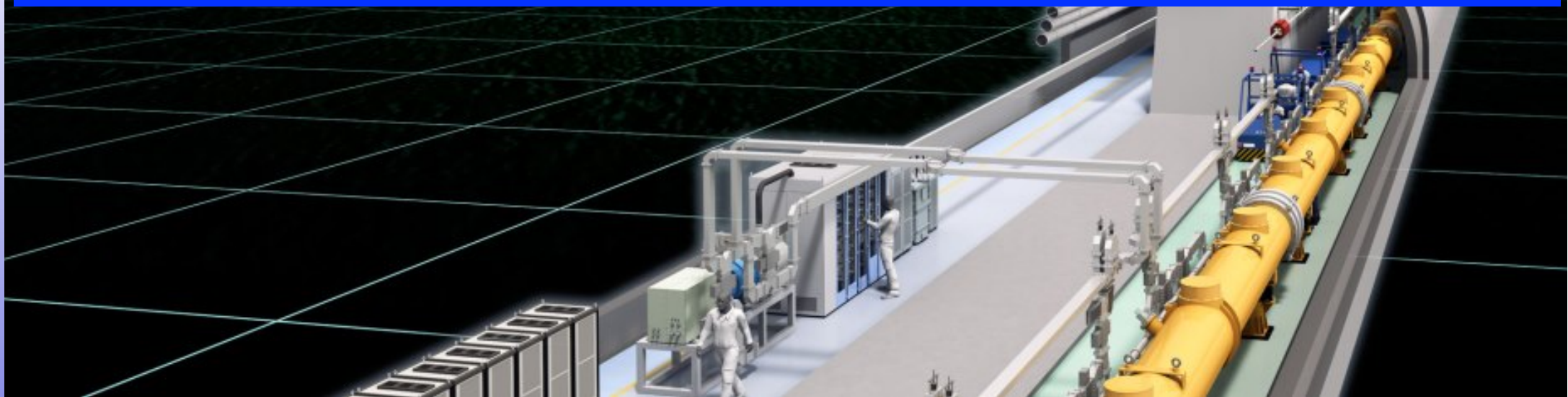




リニアコライダーにおけるヒッグス研究



2013/05/25 名古屋大学

新学術領域「先端加速器LHCが切り拓くテラスケールの素粒子物理学」

九州大学 先端素粒子物理研究センター

吉岡 瑞樹



九州大学
KYUSHU UNIVERSITY



国際リニアコライダー計画 International Linear Collider (ILC)

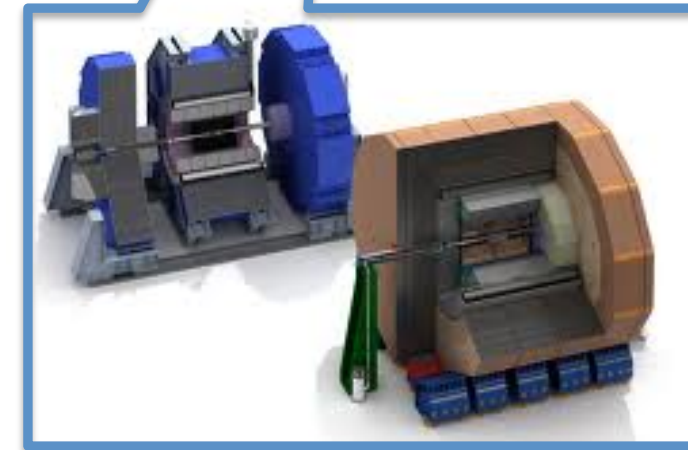
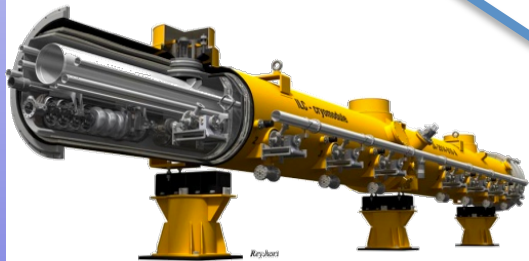
電子・陽電子を超高速で衝突させ、
ビッグバン直後の宇宙を再現！

陽電子

電子

ILD & SiD 測定器

全長31km、地下トンネル内に建設される
最先端装置群



2013/May/25

先端加速器LHCが切り拓くテラス
ケールの素粒子物理学

©Rey.Hori/KEK

国際リニアコライダー計画

International Linear Collider (ILC)

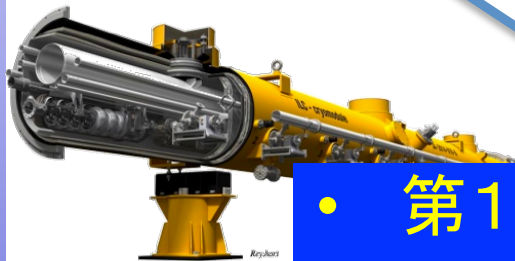
電子・陽電子を超高速で衝突させ、
ビッグバン直後の宇宙を再現！

陽電子

電子

ILD & SiD 測定器

全長31km、地下トンネル内に建設される
最先端装置群



- 第1期: 250-500 GeV (全長31 km)
 - 250 GeV: ヒッグス工場
 - 350 GeV: トップ工場
 - 500 GeV: ヒッグス自己結合、トップ湯川結合
 - 250-500 GeV: ダークマターの解明、新物理の解明
- 第2期: 1 TeV (全長50 km) に拡張？
 - これから出てくる物理によって方針を決める

2013/May

国際リニアコライダー計画

International Linear Collider (ILC)



全長31km、地下トンネル内に建設される最先端装置群

電子・陽電子を超高速で衝突させ、ビッグバン直後の宇宙を再現！

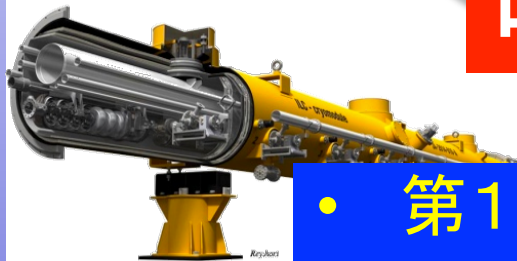
陽電子

電子

ILD & SiD 測定器

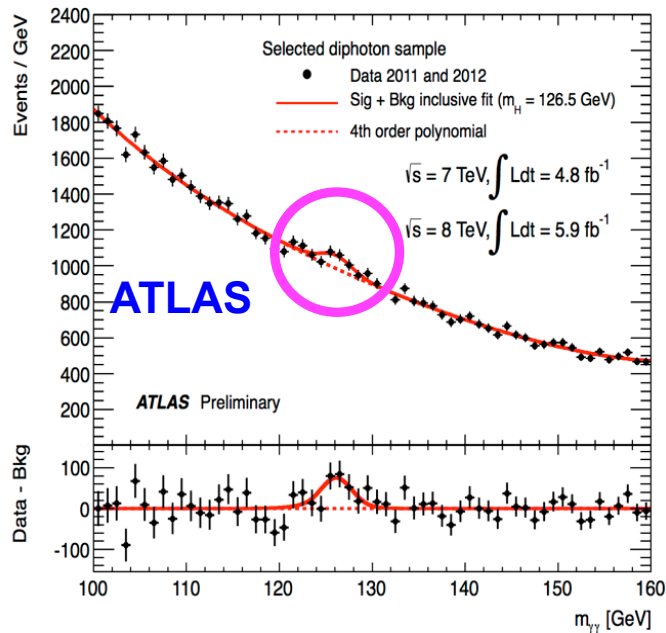
昨年来、大きな進展

- 第1期: 250-500 GeV (全長31 km)
 - 250 GeV: ヒッグス工場
 - 350 GeV: トップ工場
 - 500 GeV: ヒッグス自己結合、トップ湯川結合
 - 250-500 GeV: ダークマターの解明、新物理の解明
- 第2期: 1 TeV (全長50 km) に拡張？
 - これから出てくる物理によって方針を決める



2013/May

進展①: LHCでのヒッグス発見

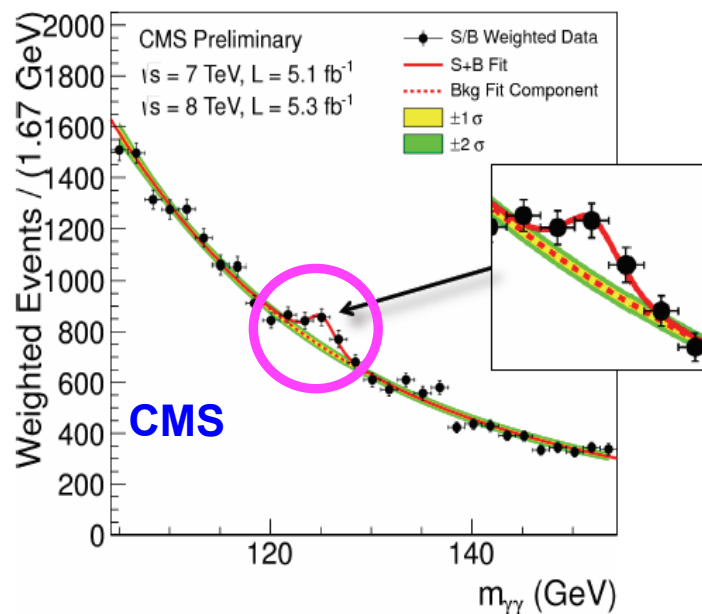


- 全く新しいタイプの素粒子
- 新たな革命の始まり



Brand-new!!

2012.07.04

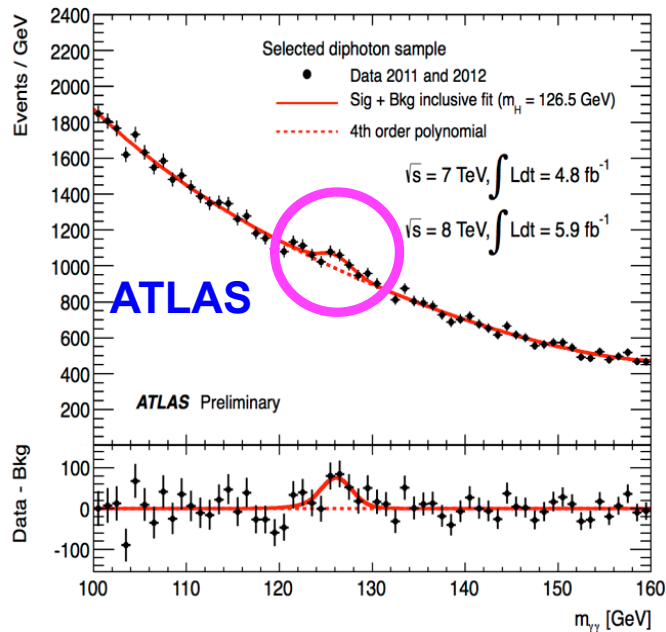


左端

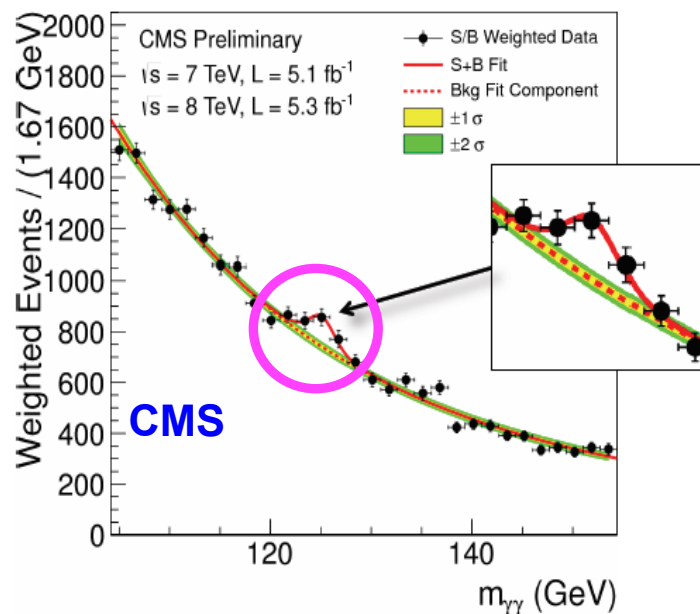
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム
レプトン	ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ ミューニュートリノ	ν_τ タウニュートリノ
	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子

ゲージ粒子	γ 光子	Z Z ボゾン
	W W ボゾン	g グルーオン

進展①: LHCでのヒッグス発見



2012.07.04

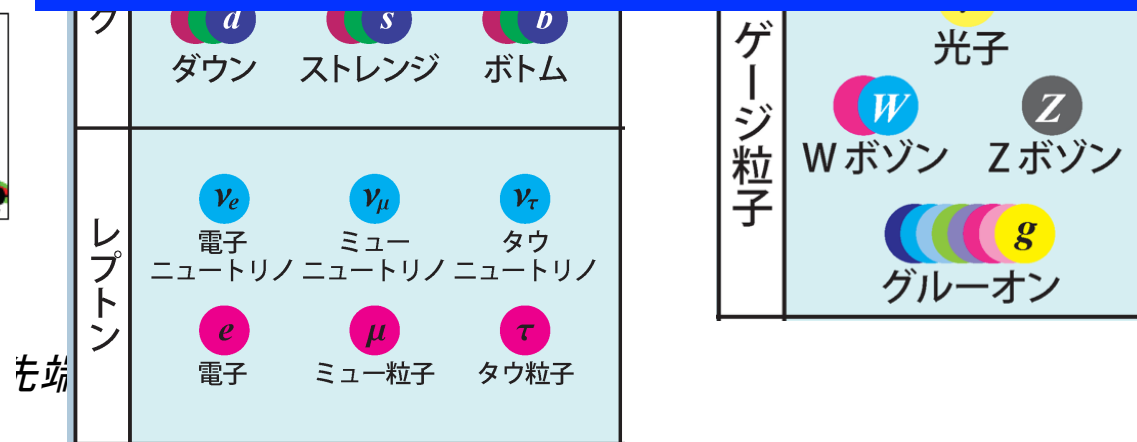


- 全く新しいタイプの素粒子
- 新たな革命の始まり



Brand-new!!

