



Jak zobaczyć pojedynczy foton, czyli czego oko nie widzi

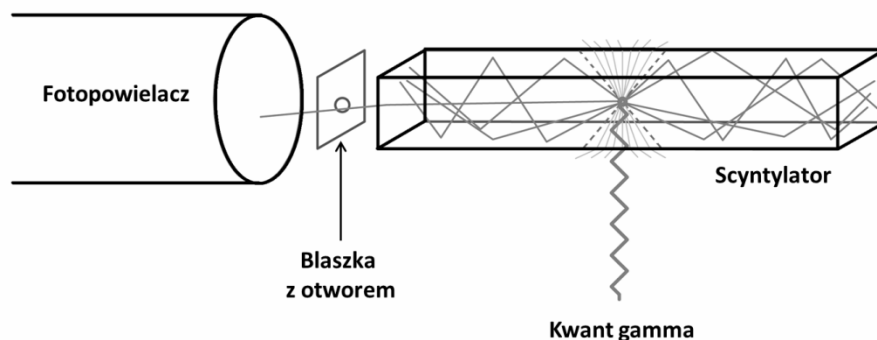
*Studenci: Łukasz Kapłon, Nikodem Krawczyk, Ines Moskal
Instytut Fizyki UJ*

Czy możemy zobaczyć jeden foton? Już w latach czterdziestych ubiegłego wieku odkryto, że aby zaobserwować błysk światła oko ludzkie potrzebuje co najmniej pięciu fotonów wpadających na siatkówkę [1]. Czy w obecnych czasach dysponujemy metodami i urządzeniami tak czułymi, aby uchwycić pojedynczy foton i pokonać ludzkie oko?

W lipcu 2012 roku grupa studentów odbywająca praktyki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego badała scyntylatory polimerowe pod kątem ich użycia w Pozytonowej Tomografii Emisyjnej. Za pomocą detektorów scyntylacyjnych udało się zarejestrować sygnały pochodzące od pojedynczych fotonów.

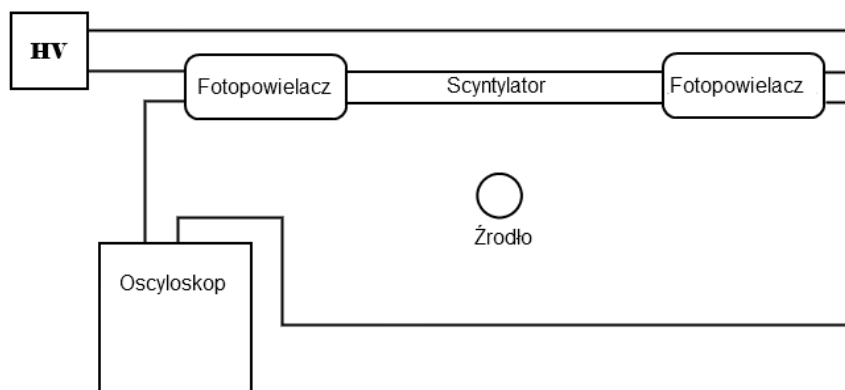
Materiały scyntylacyjne są jednymi z najstarszych rodzajów detektorów. Pierwszy przyrząd do wykrywania promieniowania jonizującego to pochodzący z 1903 roku spintaryskop skonstruowany przez Williama Crookesa [2]. Składał się on z tarczy pokrytej siarczkiem cynku – materiałem fluorescencyjnym emitującym błyski światła pod wpływem promieniowania alfa. Do tarczy dołączona była soczewka skupiająca światło. Emitowane rozbłyski można było obserwować za pomocą mikroskopu optycznego w zaciemnionym pomieszczeniu. Jednak dokładny pomiar ilości światła stał się możliwy dopiero po wynalezieniu w 1944 roku fotopowielacza, czyli elektronicznego urządzenia zamieniającego światło na sygnał elektryczny. Era scyntylatorów zaczęła się w 1948 roku, po odkryciu przez Roberta Hofstadtera pierwszego wydajnego scyntylatora, którym był kryształ jodku sodu z małą domieszką talu. Pozwoliło to na skonstruowanie licznika scyntylacyjnego (scyntylator + fotopowielacz) wykrywającego promieniowanie jonizujące i zamieniającego to promieniowanie na mierzalny sygnał elektryczny. Pierwsze scyntylatory polimerowe (czyli takie, jakich używaliśmy w naszych badaniach) pojawiły się na początku lat pięćdziesiątych XX wieku po odkryciu, że również niektóre substancje organiczne dodane do polimeru tworzą wydajny scyntylator.

