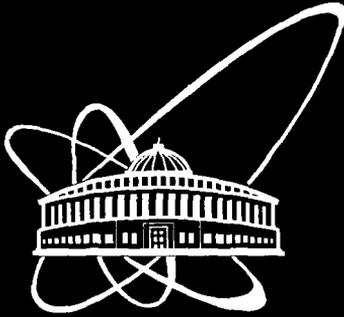




XJ0300088



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P1-2002-262

Р. Н. Бекмирзаев<sup>1</sup>, А. А. Кузнецов, Э. Х. Шукуров<sup>2</sup>,  
Б. С. Юлдашев<sup>3</sup>

СВОЙСТВА ПРОТОННЫХ КЛАСТЕРОВ  
В НЕУПРУГИХ СС-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ,  
СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ РОЖДЕНИЕМ  
 $\Lambda$ - И  $K^0$ -ЧАСТИЦ ПРИ  $P = 4,2$  ГэВ/с на нуклон

Направлено в журнал «Ядерная физика»

<sup>1</sup>E-mail: [bekmirzaev@land.ru](mailto:bekmirzaev@land.ru)

<sup>2</sup>Джизакский государственный педагогический университет,  
Узбекистан

<sup>3</sup>Институт ядерной физики АН РУз, Ташкент

2002

## Введение

Инклюзивный подход, традиционно применяемый для описания множественного рождения частиц в большом числе экспериментальных работ, в принципе использует только небольшую часть информации об этих процессах.

В настоящей работе для описания множественных процессов применяется метод [1-5], который в отличие от инклюзивного подхода даёт возможность использовать всю доступную эксперименту информацию. Метод позволяет упорядочить сложные картины релятивистских ядерных взаимодействий.

Предлагаемая работа является продолжением цикла [1-5], посвященного исследованию свойств барионных кластеров в  $\bar{h}A$ - и  $AA$ -взаимодействиях в широком интервале энергий с использованием релятивистски-инвариантных безразмерных величин:

$$b_{ik} = - \left( \frac{P_i}{m_i} - \frac{P_k}{m_k} \right)^2 = -(u_i - u_k)^2. \quad (1)$$

Здесь  $P_i, P_k$  - четырехмерные импульсы рассматриваемых частиц, а  $m_i, m_k$  - их массы.

В работе изучается образование и свойства протонных кластеров в неупругих  $CC$ - взаимодействиях с рождением  $\Lambda$ - и  $K^0$ -частиц ( $CC^{A/K}$ ).

## Методика эксперимента

Экспериментальные данные получены с помощью 2-метровой пропановой пузырьковой камеры, облученной в пучке протонов и ядер на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ. Здесь необходимо отметить следующие методические особенности. Нижняя граница, начиная с которой регистрировались протоны в камере, составила  $P_{л.с.} \approx 150$  МэВ/с. По пробегу и ионизации протоны отличались от  $\pi^+$ -мезонов до значений импульса  $P_{л.с.} = 800$  МэВ/с. Примесь  $\pi^+$ -мезонов среди положительных частиц составляла  $\approx 10 \div 15\%$ . Примесь дейтронов и тритонов среди медленных протонов с  $P_{л.с.} < 800$  МэВ/с, по различным оценкам, не превышала  $10 \div 15\%$  [6-7]. Методически вопросы обработки событий с  $V^0$ -частицами подробно рассмотрены в [8].

Выделение протонных кластеров из всех неупругих  $AC$ -взаимодействий производилось лоренц-инвариантным методом в пространстве 4-мерных скоростей. Для этого в событиях с множественностью протонов  $p_p \geq 4$  минимизировались величины

$$A_2 = \min \left[ - \sum (V_\alpha - u_1^\alpha)^2 - \sum (V_\beta - u_1^\beta)^2 \right], \quad (2)$$

где  $V_\alpha$  и  $V_\beta$  - центры кластеров  $\alpha$  и  $\beta$ ;

$$u_i^\alpha = P_i^\alpha / m_i; \quad u_i^\beta = P_i^\beta / m_i, \quad (3)$$

4-скорости вторичных барионов, относящихся к кластеру  $\alpha$  или  $\beta$  соответственно.

