

このクォークの組み合わせに対するすべての粒子が見つかったことがクォーク模型の成功である。

では、クォークの電荷（電磁相互作用に関係する結合定数）はいくらであろうか？驚くことに、 $u(+2/3)$ 、 $d(-1/3)$ 、 $s(-1/3)$ であった。

最後に復讐であるが、これらのクォークを結びつけている力が強い力であり、色荷（R、G、B）の組み合わせが白色の場合にハドロンは成立する。

[HW] 自由クォークは見つからないのは何故だろうか？考えてみなさい。昔は自由クォークを探す多くの実験が行われました。

3.4. 新しいクォークの発見（チャーム）

クォークは3個だけであろうか？電荷 $+2/3$ の物が1個で、電荷 $-1/3$ の物が2個では対称性が悪い感じがする（物理学者は対称性が好き！）。ここで1974年11月に4番目のクォーク c （チャーム）が発見された。（1974年11月革命）。=>論文を配布。

クォーク模型の更なる成功。更なる研究からチャームクォークの電荷は $+2/3$ であることが分かった。

3.5. フレーバー

復讐であるが、クォーク保存量は強い相互作用では区別されない。しかし、電磁相互作用、弱い相互作用、質量は異なる。このクォークの持つ保存量、特性をクォークフレーバー（種類）と名付ける。では、クォークのフレーバーは何種類あるのでしょうか？現在までのところ6個まで見つかった（ $+2/3$ と $-1/3$ の電荷の組が3組）。フレーバーを区別するためには電荷、質量、弱い相互作用を調べる必要がある（注：実は弱い相互作用の結合強さにも対称性があり、寿命の違いは質量の違い、つまりエネルギーの違いから来ている。）。

4. 電磁相互作用

4.1. 力（近距離力と遠距離力）

点電化間に働くクーロン力は

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

の形をしている。これは点電荷があれば、等方的に力が伝わることを意味している（球面の面積は $4\pi r^2$ ）。この力は点電荷により、電場

$$\vec{F}_2 = q\vec{E}_1,$$

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \text{ が形成されたと考えても成り立つ。}$$

力とは直接物体同士で作用するわけではなく、このように力の源が場を形成し、その場が

伝えると考えるとうまく説明される。つまり力の伝わる速度は有限であり、クーロン場の場合は、光の速度で伝わる。(注) 誘電率 (ゆうでんりつ、permittivity) は物質内で電荷とそれによって与えられる力との関係を示す係数である。

ここで、力の伝播を波として考える。例えば、海面を伝わる波には水という媒質がいる。音には空気が必要である。では電磁場を伝える媒質は何であろうか？大昔にはエーテルという媒質が存在すると考えられたが、そんなものは存在せず、現在の素粒子論では真空そのものが場を伝える性質を持つと解釈する。

ではこの場は光の速度で伝播されるのであるが、その担い手は何であろうか？実はこの電場を伝える粒子 (力の粒子) が光子である。点電荷同士は光子をやり取りして (キャッチボールして)、力を感じていたのである。

注意することはこの光子は実光子ではない。片方の点電荷から発生し、途中観測されること無く伝播し、他方の点電荷に吸収される。このような光子を虚の光子という。

[ファインマン図]

ここで、量子力学の言うところ粒子は波であり、波は粒子である。我々が知る電子とかの粒子も波として振舞うし、波だと思っていた光 (電磁波) も粒子 (光子) として振舞う。

4.2. 相対論的量子力学 (量子電磁力学)

量子力学によれば、粒子の存在確率は波動関数 ψ として現せる。 ψ はどんな形をもっているのだろうか？例えば波は $\cos(\mathbf{kx}-\omega t)$ のように表せる。(2.2)、(2.3)の関係式よりこの関数は $\cos(\mathbf{p}\mathbf{x}-E t)$ とかける。ここで \cos の解は特別な場合の解であり、一般的には $e^{i\mathbf{k}\mathbf{x}-i\omega t} = \cos\mathbf{k}\mathbf{x} + i\sin\mathbf{k}\mathbf{x}$ の関係式より、

$$\varphi = A e^{i\mathbf{k}\mathbf{x}-iEt} \text{ ————— (4.1)}$$

と書ける。ここで相対論の式に従う粒子を考えてみよう。相対論によれば、粒子に関して $E^2 = \mathbf{p}^2 + m^2$ の関係がなりたつ。この場合、粒子が持つエネルギーには静止している場合 ($\mathbf{p}=0$) で $E = \pm m$ の関係がある。粒子の質量 m は正なので、相対論の予言によれば負のエネルギーが存在することになる。これはなんだろうか？

種明かしをすると、この $-m$ のエネルギーを持つ粒子が反粒子である。ただし、反粒子の解釈は(4.1)で $\mathbf{E} \rightarrow -\mathbf{E}$ にした場合、このマイナス符号を t の方につけて、時間を逆行する粒子と解釈する。

