

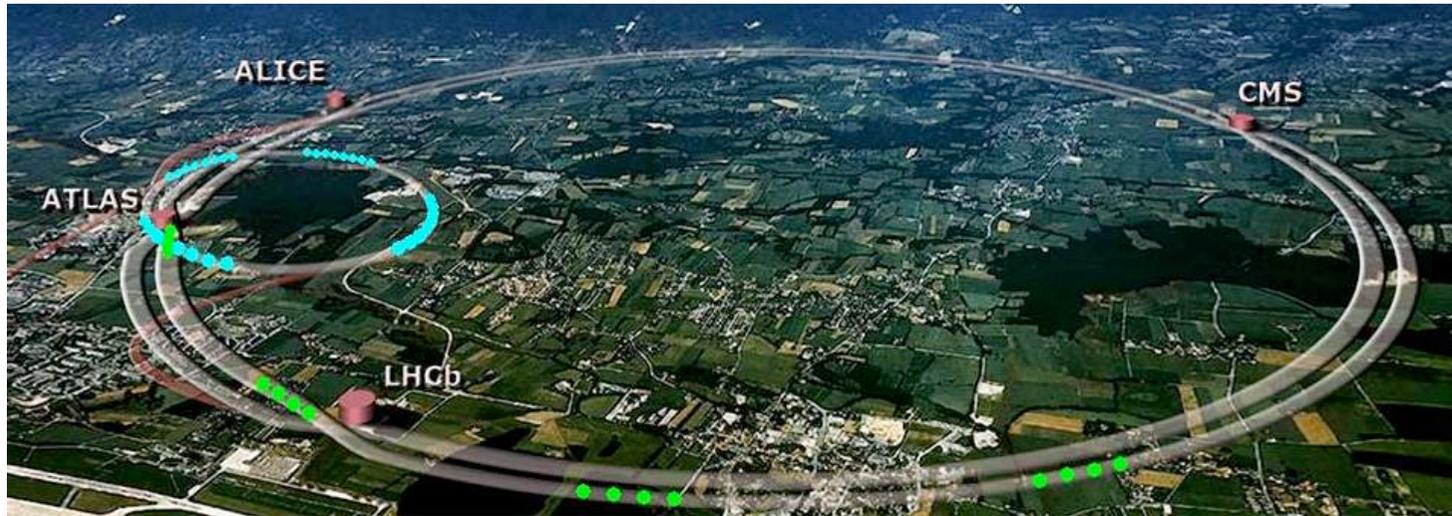
# 宇宙と素粒子

理論グループ：伊部昌宏

3/9/2026

# 素粒子標準模型の完成

2012年ヒッグス粒子が発見され素粒子標準模型が完成

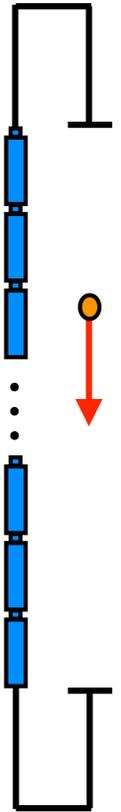


LHC 加速器の周の長さ 27km ! (山手線は 35km )

陽子と陽子を反対方向に加速してぶつけて新粒子を探す

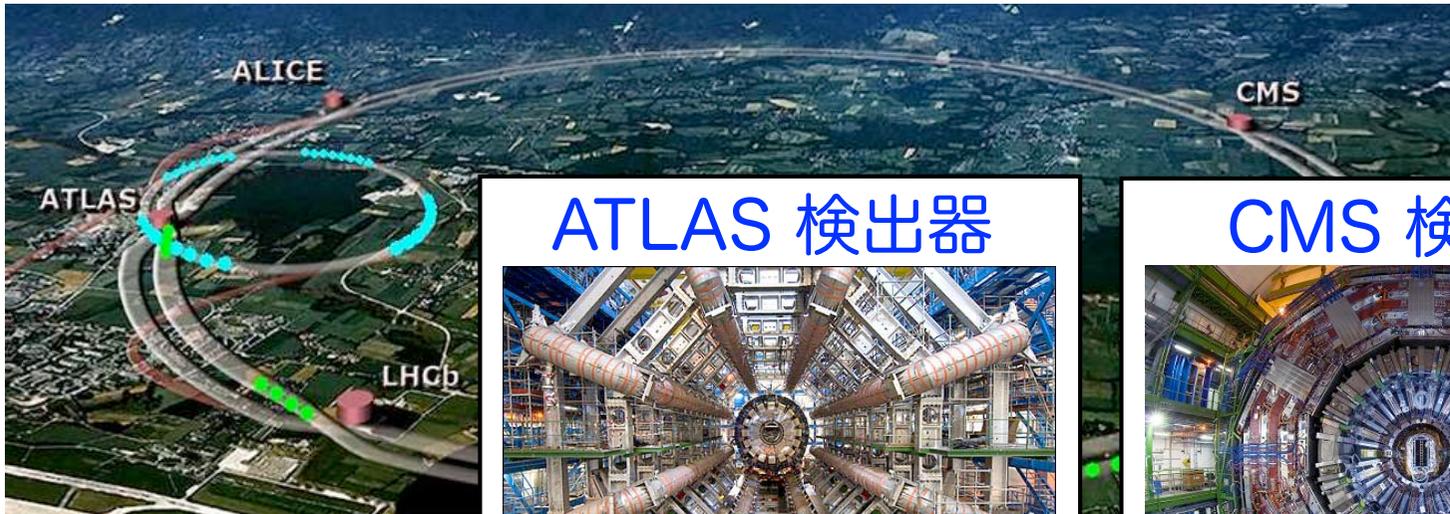
陽子 → ★ ← 陽子

衝突際のエネルギーはそれぞれの陽子を 1.5V の乾電池を約 2,500,000,000,000 個直列に繋いだ時の電位差による加速で得られるエネルギーに相当 (~ 8TeV) !

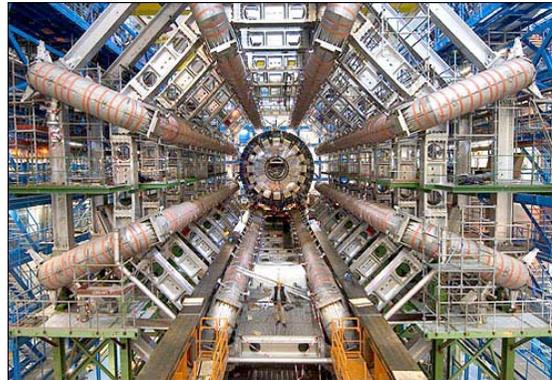


# 素粒子標準模型の完成

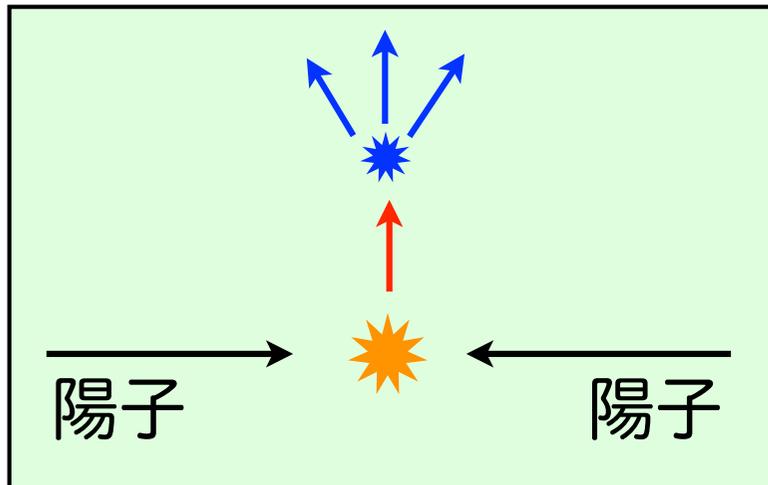
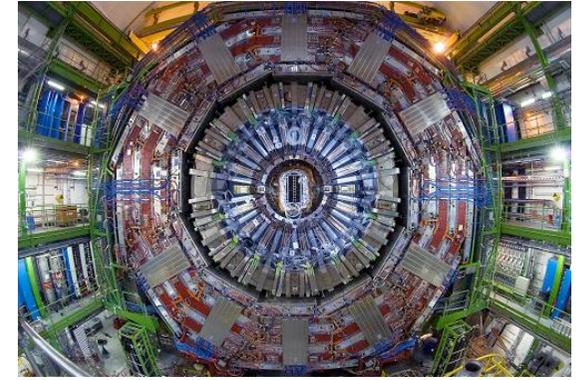
2012年ヒッグス粒子が発見され素粒子標準模型が完成



ATLAS 検出器



CMS 検出器

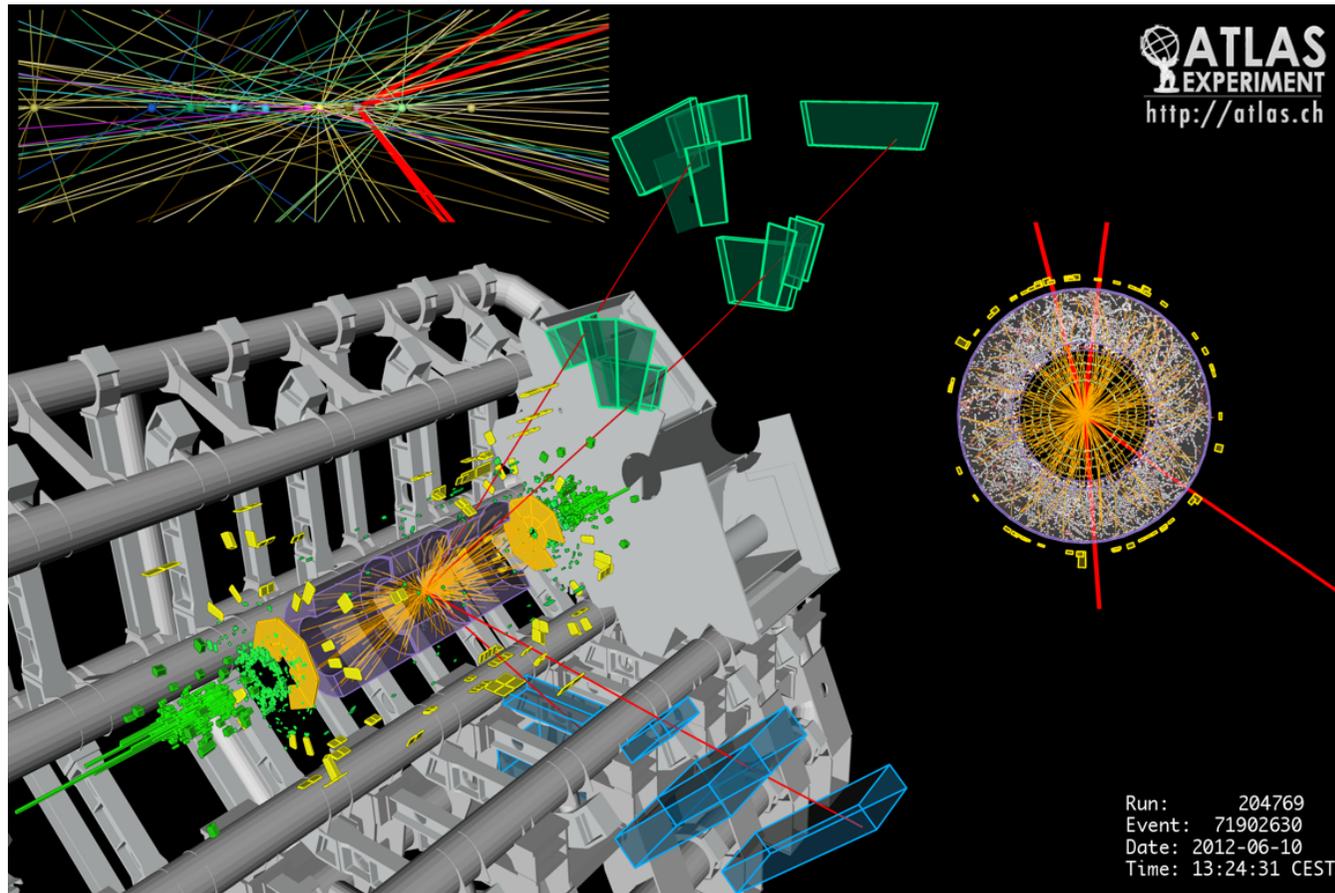


衝突によって飛び出して来た粒子の崩壊を見ることでどんな粒子が生成されたのかを調べる

(ヒッグス粒子の寿命は  $10^{-23}$  秒!)

