

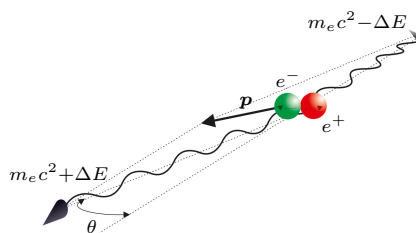
Jak pozyton, cząstka antymaterii, zrobił zawrotną karierę

*Instytut Fizyki Jądrowej PAN

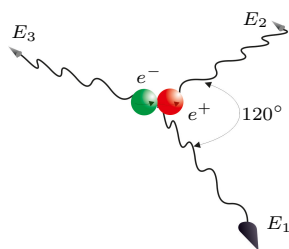
Jerzy DRYZEK*

Jednym z niezwykłych odkryć ubiegłego stulecia było to, że w naszym świecie mogą istnieć zarówno cząstki, jak i ich antycząstki, czyli materia i antymateria. W zasadzie Wszechświat mógłby być zbudowany z antymaterii i nikt by się nie zorientował, ale z jakiegoś powodu tuż po Wielkim Wybuchu coś zaburzyło tę symetrię. Większość pierwotnej materii i antymaterii uległa anihilacji, jednak niewielka część materii, która nie miała z czym anihilować, posłużyła do zbudowania obecnego świata.

Pierwszą odkrytą antycząstką, ku zaskoczeniu jej odkrywcy Carla Davida Andersona (1932 r.), był pozyton, czyli antyelektron lub inaczej dodatnio naładowany elektron. Istnienie pozytonu, które przewidział wcześniej Paul Adrien Maurice Dirac (1928 r.), jest efektem relatywistycznym. Pozyton szybko zrobił oszałamiającą karierę. Przede wszystkim dlatego, że ulega on anihilacji z napotkanym przypadkowo elektronem, produkując dwa wysokoenergetyczne tzw. fotony anihilacyjne, o energii $m_e c^2 = 511 \text{ keV}$ każdy, gdzie m_e to masa spoczynkowa elektronu, a c to prędkość światła. To stosunkowo twarde promieniowanie, ale jego obecność jednoznacznie świadczy o obecności pozytonu. W istocie proces anihilacji nie jest taki niezwykły. Masa spoczynkowa anihilujących cząstek zamienia się w energię, a dokładnie w bozony oddziaływania między nimi. W przypadku pozytonu i elektronu są to fotony, nośniki oddziaływania elektromagnetycznego, ale już w przypadku protonu i antyprotonu pojawiają się też i mezony. Wszystkie prawa zachowania są tu spełnione. Jeśli para w momencie anihilacji ma spiny ustawione w przeciwnych kierunkach, i cząstki są w spoczynku, to fotony anihilacyjne rozbiegają się dokładnie w przeciwnych kierunkach. Są też spolaryzowane liniowo, ale płaszczyzny ich polaryzacji są prostopadłe (rys. 1). Dodatkowo fotony te są splątane kwantowo. Suma spinów początkowo była równa zero, więc i suma spinów cząstek po anihilacji też jest zero. To kwantowe splątanie zaobserwowano także w urządzeniu o nazwie J-PET na Uniwersytecie Jagiellońskim. Kanał anihilacji na dwa kwanty, choć najbardziej prawdopodobny, nie jest jednak jedynym. Równoległe ustawienie spinów daje w wyniku anihilacji trzy kwanty, rozbiegające się pod kątem 120° , ale ich energia ma ciągle widmo energetyczne, ucinające się na energii 511 keV (rys. 2). Tu również występuje polaryzacja fotonów, dwa są spolaryzowane w płaszczyźnie wyznaczonej przez trajektorie fotonów z wektorem elektrycznym prostopadłym do niej, a jeden z równoległym. Suma spinów takich fotonów jest równa 1 (w jednostkach stałej Plancka $\hbar$).



