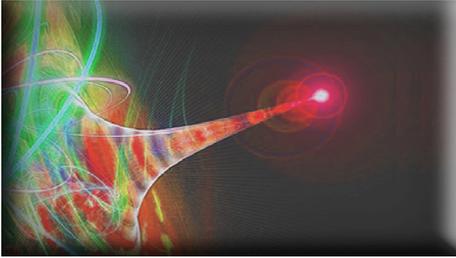


Ещё раз о "стреле времени"

В.А. Касимов, quadrica-m@mail.ru



Понятие "стрелы времени" возникло и утвердилось в классической (макро-) физике во времена Ньютона при господстве концепции абсолютных пространства и времени (3-пространство и 1-время), как вместители пространственно-временных событий. Однако, чтобы говорить о "стреле времени", необходимо для начала определиться с понятием "времени". Общефизического определения этого понятия не существовало (и поныне нет), кроме как представления его в виде параметра t , входящего в эволюционные и динамические уравнения физики. Измерение же времени обязано существованию классических *эталонов*. В этом случае обсуждение обратимости "стрелы времени" сводится к обсуждению свойства симметрии уравнений физики относительно преобразования $t \rightarrow -t$. В классической картине ньютонова абсолютного пространства-времени весьма удобно было говорить о едином порядке следования всех мировых событий. Их ход ничем не мог быть нарушен. Концептуальная возможность тотальной синхронизации часов на все времена в абсолютном пространстве-времени Ньютона вполне соответствовала этой идее. При этом основные законы физики были инвариантны относительно преобразований $t \rightarrow -t$, что создавало иллюзию возможности эволюции физического мира и в "обратную сторону". Точку в отсутствии обратимости *универсального* времени при макроуровневом описании физики поставил *эмпирический закон возрастания энтропии*. Оказалось, что существуют процессы, которые не вписываются в "обратный ход времени". Статус всеобщности "стрелы времени" на макроуровне исчез.

Классическое рассмотрение термодинамики, с её вторым началом, с помощью методов статистической физики, позволили объяснить исчезновение статуса всеобщности "стрелы времени" в связи со вторым началом термодинамики — возникновением беспорядка в многочастичных системах, описываемых методами классической физики.

На сегодняшний день известны три ипостаси существования физического мира: микро-, макро- и мега-.

При мегауровневом описании физических процессов (ОТО) напрочь отвергается возможность введения единой "стрелы времени", поскольку *координатное время* находится в зависимости от систем отсчёта и "хода" *собственного времени* в локальных точках. Более того, синхронизация координатного времени в общем случае невозможна даже по замкнутому пространственному контуру. То есть, распространение даже идеи общего и единого времени, а значит и единой "стрелы времени" — совершенно невозможны. Вопрос же обратимости (симметрия относительно преобразования $t \rightarrow -t$) локального времени, тем не менее не исчез.

И здесь встаёт вопрос: *А нельзя ли нарушение локальной "стрелы времени" на макроуровне объяснить внутренними механизмами микроуровня при едином понимании феномена времени.*

Уравнения квантовой механики, полученные с помощью *принципа соответствия* [6], наследуют все симметрии, касающиеся переменной t , поэтому достаточно разобраться с проблемой на фоне классической механики. Однако здесь добавляется нюанс, связанный с оператором эволюции $e^{-i\hat{H}t}$ для *гамильтоновых систем*, где пропагатором эволюции служит гамильтониан системы. Замена $t \rightarrow -t$ здесь, очевидно, сводится к операции комплексного сопряжения.

Из-за требования комплексного сопряжения универсальная операция обращения времени лежит вне квантовой области и не возникает спонтанно в природе [1].

