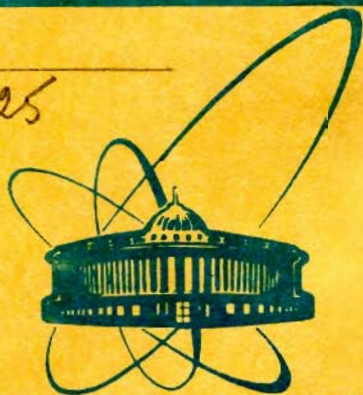


E-25



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

5363 / 2-79

24/12-79

P1 - 12647

В.С.Евсеев, Т.Н.Мамедов, В.С.Роганов,
М.В.Фронтасьева

НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА ПАШЕН-БАКА
В МЮОННЫХ АТОМАХ

1979

P1 - 12647

В.С.Евсеев, Т.Н.Мамедов, В.С.Роганов,
М.В.Фронтасьева

НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА ПАШЕН-БАКА
В МЮОННЫХ АТОМАХ

Наблюдение эффекта Пашен-Бака в мюонных атомах

Впервые экспериментально наблюдался эффект Пашен-Бака в мезоатомах углерода и кислорода при измерениях в продольных магнитных полях.

Определены значения внутреннего магнитного поля H_0 , создаваемого неспаренными электронами мезоатома или молекулы, на мезоне, находящемся в $1s$ -состоянии: для воды $H_0 = 3,0 \pm 1,2$ кЭ, для стирола $0,25 \pm 0,05$ кЭ, для дифенила $0,38 \pm 0,19$ кЭ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Observation of the Paschen-Back Effect
in Muonic Atoms

The Paschen-Back effect is experimentally observed for the first time in carbon and oxygen mesonic atoms in longitudinal magnetic field measurements. The value of the inner magnetic field H_0 made by unpaired electrons of the mesonic atom or molecular it belongs to, influencing the meson in the $1S$ state of mesonic nitrogen and mesonic boron in investigated compounds (water, diphenyl and styrene) is obtained. The detailed measurements of the residual polarization versus the values of the longitudinal magnetic field open prospects to study electron shell state in free mesonic atoms and paramagnetic molecules.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Ранее нами было показано^{/1/} что величина остаточной поляризации отрицательных мюонов в элементах, входящих в состав различных химических соединений, как правило, не достигает предельных значений, определяемых поляризацией в конце мезоатомного каскада. В качестве предельного значения поляризации в конце каскада можно принять экспериментальные величины, полученные для металлического /проводящего/ состояния данного элемента. Так, для мезоатомов, образующихся в углеводородах и имеющих электронную оболочку как у атомарного бора /принятый нами химический символ μB /, за величину остаточной поляризации в конце каскада можно использовать значение, измеренное на графите. Если для исследуемого атома невозможно получить металлическое состояние /например, для кислорода/, то можно взять в качестве предельного интерполированное значение поляризации, поскольку известна эмпирическая плавная зависимость остаточной поляризации в металлах от атомного номера элемента^{/2/}.

Данные для металлов можно считать предельно большими потому, что в них отсутствуют те дополнительные механизмы деполяризации, которые проявляются после завершения мезоатомного каскада и восстановления электронной оболочки мезоатома. Условия для дополнительной деполяризации в химических же соединениях создаются за счет магнитного взаимодействия между спином мюона и моментом парамагнитной электронной оболочки свободного мезоатома. Прекращение этой деполяризации зависит от скорости вступления мезоатома в химические реакции с образованием диамагнитных продуктов. Однако, если даже скорость реакции столь велика, что этот механизм деполяризации не срабатывает до вступления мезоатома в химические реакции, в результате химических реакций могут образоваться

и парамагнитные продукты. В парамагнитных продуктах из-за сверхтонкого взаимодействия происходит деполяризация спина мюона, а также "кажушаяся" деполяризация при измерениях остаточной поляризации методом прецессии спина мюона в слабом поперечном поле на частоте свободного спина мюона, поскольку в этом случае частота прецессии обусловлена полным магнитным моментом мезоатома.

