

# Mengenal Fisika Nuklir

Imam Fachruddin


(Departemen Fisika, Universitas Indonesia)

## Daftar Pustaka:

- P. E. Hodgson, E. Gadioli, E. Gadioli Erba, **Introductory Nuclear Physics** (Oxford U. P., New York, 2000)
- J. M. Blatt & V. F. Weisskopf, **Theoretical Nuclear Physics** (Dover Publications, Inc., New York, 1991)
- W. E. Meyerhof, **Elements of Nuclear Physics** (McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1989)

# Isi

---

- pendahuluan
  - sifat-sifat inti
  - ketidakstabilan inti
  - radioaktivitas
  - model inti
  - gaya nuklir / interaksi kuat
  - fisika partikel 
  - astrofisika nuklir
  - akselerator dan detektor
  - reaktor nuklir
-

# Fisika Partikel

Segala proses yang terjadi di alam dipicu oleh 4 interaksi fundamental, mulai dari yang kekuatannya paling kecil yaitu:

- interaksi gravitasi
- interaksi elektromagnetik
- interaksi lemah
- interaksi kuat

Interaksi gravitasi dan elektromagnetik berjangkauan tak berhingga, sementara interaksi lemah  $\sim 10^{-4}$  fm dan interaksi kuat  $\sim 1$  fm.

Tiap-tiap interaksi itu memiliki pembawa atau carrier (ingat penggambaran Yukawa tentang interaksi kuat) yaitu:

- interaksi gravitasi: **graviton** (massa = 0, muatan = 0, spin = 2)
- interaksi elektromagnetik: **foton** (massa = 0, muatan = 0, spin = 1)
- interaksi lemah: **partikel Z** (massa = 91 massa proton, muatan = 0, spin = 1) dan **partikel  $W^\pm$**  (massa 82 massa proton, muatan =  $\pm e$ , spin = 1)
- interaksi kuat: **gluon** (massa = 0, muatan = 0, spin = 1) (e = muatan elementer)

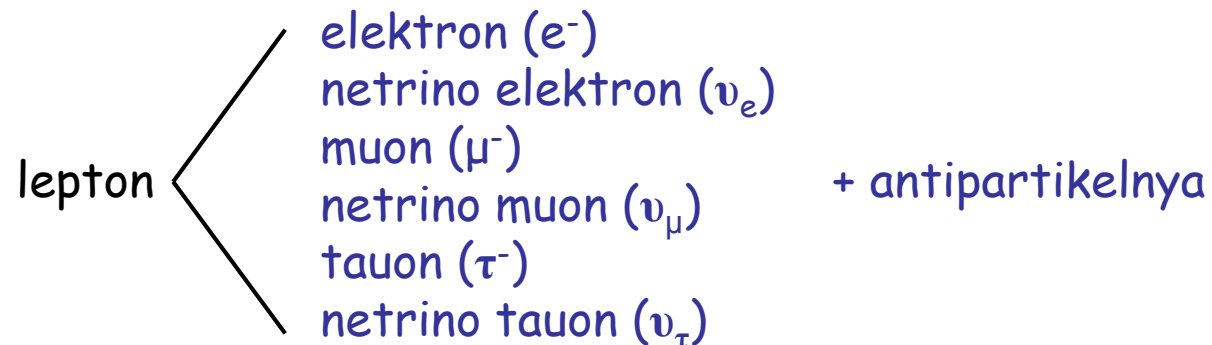
Berdasarkan interaksi kuat, partikel digolongkan menjadi **lepton** dan **hadron**.

- **lepton**: partikel yang tidak berinteraksi kuat, contoh: elektron, neutrino
- **hadron**: partikel yang dapat berinteraksi kuat, contoh: nukleon

Hadron dapat dibagi lagi berdasarkan perilaku statistiknya (fermion atau boson) yaitu, **meson** dan **barion**.

