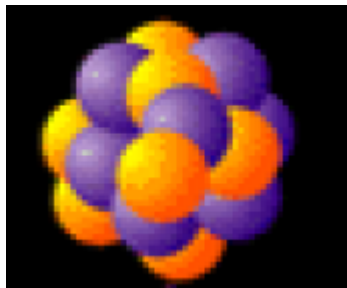


# 理論から

岡田安弘（KEK/総合研究大学院大学）  
高エネルギー物理学将来計画検討小委員会タウンミーティング  
『コライダー加速器による高エネルギー物理学の将来展望』  
2011年9月10日 名古屋大学

# TeV スケールとは

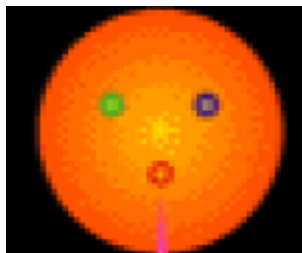
MeV



1930年代 中性子の発見  
強い相互作用、弱い相互作用の導入

素粒子でも転換する

GeV



1970年代  
3つの基本相互作用の理論の提案  
(もう一つの力を仮定した上で)

素粒子でも出てこない

Fermi

$$G_F = \frac{1}{\sqrt{2}v^2}$$

Higgs

TeV



2010年代  
電弱対称性を破る物理とは何か

# GeVからTeVへ、さらにその先へ

## No-lose theorem

TeVスケールには必ず、ヒッグス粒子が見つかるか、電弱対称性破れに関する別のシグナルが見つかる。SSC,LHCでは電弱対称性の破れに関する手掛かりが必ず何か得られる。

## ヒッグス粒子はTeV物理を探る道具

ゲージ相互作用と違いヒッグスセクターは理論的な縛りがあまりない。  
(実験で決めるべきこと)

全く異なる考え方に基づく模型でも、最初に見つかる粒子はいわゆる標準模型的なヒッグス粒子であることが多くある。

TeV物理を探るには、まずヒッグス粒子という道具について良く知らなければならない。

たとえば 標準模型の Higgs Lagrangian

$$L = |D_\mu H|^2 - (-\mu^2 |H|^2 + \lambda |H|^4)$$

(1) 超対称模型(MSSM)

本当は2 ヒッグスダブルレット模型 (でも 1 HDMが良い近似)

Cutoff scale はPlanck scale

H はsupermultiplet の一部

$\mu^2$  は超対称性の破れから

$\lambda$ はゲージ結合定数から  $\Rightarrow$  Higgs boson の質量は約 130 GeV 以下

新しい時空の対称性

(2) Little Higgs Model

Cutoff scale は $\sim 10$  TeV (複合ヒッグス模型)