Здесь необходимо отметить следующее. Динамика квантовой системы определяется двумя главными составляющими: свободной эволюцией и процедурами измерений. Свободная эволюция описывается уравнениями квантовой механики, решения которых представляются унитарными преобразованиями. Процедуры измерения описываются проекционными операторами, которые не сводимы к унитарным преобразованиям. Поэтому,

Общей универсальной операции, способной обратить вспять любую произвольную волновую функцию, в природе не существует ... а для обращения времени нужна надсистема, манипулирующая данной системой. В большинстве случаев такая надсистема не может самопроизвольно возникнуть в природе [1].

Сегодня уже можно утверждать, что "стрела времени" как необратимость времени — чисто классическое понятие физического макроуровня.

Во-первых, само понятие "времени" в квантовой механике возникает в результате проецирования микро- на макро- и измеряется классическими часами. Время присутствует только как переменная t в уравнениях физики. При микроописании (квантовая механика) его просто нет, поскольку отсутствуют реальные эталоны измерения времени. Уравнения квантовой механики симметричны по переменной t , то есть времени, унаследованному с уровня классической физики, а все эволюции описываются унитарными операторами, которые не могут изменить знак времени в экспоненте $e^{-i\hat{H}t}$

Во-вторых, среди физиков существует весьма кардинальное мнение о том что *пространство и время обречены* [Д. Гросс, 2] как метафизические сущности, а их место должны занять другие понятийные первоэлементы. Мнение Э. Виттена [7]:

... отсутствует объемное описание квантовых свойств самого пространства-времени... И здесь не было существенного прогресса в течение длительного времени в получении лучшего объемного описания. И я думаю, что это может быть потому, что ответ другого рода, чем что-либо, к чему мы привыкли.

... я сомневаюсь, что смогу сказать что-нибудь полезное. Я подозреваю, что есть дополнительный уровень абстрактности по сравнению с тем, к чему мы привыкли. Я склонен думать, что нет точного квантового описания пространства-времени — за исключением ситуаций, когда мы знаем, что есть, например, в AdS-пространстве. Я склонен думать, что в противном случае все немного мрачнее, чем точное квантовое описание. Здесь я не могу сказать ничего полезного.

Естественно, в этом случае и "стрела времени" вне макроуровневого описания исчезнет и, возможно, появятся другие (фантастические) возможности управления пространственно-временными отношениями.

В чём причина такого "демарша" в отношении пространственно-временных отношений? Суть дела в следующем.

Единого и абсолютного времени в ньютоновском субстанциональном смысле не существует. Есть порядок становления событий, то есть в лейбницевском смысле - отношение причинного упорядочения событий и фиксации их становления в терминах "причина-следствие". Для точечно-локализованных событий возникает понятие *распространения взаимодействия* в пространстве, формализованное *локальным вектором* скорости, что позволяет формально отличить в паре событий причину от следствия. В ньютоновской концепции времени, естественным образом возникло желание говорить о единой "стреле времени", что обеспечивалось универсальностью законов классической физики. Однако *sFWT*-теорема (нефункциональность связи воздействие-ответ) [3], экспериментально подтверждённая [4], теория относительности, нефункциональный характер коллапса волновой функции вносят свои коррективы в такое упорядочение [5].

Мы намеренно выделяем именно локальную пару событий, поскольку именно по этому обстоятельству нанесён сокрушительный удар *sFWT*-теоремой, которая утверждает, что ближайшее окружение квантовой системы не всегда определяет её будущее состояние. Пространственноподобные события могут менять порядок следования в паре событий при

изменении систем отсчёта. Механизмы коллапса волновых функций навряд ли могут быть описаны функционально, поскольку результаты измерений описываются вероятностными мерами и даже не скалярными, а операторными. Но именно они, в том числе, решаяще определяют поведение квантовой системы между периодами свободной эволюции.

Проблема же "стрелы времени" трансформировалась в необходимость ответа на вопрос: *Почему симметрия при преобразовании $t \rightarrow -t$ по параметру t классической и квантовой физики исчезает при глобальном обобщении этого параметра?* Одним из ответов на этот вопрос является следующее.

Любые замкнутые квантовые системы описываются векторами чистых состояний, энтропия которых в точности равна нулю и является изначально минимальной.

