

第 1 章 素粒子模型

I. 素粒子の仲間



素粒子の標準理論に含まれる素粒子は、「素粒子の分類図」のように

- 3世代のレプトン¹
- 3世代のクォーク² (3つ子)³
- 8つのグルーオン (8つ子)
- $W^\pm \cdot Z$ ボゾン⁴
- 光子

である。図の一番右の素粒子グラビトン(重力子)は重力を司る未発見の粒子で標準理論には含まれない。その他に、存在が期待される

- ヒッグス粒子⁵

¹ 1973年に、小林誠・益川敏英により、3世代のクォーク・レプトンが予言された。小林益川模型という。2008年ノーベル物理学賞受賞。

² 1964年、ゲルマン・ツワイク (M. Gell-Mann, Z. Zweig) によりクォークが導入された。

³ 3つ子のクォークは、1965年に、ハン・南部 (M. Y. Han, Y. Nambu) により導入された。同様な3つの自由度は、1964年にグリーンバーグ (O.W. Greenberg) によっても導入されている。

⁴ グラشوウ (1961)・ワインバーグ (1967)・サラム (1968) (S. L. Glashow, S. Weinberg, A. Salam) により予言された。これはレプトンの模型であり、グラشوウ・ワインバーグ・サラム模型と言う。電磁相互作用と弱い相互作用を統一的に取り扱う統一理論であり電弱相互作用を正しく記述し、未確認のヒッグス粒子を含むが、2012年7月に候補として発見された。1979年ノーベル物理学賞受賞。実際に、実験により $W^\pm \cdot Z$ を発見したファンデルメールとルビア (Simon van der Meer, Carlo Rubbia) は、1984年ノーベル物理学賞を受賞した。

⁵ ヒッグス粒子の発見を第一目標に建設された LHC (大型ハドロン衝突型加速器、Large Hadron Collider) が 2008年9月10日より運転開始。2009年11月20日より本格的に稼働し、2012年7月5日にヒッグス粒子の候補を発見し、2013年8月に標準模型のヒッグス粒子として認定された。エディンバラ大学の Peter Higgs(ピーター・ヒッグス)、ブリュッセル自由大学の Robert Brout (ロペール・ブルー)、François Englert (フランソワ・エンゲル)

も含まれており、標準模型では唯一未発見の素粒子である。これらの種類の違う粒子は、**スピン**という物理量の値の違いでまとめる事ができ (【問題 1】スピンとは何か?)

- スピン 0
 - ヒッグス粒子 (候補発見: 質量を生成する力の元)
- スピン 1/2
 - レプトン・クォーク (物質の元)
- スピン 1
 - グルーオン・ $W^\pm$ ・ Z ボゾン・光子 (物質同士を結合する力の元)
- スピン 2
 - グラビトン (未発見: 物質同士を引きつける重力の元)

である。⁶ 大雑把に

- 整数スピン (0, 1, 2): 力の元 (クーロン力を与える光子など)
- 半整数スピン (1/2): 物質の元 (水素原子を作る電子など)

である。

上の「素粒子の分類図」の左のように、クォークは 3 つ集まって陽子・中性子を作る。その時、クォークの電荷が、 $\frac{1}{3}e$ を単位にして現れる。この値を得るために

- u -クォーク (up -quark: アップクォーク) の電荷を $Q(u)$
- d -クォーク ($down$ -quark: ダウンクォーク) の電荷を $Q(d)$

とするとき、

- 陽子は uud
- 中性子は udd

と作られているので、陽子の電荷 $+e$ と中性子の電荷 0 がクォーク 3 つの電荷から与えられ

$$\begin{aligned} e &= Q(u) + Q(u) + Q(d) \\ 0 &= Q(u) + Q(d) + Q(d) \end{aligned} \quad (1.1)$$

が成り立つ時である。これから、簡単に答えが分かり

$$\begin{aligned} Q(u) &= \frac{2}{3}e \\ Q(d) &= -\frac{1}{3}e \end{aligned} \quad (1.2)$$

を得る。つまり、

ルール) が 1964 年に、ヒッグスの存在を提唱し、2013 年のノーベル物理学賞はエングレールとヒッグスの両博士に与えられた。

⁶ 規則的に $1/2$ ずつ増加しているが $3/2$ が抜けている。このスピン $3/2$ の素粒子は、重力を媒介する素粒子の重力子 (グラビトン: 未発見) に関連する粒子として予言されている。重力理論を拡張した**超対称的**重力理論に含まれる素粒子でグラビティーノと呼ぶ。宇宙の暗黒物質の候補になっている。この場合、小林益川模型も**超対称的**小林益川模型に拡張される。

