

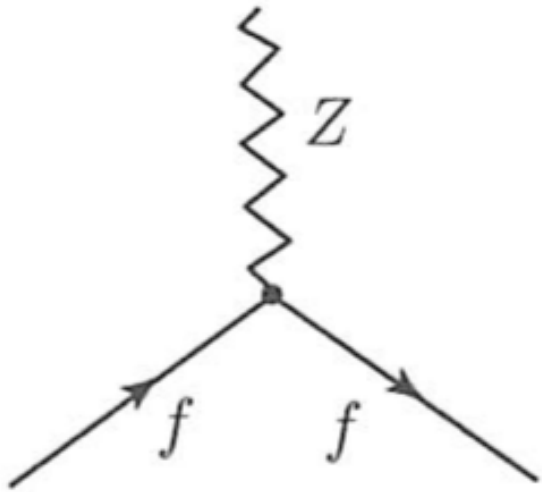
2.4 弱い相互作用

- 電磁気力…電荷
- 強い力…色荷
- 弱い力…「弱電荷」と呼ぶ人も

弱い相互作用→中性相互作用 (Z) と荷電相互作用 (W)

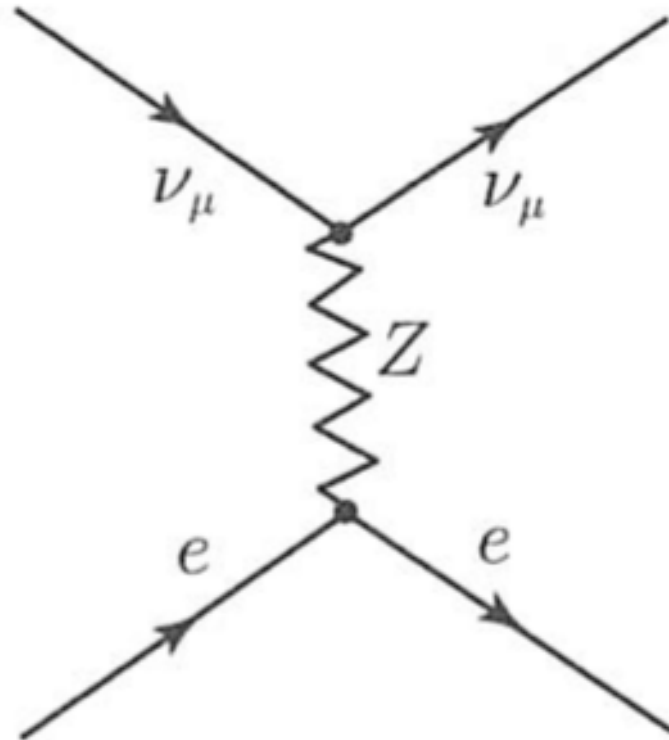
2.4.1 中性相互作用

基本的なバーテックス

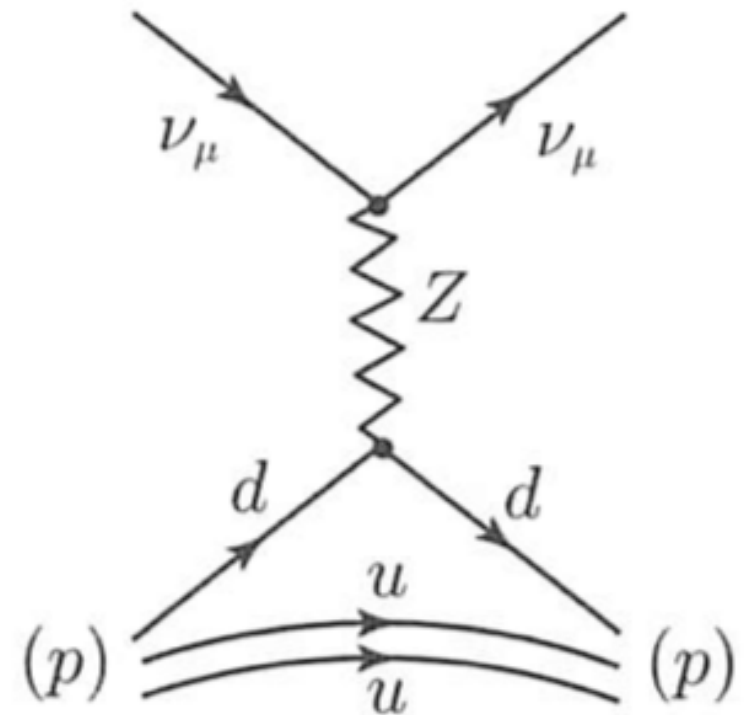


f : レプトンかクォーク

$$\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$$

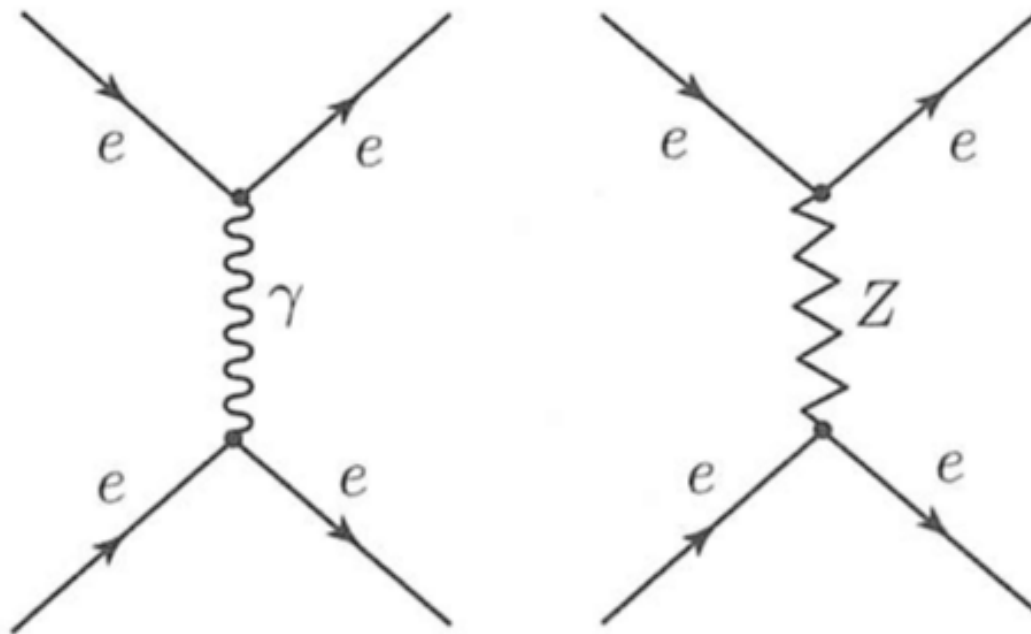


$$\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p$$



電子－電子散乱

- 光子によって誘起される過程
→必ずZによっても誘起
- 寄与…光子の方が大きい



