

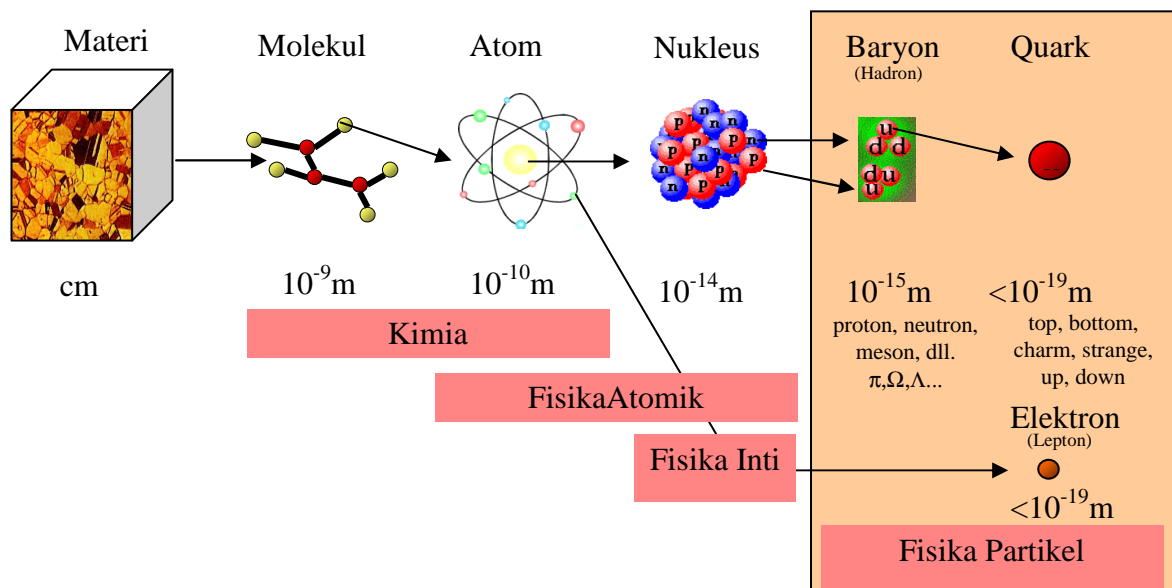
# **2** Fisika Partikel: Tinjauan Kualitatif

## **Tujuan Perkuliahan:**

Setelah mempelajari bab 2 ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Mengetahui nama, sifat dan massa dari partikel-partikel elementer
2. Mengerti proses interaksi partikel elementer dengan media boson
3. Mengetahui bilangan kuantum dari partikel-partikel elementer
4. Mengetahui komposisi dari hadron
5. Mengerti empat gaya interaksi
6. Memahami prinsip dari teori interaksi kuat (QCD)
7. Memahami prinsip dari teori interaksi elektromagnet (QED)
8. Memahami interaksi lemah partikel quark dan lepton
9. Menggambar diagram Feynman berbagai interaksi
10. Menentukan reaksi yang diperbolehkan terjadi

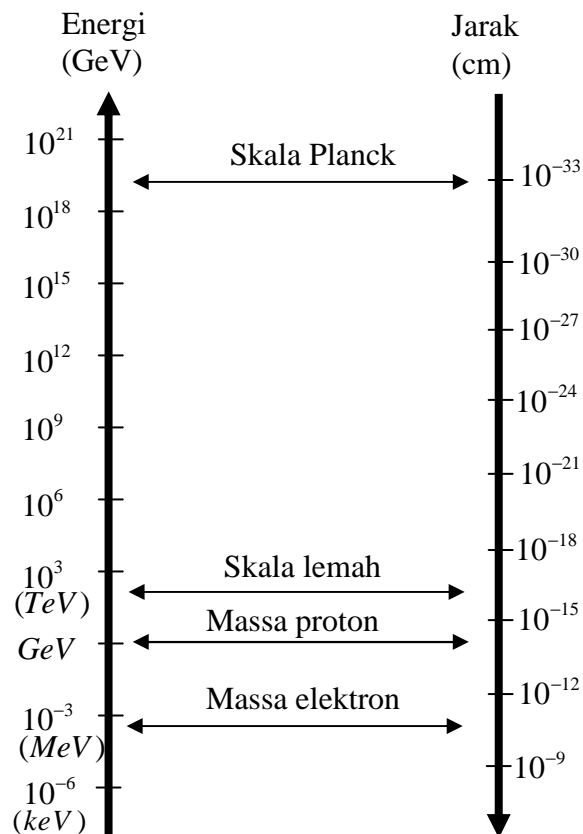
Secara garis besar, yang ingin kita pelajari adalah materi penyusun alam semesta secara keseluruhan. Saat ini, ide tersebut telah dipelajari melalui fisika partikel dan teori string. Kedua teori bertujuan untuk menggambarkan komponen-komponen terkecil penyusun materi. Dasar pemikiran fisika partikel adalah partikel-partikel elementer. Jika kita melihat lebih ke dalam sebuah materi maka akan ditemukan partikel-partikel elementer. Teori string mengambil asumsi selangkah lebih jauh bahwa partikel-partikel tersebut merupakan hasil osilasi dari string elementer, string adalah obyek fundamental. Pada bab ini kita akan mempelajari partikel fundamental penyusun materi dan interaksi antara mereka dari sudut pandang fisika partikel serta Model Standar fisika partikel. Dari sudut pandang teori string akan dijelaskan pada bab terakhir dari buku ini. Pada Gambar 2.1 diperlihatkan bagaimana materi dibangun dari bagian yang sangat kecil. Bagian yang diberi kotak adalah bagian utama dari pembahasan buku dan akan dipelajari secara kualitatif dalam bab ini.



Gambar 2.1. Struktur Materi

Mungkin sulit untuk mempercayai bahwa segala sesuatu terkomposisi dari partikel yang berukuran sangat kecil, karena mereka tidak dapat dilihat secara langsung oleh mata. Namun kenyataannya, partikel-partikel elementer merupakan unsur pokok yang membangun materi. Seperti bayangan pada layar komputer atau TV yang terkomposisi dari titik-titik (dot-dot) kecil kemudian tampak sebagai bayangan kontinu, mereka adalah materi yang tersusun oleh atom yang berarti tersusun dari partikel-partikel elementer. Obyek-obyek fisis yang tampak disekitar kita adalah kontinu dan uniform, namun pada kenyataannya tidak demikian.

Sebelum para fisikawan dapat memahami apa yang ada di dalam materi dan mendeduksikan komposisinya, mereka membutuhkan sebuah teknologi maju berupa instrumen pengukuran dengan sensitivitas yang tinggi. Namun setiap mereka mengembangkan teknologi yang akurat, lebih banyak lagi ditemukan partikel-partikrl penyusun materi, *struktur* materi. Ketika para fisikawan memiliki akses untuk menyelidiki ukuran yang lebih kecil lagi, mereka menemukan unsur yang lebih fundamental lagi, *substruktur* yang merupakan unsur pokok dari elemen-elemen struktural yang telah diketahui sebelumnya.



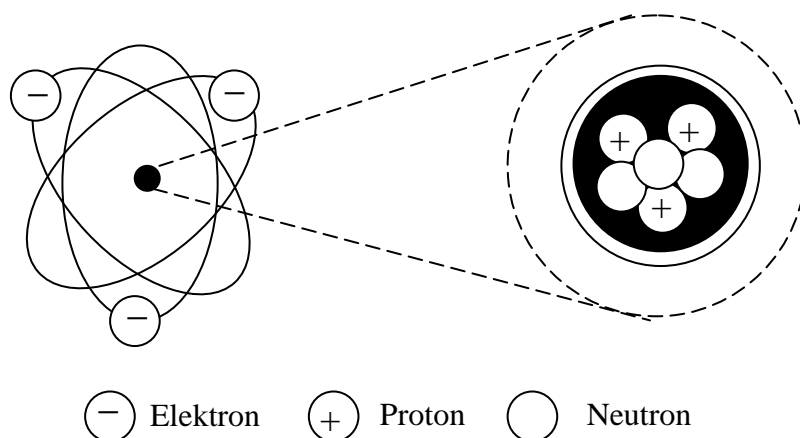
Gambar 2.2 Skala panjang dan energi dalam fisika partikel.

Tujuan dari fisika partikel adalah mencari unsur-unsur pokok paling dasar (partikel-partikel elementer) yang dimiliki oleh materi dan taat aturan terhadap hukum-hukum fisika fundamental. Kita akan mempelajari skala jarak yang sangat kecil dan skala energi yang besar (Gambar 2.2), karena partikel elementer berinteraksi pada skala tersebut dan gaya-gaya fundamental lebih mudah digabungkan. Pada skala jarak yang besar, partikel-partikel elementer tersebut terikat menjadi obyek yang terkomposisi dan hukum-hukum fisika fundamental menjadi lebih sulit digabungkan. Saat ini riset pada skala jarak yang kecil adalah hal yang menarik karena prinsip-prinsip dan hubungan-hubungan baru dapat diperlakukan di dalamnya. Sebelum kita mempelajari lebih jauh lagi, terlebih dahulu kita akan berwisata di dalam dunia materi.

## 2.1. Partikel Penyusun Materi

Apakah materi penyusun alam semesta ini? Pastilah tersusun dari objek-objek yang fundamental. Yang dimaksud dengan objek fundamental adalah objek sederhana yang

ukurannya sangat kecil<sup>1</sup>, tidak mempunyai struktur dan tidak tersusun dari sesuatu yang lebih kecil lagi atau biasa disebut dengan partikel elementer.

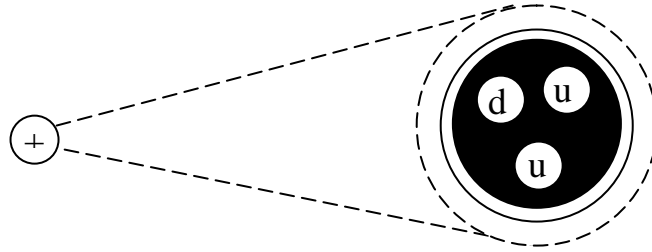


Gambar 2.3: Atom terdiri dari elektron yang mengelilingi inti yang sangat kecil. Inti tersusun atas proton yang bermuatan positif dan neutron yang bermuatan netral.

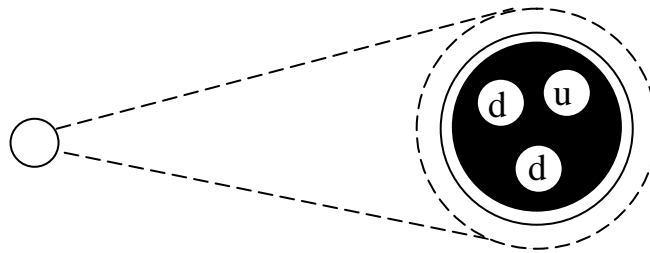
Apakah atom fundamental? Apakah inti atom fundamental? Apakah neutron dan proton fundamental? Apakah quark fundamental? Ukuran quark dan lepton yang sangat kecil membuat para ilmuwan percaya bahwa partikel-partikel ini benar-benar elementer dan merupakan partikel penyusun dari semua yang ada di alam semesta ini. Atom berukuran Angstrom ( $1 \text{ Angstrom} = 10^{-10} \text{ m}$ ) membentuk molekul-molekul setelah melalui proses kimia. Namun atom bukanlah penyusun utama dari materi karena atom masih terdiri dari inti atom yang bermuatan positif yang dikelilingi oleh elektron-elektron ( $e$ ) yang bermuatan negatif. Inti atom jauh lebih kecil dari atom, hanya menempati satu persepuluh ribu bagian dari ukuran atom. Inti atom yang bermuatan positif dibangun dari *proton* ( $p$ ) bermuatan positif dan *neutron* ( $n$ ) yang tidak bermuatan (netral), secara kolektif dinamakan sebagai *nukleon*. Ini adalah gambaran model atom yang dikenal pada periode 1920-an, dikembangkan oleh Rutherford dan Niels Bohr (Gambar 2.3).

---

<sup>1</sup> Fisika partikel mengasumsikan bahwa partikel yang berukuran sangat kecil adalah partikel serupa titik (*point-like partikel*). Dalam teori string partikel serupa titik ini adalah obyek yang memiliki nol dimensi ruang (*0-brane*).



Gambar 2.4. Sebuah proton dibangun dari dua buah *up quark* dan satu buah *down quark*.



Gambar 2.5. Sebuah neutron dibangun dari satu buah *up quark* dan dua buah *down quark*.

(d) *down quark*      (u) *up quark*

Dengan dikembangkannya akselerator partikel, banyak sekali partikel-partikel berenergi tinggi yang merupakan resonansi dari proton dan neutron. Penemuan partikel muon dari radiasi sinar kosmik mempunyai sifat sama dengan elektron tetapi berbeda massanya. Selain itu ada pula *neutrino* ( $\nu$ ) yang berasal dari radioaktivitas, yaitu neutron meluruh menjadi proton, elektron dan neutrino. Akibatnya proton dan neutron tidak lagi dianggap sebagai partikel terkecil penyusun alam semesta. Gamow kemudian memperkenalkan bahwa proton dan neutron mengandung substruktur yang lebih fundamental yang dinamakan *quark*. Proton terdiri dari dua buah *up quark* dan satu buah *down quark* (Gambar 2.4), sedangkan neutron terdiri dari satu buah *up quark* dan dua buah *down quark* (Gambar 2.5). Quark-quark ini terikat bersama-sama melalui sebuah gaya inti yang dinamakan gaya kuat (*strong force*). Se jauh ini elektron, komponen lain dari atom, dapat dikatakan fundamental karena elektron tidak dapat dibagi lagi menjadi partikel yang lebih kecil dan tidak mengandung substruktur.

Ilmuwan fisika sekarang ini sedang mencari partikel-partikel baru lainnya, setelah itu, partikel dikelompokkan dan berusaha menemukan pola bagaimana sebenarnya partikel-

partikel di alam berinteraksi. Sampai saat ini telah ditemukan 200 lebih partikel baru. Ilmuwan fisika pemenang "Nobel Prize" Stephen Weinberg memberikan suatu istilah yang dinamakan Model Standar (*Standar Model*) untuk teori fisika partikel yang menggambarkan interaksi partikel-partikel: elektron, *up quark* dan *down quark*. Partikel lain yang ditemukan kemudian dimasukkan ke dalam teori ini. Model Standar juga menggambarkan tiga dari empat gaya interaksi yang dialami partikel-partikel elementer: gaya elektromagnetik (*electromagnetic force*), gaya lemah (*weak force*) dan gaya kuat (*strong force*). Sedangkan gaya gravitasi tidak dimasukkan<sup>2</sup>. Gaya lemah dan gaya kuat sangat penting dalam proses reaksi inti, misalnya memungkinkan quark untuk terikat bersama-sama dan peluruhan inti. Perkembangan teori ini kemudian dapat menerangkan interaksi yang kompleks hanya dengan 6 quarks, 6 lepton dan partikel pembawa gaya. Hasil eksperimen dapat diperkirakan oleh teori ini.