- クォークの電荷は、 $\frac{1}{3}e$ を単位にしている

事が導かれる。クォーク・レプトンの電荷を分類表と共にまとめる。よく使う記号で表すと

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline \begin{pmatrix} u^{R,G,B} \\ d^{R,G,B} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c^{R,G,B} \\ s^{R,G,B} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} t^{R,G,B} \\ b^{R,G,B} \end{pmatrix} \dots 2e/3 \\ \hline \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \dots -e \\ \hline \end{array} \quad (1.3)$$

である。ここで、クォークの呼び名は、英語の頭文字であり

$$\begin{pmatrix} up: \text{上} \\ down: \text{下} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} charm: \text{魅力} \\ strange: \text{奇妙} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} top: \text{頂き} \\ bottom: \text{底} \end{pmatrix}$$

である。また、3 色を英語の頭文字 (**R**ed, **G**reen, **B**lue) で表してある。同様に、グルーオン (g : **g**luon)・ $W^\pm$ ・ Z ボゾン・光子 (γ) の電荷は

$$\begin{array}{|c|} \hline g, Z, \gamma \dots 0 \\ \hline W^+ \dots +e, W^- \dots -e \\ \hline \end{array}$$

である。

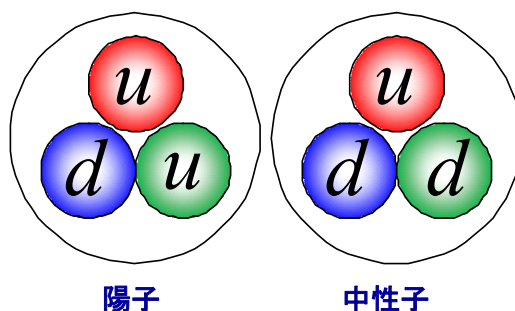
さて、クォーク 3 つから陽子と中性子が作られが、この 3 つから作られる理由を与えるために、クォーク自身 3 つ子であるという考えが導入された。この 3 という数から

- 光の 3 原色になぞらえて、(**赤**、**緑**、**青**) の 3 色 (カラー) のクォークと呼ばれる。この結果を図に表すと

	第 1 世代	第 2 世代	第 3 世代
ク ォ ー ク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム

である。光の混合に対応させて

- 陽子と中性子は (**赤**、**緑**、**青**) の 3 つ子のクォークが均等に混ざった**白色**と考える。従って、模式的に描けば



ところで実際には、(量子力学での波動関数の重ね合わせにより) 3 色は瞬時に他の色に変わって白色を保つと考えられるので、上図で色が入れ替わった状態もある。このことを数学的に表すと、**3** 色のクォークを取り扱う **SU(3)** 群に基づき陽子と中性子を構成しないといけない。この **SU(3)** 群を

- カラー**SU(3)**群

という。この 3 つ子のクォークを表すのに、3 行 1 列を使って 3 つ並べ

$$u = \begin{pmatrix} u_R \\ u_G \\ u_B \end{pmatrix}, d = \begin{pmatrix} d_R \\ d_G \\ d_B \end{pmatrix} \quad \begin{cases} R \cdots \text{赤} \\ G \cdots \text{緑} \\ B \cdots \text{青} \end{cases} \quad (1.4)$$

と表す (【問題 2】 u_R, u_G, u_B と d_R, d_G, d_B を用いて、陽子を 3 つのクォークで表せ。すべての組み合わせを列挙せよ)。 u -クォークや d -クォークは、それぞれ(1.3)のように上下に配置されるので、例えば、

