



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 97-88
ОНФ

В.В.Аммосов, А.С.Арефьев¹, И.Л.Васильев, В.А.Гапиенко,
Г.С.Гапиенко, Ю.П.Горин, В.Г.Заец, А.А.Иванилов, П.Иоанну²,
Ю.М.Козяев, В.И.Корешев, В.А.Коротков, В.Мицу², А.И.Петрухин,
В.И.Полетаев, Ю.М.Свиридов, И.С.Тростин¹, Д.Фануракис³

**ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРОНИКАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СТАЛИ
ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ПРОТОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ 70 ГэВ**

Направлено в ЯФ

¹ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

² Афинский университет, Греция

³ Институт ядерной физики, Агиа, Греция

Протвино 1997

Аннотация

Аммосов В.В. и др. Изучение характеристик проникающего излучения в стали при поглощении протонов с энергией 70 ГэВ: Препринт ИФВЭ 97–88. – Протвино, 1997. – 12 с., 7 рис., 2 табл., библиогр.: 11.

Измерены полные вероятности пробоя и пространственные характеристики проникающего излучения в стали на глубинах 1,5 – 3,0 м при поглощении пучка протонов с энергией 70 ГэВ. Измерения выполнены при помощи сцинтилляционных годоскопов большой площади. Полученные данные сравниваются с расчетом по программе GEANT 3.21 с генераторами для моделирования адрон-ядерных взаимодействий GHEISHA и FLUKA.

Abstract

Ammosov V.V. et al. Characteristics Study of Shower Punchthrough for 70 GeV Protons Incident to Steel: IHEP Preprint 97–88. – Protvino, 1997. – p. 12, figs. 7, tables 2, refs.: 11.

Measurements of the total punchthrough probability have been made for 70 GeV protons incident to steel for of steel thickness ranging from 1,5 to 3,0 m. The spatial characteristics of these showers were also measured. These results have been obtained using large scintillation counters. The results are compared with Monte Carlo calculations using GHEISHA and FLUKA generators to simulate the hadron-nucleus interactions.

Введение

Изучение процесса прохождения частиц через вещество актуально для планирования и проведения экспериментов в физике высоких энергий. Новые экспериментальные данные в этой области позволяют провести тестирование программ расчета прохождения частиц через вещество, интенсивно используемых при проектировании новых экспериментальных установок, особенно на адронных коллайдерах.

В данной работе¹ представлены результаты измерения характеристик проникающего излучения (ПИ) в стали на глубинах 1,5 – 3,0 м при поглощении протонного пучка с энергией 70 ГэВ. Измерения выполнены на ускорителе У-70 ИФВЭ при интенсивности $10^3 - 10^6$ протонов/цикл в канале 21 [1] на медленном [2] и дифракционном [3] выводах при отщеплении протонного пучка в канал с помощью кристалла [4]. Более ранние данные по межъядерному каскаду в стальном поглотителе при энергии начального протона 70 ГэВ можно найти в работе [5], где проводилось всестороннее изучение дозовых характеристик.

Настоящие измерения выполнены в рамках работ по проекту П-176 (Последний Шанс). Структура установки позволила получить не только вероятности проникновения ливня (“вероятности пробоя”) для разных толщин стали, но и данные по его поперечному распространению. Кроме того, были произведены измерения событий с двумя частицами, проходящими через всю установку, что позволило оценить уровень 2-мюонного триггера, необходимого для данного эксперимента.

Полученные экспериментальные данные по вероятности пробоя и пространственной структуре ПИ сравниваются с Монте-Карло (МК) расчетами по программе GEANT 3.21 [6] с генераторами для розыгрыша адрон-ядерных взаимодействий GHEISHA [7] и FLUKA [8]. Результаты по вероятности пробоя сравниваются также с данными других экспериментов [9,10,11], выполненных при энергиях, близких к нашей.

¹Работа выполнена при поддержке научной программы НАТО и Министерства экономики Греции.

1. Экспериментальная установка

Установка, с помощью которой были получены экспериментальные данные, схематически показана на рис. 1.

