

ROCZNIK LXV.

1947.

ZESZYT 1.

KOSMOS

Seria B.

PRZEGLĄD ZAGADNIENÍ NAUKOWYCH

W T O R U N I U

WYDAWCA: POLSKIE TOWARZYSTWO PRZYRODNICZE
IM. KOPERNIKA



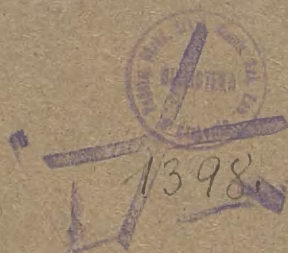
Adres redakcji:

Toruń, ul. Sienkiewicza 30/32.

Redagują:

Prof. Dr Edward Passendorfer

Prof. Dr Jan Zabłocki



M. MIĘSOWICZ

Promienie kosmiczne

1. Wstęp. ¹⁾

Okolo roku 1900 E. Rutherford i Mc Lennan stwierdzili, że nawet najstaranniej izolowany elektrometr, osłonięty od działania ciał promieniotwórczych, wykazuje zawsze obecność jakiegoś, przechodzącego przez wszystkie osłony, bardzo przenikliwego promieniowania. Początkowo źródeł tego promieniowania dopatrywano się w radioaktywności otoczenia, później jednak stwierdzono, że promieniowanie to pochodzić musi z poza ziemi. Zgodnie stwierdzono, w pomiarach dokonywanych w balonach, że w miarę wznoszenia się ponad ziemię natężenie tego promieniowania wzrasta. Wynioskowano stąd, że dochodzi ono do powierzchni ziemi z obszarów wszechświata dalekich od ziemi. Stąd powstała nazwa „promienie kosmiczne”, wprowadzona zresztą dopiero w r. 1925 przez słynnego fizyka amerykańskiego R. A. Millikana. Łatwo stwierdzono, że promienie kosmiczne nie pochodzą ze słońca, bo natężenie ich w różnych porach doby jest jednakowe. Stwierdzono dalej,

¹⁾ Czytelnikom nieobeznanim z elementami fizyki atomowej zaleca się przeczytanie najpierw uzupełnień umieszczonych na końcu artykułu.

że nie pochodzą one z pewnych określonych ciał niebieskich wzgl. z pewnych okolic wszechświata, ponieważ przy pomocy instrumentów rejestrujących promienie kosmiczne przychodzące tylko z pewnego określonego kierunku, nie stwierdzono, by któryś z kierunków w przestrzeni, był czymś wyróżniony. Przez badanie pochłaniania promieni kosmicznych w grubych warstwach wody, wzgl. ziemi wielometrowej grubości, stwierdzono, że są one wielokrotnie przenikliwsze niż najbardziej przenikliwe promienie γ ¹⁾ wysyłane przez ciała promieniotwórcze. Wynioskowano stąd, że promienie kosmiczne są, podobnie jak γ , promieniowaniem elektromagnetycznym, lecz o jeszcze krótszej niż one długości fali. Później przekonano się, że jednak promieniowanie kosmiczne, przynajmniej w większości, utworzone jest z naelektryzowanych cząstek. Początkowo sądzono, że cząstki te są elektronami ²⁾. Później przekonano się, że są to, przynajmniej w większości, inne, nowe cząstki, t. zw. mezony.

Niezwykle charakterystyczną własnością promieni kosmicznych jest zdolność wytwarzania różnego rodzaju promieniowania wtórnego. Cząstka kosmiczna przebiegając przez materię, może na swej drodze wytworzyć wiele, bo nawet tysiące lub setki tysięcy nowych, wtórnych cząstek, lub fotonów ¹⁾. Przy przejściu przez atmosferę, ten właśnie proces jest powodem zanikania składowej pierwotnej, a narastania składowej wtórnej, która później znów z kolei ulega absorpcji i zanika. To co odbieramy na poziomie morza to są już w przeważnej części cząstki wtórne. Procesy, w których te zamiany jednych cząstek w drugie następują, są bardzo skomplikowane i trudne do ujęcia teoretycznego. Szczegółowa analiza eksperymentalna promieniowania kosmicznego pod względem jakości, ilości i energii cząstek na różnych poziomach nad ziemią i pod ziemią umożliwiła dopiero teoretykom powiązanie tych faktów w pewną, w zarysach konsekwentną całość, któraby mogła być podstawą do rozwiązania zagadki powstawania promieni kosmicznych.

Promienie kosmiczne odegrały niesłychanie ważną rolę w całości fizyki nowoczesnej. Najlepsi fizycy zajmowali się tym zagadnieniem. Wymieńmy tylko laureatów Nobla, jak wspomnianego

¹⁾ Por. uzupełnienia.

wyżej E. Rutherforda i R. A. Millikana, A. Comptona, C. D. Andersona i W. Heisenberga. W promieniowaniu kosmicznym odkryto po raz pierwszy, zupełnie dotychczas nieznanne cząstki. I tak, do r. 1932 znane były tylko trzy rodzaje cząstek t.zw. elementarnych,¹⁾ z których zbudowana jest materia, a które same nie składają się już z cząstek prostszych. Były to: elektrony, protony i neutrony¹⁾. Znana była zatem jedna cząstka „lekka” elektron i dwie cząstki „ciężkie” proton i neutron. Fizyk amerykański Anderson odkrył właśnie w promieniach kosmicznych w r. 1932 nową cząstkę lekką a mianowicie „pozitron” (t. j. dodatni elektron). Rok 1938 przyniósł badaczom promieni kosmicznych i wogóle fizykom nową sensację naukową. Wspomniany odkrywca pozitronu Anderson, ze swym kolegą Neddermeyer'em odkryli w promieniach kosmicznych cząstki o ładunku elektronu lecz o masie pośredniej między masą elektronu i protonu. Cząstki te nazwano początkowo ciężkimi elektronami, później utarła się dla nich nazwa mezonów. Co ciekawsze stwierdzono, że ok. 75 % promieniowania kosmicznego dochodzącego do nas na powierzchni ziemi, to są właśnie owe mezony, najpóźniej odkryte. Wydaje się, że rola mezonów w ogólnym obrazie budowy jądra atomowego jest niepoślednia. Nowe teorie sił między cząstkami tworzącymi jądra atomowe przyjmują istnienie mezonów, aczkolwiek doświadczalnie wykryto je tylko w promieniach kosmicznych. Pozatem wszystkie inne cząstki obserwowane w promieniach kosmicznych, znane są z procesów jądrowych dokonywanych w laboratoriach.

2. Metody doświadczalne badań nad promieniami kosmicznymi.

Komora jonizacyjna Powietrze i inne gazy są w normalnych warunkach izolatorami. Naładowany elektroskop, w którym listki są izolowane od osłony bardzo dobrym izolatorem, np. bursztynem, może bardzo długo utrzymać na listku ładunek elektryczny. Znaczy to, że warstwa powietrza, która leży między listkiem a osłoną jest izolatorem. Tak jest w niedokładnych doświadczeniach. Nawet

¹⁾ Por. uzupełnienia.

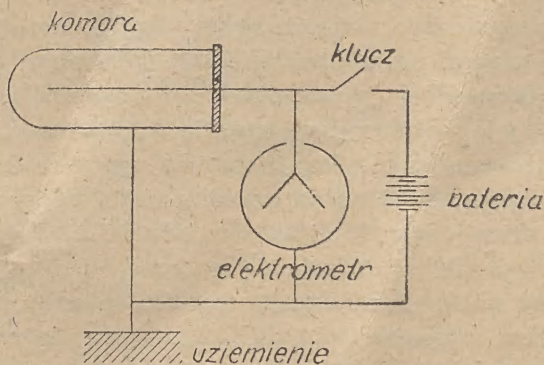
najlepiej izolowany elektroskop traci jednak swój ładunek, częściowo wskutek przewodnictwa izolatora, częściowo wskutek przewodnictwa powietrza. Przewodnictwo powietrza silnie się zwiększa gdy je poddamy działaniu preparatu promieniotwórczego lub promieni X ¹⁾ (Röntgena). Badania nad przewodnictwem elektrycznym gazów doprowadziły do wniosku, że wynika ono z t.zw. jonizacji gazu. Czynn timer który powoduje przewodnictwo gazu, nazywamy czynn timer jonizującym. Działanie czynn timer jonizującego wyobrażamy sobie jako tworzenie w powietrzu jonów. Polega to na tym, że czyn timer jonizujący wybija z drobiny danego gazu elektrony. W ten sposób drobina zostaje rozszczepiona na dwie części, elektron ujemnie naładowany i na pozostałość, resztę drobiny, dodatnio naładowaną. Elektron w gazie, w normalnych warunkach nie pozostaje długo w stanie wolnym, lecz przyczepia się do napotkanej obojętnej drobiny tworząc z nią w tym wypadku jon ujemny, podczas gdy pozabawiona elektronu drobina tworzy jon dodatni. Jeżeli gaz zjonizowany znajduje się między elektrodami, połączonymi z biegunami baterii elektrycznej, wówczas w obwodzie tym popłynie prąd elektryczny, którego natężenie w pewnych warunkach może być miarą natężenia czynn timer jonizującego.

Mechanizm powstawania jonów w wypadku gdy czynn timer jonizującym są cząstki α , cząstki β ¹⁾, czy cząstki kosmiczne, a więc cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym, wyobrażamy sobie w ten sposób, że cząstka taka dzięki oddziaływaniu swego ładunku na elektrony wchodzące w skład drobiny, może je z drobiny oderwać. Prócz cząstek takich, jak wyżej wymienione, mamy także cząstki, które nie jonizują gazu wśród którego przebiegają. Takimi są neutrony, które nie mają ładunku elektrycznego, a zatem i nieoddziałują w opisany powyżej sposób na materię.

Jeżeli komorę, której metalowe ściany stanowią jedną elektrodę, wewnątrz której znajduje się druga elektroda, połączymy z elektrometrem, wówczas szybkość ładowania się elektrody do określonego potencjału, względnie rozładowania, gdy miała pewną różnicę potencjałów w stosunku do osłony, jest w pewnych warun-

¹⁾ Por. uzupełnienia.

kach proporcjonalna do liczby par jonów, wytwarzanych w ciągu jednostki czasu w komorze przez czynnik jonizujący. Spółczynnik proporcjonalności zależy od łącznej pojemności elektrycznej układu, od objętości komory i od ciśnienia gazu w komorze. Komora jo-



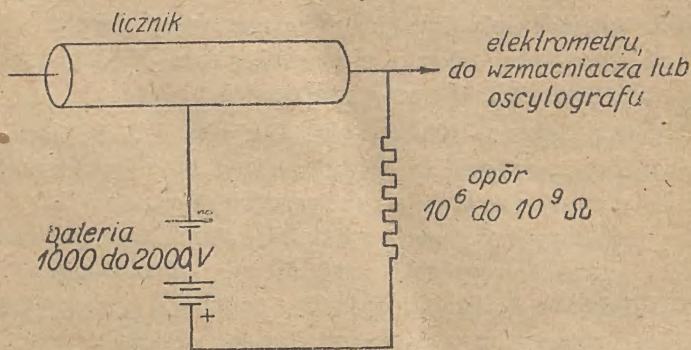
Ryc. 1.
Komora jonizacyjna.

nizacyjna była właśnie tym instrumentem, przy pomocy którego promienie kosmiczne odkryto, a później, przez dłuższy czas była jedynym instrumentem którym własności ich badano.

Licznik Geigera-Müllera (H. Geiger, W. Müller 1929)

Jest to przyrząd mający bardzo rozległe zastosowanie zarówno w fizyce jądrowej, jak też i fizyce promieni kosmicznych. Jest to cylinder metalowy (miedziany, mosiężny, aluminiowy, średnicy do kilku cm) wzdłuż którego centrycznie biegnie odizolowany od cylindra drucik (stalowy, żelazny, wolframowy, średnicy 0,1 mm do 0,2 mm). Całość jest szczelna na próżnię, co jest uskutecznione w ten sposób, że wszystko umieszczone jest w rurze szklanej i po odpowiednim napełnieniu zatopione, lub też w prymitywniejszym wykonaniu, korki izolacyjne są uszczelnione odpowiednim kitem na połączeniu z cylindrem. Po odpompowaniu powietrza licznik napełnia się, odpowiednim gazem lub mieszaniną gazu i jakiejś pary (np. wodorem lub argonem z domieszką pary alkoholu lub acetonu) pod ciśnieniem zwykle od 10 do 100 mmHg. Cylinder metalowy połączony jest z biegunem ujemnym, drut centralny natomiast z biegunem

dodatnim baterii o napięciu od 1000 V do 2000 V, przyczem w obwód włączony jest opór rzędu 10^6 do 10^9 omów. Wielkość tego oporu dobiera się różnie, w zależności od rodzaju napełnienia licznika, oraz od rodzaju stosowanego układu elektrycznego, rejestrującego wskazania licznika. Zasada działania licznika jest następująca. Jeżeli jakaś cząstka jonizująca przejdzie przez licznik, może wytworzyć w gazie znajdującym się w liczniku jedną, lub więcej par jonów. W komorze jonizacyjnej jony te dążyły od odpowiednich elektrod i stanowiły prąd rozładowujący napięcie przyłożone do komory. W liczniku Geigera proces jest inny. Po wytworzeniu pierwszej pary jonów, dążą one też do odpowiednich elektrod, przyczem elektrony jako ujemne dążą do elektrody dodatniej tj. do drutu, podczas gdy jony dodatnie posuwają się w stronę ścian cylindra. Elektrony biegnąc ku środkowi licznika wchodzą w coraz to silniejsze pole elektryczne i osiągają prędkości tak znaczne, że zderzając się z coraz to nowymi drobinami gazu, mogą je wtórnie jonizować. Powstałe w ten sposób nowe elektrony wytwarzają z kolei następne,



Ryc. 2.

Licznik Geigera-Müllera w zwykłym połączeniu ze źródłem napięcia i urządzeniem rejestrującym.

tak że z jednej pierwotnej pary jonów rozwija się lawina elektro- nowa, w rezultacie której przez obwód licznika przepływa tak duży ładunek, że skok potencjału na oporze w obwodzie licznika (rys. 2) jest tak wielki (może wynosić kilka woltów) że może być bezpo- średnie obserwowany przy pomocy elektrometru lub oscylografu

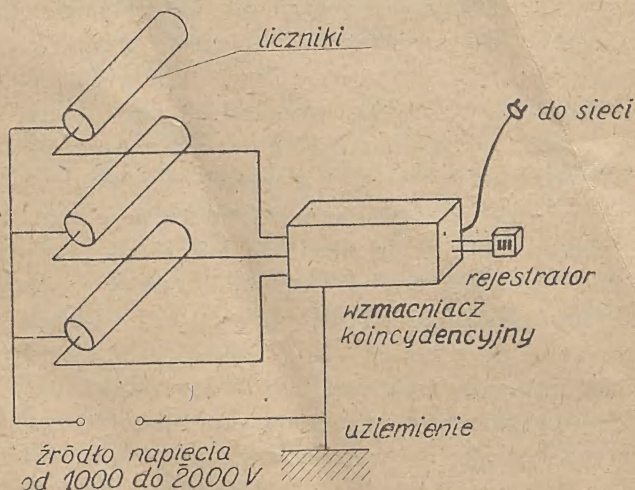
katodowego, lub tak wzmocniony przy pomocy wzmacniacza typu radiowego, że może uruchomić odpowiedni przyrząd rejestrujący. Obecnie najczęściej uruchamia się w ten sposób rejestrator tego typu; jaki jest używany w centralach telefonicznych. W ten sposób każdy impuls elektryczny przychodzący do wzmacniacza z licznika zostaje zarejestrowany, policzony przez rejestrator. Tym samym każda cząstka jonizująca która w liczniku wytworzyła przynajmniej jedną parę jonów zostaje przez aparaturę indywidualnie policzona. Liczniki Geigera mają zastosowanie do liczenia wszystkich cząstek jonizujących, które tylko mogą przejść przez ściany licznika do jego wnętrza. Promienie kosmiczne przechodzą przez ścianki licznika bez trudu, cząstki β ¹⁾ natomiast tylko te, które mają odpowiednio znaczne energie. Dla cząstek β o energiach mniejszych, stosuje się albo liczniki o bardzo cienkich ściankach, albo też w licznikach robi się małe okienka zaklejane cienką folią najczęściej aluminiową lub „zaponlakową“, szczelną, lecz przenikliwą dla danych cząstek. Podobnie konstruuje się liczniki dla promieni α ¹⁾. Licznik Geigera reaguje także na promienie γ . Tutaj jednak jonizacja jest bardzo słaba. Praktycznie pobudzają one licznik do działania tylko za pośrednictwem wyzwolonych ze ścianek licznika elektronów, które z kolei w gazie licznika wytwarzają jony, powodujące wyładowanie lawinowe w liczniku. Ponieważ nie każdy foton γ wyzwala elektrony, nie każdy foton rejestrowany jest przez licznik.

Zasadnicza więc różnica w działaniu licznika Geigera i komory jonizacyjnej jest zatem ta, że licznik reaguje na każdą cząstkę oddzielnie i rejestruje ją indywidualnie, podczas gdy komora daje pewien efekt całkowity za pewien okres czasu. Zarówno komora jonizacyjna jak i pojedynczy licznik Geigera rejestrują cząstki kosmiczne dochodzące do przyrządu ze wszystkich stron.

A teraz zapoznamy się z aparaturą o podstawowym dla badań nad promieniami kosmicznymi znaczeniu, przy pomocy której można mierzyć natężenie promieni kosmicznych przychodzących z pewnego określonego kierunku, ściślej mówiąc z pewnego określonego kąta przestrzennego. Do tego celu służy układ liczników Geigera-Müllera,

¹⁾ Por. uzupełnienia.

w tzw. połączeniu koincydencyjnym. Układ taki przedstawiony jest na ryc. 3. Trzy liczniki przedstawione na tej rycinie połączone są ze wspólnym źródłem napięcia oraz z tzw. wzmacniaczem koincydencyjnym. Jest to aparatura lampowa, tak zestawiona, że rejestruje ona impulsy nadawane przez liczniki tylko w tym przypadku jeżeli wszystkie trzy liczniki równocześnie nadają impuls. Taki fakt edezwania się współczesnego wszystkich liczników danego



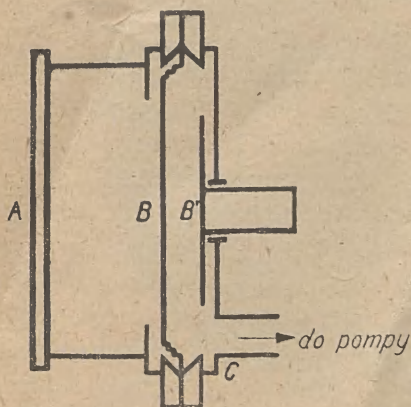
Ryc. 3.

3 licznik Geigera-Müllera w połączeniu koincydencyjnym.
Rejestrator odezwie się tylko gdy wszystkie 3 liczniki równocześnie nadadzą impulsy do wzmacniacza.

układu nazywamy koincydencją. Wskutek tego jako koincydencje rejestrowane są przez taki układ cząstki kosmiczne, które przechodzą przez wszystkie trzy liczniki równocześnie. A zatem, o ile licznik pojedynczy i komora jonizacyjna rejestrują cząstki kosmiczne przychodzące do tych przyrządów ze wszystkich stron, o tyle układ koincydencyjny liczników wybiera z przestrzeni pewien przestrzenny kąt i rejestruje tylko te cząstki, które do układu dochodzą z tego właśnie kąta. Wskutek tej własności układ liczników Geigera w połączeniu koincydencyjnym nazywany bywa „teleskopem licznikowym”.

Komora rozprężeń Wilsona. (C. T. R. Wilson 1910)

Przyrząd ten jest najdoskonalszym instrumentem w zakresie badań fizyki jądrowej i fizyki promieni kosmicznych. Jest to komora cylindryczna o średnicy do kilkudziesięciu cm, zamknięta z przodu szybą szklaną (A na ryc. 4) której tylna ściana B jest ruchoma. Komora wypełniona jest powietrzem, czy innym gazem pod ciśnieniem atmosferycznym, nasyconym parą wodną. Nagłe zwiększenie objętości komory, które tu następuje przez połączenie przewodu C z próżnią, wskutek czego tylna ściana B przeskakuje do położenia B', ma za skutek oziębienie się gazu wypełniającego komorę, chwilowe przesylenie atmosfery komory parą wodną i w konsekwencji



Rys. 4.
Komora rozprężeń Wilsona.

skraplanie się pary na jakichkolwiek zarodkach kondensacji. Tymi zarodkami mogą być jony utworzone przez przebiegającą właśnie cząstkę jonizującą. Ślad przebiegającej cząstki uwidoczniły zostaje linią mgły złożoną z kropelek skondensowanej na torze przebiegającej cząstki pary. Tę linię mgły możemy fotografować i w ten sposób tor cząstki zostaje utrwalony. Celem przestrzennego utrwalenia toru, fotografuje się często to zjawisko

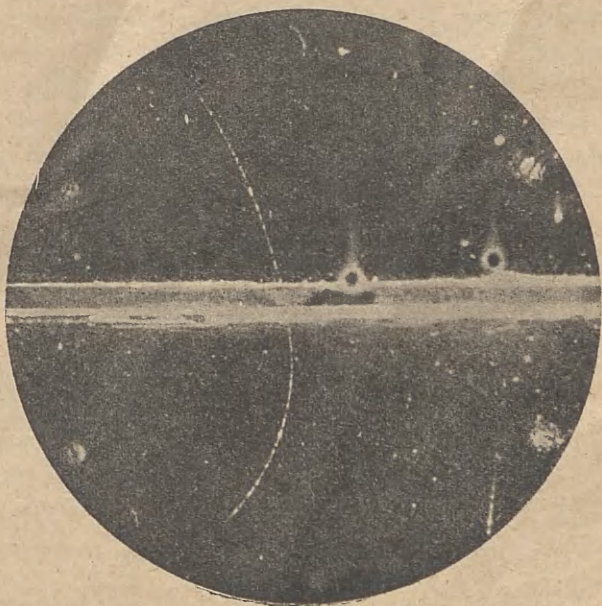
stereoskopowo. Dołączone słabe pole elektryczne do odpowiednich elektrod w komorze, usuwa dawniej wytworzone jony.

