高エネルギー加速器科学研究奨励会
平成２４年１０月５日

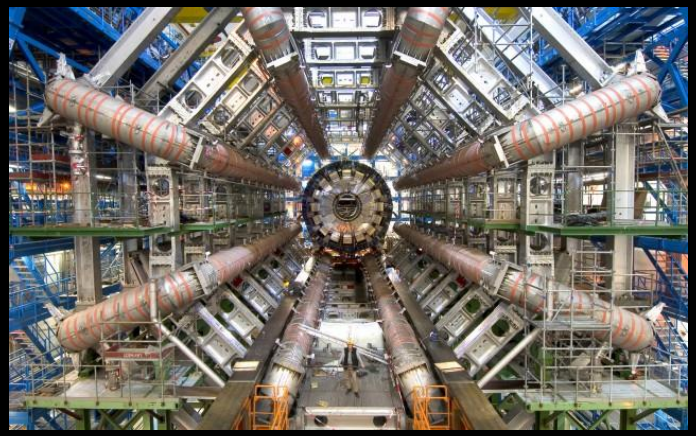
“ヒッグス粒子”の発見が物語ること

磯　暁
高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所

ヒッグス（と思われる）粒子の発見

2012年は素粒子物理学にとって記念すべき年

感涙にむせぶヒッグス博士



アトラス検出器

7月4日のヒッグス粒子の発見を報じるスライド

ヒッグス粒子とは何か？

粒子であり、そして粒子以上の存在

ヒッグス ＝

[I] 標準模型で最後まで未発見だった粒子

[II]. 真空を支配する役割
自発的対称性の破れを引き起こし
標準模型の真空を決める
↓
電子やクオークに質量を与える

[III]. 標準模型を超えた物理への窓口

[I]. (スカラー)粒子としてのヒッグスの発見

「標準模型」の素粒子の分類

スピン	粒子の種類	役割
½ フェルミオン	電子、クオーク	物質
1 ベクトル ボソン	光子, W、Z ボソン グルーオン	ゲージ力を媒介 (ゲージ粒子)
0 スカラー	ヒッグス	真空を決める

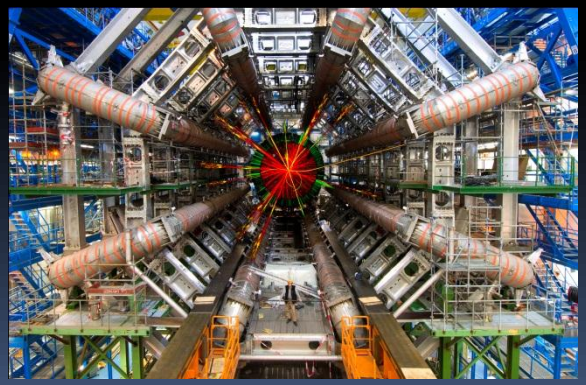
LHC　大型ハドロンコライダ @ CERN

P → ← P

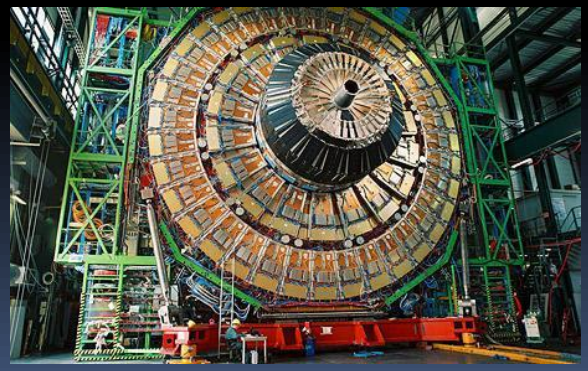
現在:　8 TeV　(4 +4)

2015: 14 TeV　(7 + 7)

二つの実験グループ.



ATLAS



CMS

小さな世界を見るためには大きなエネルギーが必要

なぜか？

量子力学の不確定性関係

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

＋相対性理論 ΔE = Δp c

$$\Delta x \Delta E \geq \hbar c \sim 200 \text{ MeV fm}$$

$$= 2 \times 10^{-7} \text{ eV m}$$

10^{12}	$T\ (era)$
10^{9}	$G\ (iga)$
10^{6}	$M\ (ega)$
10^{3}	$K\ (ilo)$
	1
10^{-3}	$m\ (ili)$
10^{-6}	$\mu\ (micro)$
10^{-9}	$n\ (ano)$
10^{-12}	$p\ (ico)$
10^{-15}	$f\ (emto)$