DESYでの実験： $e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+$ →Zによる寄与の証拠発見

- 弱い相互作用はパリティ保存しない
→電磁反応における中性弱相互作用の混入

純粋な中性弱相互作用→邪魔になるニュートリノ散乱の研究整理が必要

2.4.2 荷電相互作用

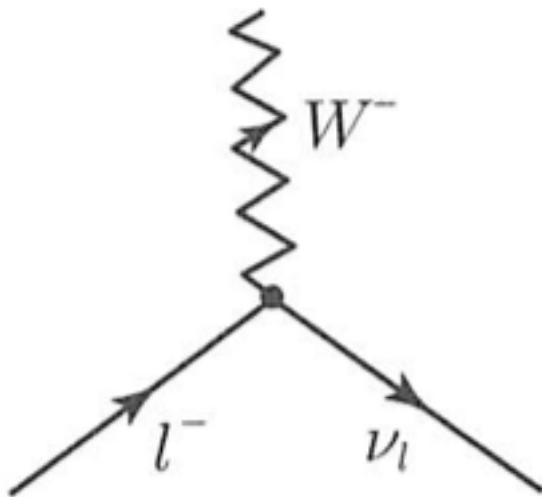
- 強い相互作用 ($q \rightarrow q + g$)
- 電磁相互作用 ($e^- \rightarrow e^- + \gamma$)
- 中性弱相互作用 ($f \rightarrow f + Z$)

→クォークのフレーバーは変わらない

- 荷電弱相互作用 → フレーバーが変わる

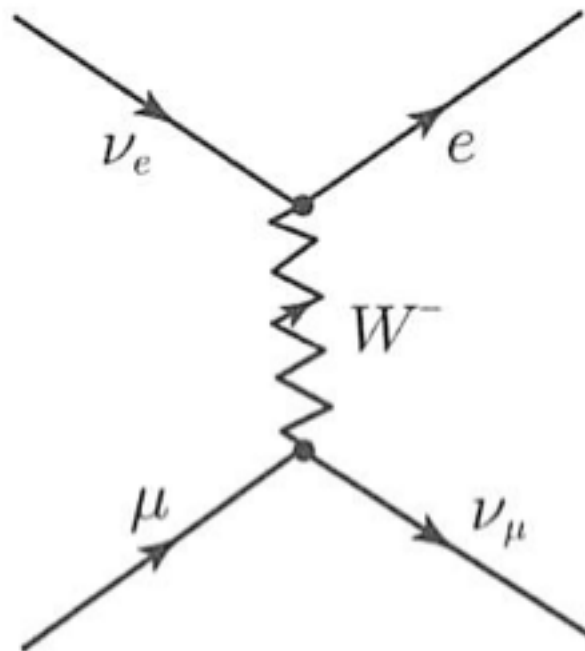
2.4.2.1 レプトン

基本的なバーテックス

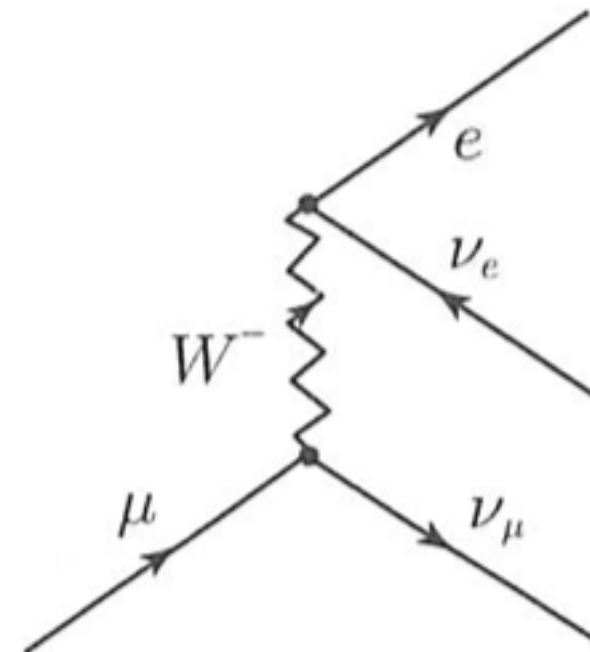


$l^- \rightarrow \nu_l + W^-$
($l^+ \rightarrow \bar{\nu}_l + W^+$ も許される)

