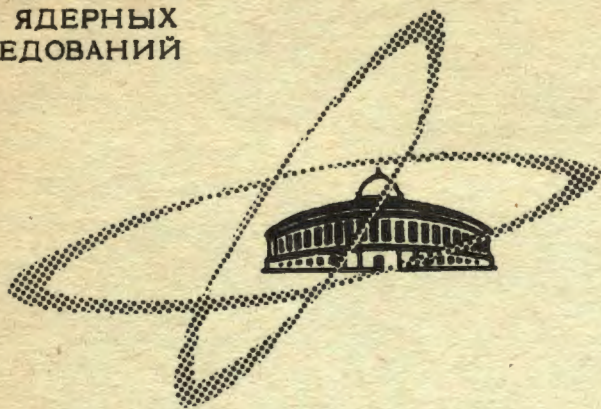


П-312

3/IX-68

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



P13 - 3901

В.И.Петрухин, Ю.Д.Прокошкин, В.М.Суворов

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

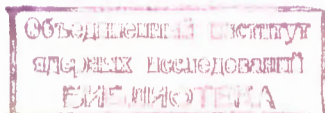
ПЕРЕХВАТ π^- -МЕЗОНОВ В СМЕСИ ВОДОРОДА
С ДРУГИМИ ГАЗАМИ

1968

P13 - 3901

В.И.Петрухин, Ю.Д.Прокошкин, В.М.Суворов

ПЕРЕХВАТ π^- -МЕЗОНОВ В СМЕСИ ВОДОРОДА
С ДРУГИМИ ГАЗАМИ



7401/2 шр.

1. В в е д е н и е

Процесс торможения и захвата π^- -мезонов в водороде протекает в несколько стадий, основными среди которых являются:

1) торможение π^- -мезонов и переход их из непрерывного спектра в дискретный (образование высоковозбужденного мезоатома или мезо-молекулы),

2) переход мезонов на низкие орбиты и

3) ядерный захват π^- -мезонов в s -состоянии



Для изолированного $p\pi^-$ -мезоатома время захвата τ_c определяется сравнительно медленными радиационными переходами с высоких орбит мезоатома в основное состояние и составляет $\approx 10^{-9}$ сек. В реальном случае при остановке π^- -мезонов в газообразном или жидком водороде образующиеся $p\pi^-$ -мезоатомы уже нельзя считать изолированными, так как среднее время до соударения их с другими атомами значительно меньше τ_c . Будучи электрически нейтральными и обладая малыми размерами, мезоатомы водорода эффективно взаимодействуют с другими атомами, так как они свободно проникают в электронные оболочки

других атомов и могут близко подойти к их ядрам. Протекающие при таких столкновениях процессы девозбуждения $p\pi^-$ -мезоатомов и захвата π^- -мезонов (Оже-эффект на электронах соседнего атома/1/ и ядерный захват из высоких ns -состояний - механизм Дая, Сноу, и Сачера/2/) значительно более интенсивны, чем радиационные переходы в изолированном $p\pi^-$ -мезоатоме/1/, и играют определяющую роль в общей картине захвата π^- -мезонов в водороде.

В случае остановки π^- -мезонов в смеси водорода с более тяжелыми атомами Z возможен еще один процесс - перехват π^- -мезона от мезоатома водорода к ядру Z при столкновениях:^{x/}



Этот процесс необратим (так как $Z\pi^-$ -мезоатом электрически заряжен) и приводит к захвату π^- -мезона ядром Z ^{хх/}.

Перехват мезонов от мезоатомов водорода к более тяжелым ядрам наблюдался только для μ^- -мезонов/12-18/. Так как время жизни μ^- -мезона в $p\mu^-$ -мезоатоме значительно превышает длительность всех каскадных переходов, то при малых концентрациях примеси Z μ^- -мезон успевает достичь K -орбиты и длительно пребывая на ней (μ^- -мезон слабо взаимодействует с протоном), эффективно перехватывается при столкновениях $p\mu^-$ -мезоатома с ядрами даже при очень малых концентрациях ядер Z ($\leq 10^{-3}$). Скорость этого перехвата w_z пропорциональна плотности (числу атомов в 1 см^3) ρ_z газа Z :

$$w_z = \frac{\lambda_z}{\rho_H^0} \rho_H \quad (4)$$

^{x/}Если система $H_2 + Z$ представляет собой не смесь, а химическое соединение, то действует другой, значительно более интенсивный механизм перераспределения π^- -мезонов/3-7/.

^{хх/}Захват π^- -мезона ядром Z приводит к развалу ядра, а не к перезарядке (1), которая подавлена до уровня $< 10^{-3} + 10^{-4}$ для всех ядер, за исключением H и 3He /8-11/.

