

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



И-67

3/11-75

P1 - 8464

804/2-75

Т.Я.Иногамова, Б.Н.Калинкин, В.Б.Любимов,
Д.Тувдендорж, В.Л.Шмонин

π^- с 12 -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ $E_{\pi} = 40$ ГЭВ
И ГИПОТЕЗА ОБ АДРОННЫХ КЛАСТЕРАХ

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

P1 - 8464

Т.Я.Иногамова, Б.Н.Калинкин, В.Б.Любимов,
Д.Тувдендорж, В.Л.Шмонин

$\pi^- \text{C}^{12}$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ $E_{\pi} = 40$ ГЭВ
И ГИПОТЕЗА ОБ АДРОННЫХ КЛАСТЕРАХ

Направлено в ЯФ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Иногамова Т.Я., Калинкин Б.Н., Любимов В.Б.,
Тувдendorzh Д., Шмонин В.Л.

P1 - 8464

$\pi^-^{12}\text{C}$ - взаимодействия при $E_\pi = 40$ ГэВ и гипотеза
об адронных кластерах

Представлен анализ некоторых характеристик взаимодействия π^- -мезонов с ядром углерода при $pc = 40$ ГэВ (распределения по множественности быстрых и медленных частиц, корреляции между ними и пр.). Полученные результаты хорошо согласуются с гипотезой о реализации промежуточных кластерных состояний.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1974

Inogamova T.Ya., Kalinkin B.N., Lyubimov V.B., P1 - 8464
Tuvdendorzh D., Shmonin V.L.

$\pi^-^{12}\text{C}$ Interactions at $E_\pi = 40$ GeV and the
Hypothesis about Hadron Clusters

The analysis of some characteristics of the interaction of π^- -mesons with ^{12}C nucleus at $pc = 40$ GeV (distributions of fast and slow particle multiplicity, correlations between them, etc.) is presented. The obtained results are in good agreement with the hypothesis of intermediate cluster state realization.

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1974

1. ВВЕДЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных по множественной генерации адронов на ядерных мишенях свидетельствует в пользу двухстадийных моделей элементарного акта.

Подход, учитывающий реализацию промежуточного кластерного состояния адронной материи, хорошо согласуется с широким кругом экспериментальных фактов, полученных в нуклон-ядерном взаимодействии^{/1,2/}.

Информация о свойствах кластерных состояний может быть получена путем проверки предположений о кластер-нуклонном взаимодействии при движении кластера внутри ядра. В работе^{/3/} был предложен метод описания динамики развития релятивистского кластера в ядерном веществе. Движение кластера описывалось системой из двух уравнений, учитывающей его расширение с околосветовой скоростью. Кластер-нуклонное взаимодействие характеризовалось двумя параметрами: $\bar{\epsilon}$ - средней энергией, переданной нуклону, и $\bar{\omega} = \langle K \rangle \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{tot}}$ - параметром неупругости взаимодействия. Как выяснилось, эти параметры не зависят от энергии ($\bar{\epsilon} \approx 0,13$ ГэВ; $\bar{\omega} \approx 0,2$). Решениями системы уравнений движения являются функции $E(\ell)$ - полная энергия кластера в зависимости от длины его пути в ядре ℓ и $\kappa(\ell)$ - фактор увеличения внутренней энергии кластера в результате его неупругих взаимодействий с нуклонами. При этом предполагалось, что лидирующая частица, образованная в процессе пионизации, слабо взаимодействует с ядром. В настоящей работе с целью дальнейшей проверки этот подход применен к анализу

результатов, полученных при изучении взаимодействий π^- -мезонов ($E_\pi = 40$ ГэВ) в двухметровой пропановой пузырьковой камере ЛВЭ ОИЯИ /4-7/.

Ниже рассматриваются следующие характеристики π^-C^{12} -взаимодействия:

- распределение по множественности релятивистских заряженных частиц n_s ;
- распределение по числу медленных протонов;
- средние характеристики γ -квантов ($\langle p_{||} \rangle$, $\langle p_{\perp} \rangle$, $\langle \cos \theta \rangle$);
- распределения по быстротам в инклюзивных процессах типа $\pi^-C^{12} \rightarrow \gamma + \dots$.