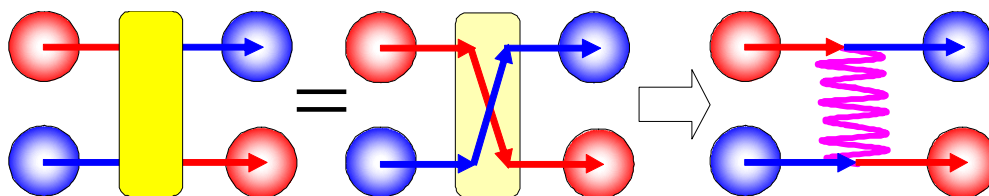
$$q = \left(\begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} u_R \\ d_R \end{array} \right\} \begin{array}{l} 2 \text{行} 1 \text{列} \\ 2 \text{行} 1 \text{列} \end{array} \\ \left. \begin{array}{l} u_G \\ d_G \end{array} \right\} \begin{array}{l} 2 \text{行} 1 \text{列} \\ 2 \text{行} 1 \text{列} \end{array} \\ \left. \begin{array}{l} u_B \\ d_B \end{array} \right\} \begin{array}{l} 2 \text{行} 1 \text{列} \\ 2 \text{行} 1 \text{列} \end{array} \end{array} \right) \begin{array}{l} 3 \text{行} 1 \text{列} \\ 3 \text{行} 1 \text{列} \\ 3 \text{行} 1 \text{列} \end{array}, \quad q = \left(\begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} u_R \\ u_G \\ u_B \end{array} \right\} \begin{array}{l} 3 \text{行} 1 \text{列} \\ 3 \text{行} 1 \text{列} \\ 3 \text{行} 1 \text{列} \end{array} \\ \left. \begin{array}{l} d_R \\ d_G \\ d_B \end{array} \right\} \begin{array}{l} 3 \text{行} 1 \text{列} \\ 3 \text{行} 1 \text{列} \\ 3 \text{行} 1 \text{列} \end{array} \end{array} \right) \begin{array}{l} 2 \text{行} 1 \text{列} \\ 2 \text{行} 1 \text{列} \\ 2 \text{行} 1 \text{列} \end{array}$$

のように表す。どちらも

- 添え字: $i=1,2$ と $\alpha=1,2,3$ を用い、 $q_{i\alpha}$ で表す

よ $q_{i\alpha}: q_{11}=q_{\text{上}R}=u_R, q_{23}=q_{\text{下}B}=d_B$ などとなる (【問題 3】 u_B, d_R を $q_{i\alpha}$ で表せ)。

さて、色が変わる様子は、「色の移動」と考える事ができ、例えば、



のような色の交換を考える事ができる。このとき、色交換のために現れる素粒子をグルーオンという。図では、波線で表されている。このグルーオンの交換により力が発生し、この力によりクォーク同士が結合し、陽子や中性子を作る。この様な力は、2 つの素粒子に**相互**に働くので

- 相互作用

という。特に、グルーオンの交換により現れる力を

- 強い力

といい、その結果現れるのが

- **強い相互作用**

である。クォークの 3 色が左図のように「上行きライン」・「下行きライン」に同時に現れる。

「上行きライン」が 3 色、「下行きライン」が 3 色、の全部で 3×3 の 9 種類現れる事になる(【問題 4】交換する色の組を、すべて列挙せよ)。その中で、1 種類は「白色の交換」をするので、取り除かれる(【問題 5】「白色の交換」を、どう説明したらよいか? 考えよ)。従って、 $9 - 1 = 8$ の 8 種類現れる事が分かる。従って、グルーオンは 8 つ子と考える事ができる。つまり、「素粒子の分類図」にあるように

- 8 つのグルーオン (8 つ子) : $8 = 3 \times 3 - 1$

が導かれる。このような 8 つのグルーオン (8 つ子) は

- 3 色 (3 つ子) のクォークを結びつけ陽子や中性子をつくる**強い力**

を与える事になる。その他に、

- $W^\pm \cdot Z$ ボゾン
- 光子

は全部で 4 種類居るが、4 種類ある理由として、クォーク・レプトンが世代ごとに上下 2 つづつまとめられ、



ており、この 2 を元にして同じ計算 (**SU(2)群**という) をすると、 $8 = 3 \times 3 - 1$ の同じ計算により $2 \times 2 - 1 = 3$ のように、3 種類現れる事になる。ここで、

- 3 は、 $W^\pm \cdot Z$ の 3 種類に対応

この場合は、 $2 \times 2 = 3 + 1$ の計算の 1 に対応する 4 番目も現れ、

- 1 は、光子に対応

している。ここに、 $W^\pm \cdot Z$ の交換により

- クォーク・レプトンの種類を変える力を含む**弱い力** (ベータ崩壊させる力)

を媒介する。素粒子相互に働くこの力より

- **弱い相互作用**

が現れる。光子の交換によるクーロン力からは、**電磁相互作用**が現れる。以上、3 種類の素粒子の交換により

- 強い相互作用...グルーオンの交換
- 弱い相互作用... $W^\pm \cdot Z$ の交換
- 電磁相互作用...光子 (γ) の交換

が現れる。このなかで、素粒子の種類を変化させ、素粒子を崩壊させるのは弱い相互作用である。

行列の大きさが決まるとクォークやレプトンに力を与える素粒子のグルーオンや光子等の交換する素粒子の数も決まる。つまり、

- クォークやレプトンに力を与える素粒子は 2 次元行列

で表されるので、その数は

$$1 \text{ 行 } 2 \text{ 列 } \begin{pmatrix} * \\ * \end{pmatrix} \text{ にたいして、} \begin{pmatrix} * & * \\ * & * \end{pmatrix} \dots 2 \times 2 = 4 \text{ つの素粒子} \quad (1.5)$$

$$1 \text{ 行 } 3 \text{ 列 } \begin{pmatrix} * \\ * \\ * \end{pmatrix} \text{ にたいして、} \begin{pmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \end{pmatrix} \dots 3 \times 3 = 9 \text{ つの素粒子} \quad (1.6)$$

