

5/Մ-06

Ա.Ի. Ալիխանյանի անվան ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Խաչատրյան Վիտալի Գրիշայի

ԱՆՅՈՒՄԱՅԻՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹԱՆ ՕՂԱԿԱՅԻՆ ՂԵՏԵԿՏՈՐՆԵՐ ԵՎ
ԼԻՑԶԱՅԻՆ ԱՍԻՄԵՏՐԻԱՆ ԷԼԵԿՏՐՈՄԱԳՆԻՏԱԿԱՆ 1 – 1000 ԳԷՎ
ԷՆԵՐԳԻԱՅՈՎ ՀԵՂԵՂՆԵՐԻ ՄԵՋ

Ա.04.16 “Միջուկի, տարրական մասնիկների և տիեզերական
ճառագայթների ֆիզիկա” մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան -2006

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.И. Алиханяна
Хачатрян Виталий Гришаевич

КОЛЬЦЕВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЗАРЯДОВАЯ
АСИММЕТРИЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛИВНЯХ 1-1000 ГэВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.16
— “Физика ядра, элементарных частиц и космических лучей”.

Ереван-2006

Ереванский
ИИ
научн
б.

Ատենախոսության թեման հաստատված է Ա. Ալիխանյանի անվան
Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում
Գիտական ղեկավար - ֆ. մ. գ. դ. Կ. Ա. Իսպիրյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ ֆ. մ. գ. դ. Է. Ղ. Գազազյան
ֆ. մ. գ. դ. Մ. Ի. Իվանյան

Առաջատար կազմակերպություն Երևանի Պետական Համալսարանի

Պաշտպանությունը կայանալու է հունիսի 13-ին 2006 թ. ժամը 14:00 -ին
ԲՈՀ-ի 024 մասնագիտական խորհրդի նիստում, որը գործում է Երևանի
ֆիզիկայի ինստիտուտում (375036, Երևան, Ալիխանյան Եղբայրների փող.
2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Ա. Ալիխանյանի անվան Երևանի
ֆիզիկայի ինստիտուտի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է մայիսի 5-ին 2006 թ.

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար ֆ. մ. գ. թ. Ա. Ի. Սարգսյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском физическом институте
им. А.И. Алиханяна .

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук
К. А. ИСПИРЯН

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук
Э. Д. Газазян
Доктор физико-математических наук
М. И. Иванян

Ведущая организация: Физический факультет Ереванского
Государственного Университета

Защита состоится 13 июня 2006 г. в 14:00 ч. на заседании
специализированного совета ВАК 024, действующего при Ереванском
физическом институте, (375036, ул. Братьев Алиханян 2, г. Ереван)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского
физического института им. А.И. Алиханяна.

Автореферат разослан 5 мая 2006 г.

Ученый секретарь спец. совета 024, к. ф-м. н. Ա. Ի. Սարգսյան А. Т. Маргарян

Актуальность темы

Детекторы переходного излучения (ДПИ) уже много лет широко
используются в экспериментальных установках физики элементарных частиц
для идентификации заряженных релятивистских частиц с Лоренц факторами
 $\gamma \geq 1000$ [1-4]. Практические ДПИ обеспечивают разделение пионов от
электронов в области импульсов 0.5 ГэВ/с - 100 ГэВ/с. В последние годы
ДПИ применяются для измерения энергии ядер с большими значениями
зарядового числа Z в первичных космических лучах. Уже работают и
накопители релятивистских ионов (например RHIC).

Принимая в расчет, что рентгеновские фотоны в области энергий от 2
до 20 кэВ излучаются с вероятностью примерно 0.2%, используют
радиаторы, состоящие из нескольких сотен интерфейсов, например, стопки
из сотен пленок из материалов с малыми зарядовыми числами Z
(полипропилен, литий и т. д.). Классический ДПИ состоит из нескольких
модулей, каждый из которых, в свою очередь, состоит из радиатора и
детектора рентгеновских фотонов. В качестве последнего, как правило,
используется многопроволочная камера, наполненная газовой смесью,
содержащей ксенон для эффективного поглощения рентгеновских фотонов.

