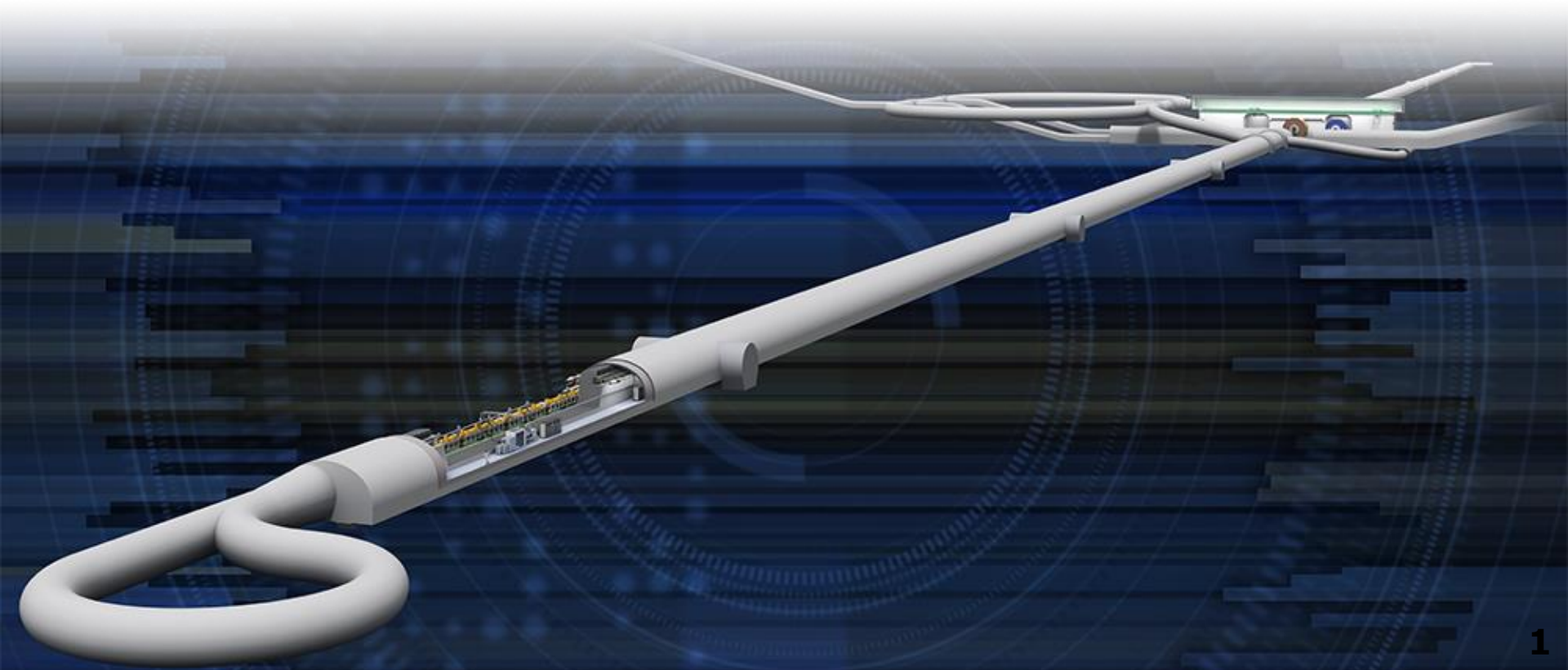
ILC大学連携タスクフォースセミナー

国際リニアコライダー計画

ILCの物理

2017/4/20@信州大学
倉田　正和（KEK）



今日の内容

1. 素粒子物理と宇宙

2. ILCについて

3.　ILCで何がわかるか？

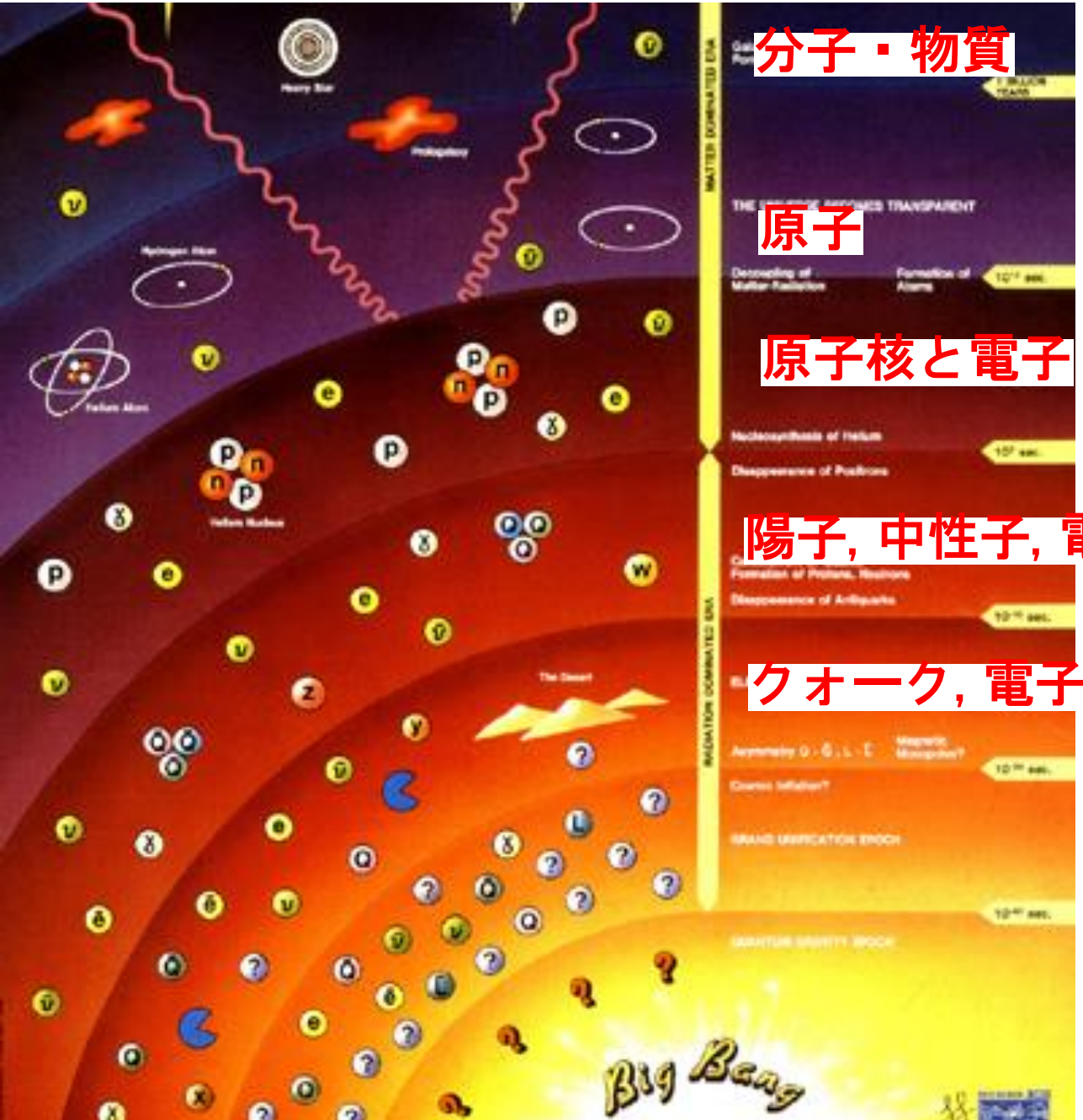
～素粒子物理の謎～

真空

最も重い素粒子

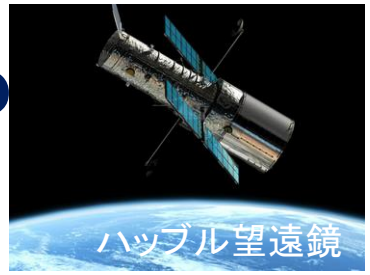
暗黒物質

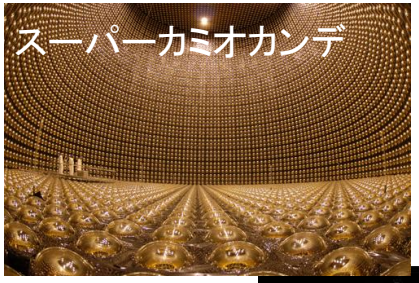
素粒子と宇宙

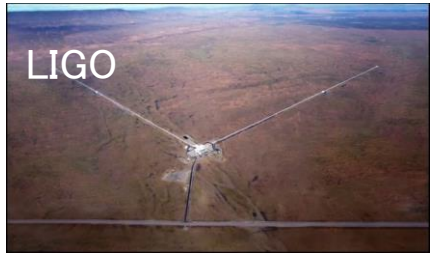


- 宇宙初期には素粒子はありのままの姿でいた
  - クォーク･レプトン
- 時間がたつにつれ
  - 陽子･中性子
  - 原子核
  - 原子
  - 分子
  - 物質
- 素粒子を調べることは**歴史をさかのぼること**

素粒子物理で宇宙をとらえる





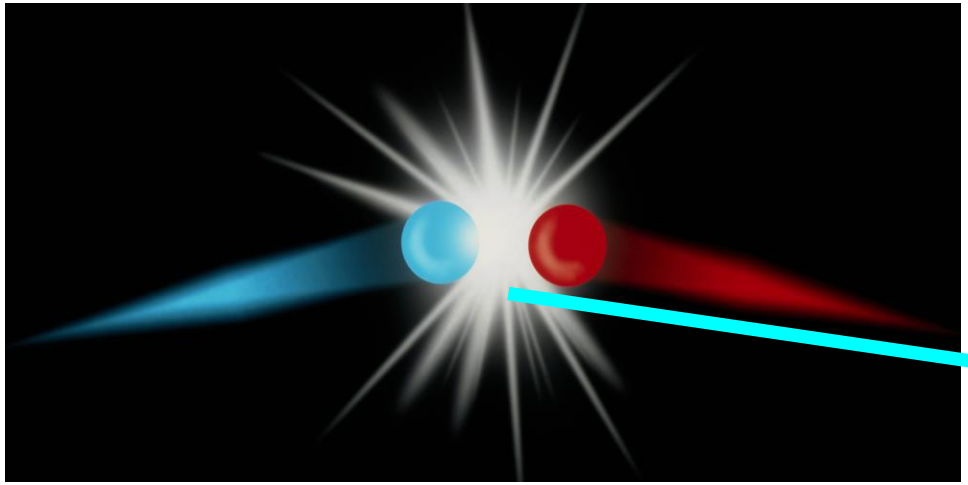


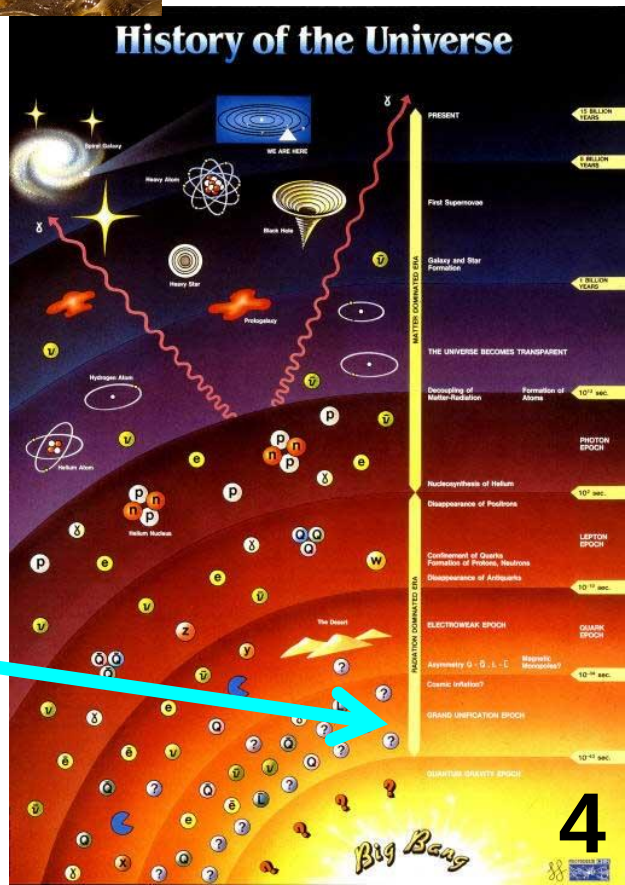
直接観測

とらえるもの：電波、X線、γ線、
ニュートリノ、重力波(New!)

加速器実験

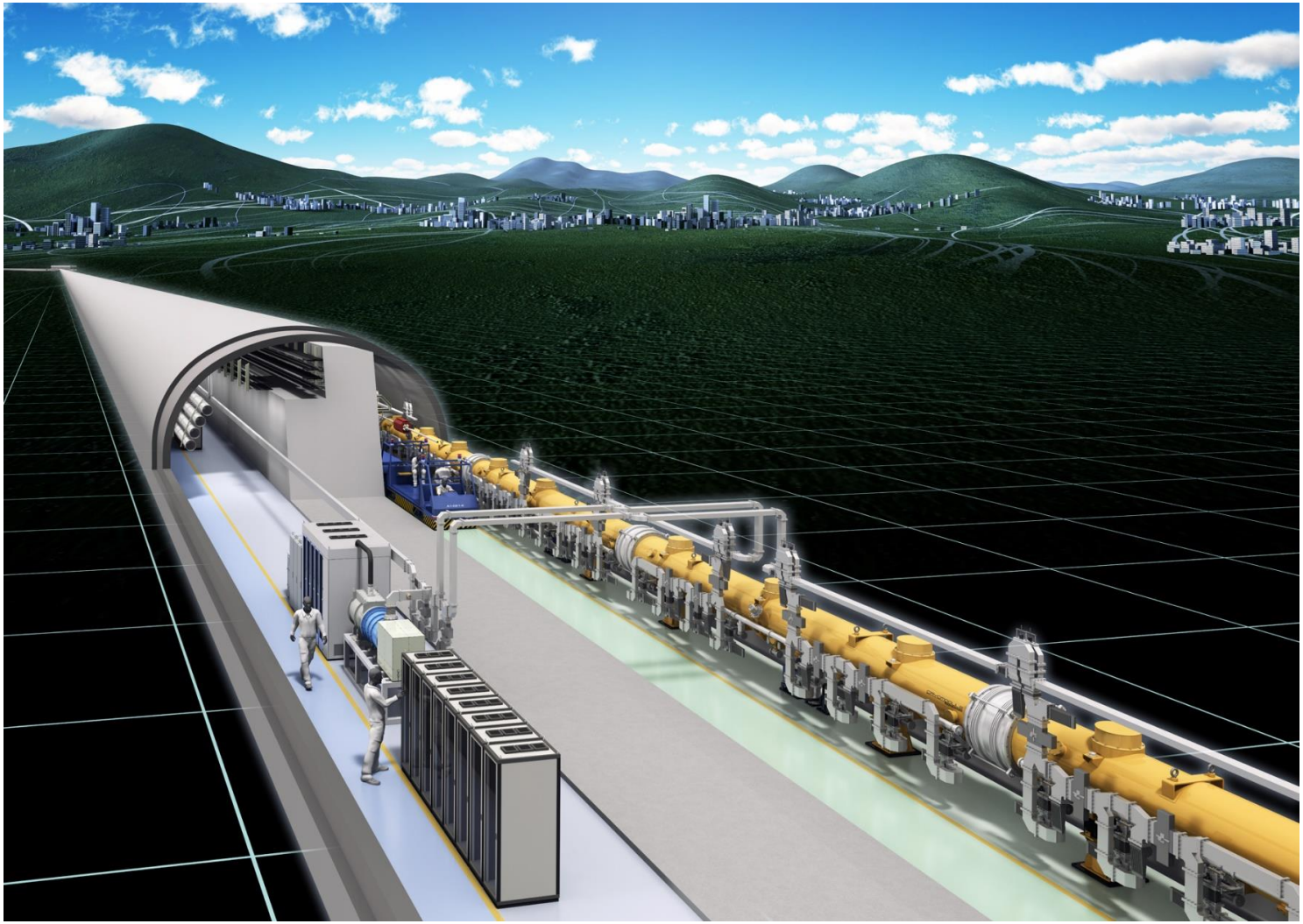
- 粒子を光速に近く加速して正面衝突
- 宇宙初期の状態を局所的に再現





ILC: 次世代の加速器実験

- 電子と陽電子のビームが衝突
- 重心系エネルギー250 – 500 GeV
- 重心系エネルギー 数TeV へのアップグレード可能(更にその先へ…)



素粒子物理の謎

1. 真空の謎

2. 最も重い素粒子の謎

3. 暗黒物質(ダークマター)の謎

素粒子物理の謎

1. 真空の謎

2. 最も重い素粒子の謎

3. 暗黒物質(ダークマター)の謎

真空の謎がひとつ解明
2012/7/4

※我々の宇宙はヒッグス粒子の元となる場で満ち満ちている

2012年7月4日 CERNにて

メディアでもヒッグス粒子発見は大きなニュースとなった

年(平成24年)7月5日 木曜日 朝日新聞 1892年3月11日第3種郵便物認可

ヒッグス粒子か 発見

万物の重さの源

国際チーム発表

万物に質量（重さ）を与えると考えられてきた「ヒッグス粒子」とみられる新粒子を発見したと、スイス・ジュネーブ近郊にある欧州合同原子核研究機関（CERN）が4日、発表した。素粒子物理学の基礎となる「標準理論」の中で唯一見つかっていなかった素粒子だ。物質が質量を獲得し、宇宙がいかにして現在の姿に至ったかを解明する意味がある。

▼3面＝研究者数千人が参加

ヒッグス粒子は、137億年前の「ビッグバン」によって宇宙が誕生した直後に、光速で飛び回る素粒子に対して水あめのように作用して、動きにくくしたと考えられている。この「動きにくさ」こそ、質量を持ったことを意味する。

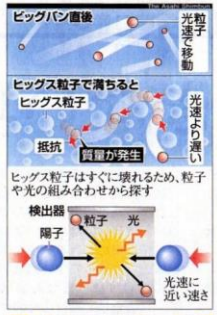
今回発表されたのは、東大や筑波大など日本の16研究機関が参加する「ATLAS」と、欧米を中心とした「CMS」という二つの研究チームの実験成果。ともに、2008年に稼働を開始したCERNの巨大加速器「LHC」を使って探索実験を続けていた。

ヒッグス粒子は、加速器で光速近くまで加速した陽子と陽子を衝突させることで人為的に作り出すことができる。だが、瞬時に別の粒子や光に変わり、直接観測できない。そこで、変身後の粒子や光を検出器でとらえ、データを統計的に解析することでヒッグス粒子の存在確率を割り出す。データ量が増えるほど確率は高まる。

今回の成果では、CMS、ATLAS共に、実験によって未知の新粒子が生まれた確率を99・9999％とはじきだした。この確度であれば物理的に「発見」と認定できる。だが、新粒子がヒッグス粒子であることを突き止めるには、なおデータを取る必要がある。今年中にデータを積み重ねて発見を確定する見通しだ。

CERNのロルフ・ホイヤー所長は、ヒッグス粒子とみられる粒子の発見について、「歴史的瞬間だが、これからの様々な発見のための始まりに過ぎない」という見解を発表した。

CERNの発表会場には、約四十年前にヒッグス粒子の存在を予測した英エディンバラ大のピーター・ヒッグス名誉教授（83）も招かれ、拍手で祝福された。（田中誠士）



LHCに設置されている検出装置「ATLAS」＝CERN、アトラス実験グループ提供

毎日新聞 第49051号 MAINICHI 毎日新聞 7月5日(木) 2012年(平成24年)

ヒッグス粒子 発見か

新素粒子検出 年内に結論

日米欧2チーム

あらゆる物質に質量を与えたと考えられる仮説上の素粒子「ヒッグス粒子」を探しているジュネーブの欧州合同原子核研究所（CERN＝ルン）は4日、大型粒子加速器「LHC」による実験で、ヒッグス粒子とみられる新たな素粒子を見つけたと発表した。ヒッグス粒子は、万物に含まれる素粒子の基本理論として1960年代に提唱された「標準理論」で存在が予言された18種の素粒子のうち、唯一未発見だ。（3面にクローズアップ）

ヒッグス粒子は、英国の物理学者ピーター・ヒッグス博士（83）が提唱。宇宙誕生の大爆発（ビッグバン）直後、素粒子に質量を誕生させる過程で重要な役割を果たした「神の粒子」と呼ばれている。

得られたデータからは発見された素粒子をヒッグス粒子と考えても矛盾がないが、ヒッグス粒子かを見極める方法は複数あり、さらなる実験や分析で確度を高める必要があるという。今年中には結論に至る見込み。

ヒッグス粒子は、英国の物理学者ピーター・ヒッグス博士（83）が提唱。宇宙誕生の大爆発（ビッグバン）直後、素粒子に質量を誕生させる過程で重要な役割を果たした「神の粒子」と呼ばれている。

喜びあうヒッグス粒子の理論提唱者のピーター・ヒッグス博士ら欧州代表のフランソワ・アングレール博士＝ブラッセル

ビッグバン 宇宙の誕生

第3種郵便物認可 朝日新聞

ヒッグス粒子研究に日本の技術

CERNの巨大加速器支える

万物に質量（重さ）を与えるという「ヒッグス粒子」とみられる新粒子の発見。その舞台となった欧州合同原子核研究機関（CERN）の巨大加速器には、東芝や古河電工など日本企業の先端技術がつめ込まれている。世界的な発見は、日本の技術力なしでは実現しなかった。

加速器は、陽子を光に近い速さにして衝突させる。すると、ヒッグス粒子が出現するという理屈だ。

その衝突を実現するのが、東芝の「超伝導4極電磁石」だ。陽子に強い磁力を加え、虫眼鏡で光を集めるように絞り込み、陽子どうしを正確にぶつける。全長27キロという巨大な装置の心臓部といえる。

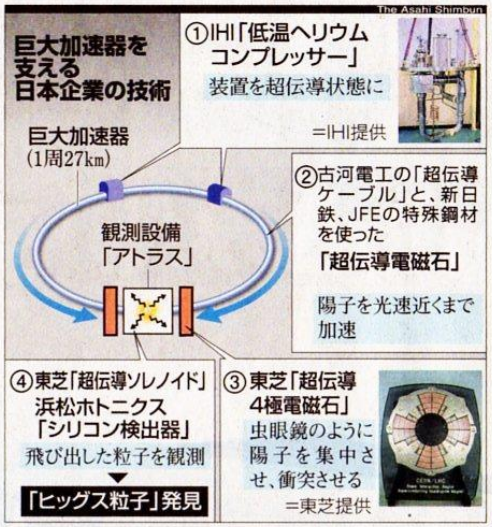
衝突で飛び出した粒子を観測するのが、観測設備「アトラス」。粒子に磁場をかけ、進む方向がどう変わるかで粒子の質量やスピードを割り出す。この磁場をつくるのも東芝の装置だ。そして、粒子の軌跡を読み取るのが浜松ホトニクスの検出器。こちらは加速器の「目」の役割を担う。

衝突前に、陽子を光速近くにさせるには、強力な磁場が必要だ。ここでは古河電工の「超伝導ケーブル」が使われた。零下271度の超低温にすると、電気抵抗がゼロになる特性がある。このケーブルをコイル状に巻いて電磁石をつくり、磁場をおこす。

その超低温をつくるのは、IHIのコンプレッサー。通常は気体のヘリウムを、液体にして圧力を下げ、零下273度の絶対零度に近い温度を生む。世界最先端の技術という。

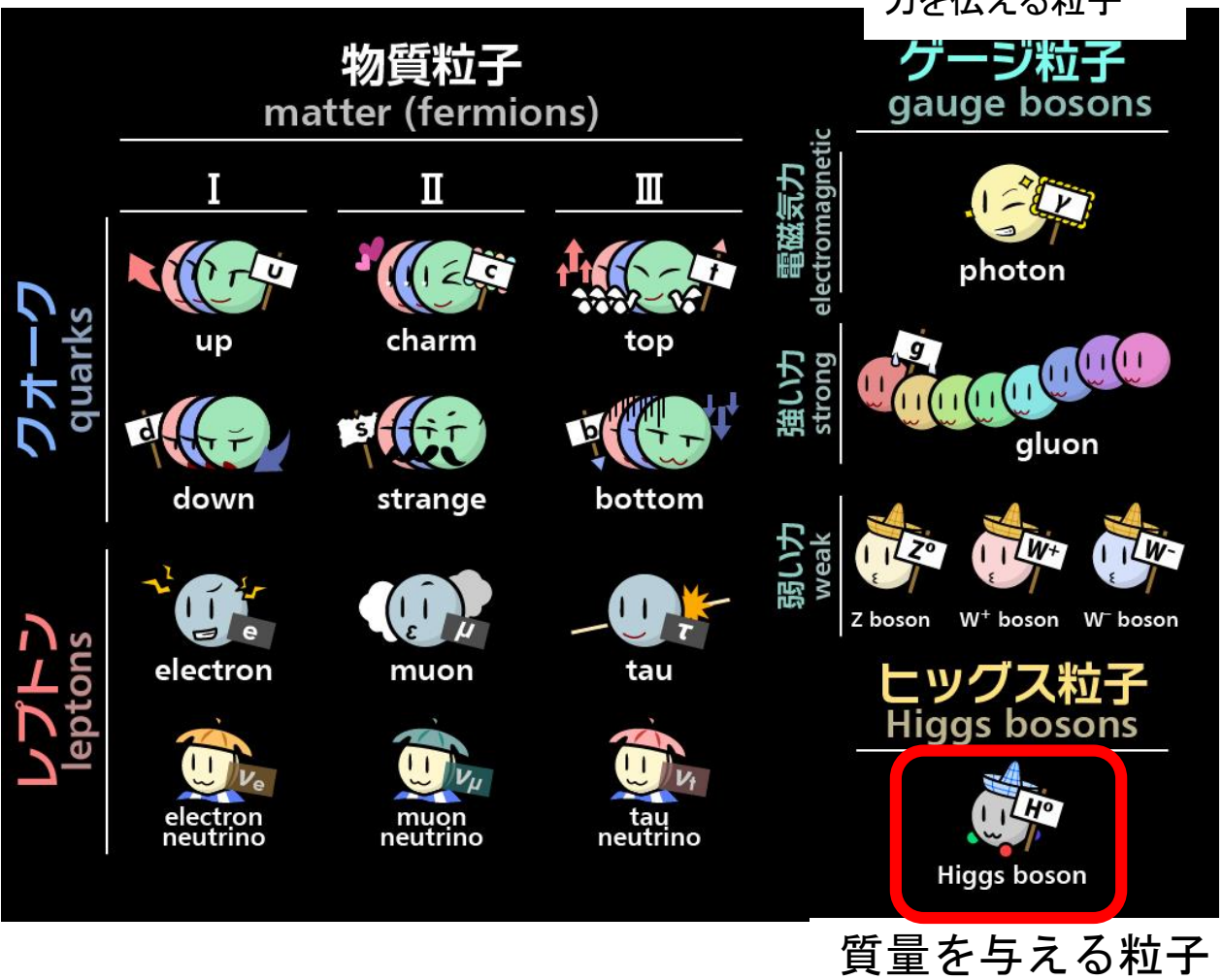
CERNの研究に協力してきた高エネルギー加速器研究機構（茨城県つくば市）の山本明・超伝導低温工学センター長は語る。

「発見は日本企業の技術力の成果でもあり、日本人は自信を持っていい」（上栗崇）



素粒子の標準理論

Standard Model (SM)

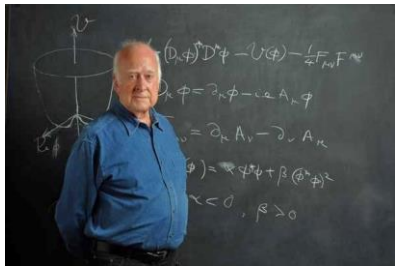


- ヒッグス粒子
今までの粒子と全く違う性質をもつ
  - スピン0
  - すべての標準理論粒子に質量を与える
- なぜヒッグス粒子が存在するかは謎
- ヒッグス場はほかの粒子の質量の元となる
  - 相互作用の強さが相手粒子の質量に比例する