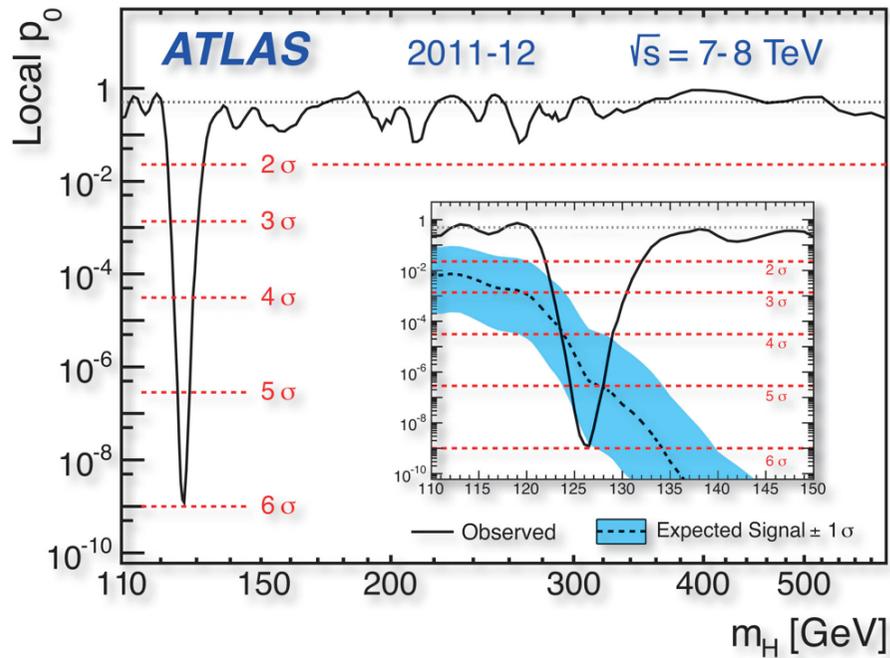
# 素粒子標準模型の完成

## アトラス検出器で捉えられたヒッグス粒子事象



ヒッグス粒子が生成され直後に2つのウィークゲージ粒子に崩壊  
それらがそれぞれ2つのミュー中間子に崩壊  
(赤い4本の線が4本のミュー中間子の軌跡)

# 素粒子標準模型の完成



- ✓ 重さは陽子の 130 倍程度
- ✓ 生成率や崩壊の仕方の詳細な解析から予想されていたヒッグス粒子の性質と一致！

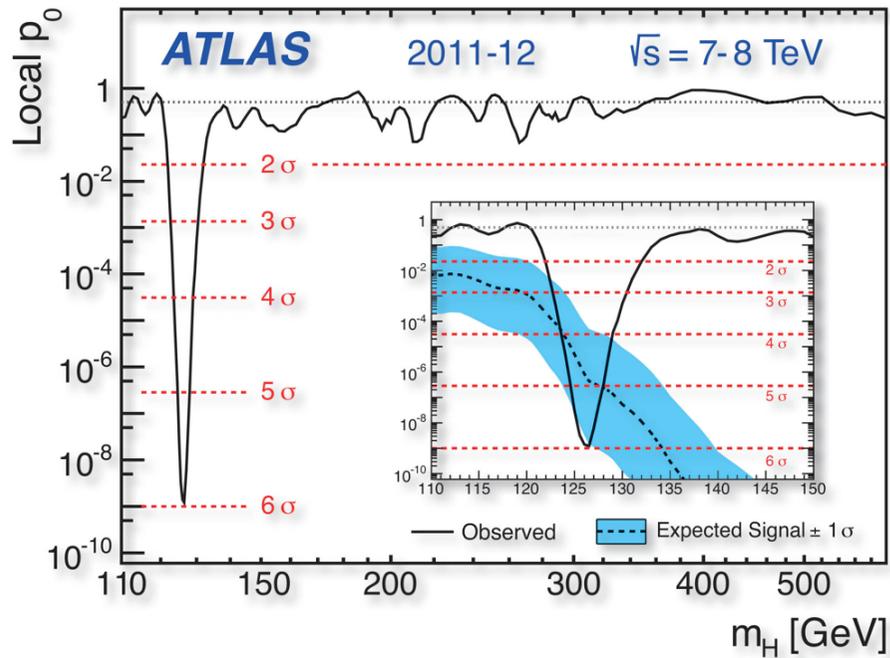
素粒子標準模型が実験的に正しいことが証明された

今日のテーマ

そもそも標準模型とは何か？

ヒッグス粒子の発見から分かってきたこと？その先は？

# 素粒子標準模型の完成



- ✓ 重さは陽子の 130 倍程度
- ✓ 生成率や崩壊の仕方の詳細な解析から予想されていたヒッグス粒子の性質と一致！

その先？

ニュートリノの質量の起源

暗黒物質の解明

宇宙の物質反物質非対称性の由来

初期宇宙(インフレーション、宇宙の相転移)の解明

さらなる統一理論

## 講義内容：

- 素粒子物理学の目的
- 素粒子物理の方法
- 素粒子の分類
- 素粒子標準模型
- 標準模型を越える物理

# 素粒子物理学の目的

---

我々が存在している自然が何故そのようになっているのかを解明し、それを記述する基本原理を理解することが目的！

- 物質は究極的には何から出来ているのか？
- 相互作用の基本法則は何か？

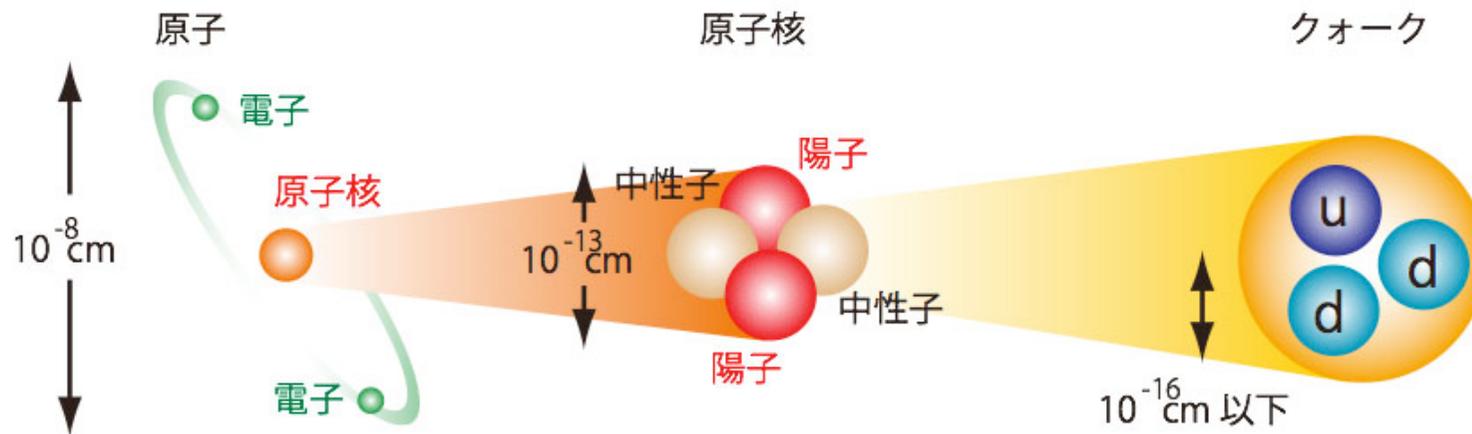


- 宇宙は何で出来ているのか？
- 宇宙はどのように始まりそして進化して来たのか？
- 宇宙は今後どうなっていくのか？

# 素粒子物理学の目的

基本原理を理解するには…

→ 物質を細かく分解していく



原子の大きさ約  $10^{-8}$  cm (Å)

原子核の大きさ約  $10^{-13}$  cm (fm)

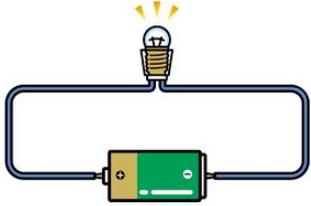
クォークの見える大きさ約  $10^{-14}$  cm 以下

ヒッグス粒子が見える大きさ約  $10^{-16}$  cm 以下

# 自然界の4つの力

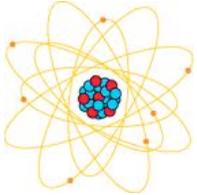
---

## ✓ 電磁気力



プラスの電荷とマイナスの電荷を結びつける力  
光は電磁波 = 光子

## ✓ 強い力



核子(=陽子、中性子)をくっつける力  
これが無いと水素しか存在しない！

## ✓ 弱い力



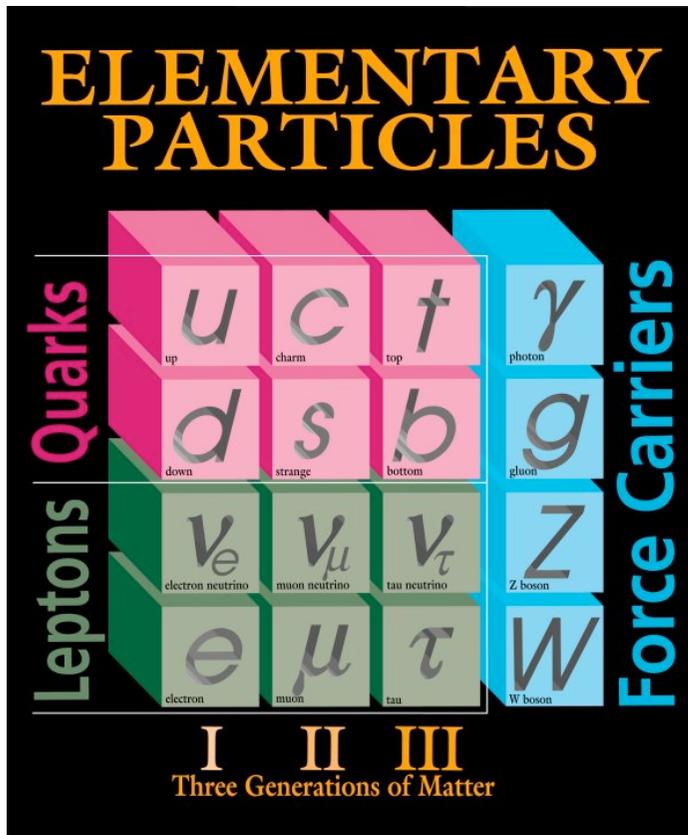
放射性崩壊の源  
ニュートリノの主要な相互作用 (太陽が輝くのに重要)  
弱い力とヒッグス粒子は密接に関係！

## ✓ 重力



万有引力！  
これが無いと地球に住めないしそもそも  
星が出来ない！

# 素粒子物理学の標準模型



- 物質は quark と lepton という粒子から出来ている。それぞれ3世代存在し質量以外は同じ性質（相互作用）を持つ。
- 粒子間の相互作用には電磁力、弱い力、強い力および重力の4種類があり、全てゲージ理論として理解される。

[Fig: Fermilab]

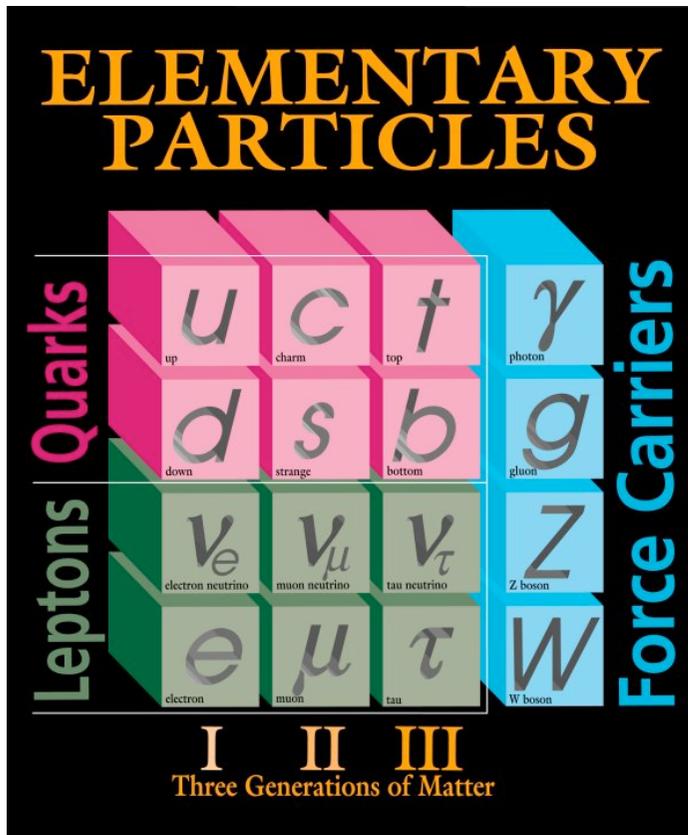
## ゲージ粒子の発見

photon in 1923 Compton Scattering

gluon @ PETRA in 1979

Z, W bosons ( $\sim 80-90$  x proton mass) @ SPS in 1983

# 素粒子物理学の標準模型



- ゲージ理論ではゲージ粒子は質量を持っていない → Z, W boson の質量はヒッグス機構によって説明される
- quark や lepton の質量もそれらのヒッグス粒子との相互作用によって与えられる。

