О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Кобялко Кирилла Владимировича
“Геометрический подход к теории фотонных многообразий в гравитационных полях”
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 (теоретическая физика).

Диссертация Кобялко Кирилла Владимировича посвящена развитию и обобщению геометрических подходов к теории фотонных многообразий в сильных гравитационных полях. Под фотонными многообразиями понимаются подмногообразия или поверхности пространства-времени, заполненные компактными фотонными орбитами. Хорошо известными примерами таких подмногообразий служат: фотонная сфера в метрике Шварцшильда, и сферические поверхности в пространстве-времени Керра, содержащие неэкваториальные сферические фотонные орбиты. Данные поверхности играют ключевую роль при описании различных оптических эффектов в сильных гравитационных полях и, в частности, при изучении механизмов формирования гравитационных теней чёрных дыр.

Актуальность темы диссертационного исследования не вызывает сомнений; она особенно возросла после получения первых изображений черных дыр M87* и Sgr A* в ходе работы международного проекта “Event Horizon Telescope”. Эти изображения являются примером экстремально сильного гравитационного линзирования. Теоретически задача линзирования обычно рассматривается на основе уравнений геодезических. Но в рамках проекта “Event Horizon Telescope” с целью поиска новой физики тестируются оптические предсказания самых разных гравитационных моделей, в том числе, выходящих за рамки класса “стандартных” решений Керра и Шварцшильда, когда разделение переменных в уравнениях геодезических не гарантируется. В связи с этим в настоящее время возникла потребность в разработке и применении новых современных методов исследования поведения неинтегрируемых динамических систем и пространств со скрытыми симметриями.

Развиваемые в диссертации геометрические методы и определяемые новые типы фотонных подмногообразий с успехом отвечают на указанный вызов (потребность), привлекая к исследованию поведения изотропных геодезических современные методы дифференциальной геометрии подмногообразий и потоков гиперповерхностей. Таким образом, открывается широкое окно возможностей для аналитических исследований оптических свойств, в том числе связанных с неинтегрируемыми динамическими системами, которые возникают в актуальных модификациях общей теории относительности. Более того, новые геометрические подходы демонстрируют свою высокую эффективность при анализе скрытых симметрий

пространства-времени. В частности, они позволяют анализировать структуру тензорных полей Киллинга различных рангов.

Весь изложенный в диссертации материал допускает естественное дальнейшее обобщение, например, в контексте исследований рассеяния массивных заряженных частиц в гравитационных полях ультракомпактных объектов.

Диссертация состоит из Введения, восьми глав, Заключения, Списка сокращений и условных обозначений, Списка литературы и двух Приложений с иллюстрациями.

Во Введении обосновывается актуальность и анализируется разработанность темы исследования, проводится достаточно подробный обзор научной литературы по изучаемой проблематике, формулируется основная цель и задачи диссертационного исследования, формулируются основные выносимые на защиту положения, а также обосновывается научная новизна, достоверность и практическая значимость результатов диссертации.

Глава 1 является математическим введением в используемый в диссертации формализм и содержит сведения и обозначения из различных современных разделов дифференциальной геометрии, теории подмногообразий, потоков гиперповерхностей и слоений многообразий.

Глава 2 содержит основные сведения и некоторые приложения теории полей Киллинга второго и первого рангов. В частности, анализируются особенности геометрического описания классов геодезических с заданными значениями сохраняющихся интегралов движения. В данной главе также разрабатывается новый геометрический метод генерации тензорных полей Киллинга второго ранга в пространствах со слоениями коразмерности один. В основе данного метода лежит идея о “подъёме” редуцируемого в слоях тензорного поля Киллинга до нередуцируемого тензора Киллинга в полном пространстве времени. Выявлены необходимые и достаточные условия возможности такого подъёма, а также отмечена его тесная связь с особенностями фотонной структуры пространств (многообразий).

В Главе 3 дается обзор как хорошо известных в литературе результатов о природе и особенности геометрии фотонных поверхностей в статических пространствах, так формулируются и новые результаты о структуре фотонных поверхностей в более общих классах стационарных пространств. В частности, приводятся общие выражения для главных кривизн инвариантных фотонных поверхностей в пространствах с изометриями. В асимптотически плоских стационарных пространствах строятся неравенства Пенроуза для пространственных сечений фотонных поверхностей и изучается их геодезическая стабильность.