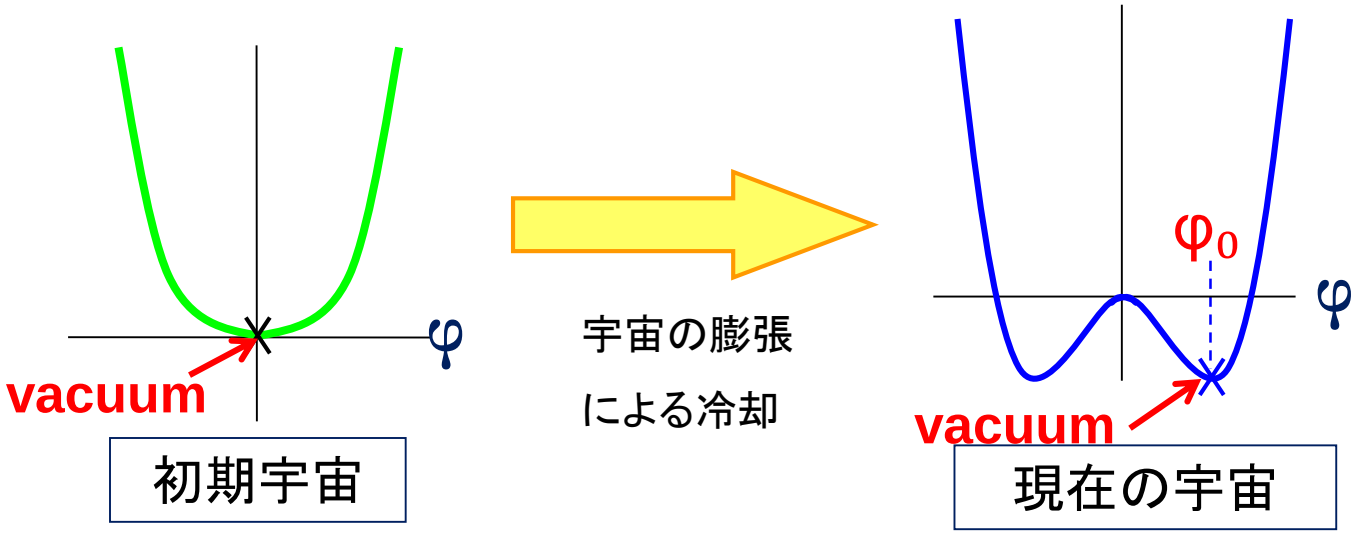
宇宙の相転移とヒッグス粒子

南部陽一郎先生

Englert　　Brout



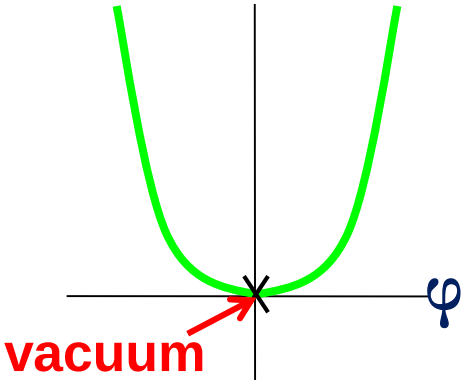
Higgs



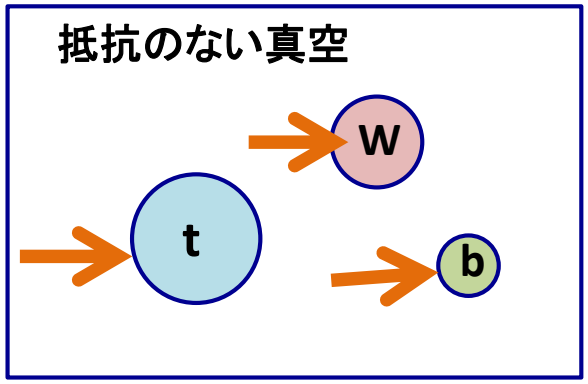
南部先生の「自発的対称性の破れ」のアイデアをもちい、ブルー、アングレール、ヒッグスが素粒子が質量を持てることを示した。

ヒッグス粒子の発見で、素粒子の質量が生まれるメカニズムが証明　→2013年、ノーベル賞

素粒子の質量の起源



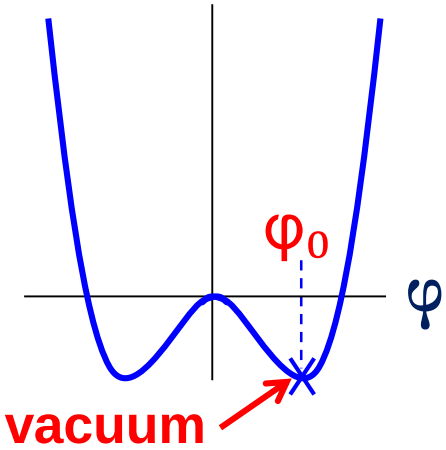
初期宇宙



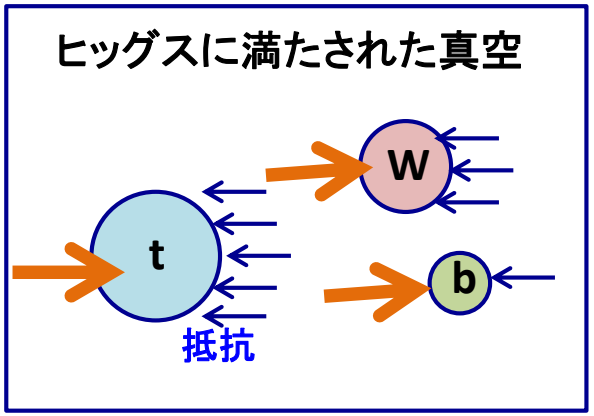
極高温のためヒッグス粒子は蒸発
素粒子は無質量

抵抗なく運動可

宇宙の膨張・冷却



現在の宇宙



真空は、ヒッグスが凝縮している状態に変化（相転移）した

加速しようとする粒子がヒッグスにぶつかって抵抗を受ける

質量≒粒子がヒッグスから受ける抵抗

ヒッグス粒子の謎

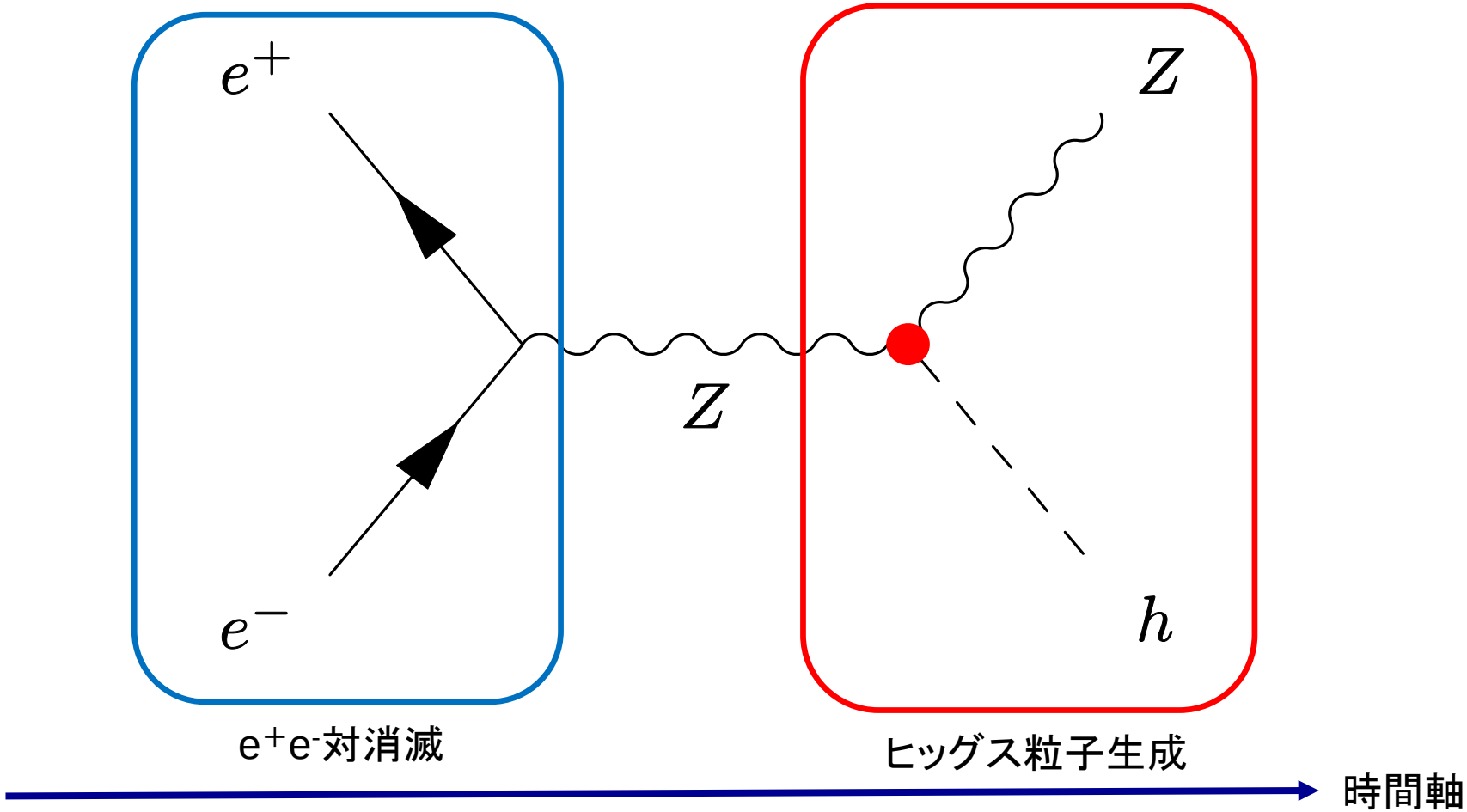
- ヒッグス粒子は多くの謎を抱えている
  a. ヒッグス粒子
     - 標準理論唯一のスピン0粒子
       - ヒッグス粒子は素粒子か？
       - ヒッグス粒子は本当に1つなのか？
     - すべての標準理論粒子に質量を与える
       - 質量を与えるメカニズムがなぜこうなったのか？

ヒッグス粒子を徹底的に調べる！

a #mylinearcollider
– A Worldwide Event
From Design to Reality
12 June 2013
Tokyo, Geneva, Chicago
www.linearcollider.org/worldwideevent
The International Linear Collider
– A Worldwide Event
From Design to Reality
12 June 2013
Tokyo, Geneva, Chicago
www.linearcollider.org/worldwideevent
そのために
ILCが
必要です！

ファインマンダイアグラム

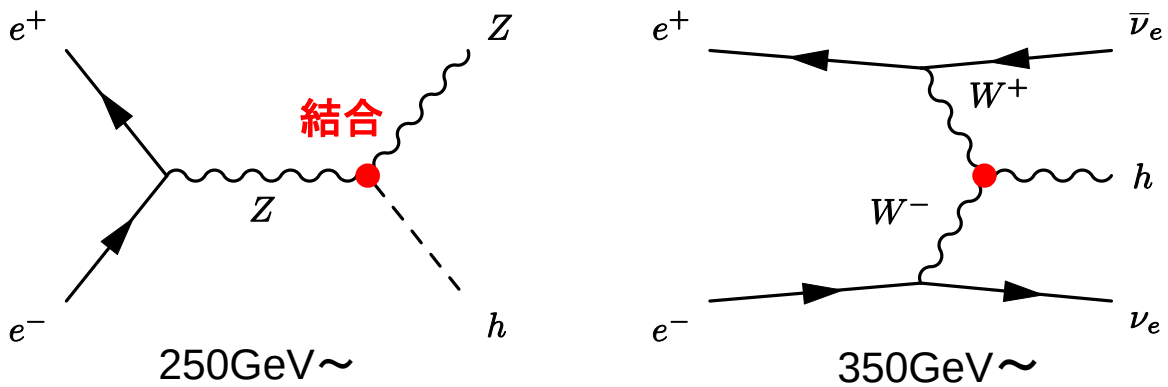
- 素粒子反応の素過程をグラフで説明



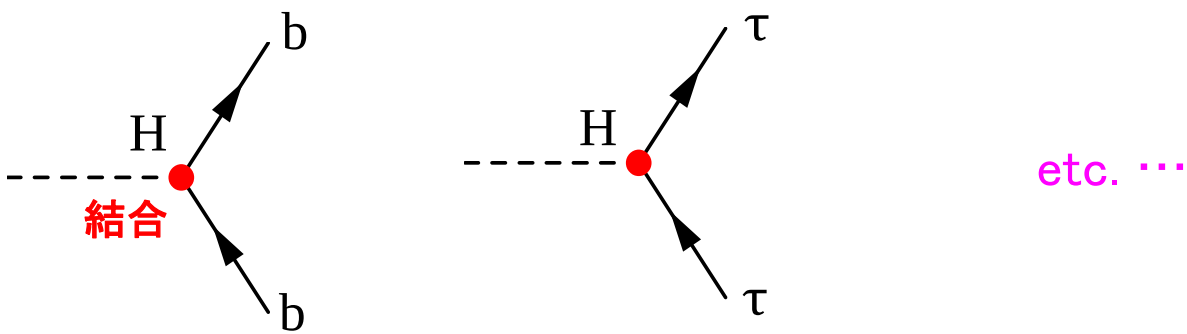
- つまり:
  - e^+e^- が対消滅→Zボソンが生成→Ｚボソンがヒッグス粒子を生成

ヒッグス結合定数

- 素粒子とヒッグスの相互作用の強さ



ヒッグス生成過程



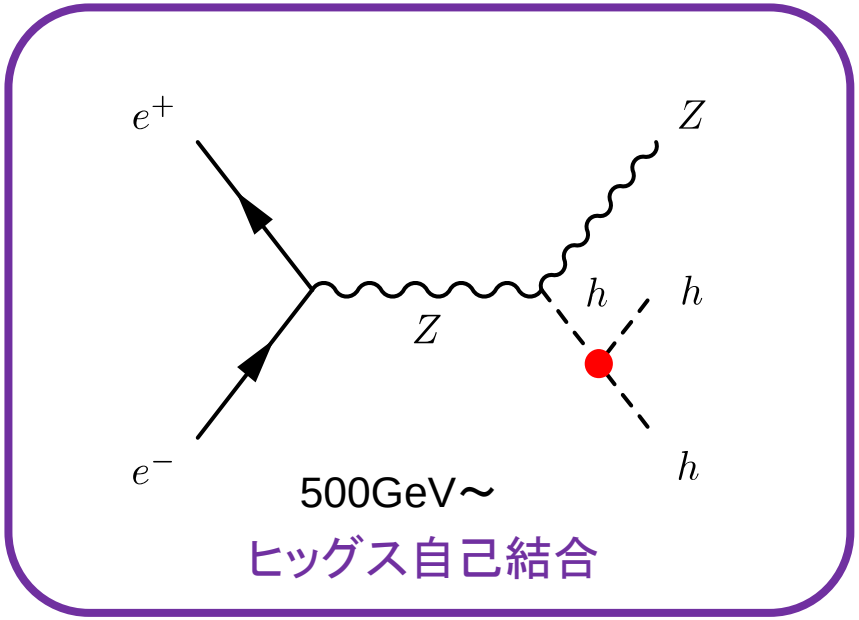
物質粒子との結合

ヒッグスがその粒子へ崩壊する事象を数えて測定する

(結合定数)^2 ∝ 反応の数

ヒッグス結合定数

- ヒッグス同士の相互作用の強さ



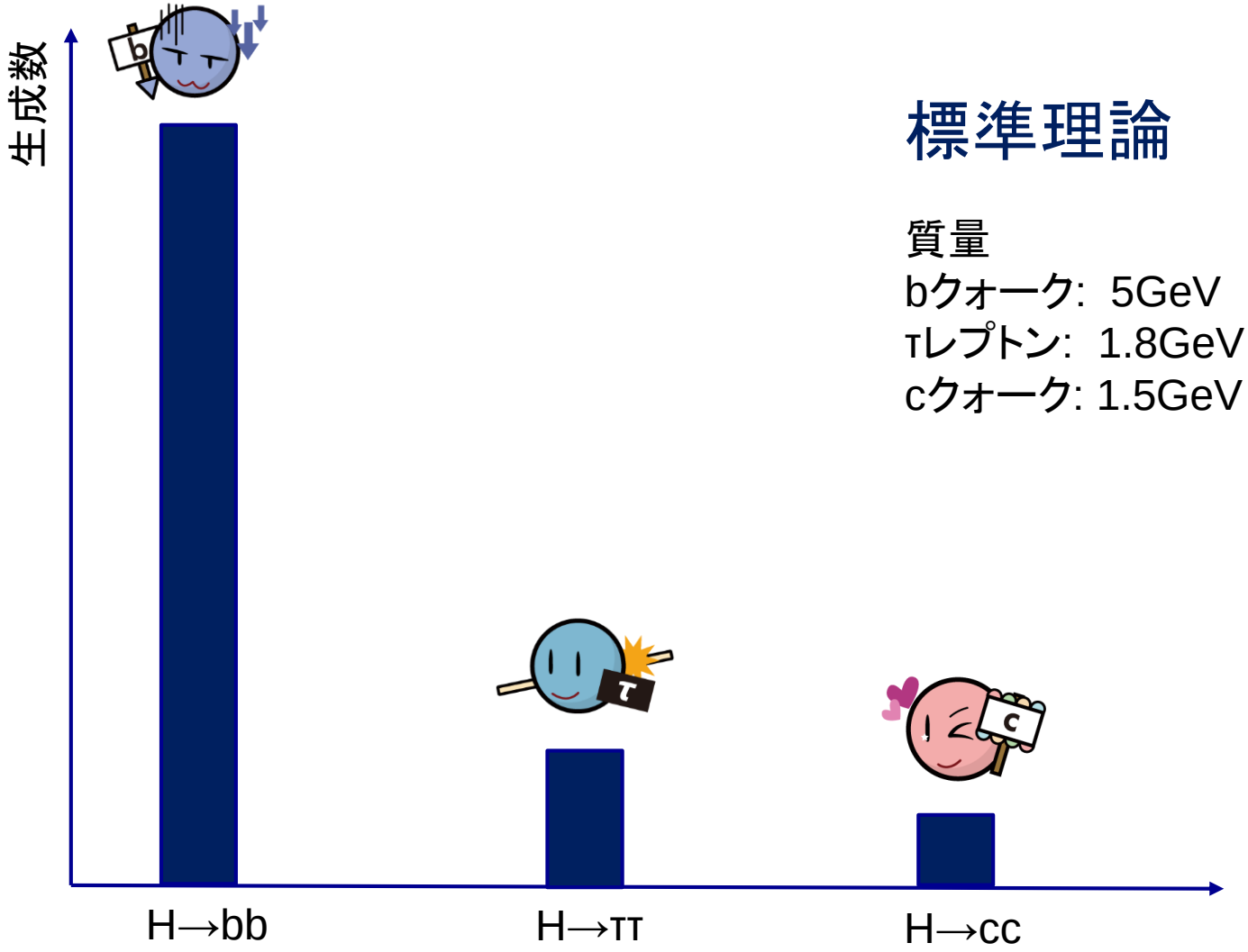
ヒッグスがその粒子へ崩壊する事象を数えて測定する

(結合定数)^2 ∝ 反応の数

標準理論のしめすところ

- 標準理論ではヒッグス結合の強さが粒子質量に比例する

(結合定数)^2 ∝ 反応の数



標準理論

質量
bクォーク: 5GeV
τレプトン: 1.8GeV
cクォーク: 1.5GeV

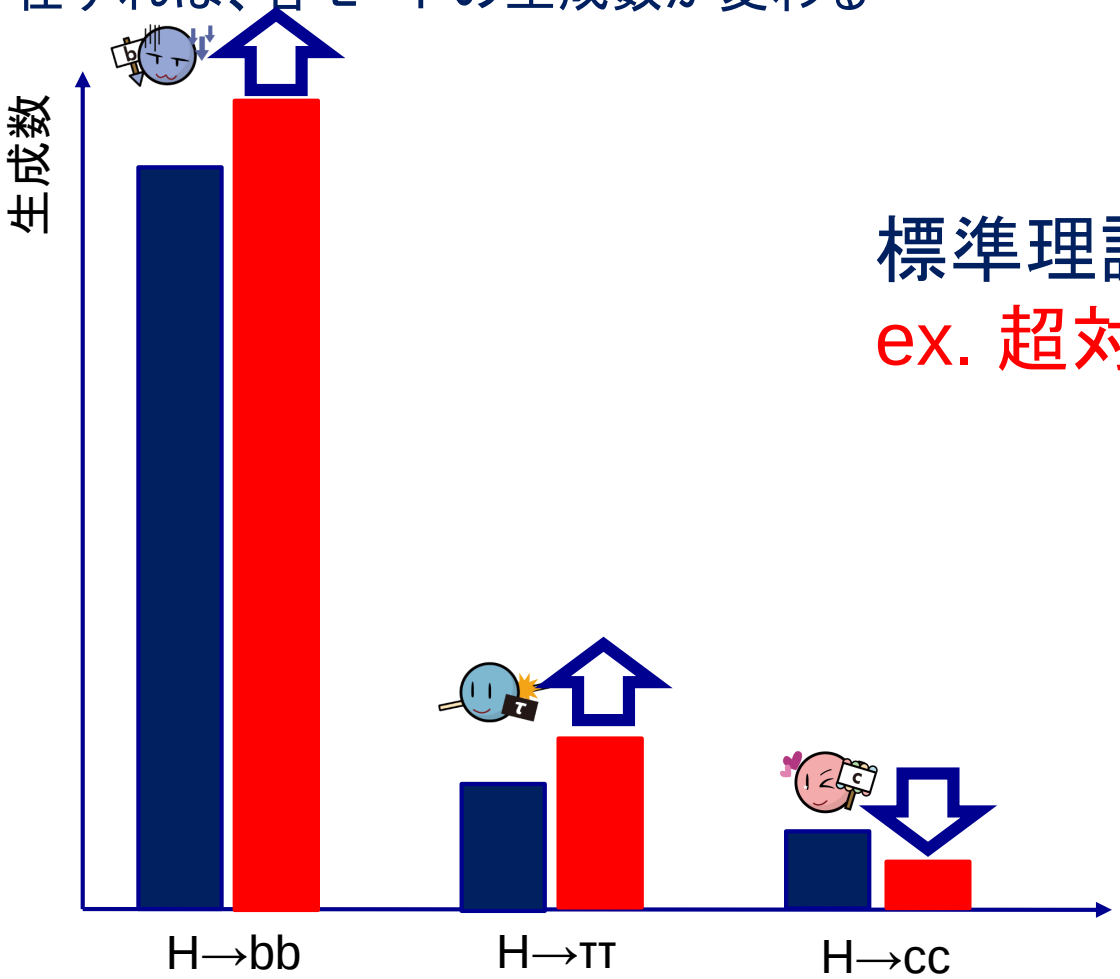
※ヒッグス粒子の半分以下の質量をもつ物質粒子

超対称性粒子

全ての基本粒子に超対称粒子の相棒がいる

ヒッグス結合定数の測定

- 新物理が存在すれば、各モードの生成数が変わる



変化の大きさは新物理のモデルに依存する

ズレのパターンを精密測定し新物理モデルを識別する

ヒッグス結合定数の測定はILCで必ずできる新物理へのアプローチ

ヒッグス粒子:まとめ

- ヒッグス粒子の発見で真空の謎がさらに深まった。

- 知りたいこと:
  - ヒッグス粒子は本当に一つか？
  - なぜスピン0か？
  - ヒッグス粒子は本当に素粒子か？
  - ほかの粒子の質量を生み出す

- ILCでヒッグス粒子を徹底的に調べて、真空の謎に迫る！

素粒子物理の謎

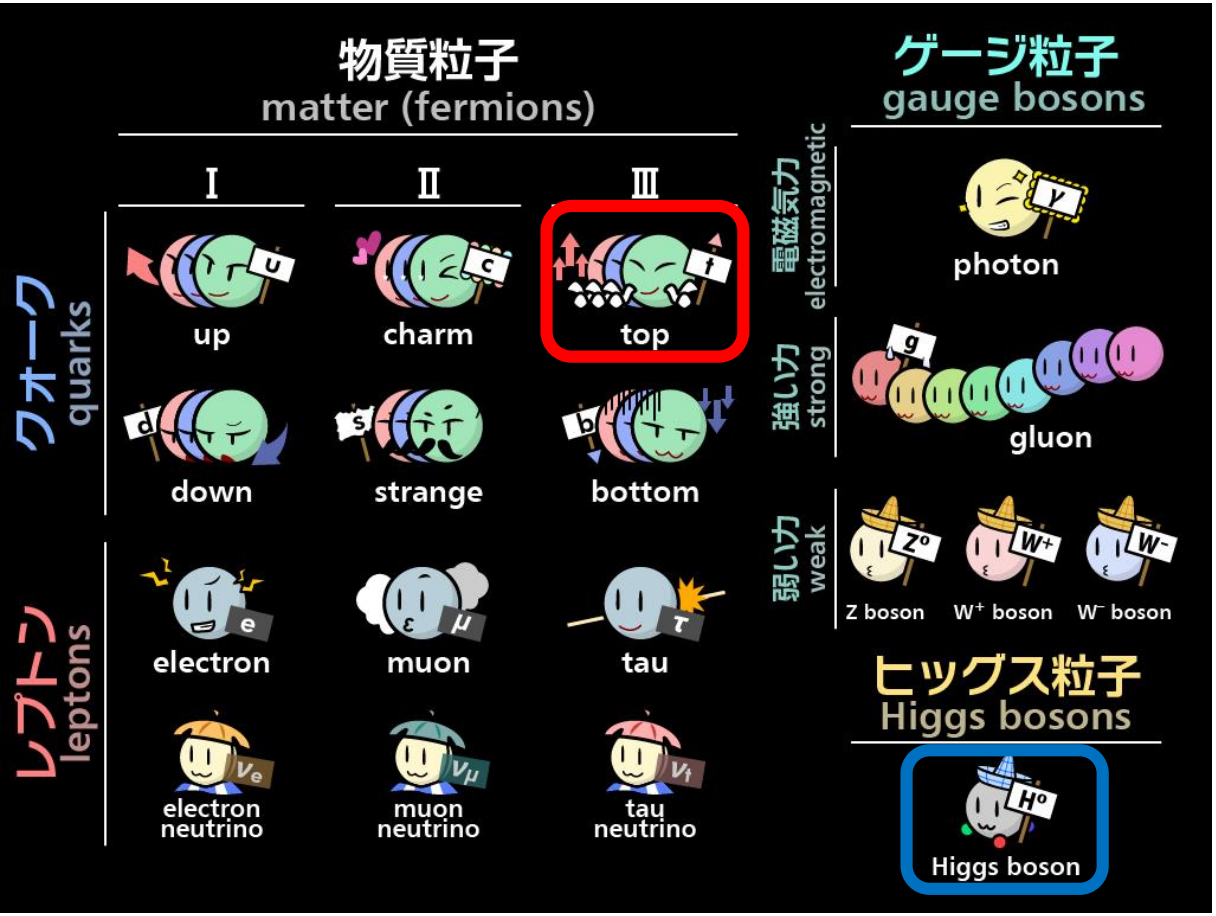
1. 真空の謎

2. 最も重い素粒子の謎

3. 暗黒物質(ダークマター)の謎

素粒子の標準理論

Standard Model (SM)



- ヒッグス粒子
  - 2012年に発見
  - 標準理論最後の粒子
- トップクォーク
  - 1995年に発見
  - 最後に発見されたクォーク
  - 電子・陽電子実験での測定は皆無

トップクォークの謎

- トップクォークは多くの謎を抱えている

b. トップクォーク

- 他のクォークに比べて、ずば抜けて重い

bクォーク: 5GeV　　tクォーク: ～175GeV

- なぜこれほど重いのか？

- これほど重い理由はあるのか？
  - 未知の新粒子と相互作用を起こしているから？

トップクォーク質量

- トップ質量は新物理を調べる際の重要なインプット
  - e.g.

