

Уроки истории
Lessons from History

DOI: 10.31857/S020596060014190-1

**РЕВОЛЮЦИОННЫЕ 10–20-е гг.: ФИЗИКА ОТ КОПЕРНИКА
ДО СОВРЕМЕННОСТИ С ВЫСОТЫ ПТИЧЬЕГО ПОЛЕТА**

ВИЗГИН Владимир Павлович – *Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН; Россия, 125315, Москва, ул. Балтийская, д. 14; E-mail: vlvizgin@gmail.com*

© Вл. П. Визгин

В статье развитие физики от Н. Коперника до современности рассматривается как последовательность научных революций: коперниканской XVI в., революции XVII в., «французской революции в физике» на рубеже 1810–1820-х гг. и квантово-релятивистской революции первой трети XX в. Обращается внимание на то, что главные научные события в этих революциях приходится на 10–20-е гг. соответствующих веков. Отмечается двухфазная структура революций XVII и XIX вв. (мы считаем своего рода революцией создание классической физики). Первыми этапами этих революций были, соответственно, галилей-кеплеровская фаза революции XVII в. и «французская» фаза революции XIX в. Две другие революции были однофазными. Обсуждаются 10–20-е гг. в физике XVIII и XXI вв., которые едва ли можно квалифицировать как научные революции. Впрочем, по поводу современной ситуации есть несколько различных точек зрения, которые мы рассматриваем. Отмечается роль астрономии и математики в рассмотренных научных революциях в физике.

Ключевые слова: научные революции, коперниканская революция, научная революция XVII в., «французская революция в физике», квантово-релятивистская революция, однофазные и двухфазные революции, Стандартная модель (в физике элементарных частиц), роль астрономии и математики.

Статья поступила в редакцию 13 июля 2020 г.

THE REVOLUTIONARY TENS AND TWENTIES: A BIRD’S-EYE VIEW OF PHYSICS FROM COPERNICUS TO MODERN TIMES

VIZGIN Vladimir Pavlovich – S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences; Ul. Baltiyskaya, 14, Moscow, 125315, Russia; E-mail: vlvizgin@gmail.com

© V. P. Vizgin

Abstract: In this article, the development of physics from N. Copernicus to modern times is reviewed as a succession of scientific revolutions: the Copernican revolution of the 16th century, the 17th century revolution, “the French revolution in physics” on the cusp of the 1810s and 1820s, and the quantum-relativistic revolution in the first third of the 20th century. It is emphasized that the most important scientific events of these revolutions occurred in the tens and twenties of the respective centuries. The structure of the 17th and 19th century scientific revolutions (we regard the creation of classical physics as a revolution of a kind) is shown to comprise two stages. The first stages of these scientific revolutions were the Galileo – Kepler phase of the 17th century revolution and the “French” phase of the 19th century revolution. Two other revolutions were one-stage. The article discusses the 1710s – 1720s and 2010s – 2020s in physics that may hardly be regarded as scientific revolutions. However, there are several different viewpoints on the current situation that are reviewed in this article. The role of astronomy and mathematics in the reviewed scientific revolutions and in physics is also noted.

Keywords: scientific revolutions, Copernican revolution, scientific revolution of the 17th century, “French revolution in physics,” quantum-relativistic revolution, one-stage and two-stage revolutions, standard model (in physics of elementary particles), role of astronomy and mathematics.

For citation: Vizgin, V. P. (2021) *Revoliutsionnye 10–20-e gg.: fizika ot Kopernika do sovremennosti s vysoty ptich’ego poleta* [The Revolutionary Tens and Twenties: A Bird’s-Eye View of Physics from Copernicus to Modern Times], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, vol. 42, no. 1, pp. 46–70, DOI: 10.31857/S020596060014190-1.

Введение

Размышляя о возможных темах юбилейного характера, приуроченных к 2020–2021 гг., я решил, что две крупных темы такого рода заслуживают особого внимания: это 125-летие начала квантово-релятивистской революции, разгар которой пришелся на 1910–1920-е гг., и 200-летие «французской революции», связанной с возникновением выходящих за рамки механики таких основных разделов физики, как волновая оптика (О. Френель), электродинамика (А.-М. Ампер), термодинамика (С. Карно), теория теплопроводности (Ж.-Б. Фурье). Кстати говоря, последняя была одновременно поворотным моментом

в математизации физики на основе теории дифференциальных уравнений с частными производными. Замечу также, что именование этого события «французской революцией в физике» введено мною и до сих пор не является общепринятым¹. Этими двумя революциями я занимался достаточно основательно, особенно первой, и в отношении их привязки к 10–20-м гг. и их фундаментальности у меня особых сомнений нет. Но у историка науки «птичьего разряда» (а я думаю, что, подобно физикам и математикам, историки науки подразделяются, по Ф. Дайсону², на «лягушек» и «птиц») возникает естественное желание посмотреть, не распространяется ли эта революционность на другие века, прежде всего XVIII, XVII, XVI? Интересными и удачными примерами краткого рассмотрения развития физики «с высоты птичьего полета» являются работы Ф. Хунда и Л. Пайнсона³. О более ранних веках, по-видимому, говорить не приходится, поскольку экспериментально-теоретическая наука – это детище эпохи позднего Возрождения и Нового времени. При чуть более пристальном рассмотрении оказывается, что 10–20-е гг. и XVI, и особенно XVII в. тоже были в той или степени революционными. XVI в. – это Н. Коперник, XVII в. – это, бесспорно, мощный старт научной революции XVII в., связанный с именами Г. Галилея, И. Кеплера и Ф. Бэкона. Но вот с XVIII в., как будто, возникает проблема: ничего похожего на революционные события в 10–20-е гг. на этот раз не видно. Что это: исключение из «правила» (не бывает хорошего правила без исключения) или и тут есть некая скрытая революционность, которая может обнаружиться при более тщательном анализе? В дальнейшем мы бегло рассмотрим особенности «революционных 10–20-х» последовательно, от Коперника до XXI в. Что же касается современной ситуации, то нам предстоит понять, находимся ли мы уже в революционном процессе и вот-вот он должен начаться или и здесь нас ждет своего рода исключение?

