

ILC で宇宙を読み解く

- 究極の統一を求めて -



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

2020/09/06 KEK virtual Open House

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

最終目標

物質、力、そして時空
の全てを一つの原理にまとめる
究極の統一

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
(りんご) (天体)

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

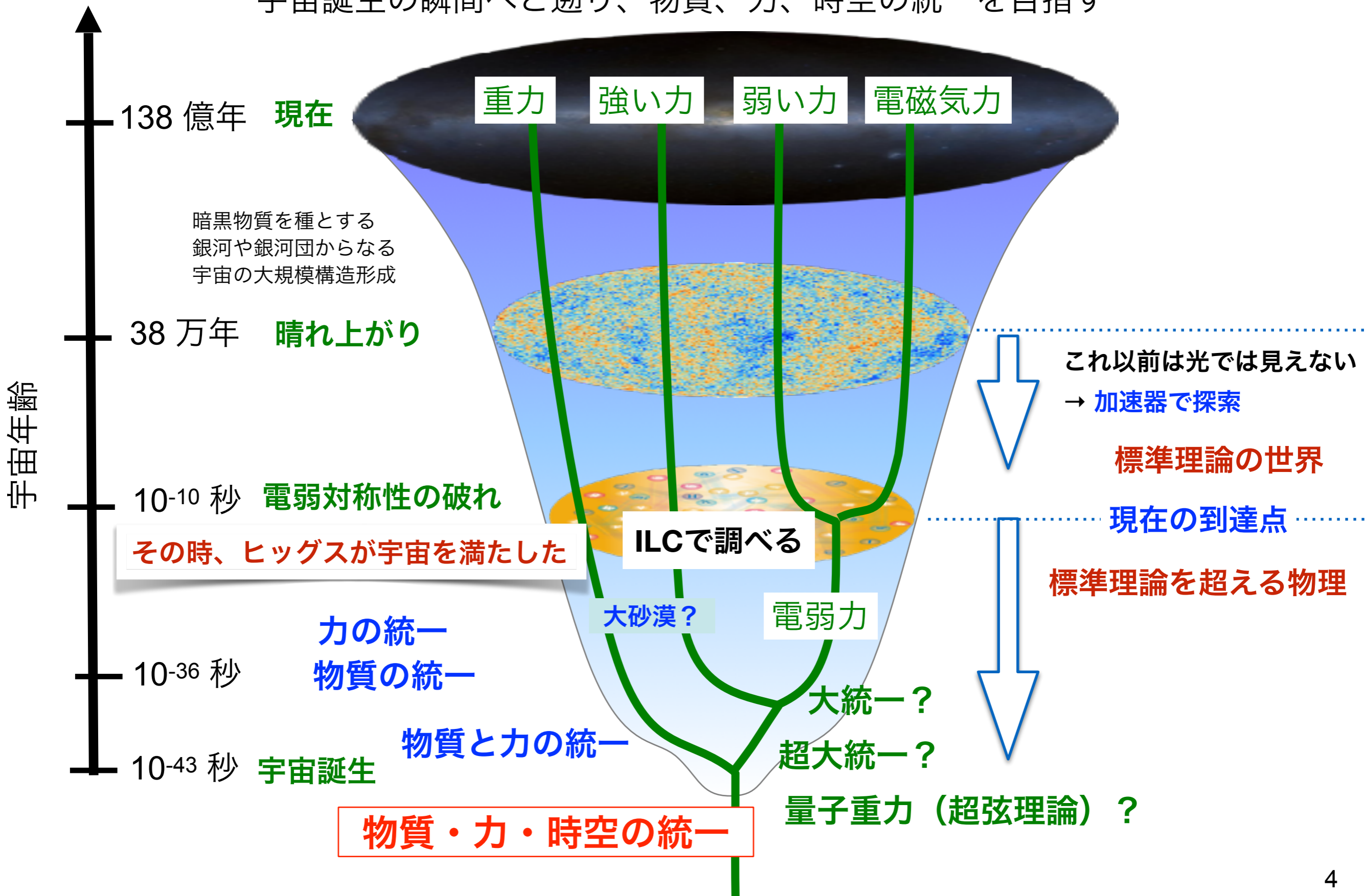
粒子性と波動性の統一

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世界像

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)

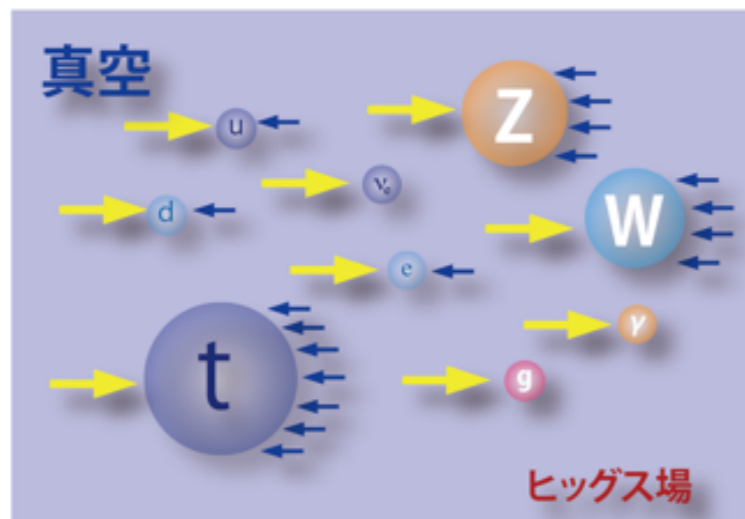
宇宙をヒッグスが遍く満たすことで
素粒子が質量を持つ

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

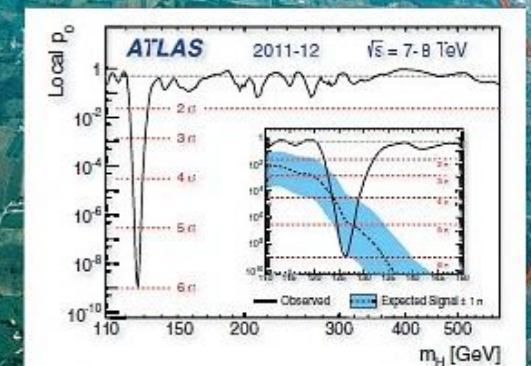
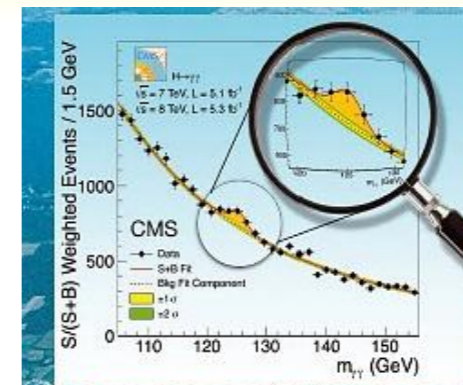
※ 質量＝動かしにくさ



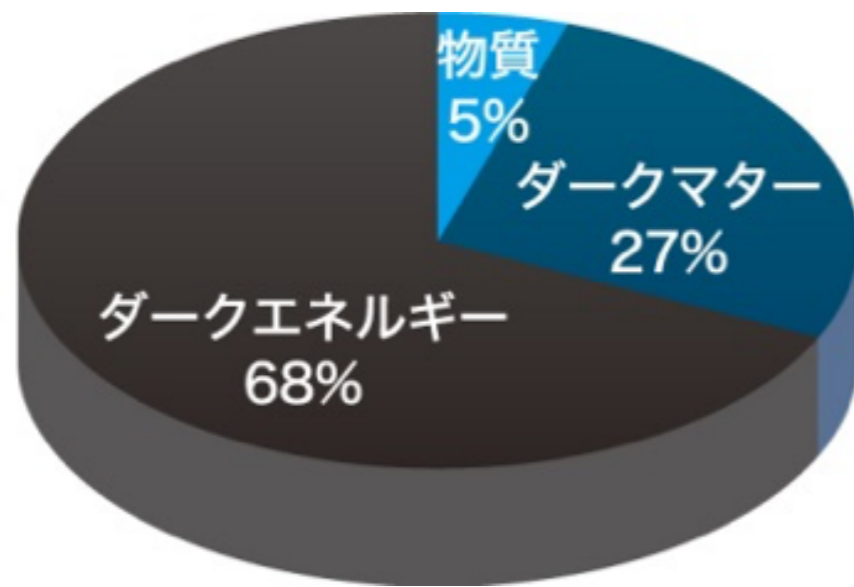
→ 力 ← ヒッグスの海からの力

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%

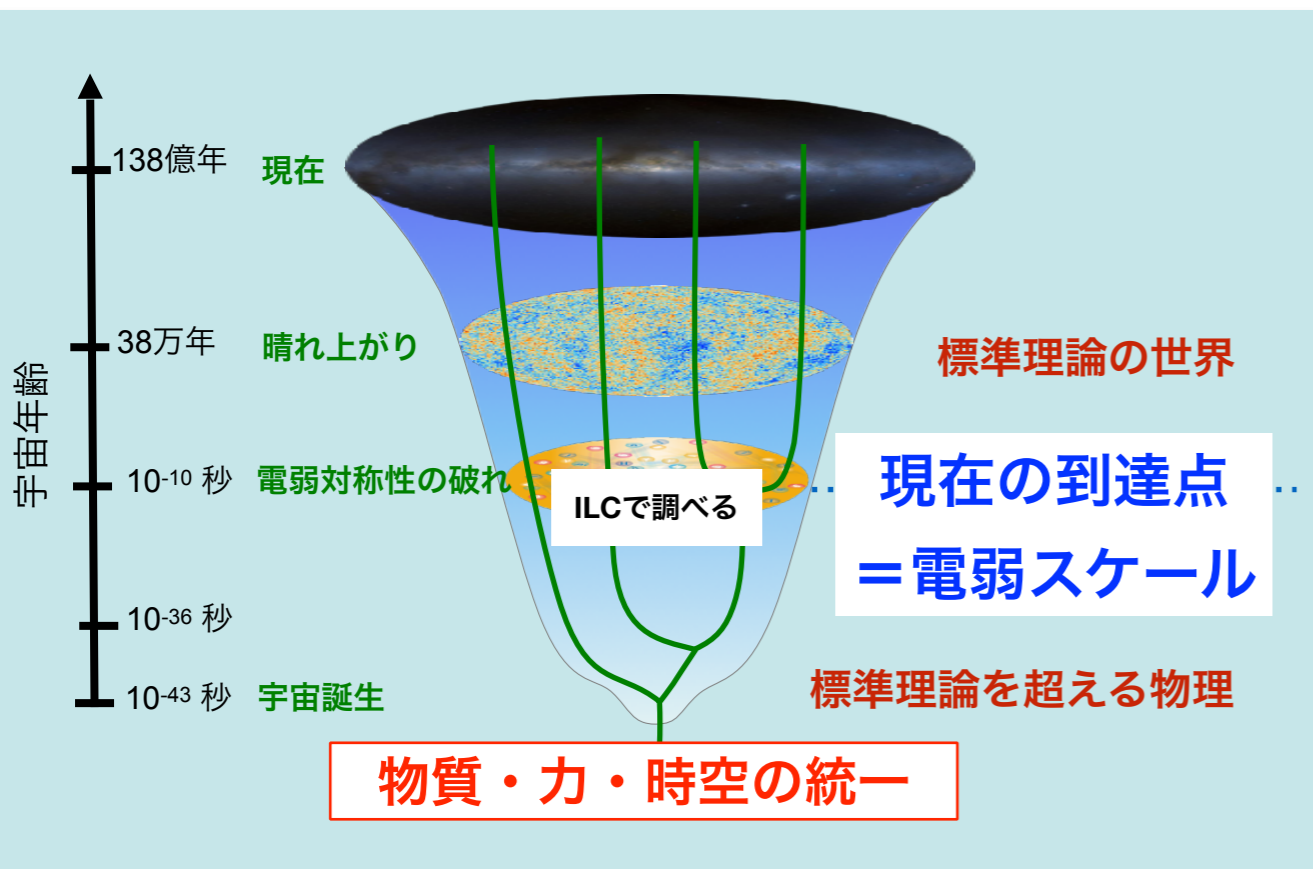
- 暗黒物質
- 消えた反物質の謎
- ニュートリノ質量/混合
- 暗黒エネルギー
- ...

