

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



П-312

27  
P1 - 9136

В.И.Петрухин, В.М.Суворов

4125/2-75

ИЗУЧЕНИЕ АТОМНОГО ЗАХВАТА  
И ПЕРЕХВАТА  $\pi^-$ -МЕЗОНОВ  
В СМЕСЯХ ВОДОРОДА С ДРУГИМИ ГАЗАМИ

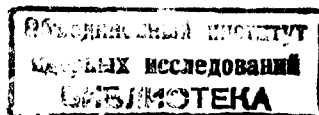
**1975**

P1 - 9136

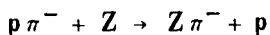
В.И.Петрухин, В.М.Суворов

ИЗУЧЕНИЕ АТОМНОГО ЗАХВАТА  
И ПЕРЕХВАТА  $\pi^-$ -МЕЗОНОВ  
В СМЕСЯХ ВОДОРОДА С ДРУГИМИ ГАЗАМИ

*Направлено в ЖЭТФ*



## Перехват $\pi^-$ -мезонов

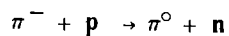


/1/

наблюдался нами в опытах по изучению ядерного захвата  $\pi^-$ -мезонов водородом в газовых смесях  $H_2 + Z$ , где  $Z$  есть He,  $N_2$ , Ne, Ar<sup>/1/</sup>. При этом оказалось, что скорость перехвата  $\lambda_Z \approx Z$ , как и в случае  $p\mu^-$ -атомов<sup>/2/</sup>. Во всем остальном, однако, из-за наличия интенсивного конкурирующего процесса ядерного захвата  $\pi^-$ -мезона протоном в мезоатоме перехват резко различается для  $\pi^-$ -и  $\mu^-$ -мезонов: 1/ перехват  $\pi^-$ -мезонов становится заметным при атомарных концентрациях тяжелых атомов  $C \approx 1$ , тогда как  $\mu^-$ -мезоны полностью перехватываются при  $C \approx 10^{-3} - 10^{-5} / C = n_Z/n_H^{3/}$ , где  $n_Z, n_H$  - числа атомов  $Z$  и водорода в  $1 \text{ см}^3$ ; 2/ приведенная к плотности жидкого водорода скорость перехвата  $\lambda_Z^0$  почти на два порядка величины превышает приведенную скорость для  $\mu^-$ -мезонов; 3/ скорость перехвата пионов на атомы гелия сравнима со скоростями перехвата на другие атомы, тогда как перехват  $\mu^-$ -мезонов на гелий резко подавлен /по расчету  $\approx 10^{-5}$  /<sup>3/</sup> и не наблюдался<sup>/4/</sup>. Все эти отличия связаны с тем, что перехват  $\mu^-$ -мезонов происходит с K-орбиты мезоатома водорода, тогда как  $\pi^-$ -мезоны перехватываются с более высоких орбит.

Интенсивный перехват пионов на атомы He обусловлен, по-видимому, тем, что для возбужденных состояний  $p\pi^-$ -атомов рассмотренный в<sup>/5/</sup> механизм запрета снимается. Можно поэтому ожидать, что при больших  $C \approx 0,1 - 1$  / концентрациях He в смеси  $H_2 + He$  будет происходить перехват  $\mu^-$ -мезонов, сравнимый по интенсивности с перехватом  $\pi^-$ -мезонов.

Настоящая работа посвящена более детальному исследованию механизма перехвата  $\pi^-$ -мезонов в смесях газов  $H_2 + Z$ , где  $Z$  есть He, Ne, Ar, Kr, Xe и  $N_2$ ,  $CO_2$ . Эксперименты выполнены на пучке  $\pi^-$ -мезонов с энергией 80 МэВ синхротронна ОИЯИ. Постановка эксперимента и процедура измерений в основном аналогичны описанным нами ранее /1/. На опыте измерялся выход пар  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$ -мезонов  $N_{\gamma\gamma}(R, C)$ , образующихся в реакции перезарядки



/2/

в газовой мишени, наполненной водородом при давлении  $\approx 40$  атм, и уменьшение выхода  $N_{\gamma\gamma}(R, C)$  из-за перехвата при добавлении к водороду газа-примеси /  $R$ -толщина тормозящего фильтра/. В качестве иллюстрации на рис. 1 показаны кривые выхода  $N_{\gamma\gamma}(R, C)$  для мишени со смесью газов  $H_2 + Xe$  при различных концентрациях Xe.

