

УДК 539.172.13

## ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ КУМУЛЯТИВНЫХ ЧАСТИЦ В РЕАКЦИЯХ $d + C$ И $d + Cu$ ПРИ ЭНЕРГИИ 2 ГэВ/нуклон

*Ю.С.Анисимов, И.Атанасов<sup>1</sup>, С.В.Афанасьев, В.К.Бондарев, А.Ю.Исупов, В.А.Каширин, Я.Климан<sup>2</sup>, А.Г.Литвиненко, В.Матеушек<sup>2</sup>, М.Морхач<sup>2</sup>, А.И.Малахов, В.Н.Пенев<sup>1</sup>, С.Г.Резников, И.А.Семенова, В.А.Смирнов, А.Ю.Стариков, И.Турзо<sup>2</sup>, А.Н.Хренов*

Изучаются корреляции протонов при малых относительных импульсах в реакциях  $dC \rightarrow ppX$  и  $dCu \rightarrow ppX$  в угловом интервале  $106\text{--}112^\circ$  в лабораторной системе координат. Получена предварительная информация о поперечных размерах области взаимодействия. Эксперимент выполнен с помощью сцинтилляционного двухплечевого спектрометра на внутреннем дейтронном пучке нуклотрона при энергии 2 ГэВ/нуклон.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

## First Results of Study of Transversal Dimension of Region of Cumulative Particles Production in $d + C$ and $d + Cu$ Reactions for Energy 2 GeV/nucleon

*Yu.S.Anisimov et al.*

Correlations of protons, emitted in the angle interval between  $106\text{--}112^\circ$  in the laboratory system, are studied in the reactions  $dC \rightarrow ppX$  and  $dCu \rightarrow ppX$  at small relative momentum of secondary protons. Preliminary information is obtained concerning the transversal size of the proton emission region. The experiment was done at the two-arm scintillation spectrometer using internal 2 GeV/nucleon deuteron beam of the Nuclotron.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Physics, JINR.

### 1. Введение

Измерение корреляционной функции образования двух вторичных частиц с малым относительным импульсом ( $q = p_1 - p_2 < 200$  МэВ/с) — широко применяемый метод в физике высоких энергий. Этот метод позволяет непосредственно проводить исследования пространственно-временной картины ядерной реакции и активно используется в ведущих физических центрах [1,2,3].

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, София

<sup>2</sup>Институт физики Словацкой академии наук, Братислава

Впервые исследования области генерации кумулятивных частиц были проведены на спектрометре БАС в Институте теоретической и экспериментальной физики [4]. Исследовались процессы адрон-ядерного взаимодействия, в которых рождались два кумулятивных протона с малым относительным импульсом [5,6,7]. Анализ корреляционных данных, выполненный в ИТЭФ, показал, что кумулятивные частицы последовательно рождаются вдоль траектории начального адрона в ядре при взаимодействии начальной частицы с ядерным веществом [8,9].

Форма области, из которой вылетают кумулятивные частицы, не является сферически-симметричной. Продольный размер этой области сравним с размером ядра мишени [10]. Поперечный размер меньше продольного и близок к характерному размеру адрона [6,8].

Из этого следует, что поперечные размеры области генерации кумулятивных частиц (в частности, протонов) должны зависеть от размеров налетающей частицы. Справедливость подобного утверждения может быть экспериментально проверена на ускорителе релятивистских ядер. Увеличивая атомный номер ускоряемых ядер, можно получить зависимость поперечных размеров области взаимодействия от размеров налетающих ядер. При этом зависимости от типа мишени не должно быть или она будет незначительной.

Все вышперечисленное послужило основой для проведения корреляционных исследований на ускорителе ядер ЛВЭ ОИЯИ — нуклотроне.

## 2. Описание установки

Для проведения исследований в рамках проекта СФЕРА был создан двухплечевой сцинтилляционный спектрометр заряженных частиц, получивший название СКАН (спектрометр кумулятивных адронов нуклотрона). Принцип работы спектрометра основан на регистрации заряженных частиц в сцинтилляционных детекторах, что позволяет проводить идентификацию частиц по времени пролета на заданной базе и по энерговыделению в веществе детекторов (метод  $dT-E$ -идентификации). Установки подобного типа работают на многих ускорителях мира и хорошо себя зарекомендовали [4,13].

