

1. 序論

本講義は高エネルギー物理学（素粒子実験物理学）の観点から、素粒子物理学の概要、特に電磁相互作用（QED）の基礎と現象論的観点からの弱い相互作用、強い相互作用及び電弱統一理論について講義します。

（小林さん要チェック）後期は理論的な発展を中心に、クォークモデル、量子色力学、大統一理論について講義されます。

1.1 素粒子とは

世界を構成する最小の基本単位。つまり世界は何からできているかという、素朴な疑問に答える学問が素粒子物理学です。

素粒子物理と原子・原子核物理の違いはなんでしょう？

共通点：ともに小さな世界を扱っている（量子力学）。

⇒ 扱う力＝電磁相互作用・強い相互作用・弱い相互作用

異なる点：

素粒子物理 ⇒ 素粒子は世界の基本構成要素。

基本粒子（内部構造を持たない質点）の性質とその運動を調べる

第1原理から物理を探求する。Simple is Best。

原子・原子核物理学 ⇒ 物性物理学と同じで（有限）多体系である。

現象をうまく説明するモデル構築を目指す。

よって、基本的にはかなり異なった学問であり、素粒子物理学は物理の中でも特異な分野と言える。

素粒子とは

①クォークとレプトン（物質を構成する粒子）：フェルミオン スピン 1/2

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	u-quark (up)	c-quark (charm)	t-quark (top)
	d-quark (down)	s-quark (strange)	b-quark (bottom)
レプトン	E (電子)	μ (ミューオン)	τ (タウ)
	ν_e (電子ニュートリノ)	ν_μ (ミューオンニュートリノ)	ν_τ (タウニュートリノ)

+その反粒子

②ゲージボゾン（力を伝える粒子）：ベクターボゾン スピン 1

電磁力	γ (光子)	電荷
弱い力	W^+, W^-, Z^0	弱電荷
強い力	G(グルーオン):8種類： $g(R\bar{R}), g(R\bar{G}), g(R\bar{B}), g(\bar{R}G), g(\bar{R}B), g(\bar{R}\bar{G}), g(\bar{R}\bar{B}), g(\bar{G}R), g(\bar{G}B), g(\bar{B}R), g(\bar{B}G), g(\bar{B}\bar{R}), g(\bar{B}\bar{G}), g(\bar{B}\bar{B})$ [$g(R\bar{R})+ g(\bar{G}\bar{G})+ g(\bar{B}\bar{B})$]	カラー荷 (R,G,B) 電荷：+、-のようなもの

- ③ヒッグス粒子： スカラーボソン スピン0
H (1個以上)； 各素粒子に質量を与える粒子。

クォークとグルーオンは直接観測されません。観測にかかる粒子はハドロンと呼ばれ

①バリオン (核子の仲間)

p(陽子)[uud]、n(中性子)[udd]、 Δ^{++} (デルタ) [uuu]、 Λ (ラムダ) [uds]、
 Σ^+ (シグマ)[uus]、 Ξ^0 (グザイ) [uss]、 Ω^- (オメガ) [sss]、 Λ_c^+ (ラムダ) [udc]...

②メソン

π^+ (π 中間子) [$u\bar{d}$]、 η^0 (エータ中間子) [$u\bar{d}+u\bar{d}+u\bar{d}$]、 ρ (ρ 中間子)、 ω 、 ϕ (ϕ 中間子) [$s\bar{s}$]、 K^+ (K 中間子) [$u\bar{s}$]、 K^0 (K 中間子) [$d\bar{s}$]、 J/ψ (ジュー・プサイ) [$c\bar{c}$]、
 D^+ (D 中間子) [$c\bar{d}$]、 Υ (アップシロン) [$b\bar{b}$]、 B^+ (B 中間子) [$u\bar{b}$]、 B_c^+ [$c\bar{b}$]...
と無数に存在する。日頃、素粒子実験で主役となるのはレプトンもしくはハドロン (素粒子ではない) である。

[HW] 以下の素粒子の質量の質量を調べなさい。

- (a) e, μ , τ , ν_e , ν_μ , ν_τ
(b) u, d, c, s, t, b
(c) γ , g, W^\pm , Z^0
(d) H (ヒッグス粒子)
(e) p, n, Λ , π^\pm , π^0 , ϕ , K^\pm , J/Ψ , D^\pm , Υ , B^\pm