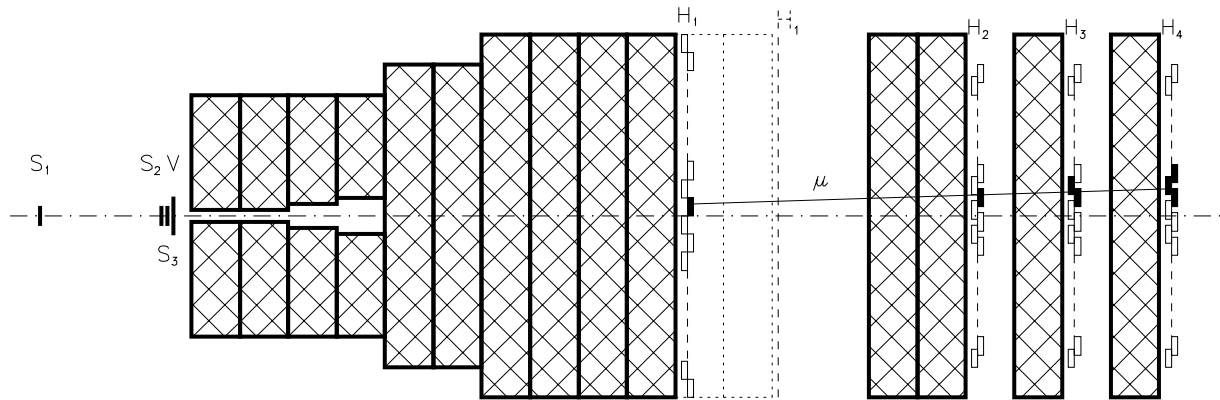


Рис. 1. Принципиальная схема установки при полной толщине стали по пучку 2,5 м. Пунктирной линией обозначены дополнительные стальные блоки, используемые в конфигурации с полной толщиной стали 3,0 м. Штрих-пунктирной линией обозначена ось канала, через S_1 , S_2 и S_3 — сцинтилляционные счетчики пучкового монитора и V — “вето” счетчик. Показано одно из реальных событий с возможным прохождением мюона.

В состав установки входили пучковый монитор и четыре сцинтилляционных годоскопа, расположенных в разрезах стального поглотителя. В качестве поглотителя использовались стальные блоки с плотностью $\bar{\rho} = 7,82 \text{ г/см}^3$, имеющие толщину по пучку 25 см и поперечные размеры от $120 \times 120 \text{ см}^2$ до $150 \times 150 \text{ см}^2$.

Сложная конфигурация поглотителя в передней части (отверстие для пучка в первых блоках стали) вызвана необходимостью уменьшить “обратный фон” от стали для активной мишени, которая будет расположена перед поглотителем во второй стадии эксперимента.

Пучковый монитор включал в себя три сцинтилляционных счетчика S_1 , S_2 и S_3 с толщиной по пучку 4 мм и диаметром 2 см каждый, и “вето” счетчик (V) с отверстием для протонного пучка с $\phi = 2,5 \text{ см}$. Размеры пучка и его положение контролировались дрейфовой камерой (не показанной на рисунке), располагавшейся перед S_2 и состоящей из дрейфовых трубок диаметром 20 мм.

Каждый из сцинтилляционных годоскопов $H_1 - H_4$ был собран из 32 сцинтилляционных полос на основе полистирола. Полосы в них были расположены вертикально и свет с них собирался на ФЭУ-85 с одной из сторон. Геометрические характеристики годоскопов собраны в табл. 1.

Измерения выполнены при двух конфигурациях размещения стальных блоков и годоскопов. В первой конфигурации полная толщина стального поглотителя составила 2,5 м. При этом измерения проводились на глубинах стали по пучку 1,5 м (годоскоп H_1), 2.0 м (H_2), 2.25 м (H_3) и 2.5 м (H_4). Воздушные промежутки между

стальными блоками, в которых размещались годоскопы, составили 1,0 м на глубине 1,5 м и по 0,22 м — на остальных глубинах. Во второй конфигурации полная толщина стального поглотителя составила 3,0 м. По сравнению с первой конфигурацией годоскоп H_1 был перемещен по пучку на 0,5 м, а в воздушный промежуток перед ним были добавлены стальные блоки с общей толщиной 0,5 м. При этом измерения проводились на глубинах стали 2,0 м (H_1), 2,5 м (H_2), 2,75 м (H_3) и 3,0 м (H_4).

Таблица 1. Геометрические характеристики годоскопов.

Годоскоп	Толщина полосы (см)	Поперечные размеры полос (см ²)	Перекрытие полос (см)	Поперечные размеры годоскопа (см ²)
H_1	1.8	150×5	0.2	150×154
H_2	1.8	140×5	1.7	140×108
H_3	1.5	150×5	1.7	150×108
H_4	2.0	150×5	1.7	150×108

Промежутки между стальными блоками и ближайшими пластинами годоскопов составили в обеих конфигурациях 2,4; 4,2; 6,2 и 10,3 см для годоскопов $H_1 - H_4$, соответственно.

