

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？

(6) 宇宙の暗黒エネルギーの謎？起源は？宇宙観測で見つかったが、最終的な答えには素粒子物理の課題か？

8.2. 各種素粒子とそれに対する実験各種

✚ 電子

- 電子の異常磁気能率の測定→もっとも高精度な微細構造定数 α の測定となっている。

✚ ミューオン

- ミューオン数を破る $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索。また μ の異常磁気能率の精密測定は超対称粒子が媒介する相互作用に感度がある。

✚ τ 粒子

- レプトン数を破る $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 崩壊探索

✚ ニュートリノ (ν_e, ν_μ, ν_τ)

- ニュートリノ質量の謎：ディラック質量かマヨナラ質量か⇒2重 β 崩壊探索
- ニュートリノ混合行列の解明とニュートリノ振動における粒子・反粒子対称性の破れの探索。T2K 実験
- ニュートリノ質量の測定：直接測定。宇宙論からの制限

✚ u,d クォーク

- 陽子のスピンの起源：陽子のスピン 1/2 は uud クォークだけでは説明できない。
- 中性子の電気双極子能率：現在のところ観測されていないので、強い相互作用で CP 対称性が保存していることを保証している。なぜ、強い相互作用で CP が保存しているのか？

✚ s クォーク

- K 中間子を使った粒子・反粒子対称性の破れの研究。時間反転対称性の破れの観測・探索。

✚ c クォーク

- $D\bar{D}$ 粒子混合 (2006 年発見)。CP 非保存は？

✚ b クォーク

- B 中間子を使った粒子・反粒子対称性の破れの研究。クォークセクターではもっとも高感度な CP および New Physics の間接測定となる。

✚ t クォーク

- t クォークの質量は、標準理論の実際の計算で重要。現在発見されているもっとも重い素粒子。何か予想しない現象が裏に存在するか？

✚ W ボソン

- W の質量は、標準理論の実際の計算で重要。トップクォークと W ボソンの質量からヒッグス粒子の質量に強い制限が付いている。また、W と Z、W と γ の間のゲージ粒子同士の結合も重要な研究対象。

✚ Z ボソン

- CERN の LEP 実験で大量の Z ボソンが生成され、非常に精密な電弱理論の検証が

行われた。またニュートリノが3種類という結果も Z ボソンの寿命（正確には崩壊巾）を測定することから決められた。

✚ ヒッグス粒子

➤ 発見及びその性質の研究は素粒子物理学の最重要課題

✚ 他未発見の粒子や相互作用を探る。

9. 超簡略量子論

9.1. プランクの量子仮説

光 => 電磁波（波）か？ 光子（粒子）か？

光（粒子）は両方の性質を持つ。

光の振動数（ ν ）と波長（ λ ）には

$$\nu = c/\lambda \quad \text{—————(2.1)}$$

の関係がある。この波としての光が、実はエネルギー E を持つ粒子として性質を併せ持つ。

この間には

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{—————(2.2)}$$

の関係が成り立ち、ここで出てきた定数 h をプランク定数（非常に重要な物理定数）という。光子の運動量は