$\mu^- + \nu_e \rightarrow e^- + \nu_\mu$



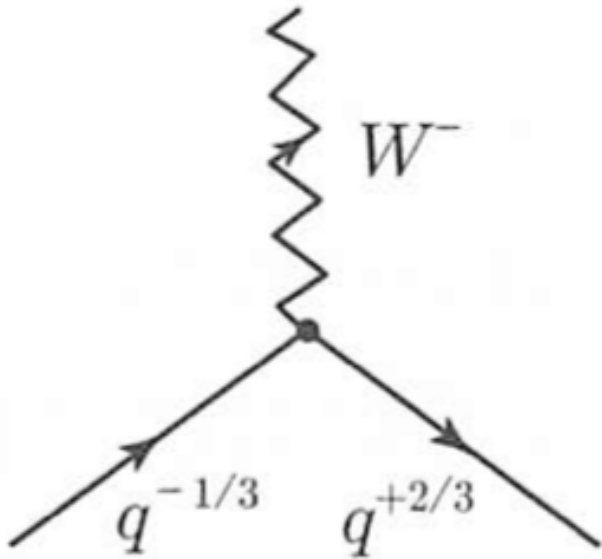
$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$



ミューオンの崩壊

2.4.3 クォーク

基本的なバーテックス



電子数、ミュー粒子数、タウ数 → 保存

クォークでは、例えば、

$$d^{-1/3} \rightarrow u^{+2/3} + W^-$$

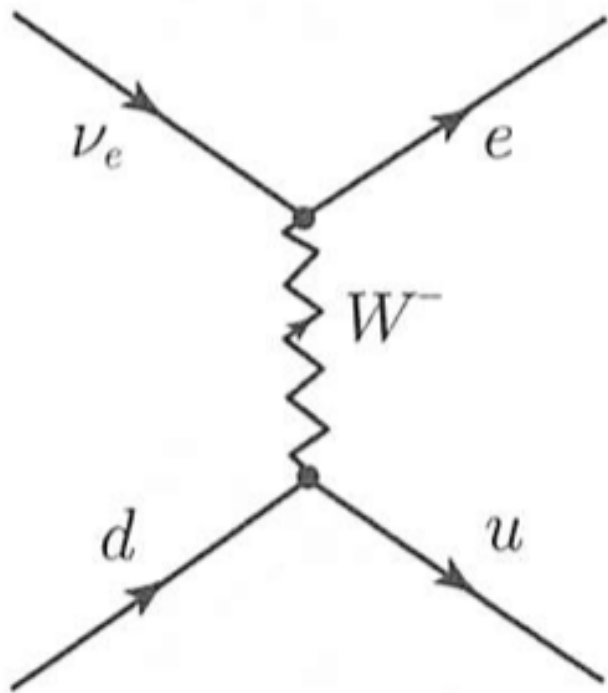
$$s^{-1/3} \rightarrow c^{+2/3} + W^-$$

$$b^{-1/3} \rightarrow t^{+2/3} + W^-$$

フレーバーは保存しない

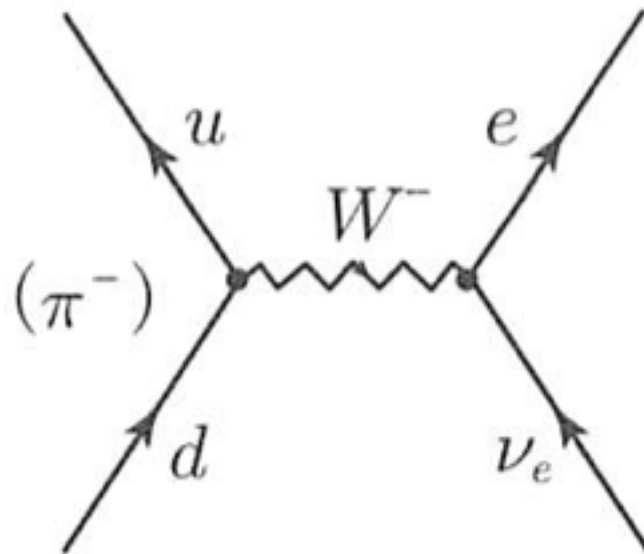
