МЕТАФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ В ФИЗИКЕ И МАТЕМАТИКЕ

DOI: 10.22363/2224-7580-2025-4-43-53
EDN: MUDURZ

О ПРИРОДЕ КВАНТОВОЙ НЕЛОКАЛЬНОСТИ

А.В. Белинский[1*], А.К. Жуковский[2]**

[1]*Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,*
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
[2]*Институт философии Российской академии наук*
Российская Федерация, 109240, Москва, Гончарная ул., д. 12, стр. 1

Аннотация. Представлен пример мысленного эксперимента для изолированной квантовой системы, который свидетельствует в пользу существования принципа взаимности координатного и импульсного описания, пронизывающих пространство-время. Рассматривается фундаментальная связь между симметрией пространства-времени и законами сохранения в физике. Анализируется вопрос о том, что является первопричиной: изотропность и однородность пространства-времени или сами законы сохранения? Обсуждаются бинарные соотношения координатного и импульсного описаний, предложенные профессором Ю.С. Владимировым, включая тезис о детерминирующей роли импульсного пространства.

Ключевые слова: квантовая нелокальность, изотропность пространства, однородность пространства-времени, законы сохранения; теорема Э. Нётер, импульсное пространство, реляционная парадигма, симметрия; квантовая запутанность, философия физики

Введение

Фундаментальные законы физики тесно связаны с симметриями пространства и времени. Ещё со времён Исаака Ньютона признавалось, что пространство однородно и изотропно, а время однородно (течения времени не зависят от начала отсчёта) [1]. Эти интуитивные симметрии означают, что физические процессы протекают одинаково во всех местах, направлениях и

* E-mail:belinsky@inbox.ru
** E-mail:andrez@rambler.ru

моментах времени в отсутствии внешних воздействий. В начале XX века Эмми Нётер строго доказала связь между такими симметриями и величинами, сохраняющимися во времени: однородность времени связана с законом сохранения энергии, однородность пространства – с законом сохранения импульса, а изотропность пространства – с законом сохранения момента импульса [2]. Таким образом, в рамках лагранжевой формулировки динамики для каждой непрерывной симметрии существует соответствующий закон сохранения.

Однако остается дискуссионным, что является причиной, а что – следствием: обусловлены ли законы сохранения существованием симметрий природы, или, наоборот, именно наличие фундаментальных законов сохранения «навязывает» симметричную структуру пространству-времени? Актуальность этого вопроса приобрела особый смысл в свете признания фундаментальной роли квантовой нелокальности, получившего эмпирическое подтверждение в экспериментах, в том числе по проверке неравенств Белла, что актуализировало необходимость переосмысления взаимосвязи между симметриями и законами сохранения как не просто формального соответствия, но как отражения глубинных принципов организации физической реальности.

Исторически сначала открывались сами законы сохранения (например, сохранение импульса в замкнутых системах было эмпирическим обобщением в XVIII–XIX вв.), а уже затем выявлялась соответствующая симметрия (однородность пространства). Однако начиная с работ Альберта Эйнштейна по теории относительности симметричные принципы были возведены в ранг исходных постулатов теории [3]. Как заметил Ю. Вигнер, Эйнштейн совершил переворот в тренде: ранее «принципы инвариантности выводились из законов природы, а с появлением теории относительности инвариантность (симметрия) стала исходным принципом построения таких законов» [4]. В данной работе коротко обсуждаются оба подхода – как традиционный (от симметрии к закону), так и обратный.

Мысленный эксперимент с замкнутой системой

В работе [5] рассматривается мысленный эксперимент с замкнутой системой, изолированной от внешней среды, в которой действуют только силы, созданные материальными объектами, входящими в эту систему. В результате любой эволюции такой системы положение и скорости всех ее частиц окажутся скоординированным, ведь сумма импульсов всех частиц системы согласно закону сохранения импульса должна оказаться неизменной.

Заметим, что это будет верно вне зависимости от того, будут ли частицы каким-то образом измерены или нет. В первом случае квантовые частицы будут находиться в состоянии *согласованной регистрации*, во втором – в случае *согласованной суперпозиции*.

В [5] делается вывод о том, что вещество замкнутой системы оказывается скоррелированным законами сохранения. Необходимо также обратить особое внимание на последнюю из измеряемых частиц, импульс которой всегда

будет жестко детерминирован. Приводятся два варианта возможной корреляции частиц внутри такой системы – детерминизм микромира, который традиционно подвергается большому сомнению, и действие какого-то нелокального фактора. В последнем случае измерение первой частицы мгновенно воздействует на состояние запутанных с нею других частиц (волновая функция коллапсирует), то есть закон сохранения импульса в рамках единой волновой функции будет выполняться автоматически. Данный подход соответствует стандартной квантовой нелокальности, при которой нарушение локального реализма экспериментально подтверждается нарушением неравенств Белла [6].

Однако закон сохранения сам по себе не объясняет, почему координируется импульс системы – он только требует, чтобы он был постоянен. Именно данное соображение имеют в виду, когда говорят, что одних лишь законов сохранения недостаточно, чтобы объяснить механизм квантовой запутанности и связанной с ней нелокальности; необходима концепция квантового состояния, содержащего сверхклассическую корреляцию. Философски это наводит на мысль о существовании некоторого общего принципа или сущности, обеспечивающей такую координацию. Так, например, А.Ю. Севальников в своей работе [7] обращается к принципу взаимности, сформулированного в частном случае впервые Максом Борном еще в 1938-м году [8], который в общем случае состоит в наличии определенной симметрии основных уравнений относительно взаимных преобразований координат и импульсов физической системы. При этом он указывает, что наблюдаемая дуальная корреляция между координатой и импульсом не может существовать сама по себе: «принцип взаимности, та корреляция, симметрия координатного и импульсного пространств… требует с необходимостью чего-то третьего, что бы конституировало наблюдаемую дуальность» [7]. Иными словами, должна существовать некоторая сущность (онтологическое основание), которая и определяет (конституирует) этот явленный феномен взаимной связи – «то, что определяет… явление и есть его сущность» [7].

Мысленный эксперимент [5] показывает, что роль законов сохранения выходит за рамки чисто количественных предсказаний – они участвуют в самом сценарии причинности и нелокальности в квантовом мире. Возвращаясь в нашей дискуссии о первичности импульсного и координатного пространства, можно сказать, что импульсное пространство в нашем случае как бы «ведает» координатным (или индивидуальными состояниями частиц), диктуя возможные комбинации результатов. Квантовая механика добавляет к этому сюжету элемент вероятности и мгновенной нелокальной связи, что делает дискуссию о первичности симметрии vs. сохранения еще более тонкой: здесь закон сохранения глобален, но проявляется он совместно с квантовой суперпозицией, то есть симметрией состояния замкнутой системы относительно перестановки возможных на ее основании результатов.

Напомним теорему, которая связывает законы сохранения и симметрию физических систем.

Теорема Нётер: от симметрии к законам сохранения

В 1918 году Э. Нётер доказала, что каждой непрерывной симметрии физической системы соответствует свой закон сохранения [9]. Основные соответствия для классической механической системы таковы:

1. Однородность времени → Закон сохранения энергии

Симметрия: лагранжиан $L(q, \dot{q}, t)$не зависит явно от времени *t:*

$$\frac{\partial L}{\partial t} = 0.$$

Сохраняемая величина: полная энергия *E* системы:

$$E = \sum_i \dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - L = const.$$

2. Однородность пространства → Закон сохранения импульса

Симметрия: лагранжиан не зависит явно от координаты q_j вдоль некоторого направления:

$$\frac{\partial L}{\partial q_j} = 0.$$

Сохраняемая величина: обобщённый импульс p_j:

$$p_j = \frac{\partial L}{\partial q_j} = const.$$

3. Изотропность пространства → Закон сохранения момента импульса

Симметрия: лагранжиан инвариантен относительно поворота на малый угол вокруг некоторой оси.

Сохраняемая величина: компонент момента импульса L_j вдоль этой оси:

$$L = r \times p, \text{ где } p = m\dot{r},$$

и

$$\frac{\partial L}{\partial t} = 0.$$

В современном виде теорема Нётер охватывает и поля, и обобщенные координаты, предоставляя единый метод получения законов сохранения из принципа наименьшего действия при наличии непрерывной симметрии.

Необходимо подчеркнуть, что изотропность пространства здесь означает отсутствие выделенных направлений: поворот системы как целого не изменяет физических величин. Из этого факта вытекает сохранение векторной величины – полного углового момента. Интуитивно, если законы природы не предпочтут ни одно направление в пространстве, то раз развёрнутую в одном направлении систему можно повернуть без последствий, «вращательное состояние» системы будет характеризоваться сохраняющимся параметром – моментом импульса.

Обратная связь: от закона сохранения к симметрии

Хотя теорема Нётер показывает, что симметрия влечёт закон сохранения, при определённых условиях справедливо и обратное утверждение: наличие закона сохранения указывает на существование соответствующей симметрии. В классической механике наличие интеграла движения обычно связано с наличием некоторой циклической (игнорируемой) координаты. Например, сохранение полной энергии в замкнутой системе подразумевает, что динамика не зависит от абсолютного значения времени (а только от интервалов времени) – то есть время однородно. Сохранение импульса указывает, что система не различает абсолютное положение в пространстве – пространство однородно. Сохранение углового момента свидетельствует, что законом не введено выделенного направления – пространство изотропно. Таким образом, сами законы сохранения можно принять за исходные постулаты, из которых выводятся свойства пространства-времени.

В гамильтоновой формулировке механики связь «сохранение ↔ симметрия» прослеживается через групповые свойства. Если некоторая величина $F(p,q)$ сохраняется (то есть ее пуассонова скобка с гамильтонианом H равна нулю: $\{H,F\}=0$), то она является генератором непрерывного преобразования, оставляющего H инвариантным. Например, сохранение компоненты импульса P_x означает, что гамильтониан инвариантен относительно трансляции вдоль оси x. Сохранение оператора момента импульса $\hat{J}_z$ в квантовой системе $\left[\hat{H}_z,\hat{J}_z\right]=0$ эквивалентно инвариантности гамильтониана относительно вращения вокруг оси z. Таким образом, каждому закону сохранения соответствует определенная непрерывная симметрия системы.

Как отмечает философ науки Марк Ланж, «…обычно говорят, что принципы симметрии объясняют законы сохранения» [10], хотя одновременно в формализме Гамильтона «…законы сохранения также влекут за собой симметрии» [10]. Таким образом, возникает вопрос: почему мы считаем, что именно симметрии лежат в основе законов, а не наоборот? И тем не менее он предлагает рассматривать симметрии как метазаконы природы – принципы более высокого порядка, обладающие особым статусом и необходимостью. Они ограничивают форму обычных законов так, как обычные законы ограничивают физические факты. В таком подходе симметрия имеет более глубокий модальный статус, тогда как законы сохранения им не обладают. Иными словами, тот факт, что физическая система сохраняет, например, энергию, сам по себе не объясняет, почему природа однородна во времени – это просто констатация наблюдаемого инварианта. А вот постулирование однородности времени (симметрии) рассматривается как объяснение того, почему энергия сохраняется во всех процессах.

Подытоживая, можно сказать, что между изотропностью/однородностью и законами сохранения существует двусторонняя логическая связь. Формально в рамках вариационного принципа верно: симметрия ⇒ сохранение. При определенных условиях верно и обратное: сохранение ⇒ наличие симметрии. Однако с точки зрения методологии и «объяснения» большинство

исследователей придают симметриям более фундаментальный статус, считая их причинами, а законы сохранения – следствиями.

Давайте теперь вернемся к приведенному выше эксперименту с замкнутой системой и рассмотрим его еще раз, учитывая не только выводы, сделанные нами выше по итогам анализа теоремы Нётер, но и подходов, которые развиваются в бинарной геометрофизике Ю.С. Владимирова.

Взгляд на эксперимент с замкнутой системой с точки зрения бинарной геометрофизики

В традиционной физике исходными элементами пространства-времени считаются точки событий, а взаимодействия описываются полями на этом непрерывном множестве точек. Ю.С. Владимирова не удовлетворила такая идеализация: он предложил, что базовыми «атомами» пространственно-временной структуры являются не отдельные точки, а пары точек с бинарной связью между ними. Иными словами, фундаментальными объектами его теории [11; 12] выступают двойки событий или состояния-взаимодействия, а пространство-время и поля следует описывать в терминах совокупности таких бинарных связей (отсюда термин бинарная геометрофизика). Эти бинарные соотношения можно понимать, как элементарные отношения «событие – событие», которые являются носителями как геометрических, так и физических свойств. Через них Владимиров пытается объединить феноменологический уровень (наблюдаемые пространственно-временные явления) с уровнем субстанциальным (глубинные связи материи). Бинарная структура, по сути, придает формальный статус тем «невидимым нитям», которые связывают события воедино, делая мир не просто набором точек, а сетью отношений.

Теперь обратимся к нашему эксперименту. Его исход показал, что любые два измерительных события в замкнутой системе не независимы: как минимум две частицы *1* и *2* при измерении в момент времени t_2 связаны мгновенно и противоположно, согласно закону сохранения импульса. Фактически пара «*1–2*» образует неделимое целое в смысле импульса – бинарное соотношение: обнаружив частицу 1 в точке *C* (либо *C*’), мы тем самым сразу же определяем и положение частицы 2 (точка *D* либо соответственно *D*’), поскольку между ними существует неизменная связь (их импульсы дополняют друг друга до константы) (рис. 1).

Можно сказать, что событие обнаружения частицы *1* и событие обнаружения частицы *2* образуют бинарную систему, описываемую одним общим инвариантом. Таким образом, рассмотренный нами эксперимент подчёркивает: чтобы полноценно описать происходящее, мало указать импульс частицы, зарегистрированной в точке *C* (если там была найдена первая частица) – необходимо одновременно учитывать и связанное с ней событие-импульс частицы, зарегистрированный в точке *D*. Бинарное отношение «*C–D*» предопределено законом природы и проявляется мгновенно при акте измерения.

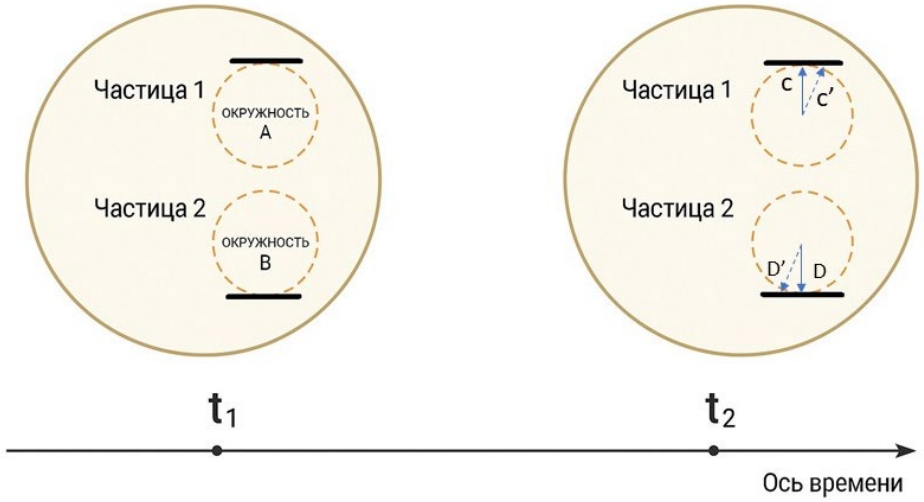


Рис. 1. Вариант эволюции замкнутой системы во времени. Границы условных волновых функций, в которых при этом может находиться каждая частица, помечены пунктирной окружностью. Жирной чертой отмечены линии стационарных датчиков
Источник: составлено авторами.

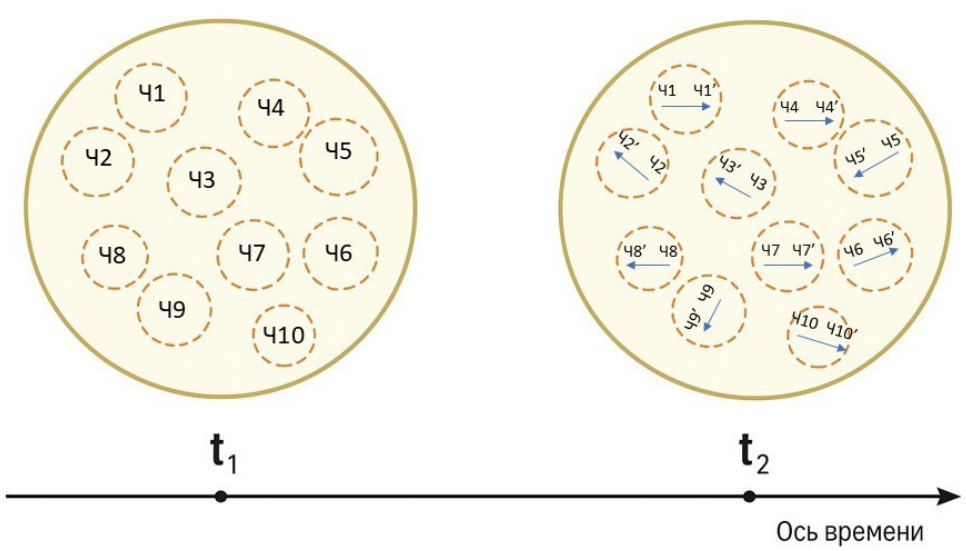


Рис. 2. Вариант эволюции во времени замкнутой системы, состоящей из 10 частиц. Чтобы не загромождать схему, на рисунке не изображены датчики, однако представим, что они есть
Источник: составлено авторами.

Более того, для системы из 10 частиц мы видим разветвлённую сеть бинарных (и более сложных, многокомпонентных) соотношений (рис. 2). Каждый акт регистрации устанавливает связь между зарегистрированной частицей и оставшейся подсистемой. По мере проведения серии измерений

формируется как бы иерархия связей: между 1-й и остальными, затем между 2-й и остальными и т.д. В финале последняя частица связана уже практически со всеми ранее измеренными частицами через цепочку законов сохранения. Эта картина удивительно созвучна реляционному подходу: состояние каждой частицы определяется не само по себе, а *отношениями* со всеми другими. Мы вправе интерпретировать это как некое подтверждение идей Владимирова.

Эксперимент подтверждает, что понятие изолированной точки (или отдельно взятой частицы) не исчерпывает реальности – существенными становятся взаимосвязи между ними. Можно сказать, что закон сохранения импульса здесь выступает конкретным примером бинарного соотношения, связывающего объекты (частицы и детекторы) в единую систему. Таким образом, мысленный эксперимент с замкнутой квантовой системой подчёркивает ключевую мысль: сохранение импульса есть проявление глубинной связности элементов системы. Симметрия пространства и времени обеспечивает неизменность общих величин, координируя эволюцию частей замкнутой системы; физически это выражается в мгновенных корреляциях при измерениях, а философски – указывает на наличие в основании природы онтологических связей (возможно, тех самых бинарных отношений), скрепляющих мир в единое целое. Такой вывод важен и для физиков, и для философов: он подтверждает, что за видимой случайностью квантовых явлений скрыта строгая структура соответствия, требующая как точного математического описания, так и философского осмысления сущности этих связей.

Вообще, очевидно, что проблема взаимосвязи симметрии и законов сохранения имеет не только физический, но и философский дискурс. Она затрагивает вопросы об онтологическом статусе законов природы и принципов симметрии. В ряде философских работ активно обсуждается, является ли связь «симметрия – сохранение» просто математическим фактом или отражает глубокую, фундаментальную структуру реальности [см., например, упомянутую [10], а также [13–15]. В подобных работах вводится понятие мета-законов для симметрий. Утверждается, что симметричные принципы обладают более высокой степенью необходимости, чем частные динамические законы. Привлекая контрафактический анализ, показано, что симметриям соответствует особый тип естественной необходимости: мы воспринимаем, например, закон сохранения энергии как следствие более общего требования однородности времени, которое нельзя «отменить» без пересмотра всей системы законов. Таким образом, в таких работах симметрия рассматривается как объяснительное основание (причина), а сохранение – как ее следствие.

Аналогичный взгляд на проблему дает и Юджин Вигнер, размышлявший о философии симметрий [4]. Он также подчеркивает методологическое, эвристическое превосходство симметрии. Он говорит о том, что симметрия получила статус самостоятельного принципа, с помощью которого открываются новые законы. В своей работе он отмечает, что если бы мы знали окончательные законы, то не нуждались бы в принципах симметрии для их поиска;

но, поскольку прямого знания нет, симметрия служит путеводным принципом в открытии законов.

Стоит упомянуть также Германа Вейля, который в середине XX века подчеркивал эстетическую и рациональную привлекательность симметрии как принципа, упорядочивающего физические теории. Так, достаточно известна его следующая фраза: «Чтобы подойти к познанию природы, человек сначала замечает в явлениях то, что в них красиво. И в физике это красота симметрии» [14]. Эта мысль иллюстрирует, почему многие физики склонны ставить симметрию на первое место: она воспринимается как проявление глубинного порядка.

Аргумент Ю.С. Владимирова об определяющей роли импульсного пространства в этом случае можно трактовать так: сами законы сохранения (существование инвариантных импульсов, энергии) «координируют» строение пространства-времени. Если в природе строго сохраняется импульс, то должно существовать однородное пространство, в котором трансляции не меняют физического состояния системы. Если сохраняется момент импульса, пространство должно быть изотропным. И наоборот, если бы пространство не было изотропным, мы ожидали бы нарушений сохранения момента импульса. Таким образом, через бинарную связь «симметрия – закон» можно утверждать: задание закона сохранения практически эквивалентно заданию соответствующей симметрии пространства-времени. Именно в этом смысле можно говорить, что импульсное пространство (в котором сформулирован закон сохранения импульса) порождает структуру координатного пространства – между ними устанавливается взаимно однозначное соответствие через группы симметрий.

Заключение

Изотропность пространства и однородность времени занимают центральное место в понимании законов природы. Теорема Нётер формализует их связь с законами сохранения, показывая, что эти свойства пространства-времени и сохранение энергии, импульса, момента импульса – две стороны одной медали. Анализ причинно-следственных отношений между ними выявляет любопытный философский момент: хотя математически связь двунаправленная, объяснительный приоритет чаще приписывается симметриям (инвариантностям), возвышая их до статуса фундаментальных принципов (метазаконов). Законы сохранения при этом рассматриваются как выводимые следствия, хотя исторически их открытие предшествовало осознанию соответствующих симметрий.

Приведенный в работе мысленный эксперимент с замкнутой квантовой системой демонстрирует, что такая квантовая система ведет себя как неделимое целое: ее частицы неразрывно связаны законами сохранения импульса. Физически это выражается в строгой корреляции измерений, которые, в силу экспериментов по проверке неравенств Белла, должны носить нелокальный характер.

Философски все это свидетельствует в пользу существования глубоких оснований координации – принципа взаимности координатного и импульсного описания и бинарных связей, пронизывающих нелокальное пространство-время. Не остается сомнений, что для понимания целостного поведения системы необходимо выйти за рамки локального редукционизма и признать объективную реальность глобальных связей, скрепляющих элементы мироздания в единый ансамбль.

Литература

1. *Фейнман Р.* Фейнмановские лекции по физике: в 3 томах // Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс ; пер. с англ. Москва : Мир, 1965. Т. 3. 560 с.
2. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 1 : Механика. 3-е изд. Москва : Наука, 1988. 216 с. (см. § 10 «Законы сохранения и симметрии пространства-времени»).
3. *Эйнштейн А.* К электродинамике движущихся тел // Эйнштейн А. Собр. науч. тр. : в 4 томах / под ред. Я.А. Смородинского. Москва : Наука, 1965. Т. 1 : Работы по теории относительности, 1905–1920. С. 56–57.
4. *Wigner E.P.* Symmetries and reflections. Scientific essays of Eugene P. Wigner. Indiana : Indiana University Press, 1967. 280 p.
5. *Белинский А.В. Жуковский А.К.* О двух вариантах интерпретации свойств замкнутых запутанных систем // Электронная техника. Серия 3 : Микроэлектроника. 2018. № 4. С. 78–91.
6. *Aspect A., Dalibard J., Roger G.* Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. Physical Review Letters. 1982. 49 (25). P. 1804–1807.
7. *Севальников А.Ю.* Электронный философский журнал Vox // Голос. Вып. 16 (июнь 2014). 16 с. URL: http://vox-journal.org
8. *Борн М.* Теория относительности и квантовая теория // Размышления и воспоминания физика. Москва : Наука, 1977. 280 с.
9. *Нётер Э.* Инвариантные вариационные задачи // Геттингенские научные известия. 1918. № 5. С. 235–257.
10. *Lange M.* Laws and meta-laws of nature: Conservation laws and symmetries // Studies in History and Philosophy of Modern Physics. 2007. Vol. 38, Issue 2. P. 457–481.
11. *Владимиров Ю.С.* Реляционная теория пространства-времени и взаимодействий. Часть 1. Теория систем отношений. Москва : Изд-во МГУ, 1996. 262 с.
12. *Владимиров Ю.С.* Геометрофизика. Москва : БИНОМ, Лаборатория знаний, 2005.
13. *Визгин В.П.* Развитие взаимосвязи принципов инвариантности с законами сохранения в классической физике. Москва : Наука, 1972. 240 с.
14. *Вейль Г.* Симметрия. Москва : Наука, 1968. 216 с.
15. *Кедров Б.М.* Принцип симметрии // Принцип симметрии. Москва : Наука, 1978. С. 5–46.

ON THE NATURE OF QUANTUM NONLOCALITY

A.V. Belinsky[1*], A.K. Zhukovsky[2]**

[1]*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*
2 bldg, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation
[2]*Institute of Philosophy of the Russian Academy of Sciences*
12/1 Goncharnaya St, Moscow, 109240, Russian Federation

Abstract. An example of a thought experiment for an isolated quantum system is considered, which testifies in favor of the existence of the principle of reciprocity of the coordinate and momentum descriptions that permeate space-time. The fundamental connection between the symmetry of space-time and the conservation laws in physics is considered. The question of what is the root cause is analyzed: isotropy and homogeneity of space-time or the conservation laws themselves. Binary relations of coordinate and momentum descriptions proposed by Professor Yu.S. Vladimirov are discussed, including the thesis on the determining role of momentum space.

***Keywords**:* quantum nonlocality, isotropy of space, homogeneity of space-time, conservation laws; E. Noether's theorem, momentum space, relational paradigm, symmetry; quantum entanglement, philosophy of physics

[*] E-mail:belinsky@inbox.ru
[**] E-mail:andrez@rambler.ru