¹ *Визгин В. П.* Математика в классической физике // Физика XIX – XX вв. в общенаучном и социокультурном контекстах: физика XIX века / Отв. ред. В. П. Визгин, Л. С. Полак. М.: Наука, 1995. С. 6–72. См. также: *Визгин В. П.* «Французская революция» в физике: «математическое рождение» классической физики и С. Карно // Исследования по истории физики и механики. 1995–1997. М.: Наука, 1999. С. 15–38; *Визгин В. П.* Французская революция в физике XIX века // Философия науки: учебник для магистратуры. 2-изд. / Ред. А. И. Липкин. М.: Юрайт, 2015. С. 47–50.

² *Дайсон Ф.* Птицы и лягушки в математике и физике // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 8. С. 859–870.

³ *Hund, F.* Geschichte der physikalischen Begriffe. Mannheim; Wien; Zürich: B. I. Wissenschaftsverlag, 1978. Teil 1: Die Entstehung des mechanischen Naturbildes. Teil 2: Die Wege zum heutigen Naturbild; *Pyenson, L. R.* History of Physics // Encyclopedia of Physics / R. G. Lerner, G. L. Trigg (eds.). London: Addison-Wesley Publ. Comp., 1981. P. 404–414.

XVI в.: Н. Коперник, начало коперниканской революции

Большинство историков и философов науки согласны в том, что начало современной науки было связано с так называемой научной революцией XVII в. ⁴ Интересно и важно признание одного из ведущих современных физиков и создателей стандартной модели в физике элементарных частиц, лауреата Нобелевской премии С. Вайнберга. Имея в виду именно эту революцию, он говорит:

Я убежден, что научная революция была настоящим прорывом в интеллектуальной истории человечества. Я сужу об это с точки зрения современного ученого [...] До научной революции наука была насыщена религией и тем, что мы сейчас называем философией; кроме того, все еще не был выработан математический аппарат. После XVII в. в физике и астрономии я чувствую себя как дома. Я узнаю многие черты науки моего времени: поиск объективных законов, выраженных математически, которые позволяют предсказывать широкий спектр явлений и подтверждены сравнением этих предсказаний с наблюдением и экспериментом ⁵.

И почти сразу дальше: «Независимо от того, была ли научная революция революцией или нет, но началась она с Коперника» ⁶. В книге В. С. Кирсанова анализ научной революции XVII в. также начинается с Коперника: «Истинная революция в астрономии началась с Николая Коперника» ⁷. Главный же труд Коперника «О вращении небесных сфер», в котором впервые обстоятельно и аргументированно была изложена гелиоцентрическая система мира, положившая начало сокрушению птолемеевской геоцентрической астрономии и аристотелевской концепции науки в целом, был опубликован в 1543 г.

Однако генезис гелиоцентрической концепции Коперника восходит к 1510–1520-м гг.! Оказывается, основные положения своей концепции Коперник изложил в рукописном сочинении «Малый комментарий относительно установленных им гипотез о небесных движениях», написанном «не позднее 1515 г., а вероятнее всего между 1505 и 1507 гг.» ⁸. Развитие этих положений и привело к великому трактату «О вращении...». Добавим, что в самом конце XV в., а именно в 1496 г., была выпущена книга И. Региомонтана и Г. Пурбаха «Сокращения Клавдия Птолемея»,

⁴ *Койре А.* От замкнутого мира к бесконечной Вселенной. М.: Логос, 2001; *Кирсанов В. С.* Научная революция XVII века. М.: Наука, 1987; *Вайнберг С.* Объясняя мир: истоки современной науки. М.: Альпина нон-фикшн, 2016.

⁵ *Вайнберг.* Объясняя мир... С. 174.

⁶ Там же. С. 175

⁷ *Кирсанов.* Научная революция XVII века... С. 81.

⁸ Там же. С. 84.

лучший учебник по птолемеевской астрономии, который когда-либо был написан, и именно по этой книге Коперник двадцать лет спустя (а, скорее, десять. — *В. В.*) познавал птолемеевскую мудрость ⁹.

Кстати говоря, первое печатное издание «Альмагеста» Птолемея на латинском языке увидело свет в эти годы, а именно в 1515 г. Не стоит забывать, что это были годы великих географических открытий и мореплаватели от Колумба до Магеллана пользовались в целях навигации трудами того же Региомонтана по астрономии, к которым были приложены таблицы долгот Солнца, Луны и планет, а также широт Луны.

