

## Критика квантового разума: измерение, сознание, отложенный выбор и утраченная когерентность

А.М. Жёлтиков

*Формальная логика наиболее известных квантовых парадоксов измерений не исключает возможности признания влияния сознания наблюдателя на результат измерения и даже на предысторию квантовой системы. Современный аппарат квантовой механики позволяет дать последовательное разъяснение роли сознания наблюдателя в физических измерениях на основе универсальных закономерностей взаимодействия квантовой системы с окружением, потери квантовой когерентности и унитарного характера эволюции вектора состояния. Сознание наблюдателя перестаёт выполнять роль агента, изменяющего предысторию квантовой системы, и становится объектом физического исследования. Основанные на принципах квантовой физики измерительные приборы открывают новый этап таких исследований.*

**Ключевые слова:** измерения в квантовой механике, роль наблюдателя в квантовом измерении, квантовая когерентность

PACS numbers: 03.65.Ta, 03.65.Yz, 03.67. – a

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.06.038155>

### Содержание

1. Введение (1119).
  2. Отложенный выбор и игра двадцати вопросов (1120).
  3. Парадокс друга Вигнера (1121).
  4. Демон Максвелла: "Информация физична" (1121).
  5. Демон Максвелла и термодинамика ионных каналов клеточных мембран (1122).
  6. Мозг как квантовая информационная система? (1122).
  7. Квант информации (1123).
  8. "Собственные функции" поля зрительного восприятия (1123).
  9. Не удивлять демона: термодинамические принципы и байесовская модель мозга (1124).
  10. Утраченная когерентность (1124).
  11. Квантовые измерительные системы для исследования мозга (1126).
  12. Заключение (1127).
- Список литературы (1127).

### 1. Введение

Проблема измерений и связанные с этой проблемой вопросы определения границы между квантовым и классическим мирами относятся к числу наиболее труд-

ных проблем квантовой физики [1–5]. Формальная логика квантовых парадоксов измерений, сформулированных на раннем этапе развития квантовой механики, не исключает возможности признания влияния сознания наблюдателя на результат измерения и даже на предысторию квантовой системы. Эта возможность указывается в работах основоположников квантовой теории. В наиболее завершённом виде такой путь решения квантовых парадоксов измерения изложен в работах Вигнера [6, 7] и Уилера [8, 9].

Для многих важных современных направлений эпистемологии квантовой механики характерна тенденция к откладыванию решения принципиального вопроса о предпочитаемых квантовых состояниях, выделяемых в процессе измерения [10]. В частности, получающая широкое распространение интерпретация квантовой механики на основе теории множественных миров [11, 12] оставляет открытым вопрос о том, каким образом эволюция квантовой системы приводит к формированию наблюдаемой в эксперименте статистики физического процесса. Эта трактовка квантовой механики уходит от непоследовательности копенгагенской интерпретации в отношении проблемы наблюдателя, рассматривая изолированную квантовую систему, состоящую из квантового объекта и наблюдателя, и распространяя квантовое описание на эту систему. Для Эверетта, создателя теории множественных миров, анализ роли наблюдателя сводится к обсуждению роли макроскопического измерительного прибора — фотоэлемента, фотопластинки и тому подобных систем [11]. Для Эверетта проблема наблюдателя "не может быть исключена как относящаяся к области психологии" [11]. Однако для исследователя, занятого эпистемологическими вопросами, такая трактовка означает, что граница между квантовым и классическим всё больше смещается в сторону наблюдателя.

А.М. Жёлтиков. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы 1, 119991 Москва, Российская Федерация;  
Texas A&M University, College Station TX, 77843 USA;  
Российский квантовый центр,  
ул. Новая 100, 143025 Сколково, Москва, Российская Федерация;  
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,  
ул. Четаева 18а, 421000 Казань, Российская Федерация  
E-mail: zheltikov@physics.msu.ru

Статья поступила 24 апреля 2017 г.,  
после доработки 16 июня 2017 г.

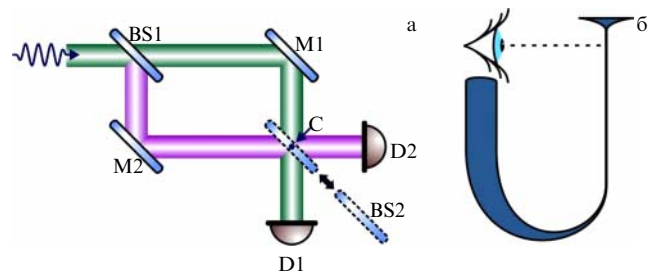
Ввиду поразительной, беспрецедентной предсказательной точности квантовой механики её эпистемологические трудности на протяжении многих десятилетий носили локальный характер и в значительной степени стимулировали развитие квантовых информационных технологий [13–17]. Однако в условиях растущей значимости физических методов для исследования мозга и его функций, включая сознание [18–20], вопрос о роли сознания наблюдателя в физическом измерении перестаёт быть чисто эпистемологическим. Этот вопрос оказывается одним из центральных вопросов нового междисциплинарного направления естественнонаучных исследований [21, 22], имеющих своей целью решение одной из ключевых проблем современного естествознания — проблемы понимания принципов работы и функций мозга.

Такое положение дел разрушает зону комфорта большой группы физиков (к которым автор по большей части относит и себя), которые стараются воздерживаться от участия в философских спорах и руководствуются в своём отношении к квантовой теории копенгагенским принципом "помалкивай и вычисляй" ("shut up and calculate"). Всё более остро встающие вопросы о роли сознания в квантовых измерениях не могут игнорироваться в быстро растущей области исследований, в которых основанные на принципах квантовой физики измерительные приборы используются для экспериментального исследования мозга, открывая новые возможности для изучения сознания [18–20, 23–27].

В настоящей работе на основе рассмотрения информационных и термодинамических аспектов измерения показывается, что аппарат квантовой механики позволяет дать последовательное разъяснение парадоксов измерений в терминах универсальных закономерностей взаимодействия квантовой системы с окружением. Мы остановимся на универсальных принципах и понятиях термодинамики и теории информации, которые являются общими для моделей взаимодействия физической системы с окружающей средой и для получивших широкое распространение объединяющих физических моделей мозга и сознания, таких как байесовская модель мозга и модели, основанные на гипотезе минимизации сознанием свободной энергии. Мы покажем, что квантовый характер воспринимаемой сознанием информации и квантовый характер процессов в микромире имеют различную природу. Будут рассмотрены характерные примеры взаимодействия квантовых и классических систем, иллюстрирующие возможность разрешения парадоксов квантовых измерений без участия наблюдателя и независимость результатов квантовых измерений от его сознания.

## 2. Отложенный выбор и игра двадцати вопросов

Проблема роли наблюдателя и его сознания в выполняемом над квантовой системой измерении играет центральную роль в парадоксах квантовой механики. Многие из известных мысленных экспериментов, показывающих трудности основных постулатов квантовой механики, наводят на мысль о неотъемлемой роли сознания наблюдателя не только в интерпретации измерения, но и в предьстории эволюции квантовой системы. Ярким примером парадоксов этого класса может служить



**Рис. 1.** (В цвете онлайн.) (а) Мысленный эксперимент отложенного выбора: BS1, BS2 — светоделительные пластины; M1, M2 — зеркала; D1, D2 — фотодетекторы. Две возможные квантовые траектории — истории фотона показаны разными цветами. (б) Отложенный выбор по Уилеру: задержанный выбор наблюдателя, определяющий предьсторию Вселенной.

сформулированный Уилером мысленный эксперимент отложенного выбора. В первоначальной постановке этого эксперимента, предложенной Эйнштейном [28, 29], исследуется фотон, который может распространяться от источника к детектору по одному из двух оптических путей (рис. 1а). Если в точке С нет светоделительной пластины, то фотон регистрируется одним из детекторов (D1 или D2). При наличии в точке С светоделительной пластины фотон не попадает на детектор D1 из-за деструктивной интерференции волн, соответствующих двум его возможным траекториям, и регистрируется детектором D2, так как в этом направлении имеет место конструктивная интерференция двух волн.

