粒子物理简介

第六节　电弱规范理论

余钊焕

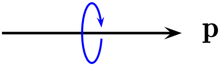
中山大学物理学院

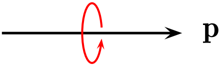
http://yzhxxzxy.github.io

2020 年 8 月

费米子螺旋度

- 旋量场 $\psi(x)$ 描述的费米子具有左旋和右旋两种极化态
- 左旋费米子的螺旋度为**负**，即自旋 $\mathbf{s}$ 在动量 $\mathbf{p}$ 方向上的投影为负
- 右旋费米子的螺旋度为**正**，即自旋 $\mathbf{s}$ 在动量 $\mathbf{p}$ 方向上的投影为正
- 对于有质量的费米子，洛伦兹变换可以把动量方向反过来，**翻转**螺旋度
- 对于无质量的费米子，螺旋度在任意惯性系中都相同
  - 可以将左旋和右旋费米子视作两种**不同**粒子
  - 螺旋度成为区分正反粒子的量子数，左旋正费米子的反粒子是右旋反费米子，右旋正费米子的反粒子是左旋反费米子





旋量场手征性与宇称不守恒

- 引入**左手**投影算符 $P_\mathrm{L} \equiv \dfrac{1}{2}(1-\gamma^5)$ 和**右手**投影算符 $P_\mathrm{R} \equiv \dfrac{1}{2}(1+\gamma^5)$
- 将旋量场 $\psi(x)$ 分解为**左手旋量场** $\psi_\mathrm{L} = P_\mathrm{L}\psi$ 和**右手旋量场** $\psi_\mathrm{R} = P_\mathrm{R}\psi$
- 对于**无质量**旋量场，或在可忽略质量的**高能极限**下，**手征性等价于螺旋度**

  左手场 $\psi_\mathrm{L}(x)$ $\begin{cases}\text{左旋正费米子}\\ \text{右旋反费米子}\end{cases}$　　右手场 $\psi_\mathrm{L}(x)$ $\begin{cases}\text{右旋正费米子}\\ \text{左旋反费米子}\end{cases}$

- **质量项** $m\bar{\psi}\psi = m(\bar{\psi}_\mathrm{R}\psi_\mathrm{L} + \bar{\psi}_\mathrm{L}\psi_\mathrm{R})$ 相当于左右手旋量场的耦合项
- 在**空间反射变换**下，动量方向反转，自旋方向不变，因而螺旋度**符号翻转**
- 对于**宇称守恒**的理论，如**量子电动力学**和**量子色动力学**，存在空间反射对称性，左右手旋量场具有**相同**的相互作用
- 在**弱相互作用**中，**宇称不守恒**，不存在空间反射对称性，其根源在于**左右手旋量场参与不同的规范相互作用**

电弱规范理论

- **电弱规范理论**是 $\mathrm{SU(2)_L \times U(1)_Y}$ **规范理论**
- $\mathrm{SU(2)_L}$ 的生成元称为**弱同位旋** T^a，$\mathrm{U(1)_Y}$ 的生成元称为**弱超荷** Y
- **电荷** $Q = T^3 + Y$，类似于盖尔曼－西岛关系
- 左手旋量场构成 $\mathrm{SU(2)_L}$ **二重态**，右手旋量场则是 $\mathrm{SU(2)_L}$ **单态**

统一记号	第 1 代	第 2 代	第 3 代	T^3	Y	Q
$L_{i\mathrm{L}} = \begin{pmatrix} \nu_{i\mathrm{L}} \\ \ell_{i\mathrm{L}} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_{e\mathrm{L}} \\ e_\mathrm{L} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_{\mu\mathrm{L}} \\ \mu_\mathrm{L} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_{\tau\mathrm{L}} \\ \tau_\mathrm{L} \end{pmatrix}$	$1/2$ $-1/2$	$-1/2$ $-1/2$	0 -1
$Q_{i\mathrm{L}} = \begin{pmatrix} u_{i\mathrm{L}} \\ d'_{i\mathrm{L}} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} u_\mathrm{L} \\ d'_\mathrm{L} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c_\mathrm{L} \\ s'_\mathrm{L} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t_\mathrm{L} \\ b'_\mathrm{L} \end{pmatrix}$	$1/2$ $-1/2$	$1/6$ $1/6$	$2/3$ $-1/3$
$\ell_{i\mathrm{R}}$	e_R	μ_R	τ_R	0	-1	-1
$u_{i\mathrm{R}}$	u_R	c_R	t_R	0	$2/3$	$2/3$
$d'_{i\mathrm{R}}$	d'_R	s'_R	b'_R	0	$-1/3$	$-1/3$

