

UZUPEŁNIENIA

ROZDZIAŁ I

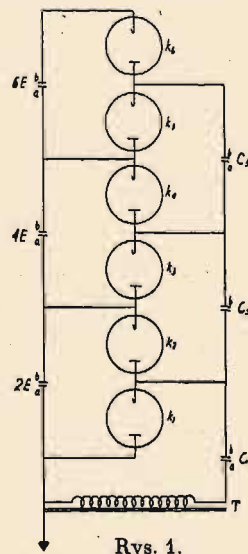
POSTĘPY TECHNIKI W DZIEDZINIE FIZYKI JĄDROWEJ

Opiszemy najpierw w krótkości najważniejsze przyrządy używane obecnie w laboratoriach fizyki jądrowej. Są to aparatury dostarczające pocisków jądrowych, tj. szybkich cząstek wywołujących przemiany jądrowe, oraz przyrządy służące do wykrywania cząstek wysyłanych przez przeobrażone jądra.

Przyrządy dostarczające szybkich cząstek możemy podzielić na cztery główne grupy: powielacze napięcia typu *Cockcrofta* i *Waltona*, cyklotrony, maszyny elektrostatyczne, generatory impulsowe.

A. Przyrządy służące do otrzymywania szybkich cząstek.

1. *Przyrząd Cockcrofta i Waltona* jest opisany w ogólnych zarysach w książce pani *Skłodowskiej-Curie* (str. 317); na tym miejscu podamy niektóre szczegóły dodatkowe. Transformator T dostarcza napięcia o wartości szczytowej E ; jeden z zacisków napięcia wtórnego jest uziemiony i łączy się poprzez kenotron K_1 (rys. 1) z jedną z okładek kondensatora C_1 , którego druga okładka jest połączona bezpośrednio z drugim zaciskiem T obwodu wtórnego. Kondensator C_1 stanowi jeden z elementów baterii identycznych kondensatorów C_3, C_5 , połączonych szeregowo. Inna bateria, zawierająca kondensatory C_2, C_4, C_6 ¹⁾ w tej samej liczbie co poprzednia, posiada jeden z biegunów uziemiony, drugi zaś jej biegun jest to właściwe źródło wyprostowanego wysokiego napięcia. Wreszcie kenotrony K_2, K_3, K_4 itd. łączą odpowiednio pary kondensatorów C_1 i C_2, C_2 i C_3 itd. Kenotrony są połączone z sobą w ten sposób, że prąd dodatni może płynąć wprost od uziemionego zacisku transformatora jednocześnie

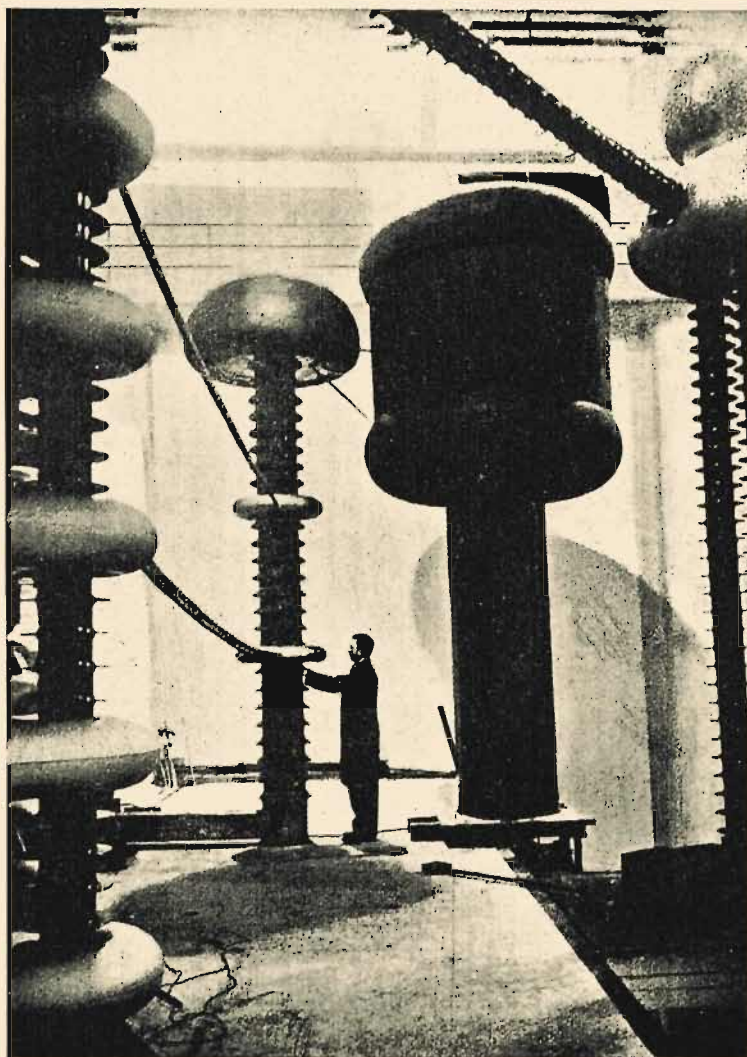


Rys. 1.

¹⁾ Z lewej strony rysunku, oznaczone tylko napięciami $2E, 4E, 6E$ itd.

przez wszystkie kenotrony. Dla skrócenia oznaczmy literą a okładkę każdego kondensatora znajdującą się bliżej transformatora, literą zaś b okładkę dalszą. Powstawanie wysokiego napięcia odbywa się w kilku fazach. W pierwszej fazie T posiada dodatni potencjał, kenotron K_1 jest «otwarty», okładka b kondensatora C_1 jest uziemiona, okładka a ma napięcie $-E$ woltów. W następnej fazie okładka a kondensatora C_1 ładuje się do $+E$, a zatem okładka b (która w tej chwili jest izolowana) otrzymuje ładunek $2CE$, który dzieli się między kondensatory C_1 i C_2 udzielając okładce b kondensatora C_2 potencjału wyższego o E od okładki a . W trzeciej fazie kondensator C_1 jest ponownie uziemiony, natomiast kondensator C_2 dzieli ładunek z kondensatorem C_3 w ten sposób, że napięcie spada do $E/2$. W czwartym etapie nowy przepływ ładunku podwyższa potencjał C_2 do $(CE/2 + 2CE)/2C = 5E/4$. Jest zatem rzeczą jasną, że podczas następnych kolejnych zmian znaku napięcia ładunek elektryczny będzie się udzielał stopniowo dalszym kondensatorom i wszystkie napięcia będą wzrastały dopóty, dopóki wszystkie kondensatory baterii oznaczone cyframi parzystymi nie naładują się do potencjałów $2E$, tj. do chwili, gdy potencjał izolowanego bieguna tej baterii przybierze wartość $V = 2nE$, gdzie n jest to liczba elementów baterii.