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



電弱スケール：

「ヒッグスが宇宙を満たす」という特別な事が起こったエネルギースケール

ヒッグスが宇宙に満ちていなかったら、素粒子は質量を持たず、光の速さで運動する。

→ 我々の体は一瞬にしてバラバラになってしまう。

→ 我々の存在理由に関わる重要な出来事。

しかし、**「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

なぜヒッグスが宇宙を
満たしたのか？

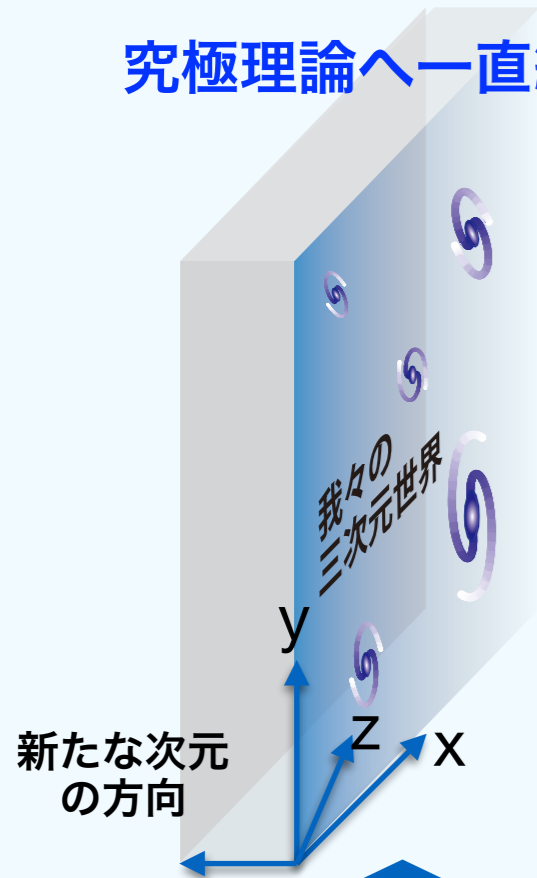


答えによって
素粒子物理学の将来
(究極の統一への道) は
大きく分岐

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



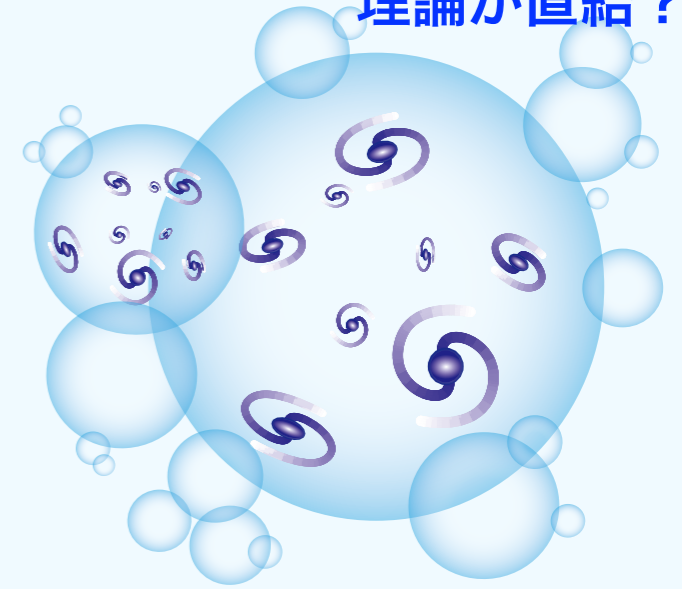
物質構造の拡張
複合ヒッグス



究極理論へ
新たな突破口

全く新しい原理？
複数宇宙+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

どの道が正しいかにより
他の大きな謎（暗黒物質、消
えた反物質、ニュートリノの質
量／混合、暗黒エネルギー等）
の答えも変わる

第一の道：「新たな次元」

第二の道：「より深い階層」

第三の道：「複数宇宙？」



究極の統一への正しい道 はどれか？

ヒッグス発見以前は、ヒッグスが見つければその質量からどの道に進むべきかが分かると期待していた

