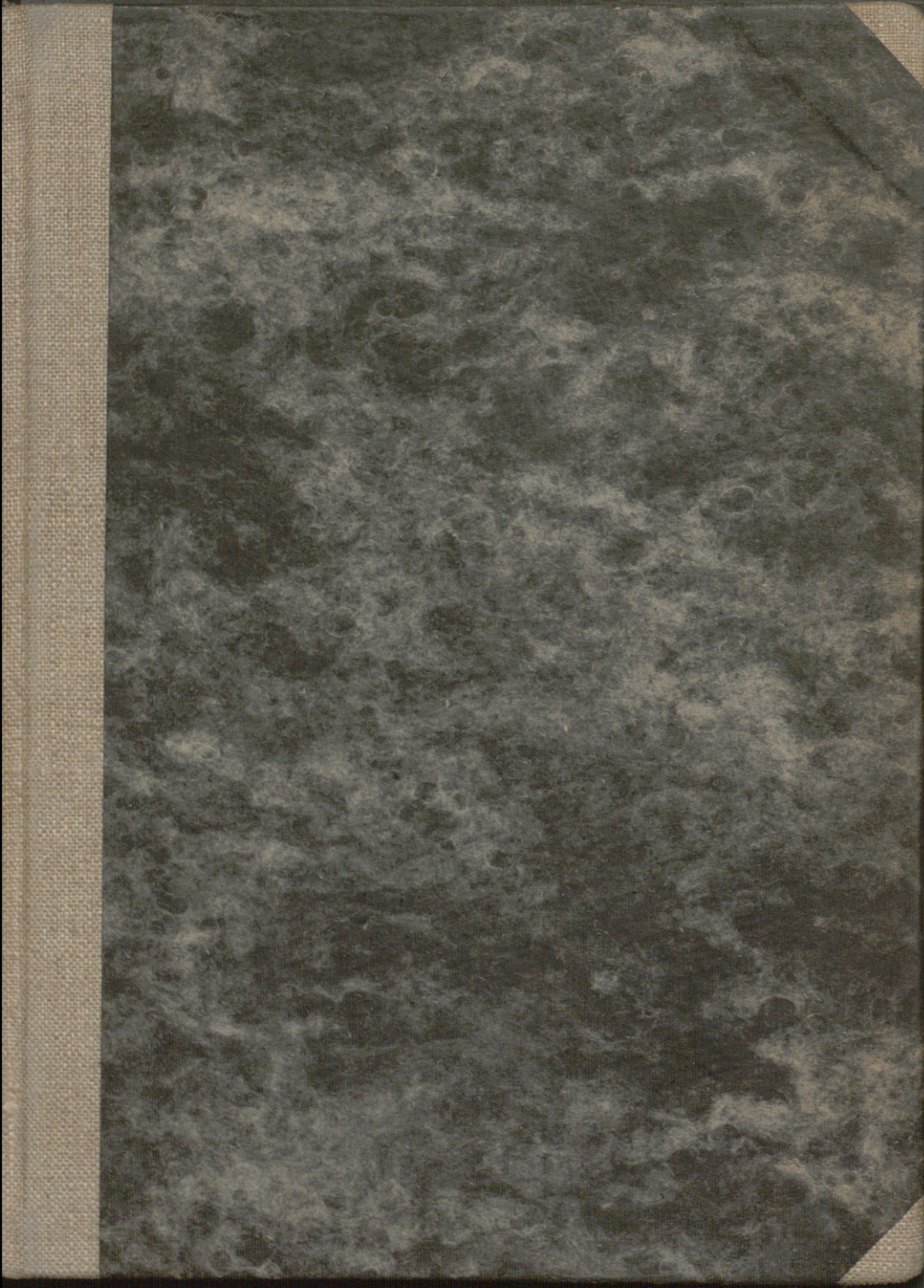
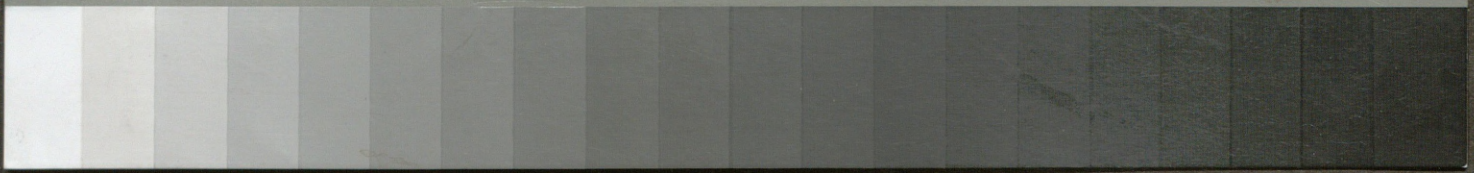




Grey Scale #13



A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19



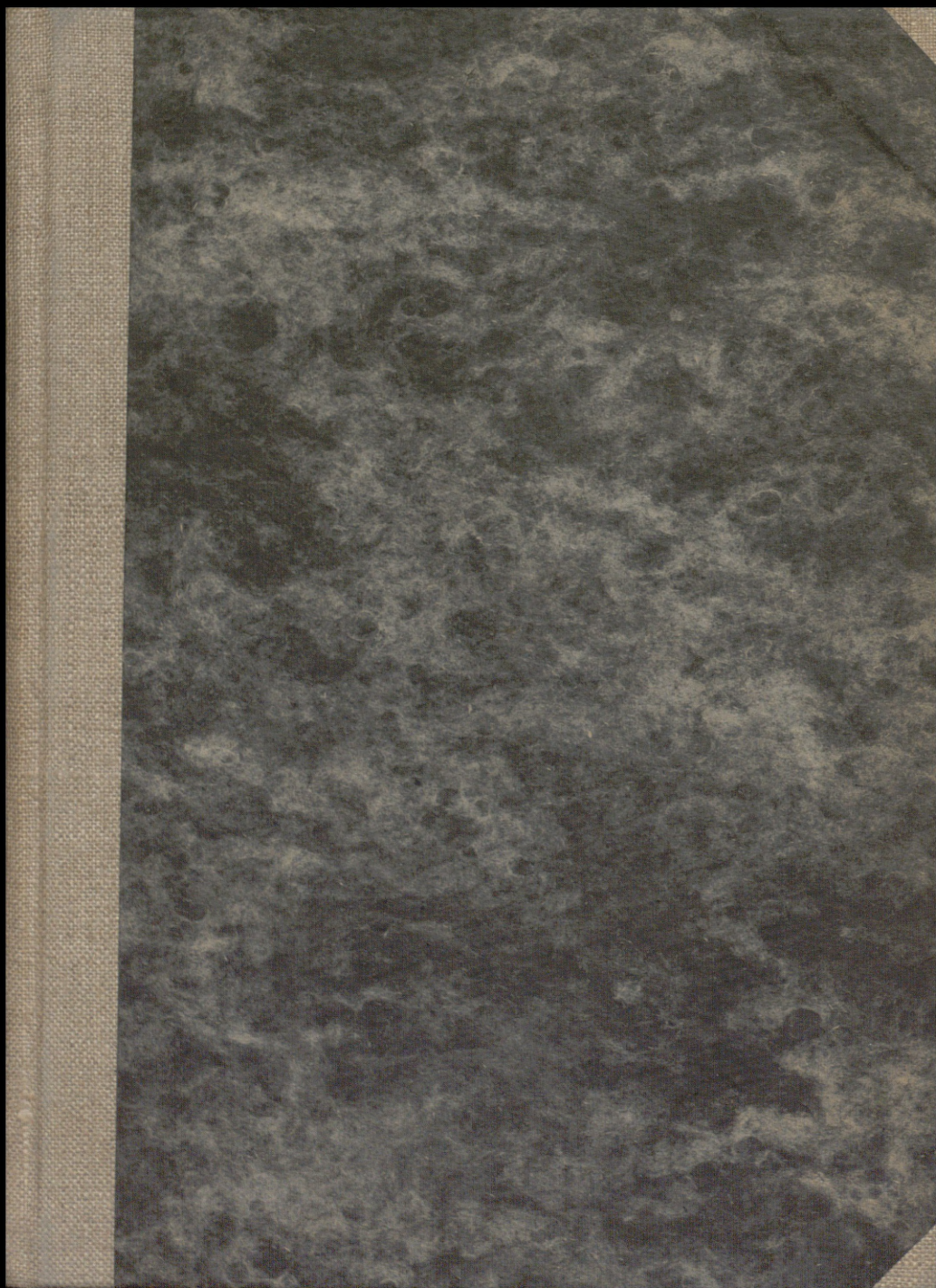
Colour Chart #13

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

Centimetres

Inches





**WYZWOLENIE ENERGII  
ATOMU**

„ Z D O B Y C Z E   N A U K I ”

Tom I   R. W. H A L L O W S :  
RADAR — REWELACJA 2 WOJNY  
(wyczerpane)

Tom II   SAMUEL EPSTEIN i BERYL WILLIAMS:  
MIKROBY CZYNIA CUDA  
Droga do Streptomycyny

Tom III   R. E. PEIERLS i JOHN ENOGAT  
WYZWOLENIE ENERGII ATOMU

ST. JAMIOŁKOWSKI i T. J. EVERT SP. Z O. O. ŁÓDŹ

R. E. PEIERLS I JOHN ENOGAT

# WYZWOLENIE ENERGII ATOMU



ST. JAMIOŁKOWSKI & T. J. EVERT SP. Z O. O., ŁÓDŹ

Tytuł oryginału  
SCIENCE NEWS Nr 2

Przełożyli:  
INŻ. B. J. SOLAK  
INŻ. A. MAZURKIEWICZ

Wszystkie prawa zastrzeżone

15 1/2

Nakład 3 000  
Papier drukowy matowy 61 × 86, 64 g.  
Objętość 11 1/2 ark.  
Wyszło z druku w maju  
E-487108

## SPIS ROZDZIAŁÓW

	Str.
<p><b>R. E. Peierls</b> — Wyzwolenie Energii Atomu — Wstęp — Stan wiedzy przed odkryciem rozpadu — Odkrycie rozpadu i znaczenie tego odkrycia — Proces łańcuchowy przy użyciu neutronów o małej szybkości — Rola uranu 235 — Wybuch — Pluton — Wykorzystanie energii atomu.</p>	7
<p><b>H. A. Bethe</b> — Atomy i jądra atomowe . . . . .</p>	29
<p><b>R. E. Peierls</b> — Produkcja paliw atomowych przez rozdział izotopów. — Izotopy — Nasze zadanie — Metody separacji izotopów — Dyfuzja i inne metody — Zakład elektromagnetyczny — Zakończenie. . . . .</p>	51
<p><b>H. L. Anderson</b> — Ujarzmienie energii atomowej i produkcja plutonu — Równowartość masy i energii — Energia z rozpadu uranu — Proces rozpadu — Produkcja Plutonu — Jądrowa reakcja łańcuchowa — Sterowanie reakcji jądrowej — Obliczenie liczebności neutronów — Zmniejszenie szybkości neutronów — Reakcja z użyciem neutronów o małej szybkości — Absorbacja rezonansowa — Moderatory neutronów — Mnożnik reakcji w reaktorze z neutronami o małej szybkości — Uchodzenie neutronów: reflektory i przesłony — Sterowanie reaktora z użyciem neutronów o małej szybkości — Silnik atomowy, pędzony reakcją łańcuchową — Produkcja plutonu — Niebezpieczeństwo promieniowania — Zastosowanie energii jądrowej — Reaktor wykorzystujący naturalny uran — Stosy, spalające skoncentrowane paliwa atomowe — Kwestia bezpieczeństwa reaktora atomowego — Zużytkowanie energii. . . . .</p>	81

	Str.
<b>M. Argo i E. Teller.</b> — Promieniotwórcze wskaźniki — Wstęp — Co to jest węgiel 14? — Produkcja promieniotwórczych izotopów — Wykrywanie — Zastosowania . . . . .	117
<b>O. R. Frisch.</b> — Narzędzia Fizyki Atomowej — Wykrywacze: komora Wilsona — Elektroskop — Wzmacniacz proporcjonalny — Powielacze gazowe — Licznik Geiger/Muellera — Kliksza fotograficzna — Przegląd narzędzi wykrywających — Narzędzia ataku: Akcelerator wysokiego napięcia — Wielokrotna akceleracja — Cyklotron, Akcelerator indukcyjny — Produkcja neutronów — Pomocnicze metody, skupienie — Pochłaniacze — Metody koincydencji — Wykrywanie neutronów — Krzywe rozpadu — Rozdzielanie chemiczne. . . . .	135

## WYZWOLENIE ENERGII ATOMU

1. WSTĘP — Doświadczalny wybuch bomby atomowej na poligonie *Alamogordo* w Nowym Meksyku, a następnie bojowe użycie bomby w Japonii, można uważać za pomyślnie zakończenie nieprzerwanego łańcucha badań i odkryć naukowych, rozpoczętych odkryciem promieniotwórczości przez Becquerela w r. 1896. Przez cały ten okres zagadnienie energii atomowej zajmowało uwagę naukowców, jako najbardziej fascynująca dziedzina odkryć naukowych. Nadzieja poznania nowych praw natury była tu głównym bodźcem, względy praktyczne odgrywały drugorzędą rolę. Nie ulega jednak wątpliwości, że prawie od czasu pierwszych odkryć, fizycy zdawali sobie sprawę z potężnych źródeł energii, zawartych w materii i z przyjemnością snuli domysły na temat zastosowań praktycznych, na wypadek, gdyby się udało część tej energii wyzwolić. Urzeczywistnienie tych marzeń wydawało się jednak bardzo odległe.

Mniej więcej do roku 1939, roku, który położył fundamenty pod przyszły bieg wydarzeń, sytuacja nie uległa zmianie mimo ogromnych postępów badań. Badania jądra atomowego stały się poważną dziedziną fizyki, ogólnie uznawaną; poznano zjawisko rozpadu atomu i umiano rozbijać atomy w pracowniach uniwersyteckich — ale nie wskazywało na to, że doświadczenia te będą miały jakiegokolwiek znaczenie praktyczne poza murami laboratoriów.

Ale już w roku 1940 zespoły naukowców w wielu krajach zaatakowały — niezależnie od siebie — problem wyzwolenia tych nowych źródeł energii w celach przerażająco praktycznych — i to z nadzieją powodzenia w krótkim czasie.

Powodem, który tak zasadniczo zmienił sytuację w czasie między 1938 i 1940 rokiem, było odkrycie „rozpadu“ uranu przez Hahna, wyjaśnienie tego zjawiska przez Frischa i Lizę Meitner, wreszcie doświadczenia przeprowadzone przez Joliotę, Halbana i Kowarskiego w Paryżu, a Fermiego, Szilarda i ich współpracowników w Ameryce. Doświadczenia te wykazały niezbicie, że przy rozpadzie atomu uranu powstają wtórne neutrony.

Dla przeciętnego obywatela doświadczenia te miały charakter niepozornych artykułów w czasopismach naukowych, artykułów podających jakieś cyfry, uzyskane w doświadczeniach laboratoryjnych — ale dla fizyka, który kiedykolwiek marzył o wyzwoleniu energii zawartej w atomie, artykuły te oznaczały, że nagle marzenia jego przeszły z dziedziny fantazji w dziedzinę praktycznych możliwości.

Aby być zupełnie pewnym, że marzenia te dadzą się urzeczywistnić, należało wykonać wiele doświadczeń i poznać wiele nowych praw natury — niemniej chwilę tę można uważać za punkt przełomowy całego problemu.

W niniejszym rozdziale zapoznamy się z przesłankami, które wówczas uczyniły doświadczenia powyższe sensacyjnymi oraz naszkicujemy drogę, którą należało odbyć, drogę, której dokładny opis zawierają dalsze rozdziały tej książki.

2. STAN WIEDZY PRZED ODKRYCIEM ROZPADU URANU. Dalsze rozdziały wprowadzą czytelnika w świat atomów i ich budowę, niemniej dla celów niniejszego ogólnego przeglądu musimy zapoznać się z pewnymi podstawowymi zasadami z tej dziedziny.

Atomy są jednostkami, z których zbudowana jest materia. Atomy są bardzo małe. Nawet najcięższe atomy pierwiastków takich jak uran, ważą tyle w porównaniu z dynią, ile waży dynia w porównaniu z kulą ziemską. Chociaż atomy są tak małe, że nawet przez najmocniejsze mikroskopy nie możemy ich dojrzeć, przez ostatnie sześćdziesięciolecie poznaliśmy szereg metod naukowych, przy pomocy których możemy udowodnić, że atomy istnieją rzeczywiście. Rozdział opracowany przez Frischa zaznajomi czytelnika z metodami, przy pomocy których można śledzić ślady zostawione przez pojedyncze nawet atomy.

Wiemy dalej że każdy atom posiada środek, czyli „jądro“, obdarzone dodatnim ładunkiem elektrycznym. Jądro otaczają elektrony, które są cząsteczkami 2000 razy (w przybliżeniu) lżejszymi od najlżejszego atomu; elektrony obdarzone są ujemnym ładunkiem elektrycznym.

Wszystkie procesy chemiczne ograniczają się do zmiany układu (przegrupowania) i ruchu elektronów. W ciężkich pierwiastkach zmiany te ograniczają się zwykle do zewnętrznych tylko elektronów, poruszających się wolniej i łatwiej poddających się zmianom. W procesach chemicznych samo jądro atomu odgrywa też pewną rolę, a mianowicie ilość ładunku dodatniego skupionego w jądrze określa ilość elektronów potrzebnych do zneutralizowania tego ładunku, a ilość elektronów określa che-

miczne właściwości atomu. Niemniej w zwyczajnych procesach mechanicznych i chemicznych jądro atomowe nie ulega zmianom.

To zachowanie się jądra staje się jasne, jeżeli się zważy, że siły, które wiążą elementy jądra w jedną całość, są bez porównania większe od sił, które rządzą ruchem elektronów otaczających jądro atomowe. Dla przykładu: energia potrzebna do rozbicia atomu helu jest około milion razy większa od energii potrzebnej do oderwania jednego elektronu od atomu helu.

Toteż energię w procesach atomowych chemicznych mierzymy zwykle w e l e k t r o n o - w o l t a c h, a energię w procesach jądrowych w milionach e l e k t r o n o - w o l t ó w. Przez elektronowo-wolt rozumiemy tę ilość energii, której nabierze elektron po przebiegnięciu pola elektrycznego wytworzonego różnicą napięć jednego wolta.

W porównaniu z jednostkami energii, do których przyzwyczailiśmy się w życiu codziennym, jest to bardzo mała jednostka; ładunek elektronu jest bowiem b. małym ułamkiem ładunków elektrycznych, którymi posługujemy się w życiu codziennym. Niemniej należy zważyć, że spalając np. węgiel wyzwalamy energię około 4 elektronowo-woltów z jednego atomu i, że suma energii uzyskanej ze spalania  $\frac{1}{8}$  kilograma węgla da nam jedną kilowatogodzinę.

Oczywiste jest zatem, że gdybyśmy potrafili wciągnąć do przemian także i jądra atomów mielibyśmy do czynienia z bez porównania większymi źródłami energii.

Że jądra niektórych atomów mogą ulegać przemianom i że przemiany te wyzwalamy energię, wiedzieliśmy od czasu doświadczeń Rutherforda i innych uczonych —

doświadczeń, które doprowadziły do zrozumienia zjawiska promieniotwórczości. Doświadczenia te wykazały, że takie pierwiastki jak np. rad, które wysyłają przenikliwe promieniowanie, posiadają niestabe jądra atomowe, jądra, które się rozpadają same, przy czym rozpadowi temu towarzyszy wyrzucanie cząsteczek o bardzo dużej energii. Tak wyrzucone cząsteczki obdarzone są zwykle dodatnim ładunkiem i unoszą ze sobą część dodatniego ładunku jądra, pozostawiając jądro ze zmniejszonym ładunkiem dodatnim. Atom o takim jądrze potrafi utrzymać proporcjonalnie mniejszą ilość ujemnych elektronów i staje się atomem o innych właściwościach chemicznych, atomem chemicznie różnej materii.

A zatem rozbitcie atomu i przemiana jednej materii w drugą nie jest czymś nowym. Proces ten odbywa się w naturze od tak dawna, jak dawno istnieją pierwiastki promieniotwórcze, takie jak rad, uran i inne. Nie mamy jednak żadnego wpływu na ten proces, nie możemy go opóźnić, przyspieszać czy też zatrzymać. Proces ten przebiega z właściwą sobie szybkością. I tak, w bryłce radu 1/580.000 część atomów rozpada się w ciągu jednego dnia, wobec tego po upływie 1600 lat tylko połowa bryłki będzie radem. Gdybyśmy mogli przynaglić Naturę i potrafili spowodować rozpad całej bryłki radu w kilku minutach zamiast 1600 lat, nawet mała ilość radu dałaby nam poważne ilości energii.

Rutherford wykazał później (w r. 1919), że możemy rozpad atomu wywołać wg naszej woli — ale kosztem energii dostarczonej przez nas. W tym celu jako pocisków użył Rutherford cząsteczek wyrzucanych przez rad lub inne pierwiastki promieniotwórcze. Cząstki te nazywał on „cząstkami alfa“ ( $\alpha$ ) i jak się później

okazało, były to jądra atomów helu, tzn. atomy helu pozbawione otaczających je elektronów, a zatem elektrycznie dodatnie. Promieniotwórcze atomy wyrzucają cząsteczki te z wielką szybkością, a energia niesiona przez nie jest rzędu milionów elektrono-woltów (w skrócie M. E. W.). Gdy teraz cząsteczka taka przelatuje przez lekki pierwiastek, zdarza się czasem, że natrafi na jedno z jąder atomowych tego pierwiastka i utkwi w nim; to połączenie spowoduje wyrzucenie z tak powiększonego jądra nowej cząsteczki. Cząsteczką tą jest „proton” czyli jądro atomu wodoru.

W ten sposób potrafiliśmy dokonać przemian pierwiastków — ale ilość atomów przemienionych była mała, a energia wyzwolona znikoma. Należy bowiem zdać sobie sprawę z tego, że dla biegnącej cząsteczki atom przedstawia cel o bardzo małym sednie. Jądro atomu, które jest tym sednem, jest dziesięć milionów razy mniejsze od całości atomu. Ponieważ nie możemy celować cząsteczkami, tylko znikoma ich część trafi w sedno. Każda wystrzelona cząsteczka na swej drodze przestrzeli po kolei szereg atomów i będzie miała szansę trafienia w jądro. Całkowita ilość tych szans jest jednak ograniczona, gdyż na swej drodze cząsteczka ustawicznie zderza się z elektronami i z tego powodu ustawicznie zwalnia. W miarę jak jej szybkość maleje, maleją szanse trafienia w jądro, gdyż tak cząsteczka jak i jądro są dodatnio naładowane, a jednoimienne ładunki elektryczne odpychają się wzajemnie. Szybka cząsteczka może stosunkowo łatwo to odpychanie przewyciężyć, ale dla cząsteczki o zmniejszonej szybkości jest to bardzo trudne, a gdy szybkość spadnie poniżej pewnej wartości, dojście cząsteczki do jądra staje się niemożliwe.

Jasne jest zatem, że ogromna większość cząsteczek utraci swą szybkość i zatrzyma się zanim uderzy w jądro, a tylko mała ich część, np. jedna cząsteczka na 100.000 lub milion, dojdzie do celu. Oznacza to, że ilość atomów, które rozbijemy, będzie z konieczności przynajmniej 100.000 razy mniejsza od ilości atomów radu, które rozpadną się i dadzą nam rozpędzoną cząsteczkę alfa. Wobec tego energia, którą zyskamy w nowych cząsteczkach, wybitych z trafionych jąder atomowych, będzie wiele tysięcy razy mniejsza od energii cząstek alfa, których użyjemy do ostrzeliwania.

Zatem tej metody w żadnym wypadku nie możemy uważać za sposób wyzyskania energii atomu dla celów praktycznych.

Doświadczenia Cockcrofta i Waltona zasadniczo nie zmieniły tej sytuacji. Fizycy ci zamiast cząsteczek alfa użyli do ataku jąder atomu wodoru lub innych pierwiastków, rozpędzając je sztucznie w rurach próżniowych napięciami rzędu miliona woltów. Takie ostrzeliwanie okazało się łatwiejsze i przyspieszyło badania — niemniej ogromna większość cząsteczek zatrzymywała się przed natrafieniem na cel i energia zużyta na rozpędzanie pocisków była bez porównania większa od energii uzyskanej.

Odkrycie neutronu przez Chadwicka w roku 1932 stanowiło jednak zasadniczy krok naprzód. Neutron jest to ciężka cząsteczka, praktycznie biorąc, o tej samej wadze co jądro wodoru, czyli proton, ale w odróżnieniu od dodatniego protonu, pozbawiona ładunku elektrycznego. Oznacza to, że przelot neutronu przez materię nie będzie zupełnie wpływał na elektrony napotkane po drodze; a zatem będzie go o wiele trudniej

zauważyć i odkryć, niż cząsteczki obdarzone ładunkiem. Cząsteczki obdarzone ładunkiem powodują bowiem gwałtowne zaburzenia w elektronach atomów, przez które przelatują i właśnie z zaburzeń tych korzystamy przy obserwacji ruchów cząsteczek. Neutron, pozbawiony ładunku, zaburzeń tych nie powoduje — ale za to odznacza się tym, że silnie atakuje jądro atomowe, gdy znajdzie się w jego sąsiedztwie. Neutrony chętnie dołączają się do jąder i wchodzi w ich skład, jądra bowiem zbudowane są z neutronów i protonów.

Neutrony nadają się zatem o wiele lepiej jako pociski do atakowania jąder atomowych, niż naładowane cząsteczki, gdyż w drodze swej poprzez materię nie tracą szybkości, chyba że trafiają na jądro atomu. Co więcej, nawet powolny neutron będzie miał dużą szansę trafienia w jądro, gdyż będąc pozbawiony ładunku elektrycznego nie jest odpychany przez jądro.

Jeżeli więc użyjemy neutronów, możemy się spodziewać, że w sprzyjających warunkach duża ich część rozbije jądra atomowe, w przeciwieństwie do pocisków obdarzonych ładunkiem dodatnim, z których jeden na milion rozbijał jądro.

Ale skąd wziąć neutrony? Najłatwiej możemy je uzyskać z lekkich pierwiastków (takich jak np. beryl), przez bombardowanie ich cząsteczkami alfa, wyrzucanymi przez rad. Toteż w ten sposób wykryto neutrony. Ale tu proszę zauważyć, że przesunęliśmy sprawę wyzwolenia energii zaledwie o krok naprzód, gdyż jak już wiemy, aby trafić jądro cząsteczką alfa marnujemy ogromne ilości energii; chociaż więc neutron ma duże

szanse rozbicia jądra, uzyskaliśmy neutron ten przez proces, w którym zużyliśmy znacznie więcej energii, niż możemy odzyskać z trafionego neutronem jądra.

3. ODKRYCIE ROZPADU ATOMU I JEGO ZNA-CZENIE. Tak wyglądał stan rzeczy w chwili, gdy rozpad atomu został odkryty. Hahn i jego współpracownicy bombardowali uran neutronami w nadziei, że neutrony utkwia w jądrach uranu i że w ten sposób powstanie jądro cięższe, które z kolei przez tzw. „transformację beta“ zwiększy swój ładunek elektryczny — i w rezultacie powstanie nowy pierwiastek, cięższy od pierwiastków wówczas znanych, z których uran o ładunku (dodatnim) 92 jednostek był ostatnim, najcięższym pierwiastkiem.

Dziś wiemy, że takie tworzenie pierwiastków „trans-uranowych“ udaje się — ale w poszukiwaniu tych pierwiastków Hahn spotkał się z zupełnie nowym zjawiskiem.

Jak zwykle, ilość nowego pierwiastka, uzyskanego przez takie bombardowanie jest znikomo mała i nie da się jej zważyć czy też posługiwać się nią w codziennym tego słowa znaczeniu. Ale taką nową pierwiastki mają często własności promieniotwórcze, gdyż zmieniawszy swój ciężar atomowy przez dodatek neutronu, wykazują tendencję także do zmiany ładunku. Ta zmiana ładunku odbywa się przez tzw. „transformację beta“, w której jądro atomu wyrzuca jeden elektron (który w przybliżeniu możemy uważać za ujemny ładunek o znikomo małej masie). Te wszystkie elektrony, zwane promieniami beta ( $\beta$ ) można wykrywać przy pomocy czułych liczników lub innych metod, opisanych w dal-

szym rozdziale przez Frischa. Możemy zatem wykrywać nawet znikome ilości tych nowych pierwiastków. Chemiczne ich właściwości możemy badać przez poddanie próbki, zbombardowanej neutronami, analizie chemicznej i śledzenie, która frakcja daje promienie beta. Na przykład: jeżeli próbkę poddamy procesowi chemicznemu, w którym bar wystąpi w formie osadu, a inne pierwiastki pozostaną w roztworze, będziemy śledzić: czy osad, czy też roztwór emituje promienie beta. Jeżeli osad, to wywnioskujemy, że promieniotwórczy pierwiastek, który wytworzyliśmy, ma cechy chemiczne baru.

Ku swemu wielkiemu zdziwieniu, Hahn rzeczywiście znalazł promieniotwórczy bar. Dokładniejsza analiza wykazała wielką ilość promieniotwórczych pierwiastków o właściwościach chemicznych pierwiastków, o ciężarze atomowym równym mniej więcej połowie ciężaru atomowego uranu.

Liza Meitner i O. R. Frisch podali wyjaśnienie tego zjawiska; neutron musiał spowodować rozpad atomu uranu, lub innymi słowy, rozłupał go na dwie w przybliżeniu równe części. Już wtedy wiedzieliśmy, że atomy najcięższych pierwiastków są niepraktycznie duże. Zawierają one tyle ładunku elektrycznego, że odpychanie się równoimiennych ładunków rozsadza je, przeciwdziałając wewnętrznym siłom, wiążącym jądro w jedną całość. Wiemy dalej, że energia zawarta w jądrze uranu jest o wiele większa, niż łączna energia zawarta w dwu jądrach o ciężarze (i ładunku) równym połowie ciężaru (i ładunku) jądra uranu. Po prostu, jądro atomu trzymane jest siłą przeciwdziałającą tendencji do rozpadu. Jeżeli nakładem pewnej pracy przełamiemy tę siłę, roz-

pad potoczy się sam i wyzwoli o wiele więcej energii, niż energia zużyta na przewyciężenie tej wiążącej jądro siły. (Dla porównania: wyciągając korek z dna pełnej wanny musimy wyłożyć pewną pracę, po czym wanna opróżnia się sama, oddając nieporównanie więcej energii, niż zużyliśmy do wyciągnięcia korka).

Potwierdzenie słuszności takiego tłumaczenia znaleźli fizycy w wielu laboratoriach. Zauważyli oni bowiem bardzo ciężkie cząstki obdarzone dużą szybkością, które były oczywiście fragmentami jądra uranowego, rozrzuconymi gwałtownie przez rozpad. Te ciężkie cząstki niosły prawie całą energię, wyzwoloną w rozpadzie, energię która wynosiła około 160 milionów elektronowoltów. Aby ocenić wielkość tej energii, proszę przypomnieć sobie, że energia wyzwolona przez jeden atom węgla w procesie spalania wynosi 4 elektronowolty, i że większość procesów promieniotwórczych obraca się w obrębie kilku milionów elektronowoltów. Spotkaliśmy się zatem ze zjawiskiem o wiele potężniejszym, niż jakiegokolwiek dotychczas znane.

Wkrótce potem Joliot, Halban i Kowarski w Paryżu i dwa zespoły naukowe w Ameryce łącznie z Fermim i Szilardem, wykazali, że oprócz odłamków jądra, w rozpadzie powstaje także kilka neutronów; innymi słowy z każdego rozbitego jądra uranu uzyskujemy kilka nowych neutronów. To odkrycie ma zasadnicze znaczenie, gdyż oto mamy źródło neutronów i nie musimy marnować milionów naładowanych cząsteczek na wybijanie neutronów z jąder atomowych.

Założmy dla prostoty rozważań, że wszystkie neutrony uderzające w jądra uranu powodują ich roz-

pad i że w każdym rozpadzie powstają dwa nowe neutrony. Wówczas, jeżeli spowodujemy rozpad jednego jądra w dużej bryle czystego uranu, uzyskamy dwa neutrony. Oba te neutrony będą biegnąć przez uran aż napotkają jądra uranowe, rozbiją je i dadzą cztery neutrony. W następnej „generacji“ neutronów powstanie ich osiem — i oczywiście jest, że ich ilość będzie wzrastać gwałtownie. Po dwudziestu generacjach będziemy mieli około miliona neutronów i wystarczy tylko 80 generacji, aby neutronów było tyle, ile jest atomów w pokazanej bryle metalicznego uranu. Jasne się staje, że jeżeli rzeczywiście pozwolimy zjawisku rozwijać się w ten sposób, wyzwolimy zawrotne ilości energii w bardzo krótkim czasie. W krótkim czasie, gdyż powstanie 80 generacji neutronów zajmie zaledwie 80 razy tyle czasu, ile upływa od chwili powstania neutronu do chwili natrafienia przez niego na jądro uranowe.

W zjawisku tym, które zwykle nazywamy „reakcją łańcuchową“ (lub lawinową) leży klucz do wyzwolenia energii atomowej na dużą skalę i z opisu powyższego jasno wynika, że istotnym warunkiem jest: a) proces, który można zapoczątkować neutronem, który wyzwala energię; b) powstanie w tym procesie wtórnych neutronów.

Oczywiście dla jasności uprościliśmy nasz opis nadmiernie. Nie jest konieczne, by właśnie dwa neutrony powstały w rozpadzie jądra; otrzymamy reakcję łańcuchową, jeżeli neutronów będzie mniej, lub więcej jak dwa, byle tylko powstało ich więcej, niż jeden neutron na jeden neutron zużyty, tak aby w miarę rozwoju łańcucha zdarzeń, całkowita ilość neutronów wzrastała. Należy jednak pamiętać, że w rzeczywistości nie każdy neutron

uzyskany z rozpadu spowoduje rozbitcie następnego jądra, a to z następujących powodów:

Po pierwsze, może się zdarzyć, że neutron uderzyw-  
szy w jądro uranu utkwi w nim i stworzy jeden z pier-  
wiastków transuranowych (cięższych od uranu), których  
poszukiwał w swych badaniach Hahn. Taki neutron jest  
oczywiście stracony dla reakcji łańcuchowej, ponieważ  
nie ma neutronowego potomstwa. Po drugie, atomy  
innych pierwiastków zanieczyszczające uran, lub też bę-  
dące składowymi częściami elementów konstrukcyjnych,  
mogą pochwytać neutrony i w ten sposób zmniejszyć  
liczbę wtórnych neutronów, które mają powstać.

W praktyce zawsze mamy do czynienia z ograniczo-  
nymi ilościami uranu i wiele neutronów może wybiec  
poza uran. Tu należy przypomnieć sobie, że „średnia  
swobodna droga“, tzn. odległość, którą neutron może  
przebiec wewnątrz uranu zanim natrafi na jądro ato-  
mowe, jest wcale pokaźna. Jeżeli wymiary bryły uranu  
są mniejsze niż ta „średnia swobodna droga“, każdy  
neutron będzie miał dużą szansę wybiegnięcia poza bry-  
łę uranową, zanim natrafi na jądro i spowoduje jego  
rozpad.

Niemniej nadal możemy posługiwać się naszym opi-  
sem reakcji łańcuchowej, tylko musimy wziąć pod uwa-  
gę ilość neutronów wtórnych powstających rzeczywiście  
w rozpadzie jądra uranowego, uwzględnić jaka ich część  
nie wybiegnie poza uran i nie zostanie zaabsorbo-  
wana przez zanieczyszczenia zanim rozbije następnę  
jądro. Tylko ta zmniejszona ilość neutronów może spo-  
wodować dalsze rozpady i podtrzymać proces łańcucho-  
wy. Ułamek, który nazywamy zwykle „*m n o ż n i k i e m*  
*r e a k e j i*“ i oznaczamy literą „*K*“ decyduje o tym

czy proces łańcuchowy jest możliwy, czy nie. Gdy wynosi on np. 0,99 reakcja łańcuchowa nie rozwinie się. Gdybyśmy bowiem wprowadzili np. 100 neutronów do uranu, ich druga generacja wynosiłaby tylko  $0,99 \times 100 = 99$  neutronów. Trzecia generacja wynosiłaby  $0,99 \times 99 = 98$  neutronów itd. Gdy jednak  $K$  wynosi np. 1,01, z początkowych 100 neutronów uzyskamy w drugiej generacji 101, w trzeciej 102 itd. i po 70 generacjach ilość neutronów podwoi się.

Dalsze badania tych zagadnień wykazały, że w zwykłym uranie szansa neutronu na spowodowanie rozpadu jądra jest bardzo mała. Większość neutronów utkwii w uderzonych przez nie jądrach. Średnia swobodna droga, którą może przebiec neutron w zwykłym uranie, jest b. duża, i dlatego choćby nawet absorpcja neutronów była mniejsza od ich przyrostu, bryła uranowa musiałaby być bardzo duża, aby reakcja łańcuchowa rozwinęła się.

4. POWOLNE NEUTRONY W PRZEBIEGU ŁAŃCUCHOWYM. Oczywiście radą na tę ostatnią trudność wydaje się być zastosowanie bardzo powolnych neutronów (o b. małej szybkości), zwłaszcza, że wiadome jest, że w wielu wypadkach przytrzymanie neutronu przez jądro i rozpad jądra następuje łatwiej przy uderzeniu neutronem o bardzo małej szybkości. (Nadmiernie upraszczając można powiedzieć, że szybki neutron zbyt krótko przebywa w sąsiedztwie jądra, by jądro mogło zauważyć jego obecność). Wiemy dalej, że można łatwo zmniejszyć szybkość neutronu, przepuszczając go przez ośrodki zawierające lekkie pierwiastki. Na przykład, bardzo dobrymi materiałami opóźniającymi są para-

fina lub woda, dzięki posiadanym atomom wodoru. Masa atomu wodoru równa jest w przybliżeniu masie neutronu, toteż gdy neutron uderzy w atom wodoru, wprawia go w ruch, oddając mu w przybliżeniu połowę swej energii. Wobec tego nawet mała warstwa parafiny lub wody wystarczy do prawie zupełnego zwolnienia biegu neutronu. Neutron zwalnia ostatecznie do takiej szybkości, z jaką poruszają się atomy wodoru w swym nieregularnym ruchu, charakterystycznym dla danej temperatury.

Próbowano zatem, czy nie uda się uzyskać reakcji łańcuchowej w układzie złożonym z uranu i związku bogatego w wodór (jak np. woda). Wiele doświadczeń, które prowadzono w tajemnicy, skończyło się niepowodzeniem. Główną przeszkodą okazało się to, że wodór wylapuje część neutronów, przy czym powstaje tzw. „ciężki wodór“, składający się z jednego jądra wodorowego i jednego neutronu. Powoduje to tak dużą stratę neutronów (łącznie ze stratą neutronów zaabsorbowanych przez sam uran), że mnożnik reakcji „K“ nie może przekroczyć jedynki.

Ulepszenie, które najpierw zaproponowała grupa badaczy w Paryżu, a następnie szereg innych badaczy, polegała na rozłożeniu materiału w warstwach lub w formie regularnej siatki przestrzennej, przy czym uran rozmieszczony był oddzielnie pośród materiału opóźniającego. Rozumowano przy tym, że uran najłatwiej absorbuje neutrony o średniej szybkości, którą neutrony posiadają w trakcie zwalniania! Mieszając materiały mniej bezpośrednio, można stworzyć takie warunki, by neutron nie miał szans na spotkanie uranu, zanim nie zwolni do szybkości właściwej dla skutecznego

ataku. Metoda ta dała lepsze wyniki, ale reakcji łańcuchowej nie dała.

Usiłowania potoczyły się dalej w kierunku zastąpienia lekkiego wodoru cięższymi pierwiastkami, które choć mniej skutecznie hamujące, dałyby mniejszą absorpcję neutronów. Próbowano użyć czystego węgla w formie grafitu, lub tzw. „ciężkiej wody“, tzn. wody, w której atom wodoru zastąpiono „ciężkim wodorem“. Dziś już wiemy, że obie metody mogą dać reakcję łańcuchową, ale że uzyskać ten wynik jest bardzo trudno. W wypadku użycia grafitu trudność polega na tym, że współczynnik „K“ jest nawet w idealnych warunkach zaledwie nieco większy od jedynki i najmniejszy nawet ślad zanieczyszczeń w graficie lub uranie obniży jego wartość poniżej jedynki uniemożliwiając reakcję łańcuchową. Z tego samego powodu utrata neutronów przez uchodzenie z powierzchni była również fatalna. Musimy zatem cały zespół uczynić bardziej dużym, tak dużym, by ilość neutronów uciekających poza system była tylko znikomym ułamkiem ilości neutronów obecnych w systemie.

W drugim doświadczeniu główną trudność stanowiło dostarczenie ciężkiej wody, która występuje w zwyczajnej wodzie jako drobny ślad, tak że sposoby oddzielania jej są żmudne i kosztowne.

Użycie grafitu przyjęto ostatecznie w projekcie amerykańskim i więcej szczegółów na ten temat znajdują czytelnicy w innym rozdziale tej książki.

5. ROLA URANU U. 235. WYBUCH. W międzyczasie szła praca w równoległym kierunku oparta na następujących przesłankach. Bohr obserwując rozpad ura-

nu doszedł do przekonania, że w procesie powodowanym przez powolne neutrony biorą udział dwa rodzaje uranu. Ogólnie wiadomo, że istnieją różne rodzaje atomów uranu (tzw. izotopy), różniące się głównie ciężarem i że najpospolitszym jest najcięższy z nich o ciężarze 238 jednostek, rzadszy z nich jest uran o ciężarze 235, gdyż na 140 atomów uranu 238 trafia się jeden atom uranu 235. W rozdziale o „Metodzie rozdziału Izotopów“ znajdzie czytelnik więcej szczegółów o tych rodzajach atomów, zwanych „izotopami“. Bohr doszedł do wniosku, że tylko lekki i rzadki izotop U. 235 może być rozbitý powolnym neutronem, natomiast większość absorpcji powolnych neutronów należy przypisać cięższemu izotopowi U. 238. Natychmiast stało się jasne, że dałoby się o wiele łatwiej wyzwolić energię atomową, gdyby udało się otrzymać pokaźną ilość izotopu U. 235, oddzieloną od innych izotopów. Niestety było równie jasne, że zadanie wydzielenia izotopu tak ciężkiego pierwiastka przekraczało najśmielsze marzenia pracownika laboratorium naukowego. Żaden z nich nie traktowałby takiej propozycji poważnie.