2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО МНОЖЕСТВЕННОСТИ n_s

Если кластер, испускающий при своем распаде в элементарном акте, в среднем, n_s^0 частиц, пройдет в ядре путь ℓ , то он распадется на n_s частиц, причём /1/:

$$n_s = n_s^0 R(\ell)$$

$$R(\ell) \approx \frac{(n_s^0 - 1,6) \kappa(\ell) + 1,6}{n_s^0} \quad (1)$$

Пусть функция $F_0(n_s^0)$ описывает распределение по n_s^0 в пион-нуклонном взаимодействии. Данное число n_s^0 в пион-ядерном соударении могут дать кластеры с таким значением n_s^0 и проходящие в ядре такой путь ℓ , чтобы выполнялось соотношение (1). Усреднение по всем возможным пробегам кластера в ядре приводит к следующему выражению для функции распределения по множественности в пион-ядерных взаимодействиях:

$$F(n_s) = \frac{\int \frac{dV_\ell}{R(\ell)} \mathcal{G}(\ell) F_0\left(\frac{n_s}{R(\ell)}\right)}{\int dV_\ell \mathcal{G}(\ell)}, \quad (2)$$

$\mathcal{G}(\ell)$ - функция, учитывающая распределение взаимодействий налетающей частицы внутри ядра.

Случай с малым числом s -частиц соответствуют, в основном, возбуждению налетающего π^- -мезона (без образования пионизационного кластера). Их парциальное сечение в элементарном акте невелико. Можно считать, что взаимодействие такого возбужденного пиона с нуклонами ядра не будет существенно отличаться от обычного пион-нуклонного. Поэтому его вторичные неупругие взаимодействия в ядре будут выводить процесс из канала с малой множественностью. Учёт этого фактора приводит к следующему выражению для оценки вероятности P_n -событий с малым числом s -частиц:

$$P_n = \frac{\sigma_n}{\sigma_{in}} \frac{\int d^2b dz e^{-\rho \sigma_{in}(z + \sqrt{R^2 - b^2})} e^{-\rho \sigma_{in}(\sqrt{R^2 - b^2} - z)}}{\int d^2b dz e^{-\rho \sigma_{in}(z + \sqrt{R^2 - b^2})}} \quad (3)$$

Здесь σ_n - парциальное сечение канала с образованием n релятивистских частиц. Согласно (3), определялась вероятность событий с $n_s = 0, 1, 2$. Для случая $n_s = 1$ учтён дополнительный вклад когерентного процесса на ядре в целом, сечение которого по оценкам /4/ составляет $\approx 1,7$ мб. Для остальных значений n_s произведен расчёт по формуле (2).

Результаты представлены на рис. 1. В качестве $F_0(n_s^0)$ использовалась функция

$$F_0(n_s^0) = \begin{cases} F_0^{\pi^- p}(n_s^0) & \text{для чётных } n_s^0 \\ F_0^{\pi^- n}(n_s^0) & \text{для нечётных } n_s^0 \end{cases}$$

