Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

САВЧЕНКО АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ

ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: **Стриханов Михаил Николаевич**
доктор физико-математических наук, профессор, врио ректора НИЯУ МИФИ, г. Москва

Научный Консультант: **Тищенко Алексей Александрович**
кандидат физико-математических наук, доцент отделения нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике, офиса образовательных программ (М) НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: **Балдин Антон Александрович**
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна), начальник сектора №3 научно-экспериментального отдела физики тяжелых ионов на LHC

Сухих Леонид Григорьевич
доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (г. Томск), проректор по академическому превосходству

Карловец Дмитрий Валерьевич
кандидат физико-математических наук, Национальный исследовательский Томский государственный университет (г. Томск), старший научный сотрудник лаборатории теоретической и математической физики

Защита состоится «23» декабря 2020 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.01.02 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте https://ds.mephi.ru/ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан: «____» _____2020 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета МИФИ.01.02
доктор физ.-мат. наук, доцент Руднев Игорь Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В современных экспериментах в области физики высоких энергий – исследования космических лучей и эксперименты на существующих и разрабатываемых ускорителях, исследователи сталкиваются с трудностями при идентификации ультрарелятивистских заряженных частиц с лоренц-факторами 10^3 и больше, например, на будущем эксперименте по исследованию рождения адронов на малых углах при ядерных столкновениях на Большом Адронном Коллайдере [1] потребуется идентификация и разделение протонов, К-мезонов и пи-мезонов в диапазоне энергий 1-6 ТэВ. Помощь в преодолении этих трудностей может оказать разработка новых или модернизация существующих детекторов частиц. Многообещающими в этом плане являются детекторы на рентгеновском переходном излучении (РПИ) [2]. По сравнению с другими типами детекторов, например, калориметрами, они обладают меньшими размерами, не уничтожают частицу, имеют бóльшую чувствительность к лоренц-фактору и могут измерять не только энергию, а также отслеживать траекторию движения частиц.

Переходное излучение (ПИ), которое испускается при пересечении заряженной частицей границы раздела между двумя различными средами, было теоретически предсказано Гинзбургом и Франком в 1945 году [3]. В 1959 году практически одновременно Гарибяном [4] и Барсуковым [5] было показано, что ПИ излучение имеет место в рентгеновской области частот с пропорциональной произведению лоренц-фактора частицы и плазменной частоты материала граничной частотой (для ультрарелятивистских заряженных частиц энергия может быть порядка сотен кэВ). В наши дни РПИ широко используется в различных экспериментах [6] и на ускорителях в так называемых детекторах или трекерах на переходном излучении [7], например, TRT в ATLAS. Детекторы переходного излучения хорошо себя зарекомендовали при отделении электронов от адронного фона при лоренц-факторах адронов около 500. Однако, при увеличении энергии частиц вклад переходного излучения от адронов становится значительным и практически выходит на насыщение при лоренц-факторе около 10^3 [8]. Данный факт позволяет заключить, что идентификация заряженных частиц сверхвысоких энергий является чрезвычайно сложной задачей, и в настоящее время не существует детекторов, способных разделять и идентифицировать отдельные заряженные частицы с лоренц-факторами 10^3 – 10^5 с надежной эффективностью. Для преодоления данного «барьера» необходима разработка детекторов нового поколения, что в свою очередь требует детальных теоретических исследований. Хотя теория РПИ хорошо описывает

случаи различной сложности, в реальных же условиях РПИ сопровождается целым рядом радиационных процессов и явлений. Именно поэтому совместно с теоретическими изысканиями необходимо пользоваться программными средствами для детального компьютерного моделирования.

Целью настоящей работы является детальное исследование, путем проведения теоретических расчетов и компьютерного моделирования, ключевых особенностей рентгеновского переходного излучения от слоистых структур (радиаторов переходного излучения) для различных типов и энергий частиц, пролетающих через них. Анализ параметров радиаторов, для возможности дальнейшего практического использования на экспериментальных установках и построение детальной компьютерной модели, с учетом всех сторонних процессов: рассеяние и поглощение фотонов и частиц, рождение излучения отличного от переходного, сопровождающих пролет первичной частицы и фотонов через радиаторы и чувствительные области детекторов.

Задачи работы.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проведено сравнение разных подходов к теоретическому описанию рентгеновского переходного излучения от стопки пластин (радиатора). Получены выражения, описывающие угловые характеристики излучения от ультрарелятивистских заряженных частиц в регулярных радиаторах.
2. Получены выражения, предсказывающие и объясняющие наличие тонкой структуры (набора резких пиков) в угловых распределениях РПИ от регулярных радиаторов с различными параметрами.
3. Проведено сравнение с экспериментальными данными и показано хорошее совпадение с полученными выражениями.
4. Построена компьютерная модель детектора переходного излучения в программном пакете Geant4 с различными типами чувствительной части установки.
5. Обоснована необходимость и проведена корректировка модуля РПИ в программном пакете Geant4. Показано хорошее совпадение теории и эксперимента с моделированием с исправленным модулем РПИ Geant4.
6. Проведено моделирование детектора с учетом различных сторонних процессов, сопровождающих движение ультрарелятивистской заряженной частицы сквозь детектор.

Научная новизна.

В работе впервые построена теория, описывающая поведение переходного излучения на малых углах, проведена корректировка модуля переходного излучения программного пакета Geant4 и построена полная компьютерная модель детектора на переходном излучении.

Научная и практическая значимость.

Детальные расчеты характеристик рентгеновского переходного излучения от слоистых структур (радиаторов) совместно с полным компьютерным моделированием создают основу для будущего проектирования детекторов на переходном излучении, необходимых для идентификации заряженных частиц с высокими лоренц-факторами вплоть до 10^5. Подобных детекторов не существует в настоящее время, поэтому для симуляции их работы создана компьютерная модель с учетом чувствительных частей детектора, основанных на реальных полупроводниковых пиксельных чипах и газовых пропорциональных камерах.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Построена теория малоуглового рентгеновского переходного излучения от слоистых сред – регулярных радиаторов для генерации излучения: получены полностью аналитические выражения, описывающие угловые характеристики излучения в зависимости от энергии ультрарелятивистских заряженных частиц и параметров радиаторов.

2. Предсказано существование серии резких пиков, в угловом распределении фотонов рентгеновского переходного излучения на малых углах. Получено дисперсионное соотношение, описывающее положение пиков в зависимости от параметров радиатора. Показано совпадение положения пиков с экспериментальными данными.

3. Доказана необходимость корректировки модуля рентгеновского переходного излучения в программном комплексе Geant4 для правильного описания пиков на малых углах, проведена необходимая корректировка. Создана полномасштабная компьютерная модель детектора на рентгеновском переходном излучении в программном комплексе Geant4. Продемонстрировано высокоточное количественное совпадение результатов моделирования спектральных и угловых распределений фотонов как с предсказаниями теории, так и с экспериментальными данными.

