

ILC/LHC upgrade の物理

兼村晋哉 富山大学理学部

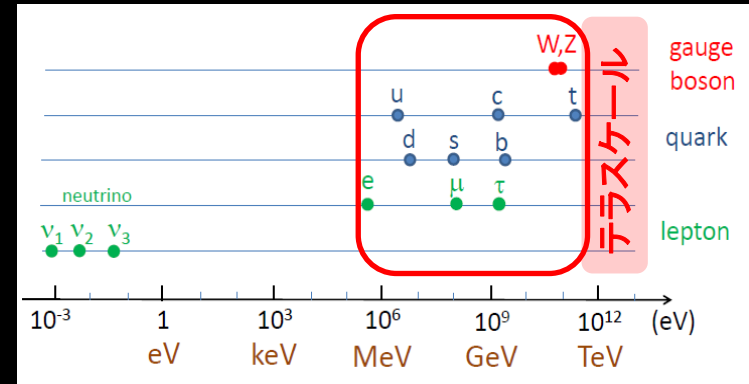
シンポジウム: LHC upgrade および ILC計画

日本物理学会2010年秋季大会

九州工業大学戸畑キャンパス 2010年9月12日

序：テラスケールの意義

- EWSBの物理
- テラスケールの物理
 - 階層性問題
 - WIMP暗黒物質
 - これら2つの理由からテラスケールの新物理学への強い期待
 - より高いエネルギー領域 (GUTスケール等) への足掛かり

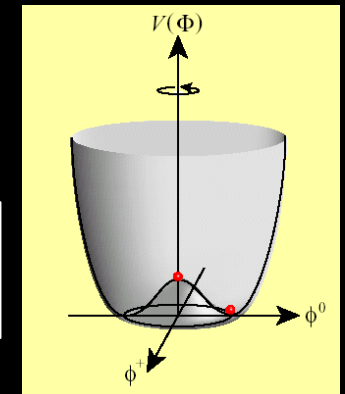


素粒子の質量起源は？

電弱対称性の自発的破れ
ヒッグスの物理

$$V(\phi) = -\mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$$

摂動ユニタリー性から
 $m_h < 1 \text{ TeV}$



序：テラスケールの意義

- EWSBの物理
- テラスケールの物理
 - 階層性問題
 - WIMP暗黒物質
 - これら2つの理由からテラスケールの新物理学への強い期待
 - より高いエネルギー領域(GUTスケール等)への足掛かり

スカラー質量の輻射補正に2次の紫外発散：テラスケールからはるか高エネルギーまでSMが成り立つことは不自然

$$\delta m_H^2 = \frac{\Lambda_{cutoff}^2}{16\pi^2}$$

新物理モデルにはテラスケールでこの問題を解決する機構があるべきである

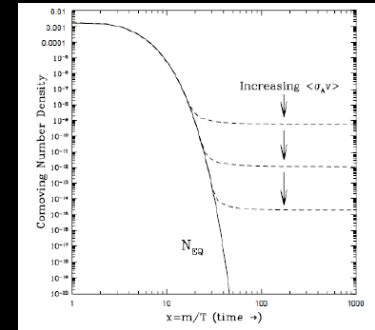
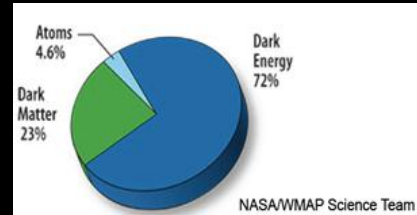
超対称性

リトルヒッグス

ゲージヒッグス統合,

序：テラスケールの意義

- EWSBの物理
- テラスケールの物理
 - 階層性問題
 - WIMP暗黒物質
 - これら2つの理由からテラスケールの新物理学への強い期待
 - より高いエネルギー領域 (GUTスケール等) への足掛かり



$$\Omega_{DM} h^2 \simeq \frac{0.1 \text{ pb} \cdot c}{\langle\sigma v\rangle}$$

$$\langle\sigma v\rangle \sim (g^2/4\pi)^2/m^2$$

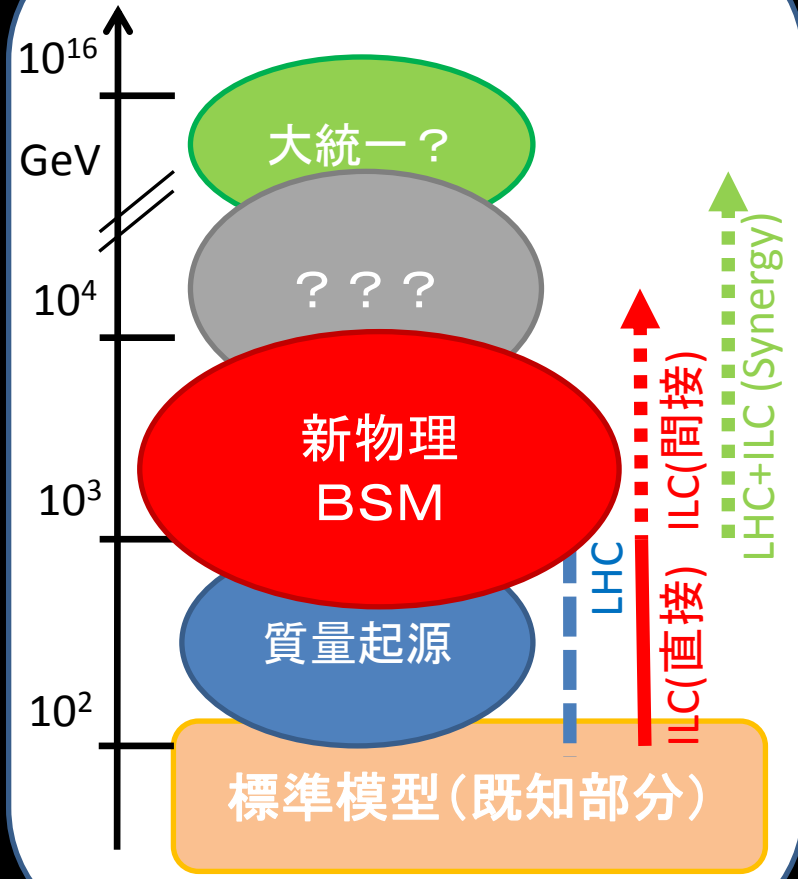
$$\Omega_{DM} h^2 = 0.1 (\text{WMAP})$$

$$m \sim g^2 \times (1 \text{ TeV})$$

DMがWIMPならその
質量はテラスケール！

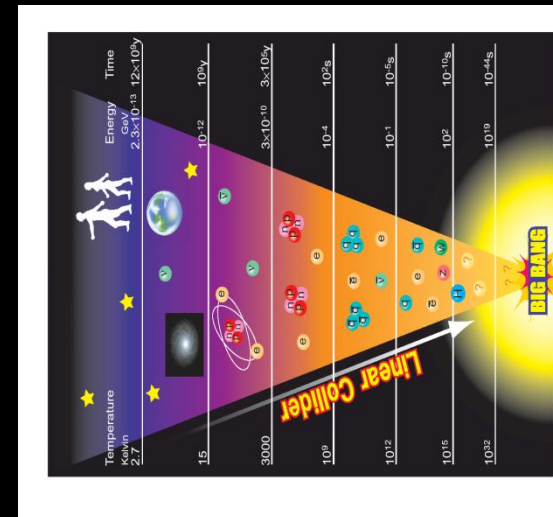
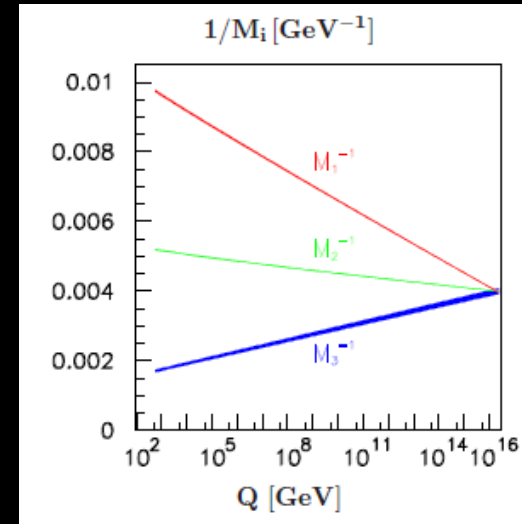
序：テラスケールの意義

- EWSBの物理
- テラスケールの物理
 - 階層性問題
 - WIMP暗黒物質
 - これら2つの理由からテラスケールの新物理学への強い期待
 - より高いエネルギー領域 (GUTスケール等) への足掛かり



序：テラスケールの意義

- EWSBの物理
- テラスケールの物理
 - 階層性問題
 - WIMP暗黒物質
 - これら2つの理由からテラスケールの新物理学への強い期待
 - より高いエネルギー領域 (GUTスケール等) への足掛かり

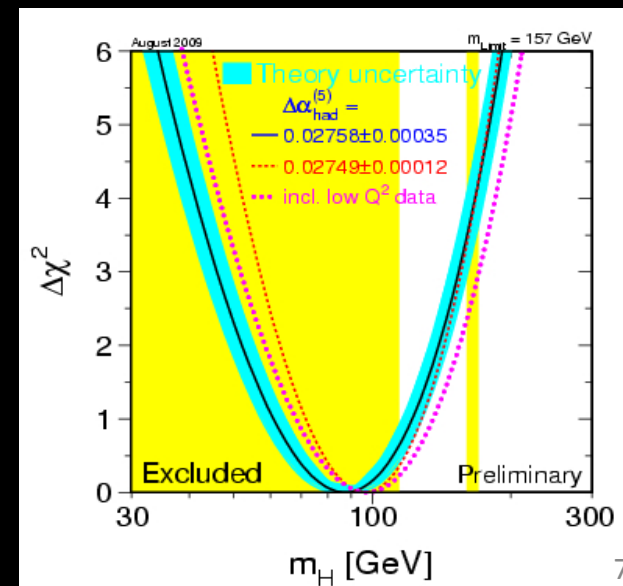
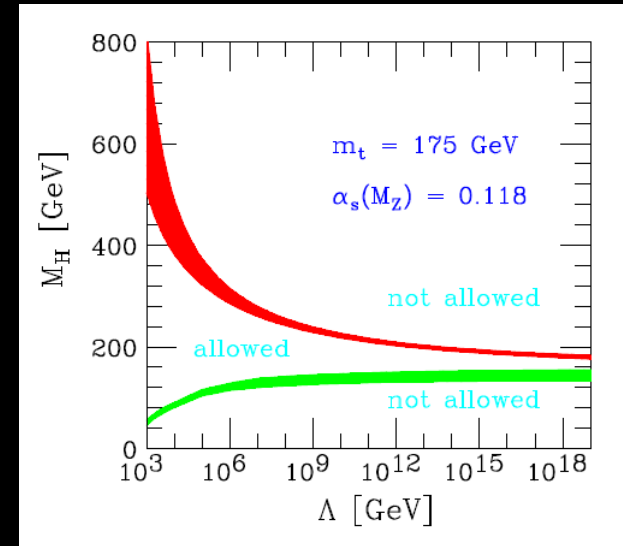


ヒッグス質量はパラメータ

$$V(\phi) = -\mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$$

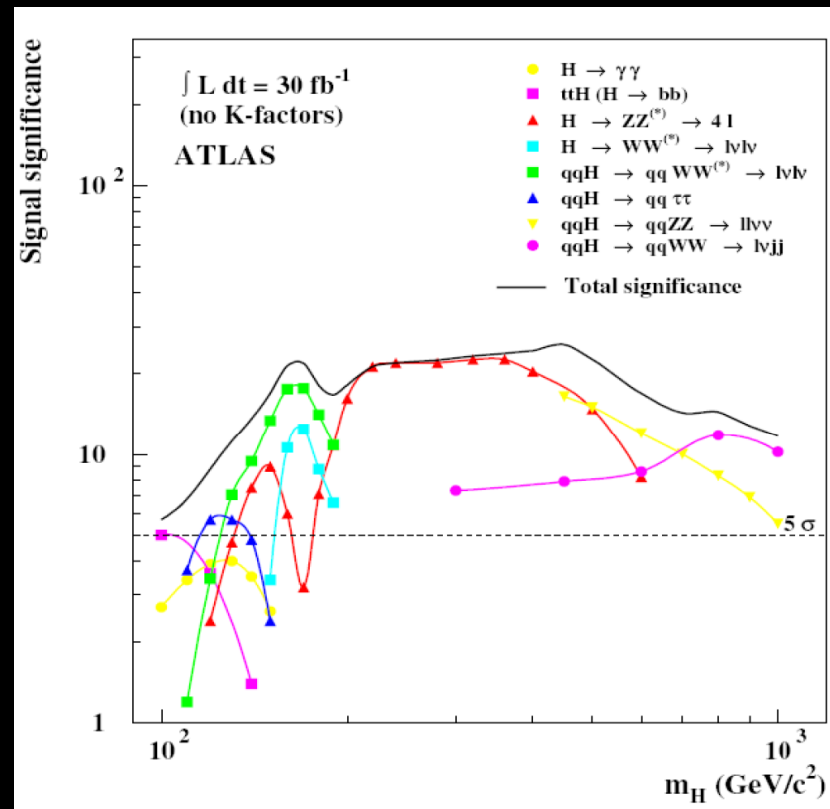
$$m_h^2 = 2\lambda v^2$$

- SMの切断 Λ と関係(RGE)
 - 軽いヒッグス(弱結合: high Λ)
 - 重いヒッグス(強結合: low Λ)
- LEP, Tevatron からの制限
 - $114 \text{ GeV} < m_h < 149 \text{ GeV}$
allowed at 95%CL, assuming
the SM Lagrangian
 - $158 \text{ GeV} < m_h < 175 \text{ GeV}$
excluded (Tevatron)