Początkowo komora została zastosowana przez Wilsona do fotografowania cząstek, które najsilniej jonizują tj. do cząstek α . Później znalazła zastosowanie do badania wszelkiego rodzaju promieniowań znanych w fizyce jądra atomowego. Do badania promieni kosmicznych zastosował po raz pierwszy komorę rozprężeń Skobieltcyn w r. 1927. Celem badania energii cząstek kosmicznych stosuje się komorę umieszczoną w silnym polu magne-

tycznym. Cząstka naładowana elektrycznie, przebiegając przez pole magnetyczne prostopadle do linii pola, doznaje odchylenia i porusza się w obrębie jednostajnego pola magnetycznego po kole, którego promień zależy od pędu tej cząstki i jej ładunku. Oczywiście jeżeli pęd cząstki jest większy, wówczas cząstka jest trudniej odchylana, promień krzywizny toru jest większy aniżeli w wypadku mniejszego pędu cząstki. Wymierzwszy promień koła toru cząstki możemy znając ładunek cząstki, wyznaczyć jej pęd. Chcąc niezależnie wyznaczyć masę cząstki, można jej prędkość wyznaczyć inną metodą a mianowicie licząc poszczególne kropelki mgły wzdłuż toru i wyznaczając stąd liczbę par jonów, wytworzonych przez cząstkę na jednostce drogi, która jest funkcją prędkości cząstki. Stosowanie pola magnetycznego do komory Wilsona przeznaczonej do badań nad promieniami kosmicznymi jest zadaniem technicznie trudnym, ze względu na konieczność stosowania silnych pól w stosunkowo dużej przestrzeni, w której musi zmieścić się komora. Dla orientacji przyjrzyjmy się cyfrowi dotyczącym urządzenia Andersona, znanego amerykańskiego badacza promieni kosmicznych, odkrywcy pozytronu i mezonu. Dla swego elektromagnesu używał on potężnych cewek miedzianych, chłodzonych wodą, których zużycie mocy elektrycznej wynosiło 440 kW. Anderson uzyskał w ten sposób pole magnetyczne o natężeniu 15000 erstedów, w którym umieścił komorę o średnicy 16,5 cm. Ryc. 5. przedstawia zdjęcie Andersona wykonane w tych warunkach, przedstawiające pozytron przechodzący przez płytkę ołowianą o grubości 6 mm. ¹⁾

Zdjęcia komorą Wilsona dla procesów jądrowych wykonuje się zwykle „na chybił trafił” tzn. w dowolnej chwili. Gdy tylko dane preparaty poddane są wzajemnie działaniu wykonuje się zdjęcia, z których później wybiera się interesujące. W wypadku promieni kosmicznych postępowanie takie byłoby bardzo niewydajne, ponieważ cząstki kosmiczne przychodzą do komory jednak dość rzadko tak, że gdybyśmy w ten sposób dokonywali zdjęć, na bardzo niewielu z nich uchwycilibyśmy cząstkę kosmiczną a cóż dopiero mówić o prawdopodobieństwie uchwycenia jakiegoś rzadszego procesu. Zasadniczą poprawę tej wydajności fotografowania zjawisk spowodowanych przez promienie kosmiczne uzyskał Blackett

¹⁾ Ryciny: 5, 9, 10, 11, 12, 16, 21, 23, 24, 25, zostały z powodów technicznych odbite na tablicach poza tekstem. Red.



Ryc. 5.

Zdjęcie dokonane przez Andersona w komorze Wilsona (1933).
Pozitron przebiega w polu magnetycznym 15000 erstedów przez
płytkę ołowianą o grubości 6 mm. Energia pozytronu przed wejściem
do płytki wynosiła $6,3 \times 10^7$ eV, po wyjściu z płytki $2,3 \times 10^7$ eV.

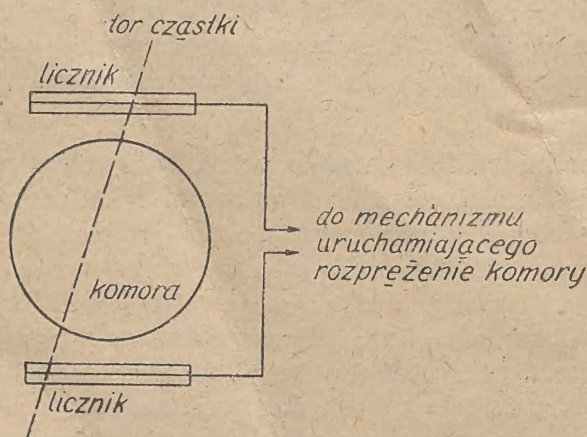
(1934) przez t.zw. sterowanie komory rozprężen licznikami. Metoda ta polega na tym, że komorę umieszcza się między układem liczników Geigera połączonych koincydencyjnie (ryc.6). Liczniki te są tak ustalone, że każda cząstka, która przejdzie przez liczniki, musi przejść przez komorę. Każdej koincydencji towarzyszy zatem przejście cząstki przez komorę. Zamiast przyrządu rejestrującego koincydencje wzgl. równoległe do niego, zamontowany mamy zwykle przekaźnik elektromagnetyczny, który w małym ułamku sekundy po koincydencji (u Blacketta w 0,01 sek.) wzbudza w komorze ekspansję. W ten sposób zdjęcie nie jest wykonane na ślepo, lecz w momencie, kiedy na pewno w komorze mamy ślad cząstki kosmicznej.

3. Zasadnicze fakty znane przed odkryciem mezonu.

Cząsteczkowa czy falowa natura promieni kosmicznych. Z powodu bardzo wielkiej przenikliwości promieni kosmicznych, przypuszczano początkowo, że są one promieniowaniem falowym, elektromagnetycznym, ¹⁾ lecz o długości fali jeszcze krótszej niż mają najkrótsze promienie γ . Nie przypuszczano, by mogły to być nie fale lecz cząstki, ponieważ nie znano cząstek, choćby w przybliżeniu tak przenikliwych, jak promienie kosmiczne. Najprędsze bowiem elektrony wysyłane przez ciała promieniotwórcze jako cząstki β przenikają warstwy niegrubsze jak na kilka milimetrów, podczas gdy już od dawna wiadano, że promienie kosmiczne przenikają warstwy materii grubości wielu metrów. Mimo że bezpośrednich dowodów „falistości” promieniowania kosmicznego nie było, przyjmowano tę „falistość”, ponieważ hipoteza struktury cząsteczkowej promieni kosmicznych wydawała się mniej prawdopodobną od tamtej. Tamtą zaś przyjmowano, ekstrapolując prawa słuszne dla promieni γ w kierunku krótszych jeszcze fal. Poglądy te musiały jednak ulegć zasadniczej zmianie od czasu doświadczeń Bothego i Kolhörstera z r. 1928: Stwierdzili oni mianowicie, że promienie kosmiczne zdolne są do wytwarzania koincydencji w licznikach Geigera. Promieniowanie powodujące koincydencje składać musi się z cząstek jonizujących, a więc z cząstek elektrycznie naładowanych, a nie z foto-

¹⁾ Por. uzupełnienia.

nów, które jonizują bardzo słabo. Zasada bowiem działania licznika Geigera na promienie γ polega na tym, że promienie te wytwarzają w gazie, którym licznik jest napełniony, wzgl. w ścianach licznika elektrony, które w liczniku wytwarzają z kolei wyładowanie lawinowe rejestrowane przez aparaturę wzmacniającą. Prawdopodobieństwo jednak wytworzenia tego pierwszego elektronu przez dany foton o dużej nawet energii jest bardzo małym ułamkiem, a stąd prawdopodobieństwo, że ten sam foton wytworzy również elektron w drugim



Ryc. 6.

Komora Wilsona sterowana licznikami. W komorze następuje tylko wtedy rozprężenie, kiedy cząstka kosmiczna przebiegnie przez oba liczniki, a więc i przez komorę.

liczniku i spowoduje w nim wyładowanie, jest już zupełnie małe. Tym samym małe jest prawdopodobieństwo spowodowania przez ten sam foton w trzech czy więcej licznikach lawiny. Tymczasem Bothe i Kolhörster obserwowali w swych doświadczeniach bardzo liczne koincydencje, co jest dowodem, że promieniowanie powodujące je, składa się z cząstek jonizujących a nie z fotonów. Później stwierdzono, że prócz cząstek istnieje także w promieniowaniu kosmicznym i część falowa niejonizująca, lecz że tworzy ona bardzo mały ułamek ogólnego natężenia promieniowania. Zastosowanie komory rozprężen do promieni kosmicznych potwierdziło powyższą interpretację doświadczeń koincydencyjnych. Na zdjęciach Wilsonowskich widzimy już kon-

kretnie ślady torów cząstek kosmicznych i tutaj co do ich korpuskularności nie może być wątpliwości. Początkowo przypuszczano że cząstki promieniowania kosmicznego są elektronami. Później stwierdzono, że na poziomie morza przeważają odkryte dopiero w r. 1938 mezony.

Pozitrony w promieniowaniu kosmicznym. Anderson w r. 1932 przy pomocy komory Wilsona w warunkach opisanych poprzednio stwierdził obecność w promieniowaniu kosmicznym cząstek o własnościach elektronów, a różniących się od nich tylko znakiem ładunku elektrycznego. Możemy je krótko określić jako elektrony dodatnie, a nazywamy je pozitronami. Zdjęcie Andersona widzimy na ryc. 5. Płyta ołowiana została umieszczona w komorze celem ustalenia kierunku biegu cząstki. Przebiega ona oczywiście od strony tej części zdjęcia, gdzie tor jest mniej zakrzywiony, t. zn. cząstka ma większą energię niż po drugiej stronie płyty. Część energii cząstka straciła przy przejściu przez płytę. Z kierunku ruchu cząstki i z kierunku pola magnetycznego oraz z kierunku jej odchylenia możemy ustalić znak ładunku elektrycznego cząstki. W ten sposób ustalił Anderson znak ładunku elektrycznego cząstki przedstawionej na ryc. 6. jako dodatni. Mogła być jeszcze tylko ta wątpliwość, czy cząstka nie jest protonem. Tę możliwość wyeliminowano przez porównanie grubości linii, która jest miarą liczby jonów wytwarzanych przez cząstkę na jednostce drogi, z grubością linii o tej samej krzywiźnie, należącej do elektronu. Okazało się, że linie te są zupełnie podobne. Również długość śladu po przejściu cząstki przez płytę ołowianą świadczy, że cząstka nie jest protonem. Gdyby była protonem to nie mogłaby mieć tak długiego śladu po przejściu przez płytę ołowianą. Długość tego śladu jest 10 razy dłuższa niż byłaby dla protonu przy tej samej krzywiźnie. Wkrótce po odkryciu Andersona Blackett i Occhialini wykazali, że w konsekwencji oddziaływania promieni kosmicznych z materią, powstają całe pęki zarówno elektronów jak i pozitronów w porównywalnych ilościach. Później wykazali ci sami autorowie, a także i inni, że podobne zjawisko wytwarzania par elektronów i pozitronów zachodzi też przy naświetlaniu ciężkich pierwiastków bardzo twardymi promieniami γ .

Niedługo po odkryciach Andersona, J. Curie i F. Jolliot odkryli pozytrony w zjawisku sztucznej promieniotwórczości przy rozpadzie pierwiastków, które powstały przez naświetlanie lekkich pierwiastków neutronami.

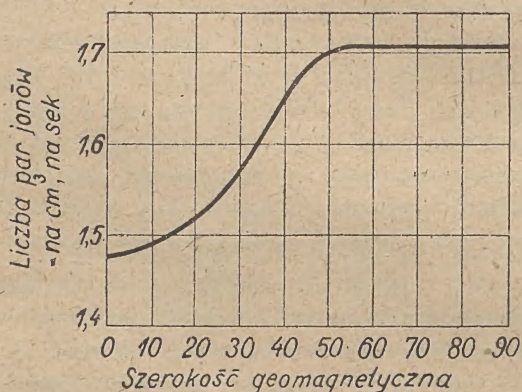
Energie cząstek promieniowania kosmicznego. Przy opisie komory Wilsona i stosowania jej w polu magnetycznym powiedzieliśmy, że komora ta jest instrumentem mogącym służyć do wyznaczenia energii cząstek przez nią przechodzących. Mierzając promień krzywizny odchylonej przez pole magnetyczne cząstki, można wyznaczyć jej pęd, a znając jej masę można wyliczyć jej energię. Pierwszy zastosował tę metodę Skobieltcyn później udoskonalił ją przede wszystkim Anderson i Blackett. Skobieltcyn nie rozporządzał dostatecznie silnym polem magnetycznym, tak, że swe pomiary musiał ograniczyć do cząstek o stosunkowo małych energiach. Obecnie dzięki bardzo silnym elektromagnesom jakie do komory Wilsona się stosuje, wymierza się energie cząstek sięgające wartości kilku 10^{10} eV. Na rycinach 5, 9, 10, 21 mamy różne zdjęcia pozytronów i elektronów kosmicznych o energiach od 10^7 do 10^9 eV. (o jednostkach energii p. uzupełnienia). Dokładne statystyki przeprowadzone przede wszystkim przez Andersona i Blacketta pozwoliły zbadać jakie liczby cząstek promieni kosmicznych przypadają na poszczególne przedziały energetyczne. Okazało się, że poczynszy od pewnej wartości energii (tj. od ok. 10^8 eV) w miarę wzrostu energii liczba cząstek maleje, niemniej uchwycenie w komorze Wilsona cząstek o energii ponad 10^{10} eV nie należy do rzadkości. I to jest górna granica rzędu wielkości energii cząstek, które można wymierzyć w komorze Wilsona. Z energii wyzwolonej w pękach promieni kosmicznych możemy wnioskować o energii cząstek kosmicznych, które takie pęki wytwarzają. Energie natomiast wyzwolane w tzw. uderzeniach Hoffmanna dochodzą do rzędu 10^{12} eV. Największą sensację pod tym względem stanowiło odkrycie przez Auger'a tzw. wielkich pęków, w których energie wyzwolane dochodzą do rzędu wielkości 10^{16} eV, a może, i więcej. To co powiedziano tutaj o energii cząstek, to dotyczy cząstek pojedynczych, indywidualnych. Jeżeli chodzi o średnią wartość energii cząstek przychodzących do granic atmosfery, to oszacować ją można z efektów pola magnetycznego ziemi. (p. ustęp następny) na ok. $6 \cdot 10^9$ eV.

Efekty pola magnetycznego ziemi. Stwierdzenie koincydencji jest dowodem, że promieniowanie kosmiczne, to które obserwujemy w atmosferze, jest utworzone z cząstek elektrycznie naładowanych. Nie przesądza to jednak kwestii czy promieniowanie kosmiczne, to pierwotne, które dochodzi do ziemi u granic atmosfery, jest korpuskularne tj. cząsteczkowe, czy falowe. Mogłoby bowiem być tak, że fotony przychodzą z poza atmosfery i w niej dopiero wywołują cząstki wtórne, np. elektrony dające efekt koincydencji. Istotnym przyczynkiem do wyjaśnienia tej kwestii są efekty pola magnetycznego ziemskiego.

Ziemię możemy uważać za kulę namagnesowaną o biegunach leżących w pobliżu biegunów geograficznych. Ściślej, pole magnetyczne ziemskie jest w przybliżeniu równoważne polu dwubieguna magnetycznego o momencie $8,1 \cdot 10^{25}$ ersted. cm^3 . Nie leży on dokładnie w środku ziemi, lecz ok. 340 km od niego w kierunku 70° szer. geogr. półn. i 160° dług. geogr. wsch. Jeżeli z wszechświata w przestrzeń pola magnetycznego ziemi padają cząstki elektrycznie naładowane, wówczas doznają odchylenia w swym biegu. Wprawdzie pole magnetyczne ziemskie jest słabe, lecz zato rozciąga się na wielkie przestrzenie przez które cząstki kosmiczne muszą przebiegać. Jeżeli zatem pole magnetyczne ziemi wpływa w sposób wyraźny na bieg promieni kosmicznych, będzie to dowodem, że w odpowiednio znacznej części pierwotne promieniowanie kosmiczne jest złożone z cząstek obdarzonych ładunkiem elektrycznym.

Efekt szerokości geomagnetycznej. Że istotnie pole magnetyczne ziemi ma wpływ na bieg pierwotnych cząstek kosmicznych, przekonał się o tem pierwszy holenderski fizyk Clay (szereg prac od r. 1927 do 1934). Badał on natężenie promieniowania kosmicznego w podróżach między Amsterdame a Indiami Holenderskimi. Badania te wykazały zależność natężenia promieni kosmicznych od szerokości geomagnetycznej, natomiast wykazały brak zależności natężenia od długości geograficznej. Odkrycie Clay'a było zachętą do dalszych badań w tym kierunku. W latach 1932 i 33 fizyk amerykański Compton zorganizował z iście amerykańskim rozmachem odnośne eksperymenty. Obserwacje kierowanych przez niego licznych ekspedycji naukowych dokonanych w 81 stacjach

badawczych różnych krajów, przy pomocy znormalizowanych komór jonizacyjnych, wykazały wyraźnie, że natężenie promieni kosmicznych wzrasta stale w miarę oddalania się od równika ku biegunom. Zależność tę przedstawia ryc. 7. Na wykresie tym, na osi odciętych mamy zaznaczoną szerokość geomagnetyczną, na osi rzędnych liczbę par jonów wytwarzaną przez promienie kosmiczne w 1 cm^3 w ciągu 1 sek. (poza tem w tych samych warunkach) która to liczba jest miarą natężenia promieni kosmicznych.

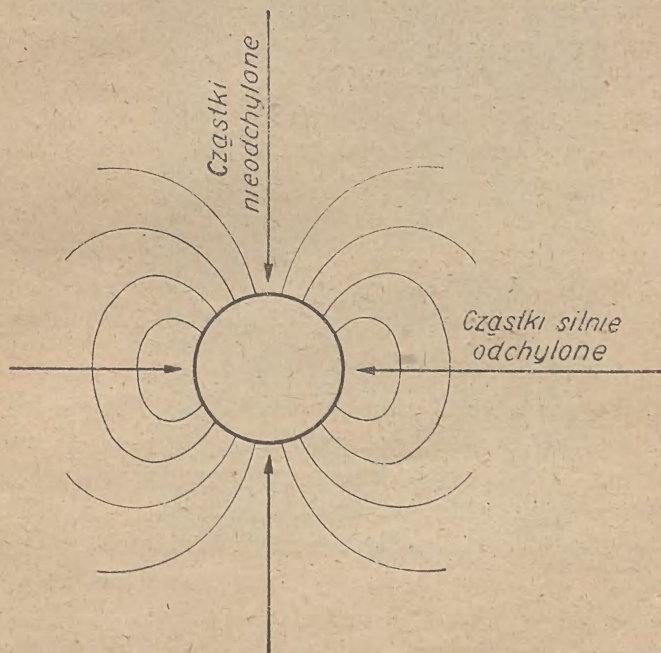


Ryc. 7.

Zależność natężenia promieni kosmicznych (mierzonych komorą jonizacyjną na poziomie morza) od szerokości geomagnetycznej.

Effekt szerokości geomagnetycznej może być interpretowany w następujący sposób. Jeżeli cząstka naelektryzowana biegnie z określoną prędkością przez pole magnetyczne, wówczas pole to działa na cząstkę pewną siłą, która zależy od kierunku pola względem kierunku ruchu cząstki. Cząstka biegnąca prostopadłe do pola doznaje oddziaływania najsilniejszego, na cząstkę zaś biegnącą wzdłuż linii pola, siła nie działa. Wyrażając się dokładniej na cząstkę działa tylko składowa pola prostopadła do kierunku ruchu cząstki. Gdyby do ziemi dochodziły tylko cząstki z kierunków pionowych, sytuacja przedstawiałaby się dość jasno. Najwięcej cząstek byłoby odchylonych na równiku geomagnetycznym, podczas gdy na biegunie cząstki wogóle nie byłyby

odchylone. (Ryc. 8) W rzeczywistości do ziemi, do granic atmosfery, dochodzą cząstki równomiernie ze wszystkich stron i mają bardzo rozmaite energie. Przy tych, dość zatem ogólnych założeniach, Lemaître i Vallarta (1933), opierając się na dawnych rachunkach Störmera, (1930) dotyczących ruchu elektronów w polu magnetycznym ziemskim, mających na celu wyjaśnienie zjawiska zorzy polarnej, wyrachowali, że na skutek działania pola magnetycz-



Ryc. 8.
Ziemia jako magnes.

nego ziemi, nie każda cząstka może osiągnąć ziemię. Z ogólnego roju cząstek kosmicznych biegnących ku ziemi, pole magnetyczne odcina część cząstek o mniejszych energiach. Im jesteśmy bliżej równika, tym więcej cząstek zostaje przez pole magnetyczne ziemskie od ziemi odchylone. Dla każdej szerokości geomagnetycznej φ istnieje pewna graniczna wartość energii $E\varphi$, o tej własności, że w danej szerokości geomagnetycznej do granic atmosfery dochodzą

tylko cząstki o energiach większych od $E\varphi^1$), a cząstki o mniejszych energiach są przez pole odchylone. Według teorii zatem, idąc od bieguna ku równikowi powinniśmy ciągle obserwować spadek natężenia promieni kosmicznych. W rzeczywistości natężenie to nie spada odrazu w miarę oddalania się od bieguna, lecz do szerokości geomagnetycznej 50° jest stałe, a potem dopiero spada. Wynika to z działania absorbującego atmosfery, które ma ten skutek, że na poziomie morza brak nam wogóle cząstek o małych energiach, wskutek czego nie obserwujemy już braku tych cząstek przy zbliżaniu się do bieguna.

Reasumując możemy powiedzieć, że efekt szerokości geomagnetycznej promieniowania kosmicznego jest dobrze przedstawiony przez powyżej naszkicowany obraz teoretyczny, co uważamy za dowód fundamentalnego faktu, że istotnie promieniowanie kosmiczne pierwotne, dochodzące do granic atmosfery naszej ziemi, utworzone jest z cząstek niosących ładunek elektryczny. W tej chwili natomiast nie przesadzamy jakie to cząstki być mogą.

Effekt wschodnio-zachodni. Badania Johnsona, prowadzone z wielką starannością od roku 1934 pozwoliły na znalezienie niewielkiego, a będącego bardzo ważnym w zagadnieniu promieni kosmicznych przyczynkiem, zjawiska. Johnson stwierdził mianowicie, że jeżeli układ koincydencyjny liczników, skierowany pod kątem ostrym do pionu, będziemy obracać dookoła osi pionowej zachowując kąt nachylenia do pionu, wówczas w pozycji kiedy układ zwrócony jest ku zachodowi, otrzymujemy kilka procent więcej koincydencji, niż w wypadku, kiedy układ jest skierowany ku wschodowi. Interpretacja tego zjawiska jest następująca.

Jeżeli zastosujemy regułę kierunkową odchylenia przewodnika, w którym płynie prąd, znajdującego się w polu magnetycznym, do cząstek elektrycznie naładowanych, padających pionowo w pole magnetyczne ziemskie, wówczas łatwo wywnioskujemy, że cząstki pier-

¹⁾ $E\varphi = 1,9 \cdot 10^{10} \cos^4 \varphi$ eV. Wynika stąd, że na szerokości geomagnetycznej 50° do granic atmosfery dojść mogą jedynie cząstki elektryczne o energiach większych niż $3 \cdot 10^9$ eV.



Ryc. 9.

Zdjęcie toru cząstki kosmicznej, która w gazie komory wytwarza elektron nie doznawszy sama wyraźnej zmiany kierunku, ani dużej zmiany energii. Energia cząstki pierwotnej ok. 10^{10} eV, cząstki wtórnej 6×10^6 eV. Zdjęcie w polu magnetycznym 10000 erstedów. Wykonał J. G. Wilson w 1938 r.

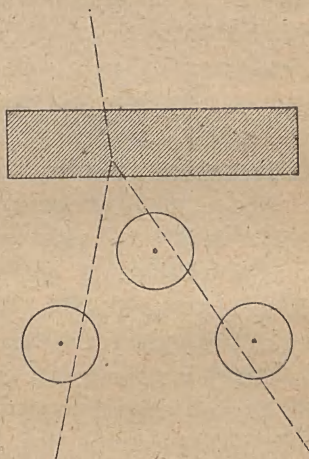
wolne dodatnio naładowane zostaną odchyłone w kierunku wschodnim, ujemnie naładowane w kierunku przeciwnym, zachodnim. Ponieważ prace Johnsona stwierdziły, że więcej cząstek przychodzi z zachodu niż ze wschodu, wnioszek stąd, że w pierwotnym promieniowaniu kosmicznym przewagę mają cząstki dodatnio naładowane.