トップクォーク質量→ヒッグス粒子の質量推定

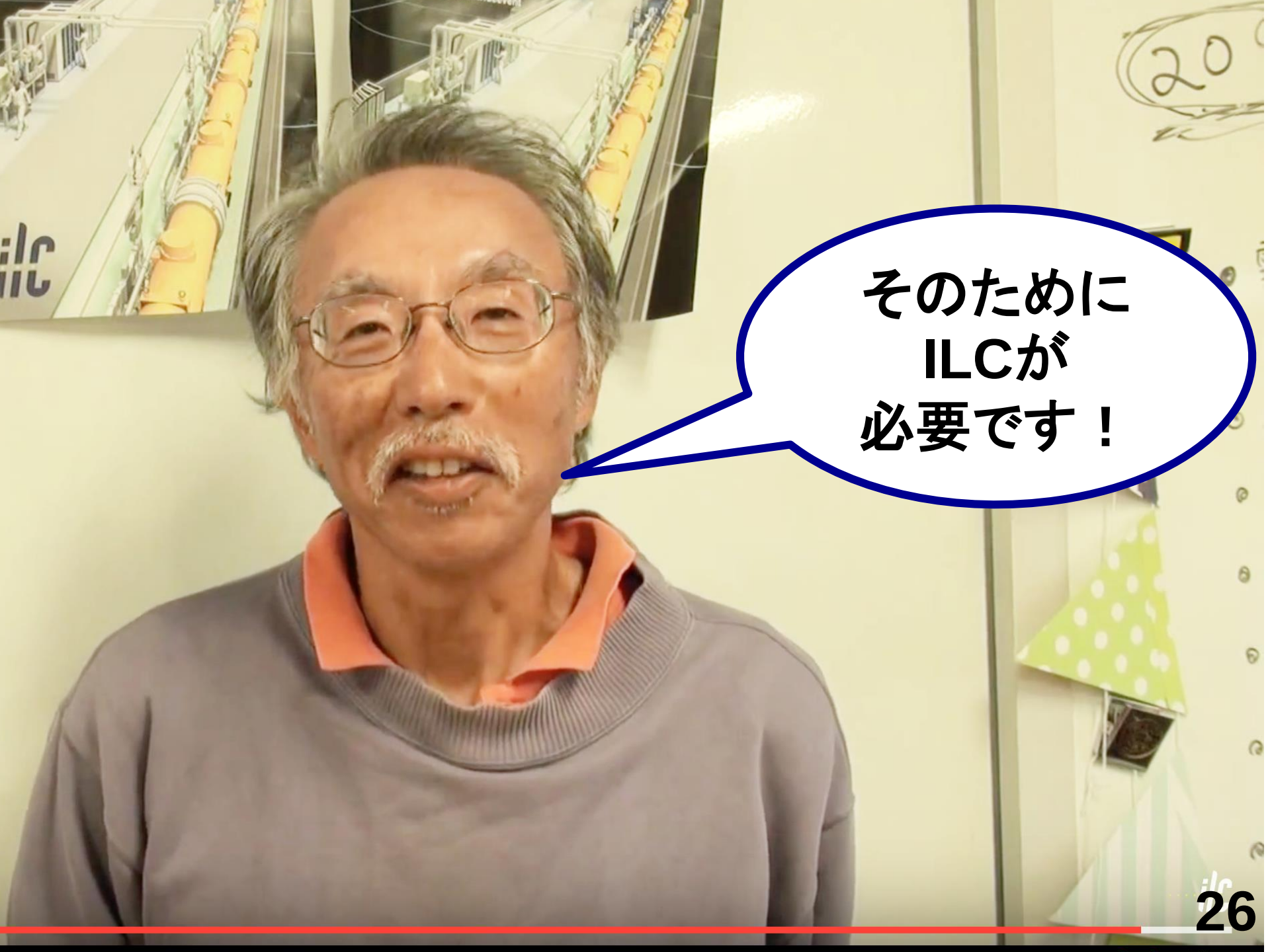
⇩

トップ・ヒッグス質量→新物理のエネルギースケールを推定

  - 質量測定の精度がいいと、新理論の予言能力が増す
  - ちゃんと測定することが重要

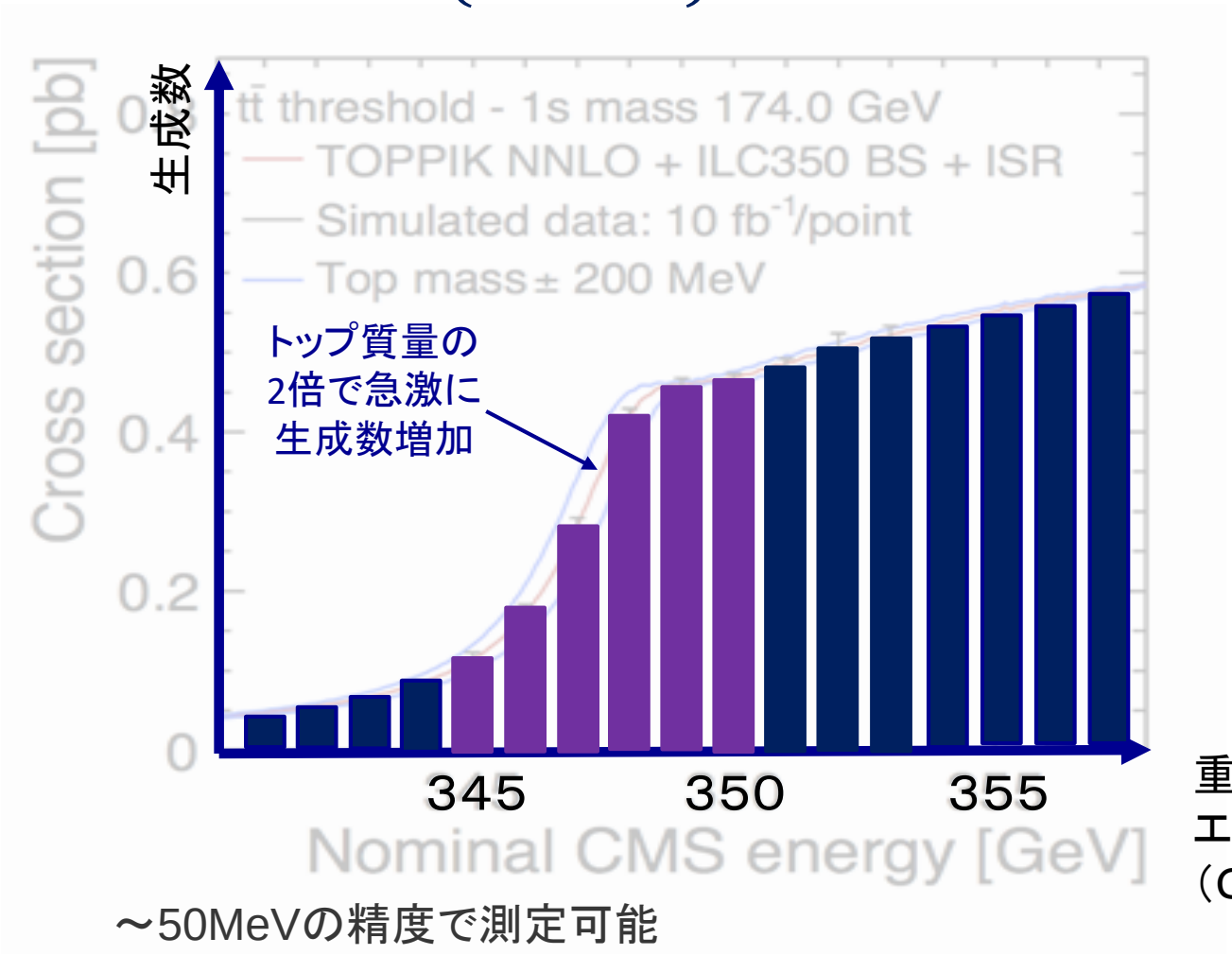
- 質量測定：トップ(対)生成閾値付近の生成断面積の精密測定
  - 生成断面積のエネルギー依存性を利用

$$(\text{断面積}) \propto \text{反応の数}$$


そのために
ILCが
必要です！

トップクォーク質量測定

(断面積) ∝ 反応の数



～50MeVの精度で測定可能

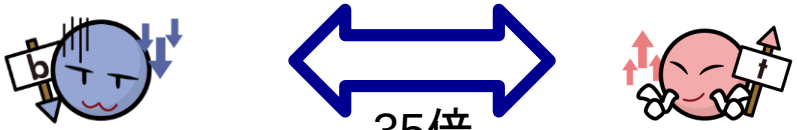
現在の精度: ～870MeV

トップクォークの謎

- トップクォークは多くの謎を抱えている

b. トップクォーク

- 他のクォークに比べて、ずば抜けて重い

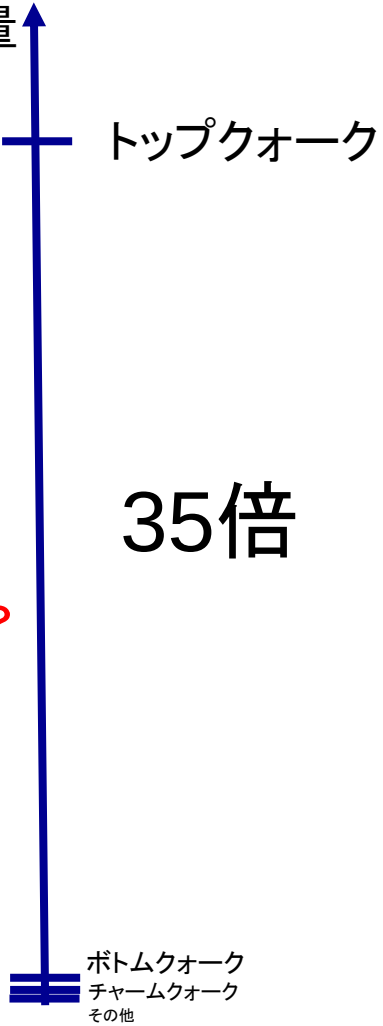


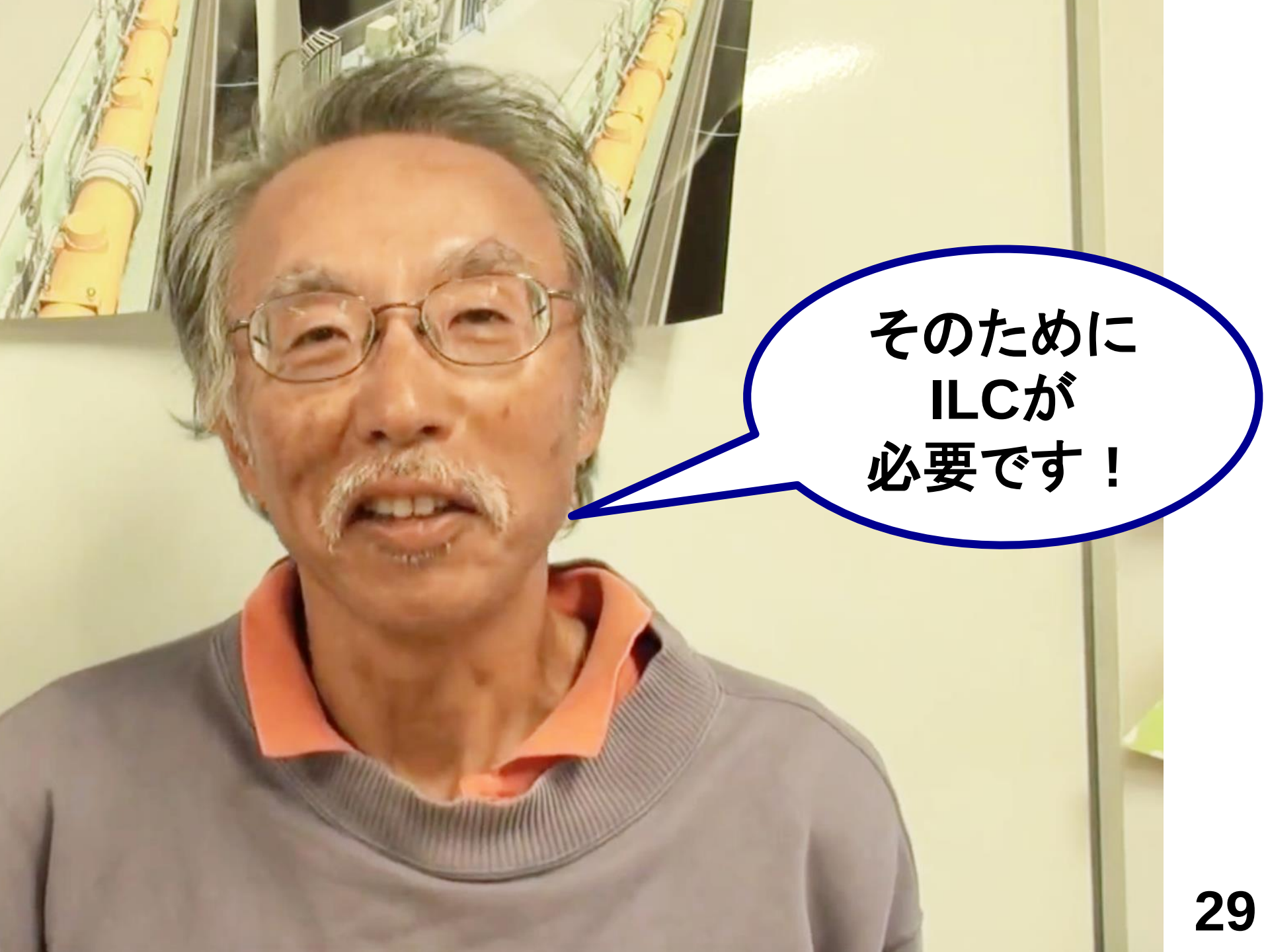
bクォーク: 5GeV　　tクォーク: ～175GeV

- なぜこれほど重いのか？

- これほど重い理由はあるのか？
  - 未知の新粒子と相互作用を起こしているから？

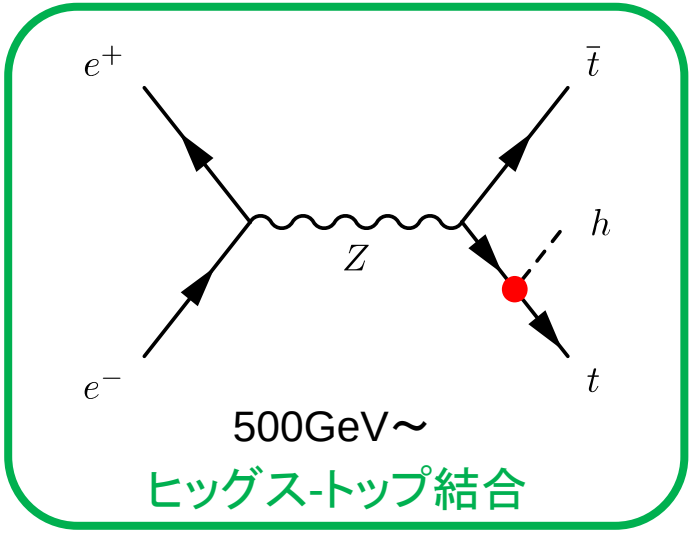
- まずは既存粒子との相互作用を徹底的に見る
  - 標準理論と違う現象がみられるか？



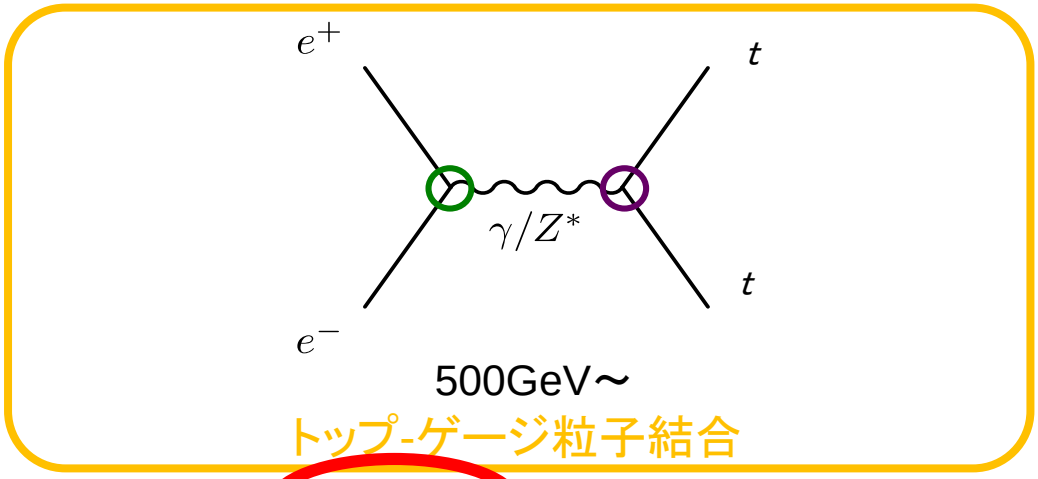

そのために
ILCが
必要です！

トップ結合定数

- トップクォークと他の粒子との相互作用の強さ



事象が生成された数を数えて測定する



トップクォーク対の異なる偏極状態での生成数をそれぞれ数えて測定する

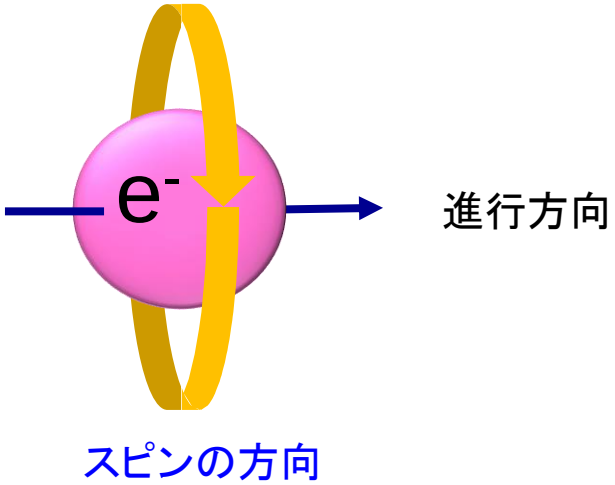
(結合定数)^2 ∝ 反応の数

偏極とは何か

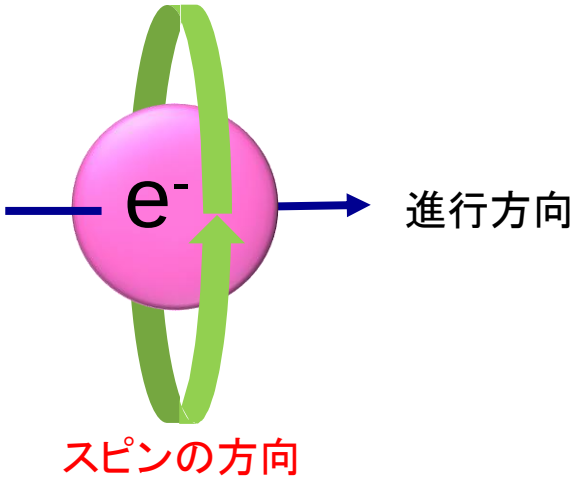
（電子のスピン＝1/2）

進行方向に対するスピンの向きで
右偏極・左偏極が決まる

右巻きスピン（右偏極）



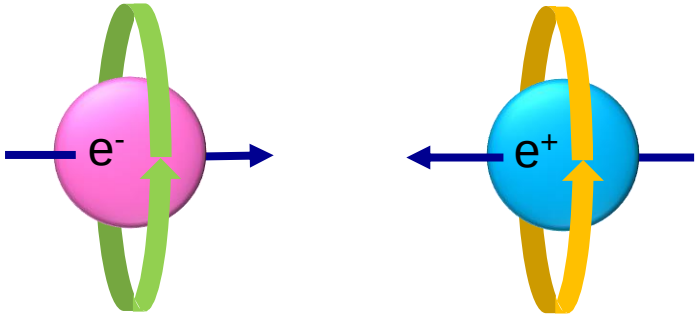
左巻きスピン（左偏極）



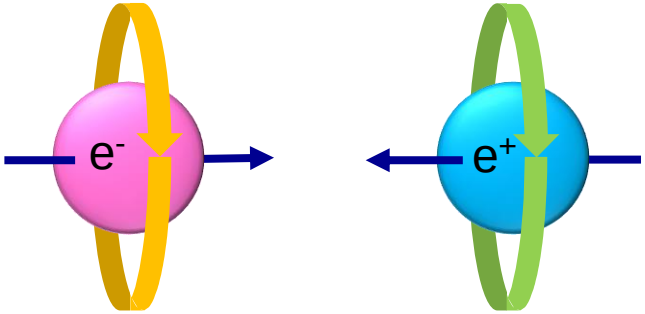
ILCは電子(陽電子)の偏極を変えて実験できる

偏極のコントロール

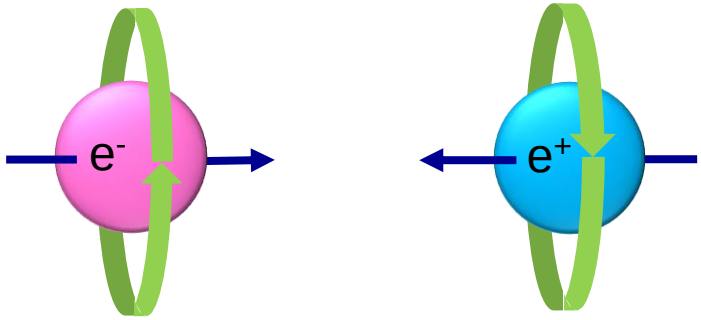
左巻き電子&右巻き陽電子



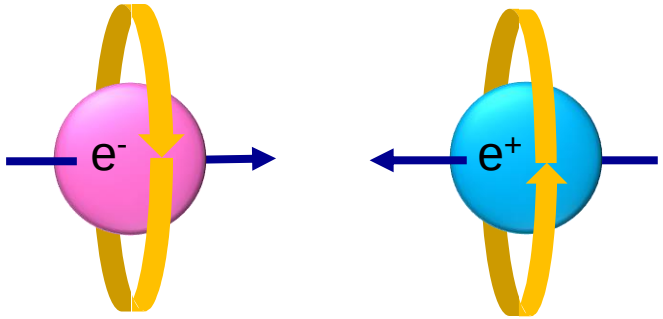
右巻き電子&左巻き陽電子



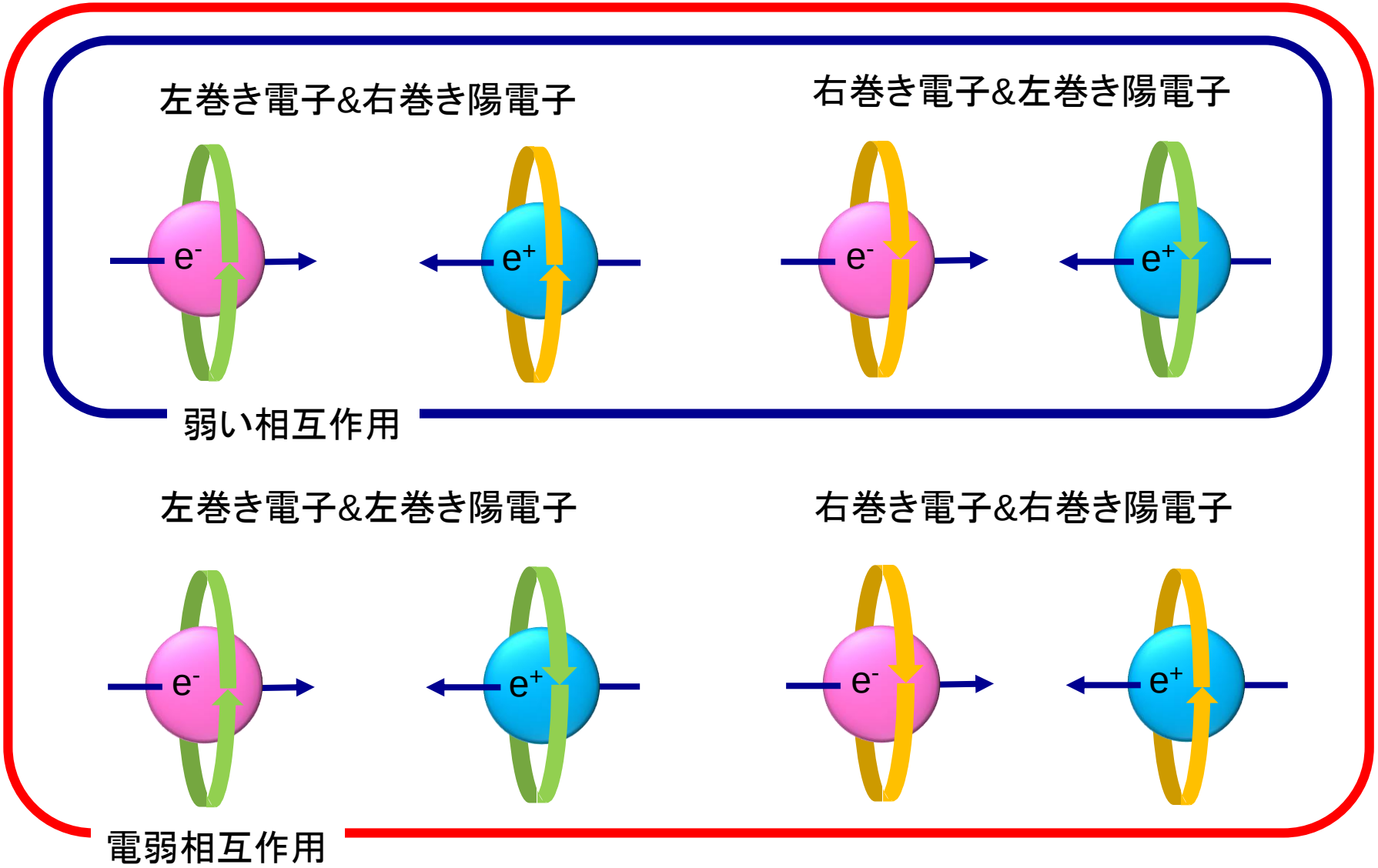
左巻き電子&左巻き陽電子



右巻き電子&右巻き陽電子



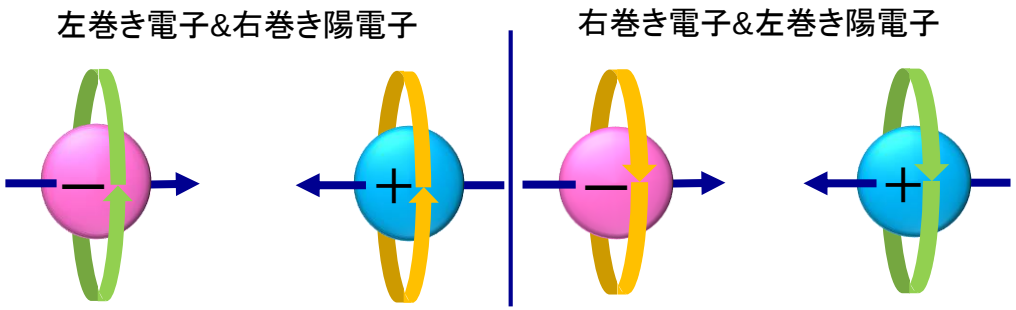
偏極のコントロール



新物理　？？？

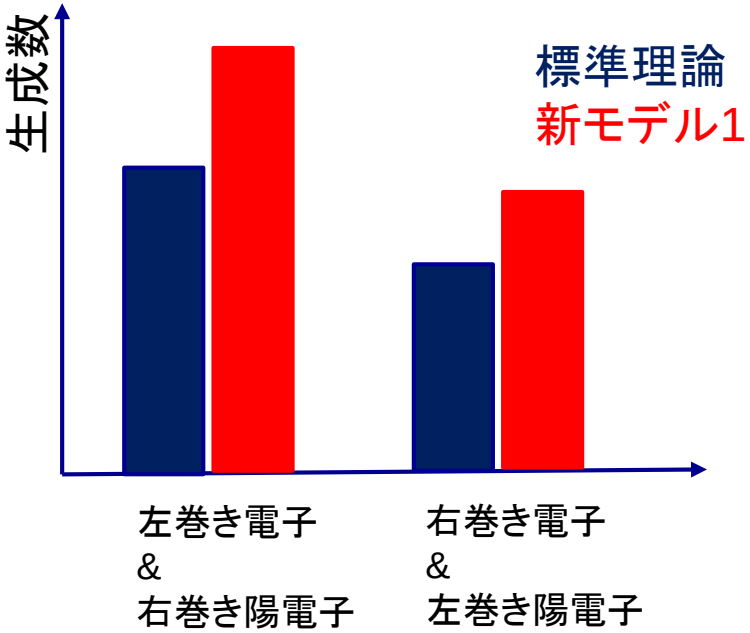
トップ結合と新物理

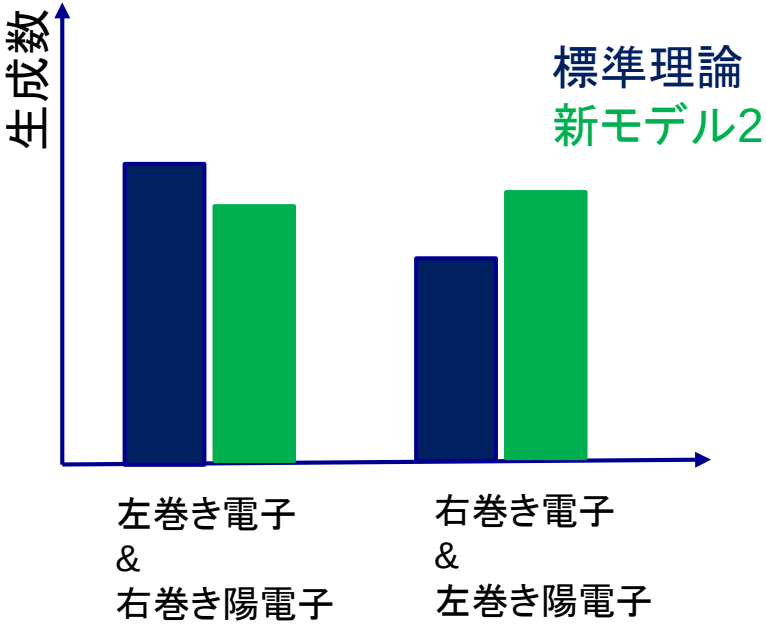
- 偏極を変えてトップ対生成数を測定



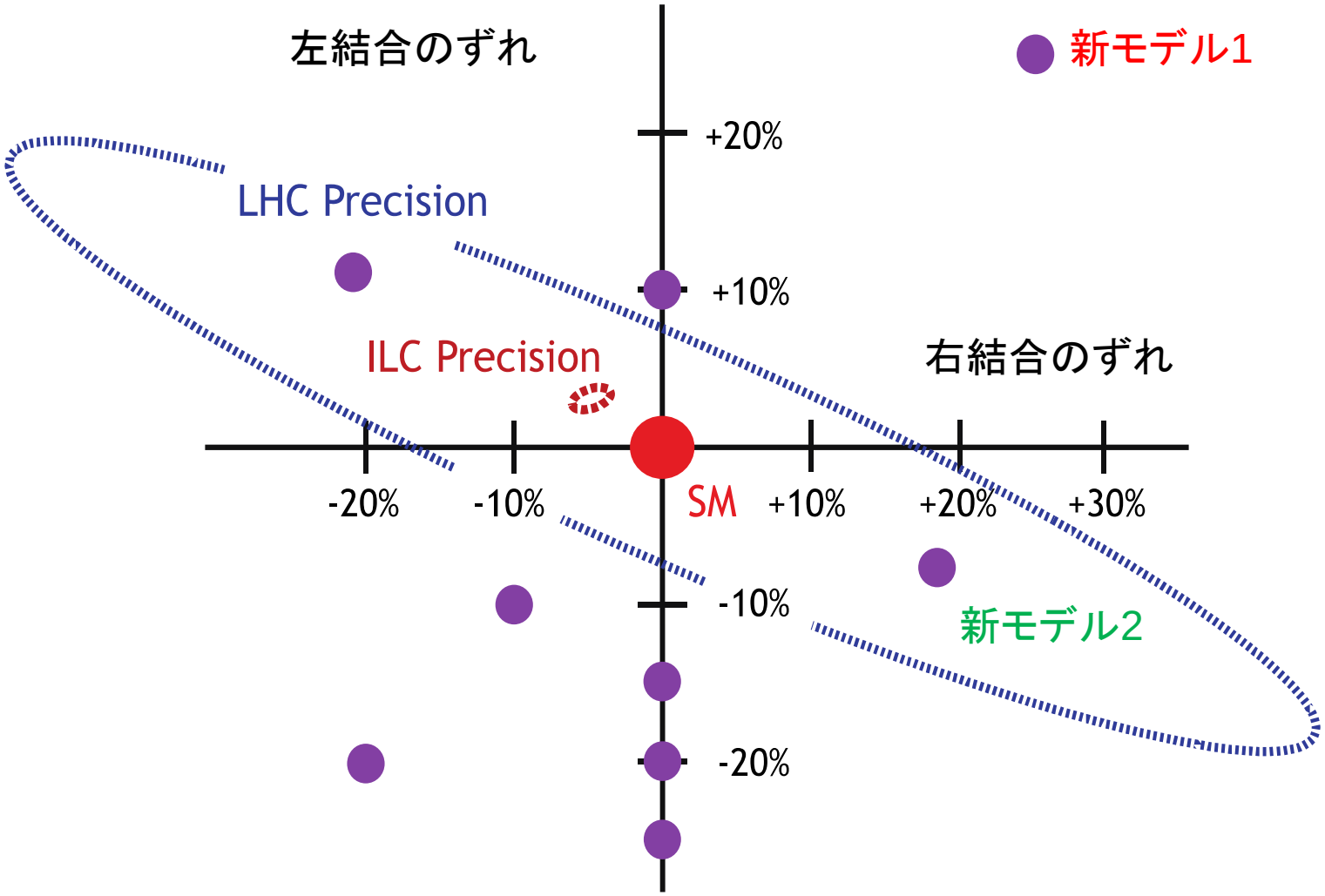
(結合定数)^2 ∝ 反応の数

- 生成数のずれから新モデルを同定





トップ結合と新物理


左結合のずれ
新モデル1
+20%
LHC Precision
+10%
ILC Precision
右結合のずれ
-20%
-10%
SM
+10%
+20%
+30%
-10%
新モデル2
-20%