(где $\rho_{\text{H}}^0 = 4,2 \cdot 10^{22}$ атомов/см³ - плотность жидкого водорода), а приведенная константа перехвата λ_{Z} пропорциональна/14,17/:

$$\lambda_{\text{Z}} \approx 8 \cdot 10^9 Z \text{ сек}^{-1}. \quad (5)$$

Иная картина имеет место при перехвате π^- -мезонов. Так как скорость ядерного захвата (1), (2) из низших состояний $p\pi^-$ - мезоатома весьма велика, то и перехват π^- -мезона на ядра Z (3) возможен только с высоких уровней $p\pi^-$ -мезоатома и интенсивно может идти лишь при больших концентрациях ядер примеси Z . Можно ожидать, что вероятность такого перехвата, как и в случае μ^- -мезонов, растет с увеличением Z .

Проведенные ранее исследования захвата π^- -мезонов в смесях водорода с другими элементами не позволили сделать вывод о наличии перехвата π^- -мезонов/15,19,20/. Целью настоящей работы являлось экспериментальное наблюдение перехвата π^- -мезонов от водорода к более тяжелым газам ($Z > 1$) и исследование характеристик этого процесса.

2. Процедура измерений

Эксперименты были выполнены на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ при помощи методики, описанной ранее/4,5, 21,22/.

π^- -мезоны с начальной энергией 80 Мэв тормозились, проходя через фильтр и ряд сцинтилляционных счётчиков, и останавливались в газовой мишени высокого давления. Мишень представляла собой шарообразный стальной сосуд объемом 900 см³, наполнявшийся смесью водорода с другими газами Z под давлением до 150 атм. Захват остановившихся π^- -мезонов водородом идентифицировался по реакции перезарядки (1). Пары γ -квантов, образующиеся в реакции (1), регистрировались при помощи черенковских спектрометров полного поглощения.

Мишень наполнялась водородом, к которому затем под избыточным давлением добавлялось различное количество газа Z , т.е. изменялась относительная концентрация C газа Z при фиксированной плотности водорода. Количество газа в мишени определялось взвешиванием. Измерения были выполнены для ряда значений плотности водорода в мишени ρ_{H} . Для каждой смеси газов была найдена зависимость скорости счёта пар γ -квантов $N_{\gamma\gamma}$ от толщины тормозящего фильтра R . Результаты одной из серий таких измерений приведены на рис. 1.