- **规范本征态** d'_i 通过 **CKM 矩阵** V_{ij} 与**质量本征态** d_i 联系起来：$d'_i = V_{ij} d_j$

费米子的电弱规范不变拉氏量

三代费米子的电弱规范不变拉氏量为

$$\mathcal{L}_{\mathrm{EWF}} = \bar{L}_{i\mathrm{L}} i\gamma^\mu D_\mu L_{i\mathrm{L}} + \bar{Q}_{i\mathrm{L}} i\gamma^\mu D_\mu Q_{i\mathrm{L}} + \bar{\ell}_{i\mathrm{R}} i\gamma^\mu D_\mu \ell_{i\mathrm{R}} + \bar{u}_{i\mathrm{R}} i\gamma^\mu D_\mu u_{i\mathrm{R}} + \bar{d}'_{i\mathrm{R}} i\gamma^\mu D_\mu d'_{i\mathrm{R}}$$

$\mathrm{SU(2)_L}$ 二重态 $Q_{i\mathrm{L}}$ 和 $L_{i\mathrm{L}}$ 的协变导数为 $D_\mu = \partial_\mu - igW_\mu^a T^a - ig'YB_\mu$，其中 $T^a = \sigma^a/2$；$\mathrm{SU(2)_L}$ 单态 $\ell_{i\mathrm{R}}$、$u_{i\mathrm{R}}$ 和 $d'_{i\mathrm{R}}$ 的协变导数为 $D_\mu = \partial_\mu - ig'YB_\mu$

这里**没有质量项**：质量项耦合左右手旋量场，从而破坏规范对称性

规范场 W_μ^a $(a = 1,2,3)$ 和 B_μ 跟**左手**旋量场的耦合与**右手**旋量场**不同**，而电磁场却**相同** 👉 为了得到电磁相互作用，需要把 W_μ^3 和 B_μ **混合**起来

$$\begin{pmatrix} A_\mu \\ Z_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_\mathrm{W} & s_\mathrm{W} \\ -s_\mathrm{W} & c_\mathrm{W} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_\mu \\ W_\mu^3 \end{pmatrix}, \quad s_\mathrm{W} \equiv \sin\theta_\mathrm{W} = \frac{g'}{\sqrt{g^2 + g'^2}}, \quad c_\mathrm{W} \equiv \sqrt{1 - s_\mathrm{W}^2}$$

g 是 $\mathrm{SU(2)_L}$ 规范耦合，g' 是 $\mathrm{U(1)_Y}$ 规范耦合，转动角 θ_W 称为**温伯格角**

A_μ 对应于**光子**，传递电磁相互作用，**电磁耦合常数** $e = gs_\mathrm{W} = g'c_\mathrm{W}$

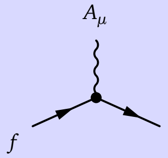
Z_μ 和 $W_\mu^\pm \equiv (W_\mu^1 \mp iW_\mu^2)/\sqrt{2}$ 对应于 Z^0 **和** $W^\pm$ **玻色子**，传递弱相互作用

费米子的电弱规范相互作用

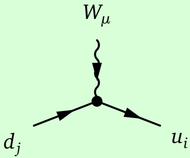
- 费米子电弱规范相互作用拉氏量 $\mathcal{L}_{\text{EWF}} \supset eA_\mu J^\mu_{\text{EM}} + gZ_\mu J^\mu_Z + g(W^+_\mu J^{+,\mu}_W + \text{h.c.})$

电磁流 $J^\mu_{\text{EM}} \equiv \sum_f Q_f \bar{f}\gamma^\mu f$, **弱带电流** $J^{+,\mu}_W \equiv \dfrac{1}{\sqrt{2}}(\bar{u}_{i\text{L}}\gamma^\mu V_{ij} d_{j\text{L}} + \bar{\nu}_{i\text{L}}\gamma^\mu \ell_{i\text{L}})$