期待されるヒッグス質量の範囲

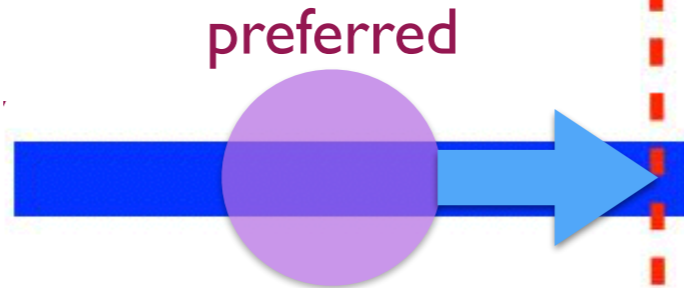
第三の道：「複数字宙？」

ずっと標準理論のまま



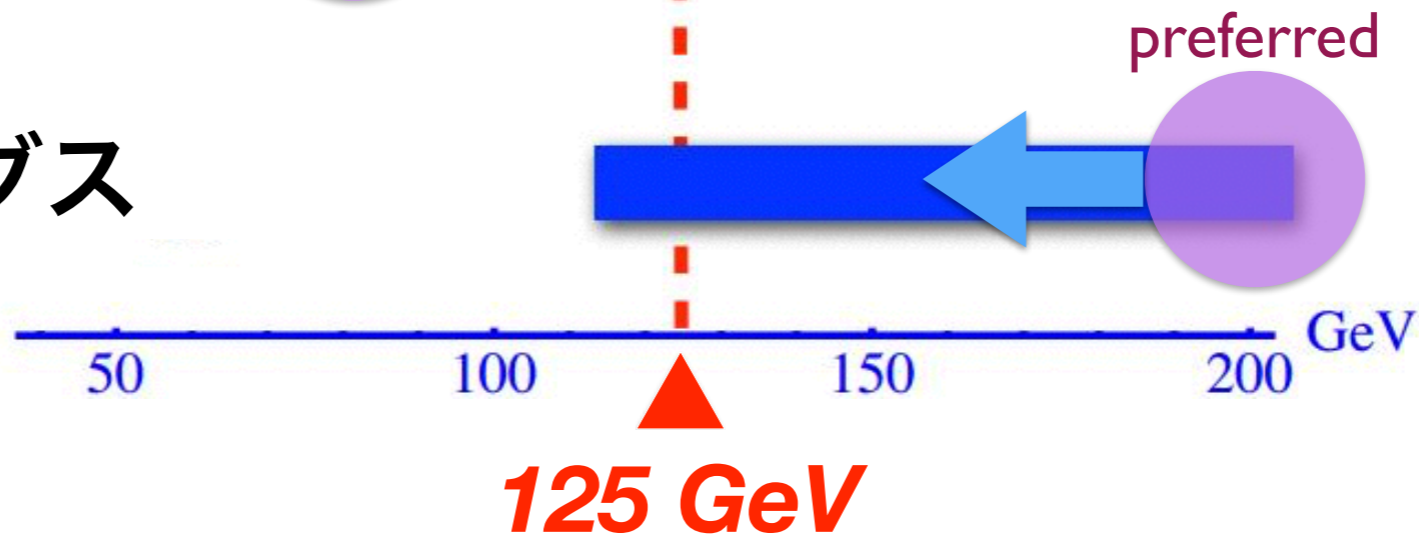
第一の道：「新たな次元」

超対称性



第二の道：「より深い階層」

複合ヒッグス



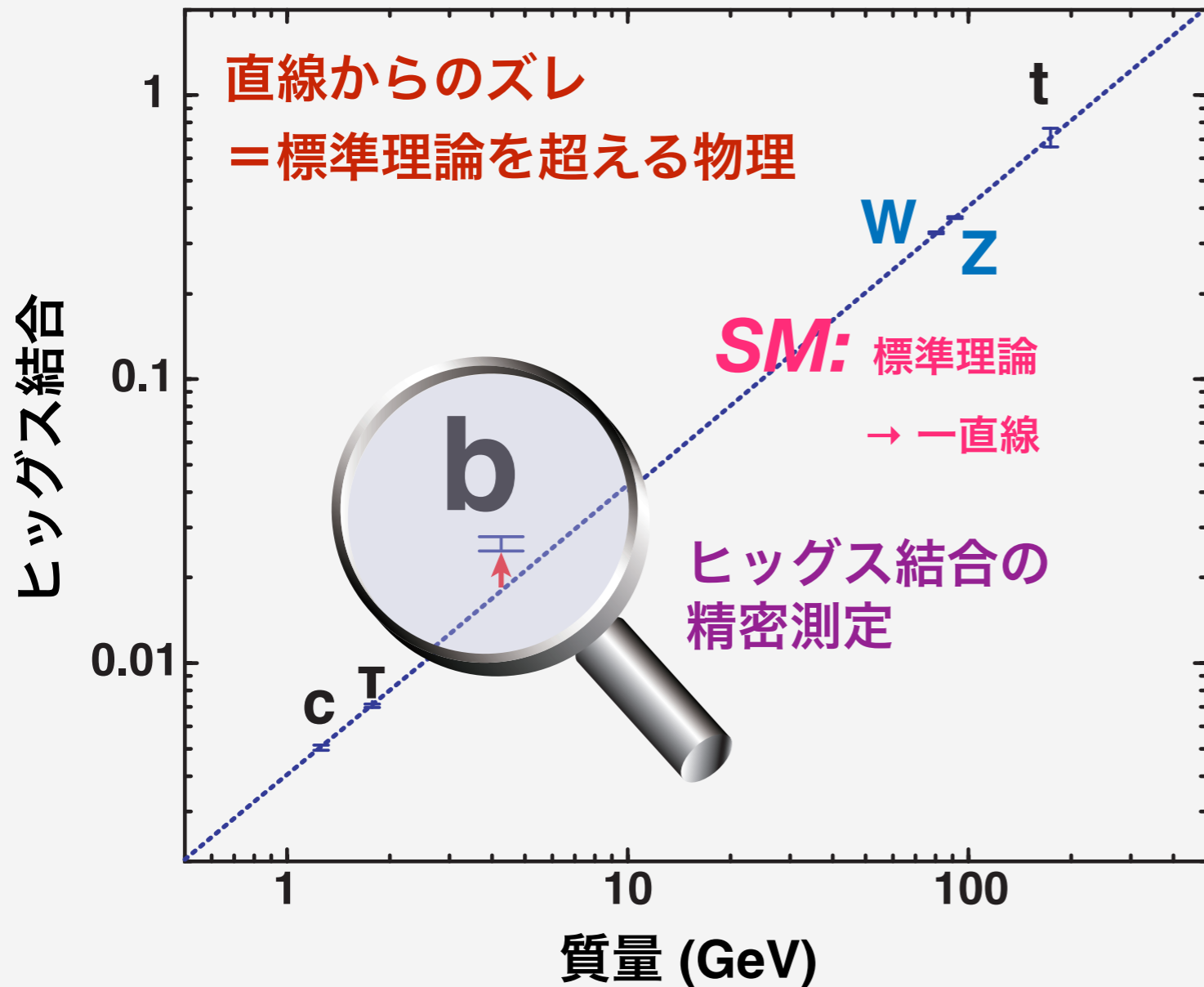
Hyung Do Kim

By A Pomarol

ヒッグスはどれとも言えない微妙な所に見つかった！

質量だけでなく

ヒッグス結合を測る必要あり



※: 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

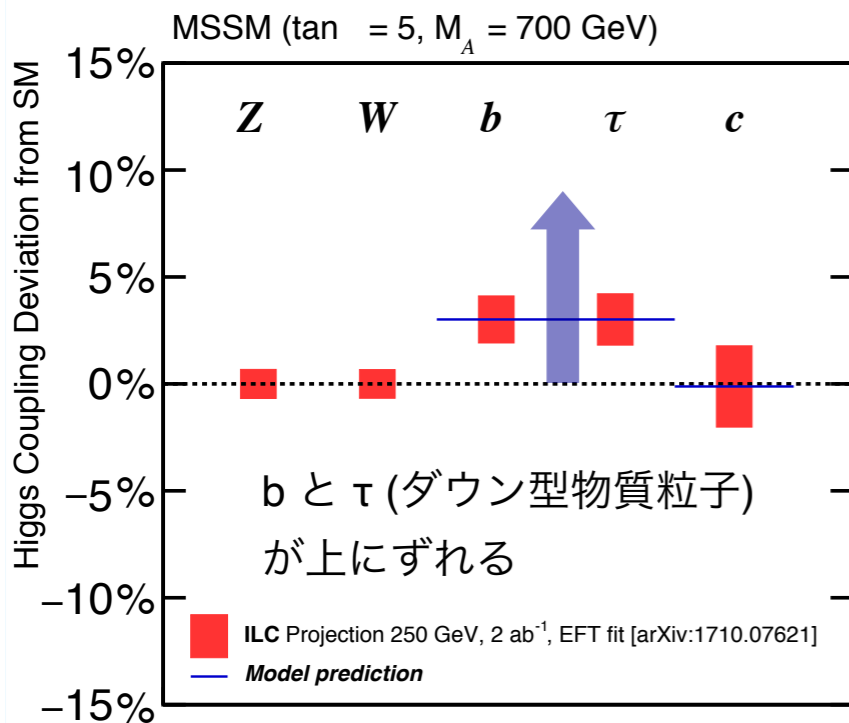
※: BSM 物理 = Beyond the Standard Model (標準理論を超える物理)

※: HL-LHC = High Luminosity LHC (高度化後のLHC)

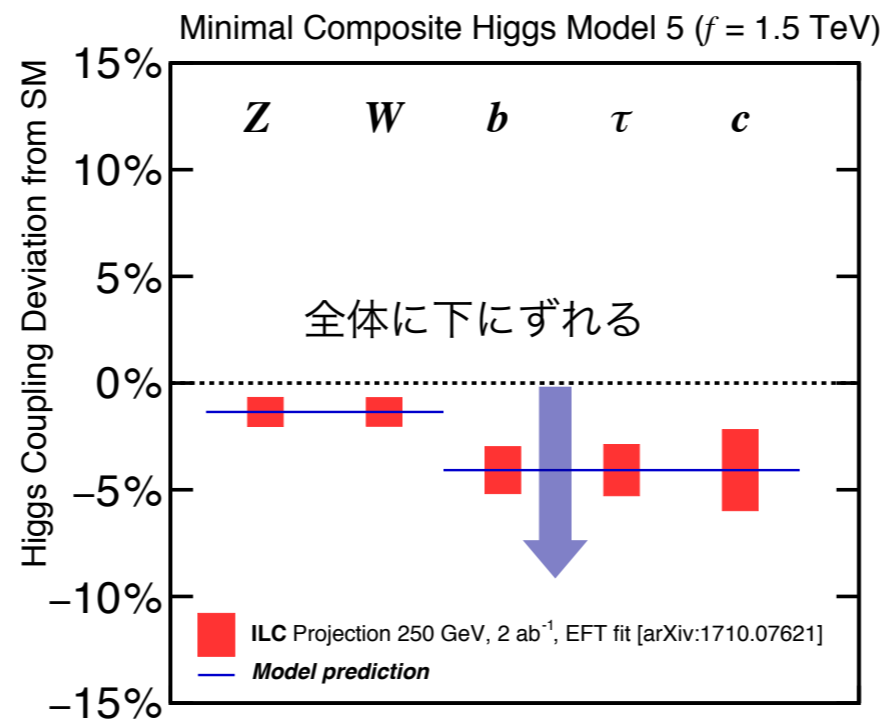
標準理論を超える物理の効果はヒッグス結合の標準理論の予想からのズレとして現れる

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

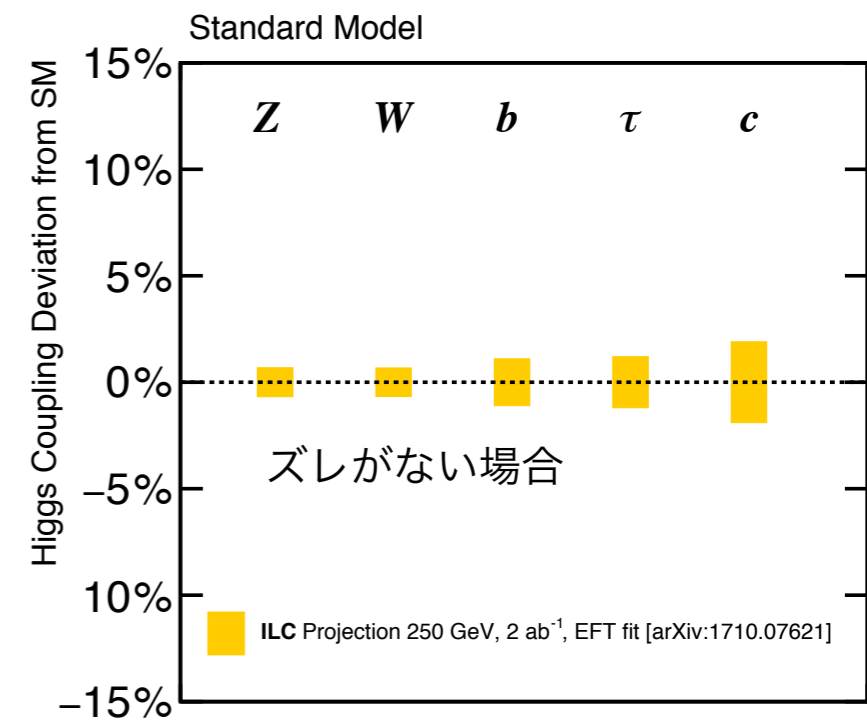


複合ヒッグス



複数字宙?

(標準理論)