[Fig: Fermilab]

## ゲージ粒子の発見

photon in 1923 Compton Scattering

gluon @ PETRA in 1979

Z, W bosons ( $\sim 80-90$  x proton mass) @ SPS in 1983

# 素粒子物理の方法

---

- 物質 → 粒子として記述
- 相互作用 → 粒子の交換として記述

道具：相対論的場の量子論

小さくて軽くて早い！

粒子の局所的な生成消滅を  
記述出来る。

陽子質量  $\sim 1.67 \times 10^{-27} \text{kg}$

$\sim 0.938 \text{GeV}$  (natural unit)

cf. Natural Unit :  $\hbar \simeq 197 \text{MeV} \cdot \text{fm} = 1$ ,  $c \simeq 3.0 \times 10^{10} \text{cm/s} = 1$

# 素粒子物理の方法

## 場の量子論の復習

N体自由粒子系シュレディンガー方程式

$$i \frac{\partial}{\partial t} \Psi(t, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N) = H_N \Psi(t, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N)$$

$$H_N = \sum_{i=1}^N H_1 = \sum_{i=1}^N \left\{ -\frac{1}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{x}_i) \right\}$$

1 体エネルギー固有状態 (plane wave for  $V = 0$ )

$$H_1 \phi_n(\mathbf{x}) = \varepsilon_n \phi_n(\mathbf{x})$$

N体エネルギー固有状態 (boson)  $E = \sum_i \varepsilon_{l_i}$

$$\Psi(t, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N) = \frac{1}{\sqrt{N!}} \sum_{\text{permutation}} \phi_{l_1}(\mathbf{x}_1) \cdots \phi_{l_N}(\mathbf{x}_N) e^{-it \sum_i \varepsilon_{l_i}}$$

エネルギー固有状態は  $i$  番目の粒子 (自由度  $\mathbf{x}_i$ ) が  $l_i$  番目の順位にいる

→ “ $l$  番目の順位に  $n_l$  個の粒子がいる”に変更する

# 素粒子物理の方法

つまり、

$$H_N |n_1, n_2, \dots\rangle = \sum_{i=1}^{\infty} n_i \varepsilon_i |n_1, n_2, \dots\rangle$$

$$N = \sum_i n_i$$

となる記述法を考える。

どうやるか？ → 各準位  $i$  に調和振動子を対応させる。

$$[a_i, a_j^\dagger] = \delta_{ij} \quad \text{真空の定義: } a_i |0\rangle = 0 \quad (\text{全ての } i)$$

エネルギー固有状態 (Fock space)

$$|n_1, n_2, \dots\rangle = \prod_i \frac{1}{\sqrt{n_i!}} (a_i^\dagger)^{n_i} |0\rangle$$

$$H = \sum_i \varepsilon_i a_i^\dagger a_i$$

# 素粒子物理の方法

## 元の波動関数との対応

場の演算子  $\hat{\varphi}(\mathbf{x}) = \sum_i a_i \phi_i(\mathbf{x})$  は生成消滅演算子の交換関係から以下の交換関係を満たす  $(a_i \text{ 状態生成子に対応する固有波動関数})$

$$[\hat{\varphi}(\mathbf{x}), \hat{\varphi}^\dagger(\mathbf{x}')] = \delta^3(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \quad [\hat{\varphi}(\mathbf{x}), \hat{\varphi}(\mathbf{x}')] = 0$$

場の演算子を用いると座標基底は

$$|\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N\rangle = \frac{1}{\sqrt{N!}} \hat{\varphi}^\dagger(\mathbf{x}_1) \cdots \hat{\varphi}^\dagger(\mathbf{x}_1) |0\rangle$$

として表すことが出来る。実際これを用いて元の波動関数は

$$\langle \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N | t; n_1, n_2, \dots \rangle = \Psi(t, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N)$$

になっていることが分かる。

# 素粒子物理の方法

## 場の量子論としての見方

ハイゼンベルグ演算子  $\hat{\varphi}(t, \mathbf{x}) = \sum_i a_i \phi_i(\mathbf{x}) e^{-i\varepsilon_i t}$  を考えると

ハミルトニアンは

$$H = \sum_i \varepsilon_i a_i^\dagger a_i = \int d^3\mathbf{x} \hat{\varphi}^\dagger(t, \mathbf{x}) \left( \frac{1}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{x}) \right) \hat{\varphi}(t, \mathbf{x})$$

と書き直せる (  $\mathbf{x}$  はもはや自由度ではなくただのラベル。 )

これは最初から場を自由度だと考え、正準交換関係

$$[\hat{\varphi}(t, \mathbf{x}), i\hat{\varphi}^\dagger(t, \mathbf{x}')] = i\delta^3(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$$

が与えられた場の量子論と同じ理論となっている。

(この場合、生成消滅演算子は  $\hat{\varphi}(t, \mathbf{x})$  の Heisenberg 方程式のモード関数の係数演算子に対応する。)

場の理論にする利点？

場の量子論にいくと  $N$  個という条件が Hamiltonian から外れる！

# 素粒子物理の方法

## N体自由粒子系 (boson)

自由度  $\mathbf{x}_i$  ( $i = 1 \cdots N$ )

$$L = \sum_i^N \frac{m}{2} \dot{\mathbf{x}}_i^2 - V(\mathbf{x}_i)$$

共役運動量

$$\mathbf{p}_i = m\dot{\mathbf{x}}_i$$

正準交換関係

$$[x_i, p_j] = i\delta_{ij}$$

エネルギー固有状態

Fock space (但し粒子数は固定)

## 量子場の理論 (boson)

自由度  $\hat{\varphi}(t, \mathbf{x})$

$$\mathcal{L} = \hat{\varphi}^\dagger(t, \mathbf{x}) \left( i \frac{\partial}{\partial t} - \frac{1}{2m} \nabla^2 - V(\mathbf{x}) \right) \hat{\varphi}(t, \mathbf{x})$$

共役運動量

$$\hat{\pi}(x) = i\dot{\hat{\varphi}}(x)$$

正準交換関係

$$[\hat{\varphi}(t, \mathbf{x}), i\dot{\hat{\varphi}}^\dagger(t, \mathbf{x}')] = i\delta^3(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$$

エネルギー固有状態

Fock space (任意の粒子数)

生成消滅のある模型を記述するには場の理論が有利！

# 素粒子物理の方法

相対論的場の理論 = ローレンツ不変なラグランジアン

$$\mathcal{L} = \hat{\phi}^\dagger(t, \mathbf{x}) \left( i \frac{\partial}{\partial t} - \frac{1}{2m} \nabla^2 - V(\mathbf{x}) \right) \hat{\phi}(t, \mathbf{x})$$



$$\mathcal{L} = \partial_\mu \phi^\dagger(x) \partial^\mu \phi(x) - m^2 \phi^\dagger(x) \phi(x) \quad \text{以降局所相互作用のみ扱うので}$$

係数は  $x$  によらない ( $V = 0$ )

( 非相対論極限  $\phi \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2m}} e^{imt} \hat{\phi}$  )

相対論的場の理論の重要な性質

$$\textcircled{1} \quad E = p_0 = \pm(m^2 + |\mathbf{p}|^2)^{1/2} \quad \longrightarrow \quad \phi = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{2p_0}} (a e^{-ipx} + \underline{b^\dagger e^{ipx}})$$

反粒子が存在！

② ラグランジアンの中の場の2次の項 = 質量項

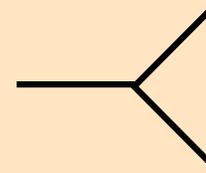
(後の Higgs の議論で重要)

# 素粒子物理の方法

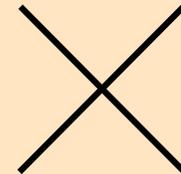
局所的場の理論における相互作用 (上記の例には粒子間相互作用はなかった)

相互作用は Lagrangean に現れる場の高次の項

$$\mathcal{L}_{int} = \phi_1 \phi_2 \phi_3$$

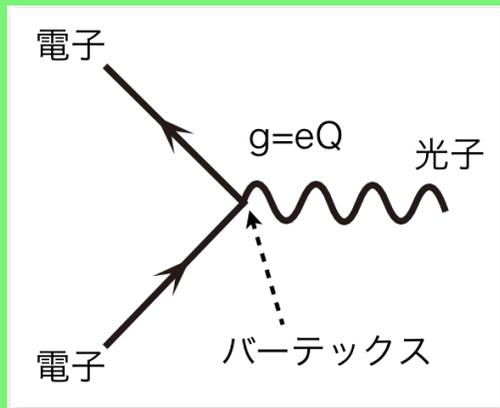


$$\mathcal{L}_{int} = \phi_1 \phi_2 \phi_3 \phi_4$$



なお標準模型はほとんど3点相互作用で記述される。

例) 電磁力  $igQA_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$



相互作用の強さ = 結合定数  $g$  の大きさ

力の見かけの強さは媒介する粒子の質量が  
重いと小さくなる。

[ cf. weak bosons are heavy

= weak interaction ]

# 素粒子の分類

---

## 素粒子の基本的特徴

- 空間的に局在する(大きさを持たない)
- 生成および消滅が可能
- 安定とは限らない
- 反粒子をもつ
- などなど

## 素粒子の分類

- 対称性による分類
- 相互作用による分類

ただしこれらの分類方法は互いに独立ではない。  
例えば、対称性によって相互作用が制限される場合もある。

# 素粒子の分類

対称性：運動法則を変えない操作 ~ ラグランジアンを不変にする操作

Lorentz 対称性以外の対称性はエネルギーを変えない操作と言っても良い  
[Coleman-Mandula Theorem]

ex) Lorentz 対称性:  $x' = \Lambda x$ ,

ex) 場の位相変換:  $\Phi' = \exp(i\alpha) \Phi$

ex) 場の非可換変換:  $\Phi' = U \Phi$  [  $U$  は様々な行列 ]

対称性は保存量を伴う (Noether theorem)

対称性に伴う保存量は一般に“電荷”と呼ばれ、各粒子(=場)の電荷を指定することでその粒子の対称性の下での変換性が指定される。

- スピン = Lorentz (特に空間回転) 対称性の下での電荷
- 電磁力の電荷 = 電磁  $U(1)$  位相変換の下での電荷
- バリオン数 = バリオン  $U(1)$  位相変換の下での電荷
- アイソスピン =  $SU(2)$  対称性の下での電荷
- カラー荷 = カラー  $SU(3)$  対称性の下での電荷

# 素粒子の分類

	粒子	電荷	反粒子	スピン	質量	平均寿命
レプトン	$\nu_e$	0	$\bar{\nu}_e$	1/2	<5.1eV	安定
	$\nu_\mu$	0	$\bar{\nu}_\mu$	1/2	<0.27MeV	安定
	$\nu_\tau$	0	$\bar{\nu}_\tau$	1/2	<31MeV	安定
	$e^-$	-1	$e^+$	1/2	0.51099906 $\pm 0.00000015$ MeV	安定
	$\mu^-$	-1	$\mu^+$	1/2	105.658389 $\pm 0.000034$ MeV	$(21.9703 \pm 0.00004) \times 10^{-6}$ s
	$\tau^-$	-1	$\tau^+$	1/2	1777.1+0.4 -0.5 MeV	$(295.6 \pm 3.1) \times 10^{-15}$ s
クォーク	u	+2/3	$\bar{u}$	1/2	2~8MeV	
	d	-1/3	$\bar{d}$	1/2	5~15MeV	
	s	-1/3	$\bar{s}$	1/2	100~300MeV	
	c	+2/3	$\bar{c}$	1/2	1.0~1.6GeV	
	b	-1/3	$\bar{b}$	1/2	4.1~4.5GeV	
	t	+2/3	$\bar{t}$	1/2	$(176 \pm 8) \pm 10$ GeV	括弧外は系統誤差を示す

[出典] 国立天文台:理科年表2005、丸善(株)、p.473

- レプトン・クォークはスピン 1/2
- $\gamma, g, W, Z$  はスピン 1
- 質量は様々(理由がない限り0でない)
- レプトン・クォークおよび W ボゾンは電磁力電荷を持つ
- クォーク・グルーオンはカラー荷を持つ