Эйнштейн предложил этот мысленный эксперимент в качестве иллюстрации трудностей основных постулатов квантовой механики. Отвечая на этот аргумент, Бор заметил, что две различные конфигурации — одна со светоделительной пластиной, другая без неё (рис. 1а), — соответствуют двум различным экспериментам. Чтобы представить трудности объяснения результатов измерений в этом эксперименте, Уилер предложил решать вопрос о внесении в схему эксперимента светоделительной пластины BS2 "в последнюю пикосекунду" перед тем, как фотон оказывается в точке С [29]. При этом в зависимости от того, вносится ли светоделительная пластина в схему эксперимента, оказывается, что фотон попал в точку С либо по одному, либо по другому из двух возможных путей. Другими словами, внесение светоделительной пластины изменяет предьсторию фотона. Как и многие другие известные парадоксы квантовой механики, мысленный эксперимент отложенного выбора сыграл исключительно важную роль в развитии квантовой теории и квантовых технологий. Экспериментальная реализация схемы отложенного выбора позволила осуществить проверку основ квантовой механики и продемонстрировать новые принципы обработки информации [30–34].

Экстраполируя этот парадокс на квантовую эволюцию Вселенной, Уилер заметил [29], что процесс измерения квантовых процессов в определённый момент времени в настоящем определяет состояние Вселенной в отдалённые моменты времени в прошлом (рис. 1б). Более того, история квантовой системы — фотона или Вселенной — оказывается зависящей от того, какие вопросы ставит наблюдатель. Уилер отмечает аналогию с игрой в двадцать вопросов [29]. По условиям этой игры один из участников, имея возможность задать

двадцать вопросов и получая ответы "да" или "нет", должен разгадать слово, заранее загаданное другими участниками игры.

Желая подшутить, участники игры решают не договариваться заранее о потайном слове. Однако логика вопросов, задаваемых участником, угадывающим слово, заставляет других участников признать, что ответом является то или иное конкретное слово. При этом, какое именно слово оказывается ответом, определяется задаваемыми в процессе разгадывания загадки вопросами. Роль наблюдателя, выполняющего эксперимент над квантовой системой, аналогична роли участника игры, разгадывающего потайное слово. Результат же физического эксперимента зависит от того, как именно ставится физический эксперимент. Эти трудности интерпретации квантовых измерений не преодолены в полной мере и в настоящее время. Однако для конкретных постановок экспериментов современный аппарат квантовой механики позволяет объяснить результаты измерений в терминах универсальных закономерностей взаимодействия квантовой системы с окружением, потери когерентности и утраты унитарного характера эволюции [10, 35]. Исключение сознания наблюдателя как элемента квантового измерения при работе с измерительными приборами, основанными на принципах квантовой физики, позволяет изучать мозг и его самые сложные функции, в том числе сознание.

### 3. Парадокс друга Вигнера

Парадокс друга Вигнера [6, 7] представляет собой один из наиболее ярких мысленных экспериментов, иллюстрирующих трудности выяснения роли сознания наблюдателя в процессе измерения. Изложим его в виде, максимально близком к оригинальному, сохраняя обозначения, использованные в работах Вигнера [6, 7, 36]. Квантовая система (кот Шрёдингера [37]) имеет два собственных состояния —  $\psi_1$  и  $\psi_2$ . Наблюдатель (Вигнер) регистрирует состояние квантового объекта не самостоятельно, а получая информацию от своего друга (друга Вигнера). Если друг Вигнера регистрирует квантовый объект в состоянии  $\psi_1$  ( $\psi_2$ ), то сам он оказывается в состоянии  $\chi_1$  ( $\chi_2$ ). Именно в одном из этих состояний находит своего друга Вигнер, спрашивая его о результате измерения. Система кот + друг Вигнера, таким образом, оказывается в состоянии  $\psi_1 \otimes \chi_1$  ( $\psi_2 \otimes \chi_2$ ).

Если начальное состояние квантового объекта  $\alpha\psi_1 + \beta\psi_2$ , то согласно принципу суперпозиции после регистрации его состояния другом Вигнера состояние системы кот + друг Вигнера имеет вид  $\alpha(\psi_1 \otimes \chi_1) + \beta(\psi_2 \otimes \chi_2)$ . Спрашивая своего друга о результате измерения, Вигнер с вероятностью  $|\alpha|^2$  ( $|\beta|^2$ ) получает ответ, что кот находится в состоянии  $\psi_1 \otimes \chi_1$  ( $\psi_2 \otimes \chi_2$ ).

Главная трудность возникает, когда Вигнер спрашивает своего друга о состоянии его сознания после измерения, но до того, как Вигнер спросил его о результате измерения. Тогда друг вынужден сообщить, что ещё до вопроса Вигнера результат измерения,  $\psi_1$  или  $\psi_2$ , уже отложился в его сознании. Ввиду такого ответа приходится признать, что сразу после измерения система кот + друг Вигнера находится либо в состоянии  $\psi_1 \otimes \chi_1$ , либо в состоянии  $\psi_2 \otimes \chi_2$ , а вовсе не в суперпозиционном состоянии  $\alpha(\psi_1 \otimes \chi_1) + \beta(\psi_2 \otimes \chi_2)$ . Таким образом, имеем

два противоречащих друг другу ответа к задаче описания состояния системы кот + друг Вигнера.

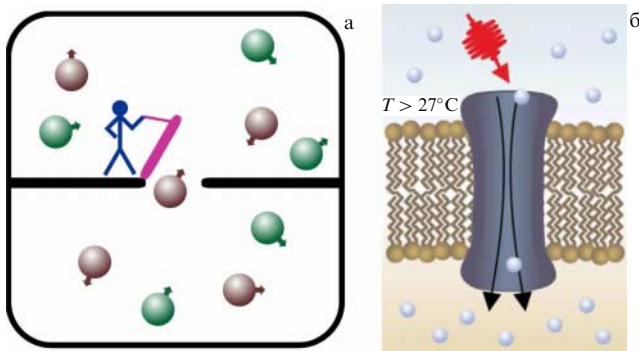
Вигнер далее отмечает, что никакого парадокса не возникло бы, если бы вместо его друга роль регистрирующей системы выполнял "простой физический прибор, такой как атом", регистрирующий наличие или отсутствие вспышки света, несущей информацию о состоянии квантового объекта. Такой прибор, по мнению Вигнера, дал бы правильный результат измерения:  $\alpha(\psi_1 \otimes \chi_1) + \beta(\psi_2 \otimes \chi_2)$ . Вигнер разъясняет этот парадокс исходя из особой роли сознания в процессе квантового измерения: "субъект, обладающий сознанием, неизбежно играет иную, нежели неодушевлённый прибор, роль в квантовой механике".

Ниже мы вернёмся к парадоксу друга Вигнера и покажем, что аппарат квантовой механики обладает ресурсом для последовательного разъяснения этого парадокса без привлечения гипотезы об особой роли сознания. Перед тем как переходить к решению этой задачи, представляется полезным составить более полное представление об информационных аспектах квантовых измерений и квантовых исследований, включая эксперименты, ставящие своей непосредственной целью изучение мозга и сознания с помощью квантовых инструментов.

