

ILC大学連携タスクフォースセミナー
～宇宙創成の謎にせまる～ 国際リニアコライダー計画

ILCの物理

京都大学
2016年 6月 9日 (木)

ジャクリン ヤン (KEK 素核研)

スライド作成に際して東大の田辺友彦さんと倉田正和さんに多大なご協力をいただきました

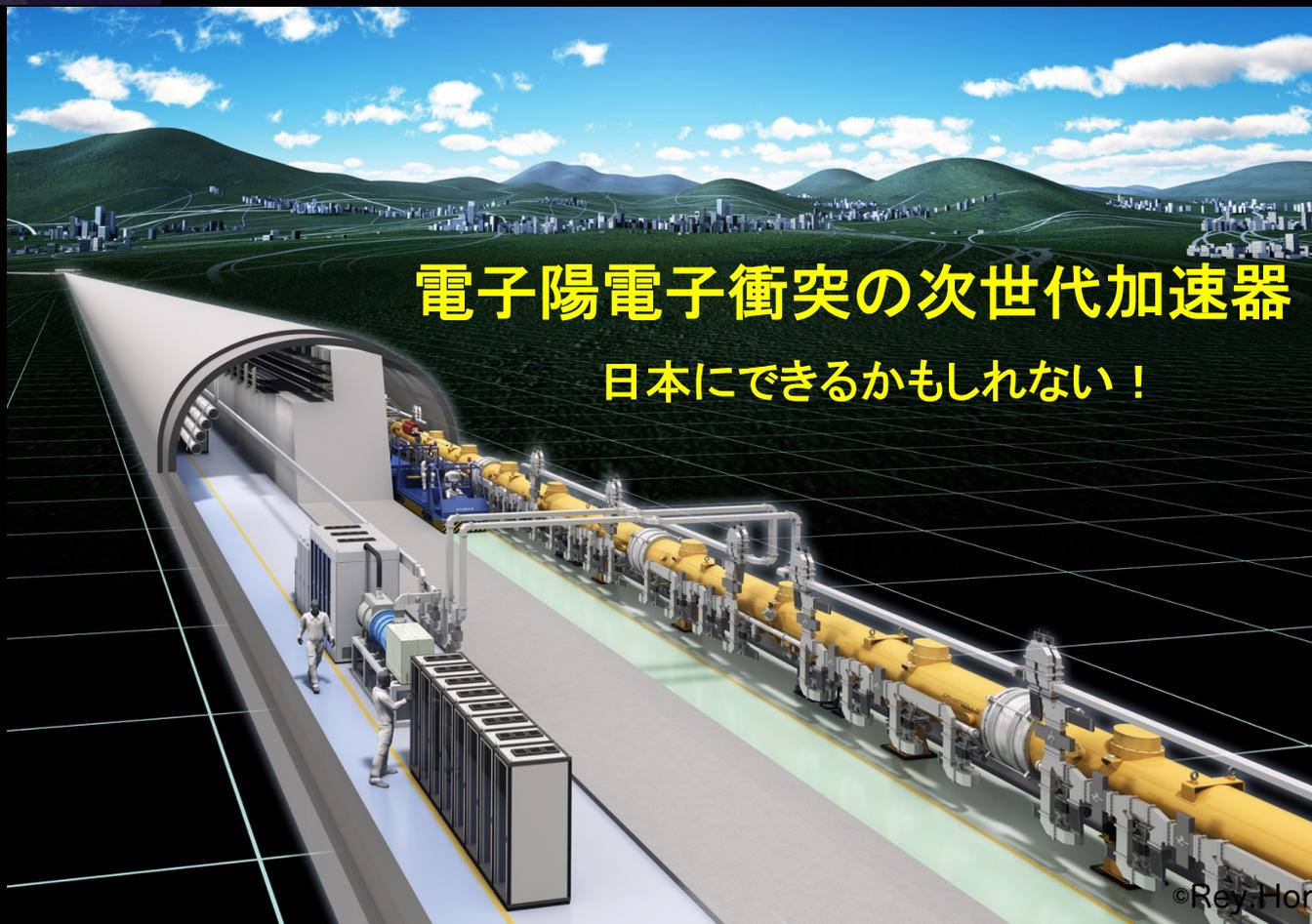


international linear collider

国際リニアコライダー

International Linear Collider

ILC



電子陽電子衝突の次世代加速器

日本にできるかもしれない！

トークの流れ

ILCで宇宙の謎にどうやってせまる？

～素粒子物理と宇宙について～

ILCのすごいところは？

～ILCの能力～

ILCで何がわかるか？

～新粒子発見とヒッグス粒子～

トークの流れ

ILCで宇宙の謎にどうやってせまる？

～素粒子物理と宇宙について～

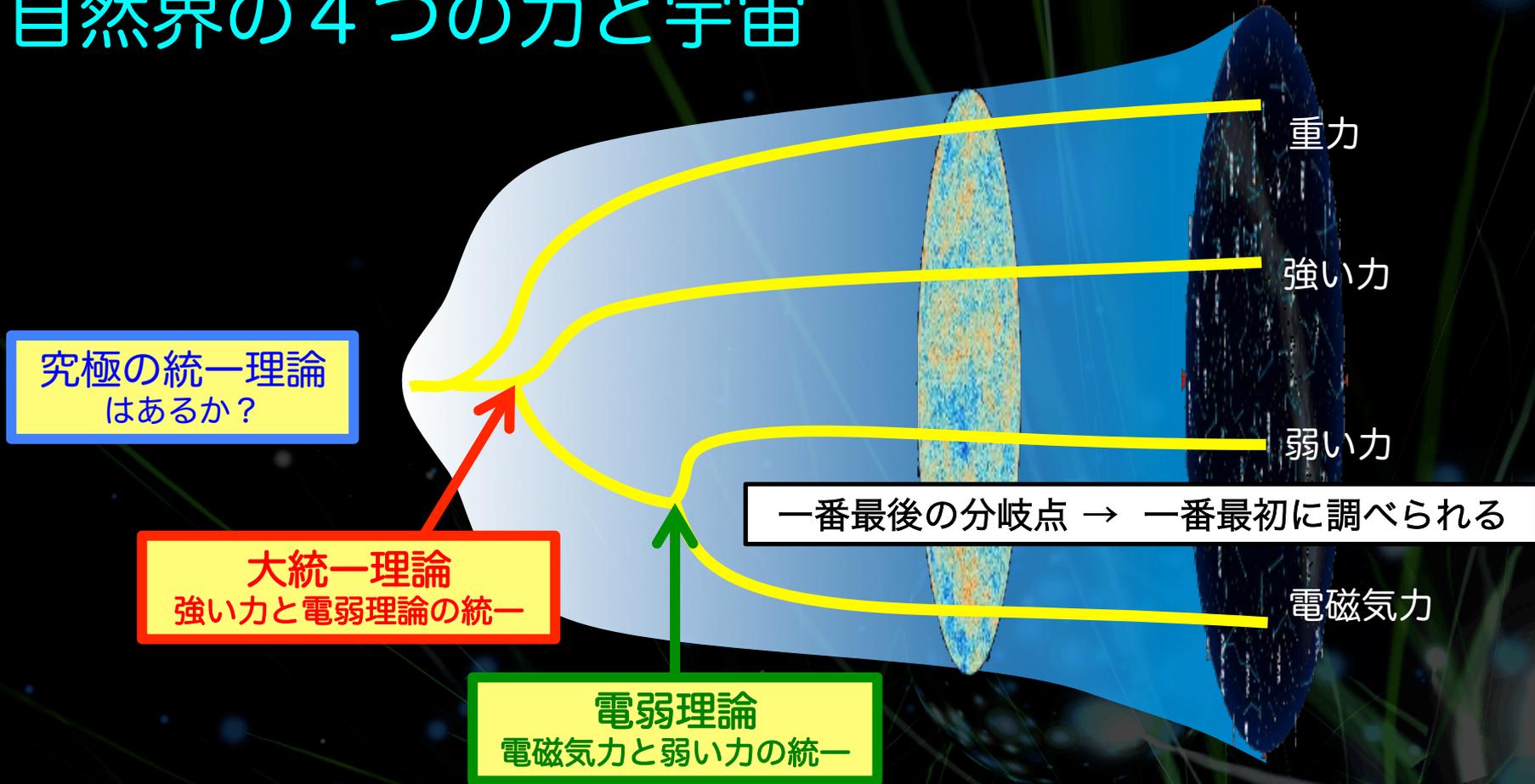
ILCのすごいところは？

～ILCの能力～

ILCで何がわかるか？

～新粒子発見とヒッグス粒子～

自然界の4つの力と宇宙



一番最後の分岐点 → 一番最初に調べられる

究極の統一理論
はあるか？

大統一理論
強い力と電弱理論の統一

電弱理論
電磁気力と弱い力の統一

↑ ここまで実験で検証完了

宇宙の年齢

10^{-44} 秒

10^{-36} 秒

10^{-10} 秒

38万年

138億年

晴れ上がり

現在

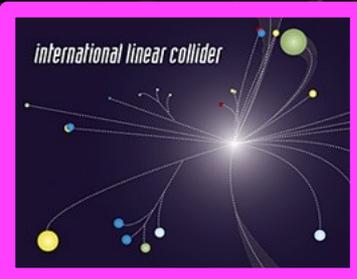
これ以前は光では見えない

力の強さはエネルギーによる

自然界の4つの力と宇宙とILC

- 現代素粒子物理学の課題：
- 宇宙の本当の姿をその誕生の時から知りたい
 - 宇宙の歴史を逆に辿りながら切り開いていく

ILCでは素粒子の衝突を用いて宇宙初期の高エネルギー反応を再現し調べる
→ 力の大統一を目指す
現在の理論体制を超えた新物理の発見が必要 (?)



重力

強い力

弱い力

電磁気力

究極の統一理論
はあるか？

大統一理論
強い力と電弱理論の統一

電弱理論
電磁気力と弱い力の統一



素粒子の標準理論

Standard Model (SM)

物質粒子

ゲージ粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 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ボゾン	 Zボゾン

質量を与える粒子



最近まで未発見

質量が生じるメカニズムが検証できなかった

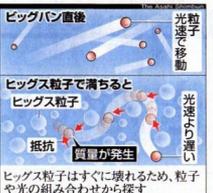
ヒッグス粒子の発見は大革命

標準理論の粒子のうち唯一未発見だった粒子がLHCで見つかった
約50年間にわたり加速器実験により検証されてきた標準理論が完結した

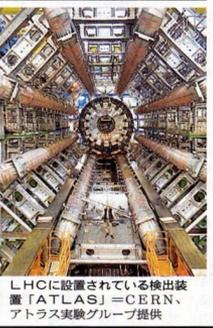


2012年7月4日 CERNにて





ビッグバン直後
光速の速い
質量が発生
抵抗
ビッグス粒子はすぐに壊れるため、粒子や光の組み合わせから探す



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

万物に質量(重さ)を与えてきた「ヒッグス粒子」とみられる新粒子を発見した、スウェーデン・ユネスケ近郊にある欧州原子核研究機関(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い「ヒッグス粒子」が質量を獲得し、宇宙がどのようにして現在の姿に至ったかを説明するの鍵が握られた。

ヒッグス粒子が発見

今回の発表されたのは、東大や筑波大など日本の16の研究機関が参加する「ATLAS」と、欧州を中心とした「CMS」という2つの研究チームの実験成果。ともに、2009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。

