必要が高くなった場合はILC350が重要になる。
- ③ P.21図の右側のシナリオ（「電弱スケールしかない」可能性が高い場合）、電弱対称性の破れやヒッグスポテンシャルの破れを詳細に研究することが重要である。この場合、重力波ばかりでなく、**ヒッグス粒子の自己結合HHHの測定が必要となり**、重心系エネルギー500GeV(正の干渉)と1 TeV(負の干渉)での精密測定が重要になる。

おまけ

1.1 Higgs coupling

2つのSynergy

- 1) HL-LHC W/Z custodial symmetry → 飛躍的精度向上
- 2) HL-LHCの得意なものは、HL-LHCの結果

coupling $\Delta g/g$	500 fb-1	2000 fb-1
HZZ	1.1%	0.63%
HWW	1.1%	0.63%
Hbb	1.7%	0.89%
Hcc	3.5%	1.8%
Hgg	3.1%	1.6%
H $\tau\tau$	2.0%	1.0%
H $\gamma\gamma$	1.5%	1.1%
H $\mu\mu$	27%	13%
Γ_H	4.1%	2.1%
BR(H→inv.) (95% CL)	0.61%	0.31%

有効場理論で展開

ILC Higgs

ILC SM

HL-LHC

LEP

Model Independent

coupling測定精度 ILC250+HL-LHC

有効な場方法の説明

Systematic Errors

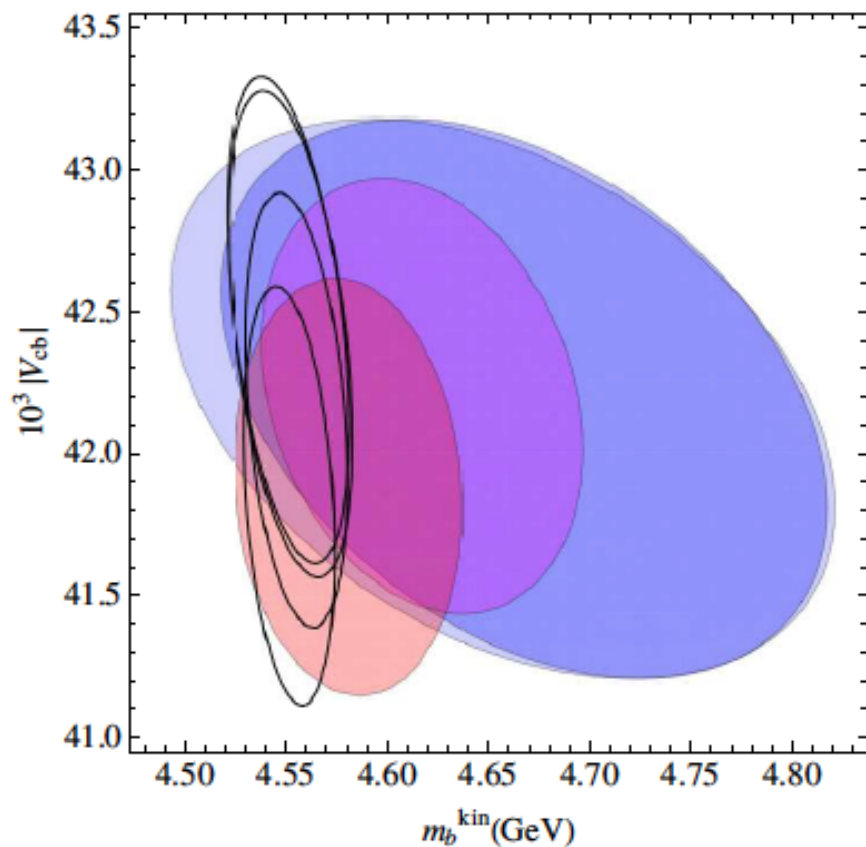
Mass of quark (b,c)
 α_s



現在のKEKBの成果です
すでに 0.5%の精度で
決まっている

系統誤差がkey

α_s	0.08%
mb	0.1%
mc	0.7%
B-tag	0.1%



$$m_b^{\text{kin}} = 4.541 \pm 0.023 \text{ GeVc}$$

(kinetic scheme)

	$\delta m_b(10)$	$\delta \alpha_s(m_Z)$	$\delta m_c(3)$	δ_b	δ_c	δ_g
current errors [10]	0.70	0.63	0.61	0.77	0.89	0.78
+ PT	0.69	0.40	0.34	0.74	0.57	0.49
+ LS	0.30	0.53	0.53	0.38	0.74	0.65
+ LS ²	0.14	0.35	0.53	0.20	0.65	0.43
+ PT + LS	0.28	0.17	0.21	0.30	0.27	0.21
+ PT + LS ²	0.12	0.14	0.20	0.13	0.24	0.17
+ PT + LS ² + ST	0.09	0.08	0.20	0.10	0.22	0.09
ILC goal				0.30	0.70	0.60

理論的進展や Lattice QCDの発展も重要

A) Anomalous HZZ coupling → 新現象

$$\mathcal{L} = \underbrace{\frac{1}{2} \left(\frac{2m_Z^2(1+a)}{v} \right) h Z_\mu Z^\mu}_{\text{(SM-like)}} + \underbrace{\frac{1}{2} \left(\frac{b}{\Lambda} \right) h Z_{\mu\nu} Z^{\mu\nu}}_{\text{(CP-even)}} + \underbrace{\frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{b}}{\Lambda} \right) h Z_{\mu\nu} \tilde{Z}^{\mu\nu}}_{\text{(CP-odd)}}$$

ILC250

$$\sigma_{Zh} \quad \frac{d\sigma}{d\cos\theta_Z} \quad \frac{d\sigma}{d\cos\theta_f} \quad \frac{d\sigma}{d\phi_f} \quad \Delta a = 0.027 \quad \frac{\Delta b}{\Lambda} = \frac{0.039}{\text{TeV}} \quad \frac{\Delta \tilde{b}}{\Lambda} = \frac{0.016}{\text{TeV}}$$

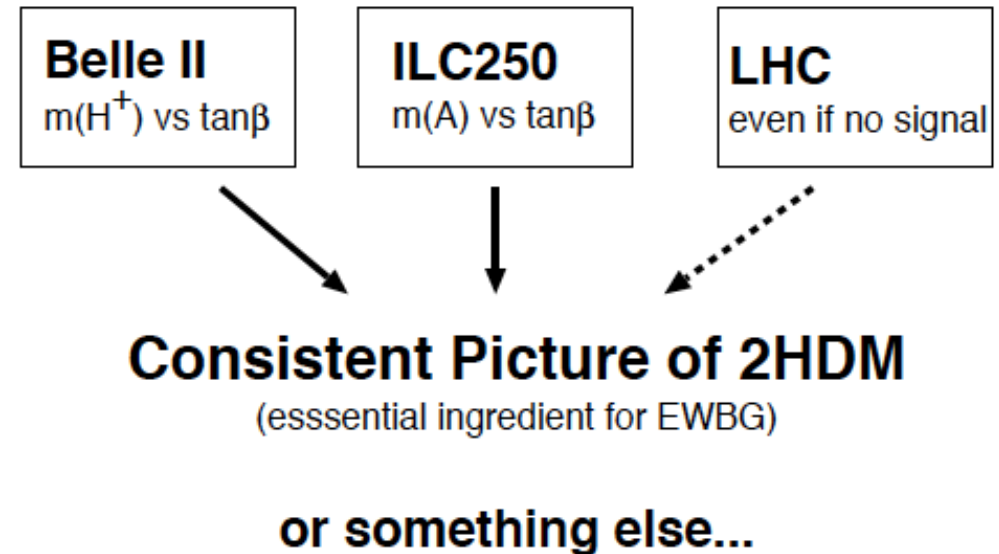
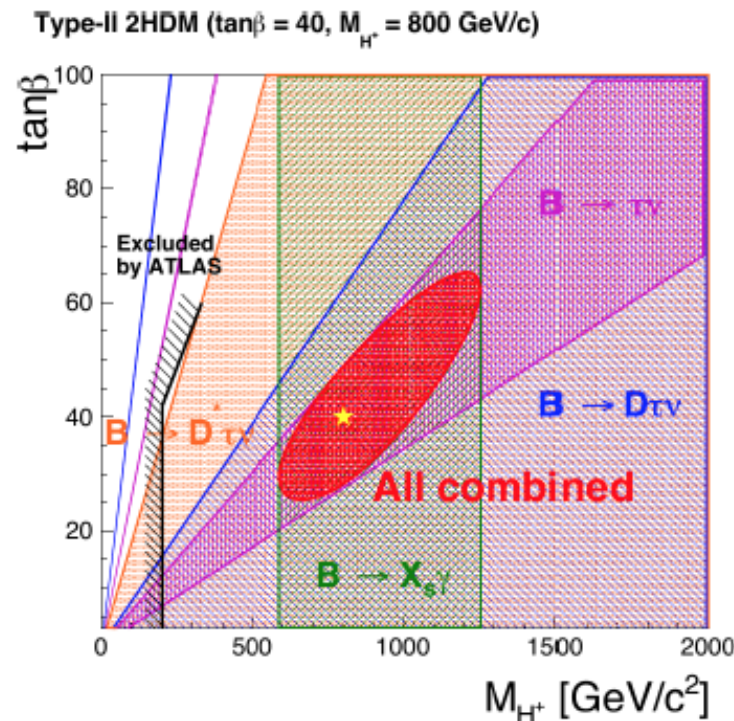
New Physics scale(Model independent)
 $\Lambda = 2.5(3.9)\text{TeV}$