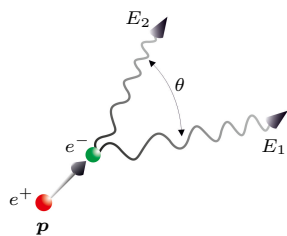
Rys. 1. Anihilacja pozytonu i elektronu „w spoczynku”. W tym przypadku elektron posiada pęd p , który sprawia, że kwanty anihilacyjne odchylają swój lot od kolinearności o niewielki kąt: $\theta = p_T/m_e c$, a ich energia, w wyniku efektu Dopplera, nieznacznie zmienia wartość o $\Delta E = p_L c/2$, gdzie p_T i p_L to rzut pędu elektronu na kierunek równoległy i kierunek prostopadły do kierunku ruchu kwantu.



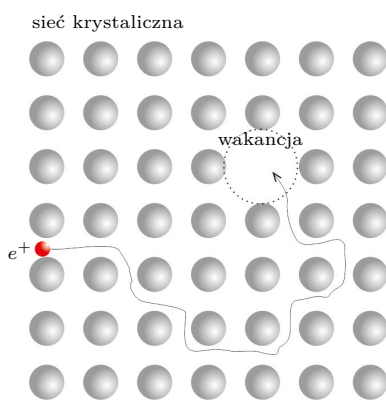
Rys. 2. Gdy spiny anihilujących cząstek są ustawione równolegle, następuje anihilacja trójkwantowa, stąd kierunki emisji fotonów ustawione są pod kątem 120° , a każdy foton ma ciągle widmo energii.

Możliwa jest też anihilacja na więcej kwantów zgodnie ze wzorem: $(-1)^n = (-1)^{L+S}$, gdzie n to liczba kwantów anihilacyjnych, a L i S to kręt orbitalny i całkowity spin anihilujących cząstek.

Przełomowym momentem w karierze pozytonu było odkrycie Sergia DeBenedettiego i współpracowników w 1949 roku. Obserwowali oni następujące zjawisko. Emitowany ze źródeł radioaktywnych podlegających rozpadowi β^+ pozyton ma bardzo wysoką energię kinetyczną, na przykład dla izotopu ^{22}Na ich maksymalna wartość to około 0,545 MeV. Taka cząstka implantowana (wprowadzona) do materii podlega zderzeniom elastycznym i nieelastycznym z jądrami atomowymi i elektronami, stopniowo wytracając swoją energię, aż w końcowej fazie lotu rozprasza się tylko na fononach (czyli kwantach drgań sieci krystalicznej) i osiąga energię drgań termicznych, tj. około 25 meV. Zjawisko to nazywamy termalizacją. Mówi się więc, że implantowany do metalu pozyton ulega termalizacji, a rozkład kątowy fotonów anihilacyjnych jest określony tylko przez rozkład pędów elektronów. Jak pokazał Paul Dirac, prawdopodobieństwo zajścia anihilacji jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalne do względnej prędkości pozytonu i elektronu, stąd tzw. anihilacja „w locie”, tj. podczas utraty kinetycznej energii, zdarza się bardzo rzadko (rys. 3). Ponad 98% pozytonów anihiluje po sterlizowaniu, gdy prędkość wynosi około $5 \times 10^4 \text{ m/s}$, ale jest ona i tak mniejsza od prędkości elektronów i nazywamy to anihilacją „w spoczynku” (jak na rysunku 1). To właśnie otworzyło drogę do detekcji struktury pasmowej elektronów, a w szczególności badań nad tzw. powierzchnią Fermiego.



Rys. 3. Anihilacja „w locie”, pęd pozytonu jest znacznie większy w stosunku do pędu elektronu. Emitowane anihilacyjne fotony mają ciągle widmo energii – od pewnej minimalnej do maksymalnej wartości zależnej od energii pozytonu. Kąt θ między kierunkami emisji tych fotonów zależy od ich energii.



Rys. 4. Trajektoria ruchu pozytonu w sieci krystalicznej i jego lokalizacja w wakancji, pustym miejscu po atomie.