To nastawienie uległo jednak zmianie, kiedy ludzie zaczęli się zastanawiać nad tym, czego można by dokonać przy pomocy tak wydzielonego izotopu uranu. A ludzi, którzy się zastanawiali, było wielu. Nic też dziwnego, że w pamięci autora niniejszego rozdziału utrwaliły się dyskusje Peierlsa i Frischa w Birmingham na temat właściwości uranu 235, które przewidywali oni na podstawie idei Bohra. Jak powiedzieliśmy bowiem poprzednio, powolne neutrony miały duże szanse rozbicia jądra w zwyczajnym uranie prawie wyłącznie dzięki obecności uranu 235. Czysty uran 235 oczywiście dałby

neutronowi o wiele większe szanse na rozbicie jądra - a równocześnie pozbylibyśmy się prawie zupełnie możliwości zaabsorbowania neutronu. Innymi słowy prawie każdy neutron mógłby rozbić jedno jądro uranowe i o ile ilość neutronów wtórnych, powstających przy tym rozbiciu będzie większa od jednego, rozwój reakcji łańcuchowej będzie praktycznie biorąc zapewniony. Jeżeli neutronów wtórnych nie wyhamuje się, przebiegną one wprawdzie trochę dłuższe drogi, zanim trafią w jądra, ale ponieważ duży procent tych trafień spowoduje rozpad, będziemy jedynie musieli użyć bryły o nieco większych wymiarach od „średniej swobodnej drogi“. Co więcej, jeśli byśmy użyli czystego uranu  $^{235}$ , szybkość powielania z jaką narastałaby ilość neutronów będzie o wiele większa, niż w reakcjach łańcuchowych, opisanych poprzednio. Neutrony nie zostały wyhamowane i będą poruszać się z dużą szybkością, tracąc niewiele czasu pomiędzy zderzeniami, a zarazem, dzięki temu że mnożnik reakcji jest znacznie większy od jedynki, potrzeba będzie mniej generacji neutronowych, aby uzyskać pewne określone ich rozmnożenie.

Ta różnica jest ważna, gdyż jeśli przeprowadzimy reakcję łańcuchową powolnymi neutronami i nie zatrzymamy jej na czas przebieg będzie trwał tylko dopóty, dopóki materiał naszego układu doświadczalnego nie stopi się i w końcu zamieni w parę na skutek wysokiej temperatury, wywołanej wyzwalaną energią. W miarę jak będzie przybierał na objętości na skutek rozszerzania się, zwiększą się szanse ucieczki neutronów z systemu zanim zdążą zderzyć się z jądrami i w rezultacie mnożnik reakcji spadnie poniżej krytycznej jedynki i reakcja łańcuchowa skończy się.

Tak się stanie rzeczywiście, gdy wyzwolona energia przekroczy nieco ilość energii potrzebnej do zamienienia uranu w parę ze wszystkimi tego następstwami (rozerwanie obudowania uranu i systemu doświadczalnego). Chociaż wybuch wywołany w ten sposób będzie weale potężny, wyzwoli zaledwie małą część energii zawartej w uranie. Jeżeli natomiast potrafiemy wywołać przebieg łańcuchowy szybkimi neutronami, w systemie o mnożniku reakcji przekraczającym znacznie jedynkę, czas w którym przebieg dojdzie do końca, będzie tak krótki, że chociaż system zamieni się w parę, nie zdąży się rozprzestrzenić zanim poważna część uranu nie zostanie wyczerpana. W rzeczywistości o tym, jaką część całkowitej energii zawartej w układzie uda nam się wyzwolić, decydują takie czynniki, jak rozłożenie uranu, konstrukcja zbiornika który go otacza; dyskusję na ten temat zawiera rozdział p. t. „Fizyka bomby atomowej“.

Ale nawet po bardzo przybliżonej ocenie siły takiej eksplozji staje się jasne, że jej znaczenie bojowe usprawiedliwia podjęcie skrajnych wysiłków nad wydzieleniem izotopów uranu i że tym wydzieleniem należy się zająć pod kątem widzenia metod fabrycznych, a nie laboratoryjnych. Tym problemem zajmuje się rozdział p. t. „Produkcja paliw atomowych przez rozdział izotopów“.

6. PLUTONIUM. Mniej więcej w tym samym czasie odkryto inną drogę, prowadzącą do tego samego celu. Jak powiedzieliśmy poprzednio, możemy przeprowadzić przebieg łańcuchowy przy pomocy powolnych neutronów, z tym, że część tych neutronów nie spowoduje rozpadu, lecz utkwii w jądrze uranowym nie powodując

jego rozbitcia. Gdy tak się stanie, jądro uranu o ciężarze 238 jednostek, zostanie zamienione przez dodatek neutronu w jądro nowego (izotopu uranowego) o ciężarze 239 jednostek. Tak już jest, że to nowe jądro atomowe potrzebuje dla większej równowagi większego ładunku dodatniego i wobec tego zaczyna wyzbywać się po kolei dwu elektronów (transformacja beta), z których każdy jak wiadomo posiada jednostkowy ładunek ujemny i znikomo małą masę. W ten sposób nowe jądro zmienia się z jądra o ładunku 92 jednostek, w jądro nowego pierwiastka neptunium o ładunku 93 jednostek (dodatnich), a następnie w jądro dalszego pierwiastka plutonium o ładunku 94 jednostek. Ten nowy pierwiastek plutonium został odkryty w Berkeley w roku 1940. Z praw rządzących zachowaniem się ciężkich jąder atomowych należało wnioskować, że plutonium będzie miało właściwości bardzo podobne do uranu 235 i że prawdopodobnie będzie się również nadawać do celów bojowych. Małe ilości tego pierwiastka otrzymano najpierw w laboratoriach posługując się nieekonomicznymi metodami, opisanymi poprzednio i przy pomocy tych próbek potwierdzono przewidywania, że plutonium, podobnie jak uran 235, trafione neutronem, stosunkowo łatwo rozpada się.

To doprowadziło do projektu, który na pierwszy rzut oka może wydawać się bardziej fantastyczny niż separacja izotopów uranu na skalę fabryczną. Pozwólmy zwyczajnemu uranowi na przebieg łańcuchowy na tyle łagodny, by nie rozsądził fabryki. Część neutronów spowoduje rozpad uranu 235 i da nam nowe neutrony do podtrzymania przebiegu łańcuchowego, oraz da dodatkowo pokaźne ilości energii, którą musimy odprowadzić

(i którą w teorii moglibyśmy zużytkować). Pozostałe neutrony zamieniają część uranu w nowy pierwiastek plutonium. Plutonium różni się właściwościami chemicznymi od uranu i gdy powstanie dostateczna jego ilość, będziemy mogli oddzielić je od uranu zwyczajnymi metodami chemicznymi.

Plutonium uzyskane w ten sposób było drugim z kolei paliwem atomowym i dziś już jest ogólnie wiadome, że z dwu bomb zrzuconych na Japonię jedna zrobiona była z uranu 235, a druga zawierała plutonium.

7. SIŁOWNIE ATOMOWE. W miarę jak poznajemy dziedzinę energii atomowej, zastosowanie jej do celów pokojowych nabiera większego znaczenia, niż jej użycie bojowe. Dla celów pokojowych tak powolne wyzwalamie energii ze zwykłego uranu w dużych „stosach“, jak i gwałtowne przebiegi zachodzące w znacznie mniejszych ilościach czystego uranu 235 lub plutonium, mogą mieć istotne znaczenie. Oczywiście, że wyzwalamie energii ze zwyczajnego uranu jest ekonomicznie biorąc bardziej obiecujące, ale pociąga za sobą budowę bardzo dużych zakładów — natomiast użycie o wiele kosztowniejszego paliwa, jakim jest uran 235 lub plutonium, pozwala nam na projektowanie silnika o stosunkowo małych wymiarach. Silnik taki będzie na najbliższą przyszłość jedynym godnym uwagi silnikiem atomowym dla celów poruszania się. Jednak nawet i w tym wypadku, konieczność chronienia ludzi przed intensywnym promieniowaniem, towarzyszącym każdemu wyzwalamiu się energii atomowej, pociągnie za sobą konieczność użycia ciężkich osłon zrobionych np. z betonu lub podobnego materiału. Z tego też powodu użycie energii ato-

mowej do napędu samochodów lub lokomotyw wydaje się obecnie fantazją. Napęd okrętów lub pojazdów o podobnych wymiarach może się przedstawiać korzystniej, ale nawet i w tym wypadku musimy wpieryw rozwiązać wiele problemów technicznych i rozważyć wiele względów ekonomicznych, zanim będziemy mogli powiedzieć, jakich korzyści należy się spodziewać z takiego zastosowania energii atomowej.

Jeden praktyczny sposób użytkowania nowych możliwości technicznych zarysowuje się jasno. Jest nim wykorzystanie nowych pierwiastków promieniotwórczych, towarzyszących wyzwalanu energii atomowej. Występowanie tych pierwiastków sprawiało dużo kłopotu i komplikacji. Rozdział o poznaczonych atomach omawia ich wykorzystanie praktyczne.

H. A. Belhe

## ATOMY I JĄDRA ATOMOWE

Już starożytnym Grekom pojęcie atomu nie było obce. Twierdzili oni, że jeżeli wziąć jakikolwiek przedmiot materialny i dzielić go stale na coraz mniejsze części, dojdzie się w końcu do tak małych cząstek, że nie dadzą się one w żaden sposób podzielić. Te cząstki nazwali oni atomami, co znaczy dosłownie — istoty niepodzielne.

Oczywiście teoria określająca materię jako zespół atomów nie była powszechnie wyznawana; wielu greckich filozofów wierzyło, że podział materii można prowadzić w nieskończoność i że atomy weale nie istnieją.

Ani jedni ani drudzy nie mogli przytoczyć dowodu na poparcie swych teorii i dopiero nowoczesna chemia i fizyka stworzyły realne podstawy teorii atomowej.

Gra nowoczesnej chemii została zapoczątkowana odkryciami francuskiego chemika Lavoisiera i współczesnych jemu badaczy, przy końcu 18 stulecia.

Wykazali oni, że można rozłożyć większość spotykanych ciał, drogą działania natury chemicznej, na prostsze ciała, czyli składniki, które nazwali oni pierwiastkami chemicznymi. Od tego czasu znaleziono w przyrodzie 88 różnych pierwiastków chemicznych. W skład ich wchodzi tlen i wodór, dwa pierwiastki, z których składa się woda; azot, który z tlenem tworzy główną masę powietrza; węgiel, jeden z podstawowych pierwiastków ciała ludzkiego i innych substancji organicznych

oraz wiele innych. Metale, jak żelazo, miedź, złoto i rtęć są również pierwiastkami chemicznymi.

Jeżeli ułamek jakiegoś pierwiastka — powiedzmy kawałek żelaza będziemy dzielili na coraz mniejsze części i jeżeli będziemy ten proces kontynuowali przez jakiś czas, dojdziemy w końcu do drobnych, niepodzielnych jednostek, które są znane w nowoczesnej chemii jako atomy.

Jeżeli wspomnianemu wyżej podziałowi ulegnie zwykłe chemiczne ciało — czyli „związek chemiczny“ i jeżeli nie będziemy stosowali żadnego działania chemicznego, a tylko podział fizyczny na części — dojdziemy w końcu do najmniejszej jednostki, która wciąż jeszcze ma własności związku z którego powstała, a którą nazywamy cząsteczką albo drobiną.

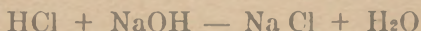
Wszystkie zjawiska chemiczne można wytłumaczyć, przyjmując, że drobina jakiegokolwiek badanej substancji składa się ze skończonej ilości atomów różnego rodzaju. Ilość atomów w drobinie jest zwykle mała; dla przykładu drobina wody zawiera dwa atomy wodoru i 1 atom tlenu, co odzwierciedla się wzorem chemicznym  $H_2O$ . Drobina zwyczajnej soli kuchennej zawiera 1 atom sodu i 1 atom chloru — stąd wzór  $NaCl$ . Jedynie w bardziej złożonych organicznych drobinach spotykamy duże ilości atomów w pojedynczej drobinie.

Chemia była w stanie wykazać, że atom każdego pierwiastka chemicznego posiada zdecydowany ciężar zwany ciężarem atomowym i była w stanie zmierzyć ten ciężar atomowy. Gdy rozłożymy wodę np. na jej składniki, znajdziemy, że za każdym razem tworzy się 16 gramów tlenu na każde 2 gramy wodoru.

Przyjąwszy wzór chemiczny wody  $H_2O$ , dochodzimy do wniosku, że jeden atom tlenu musi ważyć 16 razy więcej, niż jeden atom wodoru. Tą drogą znaleziono, że wodór posiada najmniejszy ciężar atomowy i przyjęto ten ciężar za jednostkę. Ciężary atomowe pierwiastków przymują wartości w granicach od 1 dla wodoru do 238 — najcięższego atomu uranu.

Właśnie ten charakterystyczny fakt, że rozkład każdego związku chemicznego zawsze prowadził do tych samych proporcji wagowych jego składników, był potwierdzeniem hipotezy atomowej. Nie odgrywa przy tym żadnej roli z jak małej ilości wody wyjdziemy i będziemy przeprowadzali jej rozkład, stosunek wodoru do tlenu będzie zawsze ten sam; oczywiście, dzieląc kroplę wody na coraz drobniejsze kropelki nie zmienimy jej składu chemicznego. Jest rzeczą zupełnie naturalną, jeżeli przyjmiemy, że skład wody jest określony przez fakt łączenia się w pewien prosty sposób najdrobniejszych jednostek pierwiastków — atomów — w kierunku tworzenia najdrobniejszych jednostek związków chemicznych — drobin. Oznaczenie ilości atomów każdego rodzaju w pewnej danej chemicznej drobnie wymaga bardzo długich badań; należało na przykład wykazać, że woda zawiera 2 atomy wodoru na każdy atom tlenu, a nie jednakową ilość jednego i drugiego. Nagromadzenie całego szeregu faktów i zjawisk fizycznych i chemicznych było pomoce przy tych badaniach.

Podczas reakcji chemiczne drobiny zmieniają swój skład, ale atomy zawsze pozostają te same. W prostej reakcji jak:



własności końcowych produktów reakcji, soli i wody. są zupełnie odmienne od własności ciał wyjściowych tj. kwasu solnego i sody żrącej.

Należy zaznaczyć, że ilość atomów każdego rodzaju została zachowana i nie uległa zmianie, mieliśmy na początku dwa atomy wodoru i po jednym atomie tlenu, sodu i chloru i dokładnie tę samą ilość atomów mamy po ukończeniu reakcji.

Chemia zatem dała odpowiedź i rozwiązała zagadnienia alchemiczne. Celem alchemików była zamiana taniach metali jak ołów lub żelazo na szlachetne — jak złoto. Chemia wypowiedziała się, że to jest niemożliwe; każdy z tych metali jest pierwiastkiem i było rzeczą niemożliwą zmienić w reakcji liczbę atomów każdego z tych pierwiastków.

Od czasu gdy dokładnie określono ciężary atomowe rozmaitych pierwiastków, zrobiono dwa znakomite odkrycia. Pierwsze z nich to był układ periodyczny pierwiastków, odkryty przez Mendelejewa. Zauważył on, że jeżeli uszeregować atomy według rosnących ciężarów atomowych, ich własności chemiczne będą się periodycznie powtarzały. Na przykład niektóre pierwiastki są znane jako alkalia; należą tu pospolite pierwiastki jak sód i potas. Pierwiastek posiadający sąsiedni większy ciężar atomowy od alkaliów będzie nieodmiennie „ziemią alkaliczną“ jak magnez lub wapń — natomiast pierwiastek poprzedzający alkalia będzie zawsze gazem szlachetnym jak hel, neon lub argon.

Drugim ważnym odkryciem było stwierdzenie faktu, że większość ciężarów atomowych to w przybliżeniu liczby całkowite; zasada ta obowiązuje jeszcze ściślej, jeżeli przyjąć ciężar atomowy tlenu równy dokładnie

16, co w konsekwencji daje nowy ciężar atomowy wodoru 1.008, jednak dostatecznie zbliżony do jedynki 1.000.

Mimo wszystko jest kilka jaskrawych wyjątków w tej zasadzie np. chlor, który ma ciężar atomowy 35.5; ogólnie jednak reguła ta sprawdza się zadowalająco i stanowi przedmiot zainteresowania chemików.

Pod koniec 19 stulecia stało się możliwe oznaczenie ilości atomów w znanej masie danego ciała, czyli oznaczenie ciężaru pojedynczego atomu. Było to wykonalne przez zastosowanie kinetycznej teorii gazów, która tłumaczy np. ciśnienie powietrza jako ruch drobin powietrza. Najdokładniejsze pomiary wykonane od tego czasu wykazują, że np. uncja<sup>1)</sup> wody zawiera około biliona bilionów drobin. Jest to zawrotna cyfra; konsekwentnie wielkość pojedynczego atomu jest znikomo drobna. Około stu milionów atomów ułożonych ciasno obok siebie, zajęłoby długość jednego cala<sup>2)</sup>.

Atom dziewiętnastego wieku był podobny do atomu starożytnych, niepodzielny i niezmienny. Pierwsze oznaki jego podzielności zjawily się pod koniec tego stulecia, kiedy to angielski fizyk J. J. Thomson podał do wiadomości, że w pewnych warunkach małe cząsteczki elektryczności mogą uchodzić z atomu. Te małe cząsteczki nazwał on elektronami. Okazało się, że posiadały one jednakowe ładunki elektryczne i jednakowy ciężar. Elektron posiada ujemny ładunek i jest najmniejszym ładunkiem elektryczności, kiedykolwiek zaobserwowanym. Używa się go dlatego w fizyce jako jednostki ładunku elektrycznego. Ciężar elektronu jest

<sup>1)</sup> 1 uncja = 28 g

<sup>2)</sup> 1 cal = 2,54 cm

znacznie mniejszy od ciężaru najlżejszego atomu; około 1840 elektronów waży tyle co jeden atom wodoru.

Jeżeli ujemne ładunki elektryczne wchodzą w skład atomu muszą tam być również i dodatnie ładunki, ponieważ atom jako całość jest elektrycznie obojętny. W r. 1910 lord Rutherford odkrył tajemnicę dodatnich ładunków atomu. Znalazł on, że dodatni ładunek był skupiony w każdym atomie w bardzo małej przestrzeni i był ściśle związany z przeważającą częścią masy atomu. To skupienie masy atomu noszące dodatni ładunek elektryczności nazwał on *jądrem atomowym* i przez to stworzył obecny model atomu: masywne jądro, naładowane dodatnio, otoczone przez zespół elektronów, naładowanych ujemnie. Wymiar jądra atomowego jest niezmiernie mały. Średnica atomu jest około 20.000 razy większa od średnicy jądra. Wielkość elektronu nie została jeszcze poprawnie oznaczona, ale z pewnością nie jest on większy od jądra. Wynika z tego fakt, że atom składa się właściwie z wolnej przestrzeni i jeżeli byłoby możliwe poruszanie się wewnątrz atomów, można by tylko drogą przypadku natknąć się na elektron lub jądro. Na ciężar atomu składa się suma ciężarów jądra i elektronów, a ponieważ elektrony praktycznie nie ważą, ciężar jądra reprezentuje prawie całkowity ciężar atomu. Ładunek elektryczny jądra, który jest dodatni, powinien zubożyć dokładnie ładunek otaczających je elektronów. Wiemy, że wszystkie elektrony mają taki sam ładunek elektryczny, który nazwiemy —  $e$ . Konsekwentnie znajdziemy, że ładunek każdego jądra musi być wielokrotnością dodatniego ładunku  $+ e$ . Można wyznaczyć doświadczalnie ile jednostek dodatniego ładunku zawiera dane jądro, przy czym najdo-

kładniejszą metodą jest pomiar długości fali charakterystycznych promieni X (Roentgena), które wysyła dany atom. Tą drogą znaleziono, że jądro wodoru posiada jedną jednostkę ładunku, następne, cięższe jądro helu — 2 jednostki; węgiel, azot i tlen mają kolejno 6, 7 i 8 jednostek ładunku, a najcięższe jądro uranu ma 92 jednostki. Wynika z tego, że ładunek jądra wzrasta od pierwiastka do pierwiastka równoległe z ciężarem atomowym. Każdy pierwiastek posiada swój charakterystyczny ładunek jądra i można wygodnie ponumerować pierwiastki według ilości jednostek ładunku elektrycznego zawartego w jądrze.

Wspomnieliśmy poprzednio, że znaleziono w przyrodzie 88 pierwiastków chemicznych. Jest to trochę mniej niż 92, na które byłoby dosyć miejsca, odpowiednio do możliwych, analogicznych wartości ładunku jądra. Brakujące cztery pierwiastki o liczbie ładunku 43, 61, 85 i 87 nie istnieją w przyrodzie ponieważ ich jądra są nietrwałe. Niejednokrotnie ogłaszano odkrycie któregoś z nich — niestety zwykle później stwierdzano jego fałszywość. Należy zaznaczyć, że można wyprodukować te pierwiastki przez transformację jąder atomowych, jak to później zobaczymy i tą drogą zbadano ich własności.

Jądro atomowe, które posiada  $Z$  jednostek dodatniego ładunku elektrycznego zgromadzi dokoła siebie  $Z$  elektronów, aby stworzyć obojętny atom. Jeżeli, z jakiegoś powodu, atom straci jeden lub kilka swoich elektronów, będzie on chętnie przyciągał inne elektrony, które przypadkowo mogą się znaleźć w jego sąsiedztwie i utworzy połączenie z tymi nowymi elektronami, znów w celu stworzenia obojętnego elektrycznie atomu. Dzieje

się to dzięki sile przyciągania pomiędzy ujemnie naładowanymi elektronami, a dodatnio naładowanym jądrem.

W roku 1914 zaakomity duński fizyk Niels Bohr postawił pełną teorię atomową, opartą w zasadzie na poglądach Rutherforda i teorii kwantów. Pokazał on jak obliczać ruch elektronów i jak określić własności atomów opierając się na ruchu elektronów. Teoria ta w swej obecnej formie ma dawać kompletny opis własności atomu. Pozwala ona na obliczanie długości fali widma emisyjnego atomu i na przewidywanie chemicznych własności atomu. Tego rodzaju teoretyczne przewidywania są czasami trudne do sprecyzowania z powodu bardzo skomplikowanych obliczeń matematycznych; jednak tam, gdzie te obliczenia przeprowadzono, otrzymano wyniki zgodne z doświadczeniami z zadziwiającą dokładnością, która sięga rzędu jednej milionowej.

Własności atomu mogą być przepowiedziane chociażby na podstawie znajomości ilości elektronów w atomie. W rezultacie ta właśnie ilość elektronów określa chemicznie zachowanie się pierwiastka; określa ona na przykład, że 2 atomy wodoru będą się wiązały z jednym atomem tlenu w celu utworzenia jednej drobiny wody. Ilość elektronów z kolei jest określona przez ładunek jądra atomowego i ostatecznie ładunek elektryczny jądra decyduje właściwie o własnościach pierwiastka chemicznego. Opierając się na teorii budowy atomów Bohra można było dokładnie wyjaśnić układ periodyczny pierwiastków, podany przez Mendelejewa.

Elektron można wyosobnić z atomu bez specjalnych trudności, na przykład przez przepuszczenie iskry elektrycznej. To samo zjawisko zachodzi również w bardzo gorących gazach, na przykład w sferze gazowej gwiazd

oraz na katodzie lampy radiowej, gdzie elektrony oddzielają się od atomów katody.

Wydzielenie elektronów z atomu wymaga pewnej energii do pokonania sił przyciągania pomiędzy elektronem a dodatnio naładowaną resztą atomu; z tego też powodu wydzielenie elektronu nie jest źródłem energii. Można by to zjawisko nazwać rozbijaniem atomów, z dużą dozą słuszności, normalnie jednak tej nazwy w tym przypadku nie stosuje się.

Atom Rutherforda i Bohra jest podzielny i posiada swą budowę. Jakkolwiek jądro atomowe można by z kolei uważać za niepodzielne. To założenie jednak okazało się fałszywe. Nawet przed odkryciem Rutherforda, zauważono zjawisko, które niewątpliwie było ważnym czynnikiem prowadzącym do tego odkrycia, a mianowicie, że niektóre najeńszcze atomy wydzielają dziwne promieniowanie zwane radioaktywnością. To promieniowanie ma swe źródło w jądrze atomowym. Przykładem jest jądro uranu i jądro powszechnie znanego pierwiastka radu. Oba one wydzielają cząsteczki, które niosą dwa dodatnie ładunki i można udowodnić, że są one identyczne z jądrami helu. Na skutek wypromieniowania tych cząsteczek, które znane są pod nazwą cząstek alfa, pierwiastek rad, ciało stałe — metal, zamienia się na gaz zwany emanacją radową. Ładunek jądra emanacji jest o dwie jednostki mniejszy od ładunku jądra radu, dokładnie o te dwie jednostki, które uszły z cząstką alfa. Atom helu ma ciężar atomowy równy 4 jednostkom i okazało się, że jądro emanacji radowej ma ciężar atomowy o 4 jednostki niższy od ciężaru atomowego radu.

Innego rodzaju promieniowanie również miało swe źródło w jądrze atomowym — było to tzw. promieniowanie beta. Są to zwyczajne elektrony, niosące jeden ujemny ładunek i praktycznie bez masy — nieważkie. W rezultacie jądro po wypromieniowaniu ich zyskuje jednostkę elektryczności dodatniej, na każdy utracony elektron, ale nie zmienia swego ciężaru atomowego.

W początkowej fazie odkryć zjawisk radioaktywności panowało przekonanie, że są one ograniczone do najeńszczych jąder atomowych, a mianowicie tych, które posiadają ładunek 82 jednostek lub większy. Co więcej, rozkład tych jąder zachodził samorzutnie, bez żadnego wpływu z zewnątrz i niezależnie od takiego wpływu. Ten fakt jest znany pod nazwą naturalnej radioaktywności, albo jako samorzutny radioaktywny rozpad.

Zupełnie nowe horyzonty zarysowały się w r. 1919. kiedy lord Rutherford użył cząstek alfa do bombardowania jąder azotu. Znalazł on, że na skutek tego rodzaju zderzeń powstawała zupełnie nowa cząsteczka; okazała się ona jądrem wodoru — tak zwanym protonem. Natomiast jądro azotu przemieniło się w tej reakcji w jądro tlenu.

Odkrycie to wstrząsnęło gruntownie zasadami chemii klasycznej — jakkolwiek praktyczne aspekty zostały, rzecz oczywista, niezmienione. Było więc rzeczą możliwą zamienić jeden pierwiastek chemiczny na drugi przez bombardowanie jego jądra. Nie tylko atom, ale nawet jego jądro okazało się podzielne i złożone z jeszcze mniejszych cząstek. Czym były te mniejsze cząstki dowiedziano się dopiero w r. 1932, kiedy to Sir James Chadwick odkrył jeszcze inny rodzaj cząsteczki wysyłanej przez bombardowane jądra lekkich atomów. Te nowe cząstki nie mia-

ły ładunku elektrycznego, były zatem elektrycznie obojętne i dlatego nazwano je neutronami. Miały one ciężar bardzo bliski ciężarowi protonów czyli jąder wodoru.

Obecnie jest rzeczą niezbitie stwierdzoną, że podstawowymi jednostkami jądra atomowego są neutrony i protony. Ilość jednostek ładunku w jądrze jest identyczna z ilością protonów zawartych w jądrze. Każdy proton zatem posiada jednostkę dodatniego ładunku elektrycznego. Ciężar atomowy jest w przybliżeniu równy sumie ilości neutronów i protonów. Już jakiś czas przed odkryciem neutronu zauważono fakt istnienia kilku odmian jądra tego samego pierwiastka. Te odmiany nazwano izotopami.

Wszystkie izotopy jednego pierwiastka posiadają jądra niosące ten sam ładunek jądrowy, ponieważ ten właśnie ładunek tj. jego wielkość określa chemiczne własności pierwiastka. Natomiast izotopy różnią się ciężarem atomowym. Zgodnie z naszymi obecnymi pojęciami wszystkie izotopy mają tę samą ilość protonów w jądrze a tylko ilość neutronów jest różna dla różnych izotopów.

Odkrycie izotopów dało wytłumaczenie faktu, dlaczego pewne pierwiastki chemiczne mają ciężary atomowe, które nie są liczbami całkowitymi. Na przykład, znaleziono, że pierwiastek chlor składa się z dwóch izotopów o ciężarach atomowych 35 i 37 i znajdujących się w chlorze naturalnym w proporcji 3:1. To daje w rezultacie ciężar atomowy naturalnego chloru 35,5.

Nieomal każdy pierwiastek chemiczny okazał się złożonym z kilku izotopów. Nawet wodór ma dwa izotopy, jeden o ciężarze atomowym 1 i jeden o ciężarze atomowym 2. Niemniej jednak ten ostatni, zwany ciężkim

wodorem lub deuterium, istnieje jedynie w niezmiernie małych ilościach, mianowicie 1 część na 5.000 części naturalnego wodoru. Niektóre pierwiastki mają bardzo wiele izotopów np. cyna ma ich 10. Gdy określono ciężary poszczególnych izotopów, znaleziono, że wyniki były znacznie bardziej zbliżone do liczb całkowitych, niż zwyczajne chemiczne ciężary atomowe, jednak i izotopy nie były dokładnie liczbami całkowitymi. Powiedzieliśmy poprzednio, że jądra atomowe składają się z protonów i neutronów. Protony i neutrony, albo krótko: cząstki jądra, są zespolone przez największe dotychczas znane siły. Te siły są około miliona razy większe od sił elektrycznych, które utrzymują elektrony w atomie. Te znow są większe od sił chemicznych, które utrzymują atomy w drobinie. Siły chemiczne z kolei są wielokroć silniejsze od sił sprężystych przyciągania wewnętrznego, które spajają np. kawałek stali, a każdy wie jak trudno jest taki kawałek stali rozerwać na części. Istnieje bardzo wygodna metoda pomiaru natężenia sił atomowych. Opiera się ona na teorii Einsteina o równorzędności masy i energii. Ta teoria, która jest tylko częścią powszechnie uznawanej teorii względności, podaje, że jeden gram masy odpowiada olbrzymiej ilości energii, mianowicie około 25 milionów kilowatogodzin. Jest to wydajność bardzo dużej siłowni elektrycznej, jak np. dzienna wydajność *Boulder Dam*.<sup>1)</sup>

Stosowanie teorii Einsteina do budowy jąder atomowych stoi w związku z faktem, że ciężary atomowe nie

<sup>1)</sup> Zapora Boulder została zbudowana na Czerwonym Kenionie albo na tzw. Boulder Kenionie rzeki Colorado w jej górnym biegu. Przeciętna moc stałego obciążenia około 600,000 Koni Mechanicznych. (Przyp. tłumacza)

są dokładnie liczbami całkowitymi. Ściślej biorąc, jądro tlenu, które zawiera osiem protonów i osiem neutronów, waży prawie 1% mniej niż wspomniane protony i neutrony zważone osobno. Według teorii względności Einsteina znaczy to, że jądro tlenu zawiera mniej energii niż pojedyncze protony i neutrony, w gruncie rzeczy znacznie mniej energii, ponieważ równoważnik energii, odpowiadający nawet drobnej ilości masy jest olbrzymi. Ponieważ jądro tlenu zawiera mniej energii, należy zatem dodać energii, aby je rozbić na protony i neutrony. Rozbite jądro tlenu na protony i neutrony nie będzie wobec tego źródłem energii atomowej, ale przeciwnie, będzie wymagało dużych ilości energii do przeprowadzenia tej reakcji. Różnica w ciężarze atomowym między jądrem a oddzielnymi protonami i neutronami, które tworzą to jądro, jest wskaźnikiem olbrzymich wymiarów sił działających w jądrze atomowym.

Wszystkie istniejące jądra mają tę samą właściwość tj. ważą mniej, aniżeli oddzielnie protony i neutrony, z których są zbudowane. Dlatego we wszystkich jądrach neutrony i protony są połączone przez działanie potężnych sił wiążących. Bardzo mało wiemy o tych siłach poza pewnym pojęciem o ich dużych wymiarach. Obecnie jest to jedna z najważniejszych i najbardziej interesujących dziedzin fizyki, mianowicie badania natury wewnętrznych sił, działających w jądrze. Jest rzeczą pewną, że nie są to siły natury elektrycznej, ponieważ siły elektryczne są z reguły o wiele słabsze, a jeszcze mniej mogą być one wytłumaczone jako siły wewnętrznego przyciągania, które są mniejsze od sił działających w jądrze o biliony bilionów razy. Postawiono wiele teorii, tłumaczących naturę wewnętrznych sił jądro-

wych, ale żadna z nich, jak dotychczas, nie była w stanie wyjaśnić wszystkich zjawisk.

Energia wywiązuje się, gdy protony i neutrony łączą się i tworzą bardziej złożone jądra. Ta zasada tłumaczy poniekąd źródło, z którego gwiazdy czerpią swoją energię. W gwiazdach rzeczywiście dwa protony i dwa neutrony łączą się, tworząc jądro helu, przy czym procesowi temu towarzyszy wydzielanie dużych ilości energii. Tego rodzaju reakcja nie odbywa się wprost, ale jedynie jako rezultat całego łańcucha reakcji, w których jądra węgla i azotu działają jako katalizatory. Na słońcu te reakcje idą w biliony jąder atomowych, reagujących w każdej sekundzie.

Rozbicie jądra atomowego może być również, przynajmniej w zasadzie, źródłem energii. Podczas gdy wszystkie jądra są lżejsze, aniżeli suma ciężarów oddzielnych neutronów i protonów, wchodzących w ich skład, cięższe jądra posiadają większy ciężar, aniżeli niektóre odłamki, na które te jądra mogą się rozpaść. Na przykład jądro radu ma większy ciężar niż suma ciężarów jąder emanacji radowej i helu. Ta różnica w ciężarze reprezentuje się cyfrą 1:20.000, ale to już wystarcza na wysyłanie cząstek alfa przez rad.

Jądro uranu zawierające 238 jednostek jądrowych, posiada nieco większy ciężar niż dwa jądra cyny, każde zawierające 119 jednostek. Różnica wag w tym przypadku wynosi jedną tysięczną albo jedną dziesiątą procentu — co jest poważną pozycją. Dlatego, jeżeli istniałby mechanizm rozbicia jądra uranu na dwa jądra o ciężarze atomowym około 100, wówczas tego rodzaju rozpad wywiązałby niewątpliwie poważne ilości energii. Później poznamy, że to jest dokładnie to samo zjawisko,

które towarzyszy rozbijaniu jąder atomowych, ale musimy najpierw przedyskutować inne zagadnienia, zanim przejdziemy do problemu rozpadu.

Budowę atomu zbadano przez zamianę jednego jądra na drugie. Pierwszym tego przykładem było doświadczenie Rutherforda, przekształcające azot w tlen, drogą bombardowania azotu cząsteczkami alfa. Zaobserwowano paręset takich jądrowych transformacji, przeważną część z nich w r. 1930. Są one podobne do reakcji chemicznych, gdzie jądra atomowe odgrywają rolę drobin a protony i neutrony — rolę atomów. Jądra zmieniają swój charakter w reakcji międzyjądrowej, ale całkowita liczba neutronów i całkowita liczba protonów pozostaje zawsze niezmienniona.

Reakcja jądrowa odbywa się przez ścisłe zetknięcie się obu reagujących jąder atomowych. Jedno z nich jest zwykle bardzo lekkim jądrem, takim jak jądro lekkiego albo ciężkiego wodoru lub jądro helu, albo wreszcie może to być i proton. Jeżeli używamy do tego celu naładowanej cząsteczki (jądra wodoru lub helu) możemy natrafić na trudności, ponieważ oba jądra, które mamy zbliżyć do siebie, posiadają dodatni ładunek elektryczności. Jest rzeczą powszechnie znaną, że dwa dodatnie ładunki elektryczności odpychają się wzajemnie i te siły odpychające stają się bardzo wielkie na krótkich odległościach, na które musimy zbliżyć jądra. Aby zetknąć dodatnio naładowaną cząsteczkę z jądrem atomowym jest rzeczą konieczną nadać dodatnio naładowanej cząsteczce bardzo dużą szybkość początkową. Wówczas ta szybkość może doprowadzić tę cząsteczkę do jądra, pomimo istnienia bardzo dużych sił odpychających. To jest powodem, dla czego badania atomowe wymagają

dużej aparatury, a to w celu nadawania cząsteczkom wielkich szybkości. Pierwszy tego rodzaju aparat został pomyślnie rozwiązany i zbudowany przez Cockcrofta i Waltona w Laboratorium Cavendisha. Obecnie cyklotron, skonstruowany po raz pierwszy przez E. O. Lawrence w Kalifornii i generator elektrostatyczny zbudowany po raz pierwszy przez Van de Graaffa w *Massachusetts Institute of Technology* są najbardziej upowszechnionymi typami. Są one w stanie nadać protonowi albo innej naładowanej cząsteczce energię, odpowiadającą różnicy potencjałów kilku milionów woltów, a taka energia jest wystarczająca do rozbicia nawet najcięższych, znanych jąder atomowych tj. jąder zaopatrzonych w bardzo duży dodatni ładunek i dlatego posiadających bardzo duże siły odpychające. Neutron jako pocisk specjalnie nadawał się do wywoływania wszelkiego rodzaju zmian wewnętrzno-atomowych. Powodem tego był brak ładunku elektrycznego neutronu i w konsekwencji możliwość łatwego zbliżania się do jąder atomowych, bez przeciwdziałania sił odpychających. Z tego powodu neutrony nie muszą posiadać dużej energii początkowej; właściwie bardzo wolno poruszające się neutrony są często skuteczniejsze od szybkich neutronów. Włoski fizyk Fermi i jego współpracownicy przeprowadzili znakomite badania reakcji jądrowych, wywołanych przez działania neutronów. Jest tylko jeden moment, który utrudnia stosowanie neutronów. Neutrony nie istnieją w stanie wolnym w przyrodzie, jak atomy wodoru czy helu. W miejsce tego, one same muszą wytworzyć się w reakcji jądrowej, a ilość, którą można wyprodukować w zwyczajnej reakcji jądrowej jest ściśle ograniczona.

Jest jeszcze jedna ważna różnica między neutronami, a naładowanymi cząsteczkami jądra, która dotyczy mechanizmu ich przechodzenia przez materię. Naładowane cząsteczki są podatne na działanie sił elektrycznych, jeżeli nawet nie nastąpi zderzenie z jądrem, a tylko przejście przez atom. Sa one łatwo odchylane z kierunku ruchu i mogą przyśpieszać, przez działanie własnych sił elektrycznych, elektrony i w ten sposób doprowadzić do wyrzucenia ich z atomu. To wyrzucenie zużywa energię i prowadzi do zmniejszenia szybkości naładowanych cząstek jądra. Dlatego każda naładowana cząsteczka jądra traci szybko swą energię, gdy przechodzi przez materię. Najszybsze cząsteczki, które kiedykolwiek wyprodukowano, mogą przebić tylko ułamek milimetra ciała stałego.

Neutrony, przeciwnie, nie są czule na żadne siły elektryczne i dlatego nie mogą być odchylane z kierunku ruchu, ani nie mogą wyrzucać elektronów z atomów. Jedyne zjawisko, które może się zdarzyć przy stosowaniu ich, to jest proste zderzenie z jądrami atomowymi. Ponieważ jądra atomowe posiadają znikomo małe wymiary, neutron może odbyć dość długą drogę zanim zderzy się z jądrami. Dla większości ciał stałych ta odległość wynosi od 1 do 4 cali.

Wobec tego naładowane cząsteczki jądrowe, jeżeli nawet mają dużą energię początkową, tracą ją bardzo szybko, a tym samym tracą zdolność wywoływania reakcji jądrowych. Natomiast neutrony zderzają się wyłącznie z jądrami atomowymi i każdy neutron wywoła taką lub inną reakcję, a w najprostszym przypadku zostanie zaabsorbowany przez istniejące jądro.

Specjalnie interesującym rezultatem studiów przemian wewnętrzno-atomowych było wytworzenie nowych radioaktywnych jąder, znanych jako sztucznie radioaktywne jądra, odkryte po raz pierwszy przez francuską parę Joliot. Wszystkie sztucznie radioaktywne jądra wysyłają promienie beta czyli zwyczajne ujemne elektrony, albo tak zwane dodatnie elektrony, które pod każdym względem są podobne do ujemnych, a tylko posiadają dodatnią jednostkę ładunku elektrycznego zamiast ujemnej. Odkryto około 200 takich radioaktywnych jąder i znaleziono, że prawie każdy chemiczny pierwiastek ma przynajmniej dwa, a często więcej izotopów, które posiadają własności radioaktywne. Tak na przykład węgiel, który w przyrodzie ma dwa izotopy o ciężarze atomowym 12 i 13, posiada również trzy radioaktywne izotopy; jeden o ciężarze atomowym 10, jeden o ciężarze atomowym 11, obydwaj wysyłają dodatnie elektrony i jeden o ciężarze 14, wysyłający ujemne elektrony. Ogólnie, ciężary atomowe radioaktywnych izotopów rozmieszczają się po obu stronach naturalnych, trwałych izotopów. Nawet pierwiastki, które nie mają w ogóle trwałych izotopów (liczba atomowa 43, 61, 85 i 87, jak wyżej wspomniano) posiadają radioaktywne izotopy, które wyprodukowano i zbadano.

W radioaktywnej przemianie beta nie dzieje się nic innego jak tylko przemiana protonu jądrowego w neutron, przy czym dodatni ładunek uchodzi w postaci dodatniego elektronu. Albo odwrotnie, neutron zamienia się w proton i jednostka ujemnego ładunku elektrycznego jest wysyłana w postaci zwyczajnego elektronu.

Poza naukowym znaczeniem, jądra radioaktywne znalazły zastosowanie przy śledzeniu losów pierwiast-

ków chemicznych w reakcjach chemicznych albo w procesach biologicznych. Niezmiernie łatwo jest wykryć radioaktywność przy pomocy odpowiedniego aparatu elektrycznego i radioaktywne atomy będą się zachowywały pod każdym względem, jak atomy zwyczajnych izotopów — z wyjątkiem radioaktywności. Stosowanie zatem radioaktywnych izotopów ogranicza się po prostu do czegoś w rodzaju zaopatrzenia atomów w znaki rozpoznawcze i następnie poddania ich zwyczajnym chemicznym reakcjom. Wszystkie reakcje wewnątrzno-atomowe zbadane do r. 1938 miały jedną wspólną cechę: nie tylko cząsteczka zapoczątkowująca reakcję była mała (neutron, proton, albo jądro ciężkiego wodoru lub helu, mające ciężar atomowy najwyżej 4), ale także cząsteczka wytworzona w czasie reakcji była zawsze mała i miała również ciężar atomowy nie przekraczający czterech. Cała reszta cząstek jądrowych pozostawała w drugim jądrze, wytworzonym przez reakcję.

