

Ćwiczenie: A8

Tytuł ćwiczenia: Promieniotwórczość

I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studenta z prawem rozpadu promieniotwórczego oraz wyznaczenie stałej rozpadu radonu $^{220}_{86}\text{Rn}$.

II. Zakres ćwiczenia (zadania do wykonania)

1. Cechowanie elektrometru z komorą jonizacyjną.
2. Pomiar opadu własnego listków elektroskopu z komorą jonizacyjną.
3. Wyznaczenie stałej rozpadu i okresu połowicznego zaniku radonu.

III. Zagadnienia do kolokwium

1. Własności jąder atomowych w stanie podstawowym.
2. Promieniotwórczość naturalna:
 - przemiany promieniotwórcze, rodziny promieniotwórcze,
 - rozpad α , rozpad β , emisja promieniowania γ ,
 - warunki energetyczne rozpadów α i β , widma rozpadów.
3. Reakcje jądrowe i promieniotwórczość sztuczna: odkrycie neutronu, odkrycie pozytonu.
4. Detekcja promieniowania jądrowego, rodzaje przyrządów służących do detekcji promieniowania.
5. Metoda wyznaczenia stałej rozpadu radonu.

IV. Opis urządzeń i przyrządów używanych w eksperymencie

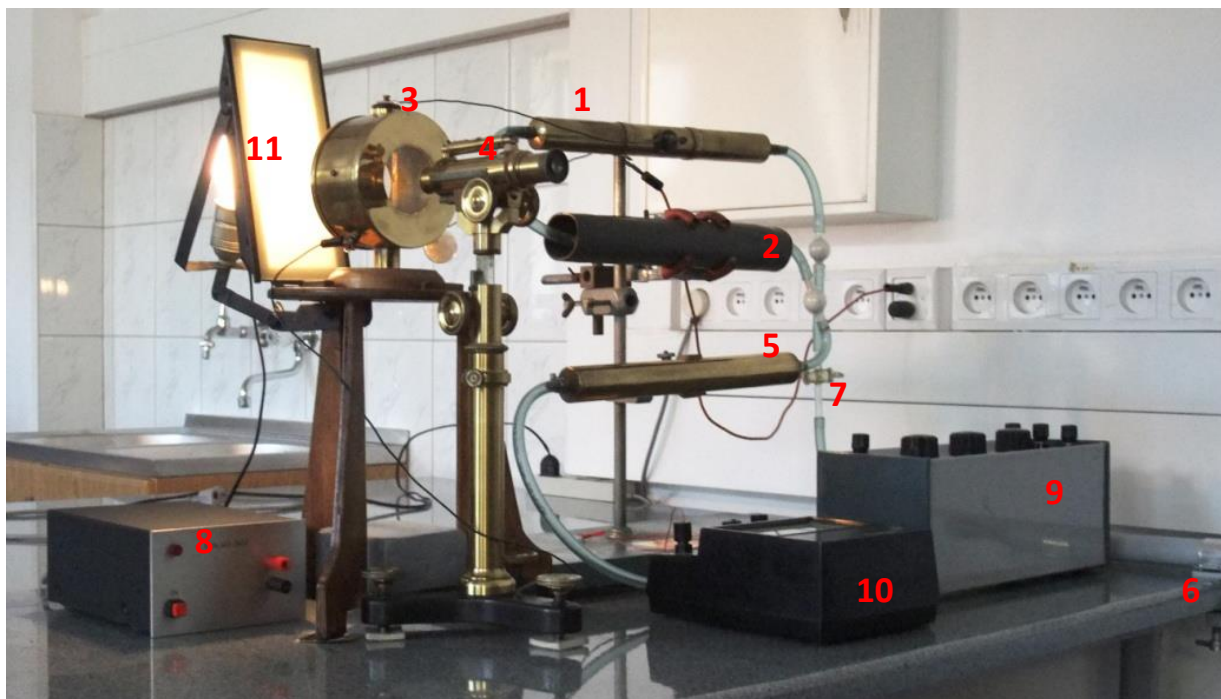
Zestaw aparaturowy przedstawiony jest na zdjęciu na Rys.1, a odpowiednie schematy połączeń na Rys. 2 i Rys. 3. W skład zestawu wchodzi następujące przyrządy (oznaczenia w nawiasach zostały użyte na Rys. 2 i 3):