После вычитания фона от перезарядки на лету в основном на стенках мишени и учета сдвига максимумов кривых  $N_{\gamma\gamma}(R, C)$  с изменением концентрации  $C$  определялось усредненное по обеим кривым отношение

$$a = \frac{N_{\gamma\gamma}^*(R, C)}{N_{\gamma\gamma}^*(R, 0)}$$

где  $N_{\gamma\gamma}^* = N_{\gamma\gamma} - N_{\gamma\gamma}^{\text{фон}}$ . Кривые  $N_{\gamma\gamma}^*(R, C)$  уширены / на 25%/ и имеют медленный спад в сторону малых  $R$  по сравнению с кривой пробегов  $n_{\pi}(R)$ . Это связано с тем, что мишень имеет форму шара, так что толщина стенки перед смесью растет с удалением от оси пучка. Изменение формы кривых  $N_{\gamma\gamma}^*(R, C)$  с увеличением концентрации примеси мало, так что кривые  $N_{\gamma\gamma}^*(R, 0)$  и  $N_{\gamma\gamma}^*(R, C)$  в пределах погрешностей измерений подобны. В этом случае вероятность ядерного захвата водородом остановившегося в смеси  $\pi^-$ -мезона

$$W = \frac{a \Delta_H}{\Delta_{HZ}(1 - \beta)} = P_H \cdot q, \quad /3/$$

4

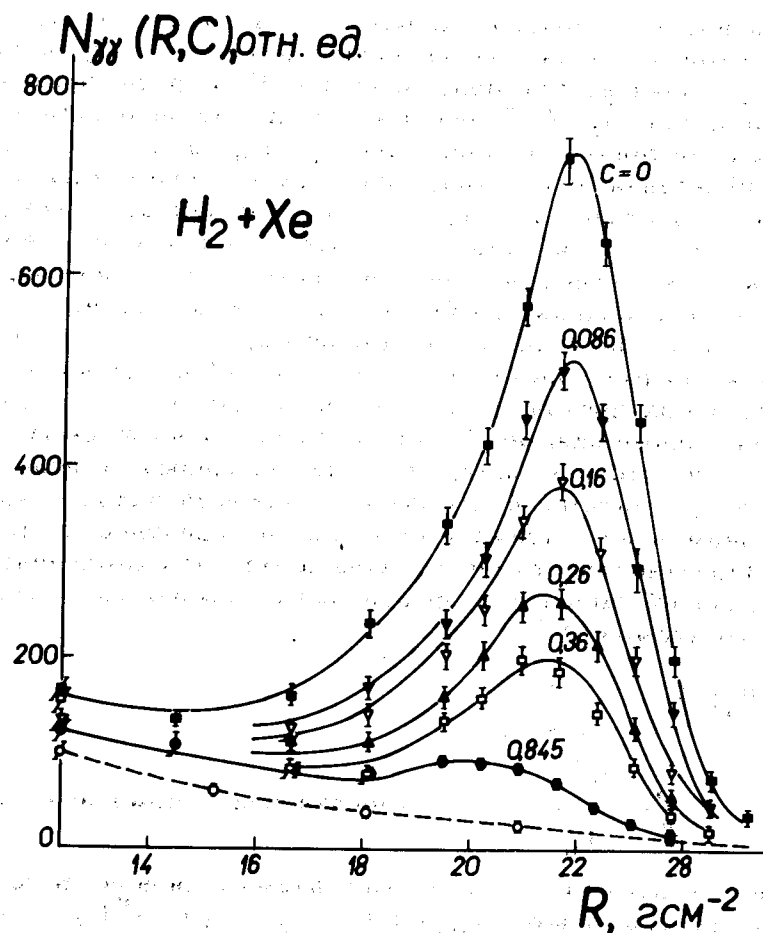


Рис. 1. Кривые выхода  $\pi^0$ -мезонов от газовой смеси  $H_2 + Xe$  при различных концентрациях примеси  $C$ ,  $R$  - толщина тормозящего фильтра; пунктирная кривая проведена по точкам, полученным с пустой мишенью.

где  $\Delta_H, \Delta_{HZ}$  - тормозные толщины водорода и смеси в мишени;  $\beta$  учитывает влияние распределения  $\pi^-$ -мезонов по пробегам на число остановок в "толстой" мишени и определяется из опыта ( $\beta \leq 6\%$ ),  $P_H$  - вероятность атомного захвата мезонов водородом в смеси;  $q = \frac{1 + \kappa C}{1 + (\Lambda + \kappa) C}$

5

