

MARIA INGLOT, GUSTAW YAMIONKA

BADANIA CIAŁ STAŁYCH
METODAMI ANIHILACJI ELEKTRONOWO-POZYTONOWEJ

Streszczenie. W artykule omówiono zjawisko anihilacji elektronowo-pozytonowej z podkreśleniem roli rozkładu kątownego kwantów γ pochodzących z anihilacji dwukwantowej. Przedstawione zostały kierunki badań ciała stałego przy użyciu wyżej wymienionej metody oraz główne problemy wynikające przy pomiarach i interpretacji wyników doświadczenia.

1. Zjawisko anihilacji

Z teorii Diraca wynika, że w procesie anihilacji powstaje energia promieniowania elektromagnetycznego równoważna sumie mas spoczynkowych elektronu i pozytonu [1]. Szereg doświadczeń wykazał te anihilacyjne własności elektronu i pozytonu [2], [3], a zjawisko anihilacji w materii dostarczyło danych o jej atomowo-molekularnej strukturze.

Anihilacja pozytonów z elektronami może zachodzić z emisją dwu, trzech lub rzadziej jednego kwantu γ .



Anihilacja z emisją jednego kwantu γ wymaga obecności trzeciego ciała, np. jądra M, odbierającego pęd odrzutu,

Stosunek przekrojów czynnych na anihilację dwufotonową $\sigma_{2\gamma}$ i trzyfotonową $\sigma_{3\gamma}$ jest rzędu stałej struktury subtelnej α

$$\frac{\sigma_{3\gamma}}{\sigma_{2\gamma}} \approx \alpha = \frac{1}{137} \quad (4)$$

natomiast $\sigma_{1\gamma}$ jest bardzo małe.

Przekrój czynny $\sigma_{2\gamma}$ obliczony przez Diraca [1] jest równy

$$\sigma_{2\gamma} = \frac{\pi r_0^2}{\gamma+1} \left[\frac{\gamma^2 + 4\gamma + 1}{\gamma^2 - 2} \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) - \frac{\gamma+3}{\sqrt{\gamma^2-1}} \right] \quad (5)$$

gdzie:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad (6)$$

v - prędkość pozytonu,

c - prędkość światła,

$$r_0 = \frac{e^2}{m c^2} = 2,8 \cdot 10^{-13} \text{ cm} - \text{klasyczny promień elektronu i pozytonu}$$

dla $\frac{v}{c} \ll 1$ wyliczony stosunek przekrojów czynnych

$$\frac{\sigma_{3\gamma}}{\sigma_{2\gamma}} = \frac{1}{372} \quad (7)$$

Przy dużych prędkościach pozytonu anihilacja praktycznie nie zachodzi, przeważają procesy jonizacji i wzbudzenia.

Kolejne niesprężyste zderzenia pozytonu powodują jego spowolnienie. W krystalicznych ciałach stałych na skutek oddziaływania z fononami końcowa energia pozytonów przyjmuje wartości rzędu setnych części elektronowolta. Proces ten nazywamy termalizacją pozytonu. W metalach, np. termalizuje się około 98% pozytonów [4], [5], a wyliczenia podają, że średni czas termalizacji pozytonów w ciałach stałych jest o dwa rzędy mniejszy od czasu ich życia.

Przewidziano również, a następnie stwierdzono doświadczalnie, istnienie związanego stanu pozyton-elektron noszącego nazwę pozytu lub pozytronium [6]. Istnieją dwa podstawowe stany pozytu: trypletowy inaczej ortopozytronium z antyrównoległymi spinami elektronu i pozytonu i singletowy - parapozytronium z równoległymi spinami elektronu i pozytonu. Trójfotonowa anihilacja jest wynikiem anihilacji elektronu i pozytonu ze stanu orto, zaś dwufotonowa - ze stanu para. Istnieje możliwość przejścia stanu orto w stan para. Szczególnie w metalach, stan orto przechodzi w stan para drogą wymiany elektronu związanego ze spinem antyrównoległym na elektron o spinie równoległym. Proces ten zwany "pick off effect" zachodzi w gazie swobodnym elektronów metalu i tłumaczy fakt, iż w metalach prawie wszystkie anihilacje są dwukwantowe.