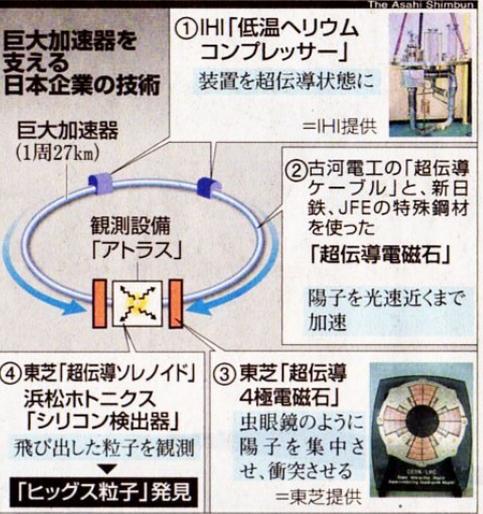
今回の成果では、CMS、ATLAS共に、実験によって未知の新粒子が生まれた確率が99.9999%と見込まれた。この確度であれば物理的に「発見」と認定できる。だが、新粒子がヒッグス粒子であるかを突き止めるには、なおデータを積み重ねて発見を確定する必要がある。今年中に「ヒッグス粒子」を発見する見込みだ。

万物の重さの源

国際チーム発表
ヒッグス粒子は、1307億年前の「ビッグバン」によって飛び回る素粒子に対して水あめのように作用し、動かしにくくしたと考えられている。この「動きにくい」性質を持った「ヒッグス粒子」が、質量の源となる。

日本においてもヒッグスの発見が盛大に報道されてきた

ヒッグス粒子研究に日本の技術



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27kmという巨大な装置の心臓部といえる。

CERNの巨大加速器支える

だ。そして、粒子の軌跡を読み取るのが浜松ホトニクス製の検出器。こちらは加速器の「目」の役割を担う。衝突前に、陽子を光速近くにするには、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度の超低温になると、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。

新聞記事のスクリーンショット。見出しは「ヒッグス粒子発見か 年内に結論 日米欧2チーム」。写真には、科学者たちが握手を交わしている様子が写っている。記事内容は、ヒッグス粒子の発見が年内に結論づけられる可能性を示している。



翌年(2013年)
アンダレール博士とヒッグス博士
ノーベル物理学賞受賞

Q: なぜノーベル賞が与えられたのか？



それは …

私たちの生存そのものに
深くかかわるメカニズムが
解明されたからである

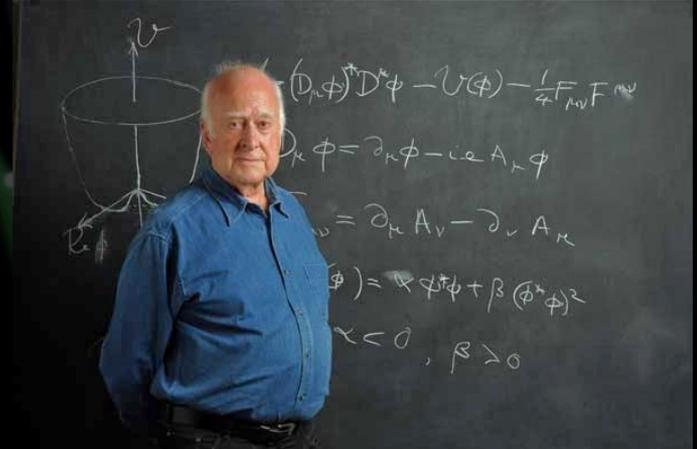
「自発的対称性の破れ」



南部陽一郎先生



アングレーン博士、ブルー博士



ヒッグス博士

それまでに素粒子がどのように質量を持つかが謎だった

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、アングレーン、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、質量が生まれるメカニズムが証明された → ノーベル賞



素粒子の質量の起源

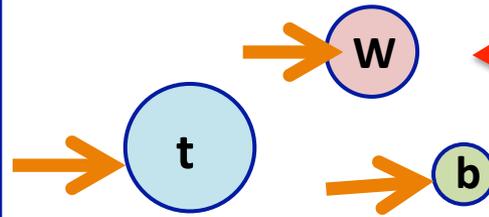
ビッグバン直後、素粒子は無質量

真空から抵抗を受けない
(真空=エネルギー最低の状態)

宇宙の膨張・冷却
誕生から約1/100億秒後に、
真空は、ヒッグスが凝縮している
状態に変化(相転移)した

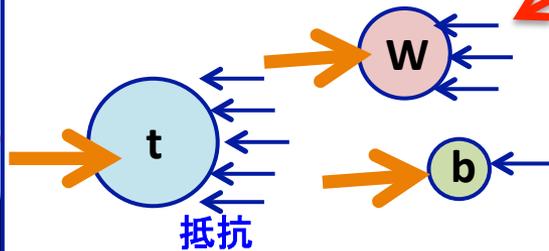
加速しようとする粒子がヒッグスにぶつかって抵抗を受ける
プールの中で歩く感覚

抵抗のない真空



相転移

ヒッグスに満たされた真空



質量 ≡ 粒子がヒッグスから受ける抵抗

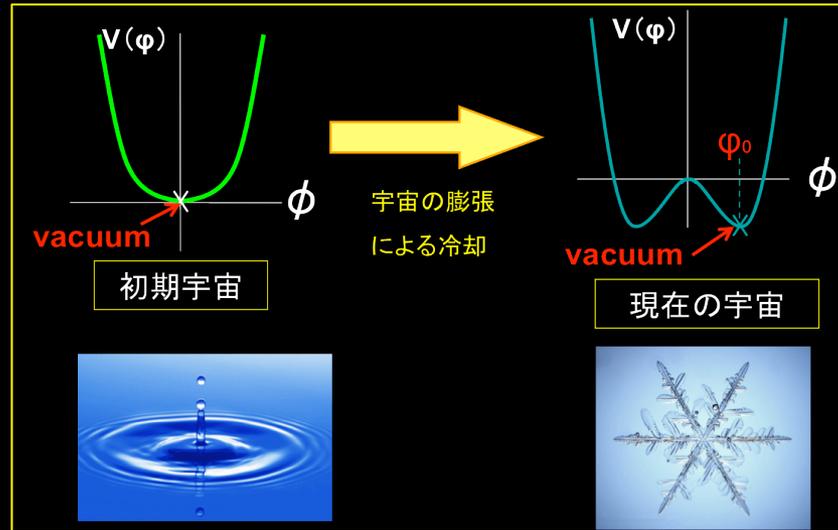
$$M = g \times v$$

ヒッグスと基本粒子との結合の強さはILCでは重要な測定値(後ほど)

g : ヒッグスと粒子の結合の強さ
 v : 真空中のヒッグスの密度

電弱エネルギースケールで対称性が破れるので 電弱対称性の破れ: Electroweak Symmetry Breaking (EWSB)₃ という

残された謎



宇宙をこのようにしたのは何か？

	物質粒子			ゲージ粒子
	第1世代	第2世代	第3世代	
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ	強い力 グルーオン 電磁力 光子 弱い力 Wボゾン Zボゾン
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム	
レプトン	 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	

+

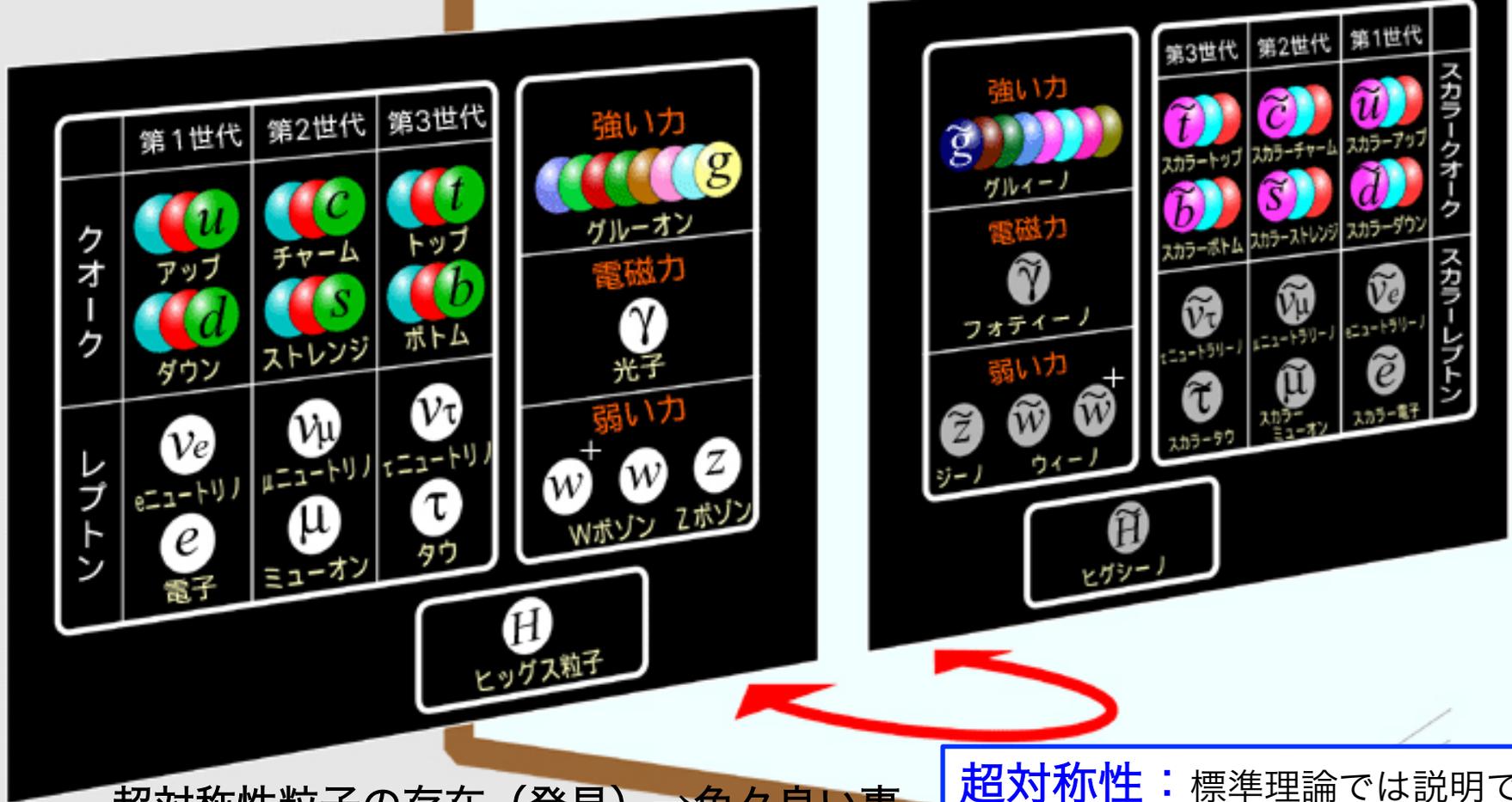
?

