素粒子物理とコライダー



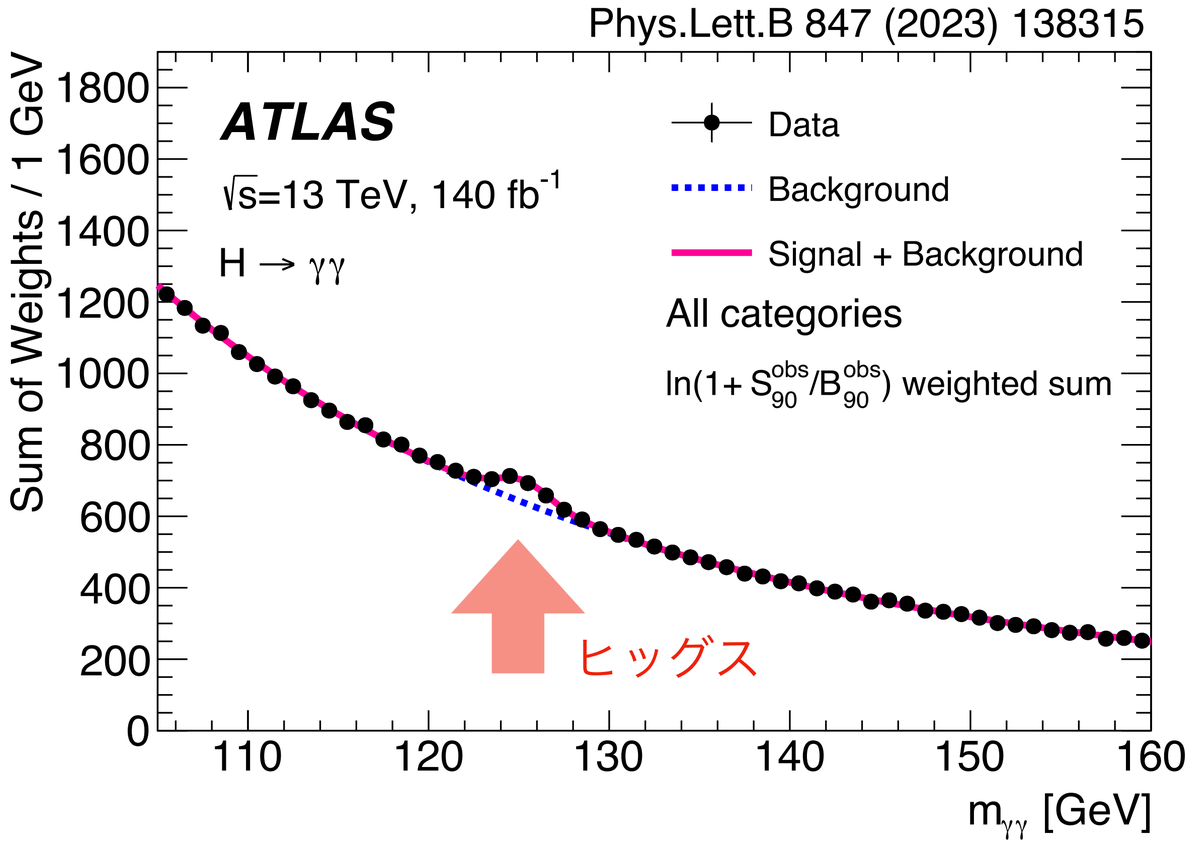
遠藤基 (KEK)