4. Создана компьютерная модель детектора на основе калориметрического модуля с учетом различных физических процессов, в том числе и рентгеновского переходного

излучения, как альтернатива для идентификации легких частиц с лоренц-факторами порядка 1000 и жестких фотонов рентгеновского излучения.

Степень достоверности результатов подтверждается детальным сравнением теории и моделирования и совпадением с экспериментальными данными, а также совпадением теоретических результатов с известными из ранее исследованных предельных случаев.

Апробация работы.

Основные результаты доложены на ряде международных конференций:

1. The 7th International Conference «Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena Channeling 2016», 24.09.2016 – 1.10.2016, г. Сирмионе, Италия.

2. The XII International Symposium «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures», 18 – 22 сентября 2017, г. Гамбург, Германия.

3. The 25th Nordic Particle Physics Meeting (Spaatind 2018) and Oslo Winter School «Standard Model, Quantum Chromodynamics, Heavy Ion Collisions», 2 – 12 января 2018, г. Осло, Норвегия.

4. VII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», 16 – 21 апреля 2018, г. Москва, НИЯУ МИФИ.

5. CAS Beam Instrumentation, 2 – 15 июня 2018, г. Хельсинки, Туусула, Финляндия.

6. The 8th International Conference «Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena Channeling 2018», 23 – 28 сентября 2018, г. Искья, Италия.

7. V Всероссийский молодежный научный форум «Open Science 2018», 21 - 23 ноября 2018, г. Гатчина.

8. TRD Workshop, 9 – 10 апреля 2019, CERN, г. Женева, Швейцария.

9. The XIII International Symposium «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures», 16 – 20 сентября 2019, г. Белгород.

Личный вклад

Автор принимал непосредственное участие в выполнении теоретических расчетов и проведении моделирования, а также в наборе экспериментальных данных, с которыми проводилось сравнение в данной работе.

Публикации автора

Материал диссертации изложен в 10 публикациях в научных рецензируемых журналах. Список публикаций приведен в конце автореферата. Все обозначенные публикации входят в базы данных Scopus и/или Web of Science.

Связь работы с научными проектами

По тематике диссертационных исследований соискатель являлся исполнителем государственного задания № FZWG-2020-0032 (2019-1569).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, приложений А и Б. Общий объем диссертации составляет 104 страниц. Диссертация содержит 49 рисунков, 1 таблицу и 123 наименования цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматривается необходимость проведения исследований, связанных с рентгеновским переходным излучением; сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость работы; приводятся основные положения, выносимые на защиту, и публикации автора по теме диссертации.

В первой главе в *первом параграфе* рассматриваются две наиболее проработанные модели переходного излучения, предложенные Г.М. Гарибяном [9] и В.Е. Пафомовым [10, 11, 12]. Указывается на наличие опечатки в широко известной статье В.Е. Пафомова [10], на Рисунке 1 показано влияние данной опечатки на форму как спектрального так и углового распределений фотонов РПИ.

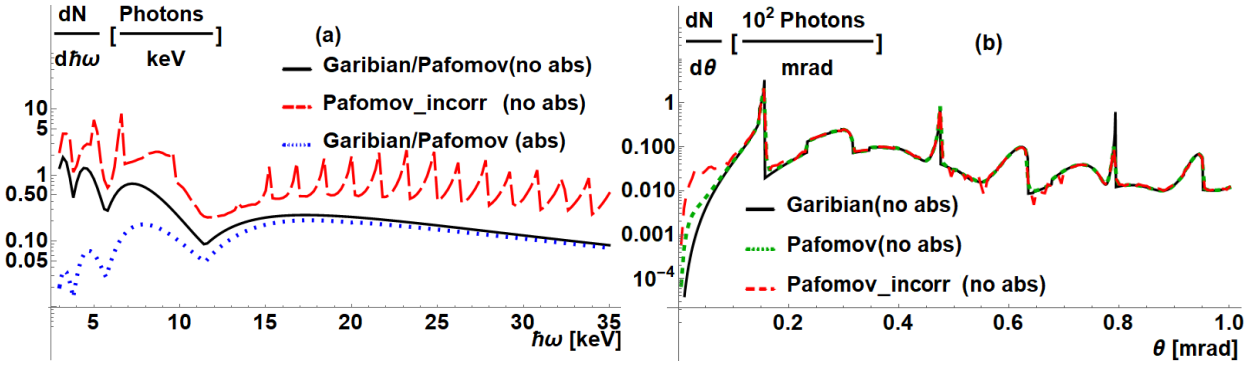

Рисунок 1 Сравнение теоретических спектральных (a) и угловых (b) распределений РПИ от электронов 20 ГэВ. Красные прерывистые линии соответствуют теории Пафомова [10] с опечаткой, интегрирование производилось численно. Черные сплошные кривые соответствуют теории Гарибяна [9] без учета поглощения фотонов РПИ. Голубые пунктирные линии соответствуют теории [9] с учетом поглощения. Зеленые пунктирные линии отвечают распределениям Пафомова [11] без учета поглощения. Радиатор РПИ состоит из 150 полипропиленовых фольг с плотностью 0.92 г/см^3 и толщиной 62 мкм, разделенных вакуумными зазорами в 2 мм.

Рассмотренные теории РПИ [9, 10] содержат в себе аналитическое описание спектральных или только спектрально-угловых распределений фотонов РПИ, а для разработки и доработки детекторов нужна также информация об угловых характеристиках РПИ (i. для расчета положения детектирующей части относительно радиатора; ii. также для использования зависимости углового распределения от лоренц-фактора γ как дополнительный инструмент детектирования частиц). Далее в главе во *втором параграфе* выводятся аналитические выражения, позволяющие точно и быстро (по сравнению с численным интегрированием) описать угловые распределения. Для этого коэффициент стопки пластинок F_M (где M – число фольг) из теории Гарибяна:

$$\frac{d^2W_G(\omega,\theta)}{d\theta d\omega}=\frac{e^2}{c}\frac{\omega^2\theta^3}{8\pi c^2}\left|Z_m-Z_{vac}\right|^2\left[\left(1-Q^{1/2}\right)^2+4Q^{1/2}\sin^2\left(\mathrm{Re}\frac{a}{Z_m}\right)\right]F_M(\omega,\theta), \tag{1}$$

$$Z_{vac}=\frac{4c}{\omega\left(\gamma^{-2}+\theta^2\right)},\ Z_m=\frac{4c}{\omega\left(\gamma^{-2}+\theta^2+1-\varepsilon(\omega)\right)},\ Q=\exp\left[-\frac{\omega a\varepsilon''(\omega)}{c}\right], \tag{2}$$

$$F_M(\omega,\theta)=\frac{\left(1-Q^{M/2}\right)^2+4Q^{M/2}\sin^2\left(M\,\mathrm{Re}\left(\frac{a}{Z_m}+\frac{b}{Z_{vac}}\right)\right)}{\left(1-Q^{1/2}\right)^2+4Q^{1/2}\sin^2\left(\mathrm{Re}\left(\frac{a}{Z_m}+\frac{b}{Z_{vac}}\right)\right)}, \tag{3}$$