ヒッグス場に伴う粒子
(未発見)



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

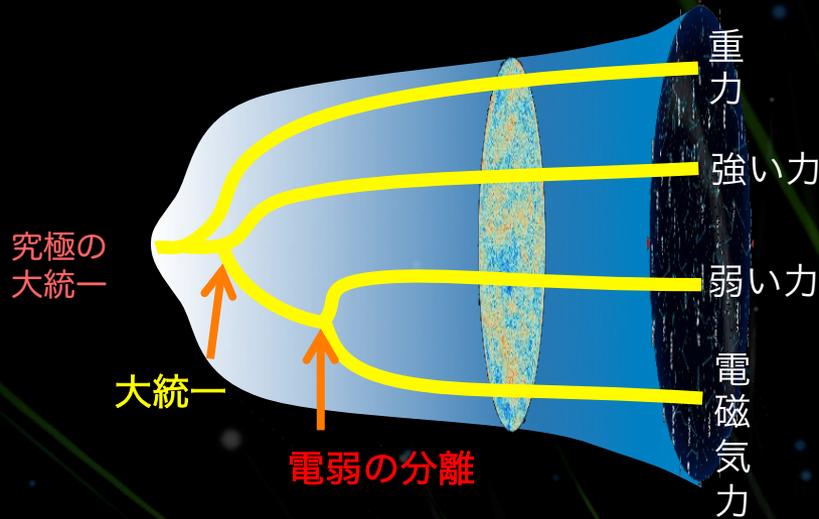


超対称性粒子の存在（発見）→色々良い事

- 大統一を実現させてくれる可能性
- 自発的対称性の破れが起きた理由を説明

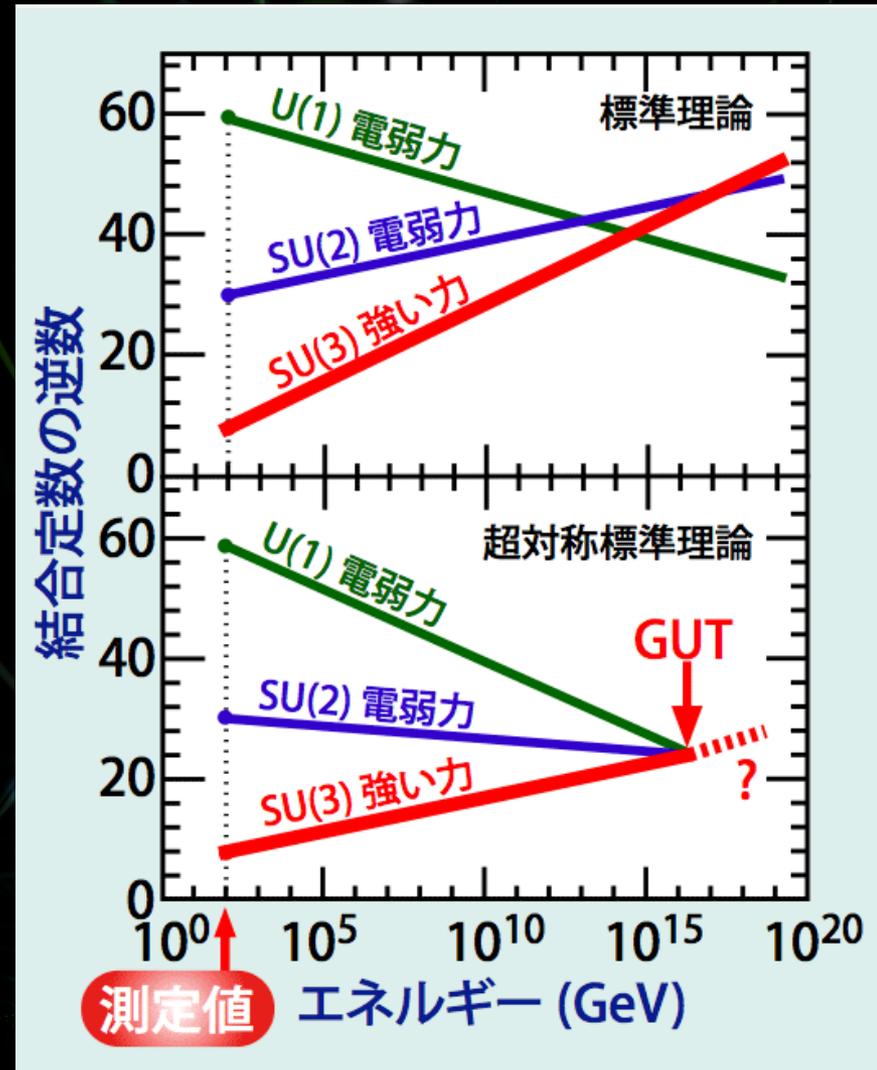
超対称性：標準理論では説明できないことを解決する有力な理論として注目されている

力の大統一



力はもともとひとつだったかもしれない

- 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
→ 大統一の可能性
- 標準理論だと力の統一は出来ない



超対称性粒子は暗黒物質の有力な候補でもある

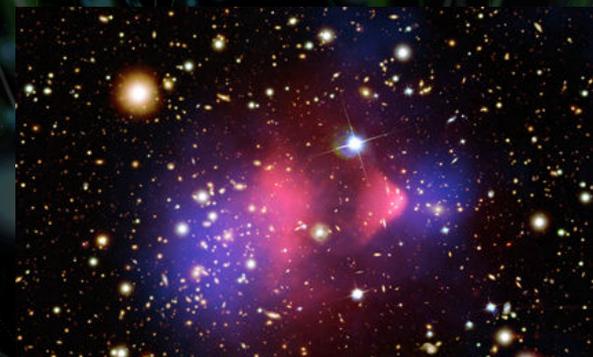
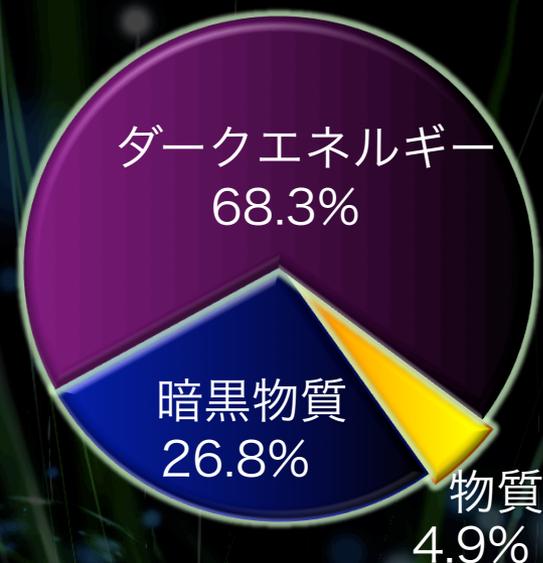
- 我々が知っている物質は宇宙の全エネルギーの5%未満
- ダークエネルギー：宇宙の加速膨張に寄与（正体不明）
- **暗黒物質 Dark Matter (DM)**（正体不明）

「知っている」（「正体不明」）
=どんな粒子で構成されているかが分かる（分からない）

DMは物質とは殆ど相互作用しない：検出が極めて困難

ILCのエネルギーで探索する場合、
DM粒子の有力候補は一番軽い中性の超対称性粒子
→超対称性粒子特有の信号に注目

- **ILCで実際DMを生成・発見し、その研究が期待されている**

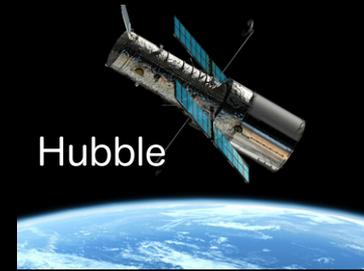


人工衛星による宇宙観測からDMの存在の証拠

銀河の回転速度からDMの反応の速さが計算できる

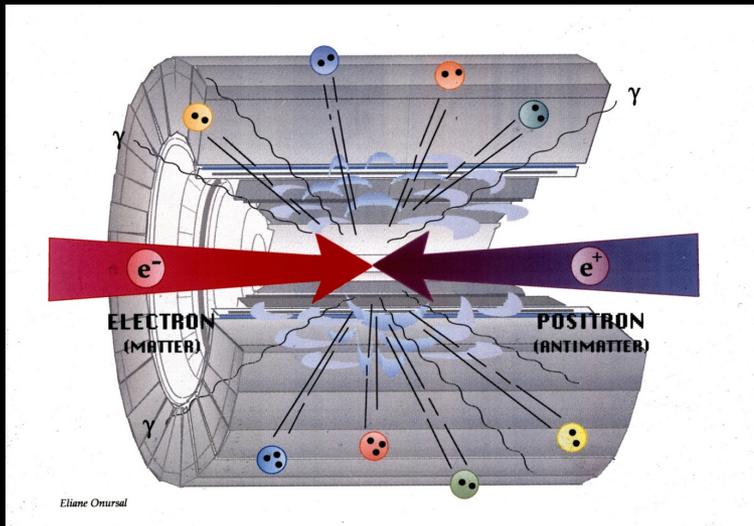
宇宙法則をとらえる方法

宇宙の直接観測（望遠鏡、衛星 etc）
に対して



加速器実験

- 粒子を光速近くまで加速し衝突させる → 宇宙初期の高温状態を局所に再現
- 衝突エネルギーが高ければ重い粒子を生成可能



Go to:

加速器時代以前に宇宙線を使って発見された粒子：
中性子、陽電子（1932）、 μ 粒子（1937）、 π 中間子（1947）

History of the Universe



LHC: 現在のコライダー実験

現在最も高エネルギーのコライダー実験: 7 TeV → 13 TeVでの実験開始

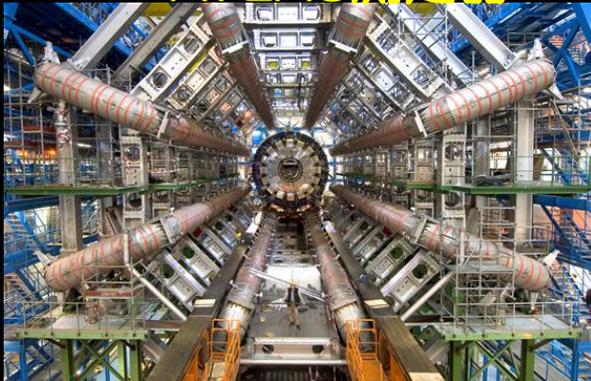
1 GeV ~ 陽子1個の質量をエネルギーに換算
1 TeV: 1 GeV の1000倍



ATLAS測定器

LHC加速器

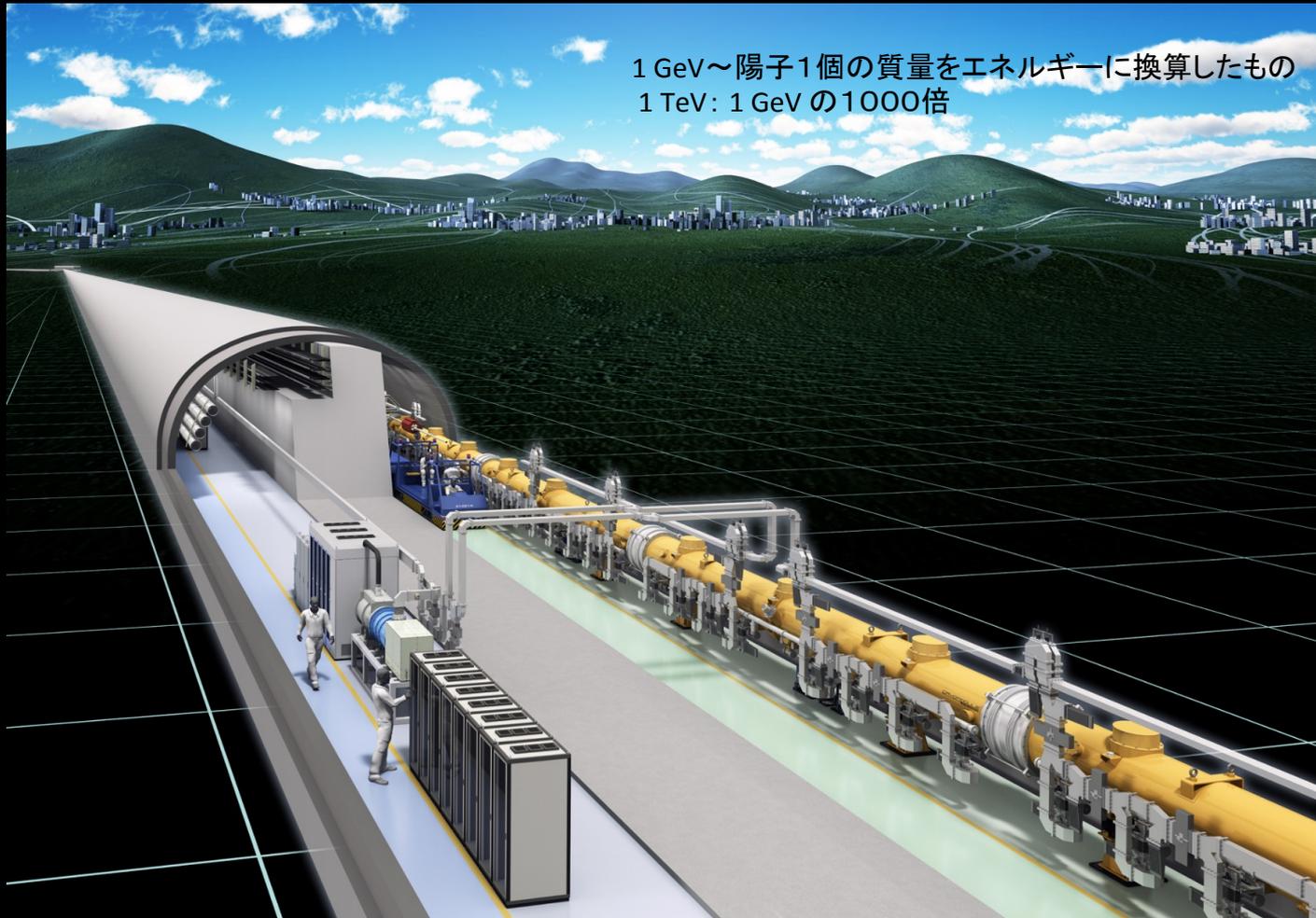
CMS測定器



ILC: 次世代のコライダー実験

電子と陽電子のビームを正面衝突
重心系エネルギー 250~500 GeV

→ 数TeVへのアップグレード可能 (さらにその先へ…)



自発的対称性の破れ(質量獲得)に残る課題

- ヒッグス粒子の発見により **どうやって** 素粒子が質量を獲得したのかが分かった

しかし、ここで満足してはいけない！

標準理論がシンプルだからといって完全に正しい保証はない

まだ説明できていない部分がある

どうして 素粒子が質量を獲得したのかをまだ知らない

ヒッグス場が真空中に凝縮した理由 ヒッグスに「親戚」がいるのか？

- 標準理論の外にある現象と関係している可能性も大いにある
例) 超対称性粒子(→大統一)、暗黒物質、etc....