Фотонный детектор обычно измеряет, наряду с переходным
излучением, также и ионизационные потери заряженной частицы,
поскольку переходное излучение испускается под очень малыми углами по
отношению к направлению движения частицы. Для дискриминации между
заряженными частицами могут быть использованы заряды, измеренные
всеми модулями детектора или количество энергетических кластеров,
превышающее некий порог (обычно в районе от 5 до 7 кэВ) или сложные
методы анализа формы импульса как функции от времени. Для расширения
возможностей ДПИ, в частности, для измерения энергий ионов, необходимо
создать ДПИ, работающие на основе новых принципов.

С другой стороны проводятся работы по применению радиоизлучения
широких атмосферных ливней для измерения энергии частиц первичного
космического излучения [5]. Однако, поскольку нет прямых измерений

Ереванский Физический
ИНСТИТУТ
научно-техническая
библиотека

зарядовой асимметрии в электромагнитных ливнях, то представляет большой интерес измерить ее на ускорителях заряженных частиц.

Выносятся на защиту:

1. Проведено численное моделирование процесса ПИ заряженной частицы в регулярной стопке пленок. Создан алгоритм и написана компьютерная программа на объектно-ориентированном языке программирования C++. Рассмотрено как оптическое переходное излучение, так и рентгеновское переходное излучение под малыми углами относительно направления движения излучающей частицы. ПИ в рентгеновской области энергий исследовано более детально, так как основная часть энергии излучения сосредоточена именно в рентгеновской области.

2. Предложена идея создания кольцевого детектора переходного излучения. Хотя ПИ заряженной частицы, в отличие от черенковского излучения, испускается не под строго определенным углом, а имеет угловое распределение с главным максимумом в области углов $\sim 1/\gamma$, тем не менее, используя фотонные детекторы с высоким пространственным разрешением для регистрации широких колец и, исходя из их параметров, а также принимая в расчет дополнительную экспериментальную информацию, можно произвести идентификацию излучающей частицы.

3. Рассмотрены методы обработки экспериментальной информации, полученной от КДПИ. Можно использовать традиционные методы подсчета числа испускаемых фотонов, числа энергетических кластеров и учет выделенной энергии. Наряду с этими проверенными методами обработки информации от детекторов ПИ, в КДПИ предлагается использовать параметры углового распределения фотонов ПИ. Разработан соответствующий алгоритм, при помощи численного эксперимента продемонстрирована его эффективность.

4. Методом Монте-Карло-моделирования исследована зарядовая асимметрия в электромагнитных ливнях, вызываемых релятивистскими

частицами с энергиями до области 1 ТэВ. Исследована зависимость параметров зарядовой асимметрии от энергии начальной частицы. Предлагается метод измерения зарядовой асимметрии.

Цель и задачи

Целью работы является обоснование идеи создания нового типа детекторов переходного излучения, КДПИ. Исследуется также зарядовая асимметрия в высокоэнергетических электромагнитных ливнях и предлагается измерять величину зарядовой асимметрии, разделяя электроны и позитроны в магнитном поле.

С помощью численного эксперимента обосновывается предлагаемая конструкция КДПИ и иллюстрируется алгоритм обработки экспериментальной информации, полученной от КДПИ. Показано, что в дополнение к традиционным методам получения экспериментальной информации от детекторов переходного излучения, КДПИ позволяет получать сведения о форме углового распределения ПИ, что дает возможность определять Лоренц фактор излучающей частицы (релятивистского иона с большим зарядом Z) и применять эту информацию для измерения энергии иона. Монте-Карло моделирование процесса образования электромагнитного ливня позволило определить параметры зарядовой асимметрии.

Научная новизна результатов

Результаты численного моделирования показывают возможность создания нового типа детекторов элементарных частиц - кольцевых детекторов переходного излучения, которые применимы для идентификации релятивистских заряженных элементарных частиц. В КДПИ, как в RICH детекторах, предлагается использовать угловое распределение излучаемых фотонов. КДПИ перспективны при идентификации высокоэнергетических элементарных частиц в области Лоренц факторов $\gamma \geq 10^3$.

С помощью численного моделирования исследованы параметры движущегося избыточного заряда в электромагнитных ливнях в широкой

области энергий ливня от 1 до 256 Гев и предлагается метод прямой регистрации зарядовой асимметрии.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и списка цитируемой литературы.

