

# 国際リニアコライダー計画の概要

- 2014年6月24日 素粒子原子核物理作業部会
- 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 東京大学素粒子物理国際研究センター
- 駒宮幸男



# 話の内容

- (1) 計画の経緯
- (2) ILCで目指す物理とその意義
- (3) LHCの物理との関係
- (4) ILCに対する国際的コミュニティの動向

# 計画の経緯

## 国際コミュニティの動向

# 国際的なリニアコライダーの歴史

1980s DESY, KEK, SLAC などでLC加速器の技術開発と  
物理・測定器の検討が始まった。

1991 **JLC-1 レポート (日本)**

C-band? でジャンプスタートHiggs-factoryから始める。

1990s 加速器技術はTESLA, S-band, C-band, X-band,  
CLICが乱舞、收拾が着かない状態。

物理・実験だけでも国際組織を作ろう

1998 **World-wide-studies of physics and detector for  
LCs** が創られた。「**アジア・欧・米**」の**三極構造**にした。

2000 Global Science Forum (OECD) ⇒ 声明

High Energy Physics Consultative Group

2002 **LC Steering Committee (ILCSC)** が創られた。

2003 DESY(ドイツ)がLC(TESLA)とXFELと組にしてドイツ政府に提案

⇒ XFELのみ認められる LCは国際的に行うべき。

ACFA LCシンポジウム(筑波)

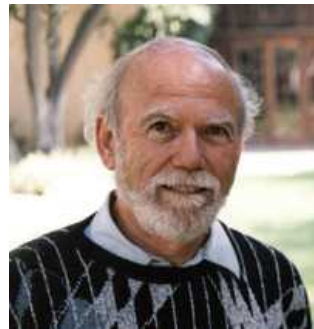
2004 **ITRP** (国際技術諮問委員会) が **超伝導RFを Main**

**Linac** の技術に選ぶ

戸塚KEK機構長はすぐにWSをKEKで敢行 (X-band⇒超伝導へ移行)

2005 **Global Design Effort (GDE)** が創られる

(Barry Barish)



2007 Reference Design Report (加速器の基本設計、コストの概算)

GDE組織: 山本明 (Project Manager) 横谷馨 (アジア地区代表)

2008 Fermilabがコケル。

2009 LOI の提出。2つの測定器コンセプトが選考される (ILD、SiD)



山田作衛RD



鈴木KEK機構長を中心に移行組織を検討Pre-ILCを提案

# 近頃の動き



2012年3月 将来計画検討小委員会答申 森委員長

6月 ILC戦略会議を結成 山下議長

7月 「**Higgs粒子**」が**LHC**で発見

10月 「ILCを日本がホストしHiggs factoryから  
段階的推進する案」拡大高エネルギー委員会で承認

12月 **Technical Design Report (TDR)**が完成⇒Review

2013年2月 ICFAの元でLinear Collider Board (LCB)が創られ、  
Linear Collider Collaboration (LCC) が正式に  
組織される (Director : Lyn Evans, Deputy: 村山齊)

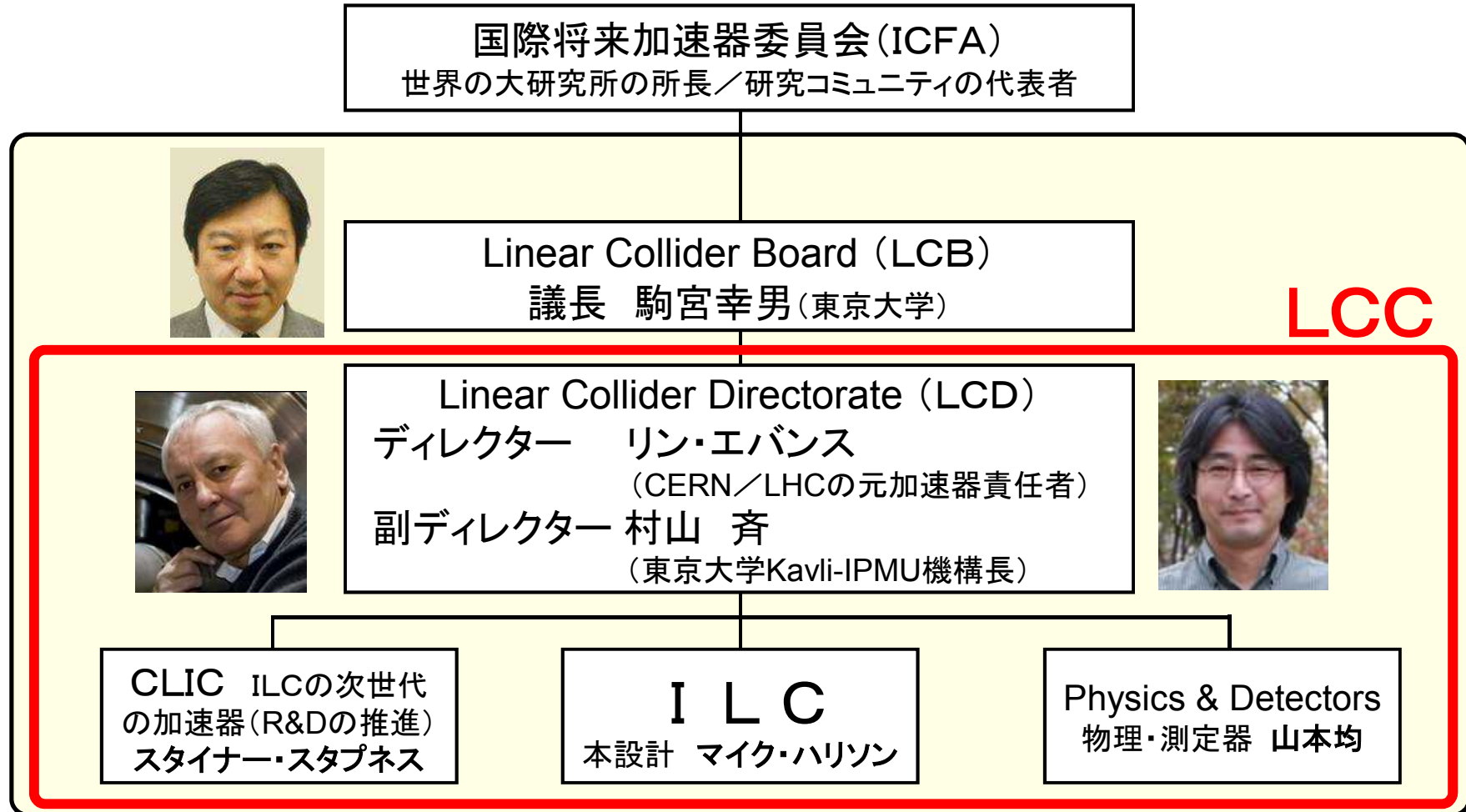


2013 6月12日 ILC Day TDR公開

2013 5月～9月 日本学術会議専門委員会

# 研究者による国際推進体制

2013年2月21日 リニアコライダー・コラボレーション(LCC)発足



※日本の中核研究機関: 高エネルギー加速器研究機構 (KEK、鈴木厚人機構長)

# 研究コミュニティのコンセンサス

## ヨーロッパ (European Strategy)

Chair: Tatsuya Nakada (Swiss Federal Institute of Technology Lausanne)

e) There is a strong scientific case for an electron-positron collider, complementary to the LHC, that can study the properties of the Higgs boson and other particles with unprecedented precision and whose energy can be upgraded. The Technical Design Report of the International Linear Collider (ILC) has been completed, with large European participation. The initiative from the Japanese particle physics community to host the ILC in Japan is most welcome, and European groups are eager to participate. Europe looks forward to a proposal from Japan to discuss a possible participation.

## アジア (Asia ACFA-HEP)

Chair: Mitsuaki Nozaki (KEK) 3<sup>rd</sup> ACFA-HEP Meeting on 17.07.2013 in Chiba

AsiaHEP/ACFA welcomes the proposal by the Japanese HEP community for the ILC to be hosted in Japan. AsiaHEP/ACFA looks forward to a proposal from the Japanese Government to initiate the ILC project.



**米国 今までにないグローバルな視点が強調**  
昨年 Snowmass process (コミュニティーの合意)を経て  
P5 (Particle Physics Project Prioritization Panel): 5月末に答申

The interest expressed in Japan in hosting the International Linear Collider (ILC), a 500 GeV  $e^+e^-$  accelerator upgradable to 1 TeV, is an exciting development. Following substantial running of the HL-LHC, the cleanliness of the  $e^+e^-$  collisions and the nature of particle production at the ILC would result in significantly extended discovery potential as described in the Drivers sections, mainly through increased precision of measurements such as for Higgs boson properties. The ILC would then follow the HL-LHC as a complementary instrument for performing these studies in a global particle physics program, providing a stream of results exploring three of our Drivers for many decades.

9

**ヒッグス、ニュートリノ質量、暗黒物質、宇宙膨張、新物理**



U.S. DEPARTMENT OF  
**ENERGY**

OFFICE OF  
**SCIENCE**

---

# HEP P5 Response and Impacts

**Jim Siegrist**

**Associate Director, Office of High Energy Physics**

**Office of Science, U.S. Department of Energy**

# Project Recommendations Continued

---

- **[R11] *Motivated by the strong scientific importance of the ILC and the recent initiative in Japan to host it, the U.S. should engage in modest and appropriate levels of ILC accelerator and detector design in areas where the U.S. can contribute critical expertise. Consider higher levels of collaboration if ILC proceeds.***
  - The meaning of “modest” will depend on the HEP budget
    - Initial support will be by redirection of effort
  - The meaning of “appropriate” will depend on the areas where Japan would like us to help
    - We believe the current priority is for site-specific accelerator R&D and design efforts
  - We await further discussions with the Japanese government



国際会議@東京（2013・11）

日本の主導への期待が集中



# ILCで目指す物理と その意義

## LHCの物理との関係

# 素粒子物理学の最重要課題

電弱対称性の破れの背後にある物理の解明

超対称性？ 複合ヒッグス模型？

相互作用の大統一(クォーク・レプトンの統一)

