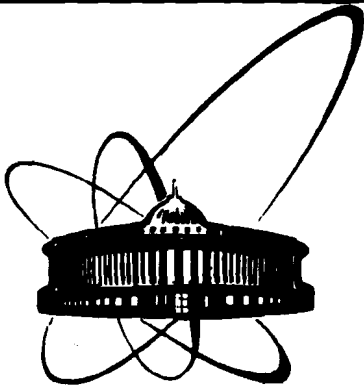


89-627



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

К 85

16-89-627

А.Р.Крылов, В.П.Бамблевский, Г.Н.Тимошенко

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ
НА УСКОРИТЕЛЯХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

Проверка алгоритма расчета
дифференциальных характеристик полей
вторичного адронного излучения из мишеней,
облучаемых релятивистскими ядрами

1989

Предварительное сравнение расчетов по программе IONCAS с экспериментами, выполненными на пучках протонов, α -частиц и ядер ^{12}C синхрофазотрона ЛВЭ, изложено в работе^{/1/}. В настоящей работе приводятся результаты более полной и детальной проверки расчетов полей вторичного излучения, выполненных по усовершенствованной версии программы с большим набором экспериментальных данных, а также с расчетами на основе метода Монте-Карло.

Для расчета двойных дифференциальных инклюзивных сечений образования адронов в ядро-ядерных взаимодействиях используется модель "Файрстрик"^{/2/}. В работе^{/3/} предлагается значение подгоночного параметра данной модели (критической барионной плотности ρ_c), равное $(0,12 \pm 0,02) \text{ фм}^{-3}$. Данное значение было подобрано на основе экспериментальных данных для энергий ядер-снарядов несколько сотен МэВ на нуклон. Механизм формирования спектров вторичных частиц, заложенный в модели, позволяет предположить, что с ростом энергий ядер-снарядов значение должно увеличиваться. Уточнение параметра ρ_c для области энергий ядер-снарядов в несколько ГэВ на нуклон было проведено на основе сравнения расчетных и экспериментально измеренных инвариантных сечений образования протонов при взаимодействии ядер с энергией 3,65 ГэВ на нуклон с ядрами меди^{/4/}. Степень согласия полученных при различных ρ_c

расчетных и экспериментальных сечений продемонстрирована на рис.1. Сравнение

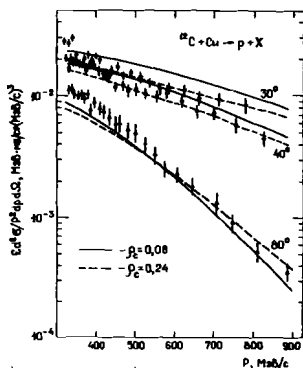


Рис.1. Сравнение расчетных (при различных значениях критической барионной плотности ρ_c) и экспериментальных инвариантных инклюзивных сечений образования протонов под различными углами при энергии ядер ^{12}C 3,65 ГэВ/нуклон.

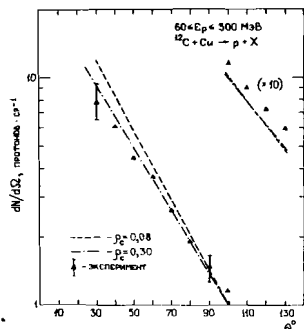


Рис.2. Сравнение расчетных (при различных ρ_c) и экспериментального угловых распределений протонов при взаимодействии с тонкой медной мишенью ядер ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон.