Wysokie napięcie V dostarczone przez ten układ przykłada się do anody przyrządu służącego do otrzymywania szybkich cząstek. Jest to rura opróżniona, w której jony służące do doświadczeń, transmutacyjnych, najczęściej protony lub deuterony, tj. jądra ciężkiego wodoru uzyskują energię kinetyczną Ve . Kształt tych rur bywa różny, zasada działania jest jednak zawsze jednakowa. Ciśnienie w rurze musi być niezmiernie niskie, rzędu wielkości 10^{-4} mm Hg, gdyż inaczej nie byłoby rzeczą możliwą nadać elektrodom różnicy potencjału rzędu kilkuset kilowoltów. Z tego samego powodu rury muszą posiadać znaczne rozmiary, np. długość rzędu 1 m, średnicę co najmniej 30 cm. Niekiedy używa się rur złożonych z kilku odcinków przedzielonych pierścieniami metalowymi, co usuwa możliwość wyładowania koronowego i daje bardziej równomierny rozkład potencjału. Bardzo ważny jest sposób uszczelniania połączeń między poszczególnymi częściami rury. Z powodu znacznych rozmiarów aparatury należy unikać ogrzewania spajanych części, a zatem lakowań lub lutowań; wszystkie połączenia uszczelnia się za pomocą plastycyny, substancji, która już w temperaturze pokojowej jest bardzo plastyczna i doskonale przylega do szkła, metali itp. Wynalezienie tej substancji, stanowiącej idealny środek pomocniczy w technice próżniowej, przystosowanej do potrzeb fizyki jądrowej, przyczyniło się w znacznej mierze do osiągnięcia pomyślnych wyników w dziedzinie sztucznej transmutacji. Inny charakterystyczny rys nowoczesnej techniki próżniowej w tej dziedzinie polega na tym, że rur nie oddziela się od pompy, gdyż «wyhodowanie» próżni, tj. usunięcie okcludowanych gazów byłoby niemożliwe: rury są nieustannie opróżniane



Generator Cockcrofta-Waltona.

podczas działania za pomocą bardzo potężnych pomp dyfuzyjnych, porwyjących około 100 litrów na sekundę.

Wobec wysokiej próżni istniejącej w opisanej rurze nie można wytworzyć w niej wyładowania; wyładowanie powstaje w rurze pomocniczej, w której ciśnienie jest rzędu $1/100 \text{ mm Hg}$ oraz napięcie rzędu 10 kilowoltów. Jony powstające w wielkiej obfitości podczas wyładowania przenikają poprzez mały otwór do głównej rury; istnieje zatem stały przepływ gazu i próżnia może być utrzymana tylko dlatego, że pompa działa bez przerwy.

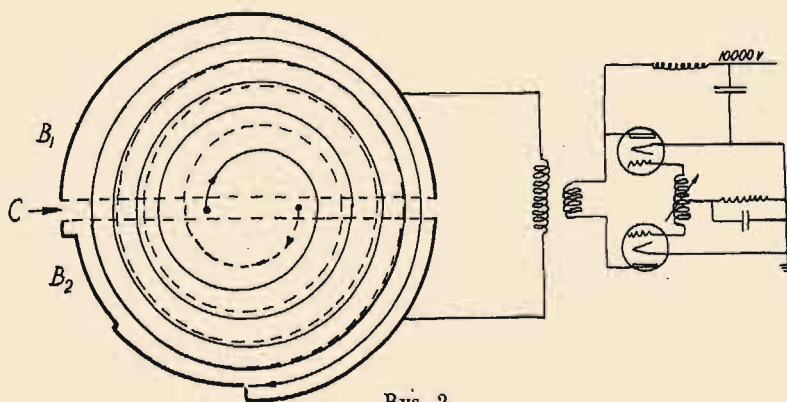
W przyrządzie używanym obecnie w Cavendish Laboratory (tabl. I), zbudowanym przez Philipsa, mamy $E = 100 \text{ kV}$, $n = 6$. $V = 1200 \text{ kV}$. Generator wysokiego napięcia jest przedstawiony na lewo na tabl. I i zawiera 12 tyratronów, oraz dwie baterie, każda z 6 kondensatorów. Na prawo widzimy zaopatrzoną w pierścieniowe przegrody rurę do przyspieszania cząstek, obok zaś tej rury opornicę o całkowitym oporze $1,2 \cdot 10^9 \text{ omów}$, przez którą przepływa prąd 1 mA służący do mierzenia przyłożonego napięcia. Cała ta aparatura znajduje się na płaskim dachu «laboratorium», stanowiącego wielką puszkę Faradaya zbudowaną z betonu zmieszanego z substancją przewodzącą elektryczność. Ściany tego pomieszczenia są uziemione, wewnątrz zaś znajdują się przyrządy służące do wytwarzania reakcyj jądrowych i obserwowania zjawisk towarzyszących tym reakcjom.

Katoda głównej rury posiada otwór, przez który przyspieszone jony przenikają do komory «reakcyjnej» i padają na próbkę substancji, w której chcemy badać transmutację. Jeżeli chcemy wydzielić jony określonego rodzaju (np. atomowe jony deuterium w mieszaninie ciężkiego i zwykłego wodoru), to odchylamy wiązkę jonów w polu magnetycznym.

