

素粒子物理学

— 概要と準備 —

素粒子物理学OAJC041/O1BC098

2025年度春bc

武内勇司

素粒子物理学 (Elementary Particle Physics)

素粒子物理学とは

物質の究極の構造
素粒子間に働く力
時空の構造, 対称性
を探究する分野

キーワード：

素粒子

相互作用

Lorentz不変性, Gauge不変性など

素粒子標準模型

素粒子標準模型(standard model) は電磁相互作用と弱い相互作用を統一した電弱相互作用と強い相互作用を扱う。重力は扱わない。この理論に明らかに反する事象は、地上実験では見つからない。一部ダークマター(暗黒物質)の存在など標準模型では説明できないものもある。

素粒子標準模型 (Standard Model)

■ フェルミオン

フェルミ統計(粒子の入れ換えに対して反対称)に従う
ディラック場 ($\text{spin } 1/2$) , 物質の基本構成要素

□ クォーク

カラー荷 (RGB) を持つ (強い相互作用をする)

□ レプトン

カラー荷を持たない

■ ボゾン

ボーズ統計(粒子の入れ換えに対して対称)に従う

□ ゲージボゾン

ベクトル場 ($\text{spin } 1$) , 相互作用を媒介

□ ヒッグスボゾン

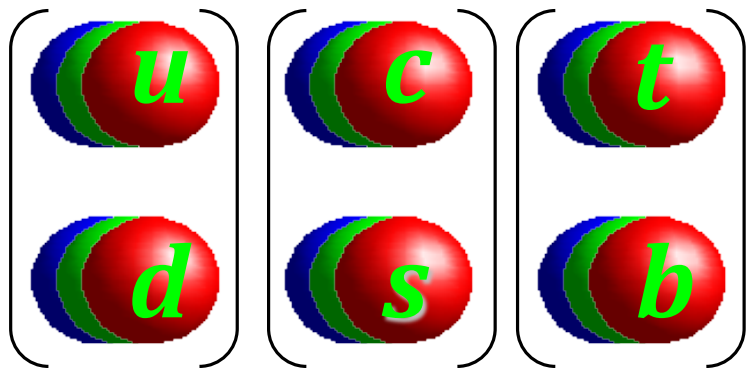
スカラー場 ($\text{spin } 0$) , 対称性の破れに伴い真空から発現

フェルミオン(Fermion)

左巻きフェルミオンのみ
右巻きは(0,0)

フェルミオン(Dirac粒子)は、
左巻きと右巻き成分をもつ。

クォーク(Quark)



電荷(e) 弱アイソスピン
(I, I_3)

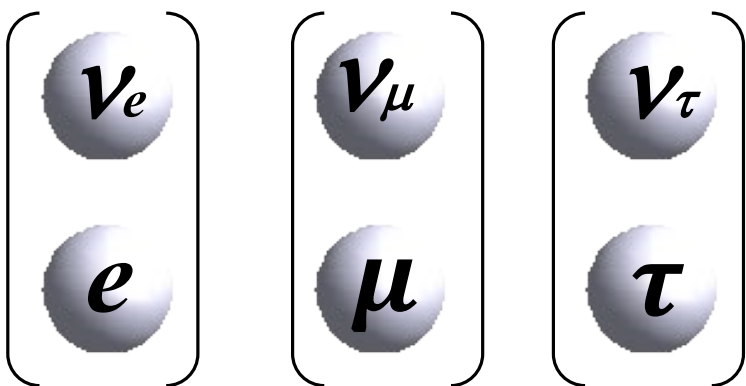
$+2/3$ $(1/2, +1/2)$

$-1/3$ $(1/2, -1/2)$

...

強い相互作用
電磁相互作用
弱い相互作用

レプトン(Lepton)



0

$(1/2, +1/2)$

...

弱い相互作用

-1

$(1/2, -1/2)$

...

