Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2019 г. по 30.06.2020 г.

по проекту **«Квантовая динамика пучков с фазами и её приложения»**,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 17-72-20013

Руководитель: канд. физ.-мат. наук Карловец Дмитрий Валерьевич

1. Разработана модель для расчёта рассеяния субнанометровых негауссовых волновых пакетов частиц современных ускорителей и электронных микроскопов. Изучены простейшие процессы рассеяния и аннигиляции в квантовой электродинамике (КЭД) и пертурбативной хромодинамике для лептонов и адронов с орбитальным моментом импульса в модели пакетов Гаусса-Лагерра. Получены первые неисчезающие поправки к сечению рассеяния приближения плоских волн для s- и t-каналов. Предложена новая методика измерения зависимости общей фазы амплитуды рассеяния (в т.ч. адронной фазы) от энергии и угла рассеяния за счёт азимутальной асимметрии сечения, возникающей в т.ч. благодаря орбитальному моменту. Показано, что «неплосковолновые» поправки могут быть порядка радиационных поправок КЭД для умерено релятивистских лептонов и адронов, особенно когда адрон (прежде всего, протон) обладает большим орбитальным моментом: $l \sim 1000$ и выше.

2. Получены непараксиальные обобщения пакетов Гаусса-Лагерра с орбитальным моментом, являющиеся точными решениями уравнений Шрёдингера, Клейна-Гордона и Дирака. Показано, что непараксиальные поправки к наблюдаемым линейно усиливаются при большом орбитальном моменте и могут достигать относительной величины 0.1% для реалистичных параметров. Данные поправки описывают, в частности, спин-орбитальное взаимодействие в свободных закрученных пучках.

3. Предсказано, что негауссовы пакеты заряженных частиц могут обладать внутренними мультипольными моментами, связанными исключительно с негауссовостью, если они разрешены CPT-симметрией. Сюда относятся закрученные электроны с орбитальным моментом, пучки Эйри, суперпозиции типа “кота Шрёдингера” и др. Магнитный дипольный момент и электрический квадрупольный момент негауссовых пакетов могут быть соизмеримыми с соответствующими моментами некоторых атомов и молекул. Генерация таких электронных состояний возможна на современных электронных микроскопах. Предсказана возможность экспериментальной регистрации непараксиального вклада квадрупольного момента в электромагнитное поле закрученного электрона по его влиянию на спектр излучения.

4. Разработана модель для расчёта «швингеровского» рассеяния холодных нейтронов с орбитальным моментом на ядрах и реалистичных мишенях. Предсказано несколько новых эффектов, в частности появление зависимости сечения рассеяния на локализованной мишени от спиральности нейтрона и действительной части адронной

амплитуды уже в борновском приближении. Предложенный нами метод является дополнительным к уже существующим и предсказывает соответствующую спиральную асимметрию вплоть до десятков процентов при реалистичных параметрах, что значительно больше, чем уже достигнутая чувствительность нейтронных экспериментов. Использование закрученных нейтронов представляется перспективным для целей нейтронной оптики и ядерной физики низких энергий.

5. Предложена модель для расчёта излучения Смита-Парселла от закрученных электронов, генерируемого при взаимодействии с проводящей решеткой. Проведены расчёты в диапазоне длин волн от ТГц до оптики в модели, когда состояние электрона описывалось как пакет Гаусса-Лагерра с магнитным моментом и электрическим квадрупольным моментом. Влияние последнего приводит к ряду интересных предсказаний: тогда как интенсивность излучения классического заряда растет приблизительно линейно с числом периодов решетки, квадрупольный вклад приводит к более быстрому квадратичному росту подобно эффекту когерентности от классического пучка. Однако здесь это чисто квантовый эффект, который для нерелятивистских и умерено релятивистских электронов может приводить к изменению углового распределения и к увеличению потерь на излучение.

6. Вычислен тензор поляризации фотонов в поле импульсного лазерного пучка Гаусса-Лагерра и Гаусса-Эрмита для линейной и эллиптической поляризации лазера и параметров установки Extreme Light Infrastructure. Исследовано рассеяние и изменение поляризации фотонов при прохождении через моду Гаусса-Лагерра, в т.ч. проведен анализ рассеяния рентгеновского импульсного пучка (частота 3*10^18 Гц, длительность = 30 фемтосекунд) на мощном лазере (мощность ~1 ПВт, длина волны 800 нм) в выделенной моде Гаусса-Лагерра. В параксиальном приближении получено выражение для числа рассеянных фотонов с выделенной поляризацией; для мод с ненулевым радиальным индексом (p = 1,10) и нулевым угловым (l = 0) дана оценка величины эффекта с учетом чистоты поляризации пучка, достижимой в современных лабораториях.

