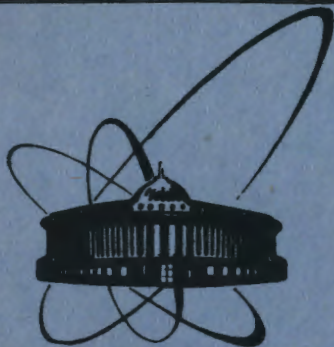


12/XII-83



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

6486/83

1-83-621

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПОЗИТРОНОВ
В МОНОКРИСТАЛЛЕ КРЕМНИЯ

Направлено в "Журнал экспериментальной
и теоретической физики"

1983

Н.К.Булгаков, А.С.Водопьянов, И.Войтковска, В.М.Головатюк,
 Э.Гузик, Н.И.Зимин, И.М.Иванченко, Р.Б.Кадыров, Т.С.Нигманов,
 В.Д.Рябцов, И.А.Тяпкин, Н.А.Филатова, Э.Н.Цыганов, М.Д.Шафранов,
 А.Форуцки

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна.

М.Д.Бавижев
 Филиал Ставропольского политехнического института, Черкесск.

И.Н.Ивахненко, Ю.В.Нильсен, Б.А.Юрьев
 НИИЯФ МГУ, Москва.

Р.Карриган /мл/, Т.Туиг
 Национальная ускорительная лаборатория им. Ферми, Батавия,
 США

У.Гибсон, Ч.Сан, Р.Вонг
 университет штата Нью-Йорк, Олбани, США

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди явлений, возникающих при прохождении заряженных частиц через монокристаллы, особый интерес, как возможный интенсивный источник гамма-квантов, представляет излучение легких релятивистских частиц при каналировании.

Впервые излучение, возникающее при каналировании позитронов высокой энергии, зарегистрировано в эксперименте, выполненном в СЛАКе^{/1/}.

В настоящей работе представлены результаты исследования взаимодействия позитронов с энергией 10 ГэВ с монокристаллом кремния при их движении под малыми углами к кристаллографической плоскости (110). Предварительные результаты опубликованы нами ранее^{/2/}.

2. СПЕКТРОМЕТР

Результаты получены с помощью установки "Кристалл"^{/3/} на протонном синхротроне Института физики высоких энергий. Пучок электронов и позитронов создан для данного эксперимента^{/4/}.

Схема установки приведена на рис.1. Пучок позитронов падает на мишень, расположенную в дистанционно управляемом гониометре. Для определения траектории частиц до и после мишени используются дрейфовые камеры, сгруппированные в три блока: ДС1-ДС3. Четвертый блок дрейфовых камер, ДС4, служит для определения траектории частиц после анализирующего магнита.

Углы вылета гамма-квантов определяются с помощью блока дрейфовых камер со встроенным конвертором, ДС5, расположенного непосредственно перед радиатором гамма-спектрометра. Дрейфовые

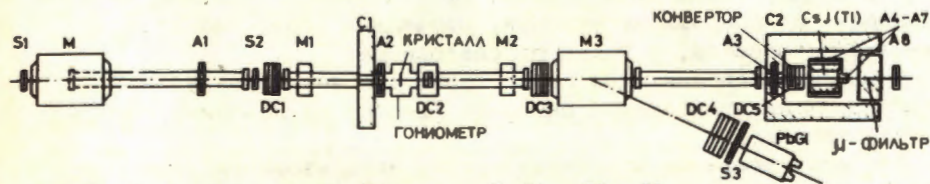


Рис.1. Схема установки "Кристалл". S1, S2, S3, A1-A7 - сцинтилляционные счетчики, M1-M2 - корректирующие магниты, M3 - анализирующий магнит, ДС1-ДС5 - блоки дрейфовых камер, C1-C2 - коллиматоры, PbCl - черенковский счетчик полного поглощения, M - магнит системы транспортировки пучка.

Объединенный институт
 ядерных исследований
 ДУБНА

камеры ДС1 и ДС3 имеют 4X- и 4Y -плоскости размерами 12,5x x12,5 см², а дрейфовая камера ДС4- 4X- и 4Y -плоскости размером 25x25 см² /5/.