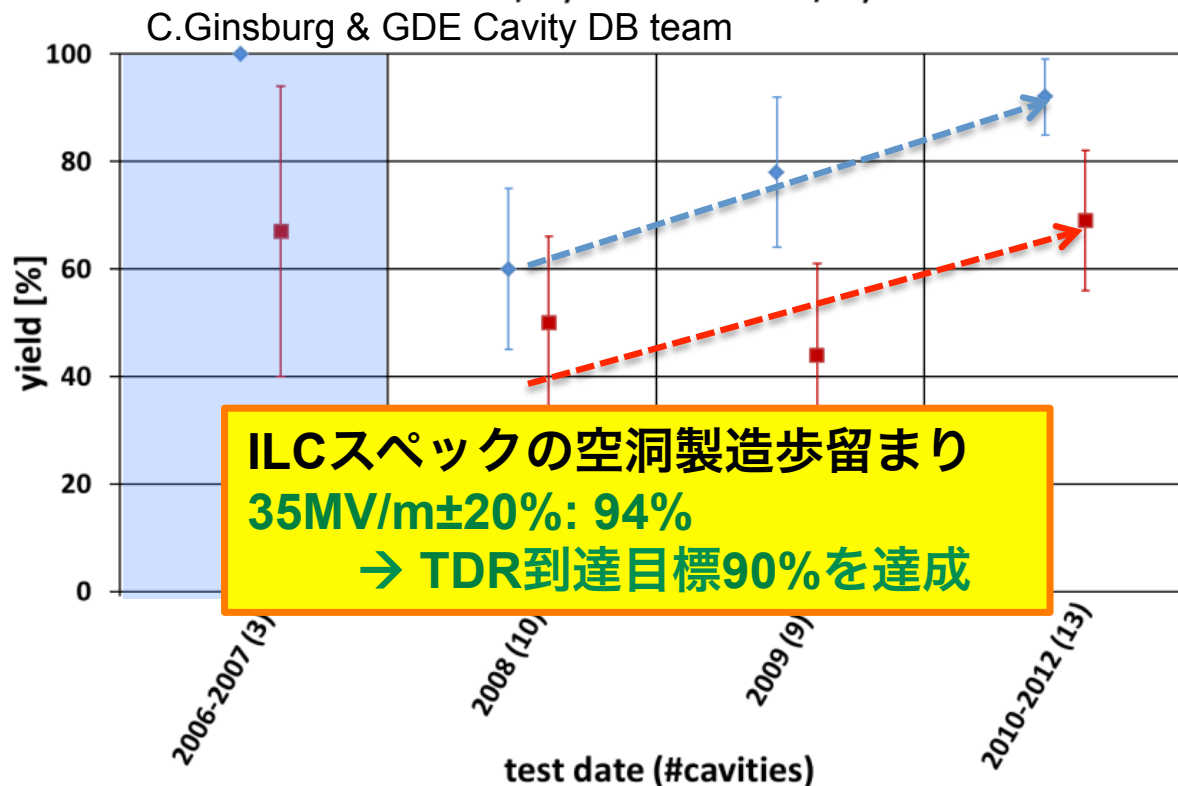
- ILCでの測定に最適な質量
- ILCの最初の目標が確定



進展②: ILC 加速器技術設計完了(2012.12)

加速空洞生産の歩留まり

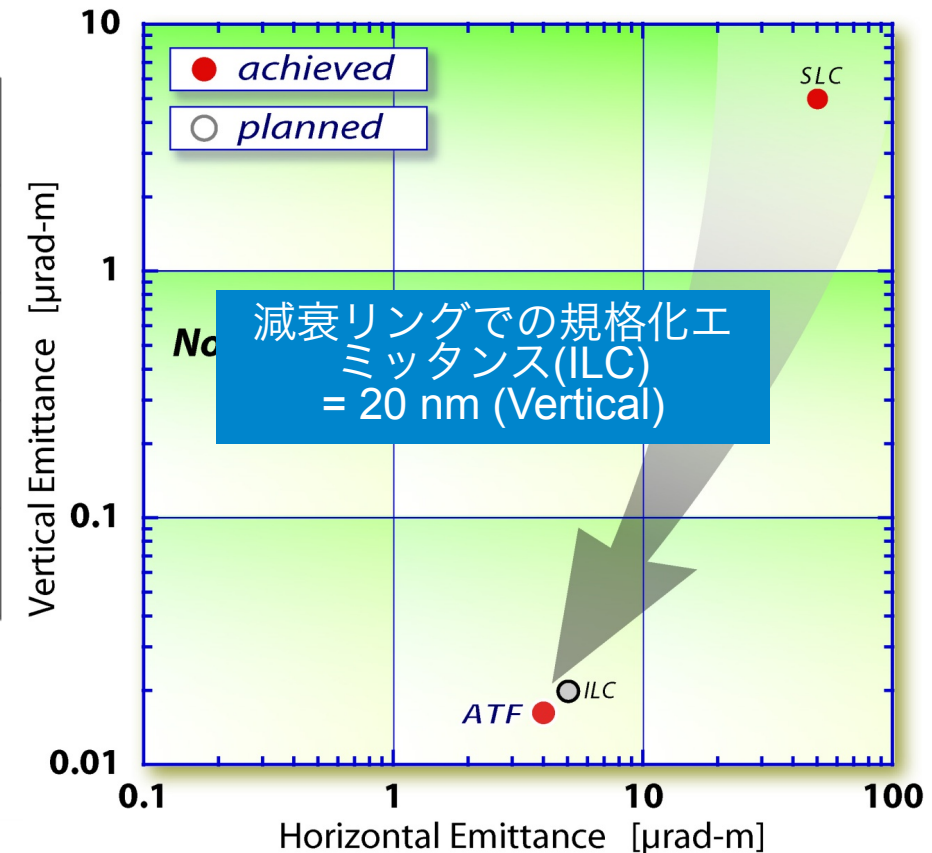
process



ILCスペックの空洞製造歩留まり
35MV/m $\pm$ 20%: 94%
→ TDR到達目標90%を達成



ATF: 目標エミッタンス達成



ILCの主要開発項目の加速空洞とエミッタンスは目標達成

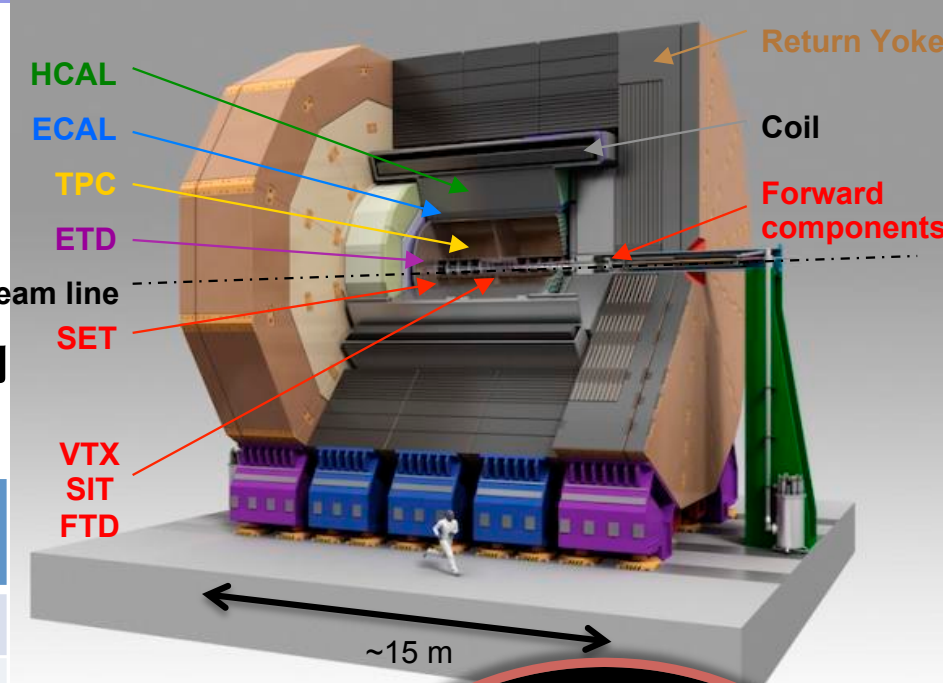
2013年以降の建設はReady

進展③: ILC 測定器詳細設計完了(2012.12)

先進的なテクノロジーの高精細センサーを搭載

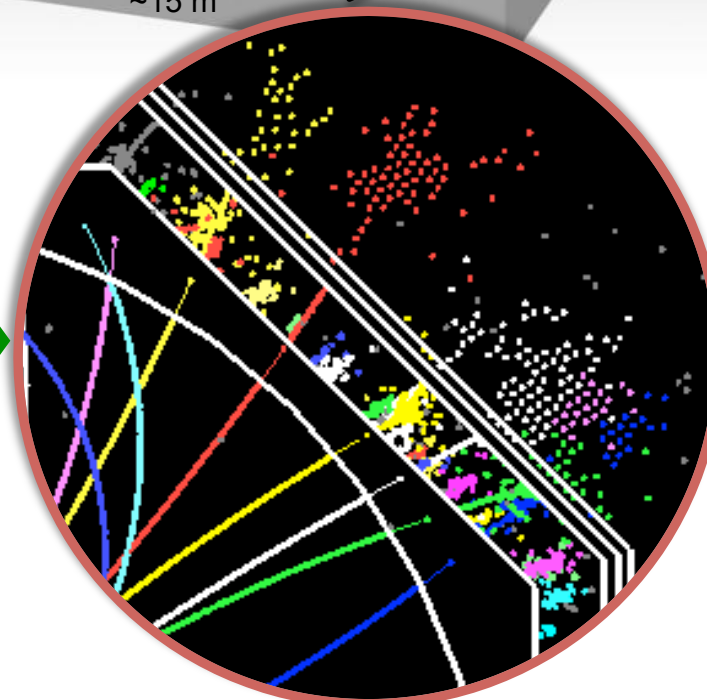
- 崩壊点検出器：高精細&低物質質量pixel検出器
- 飛跡検出器(TPC)：高分解能&低物質質量、MPGD読み出し
- カロリーメータ：超高精細センサー、5mm角(ECAL)、3cm角(HCAL)

検出器 センサーサイズ	ILC	ATLAS	精細度比
崩壊点検出器	5×5 mm ²	400×50 mm ²	800倍
飛跡検出器	1×6 mm ²	13 mm ²	2.2倍
電磁カロリーメータ	シリコン 5×5 mm ²	39×39 mm ²	61倍



高精細検出器を束ねるParticle Flow Algorithm

カロリーメータ中で各粒子のヒットを分離し、最も良い分解能を持つ検出器で粒子のエネルギー測定をする事により
Jet Energy Resolution 最小化する
(荷電粒子→Tracker、光子→ECAL、中性ハドロン→HCAL)



この先は建設 → 物理成果へ

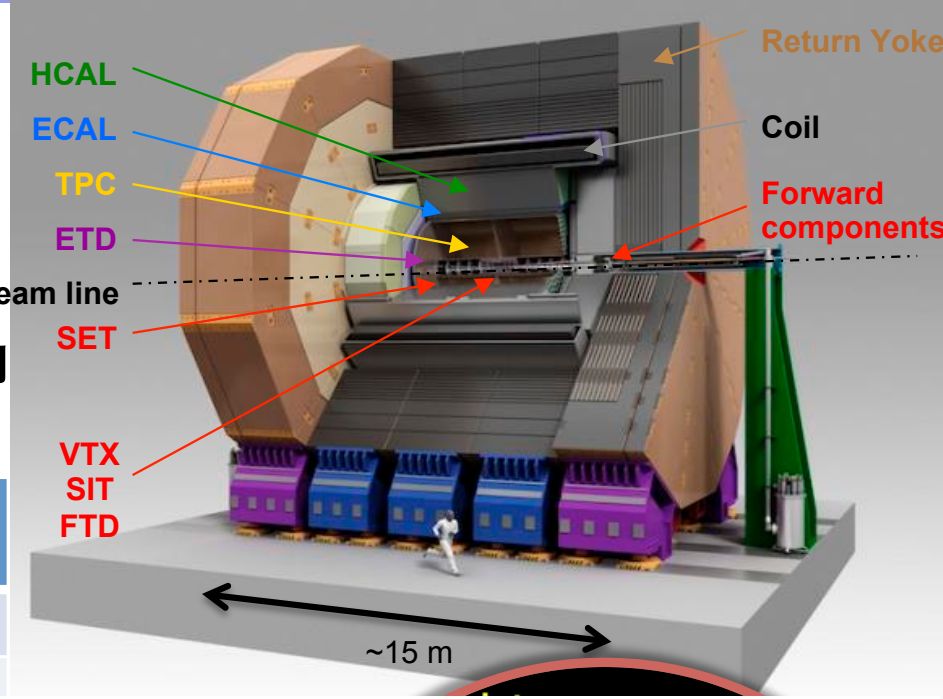
ス

進展③: ILC 測定器詳細設計完了(2012.12)

先進的なテクノロジーの高精細センサーを搭載

- 崩壊点検出器：高精細&低物質質量pixel検出器
- 飛跡検出器(TPC)：高分解能&低物質質量、MPGD読み出し
- カロリーメータ：超高精細センサー、5mm角(ECAL)、3cm角(HCAL)

検出器 センサーサイズ	ILC	ATLAS	精細度比
崩壊点検出器	5×5 mm ²	400×50 mm ²	800倍
飛跡検出器	1×6 mm ²	13 mm ²	2.2倍
電磁カロリーメータ	シリコン 5×5 mm ²	39×39 mm ²	61倍



