

ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ ЭЛЕКТРОНА С ПОМОЩЬЮ УЗКОЙ КОМПОНЕНТЫ ПИКА АННИГИЛЯЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.И.Иванов¹, Ц.Вылов, В.М.Горожанкин, Н.А.Лебедев,
В.Н.Покровский, И.А.Простаков², И.Ф.Учеваткин¹

С помощью Ge(Li)-детектора при фазовом переходе вода — лед надежно выделена узкая компонента аннигиляционного излучения, соответствующая аннигиляции термализованного пара-позитрония. В отличие от подхода, общепринятого в исследованиях доплеровского уширения аннигиляционной линии, источник ^{22}Na был растворен в объеме аннигилятора, а пик узкой компоненты получался как разность аннигиляционных спектров льда и воды. В шкале энергетических нормалей гамма-квантов $E_{\gamma 4118}({}^{198}\text{Hg}) = 411,8044(11)$ кэВ измерена энергия узкой компоненты и определено значение массы покоя электрона $m_0 c^2 = 511,003 \pm 0,005$ кэВ. Погрешность полученного значения, в основном, обусловлена систематической ошибкой, связанной с неточностью используемых реперов. Измерение времени жизни позитронов в чистом льду и во льду с растворенным источником обнаружило в последнем случае заметное нарастание интенсивности "короткой" и "длинной" компонент соответственно с 20% до 26% и с 1,5% до 9%.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Measurement of Electron Mass by Means of Narrow Component of Annihilation Radiation Peak

A.I.Ivanov et al.

Under "ice-water" phase transition the narrow component of annihilation radiation has been reliably separated with Ge(Li)-detector. This component corresponds to the thermolized para-positronium annihilation. In contrast to common approach used in investigations of Doppler extension of annihilation line, the ^{22}Na source was dissolved in annihilation volume. A narrow component peak was obtained as a difference of an ice and water annihilation spectra. The energy of narrow

¹Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии
им. Д.И.Менделеева, Ленинград

²Московский инженерно-физический институт

component peak has been measured within the energy of gamma-standards which have primary scale $E_{\gamma 411.8(^{198}\text{Hg})} = 411.8044 \pm \pm 0.005$ keV. Electron rest mass has been determined as $m_0 c^2 = = 511.003 \pm 0.005$ keV. The error of obtained value mainly corresponds to uncertainties of the used reference marks. The positron lifetime measurement in clear ice and in ice with dissolved source has shown that the intensities of "short" and "long" components increase in the last case from 20 % upto 26 % and from 1.5 % upto 9 % , respectively.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, энергия квантов, испускаемых при аннигиляции покоящегося парапозитрония, целиком определяется фундаментальными константами и составляет

$$E_{\gamma \pm} = m_e c^2 - m_e v^4 / 8 \hbar^2 = m_e c^2 (1 - \alpha^2 / 8) . \quad (1)$$

Поскольку поправочный член крайне мал, можно с достаточной степенью точности записать

$$E_{\gamma \pm} = m_e c^2 - 3,4 \text{ эВ} . \quad (2)$$

Использовать соотношения (1) или (2), вообще говоря, возможно в двух направлениях: либо для установления естественной нормы энергии γ -квантов, если считать фундаментальные константы известными, либо же для определения массы электрона $m_e c^2$ путем измерения положения аннигиляционного пика в некоторой хорошо установленной энергетической шкале (см., например, ^{1, 2/})

Однако при обычных условиях в силу сложности механизма взаимодействия позитронов с веществом пик аннигиляции уширится и приобретает сложную форму, состоящую из нескольких компонент. Наиболее наглядный путь преодоления этих затруднений состоит, по-видимому, в выделении так называемой узкой компоненты аннигиляционного пика в системе вода — лед ^{3, 4/}. Как показали детальные исследования ^{5/} угловых корреляций в этой системе при различных температурах, в общем случае угловое распределение состоит из трех компонент.