Импульсный акцептанс спектрометра этого типа ограничивается физическими и техническими условиями. Верхний предел определения импульса зависит от временного разрешения установки и пролетной базы. Современные детекторы позволяют достичь временного разрешения менее 100 пс. Варьируя пролетную базу, можно получить необходимое импульсное разрешение, однако при идентификации частиц необходимо знать их кинетическую энергию. Метод определения энергии по ионизационным потерям в веществе детектора наиболее прост и доступен. Хорошей идентификации можно добиться в области, где ионизационные потери доминируют. При регистрации протонов хорошие результаты получаются при кинетической энергии меньше 300 МэВ. Это условие определяет толщину детектора, регистрирующего ионизационные потери. В нашем случае был использован сцинтиллятор толщиной 20 см.

Схематический вид спектрометра СКАН представлен на рис.1. В состав аппаратуры входят следующие элементы:

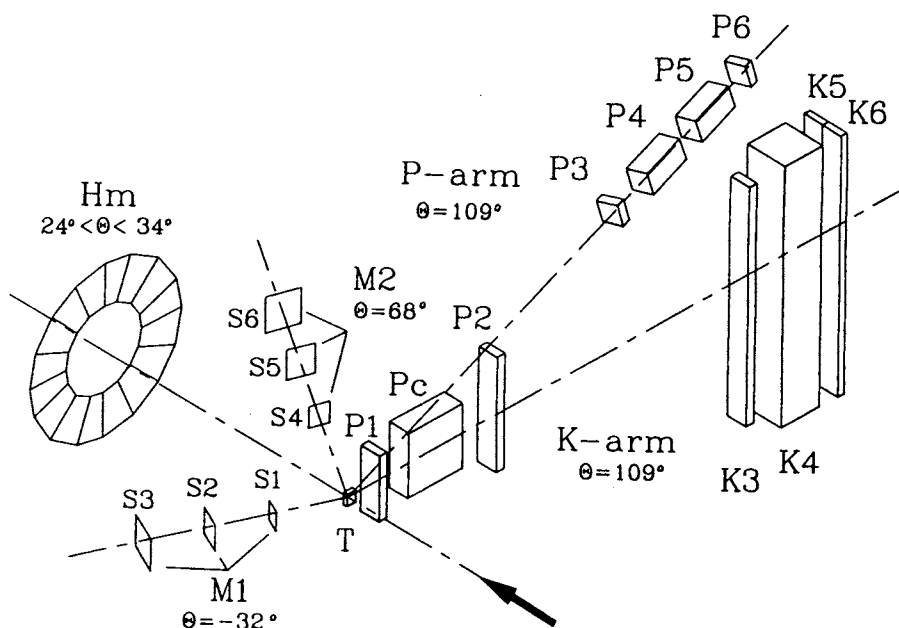


Рис.1

• Сцинтилляционный двухплечевой спектрометр, позволяющий проводить регистрацию двух протонов в импульсном диапазоне 0,32—0,72 ГэВ/с, при относительной разности импульсов двух протонов  $q_T = P_1 - P_2 < 0,2$  ГэВ/с. Конструктивно спектрометр выполнен в виде двух независимых ферм с установленными на них детекторами (P3, P4, P5, P6 — P-плечо; K3, K4, K5, K6, K7 — K-плечо) и общей головной части (детекторы P1, P2 и Pc). Детекторы P1, P2, P3 и K3 использовались для выработки триггерного сигнала и определения времени пролета (TOF-система); P4, P5, K4 и K5 — для регистрации кинетической энергии частиц; P6, K6 и K7 — для выделения высокоэнергетических частиц, прошедших через все слои вещества. Все детекторы изготовлены на основе пластического сцинтиллятора, просматриваемого с двух концов фотоумножителями. Размеры сцинтилляторов, расстояния между ними и тип ФЭУ суммированы в таблице. Спектрометр был установлен под углом  $\Theta = 109^\circ$  относительно оси реакции.

• 16-канальный сцинтилляционный годоскоп  $H_m$ , просматривающий угловой диапазон  $15 < \varphi < 30^\circ$ . Он представляет собой кольцо, разделенное на 16 сегментов. Каждый сегмент просматривается отдельным ФЭУ. Годоскоп используется для селекции прицельного параметра.