где e – заряд электрона, ω – частота излучения, c – скорость света в вакууме, θ – полярный угол наблюдения, Z_{vac} и Z_m – зоны формирования в вакууме и в среде, $\varepsilon(\omega)$ – функция диэлектрической проницаемости и $\varepsilon''(\omega)$ – ее мнимая часть, a и b – толщины фольг и зазоров, преобразуется и при $Q=1$ и $M>>1$ имеем:

$$F_M(\omega,\theta)\big|_{Q=1}=\frac{\sin^2\left(M\,\mathrm{Re}\left(\frac{a}{Z_m}+\frac{b}{Z_{vac}}\right)\right)}{\sin^2\left(\mathrm{Re}\left(\frac{a}{Z_m}+\frac{b}{Z_{vac}}\right)\right)}\xrightarrow{M>>1}\pi M\sum_r\delta\left(\mathrm{Re}\left(\frac{a}{Z_m}+\frac{b}{Z_{vac}}\right)-\pi r\right). \tag{4}$$

Результат интегрирования выражения (1) по всем рассматриваемым частотам

$$\omega_{\min}\le\omega\le\omega_{\max} \tag{5}$$

может быть записан в виде:

$$\frac{dN(\theta)}{d\theta}=\frac{1}{137}\frac{\theta^3 M}{2c^2}\sum_{r=r_{1,\min}}^{r_{1,\max}}\left|Z_m-Z_{vac}\right|^2\sin^2\left(\mathrm{Re}\frac{a}{Z_m}\right)\frac{\omega_1^3}{\left|A\omega_1^2-B\right|}\Bigg|_{\omega=\omega_1}+$$
$$+\frac{1}{137}\frac{\theta^3 M}{2c^2}\sum_{r=r_{2,\min}}^{r_{2,\max}}\left|Z_m-Z_{vac}\right|^2\sin^2\left(\mathrm{Re}\frac{a}{Z_m}\right)\frac{\omega_2^3}{\left|A\omega_2^2-B\right|}\Bigg|_{\omega=\omega_2}, \quad (6)$$

где

$$A=(a+b)\left(\theta^2+\gamma^{-2}\right)/4c, \quad (7)$$

$$B=a\omega_0^2/4c, \quad (8)$$

и частоты

$$\omega_{1,2}=\frac{\pi r\pm\sqrt{(\pi r)^2-4AB}}{2A} \quad (9)$$

должны удовлетворять неравенству (5), здесь ω_0 – плазменная частота материала фольги.

Интересно, что если фактор $F_M(\omega,\theta)$ в выражении (1) представляет набор острых пиков в то время как остальные множители есть лишь медленно изменяющиеся функции частоты, тогда возможно учесть поглощение фотонов, следуя вычислениям в [9], и как результат вместо выражения (6) получить

$$\frac{dN(\theta)}{d\theta}=\frac{1}{137}\frac{\theta^3}{8c^2}\sum_{r=r_{1,\min}}^{r_{1,\max}}M_{eff}\left|Z_m-Z_{vac}\right|^2\times$$
$$\times\left(\left(1-Q^{1/2}\right)^2+4Q^{1/2}\sin^2\left[\mathrm{Re}\frac{a}{Z_m}\right]\right)\frac{\omega_1^3}{\left|A\omega_1^2-B\right|}\Bigg|_{\omega=\omega_1}+$$
$$+\frac{1}{137}\frac{\theta^3}{8c^2}\sum_{r=r_{2,\min}}^{r_{2,\max}}M_{eff}\left|Z_m-Z_{vac}\right|^2\times \quad (10)$$
$$\times\left(\left(1-Q^{1/2}\right)^2+4Q^{1/2}\sin^2\left[\mathrm{Re}\frac{a}{Z_m}\right]\right)\frac{\omega_2^3}{\left|A\omega_2^2-B\right|}\Bigg|_{\omega=\omega_2},$$

где

$$M_{eff}=\frac{1-Q^M}{1-Q}. \quad (11)$$

На Рисунке 2 показаны результаты использования полученных выше выражений.

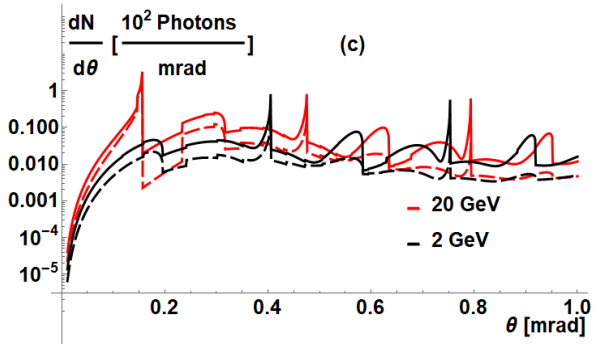

Рисунок 2 Теоретические угловые распределения РПИ от электронов 20 ГэВ без (сплошные кривые) и с (прерывистые кривые) учетом поглощения фотонов внутри радиатора (150 полипропиленовых фольг с плотностью 0.92 г/см^3 и толщиной 62 мкм, разделенных вакуумными зазорами в 2 мм).

В *третьем параграфе* приводится обсуждение полученных распределений и дается объяснение наличия и положения пиков на малых углах с помощью дисперсионного соотношения рентгеновского переходного излучения, полученного из аргумента дельта функции в (4):

$$a\omega\left(\gamma^{-2}+\theta^2+\frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right)+b\omega\left(\gamma^{-2}+\theta^2\right)=4\pi cr. \qquad (12)$$

Разрешая это уравнение относительно ω получаем частоты ω_1 и ω_2, определяемые соотношением (9). Это означает, что, на заданных r, существует две волны с частотами ω_1 и ω_2 распространяющиеся под одним и тем же углом θ. Заметим, что частоты ω_1 и ω_2 различны. Наличие двух частот вызвано дисперсией функции диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\omega)=1-\omega_0^2/\omega^2$. При совпадении данных частот для некоторых дифракционных r порядков возникают высокие и узкие пики или широкие и пологие (см. Рисунок 3), что объясняет результирующую форму пиков в угловом распределении РПИ.