Таблица. Рассчитанные (при различных ρ_c) и экспериментально измеренные средние множественности протонов и однозарядных частиц при взаимодействии ядра ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон с ядром Cu

ρ_c фм ⁻³	Средняя множественность протонов 350 < p < 800 МэВ/с	Средняя множественность однозарядных частиц с $\beta \geq 0,3^*$
0,08	3,99	35,7
0,12	3,78	34,1
0,20	3,52	32,1
0,24	3,40	31,5
0,30	3,28	30,7
эксперимент	$3,67 \pm 0,73$	$30,2 \pm 6,0$

* приведено к $\beta_{\text{геом.}} = 1,79$ бн

рассчитанных для различных ρ_c и экспериментальных ^{5/} угловых распределений протонов ($60 \leq E_p \leq 300$ МэВ) и средней множественности протонов и однозарядных частиц (d, t) представлено на рис.2 и в таблице. Средние множественности однозарядных частиц определялись для значений их скоростей $\beta \geq 0,3$. Из представленных на рисунках 1,2 данных следует, что увеличение ρ_c улучшает согласие с экспериментом в первую очередь в области малых углов, которая имеет большое значение для формирования межъядерного каскада в мишени и ловушках пучков. В результате проведенного сравнения было выбрано значение $\rho_c = (0,22 \pm 0,2)$ фм⁻³ для энергий ядер-снарядов несколько ГэВ на нуклон.

Как уже упоминалось выше, вторичные частицы, вылетающие под малыми углами относительно направления движения ядра-снаряда, вносят основной вклад в формирование второго поколения межъядерного каскада. В связи с методическими трудностями экспериментов известны лишь отдельные работы по измерениям двойных дифференциальных сечений образования высокоэнергетических нуклонов под малыми углами ($< 15^\circ$) при релятивистских энергиях ядер-снарядов. На рис.3 представлены спектральные распределения протонов из реакций $\text{Ar} + \text{Cu}$ при энергии ядра-снаряда 1,8 ГэВ/нуклон под углами 5° и $15^\circ/3/$ и из реакции $\text{Ne} + \text{NaF}$ при энергии ядра-снаряда 0,8 ГэВ/нуклон под углом $15^\circ/6/$. На этом же рисунке приведены также соответствующие распределения протонов, рассчитанные по используемой в программе I^0NCAS версии модели "файрстрик" с $\rho_c = 0,22$ фм⁻³.

Следует отметить, что для правильного описания межъядерного кас-

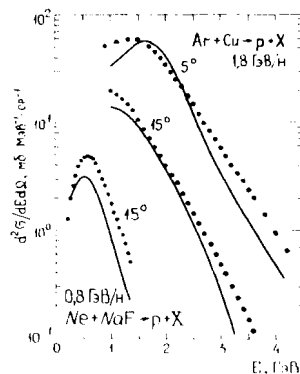


Рис.3. Сравнение расчетных (по модели "файрстрик") и экспериментальных двойных дифференциальных сечений образования протонов под малыми углами. ... - расчет; — - эксперимент.

када при расчетах необходимо в первую очередь знание количества высокоэнергетических частиц, вылетающих под данным углом, а не их детальное энергетическое распределение, поэтому согласие приведенных на рисунке 3 экспериментов и расчетов можно считать удовлетворительным. Некоторое завышение расчетных спектров для легких ядер-снарядов

может привести к соответствующей переоценке дозовой нагрузки за защитой, что вполне оправдано. С ростом же энергии ядер-снарядов и масс сталкивающихся ядер согласие улучшается.

Изложенный в [19] алгоритм использовался для вычисления по программе I^0NCAS дифференциальных по углу и энергии выходов вторичных адронов с энергией более 20 МэВ при облучении толстых цилиндрических мишеней из меди и свинца протонами, α -частицами и ядрами ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон. В усовершенствованную версию программы включен также механизм образования испарительных нуклонов с энергией более 20 МэВ из остатков ядер-мишеней при адрон-ядерных взаимодействиях. Расчеты выполнялись в приближении 2-х поколений каскадных частиц. Третье поколение рассчитывалось под некоторыми углами, и его вклад в суммарные выходы адронов не превышал 10 - 15%. В целях сокращения счетного времени на ЭВМ при вычислении второго поколения адронов в программе использовалась следующая аппроксимация дифференциальных сечений образования адронов:

$$\zeta_{i, \text{ion}}(E_0 \rightarrow E, \theta) = \exp \left[- \sum_{n=1}^5 \alpha_i^{(n)}(E_0, \theta) \cdot E^{n-1} \right].$$