LCWS プリスクール「将来電子・陽電子コライダーの物理と技術」

2026年11月8日　東京大学 本郷キャンパス

Illustration by Olena Shmahalo for U.S. Particle Physics

なぜ「発見済み」の粒子を測り続けるのか



2012年

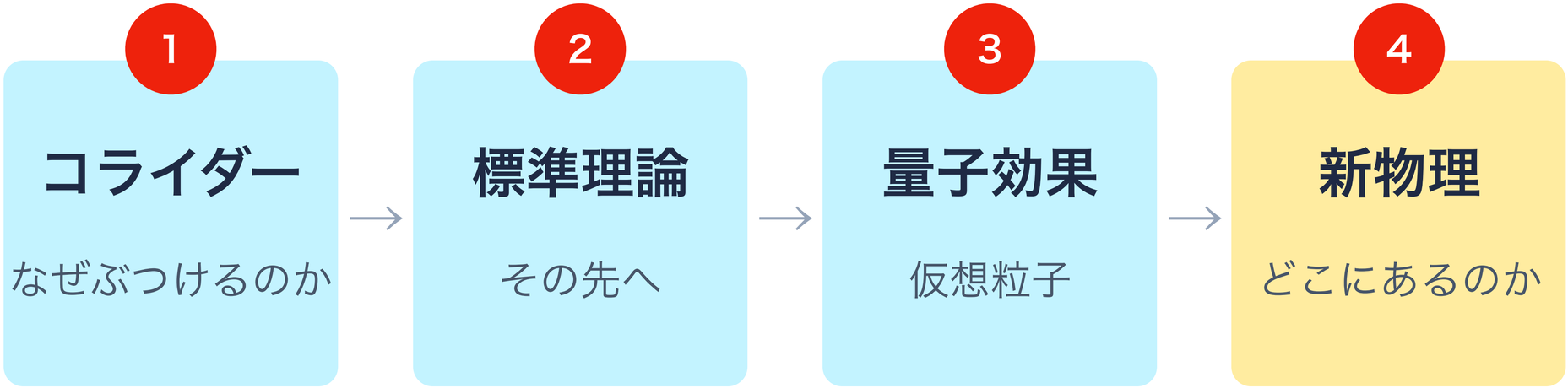
ヒッグス粒子の発見

素粒子標準理論の最後のピースが揃う

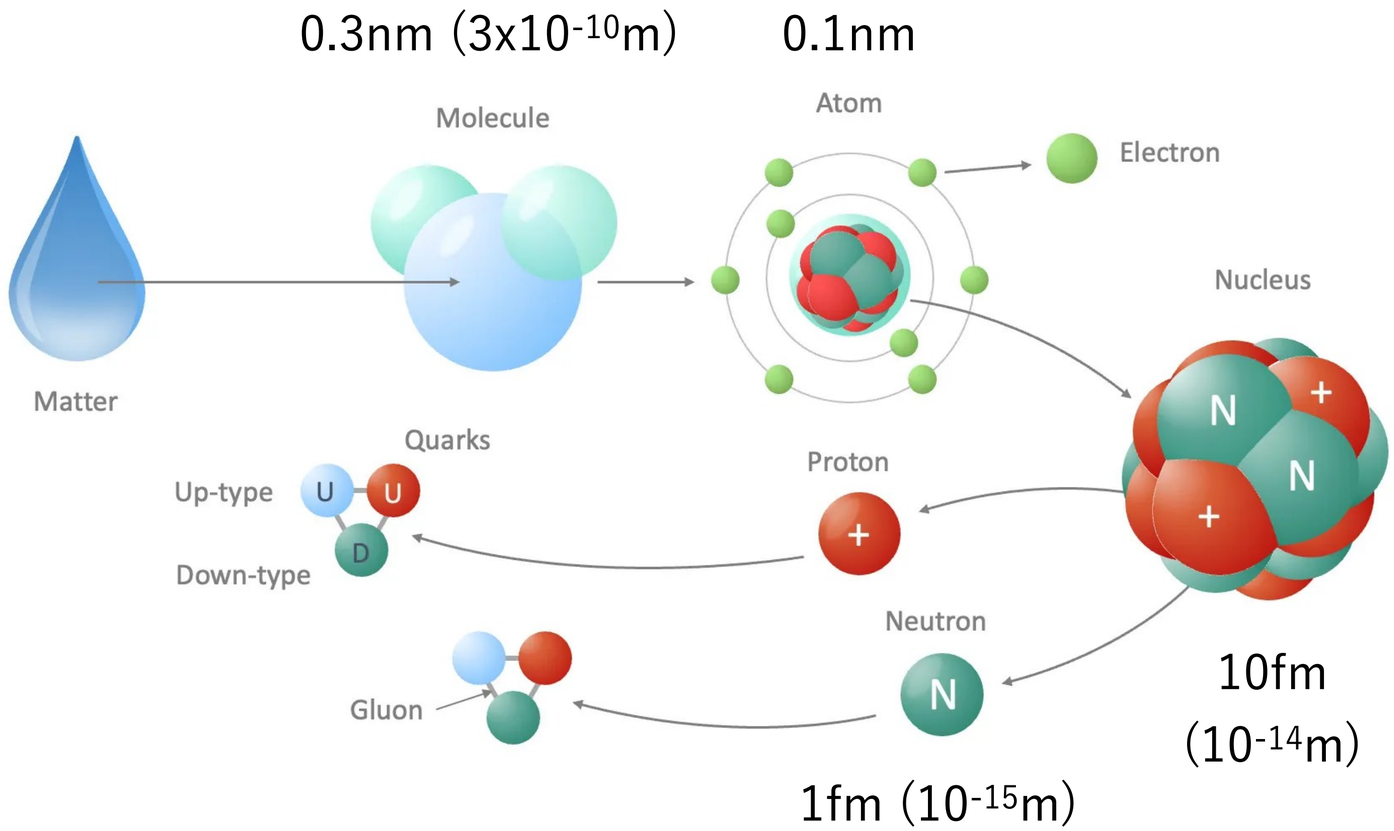
次にやること

ヒッグス粒子の精密測定

今日の講義の流れ



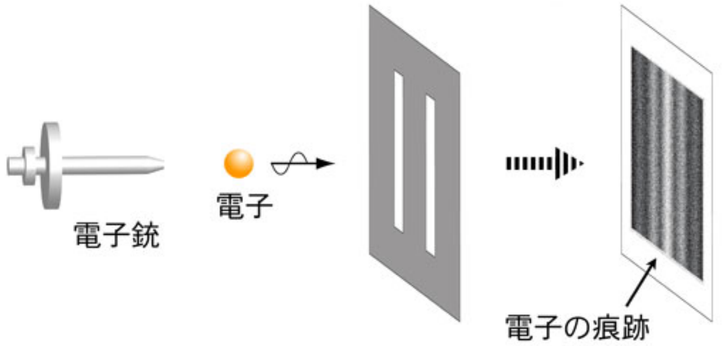
私たちは何からできているのか



量子の世界

ミクロの世界は量子の世界

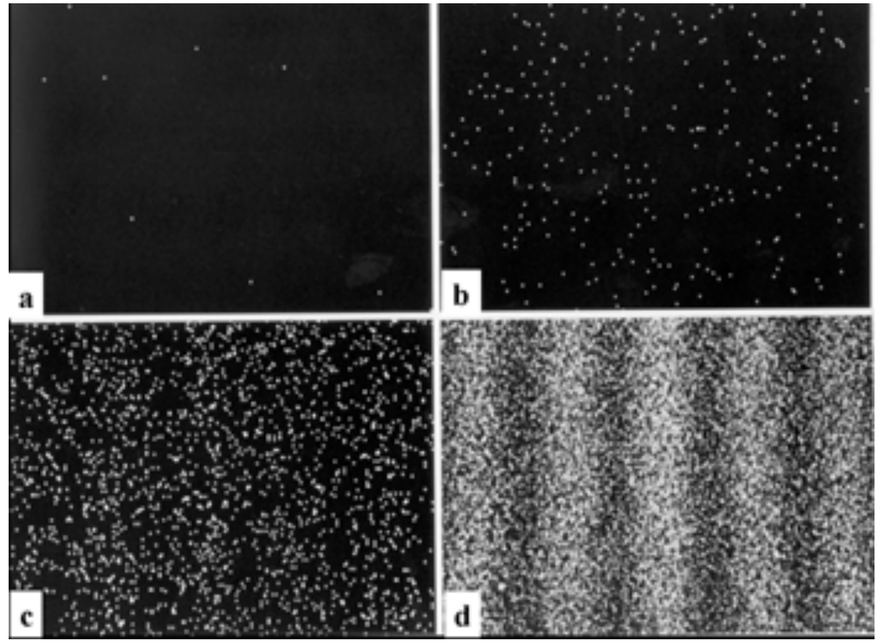
粒子と波動の二重性



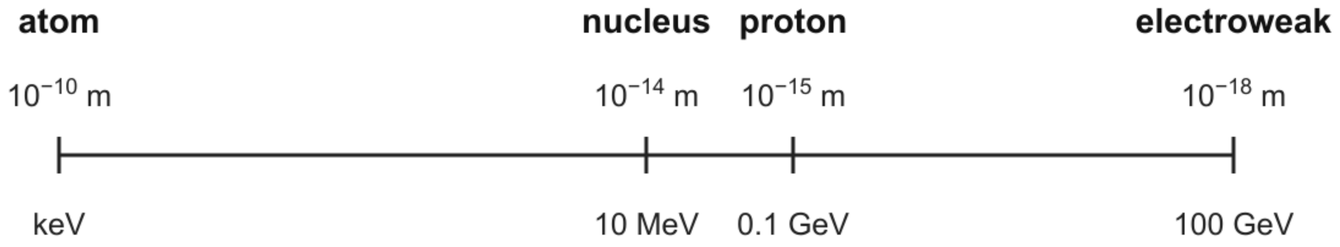
不確定性原理

$$\Delta x \, \Delta p \geq \hbar/2$$

分解能Δxを実現するには$\hbar c/\Delta x$のエネルギーが必要（距離をエネルギーの単位で表す）



cf. Tonomura et al, American Journal of Physics 57,117(1989)



コライダー → 標準理論 → 量子効果 → 新物理

量子の世界

アインシュタインの関係式

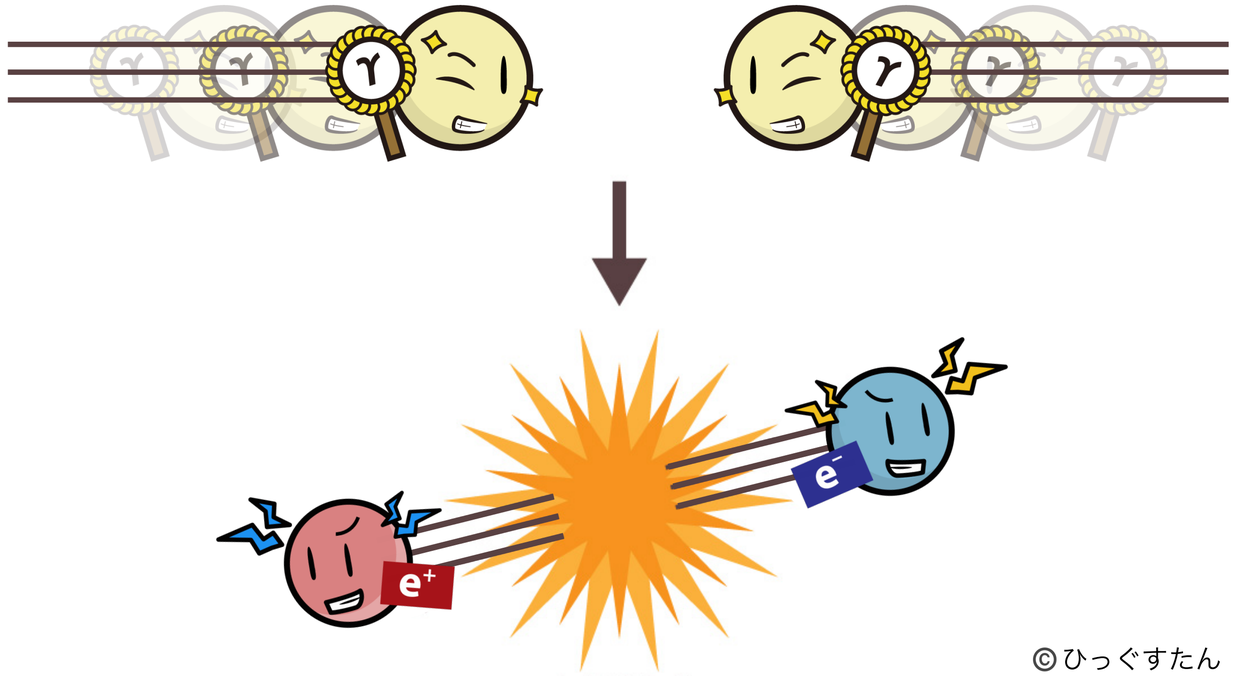
$$E = mc^2$$

粒子からエネルギーが生まれ、エネルギーから粒子が生まれる

分解能Δxを実現するためにエネルギーを上げると新しく粒子がつくられる

例：電子の対生成に必要な最低エネルギー

$$2 \times m_e c^2 \approx 1.022\,\mathrm{MeV}$$



©ひっぐすたん

どれくらいのエネルギーが必要か

$$\gamma(E_1) + \gamma(E_2) \to e^- + e^+$$

$E_1 \neq E_2$　　動いている

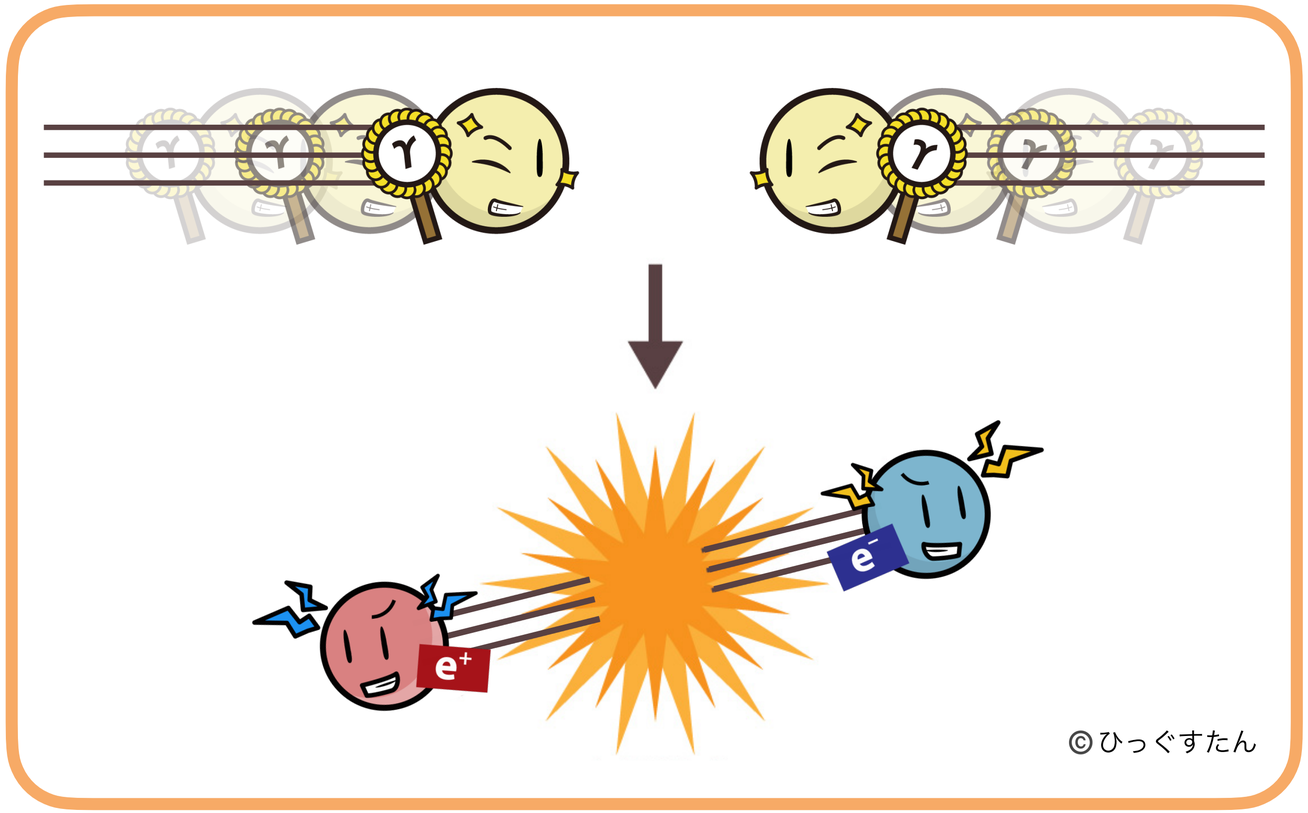
エネルギー・運動量の保存から、光子が正面衝突する場合に反応が進む条件：

$$E_1\, E_2 \geq (m_e c^2)^2$$

例：E_2が可視光 (~1eV) → $E_1 \gtrsim 260\,\mathrm{GeV}$

エネルギーが重心の運動に使われている

* 以下では自然単位系：$c = \hbar = 1$



重心が動いている系

どれくらいのエネルギーが必要か

どれくらいのエネルギーを探索（例えば粒子生成）に使えるのか

運動の系に依存しない量＝ローレンツ変換で不変な量

$$V^\mu = (v_0, \vec{v}) \quad \Rightarrow \quad V^\mu V_\mu \equiv V^2$$

$$s = (p_1 + p_2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

sは反応の前後で保存する

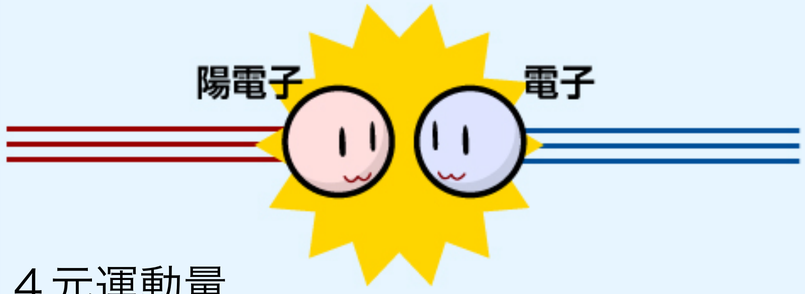
参考：前ページの例（光子が正面衝突して電子・陽電子対を作る場合）

始状態　$p_1 = (E_1, E_1\vec{n})$　$p_2 = (E_2, -E_2\vec{n})$

$$s = (p_1 + p_2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - (E_1 - E_2)^2 = 4E_1E_2$$