### 4. Демон Максвелла: "Информация физична"

Начнём с краткого рассмотрения фундаментальных свойств информации, необходимых для понимания общих закономерностей восприятия информации мозгом и информационных аспектов квантовых измерений. Основной количественной характеристикой информации является энтропия. Введённое Клаузиусом, Больцманом и Гиббсом в контексте термодинамики и статистической механики [38, 39] понятие энтропии было переработано и использовано в качестве меры информации в работах Хартли, Найквиста и Шеннона [40]. Осознание фундаментального единства термодинамического и информационного определений энтропии даёт ключ к разрешению одного из наиболее известных доквантовых парадоксов, связанных с ролью наблюдателя, его памяти и сознания в физическом измерении, — парадокса демона Максвелла [41]. Под парадоксом демона Максвелла понимается мысленный эксперимент, в котором обладающее сверхъестественными способностями "существо" (демон) помещается в разделённый на две части заполненный газом замкнутый объём (рис. 2а). Обладая способностью определять параметры каждой молекулы газа, демон отбирает наиболее быстрые молекулы и пропускает их в одну из частей объёма, не совершая, казалось бы, никакой работы, приводя, таким образом, к нарушению второго начала термодинамики.

Как показано в работах Силарда [42], Ландауэра [43] и Беннетта [44], наиболее последовательное разъяснение этого парадокса в рамках второго начала термодинамики даётся на основе осознания прямых термодинамических следствий накопления и удаления информации в системе, выполняющей роль демона Максвелла. Многочисленные механические реализации устройства типа демона Максвелла [45, 46] убедительно показывают, что, в отличие от памяти, реализуемой механическими, инженерными средствами, наличие у демона-измерителя сознания является несущественным и ненужным для



**Рис. 2.** (а) Демон Максвелла: обладая способностью определять параметры каждой молекулы газа, демон отбирает наиболее быстрые молекулы и пропускает их в одну из частей объёма, не совершая, казалось бы, никакой работы, и приводя, таким образом, к нарушению второго начала термодинамики. (б) Ионный канал клеточной мембраны, активируемый тепловым воздействием (TRP-каналы) или лазерным излучением (каналородопсин, галородопсин и пр.).

этого эксперимента — мысленного или реального. Один из главных уроков разъяснения этого парадокса, выражаемый афоризмом Ландауэра "информация физична" [47], даёт ключ к разрешению обширного класса парадоксов квантовых измерений и пониманию роли наблюдателя в процессе квантового измерения.

## 5. Демон Максвелла и термодинамика ионных каналов клеточных мембран

Осознание связи информационно-измерительных и термодинамических аспектов парадокса демона Максвелла даёт ключ к пониманию важного класса универсальных функций биологических клеточных систем, включая лежащую в основе высшей нервной деятельности функцию формирования потенциалов действия нейронами. Осуществление таких функций оказывается возможным благодаря уникальным свойствам ионных каналов клеточных мембран [48]. Функции, осуществляемые ионными каналами клеточной мембраны, поразительно напоминают функции, выполняемые демоном Максвелла. Подобно этому демону ионные каналы обладают способностью реагировать на внешние условия, переключаясь между открытым и закрытым состояниями (рис. 2б), регулируя концентрацию ионов по разные стороны мембраны и приводя к возникновению мембранного потенциала. Современные биотехнологии позволяют осуществлять генетическую кодировку мембранных каналов, чувствительных к свету [19, 20, 49, 50] или теплу [51–54]. Нейроны, в которых происходит экспрессия таких каналов, могут управляться соответственно световым сигналом или локальным изменением температуры, что открывает уникальные возможности для исследования мозга.

На основе информационно-термодинамического объяснения принципа действия системы имеется возможность выполнить количественное описание ионного канала клеточной мембраны. В частности, для теплочувствительных катионных каналов семейства TRP (transient receptor potential), используемых в экспериментах по лазерной термогенетике [51–54], вероятность срабатывания канала при изменении свободной энергии Гиббса  $\Delta G_g$  равна  $P_g = [1 + \exp(\Delta G_g/\theta)]^{-1}$  [55], где  $\theta$  — темпе-

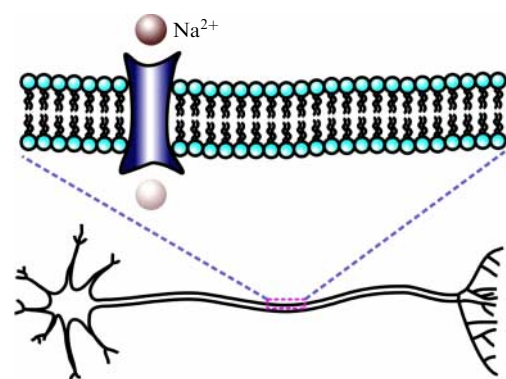
ратура. В общем случае выражение  $\Delta G_g = \Delta H_g - \theta \Delta S_g - \varepsilon$  включает сопровождающие срабатывание канала изменения энтальпии ( $\Delta H_g$ ) и энтропии ( $\Delta S_g$ ), а также  $\varepsilon$ , учитывающий прочие процессы изменения энергии. Для широко используемого в экспериментах канала TRPV1 имеем  $\Delta H_g \approx 185$  кДж/мол.,  $\Delta S_g \approx 590$  кДж/(мол. К) [55]. Вместе с тем для активируемого холодом канала TRPA1 параметры  $\Delta H_g$  и  $\Delta S_g$  имеют обратный знак:  $\Delta H_g \approx -125$  кДж/мол.,  $\Delta S_g \approx -440$  кДж/(мол. К). Термодинамические принципы дают ключ к пониманию фундаментальных ограничений на устойчивость работы отдельных термочувствительных ионных каналов в качестве мембранных затворов [56], определяя минимальное число каналов, необходимых для устойчивой активации клетки.

## 6. Мозг как квантовая информационная система?

Квантовые процессы, такие как туннелирование и перенос протонов, по-видимому, играют важную роль в работе мембранных каналов. Широко обсуждаемая в последнее время гипотеза "квантового сознания" [57–59], однако, идёт гораздо дальше. Эта гипотеза исходит из представления о мозге как о квантовой вычислительной системе. Предполагается, что в работе мозга существенную роль играют квантовые суперпозиционные состояния (рис. 3), позволяющие мозгу осуществлять квантовые вычислительные операции. Ввиду успешной экспериментальной демонстрации волновых свойств и квантовых суперпозиционных состояний даже очень больших молекул [60] такая гипотеза не может быть отвергнута как совершенно неправдоподобная.

Если бы квантовые суперпозиционные состояния действительно могли играть важную роль в работе мозга, нельзя было бы исключать прямую регистрацию квантовых суперпозиционных состояний микромира нейронами, находящимися в суперпозиционных состояниях, без потери квантовой когерентности и унитарного характера эволюции.

Однако никаких экспериментальных данных, которые свидетельствовали бы о важной роли квантовых суперпозиционных состояний в работе мозга, к настоящему времени не известно. Имеющиеся же расчёты, исходящие из реалистичных оценок для термодинамиче-



**Рис. 3.** Гипотетические квантовые суперпозиционные состояния ионов, находящихся с внутренней и внешней сторон клеточной мембраны, позволяющие реализацию операций квантовой обработки информации нейронами.

ских параметров мозга и основных физических процессов, определяющих свойства клеточных мембран и их ионных каналов [61], указывают на то, что условия взаимодействия с окружением при характерных термодинамических параметрах мозга приводят к быстрой потере когерентности квантовыми суперпозиционными состояниями. При таких условиях квантовые суперпозиционные состояния, играющие центральную роль в квантовых технологиях, не могут оказывать заметного влияния на работу мозга из-за быстрой потери когерентности такими состояниями. Таким образом, на данном этапе нет оснований рассматривать хотя бы некоторые функции мозга и хотя бы некоторые элементы сознания в виде квантовых вычислительных операций. Тем не менее квантовый характер происходящих в мозге и сознании процессов играет важную роль. Связан он, однако, не с используемыми в квантовой информатике квантовыми суперпозиционными состояниями, а с универсальным квантовым характером воспринимаемой и обрабатываемой мозгом классической информации. К обсуждению этого вопроса мы и перейдём в следующем разделе.

