

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

P-357

Л.Б.Егоров, А.Е.Игнатенко, Д.Чултэм

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
СВЕРХТОНКОЙ СТРУКТУРЫ
НА ПОЛЯРИЗАЦИЮ μ^- -МЕЗОНОВ
В МЕЗОАТОМАХ

ЖЭТФ, 1959, т37, в 6, с 516-523.

P - 357

Л.Б.Егоров, А.Е.Игнатенко, Д.Чултэм

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
СВЕРХТОНКОЙ СТРУКТУРЫ
НА ПОЛЯРИЗАЦИЮ μ^- -МЕЗОНОВ
В МЕЗОАТОМАХ

А н н о т а ц и я

Методом сцинтилляционных счетчиков измерены угловые распределения электронов от распада μ^- -мезонов в мезоатомах алюминия, фосфора и углерода. Сравнение результатов измерений показывает, что из-за взаимодействия сверхтонкой структуры имеет место уменьшение поляризации μ^- -мезонов. Результаты измерений не противоречат теоретическим предсказаниям при учете деполяризации только на К-орбите мезоатома. Сравнение результатов измерений для фосфора и полученных нами ранее для жидкого водорода показывает, что наблюдаемую полную деполяризацию μ^- -мезонов в водороде нельзя объяснить взаимодействием только тонкой и сверхтонкой структур; для этого необходимо привлечь дополнительный механизм. В качестве такого механизма может быть привлечен, например, механизм "перескока" μ^- -мезона от одного протона к другому с одновременным переходом в нижнее состояние сверхтонкой структуры. В предположении о том, что в мезоатомах металлов отсутствует влияние электронной оболочки на деполяризацию μ^- -мезонов, результаты расчетов Шмушкевича, Джрбашяна, Долинского и Юберала объясняют все экспериментальные данные по исследованию деполяризации μ^- -мезонов в различных веществах. Проведенные исследования механизма деполяризации μ^- -мезонов в различных веществах экспериментально подтверждают факт наличия в мезоатомах явлений тонкой и сверхтонкой структур. Наличие явлений тонкой и сверхтонкой структур в μ^- -мезоатомах еще раз указывает на сходство электромагнитных свойств у μ^- -мезона и электрона.

1. В в е д е н и е

Измерения^{/1/} степени поляризации μ^- -мезонов в веществах, у которых ядерные спины равны нулю, показывают, что в различных мезоатомах в пределах ошибок опыта поляризации одинакова и составляет $\sim 17\%$. Результаты измерений были качественно интерпретированы следующим образом: основными механизмами деполаризации мезонов в таких веществах являются спин-орбитальное взаимодействие и взаимодействие магнитных полей электронной оболочки атома и μ^- -мезона за время его жизни на К-орбите. Теоретическое рассмотрение процессов деполаризации μ^- -мезонов в различных веществах было сделано в работах Роуза^{/2/}, Джрбашяна^{/3/}, Шмушкевича^{/4/}, Долинского^{/5/} и Юбераля^{/6/}. Следует отметить, что результаты работ этих авторов количественно находятся в противоречии друг с другом. Действительно, рассмотрим вначале результаты расчетов деполаризации μ^- -мезонов в веществах с ядерными спинами равными нулю. Рассмотрение Роуза деполаризации только из-за спин-орбитального взаимодействия при каскадных переходах показывает, что среднее значение степени поляризации μ^- -мезона на К-оболочке должно быть равно $\sim 50\%$. Это значение не согласуется с экспериментальными данными^{/1/}. Аналогичные вычисления Шмушкевича, а также Джрбашяна дают для этой величины значение $\sim 17\%$, что хорошо согласуется с результатами измерений^{/1/}. Учет Джрбашяном дополнительной деполаризации в поле электронной оболочки, например, для атомов углерода, экранированных μ^- -мезонами, дает уменьшение степени поляризации на К-оболочке до $\sim 9\%$. Тот факт, что это значение противоречит экспериментальным данным, заставляет Джрбашяна сделать предположение о том, что в конденсированном веществе влияние соседних атомов и электронов приводит к компенсации магнитного момента электронной оболочки. Сравнение результатов расчетов Роуза с экспериментальными данными говорит в пользу того, что компенсация магнитного момента электронной оболочки не происходит, и, по-видимому, имеет место дополнительная деполаризация.