終状態　$s = (p_{e^-} + p_{e_+})^2 \geq (2m_e)^2 \qquad \therefore \ E_1\,E_2 \geq m_e^2$

反応が進む条件



４元運動量

$p_1 = (E_1, \vec{p}_1)$　　$p_2 = (E_2, \vec{p}_2)$

©ひっぐすたん

なぜ固定標的ではなく、粒子同士を衝突させるのか

固定標的に高エネルギー粒子をぶつける

$$p_1 = (E_1, E_1\vec{n}),\ p_2 = (M_{\mathrm{target}}, \vec{0})$$

$$\begin{aligned} s &= (E_1 + M_{\mathrm{target}})^2 - (E_1 - 0)^2 \\ &= 2E_1 M_{\mathrm{target}} + M_{\mathrm{target}}^2 \end{aligned}$$

$2E_1M_{\mathrm{target}}$より十分に小さい

$$\sqrt{s} \approx \sqrt{2E_1 M_{\mathrm{target}}}$$

例：7TeVビームを静止陽子にぶつける場合

$$\sqrt{s} \approx 115\,\mathrm{GeV}$$

エネルギーの大部分が重心の運動に使われている

高エネルギー粒子同士をぶつける

$$s = (p_1 + p_2)^2 = (2E_{\mathrm{beam}})^2$$

同じエネルギーの
粒子をぶつける場合

$$\sqrt{s} = 2E_{\mathrm{beam}}$$

例：7TeVのビーム同士をぶつける場合 (cf. LHC)

$$\sqrt{s} = 14\,\mathrm{TeV}$$

衝突エネルギーを効率よくミクロな反応の
探索（例：粒子生成）に使える

* 固定標的実験にも高い事象数を得られるなどのメリットがある

素粒子の標準理論

自然界にある基本的な素粒子と、それらの間に働く3つの力（相互作用）を説明する現代物理学の基本理論

「20世紀の物理学の到達点」

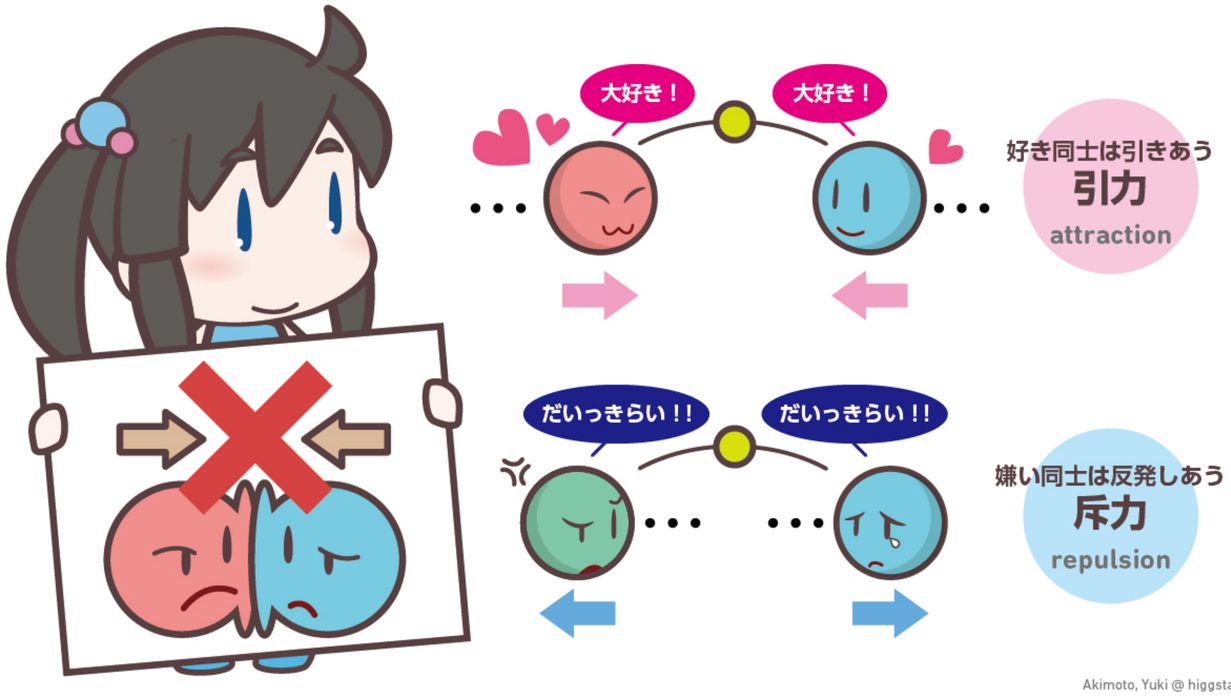
「人類の知の最高傑作のひとつ」



©ひっぐすたん

素粒子に働く力

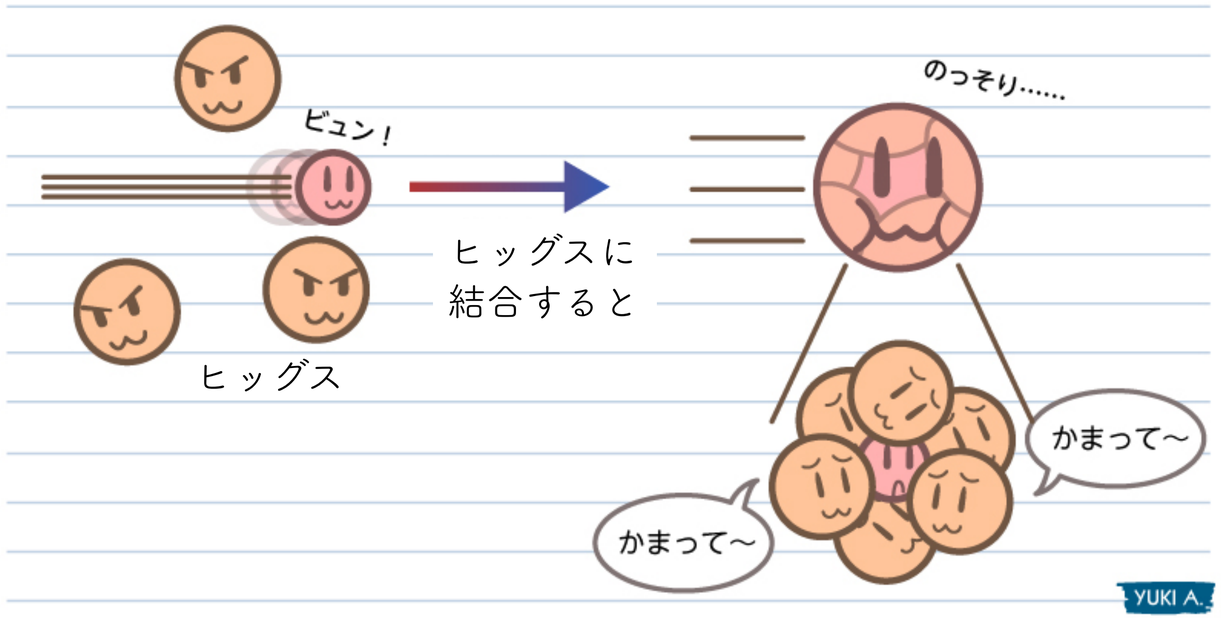
素粒子はお互いにゲージ粒子を放出・吸収して交換することで引力や斥力を感じる



素粒子の質量

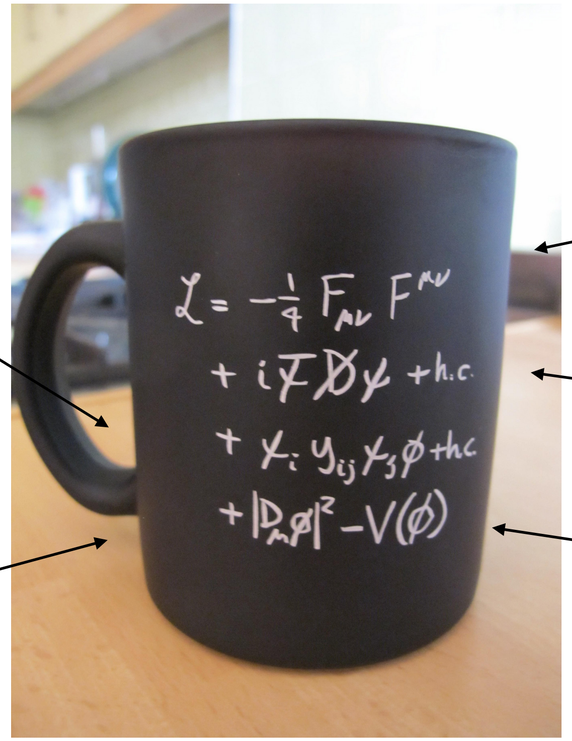
ヒッグスと結合することで質量をもつようになり、結合の強さで重さが決まる

（ただし陽子・中性子の質量の大部分は強い相互作用に由来）



©ひっぐすたん

素粒子のダイナミクス



ゲージボソンの運動項と相互作用

フェルミオンとヒッグスの相互作用

フェルミオンの運動項、
フェルミオンとゲージボソン
の相互作用

ヒッグスの運動項、
ヒッグスとゲージボソン
の相互作用

ヒッグスのポテンシャル

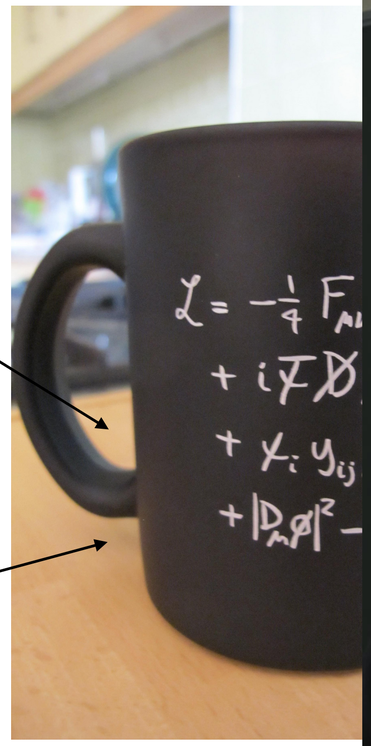
CERNで売っているマグカップ

https://www.quantumdiaries.org/2011/06/26/cern-mug-summarizes-standard-model-but-is-off-by-a-factor-of-2/

