

Co się dzieje, gdy promieniowanie jądrowe przechodzi przez materię?

Doc. dr Piotr DECOWSKI

Pytaniu zawartemu w tytule można zarzucić, że jest bardzo nieprecyzyjne. Bo czym jest promieniowanie jądrowe? Wiemy, że mogą to być lżejsze lub cięższe cząstki naładowane (np. elektrony, protony, cząstki alfa), cząstki neutralne (np. neutrina, neutrony) czy też promieniowanie elektromagnetyczne o bardzo małej długości fali (tzw. promieniowanie gamma). Każdy z typów promieniowania oddziałuje z materią na swój sposób. Oczywiście najprościej można sobie wyobrazić to oddziaływanie w przypadku cząstek naładowanych.

W każdej substancji jest mnóstwo elektronów dość równomiernie rozlokowanych w całej jej objętości. Większość z nich jest związana na orbitach atomowych, niektóre mogą się poruszać wewnątrz substancji niemal swobodnie. Cząstka naładowana przechodząc przez materię oddziałuje elektrostatycznie z poszczególnymi elektronami, wybija je z orbit (następuje jonizacja atomu) i przekazuje im część swej energii. Wytraca prędkość i wreszcie po przebyciu pewnej drogi ruch jej prawie ustaje. Jeśli spowolniana cząstka jest cząstka cięższa, np. proton, którego masa jest blisko 2000 razy większa niż masa elektronu, to jej w czasie zderzeń z elektronami ulega tylko nieznacznym odchyleniom od początkowego kierunku. W związku z tym możemy wprowadzić pojęcie zasięgu cząstek przechodzących przez daną substancję. Liczba cząstek w wiązce przenikającej przez pewien przekrój na głębokościach mniejszych od zasięgu jest w przybliżeniu równa liczbie cząstek w wiązce padającej na absorbent, choć mają one teraz energię mniejszą od energii początkowej. Na głębokościach porównywalnych z zasięgiem liczba ta gwałtownie spada do zera (rys. 1). Zanim poruszająca się cząstka ulegnie całkowitemu wyhamowaniu oddziałuje z setkami tysięcy elektronów. Jest to proces przypadkowy — jedna cząstka może napotkać na swej drodze mniejszą liczbę elektronów, inna większą. Straty energii cząstek po przejściu warstwy absorbenta o określonej grubości mogą być nieco różne.

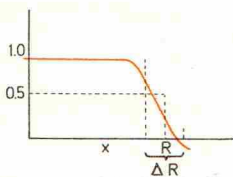
Ta nieokreśloność energii, wynikająca z przypadkowości procesu hamowania, będąca niejednokrotnie utrapieniem fizyków wykonujących doświadczenia, nosi nazwę *stragglingu* energii. Z tych samych powodów możemy również mówić o *stragglingu* zasięgu — każda cząstka przebywa w danej substancji drogą równą swemu indywidualnemu zasięgowi, na ogół nieco różnemu od średniego zasięgu cząstek. To rozmycie zasięgu (ΔR na rys. 1) dla protonów i cząstek alfa o energii od kilku do kilkuset MeV jest rzędu paru procent.

Strata energii naładowanej cząstki na określonej drodze jest oczywiście wprost proporcjonalna do gęstości elektronów w absorbencie, a ponadto zależy od prędkości cząstki i jej ładunku. Pęd przekazany elektronowi w czasie oddziaływania jest wprost proporcjonalny do siły i czasu jej działania, czyli jest wprost proporcjonalny do ładunku cząstki i odwrotnie proporcjonalny do jej prędkości. Ubytek zatem energii kinetycznej cząstki równy energii kinetycznej elektronu zależy od ilorazu kwadratu ładunku przez kwadrat prędkości cząstki. Straty energii na jednostkę drogi (tzw. zdolność hamująca ośrodka) są więc największe przy końcu drogi cząstki, tam gdzie jej prędkość jest już stosunkowo mała (rys. 2). Przy bardzo małych prędkościach cząstka nie jest już w stanie uwolnić niektórych silniej związanych elektronów w atomach, ponadto zaczyna chętnie przyjmować elektrony na swoje własne orbity, co prowadzi do zmniejszenia jej efektywnego ładunku — straty jonizacyjne maleją.

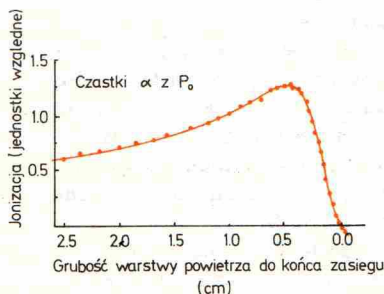
Cząstki nie posiadające ładunku oddziałują z materią znacznie słabiej. Neutrony tracą energię głównie w zderzeniach z jądrami atomów — dają tu o sobie znać krótkozasięgowo siły jądrowe. Prawdopodobieństwo takiego procesu jest znacznie mniejsze niż prawdopodobieństwo oddziaływania elektrostatycznego. Dlatego też dla neutronów większość substancji jest niemal przezroczysta; trzeba budować grube zapory, aby skutecznie zmniejszyć ich strumień. Dla neutronów wszystkie zapory ziemskie są prawie idealnie przezroczyste!