セミレプトニック過程

$$d + \nu_e \rightarrow u + e^-$$



\bar{u} と d を束縛状態

$$\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

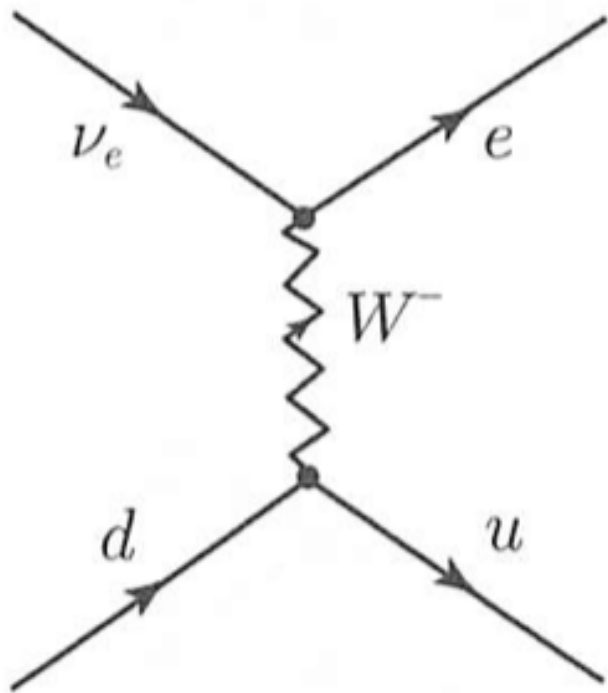


実際によく起こるのは

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

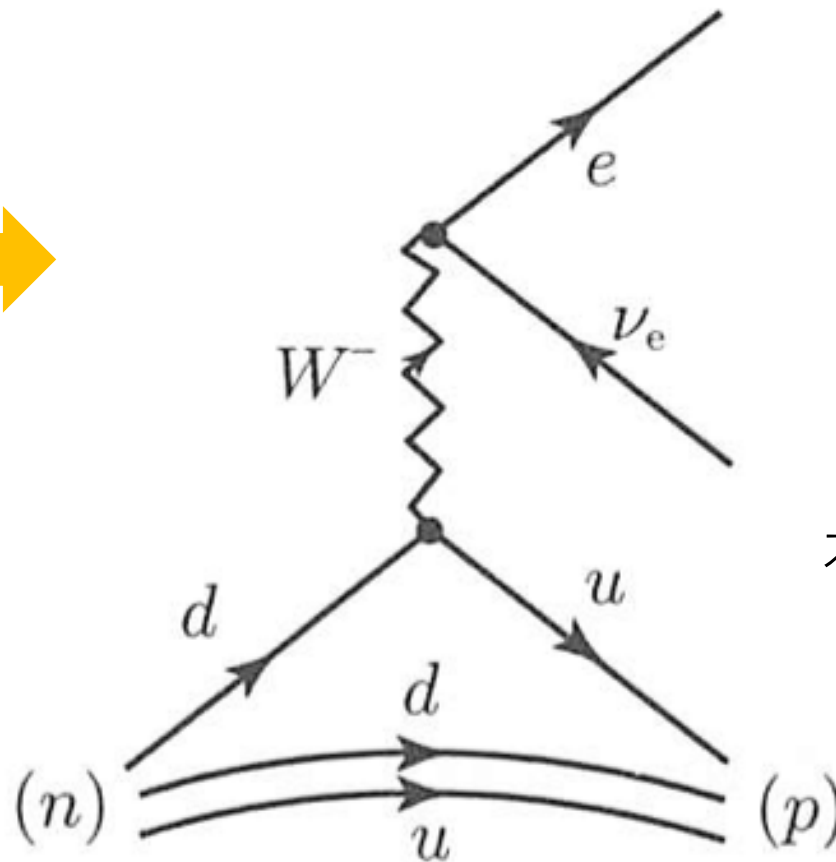
セミレプトニック過程

$$d + \nu_e \rightarrow u + e^-$$



中性子のベータ崩壊

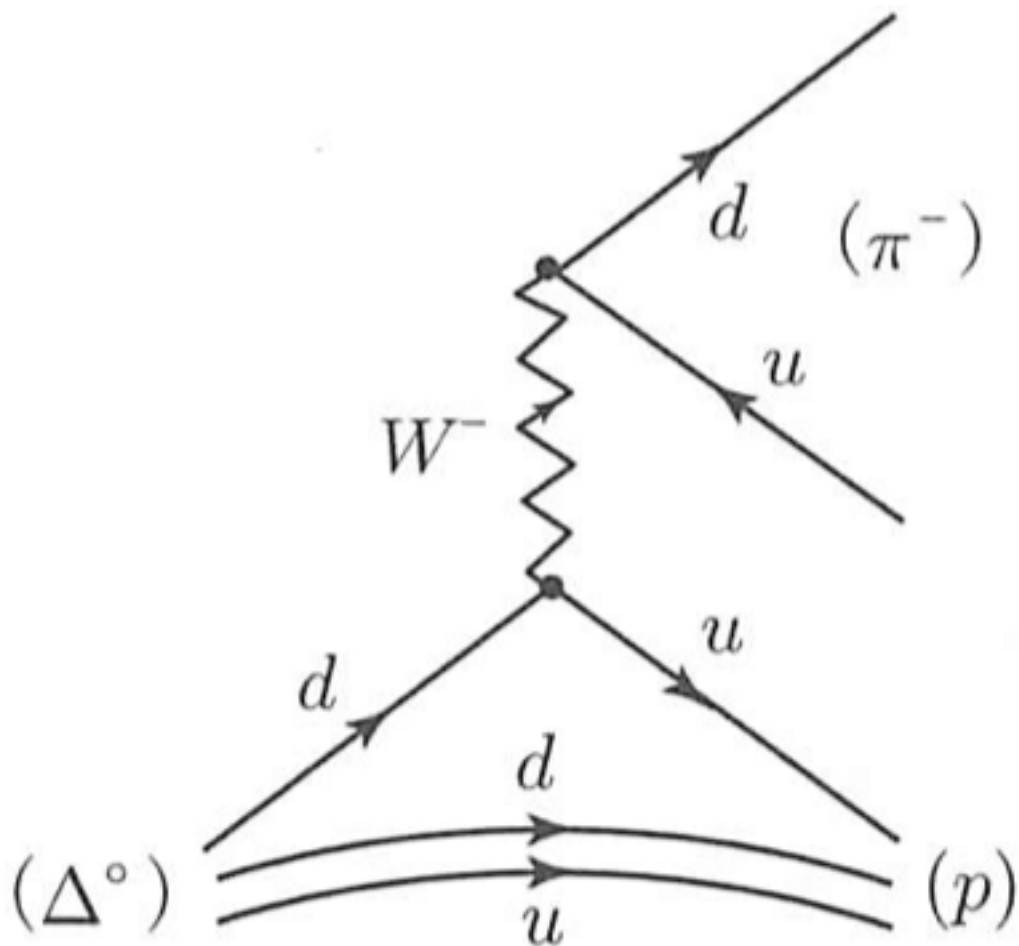
$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$