超対称性？ 余剰次元？ 核子崩壊？

暗黒物質の正体

超対称性？ Strong CP の破れ？

宇宙の加速膨張(暗黒エネルギー)の正体

インフレーションとの関連？ 真空のエネルギー？

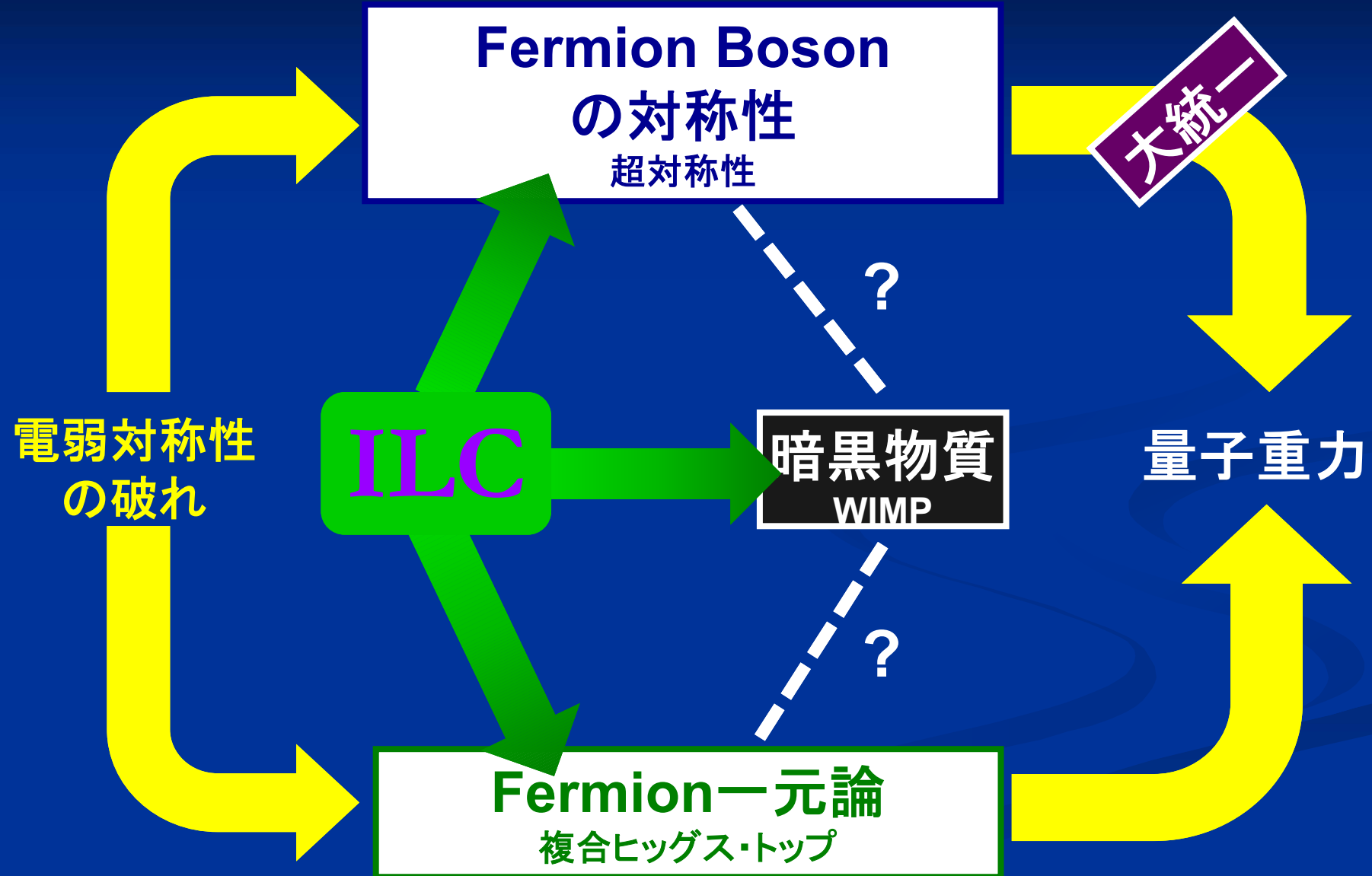
重力相互作用を如何にして理論に組み込むか

超対称性？ ⇒ 超弦理論？

標準理論を超えていかなる方向に進むか

- ヒッグス粒子をプローブとして使う
- 新粒子・新現象の直接発見
- ⇒ 精密測定
- ⇒ 発見を物理の原理に高める

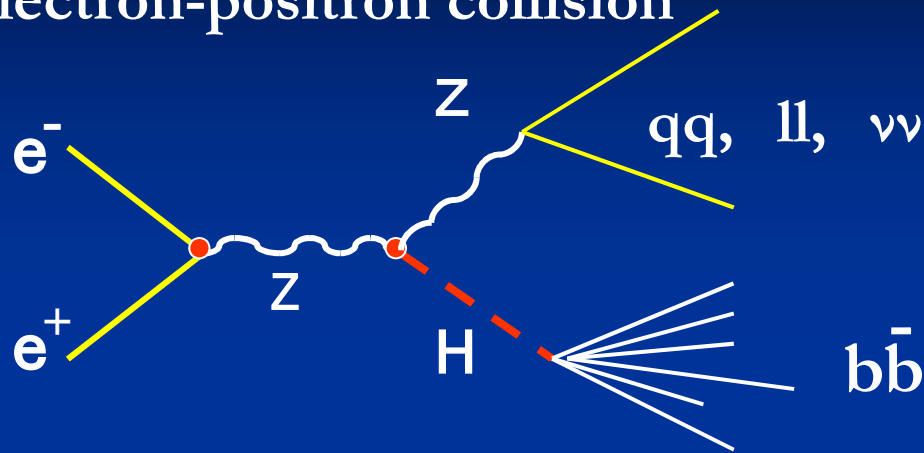
# 大分岐点



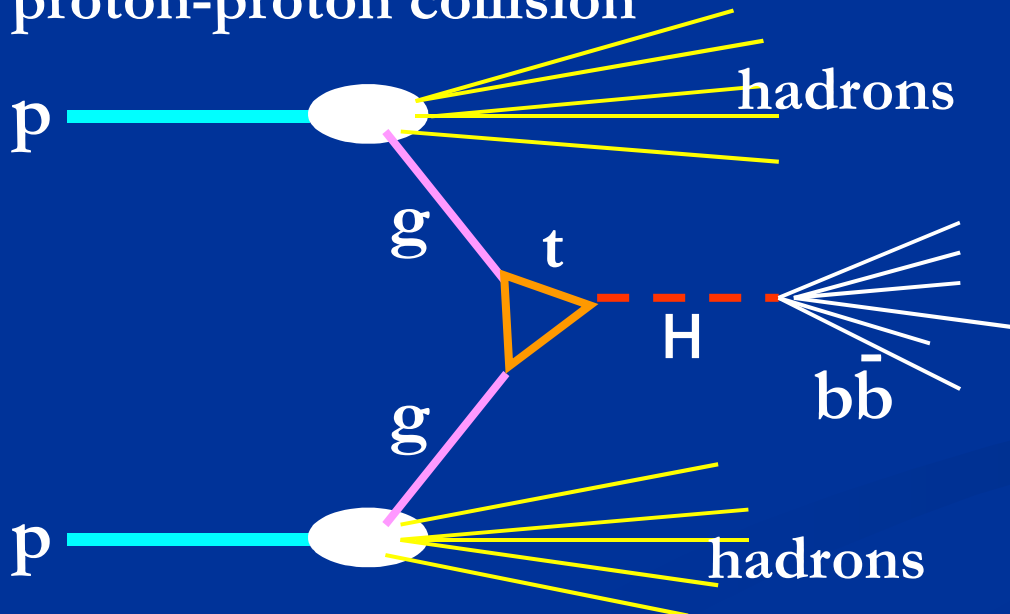
# Energy Frontier Colliders

## $e^+e^-$ と $pp$ の相乗効果

electron-positron collision



proton-proton collision



Ex. Higgs boson production

電子・陽電子の衝突は素粒子同士の衝突であり、余分な粒子が出てこない  
backgroundが低く、予言も正確

⇒ 理想的な測定器を設計でき、高精度の実験が可能

円形Colliderではsynchrotron radiationによるエネルギーロスが問題  
⇒ Linear collider が不可避となる

陽子は複合粒子

⇒ 相互作用が複雑



高い放射線下での実験(中性子)  
高い事象頻度 殆どがjunkな事象  
⇒ これに打ち勝つ高度な測定器技術が必要 (トリガーなど)であり、高度なデータ解析技術も必要



# Top Quark と Higgs Boson の物語

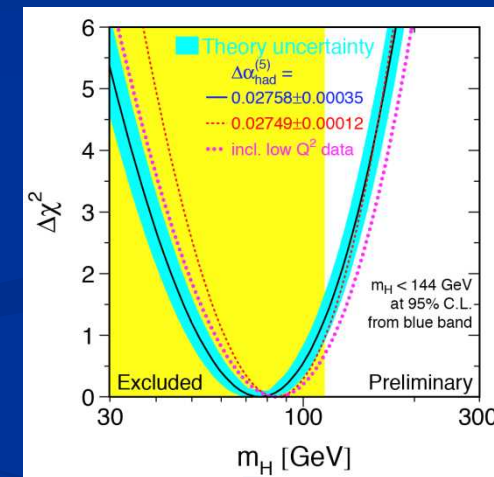
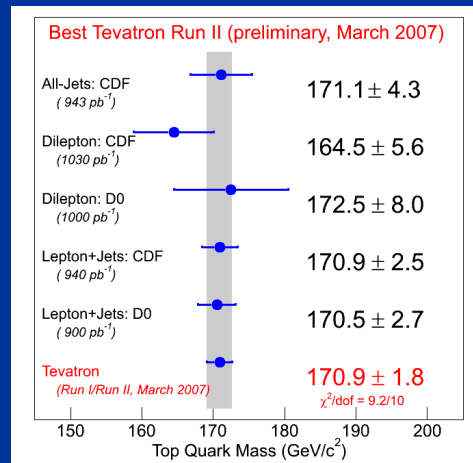
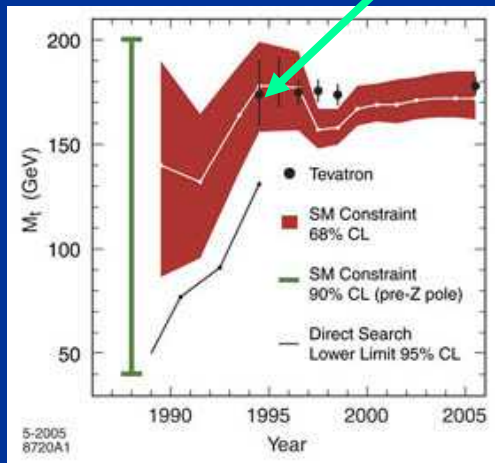
hadron collider と  $e^+e^-$  collider の相乗効果

高精度の LEP での、  
electro-weak過程の測定によって top mass を  
正確に予言した

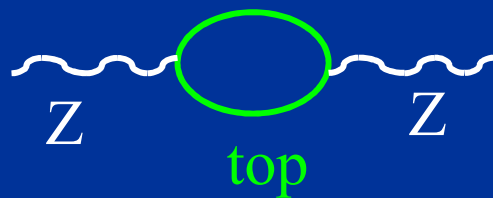
## Top quark の発見

TEVATRON での top mass の正確な測定

TEVATRON での正確な top mass と LEP/SLC での  
高精度な electro-weak data  
 $114 \text{ GeV} < M_H \lesssim 160 \text{ GeV}$

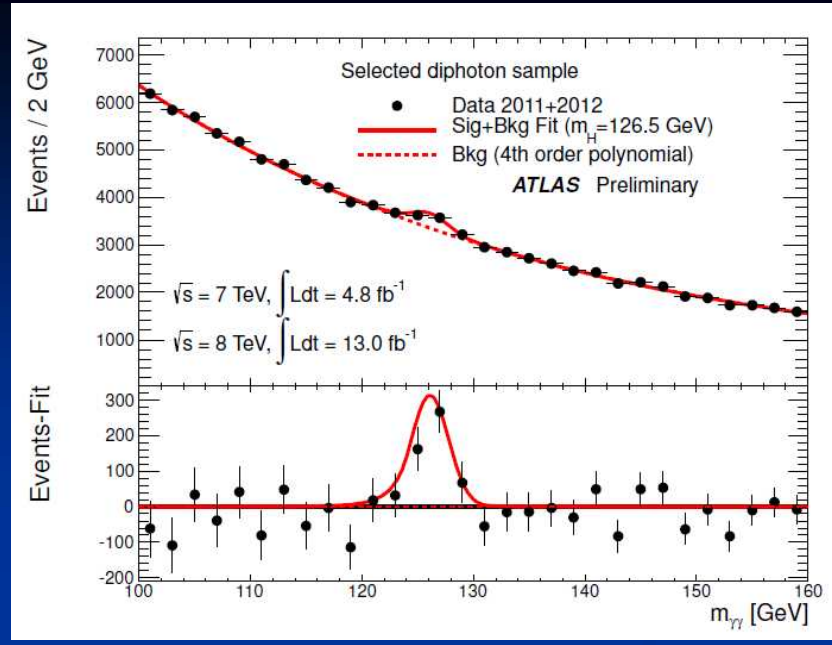
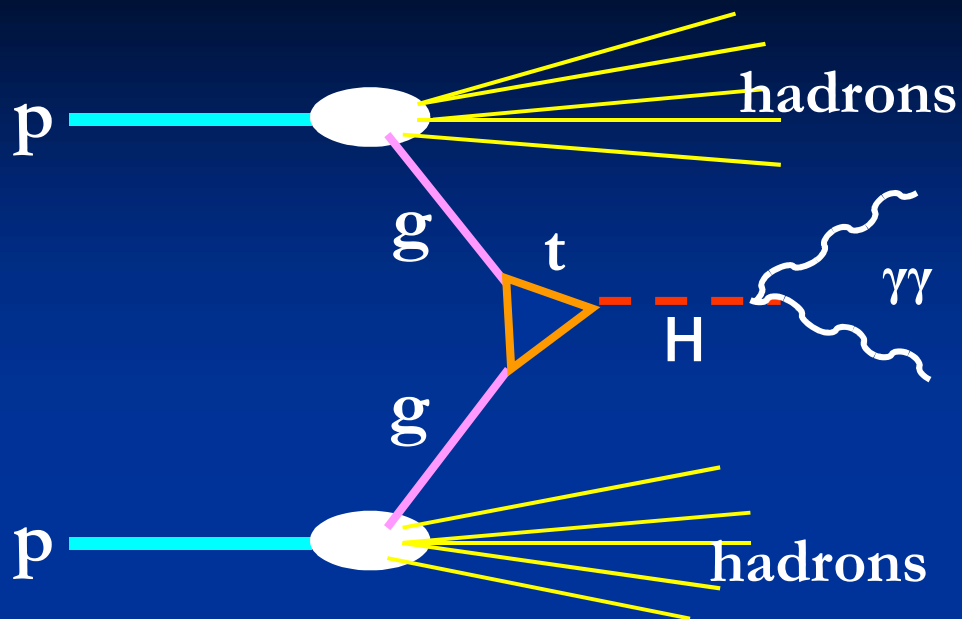