Inaczej oddziałuje z materią promieniowanie gamma. Foton gamma może wybić elektron z jednej z głębszych powłok elektronowych atomu. Cała energia zostaje wówczas zużyta na oderwanie elektronu od atomu i nadanie mu energii kinetycznej (oraz pewnego odrzutu całemu atomowi). Foton znika. Jest to tzw. efekt fotoelektryczny. Foton może ulec rozproszeniu na jednym z elektronów przekazując mu w tym jakby sprężystym zderzeniu pewną energię. Im większy jest kąt rozproszenia fotonu, tym większa jest strata jego energii (większa długość fali). Foton ulegający temu rozpraszaniu (które nazywa się rozpraszaniem komptonowskim) porusza się w kierunku innym niż kierunek padającej wiązki fotonów — czyli również ubywa z wiązki.

Wreszcie gdy energia fotonów jest odpowiednio duża (większa niż 1.02 MeV), w polu elektrycznym jąder atomów ośrodka może nastąpić tzw. kreacja pary elektron-pozyton. Część energii fotonu jest zużyta na kreację elektronu i pozytonu, reszta odnajduje się w ich energiach kinetycznych i energii odrzutu jądra, w polu którego para elektron-pozyton została wytworzona. Foton ginie. Zatem w każdym z tych trzech najbardziej ważnych rodzajów oddziaływania promieniowania gamma z materią foton, który uległ oddziaływaniami ubywa z wiązki. Pozostałe fotony biegają



Rys. 1. Zależność liczby cząstek od przebytej drogi w absorbencie

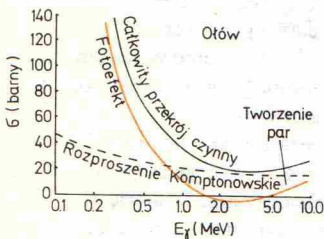
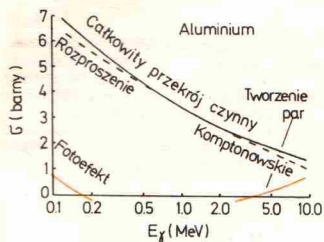


Rys. 2. Strata energii cząstek α na jednostkowej drodze (jonizacja) w funkcji ich zasięgu



Rozwiązanie zadania M 46

Prawdopodobieństwo równe jest 1, gdyż dowolne trzy punkty leżą na jednej półkuli. Aby to udowodnić, wystarczy poprowadzić koło wielkie przez dwa spośród tych punktów i wybrać tę półkulę, na której leży trzeci (jeśli trzeci punkt leży na tym kole, to wybieramy dowolną półkulę wyznaczoną przez koło).



Rys. 3. Przekroje czynne na absorpcję kwantów gamma.

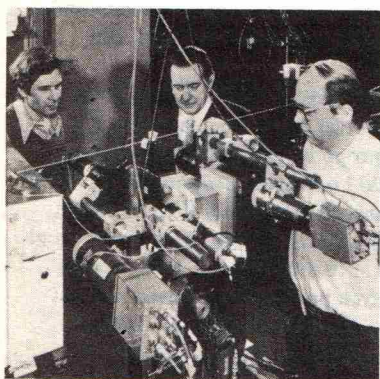
w kierunku wiązki z taką samą energią jaką miały w momencie wejścia do ośrodka. Nie ma więc sensu mówić o zasięgu promieniowania gamma w materii; można jedynie mówić o osłabieniu jego natężenia. Osłabienie ma charakter wykładniczy, co jest konsekwencją faktu, że wszystkie kwanty gamma mają równe szanse ulegnięcia oddziaływaniu w czasie swego lotu przez materię. Można wprowadzić miarę prawdopodobieństwa oddziaływania fotonu. Mierzy się je przy pomocy wielkości zwanej „przekrojem czynnym”. Jest to stosunek liczby aktów oddziaływania w jednostce czasu do liczby fotonów padających w jednostce czasu na jednostkę powierzchni, podzielony przez liczbę atomów znajdujących się w objętości ośrodka, przez którą przechodzi wiązka. Taka definicja ma prostą interpretację: wiązka byłaby równie osłabiona, gdyby ją przegrodzić doskonale absorbującą powierzchnią równą iloczynowi przekroju czynnego przez liczbę atomów w próbce objętej wiązką. Przekrój czynny, mierzony zwykle w barnach (10^{-24} cm^2), reprezentuje więc jak gdyby efektywny przekrój atomu w obserwowanym zjawisku. Całkowity przekrój czynny na absorpcję kwantów gamma składa się z sumy przekrojów odpowiedzialnych za trzy opisane procesy oddziaływania:

$$\delta = \delta_{\text{fot}} + \delta_{\text{kompt}} + \delta_{\text{par}}$$

Po przejściu warstwy substancji o grubości x natężenie wiązki fotonów zmniejsza się $e^{-n\sigma x}$ razy (n — liczba atomów substancji w jednostce objętości). Wartość przekroju czynnego silnie rośnie ze wzrostem liczby porządkowej atomów ośrodka (rys. 3). Jasne jest więc, dlaczego do budowy osłon przed promieniowaniem gamma używamy najczęściej ołowiu. Im większy strumień promieniowania, tym większa musi być grubość stosowanej osłony.