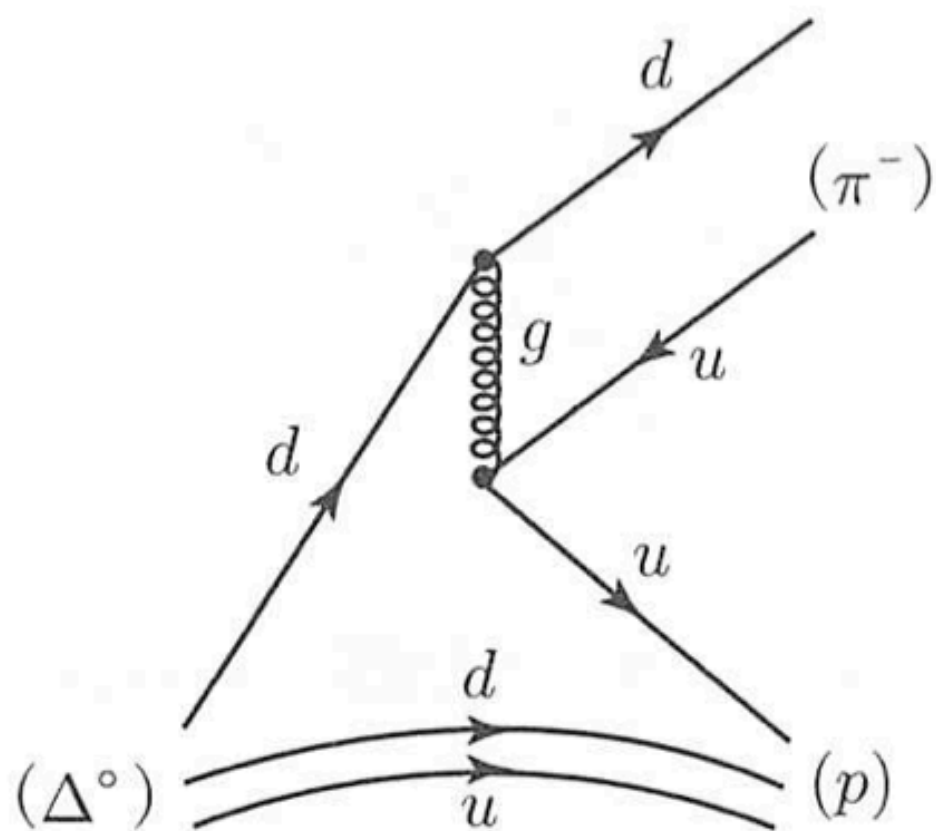
本質的に同じ図

クォークのバーテックス

ハドロニックな相互作用



強い相互作用による崩壊
(寄与が大きい)



クォークとレプトンの違い

- クォークでは世代を超えて相互作用

ラムダの崩壊 $\Lambda(uds) \rightarrow p^+(*uud*) + \pi^-(*d\bar{u}*)$

オメガの崩壊 $\Omega^-(sss) \rightarrow \Lambda(*uds*) + K^-(*s\bar{u}*)$

- 1963年：カビボが提案
- 1970年：グラシヨウ、イリオポロス、マイアニが完全な解
- 1973年：小林、益川が第3世代まで拡張

クォークの世代は弱い相互作用に対して「ゆがんでいる」

• 結合する対 $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$

$d', s', b' : d, s, b$ の線形結合

• KM行列

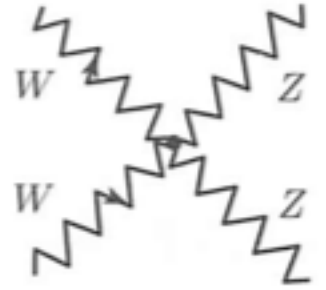
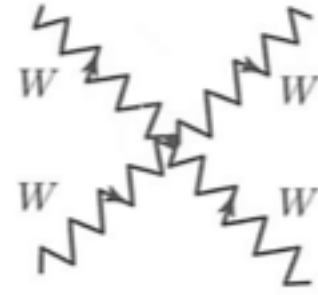
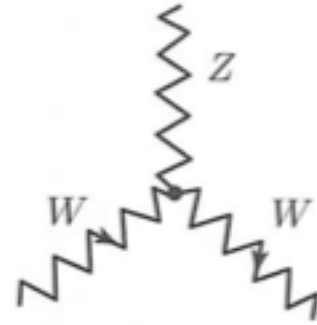
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$
$$= \begin{pmatrix} 0.974 & 0.227 & 0.004 \\ 0.227 & 0.973 & 0.042 \\ 0.008 & 0.042 & 0.999 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

V_{ud} : u と d との結合の大きさなどの指標

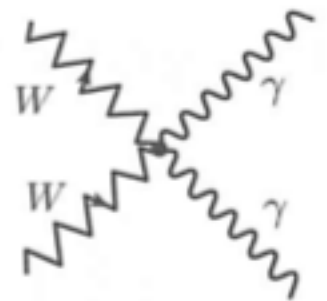
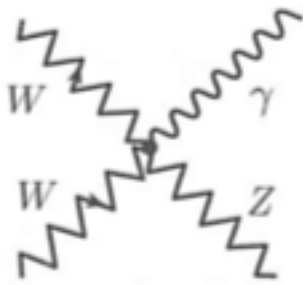
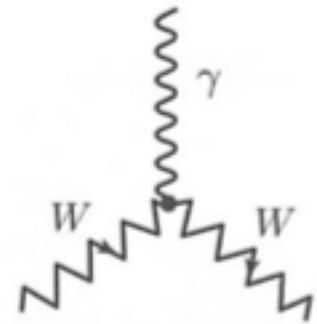
2.4.4 WとZの電弱相互作用