Energy	Distance
eV	2×10^{-7} m $= 2000$ Å
MeV	2×10^{-13} m $= 200$ fm
GeV	2×10^{-16} m $= 0.2$ fm
TeV	2×10^{-19} m $= 2 \times 10^{-4}$ fm

原子分子	eV ⇔ 2000 Å
原子核（核子）	200 MeV ⇔ 1 fm
電弱相互作用	100 GeV ⇔ 0.002 fm

自然界のスケールの階層性

10^{-36}m 10^{-28}m 10^{-20}m 10^{-12}m 10^{-4}m 1m 10^{4}m 10^{12}m 10^{20}m 10^{28}m

プランク物理（量子重力）

10^{18}GeV

大統一理論

10^{16}GeV

原子核(強い力)

ヒッグス（電弱力）

200 MeV

100 GeV

原子・分子

暗黒エネルギー

10^{-3} eV

地球の大きさ

太陽系

銀河

観測可能な宇宙の大きさ

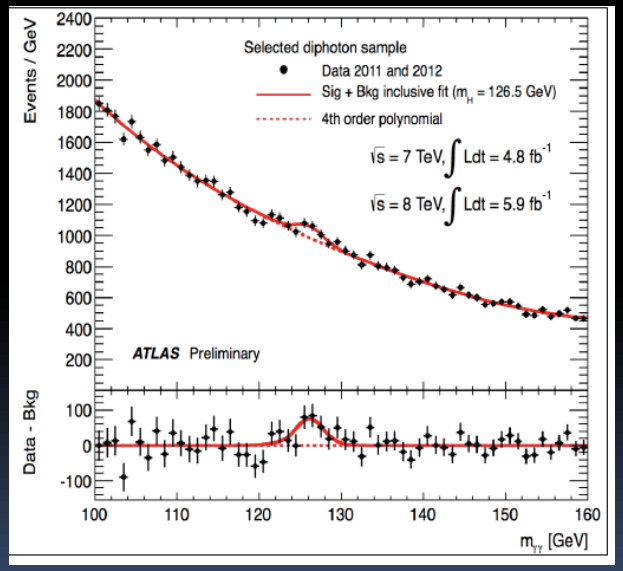
加速器実験

アインシュタイン方程式

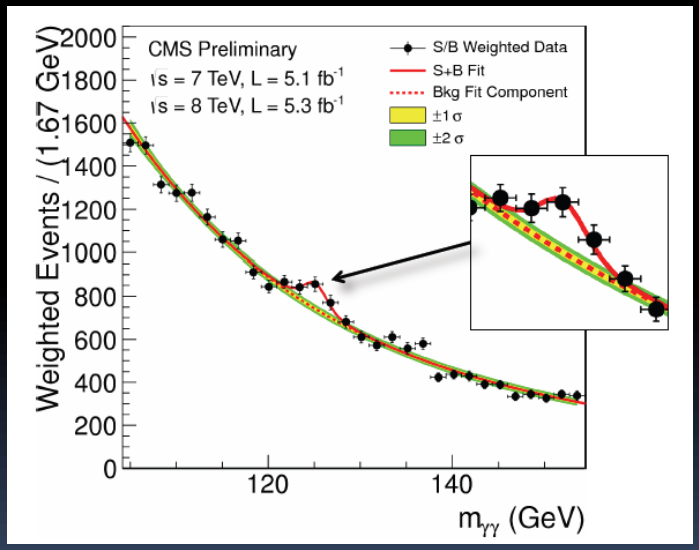
2012年7月4日　“ヒッグス粒子”の発見.

