

17-312
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

13 - 4573

В.И.Петрухин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА π -МЕЗОНОВ
ЯДРАМИ СВЯЗАННОГО ВОДОРОДА

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1969

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель -

доктор физико-математических наук,
профессор Ю.Д.Прокошкин

Официальные оппоненты -

член-корреспондент АН СССР,
профессор В.И.Гольданский,
кандидат физико-математических наук
Б.А.Долгошеин

Ведущее предприятие -

Институт теоретической и экспериментальной физики.

Автореферат разослан 1969 г.

Защита диссертации состоится 1969 г. на
заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Адрес: Дубна, Московской области, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных проблем.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета ЛЯП
кандидат физико-математических наук

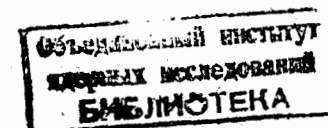
О.А.Займидорога

13 - 4573

В.И.Петрухин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА π -МЕЗОНОВ
ЯДРАМИ СВЯЗАННОГО ВОДОРОДА

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук



Исследование взаимодействий остановившихся в веществе частиц - распадов и захватов - занимает большое место в физике элементарных частиц. Большинство имеющихся данных о схемах распада и их относительных вероятностях, о массах и спинах элементарных частиц и их других важных характеристиках получены при изучении распадов и захватов остановившихся частиц. Частицы, имеющие отрицательный электрический заряд, при остановках в веществе образуют своеобразные атомы, в которых роль внешнего электрона играет захватившаяся на один из его уровней частица. Наиболее изученными из таких систем являются системы "мезон + ядро" (мезоатомы). Мезоатомная стадия накладывает своеобразный и очень глубокий отпечаток на процессы ядерного захвата и распада отрицательно заряженных частиц.

Помимо большого "практического" значения для интерпретации фундаментальных опытов исследование новых μ^- , π^- , K^- , \bar{p} , Σ^- - атомов представляет значительный самостоятельный интерес, обусловленный как некоторыми необычными свойствами новых атомов, так и возникающими в связи с этим новыми возможностями для решения задач ядерной физики и физики элементарных частиц. В качестве примеров успешной реализации этих возможностей можно указать на определение размеров ядер по мезорентгеновскому излучению в мезоатомах, точное определение массы μ^- и π^- мезонов по мезорентгеновскому излучению, обнаружение ряда новых явлений, таких как

μ -катализ ядерных реакций синтеза изотопов водорода, мюонное деление и др.

Атомный захват μ -мезонов в сплавах и химических соединениях в большинстве случаев происходит примерно в соответствии с " Z -законом", сформулированным Ферми и Теллером^{/1/} на основе грубой оценки по модели атома Томаса-Ферми. Все наблюдавшиеся отклонения от " Z -закона" направлены в сторону более слабой зависимости от Z ^{/2/}.

Несмотря на то, что в лабораторных условиях π^- -мезоны более доступны, чем μ -мезоны, π^- -мезоатомные процессы из-за больших экспериментальных трудностей исследованы значительно менее подробно, чем μ -мезоатомные. В первую очередь это относится к вопросу о захвате π^- -мезонов ядрами атомов, входящих в химические соединения. К моменту проведения экспериментов, описанных в настоящей диссертации, было выполнено 2 работы, в которых проверялась справедливость " Z -закона" для образования π^- -мезоатомов. В работе Стирса и др.^{/3/} было показано, что захват остановившихся π^- -мезонов литием в LiF подавлен сильнее, чем следовало ожидать по " Z -закону". Значительные отклонения от " Z -закона" обнаружены также Панофским с сотрудниками при исследовании захвата остановившихся π^- -мезонов ядрами водорода в водородосодержащих веществах^{/4/}. Обнаружить этот захват группе Панофского не удалось, была установлена верхняя граница для вероятности W захвата π^- -мезонов водородом, связанным в CH_2 ($W_{\text{CH}_2} < 2 \cdot 10^{-3}$) и в LiH ($W_{\text{LiH}} < 6 \cdot 10^{-3}$).