Еще два важных момента, связанных именно с «Малым комментарием», хотелось бы подчеркнуть. Во-первых, хотя Коперник и не опубликовал его, он был достаточно хорошо известен, поскольку автор рассылал эту рукопись астрономам и другим заинтересованным лицам. А во-вторых, именно в «Комментарии» было показано явное эстетическое превосходство гелиоцентризма над геоцентризмом. Это обстоятельство особенно ясно и убедительно отмечает Вайнберг в своей недавно опубликованной книге «Объясняя мир»:

Схема Коперника является классическим примером того, как теория может быть выбрана по эстетическим критериям, без всякого экспериментального доказательства, которое могло бы дать ей преимущество перед другими теориями. В случае с теорией Коперника, изложенной в «Комментарии», достоинство ее было в том, что очень многие характерные особенности теории Птолемея объяснялись одним махом с помощью вращения Земли и ее обращения вокруг Солнца... ¹⁰

И далее:

Эта работа Коперника (т. е. «Малый комментарий». — *В. В.*) является иллюстрацией того, что неоднократно повторялось в истории физики, когда простая и красивая теория, которая достаточно хорошо согласуется с наблюдениями, оказывается ближе к истине, чем теория, которая лучше нее согласуется с наблюдениями, но ужасно сложна ¹¹.

В 1543 г. выходит в свет главный труд Коперника «О вращении небесных сфер», насыщенный важными вычислениями и техническими деталями. Почему с такой задержкой, ведь фактически он был закончен в 1520-е гг., не позже 1530 г.? Дело было в том, что система Коперника задолго до публикации этого труда «была встречена протестами со стороны религиозных деятелей» ¹² и что и сам «Коперник вполне сознавал революционное значение своего труда» и именно

⁹ Там же. С. 75.

¹⁰ *Вайнберг. Объясняя мир...* С. 179.

¹¹ Там же. С.180.

¹² Там же С. 184.

поэтому [...] столь долго не решался обнародовать свои воззрения и сделал это лишь на пороге смерти, уступив настойчивым просьбам своих друзей, в первую очередь увещаниям Ретика и вармийского епископа Тидемана Гизе¹³.

Книга содержала, — резюмировал коперниковскую стадию научной революции XVII в., а точнее XVI–XVII вв., Кирсанов, — *развернутое изложение системы мироздания, основанное на принципах, сформулированных еще в «Малом комментарии»* (курсив мой. — В. В.). Значение этого события состояло в том, что отныне научное мировоззрение обрело твердую и плодотворную почву, на которой впоследствии смогло возникнуть все здание современной науки¹⁴.

XVII в., галилей-кеплеровская стадия научной революции

Поскольку два главных сочинения Г. Галилея — «Диалог о двух системах мира» и «Беседы о двух новых науках» — были опубликованы в 1630-х гг. (первый в 1632 г., а второй в 1638 г.) и к тому же в 1630–1640-х гг. появились важные в этой революции труды Р. Декарта, то следующую после коперниканской стадию обсуждаемой революции чаще всего было принято относить, скорее, к 1630-м гг. Однако более детальный анализ показывает, что основные революционные достижения в астрономии и механике, принадлежащие в первую очередь Галилею и Кеплеру, в большей степени относятся к более ранним, а именно к 1600–1620-м гг.¹⁵ Вот краткая хронология этих достижений наших героев в эти годы:

1592–1610: В эти годы (падуанский период) Галилей

приобретает известность прежде всего своими изобретениями; он составляет для своих учеников наставления по космографии, по механике, по фортификации [...] Не будет преувеличением сказать, что он представлял передовую инженерную мысль своего времени¹⁶.

1602–1609: Галилей устанавливает, что тела в пустоте падают с постоянным ускорением, не зависящим от их природы, а также что тела, брошенные под углом к горизонту, движутся по параболической траектории.

¹³ Кирсанов. Научная революция XVII века... С. 87.

¹⁴ Там же.

¹⁵ Кирсанов. Научная революция XVII века...; Вайнберг. Объясняя мир...; История механики с древнейших времен до конца XVIII в. / Ред. А. Т. Григорьян. И. Б. Погребысский. М.: Наука, 1971; Дорфман Я. Г. Всемирная история физики с древнейших времен до конца XVIII века. М.: Наука, 1974; Горелик Г. Е. Кто изобрел современную физику? От маятника Галилея до квантовой гравитации. М.: АСТ. 2013.

¹⁶ История механики с древнейших времен... С. 89–90.

1609: «Новая астрономия...» Кеплера — развитие системы Коперника на основе первого и второго законов Кеплера; революционное значение имела замена круговых орбит Коперника эллипсами.

1609–1610: «Революция в астрономии началась в 1609 г., когда Галилей впервые услышал о новом голландском приборе, который назывался “зрительная труба”»¹⁷. С помощью построенного им телескопа он сделал «шесть астрономических открытий исторической важности», четыре из которых были описаны в его сочинении «Звездный вестник», вышедшем в Венеции в марте 1610 г. Особенно важным было открытие спутников Юпитера, ставшее надежным подтверждением теории Коперника, как и обнаруженные им в сентябре 1610 г. фазы Венеры, абсолютно необъяснимые с позиций теории Птолемея.

1612: «Рассуждение о телах, пребывающих в воде» Галилея; помимо вклада в гидростатику это сочинение содержало результаты измерения периодов обращения открытых им спутников Юпитера, почти совпадающие с современными значениями.

1613: «Письма о солнечных пятнах» Галилея, в которых он впервые открыто выступил в защиту теории Коперника.

1616: Вызов Галилея в инквизицию в связи с его защитой учения Коперника и предание анафеме трактата Коперника «О вращении небесных сфер».