Дрейфовая камера низкого давления ДС2, состоящая из 2X- и 2Y-плоскостей, была разработана для данного эксперимента /6/. Уменьшение количества вещества в ДС2 произведено за счет минимизации толщины майларовых окон, вынесения всех проволочек из рабочей области пучка и снижения давления газовой смеси в камере. Камера расположена непосредственно после гониометра и вмонтирована в ионопровод установки.

Среднеквадратичное отклонение для распределения, характеризующего суммарную координатную точность блока обычных камер, составляет около 50 мкм, а ДС2 - около 90 мкм. Такие точности обеспечивают разрешение по углу входа частиц около 6 мкрад /стандартное отклонение/, а по углу выхода - около 30 мкрад /с учетом многократного рассеяния в ДС2/.

Четвертый блок дрейфовых камер позволяет измерять импульсы вторичных частиц с точностью не хуже 1%. Эта точность определяется однородностью поля анализирующего магнита. Диапазон измеряемых импульсов - 6-10 ГэВ.

Пятый блок дрейфовых камер ДС5 /7/ по восстановленной точке конверсии во встроенном конверторе дает возможность измерять угол вылета гамма-квантов из мишени. Конвертор выбирался достаточно тонким, чтобы не ухудшать энергетического разрешения гамма-спектрометра. Использовался конвертор толщиной 0,1 радиационной длины. Совместно с камерами ДС1 и ДС2 прибор обеспечивал измерение углов вылета гамма-квантов с точностью около 4 мкрад /стандартное отклонение/.

Энергия гамма-квантов определялась с помощью детектора на основе кристалла CsJ(Tl), окруженного свинцовой защитой и системой счетчиков антисовпадения. Детектор имеет форму цилиндра с диаметром 200 мм и длиной 280 мм. Кристалл просматривается одним фотоумножителем типа ФЭУ-49. Свинцовая защита гамма-спектрометра имеет коллиматор с апертурой 80x80 мм². Такая апертура позволяет измерять характеристики гамма-квантов с углами входа до 1,3 мрад. Для коррекции возможных нестабильностей в работе гамма-спектрометра производились тестовые запуски установки от фоновых мю-мезонов, прошедших через радиатор гамма-спектрометра, а также от светодиода.

В рабочих условиях для гамма-квантов с энергией 100 МэВ детектор имеет разрешение около 3% /ширины на половине высоты распределения/.

Для идентификации вторичных частиц использовался черенковский счетчик полного поглощения, выполненный на основе свинцового стекла.

Для оптимизации фоновых условий в эксперименте было уменьшено количество вещества по пути частиц. Использование магнита М1 с углом отклонения 3 мрад и М2 с углом отклонения 5 мрад

позволило направить пучок таким образом, что в апертуру гамма-спектрометра попадают гамма-кванты, образовавшиеся только в мишени или в веществе ДС2. Такие углы поворота обеспечивают попадание в рабочую апертуру менее 1% фонового излучения от вещества установки. Таким образом, суммарное количество фонового вещества, гамма-кванты от которого попадают в спектрометр, составило около 5×10^{-4} радиационных длин.

Запуск установки осуществлялся при наличии сигналов со счетчиков S1, S2, S3 и отсутствия сигналов со счетчиков антисовпадения А1, А2 и А3. Кроме того, требовалось срабатывание всех четырех проволочек ДС2 и наличие синхронизированного сигнала с амплитудой выше определенного порога со счетчика CsJ(Tl).

Установка работает на линии с ЭВМ ЕС-1040. Комплекс программ позволяет производить настройку установки и контролировать ее работу.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

При обработке данных отбирались события, в которых зарегистрирован гамма-квант с энергией выше 5 МэВ. Требовалось, чтобы продолжение входного трека частицы попадало в апертуру коллиматора гамма-спектрометра /80x80 мм²/. Сигнал в черенковском счетчике полного поглощения должен соответствовать по амплитуде сигналу от позитрона с импульсом, определенным с помощью ДС4 и магнита М3. Сумма энергий гамма-кванта и вторичного позитрона должна быть равна энергии первичного позитрона.

