

ՏՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ  
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

ЕФИ-374(32)-79

Ար.Մ.ԿՕՑԻՆՅԱՆ

ИНКЛЮЗИВНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ЭКЗОТИЧЕСКИХ  
АТОМОВ В  $eN$  И  $\mu N$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ  
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

ՏՐԵՎԱՆ 1979 ԵՐԵՎԱՆ

УДК. 539.172.3:53:001.1

Ар.М.КОЦИНЯН

ИНКЛЮЗИВНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ЭКЗОТИЧЕСКИХ АТОМОВ В  $eN$  И  $\mu N$  -  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Исследуется процесс образования  $(e\pi)$ - и  $(\mu\pi)$ -атомов в инклюзивных реакциях  $e + N \rightarrow A_{eh} + \dots$ . Получено выражение для сечения этого процесса, содержащее структурные функции инклюзивного электророждения. Приведены численные оценки для сечения образования  $A_{e\pi}$  и  $A_{\mu\pi}$  при высоких энергиях.

Ереванский физический институт

Ереван 1979

Ar.M.KOTZINIAN

THE INCLUSIVE PRODUCTION OF EXOTIC ATOMS IN  
 $eN$  AND  $\mu N$ -INTERACTIONS AT HIGH ENERGIES

The production of  $(e\pi)$  and  $(\mu\pi)$  atoms in inclusive reactions  $e + N \rightarrow A_{eh} + \dots$  is investigated. An expression for the cross section of this process is obtained, containing the structure functions of inclusive electroproduction. Numerical estimates for the cross section of  $A_{e\pi}$  and  $A_{\mu\pi}$  production at high energies are given.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1970

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЕФИ-374(32)-79

Ар. М. КОЦИЯН

ИНКЛЮЗИВНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ЭКЗОТИЧЕСКИХ АТОМОВ В  $nN$  И  $\mu N$  -  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Ереван 1979

© *Ереванский физический институт, 1979*

Исследованию процесса образования атомных систем  $A_{ab}$ , состоящих из элементарных частиц  $a$  и  $b$  ( $a, b = e^{\pm}, \mu^{\pm}, \pi^{\pm}, K^{\pm} \dots$ ) посвящен ряд теоретических работ [1-6].

Образование атомов типа  $A_{a\bar{a}}$  ( $a = e, \mu, \pi$ ) рассматривалось в следующих процессах:

- а) взаимодействие гамма-квантов [1,2] пионов [2] и электронов [5] с нуклонами и ядрами;
- б)  $e^+e^-$  - столкновения [3];
- в) атомные распады элементарных частиц [4].

Образование атомов типа  $A_{\ell h}$ , состоящих из лептона  $\ell$  и адрона  $h$ , рассматривалось в процессах двух типов:

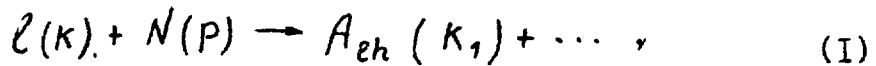
- а) атомные распады элементарных частиц [4]
- б)  $\ell N$  - столкновения [6]:  $\ell + N \rightarrow A_{\ell h} + h'$ .

Пока что проведен всего один эксперимент [7], в котором наблюдались атомы  $A_{\mu\pi}$ , образованные в распадах  $K_L^0 \rightarrow A_{\mu\pi} + \nu$

Интерес к наблюдению экзотических атомов обусловлен рядом причин. Так, например, процесс образования  $A_{e\mu}$  представляет интерес для экспериментальной проверки природы  $\mu\mu$ -взаимодействия [2]. Пучки релятивистских позитрониев дадут возможность осуществить экспериментальную проверку преобразования специаль-

ной теории относительности для компонент электромагнитного поля при значениях гамма-фактора  $10^3 + 10^4$  [8]. Измерение лэмбовского сдвига уровней в  $A_{\mu\pi}$  позволило бы уточнить экспериментальное значение электромагнитного радиуса пиона [7,9]. Последнее удобно осуществить на релятивистских пучках  $A_{\mu\pi}$  [7].

В настоящей работе рассматривается процесс образования релятивистских атомов  $A_{e\hbar}$  в инклюзивной реакции



где величины в скобках обозначают импульсы соответствующих частиц (атома).

В низшем порядке по электромагнитному взаимодействию процесс (I) описывается диаграммой рис. I.