• Два тройных монитора M1 (счетчики S1, S2 и S3) и M2 (счетчики S5, S6 и S7), установленные под углами  $\Theta_1 = -32^\circ$  и  $\Theta_2 = 68^\circ$  соответственно.

• Мишенная станция (Т) с набором из трех мишеней, позволяющая дистанционно устанавливать и менять мишени во время цикла ускорения. В качестве мишеней использовались нити из углерода и меди диаметром 8 и 70 мкм соответственно.

Название детектора	Размеры: ширина, высота, толщина, мм	Расстояние от мишени, мм	Тип вещества	Тип ФЭУ
P1	20 × 100 × 3	230	сцинтил.	ФЭУ-87
C1	30 × 160 × 160	280	аэрогель	ФЭУ-85
P2	30 × 270 × 3	550	сцинтил.	ФЭУ-85
P3	100 × 40 × 10	1560	сцинтил.	ФЭУ-87
P4	150 × 70 × 153	1604	сцинтил.	ФЭУ-110
P5	150 × 70 × 153	1790	сцинтил.	ФЭУ-110
P6	160 × 80 × 10	2005	сцинтил.	ФЭУ-85
K3	100 × 980 × 20	2070	сцинтил.	ХР2020
K4	200 × 1150 × 200	2146	сцинтил.	ФЭУ-63
K5	200 × 1150 × 200	2354	сцинтил.	ФЭУ-63
K6	100 × 1200 × 10	2610	сцинтил.	ФЭУ-85
K7	100 × 1200 × 10	2610	сцинтил.	ФЭУ-85
S1	30 × 30 × 5	415	сцинтил.	ФЭУ-85
S2	40 × 40 × 5	634	сцинтил.	ФЭУ-85
S3	70 × 70 × 5	855	сцинтил.	ФЭУ-85
S4	30 × 30 × 5	340	сцинтил.	ФЭУ-85
S5	40 × 40 × 5	565	сцинтил.	ФЭУ-85
S6	70 × 70 × 5	795	сцинтил.	ФЭУ-85

Для выбранной геометрии установки был проведен расчет ее параметров методом Монте-Карло при помощи программы GEANT-3. В программу была заложена геометрия установки с учетом основных факторов, влияющих на работоспособность спектрометра (светозащитные покрытия детекторов, воздушная среда, особенности мишенной

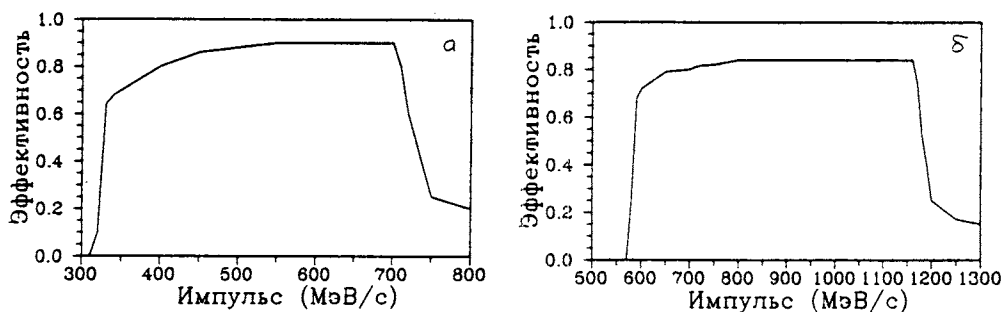


Рис. 2

станции и т.д.). Исследовались характеристики детекторов при регистрации  $\pi$ -мезонов, протонов и дейтронов. Расчеты проводились в импульсном интервале от 0 до 1,5 ГэВ/с. Результаты расчетов показали, что спектрометр имеет хорошую эффективность при регистрации протонов в импульсном диапазоне  $320 < P_p < 720$  МэВ/с и дейтронов — в диапазоне  $570 < P_d < 1220$  МэВ/с (рис. 2а,б). При регистрации  $\pi$ -мезонов ситуация гораздо хуже вследствие их нестабильности. Однако регистрация  $\pi$ -мезонов не является целью эксперимента и рассматривается нами как фоновый процесс, влияющий на работоспособность установки в целом. Основной величиной, измеряемой в эксперименте, является разность импульсов двух частиц  $q = p_1 - p_2$ . Важ-

