

Ćwiczenie 101

Pomiar przekroju czynnego na zderzenia

Cel ćwiczenia

Wyszukanie zarejestrowanych na zdjęciach z komory pęcherzykowej aktów zderzeń cząstek elementarnych wpadających do komory z atomami wypełniającego ją płynnego wodoru, w wyniku których z atomów tych wybijane są elektrony. Wyznaczenie przekroju czynnego na zderzenia powodujące wybijanie elektronów o energii zawartej w określonym przedziale.

Wprowadzenie

Własności cząstek elementarnych materii można zbadać, jedynie badając ich wzajemne oddziaływania. W tym celu analizuje się skutki fizyczne zderzenia cząstek. Rozpędzoną cząstkę można doprowadzić do zderzenia z drugą nieruchomą na przykład w tzw. komorze pęcherzykowej, zaprojektowanej specjalnie jako urządzenie umożliwiające obserwację skutków zderzenia.

Zasada działania komory pęcherzykowej

Na ideę konstrukcji komory pęcherzykowej wpadł w roku 1952 Donald Glaser w USA. Po trwającym kilka lat technologicznym jej opracowaniu w roku 1960 otrzymał za nią Nagrodę Nobla z fizyki. Przyznanie nagrody nie za odkrycie naukowe, lecz za wynalezienie metody rejestrowania zjawisk fizycznych było rezultatem wagi, jaką nadano niezwykłym możliwościom i zaletom tego narzędzia badań. Komora pęcherzykowa należy do grupy detektorów śladowych, to znaczy umożliwiających nie tylko samo policzenie cząstek (jak w licznikach Geigera-Müllera, scyntylacyjnych, Czerenkowa, półprzewodnikowych), ale zarejestrowanie torów poruszających się cząstek przez uwidocznienie i sfotografowanie ich śladów.

Z innych detektorów tej grupy można wymienić komory Wilsona (historycznie najwcześniejsze, dawno już wyszły z — ograniczonego zresztą — użycia, emulsje jądrowe (używane dotąd w badaniach promieniowania kosmicznego), stosowane obecnie szeroko komory iskrowe i streamerowe bądź dryfowe. Wszystkie one wykorzystują zjawisko jonizacji atomów materii wzdłuż toru przechodzącej przez nią naładowanej cząstki. W komorach Wilsona inicjuje ono w parze przesyconej skraplanie tej pary wzdłuż toru naładowanej cząstki; w emulsjach fotograficznych — procesy chemiczne, a w komorach iskrowych i streamerowych — elektryczne wyładowania lawinowe w gazie.

Komora pęcherzykowa to hermetyczny zbiornik metalowy wypełniony odpowiednio dobranym ciekłym gazem, utrzymanym w takiej temperaturze (mniej więcej w $2/3$ pomiędzy temperaturą krytyczną a temperaturą wrzenia) i pod takim ciśnieniem (około $2/3$ ciśnienia krytycznego), że jest on w stanie bliskim stanu cieczy przegrzanej.

Dla uzyskania izolacji cieplnej od otoczenia komora jest umieszczona w zbiorniku próżniowym. W jednej ze ścian komory znajduje się „okno” z wytrzymałego szkła, przez

które można oświetlać wewnątrz i fotografować zachodzące w cieczy zjawiska. W innej ścianie znajduje się małe „okienko”, przez które można „wstrzeliwać” do komory wiązkę równoległą do siebie lecących cząstek elementarnych (na przykład protonów lub mezonów: π^\pm czy też K^\pm), o znanej prędkości (a więc o znanym pędzie i energii), uzyskanych przy użyciu akceleratora cząstek elementarnych.

Przez nagle rozprężenie tłokiem o mniej więcej $\frac{1}{100}$ objętości przeprowadzano ciecz w stan przegrzania na czas kilku milisekund. Ten króciutki czas to czas zdolności do pracy komory pęcherzowej. Ciecz przegrzana ma tę własność, że bardzo łatwo zaczyna wrzeć — wystarczy, że znajdują się w niej jakieś niezrównoważone ładunki elektryczne. Wrzenie rozpoczyna się właśnie na tych ładunkach – powstają i rosną wokół nich pęcherzyki gazu.

Wpadające do komory naładowane cząstki elementarne jonizują na swojej drodze atomy cieczy: wzdłuż całej ich drogi powstają dzięki temu pęcherzyki. Jeżeli w tym momencie oświetli się i sfotografuje wewnątrz komory, na zdjęciu będzie widać „ślady” pozostawiona w cieczy przez poruszające się cząstki w postaci ciągu pęcherzyków powstałych wzdłuż ich torów. Komora pęcherzykowa zwykle bywa umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji B rzędu $1,5 \div 2$ T, wytwarzanym przez otaczający ją elektromagnes. Pole to zakrzywia tory cząstek naładowanych elektrycznie, dzięki czemu można określić znak ich ładunku (z kierunku zakrzywienia) oraz pęd (z promienia krzywizny toru, do którego pęd jest proporcjonalny). Cząstki nie naładowane nie zostawiają śladów w komorze, gdyż nie wywołują jonizacji cieczy.