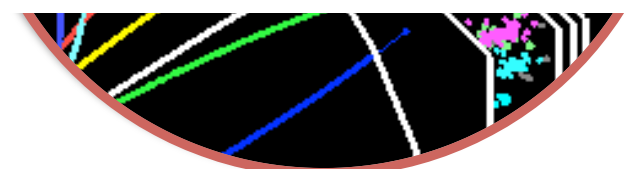
高精細検出器を束ねるParticle Flow Algorithm

カロリーメータ中で各粒子のヒットを分離し、最も良解能を持つ検出器で粒子のエネルギー測定をする事に
Jet Energy Resolution 最小化する
 (荷電粒子→Tracker、光子→ECAL、中性ハドロン→

E_j	$RMS_{90}(E_j) / \text{mean}_{90}(E_j)$
45 GeV	3.7%
100 GeV	2.8%
180 GeV	2.9%
250 GeV	2.9%

この先は**建設** → **物理成果**へ

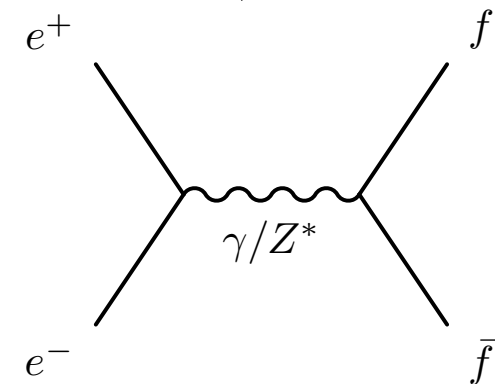
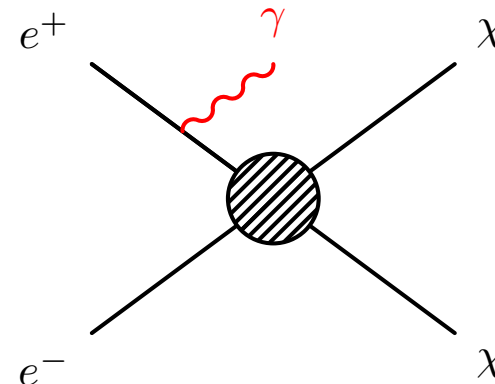
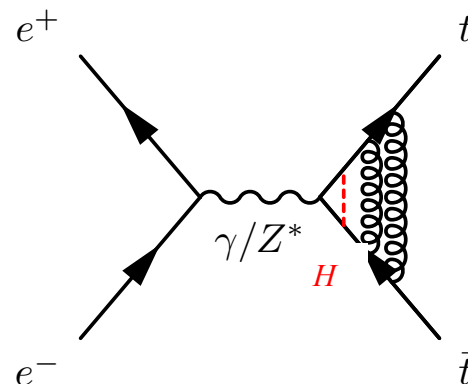
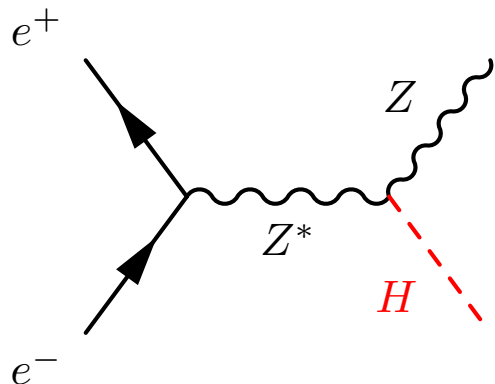
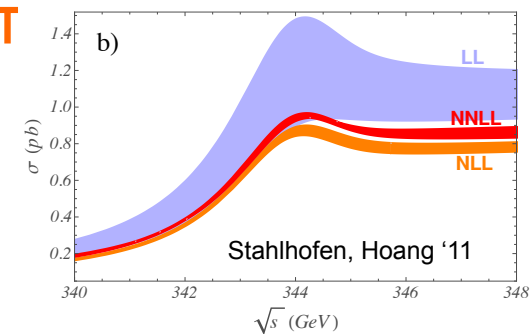
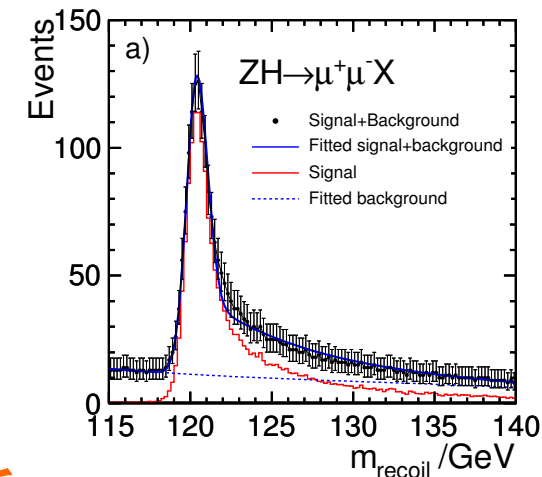
ス



ILCの物理プログラム

ILC物理プログラムの二本柱:

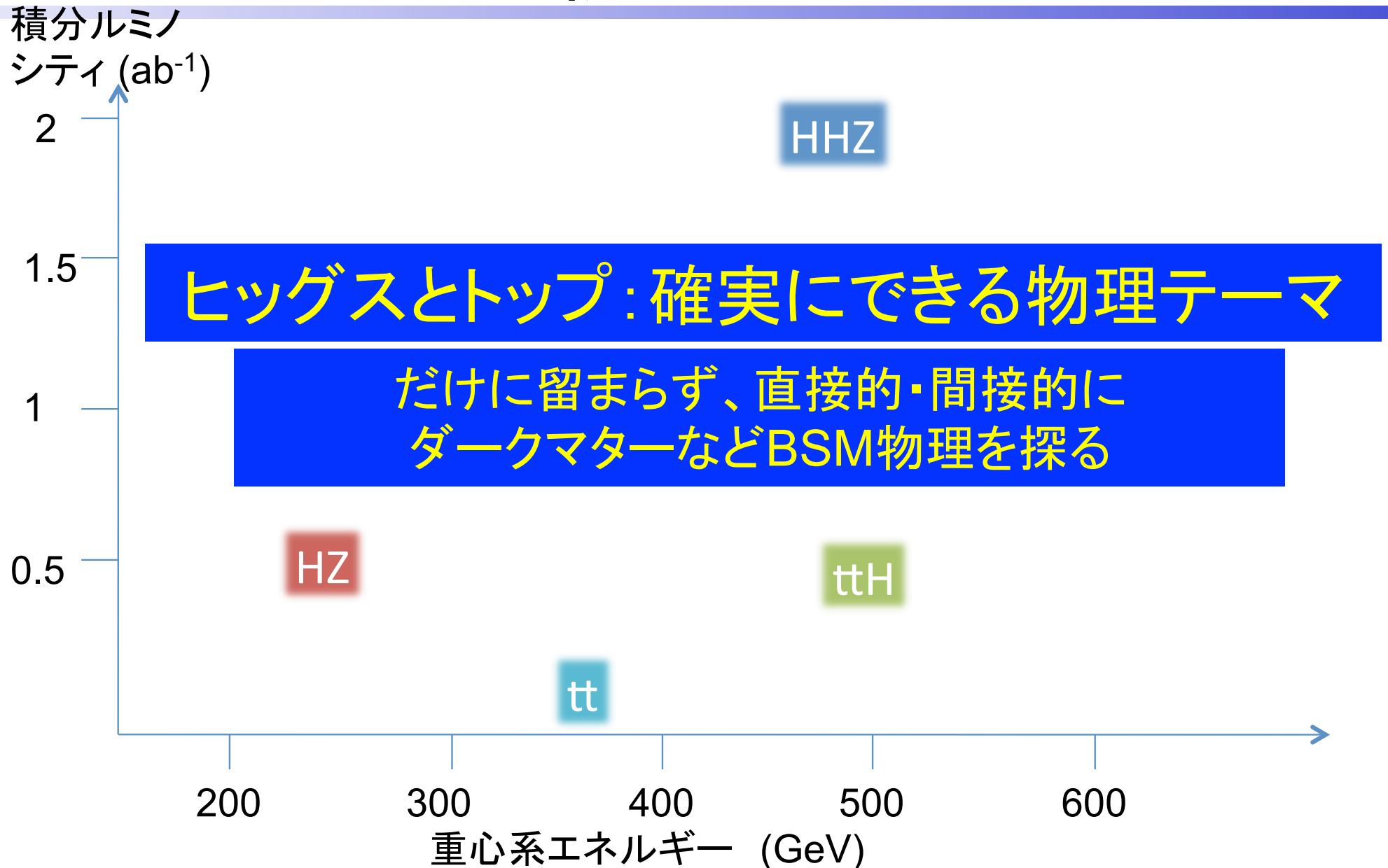
- 精密測定 of 物理:
 - ヒッグスセクターの解明
 - Top, W/Z, そして新粒子の相互作用
- 新粒子・新物理の探索
 - カラーを持たない新粒子、特にカラーを持たない中性新粒子(ダークマターの候補)の優れた発見能力
 - 新粒子の直接生成による発見だけでなく、既知の粒子生成過程の精密測定による間接的な発見が可能



2013/May/25

先端加速器LHCが切り拓くテラスケールの素粒子物理学

ILCの物理シナリオ



ILC(e^+e^- コライダー)での測定方法

ビーム

エネルギーと偏極度を
コントロールできる

$$P_{\text{electron}} = \pm 80\%$$

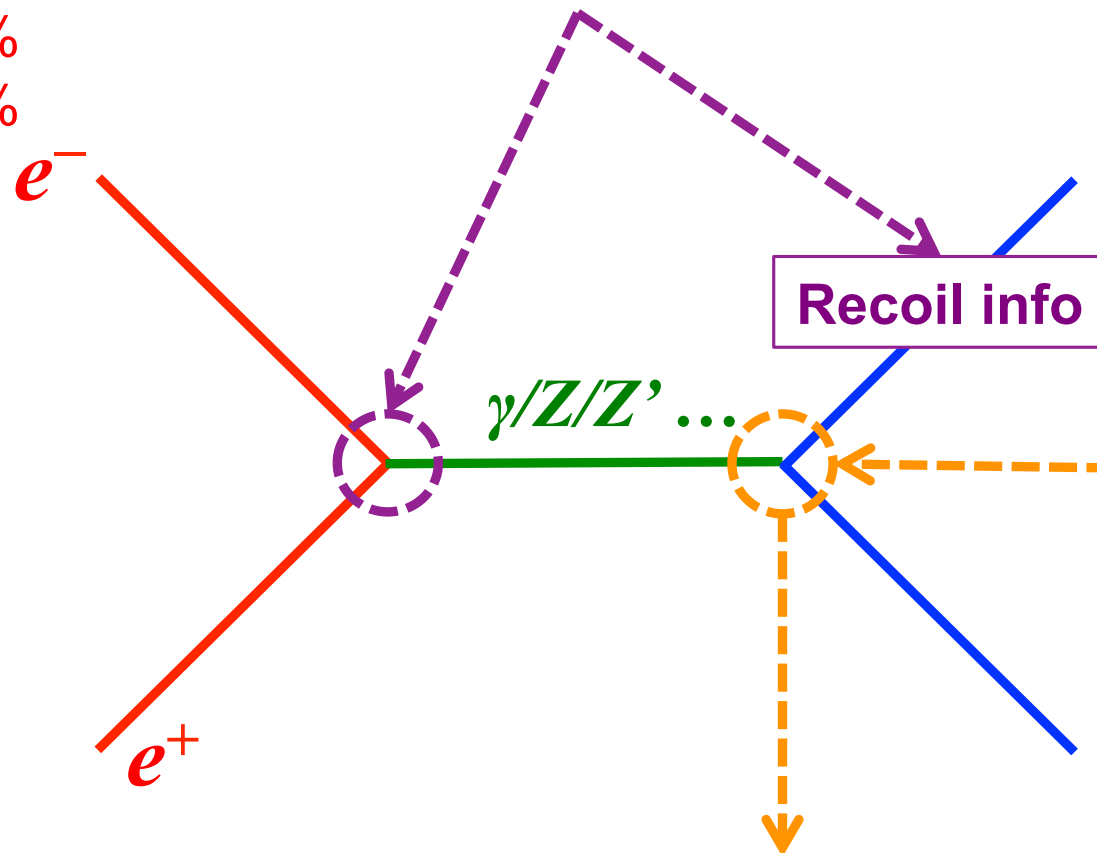
$$P_{\text{positron}} = \pm 30\%$$

反応の素過程

LEPで十分理解されている
理論の不定性 $< 1\%$

検出・測定

低バックグラウンド
超細分化されたセンサー
データは全部とる



粒子の生成

ヒッグス

トップクォーク

新粒子、たとえば

ダークマター

などの可能性

質量、スピン/CP, 結合定数などの決定
新しい物理と新しい基本原理の発見

ILCステージング計画

- 主線形加速器を延ばしていけば徐々にエネルギーを上げることができる。
* ただしDamping Ring等、他の施設があるためコストは長さに比例しない。
- 重要な物理に照準を合わせる: 250, 350, 500 GeV → 1 TeV
- 間はenergy scan、何か見つければそこで重点的にデータ取得

TDR parameters

E_{CM} (GeV)	250	350	500	1000
Luminosity ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	0.75	1.0	1.8	4.9
Integrated Luminosity (fb^{-1})	250	350	500	1000
Number of days *	385	405	322	233