2HDM and Belle II

BelleII は
Charged Higgsから
2HDをみている。

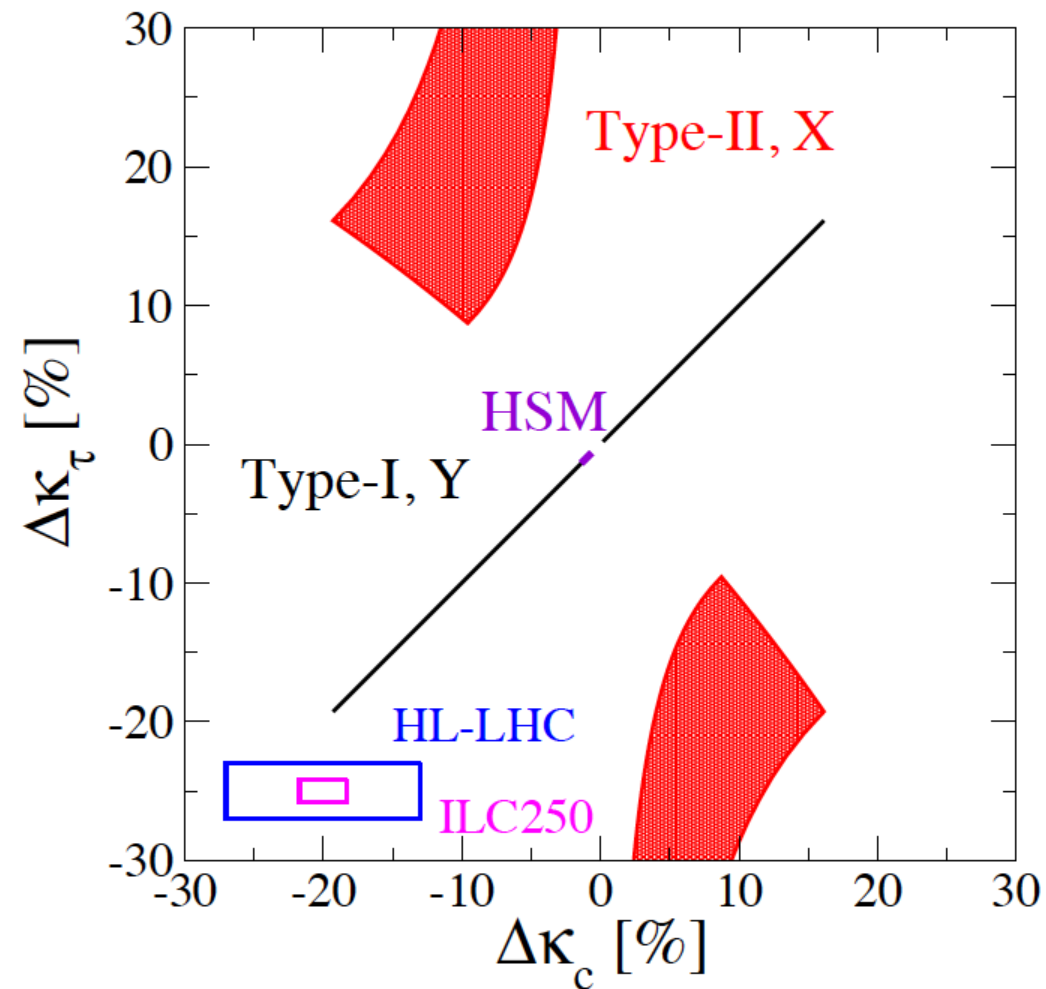
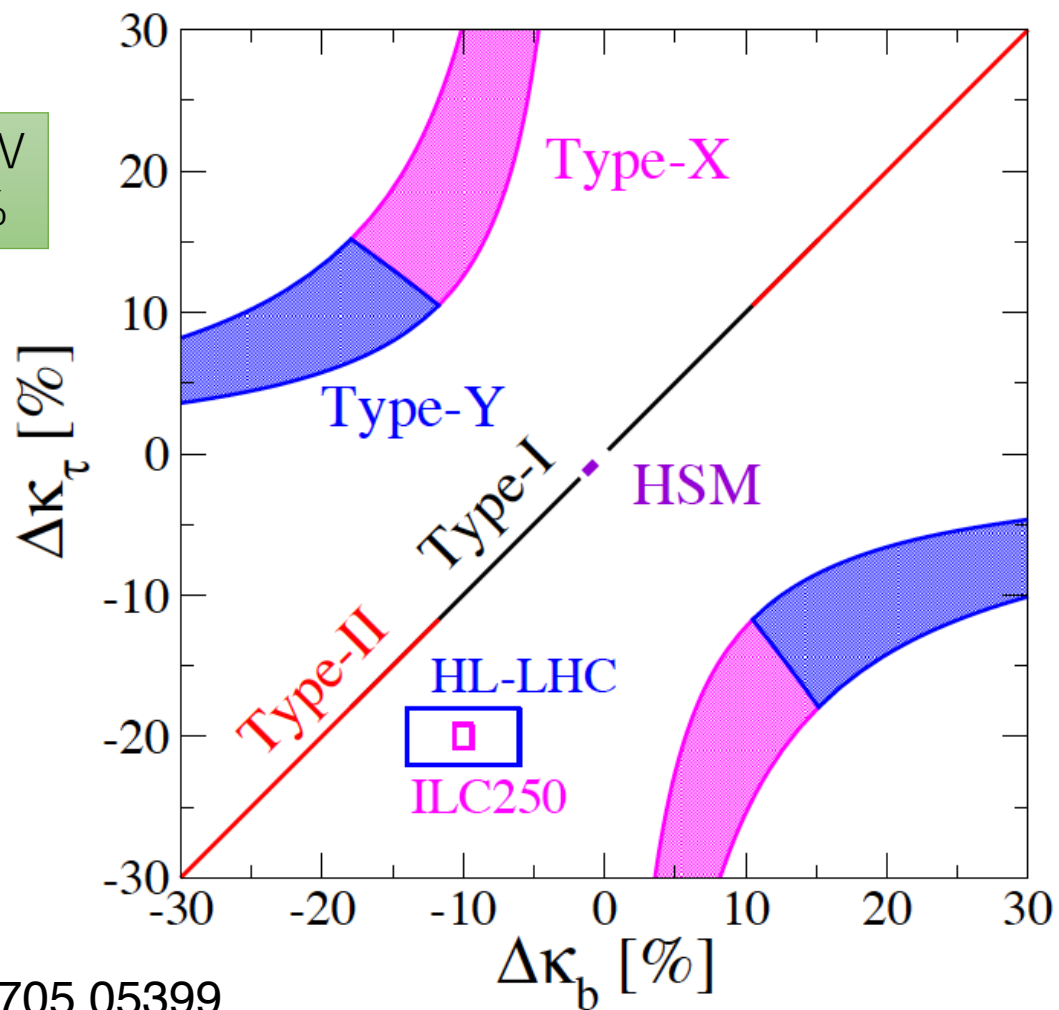
LHCは
Neutral Higgsから
2HDをみている。
NMSSM のような
Singletがあると
別の視点になる。

- Sensitivity to H^+ of type II 2HDM:
(4 independent modes) $b \rightarrow s\gamma$, $B \rightarrow \tau\nu$, $B \rightarrow D\tau\nu$, $B \rightarrow D^*\tau\nu$
- Fix $m(H^+)/\tan\beta$ or refute type-II 2HDM
- LHC may not find H^+ and extra neutral Higgs
- ILC250 sensitivity to $m(A)/\tan\beta$ becomes very crucial



$\Delta \kappa_v = 0.4\% \rightarrow$ 2HD $\Delta \kappa_\tau$ $\Delta \kappa_b$ $\Delta \kappa_c$ の測定からどのタイプの2HDなのか識別可能

MA~1TeV
 $\kappa_v = -1\%$



arXiv:1705.05399.