Obraz ten zmienił się po raz pierwszy w roku 1938. Jądro uranu zostało rozbite na dwie prawie równe części. Dokonał tego po raz pierwszy niemiecki chemik Otto Hahn i otrzymał za to odkrycie nagrodę Nobla za rok 1945. Kolejne naukowe ulepszenia następowały bardzo szybko. Pokazano, że jądro uranu można rozbić w rozmaity sposób, jednak w każdym przypadku tak, że ciężary obu części były w przybliżeniu równe.

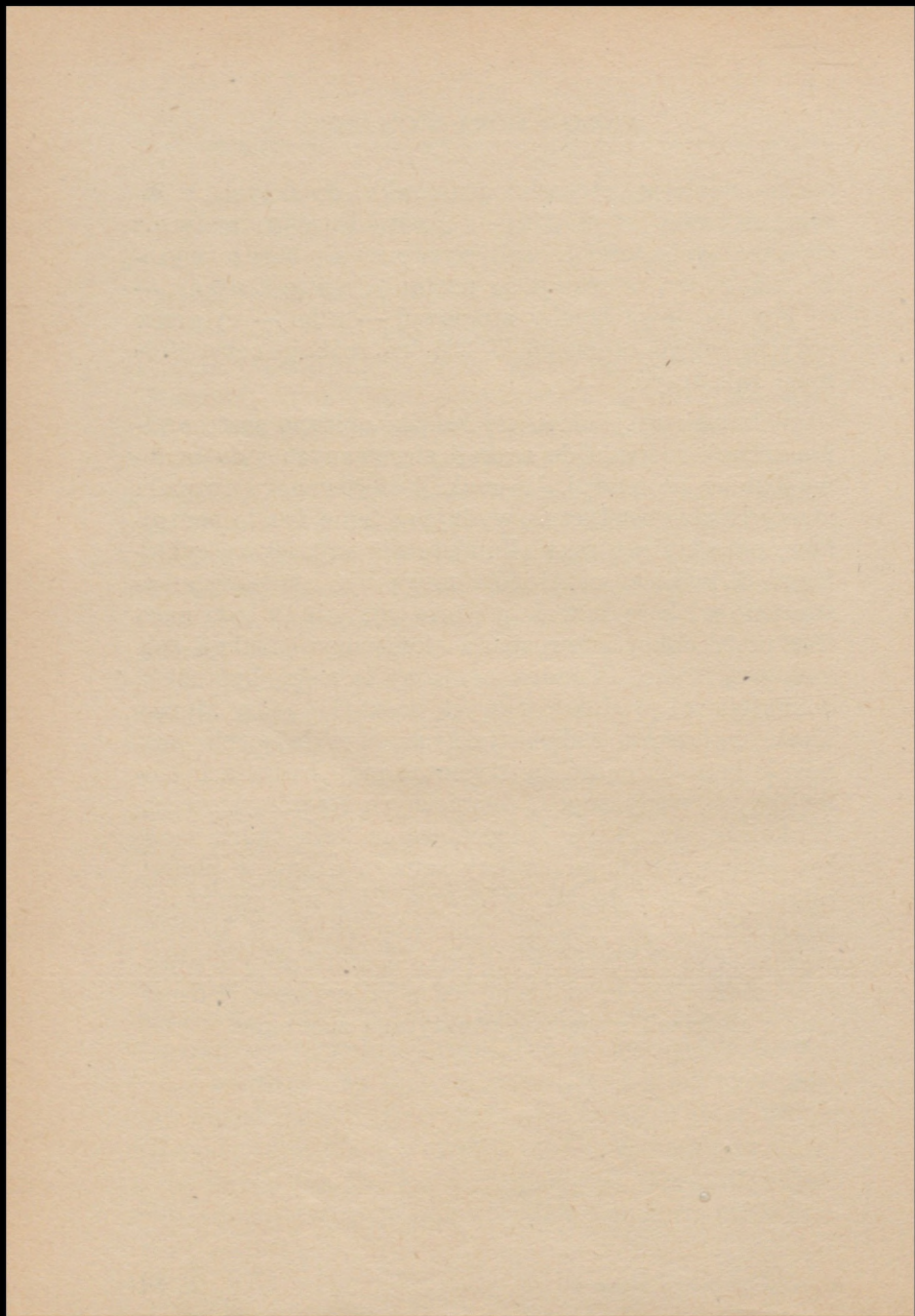
Gdy tylko odkryto zjawisko rozpadu atomowego fizycy byli w stanie obliczyć energię wywiązaną przez ten proces stosując teorię Einsteina. Jeżeli jądro uranu jest około 0.1% cięższe od sumy obu produktów rozpadu, odpowiada to, jak widzieliśmy poprzednio, olbrzymiej ilości energii. Ta energia została zmierzona niez-

leźnie, drogą bezpośrednich eksperymentów i teoria Einsteina potwierdziła się. Sprawdzenie tej teorii otrzymano poprzednio w wielu wypadkach drogą obserwacji zwyczajnych przemian jąder atomowych.

Z naukowego punktu widzenia, fakt rozbicia atomu na dwie prawie równe części nadał doniosłe znaczenie rozpadowi atomowemu, jakkolwiek, z praktycznego punktu widzenia, najbardziej interesującą cechą rozpadu jest fakt, że proces ten jest wywołany przez bombardowanie jąder uranu neutronami, oraz, że w ciągu tego procesu same neutrony z powrotem odtwarzają się. Przeciętna ilość neutronów wytwarzanych podczas każdego pojedynczego rozpadu jest większa od 1, dlatego ta reakcja daje podstawę pod reakcję łańcuchową — jądrową. Jeżeli weźmiemy pod uwagę blok uranu 235 t.j. izotopu, który poddamy procesowi rozbijania przez powolne neutrony — mogą zajść następujące wypadki. Neutron wysłany przez jakiegokolwiek źródło pada na jądro uranu i powoduje jego rozpad. Przyjmijmy, że dwa nowe neutrony tworzą się w tej reakcji. Założmy również, że blok uranu jest dostatecznie duży, aby zapobiec uchodzeniu zeń neutronów i że neutrony nie wywołują żadnej innej reakcji w U 235. Każdy zatem z tych dwóch neutronów spowoduje rozpad. W każdym z tych rozpadów wytworzą się powtórnie po dwa neutrony i w rezultacie cztery neutrony będą brały udział w następnej reakcji rozpadu. Ten proces będzie postępował naprzód i za każdym razem ilość neutronów będzie się podwajała. Przy każdym rozpadzie duże ilości energii uwalniają się w jądrze uranu. W końcu reakcja ta zatrzyma się na skutek zajścia jednej z następujących sytuacji: a) przez sterowanie z zewnątrz, które ma

zastosowanie w „stosach“ neutronów, opisanych w innym artykule tej książki, b) z powodu nagromadzenia się znacznych ilości energii wytworzy się bardzo wysokie ciśnienie i w rezultacie nastąpi eksplozja uranu — co jest podstawą bomby atomowej — albo — c) przez zużycie całego obecnego U 235, co reakcję oczywiście musi zakończyć.

W innych artykułach tej książki opisano zastosowanie reakcji rozpadu do reakcji sterowanych i do budowy bomby atomowej. W reakcji sterowanego rozpadu mamy bardzo elastyczne, wydajne i tanie źródło neutronów, parę tysięcy razy silniejsze niż największy cyklotron. Własności neutronów mogą być studiowane ze znacznie większą łatwością i precyzją, niż to było możliwe przed odkryciem rozpadu atomowego i reakcji łańcuchowej uranu. Ponadto, neutrony te mogą być użyte do ilościowej produkcji nowych rodzajów jąder atomowych, zwłaszcza radioaktywnych, wysyłających promienie beta. Te jądra są użyteczne przy badaniach biologicznych, medycznych, chemicznych i przemysłowych. W końcu, sterowana łańcuchowa reakcja jądra może być stosowana do przemiany samego uranu w pluton, pierwiastek o ładunku jądrowym 94 i nie spotykany poprzednio w przyrodzie. Tak więc nareszcie spełniły się marzenia alchemików nie tylko w teorii ale i w praktyce: można zatem zmieniać jeden pierwiastek w drugi i to w ilościach mających praktyczne znaczenie.



R. E. Peierls

## PRODUKCJA PALIW ATOMOWYCH PRZEZ ROZDZIAŁ IZOTOPÓW

1. IZOTOPY. Chemicy znali pojęcie „ciężaru atomowego“ wiele lat przed udowodnieniem przez fizyków, że atomy rzeczywiście istnieją. Wiedzieli oni, że np. waga sodu, który połączywszy się z gramem chloru da nam chlorek sodu (czyli zwyczajną sól kuchenną), jest 23 razy większa od wagi wodoru, który po połączeniu także z jednym gramem chloru da nam kwas solny.

Dziś wiemy już dlaczego tak jest; w pierwszym wypadku każdy atom chloru dołącza się do jednego atomu sodu; w drugim wypadku do jednego atomu wodoru; a atom sodu waży 23 razy tyle, co atom wodoru. Porównując w ten sposób wagi innych pierwiastków w różnych związkach chemicznych, można było porównać wagi atomów wszystkich znanych nam pierwiastków z wagą najlżejszego atomu, którym jest atom wodoru. Zauważono wtedy ciekawą rzecz, a mianowicie, że ciężar różnych atomów był prawie dokładnie równy pewnej całkowitej ilości atomów wodoru (tzn. nie jest ułamkową lecz całkowitą wielokrotnością ciężaru atomu wodoru; np. ciężar atomu sodu jest prawie dokładnie równy ciężarowi 23 atomów wodoru). Wobec tego logiczne było przypuszczenie, że atomy wszystkich pierwiastków są zbudowane z atomów wodorowych.

Badania Rutherforda i jego uczniów wykazały jednak, że sprawy nie przedstawiają się tak całkiem prosto. Badania te dowiodły, że najcięższą częścią atomu jest jego bardzo mały środek, tzw. jądro, które posiada dodatni ładunek elektryczny. Dzięki temu dodatniemu ładunkowi jądro przyciąga ujemne elektrycznie elektrony. I tak, jądro atomu wodoru posiada dodatni ładunek równy ładunkowi jednego elektronu (ale oczywiście przeciwnego znaku). Wobec tego ładunek jednego elektronu wystarcza do zneutralizowania ładunku jądra — toteż jądro wodoru i jeden elektron tworzą razem atom, którego suma ładunków jest równa zeru. Atom wodoru nie wywiera żadnego przyciągania. W atomie sodu jądro obdarzone jest dodatnim ładunkiem, równym ładunkowi jedenastu elektronów (ale o przeciwnym znaku), tak że potrzeba jedenastu elektronów, by go zneutralizować. Wielkość ładunku jądra nazywamy także „liczbą atomową“. Liczba atomowa wodoru równa jest zatem jedyńce, a sodu wynosi 11. Liczba atomowa określa chemiczne właściwości pierwiastka, dlatego że wszystkie procesy chemiczne polegają na zmianach ułożenia i zmianach ruchu elektronów w wewnętrznych przestrzeniach atomu. Tu należy podkreślić, że każdy mały ośrodek, obdarzony dodatnim ładunkiem równym ładunkowi 11 elektronów, zgromadzi wokół siebie 11 elektronów, gdyż tyle będzie potrzeba do zneutralizowania tego ładunku, po czym cały ten ustrój pod względem chemicznym będzie zachowywał się tak jak atom sodu, bez względu na to ile waży i jak jest zbudowany jego środek (jądro).

Teraz uderza nas prosty wniosek; jądro atomu sodu nie może się składać z samych jąder wodorowych (zwa-

nych protonami) gdyż waży tyle co 23 protony, a posiada ładunek równy ładunkowi zaledwie 11 protonów.

Odpowiedź dało odkrycie przez Chadwicka tzw. neutronu, który waży mniej więcej tyle samo, co proton, ale nie posiada ładunku elektrycznego. Stało się wówczas jasne, że jądro atomu sodu składa się z 11 protonów i dwunastu neutronów.

Odkrycie to równocześnie wyjaśniło istotę „izotopów”. Jak wiadomo, nie wszystkie pierwiastki mają ciężar atomowy równy całkowitej wielokrotności ciężaru atomowego wodoru. Opierając się na tej przesłance oraz korzystając z pewnych zjawisk związanych z promieniotwórczością, Soddy wpadł na pomysł, że przypuszczalnie atomy tego samego pierwiastka nie muszą być wszystkie jednakowe, ale że są i takie, które różnią się od ogółu swym ciężarem, mimo że ich własności chemiczne są identyczne. Takie atomy nazwał Soddy „izotopami”.

Z poprzednich rozważań jasne jest, że atomy jednego pierwiastka mogą mieć różne ciężary, byle ilość ładunku była ta sama. Gdy będą miały ten sam ładunek, otaczać ich będzie tyle samo elektronów, poruszających się w ten sam sposób, a ponieważ elektrony decydują o chemicznych właściwościach, atomy będą podlegały tym samym prawom chemicznym w zetknięciu z innymi pierwiastkami. Ponieważ wiemy dalej, że jądro składa się z neutronów i protonów, jasne teraz jest, że izotopy tego samego pierwiastka mają jądra zbudowane z tej samej ilości protonów, ale różnią się ilością neutronów.

Istnienie izotopów potwierdził definitywnie Aston przy pomocy swego „spektrografu masowego”. Zasadę tego przyrządu można w przybliżeniu opisać następująco: w zwyczajnym gazie atomy lub cząsteczki (cząsteczka = kilka atomów razem), poruszają się w chaotyczny sposób, gdyż ustawicznie zderzają się ze sobą. Jeżeli w zamkniętej rurze zmniejszymy ilość gazu przez wypompowanie, pozostałe atomy będą rzadziej spotykać się ze sobą, zderzenia staną się rzadsze i atomy poruszać się będą po prostych odcinkach o większej długości. Można tak silnie wypompować rurę, że pozostałe atomy będą się zderzać bardzo rzadko i każdy atom będzie miał szansę przebiegnięcia całej rury bez przeszkód.

Jeżeli teraz przez tę rurę przepuścimy prąd elektryczny (w podobny sposób jak w rurkach reklam neonowych, które są jednakże mniej opróżnione), rozpędzi to atomy, które będą się tak silnie zderzać ze sobą lub z luźnymi elektronami, że stracą przez to jeden lub więcej elektronów. Po takiej utracie elektronu staną się elektrycznie dodatnimi, gdyż ilość pozostałych elektronów będzie mniejsza od dodatniego ładunku jądra. Tak zmienione atomy nazywamy „jonami”. Jeżeli teraz w rurze umieścimy blaszki metalowe, czyli tzw. elektrody i naładujemy je elektrycznie, dodatnie jony będą przyciągane przez ujemne elektrody a odpychane przez dodatnie elektrody. Drogi jonów ulegną teraz zmianie, zamiast poruszać się po liniach prostych, będą biec po liniach krzywych, nachylonych ku elektrodzie ujemnej.

Porównajmy teraz dwa atomy o różnym ciężarze, które straciły po jednym elektronie i są wobec tego jednakowo naładowane dodatnio. Założmy dalej, że biegną w tym samym kierunku i z tą samą szybkością. Naładowana ujemnie elektroda będzie je przyciągać z tą samą

siłą, ale z powodu różnych ciężarów, a zatem różnej bezwładności, ta sama siła bardziej wpłynie na lżejszy atom, a mniej na cięższy. Cięższy atom zmieni więc swój tor mniej, niż lżejszy atom. Sprawa wygląda, obrazowo biorąc, w ten sposób, jak gdybyśmy rzucali drewnianą i papierową kulę o tej samej średnicy przeciw silnemu wiatrowi. Siła wywierana przez wiatr na obie kulki będzie taka sama (równe średnice) ale jej wpływ na tor kulki ciężkiej będzie mniejszy; kulka drewniana (cięższa) poleci dalej gdyż jej bezwładność w porównaniu z kulką papierową jest większa.

Jeżeli teraz ustawimy w rurze szereg szczelin, tak by uzyskać strumień jonów, idących początkowo prosto przez wszystkie szczeliny, a następnie poddamy je wpływowi elektrody, ugrupują się one stosownie do swych mas, przy czym cięższe jony odchylają się mniej od prostej, niż jony lekkie.

W rzeczywistości, zadanie nasze jest bardziej skomplikowane, gdyż nie możemy w prosty sposób nadać wszystkim jonom tej samej szybkości początkowej. Szybciej biegnące jony zostaną mniej odchylone niż wolniejsze i przez to różnica między ciężkimi i lekkimi jonami mogłaby się zatrzeć. Aby przezwyciężyć tę trudność w rzeczywistym spektrografie używamy płytek naładowanych elektrycznie, które odchylają tory jonów a następnie działamy na jony magnesem. Magnes daje pole magnetyczne, które również powoduje odchylenie się torów jonów, a to dlatego, że biegnące jony zachowują się jak prąd elektryczny, a magnes działa na prąd elektryczny (w taki sam sposób, w jaki działa na prąd płynący w wirnikach motorów elektrycznych, w polu magnetycznym magnesów).

Wielkość odchylenia pod wpływem działania magnesu zależy od szybkości jonu. Jeżeli teraz tak skonstruujemy naszą rurę, by odchylenie pod wpływem naładowanych płytek było w kierunku poziomym, a odchylenie pod wpływem magnesu w kierunku pionowym, z obserwacji poziomego i pionowego odchylenia jonów po przebiegnięciu rury możemy wyliczyć szybkość i masę jonu. Dla zapisywania odchylenia używamy kliszy fotograficznej, ustawionej na końcu toru biegnących jonów. Gdy doświadczenie potrwa dość długi czas, wielka ilość jonów uderzy w kliszę i spowoduje jej poczerzenie w tych miejscach gdzie uderzały jony. Mierząc rozłożenie tych zaczerwień, możemy obliczyć masę i szybkość jonów, które to zaczerwienie wywołały a z intensywności zaczerwienia możemy wnioskować o ilości jonów o jednej masie. Znamy dziś czulsze sposoby mierzenia jonów, ale nie będziemy się teraz nad tym rozwodzić (patrz fotografie 7, 9).

Przy pomocy swego spektrografu (skontruowanego na podobnych, ale bardziej zawitych przesłankach) Aston wykazał, że większość znanych pierwiastków posiada izotopy o różnych masach. Masa każdego izotopu prawie dokładnie równa się wielokrotności masy atomu wodoru. W istocie masy są zawsze nieco mniejsze niż wielokrotność masy atomu wodoru. Nie będziemy się teraz zagłębiać w dociekanie na temat tego „niedoboru masy“.

Przy pomocy opisanych wyżej metod ustalono, że uran, którym zajmujemy się szczegółowo, jest mieszaniną trzech rodzajów atomów: najliczniej występujących atomów o wadze 238 oraz nielicznych atomów o wadze 235, (których przypada jeden atom na 140 atomów uranowych) i jeszcze rzadziej występujących atomów o wa-

dze 234 (których przypada jeden atom na mniej więcej 14.000 atomów uranu).

Jak wyjaśniliśmy w rozdziale I, izotop 235 jest szczególnie wartościowy jako źródło energii atomowej.

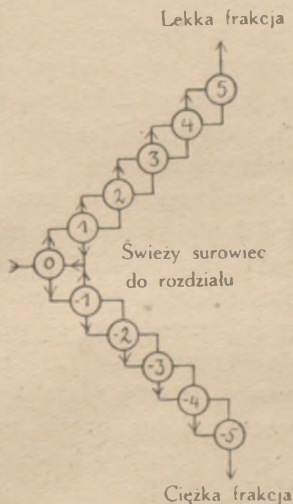
2. NASZE ZADANIE. Pytamy się zatem, w jaki sposób oddzielić uran 235 od reszty uranu. Aby zrozumieć w pełni ten problem, spróbujmy posłużyć się porównaniem. Wyobraźmy sobie, że mamy sklep, pełen piłek tenisowych o dokładnie tej samej wielkości. Bardzo mała ich ilość, mniej niż jeden procent, waży nieco mniej, przy czym ciężar lekkiej piłki ma się do ciężkiej, jak 99 do 100. Mamy teraz za zadanie wysortować lżejsze piłki. Naturalnie, w wypadku piłek, zważylibyśmy każdą piłkę na wadze i odłożyli lżejsze osobno. Ale to znaczy, że musielibyśmy każdą piłkę wziąć do ręki — tak można zrobić z piłkami, ale nie z atomami. Najlepszym z kolei sposobem byłoby postąpić tak, jak się odsiewa zboże od plew, tzn. przez wyrzucenie piłek pod wiatr w taki sposób, by tarcie powietrza odegrało rolę separatora — lżejsze piłki, na które opór będzie miał większy wpływ, upadną w innym miejscu niż cięższe. Jeżeli w ten sposób chcemy rozdzielić nasze piłki, to musimy obmyśleć jakiś bardzo dokładny przyrząd do ich wyrzucania z idealnie jednakową szybkością, gdyż nie możemy w żadnym wypadku liczyć na więcej niż 1 procent różnicy w drogach, które piłki odbędą. W dodatku mamy o tyle więcej piłek ciężkich niż lekkich, że nawet mała niedokładność przyrządu spowoduje tak duży rozrzut ciężkich piłek, że rozłożywszy się na dużej przestrzeni zasypią także przestrzeń, gdzie spadną nieliczne lekkie piłki. Jeżeli jednak potrafimy uzyskać tę dokładność rzucania, takie rozwiązanie problemu jest możliwe i wła-

śnie takiego sposobu użyto w jednej z metod rozdzielania izotopów uranu. Przypomnijmy sobie opis spektrografu masowego; w zasadzie jest to właśnie taki przyrząd do rozdzielania izotopów. W tym jednak wykonaniu, jakiego użył Aston, spektrograf może rozdzielić tylko znikome ilości materiału. Uważano za wielki sukces, gdy Oliphant wraz ze współpracownikami uzyskał w spektrografie masowym takie ilości izotopu, które wprawdzie nie poczerśniły kliszy fotograficznej, ale już pozwoliły na zbadania właściwości fizykalnych, przez przepuszczenie przez tę znikomą ilość strumienia szybkich cząsteczek. Takiej ilości izotopu, mimo długiego czasu, potrzebnego na zebranie, nie można było nawet zważyć. My chcemy oddzielić ilości rzędu kilogramów, tzn. miliardy razy więcej od tych ilości, które mogliśmy odseparować w laboratoryjnych spektrografach. Oczywiście jest, że aby uzyskać jakikolwiek wynik praktyczny należało zbudować przyrządy znacznie różniące się od laboratoryjnego spektrografu masowego, chociaż oparte na tych samych zasadach.

Nie jest to jednak jedyna metoda, jaką możemy się posłużyć. Powróćmy do przykładu piłek tenisowych. Rozdzielmy je najpierw na dwie części przy pomocy przyrządu tak skonstruowanego, by faworyzował lekkie piłki. Na przykład wsypmy piłki do skrzyni i potrząsamy skrzynią przez długi czas. W ten sposób po pewnym czasie w górnej części skrzyni znajdzie się więcej lekkich piłek niż w dolnej. Nie byłoby jednak logiczne przedłużać nadmiernie czasu potrząsania w nadziei, że w s z y s t k i e lekkie piłki znajdą się w górnej partii piłek. Przez potrząsanie bowiem nie tylko oddzielamy piłki

ale też i mieszamy je. Zabierzmy natomiast górną połowę piłek, wysypmy do innej skrzyni i potrząsajmy je znowu. Po pewnym czasie w tej drugiej mniejszej skrzyni zbierze się więcej lekkich piłek w górnej części. Przez powtórzenie tej procedury moglibyśmy wreszcie doprowadzić do tego, że cała górna połowa np. setnej z kolei skrzynki będzie zawierać same lekkie piłki. Może nam się wydawać na pierwszy rzut oka, że rzeczywiście wystarczy zbieranie tylko górnej połowy piłek, by uzyskać wynik. Innymi słowy, zaczawszy na przykład od 10.000 piłek, zabraliśmy z pierwszej do drugiej skrzyni górne 5.000 piłek, z drugiej do trzeciej skrzyni górne 2.500, 1.250 piłek z trzeciej do czwartej skrzyni, 650 z czwartej do piątej itd. Jasne jest jednak, że w ten sposób gwałtownie maleje ilość piłek, poddawanych kolejnemu wytrząsaniu i że w ten sposób uzyskamy bardzo małą część tych lekkich piłek, które znajdowały się w początkowych 10.000.

Sposób więc ten, chociaż teoretycznie możliwy, jest zbyt różrzutny dla celów praktycznych. Aby móc ideę zasadniczą praktycznie urzeczywistnić, musimy uciec się do fortelu, dobrze znanego chemikowi, pracującemu nad rozdziałem substancji przez destylację lub podobne procesy i musimy użyć tzw. „kaskady”.



Rys. 1

„Kaskada“ wygląda mniej więcej w ten sposób. Rozpocznijmy znowu separację 10.000 piłek, wytrząśmy je w skrzyni (oznaczonej „0“ na rys. 1) po czym oddzielmy górne 5.000 i wytrząsamy je dalej w mniejszej skrzyni (oznaczonej „1“ na rys. 1). Nie odrzucajmy jednak dolnych 5.000, które zawierają mniej lekkich piłek niż górne 5.000. Zamiast odrzucać je, wytrząsamy je w osobnej skrzyni (oznaczonej „-1“ na rys. 1). Gdy skończymy wytrząsanie tej skrzyni („-1“) górna warstwa tej uboższej w lekkie piłki skrzyni, będzie bogatszą w lekkie piłki (od jej dolnej połowy), będzie mniej więcej zawierać taki sam procent jak mieszanina, wysypała do skrzyni „0“, pierwszej z kolei. Możemy zatem górną warstwę skrzyni „-1“ wsypać z powrotem do skrzyni „0“ wraz z nową porcją naszej mieszaniny, natomiast jej dolną połowę do następnej z kolei skrzyni, oznaczonej na rys. „-2“. Przez potrząsanie możemy doprowadzić do tego, że jej górna warstwa będzie zawierać taki sam procent lekkich piłek ile zawierała partia wysypała do skrzyni „-1“ ze skrzyni „0“. Znowu możemy więc wsypać górną warstwę skrzyni „-2“ do skrzyni „-1“ wraz z dolną partią ze skrzyni „0“. Teraz zaczynamy rozumieć zasadę kaskady. Jej schemat podaje rysunek 1. Każde kółko przedstawia jedną skrzynię czyli „stopień“. Poziome strzałki przedstawiają materiał, który wehodzi do stopnia; „lekką frakcję“, którą odprowadzamy ze stopnia, przedstawia strzałka, skierowana w górę, „ciężką frakcję“ strzałki, skierowane w dół.

Stopień oznaczony „0“ przepuszcza świeży materiał; w stopniach 1, 2, 3 itd. materiał zawiera coraz więcej lekkiej frakcji, w stopniach -1, -2, -3 itd. coraz więcej ciężkiej frakcji.

Każdy stopień jest zasilany lekką frakcją z poprzedniego stopnia i ciężką frakcją z następnego, jako że obie te frakcje mają ten sam procentowy skład. Na przykład: zaczynając od stopnia „0” przerabiającego materiał surowy, jego lekka frakcja, odprowadzona do stopnia „1” zawiera nieco więcej lekkiej frakcji, a lekka frakcja stopnia „2” (który przerabia lekką frakcję stopnia „1”), jeszcze więcej. Ciężka frakcja ze stopnia „2” będzie w tym samym stopniu zubożona w lekki składnik, o ile wzbogaciła się w lekki składnik lekka frakcja stopnia „2”, tzn. wróci do tego samego składu procentowego, co materiał zasilający stopień „1” ze stopnia „0” — będziemy więc mogli ciężką frakcję ze stopnia „2” wprowadzić wraz z lekką frakcją ze stopnia „0” do stopnia „1”. Sprawa będzie się przedstawiać identycznie w dalszych stopniach. Nasz schemat (na rys. 1.) przedstawia kaskadę, złożoną z 5 stopni w górę i 5 stopni w dół — ale nie stoi na przeszkodzie rozbudowy tego schematu do tylu stopni, ile nam potrzeba. Z najwyższego stopnia otrzymujemy lekki składnik o żądanej czystości, z najniższego stopnia odprowadzamy materiał, prawie zupełnie pozbawiony lekkiego składnika. Jeżeli nam na tym zależy, możemy dolne stopnie przedłużyć tak, by otrzymać czysty ciężki składnik.

Z rysunku 1 wynika także, że ilość energii zużywanej w tym procesie może być bardzo duża, gdyż w początkowych stopniach przerabiamy nie tylko świeżą porcję materiału surowego, lecz także materiał zwrócony przez inne stopnie do ponownej separacji i jeżeli mamy np. 100 stopni, ilość materiału przerabianego w pierwszym stopniu może być około 100 razy większą od świeżej porcji surowego materiału, a to dlatego, że każda „pilka

tenisowa“ może średnio biorąc powrócić 100 razy do ponownej separacji, zanim ostatecznie trafi do jednego z końcowych stopni.

Zasadę kaskady, opisaną powyżej, musimy stosować wtedy, gdy proces nie wysortuje wszystkich lekkich atomów za jednym razem (tak jak to robi spektrograf) lecz daje mieszaninę, w której ilość lekkich atomów wzrosła tylko niewiele. Jest wiele sposobów uzyskania tego małego wzbogacenia i większość tych sposobów była znana od dawna, lecz używano ich dotychczas tylko na małą skalę. W następnym paragrafie opiszemy niektóre z nich.

3. METODY ROZDZIAŁU IZOTOPÓW. Pierwszym pierwiastkiem, którego izotopy rozdzielono na skalę przemysłową, był wodór, mimo, że był jednym z ostatnich pierwiastków, w którym wykryto istnienie izotopów. Urey i jego współpracownicy dowiedli, że oprócz zwyczajnego wodoru o ciężarze atomowym 1, (którego używamy jako wzorca do porównania ciężaru atomów innych pierwiastków), istnieje bardzo rzadki izotop o ciężarze 2. W zwyczajnym wodorze trafia się zaledwie jeden ciężki atom wodoru na 5.000 atomów o ciężarze 1, i z tego też powodu ciężki wodór pozostał niezauważony przez długi czas.

Izotopy wodoru w porównaniu z izotopami innych pierwiastków wykazują wyjątkowo dużą różnicę ciężarów, gdyż cięższy z nich waży dwa razy tyle co lżejszy. W rezultacie można zauważyć różnicę nawet w ich własnościach chemicznych i z tego też powodu mówi się o ciężkim wodorze jak gdyby o osobnym pierwiastku, zwanym „deuterium“. Wydaje się to sprzeczne z tym, cośmy powiedzieli poprzednio, a mianowicie, że

chemiczne właściwości atomu zależą tylko od ładunku jądra i że właśnie dlatego nie możemy rozróżnić izotopów na podstawie ich chemicznego zachowania się. Wyjaśnienie tej sprzeczności jest następujące: weźmy pod uwagę jakiś związek chemiczny wodoru z innym pierwiastkiem, np. 2 atomy wodoru i jeden atom tlenu, związane w jedną cząsteczkę wody. Ta cząsteczka powstała dlatego, że pomiędzy atomami wodoru i tlenu występują siły przyciągające, usiłujące ustawić atomy wodoru obok ciężkiego atomu tlenu; możemy sobie wyobrazić taką cząsteczkę, jako dużą kulkę w środku i dwie małe kulki, przyczepione do niej całkiem mocno. Nowoczesna teoria budowy atomu uczy nas jednak, że takie lekkie kulki nie chcą trwać nieruchomo stale w tym samym miejscu. Z tego samego powodu na przykład elektrony, które są bardzo lekkimi „kuleczkami“, nie zajmują żadnego ściśle określonego miejsca w atomie, (a zwłaszcza w bliskości środka atomu, mimo przyciągania elektrycznego) lecz snują się po pewnych wcale okazałych obszarach w obrębie atomu. Tę samą tendencję wykazują także rozpatrywane przez nas dwa atomy wodoru, (choć w znacznie mniejszym stopniu niż elektrony) i w rezultacie w cząsteczce wody atomy wodoru nie tkwią nieruchomo w określonych miejscach, lecz poruszają się nieznacznie tu i tam w sąsiedztwie swej pozycji równowagi. To zjawisko nazywamy zwykle „międzyatomowymi drganiami osiowymi“ dla odróżnienia od ruchu atomów, powodowanych temperaturą, zwłaszcza, że „drgania osiowe“ trwają nawet w temperaturze bezwzględnej zera (ok.  $-273^{\circ}\text{C}$ ). Ponieważ dalej zjawisko to jest wyraźniejsze dla lekkich cząstek niż dla ciężkich, wystąpi silniej w zwyczajnych atomach wodoru niż w ciężkich atomach deuterium. Toteż czą-

steczka „ciężkiej wody“ będzie się różnić od cząsteczki zwykłej wody mniejszym „drżaniem osiowym“ ciężkiego wodoru, chociaż siły chemiczne będą w obu wypadkach równe. Oznacza to dalej, że cząsteczka zwyczajnej wody jest mniej trwała i może być rozłożona na składowe atomy trochę łatwiej, niż cząsteczka ciężkiej wody. Na tej właśnie własności opiera się cały szereg metod oddzielania ciężkiej wody od zwyczajnej. Historycznie pierwszym sposobem było zastosowanie elektrolizy wody, odpowiednio dostosowanej do tego celu przez Ureya. Zauważył on, że jeżeli rozłożymy wodę na tlen i wodór prądem elektrycznym, wydzielony wodór jest nieco uboższy w ciężkie atomy deuterium, natomiast pozostała część wody zawiera ich nieco więcej. Zasadniczo można by zastosować kaskadę także i w tym wypadku, ale ponieważ surowiec jest tani (woda) i mamy go pod dostatkiem, najlepiej będzie zacząć od rozłożenia bardzo dużej ilości zwyczajnej wody, aż pozostanie drobna jej część. Ta mała ilość będzie silnie wzbogacona w deuterium i od tego stadium rozpoczniemy kaskadę. W praktyce takie resztki wody, pozostałe z dużych ilości rozłożonej wody można znaleźć w wielu zakładach przemysłowych i na wykorzystaniu tych właśnie resztek polegają metody przemysłowe otrzymywania deuterium.

Tu warto zauważyć, że właśnie te same okoliczności, które tak ułatwiają produkcję deuterium, opóźniły odkrycie tego izotopu wodoru. W pierwszych bowiem pracach zmierzających do znalezienia izotopów wodoru posługiwano się wodorem, pochodzącym z elektrolizy, a więc szczególnie ubogim w deuterium.

Pytamy się teraz, czy możemy zasadę tę wykorzystać do rozdziału izotopów innych pierwiastków, a w szcze-

gólności uranu. Długi czas poszukiwano metod chemicznych, które by pozwoliły rozdzielać izotopy uranu na podstawie małych różnic w trwałości związku, zależnie od tego, który izotop uranu wchodzi w jego skład. Nie znaleziono jednak takiej metody, jak zresztą było do przewidzenia. Jedyńą bowiem różnicę w chemicznym zachowaniu się izotopów zawdzięczamy ustawicznemu ruchowi atomów w „drżaniu osiowym“. Ruch ten maleje w miarę jak rośnie ciężar atomu. Dla uranu, którego ciężar atomowy jest 238 razy większy od ciężaru atomu wodoru, ruch ten jest bardzo słaby — w dodatku, ponieważ ciężary izotopów uranowych różnią się bardzo niewiele (3 jednostki na 238), ruch ten jest nie tylko mały, lecz także prawie jednakowy. Na dobitkę, różnice chemiczne wynikające z tego ruchu stają się zauważalne w bardzo niskich temperaturach, w których ruch osiowego drżania jest tego samego rzędu co ruch cieplny atomów. W wypadku wodoru, którego drżania osiowe są wcale pokaźne, ten warunek nie sprawia kłopotu, ale w wypadku uranu zmusiłoby to nas do użycia tak niskich temperatur, że wszystkie znane nam związki uranowe zamrzęłyby i w ogóle nie reagowałyby chemicznie.

Reasumując można powiedzieć, że chemiczne metody dają się z powodzeniem stosować do podziału izotopów lekkich pierwiastków — w miarę wzrostu ciężaru atomowego stają się coraz trudniejsze i praktycznie biorąc zawodzą już dla atomów o średnich ciężarach atomowych.

Gdy raz wyeliminowaliśmy metody chemiczne ze sposobów podziału izotopów uranu, pozostają nam metody mechaniczne. W zasadzie najprostszym wydaje się sor-

towanie atomów według ich ciężarów w podobny sposób, jak opisaliśmy sortowanie piłek tenisowych w potrząsanych skrzyniach. Możemy na przykład wyobrazić sobie wysoki słup gazowego lub płynnego związku uranowego, któremu pozwalamy stać spokojnie przez pewien czas, po czym zbieramy lekki uran z powierzchni w podobny sposób, jak zbieramy śmietankę z mleka. Nie ulega wątpliwości, że metoda ta dałaby rezultat, ale jest niepraktyczna z dwóch powodów:

Pierwszą przeszkodą jest ustawiczny ruch atomów pod wpływem ciepła, który powoduje mieszanie się atomów i niweczy efekt polegający na różnicy ciężarów. Zmusiłoby to nas do stosowania kolumn wysokich na kilka kilometrów, jeżelibyśmy chcieli uzyskać zupełny rozdział. Porównajmy zachowanie się tlenu i azotu zmieszanych w zwyczajnym powietrzu. Występują one w postaci cząsteczek, różniących się ciężarem o dwie jednostki, czyli prawie tyle co izotopy uranu. Niemniej są dalej wymieszane nawet na wysokościach 3.000 metrów — gdyby było inaczej — nie byłoby tlenu w powietrzu górskim i życie na szczytach górskich zamarłoby.

Wysokość kolumny, która by dała nam podział, zależy także od temperatury. Jeżeli oziębimy zawartość kolumny, ruch cieplny zmaleje i podział atomów nastąpi w odpowiednio niższej kolumnie. Z oziębianiem jesteśmy jednak ograniczeni — nie znamy bowiem związku uranu, który by był płynem w temperaturze niższej od pokojowej. Gazy skraplają się — jeżeli, chcąc utrzymać ich stan gazowy, obniżymy odpowiednio ciśnienie, ich zawartość w kolumnie stanie się znikoma. Gdy związek jest ciałem stałym, atomy nie mogą poruszać się swobodnie i metoda staje się niewykonalna.

Drugą przeszkodą jest to, że stosując wysokie kolumny nie tylko narażamy się na trudności praktyczne, lecz także powiększamy niepomiaralnie czas potrzebny do ustalenia się równowagi, tzn. czas potrzebny do przewędrowania lekkich atomów na szczyt kolumny i opadnięcia ciężkich na jej dno. Czas, przez który kolumna musiałaby stać w spokoju do chwili zebrania lekkich atomów z jej szczytu, musiałby być rzędu 1000 lat, co oczywiście przekreśla cały pomysł.

Sytuacja zmienia się jednak na korzyść, jeżeli zamiast siły ciężenia ziemskiego użyjemy wielokrotnie większego „sztucznego ciężenia“ w tzw. wirówkach. Wiemy wszyscey, że możemy przyspieszyć oddzielanie się śmietanki od mleka przez użycie tzw. centryfugi. Siłę ciężenia ziemskiego zastępujemy w tych maszynach „siłą odśrodkową“, która wielokrotnie przewyższa siłę ciężenia. Zakład przemysłowy do podziału izotopów, oparty na tej zasadzie, ma szanse powodzenia, toteż rozważono bardzo poważnie budowę takiego właśnie zakładu w amerykańskim projekcie atomowym. Powyższa metoda na równi z innymi, które omówimy dalej, nie jest jednak wcale łatwa, zmusza nas bowiem do użycia dużej ilości szybkich wirówek, które są maszynami precyzyjnymi i delikatnymi i wymagają dużej dokładności w ich produkcji.

Nawet w możliwie najszybszej wirówce niemożliwe jest oddzielić uran 235 w jednej operacji, wobec tego musielibyśmy użyć kilku wirówek połączonych w kaskadę (opisano poprzednio).

4. DYFUZJA I INNE METODY. Inna skuteczna metoda podziału izotopów uranu polega na przenikaniu (dyfuzji) gazu przez porowate przegrody, zwane mem-

branami. Metoda ta polega na następujących zasadach: Wiemy dobrze, że atomy i cząsteczki poruszają się ustawicznie, przy czym szybkość tego ruchu jest tym większa, im wyższa jest temperatura gazu, jako że temperatura jest efektem tego ruchu. Dla danej temperatury szybkość cząsteczki zależy od jej ciężaru, przy czym jest odwrotnie proporcjonalna do drugiego pierwiastka z masy — innymi słowy w tej samej temperaturze cząstka ważąca 4 razy tyle co lekka cząstka, będzie miała szybkość równą połowie szybkości cząstki lekkiej. Znaczy to dalej, że jeżeli pozwolimy gazowi uciec przez przeszczerń o niższym ciśnieniu lub próżnię, lekkie cząstki będą — średnio biorąc — szybsze od ciężkich i wyprzedzą je. Nie oznacza to jednak, że np. wypuszczając ścięśnione powietrze ze zbiornika przez rurkę otrzymamy więcej azotu (lżejszego) niż tlenu (cięższego). W rurce cząsteczki mają częstą okazję zderzania się i cząsteczki tlenu o mniejszej szybkości, będą popychane przez cząsteczki azotu, co z kolei spowoduje spadek szybkości azotu. W podobny sposób w zwartym tłumie idącym przez korytarz, każdy człowiek będzie szedł z tą samą szybkością, mimo, że poszczególni ludzie chcieliby iść szybciej, a inni wolniej.

. Ta większa szybkość cząstek lekkich może odegrać rolę tylko w takich warunkach, w których ruch cząstek zależy od nich samych i nie ulega zmianom na skutek zderzeń z innymi cząsteczkami. Takie właśnie warunki zachodzą przy dyfuzji gazów. W dyfuzji gaz przesiąka przez porowaty materiał, np. glinianą przegrodę, przenikając przez drobne szczeliny zwane „p o r a m i“. Objaśnienie zjawiska w tym przypadku jest następujące. Każda cząsteczka przechodząca przez „porę“, zde-

rzy się znacznie częściej ze stałym materiałem (ściana „pory“), niż z inną cząsteczką. Te zderzenia zmniejszą poważnie jej szybkość i z tego powodu szybkość przepływu gazu będzie bez porównania mniejsza, niż przy przepływie przez większe otwory, ale przeszkody, które napotyka cząstka nie są zależne od innych cząstek. Z tego też powodu będzie znacznie mniej przyśpieszania wolniejszych cząstek przez szybkie (i przeciwnie) i w rezultacie droga odbyta przez cząsteczkę będzie zależna od szybkości, właściwej dla jej ciężaru.