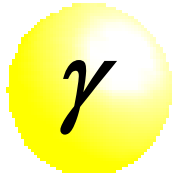
電磁相互作用
弱い相互作用

+ 上の粒子の反粒子

ゲージ粒子(ボゾン)

電磁相互作用

Photon (光子)



撮影：筑波大自然D棟

弱い相互作用

Weak Boson ($I = 1$)



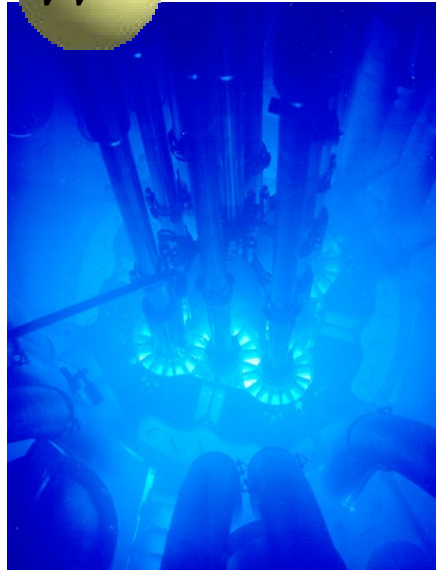
$I_3 = +1$



$I_3 = 0$



$I_3 = -1$



<https://www.flickr.com/photos/argonne/3954062594/>

強い相互作用

Gluon

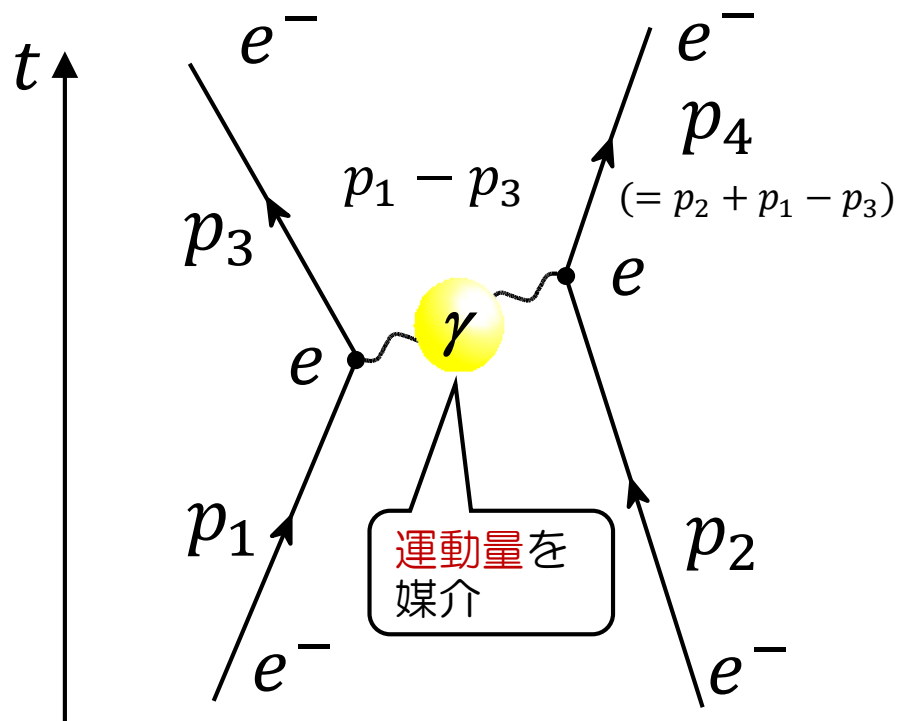


強い相互作用はこの授業では扱わない

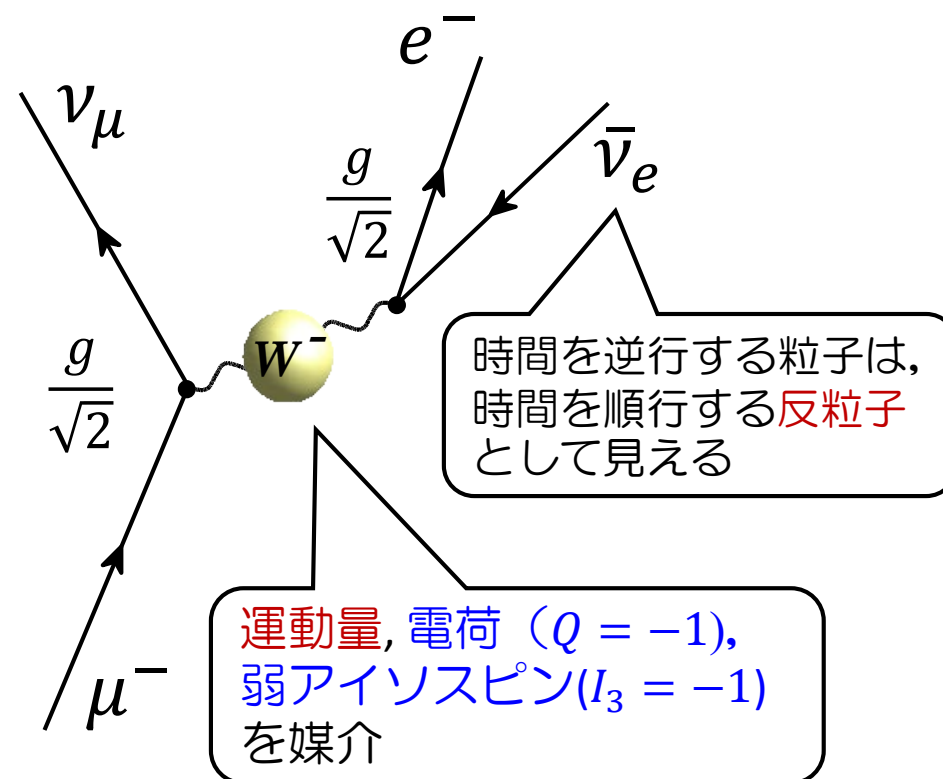
NASA/SDO (AIA)

