

Д-427

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

14 - 7703

ДЖУРАЕВ Акрам Ахматович

**ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МЮОНОВ
В КОНДЕНСИРОВАННЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СРЕДАХ**

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1974

14 - 7703

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: кандидат физико-математических
наук В.С. Евсеев.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук М.И. Подгорецкий,
доктор химических наук В.Г. Фирсов.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Автореферат разослан " " _____ 1974 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1974 г.
в час. на заседании Ученого совета Лаборатории
ядерных проблем Объединенного института ядерных иссле-
дований, г. Дубна, Московской области, Лаборатория
ядерных проблем ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

Ю.А. Батусов

ДЖУРАЕВ Акрам Ахматович

**ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МЮОНОВ
В КОНДЕНСИРОВАННЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СРЕДАХ**

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

**Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА**

Проблема деполаризации мюонов возникла в связи с открытием Ли и Янгом^{1/} нарушения пространственной четности в слабых взаимодействиях. Уже первый эксперимент^{2/}, в котором было продемонстрировано нарушение пространственной четности в процессе распада мюона, показал существенное различие в процессах деполаризации мюонов противоположных знаков. Оказалось, что степень деполаризации отрицательных мюонов значительно больше, чем положительных. Объяснение этому факту было дано впервые Дробашином^{3/} и Шмушкевичем^{4/} на основе учета спин-орбитального взаимодействия в каскадных переходах отрицательного мюона из возбужденных состояний в основное.

Поляризация мюонов P определяется по угловому распределению электронов μ^- -распада, которое описывается выражением

$$N_e(\theta) \sim 1 + a \cos \theta, \quad (I)$$

где θ — угол между направлением вылета электрона и направлением спина мюона; a — коэффициент асимметрии электронов μ^- -распада, связанный с поляризацией мюона соотношением $a = \frac{P}{3}$.

Предметом диссертации является систематическое исследование деполаризации отрицательных мюонов в различных молекулярных средах.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов.

Во введении приводится краткий обзор экспериментальных данных по измерению коэффициента асимметрии μ^- -распада в различных веществах и излагаются основные представления о деполаризации мюонов в стадии прохождения мезоатомного каскада, являющиеся основой для правильного понимания того, что происходит со спином мюона после завершения мезоатомного каскада. Теория деполаризации

в каскаде, как показано во введении, подходит для некоторого идеализированного случая, когда мезоатом имеет достаточное количество электронов для беспрепятственного развития первой фазы каскада - серии Оже - переходов, и не учитывается динамика взаимодействия мезоатома со средой.

Вторая глава посвящена рассмотрению поляризационных явлений, которые происходят при формировании электронной оболочки мезоатома и взаимодействии мезоатома со средой. Здесь отмечается, что влияние среды на деполаризацию отрицательных мюонов сказывается уже на первом этапе - деполаризации при каскадных переходах в мезоатоме, т.к. среда определяет возможности девозбуждения мезоатома с испусканием Оже-электронов. В зависимости от числа электронов, доступных Оже-процессу, деполаризация мюонов начнется с уровня, характеризуемого большим или меньшим значением главного квантового числа n .

Дальнейшая деполаризация (после завершения мезоатомного каскада), в случае мезоатомов с нулевым спином ядра, обусловлена, в основном, сверхтонким взаимодействием между парамагнитной электронной оболочкой образовавшегося мезоатома и магнитным моментом мюона, находящимся на К-орбите мезоатома. Естественно, что всякие изменения парамагнетизма электронной оболочки за время, сравнимое с характерным временем сверхтонкого взаимодействия, должно сказаться на величине остаточной поляризации мюонов.

Методика измерения деполаризации мюонов приведена в третьей главе. Это стандартная методика, используемая практически во всех исследованиях по деполаризации мюонов обоого знака, основанная на наблюдении ларморовой прецессии спина мюона в магнитном поле^{/2/}. Схематически экспериментальная установка и характерное временное распределение электронов μ^- -распада для углеродной мишени, исправленное на распадную экспоненту, приведено на рис. I.

