

Máy gia tốc hạt LHC (10 điểm)

Hãy đọc Hướng dẫn chung ở trong phong bì riêng trước khi em bắt đầu làm bài toán này.

Trong bài này, vật lí của máy gia tốc hạt LHC (Large Hadron Collider) ở CERN được thảo luận. CERN là phòng thí nghiệm vật lí hạt lớn nhất thế giới. Mục tiêu chính của nó là tìm hiểu sâu về các định luật cơ bản của tự nhiên. Hai chùm hạt được gia tốc tới năng lượng cao, được dẫn để chuyển động trong vòng xuyên của máy gia tốc nhờ một từ trường mạnh, rồi được cho va chạm vào nhau. Prôtôn không phân bố đều quanh chu vi của máy gia tốc, mà được tập hợp thành các bó. Các hạt được sinh ra do va chạm được quan sát bằng các máy dò (detector) lớn. Một vài tham số của máy LHC được trình bày trong bảng 1.

Vòng xuyên LHC	
Chu vi vòng xuyên	26659 m
Số bó trong một chùm proton	2808
Số prôtôn trong một bó	1.15×10^{11}
Các chùm proton	
Năng lượng của proton	7.00 TeV
Năng lượng của khối tâm	14.0 TeV

Bảng 1: Giá trị điển hình của các tham số của máy LHC.

Các nhà vật lí hạt sử dụng các đơn vị thuận tiện cho năng lượng, động lượng và khối lượng. Năng lượng được đo bằng êlectron-vôn [eV]. Theo định nghĩa, 1 eV là lượng năng lượng mà một hạt có điện tích nguyên tố, e, nhận được khi chuyển động giữa hai điểm có hiệu điện thế 1 vôn

$$(1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}).$$

Động lượng được đo bằng đơn vị eV/c và khối lượng được đo bằng đơn vị eV/c^2 , trong đó c là tốc độ ánh sáng trong chân không. Ví 1 eV là nhỏ, nên các nhà vật lí hạt thường sử dụng MeV (1 MeV = 10^6 eV), GeV (1 GeV = 10^9 eV) hoặc TeV (1 TeV = 10^{12} eV).

Phần A nghiên cứu sự gia tốc của proton hoặc electron. Phần B khảo sát việc nhận biết các hạt được sinh ra trong va chạm ở CERN.

Phần A. Máy gia tốc LHC (6 điểm)

Gia tốc:

Giả sử rằng các proton được gia tốc bởi một điện áp V sao cho tốc độ của chúng rất gần với tốc độ ánh sáng, và bỏ qua mọi sự mất mát năng lượng do bức xạ hoặc va chạm với các hạt khác.

A.1 Hãy tìm biểu thức chính xác cho vận tốc cuối cùng v của proton như là một hàm của điện áp tăng tốc V và các hằng số vật lí. 0.7pt

Một thiết kế cho một thí nghiệm tương lai tại CERN dự định sử dụng các proton từ LHC và cho chúng va chạm với các electron có năng lượng 60.0 GeV.

- A.2** Với các hạt có năng lượng cao và khối lượng bé thì độ sai lệch tỉ đối $\Delta = (c-v)/c$ của tốc độ cuối cùng v với tốc độ ánh sáng là rất nhỏ. Hãy xác định Δ trong phép gần đúng bậc nhất và tính Δ cho electron có năng lượng 60.0 GeV bằng cách sử dụng điện áp gia tốc V và các hằng số vật lí. 0.8pt

Bây giờ chúng ta trở lại với proton trong LHC. Giả sử rằng ống chứa chùm proton có dạng tròn.

- A.3** Hãy rút ra biểu thức cho mật độ từ thông B (cảm ứng từ) của một từ trường đều cần thiết để giữ chùm proton trên quỹ đạo tròn. Biểu thức này chỉ được chứa năng lượng của E của proton, chu vi L , các hằng số cơ bản và các chữ số. Em có thể dùng các phép gần đúng thích hợp nếu ảnh hưởng của chúng nhỏ hơn độ chính xác của các đại lượng thể hiện qua chữ số có nghĩa nhỏ nhất của đại lượng đó.
Hãy tính mật độ từ thông B cho proton có năng lượng $E = 7.00$ TeV, bỏ qua tương tác giữa các proton. 1.0pt

Công suất bức xạ

Một hạt mang điện chuyển động có gia tốc thì bức xạ năng lượng dưới dạng sóng điện từ. Công suất bức xạ P_{rad} của một hạt mang điện chuyển động tròn với vận tốc góc không đổi chỉ phụ thuộc vào gia tốc a , điện tích q của nó, tốc độ ánh sáng c và hằng số điện ϵ_0 .

