



# 250 GeV ILC の物理の意義 資料 4

- LCC物理作業部会「250 GeV 国際リニアコライダーの物理の意義」に基づいて -



リニアコライダーコラボレーション (LCC) 物理作業部会共同議長

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

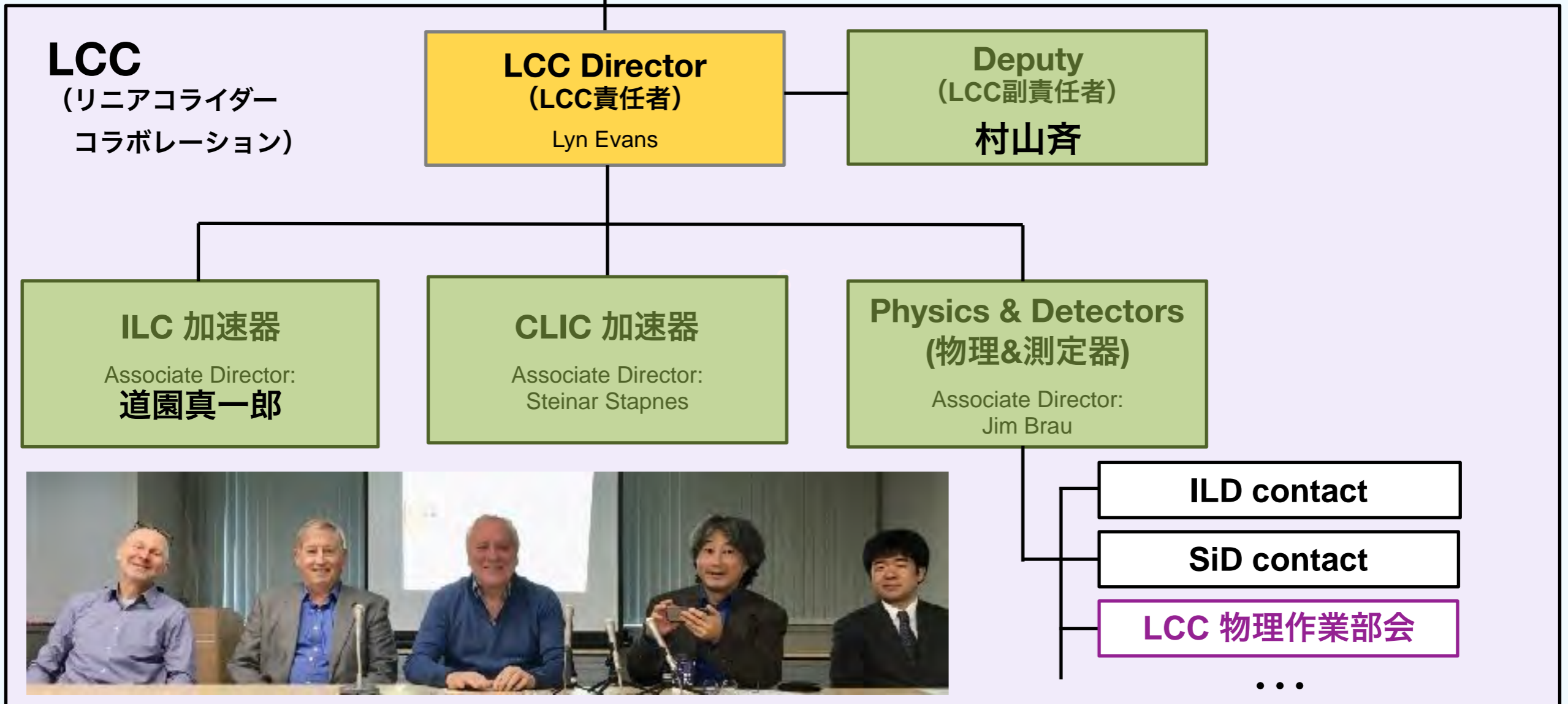
藤井恵介

2018/08/10 日本学術会議



**ICFA**  
 (国際将来加速器委員会)  
 議長: Geoffrey Taylor

**LCB**  
 (リニアコライダー国際推進委員会)  
 議長: **中田達也**



# 素粒子物理学とは

自然の究極の構成要素を探求し  
その間の相互作用を解明することを目的とする学問

## 究極目標

物質、力、そして時空  
の全てを一つの原理にまとめる  
統一理論の完成

# 統一の系譜

これまでの成功の例

ニュートンの  
運動方程式

地上の法則と天上の法則の統一

マックスウェル  
方程式

電気と磁気の統一 → 電磁気学

アンシュタインの  
相対性理論

特殊相対論：時間と空間の統一 → 時空  
一般相対論：時空と重力の統一

(重力を時空の幾何学に)

変形し運動する時空：時空は空っぽの入れ物ではない！

他の力も時空の幾何学に統一しようとするも成功を見ずに他界

場の量子論

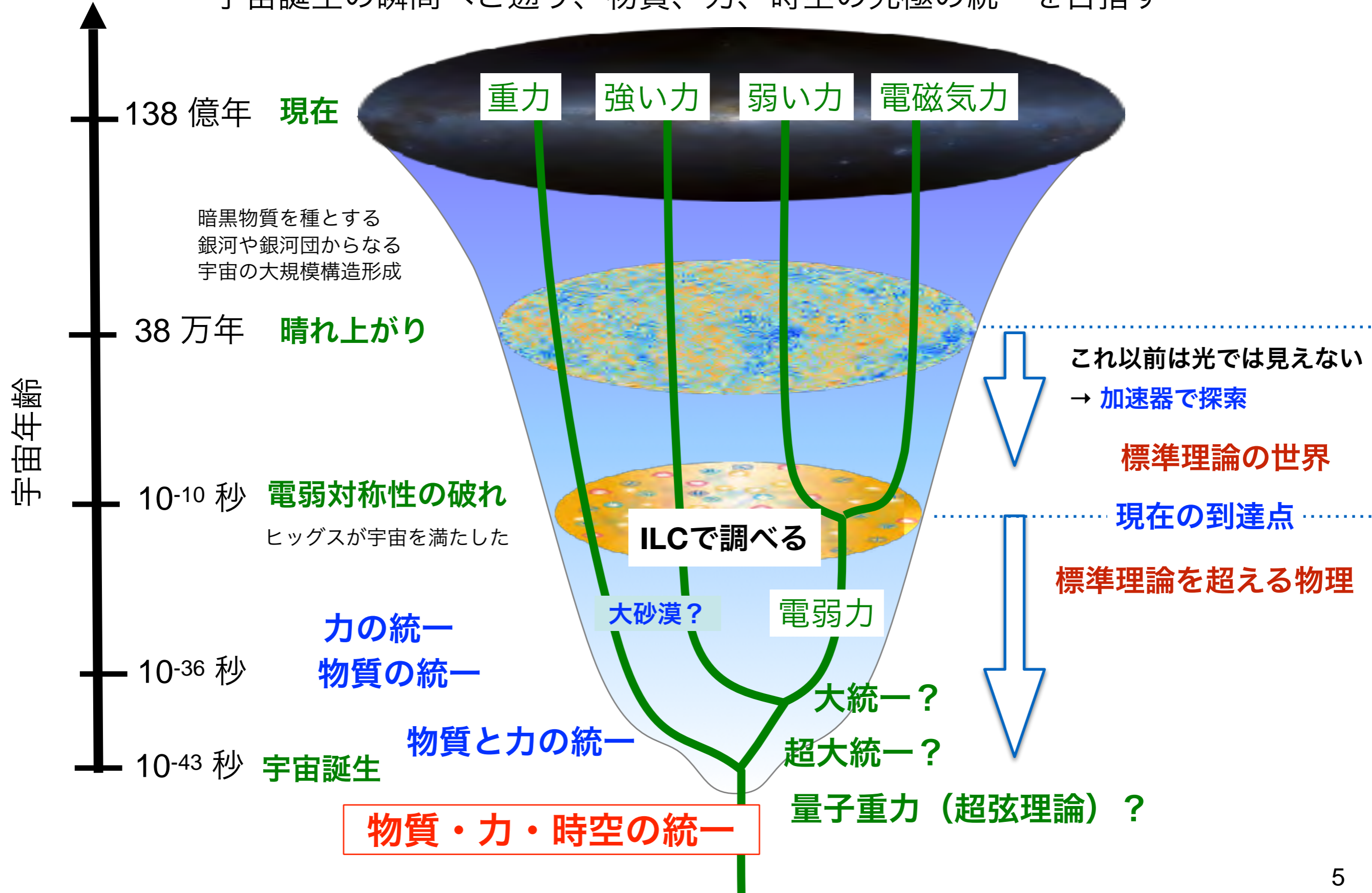
粒子性と波動性の統一

時空は粒子を作ったり消したりする能力を持つ：時空は  
空っぽの入れ物ではない！

その後の歩み：量子力学を受け入れ、先に重力以外の3つの力の統一を目指す

# 究極の統一を求めて

宇宙誕生の瞬間へと遡り、物質、力、時空の究極の統一を目指す



# 現在の到達点＝標準理論

物質粒子、力の粒子、ヒッグス粒子からなる自然像

**物質粒子** (クォークとレプトン)

**ゲージ粒子** ( $\gamma, W/Z, g$ )

電磁気力も弱い力も強い力も

**ゲージ対称性**で決まるゲージ粒子  
で伝達される

**質量を生む粒子** (H: ヒッグス粒子)

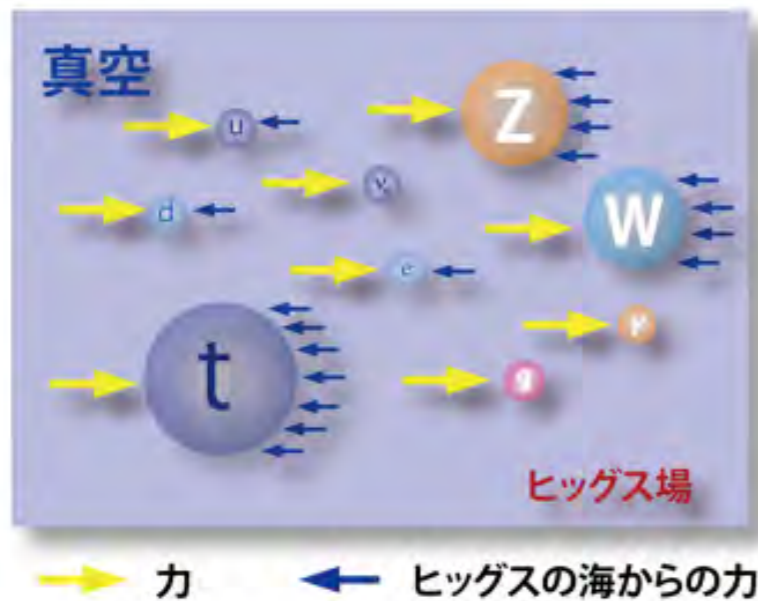
宇宙をヒッグスが遍く満たすことで  
素粒子が質量を持つ

1995年 FNAL Tevatron によるトップ (t) 発見  
→ 3 世代全ての物質粒子が完結

1983年 CERN (欧州) SPPS によるW/Z発見  
→ 電/弱/強全てのゲージ粒子が完結  
→ CERN LEP、SLAC (米国) SLC により  
ゲージ原理確立