標準理論に残る謎を解くためにILCで新物理の探索を行う

ILCでの新物理探索の作戦

(1) 新粒子の直接発見

超対称性粒子、暗黒物質などを加速の衝突で生成し測定器で見る
LHCで見つかりにくいものも探索可能

(2) 新物理の間接探索

まずは標準理論の徹底検証（例：ヒッグスやトップクォークの性質の精密測定）
標準理論からのズレのパターンから新物理を発見する

標準理論粒子の精密測定はILCで確実にできる物
→ 新物理に対する強力なアプローチ

これらを達成できるために、
ILCしか持っていないすごいところを色々備えている（次の頁～）

ILCはLHCと力を合わせて相補的に新物理を探索を行う

ILCを建設し、新物理の解明を！

トークの流れ

ILCで宇宙の謎にどうやってせまる？

～素粒子物理と宇宙について～

ILCのすごいところは？

～ILCの能力～

ILCで何がわかるか？

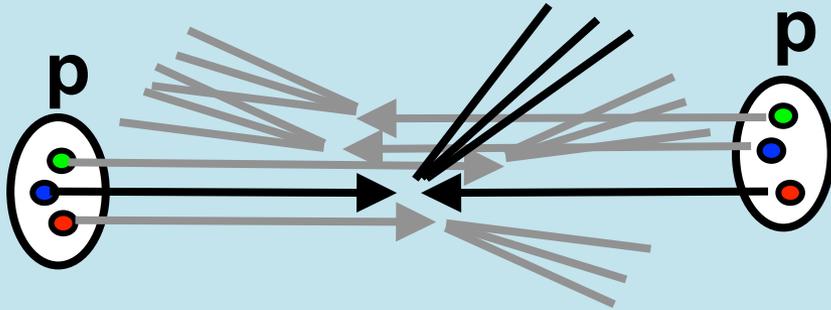
～新粒子発見とヒッグス粒子～

ILCのすごいところの代表例

1. 見たい反応だけ見える (LHCと比較した場合)
2. 反応で生じた粒子をすべて測定できる
→ 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. ビーム偏極を制御できる

LHCとILCの実験環境比較

LHC: 陽子陽子衝突

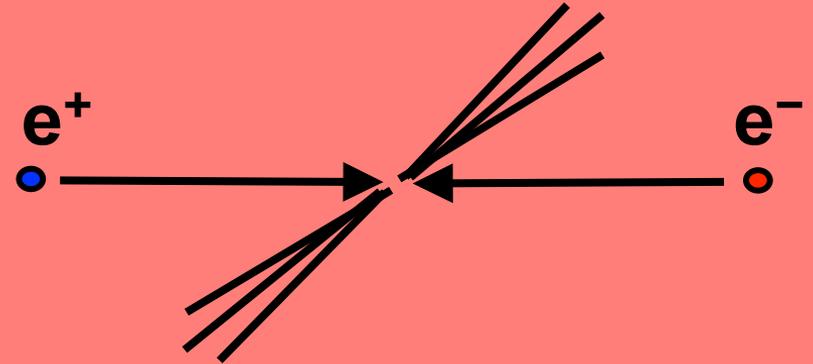


- 高い重心系エネルギー：13000 GeV
- 複合粒子同士の衝突
- 一部のエネルギーが反応に関与する
- 背景事象が多い

メリット： 高いエネルギーに到達して新粒子を発見する

注) 陽子はアップクォーク2つとダウンクォーク1つから構成される

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

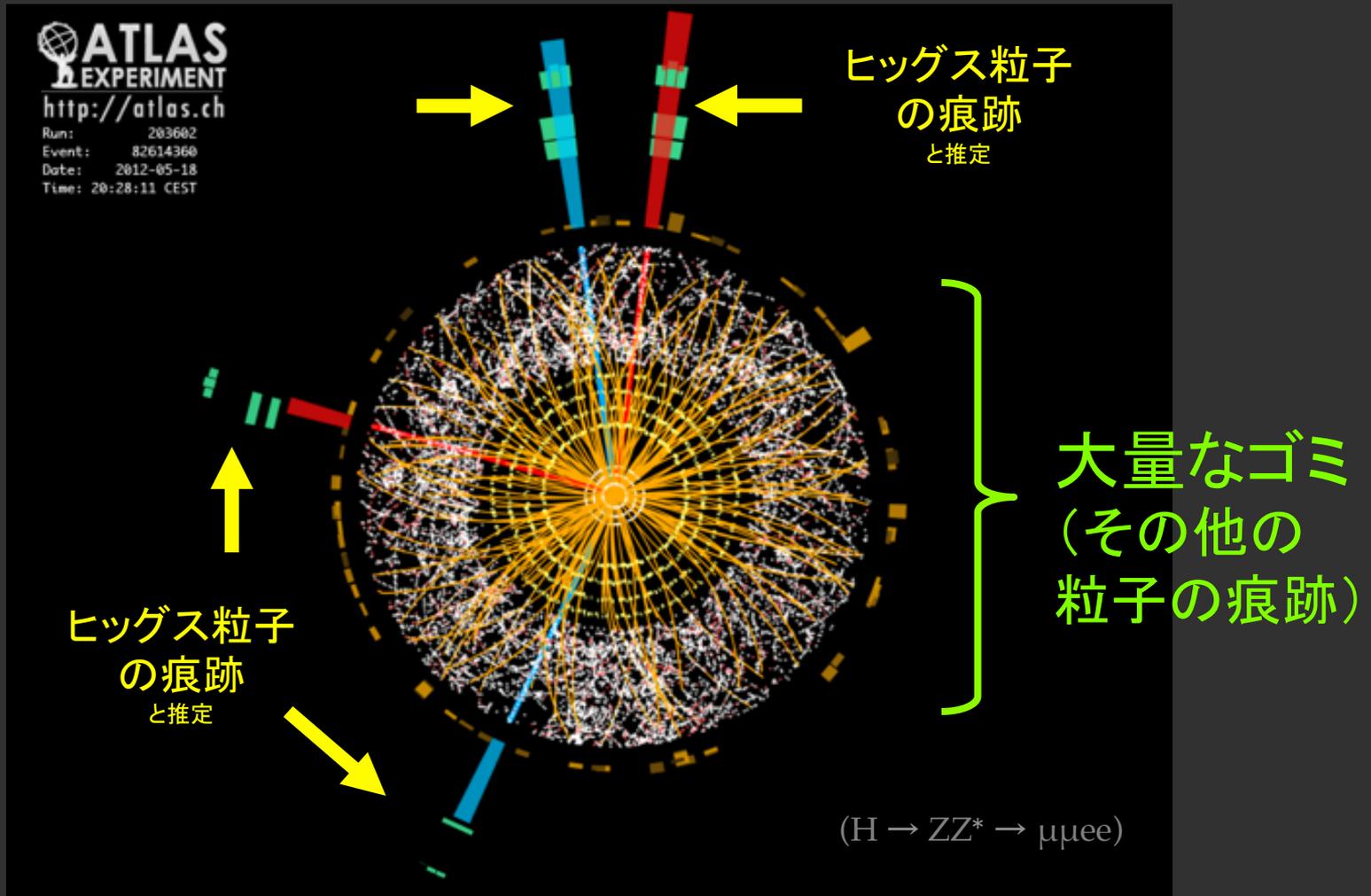
メリット： 綺麗な実験環境で新現象を探索する

背景事象(=ごみ)は観測したい信号以外の事象であり、測定精度の妨げになる

LHCではどのように見えるか？

(測定器の中での1発の反応を解析した図)

背景事象(ごみ)は信号の発見と測定精度の妨げになる



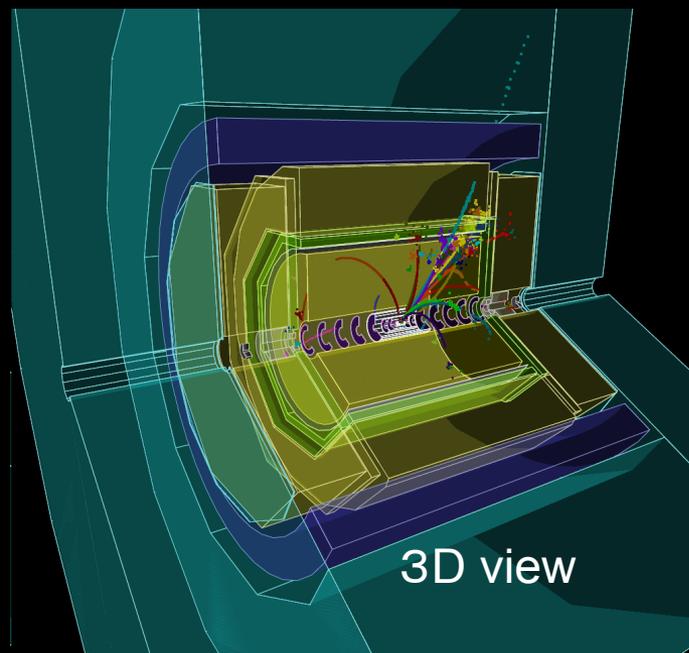
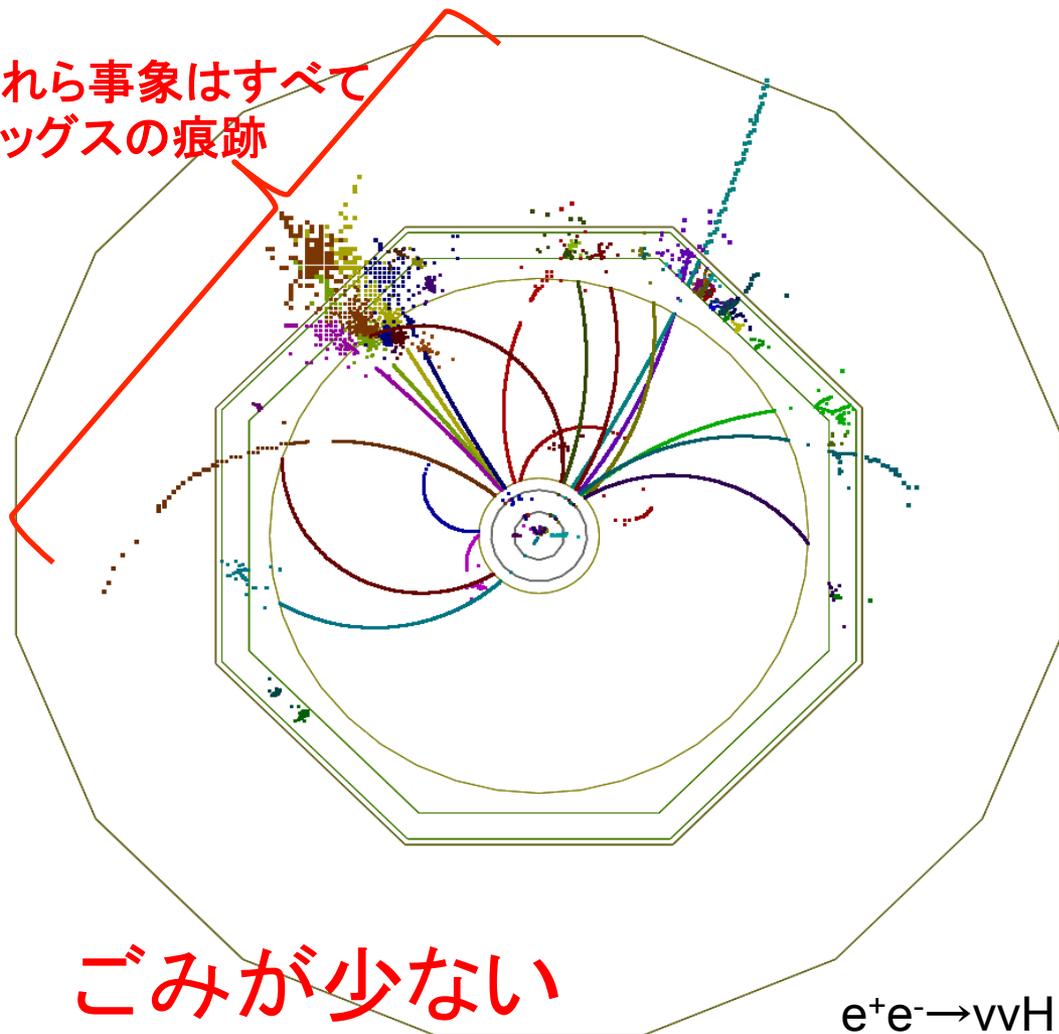
多くのごみの中からヒッグス(あるいは見たい信号)から出たものを捕まえないといけない

