

W cyklu prac uczniowskich przedstawiamy pracę wykonaną przez dwóch uczniów II klasy XIV Liceum Ogólnokształcącego im. St. Staszica w Warszawie w ramach warsztatów Krajowego Funduszu na Rzecz Dzieci zorganizowanych przez Wydział Fizyki UW.

## Jak kończy się żywot pozytonu?

Piotr BELICZYŃSKI i Eryk KOPCZYŃSKI

### I. Wprowadzenie

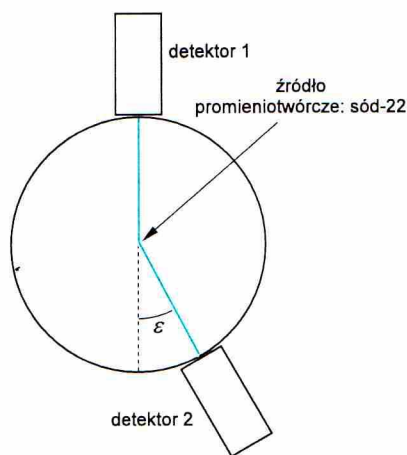
Przedmiotem naszych poszukiwań było pewne scharakteryzowanie momentu anihilacji pozytonu z elektronem, a dokładniej: stwierdzenie, czy anihilacja następuje w spoczynku, czy też nie.

Za emiter pozytonów służył nam izotop sodu-22 o okresie półtrwania 2,602 lat. W wyniku rozpadu powstaje wzbudzony izotop neonu-22, pozyton o energii 0,545 MeV oraz neutrino elektronowe. Neon-22 przechodzi do stanu podstawowego przez wyemitowanie fotonu o energii 1,274 MeV.

Nietrudno udowodnić, że gdy anihilacja następuje w spoczynku, to fotony anihilacyjne mają równe energie i kąt rozlotu wynosi 180 stopni. W pracy usiłujemy zmierzyć ten kąt i dowodzimy, że anihilacja musiała nastąpić w spoczynku.

### II. Układ doświadczalny

Pomiary wykonywaliśmy w układzie przedstawionym na rysunku 1.



Rys. 1. Układ doświadczalny.

Impulsy elektryczne detektora scyntylacyjnego były analizowane przez system zbierania danych sprzężony z komputerem PC. System zbierania danych (akwizycji danych) był obsługiwany przez program „SMAN”. Program ten może przyjmować i analizować do kilkudziesięciu parametrów pomiarowych pochodzących z rejestracji „zdarzenia” (w naszym pomiarze były to cztery parametry: dwie energie i dwa czasy). Jeśli w czasie 4 ns lub krótszym po zarejestrowaniu fotonu przez jeden z detektorów, zarejestrowano również drugi foton

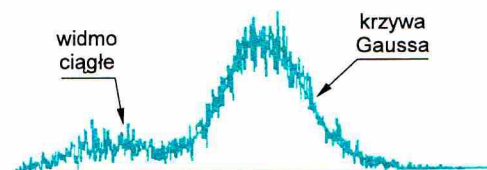
w drugim detektorze, prawdopodobnie były to zdarzenia koincydentalne. Oczywiście, nastęcza to pewne kłopoty techniczne: nie można w bezpośredni sposób zmierzyć odstępu czasowego zdarzeń, jeśli dopiero po zaistnieniu drugiego wiemy, iż trzeba odstęp ten zmierzyć. W tym celu pierwszy sygnał rejestracji puszczany jest pętlą, w której krąży przez 4 ns, oczekując na ewentualny drugi sygnał.

Detektor scyntylacyjny jest to urządzenie wykrywające fotony gamma, które oddziałują z elektronami w sieci krystalicznej soli, w naszym przypadku NaI, w tzw. scyntylatorze umieszczonym na czole detektora. Za pomocą fotopowielacza wytwarzany jest rejestrowalny prąd, proporcjonalny do pierwotnej energii wybitego elektronu.

### III. Technika

Metoda naszej pracy polegała na analizie rozkładów pewnych parametrów elektronów wybitych przez fotony. Nie rozważaliśmy więc widma fotonów, których np. energii nie mogliśmy pomierzyć bezpośrednio, lecz widma energetyczne i czasowe elektronów.

Skoncentrujmy uwagę na tzw. widmach energetycznych, czyli wykresach przedstawiających zależność między energią a liczbą elektronów zarejestrowanych z właśnie taką energią. Jeśli rozpoczniemy pomiary w układzie bez źródła promieniotwórczego, nie można zauważyć żadnych regularności, liczba zliczeń jest znikoma. Jeśli wstawimy teraz próbkę, na widmach energetycznych (rys. 2) elektronów wybitych przez fotony można zobaczyć krzywą zbliżoną do krzywej Gaussa.

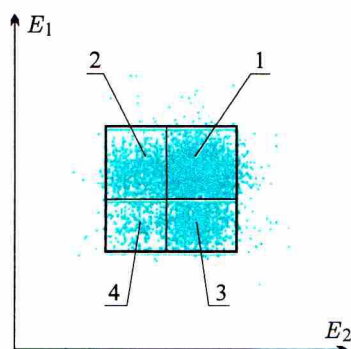


Rys. 2. Widmo energetyczne.