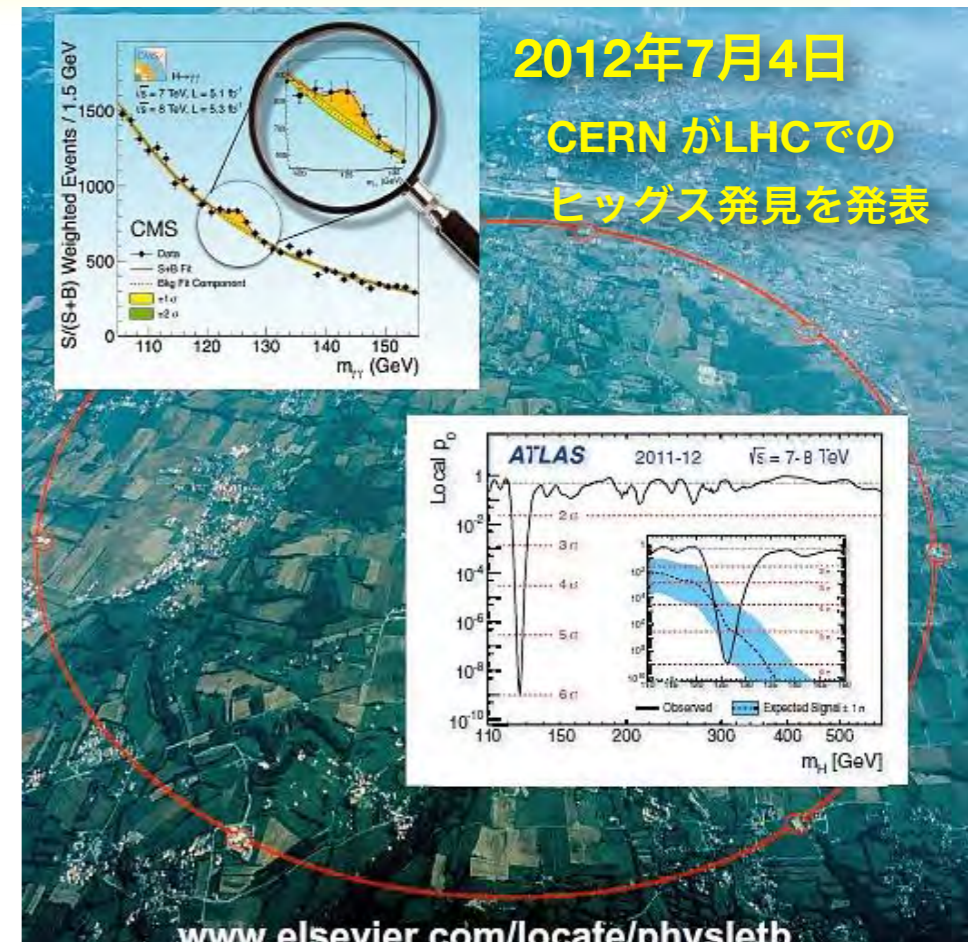
→ 2012年 LHCで発見: 標準理論完成

※ 質量＝動かしにくさ

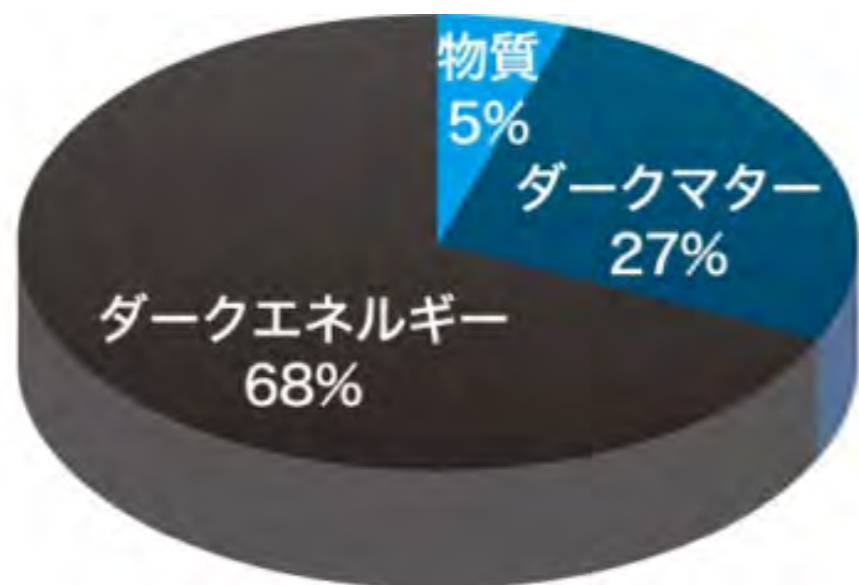


真空中に充満したヒッグスとぶつ  
かりやすい粒子ほど動かしにく  
い＝重い

- ※ 真空＝エネルギー最低の状態
- ※ LHC = Large Hadron Collider (大型ハドロンコライダー)



# 残された多くの謎



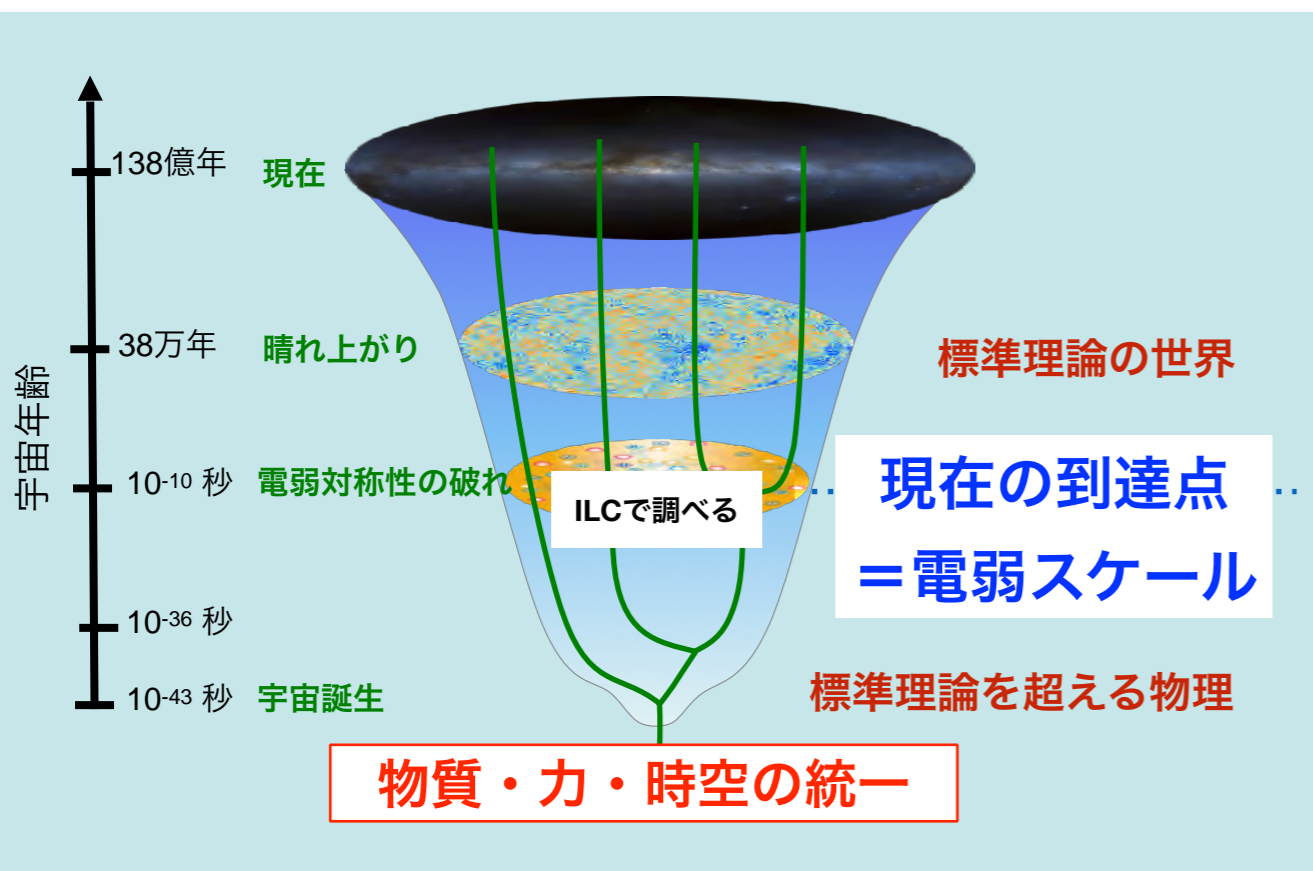
標準理論が説明できるのは宇宙の5%

- 暗黒物質
- 消えた反物質の謎
- ニュートリノ質量/混合
- 暗黒エネルギー
- ...

標準理論の（一応の）完成  
= 宇宙創成の瞬間に向けた  
新たな旅の始まり

→ 電弱スケール (= ヒッグスが宇宙を満たしたエネルギースケール) は道半ば

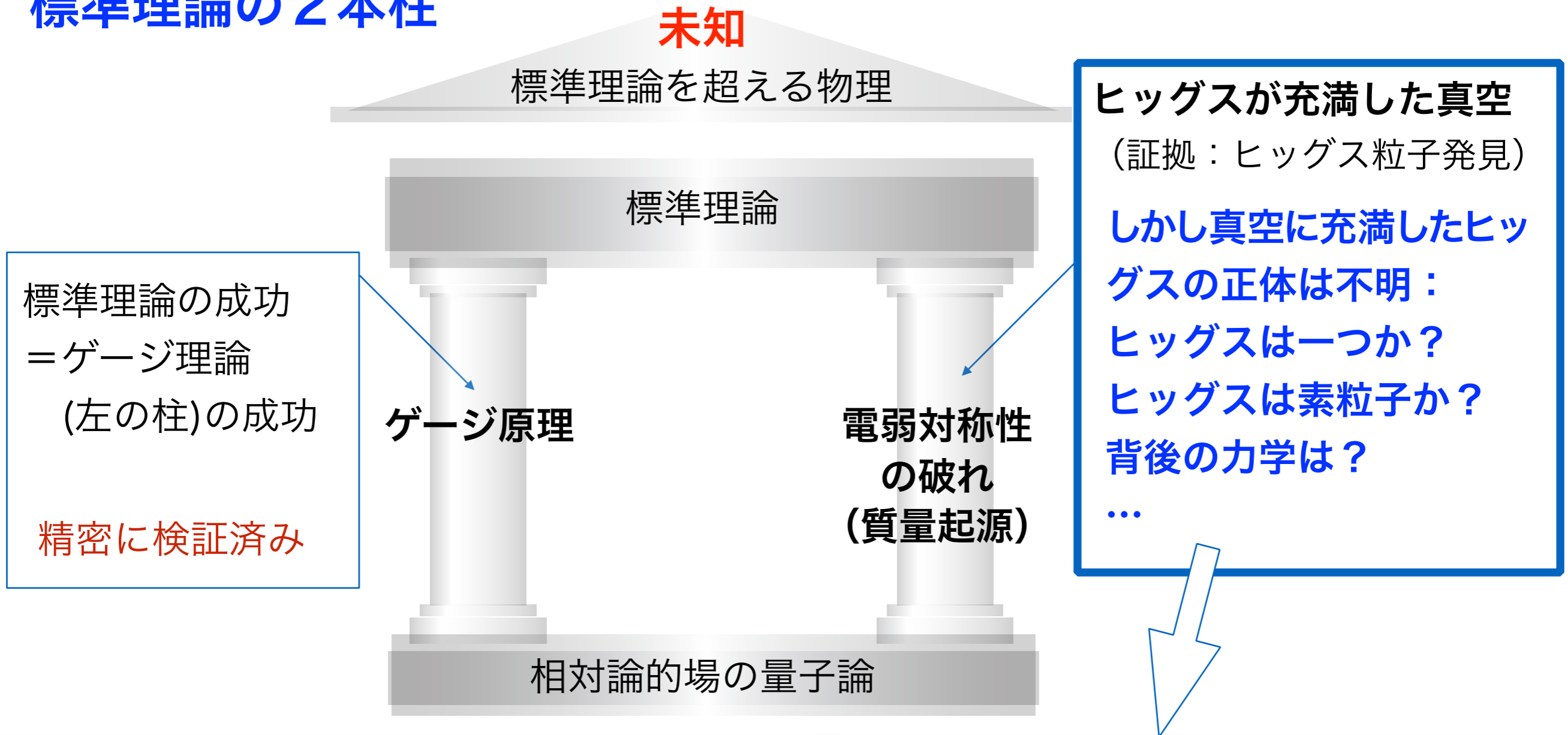
→ なぜ電弱スケールは重要か？



# なぜ電弱スケールは重要か？

真空中に充満したヒッグスの謎

## 標準理論の2本柱



とりわけ、「なぜヒッグスが宇宙を満たしたのか？」の答えは標準理論の枠外

ヒッグスが宇宙を満たした

**電弱スケールが謎を解く鍵**



# 250 GeV ILC の物理

宇宙に残された謎を理解するために必要な  
我々がまだ知らない  
物理法則が必ず存在する

それを特定することがILCの目的

2012年の Higgs 発見後、LHC では、衝突エネルギーを 8 TeV から 13 TeV にあげ、2015年から実験を続けている（LHC Run II 実験）。様々な成果を挙げているが、**これまでの所、標準理論を超える物理の兆候は現れていない。**