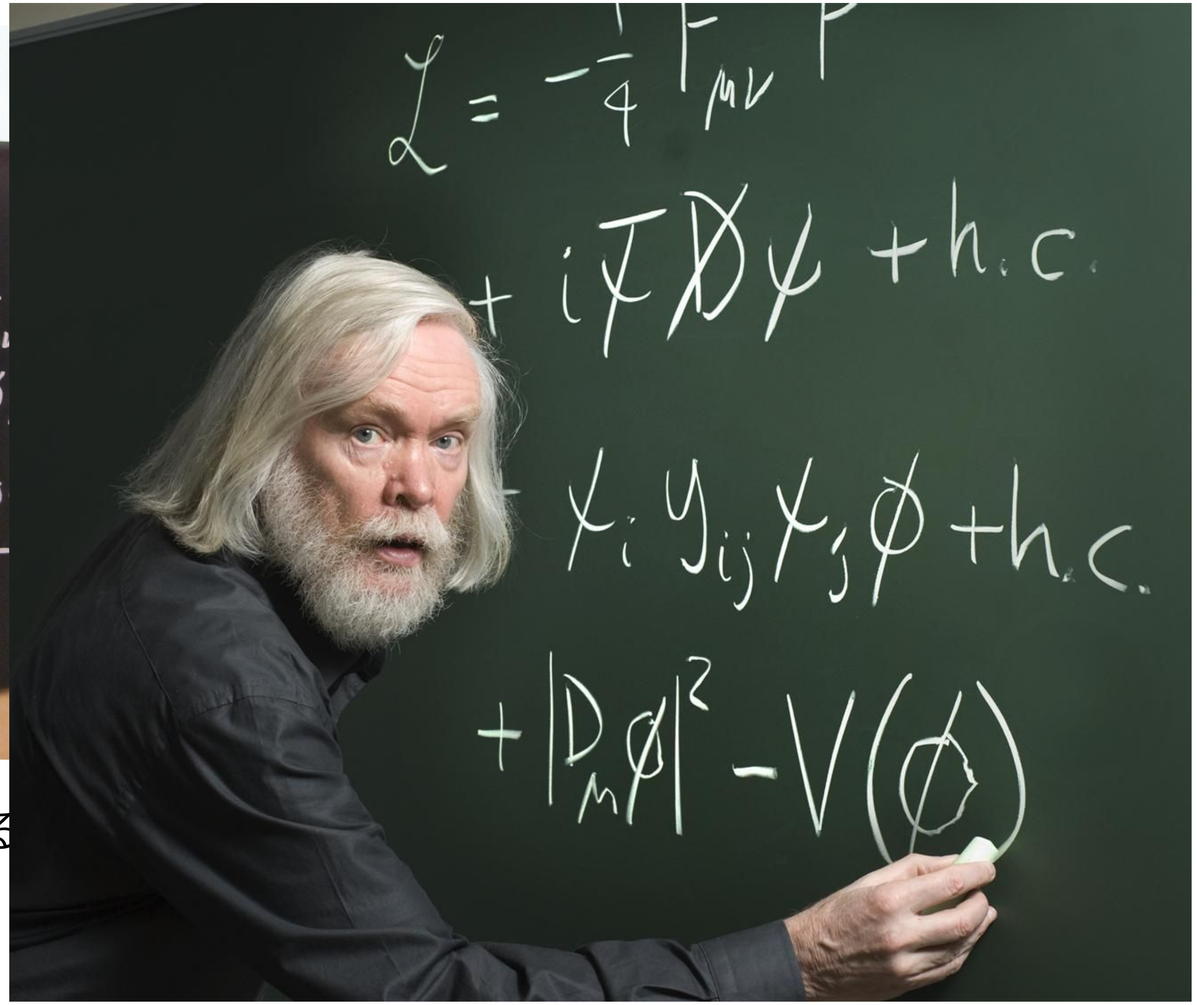
素粒子のダイナミクス

フェルミオンとヒッグスの相互作用

ヒッグスの運動項、
ヒッグスとゲージボソン
の相互作用



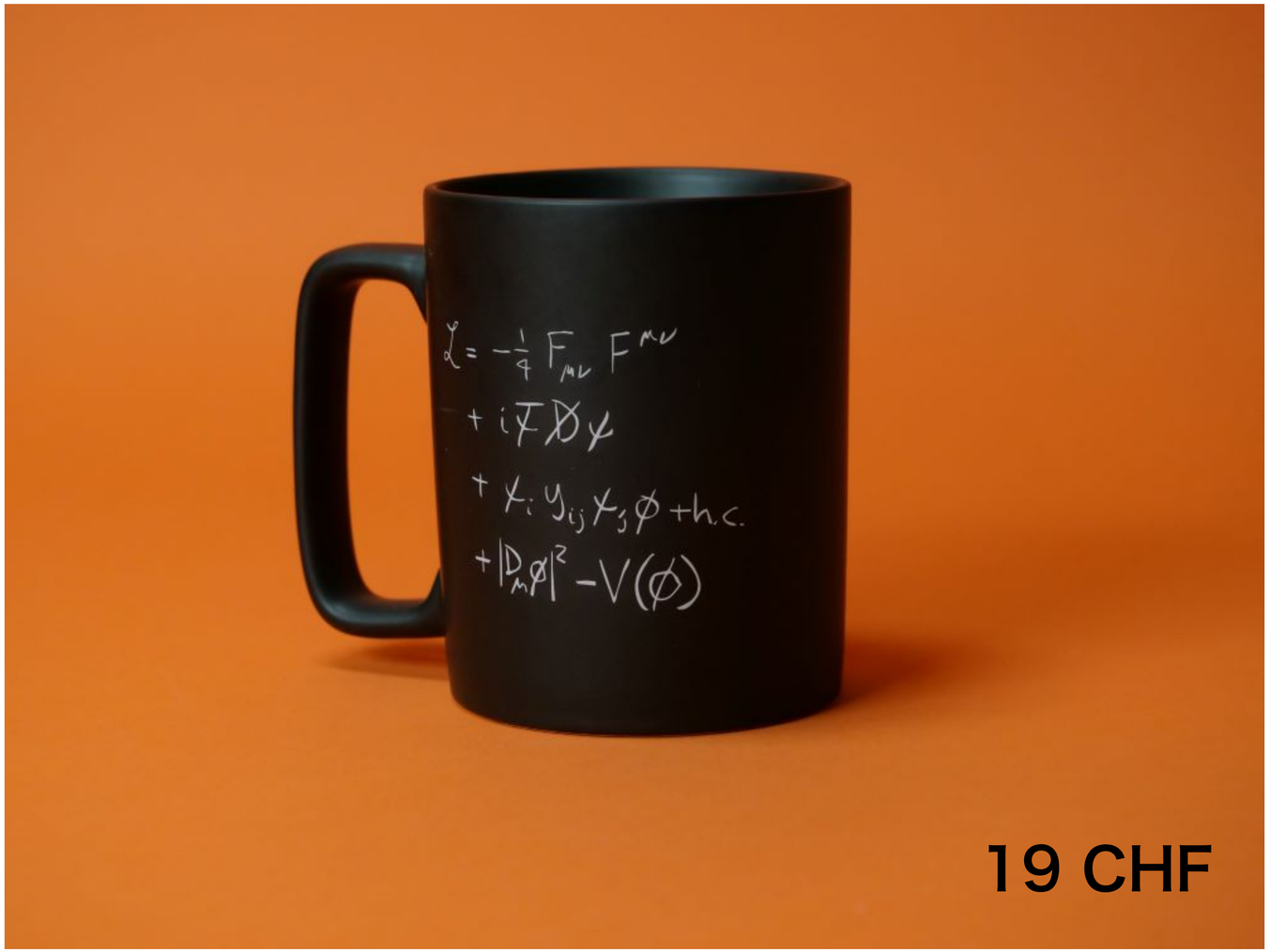
CERNで売っている



https://www.quantumdiaries.org/2011/06/26/cern-mug-summarizes-standard-model-but-is-off-by-a-factor-of-2/

©CERN

素粒子のダイナミクス



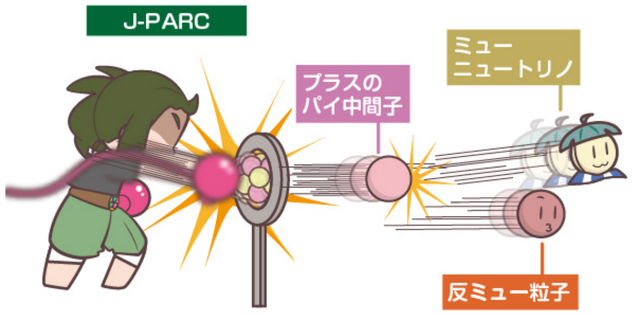
©CERN

その先に何があるのか

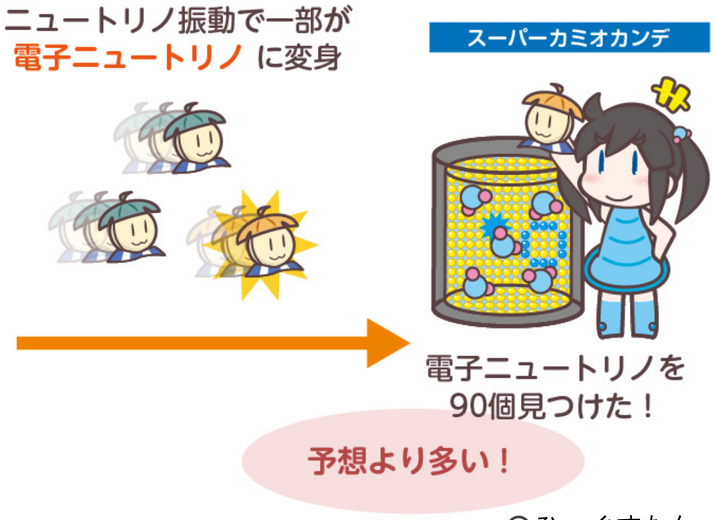
「もうすべてがわかった？」標準理論が確立したことで、その限界も見えてきた。

標準理論ではニュートリノに質量がない ↔ ニュートリノ振動の発見

例：T2K実験



陽子パンチを1.49×10^{21}回して
作った ミューニュートリノ



©ひっぐすたん

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U^*_{\alpha i} |\nu_i\rangle$$

