

# Physics at the ILC

Shigeki Matsumoto  
(University of Toyama)

## 内容

1. ILCにおける物理の目的
2. Higgs(電弱スケール)の物理
3. テラスケールの物理
4. テラスケールを超える物理
5. 宇宙論とのコネクション

## ILCにおける物理の 目的

- テラスケールの物理(ラグランジアン)を確定し, さらに高いエネルギースケールの物理を探索する足がかり作ること!

この目的にはLHCとのコネクションが必要!

- 宇宙物理学とのコネクションを確立し, 宇宙暗黒物質問題をはじめとする様々な宇宙に関する問題の解決を目指す!

# ILCにおける物理の 目的

なぜテラスケールが大事なのか？

ヒエラルキー問題と暗黒物質問題がテラスケールにおける新物理の存在を示唆！

～ ヒエラルキー問題 ～



何%程度の微調整が必要か？

$$\text{Bare} + \text{Corr.} = m_h^2$$
$$\text{Tuning level} \sim \text{Corr.}/m_h^2$$

Tuning levelは $m_h$ や $\Lambda$ に依存！

例.  $m_h = 120 \text{ GeV}$  のとき  
微調整が10%以下ならば,  
 $\Lambda_{\text{SM}} < 2 \text{ TeV}$

微調整が1%以下ならば,  
 $\Lambda_{\text{SM}} < 7 \text{ TeV}$

[C. Kolda & H. Murayama, 2000]



新しい物理はテラスケールに現れる可能性大！

# ILCにおける物理の 目的

なぜテラスケールが大事なのか？

ヒエラルキー問題と暗黒物質問題がテラスケールにおける新物理の存在を示唆！

～ 暗黒物質問題 ～

我々の宇宙には

- 電氣的(色的)に中性
- 宇宙年齢に比べ安定
- 非相対論的な運動
- 密度が $10^{-6}[\text{GeV}/\text{cm}^3]$

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

なる未知なる存在あり！

WIMP 暗黒物質仮説

弱い相互作用程度の強さの相互作用を持つ,  $O(1)$  TeV 質量の安定な中性素粒子

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

$$\langle \sigma v \rangle \sim \alpha^2/m^2 \ \& \ \alpha \sim g^2/4\pi \quad \Omega_{\text{DM}} h^2 = 0.1$$