Рассмотрим теперь результаты расчетов деполаризации μ^- -мезонов в веществах с отличными от нуля ядерными спинами. Для таких веществ, в дополнение к вышеуказанным механизмам, имеется механизм деполаризации из-за взаимодействия сверхтонкой структуры. Теоретическое рассмотрение

этого механизма было произведено в работах Роуза, Долинского, а также Юбералья. Согласно Роузу, для веществ, у которых ядерный спин равен, например, $1/2$, уменьшение поляризации должно произойти в 3 раза, по расчетам Долинского и Юбералья - в 2 раза.

Как видно из вышеизложенного, в настоящее время явление деполяризации μ^- -мезонов в различных веществах с количественной стороны остается невыясненным. Мы решили поставить ряд опытов с целью изучить влияние сверхтонкой структуры и электронной оболочки на деполяризацию μ^- -мезонов. Изучение деполяризации μ^- -мезонов в веществах с отличными от нуля ядерными спинами важно также для выяснения возможностей постановки опытов по исследованию эффектов сверхтонкой структуры, проявляющихся при захвате поляризованных μ^- -мезонов^{16,71}. В настоящей статье будут изложены в основном результаты исследования влияния сверхтонкой структуры на деполяризацию μ^- -мезонов в различных мезоатомах.

2. Основные теоретические представления

Взаимодействие сверхтонкой структуры будет оказывать влияние на поляризацию μ^- -мезонов, как в основном, так и в возбужденных состояниях мезоатомов. В этом нетрудно убедиться, если сравнить время нахождения $\tau_{ж}$ μ^- -мезона на нижних уровнях со временем τ , необходимым для поворота спина μ^- -мезона под действием поля ядра.

Оказывается, что τ много меньше $\tau_{ж}$ ^{15/}. Обозначим через P_0 степень поляризации μ^- -мезона в начальный момент его "посадки" на К-орбиту. Согласно^{15,8/}, степень поляризации μ^- -мезона, находящегося на К-оболочке, усредненная по двум состояниям сверхтонкой структуры будет равна:

$$P = P_0 \cdot \frac{1}{3} \left[1 + \frac{2}{(2J+1)^2} \right], \quad (11)$$

где J - спин ядра.

Из этой формулы видно, что величина поляризации μ^- -мезонов в момент распада или захвата ядром, зависит от спина ядра. Так, например, для ядер с $J = 1/2$ уменьшение поляризации будет происходить в два раза; для ядер с $J \gg 1$ - в три раза. Заметим, что ввиду сохранения спина системы ядро - μ^- -мезон, неполяризованное вначале ядро приобретает при этом степень

поляризации P_g , равную $P_g = \frac{4}{3} P \frac{J+1}{(2J+1)^2}$. Детальный учет деполяризации за счет сверхтонкой структуры в возбужденных состояниях мезоатома был произведен в работе Роуза. Например, для веществ, у которых ядерный спин равен $1/2$, полное уменьшение поляризации из-за взаимодействия сверхтонкой структуры в основном и возбужденных состояниях должно произойти в 3 раза.

Необходимо также отметить, что при остановке μ^- -мезонов в веществах с ядерным спином отличным от нуля будут образовываться мезоатомы в двух состояниях сверхтонкой структуры с $F = J \pm \frac{1}{2}$. Сверхтонкое расщепление в основном состоянии мезоатома гораздо больше, чем $\frac{h}{2I}$, где τ' - время жизни μ^- -мезона. Поэтому состояния с $F = J + \frac{1}{2}$ и $F = J - \frac{1}{2}$ образуют некогерентную смесь^{17/}. Каждое состояние будет характеризоваться своим значением g -величины гиромангнитного отношения. Так, выражения для g имеют следующий вид^{16/}

$$g_+ = \frac{1}{J + \frac{1}{2}} (\mu_{\mu} + \mu_N) \quad 12/$$

$$g_- = -\frac{1}{J + \frac{1}{2}} (\mu_{\mu} - \frac{J+1}{J} \mu_N), \quad 13/$$

где μ_{μ} и μ_N - магнитные моменты μ^- -мезона и ядра, соответственно.