Кристалл кремния толщиной 113 мкм ориентировался плоскостью (110) параллельно направлению пучка. Угол между пучком и осью <111> кристалла составлял около 0,5 градуса.

3.1. Ориентационные зависимости

На рис.2 и 3 представлены зависимости числа излучаемых гамма-квантов от угла входа позитронов в кристалл, нормированные, как и на всех остальных рисунках, на один падающий позитрон. Штрихпунктирная линия иллюстрирует аналогичные данные, полученные на аморфной алюминиевой мишени. Критический угол каналирования позитронов с энергией 10 ГэВ плоскостью (110) кремния составляет около 60 мкрад. Максимум вероятности излучения /рис.2/ приходится на угол входа позитронов примерно 50 мкрад относительно кристаллографической плоскости. В пересчете на толщину кристалла 1 см в максимуме излучается около 8 гамма-квантов. Как отмечалось ранее /2,8/, смещение максимума вероятности излучения относительно нулевого угла обусловлено частицами, излучающими гамма-кванты с энергией выше 200 МэВ. Однако из настоящего анализа следует, что смещение имеет место и при меньших энергиях гамма-квантов, начиная с 5 МэВ. Это иллюстрирует рис.3,

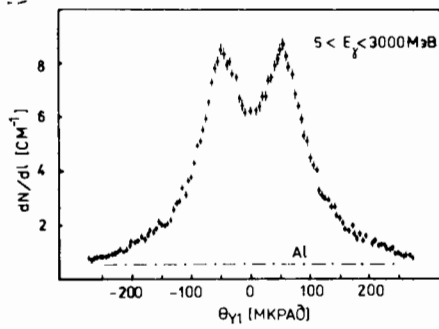
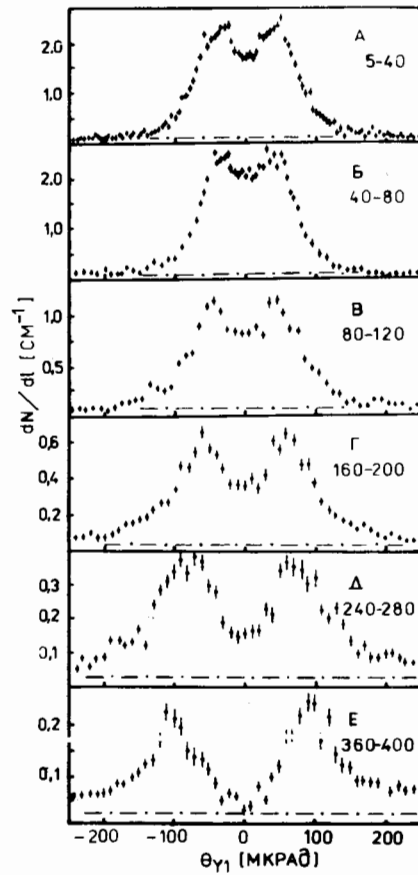


Рис.2. Зависимость числа излучаемых гамма-квантов от угла входа позитронов в кристалл.

Рис.3. Распределения числа гамма-квантов для различных диапазонов энергии в зависимости от угла входа позитронов. Границы энергетических диапазонов /МэВ/ указаны в правом верхнем углу каждого графика.



на котором отобраны события с гамма-квантами в различных диапазонах энергии. Рис.3 соответствует в основном каналированным /А,В/ и надбарьерным /Г-Е/ частицам. Из рис.3 также видно, что с ростом энергии гамма-квантов наблюдается сдвиг максимума вероятности излучения в сторону больших углов /Г-Е/.

Обращает на себя внимание тот факт, что вероятность излучения для частиц, входящих в кристалл под нулевым углом, несколько подавлена по сравнению с максимальным значением для гамма-квантов любой энергии. Вероятность излучения гамма-квантов с энергией выше 360 МэВ для частиц, входящих в кристалл под углами, близкими к нулевому, не превышает вероятности излучения в аморфной мишени, рис. 3/Е/.