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



新粒子(暗黒物質)がテラスケールにある可能性！

# ILCにおける物理の 目的

なぜテラスケールが大事なのか？

ヒエラルキー問題と暗黒物質問題がテラスケールにおける新物理の存在を示唆！

～ ヒエラルキー問題 ～

～ 暗黒物質問題 ～



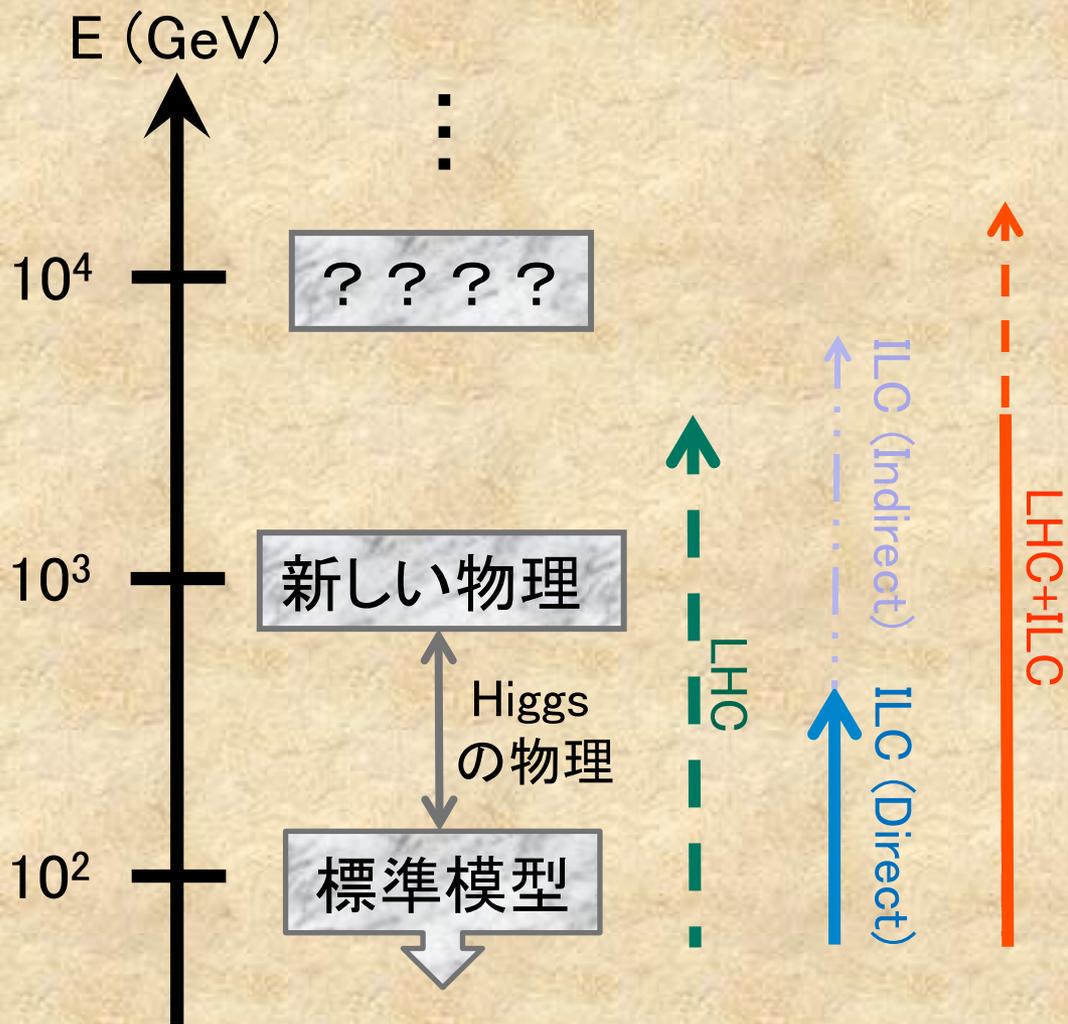
全く独立な両問題がともにテラスケールに  
新しい物理が存在する可能性を示唆！

更に重要なこととして

LHCから新しい物理のスケールが  
具体的に判明する可能性大！

# ILCにおける物理の 目的

テラスケールの物理(ラグランジアン)を確定し, さらに高いエネルギースケールを探る



## LHCにおける物理

- Higgs 粒子(達)の発見
- Colored 新粒子の発見
- 他の新粒子(達)の発見
- 新粒子(達)の性質探査

## ILC(Direct)における物理

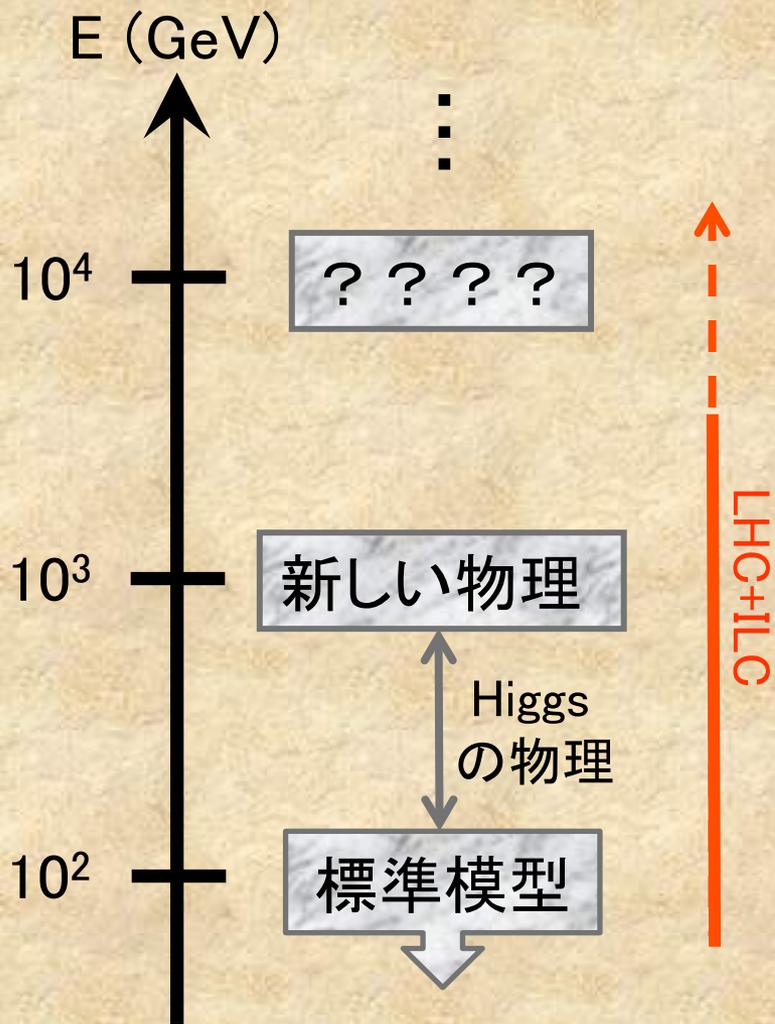
- Higgs 粒子(達)の性質決定
- 軽い新粒子(達)の性質決定
- 新粒子の相互作用決定
- 新物理の対称性の証明

## ILC(Indirect)における物理

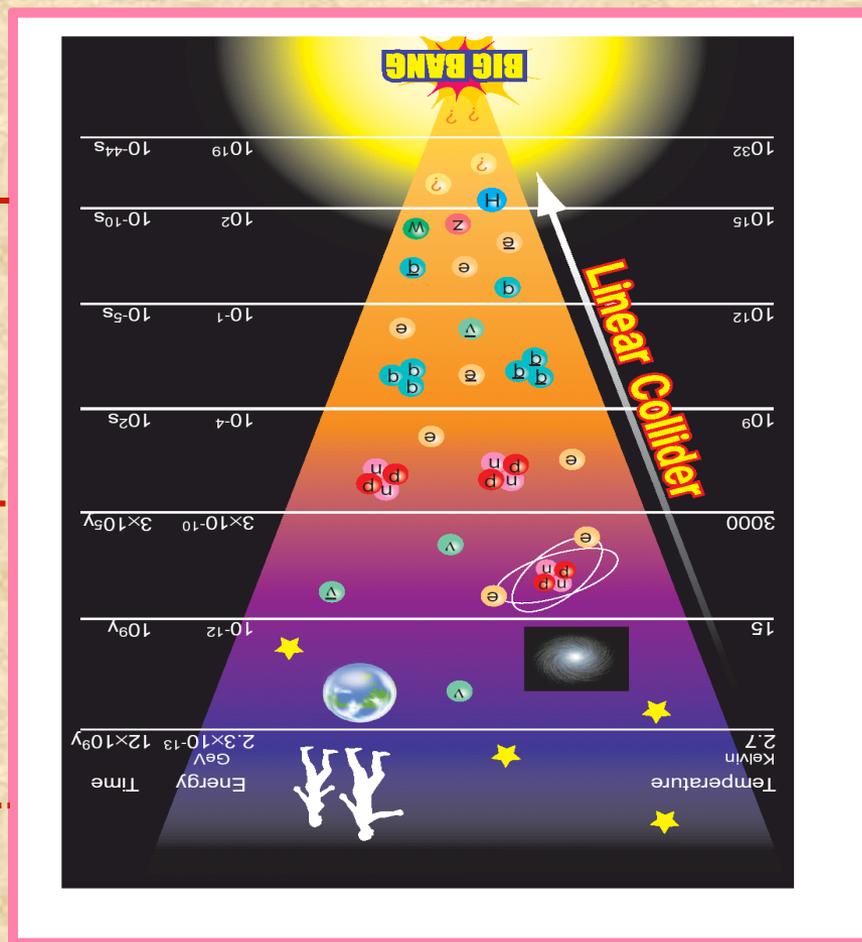
- 間接検出を用いた重い新粒子の性質の決定
- 精密測定を通じた非常に高いスケールの物理探査

# ILCにおける物理の 目的

テラスケールの物理(ラグランジアン)を確定し, さらに高いエネルギースケールを探る

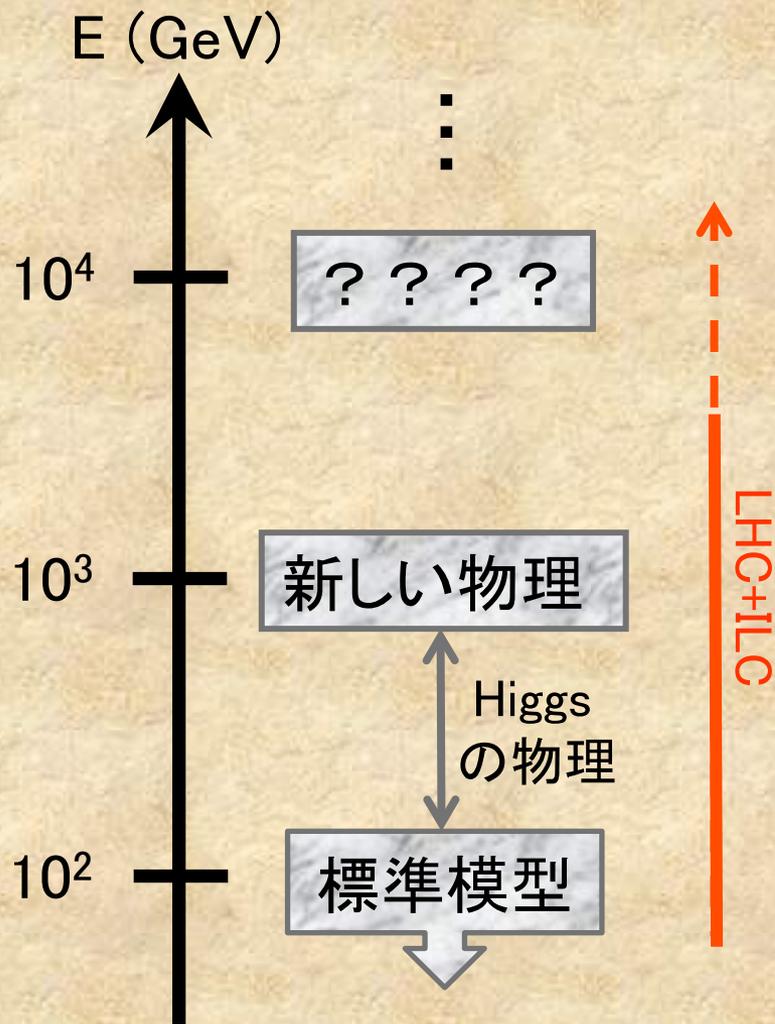


## 宇宙の熱史の解明



# ILCにおける物理の 目的

テラスケールの物理(ラグランジアン)が確定すると, 様々な分野に重要な影響を及ぼす.  
例えば, 宇宙論(初期宇宙における熱史)や, 天文学(銀河や銀河団内の質量分布等)



暗黒物質の性質が解明されると

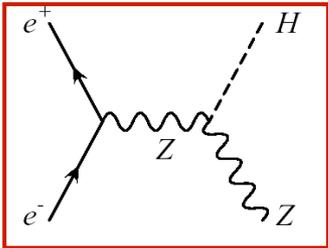


暗黒物質の性質や相互作用  
→ 対消滅断面積,  $\gamma$ 線のスペクトル  
→  $\gamma$ 線観測との比較から, 暗黒物質の銀河内分布が判明!

# ILCにおけるHiggsの物理

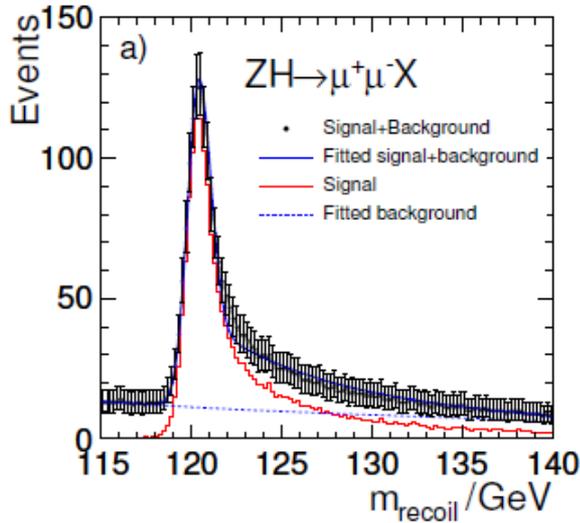
Energy scale diagram showing  $E$  (GeV) on a logarithmic scale from  $10^2$  to  $10^4$ . The diagram is divided into three regions: '標準模型' (Standard Model) at the bottom, 'Higgsの物理' (Higgs physics) in the middle, and '新しい物理' (New physics) at the top. A box with '????' is located above the '新しい物理' region.

- ヒッグス粒子を見つけてその性質をきちんと調べることは、電弱対称性の自発的な破れを理解するために最重要！
- LHCでHiggs粒子が発見される可能性大！ ILCの役目はヒッグス粒子の持つ様々な相互作用の結合定数を精密に調べることでヒッグス機構を実験的に明らかにすること！
- ヒッグスセクターはテラスケールの物理探査の第一歩！
  - ・ 複数のヒッグス粒子が電弱スケールに存在する可能性
  - ・ 多くの新粒子がヒッグス粒子と相互作用を持つ可能性



$m_H = 120 \text{ GeV}$   
 $s^{1/2} = 250 \text{ GeV}$   
 $\text{Lum.} = 250 \text{ fb}^{-1}$   
 $P(e^+) = +30\%$   
 $P(e^-) = -80\%$

## ～ ILCにおけるヒッグス生成 ～



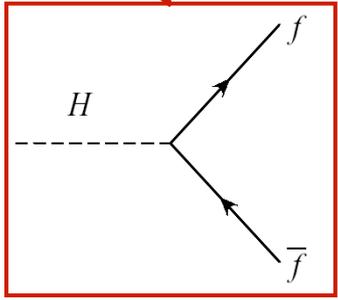
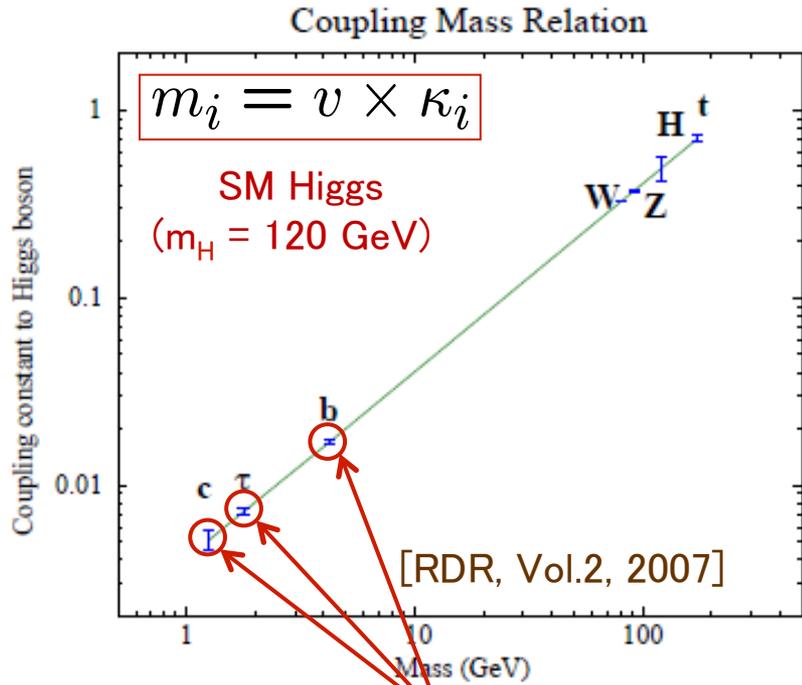
$\sigma : 3.6 \%$   
 $m_H : 40 \text{ MeV}$

HiggsのspinやCPも  
 Threshold scan  
 Angular distribution  
 等から決定可能！

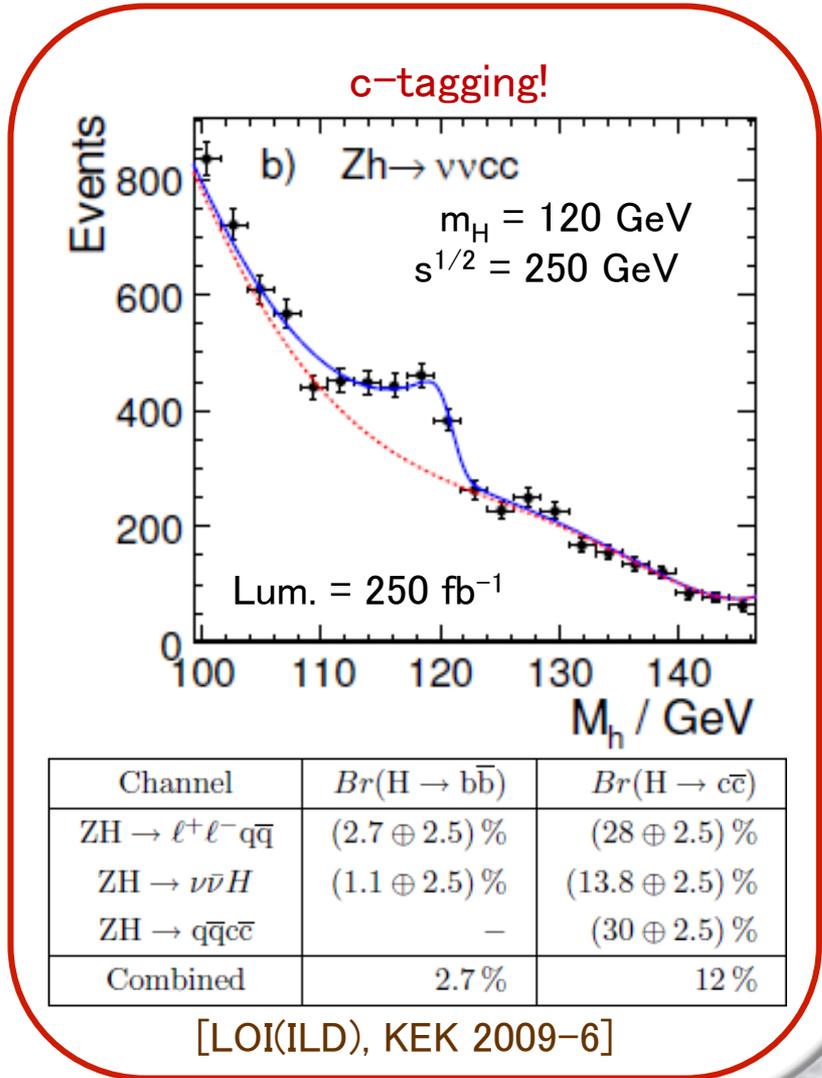
[LOI(ILD), KEK 2009-6]