вероятность ядерного захвата  $\pi^-$ -мезона протоном в  $p\pi^-$ -атоме в смеси при наличии перехвата. Выражение для  $q$  получено феноменологически /1/ в предположении, что в смеси  $H_2 + Z$   $\pi^-$ -мезон в  $p\pi^-$ -атоме либо захватывается протоном со скоростью  $\lambda_p = a n_H + d n_Z$  при девозбуждении мезоатома, либо перехватывается на атом  $Z$  со скоростью  $\lambda_Z = b n_Z$ . При этом как девозбуждение  $p\pi^-$ -атомов и ядерный захват  $\pi^-$ -мезона протоном, так и конкурирующий с ними перехват  $\pi^-$ -мезонов определяются столкновениями  $p\pi^-$ -атомов в смеси. Здесь  $a$ ,  $b$  и  $d$  - постоянные коэффициенты,  $\Lambda = b/a$  и  $\kappa = d/a$  - относительные константы перехвата /1/ и ядерного захвата пиона протоном при столкновениях  $p\pi^- + Z$ . Экспериментальные данные /1/ удовлетворительно описывались при  $\kappa = 0$ . Это означает, что индуцированные столкновениями  $p\pi^-$ -атома с атомами  $Z$  ядерный захват пиона протоном в  $p\pi^-$ -атоме имеет малую вероятность ( $d \approx 0$ ).

Вероятности атомного захвата мезонов компонентами газовой смеси пропорциональны тормозным способностям атомов /6, 7/

$$P_H(C) = \frac{1}{1 + S_0^H C} \quad /4/$$

где  $S_0^H = \frac{B_Z^0}{B_H^0}$  - относительная тормозная спо-

собность атомов  $Z$  для захватываемых пионов. В условиях нашего опыта ( $n_H = \text{const}$ )  $\Lambda_{HZ} = \Lambda_H (1 + S^H C)$ , где  $S^H$  - относительная тормозная способность атомов  $Z$ , усредненная по диапазону энергий пионов, останавливающихся в смеси. В наших первых опытах /1/, где интервал изученных концентраций тяжелых атомов (Ne, Ar) был невелик, принималось  $S^H = S_0^H$ ; тогда  $a(C) = q$ . При обработке полученных в настоящей работе результатов в этих предположениях и при  $\kappa = 0$  было получено  $\Lambda = A'C^{1/3} + B'$ , где  $A', B' = \text{const}$  для каждого  $Z$ . Для тяжелых газов (Kr и Xe)  $B' < 0$ , что лишено физического смысла. Условие  $B' > 0$  требует  $S^H > S_0^H$ . В специальных измерениях со смесями  $H_2 + N_2$  и  $H_2 + Xe$  при концентрациях  $C \approx 10^{-3}$ , где вклад перехвата пре-