→ **LHC 探索領域に簡単に見つかる新粒子はない。**

→ **500 GeV ILC での新粒子発見の可能性は下がった。**

→ **標準理論を超える物理は必ず存在する。その効果はヒッグスの性質に標準理論からのズレとして刻印されている。新粒子の兆候がないことから大きなズレは期待できない。**

→ **新物理発見ツールとしての**

**ヒッグスの精密測定 への期待が非常に高まった。**

→ **軽い新粒子が LHC の死角にある可能性はある。**

→ **250 GeV ILC での探索で発見の可能性はある。**

**なぜヒッグスが宇宙を  
満たしたのか？**

**答えによって  
素粒子物理学の将来は  
大きく分岐**

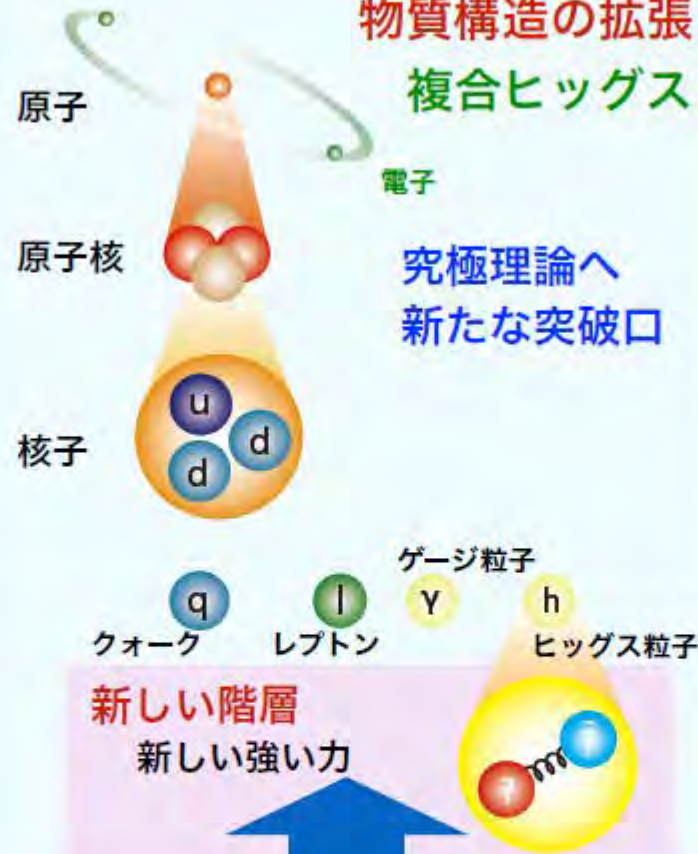
# 岐路に立つ素粒子物理学

時空概念の拡張  
超対称性または余剰次元

究極理論へ一直線



物質構造の拡張  
複合ヒッグス



全く新しい原理？  
複数字宇宙+人間原理？

標準理論と究極理論が直結？



第二の道：「より深い階層」

標準理論からのズレが見られなかった場合

第一の道：「新たな次元」

第三の道：「複数字宇宙？」

ILC

\*: 超対称性 = 物質粒子と力の粒子を入れ換える新しいタイプの次元

# 250 GeV ILC の物理 - 5つのノーベル賞級発見の例 -

## ✓ ヒッグスから超対称性

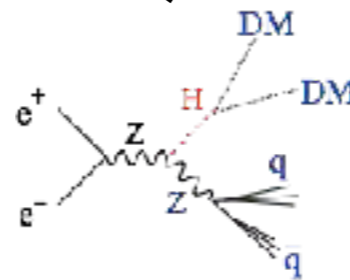
ヒッグス結合定数のズレが発見され、そのパターンが超対称模型の特徴を示す

## ✓ 複合ヒッグス

ヒッグス結合定数のズレが発見され、そのパターンが複合ヒッグス模型の特徴を示す

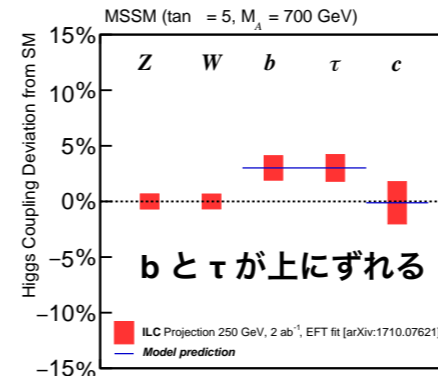
## ✓ 暗黒物質の発見 (間接的手法による)

ヒッグスが暗黒物質に崩壊  
単一光子過程での暗黒物質生成

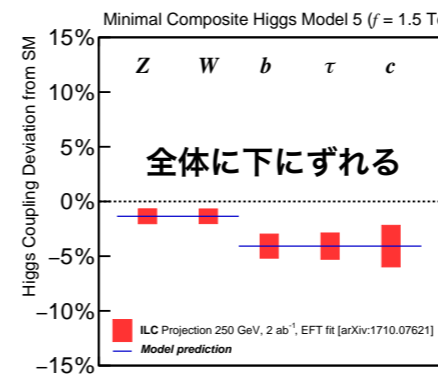


## ✓ 超対称性粒子の直接生成

ヒグシーノ(ヒッグス粒子の超対称パートナー) が暗黒物質の場合、LHCの超対称性探索の死角に入りやすい



⇒ 大統一、超弦理論

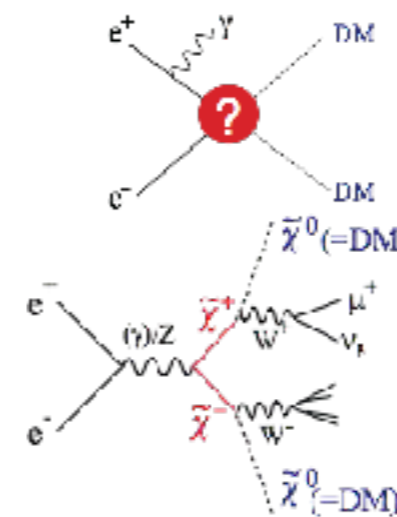


⇒ 新しい力

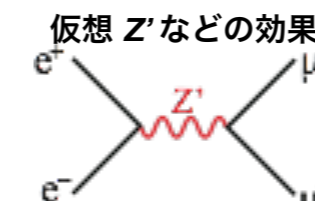
⇒ 新しいタイプの  
暗黒物質模型  
ヒッグスポータル等

## ✓ 余剰次元 (間接的手法による)

物質粒子対生成の生成頻度のズレが余剰次元の存在を示す



⇒ 超対称模型の特定



⇒ 重力とゲージ力の統一

どの場合も、TeV以上の新物理と宇宙初期のシナリオに大きく影響

インフレーション、バリオン数生成、ニュートリノ質量生成、暗黒物質の正体 …

# 250 GeV ILC の物理 - 5つのノーベル賞級発見の例 -

## ✓ ヒッグスから超対称性

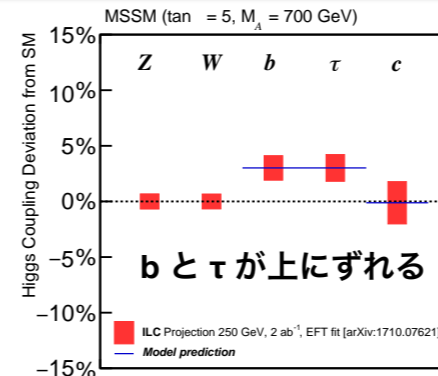
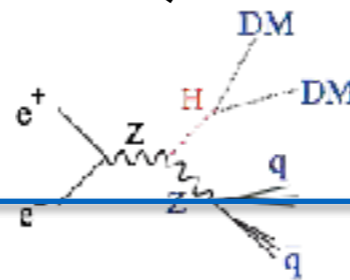
ヒッグス結合定数のズレが発見され、そのパターンが超対称模型の特徴を示す

