

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

АВАКЯН РОБЕРТ ВСЕПОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ  
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В КРИСТАЛЛАХ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
В ПРОЦЕССАХ ФОТОРОЖДЕНИЯ

(01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Ереван 1980

Работа выполнена в Ереванском физическом институте.

Официальные оппоненты: член-корреспондент АН Арм.ССР, доктор физико-математических наук, профессор Тер-Микаелян М.Л.,  
доктор физико-математических наук, профессор Белоусов А.С.,  
доктор физико-математических наук Испирян К.А.

Ведущее предприятие: Харьковский физико-технический институт

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1981 г.  
в \_\_\_\_\_ на заседании Специализированного совета Д 034.01.03 по присуждению ученой степени доктора физико-математических наук при Ереванском физическом институте (375036, г.Ереван, ул. Мар-каряна, 2)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ.  
Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1981 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета,  
к. ф.-м. н.

(В.А.ШАХБАЗЯН)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Большую информацию для изучения внутренней структуры и свойств взаимодействия элементарных частиц дают экспериментальные исследования реакций, вызываемых фотонами высоких энергий на нуклонах и ядрах. В отличие от реакций с адронами, в них содержатся сведения как об электромагнитных, так и о сильных взаимодействиях адронов. Экспериментальные исследования в этой области стимулировали развитие новых теоретических идей о внутренней структуре адронов и их взаимодействии. К таким исследованиям относится также фоторождение пионов на нуклонах в резонансной области, представляющее большой интерес для получения информации об электромагнитных характеристиках нуклонных резонансов, изучения структуры адронов, уточнения их классификации и изучения свойств электромагнитного тока адронов. Несмотря на то, что квантовые числа резонансов, определяющих фоторождение в резонансной области, известны из  $\pi N$ -рассеяния, для изучения структуры резонансов, их классификации и проверки предсказаний различных кварковых моделей реакции фоторождения продолжают оставаться очень информативными. Это связано с тем, что в модели кварков переходы  $N^* \rightarrow N\gamma$  определяются взаимодействием одного кварка с фотоном, в то время как переходы с испусканием мезонов  $N^* \rightarrow N\pi$  определяются многокварковыми взаимодействиями. В реакциях фоторождения, в отличие от  $\pi N \rightarrow \pi N$ , определяются не только величины амплитуд распадов резонансов, но и их относительные знаки. Информация о спиновой зависимости возбуждения резонансов также богаче в реакциях фоторождения вследствие того, что спин фотона равен единице.

Для получения однозначных выводов о соответствии теорети-

ческих предсказаний с экспериментом в резонансной области энергий необходимо выполнить сравнение на уровне амплитуд  $\sigma N$  процессов, извлекаемых из экспериментальных данных в рамках полного опыта по фоторождению пионов. Полный опыт процесса фоторождения пионов включает измерение в каждой реакции ( $\gamma N \rightarrow N\pi$ ) девяти независимых экспериментальных наблюдаемых. Экспериментальное исследование этих наблюдаемых становится возможным в экспериментах на поляризованных пучках фотонов с поляризованными нуклонными мишенями и с возможностью измерения поляризации нуклонов отдачи. Таким образом, создание поляризованных пучков фотонов явилось одним из важных условий выполнения отмеченной программы исследований. С другой стороны, практическая возможность получения пучков поляризованных и квазимонохроматических фотонов высоких энергий определила целесообразность исследования проблемы взаимодействия релятивистских электронов с кристаллами, привела к экспериментальному исследованию когерентного тормозного излучения (КТИ) когерентного образования электронно-позитронных пар в кристаллах, выявлению новых особенностей в когерентном тормозном излучении и обнаружению нового вида излучения при каналировании позитронов и электронов высоких энергий в кристаллах.

Состояние исследуемого вопроса и цели работы. К началу исследования процесса фоторождения пионов в ЕРФИ экспериментальная информация в III и IV резонансных областях включала только данные по дифференциальным сечениям, практически отсутствовали экспериментальные результаты по асимметрии сечения при поляризованных фотонах ( $\Sigma$ ), поляризованной мишени ( $T$ ) и данные по поляризации нуклонов отдачи ( $P$ ). В этой связи возникла необходимость в создании пучка линейно поляризованных фотонов и в методике исследования реакции фоторождения пионов на водороде. Для развертывания этих исследований в ЕРФИ была поставлена задача создания квазимонохроматического пучка фотонов на Ереванском электронном син-

хротроне с энергией 5 ГэВ. Угловые и энергетические характеристики внутреннего электронного пучка Ереванского синхротрона и требования к степени поляризации и интенсивности фотонного пучка, необходимого для исследования реакций фоторождения на установках с методикой совпадения продуктов реакции, предопределили методику когерентного тормозного излучения как наиболее перспективную.

К началу выполнения настоящей работы пучки квазимонохроматических и линейно поляризованных фотонов уже были созданы на электронных синхротронах Фраскати, Токио, DESY и на линейном ускорителе ХФТИ (г. Харьков). Однако подробных исследований явления когерентного тормозного излучения не проводилось. Ереванский электронный синхротрон, имеющий специальную систему кольцевого электромагнита, позволяет иметь маленький начальный угловой разброс внутреннего электронного пучка и подходит для подробного исследования КТИ электронов высоких энергий на кристалле.

С целью создания пучка квазимонохроматических и поляризованных фотонов было проведено теоретическое и экспериментальное исследование КТИ электронов высоких энергий на монокристаллических радиаторах различной толщины и ширины при различных коллимациях фотонного пучка.

В результате был получен пучок квазимонохроматических и линейно поляризованных фотонов по своим основным характеристикам, когерентному эффекту  $[(k \frac{dn}{dk})_{пуч} / (k \frac{dn}{dk})_{сч}]$  и величине степени поляризации фотонного пучка, превосходящий пучки, полученные на родственных ускорителях США и Западной Европы.

Разработана и создана специальная аппаратура для ориентировки кристаллических мишеней под электронным пучком, методики измерения интегральной интенсивности, ориентационных зависимостей и спектров КТИ на электронном синхротроне.

Измерена поляризация фотонов с использованием когерентного образования электронно-позитронных пар в кристалле.

Получены поляризованные фотоны предельной энергии электронного синхротрона с помощью селективного поглощения фотонов высоких энергий в кристалле корунда.

Экспериментально исследовано излучение позитронов высоких энергий при малых углах влета их в кристалл  $\Theta < \Theta_c$ . Исследованы свойства нового вида излучения при каналированном движении частиц.

С целью проведения систематических исследований асимметрии сечения в реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^+ p$  поляризованными фотонами в широком энергетическом и угловом диапазоне создан комплекс аппаратуры для исследования фоторождения нейтральных пионов в диапазоне углов в СЦИ  $\Theta_{\pi^0}^* = 40^\circ + 60^\circ$  для  $E_\gamma = 0,6 - 1,7$  Гэв.

Исследована асимметрия сечения в реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^+ p$  в интервале  $\Theta_{\pi^0}^* = 40^\circ + 130^\circ$  при  $E_\gamma = 0,7 - 1,7$  Гэв.

Научная новизна работы. Значительная часть результатов, полученных в диссертационной работе, выполнена впервые в мире. Так, например, впервые наблюдается эффект коллимации на форму спектра КТИ для тонких алмазных пластинок, впервые наблюдается подавление некогерентной части спектра и интегральной интенсивности КТИ при малых углах влета электронов в кристалл. Впервые использован монокристалл корунда как поляризатор фотонов высоких энергий при их селективном поглощении в кристалле. Впервые использован радиатор из узкого и тонкого кристалла для улучшения эффективного углового распределения внутреннего пучка электронов в синхротроне. Впервые в СССР выполнено измерение поляризации  $\gamma$ -квантов. Впервые обна-

ружено излучение при каналировании позитронов высоких энергий в кристаллах и исследованы спектральные характеристики излучения. Впервые проведены измерения асимметрии сечения в реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^+ p$  в широком угловом энергетическом диапазоне в области III и IV резонансов.

Значимость результатов исследований. Научная значимость состоит в том, что сформулированные цели исследований и полученные результаты составляют основу перспективного научно-методического направления в экспериментальной физике электромагнитных взаимодействий.

Создание пучка поляризованных фотонов, подробное исследование явлений КТИ, когерентного образования электронно-позитронных пар, обнаружение нового вида излучения при каналировании позитронов высоких энергий и использование КТИ в систематических измерениях асимметрии сечения в рамках полного опыта в фоторождении пионов в резонансной области определили направление исследований в области электромагнитных взаимодействий.

Полученные экспериментальные результаты при подробном исследовании КТИ электронов высоких энергий позволили обнаружить аномалии в поведении интенсивности жестких фотонов некогерентной части и в угловом распределении интегрального излучения КТИ.

Теоретическое и экспериментальное исследование когерентного образования электронно-позитронных пар в кристаллах позволили осуществить измерение поляризации фотонов при энергии 1,5 и 4,4 Гэв и получить поляризованный пучок фотонов предельной энергии электронного синхротрона, используя в качестве поляризатора монокристалл корунда ( $Al_2O_3$ ).

Экспериментальное исследование излучения при каналировании позитронов высоких энергий открывает новые возможности при

исследовании фотоядерных реакций и в физике твердого тела. Полученные систематические экспериментальные данные асимметрии сечения реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^+ p$  в области III и IV резонансов существенно дополнили мировую статистику данных по поляризационным измерениям и вошли в мультипольные анализы как в СССР, так и за рубежом.

Практическая ценность работы. I. Более  $10^9$  пучков квази-мономатических и поляризованных фотонов успешно используется в ЕРФИ в экспериментах по фоторождению  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  мезонов в инклюзивном фоторождении протонов и  $\pi^+$ -мезонов в кумулятивной области.