Metodę powyższą zastosował z powodzeniem G. Hertz do podziału izotopów rzadkiego gazu neonu. Aparatura laboratoryjna, której użył, dawała parę litrów gazu na kilka godzin. Hertz użył jako membran rur z niepolewanej porcelany w układzie kaskadowym. Izotopy neonu mają ciężary atomowe 20, 21 i 22 czyli najcięższy różni się od najlżejszego o 10% ciężaru, a ich szybkości w pewnej określonej temperaturze różnią się o 5%. Oznacza to, że w najkorzystniejszych warunkach, gdy uczynimy „pory“ tak ciasnymi, że zderzenia pomiędzy cząstkami nie będą miały żadnego wpływu na szybkość cząstek, szybkości z jakimi izotopy będą przenikać przez porowate membrany będą się różnić o 5%. Jeżeli rozpoczniemy rozdział od mieszaniny gazowej, zawierającej np. 10% lekkiego izotopu, gaz po przeniknięciu membrany będzie o 5% bogatszy w lekki izotop, czyli będzie zawierał 10,5% lekkiego izotopu. Gdy tak wzbogacony gaz przepuścimy przez następną membranę w następnym stopniu kaskady, koncentracja lekkiego składnika wzrośnie do 11% itd. Staje się zupełnie jasne, że będziemy musieli użyć wielu stopni kaskady, zanim otrzymamy praktycznie czysty izotop.

Wróćmy do uranu. W tym wypadku zadanie nasze jest jeszcze trudniejsze, gdyż wagi izotopów różnią się zaledwie ok. 1%, a więc największy wzrost koncentracji w każdym stopniu kaskady w najlepszym razie wyniesie około 0,5%. Inymi słowy, w idealnych warunkach dyfuzji liczba lekkich atomów wzrośnie po przejściu jednej membrany zaledwie 1.005 razy. Ponieważ lekkich atomów jest w naturalnym uranie zaledwie 0,7%, ogrom naszego zadania zarysowuje się w całej okazałości. Co więcej, czysty uran w normalnych warunkach nie jest gazem, lecz metalem i gdybyśmy chcieli zamienić go w gaz, musielibyśmy podgrzać go do tak wysokiej temperatury, której ani membrany ani pompy nie wytrzymałyby. Musimy zatem użyć związku chemicznego uranu. Ze znanych związków uranowych tylko jeden jest gazem w praktycznie możliwych warunkach, a mianowicie sześciofluorek uranu. Sześć atomów fluoru związane jest w tym związku z jednym atomem uranu. Ciężar cząsteczkowy tego związku wynosi 352 dla ciężkiego uranu a 349 dla lekkiego. Różnica ciężarów spada więc nawet poniżej 1%. Właściwości tego związku czynią go specjalnie trudnym do użycia. Jest on tak silnie żrący, że atakuje wiele materiałów normalnie używanych w chemicznych aparatach. To pogarsza sprawę nie tylko dlatego, że stopniowo zniszczyłoby aparaturę, ale także dlatego, że przy tym nagryzaniu sześciofluorek rozkłada się i zamiast lotnego związku uranowego występuje stały osad uranu na ścianach. Uran ten jest stracony z procesu rozdziału. Ponieważ dalej musimy użyć bardzo wielu stopni i gaz związku uranowego musi przejść je wiele razy, nie możemy pozwolić na nawet bardzo drobną stratę, gdyż nie by nam nie zostało w końcowym stadium. Co gorsza, osad uranu może wy-

stąpić w formie pyłu, który osadziwszy się w porach membran, zniszczy je. Najgorszym wrogiem sześciofluorku uranowego jest wilgoć, gdyż nie tylko rozkłada go w reakcji z nim, lecz także wchodzi z fluorem w związek, dając kwas fluorowodorowy (HF), który jest jeszcze bardziej żrącym związkiem. Wobec tego we wszystkich stopniach zakładu fabrycznego rozdzielającego uran musimy położyć specjalny nacisk na niedopuszczanie powietrza, które zawsze zawiera trochę wilgoci.

Aby zebrać gaz po przejściu przegrody i skompresować go tak, by mógł przejść przez membranę następnego stopnia, musimy użyć pomp. Pompy te muszą być specjalnej konstrukcji, gdyż jak wiemy sześciofluorek uranu atakuje materiały normalnie używane w konstrukcji pomp, a specjalnie silnie oleje i tłuszcze normalnie używane do smarowania i uszczelniania pomp. Wielkość potrzebnych pomp zależy w dużej mierze od dobroci membran, przy czym zależność ta wygląda następująco. Jak objaśniliśmy poprzednio, pory membrany muszą być tak małe, by cząsteczki zderzały się przede wszystkim ze ścianami porów, a nie wzajemnie ze sobą. Częstość zderzeń pomiędzy cząsteczkami zależy od gęstości gazu. Im gęstszy jest gaz, tym częściej zderzają się cząsteczki ze sobą i z tego powodu dla każdej membrany istnieje pewna największa gęstość gazu, dla której membrana będzie jeszcze dobrze działać. Jeżeli zrobimy lepszą membranę o drobniejszych porach, możemy pozwolić sobie na większą ilość zderzeń pomiędzy cząsteczkami, czyli na wyższe ciśnienie (i gęstość). Wielkość pompy prawie że nie zależy od ciężaru przetłaczanego gazu, lecz głównie od objętości. Jeżeli będziemy pracować przy niskim ciśnieniu, ten sam ciężar gazu

będzie miał większą objętość, a zatem zmusi nas do użycia większych pomp.

Reasumując możemy powiedzieć, że w zasadzie podział izotopów przez dyfuzję jest wcale prosty, ale względy praktyczne wymagają opracowania materiału na membrany, materiału na części konstrukcyjne, specjalnych smarów i uszczelnień odpornych na działanie żrące fluoru; wymagają budowy aparatury, zawierającej pompy, zupełnie szczelnie oddzielonej od powietrza atmosferycznego, oraz specjalnego sterowania przepływu gazu przez te wszystkie liczne stopnie kaskady. Te względy praktyczne przedstawiają olbrzymie wprost zadanie.

Nie możemy w chwili obecnej opisać wielu pomysłowych wynalazków, poczynionych w trakcie pokonywania licznych przeszkód, ale jest już obecnie ogólnie wiadomo, że przeszkody te zostały pokonane dzięki współpracy dużych zespołów naukowców i inżynierów i że zakład oparty na zasadzie podziału przez dyfuzję gazu pracuje.

Istnieją metody, wykorzystujące również różnice szybkości izotopów. Jedną z tych metod, opracowaną przez tegoż Hertza, wykorzystuje dyfuzję gazu nie przez membrany, lecz przez strumień innego gazu. Jeszcze inna metoda, którą zawdzięczamy Hevesyemu, wykorzystuje wyparowanie płynu w opróżnionej przestrzeni. Lżejsze cząstki płynu ulotnią się szybciej, gdyż ich szybkość jest większa. Te i inne metody dyskutowano i ostatecznie odrzucono, gdyż rokowały mniejsze nadzieje niż dyfuzja przez membrany.

Inna metoda, która natychmiast przychodzi na myśl, gdy rozważamy problem podziału izotopów, jest tzw.

dyfuzja cieplna gazu. Przez ciepłą dyfuzję gazu rozumiemy szczególne zjawisko, zachodzące w większości gazów i polegające na skłonności lekkich cząstek do gromadzenia się w gorętszym końcu ogrzewanej rury, a ciężkich w zimniejszym. Metoda ta jest specjalnie obiecująca, gdyż Clusius i jego współpracownicy obmyślili piękny fortel, dzięki któremu unikamy kaskady o wielkiej ilości osobnych stopni, lecz uzyskujemy dużą ilość stopni w obrębie jednej aparatury. Fortel ten można tak opisać: Wyobraźmy sobie dwie pionowe ściany, jedną gorącą, drugą zimną. Z powodu termicznej dyfuzji gaz w sąsiedztwie gorącej ściany będzie nieco bogatszy w lekki izotop, oraz jako cieplejszy będzie miał tendencję do ruchu w górę, podczas gdy zimny gaz będzie miał tendencję do ruchu w dół. Otrzymujemy w rezultacie krążenie gazu; w górę przy gorącej ścianie, w dół przy zimnej. Ponieważ, jak powiedzieliśmy, gaz przy gorącej ścianie jest nieco bogatszy w lekki izotop, strumień idący w górę niesie więcej izotopu lekkiego, niż strumień zstępujący przy zimnej ścianie. Per saldo otrzymamy przenoszenie się lekkiego izotopu w górę; w górnej części aparatury będzie się gromadzić coraz więcej lekkiego izotopu, dopóki wpływ naturalnej dążności gazu do mieszania się nie zrównoważy przyплиwu lekkiego izotopu. Takie urządzenie można uważać za równoważne wielkiej ilości poszczególnych stopni, ilości równej w przybliżeniu stosunkowi wysokości ścian do odległości między nimi. Wysokość ścian możemy łatwo uczynić rzędu metrów, a odległość między nimi równą ułamkowi centymetra — toteż jeden taki zespół będzie równoważny wielkiej ilości stopni i wystarczy połączyć szereg kilku zespołów, by uzyskać duże wzbogacenie gazu w lekki izotop. W rzeczywistości Clusius nie za-

stosował płaskich ścian, lecz rury koncentryczne. Wewnętrzną ogrzewał przez przepływ gorącego gazu, a zewnętrzną chłodził.

Niestety pomiary termicznej dyfuzji w sześciofluorku uranu zaraz wykazały, że właśnie w tym gazie dyfuzja termiczna zachodzi w znikomym stopniu. Przyczyny dyfuzji termicznej są zawile i zależą w dużej mierze od właściwości cząsteczek, oraz sił występujących pomiędzy nimi, tak że niemożliwością jest z góry przewidzieć, czy dyfuzja termiczna w jakimś gazie będzie duża czy mała. W wypadku sześciofluorku jest tak mała, że zakład przemysłowy, zbudowany na tej zasadzie, byłby zbyt duży, zbyt kosztowny i zużywałby zbyt dużo mocy — mimo że posiada zaletę prostoty i nie zawiera części ruchomych.

Wielu pracowników badało dyfuzję termiczną w płynach — rezultat był zawsze ten sam: użycie gazu daje lepsze rezultaty niż użycie płynu. Główną przyczyną jest to, że płyny przewodzą ciepło bez porównania lepiej niż gazy, tak że w wypadku płynu musimy o wiele więcej ciepła doprowadzać do cieplej ściany a odprowadzać od zimnej, by utrzymać tę samą różnicę temperatur obu ścian, niż w wypadku gazu. Przypuszczano zatem, że sprawa będzie się przedstawiać tak samo w wypadku sześciofluorku uranu — jednak doświadczenia przeprowadzone przez Abelsona dały niespodziewany wynik: dyfuzja cieplna w płynnym sześciofluorku uranu jest całkiem duża, mimo że w gazowym jest znikoma. Przy użyciu płynnego sześciofluorku uranu budowa zakładu przemysłowego o praktycznie możliwych wymiarach staje się wykonalna. Ale nawet i w tym korzystnym wypadku nie można polegać wyłącznie na takim zakładzie

dla produkcji uranu 235. Aby uzyskać nawet małe wzbogacenie, zakład tego rodzaju pochłaniałby olbrzymie ilości energii cieplnej (np. w postaci pary wodnej). Był taki okres w trakcie budowy zakładu w Oak Ridge, w którym mieliśmy do dyspozycji duże ilości pary wodnej, potrzebnej dla zakładu jeszcze nieukończonego. Póstanowiono zatem uruchomić zakład oparty na zasadzie termicznej dyfuzji, który by zużytkował tę parę dla wstępnego wzbogacenia uranu. Tak wzbogacony uran ułatwiłby zadanie pracującego już wtedy zakładu, zbudowanego na zasadzie elektromagnetycznej.

W końcu należy tu wspomnieć jeszcze jedną, dokładnie zbadaną metodę rozdziału izotopów, polegającą na elektrolizie. Jak ogólnie wiadomo, gdy prąd elektryczny przepływa przez roztwór soli w wodzie, ładunek elektryczny przechodzi przez roztwór dzięki przepływowi naładowanych elektrycznie atomów cząstek. Zupełnie analogicznie jak w gazach, spotkamy się z różnicą w szybkościach, z jakimi, średnio biorąc, poruszają się lekkie i ciężkie cząstki. Lekkie będą nieco szybsze. Kilku badaczy niezależnie od siebie zaproponowało piękny fortel, który by umożliwił zastosowanie tej metody w praktyce. Fortel ten polega na tym, że pozwalamy roztworowi przepływać wolno w rurze w kierunku przeciwnym do ruchu naładowanych cząstek. Gdy oba ruchy są sobie równe, cząsteczki będą stały w miejscu. Ta równowaga pomiędzy przeciwnie skierowanym przepływem roztworu i przepływem cząsteczek w prądzie elektrycznym nastąpi przy nieco różnej szybkości dla cząstek lekkich i ciężkich. W rezultacie można tak dobrać szybkość przepływu, by na pewnym odcinku rury lekki izotop powoli zaczął zmierzać w przód a ciężki w tył. H. London pomie-

rzył ilościowo to zjawisko i uzyskał słaby rozdział. Okazało się jednak, że metoda ta nie może współzawodniczyć z innymi, lepszymi metodami podziału.

5. ZAKŁAD ELEKTROMAGNETYCZNY. Wszystkie metody opisane w trzech poprzednich rozdziałach polegają na zasadach, które dają słabe wzbogacenie w jednym stopniu rozdzielającym i dlatego zmuszają nas do wielokrotnego procesu by uzyskać prawie czysty U 235. Opisany poprzednio spektrograf masowy może przeprowadzić całkowity podział w jednym stopniu, ale wydawało się zawsze, że rozbudowanie tej delikatnej metody laboratoryjnej na skalę fabryczną napotka na trudności nie do przeczyiężenia. Niemniej E. O. Lawrence rozpoczął badania na ten temat. Posłużył się zasadniczo tą samą zasadą, na której oparty jest spektrograf masowy. Zmiany, które musiał poczynić, zmierzały do uzyskania lepszej ekonomii. W zwyczajnym spektrografie masowym tylko znikoma część gazu użytego do analizy, zostaje zjonizowana (naładowana elektrycznie na skutek zderzeń) i tylko ta mała część zostaje rozprzeczona i tworzy strumień cząsteczek przechodzący przez zasadnicze części aparatury. Reszta gazu pozostaje w formie elektrycznie obojętnych atomów, wypełniających rurę i gaz ten zabierają pompy, utrzymujące niskie ciśnienie w rurze. Jasne jest, że należy się starać o możliwie dużą ilość cząstek w strumieniu i zmniejszenie o ile możliwości tej ilości gazu, która idzie do pomp i nie bierze udziału w separacji. Jest równie ważne obmyśleć sposób odzyskiwania uranu, który osiada w formie stałego osadu na ścianach aparatury, a to dlatego, że przy procesie na dużą skalę i przepuszczaniu dużych ilości materiału przez aparaturę nie tylko strata tego mate-

riału byłaby duża, lecz także osad zatkałby aparaturę w krótkim czasie. Co więcej, dla uzyskania potrzebnego w aparaturze pola magnetycznego musimy użyć dużych elektromagnesów, które stanowią najkosztowniejszą część aparatury. Aby je należycie wykorzystać, musimy użyć możliwie obfitych strumieni atomów i ustawić możliwie najwięcej takich strumieni w polu jednego elektromagnesu. Uzyskanie pola magnetycznego o właściwym natężeniu i rozłożeniu wymaga ogromnej precyzji, a ustawienie zbiorników chwytających atomy musi być bardzo dokładne. Taką precyzję może uzyskać wprawny fizyk przez staranną pracę w laboratorium. Musimy zatem tak zmodyfikować konstrukcję, by ustawienie zbiorników i nastawienie pola magnetycznego mógł wykonywać mniej wyszkolony personel w dużym zakładzie. Musimy dalej dobudować bardzo skomplikowany zakład chemiczny, który będzie nam zmieniał surowiec w związki używane w rurach rozdzielających, oraz zwracał gaz zabierany przez pompy, osad z wewnętrznych ścian aparatury itp. Ten odzyskiwany materiał zdążył zwykle już wejść w związki chemiczne ze ścianami aparatury i wymaga dodatkowej przeróbki chemicznej.

I znowu tylko olbrzymiemu wysiłkowi naukowców i inżynierów zawdzięczamy przeprowadzenie tego zadania. Mimo, że krok od delikatnej aparatury laboratoryjnej do dużego zakładu fabrycznego okazał się jeszcze trudniejszy, bardziej nieoczekiwany niż w wypadku dyfuzji przez membrany, zakład elektromagnetyczny był pierwszym, który wyprodukował użyteczną ilość uranu 235.

Chociaż teoretycznie można by przeprowadzić cały podział w jednym stopniu, w praktyce okazuje się to niewygodne, gdyż strumień ciężkiego uranu jest tylekrotnie silniejszy od strumienia lekkiego izotopu, że zmusiłby nas do bardzo dużej precyzji, gdybyśmy chcieli przeprowadzić bardzo dokładną separację w jednym stopniu. Musielibyśmy bowiem unikać nawet najmniejszego rozproszenia wiązek, gdyż nawet mały rozproszony strumień ciężkiego izotopu zmieszałby się ze słabym strumieniem lekkiego. Taką precyzję można by uzyskać, ale ograniczyłoby to poważnie ilość przepuszczanego materiału przez jeden stopień.

Toteż opłaca się użycie aparatury składającej się z dwu stopni: w pierwszym stopniu uzyskujemy niezbyt dokładny podział, po czym tak otrzymany materiał przepuszczamy przez drugi stopień, który może być mniejszy, gdyż przerabia o wiele mniejszą ilość materiału. W drugim stopniu dokonujemy ostatecznego, dokładnego podziału. Drugi stopień będąc mniejszym, nie przedstawia tak dużych trudności konstrukcyjnych jak pierwszy, ale musi być zaprojektowany znacznie staranniej, ponieważ nie możemy pozwolić na najdrobniejszą stratę materiału w tym stopniu. Materiał ten jest bardzo cenny, gdyż pochodzi z kosztownego pierwszego stopnia.

Istnieją projekty innych przyrządów, oparte na innych zasadach, które tym są podobne do zasady elektromagnetycznej, że mogą dać dużą separację w jednym stopniu, przy czym każdy atom odbywa swą własną drogę niezależnie od obecności innych atomów. Najciekawszym jest tzw. „izotron“, który używa szybkozmiennego pola elektrycznego. Pole to kolejno w szyb-

kim tempie przyśpiesza i opóźnia strumień naładowanych elektrycznie atomów, przy czym lekkie atomy poddają się wpływowi pola nieco łatwiej niż ciężkie. Możemy tak zaprojektować ten przyrząd, by cały strumień atomów skupiał się w zgrupowania w dalszej części swej drogi. To skupianie się możemy objaśnić następująco: pewna ilość atomów przechodzi przez pole, gdy ono opóźnia je, a następna ilość w chwili gdy pole je przyśpiesza dogania pierwsze, tworząc zgrupowanie. Te zgrupowania wypadną dla różnych izotopów w różnych częściach przyrządu, gdyż różne izotopy będą się poddawać wpływowi pola w różny sposób: lekkie bardziej, ciężkie mniej. Jeżeli teraz potrafimy odprowadzić atomy z odpowiednich części przyrządu w odpowiednim czasie, potrafimy zebrać np. przede wszystkim lekkie atomy. Taki przyrząd opracował R. R. Wilson i przypuszczalnie można by go użyć na skalę fabryczną, ale przyrząd elektromagnetyczny rokował lepsze nadzieje i izotronu nie użyto.

6. WNIOSKI. W artykule tym usiłowaliśmy naszkicować krótko zasady fizykalne, na których opierają się znane metody separacji izotopów oraz ogrom zadania, jaki stawia rozdział izotopów na skalę fabryczną. Wszystkie te zakłady mają jeden, wspólny cel: wydzielić czysty, lub możliwie czysty uran 235. W następnym rozdziale tej książki opiszemy w podobny sposób zakład, produkujący nowy pierwiastek pluton, który jest także paliwem atomowym. Duże zakłady fabryczne tak dla produkcji U 235 jak i plutonu wykończano pośpiesznie, gdyż nie było wówczas wiadomo, które z tych dwóch paliw będzie się lepiej nadawało do użycia w bombie

atomowej, ani jak długiego czasu będzie wymagało ukończenie każdego z tych zakładów.

Miejmy nadzieję, że w przyszłości ważność produkcji bomb atomowych ustąpi miejsca wyzwolaniu energii atomowej dla celów pokojowych. Taki rozwój zdarzeń postawi powyższe zakłady w niekorzystnej sytuacji, gdyż tzw. „stosy“ opisane w następnym rozdziale tej książki, dają nam energię wprost z surowego uranu. Niemniej dla celów praktycznych potrzebne będzie skoncentrowane źródło energii, źródło które będzie musiało spalać czyste paliwo atomowe, np. czysty lub prawie czysty pluton lub uran 235. Za wcześnie jest snuć przewidywania wobec wielu czynników, wpływających na ekonomię obu tych możliwości i dlatego nie wiemy dziś, czy zakłady rozdzielające izotopy utrzymają się jako stałe części składowe zakładów atomowych, czy też ich zadanie wyprodukowania paliwa do pierwszych bomb atomowych należy już do historii.

H. L. Anderson

## UJARZMIENIE ENERGII ATOMOWEJ I PRODUKCJA PLUTONU

Energia atomowa<sup>1)</sup> nie jest nowym odkryciem, ponieważ była uznana po raz pierwszy za źródło energii, gdy tylko zauważono zjawiska promieniotwórcze. Nie jest to źródło małego znaczenia, ponieważ nie tylko część ciepła ziemi zawdzięcza mu swe istnienie (ciepło promieniotwórczości zabezpiecza wewnątrz ziemi przed wychłodzeniem), ale także, jeśli spojrzymy wstecz, energia z drzewa, węgla, ropy i energia wodna, wszystkie nasze codzienne źródła energii, mają swoje źródło w słońcu, a mamy obecnie zupełnie poważne dowody, że energia wytwarzana przez słońce powstaje głównie dzięki istniejącym tam reakcjom jądrowym. Ta energia jednak, zamiast wytwarzać się przez rozpad jądrowy, uwalnia się drogą odbudowy jąder lekkich atomów. Dane astrofizyczne stwierdzają, że słońce zawiera duże ilości wodoru. To jest właśnie wodór, który tworzy połączenia w szeregu reakcji jądrowych w kierunku wytworzenia helu.

Te reakcje nie zachodzą samorzutnie na ziemi, ponieważ, w każdym momencie, cząsteczki mające reagować są naładowane i usiłują odpychać się wzajemnie. W laboratorium zdołano nadać kilku jądrom przyśpieszenie tego rzędu, że cząsteczki mogły dostatecznie zbliżyć się

---

<sup>1)</sup> Energia atomowa jest popularnym i utartym terminem, poprawniej należałoby określić ją jako energię jądrową.

do siebie i przereagować. To zjawisko pozwala jedynie na studiowanie samej reakcji, ale nie na wykazanie jej energii. Wewnątrz słońca temperatura sięga rzędu 20 milionów stopni, tak że na skutek ruchów termicznych atomy posiadają dostatecznie wielką szybkość, aby przedrzeć się przez silnie odpychające pole sił i zbliżyć się dostatecznie w celu wywołania reakcji. Wydzielanie się energii podtrzymuje wysoką temperaturę i reakcja odbywa się w dalszym ciągu w bardzo podobny sposób jak palenie się węgla.

Okazuje się zatem, że energia atomowa jest głównym źródłem energii na ziemi. Węgiel, ropa i drzewo, które spalamy, powstały drogą fotosyntezy dwutlenku węgla i wody przy wykorzystaniu energii atomowej. Przez wyparowywanie wód oceanów i jezior słońce zaopatruje się w energię wodną.

1. RÓWNOWARTOŚĆ MASY I ENERGII. W każdej reakcji uwalniającej energię traci się odpowiednią ilość masy. Wobec tego możemy powiedzieć, że energia powstaje z masy zgodnie z wyrażeniem Einsteina

$$E = mc^2$$

gdzie **E** jest energią w ergach, **m** jest stratą masy w gramach, a **c** jest szybkością światła,  $3 \times 10^{10}$  centymetrów na sekundę. Ta zależność sprawdza się wiernie zarówno w reakcjach chemicznych jak i w reakcjach jądrowych, jakkolwiek zmiany masy w reakcjach chemicznych są znikomo małe. Wzór Einsteina powiada nam skąd się bierze energia, co daje — jak to już powiedzieliśmy o samych siłach działających — nieco więcej wglądu w problem: dla czego ona powstaje. Jeżeli

znana jest suma mas wszystkich składników reagujących, reguła ta podaje prosty sposób obliczania wyzwolonej energii. W wielu wypadkach nie jest rzeczą łatwą zmierzyć zachodzącą zmianę masy i zwykle jest znacznie prościej zmierzyć wprost wytworzone ciepło albo wywołaną jonizację. Wzór ten podaje zatem maksymalną, możliwą energię, która wywiązałaby się, gdyby masa zamieniła się całkowicie na energię.

2. ENERGIA Z ROZPADU URANU. Jeżeli jeden cały gram masy (obojętnie czego) zamieniłby się na energię — otrzymalibyśmy  $2 \times 10^{13}$  kalorii. Zmierzoną energię wywiązującą się podczas reakcji rozpadu i wynosi ona w przybliżeniu  $2 \times 10^{10}$  kalorii<sup>1)</sup> na gram (dzieścięć milionów kilowatgodzin na funt<sup>2)</sup>). Jest to około dwa miliony razy więcej niż energia wywiązana w czasie spalania takiej samej masy benzyny, albo wysoko gatunkowego węgla antracytowego. W przypadku spalania węgla powiadamy, że atomy tlenu i węgla, biorące udział w reakcji, przyciągają się wzajemnie, gdy je do siebie zbliżymy i tworzeniu się ich połączenia towarzyszy wydzielenie energii. Dokładniej odbywa się to dzięki siłom działającym między elektronami i jądrami atomów, które tworzą drobiny materii, tak że przy pewnych związkach energia konieczna dla utrzymania atomów w zespole jest mniejsza niż przy innych. Nadmiar energii wydziela się, kiedykolwiek ma miejsce przejście

<sup>1)</sup> Jedna kaloria równa się  $4.18 \times 10^7$  ergów. Symbole jak  $10^7$  albo  $10^{10}$  są skrótami matematyków, zamiast pisania jedynek i następujących poniżej 7 względnie 10 zer.

<sup>2)</sup> Funt angielski = 453 g.

od mniej trwałej kombinacji do bardziej trwałej. Te ogólne zasady znajdują również zastosowanie przy reakcjach jądrowych. Siły działające między składnikami jądra tj. neutronami i protonami są wielokrotnie mocniejsze od sił, które działają między elektronami a jądrami drobin. Z tego powodu zmiany jądrowe operują znacznie większymi ładunkami energii, aniżeli zmiany w charakterze drobinowym. Przy rozpadzie uranu zachodzi rozbitcie najcięższego jądra na dwie w przybliżeniu równe części. Jednak neutrony i protony, z których składa się jądro uranu, znajdują się w bardziej zrównoważonym i trwałym układzie, gdy są podzielone między dwa odłamki, wytworzone podczas rozpadu. Energia wywiązana jest, w gruncie rzeczy, miarą tej właśnie wzmożonej trwałości. Nadmiar energii ujawnia się w postaci energii kinetycznej i dokumentuje się w dużej szybkości, z jaką wspomniane dwa odłamki rozlatują się.

Jest rzeczą wiadomą, że w dodatku do tych dwóch części wydziela się również dwa do trzech neutronów. Są one odpowiedzialne za akcję, dzięki której reakcja rozpadu może przenieść się na bardzo dużą ilość jąder uranu i tym samym umożliwia wywiązywanie ogromnych ilości energii, jak to zresztą później zobaczymy.

3. PROCES ROZPADU. Proces rozpadu może nastąpić jako rezultat bombardowania uranu neutronami. Neutron, jako cząsteczka elektrycznie obojętna, nie ma trudności w przenikaniu do jądra atomu uranu. Często jest rzeczą zbyt częstą stosowanie neutronów o dużych szybkościach, jakby to musiało być w przypadku naładowanych cząstek. Właściwie im wolniej neutron się porusza, tym łatwiej daje się zaabsorbować przez jądro uranu.

Jest rzeczą nieodzowną rozróżnianie rozmaitych rodzajów jąder uranu, biorących udział w reakcji. Jeżeli chodzi o chemiczne własności, wszystkie izotopy uranu zachowują się w ten sam sposób, ponieważ wszystkie one mają 92 elektrony, równoważące na zewnątrz ładunek 92 protonów obecnych w jądrze atomowym. Różne izotopy uranu różnią się od siebie liczbą zawartych neutronów. Istnieje zatem lekki izotop U 235, który zawiera 143 neutrony i inny ciężki izotop U 238, który posiada 146 neutronów. Są również innego rodzaju izotopy, zawierające różne ilości neutronów, niektóre z nich, jak to zobaczymy, mogą powstać na skutek reakcji jądrowych. Jeżeli wziąć pod uwagę ich zachowanie się w reakcjach jądrowych, izotopy mogą wykazywać znaczne różnice w tym względzie. Dwa wyżej wymienione izotopy są najczęściej spotykane w przyrodzie, ale ciężki uran zdarza się 140 razy częściej niż lekki uran.

Lekki izotop uranu U 235 jest jedynym jądrem znalezionym w przyrodzie, które może być rozbite przez działanie poruszających się neutronów. Jest rzeczą możliwą wytworzyć nowe jądra, które również miałyby tę samą własność. Tzw. powolne neutrony są absorbowane również przez jądro ciężkiego uranu, ale rozpad nie następuje, ponieważ utworzony izotop U 239 jest odporny na rozbitcie — chyba, że neutron wprowadzi z sobą, duży zapas energii, konieczny do zapoczątkowania procesu rozpadu. To samo sprawdza się w przypadku izotopu toru Th 232, który da się rozbić jedynie wtedy, gdy atakujący neutron posiada dostateczną ilość energii.

Z innych ciężkich pierwiastków, które trafiają się obficie na ziemi, studiowano bizmut i ołów, ale nie za-

uważono zjawiska rozpadu. Jest rzeczą zupełnie nieprawdopodobną, aby pierwiastki lżejsze od ołowiu zachowały się inaczej. Zatem wydzielanie energii jest możliwe przez łączenie lekkich pierwiastków, albo rozbijanie ciężkich i można przypuszczać z dużą dozą słuszności, że w przypadku średnio ciężkich pierwiastków takich np. jak żelazo, wydzielanie energii w ogóle nie zachodzi, ponieważ ich jądra są nadzwyczajnie trwałe.

4. PRODUKCJA PLUTONU. Neutrony powodują rozbicie jąder atomowych tylko niewielu pierwiastków, natomiast niemal w każdym jądrze neutron może być łatwo przychwycony. Gdy to się stanie, neutron przemienia jądro, do którego się przyłączył, w następny, cięższy izotop. Jeżeli ten nowy izotop nie jest z natury trwały, wydziela on zwykle promieniowanie cząstek beta i zamienia się skutkiem tego na sąsiedni wyższy pierwiastek w układzie periodycznym. Będziemy odtąd mówili o procesie tworzenia nowego izotopu jako procesie przychwycenia, w odróżnieniu od procesu rozbicia czy rozpadu. Jeżeli powiemy, że neutron zaabsorbował się, będziemy rozumieli, że został on albo przychwycony albo spowodował rozbicie. Neutrony mogą zderzać się z jądrami i zamiast ulec absorpcji, mogą być odrzucone z powrotem. To odrzucenie neutronów nazywamy rozpraszaniem. Rozpraszanie jest sprężyste, jeżeli kinetyczna energia zostaje zachowana, albo niesprężyste, jeżeli część energii kinetycznej neutronu zużyje się na zmianę stanu aktywizacji jądra.

Pluton wytwarza się przez absorpcję neutronów w ciężkim uranie U 238. Reakcja odbywa się najłatwiej

z poruszającymi się wolno neutronami i rozpoczyna się powstaniem U 239 zgodnie z reakcją:



U 239 jest radioaktywny i wysyła promienie beta po przeciętnym czasie,<sup>1)</sup> około 34 minut, tworząc izotop neptunu Np 239. Ten izotop jest również radioaktywny i przez wydzielenie cząsteczki beta po przeciętnym czasie 3.3 dnia, zamienia się na izotop plutonu Pu 239. Otrzymany tą drogą pluton rozkłada się wprawdzie przez wydzielenie cząstek alfa, ale dzieje się to tak wolno, że można go magazynować dla celów praktycznych oraz studiować jego własności. Rzeczą godną uwagi w naszej dyskusji jest fakt, że podobnie jak U 235, również Pu 239 daje się rozbijać przez powolne neutrony.

5. JĄDROWA REAKCJA ŁAŃCUCHOWA. Podczas gdy zbadano większą ilość reakcji jądrowych i stwierdzono fakt wydzielania pokaźnych ilości energii jądrowej, było rzeczą możliwą przeprowadzić tę reakcję tylko na niewielu atomach w tym samym czasie. Nam zależy na produkowaniu dużych zasobów tej energii i w tym celu usiłujemy przekształcić reakcję jądrową w reakcję samoczynną, tak aby duża ilość atomów reagowała równocześnie. Palenie się węgla jest reakcją cieplną, która nie będzie przebiegała poniżej pewnej temperatury zapłonu; jednak, skoro raz osiągniemy ten punkt zapłonu, wywiązane ciepło wystarcza z reguły do

<sup>1)</sup> Ten przeciętny czas nie jest identyczny z czasem zaniku połowicznego radioaktywnej substancji, ale jest dłuższy około 1.44 razy. W jaki sposób mierzy się czas zaniku połowicznego opisanego w artykule „Narzędzia fizyki atomowej”.

utrzymania masy w dostatecznie wysokiej temperaturze, koniecznej do podtrzymania palenia tak długo, jak tylko długo dostęp tlenu jest możliwy. W reakcjach jądrowych, które przebiegają w ten sposób na słońcu lub gwiazdach, temperatury zapłonu są znacznie wyższe. Dotychczas nie zdołaliśmy nauczyć się w jaki sposób można osiągać w dużej masie materii dostatecznie wysokie temperatury, aby termo-jądrowe reakcje przebiegały samorzutnie.

W reakcji rozpadu mamy do dyspozycji inne urządzenie, które może podtrzymywać samoczynną reakcję, bez uciekania się do wysokiej temperatury. Rozpad atomowy odbywa się przez absorbcję neutronów i więcej aniżeli jeden neutron wydziela się w czasie reakcji rozpadu. Jeżeli te nowe neutrony mogą wydajnie zderzać się z innymi jądrami uranu, jest rzeczą oczywistą, że rozpad jąder uranu będzie postępował, aż bardzo duża ilość tych jąder ulegnie rozbięciu.

Zbadajmy jeden prosty przykład. Wyobraźmy sobie dużą ilość łatwo rozpadającej się substancji jak U 235, do której wprowadzamy jeden neutron w celu wywołania rozpadu jądra. Ten rozpad wytwarza, powiedzmy, dwa neutrony, które ulegają absorbcji gdzieś wewnątrz masy. Przypuśćmy, że te dwa neutrony z kolei wywołują rozpad, będziemy wówczas mieli 4 neutrony wypromieniowane po skończonej reakcji. Ta reakcja może posuwać się dalej, a ilość neutronów wytworzona przez tę masę wzrośnie wielokrotnie. Ponieważ neutrony poruszają się z dużą szybkością i nie wędrują zbyt daleko zanim zostaną zaabsorbowane, pomnażanie się ich może zachodzić bardzo szybko. W bardzo krótkim czasie olbrzymia ilość jąder ulegnie rozbięciu i wyzwolą się ogromne ilości energii.

Neutrony wytwarzane w czasie reakcji rozpadu mają szybkość około  $1.5 \times 10^9$  centymetrów na sekundę, a ponieważ mają one do odbycia drogę tylko kilku centymetrów zanim zostaną ponownie zaabsorbowane, ilość ich wzrośnie dwukrotnie — w rozważanym przykładzie — w czasie rzędu  $10^{-8}$  sekundy. Zatem w jednej milionowej sekundy, ilość neutronów wzrosłaby niepomieranie i setki ton lekkiego uranu uległyby rozbięciu. Oczywiście jest to znacznie większa ilość od tej, która mogłaby naprawdę jednocześnie przereagować, jednak daje ona obraz jak duże ilości materii można zmusić do reakcji w niezmiernie krótkim czasie. Jeżeli zdamy sobie sprawę, że energia wyzwolona z jednego kilograma materiału odpowiada 17.000 ton materiału wybuchowego (np. T.N.T.<sup>1)</sup>), a czas reakcji jest niewspółmiernie krótszy, wówczas siła wybuchowa reaktora rozpadu stanie się oczywista.

To urządzenie jest podstawą bomby atomowej, jednak w praktyce nie należy używać nieskończenie wielkich ilości uranu. Jeżeli zważymy, że masa naszego materiału musi mieć skończone wymiary, musimy przyjąć, że część neutronów ujdzie z masy reagującej i nie będzie użyta w reakcji pomnażania. Co więcej, są również uboczne, konkurencyjne reakcje absorbcyjne, które zużywają neutrony, ale bez wywołania rozpadu, a tym samym bez pomnażania.

W naturalnym uranie proces absorbowania neutronów U 238, który prowadzi do Pu 239 zużywa tak dużą część neutronów, że nawet w dużej masie niewiele ich zostaje do wywołania reakcji rozpadu, a ilość neutronów wytworzona na jeden neutron zaabsorbowany jest

<sup>1)</sup> Trotyl (trójnitoluol).

mniejsza niż jeden, czyli pomnażanie neutronów nie może postępować w nieskończoność.

6. STEROWANIE REAKCJI JĄDROWEJ. Bezpośrednim środkiem, zmierzającym do zmniejszenia ubocznej absorpcji, jest zredukowanie ilości U 238 w uranie. Obejmuje to rozdzielanie izotopów, które chociaż nie należy do łatwych zadań, zostało jednak wykonane, przy dużym nakładzie kosztów i po pokonaniu całego szeregu trudności. Stało się rzeczą możliwą produkować tą drogą bomby atomowe z zespołów oczyszczonego U 235 (patrz artykuł o rozdzielaniu izotopów).

Gdy tylko udało się uzyskać czysty i nadający się do rozkładu materiał, zagadnienie skupienia i zmontowania stało się niesłychanie ważne. W jaki sposób skupić dostateczną ilość materiału, aby raz zaczęte wywiązanie energii miało przebieg wybuchowy, a równocześnie, aby być pewnym, że bomba nie wybuchnie przedwcześnie? Neutrony, które mogą zapoczątkować reakcję są produkowane przez promienie kosmiczne, mogą być wysyłane przez pewne ciała, obecne w masie reagującej jako zanieczyszczenia, a w końcu wiadomo, że jądra uranu samoczynnie, aczkolwiek niezbyt często rozpadają się. Możemy zatem oczekiwać, że niewielka ilość neutronów będzie zawsze obecna w zespole i nie mamy prawa sądzić, że niedostarczenie początkowych neutronów wywoła wstrzymanie reakcji.

Co możemy jednak zrobić w celu uniknięcia przedwczesnej eksplozji, to wyregulować produkcję neutronów przez odpowiedni stopień ich uchwycenia z układu i w rezultacie nigdy nie będzie dostatecznej ilości neutronów w uranie do rozprzestrzenienia masowej,

łańcuchowej reakcji. Jasne, że strata neutronów przez uchodzenie z masy uranu zależy od jego kształtu i wymiarów tj. stosunku wielkości powierzchni do całkowitej masy. Poniżej pewnej ilości uranu, tzw. masy krytycznej, większość neutronów ujdzie z układu, a zostanie niedostateczna ilość zdolna do „odrodzenia się” przez wywołanie nowych rozpadów. Współczynnik odradzania się, czyli mnożnik reakcji, jest terminem określającym to zjawisko w sposób zwięzły i dokładny. Jest to stosunek całkowitej ilości neutronów, wywołujących rozpad w jednej generacji, do tej ilości neutronów powstałych z tego rozpadu, która będzie go kontynuowała w następnej generacji. W prostym przykładzie, wspomnianym poprzednio, jeden neutron wywoływał rozpad wytwarzając dwa neutrony, każdy z nich z kolei wywoływał rozpad, co w rezultacie znów podwoiło ilość neutronów; mnożnik reakcji równa się tu oczywiście 2. Jeżeli natomiast, z każdych dwóch neutronów, wytworzonych przez rozpad, jeden ujdzie z układu, pozostanie więc tylko jeden do przeprowadzenia dalszego układu, mnożnik reakcji będzie równy 1. W tym ostatnim przypadku ilość neutronów, a tym samym ilość wytwarzanej energii, dzięki której reakcja się odbywa, pozostaje stałą na dowolnym, chwilowym poziomie. Wynika z tego, że jak długo mnożnik reakcji jest mniejszy od 1, co zawsze zdarza się w masie o wielkości podkrytycznej, zabłąkany neutron nie jest w stanie zdetonować osobnej reakcji łańcuchowej i materiał pozostanie nie-naruszony i bezpieczny.

Wartość mnożnika reakcji można zmieniać przez regulowanie stopnia uchodzenia neutronów, a to przez utrzymywanie materiału w dwóch lub więcej podkryty-

cznych masach, które można dowolnie zbliżać lub oddalać. Im bardziej są one skupione, tym wyższą wartość ma mnożnik reakcji. Bomba atomowa jest mechanizmem, w którym masy podkrytyczne zespalają się tak szybko, że przyrost neutronów jest bardzo gwałtowny i olbrzymia ilość energii wydziela się w bardzo krótkim czasie.

7. OBLICZANIE LICZEBNOŚCI NEUTRONÓW. Zawsze wielka ilość neutronów powstaje wewnątrz masy materiału przygotowanego do reakcji rozpadu. Załóżmy, że mamy nieco więcej niż krytyczną ilość materiału ale odsunęliśmy część tej masy dostatecznie daleko od reszty i uchodzenie neutronów jest wystarczająco silne, by utrzymać mnożnik reakcji poniżej 1. W tym przypadku, początkowe neutrony pomnożą się do pewnego stopnia, ale ich liczebność osiągnie w końcu ściśle określoną wartość, która będzie wzrastała gdy tylko mnożnik reakcji będzie zbliżał się do 1. Rozpatrzmy początkowe źródło neutronów, wysyłające jeden neutron na sekundę w kierunku naszej masy. Jeżeli określimy wartość mnożnika reakcji przez  $K$ , to pierwsza generacja będzie wytwarzała  $K$  neutronów na sekundę, ta ilość  $K$  neutronów wyprodukuje z kolei w drugiej generacji  $K_2$  neutronów na sekundę i tak dalej. Ogólnie, jeżeli  $K$  jest mniejsze od 1, całkowita końcowa ilość neutronów wytwarzanych na sekundę będzie wyrażona przez równanie

$$1 + K_1 + K_2 + K_3 + \dots = \frac{L}{1 - K}$$

Jeżeli zatem mnożnik reakcji jest 0.9 i jeżeli źródło neutronów w masie reagującej wytwarza 1 neutron na

sekundę, przytoczona wyżej analiza wykazuje, że po pewnym przeciągu czasu, neutrony będą produkowane w masie reagującej z szybkością 10 neutronów na sekundę. Przez stopniowe zbliżanie ruchomej części zespołu do reszty masy na coraz krótszą odległość, można zbliżyć wartość  $K$  coraz ściślej do 1, a liczebność neutronów może wówczas osiągnąć każdą żadaną wartość.

