

# «Существование квантовых объектов. Экспериментальная проверка метафизических установок»<sup>1</sup>

Терехович Владислав Эрикович

[v.terekhovich@gmail.com](mailto:v.terekhovich@gmail.com)

В статье рассмотрено как результаты квантовых экспериментов могут изменить метафизические представления о реальности. Экспериментальная проверка неравенств Белла, Леггета, Леггета—Гарга, а также эксперименты с отложенным выбором и квантовым «ластиком» подтверждают, что для квантовых объектов следует отказаться от представлений классического реализма. Однако конкуренция между квантовым антиреализмом и квантовым реализмом продолжается.

**Ключевые слова:** квантовые эксперименты, реальность, нелокальность, информация, потенциальное, актуальное.

## 1. Метафизические установки

Метафизика как область философии занимается самыми общими вопросами. Существуют ли объекты независимо от представления человека? Существует ли между явлениями однозначная причинная связь? Могут ли события в будущем влиять на события в прошлом? Ответы на подобные вопросы определяют наше общее представление об окружающей реальности. До недавнего времени связь между взглядами на реальность и развитием научных теорий представляла интерес только для историков и философов науки. В последние три десятилетия благодаря развитию квантовых технологий для части специалистов по квантовой физике актуальными становятся новые вопросы<sup>2</sup>. Среди них есть такие: Как представления о реальности влияют на нашу оценку различных интерпретаций квантовой теории? Как эксперименты, подтверждающие квантовую теорию, влияют на различные аспекты нашего представления о реальности?

Один из аспектов касается проблемы существования. Известно, что квантовая теория оперирует амплитудами вероятности или волновыми функциями. Последние связаны с комплексными коэффициентами, которые относятся к возможным результатам наблюдений конкретной наблюдаемой величины. Эти возможные результаты до измерения находятся в суперпозиции и могут интерферировать друг с другом. Волновая функция эволюционирует в соответствии с детерминированным уравнением Шредингера, но при переходе к результатам измерений в теории происходит разрыв. Этот разрыв заполняется с помощью правила Борна и проекционного постулата. Волновая функция с помощью оператора математически «проецируется» на возможные показания прибора с вероятностью, пропорциональной квадрату амплитуды вероятности каждого из членов суперпозиции (матрица плотности). Суперпозиция превращается в смешанное состояние. Комплексная величина превращается в вещественную (собственное значение оператора). Проблема

<sup>1</sup> Опубликовано в журнале «Метафизика» 2017. №1(23). С. 104–112. <http://lib.rudn.ru/35>.

<sup>2</sup> См.: Briggs G.A.D., Butterfield J.N., Zeilinger A. The Oxford Questions on the foundations of quantum physics //Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society, 2013. Vol. 469(2157), P. 20130299.

в том, что проекционный постулат не является ни объектом, ни процессом в пространстве-времени. Это только математическое правило, которое позволяет перейти от причинного описания квантовых явлений к вероятностному описанию результатов наблюдения. Как именно происходит выбор одной из возможностей, квантовая теория не описывает.

Если мы хотим понять квантовую механику, мы должны ответить, как минимум, на два вопроса. Если волновая функция – это суперпозиция возможных состояний, то существуют ли эти состояния до их наблюдения? И, почему разложение возможных состояний зависит от знания и выбора наблюдателя? Варианты ответов, а точнее метафизических установок в отношении квантовой реальности, можно объединить в три группы.

Для первой группы (классический реализм) квантовые явления аналогичны явлениям классическим, а значит, они реальны, локальны и детерминистичны. Реальность означает, что свойства квантовых объектов существуют объективно и не зависят от наблюдения. Волновая функция описывает наше неполное знание о реальном состоянии и похожа на статистическое распределение вероятностей. Неполнота знания подразумевает существование неких объективных свойств (скрытых параметров), которые не описываются квантовой теорией. Другая общая черта квантовой и классической реальностей – их локальность, означающая, что при отсутствии между системами физических взаимодействий, не превышающих скорость света, измерение одной системы не влияет на результат измерения другой. Это свойство вытекает из общего принципа близкодействия, согласно которому на объект влияет только его ближайшее окружение в пространстве-времени. Третье свойство квантовой реальности – детерминизм, означающий, что состояние замкнутой системы полностью определяется её состояниями в предшествующие моменты времени, а будущие состояния не могут влиять на прошедшие. На подобные установки опираются интерпретации статистические и с локальными скрытыми параметрами.