2. Подробные исследования КТИ, обнаруженный новый вид излучения при каналировании позитронов высоких энергий, разработанная методика исследований могут найти применение при решении научных и прикладных задач, связанных с взаимодействием заряженных частиц с монокристаллами.

3. Обнаруженные аномалии в КТИ электронов высоких энергий при малых углах влета в кристалл будут способствовать созданию более современной теории излучения электронов и позитронов высоких энергий в кристалле.

4. Результаты работы имеют практическую ценность для создания пучков линейно и циркулярно поляризованных фотонов на ускорителях сверхвысоких энергий.

5. Результаты экспериментальных исследований асимметрии сечения в реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^+ p$  в дальнейшем могут быть использованы при проведении мультипольных анализов и сравнении с теоретическими предсказаниями в физике электромагнитных взаимодействий.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту.

I. I. Создание на Ереванском электронном синхротроне с энергией 5 Гэв квази-мономатического поляризованного пучка фотонов высоких энергий с помощью КТИ с интенсивностью фотонного

пучка  $(1 - 5) \cdot 10^9$  эквивалентных фотонов в секунду с плавным изменением положения главного максимума (0,7 - 2,8) Гэв, с поляризацией фотонов в максимуме (95 + 45)% и мономатичностью пиков (15 + 40)%.

2. Разработана и создана специальная аппаратура для ориентировки кристаллических мишеней под электронным пучком, методика измерения интегральной интенсивности, ориентационных зависимостей и спектров КТИ на электронном синхротроне.

I. 3. Измерение поляризации фотонов с использованием когерентного образования электронно-позитронных пар в кристалле.

I. 4. Получение поляризованных фотонов предельной энергии электронного синхротрона с помощью селективного поглощения фотонов высоких энергий в монокристалле корунда.

I. 5. Исследование излучения при малых углах влета  $\theta < \theta_L$  в кристалл алмаза. Исследование свойств нового вида излучения при каналированном движении частиц.

2. I. Создание комплекса аппаратуры для исследования фоторождения нейтральных пионов в диапазоне углов в СЦИ  $\theta_{\pi^0}^* = 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$  для  $E_\gamma = 0,7 - 1,7$  Гэв.

2. 2. Исследование асимметрии сечения реакции в интервале  $\theta_{\pi^0}^* = 40^\circ + 130^\circ$  при  $E_\gamma = 0,7 - 1,7$  Гэв.

2. 3. Проведение сравнения экспериментальных результатов измерения асимметрии сечения в реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^+ p$  в интервале  $\theta_{\pi^0}^* = 40^\circ + 130^\circ$  при  $E_\gamma = 0,7 - 1,7$  Гэв с различными теоретическими анализами.

Апробация работы и публикации. Материалы диссертации представлялись и докладывались на Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий (Дубна, 1970 г.); на Международ-

ных симпозиумах по взаимодействиям электронов и фотонов высоких энергий (Бонн, 1973 г., Стенфорд, 1975 г., Гамбург, 1977 г.); на Международных конференциях по физике высоких энергий (Лондон, 1974 г., Тбилиси, 1976 г.); на Международном Балатонском симпозиуме по последним достижениям в физике высоких энергий; на Международной конференции по структуре адронов 77 (Высокие Татры, 1977 г.), а также на ежегодных Сессиях отделения ядерной физики АН СССР.

Результаты работ, изложенные в диссертации, опубликованы в виде статей в журналах "Ядерная физика", "Письма в ЖЭТФ", "ЖЭТФ", "Приборы и техника эксперимента", Препринтах ОИЯИ, "ДАН" Арм.ССР, "Изв. АН СССР", в сборниках докладов конференций отдела высоких энергий ХФТИ, в трудах Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, Препринтах БФИ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, двух частей, включающих в себя 6 глав, и заключения; содержит 193 страницы основного машинописного текста, 84 рисунка, 17 таблиц, 199 ссылок на литературу.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации кратко изложена актуальность работы, важность исследования электромагнитных взаимодействий и, в частности, фоторождения пионов в резонансной области.

Для получения полных амплитуд фоторождения реакции  $\gamma N \rightarrow \pi N$  в рамках полного опыта показана необходимость экспериментального определения различных поляризационных параметров реакции. Таким образом, обосновывается необходимость создания квазимонохроматического и линейно поляризованного пучка фотонов на Бреванском электронном синхротроне и связанные с ним исследования излучения электронов и позитронов высоких энергий в кристаллах.

Первая глава посвящена теоретическому исследованию когерентного тормозного излучения электронов высоких энергий в монокристаллах. Кратко изложены характерные особенности когерентного тормозного излучения, дан обзор теоретических и экспериментальных работ, выполненных к настоящему времени, рассмотрены особенности поведения КТИ, связанные с экспериментальными условиями, такие как типы ориентации кристаллических осей и плоскостей относительно импульса начального электрона, коллимации фотонного пучка и т.д.

Отмечаются ориентации монокристаллической мишени  $(\vec{b}_1, \vec{b}_2, \vec{b}_3)$  на углы  $\theta$  и  $\alpha$  относительно импульса начального электрона  $\vec{p}_0$  ( $\theta$  - угол между осью кристалла  $\vec{b}_1$  и импульсом электрона  $\vec{p}_0$ ,  $\alpha$  - азимутальный угол между плоскостями  $(\vec{p}_0, \vec{b}_1)$  и  $(\vec{b}_1, \vec{b}_2)$ ): 1. "эффект ряда" ( $\theta$  - мало,  $\alpha = 0$  или  $\pi/2$ ), 2. "эффект точки" ( $\theta = 50 + 75$  мрад,  $0 < \alpha < \pi/2$ ).

Приведены теоретические исследования углового распределения когерентно излученных фотонов, показана возможность улучшения спектра когерентного тормозного излучения (сужение пиков в спектре КТИ, обрезание некогерентной части и т.д.) коллимированием фотонного пучка [1].

Приведены теоретические расчеты по исследованию ориентационной зависимости полной энергии излучения. Показано, что интегральная интенсивность растет с уменьшением угла влета в кристалл ( $\theta_B \rightarrow 0$ ,  $\theta_T \rightarrow 0$ ), при достаточно малых углах интегральная интенсивность растет медленно, оставаясь почти постоянной. С уменьшением угла влета в КТИ дают вклад все меньшие и меньшие энергии фотонов и сужается энергетическая область пика интенсивности, но число фотонов растет настолько быстро, что полная излученная энергия во всяком случае вплоть до углов  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  рад ос-

тается примерно постоянной.

Приведены исследования когерентного образования электронно-позитронных пар в кристалле, использованные нами при измерении поляризации фотонов энергии 1,5 и 4,4 Гэв [7, 8], в создании поляризованных фотонов предельной энергии синхротрона селективным их поглощением в большом монокристалле корунда [5, 6], в улучшение параметров электронного пучка протонного ускорителя FNAL (США) [11].

Приведены теоретические исследования энергетических спектров когерентного тормозного излучения протонов и  $\pi$ -мезонов высоких энергий на кристалле алмаза [10].

Во второй главе представлен комплекс экспериментального оборудования, разработанного для получения пучка квазимонохроматических и поляризованных фотонов. Приведены характеристики экспериментального оборудования, включающего гониометрические установки, монокристаллические мишени, систему формирования  $\gamma$ -пучка, парный  $\gamma$ -спектрометр, квантометр Вильсона и т.д.

Парный  $\gamma$ -спектрометр был сконструирован и изготовлен на базе стандартного магнита СП-57. На электронном и позитронном плечах  $\gamma$ -спектрометра располагались четыре пары сцинтилляционных счетчиков, определяющие область энергии  $\gamma$ -квантов в пределах (0,5 + 7) Гэв. Детектировались симметричные электронно-позитронные пары в пределах  $0,47 \leq E^+/k \leq 0,53$ . Энергетическое разрешение спектрометра менялось от телескопа к телескопу в пределах 1,15 - 2,5 %.

Измерения спектра тормозного излучения от аморфной мишени показало удовлетворительную работу спектрометра в интервале  $E_{\gamma} = 0,7 - 5$  Гэв. Вычисленная энергетическая зависимость функции эф-

фективности парного спектрометра показала отличие от единицы на 10 % при 1 Гэв на 2 % при 1,5 Гэв и, начиная с  $E = 2$  Гэв, практически не отличалась от единицы.

В измерениях использовались монокристаллические алмазные мишени толщиной 2, 0,3, 0,1, 0,08 мм и монокристалл корунда толщиной 30 см. Гониометрическая установка  $\Gamma_1$  позволила дистанционно ориентировать монокристаллические мишени относительно импульса начального электрона в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точностью  $4 \cdot 10^{-5}$  рад. в диапазоне  $\mp 6^\circ$ . Гониометрическая установка  $\Gamma_2$ , использованная в экспериментах по измерению поляризации, имела пределы вращения вокруг вертикальной и горизонтальной оси  $\mp 6^\circ$  с точностью  $\mp 0,12$  мрад и  $\mp 0,14$  мрад соответственно. Установка кристалла вокруг оси пучка фиксировалась в условиях положения  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $270^\circ$  с точностью  $\mp 1^\circ$ .

Гониометрическая установка  $\Gamma_3$ , использованная в экспериментах по получению поляризованных фотонов предельной энергии синхротрона, имела возможность поворачивать кристалл вокруг вертикальной оси в пределах  $\mp 10^\circ$  с точностью  $\mp 0,3$  мрад вокруг горизонтальной оси  $\mp 8^\circ$  с точностью  $\mp 0,4$  мрад и вокруг оси пучка в пределах  $\mp 75^\circ$  с точностью 1 мрад.