Глава 1 посвящена вопросу моделирования ПИ заряженной частицы в регулярной стопке пленок. Расчеты и моделирование основываются на классической теории ПИ. Чтобы найти поля излучения и выражения для интенсивности переходного излучения при переходе заряженной частицы границы двух сред, необходимо решить уравнения Максвелла и сшивать их решения на границе двух сред.

Имея под рукой полученные этим методом формулы можно выбрать оптимальный радиатор с целью получения максимального выхода фотонов излучения в интересующем нас энергетическом диапазоне от 2 до 30 кэВ. С целью уменьшения коэффициента поглощения для пластин выбирают материалы с низким атомным номером Z , обычно литий, гидрид лития, полиэтилен, полипропилен, майлар, алюминий. Стопка пластин помещается в вакууме или в воздушной среде. Для получения максимальной интенсивности излучения на границе двух сред в качестве второй среды лучше подходит вакуум или газ с низким Z , так как с ростом Z выход излучения уменьшается (так называемый "эффект насыщения"). Ширины пластинок l_1 и промежутков l_2 должны быть больше длин формирования в соответствующих материалах ($l_1 \geq Z_1, l_2 \geq Z_2$). Величины l_1 и l_2 выбирают таким образом, чтобы получить конструктивную интерференцию между излучениями, идущими из передней и задней границ пластины и между излучениями из разных пластин.

В угловом и спектральном распределении излучения на выходе регулярного радиатора четко наблюдается интерференционная структура и имеется корреляция между полярным углом и энергией испускаемых фотонов. С целью оптимизации выполнены численные расчеты для трех типов радиаторов: литий-вакуум, полиэтилен-воздух и майлар-воздух.

Глава 2 посвящена вопросу идентификации и измерения энергии ионов с использованием углового распределения рентгеновского переходного излучения тяжелых релятивистских ионов. Число фотонов, испускаемых заряженной частицей при переходном излучении пропорционально квадрату заряда. Следовательно, есть возможность одновременной регистрации сотен и тысяч фотонов, идущих от одной частицы — многозарядного релятивистского иона. Такие ионы присутствуют в составе первичного космического излучения, а также могут ускоряться на современных ускорителях заряженных частиц (например на ускорителе LHC в CERN). Современные фотонные детекторы обладают достаточно высоким пространственным разрешением, позволяющим измерять угловое распределение фотонов переходного излучения. Нами предлагается детектор переходного излучения для идентификации тяжелых релятивистских ионов (ТРИ) путем определения релятивистского фактора частицы с помощью измеренного углового распределения переходного излучения. Схематическая конструкция детектора приведена на Рис. 1.

В составе кольцевого детектора переходного излучения в качестве фотонного детектора предлагается использовать альтернативно многопроволочную пропорциональную камеру, наполненную ксеноном или матрицу приборов с зарядовой связью (ПЗС) (так называемую CCD Array) со следующими реальными параметрами: площадь чувствительной поверхности - 5 см x 5 см, размер пиксела - 12 микрон, число пикселов - 800x800, пространственное разрешение - 50 микрон.

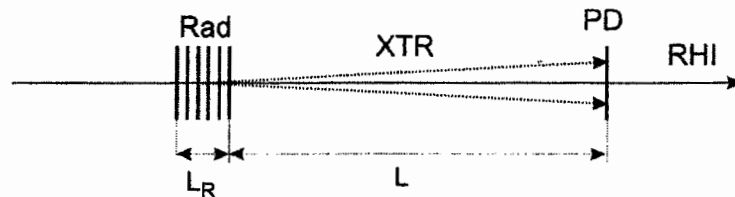


Рис. 1. Схематический вид кольцевого детектора рентгеновского переходного излучения. Полная ширина радиатора, состоящего из нескольких десятков (или сотен) полиэтиленовых пленок толщины порядка 10 микрон, равна примерно 1-5 см. Малый размер радиатора позволяет считать, что фотоны переходного излучения испускаются точечным источником. Фотонный детектор (матрица приборов с зарядовой связью) помещается на расстоянии более 2 м от радиатора. Между радиатором и фотонным детектором целесообразно поместить емкость, наполненную гелием для уменьшения потерь рентгеновского излучения.