Использование данной аппроксимации оправдано в случае, когда ионизационными потерями энергии частиц пучка на толщине мишени можно пренебречь. В противном случае $\zeta_{i, \text{ion}}$ вычисляется в соответствующей подпрограмме. Вклад фрагментов от ^{12}C определяется на основе экспериментальных данных о сечениях фрагментации ядер ^{12}C с $E=2,1$ ГэВ/нуклон, взаимодействующих с медью [7]. Оценка их суммарного вклада в выход адронов из медной мишени не превышает 15%. Результаты расчета угловых зависимостей выходов нуклонов из медной (ρ 10 см, толщина 13 см) и из свинцовой (ρ 10 см, толщина 17 см) мишеней сравниваются на рис.4 и 5 с экспериментальными данными по выходам адронов [1,8/]. Расчетный вклад π^\pm -мезонов в выход адронов во всем интервале углов не превышал пог-

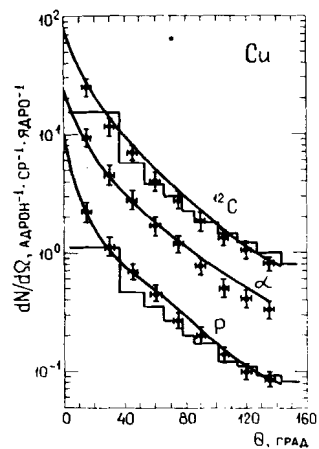


Рис.4. Расчетные распределения выходов нуклонов и экспериментальные распределения выходов адронов (с энергиями более 20 МэВ) под различными углами из медной мишени (ρ 10 см, толщина 13 см), облучаемой легкими ядрами с энергией 3,65 ГэВ/нуклон.

— расчет по программе IONCAS;
 - - - расчет методом Монте-Карло.

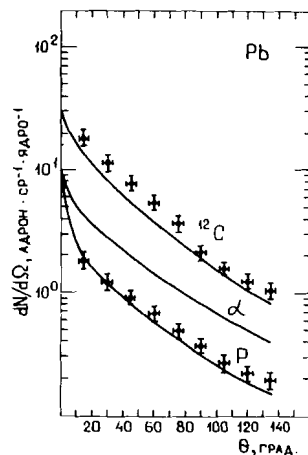


Рис.5. То же, что на рис.4, но для свинцовой мишени (ρ 10 см, толщина 17 см).

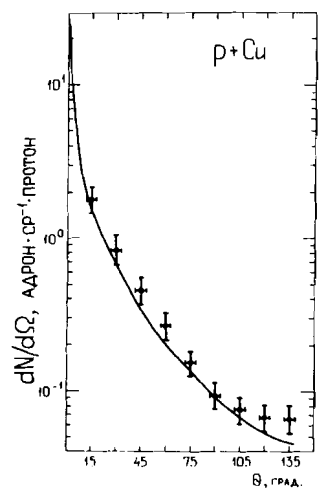


Рис.6. Сравнение расчетных выходов нуклонов (IONCAS) и экспериментальных выходов адронов (с энергиями более 20 МэВ) под различными углами при облучении пучком протонов с энергией 8,1 ГэВ медной мишени ρ 10 см, толщиной 5 см.

⊕ - эксперимент;
 — расчет.