ズレのパターンから進路が決まる

しかし、新しい物理のエネルギースケール=1 TeV → ズレは高々 ~10%

ズレを見るには 1%-レベルの精度が必要

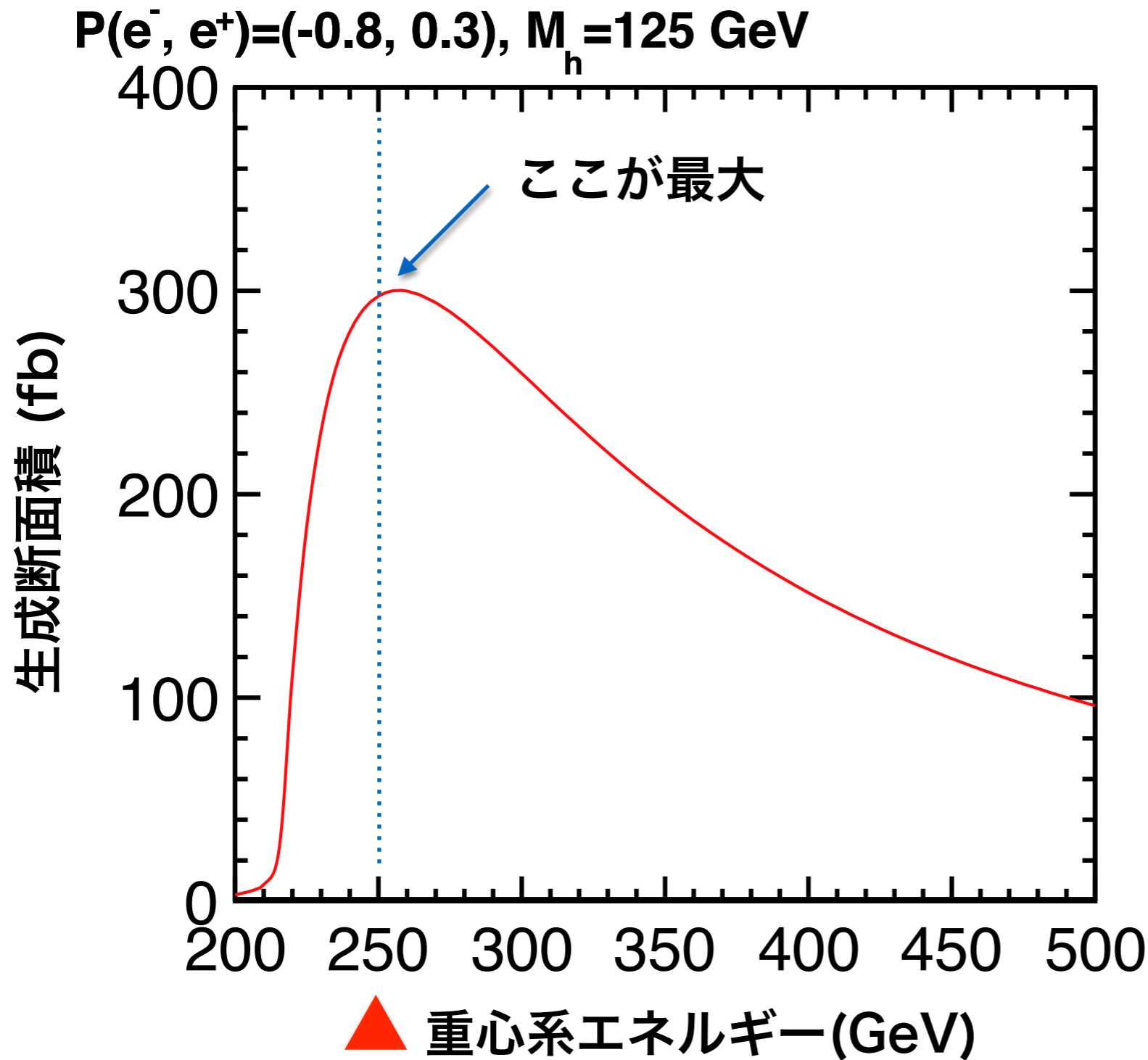
ヒッグス粒子を大量に作って精度よく測る！



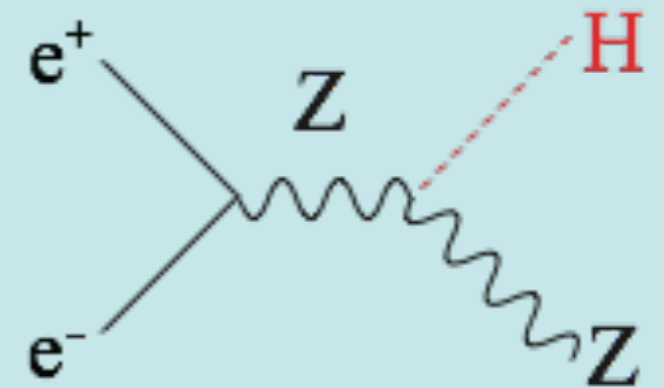
**ヒッグス工場
としての
250 GeV ILC**

250 GeV は特別なエネルギー

ヒッグス生成断面積が最大！



※: 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

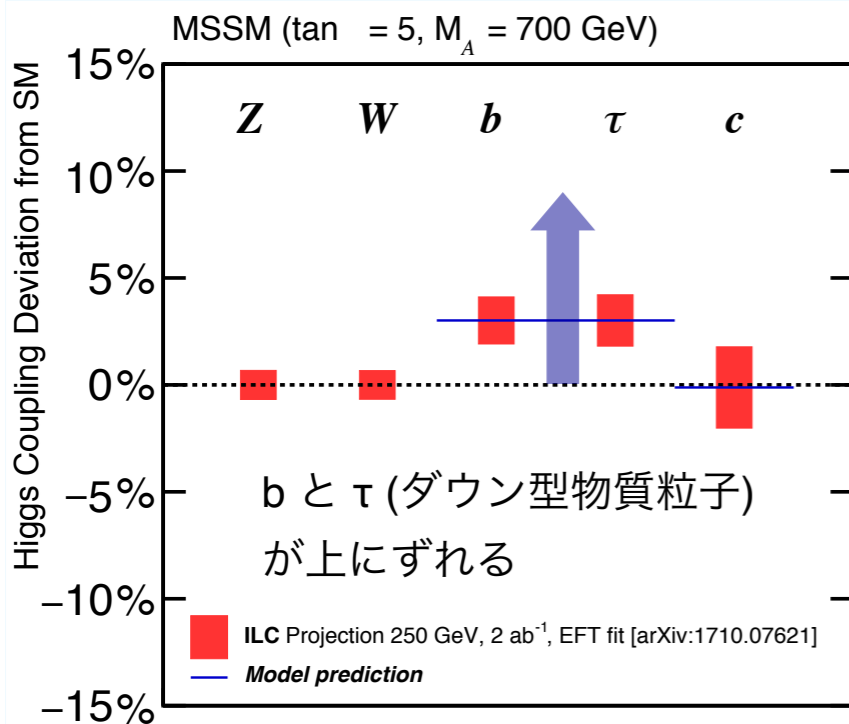
(約50万個: 2 ab^{-1})

大量のヒッグス粒子を生成し、精密測定する！

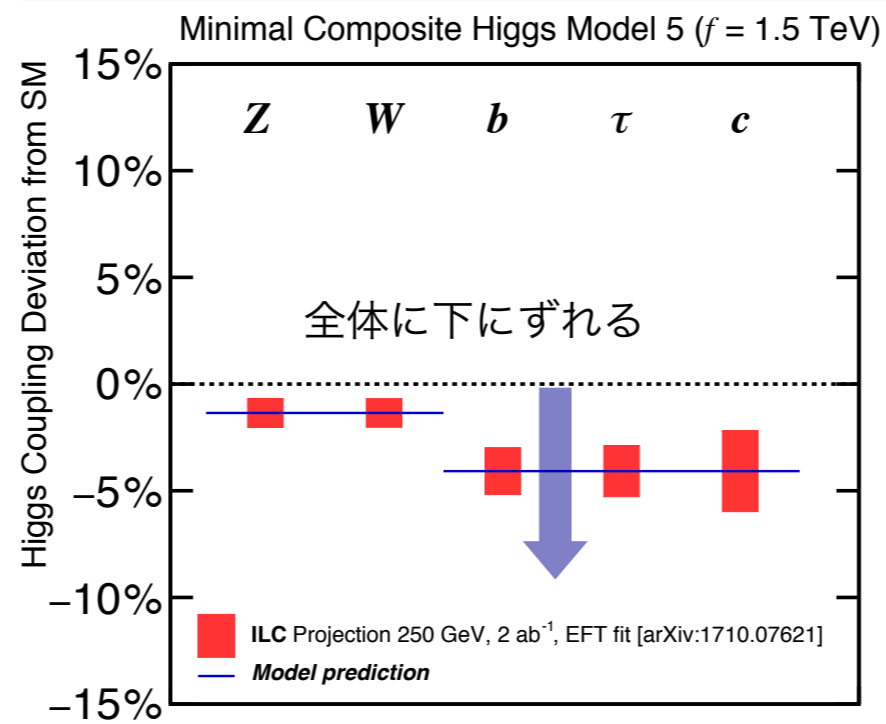
どの道に進むのか？

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

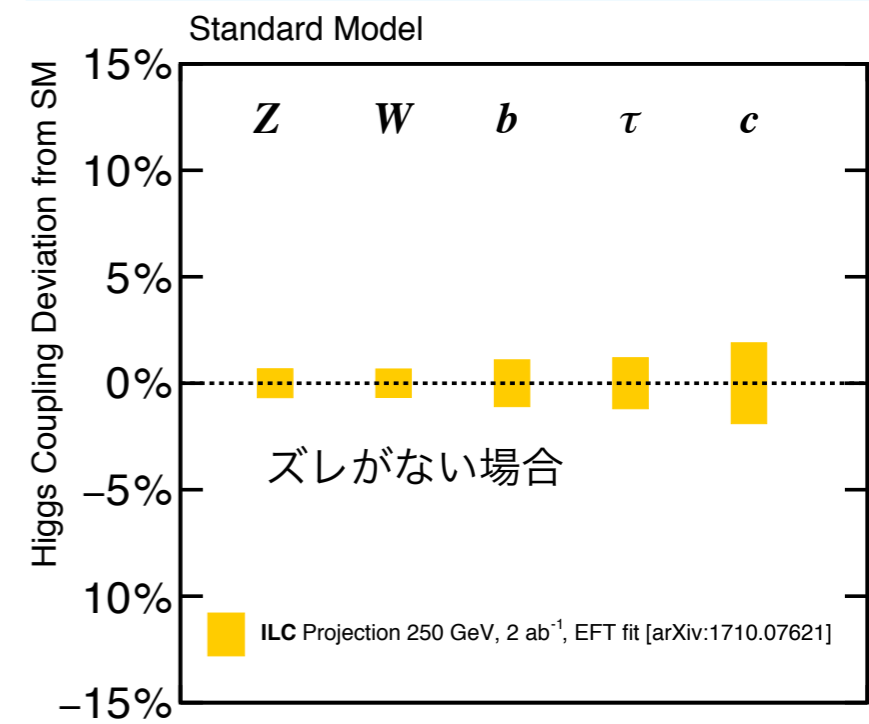


複合ヒッグス



複数宇宙？

(標準理論)