Современные ПЗС-детекторы способны отличать отдельные фотоны. ПЗС-детекторы коммерчески доступны, их параметры постоянно улучшаются и они уже нашли применение в физике элементарных частиц. Полученные "измеренные" угловые распределения для фотонов, идущих от двух разных ионов с разными значениями релятивистского фактора γ отличаются друг от друга, во первых, местом главного максимума в распределении, во вторых, общей формой распределения. Следовательно, имея в своем распоряжении экспериментальное угловое распределение фотонов переходного излучения и теоретические формулы, описывающие это распределение, можно определить Лоренц фактор излучающей частицы двумя способами: а) по месту максимума в угловом распределении в зависимости от γ , б) подгоняя угловое распределение фотонов под теоретические формулы, используя γ как свободный подгоночный параметр.

Методы обработки данных КДПИ рассмотрены в Главе 3. По сравнению с традиционными детекторами переходного излучения КДПИ обеспечивают более аккуратные измерения энергии релятивистских ионов, так как они используют как угловые, так и интенсивностные характеристики переходного излучения. Мы смоделировали работу КДПИ состоящего из радиатора, содержащего 1000 полиэтиленовых пленок толщиной 22.5 микрон, разделенных воздушными промежутками по 500 микрон и фотонного детектора, представляющего из себя наполненную ксеноном многопроволочную пропорциональную камеру толщины 2 см с 50-микронным майларовым окном. Проходящие через радиатор ядра Fe^{26} и Pb^{82} испускают рентгеновское переходное излучение, которое регистрируется фотонным детектором в энергетическом интервале от 2 до 30 кэВ.

А) Метод углового распределения. Для фотонов, излучаемых одной заряженной частицей, необходимо построить гистограмму распределения по полярному углу. Полученная гистограмма фитируется с помощью программы MINUIT из пакета программ CERNLIB. Используя аналитические формулы как подгоночные функции и считая релятивистский фактор γ свободным подгоночным параметром, находится Лоренц фактор γ начальной частицы (Рис. 2).

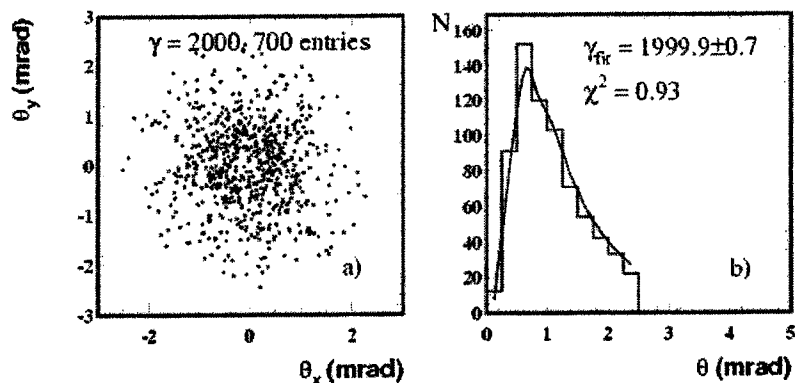


Рис. 2. а) Смоделированный $(\theta_x - \theta_y)$ график распределения детектируемых фотонов переходного излучения и б) гистограмма соответствующего углового распределения: фитированное угловое распределение детектированных фотонов (сплошная кривая), а также фитированное значение Лоренц фактора γ_{fit} тяжелого релятивистского иона Fe^{26} с $\gamma=2000$, проходящего через КДПИ. Энергии фотонов находятся в интервале 2 – 30 кэВ. Радиатором является регулярная стопка идентичных полиэтиленовых пластин. Толщина пластины $l_1=22.5$ микрон, ширина воздушного промежутка $l_2=500$ микрон.

Б) Метод угла максимальной интенсивности переходного излучения. Если $l_1 \gg Z_1$ и $l_2 \gg Z_2$ (это соотношение справедливо для нашего радиатора), где l_1 и l_2 - толщины пленок и промежутка между ними а Z_1 и Z_2 - длины зон формирования в соответствующих средах, то угловое распределение ПИ, возникающего в таком радиаторе, имеет резко выделенный максимум при $\theta_{max} = \sqrt{3}/\gamma$. На Рис. 3 показана

зависимость θ_{max} от Лоренц фактора излучающей частицы (энергии фотонов находятся в интервале от 2 до 30 кэВ). По значению угла максимальной интенсивности можно найти значение γ начальной частицы.