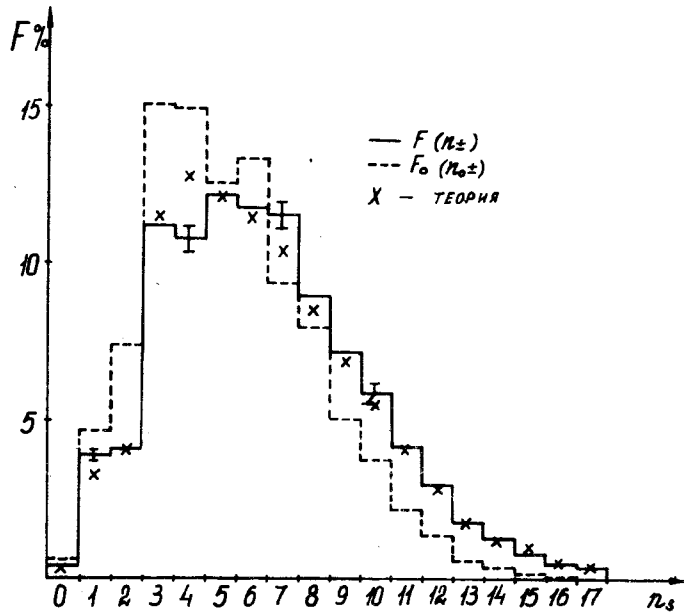


Рис. 1. Распределение по множественности релятивистских частиц для $\pi^- C^{12}$ -взаимодействий (сплошная гистограмма) и для $\pi^- N$ -взаимодействий (пунктирная гистограмма). Результаты расчета помечены x.

Соответствующая гистограмма нанесена на рис. 1 пунктиром. Из рисунка видно, что расчёт хорошо согласуется с экспериментом.

Отношение средних множественностей в $\pi^- C^{12}$ - и $\pi^- p$ -взаимодействиях, полученное путем непосредственного усреднения функции $\kappa(\ell)$ по ядру, совпадает с измеренным: $R = 1,21$ ($R_{\text{эп}} = 1,21 \pm 0,01$).

Пользуясь формулой (2), можно получить соотношение типа скейлинга по множественности. Заменив в (2) функцию $R(\ell)$ на её среднее значение, приходим к соотношению:

$$\bar{R} F(n_s) = F_0\left(-\frac{n_s}{\bar{R}}\right) \quad (4)$$

или, поскольку $F(n_s) = \frac{\sigma_n}{\sigma_{in}}$,

$$\bar{R} \frac{\sigma_n}{\sigma_{in}} = F_0\left(-\frac{n_s}{\bar{R}}\right), \quad (5)$$

что аналогично скейлинговому соотношению /8/ (величина \bar{R} выполняет ту же роль коэффициента масштабного преобразования, что и $\langle n_s \rangle \sim \bar{R}$). С ростом атомного веса ядра-мишени следует ожидать отклонения от зависимости (5), поскольку погрешности от замены $R(\ell)$ на \bar{R} будут возрастать.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ЧИСЛУ МЕДЛЕННЫХ ПРОТОНОВ В $\pi^- C^{12}$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

Пусть $P_{a\beta}^{\pi^-}$ - вероятность того, что при взаимодействии налетающего π^- -мезона с нуклоном сорта a образуется нуклон отдачи сорта β . Разобьем ядро на n слоев ("l-слои") таким образом, чтобы кластер, рожденный в i -м l-слое, испытал $i-1$ взаимодействия с нуклонами ядра. Эти слои ограничены поверхностями вида /1/ :

$$z = \sqrt{R^2 - b^2} - \ell_i.$$

Далее, пусть X - доля протонов отдачи, регистрируемых в эксперименте в интервале импульсов 150+700 МэВ/с. Тогда вероятность осуществления случая, в котором наблюдается j протонов отдачи, равна

$$\mathcal{P}^j = \sum_{i=1}^n \mathcal{P}_i^j = (P_{pp}^\pi + P_{pn}^\pi) \sum_{i=j}^n \frac{C_{i-1}^{j-1} \Delta V_i}{2^i} X^{j-1} (2-X)^{i-j} +$$

$$+ (P_{pn}^\pi + P_{nn}^\pi) \sum_{i=j+1}^n \frac{C_{i-1}^j \Delta V_i}{2^i} X^j (2-X)^{i-j-1}, \quad (6)$$

ΔV_i - эффективный нормированный объем l -слоя.

В (6) предполагается, что вероятность образования протона при взаимодействии кластера с нейтроном равна вероятности образования нейтрона при взаимодействии кластера с протоном. Величины $P_{\alpha\beta}^\pi$ для пион-нуклонного взаимодействия равны $P_{pp}^\pi \sim 0,20$, $P_{pn}^\pi \sim 0,05$, причем $P_{\alpha\beta}^\pi = 1 - P_{\alpha\alpha}^\pi$.

