

Оксфордские вопросы к основаниям квантовой физики

Дж. Бриггс, Дж. Баттерфилд и А. Цайлингер (Великобритания, Австрия)

Перевод М.Х. Шульмана (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

arXiv: 1307.1310

The Oxford Questions on the foundations of quantum physics

G. A. D. Briggs¹ (andrew.briggs@materials.ox.ac.uk), J. N. Butterfield² and A. Zeilinger³

¹Department of Materials, University of Oxford, Oxford OX1 3PH, UK

²Trinity College, University of Cambridge, Cambridge CB2 1TQ, UK

³Faculty of Physics, University of Vienna, Vienna, Austria

Двадцатый век видел две фундаментальные революции в физике — относительность и кванты. Повседневное использование соответствующих теорий может поразить воображение их огромным эмпирическим успехом. Покоится ли их инструментальная эффективность на твердой почве надежных понятий или на песке зыбких оснований? Является ли измерение квантовой системы изучением или даже созданием реальности, или простым изменением воображаемой картины? Должны ли теория относительности и квантовая теория мирно сосуществовать, или мы найдем новую теорию, которая объединит обе теории? Чтобы заострить эти вопросы, мы созвали конференцию по квантовой физике и природе реальности. Некоторые представления остаются, как всегда, противоречивыми, но некоторые поддаются усилиям теории, вооруженной экспериментом.

1. Достижения физики двадцатого века

Значительная часть истории физики двадцатого века — это история развития и укрепления идей релятивистской и квантовой революций, когда их основные положения применялись все более широко. Сейчас забывается, как неожиданно была доказана успешность в областях, далеких от первоначально охваченных ими. Почему новая хроногеометрия, введенная специальной теорией относительности Эйнштейна в 1905 году [1] для электромагнитных явлений, должна быть также справедливой для механики, термодинамики и других ветвей физики? И почему квантовая теория, созданная для систем с атомными размерами (10^{-10} м), должна оказаться подходящей для масштабов намного меньших (в экспериментах с высокими энергиями от 10^{-17} до 10^{-20} м) и намного больших (сверхпроводимость и сверхтекучесть, или даже нейтронный интерферометр, с масштабами порядка долей метра, и даже больше)? Является ли это верхним пределом масштаба, где квантовая теория может быть пригодной? Есть ощущение, что все свойства материи являются квантовомеханическими. Описания различных фазовых переходов в сплавах и проводимости в полупроводниках все основаны на квантовой теории. Новые квантовомеханические модели разрабатываются для все возрастающего спектра сверхпроводников, магнитных материалов, сегнетомагнетиков и топологических изоляторов.

То же справедливо, если мы говорим о физике внеземных процессов. Общая теория относительности имеет удивительную историю: эта теория была создана принципиально одним человеком, который концептуально руководствовался

аналитическими (отчасти непосредственно философскими) соображениями; кроме того, это было экспериментально и точно проверено для всех астрономических ситуаций. Они распространяются в диапазоне от слабых гравитационных полей, таких, как в солнечной системе, для которых имеется знаменитое объяснение очень малой прецессии Меркурия (43 дуговые секунды за столетие), которая не учитывалась теорией Ньютона, до в 10 000 раз более сильных полей в удаленных бинарных пульсарах, которые за последние 30 лет бросали нам вызывающие доказательства явления (гравитационного излучения), предсказываемого общей теорией относительности и многолетними исследованиями в этой области.

Но общая теория относительности дает не только пример успешной теории в современной физическом описании неземных феноменов. Квантовая теория также была чрезвычайно успешной в применении к астрономии: подходящим примером является использование ядерной физики для развития очень точных и детальных теорий звездных структур и эволюции.