Prawdopodobieństwo anihilacji pozytonu jest proporcjonalne do przekroju czynnego na anihilację i do gęstości elektronów środowiska.

Ta zależność powoduje, że stany związane elektron-pozyton charakteryzują się między innymi różnym czasem życia, co daje w pomiarach czasu życia pozytonu do momentu anihilacji dwie składowe czasu życia:

$$\tau_1 \sim 10^{-10} \text{ s} - \text{odpowiada stanowi para}$$

$$\tau_2 \sim 10^{-7} \text{ s} - \text{odpowiada stanowi orto.}$$

Obserwacja czasów życia, badanie wpływu takich czynników, jak: zewnętrzne pola magnetyczne, wysokie i niskie temperatury, na intensywność każdej z dwu składowych czasów życia wnosi wiele cennych informacji o procesie anihilacji. Badaniom tego rodzaju poddawane są przede wszystkim gazy, ciecze i bezpostaciowe ciała stałe.

Prócz czasów życia pozytonów do momentu anihilacji innymi ważnymi charakterystykami anihilacji są: kątowny i energetyczny rozkład powstających w tym procesie kwantów γ . W ogólnym przypadku na oba te rozkłady obserwowane w układzie laboratoryjnym wpływa ruch elektronu i pozytonu.

Przechodząc do układu związanego z ruchem środka mas anihilujących cząstek, w przypadku, gdy tylko jedna cząstka się porusza otrzymamy

$$\frac{v}{c} = \frac{2V}{c} / \left(1 + \frac{V^2}{c^2}\right) \approx \frac{2V}{c} \quad \text{przy} \quad V \ll c \quad (8)$$

gdzie:

- c - prędkość światła,
- V - prędkość środka mas anihilującej pary,
- v - prędkość cząstki.

Dla $V = 0$ obydwa kwanty γ (w anihilacji dwufotonowej) rozlatują się w przeciwnych kierunkach.

Natomiast gdy $V \neq 0$, czyli gdy elektron i pozyton poruszają się, kąt rozlatujących się kwantów γ będzie różny od 180° i energia rozlatujących się kwantów nie będzie równa masom spoczynkowym cząstek anihilujących, chociaż zmiana energii dla $V \ll c$ jest bardzo mała. Dlatego dokładny pomiar kąta rozlatywania się kwantów lub zmian ich energii stwarza możliwość wyznaczenia prędkości cząstek anihilujących.

Dla anihilacji trójkwantowej nie ma jednoznacznej korelacji między kątami rozlatywania się i energiami kwantów.

Z powyższych rozważań wynika, że najwięcej informacji doświadczalnych w szczególności o strukturze elektronowej ciał stałych dostarczyć mogą anihilacje dwukwantowe w badanym środowisku poprzez pomiar korelacji kątowych kwantów anihilacyjnych.

2. Zastosowanie zjawiska anihilacji do badań struktury ciał stałych

Doświadczenia wykazały różnice widma anihilacyjnego otrzymanego dla różnych metali, a analiza tych widm pozwoliła wyznaczyć pędy i energię Fermiego poszczególnych metali. Dla niektórych metali w postaci monokryształów stwierdzono anizotropię w kątowym rozkładzie pędów par anihilujących, co pozwoliło przy systematycznej, wielokrotnej zmianie kierunku orientacji monokryształu oszacować

kształt powierzchni Fermiego [7],[8],[9],[10],[11],[12],[13],[14]. Obserwowane były również zmiany krzywych anihilacyjnych przy przejściach fazowych i przejściach uporządkowania i nieuporządkowania w stopach. Wyraźnie widać było wpływ zmian stanu skupienia, zmian temperatury na kształt krzywych kątowej korelacji anihilacyjnych kwantów γ [15],[16],[17]. Podobnie krzywe kątowej korelacji uzyskane dla metali przejściowych [18],[19],[20] wykazały ich złożoną strukturę elektronową, gdyż prawdopodobieństwo anihilacji jest nieco różne dla elektronów skolektywizowanych i zlokalizowanych. Krzywe tych metali przyjmowały kształt dzwonu, inaczej mówiąc, paraboli z "ogonami". Zmianę tych krzywych dla kolejnych metali przejściowych przypisano stopniowemu wypełnianiu się powłok d i wzrostowi ilości s elektronów. W innych doświadczeniach badano rozcieńczone roztwory stałe [21] i wpływ domieszek na strukturę elektronową składnika podstawowego. Zaobserwowano zmianę koncentracji elektronowej w stopach, niezupełnie odpowiadającą wyliczeniom.