H は擬南部-Goldstone boson

$\mu^2$  は重いフェルミオンループから

$\lambda$ はゲージ及び湯川結合定数の補正から

新しい強い力

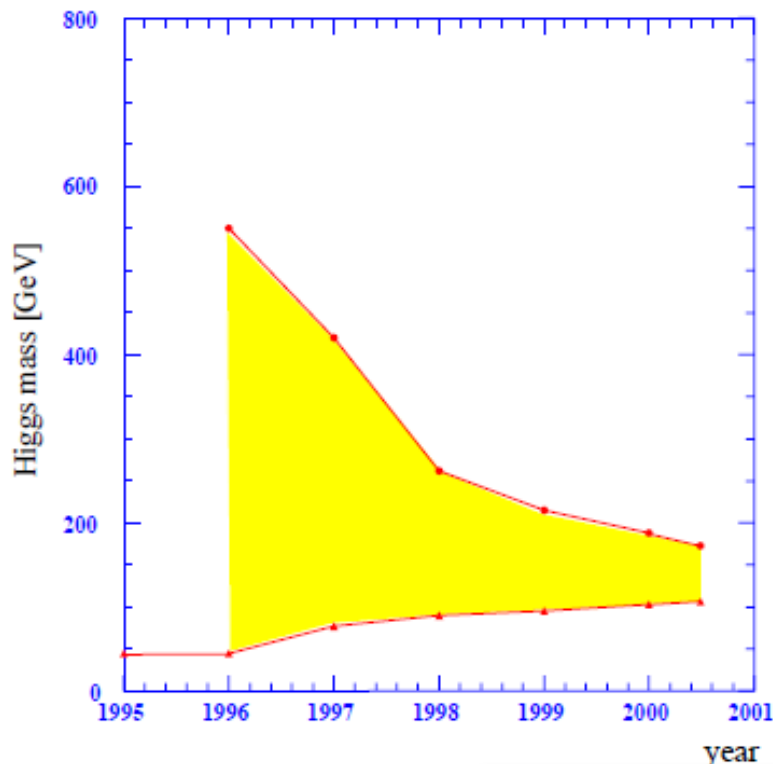
全く違う物理でも、最初に見つかるものはSM-like Higgs boson

# $SP\bar{P}S \rightarrow LEP/SLC \rightarrow LHC$

1980年代 W,Z の発見  
 1990年代 Z粒子の詳細検証 (ゲージ対称性の検証)  
 2010年代 電弱対称性の破れの物理へ

精密測定がその後の方向を示す

標準模型のヒッグス粒子の質量制限

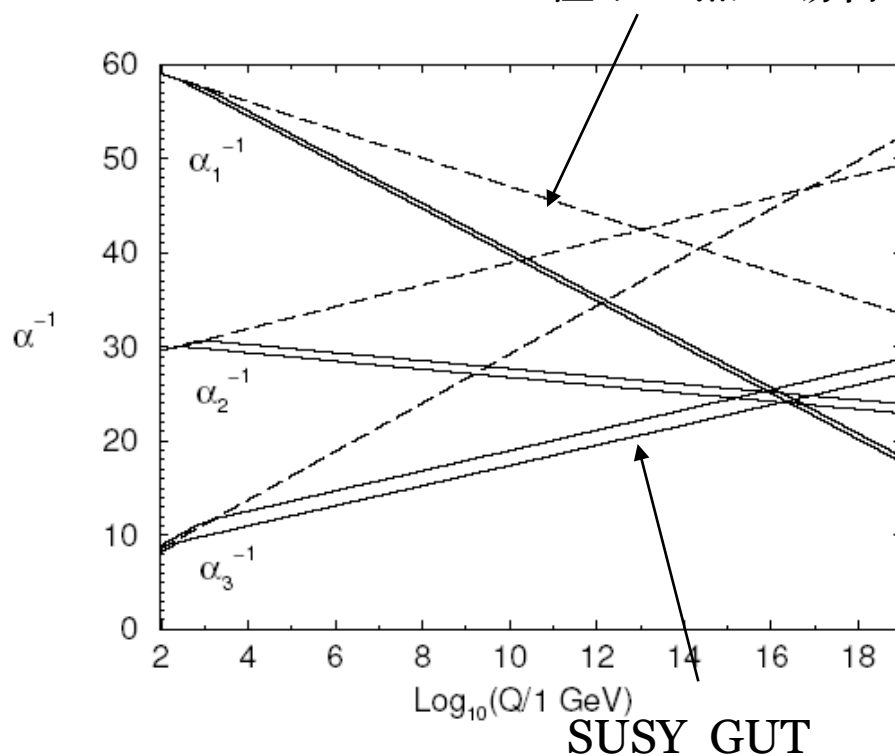


TESLA TDR

ヒッグスは軽そう

SUSY GUT の結合定数統一

SUSY 粒子の無い場合



SUSY GUT

SUSY があるかもしれない

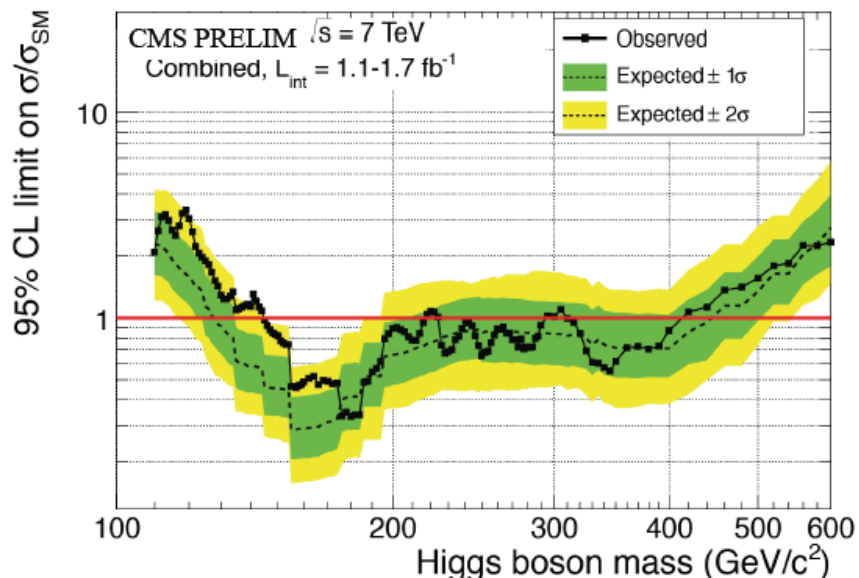
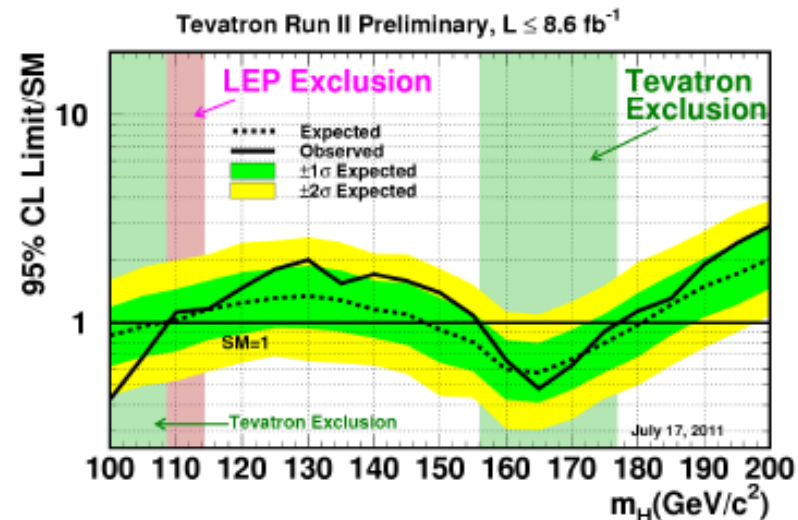
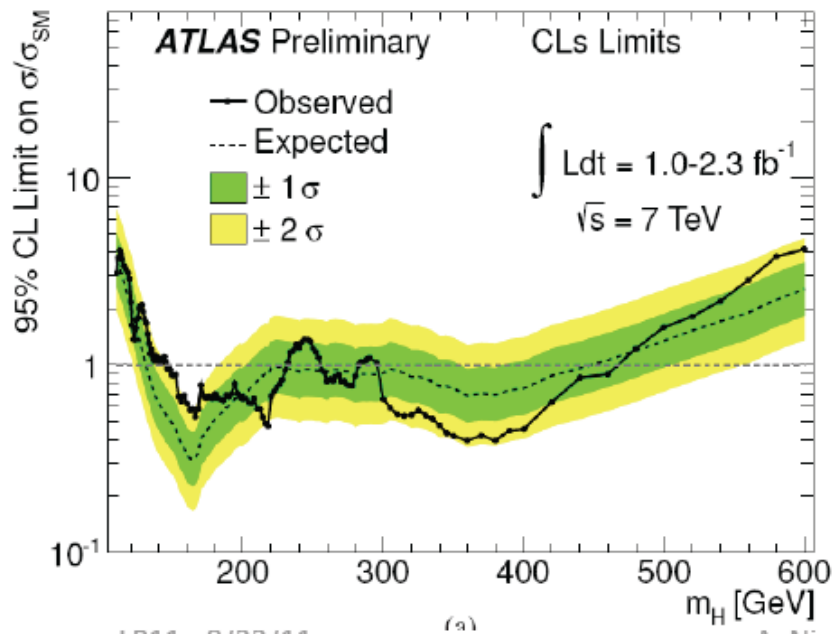
# 様々な疑問と T e V スケール物理

