Politechnika Warszawska
Wydział Fizyki
Laboratorium Fizyki II p.
Piotr Kurek

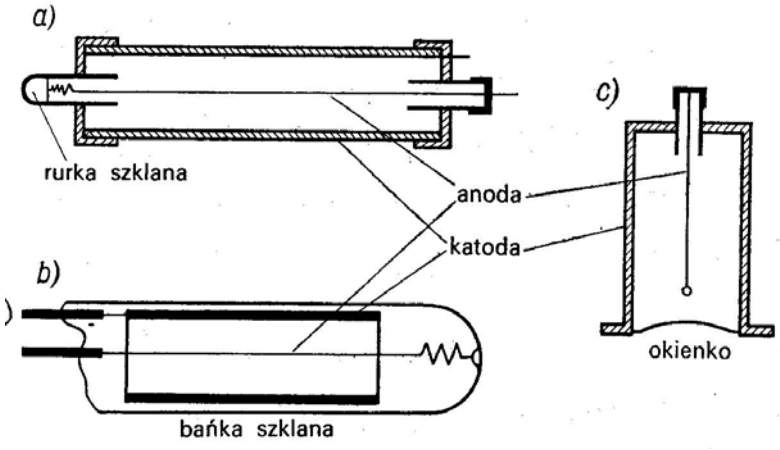
Ćwiczenie nr 50

CHARAKTERYSTYKA LICZNIKA GEIGERA-MÜLLERA I BADANIE STATYSTYCZNEGO CHARAKTERU ROZPADU PROMIENIOTWÓRCZEGO

1. Zasada działanie licznika Geigera-Müllera.

Licznik (GM) jest detektorem promieniowania jonizującego. Jego działanie oparte jest na wzmacnianiu procesów jonizacyjnych wywołanych przez promieniowanie beta **(β)** lub elektromagnetyczne promieniowanie gamma **(γ)** czy też rentgenowskie **(X).** Wzmocnienie procesów jonizacji prowadzi do wytworzenia w liczniku wyładowania lawinowego, które nie zależy od energii padającego promieniowania. Licznik GM nie służy zatem do wyznaczanie energii promieniowania, a umożliwia jedynie jego rejestrację.

Licznik GM zbudowany jest z zamkniętego metalowego cylindra oraz cienkiego drutu umieszczonego na jego osi. Cylinder i cienki drut stanowią elektrody, odpowiednio katodę i anodę do których doprowadzone jest napięcie. Układ napełniony jest gazem pod zmniejszonym ciśnieniem, zwykle jest to argon. W przypadku licznika mogącego rejestrować promieniowanie beta jedną z podstaw cylindra stanowi cienkie okienko mikowe. **Rys.1** przedstawia przykłady konstrukcji liczników GM.



Rys.1. Różne konstrukcje liczników GM: (a) licznik metalowy, (b) licznik w obudowie szklanej, (c) licznik kielichowy z cienkim okienkiem.

Wpadające do licznika cząsteczki beta czy też wtórne elektony związane z promieniowaniem elektromagnetycznym (dla tego ostatniego zastosowanie cienkiego okienka nie jest konieczne bo elektrony wtórne mogą być wybijane bezpośrednio z obudowy licznika przez fotony γ lub X)[1)] jonizują atomy gazu. W liczniku powstanie więc pewna ilość par jonów i mówimy o jonizacji pierwotnej obojętnego wcześniej gazu.

Jony są przyśpieszane w polu elektrycznym między elektrodami. Pole to jest szczególnie silne[2)] w pobliżu anody i gdy powstałe w pierwotnej jonizacji elektrony docierają w ten obszar zyskują tak dużą energię kinetyczną, że jonizują kolejne atomy. Z kolei elektrony oderwane od tych atomów jonizują następne atomy. W ten sposób powstaje w liczniku wyładowanie lawinowe.

Wyładowanie to jest podtrzymywane przez wybijane z katody fotoelektrony (w związku z powstającym we wzbudzonych atomach gazu promieniowaniem ultrafioletowym) oraz przez elektrony, które powstają na wskutek bombardowania katody przez docierające do niej jony dodatnie gazu.