Jak powszechnie wiadomo, niedoskonałość naszych przyrządów nie pozwala nam zarejestrować widma w postaci jednej linii o nieskończenie małej szerokości. Zamiast tego w widmie pojawia się krzywa Gaussa. Tylko w przypadku efektu fotoelektrycznego energia unoszona przez elektron jest dla wszystkich zdarzeń taka sama, co pozwala nam przypuszczać, że otrzymany kształt powstaje na skutek tego właśnie zjawiska.

Rozpraszanie Comptonowskie, drugi sposób oddziaływania fotonów z elektronami, powoduje natomiast nadanie elektronom energii z przedziału o szerokości znacznie większej od charakterystycznego rozmycia linii odpowiadającej efektowi fotoelektrycznemu.

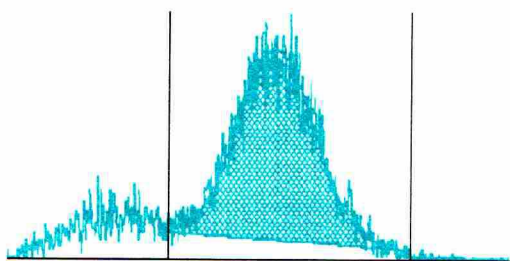
Każdy punkt wykresu z rysunku 3 symbolizuje zdarzenie, a jego współrzędne opisują energię zarejestrowaną w detektorach 1 i 2.



Rys. 3.

Na wykresie możemy wyróżnić cztery obszary, oznaczone numerami 1, 2, 3, 4. Ponieważ największa energia przekazywana jest elektronowi scyntylatora w efekcie fotoelektrycznym, widzimy, że obszar 1 stanowi rodzinę par zdarzeń typu fotoelektrycznego. Analogicznie struktury 2 i 3 to obszar zdarzeń fotoelektryczno-Comptonowskich, a 4 – Comptonowsko-Comptonowskich.

Obszar 1 jest przedmiotem naszych zainteresowań, dlatego należałoby odrzucić zdarzenia spoza tego obszaru. Najłatwiej jest to zrobić ustalając przedziały, w których musiałyby się znaleźć energie i czasy zdarzeń. W przypadku, gdy energie lub czasy są poza tymi przedziałami, zdarzenia nie uwzględniamy. Jeśli ustalimy przedział energii na osi  $E_1$ , punkty ze stref 3 i 4 zostaną odrzucone. Należy jeszcze usunąć zdarzenia ze strefy 2 poprzez ustalenie przedziału na osi  $E_2$ . Możemy uznać liczbę pozostawionych zdarzeń za miarodajną informację o częstotliwości koincydencji.



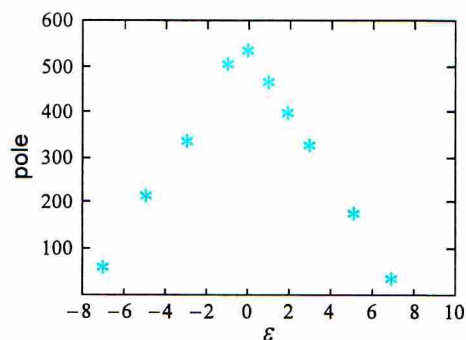
Rys. 4. Pole zaznaczonej powierzchni jest miarą liczby zdarzeń.

Rozważmy dwie metody liczenia liczby zdarzeń. Można obliczyć całkę między podanymi wartościami energii,

co jednak może wzbudzać kontrowersje z powodu dużych zmian otrzymanych wartości w zależności od metod wyznaczania granic. Innym sposobem jest liczenie wartości zwanej dalej polem (patrz rys. 4).

#### IV. Wyniki pomiarów

Na podstawie danych doświadczalnych sporządziliśmy wykresy zależności całki i pola od kąta  $\varepsilon$  (rys. 5). Można wyliczyć środek ciężkości krzywych i przyjmując go za maksimum wykresu. Wyznaczyliśmy ten kąt jako  $0,13^\circ$ . Sądymy, że błąd pomiaru znacznie przewyższa tę wartość.



Rys. 5.

Parametry układu doświadczalnego są takie, że kąt, pod jakim widzimy detektor ze środka układu doświadczalnego, wynosi 10 stopni. Gdy zwiększamy kąt, liczba zliczeń powinna maleć aż do 10 stopni, gdzie zliczenia powinny w ogóle zniknąć. Doskonale zgadza się to z danymi doświadczalnymi.

#### V. Interpretacja fizyczna – co przypuszczalnie się stało

Na podstawie zasady zachowania pędu i znajomości własności pozytonu możemy pokusić się o przypuszczenie co do przebiegu anihilacji.