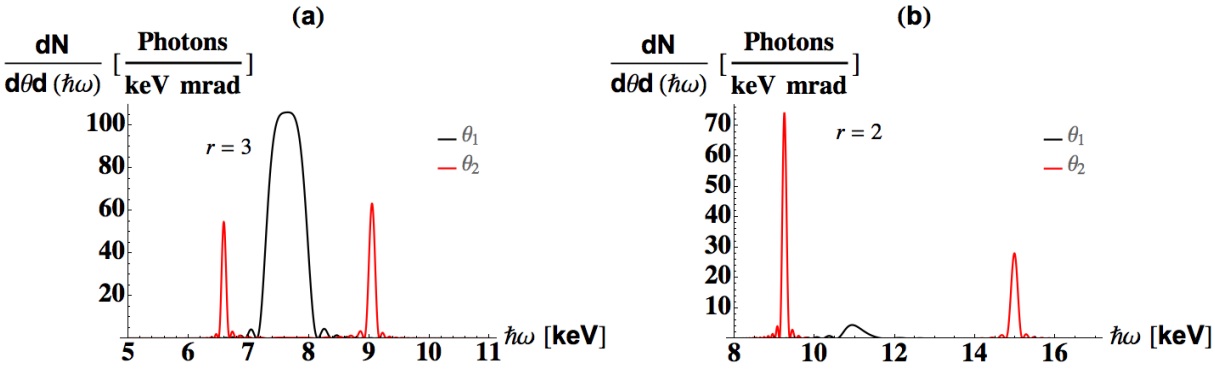

Рисунок 3 Спектрально-угловое распределение числа фотонов РПИ, построенное по формуле (1) (без учета поглощения, т.е. при $Q=1$) для фиксированного угла θ: (a) третий дифракционный порядок ($r=3$), $\theta_1=\theta^*=0.48$ мрад (черная кривая), $\theta_2=0.47$ мрад (красная кривая); (b) второй дифракционный порядок ($r=2$), $\theta_1=\theta^*=0.32$ мрад (черная кривая), $\theta_2=0.31$ мрад (красная кривая). Остальные параметры для всех кривых одинаковы: энергия электронов составляет 20 ГэВ, радиатор состоит из 150 полипропиленовых пленок с толщиной $a=62$ мкм с зазорами 2 мм между ними.

Затем в *четвертом параграфе* приводится оценка роли воздуха/вакуума между пленками радиатора, показывается незначительное влияние наличия воздуха на форму и положение максимумов в спектральных и угловых распределениях РПИ. Заключительный *пятый параграф* посвящен сравнению с экспериментальными данными (см. Рисунок 4) теоретического положения максимумов в угловом распределении фотонов РПИ. На Рисунке 4 рассматривается излучение от 20 ГэВ электронов, пролетающих через радиатор из 30 фольг Майлара толщиной 50 мкм с зазорами 2.97 мм., экспериментальные данные взяты из [13]. Для удобства сравнения теоретическая кривая была отмасштабирована на порядок так как при ее построении не учитывалось поглощение и функция детектора. Как видно положение теоретических пиков отлично совпадает с их экспериментальным положением, что показывает надежность полученных выражений.

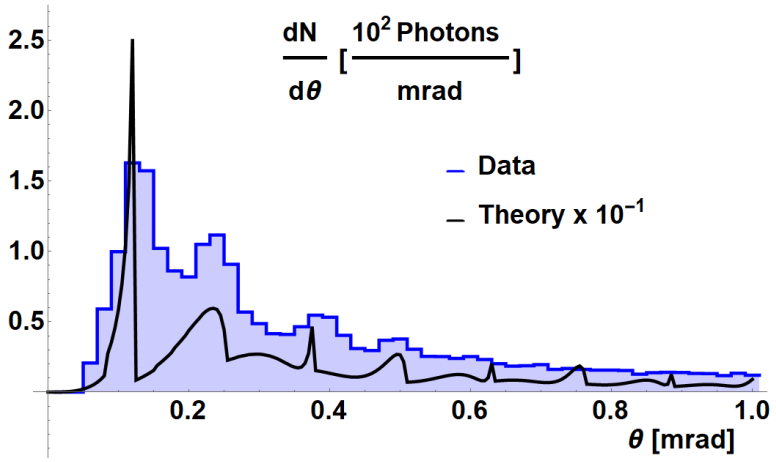

Рисунок 4 Сравнение с экспериментальными данными [13] (синяя гистограмма) теоретического углового распределения (черным) фотонов рентгеновского переходного излучения от радиатора из 30 фольг Майлара толщиной 50 мкм с зазорами в 2.97 мм для электронов с энергией 20 ГэВ. Теоретическая кривая построена без поглощения и отмасштабирована на порядок для удобства сравнения.

Во второй главе строится компьютерная модель детектора на переходном излучении (см. Рисунок 5). Ведь поскольку теория ПИ в основном описывает «чистое» РПИ, а в реальных условиях ПИ сопровождается рядом радиационных процессов и явлений, необходимым дополнением является использование мощных инструментов компьютерного моделирования. В диссертационной работе используется один из наиболее передовых и популярных инструментов моделирования – Geant, который разрабатывается с 1974 года в ЦЕРНе и других ведущих научных центрах. Данный программный пакет (а именно C++ версия Geant4 [14]) стал ведущим инструментом для компьютерного моделирования в различных областях ядерной и радиационной физики.

Также в программе выполнено наиболее важное для данного исследования условие - в Geant4 включен модуль РПИ [15].

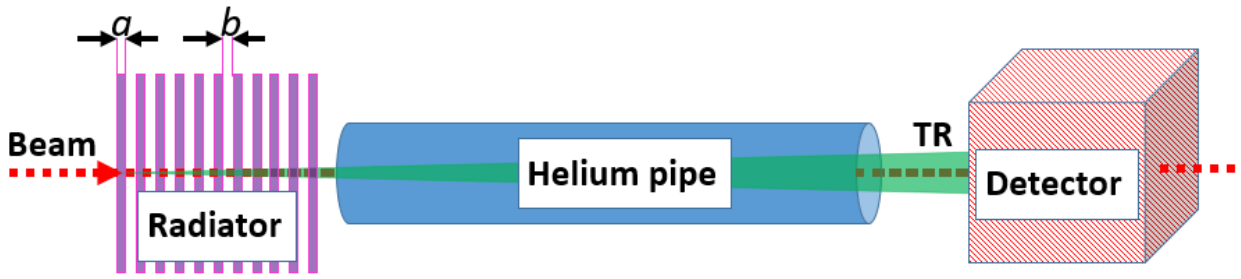

Рисунок 5 Схема детектора ПИ для одновременного измерения и спектрального и углового распределений ПИ. Первичный пучок проходит через периодическую структуру из фольг (фиолетовым) и зазоров – радиатор ПИ, далее вместе с ПИ через гелиевую трубу и детектирующий объем – газонаполненный или полупроводниковый пиксельный [13]/стриповый [16] детектор.