Фрагменты мишени ( $P_{\text{лаб}} < 300$  МэВ/с) и снаряда ( $P_{\text{лаб}} > 3.0$  ГэВ/с и  $\theta_{\text{лаб}} < 4$ ) из анализа исключались. Для нахождения величины  $A_2$  выделения двух (или одного) кластеров в каждом событии с множественностью отобранных протонов  $n_p > 4$  рассматривались все возможные разбиения частиц на две группы. Считалось, что в событии образовались два кластера или один кластер и положительно заряженная частица, если расстояние между выделенными группами барионов в пространстве 4-скоростей  $b_{\alpha\beta}$  было не менее 1, т.е. выполнялось условие

$$b_{\alpha\beta} = -(V_\alpha - V_\beta)^2 > 1. \quad (4)$$

Для определения области образования кластеров использовались релятивистски-инвариантные переменные  $x_{IC}$  и  $x_{IIC}$ , которые характеризуют долю уносимых ими 4-импульсов сталкивающихся частиц [1-5]:

$$x_{IC} = \frac{m_C^{\alpha(\beta)} (V_{\alpha(\beta)} u_{II})}{m_I (u_I u_{II})}, \quad (5)$$

$$x_{IIC} = \frac{m_C^{\alpha(\beta)} (V_{\alpha(\beta)} u_I)}{m_{II} (u_I u_{II})}. \quad (6)$$

В качестве величин  $m_I$  и  $m_{II}$  бралась масса протона  $m_p = m_{pI} = m_p = 0.938$  МэВ.

Область больших значений соответствует области фрагментации мишени, а больших  $x_{IC}$  — области фрагментации налетающего ядра. В дальнейшем считалось, что если  $x_{IIC} < x_{IC}$ , то кластеры образуются в области фрагментации пучка. В настоящей работе изучались кластеры в области  $x_{IIC} > x_{IC}$  т.е. кластеры, образованные в области фрагментации мишени.

На рис.1 показано для СС-взаимодействий распределение по расстоянию  $b_{\alpha\beta}$  между кластерами в пространстве 4-скоростей. Как видно, представленное распределение в области  $b_{\alpha\beta} > 3$  описывается степенной зависимостью типа

$$\frac{dN}{db_{\alpha\beta}} = \frac{A}{b_{\alpha\beta}^m} \quad (7)$$

с параметром  $m = 3.72 \pm 0.07$ , что согласуется с ожидаемым [4] поведением этого сечения. В области  $b_{\alpha\beta} > 1$  среднее значение величины  $\langle b_{\alpha\beta} \rangle$  равно  $2.40 \pm 0.01$ . Такой характер зависимости ранее наблюдался в экспериментах [9-10], в распределениях струй в мягких адрон-адронных, адрон-ядерных, глубоконеупругих  $\nu N$ -соударениях и  $e^+e^-$ - аннигиляциях. Величина параметра оказалась не зависящей от типа и энергий взаимодействия и равной для всех соударений  $m=3$ .

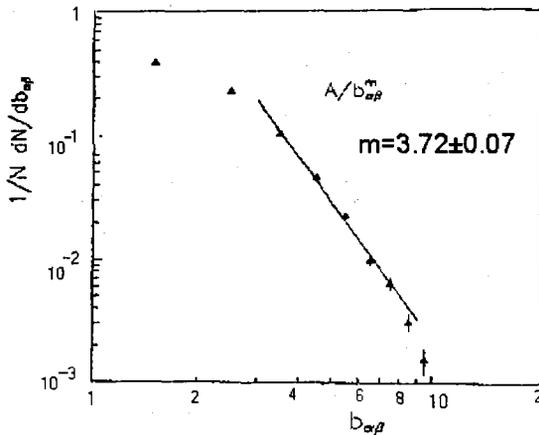


Рис.1. Распределение протонных кластеров по квадратам расстояний между ними  $b_{\alpha\beta}$  в пространстве 4-скоростей в СС-неупругих взаимодействиях

