CKM matrix

Cabbibo-Kobayashi-Maskawa matrix

CPT Symmetry

- **C Symmetry : Charge Conjugation Symmetry(-→+)**
- **P Symmetry : Parity Symmetry(x → -x)**
- **T Symmetry : Time Symmetry(t →-t)**

양자전기역학 같은 이론은 전반적으로 CPT Symmetry를 갖는다. CP Symmetry는 두 개의 Symmetry가 동시에 이루어지는 것을 생각한다. 양자전기역학은 C Symmetry, P Symmetry, T Symmetry를 개별적으로 보존하지만, 표준모형은 일반적으로 C,P,T Symmetry를 각각 깬다. 임의의 두 대칭을 조합한 Symmetry(CP, CT, PT)도 깨지만, 셋을 모두 조합한 CPT Symmetry는 보존한다.

강한 상호작용에서 CP문제

강한 상호작용에서 CP Symmetry가 깨지는가에 대해서 묻고, 깨진다면 그 정도가 왜 아주 약한지를 묻는다. 강력은 표준 모형에 따르면 자연스럽게 CP Symmetry를 깨뜨린다. 그러나 이 현상은 실험적으로 존재하지 않거나, 존재한다면 크기가 아주 작다고 확인되었다. 좀 더 자세히 말하면, 표준 모형에서 Gauge Symmetry를 따르고, Renormalization 할 수 있는 항 가운데 다음과 같은 항이 있는데

$$\theta \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} F_{\mu\nu} F_{\rho\sigma}, \; F(Faraday\, tensor), \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma}(Levi - Civita - Symbol)$$

위의 항이 P, CP Symmetry를 깬다. CP Symmetry를 깨는 정도는 이 항의 계수 θ 와 관계있다. 이 계수 θ 는 중성자의 쌍극자를 관찰하여 잘 수 있다. 실험적으로 이 값이 매우 작고, 이 계수가 작은 이유를 설명하는 것이 강력의 CP문제이다.

Axion

현재 가장 유력한 해법은 페체이 퀸 이론이다. 이 이론에 의해서 Axion 입자를 찾는 CAST(Cern Axion Solar Telescope) 실험이 진행 중이다.

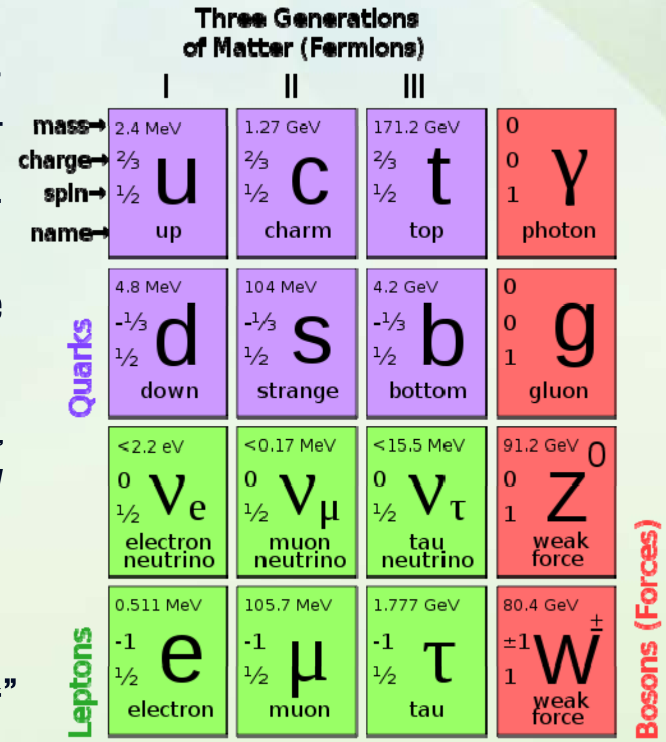
표준 모형

입자 물리학에서 표준 모형은 자연계의 기본 입자와 중력을 제외한 그 상호작용을 다루는 Gauge 이론이다. 이는 강력을 다루는 양자색역학(Quantum chromodynamics)와 약력과 전자기력을 다루는 와인버그 살람 이론으로 이루어진다. 표준 모형에 따르면, 전자와 중성미자 및 렙톤은 기본입자이나, 하드론은 쿼크로 이루어진다. 이들은 Gauge Boson에 의해서 상호작용한다.