Badania anihilacji w stopach metali przejściowych [18],[22] pozwoliły na wysnucie wniosków dotyczących zmian strukturalnych w powłoce d rozpuszczanych atomów. Zmniejszenie się pędu elektronów zostało przypisane zmniejszaniu się ilości elektronów przewodnictwa, co może być spowodowane wypełnianiem się pustych, stanów w powłoce d jednego składnika elektronami s drugiego składnika.

Podczas, gdy większość doświadczeń wykonywanych w temperaturach pokojowych interpretowana była przy założeniu prawie całkowitej termalizacji pozytonów, ostatecznie badania teoretyczne i eksperymentalne [23] wykazały możliwość anihilacji pozytonów w niskich temperaturach przed ich termalizacją [24]. Ciekawym i trudnym do wyjaśnienia okazał się efekt braku poszerzenia ogonów krzywych korelacji (poszerzenie świadczyłoby o braku termalizacji pozytonów) w próbkach polikrystalicznych, przy równoczesnym, znacznym poszerzeniu krzywych anihilacyjnych obserwowanych w monokryształach. Powiązanie tego zjawiska z dyfrakcyjnymi ugięciami pozytonów na płaszczynach kryształu daje możliwość badania zjawisk dynamicznych w kryształach.

W pracy [25] wyprowadzono korelację między parametrami nadprzewodzącego metalu i krzywymi rozkładu kwantów anihilacyjnych.

Osobne zagadnienie stanowią badania wpływu deformacji metali i ich stopów na kątowy rozkład anihilacyjnych kwantów oraz na czasy życia pozytonów w tych materiałach. Obserwowane zjawiska tłumaczy się chwytnością pozytonów w rdzeniach dyslokacyjnych i powstających wakansach, co prowadzi do zmniejszenia prawdopodobieństwa anihilacji.

Stosunkowo niewiele prac poświęconych jest badaniom materiałów ferromagnetycznych. W pracy [28] zdejmowano krzywe kątowej korelacji anihilacyjnych kwantów, przy czym pozytony anihilujące w ferromagnetyku były spolaryzowane polem magnetycznym. Prześledzenie wpływu orientacji spolaryzowanych pozytonów i kierunku namagnesowania próbek na kątowy rozkład par kwantów powstałych w wyniku anihilacji pozwoliło ustalić zgodność między kierunkiem całkowitego magnetycznego momentu silnie zlokalizowanych elektronów $3d$ a kierunkiem wektora namagnesowania próbki. W tym przypadku interpretacja wyników jest szczególnie trudna ze względu na przyjęcie uproszczonego modelu ferromagnetyka zaniebując możliwością hybrydyzacji stref $4s$ i $3d$, nie uwzględniając niejednorodności polaryzacji $4s$ elektronów itp. Ogólnie metody badań struktury ciał stałych przy użyciu anihilacji dają wyniki zgodne z wyliczonymi z modeli lub zgodnie z wynikami badań innymi metodami (analiza widma rentgenowskiego promieniowania, wykorzystanie zjawisk magnetycznych, galwanomagnetycznych, rezonansu cyklotronowego itp.).

Trudności metod anihilacyjnych polegają na założeniu w pewnych przypadkach zbyt uproszczonego modelu anihilacji co objawia się zaniebaniem oddziaływania wielu ciał, nieznaną udziału elektronów rdzenia atomowego w procesie anihilacji, całkowitym zaniebaniem prędkości pozytonów itp.

