

Ćwiczenie 102

Cząstki elementarne

Cel ćwiczenia

Analiza oddziaływań cząstek elementarnych na zdjęciach z komory pęcherzykowej. Sprawdzenie prawa zachowania ładunku i szacowanie energii w procesie wielorodnej produkcji cząstek. Identyfikacja niektórych procesów rozpadu wybranych cząstek elementarnych oraz procesów tworzenia par elektron-pozyton.

Wprowadzenie

Szczególna teoria względności

Szczególna teoria względności stanowi uogólnienie praw fizyki klasycznej ma cały występujący w przyrodzie zakres prędkości.

Podstawę teorii stanowią dwa postulaty sformułowane w r. 1905 przez Alberta Einsteina:

Postulat I: Prędkość c rozchodzenia się światła (ogólniej: fali elektromagnetycznej) w próżni jest jednakowa we wszystkich inercjalnych układach odniesienia niezależnie od ruchu źródła i obserwatora.

Postulat II: (Zasada względności): We wszystkich układach inercjalnych słuszne są te same prawa przyrody. Matematyczna postać praw jest w tych układach identyczna (niezmiennicza).

Konsekwencją przyjęcia tych postulatów była rewizja pojęć klasycznych, która doprowadziła do nowego sposobu transformowania współrzędnych czasu i przestrzeni, zwanego transformacją Lorentza.

W dynamice spełnienie postulatów szczególnej teorii względności wymagało wprowadzenia nowych definicji pędu i energii. Zasadnicza zmiana polegała na przyjęciu, że masa ciała jest rosnącą funkcją jego prędkości v , której maksymalna wartość wynosi c ,

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad \text{gdzie } m_0 \text{ – masa spoczynkowa} \quad (1)$$

Pęd został zdefiniowany jako iloczyn masy $m(v)$ i wektora prędkości

$$\mathbf{p} = m(v) \mathbf{v}, \quad (2)$$

natomiast energia całkowita E cząstki swobodnej jako

$$E = m(v) c^2. \quad (3)$$

Słynny ten wzór wyrażający równoważność masy i energii jest jedną z najważniejszych konsekwencji postulatów teorii względności.

W odróżnieniu od fizyki klasycznej, spoczywająca cząstka swobodna posiada teraz energię różną od zera, tzw. energię spoczynkową. Energię spoczynkową można interpretować jako energię potencjalną, która może być zamieniona w inną formę energii.

Przykładem jest rozpad dowolnej cząstki niestabilnej (np. jądra promieniotwórczego), w którym energia ta zamienia się częściowo na energie spoczynkowe, a częściowo kinetyczne produktów rozpadu. Kosztem zmniejszenia masy spoczynkowej wydzielane są, w postaci energii kinetycznej produktów reakcji, ogromne energie w procesach syntezy jądrowej w gwiazdach oraz w reakcjach rozszczepienia jąder w reaktorach i bombach atomowych.

Innym przykładem równoważności masy i energii jest produkcja nowych cząstek kosztem energii zderzenia dwóch innych, lub powstanie pary elektron-pozyton w wyniku oddziaływania fotonu z polem elektrycznym jądra atomowego w reakcji $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$.

Zdefiniowane w powyższy sposób wielkości \mathbf{p} i E spełniają odpowiednio prawo zachowania pędu i energii całkowitej w dowolnym inercjalnym układzie odniesienia.

Między relatywistycznym pędem i energią całkowitą zachodzi związek

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4. \quad (4)$$

Wyrażenie to ma tę samą wartość w dowolnym układzie inercjalnym czyli jest niezmiennikiem transformacji Lorentza.

W granicy $\frac{v}{c} \rightarrow 0$ wszystkie wzory relatywistyczne przechodzą w klasyczne. Prędkości obiektów z jakimi mamy do czynienia w życiu codziennym stanowią niewielki ułamek prędkości światła. Nasze codzienne doświadczenie obejmuje zatem graniczny przypadek teorii.

Doświadczalnego potwierdzenia słuszności teorii względności w całym zakresie prędkości dostarcza fizyka wysokich energii i fizyka cząstek elementarnych.

