

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ С МОНОКРИСТАЛЛАМИ
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПУЧКОВ
ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Г.Л.Бочек, В.И.Витько, И.А.Гришаев, Г.Д.Коваленко,

В.И.Кулибаба, В.Л.Мороховский, Б.И.Шраменко

Харьковский физико-технический институт АН СССР

В ряде теоретических и экспериментальных работ / 1-7 /, посвященных исследованию взаимодействия электронов высокой энергии с периодической структурой кристалла, в рамках борновского приближения показано согласие теории и эксперимента.

Однако экспериментально обнаруженное различие в сечениях тормозного излучения электронов и позитронов на кристалле / 9,10 /, а также ряд теоретических работ / 8,11-14 / указывали на применимость борновских приближений для описания процессов взаимодействия частиц с кристаллами при высоких энергиях.

В свете этих фактов представляло интерес более глубокое исследование взаимодействий электронов и позитронов высокой энергии с кристаллами, а также выяснение возможностей их практического использования.

Нами проведено экспериментальное исследование влияния знака заряда лёгких частиц на процессы тормозного излучения и упругого рассеяния, проявления эффекта блокировки в упругом рассеянии и показана роль эффекта канализации в процессе аннигиляции позитронов. Исследования проводились на линейном ускорителе электронов ЛУЭ-2 ГэВ Харьковского физико-технического института АН УССР. Пучок электронов (позитронов) с энергией 1 ГэВ энергетическим разбросом $\Delta E/E \approx 1,5\%$ и расходностью $\approx 2 \cdot 10^{-4}$ рад направлялся на монокристалл кремния, установленный в гониометре.

На рис.1 представлены зависимости полного потока энергии тормозного излучения позитронов и электронов с энергией 1 ГэВ из кристалла кремния толщиной 185 мкм от угла между направлением пучка и осью кристалла [110] в плоскости (001) /15/. Видно, что тормозное излучение позитронов минимально (позитроны канализируют), а тормозное излучение электронов максимально, когда направление кристаллографической оси [110] совпадает с направлением частиц ($\Phi = 0$).

Интересно было выяснить влияние канализирования на спектральные распределения тормозного излучения электронов и позитронов. Нами измерены спектры тормозного излучения электронов и позитронов из кристалла кремния толщиной 240 мкм, когда выполняются условия осевого канализирования ($\Phi=0$). В этом опыте, как и ранее /16/, спектры гамма-квантов измерялись по вторичным электронам /17/ (позитронам) и нормировались на величину интенсивности тормозного излучения с аморфной мишени алюминия.

Результаты измерений показаны на рис.2.

Подавление интенсивности тормозного излучения позитронов по сравнению с электронами связано с эффектом канализирования, при этом имеет место равномерное уменьшение интенсивности по всему спектру; резкий подъем интенсивности тормозного излучения электронов в области малых энергий фотонов объясняется влиянием многократного рассеяния, которое увеличивает вклад когерентных процессов. Эти результаты показывают, что с помощью кристалла могут быть созданы уникальные возможности изучения взаимодействия позитронов с электронным газом, когда обычно преобладающий вклад тормозного излучения на ядрах сильно подавлен.

Из рис.1 и 2 видно, что выполненные в борновском приближении расчёты ориентационной зависимости полного потока энергии и спектральных распределений тормозного излучения не согласуются с экспериментальными данными, что указывает на необходимость развития теории, которая позволила бы количественно описать наблюдаемые явления.

Исследование упругого рассеяния электронов /18/ и позитронов из кристалла кремния толщиной 185 мкм показало, что угловые распределения рассеянных частиц тоже проявляют зависимость от ориентации оси кристалла относительно направления первичного пучка частиц и различны для электронов и позитронов. Это видно из рис.3.

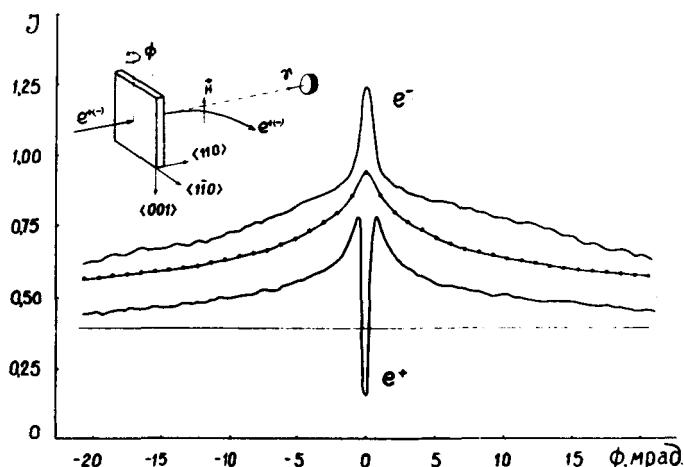


Рис.1. Ориентационные зависимости потока энергии тормозного излучения позитронов и электронов на кристалле кремния: — — эксперимент;

— ● — расчёт по формулам, полученным в борновском приближении; прямая — изотропная часть потока энергии, обусловленная тепловыми колебаниями атомов.

