

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

744, 83

7/2-83

1-82-783

Г.Н.Агакишиев,<sup>1</sup> Ц.Баатар, Е.Бартке,  
А.П.Гаспарян, В.Г.Гришин, И.А.Ивановская,  
Е.Н.Кладницкая, Р.Р.Мехтиев,<sup>1</sup> А.Н.Соломин,<sup>2</sup>  
А.П.Чеплаков, Л.М.Шеглова<sup>2</sup>

ИССЛЕДОВАНИЕ А-ЗАВИСИМОСТИ  
ИНКЛЮЗИВНЫХ СЕЧЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ  
 $\pi$ -МЕЗОНОВ В РАЗЛИЧНЫХ ИНТЕРВАЛАХ  
ПОПЕРЕЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ  
ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ  $p$ ,  $d$ ,  ${}^4\text{He}$  И  ${}^{12}\text{C}$   
С ЯДРАМИ  ${}^{181}\text{Ta}$   
ПРИ ИМПУЛЬСЕ 4,2 ГэВ/с на нуклон

<sup>1</sup>Институт физики АН АзССР, Баку.

<sup>2</sup>НИИЯФ МГУ, Москва.

Направлено в журнал "Ядерная физика"

1982

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой интерес проявляется к изучению образования частиц с большими поперечными импульсами в столкновениях адронов и ядер с ядрами при высоких энергиях. Исследование ядерных реакций с большими передачами импульса привело к открытию кумулятивного эффекта и установлению ряда универсальных закономерностей в области предельной фрагментации ядер<sup>/1,2/</sup> В экспериментах<sup>/3,4/</sup> было обнаружено аномальное, то есть растущее быстрее, чем  $A$ , возрастание выхода частиц с большими  $P_{\perp}$  в адрон-ядерных взаимодействиях. Хотя механизм этого явления пока не ясен, можно думать, что в данных FNAL по аномальной  $A$ -зависимости отражается присутствие многокварковых флуктуаций в ядре, существование которых проявляется в кумулятивных процессах. Результаты, полученные в работах<sup>/3,4/</sup>, позднее были подтверждены в целом ряде других экспериментов по адрон-ядерным взаимодействиям<sup>/5-8/</sup>. Недавно появились экспериментальные данные по ядро-ядерным взаимодействиям, указывающие на наличие аналогичного эффекта в столкновениях ядер в интервале импульсов  $1+4$  ГэВ/с на нуклон<sup>/9-11/</sup> и в  $\alpha$ -взаимодействиях при энергиях ISR<sup>/12-15/</sup>. Возникло также много различных теоретических подходов, претендующих на описание аномального возрастания сечений образования адронов с большими  $P_{\perp}$  на ядрах<sup>/16-20/</sup>, однако удовлетворительного объяснения этого явления до сих пор нет. Продолжение исследования  $A$ -зависимостей выхода частиц в ядерных реакциях имеет важное значение для проверки и развития современных моделей взаимодействия адронов и ядер с ядрами.

В данной работе мы исследовали поведение инвариантных дифференциальных сечений образования  $\pi^-$ -мезонов в зависимости от атомного номера ядра снаряда во взаимодействиях протонов и ядер  $d$ ,  $^4\text{He}$  и  $^{12}\text{C}$  с ядрами  $^{181}\text{Ta}$  при импульсе  $4,2$  ГэВ/с на нуклон.

## 2. МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для анализа использовался экспериментальный материал, полученный с помощью 2-метровой пузырьковой пропановой камеры Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, облученной протонами и ядрами  $d$ ,  $^4\text{He}$  и  $^{12}\text{C}$  с импульсом  $4,2$  ГэВ/с на нуклон. В качестве мишени в рабочем объеме камеры размещались три танталовые пластины толщиной  $1$  мм. Подробно методические вопросы эксперимента рассмотрены в работах<sup>/21,22/</sup>.