## 2.2. Interaksi dan Pembawa Gaya

Interaksi yang ada di alam semesta ini ada 4 interaksi yaitu interaksi elektromagnetik, interaksi kuat, interaksi lemah dan interaksi gravitasi. Keempat gaya itu sama-sama fundamental. Jika salah satu dari 4 gaya itu tidak ada maka alam semesta tidak akan terbentuk. Tiap-tiap gaya memiliki teori masing-masing (Tabel 1). Teori klasik dari gravitasi adalah hukum gravitasi umum Newton sedangkan teori gravitasi relativistik adalah teori relativitas umum Einstein. Para fisikawan kini sedang berupaya untuk menemukan teori kuantum gravitasi (teori gravitasi dan teori medan kuantum). Untuk sementara, kebanyakan ilmuwan berasumsi bahwa gravitasi terlalu lemah untuk berperan dalam interaksi antar partikel elementer. Teori yang menggambarkan gaya elektromagnetik adalah elektrodinamik yang rumusan klasiknya pertama kali dirumuskan oleh Maxwell pada tahun 1800-an. Teori kuantum elektrodinamik disempurnakan oleh Tomonaga, Feynman dan Schwinger pada tahun 1940-an. Teori dari gaya lemah pertama kali dinyatakan oleh Fermi pada tahun 1933, lalu dikaji ulang oleh Lee dan Yang, Feynman dan Gell-Mann dan lainnya pada tahun 50-an dan disempurnakan teorinya oleh Glaslow, Weinberg dan Salam pada tahun 60-an. Teori interaksi lemah ini biasa disebut *flavordynamics*. Sedangkan untuk gaya kuat, setelah Yukawa pada tahun 1934, tidak ada lagi teori sampai kemunculan teori kromodinamika di pertengahan 70-an. Tiga interaksi

---

<sup>2</sup> Pengaruh gravitasi sangat lemah dalam interaksi partikel-partikel elementer, mengapa? Ini adalah salah satu problem yang belum terpecahkan dalam teori Model Standar. Dalam bab terakhir dari buku ini akan dijelaskan bagaimana problem ini dapat dipecahkan melalui sebuah model yang dinamakan "Brane World". Untuk sementara gaya ini dapat dilupakan.

yaitu interaksi elektromagnet, interaksi kuat dan interaksi lemah telah dapat disatukan, dan teori tentang interaksi ini telah dapat diterangkan dalam teori Model Standar. Kekuatan gaya dari interaksi-interaksi tersebut bermacam-macam. Gaya antara dua partikel bergantung dari tipe partikel dan jarak antara partikel tersebut. Tiap gaya selalu ingin membuat setiap partikel meluruh menjadi partikel dalam keadaan energi yang lebih rendah. Kekuatan relatif dari gaya biasanya sering digambarkan dari kekuatan kopling ( $\alpha$ ). Partikel seperti elektron dan proton tidak pernah teramati meluruh karena waktu meluruhnya sangat lama, tetapi sebagian besar partikel teramati meluruh.

Tabel 2.1.  
Kekuatan. Teori dan mediator 4 interaksi

Gaya	Perbandingan Kekuatan	Teori	Mediator
Kuat	1	<i>Chromodynamics</i>	Gluon
Elektromagnetik	$10^{-2}$	<i>Electrodynamics</i>	Foton
Lemah	$10^{-7}$	<i>Flavordynamics</i>	$W^\pm$ dan $Z^0$
Gravitasi	$10^{-40}$	<i>Geometrodynamics</i>	Graviton

### 2.2.1. Gaya Gravitasi

Gravitasi merupakan gaya yang menjaga kaki kita tetap berada pada tanah dan merupakan sumber dari percepatan yang mengembalikan sebuah bola yang terlempar ke bumi. Gaya gravitasi adalah gaya atraksi antara dua partikel dan besarnya sebanding dengan massa-massa dari partikel dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua partikel. Sehingga kuatnya gravitasi bergantung pada jarak antara kedua massa tersebut. Gaya ini efektif bekerja pada jarak yang jauh seperti gaya antara planet dan galaksi. Menurut Newton gaya ini diberikan oleh

$$F_{grav} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.1)$$

dimana  $G$  adalah konstanta gravitasi Newton

$$\begin{aligned} G &= 4.17 \times 10^{-15} \text{ GeV-cm/gm}^2 \\ &= 0.67 \times 10^{-38} \text{ GeV}^{-2} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Nilai ini memberikan refleksi bahwa gaya gravitasi adalah sangat lemah. Sekarang kita hitung gaya ini pada skala mikroskopik. Energi potensial gravitasi antara dua buah proton diberikan oleh

$$V = G \frac{m_{proton}^2}{r}, \quad (2.3)$$

dimana massa proton dan jarak antara keduanya adalah

$$m_{proton} \approx 1 GeV, \quad r = 10^{-13} cm \approx 5 GeV, \quad V \approx 10^{-39} GeV. \quad (2.4)$$

Sehingga energi potensialnya diperoleh

$$V \approx 10^{-39} GeV. \quad (2.5)$$

Nilai ini juga sangat kecil sehingga pada skala mikroskopik energi potensial gravitasional dapat diabaikan. Namun kuatnya interaksi gravitasional sangat signifikan pada massa Planck,  $M_{Planck}$ ,

$$\sqrt{G} = \frac{1}{M_{Planck}} \approx 0.8 \times 10^{-19} GeV^{-1} = 1.6 \times 10^{-33} cm \quad (2.6)$$

atau

$$\frac{1}{\sqrt{G}} = M_{Planck} \approx 10^{19} GeV \quad (2.7)$$

Nilai ini berhubungan dengan sebuah jarak yang berorde panjang Planck,  $10^{-33}$  cm. Sekarang kita asumsikan bahwa interaksi ini berorde sama dengan interaksi elektromagnetik (lihat pasal berikutnya) pada massa Planck  $M_{Planck}$  maka dapat diketahui bahwa interaksi gravitasional efektif pada 1 GeV adalah

$$\alpha_G \approx \left( \frac{1 GeV}{M_{Planck}} \right)^2 \alpha \approx 10^{-38} \alpha \approx 10^{-40} \quad (2.8)$$

Kembali mengindikasikan bahwa interaksi gravitasional dapat diabaikan dalam fisika partikel. Partikel perantara yang mengkomunikasikan gaya gravitasi dinamakan *graviton*.

### 2.2.2. Gaya Elektromagnetik: Elektron dan Foton

Sejauh ini, elektron adalah fundamental dan tidak dapat dibagi-bagi serta telah diketahui secara lengkap sifat-sifatnya yang meliputi massa dan muatan. Sebuah elektron akan bergerak menuju anoda bermuatan positif dari sebuah baterai. Selain itu elektron juga merespon gaya magnetik, yaitu ketika elektron bergerak melalui medan magnetik, lintasannya akan membelok. Kedua fenomena ini adalah akibat dari muatan negatif elektron, yang menyebabkan elektron merespon baik medan listrik dan magnetik. Hal ini dapat dipelajari dalam teori klasik elektromagnetik..



Gaya elektromagnetik bekerja antara dua buah partikel bermuatan listrik, misalnya sebuah elektron yang bermuatan negatif dan sebuah proton yang bermuatan positif tarik menarik satu dengan yang lain dengan besarnya gaya sebanding dengan muatan listrik dan kuadrat jarak keduanya. Energi potensial elektromagnetik diberikan oleh

$$V = \frac{e^2}{r}. \quad (2.9)$$

Untuk elektron dan proton yang terikat dalam atom hidrogen, gaya tarik-menarik ini menghasilkan energi ikat elektron di dalam atom hidrogen yang dirumuskan oleh Bohr,

$$|E| = \frac{1}{2} \alpha^2 (\mu c^2), \quad (2.10)$$

dimana  $\mu$  adalah massa tereduksi dari sistem. Untuk atom hidrogen  $\mu \approx m_e \approx 0.5 \text{ MeV} / c^2$  menghasilkan energi ikat elektron  $|E| \approx 14 \text{ eV}$ . Kuatnya interaksi elektromagnetik ditentukan oleh bilangan  $\alpha$ ,

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137}, \quad (2.11)$$

Kita sering memberikan istilah *aksi pada sebuah jarak* untuk menggambarkan gaya elektromagnetik seperti yang telah dipelajari dalam sekolah menengah. Namun kita belum memahami bagaimana sesuatu berada pada suatu tempat dapat mempengaruhi obyek lain yang terpisah. Bagaimana pengaruh tersebut dikomunikasikan?

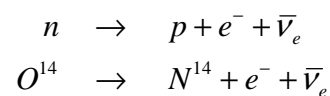
Sekarang ini gaya elektromagnetik digunakan untuk mempelajari fisika partikel. Teori fisika partikel dari elektromagnetik meliputi prediksi-prediksi persamaan Maxwell serta efek kuantumnya (teori elektromagnetik kuantum). Foton adalah sebuah kuantum dari gaya elektromagnetik dan sebagai mediator/perantara pertukaran partikel. Sebuah elektron masuk daerah interaksi mengemisikan sebuah foton dan foton kemudian merambat ke elektron yang lain, mengkomunikasikan gaya elektromagnetik, kemudian lenyap. Melalui pertukaran ini (foton bertransmisi), foton memediasi sebuah gaya dan menyampaikan informasi dari satu tempat ke tempat yang lain. Foton adalah contoh pertama kali yang diketahui sebagai *boson gauge*, partikel elementer yang akan merespon untuk mengkomunikasikan gaya tertentu. Karena tidak bermassa, jangkauan potensial elektromagnetiknya tidak berhingga, atau dapat dikatakan besar energi potensial berbanding terbalik dengan jarak, persamaan (2.9). Contoh lain *boson gauge* adalah boson lemah (*weak boson*) dan gluon, masing-masing mengkomunikasikan gaya lemah dan gaya kuat.

Keberadaan foton sebagai *boson gauge* mendorong P. Dirac, R. Feynman dan J. Schwinger serta S.I. Tomonaga<sup>3</sup> yang bekerja secara bebas telah mengembangkan teori mekanika quantum dari foton dan melahirkan sebuah teori elektrodinamika kuantum (QED = *Quantum Electrodynamics*). Teori ini meliputi semua prediksi dari teori elektromagnetik klasik serta kontribusi partikel (kuantum) terhadap proses fisika, yakni interaksi yang dihasilkan oleh pertukaran partikel-partikel kuantum. QED menjelaskan bagaimana pertukaran foton menghasilkan gaya elektromagnetik, sebagaimana akan dijelaskan dalam diagram Feynman pada pasal berikutnya dan Bab 6 secara rinci, dua elektron masuk daerah interaksi, terjadi pertukaran sebuah foton. Kemudian dua elektron muncul dengan lintasan resultannya (sebagai contoh, kecepatan dan arah gerak) dipengaruhi oleh gaya elektromagnetik yang dikomunikasikan.

Tidak semua proses QED meliputi foton yang kemudian lenyap (sebagai *partikel internal*) ada juga sebuah proses riil yaitu melibatkan foton *eksternal*, partikel yang masuk atau meninggalkan suatu daerah interaksi. Partikel-partikel seperti ini seringkali dibelokkan dan pula dapat berubah menjadi partikel lain. Partikel-partikel yang masuk atau meninggalkan suatu daerah interaksi merupakan partikel-partikel fisis riil.

### 2.2.3. Gaya Lemah dan Neutrino

Meskipun gaya ini tidak kita rasakan dalam kehidupan sehari-hari karena sangat lemah, gaya ini esensial untuk beberapa proses inti. Proses-proses inti (nuklir) mengubah struktur dari inti dan melalui proses tersebut jumlah neutron di dalam sebuah inti berubah dan melepaskan sejumlah energi. Dan energi ini menjadi daya nuklir. Gaya lemah menjelaskan bentuk peluruhan inti, misalnya peluruhan neutron menjadi proton, elektron dan neutrino,



Selama proses peluruhan di atas waktu hidup netutron adalah 71,4 s. Waktu hidup ini kemudian menentukan kuatnya gaya yang dinyatakan oleh konstanta Fermi,

$$G_F \approx 10^{-15} \text{ GeV}^{-2}, \quad \frac{1}{\sqrt{G_F}} \approx 300 \text{ GeV}, \quad \sqrt{G_F} \approx 0.7 \times 10^{-16} \text{ cm}, \quad (2.12)$$

Ini adalah skala energi untuk interaksi lemah yang ordenya sama dengan interaksi elektromagnetik, pada sebuah skala energi 1 GeV,

---

<sup>3</sup> Paul Dirac adalah fisikawan Inggris, Richard Feynman dan Julian Schwinger adalah fisikawan Amerika dan Sin-Itiro Tomonaga adalah fisikawan Jepang.

$$\alpha_{weak} = \left( \frac{1\text{GeV}}{300\text{GeV}} \right)^2 \alpha \approx 10^{-5} \alpha \approx 10^{-7}, \quad (2.13)$$

Dalam teori *elektroweak*<sup>4</sup>, sebuah teori yang menjelaskan gaya lemah dan juga gaya elektromagnetik, pertukaran partikel yang dinamakan boson gauge *lemah* (*weak gauge boson*) menghasilkan efek terhadap gaya lemah sedangkan pertukaran foton mengkomunikasikan elektromagnetik. Ada tiga boson gauge lemah:  $W^+$ ,  $W^-$  dan  $Z^0$  (kapital  $W$  menyatakan gaya lemah sedangkan tanda + dan - adalah muatan boson lemah. Boson gauge yang ketiga  $Z^0$  adalah netral dan dinamakan  $Z^0$  karena muatannya nol (*zero charge*).

Seperti juga dalam pertukaran foton, pertukaran boson gauge lemah menghasilkan gaya tarik-menarik atau tolak menolak, bergantung pada muatan lemah partikel. Muatan lemah adalah bilangan yang berperan untuk interaksi lemah sama seperti muatan listrik yang berperan untuk gaya elektromagnetik. Hanya partikel-partikel yang membawa muatan lemah mengalami gaya lemah dan muatan tersebut menentukan kekuatan dan jenis interaksi yang mereka alami.

Salah satu perbedaan antara gaya elektromagnetik dan gaya lemah adalah pada pelanggaran simetri paritas. Pelanggaran paritas (*parity violation*) berarti bahwa bayangan cermin dari partikel akan berperilaku berbeda satu dengan yang lain<sup>5</sup>. Bayangan cermin dari setiap proses fisika juga menyatakan proses fisika yang mungkin. Berbeda dengan gaya gravitasi dan elektromagnetik dan gaya interaksi lainnya, gaya lemah melanggar simetri paritas. Dalam eksperimen dengan inti Cobalt 60, C.S. Wu mengamati bahwa cobalt 60 mengalami peluruhan beta dan arah dari elektron yang diemisikan tidak dalam arah utara (Gambar 2.6a) tetapi dalam arah spin inti. Bayangan cermin untuk proses yang sama diperlihatkan pada Gambar 6b, dimana bayangan inti berotasi dalam arah berlawanan, arah spin ke bawah.

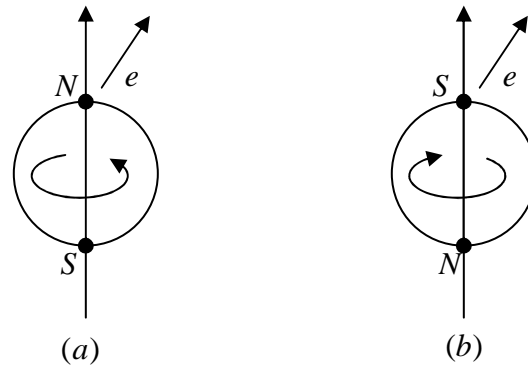
Kebanyakan partikel, seperti elektron dan proton dapat memiliki spin dalam dua arah: ke kiri atau ke kanan (seperti sebuah skrup yang berputar searah dan berlawanan arah jarum jam). Dua kemungkinan arah dari spin kemudian dinyatakan dengan istilah

---

<sup>4</sup> Pada tahun 1960, fisikawan Amerika Sheldon Glashow dan Steven Weinberg, dan Fisikawan Pakistan Abdus Salam ketiganya bekerja secara bebas mengembangkan teori *elektroweak* (*electroweak theory*).