[HW] 以下の素粒子の寿命を調べなさい。寿命が短く測定されていない粒子は、その中で寿命を定義しなさい。

- (f) e, μ , τ , ν_e , ν_μ , ν_τ
(g) W^\pm , Z^0
(h) p, n, Λ , π^\pm , π^0 , ϕ , K^\pm , J/Ψ , D^\pm , Υ , B^\pm

[HW] ϕ 、 J/Ψ 、 Υ の中 (寿命の逆数) を調べると、。。。。

1.2 力

素粒子に働く力は、重力・電磁力・強い力・弱い力の4種類であるが、重力は非常に小さいので、ここでは取り扱わない。

- 電磁力 ($e^+ \rightarrow e^-$)
- 重力 
- 弱い力 ($\nu \rightarrow e, \mu$)
- 強い力 ($n \leftrightarrow p$)

力	強さ	到達距離	特徴
強い力	1	$10^{-15}m$	陽子、原子核を束ねる力
電磁力	0.01	∞	身の回りの重力以外の力。電気。かみな

			り。分子間力。
弱い力	0.00001	$10^{-17}m$	ベータ崩壊、ニュートリノ、太陽の燃焼
重力	10^{-38}	∞	万有引力、宇宙の形成

弱い力と強い力は短距離力なので、我々の日常生活で力を感じることはない。しかし、我々の世界を形成する上では必要不可欠な力である。

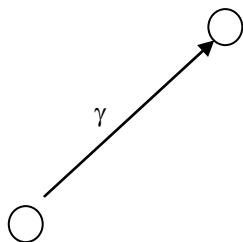
[HW] 弱い力と強い力はなぜ短距離力なのか？

力は粒子が作る場によって作用する。例として電磁場の場合、荷電粒子 1 が作る電場を荷電粒子 2 が感じる時に、力は以下のようになる。

$$\vec{F}_2 = q\vec{E}_1,$$

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

逆（粒子 1 が感じる粒子 2 の場）も然りである。粒子と場は同等で、粒子間の相互作用は一方の粒子の作る場が他方の粒子に影響を及ぼすことである。場を量子論で扱い媒介粒子の形にすることが場の量子論（素粒子物理学の基礎理論）である。



1.3 素粒子物理学の歴史

配布資料参考 [長島教科書 1 p3-4,p8]。約 100 年前に J.J. Thomson によって最初の素粒子“電子”が発見された。1920～1930 年に量子力学が確立され、近代的な素粒子物理学は 1930 年頃の陽子、中性子の発見、Dirac 方程式の確立からスタートしたといえる。1960～1970 年代のクォーク模型、各種素粒子の発見、電弱統一理論、1980～1990 年代のゲージボソンの研究、1990 年代から 2,000 年代における小林・益川模型の確立、1998 年ニュートリノ振動発見による標準理論を越えた現象の発見と続いている。

1.4 粒子の寿命 (τ) と不確定性原理:

τ秒後に粒子の個数は $1/e^{-0.368}$ となる。

μ : 2.2 μ (10⁻⁶)sec、 π[±] : 26n(10⁻⁹)sec、 π⁰ : 8.4 × 10⁻¹⁷sec(直接測定できる限界)、
中性子 : 886sec

短寿命粒子 (10⁻²⁵) : 不確定性原理より粒子の質量に不確定性が入る。

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar (6.5821220 \times 10^{-22} \text{MeV}\cdot\text{s}),$$

$$\Delta t \sim 10^{-25} \Rightarrow \Delta E \sim 6,582 \text{MeV} (\sim 7 \text{GeV})$$

こういう短寿命粒子に関しては粒子質量の幅(Γ) $\propto 1/\tau$ を寿命の代わりに使う。

例： ρ 中間子。質量 $776 \text{MeV}/c^2$ 。幅 $150 \text{MeV}/c^2$ 。対応する寿命は？（質量分布の絵を書く。） [参考：長島教科書 1 p11-12]