решности численного интегрирования ($\sim 10\%$) и при сравнении с экспериментом не учитывался. В угловом интервале 15° – 135° расчетные и экспериментальные значения согласуются в пределах погрешностей для обеих мишеней. На рис.4 приведены также угловые распределения нуклонов,

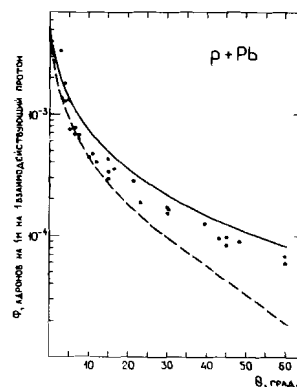


Рис.7. Угловая зависимость выходов нуклонов (— расчет по IONCAS) и адронов (● - эксперимент) с энергиями более 20 МэВ при облучении протонами с энергией 7,1 ГэВ свинцовой мишени ρ 2 см и толщиной 5 см. Пунктир - расчет в приближении одного поколения каскадных нуклонов.

рассчитанные по программам, реализующим метод прямого статистического моделирования /9-II/. Программа /10/ предназначена для расчета межядерного каскада в мишенях, облучаемых протонами; комплекс программ /9/

основан на каскадно-испарительной модели ядро-ядерных взаимодействий /12,13/. Видно, что в области углов менее $\sim 40^\circ$ программы /9,10/ дают худшее согласие с экспериментом, чем программа IONCAS. Рис.6 демонстрирует согласие расчета по программе IONCAS с угловым распределением адронов в случае, когда пучком протонов с энергией 8,1 ГэВ облучалась медная мишень ρ 10 см и толщиной 5 см. На рис.7 приведено сравнение расчетов с измерениями угловой зависимости выходов адронов при падении пучка протонов с энергией 7,1 ГэВ на свинцовую мишень ρ 2 см и толщиной по пучку 5 см /14/. В обоих экспериментах измерения проводи-

Рис.8. Сравнение спектрально-угловых выходов нейтронов из медной мишени ρ 10 см и толщиной 13 см, облучаемой протонами с энергией 3,65 ГэВ, рассчитанных по программе SHIELD (гистограмма) и IONCAS (сплошные линии).

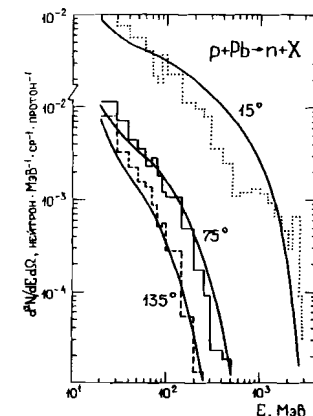
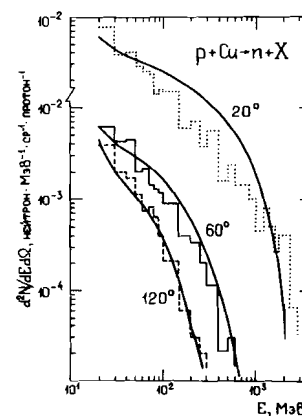


Рис.9. То же, что на рис.8, но для свинцовой мишени ρ 10 см и толщиной 17 см.

лись с помощью углеродсодержащих активационных детекторов с порогом по энергии нуклонов ~ 20 МэВ. На рис.7 пунктиром представлено расчетное угловое распределение нуклонов только первого поколения. Видно, что вклад каскадных частиц (второго поколения) в суммарные выходы нуклонов весьма велик даже для относительно малых размеров мишени (особенно под большими углами). К сожалению, в работе ^{/14/} не приведены погрешности измерений и размер пучка, падающего на мишень, хотя, по-видимому, влиянием этих факторов можно объяснить некоторое систематическое завышение расчетного распределения.

Проведенные сравнения расчетов по программе IONCAS дифференциальных по углу характеристик полей вторичного излучения из мишеней различного размера и атомного веса с экспериментами и расчетами методом Монте-Карло свидетельствуют, что точность расчетов данных характеристик полей по программе IONCAS по крайней мере не уступает точности расчетов методом прямого статистического моделирования.