В *первом параграфе* показываются возможности модуля РПИ, заложенного в Geant4 В.М. Гришиным и другими разработчиками [15], описываются параметры рассматриваемых радиаторов РПИ, а также геометрия моделируемой задачи. Затем во *втором параграфе* проводится сравнение моделирования с теорией [17], которое выявило несостоятельность описания угловых характеристик, заложенного в модуль РПИ Geant4, но при этом показало хорошее совпадение с спектральных распределений РПИ (см. Рисунок 6).

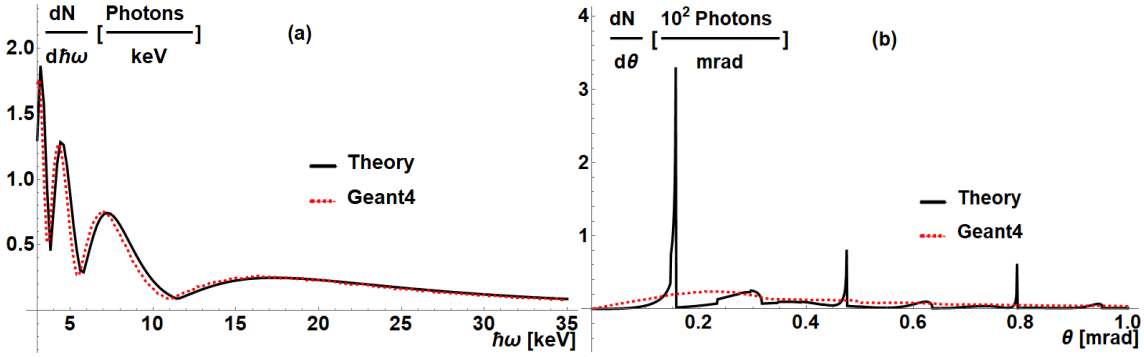

Рисунок 6 Сравнение теоретических спектральных и угловых распределений РПИ с результатами моделирования в Geant4 для различных энергий электронов, пересекающих полипропиленовый радиатор ПИ. Спектральные распределения: (a) – 20 ГэВ. Угловые распределения: (b) – 20 ГэВ.

Третий параграф посвящен сравнению Geant4 со сторонней программой моделирования RADIATOR и экспериментальными данными снятыми с использованием газ-пиксельного детектора [18]. Показано хорошее совпадение программ RADIATOR и Geant4 с точки зрения спектральных распределений фотонов РПИ, как падающих на газ-пиксельный детектор, так и поглощенный им, но угловые распределения отличаются на малых углах, что говорит о более качественном описании их в программе RADIATOR.

Стоит, однако, отметить, что даже при лучшем описании угловых характеристик фотонов РПИ программу RADIATOR нельзя рассматривать как полноценную замену Geant4 ввиду ограниченного функционала. Сравнение с результатами реального эксперимента не принесло удовлетворительного результата ввиду малого разрешения экспериментальной установки.

Наибольший интерес представляет показанное в *четвертом параграфе* сравнение моделирования и эксперимента с кремниевым пиксельным детектором [13] (см. Рисунок 7b, c), которое также доказывает, что Geant4 не справляется с описанием угловых распределений. В то же время имеет место отличное совпадение спектральных распределений РПИ (см. Рисунок 7a).

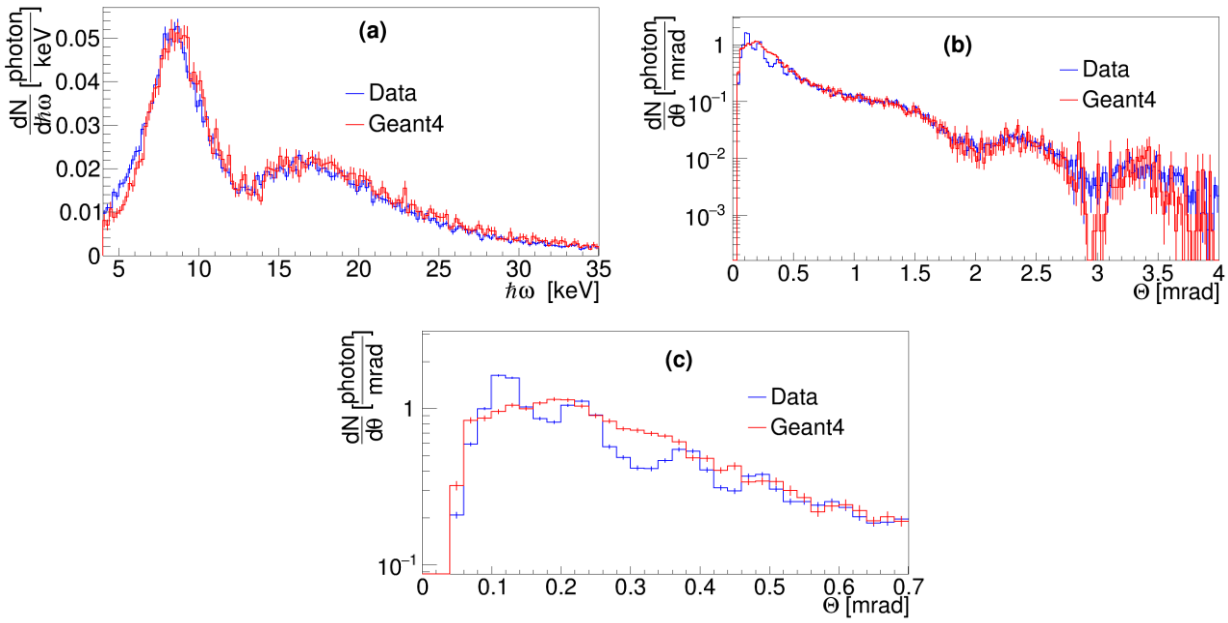

Рисунок 7 Сравнение спектров зарегистрированных фотонов ПИ (a) и угловых распределений (b) — (c) увеличенная область малых углов с рисунка (b), красными линиями обозначены результаты моделирования в программе Geant4, синими экспериментальные данные для радиатора из 30 фольг 50 мкм майлара с зазорами в 2,97 мм и энергии электронов 20 ГэВ.