<sup>5</sup> Simetri paritas dipelajari pada Bab 5. Fisikawan Cina-Amerika C.N. Yang dan T.D. Lee telah merumuskan teori pelanggaran paritas pada tahun 1950. Kemudian dikonfirmasi melalui eksperimen pada tahun 1957 oleh fisikawan Cina-Amerika C.S. Wu. Yang dan Lee menerima "Nobel Prize" dalam bidang fisika pada tahun tersebut sedangkan Wu tidak.

*kaeralitas (chirality)*<sup>6</sup>. Partikel dapat memiliki *skrup putar kiri (left handed)*, kaeralitas negatif dan *skrup putar kanan (right handed)*, kaeralitas positif. Sifat-sifat ini dimiliki oleh *spin intrinsik* partikel.

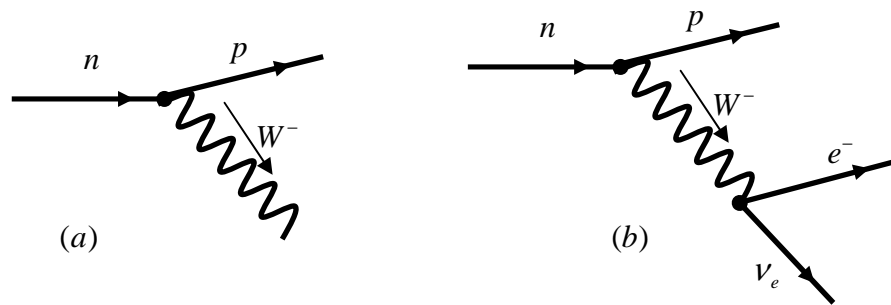


Gambar 2.6. (a) Peluruhan beta dari Co 60, elektron diemisikan dalam arah spin inti.  
(b) Elektron diemisikan berlawanan dengan arah spin inti dan bayangan cermin dari gambar (a).

Sebagaimana telah disebutkan di atas, gaya lemah melanggar simetri paritas yang berarti bahwa gaya ini bekerja secara tidak sama pada partikel skrup putar kiri (*left handed*) dan partikel skrup putar kanan (*right handed*). Dan hanya partikel skrup putar kiri yang mengalami gaya lemah. Sebagai contoh, elektron skrup putar kiri mengalami gaya lemah tetapi putaran (*spin*) arah kananya tidak. Bayangkan sebuah gaya yang bekerja pada tangan kiri tetapi tidak bekerja pada tangan kanan!

Selain pelanggaran simetri paritas, hal kedua yang sangat penting dari gaya lemah bahwa gaya ini dapat salah satu jenis partikel menjadi partikel lain. Sebagai contoh, ketika sebuah neutron berinteraksi dengan sebuah boson gauge lemah, sebuah proton dapat dihasilkan (Gambar 2.7a).

<sup>6</sup> Kata *chirality* berasal dari kata Yunani *cheir* yang berarti tangan. Disini ditulis *kaeralitas* adalah ucapan dalam bahasa Indonesia, yang dimaksud adalah *chirality*. Disini kita akan menggunakan istilah partikel skrup putar kiri untuk partikel *left handed* dan partikel skrup putar kanan untuk partikel *right handed*.



Gambar 2.7. (a) Neutron berinteraksi dengan sebuah boson gauge  $W^-$  mengubah neutron menjadi proton (dan down quark yang terdapat di dalam neutron menjadi up quark yang terdapat di dalam proton). (b) Peluruhan beta.

Karena neutron dan proton memiliki massa berbeda dan muatan berbeda, neutron haruslah meluruh menjadi sebuah proton ditambah partikel lain, sehingga jumlah muatan, energi dan momentum kekal. Dalam kasus peluruhan neutron akan dihasilkan sebuah proton, sebuah elektron dan sebuah partikel yang dinamakan *neutrino*. Proses ini dinamakan dengan (*beta decay*), Gambar 7b.

Ketika peluruhan beta diamati, belum diketahui tentang neutrino yang berinteraksi hanya melalui gaya lemah dan tidak melalui gaya elektromagnetik. Detektor partikel hanya dapat mendeteksi partikel bermuatan. Karena neutrino tidak memiliki muatan listrik dan tidak meluruh, neutrino tidak teramati oleh detektor dan belum diketahui keberadaannya. Namun tanpa neutrino, peluruhan beta tidak memenuhi kekekalan energi. Kekekalan energi adalah sebuah prinsip fundamental dalam fisika yang mengatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan, hanya dapat ditransfer dari satu tempat ke tempat lain. Sekarang ini riset tentang neutrino menjadi topik yang sangat serius dikerjakan, setelah Wolfgang Pauli dan Enrico Fermi membuktikan keberadaan neutrino. Neutrino dapat dihasilkan melalui proses inti di dalam matahari. Neutrino yang sekarang diketahui semuanya adalah skrup putar kiri (*left handed*), neutrino skrup putar kanan tidak ada atau sangat berat atau interaksinya sangat lemah dan tidak pernah dihasilkan dalam *collider partikel*.

#### 2.2.4. Gaya Kuat dan Quark

Sesuai dengan namanya, gaya kuat adalah gaya yang sangat kuat, bekerja pada proton dan neutron dalam sebuah inti. Karena kuatnya maka mereka tidak pernah dapat dipisahkan. Sebagai contoh energi ikat deuteron yang terikat dalam sebuah sistem proton sebesar 2

MeV. Jika dibandingkan dengan energi ikat elektromagnetik elektron dalam atom hidrogen, besarnya sekitar 100 ribu kali kuatnya. Gaya ini bekerja pada rentang skala  $10^{-13}$  cm.

Gaya kuat dipelajari melalui teori kromodinamika kuantum (QCD = *Quantum Chromodynamics*), yaitu teori yang dapat menjelaskan pertukaran boson gauge. Boson gauge kuat dinamakan dengan *gluon*, karena gluon mengkomunikasikan gaya untuk partikel-partikel berinteraksi secara kuat terikat bersama-sama, seperti lem "glue". Pada tahun 1950-an dan 1960-an telah ditemukan partikel-partikel yang dinamakan *pion*, *eta* dan *delta*. Partikel-partikel ini dinamakan *hadron*<sup>7</sup>. Dari namanya, hadron memiliki massa lebih besar dari elektron, hampir sebanding dengan massa proton yang mana 2000 kali besarnya dari massa elektron. Ketika itu hadron menjadi istilah yang sangat asing sebelum Murray Gell-Mann memperkenalkan bahwa hadron bukan partikel fundamental tetapi terkomposisi dari partikel-partikel yang dinamakan *quark*. Gell-Mann memperkenalkan tiga varitas quark<sup>8</sup>: *up*, *down*, dan *strange*. Hadron-hadron kemudian merupakan kombinasi dari quark yang terikat bersama-sama. Partikel quark selalu muncul terikat dengan quark lainnya. Jika proposal Gell-Mann benar maka hadron-hadron akan memiliki pola yang dapat diprediksikan.

Ada tiga tipe dari setiap varitas quark. Label untuk perbedaan ini dinyatakan dengan warna (*color*): merah (*red*), hijau (*green*) dan biru (*blue*). Dan quark yang berwarna tersebut selalu ditemukan dengan quark lain dan antiquark, terikat bersama-sama dalam *kombinasi warna-netral*. Ini adalah kombinasi dalam mana "muatan" gaya kuat dari quark-quark dan antiquark saling menghilangkan satu sama lain, analog dengan warna-warna yang menghasilkan warna putih dalam kombinasinya. Ada dua tipe dari kombinasi warna-netral. Konfigurasi hadronik stabil mengandung salah satu dari quark dan antiquark yang berpasangan atau tiga quark (bukan antiquark) yang terikat bersama-sama. Sebagai contoh, partikel yang terdiri dari pasangan quark dan anti quark dinamakan *pion* dan tiga quark terikat bersama-sama dalam proton dan neutron.

Sepanjang quark berada dalam hadron, "muatan" gaya kuat saling menghilangkan, seperti banyaknya muatan dari proton bermuatan positif dan elektron bermuatan negatif di dalam atom. Proton dan neutron terdiri dari kombinasi tiga quark yang mana muatan yang terkait dengan gaya kuat saling menghilangkan. Proton terdiri dari dua up quark dan satu down quark. Karena *up quark* memiliki muatan listrik  $+2/3$  dan *down quark* memiliki

---

<sup>7</sup> Hadron berasal dari kata Yunani yaitu *hadros* yang berarti berat, padat, hebat.

<sup>8</sup> Sekarang ini diketahui ada 6 quark.

muatan  $-1/3$  maka proton memiliki muatan listrik:  $2(2/3) + (-1/3) = +1$ . Sebuah neutron terdiri dari satu *up quark* dan dua *down quark* maka neutron memiliki muatan listrik  $(2/3) + 2(-1/3) = 0$ . Dalam eksperimen hamburan tak elastik dari Friedman-Kendall-Taylor yang dilakukan di SLAC (*Stanford Linear Accelerator Center*) telah didemonstrasikan keberadaan dari quark melalui perilaku elektron ketika mereka terhambur dari proton.

Ketika quark dihasilkan dalam tumbukan energi-tinggi, mereka belum terikat menjadi hadron, namun tidak berarti mereka terisolasi. Mereka akan selalu berombongan dengan quark-quark lain dan gluon akan menemani rombongan tersebut yang membuat kombinasi netral terhadap gaya kuat. Quark tidak pernah ditemukan bebas selalu berlingung dengan partikel-partikel yang berinteraksi kuat.

Secara kolektif, kumpulan dari partikel-partikel yang terkomposisi dari quark dan gluon yang bergerak dalam satu kesatuan dalam sebuah arah tertentu dinamakan *jet*. Ketika sebuah jet energetik terbentuk, serupa dengan seutas tali, jet energetik tidak akan pernah ditemukan. Ketika kita memotong sebuah tali maka akan menghasilkan dua potongan tali baru. Hal yang sama, ketika interaksi membagi jet, potongannya akan membentuk jet baru.: mereka tidak pernah terpisah menjadi bagian masing-masing, quark dan gluon terisolasi.

### 2.3. Partikel-partikel Fundamental

Pada pasal sebelumnya kita telah mempelajari empat buah gaya: gaya elektromagnetik, gaya lemah, gaya kuat dan gaya gravitasi. Meskipun gaya gravitasi cukup lemah untuk mempengaruhi prediksi fisika partikel dalam eksperimen. Sekarang ini kita akan mempelajari partikel-partikel dalam Model Standar. Model Standar (*Standar Model*) dari partikel adalah sebuah model untuk memahami fisika dari partikel elementer. Kecuali boson gauge, semua partikel-partikel Model Standar telah diamati. Dalam Model Standar ada dua jenis partikel fundamental yaitu *quark* dan *lepton*. Dari tinjauan mekanika kuantum, kedua jenis partikel tersebut adalah *fermion*.

Partikel-partikel ini telah diidentifikasi melalui muatannya dan juga kaeralitasnya (atau *handedness*). Seperti disebutkan sebelumnya, partikel-partikel skrup putar kiri dan kanan dapat memiliki muatan lemah yang berbeda. Quark adalah partikel fermionik fundamental yang mengalami gaya kuat. Sedangkan lepton adalah partikel fermionik fundamental yang tidak mengalami gaya kuat. Kata lepton berasal dari kata Yunani "leptos" yang artinya kecil. *Up quark*, *down quark* dan elektron berada di dalam inti dari materi sebagai

penyusun utama dari atom. Namun masih ada tambahan partikel lain yang sekarang diketahui yaitu quark yang lebih berat (*heavier quark*) dan partikel serupa elektron yang lebih berat. Sebagai contoh, partikel yang disebut *muon* ( $\mu^-$ ) memiliki muatan sama seperti elektron tetapi massanya 200 kali lebih besar dari massa elektron. Sebuah partikel yang disebut *tau* ( $\tau^-$ ) yang juga memiliki muatan sama, massanya 10 kali lebih besar dari massa elektron.

Ada tiga salinan dari himpunan partikel secara keseluruhan dengan muatan Model Standar yang sama. Masing-masing salinan tersebut dinamakan *generasi*, lihat tabel 2.2. Pada tabel 2.3 tertera tiga generasi partikel Model Standar. Quark dan lepton skrup putar kiri dan kanan diberikan secara terpisah. Masing-masing kolom mengandung partikel-partikel dengan muatan sama.

Tabel 2.2. Generasi Partikel			
Generasi Pertama	Generasi Kedua	Generasi Ketiga	Muatan listrik
electron: $e^-$	muon: $\mu^-$	tau lepton: $\tau^-$	- 1
electron-neutrino: $\nu_e$	muon-neutrino: $\nu_\mu$	tau-neutrino: $\nu_\tau$	0
up quark: $u$	charm quark: $c$	top quark: $t$	2/3
down quark: $d$	strange quark: $s$	bottom quark: $b$	- 1/3

Generasi partikel pertama mengandung elektron skrup putar kiri dan kanan, up quark skrup putar kiri dan kanan, down quark skrup putar kiri dan kanan dan neutrino skrup putar kiri dan partikel-partikelnya adalah stabil dalam mengkomposisikan atom: Sebagai contoh proton (tersusun dari  $uud$ ), neutron ( $udd$ ) dan pion  $\pi^+ (u\bar{d})$ . Generasi kedua dan ketiga terdiri dari partikel-partikel yang meluruh dan tidak ada dalam materi biasa. Mereka tidak benar-benar salinan dari generasi pertama, partikel-partikel tersebut memiliki muatan identik dengan generasi pertama tetapi lebih berat. Partikel-partikel ini ditemukan ketika mereka dihasilkan pada *collider* energi-tinggi. Generasi kedua terdiri dari muon skrup putar kiri dan kanan, charm quark skrup putar kiri dan kanan dan strange quark skrup putar kiri dan kanan, mereka sama stabilnya dengan muon-neutrino skrup putar kiri. Generasi ketiga terdiri dari tau skrup putar kiri dan kanan, top quark skrup putar kiri dan kanan, bottom quark skrup putar kiri dan kanan dan tau-neutrino skrup putar kiri. Salinan identik dari partikel-partikel tertentu dengan menandai muatan sama, dimana setiap anggota



generasinya berbeda dinamakan *flavor* dari jenis partikel. Atau label yang membedakan jenis quark atau lepton yang berbeda. Jadi ada tiga flavor tipe lepton dan tiga falvor tipe quark.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Hingga saat ini para fisikawan masih mencoba untuk memahami alasan mengapa ada tiga generasi dan mengapa partikel-partikel memiliki massa tertentu. Ini adalah sebuah problem besar yang harus dijawab oleh teori Model Standar.