素粒子の相互作用と崩壊

電子と電子の電磁相互作用における
ファインマン図



ミュー粒子の弱い相互作用による崩壊
 $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$



自然単位系

c (光速) $= \hbar (h/2\pi) = 1$ (無次元量)

- 距離 = 時間 = (エネルギー) $^{-1}$
- 質量 = 運動量 = (エネルギー) 1
- 全ての物理量はエネルギーのべき乗で表される
 - 例えばラグランジアン密度は(エネルギー) 4 , ラグランジアンは(エネルギー) 1 , 作用は無次元

$$L = \int d^3x \mathcal{L}$$

ラグランジアン

$$S = \int dt L = \int d^4x \mathcal{L}$$

作用(action)

変換定数 (自然単位系 $\Leftrightarrow$ SI単位系)

- 時間 $\Leftrightarrow$ 距離: $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$
- 時間 $\Leftrightarrow$ エネルギー: $\hbar = 6.58 \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}$
- 距離 $\Leftrightarrow$ エネルギー: $\hbar c = 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$

電磁気の単位系

Heaviside-Lorentz 単位系： $\epsilon_0 = 1, \mu_0 = 1$ (無次元量)

自然単位系 + H-L単位系では、電流はエネルギーと同じ次元になる

SI 単位系

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$



H-L with 自然単位系

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Fine structure constant (無次元量)

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \rightarrow \frac{e^2}{4\pi} \sim \frac{1}{137}$$

$$e = \sqrt{4\pi\alpha} \sim 0.303 \quad (\text{無次元量})$$

相対論のおさらい

上付き：反変ベクトル, 下付き：共変ベクトル

$$x^\mu = (t, \vec{x}) \quad \partial_\mu \equiv \frac{\partial}{\partial x^\mu} = \left(\frac{\partial}{\partial t}, \vec{\nabla} \right) \quad p^\mu = (E, \vec{p})$$

$$k^\mu = (\omega, \vec{k}) \quad j^\mu = (\rho, \vec{j}) \quad A^\mu = (\phi, \vec{A})$$

Minkowski spaceの計量テンソル(metric tensor)

$$g^{\mu\nu} = g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & -1 & & \\ & & -1 & \\ & & & -1 \end{pmatrix}$$

素粒子分野では、この定義が一般的。
宇宙分野では符号が逆のことが多い。

反変 $\leftrightarrow$ 共変

$g^{\mu\nu}$ と $g_{\mu\nu}$ は逆行列の関係
 $g^{\mu\lambda} g_{\lambda\nu} = \delta^\mu_\nu$

$$x_\mu = g_{\mu\nu} x^\nu = (t, -\vec{x})$$

$$\partial^\mu = (\partial_t, -\vec{\nabla})$$

※ 添え字 ν に関して縮約ルール適用：次ページ

相対論のおさらい

縮約(contraction)ルール

$$x^\mu x_\mu = x^2 = t^2 - \vec{x}^2 \quad \text{ローレンツスカラー (ローレンツ不変)}$$

$$p^\mu p_\mu = E^2 - \vec{p}^2 = m_0^2 \quad \text{不変質量}$$

$$k_\mu x^\mu = kx = \omega t - \vec{k} \cdot \vec{x} \quad \text{波の位相}$$

他にもローレンツ不変となる量

$$d^4x = dx^0 dx^1 dx^2 dx^3 \quad \frac{d^3p}{E} \quad \frac{d^3k}{\omega}$$

ラグランジアン密度, 作用は
ローレンツ不変量

$$S = \int d^4x \mathcal{L}$$