

## SOAL LATIHAN PEMBINAAN JARAK JAUH IPhO 2017

### PEKAN VIII

#### 1. Tumbukan dan peluruhan partikel relativistik

##### Bagian A. Proton dan antiproton

Sebuah antiproton dengan energi kinetik = 1,00 GeV menabrak proton yang diam untuk menghasilkan partikel baru  $X^0$ . Proton dan antiproton memiliki energi diam  $m_p c^2 = 0,94$  GeV.

- Hitunglah energi diam dan kecepatan partikel  $X^0$ .
- Partikel  $X^0$  selanjutnya meluruh menjadi dua buah foton. Satu foton bergerak searah dengan arah partikel  $X^0$  mula-mula. Tentukan energi foton tersebut, serta energi dan arah foton kedua.
- Jika yang terjadi, partikel  $X^0$  selanjutnya meluruh menjadi dua buah foton dimana kedua foton dipancarkan dengan sudut yang sama,  $\beta$ , terhadap arah partikel  $X^0$  mula-mula. Tentukan energi foton dan sudut  $\beta$ .

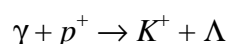
##### Bagian B. Neutrino

Seberkas neutrino- $\mu$  berenergi tinggi diciptakan di FermiLab dengan membuat sebuah partikel pion  $\pi^+$  berenergi total 2 GeV yang kemudian mengalami peluruhan melalui reaksi  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ , dan kemudian membelokkan partikel muon  $\mu^+$  keluar dari berkas menggunakan medan magnet yang kuat.

- Tentukan energi neutrino yang dihasilkan dalam proses ini menurut kerangka diam pion.
- Tentukan energi neutrino yang dihasilkan jika arah neutrino searah dengan arah pion menurut kerangka lab.
- Tentukan energi neutrino agar besar sudut arah gerakan neutrino terhadap arah pion bernilai maksimum menurut kerangka lab.

##### Bagian C. Meson K

Meson  $K^+$  (kaon) dapat diproduksi melalui foton sinar gamma yang menabrak proton yang diam, dan menghasilkan pula partikel Lambda  $\Lambda$  menurut persamaan reaksi



- Tentukan energi foton minimum sebagaimana diukur di kerangka lab (kerangka diam proton), agar reaksi di atas dapat terjadi.

- h. Tentukan, apakah mungkin bagi salah satu dari kemungkinan berikut ini dapat terjadi (i) partikel  $K^+$  atau (ii) partikel  $\Lambda$ , diam di kerangka lab, dan hitunglah energi foton yang diperlukan agar kemungkinan di atas dapat terjadi. Energi diam partikel: proton = 938 MeV; kaon = 493 MeV; lambda = 1115 MeV.

#### Bagian D. Accelerator

- i. Dengan energi yang cukup, sebuah partikel yang eksotik dapat dihasilkan dengan menabrakkan partikel biasa seperti proton ke proton lainnya yang diam. Misalnya diasumsikan tumbukan tersebut bersifat tidak elastik sama sekali. Jika partikel tunggal yang dihasilkan memiliki massa  $n$  kali massa proton ( $n > 2$ ), tentukan energi kinetik proton pertama  $K$  yang diperlukan sebagai fungsi  $n$ .
- j. Banyak accelerator seperti CERN (Eropa), Fermilab (Chicago, USA), SLAC (Stanford, USA) dan DESY (Jerman) menggunakan *colliding beam*, dan tipe accelerator ini disebut sebagai *collider*. Ditinjau dua proton masing-masing memiliki energi kinetik  $K/2$  saling mendekat dan menghasilkan partikel tunggal yang bermassa  $n$  kali massa proton ( $n > 2$ ). Tentukan nilai  $K$  yang diperlukan sebagai fungsi  $n$ .
- k. Bandingkan antara nilai  $K$  pada kedua kasus di atas.

\*\*\*

## **2. Atom Hidrogen**

### Bagian A Model Bohr

Ditinjau model Bohr untuk atom hidrogen. Sebuah elektron bermassa  $m_e$  bermuatan  $-e$  diasumsikan bergerak dengan kecepatan  $v$  mengitari inti atom yang berisi sebuah proton bermuatan  $+e$  dalam orbit lingkaran berjari-jari  $r$  di bawah pengaruh gaya Coulomb.

- a. Keadaan apakah yang dimiliki oleh momentum sudut orbital elektron dalam model Bohr? Tuliskan dalam persamaan yang melibatkan bilangan bulat positif  $n$ .
- b. Tentukan syarat untuk orbit elektron yang stabil.
- c. Hitunglah nilai orbit elektron terkecil, yang dikenal sebagai jari-jari Bohr  $a_0$ .
- d. Jika elektron mengalami transisi dari  $n = 3$  ke  $n = 2$ , tentukan panjang gelombang radiasi foton.