Для объяснения сильного подавления захвата остановившихся π^- -мезонов ядрами химически связанного водорода Панофский предположил, что в водородосодержащих веществах происходит интенсивный перехват мезонов с атомов водорода на более тяжелые атомы. По модели Панофского перехват обусловлен

специфическими свойствами мезоатома водорода. При посадке π^- -мезона на атом водорода образуется нейтральная π^-p -система, которая покидает молекулу и "блуждает" в веществе. Из-за отсутствия связанной с ней электронной оболочки эта система может очень близко подойти к ядру тяжелого атома и пион может быть перехвачен ядром.

В 1 главе диссертации описываются эксперименты^{/5/}, предпринятые с целью наблюдения захвата π^- -мезонов ядрами связанного водорода (CH_2). Для идентификации этого захвата использовалась реакция перезарядки остановившегося π^- -мезона на протоне



протекающая с высокой вероятностью ($\approx 60\%$). Эта реакция имеет весьма характерный "почерк" (распад $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$), что позволяет надежно выделять ее на фоне других процессов. Образующиеся при распаде π^0 -мезона γ -кванты испускаются с углом разлета, изменяющимся от 157° до 180° ; энергия каждого γ -кванта заключена в интервале $55 \leq E_\gamma \leq 83$ Мэв. Последнее обстоятельство позволяет выбрать для регистрации γ -квантов детекторы с высоким энергетическим порогом и создать установку с низким уровнем регистрации фона. Экспериментально было показано, что захват π^- -мезонов сложными ядрами, с которыми химически связан водород, не приводит к образованию π^0 -мезонов (см. ниже). Таким образом, задача сводится к регистрации π^0 -мезонов при остановке π^- -мезонов в мишенях из вещества типа ZHn.

Схема опыта приведена на рис. 1. π^- -мезоны с энергией 80 Мэв от синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ проходили через три сцинтилляционных счетчика 1,2,3 и тормозящие фильтры и останавливались в мишени М. Для регистрации