Для сторонников второй группы (квантовый анти-реализм) до наблюдения реального квантового состояния не существует вовсе. Есть только наше субъективное знание о возможных результатах будущих опытов, его то и описывает волновая функция. Сюда можно отнести ортодоксальную копенгагенскую интерпретацию, квантовый байесонизм и квантовую логику.

В третьей группе метафизических установок (квантовый реализм) предполагается, что до наблюдения можно говорить о неких квантовых сущностях, хотя их реальность принципиально отличается от классической. Этими сущностями могут быть: квантовые операторы, волновые функции, информация, нелокальные потенциалы, предрасположенности, отношения и т.д. Волновая функция до всякого наблюдения отражает полную информацию или знание о возможных состояниях. К этой группе можно отнести очень разные интерпретации: отдельные версии копенгагенской, многомировую, информационную, Бомовскую, модальные, реляционную, транзакционную и другие.

Несмотря на то, что метафизические установки по отношению к реальности прямо не влияют на развитие квантовой теории и квантовых технологий, в последние десятилетия в мире проводится большое число экспериментов только для того, чтобы выяснить, какая из трех точек зрения ближе к истине. Сегодня можно констатировать

три важных следствия этой работы. Во-первых, результаты экспериментов строго соответствуют предсказаниям квантовой теории. Во-вторых, эксперименты опровергают установки классического реализма для квантовых объектов. И, в-третьих, пока нет однозначного ответа в пользу квантового анти-реализма или в пользу квантового реализма. Далее кратко перечислим основные результаты экспериментов, связанных с проверкой метафизических установок о существовании квантовых объектов.

## 2. Эксперименты

Эксперименты по проверке неравенств Белла показали, что сохранить одновременно и реализм и локальность классического реализма невозможно. Надо или признать существенно вероятностное поведение даже отдельно взятой частицы и отсутствие скрытых параметров, или приписать частицам скрытые параметры, признав при этом возможность нелокальной коммуникации между ними. В первом случае мы сохраняем локальность, жертвуя реализмом, во втором — сохраняем реализм, отказавшись от локальности. В эксперименте 2015 года<sup>3</sup>, где использовались электроны, запутанные с фотонами, похоже, были устранены последние лазейки, подвергающие сомнению эти выводы. Интересно, что если двух-фотонные эксперименты имеют статистический характер, то в эксперименте Гринбергера, Хорна и Цайлингера (ГХЦ)<sup>4</sup> оказалось, что три запутанные частицы могут производить немедленный эффект в единственном эксперименте, так как измерение двух частиц позволяет с уверенностью прогнозировать свойства третьей.

Для проверки возможности сохранить реализм, пожертвовав локальностью, были сформулированы неравенства Леггета<sup>5</sup>. Если бы они соблюдались, то, возможно, квантовые объекты все-таки имеют определенные свойства до измерения, при условии, что они могут организовать мгновенные корреляции друг с другом. В экспериментах 2007<sup>6</sup> и 2010<sup>7</sup> годов неравенства Леггета нарушались, а это означает, что мгновенного влияния недостаточно для объяснения запутанности, и значит, отказ от локальности не решает проблемы. Нужно отказаться, по крайней мере, от наивного реализма, что у частицы есть определенные свойства, не зависящие от наблюдений.

Допустим, после проверки неравенств Белла мы признали пространственную нелокальность или мгновенную корреляцию двух запутанных частиц, разнесенных в пространстве. Возможно, даже это один объект, одновременно находящийся в двух точках пространства (правда, тогда неясно, почему мы наблюдаем его в виде отдельных частиц). Но остается еще один вопрос: можно ли также убедиться в предсказанной теорией временной нелокальности, согласно которой частица движется не по определенной траектории, а сразу по всей совокупности возможных траекторий?