В четвертой главе предлагаются модель и формальная теория, связывающая наблюдаемую величину остаточной поляризации со скоростью химических реакций мезоатомов. Только химические взаимодействия могут привести к компенсации магнитного момента электронной оболочки мезоатома и тем самым "выключить" деполаризацию отрицательных мюонов, обусловленную сверхтонким взаимодействием магнитных моментов мюона и электронной оболочки мезоатома. Акцепторами мезоатомов являются радикалы, образующиеся по следующим причинам: а) при торможении мюонов до скоростей, при которых они с большой вероятностью захватываются в связанное состояние с образованием мезоатома или мезомолекулы; б) при радиолизе окружающей мезоатом среды электронами, испущенными при Оже - переходах мюона с высоколежащих уровней ($n \approx 14$ для $Z \approx 10$); в) вследствие высокой ионизации молекулы, в состав которой входит мезоатом, возникает кулоновское отталкивание между фрагментами молекулы; осколки такого "кулоновского взрыва"^{/5/} при своем замедлении должны приводить к образованию радикалов; г) некоторое количество радикалов может образоваться при радиолизе среды квантами мезорентгеновского излучения, испускаемыми на последней стадии мезоатомного каскада. Было также показано, что мезоатом может вступать в химические реакции и с диамагнитными молекулами.

Для каждого отдельного мюона величину α° амплитуды прецессии спина во внешнем магнитном поле можно выразить соотношением^{/6/}

$$\alpha^\circ = \alpha_0 \{ F \cos(\omega t + \Omega t_1) + (1-F) \cos[\omega t + \Omega t_1 + f(\nu t_1)] \} \quad (2)$$

Здесь α_0 - амплитуда прецессии спина мюона, соответствующая поляризации в момент окончания мезоатомного каскада P_0 ; ω - частота прецессии свободного спина мюона в магнитном поле; Ω - частота прецессии суммарного магнитного момента мюона и электронной оболочки мезоатома ($\Omega/\omega \approx 10^2$); ν - частота сверхтонкого взаи-

действия магнитных моментов мюона и электронной оболочки мезоатома; t_1 - время вступления мезоатома в химическую реакцию с компенсацией парамагнетизма неспаренных электронов мезоатома; t_2 - время наблюдения μ^- - распада; $f(\nu t_1) = 0$, если целая часть произведения νt_1 четна, и $f(\nu t_1) = 1$ в противоположном случае; величина F определяет остаточную поляризацию, обусловленную только сверхтонким взаимодействием, и равна

$$F = \frac{1}{3} \left[1 + \frac{2}{(2j+1)^2} \right] \quad (3)$$

где j - момент электронной оболочки мезоатома в основном мезоатомном состоянии.

В эксперименте должна наблюдаться величина амплитуды прецессии свободного спина мюона (2), усредненная по времени вступления мезоатома в химическую реакцию t_1 . С учетом того, что прецессия свободного спина мюона может наблюдаться только в том случае, когда мезоатом вступает в химическую реакцию с образованием диамагнитного продукта, для величины коэффициента асимметрии электронов μ^- - распада получается^{/7/}

$$\alpha = \alpha_0 \frac{\lambda}{\lambda_0} \left\{ \frac{\lambda_0^2}{\lambda_0^2 + \Omega^2} \left[F^2 + (1-F)^2 \frac{ch \frac{\lambda_0}{\nu} - \cos \frac{\Omega}{\nu}}{ch \frac{\lambda_0}{\nu} + \cos \frac{\Omega}{\nu}} + 2F(1-F) \frac{sh \frac{\lambda_0}{\nu}}{sh \frac{\lambda_0}{\nu} + \cos \frac{\Omega}{\nu}} \right] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

где λ_0 - скорость вступления мезоатома в химическую реакцию, λ - скорость химической реакции мезоатома с образованием диамагнитного продукта. Для случая, когда $(\lambda_0 \nu) \gg \frac{\Omega}{2\pi}$, т.е. в слабых магнитных полях, это выражение упрощается и имеет следующий вид:

$$\alpha = \alpha_0 \frac{\lambda}{\lambda_0} \left[F + (1-F) \tanh \frac{\lambda_0}{2\nu} \right] \quad (5)$$

Графически соотношение (4) для различных значений Ω приведено на рисунке 2. Кривые 1, 2 и 3 на этом рисунке относятся к мезобору μ^B (мезоатом углерода имеет структуру электронной оболочки, как у обычного атома бора, и поэтому в химическом смысле может считаться изотопом бора), а кривые 4, 5 и 6 - к мезоазоту μ^N

