

E-25

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



P14 - 4052

В.С.Евсеев

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЗОАТОМОВ СО СРЕДОЙ
И ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ μ -МЕЗОНОВ

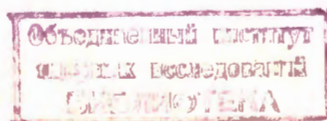
1968

P14 - 4052

В.С.Евсеев

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЗОАТОМОВ СО СРЕДОЙ
И ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ μ -МЕЗОНОВ

Направлено в журнал
"Химия высоких энергий"



754712 up.

Продольно поляризованные быстрые μ^- -мезоны, образующиеся при распаде π^- -мезонов, испытывают деполяризацию, останавливаясь в веществе. Если ядра атомов среды, в которой происходит замедление и остановка мезона, имеют спин, равный нулю (а только такие атомы будут рассмотрены в настоящей статье), то в соответствии с теорией, развитой в работах ^{/1/}, деполяризация происходит только на стадии мезоатомных каскадных переходов из-за спин-орбитального взаимодействия мезона на каждом из возбужденных состояний мезоатома. Простая теория каскадной деполяризации, развитая для случая изолированного атома, предсказывает приблизительно одинаковую величину остаточной поляризации P_μ на К-орбите мезоатома для всех мезоатомов, равную $\approx 1/6$ от первоначальной поляризации мюонов в пучке.

Несмотря на то, что систематически деполяризация отрицательных мюонов на опыте не изучалась, все же к настоящему времени проведено значительное количество экспериментальных исследований деполяризации μ^- -мезонов в различных средах ^{/4-13/}, результаты которых в основном противоречат выводам простой теории каскадной деполяризации для изолированных мезоатомов. Из этих данных следует, что значения P_μ для разных веществ меняются от нуля до некоторой максимальной величины, равной приблизительно тому значению ($\approx 1/6$), которое следует из теории каскадной деполяризации. Необходимо подчеркнуть, что все эти величины измерены

методом прецессии спина мюона в поперечном магнитном поле на частоте прецессии свободного мезона.

Особенно непонятной является полная деполяризация μ^- -мезонов при их остановке в инертных газах^{/8÷10/}, так как теория каскадной деполяризации^{/1/} построена именно для этого случая.

Если рассматривать каскадную деполяризацию в атоме, который входит в состав химического соединения, то величина P_μ , в принципе, может отличаться от той величины, которая имеет место в случае изолированного мезоатома, и меняться в зависимости от типа химической связи. Влияние соседних атомов на деполяризацию в каскаде может проявляться, например, в образовании мезомолекулярных уровней, общих для всех атомов химического соединения. Существование таких мезомолекулярных состояний следует из интерпретации^{/2/} экспериментов по посадке μ^- -мезонов на протоны, входящие в состав водородосодержащих соединений, и экспериментов, в которых исследовалась зависимость структуры К-серии мезоатомов от параметров химической связи или посадка μ^- -мезонов на атомы с различными Z в химических соединениях^{/3/}.

Учитывая сказанное выше о возможном влиянии параметров среды на деполяризацию в каскаде, можно было бы предположить, что наблюдаемые различия в величине P_μ обусловлены именно этим. Однако можно показать, что большая часть экспериментальных данных, и в особенности данные по зависимости величины P_μ в воде от температуры^{/12/} и по деполяризации в инертных газах, могут быть объяснены, если предположить существование нового механизма деполяризации-механизма парамагнитной деполяризации, который начинает действовать уже после окончания мезоатомного каскада. В этом случае дополнительная деполяризация определяется парамагнетизмом образующихся мезоатомов и их взаимодействием со средой.

По окончании стадии каскадных мезоатомных переходов образуется положительно заряженный ион мезоатома, которому мы дадим название элемента с зарядом, на единицу меньшим заряда ядра мезоатома, поскольку мезоядро (т.е. система ядро-мюон) имеет на единицу меньший заряд.