Licznik w stanie wyładowania lawinowego nie może rejestrować następnych cząstek beta czy też elektronów wtórnych. Wygaszenie lawiny jest zatem konieczne aby można zarejestrować następne cząstki jonizujące.

Jednym ze sposobów gaszenia wyładowania lawinowego jest dodanie do argonu domieszki w postaci gazów lub par o cząsteczkach wieloatomowych (metan, pary alkoholu). Przy odpowiedniej ilości domieszki wyładowanie wygaśnie samo gdyż jony cząsteczek wieloatomowych pochłaniają promieniowanie ultrafioletowe i nie wybijają z katody elektronów. Kolejne impulsy ładunkowe mogą zatem wychodzić z anody, zamienione na napięciowe i po wzmocnieniu, podane na przelicznik są rejestrowane. Liczniki GM z domieszką gazów wieloatomowych noszą nazwę liczników samogasnących.

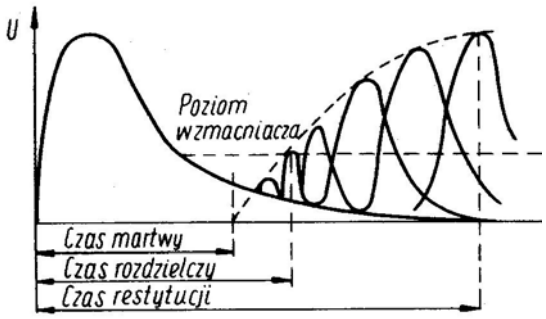
Drugą grupę stanowią liczniki niesamogasnące w których wygaszanie wyładowania lawinowego jest zewnętrzne. Rozwijająca się lawina jest wygaszana poprzez zastosowanie dużego oporu w obwodzie zasilania elektrod.

[1)] Promieniowanie γ lub X oddają energię na rzecz elektronów wtórnych w trzech zjawiskach: efekcie fotoelektrycznym, efekcie Comptona i efekcie tworzenia par.

[2)] Jeśli promień katody i anody licznika GM są odpowiednio równe a i b, napięcie wynosi V to natężenie pola elektrycznego E pomiędzy elektrodami określa wzór:
$E = V / r \ln(b/a)$.

Czas martwy

Czas, w którym licznik GM nie może rejestrować następnej cząstki jonizującej nosi nazwę czasu martwego τ. Amplituda impulsu wyjściowego osiąga pierwotną wartość po upływie tzw. czasu restytucji τ_R, a różnica $(\tau_R - \tau)$ to czas regeneracji potrzebny licznikowi aby standardowej wielkości impuls pojawił się na wyjściu. **Rys.2** przedstawia kształt impulsów na wyjściu licznika od chwili gdy pierwsza cząstka jonizująca znajdzie się w liczniku.



Rys.2. Zależność amplitudy impulsu od czasu.

Poprawkę na stratę liczby zliczeń spowodowaną istnieniem czasu martwego należy wprowadzać przy liczbie zliczeń powyżej około 100 impulsów na sek. Jeśli n_0 i n są odpowiednio rzeczywistą liczba cząstek wpadających do licznika i liczbą cząstek rejestrowanych w jednostce czasu to liczba niezarejestrowanych cząstek równa jest:

$$n_0 - n = n_0 (n\tau) \qquad [1]$$

a rzeczywista liczba cząstek:

$$n_0 = n / (1-n\tau) \qquad [2]$$

Jedną z metod wyznaczania czasu martwego jest metoda dwóch źródeł. Polega ona na porównywaniu aktywności pojedynczych źrodeł i sumy ich aktywności. Jeśli n_{01}, n_{02}, n_{012} są liczbą impulsów które powinien zarejestrować licznik w jednostce czasu, a n_t liczbą zliczeń zarejestrowanych dla tła. Wtedy:

$$n_{01} - n_t + n_{02} - n_t = n_{012} - n_t \qquad [3]$$

lub

$$n_{01} + n_{02} = n_{012} + n_t \qquad [4]$$

korzystając z równania **[2]** otrzymujemy:

$$n_1 / (1-n_1\tau) + n_2 / (1-n_2\tau) = n_{12} / (1-n_{12}\tau) + n_t / (1-n_t\tau) \qquad [5]$$