### Свойства инвариантных $F(b_k)$ -распределений протонов в кластерах и $F(b_{пс})$ - распределений кластеров относительно ядра-мишени

Для изучения свойств барионных кластеров анализировались инвариантные  $F(b_k)$  -распределения протонов в них, которые можно записать следующим образом:

$$F(b_k) = \frac{1}{N} \frac{2}{m_k^2} \int \frac{1}{\sqrt{b_k + b_k^2/4}} \frac{dN}{db_k d\Omega} d\Omega. \quad (8)$$

Эти распределения обладают тем хорошим свойством, что в системе покоя кластера  $V_\alpha=0$  средняя величина  $\langle b_k \rangle$ , получаемая из распределения (8), однозначно связана со средней кинетической энергией протонов в кластере как

$$\langle b_k \rangle = \left\langle \frac{2E_k}{m_k} - 2 \right\rangle = \frac{2 \langle T_k \rangle}{m_k}. \quad (9)$$

Таким образом, анализируя распределения (8), можно определить среднюю "температуру" протонов в кластерах.

В работах [5] и [10] были изучены зависимости  $F(b_k)$  для АС- и АТа-взаимодействий при  $P_\Lambda = 4,2$  ГэВ/с на нуклон. В рС(Та)- и dС(Та)-соударениях распределения протонов в кластерах по переменной  $b_k$  описываются экспоненциальной зависимостью вида

$$F(b_k) = a_1 \exp(-b_k / \langle b_k \rangle_1). \quad (10)$$

Средние значения  $\langle b_k \rangle_1$  и соответствующие им средние значения температуры приведены в таблице.

Средние характеристики протонов в кластерах

| Тип<br>Взаимодействия |       | Кластер типа 1          |                             | Кластер типа 2          |                             |
|-----------------------|-------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
|                       |       | $\langle b_k \rangle_1$ | $\langle T_k \rangle_1$ МэВ | $\langle b_k \rangle_2$ | $\langle T_k \rangle_2$ МэВ |
| PC                    | 4,2   | 0,133±0,004             | 62±2                        | -                       | -                           |
| DC                    | 4,2 А | 0,147±0,002             | 67±1                        | -                       | -                           |
| αC                    | 4,2 А | 0,147±0,008             | 67±1                        | 0,248±0,022             | 118±10                      |
| CC                    | 4,2 А | 0,154±0,014             | 72±7                        | 0,288±0,028             | 135±13                      |
| PC                    | 10    | 0,158±0,005             | 74±2                        | -                       | -                           |
| CC(мн)                | 4,2 А | -                       | -                           | 0,256±0,005             | 120±2                       |
| CC <sup>МК</sup>      | 4,2 А | -                       | -                           | 0,213±0,004             | 100±2                       |

В отличие от pC(Ta)- и dC(Ta)- соударений, в αC- и CC-событиях зависимость  $F(b_k)$  для CC<sup>МК</sup> описывается выражением, состоящим из суммы двух экспоненциальных функций

$$F(b_k) = a_1 \exp(-b_k / \langle b_k \rangle_1) + a_2 \exp(-b_k / \langle b_k \rangle_2) \quad (11)$$

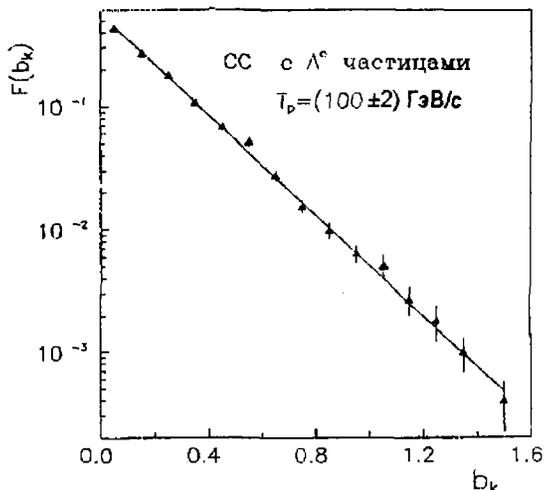
со средними значениями  $\langle b_k \rangle_1$  и  $\langle b_k \rangle_2$ , отличающимися друг от друга почти в 2 раза (см.табл.). Полученные результаты указывают на то, что в ядроядерных αC- и CC-столкновениях наблюдается образование кластеров двух типов: один из них (1) имеет температуру такую же, как кластеры, образующиеся в pC(Ta)- и dC(Ta)-столкновениях, а другой (2) имеет более высокую температуру (см.табл.).