### 7. Квант информации

Информация не только физична, но и имеет квантовый характер независимо от того, является ли информационный сигнал классическим или квантовым по своей природе. Согласно теореме подобия фурье-анализа преобразование растяжения–сжатия  $x \rightarrow ax$  аргумента функции  $f(x)$  сопровождается сжатием–растяжением аргумента фурье-образа  $F(k)$  этой функции,  $f(ax) \rightarrow |a|^{-1}F(k/a)$ . Как следствие, введённая Габором [62] в плоскости переменных частота–время информационная диаграмма сигнала оказывается квантованной. Действительно, независимо от формы сигнала  $f(x)$  для среднеквадратичных отклонений

$$(\Delta x)^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(x)f^*(x)(x-x_0)^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} f(x)f^*(x) dx}, \tag{1}$$

$$(\Delta k)^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} F(k)F^*(k)(k-k_0)^2 dk}{\int_{-\infty}^{\infty} F(k)F^*(k) dk}, \tag{2}$$

где  $x_0$  и  $k_0$  — центральные значения  $x$  и  $k$ , согласно неравенству Коши–Буняковского–Шварца имеем соотношение Габора–Гейзенберга–Вейля:  $\Delta x \Delta k \geq 1/(4\pi)$ . С математической точки зрения это соотношение полностью эквивалентно соотношению неопределённостей квантовой механики. Таким образом, площадь сигнала на информационной диаграмме, равная произведению квадратичных отклонений  $S_f = \Delta x \Delta k$ , имеет универсальный нижний предел. Как следствие, информационная диаграмма сигнала содержит счётное и конечное число "квантов" информации, называемых в теории обработки сигналов Габора логонами [62]. Соотношение неопределённостей Габора–Гейзенберга–Вейля обобщается на двумерные информационные сигналы  $f(x, y)$  [63], определяя нижний предел информационной диаграммы сигнала  $f(x, y)$  в четырёхмерном пространстве  $x, y, k_x, k_y$ , равный  $1/(16\pi^2)$ .

Рассмотренные выше общие свойства сигналов имеют важные следствия для обработки информации. Число степеней свободы ограниченного во времени и по спектру сигнала не превышает  $2\Omega T$ , где  $\Omega$  — ширина

спектра сигнала,  $T$  — его длительность. Благодаря этому, согласно теореме Найквиста–Шеннона [64], сигнал  $f(x)$ , спектр которого не содержит частот, превышающих  $k_{\max}$ , так что  $F(k) = 0$  при  $|k| > k_{\max}$ , может быть точно восстановлен из дискретной выборки  $f_n(\pi n/k_{\max})$ . Более того, для широкого класса сигналов  $f(x)$  с не превышающим октаву спектром для восстановления сигнала достаточно знание множества нулей функции  $f(x)$  (теорема Логана) [65].

### 8. "Собственные функции" поля зрительного восприятия

Точный нижний предел в неравенстве Габора–Гейзенберга–Вейля достигается специальным выбором формы сигнала. Такому выделенному классу принадлежат сигналы, описываемые функциями Габора, которые в одномерном варианте имеют вид [62]

$$f_G(x) = \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\alpha^2}\right] \exp[-ik_0(x-x_0)]. \tag{3}$$

Хорошо известно, что в квантовой механике точный нижний предел соотношения неопределённостей для координаты  $x$  и импульса  $p$  достигается для основного состояния гармонического осциллятора, волновая функция которого имеет вид, аналогичный функциям Габора. В квантовой оптике переход от квантово-механических операторов координаты  $\hat{x}$  и импульса  $\hat{p}$  к операторам рождения и уничтожения фотонов  $\hat{a}^\dagger$  и  $\hat{a}$  согласно правилу квантования гармонического осциллятора  $\hat{a} = (m\omega\hat{x} + i\hat{p})/(2\hbar m\omega)^{1/2}$  и  $\hat{a}^\dagger = (m\omega\hat{x} - i\hat{p})/(2\hbar m\omega)^{1/2}$  позволяет найти состояния светового поля с минимальной неопределённостью  $x$  и  $p$ . Эти состояния, впервые введённые Глаубером [66] и называемые когерентными состояниями, получаются из вакуумного состояния поля с помощью амплитуды перехода  $\langle 0|\alpha\rangle = \exp(-|\alpha|^2/2)$  и имеют вид  $|\alpha\rangle = \exp(-|\alpha|^2/2) \sum_n (\alpha\hat{a}^\dagger)^n |0\rangle/n!$

Поразительное свойство системы зрительного восприятия млекопитающих заключается в том [67, 68], что нейроны зрительной коры их головного мозга во многих случаях характеризуются двумерным полем восприятия сигнала, с высокой точностью описываемым двумерными обобщениями функций Габора [63, 69]

$$G(x, y; \xi, \eta, \gamma, \theta) = \exp\left[-\frac{(x-\xi)^2}{a^2} - \frac{(y-\eta)^2}{a^2}\right] \times \exp[-i\gamma(x-\xi) - i\theta(y-\eta)] \tag{4}$$

или аналогичными функциями [70], минимизирующими неопределённость воспринимаемого сигнала.

Обработка изображения  $S(x, y)$  такими клетками может быть представлена в виде разложения  $S(x, y) = \sum_{jklm} S_{jklm} G(x, y; \xi_j, \eta_k, \gamma_l, \theta_m)$  по двумерным функциям  $G$ , описывающим поле восприятия нейронов с пространственными координатами  $\xi_j$  и  $\eta_k$  и центральными пространственными частотами  $\gamma_l$  и  $\theta_m$ . Представляя множество передающих изображения сигналов  $S(x, y)$  в пространстве векторов  $|\sigma\rangle$ , запишем разложение  $S(x, y)$  в более компактном виде:  $|\sigma\rangle = \sum_n s_n |n\rangle$ . Представленное таким образом разложение сигнала изображения по функциям  $G$  показывает, что эти функции выполняют роль собственных векторов поля восприятия нейронов.

Поскольку функции Габора минимизируют неопределённость Габора–Гейзенберга–Вейля, собственные векторы  $|n\rangle$  поля восприятия нейронов обладают свойствами, аналогичными свойствам собственной функции основного состояния гармонического осциллятора и когерентных состояний фотонного поля.

### 9. Не удивлять демона: термодинамические принципы и байесовская модель мозга

Указанная выше способность системы зрительного восприятия млекопитающих минимизировать неопределённость поступающей информации в фазовом пространстве пространственных координат и пространственных частот является лишь одним из свойств, характеризующих мозг как систему обработки информации и позволяющих описывать информационные аспекты сознания в тех же терминах и категориях, что и квантовые системы обработки информации.

Общие принципы и понятия термодинамики и теории информации лежат в основе предпринимаемых в последнее время попыток построения объединяющих теорий мозга и сознания [71]. Такие попытки опираются на предположение о возможности обобщения понимаемых в смысле теории информации термодинамических принципов на самоорганизующиеся биологические системы, включая такие сложные системы, как мозг. Оптимальное состояние сознания при этом определяется как состояние, обеспечивающее минимум энтропии (удивления) восприятия через органы чувств [72].

