УДК 167

Принцип взаимности в структуре современных физических теорий

Севальников А.Ю., ИФ РАН

Аннотация: Работа посвящена принципу взаимности современной физики. В общем виде этот принцип состоит в наличии определенной симметрии основных уравнений физики относительно взаимных преобразований координат и импульсов физической системы. Несмотря на то, что принцип взаимности был сформулирован Максом Борном в 1938 г., его физический и онтологический смысл до сих пор остается неясным. В работе предлагается обоснование этого принципа исходя из финслеровой геометрии наблюдаемого мира.

Ключевые слова: Координаты, импульс, принцип взаимности, импульсное пространство, финслерова геометрия, онтология.

Физика – наука о природе и при ее познании она использует определенные методы, в частности методы теоретический и эмпирический. Неотъемлемой же частью теоретического метода является метод идеализаций. При построении любой теории используется идеальная модель, имеющая с большей или меньшей степенью приближенности своего референта в бытии. При смене теорий «степень их идеальности» изменяется таким образом, что мы вправе говорить о все большем соответствии или приближении теории к физической реальности. В идеале, собственно, физики и стремятся построить такую теорию, которая наиболее адекватным образом описывала природу.

Ньютон, в свое время, при построении здания классической механики использовал предположения об абсолютном пространстве и времени, теория относительности Эйнштейна, отказываясь от такой модели, перешла к реляционной концепции пространства-времени. В последнее время строятся и более радикальные теории, в которых физика отказывается от такой математической идеализации, как понятие точки. В рамках такого подхода наиболее известной является суперструнный подход, а также концепция бинарной геометрофизики, развиваемая Ю.С. Владимировым.

Если не обращаться пока к описанию микрореальности, то в рамках классического подхода существует такая идеализация, как однородность и изотропность пространства-времени. Однако, если отвлечься от идеализации, реальное пространство-время вряд ли можно рассматривать как однородное и изотропное.

В статье «Физика и реальность» Альберт Эйнштейн, рассматривая уравнения гравитационного поля в общей теории относительности

$$R_{ik} – (1/2)g_{ik} R = - c\ T_{ik},$$

- где R_{ik} обозначает риманов тензор кривизны, а T_{ik} – тензор энергии-импульса материи в феноменологическом представлении, отмечает, что «при такой формулировке вся механика тяготения сведена к решению одной системы ковариантных уравнений в частных производных. Эта теория избегает всех внутренних противоречий, в которых мы упрекали классическую механику. Она достаточна, насколько мы знаем, для выражения наблюдаемых фактов небесной механики. *Но она похожа на здание, одно крыло которого сделано из изящного мрамора (левая часть уравнения), а другое – из плохого дерева (правая часть уравнения)*. *Феноменологическое представление материи лишь очень несовершенно заменяет такое представление, которое соответствовало бы всем известным свойствам материи* (выделено мной – А.С.) » [1].

Отмеченное самим Альбертом Эйнштейном несовершенство уравнений (феноменологическое представление тензора энергии-импульса материи), связано, как представляется с еще одним обстоятельством, которому до сих пор уделялось не так много внимания. Как отмечает Владимиров Ю.С., «**ключевые уравнения физики, такие как уравнения Максвелла, Эйнштейна, Дирака и другие, не выводятся, а открываются**. При чтении некоторых учебников может создаться впечатление, что уравнения Эйнштейна выводятся. В действительности же рассуждения, предшествующие записи этих уравнений, либо подготавливают читателя к их восприятию, либо в них постулируется что-то эквивалентное этим уравнениям и затем по известным правилам от постулированного переходят к фундаментальным уравнениям» [2]. Возникает естественно вопрос, существуют ли принципы и основания, используя которые, можно было бы получить эти уравнения?

При общей тенденции к геометризации физики, начатой ещё с работ Клиффорда и продолженной Эйнштейном, вопрос можно сформулировать более конкретно следующим образом: *а*) в рамках каких обобщенных пространств и *б*) на основании каких принципов можно вывести уравнения Эйнштейна?