質量（= エネルギー　$E=mc^2$）

$M_H \sim$　126 GeV



ATLAS　H → 2 gamma



CMS　H → 2 gamma

[II]. 真空を支配するヒッグスの役割

ヒッグス場は
姿を見られず闇の世界で、宇宙を支配する

＝

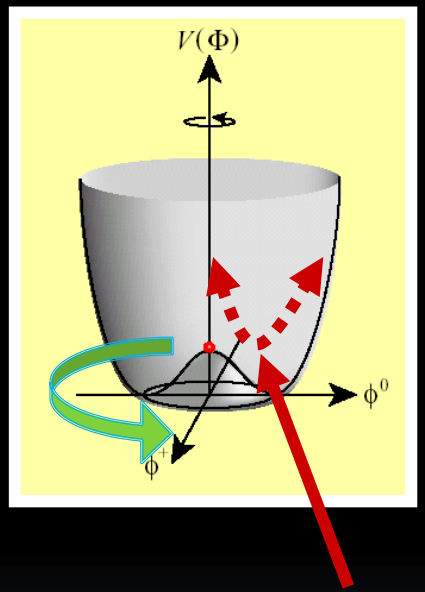
エーテルの非存在と矛盾なく
「凝縮」することで真空の性質を決める。

「凝縮」＝水が氷になるようなもの

ヒッグスポテンシャル

$$V = -\mu^2|H|^2 + \lambda(|H|^2)^2$$

$$|H| = \sqrt{\frac{\lambda}{2\mu^2}} \equiv \frac{v}{\sqrt{2}}$$



ヒッグス粒子

ポテンシャルの最低値

自発的対称性の破れ

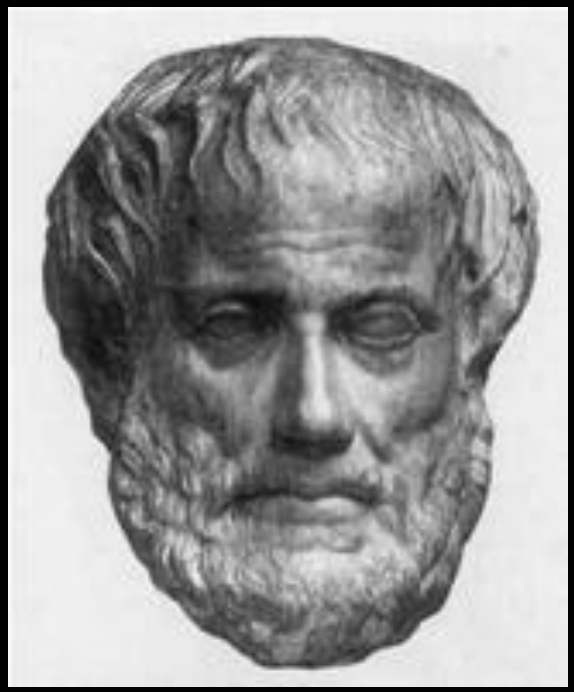
$$v = 246\mathrm{GeV}$$

この値は、ヒッグス発見以前から知られていた！

ヒッグス場の凝縮の帰結

素粒子に質量を与える

質量とは　ネバネバ？



NO

自然は運動を嫌う

アリストテレス

自然は変化を嫌う

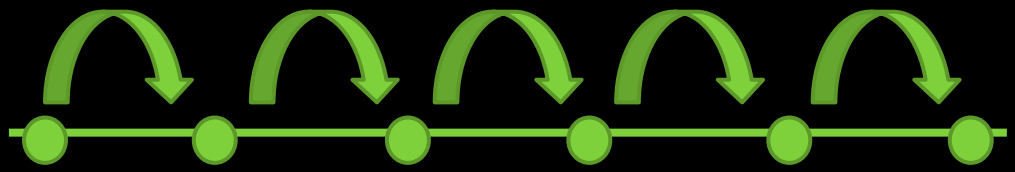
ガリレオ・ガリレイ

質量とは何か

粒子の伝搬

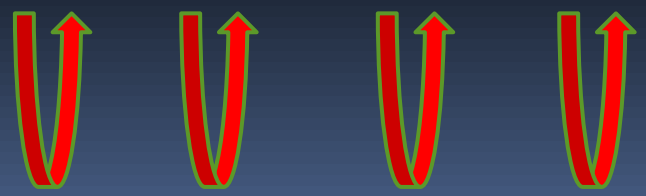
質量のない場合

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)^2 \sim \frac{1}{\epsilon}\phi(x+\epsilon)\phi(x)$$



質量がある場合

$$m^2\phi(x)^2$$



同時空点での混合
(足踏み状態)