Ниже проанализированы зависимости  $F(b_k)$  для CC<sup>МК</sup>-взаимодействий, в которых обязательно рождаются либо Λ-гиперон, либо K<sup>0</sup>-мезон. Зависимости  $F(b_k)$ , полученные в экспериментах для такого рода CC-взаимодействий, представлены на рис.2. Из рисунка видно, что в CC-событиях распределения протонов в кластерах по переменной  $b_k$  описываются экспоненциальной зависимостью, подобной (10), со средними значениями  $\langle b_k \rangle_2 = 0.213 \pm 0.004$  и соответствующей температурой  $\langle T_k \rangle = (100 \pm 2)$  МэВ.

Таким образом, в отличие от всех неупругих CC-взаимодействий, где, как было показано ранее, образуется 2 типа кластеров с разной температурой [5], в событиях типа CC<sup>МК</sup> образуется в основном один кластер с высокой температурой.

Следовательно, рождение высокотемпературных кластеров в CC<sup>МК</sup>-взаимодействиях, по-видимому, связано с динамикой образования странных частиц в релятивистских ядро-ядерных взаимодействиях.

Для изучения особенностей образования кластеров с участием странных частиц анализировалась величина инвариантного сечения  $E \frac{d^3\sigma}{dp^3}$  в зависимости от переменной  $b_{IIc}$ , где  $b_{IIc} = -(V_{II} - u_{II})^2$  (индекс II относится к ядру-мишени). Функция  $F(b_{IIc})$  записывается аналогично выражению (8).



**Рис.2.** Инвариантная функция  $F(b_k)$  для протонов в кластерах, образующихся в  $CC^{NK}$ -столкновениях. Сплошная линия – результат аппроксимации

В работе [5] было установлено, что кластеры, образующиеся в ядроядерных взаимодействиях с разной температурой, характеризуются различным распределением их относительно ядра-мишени или разной зависимостью по переменной  $b_{НС}$ . Ниже приводятся результаты, характеризующие поведение инвариантных функции  $F(b_{НС})$  для кластеров, образованных в  $CC^{NK}$ -взаимодействиях.

Установлено, что среднее значение величины  $b_{НС}$  для кластеров, образованных в  $CC^{NK}$ -взаимодействиях, равняется  $\langle b_{НС} \rangle = 0.58 \pm 0.02$ .

Это значение величины  $\langle b_{НС} \rangle$  в пределах экспериментальных ошибок хорошо совпадает с значениями этой величины, полученными ранее [5,11] для высокотемпературных протонных кластеров, образующихся в  $\alpha C$  и  $CC$ -взаимодействиях.

Следовательно, обобщая данные работ [5, 11] и полученный в настоящей работе результат, можно утверждать, что нуклонные кластеры с различной температурой характеризуются различным распределением относительно ядра-мишени в пространстве 4-скоростей. Нуклонные кластеры с низкой температурой характеризуются средним значением 4-скорости относительно ядра-мишени  $\langle b_{НС} \rangle = 0.11-0.14$ , а нуклонные кластеры с более высокой температурой характеризуются большей величиной 4-скорости относительно ядра-мишени  $\langle b_{НС} \rangle = 0.5 \div 0.6$ .