Źródłem cząstek poruszających się z prędkościami bliskimi prędkości światła jest promieniowanie kosmiczne oraz akceleratory. Największe akceleratory znajdują się w Stanach Zjednoczonych, w Szwajcarii i w Niemczech. Maksymalne energie w nich osiągnęte są rzędu 10^{12} elektronowoltów.

Cząstki elementarne

Pod nazwą cząstki elementarne rozumie się obecnie około 200 znanych cząstek, w olbrzymiej większości nietrwałych. Cząstki te pochodzą z promieniowania kosmicznego i docierają do Ziemi dzięki dylatacji ich czasów życia lub też są produkowane w warunkach laboratoryjnych w zderzeniach innych cząstek uzyskujących dostateczną energię w akceleratorach. Cząstki posiadają swoje antycząstki. Masy spoczynkowe, czasy życia i spiny są dla cząstek i antycząstek takie same. Ładunek elektryczny i moment magnetyczny różnią się znakiem podobnie jak inne liczby kwantowe.

Wszystkie procesy w których uczestniczą cząstki elementarne są wynikiem oddziaływań między nimi. Obecnie rozróżniamy cztery oddziaływania fundamentalne – wymieniając w kolejności ich intensywności: grawitacyjne, słabe, elektromagnetyczne i silne (jądrowe).

Każde oddziaływanie traktujemy jako efekt wymiany tzw. cząstki pośredniczącej (kwantu pola, nośnika oddziaływania) między oddziaływującymi obiektami. W przypadku oddziaływań elektromagnetycznych jest to neutralny, bezmasowy foton γ . Nośnikami oddziaływań silnych jest osiem obojętnych elektrycznie, bezmasowych gluonów, oddziaływania słabego trzy bozony pośredniczące W^+ , W^- , Z^0 obdarzone ładunkiem elektrycznym i mające duże masy. Nośnikiem oddziaływania grawitacyjnego jest bezmasowa cząstka – grawiton. Oddziaływania grawitacyjne są najłabsze i nie odgrywają żadnej roli w fizyce wysokich energii.

Obecna systematyka cząstek elementarnych oparta jest na ich związkach z oddziaływaniami fundamentalnymi. Wszystkie cząstki dzielą się na dwie rodziny: leptonów i hadronów.

Pierwszą rodzinę stanowi sześć leptonów. Należą do niej: elektron e , mion μ , taon τ – uczestniczące w oddziaływaniach: elektromagnetycznym i słabym, oraz towarzyszące im neutrina: elektronowe ν_e , mionowe ν_μ i taonowe ν_τ , biorące udział jedynie w słabych oddziaływaniach.

Ze względu na znikomo mały przekrój czynny na oddziaływanie z materią neutrino są niezwykle trudne do wykrycia. Problem, czy posiadają one zerową czy też bardzo małą, lecz różną od zera masę spoczynkową, jest jednym z wielu dotąd nierozwiązanych problemów fizyki cząstek elementarnych. Wszystkie leptony są fermionami (czyli posiadają spin połówkowy).

Cząstki z rodziny hadronów mogą uczestniczyć we wszystkich rodzajach oddziaływań. Hadrony dzielą się na dwie grupy: mezony i bariony. Mezony są bozonami (czyli mają spin całkowity), bariony są fermionami. Wszystkie mezony są nietrwałe, końcowym produktem ich kolejnych rozpadów są elektrony, fotony i neutrino. Do barionów zaliczamy proton, neutron oraz cięższe od nich hiperony. Hiperony są nietrwałe, końcowym rezultatem ich kolejnych rozpadów są proton i neutron oraz leptony i fotony (patrz tabela 1).

W tabeli 1 umieszczono wybrane hadrony o względnie długim czasie życia.

Zgodnie ze współczesnym stanem wiedzy wszystkie hadrony są cząstkami złożonymi, zbudowanymi z kwarków. Kwarków jest 6, wszystkie mają spin $\frac{1}{2}$ oraz ładunek ułamkowy $\frac{2}{3}|e|$ lub $\frac{1}{3}|e|$ (e – ładunek elektronu). Nie zaobserwowano doświadczalnie kwarków swobodnych i uważa się, że są one na stałe „uwięzione” wewnątrz hadronów.