W wykorzystanym przez nas układzie doświadczalnym źródło promieniotwórcze emitowało kwanty gamma, które uderzając w polimerowy scyntylator generowały w nim fotony. Kwant gamma przelatując przez materiał scyntylatora może wywołać w nim błysk światła składający się z kilku tysięcy fotonów (rys. 1). Część z tych fotonów na skutek odbić od ścianek scyntylatora dociera do jego brzegów, gdzie przyłożone są fotopowielacze, tak jak pokazano to schematycznie na rys. 2. Układ pomiarowy przedstawiono na rys. 3, a scyntylator i fotopowielacz na rys. 4.



Rys. 1. Schemat układu detekcyjnego. Kwant gamma wybija elektron, który na drodze około jednego milimetra jonizuje lub wzbudza molekuly scyntylatora powodując emisję fotonów. Fotony (szare łamane linie) padające na powierzchnię pod kątem większym od kąta całkowitego wewnętrznego odbicia (zaznaczonego przez przerywane linie) dolatują do brzegów scyntylatora, gdzie umieszczone są fotopowielacze. Reszta światła ucieka poza scyntylator (szare cienkie linie załamujące się na granicy ośrodków scyntylator-powietrze). W tym eksperymencie jeden z brzegów był zasłonięty blaszką z małym otworem. Blaszka pochłaniała większość fotonów i tylko te, które trafiły w dziurkę mogły dolecieć do fotopowielacza

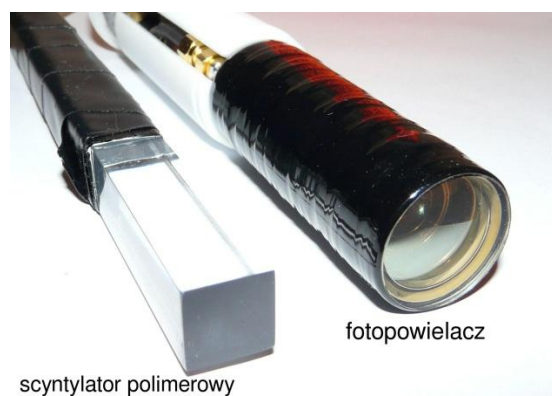
Fotopowielacz jest urządzeniem zamieniającym impuls świetlny na sygnał elektryczny, który można oglądać za pomocą oscyloskopu. W przypadku naszego scyntylatora z kilku tysięcy fotonów wytwarzanych w wyniku reakcji kwantu gamma, do fotopowielacza docierało tylko kilkaset fotonów. Żeby zarejestrować pojedynczy foton, między jednym z fotopowielaczy a scyntylatorem wstawiliśmy blaszkę z otworem na tyle małym, by do fotopowielacza z dużym prawdopodobieństwem mógł wpaść tylko jeden foton.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego wykorzystywany w badaniach. HV oznacza zasilacz wysokiego napięcia



Rys. 3. Układ pomiarowy, po lewej stronie w aluminiowych obudowach umieszczone są dwa fotopowielacze, a pomiędzy nimi jest scyntylator owinięty czarną taśmą zabezpieczającą przed zewnętrznym światłem. Za tym układem ustawiony został kolimator ołowiany ze źródłem promieniotwórczym kierujący wiązkę promieniowania w konkretny obszar scyntylatora. Po prawej stronie znajduje się oscyloskop



Rys. 4. Fragment scyntylatora polimerowego i fotopowielacza z widocznym okienkiem i soczewką skupiającą