3.2. Спектры излучения каналированных позитронов

На рис.4 и 5 представлены зависимости спектральной плотности излучения от энергии гамма-квантов для частиц в различных диапазонах углов входа. Зависимости на рис.4 показывают динамику перехода от излучения при каналировании /А, Б/ к излучению в переходной области углов /В, Г/ и к когерентному тормозному излучению- КТИ /Д, Е/. Анализируя их, можно сделать вывод, что излучение при каналировании не является частным случаем КТИ и переход между этими типами излучения происходит за счет исчезновения пика, связанного с каналированием, и увеличения спектральной плотности КТИ в области более высоких энергий гамма-квантов /широкий пик, рис. 4 Г,Д,Е/. Для каналированных частиц /рис. 5А/ спектральная плотность излучения в области максимума /60 МэВ/ в 37 раз превосходит спектральную плотность излучения в аморфной мишени эквивалентной толщины.

Из работы /8/, выполненной в ЦЕРНе, следует, что значение спектральной плотности излучения превышает соответствующую величину, получаемую в случае неориентированной мишени, примерно в 24 раза. Отличие от наших данных объясняется, по-видимому, недостаточным угловым разрешением установки, созданной в ЦЕРНе /примерно 60 мкрад/. Это не позволяет надежно отобрать каналированные частицы, и поэтому полученный спектр искажен излучением от частиц, не вовлеченных в режим плоскостного каналирования.

Ранее /2/, в спектральной плотности излучения наблюдался пик /с довольно большой статистической ошибкой/ для гамма-квантов с энергией около 25 МэВ. Из рисунка 5б, где изображена низкоэнергетическая часть спектра излучения, полученная в настоящем анализе, следует, что некоторая особенность в спектре для данного диапазона при энергии гамма-квантов около 30 МэВ, действительно, существует и она не обусловлена фоном. Наблюдаемая зависимость интенсивности пика в области 30 МэВ при изменении угла входа позитронов от 20-30 до 80-120 мкрад также говорит о связи этого пика с исследуемым процессом.

Как отмечалось нами ранее /2/, при углах входа частиц, близких к критическому, в спектре излучения появляется периодическая структура. Эта особенность видна и в настоящем анализе для частиц с углами входа, ограниченными диапазоном 56-60 мкрад /рис. 5В/. Большая доля этих частиц при своем движении внутри кристалла попадает в область вблизи плоскости атомов. Здесь потенциал отличен от параболического, описывающего движение в режиме устойчивого плоскостного каналирования /9,10/, что, по-видимому, и приводит к изменению формы спектра.

Производилась проверка влияния критериев отбора событий на абсолютную величину эффекта излучения. Найдено, что при 40%-ном изменении каждого из основных критериев абсолютная величина эффекта изменялась на 1,5-2% /в области гамма-квантов с энер-

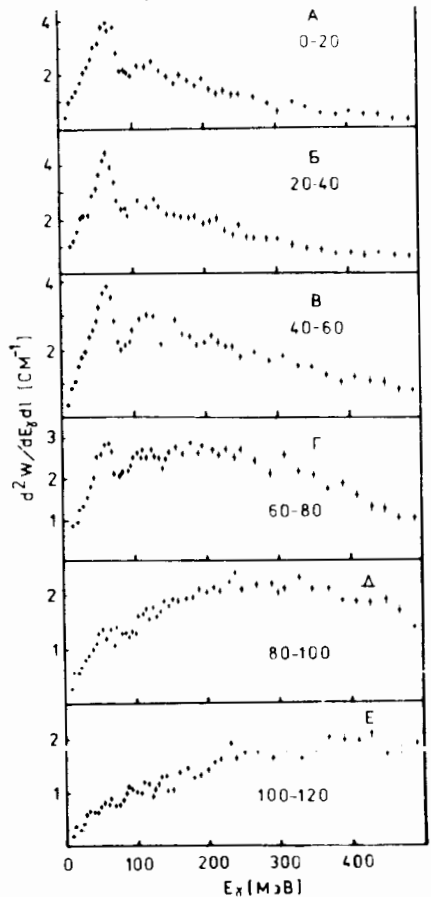
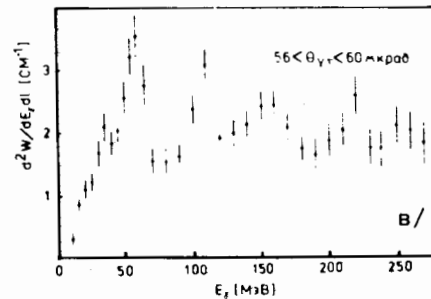
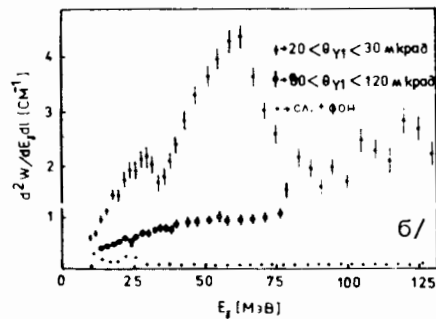
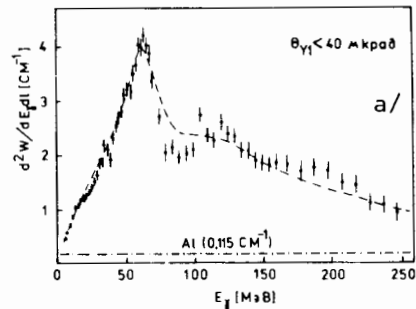