Приводится описание тракта  $\gamma$ -пучка, показаны отличительные особенности системы вывода  $\gamma$ -пучков в условиях структуры электромагнита Ереванского синхротрона и системы контроля и мониторинга  $\gamma$ -пучка, используемого в физических экспериментах.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию основных характеристик и особенностей КГИ электронов высоких энергий в кристалле алмаза, а также когерентного образования элект-

ронно-позитронных пар, связанное с измерением поляризации фотонов с энергией 1,5, 4,4 Гэв и с созданием поляризованных пучков  $\gamma$ -квантов на конце спектра тормозного излучения.

Приводятся экспериментальные исследования интегральной интенсивности КТИ  $J_{\text{и}}$  от угла ориентации  $\theta$  для двух значений другого угла ориентации  $\alpha$  равного  $0^\circ$  и  $90^\circ$  в случае кристалла ориентации (001) и (110) при энергии электронов  $E_0 = 4,5$  Гэв. Интегральная интенсивность  $J_{\text{и}}$  с уменьшением угла ориентации  $\theta$  от  $\pm 3$  мрад до нуля постепенно увеличивается до максимального значения  $J_{\text{и}}^{\text{пик}}$  при  $\pm \theta^{\text{пик}}$  различных при ориентациях  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$  и далее резко уменьшается до минимального значения, причем резко при  $\alpha = 0$ . При тщательной ориентировке кристалла, начиная с углов  $0,1 - 0,2$  мрад, вновь замечается рост интегральной интенсивности, продолжающийся до угла  $\theta = 0$ . Показано, что уменьшение толщины кристаллической мишени и угла коллимации приводит к увеличению когерентного эффекта интегральной интенсивности как в случае ориентации "эффекта ряда" так и "эффекта точки" [2, 3].

Исследовались ориентационные зависимости фиксированной энергии  $\gamma$ -квантов при  $K_1 = 0,75$  Гэв,  $K_2 = 1,5$  Гэв и  $K_3 = 2,17$  Гэв в случае "эффекта ряда" ( $\theta_B = 0$ ,  $\theta_\Gamma$  варьируется). Для всех трех энергий фотонов в угловом распределении (вокруг  $\theta_\Gamma$ ) наблюдались два симметричные пика, с каждой стороны от нулевого угла обусловленные рядами узлов (220) и (440). При вращении вокруг другой оси ( $\theta_\Gamma = 0$ ,  $\theta_B$  варьируется) наблюдается аналогичная картина, только вектор поляризации фотонов поворачивается на  $90^\circ$ . В случае ориентации (110) вращение вокруг вертикальной и горизонтальной осей не эквивалентны, а углы, при которых получают пики при горизонтальном и вертикальном вращении относятся как  $\theta_B/\theta_\Gamma = \sqrt{2}$ .

Исследовалась ориентационная зависимость для трех энергий фотонов  $K_1 = 0,98$ ,  $K_2 = 1,49$ ,  $K_3 = 2,00$  Гэв в случае "эффекта точки" ( $\theta_B = 50$  мрад,  $\theta_\Gamma$  варьируется). В угловом распределении ближе к нулевому углу хорошо выделяется пик от узла  $[4\bar{4}0]$ , затем резко выделяется пик от узла  $[2\bar{2}0]$ . В случае ориентации (001) для обеих осей вращения наблюдается симметричная картина. Углы, соответствующие пикам, равны  $\theta_\Gamma^{\text{пик}} = \theta_B^{\text{пик}}$ . Таким образом, эта ориентация удобна для получения пучков  $\gamma$ -квантов с взаимно перпендикулярными векторами поляризации.

Экспериментальное исследование зависимости интенсивности пиковой энергии фотонов в согласии с теорией КТИ отчетливо показывает увеличение интенсивности в пике с уменьшением энергии интерференционно излученных фотонов. На основе выполненных измерений можно получить интенсивность практически для любой энергии интерференционно излученных фотонов в реальных условиях Ереванского синхротрона.

Экспериментально показано, что ориентационная зависимость интенсивности  $\gamma$ -квантов определенной энергии существенным образом определяется начальной энергией электронов. Уменьшение энергии электронов приводит к уменьшению интенсивности фотонов определенной энергии и увеличению углов ориентации, соответствующих пику интенсивности.

Приводится экспериментальное исследование ориентационной зависимости фотонов энергии (8,2 + 11,8) Гэв и (17,0 + 20,6) Гэв в КТИ электронов с энергией 31 Гэв на кристалле кремния. Результаты измерений удовлетворительно согласуются с теорией [12].

Значительная часть экспериментов по исследованию КТИ на кристалле алмаза посвящена изучению энергетических спектров  $\gamma$ -квантов.

Эксперименты проводились с целью исследования спектров КТИ при различных углах ориентации кристалла, когда максимум интенсивности КТИ приходился на ту или иную энергию  $\gamma$ -квантов, как в случае "эффекта ряда", так и в случае "эффекта точки", для кристаллов обеих ориентаций (110) и (001) для различных значений энергии электронов и параметров, влияющих на интенсивность КТИ.

Исследовалось влияние на спектры КТИ экспериментальных условий, таких как угол коллимации фотонов и углы расходимости и многократного рассеяния электронов, способных вызвать изменения параметров, характеризующих КТИ [2, 9].

На рис. 1 представлены спектральные распределения интенсивности  $\gamma$ -квантов при определенных угловых ориентациях кристалла в разных экспериментальных условиях при энергии  $E_0 = 4,5$  Гэв.

Все приведенные на этом рисунке спектры соответствуют ориентации кристалла, при которой основной вклад в КТИ обусловлен одним узлом обратной решетки кристалла, т.е. соответствуют "эффекту точки". Во всех приведенных спектрах пиковая энергия  $K_n = 1,50$  Гэв. Пики интенсивности обусловлены вкладом в когерентную часть КТИ узла обратной решетки кристалла [220]. Было рассмотрено влияние как каждого из трех указанных экспериментальных условий при постоянстве двух остальных, так и при одновременном их изменении.

Как видно из рисунка, с уменьшением угла коллимации фотонного пучка увеличивается максимальный когерентный эффект и соответствующая ей степень поляризации  $\gamma$ -квантов в спектрах КТИ.

С уменьшением углов многократного рассеяния электронов в кристалле в результате уменьшения толщины кристалла увеличивается максимальный когерентный эффект и связанная с ним поляризация

$\gamma$ -квантов в спектрах КТИ.

На рисунке видно также влияние начальной расходимости электронов на спектры КТИ при "эффекте точки" при равенстве всех остальных экспериментальных условий. Уменьшение эффективной расходимости электронов из-за уменьшения ширины кристалла приводит к изменению спектра интенсивности  $\gamma$ -квантов, увеличению максимального когерентного эффекта и определяемой им степени поляризации  $\gamma$ -квантов.

Одновременно уменьшение начальной расходимости электронов и коллимации фотонов приводит к существенному изменению спектра КТИ, к значительному увеличению максимального когерентного эффекта (на 42,5%) и увеличению степени поляризации  $\gamma$ -квантов в пике интенсивности.

Наконец получены лучи  $\gamma$ -квантов со взаимно перпендикулярными векторами поляризации одинаковой формой спектра и одинаковой интенсивности КТИ [4].

Важной особенностью квазимонохроматических фотонных пучков получаемых при когерентном тормозном излучении электронов высоких энергий в кристаллах, является наличие линейной поляризации фотонов в пиковой области энергии. Экспериментальное исследование спектров фотонов когерентного тормозного излучения и сравнения их с теоретическими спектрами с учетом экспериментальных факторов, таких как коллимация, многократное рассеяние электронов в мишени, первичное расхождение электронного пучка и т.д. позволяют определить набор параметров, с помощью которого можно вычислить степень поляризации фотонов в пучке.

На рис. 2 приводится измеренный спектр КТИ вместе с теоретически вычисленным и подогнанным к экспериментальным данным спектрам и посчитанным на основе параметров подгонки энергетической зависимости степени поляризации фотонов. Расчеты проводились по

методу Монте-Карло на ЭВМ БЭСМ-6. [15]. Однако прямое экспериментальное определение степени поляризации фотонов в пучке представляет интерес как в смысле контроля правильности набора параметров для вычисления поляризации, так и в проверке теории когерентного тормозного излучения и рождения электронных и позитронных пар в кристалле.

Для измерения степени поляризации фотонов высоких энергий эффективным является метод, основанный на интерференционном рождении электронно-позитронных пар фотонами в кристаллах. Если фотоны поляризованы, то помимо когерентных эффектов возникает еще и корреляция между вектором поляризации фотона и вектором обратной решетки кристалла. При определенной ориентации кристалла возникает асимметрия в рождении электронно-позитронных пар в плоскости (импульс фотона - ось кристалла).

Для экспериментального исследования поляризации фотонов в пике интенсивности КТИ с энергией  $E_\gamma = 1,5$  Гэв измерялось число симметричных электронно-позитронных пар  $N_{\parallel}$ , образованных фотонами, поляризованными параллельно плоскости, составленной осью кристалла и импульсом фотона  $K$  и  $N_{\perp}$  фотонами, поляризованными перпендикулярно этой плоскости. Конвертором служила алмазная пластинка. Степень поляризации определяется как

$$P = \frac{1}{R} \frac{N_{\parallel} - N_{\perp}}{N_{\parallel} + N_{\perp}}$$

где  $R = \frac{d\delta_{\parallel} - d\delta_{\perp}}{d\delta_{\parallel} + d\delta_{\perp}}$  - коэффициент асимметрии,  $d\delta_{\parallel}$ ,  $d\delta_{\perp}$  - поперечники образования электронно-позитронных пар в кристалле фотонами, полностью поляризованными параллельно и перпендикулярно плоскости (ось кристалл, импульс фотона).

Углы влета выбираются таким образом, чтобы величина  $R$

была максимальной. Для этого ориентируют кристалл, в котором образуются электронно-позитронные пары, чтобы получить максимальный счет электронно-позитронных пар. Этот отсчет будет соответствовать числу  $N_{\parallel}$ , затем поворачивают кристалл на  $90^\circ$ .