Только в отдельных случаях удается наблюдать остаточную поляризацию мюонов в химическом соединении, равную предельному значению. Так, например, для мезоатомов, образующихся при остановке мюонов в воде комнатной температуры /мезоазот μ^N /, предельное значение поляризации достигается при добавлении 10% перекиси водорода ³. Этот факт объясняется тем, что в результате быстрой химической реакции μ^N с молекулами перекиси водорода образуются исключительно диамагнитные продукты, содержащие в своем составе мезоатом. Для чистой же воды поляризация вдвое меньше из-за образования парамагнитных продуктов.

В углеродсодержащих соединениях мезоатом μ^B /мезобор/ иногда имеет столь малую скорость вступления в химическую реакцию, что успеваает сработать механизм деполяризации за счет магнитного сверхтонкого взаимодействия спина мюона с моментом электронной оболочки свободного мезоатома. Однако нами найдены соединения, в которых достигается максимально возможная остаточная поляризация спина мюона в мезоатоме μ^B . Так, например, в стабильном нитроксильном радикале скорость реакции велика и образуются исключительно диамагнитные соединения ⁴.

Предельная поляризация в любом химическом соединении может быть получена и другим путем - в результате разрыва связи между спином мюона и моментом электронной оболочки с помощью магнитного поля, направленного вдоль спина мюона /эффект Пашен-Бака/.

Излучение зависимости остаточной поляризации от величины продольного поля в принципе позволяет дать ответ на следующий вопрос: обусловлена ли деполяризация мюона в 1s-состоянии после завершения мезоатомного каскада взаимодействием его спина с магнитным моментом электронной оболочки мезоатома? А если это так, то можно определить остаточную

поляризацию в конце мезоатомных каскадных переходов при остановке мюонов в различных химических соединениях и величину магнитного поля H_0 , создаваемого магнитным моментом электронной оболочки на мюоне свободного или вошедшего в состав парамагнитного соединения мезоатома. По величине H_0 можно судить о том, в каком состоянии - основном или метастабильном - образуется мезоатом, так как величина H_0 зависит^{5,6} от состояния электронной оболочки, даже если полный момент мезоатома не изменяется. Из расчетов^{5,6} следует, что величина H_0 в свободных μ^+B и μ^+N может достигать нескольких кЭ.

Измерения в меньших продольных полях необходимы для идентификации различных каналов образования парамагнитных соединений. Например, если мезоатом присоединяется к крупной молекуле, то неспаренные электроны могут делокализоваться по всей молекуле, что приводит к малому значению внутреннего поля, как это имеет место для ряда парамагнитных соединений мюония⁷, где эффект Пашен-Бака был наблюден в опытах с μ^+ -мезонами. Если же мезоатом образует парамагнитное соединение, присоединяя, например, атом водорода, то оставшиеся неспаренные электроны мезоатома будут создавать большое внутреннее поле, сравнимое по величине с полем в свободном мезоатоме.

С целью поиска эффекта восстановления поляризации продольным магнитным полем мы провели измерения остаточной поляризации в дифениле и стироле в поле $H_H = 120$ Э на установке⁸ и в дифениле, стироле и воде в поле 5450 Э на установке⁹. При измерениях в слабом продольном поле электроны от мюраспада регистрировались по интегральному счету в течение интервала времени 6,8 мкс после остановки мюона, одновременно измерялось временное распределение сигналов электронов распада, при этом количество электронов, зарегистрированных за одно измерение, определялось путем обработки на ЭВМ. В течение эксперимента поочередно определялось количество электронов с полем и без поля. В качестве контрольной мишени использовался графит, в котором эффекта Пашен-Бака не должно быть в принципе, т.к. остаточная поляризация в проводниках определяется, в основном, процессами в мезоатомном каскаде, а для разрыва ℓs связи между спином мюона и его орбитальным моментом требуются магнитные поля $10^{10} - 10^{12}$ Э.