Рис.5. Спектральная плотность излучения в зависимости от энергии гамма-квантов. Отображены частицы, попадающие в различные интервалы углов входа, указанные на рисунках. /а/ - штрих-пунктиром отмечено распределение, полученное для алюминиевой мишени, штриховая кривая рассчитана согласно /14/; /б/ - кривая (.) изображает спектр фона, включающего в себя излучение от вещества установки и случайные совпадения с шумовыми сигналами спектрометрического тракта.

гией около 60 МэВ/. В области более мягких гамма-квантов /около 30 МэВ/ изменение величины эффекта более значительно - около 8%. Для гамма-квантов с энергией выше 100 МэВ изменение в величине

Рис.4. Спектральная плотность излучения в зависимости от энергии гамма-квантов для различных углов входа позитронов в кристалл. Границы угловых интервалов /мкрад/ указаны в правом углу каждого графика.



эффекта не превышает 1%. Из этих данных следует, что случайные события /доля которых меняется при изменении критериев отбора/ лежат в основном в области гамма-квантов с энергией ниже 30 МэВ.

Систематическая ошибка в нормировке представляемых данных оценивается нами на уровне 10% и определяется в основном неконтролируемыми изменениями эффективности установки, связанными с неравномерной загрузкой спектрометра. Данные измерений спектральной плотности излучения на алюминиевой мишени /0,115 ± 0,01 см⁻²/ согласуются с расчетом, выполненным согласно /11/ и дающим величину 0,12 см⁻².

4. СРАВНЕНИЕ С ПРЕДСКАЗАНИЯМИ ТЕОРИИ

Первые теоретические работы М.А.Кумахова /12/ и открывающиеся возможности использования нового типа излучения в качестве интенсивного источника гамма-квантов стимулировали дальнейшие теоретические исследования в этой области /13-15/. Были разработаны общие вопросы теории излучения, возникающего при каналировании и в переходной области /несколько критических углов каналирования/. Экспериментальные данные, имеющие для частиц высокой энергии /1,2,8/, качественно подтвердили предсказания теории, однако были недостаточно подробными для того, чтобы проверить количественные выводы теоретических работ и выяснить их применимость для различных условий каналирования. Кроме того, в работе /2/ были обнаружены /на малой статистике/ и в настоящей работе получили подтверждение некоторые непредсказанные теорией эффекты, которые ждут своей теоретической интерпретации. Методы расчета спектров излучения чрезвычайно громоздки и разработаны в настоящее время только для простейших моделей плоскостного потенциала. Детальный учет экспериментальных особенностей еще более затрудняет расчет спектров. Поэтому мы приводим здесь лишь качественный анализ полученных в эксперименте данных. Их подробная теоретическая интерпретация не входит в задачи этой публикации и будет сделана в дальнейших работах.