Сигналы с ФЭУ годоскопов поступали по коаксиальным кабелям к регистрирующей электронике, выполненной в стандарте СУММА. Запись в регистры осуществлялась по триггерному сигналу со счетчиков мониторинга пучка $S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \bar{V}$ в воротах длительностью 40 нс. Считывание данных из регистров производилось компьютером IBM PC-386 через контроллер K331.

2. Методика измерений

Для получения несмещенных результатов необходимо учесть факторы, связанные с условиями проведения эксперимента. В данной работе были рассмотрены следующие эффекты:

- геометрический аксептанс установки;
- эффективность срабатывания годоскопов;
- наложение ливней от разных пучковых протонов;
- шумы фотоумножителей;
- радиационный фон.

Геометрический аксептанс каждого из четырех годоскопов находился на основе данных по минимальному поперечному распространению ПИ (рис. 2). Под этим мы понимаем расстояние между осью пучка и серединой ближайшей к ней срабатывавшей сцинтилляционной полосы. Экспериментальные данные и МК-расчеты показывают, что кроме, нескольких ближайших к оси пучка полос, распределения

по минимальному поперечному распространению ПИ хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью.

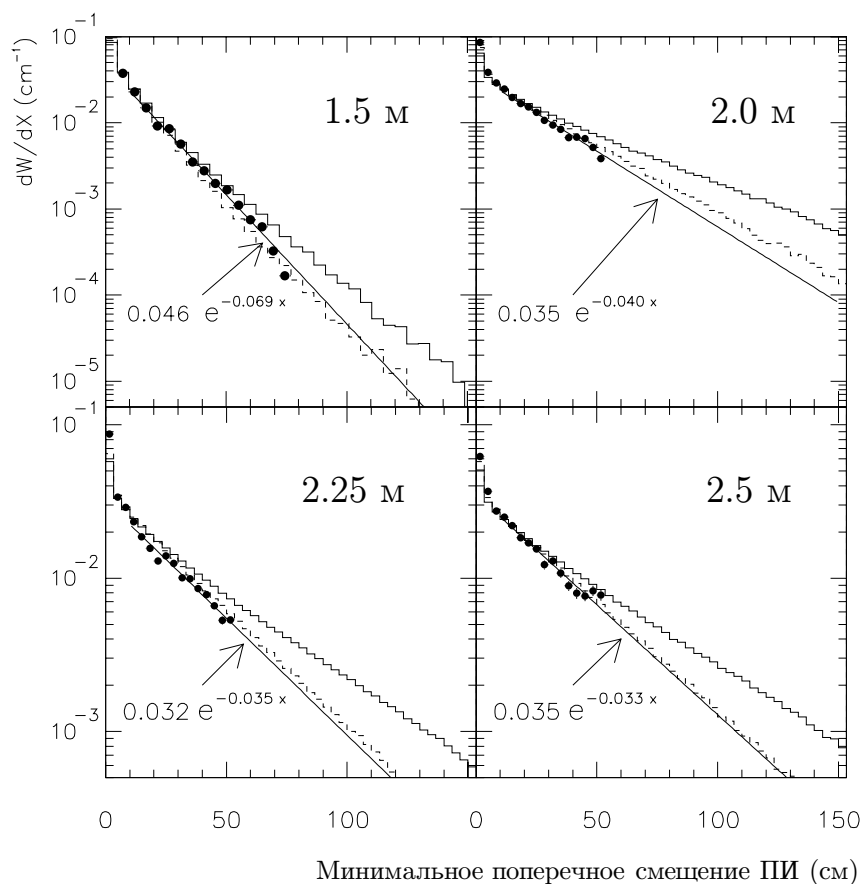


Рис. 2. Распределение по минимальному поперечному смещению ПИ для различных толщин стали, указанных на рисунке. Сплошной гистограммой показан расчет по МК с генератором FLUKA, штриховой — GHEISHA. Сплошная кривая представляет фит ($x \gtrsim 10$ см) экспериментальных данных экспонентой. Нормировка распределений описана в тексте.

На этом рисунке МК-распределения нормированы на единицу, экспериментальные — на полученную геометрическую эффективность соответствующего годоскопа, т. е. суммарная площадь под ними и экстраполирующей их экспонентой тоже равна единице. Число событий, потерянных вследствие конечности поперечных размеров годоскопов, определялась как площадь под экспонентой, с параметрами найденными из подгонки данных, за их пределами.