Если для измерения поляризации μ^- -мезонов использовать метод измерения асимметрии электронов распада^{18/}, то кривая прецессии, наблюдаемая на опыте, будет являться суперпозицией кривых прецессии μ^- -мезонов, распадающихся из обоих состояний сверхтонкой структуры. Вполне очевидно, что чем больше значение спина ядра, тем труднее будет интерпретировать такую кривую.

В качестве объектов для исследования были выбраны углерод, алюминий и фосфор. Углерод, ядра которого имеют спин равный нулю, был использован для контрольных опытов. Алюминий и фосфор были взяты для исследования эффектов сверхтонкой структуры по следующим соображениям. Во-первых, ядра Al и P сильно отличаются значением спина: для алюминия $J = 5/2$, для фосфора $J = 1/2$. Следовательно, легче будет проверять теоретические предсказания. Во-вторых, при образовании мезоатомов происхо-

дит перестройка электронной оболочки. Поэтому, если даже вначале спин электронной оболочки атома был равен нулю, электронная оболочка мезоатома может обладать спином. Наличие магнитного момента у электронной оболочки мезоатома может привести к дополнительной деполяризации μ^- -мезонов на К-орбите, так как время переориентации спина μ^- -мезона под действием магнитного поля H электронной оболочки $\tau \sim \frac{\hbar}{\mu H} \sim 10^{-10}$ сек, меньше времени жизни μ^- -мезона. Можно ожидать, что для атомов Ar и P , экранированных μ^- -мезоном, электронная оболочка будет одинаковой, а именно, замкнутой. Поэтому, в случае Ar и P можно будет изучать эффект сверхтонкой структуры в "чистом" виде. И, наконец, Телегди была высказана /9/ мысль о том, что наблюдаемая в работе /10/ полная деполяризация μ^- -мезонов в жидком водороде может быть в принципе связана с явлениями только тонкой и сверхтонкой структур. Опыт с фосфором поможет дать ответ и на этот вопрос. Действительно, ядра фосфора и водорода имеют одинаковые значения спина, а деполяризация из-за действия электронной оболочки в этих мезоатомах будет отсутствовать. Следовательно, должен быть одинаковым и эффект сверхтонкой структуры.

3. Эксперимент

Поляризация μ^- -мезонов исследовалась путем измерения анизотропии в угловом распределении электронов распада. Использовалась та же экспериментальная установка, что и в ранее опубликованных работах /10, 11/ см. рис.1/. Такими же были и условия опытов, за исключением электронной аппаратуры. В данных опытах, электронная схема работала следующим образом. В опытах с P и Ar импульс от μ^- -мезонов со схемы антисовпадений 1+2-3, задержанный на 0,1 μ сек открывал схему пропускания /"ворота"/ на время 0,5 μ сек. Через "ворота" проходили импульсы от электронов распада со схемы антисовпадений 3+4-2. В опытах с углеродом задержка равнялась 0,25 μ сек, а продолжительность "ворот" - 2 μ сек. Коэффициент асимметрии a в угловом распределении электронов распада $I(\theta) = 1 + a \cos \theta$ был определен от величины напряженности магнитного поля H , в котором находилась мишень. Область изменения напряженности магнитного поля соответствовала рассчитанной по величинам g на основании формул /2/ и /3/. В качестве мишени для фос-

фора использовался пресованный порошок красного фосфора.

Полученные значения величин a_0 -коэффициентов асимметрии для всего интегрального спектра даны в третьем столбце таблицы.

Таблица

Вещество	f	$- a_0$
Углерод	0	$0,045 \pm 0,005$
Фосфор	1/2	$0,025 \pm 0,005$
Алюминий	5/2	$0,007 \pm 0,007$
Водород	1/2	$0,005 \pm 0,005$

В приведенные величины a_0 были введены поправки, учитывающие время задержки, ширину "ворот", распад μ^- -мезонов и телесный угол детектора электронов. Указанные ошибки являются стандартными статистическими отклонениями. В таблице также дано значение a_0 для жидкого водорода, полученное нами ^{/10/} из результатов измерения числа электронов в максимуме и минимуме ожидаемой кривой прецессии.