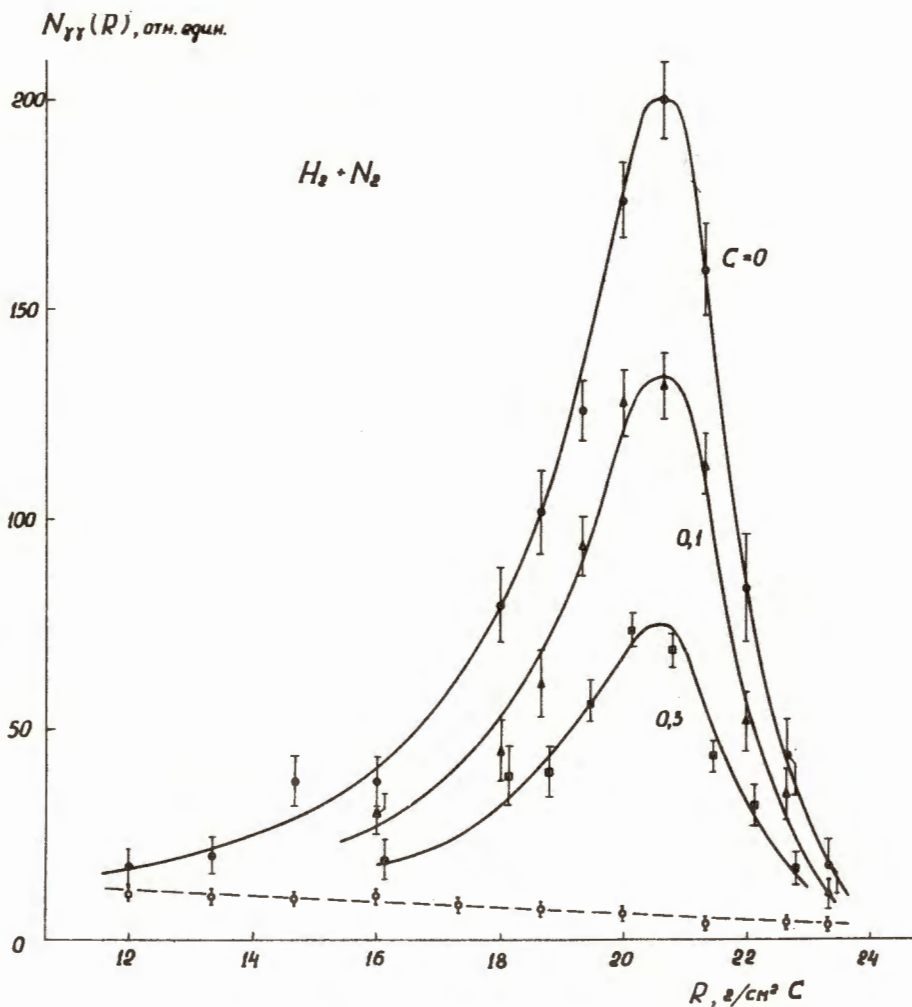


Рис. 1. Результаты одного из измерений зависимости $N_{\gamma\gamma}(R)$ для смеси $H_2 + N_2$ (темные точки). Сплошные кривые - зависимости $N_{\gamma\gamma}(R)$, вычисленные по (7) при различных значениях относительной концентрации азота C , указанных цифрами у кривых. Светлые точки и пунктирная кривая - вклад перезарядки налету $N'_{\gamma\gamma}(R)$. Плотность водорода $\rho_H = 97 \cdot 10^{-3} \rho_H^0$ (при нормальных условиях плотность газообразного водорода равна $1,3 \cdot 10^{-3} \rho_H^0$).

Наряду с процессом (1) в кривую $N_{\gamma\gamma}(R)$ небольшой вклад дает также реакция перезарядки π^- -мезонов налету в веществе стенок мишени (выход γ -квантов от перезарядки π^- -мезонов налету в газе, заполнявшем мишень, на два порядка величины меньше). Вклад перезарядки π^- -мезонов налету был найден на основании измерений зависимости скорости счёта пар γ -квантов $N'_{\gamma\gamma}$ от R для пустой мишени (см. рис. 1). Скорость счёта пар γ -квантов от реакции (1) $N^*_{\gamma\gamma}(R)$ определялась как разность $N_{\gamma\gamma}(R) - N'_{\gamma\gamma}(R)$.

3. Результаты измерений

Зависимость числа остановок π^- -мезонов в газовой мишени N_{π} от толщины фильтра R связана с распределением π^- -мезонов по пробегам $F(R)$ соотношением

$$N_{\pi}(R) = \int_R^{R+\Delta} F(R') dR' . \quad (6)$$

Здесь $\Delta = \Delta_0(1 + gC)$ - тормозная толщина газовой смеси $H_2 + Z$, $C = \rho_Z / \rho_H$ - отношение плотностей газа Z и водорода, $g = g_Z / g_H$ - отношение тормозных способностей газов, приведенных к одному атому ($g = Z$). Первоначальная посадка π^- -мезонов на атомы H и Z пропорциональна g_H и g_Z /23/. Отсюда следует, что в случае, когда нет перехвата π^- -мезонов,

$$N^*_{\gamma\gamma}(R) = \frac{N_{\pi}(R)}{1 + gC} . \quad (7)$$

Вводя вероятность Q перехвата π^- -мезонов от атомов водорода к атомам Z и

$$Y_{\gamma\gamma} = \int N^*_{\gamma\gamma}(R) dR , \quad (8)$$

получаем, что в нашей постановке эксперимента ($\rho_H = \text{const}$ т.е. $\Delta_0 = \text{const}$)

$$Q = 1 - \frac{Y_{\gamma\gamma}(\rho_H, C)}{Y_{\gamma\gamma}(\rho_H, 0)} \quad (9)$$

Распределение π^- -мезонов по пробегам $F(R)$ было определено на основании измерений зависимости $N_{\gamma\gamma}^*(R)$ с мишенью, наполненной водородом. В этом случае $N_{\gamma\gamma}^*(R)$ практически совпадает по форме с $F(R)$, т.к. ширина распределения $F(R)$ на два порядка величины превышает тормозную толщину водородной мишени Δ_0 . Вероятности перехвата Q были найдены методом наименьших квадратов путем сравнения измеренных и вычисленных зависимостей (7)-(9).

Для проверки точности описанного метода определения $Y_{\gamma\gamma}$ и Q были проведены контрольные эксперименты с водородной мишенью и мишенями из гидрида лития LiH , в которых тормозная толщина мишеней варьировалась в широких пределах. Измеренные в этих опытах величины $Y_{\gamma\gamma}$ совпали с вычисленными в пределах нескольких процентов.