# ILCにおけるHiggsの物理

## ～ ヒッグスの結合定数測定 ～

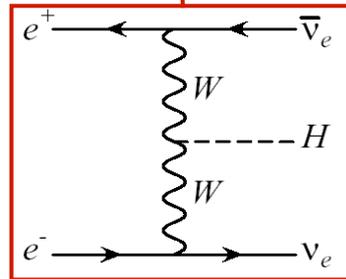
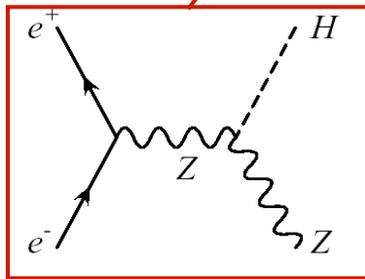
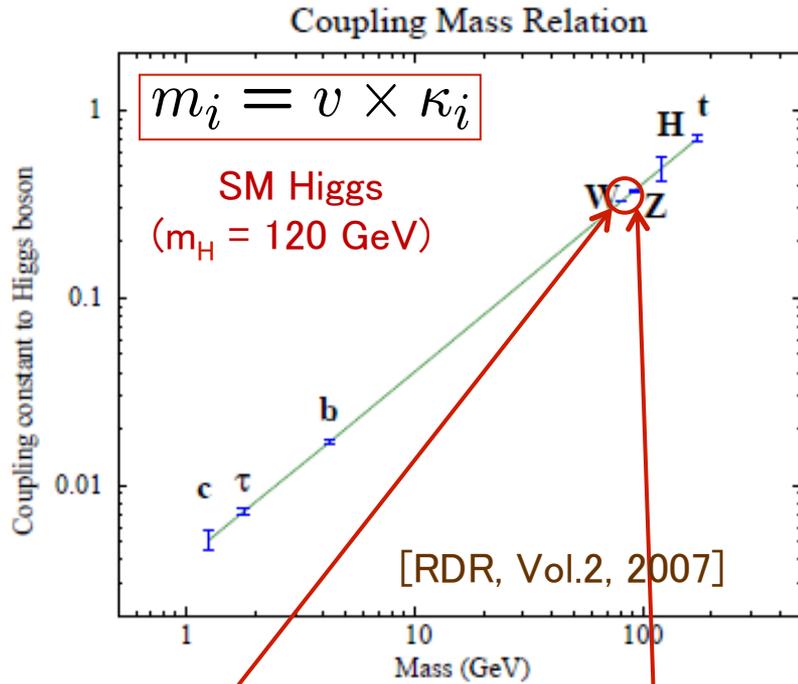


Branching ratios



# ILCにおけるHiggsの物理

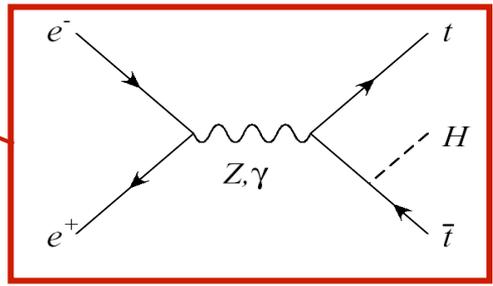
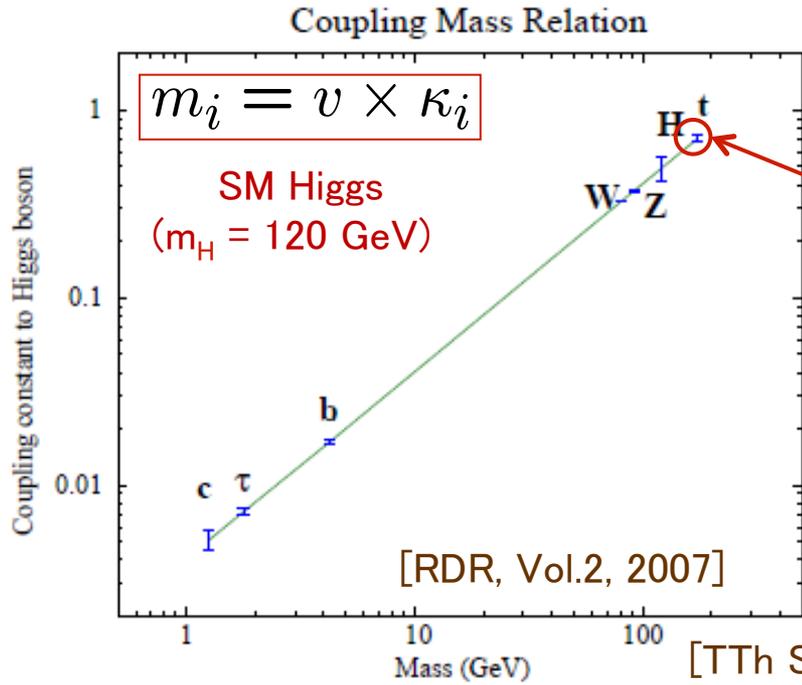
～ ヒッグスの結合定数測定 ～



Production cross sections

# ILCにおけるHiggsの物理

## ～ ヒッグスの結合定数測定 ～



ttH production

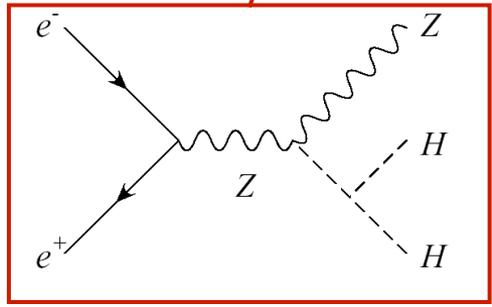
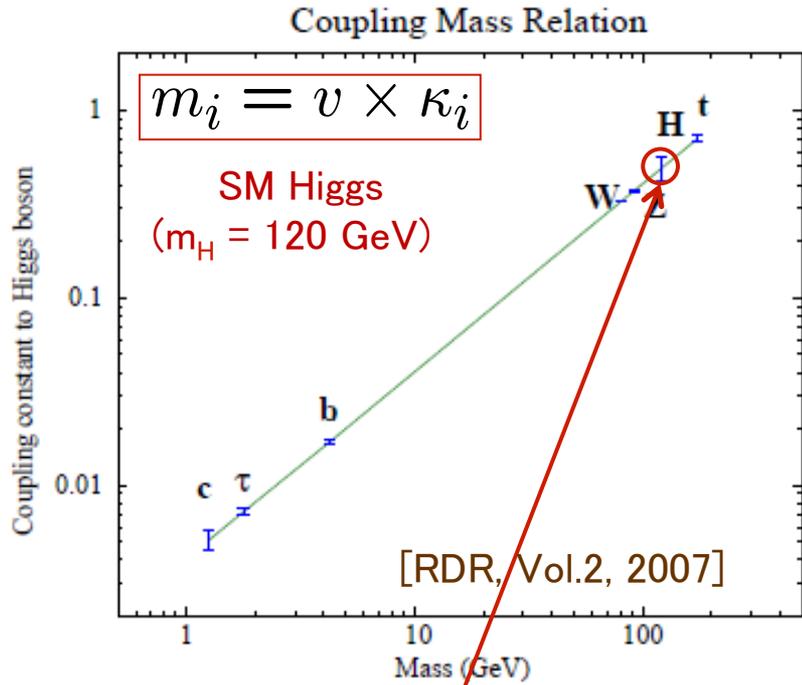
500 GeV & 1ab<sup>-1</sup>!