フレーバー
固有状態

質量（エネルギー）
固有状態

Uαi: PMNS行列

$$\begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{bmatrix}$$

フレーバー固有状態 → 質量固有状態 → フレーバー固有状態

その先に何があるのか

「もうすべてがわかった？」標準理論が確立したことで、その限界も見えてきた。

宇宙の始まりは素粒子の世界

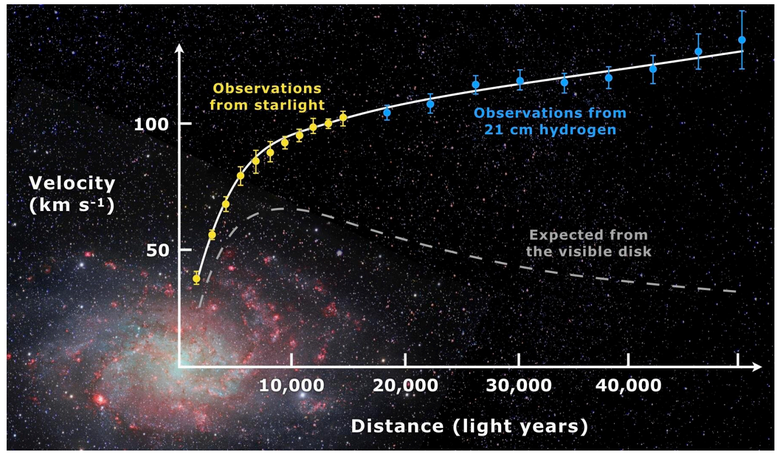
過去の宇宙は高温・高エネルギー
すべての物体はバラバラになり、素粒子になるまで
分解されて飛び交っていた

⇩

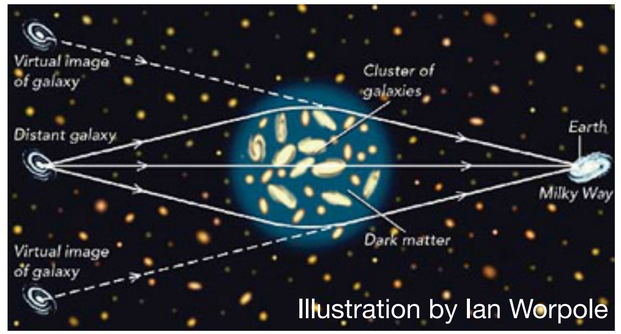
宇宙の暗黒物質の正体は？

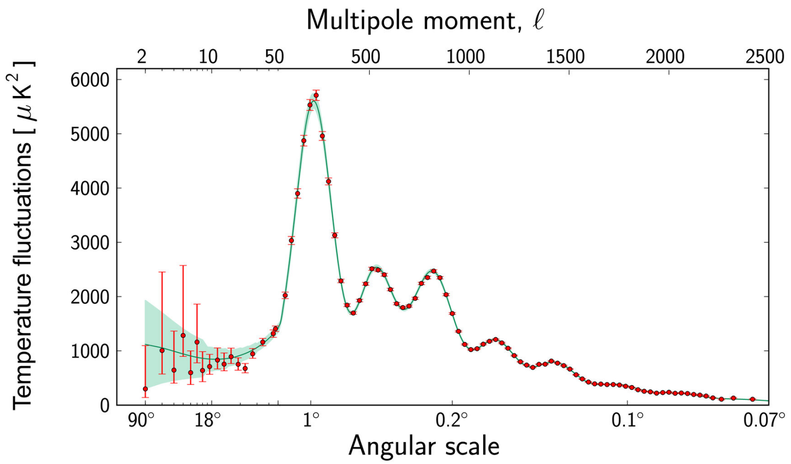
現在の宇宙にあるバリオン数の起源は？

など、標準理論では説明できないナゾ

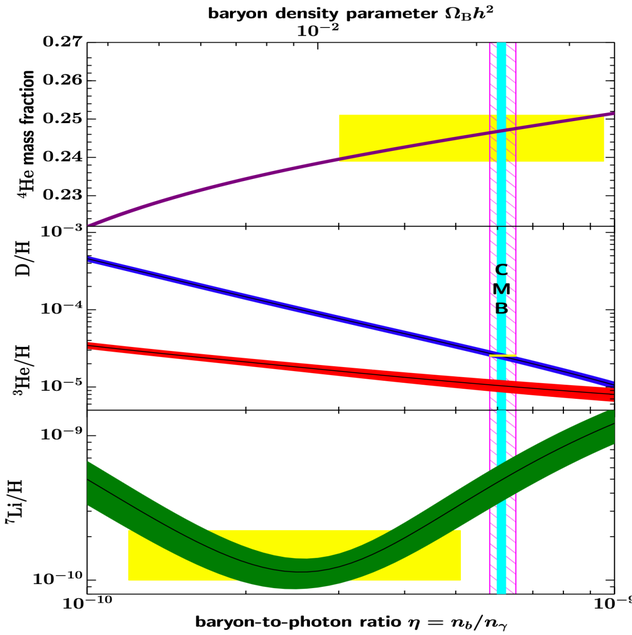


©Astronomy: Roen Kelly. M33: ESO





©ESA and the Planck Collaboration



©Particle Data Group

コライダー → **標準理論** → 量子効果 → 新物理

その先に何があるのか

「もうすべてがわかった？」標準理論が確立したことで、その限界も見えてきた。

ヒッグス粒子

多くのナゾがヒッグスに関係している

標準理論のエネルギースケールを決めている

→ なぜ標準理論は100GeVスケールにあるのか？

素粒子の質量やフレーバー混合を決めている

→ なぜ電子はとても軽くて、トップクォークは重いのか？

他にもたくさんのナゾ

多くの新物理シナリオはこれらの疑問に答えようとしてきた



©ひっぐすたん

なぜ「発見済み」の粒子を測り続けるのか

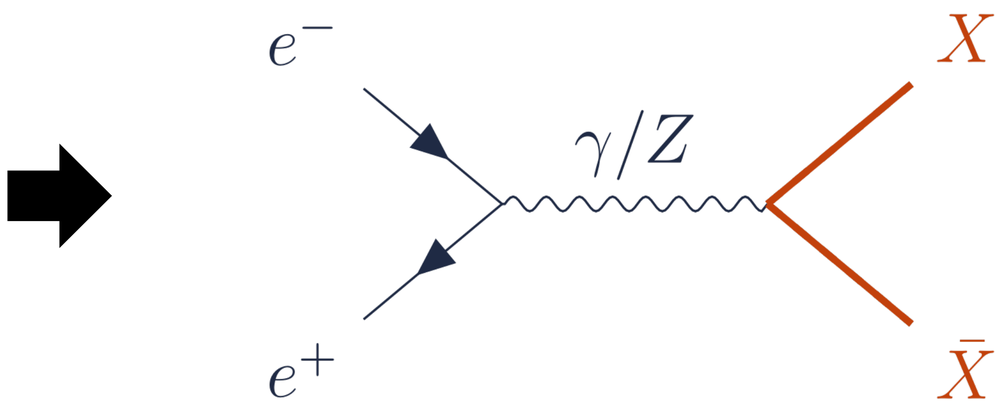
「その先」を知りたい。新しい粒子ができるまでエネルギーを上げていけば良いのか？

エネルギーが足りないと何もわからないのか

加速器で粒子を「つくる」

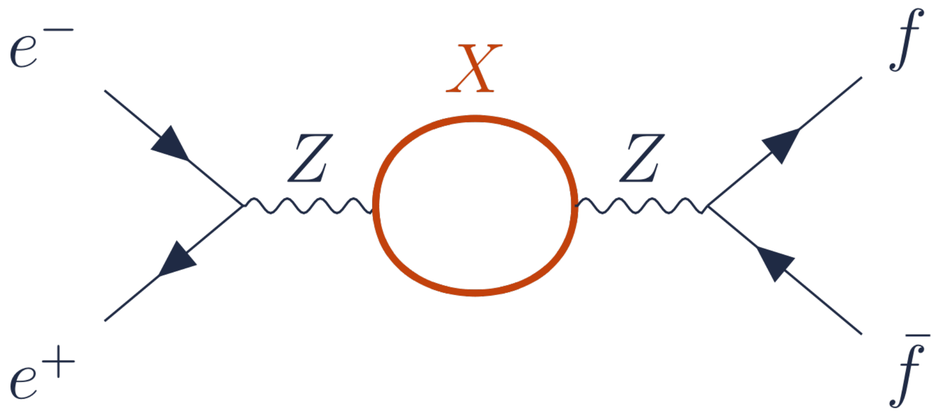
粒子の**直接生成**　(on-shell production)

つくられた粒子が（準）安定に存在する
（cf. LHCでのヒッグス発見）
例：Xの対生成では$\sqrt{s} \gtrsim 2m_X$ が必要



粒子の**仮想生成**　(off-shell production)

粒子を**量子論における中間状態**としてつくる
→ （準）安定粒子として取り出すことができない
$\sqrt{s} \gtrsim 2m_X$ は**必要ない**



重い粒子を仮想的につくる

フェルミのベータ崩壊理論　(1934)

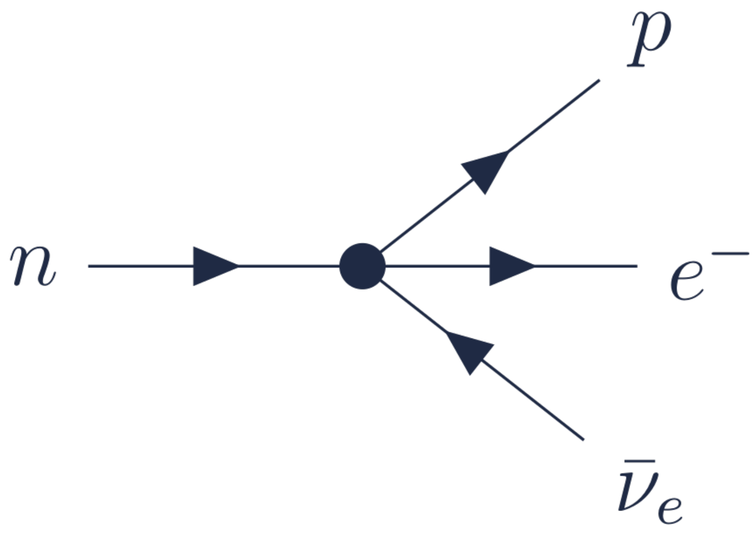
4つのフェルミオンが「1点」で相互作用する

例：中性子の崩壊

$$n \to p e^- \bar{\nu}_e$$

ミューオンの崩壊

$$\mu^- \to e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

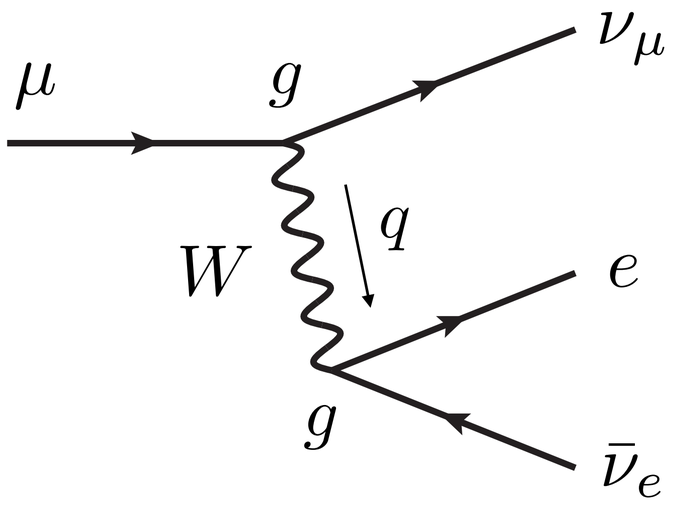


相互作用の強さ
（フェルミ結合定数）　G_F

現在、G_F の最も精密な値はミューオン寿命の測定から得られる

重い粒子を仮想的につくる

標準理論におけるミューオン崩壊



崩壊振幅（cf. ２乗して位相積分すると確率になる）

$$\mathcal{A} \propto \frac{g^2}{q^2 - M_W^2}(\bar{\nu}_\mu \gamma^\mu P_L \mu)(\bar{e}\gamma_\mu P_L \nu_e)$$