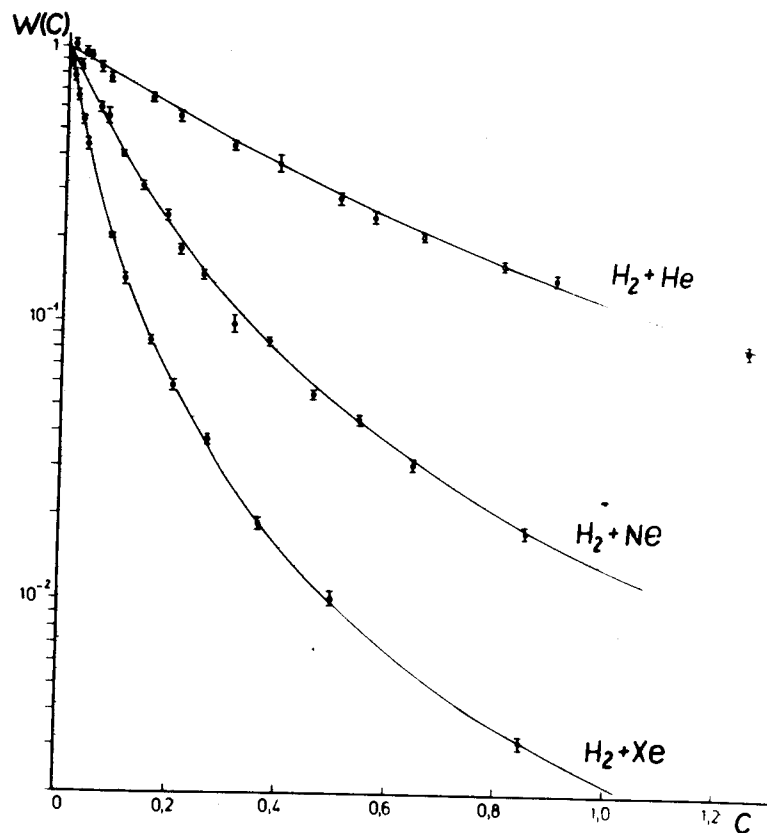


Рис. 2. Вероятности  $W(C)$  ядерного захвата пионов водородом в смесях с He, Ne и Xe. Кривые проведены по /5/ при условиях /6/, /7/ и значениях  $S_0^H$  из таблицы.

небрежимо мал, были получены значения  $a(C) > 1$ . Это означает, что  $S^H > S_0^H$ .

Результаты аппроксимировались полученным из /3/ и /4/ выражением

$$W = \frac{1}{(1 + S_0^H C)(1 + \Lambda C)} \quad /5/$$

с двумя варьируемыми параметрами  $\Lambda$  и  $S_0^H$ , значения  $S^H(C)$  задавались из /8/. Некоторые результаты измерений приведены на рис. 2. Оказалось, что экспери-

ментальные данные хорошо описываются выражением /5/ при

$$\Lambda = AC^{1/3}. \quad /6/$$

Для всех газов, кроме  $CO_2$ ,

$$S_0^H = A = \text{const}. \quad /7/$$

Полученные для исследованных газов значения  $S_0^H$  и  $A$  приведены в таблице. Любопытно отметить, что полученные из опыта значения  $S_0^H$  близки по величине к числу электронов во внешней оболочке атома  $Z$  /см. III и IV столбцы таблицы/. Это можно рассматривать как указание на то, что в атомном захвате мезонов преимущественно участвуют электроны внешней оболочки атома  $Z$ . В силу соотношения /7/ естественно предположить, что преимущественную роль в перехвате пионов на атомы  $Z$  играют электроны их внешних оболочек. Для сравнения в таблице приведены значения тормозной способности  $S_0^H$ , вычисленные по /8/ для кинетической энергии пиона, равной  $2 \text{ МэВ}$ , а также значения  $S_0^H$ , которые можно получить по данным /9, 7/ и нашим данным для  $Ag$  и  $He$  /см. таблицу/. Полученные таким образом значения  $S_0^H$  хорошо согласуются с нашими результатами.