スピン整数=ボゾン  
スピン半整数=フェルミオン

粒子	電荷	反粒子	スピン	質量(GeV)	平均寿命	媒介する相互作用
$\gamma$ (光子)	0	$\gamma$	1	0	安定	電磁相互作用
g(グルーオン)	0	g	1	0		強い相互作用
$W^+$	+1	$W^-$	1	$80.22 \pm 0.26$	$\Gamma = 2.08 \pm 0.07$ GeV	弱い相互作用
$Z_0$	0	$Z_0$	1	$91.187 \pm 0.007$	$\Gamma = 2.49 \pm 0.007$ GeV	弱い相互作用

$\Gamma = (\hbar / \text{平均寿命})$ である。

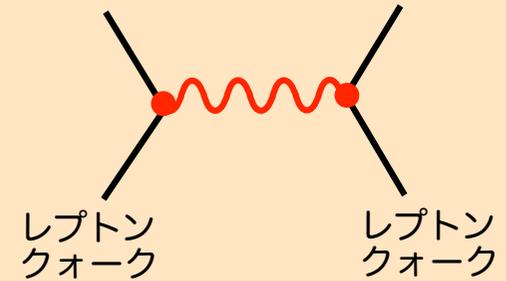
[出典] 国立天文台:理科年表2005、丸善(株)、p.473

# 素粒子の分類

## 相互作用による分類

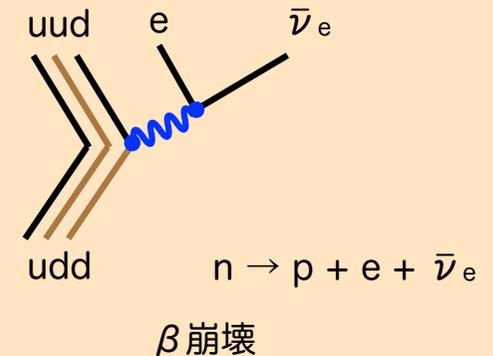
### 電磁相互作用

$\gamma$  の交換による相互作用  
到達距離は無限大  
相互作用の強さはそれほど強くない  
電磁力電荷を持っている粒子間に働く



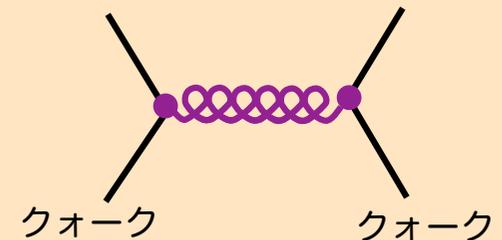
### 弱い力

W、Z の交換による相互作用  
到達距離は極めて短い  $< 0.01$  fm  
相互作用の強さは弱い  
電磁力電荷を変化させる  
レプトン間、クォーク間、  
およびレプトン-クォーク間に働く (左巻きのみ)



### 強い力

gluon の交換による相互作用  
到達距離は短い  $< 1$  fm  
相互作用の強さは強い!  
クォーク間に働く



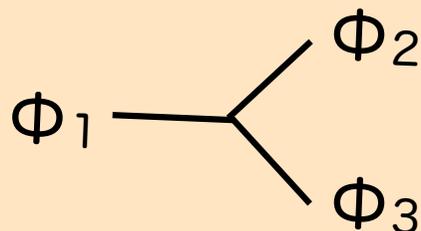
クォークは3つの力全てを感じる  
レプトンは強い力を感じない

# 素粒子の分類

## 粒子の寿命

粒子は必ずしも安定ではなく崩壊可能

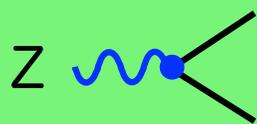
例えば3点相互作用を通してより軽い粒子に崩壊する



$\Phi_1$  が  $\Phi_2$ 、 $\Phi_3$  より重ければ崩壊可能

崩壊率の大きさは結合定数の大きさ及び崩壊粒子の質量で主に決まる

ex)



レプトン  
クォーク  
レプトン  
クォーク

質量 91.2 GeV

寿命  $2.6 \times 10^{-25}$  sec

むしろ一般的に粒子が安定もしくは長寿命であるためには理由が必要

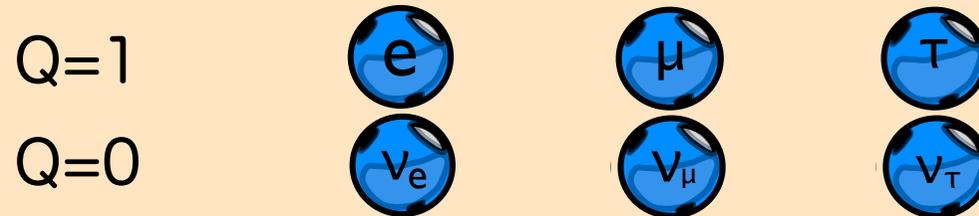
電子は安定 = 電荷を持つ最も軽い粒子

陽子もいまのところ安定 = バリオン数を持つ最も軽い粒子

# 素粒子の分類

## レプトンの実験事実

レプトンの相互作用は(質量の違いを除き)3世代平等 (Lepton universality)



ex) W, Z ボゾンの崩壊分岐比

$$\text{Br}(W^+ \rightarrow e^+ \nu_e) = \text{Br}(W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) = \text{Br}(W^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau) = 11\%$$

$$\text{Br}(Z \rightarrow e^+ e^-) = \text{Br}(Z \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \text{Br}(Z \rightarrow \tau^+ \tau^-) = 3.4\%$$

Lepton universality は W、Zボゾンとレプトンの3点相互作用の結合定数が共通であることを示している。

[ さらには quark が感じる弱い相互作用と lepton が感じる弱い相互作用の強さも同じ ]

# 素粒子の分類

## クォークカラー自由度

$ee \rightarrow \mu\mu$  反応断面積

$$\sigma^{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} = \frac{4\pi\alpha_{em}^2}{3s} = \frac{86.9 \text{ nbGeV}^2}{s}$$

$ee \rightarrow qq$  反応断面積

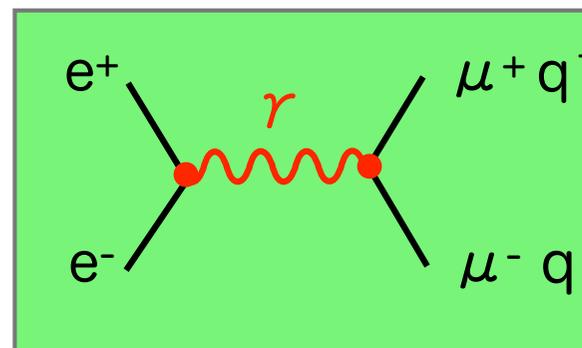
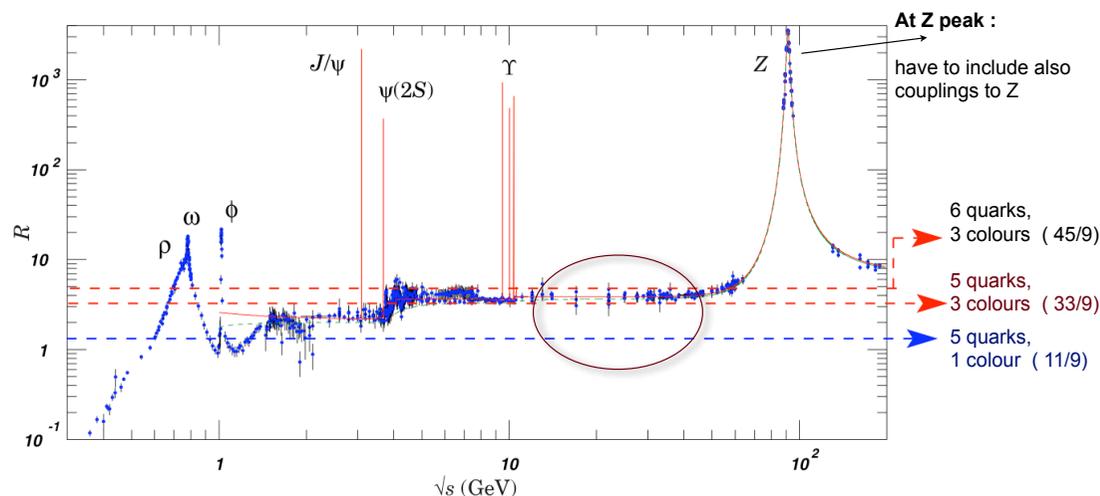
$$\sigma_0^{e^+e^- \rightarrow q\bar{q}} = \frac{4\pi\alpha_{em}^2}{3s} e_q^2 N_c = \frac{86.9 \text{ nbGeV}^2}{s} e_q^2 N_c.$$

断面積の比

$$R = \frac{\sigma^{e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}}}{\sigma^{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}} = N_c \sum_q e_q^2.$$

$$\sum_q \sigma^{e^+e^- \rightarrow q\bar{q}} = \sigma^{e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}},$$

$$R = N_c \sum_q e_q^2 = N_c \left[ \underbrace{\left(\frac{2}{3}\right)^2}_u + \underbrace{\left(-\frac{1}{3}\right)^2}_d + \underbrace{\left(-\frac{1}{3}\right)^2}_s + \underbrace{\left(\frac{2}{3}\right)^2}_c + \underbrace{\left(-\frac{1}{3}\right)^2}_b \right] = N_c \frac{11}{9}.$$



実験結果は  $N_c = 3$  で良く再現される！

# 素粒子標準模型

- 物質は quark と lepton という粒子から出来ている。それぞれ3世代存在し質量以外は同じ性質（相互作用）を持つ。
- 粒子間の相互作用は  $\gamma$ , Z, W, g によって媒介される。

## さまざまな疑問

何故世代毎の lepton-lepton-W が同じ結合定数か？

何故各クォークの quark-quark-g が同じ結合定数か？

何故各クォークの quark-lepton-g などが無いのは何故か？

...

これらの疑問は  $\gamma$ , Z, W, g がゲージ対称性に伴うゲージボゾンであると考えると理解出来る

# 素粒子標準模型

## ゲージ対称性とゲージボゾン

カラー荷やアイソスピンは非可換変換対称性の電荷

場の非可換変換:  $\Phi' = U \Phi$  [  $U$  は様々な行列、  $U = \text{Exp}[i\alpha T]$  ]

カラー対称性 =  $U$  が  $SU(3)$  群に属する対称性

アイソスピン対称性 =  $U$  が  $SU(2)$  群に属する対称性

(空間対称性の群  $SU(2)$  と同じ構造のため“スピン”と呼ばれているが独立なもの)

電磁力電荷は可換対称性  $U(1)$  の電荷,  $U = \text{Exp}[i\alpha]$

**ゲージ対称性** =  $U$  が時空点に依っている局所対称性、 $\Phi' = U(x) \Phi$

局所対称性のもとでは場の微分は共変でない

$\partial\Phi' = U(x) \partial\Phi + \partial U(x) \Phi \rightarrow$  このままではラグランジアンが不変でない…

[ cf.  $L = \partial\Phi\partial\Phi + \dots$  ]

# 素粒子標準模型

## ゲージ対称性とゲージボゾン

ゲージ場を導入して共変微分を考えることでラグランジアンが不変に出来る！

$$\text{共変微分} \quad \partial\Phi \rightarrow D\Phi = (\partial - i g \mathbf{A})\Phi \quad [\text{cf. } L = D\Phi D\Phi + \dots]$$

$$\text{ゲージ変換} \quad \Phi' = U(x) \Phi, \quad D\Phi' = U(x) D\Phi$$

$$A' = i/g U(x)\partial U(x) + U(x) A U(x)^{-1}$$

ゲージ対称性を課すと自動的にスピン1を持つゲージ粒子が導入される！

(cf. 時空の対称性のゲージ粒子 = spin 2 graviton)

ゲージ粒子と各粒子の相互作用は対称性の電荷でコントロールされる。

- × lepton-quark-W
- × lepton-quark-gluon

相互作用結合定数の普遍性も説明される

# 素粒子標準模型

素粒子標準模型 = SU(3)xSU(2)xU(1)ゲージ対称性を持つカイラルフェルミオンの模型

	SU(3)	SU(2)	U(1)
クォーク $q_L^{1,2,3} = \begin{pmatrix} u_L^{1,2,3} \\ d_L^{1,2,3} \end{pmatrix}$	3	2	1/6
$\bar{U}_R^{1,2,3}$	3*	-	-2/3
$\bar{D}_R^{1,2,3}$	3*	-	1/3
レプトン $l_L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$	-	2	-1/2
$\bar{E}_R$	-	-	1

ゲージボゾン:  $g$   $Z, W, \gamma$

ディラックフェルミオン (Lorentz 可約)  
(粒子、スピン↑↓) + (反粒子、スピン↑↓)

カイラルフェルミオン (Lorentz 既約)