При эйнштейновском подходе «искомые уравнения должны были связать геометрические величины и физические характеристики материи. Уже из ньютоновской теории гравитации следует, что в качестве источника гравитации следует выбирать величину, содержащую плотность или массу материи. После создания специальной теории относительности стало ясно, что искомая характеристика материи должна содержать скорость – более того – она должна тензорной величиной» [2]. Источником кривизны, как известно, выступает тензор энергии-импульса материи тензор энергии-импульса материи T_{ik}. При стандартном "*выводе*" уравнений Эйнштейна используется принцип наименьшего действия, где варьированию подвергается действие соответственно гравитационного поля S_g и материи S_m. Действие гравитационного поля S_g выражается, как известно, через скаляр кривизны R риманова пространства. Если мы используем единый геометрический подход, то тензор энергии-импульса материи T_{ik} должен возникать при вариации величин соответствующих уже не координатному, а импульсному пространству. Однако возникает вопрос: при «симметричном» подходе мы должны варьировать величины, соответствующие кривизне такого импульсного пространства. Если же мы исходим изначально из риманова многообразия, то кривизна такого пространства будет равна нулю, т.к. скорости и импульсы строятся на соответствующих касательных векторах, а касательное пространство, как известно, является плоским (псевдоевклидовым) пространством.

Необходимо исходить из более общих пространств, где можно было ввести нетривиальную метрику для касательных пространств. В качестве таких пространств могли бы использоваться пространства Финслера, Картана или Кавагути, которые уже неоднократно рассматривались при различных обобщениях теории относительности.

Серьёзному рассмотрению такого рода пространств мешает несколько обстоятельств. Это, прежде всего, отсутствие в настоящее время экспериментальных данных, говорящих в пользу таких геометрий [2] и, что более важно, неясность принципиальных физических оснований для их рассмотрения.

Отметим, что, вообще говоря, физический принцип, который может способствовать введению таких обобщений, давно известен. Речь идет о так называемом *принципе взаимности* (*reciprocity*), сформулированном в частном случае впервые Максом Борном еще в 1938 году [3]. До сих пор на него не обращалось должного внимания, т.к. при классическом подходе к существующим физическим понятиям не совсем понятно, что за ним скрывается.

В общем виде принцип взаимности состоит в наличии определенной симметрии основных уравнений относительно взаимных преобразований координат и импульсов (скоростей) физической системы. Прежде чем обсудить его и попытаться выяснить, с чем он связан, рассмотрим ряд эвристических соображений, рассмотрение которых позволит более полно понять этот принцип.

1. Начнем с того, что фундаментальные физические законы подчиняются законам относительности, связанные с возможностью перехода от одной системы отсчета к другой, и с заменой координатных представлений. Остановимся на этом чуть подробнее.

Необходимым составным элементом любого исследования является наличие системы отсчета. Только при наличии и правильном выборе системы отсчета, в соответствии с условиями наблюдения, можно ожидать результатов, поддающихся физической интерпретации. «Система отсчета, с одной стороны, представляет собой как бы мизансцену, на фоне которой развертываются события, с другой стороны, - это своеобразный физический прибор, предназначенный для выполнения некоторых измерений, и, как таковой имеет нечто общее с любым, обычным, физическим прибором.

Так, например, вольтметр имеет прежде всего физическую основу – базис, состоящий из магнита, рамки с обмоткой, стрелки и т.д. Но этот базис превратится в физический прибор, пригодный для измерений, только после того, как будет осуществлена его градуировка, которая должна быть, в принципе, любым, но однозначным образом зафиксирована на его шкале.

Точно также и система отсчета должна иметь физический базис – набор, определенным образом движущихся или неподвижных, тел, стандартных представлений и часов» [4].

Градуировка системы отчета распадается на две существенно различные процедуры, назовем их – (А) и (В). А-градуировка позволяет каждому телу, в механике материальной точке, сопоставит 4 координаты – числа x^k, которые характеризуют ее положение в пространстве в определенный момент времени. Ясно, что выбор координат никак не связан с изменением физической ситуации и, следовательно, мы можем переходить от одного координатного представления к другому. Из этой же произвольности следует, что в общем случае величины dx^k не могут быть истолкованы как соответствующие промежутки, и становятся таковыми лишь при введении метрики пространства.