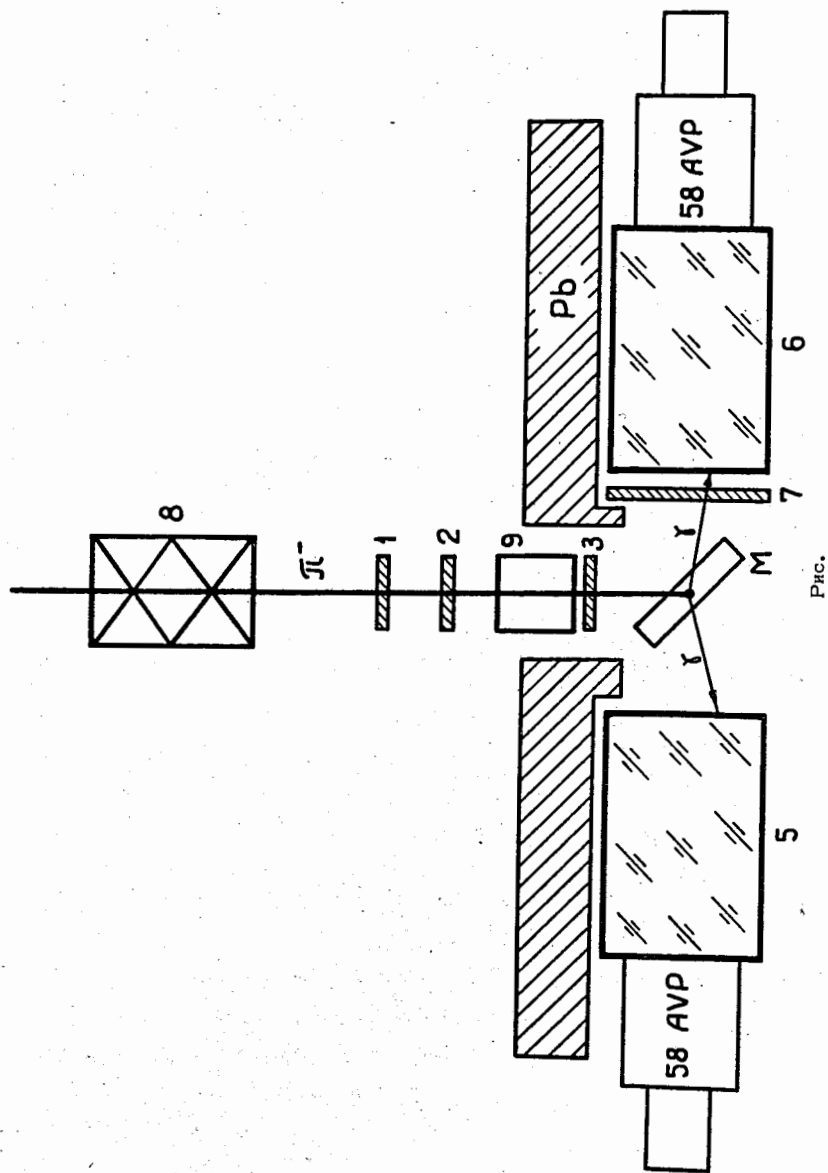


Рис.

γ -квантов от распада π^0 -мезонов, возникающих при остановке π^- -мезонов, были использованы черенковские спектрометры полного поглощения, малочувствительные к фону постороннего излучения^{/6/}. Сигналы от спектрометров и счётчика 3, регистрирующего π^- -мезоны, поступали в наносекундную схему совпадений^{/7/}.

Для наладки и калибровки аппаратуры в качестве мишени, помещаемой между спектрометрами, использовался жидкий водород, залитый в стеклянный дьюар. Энергетические пороги спектрометров выбраны равными 20 Мэв. При этом эффективность регистрации γ -квантов от распада π^0 -мезонов была близка к единице, а уровень фона - очень низким: с удалением мишени скорость счёта совпадений падала в 20000 раз. Практически весь счёт аппаратуры был связан с остановками π^- -мезонов в водороде; при уменьшении толщины тормозящего фильтра и увеличении энергии π^- -мезонов до 65 Мэв скорость счёта совпадений падала более чем в 300 раз и находилась на уровне, соответствующем известной величине сечения перезарядки π^- -мезонов налету при этой энергии^{/8/}. Таким образом, в экспериментах с жидководородной мишенью показано, что используемая аппаратура даёт возможность проводить исследования перезарядки остановившихся π^- -мезонов с точностью, на два порядка превышающей предел, достигнутый ранее.

После проведения предварительных экспериментов жидководородная мишень была заменена мишенью из полиэтилена. При этом обнаружено, что скорость счёта совпадений снижается не до уровня фона, а только на два порядка, и регистрируемый эффект связан с процессом, идущим в мишени: с удалением мишени из пучка скорость счёта падала еще в 300 раз.

Контрольными экспериментами показано, что с полиэтиленовой мишенью наблюдается именно реакция (1):

а) замена полиэтиленовой мишени мишенью из графита уменьшала скорость счёта в 50 раз;

- б) регистрируемые спектрометрами частицы являются γ -квантами;
- в) их энергия близка к 70 Мэв;
- г) оба γ -кванта возникают одновременно;
- д) наблюдавшийся эффект, как и в случае жидкого водорода, связан с остановками π^- -мезонов в мишени.

В следующей серии экспериментов^{/8/} (2 глава диссертации) было показано также, что:

- е) угловая корреляция γ -квантов при захвате π^- -мезонов в водородосодержащих веществах такова же, как и в случае реакции (1);

ж) наряду с реакцией (1) наблюдается и радиационный процесс, аналогичный реакции на свободном водороде $\pi^- + p \rightarrow \gamma + n$.

Проведенная в первых опытах оценка вероятности наблюдавшегося процесса W показала, что захват π^- -мезонов связанным в CH_2 водородом подавлен в 150 раз по сравнению со свободным водородом.

