

О ВЛИЯНИИ НАБЛЮДЕНИЯ НА ПРОТЕКАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КВАНТОВЫХ СИСТЕМАХ: ВОЗМОЖНО ЛИ ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА НАБЛЮДЕНИЯ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ?

© 2018 г. В.А. Намиот, Л.Ю. Щурова

Институт ядерной физики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119921, Москва, Воробьевы горы, 1

E-mail: vnamiot@gmail.com

**Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский просп., 53*

E-mail: ljusia@gmail.com

Поступила в редакцию 05.06.18 г.

Обсужден вопрос, каким образом в квантовой механике наблюдение за экспериментом может изменить его результаты. В качестве примеров рассмотрены задачи о влиянии наблюдений на процесс излучения кванта двухуровневой системой и о влиянии наблюдений на процесс прохождения частицы через потенциальный барьер. В первом случае наблюдение может уменьшить вероятность излучения кванта двухуровневой системой (квантовый Зенон-эффект). Однако во втором случае наблюдение за частицей может существенно, иногда даже на много порядков величины, увеличить вероятность прохождения частицы через потенциальный барьер (барьерный анти-Зенон-эффект). Обсуждается возможность проявления подобных эффектов наблюдения в биологических системах.

Ключевые слова: Зенон-эффект, барьерный анти-Зенон-эффект, влияние наблюдения на биосистемы.

DOI: 10.1134/S0006302918050228

В последние годы ряд ученых, в частности многие физики, работающие в области интерпретации квантовой теории, придерживаются мнения, что ответы на такие фундаментальные вопросы биологии, как вопросы о происхождении жизни, о механизмах макроэволюции, о природе мышления принципиально не могут быть получены в рамках классической физики. Конечно, строгого и даже нестрогого доказательства этого утверждения пока не существует. Однако если в рамках классического подхода оценить вероятность того, что за все время существования Земли на планете смог бы образоваться хотя бы один даже относительно простой геном, то эта вероятность окажется ничтожно малой [1]. На основе подобных рассуждений высказывается предположение, что эти и другие, связанные с ними, вопросы могут быть поняты только на основе квантового рассмотрения [1,2].

Конечно, в ряде случаев учет квантовых эффектов может привести к появлению только каких-то количественных поправок к измеряемым величинам. Очевидно, что подобные эффекты дают определенный вклад в работу биосистем, но вряд ли с их помощью можно по-

лучить ответ на такие основополагающие вопросы, о которых шла речь выше. Если полагать, что квантовый подход может столь кардинально изменить положение по сравнению с классическим, то в этом случае заведомо не обойтись без рассмотрения тех вопросов, которые принципиально отличают классическую ситуацию от квантовой. Одним из таких фундаментальных вопросов, отличающих квантовую ситуацию от классической, является вопрос об измерениях (наблюдениях). Так, в классической механике считается очевидным, что наступление того или иного события никак не может зависеть от того, наблюдает ли кто-нибудь за этим событием или же не наблюдает. Тем не менее еще задолго до появления классической физики древнегреческий философ Зенон Элейский приводил в своей апории рассуждение, имеющее целью доказать, что наблюдая, как Ахиллес пытается обогнать черепаху, мы увидим, что он никогда не сможет этого сделать. Согласно Зенону, за то время, за которое Ахиллес добежит до того места, где находилась черепаха в момент начала наблюдения, она продвинется немного вперед, через какой-то интервал времени он достигнет ее

нового местоположения, но она за этот же интервал продвинется вперед еще на сколько-то и так далее. Черепаха всегда будет впереди Ахиллеса...

Однако строгий анализ этого рассуждения показывает, что в нем содержится некорректность. Оно не учитывает, что сумма пусть даже бесконечного числа, но стремящихся к нулю интервалов времени между моментами регистрации местоположений Ахиллеса и черепахи, будет вполне конечной величиной, для которой мы введем обозначение τ_a . Легко видеть, что в любой момент времени t , удовлетворяющий условию $t > \tau_a$, Ахиллес уже будет впереди черепахи.

В отличие от классической физики наблюдение в квантовой механике в состоянии действительно изменить происходящее. Дело в том, что любое наблюдение за квантовой системой одновременно и воздействует на нее. Действительно, цель любого наблюдения состоит в том, чтобы получить информацию о наблюдаемой системе, но невозможно получить такую информацию и при этом совершенно не повлиять на эту систему. (Например, если мы в экспериментах по наблюдению интерференционной картины на экране, возникающей при «одновременном» пролете частицы через два отверстия в диафрагме, сможем получать информацию о том, через какое именно отверстие пролетела частица, то мы, тем самым, разрушим интерференцию.) Обычно влияние наблюдения проявляется в том, что волновая функция, описывающая наблюдаемую систему, испытывает так называемый коллапс. Хотя проблеме коллапса посвящено очень большое количество работ (см., например, работы [2,3] и ссылки в этих работах), нельзя сказать, что в этом вопросе достигнута ясность [4]. Ниже, в параграфе, посвященном выяснению причин влияния наблюдения на вероятность появления тех или иных событий, мы также коснемся этого вопроса.

Обратимся вновь к биологическим системам. В общем случае (если отвлечься от некоторых непринципиальных моментов) можно сказать: биосистемы в своем развитии сохраняют лишь то, что способствует их выживанию. В приложении к обсуждаемой ситуации это означает, что для биосистем представляет интерес только такое воздействие наблюдения на происходящее, которое каким-либо образом улучшает положение этих биосистем. Но для того, чтобы это имело место, нужно, чтобы выполнялось по крайней мере одно необходимое (хотя, вообще говоря, не являющееся достаточным) условие: воздействие наблюдения не может быть чисто случайным, а должно быть

вполне определенным. Кроме того, вряд ли подобное воздействие может представлять интерес в том случае, если его результат мог бы быть получен каким-либо более простым (например, вообще не требующим привлечения квантовой механики) способом.

То, что возможны ситуации, когда воздействие на систему, возникающее в результате наблюдения за ней, вызывает там вполне определенные целенаправленные изменения, не является чисто гипотетическим предположением. Примерами такого воздействия являются так называемый Зенон-эффект (названный так по имени Зенона Элейского), когда наблюдение замедляет протекание наблюдаемого процесса и в принципе может даже его остановить [5], а также барьерный анти-Зенон-эффект, позволяющий в ряде случаев существенно увеличить ток частиц через потенциальный барьер [6,7]. Важно, что чисто классическими методами достичь подобных результатов не представляется возможным.

Понятно, что хоть сколько-нибудь строгие количественные методы расчета подобных эффектов в приложении к биосистемам в настоящее время вряд ли могли бы быть осуществлены. Тем не менее попытка разобраться, пусть даже на качественном уровне, с тем, что происходит не только в самой наблюдаемой системе, но также и в ее окружении, сама по себе представляет существенный интерес. Такие обсуждения могут оказаться полезными не только для понимания того, что происходит в наблюдаемых системах, но и для понимания особенностей взаимодействия наблюдаемых систем с окружением (включая некоторые вопросы, связанные с коллапсом). Цель предлагаемой статьи и состоит в том, чтобы на примерах Зенон-эффекта и барьерного анти-Зенон-эффекта по возможности разобраться, хотя бы на качественном уровне, каким образом наблюдение за процессом может изменить осуществление этого процесса.

КВАНТОВЫЙ ЗЕНОН-ЭФФЕКТ НА ПРИМЕРЕ ИЗЛУЧЕНИЯ КВАНТА ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМОЙ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В ВОЗБУЖДЕННОМ СОСТОЯНИИ

Предположим, что имеется резонатор, представляющий собой объем, ограниченный идеальными отражающими стенками. Если возбудить в таком резонаторе электромагнитные колебания, то затухать они не будут. Предположим также, что в этот резонатор помещена двухуровневая система, энергии уровней кото-

рой обозначим как $E^{(1)}$ и $E^{(2)}$ ($E^{(1)} > E^{(2)}$). Простейшим примером такой двухуровневой системы является частица со спином $1/2$ в магнитном поле. Ситуация, когда магнитный момент частицы направлен против поля, соответствует первому состоянию, а когда по полю – второму состоянию. Другим примером может служить частица в потенциале $U(x)$. Конечно, уровней в данном случае не два, а гораздо больше, но здесь можно выделить два самых нижних уровня, расстояние между которыми существенно меньше, чем все остальные расстояния между любыми другими уровнями. Поэтому если работать в области энергий, соответствующих переходам между двумя низшими уровнями, то какие-либо другие переходы с участием более высоких уровней можно (по крайней мере, в каком-то приближении) не рассматривать.

Предположим, что энергия $\hbar\omega_0$ (здесь \hbar – постоянная Планка, а ω_0 – собственная частота этой моды), соответствующая одной из собственных мод резонатора, в точности равняется $\Delta E = E^{(1)} - E^{(2)}$. Условие $\hbar\omega_0 = \Delta E$ выделяет эту моду из всех остальных: она оказывается именно той единственной модой, которая эффективно взаимодействует с двухуровневой системой. (Предполагается, что взаимодействием двухуровневой системы с любой другой модой, энергия которой отличается от ΔE , можно пренебречь.)

Пусть в начальный момент времени (при $t = 0$) двухуровневая система находилась в первом состоянии. Тогда в дальнейшем, при $t > 0$, в этой системе возникнут осцилляции. Система будет переходить с первого уровня на второй и обратно, причем одновременно с этим в те моменты времени, пока она будет находиться на втором уровне, в выделенной моде резонатора будет присутствовать квант. Обозначим частоту, с которой происходят эти осцилляции (частоту Раби), символом Ω . (В принципе, если известно, как двухуровневая система взаимодействует с квантом в выделенной моде, то можно вычислить Ω в явном виде. Но для того, чтобы продемонстрировать уменьшение вероятности перехода вследствие Зенон-эффекта, этот явный вид даже не потребуются.) Обозначим вероятности того, что двухуровневая система находится в первом и втором состояниях, соответственно как $P_1(t)$ и $P_2(t)$. Для вероятностей можно записать:

$$\begin{cases} P_1(t) = \cos^2(\Omega t), \\ P_2(t) = \sin^2(\Omega t). \end{cases} \quad (1)$$

Воспользовавшись уравнением (1), мы можем определить время τ_q , через которое с вероятностью, равной единице, в выделенной моде резонатора будет присутствовать квант:

$$\tau_q = \frac{\pi}{2\Omega}. \quad (2)$$

Введем $P_q = (\tau_q)^{-1}$ – вероятность излучения кванта в единицу времени. Воспользовавшись формулой (2), мы можем записать: $P_q = 2\Omega/\pi$.

Предположим теперь, что мы осуществляем наблюдение за двухуровневой системой, т.е. последовательно через моменты времени Δt проверяем, перешла ли она уже из первого состояния во второе, или же еще нет. В принципе подобную проверку можно осуществить, например, следующим образом. Каким-либо способом расщепим второй уровень двухуровневой системы на два подуровня, разность энергий которых равняется δE (причем $\delta E \ll \Delta E$). (Строго говоря, система после такого расщепления уже должна рассматриваться как трехуровневая, но в данном случае, приближенно, ее по-прежнему можно рассматривать как двухуровневую.)

Будем последовательно, через моменты времени Δt , один за другим посылать кванты с энергией $\hbar\omega_1 = \delta E$ и облучать ими двухуровневую систему. Если двухуровневая система находится на первом уровне, то эти кванты пролетят сквозь нее, практически не рассеиваясь. Но если система находится на втором уровне, то можно так подобрать ее параметры, что с вероятностью, близкой к единице, этот квант рассеется на ней. Зарегистрировав рассеянный квант (например, с помощью фотоумножителя, помещенного вблизи системы), мы сможем определить, что система находилась на втором уровне, когда произошло рассеяние. Если же квант не был зарегистрирован, то это означает, что когда должно было произойти рассеяние, система находилась на первом уровне. Таким образом, проверяя, произошло ли рассеяние очередного кванта или нет, мы тем самым осуществляем наблюдение за состоянием двухуровневой системы. (Впрочем, Зенон-эффект может иметь место и при отсутствии фотоумножителя или каких-либо иных устройств, осуществляющих регистрацию сигнала: сам факт наличия рассеянного кванта, даже если он и не был зарегистрирован кем-либо или чем-либо, уже приводит к коллапсу волновой функции, который, фактически, и является «первопричиной» Зенон-эффекта.)

Предположим, что выполняется условие $\Omega\Delta t \ll 1$. Введем $P_u(n)$ – вероятность того, что за промежуток времени $n\Delta t$, в течение которого было проведено n наблюдений, в выделенной моде удалось обнаружить квант. Для $P_u(1)$ можно записать:

$$P_u(1) = P_2(\Delta t) = \sin^2(\Omega\Delta t) \approx (\Omega\Delta t)^2. \quad (3)$$

Как следует из выражения (3), вероятность $P_u(1) \ll 1$ и, следовательно, в подавляющем числе случаев к моменту $t = \Delta t$ никаких квантов в выделенной моде обнаружено не будет, а сама двухуровневая система по-прежнему будет находиться в первом состоянии. Но если система осталась в первом состоянии, то мы можем рассматривать момент $t = \Delta t$ как начало нового отсчета времени: все в системе будет происходить таким образом, как будто переход с первого на второй уровень в этот новый момент времени еще только начался. Воспользовавшись этим обстоятельством, мы можем выразить $P_u(2)$ через $P_u(1)$:

$$P_u(2) = (1 - P_u(1))P_u(1) + P_u(1) \approx 2P_u(1). \quad (4)$$

Продолжая подобное рассуждение по индукции и дальше, мы можем представить $P_u(n)$ как

$$P_u(n) = (1 - P_u(n-1))P_u(1) + P_u(n-1), \quad (5)$$

и до тех пор, пока $P_u(n)$ все еще можно считать малым, переписать выражение (5) в виде:

$$P_u(n) = nP_u(1). \quad (6)$$

Введем P'_q – вероятность излучения кванта в единицу времени в ситуации, когда осуществляется наблюдение за процессом излучения. Воспользовавшись выражением (6) и учитывая, что $n = t/\Delta t$, мы можем представить P'_q в виде:

$$P'_q \approx (\Omega^2\Delta t) = \Omega^2/n_z, \quad (7)$$

где $n_z = (\Delta t)^{-1}$ – число проверок двухуровневой системы в единицу времени. Как показывает уравнение (7), P'_q оказывается обратно пропорциональным n_z . (Напомним, что уравнение (7) выполняется только при условии, что $n_z \gg \Omega$.)

Сравнивая P_q и P'_q , мы видим, что P'_q в Ω/n_z раз меньше P_q . И когда мы проверяем, произошло ли рождение кванта в выделенной моде или еще нет, то мы, самым фактом проверки, уменьшаем вероятность рождения этого кванта.

БАРЬЕРНЫЙ АНТИ-ЗЕНОН-ЭФФЕКТ. ВЛИЯНИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ПРОХОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦЫ СКВОЗЬ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ БАРЬЕР

Рассмотрим пример, на котором можно продемонстрировать влияние наблюдения на процесс прохождения частицы сквозь потенциальный барьер. Пусть имеется частица А массы M , помещенная в прямоугольную потенциальную яму Z ширины L и находящаяся там в i -м состоянии с энергией $E_i = \frac{\pi^2\hbar^2 i^2}{2ML^2}$. Для того чтобы хоть как-то следить за местонахождением этой частицы, мы помещаем в яму устройство В, во многом подобное тому, которое было рассмотрено в предыдущем параграфе. Это может быть, например, устройство, включающее в себя двухуровневую систему, находящуюся в возбужденном состоянии, нижний уровень которой расщеплен на два подуровня. Эта двухуровневая система последовательно, через моменты времени Δt , облучается квантами, энергия которых совпадает с разностью энергий подуровней. Следует так подбирать параметры взаимодействия этих квантов с двухуровневой системой, чтобы вероятность рассеяния кванта на ней была бы близка к единице, когда она находилась бы на втором уровне. (Соответственно, когда система находится на первом уровне, никакого рассеяния квантов на ней вообще не происходит.) Регистрация квантов, рассеиваемых на двухуровневой системе, осуществляется с помощью помещенного рядом с ней фотоумножителя. При этом сам акт посылки кванта с последующим выяснением того, рассеялся ли он на двухуровневой системе или же пролетел, не рассеиваясь, мы будем называть испытанием или же проверкой.

Двухуровневая система взаимодействует с частицей А и в результате такого взаимодействия имеет возможность переходить с первого (верхнего) уровня (на котором она находилась первоначально) на второй (нижний) уровень. Характерный масштаб этого взаимодействия S выбирается достаточно малым (по крайней мере, он должен быть много меньше, чем L). Когда мы регистрируем (с помощью рассеянного кванта) переход в двухуровневой системе, мы, тем самым, получаем информацию о том, что частица А побывала (или, может быть, даже все еще находится) поблизости от устройства В.

Предположим, что имеет место следующая ситуация. Было проведено $(n - 1)$ испытаний, и они показали, что рассеянных квантов не было. Следовательно, в течение всего времени

$t_{n-1} = (n-1)\Delta t$, которое потребовалось для проведения этих испытаний, двухуровневая система находилась на первом уровне, и, соответственно, частица А оставалась в i -м состоянии с энергией E_i . Но вот в n -м, последнем испытании, был зарегистрирован рассеянный квант, и, следовательно, к моменту времени $t_n = n\Delta t$ в системе (в которую входят частица А и устройство В) произошел коллапс волновой функции.

Двухуровневая система после коллапса окажется во втором состоянии (но в принципе не исключено, что в дальнейшем, опять же за счет взаимодействия с частицей А, она вновь вернется в первое состояние), в то время как волновая функция частицы А будет уже описываться не одним i -м состоянием, а суперпозицией состояний. Рассмотрим какое-то j -е состояние из этой суперпозиции, энергия которого E_j удовлетворяет условию $E_j \gg E_i$. Обсудим вопрос, как зависит вероятность обнаружить это состояние от величины E_j (в данном случае имеется в виду априорная вероятность такого обнаружения, которую можно было бы в принципе рассчитать еще до проведения n -го испытания). Будем считать, что в момент времени t_{n-1} , при предпоследней проверке, это состояние точно отсутствовало. Но в дальнейшем, уже через очень короткий интервал времени Δt , удовлетворяющий условию

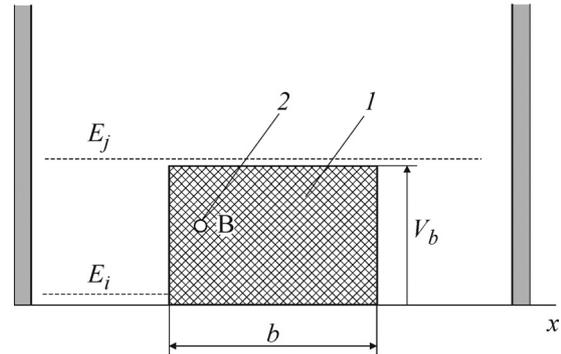
$$\delta t = \hbar/E_j < \Delta t, \quad (8)$$

неопределенность энергии в системе будет достаточно велика (что непосредственно следует из принципа неопределенности для энергии и времени), чтобы в ней могло бы появиться состояние с энергией E_j . Однако начиная с $t \approx \Delta t$ вероятность появления такого состояния p_j с ростом времени t увеличиваться уже не будет: она будет как-то осциллировать, оставаясь в среднем достаточно малой. В дальнейшем же, при $t \approx \delta t_n = n\Delta t$, когда в ходе последней проверки произойдет коллапс волновой функции, p_j как раз и будет определять вероятность того, что при этом будет зафиксирован одновременный переход двухуровневой системы на второй уровень и переход частицы А в j -е состояние с энергией E_j .

Оценить p_j можно по формуле, аналогичной формуле (3):

$$p_j \approx \sin^2(\Omega' \Delta t) \approx (\hbar \Omega' / E_j)^2, \quad (9)$$

где Ω' – некоторая эффективная частота, выполняющая здесь ту же роль, что и частота Раби в формуле (3); в принципе, если известен



Одномерная потенциальная яма Z для частицы А; 1 – симметричный прямоугольный потенциальный барьер с шириной b и высотой V_b ; 2 – двухуровневая система В.

гамильтониан взаимодействия частицы А и двухуровневой системы, то Ω' может быть вычислена в явном виде. Однако явный вид Ω' нам не понадобится в дальнейшем. При этом имеет значение тот факт, что если условие

$$\sqrt{2ME_j}S/\hbar = 1 \quad (10)$$

удовлетворяется, то заведомо можно считать, что Ω' не зависит от E_j . Если же рассматривать столь большие E_j , для которых будет удовлетворяться обратное неравенство, то для них $\Omega' \rightarrow 0$. В дальнейшем мы рассматриваем только такие E_j , для которых выполняется условие (10).

Таким образом, как это следует из формул (9) и (10), для состояний с энергиями E_j , много большими чем E_i , имеем:

$$p_j \sim E_j^{-2}. \quad (11)$$

Вероятность p_j достаточно быстро убывает с ростом E_j , поэтому, казалось бы, можно считать, что в усредненные величины, такие как, например, средняя энергия частицы А после взаимодействия с системой В, сколько-нибудь существенного вклада эти состояния давать не будут. Но из этого утверждения есть одно, но очень важное исключение. Представим себе, что на дне ямы Z имеется потенциальный барьер, например барьер прямоугольной формы (в данном случае для того, чтобы продемонстрировать, в чем состоит сущность обсуждаемого здесь эффекта, форма барьера несущественна), высота которого, отсчитываемая от дна ямы, равна V_b , а ширина равняется b ($L \gg b$). Схема такой потенциальной ямы представлена на рисунке. Пусть в начальный момент и частица А с энергией E_i , и система В находятся слева от барьера. Предположим также, что выполняется

неравенство $V_b \gg E_i$. Введем P_H – вероятность того, что частица А в процессе туннелирования сквозь барьер «просочится» в правую часть ямы Z. Для P_H можно записать:

$$P_H \sim \exp(-2\sqrt{2M V_b} b/\hbar). \quad (12)$$

Как следует из выражения (12), туннельный ток через барьер (который мы обозначим как J_H) экспоненциально быстро убывает с ростом H .

Существенно, что если в результате коллапса волновой функции, зарегистрированного системой В, частица А оказалась в состоянии с энергией E_j , превосходящей V_b , то туннелировать эта частица не будет: попасть в правую часть ямы Z она может, просто пролетев туда над барьером. Следовательно, ток частиц через барьер, обусловленный коллапсами, связанными с наблюдениями за такими частицами (мы обозначим этот ток как J_B), будет определяться только вероятностью того, что частица А при коллапсе будет зарегистрирована в каком-либо из состояний с энергией $E_j > V_b$. Но вероятности попасть в такие состояния, пропорциональные в данном случае, как это следует из выражения (11), E_j^{-2} , вообще не зависят от H . Поэтому несмотря на то, что вероятность превышения энергией частицы после коллапса величины V_b весьма мала, при достаточно больших H ток J_B существенно (возможно, что даже на много порядков) превзойдет ток J_H . Именно в этом и состоит основное свойство барьерного анти-Зенон-эффекта: когда туннельный ток очень мал, наблюдение за частицами, проходящими сквозь барьер или же отражающимися от него может, при определенных условиях, весьма существенно увеличить вероятность прохождения.

Нужно также указать на то, что при барьерном анти-Зенон-эффекте совсем не обязательно располагать систему В, осуществляющую наблюдение за частицей, вне барьера, как это сделано в ситуации, рассмотренной выше. Если располагать систему В внутри барьера, то это может даже дать определенные преимущества. С одной стороны, располагая систему В внутри барьера, мы тем самым уменьшаем вероятность для частицы приблизиться к ней и быть ею зарегистрированной. Но с другой стороны, такое уменьшение вероятности может компенсироваться тем, что в этом случае может существенно возрасти вероятность перехода частицы в надбарьерные состояния (в рассмотренном нами примере – в состояния с энергией, превышающей V_b). На качественном уровне это можно понять из следующих рассуждений. Сам факт регистрации местоположения частицы

внутри барьера означает, что находиться в подбарьерном состоянии она уже не может. Следовательно, частица должна была перейти в надбарьерное состояние. Но для того чтобы частица могла бы в дальнейшем преодолеть барьер, ей как раз и требуется перейти в надбарьерное состояние.

Таким образом, барьерный анти-Зенон-эффект позволяет в определенных случаях существенно увеличить ток частиц через потенциальный барьер. Барьерный анти-Зенон-эффект представляет также особый интерес в связи с вопросом о том, можно ли с его помощью настолько увеличить вероятность прохождения потенциального барьера, препятствующего слиянию ядер в твердом веществе, чтобы это позволило объяснить парадоксальные результаты экспериментов по холодному ядерному синтезу. Имеются экспериментальные указания, что существуют такие биологические системы и неорганические системы, в которых наблюдались подобные процессы слияния ядер. Например, в работе [8] приводится ряд ссылок на публикации, в которых, по мнению авторов, наблюдалось образование новых элементов. В этих экспериментах, как утверждают их авторы, им удавалось наблюдать в исследуемом веществе выделение энергии, не объясняемое ни химическими, ни какими-либо иными неядерными процессами, а также изменение изотопного (и даже элементного) состава такого вещества.

Выше мы представили модель для прямоугольной квантовой ямы, которая иллюстрирует основные идеи барьерного анти-Зенон-эффекта. В нашей работе [7] проведены аналитические вычисления барьерного анти-Зенон-эффекта для модельного барьера специально выбранной формы, имеющей определенное сходство с формой барьеров, препятствующих слиянию ядер в твердом веществе. Полученные формулы и приведенные в работе [7] численные оценки для многозарядных ядер показывают, что барьерный анти-Зенон-эффект может значительно, в некоторых случаях даже на порядки величины, увеличить вероятность слияния ядер в веществе.

ЧТО ЯВЛЯЕТСЯ ПРИЧИНОЙ ТОГО, ЧТО НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ПРОЦЕССОМ МОЖЕТ ИЗМЕНИТЬ ВЕРОЯТНОСТЬ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ?

Предположим, что в процессе, который был рассмотрен в предыдущем параграфе, мы исключим возможность рассеяния кванта на двухуровневой системе. Рассмотрим ситуацию, когда двухуровневая система находится в задан-

ном внешнем поле частоты ω_1 , вызывающем переходы между подуровнями ее нижнего уровня, но параметры системы подобраны таким образом, что никаких вторичных квантов излучаться при этом вообще не будет.

Казалось бы, в постановке задачи почти ничего не изменилось по сравнению с тем, что было ранее. Тем не менее никакого коллапса волновой функции и никаких частиц с энергиями $E_j \gg E_i$ в системе уже никогда не появится. Возникает вопрос, каким образом вторичный квант, энергия которого $\hbar\omega_1 \ll E_j$, может так изменить условия задачи, чтобы в ней хоть изредка, но стали бы появляться частицы с энергией $E_j - E_i$?

Гипотеза, которая могла бы объяснить столь парадоксальную ситуацию, выглядит достаточно необычно. В соответствии с этой гипотезой результат наблюдения зависит не только от состояния самой наблюдаемой системы, но также и от состояния наблюдающей системы, включающей всю окружающую наблюдаемую систему реальность.

Казалось бы, на первый взгляд, что предлагаемая гипотеза противоречит самим основам квантовой теории. Мы приведем здесь одно очень простое рассуждение, имеющее целью доказать, что эта гипотеза неверна, а затем покажем, почему такое рассуждение является некорректным.

Обозначим через $\{x\}$ набор переменных, относящихся к наблюдаемой системе, и через $\{X\}$ – набор переменных, относящихся ко всей остальной реальности. Используя эти обозначения, мы можем записать полную волновую функцию (волновую функцию наблюдаемой системы и всей остальной реальности) как $\psi(\{x\}, \{X\}, t)$. Предположим, что во время эксперимента наблюдаемая система не взаимодействует с окружающей реальностью. В этом случае, казалось бы, мы можем представить $\psi(\{x\}, \{X\}, t)$ в виде:

$$\psi(\{x\}, \{X\}, t) = \psi_1(\{x\}, t) \psi_2(\{X\}, t). \quad (13)$$

Но из выражения (13) непосредственно следует, что любые события, относящиеся к наблюдаемой системе и ко всей остальной окружающей ее реальности, являются независимыми и не в состоянии повлиять друг на друга. Другими словами, окружающая реальность никак не может изменить результат измерений во время эксперимента...

Однако до начала эксперимента и после его окончания наблюдаемая система взаимодействует с окружающей реальностью (иначе мы не можем получить никакой информации об экс-

перименте). Поэтому до начала эксперимента и после его окончания полная волновая функция не может быть представлена в виде (13). Но если во время эксперимента волновая функция описывается выражением (13), то это неявно полагает, что вся та информация, которая была получена при взаимодействии, каким-то образом исчезает в окружающей реальности и не влияет на ее поведение. Реальность как-бы эффективно «забывает» эту информацию.

Если бы речь шла о классической реальности, то объяснить подобное «забывание» было бы очень просто. В этом случае достаточно предположить, что в ней имеет место динамический хаос, и полученная информация «тонет» в образующемся шуме.

В квантовой системе такое «забывание» можно было бы объяснить, если бы квантовая система вела себя подобно системе с локальными скрытыми параметрами. Но, как было показано Беллом, поведение квантовой системы принципиально не сводится к поведению системы с локальными скрытыми параметрами – никакого эффективного «забывания» в квантовой системе нет. А если нет «забывания», то, строго говоря, мы не имеем права считать, что ψ_2 в выражении (13) зависит только от $\{X\}$ и от t , а должны в общем случае записать выражение для волновой функции как

$$\psi(\{x\}, \{X\}, t) = \psi_1(\{x\}, t) \psi_2(\{x\}, \{X\}, t). \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что поведение окружающей реальности коррелирует с поведением наблюдаемой системы, что в сущности и является причиной того, почему эта реальность может изменить результат наблюдений.

Вернемся к обсуждению вопроса о том, каким образом возникают состояния с энергией $E_j \gg E_i$. Излученный квант меняет не только наблюдаемую систему, которой он был излучен, он также меняет и окружающую реальность, в которую был излучен. И в этой измененной реальности уже могут наблюдаться (пусть даже весьма редко) такие события, которые, если бы не было такого изменения, вообще не наблюдались бы.

Обсудим теперь, хотя бы на качественном уровне, эту гипотезу чуть более подробно. То, что любое, даже самое незначительное событие, в частности, квант, излученный наблюдаемой системой, может очень существенно изменить окружающую реальность – в этом в принципе нет ничего удивительного. Реальность по каким-то параметрам всегда находится в неустойчивом или же метастабильном состоянии (если бы она была полностью устойчивой, то

никаких измерений произвести в ней было бы нельзя). А в неустойчивых системах даже малое воздействие может вызывать существенные изменения. Измененная реальность, в свою очередь, «воспринимает» наблюдаемую систему тоже как измененную. То есть, «с точки зрения» измененной реальности, волновая функция наблюдаемой системы сама претерпевает изменения – в ней происходит коллапс. Так что когда мы создали такие условия, чтобы никаких вторичных квантов не излучалось бы, мы этим исключили для наблюдаемой системы возможность «сообщить, что с ней происходит» окружающей реальности. Тем самым мы исключили возможность коллапса волновой функции и всего того, что с этим коллапсом связано, в частности возможность хотя бы редко наблюдать состояния с большими величинами энергий E_j .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе обсуждена проблема влияния наблюдений за процессом на осуществление этого процесса в квантово-механической системе. В качестве примера рассмотрено влияние наблюдений на процесс излучения кванта двухуровневой системы в возбужденном состоянии и показано, что вероятность рождения кванта в такой системе уменьшается вследствие наблюдений: квантовый эффект Зенона. В качестве другого примера рассмотрен процесс прохож-

дения частицы через потенциальный барьер и показано, что наблюдение за частицей может значительно увеличить вероятность перехода через барьер: барьерный анти-Зенон-эффект. Обсуждается роль окружающей среды в процессе наблюдения за частицей. Показано, что барьерный анти-Зенон-эффект может значительно, в некоторых случаях даже на порядки величины, увеличить вероятность слияния ядер в веществе. Такое увеличение вероятности может потенциально объяснить результаты экспериментов по трансмутации элементов в биологических системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. А. Намиот, Биофизика **59** (1), 202 (2014)
2. M. B. Mensky, *Quantum Measurements and Decoherence. Models and Phenomenology* (Kluwer Academic, Dordrecht/Boston/London, 2000).
3. M. B. Mensky, Phys. Lett. A **257** (5–6), 227 (1999).
4. W. H. Zurek, Nature Physics **5**, 181 (2009).
5. B. Misra and E. C. G. Sudarshan, J. Math. Phys. **18**, 756 (1977).
6. V. A. Namiot, Biophysics **61** (2), 342 (2016).
7. V. A. Namiot and L. Yu. Shchurova, Int. J. Mod. Phys. B **31** (11), 1750069 (2017).
8. В. И. Высотский и А. А. Корнилова, *Ядерный синтез и трансмутация элементов в биологических системах* (Мир, Москва, 2003).

On the Influence of Observation on Processes in Quantum Systems: Is It Possible to Figure out an Observer Effect in Biological Systems?

V.A. Namiot* and L.Yu. Shchurova**

**Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

***Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, Moscow, 119991 Russia*

In this paper, we discuss the question of how the observation of a process may affect its outcome. As examples, we consider the tasks on the influence of observations on the process of quantum emission by a two-level system, and on the influence of observations on the process of particle passage through a potential barrier. In the first case, the observation can reduce the probability of quantum emission by the two-level system (quantum Zeno effect). However, in the second case, the observation of a particle can significantly increase the transmission probability of a particle through a barrier, sometimes even by many orders of magnitude (a barrier anti-Zeno effect). We discuss the possibility of figuring out such observer effects in biological systems.

Keywords: Zeno effect, barrier anti-Zeno effect, influence of observation in biological systems