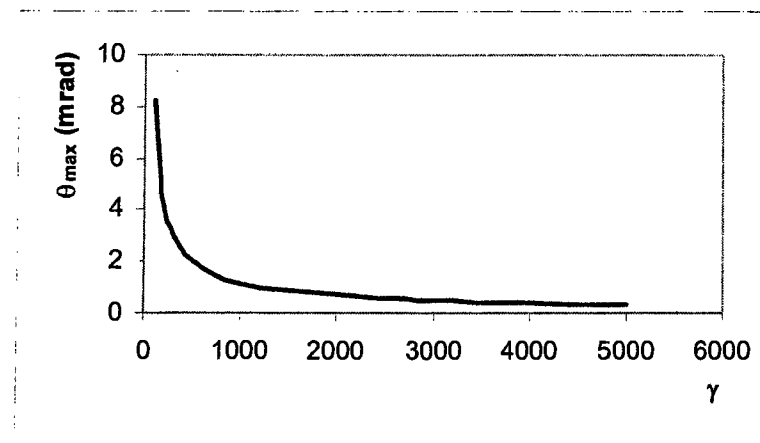


Рис. 3. Зависимость угла максимальной интенсивности переходного излучения θ_{max} от Лоренц фактора γ начальной частицы. Энергии фотонов находятся в интервале от 2 до 30 кэВ. Радиатор состоит из 1000 полипропиленовых пленок толщиной 22.5 микрон, разделенных воздушными промежутками в 500 микрон.

В) Метод подсчета полного числа фотонов или кластеров выделенной энергии. Расчетная кривая зависимости от γ полного числа фотонов излучения многозарядного релятивистского иона в интервале энергий и углов, попадающих в окно фотонного детектора, приведена на Рис. 4. Число фотонов растет, начиная с некоторого порогового значения γ и насыщается при $\gamma=3000 - 5000$. Полученная кривая отличается от кривых, получаемых с помощью ДПИ методами энерговыделения или подсчета

кластеров частиц с единичным зарядом множителем Z^2 (где Z - заряд начальной частицы в единицах заряда электрона). Процедура определения релятивистского фактора γ каждого детектированного иона с использованием γ -зависимости полного числа фотонов довольно простая. Число детектированных фотонов N определяет значение γ фактора иона, а \sqrt{N}/N - относительная ошибка измерения γ (Таблица 1.).

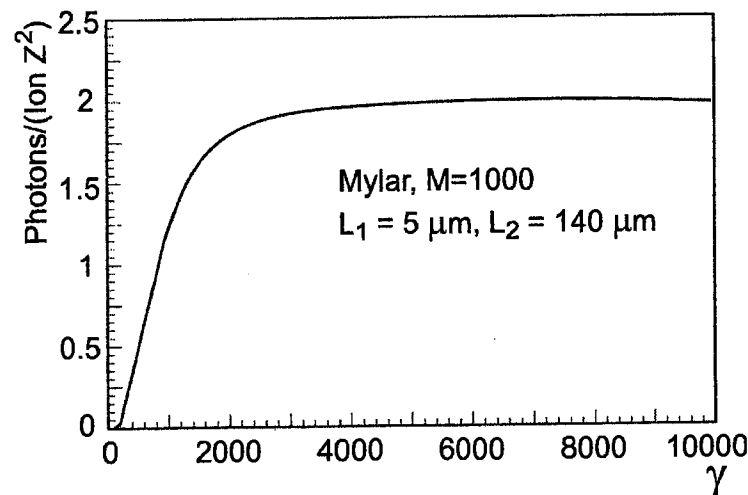


Рис. 4. Число РПИ фотонов в зависимости от Лоренц фактора γ начальной частицы в энергетическом интервале $2 \div 30$ кэВ и в интервале полярных углов от 0 до $5/\gamma$ на выходе регулярного майларового радиатора из 1000 майларовых пленок толщиной 5 микрон с промежутками между ними равными 140 микрон.

Г) Метод спектрального распределения. Если фотонный детектор наряду с хорошим пространственным разрешением имеет еще и достаточное разрешение по энергии, то измеряя спектральное

распределение фотонов, излучаемых одним ионом, можно, путем фитирования, найти релятивистский фактор γ начальной частицы.