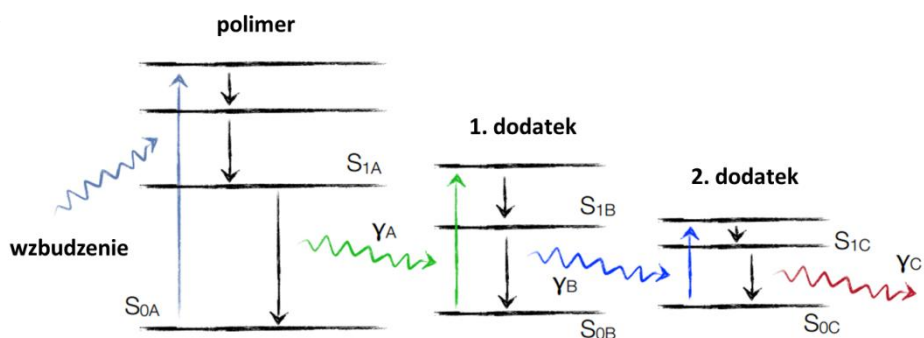
W tym celu w blaszce zrobiliśmy dziurkę o powierzchni około pół milimetra kwadratowego, co stanowiło około jedną czterechsetną powierzchni styku fotopowielacza ze scyntylatorem. Oscyloskop ustawiliśmy tak, by pokazywał sygnały z przesłoniętego fotopowielacza tylko pod warunkiem, że drugi fotopowielacz wytworzył sygnał o odpowiedniej amplitudzie. Ponieważ amplituda sygnału zależy od liczby fotonów, warunek ten dobraliśmy tak, że do drugiego fotopowielacza (czyli także do blaszki) dolatywało około czterysta fotonów, czyli dla większości badanych przypadków przez dziurkę w blaszce przelatywał

tylko jeden foton. Oczywiście mogło się też czasem zdarzyć tak, że nie przeleciał żaden czy też, że przeleciały dwa lub więcej.

Aby lepiej zrozumieć ścieżkę, której finalnym wynikiem jest obraz na oscyloskopie pochodzący od pojedynczego fotonu, poniżej opisane zostało działanie każdego z elementów układu. Proces zaczyna się, gdy w scyntylator uderzają kwanty gamma powstałe podczas promieniotwórczego rozpadu w źródle. Scyntylator jest wykonany z materiału emitującego światło, gdy przenika przez niego promieniowanie jonizujące [3]. Aby impuls świetlny mógł być zarejestrowany scyntylator musi być transparentny dla wytworzonego przez siebie światła.

Zasada działania scyntylatora polimerowego

Jednym z rodzajów scyntylatorów jest scyntylator polimerowy, składający się zazwyczaj z trzech substancji: polimeru bazowego oraz dwóch dodatkowych związków organicznych (dodatek 1 i dodatek 2) rozpuszczonych w polimerze, który zawiera w swoim łańcuchu grupy aromatyczne (pierścienie benzenowe).



Rys. 5. Mechanizm wytwarzania fotonów w scyntylatorach polimerowych: wzburzenie poziomów energetycznych w cząsteczkach organicznych i emisja światła poprzez fluorescencję.

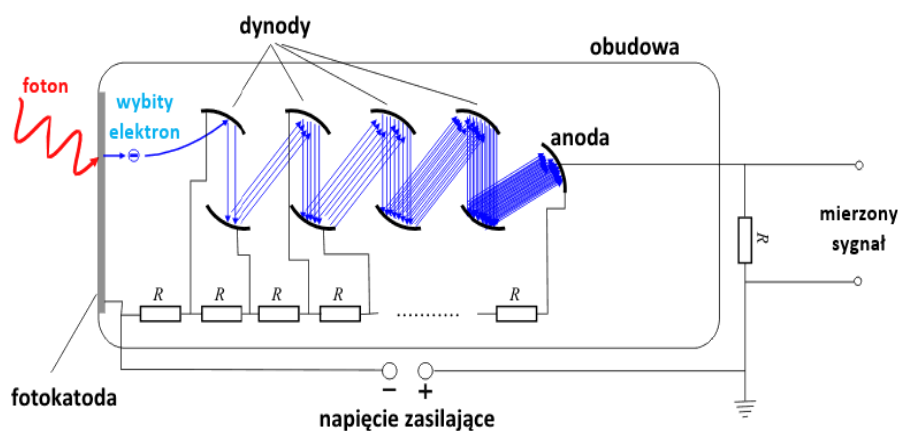
Rysunek został zaadaptowany z wykładu: http://www.kip.uni-heidelberg.de/~coulon/Lectures/Detectors/Free_PDFs/Lecture4.pdf