При правильной ориентации это число должно соответствовать минимальному числу пар  $N_{\perp}$ . Рассчитывая  $R$  для реальных условий эксперимента из теории, определяют степень поляризации  $P$ . Среднее значение измеренной величины поляризации фотонов для  $E_\gamma = 1,5$  Гэв составило  $P = 0,859 \pm 0,098$  [8].

Поляризованные фотонные пучки, созданные с помощью когерентного тормозного излучения электронов высоких энергий на кристаллах, обладающая высокой линейной поляризацией, имеют тот недостаток, что за пиковой энергией фотонов, имеющих высокую поляризацию, имеется большой высокоэнергетический хвост, усложняющий фоновые условия в экспериментах по фоторождению элементарных частиц. Создание пучков с поляризованными фотонами предельной энергии тормозного спектра, кроме теоретического, представляют практический интерес, так как существенно упрощает экспериментальные установки по исследованию фоторождения элементарных частиц. Метод селективного поглощения фотонов высоких энергий в кристаллах, основанный на корреляции между вектором решетки кристалла и компонентом вектора поляризации фотона в процессе когерентного образования электронно-позитронных пар позволяет получить поляризованный фотонный пучок при пропускании пучка неполяризованных фотонов через большую толщу кристалла. Предложения и расчеты Кабибо относились к кристаллу меди. Однако кристалл очень неудобен в смысле эксперимента вследствие малой Дебаевской температуры, требующей поддержания кристалла при азотной температуре. Имми еще рассчитан кристалл кремния, но поляризующая его способность оказалась маленькой. Поиск подходящих кристаллов привел нас к

кристаллу корунда из-за высокой Дебаевской  $1200^{\circ}\text{K}$ , большой поляризующей способности и возможности выращивания его до больших размеров.

Кристалл корунда ромбоэдрической сингонии. Сторона ромба  $5,12\text{Å}$  и плоский угол ромбоэдра  $55^{\circ}17'$ , температура Дебая порядка  $1200^{\circ}\text{K}$ .

Теоретические исследования показали реальность использования кристалла корунда как поляризатора фотонов высоких энергий [5, 6]. Эксперимент по получению поляризованных фотонов энергии  $4,4\text{ Гэв}$  был осуществлен на обычном фотонном пучке от вольфрамовой мишени с предельной энергией тормозного спектра  $4,5\text{ Гэв}$  [7].

Пучок фотонов Ереванского ускорителя с расходимостью  $0,06$  мрад и интенсивностью  $1,5 \cdot 10^9$  эквивалентных фотонов в секунду падал на монокристалл корунда толщиной  $30\text{ см}$  ( $4,7\text{ рад.дл.}$ ). Корунд был смонтирован в гониометр, обеспечивающий ориентацию кристалла под фотонным пучком с точностью  $\pm 0,03$  мрад.

Для ориентировки кристалла корунда использовалась специфическая зависимость полного сечения образования электронно-позитронных пар фотонами заданной энергии от угла их влета в кристалл. Следует отметить, что при углах, соответствующих максимальному эффективному сечению образования электронно-позитронных пар, ожидается максимальная поляризация. Экспериментально ориентация, при которой ожидается максимальная поляризация, достигается исследованием числа симметричных электронно-позитронных пар, образованных фотонами с энергией  $4,4\text{ Гэв}$ , прошедшими через кристалл корунда.

Для измерения поляризации фотонов применялась методика, ранее использованная для измерения поляризации фотонов когерентного тормозного излучения.

Степень поляризации фотонов при оптимальном угле влета =

кристалл корунда составила  $14,5 \pm 4\%$ . Такая поляризация была достигнута при падении интенсивности начального неполяризованного пучка в  $25$  раз в области энергии  $\gamma$ -квантов  $4,4 \pm 0,08\text{ Гэв}$ .

Проведен также расчет спектров фотонов, вышедших из монокристалла корунда [13, 14]. Вычисления проведены по методу Монте-Карло с учетом когерентных явлений в образовании электронно-позитронных пар фотонами, а также в тормозном излучении электронов и позитронов в кристалле

Наконец, подробное экспериментальное исследование определенных закономерностей КТИ и сравнение с теорией показало, что в области малых углов влета в кристалл наблюдаются определенные отклонения от предсказаний теории КТИ в ориентационных зависимостях интегральной интенсивности и в жесткой части спектра КТИ. В случае ориентационной зависимости интегральной интенсивности можно указать на следующие различия между теорией и экспериментом (см. рис. 3):

а). В области углов влета меньших  $1$  мрад для энергии электронов  $4,5\text{ Гэв}$  наблюдается уменьшение интегральной интенсивности, не предсказываемое теорией.

б). В области углов  $0,1 - 0,2$  мрад вновь наблюдается рост интенсивности.

Для исследования ориентационной зависимости фотонов в жесткой части спектра проводилось измерение выхода фотонов относительной энергии  $\chi = 0,973$  в зависимости от угла влета в кристалл на внутреннем пучке синхротрона с энергией электронов  $E_0 = 4,5\text{ Гэв}$ . На рис. 4 приведены результаты измерений — пунктирная кривая; сплошная кривая соответствует эйкнональному приближению, прямая соответствует КТИ основанной на теории возмущений [15, 17]. Из наблюдений обеих аномалий можно сделать вывод, что

обычная теория КТИ при энергии электронов 4 + 5 Гэв, по-видимому правильна, при углах больших  $(5-10)\theta_L$ , где  $\theta_L$  - критический угол каналирования при меньших углах, соответствующих так называемому надбарьерному движению частиц, выход излучения подавляется при еще меньших углах  $0,1 - 0,2$ , соответствующих критическому углу каналирования электронов в кристалле, выход излучения снова начинает расти, по-видимому, в основном за счет мягкой части спектра. Такая картина может симулироваться также сложной зависимостью от угла влета многократного рассеяния электронов высоких энергий в кристалле, а именно если электроны при углах влета меньших 1 мрад испытывают аномально большое многократное рассеяние, уширяется пучок и уменьшается поток  $\gamma$ -квантов, прошедший через коллиматор, а при углах меньших критического угла каналирования  $\theta_L$  происходит сильное уменьшение многократного рассеяния и увеличение потока фотонов через отверстие коллиматора. Для окончательного выявления механизма наблюдаемых аномалий, требуются дополнительные эксперименты.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию излучения позитронов высоких энергий при каналированном их движении в кристаллах, описывается теория излучения электронов и позитронов при малых углах влета  $\theta < \theta_L$  (где  $\theta_L$  - критический угол каналирования частиц в кристалле). Показаны отличительные от КТИ особенности теории излучения в дипольном приближении (и при учете недипольности) для электронов и позитронов высоких энергий.

Экспериментальные исследования спектров излучения позитронов высоких энергий в режиме каналирования были выполнены нами на линейном ускорителе электронов SLAC (США) для энергий позитронов 4, 6, 10, 14 Гэв.

Эксперимент выполнен на позитронном пучке SLAC с угловым

расхождением на уровне  $\sim 10^{-5}$  рад. при средней интенсивности позитронного пучка около одного позитрона на импульс ускорителя. Гониометрическая установка обеспечивала ориентацию кристаллического радиатора с точностью  $1,15 \cdot 10^{-5}$  рад. Эксперимент выполнялся на алмазных кристаллических радиаторах толщиной 80 мк и 600 мк ориентации (100). Регистрация излучения осуществлялась спектрометром полного поглощения на основе большого кристалла ( $20 \times$ ) NaI. Ориентация кристаллов алмаза, установленных в гониометрическое устройство, осуществлялась с помощью известных эффектов когерентного тормозного излучения позитронов в кристаллических мишенях.

Плоскость кристалла (100) располагалась перпендикулярно позитронному пучку. В эксперименте измерялось число  $\gamma$ -квантов, регистрируемое счетчиком NaI в зависимости от углов ориентации кристалла в одной плоскости при фиксированных углах относительно другой.

В эксперименте проводилось тщательное измерение полной интенсивности фотонов от ориентации кристалла вблизи углов, соответствующих планарному и аксиальному каналированию. Все измерения выполнены с шагом  $1,15 \cdot 10^{-5}$  рад.

В эксперименте были измерены спектры электромагнитного излучения при плоскостном и аксиальном каналировании позитронов высоких энергий на кристалле алмаза. Для калибровки экспериментальной установки предварительно было измерено тормозное излучение от аморфной мишени, от разориентированной кристаллической мишени и спектр когерентного тормозного излучения позитронов при энергии позитронов 10 Гэв с пиковой энергией фотонов 5 Гэв. Все эти измерения согласуются с теоретическими предсказаниями. На рис. 5 приведены измерения спектров в зависимости от углов ориентации

плоскости кристалла относительно импульса позитрона для энергии позитронов 10 Гэв. Наблюдается отчетливый пик, интенсивность которого зависит от угла ориентации плоскости кристалла относительно импульса позитрона. Интенсивность пика максимальна при положении кристалла, соответствующего планарному каналированию позитронов и уменьшается при увеличении угла. Когда угол становится намного больше критического, пик в спектре исчезает в согласии с предсказаниями в теории. Измерены спектральные плотности энергии излучения на один позитрон на единицу длины от пластинки алмаза толщиной 80 мк для позитронов с энергией 4, 6, 10, 14 Гэв. [18].

Приведены экспериментально полученные нами значения  $h\omega_{max}^{(1)}$  для разных энергий позитронов 4, 6, 10, 14 Гэв в сравнении с теоретически рассчитанными значениями для параболического потенциала. Имеется хорошее согласие в особенности при энергии 10 и 14 Гэв.