2. *Cyklotron* został wynaleziony i zbudowany w Ameryce przez *Lawrence'a*. Jest to przyrząd, który wchodzi stopniowo w powszechne użycie w laboratoriach fizyki jądrowej, gdyż rozwiązuje w nader udatny sposób zagadnienie otrzymywania pocisków jądrowych o wielkiej energii kinetycznej bez konieczności używania generatorów wysokiego napięcia, wymagających wielkiej ostrożności i zajmujących bardzo wiele miejsca. Główną część cyklotronu (tabl. II) stanowi elektromagnes wytwarzający pole rzędu 15000 oerstedów w bardzo znacznej przestrzeni (np. pomiędzy biegunami o średnicy 75 cm , oddalonymi o 10 cm). Przyrząd służący do wytwarzania przyspieszeń jest to płaskie opróżnione pudło (rys. 2), umieszczone w polu magnetycznym i zaopatrzone w dwie wielkie elektrody półcylindryczne, takie, jakie otrzymalibyśmy np. rozcinając cylindryczne pudełko wzdłuż jednej ze średnic. Za pomocą potężnego generatora krótkich fal elektrycznych przykładamy do elektrod zmienne napięcie wielkiej częstości o amplitudzie V rzędu 10 kV .

Wyobraźmy sobie, że w okolicy środka przyrządu w przestrzeni zawartej pomiędzy elektrodami powstają jony, które mają ulec przyspieszeniu. Te jony zdobywają pewną prędkość podczas pierwszego półokresu drgania elektrycznego i przenikają w głąb jednej z elektrod

z energią Vze , a ponieważ wewnątrz elektrod nie ma pola elektrycznego, przeto opisują półkole ze stałą prędkością v . Promień krzywizny jest dany przez wzór $\rho = mv/zeH$, gdzie ze jest to ładunek jonu, e — ładunek elementarny. Czas potrzebny do opisanie półkola wynosi $\tau = \pi m/zeH$, jest zatem niezależny od prędkości; zależy zaś tylko od natężenia pola i stosunku ze/m charakteryzującego dany rodzaj jonów. Jeżeli ten czas równa się dokładnie półokresowi $T/2$ drgania elektrycznego, jony wybiegną z wnętrza elektrody w okolice C , gdzie istnieje pole, w chwili gdy zmieni się znak napięcia; zostaną zatem ponownie przyspieszone i uzyskają energię kinetyczną $2Vze$, po czym przenikną w głąb drugiej elektrody. Ponieważ czas obiegu w polu elektrycznym jest stały, przeto jony pojawiają się ponownie w polu elektrycznym w takiej chwili,



Rys. 2.

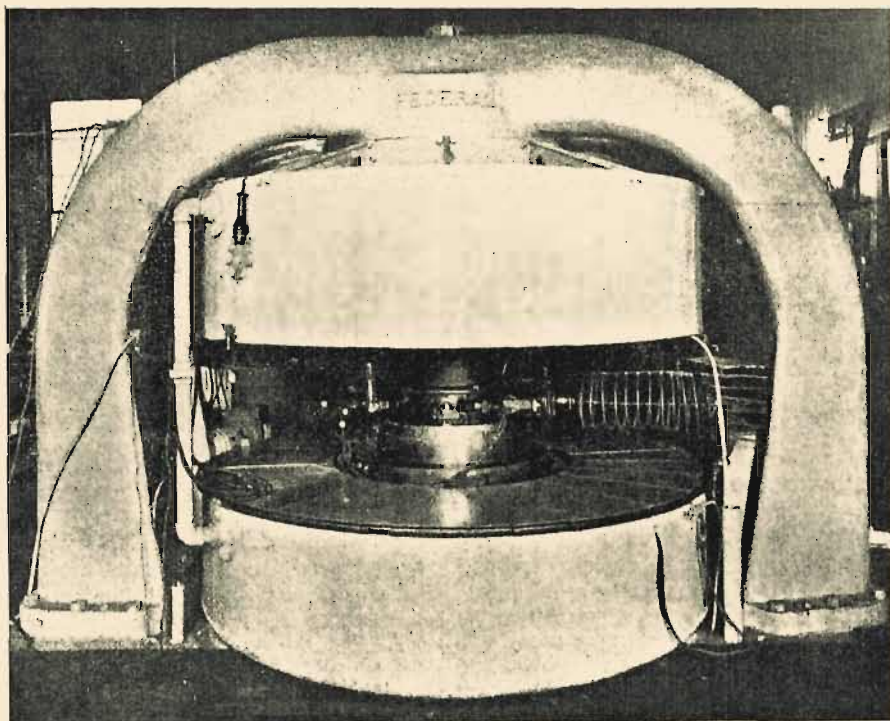
że będą mogły ulec przyspieszeniu po raz trzeci; to samo zjawisko będzie się powtarzało wielokrotnie. Promień każdego następnego półkola jest większy od poprzedniego i jony opisują linię spiralną przybliżając się coraz bardziej do bocznych ścian elektrod. Graniczna prędkość jest zatem zależna od promienia R elektrod i jest dana przez wzór:

$$v = zeRH/m.$$

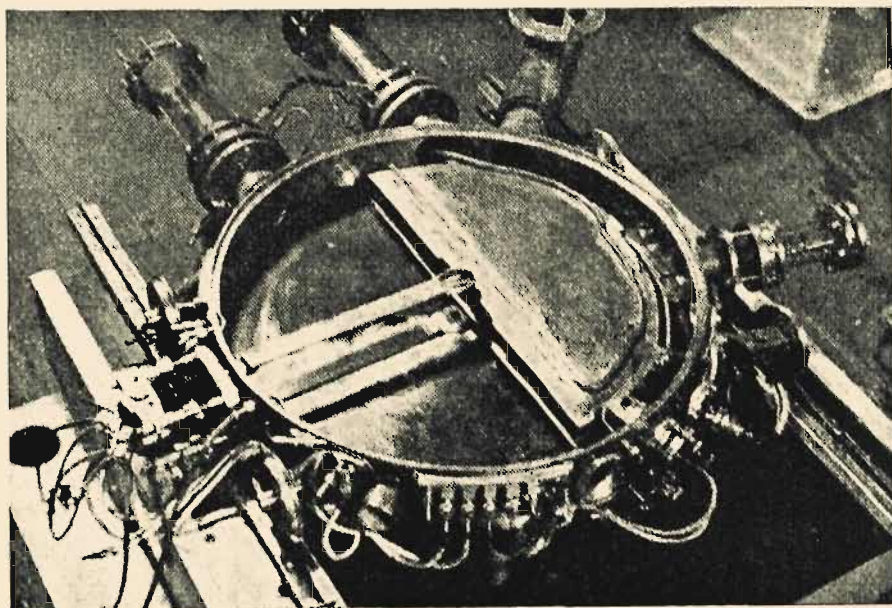
Tej prędkości odpowiada energia $mv^2/2 = z^2e^2H^2R^2/2m$; wyrażona w elektronowoltach energia ta wynosi $10^{-8}z^2e^2H^2R^2/2m$. Jeżeli $R = 20$ cm, $H = 15000$ oerstedów, $ze/m = 4825$ (deuterony), mamy $V = 2,17$ Mew. Ponieważ w cyklotronie używamy najczęściej protonów ($m = m_H$, $z = 1$), deuterionów ($m = 2m_H$, $z = 1$), oraz cząstek α ($m = 4m_H$, $z = 2$), przeto można by było sądzić, że energie tych cząstek powinny pozostawać względem siebie w stosunku: 1:1/2:1. W rzeczywistości jednak wartość H jest ograniczona warunkiem synchronizacji obiegu jonów i drgania elektrycznego, mianowicie musimy mieć $2\pi m/zeH = T$.

Np. jeżeli $H = 1,5 \cdot 10^4$, $ze/m \cong 5 \cdot 10^3$ (deuteron), mamy

$$T \cong 8 \cdot 10^{-8} \text{ sek lub } \lambda = 24 \text{ m.}$$



Cyklotron — widok całości.



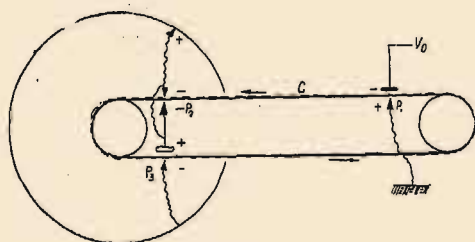
Cyklotron — pudło z jedną z półcylicydrycznych elektrod (druga wyjęta).

Ponieważ stosunek ze/m jest jednakowy dla deuteronów i dla cząstek α , warunek synchronizacji jest jednocześnie spełniony dla tych obu cząstek. Jeżeli jednak mamy do czynienia z protonami, musielibyśmy podwoić częstość potrzebną do uzyskania energii odpowiadającej największemu natężeniu pola dawanego przez elektromagnes. Długość fali jest jednak bardzo mała (24 m) w przypadku deuteronów i cząstek α ; aby tę długość zmniejszyć do połowy należałoby zmniejszyć wszystkie pojemności, a zatem powiększyć rozmiary przyrządu, co nie daje się osiągnąć w tym stopniu, w jakim by to było pożądane. Czynimy przeto rodzaj kompromisu polegającego na tym, że stosujemy największe pole magnetyczne tylko w przypadku deuteronów i cząstek α . W przypadku protonów zadowalamy się słabszym polem i wskutek tego energia protonów jest mniejsza od energii deuteronów, nie zaś dwa razy większa, jak to mielibyśmy w przypadku $H = \text{const.}$ Używane obecnie cyklotrony dostarczają protonów o energii 4 Mev, deuteronów o energii 6 Mev, oraz cząstek α o energii 12 Mev. W niedalekiej przyszłości uda się niewątpliwie przekroczyć te napięcia i osiągnąć 20 Mev jako energię cząstek α ¹⁾. Jony, które uzyskały maksymalną prędkość, muszą być wyprowadzone na zewnątrz elektrod i skierowane na bombardowaną próbkę materii. W tym celu posługujemy się szczeliną w bocznej ścianie jednej z elektrod oraz pomocniczym polem elektrycznym odchylającym wiązkę jonów w odpowiedni sposób. Jony są wytwarzane przez elektrony wybiegające z rozżarzonych włókien umieszczonych w pobliżu środka przyrządu i bombardujące drobiny bardzo rozrzedzonego gazu (wodoru, deuterium, helu), wypełniającego przyrząd.

3. *Generatory elektrostatyczne bardzo wysokiego napięcia* są to w zasadzie maszyny elektrostatyczne o bardzo wielkich rozmiarach i budowie przystosowanej do specjalnego celu. Zasadę działania objaśnia rys. 3. Pas z jedwabiu lub innej tkaniny izolującej wprawiany w ruch za pomocą motoru ładuje się dodatnio w wyładowaniu miotłkowym wychodzącym z ostrza, przenika w głąb wielkiej kuli, umieszczonej na wysokiej bakielitowej kolumnie i w miarę przesuwania się oddaje kuli używany ładunek również drogą wyładowania miotłkowego. Ładunek poabrany przez kulę w ciągu danego czasu można podwoić za pomocą kolektora zaopatrzonego w ostrza, które ładują pas ujemnie w chwili, gdy ten ostatni opuszcza wnętrze kuli. Na mocy dobrze znanego prawa elektrostatyki ładunek kuli powinien stale wzrastać aż do chwili osiągnięcia największego możliwego napięcia, którego wartość jest ograni-

¹⁾ Zgodnie z zasadą względności, masa wybiegającej cząstki α byłaby wówczas o $1/4\%$ większa od masy spoczynkowej, tj. początkowej; warunek synchronizacji nie byłby zatem dokładnie spełniony. Ta okoliczność sprawia, że osiągnięcie większej energii cząstek jest sprawą bardzo trudną; w celu skompensowania odchyłeń od synchronizacji wzrastających wraz z prędkością cząstek należałoby budować bieguny w ten sposób, aby natężenie pola wzrastało wraz z odległością od osi elektromagnesu.

czona zjawiskiem wyładowania koronowego oraz wyładowania powierzchniowego wzdłuż pasa¹⁾). Wnętrze kuli jest to przestrzeń wolna od pola elektrycznego, można w niej przeto umieścić obserwatora wraz z przyrządami.



Rys. 3.