Już w 1934 roku Stjepan Mohorovičić przewidywał istnienie stanu związanego pozytonu i elektronu (podobnego do atomu wodoru złożonego z protonu i elektronu). Stan taki nazywamy pozytem (ang. *positronium*). Układ ten w stanie podstawowym może mieć spin o wartości 0 (tzw. stan singletowy) lub 1 (tzw. stan tripletowy). Może występować również w stanach wzbudzonych. Pozyt został zaobserwowany w roku 1951 przez Martina Deutscha w pomiarach czasu życia pozytonów implantowanych do gazów. Pomiar taki wykorzystuje fakt, że jądro ^{22}Na , po emisji pozytonu, przekształca się w jądro wzbudzone ^{22}Ne , które po czasie około $2 \times 10^{-12} \text{ s} = 2 \text{ ps}$ emituje kwant gamma o energii 1,27 MeV. Jest on znacznikiem narodzin pozytonu. Wystarczy wtedy uruchomić zegar i poczekać, aż pojawi się foton anihilacyjny o energii 511 keV. Otrzymujemy zbiór wartości odstępów czasów, które tworzą tzw. widmo czasów życia, charakteryzujące się wykładniczym zanikiem, z którego można wyznaczyć średni czas istnienia pozytonu. Wielkość ta charakteryzuje materię, w której anihiluje pozyton. Zanim jednak dojdzie do anihilacji, pozyton może z napotkanym elektronem utworzyć stan związany, czyli pozyt. Obliczenia teoretyczne pokazały, że stan singletowy pozytu w próżni anihiluje po około 125 ps, natomiast tripletowy po czasie znacznie dłuższym, bo około 145 ns. Obecność właśnie tej długiej składowej czasu życia, stwierdzona przez Martina Deutscha była dowodem na istnienie pozytu. O ile pomiary widm czasów, z uwagi na ich bardzo małe wartości, były wówczas dla eksperymentatorów wyzwaniem, o tyle dziś, choć wymaga to i tak specjalistycznej aparatury, są powszechnie stosowane. Stwierdzono, że pozyt tworzy się w cieczach, ale i ośrodkach molekularnych, np. polimerach. I tu miłe zaskoczenie. Pozyt w stanie tripletowym w tych ośrodkach ma znacznie krótszy czas życia niż ten w próżni, a to z uwagi na dużą liczbę elektronów wokół. Pozyton, zamiast czekać aż zanihiluje z własnym elektronem, anihiluje z elektronem otoczenia. Redukcja czasu życia jest znaczna, bo do wartości kilku nanosekund, i – jak stwierdzono – zależy ściśle od rozmiaru pustki, w której tworzy się ten stan. W splecionych molekułach powstają naturalne obszary wolne od atomów i elektronów o promieniu od 0,1 do 0,3 nm. Właśnie w takich obszarach lokuje się pozyton. Wychwytyjąc elektron i korzystając z dostępnego miejsca, tworzy z nim stan związany. Zależność między tak stwierdzonym czasem a promieniem tej pustki służy dziś do charakteryzowania polimerów na poziomie molekularnym. Jeśli w materiale są większe pory o rozmiarach rzędu 10 nm, to pozyt dożywa w nich nawet 100 ns. Dziś jest to uznana metoda wyznaczania rozmiarów porów, tzw. porozymetria pozytonowa.

Charakterystyczny jest fakt, że pozyton w materii nie jest próbnikiem lokalnym. Stermalizowany, w idealnej sieci krystalicznej pokonuje duże dystanse, głównie w obszarach międzywęzłowych na drodze około $0,5 \mu\text{m}$. Jego czas życia jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalny do panującej tam gęstości elektronowej. Może również wnikać w obszar rdzenia atomowego, ale z uwagi na dodatnio naładowane jądro atomowe, które go odpycha, zdarza się to rzadko. Anihilacja zachodzi najczęściej z elektronami walencyjnymi (rys. 4).