Rozwiązując to równanie względem τ po pominięciu (jako bardzo małych) wyrazów proporcjonalnych do τ^2 otrzymamy:

$$\tau = (n_1+n_2 - n_{12} -n_t) / 2(n_1-n_t)(n_2-n_t) \qquad [6]$$

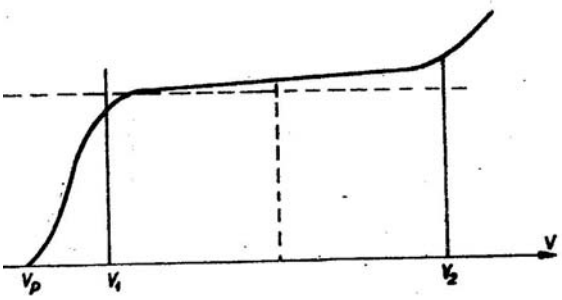
Charakterystyka licznika

Charakterystyką licznika nazywamy krzywą zależności liczby impulsów rejestrowanych w jednostce czasu od wartości przyłożonego napięcia, przy stałym natężeniu promieniowania jonizującego.

Poniżej napięcia $\mathbf{V_p}$ **(Rys.3)** wyładowanie lawinowe nie powstaje i promieniowanie nie może być rejestrowane. $\mathbf{V_p}$ jest tzw. napięciem progowym. Poczynając od napięcia V1 do napięcia V2 ilość zliczanych impulsów prawie nie zależy od napięcia. Jest to obszar plateau licznika. W licznikach GM długość plateau powinna być możliwie duża, a nachylenie plateau zdefiniowane jako procentowy wzrost liczby impulsów przy wzroście napięcia o 100V nie powinno przekraczać kilku procent.

Napięcie pracy licznika[1)] należy wybierać w środku plateau:

$$\mathbf{V_{pracy}} = \frac{\mathbf{V_1 + V_2}}{\mathbf{2}} \qquad [7]$$



Rys.3. Charakterystyka licznika Geigera-Müllera.

Napięcie wyższe od $\mathbf{V_2}$ powoduje w liczniku wyładowanie samorzutne, a przy bardzo dużych napięciach powstaje wyładowanie niegasnące.

[1)] W licznikach GM w celu obniżenia napięcia pracy stosuje się dodatkowo małe domieszki chlorowców (Cl_2 lub Br_2).

2. Prawa statystyczne, a rozpad promieniotwórczy

Zjawiska zachodzące w fizyce jądrowej mają charakter statystyczny. Na błędy związane z niedokładnością przyrządów nakładają się fluktuacje, które nie mogą być wyeliminowane gdyż są związane z naturą zachodzących procesów.

Gdy źródło promieniotwórcze o długim czasie połowiczne rozpadu umieścimy w pobliżu licznika GM i wielokrotnie, w ustalonym czasie rejestrować będziemy liczbę zliczeń to uzyskane wyniki fluktuować będą wokół wartości średniej $\bar{k}$.

Jeśli postawimy pytanie jakie jest prawdopodobieństwo P(k) otrzymania określonej liczby zliczeń to odpowiedzią jest zależność nosząca nazwę rozkładu statystycznego Poissona. W sytuacji gdy średnia liczba zliczanych przez licznik GM impulsów ma dużą wartość rozkład Poissona może być przybliżony rozkładem Gaussa.

Rozkład Poissona

Rozkład Poissona opisuje prawdopodobieństwo dla przyjmujących wartość całkowitą (dyskretną) zmiennych losowych. Może on być stosowany w przypadku rozpadu promieniotwórczego jąder ponieważ:

a) prawdopodobieństwo rozpadu pojedynczego jądra jest bardzo małe

b) w źródle promieniotwórczym znajduje się duża ilość jąder.