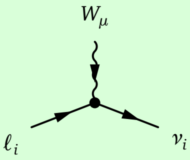
弱中性流 $J^\mu_Z \equiv \dfrac{1}{2c_{\text{W}}}\sum_f \bar{f}\gamma^\mu(g^f_{\text{V}} - g^f_{\text{A}}\gamma_5)f$, $g^f_{\text{V}} \equiv T^3_f - 2Q_f s^2_{\text{W}}$, $g^f_A \equiv T^3_f$



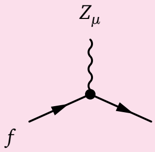
$$= iQ_f e\gamma^\mu$$



$$= i\frac{g}{\sqrt{2}}V_{ij}\gamma^\mu P_{\text{L}}$$



$$= i\frac{g}{\sqrt{2}}\gamma^\mu P_{\text{L}}$$



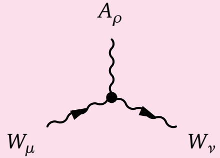
$$= i\frac{g}{2c_{\text{W}}}\gamma^\mu(g^f_{\text{V}} - g^f_{\text{A}}\gamma_5)$$

电弱规范玻色子的自相互作用

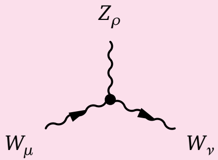
- 电弱规范场自身的规范不变拉氏量为

$$\mathcal{L}_{\mathrm{EWG}} = -\frac{1}{4}W^{a}_{\mu\nu}W^{a,\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu}$$

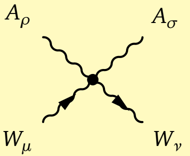
- 场强张量 $W^{a}_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu W^{a}_{\nu} - \partial_\nu W^{a}_{\mu} + g\epsilon^{abc}W^{b}_{\mu}W^{c}_{\nu}$，$B_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu$



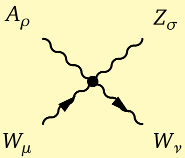
$\propto e$



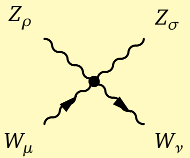
$\propto g c_{\mathrm{W}}$



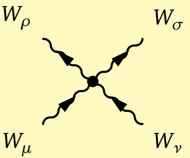
$\propto e^2$



$\propto e g c_{\mathrm{W}}$



$\propto g^2 c_{\mathrm{W}}^2$



$\propto g^2$

布劳特–恩格勒–希格斯机制

❗ 夸克、带电轻子、Z^0 和 $W^\pm$ 都具有质量，但上述 $\mathrm{SU}(2)_\mathrm{L}\times\mathrm{U}(1)_\mathrm{Y}$ 规范理论的拉氏量**还没有任何质量项**

😊 规范对称性使规范理论具有非常良好的性质，特别是**可重整性**

😨 在规范理论中直接放入**规范场的质量项**，会破坏规范对称性

😨 直接引入**旋量场的质量项**会破坏 $\mathrm{SU}(2)_\mathrm{L}\times\mathrm{U}(1)_\mathrm{Y}$ 规范对称性

💡 为了在保证可重整性的同时提供规范玻色子和费米子的质量，需要引入**布劳特–恩格勒–希格斯 (BEH) 机制**，使 $\mathrm{SU}(2)_\mathrm{L}\times\mathrm{U}(1)_\mathrm{Y}$ 对称性自发破缺

🍡 引进**希格斯标量场** $\Phi=\begin{pmatrix}\phi^+\\ \phi^0\end{pmatrix}$，$\phi^+$ 和 ϕ^0 都是复标量场；Φ 是 $\mathrm{SU}(2)_\mathrm{L}$ 二重态，具有弱超荷 $Y=1/2$，电弱规范不变的拉氏量为

$$\mathcal{L}_\mathrm{H}=(D^\mu\Phi)^\dagger(D_\mu\Phi)-V_\mathrm{H}(\Phi),\quad V_\mathrm{H}(\Phi)=-\mu^2\Phi^\dagger\Phi+\lambda(\Phi^\dagger\Phi)^2$$

🌗 协变导数为 $D_\mu=\partial_\mu-igW_\mu^aT^a-ig'YB_\mu$，$T^a=\sigma^a/2$

🌘 $V_\mathrm{H}(\Phi)$ 是希格斯标量场的**势能项**，依赖于 $\Phi^\dagger\Phi=|\phi^+|^2+|\phi^0|^2$