Jeżeli jesteśmy trochę niecierpliwi i chcemy podnieść szybciej wydajność neutronów, musimy uczynić to przez podwyższenie  $K$  nieco ponad 1. Wówczas strumień neutronów będzie się podwajał, podczas każdego okresu czasu wyrażonego wzorem

$$T = 0.1 \frac{\tau}{K - 1}$$

Tutaj tau  $\tau$  jest przeciętnym okresem życia jednej generacji neutronów. Gdy tylko osiągniemy żadaną wydajność neutronów, możemy zredukować  $K$  z powrotem do 1 i utrzymywać tę wydajność na tym samym poziomie.

Jeżeli wyprodukowanoby momentalnie wszystkie neutrony wyłącznie do reakcji rozpadu, wówczas czas pomnażania byłby tylko czasem od ich wyrzucenia do absorpcji, co dałoby nam wartość tau rzędu  $10^{-8}$  sekundy. W celu wprowadzenia czasu podwajania do jakiejś możliwej, praktycznej wartości np. 10 sekund i umożliwienia sterowania całego mechanizmu, byłoby rzeczą konieczną regulować wartość  $K-1$  z dokładnością do  $10^{-9}$ . W praktyce jest to oczywiście z gruntu niemożliwe, ponieważ już samo rozszerzenie na skutek małych zmian temperaturowych zmieniloby wartość mnożnika reakcji w sposób znacznie silniejszy, niż wyżej podana cyfra. Zawsze zachodziłoby niebezpieczeństwo, że małe zmiany tem-

peratury albo drobne zaburzenia mechaniczne spowodowałyby wzrost strumienia neutronów, bez możliwości jakiegokolwiek sterowania czy kontroli.

8. ZMNIEJSZENIE SZYBKOŚCI NEUTRONÓW, CZYLI OPÓŹNIONE NEUTRONY. Całe szczęście, że przy wytwarzaniu pewnej części neutronów zachodzi zwłoka. Opóźnione wysyłanie neutronów powstaje z tego powodu, że niektóre produkty rozpadu ulegają przekształceniu na inne jądra atomowe przez wyrzucanie cząstek beta, a te jądra dopiero z kolei wysyłają neutrony. Rozkład beta, który poprzedza wyrzucenie neutronów jest przyczyną tej zwłoki w czasie. Z powodu tego opóźnienia w wytwarzaniu neutronów, przeciętny czas ich pomnażania wzrasta, a sterowanie z zewnątrz natężenia ilości neutronów zmniejsza czułość swego wpływu na wartość mnożnika reakcji. Około 1% neutronów, wytwarzanych podczas rozpadu, ulega opóźnieniu w czasie o przeciętnej wartości około 10 sekund. Jeżeli całkowite  $K$  przekracza 1 o mniej niż 0,01, to szybkie neutrony mają wówczas współczynnik odtwarzania mniejszy od 1 i przez to nie mogą samorzutnie spowodować nieopanowanego wzrostu ilości neutronów. Każda generacja neutronów musi czekać na wyrzucenie opóźnionych neutronów. Jeżeli oznaczymy jako  $K_p$  mnożnik reakcji wyłącznie dla szybkich neutronów, a jako  $K$  ogólny mnożnik reakcji, wówczas, jeżeli  $K_p$  jest mniejsze od 1, czas podwajania ilości neutronów jest dany w przybliżeniu przez równanie

$$T = 0.1 \frac{1 - K_p}{K - 1} \tau_d$$

gdzie  $\tau_d$  jest przeciętnym czasem wyrzucania opóźnionych neutronów (około 10 sekund). Wobec tego możemy

wysterować  $K$  na wartość 1.005, a ponieważ  $K_p$  będzie wówczas około 0.995, czas podwojenia generacji wyniesie około 7 sekund. Jest rzeczą widoczną, że można regulować  $K$  w granicach 1 do 1.005 a reakcja ciągle jeszcze daje się kontrolować i sterować. Jest to znacznie większy przedział, aniżeli ten, w którym zmiany mogą być spowodowane przez wahania temperatury albo inne przypadkowe odkształcenia systemu reagującego. Sterowanie reakcji łańcuchowej i utrzymanie jej na żądanej wydajności mocy stało się łatwym problemem dzięki opóźnionym neutronom. Wymaga ono tylko prostej regulacji, przy pomocy dźwigni sterującej, którą może być mała część reagującej masy. Można uczynić to sterowanie reaktora łańcuchowego tak gładkim i precyzyjnym, że przy użyciu prostych poruszeń lekkiego mechanizmu można utrzymać poziom mocy urządzenia w granicach małego ułamka jednego procentu przez długi okres czasu.

9. REAKCJE Z UŻYCIEM NEUTRONÓW O MAŁEJ SZYBKOSCI tj. POWOLNYCH NEUTRONÓW. Naturalny uran zawiera 140 razy więcej ciężkiego izotopu U 238 niż lekkiego U 235. Proces absorpcji w U 238, który prowadzi do wytworzenia Pu 239, jest tak duży w naturalnej mieszaninie tych izotopów, że mnożnik reakcji w dużej masie uranu metalicznego nie może przekroczyć 1, a tym samym reakcja dostarczająca energii jest niemożliwa. Zwrócono już poprzednio uwagę na fakt, że trudność tę udało się obejść przez rozdzielanie izotopów, gdzie ilość ciężkiego izotopu może być wystarczająco zredukowana, podczas gdy stężenie materiału łatwiejszego do rozkładu wzrasta. Niemniej jednak, proces rozdzielania izotopów jest drogi i jeże-

liby sporządzać tą drogą całkowitą ilość aktywnego materiału, używanego w naszych reaktorach — jedynie drobny ułamek istniejącego uranu mógłby być wykorzystany.

Jednakże i naturalny uran może być użyty do przeprowadzenia reakcji łańcuchowej pod warunkiem, że neutrony ulegną opóźnieniu w reaktorze. Tego rodzaju reaktor nazywa się reaktorem powolnych neutronów — w przeciwstawieniu do reaktora szybkich neutronów, którym się dotąd interesowaliśmy. Jeżeli tylko neutrony poruszają się dostatecznie powoli, zostają one zaabsorbowane przez naturalny uran i częściej wywołują rozkład, niż produkują U 239. Krytyczną cyfrą dla reakcji łańcuchowej jest ilość neutronów wyprodukowanych, przypadająca na ilość neutronów zaabsorbowanych. W przypadku naturalnego uranu ta liczba staje się większą od 1, gdy neutrony poruszają się dostatecznie wolno, zatem reakcja łańcuchowa staje się możliwa. Gdy neutrony poruszają się szybciej wspomniana cyfra jest z reguły mniejsza od 1 i reakcja łańcuchowa nie jest możliwa.

Udało się szczęśliwie przeprowadzić reakcję z powolnymi neutronami, stosując naturalny uran, już parę lat wcześniej, zanim zakłady rozdzielające izotopy były w stanie wyprodukować dostateczne ilości uranu wzbogaconego w U 235 i stworzyć reaktor używający wszystkich neutronów. Jednakże sprawa nie jest tak prosta. Neutrony wyrzucone podczas reakcji rozpadu są szybkimi neutronami. Ich szybkość sięga rzędu  $10^9$  centymetrów na sekundę. W celu ustalenia reakcji łańcuchowej z powolnymi neutronami, należy zredukować tę szybkość do około  $2,5 \times 10^5$  centymetrów na sekundę. Taka

bowiem jest przeciętna szybkość neutronów, które poruszają się dzięki ruchom termicznym, istniejącym w temperaturze 20° C. Fermi odkrył w r. 1935 metodę umożliwiającą zwalnianie biegu neutronów. Znalazł on, że neutrony umieszczone w środowisku zawierającym lekkie pierwiastki, będą się zderzały sprężyście z tymi lekkimi jądrami i przy każdym zderzeniu część energii neutronów przeniesie się na jądro, z którym nastąpiło zderzenie. Proces opóźniania neutronów został nazwany tłumieniem albo moderowaniem, a materiał, w którym ten proces zachodzi, nazwano moderatorem.

Proces opóźniania neutronów nie przeciaga się w nieskończoność, ponieważ atomy tłumiące są same w nieustannym ruchu dzięki drganiom cieplnym. Gdy więc neutrony zwolnią biegu i obniżą swą energię, którą na równi tracą i zyskują w czasie zderzeń, ich przeciętny poziom energii stanie się równy energii ruchów cieplnych moderatora. W przedziale tych niskich energii wcale nie zachodzi rozpad ciężkiego izotopu, ale natomiast zdarza się, że szybkość rozpadu lekkiego izotopu silnie wzrasta, znacznie silniej od szybkości ubocznego, konkurencyjnego procesu absorbowania neutronów przez ciężki izotop. Ponieważ wydajność nowych neutronów, na każdy neutron, zaabsorbowany przez oba izotopy w naturalnej mieszaninie obu uranów, jest dostatecznie większa od jedności, reakcja łańcuchowa staje się możliwa.

Wprowadziliśmy zatem nowe ciało do naszego reaktora i musimy uważać, aby ten tzw. moderator nie absorbował neutronów do tego stopnia, aby mnożnik reakcji spadł poniżej 1.

10. ABSORBCJA REZONANSOWA. Trzeba pilnie baczyć, aby neutrony zbyt nie zwolniły biegu i nie zostały gromadnie przychwycone przez ciężki izotop. Prawdopodobieństwo, że neutron zostanie zaabsorbowany i wywoła rozpad w lekkim izotopie i prawdopodobieństwo, że będzie on przychwycony przez ciężki izotop, zmieniają się silnie w zależności od szybkości neutronów. Na ogół, gdy neutron porusza się znacznie szybciej niż szybkość ruchów termicznych, stosunek rozpadów U 235 do absorpcji U 238 — przemawia na korzyść absorpcji. W szczególności, jest pewien przedział szybkości neutronów, w granicach którego absorpcja przez U 238 jest olbrzymia. Nazywamy go pasmem rezonansu i jest rzeczą niezmiernie ważną zmniejszenie ilości absorpcji rezonansowych do minimum, jeżeli chcemy utrzymać mnożnik reakcji powyżej 1.

Możemy zmniejszyć ilość absorpcji rezonansowych, jeżeli potrafimy zwolnić bieg neutronów dostatecznie szybko, aby przebywały one tylko przez bardzo krótki okres czasu w tym niebezpiecznym przedziale szybkości. Pomysłowym sposobem, zastosowanym we wszystkich reaktorach o charakterze łańcuchowym, pracującym na naturalnym uranie, było ułożenie uranu porcjami w moderatorze — coś przypominającego siatkę przestrzenną. Tego rodzaju urządzenie ma zdecydowaną wyższość nad jednorodną mieszaniną uranu i moderatora. Duży procent neutronów zwalnających bieg w moderatorze może przekroczyć ten krytyczny przedział rezonansowy kompletnie bez stykania się z uranem. Mówiąc innymi słowy, gdy tylko neutrony osiągną ten przedział energii, gdzie mogłyby być z miejsca przychwycone przez proces absorpcji rezonansowych, mają one dobrą okazję

zderzyć się z jądrami moderatora przed zetknięciem się z uranem, a przez to uniknąć pułapki rezonansowej.

Sprawa jednak nie przedstawia się tak prosto, ponieważ, gdy neutron raz osiągnie poziom energii termicznej, urządzenie siatki przestrzennej jest raczej zawadą, gdyż chcemy teraz, aby neutrony absorbowały się w uranie a tu zachodzi niebezpieczeństwo, że mogą one zaabsorbować się w moderatorze, zanim spotkają uran. Przez ostrożny dobór wymiarów i wzajemnych odległości pozycji uranu w moderatorze udało się uczynić pułapkę rezonansową dostatecznie nieszkodliwą, nie tracąc równocześnie zbyt dużo na rzecz absorpcji w moderatorze.

11. MODERATORY NEUTRONÓW. Wodór, albo praktyczniej w celu otrzymania wysokiej gęstości jąder wodorowych, ciało bogate w wodór, jak nafta albo woda, opóźniają neutrony znacznie lepiej, aniżeli czyni to każda inna substancja. Przez celne centralne zderzenie z jądrem wodoru, które ma taką samą masę jak neutron, ten ostatni może stracić nagle cały swój zapas energii i zatrzymać się zupełnie. Większość zderzeń jednak to zderzenie z poślizgiem i neutron traci przeciętnie połowę swej energii w pojedynczym zderzeniu. Moderator bogaty w wodór stwarza doskonale warunki do uczynienia pułapki rezonansowej znikomo małą, ale, niestety, wodór wylapuje powolne neutrony zbyt chętnie. Ta ilość wodoru, która byłaby potrzebna do uczynienia pułapki rezonansowej dostatecznie małą, zaabsorbowałyby zbyt dużo neutronów z chwilą, gdy te osiągnęłyby poziom energii cieplnej. Wydaje się rzeczą niemożliwą zaprojektować zespół uranu i wody, w którym mnożnik reakcji byłby większy od 1.

Następnym z kolei a bardzo pożądanym moderatorem jest deuterium w postaci ciężkiej wody. Deuterium jest ciężkim izotopem wodoru, otrzymanym przez rozdzielanie izotopów. Z tego powodu jest on weale kosztownym surowcem. Wychwytywanie neutronów w wodzie ciężkiej jest znacznie słabsze, aniżeli w wodzie zwyczajnej. Ciężką wodę stosowano z powodzeniem jako moderator z naturalnym uranem w reaktorze łańcuchowym, który zbudowano w Laboratorium *Argonne* w Chicago. Hel, aczkolwiek ma nieznaczne wychwytywanie neutronów, nie nadaje się do użytku praktycznego, ponieważ nie posiada odpowiedniej gęstości. Lit i bor, następne z kolei lekkie pierwiastki, absorbują bardzo silnie. Węgiel w postaci grafitu, mimo, że nie jest zdolny dać tak wysokiego mnożnika reakcji jak ciężka woda, posiada tę zaletę, że jest względnie tani i pospolity. Z tego powodu ma on zastosowanie w większości reaktorów z naturalnym uranem, które dotychczas zbudowano.

12. MNOŻNIK REAKCJI W REAKTORZE Z NEUTRONAMI O MAŁEJ SZYBKOŚCI. Mnożnik reakcji w reaktorze z powolnymi neutronami może być wyrażony prostym wzorem. Pewna ilość neutronów wydobywająca się z bryły uranu może wywołać rozpad zarówno  $U\ 238$  jak  $U\ 235$ , podczas gdy ich energia jest ciągle wysokiego rzędu. Oznaczamy przez  $E$  pomnażanie się neutronów w tej reakcji, przez  $p$  tę część neutronów, która potrafi uniknąć pułapki rezonansowej, przez  $f$  tę część, która absorbuje się w uranie z chwilą gdy ich energia obniży się do poziomu energii termicznej, przez  $N$  ilość neutronów wyprodukowanych na każdy neutron zaabsorbowany przez uran i przez  $L$  tę część neutronów,

która ujdzie z układu i będzie stracona. Ponieważ  $(1 - L)$  jest ilością neutronów niestraconą, mnożnik reakcji wyrazi się wzorem

$$K = E p f N (1 - L).$$

13. UCHODZENIE NEUTRONÓW: REFLEKTORY I PRZESŁONY. Utratę neutronów uchodzących z układu można zawsze uczynić dowolnie małą przez odpowiednie wielkie wymiary masy reagującej. W reaktorze z naturalnym uranem jest rzeczą konieczną utrzymać stratę neutronów przez uchodzenie poniżej kilku procent. Wymaga to zespołu o bardzo dużych wymiarach. Można zredukować do pewnego stopnia uchodzenie neutronów przez obstawienie reagującej masy tzw. reflektorami. Przeważną część neutronów, która opuszcza reakcyjną przestrzeń, uchodzi do reflektora, zderza się z obcymi tam neutronami, na skutek czego zawraca i wchodzi z powrotem do reaktora. Można wydatnie zmniejszyć ilość reagującego materiału przez zastosowanie reflektorów, w celu osiągnięcia krytycznej wielkości masy.

W reaktorach z powolnymi neutronami zastosowano grafit jako reflektor, a to w celu zredukowania ilości uranu koniecznego do osiągnięcia wielkości krytycznej. Reflektor służy jeszcze jednemu ważnemu, praktycznemu celowi. Redukuje on ilości neutronów i promieni gamma wysyłanych z reagującej masy. Zarówno neutrony jak i promienie gamma są niebezpieczne dla ludzi i specjalną uwagę należy zwrócić na zredukowanie ich ilości poniżej dopuszczalnego minimum.

14. STEROWANIE REAKTORA Z UŻYCIEM NEUTRONÓW O MAŁEJ SZYBKOŚCI. Podano już jeden sposób regulowania wydajności reaktora. Istnieje jeszcze inna możliwość tam, gdzie w grę wchodzi powolne neutrony. Pewne ciała a specjalnie bor i kadmi chwytają bardzo chętnie termiczne neutrony i w praktyce okazało się bardzo wygodne stosowanie łasek lub pasków sporządzonych z tych materiałów. Mogą one być wsuwane lub wysuwane z reaktora i powodują przez tę zmianę aktywności. Tego rodzaju łaski sterujące zmieniają mnożnik reakcji raczej przez absorpcję neutronów, niż przez zmianę ich stopnia uchylenia z układu. Sterowanie daje się wykonywać przez zamontowanie lekkich i łatwo poruszających się mechanizmów.

W reaktorze z powolnymi neutronami czas pomnażania się nawet dla szybkich neutronów jest znacznie dłuższy, niż w przypadku reaktora z szybkimi neutronami. Neutron termiczny porusza się ze znacznie mniejszą szybkością (2500 metrów na sekundę) i pośuwa się na znacznie większą odległość (około 3 metrów) zanim zostanie zaabsorbowany. W rezultacie czas pomnażania się dla szybkich neutronów wynosi około jednej tysięcznej sekundy. Z tego powodu wytwarzanie energii w reaktorze powolnych neutronów nie jest dostatecznie szybkie, by wywołać wybuch. W najgorszym przypadku uran stopi się, prawdopodobnie nawet wyparuje do pewnego stopnia. Wówczas reakcja zatrzyma się wcześniej zanim ciśnienie zdola wzrosnąć tak szybko aby wywołać eksplozję. W rezultacie może powstać gwałtowny pożar i produkty rozpadu, a niektóre z nich, będące gazami mogą ulotnić się, ale, jeżeli całe urządzenie znajdowało się w odpowiednio zaprojektowanym betonowym budynku, można tego rodzaju wypadek łatwo zlokalizować.

15. SILNIK ATOMOWY PĘDZONY REAKCJĄ ŁANCUCHOWĄ. Do pierwszego reaktora użyto naturalnego uranu z grafitem jako moderatorem. Zbudowano go w Uniwersytecie w Chicago i ukończono w grudniu 1942 roku. Ponieważ masowa produkcja uranu stawała w tym czasie pierwsze kroki, większość materiału składała się z brył tlenku uranu, a tylko mała część (około 6 ton) była czystym uranem. Ponieważ ilość neutronów wysyłanych, gdy jeden neutron o energii termicznej jest zaabsorbowany przez naturalny uran, jest nieznacznie większa od 1, należy pilnie śledzić wszystkie straty neutronów. W szczególności zanieczyszczenia obecne zarówno w uranie jak w graficie są zdolne zaabsorbować nadmierną ilość neutronów. Pierwszy doświadczalny zespół o konstrukcji typu siatki przestrzennej zbudowano, w celu pomierzenia mnożnika reakcji w Uniwersytecie *Columbia* w lipcu 1941 roku, przy użyciu technicznie czystego tlenku uranu i grafitu. Dał on mnożnik reakcji tylko 0.81, głównie dzięki zanieczyszczeniom obecnym w użytym materiale. Należało zatem najpierw rozwiązać poważne przemysłowe zagadnienie, zanim można było wykonać z powodzeniem reaktor łańcuchowy, a było nim — produkowanie nadzwyczaj czystych substancji. Niektóre pierwiastki były niedopuszczalne nawet w ilościach jednej milionowej. Produkcja dostatecznie czystych materiałów była głównym zagadnieniem Laboratorium Metalurgicznego w Chicago, zorganizowanego w lutym 1942 roku, a pomyślna produkcja pierwszej reakcji łańcuchowej w grudniu tego samego roku była dowodem, że zadanie to spełniono z powodzeniem.

Pierwszy stos czyli reaktor łańcuchowy nie był wyposażony w chłodnicę i pracował z wydajnością nie przekraczającą 200 watów. W następnym roku zmontowano stos Clinton tj. siatkę złożoną z metalicznego uranu i grafitu w Oak Ridge, Tennessee. Metal posiadał kształt krótkich walcowych lasek i był umieszczony w długich kanałach w graficie w taki sposób, że powietrze mogło przepływać przez nie i usuwać dość poważne ilości wywiązanego ciepła. Laski uranu były zamknięte w gazoszczelnych puszkach aluminiowych, w celu ochrony gorącego metalu przed utleniającym działaniem powietrza. W lipcu 1944 roku wydajność mocy przekroczyła 1.800 kilowatów.

Szereg znacznie potężniejszych urządzeń zbudowano w Hanford, Waschingon. Te były również typu siatkowego z uranem metalicznym i grafitem, ale były chłodzone wodą, z uwagi na ich bardzo dużą wydajność mocy.

16. PRODUKCJA PLUTONU. Stosy o wysokich mocach nie były projektowane w celu produkowania samej mocy. Przeciwnie, wytwarzanie ciepła związane nierozłącznie z pracą tych urządzeń było raczej kłopotem, ponieważ należało się go pozbyć w jakikolwiek sposób. Urządzenia te były budowane w celu produkcji plutonu, ciała, które tworzy się przez absorbcję neutronów w U 238, ponieważ znaleziono, że pluton posiadał wysoką zdolność rozpadu i był doskonałym materiałem do produkcji bomb atomowych. Pałapka rezonansowa, z którą mieliśmy tyle zmartwień, gdy chcieliśmy uczynić reakcję łańcuchową w ogóle możliwą, jest czymś właśnie specjalnie pożądanym przy produkcji plutonu. Elementarne rozważanie wykazuje z grubsza jak wiele

energii należy rozproszyć z powodu wydzielania się jej przy rozpadzie, aby wyprodukować np. 1 funt plutonu na dobę. Trochę więcej niż 1 neutron przypadający na 1 rozpad potrzebny jest do podtrzymania reakcji łańcuchowej i nadrobienia strat przez uchodzenie i absorpcję w moderatorze albo w zanieczyszczeniach; cała reszta neutronów, wypromieniowanych na skutek rozpadu, może być zaabsorbowana przez U 238 w kierunku wytworzenia plutonu. Zatem, w przybliżeniu wytworzy się 1 atom plutonu na każdy rozpad, a energia do usunięcia będzie reprezentowana cyfrą dziesięciu milionów kilowatogodzin na funt plutonu. Przy ruchu 24 godzinnym zakład taki musiałby posiadać moc około ćwierć miliona kilowatów, produkując 1 funt plutonu na dobę. Usunięcie i zużycie mocy tej wielkości, która wystarcza na ogrzanie dużego miasta, jest zagadnieniem inżynierskim o zachęcającej skali i stanowi główną część kosztów fabrykacji.

W związku z zagadnieniem usuwania ciepła występuje inny problem, co najmniej tego samego rzędu, ale znacznie trudniejszy, a to chemiczne wydobycie świeżo otrzymanego plutonu z uranu i produktów atomowego rozpadu. Cząstki wytworzone na drodze rozpadu są silnie radioaktywne. Rozpad nie zawsze przebiega w ten sam sposób, a odłamki wyprodukowane nie zawsze są takie same, ale różnią się nieco masą i ładunkiem. Jedynie w bardzo rzadkich wypadkach rozpad daje dwa równe odłamki. Te muszą z kolei wypromieniować kilka cząstek beta, aby stać się trwałymi ciałami. Nowopowstały odłamek może wysłać pierwszą cząstkę beta w bardzo krótkim czasie, ale następna cząstka beta może być wyrzucona przeciętnie w ciągu tygodni, czasem miesięcy,

a w paru przypadkach nawet wielu lat. Promieniowanie gamma towarzyszy zwykle wydzielaniu się cząstek beta i oba te rodzaje promieniowań są niebezpieczne dla życia, ponieważ mogą niszczyć komórki i tkanki. Wynika z tego, że obsługa i przeróbka chemiczna lasek uranowych, które zawierają zarówno produkty rozpadu jak i pluton, muszą być wykonywane spoza osłon, albo sterowane na odległość z uwagi na ochronę obsługi. Co więcej, ponieważ promieniowanie to może rozkładać związki chemiczne, zagadnienie przeprowadzenia całej serii reakcji chemicznych koniecznych do oczyszczenia materiałów wymaga specjalnego potraktowania. W praktyce, w celu zmniejszenia natężenia promieniowania produktów rozpadu, przeznaczona się pewien okres czasu na „ochłodzenie“. Stos reakcyjny zatrzymuje się, a aktywne laski uranowe wypycha się do zbiornika magazynowego. Po miesiącu lub dwóch aktywność lasek dostatecznie zmaleje i umożliwi dalszą przeróbkę.

Stos w Clinton zmontowano w celu produkowania plutonu na skalę półfabryczną, tak aby można było studiować zagadnienia związane z rozdzieleniem.

17. NIEBEZPIECZEŃSTWO PROMIENIOWANIA. Reakcja jądrowa, pracująca z wydajnością 1 wata, wytwarza taką ilość promieni gamma jak 3 gramy radu. Około połowę tej wartości stanowi promieniowanie neutronów, ale neutrony są około 5 do 10 razy bardziej niebezpieczne. Trzeba zaznaczyć, że znaczna część obojga tj. neutronów i promieni gamma pochłania się w reaktorze, tak że rzeczywiście tylko 1 do 10% wydobywa się na zewnątrz, a to w zależności od konstrukcji reaktora. Jako okrągłą przybliżoną cyfrę można zapamiętać, że promieniowanie reaktora o mocy 1 wata odpowiada pro-

mieniowaniu 1 grama radu, nie zapominając równocześnie przy stosowaniu jakichkolwiek osłon, że muszą one ochraniać przed neutronami jak i przed promieniami gamma.

Jednostką pomiarową promieniowania jest Roentgen albo krótko jednostka R. Jest to ilość promieniowania, która może wyprodukować 1 elektryczną jednostkę jonizacji w jednym centymetrze sześciennym powietrza. Dopuszczalną porcją promieni gamma dla ludzkiego ciała jest 0.1 R w ciągu doby, podczas gdy 500 R wchłoniętych w ciągu krótkiego czasu jest śmiertelne i promieniowanie tego rzędu uśmierciło duże masy ludzi, gdy rzucono bombę atomową na Hiroshimę i Nagasaki. Jeżeli wyobrazimy sobie, że człowiek stałby w odległości około 10 stóp od silnika atomowego o mocy 1 wata przez osiem godzin, otrzymałby on pięciokrotną, dopuszczalną dawkę promieniowania. W zakładach dostarczających mocy między 10.000 KW a 100.000 KW (1 KW = 1.000 watów) należy przewidzieć współczynnik bezpieczeństwa dla przesłon od  $5 \times 10^7$  do  $5 \times 10^8$ . Przy przesłanianiu neutronów i promieni gamma, każda stopa betonu da w rezultacie dziesięciokrotną redukcję obu, tj. neutronów i promieni gamma, czyli w celu dostatecznej ochrony personelu należy postawić ściany betonową o grubości 8 do 9 stóp<sup>1)</sup>. Zważywszy, że reaktor pracujący nawet na czystym materiale nie może mieć mniejszych wymiarów niż 3 stopy, mierzone po krawędzi, jeżeli ma rozproszyć 100.000 Kw (ta potężna energia wytwarza się jako ciepło), łatwo zobaczymy, że ciężar wspomnianej przesłony (o gęstości 150 funtów na stopę sześcienną) wyniesie około 600 ton.

<sup>1)</sup> 1 stopa = 30,48 cm.

Byłoby rzeczą możliwą zredukować nieco całkowitą wagę przesłony przez użycie materiału o wyższej gęstości. Ponieważ przesłona ma zabezpieczyć również przeciwko neutronom, nie wystarcza użyć tylko ciężkiego metalu, takiego jak ołów. Pewna ilość substancji zawierającej wodór jest konieczna w celu zwolnienia biegu neutronów do takiego poziomu energetycznego, przy jakim mogą one być natychmiast przychwycone. Jeżeli nawet jesteśmy dość biegli w projektowaniu takich przesłon, jest rzeczą jasną, że całkowita waga naszego reaktora musi być rzędu 100 ton.

Jest jeszcze jeden ważny szczegół przy projektowaniu reaktora, a to fakt, że praktycznie każda substancja, która znajduje się wewnątrz reaktora, staje się radioaktywna na skutek absorpcji neutronów. Z tego powodu każda część, która wymaga obsługi, powinna być albo chroniona przez odpowiednie przesłony przed promieniowaniem neutronowym, albo posiadać urządzenie pozwalające na osiągnięcie jej i operowanie nią spoza przesłony, albo powinna być sterowana na odległość przez odpowiednie przyrządy.

**18. ZASTOSOWANIE ENERGII JĄDROWEJ.**  
Jeżeli reaktor jądrowy musi mieć wagę rzędu 100 ton — a z przyczyny niedrożej przesłony grubo więcej — jest rzeczą oczywistą, że mało możemy mieć nadziei na ujrzenie samochodu pędzonego napędem tego typu. Samolot ważący 200 ton i pędzony przez silnik atomowy staje się prawdopodobieństwem i jest prawdą, że tego rodzaju samoloty o odpowiednich wymiarach są przedmiotem rozważań. Silnik atomowy nadaje się specjalnie korzystnie do okrętów transoceanicznych i łodzi pod-

wodnych, ponieważ dostarcza on nie tylko dużych ilości mocy, ale nie musi być zbyt często uzupełniany w paliwo. Innego rodzaju praktyczne zastosowanie takich atomowych reaktorów może mieć miejsce w przypadku stałych siłowni w odległych miejscach, gdzie nie ma pod dostatkiem wody lub węgla. Reaktor atomowy otwiera również możliwości dla statku międzyplanetarnego, zbudowanego na zasadzie rakiety i jeżeli bez załogi, to przynajmniej sterowanego na odległość przez radio.

19. REAKTOR WYKORZYSTUJĄCY NATURALNY URAN. Dotychczas uwzględniliśmy w naszych rozważaniach dwa ogólne typy reaktora jądrowego, a to reaktora z powolnymi neutronami i reaktora z szybkimi neutronami. Naturalny uran może być i był użyty w reaktorze z powolnymi neutronami wraz z całym szeregiem różnego rodzaju moderatorów, ale należy uważać, aby nie wprowadzić do urządzenia chłodzącego — ciała absorbującego nadmiernie neutrony. Ponadto wielkość tych jednostek musi być wcale pokaźna, w celu zredukowania strat przez uciekanie, co jednak nie zawsze jest niepożądane np. w przypadku gdy chcemy pozbyć się dużych ilości energii. Całkowita waga takiej instalacji łącznie z przesłoną może wynieść parę tysięcy ton, ale wydajność mocy może osiągnąć cyfrę 1 miliona kilowatów lub więcej.

Taki reaktor „spala“ początkowo lekki izotop U 235, który jest obecny w naturalnym uranie w ilości 0.1%, ale równocześnie, jak już widzieliśmy poprzednio, powstaje pierwiastek Pu 239 z bogatszego izotopu U 238 i nadaje się również do rozpadu.

Jak długo ilość neutronów przypadająca na 1 rozpad jest większa od 2, należy przewidzieć konstrukcję tego rodzaju, aby trochę więcej niż połowa tych neutronów zużyła się do podtrzymania reakcji, a reszta do produkowania Pu 239, w celu zastąpienia stopniowo wyczerpującego się U 235.

W tych warunkach, gdy całe U 235 zużyje się, reakcja może iść dalej na Pu 239, wytworzonym dla zastąpienia U 235 i w ten sposób przeważająca część uranu może być zużyta.

Z biegiem czasu wytwarzają się produkty rozpadu. Niektóre z tych produktów mogą absorbować neutrony tak silnie, że po pewnym czasie neutrony obecne w nadmiarze zużyją się przez absorbcję w tych produktach i reakcja zatrzyma się. W tym przypadku jest rzeczą konieczną zdemontować reaktor, usunąć chemiczne produkty rozpadu i przerobić uran metaliczny z odpowiednią ilością plutonu, który powinien być dodany, aby uczynić materiał dostatecznie aktywnym. Zważywszy, że produkty rozpadu są niezwykle radioaktywne, cała ta operacja wymaga skomplikowanej aparatury i przyrządów z wyposażeniem do sterowania na odległość, umożliwiającym operowanie silnie promieniotwórczymi materiałami spoza grubych przesłon.

Pewnym ograniczeniem wydajności mocy i okresu życia każdego reaktora jądrowego jest wpływ silnie jonizujących cząstek i promieni na własności wytrzymałościowe materiałów, z których reaktor jest zbudowany. Na skutek swego silnie jonizującego działania, promienie gamma, neutrony i cząsteczki powstałe z rozpadu niszczą wiązania międzycząsteczkowe ogromnej ilości drobin. Wielka liczba skądinąd bardzo użytecznych mate-

rialów nie będzie mogła znaleźć zastosowania właśnie z tego powodu. Te materiały, które mogą być użyte, są tego rodzaju, że usiłują powrócić do swego pierwotnego stanu nawet po silnej jonizacji. Najeczęściej tymi materiałami są podstawowe metale i proste połączenia jonowe. Granica, do której nawet te materiały będą mogły wytrzymać coraz silniejsze napromieniowanie, towarzyszące każdemu usiłowaniu zyskania coraz większych energii, nie jest dotychczas znana.

20. STOSY SPALAJĄCE SKONCENTROWANE PALIWA ATOMOWE. Można uzyskać materiał wzbogacony w U 235 przez rozdział izotopów, podczas gdy, jak już widzieliśmy, Pu 239 może być otrzymane w reaktorze z powolnymi neutronami, pracującym na naturalnym uranie. Przez skoncentrowanie ilości materiału gotowego do rozkładu przez powolne neutrony, można powiększyć liczbę wyprodukowanych neutronów w stosunku do neutronów zaabsorbowanych w aktywnej substancji, silniejsze uchodzenie neutronów może być dopuszczalne, a tym samym wymiary reaktora mogą być zredukowane. Neutrony, które ujdą przez „nieszczelności“ nie muszą być koniecznie stracone na zawsze, ponieważ możemy obłożyć nasz reaktor naturalnym uranem tak, że to uchodzenie neutronów będzie wykorzystane do produkcji Pu 239.

Jako ogólna zasada obowiązuje pogląd, że neutrony są zbyt cenne, aby je kiedykolwiek tracić i zwykle można przewidzieć ich ekonomiczne zużycie. W wielu przypadkach neutrony mogą być użyte do produkcji specjalnych radioaktywnych materiałów. Niektóre produkty rozpadu są pożytecznymi radioaktywnymi ciałami i warto włożyć pewien trud w ich odzyskanie.

Przy użyciu dostatecznie wzbogaconego materiału staje się możliwa łańcuchowa reakcja szybkich neutronów. Trudno jest przy obecnym, wczesnym stanie badań dać jasną odpowiedź, czy reaktor z szybkimi neutronami ma jakieś specjalne zalety w stosunku do reaktora z powolnymi neutronami. Są różnice, które przemawiają na jego korzyść przy pewnych zastosowaniach, a nie czynią tego przy innych. Wyeliminowanie moderatora z towarzyszącą mu absorbcją jest niewątpliwym plusem. Zatrucie materiału pod wpływem produktów rozpadu będzie inne — prawdopodobnie mniejsze. Z drugiej strony trzeba operować większymi ilościami materiału w reaktorze z szybkimi neutronami, ponieważ przy dużych szybkościach neutrony trudniej absorbują się i dlatego ich uchodzenie jest bardziej prawdopodobne.

21. KWESTIA BEZPIECZEŃSTWA REAKTORA JĄDROWEGO. Nie łatwo jest wyobrazić sobie, żeby reaktor jądrowy, zaprojektowany do wytwarzania energii, mógł wybuchnąć przez przypadek, tak jak bomba atomowa. Aby otrzymać taki wybuch, jak widzieliśmy poprzednio, wymagany jest specjalny dobór warunków, które muszą być przygotowane, zwłaszcza przy projektowaniu części mechanicznej. Aktywny materiał powinien być skoncentrowany w celu otrzymania dużego mnożnika reakcji w bardzo krótkim czasie. Wielkim niebezpieczeństwem reakcji jądrowych jest fakt, że są one dużym zbiornikiem silnie promieniotwórczych produktów rozpadu. W reaktorze o dużej mocy siła promieniowania tych produktów może być równoważna wielu tonom radu. Jeśliby pozwolić na uchodzenie pro-

duktów rozpadu, wówczas zdrowie i życie ludzi byłoby zagrożone w promieniu kilku mil<sup>1)</sup> od zakładu.

Zwyczajny projekt reaktora przewiduje pewną ilość lasek bezpieczeństwa. Laski te działają zwykle na zasadzie absorpcji neutronów i w ten sposób zmniejszają mnożnik reakcji w przypadku, gdy operacyjny poziom energetyczny albo stężenie neutronów przekroczy pewną przepisaną wartość. Są one z reguły wystarczające do zabezpieczenia się przed zniszczeniem spowodowanym zawsze możliwymi wypadkami, ale ponieważ są one mechanicznymi przyrządami, posiadają tylko rolę narzędzia. Jeżeli na skutek wypadku mnożnik reakcji podniesie się o 1% w kierunku przedziału, gdzie szybkie neutrony mogą być swobodnie pomnażane, powstanie olbrzymia ich ilość, zanim laski bezpieczeństwa będą miały jakąkolwiek szansę działania. Jeżeli te zawiodą, reakcja sama zatrzyma się z powodu swego rodzaju rozrutu mechanicznego, który wywoła zwiększenie uchożenia neutronów. Może to być tylko sama rozszerzalność cieplna aktywnego materiału albo po pewnym czasie materiał stopi się i wyparuje. W krańcowym przypadku chwilowy wzrost mnożnika reakcji może być tak wielki, że nastąpi mała eksplozja zanim materiał zdąży wyparować i rozrzuć się na pewną odległość. W większości tych wypadków reaktor uległby zniszczeniu i byłoby trudną rzeczą naprawiać go wobec silnie promieniujących produktów rozpadu; największy kłopot sprawia jednak możliwość nieopanowanego rozproszenia produktów rozpadu wśród otaczającej ludności, jeżeli zdarzy się wyparowanie materiału na skutek wybuchu.

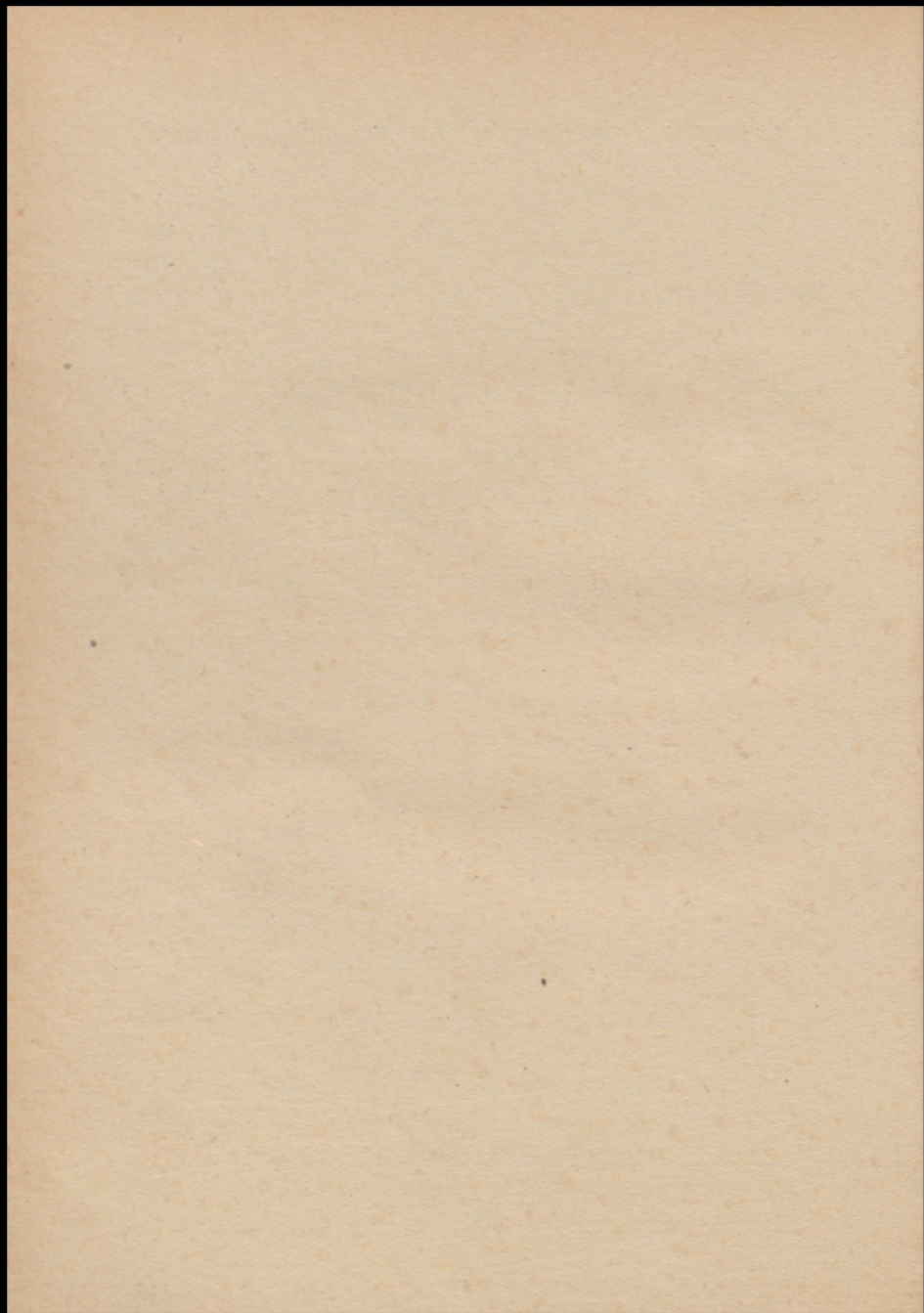
<sup>1)</sup> mila ang. = 1609,32 m.