Po wykonaniu zdjęcia proces wrzenia cieczy przerywa się, wyprowadzając ją ze stanu przegrzania przez przywrócenie pierwotnej wartości ciśnienia (sprężając ją tłokiem). Po upływie kilku sekund komora jest zdolna do dalszej pracy (częstsze niż co kilka sekund rozprężanie i sprężanie spowodowałoby ruch cieczy zaburzający obraz śladów, zamianę pracy w taką ilość ciepła, która zaburzałaby warunki termodynamiczne – i inne trudności). Jest to jednak czas bardzo krótki (dla porównania: w komorze Wilsona wynosił aż kilka minut) i tak szybki czas pracy komory pęcherzykowej stanowi jedną z wielkich jej zalet. Toteż w zbudowanych na świecie (w USA, Szwajcarii, Anglii, Francji, dawnym ZSRR) komorach wykonano setki milionów zdjęć, zanim technikę komór pęcherzykowych zastąpiła obecnie stosowana jeszcze szybsza technika – rejestracji elektronicznej cząstek w komorach iskrowych, streamerowych lub dryfowych.

Do wypełnienia komór stosowano najczęściej ciekły wodór H_2 , deuter 2H_2 , hel He , propan C_3H_8 , ksenon Xe i freon CF_3Br .

Wodór ma tę „wyższość” nad innymi cieczami, że w wypełnionej nim komorze obserwowano bezpośrednie oddziaływanie cząstek elementarnych: wpadająca do komory cząstka oddziaływała z jądrem wodoru – protonem, który jest też cząstką elementarną.

Przekrój czynny

Pojęcie przekroju czynnego wyrażającego liczbowo prawdopodobieństwo zajścia określonego procesu fizycznego jest powszechnie używane dla opisu zderzeń cząstek materii pomiędzy sobą lub z atomami bądź jądrami atomów ośrodka, przez który przechodzą. W związku z tym jest jedną z najbardziej podstawowych wielkości stosowanych w fizyce jądrowej (np. dla wyrażenia prawdopodobieństwa zajścia różnego rodzaju reakcji jądrowych) i w fizyce cząstek elementarnych (dla wyrażania prawdopodobieństwa różnego rodzaju efektów ich wzajemnego oddziaływania, na przykład wielorodnej produkcji nowych cząstek – patrz instrukcja do ćwiczenia nr 102).

W celu określenia pojęcia przekroju czynnego wyobraźmy sobie przykładowo strumień n_0 cząstek-pocisków, wylatujących w jednostce czasu po torach wzajemnie równoległych przez okno o powierzchni S i napotykających na swej drodze N cząstek-celów o jednakowych

powierzchniach przekroju δ (na przykład jednakowej wielkości baniek mydlanych unoszących się w powietrzu). Prawdopodobieństwo $p = \frac{n}{n_0}$ trafienia w jednostce czasu któregośkolwiek celu (n jest liczbą trafień) wynosi

$$\frac{n}{n_0} = \frac{N \sigma}{S}, \quad (1)$$

Jest ono równe ułamkowi wyrażającemu jaką część całkowitej powierzchni S stanowi sumaryczna powierzchnia przekrojów wszystkich N celów, wynosząca $N\sigma$. Zakłada się przy tym, że cele nawet częściowo nie przesłaniają się wzajemnie.

Liczbę celów N można wyrazić przez wielkości łatwiej dostępne pomiarowo (bądź tablicowe). N jest ilorazem masy sumarycznej M wszystkich celów (np. masy płynnego wodoru wypełniającego komorę pęcherzykową), przez masę m pojedynczego celu (atomu wodoru w komorze) $N = \frac{M}{m}$.

Z kolei $M = lS\rho$; iloczyn lS przedstawia objętość wodoru w komorze (l – długość komory, S – powierzchnia jej przekroju, ρ – gęstość wodoru).

Zatem

$$N = \frac{lS\rho}{m}.$$

Podstawiając to wyrażenie do (1), otrzymujemy na prawdopodobieństwo trafienia formułę

$$\frac{n}{n_0} = \frac{l\rho\sigma}{m}.$$

Z niej przez prawdopodobieństwo trafienia $\frac{n}{n_0}$ można wyrazić wartość σ :

$$\sigma = \frac{mn}{l\rho n_0}. \quad (2)$$

Wyrażoną tym wzorem wielkość σ (mającą formalnie wymiar powierzchni) nazywamy przekrojem czynnym (w naszym przypadku – jest to przekrój czynny na zdarzenie polegające na trafieniu celu przez pocisk). Tu w szczególności przekrój czynny jest równy po prostu powierzchni przekroju pojedynczego celu. Ogólniejszą jego cechą jest to, że stanowi on miarę prawdopodobieństwa zajścia tego zdarzenia.