である (【問題 6】それぞれの場合に、交換する素粒子を説明せよ)。

Ⅱ.素粒子変化

弱い力は、素粒子の種類を変化させる。素粒子がこの変化の様子は

- 弱い相互作用による**中性子のベータ崩壊**

に見る事ができる。右図は中性子のベータ崩壊を表し

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.7)(1.8)$$

である。ここに、

- $\bar{\nu}_e$ は反ニュートリノといい、反物質の素粒子

を表わす。反物質はバー ($\bar{}$) を付けて表わす事が多い。中性子は 3 つのクォークでできているので、その素粒子の変化で記述でき

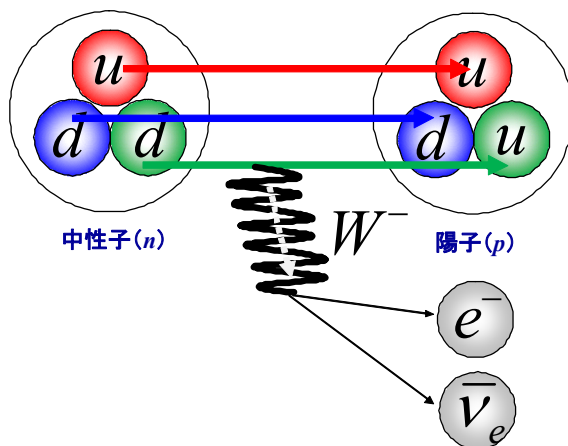
$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.9)$$

である。共に、崩壊前と崩壊後の電荷は保存しているのに注意しよう (【問題 7】 $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$

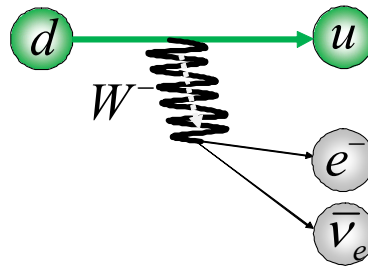
での「電荷は保存」を説明せよ)。崩壊できる素粒子は

- 質量の重い素粒子が軽い素粒子に崩壊

である。標準模型から与えられる模式図では素粒子の変化は



である。つまり、素粒子の変化を抜き出せば



である。このような、素粒子の変化は、

- クォーク同士・レプトン同士が電荷を $+e$ だけ変えることがわかる。従って、クォーク・レプトン分類表では、

$$\begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{ccc} \begin{pmatrix} u^{R,G,B} \\ d^{R,G,B} \end{pmatrix} & \begin{array}{c} \updownarrow \\ \updownarrow \end{array} & \begin{pmatrix} c^{R,G,B} \\ s^{R,G,B} \end{pmatrix} & \begin{array}{c} \updownarrow \\ \updownarrow \end{array} & \begin{pmatrix} t^{R,G,B} \\ b^{R,G,B} \end{pmatrix} \dots 2e/3 \\ \hline \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} & \begin{array}{c} \updownarrow \\ \updownarrow \end{array} & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} & \begin{array}{c} \updownarrow \\ \updownarrow \end{array} & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \dots 0 \\ \hline \end{array} \end{array}$$

のように、上下にある素粒子同士の間になる。素粒子の変化は、素粒子への力によるので、(1.5) を考慮すると、

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^- \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \nu_e \rightarrow e^- \quad (1.10)$$

と対応させることができる (【問題 8】 $e^- \rightarrow \nu_e$ を行列を用いて説明せよ)。

この崩壊過程では、質量の大小より、崩壊できる組が決まる。質量は

$$\begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{ccc} \begin{pmatrix} u^{R,G,B} : 5 \\ d^{R,G,B} : 10 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c^{R,G,B} : 1,600 \\ s^{R,G,B} : 200 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} t^{R,G,B} : 175,000 \\ b^{R,G,B} : 5,000 \end{pmatrix} \dots 2e/3 \\ \hline \begin{pmatrix} \nu_e : \approx 0 \\ e^- : 0.5 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\mu : \approx 0 \\ \mu^- : 105 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\tau : \approx 0 \\ \tau^- : 1,700 \end{pmatrix} \dots 0 \\ \hline \end{array} \end{array}$$

(質量の単位は MeV)