- **meson**: hadron yang berspin bulat (boson), contoh: pion ( $\pi$ ), kaon (K)
- **barion**: hadron yang berspin kelipatan ganjil dari setengah (fermion),  
contoh: nukleon, partikel lambda ( $\Lambda$ ), sigma ( $\Sigma$ ), omega ( $\Omega$ )

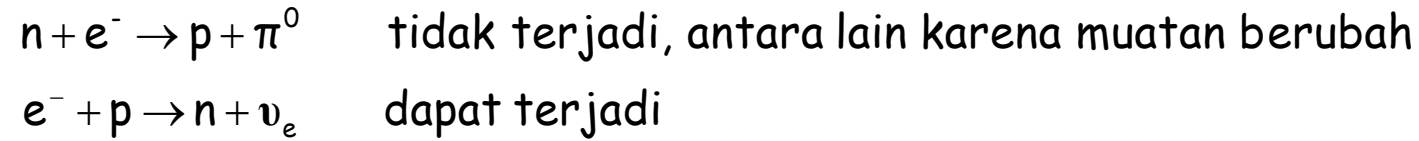
Lepton merupakan fermion, semuanya berspin setengah, jumlahnya 12.



Antipartikel memiliki massa, spin sama dengan massa, spin partikelnya, tapi muatan berlawanan.

Catatan:  $m_\mu = 200 m_e$ ,  $m_\tau = 3600 m_e$ ,  $m_\nu$  sangat kecil (bisa diabaikan), neutrino berarti si kecil netral

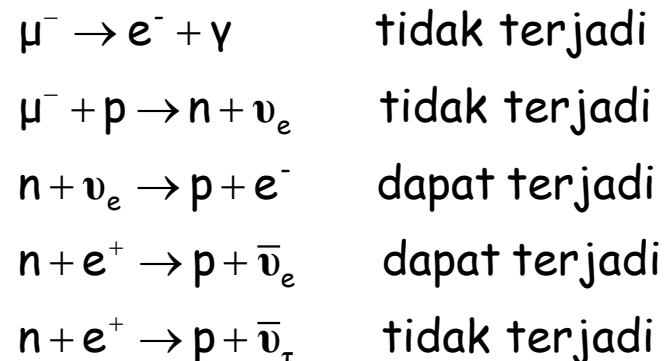
Suatu reaksi dapat terjadi jika memenuhi **hukum kekekalan energi, momentum** dan **muatan**. Contoh:



Selain tiga hukum kekekalan di atas, suatu reaksi juga harus memenuhi hukum kekekalan **bilangan lepton**. Bilangan lepton ada 3: **bilangan lepton elektron (b.l.e.)**, **bilangan lepton muon (b.l.m.)**, **bilangan lepton tauon (b.l.t.)**.

$$\begin{array}{llll} \text{b.l.e. } e^- = 1 & \text{b.l.e. } e^+ = -1 & \text{b.l.e. } \nu_e = 1 & \text{b.l.e. } \bar{\nu}_e = -1 \\ \text{b.l.m. } \mu^- = 1 & \text{b.l.m. } \mu^+ = -1 & \text{b.l.m. } \nu_\mu = 1 & \text{b.l.m. } \bar{\nu}_\mu = -1 \\ \text{b.l.t. } \tau^- = 1 & \text{b.l.t. } \tau^+ = -1 & \text{b.l.t. } \nu_\tau = 1 & \text{b.l.t. } \bar{\nu}_\tau = -1 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{untuk yang lain b.l.e.,} \\ \text{b.l.m., b.l.t.} = 0 \end{array}$$

Contoh reaksi terjadi dan tidak terjadi karena bilangan lepton:



Catatan: neutrino hanya dapat berinteraksi lemah, karena itu setiap reaksi yang melibatkan neutrino pasti terjadi melalui interaksi lemah.

Reaksi juga harus memenuhi hukum kekekalan **bilangan barion**. Semua barion memiliki bilangan barion bernilai 1, semua yang bukan barion memiliki bilangan barion bernilai 0.