## ✓ 複合ヒッグス

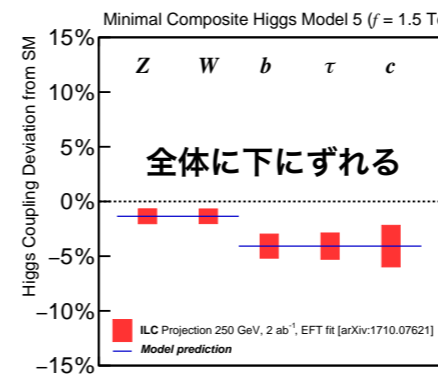
ヒッグス結合定数のズレが発見され、そのパターンが複合ヒッグス模型の特徴を示す

## ✓ 暗黒物質の発見 (間接的手法による)

ヒッグスが暗黒物質に崩壊  
単一光子過程での暗黒物質生成



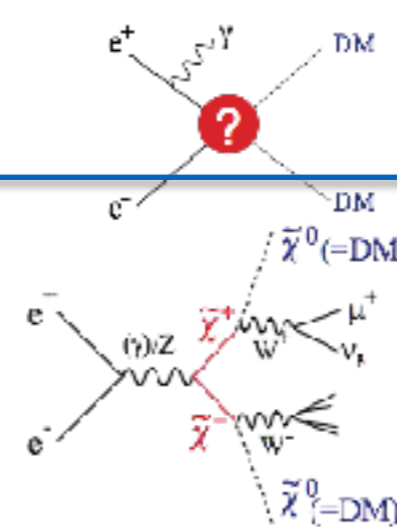
⇒ 大統一、超弦理論



⇒ 新しい力

## ✓ 超対称性粒子の直接生成

ヒグシーノ(ヒッグス粒子の超対称パートナー)が暗黒物質の場合、LHCの超対称性探索の死角に入りやすい

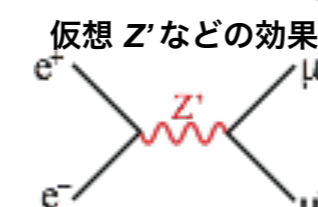


⇒ 新しいタイプの暗黒物質模型

ヒッグスポータル等

## ✓ 余剰次元 (間接的手法による)

物質粒子対生成の生成頻度のズレが余剰次元の存在を示す



⇒ 超対称模型の特定

⇒ 重力とゲージ力の統一

どの場合も、TeV以上の新物理と宇宙初期のシナリオに大きく影響

インフレーション、バリオン数生成、ニュートリノ質量生成、暗黒物質の正体 …

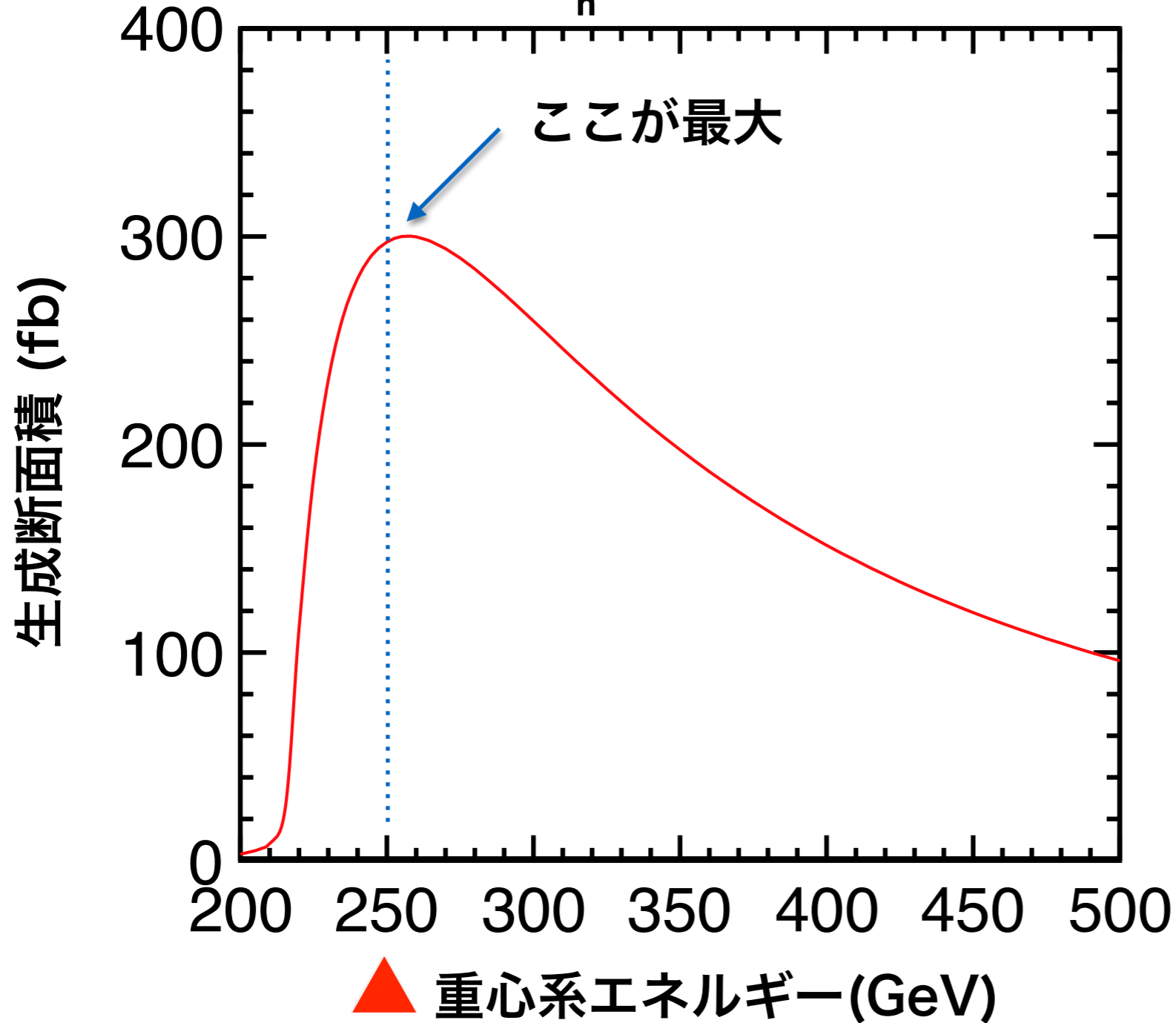
ヒッグス粒子を大量に作って調べる！

ヒッグス工場  
としての  
**250 GeV ILC**

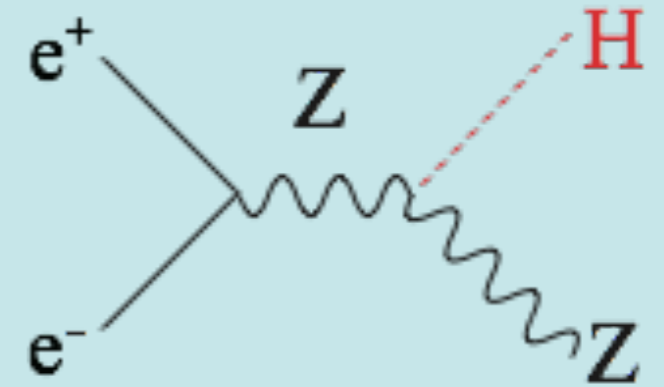
# 250 GeV は特別なエネルギー

ヒッグス生成断面積が最大！

$P(e^-, e^+) = (-0.8, 0.3)$ ,  $M_h = 125 \text{ GeV}$



※: 生成断面積 = ヒッグスの出来やすさ



ILC での  
1 ヒッグス生成で  
最も重要な反応過程

(約50万個:  $2 \text{ ab}^{-1}$ )

大量のヒッグス粒子を生成し、精密測定する！



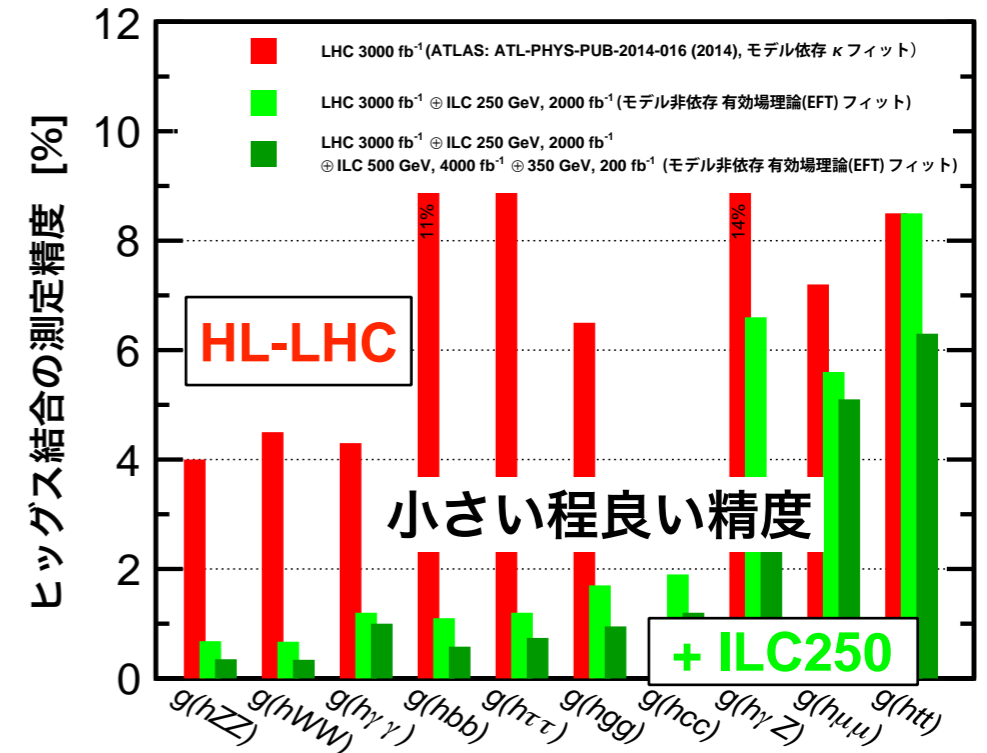
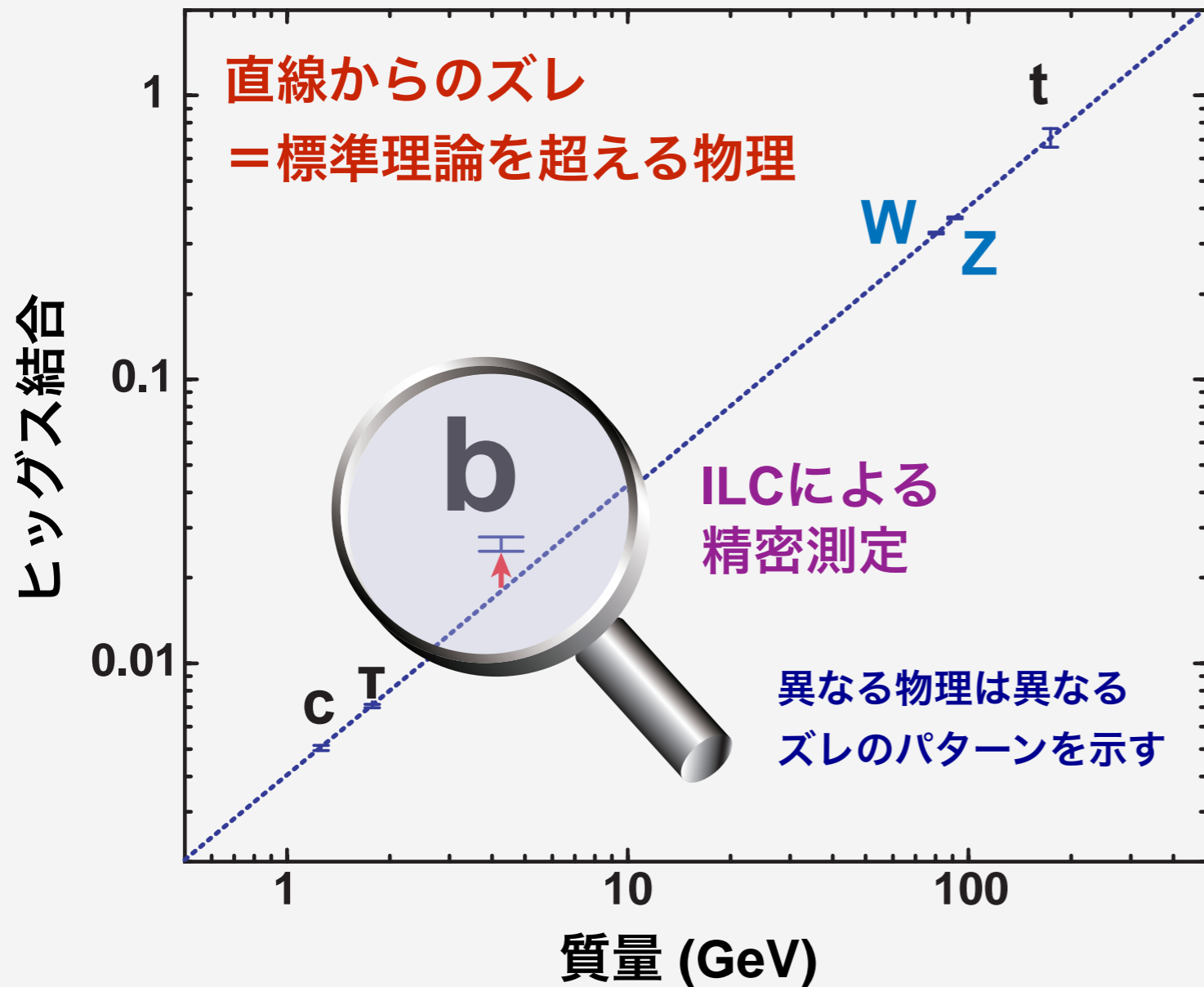
# ヒッグス結合

標準理論を超える物理の効果はヒッグス結合の標準理論の予想からのズレとして現れる

※: **ヒッグス結合** = ヒッグス粒子と他の粒子の間の相互作用の強さを表す定数

※: **BSM 物理** = **B**eyond the **S**tandard **M**odel (標準理論を超える物理)

※: **HL-LHC** = **H**igh **L**uminosity **L**H**C** (高度化後のLHC)