Исследовалось поведение инвариантных дифференциальных сечений образования  $\pi^-$ -мезонов в зависимости от  $P_{\perp}$  в реакциях



где  $A = (p, d, {}^4\text{He} \text{ и } {}^{12}\text{C})$ .

При энергии 4,2 ГэВ/с на нуклон в столкновениях с танталом множественность вторичных заряженных частиц весьма велика  $\langle n_{\pm} \rangle \leq 70$ . С методической точки зрения предпочтительнее изучать характеристики множественного рождения отрицательных пионов, так как среди отрицательных частиц они составляют абсолютное большинство. В нашем случае примеси неидентифицированных электронов и отрицательных странных частиц не превышают 5% и 1% соответственно <sup>/23,24/</sup>. Уверенно идентифицированный средний нижний граничный импульс  $\pi^-$ -мезонов составил 80 МэВ/с <sup>/24/</sup>. Поправки на потерю частиц, "застревающих" в пластине, а также на потерю частиц, вылетающих под большими углами к плоскости фотографирования, составили 11, 13 и 7% для облучений дейтронами, ядрами гелия и углерода соответственно <sup>/25/</sup>. Средняя относительная ошибка в измерении импульсов  $\pi^-$ -мезонов составила 12%, а в измерении углов - 0,01 рад <sup>/26/</sup>. Детальный анализ поправок к множественности вторичных  $\pi^-$ -мезонов проведен в работе <sup>/27/</sup>.

Число взаимодействий с танталом, использованное для анализа, и средние множественности  $\pi^-$ -мезонов в этих взаимодействиях <sup>/24,25/</sup> приведены в таблице.

Таблица

$A_i$	p	d	${}^4\text{He}$	${}^{12}\text{C}$
$N_{\text{собщ.}}$	769	1331	780	1176
$\langle n_{\pm} \rangle$	0,45 $\pm$ 0,02	0,90 $\pm$ 0,06	1,6 $\pm$ 0,1	3,4 $\pm$ 0,2

### 3. ЭФФЕКТ АНОМАЛЬНОЙ $A$ -ЗАВИСИМОСТИ И ВЫБОР ФОРМЫ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ДАННЫХ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДРО-ЯДРО

Экспериментальные данные по рождению частиц с большими поперечными импульсами на ядрах дают важную информацию о структуре сталкивающихся объектов. Так, на основе гипотезы о том, что частицы с большими  $P_{\perp}$  образуются в результате редкого процесса - жесткого, в основном однократного, соударения кварков - партоннов <sup>/16,17/</sup>, считалось, что сечение их образования в адрон-ядерных взаимодействиях должно быть пропорционально  $A^1$ . Однако в экспериментах <sup>/2-8/</sup> было обнаружено, что инвариантные сечения образо-

вания адронов с большими  $P_{\perp}$  в рА-взаимодействиях можно параметризовать степенной  $A$ -зависимостью:

$$\left( E \frac{d^3\sigma}{d^3p} \right)_{pA} \sim A^{\alpha(P_{\perp})}, \quad /2/$$

где  $\alpha(P_{\perp})$  - не зависящая от атомного веса  $A$ , растущая функция поперечного импульса, причем при больших  $P_{\perp}$  ее значения могут превышать единицу, достигая величины 1,1-1,3. Обсуждение различных механизмов, выдвинутых для объяснения эффекта аномального возрастания сечений образования частиц с большими  $P_{\perp}$  на ядрах, или аномальной  $A$ -зависимости, и подробный список литературы на эту тему содержатся в работе <sup>/28/</sup>.

Изучение аналогичных эффектов в ядро-ядерных столкновениях может помочь раскрыть природу явления аномальной  $A$ -зависимости. В этом плане представляют интерес экспериментальные данные по исследованию выхода частиц в зависимости от поперечного импульса в ядро-ядерных взаимодействиях <sup>/9-11/</sup> и в  $\alpha\alpha$ -столкновениях на ISR <sup>/12-15/</sup>. Особо следует отметить результаты, полученные в  $\alpha\alpha$ -взаимодействиях, где измерялись сечения образования адронов в области поперечных импульсов вплоть до  $P_{\perp} \approx 6$  ГэВ/с.