LHC Higgs 粒子の発見  
 $M_H \sim 126 \text{ GeV}$

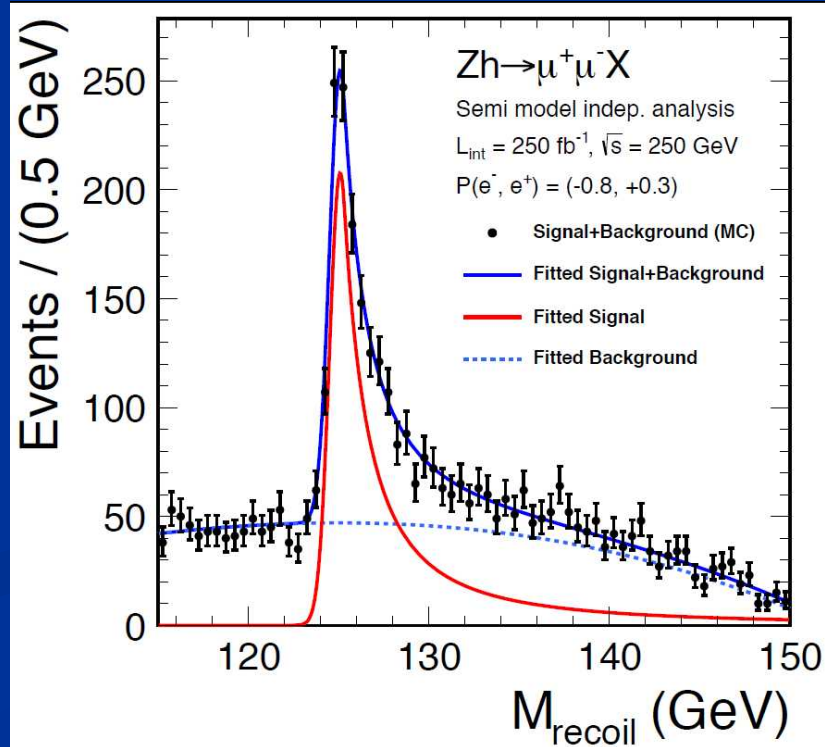
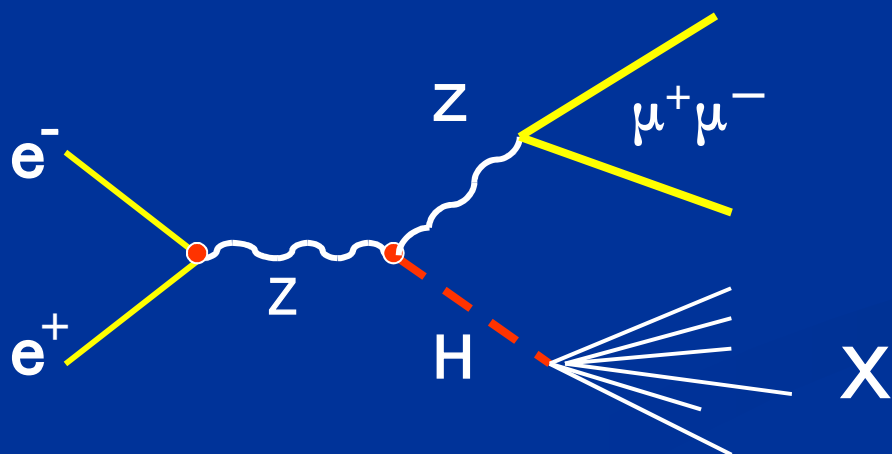


ILC Higgs の全貌を明らかにする  $\Rightarrow$  標準理論を超える

# LHC $H \rightarrow \gamma\gamma$ 質量分布



# ILC $\mu^+\mu^-$ の反跳質量分布



# ヒッグス粒子と真空

ヒッグス粒子は「真空」と同じ量子数を持つ

⇒ 真空でのヒッグス場が  $\varphi=0$  から  $\varphi=\varphi_0$  に転移する。

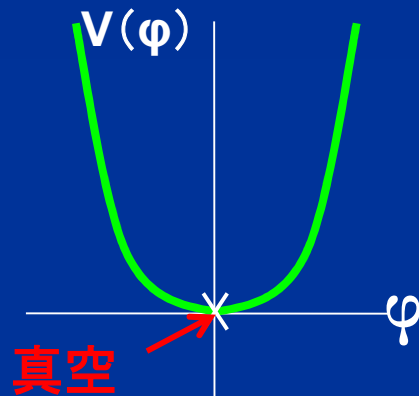
水が氷になるような相転移が生ずる。



南部陽一郎

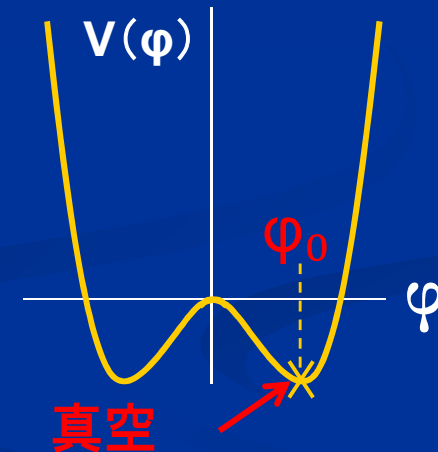


アンブレール と ヒッグス



初期宇宙

膨張による冷却



ヒッグス場  $\varphi_0$  が真空を満たす

即ち、真空（エネルギーが最も低い状態）では  $\varphi \neq 0$  .

対称性が破れる。(南部陽一郎、アンブレール、ブロウト、ヒッグス)

「超対称性」があると、この状態を実現: 井上研三たち (九州大学)

# ILCでのヒッグス粒子の研究

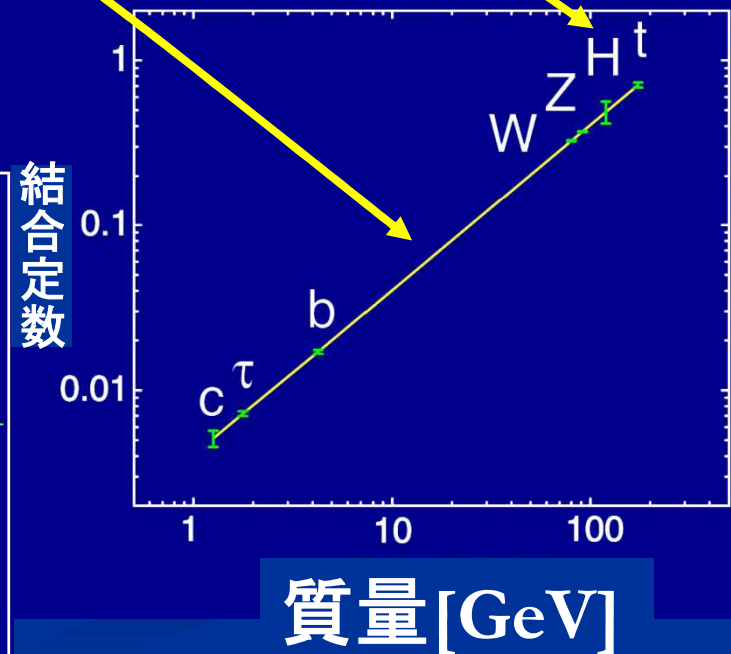
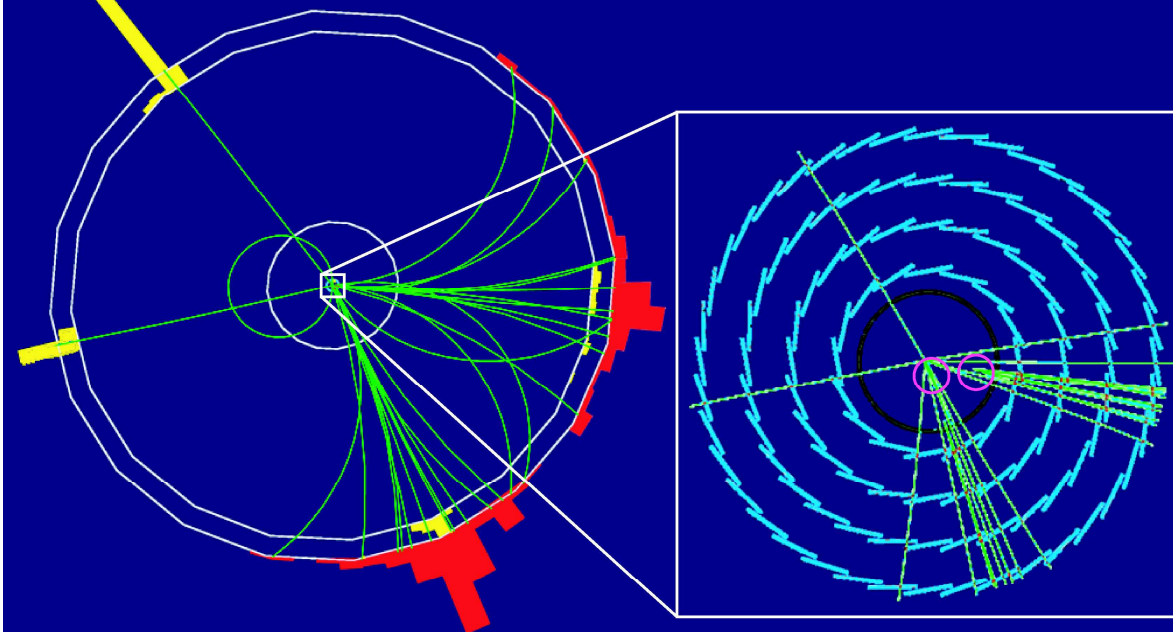
ILC は 先ずはヒッグス・ファクトリー  
O(10<sup>5</sup>)個の事象を 生成して徹底的に研究