トップクォーク:まとめ

- 最も重い粒子にこそ、新しい物理のカギがあるはず

- 知りたいこと:
  - なぜずば抜けて重いのか？
  - これほど重い理由はあるのか？

- ILCでトップクォークを徹底的に調べて、謎に迫る！

素粒子物理の謎

1. 真空の謎

2. 最も重い素粒子の謎

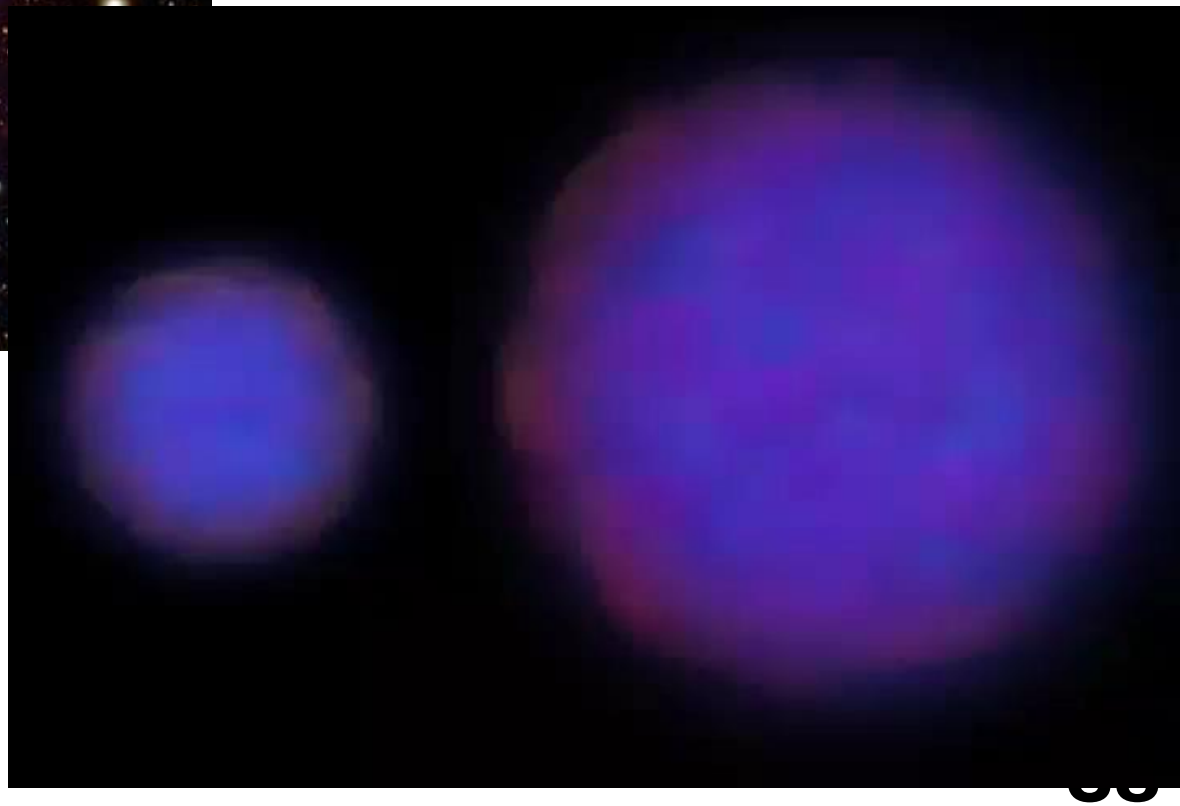
3. 暗黒物質(ダークマター)の謎

ダークマター

- 重力レンズ効果により見える、ダークマター存在の証拠のひとつ

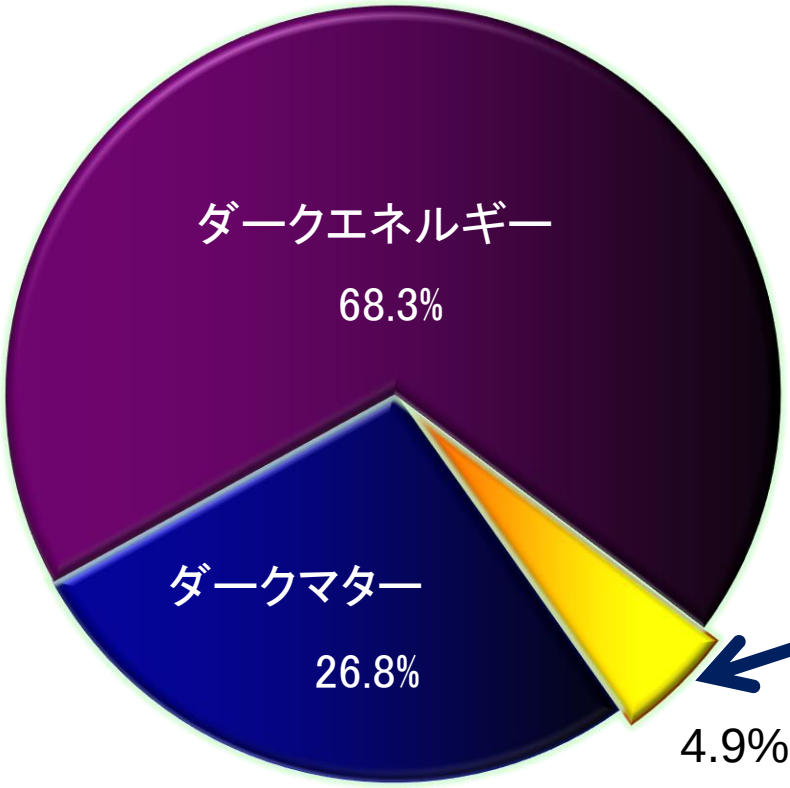
銀河同士の衝突

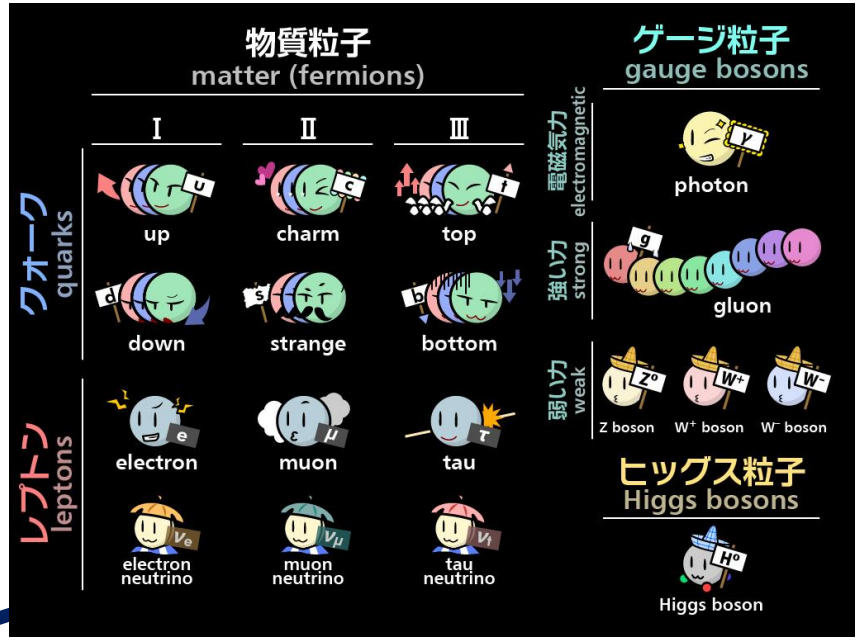
赤:既知の物質
青:ダークマター



ダークマターの謎

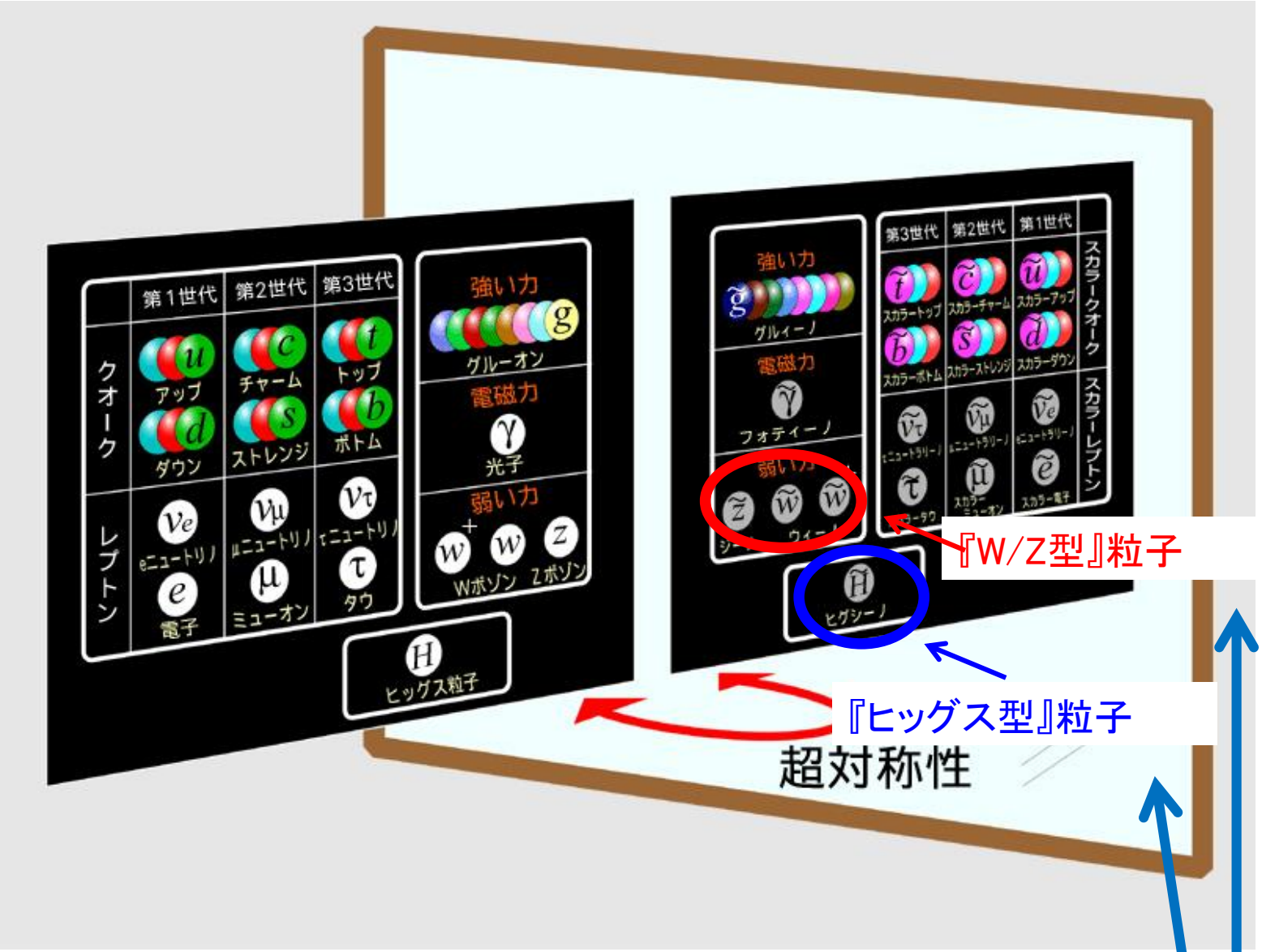
宇宙のエネルギー組成





- 我々が理解できているのは宇宙のほんの少し…

暗黒物質（ダークマター）：正体不明の粒子

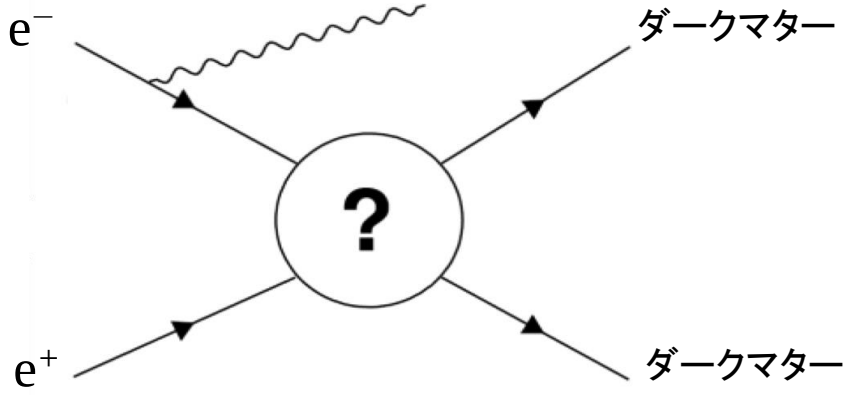

第1世代
第2世代
第3世代
クオーク
レプトン
アップ
チャーム
トップ
ダウン
ストレンジ
ボトム
eニュートリノ
μニュートリノ
τニュートリノ
電子
ミューオン
タウ
強い力
グルーオン
電磁力
光子
弱い力
Wボソン
Zボソン
ヒッグス粒子
グルイーノ
フォティーノ
ヒグシーノ
スカラークオーク
スカラーレプトン
『W/Z型』粒子
『ヒッグス型』粒子
超対称性

（ダークマターの候補）

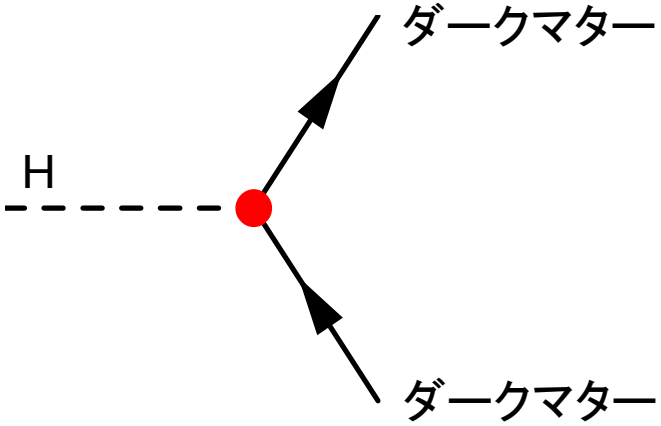
そのために
ILCが
必要です！

ダークマター探索

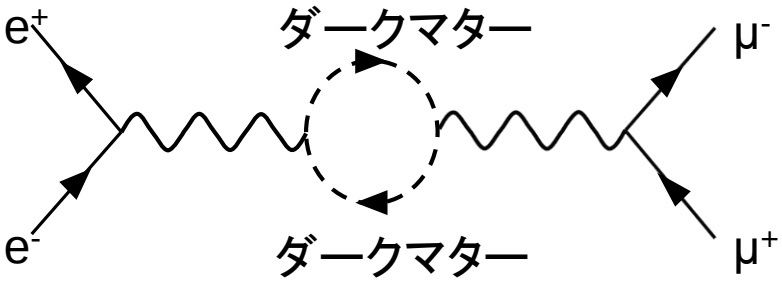
- ダークマター生成の様々な可能性
  - どんな可能性でもILCで探索可能



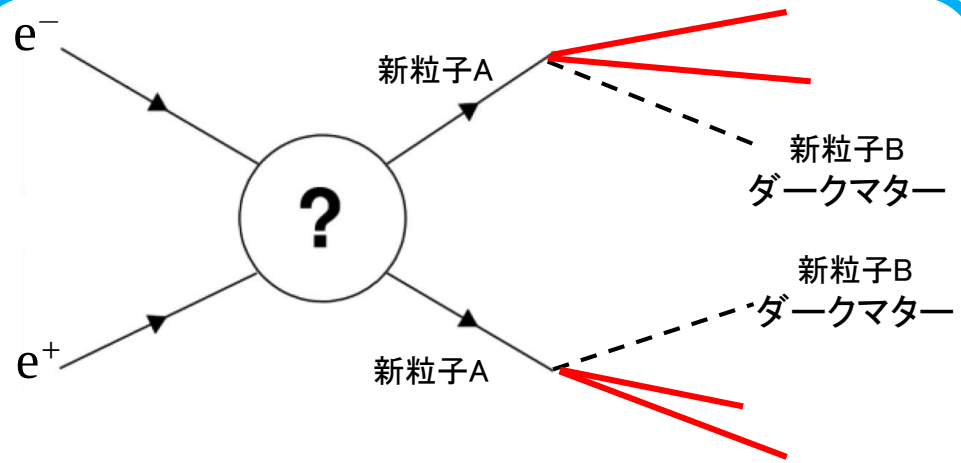
直接生成



ヒッグス粒子を通じて生成

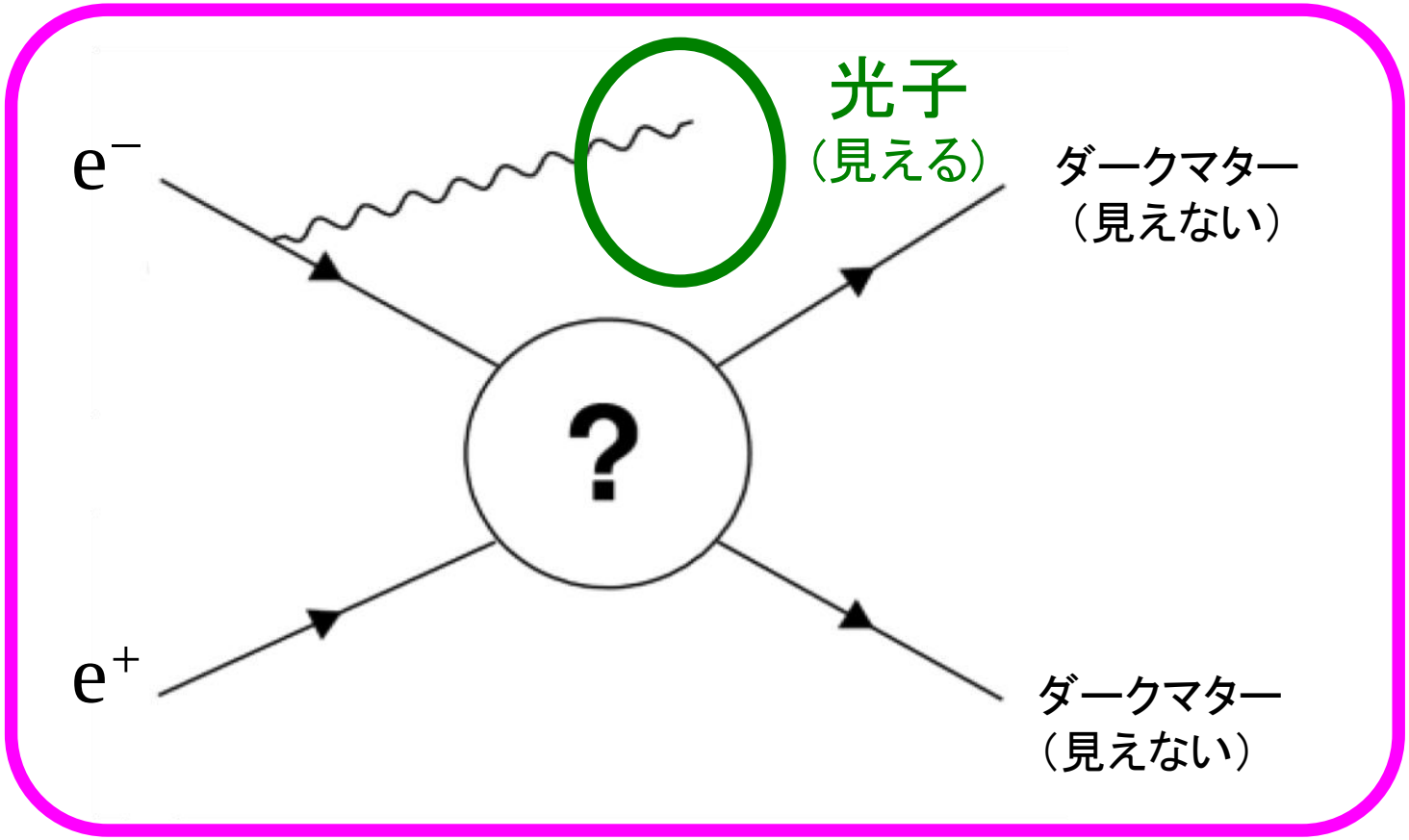


間接探索



新理論が予言する新粒子

ダークマター探索: case 1



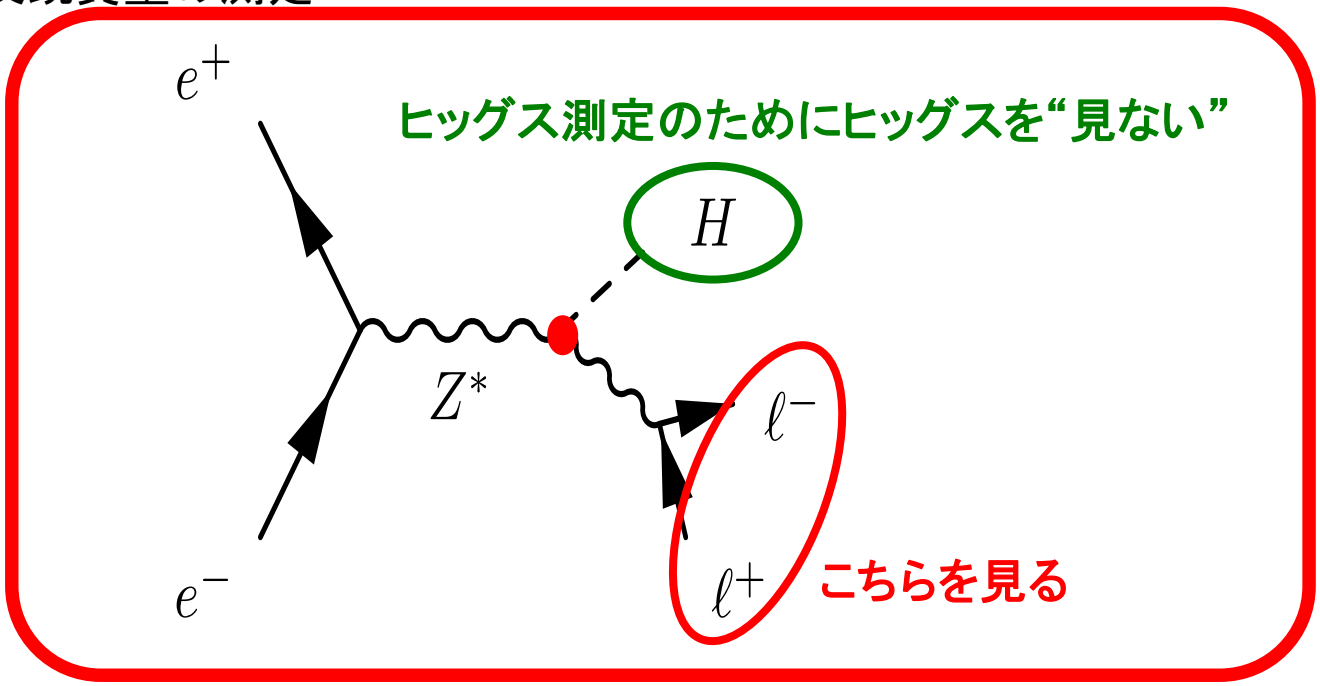
$$E_{e+e-} = E_{\text{光子}}^{(\text{最大})} + 2M_{\text{ダークマター}}$$

単光子によるダークマター直接探索

（エネルギー運動量保存を使う）

ダークマター探索: case 2

- ILCでは電子・陽電子の全エネルギーが反応に使われる
  →エネルギー・運動量保存を使うことができる
- ヒッグス反跳質量の測定



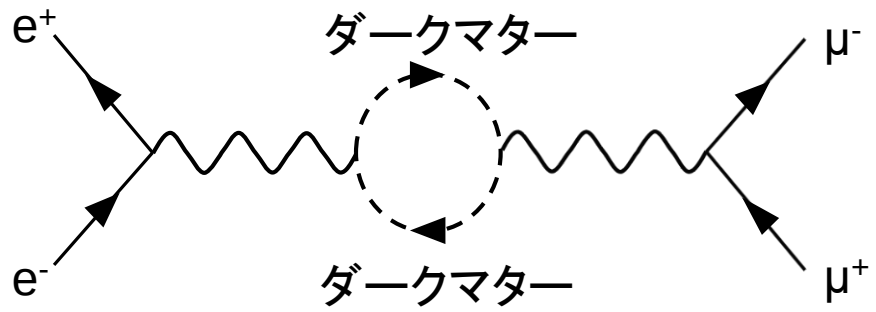
- エネルギー・運動量保存→ヒッグス粒子の4元運動量を計算

$$E_{e+e-} = E_{l+l-} + E_H$$

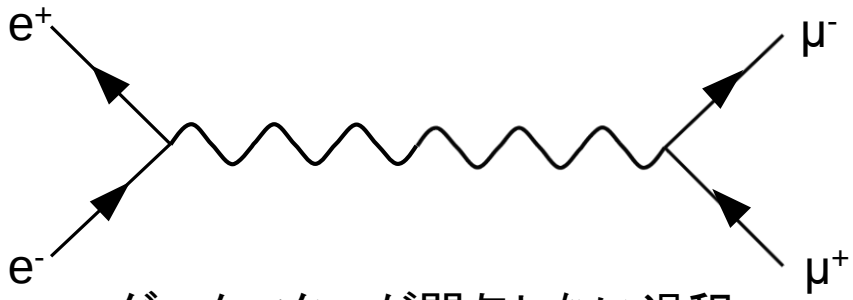
ヒッグス粒子を見ずにヒッグス粒子の質量を計算できる

→ ヒッグス粒子がダークマターに崩壊しても検出可能

ダークマター探索: case 3



間接探索



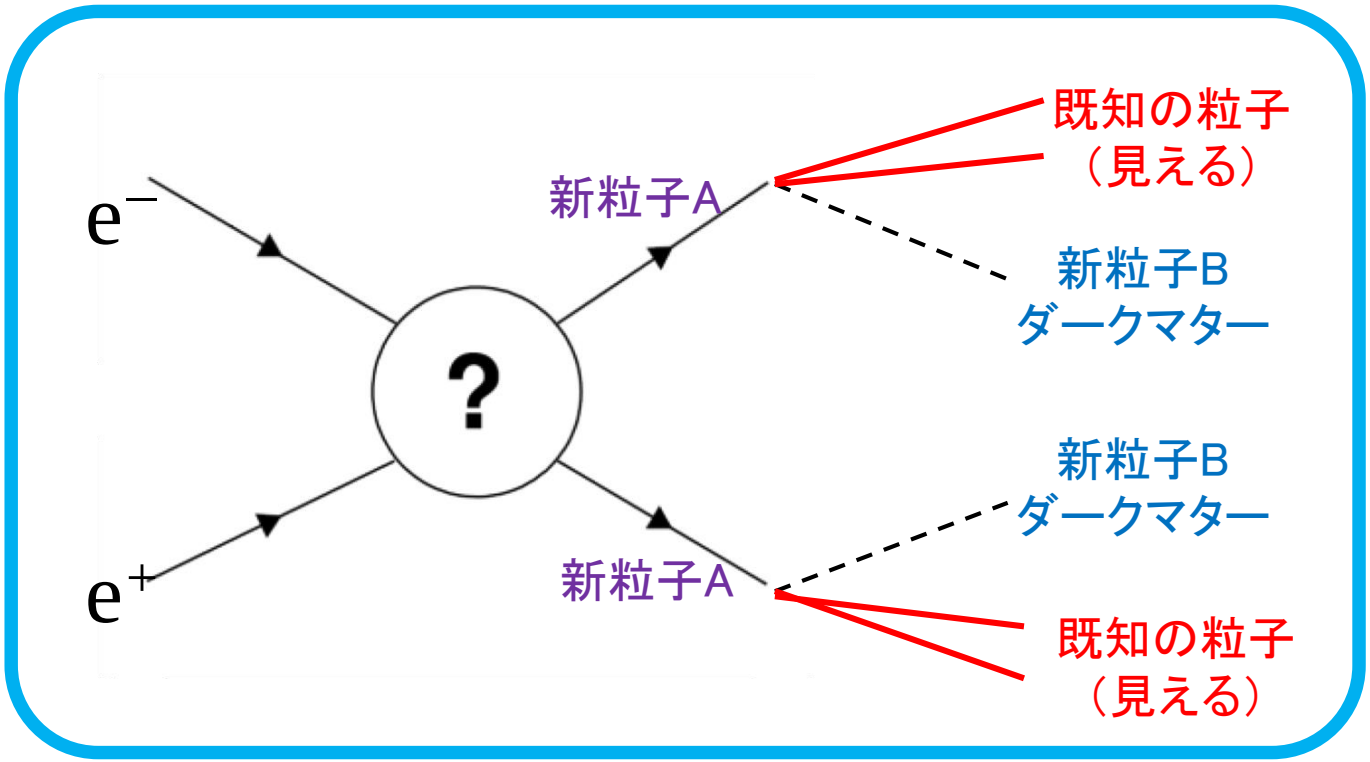
ダークマターが関与しない過程

- ダークマターの過程が、それが関与しない過程と混ざる
- ミューオン対などの生成の数(および分布)に違いが出る
  - 違いから、間接的にダークマターを探索する

