

Large Hadron Collider (10 poin)

Sebelum kalian mengerjakan soal ini, bacalah terlebih dahulu Instruksi Umum yang ada pada amplop terpisah.

Pada soal ini, kita akan mendiskusikan mengenai fisika dari LHC (Large Hadron Collider) di CERN yang merupakan laboratorium fisika partikel terbesar. Tujuan utama CERN adalah untuk mendapatkan gambaran yang mendalam tentang hukum-hukum dasar alam. Dua berkas partikel dipercepat hingga memiliki energi tinggi, kemudian oleh medan magnetik yang sangat kuat partikel tersebut diarahkan bergerak di sepanjang cincin akselerator dan akhirnya saling bertumbukan. Partikel proton tersebut tidak menyebar merata di sepanjang akselerator, namun mereka bergerak dalam kelompok. Partikel-partikel yang dihasilkan dari tumbukan tersebut diamati oleh detektor-detektor yang besar. Beberapa parameter LHC dapat dilihat pada Tabel 1.

Cincin LHC	
Keliling cincin	26659 m
Jumlah kelompok per berkas proton	2808
Jumlah proton per kelompok	1.15×10^{11}
Berkas proton	
Energi proton	7.00 TeV
Energi pusat massa	14.0 TeV

Tabel 1: Nilai numerik dari parameter-parameter khusus yang relevan pada LHC.

Fisikawan partikel menggunakan sistem satuan yang sesuai untuk energi, momentum dan massa: Energi diukur dalam electron volts [eV]. Definisi 1 eV adalah jumlah energi yang diterima oleh partikel bermuatan listrik e (muatan listrik elementer) yang bergerak melalui beda potensial satu volt ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$).

Momentum diukur dalam satuan eV/c dan massa diukur dalam satuan eV/c^2 , dimana c adalah laju cahaya di vakum. Karena 1 eV merupakan kuantitas energi yang sangat kecil, maka fisikawan partikel seringkali menggunakan MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) atau TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

Bagian A membahas mengenai percepatan proton dan elektron. Bagian B membahas mengenai identifikasi partikel-partikel yang dihasilkan pada tumbukan di CERN.

Bagian A. Akselerator LHC (6 poin)

Percepatan:

Asumsikan bahwa proton dipercepat oleh tegangan sebesar V sedemikian sehingga kecepatannya sangat dekat dengan laju cahaya. Abaikan kehilangan energi akibat radiasi atau tumbukan dengan partikel yang lain.

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.1 | Tentukan formula eksak untuk kecepatan akhir proton v sebagai fungsi dari tegangan pemercepat V , dan konstanta-konstanta fundamental. | 0.7pt |
|------------|--|-------|

Salah satu rencana desain eksperimen mendatang yang akan dilakukan di CERN adalah menggunakan proton-proton dari LHC dan menemukannya dengan elektron-elektron yang berenergi 60.0 GeV.

- A.2** Untuk partikel yang berenergi tinggi dan bermassa diam rendah, deviasi relatif kecepatan akhirnya v terhadap laju cahaya, $\Delta = (c - v)/c$, bernilai sangat kecil. Tentukan aproksimasi orde pertama untuk Δ dan hitung Δ untuk elektron yang berenergi 60.0 GeV dengan menggunakan potensial pemercepat V dan konstanta-konstanta fundamental. 0.8pt

Sekarang kita kembali ke proton pada LHC. Asumsikan pipa lintasan berkas berbentuk lingkaran.

- A.3** Turunkan formula untuk medan magnetik seragam B yang diperlukan untuk menjaga proton tetap bergerak dengan lintasan lingkaran. Formula haruslah dinyatakan hanya dalam E (energi proton), L (keliling lintasan), konstanta-konstanta fundamental dan angka murni. Anda dapat menggunakan aproksimasi yang tepat jika efek dari aproksimasi tersebut tidak merubah nilainya hingga presisi tiga angka penting. Hitung angka numerik bagi B untuk proton dengan energi $E = 7.00$ TeV. Abaikan interaksi sesama proton. 1.0pt

Daya Radiasi

Partikel bermuatan listrik yang bergerak dipercepat akan meradiasikan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Untuk partikel bermuatan listrik yang bergerak melingkar beraturan, daya radiasi P_{rad} hanya bergantung pada percepatan geraknya a , muatan listrik q , laju cahaya c dan permitivitas vakum ϵ_0 .