▶Gauge Boson은 Gauge 이론에서 힘을 매개하는 Boson이다. 해당하는 Gauge 장의 양자이고, Gauge Boson의 수는 그 Gauge 대칭의 차원 수와 같다. 표준 모형에서 Gauge Boson은 광자, W Boson, Z Boson, Gluon 4개이다.

Gauge Boson은 이론의 Symmetry를 나타낸다. 표준 모형의 Symmetry 가운데 강력의 Symmetry는 "가둠(Confinement)"으로 인하여 간접적으로 관찰할 수 있고, 약력의 Symmetry는 "힉스 매커니즘"으로 인하여 깨진다.

가둠(Confinement)이란 어떤 Gauge 이론의 모든 유한한 에너지 상태가 Gauge 불변인 성질이다. 가둠을 나타내는 Gauge 이론의 경우, 게이지 전하를 지니는 입자가 개별적으로 존재하지 못하고, 다른 게이지 전하를 지니는 입자와 뭉쳐서 Gauge 중성인 복합 입자를 만든다.



Cabbibo

두 붕괴를 설명한다.

2X2 Matrix는 다음과 같이 주어진다.

$$K^+ \to \mu^+ + \nu,\ \ u\bar{s} \to \mu\nu_\mu$$

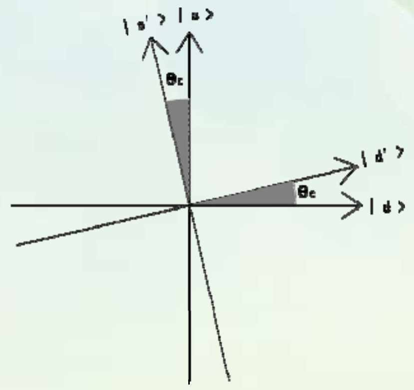
$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu,\ \ u\bar{d} \to \mu\nu_\mu$$

$$K^+ \to \pi^0 + e^+ + \nu$$

$$\pi^+ \to \pi^0 + e^+ + \nu$$

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_c & \sin\theta_c \\ -\sin\theta_c & \cos\theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

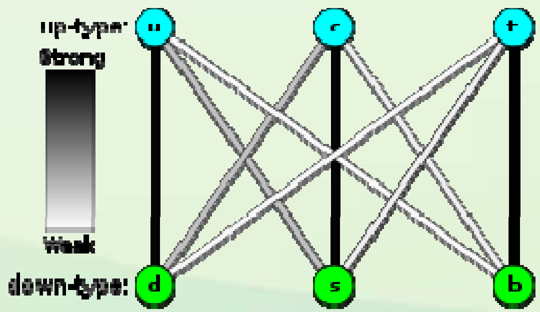
$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ d\cos\theta_c + s\sin\theta_c \end{pmatrix}$$



CKM Matrix

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cong \begin{pmatrix} 0.97419 \pm 0.00022 & 0.2257 \pm 0.0010 & 0.00359 \pm 0.00016 \\ 0.2256 \pm 0.0010 & 0.97334 \pm 0.00023 & 0.0415^{+0.0010}_{-0.0011} \\ 0.00874^{+0.00026}_{-0.00037} & 0.0407 \pm 0.0010 & 0.999133^{+0.000044}_{-0.000043} \end{pmatrix}$$



Diagonal Terms가 | Vud |, | Vcs |, | Vtb |가 지배적이다. 그래서 대부분의 붕괴는 u↔d, c ↔s, t ↔b를 발생시킨다.

Parametrization

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} e^{-i\delta/2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\delta/2} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} e^{i\delta/2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\delta/2} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

이것은 CP 위반을 관측하는데 중요하다. V_{CKM}이 Real이면 Lagrangian은 CP Symmetry가 요구되고, 강한 상호작용이다.