Для оценки эффективности годоскопов H_2 и H_3 были отобраны события, в которых каждый из внешних годоскопов H_1 и H_4 содержал по одному кластеру, каждый из внутренних годоскопов H_2 и H_3 содержал не более одного кластера,

а полное число кластеров² во всех годоскопах было не менее трех. Кроме того, требовалось, чтобы все кластеры были расположены по определенным критериям на одной прямой. Такой отбор надежно выделяет мюоны, проходящие через все годоскопы. Зная число событий, в которых мюон был восстановлен по всем четырем годоскопам (пример такого события показан на рис. 1), и число событий, где он был восстановлен только по трем при отсутствии сигнала в одном из внутренних годоскопов H_2 или H_3 , эффективность каждого из годоскопов H_2 и H_3 может быть определена по формуле

$$p_i = \frac{N_4}{N_{3i} + N_4},$$

где N_4 — число событий, в которых мюон был восстановлен по четырем годоскопам, N_{3i} — по трем, где i — номер недостающего годоскопа. Определенные таким образом эффективности оказались равными $(99,3 \pm 0,2)\%$ и $(99,1 \pm 0,2)\%$, соответственно, для H_2 и H_3 .

Для годоскопов H_1 и H_4 этот метод не может быть использован, так как мюон может родиться за первым годоскопом или быть недостаточно энергичным, чтобы дойти до H_4 . Однако учитывая идентичность сцинтиллятора и регистрирующей электроники для всех годоскопов, мы можем считать их эффективности такими же, как для H_2 и H_3 . Приняв во внимание, что обычно через годоскоп идет несколько частиц, можно видеть, что поправки на их неэффективность малы и к представленным в статье результатам они не применялись.

Так как протоны в пучке распределены по времени не равномерно, а в виде сгустков, “банчей”, то при регистрации данных с годоскопов возникает вероятность наложения данных от нескольких ливней, что приводит к кажущемуся росту вероятности пробоя с ростом интенсивности пучка. Изучая этот эффект, мы провели ряд измерений при разных интенсивностях вплоть до 10^6 протонов за цикл. Оказалось, что зависимость вероятности пробоя от интенсивности можно описать линейной функцией с параметром наклона приблизительно одинаковым для всех годоскопов и составляющим порядка 10^{-8} /протон. Приводимые в работе экспериментальные данные не содержат указанной систематики — они представляют собой результат экстраполяции к “нулевой” интенсивности.

Для учета шумов фотоумножителей, шума от наведенной в стальных блоках поглотителя радиоактивности и т. д. были проведены специальные экспозиции, в которых система сбора данных включалась случайным образом. Значения суммарных поправок от обсужденных в этом разделе эффектов собраны в табл. 2, приведенной в следующем разделе.

²Кластером мы называем совокупность взаимно перекрывающихся сработавших сцинтилляционных полос.

3. Результаты эксперимента и сравнение с МК–расчетами

Полученные данные по вероятности пробоя, поправки на фон, на величину геометрического аксептанса, а также поправленные окончательные вероятности приведены в табл. 2. Для получения окончательного результата из экспериментально определенных вероятностей пробоя вычитались шумы, и полученный результат корректировался на геометрический аксептанс годоскопа. Ошибки для этой вероятности, показанные в таблице, включают в себя как статистические ошибки, так и ошибки от поправок.

Таблица 2. Вероятность пробоя, поправка на фон, геометрический аксептанс и окончательная вероятность пробоя. Первая строка на глубинах 2,0 м и 2,5 м соответствует конфигурации установки с полной толщиной стального поглотителя 2,5 м, вторая — конфигурации с полной толщиной 3,0 м.

Толщина стали (м)	Вероятность пробоя	Поправка на фон ($\times 10^{-2}$)	Геометрический аксептанс (%)	Вероятность пробоя (поправленная)
1.5(H_1)	0.273 ± 0.001	0.36 ± 0.01	99.3 ± 0.1	0.271 ± 0.001
2.0(H_2)	0.0544 ± 0.0004	0.074 ± 0.006	88.2 ± 0.7	0.0608 ± 0.0007
(H_1)	0.0657 ± 0.0008	1.04 ± 0.02	97.3 ± 0.4	0.0568 ± 0.0009
2.25(H_3)	0.0242 ± 0.0003	0.007 ± 0.002	83.0 ± 1.4	0.0291 ± 0.0007
2.5(H_4)	0.0112 ± 0.0002	0.028 ± 0.003	78.8 ± 3.1	0.0139 ± 0.0006
(H_2)	0.0118 ± 0.0002	0.074 ± 0.005	87.3 ± 2.5	0.0127 ± 0.0004
2.75(H_3)	0.0052 ± 0.0003	0.009 ± 0.002	84.0 ± 4.4	0.0061 ± 0.0005
3.0(H_4)	0.0029 ± 0.0002	0.022 ± 0.003	83.4 ± 7.3	0.0032 ± 0.0004

На рис. 3 наши данные по вероятности пробоя приведены вместе с данными для протонного пучка с энергией 100 ГэВ, полученными на установке RD5 [9], и для π -мезонных пучков с энергиями 70 и 75 ГэВ, полученными соответственно на установках CCFR [10] и RD5 [11]. При толщине стального поглотителя 2,0 и 2,5 м, где мы имеем две оценки для вероятности пробоя, на рисунке показаны усредненные с учетом их ошибок значения. В области толщин $L=1,5 - 3$ м наши данные хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью вида

$$p(L) = (25, 2 \pm 0, 2)e^{-(3,02 \pm 0,03)L},$$

где L — длина стали в метрах.

