

О пространстве в квантовой механике*

В современной фундаментальной физике происходит перманентный пересмотр основных понятий. Особый интерес вызывает пересмотр понятий, которые имеют всеобщий характер – т.е. категорий. Их в современной физике «работает» достаточно много. Это пространство, время, движение, причинность, случайность и др. Этот пересмотр категорий нередко происходит настолько радикально, что формируются тенденции, ведущие к их полному элиминированию. Так, в квантовой механике (КМ) из динамики исключена причинность, а в современных вариантах квантовой теории гравитации отсутствует время. Вопрос ставится о макроскопичности и пространства. Концептуальный анализ этих категорий является актуальной задачей, как физического познания, так и философии физики.

В одной из самых успешных и эффективных физических теорий – квантовой механике – вопрос о природе пространства на концептуальном уровне стоит очень остро. В этой теории сосуществуют два типа пространств: гильбертово и евклидово. Основной объект стандартной копенгагенской интерпретации КМ – волновая функция – является объектом (вектором) гильбертова пространства, в то время как квантовые объекты движутся в евклидовом пространстве и времени, или, как вариант, о движении в привычном смысле вообще говорить нельзя: квантовые частицы не имеют траекторий, а только вероятности появления в той или иной точке евклидова пространства. Это заставляет поставить вопрос о сути квантовой механики. Например, вопрос о том, описывает ли стандартная КМ движение реальных частиц в пространстве и времени? Какова онтология квантованного (в данном случае нерелятивистского) мира? Адекватна ли копенгагенская онтология с чисто потенциальным существованием квантовых объектов до измерения и бестраекторностью движения в обычном евклидовом пространстве? Еще сложнее ситуация в релятивистской КМ – квантовой теории поля.

Современная тотальная методологическая тенденция в физике на эффективное описание и нередко пренебрежение анализом концептуальных вопросов, ведет, в частности, к пренебрежению поиска более глубокого понимания. В нашем случае, к отказу от поиска более глубокого понимания природы пространства на микроуровне. В противовес этому мы хотели бы обратить внимание на следующую важную тенденцию в фундаментальной физике.

В истории фундаментальной физики можно выделить последовательность фундаментальных физических теорий, которые (по факту!) связаны с эволюцией принципа относительности. Эта последовательность представляет собой связку следующих теорий: классическая механика Галилея-Ньютона, фундаментом которой является принцип относительности Галилея и преобразования Галилея; специальная теория относительности, одним из постулатов которой является специальный принцип относительности и преобразования Лоренца; общая теория относительности с постулатом в виде общего принципа

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ. «Проблема новой онтологии в современном физическом познании», проект № 14-03-00452а.

относительности (наряду с принципом эквивалентности) и общековариантных преобразований.

Эта последовательность фундаментальных теорий отражает эволюцию фундаментальной физики как теорий перемещений в пространствах все более сложной природы. Так, классическая механика описывает перемещения частиц (материальных точек) и тел в абсолютном евклидовом пространстве и времени. Специальная теория относительности описывает движение тел в 4-мерном псевдоевклидовом пространстве-времени Минковского. Общая теория относительности описывает геодезическое движение тел в 4-мерном искривленном (римановом) пространстве-времени. Нетрудно видеть, что в каждой новой фундаментальной физической теории пространство, действительно, значительно усложняется.

Если трактовать квантовую механику как механику квантовых объектов корпускулярно-волновой природы, то в принципе допустимо рассматривать квантовую механику как теорию, описывающую движение в обычном евклидовом пространстве и времени, но только вероятностным образом с помощью волновой функции. Однако пространство и время КМ - «плохие» с той точки зрения, что они евклидовы и не отвечают тенденции, которую образует представленная выше последовательность уже существующих фундаментальных механик – теорий относительности. Кроме того с квантовой механикой явным образом не связан и принцип относительности, являющийся одним из краеугольных камней этой последовательности. Тем не менее, предпринимались попытки ввести в квантовую механику аналоги принципа относительности, например, принцип относительности к средствам наблюдения (В.А.Фок). Кроме того существуют соображения в отношении релятивизации отдельных аспектов квантовой механики (см., например,¹).

Если попытаться включить квантовую механику в указанную эволюционную последовательность фундаментальных механик, то кроме необходимости развития и уточнения ее онтологических аспектов, следует искать новую геометрию пространства, которая, возможно, должна быть еще более сложной по сравнению с пространствами трех указанных механик. Не исключено, что потребуется и новая топология пространства квантовой механики.

То, что пространство должно существенным образом отличаться от обычного евклидова, по-видимому, говорят и некоторые известные эксперименты и феномены. Так, мысленный эксперимент «микроскоп Гейзенберга» дал повод утверждать об отсутствии траекторий у квантовых частиц, а в подходе Р.Фейнмана необходимо брать интеграл по всем возможным траекториям частицы, а частица движется по всем этим траекториям одновременно. Неклассичность перемещения в пространстве квантовой частицы следует и из 2-х щелевого эксперимента. Наконец копенгагенская интерпретация квантовой механики утверждает о том, что до, или между двумя измерениями квантовые частицы существуют только в потенциальной форме, что не позволяет говорить ни о каком наблюдаемом движении в пространстве, а потенциальность объектов, по-видимому, требует более глубокого анализа природы и самих пространства и времени.

Поиски такого нового пространства уже предпринимались физиками. Прежде всего, это попытки построения дискретного пространства квантовой механики. Для этого есть естественный повод – квантовый характер

¹ Эрекаев В.Д. Принцип относительности как основание фундаментальной физики. // Философские проблемы современной физики. Часть 1. – М., Макс Пресс. – 2009. – С. 16-35.

квантово-механических величин, в том числе, например, пространственных траекторий и положений частицы в пространстве. Так, еще в 1930 году В.А.Амбарцумян и Д.Д.Иваненко предложили рассмотрение пространства и времени как кубической решетки точек с целочисленными значениями координат. Х.Снайдер предложил модель дискретного пространства, в которой квантовая частица не обладает одновременно всеми тремя пространственными координатами, и в каждый момент времени можно измерить только одну из трех координат объекта, а две другие остаются неопределенными. Известны также подходы, описывающие дискретное пространство-время на световом конусе (Я.И.Френкель); рассматривающее пространство квантовой механики, состоящее из конечного числа точек (Х.Коиш, И.С.Шапиро) и другие. Однако до сих пор идея дискретного пространства не обрела формы солидной теории.

Отметим еще одну перспективу в фундаментальной физике, связанную с данной проблематикой: возможно, придется создавать и последовательно реализовывать целую программу построения неметрической физики². Так же, как постепенно прорисовывается и формируется уже набравшая мощь программа геометризации физики и менее явно – программа топологизации физики.

В итоге можно сделать вывод о необходимости выработки новых представлений о пространстве и времени в квантовой механике и соответственно во всех ее дальнейших обобщениях, начиная с квантовой теории поля как ее спецрелятивистского обобщения до общерелятивистского в квантовой теории гравитации и построения планковской физики.

² Эрекаев В.Д. Проблема времени в квантовой гравитации и квантовой космологии // Метавселенная, пространство, время. – М., ИФРАН. - 2013. – С. 122-140.