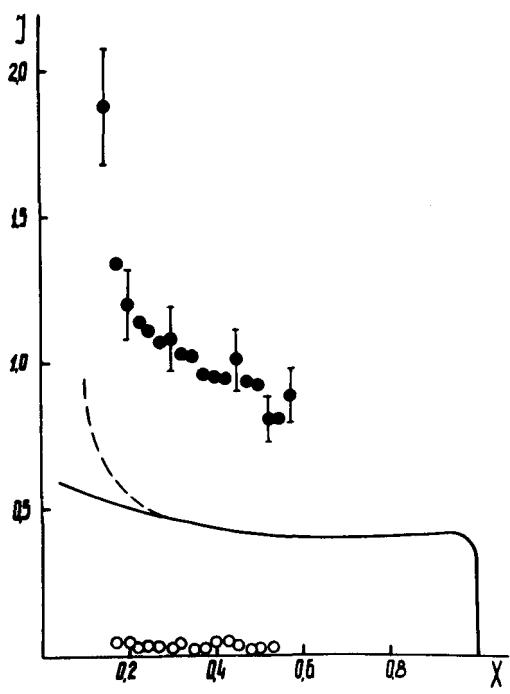


Рис.2. Спектры тормозного излучения электронов и позитронов на кристалле кремния ($\phi = 0$):
● — электроны; ○ — позитроны;
— — расчёт в борновском приближении; ---- — учёт многократного рассеяния для электронов;
J — отношение интенсивности тормозного излучения с кристаллом к интенсивности с аморфной мишени;
X — энергия гамма-квантов в единицах начальной энергии частицы ($X = E_0 - E / E_0$).

В угловых распределениях рассеянных электронов с энергией 1 ГэВ (рис.3) наблюдается картина тени от цепочки атомов кристалла (эффект затенения или блокировки), аналогичная наблюдавшейся ранее при энергии 20 МэВ^{/19/} и качественно согласующаяся с работами Кудрина, Воробьева и др.^{/20,21/}, относящимися к энергии 20 МэВ.

В отличие от электронов значительная часть пучка позитронов, каналируя параллельно плоскостям (001), проходит через кристалл не рассеиваясь и образует локальный максимум плотности в направлении первичного пучка. Когда пучок позитронов направлен вдоль оси кристалла [110] ($\Phi = 0$), то через кристалл не рассеиваясь проходит $\approx 98\%$ всех позитронов в отличие от электронов, которые в тех же условиях рассеиваются эффективнее, чем на разориентированном кристалле.

Следовательно, эффект канализации может быть использован для формирования позитронных пучков с малым эмиттансом^{/25/}, а также для выделения позитронов (и других положительных частиц) из пучков частиц разного знака.

Например, из смешанного пучка электронов и позитронов с энергией 1 ГэВ и диаметром 5 мм с помощью кристалла Si толщиной 1 мм на базе 10 м был выделен пучок позитронов с примесью электронов в соотношении 1 : 0,014. При этом потери позитронов составили 7 %.

Мы предположили^{/22/}, что значительное уменьшение интенсивности тормозного излучения для канализирующих позитронов увеличивает отношение аннигиляционного к тормозному излучению позитронов в кристалле. Исследование процесса аннигиляции позитронов на лету в монокристалле кремния толщиной 300 мкм проведено нами для случаев, когда позитроны движутся в кристалле в режиме канализации ($\Phi = 0$) и когда режим канализации отсутствует ($\Phi = 3 \cdot 10^{-2}$ рад). Используя методику работы^{/23/}, спектры гамма-квантов измерялись под углом $\Theta = 2 \cdot 10^{-2}$ рад с помощью черенковского спектрометра полного поглощения с энергетическим разрешением 13% при энергии 1 ГэВ. Измеренные спектры представлены на рис.4. Гистограммы 1 и 2 соответствуют углам $\Phi = 0$ и $\Phi = 3 \cdot 10^{-2}$ рад. Измерения выполнялись так, чтобы число зарегистрированных гамма-квантов для гистограмм 1 и 2 было одинаковым (площади под гистограммами равны).