На этом же рисунке представлены результаты нашего расчета по программе GEANT 3.21 с генераторами GHEISHA и FLUKA. Статистическая ошибка расчетов составила менее 3%. Как видно из рис. 3, МК–расчет по GHEISHA хорошо, с точностью лучше чем 10%, описывает наши данные, а расчет по FLUKA — на 50 – 80% (в зависимости от толщины стали) превышает их.

Детальный анализ состава частиц ПИ на различных глубинах для энергии налетающей частицы порядка 100 ГэВ показывает, что, начиная с глубины стали

2,5 м, существенной становится мюонная компонента ПИ. Вклад этой компоненты возрастает как при увеличении энергии налетающей частицы, так и при переходе от протонного к π — мезонному пучку. Экспериментальные данные, приведенные на рис. 3, подтверждают эти ожидания — вероятности пробоя из различных экспериментов близки друг к другу до толщины стали 2,5 м, а при больших длинах наши данные лежат ниже по сравнению с данными с π — мезонными пучками и данными для протонного пучка с энергией 100 ГэВ.

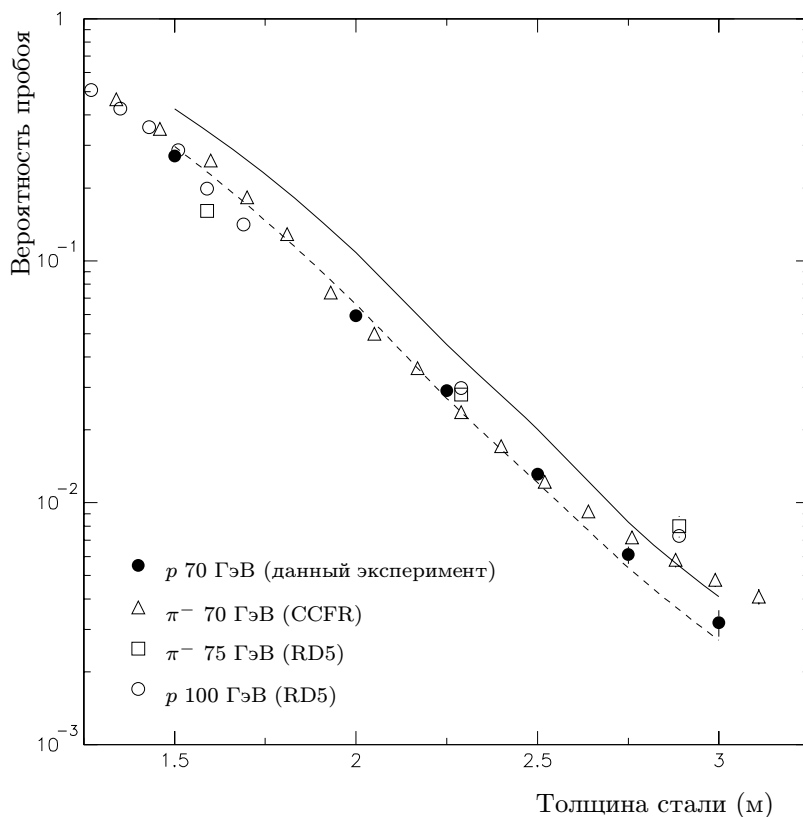


Рис. 3. Вероятность пробоя на различных глубинах стали в данном и других экспериментах в близком диапазоне энергий. Сплошной кривой показаны предсказания для данного эксперимента генератора FLUKA, штриховой — предсказания генератора GHEISHA.

Приведенные далее данные по пространственной структуре ПИ основаны на экспозициях, в которых максимальная толщина стали поглотителя равнялась 2,5 м. Эти данные имеют лучшую по сравнению с другой конфигурацией статистическую обеспеченность.

На рис. 4 представлены профили ПИ для различных толщин стали и соответствующие МК-расчеты. Для глубины стали 1,5 м расчет по GHEISHA дает более узкий, нежели экспериментальный, профиль ПИ. На других глубинах оба генератора одинаково удовлетворительно описывают профиль ПИ. Как видно из рис. 2, наиболее сильно различие в предсказаниях FLUKA и GHEISHA начинает сказываться за пределами наших годоскопов.