Для определения Q был использован также и другой способ^{23/}. При малых тормозных толщинах мишени $N_{\gamma\gamma}^*(R) \approx (1-Q)\Delta_0 N_{\pi}(R + \frac{\Delta}{2})$, как следует из (6) и (7). Обозначив через $N_{\gamma\gamma}^* \text{max}$ максимальное значение $N_{\gamma\gamma}^*(R)$, получаем

$$Q = 1 - \frac{N_{\gamma\gamma}^*(\rho_H, C)_{\text{max}}}{N_{\gamma\gamma}^*(\rho_H, 0)_{\text{max}}} \quad (10)$$

с точностью до небольшой поправки $1 + g(\Delta_0)(1 + gC)$, которая учитывает конечную величину отношения тормозной газовой мишени к разбросу пробегов π^- -мезонов. Описанный метод определения Q дал те же результаты, что и (9).

Полученные для исследованных смесей газов He, N_2, Ne и Ar с водородом величины Q приведены на рис. 2. Как видно из этого ри-

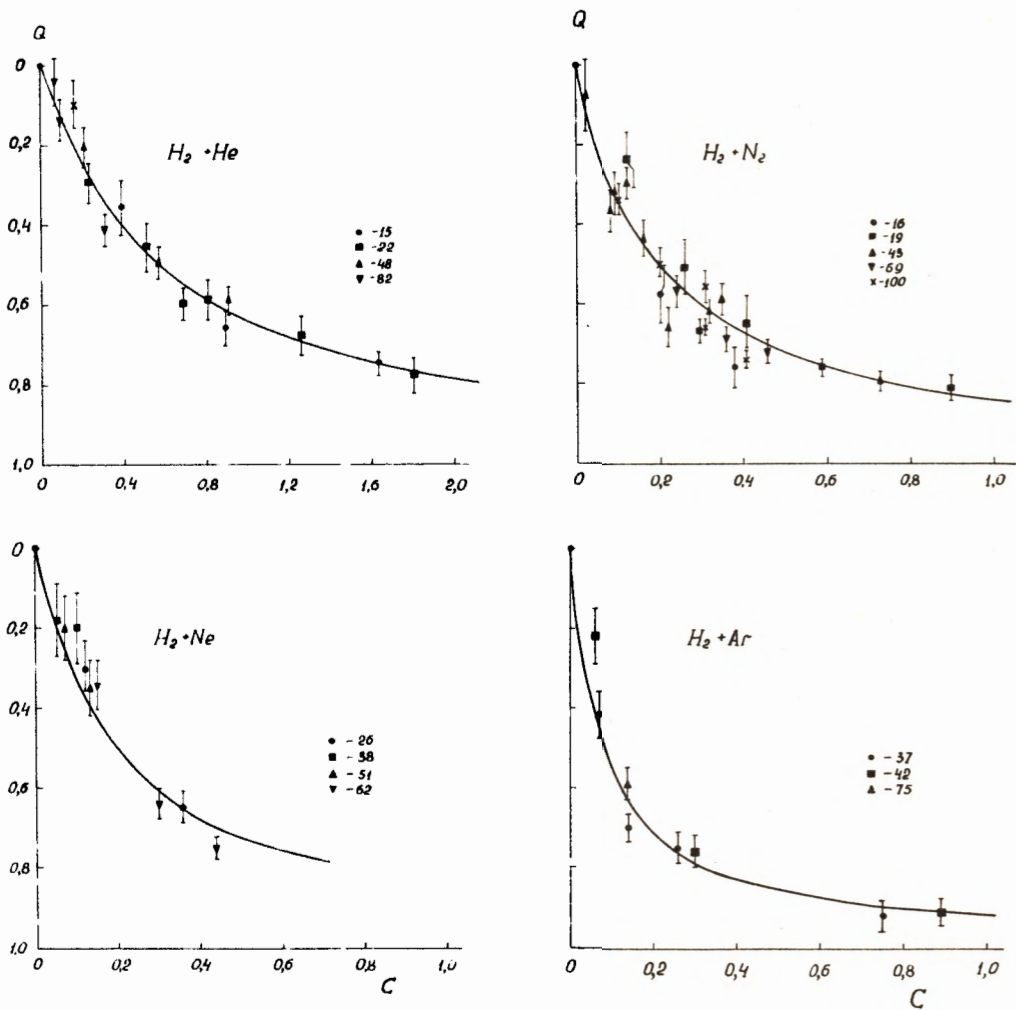


Рис. 2. Вероятность перехвата Q при различных относительных концентрациях C для смесей водорода с He, N_2 , Ne и Ar. Значения плотности водорода в единицах $10^{-3} \rho_H^0$ указаны цифрами. Кривые - зависимости (9), вычисленные при значениях Λ , приведенных в таблице, и $\kappa = 0$.