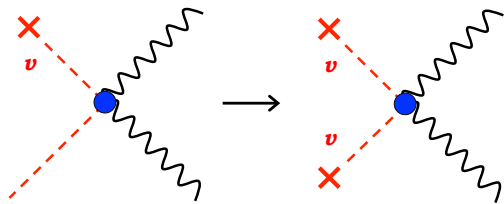
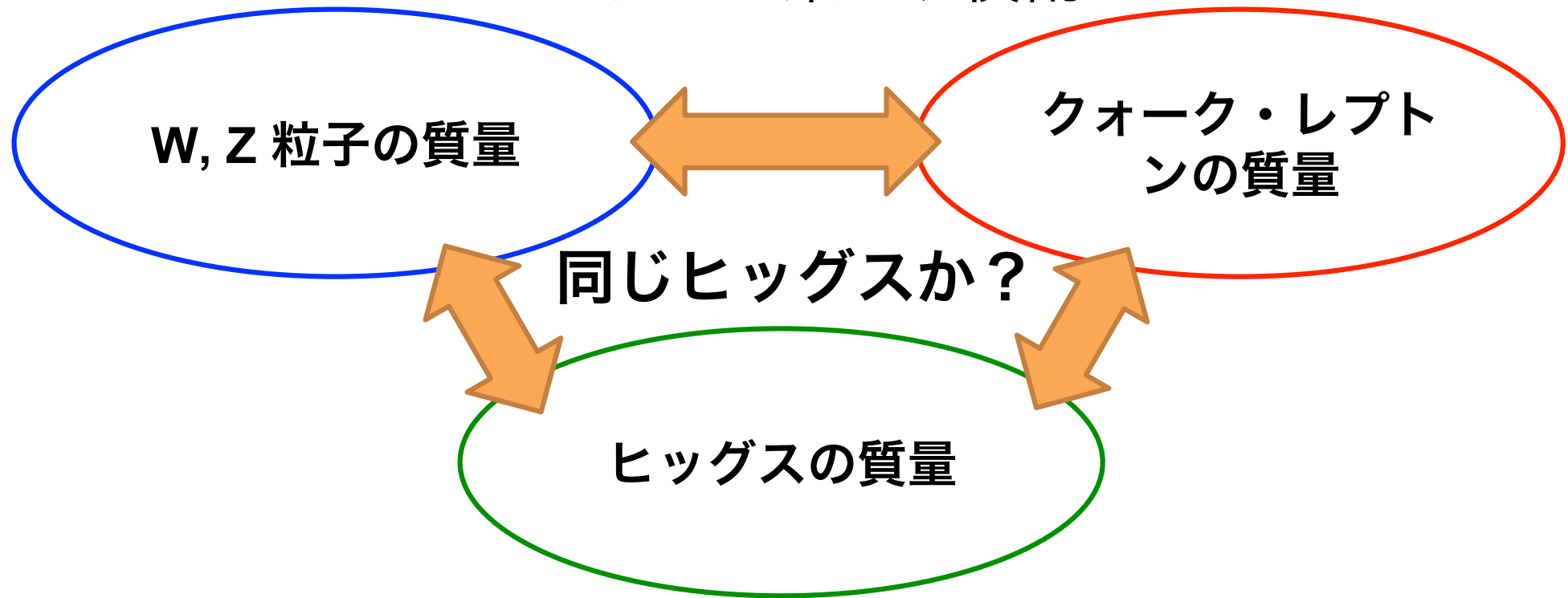
* Peak luminosityで走り続けた場合

ルミノシティ2倍オプション有り
(バンチ数1300→2600)

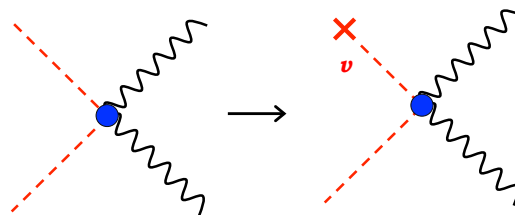
* Damping Ring & Beam Deliveryの改良により、衝突エミッタンスを下げられる可能性。

ヒッグス場、ヒッグス粒子

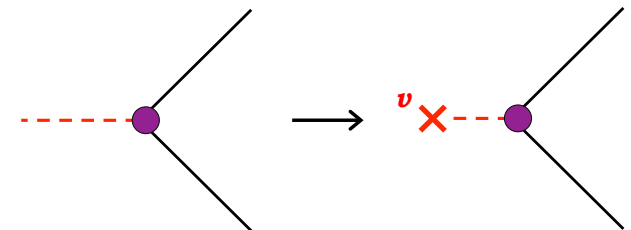
ヒッグスが果たす役割



HWW, HZZ coupling



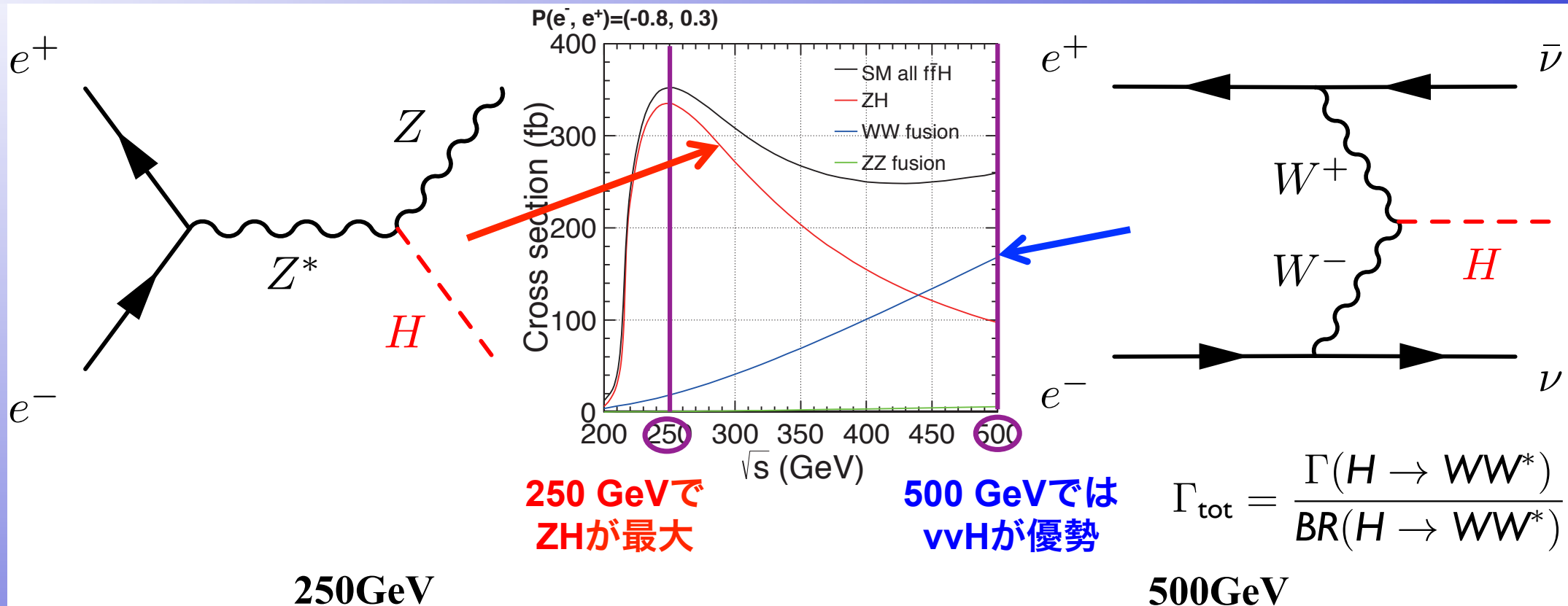
Higgs self-coupling



Yukawa coupling

ILCは、すべてのヒッグス結合を独立に測定する。

ILCヒッグス生成:2つのメインモード



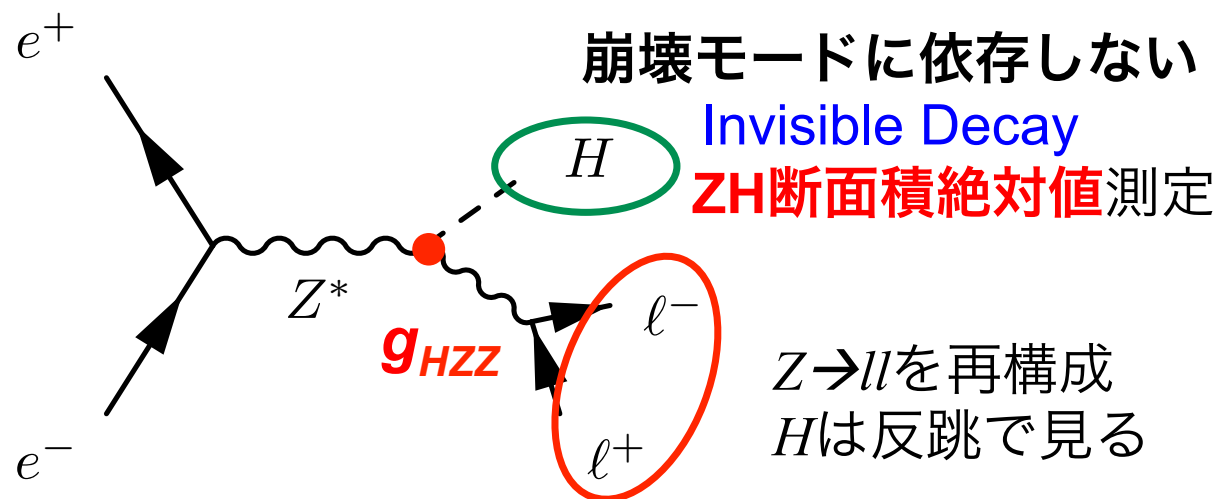
測定精度	250 fb ⁻¹	1000 fb ⁻¹
ZH断面積	2.5%	1.2%
HZZ結合定数	1.2%	0.6%

測定精度	500 fb ⁻¹	2000 fb ⁻¹
ヒッグス全巾	~6%	~3%
HWW結合定数	1.3%	0.7%

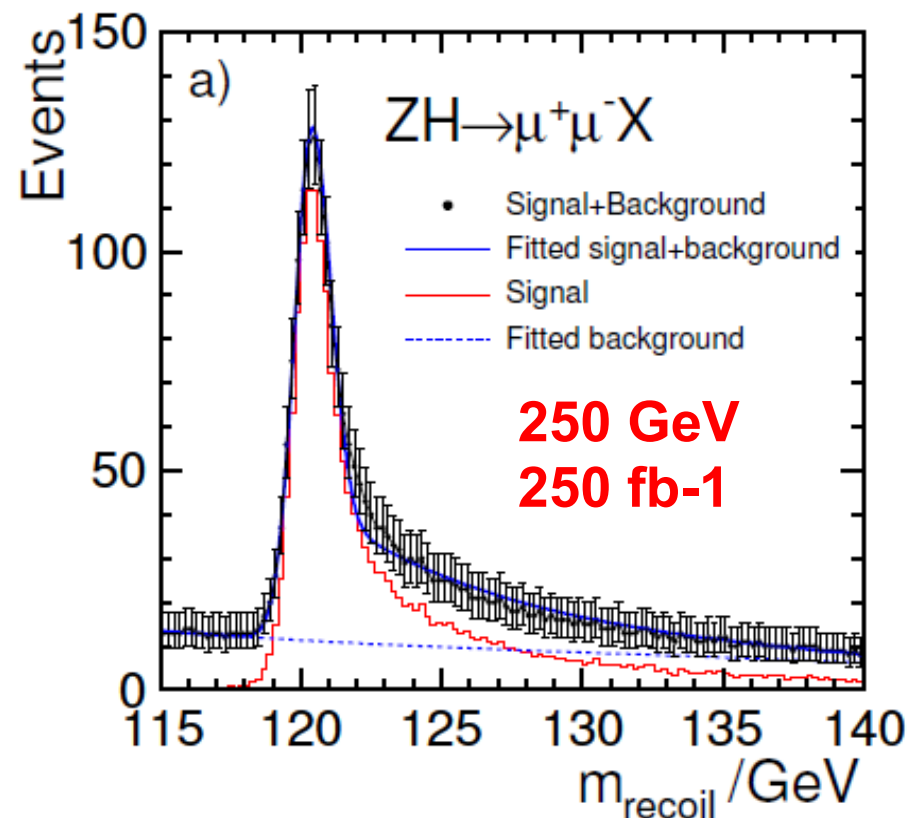
HZZ, HWW結合定数の精度:<1%

反跳質量測定

反跳質量測定: $ZH \rightarrow l^+l^-X$



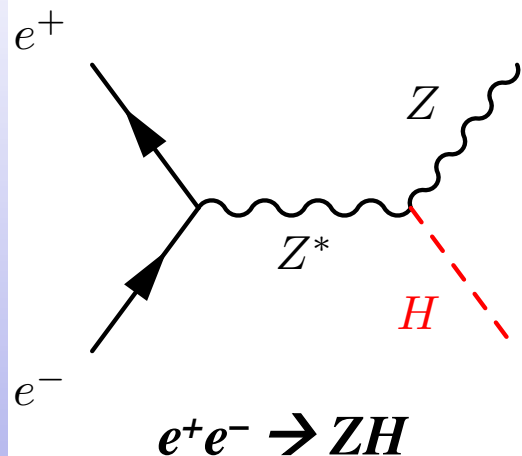
$$m_{\text{recoil}}^2 = (\sqrt{s} - E_{\ell\ell})^2 - |\vec{p}_{\ell\ell}|^2$$



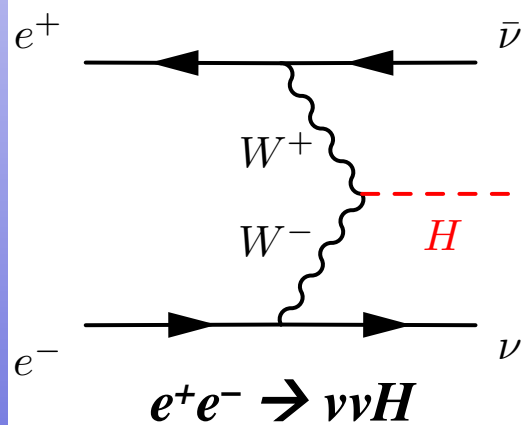
測定精度	250 fb ⁻¹	1000 fb ⁻¹
ZH断面積	2.5%	1.2%
HZZ結合定数	1.2%	0.6%

