

1 反粒子

Schrödinger や Heisenberg などにより、量子力学は目覚ましい発展を遂げた。しかし、例えば Schrödinger 方程式を見ればわかるように、これは時間について 1 階、空間について 2 階の微分で明らかに相対論的でない。そこで、Dirac は Klein-Gordon 方程式

$$(\square - m^2)\psi = 0 \quad (1)$$

を満たすという仮定から Dirac 方程式

$$(i \not{\partial} - m)\psi = 0 \quad (2)$$

を導出した。これは (1) 式を満たすので

$$E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2 \quad (3)$$

を満たす。 $m \neq 0$ の場合を考える。粒子が静止している慣性系で観測すると $\mathbf{p} = 0$ であるから、 $E = \pm m$ で負エネルギー解が存在する。

Dirac はこの問題を解決するため、Dirac の海という概念を編み出した。この海は均一で実質的な力を与えないので我々は関知しない。この海の粒子に十分なエネルギーを与えると (粒子を電子であると考えた場合) 海から電子が飛び出し、その場所においては負エネルギーの負電荷の粒子がいないということは正エネルギーの正電荷のホールが出来たと解釈される。Anderson の実験によりこれは電子と電荷のみが反対である粒子の実在が判明し、のちに Dirac が提唱したホールは反粒子として理解されるようになった。

電氣的に中性である粒子の光子 γ は $\bar{\gamma} = \gamma$ である。中性子は電氣的に中性であるが、 n_q をクォーク、 $n_{\bar{q}}$ を反クォークの数としたとき

$$B = \frac{n_q - n_{\bar{q}}}{3} \quad (4)$$

で定義されるバリオン数が異なるため、 $n \neq \bar{n}$ となる。また、中性子は中心と表面が正でその間が負という電荷構造を持ち、中性子は Dirac 粒子なのでスピンを持ち磁気双極子モーメントを持つ。

次に交差対称性を議論する。

$$A + B \rightarrow C + D \quad (5)$$

という反応を仮定すると

$$A \rightarrow \bar{B} + C + D \quad (6)$$

$$\bar{C} + \bar{D} \rightarrow \bar{A} + \bar{B} \quad (7)$$

等の反応も許される。だが、エネルギー的に許されない反応もある。例えば、 A の質量が B と C と D の合計の質量より軽いと $A \rightarrow \bar{B} + C + D$ という反応は禁止される。つまり、初期運動エネルギーがある閾値を超えないとその反応は起こらない。また、Compton 散乱

$$\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^- \quad (8)$$

とポジトロニウムの崩壊

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma \quad (9)$$

は「本当は」同じ過程であることを交差対称性は示している。

2 ニュートリノ

β 崩壊において放射性原子核の A が電子の放出を伴って少しだけ軽い原子核 B に遷移する。

$$A \rightarrow B + e^- \quad (10)$$

電荷保存のために B の電荷は A の電荷より素電荷 1 つ分正である。核子 A が静止している重心系を考えると B と e^- は大きさが等しく反対の向きに飛び出す。エネルギー保存の簡単な計算より電子のエネルギーは以下。

$$E = \left(\frac{m_A^2 - m_B^2 - m_e^2}{2m_A} \right) \quad (11)$$

だが、実験の結果電子の持つエネルギーには幅があり、これは最大値を与えているのみであった。そこで、Pauli は別の粒子が電子とともに放出されエネルギーを持ち去っていると考えた。それは電荷保存則から電氣的に中性でなければならない。そのことは実験で飛跡を残さないことから理解された。また、式 (11) で与えられる値を電子が取っていることから、この粒子は非常に軽いことが予想された。Fermi はそれをニュートリノと名付け今日では β 崩壊の本質的過程が

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu} \quad (12)$$

と理解されている。

次に π 中間子の崩壊で μ 粒子が 90 度方向に飛び出す写真がある。このときも電氣的に中性な別の粒子が生成されたと考えたのが、Powell である。Powell はこれはニュートリノであると考えた。この時代には μ 粒子が崩壊すると電子が放出されることが分かっていた。ここで、実験を繰り返すたびに電子のエネルギーが一定ならば終状態には 2 つの粒子が存在するという結論が得られる。だが、 μ 粒子の崩壊における電子のエネルギーが一定でないことが明らかになり、2 体に崩壊している可能性はなくなった。