Важную роль в разрешении возникших вопросов, связанных с увеличением энтропии, играют состояния систем так называемых запутанных частиц, квантовой когерентности и декогеренции. Чтобы понять, как концептуально строятся системы запутанных частиц и к каким следствиям это приводит в решении проблемы обратимости времени, рассмотрим на примере получения решения для двух тождественных невзаимодействующих квантовых частиц. Для этого рассмотрим как получается решение волнового уравнения для двухчастичной системы.

Если частицы не взаимодействуют между собой, уравнение для замкнутой двухчастичной квантовой системы допускает разделение переменных по обеим частицам, что даёт возможным представить два независимых решения для каждой частицы с помощью одинаковых векторов состояния $|\psi\rangle$, поскольку частицы находятся в идентичных начальных состояниях, хотя и с разными параметрами.

Обозначим вектор первой частицы через $|\psi\rangle_1$, второй через $|\psi\rangle_2$. Следует отметить, что хотя $|\psi\rangle_1, |\psi\rangle_2$ и принадлежат к одноптипным одночастичным гильбертовым пространствам, тем не менее, эти пространства разные. Поэтому вектор состояния двухчастичной системы необходимо записать в виде

$$|\Psi\rangle = |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_2. \quad (1)$$

Этот вектор принадлежит уже двухчастичному, но единому гильбертовому пространству.

В координатном представлении вектора описываются волновыми функциями. Пусть ψ_1, ψ_2 волновые функции, соответствующие первой и второй частицам. Учитывая, что волновые функции определены с точностью до множителя по модулю равным единице, представим эти функции в нормированном виде, выделив явно пространственно-временную и фазовую зависимости:

$$\psi_1 = \psi_1(x_1, y_1, z_1, t_1)e^{i\varphi_1}, \quad \psi_2 = \psi_2(x_2, y_2, z_2, t_2)e^{i\varphi_2}. \quad (2)$$

Состояния, описываемые векторами или волновыми функциями, называются *чистыми* состояниями. Вектор (1) описывает также чистое состояние.

Согласно (1), общее решение волнового уравнения для двухчастичной системы представляется в виде:

$$\begin{aligned} & \tilde{\psi}(x_1, y_1, z_1, t_1, \varphi_1; x_2, y_2, z_2, t_2, \varphi_2) = \\ & = \psi_1(x_1, y_1, z_1, t_1) \cdot \psi_2(x_2, y_2, z_2, t_2)e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)} = \tilde{\psi}e^{i\chi}. \end{aligned} \quad (3)$$

Волновая функция пары частиц, как бозонов или фермионов, должна быть симметричной относительно перестановки частиц. Чтобы удовлетворить этому требованию мы должны произвести операцию симметризации найденного решения после разделения переменных и получения решения в виде произведения волновых функций частиц. После этого волновая функция Ψ для двухчастичной системы принимает вид:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \tilde{\psi}_1 e^{i\chi_1} \pm \tilde{\psi}_2 e^{i\chi_2} \} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \tilde{\psi}_1 \pm \tilde{\psi}_2 e^{i\delta} \} e^{i\chi_1}. \quad (4)$$

В связи с переходом от одночастичных описаний (2) к целостному описанию (4) происходит нечто, что называется потерей индивидуальности частиц с фиксацией фазового соотношения между входящими волновыми функциями. Здесь, в (4):

во-первых, волновая функция Ψ симметрична (антисимметрична) относительно перестановки частиц;

во-вторых, фазовый множитель δ становится внутренней характеристикой двухчастичной системы, которую теперь необходимо рассматривать как пару когерентных частиц безотносительно к тому — где первая, а где вторая.

Именно *когерентность*, то есть жёсткое закрепление фазовой разницы δ , и даёт эффект спутанности (связи) частиц. Их же общая симметризованная волновая функция Ψ сама остаётся определённой с точностью до нового фазового множителя по модулю равным единице - $e^{i\chi_1}$, где χ_1 уже может принимать произвольные значения, поскольку когерентность частиц, составляющих систему, фиксируется фазой δ .

Однако внутрифазовая связь по δ остаётся постоянной до тех пор, пока не будет разрушена целостность системы в результате рассогласования фаз между входящими в систему частицами и эти компоненты не приобретут самостоятельность и независимость существования. Этот процесс естественно назвать *декогеренцией*. Следует заметить, что процесс декогеренции не есть потеря взаимодействия частиц между собой и частицы вовсе не возвращаются в чистые состояния.

В неразрушенной системе (системе спутанных когерентных частиц (4)) каждая частица уже не может быть представлен чистым состоянием, стандартно описываемым вектором или волновой функцией. Её описание возможно только с помощью, так называемых, матриц плотности M — описания, которое является более общим в дисциплине квантовой механики и дают возможность описывать незамкнутые квантовые системы, например одну частицу в среде другой в одночастичном гильбертовом пространстве.

Состояния, описываемые матрицами плотности, называются *смешанными* состояниями.

В этом случае для описания частицы нам необходимо задать для начала саму возможность рассмотрения её самой в двухчастичной системе, характеризуемой некоторой комбинацией чистых состояний $M^\alpha (\alpha = 1, 2)$. Зададим эту возможность соответствующими вероятностями p_α . Тогда выражение для матрицы плотности частицы M примет вид:

$$M = \sum_{\alpha} p_{\alpha} \bar{M}^{\alpha}, \quad (5)$$

где $\sum_{\alpha} p_{\alpha} = 1, p_{\alpha} \geq 0, \alpha = 1, 2$. Соотношение (5) будет определять *смесь* чистых состояний от двух частиц, каждая из которых описывается в одночастичном гильбертовом пространстве. Сама матрица плотности M также является элементом одночастичного пространства состояний и, следовательно, даёт возможность одночастичного описания частицы, находящейся в среде другой. Именно таким образом появляется возможность описания спутанности как физического феномена.

Характерным отличием смешанных состояний от чистых является следующее: энтропия чистых состояний равна нулю, энтропия Ξ смешанных состояний определяется по формуле

$$\Xi = -\overline{(\ln M)} = -\text{Sp}(M \ln M), \quad (6)$$

где M – матрица плотности системы. Энтропия обращается в нуль в случае чистого состояния и только в этом случае ¹⁾.

Нетрудно показать, что для матрицы, связанной представлением (5), в общем случае не выполняется равенство

$$M^2 = M, \quad (7)$$

которое является критерием того, что частица находится в чистом состоянии. Однако выполнение этого равенства становится возможным при выполнении условия равенства единице вероятности p_α для одной частицы и нулю для другой.

Таким образом, частица, находящаяся в среде другой частицы, обладает ненулевой энтропией и не может описываться как чистое состояние. Аналогично, энтропия незамкнутой квантовой системы, находящейся во взаимодействии со окружающей средой, также обладает ненулевой энтропией. Любые взаимодействия между различными квантовыми системами и какой-либо системы со средой, в которых нарушается равенство (7), приводят к изменениям энтропии всех участников процессов – это и взаимодействия, и измерения, вызывающие нарушение целостности системы, декогеренцию и коллапс волновых функции.

Изменение энтропии гамильтоновых систем определяется, согласно (6), динамикой изменения матрицы плотности M , которая подчиняется теореме Стоуна [6]. Исходя из этого, мы не можем говорить о безусловном увеличении энтропии для квантовых систем, хотя утверждение о нулевой энтропии замкнутой квантовой системы и об изменении энтропии при включении рассматриваемой системы во взаимодействие со средой – "имеет место быть". Знак изменения энтропии определяется решением уравнения Гейзенберга. Собственно, это и даёт возможность дальнейшего рассмотрения вопросов, связанных с нарушением или сохранением симметрии при преобразования $t \rightarrow -t$.

Рассмотрение вопросов необратимости в связи с неунитарными преобразованиями, связанными с включением квантовой системы во взаимодействие со средой как надсистемой, продолжает группа авторов [1]:

Наше рассмотрение уточняет понимание необратимости по Ландау–фон Нейману. Как оказалось, процесс измерения можно описать как совместную унитарную эволюцию квантовой системы и макроскопического измерительного устройства. Полученная макроскопическая запутанность порождает непреодолимую сложность процедуры обращения. Мы покажем, что, неожиданно, даже эволюция состояний одной или двух частиц в свободном пространстве порождает сложность, которая делает спонтанное обращение времени либо крайне маловероятным, либо фактически невозможным. Это говорит о том, что уравнение Шредингера, определяющее эволюцию квантовых систем, неявно влечет за собой необратимость, то есть и проявление стрелы времени в природе.

Ссылки

1. Г. Б. Лесовик, И. А. Садовский, М. В. Суслов, А. В. Лебедев и В. М. Винокур
 Стрела времени и ее обращение на квантовом компьютере IBM
<https://www.dropbox.com/s/8blshtirli1qmkq/ArrowTime-0.pdf?dl=0>
<https://cloud.mail.ru/public/B3gh/MY14MR9zB>
<https://www.academia.edu/38671482/>
<http://vixra.org/pdf/1903.0542v1.pdf>

¹⁾ Неравенство нулю энтропии смешанного состояния означает наличие у таких систем информационной ёмкости (по Шеннону). В силу этого, именно с помощью модуляции фазы δ общей для компонент системы спутанных и когерентных частиц можно пытаться реализовать возможность передачи данных.

2. В.А. Касимов
"Сакраментальные" пространственно-временные моменты современной физики
<https://www.dropbox.com/s/sx2cjwtd77z20ja/Sacraments.pdf?dl=0>
<https://cloud.mail.ru/public/FVfg/AvsUsyxwY>
<https://www.academia.edu/38566964/>
<http://vixra.org/pdf/1903.0324v1.pdf>
3. Джон Х. Конвей и Симон Коэн
sFWT-теорема (сильный вариант).
<https://www.dropbox.com/s/z1ngp451236tjrw/Cohen-Rus-4.pdf?dl=0>
<https://cloud.mail.ru/public/4kiM/HEG9bsGiM>
<https://www.academia.edu/34020650/>
<http://vixra.org/abs/1806.0374>
<http://vixra.org/pdf/1806.0374v1.pdf>
4. Bi-Heng Liu...
Экспериментальная проверка FTW-теоремы.
<https://www.dropbox.com/s/t9p86y1ntlzif0d/Heng.pdf?dl=0>
<https://cloud.mail.ru/public/FaBK/kWjeATKzp>
<https://www.academia.edu/32443443/>
<http://vixra.org/abs/1807.0040>
<http://vixra.org/pdf/1807.0040v1.pdf>
5. В.А. Касимов
Некоторые философские проблемы пространственно-временных отношений
<https://www.dropbox.com/s/qrv7xkoolsnppv/Ontologia-2.pdf?dl=0>
<https://cloud.mail.ru/public/5cpf/HQGdabb6j6>
<https://www.academia.edu/35261389/>
<http://vixra.org/pdf/1804.0285v2.pdf>
6. В.А. Касимов
Квантовая механика (принципы)
<https://www.dropbox.com/s/tufyza566tiba4h/KM-08-11-11.pdf?dl=0>
<https://cloud.mail.ru/public/7bwL/18Ki9P9re>
<https://www.academia.edu/32434510/>
<http://vixra.org/pdf/1807.0059v1.pdf>
7. Э. Виттен, Н. Волхвер.
Физик размышляет о природе реальности.
<https://www.dropbox.com/s/6kg3dmt5fp63ufy/A%20Physicist%20Russian.pdf?dl=0>
<https://cloud.mail.ru/public/975M/M4b1XC4Ln>
<https://www.academia.edu/38505970/>
<http://vixra.org/pdf/1903.0103v1.pdf>