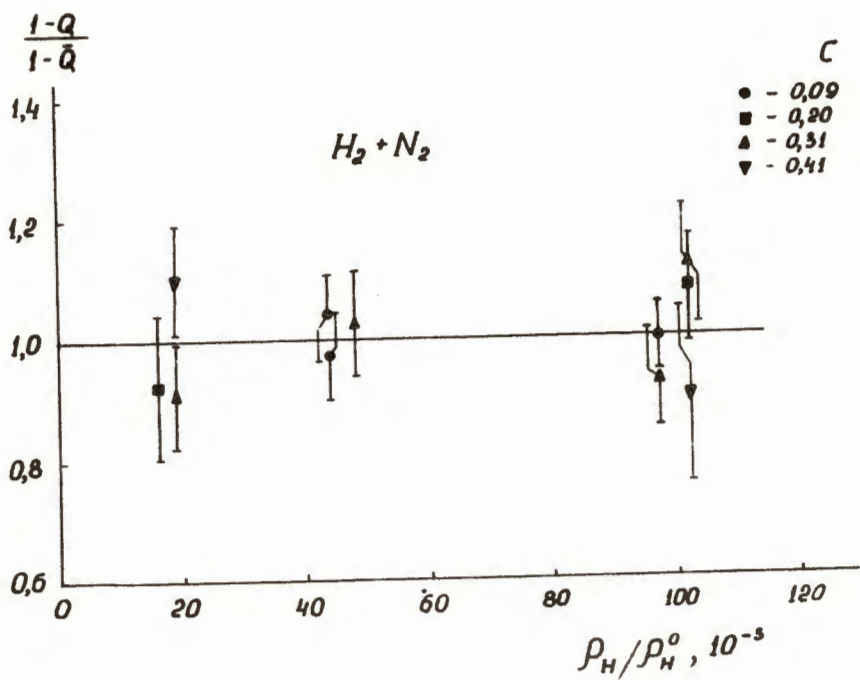


Рис. 3. Сравнение величин $(1-Q)/(1-\bar{Q})$ при различных значениях ρ_N (в единицах $10^{-3} \rho_N^0$) и фиксированной относительной концентрации C азота в смеси $H_2 + N_2$. \bar{Q} - средняя величина Q при данном C .

сунка, во всех изученных смесях наблюдается перехват π^- -мезонов от водорода к более тяжелым атомам.

4. Обсуждение

Измерения зависимостей Q от C были выполнены при различных плотностях водорода ρ_H . Как видно из рис. 3, величины Q при фиксированном значении C в пределах погрешностей измерений не зависят от ρ_H ; интенсивность перехвата определяется только относительной концентрацией тяжелых атомов C . Другой характерной особенностью наблюдавшегося процесса перехвата является рост интенсивности перехвата с увеличением заряда ядра тяжелого атома Z (рис. 2).

Рассмотрим полученные экспериментальные результаты в рамках следующей упрощенной схемы.

1) π^- -мезоны тормозятся в смеси газов $H_2 + Z$ и захватываются на высокие уровни мезомолекул и мезоатомов водорода^{x/} и Z с вероятностью, пропорциональной зарядам ядер (точнее, пропорциональной тормозным способностям $2g_H$ и g_Z); π^- -мезон, захваченный на мезомолекулярные уровни водорода, опускается на уровень изолированного $p\pi^-$ -мезоатома с главным квантовым числом $3 \leq n \leq 7/3,7/$.

2) В результате столкновений возбужденного $p\pi^-$ -мезоатома с атомами водорода и примеси Z π^- -мезон захватывается протоном или перехватывается на атом Z (см. Введение).

Скорость захвата π^- -мезона протоном в $p\pi^-$ -мезоатоме W_H пропорциональна плотностям ρ_H и ρ_Z водорода и газа Z :

$$W_H = a \rho_H + b \rho_Z + \alpha. \quad (11)$$

^{x/} Уровни изолированного $p\pi^-$ -мезоатома, на которые захватывается π^- -мезон в водороде, соответствуют значению главного квантового числа $n < 8/3,7/$.

Здесь a — скорость захвата π^- -мезона в изолированном $p\pi^-$ -мезоатоме. Эта величина, не зависящая от плотности газов, мала (см. Введение) и может быть опущена в ф-ле (11). Скорость перехвата π^- -мезонов от $p\pi^-$ -мезоатома к ядрам Z , аналогичная (4), пропорциональна ρ_Z :

$$W_Z = \frac{\Lambda_Z}{\rho_H^0} \rho_Z \quad (12)$$

В принятых обозначениях вероятность перехвата равна^{x/}

$$Q = \frac{\Lambda C}{1 + (\Lambda + \kappa) C} \quad (13)$$

где

$$\Lambda = \Lambda_Z / a \rho_H^0, \quad \kappa = b/a, \quad c = \rho_Z / \rho_H.$$