4. Обсуждение полученных результатов

Для углерода величина a_0 , измеренная в данной работе в пределах ошибок совпадает с величиной, измеренной в ранее опубликованной работе ^{/1/}. В опытах с фосфором действительно наблюдалась прецессия мезоатомов, мезоядро /система мезон+ядро/ которых находится в состоянии $f = 1$. Этот факт прямо говорит в пользу того, что в таких мезоатомах существует спиновая связь между μ^- -мезоном и ядром, т.е. сверхтонкая структура. В опытах с алюминием не было обнаружено зависимости скорости счета электронов от тока намагничивающей катушки. Вследствие того, что наблюдаемая на опыте кривая прецессии является суперпозицией кривых прецессии μ^- -мезонов, находящихся в различных состояниях сверхтонкой структуры, интерпретировать полученную кривую оказалось невозможным. При-

веденная в таблице величина a_0 для алюминия является средней по двум состояниям сверхтонкой структуры.

Произведем сравнение измеренных величин с предсказанными теоретически. Зная величины a_0 , можно определить^{/1/} степень поляризации μ^- -мезонов, например, путем сравнения с асимметрией, наблюдаемой в распаде μ^+ -мезонов, если предположить, что μ^- -распад инвариантен по отношению к совместному преобразованию инверсии пространственных координат и зарядового сопряжения. При выполнении этого требования легко показать, что имеет место соотношение $\frac{a_-}{P_-} = \frac{a_+}{P_+} \dots (4)$, где P_+ и P_- - означают степени поляризации, a_+ и a_- - коэффициенты асимметрии в проинтегрированных по энергии позитронов /электронов/ угловых распределениях $1 + a_{\pm} \cos \theta$ для μ^+ и μ^- -мезонов, соответственно. Из соотношения /4/ видно, что при сравнении поляризаций μ^- -мезонов в различных мезоатомах можно сравнивать величины a_0 . Как указывалось в § 1, сравнение результатов расчетов Роуза с экспериментальными данными^{/1/} говорит в пользу того, что должно иметь место уменьшение поляризации μ^- -мезонов из-за действия электронной оболочки в три раза. Такое уменьшение поляризации по Роузу должно произойти и из-за взаимодействия сверхтонкой структуры для веществ с $J = 1/2$. Следовательно, с учетом влияния электронной оболочки в мезоатомах углерода и фосфора величины a_0 должны быть одинаковыми, т.е. $a_C = a_P$. При отсутствии влияния электронной оболочки согласно теоретическим предсказаниям Долинского и Юберала между величинами a_0 для углерода, фосфора и алюминия должны быть следующие соотношения: $a_P = 1/2 a_C$ и $a_{Al} = 1/3 a_C$; согласно Роузу $a_P = 1/3 a_C$.

Телегди^{/9/} была высказана мысль о том, что наблюдаемая полная деполаризация μ^- -мезонов в жидком водороде^{/10/} может быть объяснена взаимодействием только тонкой и сверхтонкой структур. Если это так, то по причинам, указанным в § 2, для фосфора и водорода должны быть одинаковые значения величин a_0 , т.е. $a_P = a_H$.

Выясним теперь вопрос о том в каком соответствии с теоретическими ожиданиями находятся соответствующие соотношения между измеренными величинами a_0 . Используя нормальный закон распределения ошибок, можно сказать, что случай $a_P = a_H$ отвергается, так как $a_H < a_P$ с вероятностью 99,5%; случай $a_{Al} = 1/3 a_C$ не противоречит эксперименту, но согласно

экспериментальным данным вероятность того, что $a_{ac} > \frac{a_c}{2}$ равна 5%, а вероятность того, что $a_{ac} < \frac{a_c}{5}$ равна 39%. Величины отношений $\frac{a_c}{a_p}$ были проанализированы по критерию χ^2 . Значения границ этого отношения с вероятностью 1% /5%/ получаются следующими:

3,7 /3,0/ ÷ /1,4/ 1,2 для случая $a_p = 1/2 a_c$
5,5 /4,5/ ÷ /2,1/ 1,8 для случая $a_p = 1/3 a_c$
и 1,8 /1,5/ ÷ /0,7/ 0,6 для случая $a_p = a_c$.