Во 2 главе диссертации описываются эксперименты^{/9/} по определению Z -зависимости захвата π^- -мезонов водородом, входящим в соединения типа ZH_n (гидриды). В качестве мишеней использовались LiH , CH , CH_2 , H_2O и $C_2O_2H_8$. Анализ полученных данных показал, что приведенная вероятность захвата $P_Z = \frac{1}{n} W_Z \approx const \cdot Z^{-3,5}$. Для веществ, отличающихся только числом атомов водорода, аддитивность эффекта выполняется приближенно. Так, отношение вероятностей W для CH и CH_2 оказалось равным не 0,5, а $0,39 \pm 0,04$.

В этой главе описываются также эксперименты по определению вероятности захвата π^- -мезонов ядрами связанного водорода^{/10/}. Для сведения к минимуму систематических ошибок в измерениях использовались полиэтиленовые мишени, плотность которых была столь же малой, как и плотность жидкого водорода. При измерении жидкий водород и "легкий полиэтилен" поме-

щались поочередно в один и тот же сосуд, расположенный между спектрометрами. Таким образом, сравнение выходов γ -квантов производилось относительным методом в условиях одной и той же геометрии опыта и при одинаковом, с точностью до малых поправок, числе остановок π^- -мезонов в мишенях.

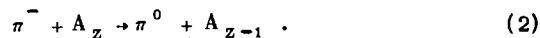
Два эксперимента^{/11/} были выполнены для проверки справедливости модели Панофского для перехвата π^- -мезонов в водородосодержащих веществах. Описание этих экспериментов составляет содержание 3 главы диссертации.

В первом опыте в качестве мишени использовался этан, помещенный в сосуд высокого давления. Плотность этана можно было изменять путем изменения давления в пределах от 0,0035 до 0,390 г·см³. Если образующийся при захвате пиона нейтральный водородный мезоатом покидает молекулу и "блуждает" затем в веществе, теряя пион при столкновении с более тяжелыми атомами (модель Панофского), то интенсивность перехвата пионов должна в нашем опыте возрастать с увеличением плотности вещества мишени, поскольку число столкновений мезоатома с другими атомами вещества растёт пропорционально плотности. Если же в перехвате принимают участие только атомы, связанные с водородом в молекуле, то интенсивность перехвата не зависит от плотности вещества мишени. Экспериментально было показано, что вероятность захвата π^- -мезонов водородом этана постоянна в широком диапазоне изменения плотности этана (≈ 100). Расхождения с предсказаниями модели Панофского получены и в опытах с растворами, в которых исследовалось, как изменяется вероятность W_{CH_4O} при растворении в метиловом спирте CH_4O тяжелых солей $LiCl$ и NaJ (см. таблицу 1).

Таблица 1

Вещество мишени	CH ₄ O	18CH ₄ O+NaJ	9CH ₄ O+NaJ	3,15CH ₄ O+LiCl
W _{эксп.,отн.ед.}	1,00±0,08	1,09±0,12	1,16±0,10	1,05±0,10
W _{расч.,отн.ед.} (модель Панофского)	1,00	0,66±0,18	0,47±0,20	0,49±0,17

В 4 главе описываются результаты экспериментов^{/12,13/}, которые в значительной своей части были выполнены как контрольные при изучении захвата π^- -мезонов ядрами связанного водорода (см.гл.2,3). Захват остановившихся π^- -мезонов ядрами может приводить к перезарядке



Другие каналы реакции захвата с перезарядкой, приводящие к развалу ядра, не могут реализоваться, поскольку при перезарядке выделяющаяся энергия составляет только 3,5 Мэв. Реакция (2) для ядер Li, Be, C, Al, Ti, Cu и Pb нами не наблюдалась, вероятность ее для этих ядер $\leq 10^{-4}$.