---

<sup>3</sup> *Merali Z.* Quantum'spookiness' passes toughest test yet // *Nature*. 2015. 525 (7567), P. 14.

<sup>4</sup> *Pan J.W. et al.* Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger–Horne–Zeilinger entanglement // *Nature*. 2000. Vol. 403(6769), P. 515-519.

<sup>5</sup> *Leggett A.J.* Nonlocal hidden-variable theories and quantum mechanics: An incompatibility theorem // *Foundation of Physics*. 2003. Vol. 33(10), P. 1469–1493.

<sup>6</sup> *Gröblacher S. et al.* An experimental test of non-local realism // *Nature*. 2007. Vol. 446(7138), P. 871-875.

<sup>7</sup> *Romero J. et al.* Violation of Leggett inequalities in orbital angular momentum subspaces // *New Journal of Physics*. 2010. Vol. 12(12), P. 123007.

Для ответа на этот вопрос были предложены неравенства Леггетта—Гарга<sup>8</sup> (их иногда называют временными неравенствами Белла), в которые входят корреляции между результатами последовательных измерений положений частицы в различные моменты времени. Эти неравенства не должны нарушаться, если одновременно верны два следствия классического реализма. Первое (макрореализм): квантовый объект, как любая макроскопическая система, для которой возможны два или более различных состояний, в любое время будет находиться только в одном из этих состояний. Второе (неинвазивность измерения): в принципе возможно определить состояние системы, создавая сколь угодно малое возмущение ее последующей динамики. Если эволюция системы происходит согласно квантово-механическим, а не классическим законам, неравенства должны нарушаться. Экспериментальная проверка не только для ядерных спинов и фотонов, но и для атомов<sup>9</sup> показала, что неравенства Леггетта—Гарга нарушаются. Это означает принципиальную невозможность свести эволюцию атома к движению по какой-либо определенной траектории. Мы всегда имеем дело с суперпозицией многих траекторий. Правда некоторые критики<sup>10</sup> считают, что нарушение неравенства Леггетта—Гарга еще не означает ложность макрореализма.

Всем известен двух-щелевой эксперимент, который как будто демонстрирует корпускулярно-волновой дуализм квантовых частиц при двух открытых щелях. Однако часто забывают, что для исчезновения интерференционной картины вовсе не обязательно закрывать одну из щелей. Достаточно у щелей установить детекторы. Удивительно, что когда нет никакой возможности измерить, через какую щель проходят частицы, на экране возникнет интерференция, как будто частица подобно волне «проходит» сразу через обе щели. Если же мы с помощью детекторов в принципе можем узнать, через какую щель прошли частицы (неважно, наблюдаем мы это или нет), интерференция исчезнет, и на экране возникнут две полосы, как при классическом сложении вероятностей. Дело в том, что согласно теории, у квантовых частиц нет никаких волн в пространстве-времени, похожих на классические электромагнитные волны. Сама возможность узнать траекторию частицы изменяет правило сложения амплитуд вероятности, а значит и результаты наблюдений. Волновые свойства проявляет не сама частица, а ее волновая функция, существование которой как раз и является проблемой.

Тот факт, что в экспериментах наблюдается интерференция не только частиц, но и макромолекул<sup>11</sup> является аргументом в пользу квантового реализма. Если квантовая теория работает для макрообъектов и является фундаментальной теорией, то ее выводы о существовании могут быть верны и для классических явлений. Основная сложность — изолировать суперпозицию возможных состояний от влияния окружения из-за явления декогеренции.

Кроме неудачного сравнения квантовых объектов с волнами классического поля, классический реализм пытается объяснить двух-щелевой эксперимент тем, что

---

<sup>8</sup> Leggett A.J., Garg A. Quantum mechanics versus macroscopic realism: Is the flux there when nobody looks? // *Physical Review Letters*. 1985. Vol. 54(9), P. 857.

<sup>9</sup> Robens C. et al. Ideal negative measurements in quantum walks disprove theories based on classical trajectories // *Physical Review X*. 2015. Vol. 5(1), P. 011003.

<sup>10</sup> Maroney O.J.E., Timpson C.G. Quantum-vs. Macro-Realism: What does the Leggett-Garg Inequality actually test? // arXiv preprint arXiv:1412.6139. 2014.