- 暗黒物質の正体は
- 力は統一されるか
- ニュートリノ質量の起源は
- 宇宙のバリオン数はどうして生じたか
- なぜ3世代
- クォークやレプトンの質量や混合はどう決まっているのか
- Strong CP problem
- Cosmological constant problem  
などなど

これらの疑問は T e V スケールで直接解決されるものもあるだろうし、別の見方が出るかもしれない。T e V の物理の全貌解明するとともに問い直されるべき。

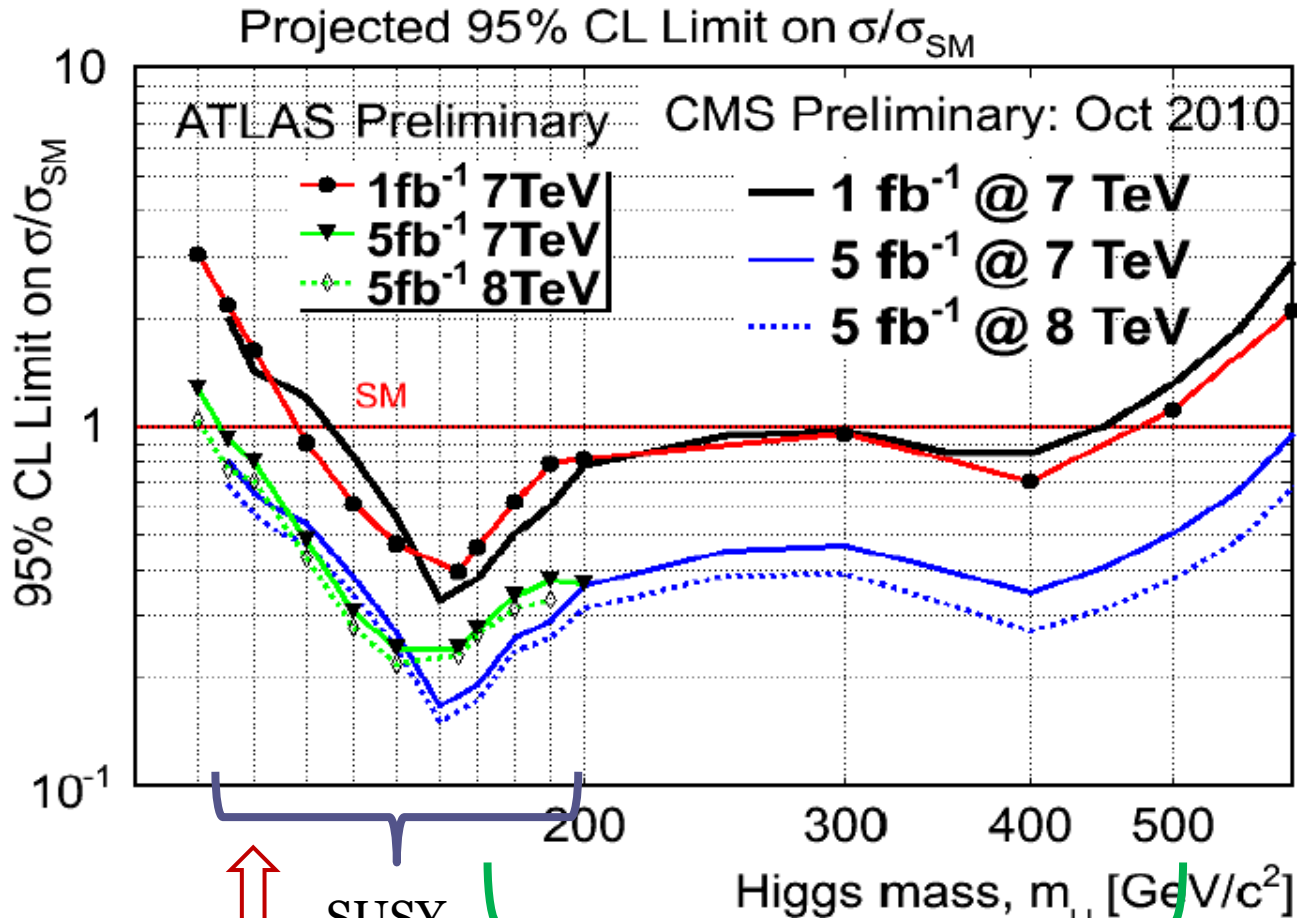
T e V スケールで、どのような力や対称性、新しい概念が見つかるかによっている。

# Higgs search の現状



# 近い将来の期待

## CMS & ATLAS Projections Compared



MSSM  
favored

SUSY  
possible

Need something more than a  
Higgs boson.