[TTh Subgroup, ILC Detect. Work., 2009]

Polarization	S / B	S/V(B)	$\Delta g_t/g_t$
(±0.0, ±0.0)	23.0 / 31.0	4.13	12.1%
(-0.8, +0.3)	38.9 / 52.8	5.35	9.3%

# ILCにおけるHiggsの物理

## ～ ヒッグスの結合定数測定 ～



ZHH production

HiggsのSelf-couplingを測る  
= Higgs Potential を測る

$\delta\lambda/\lambda$  Higgs self coupling sensitivity

Int(L)=1 ab<sup>1</sup>  
100% efficiency

$\sigma = O(0.1 \text{ fb}^{-1})$   
at  $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$

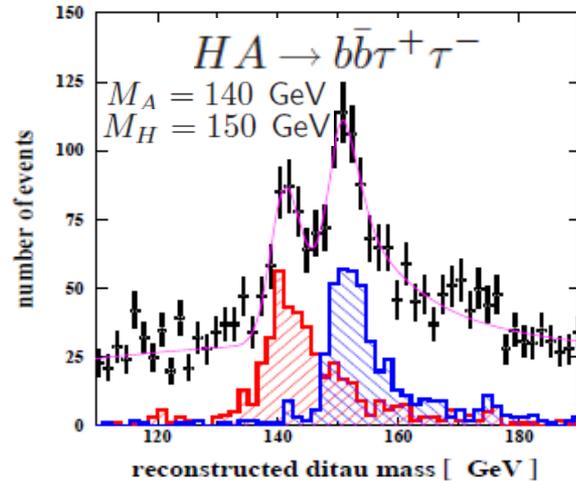
500 GeV  
1 TeV  
1.5 TeV

Higgs mass [GeV]

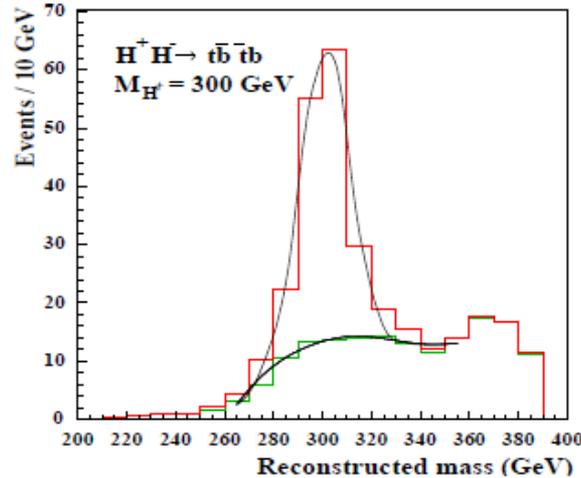
詳細Simulationが進行中！

# ILCにおけるHiggsの物理

## ~ Multi-Higgs productions ~



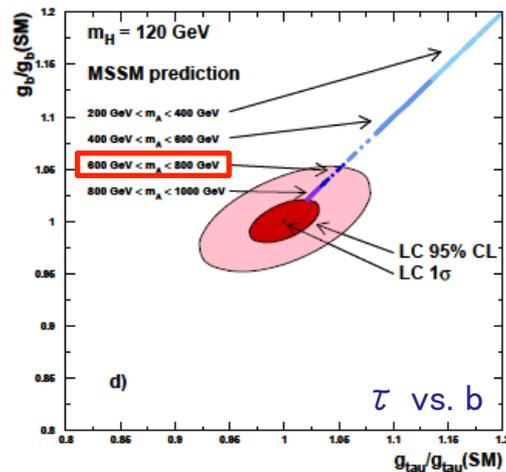
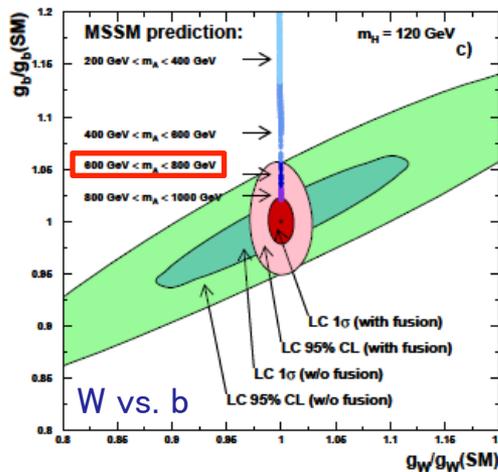
[D. Desch, et. al. 2004]



[ECFA/DESY LC Phys. WG, 2001]

- HA production  
 $s^{1/2} = 500 \text{ GeV}$   
 $\text{Lum.} = 500 \text{ fb}^{-1}$   
 $m: O(0.1) \%$   
 $\sigma: O(1) \%$
- $H^\pm$  production  
 $s^{1/2} = 800 \text{ GeV}$   
 $\text{Lum.} = 500 \text{ fb}^{-1}$   
 $\tan\beta: O(10) \%$

## ~ The deviations of couplings ~



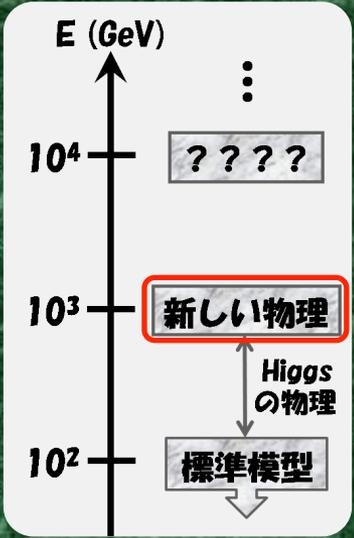
[ECFA/DESY LC Phys. WG. 2001]

- $\Delta g/g$  plots  
 $m_h = 120 \text{ GeV}$   
 $s^{1/2} = 250 \text{ GeV}$   
 $\text{Lum.} = 500 \text{ fb}^{-1}$

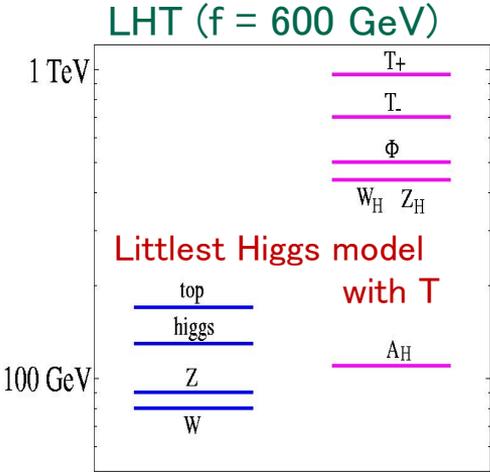
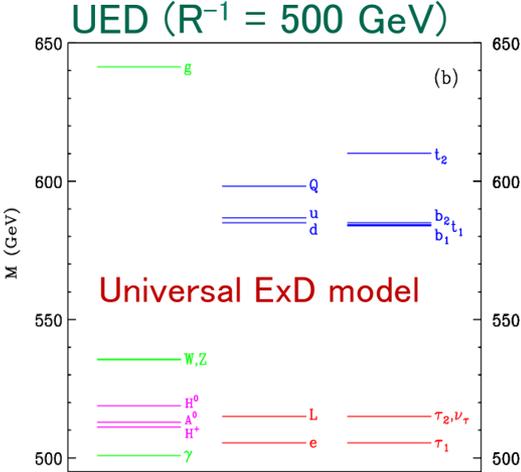
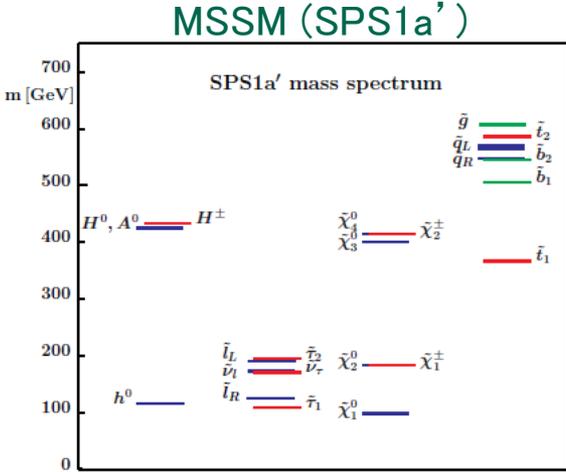
When  $m_A < 600 \text{ GeV}$ ,  
 The deviation can be  
 detected at 95% C.L.:

# ILCにおけるテラスケールの物理

- 新粒子たちの質量スケールはLHCにより判明する可能性大！
- LHCではカラーを持った粒子(比較的重い可能性有り)が頻繁に作られると期待される。一方, 軽いカラーを持っていない新粒子たちはこれらの重い新粒子の崩壊で作られる。
- 最も軽い新粒子は暗黒物質の可能性あり！ → 後述
- ILCでは軽い新粒子たちを直接作り出し, それらの粒子の性質や相互作用を精密に測定することが可能！精密測定を通じて新たな対称性を発見するのも重要な目的の一つ。