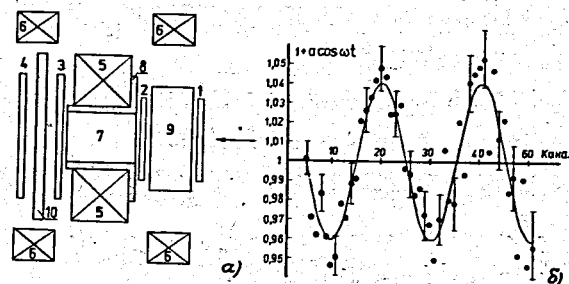


Рис.1 Схематическое изображение установки (а) и экспериментальная кривая прецессии спина мюона в магнитном поле $H = 50$ Гс (цена канала $75 \cdot 10^{-9}$ сек), исправленная на распадную экспоненту (б).

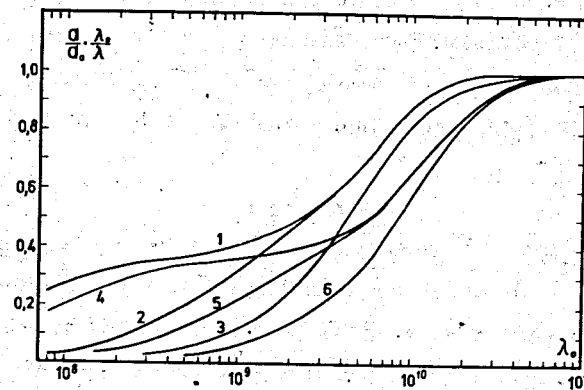


Рис.2 Графическое представление соотношения (4): Кривые 1, 2 и 3 соответствуют мезобору $\nu \approx 4,6 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$ в магнитных полях 5, 50 и 600 Гс., а 4, 5 и 6 - мезоазоту $\nu \approx 10^{10} \text{ сек}^{-1}$ в магнитных полях 5, 50 и 250 Гс.

(мезоатом кислорода), т.к. для этих мезоатомов различны частоты сверхтонного взаимодействия γ .

Экспериментальные данные и их обсуждение в рамках предложенной модели приведены в пятой и шестой главах.

В пятой главе рассматривается деполаризация отрицательных мюонов в различных органических веществах /8,9/. Отмечена корреляция [7] между радиационной устойчивостью вещества, выраженной в количестве радикалов G_R /10/, образующихся при поглощении энергии ионизирующего излучения, равной 100 эв., и остаточной поляризацией μ^- мезонов в соответствующем веществе.

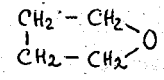
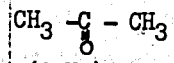
Сводные данные по радиационной стойкости и относительной остаточной поляризации мюонов a/a_c (по отношению к графиту) для органических соединений приведены в таблице I. Видно, что с ростом G_R растет остаточная поляризация, что объясняется ее связью со скоростью химических реакций мезоатома, пропорциональной концентрации радикалов вокруг мезоатома, т.е. радиационному выходу G_R :

$$\lambda_o = \Lambda_o G_R. \quad (6)$$

На рисунке 3 приведена эмпирическая связь между экспериментальными данными относительной величины коэффициента асимметрии a/a_c и величиной радиационного выхода радикалов G_R для углеводородов и фенола (C_6H_5OH), т.к. на кислород в феноле захватывается меньше 7% всех мюонов (ошибки величины G_R , равные 20%, на рисунке не приведены). Плавная кривая, хорошо ($\chi^2 = 5,2$) описывающая экспериментальные точки, есть результат обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов по соотношению (4), с учетом (6). Для значений параметров получено $\frac{a_o \lambda}{a_c \lambda_o} = 0,51 \pm 0,03$ и $\Lambda_o = (1,7 \pm 0,3) \cdot 10^{10} \text{сек}^{-1}$ (без учета ошибок G_R). Резкое увеличение величины a/a_c для кислородсодержащих веществ объясняется быстрыми химическими реакциями мезоазота с образованием диамагнитного циана $\mu^- N \equiv C - H$ /11/.