Действительно, существует более общий момент, выходящий за пределы успехов теории относительности и квантовой теории. Мы стараемся использовать различные единицы в Природе, которые наука выявляет – и, таким образом, отвлекаясь от того, насколько случайными и неожиданными они являются. Разумеется, это не является тенденцией, характерной именно для нашей эры. Например, девятнадцатый век в физике подтвердил закон тяготения Ньютона применительно к пространству за пределами Солнечной системы и позволил открыть земные элементы, существующие в звездах (с помощью спектроскопии): эти открытия были вначале неожиданными, но вскоре стали общепризнанными, встроенными в то, что называется термином ‘здравый смысл’. Аналогично, сегодня: многие и разнообразные успехи физики за последние несколько десятков лет, изучающие очень точно явления, которые сильно удалены в пространстве и времени и/или очень отличаются наших обычных ‘лабораторных масштабов’ (в отношении таких характеристических величин как энергия, температура и давление, и т.п.), выявляют замечательное единство в Природе. В качестве современного, специфического (и, буквально, умоизмерительного) примера рассмотрим точность и подробности наших моделей суперновых – что подтверждается чудесными возможностями современной технологией телескопов, позволяющих видеть и анализировать отдельные сверхновые, даже в других галактиках.

В некоторых случаях теоретическое предсказание опережающим образом стимулирует экспериментальное подтверждение; иногда бывает и по-другому. Около полувека прошло после экспериментального открытия сверхпроводимости, когда квантовая теория дала его удовлетворительное объяснение, но предсказание переходов Джозефсона предшествовало их экспериментальному внедрению. Долгое время стоял вопрос о существовании сверхпроводников при высокой температуре, но их замечательное открытие стало ошеломляющим открытием.

И еще: нашей целью не является самодовольство и триумфаторство! Не только физика не является завершенной дисциплиной: это всегда верно и для гуманитарных областей. Мы думаем, большинство физиков согласятся также, что на горизонте существуют “облака”, которые могут свидетельствовать, как велика угроза экстраполяции успехов физики двадцатого столетия, в частности, квантовой физики, подобные тем аномалиям, с которыми столкнулась классическая физика в конце девятнадцатого века. Но физики могут разойтись во мнениях относительно того, каковы конкретно эти облака, равно как и в деталях их описания.

В 2010 году, считая, что пришло время лучше определить эти “облака”, мы организовали конференцию “Квантовая физика и природа реальности”. В §2 мы описываем ее и список главных открытых вопросов относительно оснований квантовой физики. В §3 мы обсуждаем прогресс в этих вопросах; а в §4 мы возвращаемся к более общему обсуждению текущей ситуации в физике.

2. Оксфордская конференция по квантовой физике и природе реальности

Таблица 1. Оксфордские вопросы

(1) Время, необратимость, энтропия и информация (a) Является ли необратимость фундаментальным фактором для описания классического мира? (b) Как необратимость связана с квантовым измерением? (c) Что можно узнать о квантовой физике, используя понятие информации? (2) Соотношения между квантами и классикой (a) Возникает ли классический мир из квантового, и, если да, то какие концепции необходимы для описания этого перехода? (b) Как мы должны понимать переход от наблюдения к действию, основанному на полученной информации? (c) Как может “одномировая” реалистическая интерпретация квантовой теории быть совместимой с нелокальностью и специальной теорией относительности? (3) Эксперименты по исследованию оснований квантовой физики (a) Какие эксперименты могут позволить изучение макроскопических суперпозиций, включая проверки неравенств Леггетта-Гарга? (b) Какие эксперименты полезны для больших сложных систем, включая технологические и биологические системы? (c) Как можно осуществить экспериментальный мониторинг прогрессивного коллапса волновой функции? (4) Квантовая физика на теоретическом ландшафте (a) Какие подходы лидируют в категориях – теоретической, информационной, геометрической и операциональной при формулировке квантовой теории? (b) Каковы продуктивные эвристики для переосмысления квантовой теории? (c) Как квантовая физика соотносится с пространством-временем и массой-энергией? (5) Взаимодействие с проблемами философии (a) Как различные аспекты понятия реальности влияют на нашу оценку различных интерпретаций квантовой теории? (b) Как различные концепции вероятности проявляют себя в интерпретации квантовой теории?

Конференция была посвящена 80-летию со дня рождения преподобного д-ра Джона Полкингхорна (John Polkinghorne), признанию его вклада в углубление смысла квантовой физики, построенного на его выдающейся карьере в математической квантовой теории. Участники были включены в примерно равных долях: экспериментаторы, теоретики и философы физики. Конференция была тщательно спланирована с целью постановки ряда вопросов, получивших название Оксфордских Вопросы, которые должны были собрать мнения всех трех дисциплин в виде перспективных и обсуждаемых тем.