На рис.8 и 9 представлены спектрально-угловые выходы нейтронов из медной (ϕ 10 см, толщина 13 см) и свинцовой (ϕ 10 см, толщина 17 см) мишеней при падении на них протонов с энергией 3,65 ГэВ, рассчитанные по программе SHIELD ^{/15/} и программе IONCAS. Наибольшие различия наблюдаются в области малых углов, что и определяет, по-видимому, занижение расчетных ^{/15/} угловых распределений нуклонов, вылетающих из толстых мишеней, по сравнению с экспериментом (см. рис.4) в указанном угловом интервале. Расчеты спектрально-угловых распределений адронов, генерируемых в толстой мишени, проверялись сравнением с экспериментальными данными из работы ^{/16/}. На рис.10 приведены измеренные методом времени пролета спектры нейтронов ^{/16/} под углами $71 \pm 2^\circ$ и $104 \pm 3^\circ$ из медной мишени (ϕ 10 см, толщина 13 см), бомбардируемой ядрами ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон. С экспериментальными спектрами сравниваются соответствующие расчеты, выполненные по программе IONCAS для углов 70° и 105° , и расчет ^{/11/} методом Монте-Карло для углового интервала 100° - 110° . В целом наб-

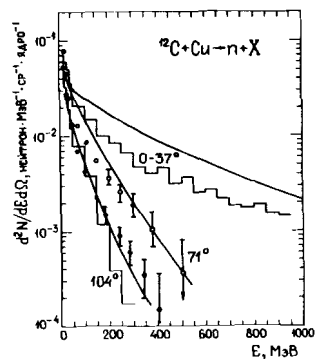


Рис.10. Спектрально-угловые выходы нейтронов из медной мишени ϕ 10 см и толщиной 13 см, облучаемой ядрами ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон.
 \circ - эксперимент;
 — - расчет по программе IONCAS;
 - - - расчет методом Монте-Карло.

людается хорошее согласие расчетных и измеренных спектров нейтронов; на этом же рисунке представлено сравнение расчетных спектров нейтронов из мишени в угловом интервале $0^\circ - 37^\circ$. По абсолютной величине различие в этих спектрах не превышает фактора 2, однако, учитывая лучшее согласие с экспериментом расчетов угловых выходов адронов из мишени под малыми углами, можно предположить, что программа IONCAS в этом интервале углов все же описывает спектральное распределение более корректно. Степень согласия расчетов спектров нейтронов под углом 45° , вылетающих из боковой поверхности толстой (ϕ 20 см и толщина 30 см)

свинцовой мишени (облучаемой протонами с энергией 1 ГэВ), проведенных по программе IONCAS, программе прямого статистического моделирования SUPER ^{/17/}, экспериментальному спектру из работы ^{/18/}, демонстрируется на рис.11.

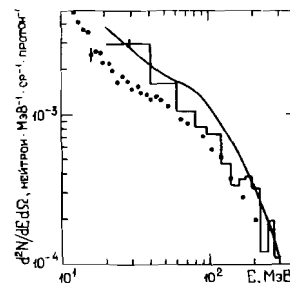


Рис.11. Спектр нейтронов, вылетающих под углом 45° через всю поверхность свинцовой мишени ϕ 20 см и толщиной 30 см, облучаемой протонами с энергией 1 ГэВ. ϕ - эксперимент; - - - расчет по программе SUPER; — - расчет по программе IONCAS.

Проверка расчетов по программе IONCAS дифференциальных по углу и энергии характеристик полей вторичного излучения из толстых мишеней, выполненная на протонах и ядрах ^{12}C , позволяет сделать вывод о том, что данная программа обеспечивает получение исходных данных по расчету защит на ускорителях с точностью не хуже, чем программы, основанные на методе Монте-Карло; при этом затраты счетного времени на ЭВМ при её использовании значительно ниже. Так, например, для расчета спектра нейтронов под одним углом вылета из мишени в приближении двух поколений требуется 7 - 10 минут при погрешности численного интегрирования менее 10%.