強い力
グルーオン
電磁力
光子
弱い力
Wボソン
Zボソン
ヒッグス粒子
強い力
グルイーノ
電磁力
フォティーノ
ヒグシーノ
第3世代
第2世代
第1世代
スカラークオーク
スカラーレプトン
スカラートップ
スカラーチャーム
スカラーアップ
スカラーボトム
スカラーストレンジ
スカラーダウン
スカラータウ
スカラーミューオン
スカラー電子
新粒子A
新粒子B
ダークマター

超対称性

ダークマター探索: case 4

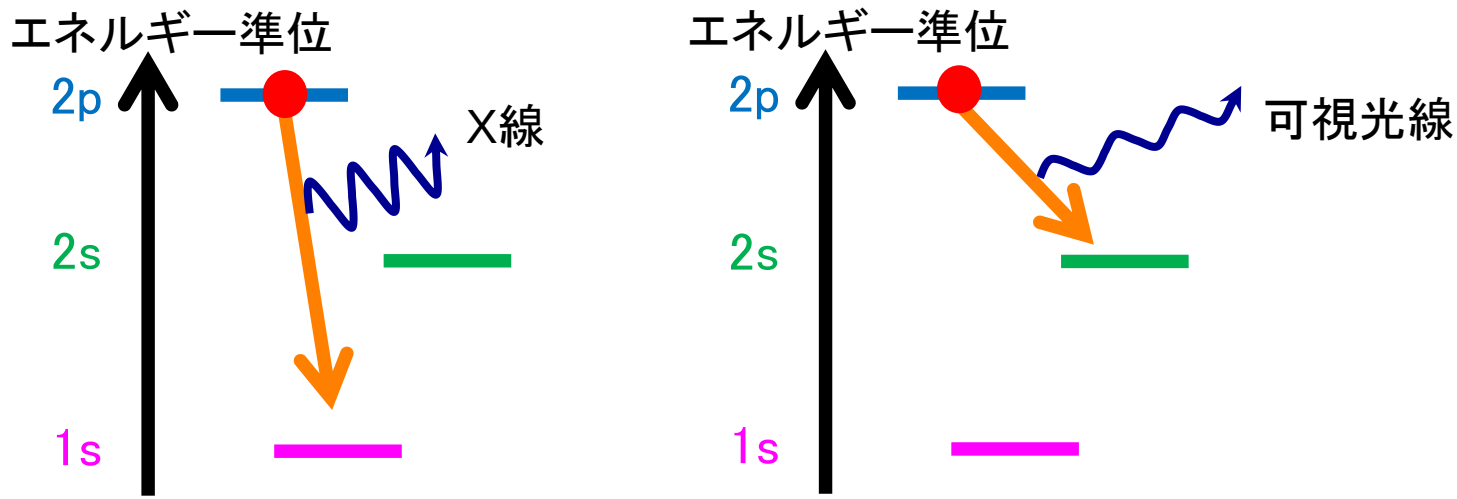


- 測定できる既知の粒子を使って、新粒子の質量を推定

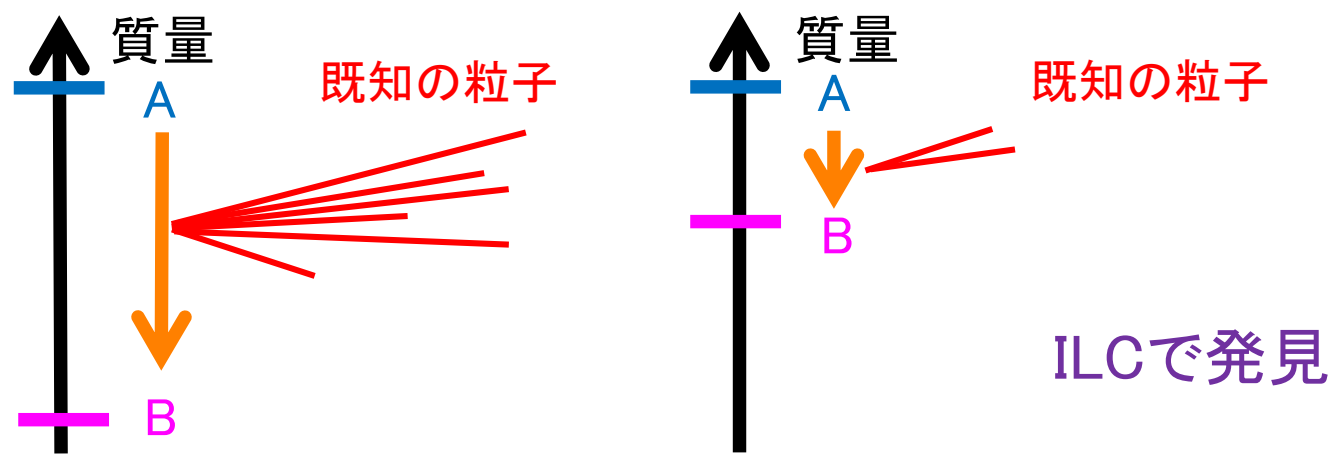
$$M_{\text{新粒子}A} - M_{\text{新粒子}B} = E^{(\text{最大})}_{\text{既知粒子群}}$$

- 生成する既知の粒子をすべて捕まえることが重要

遷移による
光放出



新粒子探索



LHCが存在否定

ILCで発見

AとBの質量の差が小さいと見えるエネルギーも小さい

まとめ

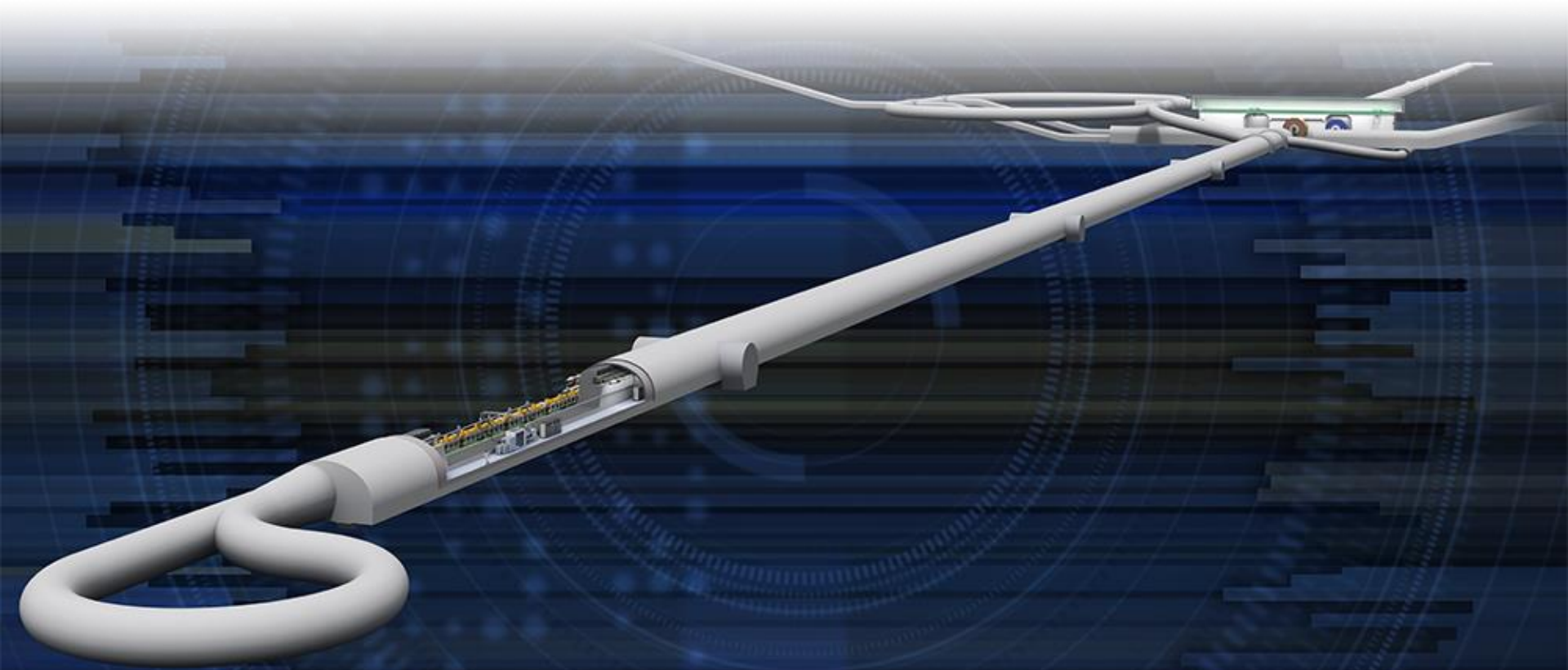
- 素粒子物理の目指すところは、宇宙初期の物理法則(＝未知の新物理)を知ろうとすること

- ILCで宇宙初期の状態を局所的に作り、新物理・新現象を発見する
  - 精密な直接探索・間接探索で新物理・新現象にせまる

- ILCで素粒子物理の謎にせまる
  （１）真空の謎 – ヒッグス粒子を徹底的に調べる
  （２）最も重い素粒子の謎 – トップクォークを徹底的に調べる
  （３）暗黒物質の謎 – ダークマターを作り、証拠をつかむ

次の物理を切り開くため、ILCは必要不可欠!

Backup slides



ILCの目的

標準理論を超える物理、

新現象・新粒子を”発見”すること！

1. 新現象の”発見”
   - 標準理論の予言との食い違いを見つける
   - 現在の精度で標準理論は物理現象とほぼ矛盾なし
     →更なる高精度での測定が必要

2. 新粒子の“発見”
   - 標準理論にはない、新しい粒子を見つける

新現象・新粒子発見のために

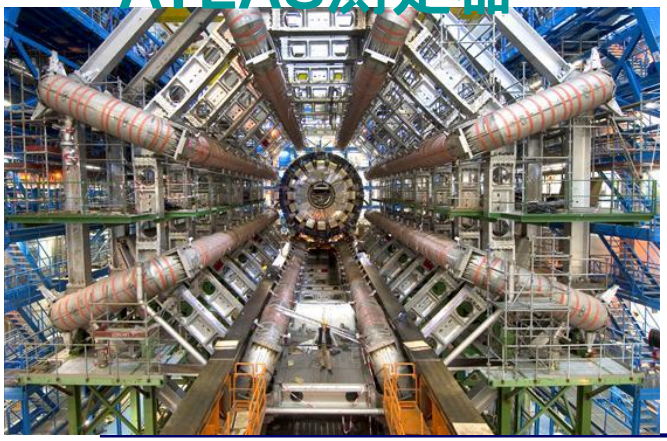
1. 新現象⇒既存の粒子を徹底的に調べる
   a. ヒッグス粒子
   b. トップクォーク

2. 新粒子⇒新粒子を徹底的に探す
   c. ダークマター
   d. 超対称性粒子
   e. その他、未知の粒子

現在の加速器実験

- 現在最も高エネルギーのコライダー実験: ラージハドロンコライダー(LHC): 13TeV

ATLAS測定器



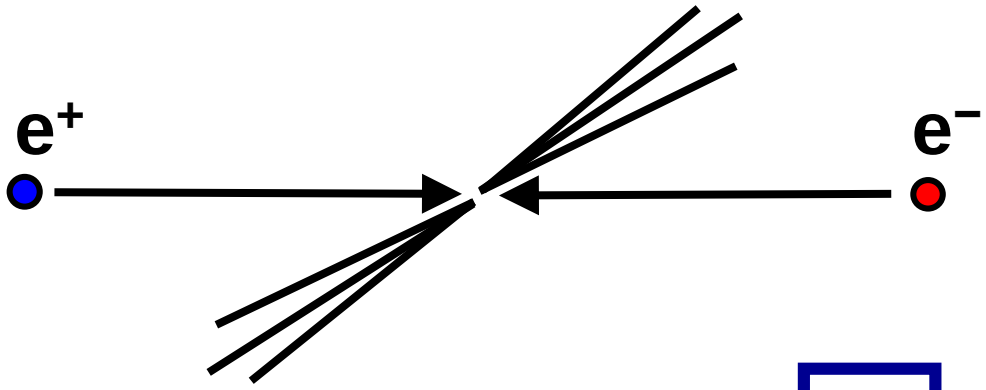
LHC加速器

CMS測定器

ILCでの反応と測定の様子

ILCの実験環境とすごいところ

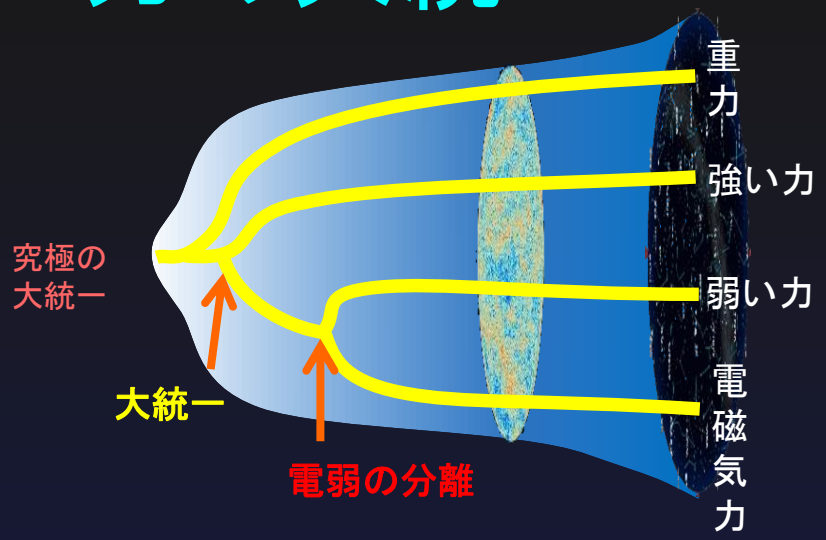
ILC: 電子陽電子衝突

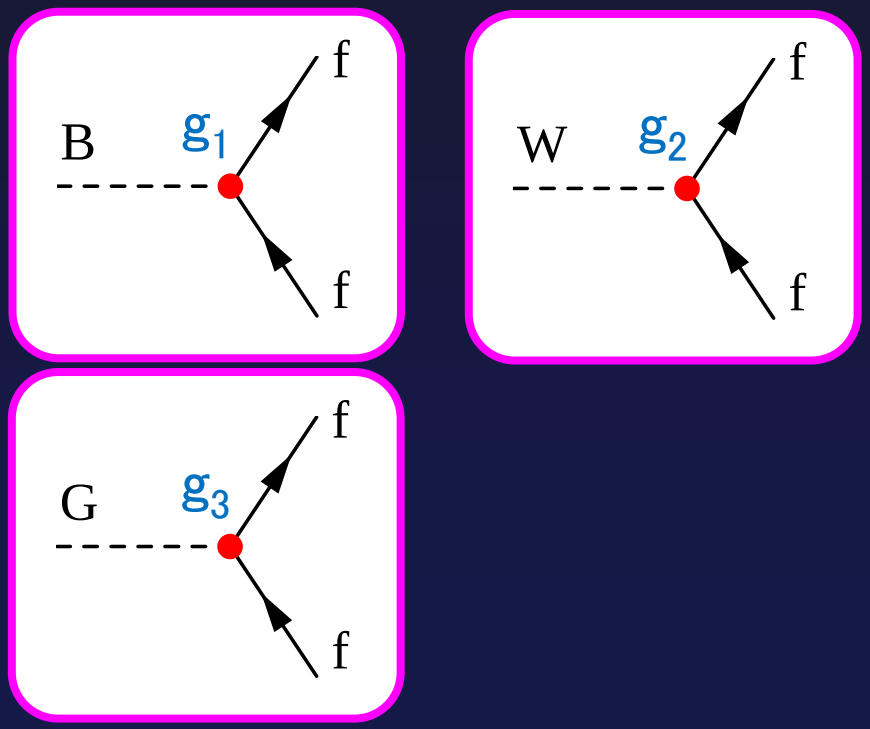


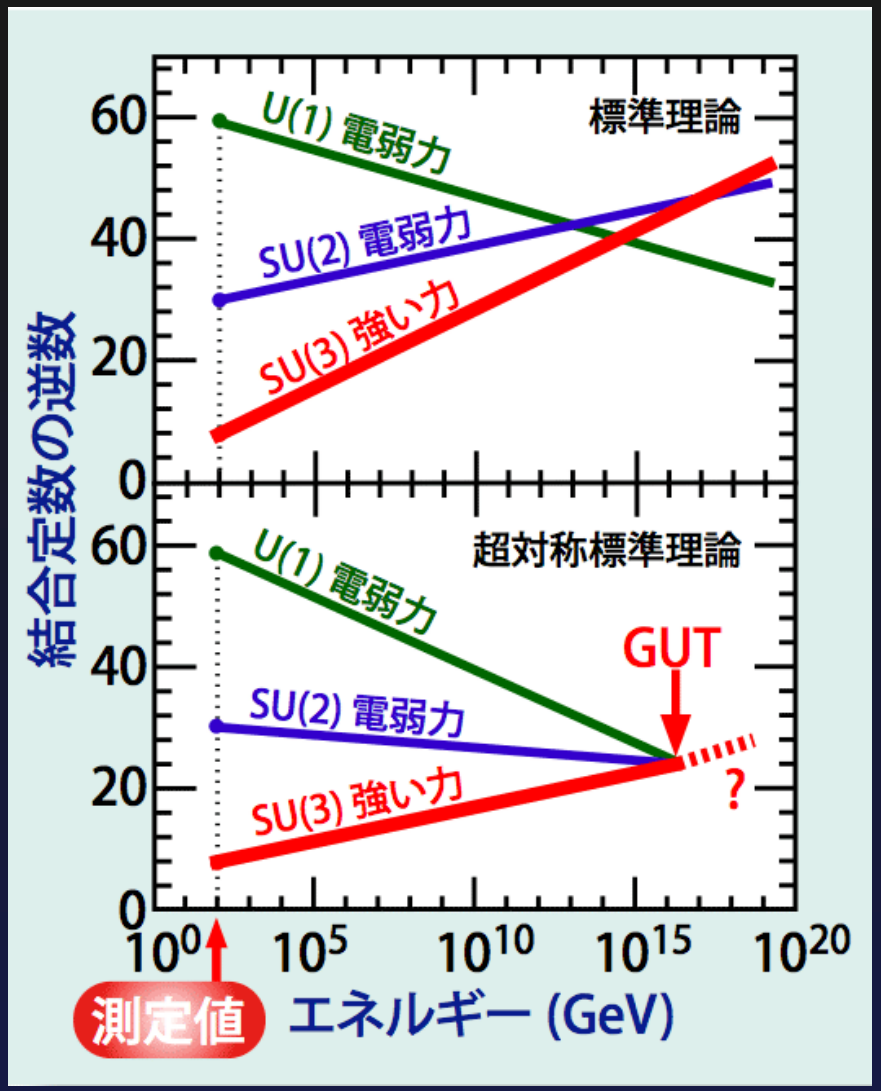
- 素粒子(電子と陽電子)の反応
- 全エネルギーが反応に使われる
- 背景事象が少ない

1. 見たい反応だけ見える
2. 出てきた粒子をほとんどすべて測定できる
   → 物理現象を非常に精密に再構成できる
3. エネルギー・運動量保存が使える
4. 電子・陽電子ビームの偏極を制御できる
5. 衝突エネルギーを変えることができる

力の大統一

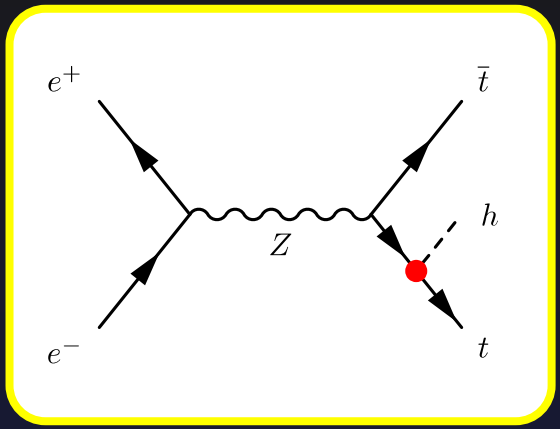






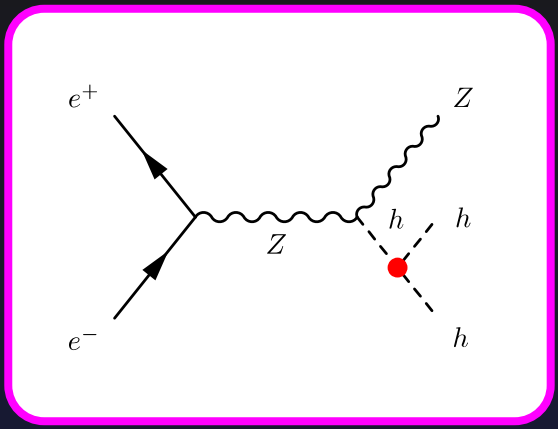
- 力の強さはエネルギーに依存する
- **超対称性粒子** が存在すれば、大きいエネルギーで力の大きさが同じになる
- 標準理論だと力の統一は出来ない

トップ湯川結合(ttH)



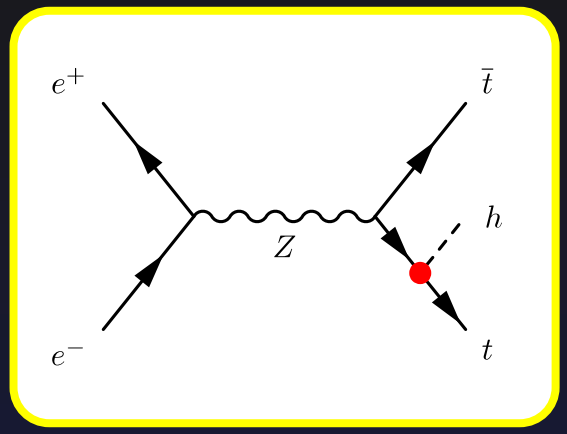
500 GeV～

ヒッグス自己結合(HHH)



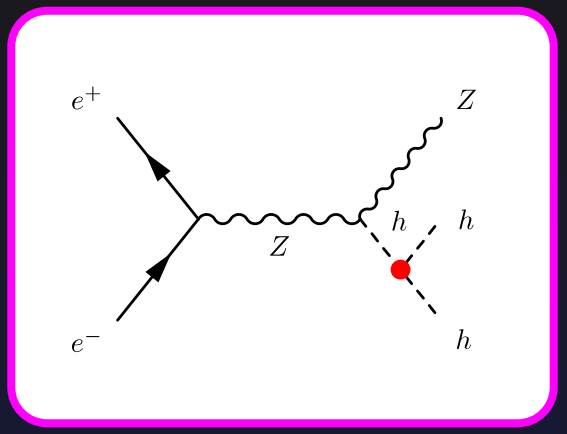
500 GeV～

トップ湯川結合(ttH)



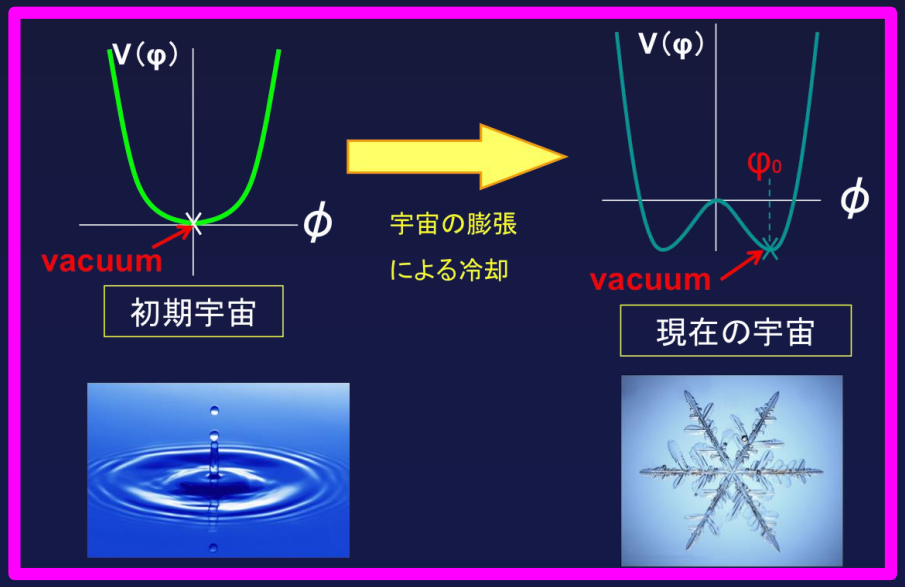
500 GeV～

ヒッグス自己結合(HHH)

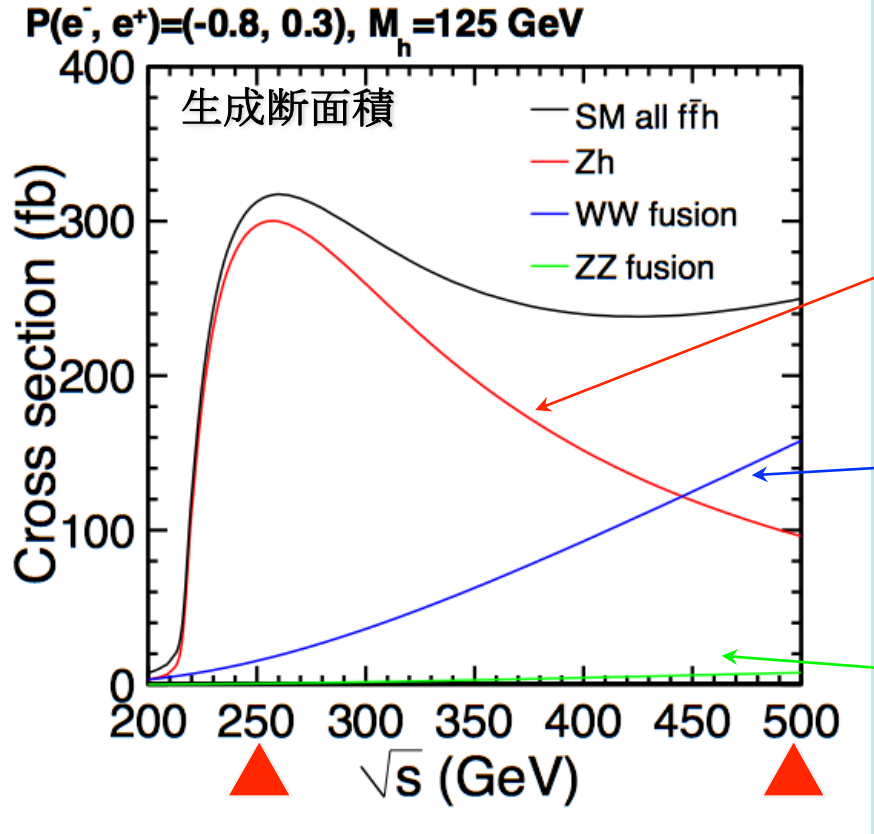


500 GeV～

トップは重いので(~175 GeV)
崩壊でみることができない



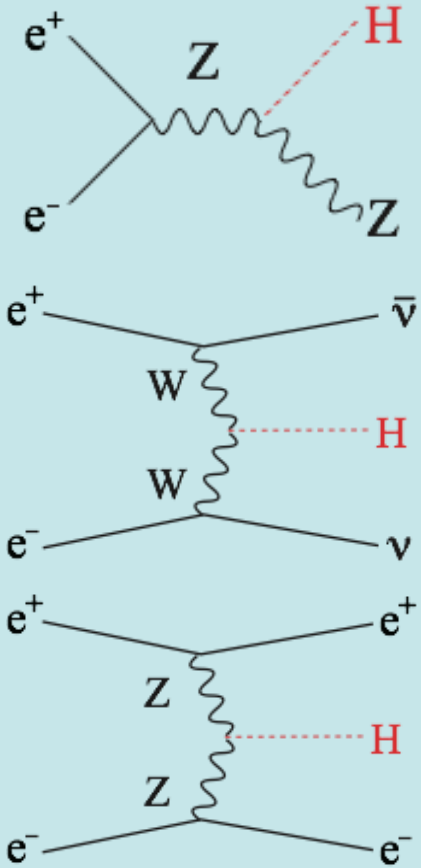
ILCにおけるHiggsの生成過程



Higgsstrahlung
(ZH) 過程
ECM=250GeV付近
で最大

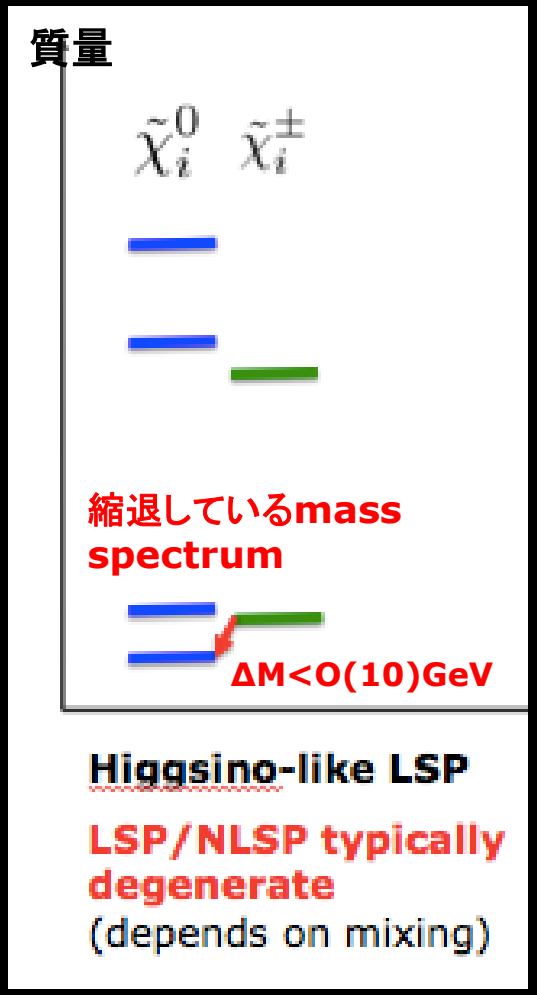
WW fusion
(ννH) 過程
ECMとともに上昇

ZZ fusion 過程
（マイナー）



- **それぞれの重心系エネルギー(ECM)で異なる測定を得意とする**
- ECM=250 GeVでZH過程を用いてHiggsの質量と全断面積の高精度測定
- 450GeV付近で、Higgs全幅とほぼ全ての結合定数を測定できる

