

素粒子

東海大学理学部物理学科
 森江正樹
 素粒子物理学専攻

1

素粒子へ

水分子(=水素原子+酸素原子)

酸素原子(=原子核+電子) スピンの1/2

光 スピンの1

原子核(=陽子+中性子:核子という)

核子(=3つのクォーク)

クォーク スピンの1/2

素粒子

2

素粒子の分類

小林誠・益川敏英 (2008)

物質粒子	物質粒子			力の場に伴う粒子	
	第1世代	第2世代	第3世代	強い相互作用	電磁相互作用
クォーク	アップ (u)	チャーム (c)	トップ (t)	グルーオン (g)	光子 (γ)
	ダウン (d)	ストレンジ (s)	ボトム (b)		
レプトン	電子ニュートリノ (ν _e)	ミューニュートリノ (ν _μ)	タウニュートリノ (ν _τ)	Wボゾン (W ⁺ , W ⁻)	Zボゾン (Z)
	電子 (e)	ミューオン (μ)	タウ (τ)		
補助場に伴う粒子	ヒッグス粒子 (H)		?	?	?

2013発見

3

素粒子の質量・電荷・スピン

電荷 (e)	フェルミ粒子	スカラー粒子	ゲージ粒子
+1		ヒッグス粒子 (H)	W ⁺ 粒子
+2/3	アップ (u) 0.005		Z ⁰ 粒子 92
+1/3	ダウン (d) 0.01		グルーオン (g) 0
0	ニュートリノ (ν _e , ν _μ , ν _τ) ...0	ヒッグス粒子 (H) 125	フォトン (γ) 0
-1/3	アップ (u) 0.005		グルーオン (g) 0
-2/3	ダウン (d) 0.01		グルーオン (g) 0
-1	電子 (e) 0.0005		グルーオン (g) 0

4

クォークから複合粒子へ

$\xi = \text{スピン } \frac{1}{2} \Rightarrow q (\text{quark: クォーク})$

$\xi^\dagger \sigma \xi = \text{スピン } 1$
 $\xi^\dagger \xi = \text{スピン } 0 \Rightarrow \bar{q}q$

$J_z = 0$ あり
 $J_z = \pm \frac{1}{2}$ あり

$\xi \xi \xi = \text{スピン } \frac{3}{2}$
 $= \text{スピン } \frac{1}{2} \Rightarrow qqq$

中間子
 重粒子 反重粒子

陽子・中性子・湯川中間子

陽子 p+
 中性子 n
 中間子

奇妙な事に...

$qqq = \text{スピン } \frac{1}{2}$

1969
 ゲルマン

坂田昌一(1955)
 山口眞夫(1959)
 ゲルマン・ツヴァイグ(1964)

中性子
 陽子

シグマ+
 シグマ0
 シグマ+

ラムダ0
 グザイ-
 グザイ0

s-クォーク=0個
 s-クォーク=1個
 s-クォーク=2個

奇妙な(strange)
 八道説(ゲルマン・ネーマン: 1961)

素粒子の崩壊による消滅(寿命)

金原子とほぼ同じ質量

クォーク	第1世代	第2世代	第3世代
アップ	u	c	t
ダウン	d	s	b

不安定
 安定

170000
 5000
 1500
 200
 10
 5

$t \rightarrow b + \nu_e + e^+$
 $b \rightarrow c + \nu_e + e^+$
 $c \rightarrow s + \nu_e + e^+$
 $s \rightarrow u + \nu_e + e^+$
 $d \rightarrow u + \nu_e + e^+$

クォークの閉じこめる強い力

3つ子=3色(Red, Green, Blue)

擬似パネカ
 中間子
 重粒子

強い相互作用
 クォーク

赤 + 赤の補色 = 白
 3色だから
 3色均一 = 白

人間には白色しか観測できない

放射能

$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ β 崩壊

放射線 (β 線)

中性子 陽子

セシウム137 \rightarrow バリウム137 + e^- + $\bar{\nu}_e$

	陽子: 55個 中性子: 82個	陽子: 56個 中性子: 81個
--	---------------------	---------------------

ベータ崩壊とスピン1粒子

$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ β 崩壊

dクォークを壊す力は? W^\pm - ボソン放出力

弱い相互作用 W ボソン Z ボソン	第1世代 クォーク アップ u ダウン d	時間経過 $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$
	レプトン 電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ 電子 e^-	

スピン1粒子 = 力の源

スピン1粒子 = ゲージ粒子

力の場に伴う粒子

強い相互作用 クォークを結合する力 グルーオン g	色の交換をする クーロン力	$d \rightarrow u + g$ グルーオン
電磁相互作用 水素原子を作る力 光子 γ		$d \rightarrow e + \gamma$ 光子
弱い相互作用 ベータ崩壊させる力 Wボソン Zボソン		$d \rightarrow u + W^-$ Wボソン