7. В рамках метода Иваненко-Соколова проведены оценки углового момента на один фотон в излучении каналированных электронов в кристалле кремния. Найдено, что для <110> аксиального каналирования 255 МэВ-ных электронов в кристалле Si средний орбитальный момент излучения в расчёте на один фотон составляет до 6 (в единицах постоянной Планка) для кристалла толщиной 5 мкм и до 3 для кристалла толщиной 0.5 мкм. Максимальное значение орбитального момента излучения при аксиальном каналировании достигается при начальном угле влёта пучка в кристалл 0.5-0.6 от критического угла Линдхарда. Для (220) плоскостного каналирования 0.1-2.5 ГэВ-ных электронов среднее значение орбитального момента излучения достигает максимума = 1 для кристалла толщиной 0.5 мкм при начальном угле влёта пучка в кристалл равном критическому углу Линдхарда.

8. Разработана теория излучения закрученных фотонов классическими токами, в том числе релятивистскими заряженными частицами при движении в ондуляторах и вигглерах. Найдена вероятность излучения для произвольного угла наблюдения и

доказано несколько правил отбора для ондуляторного излучения закрученных фотонов. Исследована универсальная инфракрасная асимптотика вероятности излучения закрученных фотонов.

9. Получены аналитические выражения для излучения закрученного фотона, сгенерированного холодным релятивистским пучком заряженных частиц. Полученная формула включает в себя как когерентные, так и некогерентные вклады, которые определяются форм-факторами пучка. Получены выражения для когерентных и некогерентных интерференционных множителей для ряда профилей пучков. Исследовано излучение пучков при движении в дисперсионной изотропной среде – краевое излучение, переходное излучение и излучение Вавилова-Черенкова, а также излучение в ондуляторах и вигглерах. Показано, что некогерентный вклад в излучении закрученных фотонов определяется исключительно нулевой фурье-гармоникой распределения пучка по азимутальному углу, т.е. вероятность некогерентного излучения такая же, как и для аксиально-симметричных пучков. Для плоских ондуляторов показано, что нечетные фурье-гармоники распределения пучка по азимутальному углу не вносят вклад в некогерентное излучение, которое в этом случае является таким же, как и для пучка, симметричного относительно отражения в оси детектора.

10. Исследовано излучение закрученных фотонов спиральными пучками. Получено правило сложения для длинных спиральных пучков, которое утверждает, что спектр закрученных фотонов по проекции полного углового момента m сдвинут на n, где n - номер гармоники когерентного излучения. Это свойство может быть использовано для создания чистых источников закрученных фотонов. Исследовано несколько примеров излучения спиральных пучков, включая краевое, переходное и излучение Вавилова-Черенкова, излучение в спиральных вигглерах и лазерной волне круговой поляризации. Найдены оптимальные параметры пучка для генерации закрученных фотонов.

11. В квазиклассическом приближении получена формула для вероятности излучения закрученного фотона скалярными и дираковскими ультрарелятивистскими частицами в электромагнитном поле общей конфигурации. Эта формула учитывает квантовую отдачу, испытываемую частицей при излучении. Исследовано излучение закрученных фотонов в спиральных ондуляторах и в циркулярно поляризованных плоских волнах. Учет квантовой отдачи запрещает излучение фотонов с энергиями, превышающими начальную энергию частиц. Установлено, что квантовая отдача увеличивает суммарный выход излучения по сравнению с классическими формулами и одновременно уменьшает энергию излучаемых фотонов. Спиновые степени свободы излучающей частицы также увеличивают вероятность излучения закрученных фотонов.

Найдено число закрученных фотонов с большими проекциями углового момента для излучения вперед. Исследован эффект распускающейся розы в излучении закрученных фотонов электронами в сильных лазерных волнах круговой поляризации и вигглерах. Изучено излучение в вигглере и в плоских волнах,

создаваемых лазерами на CO2 и Ti:Sa. Показано, что закрученные МэВ-ные фотоны с $m \sim 5$ могут генерироваться в спиральных вигглерах. Для лазеров показано, что создание чистого источника закрученных фотонов на основе нелинейного комптоновского процесса возможно только для длинных лазерных импульсов с гладкой огибающей амплитуды. Для коротких импульсов направление генерации закрученных фотонов зависит от начальной фазы волны, которой сложно управлять. Поэтому детектор будет воспринимать излучение закрученных фотонов с широким разбросом проекций углового момента.