

## Отзыв научного руководителя

о диссертации Яблокова Станислава Николаевича «Модифицированный метод Фока-Швингера для нахождения точных решений пропагаторных уравнений в присутствии магнитного поля», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Исследование квантовых процессов в сильных магнитных полях является перспективным направлением теоретической физики, лежащим на стыке физики элементарных частиц, астрофизики и космологии. Во многих работах обсуждаются масштабы полей с интенсивностью, существенно большей, чем так называемый предел Швингера  $B_e = m_e^2/e \approx 4.4 \times 10^{13}$  Гс, который иногда называют квантующим полем для электрона. Считается, что такие физические условия реализуются вблизи сильно замагниченной нейтронной звезды – магнитара, в ядре и оболочке сверхновой. Другой масштаб магнитных полей, который естественно вводить при рассмотрении условий ранней Вселенной, определяется массой калибровочного бозона  $m_w$  и может служить границей применимости Стандартной модели:  $B_w = m_w^2/e \approx 10^{24}$  Гс. Существует класс моделей ранней Вселенной, который основан на идее её доменной структуры, где такие сильные поля  $\sim B_w$  могли бы существовать.

Необходимым элементом теоретического исследования квантовых процессов в аппарате квантовой теории поля является пропагатор частицы, называемый также функцией Грина квантованного поля или функцией распространения. При исследованиях в магнитных полях указанных масштабов влияние поля на пропагатор заряженной частицы должно учитываться точно, а не по теории возмущений. Знание различных представлений пропагаторов во внешнем магнитном поле и условий их применимости является весьма важным. В литературе имеются примеры, когда непонимание таких условий приводило к появлению полностью ошибочных статей. Таким образом, исследование разнообразных представлений пропагаторов, разработка новых методов их вычисления в различных физических условиях или модификация уже имеющихся методов – актуальная задача, привлекающая внимание специалистов в области квантовой теории поля, физики элементарных частиц и астрофизики.

В диссертации С.Н. Яблокова выполнен сравнительный анализ существующих методов вычисления пропагаторов во внешних полях и разработан новый оригинальный метод – модифицированный метод Фока–Швингера, основанный на действии экспоненциального оператора на дельта-функцию, построенную из собственных решений соответствующей задачи. Разработанная модификация метода была успешно применена для нахождения пропагатора заряженной частицы (скаляра, фермиона, массивного векторного бозона), что демонстрирует её потенциал при использовании, как в схожих физических сценариях, так и в задачах с аналогичными математическими конструкциями. Эффективность метода была блестяще подтверждена тем, что он уже был использован другой группой исследователей (A. Ayala et al., Phys. Rev. D 2021, V. 103, P. 076021) для вычисления пропагатора электрона во вращающейся среде, благодаря единству в математическом описании внешних калибровочных полей и криволинейных координат через аппарат ковариантной производной.

Работа С.Н. Яблокова состоит из Введения, трёх глав и заключения. В работе представлены следующие новые результаты:

1. Разработана модификация метода собственного времени Фока–Швингера, которая позволяет значительно упростить процесс получения решения пропагаторного уравнения во внешнем постоянном магнитном поле по сравнению с известными методами.
2. Найден общий вид решения пропагаторного уравнения для векторного массивного бозона в постоянном электромагнитном поле в произвольной кси-калибровке в виде последовательного действия экспоненциальных операторов на дельта-функцию внутри интеграла по параметру собственного времени.

3. Получены выражения для пропагаторов заряженных частиц (скаляра, фермиона и массивного векторного бозона) в постоянном магнитном поле в координатном представлении в виде разложения в ряд по уровням Ландау.
4. В полученном координатном представлении пропагатора скалярной частицы исследована взаимозависимость радиальной координаты в перпендикулярной к магнитному полю плоскости и переменных время-координата в псевдоевклидовой «продольной» гиперплоскости, проявляющаяся косвенным образом через номер уровня Ландау; учёт этой взаимозависимости может быть полезен при анализе амплитуд физических процессов.

В целом С.Н. Яблоков выполнил всю программу запланированных исследований. В процессе работы С.Н. Яблоков проявил высокую степень самостоятельности и инициативности, заинтересованность и настойчивость в разрешении возникавших научных вопросов и вычислительных проблем, что позволило в итоге получить интересные результаты. Основные из полученных результатов докладывались С.Н. Яблоковым на российских и международных конференциях и школах (4th International Conference on Particle Physics and Astrophysics, г. Москва, НИЯУ МИФИ, 22-26 октября 2018 г.; Moscow International School of Physics 2020, HSE Study Center «Voronovo», 3-9 March 2020; 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics, г. Москва, НИЯУ МИФИ, 5-9 октября 2020 г.; Virtual Workshop on the Schwinger Effect and Strong Field Physics, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan, January 18-29, 2021; Всероссийские с международным участием молодежные научно-практические конференции «Физика, техника и технология сложных систем», Ярославль, 22-30 апреля 2019 г.; 20-30 апреля 2020 г.; 22-30 апреля 2021 г.).

Результаты опубликованы в шести печатных работах, из них две статьи в международных журналах «Physical Review D» и «European Physical Journal C», входящих в первый квартиль Q1 научных журналов базы данных «Сеть науки – Web of Science», и две статьи в международном журнале «Journal of Physics Conference Series».

Подготовлено и опубликовано учебно-методическое пособие «Пропагаторы заряженных частиц во внешнем магнитном поле», предназначенное для студентов, обучающихся по направлению Физика, магистерская программа Теоретическая физика, дисциплина «Квантовые процессы во внешней активной среде».

На мой взгляд, С.Н. Яблоков достаточно подготовлен для самостоятельной научной и научно-педагогической работы и имеет все основания претендовать на присвоение ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Научный руководитель,  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры  
теоретической физики  
ЯрГУ им. П.Г. Демидова

А.В. Кузнецов

18 апреля 2022 г.

Подпись заверяю:  
Заместитель начальника управления –  
директор центра кадровой политики

\_\_\_\_\_ Л.Н. Куфирина