### Bagian B Interaksi gravitasi

Anggap sebuah proton dan elektron bersama-sama membentuk atom hidrogen hanya dengan pengaruh gaya gravitasi.

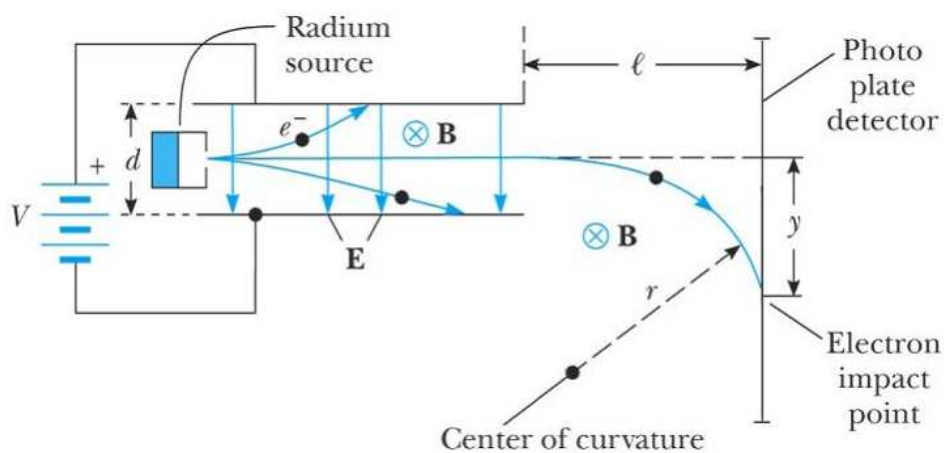
- e. Tentukan rumus tingkat-tingkat energi serta jari-jari untuk atom “gravitasi” ini, dengan tetap mempertahankan syarat untuk model atom Bohr.
- f. Tentukan nilai numerik energi dan jari-jari untuk keadaan dasar.

\*\*\*

### 3. Relativitas Khusus

#### Bagian A: Eksperimen KBN

Eksperimen Kaufmann–Bucherer–Neumann adalah suatu percobaan untuk menunjukkan momentum relativistik partikel bermuatan. Lihat Gambar di bawah ini.



Eksperimen KBN

Sumber radioaktif radium memancarkan elektron keluar akibat adanya beda potensial sebesar  $V$  yang dipasang pada celah dengan lebar  $d$ . Di antara celah tersebut terdapat medan magnet  $\mathbf{B}$  konstan yang mengarah ke dalam gambar. Besar  $\mathbf{B}$ ,  $V$  dan  $d$  telah diatur sedemikian rupa sehingga elektron keluar dengan arah sejajar dengan celah. Setelah melewati celah, masih terdapat medan magnet  $\mathbf{B}$  yang sama seperti medan di antara celah, namun disini tidak lagi terdapat medan listrik  $\mathbf{E}$ . Akhirnya elektron mengenai pelat detector pada jarak vertikal  $y$  dari arah mula-mula, dimana jarak antar pelat dengan ujung celah terdekat adalah  $l$ .

Nilai besaran yang biasa digunakan dalam eksperimen KBN adalah  $d = 2,51 \times 10^{-4}$  m,  $B = 0,0177$  T dan  $l = 0,0247$  m. Untuk beda tegangan  $V = 1060$  V, nilai  $y$  yang diukur adalah dalam eksperimen ini adalah  $0,0024 \pm 0,0005$  m. Massa elektron =  $9,1 \times 10^{-31}$  kg. Muatan elektron =  $1,6 \times 10^{-19}$  C.

- a. Tentukan jari-jari kelengkungan lintasan elektron  $r$ , dinyatakan dalam  $l$  dan  $y$ .

- b. Untuk nilai  $d$ ,  $B$ ,  $l$  dan  $V$  di atas, tentukan kecepatan elektron  $v$ , serta nilai  $y$  dan  $r$  untuk gerak partikel non-relativistik.
- c. Untuk nilai  $d$ ,  $B$ ,  $l$  dan  $V$  di atas, tentukan kecepatan elektron  $v$ , serta nilai  $y$  dan  $r$  untuk gerak partikel relativistik. Tentukan pula nilai  $\gamma = (1 - v^2 / c^2)^{-1/2}$
- d. Bandingkan antara hasil (a) dan (b), manakah nilai  $y$  yang mendekati hasil eksperimen di atas.

Bagian B: Gerak partikel relativistik dalam medan listrik E seragam

Sebuah partikel bermassa  $m$  bermuatan positif  $q$  bergerak sepanjang suatu lintasan lurus dalam suatu medan listrik  $\mathbf{E}$  yang seragam dengan besar  $E$ . Arah gerak partikel searah dengan medan  $\mathbf{E}$ . Peninjauan gerak partikel tersebut adalah secara relativistik. Asumsikan kecepatan awal dan posisi awal berturut-turut adalah  $v_0 = 0$  dan  $x_0 = 0$ .