Рассмотренная феноменологическая модель предсказывает, что вероятность перехвата π^- -мезонов (13) должна зависеть не от плотности отдельных газов смеси, а только от относительной концентрации C . Это согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 2,3). При малых C , согласно (13), Q линейно растет с увеличением C .

$$Q \approx \Lambda C, \quad (\Lambda + \kappa) C \ll 1. \quad (14)$$

В области больших относительных концентраций следует ожидать насыщения перехвата с ростом C :

^{x/} Скорость распада π^- -мезона значительно меньше скорости захвата в рассматриваемых смесях, и ею можно пренебречь.

$$Q \rightarrow Q_{\max} = \frac{\Lambda}{\Lambda + \kappa}, \quad (15)$$

$$C \rightarrow \infty$$

которое достигается при

$$C \gg \frac{1}{\Lambda + \kappa}. \quad (16)$$

Величины Λ и κ были определены по данным рис. 2 методом наименьших квадратов (см. табл.)

Таблица

Газ Z	Z	Λ	κ	Q_{\max}
He	2	$1,8 \pm 0,3$	$< 0,2$	$> 0,90$
N ₂	7	$5,2 \pm 0,5$	$< 0,4$	$> 0,93$
Ne	10	$5,2 \pm 1,0$	$< 0,5$	$> 0,91$
Ar	18	12 ± 2	$< 0,8$	$> 0,94$

Найденные значения Λ могут быть описаны линейной зависимостью (см. рис. 4):

$$\Lambda = (0,7 \pm 0,2) Z. \quad (17)$$

Приведенная константа перехвата Λ_Z , аналогичная величине λ_Z для μ^- -мезонов (5), равна:

$$\Lambda_Z \approx 3 \cdot 10^{11} Z \text{ сек}^{-1}, \quad (18)$$

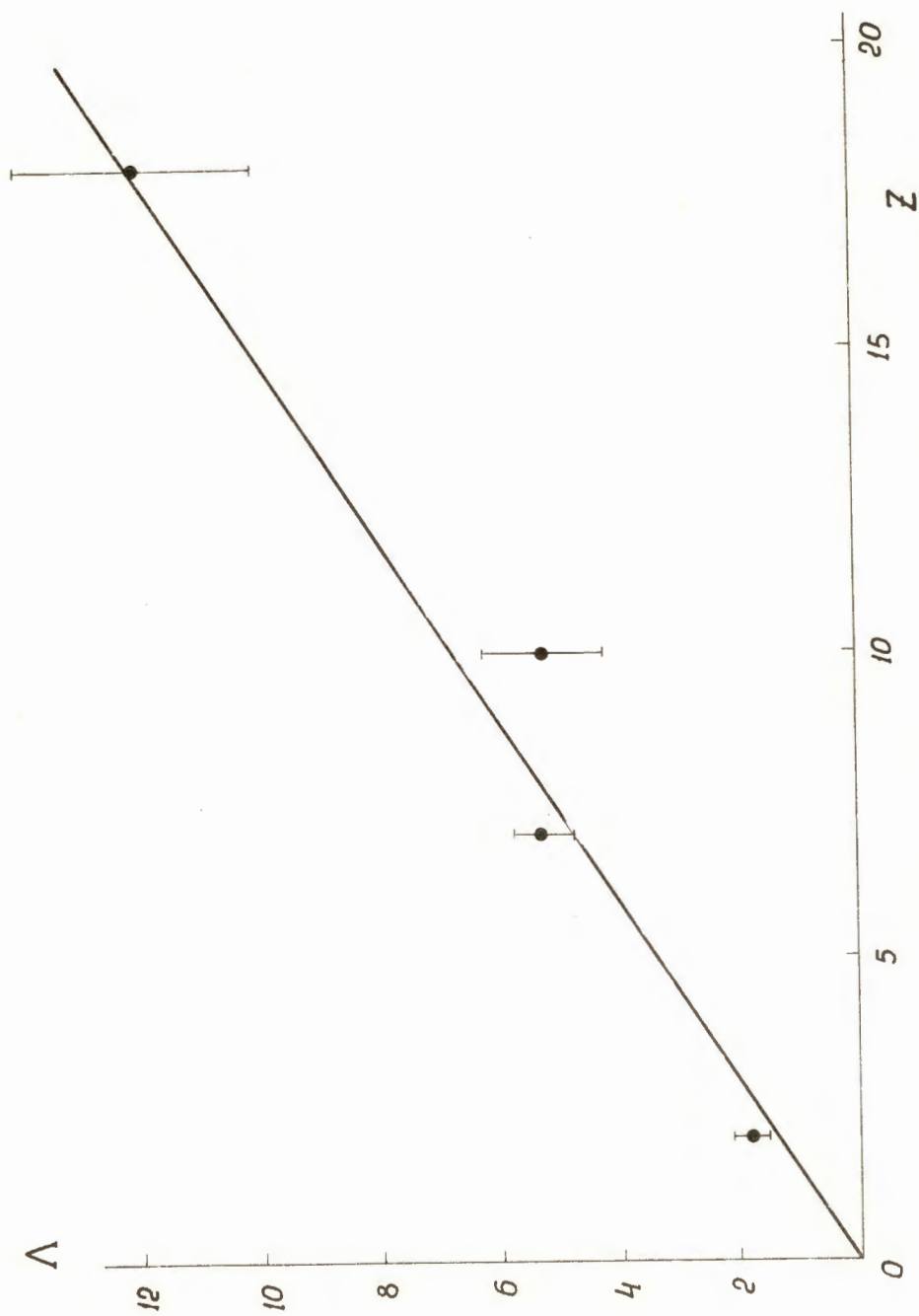


Рис. 4. Константа перехода Λ при различных значениях Z . Прямая - зависимость $\Lambda = 0,67 (17)$.

если принять, согласно/24/ $\alpha \rho_H^0 = (4 \pm 1) 10^{11} \text{ сек}^{-1}$, т.е.

$$\alpha = 1 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 / \text{атом} \cdot \text{сек.}$$

Константа перехвата π^- -мезонов Λ_Z на два порядка величины превышает константу перехвата μ^- -мезонов (4), (5), определенную в опытах при малых плотностях примеси ρ_Z . Это объясняется тем, что перехват μ^- -мезонов при малых ρ_Z происходит с К-орбиты мезоатома, в то время как π^- -мезоны при $C=1$ перехватываются с более высоких орбит ($n > 1$). Если принять, что скорость перехвата пропорциональна квадрату радиуса мезоатома ($\sim n^4$), т.е.

$$\lambda_Z \approx 8 \cdot 10^9 Z n^4 \text{ сек}^{-1} / 7/ ,$$

то из сравнения (5) и (18) следует $n \approx 3$, что согласуется с оценкой/3,7/.

Для коэффициента κ были получены значения, в пределах погрешностей совпадающие с нулем. Это свидетельствует об отсутствии заметного влияния столкновений $p\pi^-$ -мезоатомов с ядрами Z на скорость захвата π^- -мезона протоном. В таблице приведены верхние граничные оценки величин κ на уровне 90%-ой достоверности. Для всех исследованных в настоящей работе смесей газов

$$\kappa \ll \Lambda . \tag{19}$$

В области высоких относительных концентраций C (16) вероятность перехвата близка к единице.

5.3 а к л ю ч е н и е

1. Характерной особенностью исследованного в настоящей работе перехвата π^- -мезонов от водорода к более тяжелым атомам в газовой смеси $H_2 + Z$ является зависимость вероятности перехвата π^- -мезонов только от относительной концентрации примеси Z . Это означает, что захват π^- -мезонов протонами определяется столкновениями $p\pi^-$ -мезоатомов с молекулами водорода, т.е. $W_H \approx \rho_H$.

2. Перехват π^- -мезонов интенсивно протекает только при больших концентрациях примеси ($C \approx 1$), в то время как μ^- -мезоны эффективно перехватываются на ядра примеси уже при очень малых концентрациях. Это связано с большим различием в скоростях, конкурирующих с перехватом процессов ядерного захвата π^- - и μ^- -мезонов.

3. Столкновения $p\pi^-$ -мезоатома с более тяжелыми атомами не оказывают заметного влияния на скорость захвата π^- -мезона в $p\pi^-$ -мезоатоме, которая определяется, в основном, столкновениями с атомами водорода. Представляет интерес исследование перехвата π^- -мезонов смесях с высокой концентрацией C , где влияние столкновений $p\pi^-$ -мезоатомов с ядрами примесей на скорость захвата π^- -мезонов протонами может быть обнаружено. Перехват π^- -мезонов при столкновении $p\pi^-$ -мезоатома с ядрами примеси Z значительно более вероятен (особенно при больших Z), чем захват π^- -мезона протоном в результате столкновения $p\pi^-$ -мезоатома с атомом водорода.

4. Наблюдавшиеся особенности перехвата π^- -мезонов находят качественное объяснение в рамках феноменологической модели. Для более полной проверки этой модели желательно провести исследование процесса перехвата для различных смесей в широком интервале плотностей газов.