Одной A-градуировки недостаточно. Для описания движения тела, кроме сведений о положении центра его масс в данный момент времени необходимо знать его мгновенную ориентацию и скорость его центра масс. «Таким образом, в дополнение к A-градуировке необходимо еще занумеровать (перечислить) все направления и скорости относительного движения. Это и составляет содержание B-градуировки» [4]. Выбор этих начальных направлений и скоростей (ввиду относительности направления и скорости) – операция хотя необходимая, но формальная. «Две различные B-градуировки, которые в силу определения, конечно, равноправны, связаны преобразованием группы (B). Следовательно, группа (B) описывает переход от одной B-градуировки к другой, подобно тому как группа (A) устанавливает связь между двумя A-градуировками.

Подводя итог, можно слелать очень важный вывод, именно из того факта, что выбор как A-, так и B-градуировки – операция хотя и необходимая, но в основном формальная, не влияющая ни на состояние движения системы отсчета, ни тем более на состояние исследуемого объекта, следует.

I. Законы природы аналитически должны выражаться в форме общековариантной относительно обеих групп преобразований (A) и (B).

II. Все физические величины должны геометрически отображаться общековариантными относительно групп (A) и (B) тензорами» [4].

2. Если мы фиксируем систему отсчета, то уже здесь, на уровне обычной классической механики имеется связь, симметрия, отображаемая каноническими уравнениями движения, или уравнениями Гамильтона

$$dq/dt = \partial H/\partial p\ ,\ dp/dt = -\ \partial H/\partial q$$

Легко видеть, что они симметричны (точнее антисимметричны из-за знака минус во втором уравнении) относительно перестановки координат и импульсов системы.

3. В специальной теории относительности можно отметить наличие определенной симметрии, хотя в данном случае мы бы это точнее назвали аналогией в ее фундаментальных уравнениях, в частности между формой интервала и закона сохранения энергии

$$ds^2 = c^2dt^2 - \Sigma\, x_i^{\,2},\quad m^2c^2 = E^2/c^2 - \Sigma\, p_i^{\,2}\ .$$

Такая аналогия является не случайной и тесно связана со структурой пространства-времени Лобачевского в специальной теории относительности и уравнениями движения в этом пространстве. Так уравнения Гамильтона-Якоби в четырехмерном виде записываются следующим образом:

$$\Sigma\,(\partial S/\partial x_i)^2 = -\,m^2c^2,$$

но так как $\partial S/\partial x_i$ есть не что иное как 4-импульс p_i, получим закон сохранения энергии-импульса $\Sigma\, p_i^{\,2} = -\,m^2c^2$.

Если перейдем к совершенно иной физической теории, а именно к квантовой механике, то здесь связь и симметрия между координатами и импульсами является еще более прозрачной.

4. Хорошо известно, что основные законы квантовой механики, такие, как соотношения коммутации, соотношения неопределенности и т. д., симметричны по отношению к координатам x и импульсам p. Так соотношение коммутации имеет вид

$$p_x\, x - x\, p_x = -i\hbar,$$

где p_x и x – соответствующие операторы импульса и координаты. Именно отсюда и выводится соотношение неопределенностей Гейзенберга

$$\Delta\, \boldsymbol{x}\, \Delta\, \boldsymbol{p} \geq \hbar/2$$

симметричное, естественно, уже относительно самих координат и импульсов.

5. Все уравнения квантовой механики (например, Шредингера и Дирака) могут быть сформулированы как в координатном, так и в импульсном представлениях, и оба эти представления являются эквивалентными и симметричными. Так в квантовой электродинамике, как известно, имеется следующая симметрия между уравнениями Дирака в координатном и импульсном пространстве соответственно:

$$(\mathrm{i}\gamma^{\kappa}\partial/\partial x^{k} - \mathrm{m})\psi = 0, \text{ и } (\gamma^{\kappa}p_{k} + \mathrm{m})\psi = 0.$$

6. Само представление операторов носит также совершенно симметричный характер. Так, например, оператор импульса в координатном представлении имеет следующий вид

$$p_i = -i\hbar\, (\partial/\partial x_i),$$

и, наоборот, оператор координаты в импульсном представлении представляется симметрично предыдущему соотношению

$$x_i = -i\hbar\, (\partial/\partial p_i).$$

Также совершенно симметричны операторы координаты в координатном представлении и импульса в импульсном представлении, которые есть просто умножение на соответствующий параметр.

7. Законы распределения координат и импульсов в квантовой механике не просто связаны соотношением неопределенностей, но также имеют и определенный симметричный вид. Так, если у нас имеется частица, находящаяся в определенном

состоянии, описывающейся волновой функцией $\psi(x)$, то вероятность ее обнаружения в узком интервале dx близ точки x равна, как известно,

$$P(x, dx) = |\psi(x)|^2\, dx.$$

Рассмотрим для простоты частицу, расположенную в некоторой области вокруг $x = 0$, имеющей простейшее Гауссово распределение для плотности вероятности координаты частицы, описываемой волновой функцией

$$\psi(x) = K \exp(- x^2/4\sigma^2).$$

Распределение вероятности иметь то или иное значение x для такой волновой функции дается ее квадратом

$$P(x, dx) = K^2 \exp(- x^2/2\sigma^2)\, dx.$$

Можно рассчитать соответствующее распределение по импульсу и прийти к «интересному результату – распределение амплитуд по p имеет в точности ту же математическую форму, как и распределение амплитуд по x, только ширина кривой Гаусса иная... Если сделать распределение по x очень узким, то... распределение по p сильно расползется. Или наоборот, если распределение по p узко, то оно соответствует широкому распределению по x» [5]. Так, соответствующая амплитуда вероятности по импульсу будет иметь вид

$$\psi(p) = (4)^{1/4} K^{-1} \exp(- p^2 \sigma^2/ \hbar^2).$$

Легко доказать, что и делается в любом курсе квантовой механики при выводе соотношения неопределенности, что распределения по x и p всегда являются коррелированными, взаимно отображают друг друга. Такой результат тем более примечателен, что **в квантовой механике импульс частицы *p* не является функцией координаты частицы *x*** [6]. Получается, что координатное представление «отслеживает» импульсное, и наоборот (при формальной независимости координат и импульсов, что и дает собственно возможность формулировки уравнений квантовой механики в эквивалентных координатных и импульсных представлениях).

Интересно отметить, что соответствующая симметрия между координатами и импульсами ранее отмечалась Гейзенбергом и использовалась им для критики некоторых интерпретаций квантовой механики. Так, в начале 50-х годов, касаясь в статье «Развитие интерпретации квантовой теории» только что появившейся теории квантового потенциала Бома он пишет, что «язык Бома (имеется в виду формализм этой теории – А.С.) разрушает симметрию между p и q, присущую квантовой теории. Действительно, в его теории $|\psi(q)|^2$ означает плотность вероятности в координатном пространстве, но $|\psi(p)|^2$ не означает того же в импульсном пространстве. Поскольку свойства симметрии всегда относятся к физической сущности теории, совсем неочевидно, какие преимущества дает отказ от них в соответствующем языке.

То же возражение применимо к попытка де Бройля, предложившего теорию «волны-пилота»; в этом случае также $|\psi(q)|^2$ представляет собой плотность вероятности в координатном пространстве, но $|\psi(p)|^2$ не представляет ее в импульсном пространстве.

Аналогичное возражение можно сделать в несколько иной форме против статистических интерпретаций Боппа и Феньеша» [7].

8. Уравнения статистической механики также демонстрируют соответствующие симметрии. Мы в данном случае не будем останавливаться на виде симметричных соответствующих функций распределения, флуктуаций и т.д., а отметим только, что все уравнения статистики следуют из *основного постулата равновесной статистической механики* (который никак не следует, заметим, их механики классической), который гласит, **что все допустимые микросостояния замкнутой системы равновероятны**. Не входя в детали, хорошо известные физикам, упрощенно его можно пояснить следующим образом.

Уравнения статистической механики формулируются на так называемом фазовом пространстве, области допустимых значений координат и импульсов частиц системы. Если система замкнута, то ее полная энергия неизменна и равна величине E. Все фазовое пространство можно разбить на конечные ячейки, в которых будут находиться то или иное число частиц. Для координат интуитивно ясно, что частицы с равной степенью вероятности будут находиться во всех допустимых состояниях. В этих фазовых ячейках находятся частицы, обладающие определенной энергией, и сумма

$$N_1 \varepsilon_1 + N_2 \varepsilon_2 + N_3 \varepsilon_3 + \ldots,$$

(где N_i - число частиц в i–ой фазовой ячейке, а ε_i - их энергия), будет равна естественно полной энергии