Подсчёт термодинамических потенциалов проводится на основе байесовской модели мозга [73, 74], исходящей из предположения, что формирование сознанием картины окружающего мира является результатом байесовского процесса оптимизации гипотез на основе информации, поступающей в мозг от органов чувств. В рамках этой модели процессы обработки поступающей в мозг информации, обучения мозга и формирования мозга представлений об окружающем мире описываются в терминах вероятностей вырабатываемых и обновляемых мозгом гипотез и условных вероятностей наступления прогнозируемых событий. Эти вероятности подчиняются теореме Байеса [75]:

$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X)P(X)}{P(Y)}, \quad (5)$$

где  $P(X)$  — априорная вероятность гипотезы  $X$ ,  $P(X|Y)$  — апостериорная вероятность гипотезы  $X$ , понимаемая как вероятность гипотезы  $X$  при наступлении события  $Y$ ,  $P(Y|X)$  — вероятность наступления события  $Y$  при истинности гипотезы  $X$ ,  $P(Y)$  — полная вероятность наступления события  $Y$ . В рассматриваемой модели мозга теорема Байеса используется для количественного описания уверенности мозга в правильности или ошибочности определённой гипотезы  $X$ . В качестве меры поступающей в мозг информации используется энтропия, определённая по Шеннону [40],

$$H(X) = - \sum_X P(X) \log P(X). \quad (6)$$

В процессе формирования наиболее достоверной гипотезы апостериорная вероятность, получаемая на шаге

$t - 1$  формирования гипотезы на основании поступающего в мозг массива данных  $y = (y_1, \dots, y_{t-1})$ , используется в качестве априорной вероятности для следующего шага процесса (шага  $t$ ). Последовательность таких шагов описывается в виде цепей вероятностей, составленных из произведений вида

$$P(X_t|y_1, \dots, y_t) \propto P(y_t|X_t) P(X_t|X_{t-1}) P(X_{t-1}|y_1, \dots, y_{t-1}). \quad (7)$$

Произведения именно такого вида образуют амплитуды переходов и входят в интегралы по траекториям в фейнмановской трактовке квантовой динамики. Важное отличие квантовых систем состоит в том, что произведения вида (7) для квантовых систем состоят из амплитуд вероятностей, а не из самих вероятностей.

Важной количественной мерой правдоподобия вырабатываемой мозгом оценки конкретного параметра  $\chi$ , характеризующего определённый класс внешних воздействий, является информация Фишера [76]:

$$I_F = \sum_Y P(Y|\chi) \left[ \frac{\partial \log P(Y|\chi)}{\partial \chi} \right]^2. \quad (8)$$

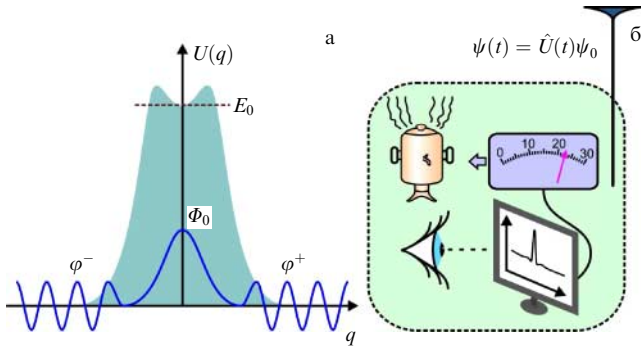
Величина, обратная  $I_F$ , удовлетворяет неравенству Крамера–Рао [77]  $\text{var}(\chi) \geq 1/I_F(\theta)$ , которое определяет универсальный предел неопределённости оценки параметра  $\chi$  на основе поступающих от органов чувств данных об окружающем мире. Информация Фишера и предел Крамера–Рао также широко используются в квантовой информатике [78]. Однако эти обстоятельства, так же как и тот факт, что принцип неопределённости Габора–Гейзенберга–Вейля оказывается применимым к поступающей в мозг информации, ни в коей мере не являются свидетельством квантового характера происходящих в мозге информационных процессов. Принцип неопределённости в квантовой механике означает, что одновременное измерение двух переменных, входящих в неравенство вида соотношения Габора–Гейзенберга–Вейля, принципиально невозможно.

В теории обработки сигналов соотношение неопределённости Габора–Гейзенберга–Вейля лишь выражает простое соотношение между свойствами функции и её фурье-образа. Процессы переноса, регистрации и хранения информации в определяющих работу и функции мозга процессах имеют не квантовую, а чисто классическую природу. Как важное проявление классического характера этих процессов, информация Фишера оказывается линейной функцией числа  $N$  выборок  $y = (y_1, \dots, y_t)$ , используемых при формировании гипотезы. Неопределённость Крамера–Рао при этом уменьшается как  $N^{-1/2}$ , что указывает на чисто классический характер информационного процесса.

Согласно общим принципам термодинамики выработка сознанием гипотез и формирование в результате этого процесса состояния сознания должно обеспечить минимум удивления, т.е. минимум энтропии чувственного восприятия [71].

### 10. Утраченная когерентность

Для иллюстрации возможности разрешения проблемы квантового измерения без использования гипотезы об особой роли сознания наблюдателя обратимся к следую-



**Рис. 4.** (а) Взаимодействие квантовой частицы с измерительным прибором:  $U(q)$  — потенциальная энергия выступающего в роли измерительного устройства шарика,  $E_0$  — энергия шарика в минимуме потенциальной ямы,  $\Phi_0(q)$  — волновая функция начального состояния шарика,  $\varphi^+$  и  $\varphi^-$  — волновые функции шарика, скатывающегося направо и налево. (б) Взаимодействие квантовой системы с измерительным прибором, являющимся частью открытой системы (показана слева от измерительного прибора), приводящее к потере квантовой когерентности и унитарного характера эволюции вектора состояния. Необратимый характер этого процесса исключает возможность воздействия сознания наблюдателя на результат эксперимента или на квантовую предысторию объекта.

щему наглядному примеру [79] взаимодействия квантового объекта с классическим измерительным прибором<sup>1</sup>. Рассмотрим квантовую частицу массой  $m$  в чистом суперпозиционном состоянии с неопределённым импульсом  $k$ , которое описывается волновой функцией

$$\psi(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x) = \alpha \exp(ikx) + \beta \exp(-ikx). \quad (9)$$

Покажем, что процесс определения знака импульса квантовой частицы, т.е. процесс определения состояния кота Шрёдингера, описываемого волновой функцией (9), может быть последовательно представлен с помощью уравнений квантовой эволюции.

В качестве измерительного прибора рассмотрим шарик массой  $M$ , установленный на вершину очень высокого усечённого конуса (рис. 4а) таким образом, что зависимость потенциальной энергии шарика  $U$  от его координаты  $q$  имеет вид, показанный на рис. 4а. Минимум энергии при  $q = 0$  обеспечивает равновесие шарика в этой точке, причём волновая функция выполняющего роль измерительного прибора шарика имеет вид

$$\Phi_0(q) = \frac{1}{(\pi a)^{1/4}} \exp\left(-\frac{q^2}{a^2}\right). \quad (10)$$

Предположим, что энергия, необходимая для того, чтобы столкнуть шарик с вершины, настолько мала, что её источником может служить исследуемая квантовая частица. Выведенный из положения неустойчивого равновесия шарик скатывается вниз по конусу, набирая кинетическую энергию. В начальный момент времени  $t = 0$  волновая функция, описывающая систему, состоящую из квантовой частицы и измерительного шарика,

имеет вид

$$\Psi_0(x, q) = \Phi_0(q) \psi(x). \quad (11)$$

Эволюция волновой функции  $\Psi(x, q, t)$ , описывающей рассматриваемую систему квантовая частица + измерительный прибор, при  $t > 0$  представляется уравнением Шрёдингера,

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x, q, t)}{\partial t} = [\hat{H}_a(x) + \hat{H}_b(q) + \hat{W}_{ab}(x, q)] \Psi(x, q, t), \quad (12)$$

где  $\hat{H}_a(x)$  — гамильтониан квантовой частицы,  $\hat{H}_b(x)$  — гамильтониан измерительного шарика,  $\hat{W}_{ab}(x, q)$  — энергия взаимодействия шарика и квантовой частицы, которая полагается равной

$$\hat{W}_{ab}(x, q) = \begin{cases} W_0 \delta(q - x), & t > 0, \\ 0, & t < 0, \end{cases} \quad (13)$$

$W_0$  — постоянная взаимодействия.

Согласно общей схеме решения квантовой задачи рассеяния, решение этого уравнения может быть представлено в виде [79]

$$\Psi(x, q, t) = \Psi_0(x, q) \exp[-i(E_0 + \varepsilon_k)t] + \varphi(x, q, t), \quad (14)$$

где  $\varphi(x, q, t)$  — волновая функция рассеянной волны,  $E_0$  — энергия шарика в минимуме потенциальной ямы при  $q = 0$ ,  $\varepsilon_k = \hbar^2 k^2 / (2m)$ .

Решение уравнения Шрёдингера (12) методом теории возмущений с малым параметром  $W_0$  даёт два выражения для функции  $\varphi(x, q, t)$ . Одно из этих решений ( $\varphi^+$ ) отлично от нуля при  $0 < q < vt$ , где  $v = \hbar k / M$  — скорость шарика. Второе решение ( $\varphi^-$ ) отлично от нуля при  $-vt < q < 0$ . Решения  $\varphi^+$  и  $\varphi^-$  отвечают состояниям квантовой системы  $\psi_1$  и  $\psi_2$  соответственно. Ввиду свойств функций  $\varphi^+$  и  $\varphi^-$  их произведение  $\varphi^+ \varphi^-$  стремится к нулю (рис. 4а), указывая на разрушение интерференции состояний  $\psi_1$  и  $\psi_2$  в результате взаимодействия квантовой частицы и макроскопического измерительного прибора. Шарик, скатывающийся с грани конуса в области положительных  $q$ , соответствует показанию макроскопического измерительного прибора, регистрирующего квантовую частицу в состоянии  $\psi_1$ . Шарик, скатившийся в область отрицательных  $q$ , показывает, что состояние квантовой частицы  $\psi_2$ . Таким образом, система квантовая частица + измерительный прибор (кот Шрёдингера + друг Вигнера) с вероятностями  $|\alpha|^2$  и  $|\beta|^2$  оказывается в состояниях  $\psi_1 \otimes \chi_1$  и  $\psi_2 \otimes \chi_2$  соответственно. Именно к этому решению собственного парадокса и пришёл Вигнер в своих более поздних работах. "Другом Вигнера" в этом мысленном эксперименте оказывается измерительный прибор с памятью и способностью стирать накопленную информацию.

Приведённый пример наглядно иллюстрирует ключевые аспекты взаимодействия квантовой системы с классическим измерительным прибором, которое приводит к потере квантовой когерентности, утрате унитарного характера эволюции вектора состояния и в конечном счёте переходу от квантового мира к классическому (рис. 4б). В рассмотренном примере начальное состояние системы квантовый объект + классический измеритель-

<sup>1</sup> Обсуждаемый здесь пример встречается в отечественной методической литературе по квантовой механике [79] ещё до введения общего понятия потери когерентности как неотъемлемой части измерения, проводимого классическим прибором над квантовой системой [35].

ный прибор описывается с помощью полностью квантовой волновой функции. До взаимодействия с измерительным прибором квантовая система находится в чистом суперпозиционном состоянии и её эволюция унитарна,  $\psi(x, t) = \hat{U}(t)\psi(x, t=0)$ . Для широкого класса систем унитарный оператор  $\hat{U}(t)$  имеет вид  $\hat{U}(t) = \exp(-i\hat{H}t/\hbar)$ , где  $\hat{H}$  — гамильтониан системы.

Взаимодействие вектора состояния измерительного прибора с окружающей средой приводит к утрате унитарного характера эволюции, потере квантовой когерентности и отбору устойчивого конечного состояния системы [10]. Важным фактором формирования классического конечного состояния из квантового начального состояния, отмеченным ещё в работах Уилера [29], является наличие в системе усиления взаимодействия. В рассмотренном примере такое усиление обеспечивается характером потенциала, в который помещён шарик, выполняющий функцию классического измерительного прибора. Именно благодаря характеру потенциала  $U(q)$  слабое воздействие на шарик со стороны квантовой системы приводит к классически наблюдаемому результату — скатыванию шарика по одной из граней конуса.

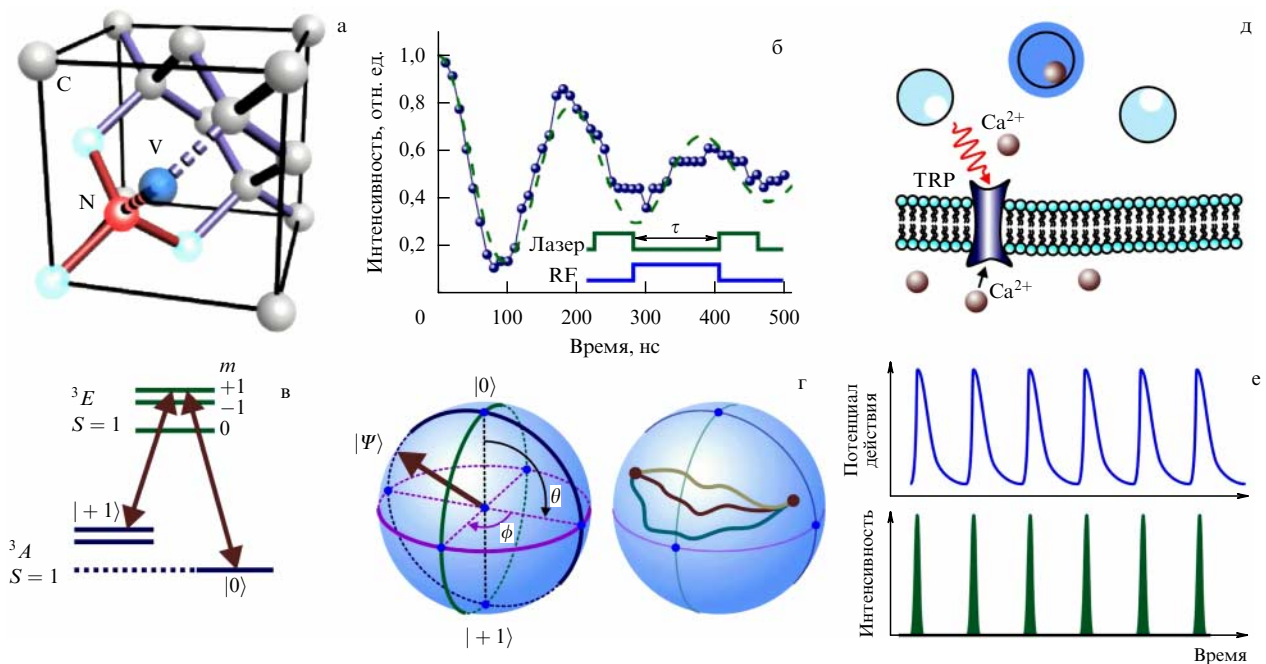
Приведённый пример нагляден, так как он подчёркивает роль неустойчивости равновесия и усиления взаимодействия, в том числе малых флуктуаций, как важных условий разрушения когерентности при макроскопическом измерении [79–82]. Этот процесс адекватно, но не всегда прозрачно физически описывается на языке приведённой матрицы плотности, характеризующей квантовую систему как часть большей системы, включающей саму квантовую систему и классический измерительный прибор, являющийся открытой системой, и взаимодействующей с окружением. Квантовое вытесняется классическим в приведённом примере в результате наложения

запрета на часть состояний квантовой системы, формально существующих в её гильбертовом пространстве.

## 11. Квантовые измерительные системы для исследования мозга

Выполненные недавно эксперименты [53, 54, 83, 84] показывают возможность использования свойств глубоко квантовых объектов для получения уникальной информации о нейросистемах, например, измерения температуры отдельных нейронов, активация которых осуществляется с помощью рассмотренных в разделе 5 (рис. 2б) теплочувствительных TRP-каналов [85, 86]. Измерение температуры в этих экспериментах становится возможным за счёт использования оптической регистрации электронного спинового резонанса в центрах азот–вакансия (NV) [87–91], создаваемых в микроили нанокристаллах алмаза (рис. 5а, в). Как физический параметр спин не имеет классического аналога. Квантовая динамика спина NV-центра, индуцируемая прикладываемым к NV-центру внешним СВЧ-полем (рис. 5б), может быть наглядно представлена в виде эволюции вектора состояния спина на сфере Пуанкаре (рис. 5г). В соответствии с общими законами квантовой динамики эволюция спинового состояния NV-центра описывается суммой квантовых траекторий, представляющих собой индивидуальные истории квантовой системы на сфере Пуанкаре (рис. 5г). Измерение отдельных квантовых траекторий динамики спина запрещено фундаментальными постулатами квантовой механики. Такое измерение приводило бы к рассмотренным выше квантовым парадоксам.