Polimerem o takich właściwościach jest polistyren, powszechnie używany także do produkcji plastikowych opakowań i przedmiotów codziennego użytku. Kwant gamma przelatując przez scyntylator, wybija elektron z atomu i przekazuje mu część swojej energii (nazywamy to efektem Comptona), następnie wybity elektron przelatując przez scyntylator oddaje swoją energię i wzbudza łańcuchy polimeru. Polimer przekazuje otrzymaną energię do pierwszego dodatku, jakim jest fluorescencyjny związek organiczny, który po zaabsorbowaniu energii od polimeru, emituje ją w postaci światła UV (fluorescencja). Energia światła UV zostaje przeniesiona do drugiego dodatku, który wyświeca ją na skutek fluorescencji w postaci światła widzialnego. Proces ten został schematycznie pokazany na rys. 5. Fotony emitowane przez drugi dodatek nie są pochłaniane

przez polimer i ich średnia droga swobodna w scyntylatorze sięga nawet kilku metrów.

Zasada działania fotopowielacza

Fotony tworzone w scyntylatorze padają na fotokatodę fotopowielacza (rys. 6) i w wyniku efektu fotoelektrycznego wybijają z jej powierzchni elektrony nazywane fotoelektronami. Proces taki ma największą wydajność dla fotonów światła niebieskiego, dlatego ważne jest takie domieszkowanie scyntylatorów, by emitowały światło w tym zakresie fal. Każdy z tak wybitych fotoelektronów jest następnie przyspieszany polem elektrycznym w kierunku pierwszej z katod wtórnych – tak zwanych dynod. Uderzając w jej powierzchnie wybija z niej kilka elektronów wtórnych. Każdy z tych elektronów jest następnie przyspieszany w polu elektrycznym i uderza w kolejną dynodę, wybijając kolejne elektrony. W wyniku takiego powielania liczba elektronów rośnie lawinowo. Strumień elektronów dociera następnie do anody zbiorczej powodując impuls prądu, którego amplituda proporcjonalna jest do liczby wybitych fotoelektronów, a ta z kolei jest proporcjonalna do liczby fotonów, które dotarły do fotopowielacza, a ich liczba jest proporcjonalna do energii elektronu wybitego w scyntylatorze przez kwanty gamma.



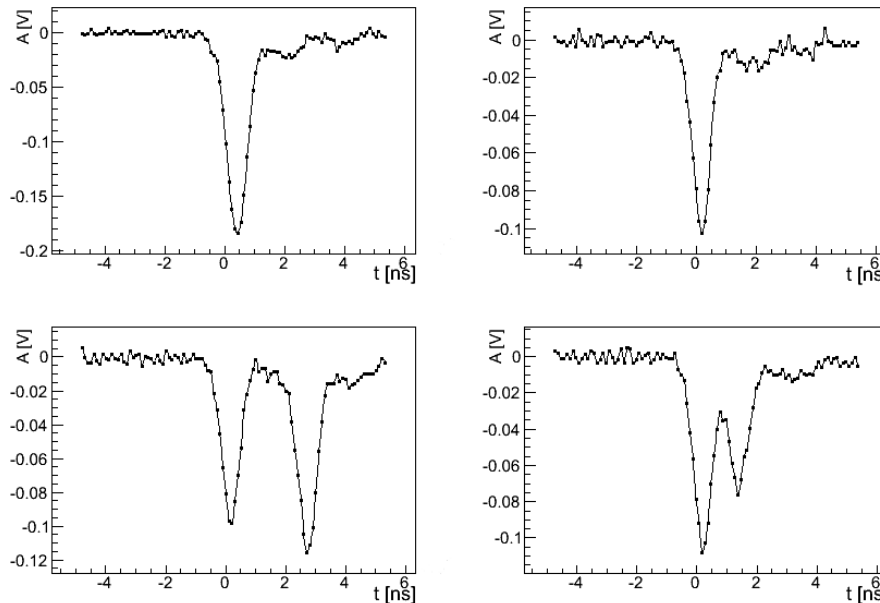
Rys. 6. Schemat działania fotopowielacza. Rysunek został zaadaptowany ze strony <http://de.wikipedia.org/wiki/photomultiplier>

Wyniki pomiarów

Po przesłaniu impulsu elektrycznego do oscyloskopu możemy zaobserwować sygnał. Do pomiarów użyliśmy oscyloskopu z częstotliwością próbkowania wynoszącą 10 GS/s, co oznacza 10^{10} pomiarów w ciągu sekundy. Zatem oscyloskop jest w stanie próbować napięcie sygnału co 100 pikosekund. W ten

sposób mogliśmy obserwować kształty sygnałów nawet o czasie trwania mniejszym niż nanosekunda.