Распределение спектральной плотности излучения /рис.5А/ качественно совпадает с теоретически рассчитанным /14/. Полученная зависимость величины спектральной плотности излучения в области максимума от угла входа позитронов в кристалл /рис.4/ и распределения на рис.3 /А,Б/ являются экспериментальным подтверждением теоретических предсказаний /ср. рис.18б /15/ / о зависимости характеристик излучения от угла входа для каналированных позитронов.

Зависимость тонкой структуры спектра в области второй гармоники /около 120 МэВ/ от угла входа частиц /рис.4А-4В, рис.5А/ не рассматривалась теоретически и требует привлечения дополнительных представлений о механизме излучения на высоких гармо-

никах в потенциале, отличимом от параболического. Анализ спектра излучения при углах, близких к критическому /рис.5В/, по-видимому, также поможет в уточнении формы плоскостного потенциала в области около вершины потенциальной ямы.

Прохождение пика при энергии около 30 МэВ /рис.5Б/, несмотря на имеющиеся теоретические попытки, остается невыясненным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены угловые и энергетические зависимости для электромагнитного излучения, возникающего при прохождении позитронов высокой энергии через монокристалл кремния.

Показано, что при плоскостном каналировании позитронов спектральная плотность излучения /в максимуме/ в 37 раз превосходит соответствующую величину для аморфной мишени.

Впервые исследовалось излучение в широком диапазоне углов входа позитронов относительно направления плоскости кристалла. Это позволило получить данные, показывающие динамику перехода от излучения при каналировании к когерентному тормозному излучению.

Полученные экспериментальные данные качественно соответствуют теоретическим расчетам. Однако интерпретация некоторых эффектов требует проведения дополнительных теоретических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирошниченко И.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 29, с. 786.
2. Головатюк В.М. и др. ОИЯИ, Д1-81-592, Дубна, 1981.
3. Водопьянов А.С. и др. ОИЯИ, Р13-82-547, Дубна, 1982.
4. Бавижев М.Д. и др. Препринт ИФВЭ, 82-74 ОП, Серпухов, 1982.
5. Filatova N.A. Fermilab-Pub-76/97-EXP, 7500, 456, 1976.
6. Головатюк В.М. и др. ОИЯИ, Р13-82-374, Дубна, 1982.
7. Водопьянов А.С. ОИЯИ, Р13-81-644, Дубна, 1981.
8. Atkinson M. et al. Phys.Lett., 1982, 110B, N2, p. 162.
9. Kumakhov M.A., Wedell R. Phys.Stat.Sol. (B), 1977, v. 84, p. 518.
10. Базылев В.А. и др. ЖЭТФ, 1980, т. 78, с. 62.
11. Yung-Su Tsui, Rev. of Mod. Phys., 1974, v. 46, p. 815.
12. Kumakhov M.A. Phys.Lett. Ser.A, 1976, v. 57, p. 17; ДАН СССР, 1976, т. 230, с. 1047.
13. Базылев В.А., Жеваго Н.К., ЖЭТФ, 1977, т. 73, с. 1697.
14. Wedell R. Phys.Stat. Sol. (b), 1978, v. 87, p. 491.
15. Базылев В.А., Жеваго Н.К. УФН, 1982, т.137, в. 4, с. 605.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 августа 1983 года.

Булгаков Н.К. и др.

1-83-621

Исследование излучения релятивистских позитронов
в монокристалле кремния

Работа посвящена исследованию излучения позитронов с импульсом 10 ГэВ/с в монокристалле кремния. Описывается установка "Кристалл". Даются характеристики основных ее узлов. Приводятся результаты изучения ориентационных зависимостей вероятности излучения для позитронов, двигающихся под малыми углами к плоскости /110/ монокристалла кремния, а также исследования спектральных плотностей излучения для разных углов входа позитронов в кристалл.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Bulgakov N.K. et al.

1-83-621

Investigation of the Radiation of Relativistic Positrons
in a Silicon Monocrystal

The work is devoted to the investigation of radiation of 10 GeV positron in a silicon crystal. The experimental set-up "Crystal" and its main characteristics are described. The probability of radiation vs crystal orientation has been investigated for positrons passing through the crystal at small angles with respect to the (110) plane. The spectral density of the radiation for different incident angles of positron is presented.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой