

# 1 Pendahuluan

Tujuan perkuliahan

Setelah mempelajari bab 1 ini, mahasiswa diharapkan

1. Mengetahui gambaran perkuliahan
2. Mengerti konsep dari satuan alamiah dan satuan-satuan dalam fisika partikel

## 1.1. Gambaran Umum Perkuliahan.

Perkuliahan Fisika Partikel terdiri dari 4 bagian. Bagian pertama membahas partikel dan interaksinya secara kualitatif. **Pada bagian pertama**, kita akan mempelajari macam-macam partikel elementer penyusun materi yang ada di alam dan sifat-sifatnya seperti massa, muatan listrik, spin dan sebagainya. Setelah partikel diperkenalkan masalah lain adalah: “bagaimana partikel-partikel tersebut berinteraksi satu sama lain?” Kalau kita membicarakan dua benda makroskopik, maka untuk mengetahui bagaimana interaksi antar mereka, salah satunya dengan memisahkan dua benda tersebut dengan jarak yang berbeda-beda, lalu diukur gaya antar keduanya. Itulah Coulomb menemukan interaksi tolakan antara dua benda bermuatan sejenis dan cara Cavendish mengukur tarikan gravitasi antar dua benda bermassa. Tetapi untuk partikel seperti proton/elektron kita sulit mengetahui interaksinya dengan cara yang demikian, karena partikel tersebut terlalu kecil dan ringan (mikroskopik). Bagaimana kita dapat mengetahui interaksi partikel elementer? Untuk menyelidiki interaksi partikel-partikel elementer, informasi-informasinya biasanya didapat dari 3 sumber yaitu (1) Hamburan, yaitu kita tembakkan satu partikel ke partikel lainnya dan mendeteksinya (misalnya: dengan mencatat sudut defleksinya). (2) Peluruhan, dimana sebuah partikel secara spontan meluruh dan kita amati hasil peluruhannya. (3) keadaan terikat (*boundstate*) dimana dua atau lebih partikel menyatu dan kita pelajari sifat dari objek campuran tersebut.

**Bagian kedua** merupakan awal bahasan fisika partikel yang mengkaji dinamika partikel atau sistem partikel berukuran mikro dalam rentang skala fermi ( $\sim 10^{-15}$  m), yakni elektron, proton, dan lain-lain, dalam mana momentum atau energi partikel bernilai sangat besar ( $10^{-3}$  GeV  $\sim 10^3$  GeV). Bertolak dari kenyataan ini, dinamika sistemnya

didasarkan pada relativitas khusus dan mekanika kuantum. Untuk itu, pada bagian ini akan dibagi menjadi dua bab, BAB 3 dan BAB 4. BAB 3 akan membahas kinematika relativistik partikel yang diturunkan dari dua postulat relativitas. Sedangkan pada awal BAB 4 akan dibahas persamaan-persamaan gelombang relativistik sebagai kelanjutan dari apa yang telah dipelajari pada BAB 2, namun sekarang mencakup mekanika kuantum. Sebagai catatan, disini tidak akan membahas secara mendalam namun hanya mengambil ide-ide pokoknya saja.

**Bagian Ketiga.** Pada bagian ini akan membahas lebih mendalam dan kuantitatif tentang penggambaran interaksi partikel. Persamaan gelombang partikel spin 0, 1/2, dan 1, perumusan relativistik Lagrange dan persamaan gerak dalam medan vektor dan skalar dibahas dalam BAB 4. Persamaan-persamaan tersebut nantinya digunakan untuk menghitung penampang lintang dan besaran-besaran dalam peluruhan dengan menggunakan kalkulus Feynman di BAB 6. Namun sebelumnya grup, simetri dan kekekalan akan dibahas di BAB 5.

**Bagian Keempat** adalah akselerator dan detektor partikel serta perkembangan terkini fisika partikel. Bagian ini akan dibagi menjadi dua bab, BAB 6 dan BAB 7. Pada bab 6 akan dipelajari prinsip dari pemercepat dan pendeteksian partikel dan bagaimana cara mengukurnya. Selanjutnya, pada BAB 7 akan dibahas topik-topik khusus dalam fisika partikel sebagai hasil perkembangan riset terkini dalam fisika partikel.