ILCでは縮退質量スペクトラムを持つ軽いHiggsinoの発見が期待されている



ILCで探索するモチベーションは？

❖ **実験の観点から**:

LHCで排他されずに残るのは**ΔMが小さい領域**

粒子間の質量差**ΔM=m(NLSP)-m(LSP)**

信号はsoftなjetやlepton、visible energy が少なく、

QCD BGの多いLHCでは探索が極めて困難 ➔ ILC の出番

❖ **理論の観点から**:

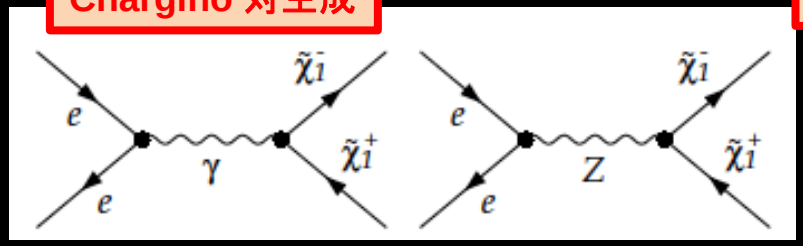
Naturalness 理論はO(100) GeVの軽いHiggsinoを予言

Zボソン質量 ~ Higgs質量 ~ Higgsino質量～100GeV

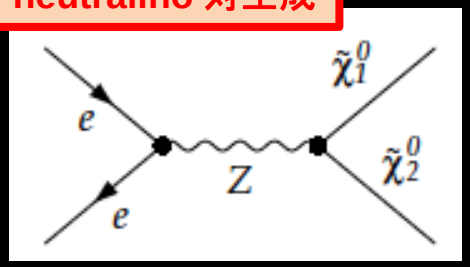
RNS model (Radiatively- driven natural SUSY)

3つのHiggsino: **χ±1, χ02, χ01 (LSP)** : ΔMが小さい

Chargino 対生成



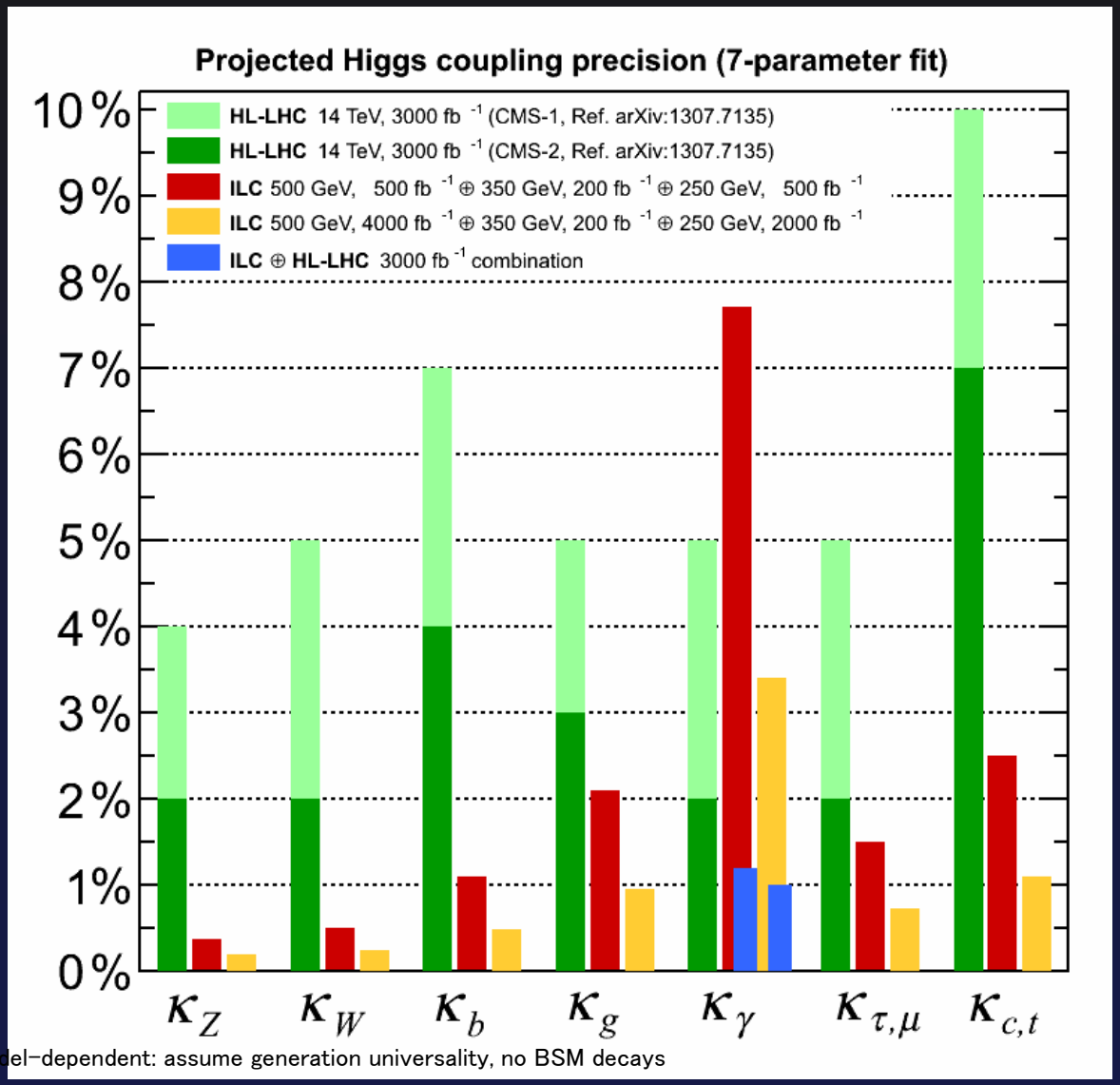
neutralino 対生成



Higgsino mass を測定➔ SUSY parameter(e.g. M1,M2,tanβ)、SUSY breakingへの手掛り

幾つかのbenchmarkがstudyされている （ΔM:1 ~20 GeV）

質量の期待精度: **～1%**

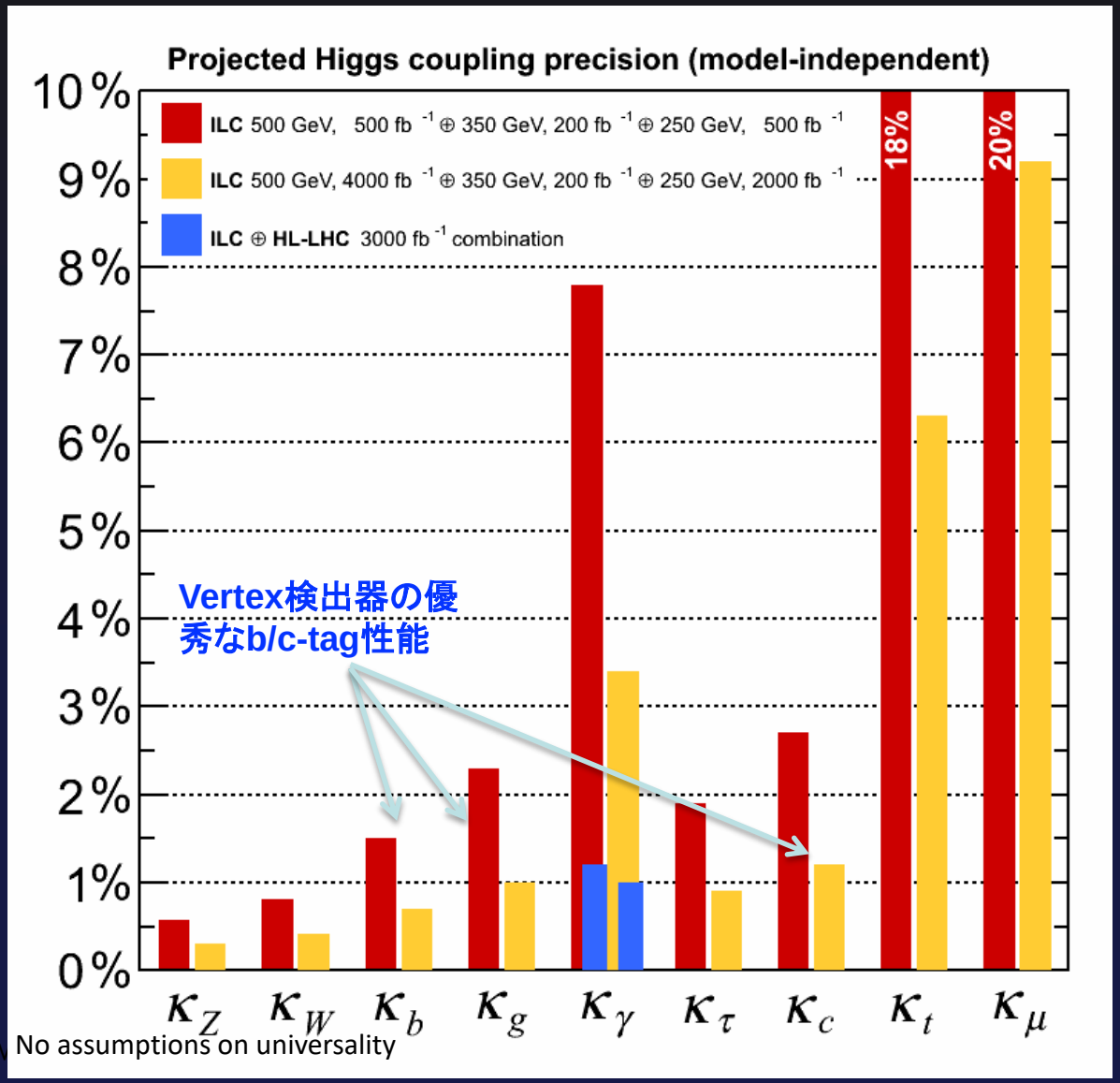


Model-dependent: assume generation universality, no BSM decays

HL-LHC 最終データ相当
ILC ~8年相当
ILC ~20年相当
ILCとLHCのデータを合わせる

Higgs 結合定数の測定精度　model independent）

ILCでしか出来ないモデル非依存測定においても、
ほぼ全ての結合定数は1%以下を達成可能



No assumptions on universality

- ILC ~8 yr
- ILC ~20 yr
- ILCとLHCのデータを合わせる

- **ECM=250-500 GeVで全ての主要なHiggs結合定数にアクセス可能**
- **ECM=550GeVまで上がればKtは3%まで改善！**

Better hγγ with LHC/ILC synergy

LHC can precisely measure
$BR(h\to\gamma\gamma) / BR(h\to ZZ^*) = (K_\gamma / K_Z)^2$

ILC can precisely measure K_Z

9 parameter のモデル非依存型結合定数 fit、LHCでは不可能

H→WW,(ZZ)

- ヒッグス全幅の導出→モデルに依らないヒッグス結合の測定が可能

$$Y_1 = \sigma_{ZH} \propto g^2_{HZZ}$$ ←Recoil study

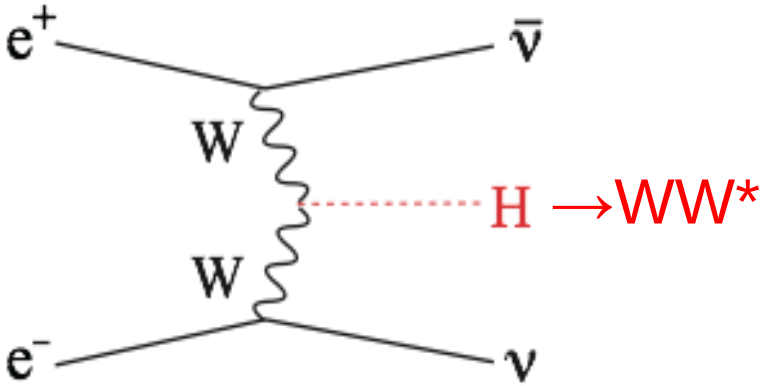
$$Y_2 = \sigma_{\nu\bar{\nu}H} \cdot \mathrm{Br}(H \to b\bar{b}) \propto g^2_{HWW} \cdot \mathrm{Br}(H \to b\bar{b})$$ ←崩壊分岐比study

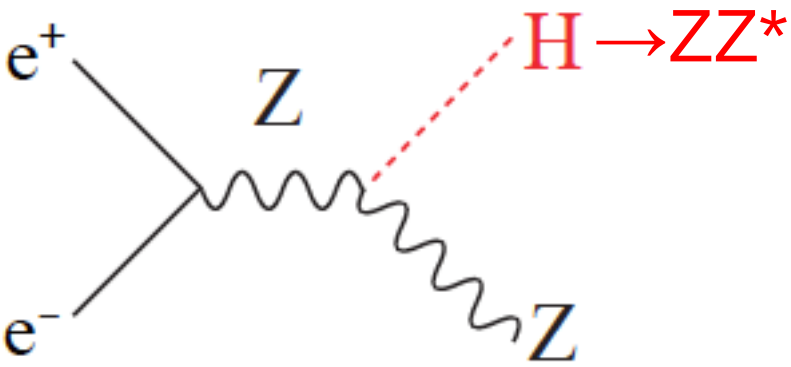
$$Y_3 = \sigma_{ZH} \cdot \mathrm{Br}(H \to b\bar{b}) \propto g^2_{HZZ} \cdot \mathrm{Br}(H \to b\bar{b})$$ ←崩壊分岐比study

$$Y_4 = \sigma_{\nu\bar{\nu}H} \cdot \mathrm{Br}(H \to WW^*) \propto \frac{g^4_{HWW}}{\Gamma_0}$$ ←H→WWで行う

H→ZZも可能だが
統計的に厳しい(Br～2%)

$$\Gamma_H \propto \frac{g^4_{HWW}}{Y_4} \propto \frac{Y_1^2 Y_2^2}{Y_3^2 Y_4}$$



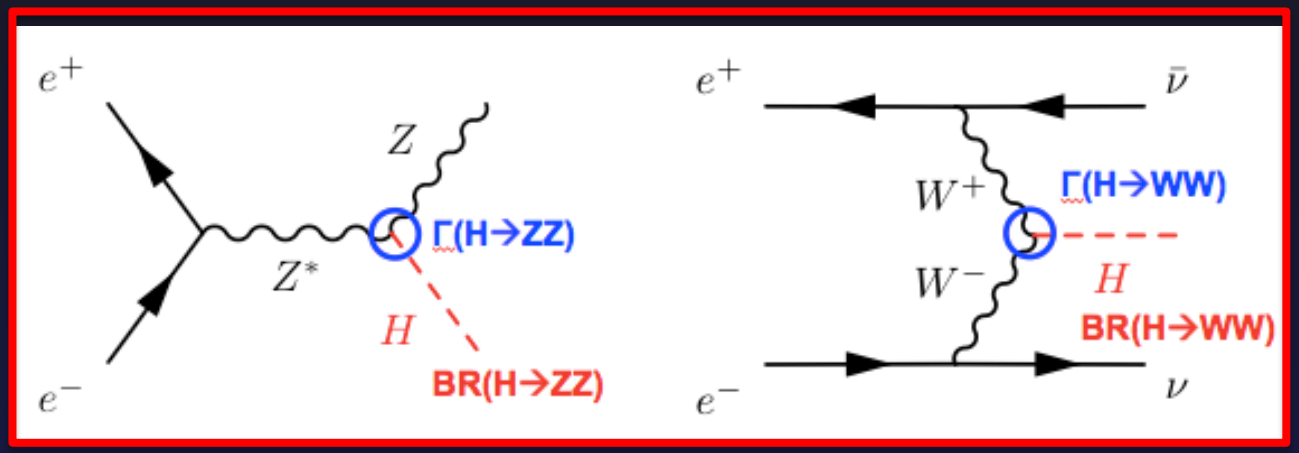


Higgs 全幅の測定

Higgs結合定数を導出するためにHiggs全幅 Γ_{tot} が必要

結合定数　$g^2_{HXX} \propto$ 部分幅 $\Gamma(H \to XX) = \Gamma_{tot} * BR(H \to XX)$　(BR:分岐比)

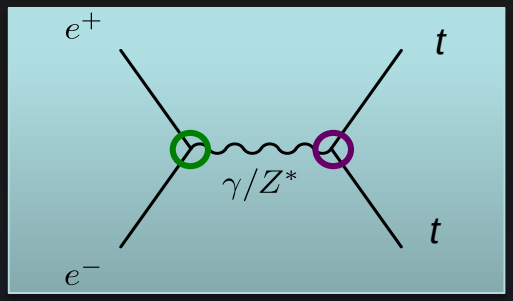
$\Gamma_{tot} = \Gamma(H \to XX) / BR(H \to XX)$:　崩壊モードXに関して部分幅と分岐比の両方が必要



原理的には
X=Z or W を使える
（対応するHiggs生成過程）

しかし、ECM = 250 GeV だけではZHもWW fusion も統計の制限がある

対策:　ECM= 350、500 GeV　のWW fusion 測定を250 GeVの反跳測定を用いて得られた高精度な分岐比と組み合わせれば　Γ_{tot} を精度よく求めることができる

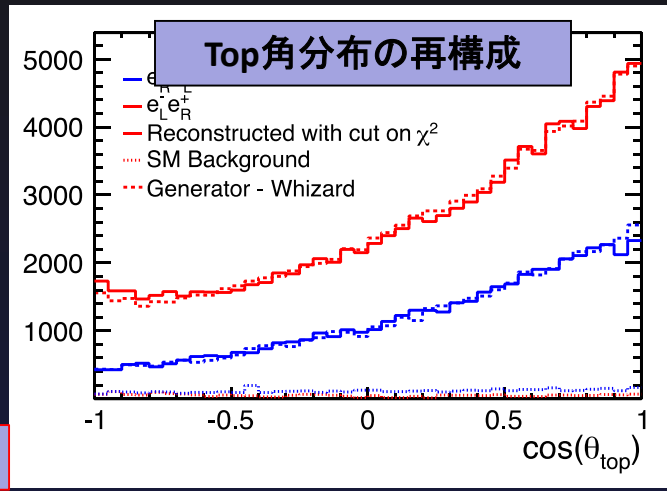


top の生成・崩壊 を利用した新物理探索 @ECM=500 GeV

各複合Higgs模型はtop（複合）の左・右巻き結合のSMからのずれを予言

左右巻きのttZ/ γ 結合の構造因子を測定➔ 複合Higgs模型にせまる

ビーム偏極（ILCの強み）が必須

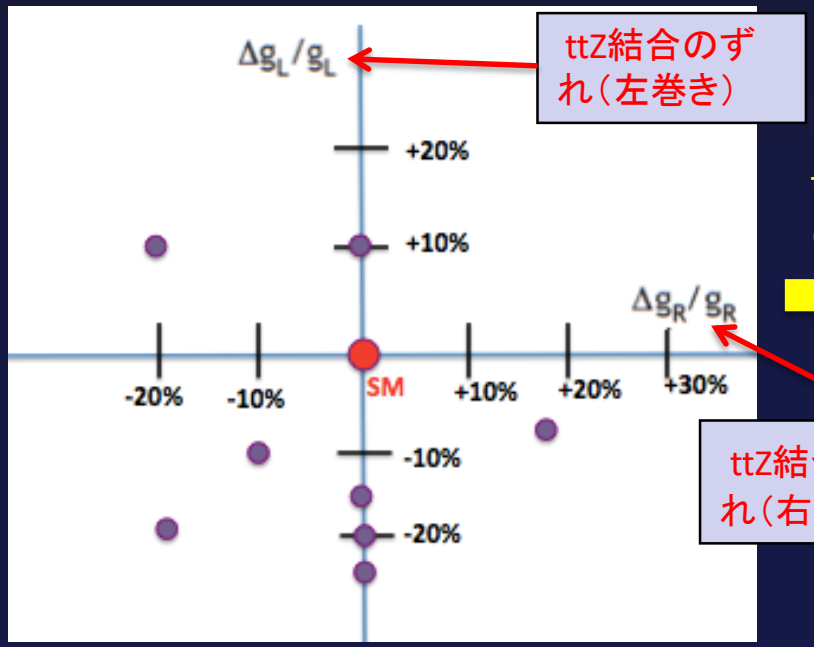


topの結合定数のSMからのズレが新物理を示唆する

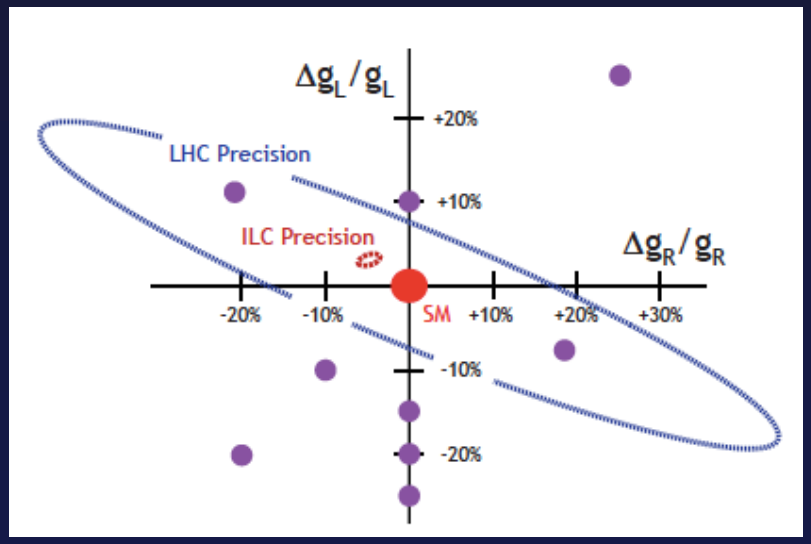
何通りかの観測値（e.g.各偏極状態でのTop pair 生成断面積 σ　非対称性 A_{FB}, A_{hel} , A_{LR} ）を測定し、構造因子　$F^{tt\gamma}_{1L}$,　$F^{tt\gamma}_{1R}$,　F^{ttZ}_{1L},　F^{ttZ}_{1R}　を導出

ILCはLHCよりも多くの複合Higgs模型をexcludeできる (68% CL)

様々な新物理模型でのtopの異常結合　（新物理スケール～1 TeV)



ttZ coupling の精密測定



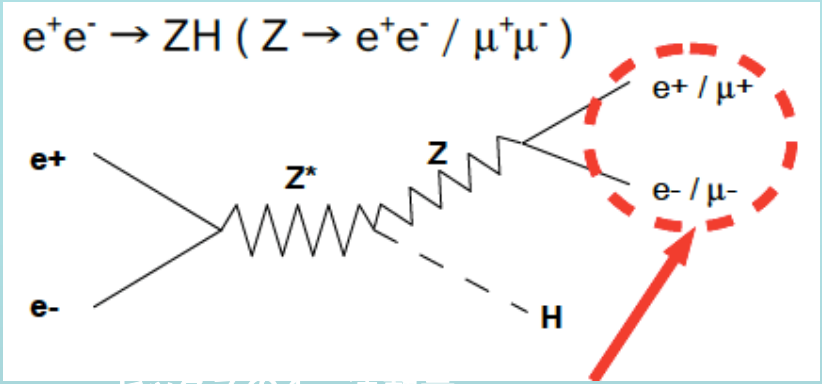
Discrimination of various new physics models with EW top couplings. [1506.05992], based on [Richard, 1403.2893]

ヒッグスの質量と生成断面積の反跳質量手法による測定

新物理の間接探索　例2

ZH全断面積（σ_{ZH}）とヒッグス質量（M_H）の精密測定

ヒッグスが付随して生成するZ に対して反跳Zが崩壊後のレプトン対の運動量のみ測定する



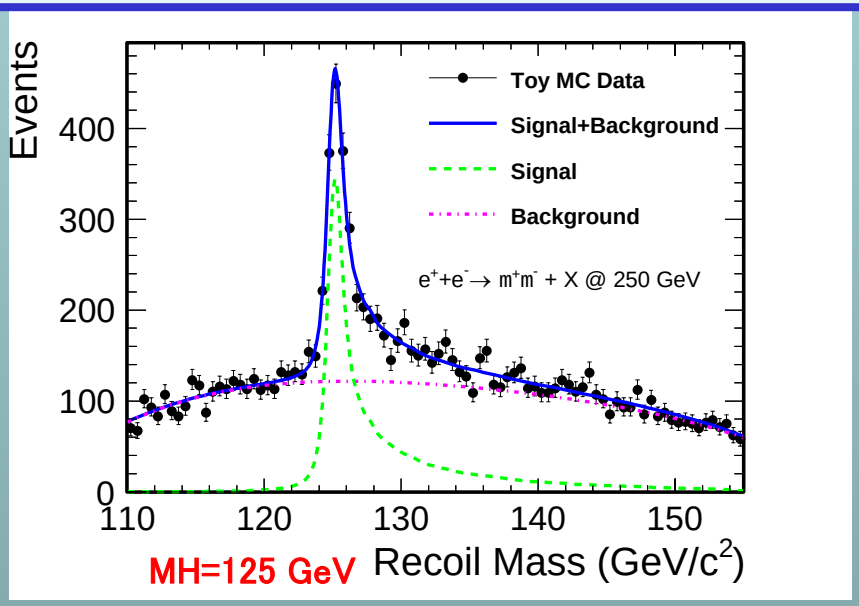
ヒッグスの4元運動量

$$M_X^2 = \left(p_{CM} - (p_{\mu+} + p_{\mu-})\right)^2$$

ヒッグス質量（M_H）= Zの反跳質量

ヒッグスを測定しているのに
ヒッグスを直接見ない
➔ SMにないヒッグス崩壊でも大丈夫
i.e. モデル非依存

反跳質量分布　ECM = 250 GeV　Z→ μ μ



σZH の絶対値はヒッグス崩壊分岐比と結合定数の絶対値測定に必須

20年間運転 から期待される精度：
HZZ結合定数：0.4%　　ΔM_H=14 MeV

ILCの新物理探索の例

(1) 新物理の間接探索
標準理論の精密測定を用いる
- ヒッグス結合定数の精密測定
- ヒッグス生成断面積の絶対値測定
- ヒッグス自己結合定数
- トップ湯川結合
- トップクオークの結合定数