$$\underset{q^2 \ll M_W^2}{\approx} -\frac{g^2}{M_W^2}(\bar{\nu}_\mu \gamma^\mu P_L \mu)(\bar{e}\gamma_\mu P_L \nu_e)$$

フェルミ結合定数 $\dfrac{G_F}{\sqrt{2}} = \dfrac{g^2}{8M_W^2}$

ミューオンより（はるかに）重いWボソンを仮想的につくって崩壊

G_F に隠れていた電弱スケール

小さなG_Fの中に数百GeVのスケールが隠れている

$$G_F \simeq 1.166 \times 10^{-5}\,\mathrm{GeV}^{-2}$$

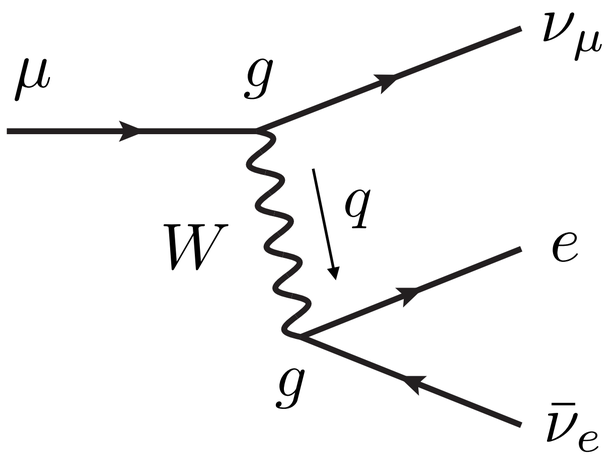
$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8M_W^2}$$

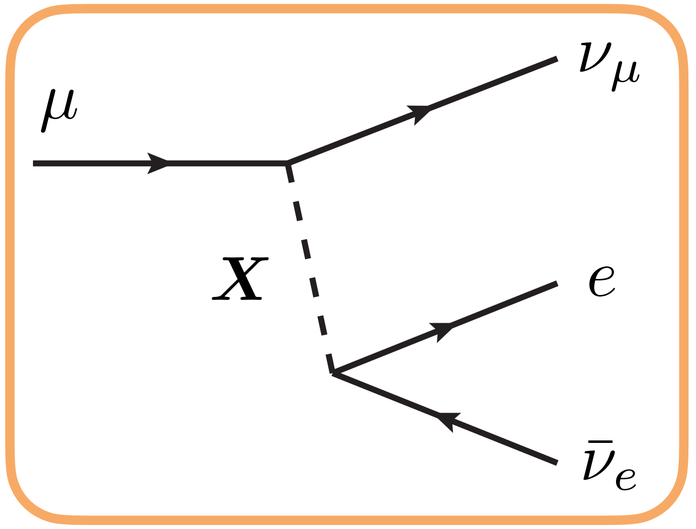
$$M_W = \frac{1}{2}gv$$

$$v = (\sqrt{2}G_F)^{-1/2} \simeq 246\,\mathrm{GeV}$$

電弱スケール（v: ヒッグス場の真空期待値）

もし重い新粒子があったら





$$G_F = G_F^{\mathrm{SM}} + \delta G_F$$

これを他の測定と比較する

XがWボソンのように寄与する場合

$$\delta G_F \sim \frac{g_X^2}{M_X^2}$$

もしくは $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\mathrm{SM}} - \frac{4\,\delta G_F}{\sqrt{2}}(\bar{\nu}_\mu \gamma^\mu P_L \mu)(\bar{e}\gamma_\mu P_L \nu_e)$

標準理論の発見の歴史

Zボソン

電弱理論 (Glashow, Weinberg, Salam 1960s)

量子電磁力学と弱い相互作用を統一
W, Zボソンの存在を予言

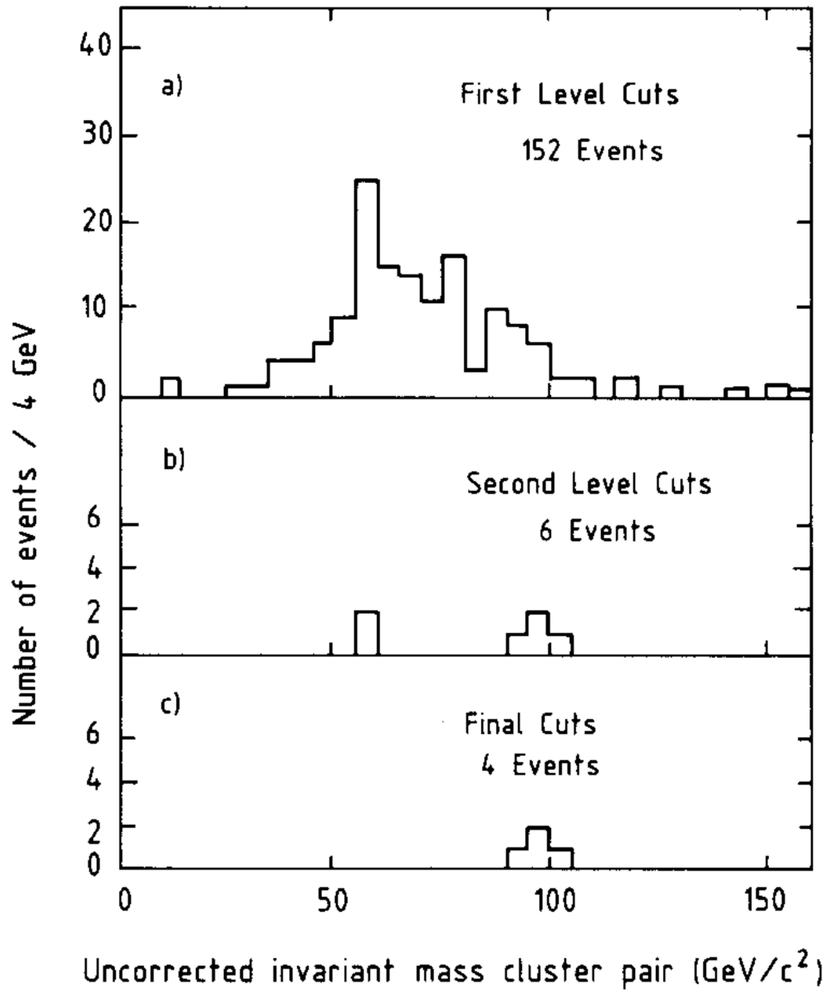
Gargamelle実験で間接探索 (CERN 1973)

弱い中性カレントの発見 $\bar{\nu}_\mu + e^- \to \bar{\nu}_\mu + e^-$

Zボソンの直接探索で発見 (CERN 1983)

直接探索： $p + \bar{p} \to Z + X$

Phys. Lett. B 126 (1983) 398



標準理論の発見の歴史

トップクォーク

B_d-$\overline{B}_d$振動の発見 (ARGUS, 1987)

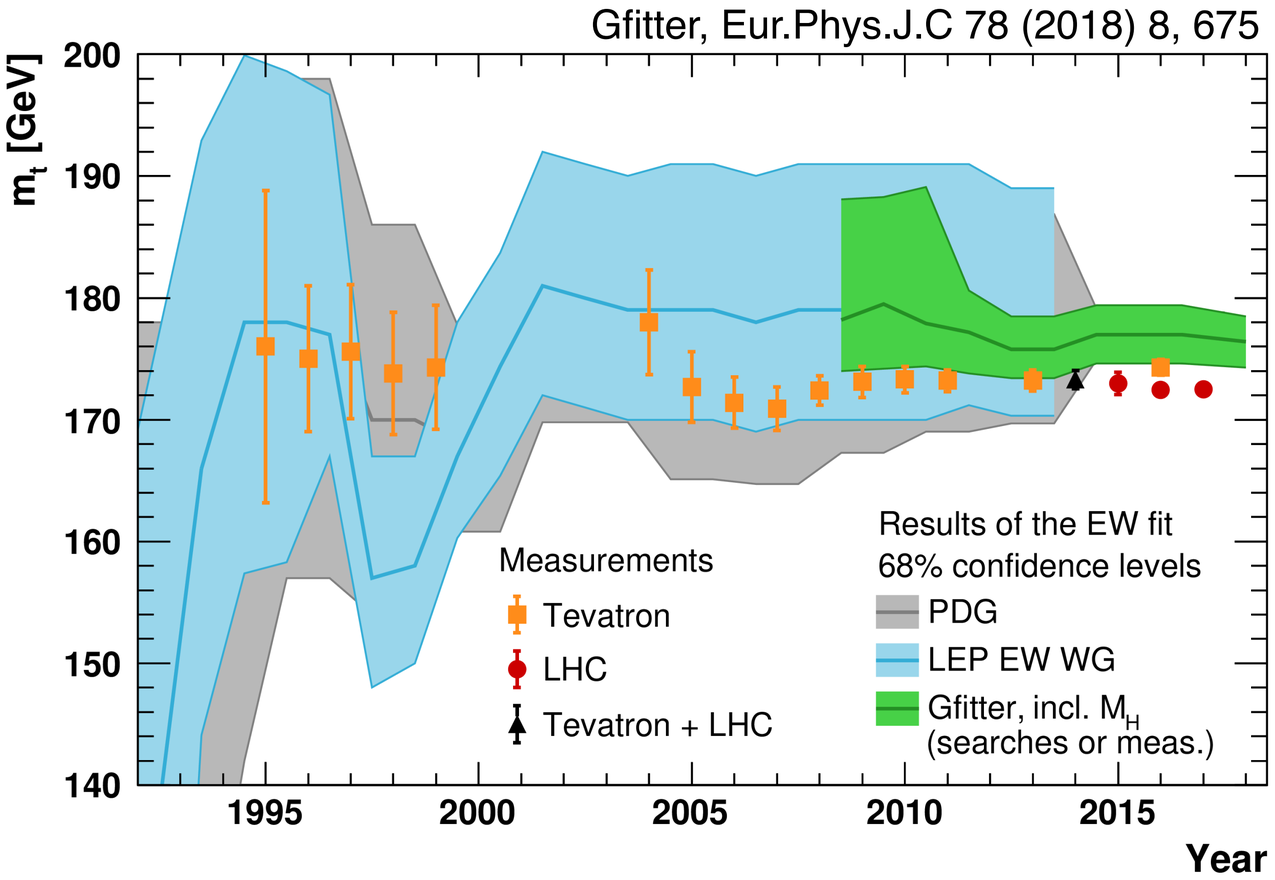
間接探索：ループ量子補正で寄与
トップクォークは重い (>50GeV)