Razem z 6 leptonami, które zachowują się jak obiekty punktowe, kwarki uważane są obecnie za fundamentalne składniki materii.

Metoda opracowywania pomiarów wykonanych na zdjęciach z komory pęcherzykowej¹

Wnętrze odpowiednio oświetlonej komory fotografowano kilkoma umieszczonymi w różnych pozycjach aparatami. Analiza zdjęć umożliwiała rekonstrukcję przestrzenną zda-

¹ Budowa i zasada działania komory pęcherzykowej opisana jest szczegółowo w instrukcji do ćw. 101.

rzeń. Komory umieszczano w jednorodnym polu magnetycznym, które powodowało zakrzywienie torów, umożliwiając określenie znaku ładunku cząstek oraz wyznaczenie ich pędu na podstawie pomiaru promienia krzywizny śladów.

Na wybranym do analizy zdjęciu dokonywano pomiaru współrzędnych punktów na torach cząstek (na dwu lub trzech zdjęciach stereoskopowych). Na podstawie tych pomiarów można było obliczyć współrzędne przestrzenne punktów, odtworzyć przestrzenny kształt torów i sprawdzać dla jakiej kombinacji różnych cząstek, przyporządkowanych kolejno na próbę poszczególnym torom, spełnione są prawa zachowania pędu i energii. Ich spełnienie nie tylko identyfikuje ostatecznie obserwowaną reakcję (określa rodzaj każdej z uczestniczących cząstek) ale dostarcza informacji o pędzie i energii każdej cząstki z osobna. Złożoność i pracochłonność tych obliczeń wymagała użycia komputerów i skomplikowanych programów liczących.

Analiza jakościowa reakcji zarejestrowanych na zdjęciach z komory pęcherzykowej

Przedstawione do analizy zdjęcia pochodzą z komory pęcherzykowej wypełnionej ciekłym wodorem lub deuterem naświetlonej wiązką mezonów π^+ bądź K^+ o pędzie 8 GeV/c lub też π^- o pędzie 21 GeV/c. Przedmiotem analizy jest:

a) wielorodna produkcja cząstek w zderzeniu π^+p bądź K^+p (rys. 1),

Wielorodną produkcją nazywamy reakcję zderzenia dwóch cząstek **w której**, kosztem części energii kinetycznej **cząstki padającej**, zostaje wyprodukowanych wiele cząstek nowych. Przykłady takich reakcji przedstawiają rysunki 1a i 1b. Linie przerywane przedstawiają cząstki elektrycznie obojętne, które w związku z tym nie zostawiają śladów w komorze: widać jedynie ślady cząstek naładowanych, które z nich powstają i na ich podstawie można wydedukować istnienie cząstek neutralnych i zidentyfikować je.

Wysokoenergetyczny mezon π^- (wyprodukowany wcześniej przy użyciu protonów rozpędzonych przez akcelerator) uderza w nieruchomy proton, stanowiący jądro wodoru wypełniającego komorę pęcherzykową. W wyniku tego zderzenia powstaje 8 naładowanych cząstek, których ślady zakrzywiają się w polu magnetycznym w jedną lub w drugą stronę zależnie od znaku ich ładunku.

Poruszająca się w komorze naładowana cząstka może uderzyć w elektron, wybijając go z atomu cieczy. Elektron taki nazywany elektronem δ zostawia w komorze charakterystyczny ślad w postaci zwiniętej spiralki (patrz rys. 1b). Na podstawie jego toru można zorientować się, w którą stronę zakrzywiają się cząstki naładowane ujemnie.