При отсутствии эффекта на графите $\frac{N_{e(H=120^\circ)}}{N_{e(H=0)}} = 1,0043 \pm$

$\pm 0,0008$ /, когда было сделано 11 пар измерений, для дифенила и стирола /11 и 4 пары измерений/ получено /после деления на отношение, полученное для графита/ соответственно $1,0040 \pm \pm 0,0033$ и $1,0050 \pm 0,0014$. Ошибки везде среднеквадратичные; статистическая ошибка $\pm 0,0004$ для графита и $\pm 0,0015$ - для стирола и дифенила.

При измерении в сильном магнитном поле 5,45 кЭ электроны регистрировались только по интегральному счету в интервале времени 7,0 мкс после остановки мюона. В этом эксперименте отношение $N_{e(H=5,45 \text{ кЭ})} / N_{e(H=0)}$ заметно отличается от единицы даже для графита; для этой мишени эффект обусловлен исключительно влиянием магнитного поля на эффективность регистрации электронов телескопом сцинтилляционных счетчиков и фокусировкой электронов продольным полем. Для графита получено

значение отношения $\frac{N_{e(H_p=5,45 \text{ кЭ})}}{N_{e(H_p=0)}} = 1,0552 \pm 0,0014$, а для

воды, дифенила и стирола /после введения поправки на фон случайных совпадений и деления на отношение для графита/ получено соответственно: $1,0191 \pm 0,0036$, $1,0301 \pm 0,0069$ и $1,0219 \pm 0,0064$. Ошибки - среднеквадратичные; статистическая ошибка для графита $\pm 0,0007$, а для воды, дифенила и стирола $\pm 0,0025$. Для каждой мишени было сделано по 3-5 пар измерений /с полем и без поля/.

Учитывая, что при комнатной температуре измеряемый коэффициент асимметрии в угловом распределении электронов от мю-распада составляет для воды, дифенила и стирола соответственно $0,020 \pm 0,001$, $0,007 \pm 0,0007$ и $0,023 \pm 0,0009$, получим следующие значения коэффициента асимметрии в сильном магнитном поле: $0,0391 \pm 0,0037$, $0,0371 \pm 0,0070$ и $0,0449 \pm 0,0065$. Нормируя полученные значения на величину коэффициента асимметрии в графите при $H_p=0$, получим окончательные значения величины a/a_0 соответственно для воды, дифенила и стирола: $0,80 \pm 0,07$, $0,76 \pm 0,14$ и $0,92 \pm 0,13$. Аналогичным способом для дифенила и стирола в слабом магнитном поле получены значения a/a_0 : $0,22 \pm 0,07$ и $0,57 \pm 0,03$.

Из полученных данных следует сделать вывод о наблюдении эффекта восстановления поляризации во всех трех мишенях. Значения a/a_c при различных H_k для всех трех исследованных соединений приведены в таблице.

Таблица

	a/a_c				
	$H_k = 0$	$H_k = 0,12 \text{ кЭ}$	$H_k = 1 \text{ Э}$	$H_k = 5,45 \text{ кЭ}$	$H_0, \text{ кЭ}$
H_2O	$0,40 \pm 0,02$	-	$0,37 \pm 0,05^*$	$0,80 \pm 0,07$	$3,0 \pm 1,2$
Стирол	$0,47 \pm 0,02$	$0,57 \pm 0,03$	-	$0,92 \pm 0,13$	$0,25 \pm 0,05$
Дифенил	$0,14 \pm 0,015$	$0,22 \pm 0,07$	-	$0,76 \pm 0,14$	$0,38 \pm 0,19$

* Из работы [10].

Поскольку при комнатной температуре в воде остаточная поляризация уже вышла на плато по температурной зависимости, т.е. скорость химических реакций много больше величины скорости деполяризации в свободном мезоатоме из-за сверхтонкого взаимодействия, наблюдаемый нами эффект увеличения поляризации в продольном поле относится, в основном, к парамагнитным молекулам, содержащим мезоатом. В случае же дифенила, и стирола, для которых при комнатной температуре малое значение поляризации в отсутствие продольного поля обусловлено действием внутреннего магнитного поля в свободном мезоатоме, наблюдаемый эффект следует отнести к среднему воздействию как поля в свободном мезоатоме, так и в парамагнитных молекулах, содержащих мезоатом μ_B .