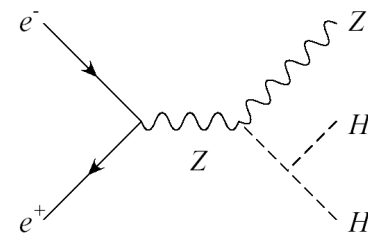
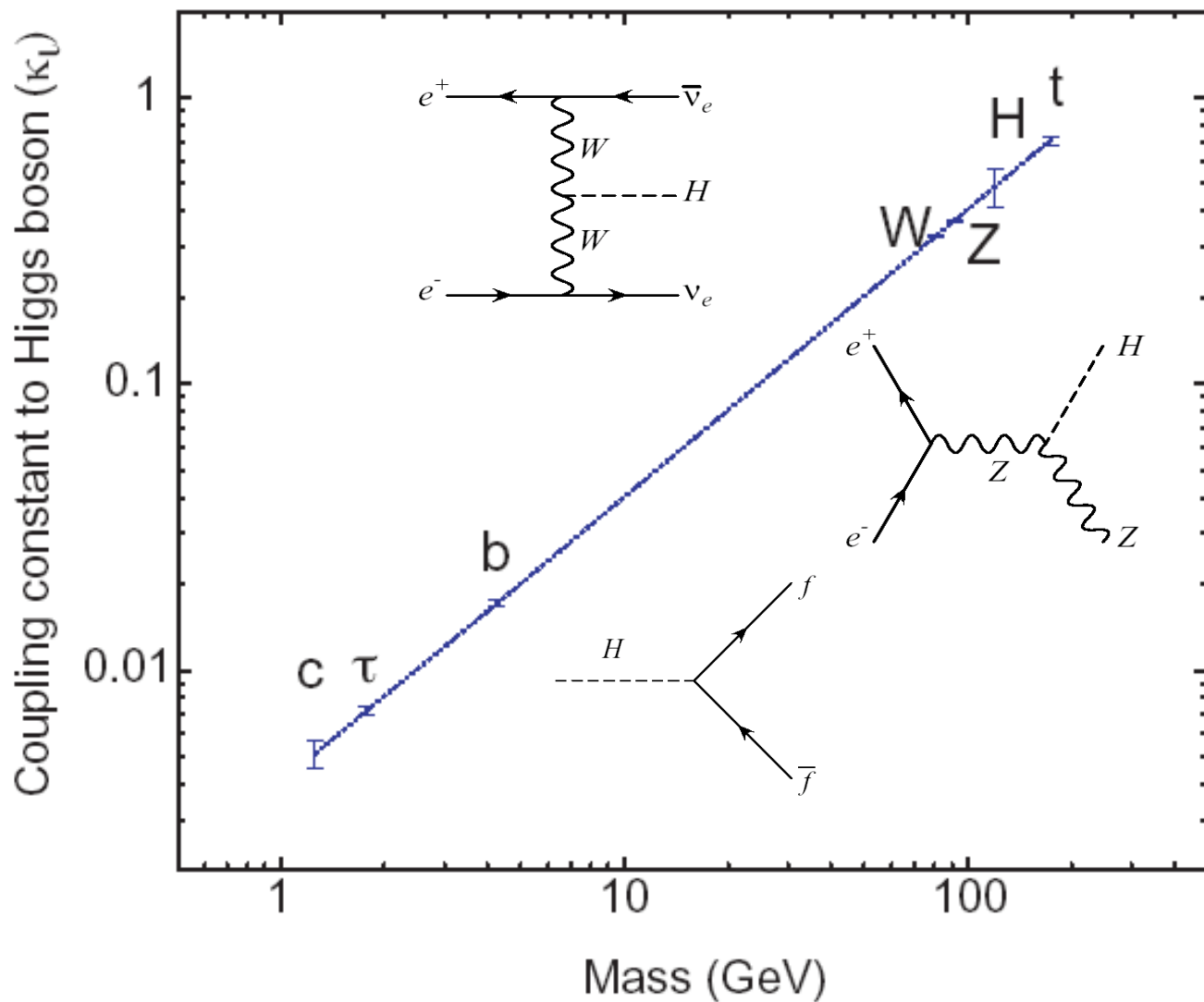
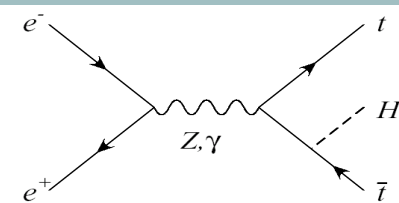


# ヒッグス粒子が見つかったら

- Mass, spin, parity を決める
- 他の素粒子との結合定数を決める (ヒッグス機構による素粒子の質量生成)
- ヒッグス粒子の自己相互作用(ヒッグスポテンシャルを決める)
- ゲージボソン縦波散乱( $V_L V_L \rightarrow V_L V_L$ ,  $V_L V_L \rightarrow HH$ )