W fizyce jądrowej na przykład, badając skutki bombardowania jąder atomów cząstkami – pociskami stwierdza się, że skutki te mogą być różne: może to być rozproszenie sprężyste padającej cząstki na jądrze albo jej rozproszenie niesprężyste, bądź też jedna lub więcej różnych reakcji jądrowych. Każdej z tych możliwości odpowiada jakaś liczba n zaobserwowanych takiego rodzaju przypadków, prowadząca zgodnie z formułą (2) do wartości liczbowej przekroju czynnego na dane zjawisko, wyrażającej prawdopodobieństwo jego zajścia. Oczywiście jest, że przekrój czynny, chociaż ma formalnie wymiar powierzchni, nie oznacza tu jakiejś rzeczywistej powierzchni, lecz prawdopodobieństwo, że zajdzie to właśnie, a nie inne spośród różnych możliwych zjawisk.

Wartości liczbowe przekrojów czynnych na różne zjawiska zależą, ogólnie biorąc, od energii uderzających cząstek-pocisków i od rodzaju zderzających się obiektów. Przyjęto wyrażać przekrój czynny w jednostkach, zwanych barnami:

$$1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2 \quad (\text{barn})$$

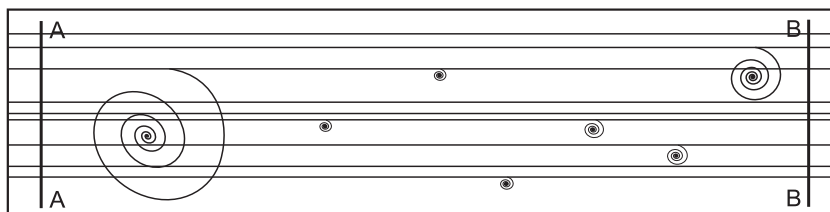
w użyciu są też jednostki pochodne od barna:

$$1 \text{ mb} = 10^{-3} \text{ b} \quad (\text{milibarn}),$$

$$1 \mu\text{b} = 10^{-6} \text{ b} \quad (\text{mikrobarn}).$$

W niniejszym ćwiczeniu obserwuje się zarejestrowane na zdjęciach zderzenia wpadających do komory pęcherzykowej cząstek elementarnych (mezonów o pędzie 16 GeV/c) z atomami wypełniającego ją płynnego wodoru, w wyniku czego (wśród wielu innych możliwości) z atomów tych są wybijane elektrony (nie jest to więc reakcja jądrowa).

Rysunek 1 przedstawia przykładowo wygląd takiego zdjęcia: widać na nim ślady torów strumienia cząstek-pocisków przebiegających wypełnione płynnym wodorem wewnątrz komory pęcherzykowej. Na niektórych śladach widać charakterystyczne „spiralki” – są to (silnie zakrzywione przez pole magnetyczne, w którym umieszczona jest komora) ślady torów niskoenergetycznych elektronów, wybitych z atomów wodoru przez pociski-mezony. Takie wybite z atomów elektrony przyjęte nazywać „elektronami δ ” (to czysto umowna oznaczenie ma jedynie zwracać uwagę na mechanizm ich pojawienia się, gdyż naturą oczywiście nie różnią się one od wszystkich elektronów). Na początku i na końcu zdjęcia narysowane są linie A-A i B-B, poprzeczne do strumienia cząstek-pocisków: bada się obszar zdjęcia zawarty pomiędzy nimi.



Rys. 1. Równoległe tory mezonów π i charakterystyczne spiralki elektronów δ (zdjęcie z komory pęcherzykowej)

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie przekroju czynnego σ na zderzenia powodujące wybijanie z atomów wodoru, wypełniającego komorę pęcherzykową, elektronów o energii zawartej w przedziale umożliwiającym pewną identyfikację śladów torów elektronowych na zdjęciu (nie za małe ani nie za duże promienie krzywizny* spiralek).

Korzystamy przy tym ze wzoru

$$\sigma = K \frac{m n}{l \rho n_0}, \quad (3)$$

W porównaniu ze wzorem (2) występuje tu jeszcze współczynnik K uwzględniający powiększenie obrazu na zdjęciu w stosunku do rzeczywistych rozmiarów w komorze. Właśnie w celu uzyskania znacznie powiększonego obrazu rozpatruje się jedynie część obszaru wnętrza komory, ograniczoną liniami A-A i B-B.