Для канализирующих позитронов интенсивность тормозного излучения ($I_{\text{торм.}}$) падает в 4,4 раза, а интенсивность аннигиляционного

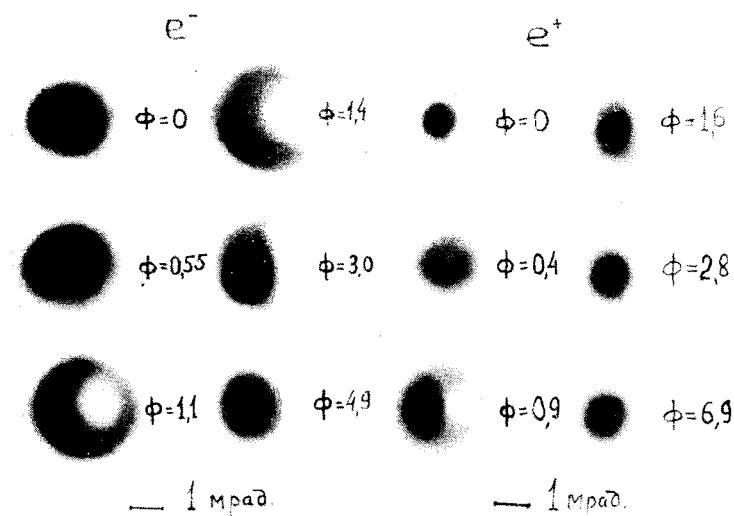


Рис.3. Угловые распределения электронов и позитронов с энергией 1 ГэВ, рассеянных на кристалле кремния.
 ϕ - угол между направлением пучка и осью [110] в мрад.

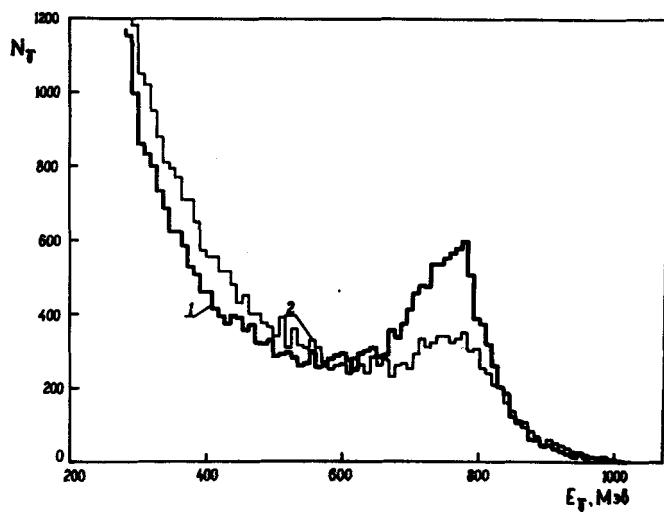


Рис.4. Спектры аннигиляционных гамма-квантов для двух ориентаций оси [111] монокристалла кремния относительно направления позитронного пучка:
гистограмма 1 - угол $\Phi = 0$;
гистограмма 2 - угол $\Phi = 3 \cdot 10^{-2}$ рад.

излучения ($I_{\text{анниг.}}$) - в 1,6 раза. При этом отношение $I_{\text{анниг.}}/I_{\text{торм.}}$, которое является показателем качества пучка монохроматических гамма-квантов, увеличивается в 2,7 раза /24/.

Приведенные экспериментальные результаты о различии взаимодействия электронов и позитронов высокой энергии с периодической структурой кристалла указывают на некоторые возможности использования монокристаллов для управления параметрами пучков частиц высокой энергии.