В этих экспериментах <sup>/12-15/</sup> было обнаружено аномальное /более чем в  $A^2 = 16$  раз по сравнению с рр-взаимодействиями/ увеличение выхода пионов с большими  $P_{\perp}$ .

Этот результат указывает, по-видимому, на существование многокварковых флуктуаций в ядре <sup>/29/</sup>. Дальнейшее исследование подобного рода эффектов для различных сталкивающихся ядер представляет несомненный интерес.

Для изучения  $A$ -зависимости сечений образования адронов в ядро-ядерных взаимодействиях естественно предположить, учитывая результаты, полученные в <sup>/9-15/</sup>, что параметризация <sup>/2/</sup> непосредственным образом обобщается на случай ядро-ядерных соударений. Пусть мы имеем реакцию



где  $A$  и  $B$  - атомные веса налетающего ядра и ядра-мишени;  $h$  - регистрируемый адрон. Тогда по аналогии с <sup>/2/</sup> полагаем, что

$$\left( E \frac{d^3\sigma}{d^3p} \right)_{AB} \sim (A \cdot B)^{\alpha(P_{\perp})}. \quad /4/$$

Отметим, что, строго говоря, такая простая параметризация является приближенной и справедлива при достаточно высоких энергиях. В общем случае  $A$ -зависимость рождения заряженных адронов в реакциях типа <sup>/3/</sup> должна учитывать как число протонов и нейтронов в сталкивающихся ядрах, так и различие в сечениях образования этих адронов в рр-, рп- и пп-взаимодействиях при данной энергии /см., например, <sup>/30/</sup> /.

#### 4. А-ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДА $\pi^-$ -МЕЗОНОВ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ЯДЕР С ТАНТАЛОВОЙ МИШЕНЬЮ

Для анализа поведения дифференциальных сечений  $\pi^-$ -мезонов, образованных в реакциях /1/, в зависимости от поперечного импульса и атомного веса ядра-снаряда /d,  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ / была использована параметризация /4/. Полученная зависимость  $\alpha(P_\perp)$  показана на рис. 1 / $\chi^2$ /на 1 ст.св.  $\approx 1,2$ /. Как видно из рисунка, в области  $P_\perp \sim 0,6$  ГэВ/с имеется некоторое превышение выхода  $\pi^-$ -мезонов по сравнению с  $\alpha(P_\perp) = 1$  для случая независимого столкновения нуклонов, однако экспериментальные ошибки велики. Исследование А-зависимости сечений образования протонов, проведенное ранее в этом эксперименте, показало, что при  $P_\perp^2 \geq 1$  /ГэВ/с<sup>2</sup> параметр  $\alpha$  достигает значения  $1,17 \pm 0,03$  /11/.

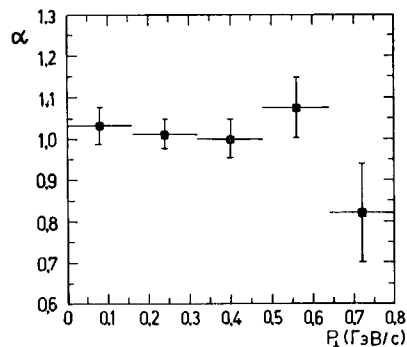


Рис. 1. Значения параметров  $\alpha(P_\perp)$ , полученные в результате аппроксимации по формуле /4/ инвариантных сечений образования  $\pi^-$ -мезонов в реакциях (d,  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ) +  $^{181}\text{Ta} \rightarrow \pi^- + X$ .

