Wstęp do Eksperymentalnej Fizyki Wysokich Energii

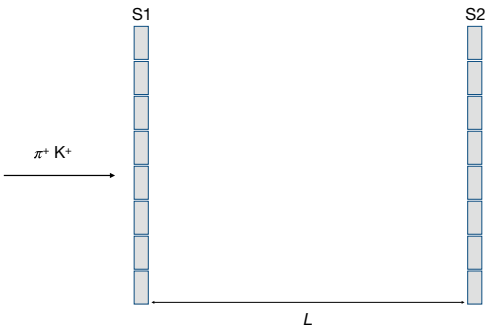
Seminarium 4.03.2024 - zagadnienia do dyskusji

1. W teorii rozpraszania, czynnik struktury (form factor) odpowiada za uwzględnienie rozciągłości przestrzennej tarczy na której następuje rozpraszanie. Czynnik struktury zdefiniowany jest jako:
$$F(q^2) \equiv \frac{1}{Ze}\int_V e^{-\frac{i}{\hbar}\vec{q}\cdot\vec{R}}\rho(\vec{R})\,dV$$
gdzie $\vec{q} = \hbar(\vec{k} - \vec{k}_0)$ jest przekazem pędu od pocisku do tarczy, a całkowanie odbywa się po objętości tarczy. W rozpraszaniu coulombowskim istotny jest rozkład ładunku w tarczy, $\rho(\vec{R})$. Pokaż, że w przypadku tarczy sferycznie symetrycznej, czynnik struktury można zapisać jako:
$$F(q^2) = \frac{4\pi\hbar}{Zeq}\int R\rho(R)\sin\left(\frac{qR}{\hbar}\right)dR$$
Znajdź postać czynnika struktury dla jądra
(a) o równomiernie rozłożonym ładunku Ze wewnątrz sfery o promieniu a,
(b) o sferycznie eksponencjalnym rozkładzie ładunku $\rho(r) = \frac{Zeb^3}{8\pi}e^{-br}$.
(c) Pokaż, że dla ładunku punktowego, $\rho(R) = \frac{\delta(R)Ze}{4\pi}$, $F(q^2) = 1$.

2. W eksperymencie badamy rozpady cząstki Σ^+ wykorzytując detektor śladowy o dobrej rozdzielczości przestrzennej. Bariony Σ^+ produkowane są w reakcji $\pi^+ + p \to \Sigma^+ + K^+$ w której cząstki π^+ o pędzie 20 GeV/c rozpraszane są na cienkiej tarczy wodorowej ($m_\pi = 0.1396$ GeV/c^2, $m_p = 0.9383$ GeV/c^2, $m_\Sigma = 1.189$ GeV/c^2, $m_K = 0.4937$ GeV/c^2). Załóżmy, że detektor ma kształt cylindra o promieniu R i długości L i jest umieszczony tuż za tarczą, a oś cylindra pokrywa się z kierunkiem wiązki π^+. Dla uproszczenia załóżmy, że wszystkie cząstki Σ^+ rozpadają się w czasie nie dłuższym niż $3\tau_\Sigma$ ($\tau_\Sigma = 0.799 \times 10^{-10}$ s).
(a) Czy nasza aparatura jest w stanie wykryć wszystkie produkty rozpadu cząstek Σ^+?
(b) Ile wynosi minimalna długość detektora, która zapewni rejestrację wszystkich możliwych punktów rozpadu Σ^+?
(c) Ile wynosi minimalny promień detektora, który zapewni rejestrację wszystkich możliwych punktów rozpadu Σ^+?
(d) Czy proponowana aparatura zapewnia detekcję wszystkich produkowanych K^+?
(e) Jeśli nie, to jaką część produkowanych K^+ jesteśmy w stanie zarejestrować, zakłądając, że są one produkowane izotropowo w układzie środka masy?

3. (a) Wiązka pionów o całkowitej energii E_π padając na tarczę wodorową, produkuje rezonans o masie M. Rezonans szybko rozpada się na cząstki o masach m_1 i m_2. Wiedząc, że $M = 2.58m_1$ oraz że $m_2 \ll m_1$, oszacuj minimalną wartość E_π aby kąt pod jakim produkowana jest cząstka m_1 był maksymalny.
(b) Załóżmy, że wyprodukowany rezonans to cząstka $\Delta(2420)$. Możliwy kanał rozpadu (inny niż w (a)) tej cząstki to $\Delta(2420) \to \Sigma + K$ ($m_\Sigma = 1.189$ GeV/c^2, $m_K = 0.494$ GeV/c^2). Załóżmy, że energia wiązki π jest taka jak wyznaczona w (a). Jeśli cząstka Σ została wyemitowana pod kątem 120° w układzie CMS, to pod jakim kątem ta emisja nastąpiła w układzie LAB? Jaki jest jej pęd?
(c) Układ eksperymentalny został zaprojektowany tak aby rejestrować cząstki Σ produkowane w powyższej reakcji. Wiedząc, że detektor ma długość 26 cm i spełnia kryterium, że rejestruje co najmniej 99% punktów rozpadu Σ, wyznacz średni czas życia cząstki Σ.

4. (Time of Flight detector) Dwa identyczne liczniki scyntylacyjne, S1 i S2, o grubości 1 cm ustawiono prostopadle do wiązki (poruszającej się w kierunku osi x) w odległości $L = 3$ cm od siebie. Służą one do pomiaru czasu przelotu cząstek. Załóżmy, że wszystkie przelatujące cząstki mają takie same pędy p. Długość radiacyjna dla scyntylatora wynosi $X_0 = 40$ cm.



