

世界は何からできているのか？

— 素粒子論のすすめ —

小桜 未来

2022 年 12 月 26 日

1 原子

原子はその中心に存在する”原子核”とその周辺に存在する”電子”に分けることができる。そして原子核は”陽子”と”中性子”の二つで構成されている。電子は-1 の電荷を持ち、陽子は +1 の電荷を持つ。また、中性子は電荷を持たない。基本的にはこの三つの粒子で原子は構成されているが、まれに原子核中の中性子が”崩壊”することがある。この崩壊のことを” β 崩壊”と言い、これは放射性崩壊の一つである。 β 崩壊を起こすと中性子が陽子に変換され、電子と反ニュートリノと呼ばれる粒子を放出する。陽子を p^+ 、中性子を n 、電子を e^- 、反ニュートリノを $\bar{\nu}$ とすると、 β 崩壊は

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

と表すことができる。全体で電荷が保存されるために、反ニュートリノは電荷を持たないことがわかる。

2 量子

ここで少々 の補足をしておこう。一般に原子の構造としては原子核の周りを電子が「回る」と表現されることがあるがこれは誤りである。ミクロの世界では粒子は”量子”と呼ばれる性質を持つことが知られている。量子の代表的な性質は

- 位置の不確かさ Δx と運動量の不確かさ Δp はある定数 \hbar を用いて $\Delta x \Delta p \geq \hbar$ という関係にあり、位置と運動量を同時に確定させることはできない。
- 位置を確定させることができない代わりに、その確率のみが計算できる。

である。つまり、電子は原子核の周りを「回っている」のではなく「確率的に分布している」。”シュレーディンガーの猫”は猫の生死が確率的に分布している例だ。

3 素粒子

素粒子とはこの世界を作っている最も基礎的な粒子のことである。例えば既に出てきた電子や反ニュートリノは素粒子である。ここで、現在まで存在することが明らかになっている、あるいは存在する可能性がかなり高い素粒子についてまとめておこう。

まず素粒子には大きく分けて三種類に分類することができる。物質を構成する”フェルミ粒子”と力を媒介する”ゲージ粒子”、そして質量を生成する”ヒッグス粒子”だ。

フェルミ粒子は”上系列クォーク”、”下系列クォーク”、”荷電レプトン”、”ニュートリノ”の四種類あることが分かっている。これらはそれぞれ電荷が異なり、上系列クォークは $+\frac{2}{3}$ 、下系列クォークは $-\frac{1}{3}$ 、荷電レプトンは -1 の電荷を持ち、ニュートリノは電荷を持たない。また、これらの粒子には電荷の符号を反転させた”反粒子”が存在する^{*1}。反粒子には上付きの”バー”を用いて表すことにする。

表1 フェルミ粒子

粒子	電荷	反粒子	電荷
上系列クォーク	$\frac{2}{3}$	上系列反クォーク	$-\frac{2}{3}$
下系列クォーク	$-\frac{1}{3}$	下系列反クォーク	$\frac{1}{3}$
荷電レプトン	-1	反荷電レプトン	1
ニュートリノ	0		

ゲージ粒子は力、つまり相互作用に対応する粒子が存在し、強い相互作用に対応する”グルーオン”、電磁気力に対応する”光子”(フォトン)、弱い相互作用に対応する”ウィークボソン”、そして重力相互作用に対応する”重力子”(グラビトン)^{*2}だ。

表2 ゲージ粒子

粒子	相互作用
グルーオン	強い相互作用
光子	電磁気力
ウィークボソン	弱い相互作用
重力子	重力

ヒッグス粒子は分類の名前ではなく素粒子の名前だ。ヒッグス粒子によりいくつかの素粒子は質量を獲得することができる。

4 記号化

議論を簡単にするため、素粒子模型の最も使われる素粒子に記号を付けることにしよう。フェルミ粒子には先に述べた四種類にそれぞれさらに三種類存在し、計十二種類以上存在することが分かっている。この三種類存在する構造は世代構造と呼ばれ、質量が低い順に第一世代、第二世代、第三世代と呼ぶ。このうち最も質量が軽い第一世代が身近なため、これに記号と名前を与えることにする。第一世代は上系列クォークから順に”アップクォーク”、”ダウンクォーク”、電子、”電子ニュートリノ”と呼び、それぞれ” u ”、” d ”、” e^- ”、” ν_e ”で表す。また、反粒子の記法は基本上付きバーを付ければよいが、電子のみ例外的に” e^+ ”と表し、”陽電子”と呼ぶ。