LHC実験

- ハドロンコライダー pp
 - 1fb 7TeV
 - 30-300fb 14TeV
- LHCはSMヒッグス発見器:
- すべての質量領域で発見可能とされている (30fb^{-1})



質量の起源？

- 新粒子が本当にヒッグスボソンかどうか

- スピン0？
- その粒子が本当に質量起源を担当しているのかどうかを見極めねば意味なし
- 質量と結合を独立に(精密に)測定することにより

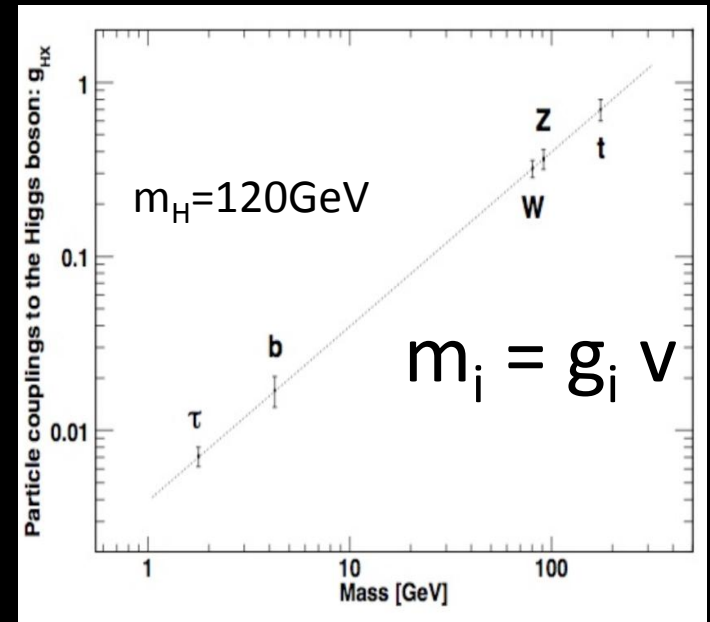
$$m_i = g_i v$$

を満たすかどうかをテストせよ

結合定数の測定

LHCでは十分ではない！

LHC 300fb⁻¹



ヒッグス機構	=	W、Z 質量
湯川結合	=	クォーク・レプトン質量
ヒッグス自己結合	=	ヒッグス質量

将来加速器実験 (HL-LHC か ILCか)

解くべき問題

- 電弱対称性の破れの本質
 - 暗黒物質の正体、ニュートリノ質量の謎、バリオン数生成の謎
 - テラスケールを支配するBSMの原理とラグランジアン決定
→ 21世紀前半の素粒子物理！
 - さらに高エネルギー(初期宇宙)の物理への展望
- これらをLHCとそれに続く将来加速器実験で明らかにすること！

LHC 14TeVで 30fb^{-1} たまったころ

- ヒッグス候補は、あれば見つかっている
- SUSY粒子など新粒子の質量がTeV以下なら見つかる可能性あり

その時のシナリオとしていろいろなケースが考えられる

さまざまな可能性

	light H	heavy H	no H	NewParticle
シナリオ1	x			x
シナリオ2		x		x
シナリオ3			x	x
シナリオ4	x			
シナリオ5		x		
シナリオ6			x	

light H : $114\text{GeV} < m_h < 150 - 200 \text{ GeV}$ (LEPにコンシステントな領域)

heavy H: $150 - 200 \text{ GeV} < m_h$ (LEPと一見矛盾する領域)

シナリオ1 (light-Higgs × NP-found)

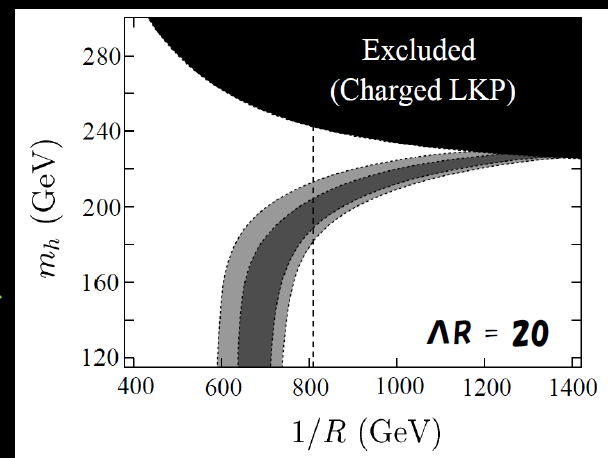
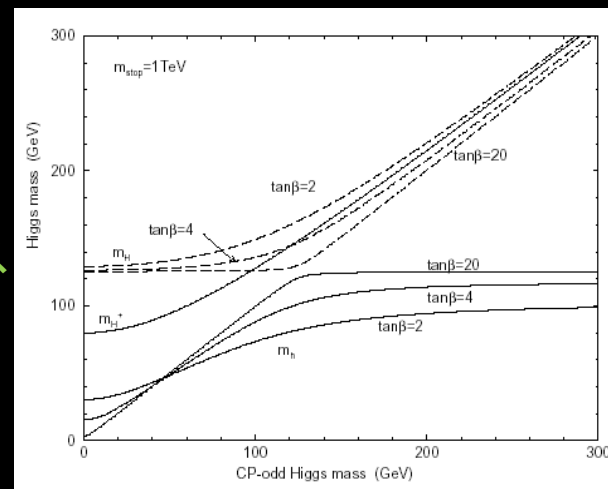
- 私たちにとって**ベスト**のシナリオ(沢山の発見)
- いろいろなTeV領域の新物理模型がある

SUSY, Little Higgs, UED, ...
これらを区別する!

- 質量の測定(スペクトル)
- スピンの測定
- 結合定数の測定
-

MSSMは
軽いヒッグスを
予言する

ミニマルな
UED模型も
DMデータ
のもとで
軽いヒッグスを
予言



Kakizaki, Matsumoto, Senami (2006)

テラスケールの新物理パラダイム
ラグランジアン構成

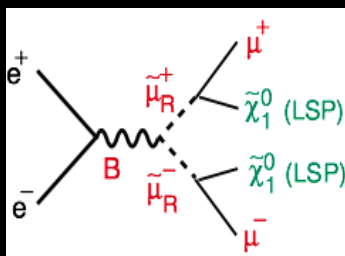
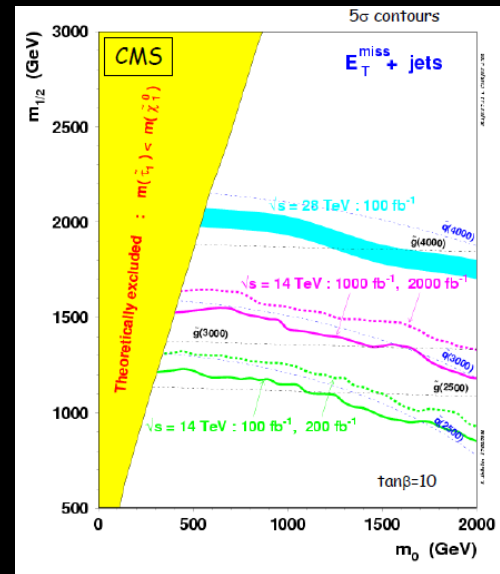
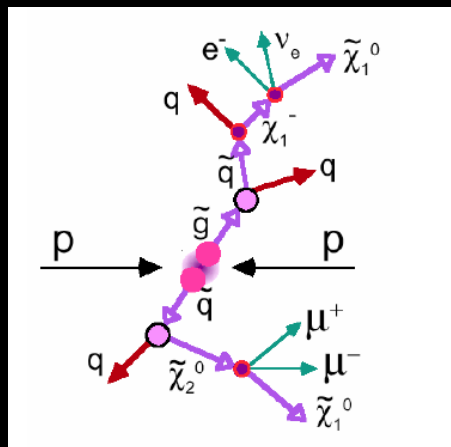
SUSY 粒子

(S)LHC

QCD過程による生成
 グレイノ、sクォークからの崩壊連鎖
 質量差を測定

ILCでは

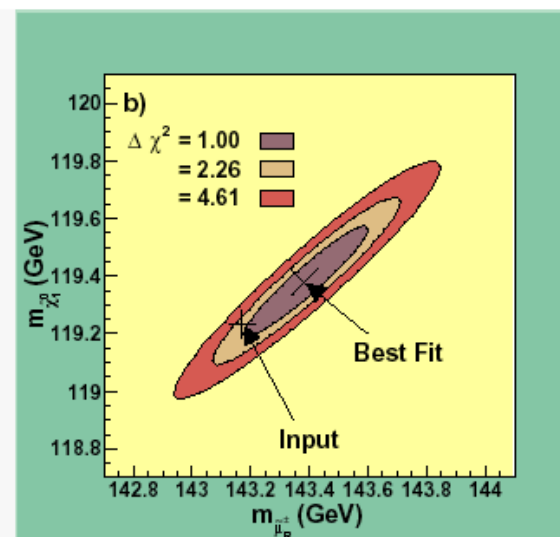
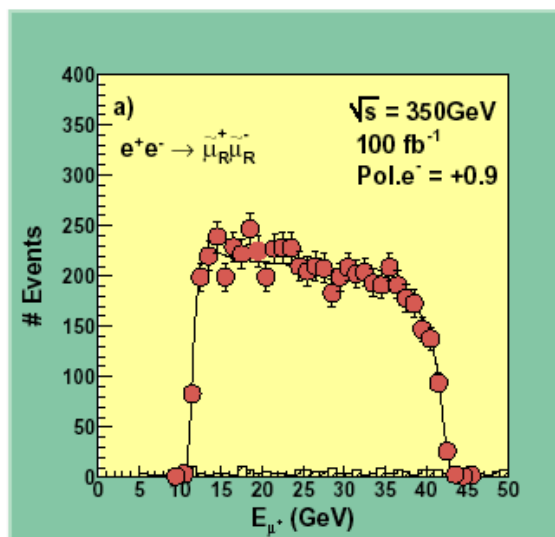
スレプトン対生成
 チャージーノ対生成, ...



質量の測定

$$\Delta m/m = O(0.1)\%$$

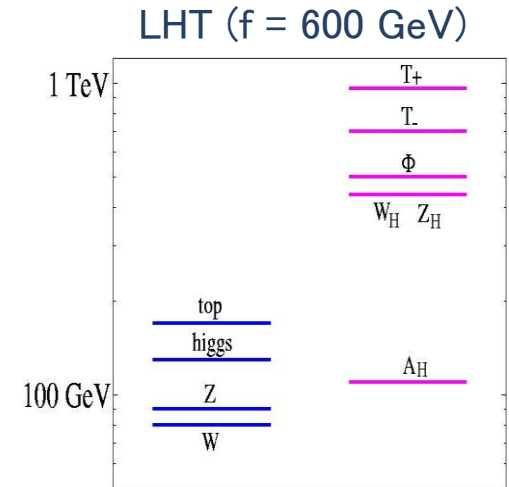
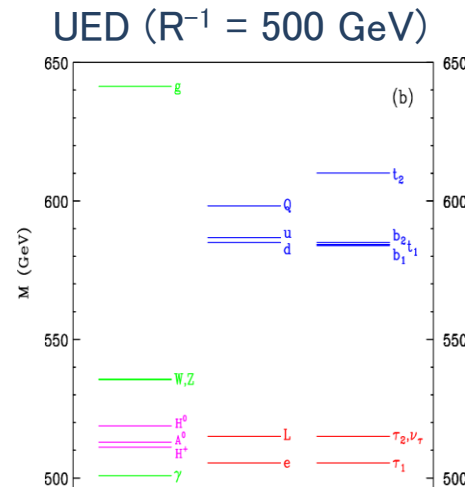
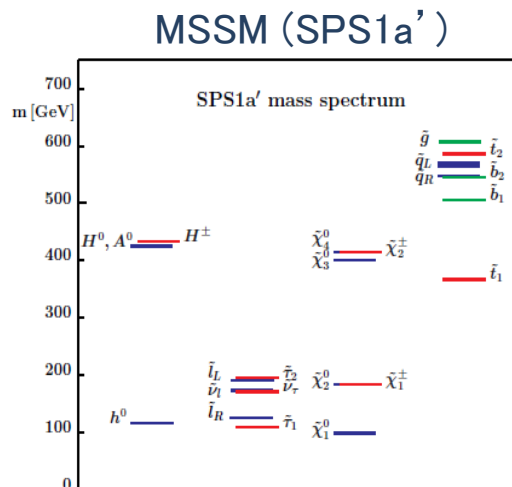
幸運なら $E=500\text{GeV}$
 で超分光可能