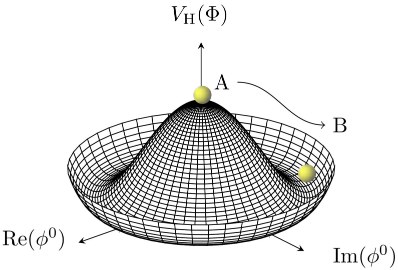
自发对称性破缺

希格斯场**势能**的行为由二次项系数 μ^2 和四次项系数 λ 决定；**假设 $\lambda > 0$**

若 $\mu^2 < 0$，势能项 $V_{\mathrm{H}}(\Phi)$ 的最小值对应 $\Phi^\dagger\Phi = 0$；希格斯场真空期待值为 $\langle\Phi\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$，它在电弱规范变换下**不变**，故规范对称性未受到破坏

若 $\mu^2 > 0$，$\Phi^\dagger\Phi = 0$ 处变成 $V_{\mathrm{H}}(\Phi)$ 的极大值，而最小值位于 $\Phi^\dagger\Phi = v^2/2$ 对应的 3 维球面上，其中 $v = \sqrt{\mu^2/\lambda}$

若压缩掉 ϕ^+ 的实部和虚部两个维度，则 $V_{\mathrm{H}}(\Phi)$ 在 ϕ^0 的实部和虚部坐标上呈现右图所示墨西哥草帽状的形式；希格斯场的真空期待值位于上述 3 维球面上的某一点，不失一般性，可取为 $\langle\Phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$



电弱规范变换会**改变**这个期待值，故真空态不满足电弱规范对称性；这种拉氏量满足对称性、真空态却不满足的现象称为对称性自发破缺

希格斯玻色子

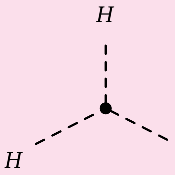
- 以上述真空期待值 $\langle\Phi\rangle$ 为基础，考虑沿 ϕ^0 实轴扰动的实标量场 $H(x)$

$$\Phi(x)=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}0\\ v+H(x)\end{pmatrix},\qquad \Phi^\dagger\Phi\to\frac{1}{2}(v+H)^2$$

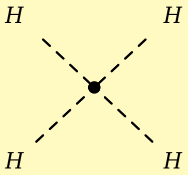
- 这种参数化方法称为**幺正规范**，其它规范可由 $\mathrm{SU}(2)_\mathrm{L}$ 规范变换得到

- $$-V_\mathrm{H}(\Phi)=\frac{1}{2}\mu^2(v+H)^2-\frac{1}{4}\lambda(v+H)^4=\frac{1}{4}\mu^2v^2-\frac{1}{2}m_H^2H^2-\frac{m_H^2}{2v}H^3-\frac{m_H^2}{8v^2}H^4$$

- $m_H\equiv\sqrt{2}\mu=\sqrt{2\lambda}v$，实标量场 H 对应于一个**质量为 m_H** 的中性标量粒子 H^0，称为**希格斯玻色子**，具有**三线性**和**四线性**自相互作用



$$=-3i\frac{m_H^2}{v}$$

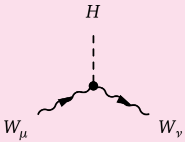


$$=-3i\frac{m_H^2}{v^2}$$

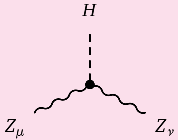
规范玻色子质量

🎈 在幺正规范下，希格斯场的协变动能项化为

$$(D^\mu\Phi)^\dagger(D_\mu\Phi) = \frac{1}{2}(\partial^\mu H)(\partial_\mu H) + m_W^2 W_\mu^+ W^{-,\mu} + \frac{1}{2}m_Z^2 Z_\mu Z^\mu + \frac{2m_W^2}{v}HW_\mu^+W^{-,\mu} + \frac{m_Z^2}{v}HZ_\mu Z^\mu + \frac{m_W^2}{v^2}H^2W_\mu^+W^{-,\mu} + \frac{m_Z^2}{2v^2}H^2Z_\mu Z^\mu$$