電子・陽電子消滅と粒子・反粒子生成

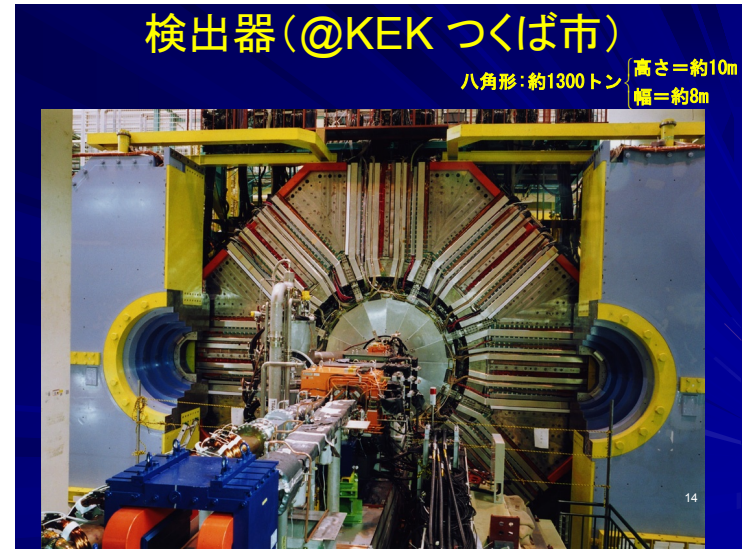
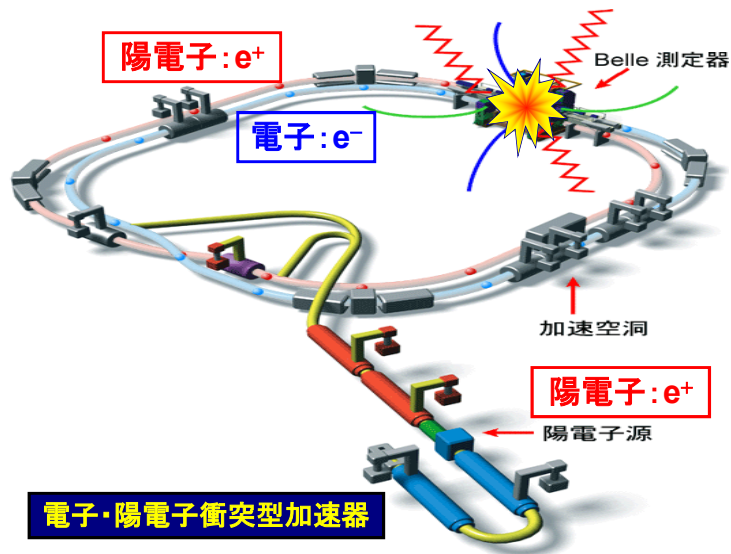
ミニ宇宙

ほとんど光子

グルーオン

J/ψ中間子

クォークは単体では観測されていない
(クォークの複合粒子内閉じ込め)



検出例

e^- e^+ c (charm) \bar{c}

$J(\psi)$ 中間子

BELLE

15

生成される粒子・反粒子

e^- e^+ u, d, s, c, b, W^- $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, W^+$ Z^0 (反粒子がない)

供給エネルギー \geq 粒子・反粒子の静止エネルギー $= mc^2 + mc^2 = 2mc^2$

供給エネルギー \geq Z粒子の静止エネルギー $= m_Z c^2$

	u	d	s	c	b	W^\pm	Z^0	t
mc^2	0.005	0.01	0.2	1.5	5	81	92	170
$2mc^2$	0.010	0.02	0.4	3	10	162	-	340

(GeV: Giga eV) $= 10^9 \text{eV}$

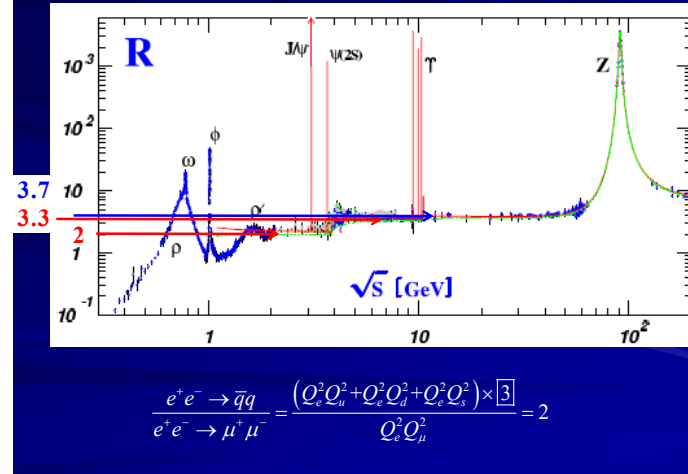
14

3つ子のクォークの痕跡

$$\frac{e^+e^- \rightarrow \bar{q}q}{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} = \frac{(Q_c^2 Q_u^2 + Q_c^2 Q_d^2 + Q_c^2 Q_s^2) \times 3}{Q_c^2 Q_\mu^2} = \left(\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \right) \times 3 = 3 \frac{6}{9} = 2$$

第1世代	第2世代	第3世代
5 アップ ダウン	1500 チャーム ストレンジ	5000 トップ ボトム
レプトン e μ	V0 V0 V0	105

3つ子のクォークの観測



未知のクォーク発見

$$\frac{e^+e^- \rightarrow \bar{q}q}{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} = \frac{(Q_c^2 Q_u^2 + Q_c^2 Q_d^2 + Q_c^2 Q_s^2) \times 3}{Q_c^2 Q_\mu^2} = 2$$

次の値 =

$$\frac{e^+e^- \rightarrow \bar{q}q}{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} = \frac{(Q_c^2 Q_u^2 + Q_c^2 Q_d^2 + Q_c^2 Q_s^2 + Q_c^2 Q_x^2) \times 3}{Q_c^2 Q_\mu^2} = 2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 \times 3 = 3 \frac{1}{3} = 3.33$$

$$\frac{e^+e^- \rightarrow \bar{q}q}{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} = \frac{(Q_c^2 Q_u^2 + Q_c^2 Q_d^2 + Q_c^2 Q_s^2 + Q_c^2 Q_x^2 + Q_c^2 Q_y^2) \times 3}{Q_c^2 Q_\mu^2} = 3 \frac{1}{3} + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \times 3 = 3 \frac{2}{3} = 3.67$$

5種類のクォークの観測

