

ПРИНЦИП ФЕРМА, ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ В ОПТИКЕ

Научные принципы являются важнейшими формами организации научного знания, выполняющими роль конституитивного начала теории. Если за первый уровень познания физической реальности принять фиксацию отдельных природных феноменов, а за второй – установление физических законов, то третий уровень познания – формулирование аподиктических принципов путем конъюкции этих законов. Одним из первых таких ноуменов в истории физики стал принцип Пьера де Ферма (1662) – основной принцип геометрической оптики, сформулированный им в полемике с картезианцами.

Время, когда был сформулирован принцип Ферма – период становления механической парадигмы, для которого характерно конвергентное мышление и рецидивы натурфилософского подхода к описанию явлений. Подобная ассимиляция характерна и для Ферма, который полагал, что в основе его оптического принципа лежит более общий метафизический принцип экономии в природе: природа всегда действует по кратчайшему пути.

Вместе с тем ретроспективный анализ этого принципа позволяет сделать вывод о его методологической универсальности и выявить многие смыслы: имплицитно содержит идею вариационного принципа, экстраполируется на новые области исследования, в частности на квантовую механику, впервые эксплицитно выражает геометрическую составляющую картины мира. Выявление роли принципа Ферма в становлении геометрической составляющей физической картины мира и является целью нашего исследования.

ПРИНЦИП ФЕРМА КАК ЭЛЕМЕНТ ГЕОМЕТРИЗАЦИИ ОПТИКИ

Геометризация как один из методов теоретической физики позволяет эксплицировать многие положения физической картины мира. Геометризация физики – это интеграция знания, выполняющая системообразующую роль в развитии физики и способствующая созданию естественнонаучной картины мира [1].

Идея геометризации времени зародилась в позднем Средневековье. Мысли о том, что промежутки времени являются по существу дела формой восприятия пространственных протяженностей, высказывались в виде чисто умозрительных догадок задолго до возникновения классической механики. Блаженный Августин писал в 400 г. н. э.: «Теперь я вижу, что время есть действительно какое-то протяжение» [2: 14]. Им были развиты представления, которые получили название функциональной концепции времени.

Согласно этим представлениям объективно-реальное время образуется в результате последовательной смены конкретных, конечных материальных вещей, явлений и процессов [3]. «Дело в том, что, согласно функциональной концепции, объективно-реальное время образуется в результате последовательной смены конкретных, конечных материальных вещей, явлений и процессов. Причем функциональное время образуется не всяким, не любым движением, а качественными изменениями, являющимися причиной становления, т.е. возникновения и исчезновения, материальных вещей, явлений и процессов как таковых. Точнее было бы сказать, что лишь конкретные, конечные материальные вещи, явления и процессы образуют свое собственное настоящее время, в котором и существуют с момента своего возникновения и до воплощения их материального содержания в другие вещи, явления и процессы» [4: 80].

Для механики большое значение имело другое выдающееся достижение геометрической мысли – многомерная геометрия. Впервые идея обобщения геометрических представлений на пространства четырех и большего, даже произвольного числа измерений, возникла в аналитической механике. Лагранж считал, что механику можно трактовать как геометрию четырех измерений, считая четвертым измерением время [5].

Важным этапом развития физики, не только механики, был этап формирования вариационных принципов механики.

Эти принципы и связанный с ними комплекс физических идей и математических методов имеют актуальное значение как в теоретической механике, так и в различных научных и технических проблемах.

Они находят применение в широком и все более расширяющемся круге вопросов теоретической физики, механики сплошных сред, теории упругости, строительной механики, теории колебаний и т.п. Большой методологический интерес представляет также сложная история возникновения и развития этих принципов [6].

Обсуждаемые идеи прошли сложный путь развития от экстремальных принципов до вариационных принципов механики и позволили найти такой способ рассуждения, при котором закон становится очевидным.

«Впервые общий принцип, наглядно объясняющий закон поведения света, был предложен Ферма примерно в 1650 г. и получил название принципа наименьшего времени, или принципа Ферма. Вот его идея: свет выбирает из всех возможных путей, соединяющих две точки, тот путь, который требует наименьшего времени для его прохождения» [7: 6].