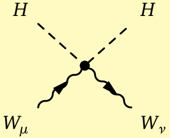
$$= 2i\frac{m_W^2}{v}g^{\mu\nu}$$



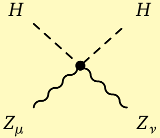
$$= 2i\frac{m_Z^2}{v}g^{\mu\nu}$$

🌙 $m_W \equiv \frac{1}{2}gv$， $m_Z \equiv \frac{1}{2}\sqrt{g^2+g'^2}\,v$

✨ 对称性自发破缺之后，**$W^\pm$ 和 Z^0 规范玻色子获得质量 m_W 和 m_Z**，有 3 个希格斯场自由度变成它们的**纵向极化分量**



$$= 2i\frac{m_W^2}{v^2}g^{\mu\nu}$$



$$= 2i\frac{m_Z^2}{v^2}g^{\mu\nu}$$

费米子质量

- 希格斯场与旋量场之间能够发生电弱规范不变的**汤川相互作用**

$$\mathcal{L}_\mathrm{Y} = -\tilde{y}_d^{ij}\bar{Q}_{i\mathrm{L}}d'_{j\mathrm{R}}\Phi - y_u d_i \bar{Q}_{i\mathrm{L}}u_{i\mathrm{R}}\tilde{\Phi} - y_{\ell_i}\bar{L}_{i\mathrm{L}}\ell_{i\mathrm{R}}\Phi + \mathrm{h.c.}, \quad \tilde{\Phi} \equiv i\sigma^2\Phi^*$$

- **Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) 矩阵** V 将 $\tilde{y}_d^{ij}$ 对角化，满足

$$V^\dagger_{li}\tilde{y}_d^{ij}V_{jk} = y_{d_k}\delta_{lk}$$

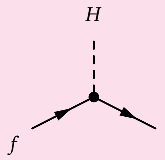
- 对称性自发破缺之后，汤川耦合项化为

$$\mathcal{L}_\mathrm{Y} = -m_{d_i}\bar{d}_i d_i - m_{u_i}\bar{u}_i u_i - m_{\ell_i}\bar{\ell}_i\ell_i - \frac{m_{d_i}}{v}H\bar{d}_i d_i - \frac{m_{u_i}}{v}H\bar{u}_i u_i - \frac{m_{\ell_i}}{v}H\bar{\ell}_i\ell_i$$

- $m_{d_i} \equiv \dfrac{y_{d_i}v}{\sqrt{2}}$，$m_{u_i} \equiv \dfrac{y_{u_i}v}{\sqrt{2}}$，$m_{\ell_i} \equiv \dfrac{y_{\ell_i}v}{\sqrt{2}}$

- 可见，**费米子获得了质量**

- 费米子与希格斯玻色子发生汤川相互作用，耦合常数正比于费米子质量



$$= -i\frac{m_f}{v}$$

夸克味混合

在标准模型中，可以将上型夸克的规范态就取为质量态，而下型夸克的规范态与质量态通过 **CKM 矩阵** V 联系：

$$\begin{pmatrix} u' \\ c' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = V \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

概率守恒要求 V 是**幺正**矩阵，标准参数化形式为

$$V = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & & s_{13}e^{-i\delta} \\ & 1 & \\ -s_{13}e^{i\delta} & & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & \\ -s_{12} & c_{12} & \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

$$s_{ij} \equiv \sin\theta_{ij}, \quad c_{ij} \equiv \cos\theta_{ij}$$

V 包含 3 个转动角 $\theta_{12} \simeq 13^\circ$，$\theta_{23} \simeq 2.4^\circ$，$\theta_{13} \simeq 0.20^\circ$，
1 个引起 CP **破坏**的复相角 $\delta \simeq 71^\circ$

CKM 矩阵元

- 拟合实验数据得到 **CKM 矩阵元的模**为

$$|V_{ij}| = \begin{pmatrix} 0.97446 \pm 0.00010 & 0.22452 \pm 0.00044 & 0.00365 \pm 0.00012 \\ 0.22438 \pm 0.00044 & 0.97359^{+0.00010}_{-0.00011} & 0.04214 \pm 0.00076 \\ 0.00896^{+0.00024}_{-0.00023} & 0.04133 \pm 0.00074 & 0.999105 \pm 0.000032 \end{pmatrix}$$