# Higgs coupling measurements at ILC

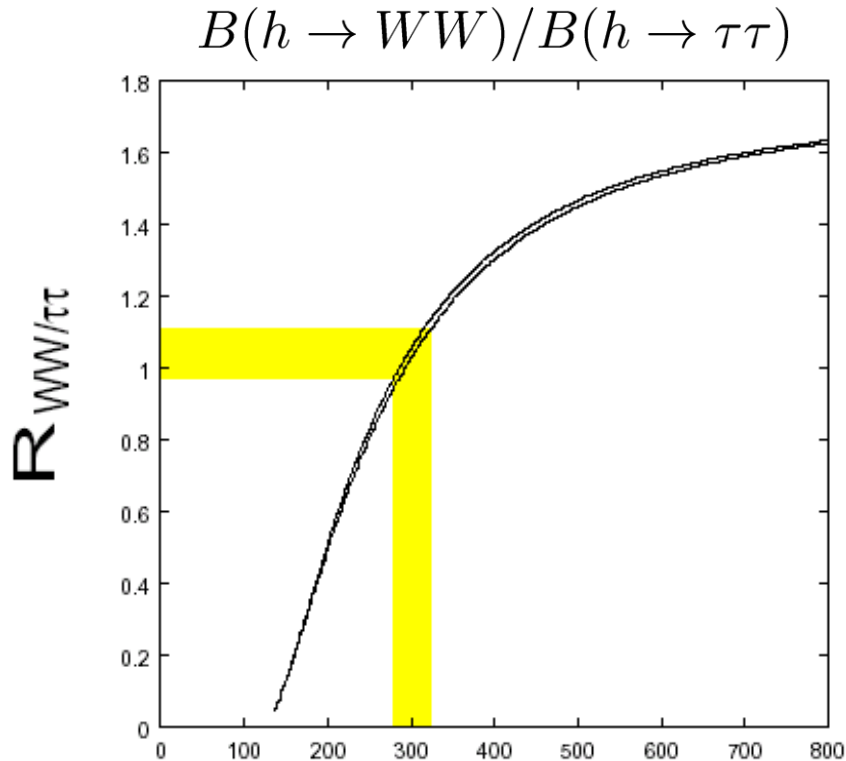
## Coupling-Mass Relation



GLC Project

# ヒッグス粒子精密測定によるTeV物理の探索(例)

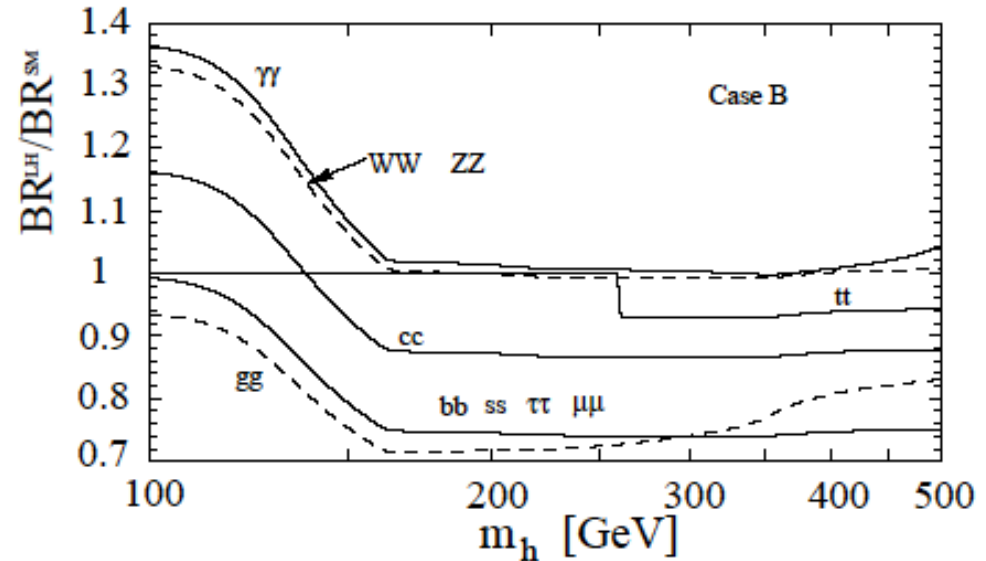
Minimal SUSY SM (MSSM)



$M_A$  (GeV) ACFA report

軽いヒッグス粒子の分岐比で重い  
ヒッグス粒子の質量がわかる

Little Higgs with T-parity



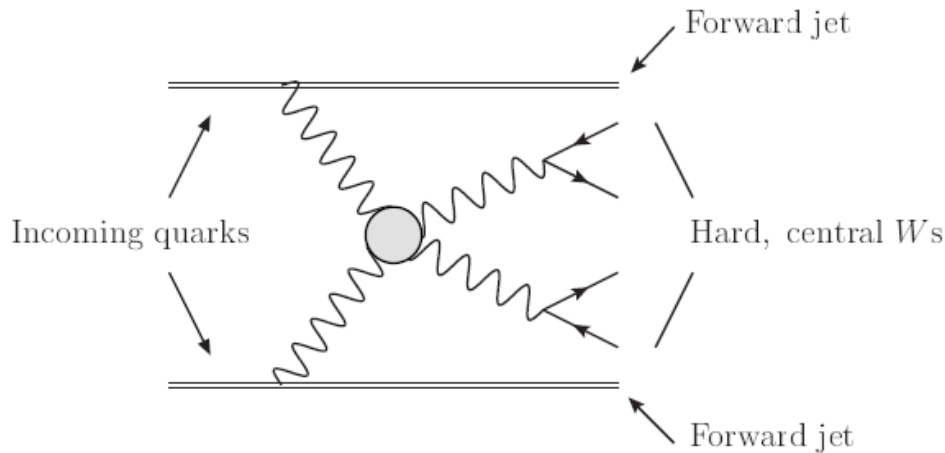
R.-C.Chen K.Tobe, C.-P. Yuan ,2006

重いフェルミオンのループ効果  
で分岐比が変化

# Strongly interacting light Higgs における $V_L V_L$ 散乱

Giudice, Grojean, Pomarol, Rattazzi, 2007

WW 散乱の高エネルギーでの振る舞いをみることは、ヒッグスセクターの中身を探るのに有用



$$\mathcal{L} \supset \frac{c_H}{2f^2} \partial^\mu (H^\dagger H) \partial_\mu (H^\dagger H),$$

(Ex. Little Higgs Models)

$$\mathcal{A}(Z_L^0 Z_L^0 \rightarrow W_L^+ W_L^-) = \mathcal{A}(W_L^+ W_L^- \rightarrow Z_L^0 Z_L^0) = -\mathcal{A}(W_L^\pm W_L^\pm \rightarrow W_L^\pm W_L^\pm) = \frac{c_H s}{f^2},$$

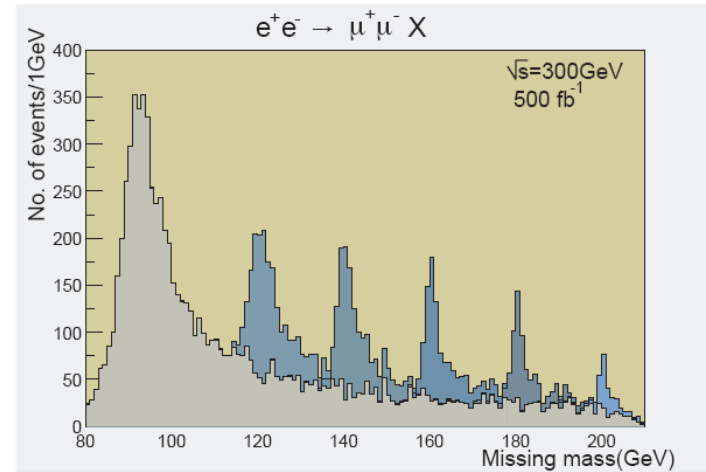
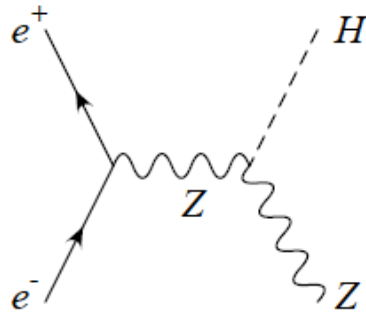
$$\mathcal{A}(W^\pm Z_L^0 \rightarrow W^\pm Z_L^0) = \frac{c_H t}{f^2}, \quad \mathcal{A}(W_L^+ W_L^- \rightarrow W_L^+ W_L^-) = \frac{c_H (s+t)}{f^2},$$