ヒッグス質量
 $\Delta m_H \leq 30 \text{ MeV}$
 2つのHiggsが縮退した
 モデルの識別
 e.g. Singlet Mixing

ヒッグス崩壊分岐比測定

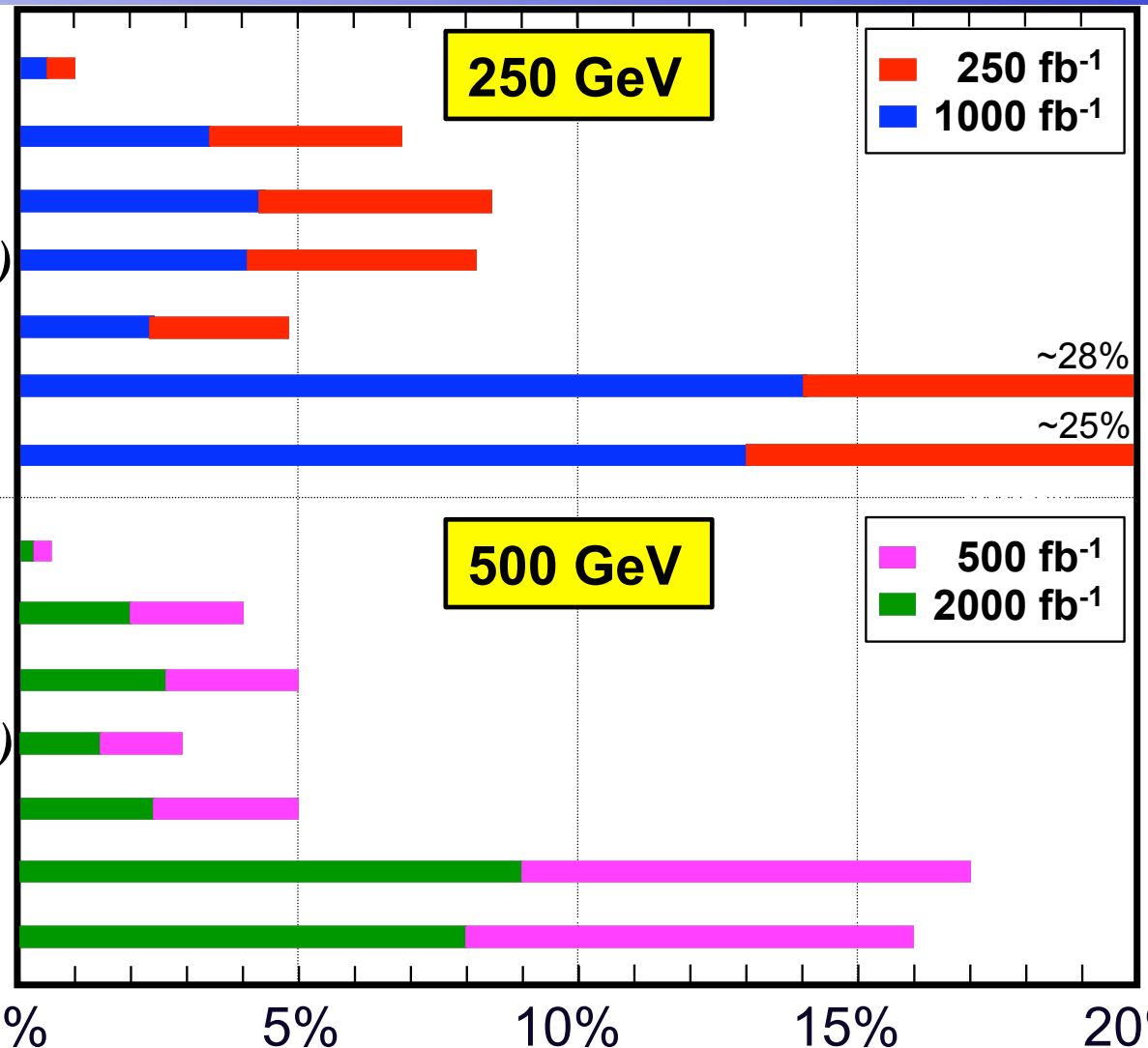


$\sigma \cdot BF(H \rightarrow b\bar{b})$
 $\sigma \cdot BF(H \rightarrow c\bar{c})$
 $\sigma \cdot BF(H \rightarrow gg)$
 $\sigma \cdot BF(H \rightarrow WW^*)$
 $\sigma \cdot BF(H \rightarrow \tau^+\tau^-)$
 $\sigma \cdot BF(H \rightarrow ZZ^*)$
 $\sigma \cdot BF(H \rightarrow \gamma\gamma)$



$\sigma \cdot BF(H \rightarrow b\bar{b})$
 $\sigma \cdot BF(H \rightarrow c\bar{c})$
 $\sigma \cdot BF(H \rightarrow gg)$
 $\sigma \cdot BF(H \rightarrow WW^*)$
 $\sigma \cdot BF(H \rightarrow \tau^+\tau^-)$
 $\sigma \cdot BF(H \rightarrow ZZ^*)$
 $\sigma \cdot BF(H \rightarrow \gamma\gamma)$

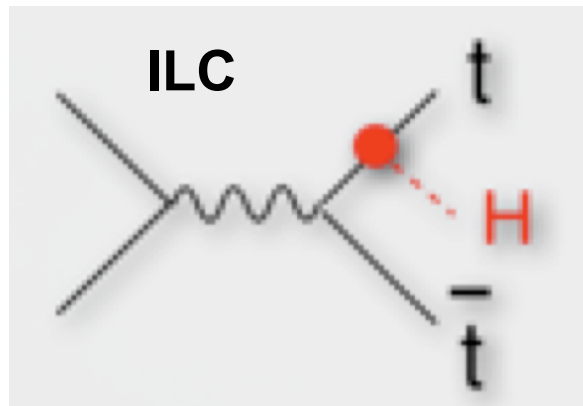
σ_{ZH} ($\sigma_{\nu\nu H}$) の誤差は
1.2-2.5% (2-3%)



$\sigma \cdot BF$ の測定精度 (統計誤差のみ)

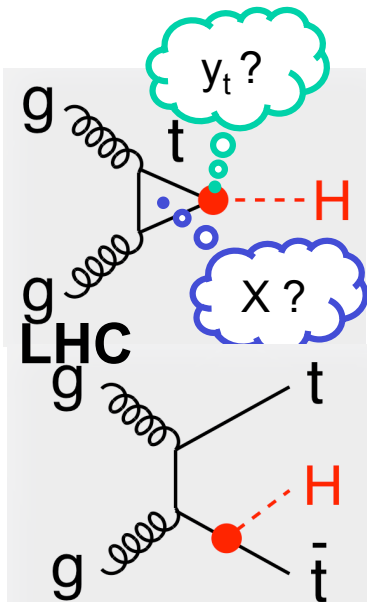
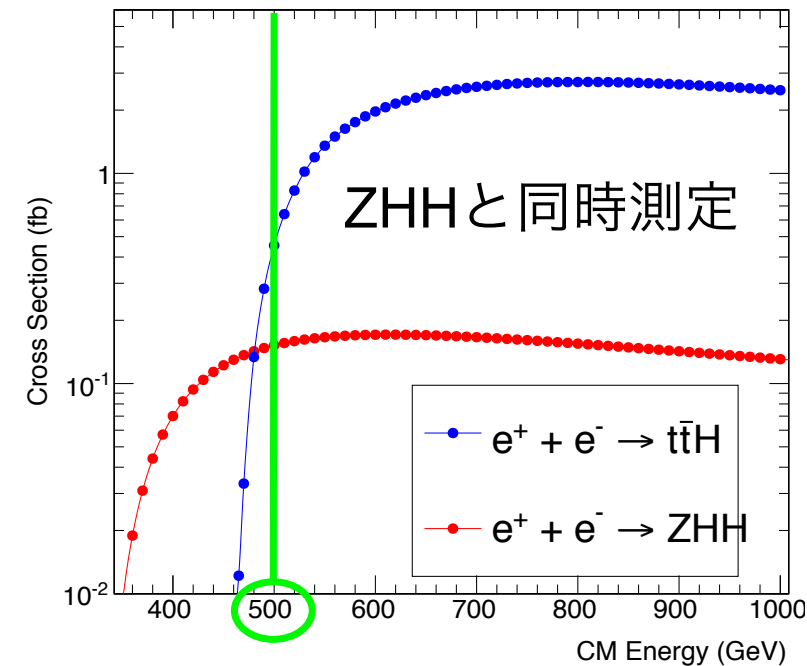
湯川結合の精度はO(1%)

トップ湯川結合



- トップ湯川結合 ≈ 1
 - トップが突出して重い特別な理由はあるか？

Strongly Interacting Light Higgs:
トップ湯川が数10%でずれる可能性 → 検証

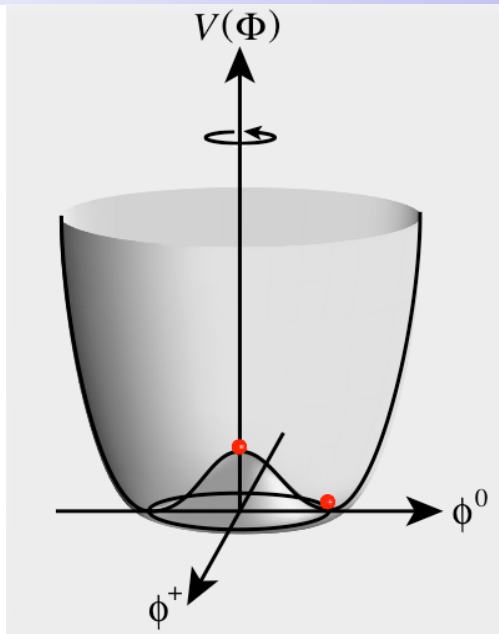


データ	S/B	Efficiency	断面積 $\Delta\sigma/\sigma$	トップ湯川 $\Delta y/y$
1 ab ⁻¹	~ 0.4	~ 0.15	25%	13%
5 ab ⁻¹	~ 0.4	~ 0.15	11%	6%

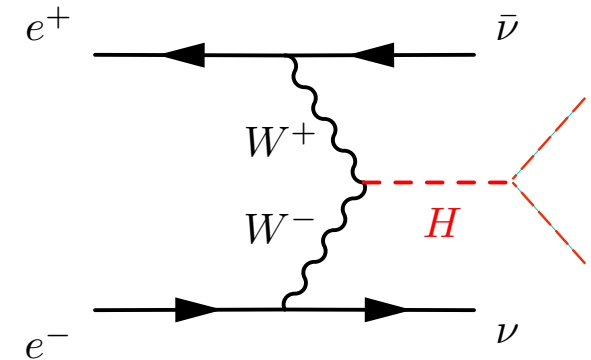
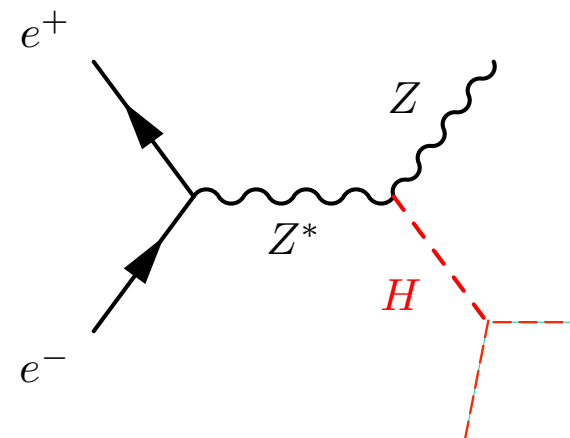
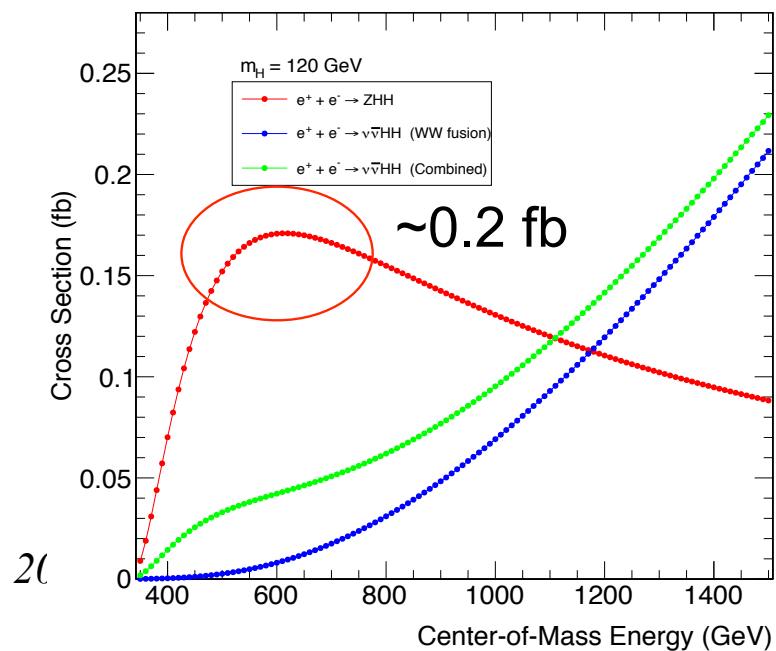
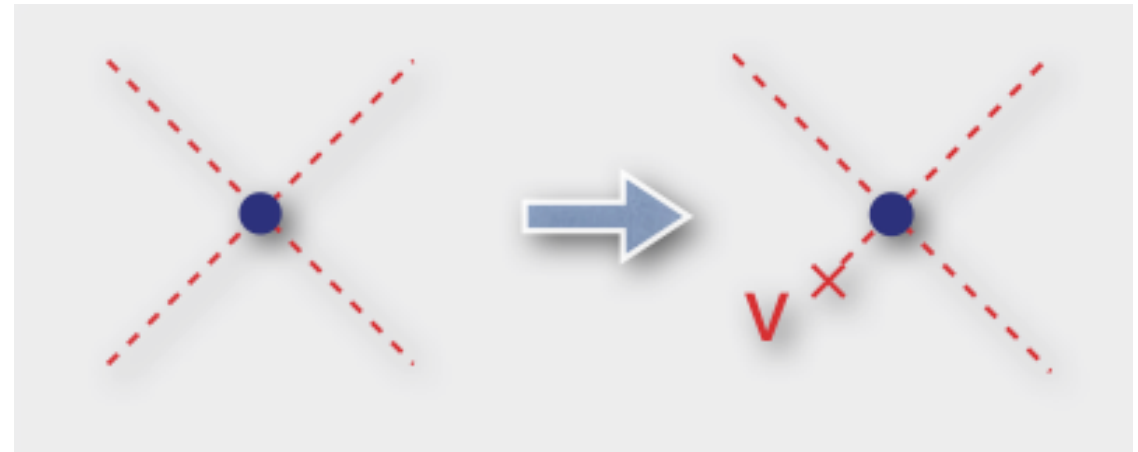
トップ湯川結合の精度は $\sim 10\%$ (500 GeV)
1 TeVでさらに感度が上がる