Заряд мезоиона зависит от того, какое количество электронов теряет атом в результате оже-эффекта; однако для дальнейшего рассмотрения нет необходимости знать величину заряда мезоиона. Мезоion в результате отдачи при испускании оже-электронов и квантов может получать энергию (> 1 эв), достаточную для того, чтобы выйти из узла решетки или из химического соединения.

Следующий этап состоит в замедлении и термализации "горячего" мезоиона и пополнении его электронной оболочки. Учитывая, что мезоion теряет энергию в основном в результате упругих соударений с примерно одинаковыми по массе атомами среды, можно утверждать, что в конденсированных средах термализация произойдет за время порядка 10^{-13} сек. За это же время произойдет восстановление электронной оболочки, поскольку из-за большой энергии сродства к электрону E_0 мезоion практически при каждом соударении будет отбирать электроны у атомов или молекул среды. Это будет продолжаться до тех пор, пока величина E_0 не станет меньше величины первого потенциала ионизации E_1 атомов или молекул среды. Именно соотношение между E_0 и E_1 определяет, в каком состоянии будет электронная оболочка мезоатома к концу периода его замедления. Если к этому времени электронная оболочка будет иметь неспаренные электроны, т.е. магнитный момент, то в слабом поперечном магнитном поле, используемом обычно в прецессионных экспериментах, должна наблюдаться прецессия не на частоте свободного мюона, а на частотах, определяемых гиромагнитными отношениями состояний системы мюон-электрон, т.е. в $\approx 10^2$ раз

больших. Это означает, что на частоте прецессии свободного мюона должна иметь место дополнительная деполяризация. Величина этой деполяризации будет зависеть от взаимодействия мезоатома со средой на следующем этапе. Интерес представляют только такие взаимодействия, которые могут привести к изменению парамагнетизма мезоатома, а именно: обмен электронами с внешней средой и химические реакции. На этом этапе поведение мезоатома формально может быть описано с помощью теории, развитой для случая атома мюония /14/.

Перейдем теперь к конкретному анализу экспериментальных данных о величине остаточной поляризации P_{μ} с точки зрения предполагаемого дополнительно к каскадному механизму парамагнитной деполяризации. В соответствии с его основными особенностями все экспериментальные данные следует разбить на несколько групп. Инертные газы /8,10,13/. В качестве примера рассмотрим деполяризацию μ^- -мезона при его остановке в неоне. После окончания стадии мезоатомного каскада образуется ион мезоатома фтора. Учитывая значение E_I для неона ($E_I = 21,6$ эв)^{x)} и значение E_0 для последнего (девятого) электрона в атоме фтора ($E_0 = 17,4$ эв), можно утверждать, что в конечном счете получается однократно положительно заряженный мезон фтора с 8 электронами в электронной оболочке. Такая структура, подобная структуре электронной оболочки кислорода, характеризуется наличием магнитного момента, равного 3 магнетонам Бора /16/. Поскольку парамагнитная структура мезоиона фтора из-за отсутствия химических реакций с атомами неона должна сохраняться в течение времени жизни мюона, деполяризация мюонов при остановке в чистом неоне, наблюдаемая на частоте свободного мезона, должна быть полной, т.е. P_{μ} должно быть близким к нулю.

x) Значения E_0 и E_I взяты из /15/.

Легко видеть, что ситуация должна быть аналогичной для всех чистых инертных газов в любом агрегатном состоянии, поскольку во всех случаях образуются парамагнитные мезоатомы. Таким образом, в принципе, можно объяснить нулевое значение остаточной поляризации, измеренное в гелии и аргоне ^{/8,10,13/}. Однако возможное наличие примесей в инертных газах может сильно усложнить картину.

Разберем влияние примесей на примере μ^- -остановок в жидком гелии. Из экспериментов следует, что полная деполяризация имеет место как на частоте прецессии свободного мезона ^{/8,9/}, так и на частоте прецессии триплетного состояния образующегося сверхтяжелого мезоатома водорода ^{/13,17/}.