Pęki promieniowania kosmicznego. Badania oddziaływania promieni kosmicznych z materią wykazały, że występują tu zjawiska zupełnie dla innych rodzajów promieniowania nieznane. Zasadniczy fakt charakterystyczny dla promieni kosmicznych jest ten, że absorpcja ich w materii, połączona jest z wysyłaniem nowych wtórnych cząstek, wzgl. fotonów, przyczem ilość wtórnych cząstek może być bardzo znaczna. Mamy tutaj do czynienia z dziwnym na pozór faktem, że natężenie promieni kosmicznych, mierzone liczbą cząstek, może przy przejściu przez warstwę materii wzrastać zamiast maleć, jak to jest w normalnym zjawisku absorpcji jakiegoś promieniowania. W wiązce wtórnej występują tutaj cząstki tego samego rodzaju, co w wiązce pierwotnej. W szczególności pewnem jest występowanie w promieniowaniu wtórnym elektronów, pozitronów i fotonów, że wymienimy tutaj tylko te, o których dotychczas była mowa. Ze względu na dużą energię cząstek kosmicznych, cząstki wtórne, którym tamte część swojej energii przekazują, mogą również mieć jeszcze wysoką energię, mieć zatem taki charakter jaki mają pierwotne cząstki kosmiczne. Pierwotne cząstki, wytwarzając wtórne, same nie muszą osłabiać się znacznie ani też zmieniać swego kierunku ruchu. Ryc. 9 przedstawia zdjęcie wilsonowskie takiego procesu w polu magnetycznym 10 000 erstedów. Cząstka pierwotna ma tutaj energię ok. 10^{10} eV, wtórna, wyzwolona w gazie komory, ma ok. $6,10^6$ eV. (Zdjęcie J. G. Wilsona 1938). Jednym z najbardziej charakterystycznych zjawisk, będącym rezultatem oddziaływania cząstek, wzgl. fotonów kosmicznych z materią, są tzw. pęki. Przez pęk rozumiemy tutaj grupę cząstek wzgl. fotonów kosmicznych powstałych przez oddziaływanie jednej cząstki wzgl. fotonu kosmicznego z materią. Skobielcyn już w r. 1926 zauważył, że przy tej samej ekspansji w komorze widocznych bywa kilka cząstek. Blackett i Occhialini otrzymują w 1933 zdjęcia tego typu, co na ryc. 10. Widzimy

tu typowe pęki cząstek kosmicznych wybiegających współcześnie (w praktycznym sensie) z tej samej okolicy najbliższego otoczenia komory. Ryc. 10 a przedstawia 16 cząstek, z których większość jest tylko nieznacznie odchyłona przez pole magnetyczne 3100 erstedów. Zjęcie 10 b zostało wykonane w silniejszym polu magnetycznym bo 14000 erstedów. Zawiera ono 19 cząstek z których można było wymierzyć 7 dodatnich (50, 140, 230, 600, 620, 750, 850 10^6 eV) i 8 ujemnych (70, 80, 100, 110, 190, 230, 900 10^6 eV). Całkowita energia tego pędu wynosiła $5 \cdot 10^9$ eV. Dodatnie i ujemne cząstki występują tutaj w przybliżeniu w równych ilościach.

Charakterystycznym jest, że nie tylko cząstki kosmiczne, ale i fotony mogą wytwarzać pęki. Na ryc. 11 i 12 widzimy proces powstawania pędu wyraźnie. W tym celu płyta ołowiana w której pęki powstają umieszczona jest w środku komory. Na ryc. 11 widzimy pęk wytworzony przez cząstkę jonizującą (widoczny ślad cząstki nad płytą), podczas gdy pęk przedstawiony na ryc. 12 wytworzony jest przez foton (brak śladu cząstki nad płytą).

Do zagadnienia pęków promieni kosmicznych wiele wnoszą zapoczątkowane przez Rossi'ego w r. 1932 badania przy pomocy liczników Geigera. Na ryc. 13 widzimy 3 liczniki połączone w układzie koincydencyjnym. Liczniki te jednakowoż nie leżą w jednej płaszczyźnie, tak że niemożliwą jest rzecz, by jedna cząstka kosmiczna przeszła przez wszystkie trzy liczniki. Rossi stwierdził, że jednak koincydencje w takim układzie istnieją. Najwidoczniej pochodzą od dwóch lub więcej cząstek, które przez trzy liczniki przebiegły równocześnie. Liczba tych koincydencji jest stosunkowo mała, znacznie jednak wzrasta, gdy nad licznikami umieścimy np. warstwę ołowiu. Zwiększając grubość warstwy, od kilku milimetrów wzwyż, stwierdzamy, że liczba potrójnych koincydencji wzrasta, przy



Ryc. 13.

Układ liczników do badania pęków, zastosowany poraz pierwszy przez Rossi'ego.

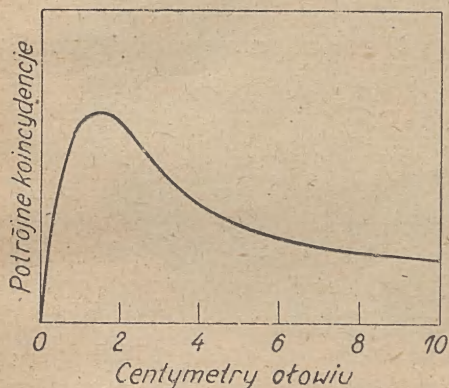


Ryc. 10.

Zdjęcia typowych pęków promieni kosmicznych.

- a) przedstawia pęk złożony z 16-tu cząstek kosmicznych w polu magnetycznym 3100 erstedów. Wykonali P. M. S. Blackett i G. P. S. Occhialini w 1933 r.
- b) przedstawia pęk złożony z 19-tu cząstek w polu magnetycznym 14000 erstedów. Ogólna energia pęku wynosi ok. $5 \cdot 10^9$ eV. Zdjęcie wykonał P. M. S. Blackett.

grubości ok. 15 mm liczba ta osiąga minimum i później maleje. Zależność tę graficznie przedstawia ryc. 14. Krzywą, przedstawiającą tę zależność, utarło się nazywać krzywą Rossiego. Jakże tłumaczy sobie to zjawisko? Najwidoczniej potrójne koincydencje są spowodowane przez pęki wytworzone w warstwie ołowiu nad



Ryc. 14.

Liczba potrójnych koincydencji przedstawiona w zależności od grubości warstwy ołowiu przy ustawieniu liczników według ryc. 13.

licznikami. Nie przesadzając sprawę, czy pęk został wytworzony przez foton kosmiczny, czy nastąpiło to w jednym akcie, w jednym punkcie, czy też nastąpiło to w procesach bardzo szybko po sobie następujących, najwidoczniej szansa takiego zjawiska wzrasta z grubością płytki i dlatego liczba pęków uchwycenych przez liczniki w jednostce czasu wzrasta. Jeżeli jednak grubość warstwy przekroczy średni zasięg cząstek wtórnych, to dalsze zwiększanie grubości warstwy, nie zwiększy liczby pęków, ponieważ

cząstki wytworzone na pierwszych milimetrach płyty będą już absorbowane, przeciwnie, dalsze zwiększanie grubości warstwy będzie powodować zmniejszanie się liczby pęków, ponieważ liczba cząstek pierwotnych wytwarzających pęki będzie malała na skutek absorpcji w płycie ołowianej.

Wielkie pęki Auger'a¹⁾ i wybuchy Hoffmanna. Na ryc. 10, 11, 12 przekazane są pęki złożone z kilku do kilkunastu cząstek. Całkowita energia cząstek takiego pędu jest rzędu kilku 10^9 eV.

¹⁾ Pęki Augera zostały odkryte po odkryciu mezonów. Ustęp ten został umieszczony w tym rozdziale, ze względu na pewną konsekwencję układu.

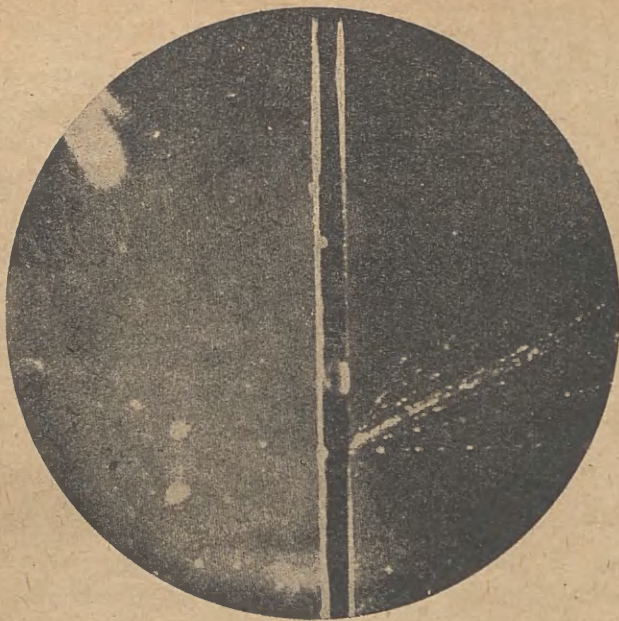
Liczne późniejsza badania wykazały, że istnieją w promieniowaniu kosmicznym pęki które zawierają znacznie więcej cząstek. W r. 1938 Auger odkrył pęki powstające w powietrzu, o bardzo wielkim przestrzennym rozrzucie. Auger znajdował koincydencje przy licznikach rozstawionych nawet na odległościach do 300 m od siebie. Oceniał on liczbę cząstek wchodzących w skład takiego olbrzymiego pędu i stwierdził, że zdarzają się pęki, w których liczba cząstek wynosi wiele tysięcy. Zauważono, że pęk taki rozpościera się dokoła „trzonu”, tj. szczególnego zagęszczenia pędu, w którym na 1 cm^2 powierzchni trafiaanej przez pęk przypada kilkaset cząstek. Stwierdzono, że całkowita energia cząstek takiego pędu wynosić może 10^{16} eV , a może i więcej. Jeżeliby zatem energia ta pochodziła od jednej jakiejś cząstki pierwotnej, która ten „wielki” pęk wytworzyła, to energia tej cząstki musiałaby mieć tę olbrzymią wartość.

Jeszcze w r. 1927 G. Hoffmann, zaobserwował podczas badań swą komorą jonizacyjną napełnioną gazem o ciśnieniu kilkadziesięciu atmosfer, że nitka elektrometru, od czasu do czasu, kilka razy na dobę — wybiegała daleko poza swe przeciętne wychylenie, wykazując w ten sposób, że w komorze powstało kilka a czasem nawet kilkanaście milionów par jonów. Początkowo nie było pewnem czy te „wybuchy” jonizacji są związane z promieniowaniem kosmicznym. Np. Millikan ze współpr. długo utrzymywali, że mamy tu do czynienia raczej z jakimś efektem aparaturowym. Później dopiero stwierdzono, że liczba tych wybuchów wzrasta z wysokością nad poziomem morza i wzrost ten jest taki sam, jak wzrost natężenia promieniowania kosmicznego. Trudno byłoby zatem przypuścić by mogła tu być jakaś inna przyczyna, niż promieniowanie kosmiczne. Początkowo nie umiano powiązać tych zjawisk z innymi zjawiskami znanymi w promieniowaniu kosmicznym. Idei np. uważania wybuchów Hoffmanna za pewien rodzaj pęków, nie dało się poprzeć doświadczalnie. Szczególnie fakt, że w wybuchach Hoffmanna wydzielają się olbrzymie ilości energii, bo przekraczające często 10^{12} eV , wydawał się trudnym do pogodzenia z tym, że w zwykłych pękach obserwowano energie rzędu co najwyżej 10^9 eV . Dopiero odkrycie wielkich pęków przez Auger'a, w których wydzielają się energie powyżej 10^{16} eV zwróciło uwagę badaczy na możliwość uważania wy-



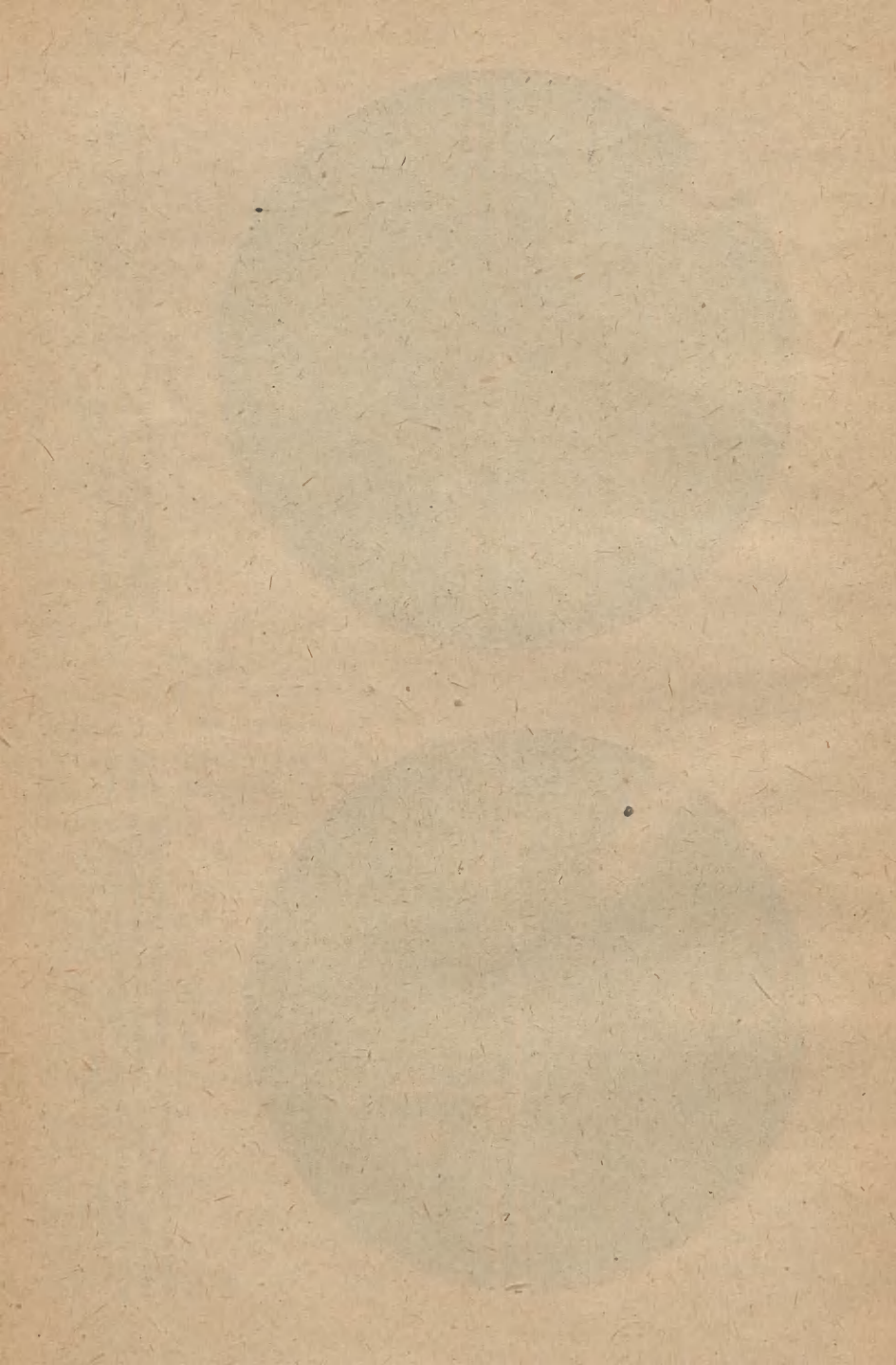
Ryc. 11.

Zdjęcie wilsonowskie pęku wytworzonego przez cząstkę jonizującą w płycie ołowianej umieszczonej w komorze. Ślad cząstki wytwarzającej pęk, widoczny w górnej części rysunku. Zdjęcie wykonali P. Auger i P. Ehrenfest (1937).



Ryc. 12.

Zdjęcie wilsonowskie pęku wytworzonego przez foton w płycie ołowianej umieszczonej w komorze. Nad płytą niema śladu cząstki wytwarzającej pęk. Zdjęcie wykonali P. Auger i P. Ehrenfest (1937).



buchów Hoffmanna za objawy właśnie tych wielkich pęków. Uważa się dzisiaj że jeżeli trzon „wielkiego” pęku przejdzie przez komorę jonizacyjną, wówczas w komorze powstaje tak wielka ilość par jonów, że elektrometr rejestruje zjawisko, które jest właśnie owym wybuchem Hoffmanna.

Zależność natężenia promieni kosmicznych od wysokości.

Zagadnienie zależności natężenia promieni kosmicznych od wysokości łączy się ściśle z historią promieniowania kosmicznego. Od pierwszych lat zainteresowań tymi promieniami, jeszcze kiedy problem skąd one pochodzą nie był rozwiązany, zaczęto badać, przy pomocy dość jeszcze prymitywnych elektrometrów i komór jonizujących, ich natężenie na wyższych nad ziemią poziomach. Początkowo próbowano tych pomiarów nawet na wysokich wieżach. I tak Wulf zbadał w r. 1910 zachowanie się komory jonizacyjnej na wieży Eiffla. Badacz ten stwierdził, że na wieży tej natężenie jonizacji jest mniejsze niż na powierzchni ziemi. Później zaczęto badać promienie kosmiczne w lotach balonami otwartymi. Pierwszym, który stwierdził wzrost natężenia promieni kosmicznych ze wzrostem wysokości nad ziemią był V. Hess. W r. 1913 przy pomocy komory jonizacyjnej, wznosząc się nad ziemię w balonie z otwartą gondolą do wysokości ok. 5000 m, stwierdził on, że początkowo w miarę wznoszenia się nad ziemię natężenie promieni kosmicznych maleje, lecz powyżej wysokości ok. 1000 m daje się obserwować stały wzrost ich natężenia. Wywnioskowano stąd, że badane promieniowanie powodujące jonizację w komorze, nie jest pochodzenia ziemskiego, lecz dochodzi do nas z poza ziemi. Początkowy spadek jonizacji (obserwowany przedtem też przy wspomnianych wyżej pomiarach na wieży Eiffla) wyjaśniono w ten sposób, że początkowo ze wzrostem wysokości oddalamy się od ziemskich źródeł promieniotwórczości i stąd spadek jonizacji w komorze. Wzrost jonizacji na większych wysokościach stwierdzony przez Hessa, został później sprawdzony przez wielu innych badaczy.

Celem zbadania tego zagadnienia na większych jeszcze wysokościach niż osiągnąć można było przy pomocy balonów kierowanych przez pilotów, zaczęto używać później tzw. balonów sond. Po raz pierwszy do badań promieni kosmicznych, użył balonów sond

znany amerykański fizyk R. A. Millikan. Balonów takich używano już dość dawno w meteorologii do badania atmosfery na dużych wysokościach. Jest to balon stosunkowo niewielkich rozmiarów z gondolą, w której znajdują się wszystkie potrzebne przyrządy automatycznie rejestrujące swe wskazania na odpowiednich taśmach. Balon taki wysyłany jest bez załogi ludzkiej, a rejestracje przyrządów odczytywane są po jego upadku na ziemię.

Millikan sprzęgał dwa balony z jedną gondolą, tak dobrane, że na dużych wysokościach jeden pękał, a drugi nie wystarczał do udźwignięcia gondoli i spadał ze stosunkowo małą szybkością w dół. Balony Millikana niosły przede wszystkim barograf dla oceny wysokości i komorę jonizacyjną. Przyrządy te były w ten sposób sprzężone, że wskazania komory mogły być podane w zależności od wskazań barometru. Balony te osiągały do 16 000 m. Obecnie dość często stosowany sposób rejestracji wskazań balonów sond, polega na tym, że aparaty nie rejestrują bezpośrednio wskazań, lecz przekazują sygnały na drodze radiowej przy pomocy krótkofalówek do stacji która balon wysłała. Daje to tę korzyść, że wrazie nawet gdyby balon uległ zgubieniu, odczyty przyrządów są zachowane i cele naukowe lotu mogą zostać wypełnione. Stosowanie balonów sond narzuca jedno zasadnicze ograniczenie w przedsięwziętych badaniach. Mianowicie stosowane aparaty muszą być stosunkowo lekkie i wskutek tego nie mogą posiadać takich zalet jak aparaty stosowane w laboratoriach. Niewątpliwie lepsze aparaty mogły być użyte w czasie lotów stratosferycznych¹⁾ urządzanych wielkimi balonami, z szczelnie zamkniętymi gondolami z obsługą ludzką. Loty te zapoczątkował w Europie A. Piccard w r. 1932, a później były dokonywane przede wszystkim w Ameryce. Rycina 15, przedstawia ogólny diagram lotów stratosferycznych, w czasie któ-

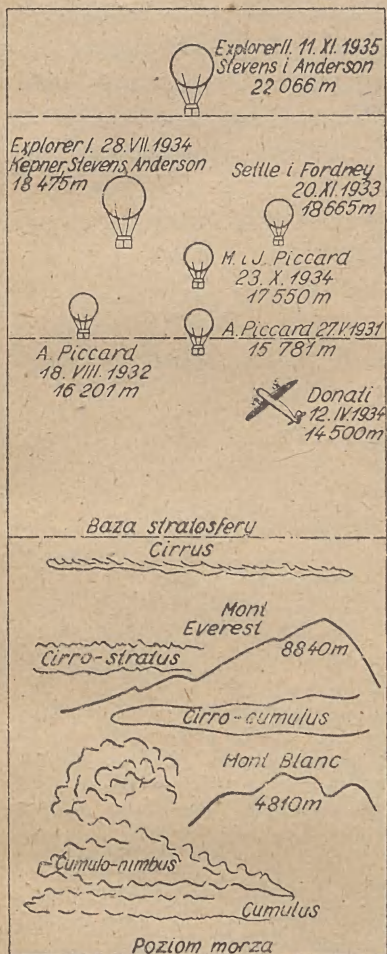
¹⁾ W atmosferze odróżniamy 2 warstwy. Najbliższa ziemi troposfera tworzy stosunkowo cienką warstwę atmosfery. Wysokość jej na biegunach sięga do ok. 9 km, podczas gdy na równiku wynosi ok. 16 km. Jest to warstwa w której mieści się ok. 95% powietrza całej atmosfery mimo jej stosunkowo niewysokiego pułapu. Tutaj odbywa się większość zjawisk atmosferycznych, którymi zajmuje się meteorologia, ona stanowi obszar silnego spadku temperatury. Obszar zupełnie rozrzedzonego powietrza znajdujący się nad troposferą nazywa się stratosferą.



Ryc. 16.

Amerykański balon stratosferyczny „Explorer 11”, który dnia 11. XI. 1935 osiągnął wysokość 22 066 m.

rych osiągnięte były światowe rekordy wysokości. Lotów tych dokonywano w balonach-olbrzymach zdolnych do udźwignięcia wielkiej gondoli hermeticznie zamkniętej, w której prócz 2-ch do

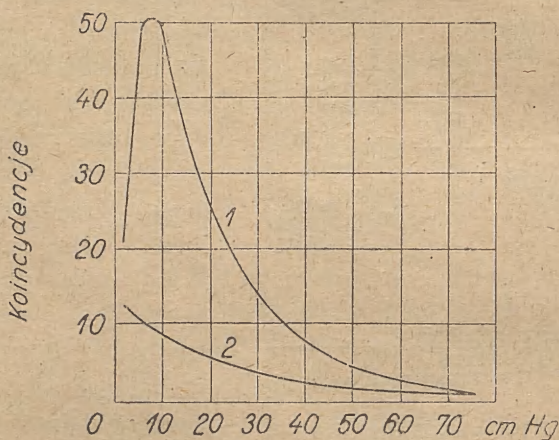


Rys. 15.