ヒッグス場の凝縮の帰結

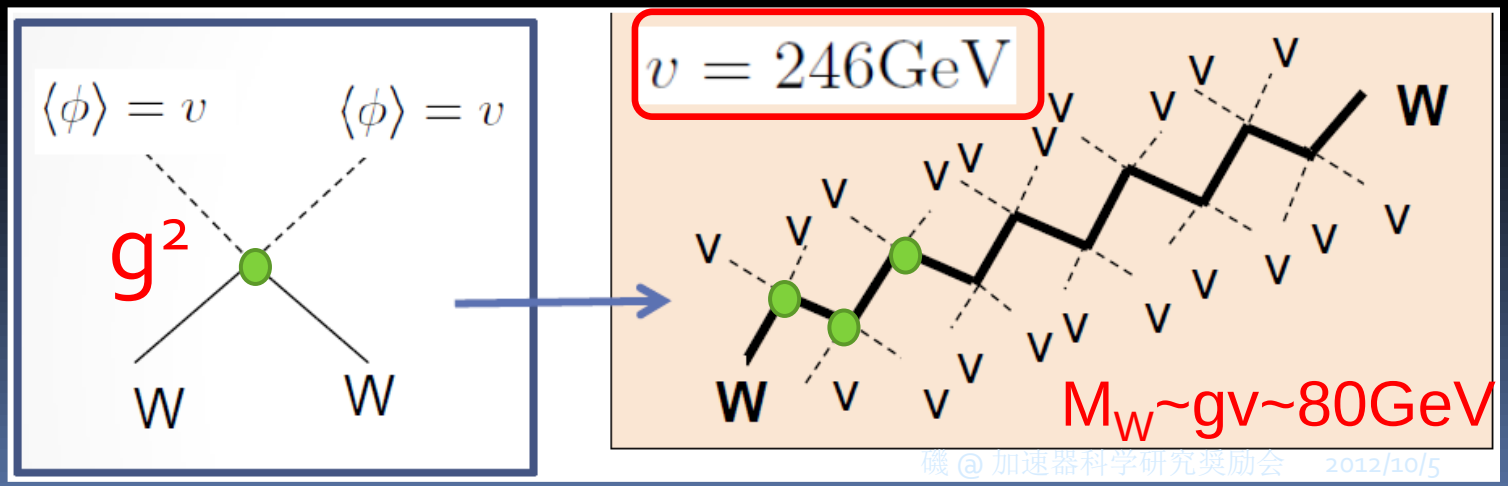
1. ゲージ粒子に質量を与える

W、Zボソン（質量をもたない）は弱い力を媒介する。

↓ ヒッグス凝縮.

超伝導のマイスナー効果と同じ

ゲージ結合　　W、Zボソンに質量を与える。



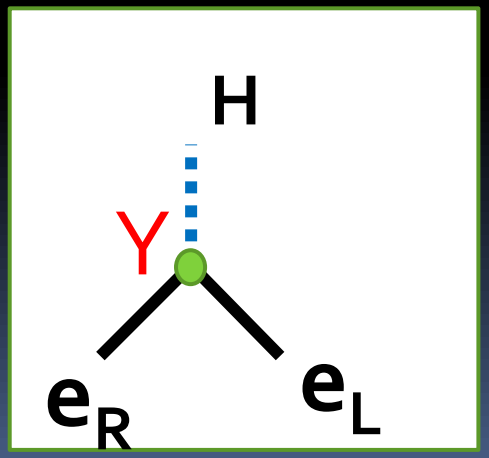
ヒッグス場の凝縮の帰結

2. 物質（クオークや電子）に質量を与える

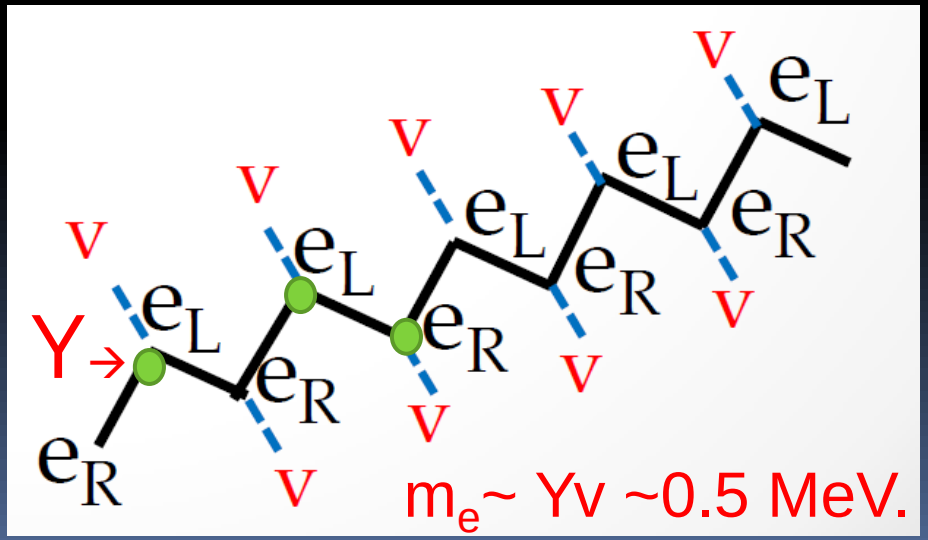
「電子」は、もともと**二つの異なる質量をもたない粒子、**
左電子と右電子からできていた。