Minimalnej i maksymalnej akceptowanej wartości promienia krzywizny spiralek odpowiadają określone energie elektronu. Wyznaczają one granice badanego przedziału energii wybijanych elektronów. Sposób obliczenia pędu, a następnie energii cząstki na

* Przez „promień krzywizny spiralki” rozumiemy wszędzie promień pierwszego zakreślonego okręgu: każdy następny jest coraz mniejszy na skutek strat energii w ciągłych zderzeniach z atomami ośrodka.

podstawie promienia krzywizny jej toru jest podany w instrukcji do ćwiczenia 102 (wzory (1) i (4)); dla uproszczenia we wzorze (1) przyjmujemy $\cos \lambda = 1$ – to znaczy zakładamy, że na wybranych do analizy zdjęciach nieuwzględnienie kąta λ nie zmieni w drastycznym stopniu wartości promienia krzywizny).

Literatura

1. Muchin K.N.: *Doświadczalna fizyka jądrowa. T.I.* Warszawa, WNT 1978
2. Szerzej o cząstkach elementarnych w instrukcji do ćw. 102 i literaturze tam podanej.

Aparatura

Oprócz kompletu zdjęć, jedynymi niezbędnymi przyrządami są: półmetrowej długości przymiar z podziałką milimetrową służący do pomiaru długości śladów torów cząstek na zdjęciach oraz szablon do sprawdzania, czy obserwowane ślady torów elektronowych mają promień krzywizny zawarte w pożądanym przedziale, umożliwiającym ich pewną identyfikację. Szablon stanowią dwa okręgi o granicznych promieniach krzywizny.

Wykonanie ćwiczenia

1. Zmierzyć promień obu okręgów wyciętych w szablonie.
2. Na każdym z osobna kolejnym zdjęciu policzyć:
 - a) liczbę n_0 śladów torów cząstek-pocisków przebiegających przez komorę,
 - b) liczbę n tych tylko spiralek elektronowych, których promień krzywizny są zawarte w przedziale wyznaczonym przez wartości promieni okręgów wyciętych w szablonie (przykładając szablon do każdej widocznej spiralki). Nie brać pod uwagę ewentualnych śladów ukośnych, nierównoległych do strumienia pocisków (czasem mogą się pojawić takie ślady ukośne pochodzące nie od samych pocisków, tylko od innych cząstek – np. różnych cząstek wyprodukowanych w oddziaływaniu pocisków z jądrami a nie elektronami). Jeżeli na którymś śladzie widać więcej niż jedną spiralkę, należy policzyć wszystkie (o odpowiednim promieniu oczywiście).
3. Zmierzyć na którymkolwiek zdjęciu długość l odcinka drogi przebywanej przez cząstek--pociski pomiędzy prostymi A-A i B-B, ograniczającymi obserwowaną część wnętrza komory.

Opracowanie wyników

1. Na podstawie zmierzonych wartości promieni obu okręgów wyciętych w szablonie policzyć odpowiadające im pędy, a następnie energie elektronów, posługując się wzorami (1) i (4) z instrukcji do ćwiczenia 102.
2. Na podstawie tak uzyskanych wartości energii E obliczyć odpowiadające im wartości czynnika Lorentza $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ i stąd $\beta = \frac{v}{c}$, posługując się wzorem

$$E = \frac{m c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (0)$$

gdzie m – masa spoczynkowa elektronu.

Porównać ze sobą obie otrzymane wartości β . W fizyce cząstek elementarnych często używa się wartości γ i β zamiast jednostek energii dla wyrażenia prędkości, a stąd energii cząstek.

3. Zmierzone liczby cząstek-pocisków n_0 i wybitych elektronów n zamieścić w poniższej tabeli.

Nr kolejny zdjęcia	Liczba cząstek-pocisków n_0	Liczba wybitych elektronów n
Sumarycznie		

4. Po wykonaniu wszystkich pomiarów w ostatnim wierszu tabeli podać sumaryczną liczbę obserwowanych cząstek-pocisków n_0 i wybitych elektronów n – na wszystkich zdjęciach łącznie. Podstawiając te wartości sumaryczne do wzoru (3), obliczyć przekrój czynny σ na zderzenia, w wyniku których z atomów wodoru wypełniającego komorę pęcherzykową wybijane są elektrony. Współczynnik K , uwzględniający powiększenie obrazu na zdjęciu w stosunku do rzeczywistych rozmiarów w komorze, a także masa atomu wodoru m i gęstość wodoru ρ są podane na szablonie.

5. Błąd pomiaru przekroju czynnego σ , wyrażonego formułą (3), obliczyć z prawa przenoszenia błędów. Przyjmujemy, że znalezione wartości sumaryczne: liczby pocisków n_0 i wybitych elektronów n obarczone są błędem statystycznym – wynoszącym $\sqrt{n_0}$ dla n_0 i \sqrt{n} dla n . Wielkości K , m , ρ uznajemy za tablicowe, więc ich błąd pomijamy.