В изотропном пространстве скорость света не зависит от направления. Наименьшему времени отвечает та же траектория, если свет распространяется по некоторому пути в одном направлении, то он будет двигаться по этому пути и в обратном направлении (известный с античных времен закон обратимости световых лучей). «Точная формулировка принципа следующая: луч, проходящий по траектории, обладает тем свойством, что любое малое изменение пути (скажем, на 1 %), расположение точки падения луча на зеркало, или формы кривой, или какие-либо иные изменения, не приводит в первом порядке к изменению времени прохождения; изменение времени происходит только во втором порядке. Другими словами, согласно этому принципу, свет выбирает один из множества ближайших путей, требующих почти одинакового времени для прохождения» [7: 18].

Принцип наименьшего времени, если его рассматривать как методологический принцип, не объясняет причину явлений в природе. Вместо причинной обусловленности, когда из одного нашего действия вытекает другое и т.д., этот принцип говорит следующее: в данной ситуации свет выбирает путь с наименьшим или экстремальным временем. Но как удастся свету выбирать свой путь? Вынюхивает он, что ли, соседние пути и сравнивает их потом друг с другом? В некотором смысле так и происходит [7].

П. Ферма пишет: «Наше доказательство основано на одном постулате: природа действует наиболее легкими и доступными путями. Мы полагаем, что именно так нужно выражать эту мысль, а не так, как это принято обычно говорить, что природа всегда действует по кратчайшим линиям.

Подобно тому, как Галилей, когда рассматривал движение тяжелых тел в природе, измерял отношение этого движения не столько расстоянием, сколько временем, мы также рассматриваем не кратчайшие расстояния или линии, а те, которые могут быть пройдены легче, удобнее и за более короткое время» [6: 7].

В доказательстве Ферма, говоря современным языком, содержится утверждение о том, что вариация времени по действительной траектории и по соседнему возможному пути равна нулю. Это условие хотя и необходимо, но не является достаточным для того, чтобы время было минимумом.

В рассмотренном Ферма простом, частном случае условие минимума и вариационное условие совпадают, но в более сложных случаях это не имеет места.

Впервые строгое обоснование принципа Ферма дал Х. Гюйгенс в «Трактате о свете» [8], где на основе своей «волновой» теории вывел, что коэффициент преломления на границе двух сред равен отношению скоростей света в этих средах.

Важен вопрос, о какой скорости идет речь в принципе Ферма – фазовой или групповой, это имеет значение, когда мы говорим о диспергирующей среде. В волновой оптике показано, что это групповая скорость. Отсюда возникает новая трактовка идеи Ферма: время, требуемое для группы волн, чтобы пройти между двумя точками, было бы минимумом.

Вариационный принцип для задач, не связанных с проблемами механики, впервые был отчетливо сформулирован в геометрической оптике применительно к теоретическому обоснованию законов отражения и преломления света. Это был принцип Ферма, или принцип наименьшего времени. Экстремальный принцип возник сначала в оптике, а потом уже в механике. Это объясняется тем, что в задачах геометрической оптики величина, которая должна быть минимальна – это время. Несмотря на всю сложность философского понимания этой категории, есть возможность относительно точного измерения и сравнения промежут-

ков времени [6]. Таким образом, рассматриваемый принцип является в определенном смысле обобщенной математической формой выражения законов геометрической оптики.

Э. Шрёдингер в своей Нобелевской лекции дает такую характеристику принципу Ферма: «Таким образом, принцип Ферма представляется просто тривиальной квинтэссенцией волновой теории». В волновой теории этот принцип находит свое обоснование: «только с точки зрения волновой теории принцип Ферма становится вполне понятным и перестает быть чудом» [9: 145].

В начале XX века в зарождающейся квантовой физике возникла проблема синтеза корпускулярно-волновых представлений о природе света и вещества. К тому времени в классической физике уже был разработан метод оптико-механической аналогии, которым и воспользовался Луи де Бройль. В своей гипотезе он руководствовался представлением о глубоком тождестве принципа наименьшего действия с принципом Ферма. Де Бройль понимал, что главной является задача получения на основе волновой теории такого выражения для групповой скорости, которое представляло бы скорость луча в корпускулярной теории. Де Бройль, пользуясь релятивистскими представлениями, показал эквивалентность принципа наименьшего действия и принципа Ферма. Введя четырехмерный волновой вектор и установив связь между ним и таким же вектором принципа наименьшего действия, он нашел связь четырех компонент и сформулировал гипотезу о том, что такое же отношение имеет место и для других компонент энергии-импульса.