<sup>11</sup> Juffmann T. et al. Real-time single-molecule imaging of quantum interference // *Nature nanotechnology*. 2012. Vol. 7(5), P. 297-300.

детекторы якобы отбирают конкретные свойства или траектории из набора уже существующих до наблюдения. Согласно другой гипотезе, квантовые объекты при помощи скрытых локальных параметров получают информацию, есть ли в системе детекторы или нет, и в соответствии с этим ведут себя или как частицы, или как волны («теория заговора»).

Чтобы доказать, что до наблюдения фотон не имеет ни определенного свойства (волна или частица), ни определенной траектории, Уилер предложил эксперимент с «отложенным выбором»<sup>12</sup>. В интерферометре Маха-Цендера измеряется задержка между случайным выбором наблюдателя, что он собирается измерять, и самим изменением свойств (траекторий) фотона. В отличие от двух-щелевого эксперимента, детекторы ставятся не у щелей, а после того, как фотон пролетел через них – непосредственно перед вторым экраном. В эксперименте 2007 года<sup>13</sup> установлено, чтобы фотон успел решить, двигаться ему сразу по обоим путям как волна или по одному из двух, как частица, информация о выборе экспериментатора должна распространяться в 4 раза быстрее скорости света. В 2015 году аналогичный эксперимент был проведен с одиночным атомом<sup>14</sup>.

В 2012 году в эксперименте с квантовым отложенным выбором<sup>15</sup> удалось наблюдать, как фотон проявил себя одновременно и как волна, и как частица. Более того, он плавно переходил от одного проявления к другому. Как известно, понятие дополненности этих несовместимых между собой аспектов – одно из центральных в стандартной копенгагенской интерпретации. В обычном эксперименте с отложенным выбором (как и при проверке неравенств Белла) мы можем сохранить реализм частиц, приписав им скрытые параметры, но пожертвовав для этого локальностью. Именно это предлагается в Бомовской механике. Однако в эксперименте с квантовым отложенным выбором мгновенной корреляции между выбором, что наблюдать и свойствами частицы недостаточно для объяснения плавного перехода от корпускулярного поведения к волновому. Как и в случае нарушения неравенств Леггета, мы снова вынуждены отказаться от предположения, что у частицы есть определенные свойства, не зависящие от наблюдений.

Еще одним аргументом в пользу квантового реализма можно считать эксперименты с квантовым ластиком<sup>16</sup>. Вместо того чтобы наблюдать, через какую щель (каким путем) прошли фотоны, тем самым влияя на них, можно «пометить» их информацией с помощью вспомогательных запутанных фотонов. Когда основные фотоны промаркированы, интерференционная картина исчезает, но если после прохождения фотонов через щели информацию об их пути стереть, интерференционная картина появится вновь. Создается впечатление, что квантовые свойства не исчезают безвозвратно после измерения, а смешанное состояние можно снова превратить в суперпозицию.

---

<sup>12</sup> Wheeler J.A. Quantum Theory and Measurement / Eds. J.A. Wheeler and W.H. Zurek, 1984. P. 182-213.

<sup>13</sup> Jacques V. et al. Experimental realization of Wheeler's delayed-choice gedanken experiment // Science. 2007. Vol. 315(5814), P. 966-968.

<sup>14</sup> Manning A.G. et al. Wheeler's delayed-choice gedanken experiment with a single atom // Nature Physics. 2015. Vol. 11, P. 539-542.

<sup>15</sup> Peruzzo A. et al. A quantum delayed-choice experiment // Science. 2012. Vol. 338(6107), P. 634-637.

<sup>16</sup> Ma X., Kofler J., Zeilinger A. Delayed-choice gedanken experiments and their realizations // arXiv preprint arXiv:1407.2930. 2014.