Schemat lotów stratosferycznych w których uzyskano rekordy wysokości. Reprodukacja ze sprawozdania z amerykańskiego lotu stratosferycznego balonu „Explorer II”.

3-ch ludzi załogi znajdowało się całe małe laboratorium do wszelkiego rodzaju pomiarów w stratosferze. Gondola musiała być hermeticznie zamknięta, ponieważ na wysokościach osiąganych przez balon, ciśnienie powietrza dochodziło do wartości zaledwie kilku cm Hg. Jest to rozrzedzenie powietrza, którego oczywiście organizm ludzki nie wytrzyma. Na skutek tego gondola prócz instrumentów pomiarowych musiała mieć urządzenie zapewniające pilotom dopływ tlenu i urządzenia absorbujące CO₂ i inne produkty oddychania, loty bowiem trwały kilka, do kilkunastu godzin. Balony były przeważnie napełniane wodorem, który później w Ameryce zastąpiono helem, ponieważ wódór, przez swoją wybuchowość zbyt często był powodem katastrof. Ryc. 16 przedstawia amerykański balon stratosferyczny „Explorer II”, który 11. XI. 1935 osiągnął wysokość 22066 m.

Jakkolwiek loty stratosferyczne dały możliwość uzyskania bardzo wielu interesujących wyników, w wielu dziedzinach nauki, jednak najdokładniejsze pomiary natężenia promieni kosmicznych dokonane zostały przy pomocy balonów sond przez Pfozera w r. 1936. Mierzył on natężenie promieni kosmicznych przychodzących do aparatury licznikowej z kierunku pionowego. Liczniki były połączone w potrójne koincydencje, które były rejestrowane w ten sposób, że rejestratory były co 4 minuty automatycznie fotografowane. Rezul-



Ryc 17.

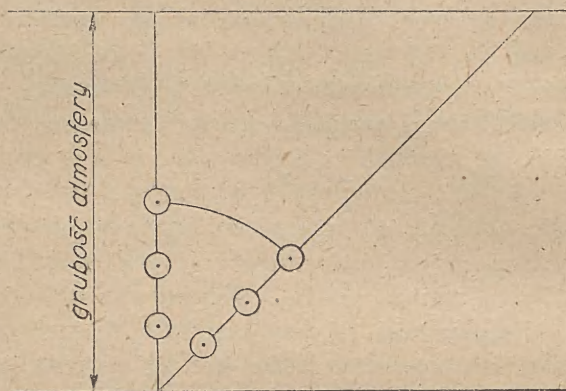
Zależność natężenia składowej pionowej promieni kosmicznych od wysokości. Na osi odciętych zaznaczone jest ciśnienie atmosferyczne jako miara wysokości, na osi rzędnych liczba koincydencji składowej pionowej. Krzywa 1 przedstawia ogólne natężenie składowej pionowej wg. pomiarów Pfozera z r. 1936. Krzywa 2 przedstawia natężenie twardej składowej (pionowej) wg. pomiarów Schein'a, Jesse'go i Wollan'a z r. 1941

taty tych pomiarów widzimy na ryc. 17 (krzywa 1). Zamiast wysokości, na osi odciętych mamy zaznaczone ciśnienie atmosferyczne. To ciśnienie jest bardziej miarodajne niż wysokość, ponieważ ono jest proporcjonalne do masy powietrza znajdującego się nad danym poziomem. Balon sonda Pfozera osiągnął wysokość ok. 35 km gdzie ciśnienie atmosferyczne wynosiło ok. 10 mmHg. W miarę wznoszenia się w górę (od prawej strony rysunku do le-

wej), liczba koincydencji do pewnej wysokości wzrasta stale, zgodnie z wynikami poprzednich badaczy. Na wysokości jednak ok. 80 mmHg, liczba koincydencji osiąga maksimum i przy dalszym wznoszeniu się w górę, natężenie promieni kosmicznych maleje. Maksymalna wartość natężenia promieni kosmicznych na tej właśnie wysokości 80 mmHg jest ok. 40 razy większa od natężenia na poziomie morza. Odkrycie przebiegu tej zależności miało bardzo wielkie znaczenie dla całokształtu zagadnienia promieni kosmicznych. Porównajmy przebieg tej zależności z krzywą Rossiego (ryc. 14) która przedstawia zależność liczby pęków od grubości warstwy w której pęki powstają. Widzimy tutaj charakterystyczne podobieństwo. I tu, i tam przy powiększaniu grubości warstwy materii, przez którą cząstki przebiegają, liczba cząstek wzrasta, osiąga pewne maksimum a później maleje. Nasuwa nam to przypuszczenie, że mechanizm mnożenia się cząstek w powietrzu, może jest podobny do mechanizmu tworzenia się pęków. Promienie kosmiczne pierwotne, które z poza ziemi przychodzą do granic atmosfery, wytwarzają w niej cząstki wtórne w procesach analogicznych do tych, jakie zachodzą przy wytwarzaniu pęków w materiałach ciężkich. Ilość ich wzrasta w miarę wzrastania grubości atmosfery (od lewej strony ku prawej ryciny 17) ponieważ ze wzrostem grubości warstwy rośnie prawdopodobieństwo takiego procesu, poczem po przekroczeniu maksimum, liczba cząstek maleje wskutek absorpcji.

Zależność natężenia promieni kosmicznych od kierunku nachylenia względem pionu. Jeżeli układ koincydencyjny liczników Geigera ustawimy w płaszczyźnie pionowej i później płaszczyznę tę będziemy odchylać od pionu (ryc. 18) zauważymy, że w miarę odchylenia jej płaszczyzny, liczba cząstek rejestrowanych przez układ liczników będzie maleć. Analiza matematyczna tej zależności wykazuje, że jest ona taką jak przewiduje teoria oparta na założeniu, że rozkład natężenia promieni kosmicznych u granic atmosfery jest zupełnie izotropowy, tzn. że promienie kosmiczne przychodzą ze wszystkich kierunków z jednakowym natężeniem. Te które dochodzą do poziomu morza mają jednak do przebiegnięcia warstwy powietrza rozmaitej grubości, zależnie od kierunku względem pionu i stąd ta zależność natężenia od kierunku, obserwowana na ziemi. Ilościowo

sprawa wygląda w ten sposób, że na poziomie morza natężenie składowej poziomej wynosi zaledwie kilka % natężenia składowej pionowej. W miarę wzrastania wysokości stosunek natężenia skła-



Ryc. 18.

Ustawienie układu liczników przy badaniu zależności natężenia promieni kosmicznych od kąta odchylenia od pionu.

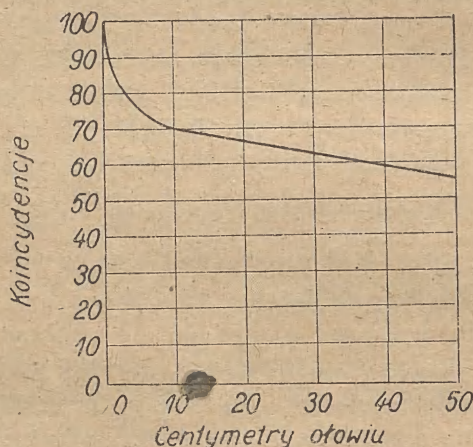
dowej poziomej do pionowej wzrasta. I tak na wysokości 13 km składowa pozioma stanowi już 20 % na wysokości 16 km stanowi już 50 % składowej pionowej.

Miękka i twarda składowa promieni kosmicznych,

Jeżelibyśmy chcieli porównać promienie kosmiczne z jakimś innym promieniowaniem, wówczas przede wszystkim musielibyśmy stwierdzić ich zupełnie wyjątkową przenikliwość, ich „twardość”. Tę twardość charakteryzuje się przy pomocy t.zw. współczynnika absorpcji. (μ) Zwykle określa się go jako ułamek natężenia danego promieniowania, który ulega absorpcji, na jednostce grubości warstwy. Naogół dla oceny twardości promieni Röntgena, γ i kosmicznych, bierze się nie współczynnik absorpcji μ , tak zdefiniowany jak powyżej, lecz jego stosunek do gęstości materii, ponieważ absorpcja ta zależy przede wszystkim od gęstości. Jasną jest bowiem rzeczą że współczynnik absorpcji dla powietrza będzie bardzo mały w stosunku np. do tegoż współczynnika dla wody czy ołowiu. Stosunek

natomiast tego współczynnika do gęstości (ρ) będzie wielkością, która bardziej będzie charakteryzować samo promieniowanie, niż materię w której absorpcja zachodzi. $\frac{\mu}{\rho}$ będzie zatem współczynnikiem absorpcji przeliczonym dla materii o gęstości jednostkowej (woda). Pierwszy ocenił ten współczynnik dla promieniowania kosmicznego z absorpcji w powietrzu Kolhörster i podał dla niego wartość $\frac{\mu}{\rho} = 5.10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ (oznacza to zatem że w materii o gęstości 1 g. cm^{-3} $\frac{5}{1000}$ promieniowania kosmicznego ulega absorpcji w warstwie o grubości 1 cm). Później okazało się, szczególnie dzięki pomiarom Millikana i Camerona, którzy (1925-26) badali natężenie promieni kosmicznych pod grubymi warstwami wody, zanurzając specjalne komory jonizacyjne aż do 60 m pod powierzchnię wody, że promieniowanie kosmiczne pod grubymi warstwami materii ulega „twardnieniu”. Na tych głębokościach współczynnik $\frac{\mu}{\rho}$ spadł do wartości 1.10^{-3} . W r. 1928 Regener określił na głębokości równoważnej 230 m wody ten współczynnik na $0,2.10^{-3}$ a wreszcie Kolhörster który w kopalni w Stassfurcie obserwował koincidence na głębokości równoważnej 500 m wody, określił go na 5.10^{-5} . Tak więc w miarę zwiększania grubości warstwy przez którą promieniowanie kosmiczne przechodzi, staje się ono coraz bardziej przenikliwe, jego współczynnik absorpcji maleje. Podejźmy teraz do tego zagadnienia z trochę innej strony. Badajmy absorpcję promieniowania kosmicznego np. w ołowiu zwiększając w sposób ciągły grubość warstwy ołowiu i przedstawmy rezultaty otrzymane graficznie (ryc. 19). Oś odciętych niech będzie osią grubości warstwy ołowiu, oś rzędnych niech będzie osią natężenia promieni. Widzimy, że krzywa ta wyraźnie rozpada się na 2 części. Mniej więcej do grubości ołowiu 10 cm, krzywa natężenia spada dość gwałtownie, lecz po przekroczeniu tej grubości dalszy spadek natężenia jest dość powolny. Mamy zatem widocznie jakieś dwa zasadnicze rodzaje, jakieś dwie składowe promieniowania kosmicznego. Jedna z nich jest silnie absorbowana i nie przenika przez warstwy ołowiu o grubości 10 cm, druga natomiast, szczególnie przenikliwa, przechodzi przez warstwy znacznie grubsze

bez wydatnej zmiany natężenia. Ta właśnie „twarda” składowa przenika przez grube warstwy wody, czy ziemi, jak to obserwował Regener, Kolhörster i inni. Pierwszym, który wyraźnie odróżnił w promieniowaniu kosmicznym te dwie składowe był P. Auger. Po nim przyjęto już stałe nazywać „twardą” składową, tę część promieniowania kosmicznego, która przenika przez warstwę ołowiu o grubości 10 cm, pozostałość zaś nazywać „miękką” składową. Stosunek ilościowy składowej miękkiej do twardej na poziomie morza jest ok. 1:3, czyli że na poziomie morza mamy wielką przewagę



Ryc. 19.

Absorpcja promieni kosmicznych w ołowiu.

składowej twardej. W miarę wznoszenia się w górę stosunek natężenia miękkiej do twardej składowej wzrasta, to zn. co raz więcej mamy cząstek składowej miękkiej w stosunku do twardej i w okolicy maksimum natężenia ogólnego tj. przy ciśnieniu ok. 80 mm Hg stosunek ten osiąga wartość 5:1, to zn. odwraca się do wyraźnej przewagi składowej miękkiej.

Początkowo przypuszczano, że sprawa przenikliwości promieni kosmicznych jest sprawą wyłącznie energii ich cząstek. Później okazało się, że kwestii przenikliwości promieni kosmicznych nie da się rozwiązać pod założeniem tylko różnych energii cząstek. Przestu-

diowanie teoretyczne oddziaływania cząstek elektrycznie naładowanych o dużej energii, z materią, prowadzi do wniosku że prawdopodobieństwo przejścia elektronu o dużej energii przez 10 cm ołowiu bez wytworzenia bogatego w cząstki pęku jest bardzo małe. Tymczasem zdjęcia wilsonowskie takich cząstek wykazują, że zdarzają się one stosunkowo często. Tak więc przyjęcie samych elektronów w promieniowaniu kosmicznym prowadzi do bardzo dużych trudności w zrozumieniu własności twardej składowej.

4. Współczesne poglądy na oddziaływanie cząstek i fotonów promieniowania kosmicznego z materią.

Wróćmy jeszcze raz do zagadnienia pęków promieniowania kosmicznego. Zagadnienie wyjaśnienia mechanizmu powstania ich było od chwili ich wykrycia punktem centralnym zainteresowania teoretyków promieniowania kosmicznego. Głównym pytaniem, na które silono się znaleźć odpowiedź było rozstrzygnięcie między dwiema zasadniczymi możliwościami. Oto te możliwości:

1. Pęk promieni kosmicznych powstaje w jednym elementarnym procesie, t. zn. z jednego punktu w jednej chwili wybiegają wszystkie cząstki i ew. fotony pęku.

2. Pęk promieni kosmicznych powstaje w kolejno bardzo szybko po sobie następujących procesach.

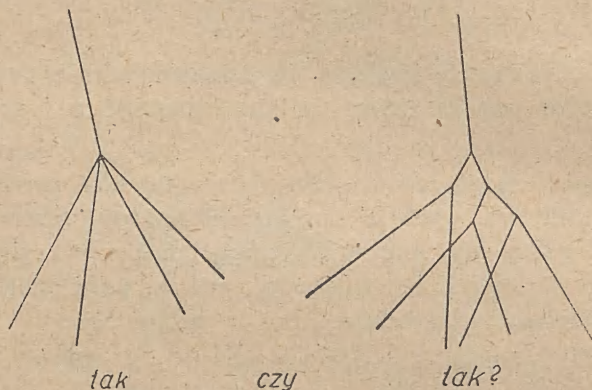
Pierwsze z tych zjawisk możemy sobie wyobrazić w ten sposób, że jądro¹⁾ jakiegoś atomu trafione przez cząstki wzgl. foton dużej energii odbiera tę energię i udziela jej kilku naraz cząstkom wybiegającym z jądra które to cząstki tworzą właśnie pęk. Proces takiego typu nazwał Heisenberg eksplozją jądra.

Drugie z tych zjawisk wyobrazimy sobie w ten sposób, że cząstka wzgl. foton wysokiej energii wytwarzające pęk wytwarzają w jednym procesie tylko jedną lub dwie cząstki wzgl. foton, te wytwarzają z kolei następne cząstki wzgl. fotony i t. d. Proces tego nazwiemy za Bhabhą i Heitlerem kaskadą.

Doświadczalnie trudno jest między tymi możliwościami rozstrzygnąć, ponieważ drogi między poszczególnymi procesami danej

¹⁾ Por. uzupełnienia.

kaskady mogą być bardzo krótkie. Obecnie wiemy, że istnieją pęki zarówno jednego jak i drugiego rodzaju. Większość tych jakie obserwujemy czy to przy pomocy liczników, czy to przy pomocy komory Wilsona, są to pęki które składają się z cząstek wzgl. fotonów o własnościach miękkiej składowej i te są pękami kaskadowymi. W ostatnich latach stwierdzono jednak istnienie pęków, w skład któ-



Ryc. 20.

Dwie możliwości powstawania pęków promieniowania kosmicznego.

rych wchodzi cząstki o własnościach *twardej składowej. Istnieją dane, które pozwalają przypuszczać, że te pęki są pękami eksplozywnymi.

Bhabha i Heitler (1937) opierając się na pracach Bethego i Heitlera opracowali teorię pęków kaskadowych. Autorowie w teorii tej, w sposób wnikliwy rozłożyli proces powstawania pędu na szereg elementarnych szybko po sobie następujących procesów. Ponieważ ta teoria ma zupełnie zasadnicze znaczenie dla całego zagadnienia promieni kosmicznych, musimy naszkicować jej zasady, a przede wszystkim rozważyć procesy elementarne, z których pęk się składa. Te zasadnicze procesy są następujące.

1. Wypromieniowanie. Wiemy, że każda lampa rentgenowska¹⁾ wysyła prócz charakterystycznych dla materiału antyka-

¹⁾ Por. uzupełnienia.

tody linii rentgenowskich, także widmo ciągłe. To widmo ciągłe jest wynikiem zahamowania elektronów wysyłanych przez katodę w atomach antykatody. Zdarzyć się może, że elektron taki zahamowany jest całkowicie w jednym akcie i wtedy całkowita jego energia przechodzi w energię wypromieniowanego fotonu. Analogiczne zjawisko zachodzi w wypadku elektronów o bardzo wielkiej energii, takich z jakimi mamy do czynienia w promieniowaniu kosmicznym. Jeżeli taki elektron przebiega blisko jakiegoś jądra atomowego, wchodzi w działanie jego pola elektrycznego, doznaje odchylenia, przyczem przechodzi w stan niższej energii, a zaburzenie pola elektrycznego elektronu ma za skutek wypromieniowanie fotonu bardzo wysokiej energii. To zjawisko, które nazywamy „wypromienianiem” jest główną przyczyną strat energii elektronów o energii większej niż 10^6 eV. Powyżej tej energii straty przez wypromieniowanie przewyższają znacznie straty energii przez jonizację, o których będzie mowa niżej. Elektron o energii większej niż 10^6 eV wypromieniowuje średnio w warstwie ołowiu o grubości 4 mm połowę swej energii. Ułamek energii wypromieniowanej przez cząstkę naelektryzowaną zależy w bardzo silnym stopniu od masy cząstki. Cząstki o dużej masie wypromieniowują mało w stosunku do cząstek o małej masie. Ściśle biorąc ułamek wypromieniowanej energii jest odwrotnie proporcjonalny do kwadratu masy cząstki. Straty energii zatem protonu przez promieniowanie są znikomo małe w porównaniu ze stratami elektronu w takim zjawisku.

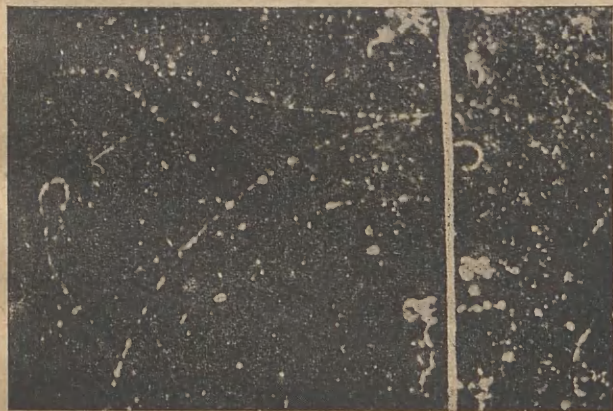
2. Tworzenie par pozitron-elektron. Jest to zjawisko będące pięknym i jedynym w swoim rodzaju przykładem zamiany energii (energii promieniowania elektromagnetycznego) na materię. Chodzi tutaj o zmaterializowanie fotonu wysokiej energii. Wiemy z zasady równoważności masy i energii, (por. uzupełnienia,) że wielkości te są w tym sensie równoważne, że układ izolowany może tracić masę przy równoczesnym wydzieleniu się energii i naodwrot, przyczem równanie przejścia masy w energię i naodwrot jest to równanie Einsteina

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Gdzie ΔE oznacza stratę wzgl. zysk energii, Δm zysk wzgl. stratę masy. $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm./sek i równa się prędkości światła w próżni.

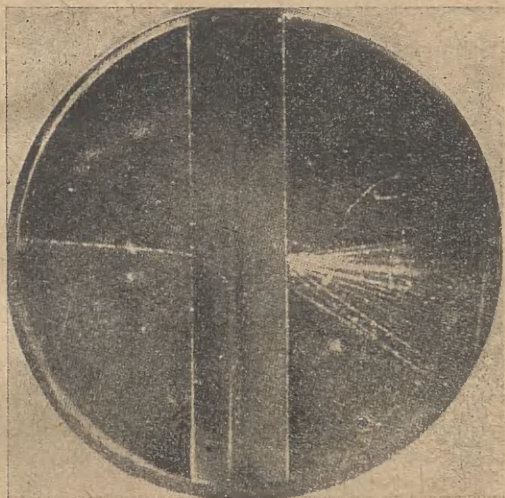
Relacja Einsteina została wielokrotnie sprawdzona doświadczalnie w reakcjach jądrowych, gdzie często mamy do czynienia z zamianą pewnej części masy jąder wchodzących w reakcję, w energię kinetyczną produktów tej reakcji, wzgl. w energię fotonu w tej reakcji wypromieniowanego. Nieznane natomiast są przypadki, by jakieś jądro atomowe, wzgl. cząstka elementarna wchodząca w skład jądra atomowego w jakimś procesie jądrowym całkowicie, znikła a na jej miejsce by się wytworzyło promieniowanie, lub naodwrot, by z promieniowania powstała jakaś cząstka tego typu z jakich jądra atomowe są zbudowane, tj. proton lub neutron. Dopiero w promieniowaniu kosmicznym i promieniach γ znaleziono przykład całkowitej zamiany energii fotonu na wytworzenie pozytronu i elektronu oraz na ich energię kinetyczną. Ponieważ masa elektronu wynosi $9,09 \cdot 10^{-28}$ g stąd na podstawie wzoru Einsteina energia potrzebna na wytworzenie tej masy jest $9,09 \cdot 10^{-28} \cdot (3 \cdot 10^{10})^2$ ergów $0,51 \cdot 10^6$ eV. Tyle potrzeba energii na samo wytworzenie jednego elektronu. Ponieważ ze względu na prawo zachowania ładunku elektrycznego z fotonu elektrycznie obojętnego musi powstać twór również elektrycznie obojętny, ładunek elektryczny nie może powstać bez rekompensaty innym ładunkiem przeciwnego znaku, przy wytworzeniu elektronu (ujemnego) powstaje równocześnie pozytron. Powstaje zatem para elektron-pozytion. Najmniejsza energia jaką posiadać musi foton dla wytworzenia takiej pary wynosi więc $2 \times 0,51 \cdot 10^6$ eV tj. ok. 10^6 eV. Istotnie zjawisko takie wielokrotnie zaobserwowano w komorze Wilsona w polu magnetycznym, gdzie z pewnego punktu obserwujemy dwa ślady wygięte w przeciwnych kierunkach, co do ładunku i masy których stwierdzono, że odpowiadają one ładunkowi i masie elektronów. Ryc. 21 przedstawia takie zdjęcie otrzymane dla promieni γ bardzo wysokiej energii. Widzimy tam dwie pary elektron-pozytion wytworzone w folii ołowianej 0,33 mm grubej przez promienie γ o energii $17,6 \times 10^6$ eV. Pole magnetyczne przy tym zdjęciu wynosiło 2500 erstedów.