- 如果忽略第三代夸克的混合，CKM 矩阵可近似为

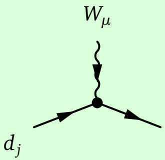
$$V_{ij} \simeq \begin{pmatrix} \cos\theta_{\mathrm{C}} & \sin\theta_{\mathrm{C}} & \\ -\sin\theta_{\mathrm{C}} & \cos\theta_{\mathrm{C}} & \\ & & 1 \end{pmatrix},$$

θ_{C} 称为 **Cabibbo 角**，满足 $\sin\theta_{\mathrm{C}} = |V_{12}|$

- CKM 矩阵的**非对角元**非零 ☞ **弱带电流**可以耦合**不同代的夸克**

- $W^+ \to u\bar{d}'$ 过程在质量态上表现为

$$W^+ \to u\bar{d} \ (V_{11} \text{ 引起})$$
$$W^+ \to u\bar{s} \ (V_{12} \text{ 引起})$$
$$W^+ \to u\bar{b} \ (V_{13} \text{ 引起})$$



$$= i\frac{g}{\sqrt{2}} V_{ij} \gamma^\mu P_{\mathrm{L}}$$

超出标准模型：中微子味混合

中微子振荡实验表明，中微子具有**微小质量**，而且存在**味混合**

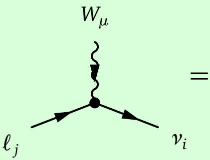
狄拉克中微子的味道本征态（即规范本征态）与质量本征态通过 **Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata (PMNS) 矩阵** U 联系：

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}, \quad U = \begin{pmatrix} \bar{c}_{12}\bar{c}_{13} & \bar{s}_{12}\bar{c}_{13} & \bar{s}_{13}e^{-i\bar{\delta}} \\ -\bar{s}_{12}\bar{c}_{23} - \bar{c}_{12}\bar{s}_{23}\bar{s}_{13}e^{i\bar{\delta}} & \bar{c}_{12}\bar{c}_{23} - \bar{s}_{12}\bar{s}_{23}\bar{s}_{13}e^{i\bar{\delta}} & \bar{s}_{23}\bar{c}_{13} \\ \bar{s}_{12}\bar{s}_{23} - \bar{c}_{12}\bar{c}_{23}\bar{s}_{13}e^{i\bar{\delta}} & -\bar{c}_{12}\bar{s}_{23} - \bar{s}_{12}\bar{c}_{23}\bar{s}_{13}e^{i\bar{\delta}} & \bar{c}_{23}\bar{c}_{13} \end{pmatrix}$$

$\bar{\theta}_{12} \sim 33^\circ$，$\bar{\theta}_{23} \sim 41^\circ$（质量正序）或 $\bar{\theta}_{23} \sim 50^\circ$（质量逆序），$\bar{\theta}_{13} \sim 8.4^\circ$

如果中微子是马约拉纳费米子，则额外存在 2 个 CP 破坏相角 ρ 和 σ，PMNS 矩阵应该再右乘 $\mathrm{diag}(1, e^{i\rho}, e^{i\sigma})$

- 太阳中微子振荡 $\bar{\theta}_{12}$
- 大气中微子振荡 $\bar{\theta}_{23}$
- 反应堆中微子振荡 $\bar{\theta}_{13}$



$$= i\frac{g}{\sqrt{2}} U_{ij} \gamma^\mu P_{\mathrm{L}}$$

e^+e^- 湮灭

💥 通过**电磁流**和**弱中性流**相互作用，e^+e^- 可湮灭成一对正反费米子 $f\bar{f}$

✨ $\sqrt{s} \sim m_Z$ 处出现 Z 的共振峰

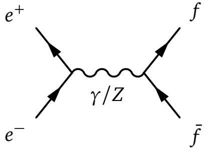
💡 受共振态和弱中性流影响较小时，截面比 $R = \dfrac{\sigma(e^+e^- \to q_i\bar{q}_i)}{\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)}$ 体现夸克味数、电荷跟 μ 子的相对差异

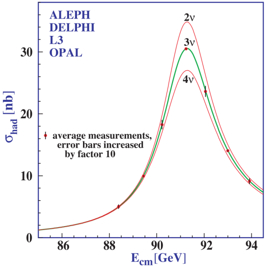
🌓 $1\ \text{GeV} \le \sqrt{s} \le 3.6\ \text{GeV}$ 处，