新粒子のスペクトルの例

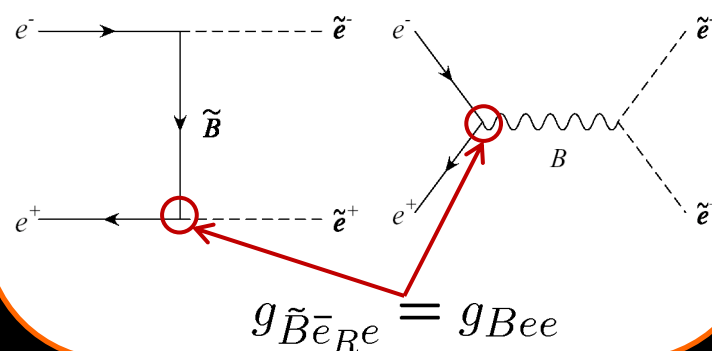
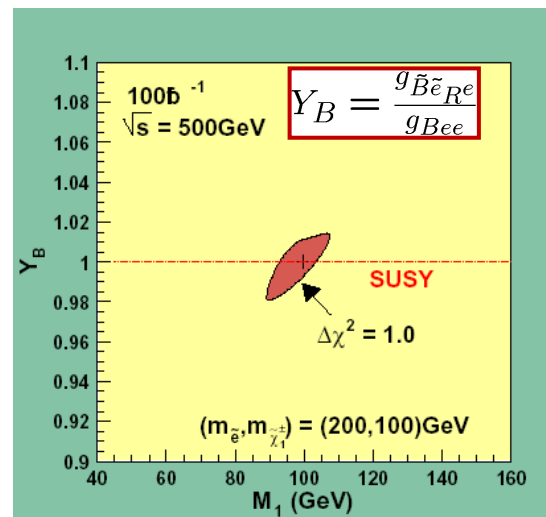
- 新粒子のスペクトルを調べて新物理のモデルを区別、決定することができる
 - 質量は0.1GeVの精度で測ること目指している@ILC

新粒子のスペクトルの例



新しい対称性の検証可能性 (SUSYの場合)

- 超対称性 = ボソンとフェルミオンの間の対称性
- 結合定数を精密に測ることで、超対称性を直接検証できる
- このように、新しい対称性を検証したり、発見するためにはILCの精密測定は大変重要な武器になる



Nojiri, Fujii, Tsukamoto, 1996

宇宙論とのコネクション ダークマターの精密測定

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \simeq \frac{0.1 \text{ pb} \cdot c}{\langle \sigma v \rangle}$$

$$\langle \sigma v \rangle \sim (g^2/4\pi)^2/m^2$$

ILCにおける超対称粒子の
質量と結合定数の精密測定が
ダークマターの正体を解明する

いろんな新物理モデルが暗黒物質
候補を含んでいる (離散対称性)

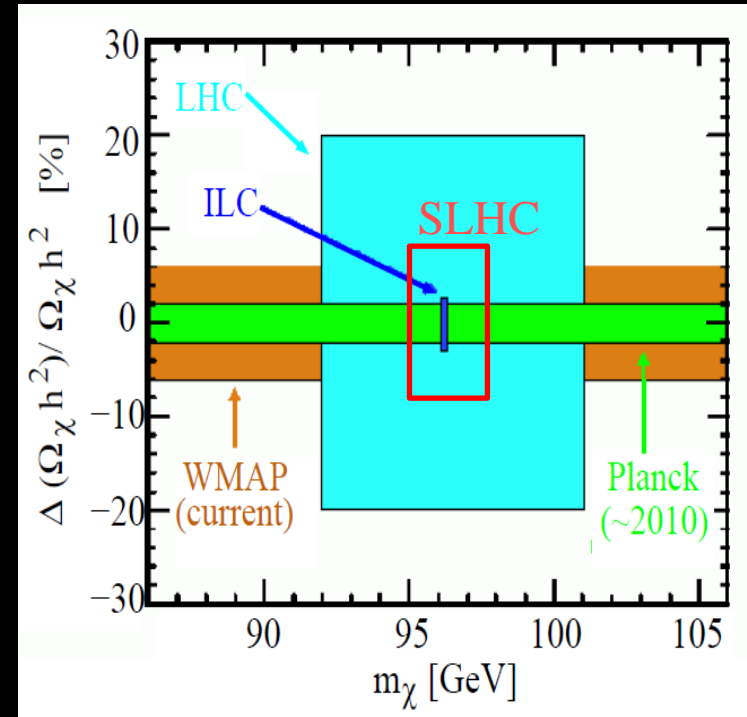
SUSY

UED

Littlest Higgs with T parity

Dark Higgs

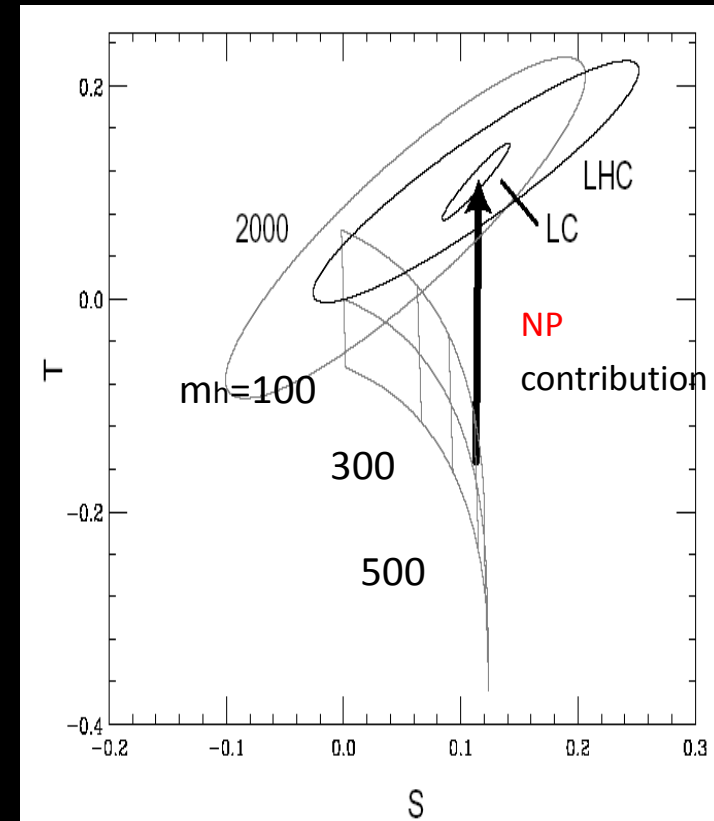
Radiative Seesaw



ニュートラリーノ質量、残存量
の精度 (cMSSMのシナリオSPS1a')

シナリオ2 (heavy-Higgs × NP-found)

- LEPに必ずしも矛盾しない
- MSSMではない新物理 (Low Λ)
- マルチTeVスケールで理論が強結合になるダイナミカルな模型
 - Technicolor
 - Fat Higgs models (SUSY)
- SLHCでのTeVの直接探索
- ILCでの重いヒッグス、New particlesの精密測定



Peskin, Wells (2001)

SUSY but “Fat” Higgs ...

Harnik, Kribs, Larson, Murayama (2004)

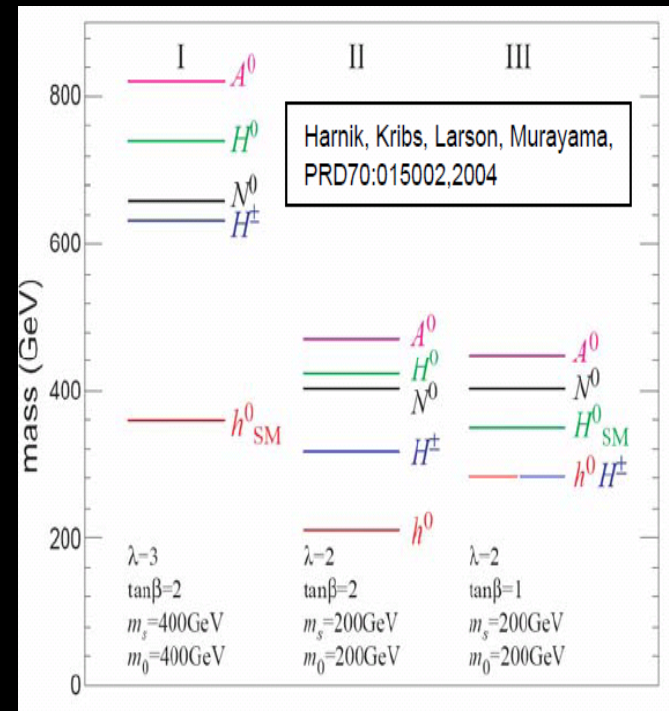
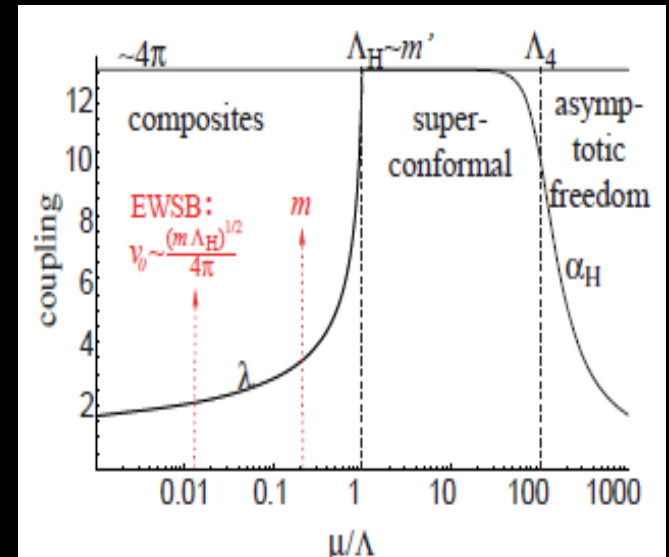
ヒッグスはマルチTeVで複合場に
低エネルギーでヒッグス H1, H2, S
Next-to MSSM (NMSSM) になっている

MSSMと異なりヒッグス質量は
ツリーで重くなれる

$$m_h^2 \simeq m_Z^2 \cos^2 2\beta + \underbrace{(\lambda_{HHS}^2 v^2 / 2)}_{\text{tree-level}} \sin^2 2\beta + \delta m_{\text{loop}}^2$$

SLHCによる重いヒッグス粒子の直接測定
ILCによる精密測定でスペクトル調べる

$$M_{H^\pm}^2 = M_A^2 - \lambda^2 v^2$$



シナリオ3 (No-Higgs × NP-found)

- Lee Quigg Thacker(1977) によるツリーユニタリティの概念では, ユニタリー性の為に1TeVまでにヒッグスが在るはず (あるいはTeVで強結合理論になり予言能力なくなる)

ヒッグスができていても見えてないだけ?

インビジブルなヒッグス崩壊

ダークマター

余剰次元 (Radion混合)

他の可能性 (ヒッグスレス)

例) ベクトル場 W' の導入によりユニタリティ救う

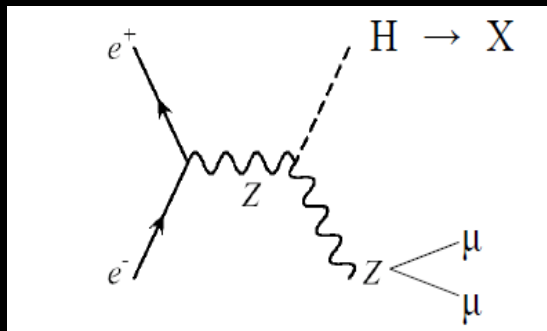
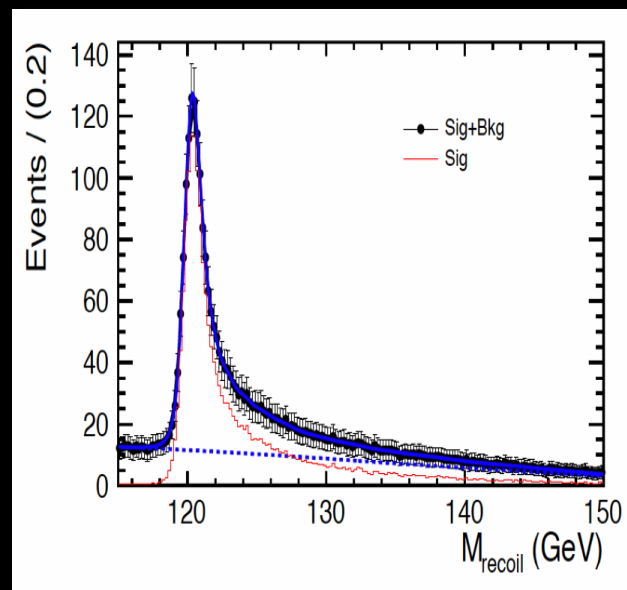
→

ヒッグスレス模型

ヒッグスのインビジブル崩壊

- ヒッグスポータル模型: ヒッグスが暗黒物質に崩壊
- 余剰次元: ヒッグスが Radion (見えない) に崩壊
- ILCではリコイルの考え方による模型に依存しない (ヒッグスの崩壊に依存しない) 解析が可能!