Gen	Quark: mengalami gaya kuat				Lepton		
1	$u_L$ 3 MeV	$d_L$ 7 MeV	$u_R$ 3 MeV	$d_R$ 7 MeV	$\nu_{eL}$ □ 0	$e_L$ 0.5 MeV	$e_R$ 0.5 MeV
2	$c_L$ 1.2 GeV	$s_L$ 120 MeV	$c_R$ 1.2 GeV	$s_R$ 120 MeV	$\nu_{\mu L}$ □ 0	$\mu_L$ 106 MeV	$\mu_R$ 106 MeV
3	$t_L$ 174 GeV	$b_L$ 4.3 GeV	$t_R$ 174 GeV	$b_R$ 4.3 GeV	$\nu_{\tau L}$ □ 0	$\tau_L$ 1.8 GeV	$\tau_R$ 1.8 GeV
	Quark left-handed: mengalami gaya lemah				Lepton left-handed: mengalami gaya lemah		

Selain itu partikel-partikel juga dikelompokan melalui interaksi yang diamati:

- 1) Partikel-partikel dengan interaksi kuat yang disebut hadron, yang dibagi menjadi baryon (contoh: proton ( $p$ ), neutron ( $n$ ), lambda ( $\Lambda$ ), sigma ( $\Sigma$ ), omega ( $\Omega$ ) dan lain-lainnya) dan meson (contoh: pion ( $\pi$ ), kaon ( $K$ ), eta meson ( $\eta$ ) dan lain-lainnya)
- 2) Partikel-partikel dengan interaksi tidak kuat, dialami oleh lepton (contoh: elektron ( $e^-$ ), neutrino elektron ( $\nu_e$ ), muon ( $\mu^-$ ), tau ( $\tau^-$ ) dan lain-lainnya).
- 3) Partikel-partikel dengan perantara elektromagnetik dan interaksi lemah (*weak interaction*), dialami oleh boson gauge (boson) yaitu foton ( $\gamma$ ), W-boson ( $W$ ), Z-boson ( $Z$ ).

## 2.4. Fermion dan Boson

Mekanika kuantum membagi dunia partikel menjadi *boson* dan *fermion*. Partikel-partikel tersebut dapat berupa partikel-partikel fundamental seperti elektron dan quark, atau gabungan elemen-elemen seperti sebuah proton atau inti atom. Setiap obyek jika tidak boson maka fermion. Sebuah obyek adalah boson atau fermion bergantung pada sebuah sifat yang dinamakan *spin intrinsik*.<sup>9</sup> Spin dari partikel tidak berhubungan dengan gerak aktual dalam ruang. Namun jika sebuah partikel memiliki spin intrinsik, interaksinya sama seperti jika partikel tersebut berotasi meskipun dalam realitanya tidak.

Sebagai contoh, interaksi antara sebuah elektron dan medan magnet bergantung pada rotasi klasik elektron, yaitu rotasi aktualnya di dalam ruang. Tetapi, interaksi elektron dengan medan magnet juga bergantung pada spin intrinsik elektron. Tidak serupa dengan spin klasik sebagai akibat dari gerak aktual dalam ruang fisis, yaitu momentum angular orbital, spin intrinsik adalah sebuah sifat dari sebuah partikel. Spin intrinsik memiliki nilai tertentu dan berlaku seterusnya untuk sebuah partikel. Misalnya foton adalah sebuah boson dan memiliki spin-1, yaitu sebuah sifat fundamental dari foton selain foton bergerak dengan laju cahaya.

Dalam mekanika kuantum, spin terkuantisasi. Spin kuantum dapat bernilai 0, 1, 2 atau setiap bilangan bulat satuan dari spin. Disini partikel yang memiliki spin akan dituliskan dengan spin-0, spin-1, spin-2 dan seterusnya. Obyek dikatakan boson jika spin intrinsiknya memiliki nilai bulat (0, 1, 2 dan seterusnya). Sedangkan obyek dikatakan fermion jika spin intrinsiknya memiliki nilai setengah bulat (1/2, 2/3 dan seterusnya). Sebuah obyek spin-1 akan kembali ke konfigurasi awalnya atau keadaan awalnya setelah obyek tersebut dirotasikan sekali waktu, sedangkan obyek spin-1/2 setelah dirotasikan dua kalinya. Dengan kata lain, satu kali putaran untuk obyek spin-1 sama halnya dengan dua kali putaran untuk obyek spin-1/2 dalam waktu yang sama.

Berikut ini kita tinjau sifat-sifat fungsi gelombang dari kedua obyek tersebut. Fungsi Gelombang dari suatu partikel banyak, untuk partikel yang tidak saling berinteraksi, dapat dituliskan sebagai perkalian dari satu fungsi gelombang partikel

$$\Psi(1,2,3,\dots) = c\Psi_A(1)\Psi_B(2)\Psi_C(3)\dots, \quad (2.14)$$

---

<sup>9</sup> Spin intrinsik adalah sebuah bilangan yang mencirikan bagaimana sebuah partikel berperilaku, seperti halnya partikel berotasi dalam ruang. Tetapi tidak bergantung dari rotasi aktual tersebut.

dimana A,B,C menggambarkan bilangan kuantum dari suatu keadaan dan 1,2,3,... adalah koordinat dari partikel ke-1, partikel ke-2 dan seterusnya dan  $c$  konstanta normalisasi. Tinjau tiga buah partikel identik dan tak terbedakan, maka pertukaran partikel tidak akan teramati atau dapat dituliskan

$$|\Psi(2,1,3)|^2 = |\Psi(1,2,3)|^2 . \quad (2.15)$$

Persamaan di atas mempunyai dua kemungkinan solusi yaitu

$$\Psi(2,1,3) = +\Psi(1,2,3) , \quad (2.16)$$

$$\Psi(2,1,3) = -\Psi(1,2,3) . \quad (2.17)$$

Dua kasus ini memiliki arti fisis yang penting. Misalnya jika dua partikel yang identik dan tidak terbedakan berada pada keadaan kuantum yang sama

$$\Psi(1,2) = c\Psi_A(1)\Psi_A(2) , \quad (2.18)$$

maka

$$\text{Kasus 1: } c_1\Psi_A(1)\Psi_A(2) = +c_1\Psi_A(1)\Psi_A(2) , \text{ berlaku untuk setiap nilai } c_1 \quad (2.19a)$$

$$\text{Kasus 2: } c_2\Psi_A(1)\Psi_A(2) = -c_2\Psi_A(1)\Psi_A(2) , \text{ hanya berlaku jika } c_2 = 0 . \quad (2.19b)$$

Partikel yang memenuhi dua kasus di atas akan memiliki sifat yang berbeda. Bosons adalah partikel yang memenuhi kasus (1) dan memiliki fungsi gelombang simetri terhadap pertukaran antara partikel identik. Boson tidak memenuhi prinsip larangan Pauli (artinya boson dapat ditemukan pada tempat yang sama) dan memenuhi fungsi distribusi Bose-Einstein. Fungsi gelombang simetrik boson dituliskan sebagai berikut:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} [\Psi_A(1)\Psi_B(2) + \Psi_A(2)\Psi_B(1)] . \quad (2.20)$$

Fermion adalah partikel yang memenuhi kasus (2) dan memiliki fungsi gelombang anti simetri terhadap pertukaran antara partikel identik. Fermion memenuhi fungsi distribusi Fermi-Dirac dan memenuhi prinsip larangan Pauli (artinya keadaan dua fermion yang identik tidak pernah ditemukan pada tempat yang sama). Contohnya, proton, neutron, elektron dan lainnya. Fungsi gelombang anti simetrik fermion dituliskan sebagai berikut:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} [\Psi_A(1)\Psi_B(2) - \Psi_A(2)\Psi_B(1)] . \quad (2.21)$$

Dari sudut pandang mekanika kuantum baryon adalah fermion dan meson adalah boson.

## 2.5. Partikel dan Antipartikel

Menurut teori medan kuantum bahwa setiap partikel memiliki pasangan yang dinamakan antipartikel. Seperti halnya partikel namun muatannya berlawanan. Ketika sebuah partikel bertemu dengan sebuah antipartikel, mereka beranihilasi satu sama lain. Seperti yang akan dipelajari pada bab 4, antipartikel adalah sebuah konsekuensi dari relativitas khusus dan mekanika kuantum yang digambarkan melalui persamaan Dirac. Sehingga dengan melibatkan anti partikel, teori medan kuantum relativistik adalah konsisten dengan mekanika kuantum dan teori relativitas khusus.

Jika setiap jenis partikel bermuatan ada di alam, seperti elektron, maka akan ada juga antipartikelnya dengan muatan berlawanan. Sebagai contoh elektron bermuatan  $-1$ , maka antielektron yang dinamakan *positron* bermuatan  $+1$ <sup>10</sup>. Antipartikel dari proton ( $p$ ), neutron ( $n$ ), elektron ( $e$ ) dan neutrino ( $\nu$ ) berturut-turut adalah antiproton ( $\bar{p}$ ), antineutron ( $\bar{n}$ ), positron ( $e^+$ ) dan antineutrino ( $\bar{\nu}$ ).

Muatan dari sebuah partikel dan antipartikelnya selalu sama dengan nol jika dijumlahkan artinya ketika sebuah partikel bertemu dengan antipartikelnya mereka dapat beranihilasi satu dengan yang lain dan musnah. Dan karena tidak membawa muatan, persamaan Einstein  $E = mc^2$  mengatakan bahwa semua massa berubah menjadi energi. Pemusnahan partikel dan penciptaan partikel terjadi di dalam accelerator partikel energi tinggi. Karena materi dan atom khususnya terkomposisi dari partikel dan bukan anti partikel, antipartikel seperti positron pada umumnya tidak terdapat di alam. Mereka dapat dihasilkan sesaat pada *collider* partikel.

## 2.6. Bilangan Kuantum Partikel Elementer

Quarks dan lepton memiliki bilangan kuantum, yang menunjukkan ciri khas partikel itu nantinya dalam berinteraksi. Beberapa bilangan kuantum tergantung pada masing-masing tipe partikel seperti *bilangan baryon* ( $B$ ) yang nilainya selalu  $1/3$  untuk semua quarks dan  $0$  untuk semua lepton dan *bilangan lepton* ( $L$ ) yang nilainya selalu  $1$  untuk semua lepton dan

---

<sup>10</sup> Proton juga bermuatan  $+1$ , tetapi massa proton 2000 kali lebih berat dari elektron karena itu proton bukan antipartikelnya.

0 untuk semua quarks. Beberapa bilangan kuantum menentukan seberapa kuat partikel itu akan terganggu (couple) dengan Gauge boson.

Bilangan kuantum untuk gaya elektromagnetik adalah muatan listrik. Sebagai contoh, lepton bermuatan dengan muatan  $\pm e$  akan terganggu lebih kuat dengan gaya elektromagnetik daripada quarks dengan muatan  $+1/3 e$  atau  $2/3 e$ . Neutrino tidak memiliki bilangan kuantum elektromagnetik karena bermuatan netral.

Bilangan kuantum untuk gaya lemah disebut *Isospin lemah* ( $I_z$ ). Bilangan kuantum isospin berawal dari adanya keluarga partikel yang anggota-anggotanya memiliki massa sama dan interaksi sama tapi muatannya berlainan. Keluarga partikel seperti ini disebut multiplet partikel. Contohnya keluarga pion memiliki 3 anggota partikel yaitu  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  dan  $\pi^0$ . Oleh karena itu perlu diperkenalkan bilangan keadaan muatan yang ditunjukkan dengan bilangan  $I$  atau lebih dikenal dengan momentum sudut spin isotopik yang arah tertentu dinyatakan oleh bilangan kuantum isospin  $I_z$ . Bilangan kuantum  $I$  ini menunjukkan multiplisitas keadaan sebanyak  $2I + 1$  dan  $I_z$ , berharga  $I, I-1, 0, \dots, -(I-1), -I$ . Sebagai contoh bilangan  $I$  dari pion adalah  $I = 1$  sehingga banyaknya keadaan yang dimiliki pion adalah  $2 \cdot 1 + 1 = 3$  dan harga  $I_z$  dari pion adalah  $1, 0$  dan  $-1$  yaitu  $\pi^+$ ,  $\pi^0$  dan  $\pi^-$ .

Bilangan kuantum untuk gaya kuat adalah *warna* (*color*). Tiap quark dapat memiliki salah satu dari tiga warna; merah, hijau dan biru. Lepton tidak memiliki bilangan kuantum warna. Partikel tertentu, seperti kaon dan hiperon dihasilkan bersamaan dengan partikel lain sehingga dimunculkan bilangan kuantum tambahan yaitu *keanehan* (*Strangeness, S*). Hanya quark aneh/strange (*s*) yang memiliki bilangan kuantum strangeness  $S = -1$ , quark yang lain memiliki  $S = 0$ . Bilangan kuantum strangeness untuk  $K^+$  dan  $K^0$  adalah  $S = +1$  sedangkan kaon  $K^-$  dan  $K^0$  dan hiperon  $\Lambda, \Sigma^+, \Sigma^-$  dan  $\Sigma^0$  memiliki strangeness  $S = -1$  dan hiperon  $\Xi$  dan  $\Xi^0$  memiliki strangeness  $S = -2$  dan  $\Omega$  memiliki strangeness  $S = -3$ . Baik baryon maupun meson dapat memiliki strangeness  $S$  yang tidak nol. Partikel  $p, n,$  dan  $\pi$  memiliki  $S = 0$ . Bilangan kuantum tertentu dari hadron adalah jumlah bilangan kuantum dari quark-quark penyusunnya Hubungan antara bilangan kuantum partikel hadron adalah

$$Q = e \left( I_3 + \frac{B}{2} + \frac{S}{2} \right). \quad (2.22)$$

Selain itu quark charm (*c*) memiliki bilangan kuantum *charm*  $C = +1$ , sedangkan quark yang lain  $C = 0$ . Bilangan kuantum Hipermuatan (*hypercharge*) ( $Y$ ) juga didefinisikan

untuk mengkarakterisasi keluarga partikel. Hipermuatan sama dengan jumlah bilangan *strangeness* (S) dan Baryon (B) dari partikel itu

$$Y = S + B \quad (2.23)$$

Bilangan kuantum fermion dan hadron dapat dilihat dalam Tabel 4 dan 5.

Quark dan lepton memiliki beberapa bilangan kuantum yang selalu kekal. Bilangan kuantum yang kekal di semua interaksi adalah *bilangan baryon* dan *lepton* (B-L), *warna* dan *muatan listrik*. Isospin lemah kekal hanya untuk reaksi kuat saja. Bilangan kuantum Strangeness kekal untuk reaksi kuat dan electromagnet tetapi tidak untuk interaksi lemah. Hukum-hukum kekekalan sangat penting nantinya dalam menggambar diagram Feynman dan menghitung penampang lintang.. Spin semua partikel quark dan lepton adalah  $\frac{1}{2}$ .. Semua quarks dan lepton (fermions) memiliki anti partikel. Anti partikel ini memiliki muatan listrik yang berlawanan dengan partikel. Semua bilangan kuantum anti partikel besarnya sama tetapi tandanya berlawanan. Jika partikel memiliki bilangan baryon  $B=1/3$  dan bilangan lepton  $L=1$  maka anti partikel memiliki  $B=-1/3$  dan  $L=-1$ . Massa anti partikel sama dengan massa partikel

Tabel 2.4. Bilangan Kuantum Fermion

Generasi	Quark	Simbol	Spin	Q <sub>e</sub>	B	L	S	C
1	up	u	1/2	+2/3	1/3	0	0	0
	down	d	1/2	-1/3	1/3	0	0	0
2	charm	c	1/2	+2/3	1/3	0	0	+1
	strange	s	1/2	-1/3	1/3	0	-1	0
3	top	t	1/2	+2/3	1/3	0	0	0
	bottom	b	1/2	-1/3	1/3	0	0	0
Generasi	Lepton	Simbol	Spin	Q <sub>e</sub>	B	L <sub>e</sub>	L <sub>μ</sub>	L <sub>τ</sub>
1	elektron	E	1/2	-1	0	1	0	0
	e-neutrino	$\nu_e$	1/2	0	0	1	0	0
2	Muon	$\mu$	1/2	-1	0	0	1	0
	$\mu$ -neutrino	$\nu_\mu$	1/2	0	0	0	1	0
3	Tau	$\tau$	1/2	-1	0	0	0	1
	$\tau$ -neutrino	$\nu_\tau$	1/2	0	0	0	0	1

Tabel 2.5. Bilangan Kuantum Hadron

Kelas	Nama	Simbol	B	$L_c$	$L_u$	$L_\tau$	S	I	$I_z$
Meson	Pion	$\pi^+$	0	0	0	0	0	1	+1
		$\pi^0$							0
$\pi^-$		-1							
Kaon	$K^+$	0	0	0	0	1	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	
	$K^0$							$-\frac{1}{2}$	
Baryon	Proton	p	+1	0	0	0	0	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$
	Neutron	n							$-\frac{1}{2}$
	$\Lambda$ -Hiperon	$\Lambda^0$	+1	0	0	0	-1	0	0
	$\Sigma$ -Hiperon	$\Sigma^+$	+1	0	0	0	-1	1	+1
		$\Sigma^0$							0
		$\Sigma^-$							-1
$\Xi$ - Hiperon	$\Xi^0$	+1	0	0	0	-2	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	
	$\Xi^-$							$-\frac{1}{2}$	
$\Omega$ - Hiperon	$\Omega^-$	+1	0	0	0	-3	0	0	

**Gaya kuat/warna** dibawa oleh boson gluon warna. Boson ini tidak bermuatan lemah dan juga tidak bermuatan listrik tetapi bermuatan warna. Terdapat 8 macam gluon, semuanya tidak bermassa sehingga menyebabkan jangkauannya tidak terhingga. Gaya warna berbeda dengan gaya lainnya, kekuatan gaya kuat semakin bertambah seiring dengan jarak. Quarks sangat dipengaruhi oleh gaya ini. Kalau gaya semakin kuat seiring dengan jarak maka kita akan ditarik sangat kuat oleh quarks di galaksi lain! Tetapi untungnya ini tidak terjadi karena ada pengurungan (*confinement*) dan derajat kebebasan asimtotik (*asymtotic freedom*) yang memastikan bahwa gluon dan quarks terikat kuat kira-kira 1 fm tetapi quark juga dapat berperilaku sebagai partikel bebas pada jarak yang sangat kecil (skala energi tinggi). Gaya kuat muncul dalam jangkauan 1 fm –2 fm dan mengikat quark-quark menjadi pion.