Из этой гипотезы следует фундаментальный вывод: динамические возможные траектории точки тождественны с возможными лучами волны.

Принцип наименьшего действия и принцип Ферма представляют собой эквивалентные формулировки одного и того же закона. Каждая частица сопоставляется с неразрывно связанным с ней волновым процессом. Оптико-механическая аналогия приобрела новый смысл, особенно, когда эксперимент подтвердил гипотезу де Бройля. Дифракция частиц и стабильность атомов являются эмпирическим базисом квантовой механики.

Принцип Гамильтона позволяет установить способ описания немеханических систем с той же математической строгостью, которая характерна для классической механики. Этот закон гласит, что всякая система стремится к состоянию с минимумом потенциальной энергии. Описанное состояние, вообще говоря, будет равновесным, хотя и не всегда. Это важный эвристический метод физики.

Философское значение метода оптико-механической аналогии в становлении волновой механики состоит в том, что существуют общие черты в макро- и микромире. Для энергии и времени, для импульса и соответствующей координаты в квантовой механике имеют место перестановочные соотношения, а самими этими величинам соответствуют операторы, поэтому классический интеграл Гамильтона и принцип наименьшего действия имеют в ней несколько иной физический смысл, чем тот, который они имели в классической физике.

Это связано с тем, что фундаментальное отличие квантовой механики от классической состоит в том, что в квантовой теории определяется амплитуда вероятности, а не сама вероятность. В квантовой теории поля изменение смысла принципа связано с новыми условиями инвариантности, локальности.

В связи с проблемой геометризации естествознания представляет интерес следующее замечание Е.Н. Князевой: «В начале XX века естествознание, подхватывая общий дух теории относительности Эйнштейна, видело в качестве своего идеала геометризацию, т.е. стремилось представить время и силовые взаимодействия через пространство и изменение его свойств. У Эйнштейна время было пространственно. Это было как бы четвертое измерение пространства. А ныне, в начале XXI века – благодаря синергетике – в фокусе внимания оказывается время. Акцент падает на эволюционность и темпоральность, на эмерджентность и случайность возникновения упорядоченных структур в природных, человеческих, социальных системах. Теперь оказывается даже возможным через время представить пространство, ибо синергетика показывает, что в пространственной конфигурации некой сложной структуры-аттрактора сегодня представлены и могут быть „вычисланы“ исторические, эволюционные стадии ее развития, обнаружены фрагменты структур „разного возраста“, несущие элементы „памяти разной глубины“, что само пространство можно рассматривать как иерархию структур разного возраста, разной временной определенности. Таким образом, происходит поворот от опространствования времени к овременению пространства» [10: 32–33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геометризация как методологическая модальность стала трендом современной физики. Одним из первых шагов в истории науки на пути к актуализации этого тренда стал принцип Ферма, имплицитно исходящий из функциональной концепции времени. Несмотря на то, что содержание принципа Ферма выходило за рамки доминирующей в то время механической картины мира, он сыграл существенную роль в становлении вариационных принципов механики.

Вариационные принципы механики не только выражают в простой инвариантной форме уравнения движения и уравнения полей, но и заключают в себе синтез дискретного и континуального аспектов движения и являются выражением обобщенного принципа причинности в физике.

В механике и оптике эти принципы и связанные с ними идеи и математические методы сыграли важную роль в становлении теоретической физики и математического анализа. В этой области физико-математических наук гармонично сочетаются выводы абстрактных математических исследований с физическим содержанием. Вариационные принципы физики являются эффективным инструментом научного исследования и представляют собой специфическую форму выражения физических законов. Появившийся в рамках математического анализа и классической механики, этот метод широко применим за пределами классической физики, в частности квантовой механики.

Вышесказанное позволяет утверждать, что принцип Ферма, сформулированный в рамках геометрической оптики, по своему методологическому значению в физике имеет тотальный характер.