5. Особый интерес представляет изучение перехвата π^- -мезонов в газовой смеси водорода и дейтерия. Так как $d\pi^-$ -мезоатом электронейтрален, можно ожидать, что в смеси $H_2 + D_2$ будет идти интенсивный обратный перехват π^- -мезонов от дейтерия к водороду, т.е. $\Lambda \ll 1$. А так как электромагнитные свойства атомов H и D близки, должно быть $a \approx b$, $\kappa \approx 1$, и вероятность перехвата для смеси $H_2 + D_2$ должна обнаруживать свойства насыщения с ростом C уже при $C \approx 1$. Наконец, для этой смеси $\kappa \gg \Lambda$, т.е. $Q_{\max} \ll 1$. Поэтому для исследования перехвата π^- -мезонов от водорода к дейтерию необходима повышенная точность измерений.

В заключение пользуемся случаем поблагодарить С.С.Герштейна и Л.И. Пономарева за большую помощь в работе.

Л и т е р а т у р а

1. H.L.Leon, H.Bethe. *Phys. Rev.*, 127, 636 (1952).
2. T.B.Day, G.A.Snow, J.Sucher. *Phys. Rev. Lett.*, 3, 61, (1959); 118, 864 (1960).
3. Л.И.Пономарев. *ЯФ* 2, 223, (1965); *ЯФ.*, 6, 389 (1967).
4. V.I.Petrukhin, Yu. D.Prokoshkin, *Nuovo Cim.*, 28, 99 (1962).
5. З.В.Крумштейн, В.И.Петрухин, Л.И.Пономарев, Ю.Д.Прокошкин. *Препринт ОИЯИ, P13-3653*, Дубна 1967. *ЖЭТФ* 54, 1690 (1968).
6. З.В.Крумштейн, В.И.Петрухин, Л.И.Пономарев, Ю.Д.Прокошкин. *Препринт ОИЯИ, P13-3870*, Дубна 1968.
7. С.С.Герштейн, В.И.Петрухин, Л.И.Пономарев, Ю.Д.Прокошкин. *Препринт ОИЯИ, P4-3860*, Дубна 1968.
8. V.I. Petrukhin, Yu.D.Prokoshkin, *Nucl. Phys.*, 54, 414 (1964).
9. В.И.Петрухин, Ю.Д.Прокошкин, А.И.Филиппов. *ЯФ*, 5, 327, (1967).
10. О.А.Займидорога, М.М.Кулюкин, Р.М.Суляев, И.В.Фаломкин, А.И.Филиппов, В.М.Цупко-Ситников, Ю.А.Шербаков. *ЖЭТФ*, 48, 1267 (1965).
11. W.Chinowsky & J.Steinberg. *Phys. Rev.*, 95, 623 (1954).
12. С.С.Герштейн. *ЖЭТФ*, 43, 706 (1962); В.Б.Беляев, С.С.Герштейн, Б.Н.Захарьев, С.П.Ломнев. *ЖЭТФ*, 37, 1652 (1959).
13. В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, Ю.А.Кушниренко, В.П.Москалёв, С.С.Герштейн, *ЖЭТФ*, 42, 439 (1962); В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, В.В.Фильченков. *Препринт ОИЯИ, D-2015*, Дубна 1965.
14. С.Т.Басиладзе, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян. *ЖЭТФ*, 49, 1042 (1965).
15. О.А.Займидорога, М.М.Кулюкин, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, В.М.Цупко-Ситников, Ю.А.Шербаков. *ЖЭТФ*, 44, 1852 (1963).
16. A.Alberigi-Quarranta, A.Bertin, G.Matone, F.Palmonari, A.Placci, P.Dalpia, G.Torelli & Zavattini. *Nuovo Cim.*, 47B, 92 (1967).
17. A.Placci, E.Zavattini, A.Bertin, A.Vitale. *Nuovo Cim.*, 52A, 1274 (1967).
18. G.Conforto, C.Rubbia, E.Zavattini, S.Focardi. *Nuovo Cim.*, 33, 1001 (1964).
19. D.Bartlett, S.Devons, S.L.Meyer, J.L.Rosen. *Phys.Rev.*, 136B, 1452 (1964).
20. K.Derrick, M.Derrick, J.C.Fetkovich, T.H.Fields, E.G.Pewitt, G.B. Yodh. *Phys. Rev.*, 151, 82 (1966).
21. А.Ф.Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д.Прокошкин, В.И.Рыкалина. *ЖЭТФ*, 1680 (1962).

22. В.И.Петрухин, Ю.Д.Прокошкин. ДАН, 160, 71 (1965).
23. В.И.Петрухин, Ю.Д.Прокошкин, А.И.Филиппов. ЯФ, 6 1008 (1967).
24. J.H.Doede, R.H.Hildebrand, M.H.Israel, M.R.Pyka. Phys. Rev., 129,
2808 (1963).

Рукопись поступила в издательский отдел
30 мая 1968 года.