а) Широкая (энергетическая ширина на половине высоты достигает 2,5 кэВ) компонента присутствует как в воде, так и во льду с интенсивностью $\sim 90\%$, слабо зависящей от температуры.

б) Промежуточная компонента с шириной около 0,9 кэВ также видна в воде и во льду, но ее интенсивность убывает с уменьшением температуры после перехода воды в лед.

в) Узкая компонента с пренебрежимо малой собственной шириной появляется за счет убывания промежуточной компоненты, а ее характеристики при температуре ниже -25°C отвечают аннигиляции термолизованного позитрония; при -117°C , например, средняя энергия позитрония составляет 0,021 эВ.

Заметим, что результаты фитирования полного аннигиляционного пика в системе вода — лед, полученные в работе^{/6/}, могут рассматриваться как непротиворечащие этому описанию.

Таким образом, разность аннигиляционных спектров льда и воды должна обнаружить узкую компоненту на небольшом отрицательном фоне, обусловленном изменением интенсивности промежуточной компоненты, причем ее ширина равна собственному разрешению спектрометра, а энергия задается соотношением (1).

По указанной схеме был поставлен один эксперимент^{/7/}. Фактически в нем при помощи бета-спектрометра находилась малая разность энергий фотоэлектронов, вырванных узкой компонентой из К-оболочки урана, и излучением $\gamma_{411,8}$ ^{198}Hg из L₃-подоболочки урана. При современных значениях энергий связи электронов в атоме урана, а также в принятой ныне шкале энергий, в которой^{/8/}

$$E(\gamma_{411,8} \text{ } ^{198}\text{Hg}) = 411,8044(11) \text{ кэВ}, \quad (3)$$

результат^{/7/} можно выразить следующим образом: энергия узкой компоненты

$$E_{\gamma \pm} = 511,010(7) \text{ кэВ}, \quad (4)$$

в то время как ожидаемое значение составляет

$$E_{\gamma \pm} = 511,0000(14) \text{ кэВ}. \quad (5)$$

За истекшие 20 лет не появлялось сообщений о наблюдении узкой компоненты в "разностной" постановке опыта, что, как очевидно, свидетельствует о трудности задачи. В этой связи мы попытались осуществить подобный эксперимент и измерить энергию узкой компоненты аннигиляционного пика в шкале (3) с помощью спектрометра с полупроводниковым детектором.

Отметим, прежде всего, что подобный спектрометр несколько уступает по разрешению прибору^{/7/}, но допускает многоканальную регистрацию, а это обстоятельство может оказаться существенным при изучении эффектов, в которых определяющую роль играет форма линии. Далее, в области энергий около 500 кэВ с помощью современной спектроскопической техники возможно достичь точности измерений энергии квантов, сопоставимой с погрешностями энергетических нормалей, т.е. порядка нескольких эВ.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Как говорилось выше, мы избрали "разностную" схему постановки опыта. В качестве аннигилятора использовалась дважды дистиллированная вода с удельной электропроводностью $\sim 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$, помещенная в цилиндрический контейнер из нержавеющей стали диаметром 20 мм и высотой 30 мм. Для быстрого замораживания к контейнеру подводился жидкий азот. Температура аннигилятора могла меняться от $+20^{\circ} \text{C}$ до -160°C и контролировалась термопарой.

Источником позитронов являлся нуклид ^{22}Na в форме NaCl с активностью около 0,2 мКи. Первоначально мы использовали квазиточечный источник, полученный выпариванием и находившийся между двумя тонкими тефлоновыми пленками. Такой источник помещался в центре контейнера, как бы между двумя полуцилиндрами воды или льда. При таком общепринятом подходе нам не удалось надежно выделить узкую компоненту аннигиляционного излучения в разностном спектре низкотемпературного льда и воды. Гораздо более эффективным оказалось прямое растворение ^{22}Na в воде аннигилятора.