ILC なら、ズレを見るのに必要な精度が得られ、ズレのパターンから進路が決まる！

**ILCの物理は
ヒッグス
だけじゃない！**

宇宙はダーク！



www.starwars.com

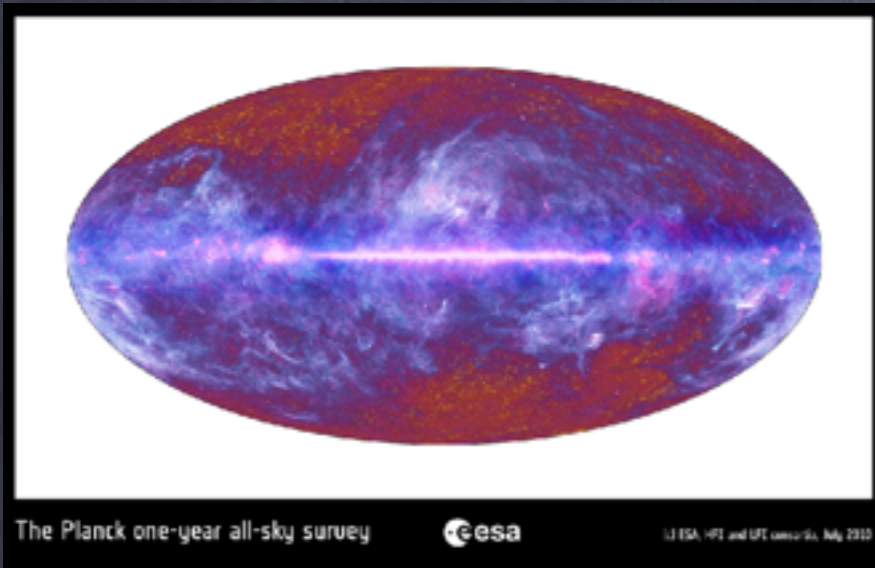
ILCで暗黒物質を作る

暗黒物質の正体は？

加速器で暗黒物質粒子を作って調べる！

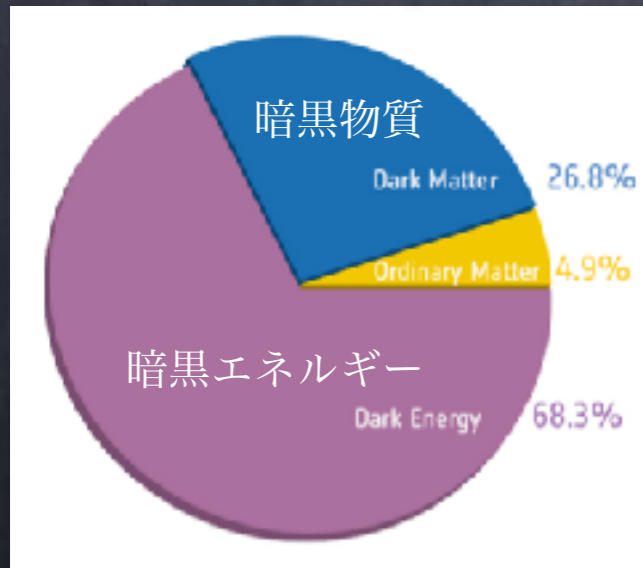
Planck衛星

宇宙背景放射の観測



The Planck one-year all-sky survey ESA, ICF and IPT members, July 2013

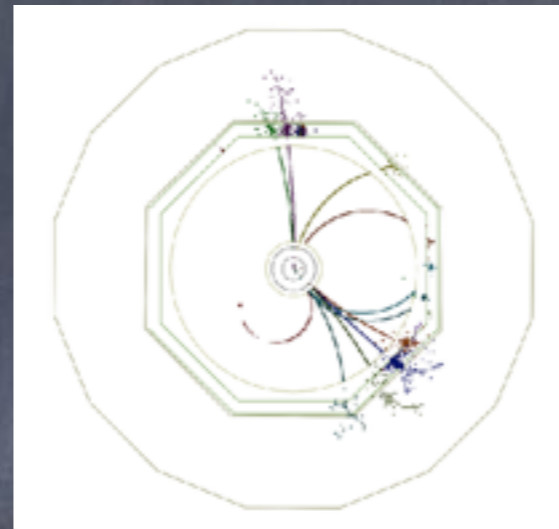
© European Space Agency



暗黒物質が一番軽い超対称粒子か？

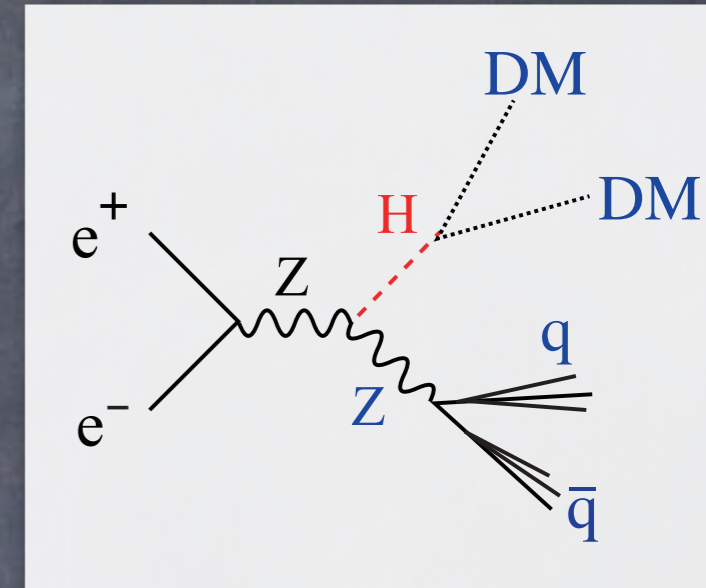
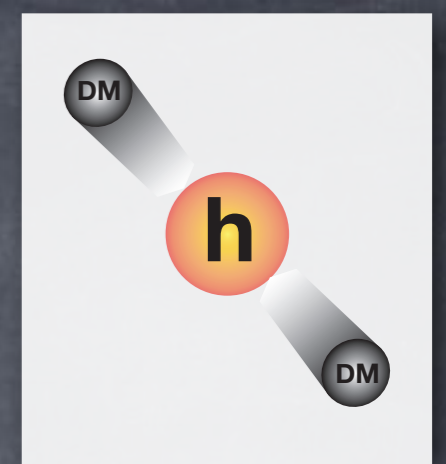
ヒッグスの不可視崩壊

暗黒物質 (Dark Matter) はヒッグスから生まれたか？

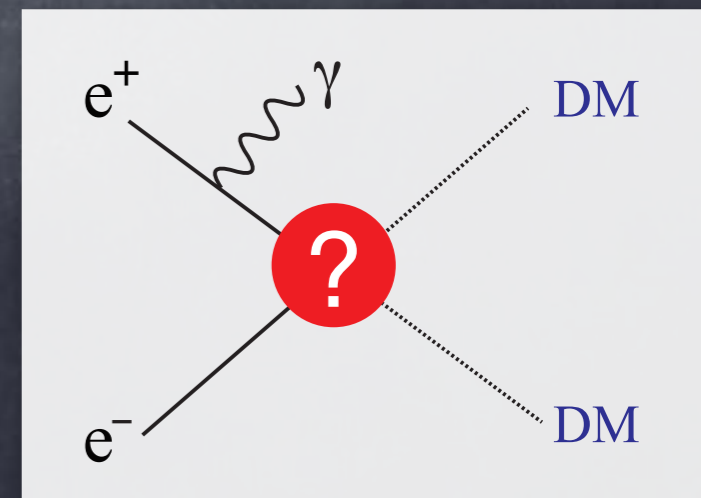


ILCで暗黒物質対生成

暗黒物質は電子・陽電子衝突で生まれるか？



ILCでは、見えない粒子もバランスの悪い事象として見える



光子だけのバランスの悪い事象

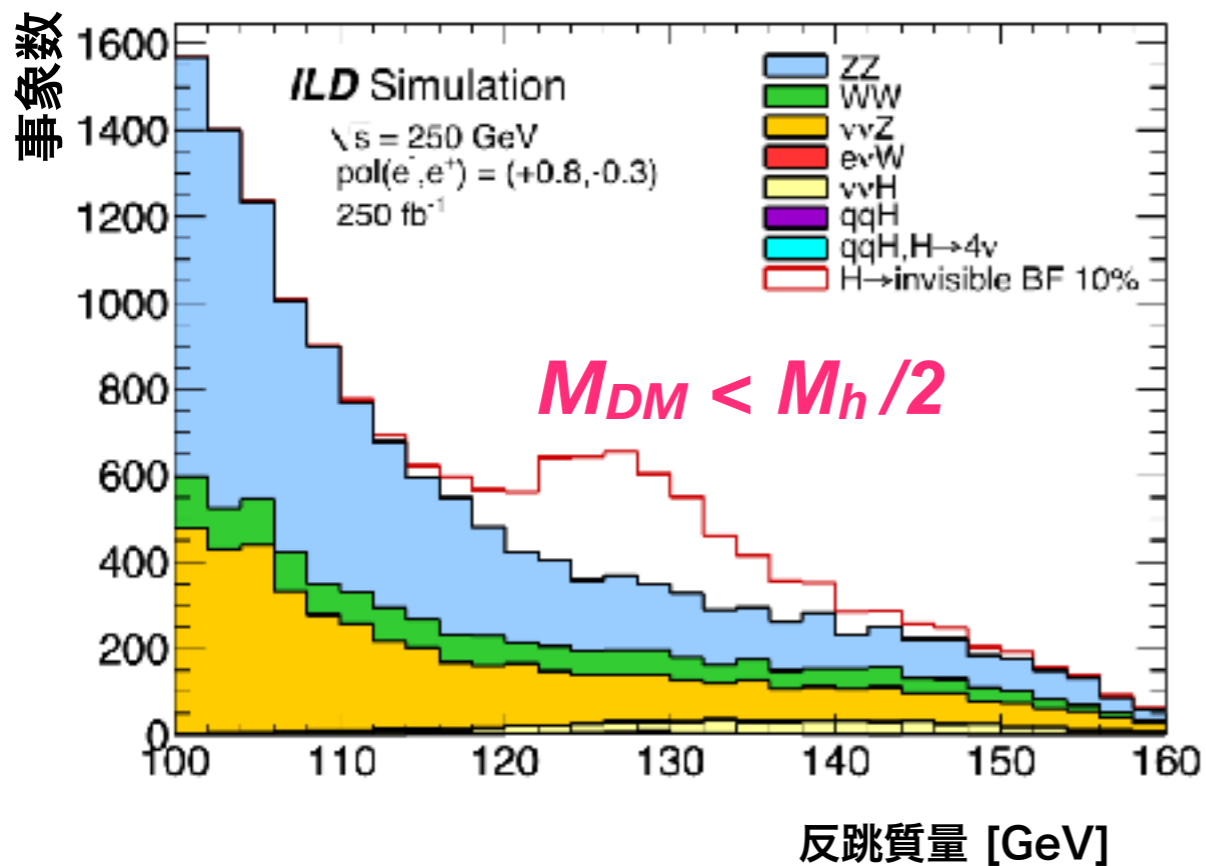
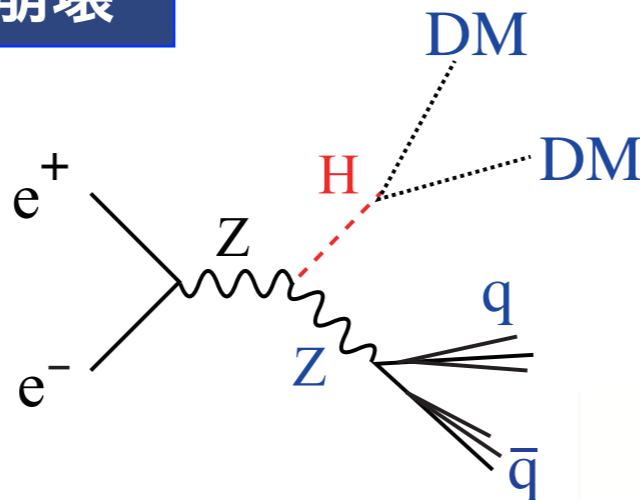
暗黒物質 (WIMP) 探索 @ 250 GeV ILC

