

中性子 (udd) : 886sec, μ : $2.2 \mu (10^{-6})\text{sec}$, π^{\pm} : $26\text{n}(10^{-9})\text{sec}$,

π^0 : $8.4 \times 10^{-17}\text{sec}$ (直接測定できる限界)、

他にももっと寿命が短い粒子がわんさかいる。

例 : Δ 粒子 (uuu)、

寿命とは？

時刻 $t=0$ に $N(0)$ 個であった粒子が、時刻 t 秒後には $N(t)$ 個に減ったとする。その場合、粒子の減少率 dN/dt は $N(t)$ 自身に比例し、その比例係数の逆数を粒子の寿命 τ と定義する。

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau} N(t) \quad \text{---(1.1)}$$

この方程式の解は

$$N(t) = N(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \text{---(1.2)}$$

と表せる。大雑把に言うと、例えば粒子は時間 τ 後にはもともとの数の 37%、 3τ 後には 5% しか生き残らない。

粒子の寿命の長さの違い。

弱い相互作用 → 寿命が長い (寿命が測定できる粒子の大半。)

電磁相互作用 → 寿命が短い (π^0 等々)

強い相互作用 → 寿命が非常に短く、粒子として存在しているか確定し難い。

不確定性原理 (量子力学) を使って粒子の寿命を推定する。

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar \quad \left(\hbar = \frac{h}{2\pi}, h: \text{プランク定数} \right) \quad (1.1)$$

$$\hbar = 6.6 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} = 4.1 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}$$

寿命が非常に短くなると、エネルギー (=粒子の質量) を決定することが出来なくなる。

質量分布の絵を書く。

例 : $\Delta^{++} \rightarrow p \pi^+$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_{\mu}$, $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$

3. クォーク模型

3.1. 強い相互作用

原子核はなぜ結ばれているのであろうか？原子核は陽子と中性子からなっている。もし陽子同士がクーロン力で反発すれば、原子核はバラバラになる。原子核が存在するということは、クーロン力 (電磁力) よりも強い力で結び付いているのである。それならば、そんな強い力は我々の身の回りで見えないのは何故だろうか？

核力の存在 : 新しい力の粒子が湯川により予言された。

π 中間子： π^+ 、 π^- 、 π^0 の 3 種類。陽子→中性子、陽子→陽子、中性子→陽子が結び付く。

核力は短距離力であった（原子核の大きさ 10^{-13}cm 程度しか届かない）。

3.1.1. 湯川理論－ π 中間子の予言－

媒介粒子に質量があり、遠くまで飛ばないと考える。この時の場のポテンシャルは

$$\text{湯川型ポテンシャル } V = \frac{e^{-mr}}{R}$$

ここで、 m は媒介粒子の質量。式(2.5)の変形式より

$$E \cdot \frac{\lambda}{2\pi} = hc = 197\text{eV} \cdot \text{nm}$$

$\lambda/2\pi$ が原子核の大きさとする

$$E = 197\text{eV} \cdot \text{nm} \div 10^{-15}\text{m} \sim 200\text{MeV}$$

このようにして、湯川は 200MeV 程度の粒子が存在し、核力を媒介すると考えた。そして、実際に 140MeV 程度の π 中間子が見つかった。

3.1.2. アイソスピン

核力は π^+ 、 π^- 、 π^0 を区別しない。つまり π 中間子に対して対称性がなりたつ。昔やったように対称性が存在すれば、保存則が存在する。この保存則はアイソスピンの保存である。また、核力は p 、 n も区別しないので、 p と n もアイソスピンが同じでその方向だけが違う粒子として強い相互作用では考えられる。

3.1.3. 核力－強い相互作用の表れ－

（余談）核力を媒介する π 中間子は素粒子ではなく、クォーク・反クォークの複合体である。 π^+ [$u\bar{d}$]。このため、核力は実が π 中間子以外の粒子でも媒介される（例えば、 ud クォークのエネルギーの高い状態等。例を書く ρ ）。よって、核力は基本相互作用ではなく、強い相互作用の現れである。（原子の例を上げ、分子の結合を説明する）。

3.1.4. 本質的な力（カラー力）

強い力の本質はクォーク同士を結び付ける力である。ここでは電子がクォークに、光子がグルーオンに対応している。電荷 e は色荷(R,G,B)に対応する。強い相互作用も基本的にはゲージ理論という枠組みで、電磁力と同等に記述でき、強い相互作用の量子力学を量子色力学（QCD : quantum chromodynamics）と言う。強い相互作用の結合定数は電磁相互作用の 100 倍にもなる。

ここで面白いことに強い力は短距離力であるが、媒介粒子グルーオンの質量はゼロである。これでは、湯川理論の π 中間子の箇所の説明と食い違う。実は強い力はその相互作用

の特徴として、距離が離れれば離れるほど、力が強くなる（グルーオンの自己結合のため。説明の絵を書く）。よって無理に引き離そうとすると、途中グルーオンの紐が切れ、そこでまた粒子が生成される。また自然に存在するのは白色（RGB, $\bar{R}\bar{R}, \dots$ ）の粒子のみである。よって、磁石を幾ら切り刻んでも、N 極と S 極になるように単独でクォークを取り出すことはできない。白色の粒子が存在するために、自然界にはクォーク 3 つの粒子（陽子、中性子等）と、2 つの粒子（ π 中間子等）しか存在しない。

（最近の話題）最近クォーク 5 つの状態や、4 つの状態の粒子が見つかったという報告もある。真相は。。。

クォークは電荷 $2/3$ もしくは $-1/3$ 、色荷（R、G、B）をもった粒子である。現在 6 種類のクォークが見つまっている。

3.2. ストレンジ粒子の発見

1940 年頃 K 中間子という粒子が見つかった。 $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ と崩壊する。両方にハドロンがあるので、この粒子は一見強い相互作用で崩壊しているかと考えられる。つまり寿命が短いはずであるが、実際は $12n$ 秒と非常に長い（強い相互作用の寿命は 10^{-23} 秒程度）。つまり弱い相互作用で崩壊していることがわかった。なぜだろう？強い相互作用で壊れないように何か保存則が存在すると思われ、ストレンジネスを導入した。ストレンジネスは強い相互作用では保存するが、弱い相互作用では破れている物理量である。

3.3. クォーク模型と半端電荷、色荷

ここで、強い相互作用での保存量としてストレンジネスが導入された。ストレンジネスという保存量を持つクォークを s クォークという。また、同様に u クォークは u という保存量を、d クォークは d という保存量を持つ。ここで、強い相互作用は u、d、s を区別しないとすると、強い相互作用では $u\bar{d}$ 、 $u\bar{s}$ の粒子状態は同じことを意味する。それでは、u、d、s クォークで同種粒子状態は何個あるのだろうか？答えは 9 個である（スピンの組み合わせを無視する）。この 9 個に対応する粒子が全て見つかった。

[メソン 8 重項の図] (資料として配布)

[HW]9 個の同種粒子状態を分ける量は何か？

答：質量、電荷、寿命（弱い相互作用、電磁相互作用）

同様に、陽子や中性子（qqq 状態）に対しても、強い相互作用における同種粒子状態が存在する。

[HW]qqq 状態の同種粒子状態（スピンの組み合わせは無視）は何個あるか？

答：27 個

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

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

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