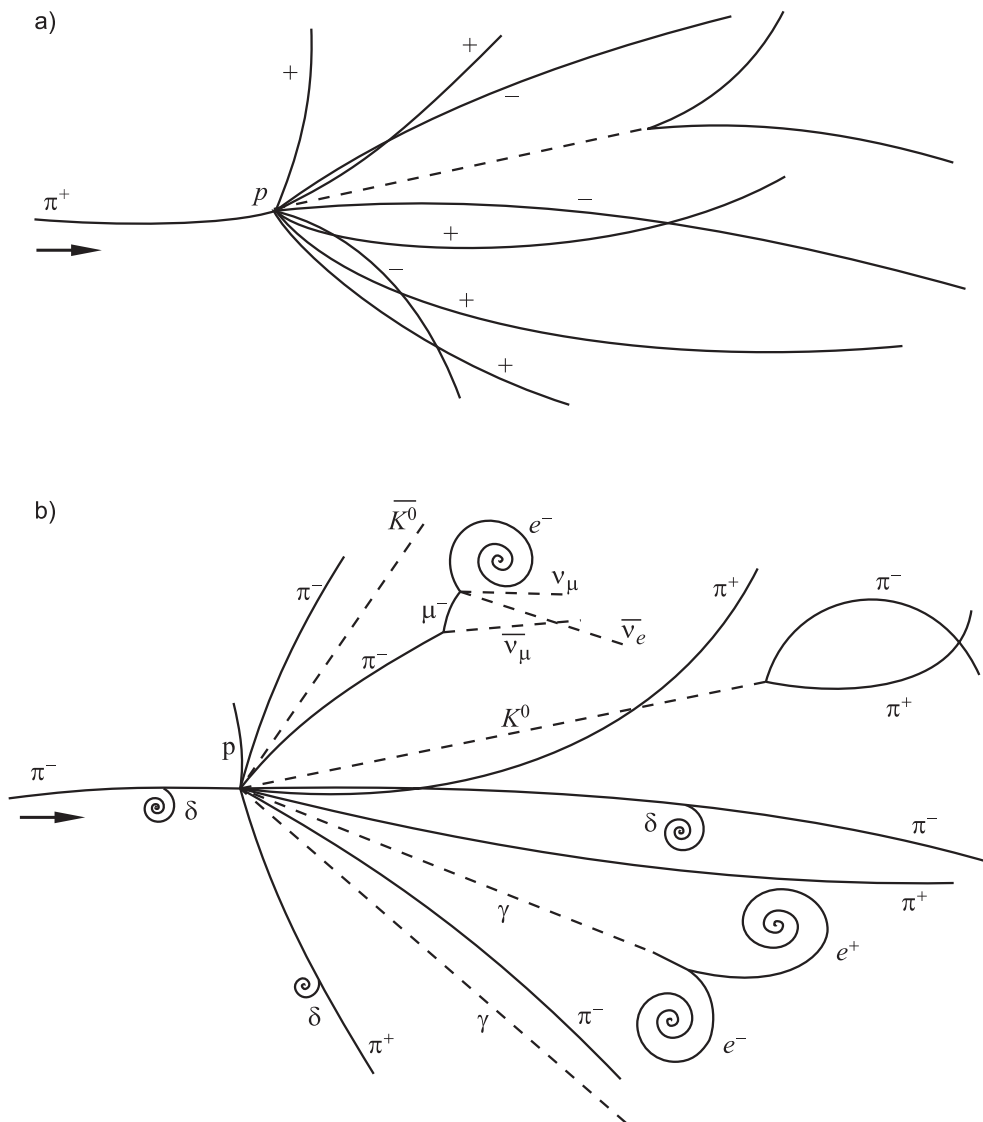
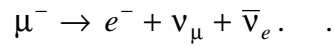
b) przemiany wyprodukowanych cząstek

W procesie wielorodnej produkcji cząstek w największych ilościach produkowane są najlżejsze bariony: dodatnio naładowane piony π^+ i π^- oraz piony neutralne π^0 . Ich rozpady są zupełnie różne.

Piony naładowane rozpadają się w locie na mion i neutrino,

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_\mu, \quad \pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_\mu.$$

Ponieważ czas życia pionów naładowanych wynosi $2,6 \cdot 10^{-8}$ s, łatwo oszacować, że przy szybkości rzędu połowy prędkości światła mogą przebiec średnio dziesiątki centymetrów. Zatem jest spora szansa na zaobserwowanie ich rozpadu w polu widzenia komory. Mion z kolei rozpada się na elektron i dwa niewidoczne neutrino (rys. 1b),



Rys. 1. Wielorodna produkcja cząstek w komorze pęcherzykowej: a) sprawdzenie prawa zachowania ładunku, b) przykłady rozpadów cząstek wyprodukowanych

Natomiast piony obojętne rozpadają się (w 99,8%) na dwa kwanty γ .