左電子と右電子が、ヒッグス場の凝縮で、混じり合う。

湯川結合



電子が質量をもつ

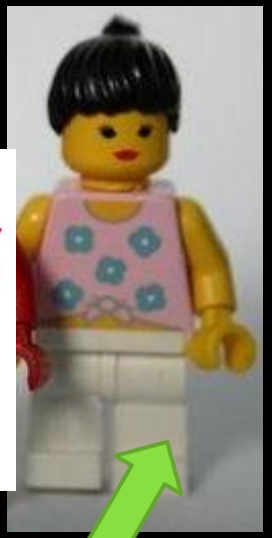


e_L e_R

ヒッグス場の凝縮の帰結

ヒッグスは、左電子と右電子の仲人

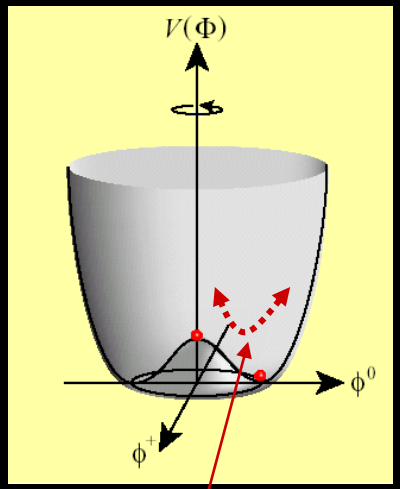
e_L



e_R

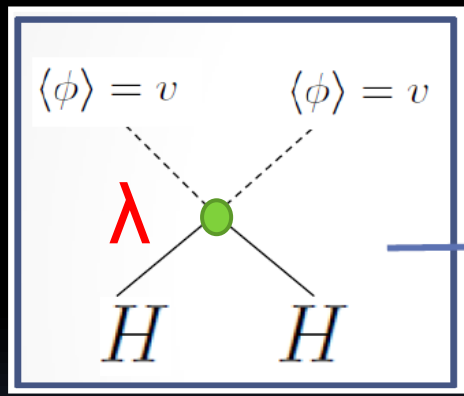
ヒッグス場の凝縮の帰結

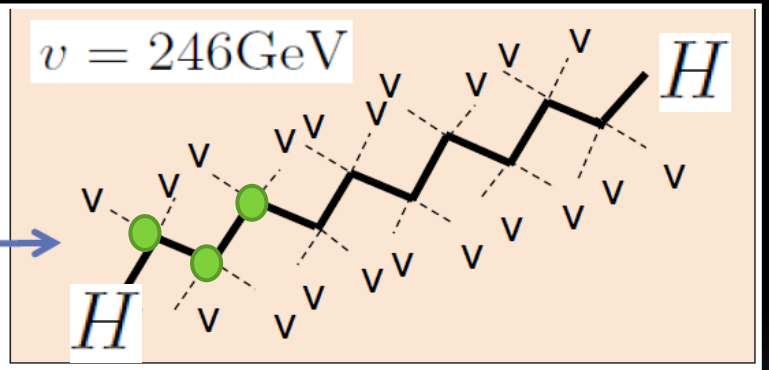
3. ヒッグス粒子自身も質量をもつ



ヒッグス粒子

$$V = -\mu^2|H|^2 + \lambda(|H|^2)^2$$





ヒッグス自己結合

$$m_H = \sqrt{2\lambda}v = 126\mathrm{GeV}$$

全ての粒子の質量はヒッグス凝縮の値に比例している (例外：ニュートリノ)

$$v = 246\mathrm{GeV}$$

電弱スケール

$$m_q = Y_q v/\sqrt{2}$$

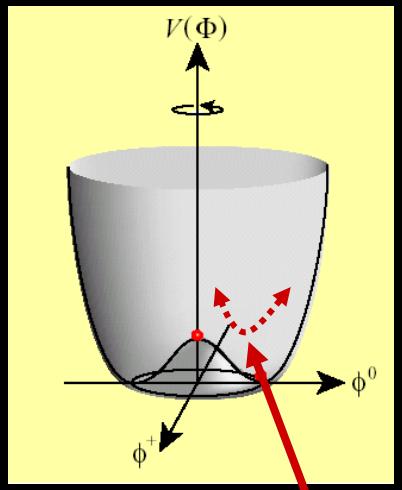
Y_q: 物質 q の湯川結合の強さ

クオーク	**u** 2 MeV	**c** 1.27 GeV	**t** 171 GeV
	d 5 MeV	**s** 104 MeV	**b** 4.2 GeV
ニュートリノ	ν_e < eV	ν_μ	ν_τ
荷電レプトン	**電子** 0.5 MeV	**μ** 106 MeV	**τ** 1.8 GeV