Contoh reaksi terjadi dan tidak terjadi karena bilangan barion:

$$n \rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad \text{tidak terjadi}$$

$$\pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^- \quad \text{dapat terjadi}$$

$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda + \bar{\Sigma}^0 \quad \text{tidak terjadi}$$

**Kecuali** reaksi yang berlangsung melalui interaksi lemah, suatu reaksi juga harus memenuhi hukum kekekalan **strangeness**. Nilai strangeness berkenaan dengan quark strange sebagai penyusun partikel. Contoh: pion, proton dan neutron memiliki strangeness 0, lambda dan sigma memiliki strangeness -1. Antipartikel memiliki strangeness yang berlawanan tanda.

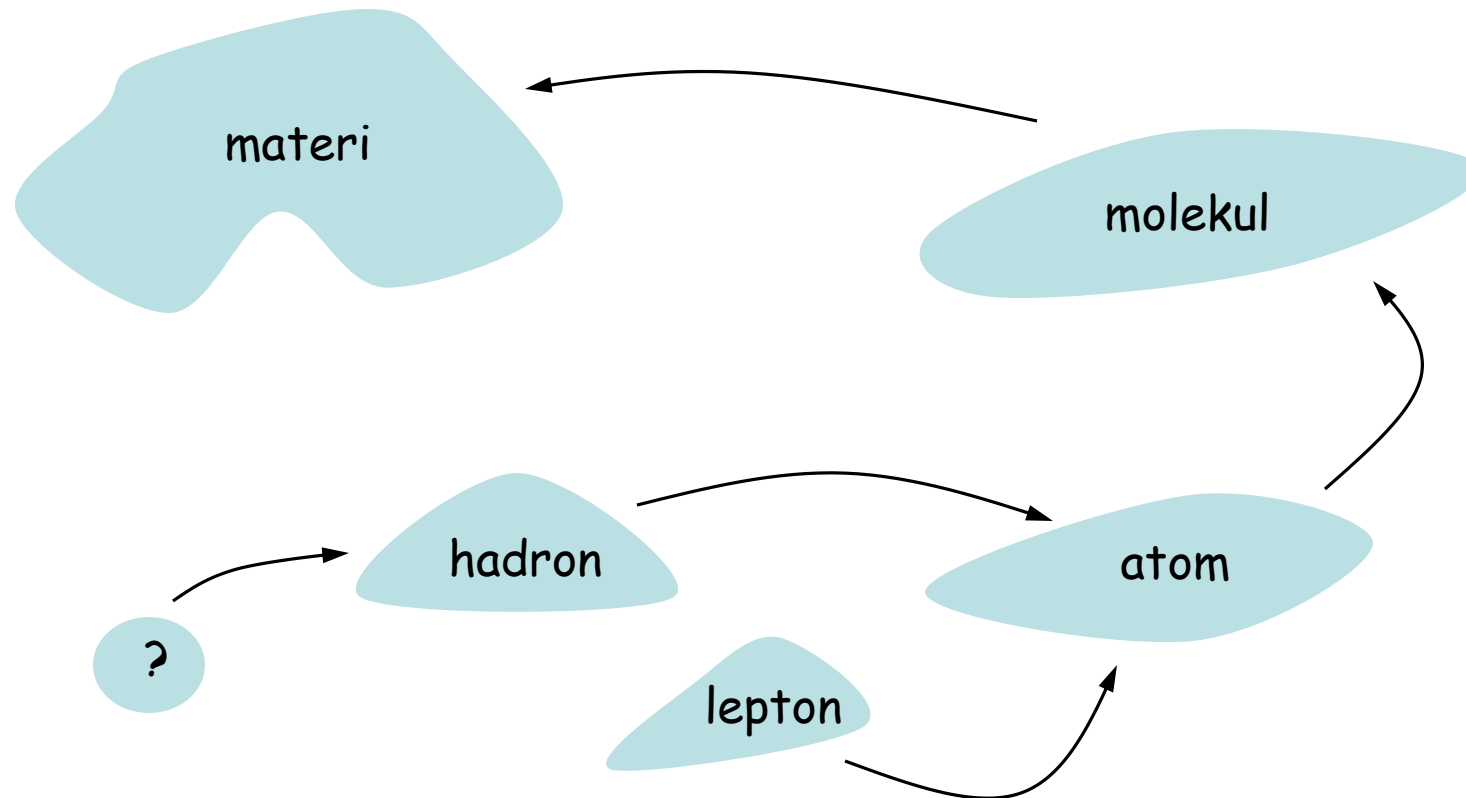
Contoh reaksi terjadi dan tidak terjadi karena strangeness:

$$\pi^- + p \rightarrow n + \pi^0 \quad \text{dapat terjadi}$$

$$\pi^0 + p \rightarrow \Lambda + \pi^+ \quad \text{tidak terjadi}$$

# Model Quark Awal

Fisikawan mencari partikel dasar (fundamental) penyusun semua materi di alam. Lepton dianggap sebagai partikel fundamental, sementara hadron bukan. Tapi hadron tidak tersusun dari lepton, jadi masih ada lagi partikel fundamental selain lepton, yang menjadi penyusun hadron.



Gell-Mann dan Zweig (1964) mengusulkan bahwa hadron tersusun dari **quark**: barion tersusun dari 3 quark, sedangkan meson tersusun dari quark dan antiquark. Terdapat tiga 'rasa' (**flavour**) quark yaitu, **up**, **down** dan **strange**. Semua quark berspin 1/2. Antiquark memiliki muatan dan strangeness yang berlawanan tanda.

nama	simbol	muatan	strangeness
up	u	$2/3e$	0
down	d	$-1/3e$	0
strange	s	$-1/3e$	-1

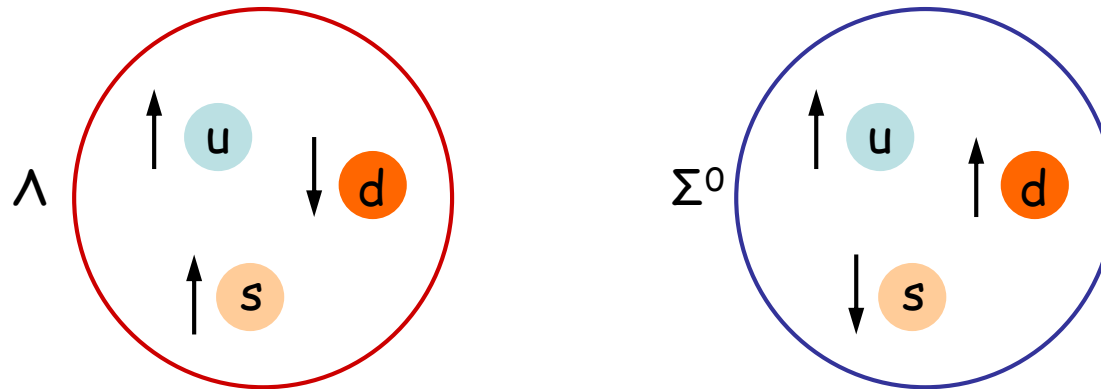
Contoh:	barion	quark	strangenes s	meson	quark	strangenes s
	p, $\Delta^+$	uud	0	$\pi^0, \eta^0$	$u\bar{u}$	0
	n, $\Delta^0$	udd	0	$\pi^-$	$\bar{u}d$	0
	$\Delta^{++}$	uuu	0	$\pi^+$	$u\bar{d}$	0
	$\Delta^-$	ddd	0	$K^+$	$u\bar{s}$	1
	$\Sigma^+$	uus	-1	$K^-$	$\bar{u}s$	-1
	$\Lambda, \Sigma^0$	uds	-1	$K^0$	$d\bar{s}$	1
	$\Sigma^-$	dds	-1	$\bar{K}^0$	$\bar{d}s$	-1
	$\Xi^0$	uss	-2			
	$\Xi^-$	dss	-2			
	$\Omega^-$	sss	-3			

sesuai dengan eksperimen



Tiga hal:

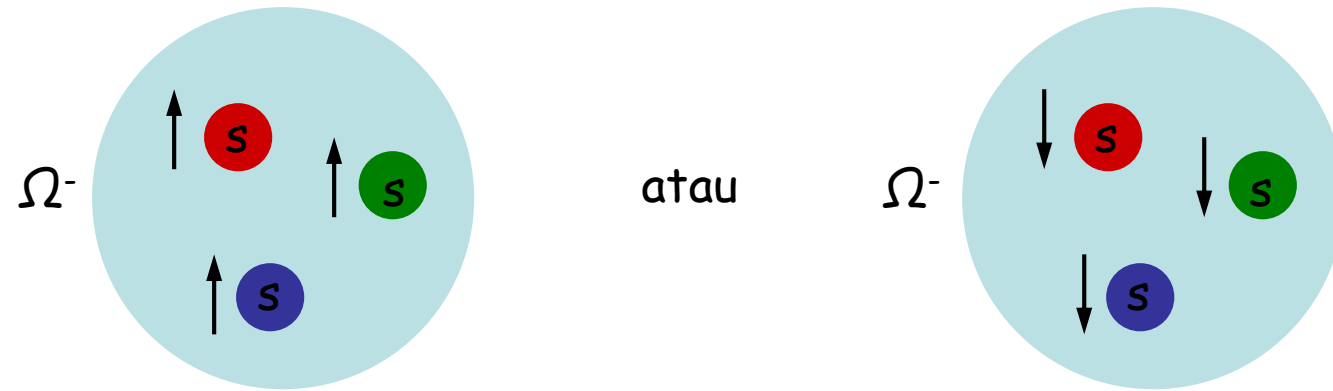
1. Terlihat bahwa kombinasi quark yang sama dapat membentuk beberapa partikel berbeda. Bagaimana mungkin? Ini mungkin karena keadaan spin sistem susunan quark itu bisa berlain-lainan; keadaan spin yang berbeda menghasilkan partikel yang berbeda. Contoh, partikel  $\Lambda$  dan  $\Sigma^0$  yang keduanya disusun dari quark u, d dan s. Keadaan spin pada  $\Sigma^0$  memiliki energi lebih tinggi dari keadaan spin pada  $\Lambda$ , sehingga massa  $\Sigma^0$  lebih besar dari massa  $\Lambda$ .



2. Antipartikel dari partikel netral memiliki muatan yang juga nol. Bagaimana membedakan keduanya? Antipartikel tersusun dari antiquark, sehingga distribusi muatan di dalamnya serta strangenessnya berbeda dari yang dimiliki partikel pasangannya. Contoh, neutron dan  $\bar{n}$ ,  $K^0$  dan  $\bar{K}^0$ .

$$\begin{array}{ll} n : \text{quark} = udd, & \text{muatan} = \frac{2}{3}, -\frac{1}{3}, -\frac{1}{3} \\ \bar{n} : \text{quark} = \bar{u}\bar{d}\bar{d}, & \text{muatan} = -\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3} \\ K^0 : \text{quark} = d\bar{s}, & \text{strangenes } s = 1 \\ \bar{K}^0 : \text{quark} = \bar{d}s, & \text{strangenes } s = -1 \end{array}$$

3. Partikel  $\Omega^-$ , yang tersusun dari 3 quark  $s$ , memiliki spin  $3/2$ . Ini berarti semua quark  $s$  memiliki arah spin sama, semua 'up' atau semua 'down'. Apakah ini tidak melanggar larangan Pauli, bahwa fermion identik tidak boleh menempati keadaan yang sama? Dari sini muncul ide bahwa tiap quark hadir dalam tiga 'warna' (color) yaitu, merah, hijau, biru. Jadi, quark dapat dibedakan dari rasa dan warnanya. Untuk  $\Omega^-$  ketiga quark  $s$  itu memiliki warna yang berbeda. Jadi tidak melanggar larangan Pauli.



Alat teori yang digunakan untuk mengkaji quark yaitu Quantum Chromodynamics (QCD).