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma. \quad .$$

Ponieważ czas π^0 życia wynosi tylko $5 \cdot 10^{-15}$ s, rozpad następuje praktycznie w wierzchołku oddziaływania, z którego wylatują dwa niewidoczne kwanty γ . Istnienie fotonu można wykryć, jeżeli w oddziaływaniu z protonami komory przekształci się w parę elektron – pozyton,

$$\gamma + p \rightarrow p + e^- + e^+, \quad .$$

Przypadek taki pokazany jest na rys. 1a. Tory obydwu cząstek e^- i e^+ są styczne do toru kwantu gamma i celują w wierzchołek oddziaływania.

Wgląd w tabelę barionów sugeruje, że po mezonach π najczęściej produkowaną cząstką są mezony K (kaony). Rys. 1b pokazuje neutralny (zatem niewidoczny) mezon K^0 , rozpadający się na parę (widocznych) pionów,

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-. \quad .$$

Należy zwrócić uwagę na to, że rozpad $K^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$ często wygląda na zdjęciu bardzo podobnie do zamiany kwantu γ w parę $e^- e^+$ (rys. 1b, 3b, 3c). Można je rozróżnić po tym, że tory elektronu i pozytonu powstającej pary są początkowo (w „wierzchołku”) styczne do siebie, podczas gdy kąt pomiędzy rozchodzącymi się mezonami π^- i π^+ powstałymi z rozpadu mezonu K^0 jest od początku różny od zera.

Najprostsza analiza ilościowa

Analiza ilościowa ma na celu rozpoznanie cząstek i pomiar ich energii oraz pędu. W każdym procesie oddziaływania cząstek spełnione są podstawowe prawa zachowania znane z fizyki obiektów makroskopowych, mianowicie

- prawo zachowania ładunku,
- relatywistyczne prawo zachowania pędu,
- relatywistyczne prawo zachowania energii.

Do analizy wybrane jest oddziaływanie, o którym wiadomo, że oprócz naładowanych cząstek (o widocznych na zdjęciu śladach) nie zostały w nim wyprodukowane żadne cząstki neutralne.

Wartość pędu p każdej wyprodukowanej cząstki oblicza się z zależności

$$p = e B \rho_{rzech} = e B \frac{\rho}{K \cos \lambda} \quad (5)$$

gdzie: e – ładunek elementarny,

B – indukcja pola magnetycznego zakrzywiającego tory cząstek; jej wartość liczbową jest podana;

λ – kąt, pod jakim cząstka zagłębia się lub wznosi w komorze względem

płaszczyzny zdjęcia (czyli płaszczyzny xy – patrz rys. 2: na zdjęciu jest więc on niewidoczny!);

ρ – promień krzywizny toru cząstki na zdjęciu: jest on rzutem rzeczywistego promienia krzywizny ρ_{rzecz} na płaszczyznę xy ,

K – powiększenie obrazu w stosunku do rozmiarów w komorze.

Kąta λ bez zdjęć stereoskopowych i komputera wyznaczyć się nie da – na płaskim. pojedynczym zdjęciu po prostu go nie widać.

Co możemy zdziałać, nie dysponując aparaturą do stereoskopowego mierzenia torów cząstek?

a) sprawdzanie prawa zachowania ładunku.

Wzór Lorentza określa siłę działającą na cząstkę w polu magnetycznym jako iloczyn ładunku q , pola magnetycznego B i prędkości v . Kierunek wektora siły F jest prostopadły do wektorów \mathbf{B} i \mathbf{v} , zatem przekształca prostoliniowy tor (jaki byłby przy nieobecności pola) w tor zakrzywiony. Dla przypadku gdy wektory \mathbf{B} i \mathbf{v} są wzajemnie prostopadłe tor jest odcinkiem koła, dla przypadku ogólnego – fragmentem linii śrubowej. Na fotografii widzimy rzut tej linii na płaszczyznę. Niemniej, zachowana jest przy tym kierunek odchylenia, zależny od znaku ładunku: ładunki dodatnie i ujemne są odchylane w lewo względnie prawo od prostej stycznej do punktu oddziaływania.