Prawdopodobieństwo zaobserwowania k zdarzeń w czasie jednego pomiaru, gdy pomiar powtarzany jest wielokrotnie opisane jest wyrażeniem:

$$P_P(k) = \frac{\bar{k}^k}{k!} e^{-\bar{k}} \qquad [8]$$

gdzie $\bar{k}$ jest średnią (wartością oczekiwaną) zdarzenia rejestrowanego w stałym czasie t.

Rozkład Poissona jest rozkładem niesymetrycznym jednoparametrowym ($\bar{k}$). Odchylenie standardowe σ opisujące rozrzut wartości rejestrowanych impulsów zależy jedynie od wartości średniej:

$$\sigma = \sqrt{\bar{k}} \qquad [9]$$

Rozkład Gaussa

Rozkład Gaussa opisuje prawdopodobieństwo dla ciągłych zmiennych losowych ale dobrze przybliża rozkład Poissona dla dużych wartości średniej. Jest symetrycznym rozkładem dwuparametrowym ($\bar{k}$,σ **).** Prawdopodobieństwo znalezienia zmiennej losowej **x** wyraża równanie:

$$P_G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{k})^2}{2\sigma^2} \right] \qquad [10]$$

WYKONANIE POMIARÓW

Pomiar mocy dawki źródła promieniotwórczego radiometrem wyposażonym w sondę Geigera-Müllera.

- Wykonać pomiary, przy tej samej geometrii źródło-sonda dla dwóch różnych co do grubości okienek sondy.
- Wyciągnąć wniosek co do rodzaju promieniowania jonizującego emitowanego ze źródła. Zapisać odpowiadającą mu reakcję rozpadu.

Wyznaczenie charakterystyki kielichowego licznika Geigera-Müllera.

- Włączyć zasilacz licznika i ustawić napięcie na 600 V.
- Włączyć komputer i uruchomić program **CW1.** Ustalić czas pomiaru 100 sek.
- Po umieszczeniu źródła w domku pomiarowym rozpocząć pomiar. Zmniejszając napięcie określić próg pracy licznika.
- Ustawić czas pomiaru na 10 sek.
- Wyznaczyć charakterystykę licznika rozpoczynając od napięcia nieco większego od napięcia progowego. Pomiary wykonywać co 2-3 V, a po osiągnięciu plateau co 5-10V, maksymalne napięcie 720V. Wyniki umieścić w tabeli:

U [V]	
n [imp.]	
I [imp/s]	
б = $\sqrt{\mathbf{I/t}}$	

- Narysować charakterystykę licznika.
- Określić długość, nachylenie plateau i napięcie pracy licznika.
- Ustawić na zasilaczu wyznaczone napięcie pracy.
- Wyniki zebrać w tzw. metrykę licznika:

$\mathbf{U_{progowe}} =$ $\mathbf{U_{pracy}} =$

Długość plateau $= \mathbf{U_2 - U_1} =$

Nachylenie plateau $= \dfrac{(\mathbf{I_2 - I_1})\mathbf{100\%}}{\dfrac{\mathbf{I_1 + I_2}}{\mathbf{2}} \; \dfrac{\mathbf{V_2 - V_1}}{\mathbf{100}}} =$

Wyznaczanie czasu martwego licznika GM metodą dwóch źródeł

- Ustalić z prowadzącym czas wykonywania pomiarów.
- Zmierzyć tło licznika.
- Umieścić 1. źródło pod licznikiem. Zmierzyć liczbę impulsów w ustalonym czasie.
- Nie potrącając 1. źródła umieścić pod licznikiem drugi preparat, wykonać pomiar.
- Usunąć spod licznika źródło 1. i wykonać analogiczny pomiar dla pozostającego w domku preparatu.

Nr preparatu	n_i [imp.]	I_i [imp/sek.]	$б_i = \sqrt{I_i/t_i}$

- Wyliczyć czas martwy licznika z zależności **[6]** i oszacować popełniany błąd w oparciu o określone dla poszczególnych pomiarów wartości $б_i = \sqrt{I_i/t_i}$. Błąd związany z pomiarem tła pominąć.