Direct measurement
challenging at LHC;
 $H \rightarrow \tau\tau$ may be possible

ヒッグス自己結合(1)



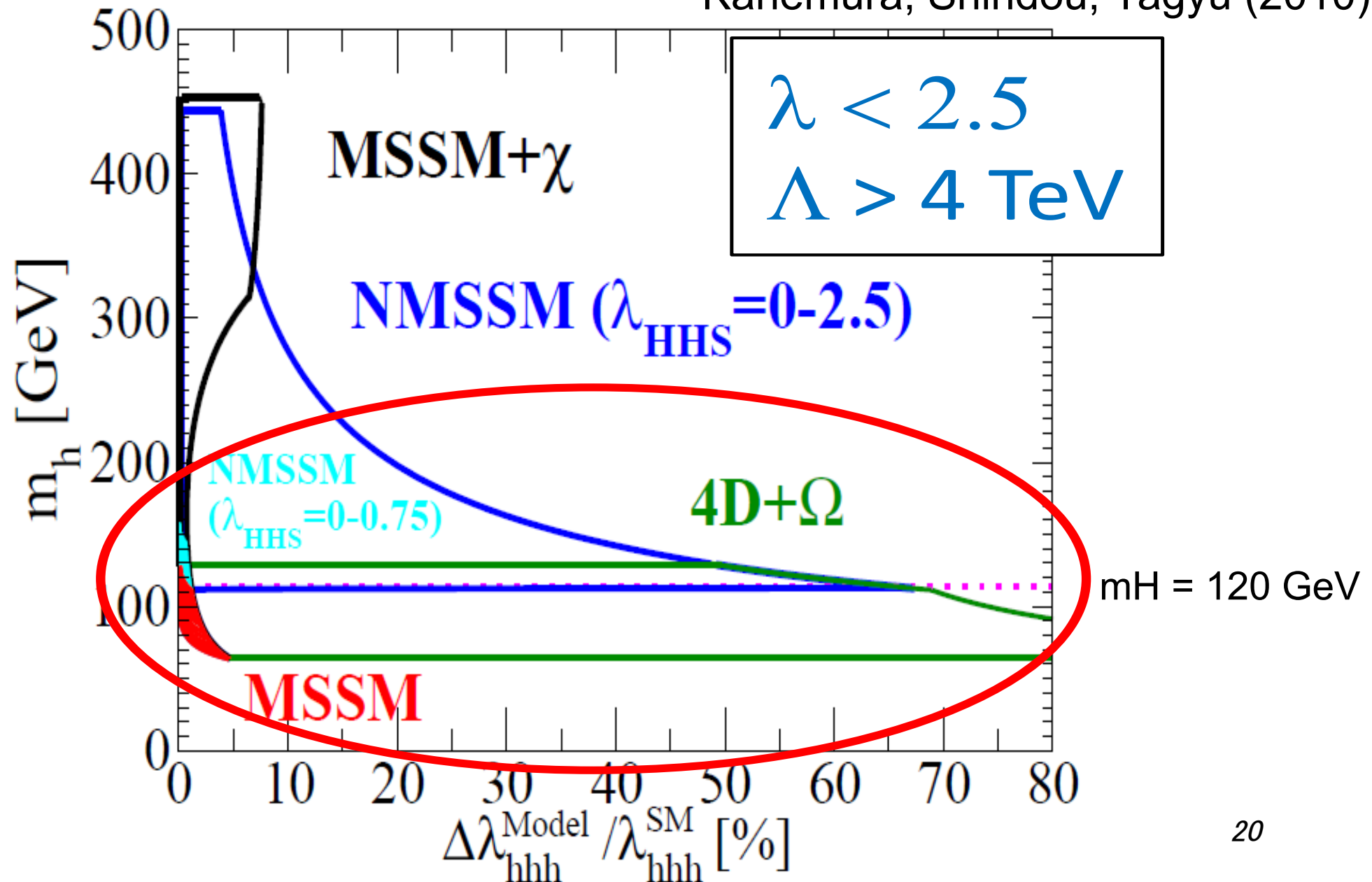
- ヒッグス3点結合の存在
→ヒッグスポテンシャルの形を決める



加速器LHCが切り拓くテラスケールの素粒子物理学

拡張ヒッグスセクターの自己結合異常

Kanemura, Shindou, Yagyu (2010)



ヒッグス自己結合(2)

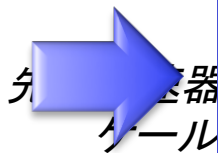
- ZHH断面積は0.2 fb、ZHHのメインモードは6 jet (H→WWなら8 jetも)
 - 現在H→bbモードで解析

S/B	Efficiency	断面積 $\Delta\sigma/\sigma$ 2 ab-1	断面積 $\Delta\sigma/\sigma$ 4 ab-1	断面積 $\Delta\sigma/\sigma$ 8 ab-1
~0.5	10%	32%	23%	16%
~0.75	15%	21%	15%	11%
~1.0	20%	16%	12%	8%

S/B	Efficiency	自己結合 $\Delta\lambda/\lambda$ 2 ab-1	自己結合 $\Delta\lambda/\lambda$ 4 ab-1	自己結合 $\Delta\lambda/\lambda$ 8 ab-1
~0.5	10%	53%	37%	27%
~0.75	15%	35%	25%	18%
~1.0	20%	27%	19%	14%

解析の改善点：H→WWも含める。Jet Finder、b-tagアルゴリズムの改良

自己結合異常はあるか？



解析の改良を経て

10-20%の精度で自己結合を測定

※1 TeVでさらに感度は上がる（断面積&三点結合の寄与アップ）

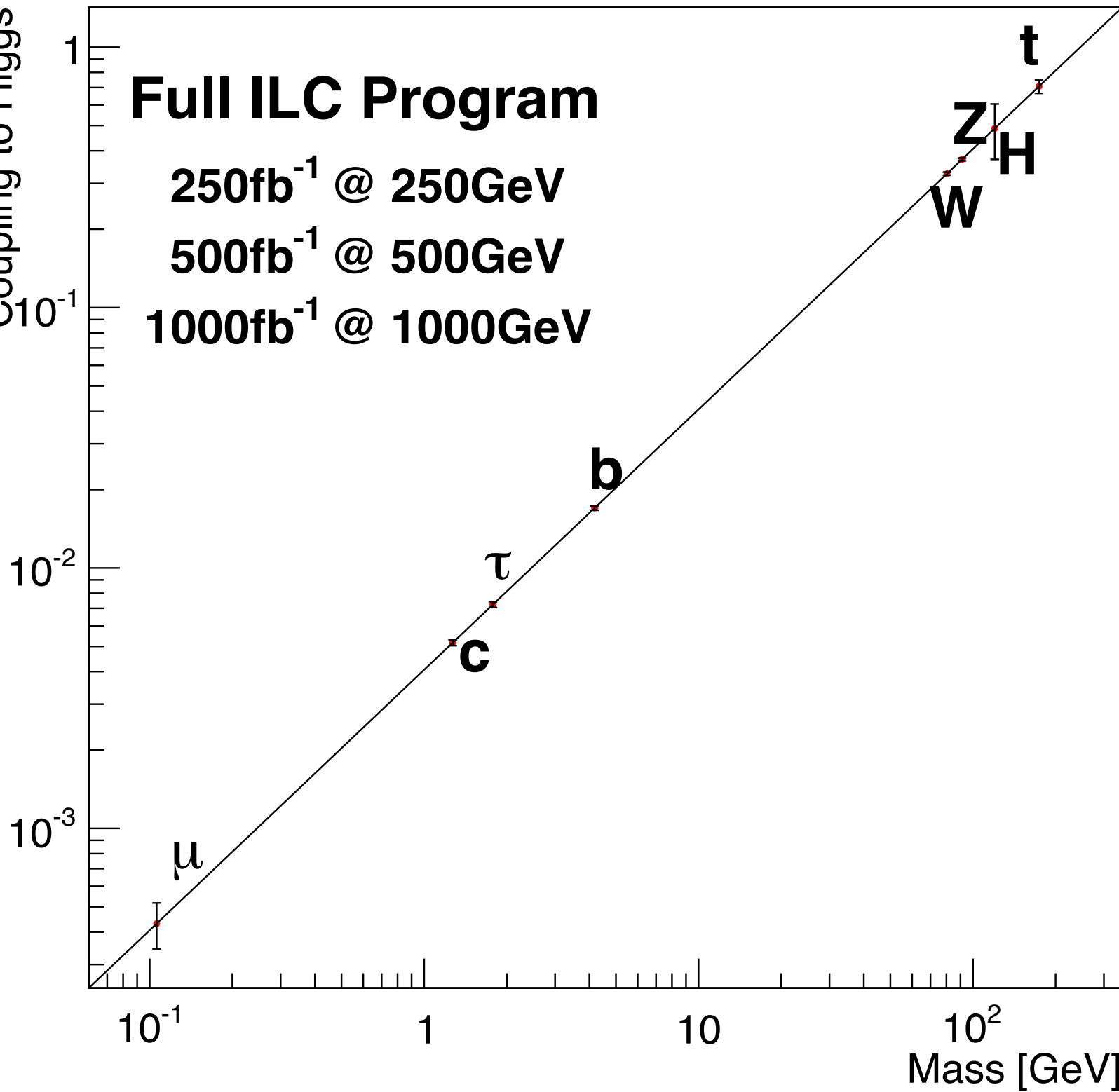
Coupling to Higgs

Full ILC Program

250fb^{-1} @ 250GeV

500fb^{-1} @ 500GeV

1000fb^{-1} @ 1000GeV



Coupling to Higgs

Full ILC Program

250fb^{-1} @ 250GeV

500fb^{-1} @ 500GeV

1000fb^{-1} @ 1000GeV

10^{-2}

10^{-3}

μ

t
Z
H
W

結合定数と質量の関係

→ 質量の素の解明

→ ズレが見えたら新物理

10^{-1}

1

10

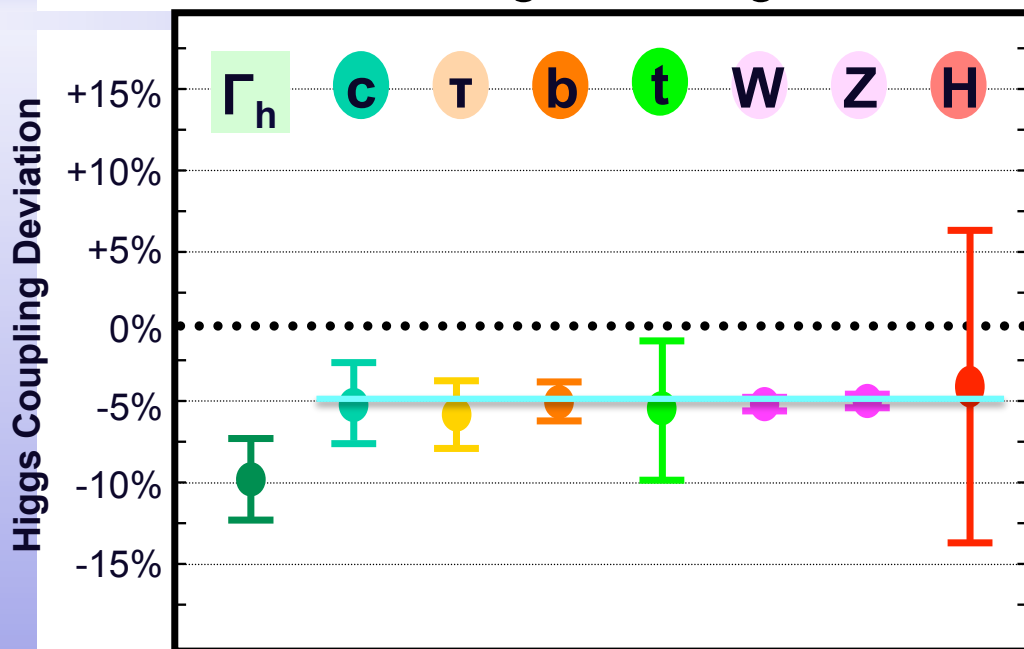
10^2

Mass [GeV]