Здесь же излагаются результаты предпринятого нами позднее поиска реакции (2) на легких ядрах ¹⁰B, ¹⁴N и ³⁵Cl, которые в отличие от ранее изученных^{/12/} имеют известные изобары с массами m_{Z-1} , удовлетворяющими соотношению

$$\Delta m = m_Z - m_{Z-1} + m_{\pi^-} - m_{\pi^0} > 0. \quad (3)$$

Величина, стоящая в левой части неравенства (3), для ¹⁰B, ¹⁴N и ³⁵Cl равна соответственно 3,5; 3,9; 3,9 Мэв, так что реакция (2) на этих ядрах оказывается энергетически возможной. Ни на одном из этих ядер реакцию (2) обнаружить не удалось. В этих же опытах была определена вероятность реакции $\pi^- + {}^3\text{He} \rightarrow \pi^0 + {}^3\text{H}$, оказавшаяся равной 0,155±0,011, что находится в согласии с полученным ранее^{/14/} значением 0,158±0,008.

В заключительной части главы обсуждаются причины резкого подавления реакции (2) на легких ядрах.

В 5 главе проводится обсуждение полученных результатов, которые показали (см.гл.2 и 3), что механизм перехвата по модели Панофского играет, по-видимому, второстепенную роль при захвате π^- -мезонов связанным водородом, поскольку целый ряд экспериментальных фактов этой моделью не объясняется. Герштейн предположил^{/15/}, что константы перехвата мезонов с атомов водорода на атомы других элементов должны слабо зависеть от Z. Эксперименты подтвердили это предсказание. В опытах со смесями газов ($\text{H}_2 + Z$), выполненных как с μ^- -мезонами^{/16/}, так и с π^- -мезонами^{/17/}, показано, что константы перехвата мезонов от водорода на ядра с зарядом Z имеют линейную зависимость от Z. При такой зависимости констант от Z в модели Панофского невозможно получить обнаруженную на опыте Z-зависимость вероятности захвата π^- -мезонов связанным водородом W (гл.2).

При наличии резкой зависимости вероятности W от заряда Z добавление к водородосодержащему веществу уже небольших примесей атомов с большим Z (например иода) должно сильно подавлять в модели Панофского захват π^- -мезонов водородом. На опыте, однако, вероятность захвата π^- -мезонов водородом метилового спирта вообще не зависит от добавления атомов с большим Z в значительных концентрациях. В модели Панофского скорость перехвата должна возрастать с увеличением абсолютной концентрации атомов с зарядом Z из-за увеличения числа столкновений π^- -атома с атомами Z. Однако на опыте такое возрастание не наблюдается. Наконец, показано, что вероятность захвата π^- -мезонов водородом в молекуле этана не зависит от плотности этана. Все эти факты свидетельствуют о том, что значительная малость вероятности захвата π^- -мезонов водородом этана обусловлена перехватом в самой молекуле

этана, а стадия "блуждания" π^-p -атома дает малый вклад в процесс перехвата.

Для объяснения описываемых процессов Пономаревым была предложена другая схема - "модель больших мезомолекул" /18/. В рамках этой модели показано, что при остановке π^- -мезонов в водородосодержащем веществе ZH основная их часть захватывается на мезоатомные уровни $Z\pi^-$ -мезоатомов; другая, меньшая часть ($\approx 1/Z$) попадает на общие для Z и H мезомолекулярные уровни, образуя $Zp\pi^-$ -систему. С общих уровней мезомолекулы π^- - мезон за счет конкурирующих радиационных и Оже-переходов попадает на разделенные уровни $Z\pi^-$ и $p\pi^-$ -мезоатомов. На этой стадии происходит существенное подавление захвата π^- -мезонов связанным водородом ($\approx Z^2$). Таким образом, при захвате π^- -мезонов ядрами связанного водорода основными являются процессы, происходящие на мезомолекулярной стадии. Однако в некоторых случаях перехват (механизм Панофского) может играть основную роль. Так, например, в смесях газов H_2+Z , где механизм, предложенный Пономаревым, полностью исключен, перехват наблюдается экспериментально /16,17/, однако подавление захвата π^- -мезонов водородом в этом случае значительно более слабое, чем в водородосодержащих веществах.