Как видно, экспериментальное значение величины $\frac{a_c}{a_p}$ согласуется в случае $a_p = 1/2 a_c$, и лежит вне 1%-границ для случаев $a_p = 1/3 a_c$ и $a_p = a_c$.

Тот факт, что измеренная величина $\frac{a_c}{a_p}$ лежит вне 1% границ для случая $a_p = a_c$, сильно указывает на то, что если образование мезоатомов всегда сопровождается перестройкой электронной оболочки исходного атома /ввиду изменения эффективного заряда ядра на единицу/, то в мезоатомах таких веществ как, например, C , Mg , Zn , Cd и Pb , по-видимому, имеет место компенсация магнитного момента электронной оболочки. Или, говоря иными словами, в этих мезоатомах, по-видимому, отсутствует спиновая связь между электронной оболочкой и π -мезоном. Вполне очевидно, что для того, чтобы этот вывод сделать более определенным необходимо исследовать непосредственно влияние электронной оболочки на поляризацию π^- -мезонов в различных мезоатомах. Для этого нужно измерить величину a_0 для веществ, помещенных в продольное магнитное поле с напряженностью, достаточной для того, чтобы разорвать связь между π^- -мезоном и электронной оболочкой.

Используя вышесказанное предположение и тот факт, что соотношения $a_p = a_c$ и $a_p = \frac{1}{3} a_c$ противоречат эксперименту, а соотношения $a_p = 1/2 a_c$ и $a_{ac} = 1/3 a_c$ не противоречат опытным данным, можно сказать, что результаты наших измерений не противоречат теоретическим предсказаниям Долинского и Юбераля, но противоречат расчетам Роуза.

Поскольку экспериментальное значение величины $\frac{a_c}{a_p}$ лежит вне 1% границ для случая $a_p = 1/3 a_c$, то можно считать, что взаимодействие сверхтонкой структуры для π -мезонов, находящихся в нижних возбужденных состояниях мезоатомов, по-видимому, является несущественным по сравнению с взаимодействием на К-орбите.

И, наконец, то, что $a_n < a_p$ с вероятностью 99,5%, говорит в пользу того, что наблюдаемую на опыте полную деполяризацию μ^- -мезонов в жидком водороде нельзя объяснить взаимодействием тонкой и сверхтонкой структур; для этого необходимо привлечь дополнительный механизм. В качестве такого механизма может быть привлечен, например, механизм перескока $^{111}\mu^-$ -мезона от одного протона к другому с одновременным переходом в нижнее состояние сверхтонкой структуры.

Таким образом, на основании вышесказанного можно заключить, что в предположении отсутствия в мезоатомах металлов влияния электронной оболочки на деполяризацию μ^- -мезонов, результаты расчетов Шмушкевича, Джрбашяна, Долинского и Юбералья объясняют все экспериментальные данные по исследованию деполяризации μ^- -мезонов в различных веществах, полученных в настоящей и ранее опубликованных работах /1,10/.

Как известно, до настоящего времени основным источником наших сведений о свойствах мезоатомов являлись опыты по исследованию рентгеновского излучения мезоатомов. Имеющиеся экспериментальные данные получены, в основном, для величин энергии уровней. Такие явления как тонкая и сверхтонкая структуры мезоатомов оставались неизученными. Это объясняется тем обстоятельством, что при существующих интенсивностях пучков μ^- -мезонов на ускорителях, и имеющихся в распоряжении экспериментаторов γ -спектрометрах, энергетическое разрешение последних является недостаточным для того, чтобы разрешить линии тонкой и, тем более, сверхтонкой структур. Проведенные исследования механизма деполяризации μ^- -мезонов в различных веществах не только подтвердили экспериментально факт наличия тонкой и сверхтонкой структур в мезоатомах, но и позволили выявить некоторые особенности этих явлений. Наличие явлений тонкой и сверхтонкой структур в μ^- -мезоатомах еще раз указывает на сходство электромагнитных свойств у μ^- -мезона и электрона.