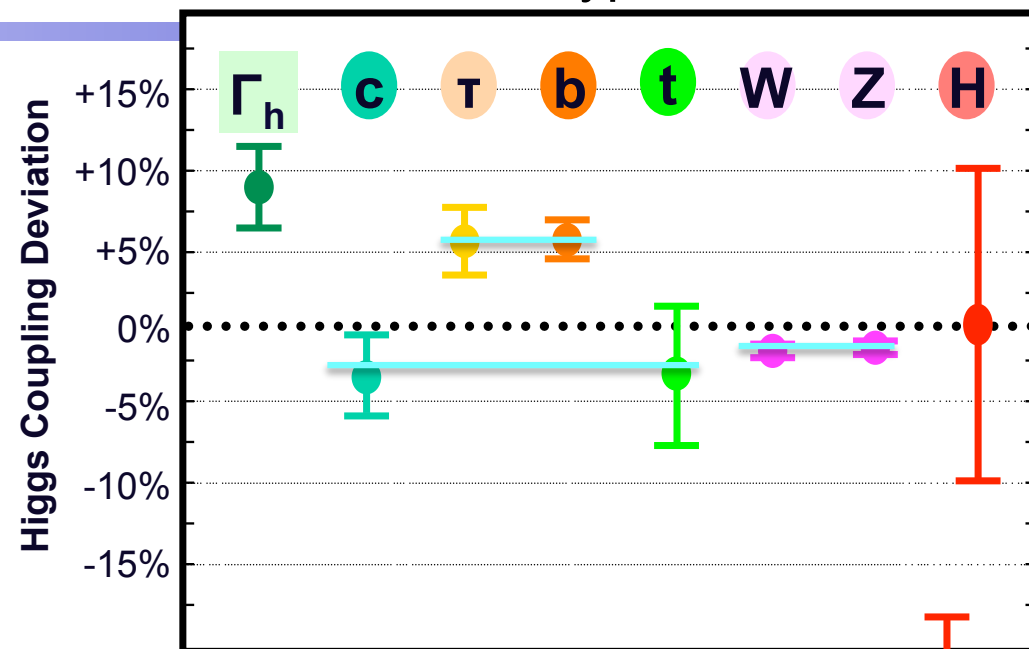
23

様々な物理の可能性

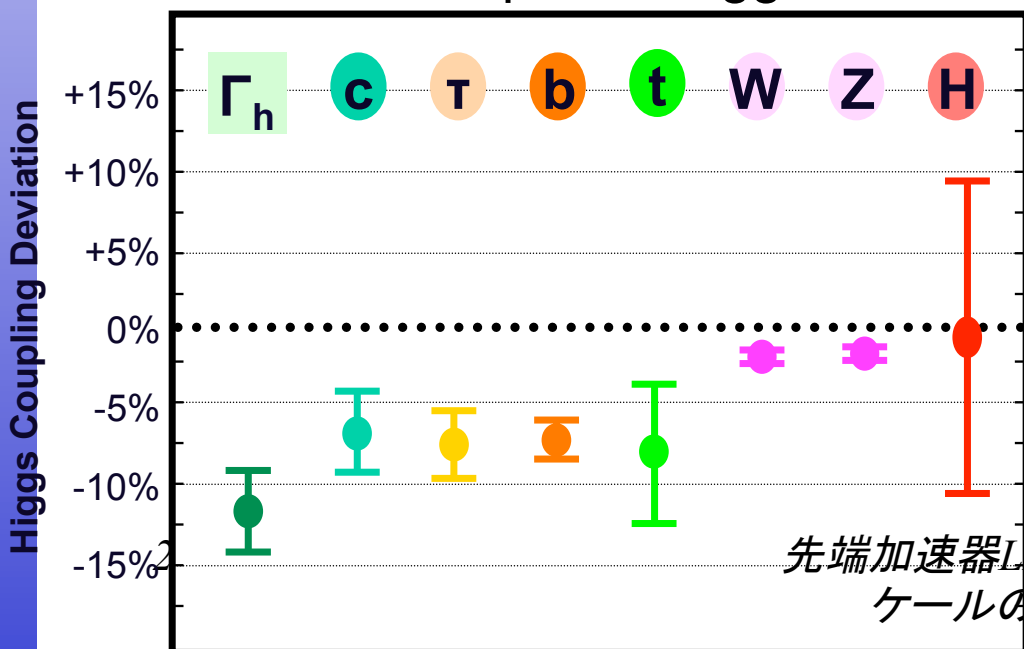
Singlet Mixing



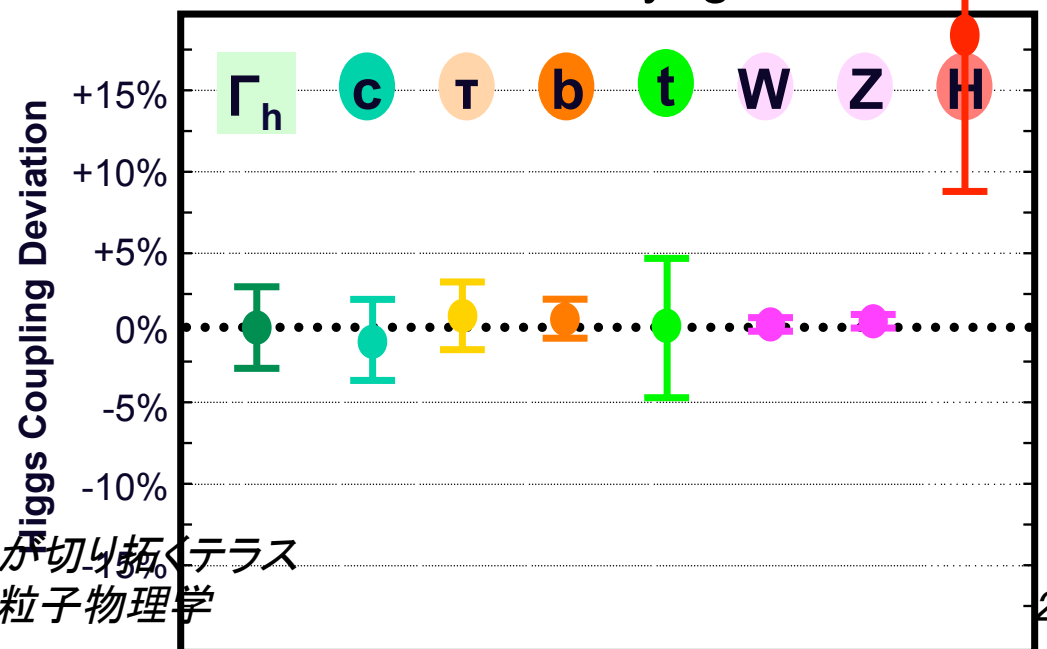
MSSM / Type II 2HDM



Composite Higgs



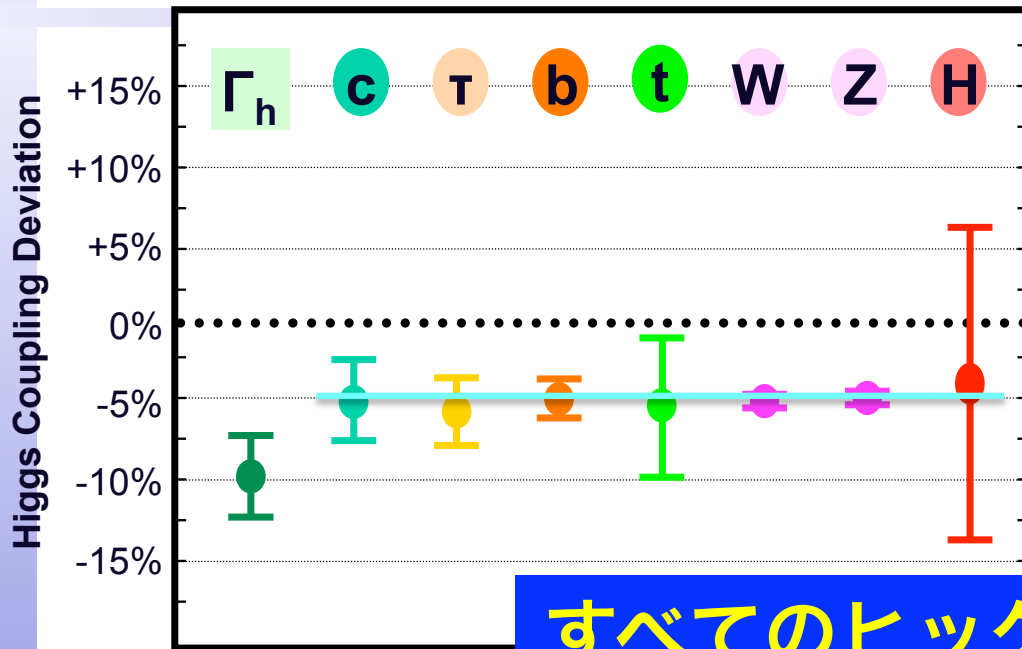
Electroweak Baryogenesis



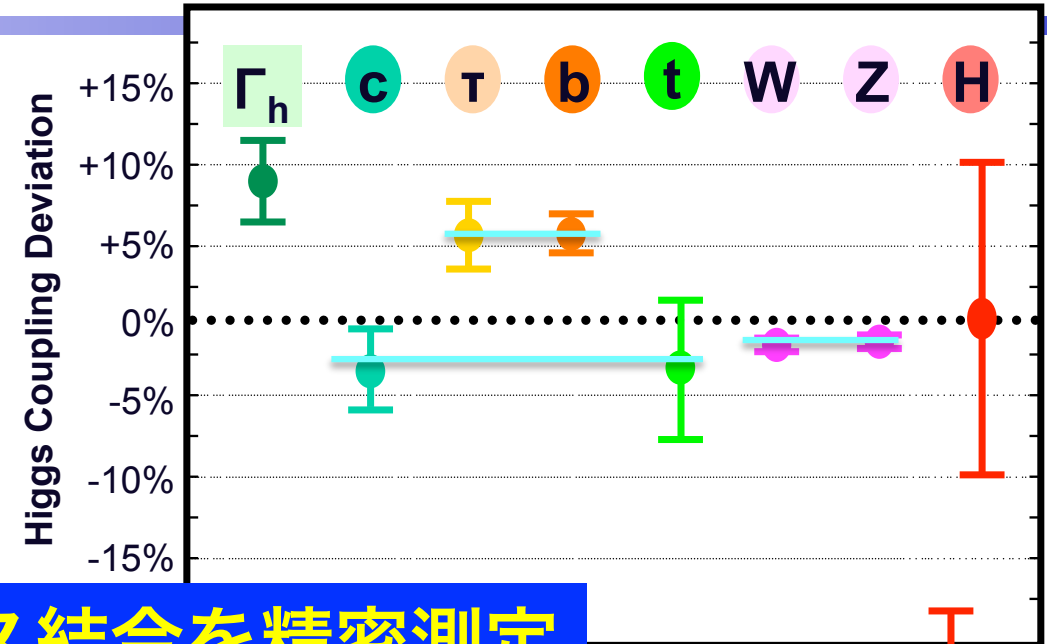
先端加速器LHCが切り拓くテラス
ケールの素粒子物理学

様々な物理の可能性

Singlet Mixing

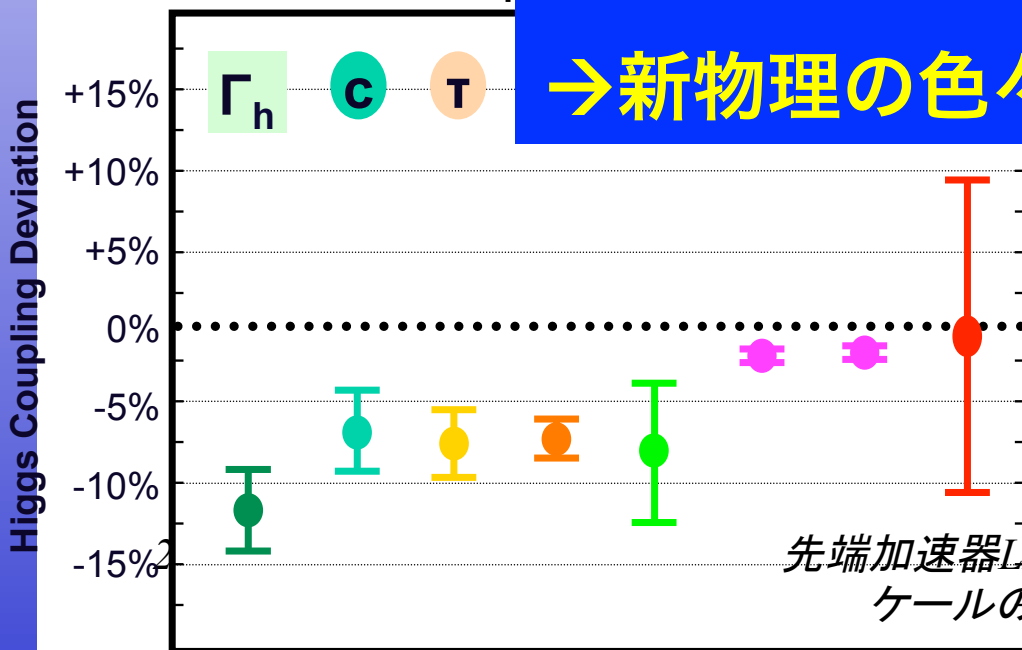


MSSM / Type II 2HDM

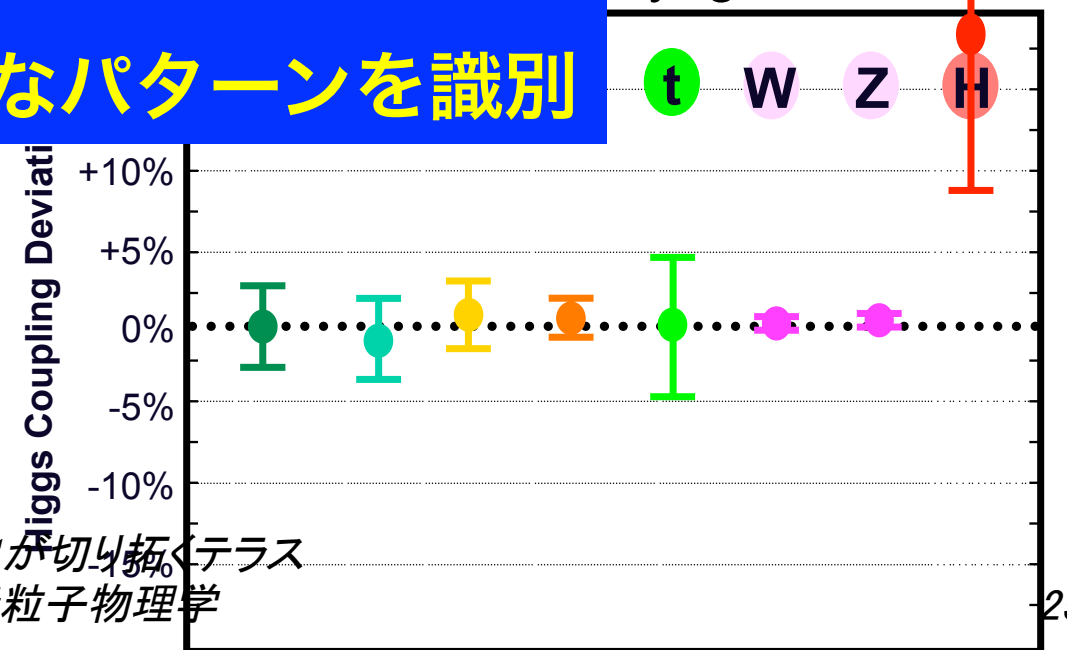


すべてのヒッグス結合を精密測定
→新物理の色々なパターンを識別

Com

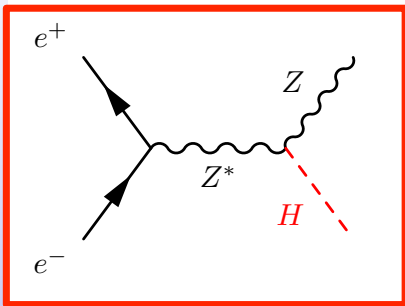


aryogenesis

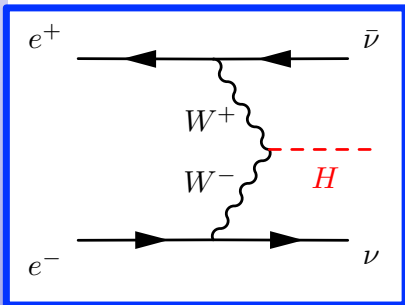


先端加速器LHCが切り拓くテラス
ケールの素粒子物理学

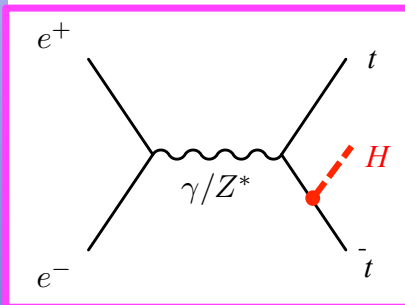
LHC/ILC Synergy



**250 GeV~
Higgs BR via
Higgs-strahlung**

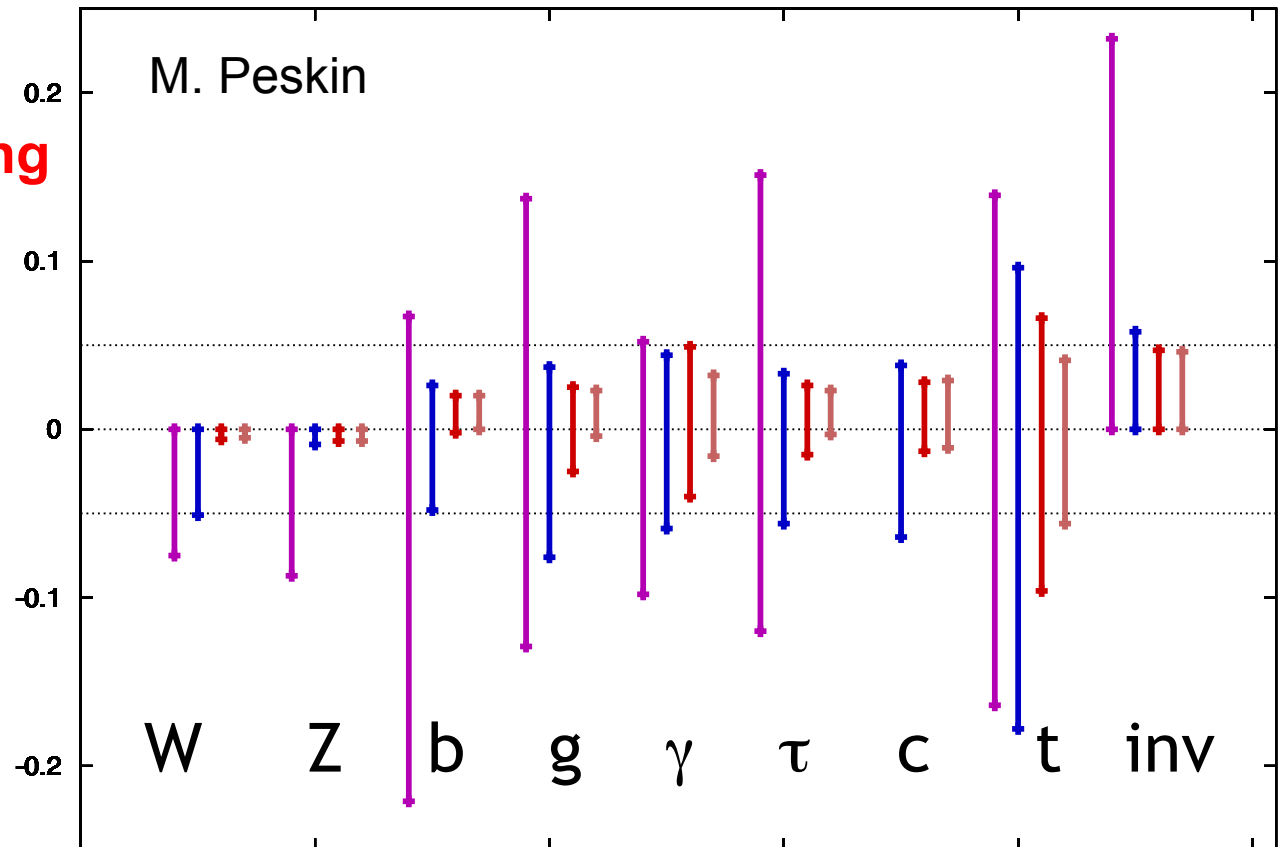


**350 GeV~
Higgs BR via
WW fusion**



**500 GeV~
Top Yukawa
Coupling**

$g(hAA)/g(hAA)|_{SM}-1$ LHC/HLC/ILC/ILCTeV



- LHCとILCのシナジー(global fit)でさらに精度を上げられる

Assumed Luminosities