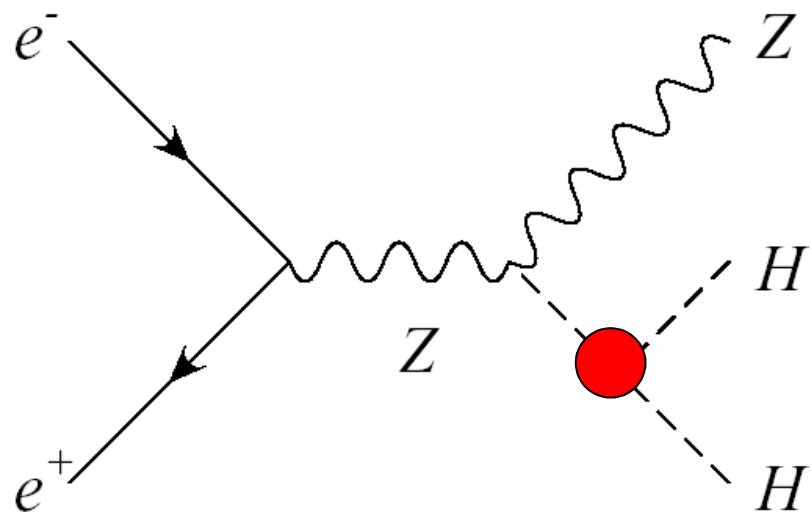
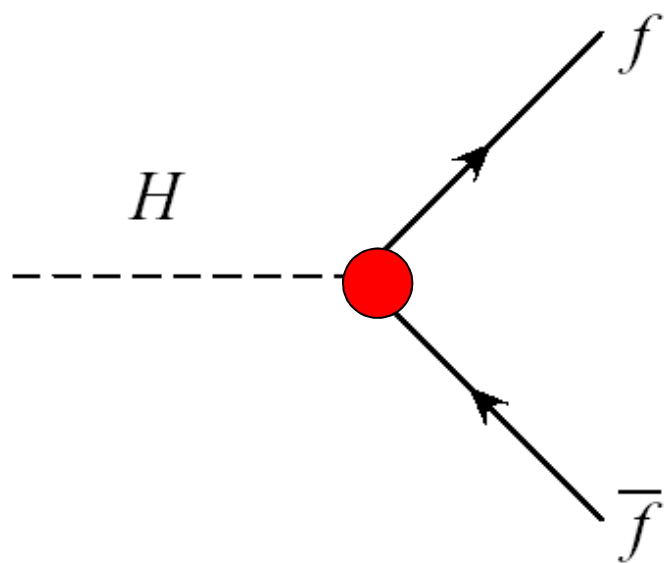
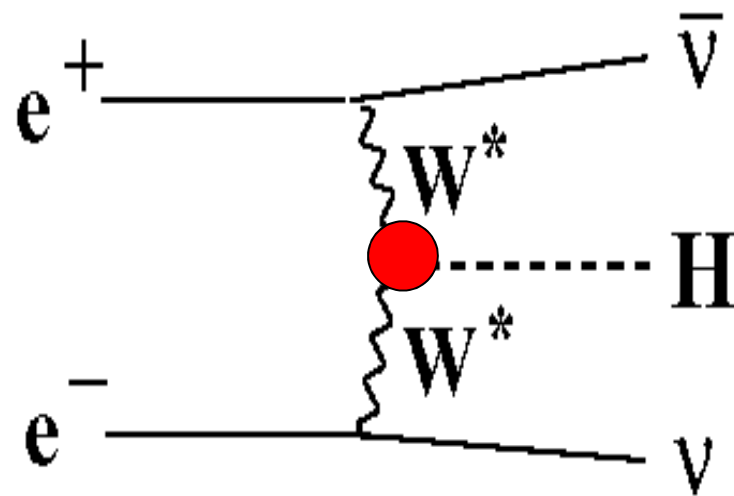
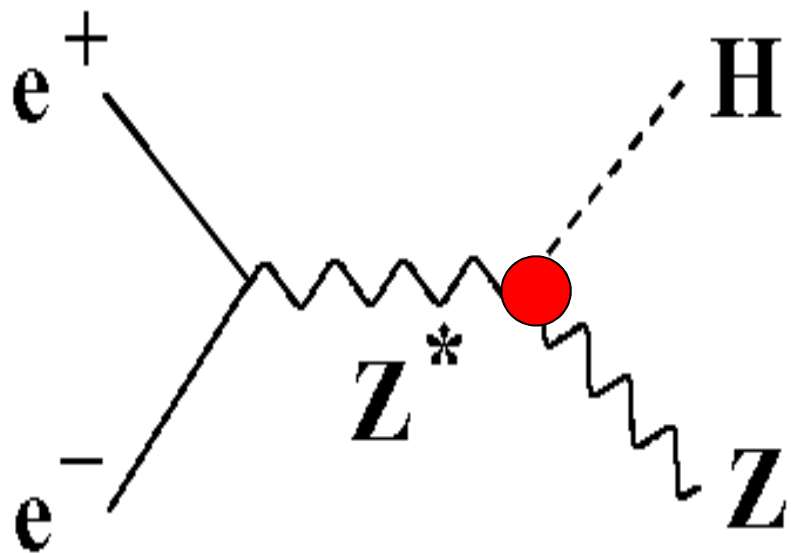
質量の起源

「真空」の構造

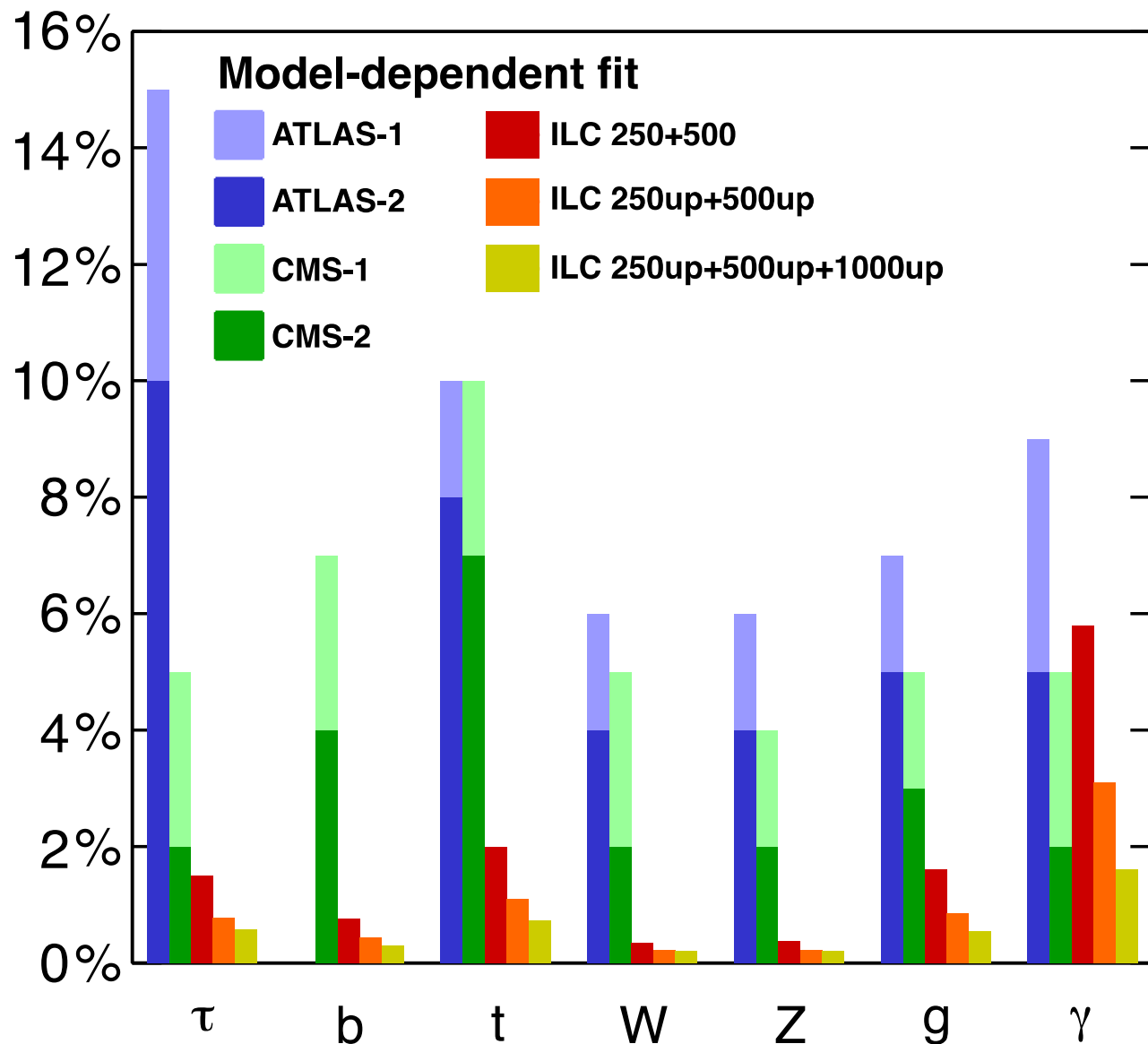
$M(\text{素粒子}) = g(\text{結合定数}) v(\text{真空期待値})$

$e^+e^- \rightarrow Z^0H^0 \rightarrow e^+ e^- + bb$





# ヒッグス粒子の結合定数



ATLAS/CMS:  
Lumi 3000 fb-1, sqrt(s) = 14 TeV

ILC 250:  
Lumi 417 fb-1, sqrt(s) = 250 GeV

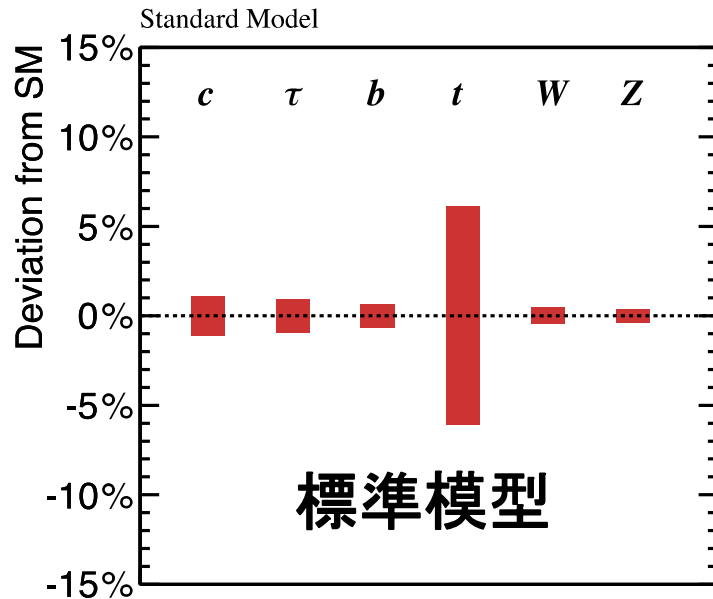
ILC 500:  
Lumi 833 fb-1, sqrt(s) = 500 GeV