{ 左巻き (粒子、スピン↓) + (反粒子、スピン↑)  
右巻き (粒子、スピン↑) + (反粒子、スピン↓)

x 3 世代

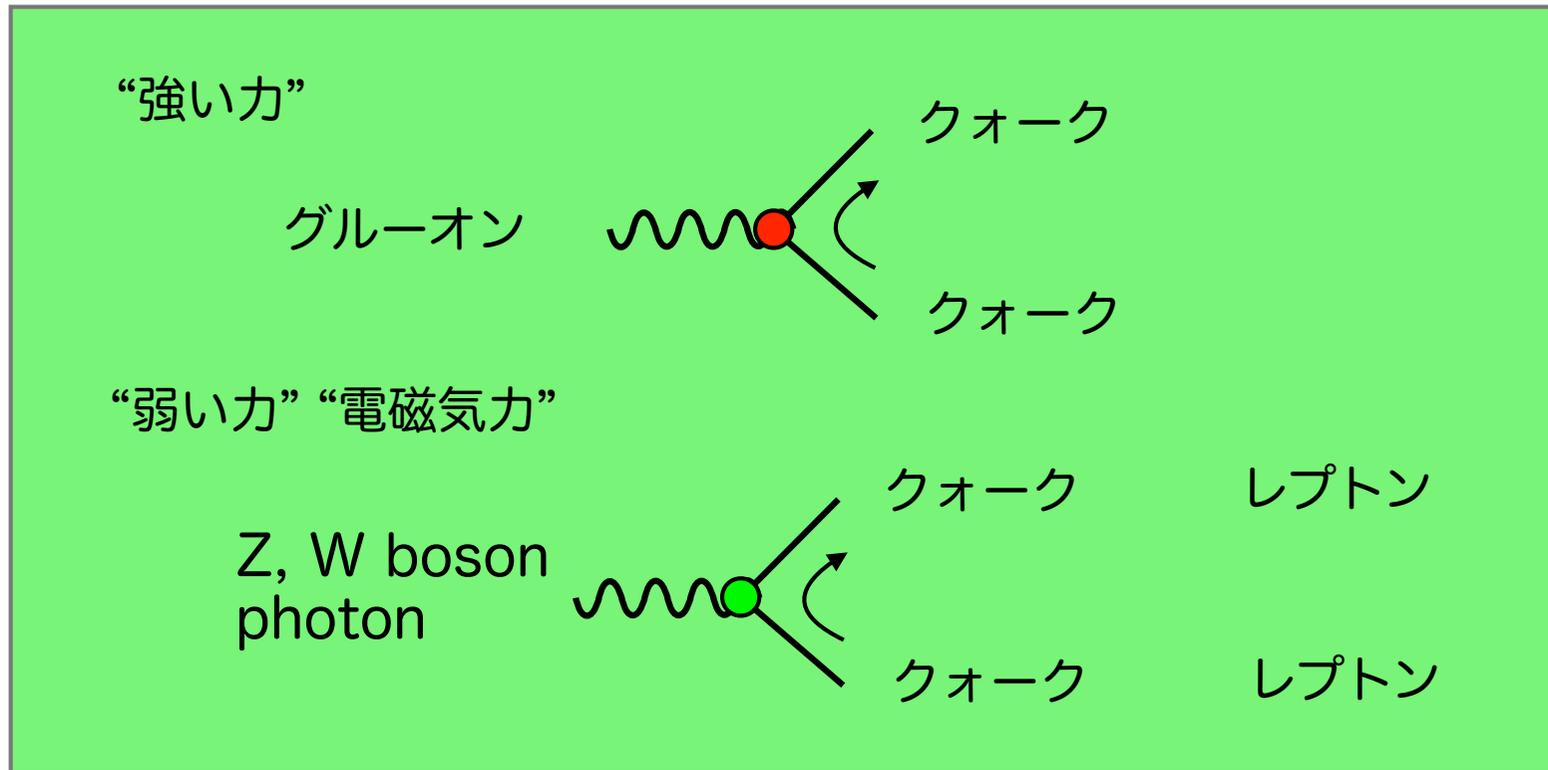
標準模型では左巻きのクォーク・レプトンのアイソスピン対称性が SU(2) ゲージ対称性となっている。

標準模型では電磁力と弱い力が SU(2)xU(1) の中に混ざって入っている。

$$Q_{EM} = T_3 + Q_{U(1)Y}$$

# 素粒子標準模型

ゲージ理論での相互作用 = “電流” + ゲージボゾン



力の強さはそれぞれのゲージ群ごとに独立の結合定数に比例 ( $g_s > g_2 > g_1$ )

# 素粒子標準模型

## …標準模型の問題点

ゲージ理論で出てくるゲージ粒子は質量を持ってない！

例：Photon は質量を持たない

$$L = - F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} / 4, \quad (F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)$$

$$\partial^\mu (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) = 0, \quad \partial^\mu A_\mu = 0$$

この理論は U(1) ゲージ対称性

$$A_\mu \rightarrow A'_\mu = A_\mu + \partial_\mu \lambda$$

を持つ！

# 素粒子標準模型

## …標準模型の問題点

ゲージ理論で出てくるゲージ粒子は質量を持ってない！

例：質量を持つスピン1粒子

$$L = - F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} / 4 + m^2 A^\mu A_\mu / 2,$$

$$\partial^\mu (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) = - m^2 A_\nu, \quad \partial^\mu A_\mu = 0$$

この場合は U(1) ゲージ対称性

$$A_\mu \rightarrow A'_\mu = A_\mu + \partial_\mu \lambda$$

を持たない！

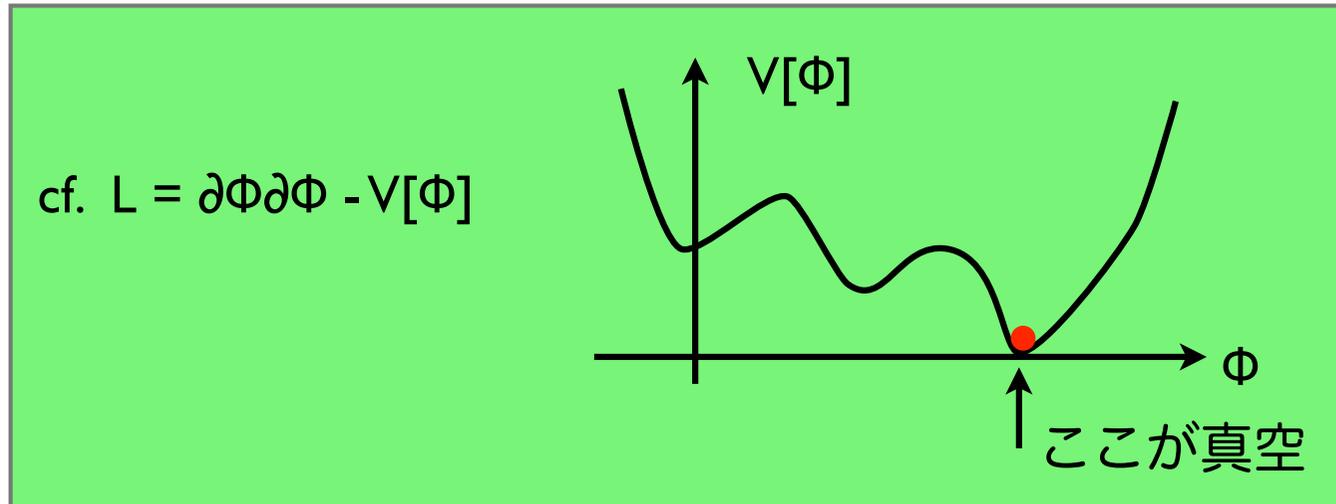
一方で W, Z ボゾンは質量を持っている。  
本当にゲージ粒子として理解できるのか？

# 素粒子標準模型

## SU(2)xU(1) の自発的対称性の破れ

理論が対称性を持っていても(つまりラグランジアンが不変でも)真空がその対称性を破ることがある。これを対称性の自発的破れという。

場の理論において、真空はエネルギーが最低な状態として定義される。

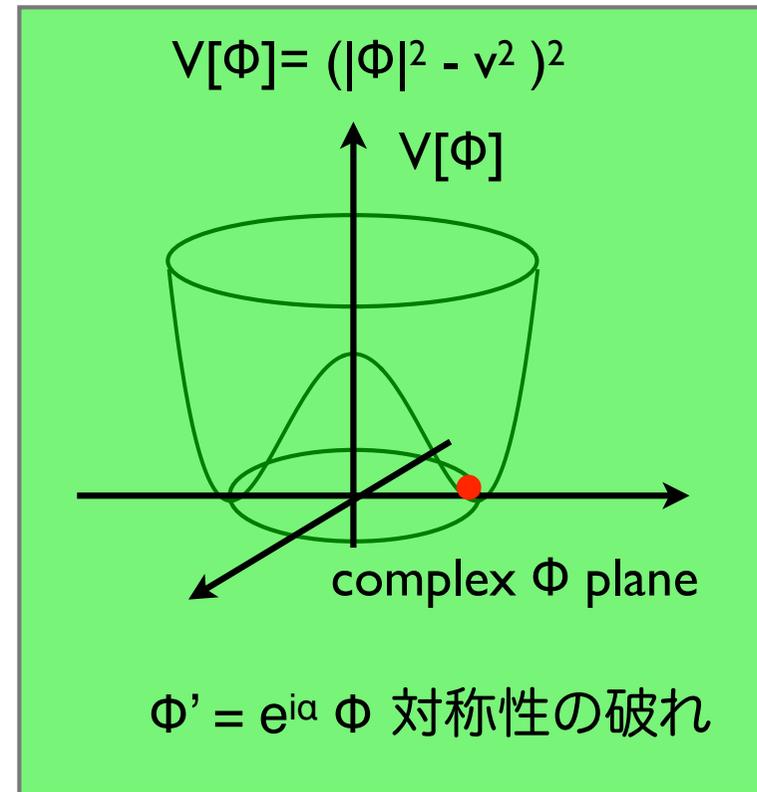
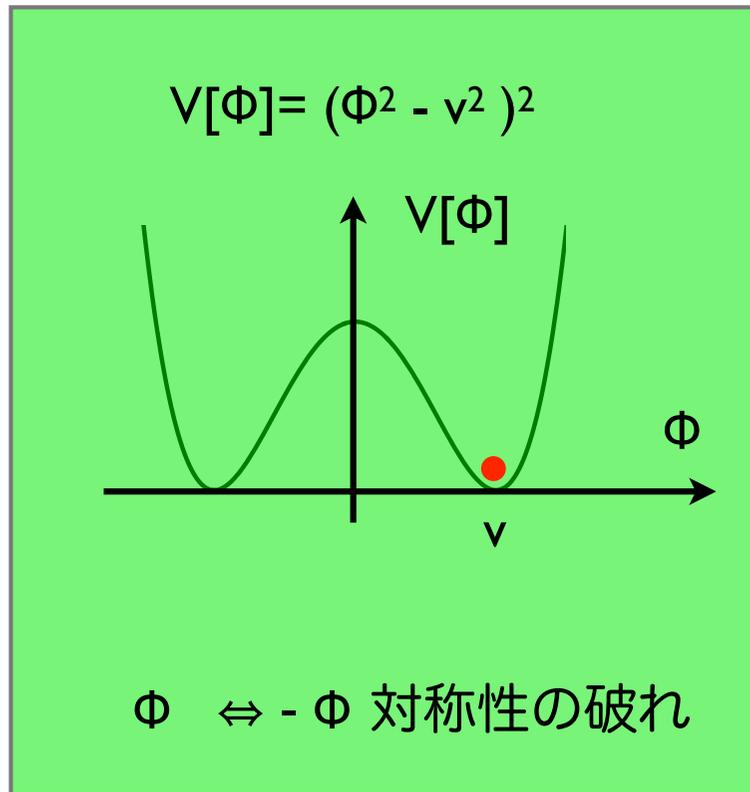