В экспериментах, объединяющих механизм квантового ластика и отложенного выбора, можно сначала зарегистрировать фотон, а уже потом решать, как он должен себя вести<sup>17</sup>. Причем физическая локальная связь между выбором наблюдателя и интерференцией исключается. И вновь была продемонстрирована нелокальность не только в пространстве, но и во времени. Экспериментаторы сделали вывод, что не существует совместимой с экспериментом наивной реалистичной картины, где поведение частицы причинно независимо от выбора наблюдателя. Другой результат эксперимента связан с ретро-причинностью. Может показаться, что после регистрации фотона, выбирая тип детектора, наблюдатель может заставить фотон в прошлом проявиться как частица или как волна, что противоречит специальной теории относительности. Однако парадокса можно избежать, если измерение в прошлом рассматривать не как что-то неизменное, а как связанное с измерениями в будущем. Например, ряд авторов<sup>18</sup> предлагают расширить утверждение Уилера о том, что явление не является явлением, пока оно не зарегистрировано, так, что явление не имеет смысла, пока оно не будет соотнесено с другими зарегистрированными явлениями, в том числе в будущем. Это не значит, что мы изменяем прошедшие события. Можно сказать, что мы просто получили дополнительную информацию или новое знание, которые изменили наше представление о результатах эксперимента в прошлом. А можно сказать, что пока в системе еще сохранялась возможность в будущем получить информацию о пути фотона, интерференции не было. Когда позже эта возможность исчезла, интерференция в прошлом тоже исчезла. Другими словами, получая новую информацию в настоящем, наблюдатель или система воссоздают прошлое. Прошлое как будто связано со своими возможными последствиями.

### 3. Что после классического реализма?

Из результатов перечисленных экспериментов следуют, как минимум, три вывода. Во-первых, они соответствуют предсказаниям квантовой теории. Во-вторых, можно считать опровергнутыми утверждения классического реализма о том, что свойства квантовых объектов локальны и существует независимо от наблюдения<sup>19</sup>. В-третьих, конкуренция между квантовым анти-реализмом и квантовым реализмом будет продолжаться до тех пор, пока мы не поймем, как возможные состояния из суперпозиции переходят сначала в смешанное состояние, а затем в одно из наблюдаемых? А также, почему разложение возможных состояний зависит от знания и выбора наблюдателя? И, что означает пространственно-временная нелокальность квантовых корреляций?

Одно из возможных направлений поиска ответов состоит в объединении в рамках квантового реализма двух подходов: модального и информационного. Использование модальных категорий возможное-потенциальное и действительное-актуальное к

---

<sup>17</sup> Ma X. et al. Quantum erasure with causally disconnected choice // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2013. Vol. 110(4), P. 1221-1226.

<sup>18</sup> Ma X. et al. Experimental delayed-choice entanglement swapping // Nature Physics. 2012. Vol. 8(6), P. 479-484.4.

<sup>19</sup> Следует признать, что для большого числа работающих физиков результаты перечисленных экспериментов не являются достаточным основанием для отказа от привычных представлений о реальности.

квантовым явлениям имеет долгую традицию<sup>20</sup>. Гейзенберг писал о возможностях, как аналоге «потенций» Аристотеля, существующих между объективной материальной и субъективной реальностями<sup>21</sup>. Фок рассматривал возможные состояния квантового поля как объективные потенциалы к осуществлению, а вероятность как численную оценку потенциальных возможностей<sup>22</sup>. Поппер считал, что волновая функция описывает не свойства объектов, а их предрасположенности проявлять при измерении те или иные возможные свойства<sup>23</sup>. В одной из версий современной модальной интерпретации<sup>24</sup> вводится онтология с двумя несводимыми друг к другу и равно реальными сферами возможности и действительности. При этом каждая возможность физически влияет на сферу действительности, даже если она никогда не станет актуальной. Метафизическая установка, в которой потенциальные состояния становятся актуальными, на вопрос «Что существует до наблюдения?» может ответить так: все альтернативные возможные квантовые явления, свойства или истории находятся в потенциальном модусе бытия и обладают определенными предрасположенностями к актуальному существованию. Амплитуду вероятности можно рассматривать как численную меру таких предрасположенностей.