電弱精密測定 (e.g., CERN-PPE-94-187)

間接探索：ループ量子補正で寄与
トップクォーク質量 ~173±20GeV

トップクォークの発見 (Tevatron 1995)

直接探索：$p + \bar{p} \to t + \bar{t}$



ヒッグスの発見も似た歴史：トップクォークの質量が決まったことで軽いヒッグスを示唆 → LHCで発見

この考え方を一般化する：有効場理論

わかっている効果 ＋ 重い新粒子 (新物理：BSM) の小さな効果

$$\mathcal{L}_{\rm eff} = \mathcal{L}_{\rm SM} + \sum \frac{c_i}{\Lambda^2} \mathcal{O}_i^{(d=6)} + \cdots$$

標準理論

わかっている物理

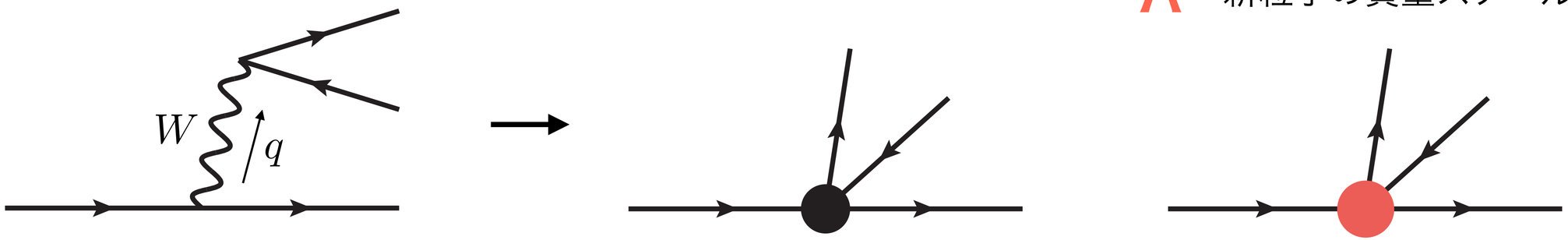
フェルミ理論

$c_i \sim g^2$, $\Lambda \sim M_W$

新物理

c_i 新粒子の結合の強さ

Λ 新粒子の質量スケール



おおざっぱな見積もり：1%のずれは何TeV？

ヒッグス結合

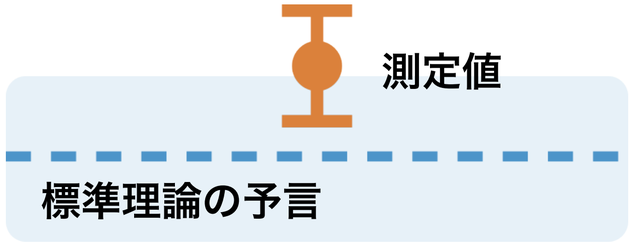
$$g_{hZZ} = g_{hZZ}^{\mathrm{SM}}(1+\delta)$$

$$\delta \sim c\frac{v^2}{\Lambda^2}$$

ヒッグスの真空期待値

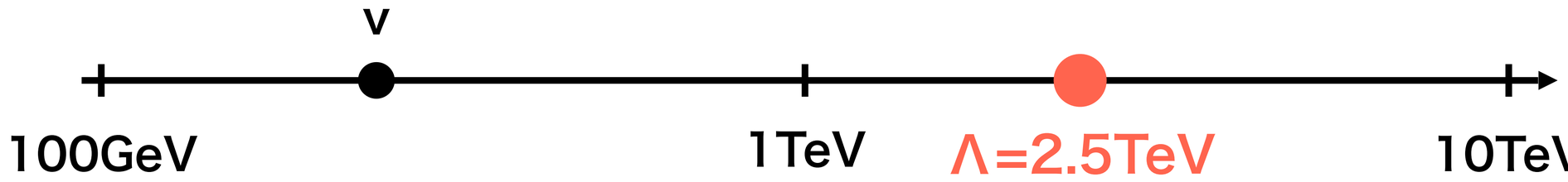
$v \simeq 246\,\mathrm{GeV}$

精度が探索可能なスケールを決める



精度　　模型が決定　　探索可能なスケール

$$\delta \sim 0.01,\ c = 1 \quad \Rightarrow \quad \Lambda \sim 2.5\,\mathrm{TeV}$$



ただしループ抑制や模型の構造によって感度は変わる

本当に測りたいのは「ずれのパターン」

1つの観測量だけでは新物理の正体はわからない

それぞれ1%の「ずれ」でもその意味は異なる

- **質量スペクトル**
- **結合定数**
- **対称性**
- **tree か loop か**

模型ごとにどこにずれが出るか異なる

例えば複数のヒッグス結合を測る

$$\delta\kappa_Z,\quad \delta\kappa_W,\quad \delta\kappa_b,\quad \delta\kappa_\tau,\quad \delta\kappa_c,\quad \ldots$$