Чтобы сравнить наши данные с аналогичными результатами, полученными при более высоких энергиях, мы воспользовались переменной  $x = P_\perp / P_{\text{max}}$ , где  $P_{\text{max}}$  - максимальный импульс в системе центра масс нуклон-нуклонного столкновения при соответствующей энергии. Если экспериментальные отношения дифференциальных сечений  $\pi^-$ -мезонов

$$R_i = (E d^3\sigma / d^3P)_{A_i \text{Ta}} / (E d^3\sigma / d^3P)_{p \text{Ta}}$$

аппроксимировать, учитывая выражение /4/, зависимостью

$$R_i = A_i^{\alpha(x_\perp)}, \quad /5/$$

где  $A_i = d, ^4\text{He}, ^{12}\text{C}$ , то имеется подобие ядро-ядерных взаимодействий при рассматриваемой энергии и протон-ядерных взаимодействий при 400 ГэВ/с /7/ /рис. 2/. На рисунке приведена также аналогичная зависимость, полученная в рА-столкновениях при 70 ГэВ/с /8/, которая располагается ниже наших экспериментальных данных. Предварительные результаты по зависимости  $\alpha(x_\perp)$  были опубликованы нами в /10/. Необходимо заметить следующее: так как параметризация /5/, полученная на основе соотно-

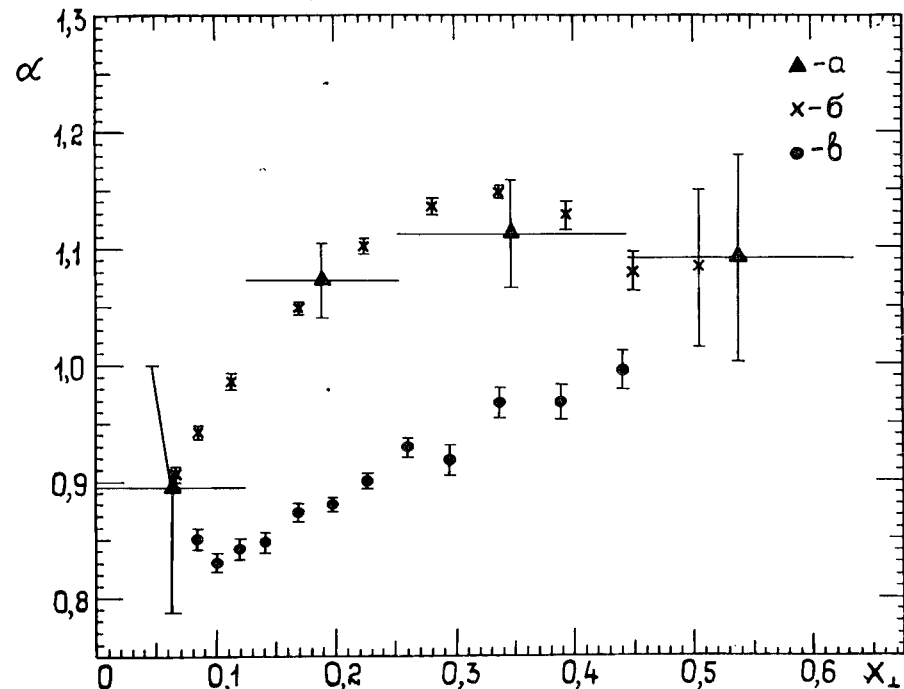


Рис. 2. Зависимость  $\alpha(x_\perp)$  для  $\pi^-$ -мезонов, полученная: а/ в результате аппроксимации отношений  $R_i = A_i^{\alpha(P_\perp)}$  по формуле /5/ при 4,2 ГэВ/с на нуклон /наш эксперимент/; б/ в рА-взаимодействиях при 400 ГэВ/с /7/ ( $E \frac{d^3\sigma}{d^3P} \sim A^{\alpha(x_\perp)}$ ); в/ в рА-взаимодействиях при 70 ГэВ/с /8/ ( $E \frac{d^3\sigma}{d^3P} \sim A^{\alpha(x_\perp)}$ ).