崩壊分岐比どうやって図る?
LHC, SLHC, ILC



$$\begin{aligned}
 m_X^2 &= p_X^2 \\
 &= s - 2\sqrt{s}E_Z + m_Z^2 \\
 &= s - 2\sqrt{s}E_{\mu\mu} + m_{\mu\mu}^2
 \end{aligned}$$

ILCの真骨頂!

ヒッグスポータルダークマター

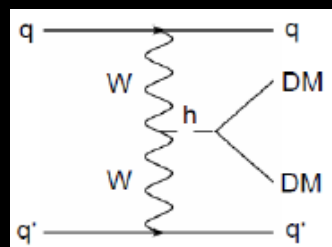
DMがヒッグスを通じてのみ
標準模型と相互作用する

$$L = c_{DM} DM^2 |\Phi|^2 \text{ の形}$$

このようなシナリオは
DM以外の新粒子が重い場合
に現れる (DM: Z_2 パリティ)

$m_{DM} < m_H/2$
なら Invisible 崩壊

LHC

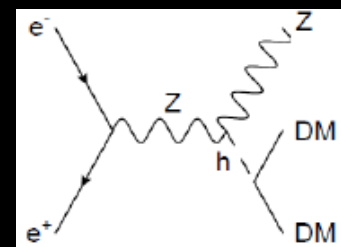


30fb^{-1} , $E=14\text{TeV}$

$Br > 0.50$ (95%CL)

Conf.@U. of Tokyo, 2009

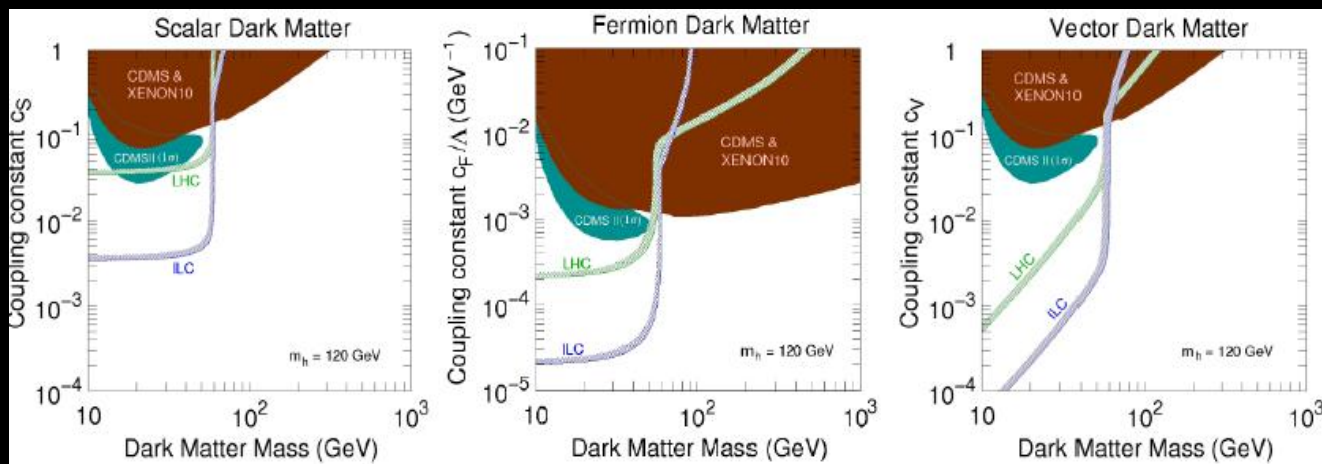
ILC



500fb^{-1} , $E = 350 \text{ GeV}$

$Br > 0.0095$ (95%CL)

M. Schumacher, 2003



SK, S. Matsumoto, N. Okada, T. Nabeshima, 2010

ヒッグスレスモデル

例) ベクトル場 W' の導入により

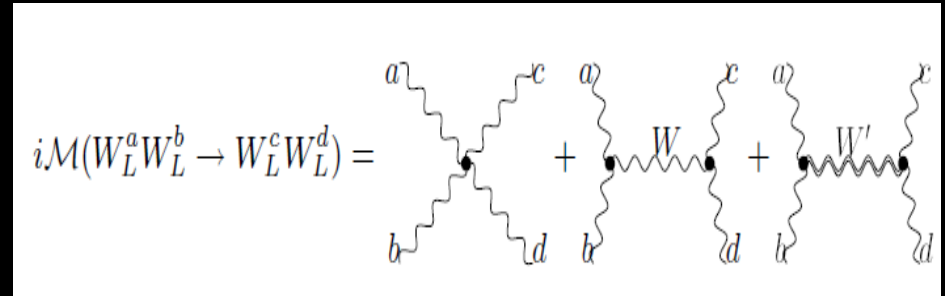
ユニタリティ救う

→ $W'W' \rightarrow W'W'$ 救うために

W'' が必要

→ W', W'', W''', \dots

→ KK Tower of the vector field



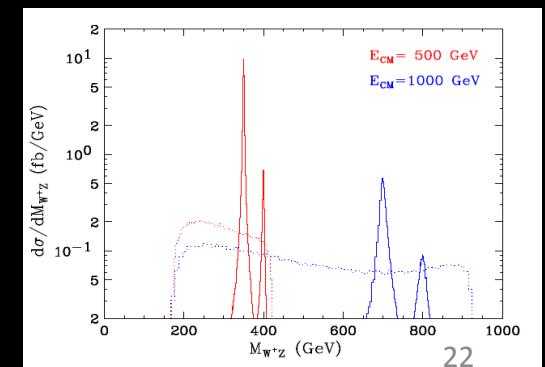
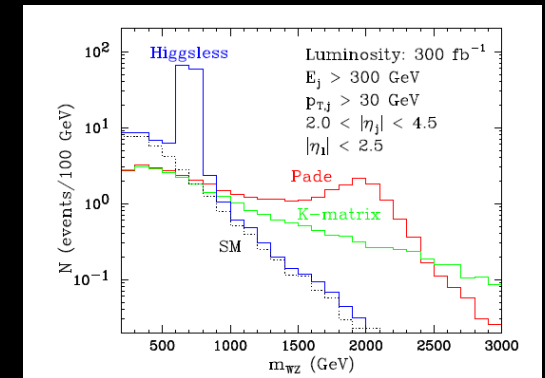
5Dのヒッグスレスモデル

Chivukula, Dicus, He, Csaki,
GrojeanMurayama, Pilo, Terning

Model	$WW \rightarrow WW$	$WZ \rightarrow WZ$	$WW \rightarrow ZZ$
SM	Yes	No	Yes
Higgsless	Yes	Yes	No

Resonance structure in WZ

Find (W'), W'' , ...



シナリオ4 (light-Higgs × no-NP)

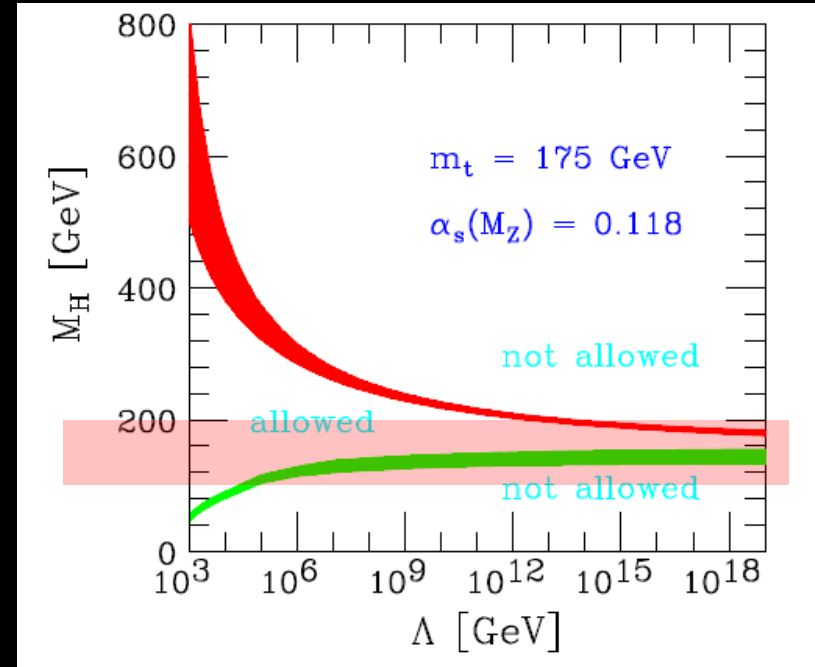
- LEPとコンシステントなシナリオ
- Very high Λ までSMは生き残れる

ストリングスケールまでSM？

- 階層性問題は残る
- 暗黒物質、ニュートリノ質量、宇宙のバリオン非対称も謎のまま
- GUTも無理,

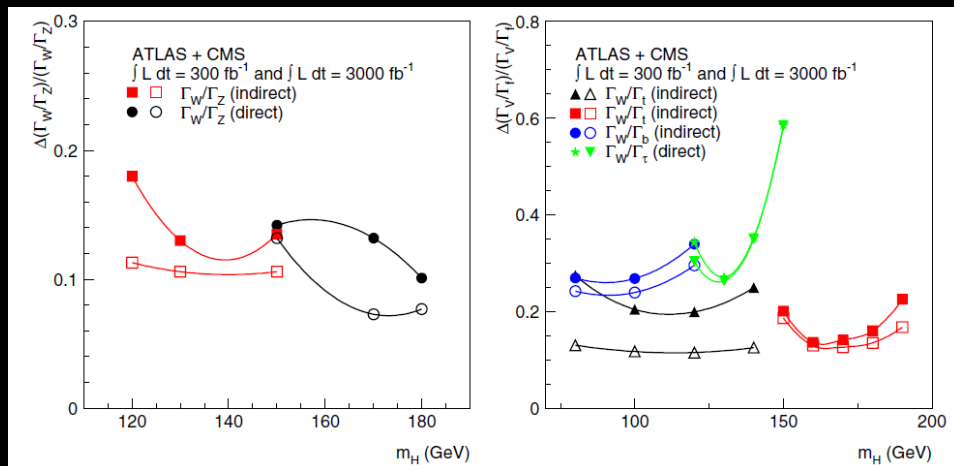
TeV領域でNPがあって”ほしい”

- もしNPのスケールがマルチTeV以下なら直接に探索可能 (SLHC)
- SM結合の精密測定で間接的に探索
- ヒッグス結合の精密測定 (質量起源)

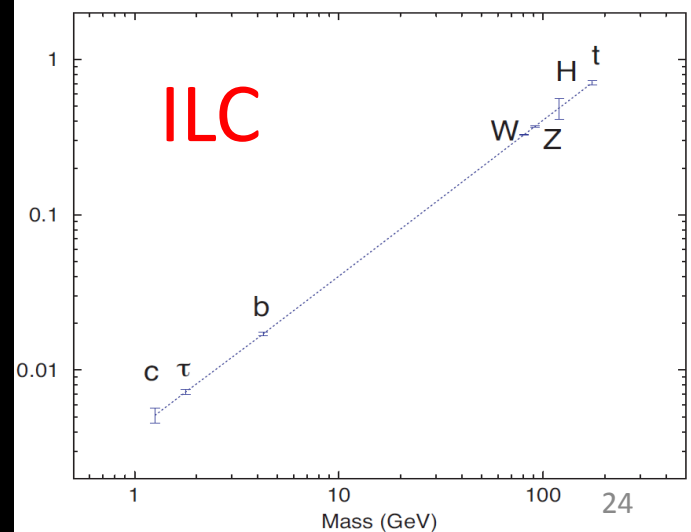
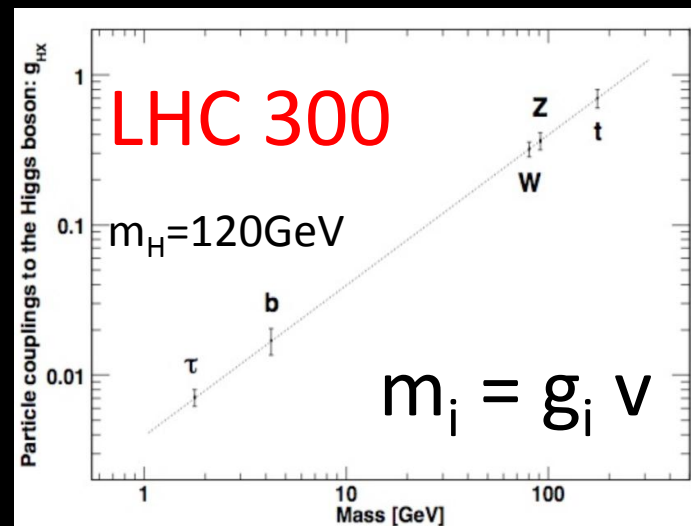