В заключение авторы считают своим долгом поблагодарить В.П. Джелепова, Л.И. Лapidуса за обсуждение результатов работы, И.С. Шапиро, Э.И. Долинского, Л.Д. Блохинцева и А.З. Долгинова за многочисленные дискуссии и ряд ценных замечаний, С.Н. Соколова за большую помощь, оказанную при обработке экспериментальных данных, а также Юбералья за его работу, присланную нам до ее опубликования.

Л и т е р а т у р а

1. А.Е.Игнатенко, Л.Б.Егоров, Б.Халуца, Д.Чултам. ЖЭТФ, 35, 1131.1958г.
2. M.E.Rose. "Depolarization Processes for Negative Mu Mesons". Preprint Oak Ridge National Laboratory. 1958.
3. В.А.Джрбашян. ЖЭТФ, 36, 277, 1959г.
4. И.М.Шмушкевич, ЖЭТФ, 36, 646, 1959 г.
5. Э.И.Долинский. Диссертация, НИИЯФ МГУ, 1959 г.
6. H.Uberall "Hyperfine Splitting effects in the capture of polarized μ^- -mesons". Preprint Carnegie Institute of Technology. 1959.
7. Bernstein, Lee, Yang and Primakoff, Phys.Rev. III, / 313, 1958.
8. R.Garwin, L.Lederman, M.Weinrich, Phys.Rev. 105, 1415, 1957.
9. V.Telegdi, Proceedings of 1958 Annual International Conference on High Energy Physics at CERN. p.250.
10. А.Е.Игнатенко, Л.Б.Егоров, Б.Халуца, Д.Чултам, ЖЭТФ, 35, 894, 1958г.
11. С.Г.Герштейн. ЖЭТФ, 34, 463, 1958 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 мая 1959 года.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

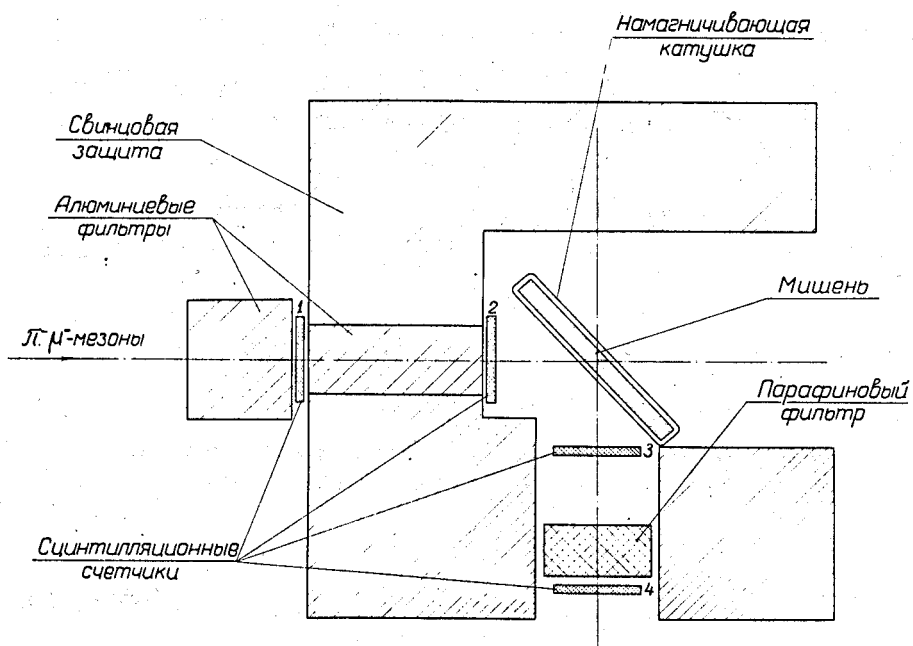


Рис. 1. Схема опыта.