湯川結合の起源を人類は知らない

ヒッグス質量の重要性

$$m_H = \sqrt{2\lambda}v = 126\mathrm{GeV}$$



ヒッグス
粒子

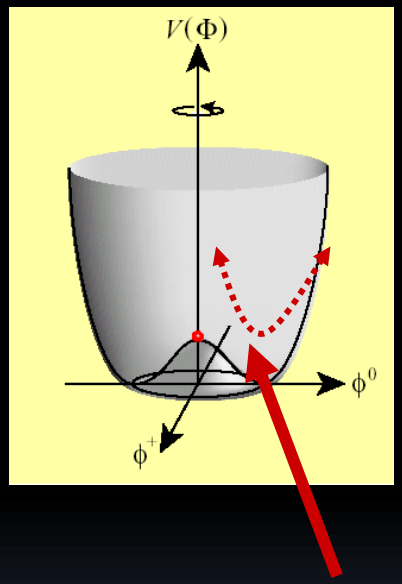
λに対する初めての証拠
(ポテンシャルの形)

$$V = -\mu^2|H|^2 + \lambda(|H|^2)^2$$

もっと高次項は？

ヒッグスポテンシャルの起源を、人類は知らない

神様（自然）はどのように
ポテンシャルの形を決めたのか?



ヒッグス
粒子

ヒッグス粒子の発見は、
新粒子の発見にとどまらず、
真空を決める手がかりになる

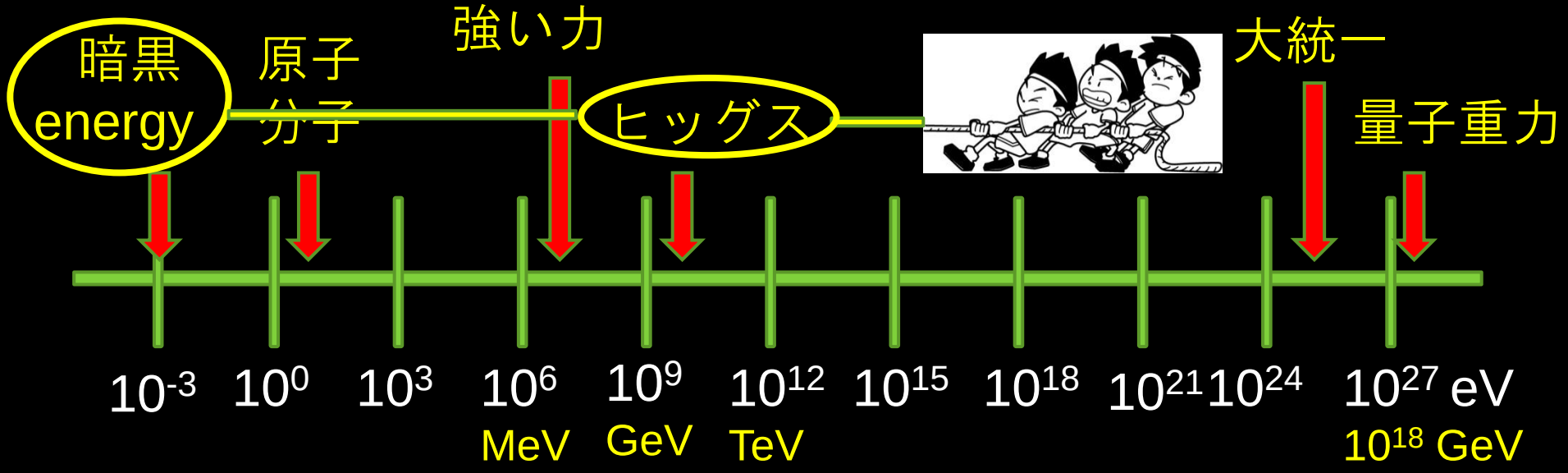
→　ヒッグスの発見は、終わりではなく
　　新しい素粒子論の始まりである

ポテンシャルの詳細を知ることが重要
　（ＩＬＣの重要性）

ポテンシャルにまつわる不思議

$$V = -\mu^2|H|^2 + \lambda(|H|^2)^2$$

1. 階層性問題 (質量項 μの安定性)