真空における  $\Phi$  の期待値が 0 でないとき、 $\Phi$  が凝縮していると考ええる。

もし真空において何らかの対称性の電荷を持った場が凝縮しているとその対称性は自発的に破れていることになる！

# 素粒子標準模型

## 自発的対称性の破れの例

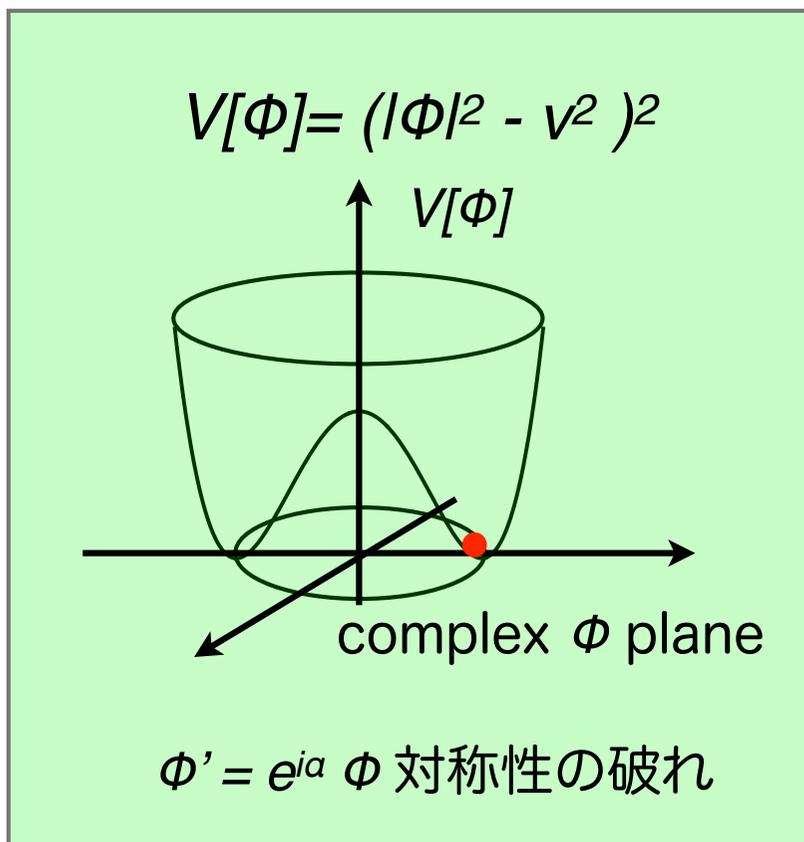


理論(=ポテンシャル)自体は対称性を持っていても真空のまわりでは対称性が見えない！ → 自発的に破れている！

# 素粒子標準模型

特にゲージ対称性が自発的に破れた場合

→ ゲージボゾンが質量を持つ！



$U(1)$  ゲージ理論の例

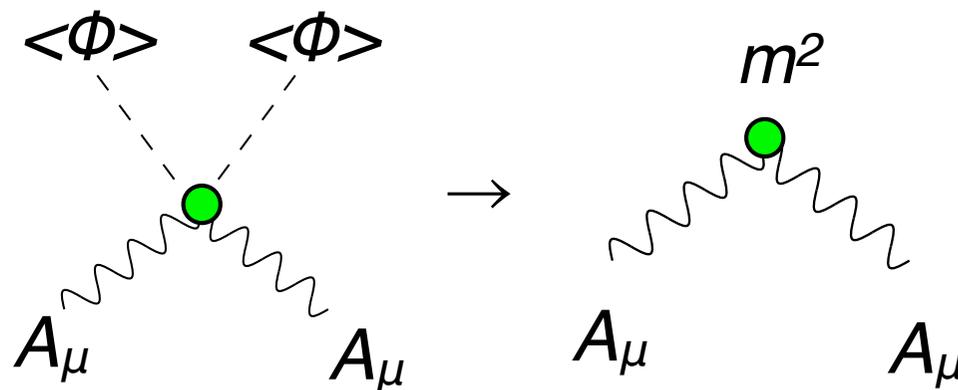
真空： $\langle \Phi \rangle = v$

$L = D_\mu \Phi^\dagger D^\mu \Phi$  に代入すると

$L = g^2 v^2 A^\mu A_\mu$  として質量が出てくる！

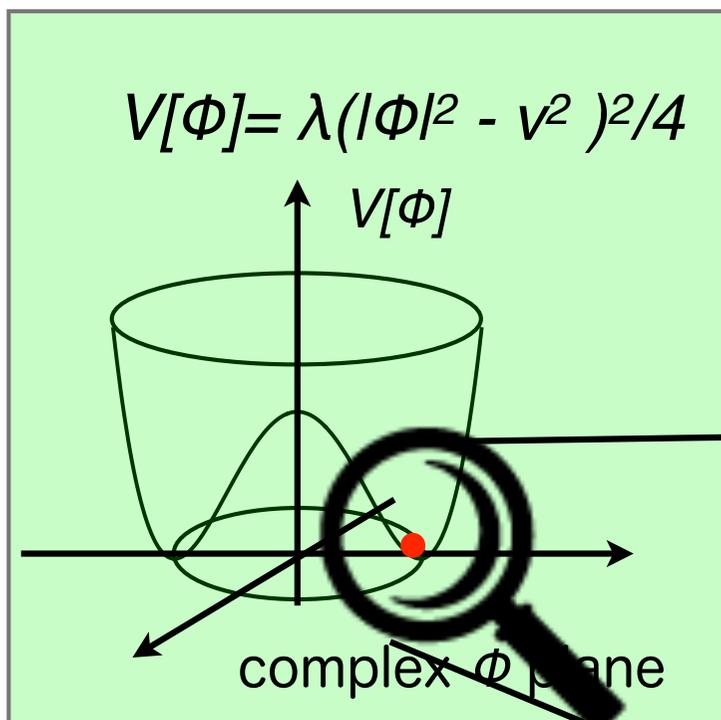
( $m = gv$ )

2点相互作用 = 質量が生じる



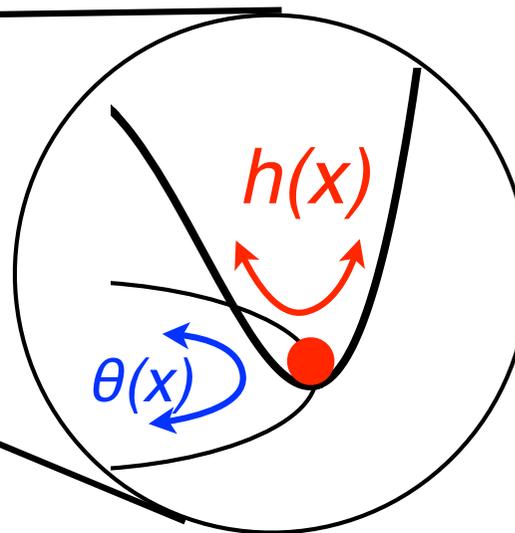
# 素粒子標準模型

自発的対称性の破れはスカラー場(= Higgs 場)の凝縮で起こる



その真空期待値の周りのゆらぎ  
= Higgs 粒子!

$$\Phi(x) = (v + h(x)/\sqrt{2}) e^{i\theta(x)}$$



$V[\Phi] \rightarrow \lambda^2 v^2 h^2$  : Higgs 粒子は質量を持つ!

標準模型 :  $SU(2) \times U(1)$  の場合は少し複雑だが基本は同じ

LHC において実際に Higgs 粒子が発見された!

# 素粒子標準模型

フェルミオンとの相互作用

$$L_{Fermion} = \psi^\dagger i \sigma_\mu D^\mu \psi - y_U H Q_L \bar{U}_R - y_D H^\dagger Q_L \bar{D}_R - y_L H^\dagger L_L \bar{E}_R$$

$y_{U,D,E}$  : 3x3 行列の係数

$$\langle H \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$

によってフェルミオンも質量を持つ！

$$m_f = y_f v$$

ヒッグスとの相互作用の強さ(=湯川相互作用定数)によって質量の大きさが決まる！

例) top quark : 173GeV  $\rightarrow$   $y_{\text{top}} \approx 1$

bottom quark : 4.5GeV  $\rightarrow$   $y_{\text{bottom}} \approx 0.026$

(今の所) LHC で観測されているヒッグスとフェルミオンの相互作用比はフェルミオンの質量比と一致している！

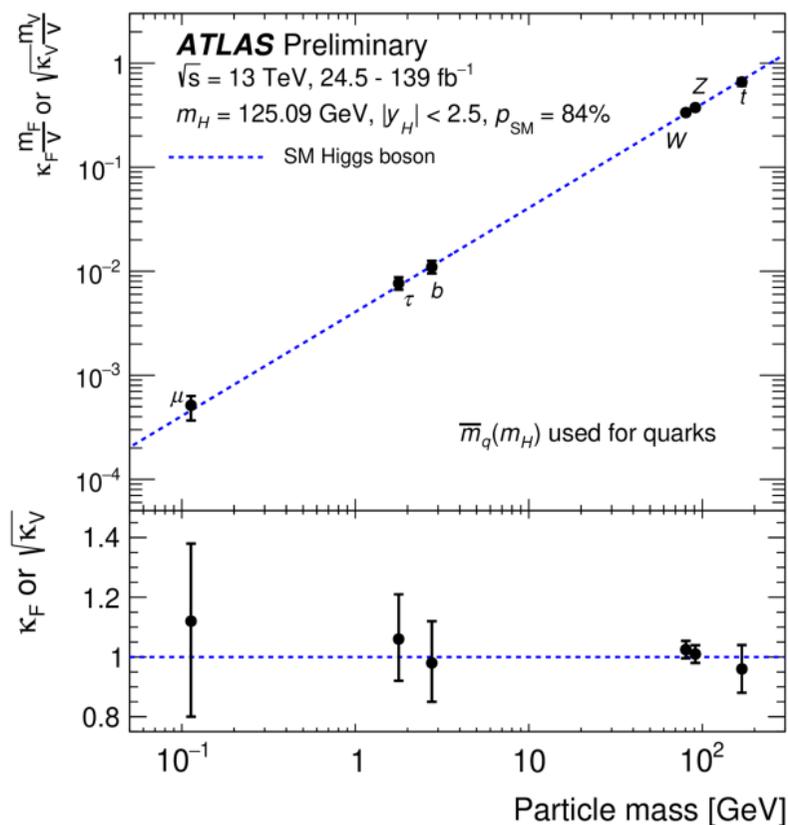
# 素粒子標準模型

## フェルミオンとの相互作用

$$L_{Fermion} = \psi^\dagger i \sigma_\mu D^\mu \psi - y_U H Q_L \bar{U}_R - y_D H^\dagger Q_L \bar{D}_R - y_L H^\dagger L_L \bar{E}_R$$

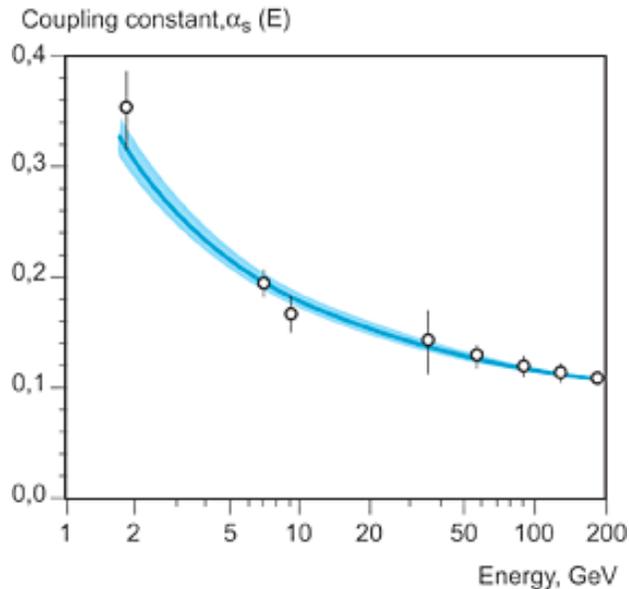
$y_{U,D,E}$  : 3x3 行列の係数

[ATLAS-CONF-2020-027]



# 素粒子標準模型

## 強い相互作用の到達距離



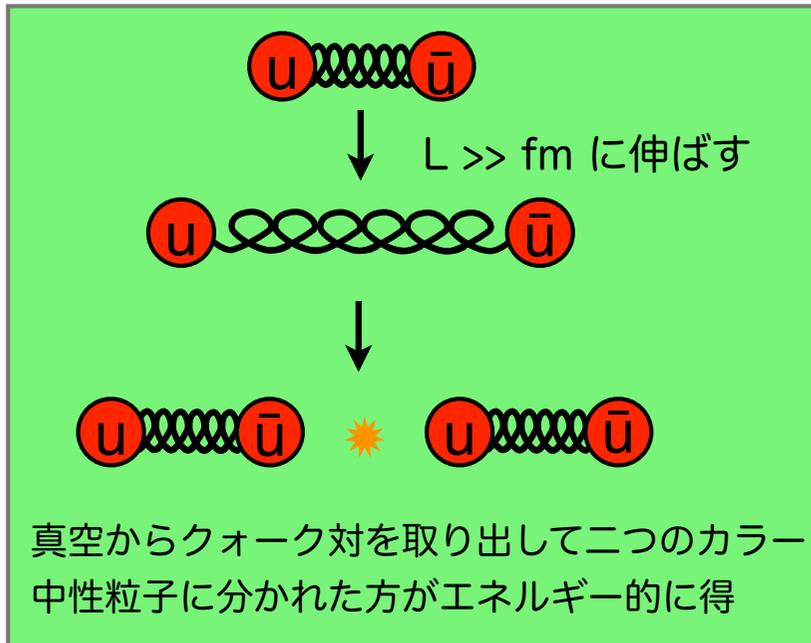
[[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2004/public.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2004/public.html)]