Со всех трех точек зрения — экспериментальной, теоретической и философской — основания квантовой физики представляют собой успешное, жизнеспособное и дискуссионное поле исследований. Во всем мире многие группы исследователей участвуют в исследовании природы квантовой теории и природы реальности, которую описывает квантовая теория. Эта работа способствует развитию, расширению и согласованию экспертных оценок трех сообществ. Соответственно, при организации конференции мы стремились пригласить широкий круг выступающих из различных областей по этой тематике. Но мы также хотели избежать пережевывания различных аспектов статус-кво в дебатах относительно оснований квантовой физики: вместо этого нас вдохновляло желание идентифицировать (хотя и критически!) набор центральных открытых проблем о природе квантовой реальности, чтобы стимулировать и направлять будущие исследования и учебные программы. В конечном счете мы

(i) пригласили некоторых участников (опять-таки: включая экспериментаторов, теоретиков и философов) написать краткую белую книгу, которая распространялась заранее;

(ii) просили спикеров выделить детали их позднейших исследований и сделать очень краткие выступления; и

(iii) попросили спикеров во время обсуждений и кофе-брейков встретиться с нами, чтобы помочь сформулировать открытые вопросы — которые, в конце конференции, мы коллективно опубликовали их под названием *Оксфордские Вопросы* (см. таблицу 1).

3. Актуальные вопросы

Для всех трех сообществ по квантовым основаниям — экспериментаторов, теоретиков и философов — последние 20 лет или около того были особенно насыщенными благодаря развитию квантовой информатики (включая квантовые вычисления и квантовая криптография). Это стимулировало и было стимулировано чрезвычайными успехами в экспериментальной области в ряде приложений физики: в оптике, замороженных ионах и атомных решетках, в трех различных направлениях в области сверхпроводников (*viz.* phase, flux and Cooper-pair box), и в ядерных и электронных спинах в молекулах, полупроводниках и алмазах.

Другая обещающая тема для всех трех областей за последние 20 лет — это декогеренция: то есть чрезвычайно быстрый и повсеместный процесс, посредством которого квантовая система распространяется в окружение, так что мы теряем способность показать квантовую интерференцию. Взаимодействие между системой и окружением нормально таково, что чтобы оставить систему в состоянии несобственной смеси, матрица плотности которой близка к

диагональной; например, положение центра масс, значение которого мы интуитивно желаем определить.

Мы приводим краткие общие результаты за последние десятилетия для каждого из трех сообществ.

(a) Теория

Исходя из отправной точки квантовой теории, теоретики успешно углубили наше понимание ее концептуальной и математической структуры. Ограничиваясь ростом фундаментальных исследований с 1960-х, можно выделить надежный следующий перечень, включая

(i) открытие различных вариантов неравенств Белла, теоремы Белла-Кохена-Спекера, неравенство Легетта–Гарга;

(ii) различный углубленный анализ, например, квантования, соотношений неопределенностей, структуры выпуклого множества пространств квантовых состояний, операторов с положительнозначными мерами (известных также как операциональная квантовая физика);

(iii) развитие альтернатив к квантовой теории, таких, как модели динамической редукции Жирарди, Пёрла, Пенроуза и Адлера, отличия которых от квантовой теории могут в дальнейшем стать объектами экспериментальной проверки; и

(iv) развитие квантовой информатики: анализ, использующий идеи из таких различных областей, как теория информации, теория сложности (с приложением к передаче сообщений, вычислениям и криптографии) и теория категорий.

(b) Эксперимент

Экспериментаторы за последние 30 лет или около того выполнили в своих лабораториях множество промежуточных экспериментов над одиночными квантовыми системами, первоначально предложенных еще отцами-основателями квантовой теории. Эти эксперименты, вместе со многими другими основополагающими экспериментами, например, над мультифотонным запутыванием, или экспериментами по проверке неравенств Белла, Белла-Кохена-Спекера или неравенств типа Легетта, послужили для получения интерпретируемых результатов, еще более высветили теорию [2]. Все еще более усилилось в связи с развитием информатики.