$$\mathcal{A}(Z_L^0 Z_L^0 \rightarrow Z_L^0 Z_L^0) = 0.$$

$$\mathcal{A}(Z_L^0 Z_L^0 \rightarrow hh) = \mathcal{A}(W_L^+ W_L^- \rightarrow hh) = \frac{c_H s}{f^2}.$$

# もしヒッグス粒子が見つからなかったら

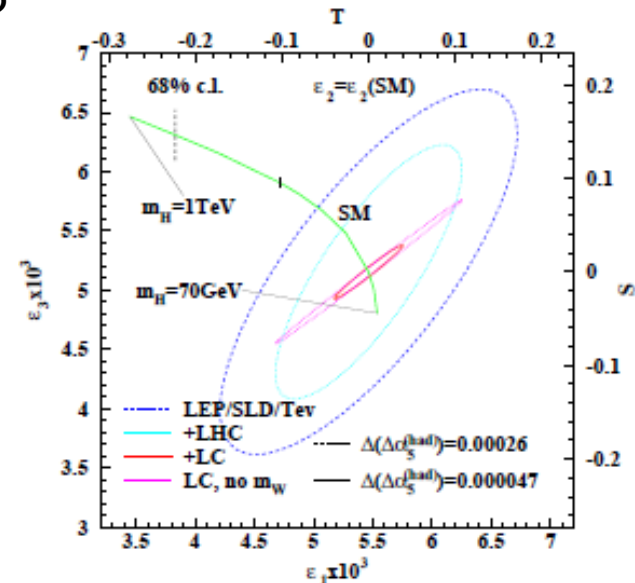
(1) ヒッグス粒子は生成されているが、invisible mode に崩壊



ILC では崩壊モードによらずにピークが見える

(2) ヒッグス粒子がない場合  
=> strongly-interacting scenario

New resonance の探索  
ゲージボソンのanomalous couplings  
電弱対称性の精密測定に戻る



GigaZ


# ヒッグス粒子以外の新粒子探索

Albert De Roeck

Ellis, Gianotti, ADR

hep-ex/0112004+ few updates

Units are TeV (except  $W_L W_L$  reach)

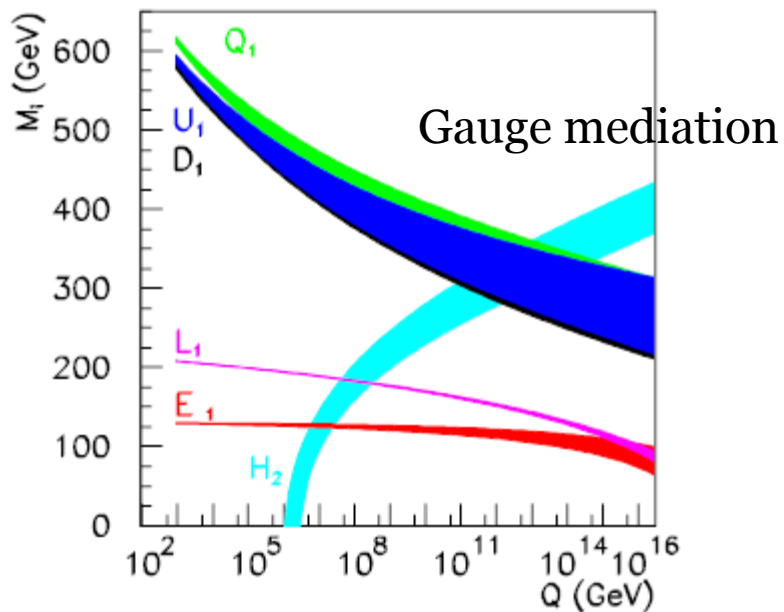
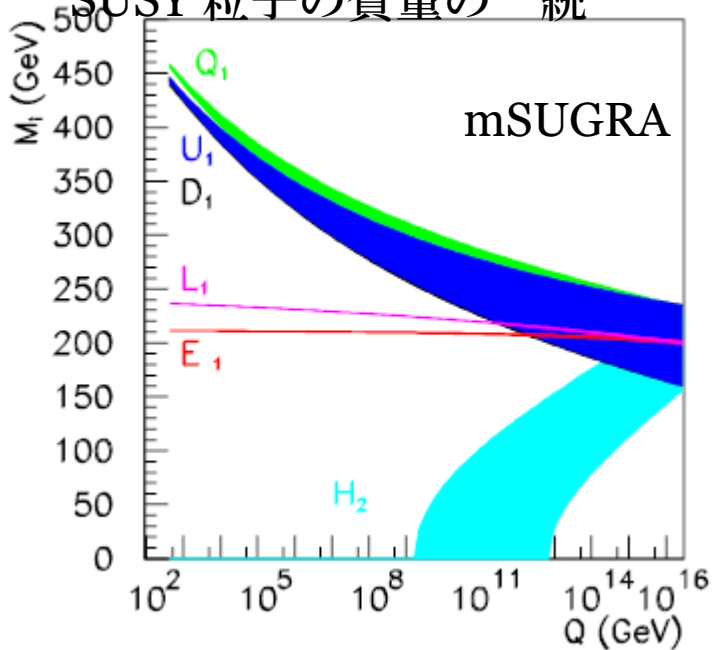
 Ldt correspond to 1 year of running at nominal luminosity for 1 experiment