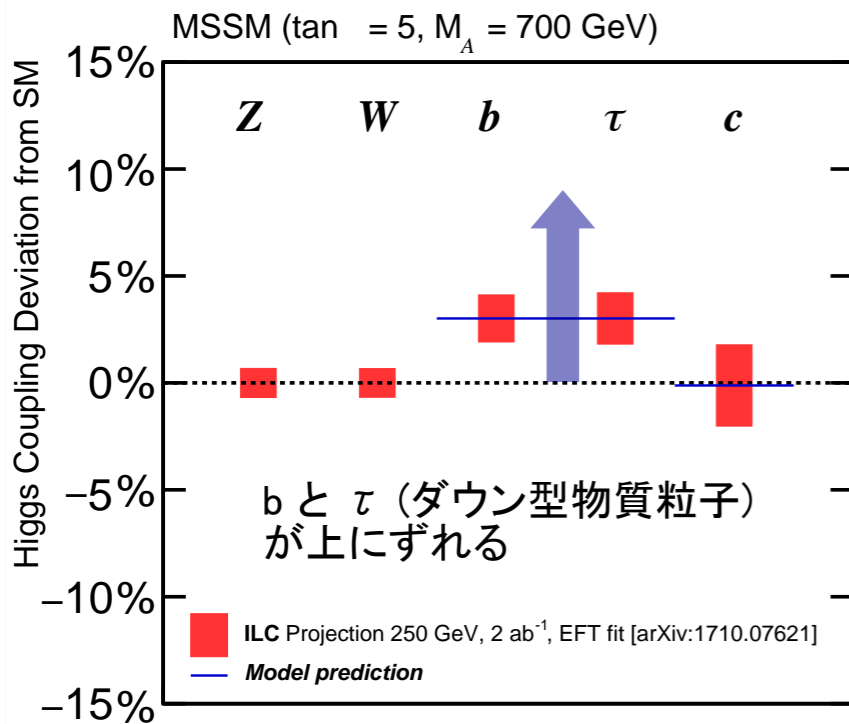
次のページで見るように期待されるズレは小さい

高い精度が必要 → LHCでは不十分 → **ILC**

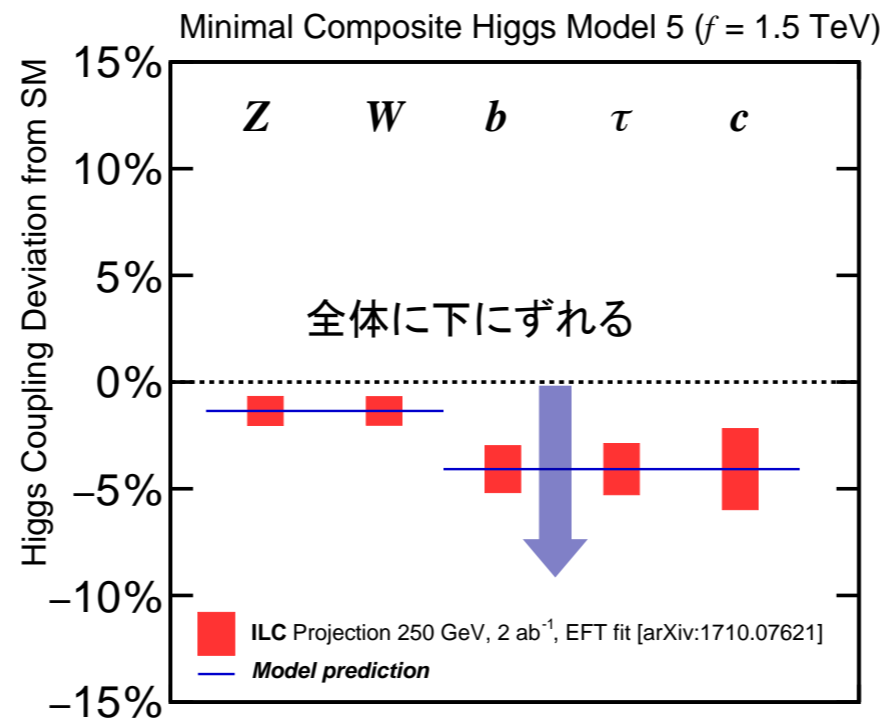
# どの道に進むのか？

3つの道の違いはズレのパターンの違いとして現れる

## 超対称性

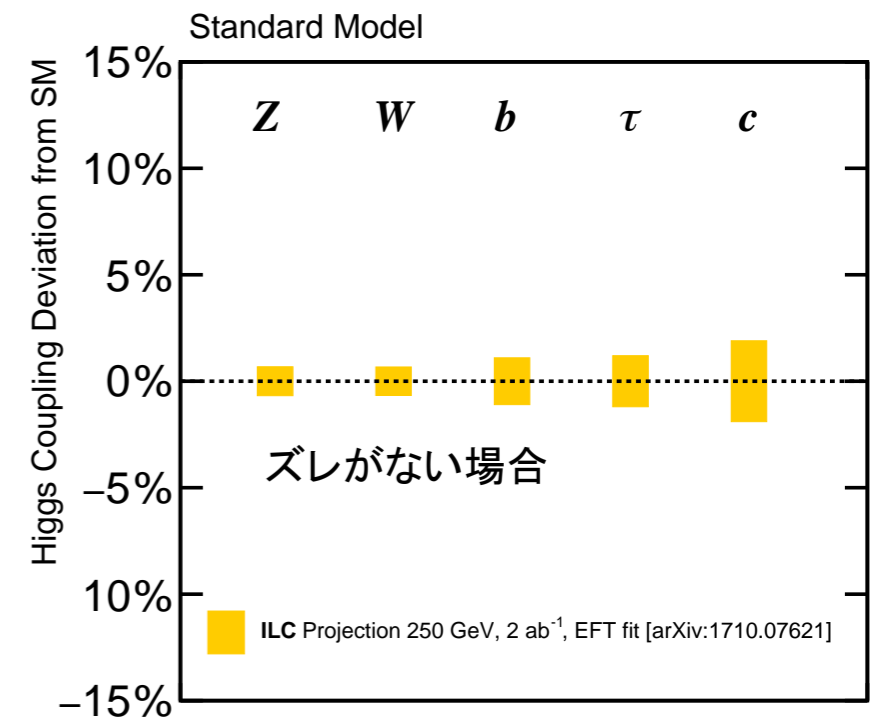


## 複合ヒッグス



## 複数宇宙？

(標準理論)