強い力のエネルギースケールが安定な理由は知っている。
しかし電弱スケール（ヒッグス質量）がなぜ安定なのか
人類はまだ知らない　＝　**階層性問題**

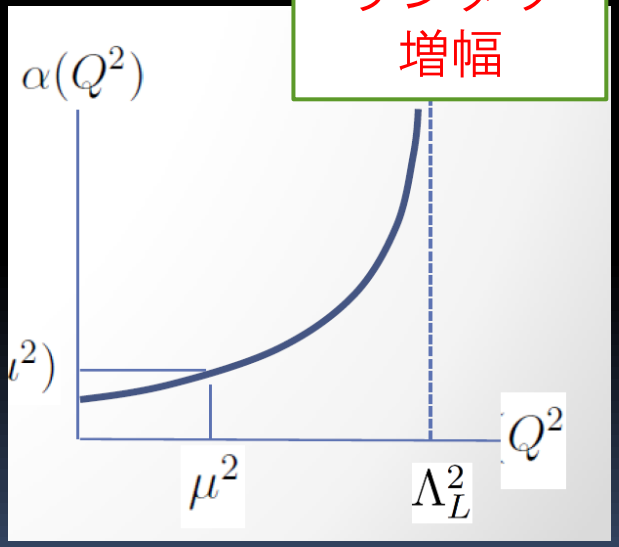
ポテンシャルにまつわる不思議

2. 真空の安定性(λ 項) ← Vの起源

力の強さは、エネルギースケールに依存する
（真空偏極効果）

電気力

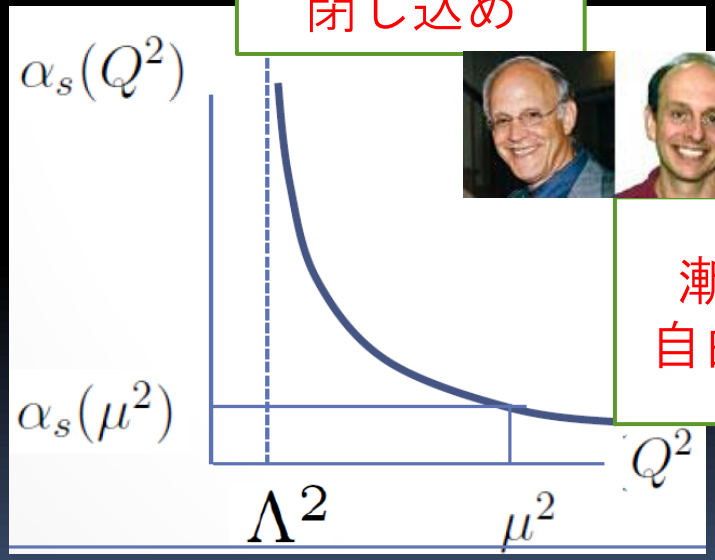
ランダウ
増幅



電荷の（プラズマ）遮蔽

強い力

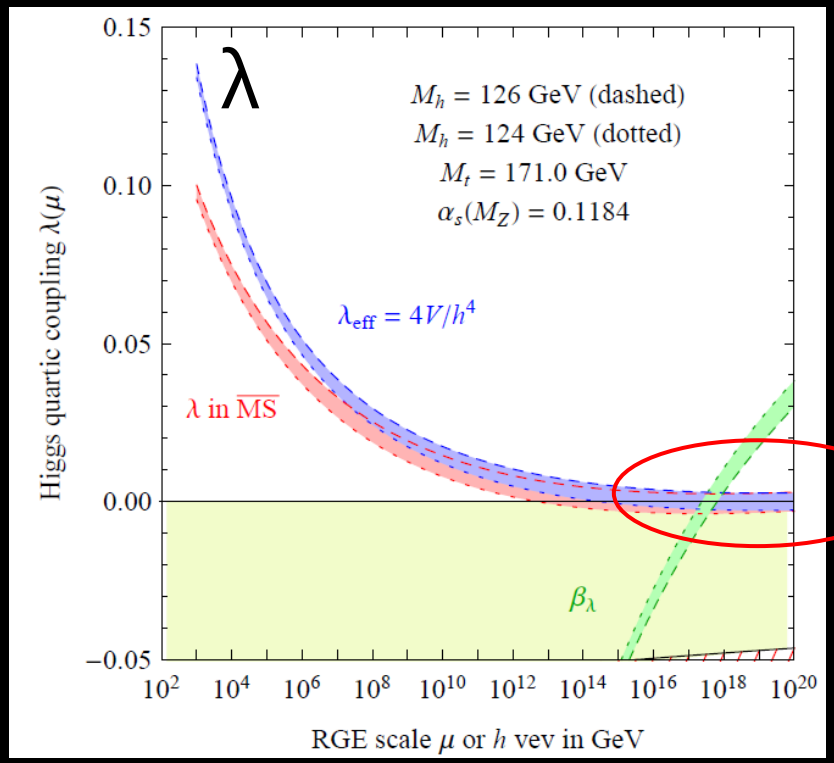
色電荷の
閉じ込め



漸近
自由性

電荷の反遮蔽

ヒッグス4点力 λ　のエネルギー変化



$$V = -\mu^2|H|^2 + \lambda(|H|^2)^2$$

$$m_H = \sqrt{2\lambda}v = 126\mathrm{GeV}$$

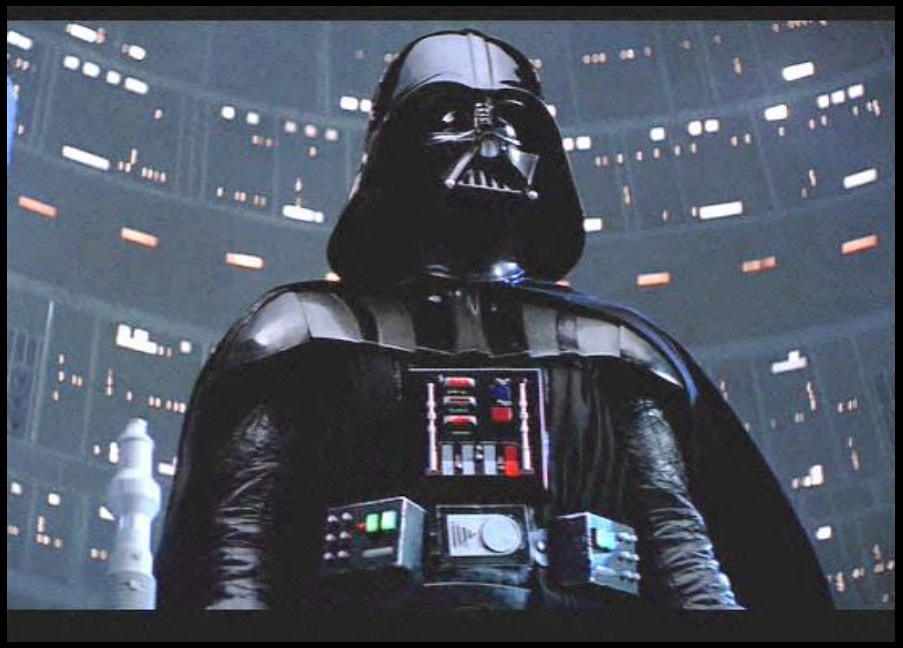
プランクスケール
(量子重力スケール)
でなぜか力が消えている

とても不思議(偶然か？)

$$V(H) = 0 \quad @M_{PL}$$

電弱スケールと量子重力