1. Komora jonizacyjna (K. JON.).
2. Pojemnik ze źródłem promieniotwórczym (PREP.) w osłonie Pb o grubości 2 mm.
3. Elektrometr (E).
4. Lunetka.
5. Suszka (S).
6. Pompka (P).
7. Dwa szklane zaworki (K_1 , K_2).
8. Zasilacz napięcia 240 V (ZAŚ.).
9. Dzielnik napięcia typ DNa-18 (DZ.NAP.).
10. Woltomierz wskazówkowy LM-3 (V).
11. Układ podświetlenia komory elektrometru.

Zasadnicze elementy zestawu (oprócz układów elektronicznych) są historycznymi egzemplarzami i pochodzą z początku XX wieku. Ich dokładne pochodzenie nie jest znane. Warto podkreślić, że takie przyrządy były wykorzystywane w badaniach nad promieniotwórczością m.in. przez Marię Curie-Skłodowską.

Elektrometr (3 na Rys. 1) jest umieszczony na drewnianej podstawie. Za elektrometrem znajduje się oświetlany żarówką ekran (11) a przed nim luneta do obserwacji i pomiaru wychylenia listka (4). Obok u góry widoczna jest komora jonizacyjna (1) a pod nią są umieszczone pojemnik z preparatem promieniotwórczym (2) i suszka (5) połączona z pompką powietrza (6).

Zestaw posiada dwa obwody: obwód przepływu powietrza z radonem i obwód elektryczny. Obwód przepływu powietrza z radonem nie wymaga jakichkolwiek ingerencji studenta – stanowi układ trwale połączonych elastycznymi rurkami pompki, suszki, pojemnika z radem i komory jonizacyjnej.



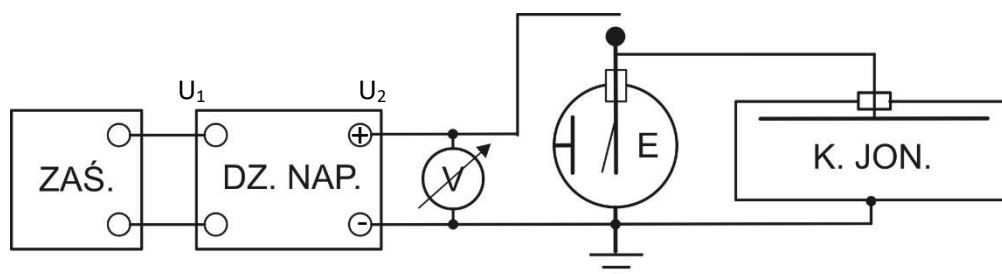
Rys.1 Zestaw do pomiaru stałej rozpadu radonu (cyfry oznaczają urządzenia wypunktowane w rozdziale IV).

V. Wykonanie ćwiczenia

(sposób postępowania, schematy blokowe, uwagi dotyczące obsługi aparatury i BHP)

Cechowanie elektroskopu ma na celu wyznaczenie wielkości wychylenia listka w funkcji przyłożonego napięcia. Wycechowany elektroskop nazywamy elektrometrem. Napięcia różnej wielkości uzyskuje się poprzez podłączenie zasilacza napięcia do wejścia dekadowego dzielnika napięcia, U_1 , Rys. 2.

1. Wyjście dekadowego dzielnika napięcia, U_2 , należy podłączyć do elektrometru. Przewód o ujemnej polaryzacji powinien być podłączony do obudowy elektrometru i do uziemienia. Drugi przewód należy podłączyć do górnego zacisku elektrometru. Sposób elektrycznego połączenia urządzeń pokazuje Rys.2.