PROCESS	LHC 14 TeV 100 fb <sup>-1</sup>	SLHC 14 TeV 1000 fb <sup>-1</sup>	28 TeV 100 fb <sup>-1</sup>	VLHC 40 TeV 100 fb <sup>-1</sup>	VLHC 200 TeV 100 fb <sup>-1</sup>	LC 0.8 TeV 500 fb <sup>-1</sup>	LC 5 TeV 1000 fb <sup>-1</sup>
Squarks	2.5	3	4	5	20	0.4	2.5
$W_L W_L$	2 $\sigma$	4 $\sigma$	4.5 $\sigma$	7 $\sigma$	18 $\sigma$	6 $\sigma$	90 $\sigma$
Z'	5	6	8	11	35	8 <sup>†</sup>	30 <sup>†</sup>
Extra-dim ( $\delta=2$ )	9	12	15	25	65	5-8.5 <sup>†</sup>	30-55 <sup>†</sup>
$q^*$	6.5	7.5	9.5	13	75	0.8	5
$\Delta$ compositeness	30	40	40	50	100	100	400
TGC ( $\lambda_\gamma$ )	0.0014	0.0006	0.0008		0.0003	0.0004	0.00008

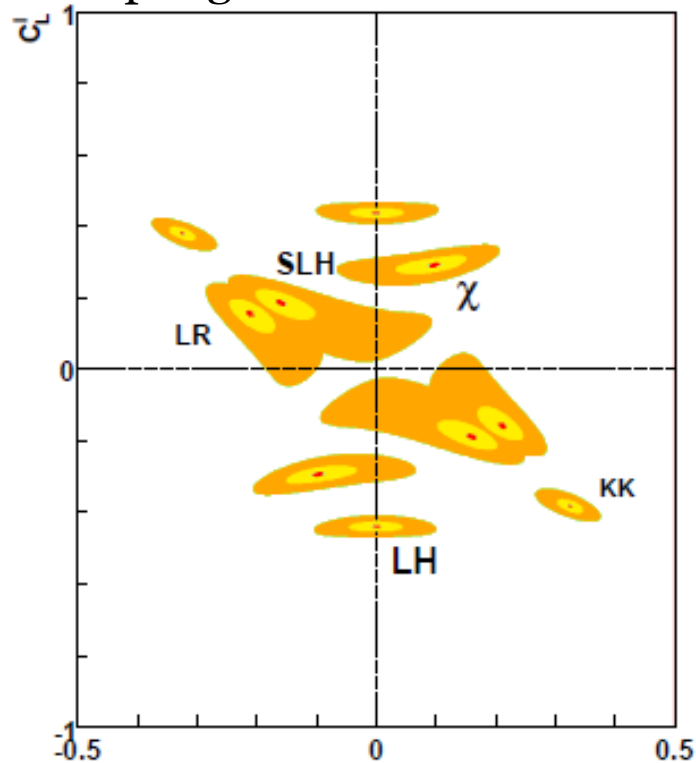
<sup>†</sup> indirect reach  
(from precision measurements)

エネルギーをあげるほど当然、探索領域は広がる。  
 まず、LHCの初期に見つかった粒子を詳しく調べるべき  
 =>それから背後にある法則性や原理を学んで他の新粒子探索へ

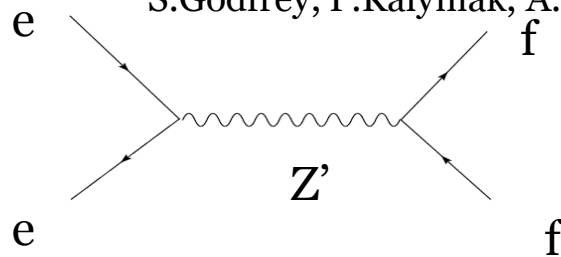
# SUSY 粒子の質量の “統一”



# Z' coupling の測定



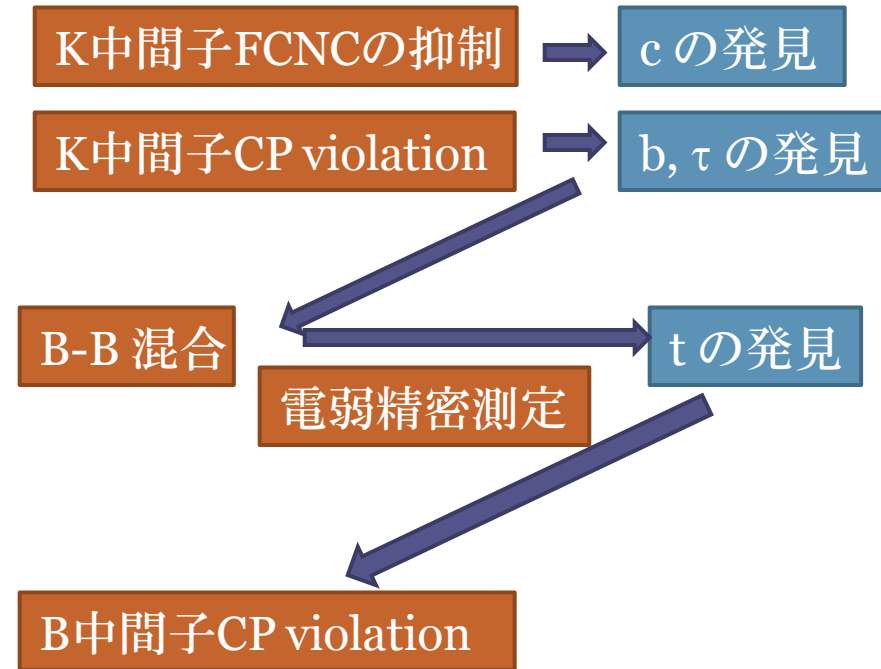
$m_{Z'} = 1-3 \text{ TeV}, E_{\text{cm}} = 500 \text{ GeV}, L = 1 \text{ ab}^{-1}$   
 S. Godfrey, P. Kalyniak, A. Tomkins