Rejestrowanie histogramów źródeł promieniotwórczych.

- Uruchomić program **CW1A.**
- Ustalić liczebność serii pomiarowej i ustawić czas pojedynczego pomiaru na 0.1 sek. (Każdy z wykonujących ćwiczenie dokonuje pomiarów dla wyznaczonego źródła promieniotwórczego i zachowuje je w pliku zawierającym w nazwie inicjały i numer zespołu laboratoryjnego).
- Dla potrzeb opracowania sprawozdania zachować pliki na dyskietce lub wysłać je na dostępny adres e-mail'owy.
- Zachowane pliki zaimportować do Origin'a. Po wydrukowaniu histogramów opisać osie i dokonać wstępnej analizy uzyskanych rezultatów.
- Określić parametry hipotetycznych rozkładów statystycznych:

wartości oczekiwanej $\bar{k} = \Sigma k \cdot P(k)$ i odchylenia standardowego $\sigma = \sqrt{\overline{(k^2)} - (\bar{k})^2}$

- Wyliczyć dla trzech wyznaczonych zmiennych losowych:

1. prawdopodobieństwo doświadczalne

2. prawdopodobieństwo wynikające z rozkładu Poissona

3. prawdopodobieństwo wynikające z rozkładu Gaussa.

- Dokonać graficznego porównania histogramu doświadczanego[1)] z hipotetycznymi. (W arkuszu kalkulacyjnym napisać algorytmy obliczania prawdopodobieństw w oparciu o rozkład Poissona oraz Gaussa, narysować odpowiadające im histogramy, a w ich tle, w postaci wykresu słupkowego dodać histogram doświadczalny. Każdy z wykonujących ćwiczenie dołącza do sprawozdania porównanie swojego rozkładu doświadczalnego, odpowiednio z rozkładem Poissona i Gaussa na dwóch osobnych kartkach).
- Stosując test zgodności rozkładów χ^2 sprawdzić czy wyniki doświadczenia podlegają przewidywanemu rozkładowi statystycznemu.

Pytania kontrolne.

1. Co to jest wyładowanie lawinowe i jaką rolę odgrywa w procesie rejestracji przez licznik Geigera-Müllera promieniowania jonizującego?
2. Jaką wartość ma pole elektryczne w pobliżu anody o promieniu 0.1mm, jeżeli promień licznika równy jest 1cm, a napięcie między elektrodami ma wartość 600V ?
3. Jaka jest różnica pomiędzy samogasnącym, a niesamogasnącym licznikiem GM?
4. Jakie rodzaje promieniowania jonizującego mogą być rejestrowane przez licznik GM? Kiedy stosuje się cienkie okienko mikowe ?
5. Czy licznik GM daje możliwość określenia energii promieniowania jonizującego?
6. Omów parametry charakteryzujące licznik GM.
7. Dlaczego w celu wyznaczenia czasu martwego licznika GM stosujemy metodę dwóch źródeł promieniotwórczych? Czy pomiar liczby zliczeń w jednostce czasu dla jednego tylko źródła daje możliwość określenia czasu martwego?

[1)] Uzyskane w trakcie pomiarów krotności wystąpień zmiennej losowej przeliczyć na prawdopodobieństwa i dokonać porównania prawdopodobieństw, a nie krotności wystąpień zmiennej losowej .

8. Jakie warunki doświadczalne muszą być spełnione aby do opisu rozpadów promieniotwórczych można było stosować rozkłady Poissona lub Gaussa?
9. Co to jest test zgodności rozkładów χ^2 i jak można go zastosować w przypadku rezultatów uzyskanych w ćwiczeniu (pozycja nr 3 literatury, str 242-263) ?

Literatura

1. A. Strzałkowski, Wstęp do fizyki jądra atomowego, PWN W-wa, 1969

2. D. Halliday, R .Resnick, J. Walker, Podstawy fizyki, tom 5, PWN W-wa, 2003.

3. J. R.Taylor, Wstęp do analizy błędu pomiarowego, PWN W-wa, 1995.