$$\Sigma N_i \varepsilon_i = E.$$

Конкретный вид и есть так называемое микросостояние. Понятно, что возможно огромное число таких микросостояний, и основная гипотеза статистической механики гласит о равенстве этих вероятностей (так называемый закон *равенства априорных* *вероятностей*, который был четко сформулирован Толменом в 1938 году, и еще ранее неявно использованный Гиббсом при выводе его уравнений [8]. То есть возникает, говоря физическим языком, близкое к равномерному распределение состояний системы на поверхности постоянных энергий. Если для координат, такое положения, как мы уже отмечали выше, представляется естественным, то обоснование такого принципа для энергий и составляет задачу обоснования статистики. На наш взгляд, это обоснование и требует привлечения рассматриваемого принципа взаимности, и принцип *равенства априорных вероятностей* тесно связан с равномерностью распределения в координатном пространстве. Попытку обоснования этого принципа мы отложим на дальнейшее, здесь же только отметим аналогию *равновероятностей* распределений по координатам и импульсам частиц системы.

Принцип взаимности не ограничивается рассмотренными выше восемью пунктами. Аналогичность многих законов физики, относящихся к разным ее областям, хорошо известна и любой физик легко сможет продолжить представленный список. Мы здесь ограничились лишь некоторыми симметриями, относящихся к координатному и импульсному пространству. Именно эти структуры будут представлять для нас интерес в дальнейшем, и именно поэтому мы здесь ими ограничились.

Вообще говоря, можно было бы ограничиться сугубо утилитаристским подходом, подходом «аналитика-позитивиста» и констатировать, что рассмотренные аналогии хорошо известны, во многом тривиальны и вытекают из структуры тех или уравнений физики и вряд ли стоит искать что-то их объединяющее. Если же и искать нечто общее, чем, вообще говоря, и занимаются физики-теоретики, то оно будет достигнуто на пути объединения, синтеза существующих теорий. Именно по этому пути и движется физика уже, наверное, более века.

Представляется интересным, что впервые принцип взаимности (reciprocity) и был сформулирован Максом Борном как раз при попытке синтеза общей теории относительности и квантовой теории, о чем мы уже упоминали выше.

Борн заметил, «что теория преобразований в квантовой механике соответствует свойству классических уравнений движения быть инвариантными по отношению к контактным преобразованиям. Последние являются одновременными преобразованиями координат x^k (включая время) и импульсов p_k (включая энергию), при которых разность величины $p_k dx^k$, записанной в старой и новых переменных, является полным дифференциалом. Точечные преобразования в x-пространстве являются всего лишь частным случаем; однако имеется другой случай, столь же простой, как и первый, который может быть описан как точечное преобразование в p-пространстве» [3].

Далее он отмечает, что в общей теории относительности имеют дело только с точечными преобразованиями в x-пространстве. Можно показать, что и делается в тензорном анализе, что преобразования импульсов p_k, подчиненные упомянутому выше условию контактности, представляют не что иное, как тензорное исчисление общей теории относительности.

Эти соображения и приводят его впервые к формулировке принципа взаимности: «Мне представляется, что точечные преобразования в p –пространстве можно было бы рассмотреть подобным же образом. Такой путь ведёт к некоему обращённому формализму теории относительности в p – пространстве, в котором везде координаты пространство–время и импульс–энергия поменялись местами.

Эти факты в сильной степени наводят на мысль о формулировке **«принципа взаимности», в соответствии с которым любой общий закон в *x*–пространстве имеет «инверсный образ» в *p*-пространстве** (выделено мной – А.С.)» [3].

Такого рода дуальность физических законов имеет далеко идущие последствия. Уже Макс Борн в упоминаемой работе, как мы уже говорили, пытался с единой позиции (на основе именно этого принципа) рассматривать теорию относительности и квантовую механику, что привело его к ряду интересных результатов.

Борн не построил развитую теорию, однако, результаты, полученные им, позволяют утверждать, что принцип взаимности в рамках физики является «чем-то большим, чем простой формализм» [3].

Неудача такой попытки связана по нашему мнению с тем, что теории «сшиваются горизонтально», без учета того, что зачастую теории описывают разные структурные уровни материи. Необходимо же переходить от «горизонтальной сшивки» к «вертикальной», к поиску наиболее общих структур в теориях и того, что за ними стоит. Этому в физике соответствует переход от «уровня уравнений» к «уровню симметрий». Первоначально те или иные симметрии играли в физике роль вспомогательную. Развитие квантовой механики, теории элементарных частиц, прежде всего калибровочных теорий показало фундаментальную роль тех или иных групп симметрий. Оказалось, что именно они несут на себе наиболее фундаментальную информацию о физической системе и уравнения, описывающие их поведение, являются всего лишь следствием из соответствующих симметрий.