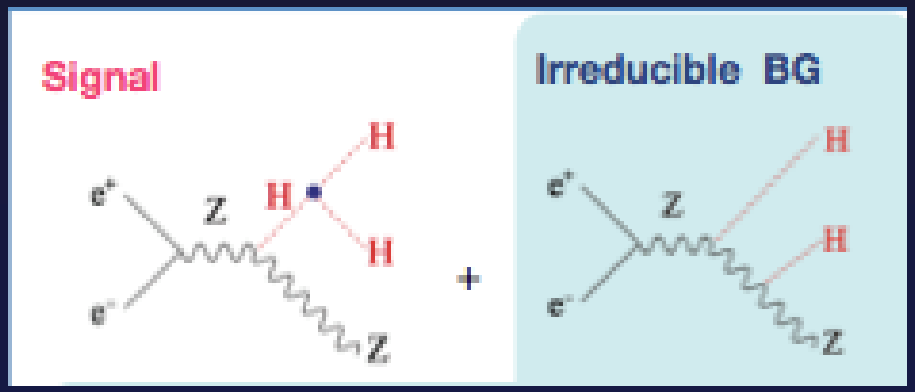
(2) 新粒子の直接探索
- **超対称性粒子**
- **暗黒物質**

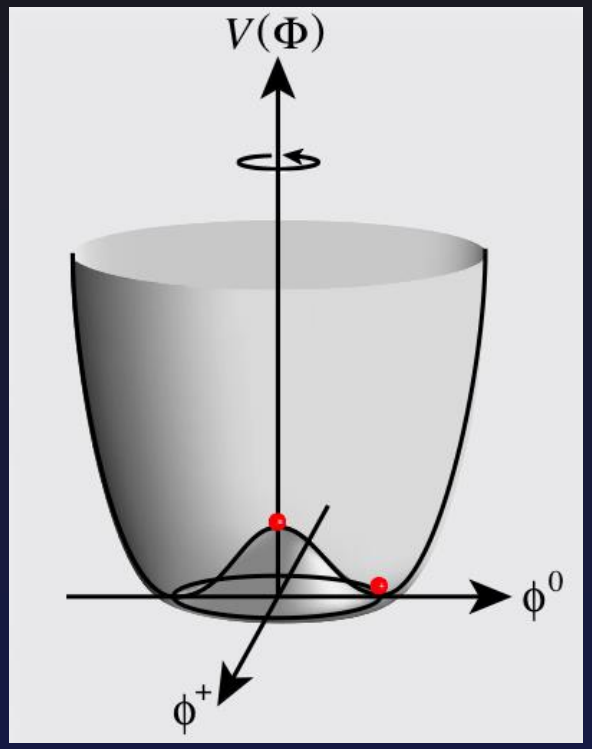
ヒッグス自己結合

ヒッグスポテンシャルの形を探り、自発的対称性の破れの検証
この測定が最初にできるのがILC

重心系エネルギー 500GeV

ILCにおいても難しい測定：
- 生成断面積が小さい　(~0.2 fb)
- 信号と区別不可能なBG振幅と干渉



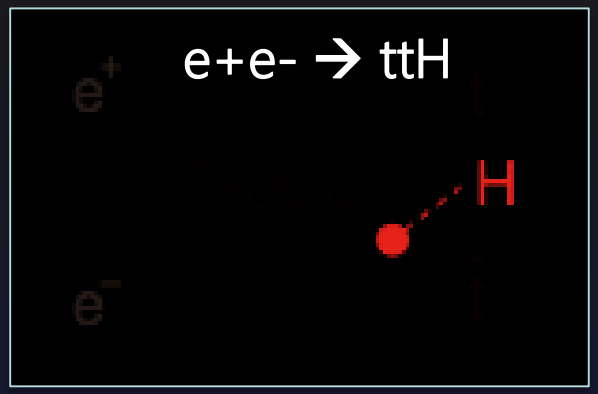


ECM=500GeV で Δλ/λ = 27% 、ECM=1 TeV で Δλ/λ = 10%　を期待

ヒッグス自己結合が物質・反物質間の非対称性に関与する可能性を検証する

トップ湯川結合測定

重心系エネルギー 500GeV



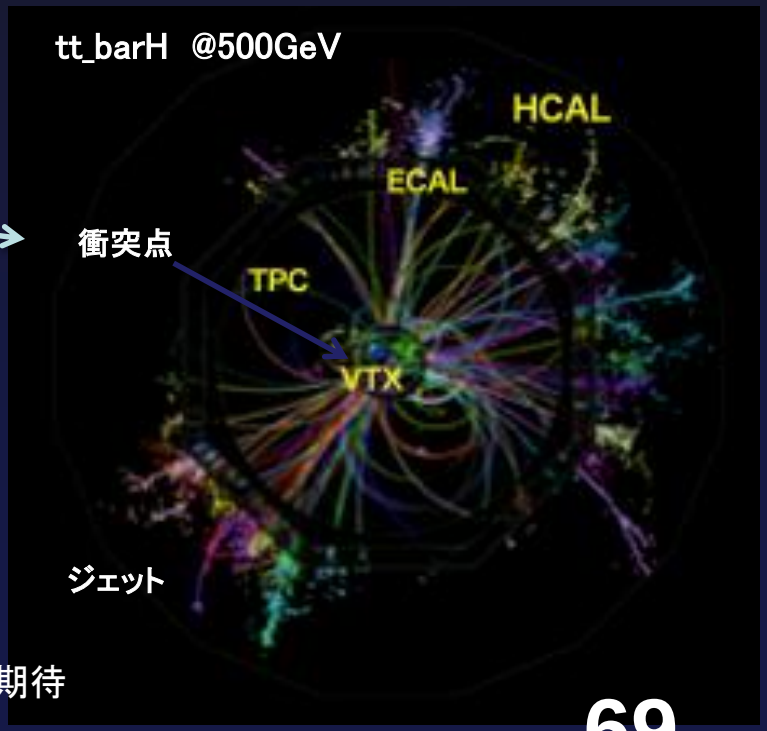
トップは特別な存在：

一番重いクォーク、ヒッグスと一番強く相互作用する
→ トップを精密測定すれば新物理への手掛り

例）　トップが複合粒子になる複合ヒッグス模型
　　→ トップ湯川結合(yt)がSMからずれる

ILCの検出器を総動員して挑む究極の測定

- 終状態に多数のジェット
- ヒッグス がbクオークジェット対に崩壊する事象を選別
- トップ崩壊（ジェットやレプトンの数）で分類して解析する



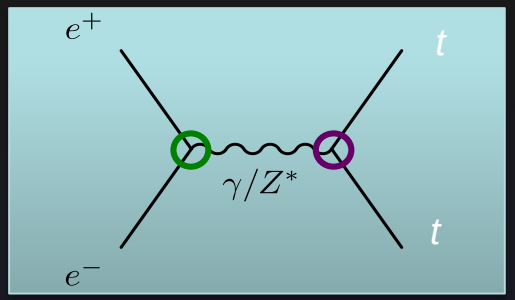
ECM=500GeV で　Δyt/yt = 6% 、ECM=1 TeV で　～1%　を期待

トップの生成・崩壊の精密測定

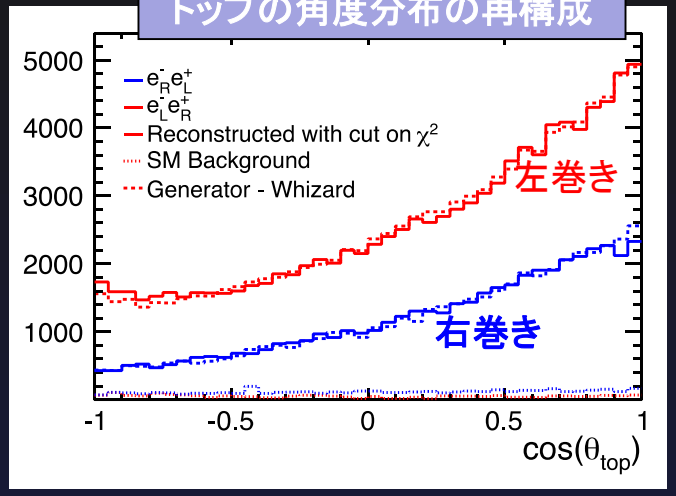
新物理の間接探索　例5

重心系エネルギー 500GeV

トップ結合定数のSMからのズレが新物理を示唆する



トップの角度分布の再構成

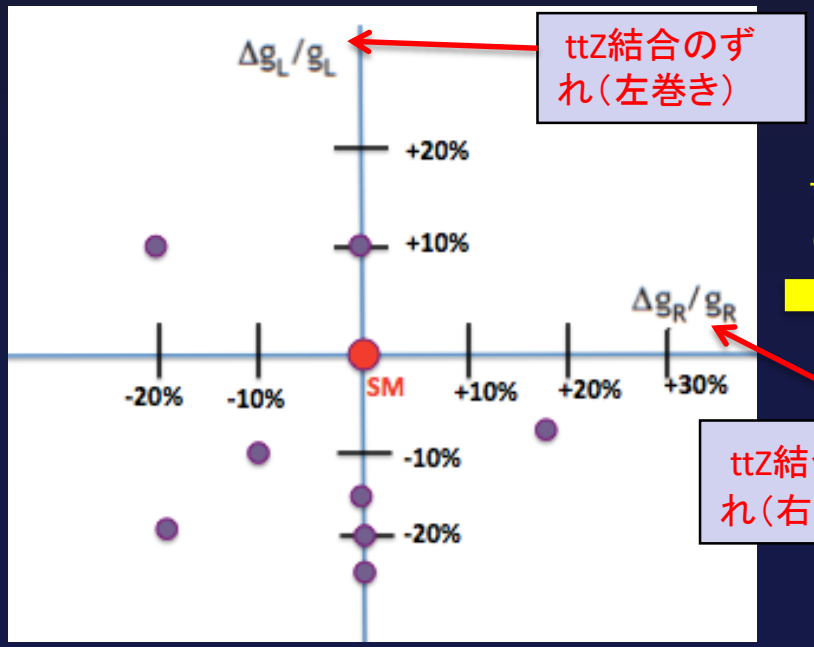


ビーム偏極（ILCの強み）が必須

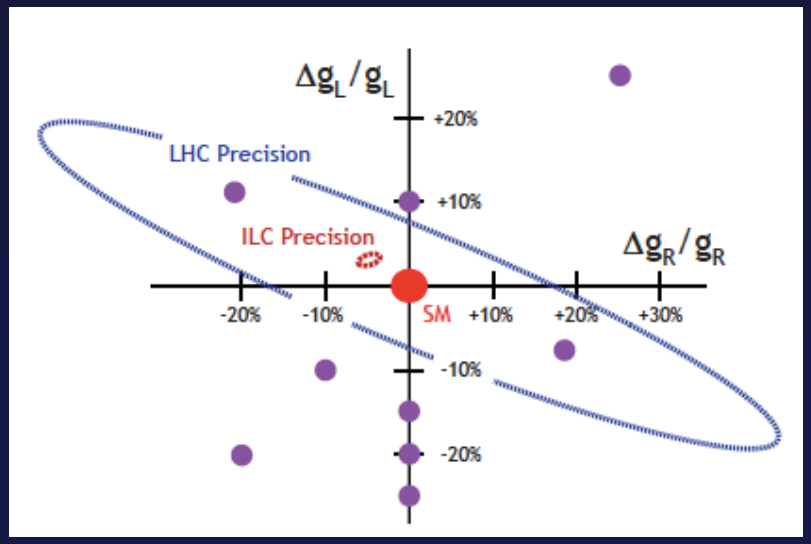
各偏極状態でのトップ対生成断面積 と非対称性を測定し、
左右巻きの構造因子 を導出

ILCはLHCよりも多くの複合Higgs模型をexcludeできる (68% CL)

様々な新物理模型でのトップの異常結合 （新物理スケール～1 TeV）



ttZ coupling
の精密測定



Discrimination of various new physics models with EW top couplings.
[1506.05992], based on [Richard, 1403.2893]

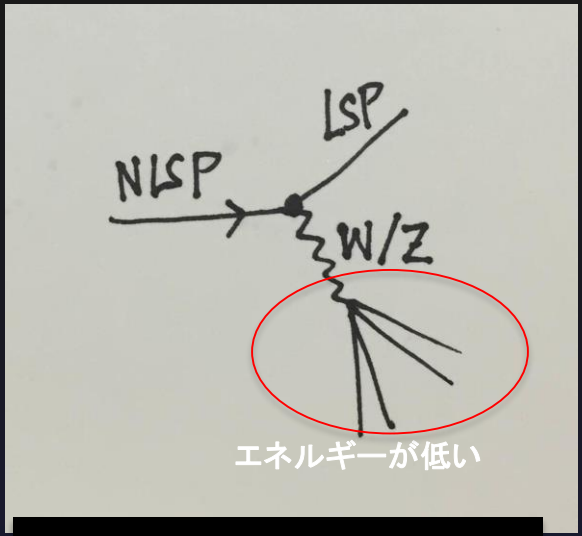
ILCでの新粒子探索

新物理の直接探索

ILCではΔMが小さい(<～O(10)GeV)のようなSUSY粒子の発見が期待されている

ΔM： 一番軽い粒子(LSP)と2番目に軽い粒子(NLSP)の質量差

ILCで探索するモチベーションは？



❖ **実験の観点から**:

LHCで排他されずに残るのはΔMが小さい領域

- ΔMが小さければ「見える」信号は低エネルギーのジェットやレプトン
- LHCの大量な背景事象に埋もれてしまい、探索が極めて困難 ➔ **ILC の出番**

❖ **理論の観点から**:

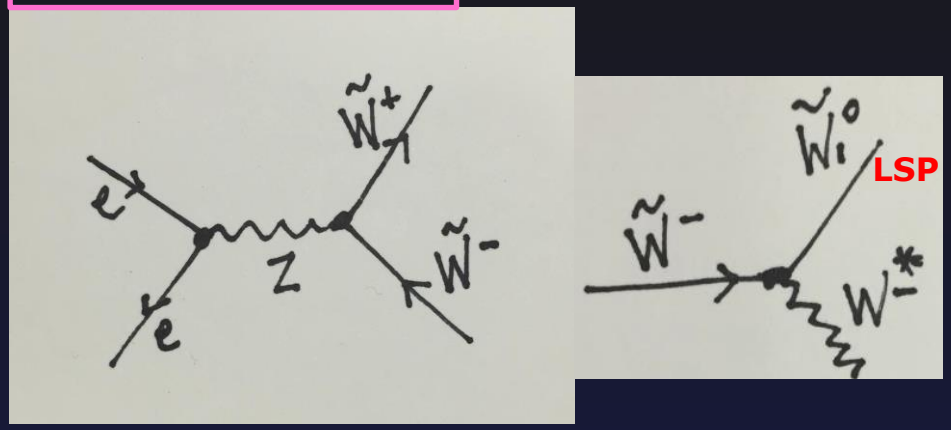
Naturalness 理論はZボソン質量とヒッグス質量に近い質量(O(100)GeV) を持つ軽いSUSY粒子を予言

一般にΔMが小さい

ILCでの軽いSUSY粒子の生成

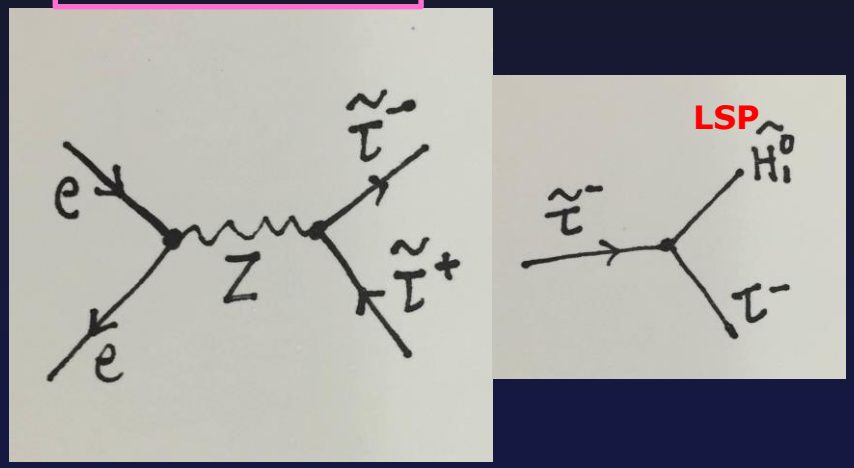
新物理の直接探索　例1

軽いHiggsino対生成

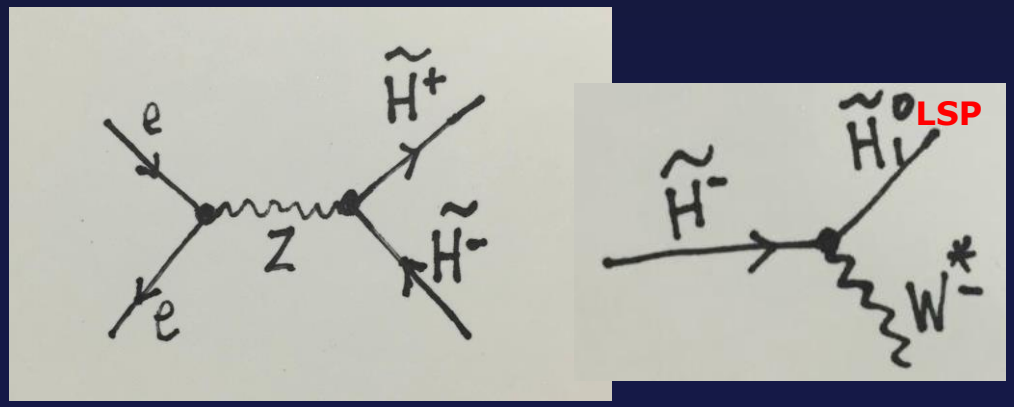


ビーム偏極を駆使するして生成された新粒子の性質を調べる

軽いStau対生成



軽いWino対生成



暗黒物質の探索@ILC

新物理の直接探索　例2

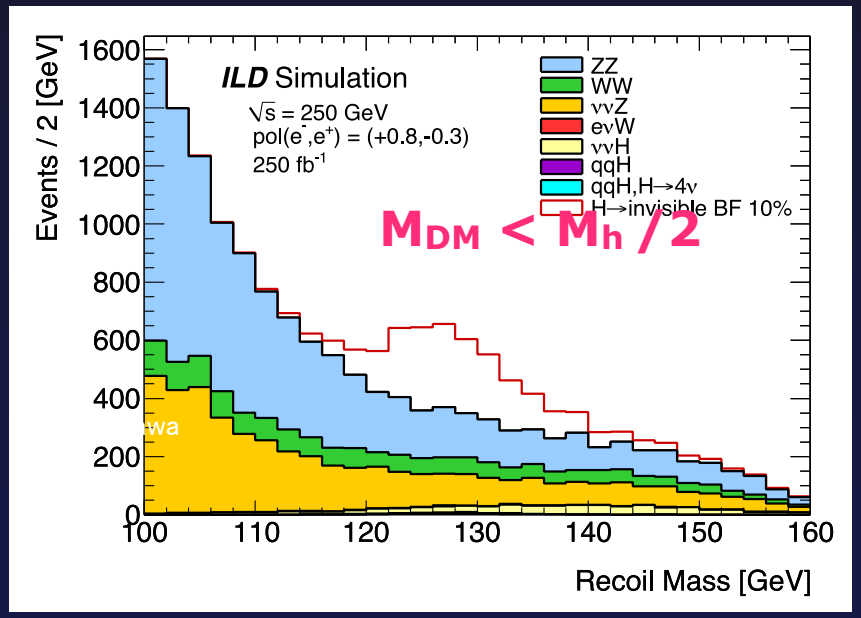
- DM質量はILCで生成可能なエネルギー領域内にある可能性が高い
  ➔ ILCでその起源、存在量、詳細性質の研究を期待している

WIMP：コライダーでの暗黒物質探索は直接探索・間接探索(宇宙など)と相補的

- 最有力なDM候補は一番軽い超対称粒子

SUSY特有の信号 (DMの崩壊を伴う)に注目：　軽いHiggsino, 軽いstau など

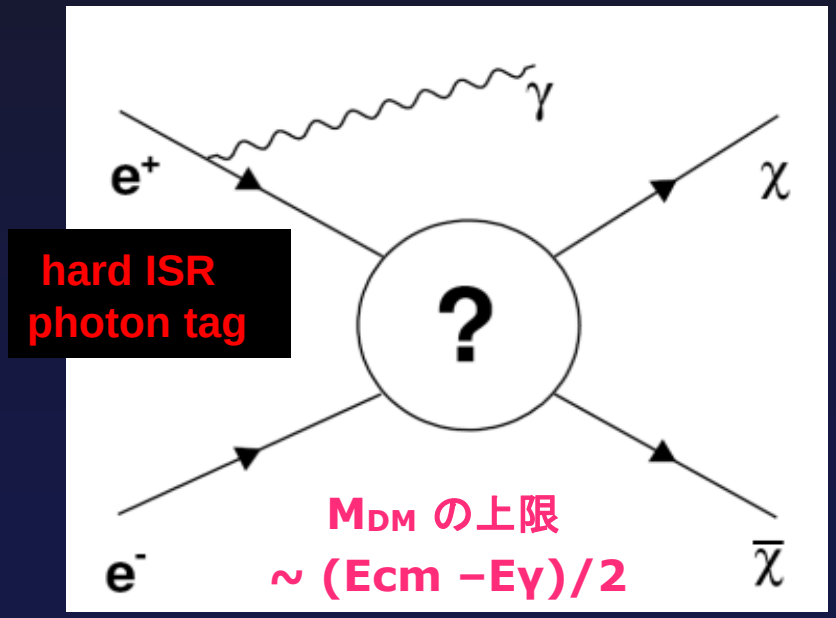
Higgs Invisible Decay



BR(H->invis) がSM値からずれたらBSMを示す

BR(H→invis.) < 0.4% at 250 GeV, 1150 fb^{-1}

Monophoton Search



探索するDM質量はECM/2まで可能

ILCは何を探求するのか？

- 標準模型の粒子が全てなのか？　力は4つしかないのか？

- 暗黒物質の正体は？

- 物質・反物質比対称性
  粒子と反粒子は対消滅し僅かに物質粒子のみ残ったのはなぜ？

- 電弱対称性の破れの背景にある真実
  Higgsは素粒子か？　1つしかないのか？

- 大統一はかなうのか？

超対称性など新物理が検証できれば、大砂漠を超えBig Bang直後の大統一のエネルギーまで成り立つ理論を手にいれうる

- ILC では素粒子同士を衝突させ、宇宙創成1兆分の1秒後の高エネルギー反応を再現し調べることにより、質量の起源や時空構造、宇宙創成の謎に挑む

- ILCとLHCは（それぞれの特徴を活かして）補完しながら研究を行う

まとめ その1

ILCはenergy frontier のe+e−コライダー

クリーンな実験環境と優秀な検出器のおかげで高精度な測定

衝突エネルギーとビーム偏極を調整可能 ➔ 特定の物理を取り出せる

ILCの物理が目指すもの：

新物理探索を通して標準理論で未解決な課題に迫る

EWSBの背後の物理、Higgsは素粒子なのか、暗黒物質、

バリオジェネシス、 力の大統一、真空の安定性、 ect ……

(1) 標準理論の検証から新物理を探索

ILCでしか出来ない精度でHiggsやtop quark の測定を行う

➔ 標準理論からのズレを感知して新物理を発見し、

ズレのパターンから新物理のモデルを同定する

(2) 新粒子の直接探索

超対称性粒子 、暗黒物質 → LHCと相補的に行う

ILCでしか出来ないものがたくさんある！

まとめ　その2

- 今後のLHC、そして将来のILC自身の実験結果に従って
  ILCの実験計画を調整可能

LHC Run 2の結果に大いに期待

➢ LHCで新発見があればILCで精査

軽ければILCで直接測定

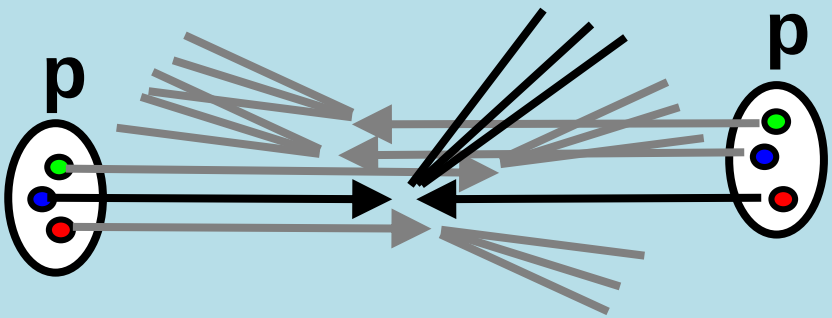
重ければ間接測定：

付随する粒子の探索、HiggsとTopの精密測定による検証

➢ LHCで発見がなくてもILCで新粒子発見の可能性がある

LHCとILCの実験環境比較

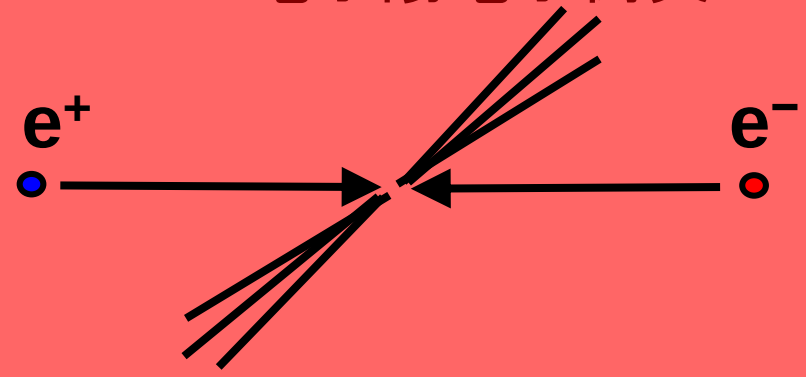
LHC: 陽子陽子衝突



- 高い重心系エネルギー：13000 GeV
- 複合粒子同士の衝突
- 一部のエネルギーが反応に関与する
- 背景事象が多い

メリット：　高いエネルギーに到達して新粒子を発見する

ILC: 電子陽電子衝突



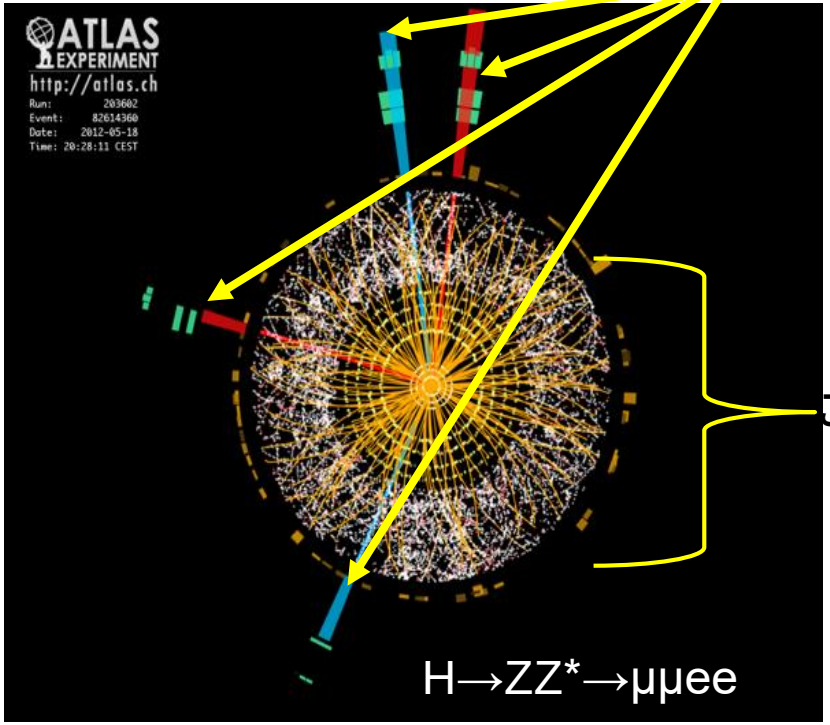
- 比較的重心系エネルギー：500 GeV
- 素粒子(電子と陽電子)の反応
- 全エネルギーが反応に使われる
- 背景事象が少ない