Prześwietlanie protonami

Grupa fizyków z Narodowego Laboratorium w Argonne (USA) wraz z zespołem lekarzy Wydziału Medycznego Uniwersytetu w Chicago prowadzi badania nad zastosowaniem wiązki protonów do prześwietlania żywej tkanki w celach diagnostycznych. Dotychczasowa, szeroko stosowana w medycynie, technika prześwietlania krótkimi falami elektromagnetycznymi (promieniami X) nie pozwala rejestrować obiektów mało różniących się gęstością, a więc pochłanianiem promieniowania. Osłabienie wiązki promieniowania elektromagnetycznego w materii zależy wykładniczo od ilości materii, którą promieniowanie przenika. Patologicznie zmieniona tkanka żywa różni się tylko nieznacznie gęstością od otaczającej ją tkanki zdrowej. Natężenia wiązek promieniowania przenikających zdrową i chorą tkankę różnią się przeto również nieznacznie, tak że wykrycie tej różnicy może być niemożliwe.. Zastosowanie niskoenergetycznej wiązki protonów do prześwietlenia radykalnie zmienia sytuację. Dla protonów niskoenergetycznych (to znaczy o tak dobranej energii, aby ilość materii, którą mają przeniknąć, była tylko nieco mniejsza od tej ilości, która zatrzymałaby je całkowicie) zmiany natężenia wiązki w miarę wzrostu ilości przenikniętej przez nią materii są bardzo szybkie. Nawet niewielka różnica w gęstości ośrodków powoduje bardzo znaczną różnicę w ilości przepuszczanych protonów. Różnica ta może wskazać na wewnętrzną strukturę badanej tkanki znacznie precyzyjniej niż konwencjonalne prześwietlenie promieniami X. Pierwsze próby rozpoczęto w lutym 1974 r. z wiązką 200 MeV protonów pochodzących z konwencjonalnego akceleratora używanego w laboratorium do badania procesów oddziaływań cząstek elementarnych.



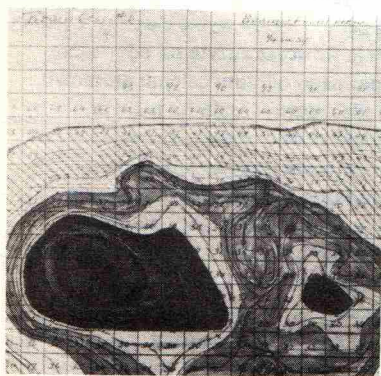
Fot. 1

W bloku tworzywa sztucznego o grubości 22,5 cm wyłobiono dołek o głębokości 0,125 mm. Prześwietlenie wiązką protonów pozwoliło wykryć to wgłębienie wykazując tym samym, że można zaobserwować zmiany gęstości mniejsze niż 0,1%.

W kwietniu 1974 r. wykonano pierwsze próby z wypreparowaną tkanką ludzką. Zdjęcie przedstawia układ doświadczalny. Próbkę tkanki mózgowej znajduje się w pojemniku wypełnionym wodą, widocznym w środku zdjęcia. Pojemnik jest przesuwany w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiązki, a licznik scyntylacyjny rejestruje natężenie przechodzącej wiązki dla każdego położenia pojemnika. W ten sposób powstaje mapa zdolności pochłaniania badanej tkanki. Całkowita dawka promieniowania, otrzymana przez tkankę w procesie prześwietlania wynosi około 5 miliremów, a więc znacznie mniej niż przy prześwietleniu konwencjonalnym. Zdjęcie przedstawia otrzymaną w opisany sposób mapę mózgu. Ciemny obszar po lewej stronie wskazuje tkankę nowotworową.

W oparciu o opisane eksperymenty i obliczenia teoretyczne sądzi się że będzie można wykrywać nowotwory mózgu o średnicy powyżej 4 mm i nowotwory piersi o średnicy nie mniejszej niż 2 mm. Wymaga to opracowania przenośnych, prostych w obsłudze i tanich akceleratorów protonów, takich, które można instalować w szpitalach. Prace w tym kierunku są już zaawansowane. Prześwietlenie protonami jest bardzo dobrym przykładem niespodziewanego zastosowania praktycznego wyników badań z dziedziny pozornie całkowicie poświęconej zagadnieniom czysto poznawczym, dziedziny, jaką jest fizyka cząstek elementarnych.

(Zdjęcia i materiał z «CERN Courier», 1974, tom 14, nr 9).



Fot. 2