3. Jonizacja. Jeżeli cząstka naładowana elektrycznie przebiega przez materię, wówczas traci energię przez jonizację. Przebiegając wśród atomów danego materiału wybija z ich powłoki elektrony, czyli jonizuje je. Straty energii przez jonizację zależą



Ryc. 21.

Powstawanie pary elektron-pozytron z fotonu γ o energii $17,6 \times 10^6$ eV. Pole magnetyczne 2500 erstedow. Grubość folii ołowianej w której para powstaje jest 0,33 mm. Promienie γ padają z dołu. Na zdjęciu widoczne dwie pary. Zdjęcie wykonali W. A. Fowler i C. C. Lauritsen.



Ryc. 23.

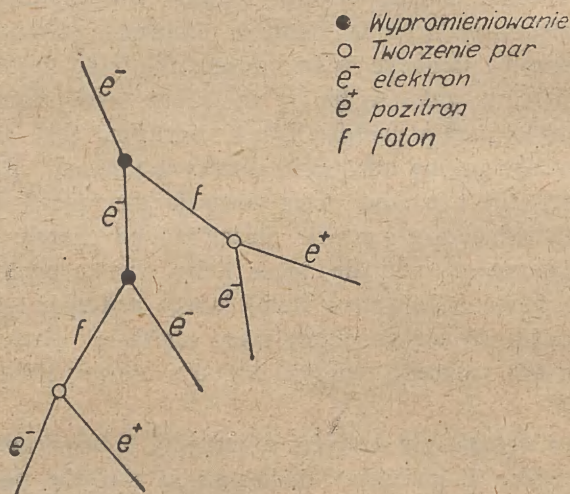
Wytworzenie pęku przez mezon. Częstka, której ślad widzimy w górnej części rysunku, przeszła już nad komorą przez warstwę ołowiu o grubości 20 cm. Jest więc najprawdopodobniej mezonem. Wytworzyła pęk złożony z elektronów i pozytronów w płycie ołowianej o grubości 1,8 cm. umieszczonej w komorze. Zdjęcie Ac. B. Lovell 1946.

przede wszystkim od prędkości cząstki. Z grubsza możemy powiedzieć, że ze wzrostem energii cząstki, straty energii przez jonizację maleją, a gdy prędkość cząstki zbliża się do prędkości światła, straty te stają się prawie niezależne od energii. Przy energii ok. 10^9 eV, elektron porusza się już praktycznie z prędkością światła, podczas gdy proton, który ma znacznie większą masę od elektronu, przy tej samej energii porusza się znacznie wolniej od elektronu i jonizuje znacznie silniej. W tym zakresie energii, proton o tej samej energii co elektron w komorze Wilsona wytwarza grubszy ślad niż elektron. Grubość śladu bowiem zależy od ilości kropelek skroplonej pary, ta zaś skrapla się na jonach wytworzonych przez cząstkę. Poniżej zatem energii 10^9 eV możliwym jest odróżnienie protonu od elektronu na podstawie różnicy w jonizacji. Dla bardzo dużych energii straty energii przez jonizację dla cząstek o różnych masach będą jednakowe i prawie niezależne od energii. Straty te będą tylko zależne od materiału, przez który cząstka przebiega. Im więcej elektronów znajduje się w 1 cm^3 danego materiału tym większa szansa jonizacji, tym większe straty przez jonizację. Rząd wielkości tych strat w tym zakresie energii jest dla ołowiu 10^7 eV na cm drogi cząstki.

Te trzy wymienione powyżej procesy tj. 1. wypromieniowanie, 2. tworzenie par i 3. jonizacja składają się na zjawisko pęku kaskadowego. Może on powstać albo z elektronu (pozytronu), albo z fotonu. Wyobraźmy sobie elektron (pozytron) dużej energii pędzący przez materię. W pewnym momencie w spotkaniu z jakimś jądrem, elektron ten wypromieniowuje foton wysokiej energii, podczas gdy sam biegnie dalej. Po przebiegnięciu pewnej drogi (w ołowiu kilka mm) proces ten może zająć po raz drugi, trzeci itd. Powstałe w tych procesach fotony wytwarzają znów pary pozytronów i elektronów. Każda z tych cząstek może znów wypromieniować foton, ten znów tworzyć parę itd. W każdym takim akcie, energia cząstki padającej dzieli się na energię, którą cząstka zachowuje i na energię fotonu wypromieniowanego (i na ew. jeszcze energię, którą zyska jądro). Analogicznie, energia fotonu dzieli się na energię pozytronu i elektronu. W ten sposób następne z kolei cząstki mają energię coraz to mniejszą, aż energia ich spadnie do wartości ok. 10^6 eV

gdzie cząstki tracą już energię prawie wyłącznie przez jonizację, a promieniowanie i tworzenie par nie mają już miejsca, kaskada nie rozmnaża się już, lecz zanika. (Ryc. 22).

Procesy wypromieniowania wzgl. tworzenia par są w ogólności pojedyncze, tzn. jeden elektron wypromiowuje jeden foton, jeden foton tworzy jedną parę elektron-pozytron. Procesy wytworzenia w jednym takim akcie kilku fotonów wzgl. kilku par są bardzo



Ryc. 22.
Schemat pęku kaskadowego.

mało prawdopodobne. Mimo to jednak procesy te, w wypadku warstwy o grubości kilku cm, mogą zależnie od energii cząstki pierwotnej, wytwarzać bardzo bogate w cząstki pęki. Ilościowo teoria kaskad Bhabhy i Heitlera daje bogate rezultaty. Pozwala na obliczenie przeciętnej liczby cząstek pęku w zależności od energii cząstki pierwotnej i od grubości warstwy materii, w której pęk się tworzy. Zgodnie z doświadczeniem (Krzywa Rossiego) teoria przewiduje występowanie maksimum zależności liczby cząstek pęku od grubości warstwy. Dla dużych energii cząstki, maksimum to występuje przy grubszej warstwie niż w wypadku mniejszych energii. Teoria pęków kaskadowych rzuca również światło na zagadnienie

zależności natężenia promieni kosmicznych od wysokości. Przebieg tej zależności (krzywa Pfoztera ryc. 17¹) da się według tej teorii wytłumaczyć, jeżeli się przyjmie, że do górnych warstw atmosfery przychodzą elektrony wzgl. fotony (nie rozstrzygamy w tej chwili czy one przychodzą z poza atmosfery, czy też tam w najgórniejszych warstwach atmosfery są wytwarzane). Elektrony te ulegają tam w górnych warstwach atmosfery kaskadowemu rozmnożeniu, poczem w dolnych warstwach ulegają absorpcji. Gdybyśmy z położenia maksimum na krzywej Pfoztera chcieli na podstawie teorii kaskad wnioskować o energii cząstek wytwarzających te kaskady, to wypadłoby na średnią energię cząstek wytwarzających te kaskady kilka 10^9 eV.

5. Mezony.

Wielkie znaczenie teorii kaskad promieniowania kosmicznego objawiło się także w zasadniczym zagadnieniu jakim było przed ok. 10 laty zagadnienie twardej składowej. Mianowicie według ustalonych poglądów na oddziaływanie cząstek elektrycznie naładowanych wysokiej energii z materią, nie można było wyjaśnić wielkiej przenikliwości twardej składowej, takiej jaką daje doświadczenie. Gdyby bowiem twardą składową tworzyły elektrony dużej energii wówczas np. w warstwach ołowiu powyżej kilku cm wytworzyłyby one bardzo bogate w cząstki kaskady, które mechanizmem podanym wyżej ulegałyby w grubszych jeszcze warstwach absorpcji. Zatem cząstki twardej składowej, które jak to wielokrotnie i przy pomocy liczników Geigera, i przy pomocy komory Wilsona obserwowano, przechodzą przez kilkucentymetrowej grubości warstwy ołowiu, nie mogą być elektronami. Mogłyby to zatem być cząstki, które nie wytwarzają kaskad. Procesem który jest zasadniczym ogniwem między poszczególnymi elementami każdej kaskady jest wypromieniowanie fotonu przez cząstkę. Mogłyby to zatem w zasadzie być protony, te bowiem wypromieniowują bardzo mało swej energii i praktycznie nie mogą tworzyć kaskad. Gdyby jednak protony wysokiej energii tworzyły twardą składową, to musiałyby licznie występować w promieniowaniu kosmicznym na poziomie morza. Odróżnienie protonów od elektronów dla energii wyższych niż 10^9 eV jest na podstawie różnic ich jonizacji praktycznie niemożliwe, jest natomiast możliwe dla

energii niższych od tej wartości. Przy pomocy komory Wilsona umieszczonej w polu magnetycznym przebadano bardzo wielkie ilości cząstek promieniowania kosmicznego aż do energii kilka 10^{10} eV. Ślady większości przebadanych cząstek wykazały jonizację nie różniącą się od jonizacji elektronów. Nawet dla małych energii cząstek, tam gdzie ślady protonów powinno się wyraźnie odróżnić od śladów elektronów, stwierdzono, że większość cząstek za słabo jonizuje (daje za słabe ślady w komorze Wilsona) by mogły być protonami. Zakres od $2 \cdot 10^8$ eV do $5 \cdot 10^8$ eV jest w każdym razie zakresem, w którym stwierdzono, że cząstki w większości nie są protonami. Stwierdzono również, że w tym zakresie energii straty energii są znacznie za małe, niż by to miało miejsce gdyby cząstki były elektronami, te bowiem traciłyby przez promieniowanie znacznie więcej energii. Stwierdzono zatem, że w omawianym zakresie energii cząstki za mało jonizują by być protonami, a za mało wypromieniowują by być elektronami. Stąd wywnioskowali Anderson i Neddermeyer w r. 1938 (którzy w r. 1932 odkryli pozytron), że muszą to być cząstki o ładunku równym ładunkowi elektronu, a o masie pośredniej między elektronem a protonem. Cząstki te wykryto w podanym wyżej zakresie energii, ponieważ w tym zakresie można je było odróżnić przez słabe promieniowanie od elektronów, a przez za słabą jonizację od protonów. Oczywiście nie wynika stąd, by cząstek tych nie było poza tym zakresem energii. Cząstki te nazwano początkowo ciężkimi elektronami, później kilka innych nazw było proponowanych, obecnie na cząstkę tę przyjęto dość powszechną nazwę mezon¹⁾.

Odkrycie mezonów w promieniowaniu kosmicznym dało rozwiązanie zagadki twardej składowej tego promieniowania. Mezony nie promieniują, nie wytwarzają zatem pęków kaskadowych, stąd ich olbrzymia przenikliwość. Składowa twarda promieniowania kosmicznego utworzona jest przez mezony.

Ładunek mezonu. Badanie jonizacji cząstek kosmicznych przez analizę torów w komorze Wilsona, jak wspomniano już wyżej wykazało, że dla olbrzymiej większości cząstek jonizacja właściwa jest taka jak dla elektronu. Już stąd wynika, że ładunek większości

¹⁾ Cząstka o masie pośredniej.

cząstek jest równy ładunkowi elektronu. Dzisiaj przyjmuje się z wielu innych, także teoretycznych względów, w które tutaj nie możemy wchodzić, że mezony mają ładunek elektryczny, co do wartości bezwzględnej równy ładunkowi elektronu. Co do znaku tego ładunku, to zdjęcia w komorze Wilsona wykonane w polu magnetycznym wykazują obecność w promieniowaniu kosmicznym mezonów i dodatnich i ujemnych. Bardzo ciekawem jest spostrzeżenie Jones'a i Hughes'a, że na poziomie morza obserwujemy wyraźnie więcej mezonów dodatnich niż ujemnych. W zakresie energii od 10^8 do 10^{10} eV stwierdzili oni, że mezonów dodatnich jest ponad 20% więcej niż ujemnych.

Masa mezonu. Z pomiarów n.p. krzywizny toru i jonizacji w komorze Wilsona można ocenić masę mezonu. Pomiarów te jednak są bardzo niedokładne, tak że obecnie można podać tylko granice w jakich masa mezonu się zawiera. Wynosi ona od 160 do 240 mas elektronu.

Promieniotwórczość mezonu. Idea nowej cząstki o masie pośredniej między masą elektronu a protonu, która doświadczalnie wykryta została w r. 1938 nie była nową dla teorii. Jeszcze w r. 1935 Japończyk Youkawa w teorii sił jądrowych przyjął istnienie takiej właśnie cząstki i myśl ta była później dość szeroko rozwijana. Według teorii cząstka ta miała mieć właśnie taką masę, jaką później znaleziono doświadczalnie dla mezonu. Teoria Youkawy prowadziła do innego jeszcze ciekawego wniosku odnoszącego się od nowej cząstki. Mianowicie według teorii Youkawy, cząstka ta nie ma być trwałą, lecz może spontanicznie, bez żadnych wpływów zewnętrznych rozpaść się na elektron i neutrino¹⁾ wg. następujących schematów.

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu$$

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu$$

gdzie μ^- oznaczają mezon ujemny

„ μ^+ „ „ dodatni

„ e^- „ elektron

„ e^+ „ pozytron

„ ν „ neutrino

¹⁾ Por. uzupełnienia.

Przy tego rodzaju równaniach pamiętajmy, że zasada zachowania ładunku stosuje się tutaj bez zastrzeżeń, tak jak w fizyce klasycznej. Ładunek z lewej strony musi się równać ładunkowi z prawej strony, natomiast zasada zachowania masy stosuje się tutaj w sensie uogólnionym przez teorię względności. Możemy mieć stratę masy przy równoczesnym zysku energii. Ponieważ w wypadku zamiany mezonu na elektron i neutrino, masy tych dwóch cząstek są małe w porównaniu z masą mezonu, przeto prawie cała masa mezonu zamienia się na energię kinetyczną elektronu i neutrina. Energia ta równa się jest $\mu c^2 \approx 10^8 \text{ eV}$, gdzie μ oznacza masę mezonu. A więc nawet spoczywający mezon rozpadając się na elektron i neutrino, już w chwili powstania udziela powstającym z niego cząstkom energię tego rzędu wielkości, jaką obserwujemy tylko w promieniach kosmicznych.

Doświadczenie pięknie potwierdziło wyniki teorii Yukawy. Dziś promieniotwórczość mezonu została różnymi metodami potwierdzona. Ale nie tylko stwierdzono rozpad mezonu. Znalezione nawet doświadczalnie czas rozpadu mezonu, wzgl. średni okres życia mezonu. Euler i Heisenberg pierwsi oszacowali okres mezonu w oparciu się na następującym fakcie. Już dawno zauważono pewną anomalie w absorpcji twardej składowej promieniowania kosmicznego, czyli jak teraz możemy powiedzieć w absorpcji mezonów. Anomalia ta polega na uderzającej, niemniej do niedawna niewytłumaczonej różnicy absorpcji twardej składowej w powietrzu i w gęstych materiałach. Przez obserwację na poziomie morza i w górach zaobserwowali pierwsi Follet i Crawshaw, że natężenie twardej składowej po przejściu przez pewną bardzo grubą warstwę powietrza jest mniejsze niż pod równoważną pod względem masy warstwą ziemi. Heisenberg i Euler pokazali, jak te fakty mogą być wytłumaczone ilościowo przez spontaniczny rozpad nowej cząstki. Wynika to mianowicie z faktu, że droga przebyta przez cząstkę kosmiczną przez warstwę o określonej masie, w wypadku powietrza jest znacznie dłuższa niż, w wypadku ośrodka gęstego. Stąd w powietrzu prócz zwykłej absorpcji mezonów, mamy straty w liczbie mezonów spowodowane ich rozpadem na długiej drodze. Z porównania tych strat mezonów w obu przypadkach można ocenić średni

czas życia mezonów. Inna metoda oceny czasu życia mezonu bardziej bezpośrednia, polega na tym że obserwuje się mezony na końcu ich drogi w dużym bloku ołowianym i bada się opóźnione koincydencje wywołane przez powstałe średnio po upływie czasu rozpadu mezonu, elektrony. Metodę tę zastosował po raz pierwszy Rasetti (1941). Podobnie jak pomiary masy, tak i pomiary średniego czasu życia mezonu są bardzo niedokładne, tak że dzisiaj możemy tylko powiedzieć że czas ten leży w granicach między $1 \cdot 10^{-6}$ a $2,5 \cdot 10^{-6}$ sek.

Zależność natężenia mezonów od wysokości. Skoro mezony są nietrwałe, promieniotwórcze, muszą powstawać w atmosferze. Początkowo przypuszczano, że powstają one jako wtórne składowej miękkiej, tj. składowej elektronowej i fotonowej. Jeżeliby to przypuszczenie było słuszne, to powinno się to dać sprawdzić doświadczalnie w ten sposób, że zależność natężenia mezonów od wysokości, powinna być taka sama, jak zależność miękkiej składowej. W miarę wznoszenia się aparatury rejestrującej mezony w górę, liczba mezonów powinna wzrastać i tam gdzie ogólne natężenie [p. ryc. 17 krzywa (1)] osiąga maksimum, również i natężenie składowej mezonowej powinno mieć maksimum, poczem natężenie jej powinno znowu maleć. Schein, Jesse i Wollan w r. 1941 wykonali odnośne pomiary, wysyłając do stratosfery balony sondy z aparaturą koincydencyjną. Częstki powodujące koincydencje musiały w aparaturze tej przechodzić przez warstwy ołowiu o grubości 18cm. Aparatura rejestrowała zatem tylko twardą składową. Najwyższa, przez wymienionych badaczy osiągnięta wysokość odpowiadała ciśnieniu 16 mm Hg. Rezultaty tych pomiarów przedstawione są na krzywej 2 ryc. 17. Widzimy, że spodziewanego maksimum nie ma. Natężenie mezonów stale wzrasta, osiąga wartość kilkanaście razy większą, niż na poziomie morza, lecz w granicach osiągniętej wysokości spadku natężenia mezonów nie zauważono. Jest to tym dziwniejsze, że niezależnie od tego z jakich cząstek pierwotnych mezony powstają, proces ich powstania musi rozgrywać się w atmosferze, więc spadek natężenia mezonów musi w końcu nastąpić. Nie możemy faktu tego inaczej wytłumaczyć, jak tylko przez przyjęcie, że wytwarzanie mezonów odbywa się w cienkiej warstwie atmosfery do

której balony sondy jeszcze nie dotarły. Oczywiście druga możliwość jest, że dotychczasowe, nieliczne niestety pomiary natężenia twardej składowej na dużych wysokościach, obarczone są tak dużym błędem, że nie można uważać ich za ostatecznie pewne.

Pęki kaskadowe spowodowane przez mezony. Jak wspomniano wyżej, są dwa zasadnicze procesy w jakich elektrony tracą energię przy przejściu przez materię, a mianowicie: 1) wypromieniowanie 2) jonizacja. W przypadku mezonu, teoria przewiduje prócz jonizacji (wypromieniowania nie uwzględniamy) jeszcze inny sposób oddawania energii. Mianowicie możliwe są takie zderzenia mezonów z elektronami materii w której mezon biegnie, w których elektron odbiera mezonowi stosunkowo dużą część jego energii. Elektron taki, wybity jest z atomu z energią tak wielką, że jest on zdolny wytworzyć pęk kaskadowy. Mamy tutaj zatem pęk kaskadowy, który zostaje wytworzony przez mezon jako cząstkę pierwotną. Tego rodzaju elektrony, względnie powstałe z nich kaskady, są w pierwszym rzędzie powodem występowania składowej miękkiej na bardzo dużych głębokościach pod ziemią, dokąd napewno nie docierają elektrony te, z którymi mamy do czynienia na powierzchni ziemi, jako z miękką składową. Te procesy można obserwować przy pomocy komory Wilsona umieszczonej pod warstwą np. 20 cm ołowiu. Prawdopodobieństwo żeby elektron dużej energii przeszedł przez taką warstwę ołowiu i wyszedł z niej jako cząstka pojedyncza jest bardzo małe, stąd w większości pojedyncze cząstki które przenikają przez tę warstwę ołowiu są mezonami. W takich warunkach wykonano zdjęcie na ryc 12 (A. C. B. Lovell 1946). Mezon, który przeszedł przez płytę ołowianą grubości 20 cm (niewidoczna na zdjęciu) trafia na umieszczoną w komorze drugą płytę ołowianą o grubości 1.8 cm w której wytwarza pęk. Jest to właśnie pęk typu opisanego w tym ustępie.

Pęki przenikliwe. Dotychczas mówiliśmy o pękach kaskadowych, które utworzone są z elektronów, pozytronów i fotonów mnożących się mechanizmem opisanym w teorii kaskad Bhabha i Heitlera. Są one zresztą najczęściej występującymi w promieniach kosmicznych pękami. W ostatnich latach przed wojną stwierdzono, że istnieją też pęki które zawierają stosunkowo duże ilości mezonów.



Ryc. 25.

Rozbite jądra atomowego przez cząstkę promieniowania kosmicznego. 600-krotne powiększenie wycinka płyty fotograficznej, w emulsji której nastąpiła eksplozja jądra. Ślady w emulsji pochodzą od cząstek wybiegających z jądra. (Schopper 1939).

Pierwszy podał dowód istnienia takich pęków Fussel (1936). Ryc. 24 przedstawia zdjęcie wilsonowskie takiego pęku. Częstka pierwotna dużej energii wpada do komory Wilsona, w której znajdują się 3 płytki ołowiane: 0,7 mm, 6,3 mm i 6,3 mm. Częstka pierwotna widocznie w pierwszej z płytek wytwarza tutaj pęk, którego większość cząstek musi być mezonami. Że tak jest wnioskujemy z tego, że większość cząstek przechodzi przez drugą grubą płytkę nie tworząc kaskady. Widzimy bowiem, że tylko jedna cząstka w trzeciej płycie tworzy nowy pęk. Charakterystycznym jest, że w pękach tego rodzaju powstają prócz mezonów także cząstki ciężkie. Widzimy takie na zdjęciu Fussel'a (ryc. 24), a poznajemy je po wyraźnie krótszym zasięgu. Dalsze dowody istnienia pęków zawierających mezony, dali doświadczeniami koincydencyjnymi Janossy i Rochester w latach od 1940 do 1943. Stwierdzili oni istnienie koincydencji spowodowanych równocześnie przez co najmniej 2,3, lub więcej cząstek z których każda musiała przeniknąć warstwę ołowiu grubości 50 cm (całkowity ciężar ołowiu użytego w aparaturze Janossy'ego wynosił 15 ton). Z badań nad absorpcją promieniowania wytwarzającego tego rodzaju pęki mogli Janossy i współpracownicy wywnioskować, że w większości pęki te wytworzone są przez protony, lecz że znaczna część tych pęków, bo ok. $\frac{1}{3}$ wytworzona jest przez składową niejonizującą, lecz bardziej przenikliwą niż fotony, prawdopodobnie przez neutrony. Ten właśnie fakt że pęki te wytwarzane są przez cząstki ciężkie stanowi jedną z przyczyn przypuszczenia, że pęki opisywanego tutaj typu powstają w procesach jądrowych, eksplozywnych, gdzie mianowicie proton, lub neutron w zderzeniu z jądrem przekazuje mu swą energię, która rozdziela się na wiele cząstek jądra powodując jego „eksplozję“, w czasie której z punktu, w którym ona nastąpiła rozbiega się wiele cząstek. Mogą to być cząstki elementarne wchodzące w skład jądra w stanie stacjonarnym, tj. protony i neutrony, lecz mogą to być także cząstki które powstają w jądrze tylko w momencie jakiejś jądrowej przemiany specjalnego typu tj. mezony.