Kontanta kopling dari gaya, yang dinyatakan dalam symbol  $g_F$  bergantung pada energi (atau jarak). Sifat-sifat boson tertera dalam tabel 2.6.

Tabel 2.6. Karakteristik Boson

Force	EM	strong	weak
Gauge Boson	$\gamma$	$8g_s, \pi$	$W^+, W^-, Z^0$
Mass	0	0, 100 MeV	100 GeV
Quantum Number	electric charge	colour	weak isospin
Range	$\infty$	$\infty, 1\text{fm}$	$10^{-18}\text{m}$
Strength	$\alpha_{EM}=0.008$	$\alpha_s \approx 1.2$	$\alpha_w=0.03$
Type	Abelian	Non-Abelian	Non-Abelian
High energy dependence	stronger	weaker	weaker

## 2.7. Hamburan, Waktu Hidup dan Diagram Feynman

### 2.7.1. Hamburan dan Waktu Hidup

Sebagaimana telah disebutkan di atas, hadron adalah partikel elementer yang terdiri dari kumpulan quarks, tidak seperti lepton, hadron mengalami interaksi kuat dan interaksi lemah. Hadron dapat merupakan: *Meson* yang merupakan partikel spin 0 dan tidak berwarna yang massa-diamnya terletak antara muon dan proton. Meson terdiri dari pasangan quark dan anti quark. Contohnya: *Pion* yaitu meson bermuatan positif  $\pi^+$  ( $u\bar{d}$ ), negatif  $\pi^-$  ( $d\bar{u}$ ) dan netral  $\pi^0$  ( $u\bar{u}$ ). Hideki Yukawa menyatakan bahwa pion inilah yang bertanggungjawab akan adanya gaya nuklir/inti. Menurut Yukawa setiap nukleon terus menerus memancarkan dan menyerap pion. Gaya nuklir/inti (salah satu contoh dari gaya kuat) akan saling tolak pada jangkauan sangat pendek dan saling tarik pada jarak nukleon yang agak jauh karena ada pertukaran partikel pion antara nukleon-nukleon tersebut. Pion bebas sulit ditemukan karena energi yang besar diperlukan untuk mendapatkan pion bebas dan juga pion tidak mantap karena berumur pendek. Umur rata-rata pion bermuatan ialah  $2.6 \cdot 10^{-8}$  s dan pion netral  $8,4 \cdot 10^{-17}$  s. Meson yang lebih berat dari pion adalah *Kaon* yang bermuatan  $K^\pm$  yang mempunyai massa 494 MeV dan Kaon yang netral  $K^0$  dengan massa 498 MeV. Kaon juga termasuk partikel yang tak mantap karena umur rata-rata Kaon adalah  $1.2 \cdot 10^{-8}$  s. Contoh lain dari meson adalah  $D^-(d\bar{c})$ ,  $D^+(c\bar{s})$ ,  $B^-(b\bar{u})$  dan  $Y(b\bar{b})$ .

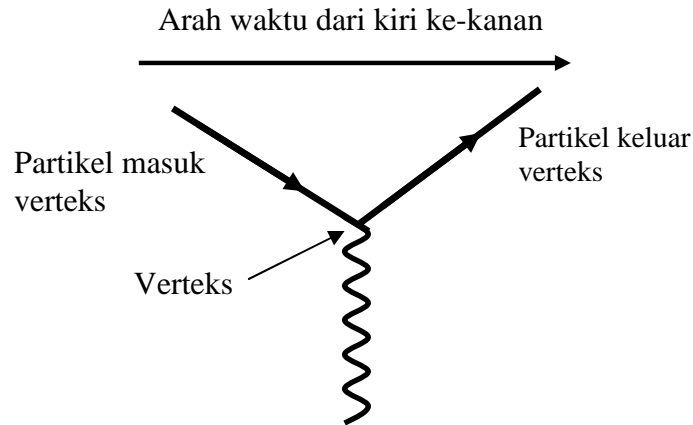
*Baryon* yaitu partikel spin 1/2 atau 3/2 dan tidak berwarna yang massanya sama atau lebih besar dari proton. Baryon adalah kumpulan dari tiga quark atau tiga anti quark. Contoh baryon yang kita kenal adalah proton ( $uud$ ) dan neutron ( $udd$ ). Proton adalah satu-satunya hadron yang mantap. Umur rata-rata proton sekitar  $10^{30}$  tahun. Neutron, walaupun dalam inti mantap tetapi dalam ruang hampa akan meluruh dengan umur rata-rata sekitar 15 menit. Baryon yang lebih berat adalah **hiperon** dan semuanya tak stabil dengan umur rata-rata kurang dari  $10^{-9}$  s. Empat kelas hiperon yang berumur paling panjang dalam urutan bertambah besarnya massa ialah  $\Lambda$  (lamda),  $\Sigma$  (sigma),  $\Xi$  (Ksi) dan  $\Omega$  (omega). Hiperon dapat meluruh menurut berbagai cara tetapi hasil akhirnya selalu proton dan neutron.

### 2.7.2. Diagram Feynman

Untuk sistem-sistem interaksi yang telah dijelaskan di atas, berlaku seperangkat kaidah yang berhubungan dengan rumusan Lagrange dari sistem. Tiap-tiap tiga interaksi dasar, interaksi elektromagnetik, lemah dan kuat, dapat digambarkan menggunakan simbol yang disebut diagram Feynman (atas nama fisikawan fisika partikel Feynman). Tiap diagram

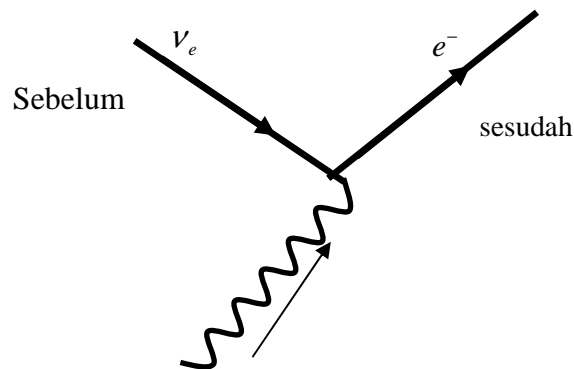


Feynman menyatakan komponen dari matematika yang cukup rumit yang digunakan untuk menghitung macam-macam aspek dari interaksi partikel, seperti penampang hamburan dan waktu hidup. Tetapi kita dapat menggunakan diagram tanpa matematika untuk mengilustrasikan bagaimana quark dan lepton berinteraksi satu sama lain. Ada tiga diagram dasar, tiap diagram berhubungan dengan tiga interaksi dasar yaitu diagram interaksi kuat, lemah dan elektromagnet. Struktur paling dasar diperlihatkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Simbul interaksi.

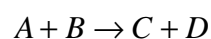
Dalam diagram dasar diatas, simbol interaksi digambarkan vertikal. Kadang-kadang simbol interaksi digambarkan agak miring untuk menandakan apakah interaksinya masuk atau keluar dari titik interaksi (verteks) atau daerah interaksi. Sebagai contoh,



Gambar 2.9. Contoh diagram Feynman

Poin-poin penting tentang diagram Feynman adalah:

1. Diagram Feynman hanyalah simbol, bukan menyatakan lintasan partikel dalam ruang dan bukan diagram ruang-waktu.
2. Simbol dibaca dari arah kiri ke kanan sesuai dengan arah waktu. Sebelah kiri diagram menunjukkan sebelum interaksi dan sebelah kanan diagram menunjukkan setelah interaksi (ada juga waktu mengarah dari bawah ke atas, maka sebelah bawah menunjukkan sebelum interaksi dan sebelah atas diagram menunjukkan setelah interaksi. Jadi perhatikan tanda arah waktu sebelum menganalisis diagram Feynman.
3. Untuk menyatakan partikel yang berinteraksi **sebelum interaksi**, kita gunakan arah tanda panah menuju titik interaksi untuk partikel dan arah tanda panah menjauhi titik interaksi untuk menyatakan anti partikel. Sedangkan untuk menyatakan partikel yang berinteraksi **setelah interaksi**, kita gunakan arah tanda panah menuju titik interaksi untuk partikel dan arah tanda panah menjauhi titik interaksi untuk menyatakan anti partikel. Atau jika partikel yang berinteraksi maka arah panahnya akan sama dengan arah waktu, tetapi jika anti partikel yang berinteraksi maka arah panahnya akan berlawanan dengan arah waktu.
4. Kaki-kaki dari diagram Feynman dapat dirotasikan terhadap titik diagram untuk menghasilkan interaksi yang mungkin dengan ketentuan: Jika suatu partikel yang tadinya berada di sebelah kiri (sebelum reaksi) dirotasikan sehingga partikel berada di sebelah kanan (sesudah reaksi maka partikel tersebut harus menjadi anti partikelnya (dengan segala konsekuensi tanda panah/symbol). Begitu juga sebaliknya. Ini dihubungkan dengan prinsip umum dalam fisika partikel yang dikenal dengan *crossing symmetry*. Tinjau reaksi berikut



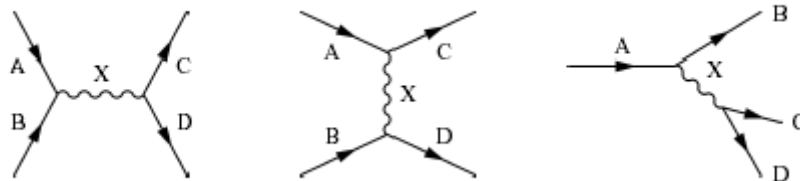
Jika reaksi diatas terjadi, maka partikel dapat “disebrangkan” ke persamaan sebelahny, tetapi partikel tersebut harus menjadi antipartikel dan interaksi ini dapat terjadi. Sebagai contoh

$$A \rightarrow \bar{B} + C + D$$

$$A + \bar{C} \rightarrow \bar{B} + D$$

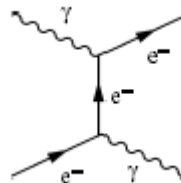
$$C + D \rightarrow \bar{A} + \bar{B}$$

Diagram Feynman untuk proses  $A + B \rightarrow C + D$  dan  $A \rightarrow B + C + D$  dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.10.

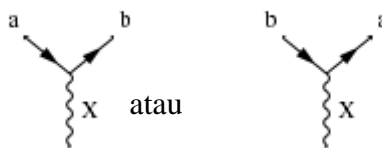
dimana A, B, C dan D adalah fermion yaitu quarks, lepton, antiquarks atau anti lepton dan X adalah boson yaitu foton ( $\gamma$ ), gluon,  $W^\pm$  atau  $Z^0$ . Karena foton dapat juga menjadi partikel bebas sehingga memungkinkan ada foton yang masuk dan keluar (tetapi tidak berlaku untuk boson yang lain yaitu gluon,  $W^\pm$  atau  $Z^0$ ) seperti yang digambarkan berikut:



Gambar 2.11.

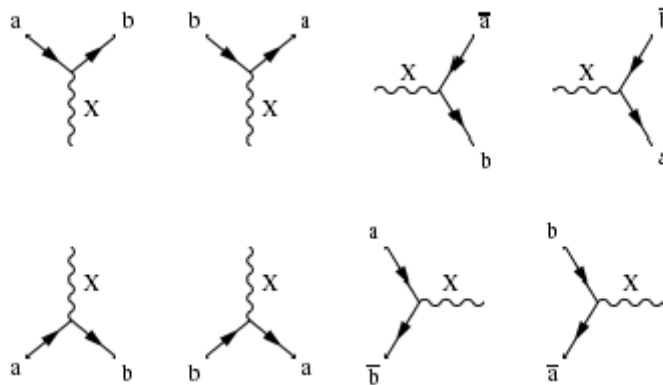
Diagram Feynman dapat dibentuk dari sejumlah vertek. Pada tiap vertek, muatan bilangan baryon dan Lepton harus kekal. Sedangkan kekekalan kekhasan quarks bergantung pada tipe interaksi (jenis X). Untuk interaksi kuat ( $X$ =gluon) atau electromagnet ( $X$ = $\gamma$ ), kekhasan quarks kekal. Untuk interaksi lemah, kekhasan quarks kekal jika  $X=Z^0$  tetapi quark tidak kekal untuk  $X=W^\pm$ . Agar keseluruhan reaksi terjadi, diperlukan energi yang cukup besar.

Jika a dan b berpasangan dengan X seperti berikut:



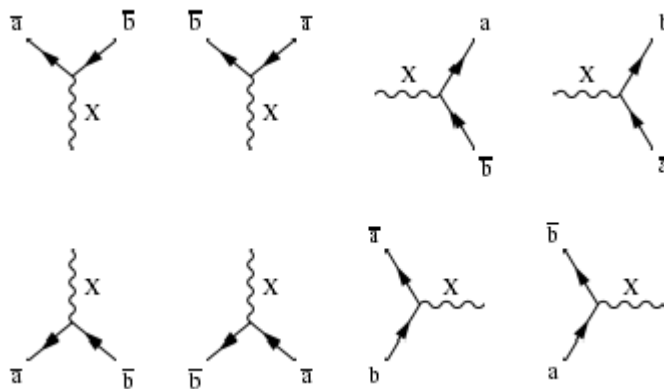
Gambar 2.12.

Maka kemungkinan yang diperbolehkan tergambar dibawah ini, yang dapat ditentukan dengan merotasikan diagram diatas dengan ketentuan jika panahnya dibalik maka partikelnya harus diganti dengan antipartikel.



Gambar 2.13.

Dengan mengganti partikel dengan antipartikel (konyugasi muatan), kemungkinan lain yang diperbolehkan tergambar dibawah ini



Gambar 2.14.

