

1. 保存則

物理学の中で保存則は重要な役割を担っている。高校物理でも

- エネルギー保存則
- 運動量保存則
- 各運動量保存則

等を使ってきた。大学の物理ではこれらの保存則が自然界における対称性と密接に関係していることを学ぶ。

ネーターの定理：何か一つの対称性があれば、それに伴って一つの保存則が存在する。

時間の等質性 → エネルギー保存則

空間の等質性 → 運動量保存則

空間の等方性 → 角運動量保存則

が導ける。

では、電荷の保存則はいかなる対称性と関係しているか。これは現在の素粒子理論の根幹であるゲージ対称性と密接に関係している（興味のある人は何か本を読んでみて下さい）。量子力学では、粒子の存在確率はその波動関数の 2 乗 $|\psi(\mathbf{x})|^2$ で与えられ、 $\psi(\mathbf{x})$ 自身を測定することはできない。よって $\psi(\mathbf{x})$ には常に $\psi(\mathbf{x})e^{i\theta}$ の不定性が伴う。この $e^{i\theta(\mathbf{x})}$ 変換に対しての対称性が電荷保存則を導き出す。

しかし、物理現象を観測してみると対称性を伴わない保存則が見つかったりする。例は

- レプトン数

$\pi^- \rightarrow e^- \gamma$ 、 $\mu^- \rightarrow e^- \gamma$ 等は起こらない。

電子は電子レプトン数 1 (ν_e も) で μ はミューレプトン数 1 (ν_μ も)、他は 0。

ただし、ニュートリノ振動 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) のようにレプトン数が保存していないケースも最近発見された。

- バリオン数

$p \rightarrow e^+ \pi^0$ 、もしレプトン数を気にするなら $p \rightarrow e^+ \nu_e \pi^0$ 等は起こらない。

陽子、中性子がバリオン数 1 を持ち、 π 中間子や電子は 0。

である。

2. 素粒子の寿命

- ① 無限の寿命を持つ粒子

光子、電子、陽子 (uud)

- ② 有限の寿命を持つ粒子

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