

現在の素粒子像 (実験編) レポート No. 1 (提出日: 11月2日 講義時)

(*) A4 レポートで名前、学生番号を記入の上提出すること。レポートが複数枚になる場合は左端をホッチキスでとめること。

- ① 素粒子の標準理論では、素粒子は 12 個のクォークとレプトン、力を伝える 4 つの粒子、質量を作るヒッグス粒子 1 つからなる。12 個のクォークとレプトンの名前と質量をすべて書きなさい。

u クォーク (質量: $1.5\sim 3\text{MeV}/c^2$)、d クォーク (質量: $3\sim 7\text{MeV}/c^2$)、
c クォーク (質量: $1.25\text{GeV}/c^2$)、s クォーク (質量: $\sim 100\text{MeV}/c^2$)、
t クォーク (質量: $\sim 4.5\text{GeV}/c^2$)、b クォーク (質量: $174\text{GeV}/c^2$)、
電子 (質量: $511\text{keV}/c^2$)、 μ (質量: $106\text{MeV}/c^2$)、 τ (質量: $1.78\text{GeV}/c^2$)
 ν_e (質量 $< 2\text{eV}/c^2$)、 ν_μ (質量 $< 2\text{eV}/c^2$)、 ν_τ (質量 $< 2\text{eV}/c^2$)

- ② 力を伝える 4 つの粒子の名前と質量を、それぞれの粒子が伝える力の種類を書きなさい。

γ (光子、質量:0) : 電磁力
g(グルーオン、質量:0) : 強い力
W(質量: $80\text{GeV}/c^2$) : (電荷を変える) 弱い力
Z⁰(質量: $91\text{GeV}/c^2$) : (電荷を変えない) 弱い力

- ③ 素粒子実験の測定装置は一般に多数の検出器を組み合わせた複雑な構造をしている。なぜ、このように多数の検出器を組み合わせる必要があるのか説明しなさい。

通常素粒子実験の測定器は

- (1) 粒子の発生点を測定するバーテックス測定器
- (2) 粒子の飛跡を測る飛跡測定器。また磁場を組み合わせると曲率を測ることで運動量を測定する。
- (3) 次に必要な場合は、荷電粒子の識別用の測定器
- (4) 電磁や光子のエネルギーを測る電磁カロリメータ
- (5) π 中間子や陽子等のハドロンのエネルギーを測るハドロンカロリメータ
- (6) 最後に上記の測定器を全て突き抜けてきたミュー粒子を検出する測定器と各機能ごとの測定器を組み合わせ、複数の粒子の位置、種類、運動量、エネルギーが測定できる。

- ④ 荷電粒子の運動量を測定する一般的方法を簡単に説明しなさい。

磁場中で粒子の通った飛跡の曲率を測り、運動量を求める。

- ⑤ ある粒子 N_0 個の生存個数が時間の関数として $N(t) = N_0 \exp(-t/\tau)$ と表せた。この粒子の

寿命の平均値 $\int_0^{\infty} dt \cdot t \cdot N(t) / \int_0^{\infty} dt \cdot N(t)$ を求めよ。

$$\int_0^{\infty} dt \cdot t \cdot N(t) / \int_0^{\infty} dt \cdot N(t) = \int_0^{\infty} dt \cdot t \cdot N_0 \exp(-t/\tau) / \int_0^{\infty} dt \cdot N_0 \exp(-t/\tau) = \tau$$

となる。よって τ を平均寿命と呼ぶ。

- ⑥ Z^0 粒子の質量をどんなに精度良く測定しても、その質量分布に 2.5GeV ($1\text{GeV} \equiv 10^9\text{eV}$) の広がり (巾) が付いてきた。不確定性原理、式(1.1)を使い、 Z^0 粒子の寿命を推定せよ。

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$$

$$2.5\text{GeV} \cdot \Delta t \sim 4.1 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s} \div 2\pi$$

$$\Delta t \sim 2.6 \times 10^{-25} \text{s}$$

- ⑦ π^+ 中間子、 π^0 中間子、ミューオン (μ^+) の主崩壊様式とその寿命を調べなさい。またその崩壊を起こす相互作用を言いなさい。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu} \quad : \text{弱い相互作用} \quad \text{寿命} : 2.6 \times 10^{-8} \text{sec}$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad : \text{電磁相互作用} \quad \text{寿命} : 8.4 \times 10^{-17} \text{sec}$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_{\mu} + \nu_e \quad : \text{弱い相互作用} \quad \text{寿命} : 2.2 \times 10^{-6} \text{sec}$$

- ⑧ もし、陽子と中性子の重さが逆であれば (つまり中性子の方が陽子より軽ければ)、世界はどうなるか推測してみなさい。

配布資料に回答あり。

になってしまうと、粒子としては観測できないではないか。

《休憩室 2：微妙な質量のバランス—物質の安定性 1》

この宇宙は、いろいろな偶然の積み重ねか、実に絶妙なバランスでつくられている。ここでは、ほんのちょっと質量が変わっただけで全く別の世界になってしまうことについて述べよう。

中性子の質量は、(3.2) 式の反応が起こるほど重い。もしほんの少し軽くて、(3.3) 式が成り立っていなかったらどうだろう。(3.2) 式の崩壊は当然起こらない。中性子は安定な粒子となる。するとこの世界は、放射線として危険な中性子が飛び交っている世界になっていただろう。人類や生命も生まれなかったに違いない。

陽子がバリオンの中で一番軽い必然性もなさそうである。もし、中性子と陽子の質量が入れ代わっていたらどうい世界になっていただろうか？

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \quad (3.14)$$

の反応によって陽子は壊れ、少なくとも水素原子は存在できない。星の主な燃料となる水素がなければ、星の輝くのもより難しかろう。また、水もない(重水はわずかにある?)ので、生命の存在しない世界になっていたに違いない。

ボーアの原子模型によれば、原子核の周りを回る電子が一定の半径の軌道のときだけ安定であるという。もちろんこれは古典的描像で、実際の原子では、原子核の周りを電子が雲のように存在している。なぜ原子は安定なのだろうか？最も単純な系、水素原子を考えよう。素粒子的な答は、

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e \quad (3.15)$$

などの反応が起きないからというものである。すなわち、次式が満たされているからである。

$$m_p + m_{e^-} < m_n + m_{\nu_e} \quad (3.16)$$

もし、電子がほんの少し重くて、(3.15) 式の反応が起きてしまうと大変である。水素原子はこの世に存在できない。また中性子も、(3.2) 式の

反応が起きないため、安定となり、そこら中に飛び回っている。やはり大変な世界である。

では、なぜ電子は原子核の電場の中心に落ち込んでしまわず、雲のように周りにいられるのだろうか？その理由は、ド・ブロイの式(1.9)式により説明できる。原子核にくっついている状態は、波長が非常に短い状態である。それは、運動量、すなわち、エネルギーが大きい状態である。雲のように広がっている方が、よりエネルギー的に低い状態である。それで、原子の大きさが大体ボーア半径くらい($\sim 10^{-10} \text{m}$)に保たれている。それでは、分子、そして物質はなぜ安定なのだろうか？これらについては休憩室 9 で考察しよう。

$$(3.2) \quad n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$(3.3) \quad m_n c^2 > m_p c^2 + m_e c^2 + m_{\bar{\nu}_e} c^2$$