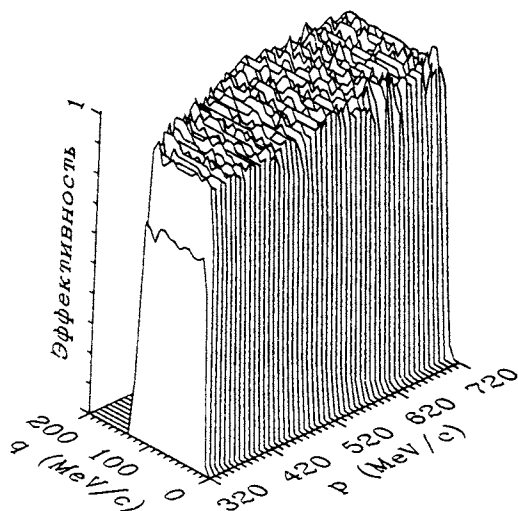


Рис. 3

ным условием корректной работы в эксперименте является хорошая эффективность при определении  $q$ . Проведенные расчеты показали, что спектрометр обладает высокой эффективностью для  $20 < q < 130$  МэВ/с (рис.3). Для определения надежности идентификации протонов и дейтронов в условиях, близких к рабочим, было проведено моделирование с учетом угловых и импульсных особенностей образования частиц в ядро-ядерном взаимодействии. Одночастичные инвариантные инклюзивные спектры сечений имеют экспоненциальный характер. Причем такая зависимость наблюдается вплоть до кинематической границы, соответствующей взаимодействию с ядром как с целым [14]. Спектры хорошо аппроксимируются выражением

$$Ed^3\sigma/dp^3 = C \exp(-T/T_0), \quad (1)$$

где  $T$  — кинетическая энергия регистрируемых частиц;  $T_0$  — параметр;  $C$  — нормировочная константа, определяющая абсолютную величину сечения. Так, для угла  $109^\circ$  были использованы следующие численные величины [15]:

Тип частицы	$C, \text{ мб ГэВ}^{-2} \text{ с}^3 \text{ ср}^{-1}$	$T_0, \text{ МэВ}$
$\pi$	12,7	71,9
p	54,1	44,9
d	7,04	29,9

Две величины, кинетическая энергия и импульс, позволяют вычислить эффективную массу частицы. Восстановление эффективной массы — наиболее простой способ разделения частиц по типам. Как показали более детальные расчеты, уровень достоверности идентификации протонов в рабочем импульсном диапазоне составляет более 98%.

### 3. Условия измерения и полученные результаты

Измерения корреляционной функции двух кумулятивных протонов проводились на пучке релятивистских дейтронов с импульсом 5,5 ГэВ/с. Ускоренные дейтроны в течение двух секунд удерживались магнитным полем ускорителя. В этот период в первичный пучок вводилась мишень и регистрировались продукты реакции. Скорость движения мишени выбиралась таким образом, чтобы счет ближайших к мишени детекторов не превышал  $10^6$  импульсов/с. Типичной величиной была интенсивность счета  $1 + 2 \cdot 10^5$  импульсов/с.

Измерения проводились в двух режимах:

- 1) одночастичном — регистрация происходит при срабатывании детекторов одного из плеч (или Р-плеча, или К-плеча);
- 2) двухчастичном — регистрируются только парные события.

Одночастичный режим использовался для определения условий эксперимента и для тестирования аппаратуры. В этом режиме были проверены фоновые условия проведения эксперимента. Отмечено, что условия проведения эксперимента вполне нормальные и случайные совпадения дают незначительный вклад. Это хорошо видно из временной диаграммы совпадения двух плеч (рис.4), где превышение над фоном составляет около  $10^2$ .

В результате экспозиции углеродной и медной мишеней зарегистрировано 10000 и 4000 двухчастичных событий соответственно. Анализ данных проводился в два этапа:

1. Определялся тип регистрируемой частицы. Строился двумерный график, на котором отображалось каждое событие со значениями  $T$  — регистрируемая энергия — и  $\tau$  — скорость частицы (рис.5). На рисунке хорошо видно, что частицы одного типа локализуются внутри отдельных областей, четко разделяемых друг с другом. По  $T$  и  $\tau$  определялась эффективная масса частицы  $M$  (рис.6). Частицы, масса которых попадала в интервал от 500 МэВ до 1200 МэВ, считались протонами и использовались для дальнейшего анализа.