質量起源の検証

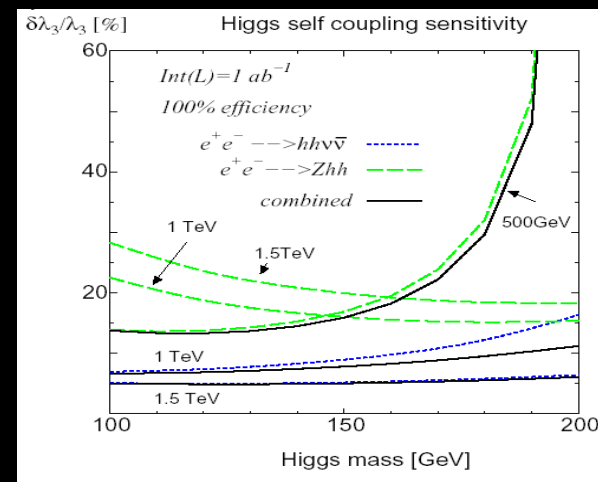
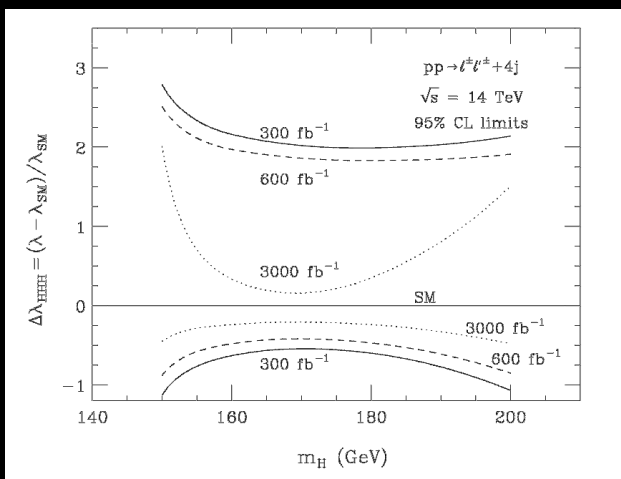
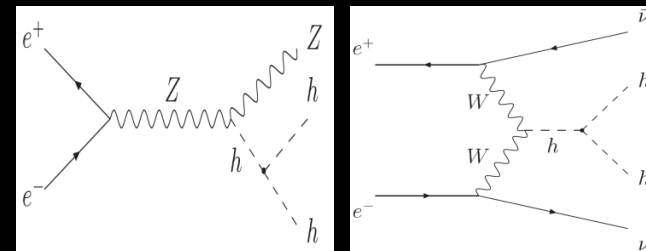
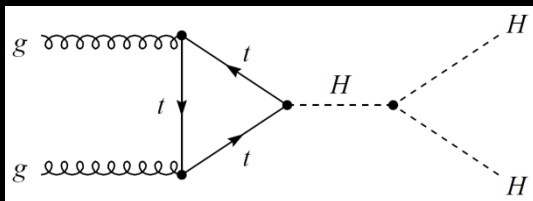
LHC, HL-LHCでの結合定数測定



- LHC(ハドロンコライダー)では比しか決まらず、結合定数決定には理論的な仮定が必要
- ILCでは絶対値が測れる
- $M_H < 140\text{GeV}$ での主崩壊モード(bb)が精度よく測れる [約2%]
SLHCでは > 30%



ヒッグス自己結合: SLHC VS ILC



- 現実的なシミュレーション研究中 (Challenging)
- **0(10)%での測定は、物理サイドからの絶対的要請**
 - ヒッグスポテンシャルの再構成
 - 電弱バリオン数生成のシナリオの検証
 - 新粒子が重いときのhhh測定による模型の区別

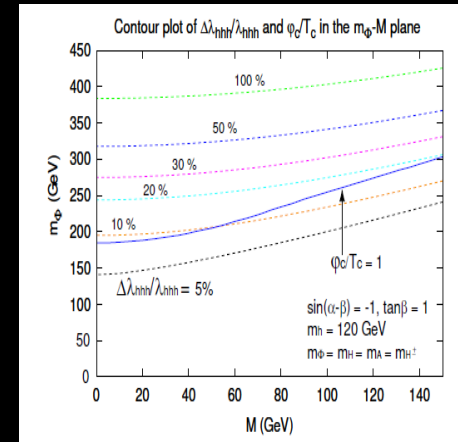
ヒッグス質量と自己結合、new physics

宇宙論とのコネクション

hhh結合のSMからのずれの大きさ
= 電弱相転移が強い一次的

$$V(\phi, T) \iff V(\phi)$$

電弱バリオン数生成のシナリオの検証



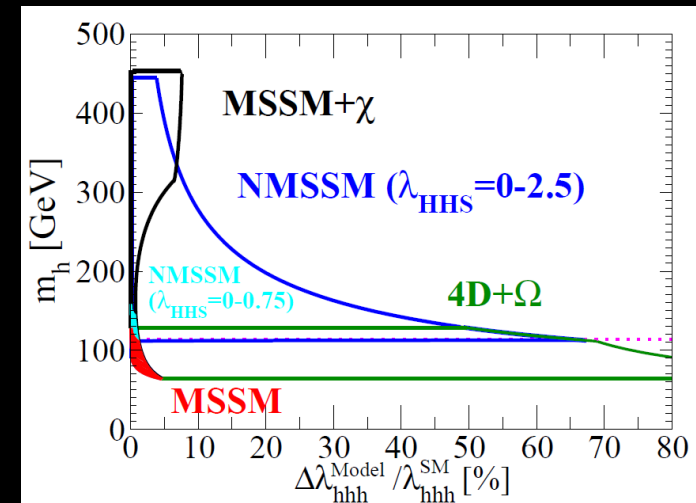
SK, Y. Okada, E. Senaha (2006)

SUSYヒッグスセクターの区別

- MSSM (2 Higgs doublets)
- MSSM + singlet (μ 問題)
- MSSM + triplets (Type-2 Seesaw)
- 4DSSM + charged singlets

(SUSY Radiative Seesaw)

- SUSY粒子が重くて直接見れなくても一番軽いヒッグス h の質量とhhh結合を測ることで各模型を区別できる

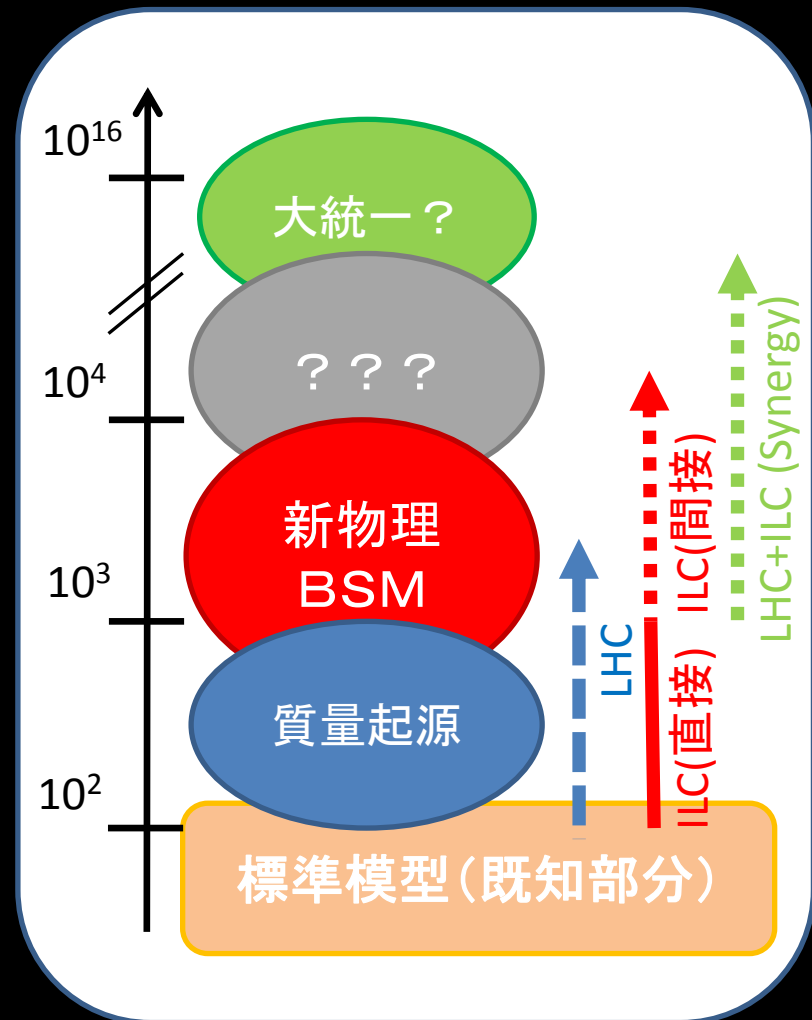


SK, T. Shindou, K. Yagyu, arXiv:1009.1836[hep-ph]

これらの検証にはhhh結合をO(10)%で測ることが必要

TeVより高いスケールの探索

- エネルギー的に直接新粒子は生成できないが、その効果が表れる物理量の精密測定により間接的に検証
 - 電弱パラメータ $\sin\theta_w$, m_w への量子効果
 - SMのゲージ結合、湯川結合に対する高次演算子の効果、異常結合の測定
 - 新しい力を媒介する重いゲージ場 (Z') の効果
 - 高次演算子による次世代スケールの検証



SLHC の直接探索 VS ILC の精密測定

Z'の探索

- ゲージ場 Z' はさまざまな模型で予言される
- LHCでDrell-Yanで直接生成

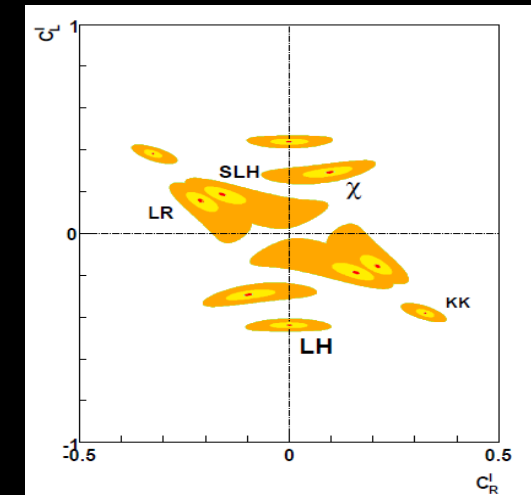
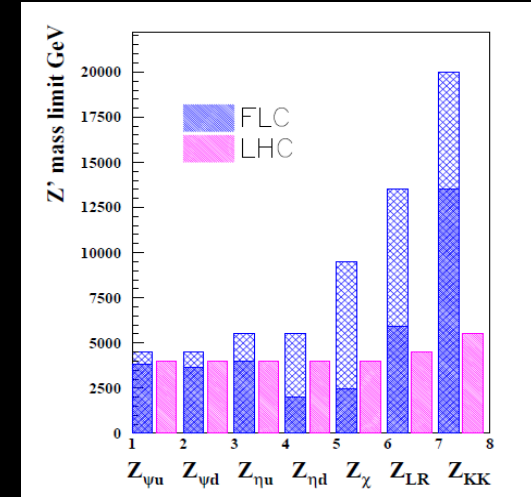
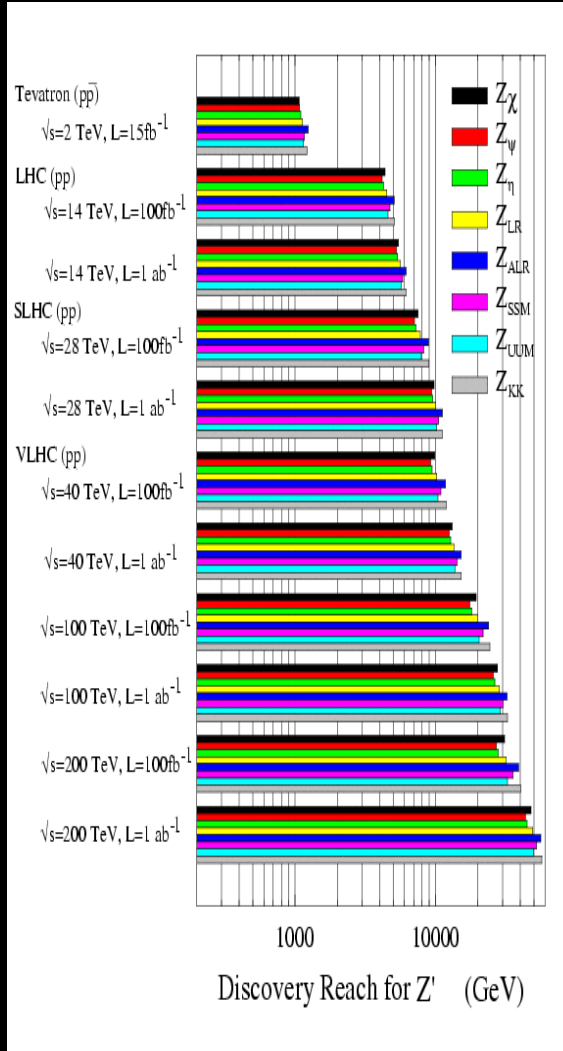
LHC (100 fb^{-1})

$m_{Z'} < 5 \text{ TeV}$

SLHC (1000 fb^{-1})