Таблица 1. Результаты Монте-Карло моделирования. Ожидаемая погрешность (в процентах) определения Лоренц фактора $\frac{\Delta\gamma}{\gamma}$ (%) релятивистских ионов Fe^{+26} с различными γ : методами распределения по углам $\left(\frac{dN}{d\vartheta}\right)$, по числу фотонов $N(\gamma)$, по углу максимальной интенсивности $\vartheta_{\max}(\gamma)$. Расчеты выполнены для КДПИ с майларовым радиатором и многопроволочной пропорциональной камерой, наполненной ксеноном.

γ	$\frac{dN}{d\vartheta}$ $\frac{\Delta\gamma}{\gamma}$ (%)	$N(\gamma)$ $\frac{\Delta\gamma}{\gamma}$ (%)	$\vartheta_{\max}(\gamma)$ $\frac{\Delta\gamma}{\gamma}$ (%)
300	...	5.37	22.6
500	3.7	5.84	20.4
1000	2.1	4.28	18.6
2000	0.5	3.56	13.2
3000	2.0	5.16	12.9
5000	2.4	7.07	11.9

Глава 4 посвящена численному моделированию электромагнитных ливней, вызываемых частицами с энергиями до 1 ТэВ, с целью изучения зарядовой асимметрии в ливнях и вопроса измерения движущегося

некомпенсированного заряда. Все элементарные электромагнитные процессы, происходящие при прохождении высокоэнергетических электронов и фотонов через среду, хорошо известны и, в принципе, моделирование высокоэнергетических электромагнитных ливней (ЭМЛ) вполне возможно. Из-за математических трудностей все теории ЭМЛ реализованы с применением различных аппроксимаций и почти все современные исследования ЭМЛ осуществлены с помощью компьютерных программ Монте-Карло моделирования EGS, FUMILI, GEANT и других, разработанных в CERN и других ведущих физических лабораториях мира. Результаты численного моделирования ЭМЛ хорошо согласуются с экспериментальными данными. Именно поэтому нами в качестве метода исследования выбрана симуляция ЭМЛ с помощью пакета программ GEANT.

Отправной точкой для нашего исследования послужила пионерская работа Г. Аскарьяна 1961 года [5], в которой автор предсказал превалирование числа электронов по сравнению с числом позитронов в высокоэнергетических ЭМЛ в результате таких процессов, как аннигиляция позитронов на лету, комптоновским и δ -электронам. В последние годы уже появились прямые экспериментальные результаты по детектированию частиц сверхвысоких энергий по излучению их ливней [6]. Так как метод регистрации когерентного черенковского и переходного радиоволнового излучения движущегося избыточного заряда в ЭМЛ представляется довольно привлекательным, особенно для астрофизики нейтрино сверхвысоких энергий и задач нейтринных осцилляций, довольно много теоретических и экспериментальных работ были посвящены этой проблеме. Появились также экспериментальные результаты измерения черенковского излучения ливней с энергиями в несколько десятков ГэВ, проведенного на SLAC-е [6]. Однако прямые измерения асимметрии зарядов еще не проведены. Поэтому в нашей работе вычислены асимметрии зарядов ЭМЛ с энергиями $E < 1000$ ГэВ и предложен метод прямого измерения избытка электронов.