標準模型の SU(3) ゲージ相互作用は距離が離れるほど強くなって行く性質を持つ。  
(漸近的自由性)

カラー荷を持った粒子を ~fm 以上引き離せない!

$$\text{Energy} \sim \text{GeV} \times (L / \text{fm})$$

カラーは閉じ込められ、カラー中性な束縛状態のみ粒子として取り出せる。

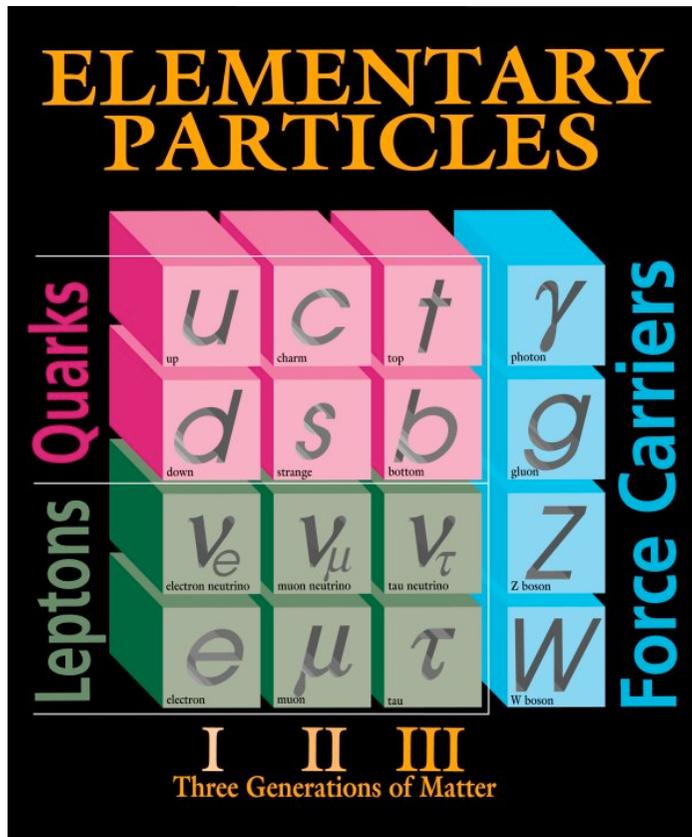


Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons					
These are a few of the many types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.776	1
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons.					
These are a few of the many types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
$p$	proton	$uud$	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	antiproton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
$n$	neutron	$udd$	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	$uds$	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	$sss$	-1	1.672	3/2

質量0のグルーオンが見つからなくても矛盾しない。

# 素粒子標準模型



Fermilab 95-759

## 標準模型のパラメータ

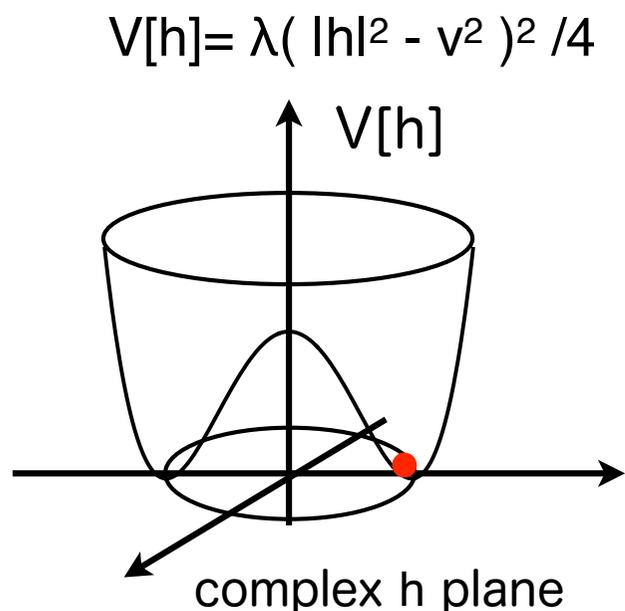
- 3つのゲージ結合定数
- Higgs の真空期待値と質量 (2個)
- 6つのクォーク質量
- 3つの荷電レプトン質量
- 3つのクォーク混合角
- 1つの混合行列の複素位相 = 小林・益川位相
- 1つの Strong CP phase
- [ +3つのニュートリノ質量  
+3つのレプトン混合角  
+3つの混合行列の複素位相 ]

標準模型では上記の19 (+9) 個のパラメータを決めれば全ての物理量を計算で決められる！

加速器実験の結果を非常に精度良く説明出来ている！！

# 素粒子標準模型

Higgs が見つかって何が分かったのか？



$v$  は弱い相互作用の測定から測られている ( $v = 174\text{GeV}$ )

一方  $\lambda$  は未知の結合定数で Higgs 質量を決める

$$m_H = \lambda v$$

Higgs が見つかって質量が分かると  $\lambda$  が分かる

$\lambda$  は Higgs の起源と密接に関係

cf.  $\lambda$  が 1 よりかなり大きいと Higgs が複合粒子の可能性！  
 $\lambda$  が小さいと Higgs が基本的な素粒子！

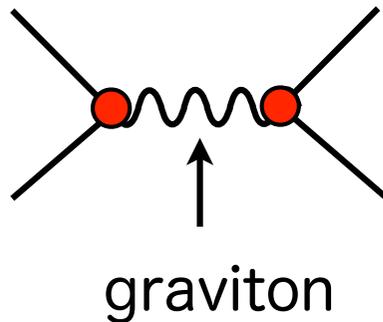
LHC が示唆している 125GeV 程度の Higgs は小さい  $\lambda$  に対応  
よって基本粒子としての Higgs が示唆されている！

もちろん Higgs 粒子の背後にある物理が今後の大きな課題！！

# 標準模型の先にあるもの

New physics へのモチベーション

## 1. Gravity



相互作用の強さ：

重力： $energy / M_{PL}$

ゲージ相互作用： $g \sim O(0.1)$

(プランクスケール：

$$M_{PL} = (8\pi G_N)^{-1/2} \approx 2.4 \times 10^{18} \text{GeV}$$

重力は  $E > M_{PL}$  で無視出来なくなる！

$E > M_{PL}$  までには New Physics が登場するはず

→ String Theory?

# 標準模型の先にあるもの

New physics へのモチベーション

## 2. Unification

標準模型のフェルミオン

	$SU(3)$	$SU(2)$	$U(1)$
$q_L^{1,2,3} = \begin{pmatrix} u_L^{1,2,3} \\ d_L^{1,2,3} \end{pmatrix}$	3	2	1/6
$\bar{U}_R^{1,2,3}$	$3^*$	-	-2/3
$\bar{D}_R^{1,2,3}$	$3^*$	-	1/3
$l_L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$	-	2	-1/2
$\bar{E}_R$	-	-	1

わりと乱雑

# 標準模型の先にあるもの

New physics へのモチベーション

## 2. Unification

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  を  $SU(5)$  に埋め込むと…

フェルミオンたちはたった2種類にまとまる!

$$\psi(5^*) = \begin{pmatrix} \bar{D}_R^1 \\ \bar{D}_R^2 \\ \bar{D}_R^3 \\ L_L^1 \\ L_L^2 \end{pmatrix} \quad \psi(10) = \begin{pmatrix} 0 & \bar{U}_R^3 & -\bar{U}_R^2 & U_L^1 & D_L^1 \\ -\bar{U}_R^3 & 0 & \bar{U}_R^1 & U_L^2 & D_L^2 \\ \bar{U}_R^2 & -\bar{U}_R^1 & 0 & U_L^3 & D_L^3 \\ -U_L^1 & -U_L^2 & -U_L^3 & 0 & \bar{E}_R \\ -D_L^1 & -D_L^2 & -D_L^3 & -\bar{E}_R & 0 \end{pmatrix}$$

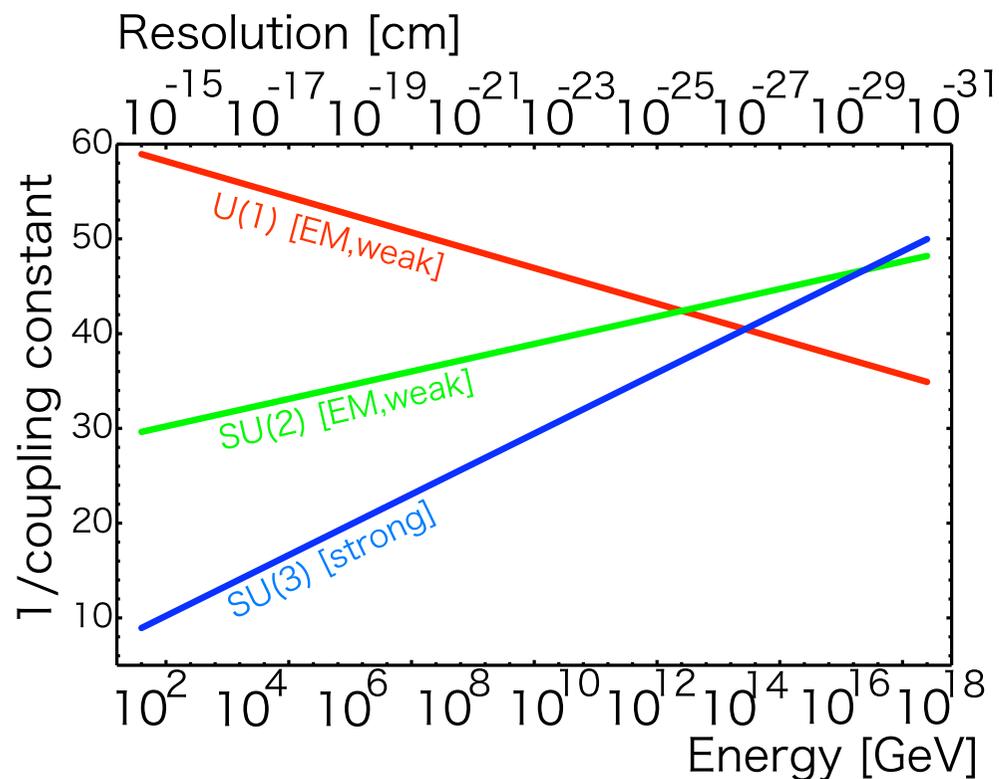
偶然とは思えない!

[これだと原子=陽子+電子が完全に中性であることがゲージ相互作用の普遍性から簡単に理解出来る!]

# 標準模型の先にあるもの

## New physics へのモチベーション

### 2. Unification



高エネルギー領域に外挿すると3つのゲージ結合定数が近づいて行く！ →  $10^{14-17} \text{ GeV}$  に統一理論？

統一理論は陽子崩壊を予言！ → *Hyper Kamiokande* に期待！

# 標準模型の先にあるもの

---

New physics へのモチベーション

## 3. Neutrino Mass

レプトンの湯川型相互作用

$$L_{Fermion} = -y_L H^\dagger L_L \bar{E}_R$$

$\langle H \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$  によって質量を持つるのは charged lepton のみ！

$$m_l = y_L v \quad (l = e, \mu, \tau)$$

Neutrino 振動 → Neutrino は質量を持つ ( $m_\nu \sim 10^{-(3-1)} eV$ ) !

標準模型は Neutrino の質量を持つ様に拡張されなければならない！

# 標準模型の先にあるもの

New physics へのモチベーション

## 3. Neutrino Mass

高次数相互作用の導入(seesaw-mechanism)!

$$L_{Fermion} = -y_L H^\dagger L_L \bar{E}_R - (H L_L)(H L_L) / \Lambda$$

$\langle H \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$  によって Neutrino も質量を持てる様になる!

$$m_L = y_L v \quad (l = e, \mu, \tau) \quad m_\nu = v^2 / \Lambda \quad (l = \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$$

Neutrino 質量 = Majorana Type の質量

$\Lambda \sim 10^{15} \text{ GeV}$  であれば Neutrino は質量 ( $m_\nu \sim 10^{-(3-1)} \text{ eV}$ )  
を説明出来る! → そのエネルギースケールに新物理!