Долю регистрируемых протонов X можно оценить, используя спектр нуклонов отдачи. Этот спектр не меняется в широком диапазоне энергий первичной частицы /9/ и с хорошей точностью описывается выражением /3/:

$$\frac{d\sigma}{dp^2} \approx \sigma^{tot} B e^{-Bp^2}, \quad (7)$$

где $B \approx 4$ (ГэВ/с)². Интегрируя по интервалу регистрируемых импульсов, находим

$$X = \frac{P_{\max} \int \frac{d\sigma}{dp^2} dp^2}{\sigma^{tot}} \approx 0,7. \quad (8)$$

Результаты расчёта по формуле (6), с учётом (8), приведены в табл. 1 и удовлетворительно согласуются с экспериментальным распределением.

4. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ \bar{n}_s И ЧИСЛОМ МЕДЛЕННЫХ ПРОТОНОВ

Соотношение между \bar{n}_s и числом медленных протонов может быть получено из формул (1) и (6). Имеем:

$$\bar{n}_s = \bar{n}_s^0 \sum_{i=j}^n \mathcal{P}_i^j R_i \quad (9)$$

R_i - величина фактора R для кластера, рожденного в i -м слое и испытавшего $i-1$ соударений с нуклонами ядра. Величины R_i вычислены с помощью решения уравнений движения кластера /3/. Результаты расчёта по формуле (9) приведены в табл. 2. Видно, что расчётные значения $\langle n_s \rangle$ близки к измеренным /4/.

5. СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ γ -КВАНТОВ, ОБРАЗОВАННЫХ В π^-C^{12} -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

В пределах точности эксперимента средние значения поперечных импульсов, P_L , γ -квантов, образованных в пион-нуклонных и в π^-C^{12} соударениях, совпадают ($\frac{1}{2}(\bar{P}_{L\pi^-p} + \bar{P}_{L\pi^-n}) \approx 0,172 \pm 0,07$, $\bar{P}_{L\pi^-C^{12}} \approx 0,177 \pm 0,03$ /6/). Этот факт непосредственно следует из развиваемой картины. Если π^0 -мезоны реализуются как отдельные частицы при распаде кластера вне ядра, то их средний поперечный импульс не должен зависеть от массы кластера (т.к. он не зависит от энергии первичной частицы в адрон-нуклонном столкновении). Следовательно, и средний поперечный импульс γ -квантов при переходе к взаимодействию на ядрах не должен измениться.

Таблица 1

N_g	0	1	2	3	≥ 4
% _{эксп.}	55,7±0,6	25,2±0,5	12,0±0,4	5,0±0,2	2,1±0,2
% _{теор.}	50,0	30,8	12,9	4,7	1,6

Таблица 2

N_g	0	1	2	3	≥ 4
\bar{n}_s эксп.	6,02±0,05	6,87±0,09	7,58±0,12	7,83±0,19	7,44±0,24
\bar{n}_s теор.	5,92	6,65	7,25	7,82	8,37

Изменение среднего продольного импульса обусловлено уменьшением скорости кластера при его движении в ядре.

Пусть $\bar{p}_{0||}$ - средний продольный импульс γ -квантов в пион-нуклонном соударении. Очевидно,

$$\bar{p}_{||} = \frac{\bar{\beta} \bar{\gamma}}{\beta_0 \gamma_0} \approx \frac{1}{\kappa} \bar{p}_{0||} \quad (10)$$

Подставляя в (10) усредненное по ядру значение величины κ ($\kappa \approx 1,3$) и $\bar{p}_{0||} = \frac{1}{2} (\bar{p}_{0||}^{\pi^- p} + \bar{p}_{0||}^{\pi^- n}) = 1,80 \pm 1,10$, находим $\bar{p}_{||} \approx 1,38 \pm 0,08$, что близко к значению, полученному в эксперименте. Использованное значение $p_{0||}$ получено с учётом примеси $\pi^- C$ -взаимодействий в событиях, отобранных как π^- -нуклонные взаимодействия.