LHCでexcessが観測された時、どんな現象が起きているか？

発見と解明のSynergie

さまざまな 2 HDの時のILC250で新現象発見可能なスケール

In MSSM, NMSSM [hbb/hWW ~ 0.64%] 1.6 TeV

In general two Higgs doublet models (unitarity bound)

[hZZ~0.38%] 1 TeV

[hbb/hWW~0.64%] 2HDM Type II, Y 3 TeV

[h $\tau\tau$ /hWW~0.84%] 2HDM Type II, X 2.7 TeV

In the Higgs doublet and singlet model (unitarity bound)

[hZZ~0.38%] 5 TeV

In Minimal Composite Higgs Model ($\xi=\sin^2(v/f)$)

[hZZ~0.38%] MCHM4 2.8 TeV

[hbb/hWW~0.64%] MCHM5, MCHM10 3.8 TeV

ざっくり
1.5-3TeVまで
完全にわかる

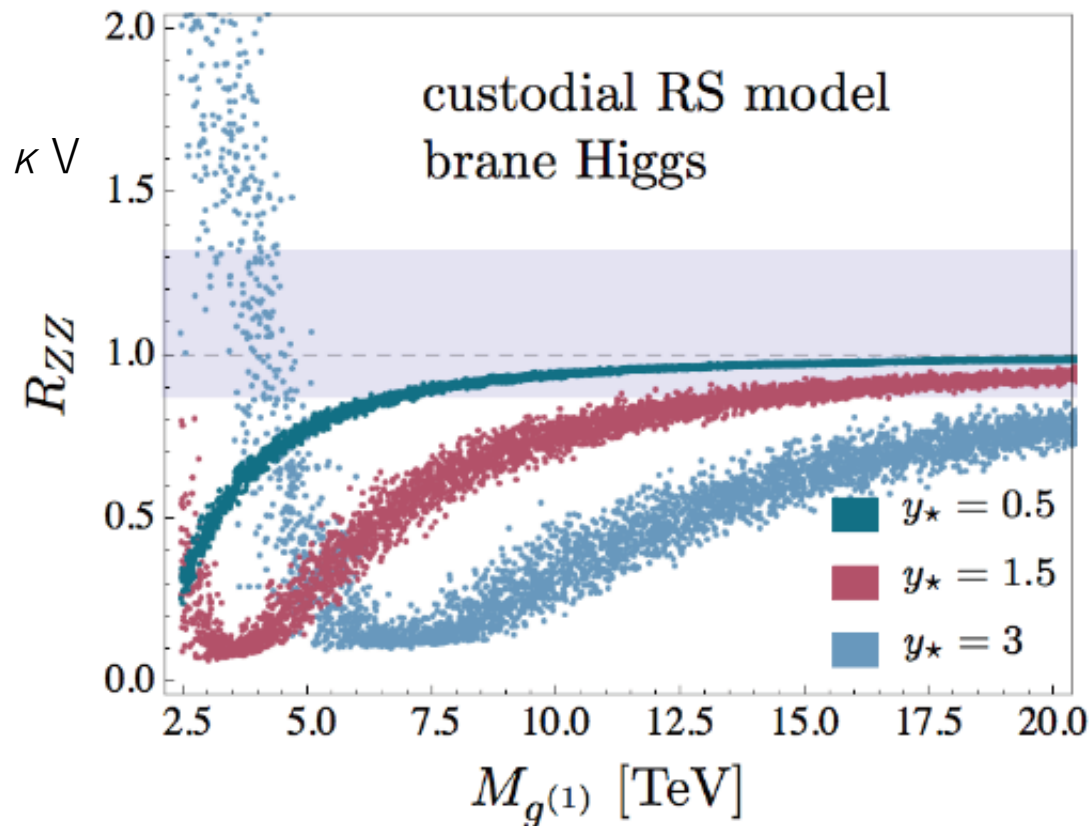
Calculation done using the results from
arXiv:1705.05399.

D) 余剰次元への感度

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{eff}} = & c_W \frac{2m_W^2}{v_{\text{SM}}} h W_\mu^+ W^{-\mu} + c_Z \frac{m_Z^2}{v_{\text{SM}}} h Z_\mu Z^\mu - \sum_{f=t,b,\tau} \frac{m_f}{v_{\text{SM}}} h \bar{f} (c_f + c_{f5} i \gamma_5) f \\ & - c_{3h} \frac{m_h^2}{2v_{\text{SM}}} h^3 - c_{4h} \frac{m_h^2}{8v_{\text{SM}}^2} h^4 + c_g \frac{\alpha_s}{12\pi v_{\text{SM}}} h G_{\mu\nu}^a G^{a,\mu\nu} - c_{g5} \frac{\alpha_s}{8\pi v_{\text{SM}}} h G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a,\mu\nu} \\ & + c_\gamma \frac{\alpha}{6\pi v_{\text{SM}}} h F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - c_{\gamma 5} \frac{\alpha}{4\pi v_{\text{SM}}} h F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} + \dots \end{aligned}$$

$$c_W \approx c_Z \approx 1 - 0.078 \left(\frac{5 \text{ TeV}}{M_{g(1)}} \right)^2$$

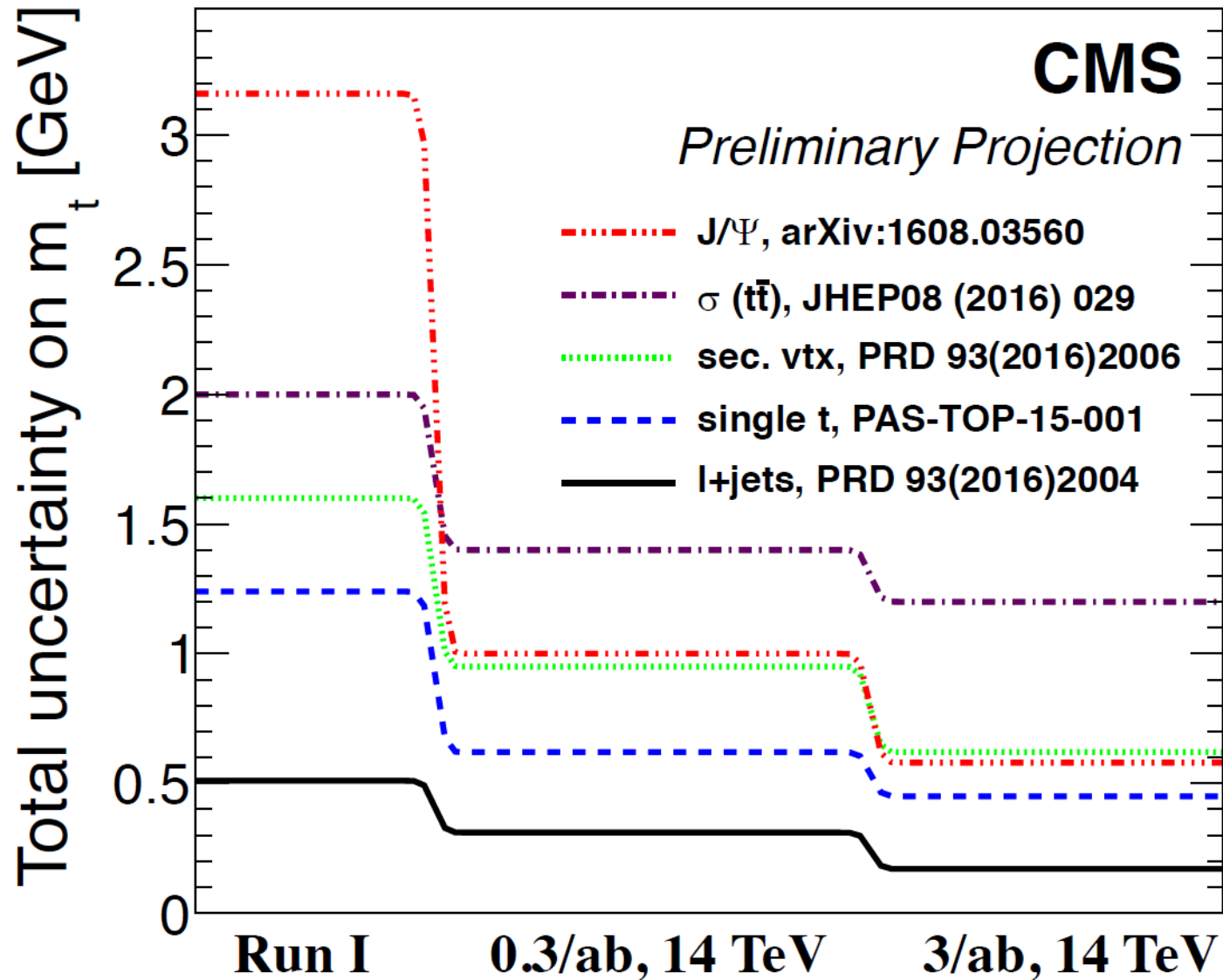
$$c_f = 1 - \tilde{a}_f (5 \text{ TeV} / M_{g(1)})^2$$