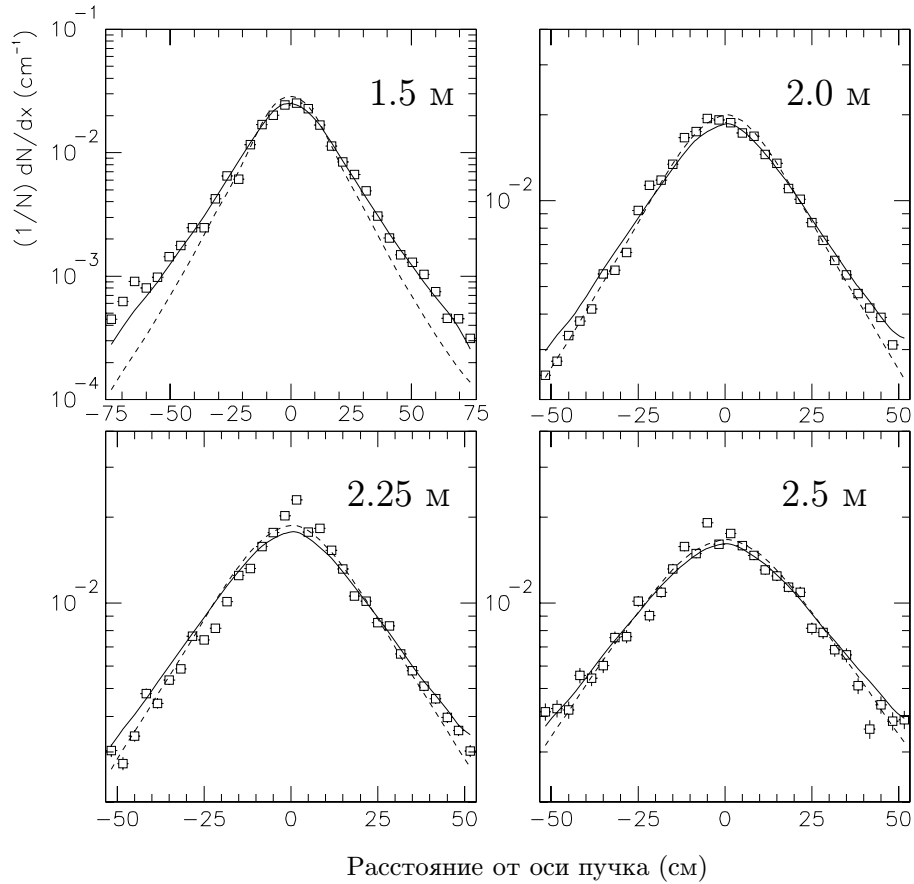


Рис. 4. Распределение по частоте срабатывания сцинтилляционных полос. Сплошной кривой показаны предсказания генератора FLUKA, штриховой — GHEISHA. Все распределения нормированы на единицу.

На рис. 5 представлены распределения по числу кластеров в годоскопах $H_2 - H_4$ и соответствующие МК-расчеты. Как можно было ожидать, данные показывают слабое уменьшение вероятности появления события с большим числом кластеров при увеличении толщины стали. Оба генератора дают одинаковые результаты во всех плоскостях, но хорошее согласие с данными имеется только для последней.

Другой характеристикой ПИ, дополняющей предыдущую, является распределение по числу пластин в кластере. Для идеального случая равномерного пучка частиц, летящих перпендикулярно сцинтилляционной плоскости, можно ожидать, что отношение числа событий с одной сработавшей полосой к числу событий, где сработало две полосы, будет приблизительно равно отношению площадей с неперекрывающимися и перекрывающимися полосами. В нашем случае 32 сцинтилляционные полосы — это отношение равно 34/31.

Экспериментальные данные, представленные на рис. 6, показывают, что оно намного больше — порядка 3. МК-расчеты, приведенные на этом же рисунке, показывают, что главной причиной этого являются нейтроны, дающие в основном

сигнал только в одной пластине годоскопа. Чтобы не перегружать рисунок, МК-распределение по числу пластин в кластере для случая, когда взаимодействие нейтронов в сцинтилляционных пластинах “отключено” и, следовательно, они не дают сигнала, представлено только для генератора FLUKA. Для другого генератора результат получается таким же. Для других годоскопов H_3 и H_4 экспериментальные данные и МК-расчеты практически совпадают с тем, что показаны на рис. 6.