Na ogół, większość tych niebezpieczeństw sytuacji może być wykluczona przez odpowiednią konstrukcję stosu, ale jest rzeczą nieodzowną bardzo dokładne zbadanie wszystkich możliwości wypadku w każdej niemal sytuacji. Przy bezpiecznej konstrukcji używamy mniej aktywnego materiału od tego, który mógłby ewentualnie dać zbyt wielki mnożnik reakcji we wszystkich możliwych zgrupowaniach materiału. Należy również zabezpieczyć się przed zbliżeniem jakiegokolwiek dodatkowego materiału na taką odległość, że mnożnik reakcji mógłby raptownie wzrosnąć. Trwale przesłony umieszczone wokół konstrukcji spełniają to zadanie. Stos powinien być zaprojektowany do pracy w stałej temperaturze, tak aby jej wzrost zredukował równocześnie mnożnik reakcji. Co więcej, utrata chłodziwa powinna również redukować mnożnik, albo, jeżeli to nie jest możliwe, utrata nie powinna być tak szybka, aby laski bezpieczeństwa nie zdążyły w porę zareagować.

22. ZUŻYTKOWANIE ENERGII. Żaden z silników czy reaktorów jądrowych, zbudowanych dotychczas, nie był projektowany na dostarczenie energii. Z tego też powodu należy wykonać całą masę prac doświadczalnych w celu zbadania możliwości tego źródła energii. Aczkolwiek energia ta przejawia się początkowo jako ruch cząsteczek wywołany przez rozpad, ruch ten szybko znika w otaczającym materiale, a objawia się jako ciepło.

Jeżeli celem „silnika atomowego“ jest dostarczanie ciepła — np. do ogrzewania miast — przeniesienie tej energii nie nastęrcza specjalnych trudności — powiedzmy, przez przepuszczenie zimnej wody przez reaktor i zamianę jej na gorącą wodę lub parę. Jeżeli interesu-

jemy się jakimś rodzajem mocy mechanicznej lub elektrycznej, wówczas ogrzewanie wody nie byłoby bardzo ekonomicznym zużytkowaniem energii jądrowej. Byłyby bardziej pożądane inne środki chłodzące, które mogą absorbować ciepło w znacznie wyższej temperaturze, aczkolwiek każda możliwość powinna być rozważona z punktu widzenia absorpcji neutronów, radioaktywności, odporności na promieniowanie i korozję. Płynny bizmut i płynny sód są możliwymi chłodziwami tego rodzaju. Nie należy zapominać o gazowych chłodziwach, ponieważ jest rzeczą zupełnie do pomysłenia, że silnik jądrowy mógłby służyć jako źródło ciepła dla silnika strumieniowego albo odrzutowego.



M. Argo i E. Teller

## PROMIENIOTWÓRCZE WSKAZNIKI

WSTĘP. Zastraszające skutki bombardowania bombami atomowymi okazały w całej pełni możliwości wojennego zastosowania energii atomowej. Tak długo, jak wojna jest chociażby tylko odległą możliwością, problem bomby atomowej posiada pierwszorzędne znaczenie. Pokojowe zastosowanie potwornie wielkiej energii, wywiązanej z drobnej ilości masy, wydaje się na pierwszy rzut oka mniej interesujące. Pomimo realnych możliwości zastosowania tej energii, urzeczywistnienie ich napotyka na wiele trudności. Nie należy oczywiście oczekiwać całkowitego zastąpienia zwyczajnych, codziennych źródeł energii przez energię atomową. Jedną z najpoważniejszych trudności stanowi promieniowanie, które zawsze towarzyszy wywiązywaniu się energii podczas rozpadu. Promieniowanie to jest tak intensywne, zwłaszcza tam, gdzie wytwarza się dość duża ilość energii, że ludzie mogą poruszać się w najbliższym sąsiedztwie jedynie ubezpieczeni przez grube i ciężkie przesłony (patrz strona 107).

Istnieje jednak pewne zastosowanie, które zaczyna nabierać dużego znaczenia i jest raczej subtelnej natury. Opiera się ono na fantezie, że wspomniane poprzednio promieniowanie, które jest tak niebezpieczne w dużych ilościach, może być bez trudu wykryte w bardzo drobnych ilościach, które są zupełnie nieszkodliwe dla ludzkiego organizmu. To promieniowanie jest niezmiernie interesujące, ponieważ głównym źródłem jego są ato-

my, które praktycznie we wszystkich innych własnościach są podobne do zwyczajnych atomów (tj. takich, które nie promieniają). Ten nowy rodzaj atomów może zatem mieć zastosowanie w procesach biologicznych, chemicznych i przemysłowych jako „pозnaczone“ atomy, a tym samym łatwe do rozpoznania. Ten fakt czyni je nadzwyczaj użytecznymi. Dla przykładu rozważmy atom znany jako węgiel 14, który jest radioaktywną repliką zwyczajnego węgla, albo węgla 12. W każdym związku chemicznym ta radioaktywna substancja zachowuje się zupełnie identycznie jak każdy inny atom węgla. Natomiast jej promieniowanie daje się wykryć w obecności jednej tysięcznej części miligramu węgla 14 i staje się niebezpieczne tylko wtedy, gdy ta ilość wzrośnie parę tysięcy razy. Ten duży przedział pozwala zatem na jej bezpieczne stosowanie.

Można sobie łatwo wyobrazić, jak bardzo wartościowe i rzeczywiście jedyne w swoim rodzaju informacje można otrzymać przez śledzenie poruszeń grupy atomów „pозnaczonych“ przez swą radioaktywność. Przytoczymy parę przykładów, w jaki sposób używano tych atomów w przeszłości i jak je można używać na przyszłość, w celu zrozumienia mechanizmu pewnych fizycznych procesów i chemicznych reakcji. W szczególności można studiować zachowanie się żywych organizmów, używając tego precyzyjnego narzędzia z o wiele większą dokładnością, niż to było dotychczas możliwe.

Zanim jednak zagłębimy się w ten problem i jego praktyczne zastosowanie, musimy wpiерw dowiedzieć się trochę więcej o naturze radioaktywnych atomów.

1. CO TO JEST „WĘGIEL 14“? Budowa atomów i jąder była już omówiona na str. 29—49. Pamiętajmy

więc, że wszystkie jądra atomowe składają się ze skupu-  
 pieniu protonów i neutronów. Najpospolitszy gatunek ją-  
 dra pierwiastka węgla posiada sześć protonów i sześć  
 neutronów, albo sumarycznie: dwanaście ciężkich cząste-  
 czek — stąd nazywamy go węglem 12. Inne jądra wę-  
 gla mają pięć, siedem, względnie osiem neutronów i two-  
 rzą odpowiednio węgiel 11, węgiel 13 i węgiel 14.

Węgiel 14, w którym równowaga jądra została zwich-  
 nięta przez obecność dwóch dodatkowych neutronów,  
 jest promieniotwórczy i usiłuje wyrzucić jeden elektron  
 z jądra (albo raczej z neutronu wewnątrz jądra). Ten  
 proces przemiana neutron (który nie posiada ładunku  
 elektrycznego) w (dodatnio naładowany) proton. Ten  
 dodatkowy proton przyciąga jeszcze jeden elektron,  
 i w rezultacie atom nie przypomina już wcale węgla ale  
 azot, mając w swoim jądrze siedem protonów i siedem  
 neutronów, a siedem elektronów na zewnątrz jądra. Moż-  
 na obserwować elektron wyrzucony we wspomnianym  
 procesie przez stosowanie rozmaitych metod, jak to  
 omówiono na stronie 122 i następnym. Ten proces prze-  
 miany nie przebiega równocześnie we wszystkich ato-  
 mach radioaktywnego węgla, ani nie zachodzi on natych-  
 miast po utworzeniu się węgla 14. Wiele atomów tego  
 węgla istnieje w dalszym ciągu tysiące lat. Jeżeli wyjść  
 z pewnej ilości tego węgla, to po upływie przeciętnie  
 około trzech tysięcy lat znaleźlibyśmy, że połowa węgla  
 zamieniła się, albo „rozłożyła się“ na azot, a po upływie  
 nowych trzech tysięcy lat mielibyśmy tylko ćwierć pier-  
 wotnej ilości. Czas, podczas którego połowa materiału  
 rozkłada się, jest znany jako czas zaniku połowicznego  
 izotopu. Niektóre promieniotwórcze pierwiastki mają  
 dłuższe okresy zaniku połowicznego, inne znów mają  
 krótsze. Niektóre z tych okresów są zbyt krótkie, aby

umożliwiły rozpoznanie istnienia pewnych izotopów, inne mają wielkość sekund, minut, dni i tak dalej. Jeśli jakiś pierwiastek ma krótki czas zaniku połowicznego, znaczy to, że jego szybkość rozpadu jest wielka, a duża ilość cząstek wypromieniowana na sekundę czyni ten pierwiastek łatwym do wykrycia.

2. PRODUKCJA RADIOAKTYWNYCH IZOTOPÓW. Jednym ze sposobów produkowania „pозnaczonego“ węgla 14 jest bombardowanie zwyczajnego węgla neutronami. Większość zwyczajnych atomów węgla, to węgiel 12. Jeden procent węgla, to węgiel 13. Jeżeli ten zaabsorbujе jeden neutron, ulegnie on przemianie na węgiel 14. To jest tylko jeden przykład produkcji radioaktywnych izotopów przez absorpcję neutronów. Istnieje cała masa innych sposobów. Udoskonalenie stosów pracujących na reakcji łańcuchowej znacznie uprościło metodę produkcji, dzięki dużej ilości neutronów uchodzących ze stosu.

Należy pamiętać, że jądro uranu może rozpaść się na części o rozmaitych względnych proporcjach; na skutek tego wytwarza się duża różnorodność aktywnych jąder. Izotopy około 22 pierwiastków znajdują się pośród produktów rozpadu nie wyłączając na przykład bromu, jodu, molibdenu i srebra. Zarówno produkty rozpadu jak i neutrony są niezmiernie obficie produkowane przez stos. Ciała promieniotwórcze są obecnie możliwe do otrzymania w znacznie większych ilościach, niż to było kiedykolwiek stosowane w lekarskich badaniach naukowych.

W porzedzającej dyskusji wspomnieliśmy tylko jeden rodzaj radioaktywnych izotopów, które wyrzucają jeden elektron z jądra. Są jeszcze inne izotopy, które

wyrzucają pozytrony (dodatnie elektrony) na przykład węgiel 11. Istnieją dalej izotopy, które wysyłają cząstki alfa (jądra helu), jak np. rad. Radioaktywne izotopy tego rodzaju nie powstają tak obficie jak substancje wyrzucające elektrony. Ograniczymy zatem naszą dyskusję do tych ostatnich.

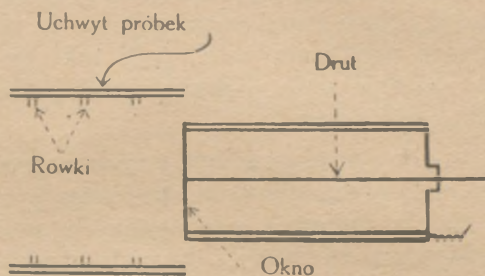
**3. WYKRYWANIE.** Już poprzednio wspomniano, że można wykryć radioaktywne atomy, śledząc wysyłane przez nie promieniowanie. Charakterystyczną własnością ciał, które mamy zamiar omawiać, jest wysyłanie elektronów. Niemniej jednak wyrzuceniu elektronu towarzyszy często dalsze wypromieniowanie. Zdarza się zatem, że po wyrzuceniu elektronu jądro pozostaje w stanie aktywnym, zawierając nadmiar energii i pozbywa się go następnie przez wysyłanie fal elektromagnetycznych. Te fale są podobne do fal widzialnego światła, ale posiadają znacznie wyższą częstotliwość. Właściwie są one znacznie bardziej zbliżone do promieni Roentgena, które są falami elektromagnetycznymi o częstotliwościach parę tysięcy razy wyższych od częstotliwości zmierzonych w widzialnym świetle. Jednak fale elektromagnetyczne wysyłane przez jądra atomowe przekraczają znacznie promienie Roentgena, jeżeli chodzi o częstotliwość i zdolność przenikania.

Elektrony wysyłane przez ciała promieniotwórcze nazywamy promieniami beta. Towarzyszące promieniowanie elektromagnetyczne nazywamy promieniami gamma. Promienie gamma posiadają nadzwyczajną zdolność przenikania. Stopień ich absorpcji w rozmaitych ciałach zależy od energii, w którą są zaopatrzone; zdolność przenikania wzrasta ze wzrostem tej energii. To samo obo-

wiązuje i dla promieni beta, ale, ogólnie biorąc, promienie beta absorbują się znacznie łatwiej, niż promienie gamma. Potrzeba warstwy aluminium o grubości około pięciu centymetrów w celu zaabsorbowania połowy energii przeciętnego promienia gamma. Można natomiast otrzymać zupełną absorpcję przeciętnego promienia beta przez warstwę aluminium trzydzieści razy cieńszą. Promienie beta o niskiej energii absorbują się w niezmiernie cienkich warstwach materii i to czyni wykrywanie niektórych radioaktywnych materiałów bardzo utrudnionym, ponieważ specjalną uwagę trzeba zwrócić na doprowadzenie tego promieniowania do wykrywających instrumentów.

Jest obecnie w użyciu cały szereg instrumentów służących do wykrywania nie tylko samej obecności, ale i ilości promieni beta lub gamma. Najpospolitszym z nich jest licznik Geiger-Muellera (krótko licznik G-M). Czulym elementem większości liczników jest przestrzeń wypełniona gazem. Jeżeli jakiś promień beta, tj. szybki elektron wpadnie w tę przestrzeń, natychmiast zaczyna rozdzielać swą energię między obecne atomy i drobiny gazu przez zderzanie się z nimi. Zwykle ilość energii dostarczona gazowi jest wystarczająca do wyrzucenia jednego z zewnętrznych elektronów atomów gazu, co daje w rezultacie atom z nadmiarem ładunku dodatniego. Proces rozdzielania drobiny gazu na różnoimiennie naładowane części nazywamy jonizacją. Im więcej energii ma promień beta, tym więcej może wytworzyć jonów. Promienie gamma jonizują gaz drogą pośrednią, najpierw zderzają się z elektronem i udzielają mu pewnego zasobu energii, a następnie zostawiają go wolno do odegrania roli promienia beta.

Licznik, albo rurka Geiger-Muellera składa się z walcowatego naczynia, cylindra, wykonanego z przewodzącego materiału. W osi cylindra umocowany jest cienki



Rys. 2. Rurka licznika Geiger - Muellera. Próbkę wprowadza się w rowki uchwytu w różnych odległościach od okna.

drut (patrz rys. 2). Samą rurkę najpierw ewakuuje się, a następnie wypełnia gazem pod ciśnieniem zwykle około jednej piątej atmosfery. Znalezione, że dobrą mieszaniną gazową jest 90 procent argonu i 10 procent alkoholu etylowego. Przykładamy różnicę potencjałów — około tysiąca woltów — pomiędzy cylinder a drut, przy czym ten ostatni jest dodatni. Potencjał tego rzędu jest dostatecznie niski, aby zapewnić brak jakiegokolwiek prądu, gdy nie ma jonów gazowych. Teraz wyobraźmy sobie że promień beta wchodzi do wnętrza. Zaczyna on jonizować gaz i dodatnio naładowane jony poruszają się w kierunku ściany cylindra, a elektrony wędrują do dodatniego drutu. Pod wpływem różnicy potencjałów nabierają one przyśpieszenia i jonizują dalsze drobiny gazu. W ten sposób powstaje lawina elektronowa. Różnica potencjałów jest tak dobrana, że jeden elektron jest w stanie zapoczątkować lawinę dostatecznie wyraźną

do zarejestrowania, ale równocześnie taką, która ustanie z chwilą, gdy wszystkie elektrony osiągną drutu. Gdy to się stanie, cięższe, dodatnio naładowane jony, aczkolwiek z nieco mniejszą szybkością, są przyciągnięte przez zewnętrzną ścianę i rurka jest gotowa do zarejestrowania nowego promienia beta, jeśli taki by się zjawiał. Cała ta operacja trwa w przybliżeniu jedną dziesięciotysięczną część sekundy.

Wytworzony prąd może być przesłany przez przyrząd elektronowy do wzmacniacza (podobnie jak są wznaczniane sygnały radiowe), a następnie do mechanicznego albo elektronicznego licznika. Energia otrzymana z rurki G-M nie jest energią cząsteczki, która wchodzi do niej, ale jest czerpana z energii zmagazynowanej w napięciu zasilania licznika. Sama cząsteczka działa jedynie jako swego rodzaju kurek spustowy do wyzwolenia tej energii.

Wykrycie promieni beta i gamma przedstawia czasem zgoła różny problem, a to z powodu odmiennej natury obu promieni. Promienie gamma przenikną łatwo ściany licznika, ale znalazłszy się w środku, będą dość wolno traciły swą energię na rzecz gazu. Dlatego przeciętnie jeden na sto kwantów gamma, przechodzących przez licznik, będzie zarejestrowany. Natomiast promienie beta wytwarzają bardziej obficie jony wewnątrz licznika i niemal każdy daje się pojedynczo zarejestrować; trudniej natomiast jest im wejść do wnętrza licznika. Liczniki promieni beta zaopatruje się w bardzo cienkie okna (zwykle z folii aluminiowej, albo miki) o grubości rzędu tysięcznych cala. W pewnych przypadkach, gdzie nie ma promieni gamma, a promienie beta mają niską energię, nie udaje się pomyślnie rozwiązać konstrukcji okna wlotowego, które pozwoliłoby na przeniknięcie pro-

mieni do wewnątrz. W takich przypadkach jest rzeczą normalną np. w przypadku węgla 14, wprowadzić związek zawierający radioaktywny pierwiastek wprost do wnętrza licznika.

Atomy radioaktywne nie są jedynymi, które mogą być, albo były użyte jako atomy „pозnaczone“, czyli wskaźniki promieniotwórcze, w badaniach naukowych. Inne rzadkie izotopy, jak ciężki wodór (wodór 2, składający się z neutronu i protonu), albo węgiel 13 (składający się z sześciu protonów i siedmiu neutronów) znalazły swe zastosowanie, zwłaszcza w pracach biologicznych. W przypadku tlenu i azotu używa się trwałych izotopów tlenu 18 i azotu 15, ponieważ reszta promieniotwórczych izotopów tlenu i azotu posiada bardzo krótki okres zaniku połowicznego. We wszystkich tego rodzaju przypadkach wykrycie poznaczonych atomów jest bardziej skomplikowane i wymaga stosowania spektrografu masowego (patrz artykuł o separacji izotopów). Jeżeli chcemy wykryć radioaktywne izotopy, jedynym aparatem potrzebnym do tego celu jest licznik i wzmacniacz. Taki aparat nie jest w zasadzie bardziej skomplikowany, niż zwyczajny aparat radiowy i bez wątpienia będzie on powszechnym i tanim artykułem.

4. ZASTOSOWANIA. Wskaźniki promieniotwórcze miały już wcześniej swe zastosowanie w wielu poważnych doświadczeniach, ale w okresie przedwojennym badania te były ograniczone szczupłością materiału sztucznie wyprodukowanych radioaktywnych izotopów. Izotopy te otrzymywano zwykle w małych ilościach przez bombardowanie rozmaitych materiałów strugami jonów o wysokiej energii, otrzymanych w bardzo kosztownych aparatach, takich jak cyklotron. Wtedy gdy

udoskonalenie stosów pracujących na reakcji łańcuchowej umożliwiło otrzymywanie promieniotwórczych materiałów w znacznie większych ilościach — tajemnica wojskowa stała na przeszkodzie rozdzieleniu tych materiałów pomiędzy instytuty badawcze. Obecnie, wobec częściowego uchylenia tajności tych badań, możemy oczekiwać, że w niedalekiej przyszłości otrzymają one potężny bodziec do rozwinięcia się w całym szeregu dziedzin właśnie dzięki istnieniu tego prostego, a tak potężnego narzędzia.

W następnych paragrafach wymienimy parę doświadczeń, które już przeprowadzono przy pomocy wspomnianych substancji. Będziemy również usiłovali naszkicować obraz przyszłych, prawdopodobnych zastosowań przez omówienie nowych, możliwych kierunków badań. Niektóre z nich będą się wydawały fantastyczne, niektóre nie będą zbyt szczęśliwe, a niektóre — wręcz niemożliwe, jednak żywimy nadzieję, że nasza dyskusja odsłoni wielkość i ważność tego pola badań.

Jednym z raczej nie bardzo realnych, ale niezupełnie niemożliwych zastosowań jest „poznaczenie“ mas powietrza. Nowoczesna meteorologia opiera się na śledzeniu ruchów mas powietrza oraz zmian, którym one ulegają podczas tego ruchu. To umożliwia przepowiadanie pogody na dłuższy okres czasu. W celu zidentyfikowania mas powietrza musimy opierać się na takich własnościach jak wilgotność powietrza, która może zmieniać się i przez to wprowadzać swego rodzaju niepewność wniosków. Jest również rzeczą niemożliwą śledzić pewną masę powietrza, chyba że zdarzy się, iż odróżnia się ona od sąsiednich mas dzięki pewnej charakterystycznej własności. Użycie promieniotwórczych wskaźników pozwoli nam obserwować dokładniej poruszanie się i mieszanie

mas powietrza. Należy wprowadzić wskaźnik jako bardzo drobny pył, albo lepiej jako gaz. Liczniki Geiger-Muellera umieszczone w zwyczajnych sondach balonowych mogłyby wyznaczyć tę masę powietrza, a przez określenie ilości radioaktywności mogłyby z pewnym prawdopodobieństwem powiedzieć, do jakiego stopnia ta masa zmieszała się z sąsiednimi nie-radioaktywnymi masami powietrza. Jedną z trudności tego zastosowania byłaby duża ilość materiału potrzebnego do „poznaczenia“ atmosfery. Co prawda „poznaczenie“ mas powietrza zdarzyło się już automatycznie, gdy wybuchły bomby atomowe. W miesiąc później wykryto wytworzoną przez wybuchy radioaktywność w masach powietrza na dużych wysokościach, po odbyciu przez nie podróży dosłownie dookoła ziemi. Znacznie mniejsze ilości aktywnego materiału mogłyby być wystarczające do „znaczenia“ drobnych ilości powietrza na krótkie okresy czasu.

Schodząc z powrotem na ziemię — można używać promieniotwórczości do obserwowania ruchu i zużycia powierzchniowego wewnętrznych elementów maszyn. Żelazo posiada izotop wysyłający promieniowanie i posiadający okres zaniku połowicznego 43 dni. Można go użyć jako domieszki do stali, z której wykonano części maszyn. Mogłoby wydawać się prostszym np. pomalowanie powierzchni jakimś jaskrawym kolorem albo użycie warstwy odmiennego materiału na powierzchni; jednak wówczas należałoby rozmontować maszynę w celu skontrolowania badanych powierzchni. Natomiast promienie gamma można łatwo śledzić przez ściany maszyny. W ten sposób można stwierdzić czy powierzchnie pracujące zużywają się, albo czy maszyna porusza się w żądany sposób. W babiecie, tj. metalu z którego robi się łożyska, moż-

na użyć antymonu z 60-dniowym okresem zaniku połowicznego. Stopień wycierania się łożysk mógłby być pomierzony przez oznaczenie radioaktywności powstałej w oleju smarującym.

Promieniotwórcze izotopy mogą również być użyte w celu ułatwienia pracy chemikom-analitykom. Zadaniem chemii analitycznej ilościowej jest oznaczenie całkowitej ilości pewnego pierwiastka w danej próbce. Aby to osiągnąć należy wprawdzie wyosobnić z próbki żądany pierwiastek (albo dokładnie znany jego związek), a cała trudność leży w tym, żeby niczego nie stracić. W proponowanej metodzie dodajemy niezmiernie drobną ilość promieniotwórczego izotopu szukanego składnika do całej masy, oznaczając równocześnie jej średnią aktywność na gram wagi. Przeprowadzamy następnie rozdzielanie zwyczajnymi metodami i określamy teraz aktywność czystego preparatu. Wzrost aktywności na gram jest odwrotnie proporcjonalny do pierwotnego stężenia pierwiastka, którego zawartość oznaczaliśmy. Straty zaśle przy rozdzielaniu nie mają tu żadnego znaczenia. Jedynie ważną rzeczą jest otrzymać ostatecznie czystą próbkę.

Prawdziwie ważne zastosowanie to dziedzina medycyny i biologii, gdzie mamy do czynienia z pospolitymi organami, których szczegóły budowy wewnętrznej i funkcje nie są dokładnie znane. Niestety nie posiadamy odpowiednich, użytecznych wskaźników radioaktywnych dla podstawowych pierwiastków azotu i tlenu. Dla dwóch pozostałych — węgla i wodoru, wskaźniki C 14 i H 3 są wcale drogie, a nieaktywne izotopy C 13 i H 2 mogą być w dalszym ciągu stosowane. Trudno jest powiedzieć, które z nich będą w większej podaży; można natomiast powiedzieć, że promieniotwórcze izotopy będą

łatwiejsze do wykrycia. Użyto już radioaktywnego węgla przy studiowaniu drogi i historii kwasu mlekowego, produktu odpadowego, wytwarzanego w mięśniach przez wysiłek.<sup>1)</sup> Znalaziono, że mleczany (tj. sole kwasu mlekowego) mogą być przekształcone w wątrobie w cukry lub inne węglowodany.

Radioaktywne izotopy innych pierwiastków, jak siarki, żelaza, fosforu i jodu są łatwe do wyprodukowania i wykrycia, a posiadają kapitalne znaczenie dla organizmów. Użyto np. radioaktywnego żelaza w celu oznaczenia objętości krwi u psów. Tego rodzaju technikę można stosować do innych zwierząt i do organizmów ludzkich. Karmi się psa jedzeniem, zawierającym radioaktywne żelazo, które odkłada się w hemoglobinie czerwonych ciałek krwi. Pobiera się następnie znaną ilość aktywnych komórek i wstrzykuje drugiemu psu. Rozcieńczenie tych aktywnych komórek jest bezpośrednim oznaczeniem objętości krwi.<sup>2)</sup>

Oprócz tych przykładów badań, które pozwalają na wniknięcie w podstawowe właściwości i funkcje organizmów, pierwiastki radioaktywne mogą służyć jako pożyteczne narzędzie przy stwierdzaniu anormalności tych organizmów. Często jest rzeczą bardzo trudną zdecydować, w którym miejscu należy amputować nogę przy zakażeniu krwi. Mamy tu na myśli przypadek, gdzie gangrena została wywołana przez niedostateczne krążenie krwi. Jeżeli wprowadzić radioaktywny sód do krwi, poniesie ona promieniotwórczość tak daleko, jak daleko

<sup>1)</sup> Haętings, Kistiankowsky, Cramer, Klemperer, Solomon i Venelend: *Science* 91, 421 (1940).

<sup>2)</sup> Whipple, Hahn, Balfour, Ross, Bale: Objętość czerwonych ciałek krwi krążąca i całkowita, oznaczona przez radio-żelazo. *Science* 91, 87 (1941).

sięga jej krążenie. Radioaktywny sód wysyła promienie gamma, które można wykryć po prostu przez poruszenie licznika ponad zakażoną kończyną. Punkt, w którym nie możemy już znaleźć promieniowania, jest miejscem, powyżej którego powinno się amputować.

Rak jest innym przykładem, gdzie schorzałe tkanki należy często usunąć chirurgicznie. Jedną z przyczyn niepowodzenia operacji raka jest fakt, że schorzałe tkanki mogą oderwać się i zostać uniesione przez strumień krwi do innych części ciała, gdzie nie zostaną wykryte wcześniej, zanim nie nastąpi podrażnienie innego organu. Byłoby wielce pomocną rzeczą przy leczeniu raka, gdyby można śledzić luźne cząsteczki tkanki rakowej. Na ogół nie wyobrażamy sobie w tej chwili praktycznego wykonania tego. Aczkolwiek w specjalnym przypadku raka tarczycy można jednak żywić pewne nadzieje. Gruzoł tarczycowy przyjmuje zarówno radioaktywny jod, jak i zwyczajny jod, bez różnicy. Nawet oderwane cząstki tkanki tarczycy zarażone rakiem, znajdujące się w innych częściach ciała, będą przyjmowały jod. Tą drogą można znaleźć te niebezpieczne ogniska anormalnej tkanki tarczycy przez poruszenie licznika wzdłuż powierzchni ciała.

Metodą wskaźników promieniotwórczych można również kontrolować długo-okresowe biologiczne zjawiska. Jest rzeczą prawdopodobną, że tworzenie się próchnicy stoi w związku z szybkością odkładania fosforu w zębach. Jest jednak rzeczą niemożliwą udowodnić prawdziwość tego założenia. Dalej, nie jest łatwo stwierdzić, jaki czynnik reguluje odkładanie się fosforu. To zagadnienie może być teraz rozwiązane przez wprowadzenie radio-fosforu do pożywienia i śledzenia, ile tej radioaktywności zjawia się w zębach.

Stosując tę metodę można również śledzić inne wolne procesy. Radio-wapń może okazać się wartościowym przy badaniach zwapnienia żył, które stoi w związku z odkładaniem się wapna w żyłach. Może on umożliwić wczesne rozpoznanie i może również dostarczyć szybkiej metody sprawdzania sposobów zapobiegawczych i leczniczych. W gruncie rzeczy rozpoznanie zaburzenia i śledzenie procesu leczenia są co najmniej równie ważne, jak łatwe i skuteczne wyleczenie.

Mówiąc ogólnie, nie wydaje się rzeczą niemożliwą, aby śledzenie przemiany materii przy pomocy radioaktywnych wskaźników stało się stereotypową procedurą w szpitalach, a nawet w prywatnych badaniach lekarskich. Oczywiście użyteczność tego rodzaju prób musiałaby być potwierdzona przez doświadczenia z dziedziny przemiany materii na zdrowych i chorych organizmach.

Rozpoznanie choroby, może najważniejsze ze wszystkiego, nie jest jedynym zastosowaniem radioaktywnych materiałów w medycynie. Co więcej, rado-terapia mogła być wykonywana jedynie przy stosowaniu kosztownych aparatów i materiałów. Produkowanie radioaktywnych substancji na dużą skalę uczyni ten rodzaj lecznictwa ogólnie tańszym i bardziej rozpowszechnionym. Popyt na radioaktywne substancje będzie bardzo silny, zarówno dla ważnej dziedziny niszczenia tkanki raka, jak i dla drobnych zastosowań, np. usuwania brodawek i niszczenia zakażenia grzybicą. W niektórych przypadkach te krótkotrwałe izotopy mogłyby znaleźć szerokie zastosowanie w formie plastrów i opatrunków; już sam fakt krótkotrwałości ich radioaktywnego życia silnie zmniejsza niebezpieczeństwo oparzenia. Rak wewnętrzny i rak zaawansowany bardzo często nie mogą być leczone

przez stosowanie rado-terapii, ponieważ zdrowe tkanki mogłyby ulec wypaleniu na skutek promieniowania. Po-  
kładamy duże, choć może nieco odległe nadzieje w po-  
mocnym działaniu radioaktywnych substancji przy osią-  
gnięciu specyficznego i miejscowego leczenia.

Na przykład pojemność gruczołu tarczycowego na przyswajanie jodu, jak to już wspomnieliśmy, może być użyta w celu koncentrowania promieniowania aktywnego izotopu jodu na tkance rakowej w gruczole, bez narażenia sąsiednich, zdrowych tkanek. Zważywszy całą masę istniejących obecnie radioaktywnych ciał, z których duża ilość — to izotopy normalnych składników tkanki ciała ludzkiego, można doszukiwać się innych zjawisk, w których radioaktywne ciała przyłączają się do rakowatej tkanki zarażonego organizmu. Doświadczenia z fosforem i strontem przy leczeniu leukemii wykazują, że tkanka zarażona leukemią absorbuje więcej fosforu, niż normalna kość i że radioaktywne materiały mogą być tam skoncentrowane dla bardziej skutecznego promieniowania<sup>1)</sup>. Niemniej jednak największy postęp w walce z rakiem i wielu innymi chorobami może mieć swe źródło w podstawowych badaniach z dziedziny biologii, przeprowadzanych raczej dla lepszego zrozumienia fizjologicznych procesów, niż dla jakiegoś specyficznego celu.

Oczekujemy również, że rolnictwo wysunie swe żądania dostaw radioaktywnych ciał. Czasami udaje się otrzymać nie tylko nowe odmiany, ale nawet nowe gatunki przez proces zwany mutacją, i jest rzeczą powszechnie znaną, że częstość mutacji może być zwiększona przez radioaktywną podniechę. Należy spodziewać się, że

<sup>1)</sup> Lawrence T. H., Scott K. G. i Tuttle L. W. *Int. Clin. N. S.* 3 (1939).

przeprowadzanie doświadczeń z odmianami roślin powinno być umożliwione odpowiednio przeszkolonym botanikom czy ogrodnikom. Z drugiej strony jest rzeczą bardzo prawdopodobną, że wytwarzanie nowych gatunków roślin będzie wkrótce ograniczone raczej przez sam napływ nowych specjalistów-hodowców roślin, którzy są w stanie rozpoznać nowe i wartościowe gatunki, niż przez same możliwości ich wytwarzania.

Przypuszczalnie, studiowanie wydajności nawozów w danych warunkach wzrostu i uprawy stanie się najbardziej powszechnym ze wszystkich znanych zastosowań promieniotwórczości. Można łatwo i szybko określić zużycie w roślinie pierwiastków dostarczonych w nawozie, a to przez mierzenie ilości radioaktywności powstałej w roślinie jako rezultatu przyswajania „pозnaczo-nych“ atomów, dodanych poprzednio do nawozu. Zmiany warunków uprawy gleby od gospodarstwa do gospodarstwa nie powinny odtąd stanowić momentu niepewności przy nawożeniu, ponieważ każdy gospodarz może przeprowadzić szereg prób i analiz, jaki nawóz jest najlepiej przyswajany przez jego ziemię.

Proponowane wyżej powszechne stosowanie przywodzi nas do zagadnienia bezpieczeństwa przy rozdziale detalicznym. Podobnie jak samochody, albo proch strzelniczy, materiały radioaktywne mogą być niebezpieczne przez nieświadomość, wypadek, albo celowe nadużycie. Odpowiednio pouczeni lekarze będą stosowali aktywne izotopy do celów leczniczych z takim zaufaniem i bezpieczeństwem, jak stosują oni narkotyki. Doprawdy nie są one bardziej niebezpieczne, niż wiele narkotyków będących w powszechnym użyciu. Dla celów przemysłowych, rolnych i innych rozdział powinien odbywać się na tych samych ostrożnych zasadach, jak np. rozdział powszech-

nie znanych trucizn. Należy pamiętać, że w wielu przypadkach potrzeba tylko bardzo małej, zupełnie nieszkodliwej ilości. Podczas gdy ścisłe przepisy są oczywiście konieczne, nadmierna ich surowość nie powinna mieć miejsca i nie powinna utrudniać postępu.

Widzieliśmy, że radioaktywne produkty mogą być użyte nie tylko do zwiększania naszej potęgi i możliwości wojowania, ale również do rozszerzenia naszej wiedzy i prawdopodobnie do ratowania życia ludzkiego. Te wspaniałe narzędzia powinny być wkrótce dostępne dla wszystkich naukowców świata. Byłby to jeden ze sposobów, w którym postęp wiedzy atomowej, zamiast wywoływania niepokojów i podejrzeń, mógłby doprowadzić do ogólnoświatowej współpracy.

## NARZĘDZIA FIZYKI ATOMOWEJ

Niedawny, oszałamiający sukces w wyzwoleniu ogromnych ilości energii zawartej w ciężkich jądrach atomowych był możliwy dzięki szeregowi długich i żmudnych badań i dociekań. Dały one fizykom stopniowo coraz głębszy wgląd w budowę tego drobnego rdzenia bardzo skupionej masy, który jest ośrodkiem każdego chemicznego atomu i zawiera niemal cały jego ciężar. Przypadkowe odkrycie Becquerela czegoś, co później nazwano zjawiskiem promieniotwórczości, rozpoczęło serię emocjonujących badań, podczas których zastąpiono niektóre z naszych niewzruszonych przykazań chemicznych, jak niezmienność pierwiastków, zachowanie masy i energii, przez znacznie ogólniejsze prawa, stanowiące obecnie podwalinę naszej współczesnej wiedzy o budowie atomów. Zauważono dość wcześnie, że promieniotwórcze ciała wyzwalają, wprawdzie bardzo powoli, potężne ilości energii; jednak przez długi czas wszelkie usiłowania kontrolowania procesu wyzwalań tej energii pozostały całkowicie bezowocne. Ilości energii wyzwalał przez „rozbijaczy atomów“, jakkolwiek olbrzymie w porównaniu do znikomych mas wchodzących w grę, były jednak śmiesznie małe w stosunku do potrzeb ludzkich. Mimo wszystko nie zmarnowano wysiłków rozbijaczy atomów, ponieważ dzięki ich pracy nagromadzono zapas wiedzy, który w końcu pozwolił nam rozwiązać zagadnienie sterowanego wywiązywania energii atomowej.

Przez fizykę atomową rozumiemy zwykle tę dziedzinę wiedzy i badań, które zajmują się przemianami jąder atomowych. Ładunek elektryczny, masa, moment magnetyczny, wielkość i kształt jąder atomowych wyznaczono sposobami, które nie uwzględniają ich przemian; te badania nie należą, normalnie biorąc, do fizyki atomowej.

Do mniej więcej 1930 roku fizyka atomowa była właściwie studium promieniotwórczości. Zadaniem fizyka było tylko obserwować co się zdarzyło, nie musiał on stwarzać zjawisk, które miał zamiar badać. Miał on jedynie wyosobnić z całego szeregu zjawisk, zachodzących równocześnie, jedno, na które chciał zwrócić specjalną uwagę, i skonstruować instrumenty, które byłyby dostatecznie czułe na badane zjawisko.

W latach późniejszych nauczyliśmy się sztucznie wytwarzać przemiany jądrowe i obecnie obserwowanie substancji radioaktywnych tworzy tylko małą część działalności fizyka atomowego. Zbudowano potężne maszyny (z których cyklotron jest tylko jednym, szeroko reklamowanym przykładem) do „miażdżenia atomów“ i dzięki ich użyciu poczyniono zadziwiające postępy w naszej wiedzy. Z drugiej strony, narzędzia do obserwowania przemian atomowych są zasadniczo takie same, jak przed 1930 r., chociaż ich zasięg, szybkość i dokładność stale się powiększa.

Rozpocznę zatem mój artykuł o narzędziach fizyki atomowej od opisu „narzędzi wykrywających“, używanych do obserwowania zjawisk, które towarzyszą przemianom atomowym (naturalnym lub sztucznym). Potem nastąpi rozdział o „narzędziach atakujących“, używanych do wywoływania przemian jądrowych; ich opis będzie oczywiście niekompletny z powodu dużej różnorodności tych maszyn. W końcu omówię sposoby użycia

tych dwóch rodzajów narzędzi równocześnie i technikę operacji konieczną do wyosobnienia dla badań jednego, poszczególnego zjawiska.

1. WYKRYWACZE. Wszystkie przemiany jądrowe wywołują (pośrednio lub bezpośrednio) zjawisko poruszających się szybko, elektrycznie naładowanych cząstek. Przelatując przez powietrze (albo inny gaz) cząsteczki te zderzają się po drodze z drobinami i często w zderzeniu wytrącają z nich jeden elektron; ten elektron przyłącza się zwykle do jakiejś pobliskiej drobiny. W rezultacie cząsteczka pozostawi za sobą smugę, składającą się z drobin, z których pewne utraciły elektron i będą tym samym naładowane dodatnio, podczas gdy inne zyskały dodatkowy elektron i dlatego będą miały ładunek ujemny. Naładowane w ten sposób elektrycznie drobin (albo atomy) nazywamy jonami, a proces, w którym one powstają — jonizacją.

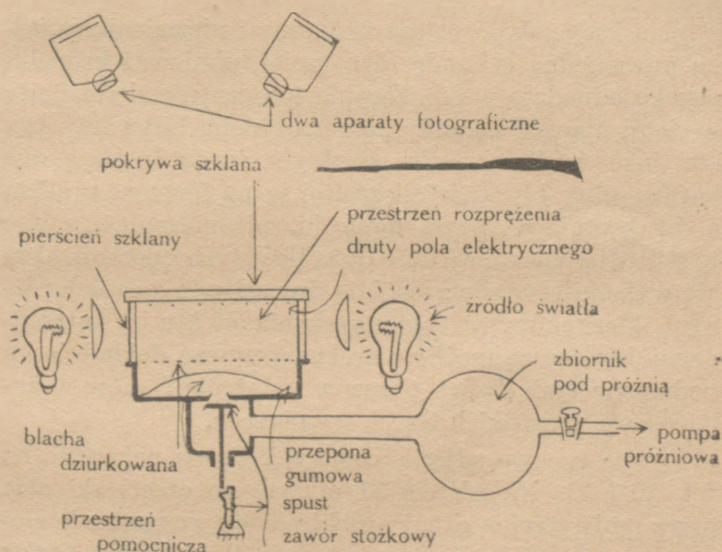
Jonizacja gazów przez szybko poruszające się, elektrycznie naładowane cząstki, tworzy podstawę prawie wszystkich istniejących metod badania przemian jąder atomowych.

2. KOMORA WILSONA. C. T. R. Wilson (Cambridge) wynalazł metodę czynienia smug jonów widzialnymi. Metoda opiera się na przyczepieniu kropelki wody do każdego jonu, na skutek skraplania się wilgoci w otaczającym powietrzu. Podczas sprężania powietrze zagrzewa się (jak to czytelnik na pewno zauważył, używając pompy rowerowej), a gdy się rozpręża, staje się chłodniejsze. Jeżeli pozostawić wodę w sąsiedztwie ograniczonej ilości powietrza, wyparuje ona tylko do pełnego nasyceenia powietrza parą wodną; ilość wilgoci, ko-

nieczna do nasycenia powietrza, wzrasta ze wzrostem temperatury. Jeżeli rozprężyć nagle wilgotne i nasycone powietrze, będzie ono wówczas zawierało więcej wilgoci niżby to odpowiadało jego obniżonej temperaturze; jest ono, powiadamy, przesycone. Nadmiar wilgoci skrapla się na czymkolwiek „pod ręką“ i jeżeli przesyconie jest dostatecznie silne, pojedyncze jony mogą działać jako zarodniki skraplania. Każdy jon staje się zatem małą kropelką wody, a smuga jonów wygląda jak pasmo chmury, dość podobne do białych smug, które powstają czasem za samolotami na dużych wysokościach. Krótko mówiąc, metoda ta polega na przepuszczaniu badanych cząstek przez wilgotne powietrze, które wtedy nagle rozprężamy. Aparat zbudowany według tej zasady przez Wilsona nosi również nazwę komory mgielnej, albo komory rozprężenia. Skonstruowano wiele typów tego aparatu do rozmaitych specjalnych zadań. Dość typową komorę przedstawia nam rys. 3.