- A.4** Hãy dùng phép phân tích thứ nguyên để tìm biểu thức cho công suất bức xạ P_{rad} . 1.0pt

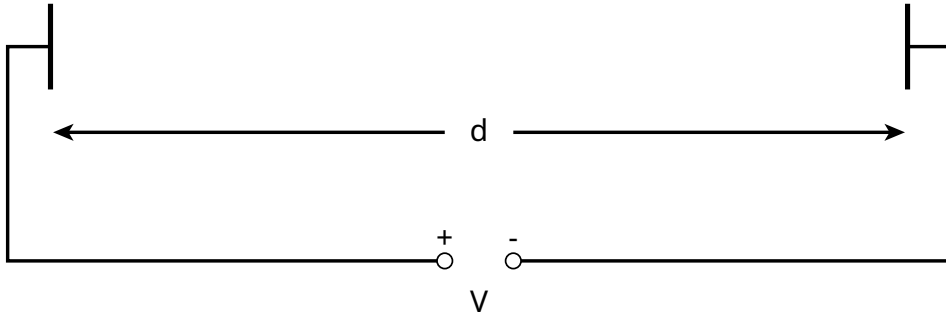
Công thức đúng của công suất bức xạ chứa hệ số $1/(6\pi)$; hơn nữa, phép tính đầy đủ theo thuyết tương đối chứa thêm thừa số γ^4 , với $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Hãy tính công suất bức xạ toàn phần P_{tot} của máy LHC cho một proton có năng lượng $E = 7.00$ TeV (Xem bảng 1). Em có thể dùng các phép gần đúng thích hợp. 1.0pt

Gia tốc thẳng

Ở CERN, proton từ trạng thái nghỉ được gia tốc trong một máy gia tốc thẳng có độ dài $d = 30.0$ m qua một hiệu điện thế $V = 500$ MV. Giả thiết rằng điện trường là đều. Một máy gia tốc thẳng gồm hai tấm phẳng như được phác họa trên Hình 1.

- A.6** Hãy xác định thời gian T để proton đi qua điện trường này. 1.5pt



Hình 1: Phác họa máy gia tốc thẳng

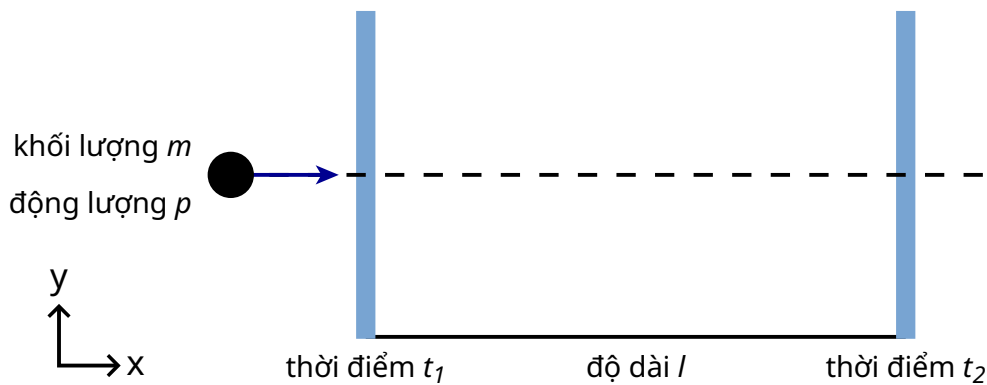
Phần B. Nhận biết hạt (4 điểm)

Thời gian bay:

Điều quan trọng là nhận biết các hạt năng lượng cao được sinh ra trong các va chạm để giải thích các quá trình tương tác. Một phương pháp đơn giản là đo thời gian t mà một hạt với động lượng đã biết cần để vượt qua một độ dài l trong một bộ phận được gọi là máy dò Thời-gian-bay (Time-of-Flight, ToF). Các hạt điển hình được nhận biết trong máy dò, cùng với khối lượng của chúng, được liệt kê trong bảng 2.

Hạt	Khối lượng [MeV/c ²]
Deuteron	1876
Proton	938
Kaon mang điện	494
Pion mang điện	140
Electron	0.511

Bảng 2: Các hạt và khối lượng của chúng.

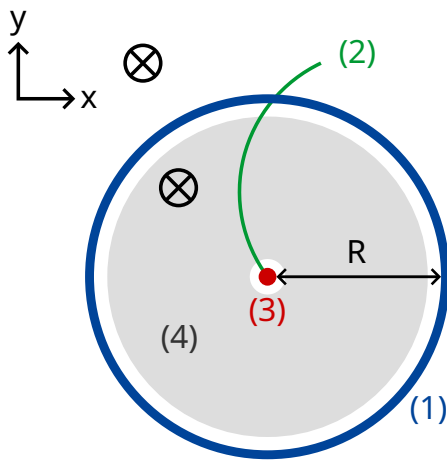


Hình 2: Sơ đồ phác họa của máy dò Thời-gian-bay (ToF).