Maszyna tego rodzaju została zbudowana po raz pierwszy przez *Van de Graaffa*, *Comptona* i *Van Atta*. Tablica III przedstawia maszynę *Hafstada*, *Tuve'a* i *Dahla*, która różni się od poprzedniej tym, że na zewnątrz kuli naładowanej do wysokiego potencjału jest umieszczona koncentrycznie większa

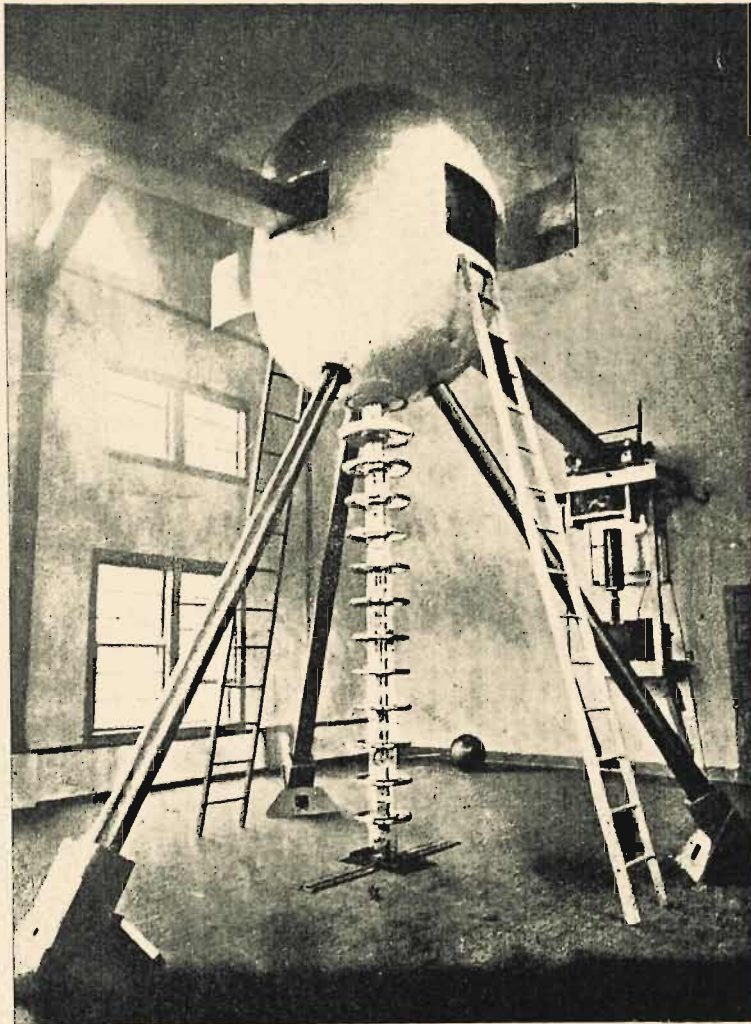
kula, której potencjał ma wartość pośrednią między potencjałem najwyższym i potencjałem ziemi. Rura służąca do przyspieszeń wychodzi z wnętrza kuli naładowanej, obok niej znajdują się przyrządy służące do otrzymania wiązki jonowej.

B. Metody wykrywania cząstek wysyłanych w reakcjach jądrowych.

1. *Komora rozprężen Wilsona* została opisana szczegółowo w książce pani *Skłodowskiej-Curie* (str. 167). Opiszemy tylko bardzo prostą postać tego przyrządu, obmyśloną przez *C. T. R. Wilsona*. Tłok jest zastąpiony błoną kauczukową, oddzielającą komorę rozprężen od zbiornika, w którym możemy zmieniać ciśnienie. W chwili początkowej ciśnienie w zbiorniku jest większe od ciśnienia atmosferycznego i błona jest wyдутa ku wnętrzu komory. Rozprężenie powstaje w chwili nagłego przywrócenia ciśnienia atmosferycznego w zbiorniku, wskutek czego błona szybko opada. W celu uniknięcia wirów i innych zaburzeń umieszczamy w cylindrze siatkę metalową, która dzieli go na dwie części: część górną, służącą do obserwowania torów mgiełkowych oraz dolną, w której odbywają się przesunięcia błony kauczukowej.

W ostatnich czasach opracowano w Cavendish Laboratory ulepszony model tej komory (rys.4). W chwili początkowej ciśnienie wewnątrz komory jest równe ciśnieniu atmosferycznemu; ruch błony *M* w dół zachodzi wskutek tego, że zbiornik łączymy nagle z innym zbiornikiem opróżnionym. Zamiast siatki metalowej umieszcza się w komorze krążek *D* z licznymi otworami, przykryty czarnym aksamitem, co lepiej zabezpiecza od wirów. Stopień rozprężenia można regulować za pomocą innego, przesuwanego krążka *B*, na który błona opada w swym ruchu ku dołowi.

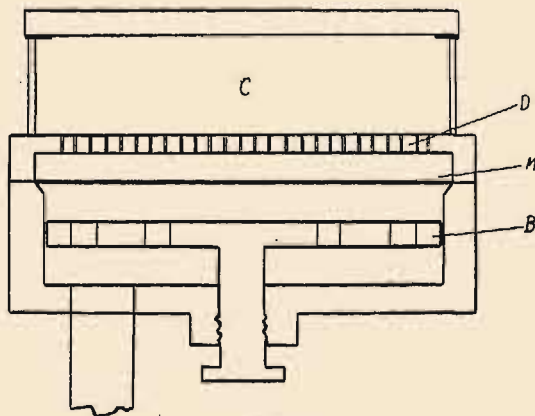
¹⁾ W celu zmniejszenia tych zjawisk opracowano plan wielkiej komory wysokiego ciśnienia, w której można by było umieścić maszynę elektrostatyczną. Zjawiska te ulegają również osłabieniu, jeżeli powietrze jest zmieszane z czterochlorkiem węgla (*Joliot*). Generator zbudowany przez *Herba*, *Parkinsona* i *Kersta*, wytwarzający ok. $2 \cdot 10^8$ w, znajduje się wewnątrz stalowej komory zawierającej powietrze pod ciśnieniem 6,5 atm.



Generator elektrostatyczny Hafstada, Heydenburga i Tuve'a.

