

素粒子標準理論の現状と残された課題

棚橋 誠治

名古屋大学

素粒子宇宙起源研究機構 / 大学院理学研究科

素粒子原子核物理作業部会

素粒子標準理論とは

- * 3世代のクォークとレプトンと、その間にはたらく「強い相互作用」、「弱い相互作用」、「電磁相互作用」を記述する場の量子論
- * キーワード：対称性と保存則、くりこみ可能性
電子 (陽子) の安定性を保証する電荷 (バリオン数) 保存則
素粒子間の相互作用を規定するゲージ対称性

FERMIONS matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...					
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-2)\times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M middle neutrino*	$(0.009-2)\times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H heaviest neutrino*	$(0.05-2)\times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

素粒子標準理論とは

- * $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ のゲージ対称性をもつ場の量子論
- * 「強い相互作用」、「弱い相互作用」、「電磁相互作用」を記述する
- * くりこみ可能性とゲージ対称性 \Rightarrow 高い予言能力

BOSONS			force carriers spin = 0, 1, 2, ...		
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W⁻	80.39	-1	Higgs Boson spin = 0		
W⁺ W bosons	80.39	+1	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
Z⁰ Z boson	91.188	0	H Higgs	126	0

Particle Adventure より

標準理論の成功 (量子電磁気学)

標準理論のパラダイム：くりこみ可能なゲージ理論



電子の異常磁気能率

$$a_e \equiv \frac{g_e - 2}{2} = \frac{\alpha}{2\pi} + \dots$$

の輻射補正計算 (2次摂動 1948年: J.Schwinger) と測定値が良い一致を示したことが量子電磁気学 (QED) の確立に大きく貢献した

標準理論の成功 (量子電磁気学)

電子異常磁気能率の実験・理論の進展

実験値：(2008年ハーバードグループ)

$$a_e(\text{HV08}) = 1\,159\,652\,180.73(0.28) \times 10^{-12}$$

QED 摂動 10 次計算の完成：(2012年: 理研、名大: 青山、早川、木下、仁尾)

$$a_e(\text{理論}) = 1\,159\,652\,181.78(0.77) \times 10^{-12}$$

理論値の誤差のほとんどが微細構造定数 α (QED 結合定数) の測定の誤差によるもの

10桁の精度で実験値と理論値が一致 !!

標準理論の成功 (量子電磁気学)

成功の理由：

- * ゲージ対称性:
ゲージ場 (電磁場) は保存量 (電荷) と結合する。保存則が電磁場の相互作用を決定する (電荷が同じであれば同じ相互作用)。
- * くりこみ可能性:
ゲージ対称性と矛盾せずくりこみ可能な QED の理論パラメータは、電子質量 (m_e) と微細構造定数 (α) のふたつのみ。

⇒ 高い予言能力

QED の背後の未知の物理の効果は高次演算子

$$e \frac{m_e}{\Lambda^2} \bar{\psi} \sigma_{\mu\nu} \psi F^{\mu\nu}$$

を經由してしかあらわれない。

$\Lambda \sim 1\text{TeV}$ 程度のスケールの未知の物理には insensitive!!