Таблица I

Сводные данные по радиационной стойкости, выражаемой значениями G_R , и остаточной поляризации мюонов (a/a_c) для органических соединений.

№ пп	Вещество	Структура	a/a_c	G_R
I.	Дифенил	Ph - Ph	$0,14 \pm 0,03$	$0,045 \pm 0,009$
2.	Толуол	Ph - CH ₃	$0,30 \pm 0,06$	$0,08 \pm 0,02$
3.	Фенол	Ph - OH	$0,30 \pm 0,05$	$0,10 \pm 0,02$
4.	Анизол	Ph - OCH ₃	$0,58 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,02$
5.	Бензол	Ph	$0,35 \pm 0,07$	$0,16 \pm 0,03$
6.	Хлорбензол	Ph - Cl	$0,32 \pm 0,07$	$0,20 \pm 0,04$
7.	Стирол	Ph - CH = CH ₂	$0,45 \pm 0,04$	$0,30 \pm 0,06$
8.	Фенилциклогексан	Ph - C ₆ H ₁₁	$0,43 \pm 0,04$	$0,30 \pm 0,06$
9.	Циклогексан	C ₆ H ₁₂	$0,43 \pm 0,04$	$1,6 \pm 0,32$
10.	Тetraгидрофуран		$0,64 \pm 0,05$	$1,7 \pm 0,34$
11.	Ацетон		$0,63 \pm 0,05$	$1,8 \pm 0,9$
12.	Полиэтилен	(C ₂ H ₄) _n	$0,51 \pm 0,05$	$3,0 \pm 1,5$
13.	Метанол	CH ₃ OH	$0,75 \pm 0,05$	$5,5 \pm 2,7$
14.	Этанол	C ₂ H ₅ OH	$0,67 \pm 0,05$	$6,0 \pm 3,0$

Факт наблюдения корреляции между величиной остаточной поляризации отрицательных мюонов и радиационным выходом радикалов в данном веществе может служить подтверждением гипотезы о быстрых химических реакциях мезоатомов с радикалами, которые образуются при радиоллизе среды вблизи мезоатома.

В работе^{/8/} отмечается зависимость остаточной поляризации от структуры вещества, которая выражается в том, что в мономерных органических соединениях остаточная поляризация μ^- - мезонов больше, чем в соответствующих полимерах. Результаты этой работы, а также известные литературные данные приведены в таблице 2. Видно, что величина остаточной поляризации в мономерных соединениях примерно в 1,4 раза больше, чем в полимерах, за исключением пары изопрен-полиизопрен. Наблюдаемая зависимость объясняется на основе представления о миграции части энергии по цепи полимеров за пределы зоны химической активности мезоатома, что приводит к уменьшению концентрации радикалов в этой области и, тем самым, к уменьшению остаточной поляризации. В молекуле полиизопрена наличие двойной связи $-\dot{C}=C-$ препятствует передаче энергии по цепи^{/12/}.

В эксперименте^{/8/} наблюдался рост величины остаточной поляризации μ^- - мезонов с ростом температуры в стироле и бензоле. На рис. 4 приведены экспериментальные значения a/a_c при различных температурах в этих веществах. Плавные кривые соответствуют соотношению (4) в предположении: а) что зависимость скорости химической реакции от температуры описывается соотношением Аррениуса в виде

$$\lambda_0 = \Lambda \left(\frac{T}{300} \right) \exp \left(- \frac{E}{kT} \right) \quad (7)$$

где Λ - предэкспоненциальный множитель скорости химической реакции мезоатомов со средой при температуре 300°K, E - энергия активации химической реакции и k - постоянная Больцмана; либо б) что

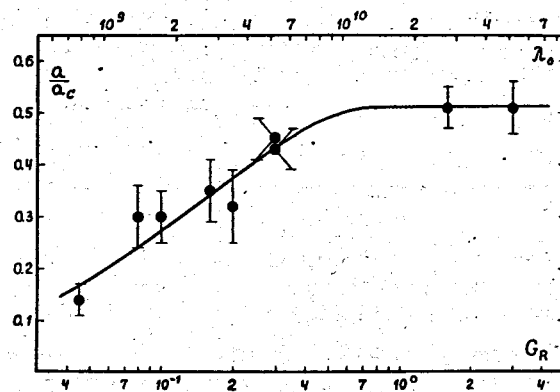


Рис. 3 Корреляция между остаточной поляризацией μ^- - мезонов и радиационной устойчивостью соответствующих углеводородов (нижняя шкала) и величиной λ_0 (верхняя шкала).