(i) Было экспериментально установлено нарушение неравенства Белла в целом ряде приложений [3], и, таким образом, экспериментально продемонстрировано запутывание и показана неполнота квантовой механики в том смысле, о котором говорил Эйнштейн и др. [4] в 1935 году. Были выполнены различные эксперименты с отложенным выбором, последовательно отвергающие любое примирение дополнительности Бора с локальной концепцией физической реальности Эйнштейна [5], и эти эксперименты были распространены с расширением подхода на многочастичные ситуации [6].

(ii) Была продемонстрирована квантовая интерференция в дифракционных экспериментах с молекулами все увеличивающегося размера, совсем недавно – с молекулами, содержащими до 430 атомов [7]. Этого еще недостаточно для

проверки непрерывных спонтанных моделей локализации, но было показано, что вплоть до этих масштабов отсутствуют отклонения от квантовых предсказаний.

(iii) Неравенство Легетта-Гарга было проверено в различных экспериментах с фотонами, сверхпроводимостью и спиновыми эффектами. Некоторые из них требуют слабых измерений или допущения о стационарности, но возможно нарушить неравенство при действительно отрицательных результатах измерений, с учетом возможных погрешностей из-за несовершенных начальных условий [8]. Проверка была расширена на высшие размерности гильбертова пространства, с проективными измерениями, которые всегда не проверяемы по протоколу [9].

(iv) Теорема Кохена-Спекера была непосредственно проверена в эксперименте с одиночными фотонными кутритами, чтобы показать невозможность существования неконтекстуальной теории [10]. Квантовая телепортация была продемонстрирована на расстоянии свыше 143 км [11]. Она использует запутывание и показывает, как техника, требуемая для квантовых оснований и квантовых технологий, соответствует замечательной степени “квантовости”. Возможно, это не является неожиданным: по этим очень различным резонам требуется экспериментальное расширение уровня “квантовости”.

(с) Философия

Философия квантовой физики достигла зрелости в изучении оснований, начиная с 1960-х. Естественно, она фокусировалась на ‘парадоксах’ нелокальности и измерения. Отталкиваясь от переоценки и углубления некоторых существующих интерпретаций, в частности, копенгагенской и эвереттовской, она также давала оценку в концептуальной перспективе: неортодоксальные теории, такие, как теория волны-пилота и модели динамической редукции; и различные развивающиеся направления квантовой информатики.

(i) За прошедшее десятилетие был достигнут большой прогресс в уточнении ограничений интерпретаций квантовой теории, т.е. интерпретаций, которые постулируют физические состояния на основе квантовых состояний. Такие пси-эпистемологические теории заявляют об учете случайности в результатах измерений в терминах выделенных статистических распределений этих постулированных состояний, тогда как пси-онтологическая теория должна позволять каждому физическому состоянию соответствовать только одному квантовому состоянию. В соответствии с концепциями макрореализма Легетта-Гарга может быть проведено различие между измерениями, которые не разрушают квантового состояния, и измерениями, которые не затрагивают физического состояния. Пси-эпистемологические модели стали объектом возрастающих ограничений. Было предположено, что при некоторых допущениях пси-эпистемологические модели могут быть отвергнуты или ограничены [12].

(ii) Был также достигнут прогресс в развитии и оценке эвереттовской интерпретации квантовой механики. В частности, для эвереттианцев характерно: (а) их обращение к декогеренции для описания ‘расщепления миров’ как эффективному процессу, который не конфликтует с реальностью; (b) их обращение к теории решений для оправдания применения идеи вероятности, точнее, правила Борна, в мультиверсе, где ‘ничего не происходит’ [13]. Как показывает оценка эвереттовской интерпретации (включая (а) и (b)), текущее

состояние может быть оценено на основании итогов недавних результатов другой Оксфордской конференции [14].

(iii) Идея, что квантовая физика привлекает новые логические и алгебраические структуры, возвращает нас в 1930-е, особенно основополагающая статья 1936 года Биркгофа и фон Неймана 'Логика квантовой механики' [15]. Но в последние годы были открыты и развиты новые структуры, часто использующие теорию категорий и ее дочернее ответвление, теория топосов (которую математики разработали только после 1950 года). Одна главная линия исследования использовала теорию категорий для формирования нового графического формализма квантовой физики, особенно протоколов квантовой информатики, таких, как телепортация. Сейчас все это хорошо развито, чтобы успешно сравнить с предложением Биркгофа и фон Неймана [16]. Другая главная линия предложила использование топосов, давая еще и третью квази-логическую формулировку квантовой теории [17].