- GWS模型

→WとZの直接結合が存在
(QCDのグルーオン)



Wは荷電→光子とも結合



2.5 崩壊と保存則

保存則が禁止しない限り、粒子はより軽い粒子に崩壊

- 光子…安定（質量ゼロ）
- 電子…安定（最も軽い荷電粒子・電荷保存則）
- 陽子…安定かも（最も軽いバリオン・バリオン保存則？）

- 最も軽いニュートリノ…安定（レプトン保存則）

これらの反粒子、原子核中の中性子なども安定

不安定な粒子の平均寿命 τ

• μ : 2.2×10^{-6} 秒 ($\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$)

• π^+ : 2.6×10^{-8} 秒 ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$)

• π^0 : 8.3×10^{-17} 秒 ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$)

大抵の粒子は異なる崩壊様式をもつ

K^+ : $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 64%

$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ 21%

$K^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \pi^0$ 5%

• 寿命や崩壊比を計算することが理論の1つのゴール

3つの相互作用の典型的な寿命

- 強い相互作用 10^{-23} 秒 ← 「通常の」時間の単位
($\Delta^{++} \rightarrow p^+ + \pi^+$)
- 電磁相互作用 10^{-16} 秒
($\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$)
- 弱い相互作用 10^{-13} 秒 ~ 15分 (中性子 : $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$)
($\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$)

同じ相互作用による崩壊→質量差が大きいほど早く崩壊

* 10^{-17} 秒程度より長い寿命は「安定」粒子

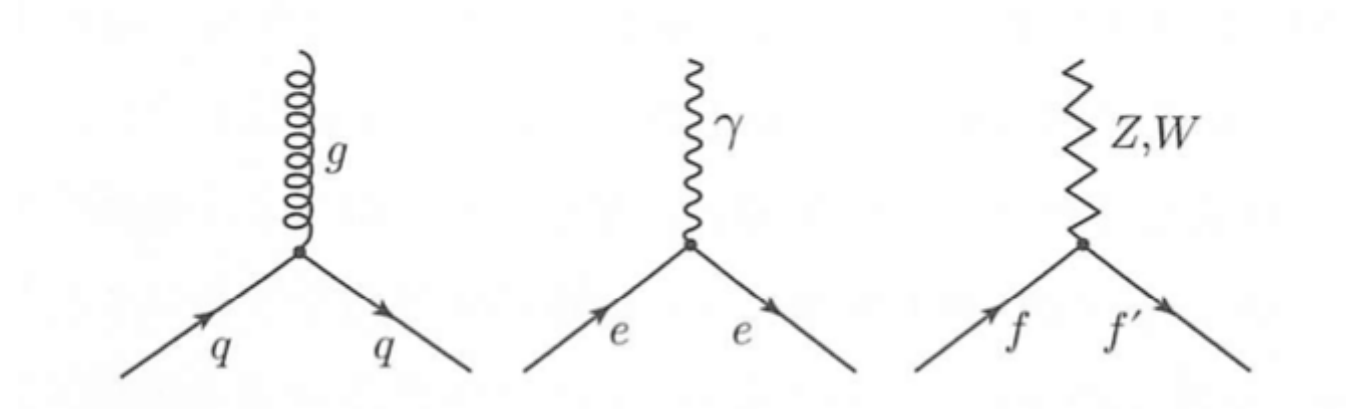
3つの相互作用では

- ・エネルギー保存
- ・運動量保存
- ・角運動量保存

が成り立つ
(特殊相対論から導出されるため)

バーテックスで保存を確認

1. 電荷
2. 色
3. バリオン数
4. レプトン数
5. フレーバー
6. OZI則

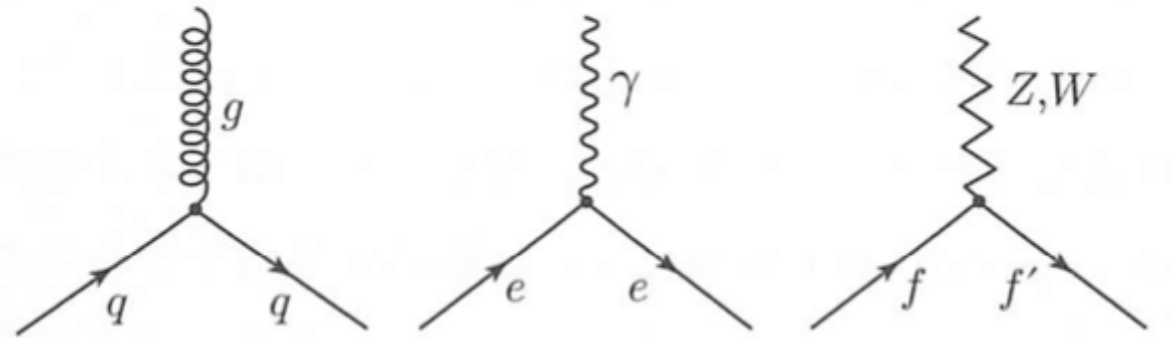


1. 電荷

全ての相互作用で保存

弱い相互作用ではWが持ち出す

2. 色



電磁相互作用と弱い相互作用に影響しない。

強い相互作用ではグルーオンが持ち出すが、反応前後では色荷ゼロ

3. バリオン数

クォークの総数は一定

- バリオン (qqq) $B = 1$
- 反バリオン ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$) $B = -1$
- 中間子 ($q\bar{q}$) $B = 0$