LHC = LHC14TeV: 300fb⁻¹

HLC = ILC250: 250fb⁻¹

ILC = ILC500: 500fb⁻¹

ILCTeV = ILC1000: 1000fb⁻¹

2013/May/25

先端加速器LHCが切り拓
ケールの素粒子物理

Maximum deviation when nothing but the 125 GeV
object would be found at LHC

26

Summary

- ILC加速器は2012年12月に技術設計書完成。
2013年以降の建設Ready。
- ILC測定器も2012年12月に詳細設計完了。
ILC測定器でヒッグスの精密測定。
- ILCでヒッグスの全容解明。LHCとのシナジー
でさらなる精度向上。

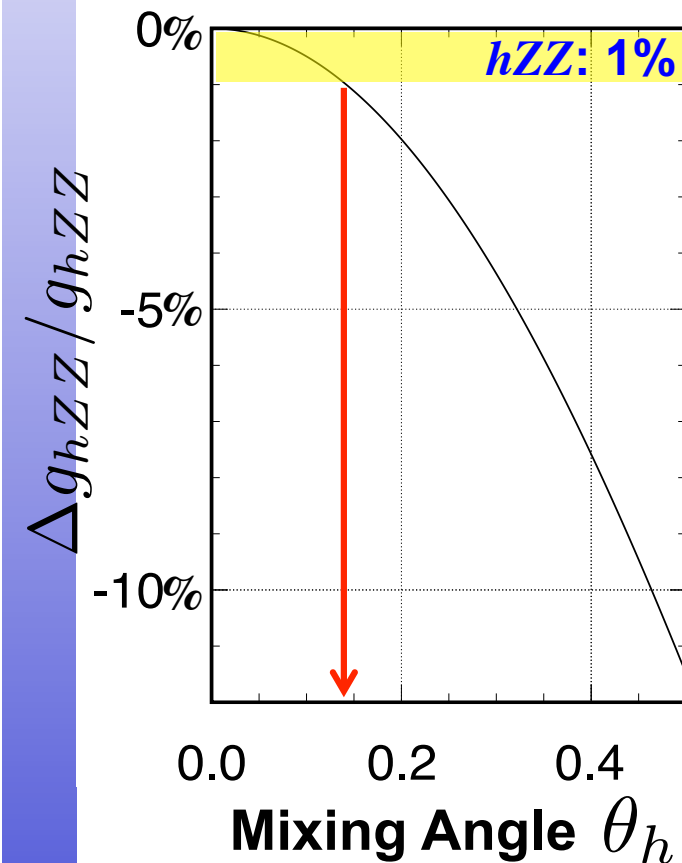
Backup

ILCヒッグス測定で迫る新物理

Higgs-Singlet Mixing

e.g. $U(1)_{B-L}$, Radion, Dilaton

$$\frac{\Delta g_{hVV}}{g_{h_{SM}VV}} \approx -\sin^2 \theta_h / 2$$

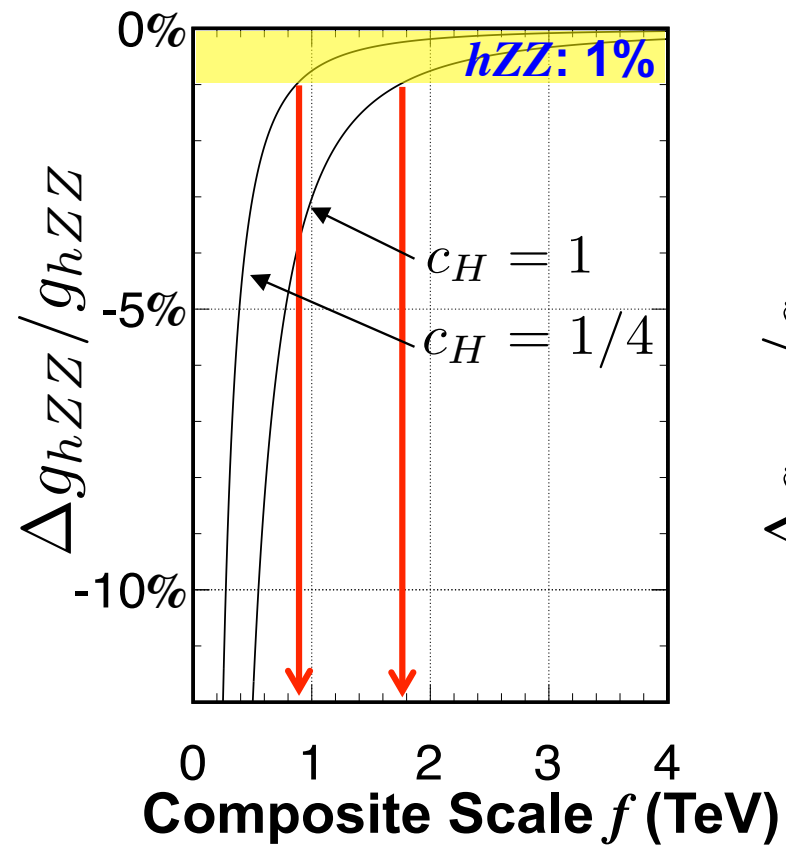


$$\theta_h < 0.15 \text{ rad}$$

Composite Higgs

e.g. Little Higgs, Holographic Higgs

$$\frac{\Delta g_{hVV}}{g_{h_{SM}VV}} \approx -c_H \xi / 2, \quad \xi = v^2 / f^2$$

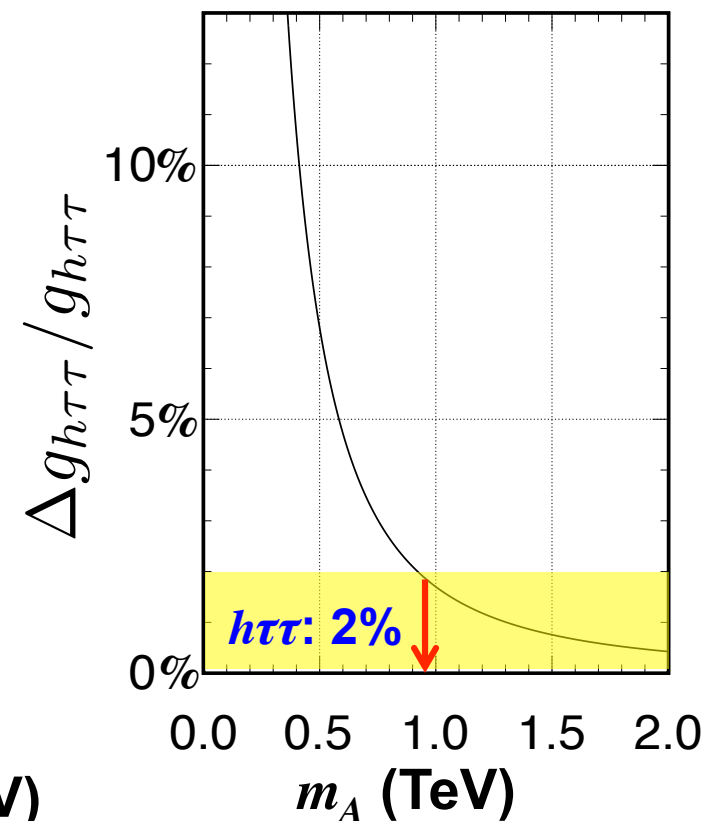


$$f > 1-2 \text{ TeV}$$

MSSM

$\tan \beta = 5$, radiative corr. ~ 1

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



$$m_A > 1 \text{ TeV} \quad (\tan \beta = 5)$$