Pozyton opuszcza jądro z energią 0,545 MeV. Ponieważ jednak oddziałują na niego pola elektryczne elektronów, powoduje ruch tychże cząstek („pociąga” je za sobą). Oddaje w ten sposób swoją energię kinetyczną i zmniejsza prędkość. W pewnym momencie (kiedy jego energia kinetyczna spada poniżej 6,8 eV) trafia na elektron, z którym może utworzyć pozytonium, czyli stan związany elektron-pozyton. Poprzez schodzenie na coraz niższe poziomy energetyczne (towarzyszy mu emisja fotonów o energii  $\sim 1$  eV) traci energię, aż dochodzi do anihilacji. Pozyton nie ma już energii kinetycznej, więc fotony powstałe przy anihilacji mają równe energie i kąt rozlotu 180 stopni.

## VI. Źródła błędów

Błędy towarzyszyły nam przy każdym pomiarze. Możemy je podzielić na kilka grup:

- zakłócenia pochodzące od naturalnych źródeł promieniotwórczych,
- niedokładność pomiaru kąta między detektorami,
- niedokładność pomiaru energii przez detektory,
- niedokładność pomiaru przez komputer czasu między zdarzeniami,
- niedokładność wyznaczenia przedziałów energii i czasu,
- inne błędy.

Pomimo takiej liczby błędów wyniki nasze możemy uznać za wiarygodne. Pozwoliły nam one odpowiedzieć na postawione na początku pytanie.

## VII. Zakończenie

Jak wiadomo, antycząstki mogą anihilować z cząstkami powszechnie nam znanymi – elektronami, protonami, neutronami itp. Okazuje się jednak, że antycząstki nie anihilują natychmiast z cząstkami, lecz mogą przez pewien czas istnieć w ośrodku materialnym.

Zjawisko anihilacji już znalazło szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach życia, szczególnie w medycynie, gdy trzeba ustalić drogę przejścia podanych substancji przez organizm. Z uwagi na charakterystyczne parametry fotonów anihilacyjnych możliwe jest precyzyjne umiejscowienie tych substancji.

## VIII. Podziękowania

Chcielibyśmy przede wszystkim podziękować panu dr. hab. Zygmuntovi Szeffińskiemu za jego pomoc w zrozumieniu zagadnienia, przeprowadzeniu pomiarów i ich interpretacji. Pragniemy również gorąco podziękować naszym kolegom z grupy, w której prowadziliśmy eksperyment, Piotrowi Miłosiowi i Piotrowi Sozańskiemu. Dziękujemy panu profesorowi Bogdanowi Cichockiemu za zorganizowanie warsztatów i nadzór nad nimi, a także panu Ryszardowi Rakowskiemu, dzięki któremu warsztaty w ogóle się odbyły.

## IX. Literatura

- [1] E. Skrzypczak, Z. Szeffiński, *Wstęp do fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych*, PWN 1995.  
[2] W. Mizerski, W. Nowaczek, *Tablice fizyczno-astronomiczne*, Wyd. Adamantan 1995.



## Zadania

Redaguje Krzysztof OLESZKIEWICZ

**M 804.** Na nieskończonej szachownicy ustawionych jest 1999 skoczków szachowych. Udowodnij, że można spośród nich wybrać 1000 takich, że żadne dwa z nich się nie atakują.

Rozwiązanie na str. 3

**M 805 (zawody Baltic Way 1996).** Dwie osoby grają w „kółko i krzyżyk” na nieskończonej szachownicy. Wygrywa gracz, który pierwszy utworzy ze swoich znaków kwadrat  $2 \times 2$ . Czy istnieje strategia zapewniająca zwycięstwo graczowi rozpoczynającemu rozgrywkę?

Rozwiązanie na str. 2

**M 806.** Udowodnić, że

$$\frac{1}{\sqrt[n]{n+1}} + \frac{1}{\sqrt[m]{m+1}} \geq 1$$

dla dowolnych liczb naturalnych  $m$  i  $n$ .

Rozwiązanie na str. 4

Redaguje Krzysztof REJMER

**F 449.** Rozpraszanie fotonu na naładowanej cząstce poruszającej się z prędkością bliską prędkości światła nazywane jest odwrotnym rozpraszaniem Comptona. Rozważmy następujący problem: cząstka o masie  $m$  i energii  $E$  ( $E \gg mc^2$ ) zderza się czołowo z fotonem o takiej częstocie kołowej  $\omega$ , że  $\hbar\omega \ll mc^2$ . Jaka jest maksymalna energia rozproszonego fotonu? Ile wynosi ta energia w przypadku fotonu promieniowania reliktoowego o temperaturze około 3 K i protonu promieniowania kosmicznego o energii rzędu  $10^{20}$  eV? Podana temperatura 3 K odpowiada energii  $k_B T \simeq 2,6 \cdot 10^{-4}$  eV. Masa protonu (wyrażona w eV) wynosi  $m = 0,918 \cdot 10^9$  eV. Rozwiązanie na str. 2

**F 450.** Rysunek przedstawia bardzo uproszczony model sieci pajęczej. Mucha, która się przykleiła do jednej z nitek, wprawia ją w drgania, które z dobrym przybliżeniem można uważać za prostopadłe. Na której z nitek, zaznaczonych na rysunku, pajęk odebrałby najsilniejszy sygnał, jeśli drgania a) są prostopadłe do płaszczyzny pajęczyny, b) są zawarte w tej płaszczyźnie?

Rozwiązanie na str. 3