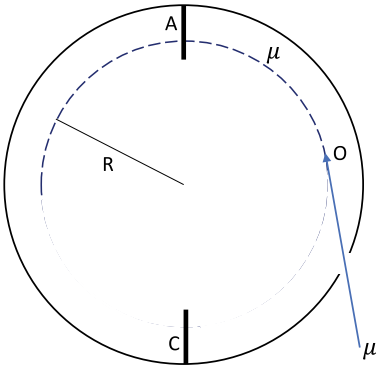
(a) Pokaż, że w granicy $E \gg m$ relacja pomiędzy czasem przelotu cząstek o masach m_1 i m_2 ma postać:

$$\Delta T \equiv T_2 - T_1 = \frac{L}{2c}\frac{m_1^2 - m_2^2}{p^2}$$

(b) Chcemy wykorzystać powyższy układ do separacji π^+ ($m_\pi = 139$ MeV/c^2) oraz K^+ ($m_K = 493$ MeV/c^2) w wiązce w której wszystkie cząstki mają pęd $p = 1$ GeV/c. Jaka jest wymagana rozdzielczość czasowa detektorów scyntylacyjnych, aby było możliwe rozróżnienie cząstek w ramach 4 odchyleń standardowych?

(c) Załóżmy, że liczniki S1 i S2 składają się z pasków o długości 5 cm (w kierunku osi y) oraz że pomiędzy nimi w jednakowej odległości umieszczono identyczny detektor S3. Włączono jednorodne pole magnetyczne o indukcji 1 Tesla, prostopadłe do płaszczyzny rysunku, w obszarze pomiędzy S1 i S2. Taki układ można wykorzystać jako spektrometr do pomiaru pędu na podstawie pomiaru długości strzałki (ang. sagitta). (W geometrii strzałka łuku kołowego to odległość od środka łuku do środka jego cięciwy.) Oszacuj względną rozdzielczość pomiaru pędu, $\Delta p/p$, dla pionów o pędzie 1 GeV/c.

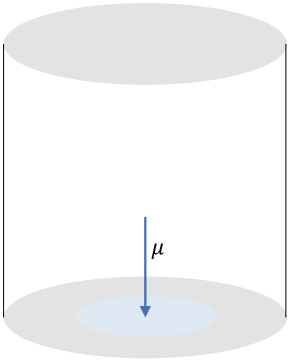
5. Muon o pędzie $p = 300$ MeV/c wpada w obszar jednorodnego pola magnetycznego o indukcji $B = 0.5$ T, prostopadłego do płaszczyzny rysunku. W chwili t_0 kiedy muon znajduje się w punkcie O, pole magnetyczne zostaje włączone, tak aby utrzymać go na orbicie kołowej o promieniu R. Ośrodek w którym porusza się muon ma gęstość $\rho = 10^{-3}$ g/cm^3, ale poruszając się po orbicie kołowej muon przelatuje przez dwie żelazne przegrody, każda o grubości 2 mm ($\rho_{\mathrm{Fe}} = 7.87$ g/cm^3).



(a) Znajdź $\Delta B = B' - B$, gdzie B jest wartością indukcji magnetycznej w chwili t_0, a B' wartością potrzebną do utrzymania muonu na orbicie kołowej o promieniu R po jednym obiegu okręgu.

(b) Jeśli całą aparatura zostanie umieszczona w próżni, a przegrody żelazne usunięte, po ilu średnio obiegach muon się rozpadnie?

6. Detektor Super Kamiokande to ogromny cylinder wypełniony czystą wodą ($n = 1.33$, $\rho = 1$ g/cm^3) odczytywany za pomocą fotodetektorów. Atmosferyczne neutrina muonowe są rejestrowane za pomocą promieniowania Czerenkova emitowanego przez muony produkowane w oddziaływaniuach neutrin z jądrami wody. Załóżmy dla uproszczenia, że wszystkie muony mają pęd 1 GeV/c.



(a) Oszacuj maksymalną długość śladu muonu w wodzie.

(b) Na jakiej części tej drogi muon emituje promieniowanie Czerenkova?

(c) Jaki jest promień okręgu na dnie detektora oświetlony promieniowaniem Czerenkova, jeśli muon został wyprodukowany w odległości 50 cm od dna zbiornika i poruszał się wzdłuż osi cylindra (rysunek).

7. (a) W zderzaczu kołowym przeciwbieżnych wiązek elektronowej i pozytonowej (o jednakowych i przeciwnie skierowanych pędach) następują zderzenia przy energii $\sqrt{s} = 90$ GeV. Po każdej stronie punktu interakcji, w odległości 2 m znajdują się detektory pierścieniowe, o promieniach wewnętrznym i zewnętrznym równych odpowiednio 12 cm i 20 cm i zaniedbywalnych grubościach. Detektory te służą do rejestracji elektronów i pozytonów rozproszonych w procesie Bhabha, $e^+ + e^- \to e^+ + e^-$. Wiedząc, że obserwowana częstość detekcji procesu Bhabha wynosi 1 przypadek na sekundę, oraz znając postać różniczkowego przekroju czynnego na ten proces:

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = \frac{8\pi\alpha^2}{E_e^2}\frac{(\hbar c)^2}{\theta^3}$$

gdzie E_e to energie rozproszonych e^- oraz e^+, a θ to kąt polarny rozproszonych e^+/e^- względem kierunków wiązek padających, znajdź świetlność akceleratora.

(b) Oblicz średnią liczbę zderzeń cząstka-cząstka w zderzeniu dwóch pęczków jeśli wiadomo, że świetlność wynosi $\mathcal{L} = 2.5 \times 10^{31}$ cm^{-2}s^{-1}, całkowity przekrój czynny $\sigma = 20$ mb, a pęczki przecinają się co 4 μs. Ile wynosi prawdopodobieństwo, że w przecięciu pęczków nie nastąpi ani jedno zderzenia cząstka-cząstka?