- e. Tentukan percepatan partikel tersebut  $a$  dinyatakan sebagai fungsi kecepatan  $v$ .
- f. Tentukan kecepatan  $v$  dinyatakan sebagai fungsi waktu  $t$ .
- g. Tentukan percepatan  $a$  dinyatakan sebagai fungsi waktu  $t$ .
- h. Tentukan jarak  $x$  sebagai fungsi  $t$ .
- i. Tunjukkan bahwa untuk medan  $E$  yang lemah, perumusan percepatan, kecepatan dan jarak sebagai fungsi waktu kembali ke bentuk perumusan klasik.

\*\*\*

**4. Eksperimen Fisika Partikel**

Suatu eksperimen fisika partikel disajikan pada Gambar di bawah ini. Suatu berkas proton menumbuk target berupa besi. Tumbukan ini menghasilkan berbagai macam partikel. Pada kasus tertentu, suatu partikel yang berenergi tinggi tetapi tidak stabil akan dapat dihasilkan dari target dan selanjutnya setelah meninggalkan target besi akan meluruh.

Disini, partikel yang dihasilkan adalah partikel X yang netral, kemudian meluruh menjadi pasangan partikel yang muatannya berlawanan tetapi massanya berbeda. Pertama, saat X meluruh menjadi dua partikel, titik puncak/percabangan peluruhan (decay vertex) ditentukan menggunakan silicon vertex tracker, yang juga mengukur sudut bukaan (opening angle)  $\theta$  antara kedua partikel. Kemudian, momentum kedua partikel  $p_1$  dan  $p_2$  ditentukan menggunakan spektrometer magnetik. Drift chamber melacak lintasan partikel dan mengukur kelengkungannya dalam suatu medan magnet seragam. Disini, lintasan partikel dibatasi pada bidang yang tegak lurus medan magnet. Medan magnet pada gambar mengarah ke luar halaman. Akhirnya, energi total  $E_1$  dan  $E_2$  (termasuk energi diam partikel) diukur dengan menggunakan segmented calorimeter.

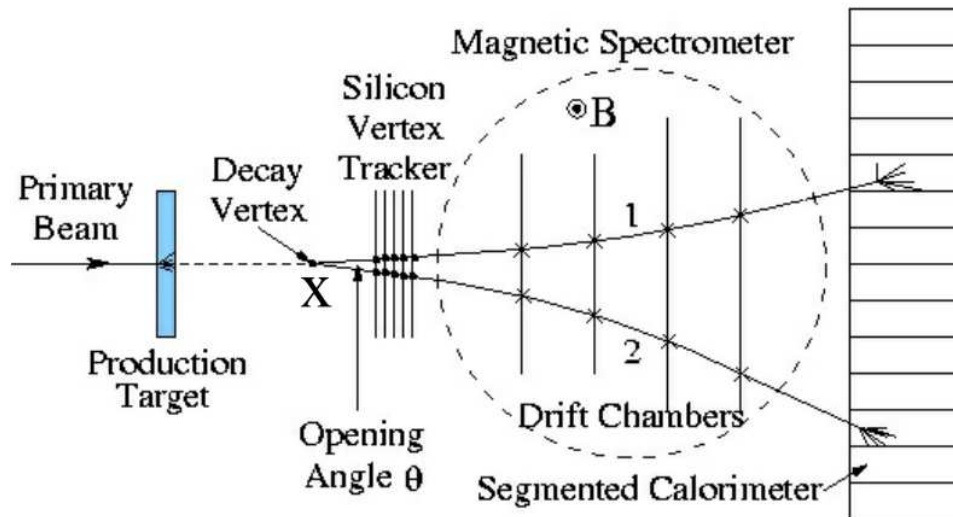
Data:

Partikel 1:  $E_1 = 4,66 \text{ GeV}$ ,  $R_1 = 75 \text{ meter}$  (jari-jari kelengkungan partikel 1 di dalam medan B)

Partikel 2:  $E_2 = 2,53 \text{ GeV}$ ,  $R_2 = 40 \text{ meter}$  (jari-jari kelengkungan partikel 2 di dalam medan B)

Sudut bukaan  $\theta = 12 \text{ derajat}$ .

$B = 0,2 \text{ Tesla}$



- Tentukan tanda muatan masing-masing partikel
- Tunjukkan bahwa radius kelengkungan  $R$  dari suatu partikel relativistik  $e$  yang bergerak dalam gerak melingkar seragam yang tegak lurus terhadap medan magnet  $B$  seragam memiliki hubungan dengan momentum relativistiknya  $p$  melalui hubungan
$$p = aR.$$
- Tentukan nilai tetapan  $a$  dalam satuan SI untuk eksperimen ini.
- Tentukan massa partikel  $m_1$  dan  $m_2$  dalam satuan  $\text{GeV}/c^2$ .
- Tentukan massa partikel  $X$ .

\*\*\*