$m_{Z'} < 7 \text{ TeV}$

(S) LHCで見つかったら、
その質量の情報を使って、
ILCで結合定数を決めれる
模型を区別できる！



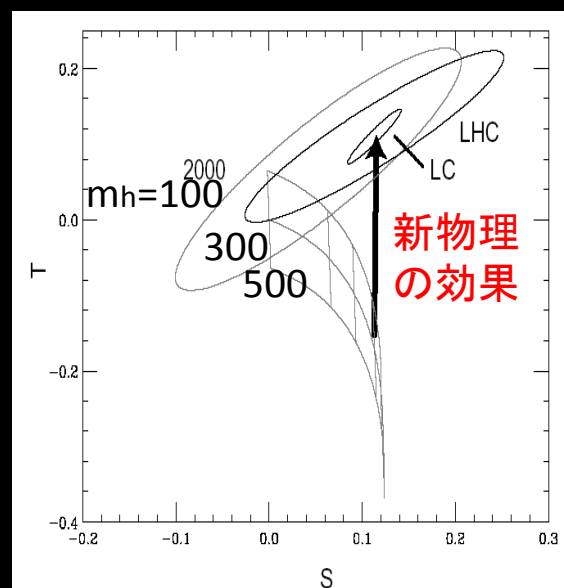
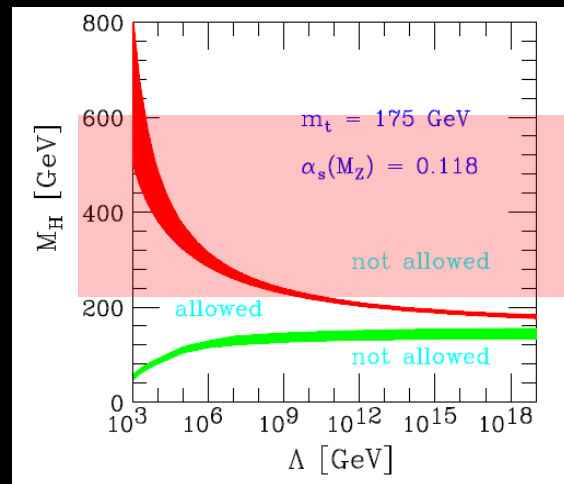
シナリオ5 (Heavy-Higgs × No-NP)

- ヒッグスは重いところに見つかった
- 他に何も見つからない
- Low Λ シナリオ
- 重いヒッグスはLEPと矛盾

⇒ 必ず何か**新しいダイナミクス**
が**TeV**になければならない

TeV領域の新粒子を発見せよ！

- SLHCのエネルギーリーチ **直接探索**
- ILCで重いヒッグスの**精密測定**



シナリオ6 (No-Higgs × No-NP)

- ヒッグスも何もなければ、ツリーレベル・ユニタリ
ティからTeV以上で電弱理論は強結合になる
この場合は理論の予言能力がなくなる
- あるいは、新粒子がヒッグスの代わりにユニタリ
ティを救う(例:ヒッグスレス模型)
- そのスケールに次世代加速器実験で直接間接に
到達可能なはず(シナリオ3に比べてNPの質量ス
ケールがやや高いだけ)

いずれにせよ、新物理の存在は確定的

- 興味深いシナリオだが...
- LHCで発見の成果がないシナリオ
- (SLHC、ILC実現のためには)悪夢のシナリオ

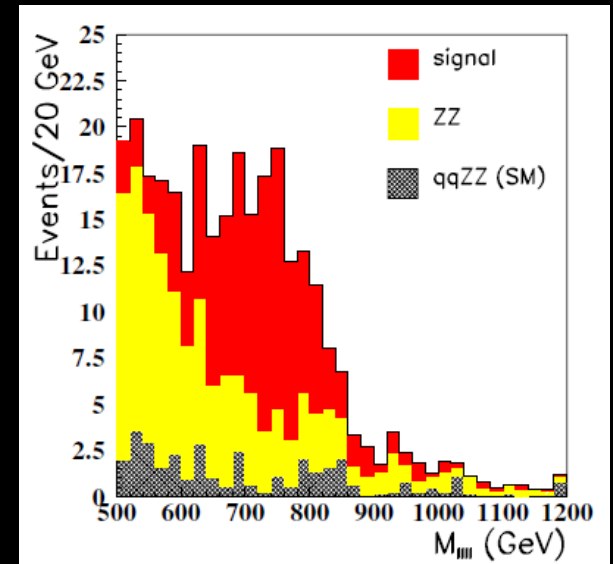
強結合WW, WZ共鳴

- TeV までヒッグスも新粒子も見つからない
- ⇒ 摂動ユニタリー性破綻
- ⇒ 強結合物理

- ρ 中間子のようなベクトル共鳴
- WW, WZ の共鳴として観測されるかもしれない

- エネルギーが足りれば線形加速器でも研究可能

Gianotti, et al., EPJC39, 293 (2005)



新物理の質量スケールが未定の際は粒子発見器としてのハドロン加速器のほうが有利?

まとめ

	light H	heavy H	no H	NewParticle	SLHC	ILC
シナリオ1	x			x	○	◎
シナリオ2		x		x	○	◎
シナリオ3			x	x	○	◎
シナリオ4	x				△	◎
シナリオ5		x			◎	△
シナリオ6			x		◎	○

二者択一という意味ではありません

新たな粒子、現象の発見
精密測定とラグランジアン構成

ハドロンコライダー SLHC
レプトンコライダー ILC

Back up



Indicative Physics Reach



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

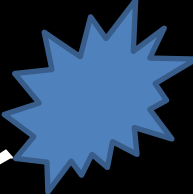
† indirect reach
(from precision measurements)

Approximate mass reach machines:

$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}, L=10^{34} \text{ (LHC)}$: up to $\approx 6.5 \text{ TeV}$

$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}, L=10^{35} \text{ (SLHC)}$: up to $\approx 8 \text{ TeV}$

$\sqrt{s} = 28 \text{ TeV}, L=10^{34}$: up to $\approx 10 \text{ TeV}$



標準模型ヒッグスの崩壊分岐比

- 軽い場合 ($m_h < 140\text{GeV}$)

$bb, \tau\tau, cc$ (Yukawa)

gg (top-loop)

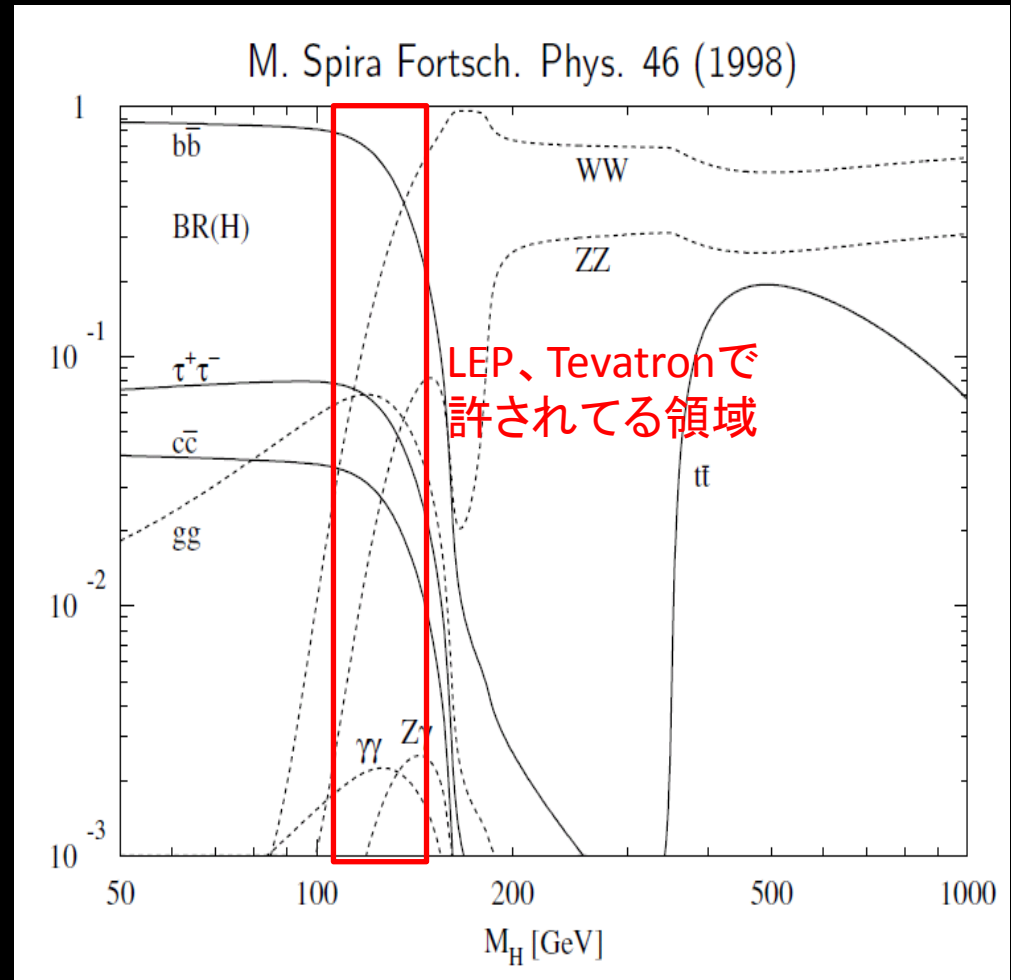
$\gamma\gamma$ (W-loop, top-loop)

- より重い場合

ほとんどゲージ場に行く

$WW(*), ZZ(*)$

tt (never dominant)



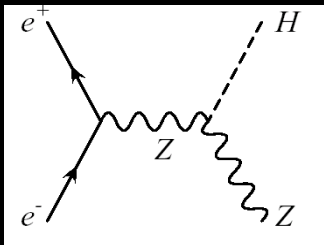
LEP, Tevatronからの制限



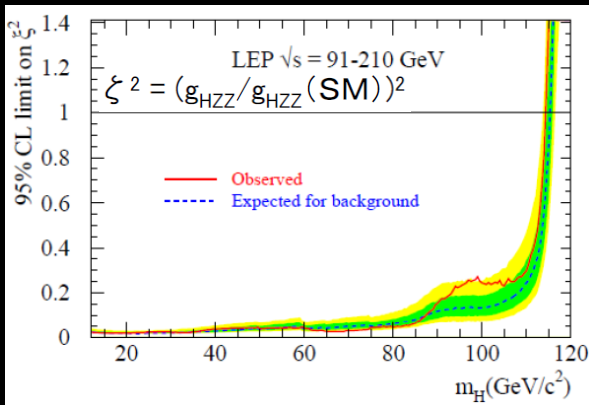
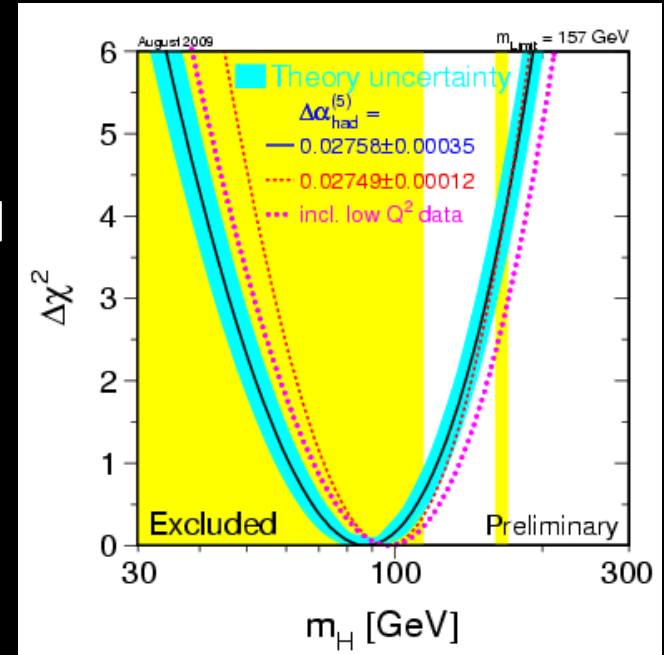
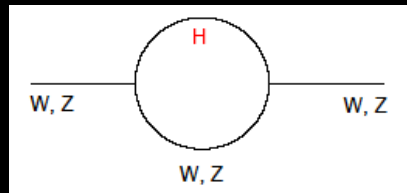
Search at LEP

$114 < m_H < 144 \text{ GeV}$ (95% CL)
 185 GeV (95% CL) [incl. direct search]

Direct search



Indirect bound via the oblique correction



$$(\Delta\rho)^{1-Higgs} \sim -\frac{3G_\mu M_W^2 \sin^2 \theta_W}{8\sqrt{2}\pi^2 \cos^2 \theta_W} \log\left(\frac{M_H^2}{M_W^2}\right)$$

In the SM, a light Higgs (< 200 GeV) is favored from both theory (triviality) and the data