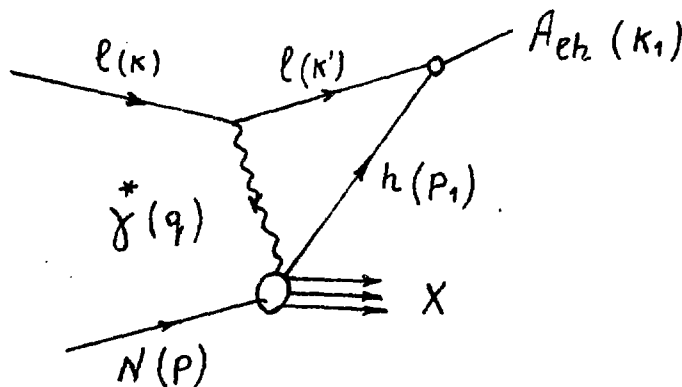


Рис. I

Этой диаграмме соответствует инвариантная амплитуда

$$m = \frac{\psi_n^*(0)}{\sqrt{2\mu}} \bar{u}_{k'} \gamma_\mu u_k \frac{4\pi\alpha}{q^2} \langle h(p_1), X | j_\mu | N(p) \rangle, \quad (2)$$

где  $\psi_n(\vec{r})$  - шредингеровская волновая функция атома,  $n$  - главное квантовое число,  $\mu = \frac{m_e \cdot m_h}{m_e + m_h}$  - приведенная масса атома,

$$K' = \frac{m_e}{m_e + m_h} K_1, \quad P_1 = \frac{m_h}{m_e + m_h} K_1 \quad (3)$$

$q = K - K'$  - импульс виртуального фотона. Поскольку при  $\tau \rightarrow 0$   $\psi_{ne}(\vec{r}) \sim \tau^e$ , то атомы будут образовываться в  $\delta$ -состоянии, для которого

$$|\psi_n(0)|^2 = \frac{\alpha^3 \mu^3}{\pi n^3} \quad (4)$$

Как обычно введем адронный тензор

$$N_{\mu\nu} = \frac{1}{2} \sum_X \langle N(p) | j_\mu | h(p), X \rangle \langle X, h(p.) | j_\nu | N(p) \rangle \quad (5)$$

Разложим этот тензор по векторам поляризации виртуального фотона:  $\epsilon_\alpha^\mu(q)$  ( $\alpha = +, 0, -$  - спиральности виртуального фотона). Коэффициентами разложения будут структурные функции, соответствующие дифференциальному сечению виртуального фоторождения адрона  $h$  [10]:

$$P_1 \frac{d^3 \sigma_{ab}}{dP_1^3} = \frac{\alpha}{4\pi^2 [W^2 - m_N^2]} \epsilon_\alpha^* (q) \epsilon_b^\nu (q) W_{\mu\nu} \quad (6)$$

где  $W^2 = (p+q)^2$

Используя определения (5), (6) и выражение (4), из формулы (2) для сечения процесса (I) в лабораторной системе координат ( $\vec{p} = 0$ ) получим:

$$\frac{d^3 \sigma_{(a)}}{dk_1^0 d\Omega} = \Gamma_n \left\{ P_1 \frac{d^3 \sigma_{++}}{dP_1^3} + \epsilon P_1 \frac{d^3 \sigma_{+-}}{dP_1^3} + \right.$$

$$\left. + (\varepsilon + \Delta) P_1^0 \frac{d^3 \hat{G}_{000}}{d p_1^3} + 2 \sqrt{\varepsilon(1 + \varepsilon + 2\Delta)} \operatorname{Re} P_1^0 \frac{d^3 \hat{G}_{+0}}{d p_1^3} \right\}, \quad (7)$$

где

$$\Gamma_n = \frac{2\alpha^4 \mu^2 |\vec{K}_1| [W^2 - m_N^2]}{-q^2 n^3 m_N |\vec{K}| (1 - \varepsilon)}, \quad (8)$$

$$\varepsilon = \left( 1 - \frac{q^2}{2K_1^2} \right)^{-1}, \quad (9)$$

$$\Delta = -\frac{2m_e^2}{q^2} (1 - \varepsilon). \quad (10)$$

В выражении (9), определяющем степень поляризации виртуального фотона  $\varepsilon$ ,  $K_1$  — поперечная к  $\vec{q}$  составляющая импульса начального лептона \*).

Входящие в выражение (7) структурные функции  $P_1^0 \frac{d^3 \hat{G}_{ab}}{d p_1^3}$  измеряются в экспериментах по электророждению:  $\ell + N \rightarrow \ell + h + \dots$ . Отметим, что, хотя в общем случае эти структурные функции зависят от четырех независимых инвариантов  $q^2$ ,  $W^2$ ,  $P \cdot P_1$ ,  $q \cdot P_1$ , из-за соотношения (3) в выражение (7) они входят при

$$q \cdot P_1 = -\frac{m_h}{m_e} \frac{q^2}{2} \quad (11)$$

\*). При высоких энергиях, пренебрегая массой лептона, вместо (9) имеем  $\varepsilon = \left( 1 - 2 \frac{\vec{q}^2}{q^2} \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta}{2} \right)^{-1}$ , где  $\theta$  — угол вылета атома.

Простые численные оценки для сечения процесса (I) можно получить, если учесть, что при условии

$$-q^2 \ll m_N^2 \quad (12)$$

$$P_1^\circ \frac{d^3 \delta_{++}}{dP_1^3} \approx P_1^\circ \frac{d^3 \delta_\gamma}{dP_1^3}, \quad P_1^\circ \frac{d^3 \delta_{a_0}}{dP_1^3} \approx 0, \quad (13)$$

где  $P_1^\circ \frac{d^3 \delta_\gamma}{dP_1^3}$  - сечение процесса  $\gamma + N \rightarrow h + \dots$  для неполяризованных фотонов.