шения /4/, достаточно хорошо описывает экспериментальные данные при 4,2 ГэВ/с / $\chi^2$ /на 1 ст.св.  $\approx 0,5$ /, то это означает, если принять во внимание замечания в конце предыдущего раздела, что разницей между рТа- и пТа-взаимодействиями можно пренебречь на данном уровне статистической обеспеченности нашего эксперимента. Таким образом, параметризация /5/ может рассматриваться как средство наблюдения А-зависимости выхода частиц в ядро-ядерных взаимодействиях.

Отметим, что проведенное сравнение носит ограниченный характер в силу того, что данные при 70 /8/ и 400 ГэВ/с получены для частиц, вылетающих под углами, близкими к  $90^\circ$  в системе центра масс нуклон-нуклон, в то время как наши результаты относятся к инклюзивному рождению  $\pi^-$ -мезонов в реакциях /1/.

В заключение подчеркнем, что приведенные выше результаты можно рассматривать как указание на возможное существование аномаль-

ной  $A$ -зависимости инклюзивных сечений образования  $\pi^-$ -мезонов во взаимодействиях легких ядер с танталовой мишенью при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон в области относительно небольших  $P_{\perp}$ . В пределах экспериментальных ошибок наши данные по  $\alpha(x_{\perp})$  сходны с аналогичными результатами, полученными в протон-ядерных взаимодействиях, что дает основание высказать предположение о подобии процессов рождения частиц в ядро-ядерных и нуклон-ядерных взаимодействиях при указанных энергиях. Дальнейшее проведение экспериментов и набор статистики позволят сделать более определенные выводы по исследуемым вопросам.

Авторы выражают благодарность участникам сотрудничества по исследованию ядро-ядерных взаимодействий на 2-метровой пропановой камере за помощь в работе и полезные замечания. Мы признательны Е.М.Левину, Е.М.Лейкину, Н.Н.Николаеву, Ю.М.Шабельскому и Н.П.Юдину за обсуждение результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Балдин А.М. ОИЯИ, P7-5769, Дубна, 1971; ОИЯИ, P7-5808, Дубна, 1971; Краткие сообщения по физике, 1971, 1, с. 35; Progress in Particle and Nuclear Physics, 1980, 4, p. 95.
2. Балдин А.М. и др. ОИЯИ, P1-5819, Дубна, 1971; Proc. Rochester Meeting APS/OPF, N.Y., 1971, p. 131; Ставинский В.С. ЭЧАЯ, 1979, 10, с. 949.
3. Cronin J.W. et al. Phys.Rev., 1975, D11, p. 3105.
4. Kluberg L. et al. Phys.Rev.Lett., 1977, 38, p. 670.
5. Garbutt D.A. et al. Phys.Lett., 1977, 67B, p. 355.
6. MacCarthy R.L. et al. Phys.Rev.Lett., 1978, 40, p. 213.
7. Antreasyan D. et al. Phys.Rev., 1979, D19, p. 764.
8. Абрамов В.В. и др. ЯФ, 1980, 31, с. 660.
9. Nagamiya Sh. Preprint LBL-12950, presented at the Fifth High Energy Heavy Ion Summer Study, LBL, CA, May 18-22, 1981.
10. Akhbabian N. et al. JINR, E1-82-510, Dubna, 1982.
11. Агакишиев Г.Н. и др. ОИЯИ, P1-82-53, Дубна, 1982.
12. Faessler M.A. Invited Talk given at the 9th Int.Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure, Versailles, 1981; Preprint CERN-EP/81-74.
13. Bell W. et al. Preprint CERN-EP/82-25; Phys.Lett., 1982, 112B, p. 271.
14. Karabarbounis A. et al. Phys.Lett., 1981, 104B, p. 75.
15. Angelis A.L.S. et al. Report submitted to the 20th Int.Conf. on High Energy Physics, Lisbon, 1981.
16. Farrar G. Phys.Lett., 1975, 58B, p. 185.
17. Pumphin J., Yen E. Phys.Rev., 1975, D11, p. 1812.
18. Золлер В.Р., Николаев Н.Н., Остапчук А.Я. Элементарные частицы, VI школа физики ИТЭФ. Атомиздат., М., 1979, 3, с. 3.