О.А. Никонов, В.С. Гнатюк,
Мурманский государственный технический университет

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никонов О.А. 2014. *Геометризация как методологический принцип развития естествознания: Монография*. М., изд-во Современного гуманитарного университета: 264 с.
2. Сазанов А.А. 2008. *Четырехмерная модель мира по Минковскому*. М., ЛКИ: 288 с.
3. Блаженный Августин. 2000. *О граде Божьем*. Минск, Харвест; М., АСТ: 1296 с.
4. Чудинов Э.М. 1974. *Теория относительности и философия*. М., Политиздат: 304 с.
5. Лагранж Ж. 1950. *Аналитическая механика. Том 1*. М. – Л., Государственное издательство технико-теоретической литературы: 594 с.
6. *Вариационные принципы механики*. Под ред. Л.С. Полака. 1959. М., Государственное издательство физико-математической литературы: 932 с.
7. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. 1965. *Фейнмановские лекции по физике. Т. 3. Излучение. Волны. Кванты*. М., Мир: 238 с.
8. Гюйгенс Х. 1989. Трактат о свете. В кн.: Голин Г.М., Филонович С.Р. *Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.)*. М., Высшая школа: 121–141.
9. Шрёдингер Э. 2001. Фундаментальная идея волновой механики. Нобелевская лекция, 12 декабря 1933 г. В кн.: Шрёдингер Э. *Лекции по физике*. Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»: 143–155.
10. Князева Е.Н. 2006. Проблема времени в синергетике: некоторые идеи С.П. Курдюмова. В кн.: *Синергетика. Труды конференции. Т. 8. «Самоорганизация и синергетика»*. М., МГУ: 32–33.

REFERENCES

1. Nikonov O.A. 2014. *Geometrization as a methodological principle for the development of science: Monograph*. [The geometrization as a methodological principle for the development of science: Monograph]. Moscow, Modern Humanities University: 264 p. (In Russian).
2. Sazanov A.A. 2008. *Chetyrehmernaya model' mira po Minkovskomu*. [Four-dimensional model of the world by Minkowsky]. Moscow, LKI: 288 p. (In Russian).
3. Augustine. 2000. *O grade Bozh'em*. [The city of God]. Minsk, Harvest; Moscow, AST: 1296 p. (In Russian).
4. Chudinov E.M. 1974. *Teoriya otnositel'nosti i filosofiya*. [The theory of relativity and philosophy]. M., Politizdat: 304 p. (In Russian).
5. Lagrange J. 1950. *Analiticheskaya mekhanika. Tom 1*. [Analytical mechanics. Vol. 1]. Moscow – Leningrad, State Publishing House of Technical and Theoretical Literature: 594 p. (In Russian).

6. *Variatsionnye printsipy mekhaniki*. [Variational principles of mechanics]. L.S. Polak (Ed.). 1959. Moscow, State Publishing House of Physico-Mathematical Literature: 932 p. (In Russian).
7. Feynman R., Leighton R., Sands M. 1965. *Feynmanovskie leksii po fizike. T. 3. Izluchenie. Volny. Kvanty*. [The Feynman lectures on physics. Vol. 3. Radiation. Wave. Quanta]. Moscow, Mir: 238 p. (In Russian).
8. Huygens C. 1989. [A treatise on light]. In: Golin G.M., Filonovich S.R. *Klassiki fizicheskoy nauki (s drevneyshikh vremen do nachala XX v.)*. [Classics of the physical science (from ancient times to the beginning of the 20th century)]. Moscow, Vysshaya Shkola: 121–141. (In Russian).
9. Schrödinger E. 2001. [The fundamental idea of wave mechanics. Nobel lecture, 12 December 1933]. In: Schrödinger E. *Leksii po fizike*. [Lectures on physics]. Izhevsk, Scientific and Publishing Center “Regular and chaotic dynamics”: 145 p. (In Russian).
10. Knyazeva E.N. 2006. [The problem of time in synergy: some ideas of S.P. Kurdyumov]. In: *Sinergetika. Trudy konferentsii. T. 8. “Sa-moorganizatsiya i sinergetika”*. [Synergy. Proceedings of the conference. Vol. 8. “Self-organization and synergy”]. Moscow, Moscow State University: 32–33. (In Russian).

Сдано в набор 16.06.2017. Подписано к печати 20.06.2017. Дата выхода в свет 30.06.2017.

Формат 60×88¹/₈

Цифровая печать. Усл. печ. л. 11,4. Тираж 200 экз. Зак. 1465. Цена свободная

Учредители: Российская академия наук, Южный научный центр РАН

ПИ № ФС 77-65020, дата регистрации: 10.03.2016

Отпечатано в ФГУП «Издательство «Наука» (Типография «Наука»), 121099, Москва, Шубинский пер., 6