При сравнении экспериментальных результатов спектральной плотности энергии излучения на один позитрон на единицу длины для алмазного кристаллического радиатора толщиной 80 мк с теоретическими предсказаниями наблюдается определенное различие, по-видимому, обусловлено процессом деканализирования позитронов, связанным с мозаичностью кристалла. К сожалению, специальных исследований структуры кристалла нами не проводилось. На основании сравнения спектров с теоретическим расчетом можно считать, что в нашем случае удерживалась в канале только часть позитронов. Остальные позитроны деканализировали, заполнили надбарьерные состояния поперечной энергии и давали вклад в более жесткую часть энергии излучения.

Характерные частоты излучения надбарьерными позитронами

высокой энергии оказываются более чем в два раза выше соответствующих частот для каналированных частиц. Тогда разница между результатами теории и эксперимента может быть компенсирована, если учесть также вклад от излучения позитронов, которые вследствие деканализирования на несовершенствах кристаллов превратились в надбарьерные.

Резюмируя, можно сказать, что в эксперименте был обнаружен новый вид интенсивного излучения в кристаллах, отличный от ранее наблюдавшихся и связанный с каналированием частиц в кристалле.

В пятой главе анализируется состояние теоретических и экспериментальных работ по фоторождению нейтральных пионов поляризованными фотонами и обосновывается постановка экспериментальных исследований. Описываются экспериментальные установки для измерения асимметрии сечения реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$  в диапазоне углов  $\theta_{\gamma p}^* = 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$  для  $E_\gamma = 0,7 - 1,7$  Гэв [19, 20] и моделирование реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$  для экспериментальной установки при  $\theta_{\gamma p}^* = 60^\circ$  по методу Монте-Карло [21].

Экспериментальная установка по исследованию асимметрии реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$  поляризованными фотонами с  $E_\gamma = 0,7 - 1,7$  Гэв и  $\theta_{\gamma p}^* = 60^\circ$  представляла собой двухплечевой спектрометр.

Пионное плечо — это спектрометр полного поглощения для регистрации  $\gamma$ -квантов, созданный на основе кристалла NaI цилиндрической формы, диаметром 200 мм и высотой 300 мм. Характеристики спектрометра были изучены на электронном пучке с энергией 1 - 3 Гэв [22, 23].

Протонное плечо установки состояло из блока десяти узкозачеренных искровых камер (ИИК) для выделения угла вылета протона, двух счетчиков  $dE/dx$ , годоскопа, медного поглотителя, системы пробных счетчиков и антисчетчика. Телесный угол регистра-

ции протонов равен  $9 \cdot 10^{-3}$  стерад и определяется апертурным счетчиком. Протонное плечо установлено на поворотной платформе, позволяющей менять угол регистрации протонов в большом диапазоне.

Для отделения протонов от сопутствующих  $\pi^+$ -мезонов были использованы два  $dE/dx$  сцинтилляционных счетчика.

Энергия протонов определялась системой четырех пробегных сцинтилляционных счетчиков. Размеры счетчиков ( $50 \times 20 \times 2$ ) см<sup>3</sup>. Перекрывание области энергии  $T_p = (100 + 300)$  Мэв достигалось изменением толщины медного поглотителя. Наличие четырех пробегных счетчиков, которые одновременно являются и поглотителями, позволяет разделить 40-Мэвную область энергии протонов на 4 интервала. Средняя энергия протонов со своей среднеквадратичной ошибкой для каждого счетчика определялась расчетом в кинематических условиях данного эксперимента по методу Монте-Карло.

Экспериментальная установка для исследования асимметрии реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^+ p$  при  $E_\gamma = 0,7 - 1,7$  Гэв при  $\theta_{\pi^+}^* = 40^\circ - 50^\circ$  была несколько усложнена из-за малой энергии протонов отдачи и увеличения ее светосилы. Она также состояла из двух плеч. Одно из них предназначено для регистрации  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$ -мезона и представляет из себя установленный на поворотной платформе (диапазон углов  $10^\circ + 80^\circ$ ) спектрометр полного поглощения на основе кристаллов  $NaI(Tl)$ , состоящего из 16-ти модулей прямоугольной формы с размерами ( $130 \times 130 \times 300$ ) мм<sup>3</sup>. Общая рабочая поверхность всех модулей составляла ( $520 \times 520$ ) мм<sup>2</sup>.

На вторичном электронном пучке исследовалось энергетическое разрешение и временные характеристики всех 16-ти модулей кристалла  $NaI$  для осуществления быстрого совпадения с сцинтилляционными счетчиками [24].

Второе плечо установки предназначалось для регистрации

протонов и представляло из себя пробегный спектрометр, состоящий из 30-ти узкоазоных искровых проволочных камер (ИПК) с ферритонным съемом информации, набора поглотителей и сцинтилляционных счетчиков. Спектрометр позволял определить энергию протонов в интервале ( $60 + 300$ ) Мэв и имел телесный угол регистрации  $10^{-2}$  стер. Протонное плечо устанавливалось на поворотной платформе, позволяющей изменять угол регистрации в широком диапазоне ( $50 + 130^\circ$ ).

Проволочные искровые камеры были сгруппированы в пять групп, между которыми были установлены счетчики и поглотители. Первая группа, состоящая из 10-ти камер с размерами ( $200 \times 250 \times 40$ ) мм<sup>3</sup>, составляла один блок и служила для определения угла рождения протонов с точностью  $5 \cdot 10^{-3}$  рад., а остальные группы, содержащие 12 ИПК с размерами ( $250 \times 400 \times 40$ ) мм<sup>3</sup> и 8 ИПК с размерами ( $500 \times 800 \times 40$ ) мм<sup>3</sup> сочленены с поглотителями из железа для определения энергии протонов. Средняя энергия протонов со своей среднеквадратичной ошибкой для каждого поглотителя и счетчиков определялась расчетом в кинематических условиях данного эксперимента по методу Монте-Карло. Среднеквадратичная ошибка определения энергии первичного фотона составляла  $\pm 25$  Мэв для  $\theta_{\pi^+}^* = 40^\circ$  и  $\pm 30$  Мэв для  $\theta_{\pi^+}^* = 50^\circ$ .

Для съема и предварительной обработки информации, поступающей из экспериментальной установки в режиме вывода полного объема информации в линию на систему ЭВМ РДР-9, РДР-8 и М-222, служила специальная система "Искра" [20].

Съем информации происходил после триггерного импульса, который появляется при наличии импульсов в протонном и пионном каналах.

Максимальная частота триггера - 1 триггер при одном сбросе ускорителя. Длительность сброса составляет 1 - 3 мсек. Время между импульсами ускорителя составляет 20 мсек. За это время, с

большим запасом, снимается информация с установки, передается на ЭВМ и записывается в промежуточный буферный накопитель (диск и лента).

Общий объем информации, соответствующий одному событию в установке, составлял 100-200 18-ти разрядных слов.

Обработка данных проводилась на ЭВМ М-222.

В шестой главе приводится методика измерения асимметрии сечения реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^+ p$  поляризованными фотонами с использованием двух пучков  $\gamma$ -квантов с взаимно перпендикулярными векторами поляризации фотонов с одинаковой интенсивностью и формой спектра КТИ.

Для измерения асимметрии сечения фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на водороде в широком интервале углов  $\theta_{\pi^0}^* = 40^\circ - 130^\circ$  при  $E_\gamma = 0,7 - 1,7$  Гэв использовались фотоны когерентного тормозного излучения электронов энергии 3,6 и 4,7 Гэв на кристалле алмаза.

Качество эксперимента во многом зависело от формирования фотонного пучка в кольце и условий вывода электронного пучка на кристаллическую мишень.

Основными требованиями являлись:

1. Стабильность углового распределения начальных электронов в пределах 0,1 мрад.

2. Стабильность начальной энергии электронов с точностью не хуже 1%.

3. Равномерное заполнение электронов в "бунчах" и их равномерный вывод внутри псылки с длительностью 2 - 3 мсек.

Выполнение этих условий обеспечивало стабильную форму спектра КТИ, постоянное отношение  $(k \frac{dn}{dk})_{\text{мик}} / (k \frac{dn}{dk})_{\text{ам}}$  стабильное положение  $(k \frac{dn}{dk})_{\text{мик}}$  в течение длительного време-

ни, равенство  $(k \frac{dn}{dk})_{\text{мик}}$  при двух взаимно перпендикулярных поляризациях.

Максимальная допустимая интенсивность  $\gamma$ -пучка, при которой загрузка каждого счетчика не приводила к потерям счета, а случайные совпадения не превышали 5 - 10%, соответствовала  $\sim 10^8$  экв. фот./сек.

С целью проверки правильности отбора интервала  $E_\gamma \pm \Delta E_\gamma$  начальной энергии фотонов экспериментальной установкой исследовался выход совпадений ( $P_{\pi^0}$ ) в зависимости от угла вылета электронов в кристаллическую мишень в ориентации "эффекта точки". Фиксировался угол, при котором выход ( $P_{\pi^0}$ ) является максимальным, измерялся спектр фотонов парным спектрометром. Во всех измерениях пиковая энергия фотонов, измеренная парным спектрометром с точностью 20-30 Мэв совпадала с расчетной энергией  $E_\gamma$  для заданной кинематики двухчастичной реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^+ p$ .

Определив необходимую ориентацию кристалла и измерив форму спектра КТИ для вертикального и горизонтального направления вектора поляризации фотонов, проводился набор статистики по измерению выхода реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^+ p$ . Наряду с основными измерениями производились измерения с нарушенной кинематикой и с пустой мишенью. В процессе измерений форма спектра и положение интерференционного пика поляризованных фотонов периодически контролировалась парным спектрометром.