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



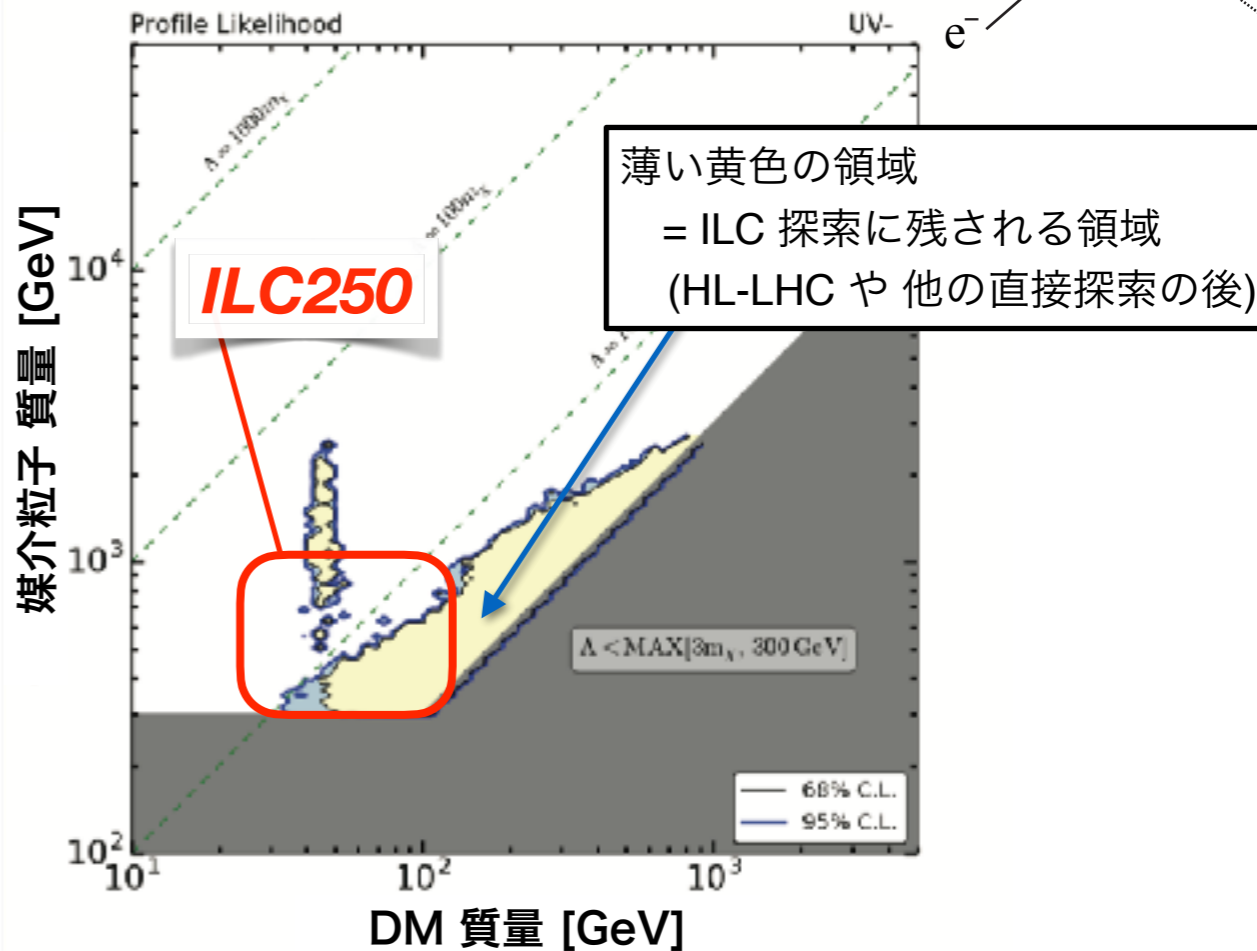
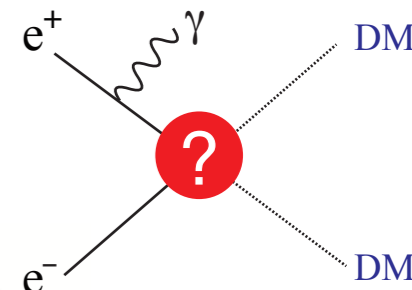
探索可能不可視崩壊の分岐比：0.3% まで

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黒物質の探索に有効

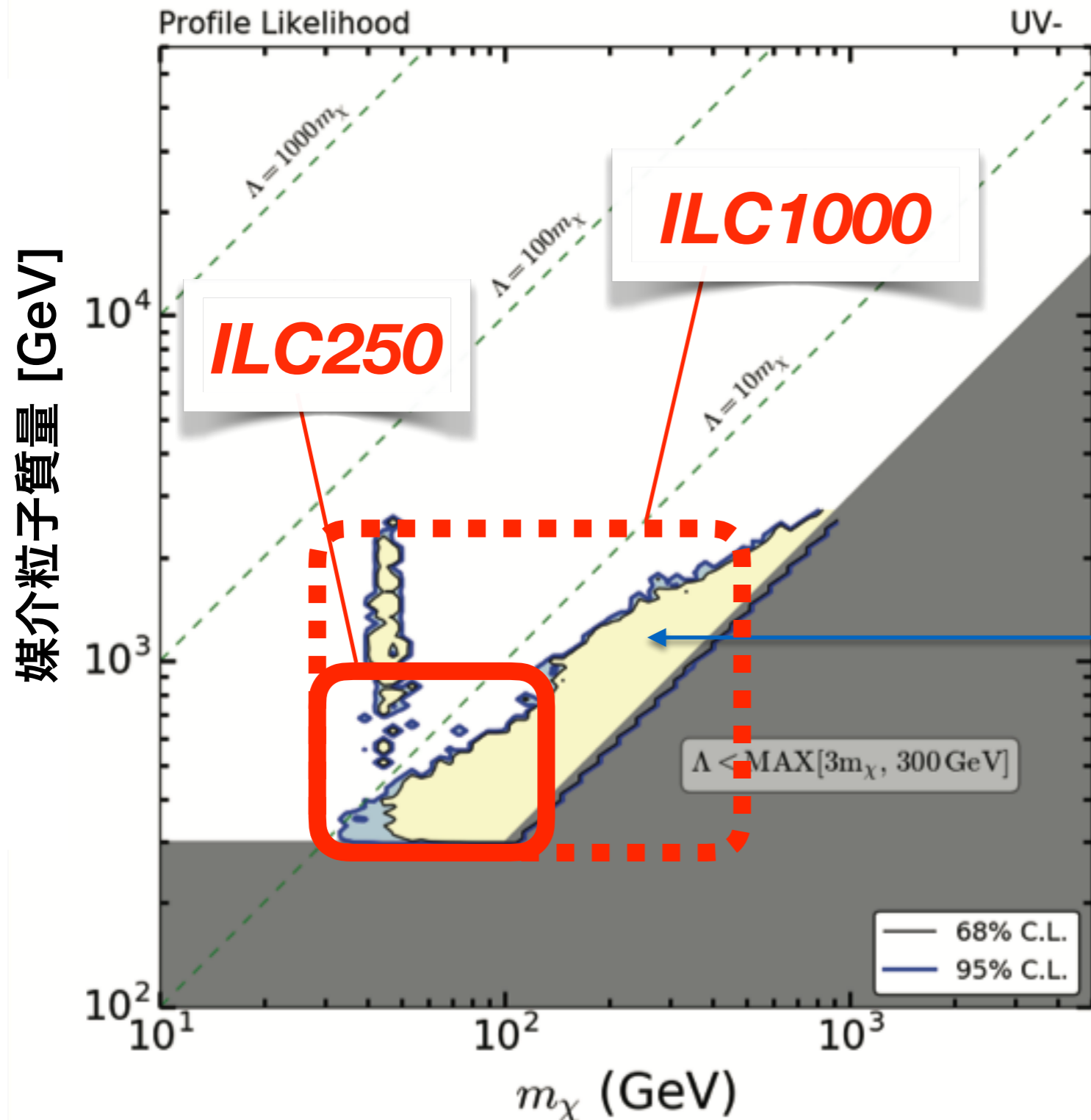


250 GeV でもかなり発見の可能性はある

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

WIMP 探索

単光子生成探索



薄い黄色の領域

= ILC 探索に残される領域

(HL-LHC や 他の直接探索の後)

**250 GeV ILC で
発見の可能性がある**

**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

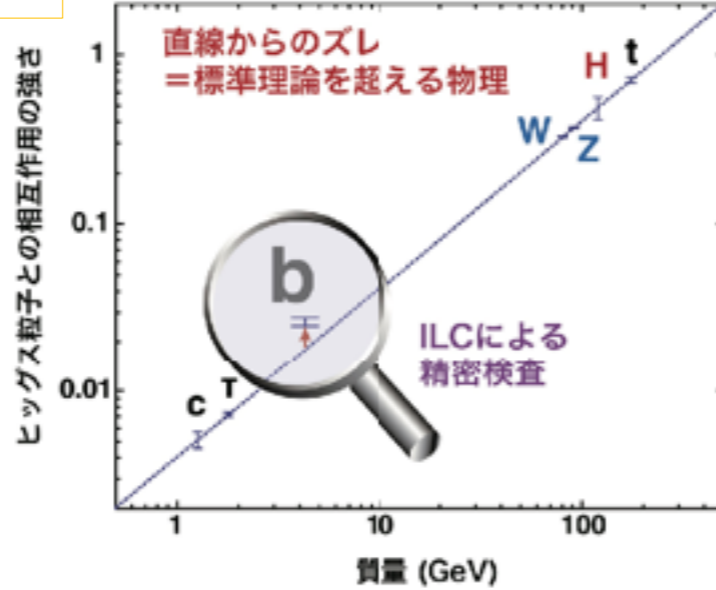
包含断面積: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow e^+e^-)$
 包含断面積: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 包含断面積: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow qq)$
 Zボソンの角分布: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow e^+e^-)$
 Zボソンの角分布: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 Zボソンの角分布: $e^+e^- \rightarrow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

$e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow bb) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow cc) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow gg) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow WW) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow ZZ) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{"exotic"}) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow bb) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow cc) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow gg) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow WW) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow ZZ) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{"exotic"}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow bb) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow cc) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow gg) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow WW) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow ZZ) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{"exotic"}) (Z \rightarrow qq)$
 包含断面積: $e^+e^- \rightarrow \gamma H$

光子の角分布: $e^+e^- \rightarrow \gamma H$

CP効果

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



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
- ヒッグス精密測定と密接に関係
- 偏極が非常に重要