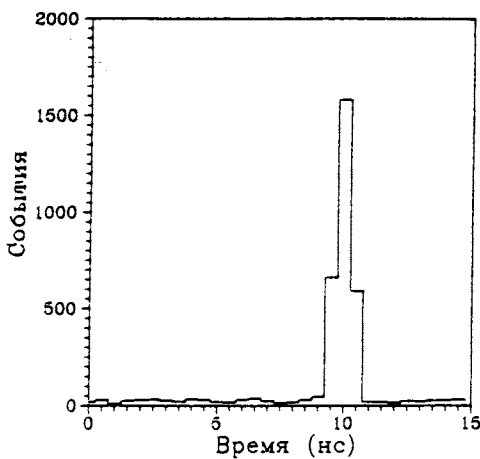


Рис. 4

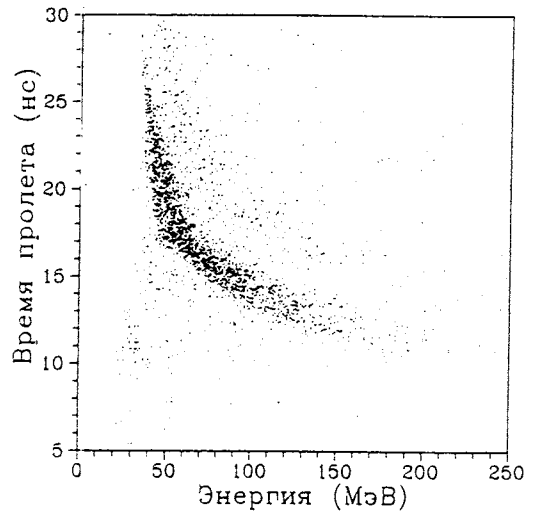


Рис. 5

2. Для отобранных событий строилась корреляционная функция

$$R_2(p_1, p_2) = \frac{\sigma_{inel} d^2\sigma / dp_1 dp_2}{d\sigma / dp_1 d\sigma / dp_2} = C \frac{N_{12}}{N_1 N_2}, \quad (2)$$

где  $C$  — нормировочный множитель,  $N_{12}$  — число двухчастичных событий и  $N_1, N_2$  — число одночастичных событий.

Результаты анализа представлены на рис.7 и рис.8 для реакций  $d+C$  и  $d+Cu$  соответственно (на графике данные отмечены треугольниками. Для сравнения приведены данные реакций  $p+C$  и  $p+Ti$ , взятые из работы [8]. Хорошо видно, что наши данные и данные ИТЭФ заметно различаются, несмотря на большие ошибки. Фитирование данных по методу, предложенному Ледницки и Любошицем [16], показало, что радиус области генерации двух протонов близок радиусу дейтрона (углерода) и приблизительно равен  $r_{d+C} = 3_{-0,4}^{+0,5}$  фм. Это примерно в два раза больше величины, полученной в