1.5 自然単位系

基本単位系 (MK S 単位系 ; M[メートル]、K[キログラム]、S[秒]、A[アンペア]) はマクロな世界を記述するのに適しているがマイクロな世界を表すには不向きである。

自然定数

名称	記号	値	単位
プランク定数	$\hbar (= h/2\pi)$	$1.05457266 \times 10^{-34}$	$m^2 kg \cdot s^{-1} = J \cdot s$
光速	c	299,792,458	$m \cdot s^{-1}$
素電荷	e	$1.602217733 \times 10^{-19}$	$A \cdot s$
重力定数	G	6.67259×10^{-11}	$m^3 kg^{-1} \cdot s^{-2}$

自然単位系： $\hbar = c = \epsilon_0 = 1$ (真空の誘電率)=1 ($\mu_0=1$ ともなる)

$$\alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad \Rightarrow \quad e = 0.0917012$$

✚エネルギー： $1 \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{J}$

$1 \text{keV} = 10^3 \text{eV}$, $1 \text{MeV} = 10^6 \text{eV}$, $1 \text{GeV} = 10^9 \text{eV}$, $1 \text{TeV} = 10^{12} \text{eV}$

✚質量： $1 \text{eV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-36} \text{kg}$

電子が $511 \text{keV}/c^2$ 、陽子が $938 \text{MeV}/c^2$

✚運動量： $1 \text{eV}/c = 0.535 \times 10^{-27} \text{kgm/s}$

✚断面積： $1 \text{b} \equiv 10^{-24} \text{cm}^2$

$$\sigma(e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-) = \frac{4\pi\alpha^2}{3} \frac{1}{s} \quad (\text{注}) s \text{ は重心系の全エネルギーの 2 乗}$$

この反応の断面積を m^2 で表すと、エネルギー 1GeV での反応断面積は

$$\frac{4\pi\alpha^2}{3} \frac{(\hbar c)^2}{s} \approx \frac{4\pi(137)^{-2} (1.05 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8)^2}{3 (1.6 \times 10^{-19} \times 10^9)^2} \approx 9 \times 10^{-36} m^2$$

$$\sigma \sim 2\pi r^2 = 9 \times 10^{-36}$$

$r \sim 10^{-18} \text{m}$; よって反応粒子を古典的に大きさがあるとするとその大きさは 10^{-18}m に対応する。この対応は正確ではなく、皆さんに素粒子反応の大きさのスケールを理解してもらいたいだけです。

[HW] 核力の到達範囲を考慮する。 π 中間子の質量を 140MeV として、不確定性原理

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar, \Delta E = c\Delta t, \text{ を使って仮想 } \pi \text{ 中間子が相互作用を及ぼす距離 } \Delta l \approx \frac{\hbar c}{140 \text{MeV}} = ?? \text{cm}$$

を求めよ。次に弱い相互作用の到達距離を推測するために、弱い相互作用の媒介粒子であ

る W^\pm が相互作用を及ぼす距離を求めよ。

1.6 相対論の関係式とローレンツ変換

4元ベクトル

$$4 \text{ 元座標} \quad x \equiv (x^0, x^1, x^2, x^3) \equiv (ct, \mathbf{x}),$$

$$4 \text{ 元運動量} \quad p \equiv (p^0, p^1, p^2, p^3) \equiv (E/c, \mathbf{p}) \quad \text{注: 単位を合わせる}$$

内積

$$a \cdot b \equiv a^\mu b_\mu \equiv a^0 b_0 + a^1 b_1 + a^2 b_2 + a^3 b_3 \equiv a^0 b^0 - \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$$

$$b_\mu \equiv (b^0, -\mathbf{b})$$

$$p^2 \equiv (E/c)^2 - \mathbf{p}^2 = m^2 c^2$$

$$E = \sqrt{\mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4}$$

$$E = (\mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{非相対論的極限 } (mc \gg |\mathbf{p}|) \quad = mc^2 \left(1 + \frac{\mathbf{p}^2}{m^2 c^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\mathbf{p}^2}{m^2 c^2}\right)$$