19. Змушко В.В. ЯФ, 1980, 32, с. 246; ЯФ, 1980, 32, с. 448.
20. Treleani D., Wilk G. Nuovo Cimento, 1980, 60A, p. 201.
21. Абдрахманов Е.О. и др. ОИЯИ, P1-10779, Дубна, 1977; ЯФ, 1978, 27, с. 1020.
22. Abdgrakmanov E.O. et al. JINR, E1-11517, Dubna, 1978; ЯФ, 1978, 28, с. 1304.
23. Гаспарян А.П. и др. ОИЯИ, 1-80-778, Дубна, 1980.
24. Ангелов Н. и др. ОИЯИ, P1-12281, Дубна, 1979; ЯФ, 1979, 30, с. 1590.
25. Агакишиев Г.Н. и др. ОИЯИ, P1-81-176, Дубна, 1981; ЯФ, 1981, 34, с. 1517.
26. Ангелов Н. и др. ОИЯИ, 1-12424, Дубна, 1979.
27. Агакишиев Г.Н. и др. ОИЯИ, 1-82-235, Дубна, 1982.
28. Faessler M.A. Invited Talk given at the Int.Conf. on Physics in Collision: High Energy  $e^+e^-$ ,  $ep$ ,  $pp$  Interactions, Blacksburg, Va, USA, 1981; Preprint CERN EP/81-103.
29. Балдин А.М. и др. УФН, 1982, 137, с. 361.
30. Sukhatme U.P., Wilk G. Preprint SLAC-PUB-2844, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 ноября 1982 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
D17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
D6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
D3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
D13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
D1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
D1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000-Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Агакишиев Г.Н. и др. 1-82-783

Исследование  $A$ -зависимости инклюзивных сечений образования  $\pi^-$ -мезонов в различных интервалах поперечных импульсов во взаимодействиях  $p$ ,  $d$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{12}\text{C}$  с ядрами  ${}^{181}\text{Ta}$  при импульсе  $4,2$  ГэВ/с на нуклон

Исследуется  $A$ -зависимость инвариантных дифференциальных сечений образования  $\pi^-$ -мезонов в инклюзивных реакциях  $/p, d, {}^4\text{He}, {}^{12}\text{C} / + {}^{181}\text{Ta} \rightarrow \pi^- + X$  при  $P_0 = 4,2$  ГэВ/с на нуклон при  $P_{\perp} \leq 0,8$  ГэВ/с. Полученные результаты сравниваются с аналогичными данными для протон-ядерных взаимодействий при высоких энергиях.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Agakishiev G.N. et al. 1-82-783

Study of  $A$ -Dependence of Inclusive Cross Sections of  $\pi^-$ -Mesons in Different Intervals of Transverse Momentum in  $p$ ,  $d$ ,  ${}^4\text{He}$  and  ${}^{12}\text{C}$  Interactions with Tantalum Nuclei at  $4.2$  GeV/c per Nucleon

The  $A$ -dependence of the invariant differential production cross sections of  $\pi^-$ -mesons is investigated in the inclusive reactions  $(p, d, {}^4\text{He}, {}^{12}\text{C}) + {}^{181}\text{Ta} \rightarrow \pi^- + X$  at  $P_0 = 4.2$  GeV/c per nucleon at the  $P_{\perp} \leq 0.8$  GeV/c. The obtained results are compared to the analogous data on proton-nucleus interactions at high energies.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод авторов.