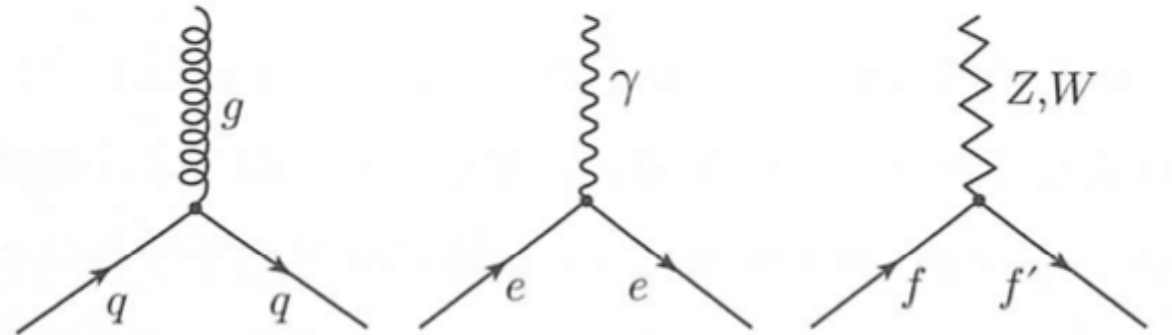
→ バリオン数も保存

クォークのバリオン数

$$B = 1/3$$

反クォークのバリオン数

$$B = -1/3$$



4. レプトン数

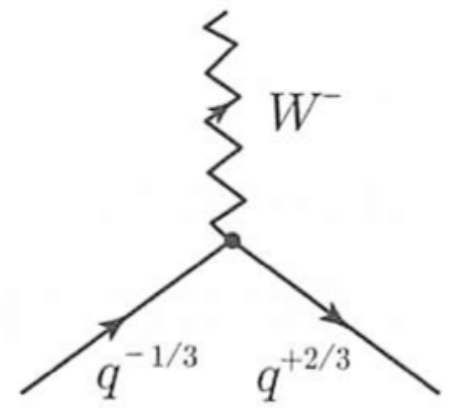
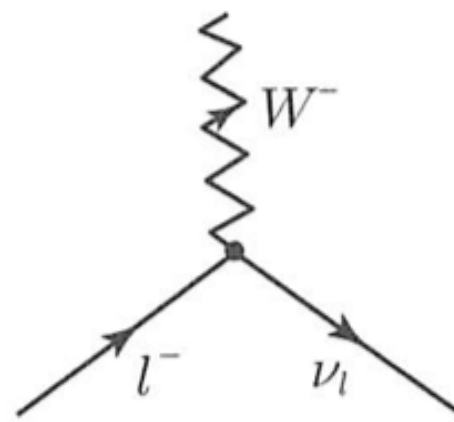
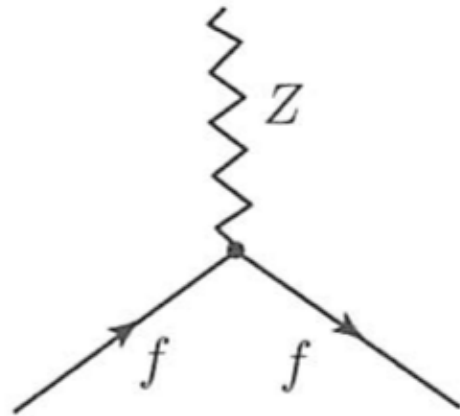
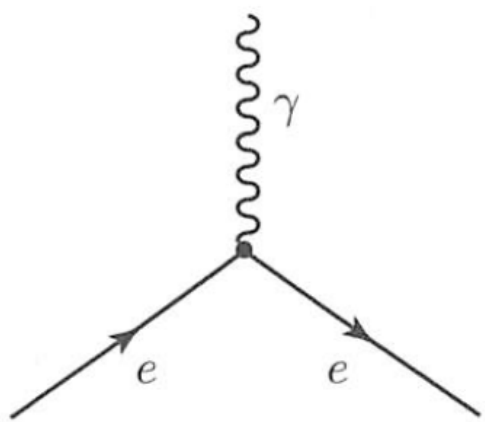
強い相互作用…無関係

電磁相互作用… $e^- \rightarrow e^- + \gamma$ のように同じ粒子

弱い相互作用… $f \rightarrow f + Z, l^- \rightarrow \nu_l + W^-$

$$q^{-1/3} \rightarrow q^{-2/3} + W^-$$

→レプトン数は保存



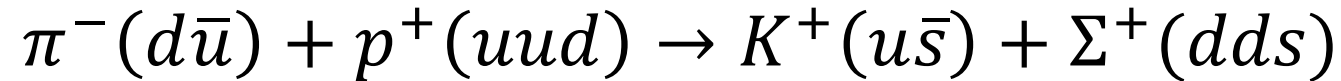
5. フレーバー

強い相互作用、電磁相互作用…保存

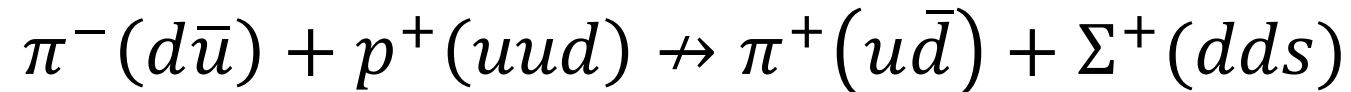
弱い相互作用…保存しない

弱い力 \ll 電磁気力 \ll 強い力 \rightarrow 近似的には保存するときも

- ・ ストレンジ粒子の生成



ストレンジネス保存を破る



崩壊 → ストレンジネス保存を破っている
(強い力、電磁気力によらないため)