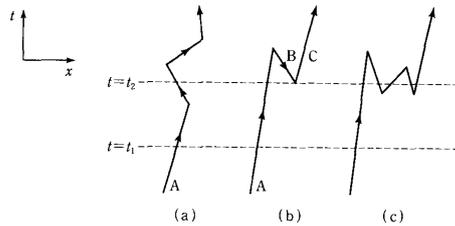


図 3.3 時間の逆行を許すと真空中に粒子・反粒子対が現れる
(a) 通常の散乱, (b) 時間逆行を許す場合, (c) $t=t_2$ で 5 個の粒子が存在する。

[ファインマン図で説明]

この量子論、相対論を基に作られた量子電磁力学 (QED) はもっとも精密な議論である。また、量子電磁力学の方程式で電子やクォークの運動を記述する Dirac 方程式は、電子やクォークがスピン (磁石の棒のようなイメージ。電荷が回ると磁場ができる) をもつことを予言する。

例えば、量子電磁力学では電子 (もしくはミューオン) の磁気能率 (磁石としての性質) を予言するが実験と非常に良い精度で一致している (例をあげる)。

実験値： 1.001159652198

理論値： 1.001159652140

4.3. ボソン (主に力の粒子) とフェルミオン (主に物質粒子)

上記の例で、力を伝える粒子 (光子) と物質を構成する粒子があることがわかった。両方とも、粒子としての性質と波としての性質を持つ点は同じであるが、決定的に異なることがある。一つは、物質を構成する粒子 (例: 電子) は空間のある状態に 1 個しか詰められないが、力を伝える粒子 (例: 光子) はある状態に何個でも詰めれる (レーザー光線が良い例)。この違いは、それぞれの粒子が従う統計に起因している。力を伝える粒子のスピンは整数 (光子: スピン 1) でボソンと言い、ボーズアインシュタイン統計に従う。逆に物質を構成する粒子のスピンは半整数 (電子: スピン 1/2) でフェルミ・ディラック統計に従う。このボソンかフェルミオンかという点、つまり粒子のスピンにより、それぞれの粒子の集団的振る舞いは大きく異なる。

4.4. ファインマン図 (「御冗談でしょファインマンさん」を紹介する)

- (a) 電子と原子核との散乱
- (b) 電子と陽電子との散乱 {図が 2 つある。}
- (c) 電子と陽電子からミューオン対、クォーク対ができる反応
(やじるしが粒子の時間の流れを示していることも説明)

ファインマン図が散乱の確率振幅と 1 対 1 対応しているので、計算するのに便利な道具である。散乱振幅の絶対値を 2 乗して運動量で積分すると散乱断面積 (散乱される

確率) が得られる。ファインマン図を2乗すると反応確率になるので、反応確率は電荷の2乗(バーテックスの数)の2乗に比例している。よって(c)の反応でミューオン対、クォーク対に行く確率が計算できる。

5. 弱い相互作用

5.1. β 崩壊

弱い相互作用の典型例は、高校で習った β 崩壊である。通常の β 崩壊の例は

${}^{42}_{18}\text{Ar} \rightarrow {}^{42}_{19}\text{K} + e^- + \bar{\nu}_e$ で原子核中の中性子が陽子に変わる。ここで放出される電子を β 線と呼ぶ。よって、これは核内の核子が $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ と崩壊したことになる。またクォークレベルで書くと $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ となったことに対応する。

また β^+ 崩壊もあり、こちらは

$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ 及び $u \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ に対応する。

質量数 A の原子核の質量は、自由な陽子と中性子の質量の和よりも軽い(よって原子核が束縛されている)。

$$m_A < Zm_p + Nm_n$$

である。同じ質量数 A でも

$m(Z, N) < m(Z-1, N+1)$ [$m(Z+1, N-1)$] の時は β 崩壊(β^+ 崩壊)をして、 (z, N) の状態へと変わる。

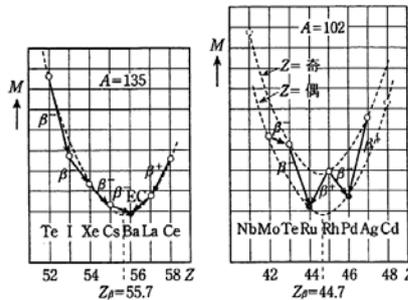


図 8.1 質量数 A =一定のときの、原子核質量の原子番号 Z 依存性 (八木浩輔著「原子核物理学」朝倉書店(1971), 図 101)

中性子は $m_n > m_p + m_e$ なので、単独でも $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ と崩壊する。

逆に陽子はエネルギー保存則から、他に崩壊できない安定な粒子となっている。

5.2. 弱い相互作用と粒子

弱い相互作用は、クォークとレプトン全ての粒子に平等に作用する。(注:クォークとレプトンの表を書き、強い相互作用、電磁相互作用についても説明。)以下の反応は全て弱い相互作用である。

$$\Lambda(uds) \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \text{ と}$$