Исходя из расчетов вероятности оже-переходов ^{/18/}, следует ожидать, что при образовании мезоатома водорода имеется большая вероятность, что будут потеряны оба электрона, и должна наблюдаться прецессия на частоте свободного мезона. Поскольку это не так, то можно, по-видимому, предположить, что происходит быстрое присоединение электрона к мезоядру либо при соударении "горячего" мезоядра с атомом гелия, либо при взаимодействии мезоядра с примесями, имеющими $E_1 < 13$ эв. Подобно мюонии ^{/19/}, мезоатом водорода образуется с равной вероятностью в синглетном и триплетном состояниях. В синглетном состоянии за время порядка 10^{-10} сек произойдет полная деполяризация за счёт эффекта сверхтонкого расщепления, но триплетное состояние должно в чистом гелии сохранять поляризацию μ^- -мезона. Отсутствие поляризации на частоте триплетного состояния мезоатома водорода, на наш взгляд, в принципе, может быть объяснено конверсией триплетного состояния в синглетное при соударении мезоатома водорода с молекулами парамагнитных примесей. Если учесть, что константа скорости конверсии атома водорода и других его аналогов (мюония или позитрония) на O_2 и NO равны соответственно

$2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \text{ сек}^{-1}$ и $2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \text{ сек}^{-1} / 20$, и предположить, что эти значения будут такими же в случае мезоатома водорода, то можно ожидать, что полная деполяризация наступит за время около 10^{-7} сек при наличии в жидком ^4He всего 10^{-4} и 10^{-6} (по количеству молекул) O_2 и NO соответственно. Поскольку в опытах по измерению R_μ в жидком гелии не предпринималось специальных мер для контроля за чистотой газа во время эксперимента, то нельзя исключить, что могла иметь место значительная концентрация примесей.

Если обеспечить необходимую чистоту газа от любых примесей, то, естественно, должна наблюдаться прецессия на частоте свободного мезона. Если в таких условиях будет заметна прецессия на частоте триплетного состояния мезоатома водорода, то это может означать наличие вклада атомного захвата "горячего" мюона, т.е. может дать информацию о кинетической энергии образующегося мезоатома, что связано с механизмом перехода μ^- -мезона в дискретный спектр $^{21}/x$. Такая информация представляет большой интерес, поскольку в настоящее время совершенно не ясно, какой вклад дают различные возможные механизмы образования мезоатома $^{2,21}/$.

Ситуация, описанная для случая гелия, применима к любому инертному газу.

Проводники и полупроводники. $^{4,7}/$ Легко заметить, что значения R_μ для металлов и графита максимальны и приблизительно равны для всех этих веществ той величине, которая следует из простой теории каскадной деполяризации. Особенность образования мезоатомов в проводниках состоит в том, что не существует энергетических

х) Ситуация может быть в какой-то мере аналогичной той, которая имеет место при образовании мезомолекулы $d\bar{d}\mu^-$, где наблюдается зависимость вероятности её образования от энергии мюона $^{24}/$.

ограничений при восстановлении разрушенной электронной оболочки мезоатома из-за большой плотности электронов проводимости. При этом во всех исследованных проводниках образующийся мезоатом имеет парамагнитную электронную оболочку с одним неспаренным валентным электроном. Казалось бы, ситуация не отличается от той, которая имеет место в случае образования мезоатома в инертных газах. То обстоятельство, что значение R_{μ} в проводниках в действительности максимально, на наш взгляд, может быть объяснено большой скоростью обменного взаимодействия валентного электрона мезоатома с электронами проводимости. Такой обмен приводит к тому, что валентный электрон в проводниках не существует в состоянии с определенным направлением спина и мезоатом не имеет магнитного момента. Механизм обменного взаимодействия с электронами проводимости впервые был использован /22,23/ для объяснения того, почему в металлах не образуется мюония, т.е. почему наблюдается близкое к максимальному значение R_{μ} , измеренное на частоте свободного μ^+ -мезона.

То обстоятельство, что значения R_{μ} для металлов и графита отличаются друг от друга не более чем на 25%, указывает на слабое влияние их электронной структуры на степень деполяризации в каскаде.