6. Cząstki ciężkie.

Składowa neutronowo-protonowa. W poprzednim ustępie mówiliśmy, że pęki eksplozyjne wytwarzane są prawdopodobnie przez protony wzgl. neutrony. Oczywiście nasuwa się tutaj pytanie

skąd one się biorą w promieniowaniu kosmicznym. Nierozstrzygając w tej chwili sprawy czy możliwym jest, by one właśnie były częstkami pierwotnymi tj. by przychodziły z poza ziemi do granic atmosfery, musimy tutaj zauważyć, że napewno istnieją cząstki ciężkie, które powstając z miękkiej składowej, są pewnym jej efektem wtórnym. Stwierdzono mianowicie, że wzrost natężenia protonów i neutronów z wysokością w promieniowaniu kosmicznym jest wzajemnie proporcjonalny i przebiega zupełnie analogicznie do krzywej (ryc. 17) natężenia miękkiej składowej w zależności od wysokości. Liczba neutronów jest mniej więcej równa liczbie elektronów miękkiej składowej, liczba protonów jest ok. 100 razy mniejsza. Prawdopodobnym jest, że neutrony i protony powstają raczej z fotonów zawartych w miękkiej składowej.

Reakcje jądrowe spowodowane promieniami kosmicznymi. Przy przeglądaniu płyt fotograficznych, które były poddane tylko działaniu promieni kosmicznych odkryli Blau i Wambacher (1937) ślady procesów, które interpretują jako rozbicia jąder atomowych. Na płycie fotograficznej wygląda to w ten sposób (ryc. 25), że z jednego punktu emulsji światłoczułej wybiega promieniście kilka paciorkowatych linii utworzonych przez ziarenka srebra danej emulsji. Linie te pochodzą od produktów danej reakcji jądrowej, jaka w tym punkcie przez cząstkę wzgl. foton kosmiczny została dokonana. Zasięg tych cząstek jest tak duży, że niema mowy by ślady mogły pochodzić od promieniotwórczych domieszek przypadkowo znajdujących się w emulsji kliszy, które to domieszki mogłyby emitować cząstki dające też ślady, lecz znacznie krótsze. Że opisane tutaj zjawisko pochodzi od promieni kosmicznych, udowodnili Stetter i Wambacher (1939) wykazawszy, że częstość tych procesów rośnie wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem ziemi, na której płyty są eksponowane. Podobnie jak to stwierdzono w odniesieniu do występowania pojedynczych protonów i neutronów w promieniowaniu kosmicznym, tak i tutaj stwierdzono, że zależność częstości występowania tych zjawisk od wysokości nad poziomem morza, jest taka sama jak zależność natężenia składowej miękkiej od wysokości. Dowodzi to, że między tymi zjawiskami zachodzi ścisły związek. Jest prawdopodobnem, że większość protonów

i neutronów, które pojedynczo obserwujemy w promieniach kosmicznych na poziomie morza, jest właśnie tego pochodzenia. Byłyby więc one wytwarzane przez miękką składową, najprawdopodobniej przez jej część fotonową, w tego rodzaju procesach.

7. Co jest pierwotnym promieniowaniem kosmicznym?

W poprzednich rozdziałach zapoznaliśmy się z trzema zasadniczymi składnikami promieniowania kosmicznego, z których pierwsze dwa stanowią zdecydowanie przeważającą część promieniowania kosmicznego, natomiast trzeci stanowi bardzo niewielki ułamek ogólnego natężenia. Są to mianowicie.

1. Składowa miękka którą możemy rozdzielić na składową kaskadową oraz na składową miękką wtórną mezonowej złożoną z elektronów powstałych z rozpadu mezonów oraz z elektronów wybitych z atomów przez mezony i ewentualnie z nich powstałych kaskad.

2. Składowa twarda (mezonowa).

3. Składowa cząstek ciężkich. Składowa złożona z protonów i neutronów i ewentualnie innych cząstek ciężkich, powstałych prawdopodobnie w reakcjach jądrowych spowodowanych promieniami kosmicznymi.

Zasadniczym zagadnieniem, którym się teraz zajmujemy, jest rozstrzygnięcie, co z tych różnych rodzajów promieniowania, któreśmy w artykule tym wymienili przychodzi do granic atmosfery z wszechświata, co jest zatem promieniowaniem pierwotnym, a co tego promieniowania wytwarza się wtórnie w atmosferze.

Pierwotne promieniowanie kosmiczne nie może być strumieniem fotonów, ani neutronów lecz musi być utworzone z cząstek elektrycznie naładowanych. Fotony bowiem neutrony nie byłyby wcale odchylane przez pole magnetyczne ziemskie i niemożliwe byłyby opisywane powyżej efekty pola magnetycznego ziemskiego. Pozostaje nam zatem rozstrzygnąć między różnymi cząstkami elektrycznie naładowanymi. Dyskutujemy zatem różne możliwości. Mezony też nie mogą być cząstkami pierwotnymi, ponieważ są promieniotwórcze nietrwałe. Ich średni czas życia wynosi ok. 10^{-6} sek., zatem jasną jest rzeczą,

że muszą powstać gdzieś w pobliżu ziemi, by mogły dotrzeć w czasie swego życia do naszych aparatów. Przypuśćmy teraz tytułem próby, że elektrony są cząstkami pierwotnymi i w jakichś nieznanym nam zresztą procesach, wytwarzają mezony. Powyższe przypuszczenie nie wytrzymuje jednak konfrontacji z faktami. Przy omawianiu zależności natężenia twardej składowej od wysokości, stwierdziliśmy, że zależności tej brak charakterystycznego maksimum, które występowało dla składowej miękkiej na wys. ok. 80 mm Hg. Widać stąd, że składowa mezonowa nie może być efektem wtórnym składowej miękkiej, gdyby bowiem tak było przy maksimum natężenia składowej miękkiej powinno występować również maksimum składowej twardej, czego doświadczenie nie wykazuje. A zatem mezony nie mogą być cząstkami pierwotnymi promieniowania kosmicznego (ponieważ są nietrwałe) nie mogą też pochodzić od składowej miękkiej.

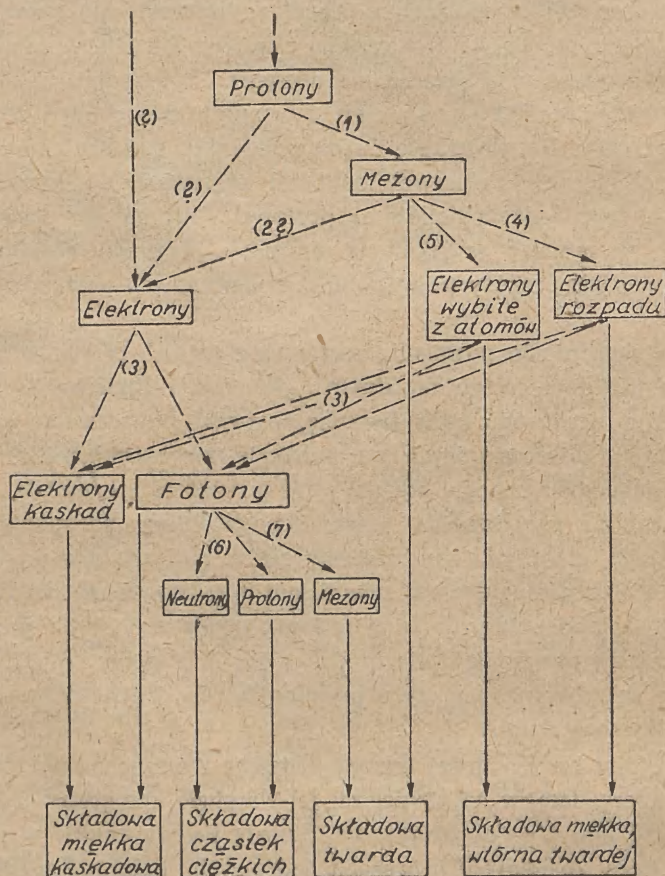
Że elektrony nie mogą tworzyć pierwotnego promieniowania kosmicznego, wynika też z faktu zaobserwowanego przez Schein'a, Jesse'go i Wollan'a że w górnych warstwach atmosfery, które autorzy ci badali przy pomocy aparatur koincydencyjnych wysyłanych balonami sondami na bardzo wielkie wysokości, badacze ci nie znaleźli elektronów o dużych energiach, przynajmniej w ilościach, któreby mogły wytłumaczyć duże natężenie mezonów jakie z tych elektronów musiałyby powstać.

Wspominaliśmy przy omawianiu efektów geomagnetycznych o tzw. efekcie wschodnio - zachodnim, z którego wynika, że z wszechświata dochodzą do granic atmosfery cząstki elektrycznie naładowane, o przewodze ładunku dodatniego. Również gdy mówiliśmy o znaku ładunku mezonu, zwróciliśmy uwagę na interesujący fakt, że mezony o ładunku dodatnim stanowią dość poważną większość między wszystkimi mezonami. Z efektów tych, po wzięciu zresztą pod uwagę wielu jeszcze innych okoliczności, wywnioskowali Johnson (1939), Swann (1940) i in. że pierwotnymi dochodzącymi do nas z wszechświata cząstkami kosmicznymi są protony. Co możemy powiedzieć o procesach, w jakich protony padające z wszechświata do granic atmosfery wytwarzają mezony? Przypomnijmy sobie badania zależności natężenia

składowej mezonowej od wysokości [ryc. (7) krzywa (2)]. Widzimy tam, że w miarę wznoszenia się w górę, natężenie mezonów stale rośnie i aż do wysokości osiągniętych przez balony sondy tj. do ok. 16 mm Hg. nie zaobserwowano żadnego spadku natężenia mezonów. Spadek ten musi przecież w końcu nastąpić, skoro mezony powstają w atmosferze. Widocznie jednak proces wytwarzania mezonów przez protony rozgrywa się na tak cienkiej warstwie atmosfery, że aparaty pomiarowe warstwy tej jeszcze nie dosięgły. Poprzednio wspomnieliśmy o badaniach Janossy'ego i współpr. nad pękami złożonymi z mezonów. Na podstawie swych pomiarów, badacze ci wysunęli przypuszczenie, że najprawdopodobniej cząstkami wytwarzającymi większość tego rodzaju pęków są protony. Jest bardzo prawdopodobnym, że procesy w jakich te mezony z protonów powstają, są takie same, jak procesy powstawania z pierwotnych protonów w atmosferze.

To zagadnienie powstania mezonów z cząstek pierwotnych jest istotnym punktem całego zagadnienia promieni kosmicznych. Jeżeli punkt ten uważalibyśmy za wyjaśniony, wówczas powstawania wszystkich innych, obserwowanych na poziomie morza składników promieniowania kosmicznego, możnaby też uważać za zrozumiałe. Ogólny mechanizm powstawania wszystkich gatunków promieniowania kosmicznego, z którymi zapoznaliśmy się w tym artykule wyobrazić sobie możemy posługując się schematem przedstawionym na ryc. 26. Linie kreskowane obrazują tutaj różne procesy w których powstają różne rodzaje promieniowania, podczas gdy linie pełne pionowe prowadzone są od tychże rodzajów promieniowania, jeżeli dochodzą one do powierzchni ziemi.

Protony bardzo dużej energii padające z wszechświata do granic atmosfery, tam, w najgórniejszej jej warstwie, nie grubszej jak na kilkanaście mm Hg, do której nie dotarły balony sondy, w niecałkiem jeszcze zbadanych procesach jądrowych, najprawdopodobniej tego typu, co procesy w których powstają obserwowane na ziemi pęki przenikliwe, wytwarzają mezony. (1) W zasadzie, elektrony jakie obserwujemy na poziomie morza, możnaby wszystkie uważać za wtórne mezonów, powstające z nich przez rozpad lub przez wybijanie ich z atomów. Niewykluczonym jest jednak że część



Ryc. 26.

Schemat powstawania różnych rodzajów promieniowania kosmicznego z pierwotnych protonów. Linie przerywane oznaczone cyframi przedstawiają różne procesy powstawania cząstek w atmosferze. Linie pionowe oznaczają, że cząstki dochodzą do powierzchni morza.

elektronów powstaje równocześnie z mezonami z pierwotnych protonów. (?) wzgl. przychodzi z wszechświata (?) Elektrony obecne w górnych warstwach atmosfery są początkiem rozwijających się tutaj kaskad (3), które tworzą składową miękką. Mezony wytworzone w najgórniejszych częściach atmosfery dochodzą częściowo do poziomu morza i tu tworzą rejestrowaną tam składową twardą, częściowo zaś przyczyniają się do wzbogacenia składowej miękkiej wytwarzając elektrony przez rozpad (4) oraz przez wybijanie elektronów z atomów (5) i udzielanie im takiej energii że są one również zdolne do wytwarzania kaskad (3). Protony i neutrony (składowa cząstek ciężkich) powstają prawdopodobnie w jądrowych przemianach eksplozywnych z fotonów składowej miękkiej (6). Niewykluczonym jest, że w procesach ostatnio wymienionych wytwarzają się takie mezony (7). Fakt ten, że składowa fotonowa wytwarza również mezony, szczególnie na średnich wysokościach atmosfery, stwierdzony został doświadczalnie.

Niestety przy dzisiejszym stanie wiedzy doświadczalnej z zakresu promieni kosmicznych trudno jest podać interpretację tych rozlicznych i ciekawych, a jednak tak zawiłych zjawisk, taką, by była w pełni konsekwentną i pewną.

Szczególnie dużą lukę stanowi tutaj brak danych odnośnie do procesu właśnie najważniejszego tj. do procesu powstawania mezonów z protonów promieniowania kosmicznego pierwotnego. Ostatecznie można więc tylko powiedzieć, że interpretacja podana w tym artykule odpowiada stosunkowo najlepiej faktom doświadczalnym obserwowanym w tej dziedzinie do chwili obecnej.

Dane ilościowe. Na zakończenie podamy trochę danych ilościowych dotyczących najbardziej charakterystycznych wielkości z którymi mieliśmy tutaj do czynienia, a które uzupełnią nam obraz tych wszystkich zjawisk o których była mowa. A więc ile cząstek przybiega do granic atmosfery w jednostce czasu, ile ich dobiega do powierzchni ziemi, jakie są ich zdolności jonizacji, jakie są ich energie itd. Te najbardziej charakterystyczne dane zbierzemy dla przejrzystości w następującej tabelce.

1.	Liczba cząstek kosmicznych padających na 1 cm^2 na 1 minutę na poziomie morza.	$1/\text{cm}^2 \text{ min.}$
2.	Liczba cząstek kosmicznych padających na 1 cm^2 na 1 minutę u granic atmosfery.	$30/\text{cm}^2 \text{ min.}$
3.	Liczba par jonów wytwarzanych przez promieniowanie kosmiczne w 1 cm^3 powietrza w war. norm. na 1 minutę na poziomie morza.	$120/\text{cm}^3 \text{ min.}$
4.	Liczba par jonów wytwarzana przez cząstkę kosmiczną na 1 cm drogi w powietrzu w warunkach normalnych.	$120/\text{cm}$
5.	Średnia energia cząstek kosmicznych u granic atmosfery.	$6 \cdot 10^9 \text{ eV}$
6.	Najwyższa energia cząstki kosmicznej.	10^{16} a może 10^{20} eV
7.	Strumień energii niesionej przez promieniowanie kosmiczne przez 1 cm^2 i 1 minutę.	$2 \cdot 10^{11} \text{ eV cm}^2 \text{ min.}$

A teraz jeszcze parę słów o tym jak te dane otrzymano.

Ad. 1 i 2. Liczbę cząstek kosmicznych padających na 1 cm^2 na minutę otrzymujemy, mierząc licznikami w układzie koincydencyjnym liczbę cząstek przychodzących z danego kąta przestrzennego, a następnie przy znanej zależności natężenia promieni kosmicznych od kąta odchylenia od pionu, oblicza się ich natężenie dla cząstek przychodzących ze wszystkich stron.

Ad. 3. Liczbę par jonów wytworzonych przez promieniowanie kosmiczne w 1 cm^3 powietrza oblicza się z natężenia prądu w komorze jonizacyjnej i z objętości komory.

Ad. 4. Liczbę par jonów, wytworzonych przez jedną cząstkę na jednostce drogi można wyliczyć z danych 1) i 3) względnie wyznaczyć bezpośrednio doświadczalnie metodami, których tutaj już nie będziemy opisywali.

Ad. 5. Średnią energię cząstek dochodzących do granic atmosfery otrzymujemy drogą różnych rozważań. Stosunkowo najbardziej miarodajną ocenę tej wielkości otrzymujemy z analizy efektu odchylenia biegu cząstek kosmicznych przez pole magnetyczne ziemskie, w szczególności z efektu szerokości geomagnetycznej.

Ad. 6. Maksymalną energię cząstek kosmicznych obliczamy z oszacowania liczby cząstek w pęku i ich energii. Badania nad wielkimi pękami, które powstają w powietrzu a które mogą zawierać nawet milion cząstek pozwalają na ocenę energii najbogatszych w energię cząstek.

Ad. 7. Strumień energii niesionej przez promieniowanie kosmiczne obliczamy, mnożąc liczbę cząstek dochodzących do granic atmosfery przez ich średnią energię.

Oceńmy jeszcze z danych zawartych w naszej tabeli ogólną moc, jaką ziemia otrzymuje ze wszystkich stron z promieniowaniem kosmicznym. W tym celu trzeba pomnożyć strumień energii z punktu 7 przez powierzchnię ziemi (Promień ziemi 6370 km, pow. ziemi $5,1 \times 10^{18} \text{ cm}^2$. Całkowita moc odbierana przez ziemię jest stąd $10,2 \times 10^{29} \text{ eV/min.} = 1,6 \times 10^{18} \text{ erg/min} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ KM}$. A więc otrzymujemy z promieniowaniem kosmicznym olbrzymią bo prawie 4 miliony koni mechanicznych wynoszącą moc. Ale nie przeceniajmy tej mocy. Jest ona porównywalna z mocą jaką promieniają ku ziemi gwiazdy, jest natomiast znacznie mniejsza niż moc jaką ziemia otrzymuje od słońca. Niewątpliwie najbardziej uderzającym faktem w promieniowaniu kosmicznym jest wielkość energii, jaka zdarza się u cząstek tego promieniowania. Zwróćmy bowiem uwagę na cyfrę podaną w pozycji 7) tabeli. Istnienie cząstek kosmicznych o energii 10^{16} eV jest dowiedzione. Zwróćmy bliżej uwagę na tę ogromną cyfrę. $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ erga}$. Stąd $10^{16} \text{ eV} = 16000 \text{ ergów}$, ale przecież to już jest $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ Kgm}$. A to jest energia niesiona przez jedną cząstkę. W artykule o promieniach kosmicznych, który ukazał się w bieżącym roku w czasopiśmie „Endeavour” autor, A.C.B. Lovell wyraża możliwość istnienia w promieniach kosmicznych cząstek o energii 10^{20} eV . Tutaj dochodzimy do energii, które już sobie trudno wyobrazić jako energie pojedynczych cząstek elementarnych. Są to bowiem już energie zupełnie makroskopowego rzędu wielkości. $10^{20} \text{ eV} = 16 \text{ dżuli} = \text{ok. } 1,6 \text{ Kgm}$ jako energia pojedynczej cząstki elementarnej!

Pochodzenie promieni kosmicznych. W poprzednich rozdziałach przedstawiliśmy argumenty, z których wynikało przyjęcie protonów jako pierwotnych, do ziemi z wszechświata docierających

cząstek kosmicznych. Pod tym założeniem zarysowaliśmy ogólny obraz, jaki dzisiaj jest przyjęty dla zespolenia zawiłych faktów promieniowania kosmicznego, skomplikowanej gry między cząstkami pierwotnymi a wyzwolonymi z nich cząstkami wtórnymi, w pewną konsekwentną całość. Niezależnie jednak od tego, czy protony są istotnie tymi pierwotnymi cząstkami, nasuwa się drugie zasadnicze pytanie skąd biorą cząstki promieniowania kosmicznego tak olbrzymie energie.

Wydawało się, że w odpowiedzi na to pytanie może pomóc rozstrzygnięcie kwestii, skąd to promieniowanie przychodzi. Czy istnieją „okolice” wszechświata, skądby to promieniowanie mogło przychodzić, względnie, skądby przychodziło ze wzmożonym natężeniem. Gdyby takie „okolice” wszechświata istniały, wówczas badanie natężenia promieni kosmicznych wykazywałoby okresowe zmiany natężenia w czasie, wynikające z ruchu ziemi z powodu skierowania się aparatów na coraz to inne części przestrzeni międzygwiazdnych. Badania takie jednakowoż wykazały, że w granicach błędów doświadczeń, nie znaleziono żadnego w wszechświecie wyróżniającego się kierunku. Dzisiaj możemy to uważać za fakt, że promieniowanie kosmiczne, w otaczającej nas przestrzeni wszechświata jest izotropowe. Inaczej mówiąc wszechświat „wypełniony” jest równomiernie promieniowaniem kosmicznym.

Poszukiwania w przestrzeni otaczającej ziemię nie przyczyniły się zatem do rozwiązania zagadnienia pochodzenia promieniowania kosmicznego. Niezależnie od tego możemy się teraz zapytać, czy możliwe są jakieś zjawiska analogiczne do znanych nam zjawisk obserwowanych na ziemi, które mogłyby się rozgrywać we wszechświecie, np. we wnętrzu gwiazd, które mogłyby być źródłem cząstek o energiach obserwowanych w promieniach kosmicznych. Różne dane, jakie dostarcza nam astrofizyka, pozwalają przypuszczać, że we wnętrzu gwiazd panuje temperatura kilkudziesięciu milionów stopni. Z wysokości tej temperatury możemy w przybliżeniu ocenić na podstawie kinetycznej teorii materii średnią energię kinetyczną atomów. W tych warunkach, z takiego rozumowania obliczona energia atomu wynosiłaby kilka 10^{-9} ergów tj. kilka tysięcy eV. Widzimy zatem, że w tych warunkach atom miałby energię, jaką się

uzyskuje w laboratorium przy pomocy prostych środków doświadczalnych. Jak widać energia ta jest znikomą małą w porównaniu z energią cząstek kosmicznych. Jest ona również małą w porównaniu z energiami, jakie muszą mieć cząstki, aby mogły wywoływać reakcje jądrowe z praktycznie wystarczającą wydajnością. Nie jest jednak wykluczonym, że we wnętrzu gwiazd, w warunkach które trwają stale, zachodzić mogą jakieś reakcje jądrowe spowodowane czynnikami, których narazie nie znamy.

Gdybyśmy istnienie takich nieznanых procesów jądrowych przyjęli, moglibyśmy się z kolei zapytać, czy możliwe są w ogóle takie zjawiska o charakterze przemian jądrowych w których mogłyby powstawać cząstki o energiach takich, jakie obserwujemy w cząstkach promieniowania kosmicznego. W warunkach ziemskich mamy do czynienia z cząstkami wysokich energii dwojakiego typu. Są to albo cząstki wysyłane przy okazji naturalnych, względnie sztucznie spowodowanych, rozpadów jądra atomowego ¹⁾, albo są to cząstki elektrycznie naładowane przyspieszane przy pomocy potężnych źródeł napięcia elektrycznego. W procesach tzw. naturalnej promieniotwórczości, jądra najcięższych pierwiastków, począwszy od polonu, spontanicznie, bez wpływu jakichkolwiek czynników zewnętrznych ulegają rozpadowi, emitując przy tej okazji cząstki dużej energii. Są to albo cząstki α (jądra helu), albo cząstki β (elektrony). Prędkości emitowanych cząstek są olbrzymie; dla cząstek α dochodzą do kilkunastu %, dla cząstek β przekraczają 99% prędkości światła. Energie tych cząstek są odpowiednio wielkie. I tak cząstki α wysyłane przez polon, mają energie ok. $5,5 \times 10^6$ eV. Energie najszybszych cząstek β wynoszą też kilka $\times 10^6$ eV.