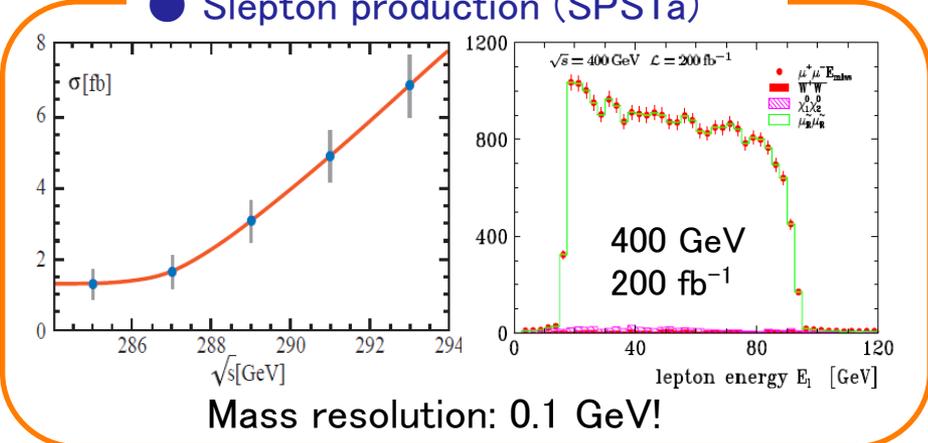
## ～ 新粒子のスペクトルの例 ～



# ILCにおけるテラスケールの物理

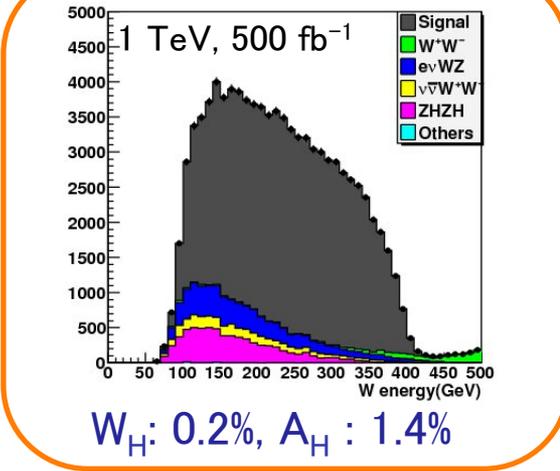
## ～ ILCにおける新粒子シグナル ～

### ● Slepton production (SPS1a)



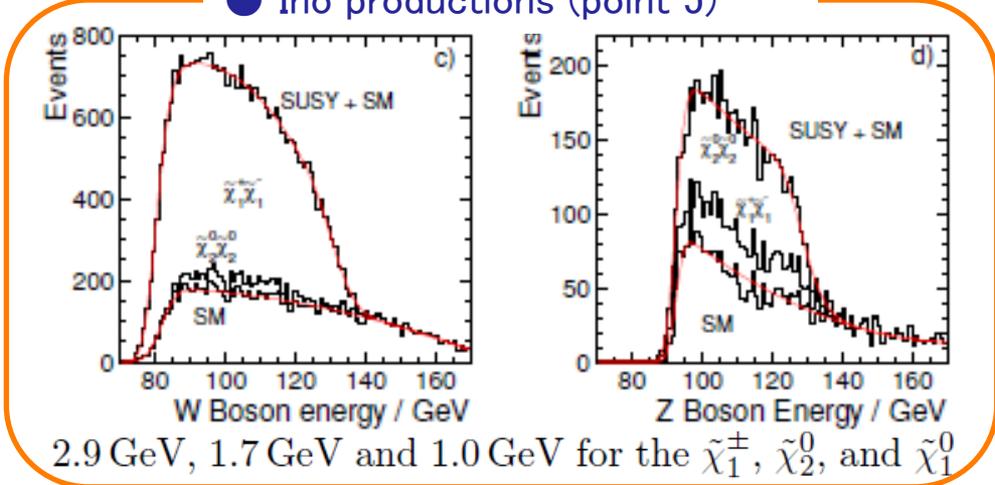
[A. Freitas, et. al., 2004, H. U. Martyn, 2003]

### ● $V_H$ production (LHT)



[E. Asakawa, et. al., 2009]

### ● Ino productions (point 5)

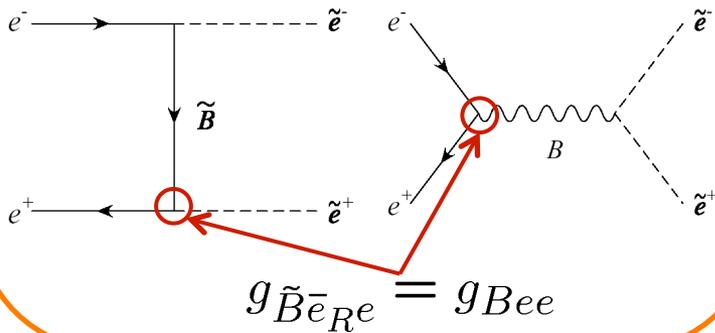
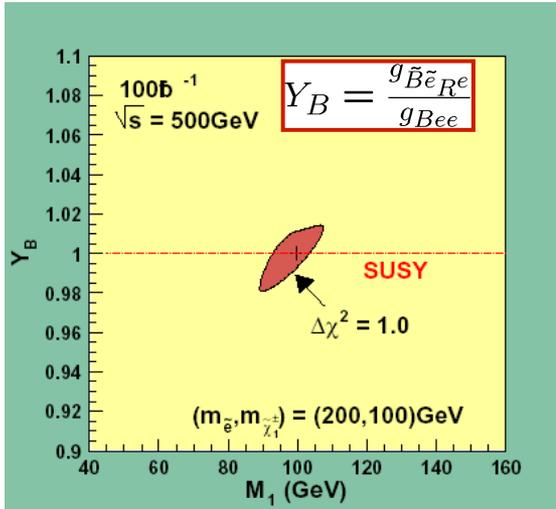


[LOI(ILD), KEK 2009-6]

# ILCにおけるテラスケールの物理

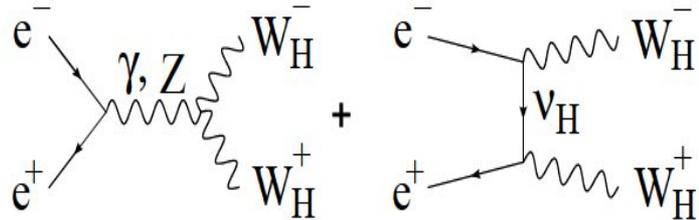
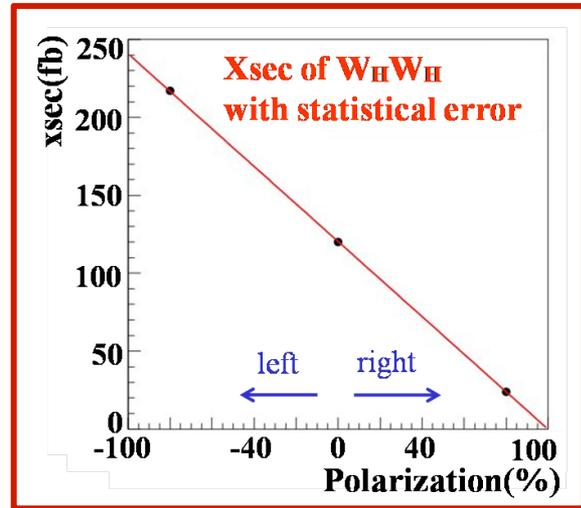
～ 新しい対称性の証明 ～

## ● Slepton production



[M.Nojiri, K. Fujii, T. Tsukamoto, 1996]