1619: «Гармония мира» Кеплера, в которой был сформулирован и третий закон Кеплера.

1620: «Новый органон» Ф. Бэкона, сочинение,

в котором он выступает против догматического наследия Аристотеля и говорит, что в основание науки должен быть положен опыт, который, в свою очередь, служит критерием ее истинности¹⁸.

1624: «Послание к Инголи» Галилея — первая попытка обоснования системы Коперника на основе механики; формулировка и объяснение галилеевского принципа относительности.

Этой комментированной хронологии достаточно, чтобы уверенно утверждать, что 10–20-е гг. XVII в. были действительно революционными. При этом в центре внимания продолжало оставаться противостояние Коперника с Птолемеем и Аристотелем. Система Коперника стимулировала и построение новой механики, которая, в свою очередь, позволяла глубже обосновать саму эту систему. С другой стороны, астрономическая теория Коперника уточнялась и совершенствовалась. Законы Кеплера, как и принципы механики Галилея, во второй половине XVII в. привели И. Ньютона к завершению основ классической механики и созданию небесной механики, позволившей дать поразительное по точности описание движения планет и других небесных тел Солнечной системы, фактически мироздания Коперника. «Математическими началами натуральной философии» Ньютона

¹⁷ Вайнберг. Объясняя мир... С. 204.

¹⁸ Кирсанов. Научная революция XVII века... С. 56.

(1687) завершается и великая научная революция XVII в. Но не будем забывать, что у ее истоков находятся два революционных периода — 10–20-е гг. XVI и XVII вв., — насыщенные гениальными прозрениями революционеров, их удивительной смелостью, острыми социальными конфликтами, сомнениями и ошибками.

XVIII век — исключение?

Если бы «Начала» Ньютона увидели свет хотя бы на 20–25 лет позже, то и 10–20-е гг. XVIII в. было бы правомерно назвать революционными и наше наблюдение не знало бы исключений. Но этого не случилось. А что же происходило в это время? Чтобы это понять, надо снова обратиться к хронологии. Но наука выросла, ученых стало больше, поэтому даже самая беглая хронология 1710–1720-х (1730-х) гг. более насыщена событиями, чем революционные 10–20-е гг. двух предыдущих столетий.

Итак, хронология развития физики первых десятилетий XVIII в.:

1703: «Оптика» Ньютона, Ньютон — президент Лондонского королевского общества (ЛКО).

1706–1709: Электростатические исследования члена ЛКО Ф. Гауксби.

1713: Второе издание «Начал» Ньютона, шесть экземпляров Ньютон посылает Петру I.

1715–1716: Г. В. Лейбниц против Ньютона и ньютонианства. Введение Лейбницем понятия действия и возможное предвосхищение принципа наименьшего действия, впервые явно введенного П. Л. Мопертюи в 1740 г. Встреча Лейбница с Петром I и лейбницевский проект Петербургской академии наук. Кончина Лейбница (1716).

1716: «Форономия» Я. Германа — развитие классической механики Ньютона. С 1725 г. Герман в Петербургской академии наук.

1717: Принцип возможных перемещений И. Бернулли.

1719: Второе издание «Оптики» Ньютона (дополнено проблемами эфира, развитие корпускулярной оптики).

1722: Х. Вольф — введение понятия «теплород».

1724: И. Бернулли — принцип виртуальных скоростей, использование принципа живых сил в работах 1720-х гг.

1724–1725: Создание Петербургской академии наук. С 1725 г. в ней начали работать 16 иностранных ученых, среди них такие крупные фигуры, как Я. Герман, Д. и Н. Бернулли, Г. Б. Бюльфингер, Ж. Делиль, Х. Гольдбах и др. Л. Эйлер появится там в 1727 г. и будет работать до начала 1740-х гг.

1724–1742: Работы Д. Фаренгейта, Р. Реомюра и А. Цельсия по термометрии.

1727: Кончина Ньютона. Механика и физика Ньютона продолжают завоевывать континентальную Европу в борьбе с картезианством.

1727–1741: Эйлер в Петербургской академии наук; выдающиеся труды по классической механике и математике, изданная в 1736 г.

«Механика» Эйлера — наиболее важный вклад в механику после Ньютона и важный шаг на пути создания «аналитической механики».

1727–1729: С. Грей, исследование электрических явлений, открытие электропроводности.

1730: И. Бернулли разрабатывает картезианскую вихревую теорию движения планет, работа была удостоена премии Парижской академии наук (свидетельство продолжающейся борьбы между ньютонианством и картезианством в континентальной Европе).

1731: Дискуссия об истинной мере силы и движения (mv или mv^2 в квадрате, среди участников Герман и И. Бернулли, опубликовавшие работы на эту тему в «Комментариях» Петербургской академии наук).

1732: П. Л. Мопертюи выступает в защиту ньютонианства, особенно закона всемирного тяготения в «Речи о фигуре звезд». Несколько позже (в 1750-е гг.) он писал об этом:

Потребовалось более полувека для того, чтобы приучить континентальные академии к притяжению. Оно оказывалось запертым на своем острове; как только оно пересекло море, оно казалось репродукцией отвергнутого чудовища...¹⁹

В 1744 г. Мопертюи выдвинул принцип наименьшего действия, получивший развитие в работах Эйлера и Ж. Л. Лагранжа и составивший в дальнейшем одно из основных направлений развития аналитической механики.