2. *Licznik Geigera-Müllera* jest to przyrząd niezmiernie użyteczny w badaniach reakcyj jądrowych oraz promieni kosmicznych. Przyrządowi temu poświęcono wiele prac doświadczalnych i teoretycznych; nie zdołano jednak wyjaśnić w zupełności zjawisk, które w nim zachodzą, toteż budowa «dobrego» licznika opiera się raczej na danych natury empirycznej. Badając liczbę N wyładowań zachodzących w ciągu określonego czasu jako funkcję różnicy potencjałów V pomiędzy osłoną i nitką, otrzymujemy krzywą posiadającą część poziomą, po której następuje

szybki wzrost. Część pozioma odpowiada zakresowi napięć używanych do liczenia cząstek. Szerokość tego przedziału waha się bardzo znacznie w różnych licznikach, niekiedy zdarza się nawet, że tej części wcale nie ma. Przy użyciu napięć odpowiadających wspomnianemu obszarowi każde wyładowanie jest następstwem przejścia jednej jonizującej cząstki i wygasa natychmiast po ustaniu przyczyny (po upły-



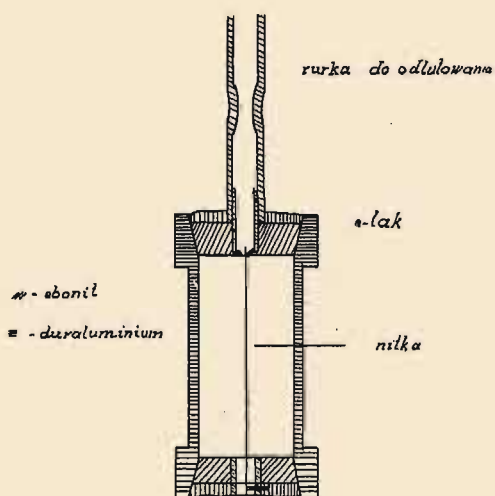
Rys. 4.

wie czasu rzędu wielkości $10^{-3} - 10^{-5}$ sek); szybki wzrost liczby wyładowań w części następującej po części poziomej wynika z tego, że wyładowanie powstające z tego lub innego powodu trwa przez dłuższy czas i posiada natężenie zmieniające się w sposób nieciągły. Dobry licznik powinien posiadać «zakres liczenia» możliwie największy, tj. dawać chwilowe wyładowania bez zjawisk wtórnych nawet w tym przypadku, gdy napięcie jest znacznie (o kilkaset woltów) większe od napięcia, przy którym licznik zaczyna działać. W celu szybkiego wygaszenia wyładowania posługujemy się różnymi sposobami. W licznikach napełnionych trwałymi gazami (powietrze, wodór, gazy szlachetne) nitka naładowana dodatkowo jest połączona z ziemią poprzez bardzo wielki opór (rzędu kilku tysięcy megomów); podczas przejścia wyładowania powstaje przeto znaczny spadek potencjału wzdłuż tego oporu; różnica zaś potencjału pomiędzy osłoną i nitką opada poniżej wartości, przy której jest możliwe istnienie wyładowania. Ta metoda posiada niektóre ujemne strony, zwłaszcza w przypadku, gdy impuls pochodzący od wyładowania jest przekazywany siatce pierwszej lampy wzmacniacza poprzez kondensator; w istocie nabój udzielony kondensatorowi spływa ku ziemi przez opór w ciągu stosunkowo długiego czasu, wskutek czego impuls pojawiający się natychmiast po pierwszym nie może być wzmocniony. Z tego powodu zastępujemy obecnie używane dawniej lekkie gazy ciężkimi pa-

rami organicznymi (aceton, alkohol), których jony dodatnie, posiadające bardzo małą ruchliwość, nagromadzają się podczas wyładowania i wytwarzają ładunek przestrzenny, kompensujący częściowo przyłożone napięcie i powodujący zanikanie wyładowania. W licznikach tego typu nitka może być połączona z ziemią oporem rzędu wielkości 1 megoma; stała czasu jest znacznie mniejsza niż w poprzednim urządzeniu i «zdolność rozdzielcza», tj. liczba wyładowań w sekundzie, które przyrząd może zliczyć, osiąga wartość zbliżoną do 100.

Nie będziemy zajmowali się szczegółami dotyczącymi budowy liczników (materiał nitki i sposób przygotowania jej powierzchni, metal użyty jako osłona, sposób uszczelnienia, substancje izolujące, natura mieszaniny gazowej itd.). Opiszemy tylko model używany w laboratorium chemii jądrowej (profesor *Joliot*) w Collège de France (rys. 5).

Licznik składa się z rury cylindrycznej, wyrobionej z duraluminium, której ścianki posiadają w części środkowej (długość ok. 4 cm, średnica ok. 2 cm) grubość zbliżoną do 0,1 mm. Natomiast części końcowe posiadają grube ściany i służą do umieszczenia izolujących korków eboni-



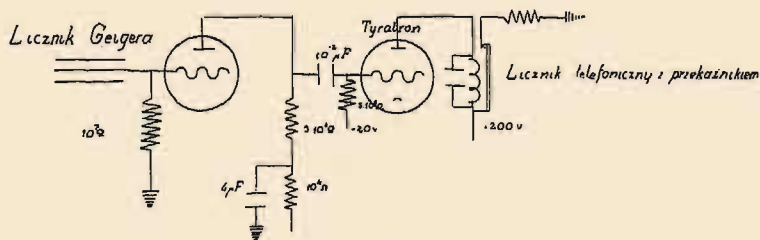
Rys. 5.