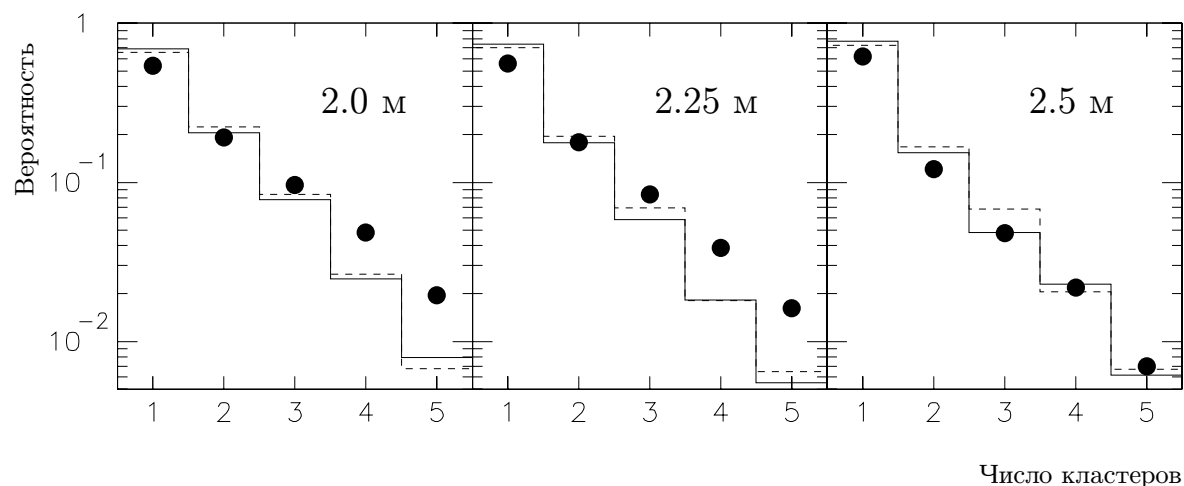


Рис. 5. Распределение по числу кластеров в годоскопах. Сплошной гистограммой показаны предсказания генератора FLUKA, штриховой — GHEISHA. Все распределения нормированы на единицу.

На рис. 7 представлено распределение по числу кластеров, когда это число одинаково во всех четырех годоскопах. Такие топологии характерны для мюонного компонента ПИ. По оси ординат здесь отложена абсолютная вероятность регистрации такой топологии на один падающий протон. Расчеты с использованием обоих генераторов хорошо описывают полученные вероятности.

Для оценки фона от ПИ для процессов с рождением пары мюонов нами определялась вероятность регистрации топологии ПИ, имитирующей прохождение через регистрирующую часть установки мюонной пары. Для этого из событий с двумя кластерами в каждом из четырех годоскопов отбирались такие, в которых удавалось провести две прямые, проходящие через 4 кластера каждая, и пересекающиеся перед первой сцинтилляционной плоскостью. Вероятность осуществления таких топологий ПИ, имитирующих пару мюонов, оказалась равной $(4 \pm 2) \cdot 10^{-6}$, что сопоставимо с вероятностью $2,3 \cdot 10^{-6}$, предсказанной расчетом с генератором FLUKA и с вероятностью $2,0 \cdot 10^{-6}$ из расчета с GHEISHA.

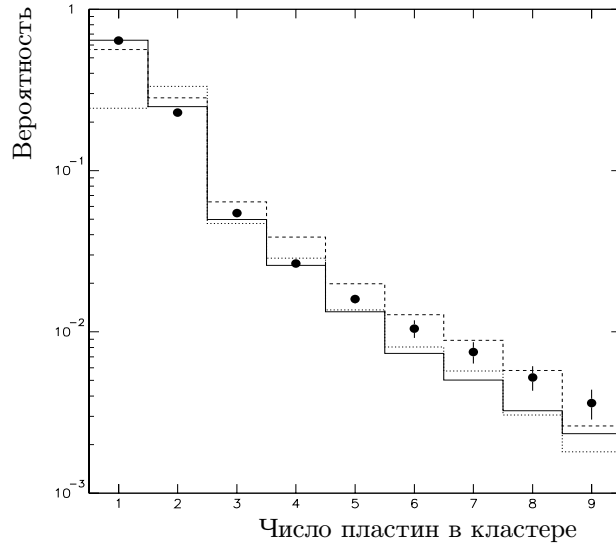


Рис. 6. Распределение по числу пластин в кластерах, нормированное на 1, для толщины стали 2.0 м. Сплошной гистограммой показаны предсказания генератора FLUKA, штриховой — GHEISHA. Пунктирная линия соответствует расчетам с генератором FLUKA с “выключенным” взаимодействием нейтронов в сцинтилляционных полосах.