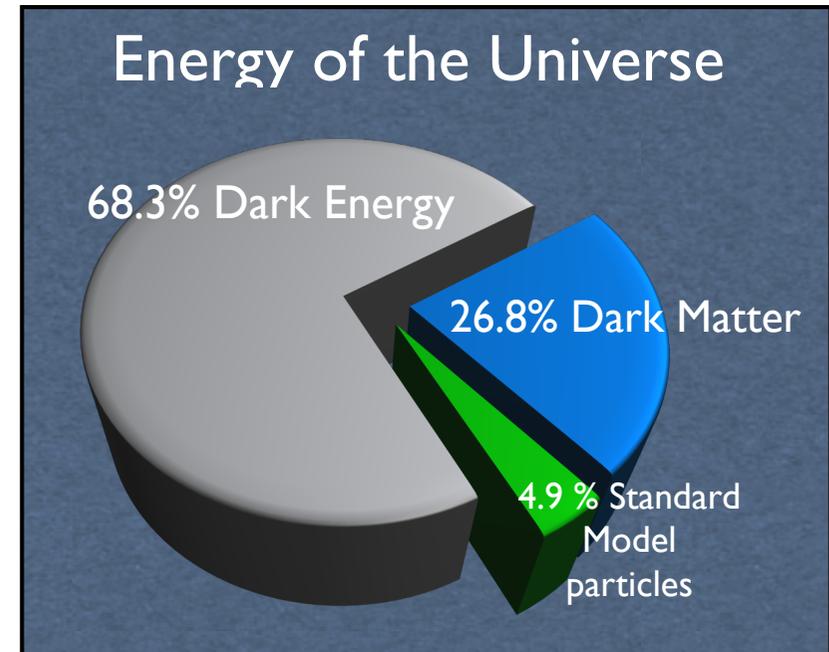
# 標準模型の先にあるもの

New physics へのモチベーション

## 4. 暗黒物質、暗黒エネルギー

近年の宇宙観測から、宇宙は標準模型にない物質で占められていることが明らかになって来た！ → 標準模型を越えた物理がある！

- ✓ 銀河の回転曲線
- ✓ 宇宙背景放射のゆらぎの観測
- ✓ 重力レンズ
- ✓ 宇宙の大規模構造形成  
シミュレーション



# 標準模型の先にあるもの

## New physics へのモチベーション

### 4. 暗黒物質、暗黒エネルギー

近年の宇宙観測から、宇宙は標準模型にない物質で占められていることが明らかになって来た！ → 標準模型を越えた物理がある！

#### ✓ 暗黒物質の候補

電荷を持たない安定粒子

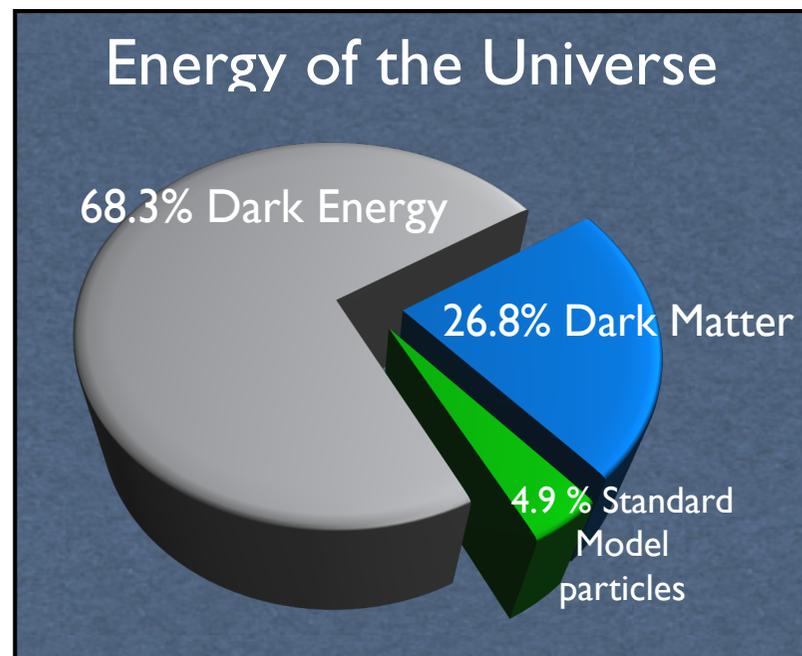
質量領域： $10^{-19}$  eV -  $10^{60}$  GeV

WIMP (超対称模型など)

アクシオン (strong CPの解)

原始ブラックホール

→ まだまだ未説明！



#### ✓ 暗黒エネルギーはもっと謎！

→ 暗黒セクターは標準模型を越えた物理を示唆している！

# 標準模型の先にあるもの

---

New physics へのモチベーション

## 5. インフレーション

### 宇宙の平坦性問題

宇宙の曲率半径  $K^{-1/2}$  は宇宙膨張係数  $a$  に比例

宇宙の見渡せる大きさ  $H^{-1}$  は宇宙膨張  $a^{3(1+\omega)/2}$  で大きくなる

(状態方程式が  $p=\omega\rho$  の物質が支配的の時期)

通常宇宙 ( $\omega = 0$  or  $1/3$ ) だとすると宇宙はある時刻に少し曲がっていると相対的にどんどん曲がって行く！

一方観測から今の宇宙は曲がっていない！

→ 過去にはもっともっと平坦な宇宙だった！

→ なんで？ = 平坦性問題

# 標準模型の先にあるもの

---

New physics へのモチベーション

## 5. インフレーション

宇宙の平坦性問題

宇宙の曲率半径  $K^{-1/2}$  は宇宙膨張係数  $a$  に比例

宇宙の見渡せる大きさ  $H^{-1}$  は宇宙膨張  $a^{3(1+\omega)/2}$  で大きくなる

( $p=\omega\rho$  の物質が支配的の時期)

宇宙を  $\omega = -1$  の物質が支配していた時期が過去にあれば  
むしろ曲がっていた宇宙を平坦に出来る！

$\omega = -1$  の物質 = インフラトン  $\notin$  標準模型！

( Higgs 場をインフラトンに使うアイデアもあるが)

# 標準模型の先にあるもの

New physics へのモチベーション

## 5. インフレーション

宇宙のホライズン問題

宇宙のある時期に見渡せる大きさ  $H^{-1} (\propto a^{3(1+\omega)/2})$  は  
その後膨張係数  $a$  に比例して広がって行く！

通常宇宙 ( $\omega = 0$  or  $1/3$ ) だとすると“新たに”見渡せる様になる  
半径は常に過去に見渡せた半径より大きい！

宇宙の晴れ上がりの時期 ( $T \sim 3000\text{K}$ ) の時期に見渡せた半径は現在  
**70Mpc** 程度まで引き延ばされている  
これは現在見渡せる半径 **3000Mpc** よりずっと小さい！

一方で宇宙背景放射は一様 → 何故？ = **ホライズン問題！**

# 標準模型の先にあるもの

---

New physics へのモチベーション

## 5. インフレーション

宇宙のホライズン問題

宇宙のある時期に見渡せる大きさ  $H^{-1} (\propto a^{3(1+\omega)/2})$  は  
その後膨張係数  $a$  に比例して広がって行く！

通常宇宙 ( $\omega = 0$  or  $1/3$ ) だとすると“新たに”見渡せる様になる  
半径は常に過去に見渡せた半径より大きい！

宇宙を  $\omega = -1$  の物質が支配していた時期 “新たに”見渡せる様になる  
半径は実は過去に見渡せていたことに出来る！

**インフレーションで解決できる！**

インフラトンの揺らぎから生じる背景放射の揺らぎも観測と良く合っている！

# 標準模型の先にあるもの

---

New physics へのモチベーション

## 6. バリオン非対称性

現在の宇宙は物質ばかりで反物質は残っていない！

$$(n_B - n_{\bar{B}}) / n_\gamma \sim 10^{-9} \quad (n_B \gg n_{\bar{B}})$$

宇宙の初期では  $n_\gamma \sim n_B$

$$(n_B - n_{\bar{B}}) / n_B \sim 10^{-9}$$

宇宙の初期で僅かに非対称性が生成！

インフレーションがあると粒子はいったん薄まってしまう！  
→ バリオン対称な宇宙から非対称性を生成！

# 標準模型の先にあるもの

---

New physics へのモチベーション

## 6. バリオン非対称性

物質対称な宇宙から非対称性を生成する条件

サハロフ 3 条件

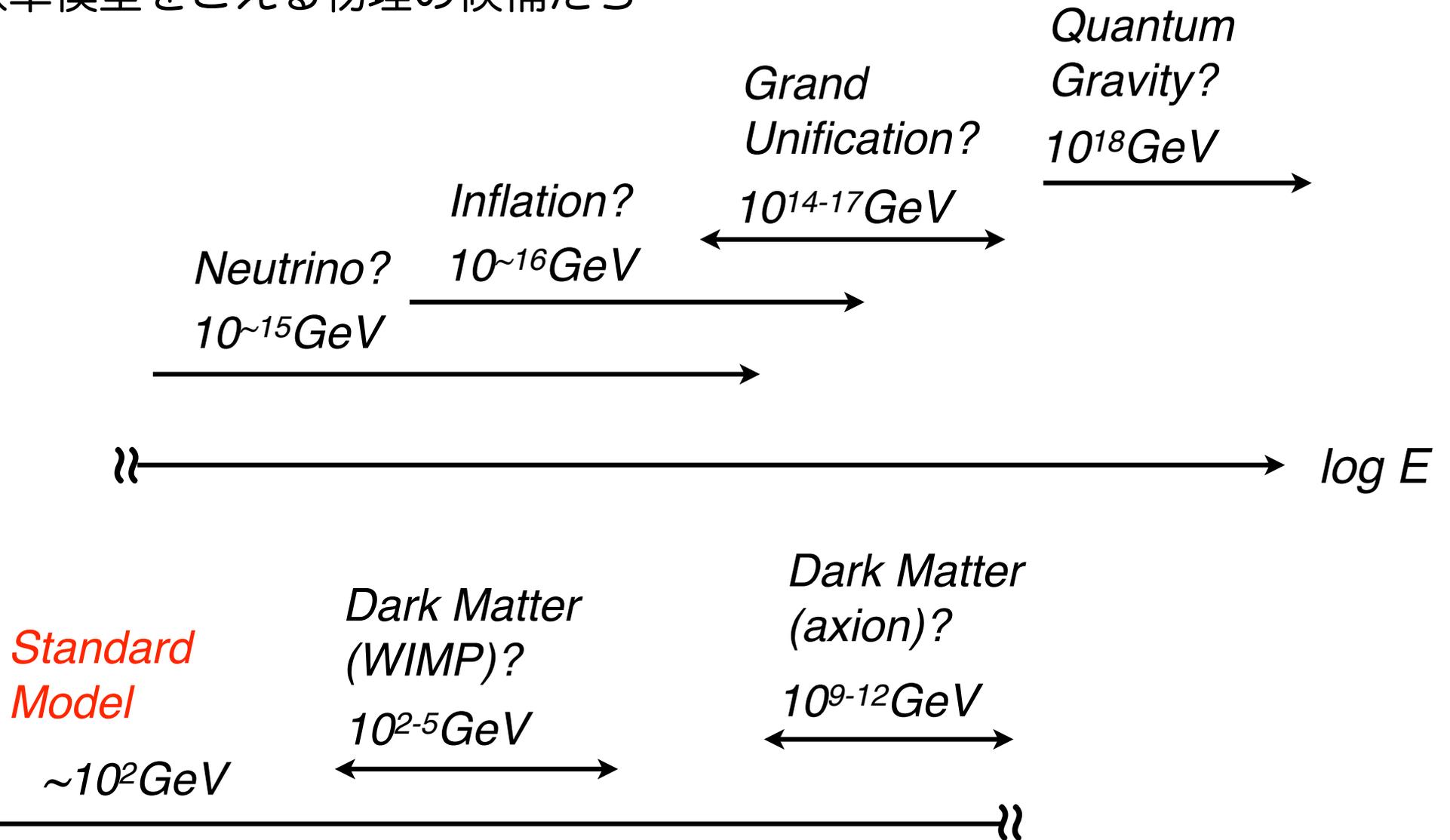
- ✓ バリオン対称性を破る相互作用
- ✓ C, CP 対称性を破る相互作用
- ✓ これらの対称性を破る相互作用が宇宙膨張よりゆっくり

標準模型ではバリオン数が保存する!

→ 新物理の存在を示唆!

# 標準模型の先にあるもの

標準模型をこえる物理の候補たち



これらの新物理と標準模型を繋ぐ TeV スケールの物理にも期待！  
もちろんこれら以外にもまだ考えられていない理論の可能性も！

# まとめ

---

標準模型は19 (+9) 個のパラメータを決めれば全ての物理量を計算出来る非常に成功した模型。

2012年LHC 実験において Higgs 粒子が発見された！  
標準模型が遂に完成。

一方標準模型を越えた物理の存在がさまざまな方向から示唆されている  
(重力、ニュートリノ質量、大統一理論、暗黒物質、暗黒エネルギー、  
インフレーション、宇宙のバリオン非対称性などなど)

今後の LHC 実験に加えて、暗黒物質の直接検出実験、宇宙線観測を通じた暗黒物質の探索、陽子崩壊やニュートリノ物理のより精密な測定から目が離せない