ILC 250up:  
Lumi 1920 fb-1, sqrt(s) = 250 GeV

ILC 500up:  
Lumi 2670 fb-1, sqrt(s) = 500 GeV

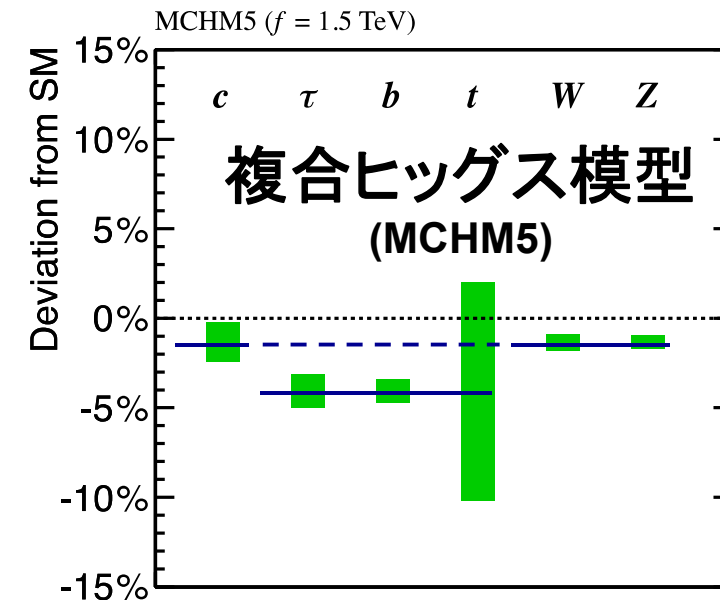
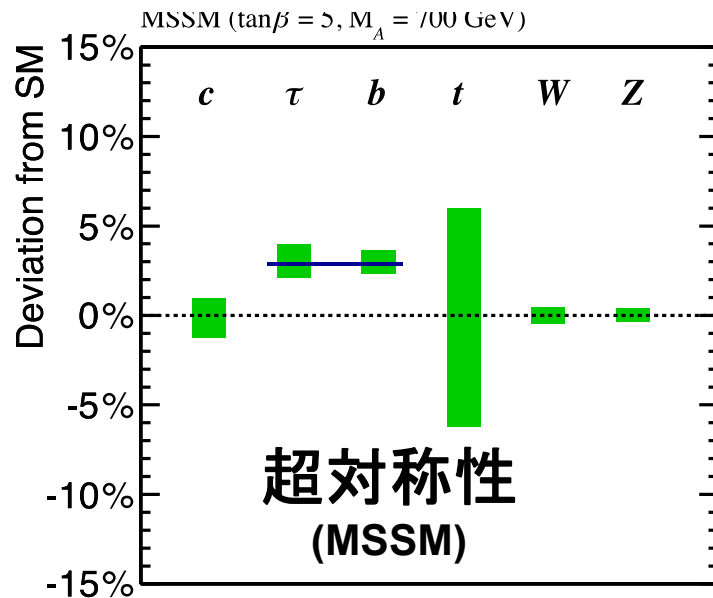
ILC 1000up:  
Lumi 4170 fb-1, sqrt(s) = 1 TeV

# ヒッグス結合定数のずれのパターン



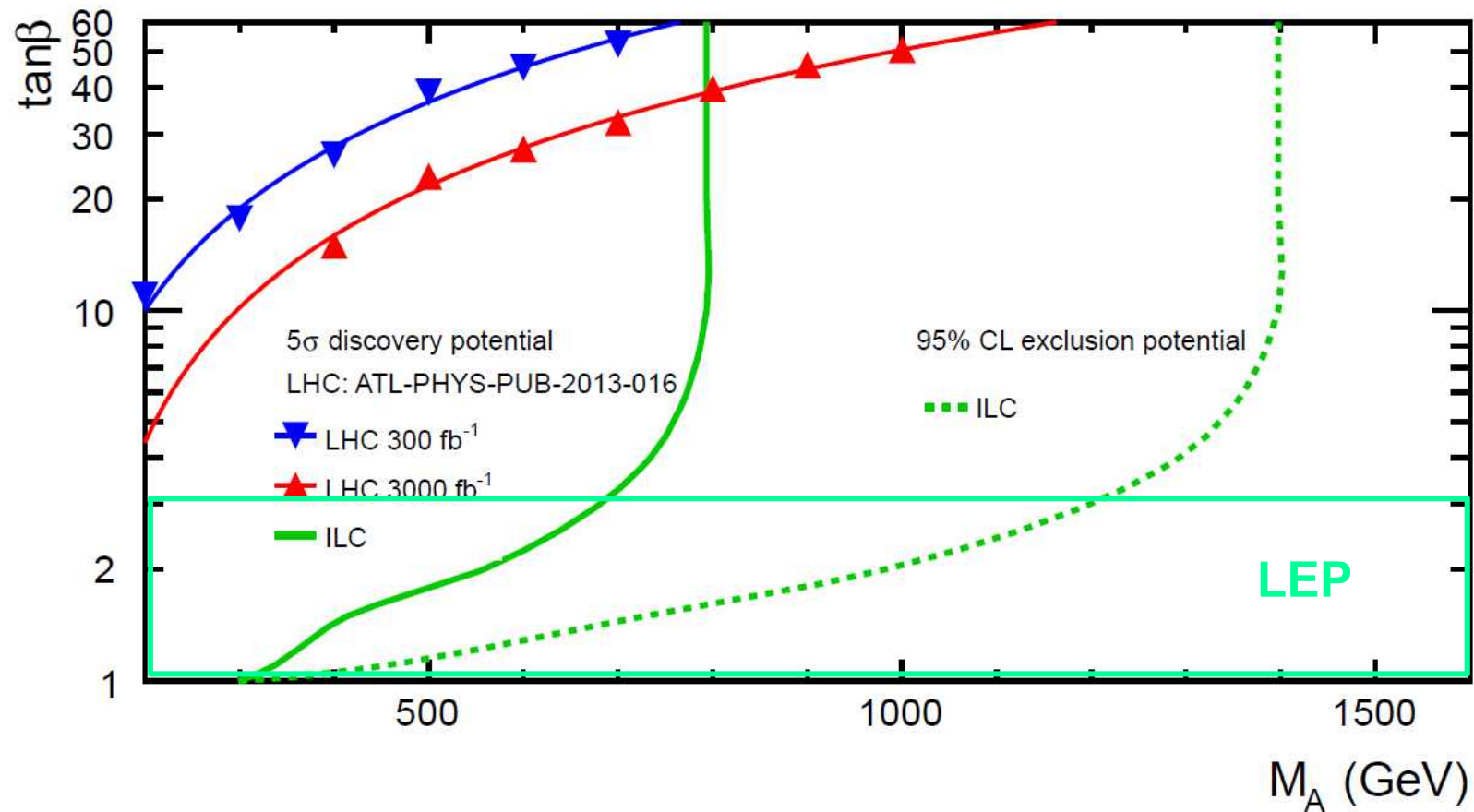
標準理論を超えるモデルは、ヒッグス結合に関して、特徴的な標準理論からのずれのパターンを示す。ILCにおけるヒッグスの様々な素粒子との結合定数の精密測定によって、 $O(1)\%$ の標準理論からのずれを測定でき、標準理論を超える素粒子物理の方向を同定をすることが出来る。

$L = 1150 \text{ fb}^{-1}$ ,  $E_{\text{cm}} = 250 \text{ GeV}$   
 $L = 1600 \text{ fb}^{-1}$ ,  $E_{\text{cm}} = 500 \text{ GeV}$



# 重いヒッグス粒子にせまる

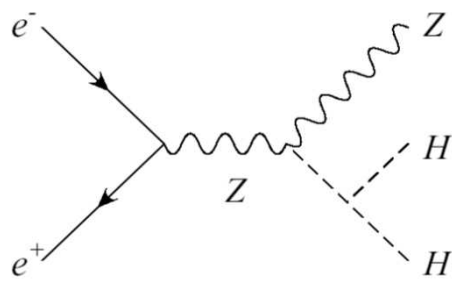
- 直接探索  $\Rightarrow$  LHC
- ヒッグス結合定数への影響をみる  $\Rightarrow$  ILC



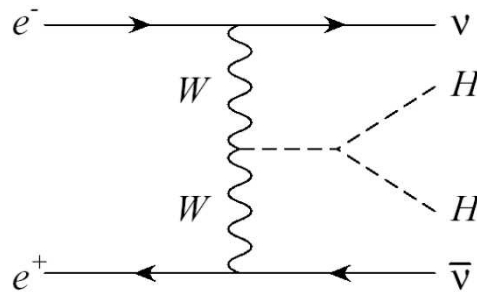
L=1150 fb<sup>-1</sup>, E<sub>cm</sub> = 250 GeV  
L=1600 fb<sup>-1</sup>, E<sub>cm</sub> = 500 GeV



# Higgs 自己結合



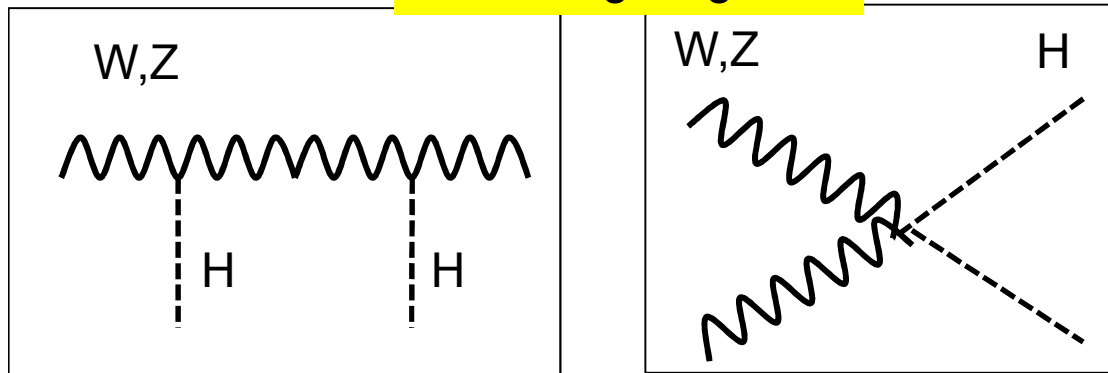
500 GeV (ZHH)



1 TeV ( $\nu\nu$ HH)

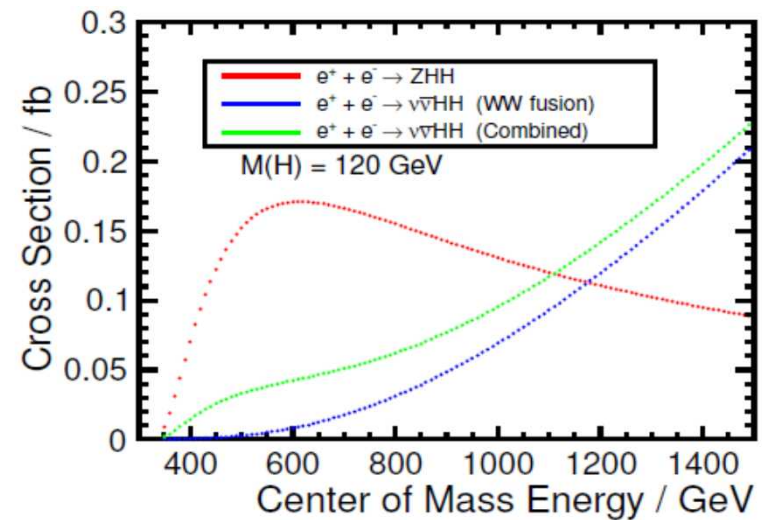
1. 断面積は小さい  
O(100) events
2. 干渉するダイアグラムの  
ために感度が下がる