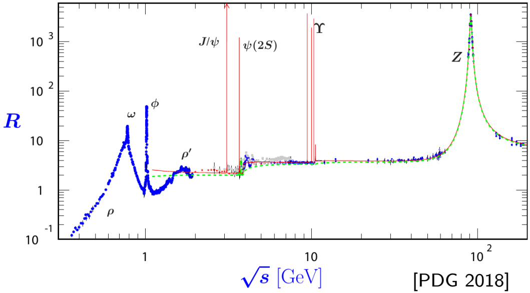
$$R \simeq 3\left[2\left(-\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2\right] = 2$$

🌗 $3.7\ \text{GeV} \le \sqrt{s} \le 10\ \text{GeV}$ 处，

$$R \simeq 3\left[2\left(-\frac{1}{3}\right)^2 + 2\left(\frac{2}{3}\right)^2\right] = \frac{10}{3}$$

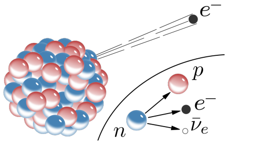






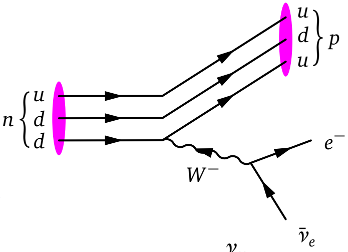
[PDG 2018]

β 衰变



- 弱相互作用引起**原子核 β 衰变**
- 质量数为 $A = Z + N$ 的原子核具有 Z 个质子和 N 个中子，通过 β 衰变会变成具有 $Z+1$ 个质子和 $N-1$ 个中子的原子核 A'，即

$$A(Z,N) \to A'(Z+1, N-1) + e^- + \bar{\nu}_e$$

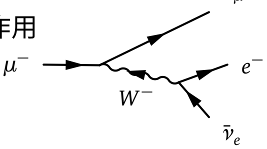


- 在**核子**层次，以上过程体现为**中子 β 衰变**，

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

- 在**夸克**层次，以上过程体现为 **d 夸克 β 衰变**

$$d \to u + e^- + \bar{\nu}_e$$

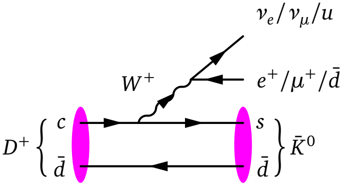


- 此过程来自 W^- 玻色子传递的**弱带电流**相互作用
- 在**轻子**方面，类似的过程有 **μ 子衰变**

$$\mu^- \to \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$$

介子弱衰变

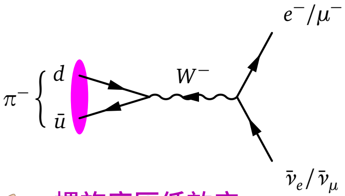
弱带电流相互作用也会引起介子衰变



$D^+(c\bar{d})$ 衰变到 $\bar{K}^0$ 和轻子或夸克（☞ 介子）

$$D^+ \to \bar{K}^0 + \nu_e/\nu_\mu/u + e^+/\mu^+/\bar{d}$$

D^+ 中 $\bar{d}$ 夸克实际没参与衰变，称为**旁观者**

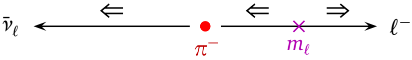


$\pi^-(\bar{u}d)$ 衰变到带电轻子和反中微子

$$\pi^- \to e^-/\mu^- + \bar{\nu}_e/\bar{\nu}_\mu$$

π^- 静止系中，**角动量守恒**要求末态轻子和反轻子的螺旋度相同，但弱带电流只耦合左旋费米子和右旋反费米子，需要由**质量翻转螺旋度** ☞ **螺旋度压低效应**

☞ $$\frac{\Gamma(\pi^- \to e^-\bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \to \mu^-\bar{\nu}_\mu)} \sim \frac{m_e^2}{m_\mu^2} \simeq 2 \times 10^{-5}$$



☞ $\pi^- \to \mu^-\bar{\nu}_\mu$ 分支比为 99.9877%，$\pi^- \to e^-\bar{\nu}_e$ 分支比为 0.0123%