Взаимодействие спина с внешним классическим СВЧ-полем, однако, обуславливает связь спина с множествен-



**Рис. 5.** Квантовые сенсорные системы для исследования мозга: (а) NV-центр в кристаллической решётке алмаза, (б) временная зависимость оптического сигнала, отражающая квантовую динамику спина NV-центра в присутствии управляющих импульсов лазерного (532 нм) и СВЧ (RF) излучения, (в) упрощённая диаграмма спиновых состояний NV-центра, (г) эволюция вектора состояния спина NV-центра на сфере Пуанкаре (слева) и индивидуальные квантовые траектории эволюции спинового состояния (справа), (д) теплочувствительный ионный канал на клеточной мембране нейрона, активируемый лазерным излучением, (е) активно формируемые последовательности потенциалов действия.



ными классическими степенями свободы поля, приводящую к потере когерентности между различными индивидуальными квантовыми историями спина и выделению предпочтительной квантовой траектории. Оказывается возможным с помощью изменения формы импульса СВЧ-поля осуществить активное управление квантовой динамикой спина (рис. 5б). Форма спектра электронного спинового резонанса, индуцируемого приложенным СВЧ-полем и регистрируемого с помощью оптических методик, оказывается чувствительна к слабым магнитным полям и малым изменениям температуры. Благодаря этому обстоятельству спин одиночного NV-центра или ансамбля NV-центров может быть использован для высокочувствительного измерения магнитных полей и температуры с субклеточным пространственным разрешением [92–102].

В условиях точного температурного контроля термодинамическое состояние отдельного нейрона управляется путём нагревающего клетку лазерного импульса (рис. 5д). Локальный нагрев клетки с помощью одиночных импульсов лазерного излучения или специально подбираемых цугов световых импульсов позволяет формировать отдельные всплески или управляемые последовательности потенциала действия (рис. 5е), свидетельствующие о точно управляемом изменении свободной энергии и энтропии нейрона, подвергаемого лазерному воздействию [54, 84].

## 12. Заключение

За свою вековую историю квантовая механика выдержала проверку самыми сложными физическими экспериментами, результаты которых всякий раз с поразительной точностью подтверждали предсказания квантовой теории. На протяжении всего этого времени проблема интерпретации волновой функции и коллапса этой функции в процессе измерения продолжала оставаться одной из наиболее трудных проблем квантовой физики. Формальная логика парадоксов квантовых измерений не исключает возможности признания влияния сознания наблюдателя на результат измерения и даже на предысторию квантовой системы. Однако на всех этапах развития квантовой механики наличие такой возможности рассматривалось, скорее, как серьёзная трудность системы постулатов квантовой теории, нежели реально существующий механизм изменения предыстории квантовой системы сознанием наблюдателя.

Разработанный к настоящему времени аппарат квантовой механики позволяет дать последовательное разъяснение роли сознания наблюдателя в физических измерениях на основе универсальных закономерностей взаимодействия квантовой системы с окружением и потери квантовой когерентности. Эволюция замкнутой квантовой системы носит унитарный, детерминированный характер. Динамика такой системы описывается волновой функцией, являющейся решением соответствующего волнового уравнения. Взаимодействие квантовой системы с окружением, включая классический измерительный прибор как частный случай окружения, приводит к нарушению замкнутости системы. Такое измерение приводит к утрате унитарного характера эволюции системы вследствие взаимодействия с открытой классической системой измерительного прибора, потере квантовой когерентности и отбору устойчивого конечного

состояния системы. Существенно неунитарный и необратимый характер этого процесса исключает возможность воздействия сознания наблюдателя на результат эксперимента или на квантовую предысторию объекта. Таким образом, сознание наблюдателя перестаёт быть агентом, изменяющим предысторию квантовой системы, каковым оно выступает в мысленном эксперименте Уилера, и становится объектом физического исследования. Основанные на принципах квантовой физики измерительные приборы открывают новый этап в таких исследованиях.

Автор выражает глубокую признательность К.В. Анохину за многочисленные стимулирующие и плодотворные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 16-02-00843, 17-00-00212 и 18-52-00025) и Фонда Уелча (грант А-1801-20180324). Исследования в области квантовой оптической физики и квантовых технологий поддержаны грантом Правительства Российской Федерации 14.Z50.31.0040 от 17 февраля 2017 г. Исследования в области аттосекундной спектхронографии выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант 17-12-01533).

## Список литературы

1. Einstein A, Podolsky B, Rosen N *Phys. Rev.* **47** 777 (1935)
2. Bohr N *Phys. Rev.* **48** 696 (1935)
3. Фок В А и др. *УФН* **16** 436 (1936)
4. Фок В А *УФН* **62** 461 (1957); Fock V A *Czech. J. Phys.* **7** 643 (1957)
5. Фок В А *УФН* **66** 599 (1958); Fok V A *Sov. Phys. Usp.* **1** 208 (1958)
6. Wigner E P *Am. J. Phys.* **31** 6 (1963)
7. Wigner E P *Proc. Am. Phil. Soc.* **113** 95 (1969)
8. Wheeler J A *Rev. Mod. Phys.* **29** 463 (1957)
9. Wheeler J A, in *Mathematical Foundations of Quantum Theory* (Ed. A R Marlow) (New York: Academic Press, 1978) p. 9
10. Zurek W H *Rev. Mod. Phys.* **75** 715 (2003)
11. Everett H (III) *Rev. Mod. Phys.* **29** 454 (1957)
12. DeWitt B S, Graham N *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton: Princeton Univ. Press, 1973)
13. Bell J S *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987)
14. Белинский А В, Клышко Д Н *УФН* **163** (8) 1 (1993); Belinskii A V, Klyshko D N *Phys. Usp.* **36** 653 (1993)
15. Клышко Д Н *УФН* **164** 1187 (1994); Klyshko D N *Phys. Usp.* **37** 1097 (1994)
16. Клышко Д Н *УФН* **166** 613 (1996); Klyshko D N *Phys. Usp.* **39** 573 (1996)
17. Bouwmeester D, Ekert A, Zeilinger A (Eds) *The Physics of Quantum Information* (Berlin: Springer, 2000)
18. Stehling M K, Turner R, Mansfield P *Science* **254** 43 (1991)
19. Deisseroth K *Nature Meth.* **8** 26 (2011)
20. Miesenböck G *Science* **326** 395 (2009)
21. Менский М Б *УФН* **171** 459 (2001); Menskii M B *Phys. Usp.* **44** 438 (2001)
22. Менский М Б *УФН* **175** 413 (2005); Menskii M B *Phys. Usp.* **48** 389 (2005)
23. Zheltikov A, Anokhin K *Phys. Rev. E* **84** 061902 (2011)
24. Brown C T A, Deckert V, Sergeev A M, Zheltikov A M (Eds) *J. Biophotonics* **3** 639 (2010)
25. Доронина-Амитонова Л В и др. *УФН* **185** 371 (2015); Doronina-Amitonova L V et al. *Phys. Usp.* **58** 345 (2015)
26. Doronina-Amitonova L V et al. *Sci. Rep.* **3** 3265 (2013)
27. Doronina-Amitonova L V et al. *Appl. Phys. Lett.* **99** 231109 (2011)
28. Bohr N, in *Albert Einstein: Philosopher–Scientist* (Ed. P A Schlipp) (Evanston, Ill.: Library of Living Philosophers, 1949)
29. Wheeler J A, in *Quantum Theory and Measurement* (Eds J A Wheeler, W H Zurek) (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1983) p. 182
30. Scully M O, Englert B-G, Walther H *Nature* **351** 111 (1991)
31. Scully M O, Drühl K *Phys. Rev. A* **25** 2208 (1982)
32. Aharonov Y, Zebairy M S *Science* **307** 875 (2005)