## 1.2. Apa Itu Fisika Partikel?

Fisika partikel adalah ilmu yang menggambarkan partikel elementer pembentuk struktur dari materi dan interaksi antar mereka. Partikel-partikel tersebut **sangat berenergi (berkecepatan tinggi)** dan **sangat kecil**. Karena partikel tersebut sangat berenergi maka fisika partikel (*Particle Physics*) sering juga disebut Fisika Energi Tinggi (*High Energy Physics*). Kecil artinya Mekanika Kuantum sangatlah berperan dalam mempelajari fisika partikel, dimana partikel akan cenderung berperilaku seperti gelombang. Berdasarkan rumus de Broglie:

$$\text{panjang gelombang} = \frac{\hbar}{\text{momentum}} \quad \text{atau} \quad \lambda = \frac{\hbar}{p}$$

dimana  $\hbar$  adalah konstanta Planck dan nilainya sangat kecil yaitu  $6.63 \cdot 10^{-34}$  Js. Berenergi artinya Relativitas Khusus sangat berperan sehingga kita akan banyak menggunakan persamaan Einstein yaitu

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

dimana  $c$  adalah kecepatan cahaya di vakum dan nilainya sangat besar,  $3 \cdot 10^8$  m/s. Empat realisasi mekanika dapat digambarkan sebagai berikut



Dalam relativitas, energi dan momentum selalu kekal tetapi massa diam tidak harus kekal dan dalam relativistik membolehkan ada partikel yang memiliki massa diam nol. Sedangkan dalam mekanika kuantum suatu fisika digambarkan oleh keadaanya (*states*) (fungsi gelombang Schrodinger atau *ket* dalam Dirac). Hasilnya tidak ditentukan oleh kondisi awal tetapi ditentukan oleh probabilitas suatu transisi terjadi. Sebenarnya untuk sesuatu yang cepat dan kecil, kita membutuhkan teori yang memadukan prinsip relativitas dan kuantum yaitu teori medan kuantum sehingga fisika partikel harusnya didominasi oleh teori medan kuantum.

Dalam beberapa tahun terakhir sebuah teori telah muncul yang menggambarkan semua interaksi partikel elementer kecuali gravitasi. Ini dikarenakan sejauh ini diperkirakan interaksi gravitasi antar partikel mikroskopik terlalu lemah. Teori ini disebut Model Standar.

Bagaimana menghasilkan partikel elementer? Untuk menghasilkan partikel ada 3 sumber utama yaitu (1) Sinar kosmik, (2) reaktor nuklir dan (3) akselerator partikel. Akselerator partikel telah menjadi mesin penghasil partikel baru dalam beberapa tahun terakhir. Pada umumnya untuk menghasilkan partikel yang bermassa besar harus semakin besar energi tumbukannya. Jika ingin mempelajari interaksi pada jangkauan yang amat pendek, diperlukan partikel yang sangat berenergi (berkecepatan tinggi).

Bagaimana mendeteksi partikel elementer?. Kebanyakan mekanisme dari detector mengacu pada fakta bahwa partikel bermuatan berenergi tinggi melewati materi, partikel tersebut akan mengionisasi atom sepanjang lintasannya. Tetapi partikel-partikel netral tidak menyebabkan ionisasi sehingga partikel-partikel tersebut tidak meninggalkan jejak. Lintasan partikel-partikel netral dideteksi dengan menganalisis jejak dari partikel bermuatan yang berinteraksi dengan partikel-partikel netral tersebut akibat adanya kekekalan energi dan momentum.