Gęstość elektronowa jest różna w różnych metalach, stąd i czas życia implantowanego do nich pozytonu zmienia się, np. w żelazie to 106 ps, podczas gdy już w magnezie 225 ps. Tak jest w idealnej sieci krystalicznej. Najczęściej jednak sieci zawierają różne defekty, np. pustkę po atomie, czyli tzw. wakancję (rys. 4). Dodatni pozyton, skanując duży obszar, może zostać w takim miejscu złapany jak w studni potencjału. Ponieważ jest tam mniejsza gęstość elektronowa, czas życia tak zlokalizowanego pozytonu wyraźnie się zwiększa, np. w wakancji w żelazie to już 170 ps,

a w magnezie 250 ps. Defekty, takie jak wakancje, ich skupiska, dyslokacje czy granice ziaren są powszechne w materiałach, a dokładne kwantowe obliczenia czasu życia pozytonów w nich zlokalizowanych pozwalają w oparciu o pomiary widm czasowych na identyfikację defektów. To dziś ogromny obszar badań rozwijany od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku, znany pod nazwą spektroskopii anihilacji pozytonów.

Prace Allena P. Millsa juniora i Kelvina G. Lynna w latach 1978–1979 przyniosły kolejne zaskakujące odkrycie. Stermalizowany pozyton, błędząc przypadkowo tuż przy powierzchni próbki, może zostać z niej wyrzucony z energią około 2 eV. Jest za to odpowiedzialna ujemna praca wyjścia pozytonów (stwierdzona w niektórych metalach, np. w wolframie). Takim wyrzuconym powolnym pozytonem łatwo już manipulować. Za pomocą pola elektrycznego i magnetycznego formuje się skupioną wiązkę pozytonów, które można w polu elektrycznym przyspieszyć do zadanej energii. Prawie monoenergetyczne pozytony implantowane są do

materii, ale już blisko powierzchni, bo na głębokościach poniżej 1 μm . Wydajność takiego moderatora (czyli spowalniacza) jak wolfram jest niewielka, bo na 10^4 pozytonów implantowanych ze źródła ^{22}Na tylko jeden jest wyrzucany z równie niską energią. Pomimo tego jest to wystarczające, aby uzyskać strumień – jak je nazywamy – powolnych pozytonów. Powstał tu ogromny obszar badań dotyczący defektów zlokalizowanych przy powierzchni, np. w półprzewodnikach istotnych z punktu widzenia współczesnej elektroniki. Można już dziś mówić o tzw. profilometrii pozytonowej.

O ile źródła pozytonów emitowane w rozpadach β^+ nie są zbyt wydajne, o tyle zastosowanie liniowych akceleratorów elektronowych pozwala uzyskać naprawdę wysokie wydajności. Przyspieszony we wspomnianych akceleratorach do energii około 30 MeV elektron uderza w tarczę, np. wolframową, produkując podczas hamowania ogromny strumień fotonów. Jeśli taki foton znajdzie się w pobliżu jądra atomowego, to w procesie reakcji może zamienić się w parę pozyton–elektron. Tarcza wolframowa wypełnia się pozytonami, z których część jest wyrzucana na powierzchnię, a dalej procedura przebiega jak wyżej. Uzyskane w ten sposób strumienie powolnych pozytonów są o trzy, cztery rzędy wielkości większe niż w przypadku użycia emiterów β^+ . Pozwala to przymierzyć się do naprawdę marzycielskich pomysłów, takich jak na przykład laser z użyciem pozytu, czy kondensat Bosego–Einsteina pozytonów. W takiej instalacji, jaka znajduje się w Instytucie Fizyki Promieniowania w Dreźnie-Rossendorfie, wiązkę dodatkowo szatkuje się na paczki, które w równych odstępach czasu uderzają w próbkę, ale na głębokości już poniżej 0,2 μm . Dalej za pomocą specjalnej aparatury mierzy się w tym obszarze widma czasów życia. Widmo takie już po czasie kilku minut zawiera około 10^7 zliczeń anihilacyjnych zdarzeń. W japońskim Instytucie Nauki o Strukturze Materiałów w Tsukubie używa się tak uzyskanej wiązki do dyfrakcji pozytonów na powierzchni kryształów. Dodatkowo naładowany pozyton,

poruszając się pod niewielkim kątem do badanej powierzchni, skanuje tylko pierwszą warstwę atomową, nie wnikając do wnętrza struktury. Dyfrakcyjny obraz rozproszonych pozytonów powstaje na luminescencyjnej tarczy ustawionej prostopadłe do tej powierzchni.