Однако признание двух модусов бытия еще не объясняет, каким образом факт наблюдения способствует переходу квантовых состояний в актуальность. Не случайно понятия «потенциальное» и «актуальное» используются сторонниками как квантового анти-реализма, так и квантового реализма. В одних интерпретациях благодаря наблюдению актуальной становится только одна возможность, оставшиеся или исчезают, или остаются в потенциальном модусе. В других считается, что каждое возможное состояние реализуется как актуальное, а наше сознание выбирает эти состояния в одной из возможных ветвей Вселенной. В третьих реализуется вся совокупность возможных состояний системы наблюдатель-прибор-объект, а мы лишь наблюдаем совокупный результат их совместной актуализации.

Прояснить ситуацию мог бы информационный подход, который анализирует отношения двух понятий: знание наблюдателя и информация. К сожалению, в информационных интерпретациях квантовой механики часто возникает путаница из-за различного понимания термина «информация»<sup>25</sup>. Сторонники квантового анти-реализма под информацией понимают или знание наблюдателя, уменьшающее неопределенность, или степень уверенности конкретного человека (пси-эпистемологический подход). Сторонники квантового реализма рассматривают информацию как самостоятельную сущность, не обязательно связанную с человеком (пси-онтический подход).

В качестве примера нечеткого использования понятий знание и информация приведем мнения двух признанных специалистов. Войцех Цурек описывает, как из теории декогеренции следуют онтологические свойства векторов состояний, а

---

<sup>20</sup> См.: Севальников А.Ю. Интерпретации квантовой механики: В поисках новой онтологии. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 192 с.; Терехович В.Э. Модальные подходы в метафизике и квантовой механике // Метафизика. 2015. №1. С. 129-152.

<sup>21</sup> Гейзенберг В. Шаги за горизонт. М.: Прогресс, 1987. С. 222-223.

<sup>22</sup> Фок В.А. Об интерпретации квантовой механики // Успехи физических наук. 1957. Т. LXII, Вып. 4.

<sup>23</sup> Поппер К.Р. Квантовая теория и раскол в физике. М.: Логос, 1998. С. 17.

<sup>24</sup> Lombardi O., Castagnino M. A modal-Hamiltonian interpretation of quantum mechanics // Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics. 2008. Vol. 39(2), P. 380-443.

<sup>25</sup> См.: Мамчур Е.А. Теоретико-информационный поворот в интерпретации квантовой механики. Философско-методологический анализ // Вопросы философии. 2014. № 1. С. 57-71.

объективное существование отобранных состояний приобретает через эпистемологическую “передачу информации”<sup>26</sup>. Однако решающую роль в определении того, какие состояния квантовых систем могут обнаруживаться наблюдателями, играет степень коррелированности или распространенности информации. Информация усиливается за счет ее распространенности или избыточности<sup>27</sup>. Антон Цайлингер, с одной стороны, считает, что не может быть обосновано понятие реальности без возможности высказывать о ней утверждения для получения информации о ее свойствах. Одновременно, он возражает против субъективистской интерпретации роли наблюдателя: «Ясно, что сознание ни в коей мере не влияет на частицу»<sup>28</sup>.

Чтобы мы не понимали под информацией, без нее мы вряд ли обойдемся, если хотим понять, что происходит в квантовых экспериментах. Но для этого необходимо найти ответы на несколько вполне метафизических вопросов. Какова разница между информацией и знанием наблюдателя? Есть ли у информации и знания носитель, и кто или что их воспринимает? И, наконец, каким образом информация и знание превращаются в объекты?

Похоже, что с классическим реализмом для квантовых объектов можно попрощаться. Но что дальше? Возможно, вместо проблемы реальности и нелокальности квантовых объектов, следует сосредоточиться на проблеме реальности и нелокальности знания и информации о потенциальных и актуальных свойствах этих объектов.

## Список литературы.

*Гейзенберг В.* Шаги за горизонт. М.: Прогресс, 1987. С. 222-223.

*Мамчур Е.А.* Теоретико-информационный поворот в интерпретации квантовой механики. Философско-методологический анализ // Вопросы философии. 2014. № 1. С. 57-71.

Наука и предельная реальность: квантовая теория, космология и сложность / Ред. Дж. Барроу, П. Дэвис, Ч. Харпер мл. М.-Ижевск: ИКИ. 2013. С. 176-185.