Pozostaje zagadnienie, jaki znak przypisać cząstkom. Jeżeli na zdjęciu jest przynajmniej jeden elektron deta, określa on znak odchylenia cząstki naładowanej ujemnie.

b) szacowanie energii cząstki padającej

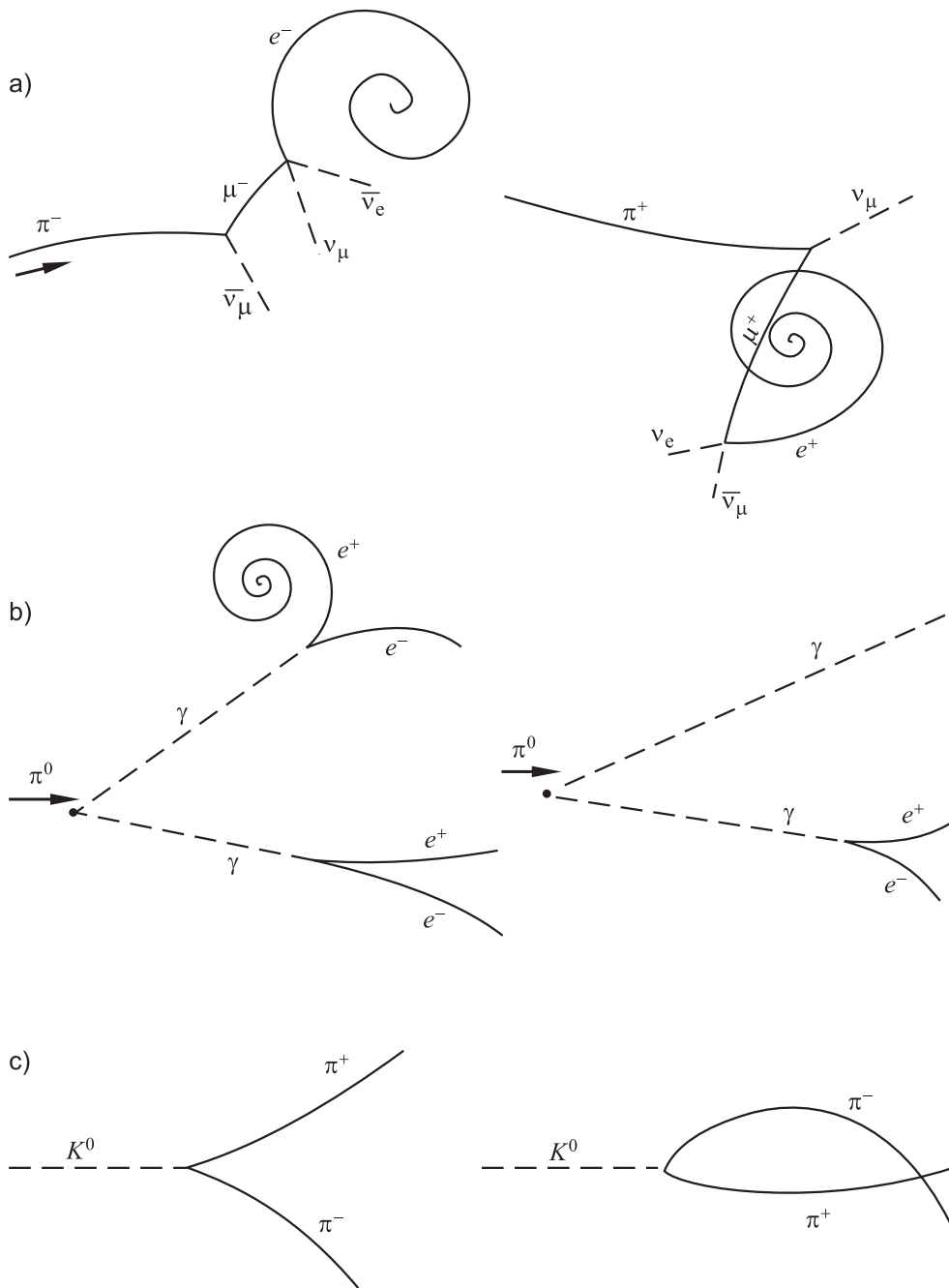
W wyniku oddziaływania padającej cząstki (pion lub proton) z protonem tarczy, wyprodukowanych zostaje m nowych cząstek. Ponieważ zachodzi to poprzez oddziaływania silne, muszą to być bariony. Najobficiej produkowane są najlżejsze piony. Energię padającej cząstki można oszacować od dołu biorąc pod uwagę znane masy spoczynkowe wyprodukowanych cząstek. W fizyce cząstek elementarnych energii nie wyraża się w dżulach, tylko w elektronowoltach:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