Съем информации, накопление данных и их обработка были полностью автоматизированы. После каждого цикла измерений физическая информация поступала на комплекс ЭВМ, РДР - 9 и М - 222, записывалась и хранилась на магнитных лентах ЭВМ РДР-9 и одновременно передавалась в оперативную память ЭВМ-М-222 для предварительной обработки. На АЦПУ М-222 выводилась обработка предварительной информации: например, эффективность проволочных искровых камер годоскопических счетчиков и другая информация, не-

обходимая для оперативного контроля стабильности результатов измерений. После обработки физической информации результаты измерений выводились на АЦПУ в виде гистограмм для различных начальных энергий  $E_\gamma$  и углов  $\theta_{\pi^*}$ , откуда и вычислялась величина асимметрии  $\Sigma$ . Через телетайп осуществлялось обращение к ЭВМ с целью ввода констант, вызова программ предварительной обработки данных и т.д.

Зависимость дифференциального сечения реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$  от поляризации фотонов характеризуется величиной асимметрии

$$\Sigma = \frac{\sigma_{\perp} - \sigma_{\parallel}}{\sigma_{\perp} + \sigma_{\parallel}} = \frac{1}{\bar{P}_\gamma} \frac{C_{\perp} - C_{\parallel}}{C_{\perp} + C_{\parallel}}$$

где  $\sigma_{\perp}(C_{\perp})$ ,  $\sigma_{\parallel}(C_{\parallel})$  - сечения и выходы рождения пионов фотонами с вектором поляризации перпендикулярным (параллельным) плоскости реакции,  $\bar{P}_\gamma$  - эффективная поляризация фотонного пучка усредненная по области  $\Delta E_\gamma$ , "охватываемой" экспериментальной установкой. В экспериментально определяемые величины  $C_{\perp}$  и  $C_{\parallel}$  вводились поправки, связанные с вкладом фоновых процессов и пустой мишенью.

Приводятся впервые измеренные нами величины асимметрии фоторождения  $\pi^0$ -мезонов для углов  $\theta_{\pi^*} = 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 110^\circ, 130^\circ$  для  $E_\gamma = 0,65 + 1,65$  [25-30, 31]. Также приводится результат контрольного эксперимента, выполненного при  $E_\gamma = 1,5$  Гэв для сравнения с ранее выполненными измерениями.

Ошибки в величине асимметрии включают статистическую ошибку, а также ошибку в определении степени эффективной поляризации фотонов  $\bar{P}_\gamma$ , составляющую  $\sim 10\%$ .

Располагая экспериментально измеренными величинами  $C_{\perp}$  и  $C_{\parallel}$  и эффективностью экспериментальных установок, на которых проводились измерения асимметрии, можно определить величину дифференциального сечения реакции фоторождения  $\pi^0$ -мезонов неполяризованными фотонами  $d\sigma/d\Omega$ , как функцию от энергии  $E_\gamma$  - тормозных  $\gamma$ -квантов и угла рождения пиона  $\theta_{\pi^*}$  в СЦИ. Надо отметить, что полученные нами результаты по дифференциальным сечениям не претендуют на высокую точность по сравнению с измеренными ранее данными и позволяют лишь удостовериться в правильности отбора двухчастичной реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ .

При вычислении асимметрии число измеренных совпадений протона отдачи и  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$ -мезона с вычетом случайных совпадений исправлялось на вклады от а) фоновых процессов, б) пустой мишени (составляла 3,5% от выхода с полной мишенью), которые определялись экспериментально.

Статистическая ошибка в определении  $C_{\perp}$  и  $C_{\parallel}$  достигает 5 - 7%. Ошибка в определении эффективной поляризации  $\bar{P}_\gamma$  была связана с неточностями в определении экспериментальных параметров фотонного пучка, таких как расходимость первичных электронов, угол многократного рассеяния в монокристалле, коллимация фотонного пучка, которые находились при подгонке к экспериментально измеренным спектрам с определенной статистической ошибкой теоретического спектра интенсивности фотонов.

Приводится сравнение экспериментальных результатов по измерению асимметрии сечения реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$  поляризованными фотонами с энергией 0,8 - 1,65 Гэв и углов вылета  $\pi^0$ -мезонов в СЦИ  $40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 110^\circ, 130^\circ$  с теоретическими предсказаниями различных феноменологических анализов.

На рис. 6 приведены экспериментальные результаты энергетической зависимости асимметрии для углов  $\theta_{\pi^*} = 40^\circ, 50^\circ$  и  $60^\circ$

вместе с теоретическими предсказаниями. Для углов  $\Theta_{\gamma\pi}^* = 40^\circ$  наблюдается максимум асимметрии в третьей резонансной области при энергиях 1,0 - 1,05 ГэВ, предсказанный до выполнения этих измерений анализом Феллера и других и хорошо согласующийся с предсказаниями Азнаурян и других.

В случае угла  $\Theta_{\gamma\pi}^* = 60^\circ$  измерения выполнены в более широком интервале энергий 0,8 - 1,3 ГэВ. Они подтверждают предсказания Феллера и других о значительной величине асимметрии при  $E_\gamma = 1,0 - 1,1$  ГэВ для углов  $\Theta_{\gamma\pi}^* = 30^\circ - 60^\circ$  и хорошо согласуются с предсказаниями Азнаурян и др.

Приведена энергетическая зависимость асимметрии при  $\Theta_{\gamma\pi}^* = 110^\circ$  в интервале энергий 0,9 - 1,65 ГэВ, рис. 7а. В данном случае энергетическое поведение асимметрии характеризуется ярко выраженной резонансной структурой с резким убыванием до отрицательных значений в третьей резонансной области до  $E_\gamma = 1,05$  ГэВ и дальнейшим ростом в области четвертого резонанса. В области энергий 1,2 ГэВ наиболее близко экспериментальные результаты воспроизводят кривые анализов Феллера и других, Азнаурян и других. При более высоких энергиях экспериментальные данные систематически превышают предсказания анализа Меткалфа и Волкера, хотя при этом наблюдается согласие с ходом кривой.

Приведена энергетическая зависимость асимметрии при угле  $\Theta_{\gamma\pi}^* = 130^\circ$  рис. 7б. Величина асимметрии при этом угле также имеет ярко выраженную резонансную структуру с отрицательными значениями в третьей резонансной области и положительными - в четвертой.

Полученные нами результаты, так же как и результаты измерений, выполненных в Кембридже при  $\Theta_{\gamma\pi}^* = 90^\circ$  в районе III резонанса, обнаруживают структуру, для объяснения которой требуется наличие сильной интерференции между амплитудами  $F_{15}$  и другими

мультипольными амплитудами.

Для этой структуры характерна знакопеременная угловая зависимость  $\Sigma$  с положительными значениями при углах, меньших  $90^\circ$ , и отрицательными значениями при больших углах. Такое поведение  $\Sigma$  в III резонансной области требует для своего объяснения больших положительных мультиполей  $A_{0+}$  и  $A_{2-}$ . Если насыщать эти мультиполи вкладами одних только резонансов, то это требование для  $A_{0+}$  приводит к существенному смешиванию между резонансами  $S_{II}(1535)$  и  $S_{II}(1700)$ , а для  $A_{2-}$  хорошо согласуется с предсказаниями кварковой модели для резонансов  $\chi_{13}(1700)$  и  $\rho_{33}(1670)$ .

Приведены угловые зависимости асимметрии для трех значений энергии фотонов  $E_\gamma = 0,9, 1,05, 1,2$  ГэВ вместе с экспериментальными данными других лабораторий и предсказаниями теоретических анализов. В случае  $E_\gamma = 0,9$  ГэВ экспериментальные значения асимметрии в области малых углов  $40^\circ + 60^\circ$  лежат несколько выше критич. теоретических предсказаний.

Значения  $\Sigma$  для энергии фотонов  $E_\gamma = 1,05$  ГэВ при углах  $\Theta_{\gamma\pi}^* = 40^\circ$  и  $60^\circ$  согласуются с анализами Феллера и других и Азнаурян и других. Экспериментальные результаты для  $\Theta_{\gamma\pi}^* = 50^\circ$  находятся ниже этих предсказаний.

Во всех областях углов при  $E_\gamma = 1,2$  ГэВ наши результаты подтверждают предсказания Феллера и других и Азнаурян и других.

Сравнение экспериментальных результатов с предсказаниями Меткалфа и Волкера указывает на сильное расхождение между ними при энергии фотонов выше 1,05 ГэВ. Предсказания этого анализа не согласуются с экспериментально полученным пиком в величине асимметрии в районе четвертого резонанса ( $E_\gamma = 1,5$  ГэВ).

Приведены угловые распределения асимметрии сечения процесса  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$  при энергиях 1,35 ГэВ и 1,65 ГэВ. Вместе с нашими данными здесь представлены измерения, выполненные в Дарсбери в

интервале углов в СЦИ  $30^\circ + 90^\circ$ . Наши результаты при  $E_\gamma = 1,35$  Гэв вместе с данными работы Дарсбери качественно не противоречат общему ходу кривой анализа КМОР (Книс, Мурхауз, Оберлак, Розенфельд), основанного на дисперсионных соотношениях, хотя обнаруживает сильное расхождение с предсказаниями Меткалфа-Волкера.

При  $E_\gamma = 1,65$  Гэв как КМОР, так и Меткалф и Волкер удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами.

Приведены экспериментальные результаты углового распределения асимметрии сечения  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$  для  $E_\gamma = 1,5$  Гэв вместе с предсказаниями кварковой модели. Результаты наших измерений, а также экспериментальные результаты Алспектора и других (США) не согласуются с этим предсказанием. Полученное разногласие может быть объяснено, если резонанс  $F_{37}(1950)$  возбуждается (вопреки предсказанию кварковой модели) не чисто магнитным возбуждением  $M_{3+}$ , а есть вклад  $E_{3+}$  либо при энергии  $E_\gamma = 1,5$  Гэв возбуждается не только резонанс  $F_{37}$ , а имеются также вклады других резонансов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами настоящей работы, значительная часть которых выполнена впервые, являются:

1. Создан квазимонохроматический линейно-поляризованный пучок фотонов на Ереванском синхротроне. Он по своим основным характеристикам — когерентному эффекту, монохроматичности и степени поляризации — значительно превосходит аналогичные пучки, созданные на родственных ускорителях в США и в Западной Европе.