## ● $W_H$ production

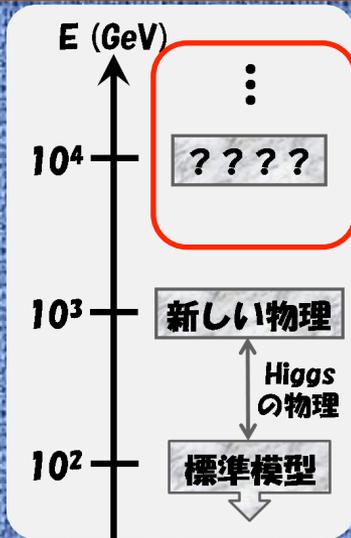


$W_H$  はU(1) chargeを持たず！

[E. Asakawa, et. al., 2009]

# ILCにおけるテラスケールを超える物理

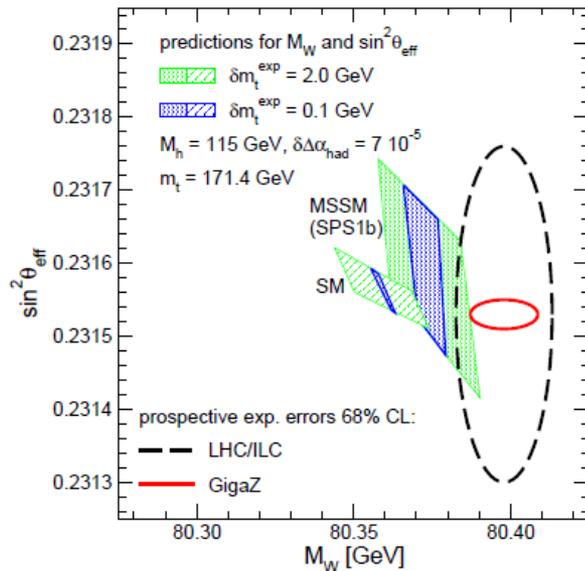
- テラスケールを超える新物理は、新粒子たちを直接作ることとはできないが、精密測定を通じて探索することが可能。
- LEP実験と同様  $m_W$  や  $\sin^2 \theta_W$  に対する輻射補正の検出・制限。
- 標準模型に対する高次元演算子の寄与を検出・制限する。
- Z' ボソン等の新しい力の媒介粒子の発見や、それらの粒子が標準模型の粒子とどの様に相互作用をするのかを同定。またテラスケールの新粒子の性質を精密に測ることで、GUT等の非常に高いエネルギースケールの物理の情報が得られるかも。



## ～ 精密測定 ～

LEPの実験と同様に電弱スケールの物量を精密に測定することで高いエネルギースケールの物理の兆候をとらえることが可能！

- LHC/ILC の両データを使った電弱スケールの物理量に対する精密測定はかなり強力！
- さらにILCの GigaZ option (ILCでZボソンを大量に生成するoption)を使うと超強力！

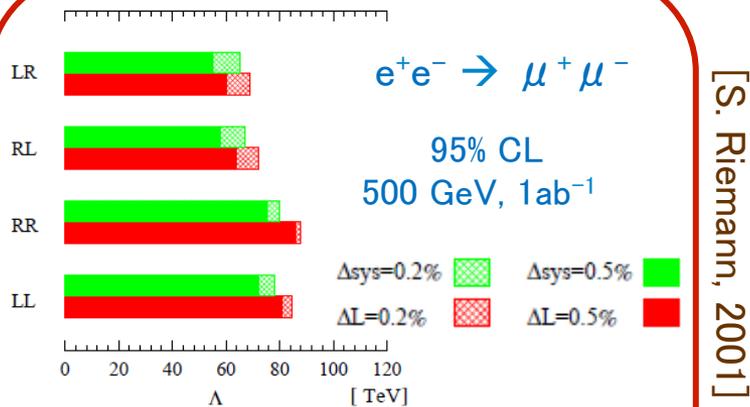


[S. Heinemeyer, et. al., 2006]

# ILCにおけるテラスケールを超える物理

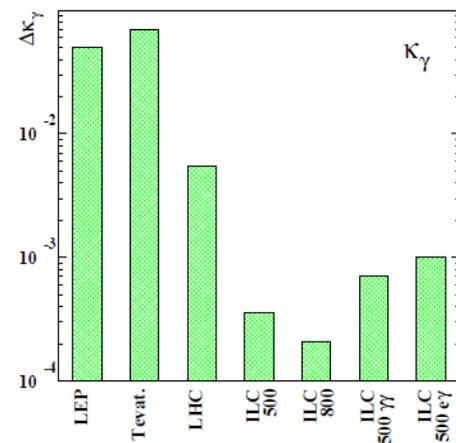
～ 高次元演算子及び異常結合定数 ～

## ● Dim-6 operator



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

## ● Gauge couplings

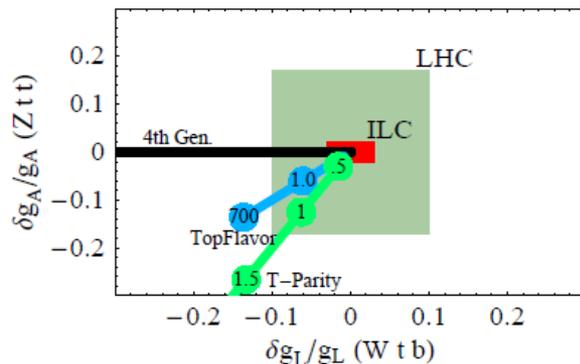


$$iK_V W_\mu^- W_\nu^+ V_{\mu\nu}$$

[K. Monig, et. al., 2005]

P.S. Quartic couplings も測れる

## ● Top couplings



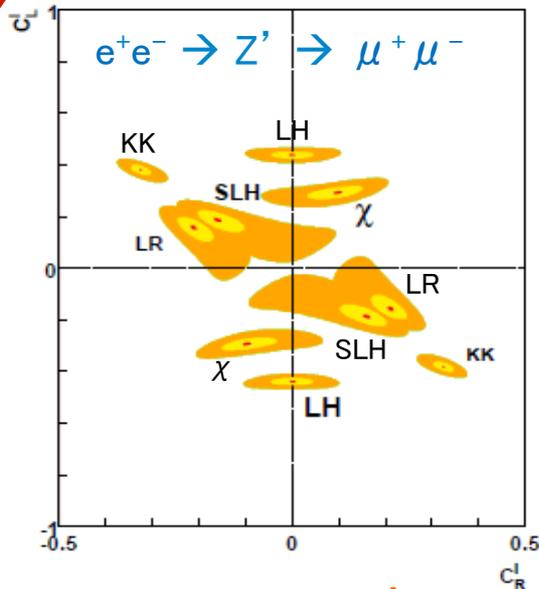
Axial Ztt vs. Wtb

[P. Batra, et. al., 2006.]

# ILCにおけるテラスケールを超える物理

## ～ テラスケールを超える物理の探索 ～

### ● Z' -search



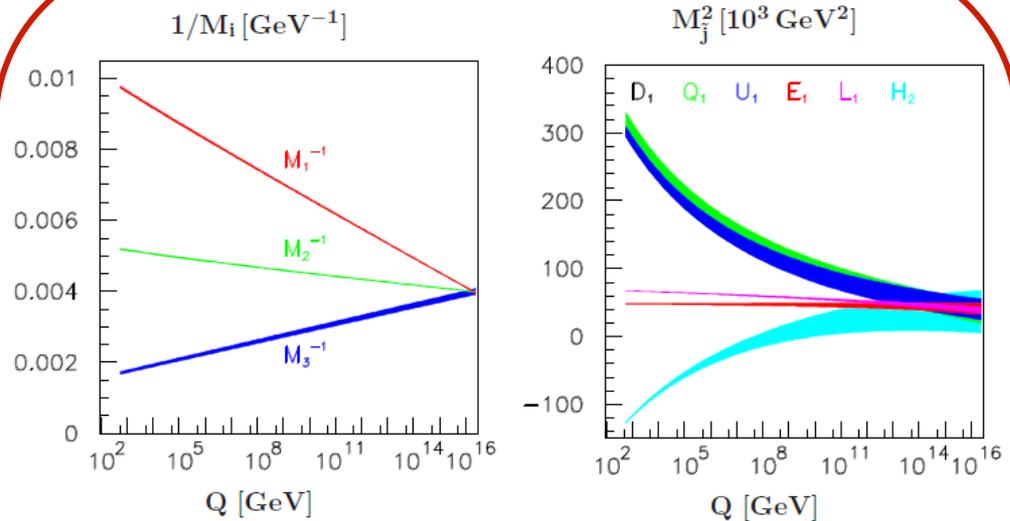
LHC may discover  $Z'$ , then  
 → Physics behind  $Z'$  at ILC