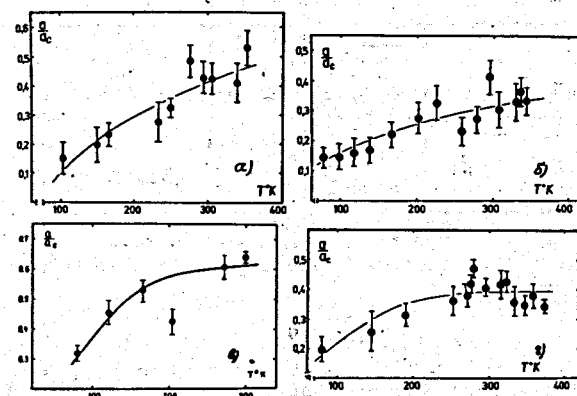


Рис.4 Зависимости остаточной поляризации μ^- - мезонов от температуры вещества: (а)-стирол, (б)-бензол, (в)-7.5%-раствор перекиси водорода и (г)-вода).

Таблица 2

Деполаризация отрицательных мюонов в мономерных и полимерных органических соединениях.

Вещество	a/a_c	$\frac{a \text{ (мон)}}{a \text{ (пол)}}$
Винилацетат	$0,859 \pm 0,035$	$1,51 \pm 0,12$
Поливинилацетат	$0,570 \pm 0,033$	
Бутилметакрилат	$0,830 \pm 0,037$	$1,28 \pm 0,09$
Полибутилметакрилат	$0,650 \pm 0,037$	
Метилметакрилат	$0,754 \pm 0,026$	$1,29 \pm 0,09$
Полиметилметакрилат	$0,583 \pm 0,035$	
Стирол	$0,535 \pm 0,029$	$1,50 \pm 0,14$
Полистирол	$0,357 \pm 0,027$	
Изопрен	$0,619 \pm 0,073$	$0,96 \pm 0,13$
Полиизопрен	$0,646 \pm 0,057$	
Толуол	$0,45 \pm 0,05$	$1,36 \pm 0,43$
Поливинил	$0,33 \pm 0,09$	

скорость химической реакции мезоатомов есть степенная функция температуры вида

$$\lambda_0 = \Lambda_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^m \quad (8)$$

Результаты обработки приведены в таблице 3. Там же приведены значения $(a/a_c)_{300^\circ\text{K}} / (a/a_c)_{80^\circ\text{K}}$ для мономеров: стирола, бензола, n -бутилового спирта и полимеров: полистирола и полибутилметакрилата. Видно, что размах температурной зависимости коэффициента асимметрии электронов μ^- распада в мономерных соединениях больше, чем в полимерных. Это может быть объяснено уменьшением плотности радикалов вблизи мезоатома, вследствие ми-

Таблица 3

Результаты обработки зависимости остаточной поляризации от температуры

Вещество	$\frac{a_0}{a_c} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_0}$	$E \text{ (кал)}$	m	$\Lambda \cdot 10^{-10} \text{ сек}^{-1}$	$\Lambda_0 \cdot 10^{-10} \text{ сек}^{-1}$	$\left(\frac{a}{a_c} \right)_{300} / \left(\frac{a}{a_c} \right)_{80}$
Стирол	$0,60 \pm 0,34$ $0,49 \pm 0,05$	345 ± 135 -	- $3,7 \pm 1,3$	$0,55 \pm 0,16$ -	$0,31 \pm 0,09$ $0,60 \pm 0,25$	$3,6 \pm 0,8$
Бензол	$0,54 \pm 0,16$ $0,36 \pm 0,03$	$0,01 \pm 275$ -	- $1,9 \pm 0,6$	$0,18 \pm 0,09$ -	$0,18 \pm 0,09$ $0,60 \pm 0,40$	$2,8 \pm 1,2$
В о д а	$0,40 \pm 0,02$ $0,39 \pm 0,02$	232 ± 176 -	- $2,3 \pm 1,1$	$5,2 \pm 4,0$ -	$3,5 \pm 2,7$ $3,2 \pm 2,4$	$2,0 \pm 0,6$
H_2O_2 (7,5%)	$0,60 \pm 0,02$ $0,59 \pm 0,07$	197 ± 29 -	- $1,4 \pm 0,4$	$5,3 \pm 4,0$ -	$3,8 \pm 2,8$ $2,4 \pm 1,5$	$2,0 \pm 0,3$
n -бутиловый спирт	-	-	-	-	-	$2,72 \pm 0,40$
Полистирол	-	-	-	-	-	$1,33 \pm 0,31$
Полибутилметакрилат	-	-	-	-	-	$1,57 \pm 0,13$