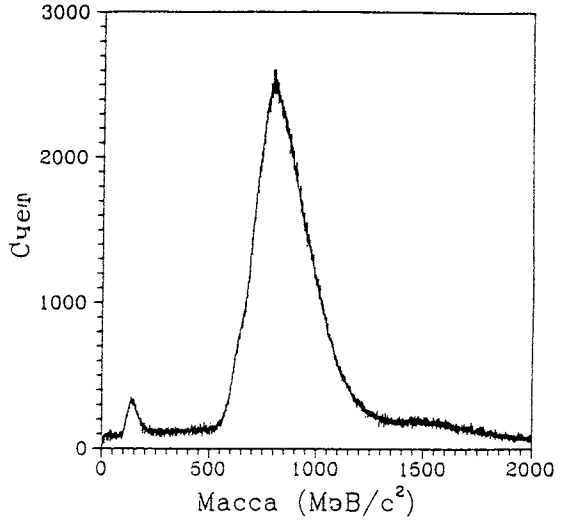


Рис. 6

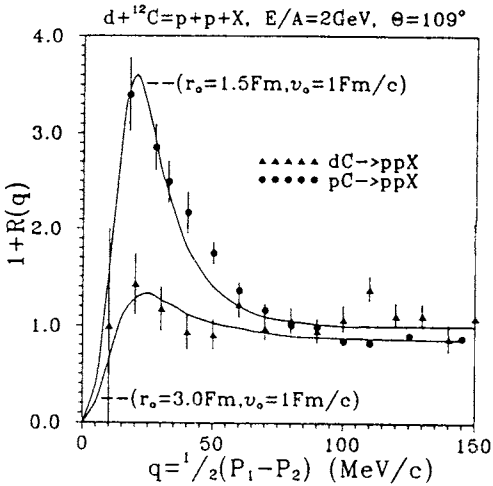


Рис. 7

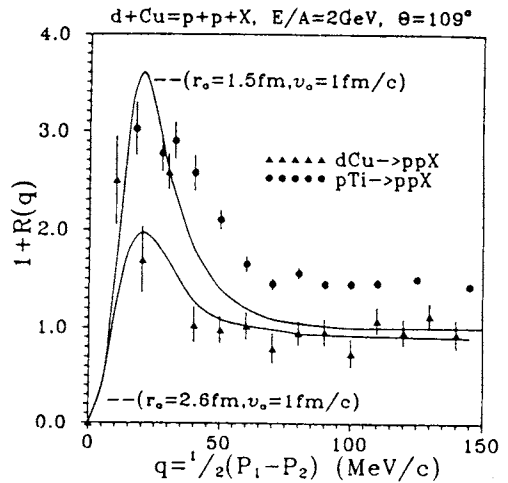


Рис. 8

адрон-ядерном взаимодействии (данные ИТЭФ). Близкое значение имеет радиус области генерации и в  $d + \text{Cu} \rightarrow p + p$  реакции:  $r_{d+\text{Cu}} = 2,6_{-0,7}^{+0,8}$  фм.

Как видно из приведенных данных, корреляционная функция для  $d + A$ -взаимодействия заметно отличается от корреляционной функции для  $p + A$ -взаимодействия. Причем эта зависимость сохраняется как для углеродной, так и для медной мишени.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования  $d + A$ -взаимодействия с образованием двух кумулятивных протонов под углом  $109^\circ$  показали заметное отличие в поведении корреляционной функции от данных, полученных в реакции  $p + A$  (ИТЭФ) [8]. Фитирование данных с использованием модели гауссового распределения источника вторичных протонов показало, что разница в полученных величинах для  $r_{d+A}/r_{p+A}$  приблизительно соответствует различию в размерах первичных частиц  $r_d/r_p$ .

Однако приведенный результат следует рассматривать как предварительный вследствие различия условий, в которых были получены данные для  $d + A$ - и  $p + A$ -взаимодействий. Результаты могут содержать систематические ошибки, трудно поддающиеся анализу. Для более корректного измерения следует провести исследование корреляционной функции для реакций  $A + A$  и  $p + A$  в одних условиях.

Авторы благодарят всех сотрудников ЛВЭ, оказывавших помощь при проведении эксперимента. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №96-15-96423).

#### Литература

1. Bauer W., Gelbke C. — Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1992, 42:77-100, p.77.
2. Копылов Г.И., Подгорецкий М.И. — ЯФ, 1973, т.18, с.656.
3. Korylov G.I. — Phys. Lett., 1974, v.50B, p.472.
4. Баюков В.Д. и др. — ПТЭ, 1982, вып.3. с.29.
5. Баюков В.Д. и др. — ЯФ, 1981, т.34, вып.1., с.95.
6. Власов А.В. и др. — ЯФ, 1982, т.36, с.915.
7. Власов А.В. и др. — Препринт ИТЭФ, 1988, 101.
8. Баюков В.Д. и др. — ЯФ, 1989, т.50, вып.4, с.1023.
9. Власов А.В. и др. — ЯФ, 1995, т.58, с.669.
10. Бобченко Б.М. и др. — ЯФ, 1979, т.30, вып.6, с.1553.
11. Власов А.В. и др. — Препринт ИТЭФ, 57-90, 1990.
12. Бургов Н.А. и др. — ЯФ, 1976, т.24, с.1183.
13. Baden A. et al. — GSI-82-5 Report, 1982.
14. Ставинский В.С. — ЭЧАЯ, 1979, т.10, вып.5, с.949.
15. Bondarev V.K. et al. — JINR, E1-93-84, Dubna, 1984.
16. Ледниcki P., Любошиц В.Л. — ЯФ, 1982, т.35, вып.5, с.1316.