towych, w których osi są umocowane części metalowe, służące do umocowania i naprężania nici. Można używać nitki z wolframu lub ze stali. Jedno z zakończeń, do których jest przytwierdzona nitka, ma kształt rurki, na którą nakłada się rurkę szklaną zaopatrzoną w przewężenie. W tym miejscu rurkę zatapia się po napełnieniu licznika parą acetonu pod ciśnieniem 10 mm Hg. Zakres liczenia jest rzędu 300 woltów, napięcie użytkowe jest zbliżone do 1300 woltów. Jako źródła napięcia można używać bądź baterii akumulatorów, bądź odpowied-

nio stabilizowanego prostownika wysokiego napięcia. Nader dogodna metoda stabilizacji polega na tym, że wyprostowany prąd przechodzi przez szereg lamp neonowych. Ponieważ spadek napięcia w lampie neonowej jest stały (około 100 woltów), przeto zużywając odpowiednio dobraną liczbę lamp neonowych i regulując w razie potrzeby napięcie za pomocą dodatkowego potencjometru, otrzymujemy pożądaną stałość napięcia osłony licznika. Impulsy są przekazywane siatce wzmacniacza bądź bezpośrednio, bądź przez kondensator. Rysunek 6 przedstawia jeden z używanych schematów. Ujemny impuls po wzmocnieniu przez

pierwszą lampę zmienia znak i ładuje dodatnio siatkę tyratronu, którego prąd anodowy uruchamia licznik telefoniczny, zaopatrzony w przełącznik służący do gaszenia łuku powstającego w tyratronie.

Ponieważ cały proces odbioru, a mianowicie wyładowanie w liczniku *Geigera-Müllera*, rozładowywanie się kondensatorów, ruchy kotwicy licznika telefonicznego, trwa w ciągu określonego czasu, przeto wzmacniacz nie notuje wszystkich impulsów. Liczenie jest przeto obciążone



Rys. 6.

żone błędem systematycznym, którego wartość zarówno względna jak i absolutna wzrasta szybko wraz z częstością wyładowań w liczniku. Istnieje kilka wzorów przedstawiających liczbę N impulsów zarejestrowanych przez wzmacniacz w zależności od liczby N_0 wyładowań w liczniku *Geigera-Müllera*. Żaden z tych wzorów nie jest zupełnie dokładny; granice stosowalności różnych wzorów są zależne od warunków doświadczalnych. Przytoczymy tylko jeden wzór wyróżniający się prostotą i dobrą zgodnością z doświadczeniem w dosyć szerokim zakresie:

$$N = N_0 / (1 + N_0 \tau) \quad (1),$$

gdzie τ jest to najmniejszy odstęp czasu między dwoma kolejnymi impulsami, które mogą być wzmocnione i zarejestrowane. Uzasadnienie tego wzoru jest następujące: Jeżeli liczby N i N_0 są odniesione do jednostki czasu, całkowity czas stracony dla rejestracji w jednostce czasu wynosi $N\tau$, liczba impulsów straconych wynosi przeto $NN_0\tau$. Mamy zatem:

$$N + NN_0\tau = N_0, \text{ z czego wynika (1).}$$

Zgodnie z tym wzorem N powinno dążyć do wartości granicznej $1/\tau$, gdy N_0 wzrasta nieograniczenie. W rzeczywistości jednak stwierdzamy, że N osiąga maximum zbliżone do $1/\tau$, po czym zmniejsza się i dąży do zera. Wzór (1) nie stosuje się przeto w przypadku bardzo wielkich N_0 , natomiast zdaje dobrze sprawę z doświadczenia w zwykłych warunkach, tj. wtedy, gdy N_0 jest mniejsze od $1/\tau$ lub nieznacznie przekracza tę wartość. W pomiarach bardzo dokładnych lepiej zrezygnować z wzorów teoretycznych i wyznaczyć doświadczalnie zależność $N = f(N_0)$, co można uczynić za pomocą urządzenia dającego znaną i dowolnie regulowaną liczbę wyładowań. Z drugiej strony poprawka jest zawsze tym

mniejsza, im mniejsze jest τ ; należy przeto dążyć do tego, aby ta stała posiadała możliwie najmniejszą wartość. W najlepszych używanych obecnie układach (*Wynn-Williams*, *Neher-Harper*) ta stała jest tego samego rzędu wielkości, co czas trwania wyładowania w liczniku.

Oprócz systematycznego błędu, wynikającego z gubienia impulsów, liczby dawane przez układy liczące wyładowania podlegają *fluktuacjom statystycznym*. Zgodnie z teorią podaną w książce p. *Sktłodowskiej-Curie* (str. 152), średni kwadrat s^2 fluktuacji równa się liczbie impulsów, tj. N .

3. *Metoda koincydencji* używana w badaniach promieni kosmicznych wchodzi również w coraz to częstsze użycie w pracach z dziedziny promieniotwórczości i fizyki jądrowej. Metoda polega na tym, że 2 lampy, których siatki otrzymują impulsy liczników *Geigera-Müllera*, lub większa liczba takich lamp, są połączone równolegle w ten sposób, że wszystkie anody łączą się z dodatnim biegunem baterii przez wspólny opór anodowy R , rzędu wielkości 1 megoma. Jeżeli napięcie baterii jest zbliżone do 200 woltów, całkowity prąd anodowy I jest bardzo mały; jest to oczywiście słuszne *a fortiori* dla prądów indywidualnych i_1 , i_2 itd., tak iż punkt charakterystyki lamp odpowiadający ich funkcjonowaniu znajduje się w okolicy, w której rzeczywiste napięcie anodowe V_a jest bardzo małe, «opór wewnętrzny» zaś zmienia się szybko wraz z napięciem. W tych warunkach całkowity prąd zachowuje wartość prawie niezmienną, gdy prąd anodowy przestaje przechodzić przez jedną lub dwie lub nawet wszystkie lampy z wyjątkiem tylko jednej. W istocie, nawet jeżeli zmiana tego prądu ΔI jest bardzo mała, potencjał anodowy wzrasta o $R\Delta I$, wartość, która jest znaczna wobec V_a , gdyż opór R jest wielki i wskutek tego prąd w lampie «nie zgaszonej» wzrasta tak znacznie, że ta lampa zastępuje sama wszystkie inne, tj. przepuszcza prąd anodowy równy w przybliżeniu I . Ten prąd I zostaje niejako usunięty tylko w przypadku, gdy wszystkie lampy są jednocześnie «zablokowane»; potencjał anodowy wzrasta wówczas o RI , wartość, która jest rzędu kilkudziesięciu woltów; ta zmiana przekazana dalszym organom wzmacniacza wystarcza na ogół do zarejestrowania impulsu. Ponieważ «gaszenie» lamp, tj. usuwanie z nich prądu anodowego, zachodzi wskutek przybywania impulsów, które ładują siatki ujemnie, przeto impulsy indywidualne nie mogą być zanotowane i przyrząd funkcjonuje tylko w przypadku, gdy wszystkie lampy wejściowe są «blokowane» wskutek pojawienia się jednoczesnego impulsu na wszystkich siatkach, a zatem wskutek wyładowania przebiegającego przez wszystkie liczniki w tej samej chwili. Należy wszelako odróżniać koincydencje rzeczywiste, wynikające z jednoczesnego przejścia jednego lub kilku elektronów przez wszystkie liczniki, od koincydencji przypadkowej, pochodzącej od wyładowań, które wskutek statystycznego charakteru zjawisk tego rodzaju pojawiły się we wszystkich licznikach w mniej więcej tej samej chwili. Liczba tych przypad-