i jednostkach pochodnych: keV, MeV, GeV.

Literatura

1. Orear J.: *Fizyka t.I. II*. Warszawa, WNT 1993
2. Strzałkowski A.: *O siłach rządzących światem*. Warszawa, PWN 1996
3. Acosta V. i in.: *Podstawy fizyki współczesnej*. Warszawa, PWN 1987



Rys. 3. Przykłady rozpadów cząstek obserwowane w komorze pęcherzykowej:
 a) naładowane π^\pm , b) neutralne π^0 , c) neutralne K^0

Aparatura

Zdjęcia z komory pęcherzykowej (błony pozytywowe) ogląda się i analizuje w projekcji na stole – przy użyciu zwykłego powiększalnika fotograficznego. Do tych zdjęć, na których wykonuje się pomiary, dołączone są ich negatywowe odbitki na papierze fotograficznym, ułatwiające rozpoznanie śladów dzięki znajdującemu się na nich opisowi. Na odwrocie tych odbitek podane są też wszystkie niezbędne do obliczeń dane. **Do pomiaru promieni krzywizn torów służy komplet 4 szablonów z narysowanymi łukami okręgów o różnych promieniach. Ponadto do dyspozycji jest komputer z programem symulującym graficznie różne rodzaje reakcji zachodzących w wyniku zderzenia cząstek elementarnych i wykonującym niezbędne obliczenia.**

Wykonanie ćwiczenia

A. Sprawdzenie praw zachowania dla wielorodnej produkcji cząstek.

1. **Zwrócić się do pracownika technicznego z prośbą o uruchomienie programu na komputerze i wykonać część 1 programu („Symulacje zderzeń”). Czas wykonania tej części nie powinien przekraczać 15 min.**
2. Założyć do ramki powiększalnika wskazane przez prowadzącego ćwiczenia zdjęcie (błonę pozytywową) przedstawiające reakcję wielorodnej produkcji cząstek. Błonę należy tak obrócić przed włożeniem do ramki, aby obraz na stole był zorientowany tak samo, jak na odpowiadającej mu papierowej odbitce zdjęcia i aby widoczny był punkt, w którym zaszła reakcja. Wybrać (dowolnie, według uznania) wielkość obrazu i wyregulować jego ostrość, rozciągając odpowiednio mieszek z obiektywem. Wielkości obrazu odtąd nie wolno już zmieniać. Na papierowej odbitce znaleźć czerwono zaznaczone punkty „A” i „B”. Odszukać je na obrazie rzutowanym przez powiększalnik i zmierzyć odległość między nimi.
3. Przerysować do sprawozdania ślady cząstek w badanej reakcji i ponumerować je zgodnie z numeracją na odbitce. Określić znak ładunku każdej cząstki (zarówno padającej, jak wyprodukowanych). Policzyc ile było cząstek ujemnych a ile dodatnich przed zderzeniem i po zderzeniu (por. rys. 1a).
4. Przepisać wszystkie dane podane na odwrocie odbitki fotograficznej. W celu wyznaczenia pędów wszystkich wyprodukowanych cząstek, pomierzyć za pomocą szablonów promienie krzywizny ρ ich torów. Należy starannie dobierać takie krzywe, które pokrywają się możliwie najdokładniej z rzutowanymi na stole obrazami śladów. Ponieważ cząstki tracą energię przechodząc przez ciecz, zakrzywienie torów rośnie w miarę oddalania się od ich początku, dlatego krzywe należy dopasowywać do początkowej części śladu. Nie dotyczy to śladów o bardzo małym zakrzywieniu (duży pęd cząstki), dla których dopasowanie należy wykonać na jak największej długości śladu.