Vector Boson への結合
Fermionへの結合 ともに抑制

$M(\text{KK-gluon}) = 10\text{--}20 \text{ TeV}$ ($y = 1.5\text{--}3$)
の感度

HL-LHCのtop mass



Total uncertainty from measurements :
~200 MeV (black solid line)

Expected theory uncertainty for
translating the MC mass to the pole mass
in 2030 : ~200 MeV

(高次補正：フラグメント：理論との協働)

→ Combined total uncertainty on
 m_{top} ~ 300 MeV

B) TGCの精密測定

$$\Delta\mathcal{L}_{TGC} = ig_V \{ g_{1V} V^\mu (W_{\mu\nu}^- W^{+\nu} - W_{\mu\nu}^+ W^{-\nu}) + \kappa_V W_\mu^+ W_\nu^- V^{\mu\nu} + \frac{\lambda_V}{m_W^2} W_\mu^-{}^\rho W_\rho^+ V^{\mu\nu} \}$$

$V = Z, \gamma$

in EFT 3 free parameters: $g_{1Z}, \kappa_\gamma, \lambda_\gamma$

2000 fb-1 @ 250 GeV, simultaneous fit

Higgs coupling
測定で
重要

$$\Delta g_{1Z} = 3.8 \times 10^{-4}$$

$$\rho(g_{1Z}, \kappa_\gamma) = 70.1\%$$

$$\Delta \kappa_\gamma = 4.5 \times 10^{-4}$$

$$\rho(g_{1Z}, \lambda_\gamma) = 41.0\%$$

$$\Delta \lambda_\gamma = 3.8 \times 10^{-4}$$

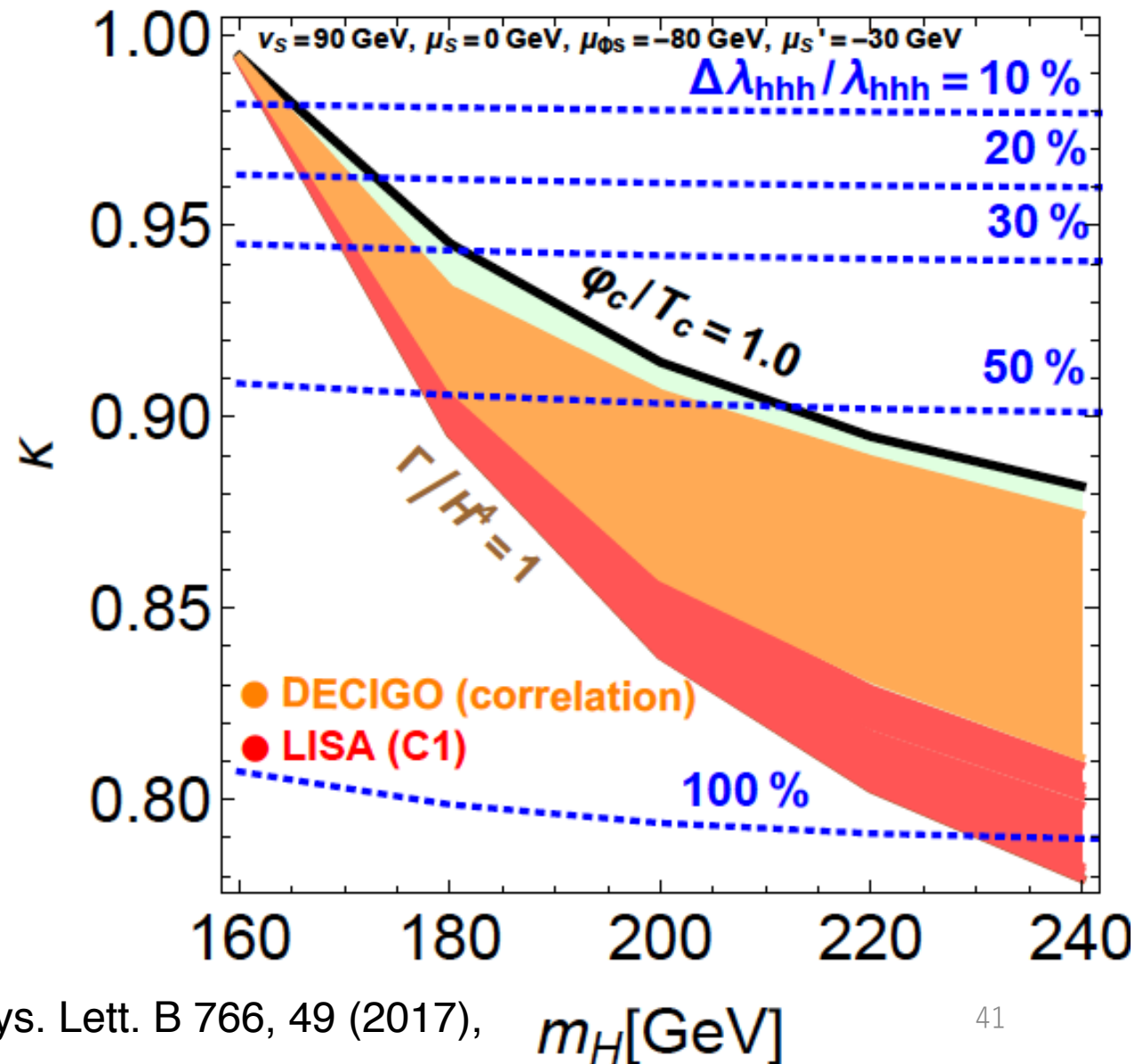
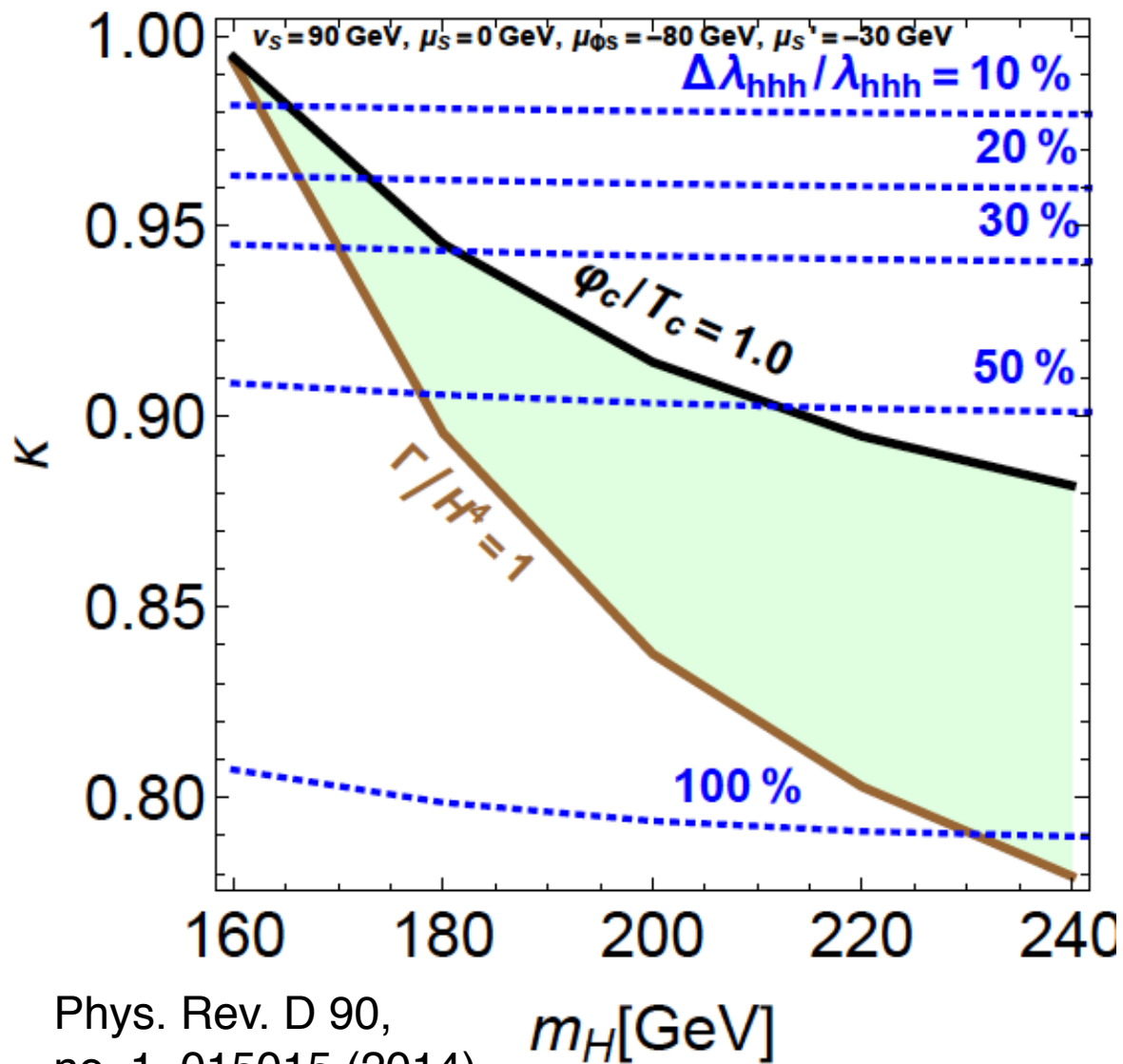
$$\rho(\kappa_\gamma, \lambda_\gamma) = 38.5\%$$