Rys.2 Schematyczny rysunek połączeń elektrycznych pomiędzy urządzeniami.

2. Następnie należy włączyć podświetlenie elektrometru (matowa żarówka z białą przesiłą rozpraszającą światło) umieszczone za elektrometrem (na Rys. 1 żarówka jest włączona).

3. Pomiary należy wykonać zmieniając wartość napięcia od 0 do 240 V (i z powrotem od 240 V do 0) skokiem co 10V. Napięcie zmieniamy dekadowym dzielnikiem napięcia (używając czarnych pokręteł), należy dobrać odpowiedni zakres woltomierza (np. 300V).
Wychylenia listka obserwowane są lunetką i jako liczba małych działek skali zapisywane w tabeli 1.
4. Po wykonanym pomiarze ustawić napięcie podawane przez dzielnik na 0V i wyłączyć zasilacz.
5. Odłączyć przewód doprowadzający napięcie do górnego zacisku elektrometru.

Tabela I. Cechowanie elektrometru.

Nr. pomiaru	Napięcie [V]	Położenie listka [dz.]		
		n (0-240)	n (240-0)	n <i>średnie</i>
1	0			
2				
25	240	64	66	65

Pomiar opadu własnego elektrometru z komorą jonizacyjną

W tej części doświadczenia zostanie wyznaczona szybkość rozładowania elektrometru i komory jonizacyjnej bez radonu. W tym celu:

1. Przed wykonaniem pomiaru opadu własnego należy sprawdzić, czy zasilacz napięcia jest wyłączony i kabel łączący zasilacz (wyjście +) jest odłączony od elektrometru.
2. Do górnego zacisku elektrometru należy podłączyć przewód łączący go z komorą jonizacyjną (standardowo układ ten jest połączony).
3. Do pomiaru należy wybrać odpowiedni zakres działek na skali okularu. Ponieważ z cechowania elektrometru wynika, że jego czułość zmienia się z napięciem, to do pomiaru opadu własnego należy wybrać ten sam zakres napięć jaki będzie stosowany w dalszej części doświadczenia. Przykładowo, może to być zakres pomiędzy 40 a 60 działkami (albo pomiędzy 50 a 60 działkami). Krótszy przedział wykorzystuje bardziej liniową część charakterystyki, ale wymaga dużej sprawności w notowaniu krótkich czasów kiedy już w komorze jonizacyjnej znajdzie się radon.
4. Końcówkę kabla dostarczającego napięcie trzymać za izolację i nie dotykać nim metalowych elementów. Ustawić napięcie na dekadowym dzielniku napięcia na 240V, włączyć zasilacz i na chwilę przyłożyć końcówkę kabla do główki elektrometru. Listek elektrometru powinien się wychylić poza przyjęty do pomiarów zakres. Następnie wyłączyć zasilacz napięcia i odłożyć końcówkę kabla.
5. Stoperem rejestrować czas przejścia listka przez wyznaczony zakres skali elektrometru. Należy wykonać kilka pomiarów czasu opadu własnego listka a wyniki zapisać w tabeli II.

Tabela II. Opad własny elektrometru pomiędzy działkami (tu wpisać zakres działek elektroskopu)

Nr. pomiaru	Czas opadania [sek]
1	
2	
3	

Na podstawie danych z tabeli II obliczamy średni czas opadania listka Δt pomiędzy wybranymi działkami oraz średnią prędkość opadania listka elektrometru v_0 ze wzoru:

$$v_0 = \frac{n}{\Delta t}$$

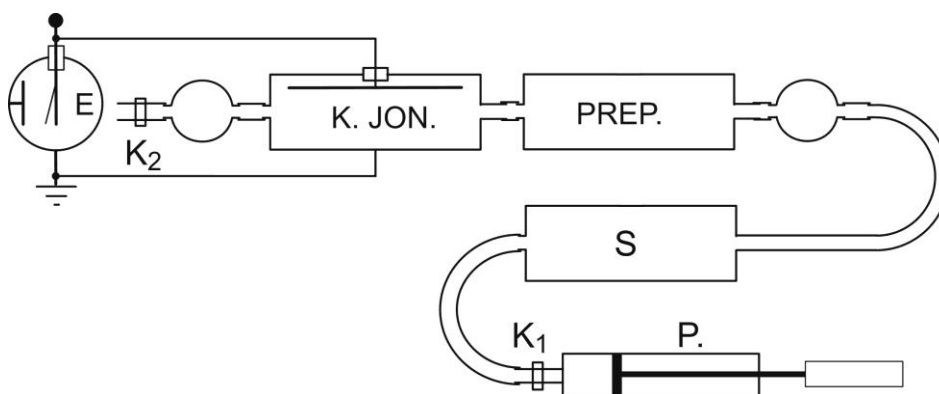
Wyznaczenie stałej rozpadu radonu.

Elementy układu należy połączyć, jak pokazuje Rys. 3. Przebieg doświadczenia jest następujący:

1. Otwarcie zaworków K_1 i K_2 .
2. Kilukrotne naciśnięcie pompki (np. 5-ciokrotne) w celu wprowadzenia do komory jonizacyjnej radonu z pojemnika z preparatem promieniotwórczym.
3. Zamknięcie zaworków K_1 i K_2 .
4. Ładowanie elektrometru (napięciem, które spowoduje wychylenie listka nieco ponad przyjętą skalę pomiarową). Ładowanie odbywa się poprzez chwilowe przyłożenie przewodu napięcia do główki elektroskopu). Po odłączeniu przewodu ładującego przewód należy trzymać w ręce za izolację.
5. W chwili, gdy opadający listek mija początkową działkę wybranego zakresu pomiarowego, uruchamiany jest pierwszy sekundomierz.
6. W chwili, gdy opadający listek mija środkową działkę wybranego zakresu pomiarowego, uruchamiany jest drugi sekundomierz.
7. W chwili, gdy opadający listek mija końcową działkę wybranego zakresu pomiarowego, zatrzymywany jest pierwszy sekundomierz. Odczyt z tego sekundomierza jest czasem opadania Δt_1 w pierwszym przedziale.
8. Nie zatrzymując drugiego sekundomierza, należy ponownie naładować elektrometr, jak w punkcie 4 powyżej.
9. Zerujemy pierwszy sekundomierz i mierzymy nim czas opadania listka Δt_2 , tak jak opisano powyżej w punkcie 5.
10. Sekundomierzem drugim mierzony jest czas przejścia listka t_2 przez środek przedziału. Sekundomierza tego nie należy zatrzymywać.
11. Cykl pomiarowy (punkty 4-10) należy powtarzać tak wiele razy, aż szybkość opadania będzie bliska biegowi własnemu (z reguły ok 7-10 cykli).
12. Obliczyć szybkości opadania w chwilach t_1 , t_2 , t_3 , ...

$$w_1 = \frac{n}{\Delta t_1}, \quad w_2 = \frac{n}{\Delta t_2}, \quad \dots \quad (5)$$

13. Od obliczonych szybkości opadania należy odjąć szybkość biegu własnego v_0 : $v_i = w_i - v_0$.
14. Zaleca się przeprowadzenie 10 serii takich pomiarów (punkty 1-13). W przypadku zajęć z ograniczoną liczbą godzin, o ilości wykonywanych serii decyduje nauczyciel prowadzący zajęcia.



Rys.3 Schematyczny rysunek połączeń pomiędzy pompką, suszką, komorą z preparatem i komorą jonizacyjną wraz z elektrometrem.

Uwagi odnośnie do bezpieczeństwa pracy.