33. Ma X et al. *Nature Phys.* **8** 479 (2012)
34. Ma X, Kofler J, Zeilinger A *Rev. Mod. Phys.* **88** 015005 (2016)
35. Zeh H D *Found. Phys.* **1** 69 (1970)
36. Wigner E P, in *Quantum Theory and Measurement* (Eds J A Wheeler, W H Zurek) (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1983) p. 324
37. Schrödinger E *Naturwissenschaften* **23** 807 (1935)
38. Boltzmann L *Vorlesungen über Gastheorie* (Leipzig: J.A. Bart, 1895); Пер. на англ. яз.: *Lectures on Gas Theory* (Berkeley: Univ. of California Press, 1964)
39. Gibbs J W *Trans. Connecticut Acad. Arts Sci.* **3** 108 (1874)
40. Shannon C E *Bell Syst. Tech. J.* **27** 379 (1948)
41. "Letter from J.C. Maxwell to P.G. Tait", недатированное; воспроизведено в Knott C G *Life and Scientific Work of Peter Guthrie Tait* (Cambridge: Univ. Press, 1911)
42. Szilard L Z. *Phys.* **53** 840 (1929)
43. Landauer R *IBM J. Res. Develop.* **5** 183 (1961)
44. Bennett C H *Int. J. Theor. Phys.* **21** 905 (1982)
45. Feynman R P *Feynman Lectures on Computation* (Ed. A J G Hey, R W Allen) (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1996)
46. Raizen M G *Science* **324** 1403 (2009)
47. Landauer R *Phys. Lett. A* **217** 188 (1996)
48. MacKinnon R *Nature* **350** 232 (1991)
49. Boyden E S et al. *Nature Neurosci.* **8** 1263 (2005)
50. Deisseroth K *Nature Neurosci.* **18** 1213 (2015)
51. Bath D E et al. *Nature Meth.* **11** 756 (2014)
52. Chen R et al. *Science* **347** 1477 (2015)
53. Fedotov I V et al. *Sci. Rep.* **5** 15737 (2015)
54. Ermakova Yu G et al. *Nature Commun.* **8** 15362 (2017)
55. Vriens J, Nilius B, Voets T *Nature Rev. Neurosci.* **15** 573 (2014)
56. Zheltikov A M *J. Appl. Phys.* **123** 224701 (2018)
57. Penrose R *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics* (Oxford: Oxford Univ. Press, 1999)
58. Stapp H P *Mind, Matter, and Quantum Mechanics* (New York: Springer, 1993)
59. Hameroff S, Penrose R *Phys. Life Rev.* **11** 39 (2014)
60. Arndt M et al. *Nature* **401** 680 (1999)
61. Tegmark M *Phys. Rev. E* **61** 4194 (2000)
62. Gabor D J. *IEE* **93** 429 (1946)
63. Daugman J G *J. Opt. Soc. Am. A* **2** 1160 (1985)
64. Shannon C E *Proc. IRE* **37** 10 (1949)
65. Logan B F (Jr.) *Bell Syst. Tech. J.* **56** 487 (1977)
66. Glauber R J *Phys. Rev.* **131** 2766 (1963)
67. Hubel D H, Wiesel T N *J. Physiol.* **160** 106 (1962)
68. Pollen D A, Lee J R, Taylor J H *Science* **173** 74 (1971)
69. Marčelja S J. *Opt. Soc. Am.* **70** 1297 (1980)
70. Stork D G, Wilson H R *J. Opt. Soc. Am. A* **7** 1362 (1990)
71. Friston K *Nature Rev. Neurosci.* **11** 127 (2010)
72. Friston K, Kilner J, Harrison L J. *Physiol. Paris* **100** 70 (2006)
73. Knill D C, Pouget A *Trends Neurosci.* **27** 712 (2004)
74. Doya K et al. *Bayesian Brain: Probabilistic Approaches to Neural Coding* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 2007)
75. Bayes F R S *Philos. Trans. R. Soc.* **53** 370 (1763)
76. Fisher R A *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A* **222** 309 (1922)
77. Cramér H *Mathematical Methods of Statistics* (Princeton: Princeton Univ. Press, 1946)
78. Nielsen M A, Chuang I L *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000)
79. Блохинцев Д И *Принципиальные вопросы квантовой механики* (М.: Наука, 1966); Пер. на англ. яз.: Blokhintsev D I *The Philosophy of Quantum Mechanics* (Dordrecht: D. Reidel, 1968)
80. Кадомцев Б Б *УФН* **164** 449 (1994); Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **37** 425 (1994)
81. Кадомцев Б Б, Питаевский Л П *УФН* **167** 1133 (1997); Kadomtsev B B, Pitaevskii L P *Phys. Usp.* **40** 1081 (1997)
82. Кадомцев Б Б *УФН* **165** 967 (1995); Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **38** 923 (1995)
83. Safronov N A et al. *Appl. Phys. Lett.* **106** 163702 (2015)
84. Lanin A A et al. *Opt. Lett.* **41** 5563 (2016)
85. McKemy D D, Neuhauser W M, Julius D *Nature* **416** 52 (2002)
86. Gracheva E O et al. *Nature* **464** 1006 (2010)
87. Taylor J M et al. *Nature Phys.* **4** 810 (2008)
88. Maze J R et al. *Nature* **455** 644 (2008)
89. Balasubramanian G et al. *Nature* **455** 648 (2008)
90. Le Sage D et al. *Nature* **496** 486 (2013)
91. Childress L et al. *Science* **314** 281 (2006)
92. Babinec T M et al. *Nature Nanotechnol.* **5** 195 (2010)
93. Kucsko G et al. *Nature* **500** 54 (2013)
94. Fedotov I V et al. *Sci. Rep.* **4** 5362 (2014)
95. Fedotov I V et al. *Opt. Lett.* **39** 6954 (2014)
96. Blakley S M, Fedotov I V, Kilin S Ya, Zheltikov A M *Opt. Lett.* **40** 3727 (2015)
97. Fedotov I V et al. *Opt. Lett.* **39** 6755 (2014)
98. Fedotov I V et al. *Appl. Phys. Lett.* **105** 261109 (2014)
99. Fedotov I V et al. *Opt. Lett.* **41** 472 (2016)
100. Blakley S M et al. *Opt. Lett.* **41** 2057 (2016)
101. Blakley S M et al. *Opt. Lett.* **41** 2077 (2016)

### The critique of quantum mind: measurement, consciousness, delayed choice, and lost coherence

A.M. Zheltikov

Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, 119991 Moscow, Russian Federation;

Texas A&M University, College Station, Texas, USA;

International Center for Quantum Optics and Quantum Technologies (the Russian Quantum Center),

ul. Novaya 100, 143025 Skolkovo, Moscow, Russian Federation;

Tupolev Kazan National Research Technical University, ul. Chetaeva 18a, 421000 Kazan, Russian Federation

E-mail: zheltikov@physics.msu.ru

The formal logic of many celebrated paradoxes of quantum measurements does not rule out the effect of observer's mind on the outcome of a measurement and even on a prehistory of a quantum system. The modern methodology of quantum mechanics offers a consistent explanation of the role of observer's consciousness in physical measurements in universal terms of interaction of a quantum system with environment, loss of quantum coherence, and unitary evolution of the state vector. In this picture, observer's consciousness is no longer an agent that changes the prehistory of a quantum system, but is rather an object of physical study. Instruments and methods based on quantum physics open a new phase in such studies.

**Keywords:** measurements in quantum mechanics, observer in quantum measurement, quantum decoherence

PACS numbers: 03.65.Ta, 03.65.Yz, **03.67. – a**

Bibliography — 101 references

Received 24 April 2017, revised 16 June 2017

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **188** (10) 1119–1128 (2018)

*Physics – Uspekhi* **61** (10) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.06.038155>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.06.038155>