どの結合がどれだけずれるかは模型ごとに違う

大事なのは「ずれの大きさ」だけでなく
「ずれのパターン」

→ 具体的な内容は次の愛甲さんの講義で

Q. なぜ「発見済み」の粒子を測り続けるのか

A. TeVスケールの新物理を量子的に探索するため

精度が探索スケールを決め、ずれのパターンで正体を絞り込む

新物理に迫る二つのアプローチ

標準理論の先にある物理をどう探るのか？

重い粒子を直接作りたい

高い衝突エネルギー

十分なデータ量も必要

代表例：HL-LHC、将来のハドロン加速器

新粒子の量子効果を探りたい

精密な測定・高い理論予言

クリーンでよくわかった初期状態

代表例：電子・陽電子コライダー

直接探索と間接探索は相補的

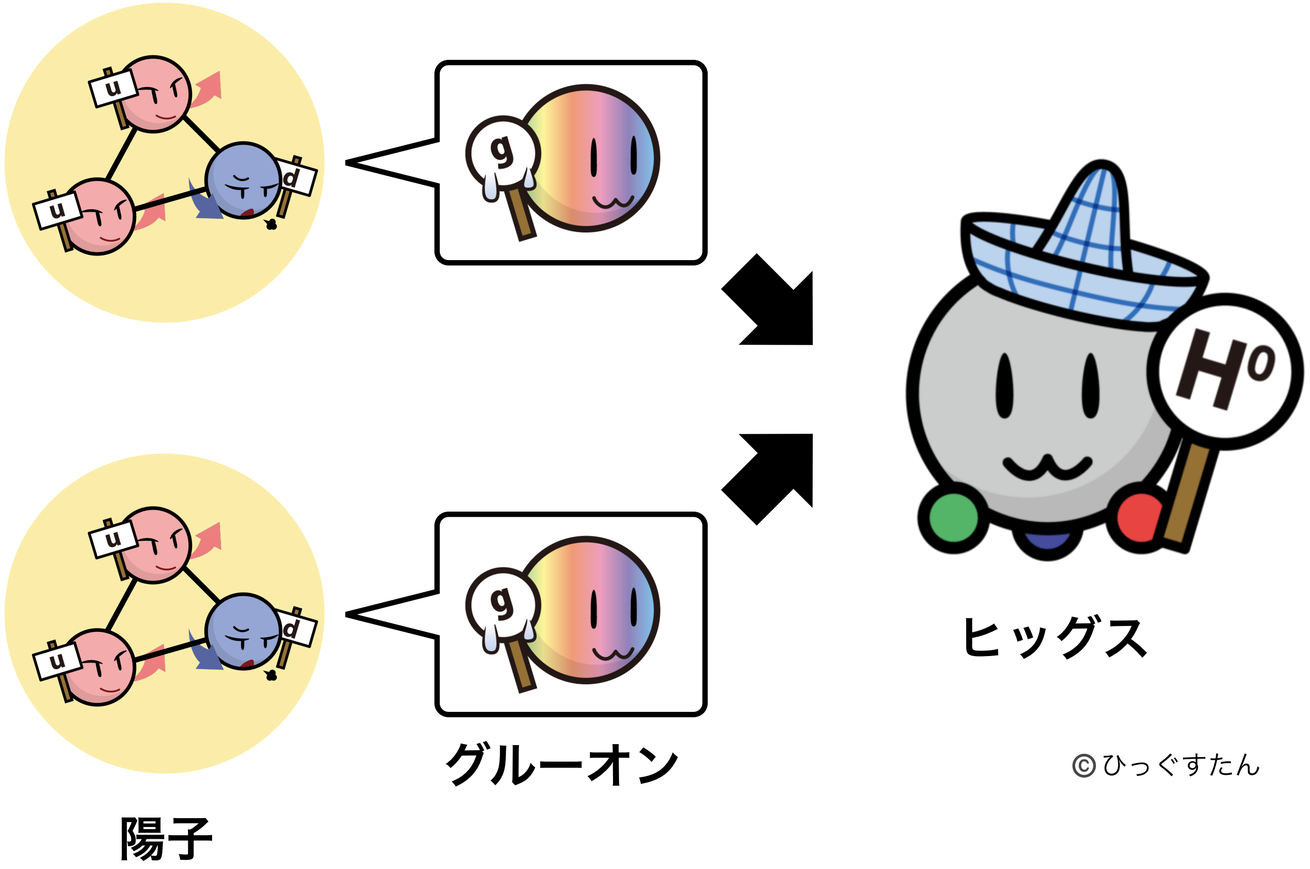
次の講義：将来電子・陽電子コライダーで何が測れるのか？

どうもありがとうございました



LHCで

ヒッグス粒子をつくる



陽子

グルーオン

ヒッグス

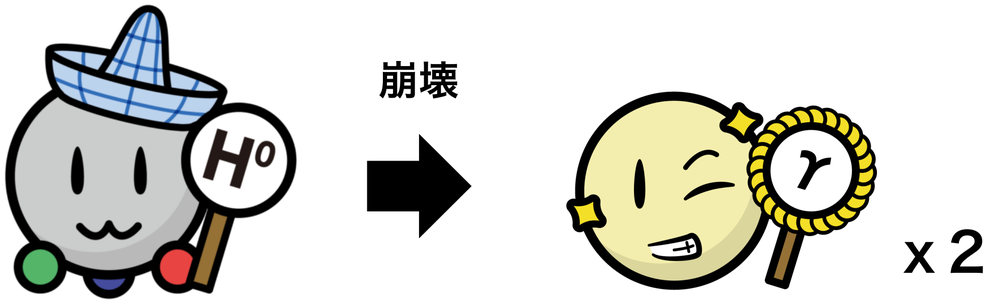
©ひっぐすたん

グルーオンの衝突

$$\sqrt{\hat{s}} = m_H$$

ただし、グルーオンは陽子のエネルギーの
一部しかもっていない
（キーワード：パートン分布関数）

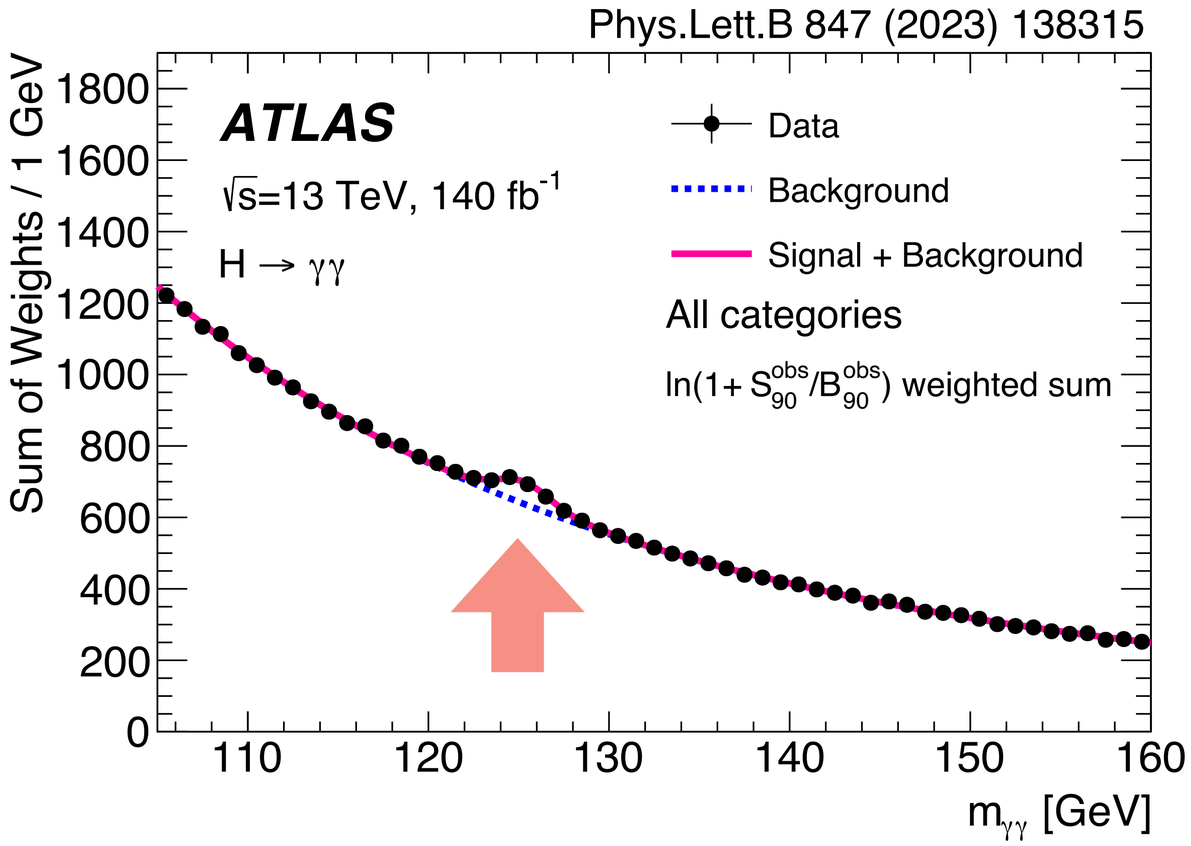
ヒッグス粒子をみつける



©ひっぐすたん

$$m_{\gamma\gamma}^2 = (p_{\gamma 1} + p_{\gamma 2})^2$$
$$= m_H^2$$

ヒッグスが崩壊した場合

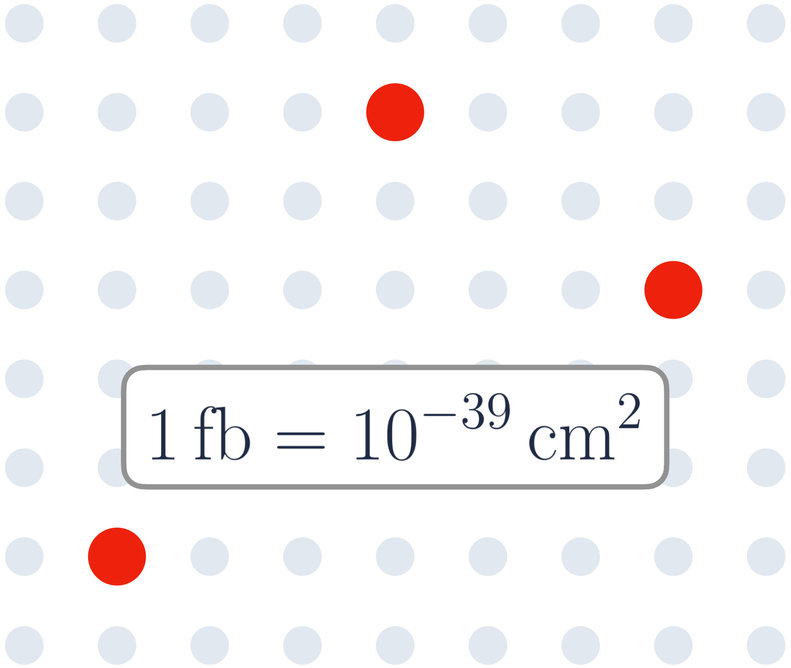


二つの光子がヒッグスの崩壊に由来しない場合、いろいろな値をとれる → 背景事象はなだらかな分布

どれくらい起こるか

ある過程のおこりやすさ：断面積 σ

ほとんどの衝突は「ありふれた」事象。ねらう信号はまれ



どれだけ衝突させるか：ルミノシティ L

積分ルミノシティ

$$\mathcal{L}_{\mathrm{int}} = \int \mathcal{L}(t)\,dt$$

単位は「断面積の逆数」

fb^{-1}

フェムトバーンの逆数

ab^{-1}

アトバーンの逆数

1 ab^{-1} = 1000 fb^{-1}

どれくらい起こるか

ある期間に注目する過程が何回起こるか

$$N = \sigma \mathcal{L}_{\mathrm{int}}$$

$$N_{\mathrm{obs}} = \sigma \mathcal{L}_{\mathrm{int}} \times \mathrm{BR} \times \epsilon \times \cdots$$

実際は分岐比・検出効率などが掛かる

統計誤差： $\sqrt{N}$

相対誤差は 1/√N で小さくなる

例：1fb の過程を 1ab⁻¹ 集めたら何事象？

$$\sigma = 1\,\mathrm{fb}, \qquad \mathcal{L}_{\mathrm{int}} = 1\,\mathrm{ab}^{-1}$$

1 ab⁻¹ = 1000 fb⁻¹



$$N = 1000$$

ヒッグスファクトリーでヒッグスが
何個つくられるか計算してみよう

どれくらい起こるか

例：ヒッグスファクトリーで作るヒッグスの数

√s ≈ 250GeV 付近の場合

$$\sigma(e^+e^- \to ZH) \sim \mathcal{O}(10^2)\,\mathrm{fb}$$

$$\mathcal{L}_{\mathrm{int}} \sim \mathcal{O}(1)\,\mathrm{ab}^{-1}$$

⇩

$$N_{ZH} \sim \mathcal{O}(10^5)$$

数十万個のヒッグス粒子

固定標的にぶつける場合

固定標的に高エネルギーの粒子をぶつける： $p_1 = (E_1, E_1\vec{n}),\ p_2 = (M_{\mathrm{target}}, \vec{0})$

$$s = (p_1 + p_2)^2 = (E_1 + M_{\mathrm{target}})^2 - (E_1 - 0)^2 = 2E_1 M_{\mathrm{target}} + M_{\mathrm{target}}^2$$

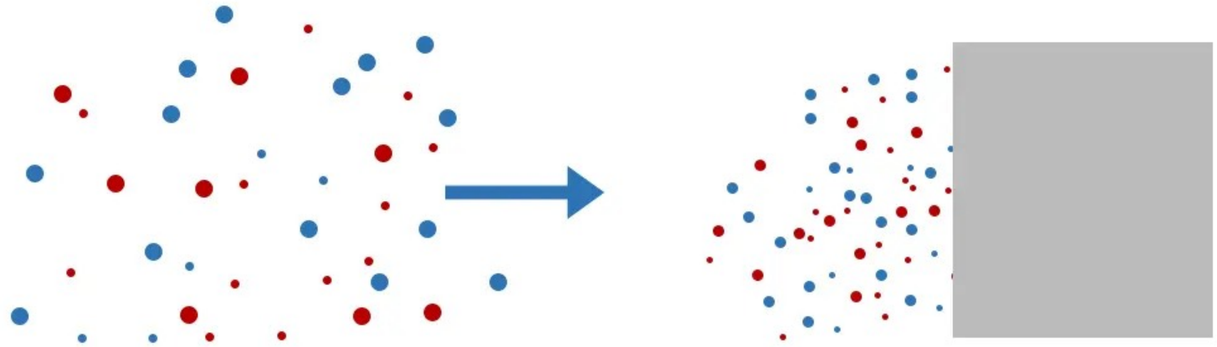
$2E_1M_{target}$より十分に小さい

$$\sqrt{s} \approx \sqrt{2E_1 M_{\mathrm{target}}}$$

例：LHCの $\sqrt{s} = 14\,\mathrm{TeV}$を実現するためには

陽子ビームを陽子の固定標的にぶつける場合

$$E_1 \approx 100,000\,\mathrm{TeV}$$



© BBC resource

このエネルギーをLHCと同程度の磁石（約8テスラ）を使う円型加速器で加速する場合

曲率半径は4万km必要（静止衛星の軌道半径 cf. 地球の半径：6,400km）