すごいところ1: ILCではどのように見えるか?

- 殆ど全てが興味ある反応から出たもの
- 殆ど全てを捕まえられる
- 複雑な反応も徹底的に調べられる

(測定器の中での1発の反応を解析した図)

これら事象はすべて
ヒッグスの痕跡



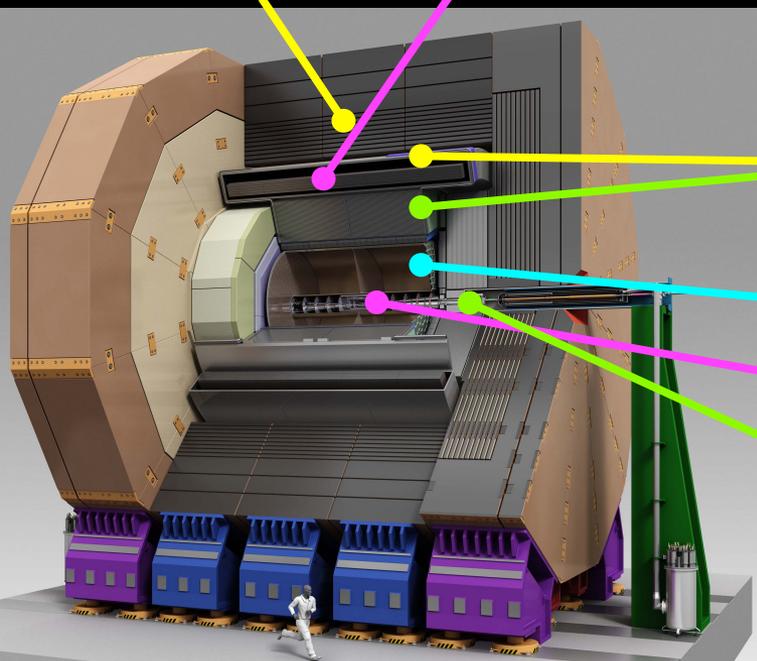
すごいところ 2: 高精細・高性能測定器

International Large Detector (ILD)

世界中の研究者との国際協力を開発を行っている 32カ国、~700人

ミューオン検出器

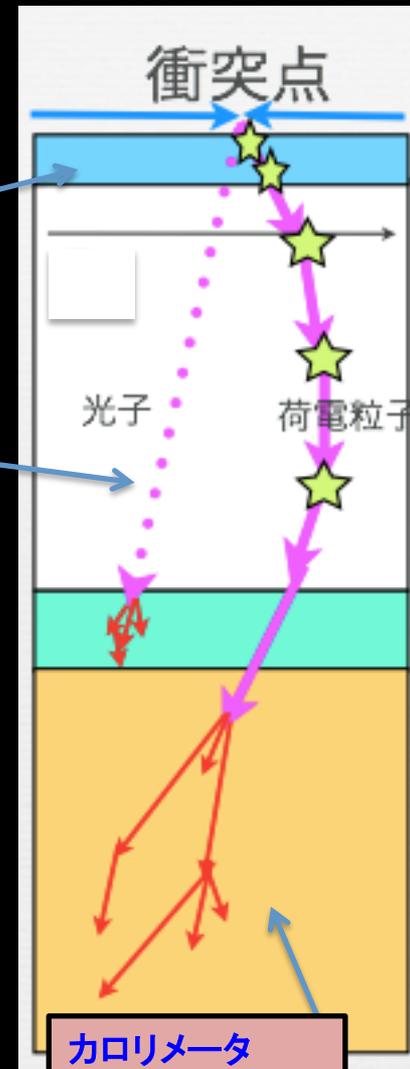
ソレノイド



ILD測定器

崩壊点検出器 : 衝突点付近で短距離走って崩壊する粒子の軌跡を測る

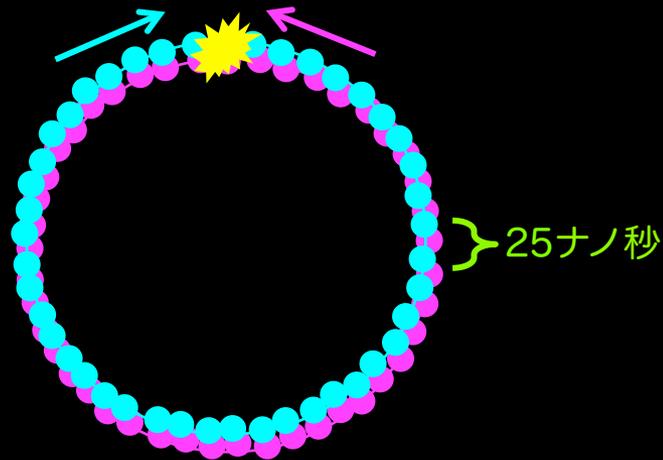
飛跡検出器 : 荷電粒子の運動量測定



カリメータ
エネルギー測定

衝突点を色々な検出器で取り囲み、個々の粒子の性質に最適な検出器で粒子エネルギーを測る
→ 元の物理反応を再構成する

LHC：ビームが次々と衝突



ILC：衝突&休憩の繰り返し



	LHC	ILC
読み出し速度	★★★★	★
放射線耐性	★★★★	★
センサーの数 (細かさ・薄さ)	★	★★★★★

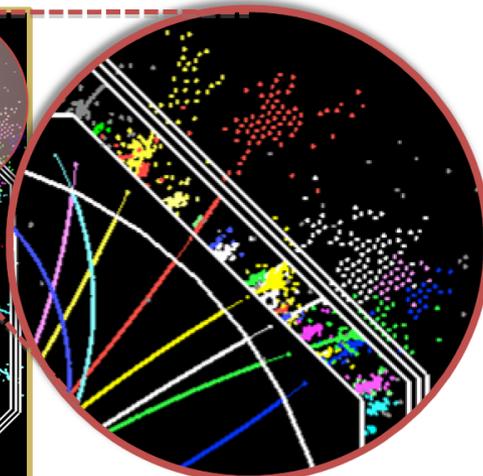
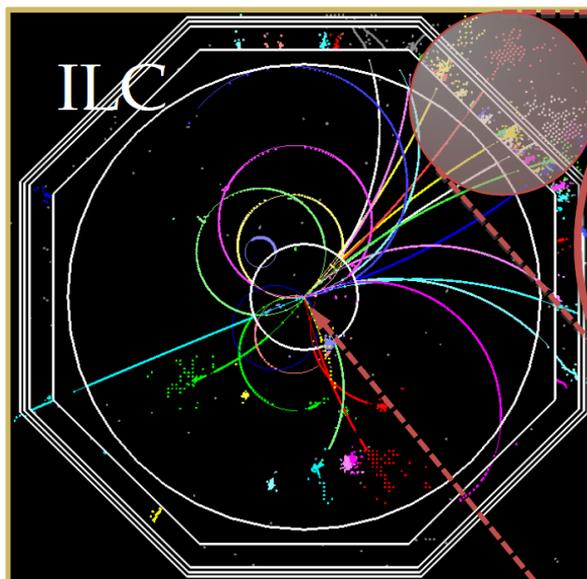
余力あり

ILCでは、読み出し速度と放射線耐性をLHCほど頑張らなくていい分、背景事象の少ない環境で活かせる高精細な測定器をつくる余力がある

ILC測定器

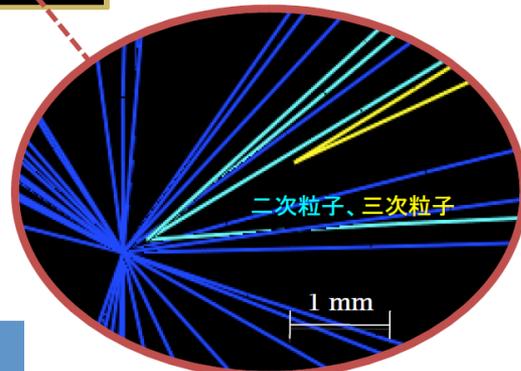
反応の細部を
かつてない精度で
詳細に捕らえる

高精細・高性能な
検出器で実現



ILC:シャワーの個々の
粒子の軌跡を検出

衝突点で生じた、短距離だけ
走って崩壊する粒子の軌跡



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 μm^2	400×50 μm^2	800倍
飛跡検出器	1×6 mm^2	13 mm^2	2.2倍
電磁カロリメータ	5×5 mm^2	39×39 mm^2	61倍

