

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。

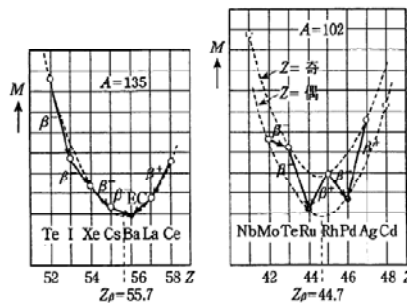


図 8.1 質量数 A =一定のときの、原子核質量の原子番号 Z 依存性 (八木浩輔著「原子核物理学」朝倉書店(1971), 図 101)

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。

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

$\Lambda(uds) \rightarrow p + \pi^-$ と

$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ と

$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ と

$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$

しかも、家電カレントにおいては必ずクォーク対やレプトン対で反応が起こっている。

(u,d),(c,s),(t,b),(e, ν_e), (μ, ν_μ), (τ, ν_τ) が組となり、その間をW粒子が媒介している。ただし弱い相互作用では(u,s)、(u,b)と言った組も可能で弱い相互作用の s と強い相互作用の s は異なっている。これは $d_w = \cos\theta_s + \sin\theta_s$ と書ける{w,s は weak、strong[質量の状態]の意味}。弱い相互作用では、ストレンジネスやチャーム数は保存していない。しかも、弱い相互作用は、左巻きの粒子のみに作用するという不均衡がある。クォークとレプトンはスピン 1/2 を持つフェルミオンで、スピンの進行方向に向いていれば右巻き、逆方向なら左巻きである。弱い相互作用ではヘリシティ (左巻きか右巻きかを示す量) が保存される。

パリティの破れの説明。

弱い相互作用が、なぜ左巻きの粒子にしか働かないかは分からないが、自然がたまたまそうだったのかもしれない (注: 人間世界も右利きがなぜか多かったり、DNA の螺旋が左巻きとか対称性がやぶれているケースが多く見られる)。

5.3. パリティの破れ

物理学では、鏡映変換 $\{(x,y,z) \rightarrow (-x, -y, -z)\}$ をパリティ変換という。弱い相互作用以外の相互作用 (重力、電磁力、強い力) は全て、物理法則がパリティ変換をしても変わらなかった。しかし、弱い相互作用においては、このパリティ変換 {左巻き \leftrightarrow 右巻き} が最大限に破れており、1950 年代に物理学者を非常に驚かせた。存在するニュートリノは左巻きである。

また、弱い相互作用ではさらに C P {荷電・パリティ} 変換や T{時間}変換も破れていることが分かっている。(=<小林・益川氏により説明されている。)

5.4. 弱い相互作用は更に近距離力

弱い相互作用が弱いのは、力の媒介粒子 W、Z ($\sim 100\text{GeV}/c^2$) が非常に重いからである。 π 中間子より 1,000 倍近く重いので、力は 1,000 分の 1 の距離しか届かない。例えば、素粒子反応は断面積 (長さの 2 乗) でその大きさが測られる。すると、弱い相互作用の大きさは、強い相互作用に比べて 100 万分の 1 という小さな値になる。

(注: ここで、ファインマン図を書く。またフェルミの 4 点相互作用も説明する。荷電カレント反応 (W)、中世カレント反応 (Z) についても説明。)

5.5. 弱い相互作用の媒介粒子

核力の媒介粒子、 π 中間子に π^+, π^-, π^0 と3種類合ったのと同様に、弱い相互作用を媒介する力の粒子も W^+, W^-, Z^0 と3種類ある。 W を荷電カレント、 Z を中性カレントと言う。しかも驚いたことに、弱い相互作用の中性カレントと電磁相互作用の中性カレント（つまり光子）は、より対称性をもった中性カレント W^3, B^0 の混合状態であることがわかった。

つまり、電磁相互作用と弱い相互作用は、統一的に記述できることが分かった。また、弱い相互作用の電荷(g)と電磁相互作用の電荷(e)の比は、重要な物理パラメータで

$$\sin \theta_w = e/g$$

で θ_w をワインバーグ角と言ひ、 $\sin^2 \theta_w = 0.23$ と測定されている。

(注) θ_w を使って、光子と Z^0 の混合は

$$\begin{aligned} A &= B \cos \theta_w + W^3 \sin \theta_w \\ Z &= -B \sin \theta_w + W^3 \cos \theta_w \end{aligned} \quad \text{つまり} \quad \begin{pmatrix} A \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_w & \sin \theta_w \\ -\sin \theta_w & \cos \theta_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \\ W^3 \end{pmatrix}$$

と表せる。

6. ゲージ理論

6.1. 粒子の存在確率

素粒子は波であり粒子であった。これは観測する粒子の運動量により、その存在分布が決まる。素粒子の存在確率は波動関数 $\psi(\mathbf{x})$ {複素数} で記述される。実際にある場所に存在する確率は $|\psi|^2$ として記述される。意味のある物理量は全て $|\psi|^2$ で表現されるので、波動関数 $\psi(\mathbf{x})$ には位相分 ($e^{i\theta}$ の θ) の不定性が付きまとう (つまり位相は決定されない)。

6.2. 大局的ゲージ変換

波動関数において位相は決定できないので、全空間で位相を θ だけ変えても物理法則は変わらない。

6.3. 局所的ゲージ変換 (電磁力)

絶対時間 \Leftrightarrow 光速: どちらが不変だったか?

同じように、位相変換を各点で行なっても物理法則が不変だとする {我々の空間 (真空) の条件}。この結果、各点の位相変換による歪みを打ち消すために新たなる場 (粒子) が必要となる。この場が、ゲージボソン (力を伝える粒子) である。