Для всех газов, кроме  $CO_2$ , значения  $S_0^H$  и  $\Lambda$  описываются линейной зависимостью от  $Z^{1/3}$  /рис. 3/.

$$S_0^H = (7,1 \pm 0,1) (Z^{1/3} - 1), \quad \Lambda = S_0^H C^{1/3}. \quad /8/$$

Поскольку в статистической модели атома Томаса-Ферми квадраты радиусов атомов  $r_Z^2 \approx Z^{1/3} / 10$ , из /8/ следует, что вероятности атомного захвата мезонов и константы перехвата  $\Lambda$  в одноатомных газах пропорциональны сечениям атомов. Весьма слабая зависимость  $S_0^H$  от  $Z$ , вероятно, обусловлена заметной экранировкой электронов внутренних оболочек атома /особенно в тяжелых атомах/ для остановившегося мезона. Для пионов с кинетической энергией  $2 \text{ МэВ}$  можно ожидать меньшего влияния экранировки. Действительно, как видно из таблицы для больших  $Z$ ,  $S_0^H$  заметно меньше, чем  $S_0^H$ . Для малых  $Z$  для

Таблица

Газ	$Z$	$S_0^H$	Число электронов во внешней оболочке атома						
			I	II	III	IV	V	VI	VII
He	2	$1,84 \pm 0,09$			2		1,73	$1,72 \pm 0,13 / 9 /$	$1,84 \pm 0,90$
Ne	10	$7,65 \pm 0,35$			8		7,25	$7,1 \pm 0,4 / 9 /$	$7,65 \pm 0,35$
Ar	18	$11,6 \pm 0,4$			8		11,8		$11,6 \pm 0,4$
Kr	36	$16,4 \pm 0,6$			18		20,0		$16,4 \pm 0,6$
Xe	54	$20,4 \pm 0,7$			18		27,6		$20,4 \pm 0,7$
$N_2$	7	$6,6 \pm 0,3$			5		5,5	$5,8 \pm 0,3 / 9 /$	$6,6 \pm 0,3$
$CO_2$	7,3	$8,8 \pm 1,0$			5,3		5,5	$6,4 \pm 0,4 / 7 /$	$8,5 \pm 0,7 / 9 /$
C	6				4				$4,6 \pm 0,3 / 11 /$
$(CH_4 + H_2)$									