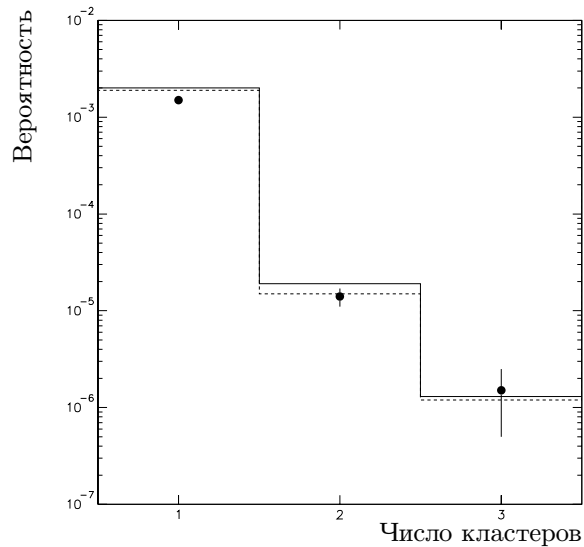


Рис. 7. Вероятность регистрации одинакового во всех четырех годоскопах числа кластеров. Сплошной гистограммой показаны предсказания генератора FLUKA, штриховой — GHEISHA.

Заключение

Измерены интенсивность и пространственные характеристики ПИ в стали на глубинах 1,5 – 3,0 м при поглощении пучка протонов с энергией 70 ГэВ. Полученные результаты по вероятности пробоя согласуются с данными других экспериментов в близком диапазоне энергий. Определена вероятность регистрации топологии ПИ, имитирующей прохождение мюонной пары через 2,5 м стали. Она составила $(4 \pm 2) \cdot 10^{-6}$. Сравнение полученных данных и МС-расчетов с различными генераторами для моделирования адрон-ядерных взаимодействий дало следующие результаты.

1. Измеренная вероятность пробоя хорошо, с точностью лучше чем 10%, описывается МК-расчетом с генератором GHEISHA. Расчет по FLUKA дает завышенные на 50 – 80% вероятности пробоя.

2. Данные по поперечному распространению ПИ хорошо описываются расчетом с генератором GHEISHA. Расчет по FLUKA дает более широкое поперечное распространение. Измеренные профили ПИ описываются обоими генераторами, за исключением глубины 1,5 м стали, где расчет по GHEISHA дает более узкий профиль, нежели экспериментальный.

3. Экспериментальные распределения по числу кластеров в годоскопах и их ширине, а также вероятности одновременной регистрации совпадающего во всех годоскопах числа кластеров и регистрации топологии ПИ, имитирующей прохождение мюонной пары через 2,5 м стали, удовлетворительно описываются МС-расчетами.

Авторы благодарны В.Б.Аникееву и В.П.Крючкову за обсуждение рукописи статьи и сделанные замечания.

Список литературы

- [1] Баталов А.А. и др. — Препринт ИФВЭ 87–116, Серпухов, 1987.
- [2] Мызников К.П. и др. — Препринт ИФВЭ 70–51, Серпухов, 1970.
- [3] Асеев А.А. и др. — Препринт ИФВЭ 85–23, Серпухов, 1985.
- [4] Архипенко А.А. и др. — Препринт ИФВЭ 90–91, Протвино, 1990.
- [5] Бритвич Г.И., Кустарев В.Н., Лебедев В.Н. — Препринт ИФВЭ 74–87, Серпухов, 1974;
Волынчиков А.И., Гетманов В.Б., Крупный Г.И. и др. — Препринт ИФВЭ 83–86, Серпухов, 1983.
- [6] Brun R., Carminati F. CERN Program Library Long Writeup W5013, Geneva 1993.
- [7] Fesefeld H. — Preprint PITNA 85/02, Aachen, 1985.

- [8] Fasso A. et al., FLUKA92. In: Proc. of the Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environment, Santa Fe, 11 – 15 January (1993).
- [9] Albajar C. et al. — Preprint CERN-PPE/95-61, Geneva, 1995.
- [10] Sandler P.H. et al. // Phys.Rev. 1990. V. D42. P. 759.
- [11] Aalste M. et al. // Z.Phys. 1993. V. C60. P. 1.

Рукопись поступила 10 декабря 1997 г.

В.В.Аммосов и др.

Изучение характеристик проникающего излучения в стали при поглощении протонов с энергией 70 ГэВ.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати 22.12.97. Формат $60 \times 84/8$.

Офсетная печать. Печ.л. 1,5. Уч.-изд.л. 1,15. Тираж 150. Заказ 20.

Индекс 3649. ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