Znając wszystkie szczegóły, warto przeanalizować ostateczny wynik badań. Są nim sygnały od pojedynczych fotonów pokazane w górnej części rysunku 7.



Rys. 7. Kształt sygnałów od pojedynczych fotoelektronów. Na osi pionowej pokazane jest napięcie, a na poziomej czas

Górne wykresy ilustrują, że sygnały od pojedynczych fotonów mają amplitudę rzędu 100 mV i czasie trwania około 1,5 nanosekundy. Zdarzały się również przypadki, gdy do otworu w przesłonie trafiały kolejno po sobie w bardzo małym odstępie czasowym dwa fotony, co powodowało podwójny sygnał (dolna część rys. 7). Wykresy powyższe pozwalają na obliczenie wzmocnienia fotopowielacza, czyli ile elektronów znajduje się w sygnale wychodzącym z fotopowielacza po uderzeniu w niego jednego fotonu. Liczba elektronów w impulsie określa ładunek tego impulsu.

Ładunek $Q = I \cdot t$, gdzie I oznacza natężenie prądu, a t czas.

$I = U/R$, gdzie U to napięcie, a R oznacza opór.

Zatem $Q = U \cdot t/R$.

W naszym przypadku opór wynosił 50 Ω .

$U \cdot t$ obliczamy jako pole powierzchni pod wykresem obserwowanego sygnału.

Przykładowo, w przypadku prawego górnego sygnału pole powierzchni wynosi około 0,075 V \cdot ns, czyli $Q = 1,5$ pC.

Ponieważ ładunek jednego elektronu $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, to $Q \approx 10^7 e$.

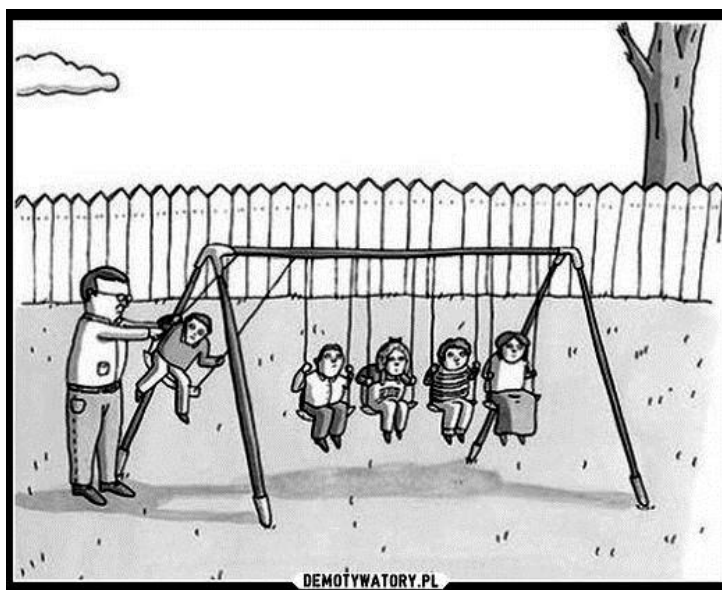
To oznacza, że w tym przypadku fotopowielacz z jednego fotoelektronu wytworzył sygnał składający się z 10^7 elektronów.

Opisana w tym artykule metoda umożliwia wyznaczanie liczby fotoelektronów w sygnałach wytwarzanych w detektorach scyntylicyjnych, a liczba ta jest istotna przy wyznaczaniu energetycznej i czasowej zdolności rozdzielczej detektorów.

Literatura

- [1] S. Hecht, S. Shlaer, M.H. Pirenne, *Energy, Quanta and Vision* (1942)
- [2] W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and particle Physics Experiments*, Springer (1992) s. 149
- [3] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, Wiley (2000) s. 220

Nadesłane do Redakcji



Fizycy są wspaniałymi rodzicami