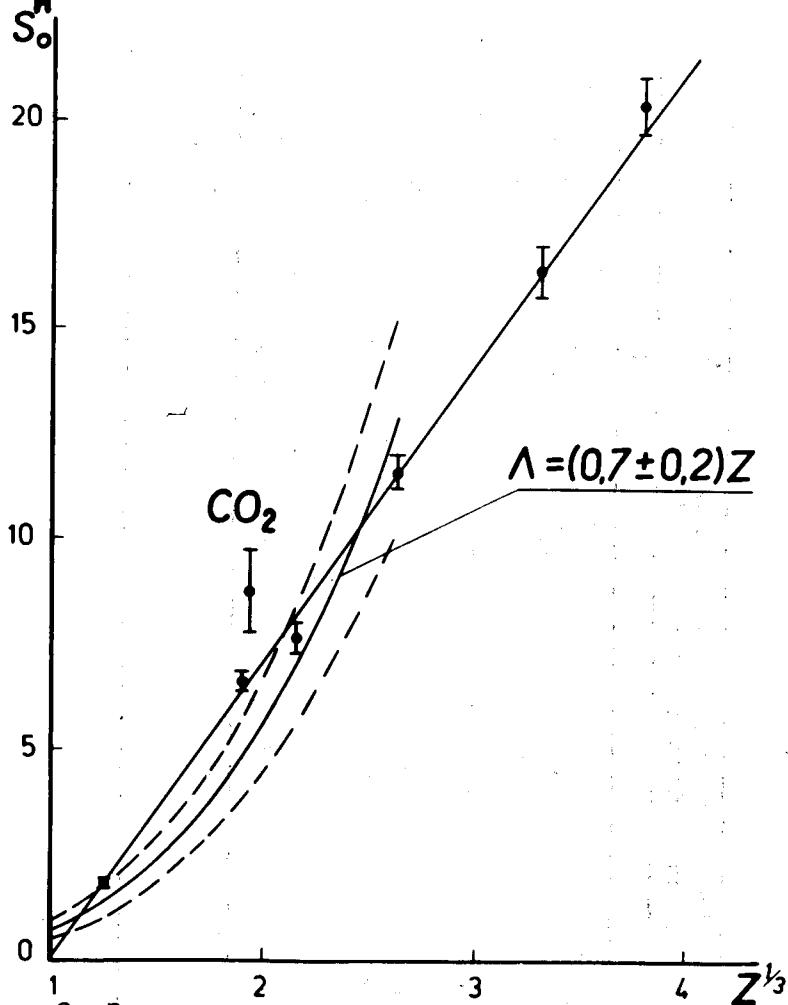


Рис. 3. Зависимость относительной атомной нормозной способности  $S_0^H$  от  $Z$ . Прямая проведена по /8/:  $S_0^H = (7,1 \pm 0,1) Z^{1/3} - 1$ . Здесь же показана зависимость  $\Lambda = (0,7 \pm 0,2) Z$  и пунктиром - погрешности в ее определении /1/.

всех газов, кроме  $\text{CO}_2$ ,  $S_0^H$  и  $S_0^H$  мало различаются. Для  $\text{CO}_2$  значение  $S_0^H$  почти в 1,5 раза больше величины  $S_{0\text{int}}^H$ , которую можно получить интерполяцией по формуле

/8/. Такое же anomalous увеличение вероятности посадки мезона на молекулу  $\text{CO}_2$  в газовых смесях наблюдалось в работе /9/. Следует отметить, что в интервале изменения  $Z$  от He до Ar зависимость  $\Lambda(Z)$ , определяемая соотношениями /6/ - /8/, совпадает в пределах погрешностей с нашим прежним результатом  $\Lambda = (0,7 \pm 0,2) Z^{1/3}$ .

Установленная в настоящей работе весьма слабая зависимость от  $Z$  константы перехвата пионов ( $\Lambda \approx Z^{1/3}$ ) определяется двумя факторами: наличием сильного взаимодействия в  $p\pi^-$ -атоме и действием механизма Дея-Сноу-Сачера /12/. Совместное действие этих двух факторов приводит к тому, что в перехвате участвуют только состояния  $p\pi^-$ -атома с довольно высокими возбуждениями. На основании расчетов /13,14/ можно заключить, что перехват происходит из состояний с квантовыми числами  $n \approx 3-4$ .

Зависимость относительной скорости перехвата  $\Lambda$  от концентрации примеси  $C$  связана, по-видимому, с тем, что перехват происходит из нескольких возбужденных состояний  $p\pi^-$ -атома. Вклад каждого состояния  $n$  в перехват определяется не только соотношением между скоростями перехвата и девозбуждения  $p\pi^-$ -атома за счет внешнего оже-эффекта, но и вероятностью образования этого состояния  $\gamma_n$ . С увеличением концентрации

С вклад перехвата из состояний с высокими возбуждениями будет расти, что приведет к обеднению заселенности состояний с меньшими возбуждениями, т.е.  $\gamma_n = \gamma_n(C)$ . Поскольку сечение перехвата растет с номером возбуждения  $p\pi^-$ -атома /15/, это приведет к росту  $\Lambda$  с увеличением концентрации  $C$ . К такому же эффекту будет приводить и обеднение заселенности состояний  $p\pi^-$ -атома с малыми возбуждениями, из которых в основном происходит ядерный захват  $\pi^-$ -мезона протоном ( $\approx 1/n^3$ ).