Z jakimi energiami mamy do czynienia przy rozpadzie spowodowanym w sztucznie wywołanych reakcjach jądrowych? Wyzwolenie energii w tych reakcjach odbywa się na koszt energii wiązania jądra atomowego inaczej mówiąc na koszt defektu masy ¹⁾ danego jądra atomowego. Tak np. energia wiązania cząstki α która jak wiadomo składa się z dwóch protonów i dwóch neutronów, wynosi ok. $28 \cdot 10^6$ eV ¹⁾. Takiej syntezy dwóch protonów i dwóch neutro-

¹⁾ Por. uzupełnienia.

nów na cząstki α nigdy nie zaobserwowano. Pośrednio synteza taka zachodzi przy bombardowaniu litu protonami. Proton zostaje wówczas przez jądro litu pochłonięty, lecz powstały w ten sposób twór rozpada się na dwie cząstki α , z których każda ma energię $8,6 \times 10^6 \text{ eV}$. Przytoczona tutaj reakcja należy do procesów jądrowych najbogatszych w wydzielaną energię z pośród znanych do roku 1938. W reakcjach jądrowych szczególnego typu, które zostały wyzyskane w wyzwaniu tzw. energii atomowej, przy rozpadaniu się jąder uranu na dwa nowe jądra o bliskich sobie masach, jądra te z reakcji tej wynoszą olbrzymie energie, rzędu 100 MeV tj. 10^8 eV .

Widzimy zatem, że energie, które uzyskujemy w znanych nam zjawiskach jądrowych zaledwie dorównują energiom, które obserwujemy u powolniejszych raczej cząstek promieniowania kosmicznego. Gdybyśmy sobie wyobrazili, że gdzieś w dali wszechświata odbywają się jakieś reakcje jądrowe, które są źródłem protonów dochodzących do naszej atmosfery jako promieni kosmicznych, nie potrafimy podać takiego procesu w którymby mogły wydzielać się energie 10^{16} eV czy więcej. Swego czasu, gdy nie znano jeszcze natury promieniowania kosmicznego, gdy przypuszczano, że przychodzą one do ziemi w postaci bogatych w energie fotonów, gdy przede wszystkim nie wiedzano jak wielkie energie niesione są w promieniowaniu kosmicznym, snuto różne hipotezy (Eddington, Jeans i inni) według których promienie kosmiczne powstają przez znikanie materii w warunkach nieznanych nam na ziemi. Nie będziemy już tych rozmaitych hipotez rozważać bardziej szczegółowo, ponieważ przy dzisiejszych naszych wiadomościach o energiach jakie zdarzają się u cząstek kosmicznych, wszystkie te hipotezy tracą podstawy naukowe. Gdybyśmy bowiem nawet przyjęli, że jądro najcięższego pierwiastka tj. uranu całkowicie zanihilowało się, całkowicie znikło jako masa, wówczas wydzieliliby się zaledwie $2,2 \cdot 10^{11} \text{ eV}$ energii (masa jądra uranu = $238 \text{ at. j. m.} = 238,093 \cdot 10^9 \text{ eV} = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ eV}$ ¹⁾). Tymczasem w promieniowaniu kosmicznym obserwujemy cząstki o energiach wyższych niż 10^{16} eV . Jesteśmy tutaj zatem u kresu opartego na racjonalnych podstawach naukowych rozumowania. O ile zatem, przyjąwszy protony jako

¹⁾ Por. uzupełnienia.

cząstki pierwotne promieni kosmicznych, można jako tako powiązać w pewną konsekwentną całość ogół zjawisk związanych z promieniowaniem kosmicznym, o tyle nie możemy dzisiaj podać rozwiązania zagadki pochodzenia tych promieni.

Literatura dotycząca promieni kosmicznych.

- S. Szezeniowski „Promienie kosmiczne“ Zbiorek Biblioteki Wiedzy t. 12. p.t. „Od gwiazdy do atomu“. Obszer-ny, jedyny w języku polskim artykuł tego tematu, doskonale, w popularny sposób wprowadzający w całość zagadnienia promieni kosmicznych do r. 1936.
- R. A. Millikan „Electrons, protons, photons, neutrons and cosmic rays“ Cambridge 1935.
- D. K. Froman and J. C. Stearns „Cosmic-Ray Showers and Bursts“ Reviews of Modern Physics t. 10. Nr 3. 1939.
- W. Heisenberg „Kosmische Strahlung“ Springer 1943. Zbiór artykułów różnych autorów.
- L. de Broglie „Le Méson“ Paris 1945. Zbiór artykułów różnych autorów.
- L. Léprince-Ringnet „Les Rayons cosmiques“ Paris 1945

Powyższy spis zawiera obszerniejsze artykuły poświęcone zagadnieniu promieni kosmicznych. Pierwsze dwie z wymienionych publikacji ujęte są popularnie. Obszerna literatura szczegółowa podana jest wyczerpująco w trzech ostatnich artykułach.

Uzupełnienia.

Atomistyczna budowa materii. Pojęcie atomu weszło do nauki (poza filozofią) w tzw. hipotezie atomistycznej na przełomie wieku 18 i 19. Dopiero jednak fizyka drugiej połowy 19 wieku dała pojęciu temu rzeczywiste kształty. Odkryto ok. 90 pierwiastków, czyli substancji prostych, z których zbudowane są substancje złożone tj. związki chemiczne. Pierwiastki składają się z atomów, które są najdrobniejszymi elementami budowy materii, w których cechy pierwiastków są zaznaczone. Atomy poszczególnych pierwiastków łączą się z sobą w drobiny (cząsteczki, molekuły).

I tak, drobina wody składa się z dwóch atomów wodoru i jednego atomu tlenu, drobina soli kuchennej składa się z atomu chloru i atomu sodu, drobina tlenu składa się z dwóch atomów tlenu, drobina ozonu składa się z trzech atomów tlenu itd. Według tzw. kinetycznej teorii materii rozwiniętej najpierw dla gazów, drobiny gazu trwają w bezustannym i zupełnie bezładnym ruchu. Ten ruch jest szybszy dla wyższych temperatur gazu. Ciśnienie, jakie gaz wywiera, wynika z uderzeń drobin o ściany. W ciałach stałych, drobiny wzgl. atomy mają swe określone położenia, są uporządkowane. Dokoła tych położzeń równowagi mogą wykonywać tylko pewne drgania. W cieczach te położenia równowagi mogą się przemieszczać, średnie jednak wzajemne odległości drobin od siebie nie są wiele różne, niż w wypadku ciał stałych. Kinetyczna teoria materii powiązała ścisłymi formułami takie wielkości jak średnia prędkość drobin, ilość drobin w jednostce objętości, ich masę i wielkość z wielkościami, które dało się wyznaczyć doświadczalnie, jak np. ciśnienie, temperatura, współczynnik lepkości czy dyfuzji. Później porównano te rezultaty z wynikami osiągniętymi na innych podstawach i w ten sposób znaleziono zgodnie, że np. masa atomu wodoru $m_H = 1,66 \cdot 10^{-24}$ g, promień pomyślanego jako kulka atomu wodoru $r_H = 0,5 \cdot 10^{-8}$ cm, średnia prędkość drobin wodoru w temperaturze 0°C , $v = 1845$ m/sek. Liczba drobin dowolnego gazu w 1 cm^3 , w temp. 0°C pod ciśn. 1 atm. $N = 2,7 \cdot 10^{19}$.

Elektryczność w budowie materii. Cennych a nawet zasadniczych wiadomości o budowie atomu dostarczyły badania nad własnościami elektrycznymi materii. Badania te doprowadziły badaczy do wniosku, że atomy składają się z części elektrycznie naładowanych o znakach przeciwnych. Na zewnątrz ładunki te równoważą się, tak że atom jest elektrycznie obojętny. Część ujemna ładunku atomu składa się z elektronów, tj. cząstek o najmniejszym ładunku elektrycznym, jaki wogóle zaobserwowano i o bardzo małej masie, która jest ok. 2000 razy mniejsza od masy najlżejszego z pośród atomów tj. atomu wodoru. Jeżeli uszeregujemy pierwiastki według wzrastających ciężarów atomowych, to otrzymamy je w kolejności, w której występują one w tzw. układzie periodycznym pierwiastków. Oto pierw-

szych dziesięć w tej kolejności. Wodór (1H), hel (2He), lit (3Li), beryl (4Be), bor (5B), węgiel (6C), azot (7N), tlen (8O), fluor (9F), neon (10Ne). Ostatnim dziewięćdziesiątym drugim, w tym szeregu jest najcięższy z pierwiastków, uran (92U). Dla lepszej orientacji w tym szeregu, symbolom chemicznym pierwiastków dodaliśmy znaczek, przedstawiający liczbę porządkową pierwiastka w układzie periodycznym. Okazało się, że liczba elektronów w atomie równa jest właśnie tej liczbie porządkowej. Największa zatem liczba elektronów w atomie jest 92, dla atomu uranu. Ponieważ jeden elektron waży ok. 2000 razy mniej niż najlżejszy atom, stąd wniosek, że przeważająca część masy całego atomu skoncentrowana być musi w pozostałej poza elektronami części atomu, którą nazywamy jądrem atomowym.

Elektrony. Wolne, oderwane od atomów elektrony obserwujemy w tzw. promieniach katodowych. Jeżeli do dwóch elektrod wtopionych w rurkę szklaną, z której wypompowano dokładnie powietrze, przyłożymy napięcie kilku tysięcy woltów, wówczas z elektrody połączonej z biegunem ujemnym (katody) wybiegają promienie zwane katodowymi. Promienie te pobudzają do świecenia substancje fluoryzujące i czernią klisze fotograficzne. Badania wykazały, że promienie te stanowią strumień cząstek naelektryzowanych ujemnie, co do których okazało się później, że są one elektronami. Ładunek elektronu jest najmniejszym ładunkiem w jakim elektryczność występuje. Ładunek ten nazywamy ładunkiem elementarnym. Wielkość ładunku elementarnego wyznaczył bezpośrednio R. Millikan badając najmniejsze ładunki elektryczne uzyskiwane przez maleńkie, tylko pod mikroskopem widoczne kropelki rozpylonej oliwy, na które Millikan oddziaływał polem elektrycznym znanego natężenia. Dzisiaj przyjmuje się jako najprawdopodobniejszą wartość ładunku elementarnego $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ kulombów. Z odchylenia strumienia elektronów (promieni katodowych) w polu magnetycznym i elektrycznym, można znając ładunek elektronu wyznaczyć jego masę. Z takich pomiarów wynikało, że masa elektronu $m_e = 9,11 \cdot 10^{-28}$ g. czyli 1840 mniej od masy najlżejszego z atomów, tj. atomu wodoru.

Jednostki energii w fizyce atomowej. Najczęściej tutaj używaną jednostką energii jest 1 eV (elektronowolt) 1 eV jest ener-

gią, jakiej nabywa swobodny nabój elektryczny równy ładunkowi elektronu, przyspieszony napięciem elektrycznym jednego wolta. 1 kulomb przebiegając różnicę potencjałów 1 wolta nabywa energii 1 dżula, stąd $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ kulomb. wolt $= 1,6 \times 10^{-19}$ dżula $= 1,6 \times 10^{-12}$ erga. A zatem $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-12}$ erga, 1 MeV (1 megaeletronowolt) $= 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-6}$ erga.

Widmo elektromagnetyczne. Od czasów Maxwella wiemy, że światło możemy uważać za fale elektromagnetyczne, tj. fale które polegają na rozchodzeniu się w przestrzeni drgań wektorów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Fale te przenoszą fazę tych drgań z prędkością 300000 km/sec. (3×10^{10} cm/sec). Długość fali świetlnej jest bardzo mała, wynosi bowiem zależnie od barwy światła od ok. 4×10^{-5} do ok. 8×10^{-5} cm. Później okazało się, że prócz fal świetlnych mamy cały szereg gatunków promieniowania elektromagnetycznego, które różnią się od światła długością fali. Jeżeli różne gatunki promieniowania elektromagnetycznego uszeregujemy według malejących długości fali, to na początku tego szeregu będziemy mieli fale radiowe a na końcu jego będzie falowa składowa promieniowania kosmicznego. Długość fali danego rodzaju promieniowania elektro-magnetycznego związana jest z częstotliwością z jaką drgają pole elektryczne i magnetyczne wzorem $c = \lambda \nu$ ($c = 3 \times 10^{10}$ cm/sec). Poniżej podajemy zestawienie różnych gatunków promieniowania elektro-magnetycznego.

W i d m o e l e k t r o - m a g n e t y c z n e

1	2	3	4
Rodzaj promieniowania elektro-magnetycznego	R z ą d długość fali ¹⁾	Częstość drgań odpowiadająca długości fali z kolumny 2.	Energia $E = h \nu$ ¹⁾
Fale radiowe	100 m	$3 \times 10^6/\text{sek}$	$1,24 \times 10^{-8} \text{ eV}$
Fale radarowe	1 cm	$3 \times 10^{10}/\text{sek}$	$1,24 \times 10^{-4} \text{ eV}$
Fale podczerwone	10^{-3} cm	$3 \times 10^{13}/\text{sek}$	$1,24 \times 10^{-1} \text{ eV}$
Światło widzialne	8×10^{-5} do $4 \cdot 10^{-5}$ cm	4×10^{14} do $8 \times 10^{14}/\text{sek}$	1,5 do 3 eV
Prom. ultrafioletowe	10^{-5} cm	$3 \times 10^{15}/\text{sek}$	$1,24 \times 10^1 \text{ eV}$
Promienie X	10^{-8} „	$3 \times 10^{18}/\text{sek}$	$1,24 \times 10^4 \text{ eV}$
„ γ	10^{-10} „	$3 \times 10^{20}/\text{sek}$	$1,24 \times 10^6 \text{ eV}$
Falowa część promieni kosmicznych	10^{-13} „	$3 \times 10^{23}/\text{sek}$	$1,24 \times 10^9 \text{ eV}$

¹⁾ W kolumnie tej nie jest podany zakres długości fali (z wyjątkiem fal widzialnych) lecz rząd wielkości spotykany dla danego promieniowania.

¹⁾ Por. ustęp następny.

Zjawisko fotoelektryczne. Fotony. Jeżeli na płytkę metalową pada światło dostatecznie krótkiej fali, lub, jeszcze lepiej, promieniowanie ultra-fioletowe, wówczas płytka wysyła ze swej powierzchni elektrony: Zjawisko to jest praktycznie wyzyskane w komórkach fotoelektrycznych. Badania wykazały, że zależność między prędkością elektronów wybiegających z płytki a częstotścią drgań promieniowania wyzwalającego je jest $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + P$ (Einstein 1905) gdzie m jest masą elektronu, v prędkością elektronu, ν częstotścią drgań promieniowania, h tzw. stałą Plancka i P pewną stałą wymiaru pracy. Równanie to interpretujemy w następujący sposób. Równolegle do falowego opisu zjawisk świetlnych, na podstawie którego światło jest falowaniem elektromagnetycznym, przyjmijmy inny obraz dla tych zjawisk. Wyobraźmy sobie, że energia tego promieniowania nie jest wysyłana i przenoszona w sposób ciągły, lecz porcjami, które nazywamy kwantami promieniowania, ogólnie kwantami energii. Jest to założenie które wypowiedział po raz pierwszy Planck (1900) i które jest jednym z fundamentów fizyki współczesnej. Według Plancka energia takiego kwantu jest równa $E = h\nu$, gdzie h jest stałą powszechną tzw. stałą Plancka $h = 6,62 \times 10^{-27}$ erg. sek. Później stwierdzono, że te „cząstki“ promieniowania, zachowują się jak prawdziwe cząstki. Nie tylko prawo zachowania energii, ale i prawo zachowania pędu stosuje się dla tych „cząstek“. Te „cząstki“ nazywamy fotonami. Przytoczone powyżej równanie Einsteina, które daje związek między częstotścią drgań promieniowania a energią elektronu wyzwolonego tym promieniowaniem z płytki, możemy wyjaśnić na tle tych poglądów, jak następuje. Na płytkę metaliczną pada rój fotonów o energiach $h\nu$. Fotony te wybijają z powierzchni metalu elektrony przyczym energia $h\nu$ zostaje zużyta na energię kinetyczną elektronu $\frac{1}{2}mv^2$ oraz częściowo na pracę P potrzebną na wybiecie elektronu z wnętrza metalu.

Promienie X (Röntgena). Jeżeli wiązka elektronów dostatecznie szybkich (promieni katodowych) pada na płytkę umieszczoną na drodze tych promieni, wówczas płytka ta staje się źródłem promieni o bardzo charakterystycznych własnościach. Promienie te działają na kliszę fotograficzną, powodują świecenie specjalnych tzw.

fluoryzujących substancji, jonizują gaz przez który przechodzą i wreszcie wykazują własność, która zdecydowała o ich praktycznym zastosowaniu, a mianowicie, przenikają przez różne materiały, a nawet przez metale. Promienie te zostały odkryte w r. 1895 przez Röntgena i zostały przez niego nazwane promieniami X. Przenikanie promieni X przez różne materiały i różnica absorpcji tych promieni przy przejściu przez różne materiały, zostały wykorzystane w diagnostyce lekarskiej. Ciała zbudowane z pierwiastków lekkich przepuszczają łatwo promienie X, ciała natomiast zbudowane z pierwiastków ciężkich, silniej promienie te absorbują. Skóra i tkanki mięsne są dla nich łatwo przepuszczalne, kości natomiast silniej je absorbują. Na tym polega zastosowanie tych promieni do prześwietleń i zdjęć lekarskich. Promienie X są jednym ze składników ogólnego widma elektro-magnetycznego. Przez długi jednak czas nie wiadano o tym. Decydującym bowiem eksperymentem który rozstrzyga o „falistości” danego zjawiska jest efekt interferencji. Wiemy, że wiązka światła ugięta na rysach siatki dyfrakcyjnej, daje na ekranie tzw. widmo dyfrakcyjne, które może służyć do wyznaczenia długości fali tego promieniowania. Analogicznego efektu nie znajdowano przez długi czas dla promieni X. Dopiero po upływie więcej niż 15 lat od odkrycia tych promieni, prace Laue’go i Braggów wykazały, że promienie X przy przejściu przez kryształy ulegają ugięciu i interferencji i że zjawisko to pozwala wyznaczyć długość fali tych promieni. Widocznie kryształ ze swymi regularnie w przestrzeni umieszczonymi atomami, działającymi jako centra uginania się promieni X, gra dla nich rolę siatki dyfrakcyjnej. W ten sposób znaleziono, że długość fali promieni X jest tego samego rzędu wielkości, co wzajemna odległość atomów w kryształach tj. 10^{-8} cm.

Promieniotwórczość. H. Becquerel w r. 1896 stwierdził, że uran i jego związki wysyłają promienie, które on nazwał uranowymi, a które mają własności dość podobne do promieni X. Podobnie jak tamte, tak i te przenikają przez ekrany metalowe, działają na kliszę fotograficzną i powodują jonizację gazu przez który przechodzą. W przeciwieństwie do promieni X, które wytwarzamy przy pomocy odpowiednich aparatów i lamp, promienie które wysyła

uran, wysłane są samorzutnie, a czynniki zewnętrzne nie mają żadnego wpływu na emisję promieniowania. W r. 1898 odkryli *M a r i a* i *P i o t r* *C u r i e* nowy pierwiastek promieniotwórczy rad który jest ok. milion razy bardziej aktywny od uranu. Od r. 1898 odkryto cały szereg substancji promieniotwórczych. Celem zanalizowania promieniowania wysyłanego przez te substancje przepuszczono to promieniowanie przez pole magnetyczne prostopadłe do kierunku tego promieniowania. Pole magnetyczne rozszczepia je na 3 wiązki, na 3 rodzaje promieniowania, a mianowicie α (alfa), β (beta) i γ (gamma). Z kierunku odchylenia promieni α i β wynioskowano, że pierwsze z nich α są cząstkami elektrycznie naładowanymi i mają ładunek dodatni, a drugie β również elektrycznie naładowane, mają ładunek ujemny. Promienie γ nie odchyłały się w polu magnetycznym zupełnie i okazały się promieniowaniem elektro-magnetycznym o bardzo krótkiej długości fali. Powiedziano wyżej, że rad wysyła promieniowanie stałe, bez względu na warunki zewnętrzne. Stwierdzono, że w otoczeniu radu powstają nowe substancje. Powstaje mianowicie między innym gaz promieniotwórczy *r a d o n* (e m a n a c j a r a d o w a), oraz drugi gaz *h e l*. Z jednego zatem pierwiastka radu powstają inne pierwiastki zatem radu powinno ubywać. W tym przypadku trudno jest to stwierdzić doświadczalnie. Istnieją jednak inne pierwiastki promieniotwórcze dla których fakt zmniejszania się ilości danego pierwiastka można nietrudno stwierdzić. Weźmy np. pierwiastek, również odkryty przez *M a r i e* *C u r i e*, *p o l o n*. Można stwierdzić, że natężenie promieniowania wysyłanego przez ten pierwiastek spada do połowy w ciągu 136 dni. Fakt ten dowodzi, że i pierwiastka tego w czasie tym ubyło połowę. I radu ubywa stale. W tym przypadku jednak stwierdzono, że czas w którym ilość radu spada do połowy wynosi, 1590 lat, tak że nie możemy tego grubymi metodami zauważyć.

Cząstki α . Bliższe badania wykazały, że cząstki α mają masę w przybliżeniu 4 razy większą od masy jądra helu tj. drugiego powodorze pierwiastka w układzie periodycznym. Badania *R u t h e r f o r d*'a i *R o y d s*'a wykazały, że cząstki α są rzeczywiście jądrami helu, które uzupełnione dwoma elektronami stają się atomami helu. Prędkości cząstek α wysyłanych przez dany pierwiastek promie-

niotwórczy, są w przybliżeniu jednolite. Są one rzędu 10^9 cm/sek tzn. rzędu $1/10$ prędkości światła, co dla masy równej masie cząstki α stanowi energię rzędu 10^{-6} erga lub 10^6 eV. Cząstki α bardzo silnie jonizują gazy. Cz. α w powietrzu o ciśnieniu atmosferycznym, wytwarza kilka 10^4 par jonów na jednym cm drogi. Zasięg cząstek α w powietrzu o ciśnieniu atmosferycznym jest rzędu kilku cm.

Cząstki β . Badania odchylenia cząstek β w polu magnetycznym dowiodły, że cząstki β są elektronami o olbrzymich prędkościach sięgających ponad 99% prędkości światła. Energie cząstek β sięgają podobnie jak i energie cząstek α wielkości 10^6 eV. Cząstki β jonizują gazy znacznie słabiej niż cząstki α . Liczba par jonów wytworzonych na 1 cm drogi w powietrzu o ciśn. atm. jest rzędu kiludziesięciu par jonów. Charakterystycznym i bardzo ważnym dla cząstek β jest fakt, że cz. β wysyłane przez pewien pierwiastek promieniotwórczy mają bardzo rozmaite energie. Rozkład liczby cząstek β na poszczególne ich energie, czyli tzw. widmo cz. β dowolnego radiopierwiastka jest widmem ciągłym. Widmo to rozciąga się od bardzo małych energii, aż do wspomnianej wartości 10^6 eV. Do zagadnienia tego wrócimy jeszcze w jednym z ustępów późniejszych.