*Поппер К.Р.* Квантовая теория и раскол в физике. М.: Логос, 1998. С. 17.

*Севальников А.Ю.* Интерпретации квантовой механики: В поисках новой онтологии. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 192 с.

*Терехович В.Э.* Модальные подходы в метафизике и квантовой механике // Метафизика. 2015. №1. С. 129-152.

*Фок В.А.* Об интерпретации квантовой механики // Успехи физических наук. 1957. Т. LXII, Вып. 4.

*Briggs G.A.D., Butterfield J.N., Zeilinger A.* The Oxford Questions on the foundations of quantum physics // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society, 2013. Vol. 469(2157), P. 20130299.

*Gröblacher S. et al.* An experimental test of non-local realism // Nature. 2007. Vol. 446(7138), P. 871-875.

*Jacques V. et al.* Experimental realization of Wheeler's delayed-choice gedanken experiment // Science. 2007. Vol. 315(5814), P. 966-968.

*Juffmann T. et al.* Real-time single-molecule imaging of quantum interference // Nature nanotechnology. 2012. Vol. 7(5), P. 297-300.

<sup>26</sup> *Zurek W.H.* Decoherence and the transition from quantum to classical-revisited // Los Alamos Science. 2002. Vol. 27, P. 86-109.

<sup>27</sup> *Zurek W.H.* Quantum darwinism // Nature Physics. 2009. Vol. 5(3), P. 181-188.

<sup>28</sup> Наука и предельная реальность: квантовая теория, космология и сложность / Ред. Дж. Барроу, П. Дэвис, Ч. Харпер мл. М.-Ижевск: ИКИ. 2013. С. 176-185.



- Leggett A.J., Garg A.* Quantum mechanics versus macroscopic realism: Is the flux there when nobody looks? // *Physical Review Letters*. 1985. Vol. 54(9), P. 857.
- Leggett A.J.* Nonlocal hidden-variable theories and quantum mechanics: An incompatibility theorem // *Foundation of Physics*. 2003. Vol. 33(10). P. 1469–1493.
- Lombardi O., Castagnino M.* A modal-Hamiltonian interpretation of quantum mechanics // *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. 2008. Vol. 39(2), P. 380-443.
- Ma X. et al.* Experimental delayed-choice entanglement swapping // *Nature Physics*. 2012. Vol. 8(6), P. 479-484.
- Ma X. et al.* Quantum erasure with causally disconnected choice // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013. Vol. 110(4), P. 1221-1226.
- Ma X., Kofler J., Zeilinger A.* Delayed-choice gedanken experiments and their realizations // *arXiv preprint arXiv:1407.2930*. 2014.
- Manning A.G. et al.* Wheeler's delayed-choice gedanken experiment with a single atom // *Nature Physics*. 2015. Vol. 11, P. 539-542.
- Maroney O.J.E., Timpson C.G.* Quantum-vs. Macro-Realism: What does the Leggett-Garg Inequality actually test? // *arXiv preprint arXiv:1412.6139*. 2014.
- Merali Z.* Quantum'spookiness' passes toughest test yet // *Nature*. 2015. 525(7567), P. 14.
- Pan J.W. et al.* Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger–Horne–Zeilinger entanglement // *Nature*. 2000. Vol. 403(6769), P. 515-519.
- Peruzzo A. et al.* A quantum delayed-choice experiment // *Science*. 2012. Vol. 338(6107), P. 634-637.
- Robens C. et al.* Ideal negative measurements in quantum walks disprove theories based on classical trajectories // *Physical Review X*. 2015. Vol. 5(1), P. 011003.
- Romero J. et al.* Violation of Leggett inequalities in orbital angular momentum subspaces // *New Journal of Physics*. 2010. Vol. 12(12), P. 123007.
- Wheeler J.A.* *Quantum Theory and Measurement* / Eds. J.A. Wheeler and W.H. Zurek, 1984. P. 182-213.
- Zurek W.H.* Decoherence and the transition from quantum to classical-revisited // *Los Alamos Science*. 2002. Vol. 27, P. 86-109.
- Zurek W.H.* Quantum darwinism // *Nature Physics*. 2009. Vol. 5(3), P. 181-188.