Графики, представленные выше, подтверждают необходимость проведения корректировки модуля РПИ Geant4. В *пятом параграфе* указывается, что при исследовании возможных причин отличия результатов моделирования (угловых распределений) от теории и эксперимента оказалось, что необходимо внести лишь небольшие изменения в код программы, которые подробно обсуждаются в основном тексте диссертации, а также в статье [19], а исходный код и исправленные строки находятся в приложениях А и Б, соответственно. После применения правок угловые распределения стали хорошо совпадать с экспериментом, что и показано на Рисунке 8.

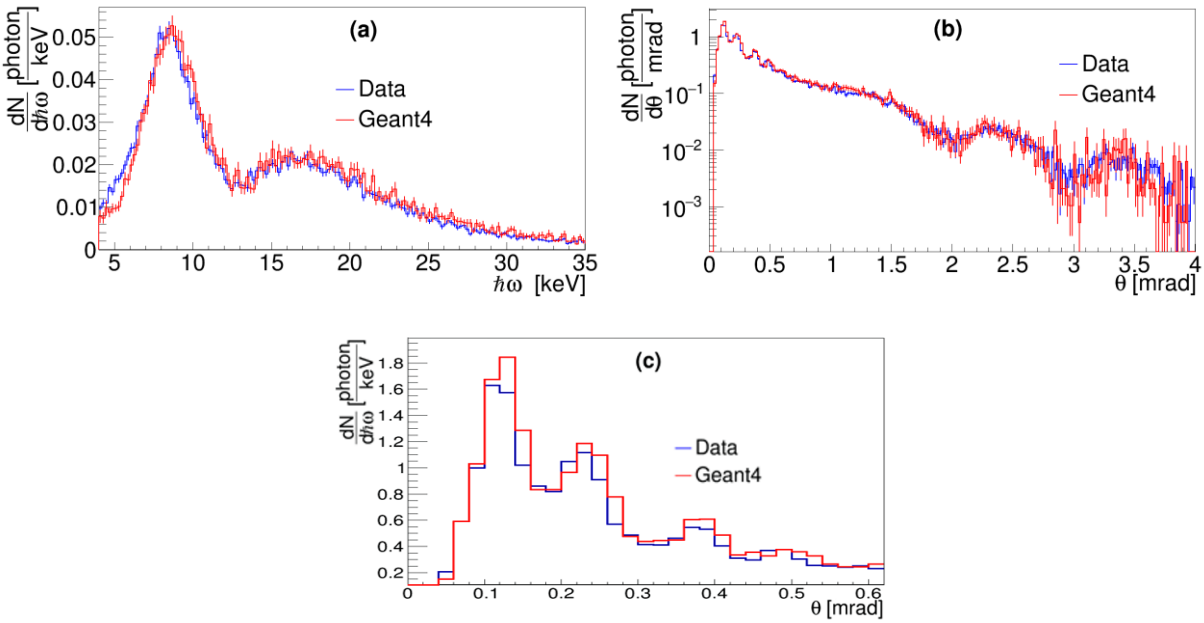

Рисунок 8 Сравнение спектральных (a) и угловых (b, c) распределений зарегистрированных фотонов РПИ, красными линиями обозначены результаты моделирования в программе Geant4, синими экспериментальные данные для радиатора из 30 фольг 50 мкм майлара с зазорами в 2,97 мм и энергии электронов 20 ГэВ.

<u>В Третьей главе</u> проводится моделирование процессов, сопровождающих пролет частицы через слоистые структуры. В *первом параграфе* производится оценка и обсуждается влияние многократного рассеяния на замывание углового распределения фотонов рентгеновского переходного излучения. На Рисунке 9 показано влияние количества фольг на учет многократного рассеяния в Geant4.

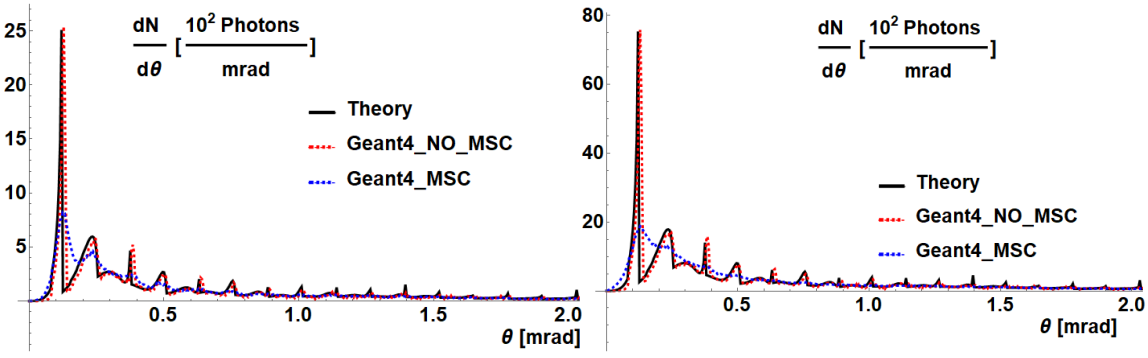

Рисунок 9 Сравнение угловых распределений фотонов переходного излучения от радиатора из 30 (сверху) и 90 (снизу) фольг 50 мкм майлара с зазорами 2,97 мм и энергии электронов 20 ГэВ. Черными линиями показана теория, описанная в Главе 1. Красным пунктиром результат моделирования без многократного рассеяния и синим с рассеянием.

В работе [20] был предложен альтернативный вариант детектора, который мог бы получать дополнительную информацию о первичной частице при регистрации высокоэнергичных фотонов РПИ, вылетающих из боковых поверхностей радиатора из-за

комптоновского рассеяния (см. Рисунок 10). В основе такого детектора лежат калориметры, окружающие радиатор. *Второй параграф* целиком посвящен созданию и анализу компьютерной модели самостоятельного калориметрического модуля, за основу которого был взят калориметр мюонного эксперимента g – 2, как наиболее интересный с точки зрения моделирования процессов, сопровождающих пролет частицы через сложную слоистую структуру, которая показана на Рисунке 11. Подобный калориметр с точки зрения кода обладает модульной структурой, что позволяет гибкую подстройку параметров, добавление или удаление элементов структуры и дает возможность оценки влияния различных физических процессов на каждом слое (рассеяние, рождение электрон-позитронных пар, переходное и тормозное излучения и т.д.).

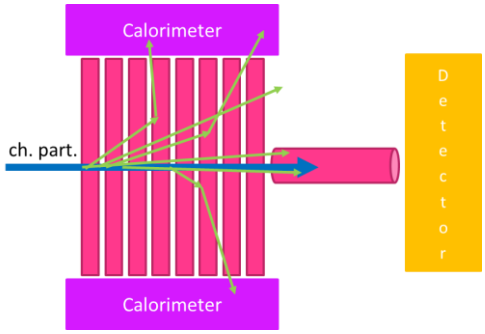

Рисунок 10 Схема альтернативного детектора на переходном излучении, в котором калориметры используются в качестве обкладок вокруг радиатора для регистрации жестких фотонов РПИ, испытавших комптоновское рассеяние. Синей стрелкой изображена первичная частица, зелеными фотоны РПИ.