を結びつけるヒント？？

真空を支配するヒッグス場



ほんの少しその姿が見え始めている
しかし、まだ謎だらけ
背後には、どんな世界が広がっているのか

まとめ　ヒッグス粒子の発見

粒子であるが粒子以上

1. 自発的対称性の破れを引き起こし、
   標準模型の「真空構造」を決める　→　質量を与える
   ↓
   ヒッグス粒子との結合力の強さを調べる（ＩＬＣ）

2. 標準模型を超えた物理への窓口
   （Ｂファクトリなどとの連携の必要性）

3. わかっていないこと（理論への挑戦）
   ヒッグスポテンシャルの起源と安定性
   結合力の起源
   背後にある未知の物理

素粒子物理学は7月4日
新たな「革命時代」に入った

理論家にとって
　電弱スケール、暗黒エネルギーを理解する
　パラダイム・シフトが必要

実験家にとって
　新たな方向性を見つける手がかりが重要
　　→　ＩＬＣの重要性

本日、覚えて頂きたいこと

$$\Delta x \Delta E \geq \hbar c \sim 200 \text{ MeV fm}$$

$$= 2 \times 10^{-7} \text{ eV m}$$

何故小さな世界を見るのに大きな加速器が必要なのか

真空の性質はヒッグスの凝縮に支配されている