2. 7 TeV
までの感度

Kvがずれる、ILC250で
check できる

2重の確認 (Synergy)

重力波でも観測できる



Two Higgs doublet model [Z_2 のある場合]

$$\begin{aligned} V_{\text{tree}}(\Phi_1, \Phi_2) = & -\mu_1^2 \Phi_1^\dagger \Phi_1 - \mu_2^2 \Phi_2^\dagger \Phi_2 - \frac{1}{2} \left(\mu^2 \Phi_1^\dagger \Phi_2 + \text{H.c.} \right) + \\ & + \frac{\lambda_1}{2} \left(\Phi_1^\dagger \Phi_1 \right)^2 + \frac{\lambda_2}{2} \left(\Phi_2^\dagger \Phi_2 \right)^2 + \lambda_3 \left(\Phi_1^\dagger \Phi_1 \right) \left(\Phi_2^\dagger \Phi_2 \right) + \\ & + \lambda_4 \left(\Phi_1^\dagger \Phi_2 \right) \left(\Phi_2^\dagger \Phi_1 \right) + \frac{1}{2} \left[\lambda_5 \left(\Phi_1^\dagger \Phi_2 \right)^2 + \text{H.c.} \right]. \end{aligned}$$

$$\langle \Phi_1 \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \cos \beta \end{pmatrix}, \quad \langle \Phi_2 \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \sin \beta e^{i\theta} \end{pmatrix}, \quad \begin{aligned} \delta_1 &= \text{Arg}[(\mu^2)^2 \lambda_5^*], \\ \delta_2 &= \text{Arg}(v_1 v_2^* \mu^2 \lambda_5^*) \end{aligned}$$

$$|\mu^2| \sin(\delta_1 - \delta_2) = v^2 \sin \beta \cos \beta |\lambda_5| \sin(\delta_1 - 2\delta_2),$$

Current data of EDM

$$|d_e^{\text{ACME}}| < 8.7 \times 10^{-29} \text{ e} \cdot \text{cm},$$

$$|d_e^{\text{YbF}}| < 1.06 \times 10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm},$$

$$|d_n| < 2.9 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}.$$

General two Higgs doublet model

$$\begin{aligned} -\mathcal{L}_Y &= \bar{l}_{iL} (Y_1 \Phi_1 + Y_2 \Phi_2)_{ij} e_{jR} + \text{h.c.} \\ &\ni \bar{e}_{iL} \left[\frac{y_i}{\sqrt{2}} \delta_{ij} s_{\beta-\alpha} + \frac{1}{\sqrt{2}} \rho_{ij} c_{\beta-\alpha} \right] e_{jR} h \\ &\quad + \bar{e}_{iL} \left[\frac{y_i}{\sqrt{2}} \delta_{ij} c_{\beta-\alpha} - \frac{1}{\sqrt{2}} \rho_{ij} s_{\beta-\alpha} \right] e_{jR} H \\ &\quad + \frac{i}{\sqrt{2}} \bar{e}_{iL} \rho_{ij} e_{jR} A + \text{h.c.} , \end{aligned}$$

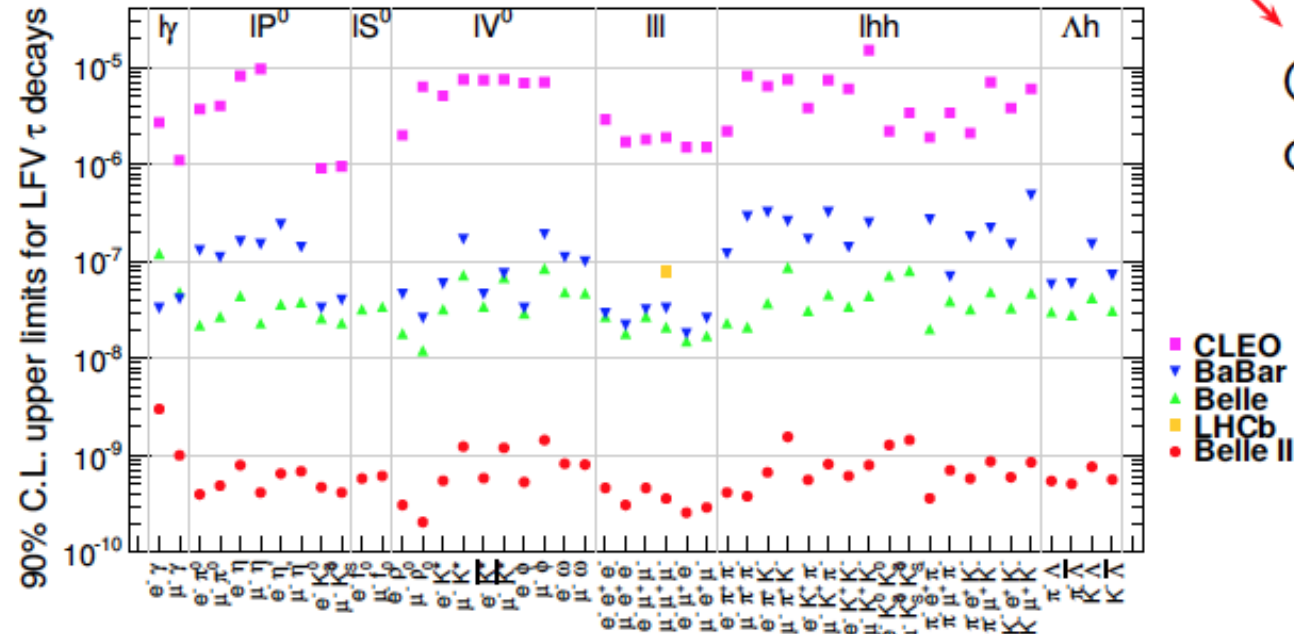
CLFV

- $h \rightarrow \tau e$ and $\tau \mu$ sensitivity — $\mathcal{B} \sim 0.4\%$ (2σ) at ILC250
(simple cut analysis, 250 fb^{-1} , JHEP07,059(2016))



- HL-LHC suffers from huge background
- Belle II τ LFV search down to $O(10^{-10})$ to $O(10^{-9})$ in many modes
- MEG II $\mu \rightarrow e \gamma$ down to $O(10^{-14})$