Спектры γ -квантов изучались с помощью Ge(Li) -детектора объемом $200 \text{ мм}^2 \times 5 \text{ мм}$, энергетическое разрешение которого в области 511 кэВ (^{106}Ru) составляло 0,95 кэВ. Для более детального анализа формы аннигиляционной линии исследуемый диапазон энергий 476-570 кэВ был растянут на 1200 каналов. Энергетическая градуировка спектрометра (парабола) проводилась с помощью нуклидов.

$$^7\text{Be}, \quad E_{\gamma} = 477,6064(26) \text{ кэВ} \quad /9/$$

$$^{106}\text{Ru}, \quad E_{\gamma} = 511,8605(31) \text{ кэВ} \quad /10/$$

$$^{207}\text{Bi}, \quad E_{\gamma} = 567,703(3) \text{ кэВ} \quad /11/$$

Во избежание систематических ошибок из-за различных телесных углов, обусловленных конечными размерами аннигилятора, калибровочные источники равномерно распределялись на его боковой поверхности. Хорошее качество детектора позволяло вполне удовлетворительно описывать форму линии в виде одиночного гауссиана. Возможная при этом систематическая погрешность калибровки невелика и практически постоянна в рассматриваемом узком диапазоне энергий.

Аннигиляционный спектр воды при 20°C вместе с "боковыми" реперами ^7Be и ^{207}Bi снимался в течение 10 ч, так что в аннигиляционном пике накапливалось около $3 \cdot 10^6$ импульсов (см. рис. 1а). Затем проводилось быстрое замораживание до

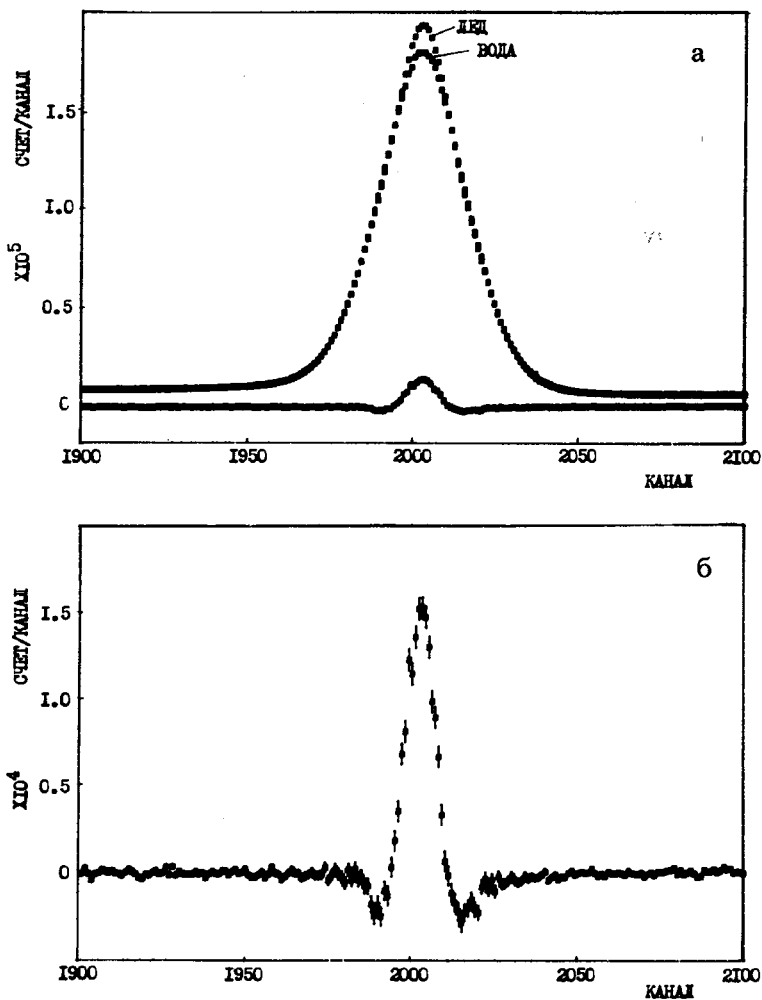


Рис. 1

-160°C , и вновь снимался спектр в течение того же живого времени. Далее проводилось оттаивание аннигилятора и цикл повторялся.