Innym zagadnieniem jest skończona zdolność rozdzielcza aparatury i wydajność procesu, w tym jednak przypadku stosowanie skończonych [29] lub punktowych szczelin (przy dużych aktywnościach źródła β) wpływa znacznie na poprawę zdolności rozdzielczej aparatu-

ry, a tym samym na dokładniejszą obserwację zjawisk zachodzących w materii.

Wpłynęło do Redakcji 28.3.71 r.

LITERATURA

- [1] DIRAC P.A.N. - Proc. Combr. Phil. Soc. 26, 361 (1930).
- [2] DE BENEDETTI S., RICHINGS H.J. - Phys. Rev. 85, 377 (1952).
- [3] BELL R.E., GRAHAM R.L. - Phys. Rev. 90, 644 (1953).
- [4] WŁASOW N.A. - Dokłady Akad. Nauk 59, 879 (1948).
- [5] LEE-WHITING G.E. - Phys. Rev. 97, 1557 (1955).
- [6] GOLDANSKIJ W.I. - Fiziczeskaja chimia pozitrona i pozitroni-
ja, Moskwa 1968.
- [7] KRIWOGŁAZ M. - Fizika metali i metalożiwied. 7, 151 (1959).
- [8] DEHTJAR J. - Czech. Journal Phys. B 18 (1968).
- [9] MIJNAREND S.P.E. - Journal of Appl. Phys. 40, 6 (1969).
- [10] WOLKENSZTAJN N.W. - Żurnał Eksper. i Teoret. Fiz. 58, nr 5
(1970).
- [11] MIJNAREND S.P.E. - Phys. Rev. 178, nr 2, 622 (1969).
- [12] DEHTJAR J. - Dokł. Akad. Nauk 133, 60 (1960).
- [13] DEHTJAR J. - Dokł. Akad. Nauk 140, 1293 (1962).
- [14] FUJIIWARA R., SUEOKA O. - Journal Phys. Soc. Japan 21, 1947
(1966).
- [15] DEHTJAR J., MICHALENKO W.S. - Dokł. Akad. Nauk SSSR, 133, 60
(1960).
- [16] DEHTJAR J., MICHALENKO W.S. - Dokł. Akad. Nauk SSSR, 140, 1293
(1961).
- [17] NELNGAILIS J. - Ph. D. Thesis, Carnegie Institute of Technolo-
gy, 1965.
- [18] ROZENFELD B. - Acta Phyd. Polon. 31, 197 (1967).
- [19] STEWART A.T. - Canad. J. Phys. 35, 168 (1957).
- [20] ŚWIĄTKOWSKI W. - Wiadomości chemiczne, 5 (1967).
- [21] DEHTJAR J. - Woprosy fiziki metali, 13 70 (1961).

- [22] DEHTJAR J. - Woprosy fiziki metalałow, 17 50 (1963).
 [23] CARBOTTE J.P., ARORA H.L. - Canad. J. Phys. 45 387 (1967).
 [24] DEHTJAR J. - Fizika Twiord. Tieka - 12 2 (1970).
 [25] Ukrain. Fiz. Zb. USSR, 14, 9, 1409 (1969).
 [26] ADAMIENKO A.A. - Dokł. Akad. Nauk. SSSR, 181, 1, 68 (1968).
 [27] ADAMIENKO A.A. - Dokł. Akad. Nauk SSSR, 173 6, 1291 (1967).
 [28] DEHTJAR J. - Dokł. Akad. Nauk SSSR 174 4 (1967).
 [29] MIJNARENS P.E. - J.Appl. Phys. (USA) 40, 7. 3027 (1967).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЁРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ
 ЭЛЕКТРОННО-ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛАЦИИ

Р е з ю м е

В статье указано процесс электронно-позитронной аннигиляции в котором подчеркнута роль углового распределения аннигиляционных γ -квантов.

Представлено направления исследований твёрдого тела при использовании выше указанного процесса а также обсуждено главные проблемы возникающие при измерениях и интерпретации результатов опыта.

INVESTIGATION OF SOLIDS BY ELECTRON-POSITRON ANNIHILATION

S u m m a r y

Electron-positron annihilation was discussed with particular reference to angular distribution of two-photon annihilation radiation. Studies of solids using this method and main problems encountered during the measurements and their interpretation were described.