4. Физика сегодня и завтра

Мы закончим постановкой Оксфордских Вопросов в контексте обсуждения в §1. Во-первых, мы свяжем их с двумя "облаками" (§4a). В конечном счете, в §4b мы даже расширим эту точку зрения, сравнив существующую ситуацию в физике с научной революцией шестидесятых годов столетия.

(a) Два облака на горизонте

Наше первое "облако" – это проблема квантового измерения: то есть трудность объяснения полностью в терминах квантовой теории возникновения классического мира, т.е. того, что мир так точно описывается классической физикой с его определенными значениями – мир, свободный от суперпозиции и запутывания.

Это "облако" лучше определено некоторыми из Оксфордских вопросов, именно следующими:

- вывод, является или нет 'коллапс волнового пакета' физическим процессом, ставится некоторыми Оксфордскими Вопросами: в частности, 1b, 2a, 2c, 3a, 3c и 5a;
- вывод, могут ли идеи теории информации высветить нашу концепцию реальности, охватывается вопросами: 1c, 4a, 5a и 5b; и
- анализ неортодоксальных альтернатив квантовой теории охватывается вопросами: 1a, 2a, 3a и 4b.

Наше второе "облако" – это поиск квантовой теории гравитации. При обсуждении квантовых оснований это, разумеется, как пресловутый слон в помещении (тогда как первое облако равным образом представлено пресловутой кошкой!). Эта проблема озвучена Оксфордским Вопросом 4c: как квантовая физика соотносится с пространством-временем и массой-энергией?

То есть, общая теория относительности и квантовая теория еще нуждаются в примирении. Почему мы развили успешную квантовую теорию, охватывающую другие фундаментальные взаимодействия в Природе (электромагнитное, слабое и сильное), но мы не имеем аналогичных успехов в квантовой теории гравитации.

Соответственно, поиск такого примирения, возможно, объединения, стал целью в понимании теоретической физики.

Имеются концептуальные причины того, почему эта цель является ускользающей. Контрастирующие концептуальные структуры 'составляющих' теорий и выходные противоречия по их интерпретации приводят к конфликту базовых подходов к квантовой гравитации. В то время как теория относительности основана на принципах, которые разумны с физической точки зрения, таких, как принципы относительности и эквивалентности, остается, открытым вопрос, может ли быть квантовая теория обоснована с помощью сравнимых принципов. Более конкретно, наше первое "облако", проблема квантового измерения, или 'коллапс волнового пакета', появляется здесь в космологическом аспекте. Как квантовые флуктуации в ранней Вселенной, эти предполагаемые источники гравитационных возмущений, породивших крупномасштабные структуры, становятся классическими?

Но мы хотим подчеркнуть другую причину: именно, огромную нехватку экспериментальных данных! Есть общие причины предполагать, что нужные данные относительно квантовой гравитации требуют высоких энергий (соответственно, малых расстояний и коротких времен), полностью недоступных для нас. Значение планковской длины, которую мы ожидаем в качестве характерной для квантовой гравитации, равно примерно 10^{-35} м. Это действительно очень мало: диаметр атома, ядра, протона и кварка равны, соответственно, порядка 10^{-10} , 10^{-14} , 10^{-15} и 10^{-18} м. Так что планковская длина на много порядков величины отличается от (верхнего предела для) диаметра для кварка, как этот диаметр отличается по масштабу от привычного нам сантиметра!