Долговременная нестабильность аппаратуры приводила к тому, что положение пиков в последовательно снятых спектрах вода — лед несколько смещалось. Однако это смещение не превышало 1 канала и, что особенно важно, расстояние между реперами (цена канала) сохранялось неизменным. Поэтому для построения разностного спектра лед — вода было достаточно сдвинуть (естественно, с учетом нелинейности) спектр воды. Подобный сдвиг осуществлялся по экспериментальным точкам, без каких бы то ни было предположений о форме линии, с помощью 5-точечной интерполяционной формулы Лагранжа. Один из полученных нами раз-

ностных спектров изображен на рис. 16. Отчетливо видна узкая компонента аннигиляционного пика на отрицательном симметричном фоне. Заметим, что учет нелинейности при совмещении спектров приводит к заметному искажению симметрии отрицательной части. Отметим также, что при правильно выполненной процедуре сдвига полученные разности в области реперных линий не носят систематического характера.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для обработки полученного разностного спектра узкая компонента представлялась в виде гауссиана, а отрицательная часть — в виде параболы. Энергетическая ширина гауссиана на полувысоте составила $\sim 0,9$ кэВ, что совпадает с собственным разрешением спектрометра. Ширина же параболической компоненты на полувысоте составила $1,3$ кэВ, а по основанию — около $2,6$ кэВ. Подобные характеристики, с учетом собственного разрешения спектрометра, не противоречат предположению о том, что эти компоненты обусловлены аннигиляцией термализованного позитрония и позитрония со средней энергией $1,3$ эВ соответственно.

Энергия узкой компоненты определялась с помощью градуировки, задававшей положениями "боковых" реперов, которые снимались одновременно с аннигиляционным спектром льда. Поправка на нелинейность, найденная по измерениям с тремя реперами, вводилась после объединения оценок энергии; эта процедура была близка к описанной ранее /12/.

Суммарный результат восьми измерений узкой компоненты может быть представлен в виде

$$E_{\gamma \pm} = 510,999(5) \text{ кэВ.} \quad (6)$$

Точность этого результата определяется в основном систематической ошибкой, обусловленной погрешностями в измерениях энергии реперов.

Как видно, полученное значение $E_{\gamma \pm}$, вообще говоря, не противоречащее значению (4), ближе к ожидаемому значению (5). Иными словами, на основании (6) можем записать

$$m_e c^2 = 511,003(5) \text{ кэВ,} \quad (7)$$

в то время как принятое в /2/ значение составляет

$$m_e c^2 = 511,0034(14) \text{ кэВ.} \quad (8)$$

Попытка описать весь аннигиляционный пик одним гауссианом приводит к таким оценкам энергии этого пика:

$$E(\gamma^\pm \text{ вода}) = 510,982(5) \text{ кэВ},$$

$$E(\gamma^\pm \text{ лед, } -160^\circ \text{ C}) = 510,985(5) \text{ кэВ},$$

которые значимо отличаются от энергии узкой компоненты (6). Подобным подходом нецелесообразно пользоваться в метрологических целях, поскольку получаемые при этом оценки могут заметно зависеть от условий аннигиляции позитронов.

4. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Дополнительным источником информации, в принципе, могущей пролить свет на механизм взаимодействия, являются измерения времени жизни позитронов в веществе. Хорошее согласие с измеренными спектрами достигается обычно (см., например, ^{13/}) их разложением на три компоненты. Так, для воды при +20 °C были найдены компоненты с временем жизни 0,22 (2); 0,46 (2); 1,86 (2) нс и интенсивностями около 25, 48 и 27% соответственно, тогда как для льда при -160 °C времена жизни составляли около 0,12; 0,6 и 1 нс, интенсивность промежуточной компоненты возросла примерно до 78%, а длинной — упала до 1,5%. Казалось бы, заманчиво связать эти компоненты с аннигиляцией парапозитрония, свободных позитронов и ортопозитрония, однако такая простая интерпретация наталкивается на ряд трудностей, связанных со значением времен жизни и их относительных интенсивностей (подробнее см. ^{13/}).