## Свойства инвариантных $F(x_k)$ -распределений протонов в кластерах

Переменная  $x_k$  для протонов из кластера  $\alpha$  определяется соотношением

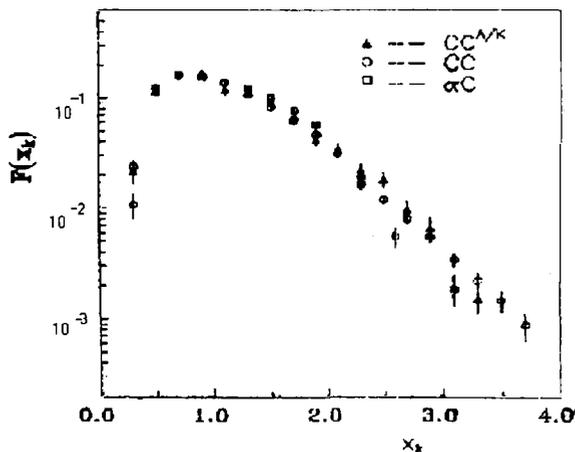
$$x_k^\alpha = \frac{h_{\beta k}}{b_{\alpha\beta}} = x_k, \text{ где } h_{\beta k} = -(V_\beta - u_k^\alpha)^2. \quad (12)$$

Переменная  $x_k$  в системе покоя  $\alpha$ -кластера  $V=0$  переходит в переменную светового фронта  $x_k^\alpha = u_{k_0}^\alpha - u_k^\alpha$  при достаточно больших  $b_{\alpha\beta} > 1$ . Здесь ось  $z$  определяет направление линии, соединяющей центры кластеров  $V_\alpha$  и  $V_\beta$  в 3-мерном пространстве. Отсюда следует, что зависимость инвариантной функции  $F(x_k)$  от переменной  $x_k$  означает зависимость от направления отрезка, соединяющего центры кластеров  $V_\alpha$  и  $V_\beta$ . Это, в свою очередь, означает, что изолированная система (кластер) должна распадаться анизотропно по отношению к указанному направлению в система покоя кластера.

Инвариантная функция  $F(x_k)$  представляется следующим образом:

$$F(x_k) = \frac{2}{m_N^2 b_{\alpha\beta}} \int \frac{1}{\sqrt{x_k b_{\alpha\beta} + (x_k b_{\alpha\beta})^2 / 4}} \frac{d\Omega}{dx_k d\Omega} d\Omega. \quad (13)$$

На рис.3 представлены зависимости  $F(x_k)$  для  $CC^{MK}$ -,  $CC$ - и  $\alpha C$ -взаимодействий, полученные в эксперименте.



**Рис.3.** Инвариантные функции  $F(x_k)$  для протонов в кластерах, образующихся в  $\alpha C$ -,  $CC$ -, и  $CC^{MK}$ -взаимодействиях

Из рисунка видно, что значения  $F(x_k)$  для рассматриваемых типов взаимодействий совпадают в пределах ошибок, т.е. не зависят от атомного веса ядра-снаряда. Ранее такая независимость для  $F(x_k)$  от атомного веса ядра-снаряда и от энергии была получена для  $pC$ -,  $dC$ - и  $\pi C$ - взаимодействий

в интервале импульсов 4÷40 ГэВ/с. Следует отметить, что зависимости  $F(x_k)$  для  $CC^{AK}$ -,  $CC$ - и  $\alpha C$  – соударений несколько шире, чем в  $pC$ - и  $dC$ -столкновениях. Последнее обстоятельство является отражением существования в  $CC^{AK}$ -,  $CC$ - и  $\alpha C$  - взаимодействиях барионных кластеров более высокой, чем в  $pC$ - и  $dC$  – соударениях, температуры.

### Заключение

Совокупность данных о свойствах нуклонных кластеров в событиях со странными частицами, полученная в настоящем эксперименте, и их сравнение с полученными ранее результатами по свойствах нуклонных кластеров без странных частиц, образующихся в  $(p,d,\alpha,C)C$ - взаимодействиях при тех же энергиях, позволяют сделать следующие выводы:

1. Впервые обнаружено, что в  $CC^{AK}$  – столкновениях при импульсе 4.2 ГэВ/с образуются нуклонные кластеры, характеризующиеся высокими значениями средней кинетической энергии протонов в системе покоя кластеров:  $\langle T_p \rangle = (100 \pm 2)$  МэВ.