(b) На полпути через лес

Чтобы дополнить эту 'фотографию' текущего состояния физики, мы хотим привести аналогию с работой Ровели [18]. Он предположил, что наша текущая ситуация подобна ситуации с философами-механицистами, такими, как Галилей и Кеплер в начале семидесятых прошлого столетия. Как они распутывали клубок, завязанный Коперником и Браге, на пути к синтезу, построенному Ньютоном, так и мы тоже находимся 'на полпути через лес'. Разумеется, мы должны быть осторожными, чтобы не упрощать научную революцию и не сводить ее к повторяющимся этапам и *тем более* к легким аналогиям между различными историческими ситуациями. Тем не менее, поразительно, что 'мешанина' доктрин таких фигур, как Галилей и Кеплер, как оказалась, вела к перспективе более позднего синтеза. При всей своей гениальности они кажутся нам (в свете анахронизмов прошлого) 'переходными фигурами'. Некоего будущего историка физики двадцатого века, свободного от заблуждений, вряд ли утешит соображение, что будущий синтез общей теории относительности и квантовой теории обеспечен за последние несколько десятилетий усилиями в квантовой гравитации, достойными и осмысленными (как можно надеяться) по мнению авторов, но представляющие собой мешанину из правильных и ошибочных результатов с точки зрения этого читателя!

Благодарности:

We thank the participants at the conference for helping to develop and refine the Oxford Questions.

Поддержка:

Sponsored by the John Templeton Foundation.

Ссылки

1. Einstein A. 1905 On the electrodynamics of moving bodies. *Ann. Phys.* **17**, 891–921.
2. Pan J-W, Zeilinger A, Aukowski M. 2012 Multiphoton entanglement and interferometry. *Rev. Mod. Phys.* **84**, 777–838. (doi:10.1103/RevModPhys.84.777)
3. Aspect A. 1999 Bell's inequality test: more ideal than ever. *Nature* **398**, 189–190. (doi:10.1038/18296)
4. Einstein A, Podolsky B, Rosen N. 1935 Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* **47**, 777–780. (doi:10.1103/PhysRev.47.777)
5. Jacques V, Wu E, Grosshans F, Treussart F, Grangier P, Aspect A, Roch J-F. 2007 Experimental realization of Wheeler's delayed-choice Gedanken experiment. *Science* **315**, 966–968. (doi:10.1126/science.1136303)
6. Pan JW, Bouwmeester D, Daniell M, Weinfurter H, Zeilinger A. 2000 Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger–Horne–Zeilinger entanglement. *Nature* **403**, 515–519. (doi:10.1038/35000514)
7. Gerlich S, Eibenberger S, Tomandl M, Nimmrichter S, Hornberger K, Fagan PJ, Tuxen J, Mayor M, Arndt M. 2011 Quantum interference of large organic molecules. *Nat. Commun.* **2**, 263. (doi:10.1038/ncomms1263)
8. Knee GC *et al.* 2012 Violation of a Leggett–Garg inequality with ideal non-invasive measurements. *Nat. Commun.* **3**, 606. (doi:10.1038/ncomms1614)
9. George RE *et al.* 2013 Opening up the three quantum boxes causes classically undetectable wavefunction collapse. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **110**, 3777–3781. (doi:10.1073/pnas.1208374110)
10. Lapkiewicz R, Li P, Schaeff C, Langford NK, Ramelow S, Wiesniak M, Zeilinger A. 2011 Experimental non-classicality of an indivisible quantum system. *Nature* **474**, 490–493. (doi:10.1038/nature10119)
11. Ma X-S *et al.* 2012 Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward. *Nature* **489**, 269–273. (doi:10.1038/nature11472)
12. Pusey MF, Barrett J, Rudolph T. 2012 On the reality of the quantum state. *Nat. Phys.* **8**, 474–477. (doi:10.1038/nphys2309)
13. Wallace D. 2012 *The emergent universe*. Oxford, UK: Oxford University Press.
14. Saunders SW, Barrett J, Kent A, Wallace D (eds) 2011 *Many worlds? Everett, quantum theory and reality*. Oxford, UK: Oxford University Press.
15. Birkhoff G, von Neumann J. 1936 The logic of quantum mechanics. *Ann. Math.* **37**, 823–843.
16. Coecke B. 2013 The logic of quantum mechanics: take II. In *Logic and algebraic structures in quantum computing and information* (eds J Chubb, A Eskandarian, V Harizanov). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
17. Isham C. 2011 Topos methods in the foundations of physics. In *Deep beauty: understanding the quantum world through mathematical innovation* (ed. H Halvorson), pp. 187–206. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
18. Rovelli C. 1997 Halfway through the woods: contemporary research on space and time. In *The cosmos of science: essays of exploration* (eds J Earman, J Norton), pp. 180–223. Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh Press.