At Tevatron $160 < m_H < 170 \text{ GeV}$ excluded. 37

LEP, Tevatron からの制限

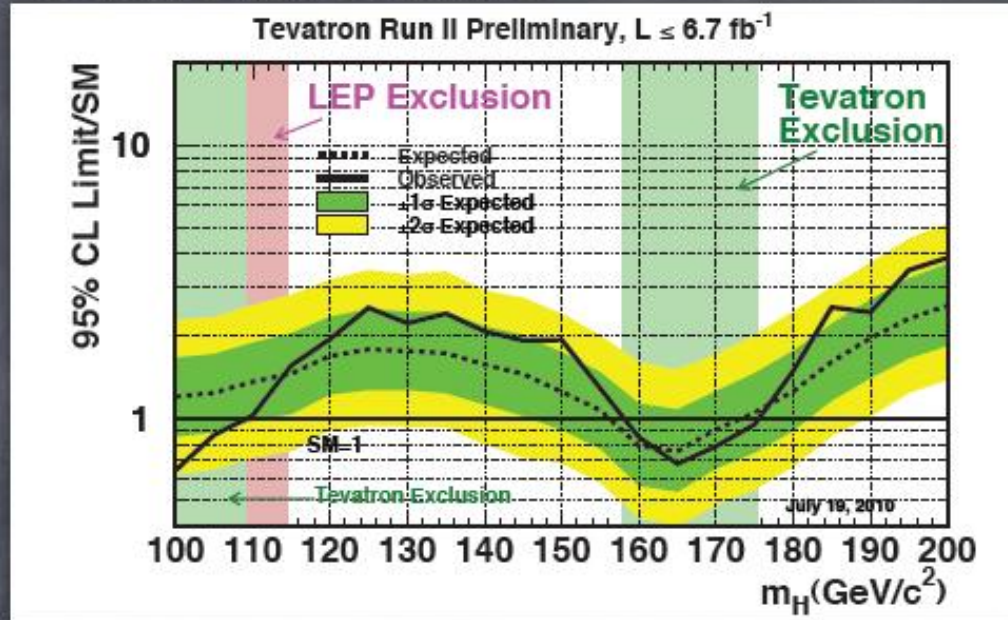


Conclusions

Ben Kilminster

ICHEP 2010

July 26, 2010



- Higgs has no place to hide !
 - ▶ Squeezing allowed mass from both sides
 - 95% CL Exclusion $158 < m_H < 175 \text{ GeV}$ (about expected)
 - Limit $1.5 \times \text{SM}$ @ 115 GeV
- BSM searches : consistent with SM
 - ▶ 2 sigma is largest discrepancy in CDF MSSM $H \rightarrow b\bar{b}$ (so far)

LEP, Tevatron からの制限



Ben Kilminster

Prospects for Higgs evidence

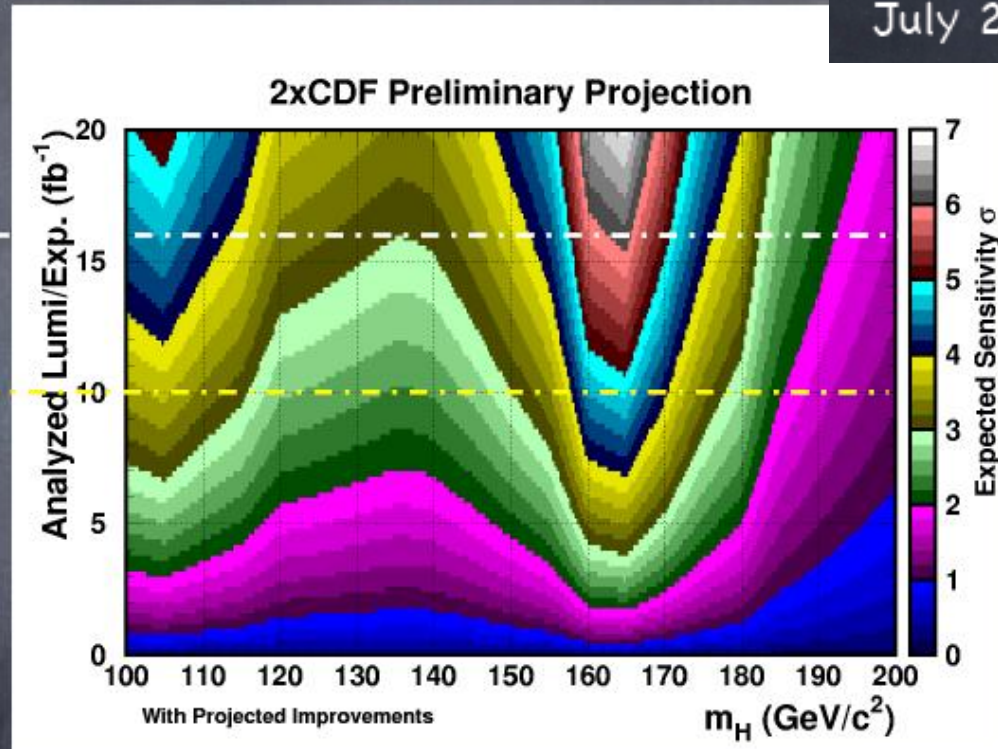
ICHEP 2010
July 26, 2010

~16 fb⁻¹ :*

> 3 σ expected
sensitivity from
100 - 185 GeV
4 σ @ 115 GeV

End of 2011: - - -

> 2.4 σ expected
sensitivity across mass
range
3 σ at 115 GeV



* 16 fb⁻¹ : based on "Run III" proposal to run 3 more years

LHCでの結合定数の測定

$$\sigma(H)BR(H \rightarrow X) = \frac{\sigma(H)^{SM} \Gamma_p \Gamma_X}{\Gamma_p^{SM} \Gamma}$$

To be measured

Duhrssen, Heinemeyer, Logan, Rainwater,
Weiglein, Zeppenfeld hep-ph/0406323

$$\Gamma_g, \Gamma_W, \Gamma_Z, \Gamma_\gamma, \Gamma_\tau, \Gamma_b, y_t^2$$

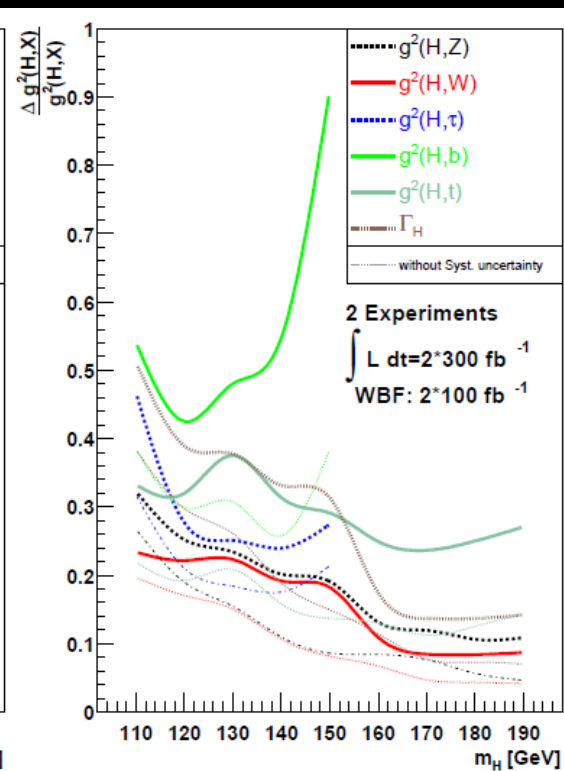
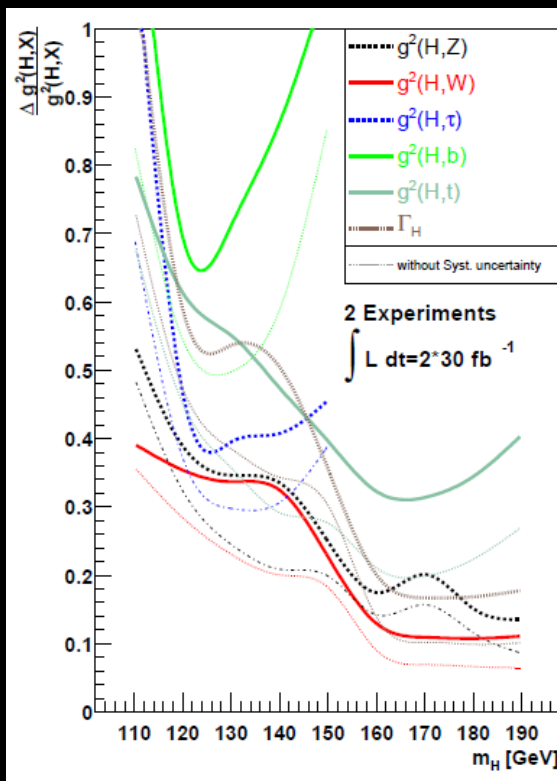
gg→H → WW なら
($\Gamma_g \Gamma_W$)/ Γ が測られる

V=W,Zに対して理論的な
仮定を入れる

$$\Gamma_V < \Gamma_V^{SM}$$

Relative precision of
coupling-square

25-35% for g_{ttH}^2 and $g_{\tau\tau H}^2$
10-25% for g_{VVH}^2
40-60% for g_{bbH}^2

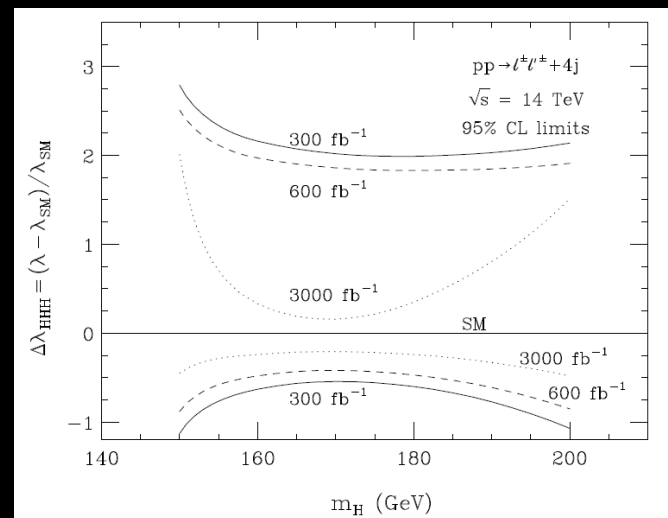
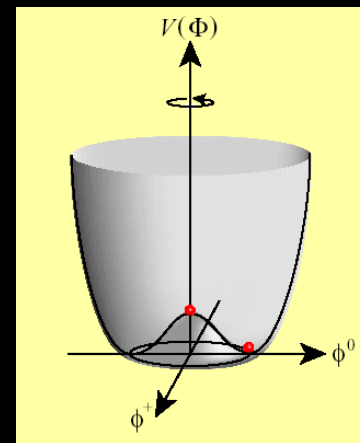
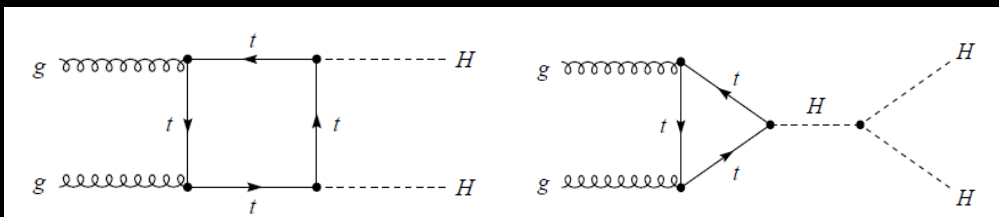


LHCでのヒッグス自己結合の測定

ヒッグス自己結合

- ヒッグスポテンシャルの構造を解明し、対称性の破れの本質の理解に必要
- **hhh結合を測定することでのみ可能**
- LHC 300では困難
- LHC 3000: 20-40% ($m_h=160-180\text{GeV}$)
- 自己結合が**あるかないか**はわかる