Поскольку в полупроводниках плотность свободных зарядов мала, скорость обменного взаимодействия может оказаться столь низкой, что часть мезоатомов испытает дополнительную деполяризацию. Этим, по-видимому, можно объяснить существенный разброс значений этой величины по данным разных работ /7,9/, поскольку образцы кремния могли иметь разную плотность свободных носителей тока.

Химически активные диэлектрики. К этой категории веществ относятся вода /12/, сера /7,24/ и углеводороды /11,13/. Начнем с рассмотрения образования мезоатомов в воде. Энергия сродства ($E_0 = 14,5$ эв) для последнего электрона в мезоатоме азота больше значе-

ния E_I ($E_I = 12,6$ эв) для молекулы воды^{/15/}, и поэтому образуется нейтральный мезоатом азота с парамагнитной электронной оболочкой. Если бы парамагнетизм этого мезоатома сохранялся достаточно долго, мы наблюдали бы полную деполяризацию μ^- -мезонов в воде. Отличное от нуля экспериментальное значение P_μ , измеренное на частоте прецессии свободного мезона, и в особенности зависимость P_μ от температуры^{/12/}, могут быть, в принципе, объяснены, если принять во внимание химические реакции, приводящие к образованию диамагнитных соединений, содержащих мезоатом азота.

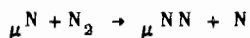
Термализованный мезорадикал азота $\mu^{\cdot N}$ может, например, вступить в химическую реакцию с молекулами воды:



и т.д.

Соединения $\mu^{\cdot NH}$, $\mu^{\cdot NO}$ и т.д. обладают неспаренными электронами, но могут образоваться в различных основных состояниях, среди которых есть и синглетное. Согласно правилу мультиплетности Гунда^{/25/} наиболее стабильным должно быть триплетное состояние; однако, если вероятность переходов между различными основными состояниями указанных молекул сравнима с вероятностью μ^- -распада, следует ожидать сохранения некоторой остаточной поляризации в синглетном состоянии. Более того, различная температурная зависимость вероятности образования молекул $\mu^{\cdot NH}$, $\mu^{\cdot NO}$ и т.д. может, в принципе, обеспечить наблюдаемую на опыте температурную зависимость P_μ . Нельзя исключить также возможности протекания "горячих" химических реакций с образованием, например, молекулы $\mu^{\cdot NH_2}$, к которой применимы все вышеприведенные рассуждения. Можно предположить также, что некоторый вклад в температурную зависимость P_μ может вносить реакция

изотопного замещения с образованием диамагнитного соединения $\mu^N N$:



на растворенном в воде молекулярном азоте, концентрация которого меняется в зависимости от температуры воды. Имеется, наконец, некоторая вероятность того, что после своего образования мезоатом азота не получает заметной кинетической энергии. В таком случае на димере (H_2O_2) или в решетке льда возможно образование нейтральной диамагнитной молекулы $\mu^N NH_3$. Это тем более вероятно, что согласно модели больших мезомолекул ^{/2/} вероятность ионизации за счет оже-эффекта при образовании общемолекулярных состояний должна быть заметно меньше. Зависимость содержания димеров в жидкой воде от температуры, а также изменение структуры решетки льда (и, следовательно, взаимного расположения атомов водорода и кислорода) при изменении температуры также могут посредством различной вероятности образования $\mu^N NH_3$ обеспечить какую-то часть температурной зависимости R_μ .

Естественно, априори невозможно отрицать того, что в зависимости от изменения температуры будет изменяться вероятность образования мезомолекулярных состояний и, следовательно ^{/2,3/}, величины R_μ .^{x)}

Решающим, на наш взгляд, экспериментом, позволяющим отделить влияние химических реакций на R_μ от мезомолекулярных эффектов на стадии каскадных мезоатомных переходов, было бы исследование температурной зависимости структуры мезорентгеновской К-серии при остановке μ^- -мезонов в воде. Отсутствие такой зависимости однозначно свидетельствовало бы в пользу механизма парамагнитной деполяризации.