最も軽いストレンジバリオン… $\Lambda(uds)$

→ $n(udd)$ か $p^+(uud)$ と何かに崩壊

最も軽いストレンジ中間子…… K

→ n と K の重さは Λ を超える

実際、64%は $\Lambda \rightarrow p^+ + \pi^-$ 、36%は $\Lambda \rightarrow n + \pi^0$

・ $\Delta^0(udd)$ は $p^+ + \pi^-$ 、 $n + \pi^0$ に崩壊でき、寿命は短い

6. OZI則

(大久保、ツヴァイク、飯塚による)

ϕ の崩壊

$$\phi \rightarrow K^+ + K^-$$

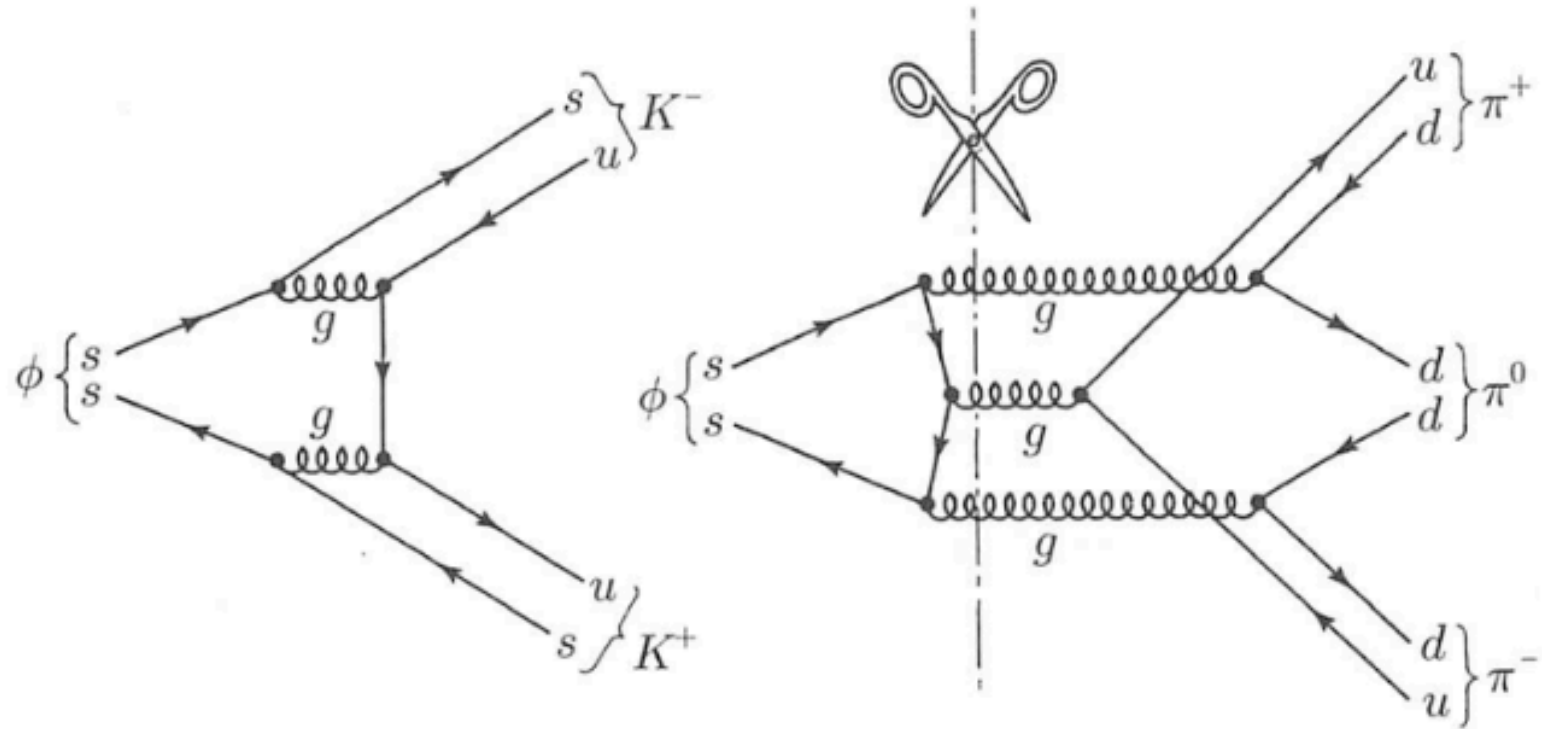
$$\phi \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^-$$

実験結果… K に崩壊しやすい

2つの K の質量和 $990 \text{ MeV}/c^2$ > 3つの π の質量和 $415 \text{ MeV}/c^2$

→エネルギー的には π に崩壊しやすい

「OZI則」 グルーオンの線だけを切って分けられる過程は抑制



抑制される過程→「ハード」である必要がある

(q, \bar{q} を放出し、放出した q, \bar{q} が束縛状態になり、ハドロンをつくる)

漸近的自由によると、

グルーオンが「ハード」(高エネルギー)…結合は弱い

「ソフト」(低エネルギー)…結合は強い

• $\psi (c\bar{c})$ の崩壊

$$\psi \rightarrow 3\pi$$

$$\psi \rightarrow D^+(c\bar{d}) + D^-(d\bar{c})$$

$$(\text{あるいは } D^0(c\bar{u}) + \bar{D}^0(u\bar{c}))$$

$\phi(s\bar{s})$ の崩壊

$$\phi \rightarrow 3\pi$$

$$\phi \rightarrow K^+(u\bar{s}) + K^-(s\bar{u})$$

OZI則により $\psi \rightarrow 3\pi$ は抑制

D 対は ψ より重い

→ ψ の寿命は長い (約 10^{-20} 秒)

強い相互作用の時間スケールより1000倍もゆっくり