грации части энергии по цепям молекул и, следовательно, уменьшении скорости химических реакций мезоатома λ_0 ; это приводит к перемещению температурной зависимости в область $\lambda_0 \ll \nu$, характеризующуюся более пологой зависимостью a/a_0 от λ_0 и, следовательно, от T (см. рис.2).

В шестой главе рассматривается деполяризация μ^- мезонов в воде и водных растворах. Следует отметить резкое, примерно в 1,8 раза, увеличение поляризации для водного раствора перекиси водорода^{/13/}. Это свидетельствует о появлении новых (по сравнению с водой) каналов химических реакций мезоатомов μ^- непосредственно с молекулами H_2O_2 , ведущих к образованию диамагнитных соединений.

Были проведены эксперименты^{/13/} с целью выяснения зависимости остаточной поляризации отрицательных мюонов от напряженности и направления внешнего магнитного поля. Напряженность продольного поля менялась в интервале 0 ± 1265 гс., а поперечного 20 ± 200 гс, что определялось экспериментальными возможностями установки. Эксперимент проводился как на воде, так и на 7,5%-растворе перекиси водорода. Отсутствие зависимости остаточной поляризации от напряженности поперечного магнитного поля в указанном интервале позволило установить нижнюю границу для скорости вступления мезоазота в химическую реакцию при комнатной температуре, которая оказалась равной $\lambda_0^{min} \approx 10^{10}$ сек⁻¹. Эксперимент в продольном поле дал возможность оценить частоту сверхтонкого взаимодействия магнитного момента мюона с магнитным моментом электронной оболочки мезоатома кислорода $\nu_N \approx 10^{10}$ сек⁻¹. Эта величина не противоречит значению ν , полученному пересчетом из экспериментально найденного^{/14/} для атомарного азота.

В работе^{/15/} впервые была обнаружена зависимость остаточной поляризации от температуры в воде. В^{/13/} аналогичная зависимость

обнаружена в 7,5%-водном растворе перекиси водорода. Экспериментальные результаты и кривая, описывающая их согласно соотношению (4), с учетом (7) или (8), приведены на рисунке 4, а соответствующие этим кривым коэффициенты в таблице 3. Как видно из табл. 3, значения параметров Λ_0 , ϵ и m в пределах ошибок совпадают для воды и 7,5%(по весу) водного раствора перекиси водорода, а значения параметра $\frac{a_0 \lambda}{a_c \lambda_0}$ существенно различаются. Это может означать, что при одной и той же скорости химических реакций в растворе перекиси водорода значительно более вероятным процессом является образование диамагнитных соединений в реакциях мезоазота с молекулами перекиси водорода.

В работах^{/9, 13/} приводятся экспериментальные данные по зависимости остаточной поляризации от концентрации водного раствора перекиси водорода. Экспериментальные точки и расчетные кривые с учетом химических реакций (сплошная линия) и без учета химических реакций (пунктирная линия) приведены на рис. 5.

Уже для воды^{/13, 14/} зависимость остаточной поляризации от температуры в области комнатной температуры выходит на плато. Тогда для описания концентрационной зависимости остаточной поляризации можно пользоваться численным соотношением

$$\frac{a}{a_c} = \frac{a_0 \lambda \{1 + (0.30 \frac{\epsilon}{\lambda} - 0.39) [H_2O_2]\}}{a_c \lambda_0 \{1 + (0.30 \frac{\epsilon}{\lambda_0} - 0.39) [H_2O_2]\}}, \quad (9)$$

где λ_0 и ϵ_0 - скорости химических реакций мезоазота в чистой воде и чистой перекиси водорода; λ и ϵ - то же для образования только диамагнитных соединений и $[H_2O_2]$ - молярная концентрация перекиси водорода, выраженная в единицах 10^{22} см⁻³.