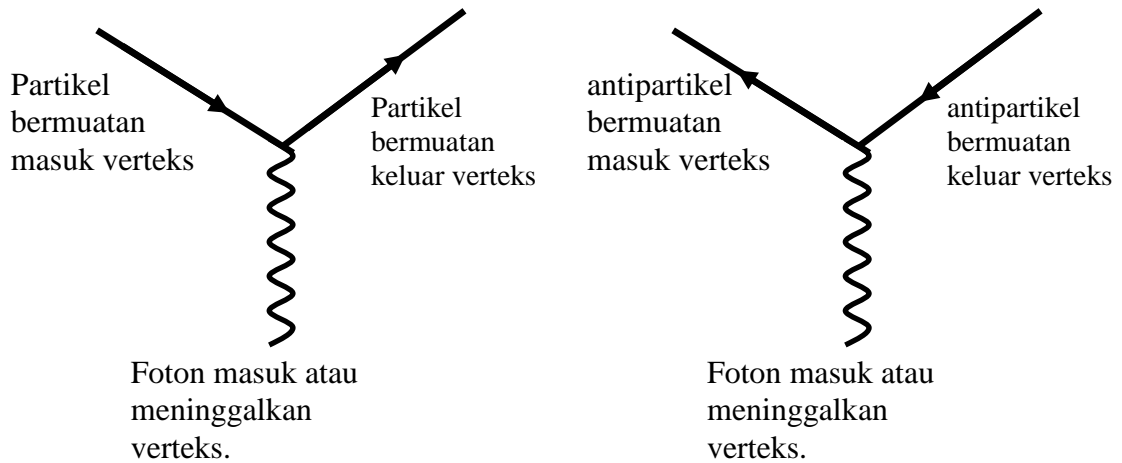
Untuk lebih jelasnya diagram Feynman akan dijelaskan di setiap interaksi

### A. Quantum Electrodynamics (QED)

Interaksi elektromagnet menggambarkan interaksi antara partikel-partikel bermuatan. Bilangan kuantum atau muatan dari elektromagnetik adalah muatan listrik ( $Q$ ). Jangkauan gaya elektromagnet tidak berhingga. Ini dikarenakan foton tidak bermassa. Kekuatan relatif dari gaya electromagnet diberikan oleh persamaan (2.11).

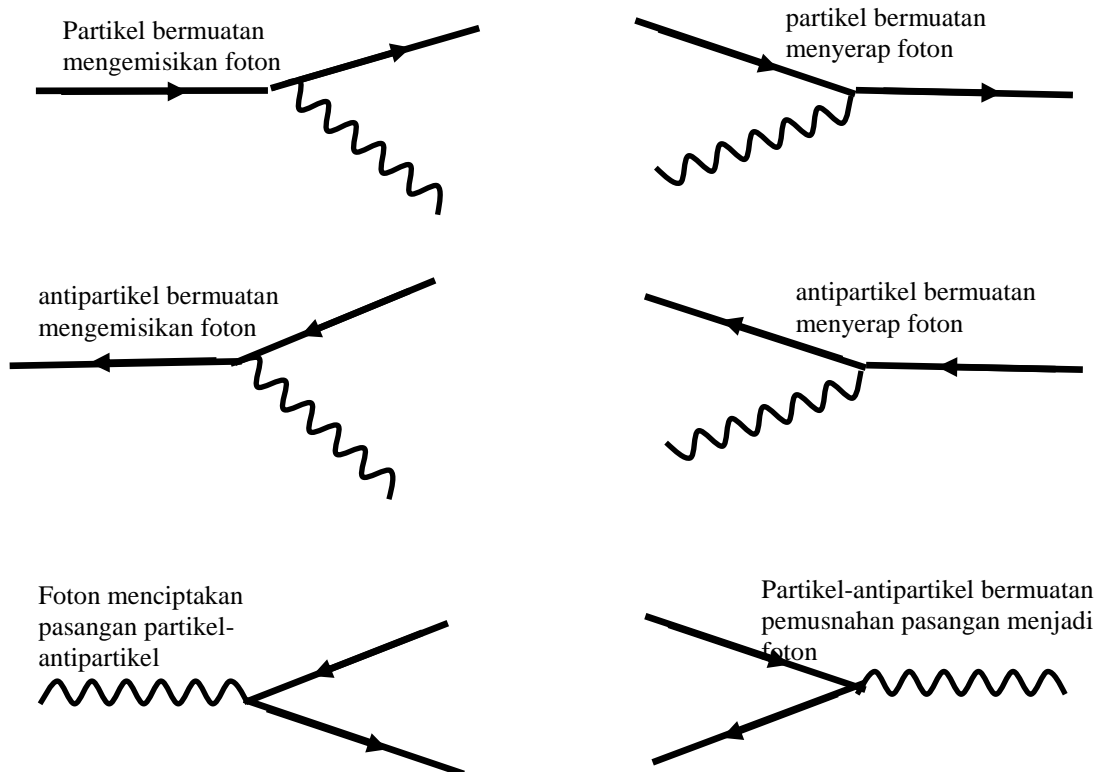
Semua fenomena elektromagnetik dapat digambarkan dalam proses dasar (diagram Feynman) berikut. Ingat! Tiap diagram dibaca dari kiri dan ke kanan, karena waktu berarah dari kiri ke kanan. Sisi kiri menggambarkan sebelum interaksi dan sebelah kanan

menggambarkan setelah interaksi. Dua diagram dasar interaksi elektromagnet diberikan sebagai berikut:



Gambar 2.15.

Dengan merotasikan kaki-kaki dari diagram, interaksi yang mungkin diantaranya: (Perhatikan panah yang arahnya berlawanan dengan arah waktu menandakan antipartikel). Makna dari dua diagram di atas diberikan sebagai berikut

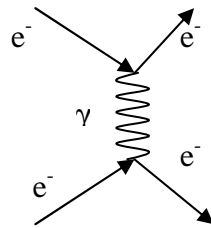


Gambar 2.16.

Dari diagram-diagram dasar ini kita dapat membangun diagram Feynman untuk tiap proses dalam QED. Contoh fenomena EM yang digambarkan dalam diagram Feynman:

1. Interaksi antara dua elektron

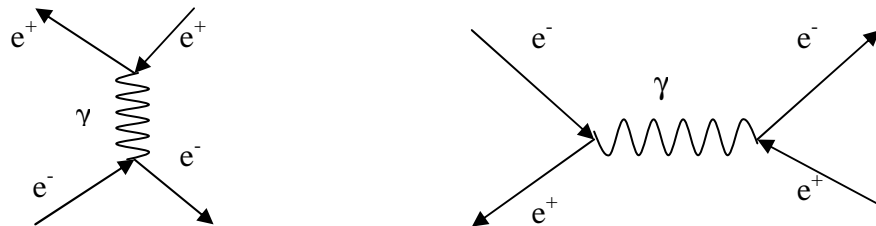
Pada proses ini, dua elektron masuk berinteraksi dengan saling bertukar foton kemudian keluar. Interaksi antar dua elektron ini dalam teori klasik dikenal dengan gaya coulomb total menolak. Dalam QED proses ini disebut hamburan Moller.



Gambar 2.17.

2. Interaksi antara elektron dan positron (antielektron)

Jika kita rotasikan kaki-kaki diagram Feynman diatas, maka akan didapat gambar (a) dan (b).



Gambar 2.18.

(a) gaya listrik saling tarik menarik

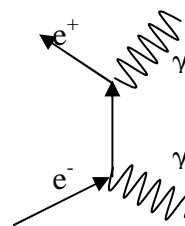
(b) anihilasi elektron-positron menghasilkan elektron dan positron

Diagram (a) menunjukkan gaya Coulomb saling tarik menarik antara elektron dan positron (anti elektron) sambil bertukar foton sedangkan diagram (b) menunjukkan elektron dan positron beranihilasi membentuk foton lalu foton mematerilasi menjadi elektron dan positron. Kedua diagram dalam QED dikenal dengan hamburan Bhabha

3. Pemusnahan pasangan

Pemusnahan pasangan elektron dan anti elektron menjadi foton dapat digambarkan:

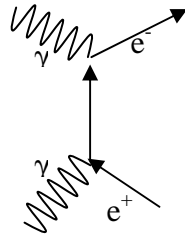
$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$



Gambar 2.19.

#### 4. Penciptaan pasangan

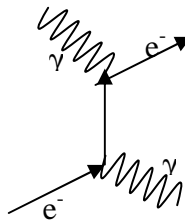
Produksi pasangan foton mematerisasi menjadi pasangan elektron dan positron dapat digambarkan:  $\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$



Gambar 2.20.

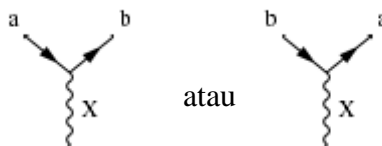
#### 5. Hamburan Compton

Sedangkan hamburan Compton dapat digambarkan:  $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$



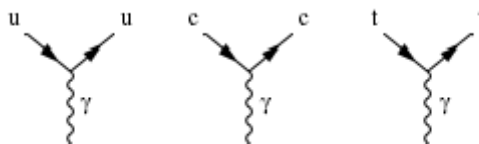
Gambar 2.21.

Secara umum, jika a dan b berpasangan dengan X seperti berikut:

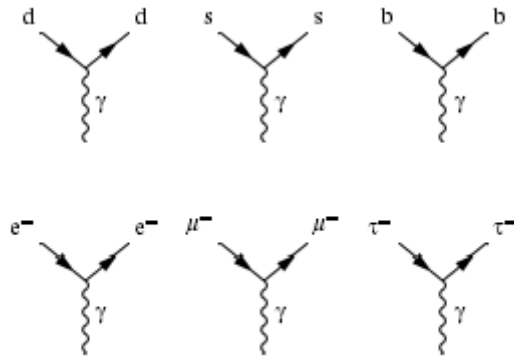


Gambar 2.22.

Untuk interaksi electromagnet, X adalah foton ( $\gamma$ ) yang berpasangan hanya dengan partikel bermuatan saja dan kemungkinan a dan b yang diperbolehkan adalah

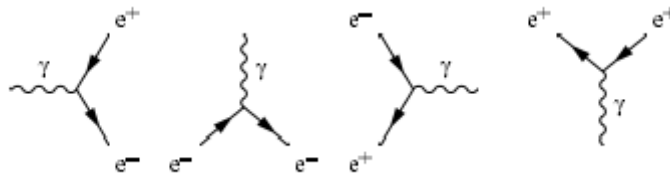


Gambar 2.23.



Gambar 2.24.

dan kemungkinan lain yang diperbolehkan



Gambar 2.25.

## B. Quantum Chromodynamics (QCD)

Teori tentang interaksi kuat adalah Quantum Chromodynamic (QCD). Sifat dari interaksi kuat:

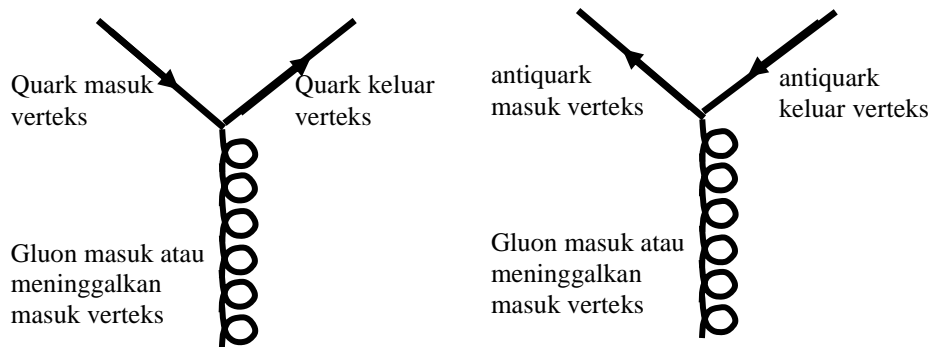
1. Interaksi kuat hanya bekerja pada quark
2. Interaksinya sangat kuat sampai dapat mengatasi tolak menolak antar proton dalam inti.
3. Interaksi kuat dapat menyatukan quark-quark hanya dalam 2 konfigurasi
  - $qqq$  untuk baryon dan  $\overline{qqq}$  untuk anti baryon
  - $q\bar{q}$  untuk meson

Dalam QCD, muatan dari interaksi kuat adalah warna dan proses dasarnya adalah quark  $\rightarrow$  quark+gluon.. Quark membawa muatan (yang bukan muatan listrik) yang disebut warna. Karena lepton tidak memiliki muatan warna maka interaksi kuat hanya terjadi pada quark Muatan ini memiliki tiga tipe yang diberi label merah (r), Green (g) dan Blue (b). Kumpulan quark r+g+b saling tarik menarik tetapi jika pasangan quark berwarna (misalnya: r+g) saling tolak menolak Untuk tiap warna , terdapat anti warna yaitu anti red



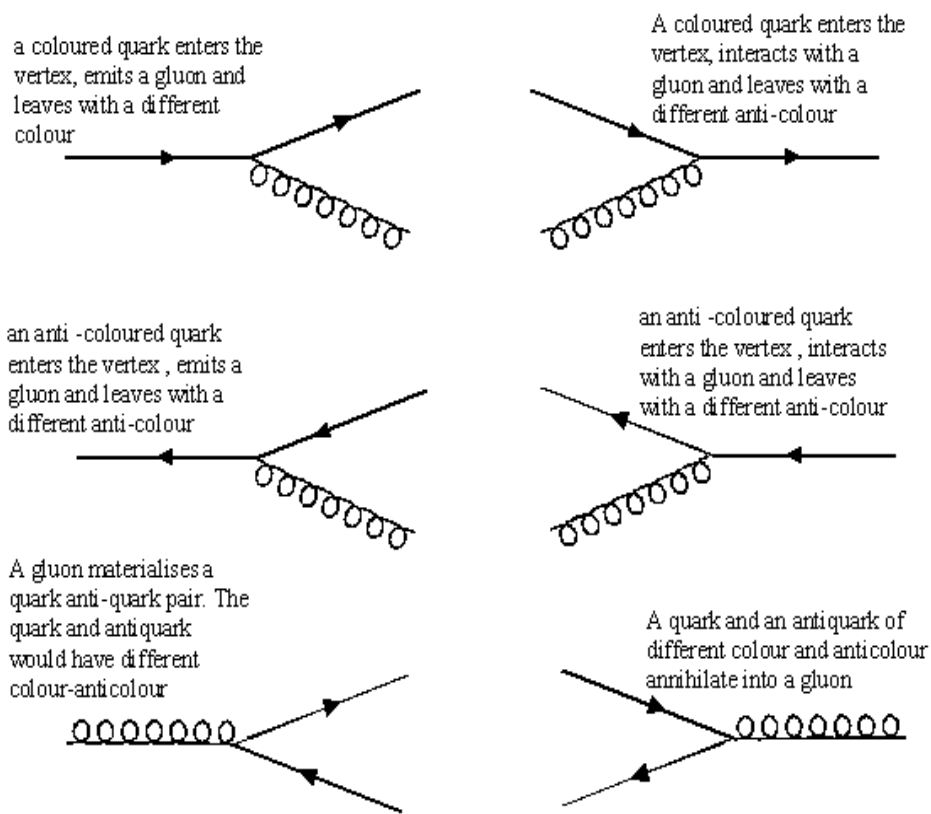
( $\bar{r}$ ), anti green ( $\bar{g}$ ) dan anti blue ( $\bar{b}$ ). Quark dengan warna dan quark dengan anti warna saling tarik menarik sama dengan kumpulan quark r+g+b membentuk kombinasi yang netral (tidak berwarna). Ini artinya pasangan red dengan anti red, blue dengan anti blue dan green dengan anti green saling tarik menarik. Sedangkan pasangan red dengan anti blue, red dengan anti green dsb saling tolak menolak. Itulah mengapa quark membentuk baryon ( $qqq$ ) dan meson ( $q\bar{q}$ ).