2. Установлено, что значения температуры, а также другие характеристики, описывающие свойства протонных кластеров в событиях со странными частицами, в пределах ошибок подобны тем, которые были получены ранее при исследовании свойств высокотемпературных нуклонных кластеров в событиях без странных частиц, образующихся в  $\alpha C$ - и  $CC$ -столкновениях при тех же энергиях [5].

### Литература

1. Балдин А.М. и др., ЯФ, т. 44, 1209(1986).
2. Балдин А.М., Диденко Л.А., Краткие сообщения ОИЯИ, 3-84, 5(1984); 8-85, 5(1985).
3. Балдин А.М., Балдин А.А., Краткие сообщения ОИЯИ, 17-86, 19(1986).
4. Армутлийски Д. и др. Краткие сообщения ОИЯИ, 4 (24)-87, 5(1987).
5. Балдин А.М. и др., ЯФ, т. 49, 1043(1989).
6. BBCDSSTTU-BW Cojral//Phys.Lett., V.B39, 371(1972).  
Ангелов Н.С. и др., ЯФ, т.25, 1013(1977).
7. Adyasevich B.P. IAE – 3913/2.M., 1984, IAE –4148/2 1985.
8. Армутлийски Д. и др., ЯФ, т.43, 366(1986).
9. Балдин А.М. и др., ЯФ, т.49, 1034(1989).
10. Гришин В.Г. и др., Препринт ОИЯИ, P1-89-838, Дубна, 1989.
11. Балдин А.М. и др., Препринт ОИЯИ, P1-90-263, Дубна, 1990.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

| Индекс | Тематика   |
|--------|--|
| 1.     | Экспериментальная физика высоких энергий   |
| 2.     | Теоретическая физика высоких энергий   |
| 3.     | Экспериментальная нейтронная физика  |
| 4.     | Теоретическая физика низких энергий  |
| 5.     | Математика   |
| 6.     | Ядерная спектроскопия и радиохимия   |
| 7.     | Физика тяжелых ионов   |
| 8.     | Криогеника   |
| 9.     | Ускорители   |
| 10.    | Автоматизация обработки экспериментальных данных   |
| 11.    | Вычислительная математика и техника  |
| 12.    | Химия  |
| 13.    | Техника физического эксперимента   |
| 14.    | Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами   |
| 15.    | Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях   |
| 16.    | Дозиметрия и физика защиты   |
| 17.    | Теория конденсированного состояния   |
| 18.    | Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники |
| 19.    | Биофизика  |

Бекмирзаев Р. Н. и др.

P1-2002-262

Свойства протонных кластеров в неупругих  $CC$ -взаимодействиях, сопровождающихся рождением  $\Lambda$ - и  $K^0$ -частиц при  $P=4,2$  ГэВ/с на нуклон

Свойства протонных кластеров в  $CC^{A/K}$ -столкновениях при 4,2 ГэВ/с на нуклон изучены с помощью нового релятивистски-инвариантного подхода в пространстве относительных четырехмерных скоростей. Обнаружено, что при этом образуются нуклонные кластеры, характеризующиеся высокими значениями средней кинетической энергии протонов в системе покоя кластеров:  $\langle T_p \rangle = (100 \pm 2)$  МэВ.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

### Перевод авторов

Bekmirzaev R. N. et al.

P1-2002-262

Properties of Proton Clusters in  $CC^{A/K}$  Collisions at 4.2 GeV/c per nucleon with  $\Lambda$  and  $K^0$  Production

Properties of proton clusters in  $CC^{A/K}$  collisions at 4.2 GeV/c per nucleon were studied by relativistic invariant approach in relative four-dimensional velocity space. It is revealed that in this case the nucleon clusters being characterized by high value of the average kinetic energies of protons in the cluster rest system are formed:  $\langle T_p \rangle = (100 \pm 2)$  MeV.

The investigation has been performed at the Veksler-Baldin Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

**Редактор *М. И. Зарубина*  
Макет *Н. А. Киселевой***

**Подписано в печать 26.11.2002.**

**Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.**

**Усл. печ. л. 0,44. Уч.-изд. л. 0,5. Тираж 365 экз. Заказ № 53633.**

**Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.**

**E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)**

**[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)**