Na końcu należy wspomnieć o diagnostycznej technice medycznej nazwanej PET, czyli tomografii pozytonowej. Komórki guzów nowotworowych rozwijające się u chorych osób, charakteryzują się wysokim zapotrzebowaniem na glukozę, znacznie wyższym niż zdrowe komórki. Wystarczy do glukozy przytwierdzić β^+ izotop, na przykład ^{18}F , i wstrzyknąć tak przygotowany preparat do ciała pacjenta. Izotop ten, z czasem połowicznego zaniku około 110 min., emituje pozyton – który przecież musi anihilować, bo elektrony są wszędzie – produkując dwa kolinearne kwanty. Wystarczy teraz otoczyć pacjenta detektorami i zrekonstruować mapę miejsc anihilacyjnych zdarzeń. Tam, gdzie izotopu będzie najwięcej, a więc w samym guzie nowotworowym, detektor ujawni większą liczbę anihilacji niż w otoczeniu. Pozwala to zlokalizować samego guza, jeśli się rozwija, i określić jego rozmiar. Istnieją już w naszym kraju ośrodki prowadzące taką diagnostykę, która staje się standardową metodą w diagnostyce i terapii nowotworowej.

Jeśli Czytelnik chciałby zapoznać się bliżej z anihilacją pozytonów, autor zachęca do odwiedzenia strony: ifj.edu.pl/private/jdryzek/.

Jako autor zajmujący się od wielu, wielu lat techniką anihilacji pozytonów, jestem pewien, że jeszcze nieraz nas zaskoczą. Pozyton to lekka cząstka, o stosunkowo małej masie spoczynkowej, łatwa do wyprodukowania w energetycznych procesach. Może być ona pomocna w poszukiwaniu rozpadu protonu czy rozpadu cząstek ciemnej materii. Jakież anomalne zachowania w strumieniu pozytonów, docierających z kosmosu, mogą być sygnałem takich procesów. Fakt, że pozytony są obecne w centrum naszej galaktyki jako wynik rozpadów izotopów promieniotwórczych został stwierdzony już dawno, ale czy tylko tam?

Zagrajmy w Saperę

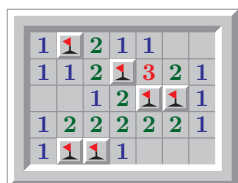
Tomasz CIEŚLA*

*Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Uniwersytet Warszawski

Czytelnicy, którzy mieli styczność ze starszymi wersjami systemu operacyjnego Windows, z pewnością korzystali z dostępnych tam pasjansów Solitaire i FreeCell oraz gier: zręcznościowej Pinball, karcianej Kierki czy logicznej Saper. W artykule przyjrzymy się bliżej ostatniej z nich.

Zasady

Gra w Saperę polega na odkrywaniu pól prostokątnej planszy $m \times n$, na której ukryto k min (liczba ta jest znana uczestnikowi przed rozpoczęciem rozgrywki). Miny rozmieszczone są losowo – każdy układ pojawia się w grze z takim samym prawdopodobieństwem. Gdy pole z miną zostanie odkryte, dochodzi do wybuchu, a gracz przegrywa. W przeciwnym razie na odkrytym polu pojawia się liczba sąsiednich pól, na których są ukryte miny (pola sąsiadują, jeśli stykają się bokiem lub wierzchołkiem). Celem gry jest zlokalizowanie wszystkich min. Dla przejrzystości, pola z zerem wyświetlane są jako puste, a żeby przyspieszyć rozgrywkę, odkrycie takiego pola automatycznie odsłania również wszystkie pola sąsiednie. Gracz ma możliwość stawiania flag na polach – oznacza w ten sposób miejsca, w których znajduje się mina.



Przykładowa pozycja końcowa na planszy 7×5 , na której ukryto 6 min.