Gluon dapat dipandang sebagai suatu cara muatan warna bertukar warna antar quark dan anti quark. Seperti juga pada interaksi electromagnet, ada beberapa kemungkinan interaksi dengan merotasikan kaki-kaki diagram Feynmannya, tetapi tidak seperti foton, gluon disini membawa muatan warna sebagai bentuk interaksi antar quarknya. Diagram Feynman dasar untuk interaksi kuat sebagai berikut:



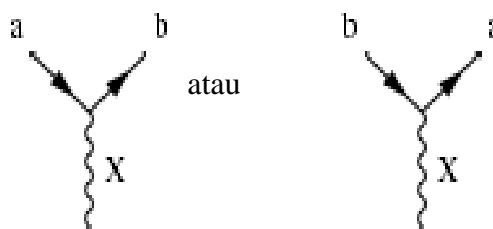
Gambar 2.26

Kombinasi dari diagram Feynman yang pertama diantaranya:



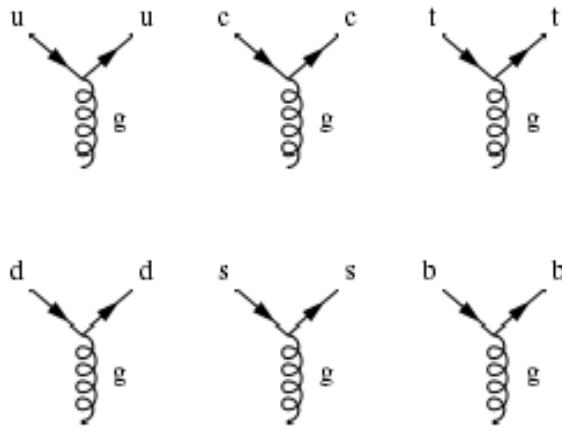
Gambar 2.27

Secara umum, jika a dan b berpasangan dengan X seperti berikut:



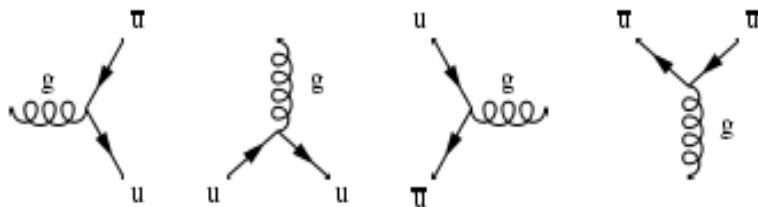
Gambar 2.28

Untuk interaksi kuat X adalah gluon yang berpasangan hanya dengan quarks, dan kemungkinan a dan b yang diperbolehkan



Gambar 2.29

dan kemungkinan lain yang diperbolehkan



Gambar 2.30

### C. Interaksi lemah

Interaksi lemah adalah interaksi antar quark maupun lepton. Teori interaksi lemah adalah flavordynamics. Interaksi lemah bertanggung jawab atas transisi antara tiga keluarga quark dan lepton. Boson W dan Z<sup>0</sup> terganggu dengan semua quark dan lepton. Interaksi lemah dimediasikan oleh pertukaran boson W dan Z<sup>0</sup>. Peluruhan lepton dan quark terjadi karena interaksi lemah. Ada tiga ciri dari peluruhan tertentu yang mengacu pada postulat dari interaksi lemah yaitu

1. Kelajuan rendah atau waktu hidupnya lama dibandingkan interaksi yang lain.
2. Hukum kekekalan tertentu tidak dipenuhi diantaranya perubahan dalam paritas, keanehan dan isospin
3. Peluruhannya sering disertai oleh neutrino. Pada peluruhan/reaksi pada interaksi lain tidak disertai oleh neutrino.

Kekuatan kopling gaya lemah adalah

$$\alpha_w \approx 10^{-6} \tag{2.24}$$

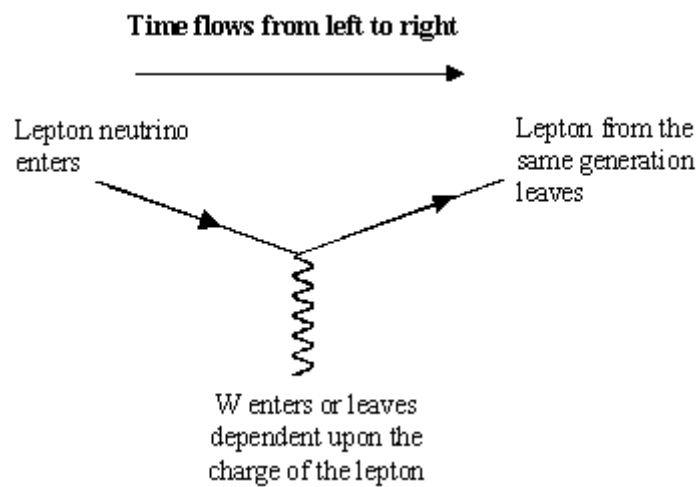
Kekuatan kopling dari gaya lemah ini semakin kuat seiring dengan bertambahnya energi

$$\alpha_w \approx \alpha \left( \frac{E}{m_w c^2} \right)^2 \quad (2.25)$$

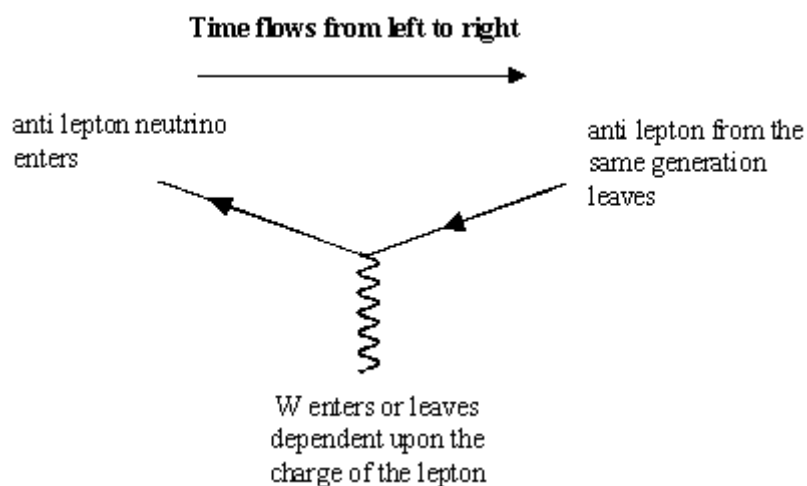
Karena lepton dan quark berinteraksi lemah, maka banyak diagram Feynman dasar yang berhubungan dengan interaksi lemah. Disini kita akan memfokuskan interaksi lemah antar lepton dan interaksi lemah antara quark.

### A. Lepton

Diagram Feynman dasar interaksi lemah untuk lepton adalah

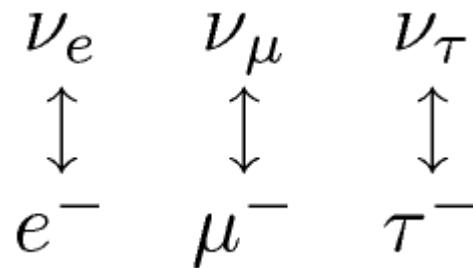


Gambar 2.31.



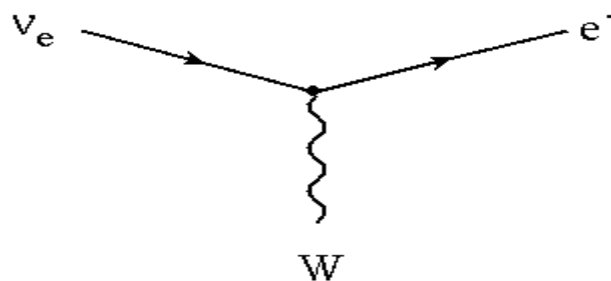
Gambar 2.32.

Diagram ini berlaku umum semua interaksi lemah yang diperbolehkan untuk semua lepton. Interaksi lemah lepton yang diperbolehkan adalah bahwa lepton menjadi neutrino atau sebaliknya, lepton dan neutrino harus dari generasi yang sama. Ini dikarenakan disetiap interaksi, bilangan lepton harus kekal. Interaksi antara neutrino dan lepton yang diperbolehkan adalah:



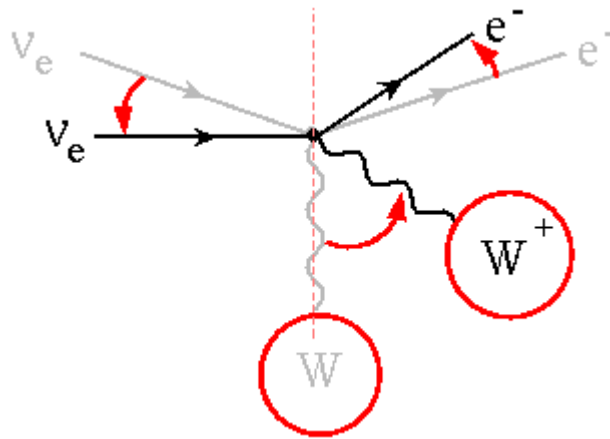
Gambar 2.33.

Kita lihat contoh interaksi antara neutrino-electron dan electron. Maka diagramnya menjadi:



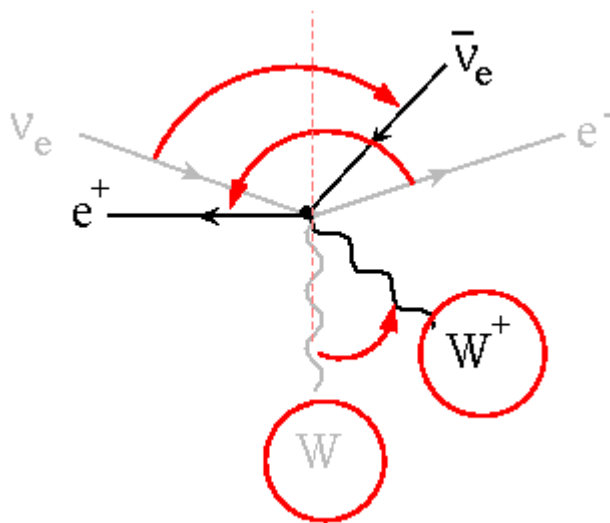
Gambar 2.34.

Diagram ini masih belum benar, karena Boson-W disini belum bermuatan. Seperti pada pembahasan sebelumnya bahwa di setiap interaksi termasuk interaksi lemah, muatan sebelum interaksi dan sesudah interaksi haruslah kekal. Tetapi jika kita rotasikan kaki-kaki diagram seperti dibawah ini, maka interaksi lemah yang benar kita dapatkan. Perhatikan sekarang muatan sebelum dan sesudah interaksi sama.



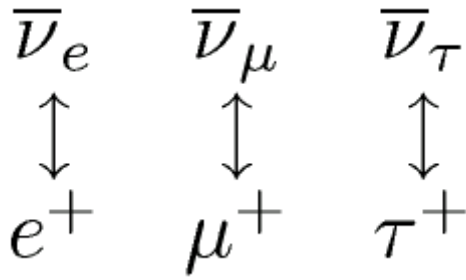
Gambar 2.35.

Selanjutnya tinjau interaksi positron yang menghasilkan pasangan anti neutrino-elektron dan boson virtual  $W^+$ . Maka jika kaki-kaki pada diagram sebelumnya dirotasikan maka diagram  $\nu_e \rightarrow e + W^+$  akan menjadi diagram  $e^+ \rightarrow \bar{\nu}_e + W^+$  dibawah ini. Perhatikan perubahan partikel menjadi anti partikel akibat rotasi



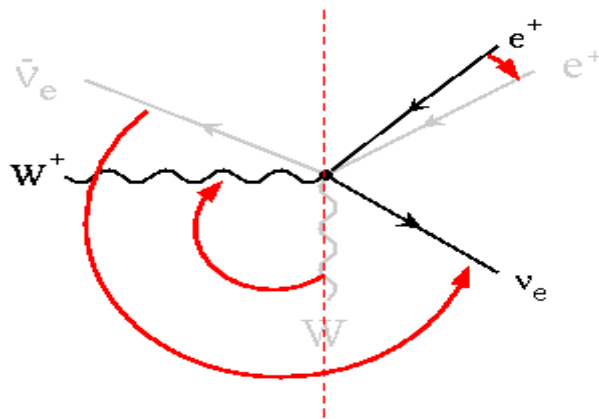
Gambar 2.36.

Jadi dapat dilihat interaksi lemah yang diperbolehkan untuk anti lepton diperlihatkan sebagai berikut:



Gambar 2.37.

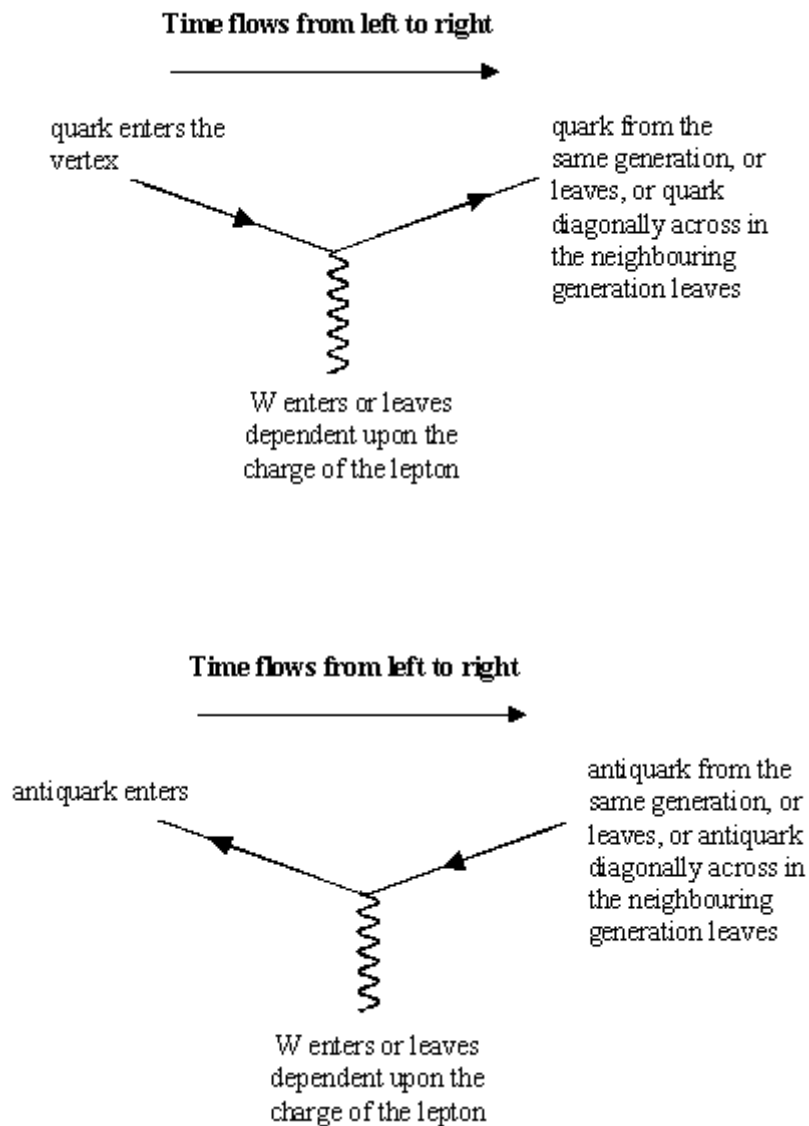
Jadi boson  $W^+$  (virtual boson  $W=$  biasanya dihasilkan dari peluruhan) dapat menghasilkan pasangan anti elektron dan neutrino-elektron (bukan anti neutrino-elektron, hati-hati) seperti digambarkan berikut:



Gambar 2.38.