Resolving power (95%CL)

- Leptonic observables
- $M_Z = 1, 2, 5$  TeV
- $s^{1/2} = 500$  GeV
- Lum. =  $1 \text{ ab}^{-1}$

[S. Godfrey, et. al., 2005]

### ● Grand Unification



cMSSM模型の(SPS1a')のGUT condition

- 新粒子達の性質
- 模型パラメータの決定
- 繰り込み群方程式を解く

テラスケールで発見された新粒子の性質を詳細に調べることで, GUTを探索できるかもしれない!  
 (LHC及びILCの結果をともし用いる必要性あり!)

[G. A. Blair, et. al., 2002]

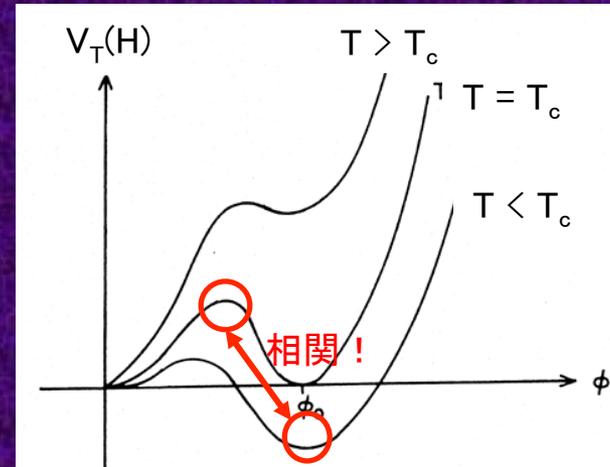
# ILCと宇宙とのコネクション



## ～ 電弱バリオン数生成 ～

シナリオの必要条件:

電弱相転移が強い一次相転移であること!



電弱相転移が一次である

→ Hの自己相互作用に強い補正

具体例: Two Higgs Doublet Model

$g_{HHH}$ に少なくとも10%異常の補正あり!

[S. Kanemura, Y. Okada, E. Senaha, 2005]

# ILCと宇宙とのコネクション

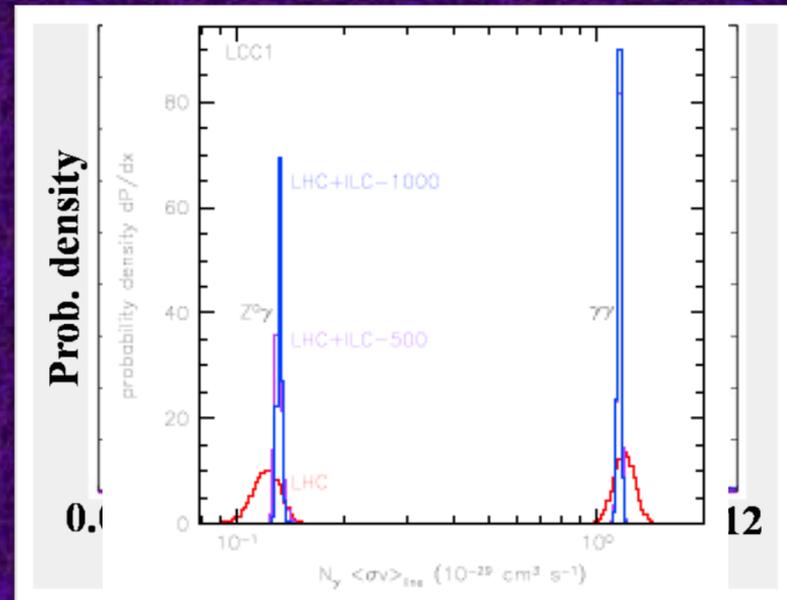


## ～ 宇宙暗黒物質 ～

テラスケールの新粒子のうち、最も軽い粒子はWIMP暗黒物質となる可能性あり！

テラスケールの物理を解明 → 暗黒物質現象を記述

暗黒物質の検出率 (LHC+ILC)



[E. Baltz, M. Battaglia, M. Kawasaki, P. Schmitz, J. Zang, 2006]

Stau- $\tau$  横軸は断面積の新粒子の質量 GeV!

# ILCと宇宙とのコネクション

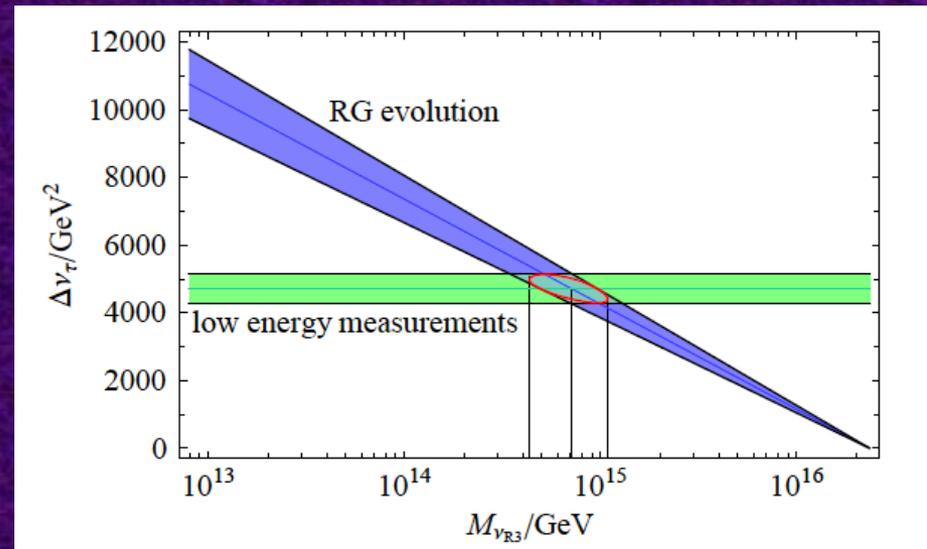


~ Leptogenesis ~

右巻きマヨラナニュートリノ崩壊 → 宇宙のレプトン数  
 → スファロン過程  
 → 宇宙のバリオン数

右巻きマヨラナニュートリノ質量 ~ GUT スケール!

第3世代スニュートリノの質量シフト



[A. Freitas, W. Porod, P. M. Zerwas, 2005]

繰り込み群に対する、ニュートリノセクターの  
 第3世代の湯川結合の影響を見る!

# まとめ

- ILCでは詳細なヒッグスセクターの探索が可能。ヒッグス粒子の質量や量子数,さらには相互作用を同定することは電弱相転移や素粒子の質量生成を理解するために必要不可欠!
- LHCが初めてテラスケールの物理の探索を行いつつあり,そこでどの程度のスケールに新しい物理があるのかが具体的に判明すると期待される.この情報は,ILCの物理にとりとても重要!
- ILCにおける重要な目的の一つは,新粒子を直接作り出しその性質等を出来る限り詳細に,かつ模型の詳細に依存しない方法で行う.そしてLHCの結果と結合し,テラスケールの物理(ラグランジアン)を確定させること.
- さらにレプトンコライダーの利点を生かした精密測定を行い,テラスケールの物理よりも高いエネルギースケールの物理の探索の足がかりを作ることも重要な役割.
- ILCと宇宙物理学とのコネクションは非常に重要.特に暗黒物質の物理との相性は抜群.暗黒物質問題の解決にとっても重要.