である (数値は大雑把な値である)。質量の大きい素粒子から質量の小さい素粒子に崩壊するので、クォーク同士は、例えば、 t, b であると

$$\begin{array}{l} \odot t \rightarrow b, t \rightarrow s, t \rightarrow d \\ \odot b \rightarrow c, b \rightarrow u \end{array} \quad (1.11)$$

の崩壊が可能になる (【問題 9】 c, s, d の崩壊先をすべて列挙せよ)。レプトン同士は、

$$\begin{array}{l} \odot \tau^- \rightarrow \nu_\tau \\ \odot \mu^- \rightarrow \nu_\mu \\ \odot e^- \rightarrow \nu_e \end{array} \quad (1.12)$$

のみである。これは、レプトンに特有な事情があり

- τ^- の崩壊相手を ν_τ と名前を付ける
- μ^- の崩壊相手を ν_μ と名前を付ける
- e^- (は崩壊しないが) の相手を ν_e と名前を付ける

という事情により、もともと他のニュートリノ (ν) への崩壊: $\tau^- \rightarrow \nu_e$ 等、はありえないのである。クォークの場合は、

- **質量を測定**して、それぞれのクォークを発見

したが、ニュートリノの場合は、ニュートリノの質量を測って発見されたのではなく、上述のように

- **崩壊後の状態**で ν_e 、 ν_μ や ν_τ と決定

されている。この決定方法の違いは、クォークの崩壊現象の代わりに、ニュートリノでは

- **ニュートリノ振動**という現象になって観測

された。1998 年のことである。この観測により、ようやくニュートリノの質量が確認され、その質量を測れる可能性を開いた。現在の所 (2014 年)、ニュートリノ質量を直接測る事に成功していない。 $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ の崩壊は、図から分かるように 2 の過程が連続して起こると考えられ

$$d \rightarrow u + W^-, \quad W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.13)$$

である。つまり、

- **d 消滅**と同時に u と W^- **生成**
- **W^- 消滅**と同時に e^- と $\bar{\nu}_e$ **生成**

のように、**素粒子の消滅・生成過程**として捉える事ができる。

ところで、 $W^\pm, Z$ 等の質量は

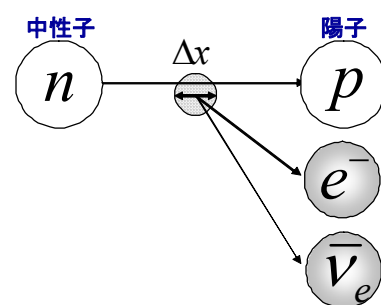
$g, \gamma: 0 \cdots 0$
$Z: 90,000 \cdots 0$
$W^\pm: 81,000 \cdots \pm e$

(質量の単位は MeV)

であるので (数値は大雑把な値である)、 d (10 MeV) より W^- (81,000 MeV) の質量が大きいので $d \rightarrow u + W^-$ の崩壊は実際には

起こらないが、崩壊過程では起こっている。この理由は、量子力学での不確定性関係

$$\Delta x \Delta p \sim \hbar \quad (1.14)$$



に関連している。つまり、

- 大きさ Δx では、 $c\Delta p$ 程度のエネルギーが瞬間的に蓄えられるという事になる。 W^- が生成されるには、(1.14)より大雑把に

$$c\hbar = 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm} \quad (\text{fm} = 10^{-15} \text{ m}) \quad (1.15)$$

を用いて

$$c\Delta p \sim \frac{c\hbar}{\Delta x} = \frac{197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{\Delta x} \geq 81,000 \text{ MeV} \quad (1.16)$$

であれば、このエネルギーが質量エネルギーに変換され、極小領域で W^- が瞬間的に作られ交換される。この時の極小領域の大きさは、大雑把に

$$\Delta x \leq \frac{197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{81,000 \text{ MeV}} \approx 2 \times 10^{-3} \text{ fm} = 2 \times 10^{-16} \text{ cm} \quad (1.17)$$

程度になる。この位の領域内で、中性子の崩壊が起こる事になる。この様な場合には、素粒子は瞬時に消滅し観測にかからない。これを

- **仮想状態** (virtual state) といい**観測にかからない素粒子**

である。今の例では、観測にかかる粒子は「 $n, p, e^-, \bar{\nu}_e$ 」である。仮想状態を指定するのに、

- $d \rightarrow u + "W^-"$, $"W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ と " " を付ける

事にする (【問題 10】 $t \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ の場合を、(1.13)のように W^+ を用いて表し、 W^+ の状態を議論せよ)。この仮想状態は量子力学から**素粒子の場の理論**に移行すると自動的に現れる状態である。