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

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

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

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

断面積: $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow qq) (Z \rightarrow ll)$
 断面積: $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$

異常3重ゲージ結合のCP保存測定:

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

$e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow qq) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow qq) (Z \rightarrow ll)$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$
 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:

$e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow e^+e^-) + X$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow \mu^+\mu^-) + X$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow qq) + X$
 $e^+e^- \rightarrow AH$

1荷電ヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow H^- H^+ H \rightarrow \tau^+ \nu, cs, cb$
 $e^+e^- \rightarrow W^+ H^+$

2荷電ヒッグス粒子探索:

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

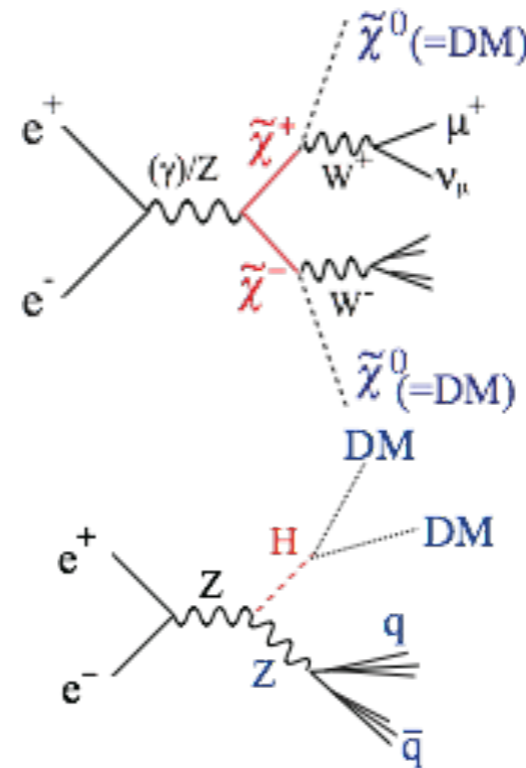
励起レプトン探索

長寿命粒子探索

重イオン粒子探索

新粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow ee + X$ $e^+e^- \rightarrow \mu\mu + X$
 $e^+e^- \rightarrow \tau\tau + X$ $e^+e^- \rightarrow e\mu + X$
 $e^+e^- \rightarrow e\tau + X$ $e^+e^- \rightarrow \mu\tau + X$
 $e^+e^- \rightarrow bb + X$ $e^+e^- \rightarrow cc + X$
 $e^+e^- \rightarrow qq + X$ $e^+e^- \rightarrow bc + X$
 $e^+e^- \rightarrow bq + X$ $e^+e^- \rightarrow cq + X$
 $e^+e^- \rightarrow gg + X$ $e^+e^- \rightarrow eq + X$
 $e^+e^- \rightarrow \mu q + X$ $e^+e^- \rightarrow \tau q + X$
 $e^+e^- \rightarrow W + X$ $e^+e^- \rightarrow Z + X$
 $e^+e^- \rightarrow \gamma + X$



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:

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$
 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$
 $e^+e^- \rightarrow bb$ $e^+e^- \rightarrow cc$
 $e^+e^- \rightarrow ss$ $e^+e^- \rightarrow qq$

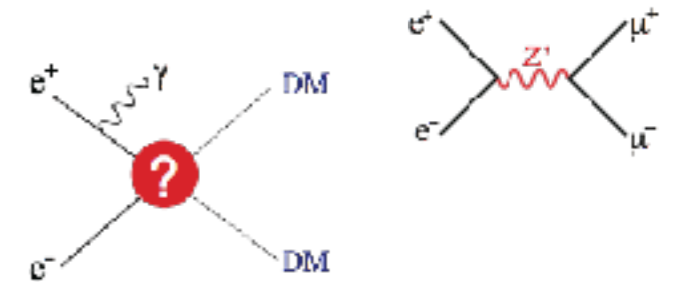
τ の崩壊分岐比

τ の偏極

τ 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

$e^+e^- \rightarrow bb, bbg, bbgg$
 $e^+e^- \rightarrow cc, ccg, ccgg$
 $e^+e^- \rightarrow qq, qqg, qqgg$

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

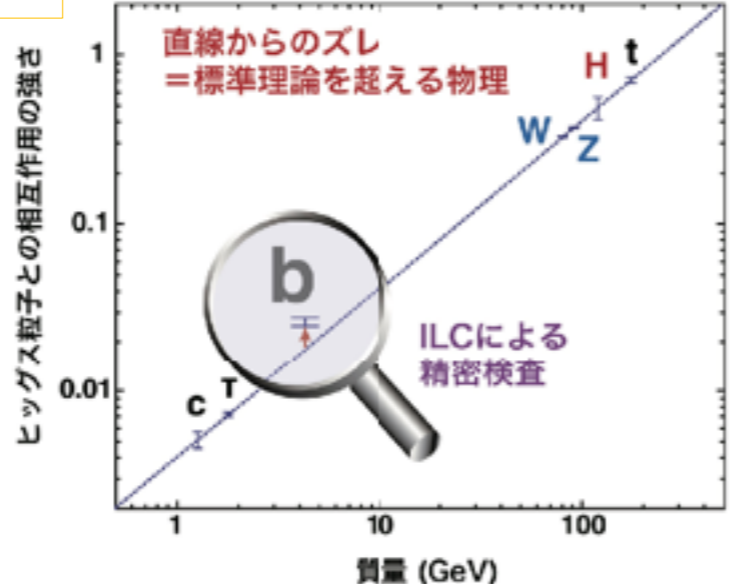
非常に多くの研究対象

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:

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



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:

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

2荷電ヒッグス粒子探索:

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

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: $e^+e^- \rightarrow \gamma + X$
 $e^+e^- \rightarrow \gamma e^+e^-$
 $e^+e^- \rightarrow \tau q + X$
 $e^+e^- \rightarrow Z + X$

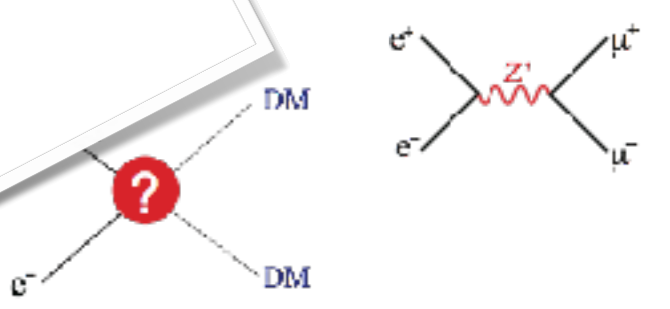
2-フェルミオン過程

- 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:

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

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, gluon

ハドロン内およびハドロン系での粒子相関

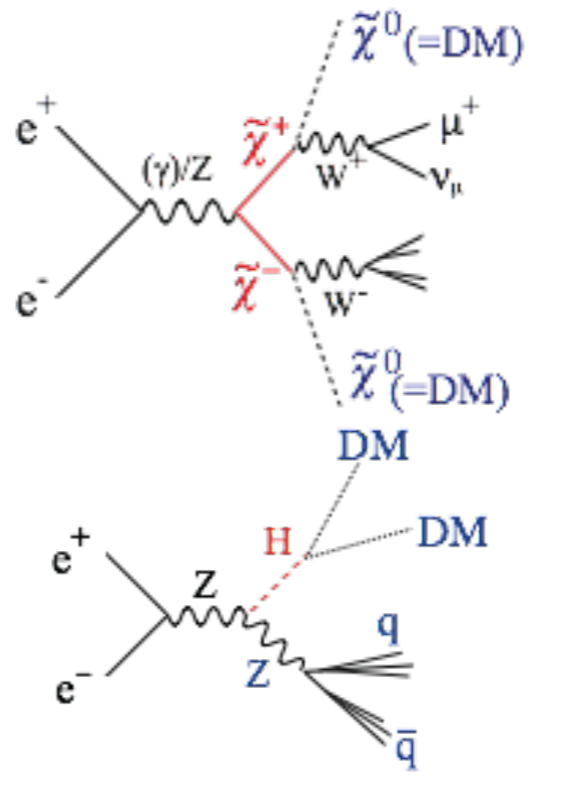
b,c,s,u,dバリオン、メソンの生成と崩壊

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（より深い階層）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。**

250 GeV 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。こ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。

250 GeV の ILC 計画は、電子・陽電子リニアコライダーとして、250 GeV 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世界をリードする国際素粒子物理学の拠点となる。

付録

**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

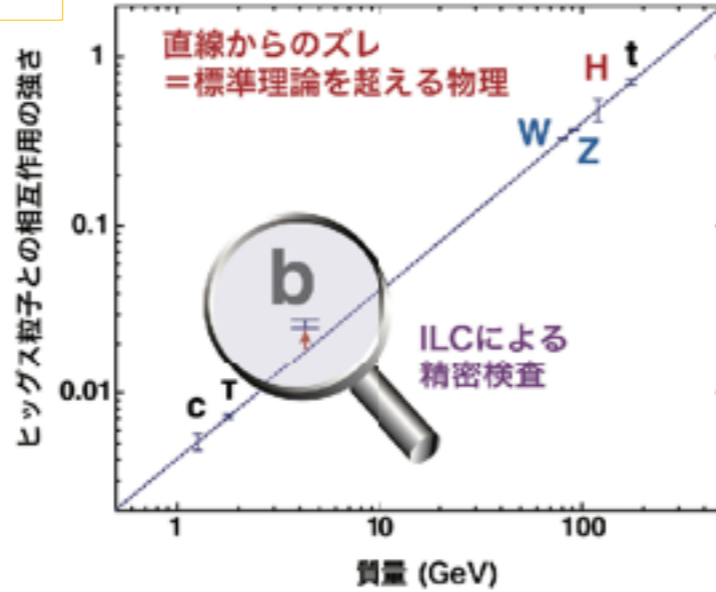
包含断面積: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow e^+e^-)$
 包含断面積: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 包含断面積: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow qq)$
 Zボソンの角分布: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow e^+e^-)$
 Zボソンの角分布: $e^+e^- \rightarrow H (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 Zボソンの角分布: $e^+e^- \rightarrow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

$e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow bb) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow cc) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow gg) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow WW) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow ZZ) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{"exotic"}) (Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow bb) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow cc) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow gg) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow WW) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow ZZ) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{"exotic"}) (Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow bb) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow cc) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow gg) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow WW) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow ZZ) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible}) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{"exotic"}) (Z \rightarrow qq)$
 包含断面積: $e^+e^- \rightarrow \gamma H$

光子の角分布: $e^+e^- \rightarrow \gamma H$

CP効果

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



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
- ヒッグス精密測定と密接に関係
- 偏極が非常に重要