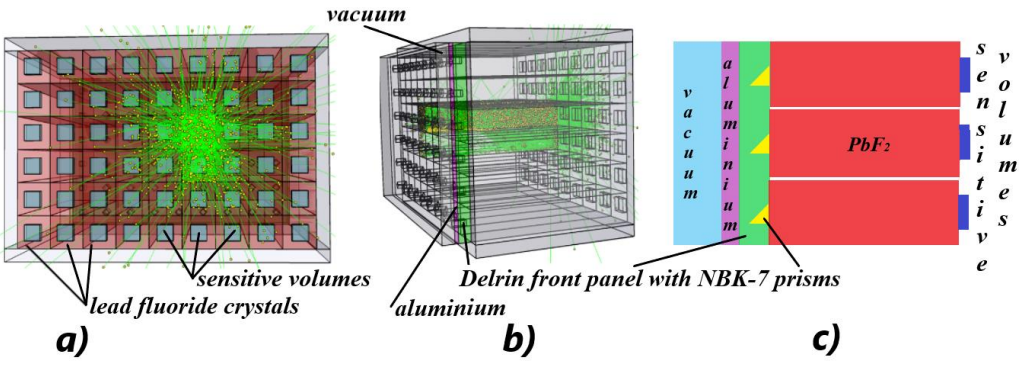

Рисунок 11 Структура калориметрического модуля, моделирование которого проводилось с использованием программы Geant4.

Далее в параграфе описывается моделирование слой за слоем с получением информации о ливнях вторичных частиц, тормозном и переходном излучении (см. Рисунок 12), черенковском излучении в кристаллах калориметра и на их выходных гранях (спектральные и угловые распределения фотонов) — всего того, что нужно для измерения энергии частицы, попавшей в калориметр.

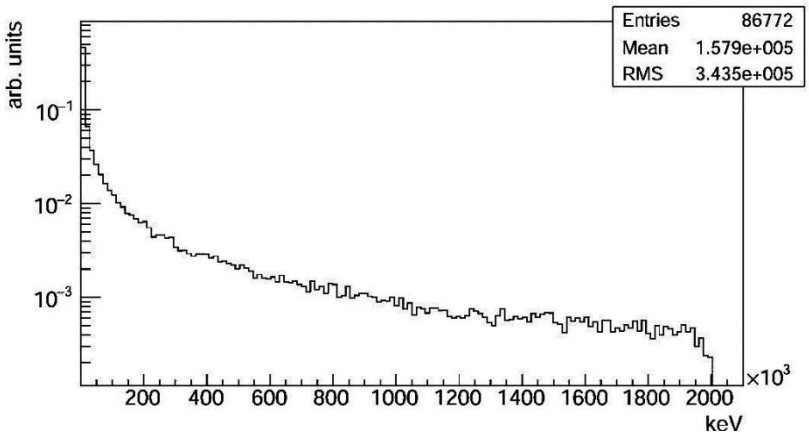

Рисунок 12 Распределение энергии переходного излучения и тормозного излучения, смоделированное при прохождении 2 ГэВ позитронов через 3 мм алюминиевую пластину и фронтальную панель из сантиметрового пластика Delrin.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по проделанной в диссертации работе**.**

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В данной диссертационной работе были теоретически исследованы характеристики переходного излучения, в частности распределение фотонов по углам. Была построена теория малоуглового рентгеновского переходного излучения от слоистых сред и получены аналитические выражения, позволяющие точно определять угловые распределения фотонов от различных радиаторов для различных энергий частиц.
2. Построенная теория предсказала наличие острых пиков в угловых распределениях фотонов переходного излучения на малых углах, и показала, что данные пики физически являются результатом сложной интерференции волн, излучаемых от фольг радиатора. Получено дисперсионное соотношение, решение которого позволяет оценить положение основных максимумов в зависимости от параметров радиатора для конкретных экспериментальных целей.
3. Продемонстрировано высокоточное совпадение теоретических результатов с экспериментальными измерениями угловых распределений РПИ.
4. Для учета сторонних процессов, сопровождающих переходное излучение, была создана модель детектора переходного излучения в программном комплексе Geant4, на основе концепта одномоментного измерения угловых и спектральных распределений переходного излучения. Однако, сравнение результатов моделирования с построенной теорией, а затем и с экспериментом, показало необходимость корректировки модуля рентгеновского переходного излучения.

Расхождение наблюдалось в угловых распределениях фотонов переходного излучения на малых углах. Спектральные распределения хорошо совпали как с теорией, так и с экспериментом.

5. На основе теоретических и экспериментальных результатов была проведена корректировка встроенного модуля переходного излучения, которая свелась к внесению изменений в основной код, ответственный за расчет характеристик переходного излучения в программном комплексе Geant4. После выполнения необходимых правок, прежние расхождения в угловых распределениях нивелировались, и новое сравнение теории и эксперимента с моделированием дало хорошее совпадение распределений фотонов по углам. Теперь такой скорректированный модуль позволяет использовать возможность генерации рентгеновского переходного излучения для дальнейших разработок детекторов на РПИ.
6. Построена модель детектора на основе калориметрического модуля, предназначенного для регистрации жестких фотонов рентгеновского переходного излучения, рассеявшихся в радиаторе под большими углами. Рассеяние на большие углы можно использовать как дополнительный инструмент исследования переходного излучения и характеристик порождающих его быстрых частиц [20]. За основу был взят калориметрический модуль, используемый в настоящее время для эксперимента g-2. Данная модель учитывает широкий спектр процессов, сопровождающих пролет частиц через структуру модуля, что дает возможность использовать модель для моделирования различных детекторов в будущем.

Результаты моделирования и теоретических исследований, полученные в данной работе, уже себя оправдали и дальше будут играть важную роль в разработке детекторов, способных детектировать ультрарелятивистские заряженные частицы с лоренц-факторами выше 10^3, включая адроны энергетического диапазона 2 – 5 ТэВ, что, например, является ключевым требованием для Малоуглового спектрометра на LHC (Small Angle Spectrometer или Forward Hadron Spectrometer) [1], – нового эксперимента, который сегодня активно обсуждается в научном сообществе, и других экспериментов такого рода.