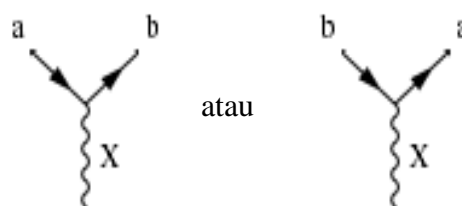
## B. Quarks

Diagram Feynman dasar interaksi lemah untuk quark adalah



Gambar 2.39.

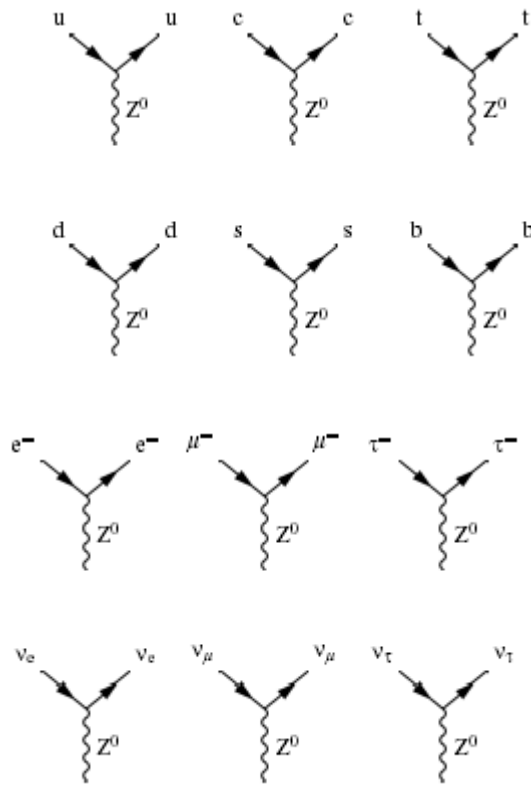
Secara umum, jika a dan b berpasangan dengan X seperti berikut:



Gambar 2.40.

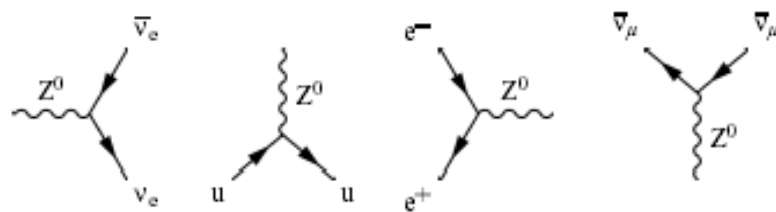


Untuk interaksi lemah X adalah  $Z^0$  atau  $W^\pm$ .  $Z^0$  berpasangan dengan semua quarks dan lepton tanpa merubah flavour/kekhasannya dan kemungkinan a dan b yang diperbolehkan



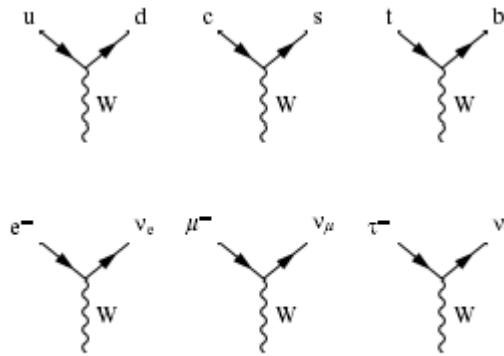
Gambar 2.41.

Dan kemungkinan lain yang diperbolehkan



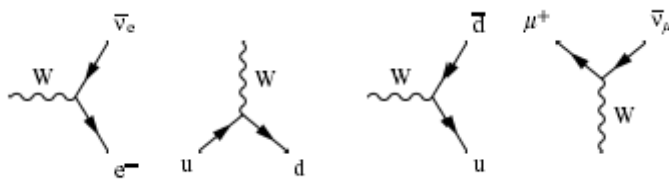
Gambar 2.42.

$W^\pm$  berpasangan dengan semua quarks dan lepton, flavour/kekhasannya berubah dan kemungkinan a dan b yang diperbolehkan



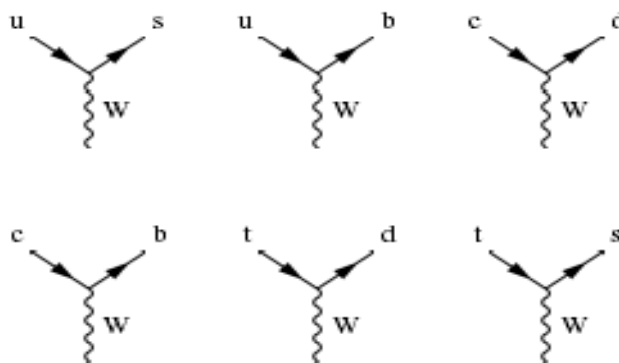
Gambar 2.43.

dan kemungkinan lain yang diperbolehkan



Gambar 2.44.

Keadaan dibawah ini juga diperbolehkan tapi kemungkinannya kecil



Gambar 2.45.

## 2.8. Unifikasi gaya

Interaksi elektromagnet dan interaksi lemah disatukan pada energi yang lebih besar dari massa boson  $W$  dan  $Z^0$ . Perpaduan antara interaksi elektromagnet dan interaksi lemah ini disebut interaksi elektroweak. Interaksi kuat dan interaksi elektroweak diharapkan memiliki kekuatan yang sama pada energi yang sangat tinggi (kira-kira  $10^{16}$  GeV) sehingga

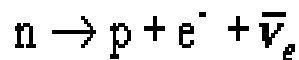
akan terjadi perpaduan antara interaksi kuat dan elektroweak yang disebut teori kesatuan agung (*Grand Unified Theory, GUT*). Ini dapat terjadi karena kekuatan kopling interaksi kuat semakin kecil sedangkan konstanta kopling interaksi lemah semakin besar seiring dengan bertambahnya energi. Prediksi dari GUT adalah peluruhan proton. Pada energi yang lebih tinggi lagi (kira-kira  $10^{19}$  GeV), interaksi gravitasi diharapkan memiliki kekuatan yang sama dengan interaksi kuat. Sehingga keempat interaksi dapat terangkum dalam satu teori yang dinamakan **Super Grand Unification Theories** atau juga **Theory of Everything (TOE)**.

**Contoh 2.1.**



Pada kasus ini neutron meluruh menjadi proton, electron dan anti-neutrino dengan interaksi lemah..

Analisis quark menyatakan

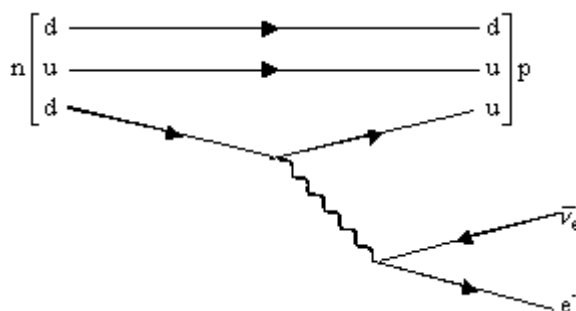


d→d

u→u

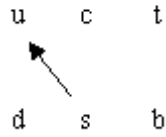
d→u dengan penciptaan electron dan anti-neutrino.

Diagram Feynman adalah sebagai berikut:



Gambar 2.46.

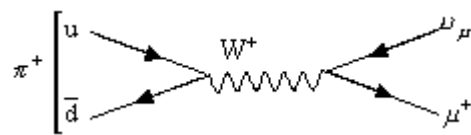
Seperti telah diterangkan sebelumnya, bahwa interaksi lemah membolehkan quark untuk merubah flavornya.



**Contoh 2.2.**

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

Pada contoh ini quark u dan anti-d dalam pi-plus berannihilasi untuk menghasilkan uce a  $W^+$ . Kemudian  $W^+$  mematerilisasi menjadi pasangan lepton dan antilepton.

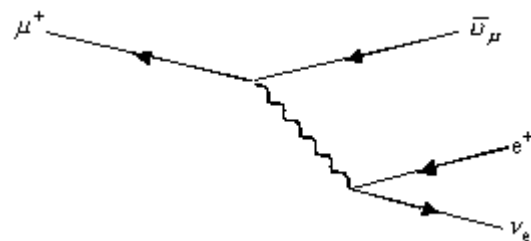


Gambar 2.47.

**Contoh 2.3.**

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

Pada contoh ini, muon positif memancarkan  $W^+$  dan bertransformasi menjadi anti neutrino Boson  $W^+$  kemudian mematerisasi pasangan lepton-antilepton generasi pertama.



Gambar 2.48.

### Contoh 2.4.

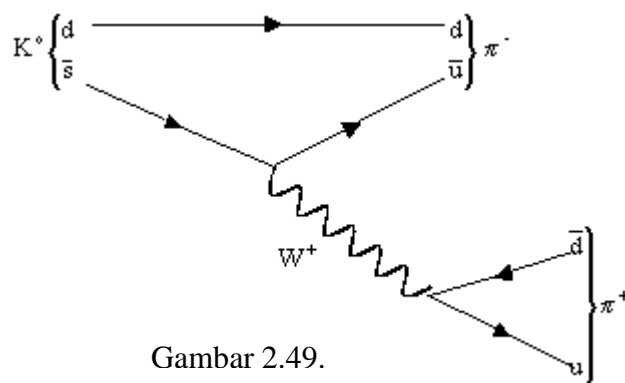
$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

Pada kasus ini Kaon-nol meluruh menjadi pi-minus dan pi-plus dengan interaksi lemah. Analisis quark menunjukkan

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

$$d \rightarrow d$$

$\bar{s} \rightarrow \bar{u}$  diiringi penciptaan pasangan antidown - up .



Gambar 2.49.

### Rangkuman

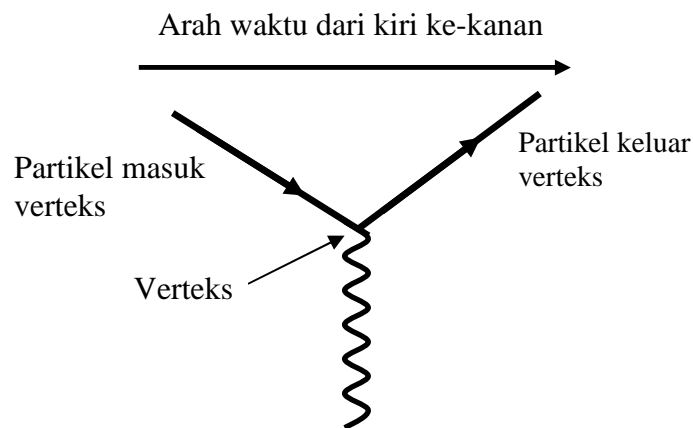
1. Dalam Model Standar ada dua jenis partikel fundamental yaitu *quark* dan *lepton*. Masing-masing ada 3 generasi sehingga ada tiga flavor tipe lepton dan tiga falvor tipe quark.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

2. Interaksi kuat menggambarkan interaksi antara quark. Teori interaksi kuat adalah QCD. Interaksi elektromagnet menggambarkan interaksi antara partikel-partikel bermuatan. Teori interaksi EM adalah QED. Interaksi lemah adalah interaksi antar quark maupun lepton. Teori interaksi lemah adalah flavordynamics
3. Bilangan kuantum yang kekal di semua interaksi adalah *bilangan baryon* dan *lepton* ( $B-L$ ), *warna* dan *muatan listrik*. Isospin lemah kekal hanya untuk reaksi kuat saja.

Bilangan kuantum Strangeness kekal untuk reaksi kuat dan electromagnet tetapi tidak untuk interaksi lemah

4. Perpaduan antara interaksi elektromagnet dan interaksi lemah ini disebut interaksi elektroweak. Interaksi kuat dan interaksi elektroweak diharapkan memiliki kekuatan yang sama pada energi yang sangat tinggi (kira-kira  $10^{16}$  GeV) sehingga akan terjadi perpaduan antara interaksi kuat dan elektroweak yang disebut teori kesatuan agung (*Grand Unified Theory, GUT*). Pada energi yang lebih tinggi lagi (kira-kira  $10^{19}$  GeV), interaksi gravitasi diharapkan memiliki kekuatan yang sama dengan interaksi kuat. Sehingga keempat interaksi dapat terangkum dalam satu teori yang dinamakan **Super Grand Unification Theories** atau juga **Theory of Everything (TOE)**.
5. Diagram Feynman dapat dibentuk dari sejumlah verteks. Pada tiap verteks, muatan bilangan baryon dan Lepton harus kekal. Sedangkan kekekalan kekhasan quarks bergantung pada tipe interaksi (jenis X). Untuk interaksi kuat ( $X=\text{gluon}$ ) atau electromagnet ( $X=\gamma$ ), kekhasan quarks kekal. Untuk interaksi lemah, kekhasan quarks kekal jika  $X=Z^0$  tetapi quark tidak kekal untuk  $X=W^\pm$ . Struktur paling dasar dari diagram Feynman diperlihatkan pada gambar



Gambar 2.50.

### Soal-soal Latihan

1. Contoh fenomena EM (QED) yang digambarkan dalam diagram Feynman diantaranya adalah hamburan Moller (interaksi electron dengan electron) dan Hamburan Bhabha (hamburan electron dan positron) dan lainnya. Gambarkan diagram Feynman dan jelaskan interaksinya dengan cara membaca diagram Feynmannya untuk:

- a. gaya listrik antara elektron dengan elektron
  - b. anihilasi pasangan elektron dan positron menjadi foton
  - c. hamburan compton
  - d. produksi pasangan yaitu foton menjadi pasangan elektron dan positron
2. a. Tentukan quark penyusun partikel hadron pada reaksi dibawah ini!
  - b. Tentukan bilangan kuantum partikel-partikel pada reaksi-reaksi di bawah ini  
(B,L,Q,S,I<sub>z</sub> (bukan spin) )
  - c. Manakah reaksi yang diperbolehkan, reaksi yang berinteraksi kuat dan reaksi yang berinteraksi lemah dibawah ini? Jelaskan jawabanmu!
    - (1).  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$     (2)  $p + p \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^+ + \pi^- + \pi^-$     (3)  $\bar{K}^0 + e \rightarrow \pi^+ + \bar{\nu}_e$
    - (4).  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$     (5)  $p + p \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^+ + \pi^- + \pi^-$     (6)  $\bar{K}^0 + e \rightarrow \pi^+ + \bar{\nu}_e$
  - d. Gambarkan diagram Feynman dari reaksi yang diperbolehkan pada soal 1c
3. Tinjau peluruhan  $\Lambda \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$  , pembawa gaya apa yang dimediasi?  
Gambarkan diagram Feynman dan jelaskan pula proses peluruhan tersebut!
  4. Manakah peluruhan berikut ini yang termasuk peluruhan kuat? Dan lemah? Jelaskan jawabanmu! Pembawa gaya apa yang dimediasi!  
 $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$  dan  $\Delta^- \rightarrow n + \pi^-$
  5. Tinjau anihilasi electron dan positron berikut, gambarkan diagram Feynman dan jelaskan proses anihilasi tersebut sampai menghasilkan hadron  
 $e^- + e^+ \rightarrow \Lambda + K^+ + \pi^- + \pi^0 + \bar{n}$