Обработывая экспериментальные данные методом наименьших квадратов при использовании значения $\lambda_0 = (2,8 \pm 1,5) 10^{10}$ сек⁻¹, определяемого как среднее по температурным зависимостям в воде и водном

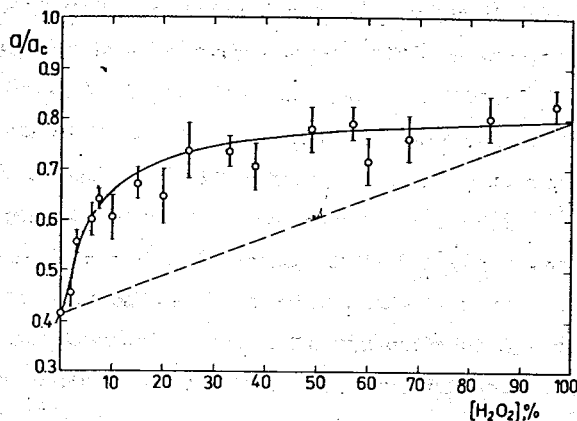


Рис.5 Зависимость остаточной поляризации μ^- - мезонов от концентрации водного раствора перекиси водорода (в весовых процентах).

растворе перекиси водорода, получаем для ℓ_0 значение $/6,9 \pm 5,0/ \cdot 10^{11} \text{сек}^{-1}$. Следует отметить, что основная ошибка ℓ_0 связана с большой неопределенностью в определении λ_0 . Так как ℓ_0 представляет скорость химической реакции мезоатома μ^- с чистой перекисью водорода, то можно получить значение константы скорости для этой реакции: $K = /2,7 \pm 1,9/ \cdot 10^{-11} \text{сек}^{-1} \text{см}^3$. Это значение по порядку величины совпадает со значениями констант скоростей химических реакций, лимитируемых диффузией^{/16/}.

Л и т е р а т у р а

1. T. D. Lee, C. N. Yang, Phys. Rev., **104**, 254 (1956).
2. R. L. Garvin, L. M. Lederman, M. Weinrich, Phys. Rev., **105**, 1415 (1956).
3. В. А. Джрбашян, ЖЭТФ, **36**, 277 /1959/.
4. J. M. Shmushkevich, Nucl. Phys., **11**, 419 (1959).
5. T. A. Karlson, R. M. White, Chem. Eff. of Nucl. Transf., Vienna, **1**, 23 (1965).
6. А. А. Джурбаев, В. С. Евсеев, ЖЭТФ, **62**, 1167 /1972/.
7. А. А. Джурбаев, В. С. Евсеев, препринт ОИИИ, PI4-7212, Дубна /1973/.
8. А. А. Джурбаев, В. С. Евсеев, Ю. В. Обухов, В. С. Роганов, ЯФ, **16**, 114, /1972/.
9. А. А. Джурбаев, В. С. Евсеев, Ю. В. Обухов, В. С. Роганов, препринт ОИИИ, PI4-7213, Дубна /1973/.
10. С. Д. Пшежецкий, Механизм радиационно-химических реакций, Госхимиздат, М. /1962/; сб. Свободно-радикальные состояния в химии, Новосибирск, Наука Сиб. отд. АН СССР /1972/.
11. О. К. Фомин, Успехи химии, **36**, 1701 /1967/.
12. Сб. "Радиационная химия полимеров", М., Наука /1966/.
13. А. А. Джурбаев, В. С. Евсеев, Ю. В. Обухов, В. С. Роганов; ЖЭТФ, **62**, 2210 /1972/.
14. G. Wessel, Phys. Rev., **92**, 1581 (1953); M. A. Heald, R. Beringer, Phys. Rev., **96**, 645 (1954).
15. В. С. Евсеев, В. С. Роганов, В. А. Черногорова, Г. Г. Мясичева, Ю. В. Обухов, ЯФ, **8**, 742 /1968/.
16. Е. Колдин, "Быстрые реакции в растворе" М., Мир /1966/.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 января 1974 года.