Значение внутреннего поля H_0 , которое воздействует на мюон, для всех трех веществ может быть определено путем варьирования экспериментальных данных по формуле

$$a/a_c = (c + d \frac{x^2}{1+x^2}),$$

где a/a_c - относительное /по отношению к графиту/ значение остаточной поляризации в продольном магнитном поле $H_x \sim \frac{H}{H_0} d$, H_0 - характерное поле сверхтонкого взаимодействия, $c = a/a_c$ при $H_x = 0$, d - предельное значение, равное $(a/a_c - c)$ при $x \sim 1$. В таблице приведены полученные таким образом значения H_0 .

Полученное нами значение H_0 для воды не противоречит тому, которое можно было бы ожидать для свободного μ^N в метастабильном состоянии ^{1,6/} или для парамагнитных соединений μNH^{*} , μNH_2^* , μNO^* , в которых неспаренные электроны локализованы вблизи мезоатома.

Для стирола и дифенила поле H_0 может принимать, в принципе, две группы значений. Меньшие значения /порядка 10^2 Э/ обусловлены образованием парамагнитных соединений μB , в которых имеет место делокализация неспаренных электронов по всей молекуле, имеющей достаточно большие размеры. Большие значения H_0 /несколько кЭ^{1,6/} связаны с наличием свободного μB ; наличие свободного μB в мишени надо учитывать, т.к. при комнатной температуре значение остаточной поляризации в таких углеводородах, как стирол и дифенил, еще не находится на плато температурной зависимости ^{1/}.

Поэтому кривая зависимости a/a_c от H_x в стироле и дифениле может иметь более сложный вид, когда часть поляризации восстанавливается при $H_x \approx 10^2$ Э, а восстановление до предельного значения происходит при существенно больших магнитных полях. Наличие эффекта восстановления поляризации в углеводородах с $H_0 \approx 10^2$ Э свидетельствует об образовании парамагнитных соединений μB с делокализованным парамагнетизмом.

Поскольку данные для стирола и дифенила обработаны по формуле, учитывающей наличие только одного значения H_0 /являющегося средним по нескольким возможным значениям/, и отсутствуют экспериментальные данные при $H_x \approx 1 \div 3$ кЭ, полученные значения H_0 не исключают наличия также участка с H_0 , характерным для свободного μB ^{1,6/}.

В заключение сделаем следующие выводы:

1. Впервые экспериментально наблюдался эффект Пашен-Бака в мю-мезоатомах углерода и кислорода.
2. Определены значения поля H_0 , создаваемого неспаренными электронами мезоатома или молекулы, в составе которого он

находится, на мезоне, находящемся в $1s$ -состоянии мезоазота и мезобора в исследованных соединениях.

3. Детальное измерение зависимости остаточной поляризации от величины продольного поля открывает перспективы для изучения состояний электронной оболочки в свободных мезоатомах и парамагнитных молекулах.

ЛИТЕРАТУРА

1. "Muon physics". Acad. Press, 1975, vol.III, p.235.
2. Джураев А.А. и др. ЖЭТФ, 1972, 62, с. 1424.
3. Джураев А.А. и др. ЖЭТФ, 1974, 66, с. 433.
4. Баландин М.П. и др. ОИЯИ, Р1-12082/ Дубна, 1979.
5. Горелкин В.Н., Смилга В.П. ЖЭТФ, 1974, 66, с. 1201.
6. Таммет Э.В. ЯФ, 1970, 11, с. 840; ЯФ, 1976, 23, с. 1042.
7. Мясищева Г.Г. и др. ЖЭТФ, 1967, 5, с. 227; ЖЭТФ, 1969, 56, с. 1199.
8. Бабаев А.И. и др. ЖЭТФ, 1966, 50, с. 877.
9. Мелешко Е.А. и др. Препринт ИАЭ-2320, 1973.
10. Джураев А.А. и др. ЖЭТФ, 1972, 62, с. 2210.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 июля 1979 года.