

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。大局的ゲージ変換と局所的ゲージ変換の概念図は次の通りである。

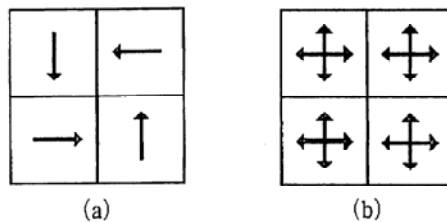


図 5.4 (a) グローバル対称性と (b) ローカル対称性をもつパターン例

6.3. 局所的ゲージ変換（電磁力）

絶対時間 ⇔ 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、ゲージ粒子（力を伝える粒子）である。

実際に $e^{i\alpha\theta(x)}$ を物理の方程式 {正確にはラグランジアン} に入れて不変とするためには、電磁場が必要となる。電磁力の場、光子が局所ゲージ不変性から生じる例を以下に見る。

例えば、物理の運動方程式には微分が含まれている。

$\phi \rightarrow \phi e^{i\alpha\theta(x)}$ と変換したとする。方程式は、このゲージ変換のため

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi e^{i\alpha\theta(x)} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) e^{i\alpha\theta(x)} + \phi \left(\frac{\partial e^{i\alpha\theta(x)}}{\partial x} \right) = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) e^{i\alpha\theta(x)} + i\alpha\phi \left(\frac{\partial \theta(x)}{\partial x} \right) e^{i\alpha\theta(x)}$$

と余分な項が現れた。ここで方程式（厳密にはラグランジアン）に $\alpha \phi A$ という項がもともと含まれていたとし、 A はゲージ変換により

$$\alpha A \rightarrow \alpha A - i\alpha \left(\frac{\partial \theta(x)}{\partial x} \right) \quad \text{—————(6.1)}$$

と変換することを要請する。 $\alpha \phi A$ という項から ϕ と A の結合の大きさが決まり、これが電荷に対応する {注： ϕ は電子、 A は光子に対応している。}

また、方程式中で光子の質量は AA という項で表され、これは式(6.1)の変換で不変でないので、光子の質量はゼロとなる。同様の議論で、ゲージ粒子（光子、グルーオン等々）の質量はヒッグス機構を用いない限り、すべてゼロとなる。

余談(1)ネーターの定理により、局所ゲージ不変性から電荷の保存則が導かれる。

余談(2)結合定数として有名な微細構造定数 α (1/137) であるが、宇宙物理のデータから時間変化している証拠が得られている (2001年：渡辺教科書 P122)。

6.4. 局所的ゲージ変換（弱い力）

弱い相互作用では、 π 中間子が W 粒子を出して

$$\pi \rightarrow \mu\nu$$

と崩壊する。この崩壊はクォークレベルで書くと

$$u + \bar{d} \rightarrow W^+ \rightarrow \mu^+ \nu$$

と崩壊する。この時、 W 粒子は u, d クォークと μ, ν と結び付く (ファインマン図)。

この相互作用 (反応) では W クォークは u クォークと d クォークを区別しない。この u, d

クォーク、もしくは μ, ν をペアーで $\varphi = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu \\ \nu \end{pmatrix}$ と定義し u, d 間の回転で方程式を不変

とすると、各点のこの回轉變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、弱い相互作用のゲージボソン W である。

驚いたことに、電磁相互作用も弱い相互作用も同じように局所ゲージ不変性の考えから導き出される。これは強い相互作用にも当てはまり、ゲージ理論が現在の素粒子の標準理論となっている。

より詳しくは、解析力学でラグランジアンを理解した後、素粒子物理学の教科書（相原さん本）を読むと良い。

7. ヒッグス機構と標準理論

ゲージ理論では、ローカルゲージ変換の歪みを打ち消すために導入されたゲージボソンの質量をゼロと予想する。これは弱い相互作用の媒介粒子 W, Z が質量を持つことと矛盾です。また弱い相互作用のゲージ理論では、方程式中の粒子の質量項がゲージ不変性を満たさない。しかし、クォークとレプトンは質量を持つ。この矛盾を解決したのがヒッグス機構である。（注：ヒッグス機構のアイデア、自発的対称性を永久磁石を使って説明。磁石を熱すると磁場が消えることを説明し、標準理論のラグランジアンが高エネルギーで成立していることを説明する。）

そして、ヒッグス機構+ゲージ理論により、弱い相互作用の粒子の質量、電弱相互作用の混合が同時に説明できたことを述べる。

標準理論はこのゲージ理論、電弱統一、素粒子の質量の鍵を握るヒッグス粒子を予言しており、2008年から稼働する LHC（大ハドロン衝突加速器）での発見が大いに期待されている。

8. 21世紀の素粒子物理学（実験編。TNの独断）

8.1. 解明すべき問題

(1) ヒッグス粒子の発見

(2) 新しい対称性 {超対称性や余剰次元等の時空の対称性} の探求。

⇒宇宙の暗黒物質の最有力候補は未発見の素粒子である。

特に超対称性粒子が有力と考えられている。

(3) 力の統一の理解

電磁力、弱い力、強い力は全てゲージ理論で記述できる。それでは、本当にこの3つの力は統一されるのか？ ⇒（スーパーカミオカンデによる）陽子崩壊の発見が証拠となる。

(4) 物質優勢宇宙の謎。どこに CP の破れがあったか？

(5) ニュートリノ質量を含む、クォークとレプトンの階層性の問題。

なぜ、質量がこんなに異なるのか？世代とは何か？粒子反粒子対称性の破れの起源は？