В Главе 4 определяются новые типы фотонных подмногообразий - фундаментальное фотонное подмногообразие и фотонная область. Данные объекты обобщают классические фотонные поверхности и области на случай стационарных аксиально-симметричных пространств и имеют самодостаточную геометрическую интерпретацию, без отсылки к динамическим геодезическим уравнениям. Фундаментальное фотонное

подмногообразие имеет компактное пространственное сечение, как правило, сферической топологии, и улавливает все, хоть раз касающиеся его изотропные геодезические с фиксированным значением прицельного параметра. Как и обычные фотонные сферы в метрике Шварцшильда, новые фотонные подмногообразия играют ключевую роль в процессах формирования гравитационных теней ультракомпактных объектов в модифицированных теориях гравитации. В заключении главы, исследуется связь между фундаментальными фотонными подмногообразиями и скрытыми симметриями пространства-времени.

В Главе 5 содержится формулировка основных математических аспектов развиваемой теории в терминах фиксированной системы координат типа Бойера-Линдквиста. Получены частные виды условий интегрируемости и совместности для генерации нетривиального тензора Киллинга второго ранга, выведено общее дифференциальное уравнение для описания фундаментальных фотонных поверхностей «несферической» формы.

В Главе 6 разработанные в предыдущих главах методы применяются к стационарным метрикам с вращением, таким как метрики Керра и Керра-Ньюмена. Формулируется расширенная классификация чёрных дыр и голых сингулярностей, основанная на особенностях структуры их фотонных поверхностей и свойствах излучения фотонов на бесконечность. Данная классификация расширяет классификацию на “сильные” и “слабые” сингулярности, предложенную Сингом для статических пространств, и имеет тесную связь с задачей классификации гравитационных теней.

Глава 7 содержит подробный анализ оптических свойств класса Плебанского-Демьянского стационарных аксиально-симметричных пространств типа D. Данное семейство решений включает черные дыры, голые сингулярности, кротовые норы, пространства с ускорением и космологической постоянной. Для широкого диапазона физических параметров проведена классификация типов и числа фотонных поверхностей и областей, а также найдены соответствующие тензорные поля Киллинга второго ранга.

Глава 8 содержит приложения разработанного в диссертации геометрического подхода к изучению фотонной структуры пространств Зипоя-Вурхиса, относящихся к классу статических решений за рамками керровской парадигмы, которые активно исследовались в последнее время в литературе. На данном примере демонстрируется, что существование фундаментальных фотонных подмногообразий не является уникальной особенностью вращающихся решений и следствием интегрируемости геодезических уравнений. При этом проводимое в данной главе численное исследование поведения изотропных геодезических демонстрирует, что даже в случае неинтегрируемых динамических систем фотонные поверхности играют важную роль в контексте описания различных оптических феноменов.

Диссертация хорошо оформлена в целом и содержит в Приложении множество высококачественных цветных рисунков. Она является

завершённым научным исследованием, которое может иметь важные научно-практические применения (например, в астрофизике). В качестве замечания следует отметить отсутствие упоминания в тексте диссертации о применении фотонных сфер при вычислении спектров квазинормальных мод различных тестовых полей в эйкональном приближении. Это замечание носит характер пожелания на будущие исследования и не снижает ценности работы.

Проведённые в диссертации исследования и полученные результаты, выводы и рекомендации являются новыми, обоснованными и достоверными. Основные результаты своевременно опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах с высокими импакт-факторами, а также были доложены на научных конференциях и семинарах. Автореферат диссертации верно и полностью соответствует тексту и основным выводам диссертации.

На основании вышеизложенного заключаю, что диссертационная работа «Геометрический подход к теории фотонных многообразий в гравитационных полях» представляет собой законченное научное исследование, удовлетворяет всем требованиям ВАК и критериям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и её автор, Кобялко Кирилл Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 (теоретическая физика).

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник отдела
координации научных исследований и разработок
Федерального государственного бюджетного
учреждения Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологической службы (ФГБУ ВНИИМС),
Москва, 119361, ул. Озерная, 46,
Специальность 01.04.02 (теоретическая физика)
тел.: 8-916-525-3911, эл. почта: ivas@vniims.ru

В.Иващук — В.Д. Иващук

Подпись доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника ФГБУ ВНИИМС В.Д. Иващука заверяю:

Специалист по персоналу Бурина

18.08.2022 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ * ОГРН 1127708055054 * ВНИИМС * ОТДЕЛ КАДРОВ * МОСКВА * Федеральная служба по аккредитации