2. Разработана и создана экспериментальная установка с пре-

цезионными устройствами ориентировки кристаллических мишеней на внутреннем пучке синхротрона для исследования когерентного тормозного излучения и получения пучка линейно-поляризованных фотонов.

3. Впервые наблюден эффект осевой коллимации для тонких алмазных радиаторов, приводящий к сужению фотонных линий и к значительному подавлению некогерентной части КТИ.

4. Подробно исследованы ориентационные зависимости интегральной интенсивности и интенсивности определенной энергии  $\gamma$ -квантов КТИ. Исследованы энергетические спектры КТИ при различных ориентациях кристаллических радиаторов.

5. Исследовано влияние экспериментальных условий на ориентационные зависимости интегрального излучения, интенсивности определенной энергии  $\gamma$ -квантов и энергетические спектры КТИ.

6. Созданы пучки  $\gamma$ -квантов высоких энергий с векторами поляризации, направленными в двух взаимно перпендикулярных направлениях, имеющих одинаковую степень поляризации, форму спектра и интенсивность.

7. Созданы универсальные программы на ЭВМ БЭСМ-6, позволяющие с учетом всех экспериментальных факторов подогнать теоретические вычисления спектров к экспериментальным результатам. На основе параметров подгонки вычислена степень поляризации  $\gamma$ -квантов в зависимости от их энергии.

8. Впервые замечено аномальное уменьшение интенсивности фотонов предельной энергии спектра тормозного излучения и интегральной интенсивности при малых углах влета электронов в кристаллы.

9. Впервые в СССР осуществлено измерение поляризации фотонов энергии 1,5 и 4,4 Гэв.

10. Впервые для ускорителей с энергией 5 Гэв получены поляризованные фотоны предельной энергии тормозного излучения 4,4 Гэв методом их селективного поглощения в монокристалле корунда.

11. Впервые наблюден и надежно идентифицирован новый вид излучения при каналировании позитронов с энергией 4, 6, 10, 14 Гэв в кристалле алмаза. Эксперимент выполнен на уникальном по своим угловым и энергетическим характеристикам пучке позитронов SLAC, что позволило отделить излучение при каналировании от сопутствующего КТИ.

12. Разработана и создана экспериментальная установка для исследования асимметрии сечения в фоторождении  $\pi^0$ -мезонов поляризованными фотонами в области энергий III и IV резонансов, включающая в себя пробный спектрометр на проволочных искровых камерах и годоскопический спектрометр полного поглощения на основе модулей кристалла NaI, работающая в линию с ЭВМ, РДР-8, РДР-9 и М-222.

13. Получены экспериментальные результаты по асимметрии сечения в реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$  поляризованными фотонами в области углов в СЦ  $\theta_{\pi^0}^* = 40^\circ + 130^\circ$  для  $E_\gamma = (0,8 - 1,65)$  Гэв. Экспериментальные данные сравнивались с результатами различных теоретических анализов. В области  $\theta_{\pi^0}^* = 30^\circ - 60^\circ$  при  $E_\gamma = (0,9 + 1,2)$  Гэв предсказанная в теоретических анализах высокая величина асимметрии подтвердилась в наших измерениях. При углах  $\theta_{\pi^0}^* = 110^\circ$  и  $130^\circ$  наблюдается ярко выраженная резонансная структура асимметрии с резким убыванием до отрицательных значений в области III резонанса и с дальнейшим ростом в области IV резонанса, требующая для своего объяснения сильную интерференцию между амплитудами  $F_{15}$  и другими мультипольными амплитудами.

Измеренное угловое поведение асимметрии сечения в области

III резонанса требует для своего объяснения существенного смешивания между резонансами  $S_{11}(1535)$  и  $S_{11}(1700)$  при этом константа радиационных распадов  $\chi_{13}(1700)$  и  $\chi_{31}(1670)$  хорошо согласуется с предсказаниями кварковой модели.

14. Измерения асимметрии при  $E_\gamma = 1,5$  Гэв в области углов  $90^\circ, 110^\circ, 130^\circ$  не согласуются с предсказаниями кварковой модели, относительно чисто магнитного возбуждения  $M_{3^+}$  резонанса  $F_{37}(1950)$ , а свидетельствует о наличии вклада  $E_{3^+}$  резонанса  $F_{37}(1950)$  и вкладов других резонансов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Угловое распределение тормозного излучения электронов высоких энергий на кристалле алмаза./Авакян Р.О., Армагян А.А., Дарбинян С.М., Сехосян С.В.-ИАН Арм ССР, 1967, 45, I, с. 3-8.
2. Квазимонохроматический поляризованный пучок фотонов Бреванского ускорителя.-Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий./Авакян Р.О., Армагян А.А., Арутюнян Л.Г. и др.- (Дубна, 1971) Атомиздат, 1972, 740 с.
3. Исследование когерентного тормозного излучения на кристаллах./Авакян Р.О.-Изв. Арм. ССР, Физика, 1973, 3, с. 462-463.
4. Получение фотонных пучков со взаимно перпендикулярными векторами поляризации одинаковой интенсивности и с одинаковой степенью поляризации./Авакян Р.О., Армагян А.А., Арутюнян Л.Г. и др.-Изв. АН Арм. ССР, Физика, 1975, 10, с. 61-63.
5. О возможности применения кристалла корунда как поляризатора фотонов высоких энергий./Авакян Р.О., Армагян А.А., Дарбинян С.М.-Изв. АН Арм. ССР, Физика, 1972, 7, 4, с. 298-300.
6. Когерентное образование электронно-позитронных пар и тормозное излучение на кристалле корунда.-Изв. АН Арм. ССР, Физика, 1972, 5, с. 311-319./Авакян Р.О., Армагян А.А., Дарбинян С.М.

7. Получение и исследование поляризованного фотонного пучка предельной энергии Ереванского ускорителя. /Авакян Р.О., Армагян А.А., Арутюнян Л.Г. и др. - Изв.АН Арм.ССР, Физика, 1975, 10, с. 423-426.
8. Измерение поляризации фотонного пучка Ереванского электронного ускорителя. /Авакян Р.О., Армагян А.А., Арутюнян Л.Г. и др. - Изв.АН Арм.ССР, Физика, 1974, 9, 6, с. 252-255.
9. Исследование когерентного тормозного излучения на кристалле алмаза. /Авакян Р.О., Армагян А.А., Арутюнян Л.Г., Вартанян Г.А. и др. - Изв.АН Арм.ССР, Физика, 1971, в.6, с. 138-141.
10. Тормозное излучение протонов и  $\mu$ -мезонов высоких энергий на кристалле алмаза. - Изв.АН Арм.ССР, Физика, 1969, 4, с. 236-238./Авакян Р.О., Армагян А.А.
- II. Enhancement in Electron Beam Purity and Intensity at Fermilab with Use of Crystalline Tungsten Targets/ Akopov N., Avakian R., Darbinian S. et al.-HEPL Report, 1977, 795, High Energy Phys. Lab. Stan. Univ.-Stanford, Calif, Calif. 94305
12. Поляризованные фотоны от монокристалла кремния на 31 Гэв электронном пучке Серпуховского протонного ускорителя. /Майшев В.А., Фролов А.М., Авакян Р.О. и др. - ЖЭТФ, 1979, 77, в.5, с. 1708-1719.
13. Вычисление по методу Монте-Карло энергетического спектра и углового распределения фотонов, прошедших толстый монокристалл кремния. /Авакян Р.О., Армагян А.А., Дарбинян С.М. и др. - Дубна, 1973.-II с. (Препринт/ОИЯИ, PII-7494).
14. Энергетический спектр фотонов после выхода из кристалла корунда. /Авакян Р.О., Армагян А.А., Дарбинян С.М. и др. - Дубна, 1974. - 6 с. (Препринт/ОИЯИ, II-7973).
15. Вычисление поляризации тормозного пучка фотонов. /Авакян Р.О.,

- Акопов Н.З., Безверхая А.П., Дарбинян С.М.-Ереван, 1977. - 8 с. (Препринт/ВФИ, 265(58)-77).
16. Исследование ориентационной зависимости выхода тормозных фотонов предельной энергии в кристаллах. /Авакян Р.О., Армагян А.А., Арутюнян Л.Г. и др. - Письма в ЖЭТФ, 1975, 21, в.7, с. 451-453.
17. Аномально малый выход жестких фотонов тормозного излучения сверхбыстрых электронов в кристаллах. /Авакян Р.О., Армагян А.А., Арутюнян Л.Г. и др. - Изв.АН Арм.ССР, Физика, 1975, 10, с. 343-349.
18. Экспериментальное исследование радиации релятивистских канализированных позитронов. /Мирошниченко И.И., Мерей Д.Д., Авакян Р.О., Фигут Г.Х. - Письма в ЖЭТФ, 1979, т.29, в.12, с. 786-790.
19. Двухплечевая установка для исследования фоторождения  $\mathcal{J}^c$  и  $\eta$  мезонов поляризованными фотонами. /Авакян Р.О., Авакян Э.О., Аветисян А.О. и др. - Ереван, 1976. - 23 с. (Препринт/ВФИ 202(48)).
20. Экспериментальная установка, работающая на линии с ЭВМ, по измерению асимметрии и поляризации протонов отдачи в экспериментах по фоторождению  $\mathcal{J}^c$ -мезонов поляризованными фотонами. /Авакян Р.О., Авакян Э.О., Аветисян А.О. и др. - Материалы семинара по обработке физической информации. Агван, 1975, Ереван-1976, с. 107-114.
21. Расчет по методу Монте-Карло эксперимента по измерению асимметрии фоторождения  $\mathcal{J}^c$ -мезона поляризованными  $\gamma$ -квантами. /Авакян Р.О., Акопов Н.З., Петросян Ж.В., и др. - Ереван, 1976. - 21 с. (Препринт/ВФИ-171(17)).