Если в качестве начального лептона выбрать электрон, то, как легко видеть, условие (12) хорошо выполняется вплоть до энергий  $K_e^\circ \approx 20$  Гэв. При этом  $\epsilon \approx 0$  и для сечения процесса (I) имеем простое выражение:

$$\frac{d^2 \delta_{(n)}^{e+N \rightarrow Aeh^+ \dots}}{dk_i^\circ d\Omega} = \frac{4\alpha^4 m_e^2}{-q^2 n^3} \cdot \frac{d^2 \delta_{\gamma+N \rightarrow h}}{dk_i^\circ d\Omega}. \quad (14)$$

Численные результаты для сечения образования  $Aeh^+$  для двух значений начальной энергии и различных углов рассеяния, полученные по формуле (14) с использованием экспериментальных данных из работы [11] приведены в таблице I. Там же приведены соответствующие значения  $q^2$ .

Таблица I

$\theta$ в град	$K_1^\circ$ в ГэВ	$-q^2$ в ГэВ <sup>2</sup>	$\frac{d^2 \sigma_{(n)}^{\ell+p \rightarrow A_{\ell n} + \dots}}{dk_1^\circ d\Omega}$ в $\frac{\text{см}^2}{\text{ГэВ} \cdot \text{стер.}}$
		$K_e^\circ = 9 \text{ ГэВ}$	
0	4,2	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-39}$
6	4,8	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-40}$
10	5,8	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-42}$
18	3,2	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-43}$
		$K_e^\circ = 18 \text{ ГэВ}$	
0	4,2	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-39}$
6	4,8	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-40}$
10	5,8	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-42}$
18	3,2	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-43}$

В реакции образования ( $\mu \pi$ ) - атомов при  $\theta = 0$   
 $-q^2 < 6 \cdot 10^{-2} \text{ ГэВ}^2$  для  $K_\mu^\circ < 22 \text{ ГэВ}$ , а  $\epsilon = 0$ . Снова  
используя (13), из (7) получим

$$\frac{d \sigma_{(n)}^{\mu+N \rightarrow A_{\mu n} + \dots}(\theta=0)}{dk_1^\circ d\Omega} = \frac{4d^4 \mu^2}{-q^2 n^3} \frac{|\vec{k}_1|}{|\vec{k}|} \varphi_0 \left( p_1^\circ \frac{d^3 \sigma^{\delta+N \rightarrow h+\dots}(\theta=0)}{dp_1^3} \right) \quad (15)$$

В таблице 2 приведены оценки величины сечения процесса  $\mu^- + p \rightarrow A_{\mu\pi} + \dots$ , полученные по формуле (15) с использованием экспериментальных данных по инклюзивному фоторождению  $\pi^+$  [11].

Таблица 2

$K_{\mu}^{\circ}$ в ГэВ	$K_1^{\circ}$ в ГэВ	$-q^2$ в ГэВ <sup>2</sup>	$\frac{d^2 \sigma_{(1)}^{\mu+p \rightarrow A_{\mu\pi} + \dots}}{dK_1^{\circ} d\Omega}$ в $\frac{\text{см}^2}{\text{ГэВ.степ.}}$
12	7,3	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-37}$
16	7,3	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-37}$
21	7,3	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-37}$

Отметим, что при численных оценках мы не учитывали экспериментальные ошибки инклюзивного фоторождения  $\pi^+$ .

Автор благодарит С.Г.Матиняна за интерес к работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. I.L.Uretsky, T.R.Palfrey, Phys.Rev. 121, 1798, 1961.
2. С.М.Биленький, Нгуен Ван Хьеу, Л.Л.Неменов, Ф.Г.Ткебучава  
ЯФ, 10, 812, 1969.
3. Г.В.Меледин, В.Г.Сербо \*, А.К.Сливков. Письма ЖЭТФ, 13, 98,  
1971.
4. Л.Л.Неменов. ЯФ, 15, 1047, 1972; ЯФ, 16, 125, 1972.
5. А.А.Ахундов, Д.Ю.Бардин, Л.Л.Неменов. ЯФ, 27, 1542, 1978.
6. Ар.М.Коцинян, А.В.Тарасов. Препринт ЕФИ-380(38)-79.
  
7. R.Coombes et al. Phys.Rev.Lett. 37, 249, 1976.
8. Л.Л.Неменов. Препринт ОИЯИ, Р1-9145, Дубна, 1975.
9. А.Каримходжаев, Р.Н.Фаустов. ЯФ, 29, 463, 1979.
  
10. L.N.Hand, Phys.Rev. 129, 1834, 1963
  
11. A.M.Boyarski et al. Phys.Rev. D14, 1733, 1976

Рукопись поступила 29-го июня 1979 г.



Редактор Л.П.Мукаян

Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 253

БФ-05963

Тираж 299

Препринт ВФИ

Формат издания 60 x 84/16

Подписано к печати 18/IX-79г.

0.7 уч.изд. л. Ц. 5 к.

Издано Отделом научно-технической информации  
Ереванского физического института, Ереван-36, пер. Маржаряна 2