### 1.3. Satuan dalam Fisika Partikel

Dalam fisika partikel, sebagai contoh kita akan menemukan informasi partikel:

$$\text{Massa proton} \sim 1 \text{ GeV} \text{ dan jari-jari proton} \sim 4 \text{ GeV}^{-1}$$

Ternyata informasi satuan dari massa adalah energi (E) dan panjang adalah kebalikan energi ( $E^{-1}$ ). Seperti yang telah kita ketahui bahwa satuan unit yang sering dipakai adalah {M,L,T}. Dalam fisika partikel, besaran penting yang digunakan adalah

$$[c] = [\text{kecepatan}] = LT^{-1}$$

$$[\hbar] = [\text{panjang} \times \text{momentum}] = ML^2T^{-1}$$

$$[E] = [\text{massa} \times \text{kecepatan}^2] = ML^2T^{-2}$$

Dari rumusan

Jika hubungan dimensi ini dibalik menjadi

$$L = [\hbar][c][E]^{-1}$$

$$M = [E][c]^{-2}$$

$$T = [\hbar][E]^{-1}$$

Untuk menyederhanakan perumusan matematika, para ilmuwan memilih satuan yang dinamakan **unit alamiah** dimana  $\hbar = c = 1$ , Akibatnya besaran-besaran diatas menjadi

Besaran Panjang	$L = [\hbar][c][E]^{-1} \sim [E]^{-1} \sim$ Kebalikan dari energi
Besaran Massa	$M = [E][c]^{-2} \sim [E] \sim$ Energi
Besaran Waktu	$T = [\hbar][E]^{-1} \sim [E]^{-1} \sim$ Kebalikan dari energi

Sehingga massa proton = 1 GeV artinya  $m = 1 \text{ GeV}/c^2 = 1.6 \cdot 10^{-10} / (3 \cdot 10^8)^2 = 1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  dan jari-jari proton = 4  $\text{GeV}^{-1}$  artinya  $r = 4(\hbar c) \cdot \text{GeV}^{-1} = 8 \cdot 10^{-16} \text{ m}$ .

Atau

$$1 \text{ kg} = 5.607 \cdot 10^{26} \text{ GeV}$$

$$1 \text{ m} = 5.068 \cdot 10^{15} \text{ GeV}^{-1}$$

$$1 \text{ s} = 1.519 \cdot 10^{24} \text{ GeV}^{-1}$$

Beberapa satuan panjang, energi dan penampang lintang dinyatakan pada tabel di bawah ini:

Tabel 1.1  
Satuan-satuan panjang, energi dan penampang lintang

1 parsec	$3 \cdot 10^{18}$ cm
1 angstrom	$10^{-10}$ m
1 fm	$10^{-15}$ m
1 MeV	$10^6$ eV
1 GeV	$10^9$ eV
1 TeV	$10^{12}$ eV
1 PeV	$10^{15}$ eV
1 barn	$10^{-24}$ cm <sup>2</sup>
1 millibarn (mb)	$10^{-27}$ cm <sup>2</sup>
1 nanobarn (nb)	$10^{-33}$ cm <sup>2</sup>
1 picobarn (pb)	$10^{-36}$ cm <sup>2</sup>
1 fembarn (fb)	$10^{-39}$ cm <sup>2</sup>

Bagaimana dengan satuan dari muatan listrik? Terdapat 3 sistem satuan untuk muatan listrik dalam ilmu fisika partikel yaitu:

- (1) Sistem SI dimana satuan muatannya Coulomb sehingga hukum Coulomb dituliskan:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (SI)$$

Dengan q adalah muatan yang besarnya  $1.6 \cdot 10^{-23}$  coulomb

- (2) Sistem gaussian dimana satuan muatannya adalah unit elektrostatik (esu) sehingga hukum Coulomb dituliskan:

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (G)$$

- (3) Sistem Heaviside-Lorentz sehingga hukum Coulomb dituliskan:

$$F = \frac{1}{4\pi} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (HL)$$

Hubungan ketiga unit muatan adalah

$$q_{HL} = \sqrt{4\pi} q_G = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0}} q_{SI}$$

Dalam fisika partikel dikenal suatu konstanta yaitu konstanta struktur baik (*fine structure constant*) yaitu

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137} \text{ (e dalam G dan } c \neq \hbar \neq 1 \text{)}$$

dimana e adalah muatan elektron dalam satuan Gaussian. Kebanyakan buku partikel menggunakan

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137} \text{ (e dalam HL dan } c = \hbar = 1 \text{)}$$

karena menggunakan muatan dalam satuan Heaviside-Lorent dan mengambil unit alamiah  $c = \hbar = 1$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = \frac{1}{137} \text{ (e dalam SI dan } c = \hbar = 1 \text{)}$$