## Interfering diagrams



(VVH coupling)<sup>2</sup>

VVHH coupling

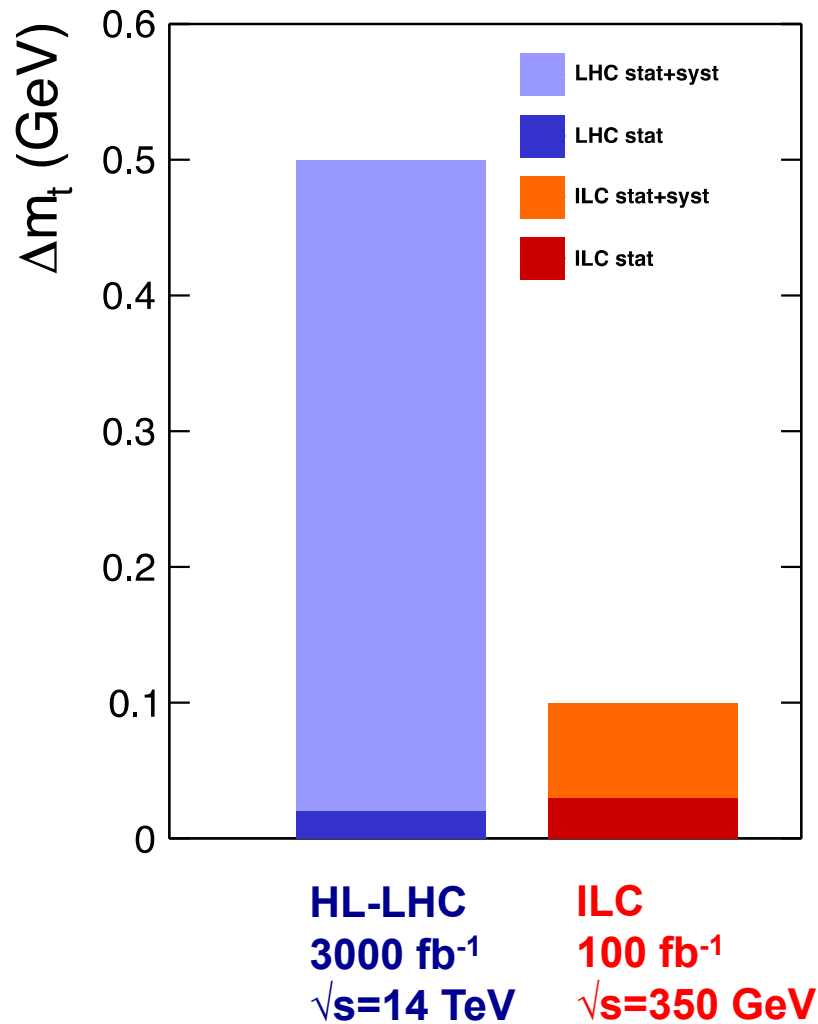


**$\lambda$ の測定**      O(10)%      現在詳細研究中

電弱対称性の破れの解明      ヒッグスポテンシャルの形状  
電弱エネルギースケールでの宇宙のバリオン生成に関与

# Top Quark Mass

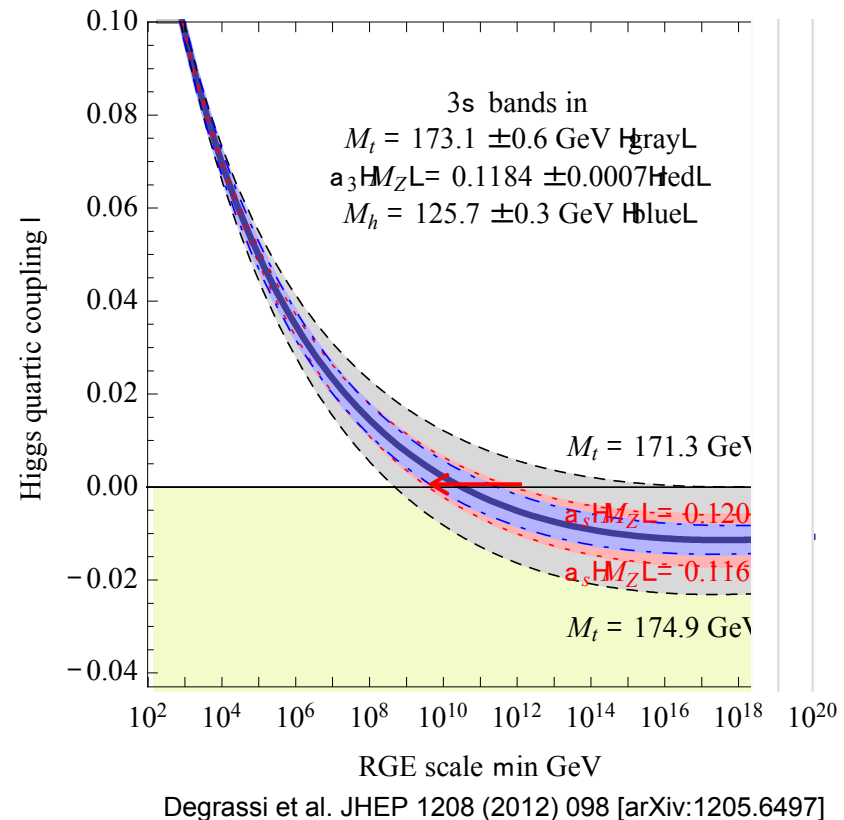
## トップクォーク質量



トップクォークの質量は、素粒子物理における最重要パラメータのひとつ。

- ・SUSYの破れのスケールに関係
- ・複合ヒッグス模型のスケールを決める
- ・我々の宇宙の真空の安定性に関係

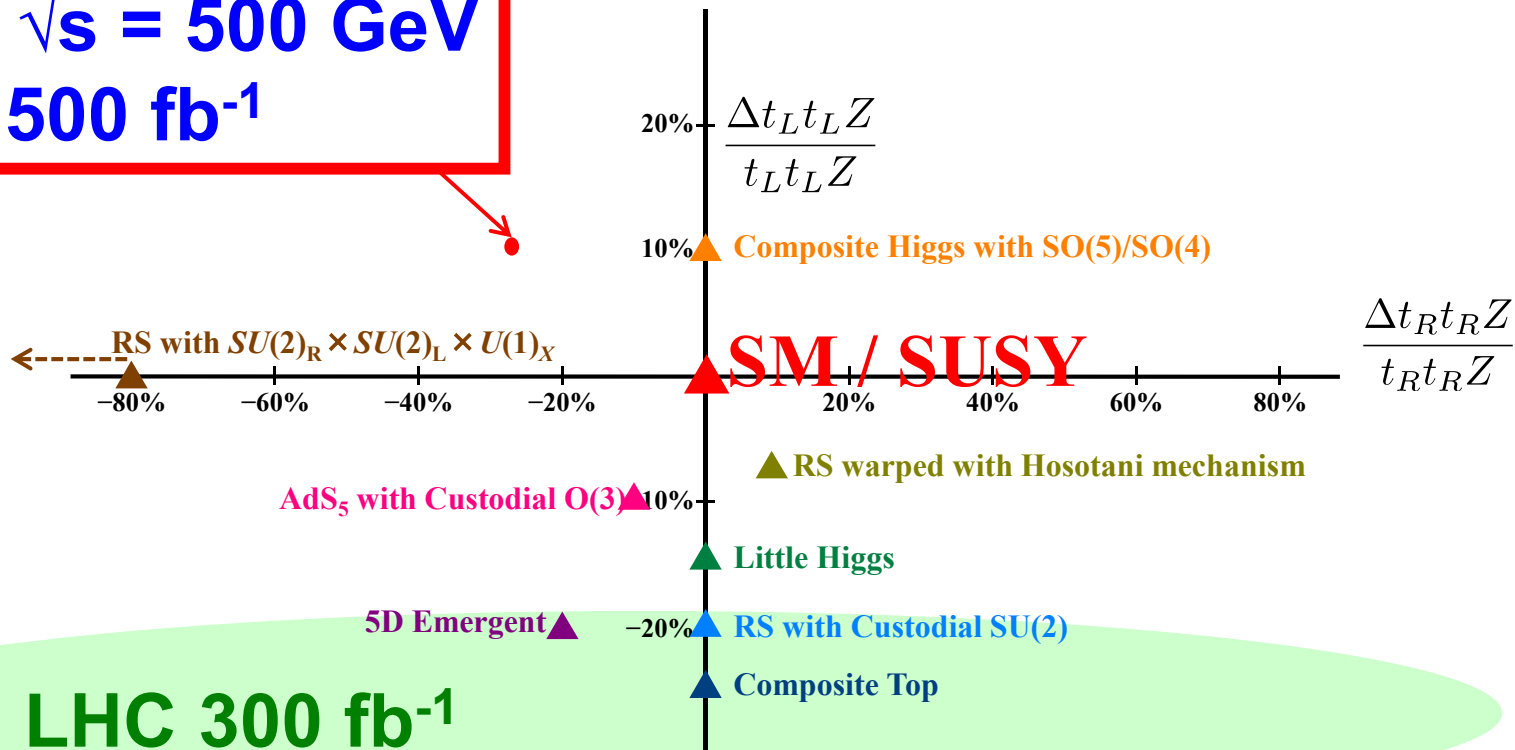
いずれの場合も、約0.1 GeVの精度が要求される



HL-LHC, Ref: arXiv:1311.2028

# トップクォークとZボゾンの結合の精査 ⇒ 超対称性などと区別できるだけでなく 複合粒子モデルなどを分離できる

**ILC  $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$   
 $L = 500 \text{ fb}^{-1}$**



Deviations for different models for new physics scale at ~1 TeV.  
Based on F. Richard, arXiv:1403.2893

# 暗黒物質 現在の宇宙観測

## ■ 宇宙のエネルギー組成

反物質                    ~0 %

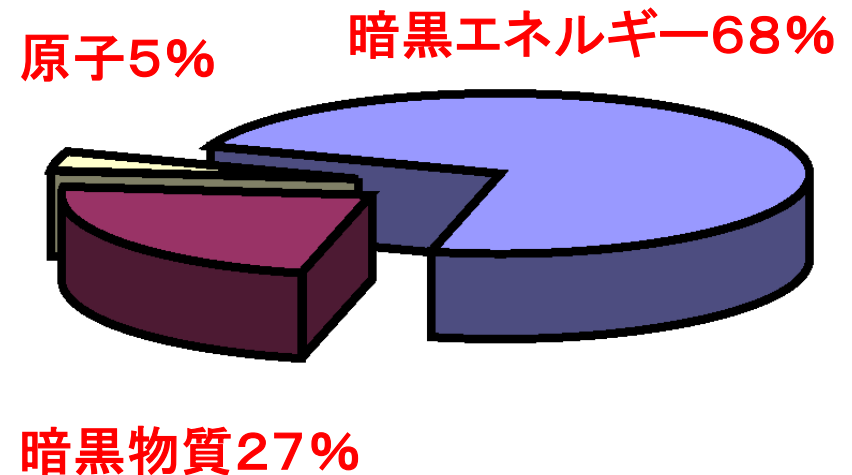
原子など                    5 %

暗黒物質                    27 %

暗黒エネルギー        68 %

(Planck衛星の結果)

95% は未解決

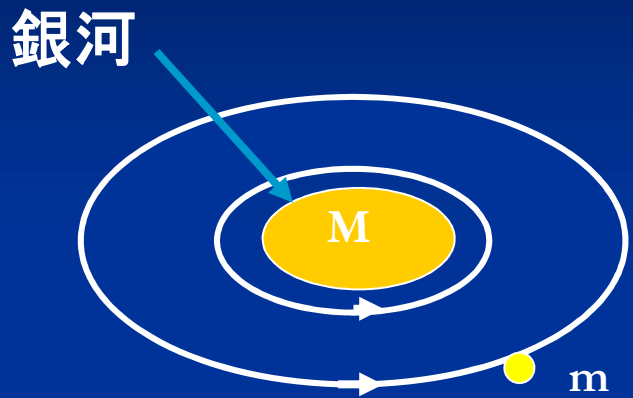


暗黒物質は宇宙の質量の80%以上を占める

これらは素粒子物理学で理解されるべき

# 宇宙の暗黒物質 (Dark Matter) の説明

## 銀河の周りを回る星の速度



重力 = 遠心力  $G M m / r^2 = m v^2 / r$

銀河外  $v = \sqrt{GM/r}$

銀河内  $v = \sqrt{4\pi G \rho / 3} r$

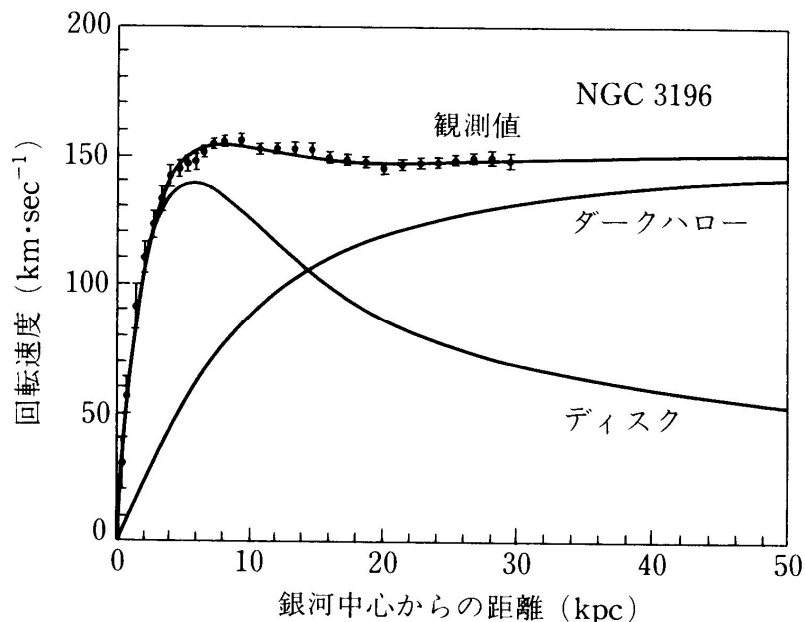
星がほとんどいない遠方まで行っても速度は減少しない。

⇒我々の銀河にも  $1 \text{ cm}^3$  当たりに陽子の質量の1/3の暗黒物質がある

暗黒物質が銀河の種となった。

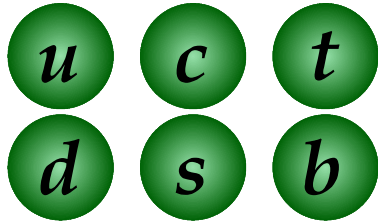
暗黒物質の起源である素粒子を発見し精査する ⇒ 暗黒物質生成のメカニズムを説明、密度を予言

$$\Omega \sim (m/T_F) T_0^3 / (\rho_c M_{\text{Pl}} \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle)$$