В последующие 1730-е и 1740-е гг. тенденции развития физико-математических наук, четко обозначившиеся в 1710–1720-е гг., продолжают укрепляться. Мы имеем в виду нарастающее торжество ньютонианства и формирование основ аналитической механики (1734 г. — «Набросок новой физики неба» И. Бернулли, 1736 г. — «Механика» Эйлера, 1738 г. — «Элементарное изложение учения Ньютона» Ф. М. Вольтера и «Гидродинамика» Д. Бернулли, 1743 г. — «Трактат о динамике» Ж. Л. Даламбера, 1744–1746 гг. — работы Мопертюи и Эйлера по принципу наименьшего действия и т. д.), появление все большего числа работ по электростатике и электрическим явлениям вообще (1733–1737 гг. — исследования Ш. Ф. Дюфе о двух видах электричества и первые идеи об электрической природе молнии, 1745–1747 гг. — изобретение лейденской банки — конденсатора, разного рода электрометров и т. д. (П. Мушенбрёк, У. Ватсон, Г. В. Рихман (в Петербурге) и др.) и продолжающееся расширение академических исследований в России (в том числе на основе Физического кабинета Академии наук и работ Эйлера, Г. В. Крафта, Рихмана и вернувшегося в 1741 г. из-за границы М. В. Ломоносова).

Таким образом, 10–20-е гг. XVIII в. не отмечены масштабными революционными сдвигами. Скорее, происходит восприятие, усвоение и развитие ньютоновской части революции XVII в., которое особенно остро протекает в континентальной Европе (в связи с противостоянием

¹⁹ Цит. по: Дорфман. Всемирная история физики... С. 253.

ньютонианства и картезианства). Одним из важных направлений этого развития были первые шаги на пути к созданию аналитической механики (Лейбниц, Герман, И. Бернулли, Эйлер, Д. Бернулли, Мопертюи), достигшие полной зрелости в трудах Лагранжа и существенно позже — У. Р. Гамильтона. Обращают на себя внимание и экстенсивно растущие исследования электричества. Все-таки с определенной натяжкой можно говорить о начале своеобразной научной революции в России, которая носила институциональный характер. Мы имеем в виду создание Петербургской академии наук, благодаря членам которой российский вклад в мировую науку XVIII в. оказался вполне заметным ²⁰.

ХІХ в. — «французская революция в физике»

В XIX в. дело обстоит и проще, и сложнее. Проще потому, что в 1995–1999 гг. я сам, изучая взаимодействие физики и математики в XIX в., обнаружил поразивший меня феномен, который я сначала назвал «французским взлетом» классической физики, а чуть позже решил назвать «французской революцией в физике» ²¹. Сложнее потому, что в действительности речь шла только о первой фазе в возникновении классической физики, сосредоточенной в окрестности 1820 г. Второй же фазой, связанной с созданием максвелловской электродинамики, термодинамики У. Томсона и Р. Клаузиуса, а также кинетико-статистической теории теплоты Дж. К. Максвелла и Л. Больцмана и оформившейся в 1860–1870-е гг., заниматься обстоятельно не приходилось. И для правомерности сопоставления научных революций XVII и XIX вв. требуются дополнительные исследования. Тем более что среди историков физики сложилась устойчивая традиция считать процесс возникновения классической физики после Ньютона процессом, скорее, эволюционным, на смену которому только в конце 1890-х гг. приходит ошеломляющая квантово-релятивистская революция, в полной мере развернувшаяся в 10–20-е гг. XX в.

Вернемся к «французской революции» в физике. Прежде всего кратко обсудим, почему создание основ классической физики как учения о свете, электричестве и магнетизме, а также о теплоте сфокусировалось на весьма коротком отрезке времени и притом главным образом во Франции. После этого мы покажем, что общей доминантной чертой главных сдвигов в каждой из упомянутых областей физики была их аналитическая математизация, т. е. создание немеханических теорий, основанных на математическом анализе. Анализируя хронологию событий в физике в 10–20-е гг., мы обнаруживаем поразительную

²⁰ Дмитриев И. С., Кузнецова Н. И. Академия благих надежд. М.: НЛО, 2019; Кузнецова Н. И. Социокультурный эксперимент Петра I и формирование науки в России // Вопросы философии. 1989. № 3. С. 49–60.

²¹ Визгин. Математика в классической физике... С. 6–72; Визгин. «Французская революция» в физике... С. 15–38.

вещь: на рубеже 1820-х гг. в основных областях физики происходит своего рода «фазовый переход» от накопления эмпирических фактов и попыток их истолкования на основе механистических гипотез (в духе «молекулярной механики» П. С. Лапласа) к построению феноменологических, не связанных с механикой теорий, основанных на математико-аналитическом истолковании эмпирических соотношений (см. об этом также работы И. Граттана-Гиннеса²²). И здесь мы наблюдаем не только временную фокусировку главных событий (1820 г. плюс-минус три-четыре года), но и «пространственную» их локализацию: они почти все происходят во Франции. Вот очень беглая хронология:

1819: О. Френель «Мемуар о дифракции света», в котором была развита волновая оптика, эти исследования были начаты им в 1815 г.

1820: После обнаружения Х. Эрстедом магнитного действия электрического тока Ампер открывает элементарный закон взаимодействия электрических токов (закон Ампера) и затем разрабатывает с помощью математического анализа методы решения задач «электродинамики». Законченная им в 1823 г. «Теория электродинамических явлений» была опубликована в 1826 г. Максвелл впоследствии называл Ампера «Ньютоном электричества».