- A.4** Dengan menggunakan analisis dimensional, tentukan formula untuk daya radiasi P_{rad} . 1.0pt

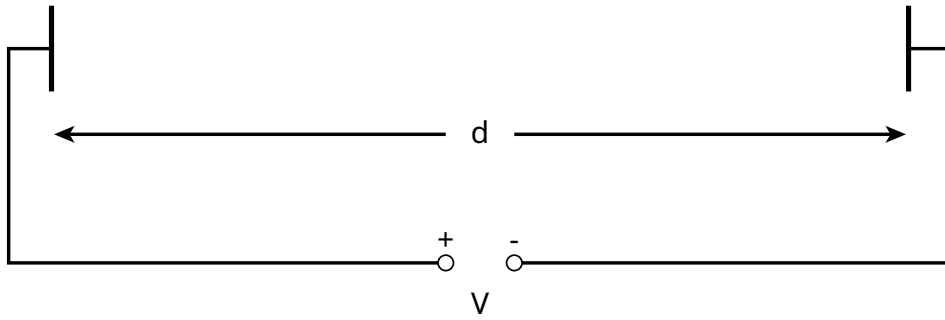
Formula sesungguhnya untuk daya radiasi mengandung faktor $1/(6\pi)$. Untuk kasus relativistik, formula juga mengandung faktor pengali tambahan γ^4 , dengan $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Hitunglah daya radiasi total P_{tot} pada LHC untuk proton dengan energi $E = 7.00$ TeV (lihat tabel 1). Kalian dapat menggunakan pendekatan aproksimasi yang cocok. 1.0pt

Percepatan Linear

Di CERN, proton-proton yang diam akan dipercepat oleh suatu akselerator linear dengan panjang $d = 30.0$ m dan tegangan $V = 500$ MV. Asumsikan bahwa medan listriknya homogen. Akselerator linear terdiri dari dua pelat seperti pada Gambar 1.

- A.6** Tentukan waktu T yang diperlukan proton untuk melewati daerah bermedan ini. 1.5pt



Gambar 1: Sketsa dari modul akselerator

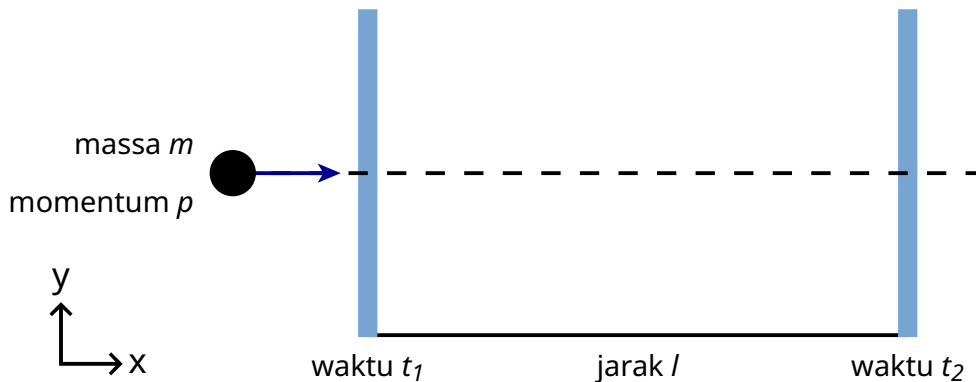
Bagian B. Identifikasi Partikel (4 poin)

Time of flight:

Untuk mendapatkan interpretasi dari proses interaksi pada tumbukan, sangatlah penting untuk dapat mengidentifikasi partikel-partikel berenergi tinggi yang dihasilkan dari tumbukan. Suatu metoda sederhana untuk hal ini adalah dengan mengukur selang waktu (t) yang dibutuhkan untuk menempuh jarak l dari suatu partikel dengan momentum yang diketahui. Metoda ini disebut sebagai detektor Time-of-Flight (ToF). Beberapa partikel yang diidentifikasi oleh detektor dan massanya masing-masing diberikan pada Tabel 2.

Partikel	Massa [MeV/c^2]
Deuteron	1876
Proton	938
Kaon bermuatan	494
Pion bermuatan	140
Elektron	0.511

Tabel 2: Partikel-partikel dan massanya.

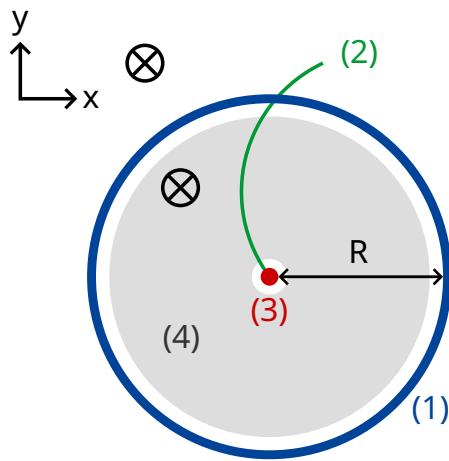


Gambar 2: Skema gambaran dari detektor time-of-flight.