Пользуясь релятивистским преобразованием углов, нетрудно получить выражение, связывающее $\langle \cos \theta \rangle$ в реакциях на ^{12}C и нуклоне:

$$\langle \cos \theta \rangle = \sqrt{\frac{1}{1 + \bar{\kappa}^2 \left(\frac{1}{\langle \cos \theta \rangle_0} - 1 \right)}} \quad (11)$$

Подставляя в (11) $\langle \cos \theta \rangle_0 = 0,884 \pm 0,008$, находим $\langle \cos \theta \rangle = 0,824 \pm 0,008$ ($\langle \cos \theta \rangle_{\text{эксп.}} = 0,846 \pm 0,005$).

6. СРАВНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПО БЫСТРОТАМ В ОДНОЧАСТИЧНЫХ ИНКЛЮЗИВНЫХ ПРОЦЕССАХ

$\pi^- p \rightarrow \gamma + \dots$ и $\pi^- C^{12} \rightarrow \gamma + \dots$

В работе /7/ измерены нормированные поперечные сечения $\frac{1}{\sigma_{\text{in}}} \frac{d\sigma}{dy}$ для реакций $\pi^- p \rightarrow \gamma + \dots$ и $\pi^- C^{12} \rightarrow \gamma + \dots$ в зависимости от продольной быстроты в л.с.к. Для обеих реакций в области $1 \leq y \leq 3$ наблюдается плато.

Установим связь между нормированными сечениями в пион-нуклонных и в пион-ядерных взаимодействиях.

При прохождении кластером пути ℓ в ядерном веществе быстрота претерпевает сдвиг на величину

$$\Delta y(\ell) = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1 + \beta_0}{1 - \beta_0} - \frac{1 - \beta(\ell)}{1 + \beta(\ell)} \right] \quad (12)$$

(уменьшается скорость кластера $\beta(\ell)$). При этом сечение увеличивается на фактор

$$\bar{R}(\ell) = 1,2. \quad (13)$$

Можно оценить масштаб сдвига плато. Из (12) следует:

$$\Delta y(\ell) \approx \frac{1}{2} \ln \frac{\gamma_0}{\gamma(\ell)} \approx \ln \bar{\kappa} \approx 0,3. \quad (14)$$

Как рост сечения (13), так и величина сдвига плато (14) не противоречат эксперименту.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, представленный нами анализ основных характеристик взаимодействия π^- -мезонов с ядрами ^{12}C согласуется с гипотезой о реализации промежуточных кластерных состояний в процессе множественного рождения адронов.

Большой интерес представило бы уточнение данных по распределению коэффициента неупругости в адрон-ядерных взаимодействиях при различном числе медленных протонов. Это позволило бы получить важную информацию и об особенностях взаимодействия лидирующей частицы с нуклонами ядра.

Авторы благодарны В.Г.Гришину за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.Н.Калинкин, В.Л.Шмонин. Препринт ОИЯИ, P2-7870, Дубна, 1974.
2. Б.Н.Калинкин, В.Л.Шмонин. Препринт ОИЯИ, P2-7871, Дубна, 1974.
3. Б.Н.Калинкин, В.Л.Шмонин. Препринт ОИЯИ, P2-7869, Дубна, 1974.
4. А.У.Абдурахимов, Н.Ангелов и др. Препринт ОИЯИ, P1-6277, Дубна, 1972.
5. В.Г.Гришин, Т.Я.Иногамова, Ш.В.Иногамов. Препринт ОИЯИ, P1-7523, Дубна, 1973.
6. А.У.Абдурахимов, Н.Ангелов и др. Препринт ОИЯИ, P1-6928, Дубна, 1973.
7. Сотрудничество: Будапешт-Бухарест-Варшава-Дубна-Краков-Москва-София-Ташкент-Тбилиси-Улан-Батор-Ханой. Препринт ОИЯИ, P1-7668, Дубна, 1974.
8. Z.Koba, H.V.Nielsen, P.Olesen. Nucl. Phys., B40, 317 (1972).
9. V.S.Barashenkov, K.K.Gudima, S.M.Eliseev. et al. Proc. XI Conf. on Cosmic Rays, Budapest, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 декабря 1974 года.