kowych koincydencji nie jest bynajmniej do zaniedbania wobec liczby koincydencji rzeczywistych, zwłaszcza w przypadku, gdy mamy do czynienia z koincydencjami podwójnymi. Liczba ta, ν , może jednak być obliczona, jeżeli znamy czas, τ , w ciągu którego lampka po pochwyleniu impulsu pozostaje niezdolna do przekazania następnego impulsu. Jeżeli N_1 i N_2 są to liczby wyładowań w jednostce czasu w oddzielnych licznikach, to mamy $\nu = 2N_1N_2\tau$; stałą τ wyznaczamy licząc ν , N_1 i N_2 w warunkach, w których prawdziwe koincydencje nie zachodzą, np. w przypadku gdy liczniki znajdują się w dostatecznej odległości jeden od drugiego. W przypadku koincydencji potrójnych, poczwórnych itd., wzór wyrażający liczbę koincydencji przypadkowych jest bardziej skomplikowany, liczba ta jest jednak znacznie mniejsza, gdyż jest proporcjonalna do τ^2 , τ^3 itd. W najlepszych używanych obecnie układach koincydencyjnych stała jest mniejsza od 10^{-5} sek; liczba koincydencji przypadkowych jest wówczas bardzo mała, np. w przypadku, gdy $N_1 = N_2 = 550/\text{min}$, wynosi mniej niż jedną koincydencję na 10 min.

4. *Wzmacniacz proporcjonalny.* W znacznej liczbie zagadnień fizyki jądrowej jest rzeczą ważną wyznaczać nie tylko liczbę cząstek jonizujących, lecz również wielkość jonizacji spowodowanej przez te cząstki w określonych warunkach. W tym celu używamy komór jonizacyjnych napełnionych gazem, najczęściej pod ciśnieniem atmosferycznym; napięcie dobieramy w ten sposób, aby mieć do czynienia z prądem nasycenia i aby jonizacja zderzeniowa nie odgrywała żadnej roli. Jeżeli jedna z elektrod (której potencjał jest zbliżony do zera) komory jest połączona z wejściową siatką wzmacniacza, słaby impuls wynikający z przejścia jednej cząstki przez komorę powinien być wzmocniony w ten sposób, aby na wyjściu otrzymać skutek, który można by było wykryć za pomocą stosownego przyrządu pomiarowego, np. za pomocą oscylografu. Podamy przykład liczbowy. Założmy, że komora jonizacyjna posiada głębokość 5 mm i że badane są cząstki α . Liczba jonów utworzonych przez jedną cząstkę jest wówczas rzędu wielkości 15000, co odpowiada wydzieleniu ładunku w ilości $7,2 \cdot 10^{-6}$ j. es. Jeżeli pojemność układu siatka-elektroda wynosi 2 cm, potencjał zmieni się o $7,2 \cdot 10^{-6} \cdot 300/2 = 1,08 \cdot 10^{-3}$ wolta; jest zatem rzeczą oczywistą, że chcąc otrzymać na wyjściu zmianę potencjału rzędu 30 woltów, musimy dbać o to, aby wzmacniacz posiadał wzmocnienie rzędu 30000. Osiągnięcie współczynnika wzmocnienia tego rzędu wielkości nie jest rzeczą trudną, wystarcza układ cztero- lub pięciolampowy, w którym kolejne ogniwa są połączone sprzężeniem pojemnościowo-oporowym. Należy jednak zachować szereg ostrożności w celu uniknięcia drgań relaksacyjnych, oraz zmniejszenia zakłóceń wynikających ze zjawiska *Johnsona* i z innych analogicznych powodów. Te okoliczności sprawiają, że nie jest rzeczą wskazaną przekraczać wymieniony stopień wzmocnienia i z tego powodu metoda bywa stosowana na ogół tylko do cząstek silnie jonizujących, tj. do cząstek α ,

do protonów lub deutronów. Chociaż jednak nie umiemy dotąd mierzyć za pomocą wzmacniacza proporcjonalnego jonizacji spowodowanej przez elektrony, ta jonizacja sprawia często wiele trudności, zwłaszcza wówczas, gdy chcemy badać nieliczne cząstki ciężkie wysyłane w zjawiskach transmutacji w obecności silnego promieniowania γ . W tym bowiem przypadku przez komorę przebiegają nieustannie w wielkiej liczbie elektrony *Comptona*, a chociaż indywidualne działania pochodzące od tych elektronów nie dają wskazań na wyjściu, to jednak nakładanie się tych efektów uniemożliwia często wykrywanie ciężkich cząstek. W celu uniknięcia tej niedogodności należy dbać o to, aby ładunek udzielony wzmacniaczowi wskutek przejścia jednego elektronu odpływał w ciągu czasu znacznie krótszego niż przeciętny odstęp czasu pomiędzy chwilami pojawienia się dwóch elektronów. Wynik ten osiągamy dobierając pojemności C kondensatorów przekazujących impulsy oraz upływowe opory R siatek tak, aby iloczyn RC , tj. «stała czasu», posiadał wartość dostatecznie małą. Jest również rzeczą konieczną, aby oscylograf posiadał bardzo wielką zdolność rozdzielczą, tj. bardzo krótki okres drgań własnych, np. rzędu wielkości 10^{-4} sek.