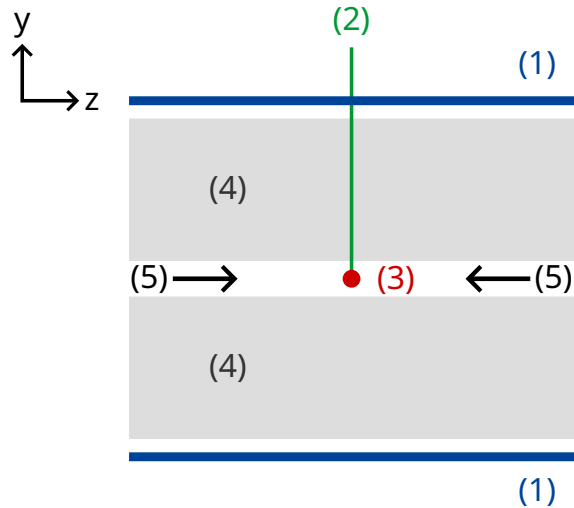
- B.1** Tentukan massa diam dari partikel m dinyatakan dalam momentum p , jarak tempuh l dan waktu tempuh t . Asumsikan partikel memiliki muatan listrik e dan bergerak dengan kecepatan yang nilainya dekat dengan c pada suatu lintasan garis lurus di detektor ToF dan arah gerakanya tegak lurus pada dua pelat (lihat Gambar 2). 0.8pt

- B.2** Hitung jarak minimum l dari detektor ToF yang memungkinkan agar dapat membedakan partikel kaon bermuatan dari partikel pion bermuatan yang memiliki nilai momentum yang sama, yaitu $1.00 \text{ GeV}/c$. Untuk mendapatkan pemisahan partikel yang bagus, maka selisih waktu tempuh kedua partikel haruslah lebih besar dari waktu resolusi detektor. Resolusi dari detektor ToF biasanya memiliki nilai 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

Partikel-partikel yang dihasilkan pada LHC diidentifikasi dengan menggunakan dua tingkat detektor yang terdiri dari detektor jejak dan detektor ToF. Gambar 3 menunjukkan skema peralatan dilihat secara transversal dan longitudinal terhadap arah gerak berkas proton. Kedua detektor tersebut merupakan sebuah tabung yang melingkupi daerah interaksi dengan berkas partikel bergerak di pusat tabung. Detektor jejak mengukur jejak lintasan gerak dari partikel bermuatan listrik yang bergerak pada daerah bermedan magnetik yang arahnya sejajar dengan arah gerak berkas proton. Dengan mengetahui radius lintasan gerak partikel r , kita dapat menentukan momentum transversal partikel p_T . Karena waktu tumbukan diketahui, maka detektor ToF hanya membutuhkan satu tabung untuk mengukur waktu tempuh (waktu yang ditempuh dari tumbukan hingga sampai tabung ToF). Tabung ToF ini ditempatkan persis diluar kamar jejak. Untuk soal ini kalian dapat mengasumsikan bahwa semua partikel yang dihasilkan dari proses tumbukan bergerak pada arah tegak lurus terhadap arah berkas proton awal. Hal ini menyatakan bahwa partikel-partikel yang dihasilkan tidak memiliki momentum pada arah gerak berkas proton awal.



bidang transversal



penampang lintang dari
tampilan longitudinal di pusat
tabung yg sejajar arah grk berkas

- (1) - Tabung ToF
- (2) - jejak lintasan
- (3) - titik tumbukan
- (4) - tabung pelacak jejak
- (5) - berkas proton
- ⊗ - medan magnetik

Gambar 3 : Skema eksperimen untuk identifikasi partikel dengan ruang pelacak jejak dan detektor ToF. Kedua detektor merupakan suatu tabung yang melingkupi titik tumbukan di pusat tabung tersebut. Kiri: tampilan transversal, tegak lurus terhadap arah gerak berkas. Kanan: tampilan longitudinal, sejajar arah gerak berkas. Gerak dari partikel hasil tumbukan tegak lurus terhadap arah gerak berkas awal.

B.3 Tentukan massa diam dari partikel dinyatakan dalam medan magnetik B , 1.7pt
radius dari tabung ToF R , konstanta-konstanta fundamental dan besaran-
besaran yang diukur: radius jejak lintasan r dan waktu tempuh t .

Kita mendeteksi empat partikel dan ingin mengidentifikasinya. Besar medan magnetik pada detektor jejak adalah $B = 0.500$ T. Radius dari tabung ToF adalah 3.70 m. Berikut ini adalah data dari partikel-partikel hasil pengukuran ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Partikel	Radius r [m]	Waktu tempuh t [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Identifikasi keempat partikel tersebut dengan menghitung massanya masing-masing. 0.8pt