Grand picture
of CLFV

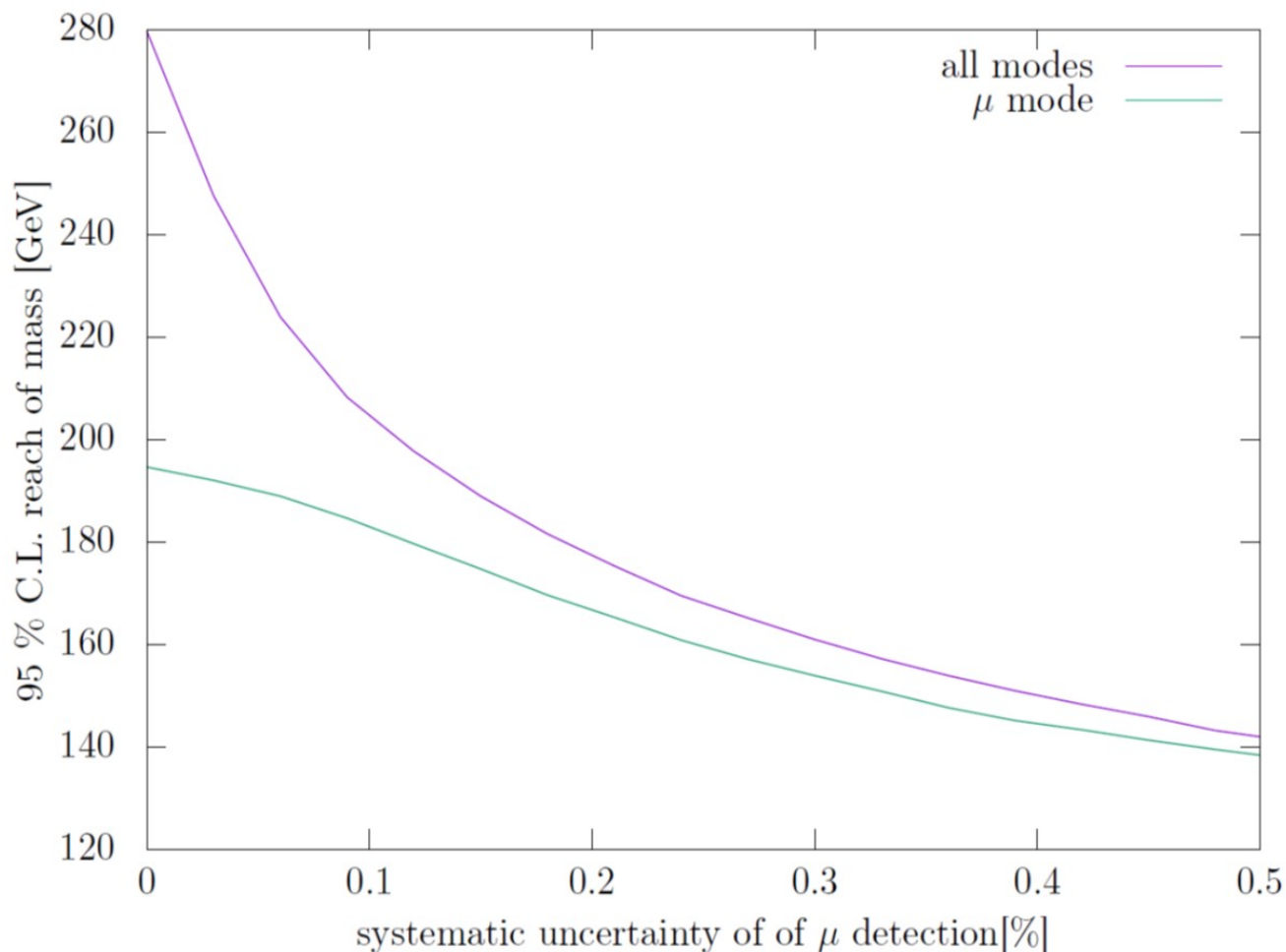


3.3 A) Weak Charged WIMP

自然さ : Higgsino search

相補的

Wino case: LHCで探索



[$ee \rightarrow \text{SM}$] [$ee \rightarrow \mu\mu$]

の断面積から

Higgsinoの効果:

muon 検出の不定性 0.1%

Higgsino $\sim 200\text{GeV}$
まで検証可能

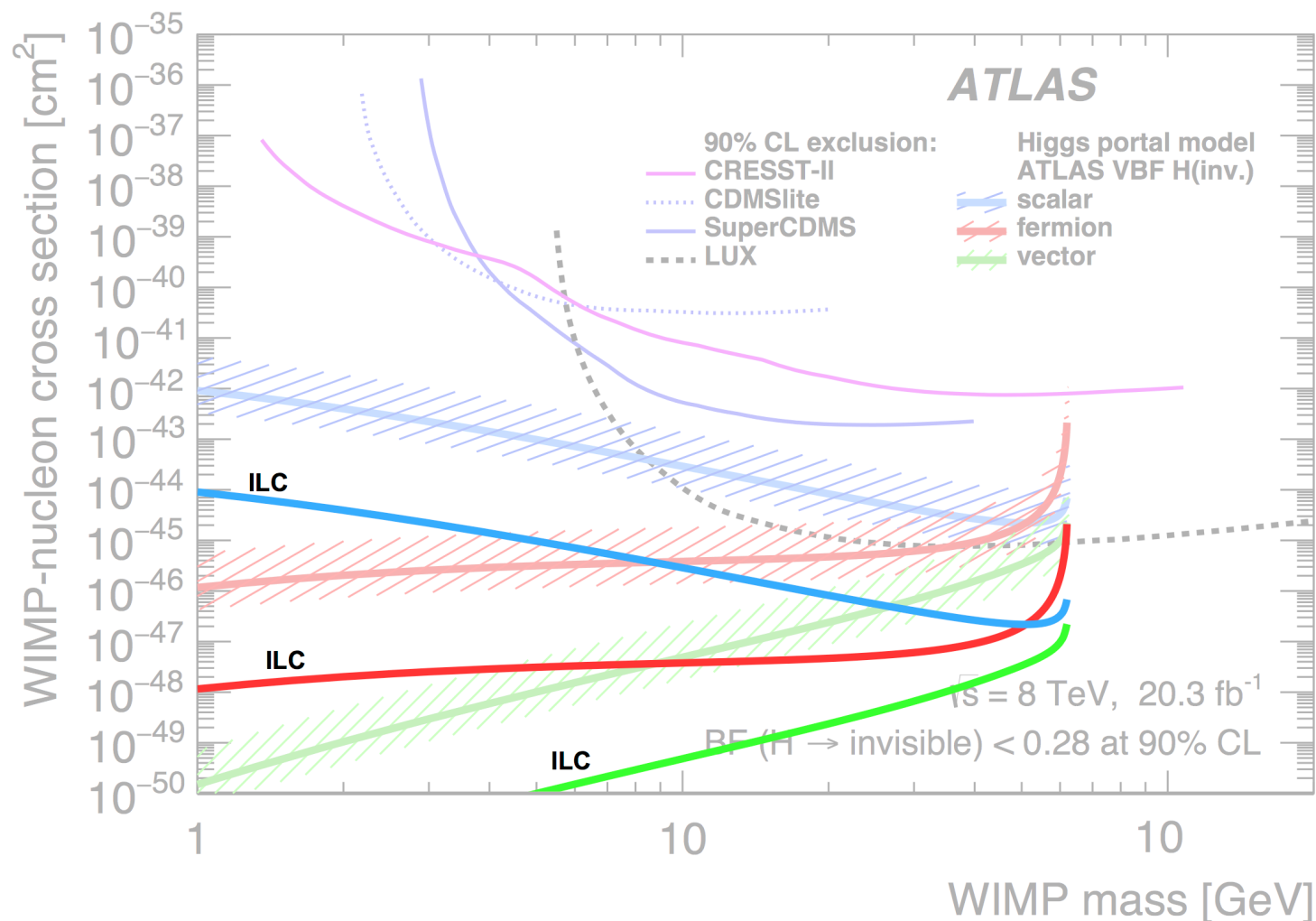
✓ ヒッグシーノ質量の上限 [arXiv: 1110.6926]

$$\mu \lesssim 200 \text{ GeV} \left(\frac{m_h}{120 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{\Delta^{-1}}{20\%} \right)^{-1/2}$$