Заметим, кстати, что хорошо известна соответствующая «симметрийная» связь между координатным пространством и импульсом замкнутой системы, а именно закон сохранения энергии-импульса тесно связан с фактом однородности пространства-времени. Действительно, в силу этой однородности свойства замкнутой системы не меняются при любом параллельном переносе системы как целого в пространстве. Параллельный перенос есть такое преобразование координат, при котором все точки системы смещаются на один и тот же вектор ε, т.е. их радиус вектор получает соответствующее приращение: $r \rightarrow r + \varepsilon$. Рассматривая неизменность т.н. функции Лагранжа при бесконечно малом смещении dx легко получить закон сохранения импульса $\mathbf{dp/dt = 0}$.

Легко видеть, большинство рассмотренных выше примеров связано с некоторой симметрией законов при замене $(\partial/\partial x_i) \rightarrow p_i$ и наоборот, что приводит, с точки зрения математики, к рассмотрению т.н. «касательных пространств». Не входя в математические детали, будем просто говорить об импульсном пространстве и, обобщая все рассмотренные выше примеры, сформулируем принцип взаимности (обобщая формулировку Макса Борна) следующим образом:

Фундаментальные физические законы являются общековариантными при переходе от координатного к импульсному пространству.

«Общековариантность» здесь означает имение и «инверсного образа» (по Борну), и неизменность формы записи уравнений при переходе от координатного к импульсному пространству.

На наш взгляд, этот принцип позволяет по-новому рассмотреть целый ряд вопросов современной физики, как ранее многократно обсуждавшихся (например, принцип дополнительности и неопределенности в квантовой механике), так и новых, ранее практически ускользавших от внимания исследователей. Одним из таких вопросов является как раз эквивалентность описания квантовых процессов в координатном и импульсном представлениях. Для целей нашего исследования наиболее интересным представляется вопрос об онтологическом статусе импульсного пространства. Является ли оно лишь вспомогательным математическим конструктом или ему соответствует некоторый референт в бытии?

Один тот факт, что уравнения квантовой механики в импульсном пространстве приобретают более простой и изящный вид, заставляет задуматься о его реальности, бытийности, существовании соответствующего ему референта в реальности. Однако, оставаясь в рамках старой, декартовской парадигмы бытия, вопрос о соответствующей интерпретации этого принципа даже не может быть осмысленно поставлен. Говоря точнее, здесь он всегда будет оставаться как раз чисто формальным и удобным математическим принципом, который неизвестно что скрывает.

Тем не менее, его фундаментальный, его работоспособность во всех областях физики, заставляет задуматься о существовании фундаментального закона, принципа, математическим выражением которого он бы и являлся. В рамках классической парадигмы, восходящей к ньютоновско-декартовским представлениям, как видится, вопрос о существовании такого принципа не может быть даже осмысленно поставлен. Дело в том, что эта симметрия требует существования импульсного пространства (в некотором смысле) «самого по себе», независимо от координатного пространства, что противоречит обыденной физической интуиции.

Как представляется, существуют два подхода в рамках которых возможно непротиворечивое рассмотрение принципа взаимности. Первый подход в рамках классической механики, второй в рамках квантовой теории.

Применение принципа взаимности при классическом описании реальности весьма естественно «индуцирует» финслеров подход. В некотором смысле, наиболее общий лагранжев и гамильтонов формализмы уже изначально отображают в себе «протофинслерову» структуру реальности.

Как хорошо известно, в наиболее общем виде законы физики формулируются в рамках лагранжевого формализма, когда задается функция действия $\mathrm{S}(x)$:

$$\mathrm{S}(x) = \int \mathrm{L}(x^i, \mathrm{d}x^i/\mathrm{d}t)\, \mathrm{dt} .$$

Уравнения движения системы находятся из условия экстремальности функции действия. Сразу же отметим, что функция Лагранжа $\mathrm{L}(x^i,\mathrm{d}x^i/\mathrm{d}t)$ играющая фундаментальную роль в физике, является «естественным» финслеровым геометрическим объектом, а именно она задает норму вектора $\mathrm{d}x^i/\mathrm{d}t$ в касательном пространстве $\mathrm{T_n}$, опирающемся на точку с координатами x^i. Укажем также на то, что функция Гамильтона $\mathrm{H}(x^i, p_i)$ является нормой вектора с компонентами p_i, принадлежащего так называемому дуальному касательному пространству.