# Model Quark dan Lepton Menurut 'The Standard Model'

Model quark awal masih belum cukup untuk menjelaskan semua partikel. Kemudian dikembangkan **model standar** fisika partikel, yang menjadikan quark dan lepton sebagai partikel fundamental.

berdasarkan penemuan sebelum 1974:

quark :	u	d	?	s	→ dicari quark baru
lepton :	$\nu_e$	$e^-$	$\nu_\mu$	$\mu^-$	

1974: quark **charm (c)** ditemukan dengan muatan  $2/3e$ :

quark :	u	d		c	s
lepton :	$\nu_e$	$e^-$		$\nu_\mu$	$\mu^-$
partikel fundamental generasi 1				partikel fundamental generasi 2	

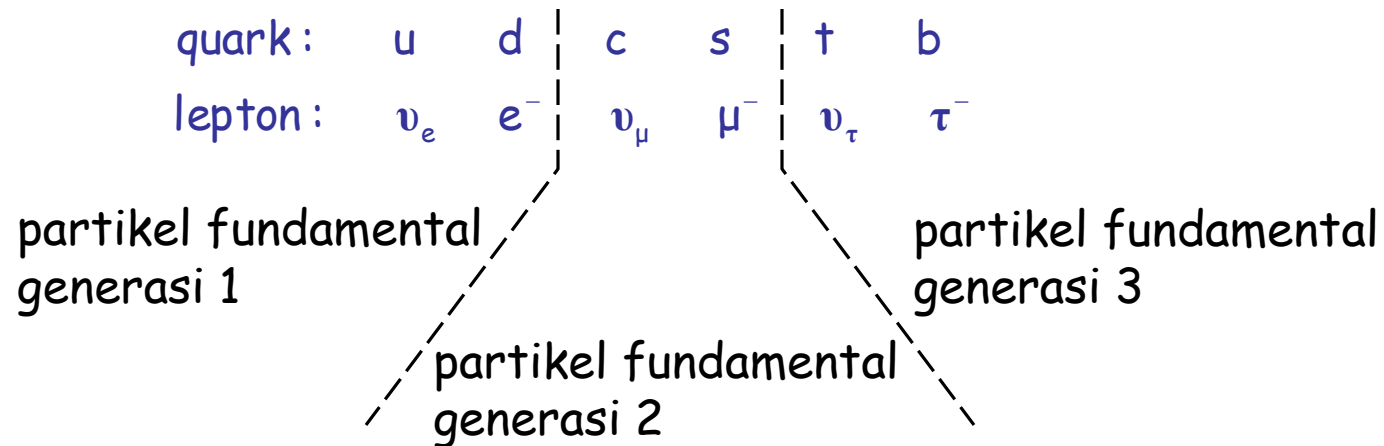
Quark c memiliki bilangan charm 1, quark yang lainnya 0.

1975: lepton tauon ( $\tau$ ) ditemukan, kemudian juga neutrino tauon ( $\nu_\tau$ ):

quark:	u	d	c	s	?	?	→ dicari 2 quark baru
lepton:	$\nu_e$	$e^-$	$\nu_\mu$	$\mu^-$	$\nu_\tau$	$\tau^-$	

Diajukan (diprediksi) 2 quark **top** atau **truth** (t) dan **bottom** atau **beauty** (b). Keduanya terbukti ditemukan dalam eksperimen. Quark b ditemukan di akhir dekade 70-an, muatannya  $-1/3e$ . Quark t ditemukan 1995, muatannya  $2/3e$ .

1995: partikel fundamental menurut model standar fisika partikel:



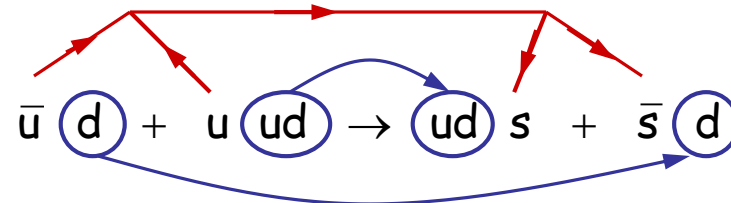
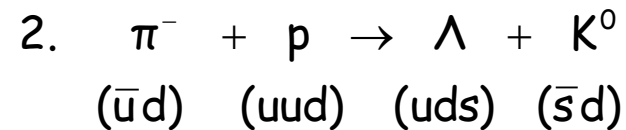
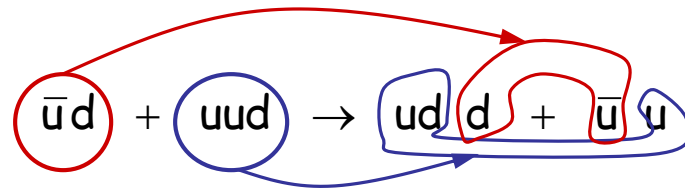
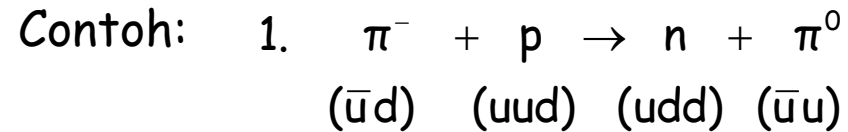
Quark t memiliki bilangan topness 1, quark yang lainnya 0.

Quark b memiliki bilangan beauty -1, quark yang lainnya 0.

# Interaksi Kuat dan Interaksi Lemah Menurut Quark

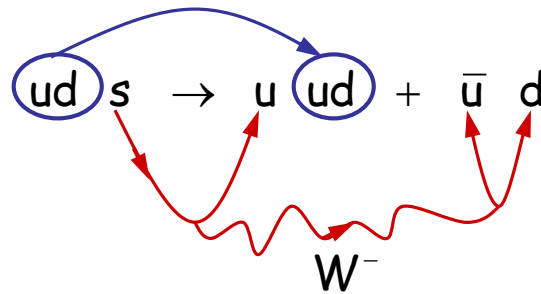
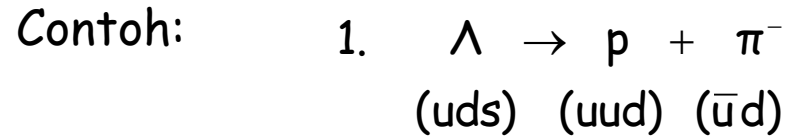
Interaksi kuat mengakibatkan:

- perubahan susunan quark yang terlibat dalam reaksi,
- penciptaan quark-antiquark.



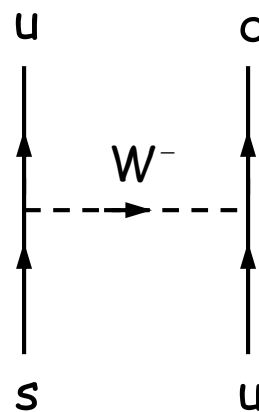
Interaksi lemah mengakibatkan:

- perubahan 'rasa' quark yang terlibat dalam reaksi.

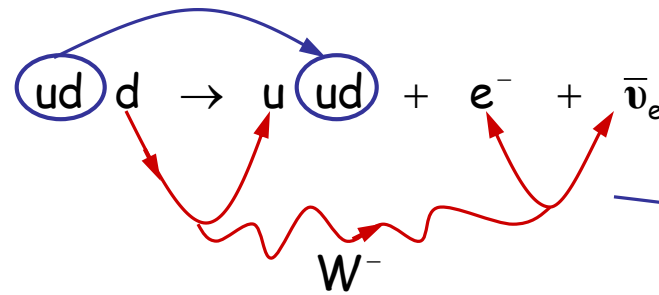
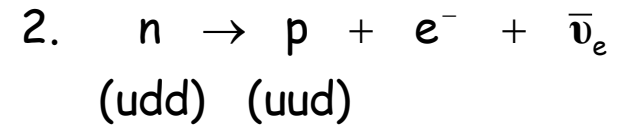


strangeness  
berubah dalam  
reaksi ini, ini boleh  
terjadi karena  
reaksi berlangsung  
bukan dengan  
interaksi kuat atau  
elektromagnetik

secara diagram



dalam diagram  
arah antipartikel  
berlawanan dengan  
arah partikelnya



secara diagram