10%の自然さの検証可能

3.3 B) Singlet-like WIMP

Invisible decay = 0.3% $\rightarrow$ Physics impact Light DM

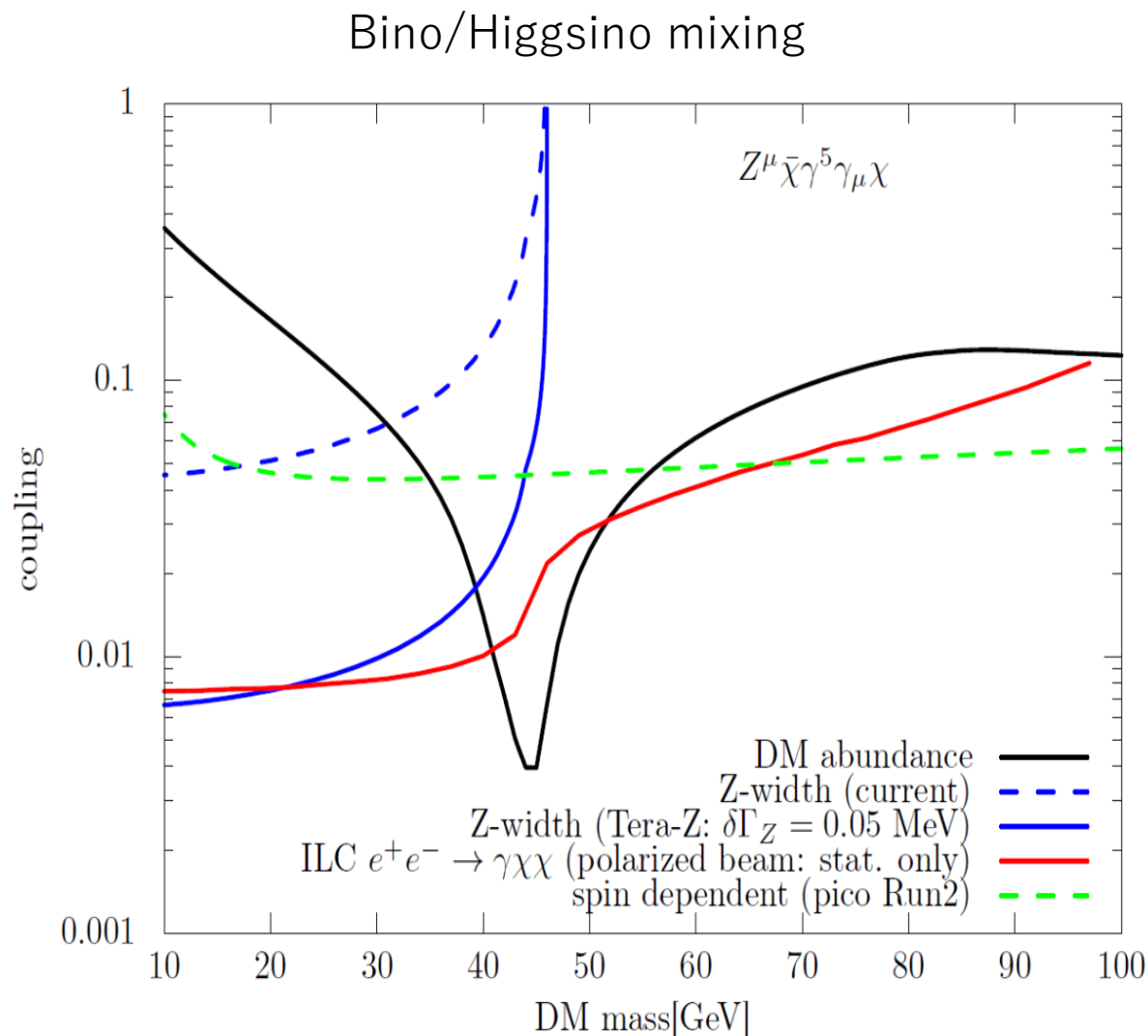


Higgsとの結合により
 $h \rightarrow XX$ のinvisible 崩壊
が可能になる。
この制限を左図にしめす。

WIMP mass $< \frac{1}{2}$ Higgs mass
の領域は、ほぼ完全に
カバーできる。

$\frac{1}{2}$ Higgs mass より重い
領域は、直接探索でカバーできる。
BinoのケースはHL-LHC

3.3 C) Bino/Higgsino mixing



HiggsinoのみならずBinoも電弱スケールに存在することを予言する。このとき最も軽いNeutralino（暗黒物質）は両者が混合したもので記述され、通常Higgsと相互作用(Higgs-Neutralino-Neutralino結合)を持ち、地下実験におけるスピンの依存しない直接検出で効率的に探査される。しかしながら、この結合が抑制されてしまうパラメータ領域もまた存在する（Higgs Blind Spot領域）。このときNeutralino（暗黒物質）の物理はZボソンとの相互作用（Z-Neutralino-Neutralino結合）で支配されるため、ILCにおいてMono- γ やZボソンのInvisible崩壊のチャンネルを通して探査が可能となる

Justification: Custodial symmetry 0.5%

$$\Gamma_H = \frac{\Gamma_{HWW}}{\text{Br}(H \rightarrow WW^*)} \propto \frac{g_{HWW}^2}{\text{Br}(H \rightarrow WW^*)}$$

- estimate of $\text{Br}(H \rightarrow WW^*)$ measurement at ILC 250 is improved by a factor of 2
- custodial symmetry is calculated in EFT framework $\Delta(\kappa_W/\kappa_Z) < 0.1\%$ (tree level); important inputs include TGC, $\text{Br}(H \rightarrow \gamma\gamma)$ and $\text{Br}(H \rightarrow \gamma Z) \rightarrow$ another nice synergy between LHC and ILC
- in EFT, $\sigma(e^+e^- \rightarrow ZH)$ is not any more simply proportional to Γ_{HZZ} (both $\propto \kappa_Z^2$ in κ -framework)
- as a result, κ_Z precision would get a bit worse; equivalently close to our results assuming $\Delta(\kappa_W/\kappa_Z) = 0.5\%$

Higgs couplings in EFT framework

Barlow, Fujii, Jung, Peskin, Tian, et al, paper in preparation

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow Zh) = (SM) \cdot (1 + \overset{\text{like kappa}}{2\eta_Z} + \overset{\text{from D-6 operator}}{(5.5)\zeta_Z})$$

$$\Gamma(h \rightarrow ZZ^*) = (SM) \cdot (1 + 2\eta_Z - (0.50)\zeta_Z) ,$$

$$\Gamma(h \rightarrow WW^*) = (SM) \cdot (1 + 2\eta_W - (0.78)\zeta_W)$$

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

$$\zeta_W = (8c_{WW})$$

$$\zeta_Z = c_w^2(8c_{WW}) + 2s_w^2(8c_{WB}) + (s_w^4/c_w^2)(8c_{BB})$$

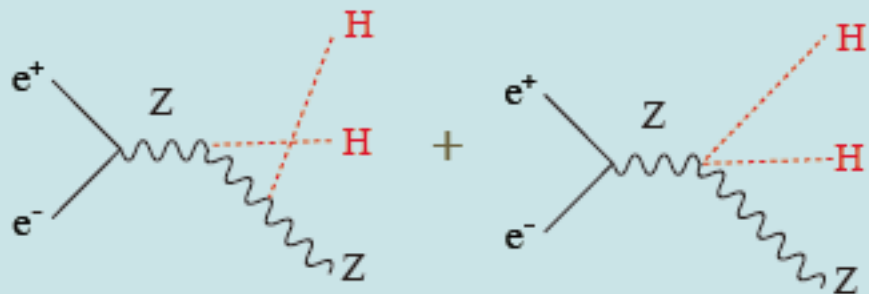
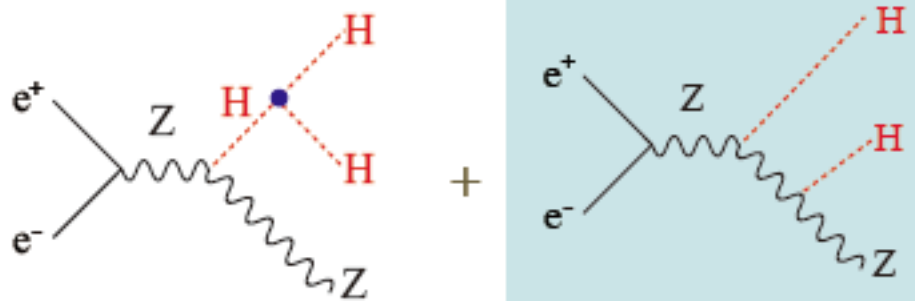
inputs from LHC

$$\Gamma(h \rightarrow \gamma\gamma) = \Gamma(h \rightarrow \gamma\gamma)_0 \cdot \left(1 + (1 + 2s_w^2)\delta g + 2c_w^2\delta g' - \delta v - c_H \right. \\ \left. + 526.1 s_w^2((8c_{WW}) - 2(8c_{WB}) + (8c_{BB})) \right)$$

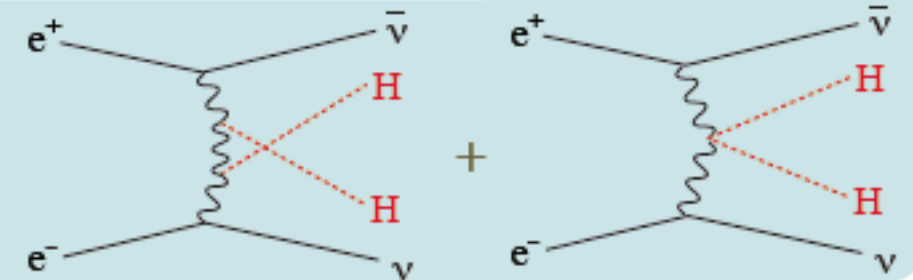
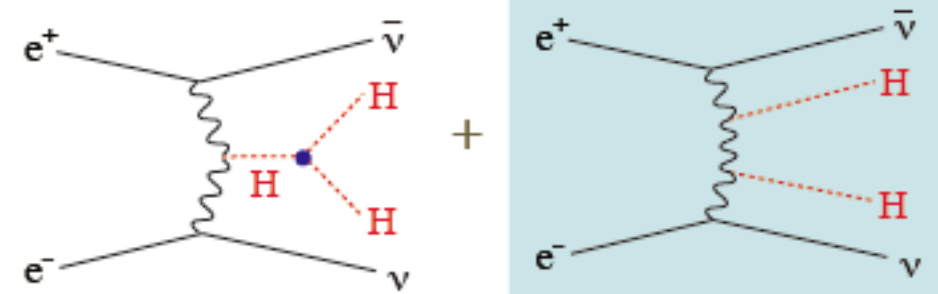
$$\Gamma(h \rightarrow Z\gamma) = \Gamma(h \rightarrow Z\gamma)_0 \cdot \left(1 + [0 \text{ for the moment}] - \delta v - c_H \right. \\ \left. + 289.7 s_w c_w((8c_{WW}) - (1 - \frac{s_w^2}{c_w^2})(8c_{WB}) - \frac{s_w^2}{c_w^2}(8c_{BB})) \right)$$