22. Энергетическое разрешение сцинтилляционного счетчика на основе большого кристалла  $\text{NaI(Tl)}$ . /Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Бахшецян Р.А. и др. - ПГЭ, 1976, №1, с. 46-47.
23. Исследование амплитудных и временных характеристик спектрометра полного поглощения на основе кристалла  $\text{NaI(Tl)}$ . /Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Бахшецян Р.А. и др. - Ереван, 1977.- 15 с. (Препринт/ВФИ-223(15)).
24. Аппаратура для регистрации электронов и гамма-квантов (АРЭГа-К) - на основе кристаллов  $\text{NaI(Tl)}$ . /Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Вартапетян Г.А. и др. - Изв.АН Арм.ССР, 1979, т.14, в.1, с. 50-53.
25.  $\pi^0$  and  $\eta^+$  Production with Polarized Photons in the Energy Range 1-2 GeV/Abrahamian L.O., Aganians A.O. et al.-Phys. Rev.Lett. 1974, 48B, p.463-474
26.  $\pi^0$  and  $\eta^+$  Production with Polarized Photons in the Resonance Region/ Abrahamian L.O., Avakian R.O., Aganians A.O. et al.-Contributed paper to Stanford Conference (1975), Erewan, 1975-. 16p. (Preprint EFI-136-(75)).
27. Асимметрия сечения реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$  в интервале энергии 0,9 - 1,65 Гэв при  $\Theta_{\pi^0}^{\text{с.ц.}} = 110^\circ$ . /Абрамян Л.О., Авакян Р.О., Акопов Н.З. и др. - Письма в ЖЭТФ, 1976, т.23, в.7, с. 415-419.
28. Hadron Structure as Known from Electromagnetic and Strong Interactions, Proceedings of the Hadron Structure 77 Conference High Tatras 1977/ Abrahamian L.O., Adamian F.V.; Aganians A.O., Akopov A.Z., Avakian R.O. et al.-Publishing House of the Slovak Acad.of Science Bratis. 1979,p.123-134.
29. Измерение асимметрии в фоторождении  $\pi^0$ -мезона в резонанс-

- ной области. /Авакян Р.О., Авакян Э.О., Аветисян А.Э. и др. - Ядерная физика, 1977, т.26, в.5, с. 1014-1017.
30. Измерение асимметрии сечения в фоторождении  $\pi^0$ -мезона для углов пиона в СЦИ  $40^\circ$  и  $50^\circ$  в резонансной области. /Авакян Р.О., Авакян Э.О., Аветисян А.Э. и др. - Ядерная физика, 1979, т.29, в. 5, с. 1212-1215.

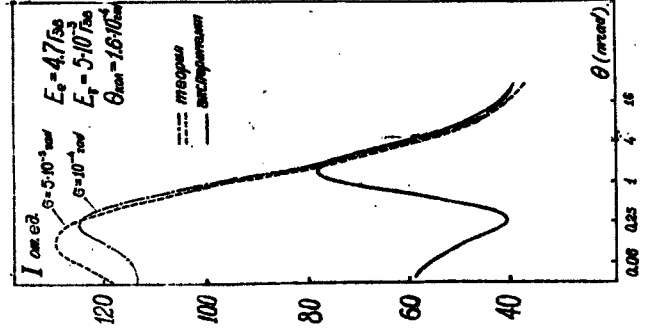


Рис. 3. Зависимость интегрированной интенсивности от угла вылета в кристалл алмаза.

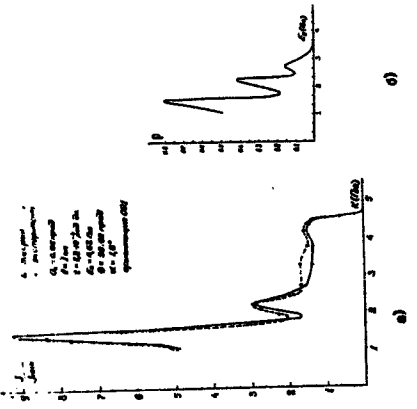


Рис. 2. Измеренный спектр КТИ вместе с теоретически вычисленным и подогнанным к экспериментальным данным спектром (а) и поляризацией (б).

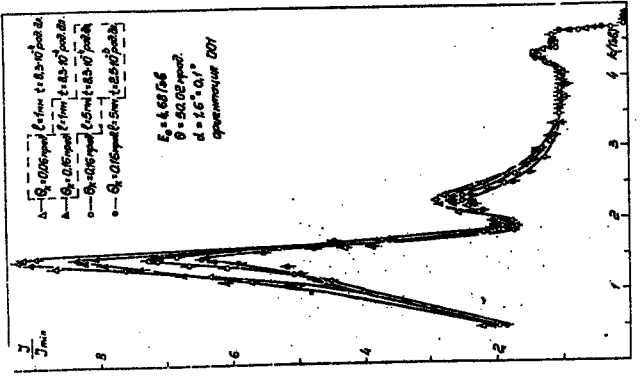


Рис. 1. Влияние экспериментальных условий на форму спектров КТИ.

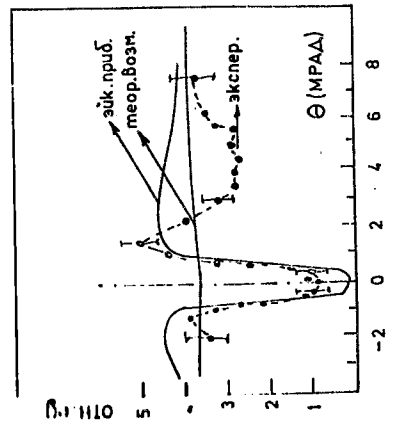


Рис. 4. Ориентационная зависимость  $\gamma$ -квантов энергии 4,38 Гэв в случае "эффекта ряда" для ориентации кристалла (100).

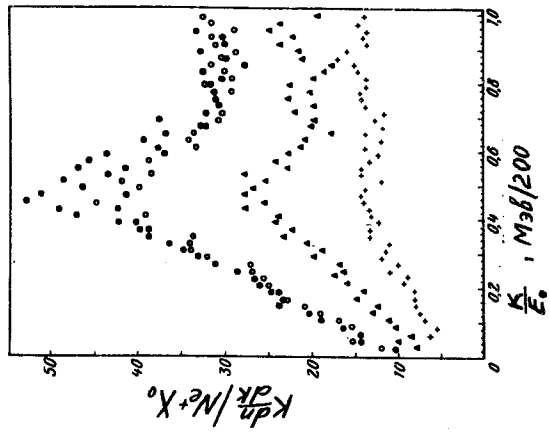


Рис. 5. Спектры излучения при планарном канальровании позитронов с энергией 10 Гэв в зависимости от угла  $\theta$  между плоскостью кристалла и импульсом позитрона:  $\bullet - \theta = 0$  рад;  $\square - \theta = 4,6 \cdot 10^{-5}$  рад;  $\Delta - \theta = 9,2 \cdot 10^{-5}$  рад;  $+ - \theta = 11,5 \cdot 10^{-5}$  рад.

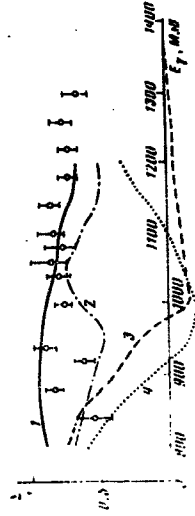
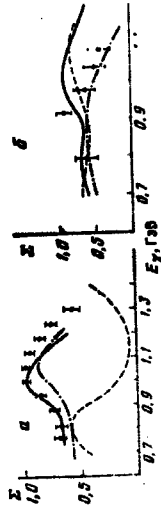
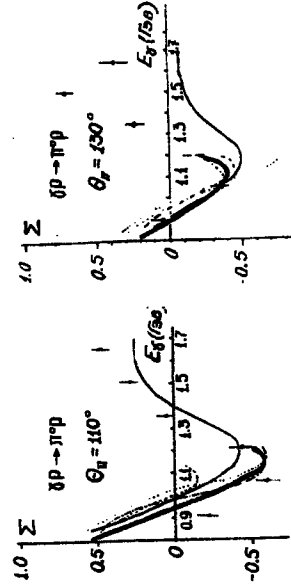
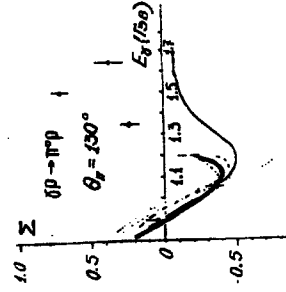


Рис. 6. Энергетическая зависимость асимметрии  $\Sigma$ : а) для  $\theta^* = 40^\circ$ ; б) для  $\theta^* = 50^\circ$ ; в) для  $\theta^* = 60^\circ$  в СИ.

Теоретические кривые взяты из работ: штриховая - Меткалф и Волкер, штрихпунктирная - Феллер и др., сплошная - Азнаурян и др., точечки - МОР.



(а)



(б)

Рис. 7. Энергетическая зависимость асимметрии сечения в реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^+ p$  для угла вылета мезона в СИ  $\theta^* = 110^\circ$  (а) и  $\theta^* = 130^\circ$  (б). Теоретические кривые: сплошная - Азнаурян и др., штриховая (тонкая) - Меткалф и Волкер, точки и пунктирная - Мурхауз и Ранкин, штрихпунктирная - Феллер и др.

Заказ 875

ВЭ-03420

Тираж 170

Подписано к печати 16.12.80г.

Формат издания 60 x 84/16

0,7 уч. изд. л. Ц. 4 к.

Издано Стригим научно-технической информации  
Ереванского физического института, Ереван-36, пер. Маркарян 2