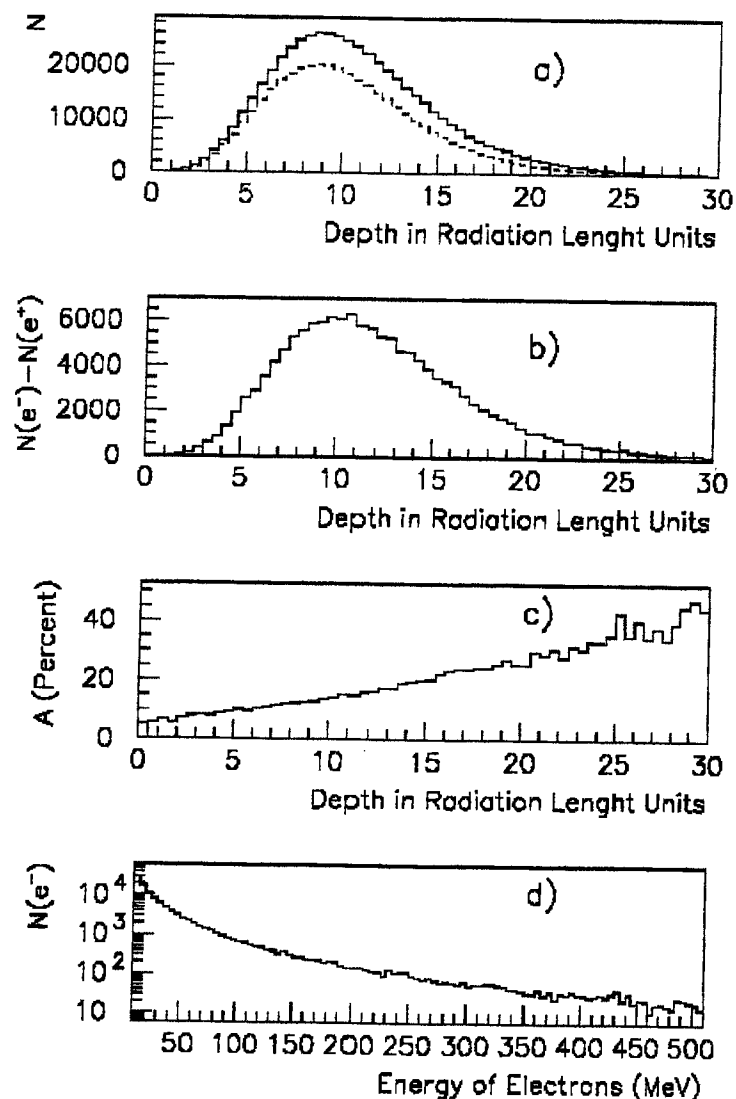


Рис. 5. Характерные зависимости зарядовой асимметрии.

На Рис.5. показаны характерные зависимости зарядовой асимметрии ливней, образованных в среде BGO-сцинтиллятора. Энергия начальной частицы $E_\gamma = 128$ ГэВ, частицы прослеживаются до энергии $E_{crit} = 0.4$ МэВ; (а) число частиц в ЭМЛ в зависимости от глубины распространения ливня для электронов (непрерывная гистограмма) и позитронов (пунктир); (б) зависимость избыточного заряда $V = N_{e^-} - N_{e^+}$ от глубины распространения ливня (в единицах радиационной длины); в) зависимость зарядовой асимметрии $A = (N_{e^-} - N_{e^+}) / (N_{e^-} + N_{e^+})$ от глубины распространения ливня (в единицах радиационной длины); д) энергетический спектр электронов на максимуме избыточного заряда. Всего было смоделировано 100 событий (ливней).

Используя результаты исследований ЭМЛ-моделирования с помощью GEANT [7], был предложен метод и показана возможность экспериментального наблюдения в ЕрФИ, SPS, CERN и FERMILAB процессов, связанных с избыточным зарядом в ЭМЛ.

Выводы

1. На основе хорошо разработанной теории рентгеновского переходного излучения проведены компьютерные расчеты параметров рентгеновского переходного излучения заряженной частицы в регулярной стопке идентичных пленок. Получены спектральные и угловые распределения интенсивности излучения и числа фотонов. Разработаны алгоритмы расчетов и созданы компьютерные программы, которые могут быть использованы для исследований, связанных с разработкой детекторов переходного излучения.

2. Исследована идея создания нового типа ДПИ - кольцевых детекторов переходного излучения (КДПИ), в которых, используя параметры углового распределения фотонов переходного излучения, испускаемых тяжелым релятивистским ядром, определяется Лоренц фактор начальной частицы. Предлагается конструкция КДПИ. Исследования

показывают, что радиатор целесообразно собирать из пленок, изготовленных из углеродных материалов типа полипропилена или майлара. Изучен вопрос использования в качестве фотонного детектора наполненную ксеноном пропорциональную камеру или матрицу приборов с зарядовой связью.

По сравнению с традиционными ДПИ, КДПИ могут обеспечить более точное определение энергии заряженной частицы и они могут найти применение в экспериментах по регистрации тяжелых релятивистских ионов. КДПИ можно применять для измерения спектра ядер в первичных космических лучах.