Аппроксимируя экспериментальные данные формулой /5/, мы не можем исключить из рассмотрения альтернативный вариант, когда  $\Lambda = A$  и  $S_0^H = AC^{1/3}$ . Это можно сделать, изучая ядерный захват пионов компонентами газовых смесей, в которых не может происходить перехват, например, в смесях  ${}^3\text{He} + Z^{7/}$ .

Перехват пионов изучался также в /16,17/. В /16/ исследовался перехват пионов в смеси  $\text{H}_2 + \text{Ar}$  при давле-

нии водорода 1 атм и концентрациях  $C \lesssim 0,1$ . При обработке данных принималось  $\Lambda = \text{const}$  и было получено  $\Lambda = 12,5 \pm 3,9$  в диапазоне  $C \lesssim 0,1$ ; наше значение  $\Lambda = 5,4 \pm 0,2$ . В /17/ измерена вероятность  $W$  ядерного захвата остановившихся  $\pi^-$ -мезонов водородом в растворе Ne в жидком водороде ( $C=0,16$ ); она оказалась равной  $/17 \pm 5/\%$ . По нашим данным, при плотности водорода, в 21 раз меньшей, и  $C=0,16$   $W = /26 \pm 1/\%$ . Несмотря на фрагментарность данных /16, 17/, можно сделать заключение, что в широком интервале изменения плотности водорода /от  $5 \cdot 10^{19}$  ат/см<sup>3</sup> /16/ до  $4,2 \cdot 10^{22}$  ат/см<sup>3</sup> /17/ / основным является механизм перехвата, определяемый столкновениями  $p\pi^-$ -атома с атомами /молекулами/ смеси.

Нам приятно выразить благодарность за полезные обсуждения Г.Я.Коренману, Л.И.Пономареву и З.Цисеку.

### Литература

1. В.И.Петрухин, Ю.Д.Прокошкин, В.М.Суворов. ЖЭТФ, 55, 2173 /1968/.
2. A.Placci et al. Nuovo Cimento, 64A, 1053 (1969);  
A.Bertin et al. Phys.Rev., 7A, 462 (1973).
3. А.В.Матвеевко, Л.И.Пономарев. ЖЭТФ, 63, 48 /1972/.
4. M.Schiff. Nuovo Cimento, 22, 66 (1961);  
О.А.Займидорога и др. ЖЭТФ, 41, 1804 /1962/.
5. С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 43, 706 /1962/.
6. E.Fermi, E.Teller. Phys.Rev., 72, 399 (1947).
7. В.И.Петрухин, Ю.Д.Прокошкин, А.И.Филиппов. ЯФ, 6, 1008 /1967/.
8. Studies in Penetration of Charged Particles in Matter.  
Washington, 1964.
9. Ю.Г.Будяшов, В.Г.Зинов, А.Д.Конин, А.И.Мухин.  
ЯФ, 5, 830 /1967/.
10. В.И.Петрухин, В.Е.Рисин, И.Ф.Саменкова, В.М.Суворов. ОИЯИ, Д1-8876, Дубна, 1975.
11. П.Гамбош. Статистическая теория атома и ее применение. ИЛ., Москва, 1951.
12. T.V.Day, G.A.Snow, T.Sucher. Phys.Rev.Lett., 3, 61 (1959).
13. M.Leon, H.Bethe. Phys.Rev., 127, 636 (1962).
14. M.Leon. Phys.Lett., 37B, 87 (1971).
15. С.С.Герштейн, В.И.Петрухин, Л.И.Пономарев,  
Ю.Д.Прокошкин. УФН, 97, 3 /1969/.
16. J.Picard et al. Lettere al Nuovo Cimento, 2, 957 (1971).
17. W.M.Bugg et. al. Phys.Rev., 5D, 2142 (1972).