Отсутствие поляризации в жидком кислороде ^{/13/} может быть объяснено либо парамагнетизмом соединений μ^N с кислородом, либо, если эти соединения образуются и живут достаточно долго в синглет-

^{x)} См. сноску на стр. 8.

ном состоянии, — деполаризацией (на любой частоте прецессии) за счет рассеяния на парамагнитных молекулах O_2 .

Величина остаточной поляризации в сере ^{/24/} заметно меньше, чем в проводниках. Понимание этого с точки зрения механизма парамагнитной деполаризации осложняется тем, что в литературе имеются противоречивые данные о величине E_I для молекул типа S_{2n} : $E_I = -10,7$ эв ^{/26/} и $E_I = 9,3$ эв ^{/15/} . Принимая во внимание величину $E_0 = -10,55$ эв ^{/27/} , для атома фосфора — в зависимости от того, какое E_I будет взято, — следует ожидать образования либо парамагнитного нейтрального мезоатома фосфора, либо его диамагнитного иона с 14 электронами. Для разделения механизмов деполаризации в сере необходимы дальнейшие эксперименты и, в частности, по изучению температурной зависимости R_μ .

Поскольку энергия связи последнего электрона в мезоатоме бора всего 8,3 эв, а все используемые для измерения R_μ углеводороды имеют высокий потенциал ионизации ^{/15/} , во всех случаях в конечном счете образуется однократно положительно заряженный мезоion бора, имеющий диамагнитную электронную оболочку. Вероятность вступления мезоиона бора в химическую реакцию с углеводородами, по-видимому, очень мала, поскольку реакция отрыва атомов водорода или углерода требует большой энергии активации. Возможно, именно по этой причине в углеводородах не найдено заметной остаточной поляризации на частоте прецессии системы мюон-электрон ^{/13/} .

Можно предположить, что большие различия в величине R_μ для графита и разных углеводородов не связаны с механизмом парамагнитной деполаризации, а, скорее, являются следствием влияния параметров среды на механизм каскадной деполаризации. Однако истинное соотношение между этими двумя механизмами в случае углеводородов должно быть определено в результате дополнительных экспериментов, к

числу которых можно отнести следующие. Во-первых, необходимо исследовать структуру К-серии при образовании мезоатома в графите и углеводородах. Если для этих веществ структура К-серии будет разной, мы получим веский аргумент в пользу каскадного механизма деполяризации. С другой стороны, следует изучить температурную зависимость P_{μ} в углеводородах, т.к. её наличие будет свидетельствовать в пользу механизма парамагнитной деполяризации.

В более общем смысле механизм парамагнитной деполяризации может быть идентифицирован, если в предлагаемых ниже основных опытах будут получены следующие результаты.

1. Должна наблюдаться прецессия на частоте прецессии системы мюон-электрон.

2. Должен наблюдаться рост величины P_{μ} с увеличением напряженности продольного магнитного поля, т.к. оно разрывает связь между спином мюона и магнитным моментом электронной оболочки мезоатома.

3. В полупроводниках значение P_{μ} должно уменьшаться с уменьшением температуры (или плотности свободных электронов), так как при низких температурах мезоатом может существовать в состоянии с определенным вектором магнитного момента.

4. Измеряемое на частоте прецессии свободного мезона значение P_{μ} должно изменяться в результате добавления к веществу мишени соединений, способных активно взаимодействовать с мезоатомом, меняя его магнитные свойства.

5. Знак температурной зависимости P_{μ} должен определяться магнитными свойствами образующегося в среде мезоатома.

Если вышеперечисленные эксперименты подтвердят наличие нового механизма деполяризации, мы получим новые, уникальные методы исследований поведения различных тяжелых атомов в реальных средах или методы исследования параметров этих сред.

В заключение автор благодарит Л.А.Блюменфельда, В.И.Гольданского, Б.А.Долгошеина, А.И. Мухина, Ю.В.Обухова, Л.И.Пономарева, Б.М. Понтекорво, Г.Стайнера, В.Г.Фирсова, В.Хьюза за полезные дискуссии.