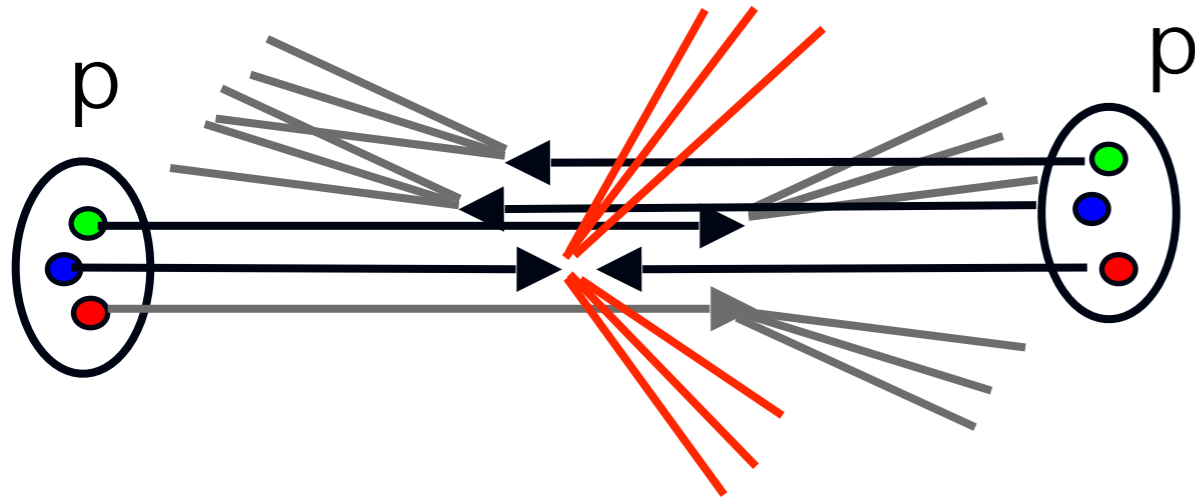


ILCの精度があれば、ズレのパターンから進路が決まる

**なぜILCでは  
精密測定が可能なのか？**

# ILCのクリーンな環境

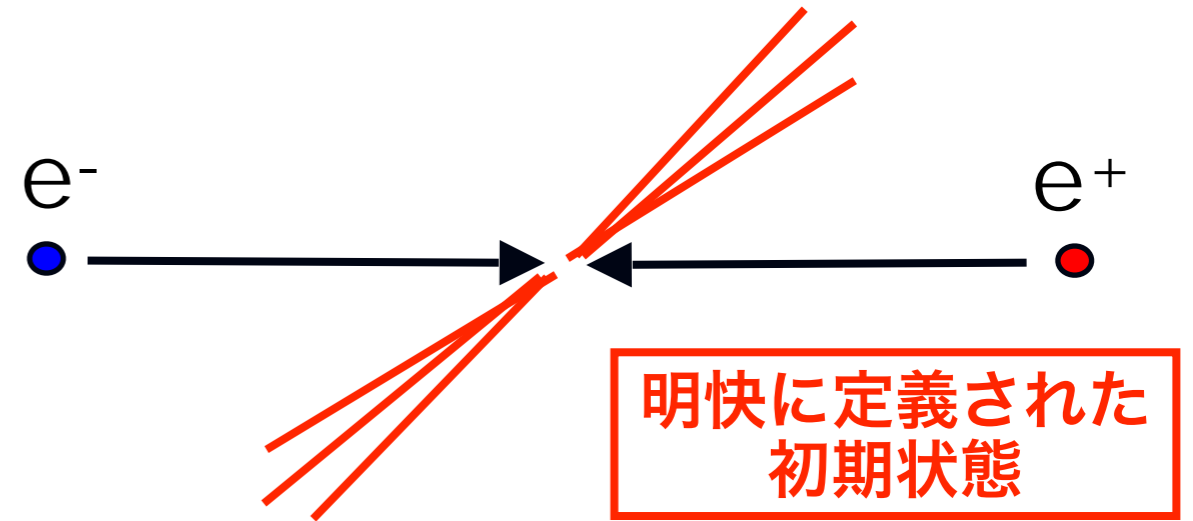
## LHC: 複合粒子同士の衝突



重心系エネルギー 7-14 TeV

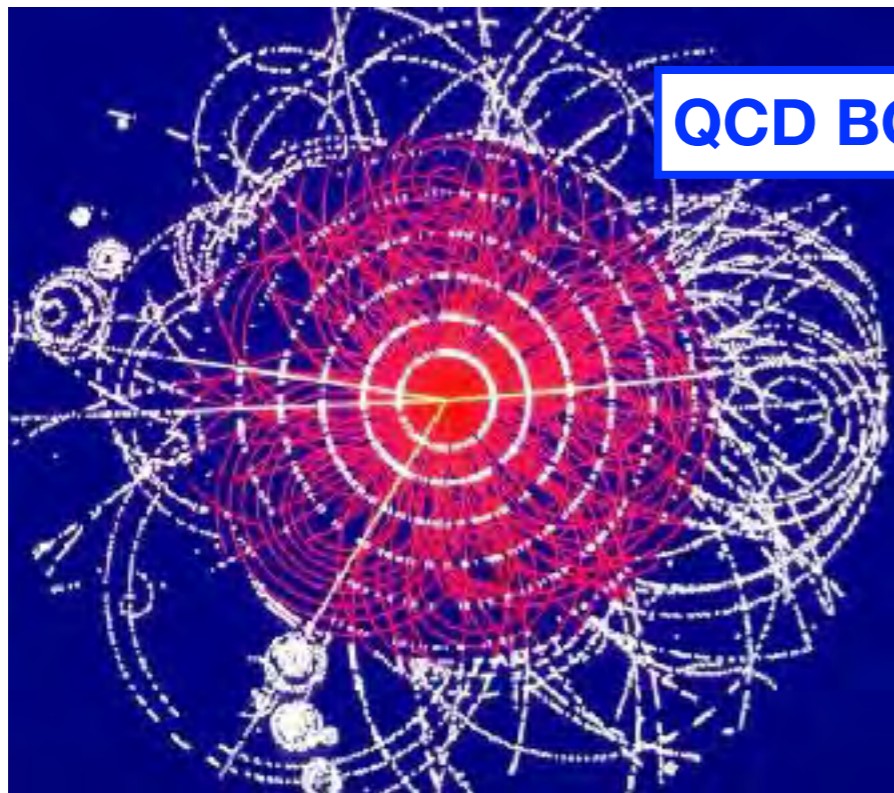
衝突毎に複数回反応  
初期状態不定性

## ILC: 素粒子同士の衝突



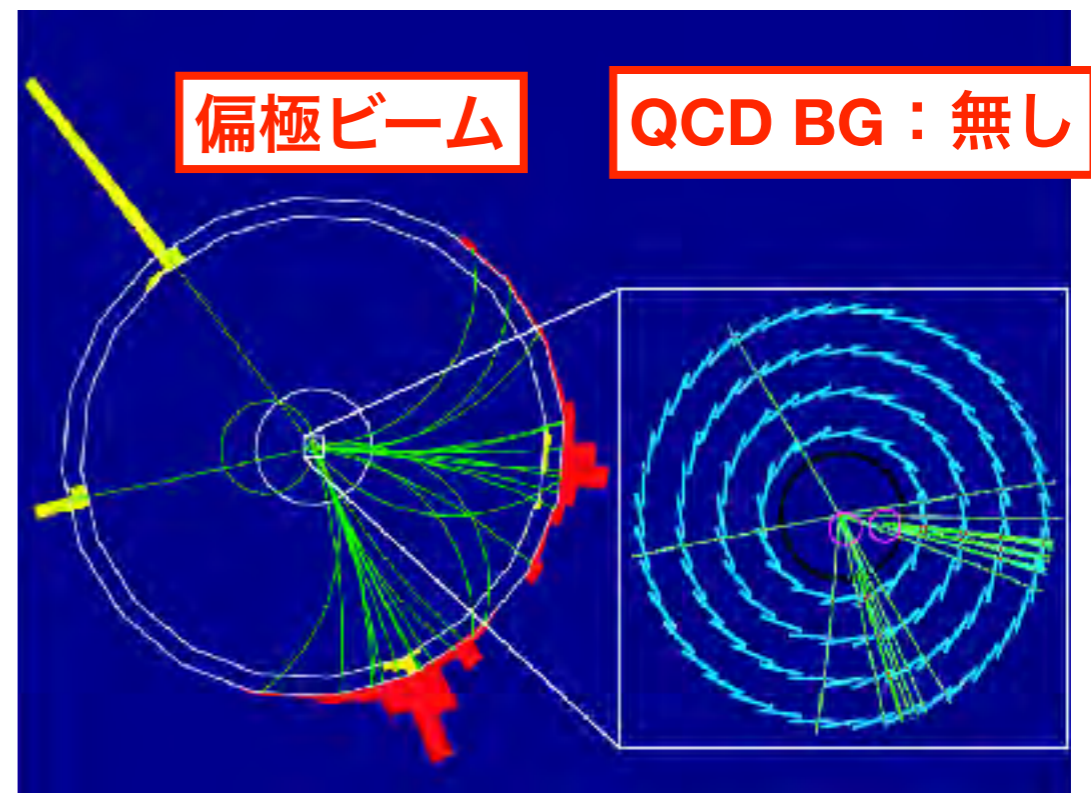
重心系エネルギー 250 GeV

1 衝突 1 反応  
重心系 = 実験室系



QCD BG : 大

- ※: BG = Back Ground (背景事象)
- ※: QCD = Quantum Chromo-Dynamics (標準理論の中の強い力を表す部分)



偏極ビーム

QCD BG : 無し

陽子は複合粒子 ⇒ 相互作用が複雑  
到達可能なエネルギーは高い

素粒子同士の衝突であり、余分な粒子が出てこない  
新現象を見逃す事がない。

# 高性能測定器

技術設計報告書 (TDR) に記載されている2つの測定器提案 (国際的に設計開発が進行中)

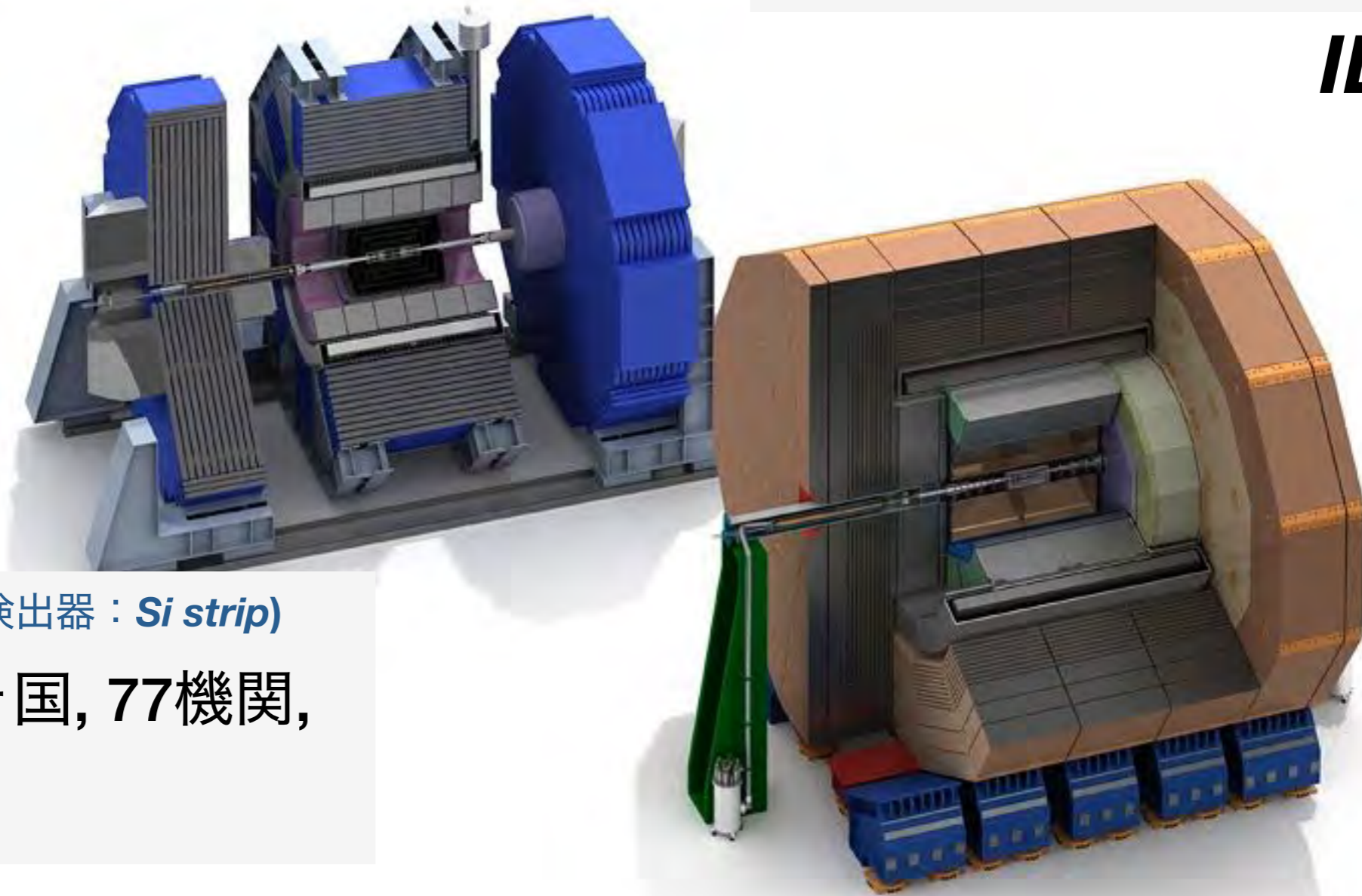
- ILC 測定器の性能は、LHC と比較して運動量分解能で~10倍、細密度で100~1000倍程度。
- これはILCのクリーンな環境があって初めて可能。同じことは LHC 環境では不可能。

- **大きな半径** (中央飛跡検出器 : **TPC**)
- **LOI 署名者: 32ヶ国, 151機関, ~700人**

**ILD**

**SiD**

- **高磁場** (中央飛跡検出器 : **Si strip**)
- **LOI 署名者: 18ヶ国, 77機関, ~240人**



# 250 GeV ILCでの 新粒子発見の可能性

- 過去の最高エネルギー電子陽電子コライダー  
（CERN の LEP2）に比べて  $10^3$  高いルミノシティ
- ビーム偏極
- より高性能な測定器

により、**微弱な信号に対する感度が大きく向上する。**

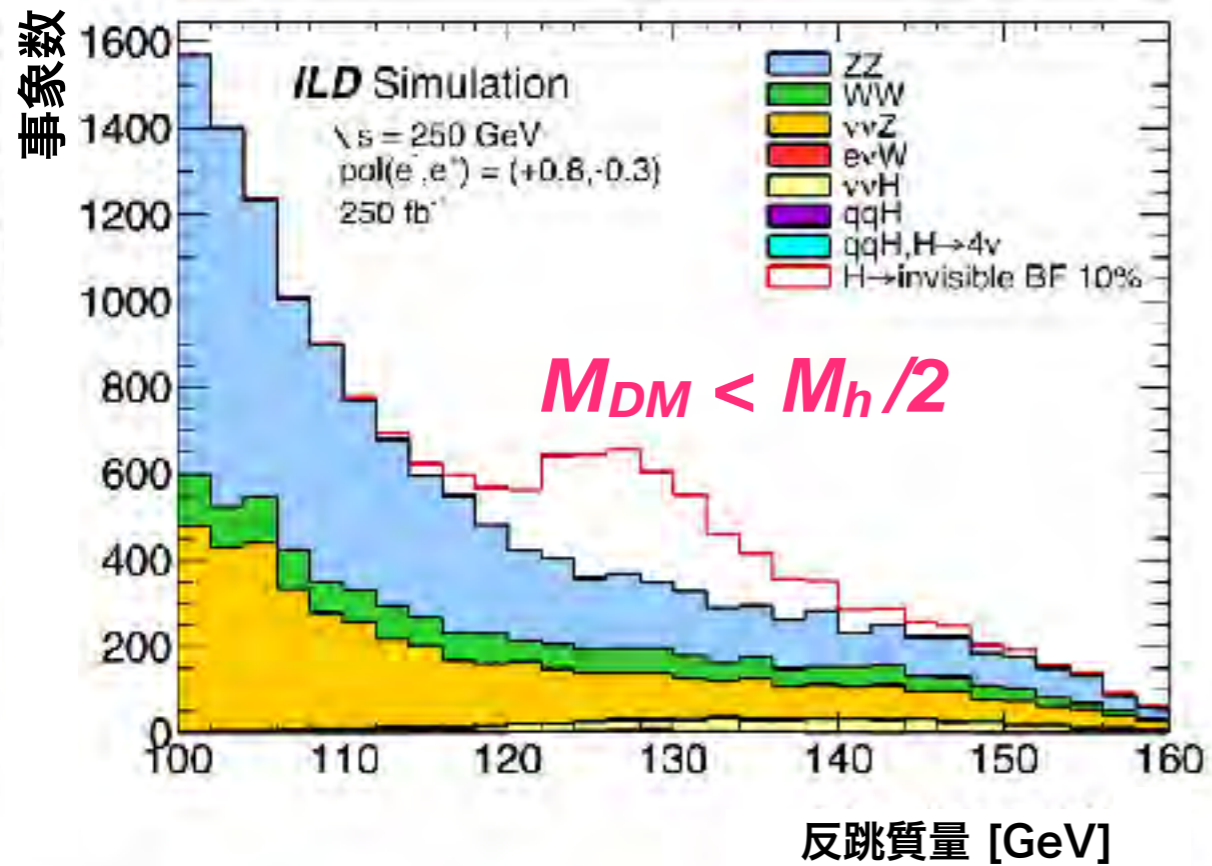
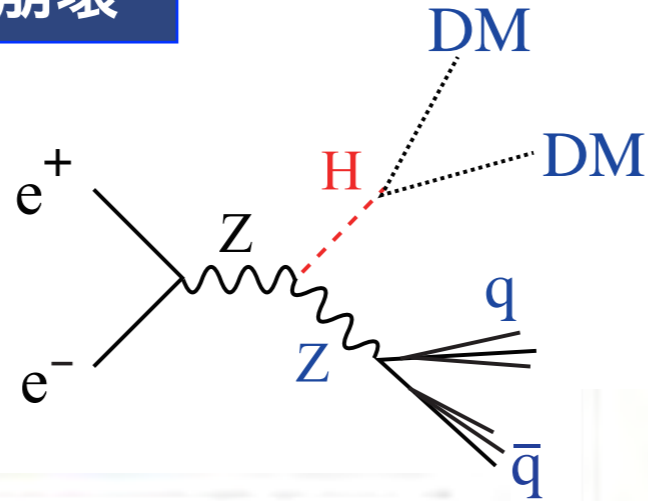
※ ルミノシティ = ビーム強度の単位  
反応頻度 = ルミノシティ × 反応断面積