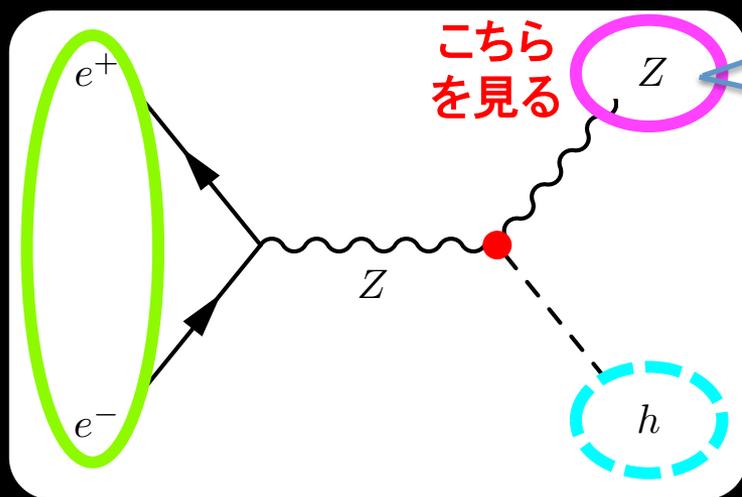
建設コストはLHCと同程度

すごいところ 3: エネルギー・運動量保存

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・運動量保存を物理反応の再構成に使える

例) ヒッグス粒子の生成過程をエネルギー・運動量保存を用いて再構成する

- ヒッグスは測定しにくい・見えない粒子(DM?)に崩壊したらどうする?
- 付随して生成するZ粒子の崩壊物は奇麗に観測できるレプトン対
→レプトン対の運動量のみ測定すればよい



$$P_{e^+e^-} - P_Z = P_h$$

4元運動量

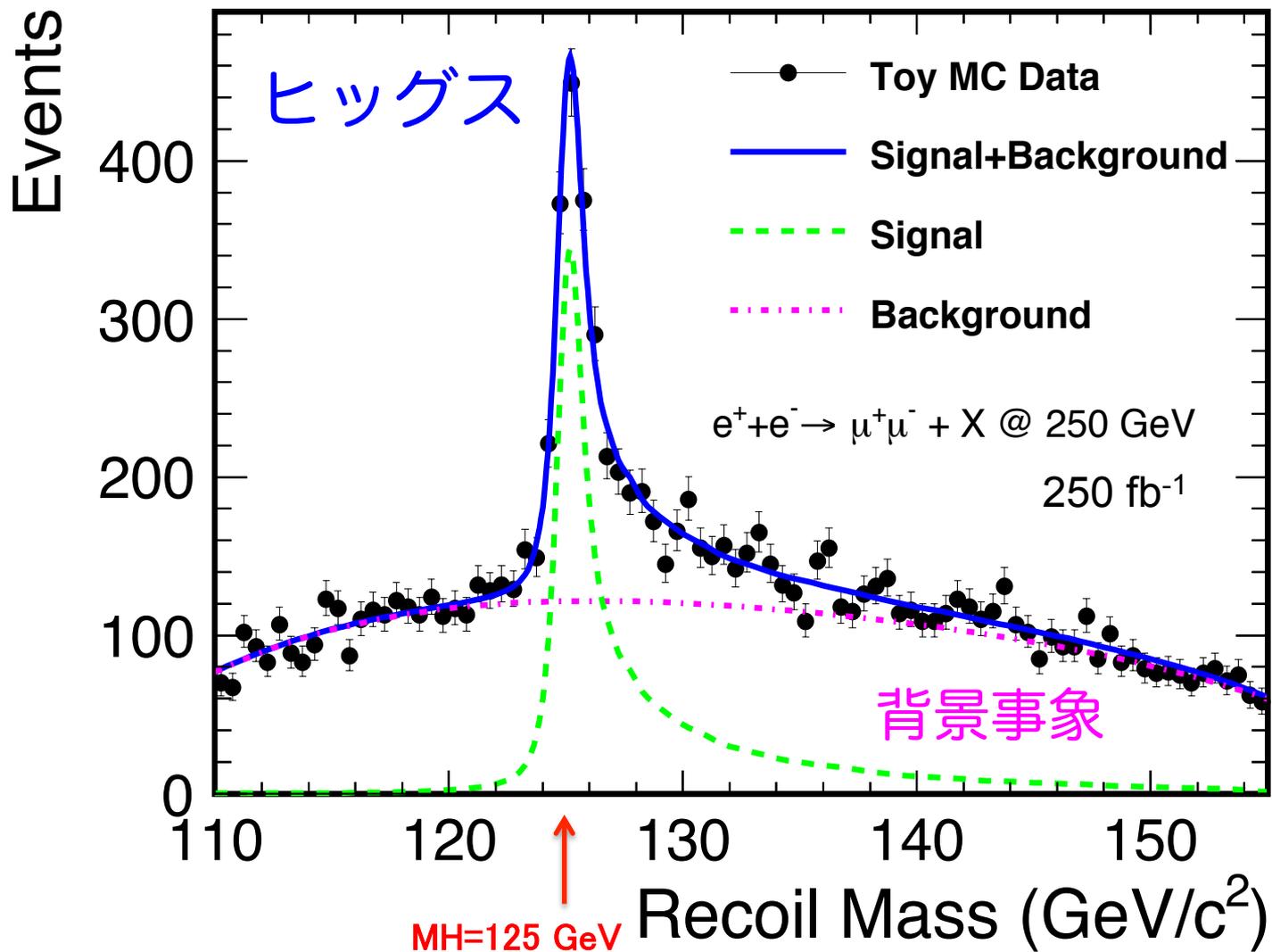
ヒッグスを測定しているのに
ヒッグスを直接見ない

ヒッグス粒子の質量(反跳質量)を計算:

$$m_{\text{recoil}}^2 = (\sqrt{s} - E_{\ell\ell})^2 - |\vec{p}_{\ell\ell}|^2$$

ヒッグスの生成断面積と質量の精密測定

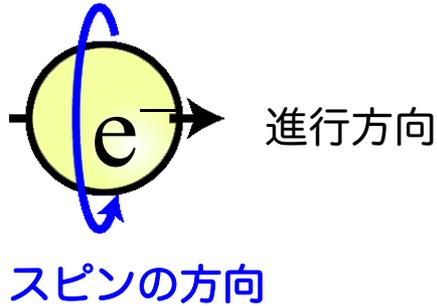
出典 J.Y. et al, arXiv:1604.07524



すごいところ 4: 偏極を制御できる

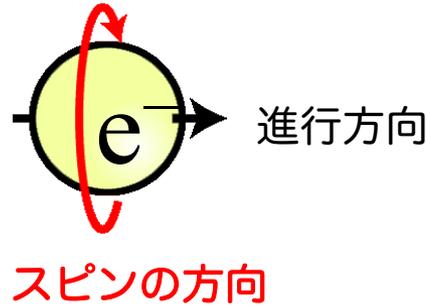
進行方向に対するスピン(自転の角運動量)の向きで右偏極、左偏極が決まる

右巻きスピン (右偏極)



右巻き: スピンと進行方向が平行

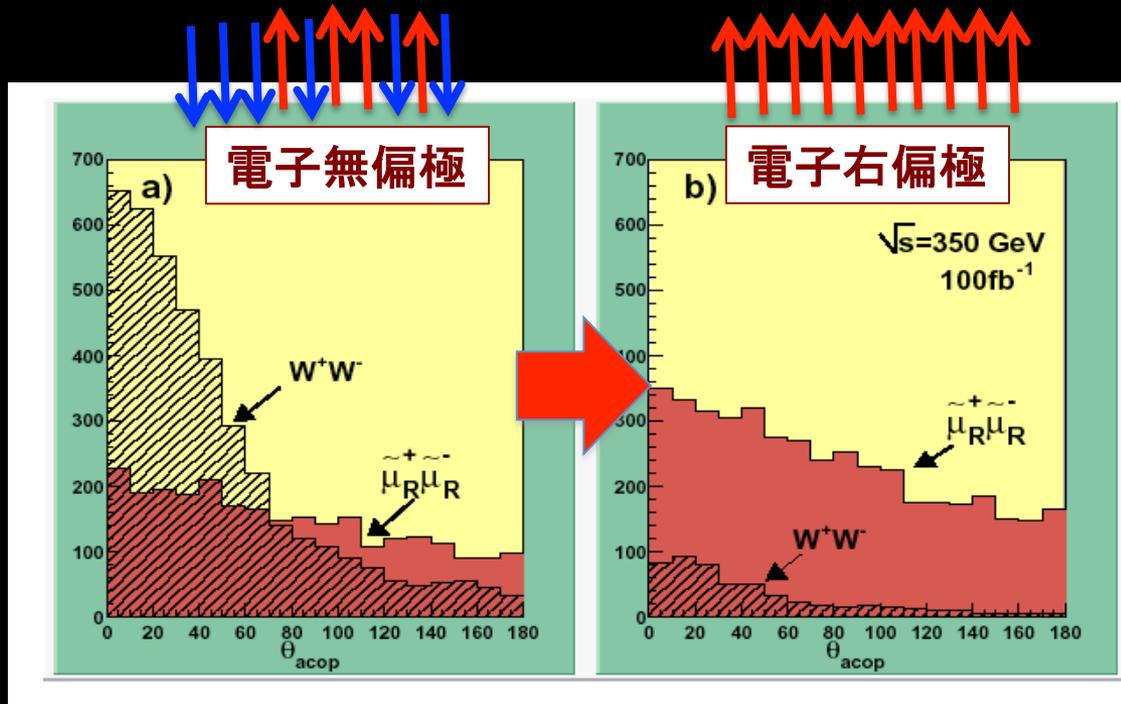
左巻きスピン (左偏極)



左巻き: スピンと進行方向が反平行

ILCでは電子(陽電子)の偏極を制御できる

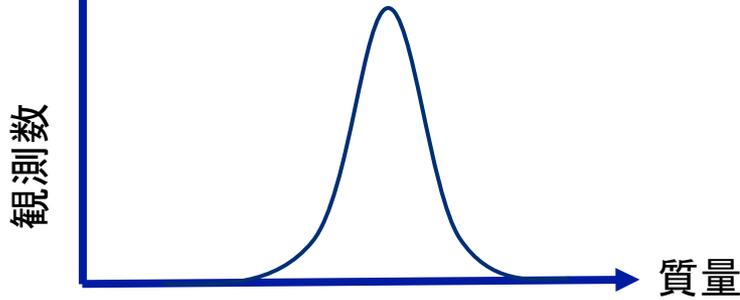
- 物理反応の生成レートを変える
- 特定のプロセスを増やせる
 - 背景事象を減らせる



正体不明の粒子のピークが見つかった

質量は測定されるが...

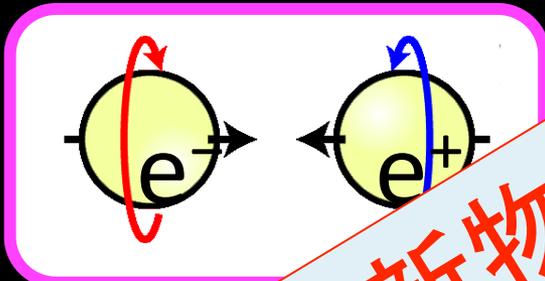
→ この粒子はいったいどういうもの？



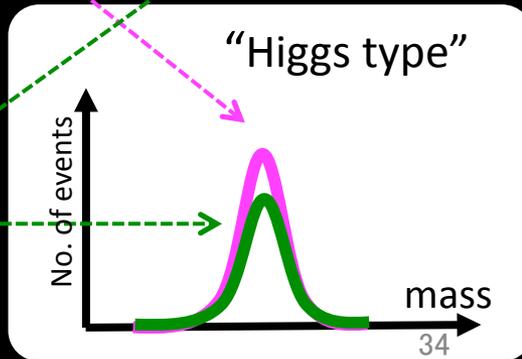
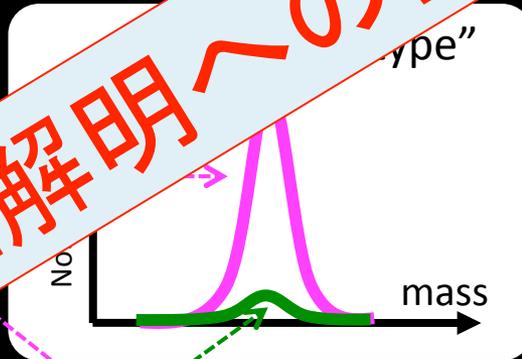
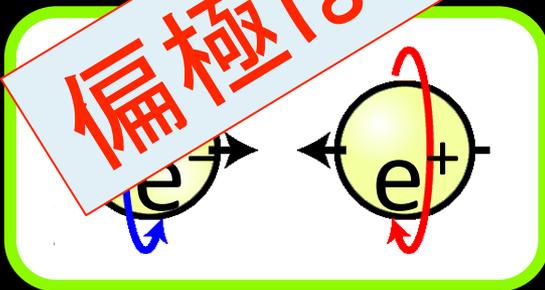
すごいところ 4: 偏極制御の最も重要な

新粒子の性質を推定できる！

左巻き電子・右巻き陽電子



右巻き電子・左巻き陽電子



例：超対称性粒子

- 右・左偏極のときの生成数(観測事象数)を見る
- 粒子の識別が可能

偏極は新物理解明への強力なツール！

トークの流れ

ILCで宇宙の謎にどうやってせまる？

～素粒子物理と宇宙について～

ILCのすごいところは？

～ILCの能力～

ILCで何がわかるか？

～新粒子発見とヒッグス粒子～

ILCの新物理探索の例

精密測定による新物理間接探索

- ヒッグス生成断面積の絶対値測定
- ヒッグス結合定数の精密測定
- トップクォークの電弱結合定数
- トップクォーク質量の精密測定
- トップ湯川結合
- ヒッグス自己結合定数
- W/Z粒子結合定数の精密測定（新しい力の粒子）
- etc.