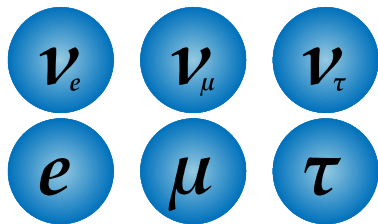


# 超対称性粒子

クォーク



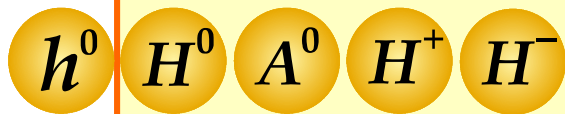
レプトン



ゲージ粒子



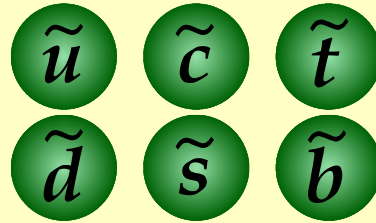
ヒッグス粒子 未発見



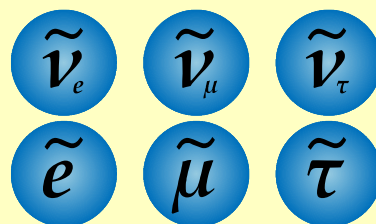
標準模型的な  
ヒッグス

拡張ヒッグス

スカラークォーク 未発見



スカラーレプトン 未発見



ゲージーノ 未発見



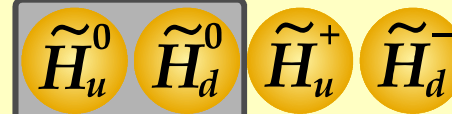
ビノ

ウィーノ

グルイーノ

暗黒物質候補

ヒグシーノ 未発見



## 超対称性

フェルミオンとボゾンの交換に対する対称性。超対称性があれば、ヒッグススケールが量子重力スケールと比べてなぜ小さいか説明できる。超弦理論でも超対称性が必須。

同じ質量を持つ超対称性パートナー粒子は未発見のため、超対称性は自発的に破れている必要がある。未知の新物理が超対称性粒子に対して働くさまざまな媒介機構が提唱されている。

電気的中性で超対称性粒子の中で最も軽いもの (Lightest Supersymmetric Particle: LSP) が暗黒物質候補となる。

## 暗黒物質候補

- Bino
- Wino
- Higgsino

# 超対称性(SUSY)はいくつもの問題を解決

## (1) ヒッグス粒子の質量の安定化

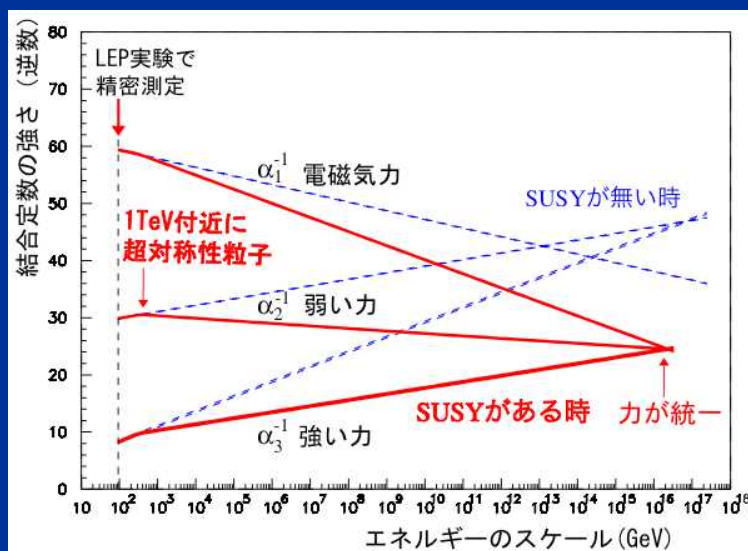
標準理論の枠内だと左図のような量子補正でヒッグス粒子の質量は2次発散



## (2) 最も軽い超対称性粒子は、宇宙の「暗黒物質」の最有力候補

⇒宇宙構造の理解

## (3) 超対称性は電磁力・弱い力・強い力の大統一を予言



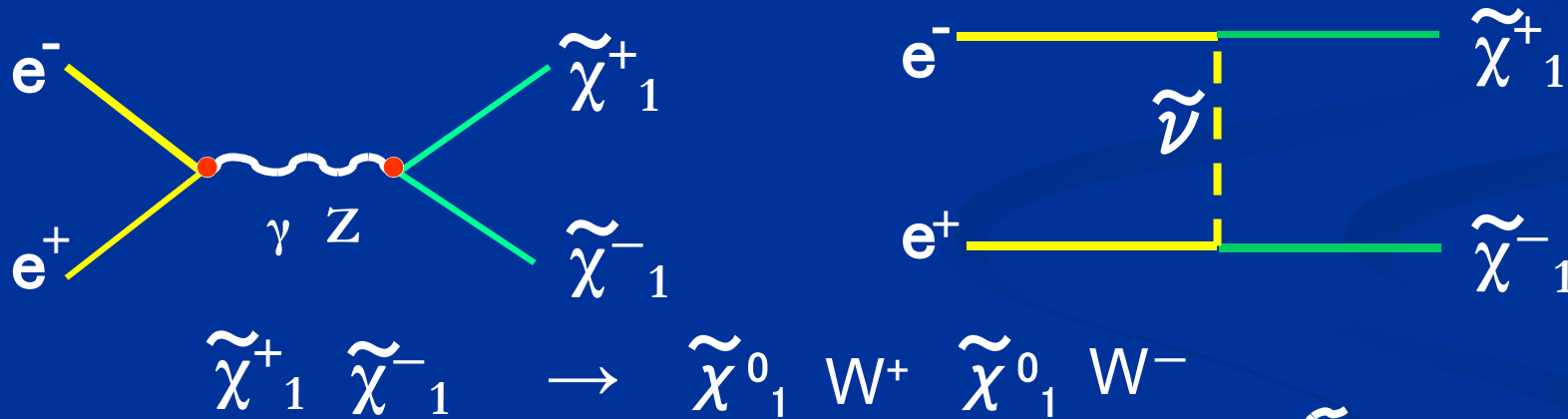
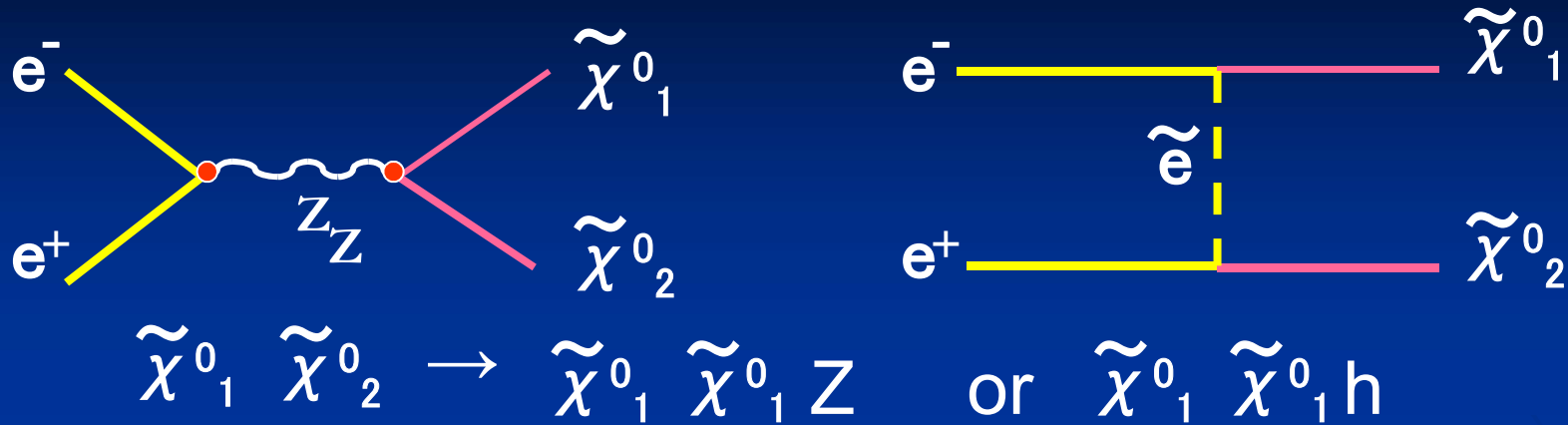
超対称性がない場合は3種の力が統一されない