Płyta szklana stanowi pokrywę, a pierścienie szklane tworzą boczne ściany. Dno obserwowanej przestrzeni wykonane jest z arkusza blachy dziurkowanej, pokrytej czarnym aksamitem, który działa jako tło i pasma mgielne mogą na nim jasno się zarysowywać. Poniżej znajduje się gumowa przepona, która oddziela przestrzeń rozprężania od przestrzeni pomocniczej. Ta ostatnia wypełniona jest powietrzem pod odpowiednim ciśnieniem, regulowanym przy pomocy manometru, które nadyma membranę, jak to uwidoczniło na szkicu. Gdy chcemy wywołać rozprężenie, otwieramy stożkowy zawór; powietrze wpada z przestrzeni pomocniczej do dużego zbiornika pod próżnię. W rezultacie przepona zostaje przyszana do podstawy płyty. W ten sposób powietrze, zawarte w komorze obserwacyjnej, ulega roz-

prężeniu w pewnym określonym stopniu. Blacha dziurkowana i aksamit zabezpieczają przed ewentualnymi wirami powietrznymi, które mogłyby powstać na skutek gwałtownego ruchu gumowej przepony i zakłócić obraz kropelek w komorze obserwacyjnej. Moczymy zwykle aksamit przed zmontowaniem komory i w ten sposób mamy pewien zapas wilgoci.



Rys. 3. Komora Wilsona, przedstawiona schematycznie.

Jeżeli jony nie są zatrzymane przez tworzące się kropelki, biorą wówczas udział w ruchach cieplnych drobin gazu i szybko rozpraszają się; w ciągu jednej dziesiątej sekundy smuga staje się tak rozejńczona, że dałaby tylko bardzo blade pasmo mgły, jeżeli ponownie wywołano rozprężenie. W celu oczyszczenia komory Wilso-

na ze „zużytych“ jonów, musimy mieć do dyspozycji pole elektryczne. Kilka cienkich drutów, umieszczonych w pobliżu pokrywy i utrzymywanych na napięciu około 100 woltów wyższym od potencjału dziurkowanej, metalowej płyty, zniszczy wszystkie jony tak szybko, jak tylko zdołają one utworzyć się, tj. w ułamku sekundy; pole elektryczne może być wyłączone automatycznie w momencie rozprężenia.

Ślad kropelek pozostaje widoczny i niezmienny tylko przez jedną sekundę albo mniej, ponieważ kropelki szybko odpadają w dół. Zwykle fotografuje się te ślady w ciągu ułamka sekundy po rozprężeniu. Używamy często, jako źródła światła, zwykłych żarówek; dają one bardzo silny błysk, jeżeli zasilić je na moment prądem o dwukrotnie wyższym napięciu, niż normalne, mimo to potrafią one znieść dość dużą ilość tych operacji. Często wykonujemy równocześnie dwa zdjęcia z dwóch różnych kierunków, w celu uzyskania efektu przestrzennego; jest rzeczą możliwą zrekonstruować dokładnie na podstawie tych dwóch obrazów położenie śladów w komorze we wszystkich trzech wymiarach.

Pewne typowe zdjęcia komory Wilsona pokazano na fot. 10 i 11. Na zdjęciu 11 otrzymano cząsteczki alfa przez umieszczenie silnej próbki polonu wewnątrz komory; w rezultacie utworzyła się duża ilość śladów torów cząstek alfa podczas jednego rozprężenia. Widać z fotografii, że wszystkie ślady torów są mniej więcej tej samej długości. Cząstki alfa mają ściśle określony zasięg, który zależy od ich szybkości. Gdy cząstka porusza się przez powietrze, traci ową szybkość i w końcu nie jest już w stanie jonizować drobin powietrza i ślad jej kończy się. Pomiar długości śladu jest wygodnym sposobem mierzenia szybkości, a tym samym energii cząsteczki.

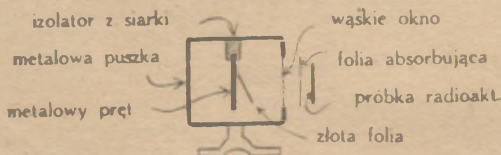
Elektrony (patrz fot. 10) dają ślady torów, które są znacznie mniej wyraźne i przejrzyste, ponieważ wytwarzają one daleko mniej jonów wzdłuż tej samej długości drogi i ponieważ zbaczą z toru na skutek zderzeń. Ich zasięg jest nieokreślony i zwykle znacznie większy, aniżeli cząstek alfa. Najlepszą metodą pomiaru ich energii jest ułożenie miedzianych cewek wokół komory i przesłanie przez nie prądu elektrycznego, co wytworzy w komorze pole magnetyczne. W takim polu elektrony zbaczą i poruszają się raczej po liniach krzywych, niż po prostych. Istnieje łatwa zależność między krzywizną, natężeniem pola magnetycznego a energią elektronu, z której można tę energię obliczyć.

Komora Wilsona może również wykrywać promienie gamma i neutrony, chociaż te nie posiadają ładunku elektrycznego i same nie tworzą śladów torów. Promienie gamma to kwanty światła (fotony) o wysokiej energii i mogą one udzielić dostatecznie dużo energii elektronowi, a tym samym wywołać ślad w komorze Wilsona.

Neutrony nie reagują z elektronami w sposób dający się pomierzyć, natomiast czynią to z jądrami atomowymi. W zderzeniu na przykład z jądrem wodoru (protonem), neutron odbija się i udziela części energii protonowi. Dlatego komora napełniona wodorem wykryje szybkie neutrony przez wykazanie śladów protonów, które powstają wewnątrz komory bez „widocznego“ powodu. Protony dają proste ślady torów z dokładnie widocznym zasięgiem, podobnie jak cząstki alfa, tylko nieco cieńsze. Wzrokowy i dokładny charakter, oraz nadzwyczajna prostota dostarczania wiadomości przez komorę Wilsona jest zbyt oczywista, aby wymagała szerszego do wrodzenia. Duża ilość naszego zaufania w prawdziwość naszych szczegółowych opisów procesów jądrowych po-

chodzi z dokumentarnych dowodów, otrzymanych z obrazów komory Wilsona. Będzie lepiej, jeżeli później omówimy jej niedoskonałości przez porównanie jej z innymi naukowymi przyrządami.

3. ELEKTROSKOP. Elektroskop jest najprostszym narzędziem badawczym fizyki atomowej, a właściwie najstarszym elektrycznym instrumentem pomiarowym. Daje on tylko bardzo prymitywny rodzaj informacji



Rys. 4. Elektroskop — przedstawiony schematycznie.

i nie jest specjalnie czuły, ale jest prosty, niezawodny i dokładny. Według typowej konstrukcji główna jego część jest paskiem bardzo cienkiej blaszki złota, która spoczywa na dobrym izolatorze elektrycznym (zwykle kawałku siarki) — całość zamknięta w puszcze metalowej (patrz rys. 4).

Udziela się teraz ładunku elektrycznego przez chwilowe dotknięcie puszki naładowanym drutem (nie pokazanym na rysunku); złoty pasek podniesie się wówczas, z powodu wzajemnego odpychania się jednoimiennych ładunków obecnych na nim i na łasce. Jeżeli nie ma jakiegokolwiek źródła jonizacji, laska pozostanie naładowana przez długi czas (wiele godzin). Jeżeli natomiast powietrze wewnątrz puszki zjonizuje się — stanie się wtedy słabo przewodzące. Zakładając, na przykład, że laska jest naładowana dodatnio, ujemne jony będą wę-

drowały do laski, podczas gdy dodatnie powędrują do ścian puszek. W rezultacie laska rozładuje się stopniowo, a złoty pasek wróci powoli do swego pierwotnego pionowego położenia. Ten ruch można obserwować przy pomocy niezbyt silnego mikroskopu, umocowanego na puszcze, a szybkość tego ruchu (mierzona przy pomocy stopera) jest wskaźnikiem natężenia jonizacji.

W przeciwieństwie do Komory Wilsona, elektroskop nie nam nie mówi o naturze cząsteczek, które wywołały jonizację. Z drugiej strony jest on aparatem ilościowym i podaje dokładnie z jaką szybkością wytwarzają się jony. Przez zmienianie warunków można nawet z grubszą oceniać rodzaj promieniowania. Na przykład, jeżeli puszka posiada okno wykonane z cienkiej folii aluminiowej, i jeżeli umieścić aktywną próbkę przed oknem, promienie alfa, beta lub gamma mogą wejść do wnętrza puszek. Nałożenie arkusza papieru zatrzyma cząsteczki alfa, a odpowiedni spadek jonizacji — według pomiaru wolniejszego ruchu złotej folii — wskazuje, jaki ułamek jonizacji odpowiadał cząstkom alfa. Blacha mosiężna o grubości półtora milimetra zatrzyma wszystkie promienie beta (elektrony), a pozostała słaba jonizacja będzie odpowiadała wyłącznie promieniom gamma. Jeżeli zwiększyć grubość nakładanego absorbera przez powolne i dokładnie znane stopniowanie i jeżeli przedstawić zauważoną jonizację jako funkcję grubości absorbera, otrzymamy tak zwaną krzywą absorpcji promieniowania wysyłanego przez próbkę. Można otrzymać z tej krzywej szczegółowy skład promieniowania i wiele własności ciał promieniotwórczych określono w ten sposób.

Jedyną niedoskonałością elektroskopu jest ograniczona czułość. Około stu cząstek alfa, a jeszcze większa ilość elektronów musi przejść przez puszkę, aby wytworzyć

widzialne przesunięcie złotego paska. Poczyniono cały szereg wysiłków w celu zwiększenia czułości elektroskopu i wśród wcale skomplikowanych instrumentów (zwanych elektrometrami) które zdołano udoskonalić, są też i tak czułe, że jonizacja wywołana przez jedną cząstkę alfa jest nie tylko do wykrycia, ale daje się dokładnie wymierzyć. Trzeba zaznaczyć, że te instrumenty są tak delikatne i przez to tak niewygodne w użyciu, że posługiwano się nimi przy bardzo niewielu badaniach.

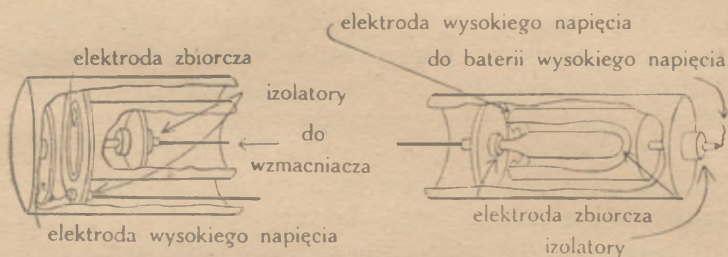
4. WZMACNIACZ PROPORCJONALNY. Sprawne wykrywanie jonizacji wywołanej obecnością pojedynczych cząstek stało się możliwe jedynie dzięki udoskonaleniu lampy radiowej. Potrzeba było pewnego wysiłku dla udoskonalenia wzmacniaczy, które wzmacniałyby delikatne impulsy wehodzące (0,001 wolta lub mniej) do impulsów wychodzących, dostatecznie wielkich i możliwych do zarejestrowania, a mimo to dokładnie proporcjonalnych do stopnia jonizacji.

Greinacher w Szwajcarii, Ortner i Stetter w Austrii i Wynn-Williams w Anglii byli pionierami tych ulepszeń.

Od strony zasilania amplifikatora mamy komorę jonizacyjną, do której powinny wejść cząsteczki w celu zarejestrowania swej obecności. Pewne typowe komory jonizacyjne pokazano na rys. 5.

Głównymi częściami są: elektroda zbiorcza — płyta, albo laska metalowa — która jest połączona z zasilaniem wzmacniacza i elektroda wysokiego napięcia, połączona z baterią o napięciu od paruset do paru tysięcy woltów, która służy do wytworzenia pola elektrycznego w sąsiedztwie zbiorczej elektrody. To pole wprowadza w ruch jony, przy czym jony dodatnie są przyciągane przez ujemną elektrodę i na odwrót.

Kiedykolwiek cząstka alfa przelatuje przez komorę i pozostawia smugę jonów, zaczyna płynąć słaby prąd, przedstawiający ruch elektronów i trwa (przez mały ułamek sekundy) tak długo, aż wszystkie jony dostaną się do elektrody. Krótki prąd pulsujący ładuje zbiorczą elektrodę — a tym samym siatkę zasilania wzmacniacza —



Rys. 5. Komory jonizacyjne w przekroju.

do potencjału nieco różnego od jego normalnej wartości. Ta drobna różnica potencjałów jest impulsem, który ulega wzmocnieniu przez wzmacniacz w ten sam sposób, w jaki wzmacniacz radiowy wzmacnia drobne impulsy chwyczone przez antenę.

Istnieje cała różnorodność przyrządów rejestrujących, które można przyłączyć do strony odbioru wzmacniacza. Najprostszym i najbardziej pospolitym jest licznik taki, jakiego używają w centralach telefonicznych, który podaje ilość rozmów odbytych przez abonenta w ciągu pewnego okresu czasu. Przyrząd jest tak wyregulowany, że tylko impulsy powyżej pewnej wielkości będą na niego działały; liczniki wielokrotne z różnymi schematami połączeń podają dane co do rozkładu wielkości impulsów, z których można wysnuć wnioski co do ilości i charakteru cząstek przechodzących przez komorę.

Jeżeli podłączyć głośnik od strony odbioru wzmacniacza, pojedyncze cząstki będą słyszalne jako ostre trzaski wśród ciągłego, syczącego szmeru. Ten hałas jest głównie spowodowany bezładnym ruchem elektronów w pierwszej lampie wzmacniacza; może być on zmniejszony przez celową konstrukcję, ale nie można się go pozbyć całkowicie. Przedstawia on granicę wielkości impulsu, który można jeszcze wykryć; jeżeli impuls jest tak słaby, że znika w ogólnym szmerze, żadne wzmocnienie nie będzie w stanie wykryć go. Cząsteczka musi wytworzyć paręset jonów, w celu wyprodukowania wykrywalnego impulsu; jest to więcej, niż szybki elektron zdoła wytworzyć przechodząc przez komorę jonizacyjną przyzwoitych wymiarów. Jeżeli chcemy wykryć pojedyncze elektrony, musimy wzmocnić impuls jeszcze przed wejściem do wzmacniacza. To jest, w gruncie rzeczy, zupełnie wykonalne.

5. POWIĘLACZE GAZOWE. Jeżeli uczynić dostatecznie silnym pole elektryczne w komorze jonizacyjnej, jony będą się poruszały tak szybko, że same będą w stanie jonizować gaz. Nowopowstałe jony dołączają się do tego wyścigu i produkują z kolei nowe jony. W rezultacie otrzymujemy rosnącą lawinę jonów (do pewnego stopnia podobną do lawiny neutronów w bombie atomowej), a ilość jonów wytworzonych pierwotnie pomnaża się przez zderzanie się z gazem.

Aby praktycznie zużytkować to zjawisko używa się powszechnie cienkiego drutu jako zbiorczej elektrody; w pobliżu drutu tworzymy niezwykle silne pole elektryczne, a przez nałożenie umiarkowanego napięcia około tysiąca woltów na przeciwną (cylicyndryczną) elektrodę, można uczynić je tak silnym, że wywoła pomnażanie się

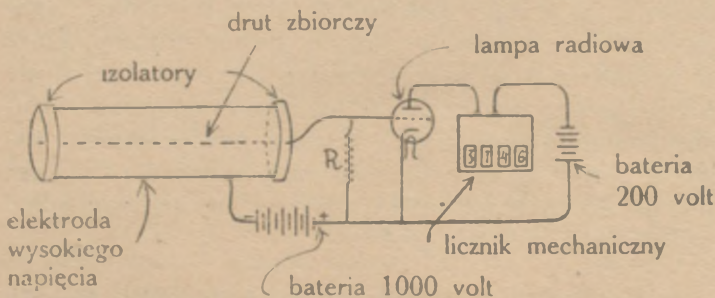
jonów. Komora jonizacyjna skonstruowana według tych założeń nosi często nazwę licznika (rys. 6).

Przez odpowiednie dobranie napięcia można otrzymać pomnażanie przez współczynniki, czyli mnożniki, sięgające jednego tysiąca, a mimo to dostać impulsy, które w przybliżeniu są proporcjonalne do pierwotnej ilości jonizacji; przyrząd użyty w ten sposób nazywamy proporcjonalnym licznikiem. Wraz z powiększaniem napięcia bardzo gwałtownie wzrasta pomnażanie i czasem jest nie do opanowania! Pojedynczy jon może wywołać wyładowanie miliona jonów.

6. LICZNIK GEIGER-MUELLERA (albo Licznik G. M.). Geiger i Mueller (Niemcy) pierwsi pokazali, w jaki sposób stłumić nadmierne wyładowania, aby w następnym ułamku sekundy licznik był z powrotem w swej pierwotnej pozycji — gotowy do przyjęcia następnej cząsteczki. Każde wyładowanie jest dostatecznie silne do wykrycia przy użyciu elektroskopu i niektóre z początkowych badań, gdzie używano tego przyrządu, polegały rzeczywiście na wzrokowej obserwacji; ta metoda jest jednak żmudna i później zastosowano prosty wzmacniacz w celu poruszania mechanicznego licznika.

Tłumienie wyładowań można otrzymać przez uczynienie oporu  $R$  (rys. 6) bardzo dużym, tysiąc megaomów albo więcej, przez wypełnienie licznika specjalną mieszaniną gazową (na przykład argonem zawierającym trochę pary alkoholu) albo przez obniżenie napięcia na liczniku na krótki czas po każdym impulsie. Pierwsza metoda jest obecnie rzadko używana, ponieważ zajmuje zbyt dużo czasu licznikowi na powrót do pierwotnego położenia, z pozostałych dwóch metod obie posiadają swoich zwolenników.

Ponieważ jonizująca cząsteczka wytwarza wszystkie swoje jony praktycznie w tym samym czasie (w ciągu jednej stumilionowej części sekundy albo mniej), każ-



Rys. 6. Licznik G. M. i obwód rejestrujący.

da cząsteczka przechodząca przez licznik G. M. wytworzy tylko jeden impuls, niezależnie od tego, czy jonizuje ona jedną drobinę gazu, czy tysiące, ani czy cząsteczka jest elektronem, czy cząstką alfa. Zasadnicza wartość licznika G. M. leży w jego zdolności liczenia poszczególnych elektronów. Duża ilość radioaktywnych izotopów rozpada się z wydzielaniem (dodatnich lub ujemnych) elektronów i liczniki G. M. są szeroko stosowane do badań tych rozpadów, albo do pomiarów ilości pewnego izotopu w danej próbce. Zastosowanie wskaźników promieniotwórczych w chemii, biologii i medycynie (patrz artykuł o wskaźnikach promieniotwórczych) wprowadziło licznik G. M. do wielu pracowni, gdzie nawet nie stanęła noga fizyka atomowego.

Jak przy wszystkich metodach obliczania, tak i tu mamy trzy ograniczenia, które mogą być w skrócie zasyntetyzowane: statystyczne, stałej wartości układu i rozkładowe.

Zjawiska jądrowe zachodzą beładnie, niezależnie jedno od drugiego. Dlatego ilość zjawisk w pewnym przedziale czasu podlega zmianom, które zachodzą we wszystkich zjawiskach statystycznych. Jeżeli obserwujemy 100 impulsów w ciągu jakiejś jednej minuty, nie znaczy to, że przeciętna ilość tych impulsów na minutę jest dokładnie 100; oznacza to jedynie, że przeciętna wartość leży prawdopodobnie między 90 a 110 na minutę, aczkolwiek wartości jeszcze bardziej odległe od setki nie są wcale wykluczone. Ogólnie, jeżeli obserwujemy przeciętnie  $N$  impulsów, prawdziwa wartość przeciętna leży prawdopodobnie między  $N + \sqrt{N}$ , a  $N - \sqrt{N}$ . Niepewność wyniku  $\sqrt{N}$  wzrasta wolniej niż samo  $N$  i dlatego dokładność polepsza się ze wzrostem liczby impulsów. Jeżeli szybkość zjawiania się impulsów jest bardzo niska, musi się prowadzić doświadczenie przez bardzo długi czas, a to dla nagromadzenia dostatecznej ilości impulsów. Przy niezmiernie wolnych procesach czas wymagany staje się absurdalnie długi, głównie dzięki istnieniu tzw. tła, tj. stałej wartości układu.

Wszystkie pospolite ciała (szkło, metale etc.) zawierają ślady radioaktywnych substancji i każdy licznik (albo komora jonizacyjna) wyśle czasem samoczynnie impulsy. Dla każdego licznika należy tę wartość stałą wyznaczyć niezależnie, czyli określić tzw. tło pomiaru i odejmować ją od wyniku każdego doświadczenia. Ta poprawka staje się stosunkowo wielką i niepewną, jeżeli zjawisko mierzone jest bardzo słabe.

Na przykład, jeżeli jakiś licznik G. M. ma stałą wartość 30 impulsów na minutę, pomiar wykonany na próbie, dającej tylko jeden dodatkowy impuls na minutę, jest niepodobieństwem. Jeżeli pracować przez dwie godziny i mierzyć w ciągu pierwszej wartość „tła“ aparatu,

a przez drugą samą próbkę, to w idealnym przypadku naliczymy w pierwszej godzinie wartość  $30 \times 60 = 1800$ , a w drugiej godzinie  $(30+1) \times 60 = 1860$ . Każdy z tych pomiarów ma jednak niepewność statystyczną około  $\sqrt{1800} = 43$ ; oczekiwana różnica 60 leży zatem na granicy niepewności statystycznej, a jej prawdziwa wartość jest jeszcze ciągle wątpliwa, nawet po tych dwóch godzinach liczenia. Otrzymanie wartości pomiaru z niepewnością plus minus 20 procent zajęłoby około pięćdziesięciu godzin, i to byłoby jeszcze bardzo niedokładne.

Jeżeli zagadnienie pozwoli na to, będziemy starali się utrzymać wysoką szybkość odliczania, co pozwoli na osiągnięcie żądanej dokładności w krótkim przeciągu czasu. Oznacza to jedynie, że impulsy będą bardzo blisko siebie i czasami może się zdarzyć, przy bardzo bliskim ich następstwie, że nie zostaną one rozpoznane oddzielnie i tylko jeden z nich będzie rejestrowany. Mechanizm licznika wymaga zwykle jednej setnej części sekundy lub dłużej do zarejestrowania jednego impulsu i jeżeli nowy impuls zdarzy się w ciągu tego czasu, nie zostanie on zarejestrowany. Dlatego przy wzroście szybkości odliczania coraz większy procent impulsów ulega utracie i w końcu licznik mechaniczny zdławi się zupełnie.

Pomysłowym przyrządem jest „licznik połówkowy“ (wynaleziony przez Wynn-Williamsa), który przesyła tylko co drugi impuls i ma wielką zdolność rejestracji, ponieważ nie zawiera ruchomych części, a tylko lampy radiowe. Zwykle łączymy kilka tych liczników połówkowych w szereg, tak, że każdy z nich wysyła do następnego tylko połowę impulsów otrzymanych od swego poprzednika. Przez ten proces powtarzanego dzielenia ilość

ei impulsów można znacznie zmniejszyć ilość tych impulsów, które licznik ma zarejestrować; jeżeli użyć sześciu połówkowych liczników, połączonych szeregowo, mechaniczny licznik (na końcu) ma do zarejestrowania tylko co 64 z pierwszych impulsów i może dlatego łatwo dać sobie radę z ilością kilku tysięcy na minutę. Licznik G. M. potrzebuje tylko jednej dziesięciotysięcznej części sekundy do odpoczynku po każdym wyładowaniu. Jeżeli nie chcemy stracić więcej niż kilka procent cząsteczek, nie powinniśmy iść wyżej z liczeniem niż dziesięć tysięcy na minutę. Komory jonizacyjne pracują nawet przy większych częstotliwościach.

7. KLISZA FOTOGRAFICZNA. Jeżeli szybkie cząsteczki padną na kliszę fotograficzną utworzą one (podobnie jak światło) ukryty obraz, który można wywołać. Stąd duża liczba elektronów albo padając wprost na kliszę albo tworząc się na niej na skutek działania promieni gamma, będzie działała na nią w ten sposób, że po wywołaniu klisza okaże się zezerniała. To właśnie zjawisko pomogło Becquerelowi do wykrycia promieniotwórczości. Klisza fotograficzna jest znacznie mniej czuła niż licznik, ale istnieją doświadczenia, w których nie odgrywa to żadnej roli, jeżeli np. chcemy dowiedzieć się, w którym miejscu elektron trafia do aparatu wykrywającego.

Pojedyncza cząstka alfa, wchodząc do drobno-ziarnistej emulsji na kliszy, może zaatakować parę ziaren bromku srebra, co potem da się wywołać, i w ten sposób, używając silnego mikroskopu, można zidentyfikować jej ślad jako równy szereg około tuzina czarnych punktów (ziaren srebra). Dlatego można używać kliszy fotograficznej do uwidoczniania śladów cząstek alfa i innych,

szybko poruszających się jąder atomowych. Nie podaje ona tak dokładnych szczegółów, jak komora Wilsona i nie umożliwia oglądania elektronu, ale jest niezmiernie łatwa w użyciu i posiada tę zaletę, że rejestruje cząsteczki przez cały czas w przeciwieństwie do komory Wilsona, która rejestruje obecność cząsteczek tylko podczas krótkiego momentu, bezpośrednio po rozprężeniu.

#### 8. PRZEGLĄD NARZĘDZI WYKRYWAJĄCYCH.

Większość badań jąder atomowych przeprowadza się dzisiaj przy użyciu liczników albo komór jonizacyjnych; mechaniczne liczniki stosuje się tylko do rejestrowania wyników. Ta metoda łączy maksymalną czułość — ponieważ jest ona w stanie wykryć nawet pojedynczą zmianę atomową — z pojemnością, potrzebną do otrzymania dokładnych wyników, przez rejestrowanie dużej liczby zjawisk w przeciągu krótkiego czasu. Wydzielenie cząstek pewnego gatunku jest z reguły możliwe. Przez dostosowanie stopnia wzmacniania, wzmacniacz proporcjonalny może liczyć protony w obecności neutronów, a produkty rozpadu w obecności cząstek alfa. Z drugiej strony licznik G. M. będzie wykrywał elektrony, podczas gdy cięższe cząsteczki ulegną absorpcji w ścianach, chyba że uczynimy je celowo bardzo cienkimi. Jeżeli cząsteczki są obecne w dużych ilościach, można je oznaczyć przy pomocy elektroskopu; jest to również pewnego rodzaju metoda obliczania w tym sensie, jak ważenie worka z monetami odpowiada przeliczaniu ich.

Jeżeli jakieś zjawisko jest nowe i niezupełnie zrozumiałe, jest zwykle bardzo trudno wytłumaczyć je jedynie na podstawie przeliczenia. To jest właśnie przypadek, gdzie komora Wilsona oddaje nieocenione usługi, ponieważ pokazuje ona na pierwszy rzut oka gatunek czą-

steczek i ich wzajemne związki. Jeżeli nie posiadalibyśmy komory Wilsona, odkryto by z pewnością i bez niej neutron, pozytron i mezon, ale znacznie później i z dużym nakładem wysiłku. Trzeba jednak przyznać, że nagromadzenie dostatecznej ilości danych przy użyciu komory Wilsona jest powolne i żmudne. Komora musi zwykle parę minut odpoczywać po każdym rozprężeniu i tylko niewiele śladów torów można fotografować za każdym razem, bo inaczej obraz staje się zbyt niezrozumiały. Po wykonaniu zdjęć każdy poszczególny ślad toru musi być zmierzony przez eksperymentatora. Dlatego komory Wilsona używa się do właściwych pomiarów (w odróżnieniu od orientacyjnych) tylko dla zjawisk, które są trudne do odizolowania metodami przeliczania. W pewnych przypadkach klisza fotograficzna może zająć miejsce komory Wilsona, chociaż mierzenie śladów torów pod potężnym mikroskopem jest nawet bardziej nudne, niż pomiar komorą Wilsona.

9. NARZĘDZIA ATAKU. W celu sprowokowania przemiany jądrowej musimy skupić dużą ilość energii na jądrze. Kula karabinowa ma znacznie więcej energii, niż cząstka alfa, ale jej energia jest rozdzielona między bardzo wielką liczbą atomów i nie można skupić jej na jakimś pojedynczym atomie.

Z tego powodu pociski używane w przemianach jądrowych muszą same mieć wymiary tego samego rzędu co jądra. Rutherford odkrył przemianę jądra azotu pod wpływem bombardowań szybkimi jądrami helu (cząstkami alfa), które szczęśliwie są dostarczane przez naturalne promieniotwórcze ciała. Zdawał on sobie sprawę, że zakres tych badań powiększyłby się znacznie, jeżeli inne lekkie jądra można by sztucznie przyspieszać do

osiągnięcia przez nie tych samych lub większych energii. Pod jego kierownictwem właśnie udał się pierwszy tego rodzaju eksperyment, przeprowadzony przez J. D. Cockerofta i E. T. S. Waltona, tj. rozbitcie litu działaniem szybkich protonów.

Szybkości, które trzeba nadać protonom lub innym jądom, dla umożliwienia im wywołania przemiany jądrowej, idą w tysiące mil na sekundę, znacznie więcej, aniżeli można osiągnąć stosując znane środki mechaniczne z materiałami wybuchowymi włącznie. Jedyną drogą, na której możemy im udzielać tych dużych szybkości, to działanie pola elektrycznego na ich elektryczne ładunki. Energia kinetyczna, którą cząsteczka osiąga podczas przyspieszania, jest równa iloczynowi z jej ładunku i różnicy potencjału elektrycznego między punktami, gdzie zachodzi to przyspieszanie. Dlatego wyrażamy zwykle energię cząsteczek w elektro-woltach (skrót ev), która jest energią jednego elektronu (albo protonu, ponieważ posiada on tę samą wielkość ładunku) przyspieszonego przez różnicę potencjałów jednego wolta. Do potrzeb fizyki atomowej jest to zbyt mała jednostka i bardziej odpowiednią jest milion elektrowoltów (symbol Mev). Proton, posiadający energię kinetyczną 1 Mev ma szybkość około 9.000 mil. na sekundę.

Tylko najlżejsze jądra nadają się na pociski, ponieważ cięższe jądra mają większy ładunek elektryczny i dlatego są silniej odpychane przez jądra, które chciałibyśmy rozbić. Większość prac została wykonana przy użyciu protonów (jąder zwyczajnego wodoru), deuteronów (jąder ciężkiego wodoru, rzadkiego izotopu o ciężarze atomowym 2, zwanego również deuterium) i cząstek alfa (jąder helu). W następnym opisie rozmaitych metod przyspie-

szania cząstek będziemy mówili o protonach jedynie przykładowo.

a) AKCELERATOR WYSOKIEGO NAPIĘCIA. Najprostszym sposobem wytworzenia protonów posiadających energię, powiedzmy 1 Mev, jest umieszczenie ich w rurze pod próżnią i nałożenie na końcu tej rury różnicy potencjałów jednego miliona woltów. Pole elektryczne pędzi protony wzdłuż rury zwiększając ich szybkość aż, u wylotu rury, uderzą one „cel“ tj. warstwę pierwiastka, którego atomy chcemy przemienić, albo któregoś z jego związków.

Całkowite urządzenie składa się zatem z czterech części: źródła jonów, gdzie wodór jonizuje się i daje protony; rury przyspieszającej, w której protony nabierają szybkości; celu bombardowania, gdzie niektóre z nich zderzą się z jądrami, które chcemy badać; i wreszcie prądnicę wysokiego napięcia, z której protony czerpią swoją energię.

Źródło jonów jest zbudowane do pewnego stopnia według tych samych zasad, co lampa radiowa. Gorące włókno metalowe wysyła elektrony, które podążają do anody, pod działaniem różnicy potencjałów paruset woltów. Wprowadzamy wolny strumień wodoru tak, że niektóre z elektronów w drodze do anody zderzają się z drobinami wodoru i jonizują go. Źródło jonów połączone jest z rurą przyspieszającą małym otworem (powiedzmy o średnicy 3 milimetrów). Jony, które zbliżą się do tego otworu, są wysysane przez silne pole elektryczne, działające z przeciwnej strony. Jeżeli wolimy raczej deuterony lub jądra helu, niż protony, wprowadzamy deuterium albo hel zamiast wodoru.

Rura przyśpieszająca jest z reguły wykonana z pewnej liczby izolujących części, czyli segmentów (ze szkła albo porcelany), poprzedzielanych segmentami metalowymi, które znów połączone są z prądnicą wysokiego napięcia w ten sposób, że napięcie wzrasta równomiernie od segmentu do segmentu. W ten sposób każdy z izolujących segmentów musi znosić tylko ułamek całkowitej różnicy potencjałów, a doświadczenie uczy, że jest rzeczą możliwą obciążyć rurę przyśpieszającą znacznie większą różnicą potencjałów, niż gdyby to była tylko jedna długa rura izolująca. W celu wytworzenia dobrej próżni łączy się kilka wydajnych pomp (olejowych, dyfuzyjnych) z rurą przyśpieszającą. Dobra próżnia jest konieczna do zabezpieczenia protonów przed utratą energii na skutek zderzeń z drobinami gazu podczas poruszania się wzdłuż rury; co więcej, jeżeli próżnia jest niedostateczna, gaz obecny w rurze zaczyna przewodzić i prądnica nie jest w stanie dłużej utrzymać wymaganego wysokiego potencjału elektrycznego.

Cel bombardowania musi być chłodzony, ponieważ protony, zatrzymując się na nim, zamieniają swą energię kinetyczną na ciepło. Dlatego cel jest często wydrążoną płytą miedzianą, chłodzoną wodą, pokrytą warstwą pierwiastka, który chcemy bombardować protonami. Cienka warstwa jest zupełnie wystarczająca, ponieważ nawet względnie szybkie protony nie mogą przeniknąć głębiej niż na jeden milimetr ciała stałego. Fizycy mówią o „grubym“ celu, jeżeli warstwa jest dostatecznie gruba, aby zatrzymać zupełnie bombardowanie cząsteczek. W tym przypadku protony tracą stopniowo swą energię, przechodząc przez dany materiał i podczas tego zwalniania biegu mogą wywołać rozpad w każdej chwili. Jeżeli badacz ma zamiar studiować działanie protonów o ściśle

określonej energii, używa on „cienkiego“ celu, przez umieszczenie tylko śladu żądanej substancji na płycie, a to przez nadestyłowanie jej nad próżnią. W tej cienkiej warstwie protony tracą bardzo niewiele energii, a materiał umieszczony pod spodem jest tak dobrany, że nie wywołują one w nim żadnych jądrowych przekształceń.

Najtrudniejszym zadaniem jest wytworzenie koniecznego wysokiego napięcia. Jeżeli podnieść różnicę potencjałów między dwoma kawałkami metalu, dojdziemy w końcu do momentu, kiedy izolacja powietrzna między nimi zawodzi; iskra przeskakuje z jednego kawałka na drugi i potencjał gwałtownie opada do znacznie niższej wartości. W celu otrzymania wyższych napięć należy powiększyć odległość między dwoma metalowymi kawałkami; aczkolwiek przy różnicy potencjałów jednego miliona woltów iskra może przeskoczyć odległość wielu stóp. Można powiększyć kilkakrotnie odporność powietrza na przebicie elektryczne przez podwyższenie jego ciśnienia albo przez dodanie małych ilości pewnych gazów, zwłaszcza freonu (dwuchloro-dwufluoro metanu, używanego powszechnie w urządzeniach chłodzalnicych).

Obecnie używa się najczęściej dwóch typów generatorów wysokiego napięcia: zespołu transformatora i prostownika, oraz generatora używającego pasa elektrycznego (wynalezione go przez van de Graaffa i noszącego jego imię).

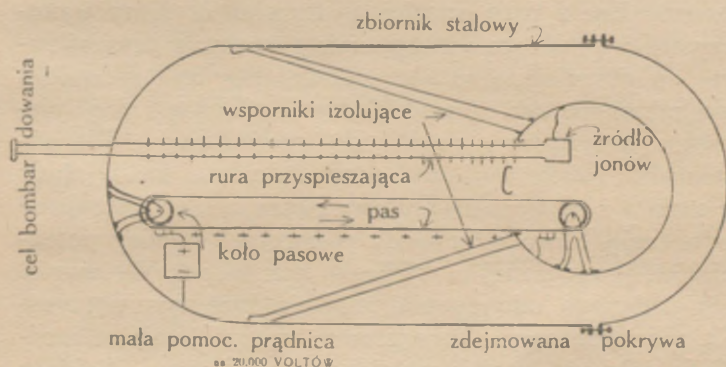
Układ transformatora i prostownika jest typowym stosowaniem normalnej techniki, dyktowanej przez inżynierię elektryczną. Prąd zmienny (taki, jakiego dostarcza elektrownia) przetwarza się przy użyciu transformatora na słabszy prąd, ale o wyższym napięciu, a następnie przesyła się go przez lampę prostowniczą (kenotron),

której pozwala na przechodzenie prądu tylko w jednym kierunku. Prąd, który przechodzi przez prostownik, jest prądem pulsującym, wyrównanym przy pomocy dużych kondensatorów.

Każdy aparat radiowy, pracujący na prądzie zmiennym, posiada podobne urządzenie dla wytwarzania prądu stałego o napięciu kilkuset woltów, a główna różnica leży w stosowaniu większych transformatorów, prostowników i kondensatorów w celu uzyskania wyższych napięć. Ponieważ transformator jest najdroższą częścią urządzenia i cena jego wzrasta silnie z jego szczytowym napięciem, wykazano dość dużą pomysłowość przy szczęśliwych rozwiązaniach układów, gdzie napięcie na odbiorze było kilka razy większe od szczytowego napięcia użytego transformatora.

„Van de Graaff“ jest wspaniałym potomkiem starożytniej rodziny maszyn elektrostatycznych, które swego czasu były dumą sztuki fizyków a obecnie zostały usunięte w zaprószonego kąta sali wykładowej. Podstawowym założeniem tych maszyn jest zjawisko przenoszenia ładunków elektrycznych złączonych z materią z miejsca na miejsce, przy użyciu wirujących tarcz, wykonanych z izolacyjnego materiału. W maszynie Van de Graaffa tarczę zastąpiono izolacyjnym pasem, poruszającym się na dwóch kołach. Wprowadzamy ładunek elektryczny na pas w pobliżu jednego koła pasowego, a następnie przenosimy go do dużej, pustej kuli metalowej, która otacza drugie koło pasowe. Gdy coraz więcej ładunku zbiera się na kuli metalowej, potencjał jej wzrasta do momentu, w którym albo nastąpi wyładowanie iskrowe, albo dostateczna ilość prądu będzie uchodziła z kuli i zapobiegnie dalszemu wzrostowi napięcia. Dla uzyskania napięć powyżej miliona woltów umieszcza się

całe urządzenie (łącznie z rurą przyspieszającą i źródłem jonów) wewnątrz dużego stalowego zbiornika, do którego pompuje się powietrze (zawierające nieco freonu) pod ciśnieniem około 7 atmosfer. Cel bombardowania znajduje się zwykle przy końcu rury długiej na kilka stóp, która wystaje ze stalowego zbiornika w celu łatwiejszego dostępu dla wszelkiego rodzaju narzędzi wykrywających (patrz rys. 7 i foto 6).



Rys. 7. Generator pasowy (Van de Graaff) i rura przyspieszająca przedstawione schematycznie.

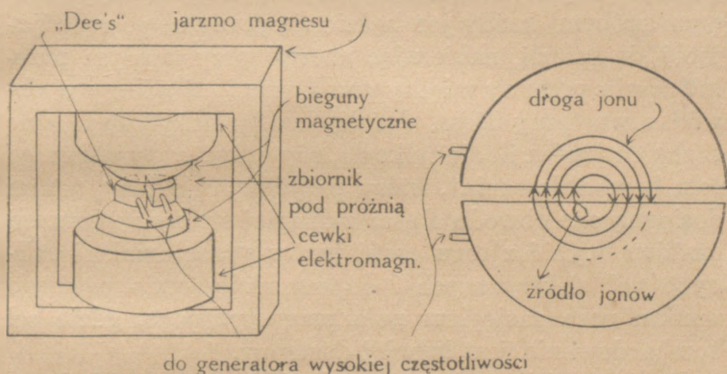
Zespoły „transformator — kenotron“ zbudowano do napięć sięgających dwóch milionów woltów, a przy stosowaniu generatora pasowego osiągnięto napięcia około czterech milionów woltów. Pewien dalszy postęp według tych założeń jest możliwy. W międzyczasie odkryto kilka metod, które umożliwiają zasilanie cząsteczek energią wielu Mev, bez koniecznego użycia tak wysokich napięć.

b) WIELOKROTNA AKCELERACJA — CYKLOTRON. Pierwszą tego rodzaju próbą był liniowy, wielokrotny akcelerator. Ułożono pewną ilość krótkich rur

metalowych wewnątrz zbiornika nad próżnią, ze źródłem jonów przy jednym końcu; wszystkie nieparzyste rury połączono razem, a wszystkie parzyste w osobny zespół. Jeżeli nałożylibyśmy pewną stałą różnicę potencjałów między te dwa zespoły rur, na przykład czyniąc nieparzyste dodatnimi w stosunku do parzystych, proton poruszając się od rury pierwszej do drugiej nabierałby przyśpieszenia, ale straciłby ten zapas energii przechodząc z rury drugiej do trzeciej. Możemy wykorzystać jednak czas przebywania protonu w drugiej rurze na odwrócenie różnicy potencjałów między oboma zespołami rur tak, że proton ulegnie pewnemu przyśpieszeniu w momencie wejścia do trzeciej rury. Ten odwracalny proces może być powtarzany dla każdej rury z osobna i ostatecznie protony ukazują się wyposażone w energię, która odpowiada pierwotnej różnicy potencjałów, pomnożonej przez liczbę rur. W celu wytworzeniażądanego odwracania napięcia łączymy parzyste i nieparzyste rury z generatorem wysokiej częstotliwości (podobnym do nadawczej stacji radiowej). Robimy rury coraz dłuższe w miarę oddalania się od źródła jonów tak, że jony przebywają w poszczególnych rurach przez ten sam okres czasu, mimo swej wzrastającej szybkości.

W celu uzyskania pokaźnych energii musimy stosować dużą ilość rur i wówczas aparat staje się anormalnie długi (setki stóp) i niepraktyczny. Pomysłem, który umożliwił praktyczne stosowanie tej metody, było umieszczenie całej aparatury w silnym polu magnetycznym, ponieważ w tego rodzaju polu torem swobodnie poruszającej się cząsteczki jest raczej koło, niż linia prosta. I tu trzeba zanotować jeden bardzo szczęśliwy fakt o decydującym znaczeniu. Gdy cząsteczka nabiera przyśpie-

szenia, obwód koła, po którym ona porusza się, powiększa się właśnie w ten sposób, że czas, potrzebny na jedno pełne okrążenie, pozostaje bez zmiany.