500 GeV LC でも模型を区別できる

# スーパーBファクトリー

- 直接探索と間接探索は相補的な役割をもつ。
- Super B の特徴はいろいろな間接探索の方法があること (B, D,  $\tau$ 崩壊)
- LHCb とは車の両輪の関係
- 標準模型からのずれのパターンをみることで、いろいろな模型を区別するのに有用





# 次世代Bファクトリーの物理の特徴

- 様々な物理量により新しい相互作用の性質を探ることができる。

新しいCP位相

$S(B \rightarrow \phi K_S) - S(B \rightarrow J/\psi K_S)$

$A(B \rightarrow \pi K)$

$S(b \rightarrow s\gamma)$

DD mixing

Chiral structure

$S(B \rightarrow K_S \gamma)$

$A_{FB}(B \rightarrow K^* l l)$

レプトンフレーバーの破れ

$\tau \rightarrow \mu \gamma, \tau \rightarrow e \gamma,$

$\tau \rightarrow \mu \mu \mu, \tau \rightarrow \mu \mu e, \tau \rightarrow \mu e e, \tau \rightarrow e e e,$

$\tau \rightarrow \mu \eta, \tau \rightarrow \mu \pi, \tau \rightarrow \mu K \dots\dots\dots$

新しい”Weak Interaction”

$B \rightarrow \tau \nu$

$B \rightarrow D \tau \nu$

# 期待される測定精度

50-75  $\text{ab}^{-1}$ 

	Observable	Super Flavour Factory sensitivity
CKM parameters	$\sin(2\beta) (J/\psi K^0)$	0.005–0.012
	$\gamma (B \rightarrow D^{(*)} K^{(*)})$	1–2°
	$\alpha (B \rightarrow \pi\pi, \rho\rho, \rho\pi)$	1–2°
	$ V_{ub} $ (exclusive)	3–5%
	$ V_{ub} $ (inclusive)	2–6%
	$\bar{\rho}$	1.7–3.4%
b-s transition	$\bar{\eta}$	0.7–1.7%
	$S(\phi K^0)$	0.02–0.03
	$S(\eta' K^0)$	0.01–0.02
B- $\rightarrow$ (D) $\tau\nu$	$S(K_S^0 K_S^0 K_S^0)$	0.02–0.04
	$\phi_D$	1–3°
	$\mathcal{B}(B \rightarrow \tau\nu)$	3–4%
	$\mathcal{B}(B \rightarrow \mu\nu)$	5–6%
	$\mathcal{B}(B \rightarrow D\tau\nu)$	2–2.5%
EW penguin	$\mathcal{B}(B \rightarrow \rho\gamma)/\mathcal{B}(B \rightarrow K^*\gamma)$	3–4%
	$A_{CP}(b \rightarrow s\gamma)$	0.004–0.005
	$A_{CP}(b \rightarrow (s+d)\gamma)$	0.01
	$S(K_S^0 \pi^0 \gamma)$	0.02–0.03
	$S(\rho^0 \gamma)$	0.08–0.12
	$A^{\text{FB}}(B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-) s_0$	4–6%
tau LFV	$\mathcal{B}(B \rightarrow K\nu\bar{\nu})$	16–20%
	$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\gamma)$	$2-8 \times 10^{-9}$
	$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\mu\mu)$	$0.2-1 \times 10^{-9}$
	$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\eta)$	$0.4-4 \times 10^{-9}$

o(10%) physics (Now)  
=> o(1%) physics (Future)

## 標準模型からのずれのパターンの例

2003 SLAC WS Proceedings, hep-ph/0503261

Model	$B_d$ Unitarity	Time-dep. $CPV$	Rare $B$ decay	Other signals
mSUGRA(moderate $\tan \beta$ )	-	-	-	-
mSUGRA(large $\tan \beta$ )	$B_d$ mixing	-	$B \rightarrow (D)\tau\nu$ $b \rightarrow sl^+l^-$	$B_s \rightarrow \mu\mu$ $B_s$ mixing
SUSY GUT with $\nu_R$	-	$B \rightarrow \phi K_S$ $B \rightarrow K^*\gamma$	-	$B_s$ mixing $\tau$ LFV, $n$ EDM
Effective SUSY	$B_d$ mixing	$B \rightarrow \phi K_S$	$A_{CP}^{b \rightarrow s\gamma}, b \rightarrow sl^+l^-$	$B_s$ mixing
KK graviton exchange	-	-	$b \rightarrow sl^+l^-$	-
Split fermions in large extra dimensions	$B_d$ mixing	-	$b \rightarrow sl^+l^-$	$K^0\bar{K}^0$ mixing $D^0\bar{D}^0$ mixing
Bulk fermions in warped extra dimensions	$B_d$ mixing	$B \rightarrow \phi K_S$	$b \rightarrow sl^+l^-$	$B_s$ mixing $D^0\bar{D}^0$ mixing
Universal extra dimensions	-	-	$b \rightarrow sl^+l^-$ $b \rightarrow s\gamma$	$K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu}$

**MFV****MFV****MFV**

SUSY

Extra  
Dimension  
models

# コメント

- 現在、TeVを超える物理への入り口に立っている。(いったん入り口から入ったら、もう No-lose theorem に守られていない。)
- まずやるべきことは、LHCで発見された粒子を詳しく調べること。(ヒッグス粒子は貴重な手掛かり。それ以外の粒子が見つければ、おそらく新粒子探索時代の幕開け。)
- 約30年前に、高エネルギー実験のGeVからTeVへの道筋のシナリオを描く際には、欧米が主導した。TeVから先の物理を進めるには、日本の役割が大きい。