# 暗黒物質 (WIMP) 探索 @ 250 GeV ILC

Weakly Interacting Massive Particle

## 1. ヒッグスの不可視崩壊

暗黒物質 (Dark Matter) がヒッグスとのみ相互作用する場合に有効



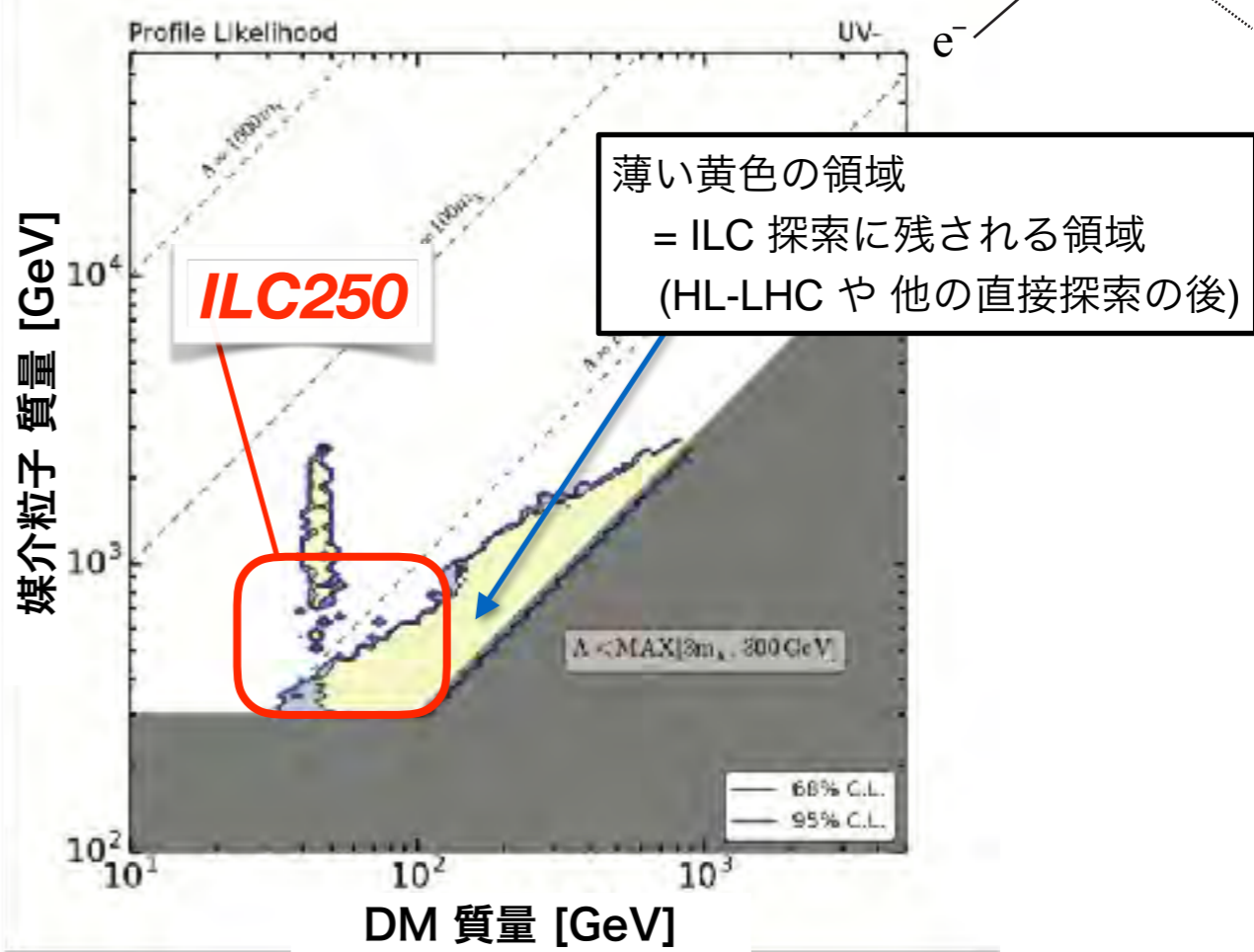
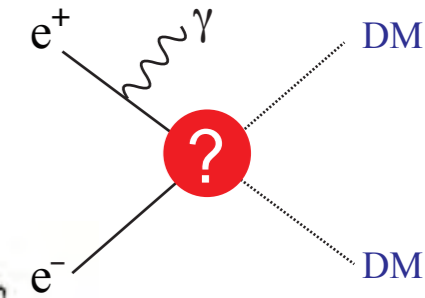
探索可能不可視崩壊の分岐比：0.3% まで

HL-LHC の 20倍の感度

## 2. 単光子生成探索

様々なタイプの暗黒物質に感度を持つ探索

特に直接探索や、LHC での探索では発見が難しいレプトンや電弱ゲージボソンに結合する暗



250 GeV でもかなり発見の可能性はある

※: HL-LHC = High Luminosity LHC (高度化された LHC)

**250 GeV ILCでできることは  
非常にたくさんある！**



# 非常に多くの研究対象

## ヒッグス精密測定

- ILCで確実にできる測定
- ヒッグス粒子は特別

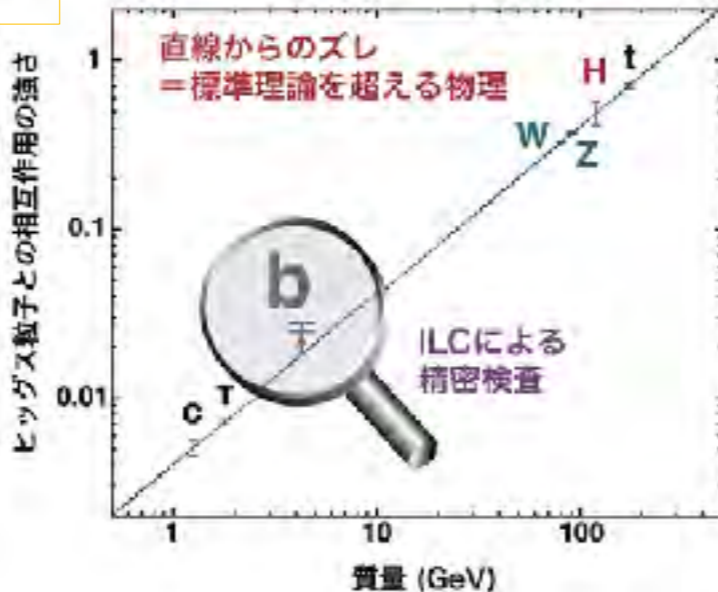
包含断面積:  $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 包含断面積:  $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 包含断面積:  $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow q q)$   
 Zボソンの角分布:  $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 Zボソンの角分布:  $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 Zボソンの角分布:  $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow q q)$   
 部分生成断面積:

$e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow b b) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow c c) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow g g) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+ \tau^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow W W) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow Z Z) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{“exotic”}) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow b b) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow c c) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow g g) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+ \tau^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow W W) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow Z Z) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{“exotic”}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow b b) (Z \rightarrow q q)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow c c) (Z \rightarrow q q)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow g g) (Z \rightarrow q q)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+ \tau^-) (Z \rightarrow q q)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow q q)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow W W) (Z \rightarrow q q)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow Z Z) (Z \rightarrow q q)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow q q)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{“exotic”}) (Z \rightarrow q q)$   
 包含断面積:  $e^+e^- \rightarrow \gamma H$

光子の角分布:  $e^+e^- \rightarrow \gamma H$

### CP効果

$e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+ \tau^-) (Z \rightarrow q q)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+ \tau^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+ \tau^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+ \tau^-) (Z \rightarrow \nu \nu)$   
 $H \rightarrow (W \rightarrow q q) (W \rightarrow q q)$   
 $H \rightarrow (W \rightarrow q q) (W \rightarrow l \nu)$   
 $H \rightarrow (Z \rightarrow q q) (Z \rightarrow q q)$   
 $H \rightarrow (Z \rightarrow q q) (Z \rightarrow l l)$   
 $H \rightarrow (Z \rightarrow l l) (Z \rightarrow l l)$



## 電弱相互作用精密検証

- ILCで確実にできる測定
- LEPの3桁上の統計量
- ヒッグス精密測定と密接に関係
- 偏極が非常に重要

断面積:  $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q q) (W \rightarrow q q)$   
 断面積:  $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q q) (W \rightarrow l \nu)$   
 断面積:  $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow l \nu) (W \rightarrow l \nu)$   
 Wボソンの崩壊分岐比、質量、幅:

$e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q q) (W \rightarrow q q)$   
 $e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q q) (W \rightarrow l \nu)$   
 3重ゲージ結合のCP保存測定:

$e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q q) (W \rightarrow l \nu)$   
 3重ゲージ結合のCPの破れ測定:

$e^+e^- \rightarrow (W \rightarrow q q) (W \rightarrow l \nu)$   
 断面積:  $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q q) (Z \rightarrow q q)$

断面積:  $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q q) (Z \rightarrow l l)$

断面積:  $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow l l) (Z \rightarrow l l)$   
 異常3重ゲージ結合のCP保存測定:

$e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q q) (Z \rightarrow q q)$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q q) (Z \rightarrow l l)$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow l l) (Z \rightarrow l l)$   
 異常3重ゲージ結合のCPの破れ測定:

$e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q q) (Z \rightarrow q q)$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q q) (Z \rightarrow l l)$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow l l) (Z \rightarrow l l)$   
 断面積:  $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$

光子の角分布:  $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$

断面積:  $e^+e^- \rightarrow \gamma \gamma$

角分布:  $e^+e^- \rightarrow \gamma \gamma$

## 新粒子探索

- 新物理の直接的証拠の発見可能性

新たなヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow e^+e^-) + X$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow \mu^+\mu^-) + X$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q q) + X$   
 $e^+e^- \rightarrow A H$

1荷電ヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow H^\pm H^\pm H \rightarrow \tau^+ \nu, c s, c b$   
 $e^+e^- \rightarrow W^\pm H^\pm$

2荷電ヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow W^+ W^+ + X$   
 $e^+e^- \rightarrow e^+e^+ + X$      $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^+ + X$   
 $e^+e^- \rightarrow \tau^+ \tau^+ + X$