The Wolfenstein Parametrization

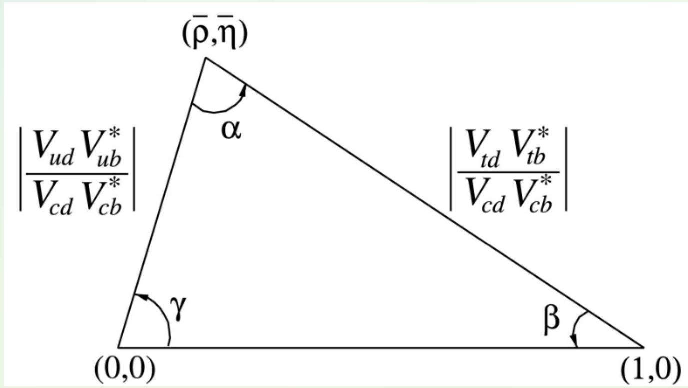
V_{us}의 값을 결정했다.

$$V = \begin{pmatrix} 1-\frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

$$\lambda = \frac{|V_{us}|}{\sqrt{|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2}}$$

$$A\lambda^2 = \lambda \frac{|V_{cb}|}{|V_{us}|}$$

$$A\lambda^3(\rho + i\eta) = V_{ub}^*$$



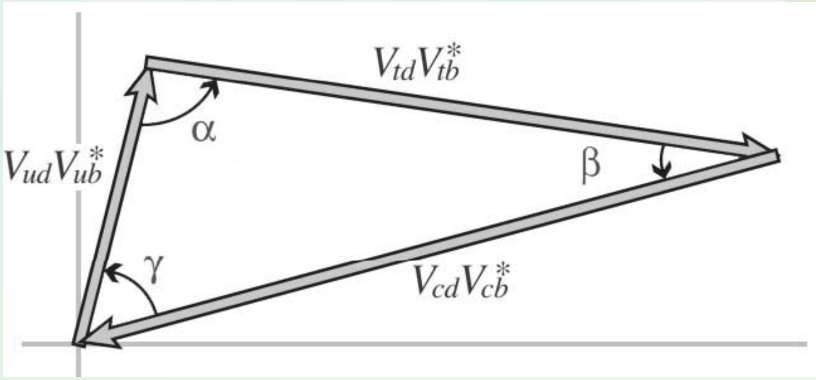
$|V_{us}|$는 $|V_{cd}|$와 같아야 한다. λ^2 Order의 V_{cd} 값을 찾았고, 그리고 A를 채용했다. 그래서 λ^2에 대한 V_{cd}를 수정했다. λ^3에 대해서 새로운 Parameter ρ와 η를 넣었는데

$$(\bar{\rho},\bar{\eta}) = (1-\frac{\lambda^2}{2})(\rho,\eta), \quad [(\bar{\rho}+i\bar{\eta})(ontheleft)],[(1-\bar{\rho}-i\bar{\eta})(ontheright)]$$

Matrix 요소들과 실험 Data를 Matching하면, 삼각형을 완성시킬 수 있다.

V는 Unitary이기에 $V^{+}V=1$.

$$\begin{pmatrix} V_{ud}^* & V_{cd}^* & V_{td}^* \\ V_{us}^* & V_{cs}^* & V_{ts}^* \\ V_{ub}^* & V_{cb}^* & V_{tb}^* \end{pmatrix}\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



$$V_{ub}^*V_{ud} + V_{cb}^*V_{cd} + V_{tb}^*V_{td} = 0$$

$$z_i \in C, z_i = x_i + iy_i$$

$$z_1 = V_{ub}^*V_{ud}, z_2 = V_{cb}^*V_{cd}, z_3 = V_{tb}^*V_{td}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 = \mathrm{Re}(V_{ub}^*V_{ud}) + \mathrm{Re}(V_{cb}^*V_{cd}) + \mathrm{Re}(V_{tb}^*V_{td}) = 0$$

$$y_1 + y_2 + y_3 = \mathrm{Im}(V_{ub}^*V_{ud}) + \mathrm{Im}(V_{cb}^*V_{cd}) + \mathrm{Im}(V_{tb}^*V_{td}) = 0$$

$$z_1 + z_2 + z_3 = 0$$

$$\sin 2\alpha = \frac{2\overline{\eta}[\overline{\eta}^2 + \overline{\rho}(\overline{\rho} - 1)]}{[\overline{\eta}^2(1-\overline{\rho}^2)][\overline{\eta}^2 + \overline{\rho}^2]}$$

$$\sin 2\beta = \frac{2\overline{\eta}(1-\overline{\rho})}{[\overline{\eta}^2(1-\overline{\rho}^2)]}$$