$150\text{GeV} < m_h < 200\text{GeV}$

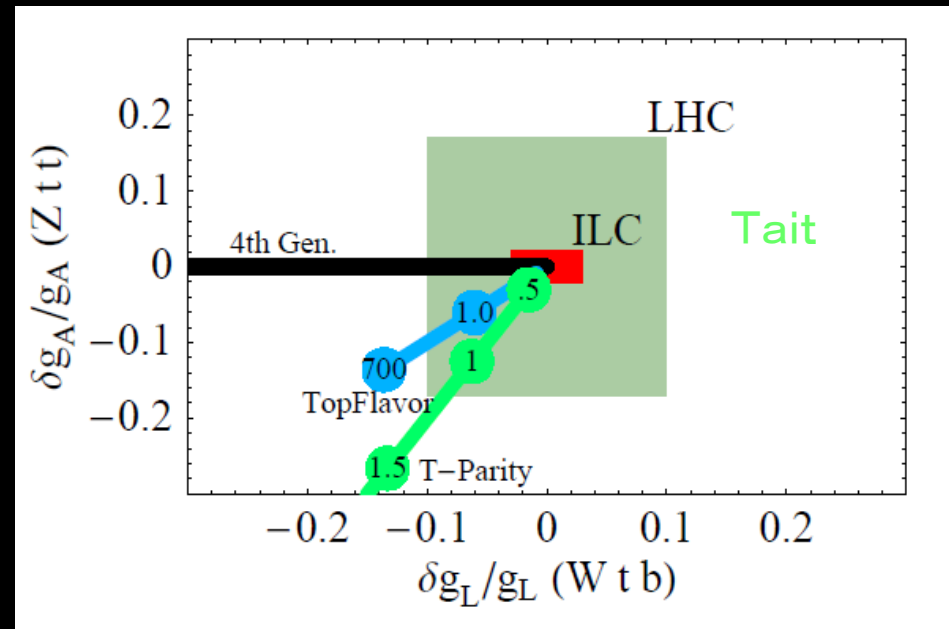


$M_h < 150\text{GeV}$ ならLHCでは事実上測定不能！

Bauer, Plehn, Reinwater, 2002

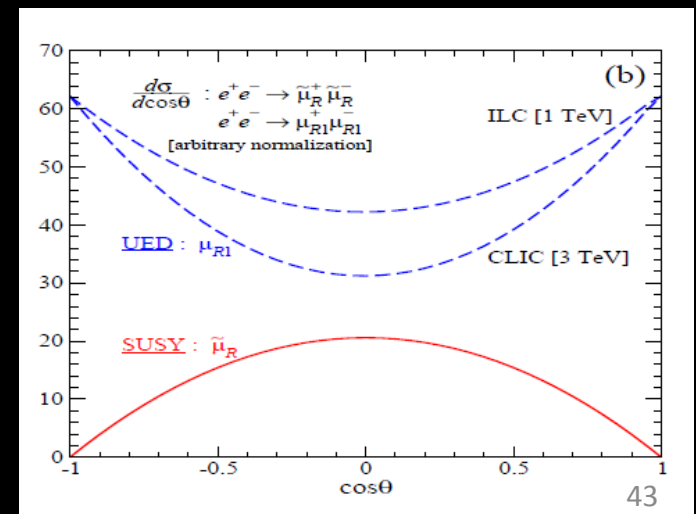
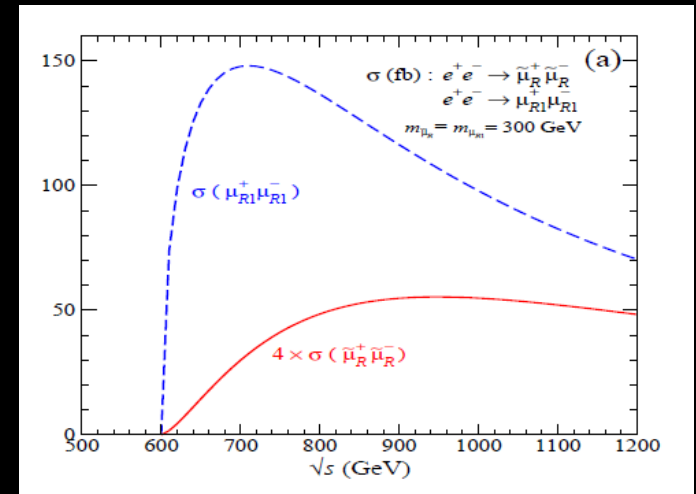
異常結合定数

- SMの結合定数に現れる新しい物理模型の効果を計算し、精密測定で新物理模型を区別する
- 例) Ztt , Wtb の精密測定でトップクォークと関係する新物理模型を区別できる



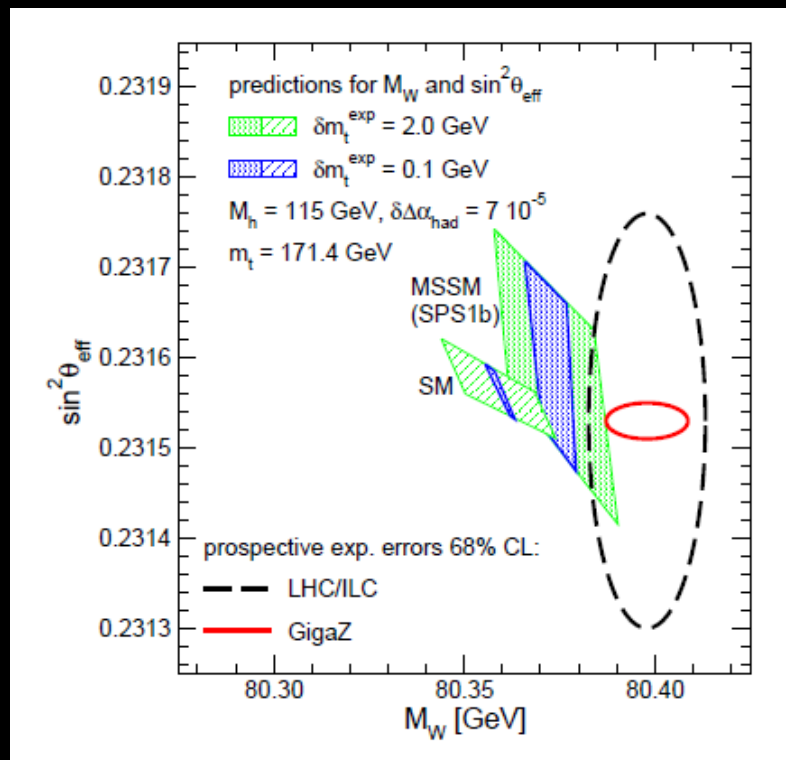
スピンの測定と模型の区別

- MSSMとUEDはスペクトルが似ている
- SLHC to be written
- ILC
 - 閾値での振る舞い
 - 角度分布
- 区別可能



精密測定

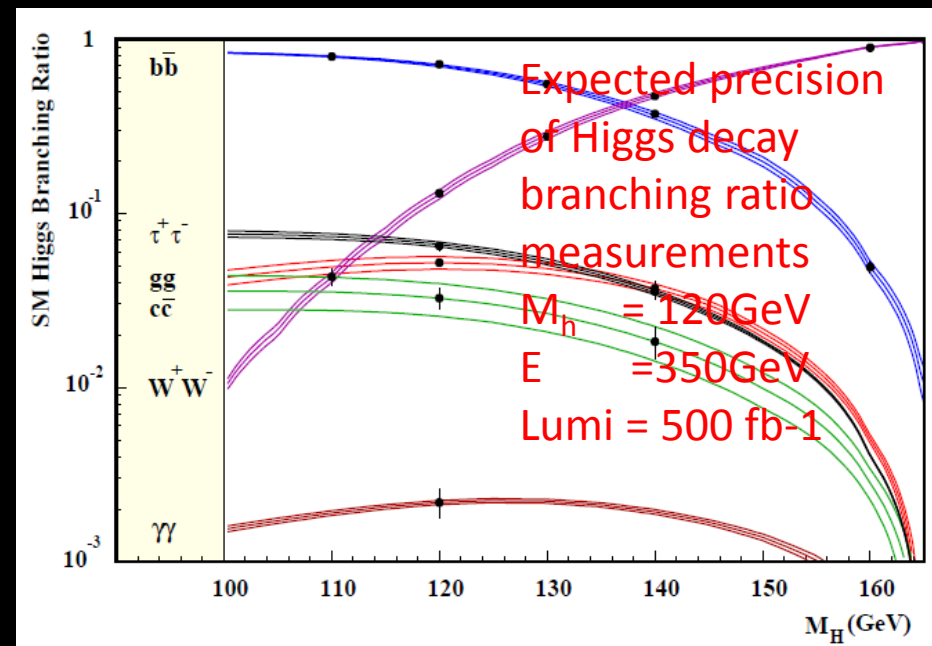
- 新物理模型の量子効果の研究
- 電弱パラメータの精密測定
- GigaZ/MegaW
- LEP実験のより高い精度でやり直す
- 新物理模型のシナリオを分別できる



ILCでのヒッグス崩壊分岐比の測定

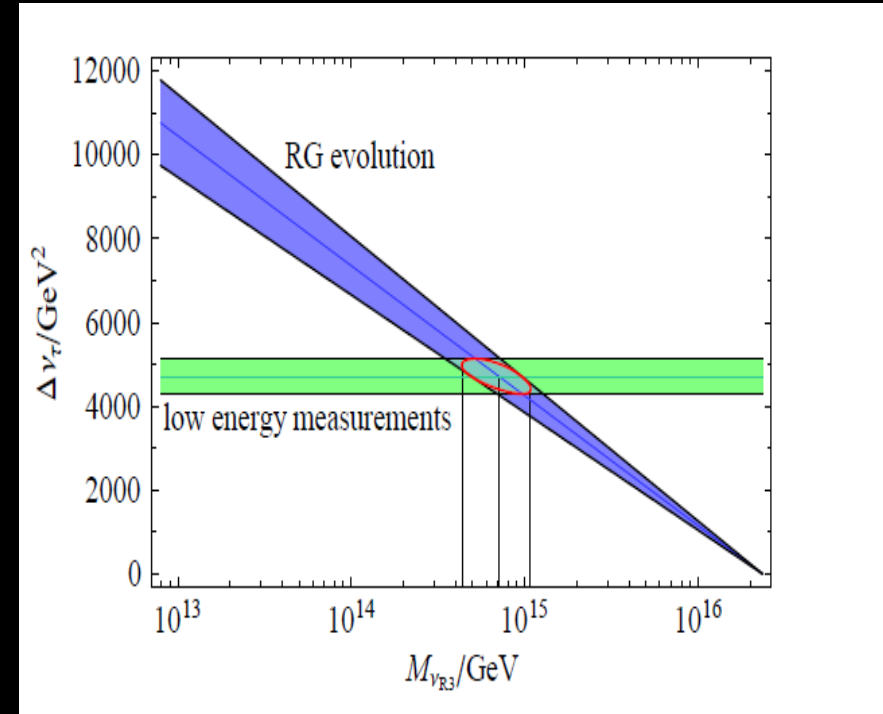
- LHCでは比しか決まらず、結合定数決定には理論的な仮定が必要だった
- ILCでは絶対値が測れる
- $M_H < 140\text{GeV}$ での主崩壊モード(bb)が精度よく測れる [約2%]
SLHCでは > 20%

Decay mode	Relative precision (%)
$b\bar{b}$	1.0–2.4
$c\bar{c}$	8.1–12.3
$\tau^+\tau^-$	4.6–7.1
gg	4.8–10
WW	3.6–5.3
$\gamma\gamma$	23–35



右巻きニュートリノ質量のスケール (レプトジェネシスのシナリオ)

- シーソー機構
 - 非常に高いスケールのマヨラナ質量をもつ右巻きニュートリノを導入
- レプトジェネシス
 - 右巻きニュートリノのCP破れ相互作用を通じた崩壊によるレプトン数生成
 - スファレロン過程
 - バリオン数に転化



Freitas, Porod, Zerwas, 2005

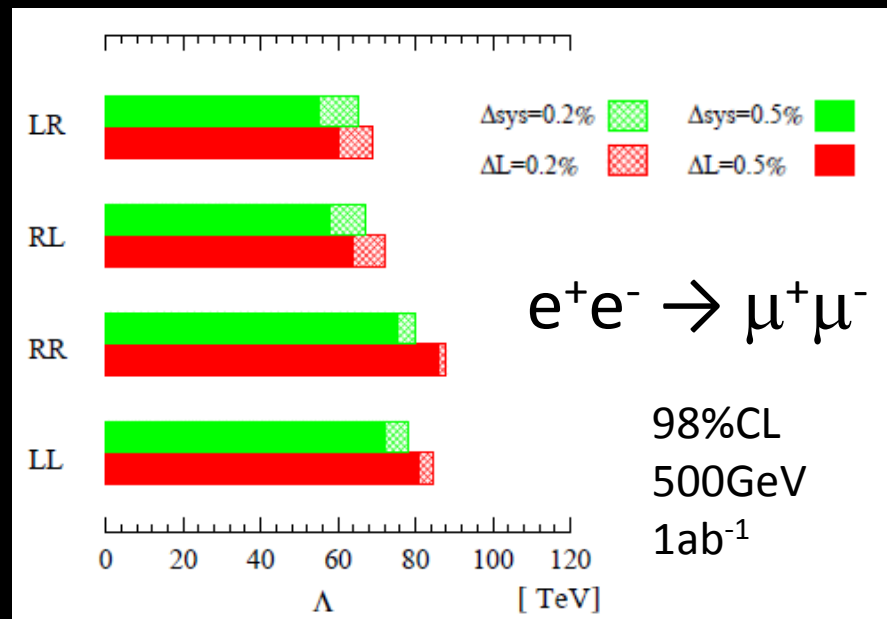
$$\Delta_\nu \sim \log(M_{\text{GUT}}/M_{\text{RN}})$$

Δ_ν = Slepton の質量²の差で表せる

ILCでスレプトン質量の精密測定をすることにより、重い右巻きニュートリノのマヨラナ質量に対する情報が得られるかもしれない

高次演算子at ILC

- 高次(dim6)演算子の効果は Λ (新物理のスケール)の情報与える
- 精密測定で効果が見えない \Rightarrow Λ に制限がつく



$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \sum_{i,j=L,R} \eta_{ij} \frac{4\pi}{\Lambda^2} \bar{e}_i \gamma^\mu e_i \cdot \bar{f}_j \gamma_\mu f_j$$