メリット：綺麗な実験環境で新現象を探索する

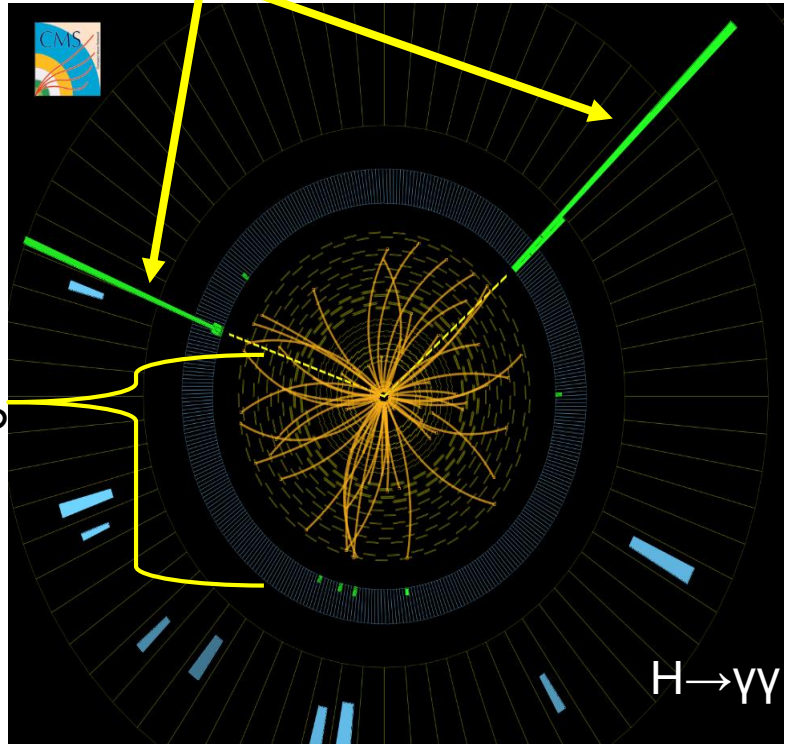
LHCではどのように見えるか？

- LHCで粒子衝突後に起きたことを見てみると…

これらがヒッグスから出てきたもの



これらは他から



アトラス実験より

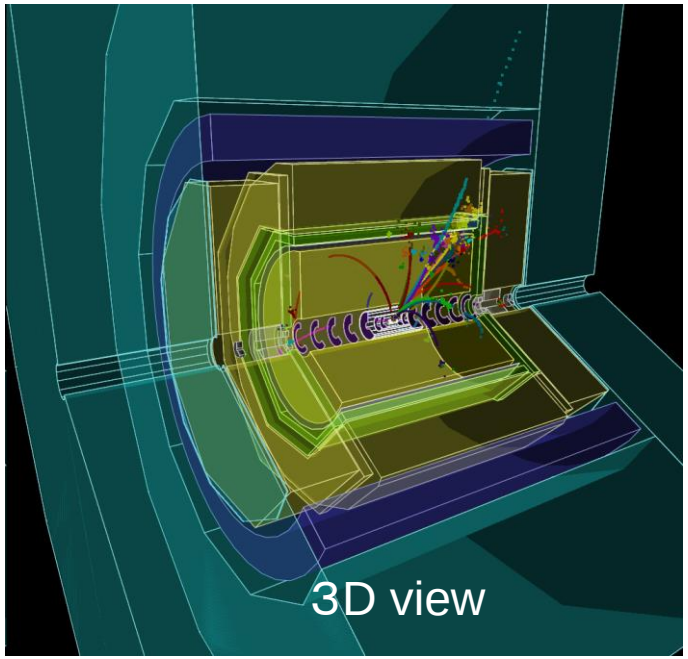
CMS実験より

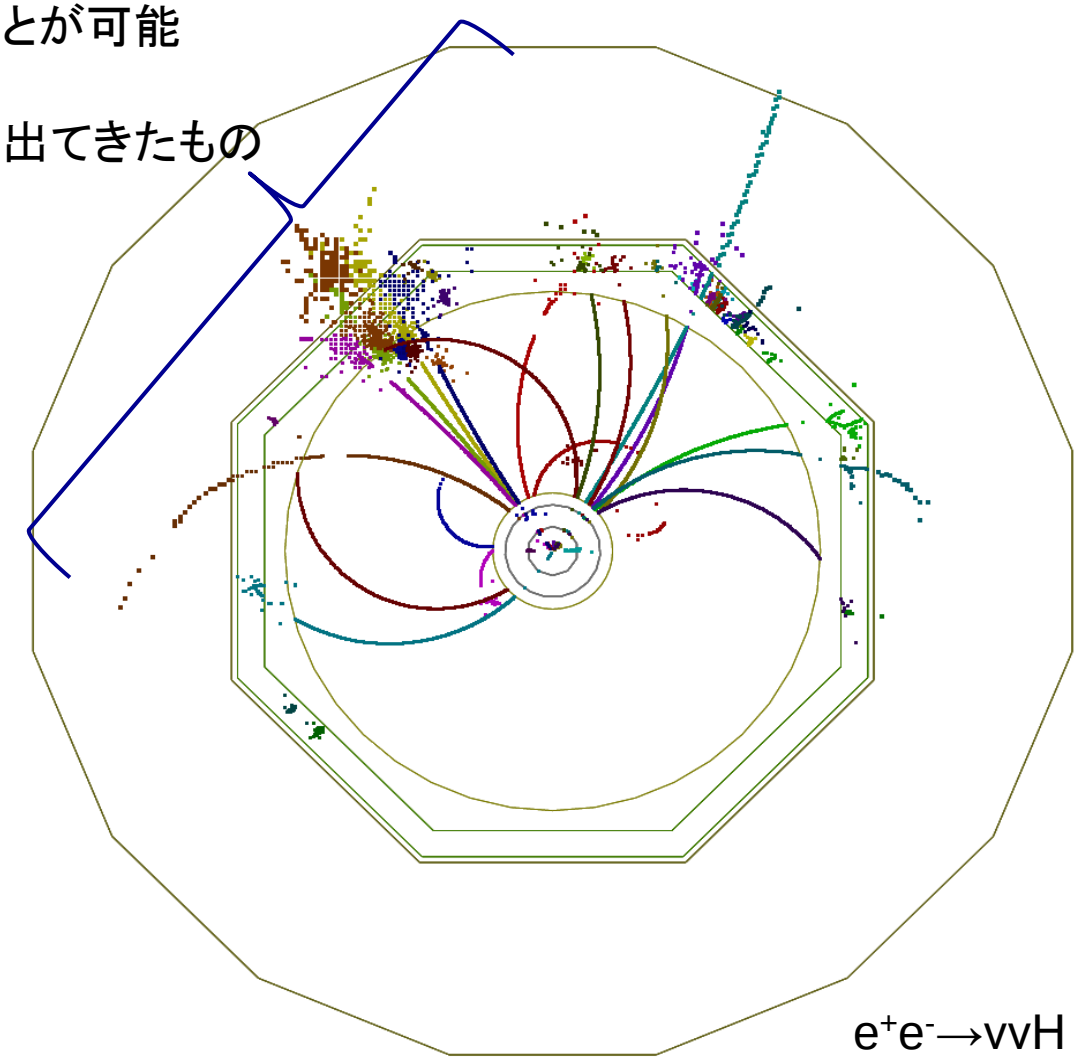
- 多くのいらないもの中でヒッグス（あるいは見たいもの）から出てきたものを捕まえないといけない
- この中でヒッグス粒子を見つけたLHCはすばらしい

すごいところ１：ILCではどのように見えるか

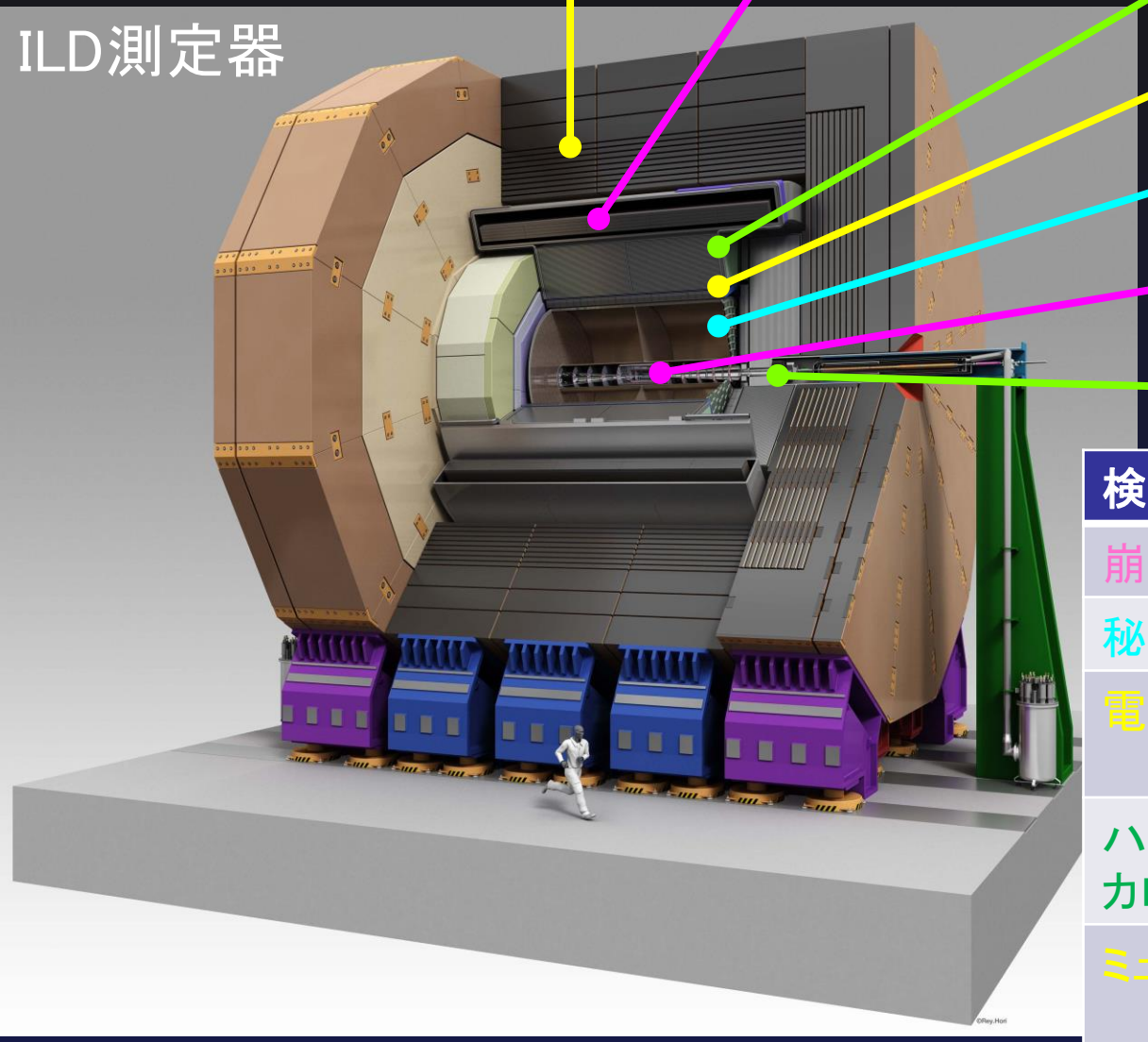
- ILCで粒子衝突後に起きるであろうことを見てみると…
- ほとんどすべてが興味ある反応から出るもの
- 出てくるものをほとんど捕まえることが可能

- 例:この事象はすべてヒッグスから出てきたもの





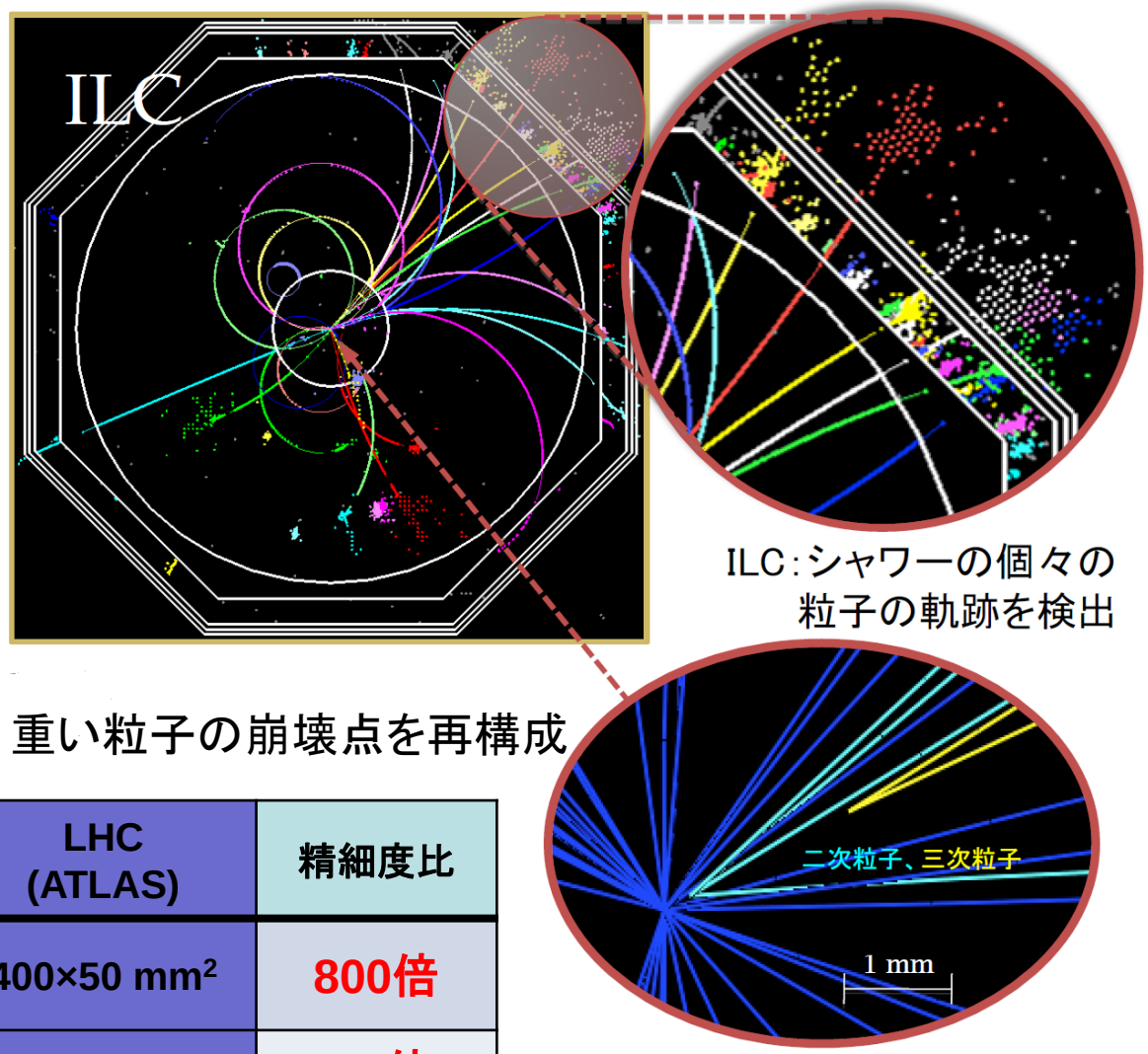
ILCの測定器



検出器	測定量
崩壊点検出器	飛跡・運動量
秘跡検出器	運動量・飛跡
電磁カロリメータ	光子・電子のエネルギー
ハドロンカロリメータ	その他粒子のエネルギー
ミューオン検出器	ミューオンの飛跡

すごいところ2: ILCの高精細・高性能測定器

ILC測定器:
複雑な反応でも精密な
エネルギー測定が可能
となるよう設計

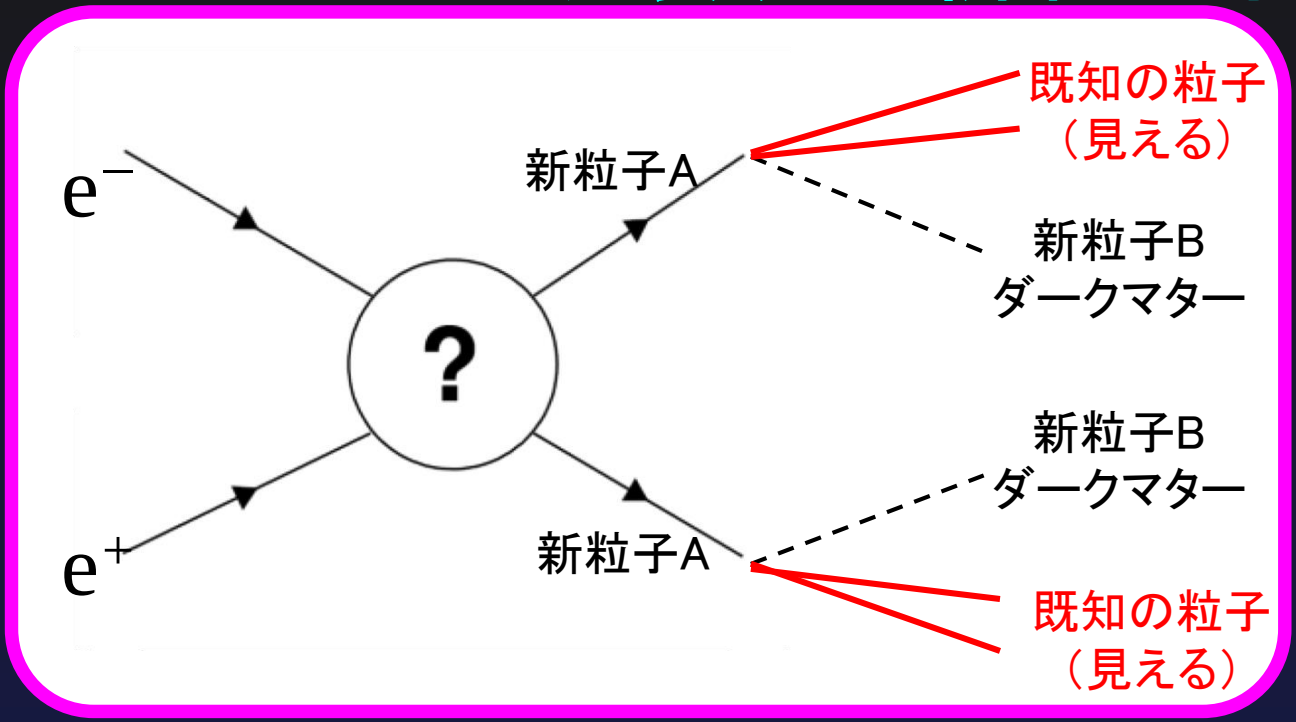


高精細・高性能な
検出器で実現:

検出器 センサーサイズ	ILC	LHC (ATLAS)	精細度比
崩壊点検出器	5×5 mm^2	400×50 mm^2	800倍
飛跡検出器	1×6 mm^2	13 mm^2	2.2倍
電磁カロリー メータ	5×5 mm^2	39×39 mm^2	61倍

すごいところ2: ILCの高精細・高性能測定器なら

- ダークマターへ崩壊する新粒子探索



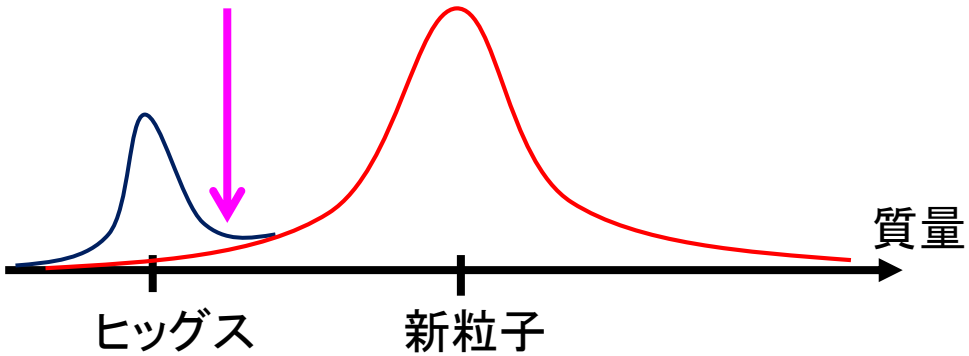
ILCで発見
（測定器がすごい）

AとBの質量の差が小さいと見えるエネルギーも小さい

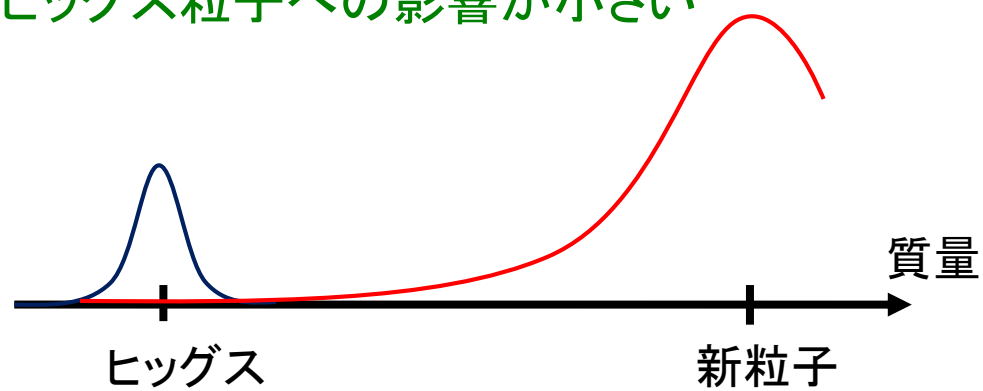
ILCなら発見可能（ILC測定器がすごい）

新粒子の間接探索

新粒子が比較的軽い場合
ヒッグス粒子への影響が大きい



新粒子が比較的重い場合
ヒッグス粒子への影響が小さい



精密測定で
高いエネルギーの
新物理にアクセス

※実際には他の様々な物理量で新物理の影響を見ます（例：ヒッグス結合定数）

富士の裾野: 富士山効果分かりやすい

さいたま市
越谷市
川越線
武蔵野線
東武野田線
狭山市
入間市
東武東上線
青梅市
所沢市
常磐線
京都
八高線
五日市線
西武拝島線
西武新宿線
青梅線
東京
中央本線
八王子市
府中市
千代田区
調布飛行場
浦安市
京葉線
相模原市

山梨県
都留市
道志村
富士河口湖町
鳴沢村
富士吉田市
丹沢山
山中湖村
神奈川
秦野市
富士山
小山町
松田町
御殿場市
南足柄市
御殿場線
小田原市
富士宮市
愛鷹山
箱根山
箱根町
裾野市
富士市
真鶴町

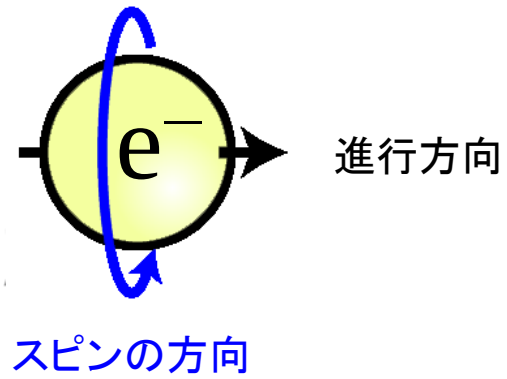
富士山
東京: 富士山効果は？
精密測定が必要

偏極とは何か

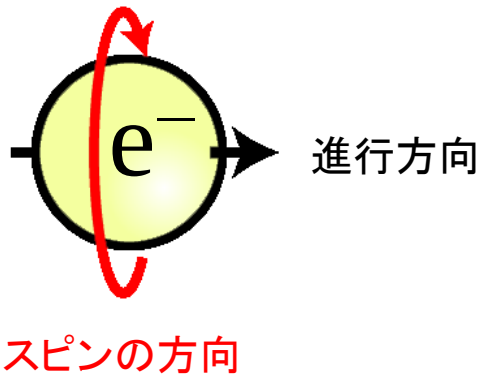
（電子のスピン＝1/2）

進行方向に対するスピンの向きで
右偏極・左偏極が決まる

右巻きスピン（右偏極）



左巻きスピン（左偏極）



ILCは電子(陽電子)の偏極を制御できる

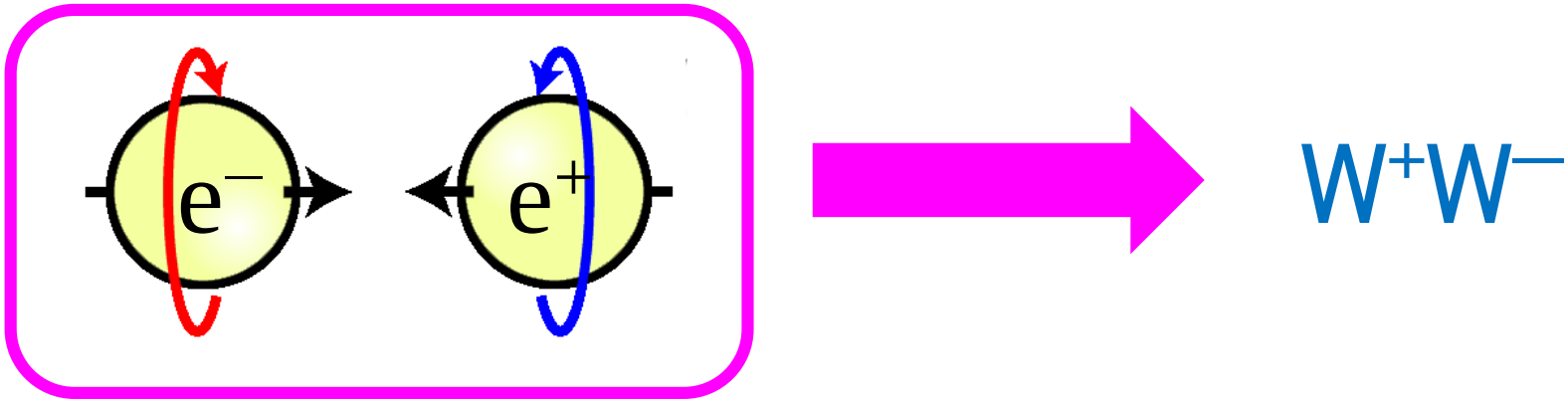
すごいところ４: 偏極の利点

- 偏極によって反応が変わる

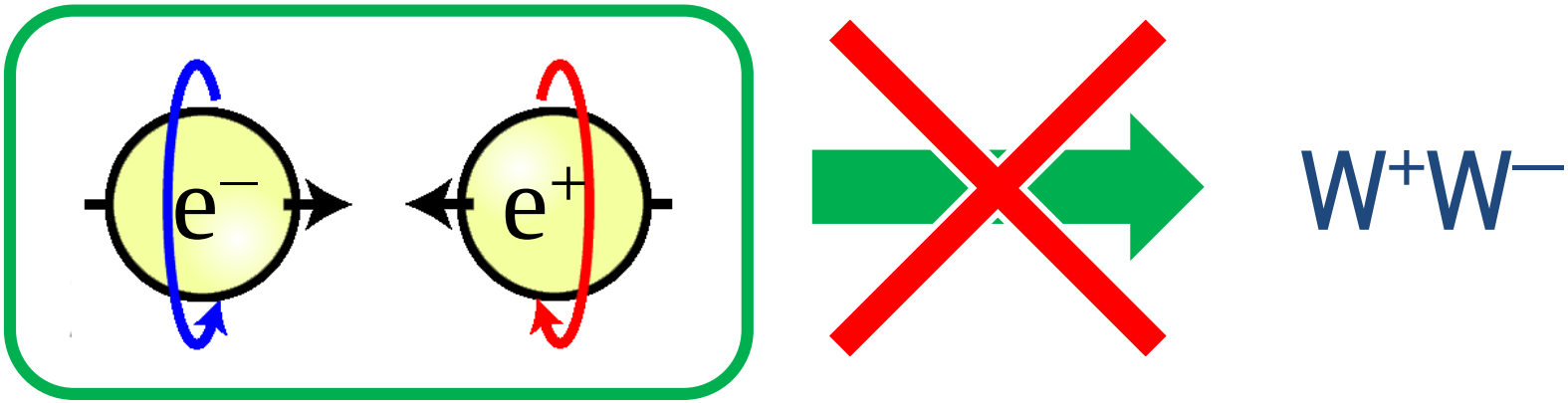
→見たいものに応じて生成を制御

左巻き電子･右巻き陽電子

（背景事象の抑制）



右巻き電子･左巻き陽電子

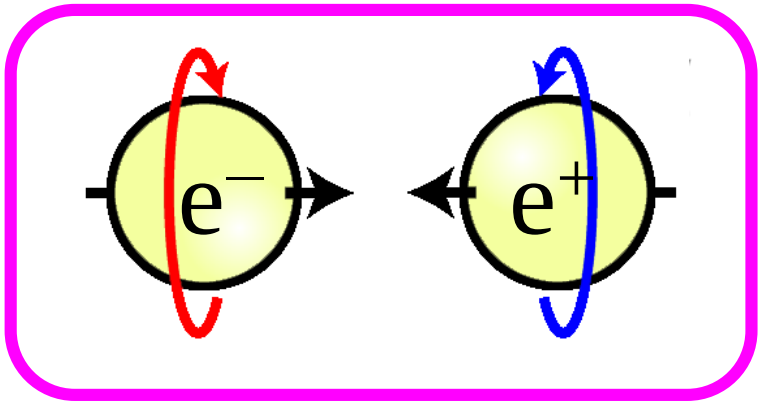


すごいところ４：偏極の重要性

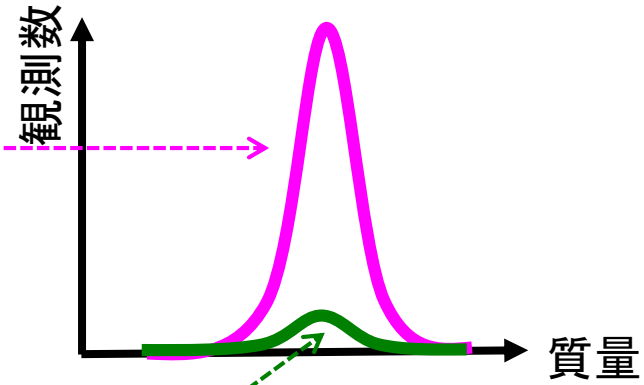
- 偏極によって反応の仕方が変わる

→新粒子の識別ができる

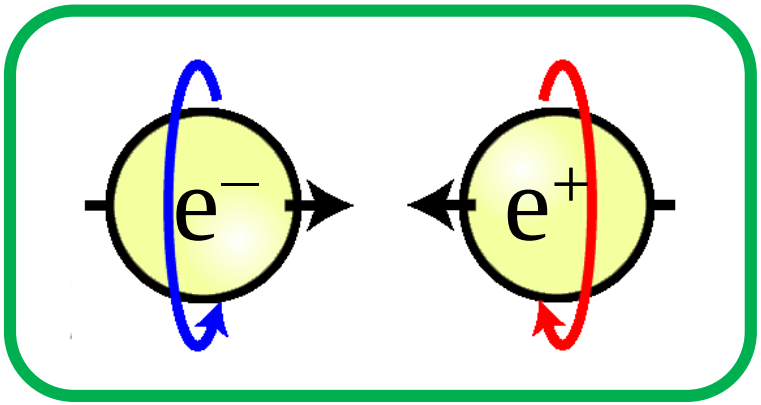
左巻き電子・右巻き陽電子



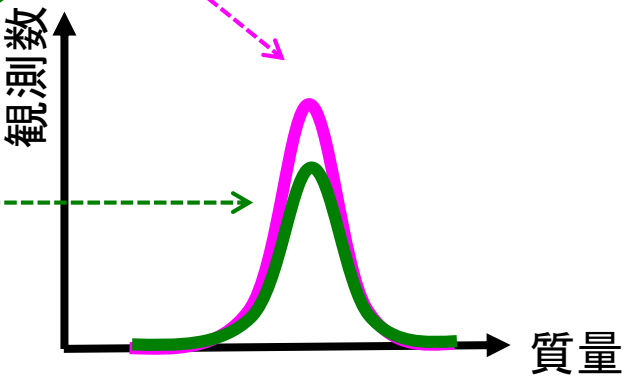
『W/Z型』粒子の場合



右巻き電子・左巻き陽電子



『ヒッグス型』粒子の場合



H°

t

動画にて仕組みをご紹介