新粒子の直接探索

- ダークマター
- 超対称性粒子
- etc.

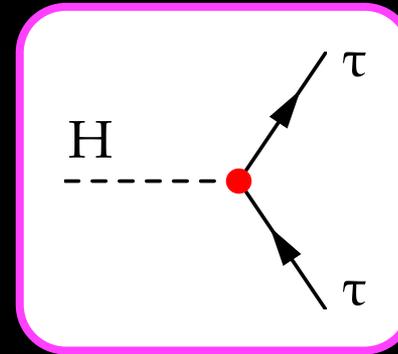
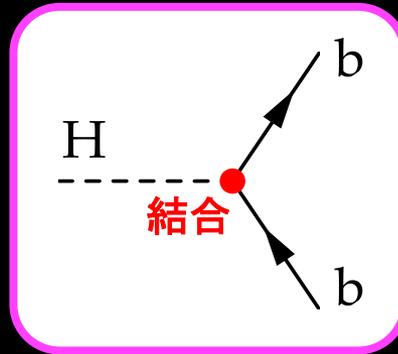
ILCで出来る物理は
直接探索も間接探索も豊富

ここで幾つかの代表例を挙げます

ヒッグス結合定数

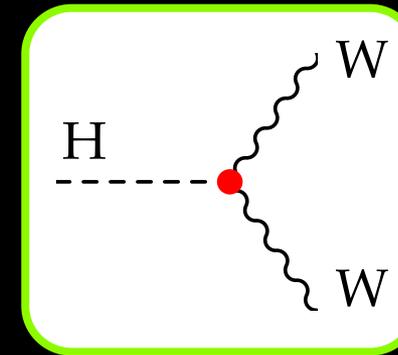
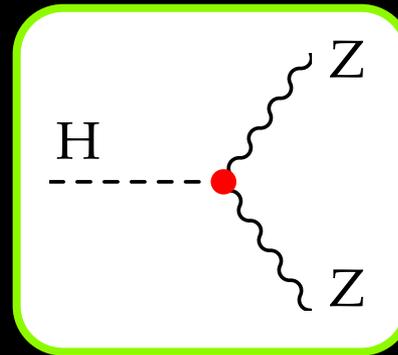
素粒子とヒッグスの相互作用の強さ

物質粒子との結合



etc. ...

ゲージ粒子との結合



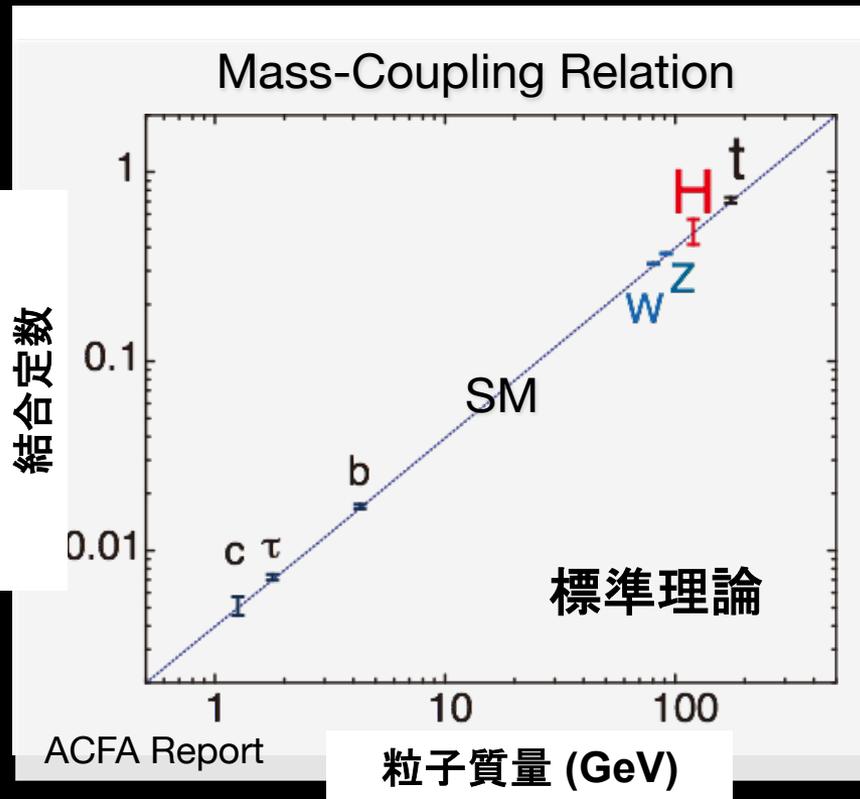
ヒッグスがその粒子へ崩壊する事象を数えて測定する

$$(\text{結合定数})^2 \propto \text{反応の数}$$

ヒッグス結合定数の精密測定

新物理の間接探索 例1

- 標準理論では結合の強さが粒子質量に比例
- 新物理が存在すれば、必ずヒッグス結合定数にズレが生じる



なんだか気持ちわるい？

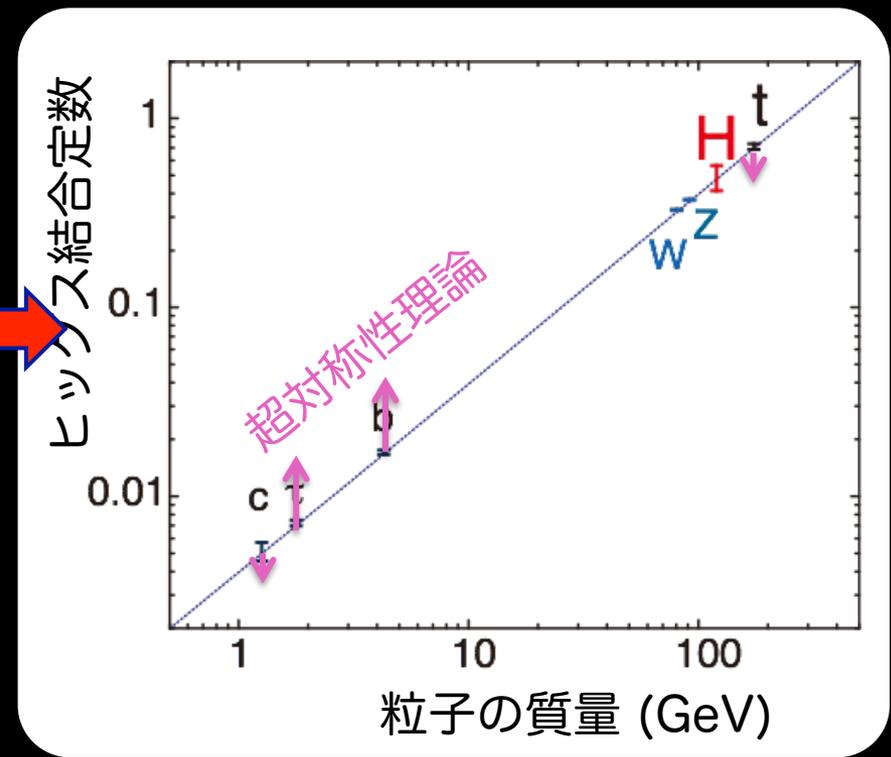
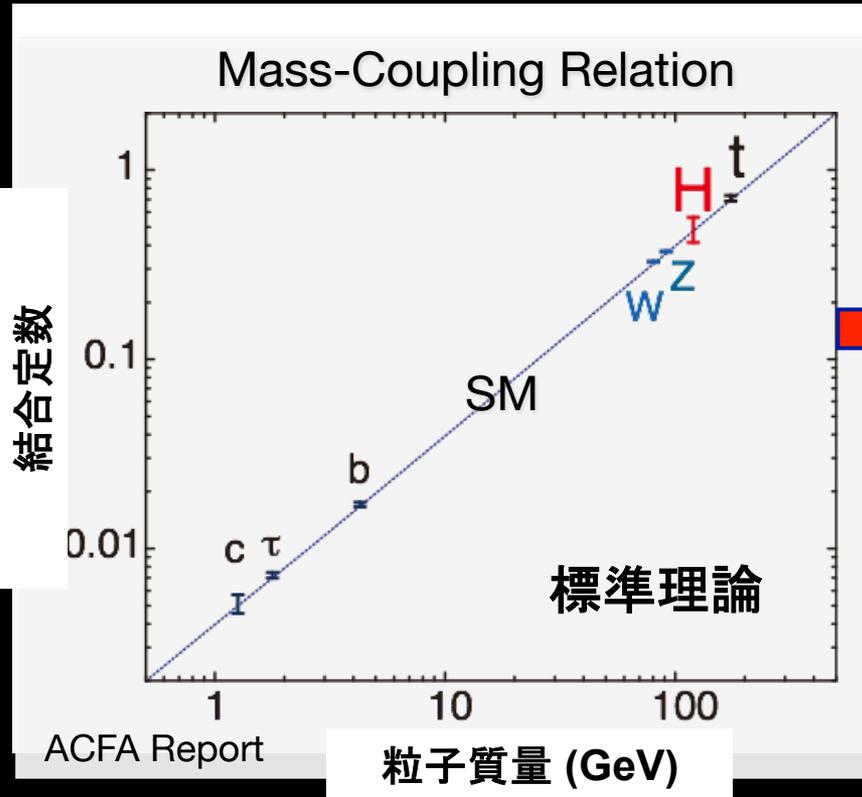
ズレ (= 観測値) の大きさは新物理のモデルと新粒子の質量に依存する
ズレのパターンを精密測定し新物理モデルを識別する