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

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

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

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

断面積: $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow qq) (Z \rightarrow ll)$
 断面積: $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$

異常3重ゲージ結合のCP保存測定:

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

$e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow qq) (Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow qq) (Z \rightarrow ll)$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow ll) (Z \rightarrow ll)$
 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:

$e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow e^+e^-) + X$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow \mu^+\mu^-) + X$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow qq) + X$
 $e^+e^- \rightarrow AH$

1荷電ヒッグス粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow H^- H^+ H \rightarrow \tau^+ \nu, cs, cb$
 $e^+e^- \rightarrow W^- H^+$

2荷電ヒッグス粒子探索:

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

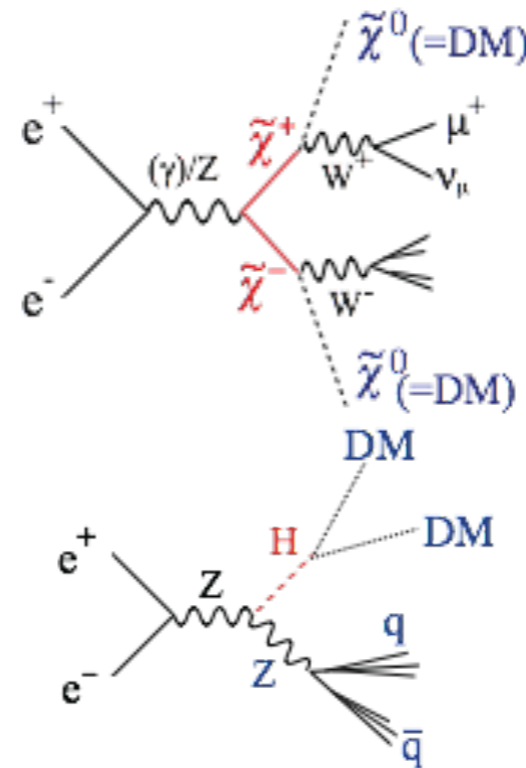
励起レプトン探索

長寿命粒子探索

重イオン粒子探索

新粒子探索:

$e^+e^- \rightarrow ee + X$ $e^+e^- \rightarrow \mu\mu + X$
 $e^+e^- \rightarrow \tau\tau + X$ $e^+e^- \rightarrow e\mu + X$
 $e^+e^- \rightarrow e\tau + X$ $e^+e^- \rightarrow \mu\tau + X$
 $e^+e^- \rightarrow bb + X$ $e^+e^- \rightarrow cc + X$
 $e^+e^- \rightarrow qq + X$ $e^+e^- \rightarrow bc + X$
 $e^+e^- \rightarrow bq + X$ $e^+e^- \rightarrow cq + X$
 $e^+e^- \rightarrow gg + X$ $e^+e^- \rightarrow eq + X$
 $e^+e^- \rightarrow \mu q + X$ $e^+e^- \rightarrow \tau q + X$
 $e^+e^- \rightarrow W + X$ $e^+e^- \rightarrow Z + X$
 $e^+e^- \rightarrow \gamma + X$



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:

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$
 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$
 $e^+e^- \rightarrow bb$ $e^+e^- \rightarrow cc$
 $e^+e^- \rightarrow ss$ $e^+e^- \rightarrow qq$

τ の崩壊分岐比

τ の偏極

τ 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

$e^+e^- \rightarrow bb, bbg, bbgg$
 $e^+e^- \rightarrow cc, ccg, ccgg$
 $e^+e^- \rightarrow qq, qqg, qqgg$

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

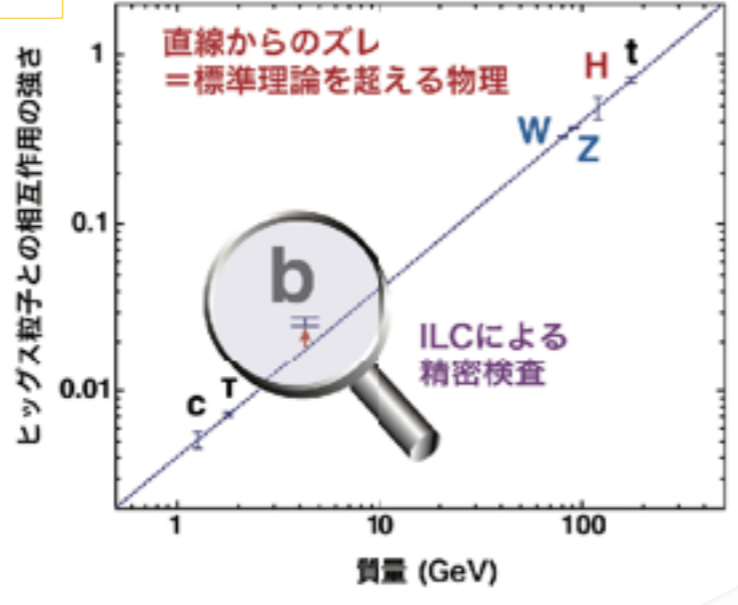
ヒッグス精密測定

- 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: $e^+e^- \rightarrow H(Z \rightarrow qq)$
 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: $e^+e^- \rightarrow H(Z \rightarrow qq)$
 部分生成断面積:

- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow bb)(Z \rightarrow e^+e^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow cc)(Z \rightarrow e^+e^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow gg)(Z \rightarrow e^+e^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-)(Z \rightarrow e^+e^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-)(Z \rightarrow e^+e^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow WW)(Z \rightarrow e^+e^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow ZZ)(Z \rightarrow e^+e^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible})(Z \rightarrow e^+e^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{“exotic”})(Z \rightarrow e^+e^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow bb)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow cc)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow gg)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow WW)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow ZZ)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible})(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{“exotic”})(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow bb)(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow cc)(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow gg)(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-)(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-)(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow WW)(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow ZZ)(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible})(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{“exotic”})(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow bb)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow cc)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow gg)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \mu^+\mu^-)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow WW)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow ZZ)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{invisible})(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \text{“exotic”})(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$

光子の角分布: $e^+e^- \rightarrow \gamma H$
 CP効果
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-)(Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-)(Z \rightarrow e^+e^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-)(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)$
 $e^+e^- \rightarrow (H \rightarrow \tau^+\tau^-)(Z \rightarrow \nu\nu)$
 $H \rightarrow (W \rightarrow qq)(W \rightarrow qq)$
 $H \rightarrow (W \rightarrow qq)(W \rightarrow l\nu)$
 $H \rightarrow (Z \rightarrow qq)(Z \rightarrow qq)$
 $H \rightarrow (Z \rightarrow qq)(Z \rightarrow ll)$
 $H \rightarrow (Z \rightarrow ll)(Z \rightarrow ll)$



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: $e^+e^- \rightarrow \gamma X$
 $e^+e^- \rightarrow e^+q + X$
 $e^+e^- \rightarrow \tau q + X$
 $e^+e^- \rightarrow Z + X$

重ゲージ結合のCP保存測定:
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow qq)(Z \rightarrow qq)$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow qq)(Z \rightarrow ll)$
 $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow ll)(Z \rightarrow ll)$

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

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:

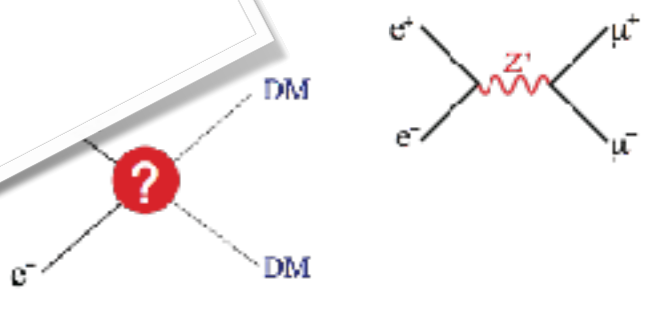
- $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow e^+e^-) + X$
- $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow \mu^+\mu^-) + X$
- $e^+e^- \rightarrow (Z \rightarrow qq) + X$
- $e^+e^- \rightarrow AH$
- 1荷電ヒッグス粒子探索:
 $e^+e^- \rightarrow H^- H^+ H \rightarrow \tau^+ \nu, cs$
 $e^+e^- \rightarrow W^- H^+$
- 2荷電ヒッグス粒子探索:
 $e^+e^- \rightarrow W^+ W^- H H$
 $e^+e^- \rightarrow H^+ H^- H$

2-フェルミオン過程

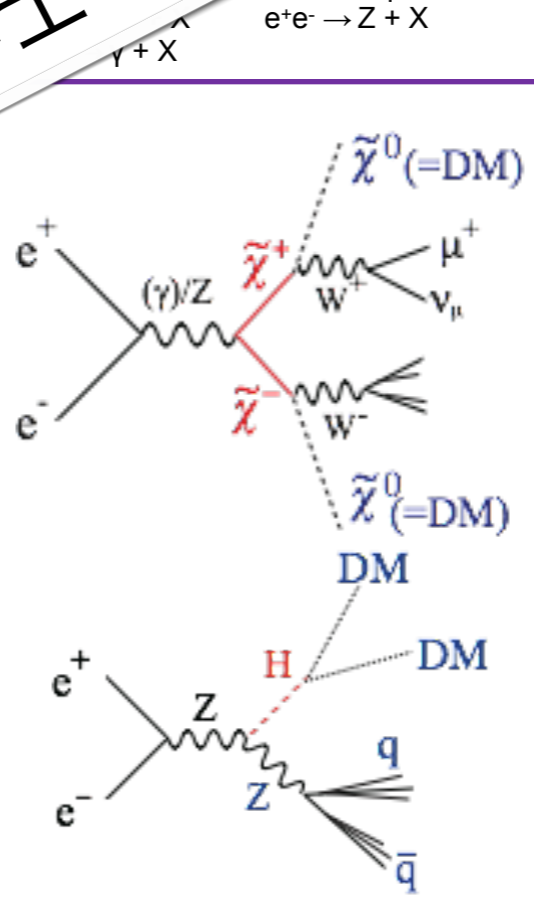
- 新たな力の発見可能性
- LEPの3桁上の統計量
- 偏極が非常に重要

断面積と角分布:

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ | $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ |
| $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ | $e^+e^- \rightarrow cc$ |
| $e^+e^- \rightarrow bb$ | $e^+e^- \rightarrow qq$ |
| $e^+e^- \rightarrow ss$ | |
- 偏極依存分岐比
- 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

- $e^+e^- \rightarrow bb, bbg, bb\bar{g}$
- $e^+e^- \rightarrow cc, ccg, cc\bar{g}$
- $e^+e^- \rightarrow qq, qqg, qq\bar{g}$

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