1822: «Аналитическая теория теплоты» Фурье, знаменитый трактат, стоящий у истоков математической физики вообще и содержащий теорию теплопроводности на основе соответствующего дифференциального уравнения параболического типа с частными производными.

1824: «Размышления о движущей силе огня...» Карно, труд, положивший начало термодинамике.

Конечно, названные работы не исчерпывали теории соответствующих областей физики, но, тем не менее, так или иначе лежали в их основе. Кроме того, их исключительно французское происхождение — это определенная идеализация. Френелю в определенной степени предшествовал англичанин Т. Юнг, немец Г. С. Ом в 1826 г. открыл основной закон электрических цепей, носящий его имя и т. д. Отметим еще два обстоятельства. Во-первых, названные прорывные труды во многом противостояли доминирующей в конце XVIII — начале XIX в. исследовательской программе Лапласа, механистической по своему существу (концепция «молекулярной механики») и опирающейся в оптике на корпускулярные представления. Впрочем, Лаплас и его приверженцы (С. Д. Пуассон, Ж.-Б. Био, Ж. Гей-Люссак и др.) тоже высоко ценили и использовали математический анализ. Во-вторых, этими достижениями французская физика в значительной мере была обязана возникшей на волне Великой французской революции знаменитой Парижской политехнической школе (1794), с которой так или иначе были связаны и «лапласианцы», и «антилапласианцы» (Френель, Ампер, Фурье и Карно). Именно в этот период

²² *Grattan-Guinness, I. Convolutions in French Mathematics, 1800–1840.* Basel; Boston; Berlin: Birkhäuser, 1990. Vol. 1–3.

формируется концепция, что классическая физика с математической точки зрения — это теория дифференциальных уравнений с частными производными (в отличие от механики, которая в математическом плане сводится к теории обыкновенных дифференциальных уравнений). «Дифференциально-аналитическая» суть классической физики, согласно А. Пуанкаре, коренится в том, что она по своей природе локальна и поэтому «знание элементарного факта позволяет [...] сформулировать задачу в виде дифференциального уравнения»²³. И в заключение приведем высказывание русского творца неевклидовой геометрии Н. И. Лобачевского, который в 1820-е гг. возглавлял кафедру физики в Казанском университете и прекрасно владел новейшими физическими теориями:

Хотя физика повсюду заимствует пособие математики и одолжена сей науке своим существованием [...] главнейшее в ней применение чистой математики и механики до сих пор сделано в той части, где говорится о телах без тяжести, каковы вещество теплоты, света, электричества и магнита.

И далее:

Теория распространения теплоты в телах дана г-м Фурье; учение о свете г-м Френелем; в сочинениях Лапласа и Пуассона находим достаточное учение о движении звука и волн; теория электрических и электродинамических явлений в записках Пуассона и Ампера, изданных от Французской академии²⁴.

XX в. — квантово-релятивистская революция

1910–1920-е гг. — это время уже развернувшейся в полной мере научной революции, начало которой можно довольно точно датировать открытием в декабре 1895 г. рентгеновских лучей. В отношении этой революции, как и в отношении революции XVII в., среди историков и философов науки принципиальных разногласий нет²⁵. Главное

²³ Цит. по: *Визгин*. Математика в классической физике... С. 40.

²⁴ Цит. по: Там же. С. 15.

²⁵ *Дорфман*. Всемирная история физики...; *Pais, A.* Inward Bound. Of Matter and Forces in the Physical World. Oxford: Clarendon Press; New York: Oxford University Press, 1986; *Кобзарев И. Ю., Манин Ю. И.* Элементарные частицы. Диалоги физика и математика. М.: ФАЗИС, 1997; *Визгин В. П.* Математика в квантово-релятивистской революции // Физика XIX–XX вв. в общенаучном и социокультурном контекстах. Физика XX века и ее связь с другими разделами естествознания / Отв. ред. Г. М. Идлис. М.: Янус-К, 1997. С. 7–30; *Степин В. С.* Теоретическое знание. М.: Прогресс-Традиция, 2000; Дискуссия о проблемах научных революций в точном естествознании // Историко-астрономические исследования. М.: Физматлит, 2003. Вып. 28. С. 85–154; *Визгин В. П.* О проблеме научных революций и их типологии // Человек. Наука. Цивилизация. К семидесятилетию академика В. С. Степина / Отв. ред. и сост. И. Т. Касавин. М.: Канон+, 2004. С. 179–195; *Ильин В. А., Кудрявцев В. В.* История и методология физики: учебник для магистров. 2-е изд. М.: Юрайт, 2014.

содержание этой революции, несмотря на ее сложность, — это переход от классической механики и физики с присущими им классическими представлениями о пространстве, времени, причинности, взаимодействии и т. п. к неклассической физике, с лежащими в ее основе специальной и общей теориями относительности, а также квантовой механикой и квантовой электродинамикой, в которых зафиксированы существенно новые представления о названных выше фундаментальных понятиях. Бегло коснемся хронологии событий именно 10–20-х гг., добавив лишь, что в 1900 г. М. Планк предложил квантовую теорию излучения, а в 1905 г. А. Эйнштейн создал специальную теорию относительности (СТО) и постулировал существование световых квантов. В 1907 г. он же выдвинул принцип эквивалентности, а Г. Минковский ввел четырехмерное пространство — время, две ключевые концепции, позволившие Эйнштейну создать общую теорию относительности (ОТО).