同様にゲージ粒子にも記号を付ける。グルーオンは” g ”、光子は” γ ”、重力子は” G ”で表す。ウィークボソンは” W^+ ”ボソン、” W^- ”ボソン、 Z ボソンの三種類に分けられ、それぞれ” $W^+/W^-/Z$ ”と表す。

^{*1} ニュートリノに反粒子が存在するかどうかは分かっていない。ニュートリノの反粒子はニュートリノ自身である可能性がある。

^{*2} 重力子はゲージ粒子の中で唯一未発見

表3 第一世代フェルミ粒子

粒子	記号	電荷	反粒子	記号	電荷
アップクォーク	u	$\frac{2}{3}$	反アップクォーク	\bar{u}	$-\frac{2}{3}$
ダウルクォーク	d	$-\frac{1}{3}$	反ダウルクォーク	\bar{d}	$\frac{1}{3}$
電子	e^-	-1	陽電子	e^+	1
電子ニュートリノ	ν_e	0	反電子ニュートリノ	$\bar{\nu}_e$	0

表4 ゲージ粒子

粒子	記号	相互作用
グルーオン	g	強い相互作用
光子	γ	電磁気力
ウィークボソン	W^\pm/Z	弱い相互作用
重力子	G	重力

5 相互作用

個々の相互作用がどのようなときに現われるのかについて具体的に説明しよう。

5.1 強い相互作用

強い相互作用は原子核を構成する素粒子、クォークを結合する相互作用である。クォークはそれぞれ電荷を持つため、電磁気力により反発することがあるはずだが、これよりも「強い」相互作用によって原子核の形をとどめている。

5.2 電磁相互作用

電気力と磁気力を融合した相互作用である。電気力と磁気力は深い関係があり、理論物理学によって二つの力は一つの式にまとめられている。

5.3 弱い相互作用

β 崩壊を起こす力のことである。これは電磁気力よりも「弱い」ため、このような名前になっている。

5.4 重力相互作用

質量に対して働く力のことである。素粒子について考える際には無視することが多い。なぜなら素粒子は軽すぎるため他の相互作用に比べて重力相互作用があまりにも弱すぎるからである。

6 強い相互作用とカラー

陽子と中性子はクォークで構成されている。具体的には陽子は uud、中性子は udd である。強い相互作用はこの三つのクォークの間に作用するが、これを説明する際に用いられるのが”カラー”である。クォークは^{*3}赤、青、緑の三種類のカラーを持っている。このカラーが無色になるようにするのが強い相互作用だということだ。赤、青、緑はそれぞれ頭文字を取って R、B、G で表すことが多い。また、反粒子はそれぞれ反カラー、つまり補色を持っている。これらの組み合わせで无色になるのは以下のいずれかである。

- RGB の三つの素粒子で構成されている。
- 反 R 反 B 反 G の三つの素粒子で構成されている。
- R と反 R の二つの素粒子で構成されている。
- B と反 B の二つの素粒子で構成されている。
- G と反 G の二つの素粒子で構成されている。

1 つ目を”バリオン”(重粒子)、2 つ目を”反バリオン”(反重粒子)、残りの 3 つを”メソン”(中間子) と呼ぶ。中性子や陽子はバリオンである。すべて書くことはしないが、例えば陽子の一つとして $u_R u_B d_G$ といったものが考えられるだろう。

7 電気力はなぜ逆二乗則を満たすのか？

電気力は二つの粒子の電荷を q_1, q_2 とすると、

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

と表されるということが分かっている。面白い点は r^2 に反比例している点だ。これはなぜなのか。電荷 q_2 を中心に置くとしよう。すると、電磁気力を媒介する光子が中心から四方八方に放たれ、光子は球面を描きながら徐々に広がっていくはずである。これが r^2 に反比例する理由だ。つまり、光子が球面を描きながら四方八方に広がることで、球面は r^2 に比例するため^{*4}、光子の密度が中心から離れるにつれて薄くなり、 r^2 に反比例して電気力は弱くなるのだ。重力の近似理論である万有引力の法則も逆二乗則を満たしており、満たす理由は電気力と同じだ。

8 素粒子論の個人的に面白い点

- 世界を構成しているものについての理論なので面白い
- 文章を読んだだけでは複雑に見えるが実際この PDF で説明した内容は $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$ という数式でまとめることができる、世界がなぜこんなにも単純にできたのかというのを調べるのは面白い
- 世界の全てを理解した気になれるのは面白い

^{*3} カラーを持っているのはクォークとグルーオンのみである。そのため、強い相互作用はクォークとグルーオンに対してのみ起こる。

^{*4} $S = 4\pi r^2$