ヒッグス結合定数の精密測定はILCで必ずできる新物理へのアプローチ

ヒッグス結合定数の精密測定

新物理の間接探索 例1

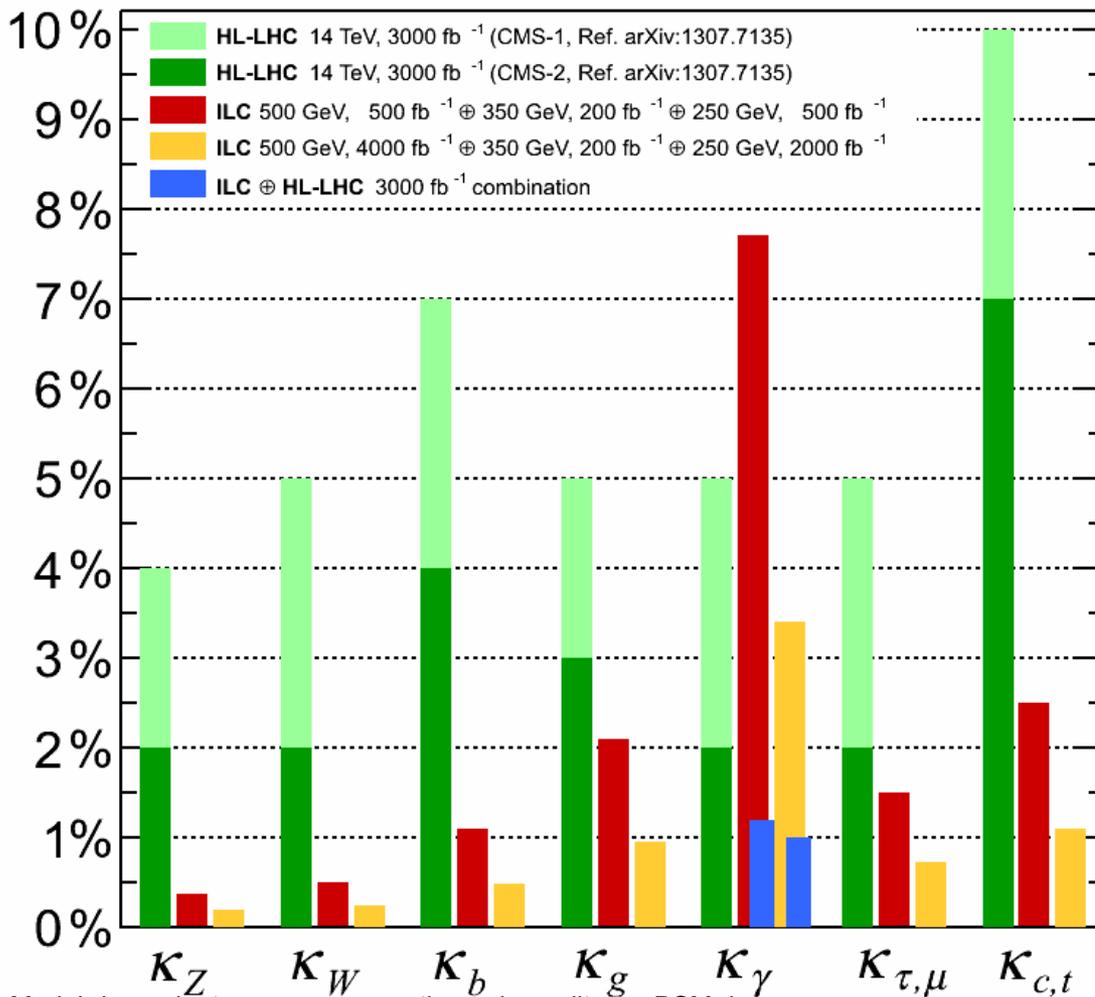
- 標準理論では結合の強さが粒子質量に比例
- 新物理が存在すれば、必ずヒッグス結合定数にズレが生じる



ズレ (= 観測値) の大きさは新物理のモデルと新粒子の質量に依存する
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精密測定はILCで必ずできる新物理へのアプローチ

Projected Higgs coupling precision (7-parameter fit)



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

ILCではLHCを3-10倍
上回る測定精度
(殆どの結合定数は1%より
良い精度1を達成)

- ILCでしかこの精度を達成できない
- ズレを見るためにILCが必須!

小さい ΔM ($< \sim O(10)$ GeV) を持つ軽い超対称性粒子の発見・精密測定は ILC で期待されている

ΔM : 一番軽い粒子(LSP)と2番目に軽い粒子(NLSP)の質量差

研究のモチベーション

❖ 実験の観点から:

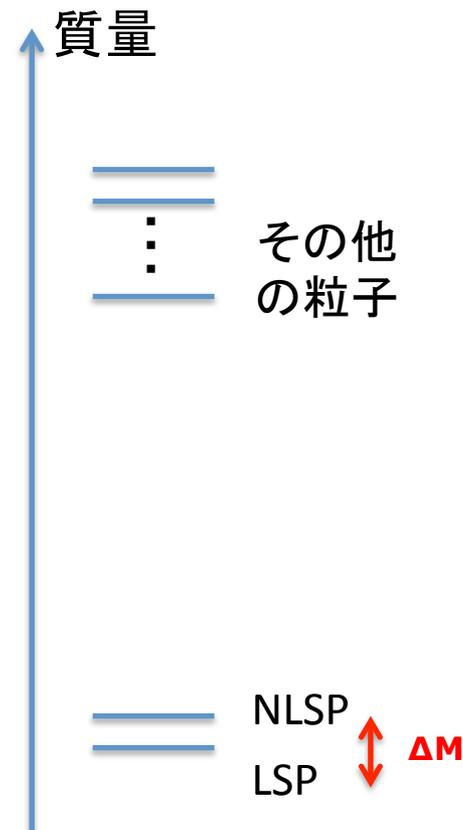
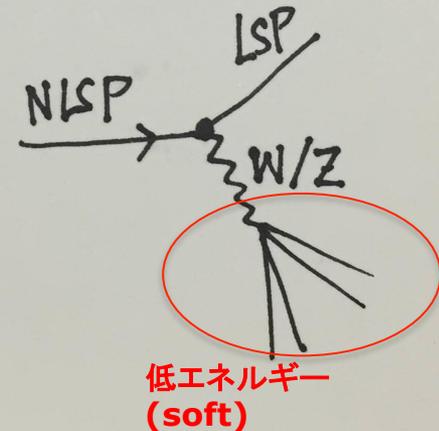
LHCでは既に大きい ΔM 領域が排他されている
小さい $\Delta M \rightarrow$ 「見える信号」の運動量が低い
LHCの大量な背景事象に埋もれる

\rightarrow ILC なら見える!

❖ 理論の観点から:

Naturalness theory:

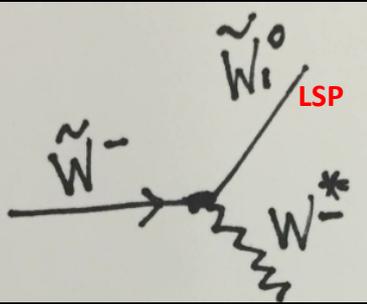
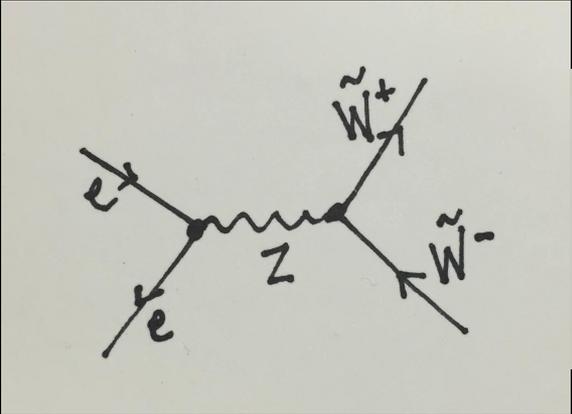
- 軽い超対称性粒子 (Higgsino) の質量はZボソンとヒッグスに近いと预言する ($O(100)$ GeV)
- 一般的に ΔM も小さい



軽い超対称性粒子の直接探索

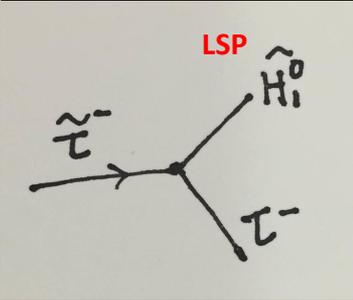
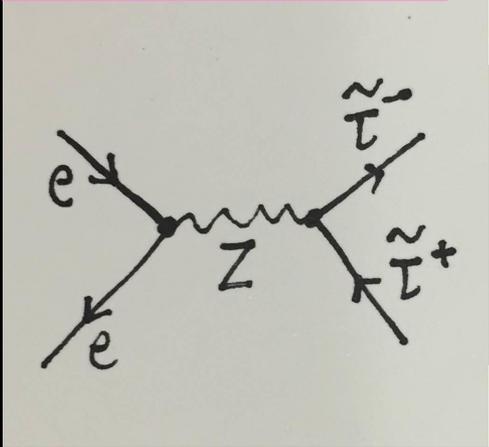
新物理の直接探索

軽いWino の対生成

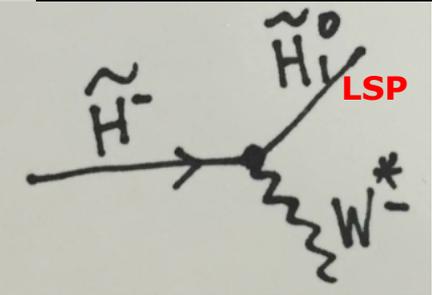
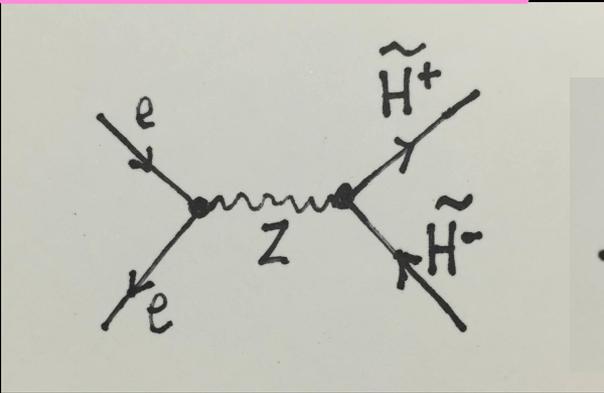


ビーム偏極を駆使して新粒子の性質を解明する

軽い Stau の対生成

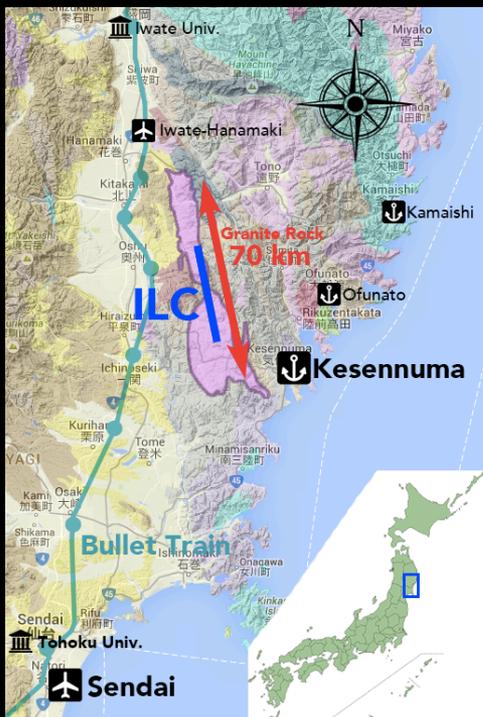


軽い Higgsino の対生成





研究者コミュニティが考えるタイムライン



政府における検討が開始された
国際リニアコライダー(ILC)に関する有識者会議 (2014年5月より)

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/index.htm

今後政府の決定 (予想2~3年) があれば：
準備期間4年程度+建設期間10年程度で完成

岩手・宮城県の北上山地
現場での技術設計が進行中

ILCのまとめ

ILCは世界最前線の電子陽電子コライダー すごいところがたくさん
クリエーターも優秀な検出器、ビーム偏極を制御可能

ILCの物理が定まるのは宇宙初期の高エネルギー反応を再現し調べることにより、
宇宙の創成の謎に挑み、我々の世界の統一的な理解を目指す

新物理探索を通して標準理論の未解決な課題に迫る

- (1) 標準理論の検証を用いた新物理の探索
ILCでしか出来ない精度でヒッグスやW/Zの質量測定を行う
→ 標準理論からのズレを測定して新物理の探索
- (2) 新粒子の直接探索 超対称性粒子 → 力の伝達物質、ダーク物質

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

➤ LHCで新粒子の発見があればILCで精査

軽ければILCで直接測定、重ければ間接測定

LHCで発見がなくてもILCで新粒子発見の可能性はある

ILCでしか出来ないものがたくさんある!!

**本講演の最後に
持ち帰っていただきたい
メッセージが2つあります**

メッセージ その1

我々の宇宙の究極な理解を目指して、
ILCは前代未聞の高精度な物理を提供する

メッセージ その2

このトークを聞いて、ILCに興味を持ち始める方々へ

ちょうど皆さんが研究者になる頃には
最先端の大規模な国際的高エネルギー実験
にその立ち上げから細部まで関わる事ができる

自分の能力を発見する・延ばす素晴らしい機会である

ILCを是非
一緒に実現させましょう！

ご清聴ありがとうございました