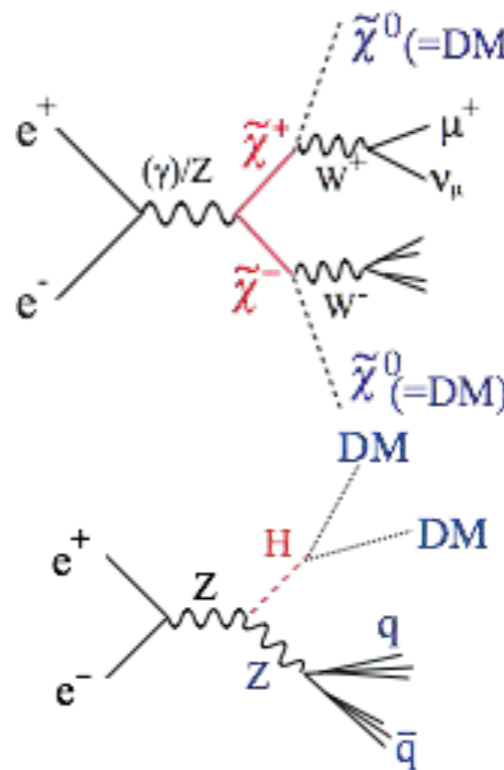
励起レプトン探索

長寿命粒子探索

重イオン粒子探索

新粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow e e + X$      $e^+e^- \rightarrow \mu \mu + X$   
 $e^+e^- \rightarrow \tau \tau + X$      $e^+e^- \rightarrow e \mu + X$   
 $e^+e^- \rightarrow e \tau + X$      $e^+e^- \rightarrow \mu \tau + X$   
 $e^+e^- \rightarrow b b + X$      $e^+e^- \rightarrow c c + X$   
 $e^+e^- \rightarrow q q + X$      $e^+e^- \rightarrow b c + X$   
 $e^+e^- \rightarrow b q + X$      $e^+e^- \rightarrow c q + X$   
 $e^+e^- \rightarrow g g + X$      $e^+e^- \rightarrow e q + X$   
 $e^+e^- \rightarrow \mu q + X$      $e^+e^- \rightarrow \tau q + X$   
 $e^+e^- \rightarrow W + X$      $e^+e^- \rightarrow Z + X$   
 $e^+e^- \rightarrow \gamma + X$



## 2-フェルミオン過程

- 新たな力の発見可能性
- LEPの3桁上の統計量
- 偏極が非常に重要

断面積と角分布:

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$      $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$   
 $e^+e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$   
 $e^+e^- \rightarrow b b$      $e^+e^- \rightarrow c c$   
 $e^+e^- \rightarrow s s$      $e^+e^- \rightarrow q q$

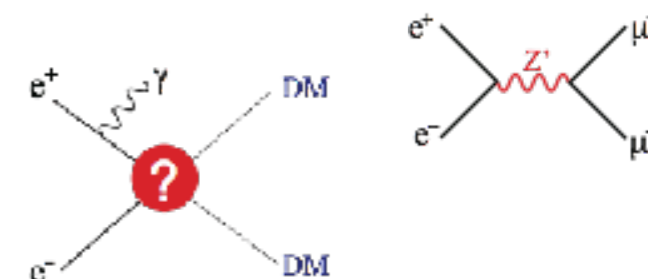
$\tau$ の崩壊分岐比

$\tau$ の偏極

$\tau$ の寿命

クォークとレプトンの複合粒子可能性

余剰次元探索



## 量子色力学・核物理

- ILCで確実にできる測定
- 背景事象の詳細な理解
- 新粒子発見に重要

$\alpha_s (q^2)$  測定

$e^+e^- \rightarrow b b, b b g, b b g g$   
 $e^+e^- \rightarrow c c, c c g, c c g g$   
 $e^+e^- \rightarrow q q, q q g, q q g g$

フラグメンテーション関数測定

b, c, s, q, gluon  
 ハドロン内およびハドロン系での粒子相関

b, c, s, u, dバリオン、メソンの生成と崩壊

エキゾチックハドロン探索:

テトラクォーク、ペンタクォーク、  
 グルーボール、等

2光子衝突におけるジェット生成

2光子衝突におけるb, c, s, u, dバリオン、メソンの生成と崩壊

2光子衝突におけるレプトン生成

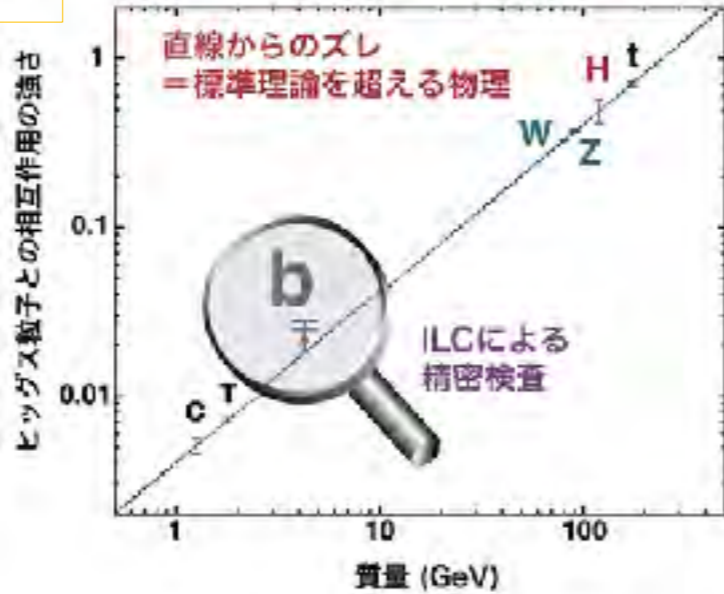
# 非常に多くの研究対象

## ヒッグス精密測定

- ILCで確実にできる測定
- ヒッグス粒子は特別

包含断面積:  $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 包含断面積:  $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 包含断面積:  $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 Zボソンの角分布:  $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 Zボソンの角分布:  $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 Zボソンの角分布:  $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 部分生成断面積:

$e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow b\bar{b}) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow c\bar{c}) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow g\bar{g}) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow W^+W^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow Z Z) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{"exotic"}) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow b\bar{b}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow c\bar{c}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow g\bar{g}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow W^+W^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow Z Z) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{"exotic"}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow b\bar{b}) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow c\bar{c}) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow g\bar{g}) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow W^+W^-) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow Z Z) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{"exotic"}) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 包含断面積:  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$   
 光子の角分布:  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$   
 CP効果  
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$   
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow \nu\nu)$   
 $H \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow q\bar{q})$   
 $H \rightarrow (W \rightarrow q\bar{q}) (W \rightarrow l\nu)$   
 $H \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 $H \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow ll)$   
 $H \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$



## 電弱相互作用精密検証

- ILCで確実にできる測定
- LEPの3桁上の統計量
- ヒッグス精密測定
- 偏極が重要

断面積:  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow ll)$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$   
 異常3重ゲージ結合のCP保存測定:  
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow q\bar{q})$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) (Z \rightarrow ll)$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$   
 断面積:  $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$   
 光子の角分布:  $e^+e^- \rightarrow \gamma Z$   
 断面積:  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$   
 角分布:  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

## 新粒子探索

- 新物理の直接的証拠の発見可能性

新たなヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow e^+e^-) + X$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow \mu^+\mu^-) + X$   
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow q\bar{q}) + X$   
 $e^+e^- \rightarrow AH$

1荷電ヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow H^\pm H^0 H^0 \rightarrow \tau^+\nu, c\bar{s}$   
 $e^+e^- \rightarrow W^+ H^0$

2荷電ヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow W^+ W^- H^0$   
 $e^+e^- \rightarrow W^+ W^- H^\pm$   
 $e^+e^- \rightarrow W^+ W^- H^0 H^0$

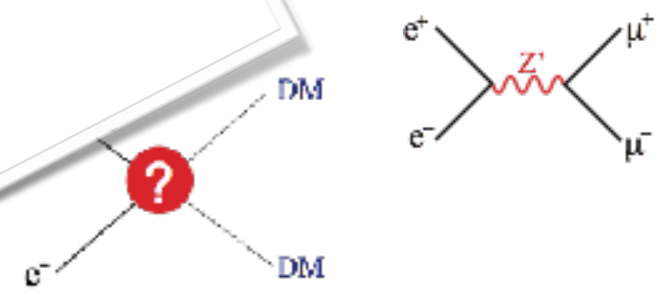
## 2-フェルミオン過程

- 新たな力の発見可能性
- LEPの3桁上の統計量
- 偏極が非常に重要

断面積と角分布:

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$   
 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$   
 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$   
 $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$   
 $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$   
 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

プロトンの複合粒子可能性



たくさんの論文、たくさんのPh.D  
 LHC ATLAS実験の例: 大学院学生数 = 約1200人  
 毎年約200人の博士号取得者

## 量子色力学・核物理

- ILCで確実にできる測定
- 背景事象の詳細な理解
- 新粒子発見に重要

$\alpha_s(q^2)$  測定

$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}, b\bar{b}g, b\bar{b}g\bar{g}$   
 $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}, c\bar{c}g, c\bar{c}g\bar{g}$   
 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}, q\bar{q}g, q\bar{q}g\bar{g}$

フラグメンテーション関数測定

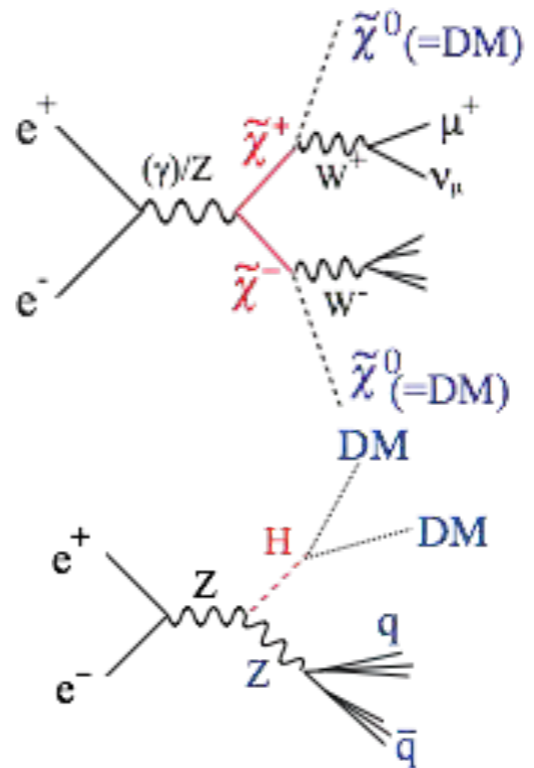
$b, c, s, q, \text{gluon}$   
 ハドロン内およびハドロン系での粒子相関  
 $b, c, s, u, d$ バリオン、メソンの生成と崩壊  
 エキゾチックハドロン探索:

テトラクォーク、ペンタクォーク、  
 グルーボール、等

2光子衝突におけるジェット生成

2光子衝突における $b, c, s, u, d$ バリオン、メソンの生成と崩壊

2光子衝突におけるレプトン生成



まとめ

# 将来の素粒子物理学の拠点としてのILC

我々は電弱スケールを越え、宇宙創成の瞬間に向けた新たな道に踏み出す段階に来ている。**時空概念の拡張の道に進むのか、物質構造の拡張（新たな階層）の道に進むのか、それとも全く新しい原理が必要になるのか**、我々は今この分岐点に立っている。

250GeV ILCは、最高エネルギーの電子・陽電子衝突による**ヒッグス粒子の精密測定や新粒子発見（暗黒物質や超対称性粒子）**を通して素粒子物理学の進路を決め、**宇宙創成の瞬間に向けた道を切り開く加速器**である。そこで得られた結果によっては、自然のより統一的な理解を求め、さらにエネルギー・フロンティアを押し広げる必要が生じるかもしれない。しかし、それを見極めることこそが宇宙創成の瞬間への道であり、素粒子物理学の王道である。

**250GeVのILC計画は**、電子・陽電子リニアコライダーとして、250GeVをはるかに超える高いエネルギーへと展開する将来性を備え、**将来の長きに渡って国際的に魅力的な施設であり続ける。**