超対称性があると $10^{16}$  GeVという高エネルギースケールで力が統一される

## (4) 重力を含む力の超統一で決定的な役割 (余剰空間次元の数を決める)

# ILCでの暗黒物質粒子の探索

質量の低い方から攻める



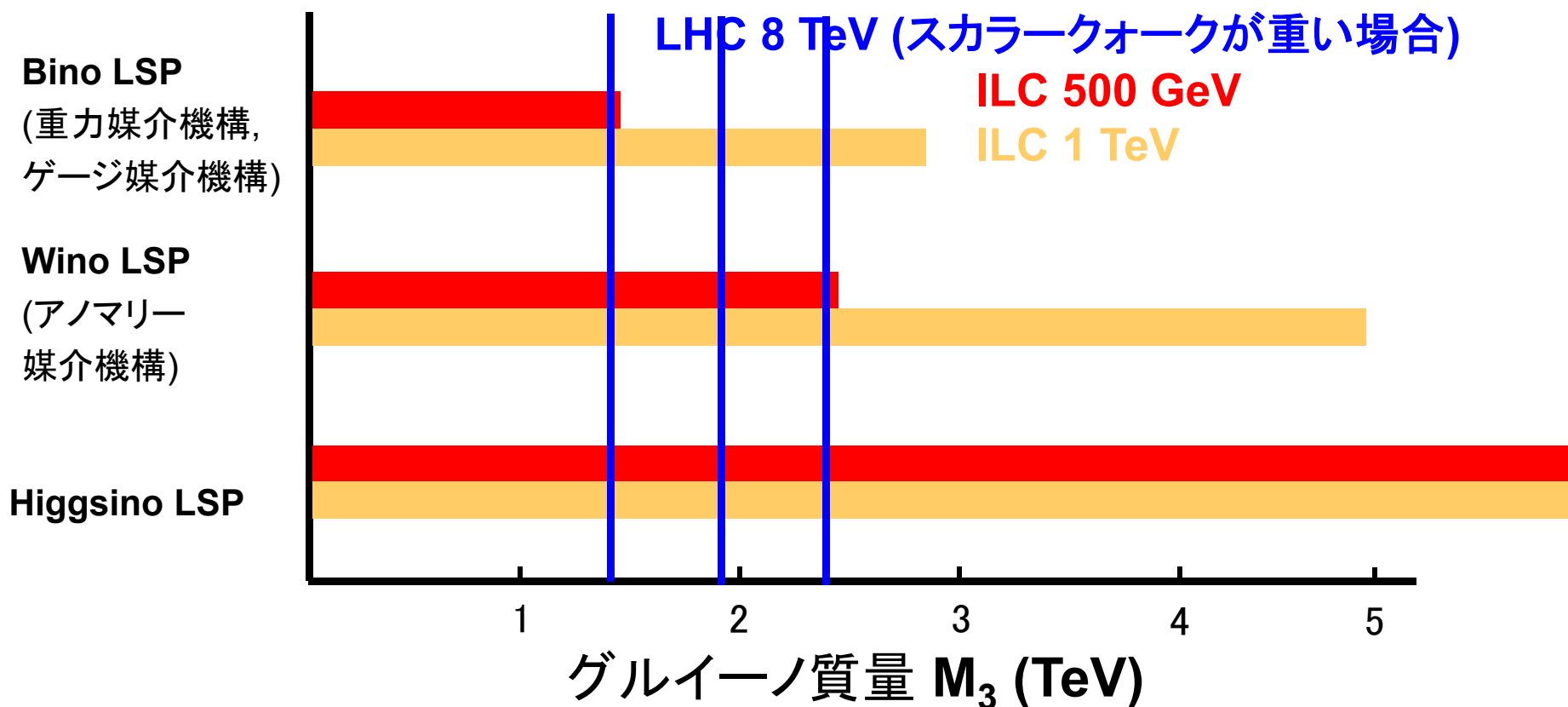


# 超対称性粒子に対する感度

LHC: グルイーノ探索

ILC: チャージーノ・ニュートラリーノ探索

→ 質量関係式をもちい、グルイーノ質量に焼き直して比較

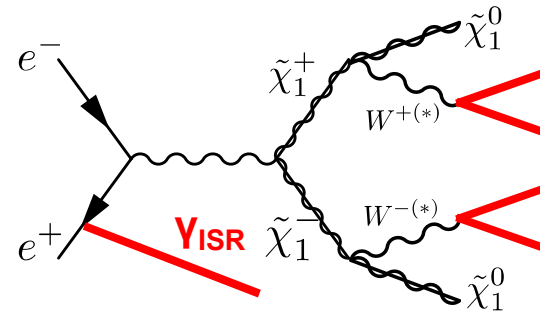


※備考: MSUGRA/GMSB 関係式  $M_1 : M_2 : M_3 = 1 : 2 : 6$ ; AMSB 関係式  $M_1 : M_2 : M_3 = 3.3 : 1 : 10.5$

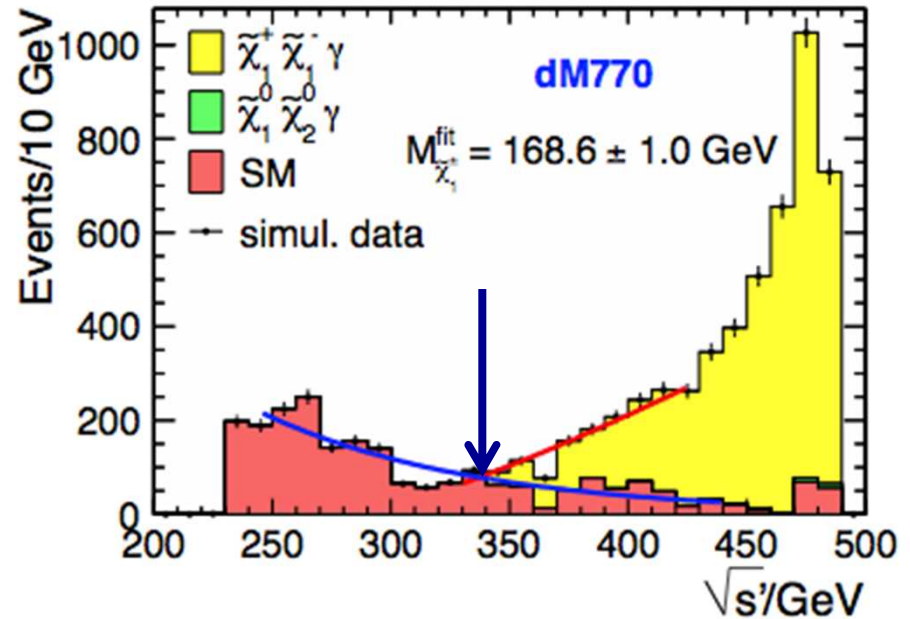
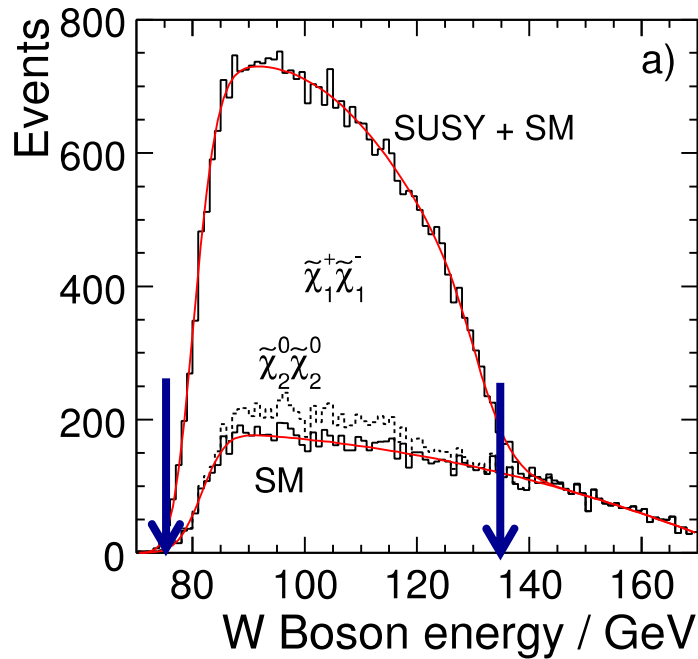
# SUSY発見後：質量・結合の精密測定

$$\tilde{\chi}_1^\pm = \text{○} \cdot \tilde{W}^\pm + \text{●} \cdot \tilde{H}^\pm$$

$\parallel$   
 $\langle \tilde{H}^\pm | \tilde{\chi}_1^\pm \rangle$



## SUSY粒子の質量精密測定



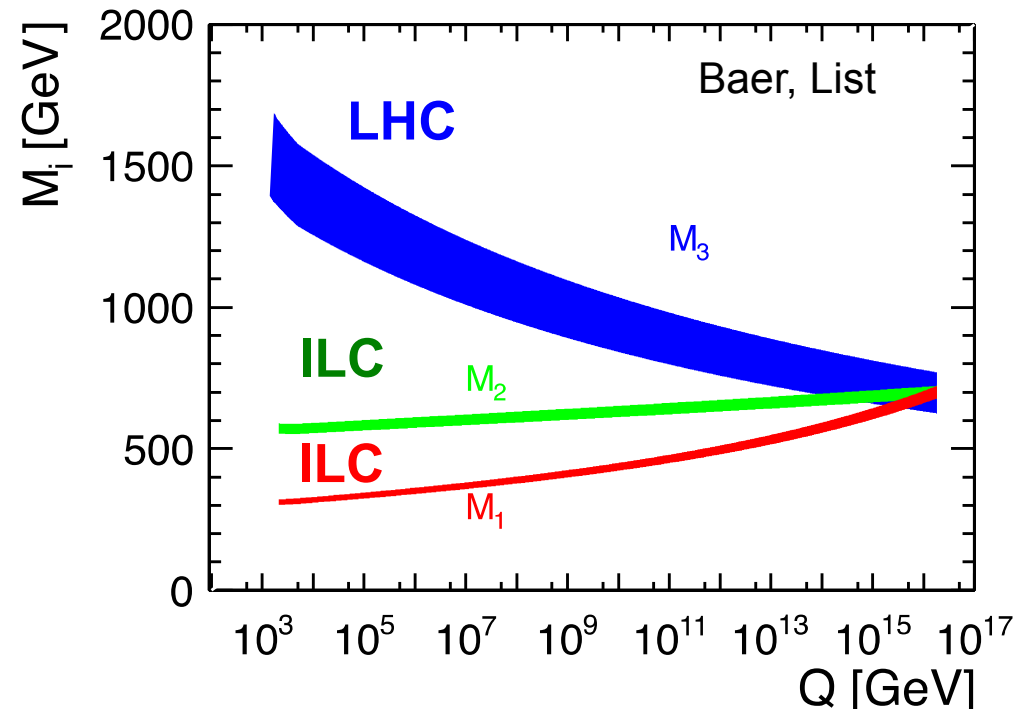
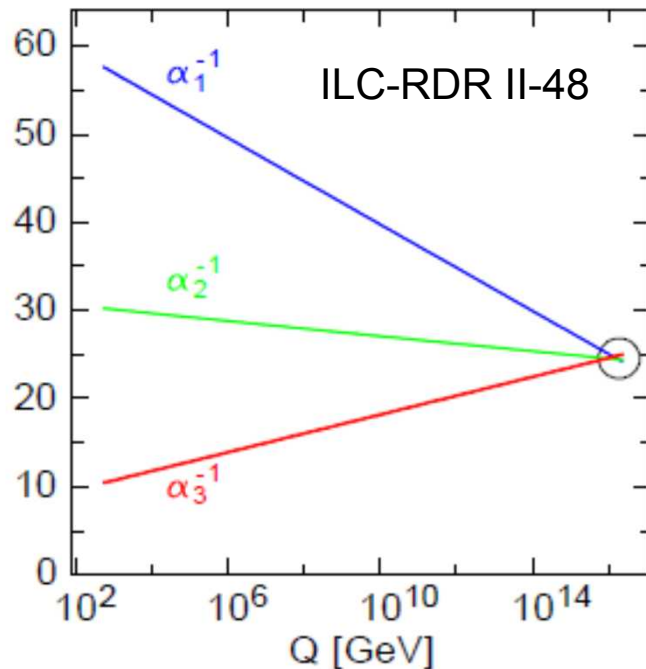
## 端点の場所で質量を決定

Chargino・Neutralinoが  
ジェットに崩壊するケース  
O(1)%の質量測定  
LSP=116 GeV  
NLSP=217 GeV

CharginoとNeutralinoの質量差が小さい場合  
は、初期制動放射(ISR)の光子を捕らえる。  
O(1)%の質量測定

# 大統一の検証

- ILC  $\rightarrow$   $M_1$ - $M_2$ のGUT relationをチェック可能
- LHCでgluinoが見つければ、ILC-LHC両方の測定で大統一のテストが可能
- LHCでgluinoが見つからなければ、ILCによって大統一の仮定の下でのgluino質量の予言が可能
- $M_1$ - $M_2$ のGUT relation のチェック  $\rightarrow$  超対称性の破れのシナリオの同定が可能: GUT, gauge mediation, anomaly mediation, etc.



## まとめ

ILCは昨年技術設計書(TDR)が完成し、国際組織(LCC)によって工学設計へと進んでる。ILCは**グローバルプロジェクト**として進んでいく。

ILCではクリーンな実験環境で、**ヒッグス粒子をプローブ**として、TeVスケールにおいて、標準理論を超える大分岐の方向を見極め、大統一やプランクスケールでの物理を俯瞰する。ヒッグス粒子の全貌を明らかにする。

トップクォークの精査によって、ヒッグス粒子ポテンシャルの安定性を調べ、標準理論を超えるモデルを識別する。

標準理論では説明ができない**暗黒物質**を形成する素粒子を探索し、発見の暁には精査し暗黒物質を解明する。

これらは**LHCやLH-LHCでの成果を凌駕するものであるが、LHCがともに走ることでより多くの相補的な知見が得られる。**