HHH coupling

Signal diagram



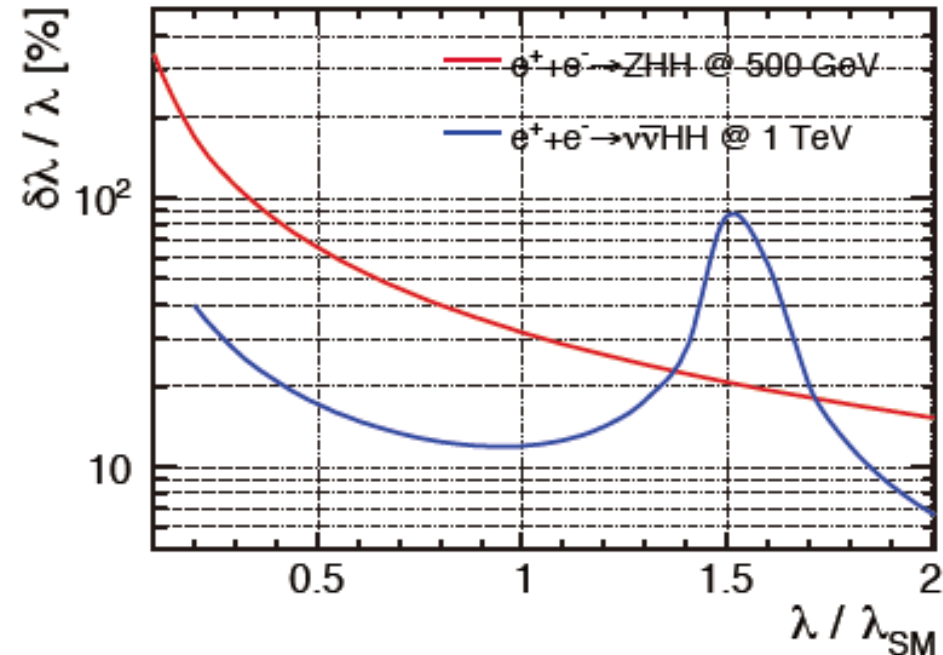
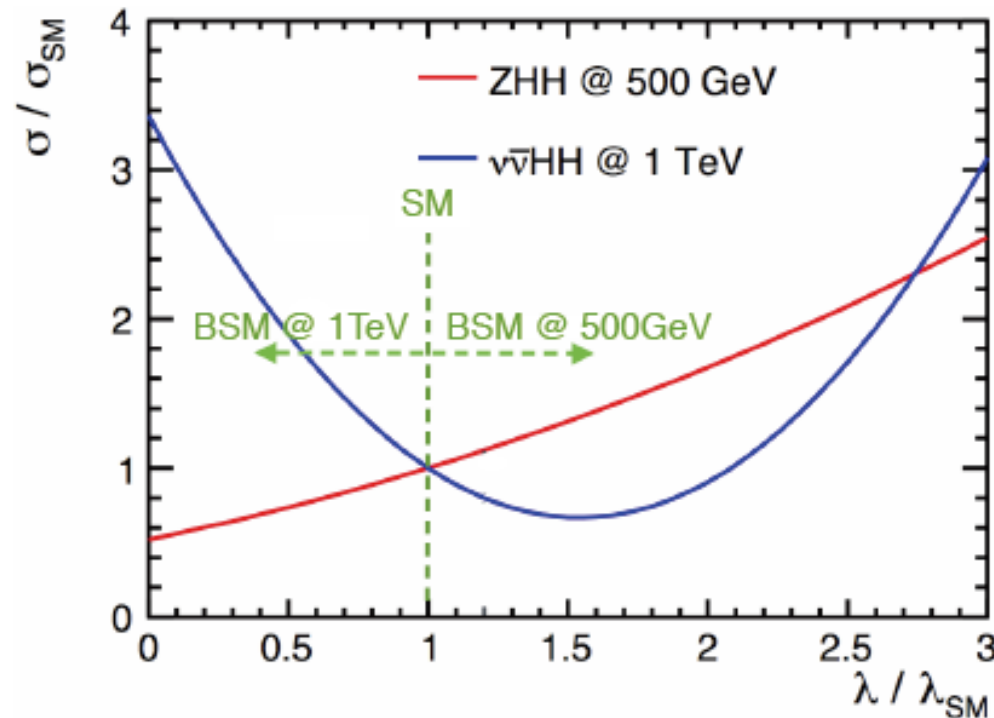
Signal diagram

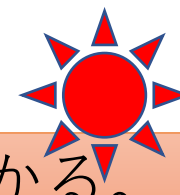


Higgs self-coupling: when $\lambda_{HHH} \neq \lambda_{SM}$?

- constructive interference in ZHH, while destructive in $\nu\bar{\nu}HH$ (& LHC) → complementarity between ILC & LHC, between $\sqrt{s} \sim 500$ GeV and >1 TeV
- if $\lambda_{HHH} / \lambda_{SM} = 2$, Higgs self-coupling can be measured to $\sim 15\%$ using ZHH at 500 GeV e^+e^-

Duerig, Tian, et al, paper in preparation



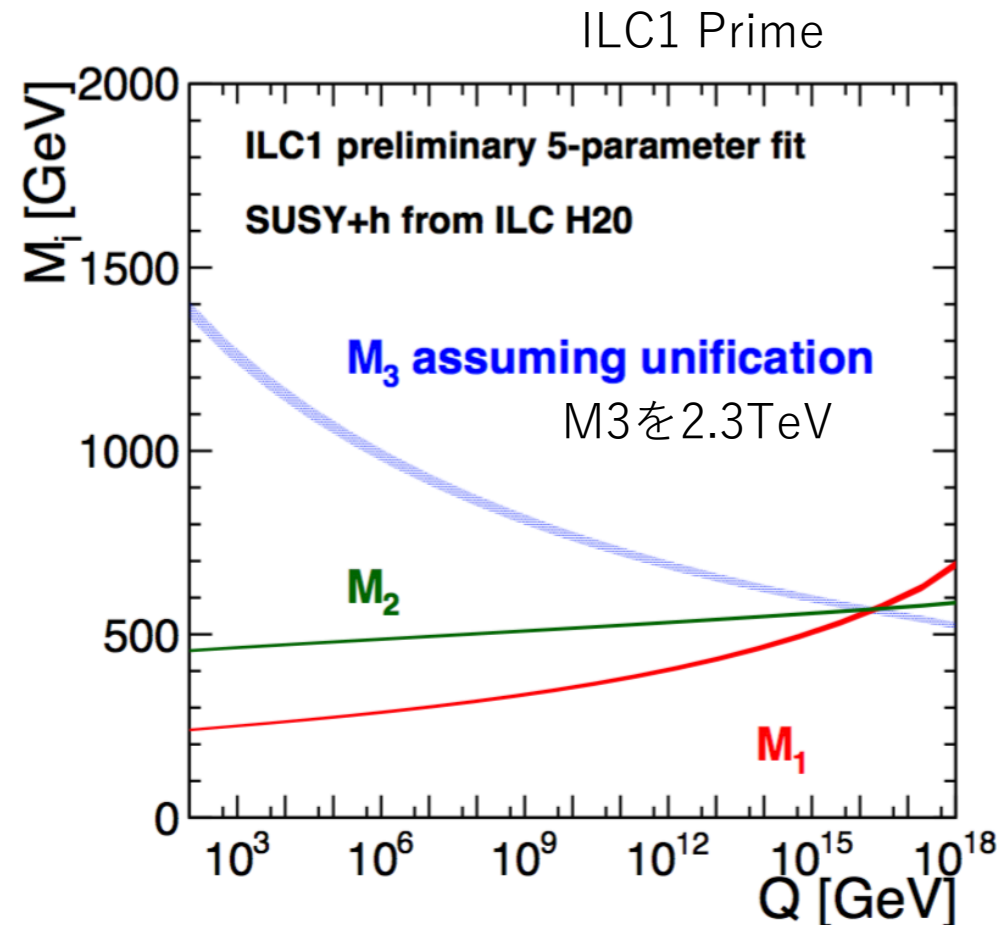


田辺さん、Junpingさん

SUSY らしき信号が HL-LHC ILC250でGUTがわかる。

HL-LHC で Gluino-like な excessが見えた。
Naturalness Higgsino Discovery → 2 パターン 可能？

	ILC1prime mass [GeV]
N_1	102.5
N_2	124.1
C_1	117.3
N_3	264.3
N_4	517.2
C_2	505.9
gluino	2293



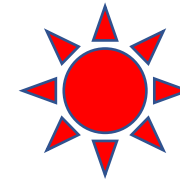
Gluino 2.5TeVくらい
Pure Higgsino 200GeV?
GUT いえない?
Error 大きくていいから

シナリオ

LHCでexcess
ILC で indirect
→ GUT の示唆

ILCのアップグレード
→ GUTのスケール決定

Flowchart of Higgsino Search at ILC



浅井 Logic を
Consistentにする。