1. Zachować ostrożność przy posługiwaniu się zasilaczem napięcia. Podczas ładowania elektrometru **nie dotykać ręką końca przewodu „+”**, który znajduje się pod napięciem - w tym celu należy **trzymać przewód za izolację**. Przy pomiarze opadu własnego elektrometru (zadanie 2) należy, dla bezpieczeństwa pracy, po naładowaniu elektrometru **wyłączyć zasilacz**.

- Pojemnik na źródło promieniotwórcze jest zamknięty i osłonięty warstwą ołowiu o grubości 2 mm, co jest wystarczającym zabezpieczeniem przed przenikaniem na zewnątrz promieni emitowanego przez izotopy pochodzące z rozpadu wyjściowych jąder ^{232}Th . Okres połowicznego zaniku ^{232}Th jest równy $1.39 \cdot 10^{10}$ lat.
- Za wyjątkiem czynności pompowania preparatu promieniotwórczego do komory jonizacyjnej, krany K_1 i K_2 w układzie przepływowym (Rys. 3) muszą być zamknięte.

VI. Opracowanie wyników i raport końcowy

Zadanie 1.

Do wyników pomiarowych cechowania elektroskopu (tabela I) należy dopasować krzywą w postaci wielomianu 2-go lub 3-go stopnia wykorzystując np. funkcję polyfit.m programu Matlab. Podać równanie tej krzywej cechowania, wartości współczynników i ich niepewności. Przedstawić punkty pomiarowe i krzywą cechowania elektroskopu na wykresie.

Zadanie 2 i 3.

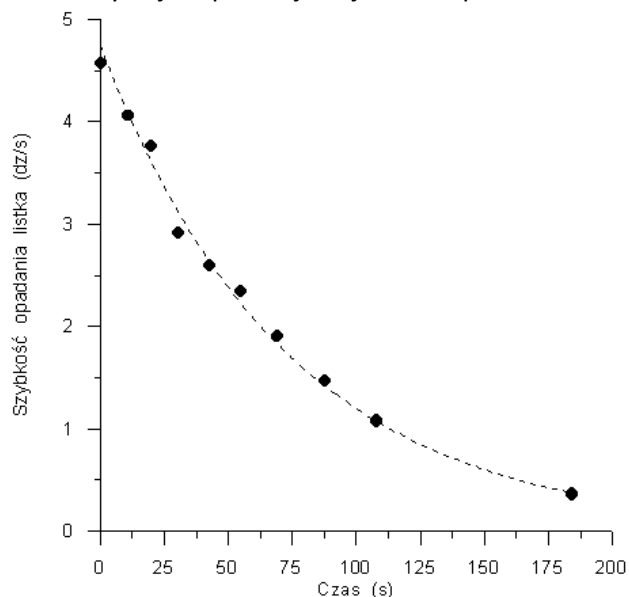
Wyniki pomiarów i obliczeń stałej rozpadu radonu dla każdej serii pomiarowej należy umieścić w osobnej tabeli:

Tabela III. Pomiar czasów opadania. Seria 1.

Nr pomiaru	Δt_i [s]	t_i [s]	w_i [dz/s]	v_i [dz/s]
1.				
2.				
...				

