Feynmanovi diagrami. Reakcijo ponazorimo s sledečimi predpisi:

$\rightsquigarrow$:	Virtualni foton oz. nosilec interakcije
$\longrightarrow$:	Delec
$\longleftarrow$:	Antidelec

V splošnem nepolne črte predstavljajo nosilce interakcij: fotone (EM interakcija), gluone (močna interakcija) in $W^{\pm}, Z$ bozone (šibka interakcija). Z α označimo sklopitveno konstanto interakcije, ki jo potrebujemo za amplitudo prehoda. Propagator interakcije izračunamo po formuli

$$\frac{1}{q^2 + M^2c^4}$$

M je masa nosilca interakcije.

Šibka interakcija. Za primer vzemimo razpad β: $n \to pe^- \,\overline{\nu}_e$
Pri opisani reakciji je nosilec šibke interakcije bozon W^- z energijo $M_W c^2 = 95\,\mathrm{GeV}$. Sklopitveno konstanto tokrat označimo z α_W.

Potek reakcije: Eden od kvarkov d odda virtualni W^- in se pri tem spremeni v kvark u. Bozon 'razpade' v elektron e^- in elektronski antinevtrino $\overline{\nu}_e$.

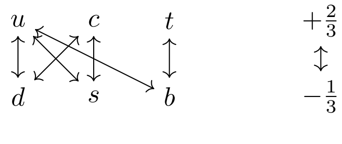
$$\mathcal{M} \propto \sqrt{\alpha_w}\frac{1}{(p-p')^2 - M_w^2c^4}\sqrt{\alpha_w} = \frac{\alpha_w}{q^2 - M_w^2c^4}$$

$$|\mathcal{M}|^2 \propto \alpha^2\left(\frac{\alpha_w}{q^2 - M_w^2c^4}\right)^2 \sim \frac{\alpha_w^2}{M_w^4c^8}$$

Drugi primeri:

- $D^0 \to K^-e^+\nu_e$: Kvark c odda virtualni W^+ bozon in se spremeni v kvark s. Iz bozona nastaneta e^+ in ν_e.
- $\pi^+ \to \mu^+\nu_\mu$: Tu oba kvarka (u in $\overline{d}$) izgineta in oddata bozon W^+. Iz tega nastaneta μ^+ in ν_μ.
- $D^0 \to K^-\pi^+$: Kvark c odda bozon in se spremeni v kvark s. Iz bozona nastaneta kvarka $u\overline{d}$, ki skupaj tvorita π^+.
- $D^0 \to K^-\pi^+$: Kvark c odda bozon in se spremeni v kvark d. Iz bozona nastaneta kvarka $u\overline{d}$, ki skupaj tvorita π^+.

Prehodi med kvarki. Narišemo tabelo prehodov med kvarki.



Verjetnosti za prehode. Imamo matriko Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, ki opisuje potenciale med kvarki. Je unitarna, kompleksna matrika.

$$V_{CKM} = \begin{array}{c} \\ u \\ c \\ t \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} d & s & b \end{array} \\ \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \end{array}$$

Wolfsteinova parametrizacija:

$$V_{CKM} = \begin{bmatrix} 1-\lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho+i\eta) \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & A\lambda^2 & 1 \end{bmatrix}$$

Po Wolfsteinovi parametrizaciji je

- $\lambda = 0.225$
- $A = 0.826$
- $\eta = 0.348$
- $\rho = 0.159$

Tedaj dobimo matriko absolutnih vrednosti

$$V = \begin{bmatrix} 0.974 & 0.225 & 0.004 \\ 0.225 & 0.974 & 0.041 \\ 0.009 & 0.041 & 0.999 \end{bmatrix}$$

Pri šibki interakciji se en kvark spremeni v drugega, nastanejo novi kvarki in tako naprej. Amplitudo ($\mathcal{M}$) dobimo iz matričnega elementa, na primer:

$$D^0 \to K^-\pi^+$$

Pri reakciji se $\overline{u}$ ohrani, c postane s, nastaneta pa u in $\overline{d}$. Amplituda je tedaj enaka

$$\mathcal{M} \propto \sqrt{\alpha_w}\sqrt{\alpha_w}V_{cs}V_{ud}$$

Pretvorba delec-antidelec. Primer:

$$K^0 \to \overline{K^0}$$
$$\widehat{H}\psi = \widehat{E}\psi$$

reakcija poteka z neko časovno odvisnostjo:

$$|K^0\rangle \to a(t)|K^0\rangle + b(t)|\overline{K^0}\rangle$$

Ker se tako $|K^0\rangle$ kot $|\overline{K^0}\rangle$ spreminjata skozi čas, nobena od njiju ne mora biti lastna vrednost, lahko pa je njuna linearna kombinacija:

$$|K_1\rangle = \cos\vartheta|K^0\rangle + \sin\vartheta|\overline{K^0}\rangle$$
$$|K_2\rangle = -\sin\vartheta|K^0\rangle + \cos\vartheta|\overline{K^0}\rangle$$

Iz razlogov, v katere se zaenkrat ne bomo poglabljali, je $\vartheta = 45°$. Dobili smo lastni stanji $\widehat{H}$.

$$\widehat{H}|K_1\rangle = E_1|K_1\rangle$$
$$\widehat{H}|K_2\rangle = E_2|K_2\rangle$$
$$|K_1(t)\rangle = |K_1(t=0)\rangle e^{-\frac{iE_1t}{\hbar}}$$
$$|K_2(t)\rangle = |K_2(t=0)\rangle e^{-\frac{iE_2t}{\hbar}}$$

Vrh tega lahko zapišemo $|K_1\rangle - |K_1\rangle = \sqrt{2}|K_0\rangle$ in na podlagi tega izrazimo $|K^0\rangle$ in $|\overline{K^0}\rangle$. S tem dobimo valovno funkcijo

$$|\psi\rangle = |K^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|K_1(0)\rangle e^{-\frac{iE_1t}{\hbar}} - |K_2(0)\rangle e^{-\frac{iE_2t}{\hbar}}\right)$$

Če želimo izraziti verjetnost, da se bo K^0 pretvoril v $\overline{K^0}$, moramo izračunati skalarni produkt:

$$\langle\overline{K^0}|\psi(t)\rangle = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\langle K_1| + \langle K_2|\right)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\||K_1\rangle e^{-\frac{iE_1t}{\hbar}} - |K_2\rangle e^{-\frac{iE_2t}{\hbar}}\right)$$
$$= \frac{1}{2}\left(e^{-\frac{iE_1t}{\hbar}} - e^{-\frac{iE_2t}{\hbar}}\right)$$