Rys. 8. Cyklotron — przedstawiony schematycznie.

Aparat skonstruowany na tej zasadzie szybko zdobył sobie nazwę „cyklotronu“. Zamiast dużej ilości rur stosujemy przyspieszające elektrody, które nazywamy Desami, dla ich podobieństwa w kształcie do dużego D. Razem tworzą one pustą skrzynię metalową, przeciętą wzdłuż średnicy. Umieszczamy je w zbiorniku pod próżnią między biegunami bardzo silnego, jednostajnego pola magnetycznego w poprzek Desów (patrz rys. 8). Jony wytwarzają się w pobliżu środka Desów i używamy tu źródła jonów podobnego w pewnym stopniu do poprzednio opisanego. Te jony, które opuszczą źródło w odpowiednim czasie, ulegną przyspieszeniu przez jeden z Desów; po opisaniu toru połowy obwodu koła jon dojdzie do krawędzi Desa w momencie, gdy napięcie (dostarczane do Desów z generatora wysokiej częstotliwości) zmie-

ni kierunek i jon ulegnie dalszemu przyśpieszeniu. Oczywiście częstotliwość pola musi być precyzyjnie regulowana, aby jony mogły poruszać się „w krok“. Jeżeli regulacja ta jest szczęśliwa (głównie dzięki przypadkowym próbom) każdy jon będzie się poruszał po rozwijającej się spirali, nabierając energii przy każdym przekraczaniu przerwy między obu Desami, aż uderzy w obwód zewnętrzny Desa. Jeżeli chcemy zużytkować tyle szybkich jonów, ile się tylko da, używamy „wewnętrznego celu bombardowania“, który przychwytuje jony, zanim osiągną one obwodu Desa; z drugiej strony jest rzeczą możliwą wybić z toru część jonów przez działanie silnych pól elektrycznych i doprowadzić je do pewnego punktu poza zasięgiem pola magnetycznego, gdzie cel bombardowania jest łatwiej dostępny.

Przez powiększanie magnesów i Desów umożliwiamy elektronom wirowanie po co raz większej spirali i uzyskanie przez to coraz większej energii. Z tego powodu budowano cyklotrony o coraz większych wymiarach. Największy pracujący cyklotron posiada magnes ważący 200 ton, z biegunami o średnicy około 2 metrów; może on wytwarzać jądra helu (cząstki alfa) o energii 40 Mev. Zaprojektowano również cyklotron z magnesami, ważącymi 3.000 ton i 6 metrowymi biegunami, w celu otrzymania jąder helu sięgających 100 Mev i nie ma wątpliwości, że spełniłby on swoje zadanie. Jest jednak pewna granica rozwoju tej metody. Wyżej przytoczona zasada, że jon zawsze zużywa ten sam czas na pełne okrążenie w pewnym danym polu magnetycznym, niezależnie od swojej szybkości, nie sprawdza się dokładnie, gdy szybkość cząsteczki zbliża się do szybkości światła. Gdy cząstka alfa osiągnie energię 80 Mev, czas pełnego okrążenia wzrasta o dwa procent; należy stosować bardzo potęż-

ne generatory wysokiej częstotliwości, w celu ukończenia całego procesu przyspieszania w ciągu małej ilości okrążeń, tak, że cząsteczki nie wypadną „z kroku“ przed ukończeniem przyspieszenia. Dla nadawania znacznie wyższych energii trzeba stosować specjalne „chwyty“ praktyczne i są one w stadium udoskonaień (patrz foto 3, 4, 5).

Rozważa się obecnie rozmaite projekty, zmierzające do wytwarzania cząstek z energiami kilkuset Mev. Wielokrotny liniowy akcelerator może z czasem powrócić z uwagi na duży postęp poczyniony dzięki radiolokacji w technice wytwarzania krótkich fal elektrycznych o dużej mocy. Wymienimy tylko jeden przyrząd, betatron, przy pomocy którego wytworzono elektrony (ale nie jądra) o energii 100 Mev.

c) AKCELERATOR INDUKCYJNY („BETA-TRON“). Betatron jest pomysłowym zastosowaniem zasad pracy transformatora. W transformatorze przesyłamy zmienny prąd elektryczny przez uzwojenie (pierwotne), które otacza żelazny rdzeń. Zmiany w magnetyźmie rdzenia, spowodowane przez zmienny prąd pierwotny, wytwarzają zmienne napięcie we wtórnym uzwojeniu, które również otacza rdzeń żelazny. Napięcie to jest proporcjonalne do ilości zwojów uzwojenia wtórnego i nie jest nadzwyczajnie trudną rzeczą zbudować transformator, który da 100 woltów na jeden zwoj. Uzwojenie wtórne, zawierające milion zwojów, wytworzyłoby teoretycznie napięcie stu milionów woltów, ale oczywiście izolacja przepaliłaby się na długo przed osiągnięciem tego napięcia.

W betatronie nie ma wtórnego uzwojenia. Zamiast niego mamy rurę szklaną lub porcelanową, wygiętą

w pierścien (podobnie jak dętka samochodowa), w której elektrony zmuszone są do krążenia w koło wiele razy. Po każdym okrążeniu elektron zyskuje ilość energii, odpowiadającą napięciu wytworzonemu przez jeden zwój tej hipotetycznej cewki uzwojeń, czyli około 100 woltów i jest rzeczywiście możliwe przepędzać elektrony wokół milion razy. Odpowiednia część pola magnetycznego jest odchylona od żelaznego rdzenia i przechodzi przez przestrzeń w której krążą elektrony, a to w celu wygięcia ich torów (które normalnie byłyby liniami prostymi) w kształt koła o żądanej wielkości.

Betatron został wynaleziony w Ameryce podczas wojny (przez D. W. Kersta, około 1941 roku) i miał skromne zastosowanie do celów fizyki atomowej. Pod koniec 1945 roku firma General Electric Co., Schenectady, ogłosiła pomyslnie rozwiązanie betatronu, produkującego elektrony o energii 100 Mev. Używa się obecnie tego aparatu w pracach badawczych i poważne wyniki osiągnięto przy jego pomocy.

**10. PRODUKCJA NEUTRONÓW.** Neutrony nie występują w przyrodzie (z wyjątkiem bardzo małych ilości w promieniach kosmicznych), a jeźliby nawet występowały, nie moglibyśmy ich przyspieszać, ponieważ nie mają one żadnego ładunku elektrycznego. Jeżeli chcemy otrzymać neutrony, musimy wywołać pewne przemiany jądrowe, w których neutrony uwalniają się i użyć do pomocy protonów albo innych naładowanych cząsteczek.

Jednym ze sposobów, to bombardowanie berylu cząstkami alfa z jakiegoś radioaktywnego źródła. Na przykład mieszamy trochę soli radu z nadmiarem berylu (obydwa składniki w stanie proszku) i zamykamy je

w ruchomej puszcze (o wielkości około jednego centymetra). Takie źródło będzie wysyłało około miliona neutronów na sekundę równocześnie we wszystkich kierunkach; łatwo można je wstawić w jakiegokolwiek doświadczalne urządzenie i praktycznie nie zmienia się ono z czasem. Nieomal wszystkie podstawowe własności neutronów odkryto przy pomocy źródła tego typu.

Neutrony wysyłane przez nabój rado-berylowy są bardzo różnorodne i ich energie kinetyczne wahają się w przybliżeniu między 0,1 a 10 Mev. Używając sztucznie przyspieszonych cząsteczek udaje się wytwarzać jednorodne neutrony, tj. takie, z których wszystkie mają prawie jednakową energię. Na przykład przez bombardowanie deuterium deutronami o energii 0,1 do 0,2 Mev (wystarczy użycie małego zespołu transformatora-kenotronu) otrzymamy neutrony o energii 2,5 Mev. Cienka warstwa litu, bombardowana protonami o energii 2 do 3 Mev (z Van de Graffa) służy jako źródło neutronów, których energia może się zmieniać w granicach nieomal od zera do około 1 Mev przez zwyczajne regulowanie napięcia na Van de Graffie.

Ostatnio powstało najpotężniejsze ze wszystkich źródło neutronów, kiedy zrealizowano jądrowe reakcje łańcuchowe. Ilość neutronów wytworzonych przez duży stos grafitowy, pracujący pełną mocą, jest miliony razy większa od tej, którą można otrzymać z cyklotronu. Nawet o wiele mniejsze reaktory mogą z powodzeniem służyć jako źródła neutronów i jest rzeczą bardzo prawdopodobną, że takie reaktory niedługo znajdą swoje miejsce w pracowniach fizyki atomowej.

Ponieważ neutrony są elektrycznie obojętne, nie są zatem odpychane przez ładunki elektryczne obecne w ją-

drach atomowych i dlatego mogą zbliżyć się do nich nawet bardzo powoli. Niektóre jądra reagują znacznie silniej z powolnymi elektronami, niż z szybkimi. Używając materiałów takich jak woda albo parafina, które zawierają dużo wodoru, możemy łatwo opóźnić bieg neutronów. Za każdym razem po zderzeniu neutronów z jądrem wodoru, ten pierwszy traci przeciętnie połowę swej energii. Po mniej więcej dwudziestu zderzeniach energia jego stanie się tak niska, że będzie ona tego samego rzędu, co energia atomów samego węgłowodoru, istniejąca tam dzięki ruchom cieplnym (drżaniom cieplnym). Potem neutron będzie zyskiwał i tracił na przemian energię podczas ciągłych zderzeń i będzie wędrował bez celu tu i tam w materiale jako „termiczny neutron“, aż w końcu połączy się z jakimś istniejącym jądrem albo zupełnie ujdzie z obrębu materiału badanego.

## 11. POMOCNICZE METODY

Oprócz narzędzi atakujących, tj. takich, które wywołują zmiany jądrowe i wykrywających, tj. takich, które wykrywają cząsteczki powstałe na skutek tych przemian — fizyk atomowy potrzebuje jeszcze całego szeregu operacji. Mają one za zadanie wydzielenie z całej masy procesów, zachodzących równomiernie, jednego szczególnego zjawiska, którym badacz się interesuje. Z całego mnóstwa tych operacji opiszemy tylko parę ważniejszych.

a) SKUPIENIE. Cząstki alfa są bardzo łatwe do skolimowania, czyli skupienia w wąską wiązkę; dwa małe otwory wycięte w cienkiej blaszce, albo nawet papierze, dokażą tej sztuki, przy czym jeden otwór należy

umieścić blisko źródła cząstek, a drugi nieco dalej. W przypadku elektronów arkusz blachy powinien być grubszy, ale to nie wystarcza, bo elektrony mają tendencję zbaczania z drogi na skutek zderzeń z drobinami powietrza. Dlatego dla dobrego skupienia powinniśmy umieścić pod próżnią źródło elektronów i otwory kolimacyjne. Promienie gamma mogą przeniknąć warstwę ołowiu grubą na cal, aby je skupić, należy umieścić źródło w środku grubościennego bloku ołowianego (powiedzmy sześcianu o boku na jedną stopę) z otworem nawierconym od powierzchni do środka. Neutrony można skupić podobnie jak promienie gamma, tylko należy użyć parafiny zamiast ołowiu i wymagana jest większa grubość ścian (około dwóch stóp).

W wielu przypadkach możemy uzyskać skupianie bez używania kolimacyjnych otworów — po prostu przez umieszczenie wykrywaczy w takiej odległości od źródła, że tylko cząsteczki zawarte w wąskim kącie kierunkowym mogą w ogóle trafić w wykrywacz.

b) POCHŁANIANIE. Arkusz papieru zatrzymuje całkowicie cząstki alfa. Mikę można łupać na arkusze znacznie cieńsze od papieru i bardzo równomiernej grubości. Jeżeli wprowadzimy kolejno coraz to grubsze arkusze miki w strumień skupionych cząstek alfa, najpierw ilość cząstek wychodzących będzie niezmienną, aż w pewnym momencie zmaleje raptownie do zera, gdy grubość miki przekroczy pewną wartość; przez pomiar tej grubości możemy znaleźć wyrażenie na energię cząstek alfa. Jeżeli cząstki alfa są mieszaniną cząstek o dwóch różnych poziomach energetycznych i jeżeli będziemy zwiększali stopniowo grubość przesłon mikowych

— ilość cząstek przechodzących i rejestrowanych zmaleje do zera w dwóch stopniach.

Elektrony zachowują się w pewnym sensie podobnie, z tą tylko różnicą, że spadek do zera jest bardziej łagodny. W rezultacie użycie pochłaniaczy czyli absorberów (w tym przypadku zwykle cienkich arkuszy aluminiowych) pozwala na określenie największej energii reprezentowanej wśród badanych elektronów, ale daje tylko bardzo niejasne dane co do obecności elektronów o słabszej energii.

W przypadku promieni gamma, a tym bardziej neutronów, stosowanie pochłaniaczy nie jest normalnie najlepszą drogą do określenia energii.

c) METODA KOINCYDENCJI. Jeżeli jakiś elektron przechodzi przez dwa liczniki G. M. wywoła on w każdym w nich wyładowanie i oba te wyładowania będą praktycznie równoczesne. Można połączyć te dwa liczniki z obwodem lamp katodowych, zestawionym w ten sposób, że będzie on poruszał licznik mechaniczny, o ile, i tylko wtedy, jeżeli oba liczniki G. M. wytworzą wyładowania w tym samym czasie. Tego rodzaju obwód nazywamy obwodem koincydencji.

Interesującym zastosowaniem obwodu koincydencji jest następująca metoda oznaczania energii promieni gamma. Pozwalamy promieniom gamma uderzać w cienką blaszkę, czyli folię metalową; przeważna ilość tych promieni przejdzie na wskroś, ale niektóre z nich wyrzucą elektrony z folii. Jeżeli teraz próbować oznaczyć maksimum energii tych elektronów (która równa jest energii promieni gamma) przez pomiar ich pochłaniania w foliach metalowych, jak to wyżej opisano, zjawisko

pochłaniania będzie częściowo zaciemnione przez fakt, że gdy zwiększymy grubość warstwy pochłaniacza, badane promienie gamma wyrzucą z niego dodatkowe elektrony. Jeśli jednak pierwotne elektrony były rejestrowane przez dwa liczniki G. M. połączone w obwód koincydencji i jeśli umieścić płytki pochłaniacza między dwoma licznikami, wówczas dodatkowe elektrony przejdą tylko przez jeden z dwóch liczników i z tego powodu nie będą zarejestrowane. W efekcie można poprawnie oznaczyć absorpcję elektronów wyrzuconych z pierwszej folii metalowej.

Innego rodzaju zastosowanie badania koincydencji, to badania reakcji jądrowych, które wywołują równoczesne wyrzucenie dwóch cząsteczek z tego samego jądra. Jest również możliwe połączyć więcej niż dwa, tj. trzy, cztery lub więcej liczników G. M. do tego samego obwodu koincydencji i przez to wydzielić, na przykład, elektrony poruszające się w pewnym liczniku i wyrzucone z dwoma kwantami gamma, nie bacząc na obecność całej masy innych elektronów i kwantów gamma, które nie spełniają tego specjalnego warunku. Jest rzeczą oczywistą, że metoda koincydencji jest rzeczywiście potężnym i wszechstronnym narzędziem do rozwiązywania zagadnień związanych z jądrami atomowymi.

d) WYKRYWANIE NEUTRONÓW. Szybkie neutrony wykrywa się zwyczajnie dzięki ich zdolności zderzania się z jądrami wodoru i udzielania im części swej energii; powstałe w ten sposób szybkie protony mogą być wykryte przez komorę jonizacyjną, połączoną ze wzmacniaczem. W tym celu komora jonizacyjna jest albo wypełniona wodorem, albo wyłożona cienką warstwą uwodornionego związku, takiego jak np. parafina. Po-

wolne neutrony, w szczególności neutrony termiczne, mają zbyt mało energii, aby je wykryć powyższym sposobem. Tutaj wykorzystujemy zjawisko, że jądra boru łatwo poddają się działaniu powolnych neutronów z równoczesnym wydzieleniem szybkich cząstek alfa, które można łatwo wykryć. „Komora borowa“ tj. komora jonizacyjna wyłożona borem albo wypełniona gazowym trójfluorkiem boru jest bardzo wygodnym i powszechnie używanym przyrządem do pomiaru natężenia strumieni powolnych neutronów.

Zupełnie inna metoda opiera się na zjawisku, że niektóre pierwiastki (złoto, jod, mangan i cały szereg innych) stają się radioaktywne pod działaniem powolnych neutronów. Ten przebieg daje się mierzyć przy pomocy licznika G. M. albo jeżeli jest dość silny, przy pomocy elektroskopu.

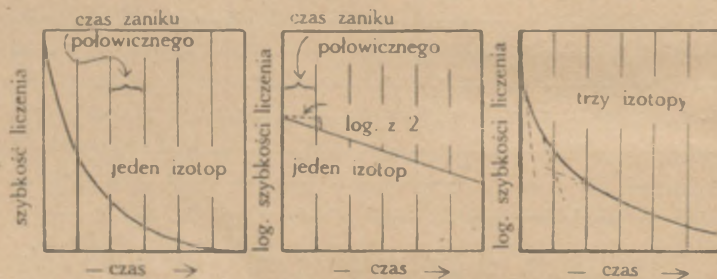
e) KRZYWE ROZPADU. Wiele reakcji jądrowych wywołuje utworzenie się niestabilnego jądra, które usiłuje rozłożyć się po pewnym czasie, prawie z reguły z wydzieleniem (dodatnich lub ujemnych) elektronów. Na przykład, jeżeli wystawić sód na działanie powolnych neutronów, pewne z nich ulegną zaabsorbowaniu przez jądra sodu, dając w rezultacie sód o ciężarze atomowym 24 (zwyczajny sód ma 23). Jeżeli umieścić napromienioną w ten sposób próbkę w pobliżu licznika G. M. zauważymy, że szybkość wskazań licznika maleje według pewnego określonego prawa. Jeżeli ta szybkość maleje według pewnej liczby podczas pierwszej godz., zmaleje również według tej samej liczby w ciągu jakiegokolwiek godziny. To twierdzenie sprawdza się, jeżeli zamiast godziny wybierzemy inne okresy czasu. Powszechnie przy-

jętym sposobem określania szybkości rozkładu substancji radioaktywnej jest określanie tzw. okresu zaniku połowicznego tj. okresu czasu, w ciągu którego promieniowanie zmaleje do połowy. Okres zaniku połowicznego sodu 24 jest 15,5 godziny, stąd w  $2 \times 15,5 = 31$  godzinie ilość promieniowania zmaleje 4-krotnie, w  $3 \times 15,5 = 46,5$  godzinach zmaleje 8-krotnie itd.

W tym miejscu jest rzeczą wygodną stosować logarytm szybkości wskazań licznika, tj. ilości promieniowania. Jeżeli jakaś cyfra maleje wg pewnego współczynnika, jej logarytm maleje o pewną wartość. Stąd logarytm szybkości wskazań w naszym przykładzie maleje o stałą liczbę w ciągu godziny. Jeżeli przedstawimy na wykresie zależność logarytmu szybkości wskazań licznika od czasu (podobnie jak np. dyrektor handlowy przedstawia wahania w sprzedaży w zależności od czasu) otrzymamy krzywą, która opada ze stałym nachyleniem — innymi słowami — linię prostą.

Z nachylenia tej linii możemy na pierwszy rzut oka określić czas zaniku połowicznego, a fakt, że linia jest rzeczywiście prostą, jest dla badacza potwierdzeniem, że ma on do czynienia z czystą próbką promieniotwórczego ciała. Jeżeli taka próbka zawiera mieszaninę dwóch lub więcej aktywnych izotopów, linia przestanie być prostą. Na przykład, jeżeli napromieniamy sód szybko, a nie powolnymi neutronami, znajdziemy, że aktywność próbki zmaleje bardzo gwałtownie w ciągu niespełna pierwszej minuty, potem znacznie wolniej w ciągu następnej pół godziny, a w końcu znów zupełnie powoli, zgodnie z czasem zaniku połowicznego, tj. 15,5 godziny. Jeżeli wykreślić logarytm szybkości wskazań licznika w zależności od czasu, jak to robiliśmy poprzednio, otrzyma-

my linię krzywą (rys. 9, wykres prawy). Można wykazać, że linia ta powstała przez „nałożenie“ trzech linii prostych; innymi słowy, próbka zawiera mieszaninę trzech aktywnych izotopów, których okresy zaniku połowicznego są 40 sekund, 10 minut i 15,5 godziny. Jeżeli mamy więcej niż trzy lub cztery radioaktywne izotopy, zmieszane w próbce, a zwłaszcza, jeżeli ich okresy zaniku połowicznego są niebardzo różne od siebie (co szczęśliwie nie miało miejsca w przypadku sodu) analiza krzywej rozpadu staje się bardzo niepewna i trzeba wówczas prosić chemika o pomoc.



Rys. 9. Krzywe rozpadu.

f) ROZDZIELANIE CHEMICZNE. Substancje radioaktywne powstałe z pewnych pierwiastków nie są najczęściej izotopami tego samego pierwiastka i dlatego można je rozdzielić chemicznymi metodami. Można np. rozpuścić badaną próbkę, dodać jakiegoś odczynnika, który wytrąci jeden z badanych pierwiastków, a nie wytrąci drugich. Pewna niecodzienna trudność leży w tym, że chociaż odczynnik może tworzyć nierozpuszczalne połączenie z pierwiastkiem, który chcemy wydzielić, jednak tak mało wytwarza się go zwykle w przemianach

jądrowych, że nie ma mowy o wytworzeniu stałych ziaren materii, które byłyby dostatecznie wielkie do zatrzymania przez sączek i stąd nie będziemy mieli osadu, nadającego się do sączenia. Dlatego dodajemy zwykle do roztworu małej ilości tego pierwiastka, który usiłujemy wydzielić, i umożliwiaamy w ten sposób wytworzenie się osadu. Ten tak zwany nośnik jest zwyczajnym, nieradioaktywnym materiałem i dlatego nie przeszkadza w pomiarach promieniotwórczości.

Przekształcenie uranu pod wpływem neutronów, które tworzy podstawę otrzymywania energii atomowej, jest tak zagmatwanym zespołem nakładających się wzajemnie procesów, że przez trzy lata doprowadzało ono do rozpaczy naukowców Rzymu, Paryża i Berlina. Gromadzono poszlaki właściwego rozwiązania, ale nie rozumiano ich. Idąc za jednym z tych śladów Hahn i Strassmann w Berlinie skupili swoje zainteresowanie na pewnej aktywnej substancji, która powstała na skutek bombardowania uranu neutronami i którą można było wytrącić z roztworu, używając baru, jako nośnika. Ten fakt weale jednak nie dowodził, że szukana substancja była izotopem baru, ponieważ rad zachowuje się podobnie. Próbą ogniową było usiłowanie oddzielenia nieznannej substancji od jej nośnika, tj. baru, zadanie, które się nie powiodło. Natomiast udało się rzeczywiście wyosobnić małą ilość izotopu radowego, dodanego celowo do nośnika barowego. To doświadczenie stwierdziło ostatecznie, że nasza nieznaną radioaktywną substancją była izotopem nie radu, a baru. Ponieważ jądro baru ma mniej niż dwie trzecie ładunku jądra uranu, stąd wysnułto nieunikniony wniosek, że uran może rozpaść się na dwie mniej więcej równe części i potwierdzono to wkrót-

ce fizykalnymi doświadczeniami. Odkryto bardzo szybko, że obecność jąder baru nie jest koniecznym zjawiskiem przy rozpadzie; jądro uranu jest w stanie rozpaść się w rozmaity sposób i znaleziono więcej niż dwadzieścia pierwiastków wśród produktów tego rozpadu.

HR. GALEAZZO CIANO

# PAMIĘTNIKI

1939 — 1943

PAMIĘTNIKI obejmują tragiczny okres od 1939 r. do daty śmierci Ciano w r. 1943 i odsłaniają stosunki wewnętrzne partii, wpływy rodziny Petacci na Mussoliniego, stosunek partnera Osi do Niemiec i Japonii, istotne nastroje narodu włoskiego, słowem wszystko to, co kryło się za pompatyczną, oficjalną propagandą jedności, przyjaźni i idealizmu faszystowskiego.

Stron 592 formatu 17,5×24,5 cm.

Cena dwóch tomów zł 1900,—.

Do nabycia we wszystkich księgarniach

---

ST. JAMIOŁKOWSKI i T. J. EVERETT  
sp. z o. o. ŁÓDŹ

MAREK SADZEWICZ

# NIEDOPYRZ

Powieść w dwóch tomach.

„...CIEKAWA ta przedwojenna epoka, ciekawa przez złudzenia w jakich ludzie żyli, uważając, że ten ich świat jest najlepszym ze wszystkich światów. Artystycznie wiążąca, przykuwająca wyobraźnię ta nasza zburzona Jerozolima — Warszawa. Jej odtwórcą w swej powieści jest Sadzewicz — znawca i bywalec jeśli chodzi o różnego autoramentu lokale i lokaliki, dzienne i nocne czyli tzw. „mordownie“, oraz odcinek życia dziennikarsko-redakcyjnego. Pod tym względem życia społeczno-obyczajowego „Warszawki“ — powieść stanowi niewyczerpalną kopalnię typów i scen, malowanych z autentycznym realizmem“.

(Wyjątek z recenzji St. Józefowicza — „Powszechne Słowo“ z dnia 30 maja 1948).

Stron 585 formatu A 5

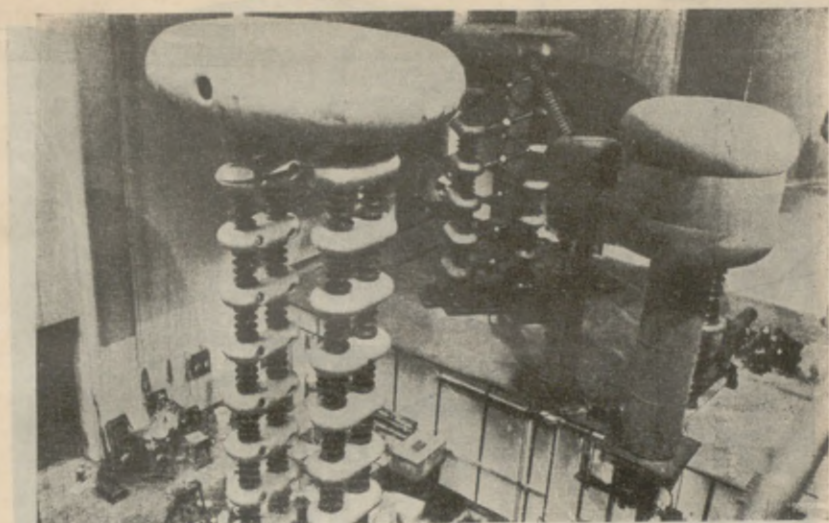
Cena dwóch tomów zł 1500,—.

Do nabycia we wszystkich księgarniach

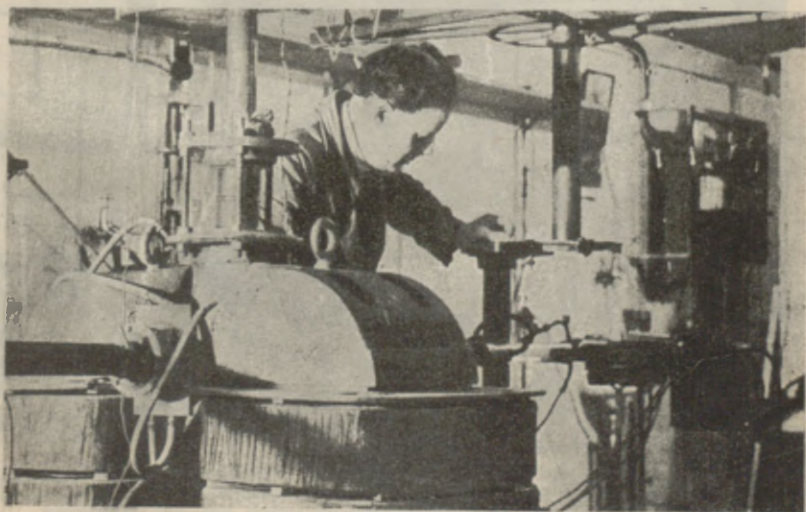
---

ST. JAMIOŁKOWSKI i T. J. EVERT

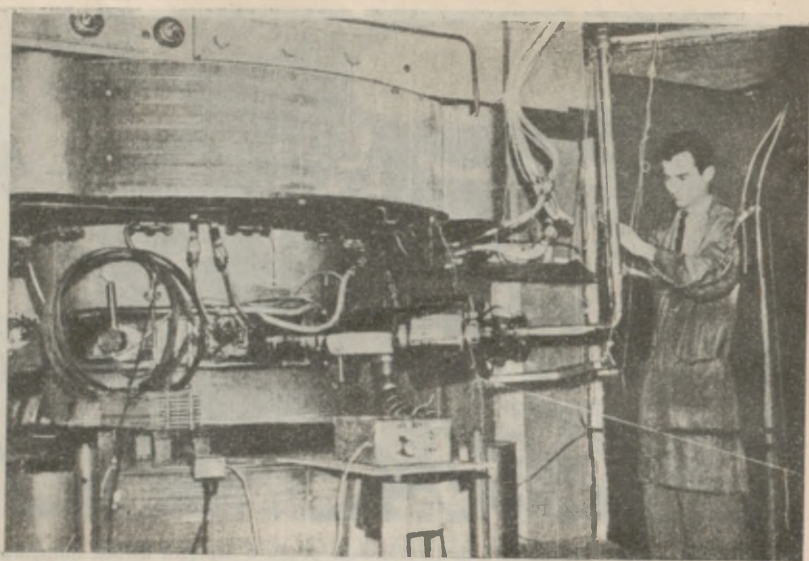
sp. z o. o. ŁÓDŹ



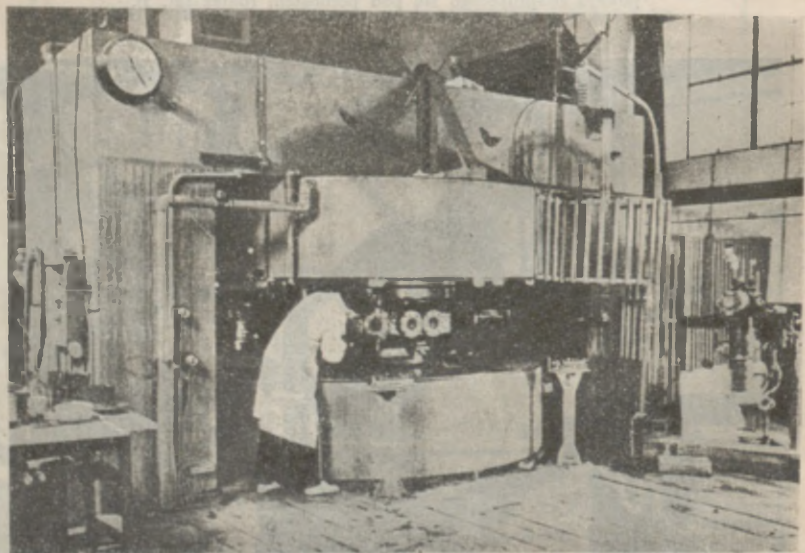
Fot. 1. Montaż generatora dostarczającego prądu o napięciu dwóch milionów woltów w Laboratorium Wysokich Napięć Uniwersytetu w Cambridge. W głębi widoczny generator dostarczający napięcia 1 miliona woltów, używany do rozpędzania deuteronów, które przechodzą przez rurę widoczną w prawej części hall do pokoju znajdującego się pod pomostem (patrz fot. 2).



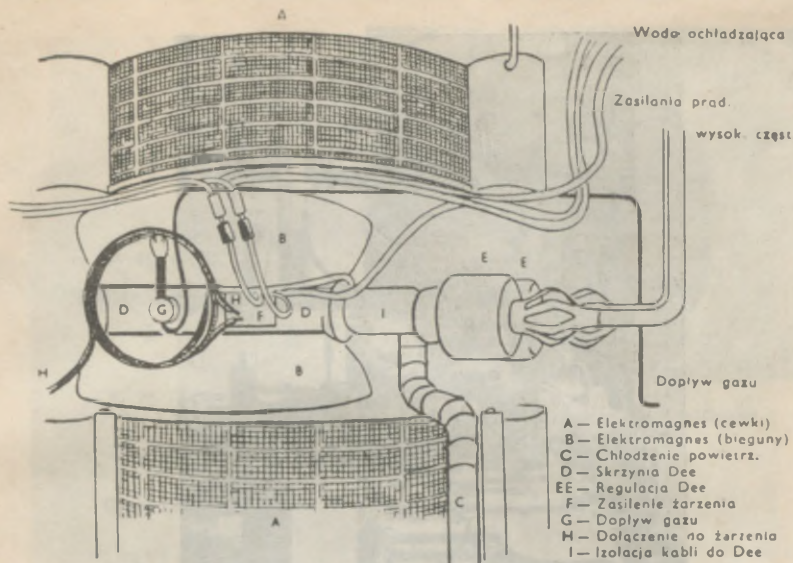
Fot. 2. Rozpędzone deuterony przechodzą w dół rury (widocznej obecnie po lewej stronie) i wirują wzdłuż żarzącej się szklanej rury na skutek działania połącznego magnesu. Bezpośrednio poniżej ręki operatora bombardują one atomy, rozbijając niektóre z ich jąder



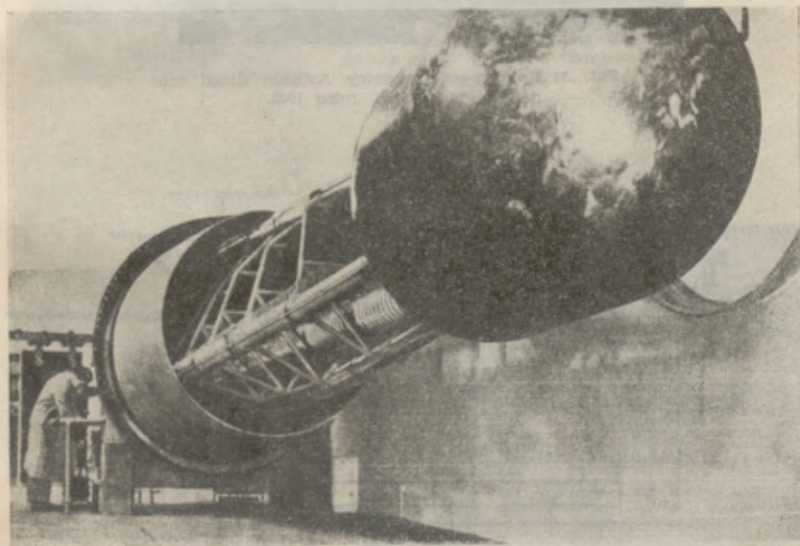
Fot. 3. Pierwszy model cyklotronu w Cambridge. Rury wokół całego urządzenia transportują wodę chłodzącą (patrz schemat obok).



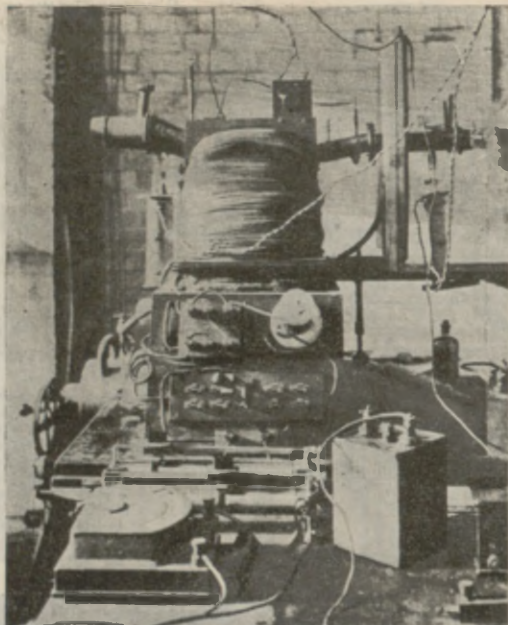
Fot. 5. Cyklotron w Tokio przed wojną. Badacz, zdejmując śrubę na zbiorniku, trzymając głowę między cewkami uzwojenia. Wielka prostokątna rama z litej stali wokół cewek stanowi łożysko magnesu. Zniszczenie tej maszyny wywołało wielkie oburzenie wśród naukowców zarówno w Anglii jak i w Ameryce ponieważ nie uważali oni cyklotronu za narzędzie wojny.



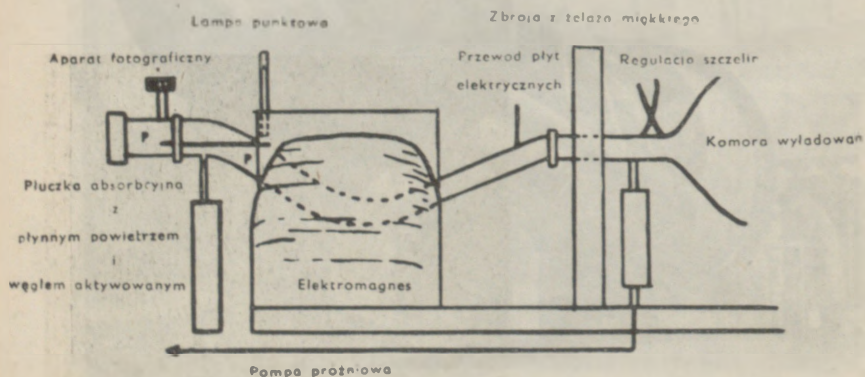
Fot. 4. Schemat cyklotronu przedstawionego na fot. 3.



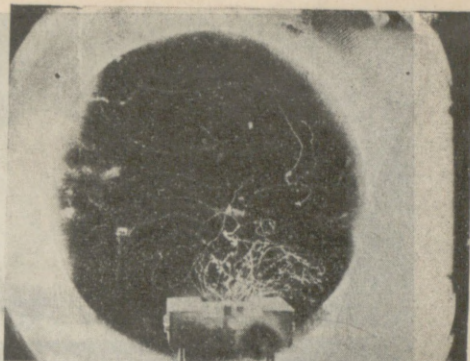
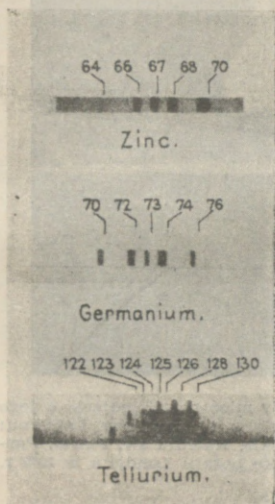
Fot. 6. Generator Van de Graaff'a (Uniwersytet Notre Dame) ze zdjętą pokrywą zewnętrzną i częściowo zdemontowany. Elektroda wysokiego napięcia, skierowana do widza, jest podtrzymywana przez ramę zmontowaną na podstawie, widocznej na tylnym planie. Rura rozpędzająca cząsteczki przechodzi przez dolną część ramy i wygląda jak tłusta dźdźownica, natomiast cieńsza dźdźownica na przednim planie, to opornica używana przy pomiarze napięcia. Pas jest również widoczny i przechodzi dwukrotnie przez górną część ramy.



Fot. 7. Spektrograf masowy Astona; drugi model zbudowany w roku 1935.

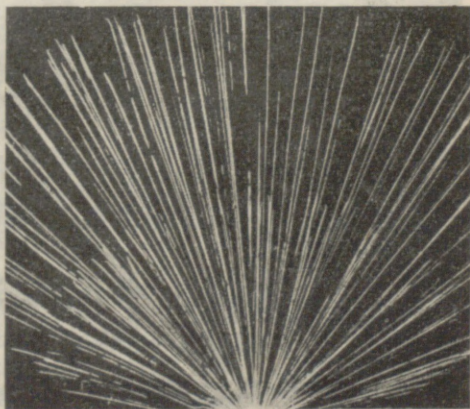


Fot. 8. Jony wytwarzają się w komorze wyladowań elektrycznych i przechodzą w dół do rury po lewej stronie przez szpary, następnie pomiędzy naładowanymi płytami (nie pokazanymi na rysunku), mijają bieguny elektromagnesu (linie kreskowane) i padają na płytę fotograficzną, leżącą poziomo wewnątrz aparatu fotograficznego. Lampa ruchowa robi znak na płycie dla określenia jej pozycji w aparacie fotograficznym (Schemat fot. 1).

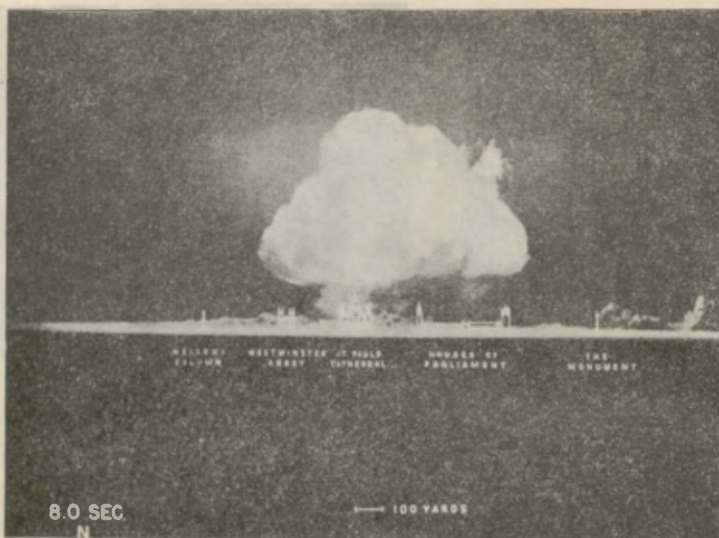


Fot. 10. Ślady torów elektronów

Fot. 9. Typowe widma masowe. Każdy czarny pasek jest znakiem zrobionym na filmie przez cząstki jednego izotopu; odpowiednie ciężary atomowe wpisano ponad paskami.



Fot. 11. Ślady torów cząstek alfa.



Fot. 12. Wybuch pierwszej bomby atomowej. Aby mieć pewne pojęcie o jego zasięgu nadrukowano białe kontury znanych budynków i pomników Londynu: np. od lewej Kolumna Nelsona, Opactwo Westminsterskie, Katedra św. Pawła, Parlament, „Monument” kolumna wystawiona na pamiątkę pożaru Londynu w 1666 r.





Fot. 14. Światowe złoża uranu i ich rozrzeszczenie.



Fot. 15. Ludzie, którzy rozbili atom. Dr E. S. Walton, Lord Rutherford i dr J. D. Cockcroft, którzy rozbili atom w Laboratorium Cavendisha w Cambridge w roku 1932



Fot. 16.  
Prof. Niels Bohr



Fot. 17  
Prof. Sir James  
Chadwick



Fot. 18.  
Dr Enrico Fermi

Biblioteka Główna  
Akademii Sztuki Wojennej

151/2



12-000151-000-0