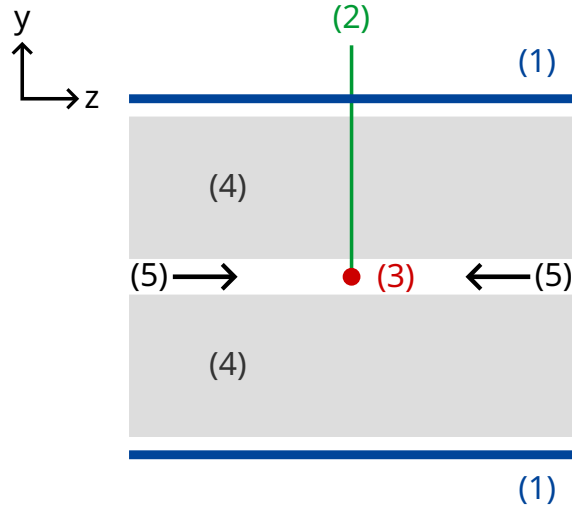
- B.1** Hãy biểu diễn khối lượng m của hạt theo động lượng p , độ dài bay l và thời gian bay t , giả thiết rằng các hạt mang điện tích nguyên tố e , chuyển động với vận tốc gần bằng c , trên một quỹ đạo thẳng, trong máy dò ToF; hạt chuyển động vuông góc với hai mặt phẳng của máy dò (xem hình 2). 0.8pt

- B.2** Hãy tính độ dài tối thiểu l của một máy dò ToF cho phép phân biệt một cách an toàn kaon mang điện với pion mang điện, động lượng của cả hai hạt đều bằng $1.00 \text{ GeV}/c$. Để phân biệt được tốt, độ chênh lệch về thời gian bay ít nhất phải lớn hơn ba lần độ phân giải thời gian của máy dò. Độ phân giải điển hình một máy dò ToF là 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

Trong phần tiếp theo, các hạt được sinh ra trong một máy dò LHC điển hình được nhận diện trong một máy dò hai giai đoạn, gồm một máy dò theo dõi đường đi và một máy dò Thời-gian-bay ToF. Hình 3 cho thấy cấu trúc đầu dò trong mặt phẳng vuông góc với chùm proton và dọc theo chùm proton. Cả hai máy dò đều là các ống bao quanh vùng tương tác với chùm hạt đi dọc phần giữa của ống. Máy dò theo dõi đường đi đo quỹ đạo của một hạt mang điện chuyển động trong từ trường có phương song song với chùm proton. Bán kính r của quỹ đạo cho phép xác định động lượng ngang p_T của hạt. Vì thời điểm va chạm đã được biết, nên máy dò ToF chỉ cần một ống để đo thời gian bay (là thời gian tính từ lúc va chạm đến khi ống ToF thu được hạt). Ống ToF này nằm ngay bên ngoài buồng theo dõi đường đi. Trong nhiệm vụ này, em có thể giả thiết rằng mọi hạt sinh ra bởi va chạm chuyển động vuông góc với chùm proton, điều này có nghĩa là các hạt được tạo ra không có động lượng dọc theo phương chuyển động của chùm proton.



nhìn ngang



mặt cắt dọc
qua tâm ống
theo phương của chùm proton

- (1) - ống ToF
- (2) - đường đi
- (3) - điểm va chạm
- (4) - ống theo dõi
- (5) - chùm proton
- ⊗ - từ trường

Hình 3: Bố trí thí nghiệm để nhận biết hạt với một máy dò theo dõi đường đi và máy dò ToF. Cả hai máy dò là những ống bao quanh điểm va chạm, nằm ở giữa. Hình trái: nhìn ngang, vuông góc với chùm proton. Hình phải: nhìn dọc, song song với chùm proton. Các hạt sinh ra chuyển động vuông góc với chùm proton.

B.3 Hãy biểu diễn khối lượng của hạt theo mật độ từ thông B , bán kính R của ống ToF, các hằng số cơ bản và các đại lượng đo được: bán kính r của quỹ đạo và thời gian bay t . 1.7pt

Chúng ta phát hiện được bốn loại hạt và muốn nhận biết chúng. Mật độ từ thông trong máy dò theo dõi đường đi là $B = 0.500 \text{ T}$. Bán kính R của ống ToF là 3.70 m . Dưới đây là các phép đo ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Hạt	Bán kính quỹ đạo r [m]	Thời gian bay t [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Nhận biết 4 loại hạt bằng cách tính khối lượng của chúng.

0.8pt