На установке для временных измерений с разрешением 0,260 нс и ценой канала 0,0256 нс мы изучили спектры позитронов в воде (при 20 °C) и во льду (при -160 °C) с растворенным источником. Фитирование с тремя компонентами при помощи программы POSITRONFIT ^{14/} дало следующие результаты. Для воды: $\tau_1 = 0,30(1)$ нс, $I_1 = 54(4)\%$; $\tau_2 = 0,66(8)$ нс, $I_2 = 24(3)\%$; $\tau_3 = 2,11(9)$ нс, $I_3 = 22(1,4)\%$, тогда как для льда $\tau_1 = 0,18(1)$ нс, $I_1 = 26(2)\%$; $\tau_2 = 0,55(2)$ нс, $I_2 = 65(2)\%$; $\tau_3 = 1,12(14)$ нс, $I_3 = 9(4)\%$. Отметим, что значение χ^2 в обоих случаях составляло около 460 при 422 степенях свободы.

Сравнение полученных результатов между собой и с литературными данными не позволяет, к сожалению, сделать однозначных выводов о механизмах появления узкой компоненты во льду или улучшения условий ее наблюдения при растворении источника.

Наиболее существенным изменением при переходе от чистого льда ко льду с примесями является увеличение интенсивностей

"длинной" и "короткой" компонент: I_3 — с 1,5% до 9% и I_1 — с 20% до 26%.

Увеличение I_3 отмечалось также в работе /14/, где оно было приписано захвату ортопозитрония в ловушки, образованные примесями. Заметим, что, согласно результатам работы /15/, наличие микропримесей во льду приводит к незначительному уширению узкой компоненты, однако авторы отмечают, что им не удалось получить ясных доказательств изменения числа образующихся парапозитрониев под действием микропримесей.

Увеличение I_1 может быть связано с улучшением условий термализации парапозитрония в растворенном источнике, что должно привести к увеличению интенсивности узкой компоненты. Впрочем, более детальное рассмотрение этих вопросов выходит далеко за рамки настоящей работы.

В заключение авторы выражают благодарность проф. К.Я.Громову за постоянный интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джелепов Б.С., Шестопалова С.А. *Ядерно-спектрометрические нормалы*. М., Атомиздат, 1980.
2. *Квантовая метрология и фундаментальные константы*. М., Мир, 1981.
3. Colombino P. et al. — *Nuovo Cim.*, 1958, v.8, p.508.
4. De Zafra R.L. et al. — *Phys.Rev.*, 1958, v.112, p.19.
5. Colombino P. et al. — *Nuovo Cim.*, 1965, v.38, p.707.
6. Fransson K. et al. — *Nucl.Instr.Meth.*, 1976, v.138, p.479.
7. Murray G. et al. — *Nucl.Phys.*, 1963, v.45, p.77.
8. Kessler E.G. et al. — *Phys.Rev.Lett.*, 1978, v.140, p.171.
9. Kumahoru H. et al. — *Nucl.Instr.Meth.*, 1983, v.206, p.489.
10. Shizuma K. et al. — *Nucl.Instr.Meth.*, 1976, v.137, p.599.
11. Горожанкин В.М. и др. *Сообщение ОИЯИ, Р6-85-268, Дубна, 1985.*
12. Вылов Ц. и др. — *ЭЧАЯ*, 1978, т.8, с.1350.
13. Eldrup H. et al. — *J.Chem.Phys.*, 1972, v.57, p.495.
14. Kirkegaard K., Eldrup M. — *Comp.Phys.Com.*, 1974, v.7, p.401.
15. Milosevic-Kvajic M. et al. — *J.Chem.Phys.*, 1972, v.56, p.2567.

Рукопись поступила 26 ноября 1987 года.