Budowa jądra atomowego. Doświadczenia jednego z twórców nauki o jądrze atomowym słynnego Rutherforda nad rozpraszaniem cząstek α przez materię, pozwoliły ocenić wielkość promieni jąder atomowych. Z tych doświadczeń okazało się, że jądro atomowe jest niesłychanie małe w porównaniu z całym atomem. Rząd wielkości promienia jądra atomowego jest mianowicie od 10^{-13} cm do 10^{-12} cm tzn. że jest ok. 100 tysięcy razy mniejszy od promienia całego atomu. Wiemy że atomy różnych pierwiastków różnią się przede wszystkim masami. Stąd wniosek, że i jądra różnych pierwiastków będą się różnić masami. Powstało zagadnienie, czy jądra atomowe są już niepodzielnymi cząstkami, charakterystycznymi dla danych pierwiastków, czy też może są one zbudowane z jakichś prostszych jeszcze cząstek. Zjawisko promieniotwórczości wydaje się świadczyć o słuszności drugiego z tych przypuszczeń. Możemy je bowiem tłumaczyć przypuszczając, że emitowanie cząstek α polega na rozpadzie danego jądra atomowego,

na jakieś jądro prostsze i cząstkę α . Ponieważ cząstka α ma ciężar prawie dokładnie 4 razy większy od ciężaru jądra najbliższego z pierwiastków tj. jądra wodoru, nasunęło się przypuszczenie, że właśnie jądra wodoru są cząstkami elementarnymi, z których zbudowane są jądra atomów wszystkich pierwiastków. Te jądra wodoru, nazywamy protonami. Są to więc cząstki dodatnio naładowane o ładunku elektrycznym równym ładunkowi elektronu i o masie ok. 1840 razy większej niż masa elektronu. Hipoteza, że protony są jedynymi cząstkami składowymi jądra, nie była jednak możliwą do przyjęcia. Weźmy pod uwagę np. jądro helu. Ponieważ hel ma liczbę porządkową 2, ma zatem w atomie 2 elektrony, zatem w jądrze powinien mieć 2 i tylko 2 protony dla zubożenia ładunku elektrycznego całego atomu. Ale ciężar atomowy helu jest 4, zatem jądro helu powinno zawierać jeszcze jakieś dwie cząstki o masie równej masie protonu, lecz bez ładunku elektrycznego. Takie cząstki nazywamy neutronami. Jądro helu składa się zatem z dwóch protonów i dwóch neutronów. Ogólnie dla dowolnych pierwiastków będziemy mieli następujący schemat obliczenia ilości neutronów i protonów w jądrze.

Ilość protonów w jądrze = liczbie porządkowej pierwiastka w układzie periodycznym.

Ilość protonów + ilość neutronów w jądrze = ciężarowi atomowemu danego jądra.

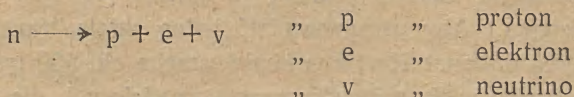
Miejsce pierwiastka w układzie periodycznym, a więc i jego własności chemiczne, wyznaczone są zatem liczbą protonów w jądrze. Istnieją atomy o tej samej ilości protonów, a o różnej ilości neutronów w jądrze. Atomy te będą atomami tych samych zatem chemicznie pierwiastków, które będą miały inne ciężary atomowe. Takie atomy nazywamy izotopowymi. Pierwiastki występujące w przyrodzie są naogół mieszaninami różnych izotopów. Chlor ma np. dwa izotopy, jeden o masie 35, drugi o masie 37. Mieszanina ich występująca w przyrodzie ma ciężar atomowy „chemiczny” 35,46. W symbolice fizyki jądrowej masę danego izotopu zaznaczamy dodatkowym wskaźnikiem przy symbolu danego pierwiastka. Dwa wymienione izotopy chloru będą miały symbole ^{35}Cl i ^{37}Cl . Proton będzie zatem miał znak ^1H , cząstka α ^4He itd.

Widmo promieni β . Nukleony. Neutrino. Jądro atomowe zbudowane jest z cząstek ciężkich dwojakiego rodzaju tj. z neutronów i protonów. Oba te rodzaje cząstek ciężkich obejmuje się zwykle obecnie wspólną nazwą nukleonów. W tej terminologii w jądrze mamy zatem tylko nukleony. W jaki więc sposób powstają promienie β , które są elektronami wybiegającymi w czasie rozpadu z jądra? Skąd biorą się te elektrony, skoro w jądrze ich nie ma? Obecnie utrwalil się pogląd, który właśnie usprawiedliwia tę wspólną nazwę dla obu rodzajów cząstek, jądrowych. Według tego poglądu, neutron i proton są dwoma różnymi stanami jednej cząstki tj. nukleonu. Nukleony mogą przechodzić ze stanu neutronowego do stanu protonowego. Inaczej mówiąc neutron może się zmieniać w proton lub naodwrot, przyczem ze względu na prawo zachowania ładunku elektrycznego przejściu temu towarzyszyć musi emisja elektronu (ujemnego) lub pozytronu (elektronu dodatniego). Neutron zamieniając się zatem w proton emituje równocześnie elektron, proton zaś zamieniając się w neutron emituje równocześnie pozytron. Procesy te zachodzą w czasie rozpadu promieniotwórczego β . Wiele danych każe nam przypuszczać, że energia tego spontanicznego rozpadu, tzn. ilość energii, jaka się w akcie takiego rozpadu wydzieli, jest dla danego pierwiastka stałą. Cząstki β , które energię tego rozpadu muszą pobrać, powinny zatem wybiegać z jąder rozpadającego się pierwiastka z jednakowymi energiami

Tymczasem jak wspominaliśmy już wyżej, widmo cząstek β jest ciągłe. Prędkości, wysyłanych w danym rozpadzie promieniotwórczym cząstek β , są bardzo rozmaite. Problem ten jest jednym z najtrudniejszych problemów fizyki nowoczesnej. Nie brak było przypuszczeń, i to ze strony najpoważniejszych fizyków (Bohr), że może w procesach pojedynczych jąder atomowych zasada zachowania energii nie stosuje się. W końcu utarł się pogląd, że prawo zachowania energii zachowuje ważność nawet dla tych procesów, lecz część energii rozpadu emitowana jest w postaci dotychczas niewykrywalnej. Według Pauli'ego równocześnie z elektronem β , w czasie rozpadu emitowana jest cząstka, t. zw. neutrino, której obecność trudno jest wykryć. Neutrino ma bardzo małą masę i nie ma ładunku elektrycznego. Cząstka taka praktycznie nie oddzia-

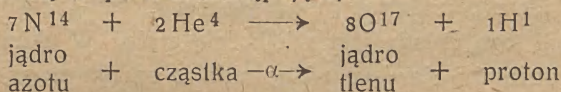
ływuje z materią i stwierdzenie jej doświadczalne nastęrcza bardzo poważne trudności. Zamiana neutronu w proton przebiegałaby w tym ujęciu według następującej formuły.

gdzie n oznacza neutron



W ostatnich latach prowadzono bardzo intensywne badania nad możliwościami doświadczalnego stwierdzenia istnienia neutrina. Przekonyującym dowodem istnienia neutrina jest zdjęcie wilsonowskie rozpadu mezonu w promieniowaniu kosmicznym, dokonane przez Williamsa w r. 1940. Widzimy tam ślad elektronu powstającego z mezonu ślad, który zbacza w bok od śladu mezonu, a nie widzimy śladu cząstki, która musiała przecież wybiec w innym kierunku, ze względu na konieczność zachowania pędu.

Reakcje jądrowe. Pierwszym, który dokonał przemiany czyli tzw. transmutacji pewnych pierwiastków w inne, był Rutherford, który w r. 1919 zamienił azot bombardując go cząstkami α , w tlen i wodór. Stwierdził on mianowicie, że w pewnych warunkach przy ostrzeliwaniu azotu cząstkami α , wysyłanymi przez preparat promieniotwórczy, wyrzucane zostają protony. Widocznie jądro azotu musiało wchłonąć padającą cząstkę α lecz wydać pewną resztę w postaci protonu. Z bilansu masy i ładunku wynika, że powstaje jądro tlenu ${}^{\text{O}}_{17}$, co możemy sprawdzić, wypisując tę „reakcję” jądrową w postaci następującej



W ślad za tą pierwszą reakcją jądrową Rutherforda otrzymano dalsze, początkowo również przez bombardowanie cząstkami α , później przez bombardowanie przyspieszonymi wysokim napięciem protonami a w szczególności neutronami. Reakcja, która najczęściej służy do otrzymania neutronów jest to bombardowanie berylu cząstkami α . Jej równanie jest następujące.



Wydajność reakcji jądrowych. Wielu z tych, którzy dowiadują się o tych przemianach pierwiastków jednych w inne, stawia pytanie, czy możliwym byłyby takie przemiany w skali praktycznej. Doświadczenia okazały jednak, że sprawa jest pod tym względem beznadziejna. Aby przeprowadzić jedną udaną transmutację azotu, taką jakiej dokonał Rutherford, trzeba ok. 500 tysięcy cząstek α . Często trzeba wielu milionów cząstek padających dla przeprowadzenia jednej przemiany. Nie trudno to zrozumieć, gdy się zważy, o czym była mowa wyżej, że średnica jądra atomowego, jest około 100 tysięcy razy mniejsza od średnicy całego atomu. Prawdopodobieństwo zatem „trafienia” jądra jest bardzo małe. Przemiany jądrowe mogą być dokonywane nawet w dużych ilościach przypadków, lecz są to jednak procesy pojedynczych atomów. Jeżeli uzmysłowimy sobie fakt, że np. w 1cm^3 ciała stałego znajduje się ok. 10^{22} atomów, to tyle takich procesów jądrowych musielibyśmy dokonać, by tę ilość danej substancji na tej drodze wytworzyć. Sprawa ta wygląda inaczej w t. zw. redukcjach łańcuchowych, z jakimi mamy do czynienia przy wyzwalamiu energii atomowej.

Uogólniona zasada zachowania energii, czyli tzw. zasada równoważności masy i energii. W fizyce klasycznej mieliśmy dwie fundamentalne zasady, z których jedna tj. zasada zachowania energii miała najszerze zastosowanie we wszystkich działach fizyki i techniki, druga zaś tzw. zasada zachowania masy była podstawą ilościowej chemii. Pierwsza głosi, że w układzie odizolowanym od otoczenia, suma wszystkich rodzajów energii tego układu jest wielkością stałą. W układzie mogą się odbywać rozmaite zjawiska, różne rodzaje energii mogą się wzajemnie wymieniać, jedne mogą znikać inne mogą powstawać, lecz suma wszystkich rodzajów energii w takim układzie nie zmienia się. Zwiększenie energii tego układu może być spowodowane tylko przez doprowadzenie energii w jakiejkolwiek postaci z zewnątrz, np. przez wykonanie pracy sił zewnętrznych, lub doprowadzenie ciepła układowi. Zmniejszenie energii układu może znów być rezultatem wydania przez układ pracy, czy ciepła, czy promieniowania, czy wreszcie innego jakiegoś rodzaju energii na zewnątrz. Druga z wymienionych tutaj zasad tj. zasada zachowania masy głosi, że w układzie izolo-

wanym od otoczenia, suma mas wszystkich części układu pozostaje stałą. Np. podczas reakcji chemicznej, suma mas wszystkich ciał biorących udział w reakcji chemicznej, przed reakcją i po reakcji jest wielkością stałą.

Jeżeli dwa rodzaje energii przechodzą jeden w drugi, a bilans energetyczny chcemy wyrazić liczbowo, wówczas dla przeliczenia jednego rodzaju energii w drugi, jeżeli wyrażone są w różnych jednostkach, posługujemy się odpowiednim tzw. równoważnikiem. Np. między pracą L wyrażoną w Kgm a ciepłem Q z tej pracy powstałym mamy znany związek $L=J \cdot Q$, gdzie $J=427$ Kgm/Kcal jest tzw. mechanicznym równoważnikiem ciepła.

Z końcem ubiegłego stulecia wydawało się, że sprawa słuszności obu omawianych zasad jest zupełnie przesądzona i tak już zamknięta, że niczego nowego nie można tutaj już oczekiwać. Dopiero teoria względności stworzona przez A. Einsteina w latach od 1905 do 1915 rzuciła zupełnie nowe światło na to zagadnienie. Jednym z wniosków tej teorii jest tzw. zasada równoważności masy i energii. W konsekwencji tej zasady masy izolowanego układu ciał nie możemy uważać za wielkość absolutnie stałą. Możliwe są procesy, w których część masy ciała może zniknąć, a w jej miejsce powstać pewna ilość energii. Naodwrot z pewnej energii niezwiązanej z masą, np. z energii promienistej, może powstać ściśle określona masa tej energii równoważna. Czysto formalnie, dwie podstawowe zasady zachowania energii i masy, na gruncie rezultatów teorii względności, stają się jedną zasadą zachowania energii, z tym, że masa jest też pewną postacią energii. Ilościowo, ta równoważność masy i energii przedstawia się w ten sposób, że jeżeli przez Δm oznaczymy ilość masy, która przekształciła się w energię a przez ΔE ilość energii, która z tej masy powstała, wówczas według Einsteina mamy:

$$\Delta E = c^2 \cdot \Delta m.$$

c^2 będzie więc tutaj pewnym energetycznym równoważnikiem masy. Liczbowo mamy $c^2=9 \cdot 10^{20}$ erg/g¹⁾, inaczej $c=3 \cdot 10^{10}$ cm/sek czyli równa się prędkości światła w próżni.

$$\begin{aligned} \frac{\text{erg}}{\text{g}} &= \frac{\frac{\text{cm}^2}{\text{sek}^2}}{\text{g}} = \frac{\text{cm}^2}{\text{sek}^2} \end{aligned}$$

Z wartości liczbowej tego energetycznego równoważnika masy wynika, że w razie zupełnej anihilacji (tj. zniweczenia) 1 g masy, otrzymalibyśmy $9 \cdot 10^{20}$ ergów pracy tj. $9 \cdot 10^{13}$ dżuli tj. ok. 10^{13} Kgm, tj. 10 billionów kilogramometrów pracy. Używając innych jednostek możemy wyliczyć, że z jednego kilograma zanihilowanej masy, gdyby zamieniła się na energię, otrzymalibyśmy ok. 26 miliardów kilowatgodzin energii, czyli tyle, ile przed wojną wytwarzały wszystkie elektrownie Stanów Zjednoczonych przez dwa miesiące. Oczywiście pytanie, jakie tutaj się nasuwa, jest, dlaczego wobec tego nie wykorzystujemy tych możliwości. Dlaczego pracujemy w ciężkim trudzie, wydobywając węgiel, czy ujarzmiając rzeki dla stwarzania siłowni, skoro w masie każdego ciała tkwią tak olbrzymie zapasy energii. Odpowiedź na to zasadnicze pytanie daje nam doświadczenie. W jakich warunkach dotychczas zaobserwowano zamianę masy na energię? Okazuje się, że warunki te są zupełnie wyjątkowe. Zdarzają się one tylko dla pojedynczych, indywidualnych jąder atomowych, w procesach przemian jądrowych, które jak wspominaliśmy wyżej dają się urzeczywistnić bardzo rzadko. Taki przynajmniej był stan rzeczy do odkrycia nowych sposobów wyzwalańa t. zw. energii atomowej. Jak przedstawia się sprawa zamiany masy na energię rozpatrywana w stosunku do pojedynczych jąder atomowych? Zagadnienie to łączy się ze sprawą energii wiązania jąder atomowych. Wiemy przecież, że jądra składają się z protonów i neutronów między którymi działać muszą pewne siły przyciągające. Aby jądro rozłożyć na jego części składowe musimy wykonać pewną pracę, która będzie równa właśnie owej energii wiązania. Jakież mamy dane odnośnie do tych energii wiązania jąder atomowych. Zasadnicze prace zapoczątkowane przez Astona dały nauce bardzo dokładne dane dotyczące mas poszczególnych jąder. Aston przez odchylenie jonów danego atomu w polu magnetycznym i elektrycznym, z wielkości wypadkowego wychylenia, mógł obliczyć masę jądra danego atomu. O dokładności tych pomiarów czytelnik może się zorientować z kilku danych zebranych w tabelce na str. 69. W tabliczce tej prócz wodoru widzimy t. zw. deuteron tj. izotop wodoru, o zaokrąglonym ciężarze atomowym 2, t. zw. „ciężki” wodór, oraz „lekki” hel o ciężarze 3. Później określono

równie dokładnie masę neutronu. Znalezione, że wynosi ona 1,00895. Wszystkie przytoczone tutaj masy wyrażone są w t. zw. atomowych jednostkach masy. Są to jednostki, w których masa atomu tlenu równa się 16,00000. Inaczej mówiąc atomowa jednostka masy (at. j. m.) = $1/16$ masy atomu tlenu, tj. w przybliżeniu $1,66 \cdot 10^{-24}$ g. czyli masie atomu wodoru. Mając do dyspozycji masy wszystkich jąder, możemy porównać masy ich z sumą

Pierwiastek	Symbol	Liczba porządkowa w układzie okresowym	Zaokrąglony ciężar atomowy danego izotopu	Masa atomu danego izotopu
Wodór Deuteron	H	1	1	1,00813
			2	2,01472
Hel	He	2	3	3,01699
			4	4,00386
Lit	Li	3	6	6,0169
			7	7,0181

mas ich części składowych. Okazuje się, że dla jąder znanych pierwiastków zawsze masa jądra jest mniejsza od sumy mas jego składników. Różnicę między sumą mas składników a masą jądra nazywamy defektem masy jądra. Jeżeli rozważymy tę sprawę z punktu widzenia zasady równoważności masy i energii to defektowi masy odpowiada pewna energia, która właśnie będzie energią wiązania danego jądra atomowego. Jako przykład obliczmy energię wiązania cząstki α . Cząstka α jak wiemy, jako jądro helu, składa się z dwóch protonów i dwóch neutronów. Defekt masy dla helu będzie więc $2 \cdot 1,00813 + 2 \cdot 1,00895 - 4,0039 = 0,03026$ at. j. m. Łatwo obliczyć że według relacji Einsteina energia odpowiadająca atomowej jedn. masy jest $0,93 \cdot 10^9$ eV i naodwrot $1 \text{ eV} = 1,07 \cdot 10^{-9}$ at. j. m. Stąd defektowi masy dla cząstki α odpowiada energia $27,9 \cdot 10^6$ eV.

Jest to zatem energia wiązania cząstki α t. zn. tyle energii musimylibyśmy cząstce α dostarczyć, by ją rozbić na 4 cząstki z których się składa. Tyle też energii mogłoby się naodwrot wydzielić, gdy-

byśmy mogli spowodować syntezę jednej cząstki α z dwóch protonów i dwóch neutronów. Bezpośrednio syntezę takiej nie dokonano, lecz przy bombardowaniu litu protonami jako produkt reakcji uzyskano dwie cząstki α według równania $3\text{Li}^7 + 1\text{H}^1 = 22\text{He}^4$. Przemiany tej dokonali Cockroft i Walton w r. 1932 bombardując lit protonami przyspieszonymi napięciem kilkuset tysięcy woltów. Te cząstki α , w reakcji tej powstające, mają zasięg w powietrzu normalnym 8,4 cm, t. j. przewyższają zasięgiem a więc i energią wszystkie znane z naturalnej promieniotwórczości cząstki α . Ich energia wynosi mianowicie 8,6 MeV. Jest to energia istotnie wyzwolona kosztem zmniejszonej masy, energia bowiem dostarczona przez proton powodujący tę przemianę wynosi zaledwie kilkaset tysięcy eV. Zdajemy sobie teraz sprawę z ilości energii wydzielonych ze straty masy, z jakimi mamy do czynienia w zjawiskach jądrowych. Porównajmy te ilości energii z energią pochodzącą ze znanych nam dobrze pospolitych źródeł energii. Weźmy pod uwagę, jako takie pospolite źródło energii węgiel. Wiemy dobrze, ile ciepła wydzielą się przy spaleniu 1 kg węgla. Równie dobrze wiemy ile atomów znajduje się w jednym kilogramie węgla. Dzieląc tę ilość ciepła przez ilość atomów otrzymamy ile ciepła wydzielą się przy spaleniu się 1 atomu węgla. Jest to oczywiście bardzo mała ilość energii, niemniej da się ona dokładnie obliczyć. Tę energię możemy porównać z energiami wydzielonymi w procesach przemian jąder atomowych, które bezpośrednio dla pojedynczych jąder wyznaczamy. Okazuje się, że w procesach jądrowych wydzielą się około milion razy więcej energii, niż przy spalaniu węgla (wszystko licząc na jeden atom). Oczywiście zupełnie inna sytuacja zarysowała się od czasu kiedy stwierdzono, że w procesach rozbijania jąder uranu przez neutrony możliwe są t. zw. reakcje łańcuchowe. Są to takie procesy, w których jeden proces raz zapoczątkowany powoduje już sam, bez zewnętrznych przyczyn, drugi analogiczny, ten z kolei trzeci, ten następny itd. W ten sposób, w pewnych warunkach wszystkie atomy danej porcji uranu mogą wziąć udział w reakcji i wtedy wydzielenie się energii jest olbrzymie.

Rękopis otrzymano 4. stycznia 1947 r.

SPIS RZECZY

	str.
1. Wstęp	1
2. Metody doświadczalne badań nad promieniami kosmicznymi . .	3
Komora jonizacyjna	3
Licznik Geigera-Müllera	5
Komora rozprężeń Wilsona	9
3. Zasadnicze fakty znane przed odkryciem mezonu	11
Cząstkowa czy falowa natura promieni kosmicznych?	11
Pozitrony w promieniowaniu kosmicznym	13
Energie cząstek promieniowania kosmicznego	14
Efekty pola magnetycznego ziemi	15
Efekt szerokości geomagnetycznej	15
Efekt wschodnio-zachodni	18
Pęki promieniowania kosmicznego	19
Wielkie pęki Auger'a i wybuchy Hoffmana	21
Zależność natężenia promieni kosmicznych od wysokości . . .	23
Zależność natężenia promieni kosmicznych od kierunku nacy- lenia względem pionu	27
Miękką i twardą składową promieni kosmicznych	28
4. Współczesne poglądy na oddziaływanie cząstek i fotonów pro- mieniowania kosmicznego z materią	31
5. Mezon	37
Ładunek mezonu	38
Masa mezonu	39
Promieniotwórczość mezonu	39
Zależność natężenia mezonów od wysokości	41
Pęki kaskadowe spowodowane przez mezony	42
Pęki przenikliwe	42
6. Cząstki ciężkie	43
Składowa neutronowo-protonowa	43
Reakcje jądrowe spowodowane promieniami kosmicznymi . . .	44
7. Co jest pierwotnym promieniowaniem kosmicznym	45
Dane ilościowe	49
Pochodzenie Promieni kosmicznych	51
Uzupełnienia	55

Pedagogiczna Biblioteka Wojewódzka

nr inw.: ICZ - 502 **NAG.D**



cz. C.502/S.B/1947