Л и т е р а т у р а

1. J.M.Shmushkevich, Nucl. Phys., 11, 419 (1959);
В.А.Джрбашян. ЖЭТФ, 38, 277 (1959); R.A.Mann, M.E.Rose. Phys. Rev., 121, 293 (1961).
2. Л.И.Пономарев. Ядерная физика, 2, 223 (1965); 6 388 (1967).
3. В.Г.Зинов, А.Д.Кониин, А.И. Мухин, Г.А.Полякова. ЯФ, 5, 591 (1967).
4. В.С.Евсеев, В.И.Комаров, В.З.Куш, В.С.Роганов, В.А.Черногоров, М.М.Шимчак. ЖЭТФ, 41, 306 (1961); Acta Phys. Polonica, 21, 313 (1962).
5. E.W.Anderson, theses. Columbia Univ., Nevis, 136 (1965).
6. R.M.Sundelin, thesises. Carnegie. Inst. Technol., CAR-882-22 (1967).
7. A.Astbury, P.M.Hattersley, M.Hussain, M.A.R.Kemp, H.Muirhead, T.Woodhead. Proc. Phys. Soc., (L), 78, 1144 (1961).
8. R.Prepost, V.W.Hughes, S.Penman, D.McColm, K.Ziock. Bull. Amer. Phys. Soc., ser. II, N1, 75 (1960).
9. J.Kane, thesises. Carnegie. Inst. Technol., CAR-882-9 (1964).
10. D.C.Buckle, J.R.Kane, R.T.Siegel, R.J.Wetmore. Bull. Amer. Phys. Soc., ser. II, 12, N7, 1050 (1967).
11. В.С.Евсеев, В.С.Роганов, В.А.Черногорова, Г.Г. Мяснищева, Ю.В.Обухов. Преприят ОИЯИ, P14-3809, Дубна, 1968.
12. В.С. Евсеев, В.С.Роганов, В.А.Черногорова, Г.Г. Мяснищева, Ю.В.Обухов. Преприят ОИЯИ, P14-3832, Дубна, 1968.

13. D.C. Buchle, J.R. Kane, R.T. Siegel, R.J. Wetmore. *Phys. Rev. Lett.*, 20, N14, 705 (1968).
14. И.Г.Ивантер, В.П.Смилга. *ЖЭТФ*, 54, вып.3, 559 (1968). M₄
15. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону (справочник). АН СССР, 1962.
16. Я.Г.Дорфман. *Магнитные свойства и строение вещества*. М., 1955.
17. D.McCollm, K.Zlock, V.W.Hughes, S.Penman, R.Prepost. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, ser. II, 5, N1, 75, X5 (1960).
18. G.Burbidge, A. de Borde. *Phys. Rev.*, 89, 189 (1953);
A. de Borde. *Proc. Phys. Soc.*, A67, 57 (1954).
19. V.W.Hughes. *Muonium*, *Ann. Rev. of Nucl. Sci.*, 16, 445 (1966).
20. А.Д.Мокрушин, В.И.Гольдманский. *ЖЭТФ*, 53, 2(8), 478 (1967).
21. Y.N.Kim. *Phys. Lett.*, 3, N1, 33 (1962).
22. И.В.Яковлева. *ЖЭТФ*, 35, 968 (1958).
23. А.О.Вайсенберг. *Мю-мезон*, М., 1964.
24. В.С.Евсеев, Ф.Кильбингер, В.С.Роганов, В.А.Черногорова,
М.Шимчак. *ЯФ*, 4, вып.3, 545 (1966).
25. М.А.Ельяшкевич. *Атомная и молекулярная спектроскопия*, М., 1962.
26. *Handbook of Chemistry and Physics* (44th ed), USA, 1962.
27. *Справочник химика*, том 1, второе издание, Л.-М., 1962.
28. Э.А.Весман. *Письма ЖЭТФ*, 5, вып. 4, 113 (1967); Препринт ОИЯИ, Р4-3256, Дубна (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел
22 августа 1968 года.