$$= mc^2 + \frac{\mathbf{p}^2}{2m}$$

➤ 計算例

Z ボソン (90 GeV/c²) 生成に必要な加速器エネルギー

◇ 電子・陽電子衝突実験

$$p_1 = (E_1/c, \mathbf{p}_1), p_2 = (E_2/c, \mathbf{p}_2) \quad \mathbf{p}_1 = -\mathbf{p}_2, m_e = 511 \text{ keV}/c^2$$

$$(E_1/c + E_2/c)^2 = 90^2/c^2$$

$$E = 45 \text{ GeV}$$

◇ 陽子固定標的実験

$$p_1 = (E_1/c, \mathbf{p}_1), p_2 = (E_2/c, 0) \quad \mathbf{p}_1 = (0, 0, p_z), \mathbf{p}_2 = 0, m_p \sim 1 \text{ GeV}/c^2$$

$$(E_1/c + m_p)^2 = 90^2/c^2$$

$$p \gg m_p \text{ より}$$

$$2 m_p E_1 = 90^2$$

$$E_1 \sim 4000 \text{ GeV}$$

ローレンツ変換

慣性系 K に対して、 x 方向に速度 $v = \beta c$ で動いている別の慣性系 K' での座標は

$$\begin{pmatrix} x^0 \\ x^1 \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^0 \\ x^1 \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix} \quad \text{----- (1.1)}$$

と表せる。ここで β 、 γ は

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \text{ である。}$$

[HW] 式(1.1) の逆変換を求めよ。つまり慣性系 K の座標を慣性系 K' の座標で表せ。

また粒子のエネルギーと運動量は

$$E = \gamma mc^2, \quad p = \gamma m \beta c$$

と表せる。

この式から、素粒子実験でよく使われる形式に変換すると

$$\gamma = \frac{E}{mc^2}, \quad \beta = \frac{pc}{E} \quad \text{----- (1.2)}$$

となる。素核宇宙実験系に行く人は覚えておくと役に立つ公式です。

[HW] 1次宇宙線（主に陽子）が大気中で原子核と反応し π^+ 中間子が生成される。しかし地上で観測される宇宙線の大部分は μ 粒子である。この現象について考察する。 5GeV の π^+ 中間子が上空 $10,000\text{m}$ で生成されたとして、 π^+ 中間子の β と γ を求めよ。そして、 π^+ 中間子が平均寿命内で飛行できる距離（飛程）を求めよ。また π^+ 中間子は崩壊して μ 粒子が生成される。 4GeV の μ 粒子が生成されたとして、 μ 粒子の飛程を求めよ。

[HW] $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 崩壊を利用してニュートリノビームを生成することを考える。 π^+ の飛行方向にニュートリノ検出器を設置して π^+ の飛行方向($\theta=0^\circ$)に放出されたニュートリノを観測する。エネルギー E_π の π^+ の中間子により生成されるニュートリノのエネルギー E_ν はいくらか？ $m_\pi=140\text{MeV}$, $m_\mu=106\text{MeV}$ を使い $E_\pi, p_\pi \gg m_\pi$ と仮定して答えよ。

[HW] 4元運動量(E_γ, \vec{p}_γ)の光子と静止した電子(E_e, \vec{p}_e)の散乱を考える（コンプトン散乱）。散乱後の光子のエネルギーを求める。

$$\begin{aligned}
(E_\gamma, \vec{p}_\gamma) + (E_e, \vec{p}_e) &= (E'_\gamma, \vec{p}'_\gamma) + (E'_e, \vec{p}'_e) \\
(E_\gamma, \vec{p}_\gamma) + (m_e, \vec{0}) - (E'_\gamma, \vec{p}'_\gamma) &= (E'_e, \vec{p}'_e) \\
m_e^2 + 2m_e E_\gamma - 2E'_\gamma(m_e + E_\gamma) + 2\vec{p}_\gamma \cdot \vec{p}'_\gamma &= m_e^2 \\
2E'_\gamma(m_e + E_\gamma - E_\gamma \cos \theta) &= 2m_e E_\gamma \\
E'_\gamma &= \frac{m_e E_\gamma}{m_e + E_\gamma(1 - \cos \theta)} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e}(1 - \cos \theta)}
\end{aligned}$$