Авторы выражают благодарность Лосевой А.А. за помощь в оформлении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.П.Бамблевский, А.Р.Крылов, Г.Н.Тимошенко. ОИЯИ, 16-88-486, Дубна, 1988.
2. W.D.Myers. Nucl. Phys., A296 (1978), p.177.
3. J.Gosset et al. Phys. Rev., C18 (1978), p.844.

4. В.Р.Адыасевич et al. Phys. Lett., 142B (1984), p.245.
5. Б.П.Адыасевич и др. ЯФ, т.40, вып.2(8), (1984), с.495.
6. R.L.Hatch, S.E.Koonin. Phys. Lett., 81B, N1(1979), p.1.
7. D.L.Olson et al. Phys. Rev., C28, N4(1983), p.1602.
8. В.П.Бамблевский. ОИЯИ, I6-85-35, Дубна, 1985.
9. В.С.Барашенков и др. ОИЯИ, P2-85-124, Дубна, 1985.
10. А.С.Ильинов и др. Библиотека программ для расчета взаимодействия частиц высоких энергий с однородными и неоднородными средами. ИЯИ АН СССР, М., 1985.
11. А.Полянски, А.Н.Соснин. АЭ, т.66, вып.3(1989), с.213.
12. В.С.Барашенков и др. ОИЯИ, P2-81-802, Дубна, 1981.
13. В.С.Барашенков и др. ОИЯИ, P2-83-117, Дубна, 1983.
14. G.S.Levine et al. Particle Accelerators, 3 (1972), p.91.
15. Н.М.Соболевский. ОИЯИ, Б1-2-5458, Дубна, 1970.
16. В.Е.Алейников, А.В.Солодилов, Г.Н.Тимошенко. ОИЯИ, P16-85-97, Дубна, 1985.
17. С.Л.Кучинин, В.И.Матушкин, Н.В.Мохов. В трудах Третьей всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок, т.6, ТТУ, Тбилиси, 1985, с.106.
18. T.S.Fraser. Proceeding of an Information Meeting on Accelerator-Breeding, CONF-770107, Brookhaven, 162 (1977).
19. А.Р.Крылов.- Сообщение ОИЯИ I6-89-626, Дубна, 1989.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 августа 1989 года.

Крылов А.Р., Бамблевский В.П., Тимошенко Г.Н. 16-89-627
Прогнозирование радиационных полей на ускорителях релятивистских ядер. Проверка алгоритма расчета дифференциальных характеристик полей вторичного адронного излучения из мишеней, облучаемых релятивистскими ядрами

Приведены результаты сравнений с экспериментальными данными расчетов дифференциальных характеристик полей высокоэнергетического адронного излучения, генерируемого в мишенях под действием легких релятивистских ядер. Расчеты выполнены по алгоритму, изложенному в работе /19/. Проверка расчетов угловых и спектрально-угловых распределений вторичных адронов из различных мишеней, облучаемых протонами, α -частицами и ядрами ^{12}C в диапазоне энергий от одного до нескольких ГэВ на нуклон, показала, что согласие с экспериментами предложенного алгоритма по крайней мере не хуже, чем у программ, реализующих метод статистического моделирования, но затраты счетного времени на ЭВМ существенно меньше.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод авторов

Krylov A.R., Bamblevskij V.P., Timoshenko G.N. 16-89-627
Prognostication of Radiation Fields on Relativistic Ion Accelerators. Examination of Calculation Algorithm of Secondary Hadron Radiation Fields Differential Characteristics from Targets Irradiated by Relativistic Ions

The results of comparison of experimental data with calculations of high-energy hadron radiation fields differential characteristics generated by light relativistic ions in targets are presented. The calculations have been carried out by the algorithm described in /19/. The examination of angular and energy-angular distributions calculation of the secondary hadrons from different targets irradiated by protons, α -particles and ^{12}C ions in energy range from one to several GeV on nucleon showed the agreement of this algorithm with experiments is not worse at least than the statistical model based programs, but the computer time is essentially less.

The investigation has been performed at the Department of Radiation Safety and Radiation Researches, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989