Публикации автора

1 **A.A. Savchenko**, A.A. Tishchenko, D.Yu. Sergeeva et al., *Fine structure of angular distribution of x-ray transition radiation from multilayered radiator in Geant4* // Journal of Instrumentation. 2020. Vol. 15. P. C06024. **(WOS, Scopus)**

2 J. Alozy, N.Belyaev, M. Campbell, (…), **A.A. Savchenko** et al., *Studies of the spectral and angular distributions of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip* // Nucl. Inst. and Meth. A. 2020. Vol. 961. P. 163681. **(WOS, Scopus)**

3 W. Wagner, **A.A. Savchenko**, B. Azadegan, *Simulation of positron spectra of a hybrid positron source* // Journal of Instrumentation. 2020. Vol. 15. P. C06006. **(WOS, Scopus)**

4 F. Dachs, J. Alozy, N. Belyaev, (…), **A.A. Savchenko** et al., *Transition radiation measurements with a Si and a GaAs pixel sensor on a Timepix3 chip* // Nucl. Inst. and Meth. A. 2020. Vol. 958. P. 162037. **(WOS, Scopus)**

5 J. Alozy, N.Belyaev, M. Campbell, (…), **A.A. Savchenko** et al., *Identification of particles with Lorentz factor up to 10^4 with Transition Radiation Detectors based on micro-strip silicon detectors* // Nucl. Inst. and Meth. A. 2019. Vol. 927. P. 1. **(WOS, Scopus)**

6 W. Wagner, **A. A. Savchenko**, B. Azadegan, and M. Shafiee, *Nondipolarity of axial channeling radiation at GeV beam energies* // Phys. Rev. AB. 2019. Vol. 22. P. 054502. **(WOS, Scopus)**

7 **A.A. Savchenko**, D.Yu. Sergeeva, A.A. Tishchenko, M.N. Strikhanov, *Small-angle X-ray transition radiation from multilayered structures* // Phys. Rev. D. 2019. Vol. 99. P. 016015. **(WOS, Scopus)**

8 **A.A. Savchenko**, A.A. Tishchenko, E.A. Shulga, A.S. Romaniouk, Yu.S. Smirnov, M.N. Strikhanov, *X-ray transition radiation from polypropylene radiator: experiment and Geant4* // Physics of Atomic Nuclei. 2018. Vol. 81. P. 1618. **(WOS, Scopus)**; Савченко А.А., Тищенко А.А., Шульга Е.А., Романюк А.С., Смирнов Ю.С., Стриханов М.Н., *Рентгеновское переходное излучение от полипропиленового радиатора: эксперимент и Geant4* // Ядерная Физика и Инжиниринг. 2018. Том 9. № 2. с. 166–170.

9 E. Schioppa, F. Dachs, J. Alozy, (…), **A.A. Savchenko** et al., *First measurements of the spectral and angular distribution of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip* // Nucl. Inst. and Meth. A. 2018. Vol. 936. P. 523. **(WOS, Scopus)**

10 **A.A. Savchenko**, A.A. Tishchenko, S.B. Dabagov et al., *Geant4 simulations of the lead fluoride calorimeter* // Nucl. Inst. and Meth. B. 2017. Vol. 402. P. 256. **(WOS, Scopus)**

Список литературы

[1] M. Albrow, "A Very Forward Hadron Spectrometer for the LHC and Cosmic Ray Physics," *arXiv:1811.02047v1,* 2018.

[2] A. Andronic and J. Wessels, "Transition radiation detectors," *Nucl. Instr. and Meth. A,* vol. 666, p. 130, 2012.

[3] V. L. Ginzburg and I. Frank, "Radiation from a uniformly moving electron due to its transition from one medium into another," *J. Phys. USSR,* vol. 9, p. 353, 1945.

[4] G. M. Garibyan, "Transition radiation effects in particle energy losses," *JETP,* vol. 37, p. 372, 1960.

[5] K. A. Barsukov, "Transition radiation in waveguides," *JETP,* vol. 37, p. 787, 1960.

[6] T. Siedenburgathe et al. (AMS-TRD Collaboration), "The AMS TRD. A gasdetector designed for operation in space," *Nucl. Phys. B - Proceedings Supplements,* vol. 150, p. 30, 2006.

[7] E. Abat et al. (ATLAS collaboration), "The ATLAS TRT end-cap detectors," *Journal of Instrumentation,* vol. 3, p. P02014, 2008.

[8] X. Artru, G. B. Yodh and G. Mennessier, "Practical theory of the multilayered transition radiation detector," *Phys. Rev. D,* vol. 12, p. 1289, 1975.

[9] Г. М. Гарибян и Я. Ши, Рентгеновское переходное излучение, Ереван, 1983.

[10] В. Пафомов, «Излучение заряженной частицы при наличии границ раздела,» *Труды ФИАН,* т. 44, p. 28, 1969.

[11] V. E. Pafomov, "On the Interference Effects of Radiation in Layered Media," *Sov. Phys. Tech. Phys. ,* vol. 8, p. 412, 1963.

[12] V. E. Pafomov, "Radiation of a charged particle in the presence of a separating boundary," *The Lebedev Phys. Inst. Series, Springer,* vol. 44, p. 25, 1971.

[13] J. Alozy, N. Belyaev, M. Campbell et al. , "Studies of the spectral and angular distributions of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip," *Nucl. Inst. and Meth. A ,* vol. 961 , p. 163681, 2020.

[14] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis et al., "Recent Developments in Geant4," *Nucl. Instrum. Meth. A ,* vol. 835, p. 186, 2016.

[15] V. M. Grichine and S. S. Sadilov, " GEANT4 models for X-ray transition radiation," *Nucl. Instrum. Methods A ,* vol. 522, p. 122, 2004.

[16] J. Alozy, N. Belyaev, M. Campbell et al., "Identification of particles with Lorentz factor up to 10^4 with Transition Radiation Detectors based on micro-strip silicon detectors," *Nucl. Instrum. Methods A,* vol. 927, p. 1, 2019.

[17] A. A. Savchenko, D. Y. Sergeeva, A. A. Tishchenko and M. N. Strikhanov, " Small-angle X-ray transition radiation from multilayered structures," *Phys. Rev. D ,* vol. 99, p. 016015, 2019.

[18] N. Belyaev, M. L. Cherry, K. Desch et al. , "Measurements of angular distribution and spectrum of transition radiation with a GridPix detector," *Journal of Physics: Conference Series,* vol. 934, no. 1, p. 012049, 2017.

[19] A.A. Savchenko, A.A. TishchenkPs, D.Yu. Sergeeva et al., "Fine structure of angular distribution of x-ray transition radiation from multilayered radiator in Geant4," *Journal of Instrumentation,* vol. 15, p. C06024, 2020.

[20] Michael L. Cherry, Gary L. Case,, "Compton scattered transition radiation from very high energy particles," *Astroparticle Physics,* vol. 18, no. 6, p. 629, 2003.