Skrupulatność dopasowania jest decydująca dla orzeczenia na temat spełnienia – bądź nie – zasad zachowania pędu i energii. Aby ocenić dokładność tego dopasowania, trzeba znaleźć dolną i górną granicę wartości promienia krzywizny. Zatem, po zorientowaniu się najpierw ile krzywych szablonu pasuje mniej więcej do danego śladu (uwzględnić przy tym fakt, że krzywe na szablonach są cieńsze od śladów) i która krzywa pasuje najlepiej, należy przyjąć pierwszą z już nie pasujących krzywych od strony niższych wartości promienia jako dolną

granicę ρ_1 , a pierwszą z już nie pasujących od strony wyższych wartości promienia jako górną granicę ρ_2 . Jako trzecią wartość promienia krzywizny ρ_3 przyjmujemy wartość najlepiej pasującą. Komputerowi podaje się jako dane wejściowe po trzy wartości promienia ρ dla każdej cząstki wyznaczone w opisany sposób.

Należy koniecznie zachować numerację śladów zgodną z ich numeracją na dołączonej odbitce (bo w takiej kolejności podane są kąty λ i φ dla torów). Jeśli dla niektórych śladów przyłożeniu szablonu przeszkadza kolumna powiększalnika, to błonę w ramce można obrócić o 180° (ale bez odwracania jej na drugą stronę).

Opracowanie wyników

1. W celu sprawdzenia prawa zachowania ładunku, wykorzystując znalezione liczby cząstek dodatnich i ujemnych, obliczyć całkowity ładunek przed zderzeniem (pamiętając, że jądrem atomu wodoru jest proton) oraz po zderzeniu. Czy zasada zachowania ładunku w badanej reakcji jest spełniona?

Wyniki pomiarów promieni krzywizny ρ zamieścić w tabeli 2.

Tabela 2

Nr śladu	λ	φ	ρ_1	ρ_2	ρ_3	Rodzaj cząstki	m_0	E	p_x	p_y	p_z

2. Obliczyć współczynnik powiększenia K rzutowanego obrazu – dzieląc zmierzoną w projekcji odległość punktów „A” i „B” przez ich rzeczywistą odległość w komorze (podaną na odwrocie odbitki).
3. Uzyskane wyniki pomiarów oraz wielkości podane wprowadzić do komputera (część II programu – pt. „Analiza pomiarów”). Uzupełnić tabelę 2 oraz tabelę 3 wynikami z komputera albo – jeśli można uzyskać wydruk komputerowy wyników obliczeń – załączyć ten wydruk.

Tabela 3

	E	p_x	p_y	p_z
Wartość sumaryczna dla wszystkich 8 cząstek powstałych w wyniku zderzenia				
Wartość sumaryczna (przed zderzeniem) dla 2 cząstek zderzających się				
Różnica takich sumarycznych wartości – po zderzeniu i przed nim				
Obliczony błąd pomiarowy tej różnicy				

Jaki wniosek wynika z tabeli 3 – czy w ramach oszacowanego błędu pomiarowego prawa zachowania pędu i energii są spełnione?

B. Rozpoznawanie rozpadów mezonów π^- , π^+ , π^0 i K^0 oraz reakcji tworzenia par $e^- e^+$

Poszukać przykładów wymienionych procesów na kilku błonach wskazanych przez prowadzącego ćwiczenia. Pomocne są przy tym rysunki 1a, 1b, 3a, 3b i 3c. Znalezione przypadki odrysować do sprawozdania, zapisując przy każdym śladzie znak ładunku cząstki określony z kierunku zakrzywienia śladu.

Uwaga. Na tych zdjęciach cząstką padającą jest mezon π^- , a cieczą wypełniającą komorę jest deuter.

Opracowanie wyników

W celu sprawdzenia prawa zachowania ładunku znaleźć ładunek całkowity przed i po zajściu obserwowanego procesu i wpisać te wyniki do sprawozdania obok rysunku. Czy w wyniku procesu ładunek całkowity uległ zmianie?