1911: Ядерная планетарная модель атома Э. Резерфорда.

1911: Первый Сольвеевский конгресс в Брюсселе, посвященный квантовой теории, на котором были четко зафиксированы неспособность классической физики объяснить ряд явлений микромира и первые успехи квантовой теории в этом направлении.

1913: Квантовая теория атома водорода Н. Бора.

1915: Создание ОТО Эйнштейном (общековариантные уравнения гравитационного поля получены одновременно Эйнштейном и Д. Гильбертом).

1915–1916: Теория строения атома Бора — Зоммерфельда.

1917: Эйнштейн — основы релятивистской космологии. Модель статической замкнутой Вселенной, введение космологической постоянной.

1918: Теорема Э. Нётер о связи законов сохранения с принципами симметрии.

1921: Геометрическая полевая программа. Единые теории гравитации и электромагнетизма Г. Вейля, Т. Калуцы, А. С. Эддингтона. Эйнштейн становится лидером этой программы.

1922–1924: Теория нестационарной (расширяющейся) Вселенной А. А. Фридмана.

1923–1924: Концепция корпускулярно-волнового дуализма вещества Л. де Бройля.

1925: В. Гейзенберг — квантовая механика, М. Борн и П. Иордан — матричная структура квантовой механики.

1926: Э. Шрёдингер — волновой вариант квантовой механики (уравнение Шрёдингера).

1926: М. Борн — статистическая интерпретация волновой функции и квантовой механики.

1927: Принцип неопределенности Гейзенберга и принцип дополнительности Бора. Вместе со статистической трактовкой Борна они составляют основу физической интерпретации квантовой механики.

1927: К. Дэвиссон, Л. Джермер, Дж. П. Томсон — дифракция электронов.

1927–1929: Ж. Леметр разрабатывает теорию расширяющейся Вселенной, а Э. Хаббл подтверждает это расширение наблюдениями.

1928–1929: П. Дирак, Гейзенберг, В. Паули — основы квантовой электродинамики и квантовой теории поля (уравнение Дирака).

В этой впечатляющей хронологии опущен целый ряд важных экспериментальных достижений, которые так или иначе сопровождали развитие квантово-релятивистских теорий. Это эксперименты Резерфорда, Х. Гейгера и Э. Марсдена по рассеянию альфа-частиц в тонких металлических пленках и Р. Милликена по измерению заряда электрона, опыты Дж. Франка и Г. Герца, подтвердившие квантовые постулаты Бора, опыты О. Штерна и В. Герлаха, приведшие к введению спина электрона, открытие рассеяния фотонов на свободных электронах (эффект А. Комптона), гравитационное отклонение света вблизи Солнца (Эддингтон и др.) и т. д.

Если считать, что научная революция (по Т. Куну) — это переход от парадигмы классической физики к парадигме неклассики, то динамику событий, содержащуюся в хронологии, описать в этих терминах очень трудно, если вообще возможно. Этот переход поддается определенному истолкованию в терминах глобальных исследовательских программ (т. е., скорее, по И. Лакатосу, чем по Куну)²⁶. Но при этом приходится учитывать возникшие в этот период электромагнитно-полевую программу, на смену которой пришли релятивистская программа, основанная на СТО, и квантовая программа. При попытке построить релятивистскую теорию тяготения пришлось ввести расширенную релятивистскую программу, выходящую за рамки СТО и приведшую сначала к ОТО, а затем — даже к геометрической полевой программе, которая в определенном смысле оказалась тупиковой. Квантовая программа бурно прогрессировала и привела к квантовой механике, которую удалось развить за счет ее соединения с релятивистской программой: в итоге появилась квантово-релятивистская программа. Эта программа стала базовой в физике элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий. Дополнив ее концепцией локально-калибровочной симметрии, физики пришли в начале 1970-х гг. к так называемой Стандартной модели, являющейся общепринятой современной теорией элементарных частиц²⁷.

Главными «революционерами» 10–20-х гг. в XVI в. был Коперник, в XVII в. — Галилей и Кеплер, в XIX в. — Френель, Ампер, Фурье и Карно, в XX же веке их число заметно возрастает: помимо бесспорных корифеев Эйнштейна и Бора, к ним надо добавить, как минимум,

²⁶ *Визгин*. Математика в квантово-релятивистской революции... С. 7–30; *Визгин*. О проблеме научных революций...

²⁷ *Pais*. *Inward Bound...*; *Кобзарев, Манин*. Элементарные частицы...; *Sao, T. Yu*. *Conceptual Development of the 20th Century Field Theories*. Cambridge: Clarendon University Press, 1997.

Э. Резерфорда и «квантовых теоретиков» де Бройля, Гейзенберга, Шрёдингера, Паули, Борна, Дирака (а может быть, еще и Х. А. Лоренца, Планка, Минковского, Эддингтона и др.).

XXI в. — революционные события уже начались или они вот-вот начнутся?

В попытке ответить на этот вопрос историк науки рискует значительно больше, чем физики, работающие на переднем крае науки. Тем не менее мы попробуем это сделать. Во-первых, мы соберем высказывания некоторых из лидеров физики конца XX — начала XXI в. о современной ситуации. Во-вторых, интересно сопоставить ожидания, зафиксированные в текстах физиков 1990–2000-х гг., с тем, что произошло через 10–30 лет, т. е. в последние пять-десять лет. Здесь хотя бы бегло следует выявить и назвать главные достижения последнего времени и вместе с тем основные нерешенные проблемы фундаментального характера.