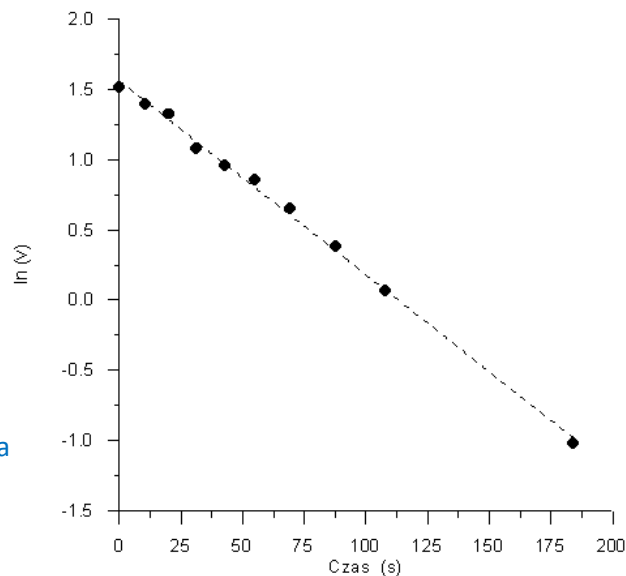
W celu wyznaczenia stałej rozpadu R_n zakładamy, że szybkość opadania listka elektroskopu jest proporcjonalna do liczby cząstek, które uległy rozpadowi w komorze jonizacyjnej. Zatem relacja opisująca prawo rozpadu promieniotwórczego spełniona jest także dla szybkości opadania listka. Aby wyznaczyć stałą rozpadu radonu wyniki każdej serii należy przedstawić na wykresie korzystając z metody 1 lub metody 2:

- (metoda 1) we współrzędnych t na osi x i v_i na osi y . W tym układzie współrzędnych wykres powinien mieć postać funkcji o zaniku eksponentialnym z wykładnikiem $-\lambda$ (zgodnie z prawem rozpadu). Dopasowanie do punktów pomiarowych krzywej wykładniczej pozwala wyznaczyć stałą rozpadu radonu i czas połowicznego zaniku. Przykładowy wykres uzyskany w tej metodzie przedstawia rysunek 4. Dla każdego wykresu należy podać współczynniki dopasowania krzywej eksponentialnej z ich niepewnościami.



Rys. 4 Zależność prędkości opadania listka od czasu dla serii pomiarowej 1.

2. (metoda 2) we współrzędnych t na osi x i $\ln(v_i)$, na osi y . W tym układzie współrzędnych wykres powinien mieć postać prostej o nachyleniu równym $-\lambda$. Prosta powinna być dopasowana do punktów doświadczalnych z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów z podaniem obu współczynników prostej wraz z ich niepewnościami. Przykładowy wykres uzyskany tą metodą przedstawia Rys. 5.



Rys. 5 Zależność logarytmu prędkości opadania listka od czasu dla serii pomiarowej I.

Wartością końcową stałej rozpadu jest średnia arytmetyczna uzyskana ze wszystkich serii pomiarowych. Na podstawie znajomości stałej rozpadu należy wyliczyć czas połowicznego zaniku radonu.

Niepewności pomiarowe.

Każda krzywa wpisana w punkty doświadczalne na wykresie (dla każdej serii) powinna być opisana odpowiednim równaniem, z podaniem wartości parametrów tej krzywej (wraz z jednostkami) oraz podaniem niepewności dopasowania tych parametrów.

Wyliczone z każdej serii λ należy przedstawić w osobnej tabeli oraz obliczyć średni błąd kwadratowy:

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{V(\lambda)} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{k=1}^N (\lambda_k - \langle \lambda \rangle)^2} \quad (6)$$

gdzie: σ_{λ} - estymator wariancji, $V(\lambda)$ - wariancja, $\langle \lambda \rangle$ - średnia wartość λ , N - liczba pomiarów. W przypadku mniejszej liczby serii pomiarowych za niepewność określenia stałej rozpadu przyjąć maksymalną niepewność wpisania krzywej (prostej lub funkcji eksponentialnej) w punkty doświadczalne.

Znając niepewność wyznaczenia stałej rozpadu obliczyć niepewność czasu połowicznego zaniku.

Otrzymane wyniki stałej rozpadu oraz czasu połowicznego zaniku radonu zapisać z uwzględnieniem wyznaczonych niepewności pomiarowych oraz niepewnościami procentowymi. Wyniki należy porównać z danymi literaturowymi i omówić ewentualne przyczyny ich niezgodności.