Литература

1. М.Л.Тер-Микаелян. ЖЭТФ, 25, 296 /1953/; ЖЭТФ, 25, 289 /1953/.
2. H.Uberall. Phys.Rev., 103, 1055 /1956/.
3. G.Barbiellini et al. Nuovo Cim., v.26, 435/1963/.
4. G.Diambrini. Rev.Mod.Phys., 40, 611 /1968/.
5. G.Bologna et al. Nuovo Cim., 42, 844 /1966/.
6. Р.О.Авакян и др. Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий. Изд.ОИЯИ, т.2, 746, 1971 .
7. В.Г.Горбенко и др. Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий.Дубна,изд.ОИЯИ,т.2,738,1971 .
8. E.Feretti. Nuovo Cim., 78, 225 /1972/.
9. И.А.Гришаев и др. УФЖ, 16, 9, 1584 /1971/.
- 10.B.L.Walker et al. 25, 5 /1970/.
- II.А.И.Ахиезер и др. 'Письма в ЖЭТФ', 13, 713 /1970/.
- 12.А.И.Ахиезер и др. Теоретическая и математическая физика, т.23, в.1, с.II /1975/.
- 13.А.И.Ахиезер и др. ДАН СССР, 2, 226 /1976/.
- 14.А.И.Ахиезер и др. УФЖ, 21, 1, 10 /1976/.
15. В.Мороховский и др. 'Письма в ЖЭТФ', 16, 3, 162 / 1972/.
- 16.Г.Л.Бочек и др. Труды VI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами.М.,Изд.МГУ, с.256, 1975 .
- 17.Г.Л.Бочек и др. ЖЭТФ, 67, 8, 808 /1974/.
- 18.В.Мороховский и др.Труды У Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами.Москва,изд.МГУ, стр.173, 1976 .
- 19.Н.Kumm et al. Radiation effects, 12, 53 /1972/.
20. V.V.Kudrin and S.A.Vorobiev. Radiation Effects, 25, 119/1975/.

21. С.А.Воробьев и др. Труды VI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. Москва, Изд.МГУ, с.256, 1975 .
22. И.А.Гришаев и др. Труды У Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. Москва, Изд. МГУ, с.277, 1974 .
23. Б.И.Шраменко и др. „Атомная энергия”, 40, 4, 345 /1976/.
24. Г.Л.Бочек и др. „Письма в ЖЭТФ”, 24, 2, 103 / 1976/.
25. И.А.Гришаев и др. Тезисы докладов УШ Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами, Москва, 31 мая - 2 июня 1976 г. Изд.МГУ, Москва, 1976, с.59.

Д И С К У С С И Я

K.O.Nielsen: Some experiments have been accomplished at CERN with 15 GeV pions. In some respect channeling effects became increasingly important at higher energies in the sense that the widths of dips decrease only as $(p \cdot v)^{-\frac{1}{2}}$, while multiple-scattering in detectors and windows decrease as $(p \cdot v)^{-1}$.

Also channeling energy-loss effects persist at very high energies, thus making the same channeling effect detectable by using the crystal also as an energy-loss detector. Such a technique can be used for 1) collimating positive high-energy particles and 2) for discriminating between positive and negative particles. Applications of channeling effects for measurements of elementary particle lifetimes in the range down to 10^{-20} sec can also be foreseen.

С.П.Капица: Как влияет температура на указанные эффекты канализации и как они изменяются при энергиях в 100 и 10 МэВ?

И.А.Гришаев: Снижение температуры должно усилить эффекты, сделать их более яркими.

Эксперименты на меньших энергиях дадут значительное ослабление эффектов, так как в их основе существенно необходим релятивизм.

G.A.Loew: 1. What are the electron and positron intensities used on these silicon crystals?

2. What is the x-coordinate in Your slide which shows intensity in y ?

И.А.Гришаев: 1. Электроны и позитроны имели интенсивности одинаковые на уровне $5 \cdot 10^9$ частиц в секунду.

2. По оси x отложена энергия γ -квантов в относительных единицах (в долях энергии первичного пучка).

K.O.Nielsen: One of the slides showed a sharp dip. Two questions: 1. Have you compared the width with the critical angle given by the formula

$$\psi = \sqrt{\frac{4 z_1 z_2 e^2}{p \cdot v \cdot d}}$$

$z_1 e$ and $z_2 e$ are the charge of the incident particle and the target nuclei, respectively, p and v are the relativistic momentum and velocity, and d is the distance between target atoms?

2. Have you any explanation for the unusual high shoulder?

И.А.Гришаев: 1. Качественное согласие с формулой имеется, но с учетом релятивизма.

2. Подъем на "крыльях" связан с наличием когерентных процессов во взаимодействии электронов и позитронов с атомами решетки.

С.П.Капица: Как связана ширина минимума для e^+ с угловой расходимостью вашего пучка?

И.А.Гришаев: Угловая расходимость пучка около $2 \cdot 10^{-4}$, угол канализации в несколько раз больше, именно это и привело к возможности получения представленной здесь информации.

И.Енчевич: Скажите, пожалуйста, чем обусловлен выбор именно кремниевых монокристаллов в ваших экспериментах?

И.А.Гришаев: Опыты проводились и на других кристаллах, в частности, кристаллах германия, ниобия, алмаза, но на кремнии в связи с наилучшим качеством кристалла эффекты наиболее ярки.