Если учесть «естественную финслеровость» фундаментальных физических законов, с одной стороны, а с другой стороны и совершенно естественное преодоление в рамках финслеровой геометрии некоторых затруднений при формулировке релятивистской механики (см., напр. [9]), обобщение уравнений физики исторически могло бы развиваться в русле финслеровых геометрий. Кроме отмеченного выше отсутствия фундаментального принципа, ведущего к симметрии координатного и импульсного представлений, существует еще один фактор, существенно препятствовавший широкому рассмотрению финслерова подхода. Это то обстоятельство, что финслерова геометрия вводит явную анизотропию пространства. Ряд открытий, совершенных в последнее время в области физики и космологии, могут весьма убедительно свидетельствовать о такого рода анизотропии. Упомянем из них лишь данные по анизотропии и поляризации фонового реликтового излучения (WMAP), работы Ж.-П. Лумине из Франции и Д. Макмиллана (США). Об анизотропии реального пространства, как представляется, весьма убедительно и свидетельствуют работы С.Э. Шноля и В.А. Панчелюги. Особенностью всех этих работ является то, что наблюдаемая анизотропия пространства достаточно мала. Именно это обстоятельство и может свидетельствовать о том, что физические теории до этих пор вполне могли развиваться на базе представлений об однородном и изотропном пространстве-времени.

Последние рассуждения были связаны в значительной мере только с теориями классического типа. Однако в современной физике наиболее фундаментальной теорий является квантовая механика, и не одна новая теория в физике никак не может ее игнорировать. Как представляется, именно квантовая механика и дает возможность ответить на вопрос, почему в соответствии с принципом взаимности пространство импульсов может существовать «само по себе», или, говоря языком философским, сказать нам нечто об онтологическом статусе импульсного пространства. Для этого рассмотрим, к примеру, уравнение Дирака

$$(i\gamma^{\kappa}\partial/\partial x^{k} - m)\psi = 0.$$

С точки зрения структуры оно имеет простой вид – действие некоторого оператора $(i\gamma^{\kappa}\partial/\partial x^{k} - m)$ на поле (волновую функцию) ψ. Его можно переписать в виде

$$(i\gamma^{\kappa}\partial/\partial x^{k})\psi = m\psi$$

С левой стороны на поле ψ действует опять некоторый оператор, а именно $i\gamma^{\kappa}\partial/\partial x^{k}$, что есть не что иное (упрощенно говоря), как оператор импульса. Легко видеть, что в импульсном представлении оно записывается соответственно в следующем виде

$$\gamma^{\kappa}p_{k}\,\psi = m\psi.$$

Если мы рассматриваем наиболее общий случай взаимодействия с электромагнитным полем, то уравнение Дирака запишется в виде

$$\gamma^{\kappa}\,(i\partial/\partial x^{k} - eA)\,\psi \;=\; m\psi,$$

где А – вектор-потенциал электромагнитного поля, что также является фактически действием обобщенного импульса $\boldsymbol{P} = p + eA$ на волновую функцию.

Теперь если вспомнить, что квантовая механика описывает скорее возможности (амплитуды вероятностей) переходов и может формулироваться в гейзенберговском представлении, то можно показать, что импульсное пространство мы должны соотносить с некоторой структурой, обладающей специфическими онтологическими характеристиками. В соответствии с идеями В. Гейзенберга и В.А. Фока, можно утверждать то, что квантовая механика отсылает нас к старым метафизическим представлениям о существовании *бытия в возможности* и *бытия в действительности*. Волновые функции, операторы описывают скорее возможности, вероятности осуществления событий и связаны с бытием в возможности («потенциальные возможности» У Фока); при измерении происходит редукция волновой функции, и мы наблюдаем одно из возможных состояний системы. Последнее и есть бытие в действительности, «осуществившееся» по Фоку. Новоевропейская философия и вслед за ней физика стала мыслить и связывать сущее только с бытием действительным, квантовая механика реально возвращает нас к давно подзабытым представлениям о многомодусном бытии. Не входя в детали, можно показать (подробнее см., напр. [10]), что **мы можем соотнести «бытие в возможности» с импульсным пространством**. Наблюдаемый же импульс какой–либо частицы есть просто актуализация той или иной вероятности нахождения ее в соответствующем состоянии. При таком рассмотрении, принцип взаимности, сформулированный выше, обобщается. В соответствии с ним, если вспомнить формулировку Макса Борна, любой общий закон в координатном пространстве имеет «инверсный образ» в импульсном пространстве. Если соотнести, как мы сделали выше, импульсное пространство с «потенциальным», то этот принцип можно сформулировать таким образом:

Законы сущего на одном модусе бытия дублируют, а точнее, отображают законы сущего на другом модусе бытия, и наоборот.

Сформулированный в таком виде этот принцип вовсе не является новым и хорошо известен в истории философии. Так или иначе, он связан и с концепциями инь-ян в китайской философии, нама-рупа в индусской метафизике, основными идеями платоновской и аристотелевской философии, а также идеями «потенциального» и «актуального» в средневековой схоластике. Вовсе не случайно Нильс Бор идею дополнительности рассматривал в значительно более широком аспекте, нежели чем она вытекает из сущности квантовых процессов, и символ инь-ян ☯ китайской метафизики был высечен на его надгробии.

Принцип взаимности требует рассмотрения импульсного пространства как существующего в некотором смысле независимо от обычного координатного пространства, что сильно противоречит обыденному здравому смыслу. Если вспомнить, однако, утверждение Гейзенберга, что квантовая механика возвращает нас аристотелевской метафизике и, конкретно, к его концепции *δυναμισ* - бытия в возможности, и учесть, что операторы импульса и описывают такого рода возможности, то такой вывод не представляется таким уж и странным.

Вообще говоря, принцип взаимности, дуальность физических структур, которые мы рассматриваем, требует своего объяснения. Объяснение может быть двоякого рода. Мы можем подойти к этому явлению с точки зрения физики и искать общую теорию, в которой этот принцип выступал бы как явное следствие некоторых более первичных посылок. Можно к этому вопросу подойти более общим образом, и осмыслить его уже с точки зрения философии. Можно сделать вывод, что принцип взаимности, та корреляция, симметрия координатного и импульсного пространств, наблюдаемая в основных физических законах требует с необходимостью чего-то третьего, что бы конституировало наблюдаемую дуальность. Без конкретизации деталей, с самой общей точки зрения, то, что определяет, конституирует наблюдаемое явление и есть его *сущность*, *чтойность* данного феномена.

Описание сущего при этом вполне укладывается в рамки триадного подхода при описании реальности, которую мы уже отмечали и ранее [10]:

ουσια - сущность, «чтойность» феномена;

δυναμισ - возможность, потенциальность, потенция;

ενεργεια - энергия, деятельность, действительность, актуальное.

Эта триада (*ουσια* - *δυναμισ* - *ενεργεια*) хорошо известна. Она использовалась не только в греческой метафизике, но и в китайской и индийской философии, в зороастризме, в целом ряде других традиционных культур. Именно существование второго члена этой триады, промежуточной динамической реальности, связанное непосредственно импульсным представлением в квантовой механике, и отвечает за существование принципа взаимности, а также и может «наводить», конституировать анизотропию наблюдаемого макроскопического пространства. Последнее обстоятельство и может легитимизоровать применимость финслеровой геометрии при описании реального пространства-времени, что требует в дальнейшем специальных физических исследований.

Литература:

1. Эйнштейн А. Физика и реальность // Физика и реальность. М. Наука. 1965.
2. Владимиров Ю.С. Геометрофизика. М. Бином.2005.
3. Борн М. Теория относительности и квантовая теория // Размышления и воспоминания физика. М. Наука. 1977.
4. Родичев В.И. Геометрические свойства систем отсчета // Эйнштейновский сборник. 1971. М., Наука, 1972.
5. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.8-9, М., 1978.
6. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики. М. Наука. 1976.
7. Гейзенберг, Вернер. Развитие интерпретации квантовой теории // Нильс Бор и развитие современной физики. М. 1958.
8. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. М., Мир. Т. 1.1978.
9. Рунд Х. Дифференциальная геометрия финслеровых пространств. М. Наук. 1981.
10. Севальников А.Ю. Современное физическое познание: в поисках новой онтологии. М. ИФ РАН. 2003.