3. Интенсивные работы по Монте-Карло моделированию электромагнитных ливней позволяют уточнить знания о параметрах движущегося избыточного заряда в ливнях. В частности, для компоненты ливня ниже 10 МэВ, при энергиях начальной частицы ливня 1 - 256 ГэВ наши расчеты предсказывают существование значительного избыточного заряда. Результаты исследований показывают наличие довольно большой зарядовой асимметрии не только в ливнях очень высоких энергий (100 ГэВ и выше), но и в ливнях сравнительно невысоких энергий (порядка 1 ГэВ).

Предлагается метод прямого измерения зарядовой асимметрии в ливнях в области 100 ГэВ путем разделения электронов и позитронов с помощью магнитного поля.

Цитируемая литература

1. Алиханян А.И., Арутюнян Ф.Р., Испирян К.А., Тер-Микаелян М.Л., "ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ", ЖЭТФ, т. 41, вып. 6(12), с. 2002-2010, (1961).
2. Ter-Mikaelian M.L. "HIGH-ENERGY ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN CONDENSED MEDIA", New York, John Wiley & Sons, 1972.
3. Гарибян Г.М., Ян Ши, "РЕНТГЕНОВСКОЕ ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ", Ереван, 320с., (1983).

4. B. Dolgoshein "Transition Radiation Detectors" , Nucl. Instr. and Meth., A326, 434-469 (1993).
5. Г. А. Аскарьян, ЖЭТФ т. 41, с. 616–618, (1961).
6. D. Saltzberg, P. Gorham, D. Walz, C. Field, R. Iverson, A. Odian, G. Resch, P. Schoessow, and D. Williams, "OBSERVATION OF THE ASKARYAN EFFECT: COHERENT MICROWAVE CHERENKOV EMISSION FROM CHARGE ASYMMETRY IN HIGH-ENERGY PARTICLE CASCADES", Phys. Rev. Lett. 86, 2802–2805 (2001).
7. R. Brun, F. Carminati, "GEANT - DETECTOR DESCRIPTION AND SIMULATION TOOL", CERN Program Library Long Writeup W5013, (1993).

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. V.G. Khachatryan, Ring X-Ray Transition Radiation Detectors on the Basis of Charge Coupled Device Array in Advanced Radiation Sources and Applications Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, held in Nor-Hamberd, Yerevan, Armenia, August 29 - September 2, 2004, NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, v. 199 , XII, pp 293-299, 2005.
2. К.А. Испириян, М.К. Испириян, В.Г. Хачатрян, КОЛЬЦЕВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, Известия НАН Армении, Физика, т. 40, N 6, с.424-432 (2005).
3. В.Г. Хачатрян, Кольцевые детекторы рентгеновского переходного излучения для идентификации тяжелых релятивистских ионов, Вестник МАНЭБ, т. 10, 6, с. 92-95, 2005.
4. М.А. Агинян, К.А. Испириян, М.К. Испириян, V.G. Khachatryan, PROCESSING OF THE DATA OF RING TRANSITION RADIATION DETECTORS, Nucl. Instr. and Meth. A522:112-115,2004.
5. М.А. Агинян, Л.А. Gevorgian, К.А. Испириян and V.Kh.Khachatryan, UV RADIATION PRODUCED IN STACK OF THIN PLATES AND UV RING TRANSITION RADIATION DETECTORS (RTRD), Nucl. Instr. and Meth. A522, 99-103, 2004.

6. N.Z.Akopov,, M.K.Ispirian and V.Kh.Khachatryan, Ring Transition Radiation Detectors, Proc. of the Intern. Workshop Transition Radiation Detectors of 3-th Millennium, Bari , Italy, Sept. 2001, Frascati Physics Series, v. XXV, p.57, 2002.
7. R.O. Avakian, K.A. Ispirian, R.K. Ispirian, V.G. Khachatryan (Yerevan Phys. Inst.), P. Sona (INFN, Florence & Florence U.), E. Uggerhoj (Aarhus U.), CHARGE ASYMMETRY IN 1-GEV TO 1000-GEV ELECTROMAGNETIC SHOWERS AND POSSIBILITY OF ITS MEASUREMENT, Nucl. Instr. and Meth. B173, 61-66, 2001.