Таким образом, в экспериментах /5,9,10,11,12,13/, составивших основу диссертации:

- 1) экспериментально обнаружен захват остановившихся π^- -мезонов ядрами связанного водорода в водородосодержащих веществах и измерена вероятность этого процесса;
- 2) исследована зависимость вероятности W захвата π^- -мезонов ядрами связанного водорода в водородосодержащих соединениях от Z. Показано, что $P_Z \sim Z^{-3,5}$;
- 3) экспериментально проверены предсказания модели перехвата, предложенной Панофским. Показано, что в водородосодержащих веществах захват π^- -мезонов связанным водородом происходит по иному механизму, вклад механизма Панофского в этот процесс мал;

4) исследована перезарядка остановившихся π^- -мезонов на ядрах. Экспериментально показано, что вероятность этого процесса $\leq 10^{-4}$ для всех исследованных ядер, кроме 3He .

Результаты, изложенные в настоящей диссертации, послужили основой для пересмотра представлений о механизме захвата π^- -мезонов связанным водородом. Выполненные эксперименты показали, что захват π^- -мезонов связанным водородом определяется не мезоатомной, а мезомолекулярной стадией процесса, а перехват в водородосодержащих соединениях играет второстепенную роль.

Л и т е р а т у р а

1. E. Fermi, E. Teller. Phys., Rev., 72, 399 (1947).
2. J.S. Baijal, J.A. Diaz, S.N. Kaplan, R.V. Pyle. Nuovo Cim., 30, 711 (1963).
В.Г. Зинов, А.Д. Конин, А.И. Мухин. Я.Ф., 2,5, 859 (1965).
3. M.B. Stearns, M. Stearns, L. Leipuner. Phys. Rev., 108, 445 (1957).
4. W.K.H. Panofsky, L. Aamodt, H.F. York. Phys. Rev., 78, 825 (1950). W.K.H. Panofsky, R.L. Aamodt, J. Hadley. Phys. Rev., 81, 565 (1951).
5. А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин. ЖЭТФ, 42,6, 1680 (1962).
6. А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин. Nuovo Cim., 24, 405 (1962).
7. А.Ф. Дунайцев. ПТЭ, 6, 77 (1964).
8. D. Bodansky, A.M. Sachs, J. Steinberger. Phys. Rev., 93, 1367 (1954); W. Spry. Phys. Rev., 95, 1295, (1954); J. Tinlot, A. Roberts. Phys. Rev., 94, 137 (1954); K. Miyake, K.F. Kinsey, D.E. Knapp. Phys. Rev., 126, 2188 (1962).
9. V.I. Petrukhin, Yu.D. Prokoshkin. Nuovo Cim., 28, 99 (1963).
10. А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин. Nuovo Cim.,
11. В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин. ДАН, 180, 1, 71 (1965).
12. В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин. Препринт ОИЯИ, P-1470, Дубна, (1963).
V.I. Petrukhin, Yu.D. Prokoshkin. Nucl. Phys., 54, 414 (1964).
13. В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, А.И. Филиппов. Препринт ОИЯИ P-2780, Дубна (1966). Я.Ф., 5, 2, 327 (1967).

14. О.А.Займидорога, М.М.Кулюкин, Р.М.Суляев, И.В.Фаломкин, А.И.Филиппов, Б.М.Цупко-Ситников, Ю.А.Шербаков, ЖЭТФ, 48, 1267, (1965).
15. С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 43, 706 (1962).
16. С.Г.Басиладзе, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян. ЖЭТФ, 49, 1042(1965).
17. В.И.Петрухин, Ю.Д.Прокошкин, В.М.Суворов. Препринт ОИЯИ, Р13-3901, Дубна (1968). ЖЭТФ, 49 №6, 2173-2180, 1968 г.
18. Л.И.Пономарев. Диссертация ОИЯИ, 1965г.
19. Л.И.Пономарев. Я.Ф., 2,232(1965; Я.Ф., 6,388(1967).

Рукопись поступила в издательский отдел
1 июля 1969 года.