Literatura

1. A. Strzałkowski, *Wstęp do fizyki jądra atomowego*, PWN, Warszawa 1978.
2. R. M. Eisberg, *Podstawy Fizyki Współczesnej*, PWN, Warszawa 1968.
3. E. Skrzypczak, Z. Szepliński, *Wstęp do fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych*, PWN, W-wa 1995.
4. C. Bobrowski, *Fizyka, krótki kurs*, wyd. ósme, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.

Appendix: Materiały pomocnicze

Prawo rozpadu promieniotwórczego.

Jeśli początkowa liczba nietrwałych, takich samych jąder w czasie $t = 0$ jest równa N_0 , to po upływie czasu t pozostanie ich mniej, a zależność liczby N od czasu jest opisana wzorem:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Równanie to stanowi matematyczny zapis prawa rozpadu promieniotwórczego. Odwrotność stałej rozpadu nosi nazwę czasu życia:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

Obok czasu życia wprowadza się inny parametr zwany czasem połowicznego zaniku T , po którym pozostaje połowa z pierwotnej liczby jąder:

$$\frac{N(T)}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

Warto zaznaczyć, że powyższy opis dotyczy jąder które podlegają tylko jednemu rozpadowi. Inaczej jest, jeśli rozpatruje się rozpad jąder w szeregu radioaktywnym, kiedy kolejne, pochodne jądra rozpadają się z różnym prawdopodobieństwem. Dla potrzeb tego ćwiczenia ograniczymy jednakże rozważania do najprostszej formy opisu, podanej równaniem (1).

1. Elektrometr

Elektrometr jest przyrządem który rejestruje obecność ładunku. Wycechowany, pozwala określić jego ilość. Jest formą kondensatora, na którego okładkach istnieje napięcia a pomiędzy okładkami jest pole elektryczne. Ładunek elektryczny zgromadzony na ruchomych elementach wewnątrz elektrometru podlega siłom elektrostatycznym. Jeśli siły elektrostatyczne są dostatecznie duże wówczas mogą przemieścić element służący za wskazówkę. W doświadczeniu stosowany jest elektrometr ze wskazówką w postaci folii (listka) ze złota. Wychylenie takiej wskazówki jest zależne od wielu sił, w tym najważniejszymi są siły elektrostatycznego przyciągania i odpychania i równoważąca je siła ciężkości. Ponadto działa siła sprężystości folii i siły adhezji pomiędzy folią a płytką do której jest zamocowana. Przed ilościowymi pomiarami elektroskop musi być wycechowany, tzn. musi być znana wartość wychylenia listka mierzona w działkach, w funkcji przyłożonego potencjału. Z reguły obudowa elektrometru jest połączona z uziemieniem.

2. Radon i preparat promieniotwórczy.

Radon ${}^{220}_{86}\text{Rn}$ jest tzw. emanacją toru ${}^{232}_{90}\text{Th}$ i powstaje w sekwencji rozpadów, która kończy się na stabilnym izotopie ${}^{208}_{82}\text{Pb}$. Tor 232 jest długożyciowym izotopem z półokresem rozpadu wynoszącym $1,4 \times 10^{10}$ lat, a więc praktycznie jest źródłem niewyczerpalnym. Radon ${}^{220}_{86}\text{Rn}$, zwany też toronem, jest natomiast krótkożyciowym izotopem z półokresem rozpadu wynoszącym 55,6 sek. Podczas rozpadu radonu ${}^{220}_{86}\text{Rn}$ powstaje cząstka α i izotop ${}^{216}_{84}\text{Po}$, który po 0.15 sek. Rozpada się ponownie emitując cząstkę α . Przedmiotem badań tego doświadczenia jest rozpad z półokresem 55,6 sek. Warto zaznaczyć, że w przyrodzie występuje wiele różnych izotopów radonu, wśród nich także radon ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ w szeregu radowym z półokresem rozpadu 3,82 dnia i ${}^{219}_{86}\text{Rn}$ w szeregu uranowym z półokresem rozpadu wynoszącym 3,96 sek.