Наиболее значительные достижения последних десятилетий в фундаментальной физике, к которой мы относим (по В. Л. Гинзбургу²⁸) микрофизику (прежде всего физику элементарных частиц) и мегафизику (астрофизику и особенно космологию), не слишком заметны в первой области и более внушительны во второй. Вот примерная хронология этих достижений.

1998–1999: Открытие ускоренного расширения Вселенной, открытие антигравитирующей «темной энергии», ответственной за это расширение.

1998–2002: Открытие нейтринных осцилляций, выходящих за пределы Стандартной модели и приведших к определению масс различных нейтрино.

2003: Измерения анизотропии реликтового излучения (миссией *WMAP*) надежно подтвердили возникновение начальных неоднородностей во Вселенной из начальных квантовых флуктуаций (В. Ф. Муханов и Г. В. Чибисов).

2012: Открытие бозона Хиггса.

2013: Уточнение данных по анизотропии реликтового излучения (миссия *Planck*), подтверждение евклидовости Вселенной и квантово-флуктуационной концепции формирования неоднородностей Вселенной.

2016: Открытие гравитационных волн, возникающих при слиянии черных дыр или черных дыр с нейтронными звездами (коллаборация *LIGO*).

²⁸ Гинзбург В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными? // Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике: статьи и выступления. 3-е изд. М.: Бюро Квантум, 1995. С. 5–158; Гинзбург В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века? // Гинзбург В. Л. О науке, о себе и о других: статьи и выступления. 3-е изд. М.: Физматлит, 2003. С. 11–74.

2018–2020: Экспериментальные исследования по поиску четвертого, так называемого стерильного нейтрино сравнительно большой массы, которое могло бы претендовать на роль темной материи (в частности В. Н. Гаврин в ИИИ РАН).

2020: М. Башканов и Д. П. Уоттс — гипотеза использования дибарионного шестикваркового бозона (гексакварка *d-star*) в качестве частиц темной материи ²⁹.

По авторитетному мнению Вайнберга,

прогресс в физике частиц замедлился после создания в 1960–1970-х гг. Стандартной модели элементарных частиц, которая обобщала все имеющиеся на тот момент данные об их поведении. Единственное открытие, сделанное за последние годы в этой области, которое выходит за рамки Стандартной модели, — определение мизерных масс различных типов нейтрино... ³⁰

Если это так, то революции в этой области явно не случилось. Гораздо больше оснований говорить о локально-калибровочной революции 1960–1970-х гг., завершившейся созданием Стандартной модели. Кстати говоря, открытие бозона Хиггса в 2012 г. стало еще одним блестящим экспериментальным подтверждением Стандартной модели. Итак, современная фундаментальная физика стоит на трех китах: квантовая механика, общая теория относительности (ОТО) и Стандартная модель частиц (СМ). Первым двум китам примерно по 100 лет, а СМ, впрочем, сильно связанной с квантовой теорией поля (и значит, с квантовой механикой), — уже полвека.

Успех Стандартной модели, — отмечает тот же Вайнберг, — очевидно, не означает конца истории. Во-первых, значения масс кварков и лептонов в этой теории получаются из экспериментов, а не рассчитываются из первых принципов [...]

Кроме того, некоторые ужасно интересные вещи не входят в Стандартную модель, например гравитация и темная материя... ³¹

Тут следовало бы добавить еще «одну интересную вещь» — темную энергию, которой также нет места в СМ. Эта давняя выделенность гравитационного взаимодействия, которое по-прежнему описывается классической ОТО, не поддающейся квантованию, и появление «темных феноменов», связанных с релятивистской космологией и находящихся за пределами СМ, особенно отчетливо подчеркивает неполноту Стандартной модели.

Из приведенной выше хронологии видно, что наиболее впечатляющие открытия последних десятилетий были сделаны в космологии. По Вайнбергу, «сегодня мы живем в золотой век космологии» ³², и многие имен-

²⁹ *Bashkanov, M., Watts, D. P. A New Possibility for Light-Quark Dark Matter // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. 2020. Vol. 47. No. 3. P. 1–10.*

³⁰ *Вайнберг С. Все еще неизвестная Вселенная. Мысли о физике, искусстве и кризисе науки. М.: Альпина нон-фикшн, 2020. С. 26–27.*

³¹ Там же. С. 216.

³² Там же. С. 27.

но от нее ожидают революционных воздействий на физику элементарных частиц и фундаментальную физику в целом. Отмечая «относительный застой» в развитии физики частиц, С. В. Троицкий писал в своем обзоре «Нерешенные проблемы физики элементарных частиц»:

Тем не менее есть все основания предполагать, что физика частиц в ближайшие годы вновь станет бурно развивающейся дисциплиной. С одной стороны, накопилось определенное количество экспериментальных результатов (в первую очередь связанных с космологией и астрофизикой элементарных частиц, но также и лабораторных), указывающих на неполноту Стандартной модели³³.

Правда, в 2012 г. были еще особые ожидания, связанные с пуском Большого адронного коллайдера, которые вскоре оправдались, но в своего рода консервативном варианте: через полгода после обзора Троицкого на БАКе был открыт бозон Хиггса, блестяще подтвердивший СМ. В. А. Рубаков вскоре после открытия писал по этому поводу:

Несмотря на все усилия, до сих пор никаких экспериментальных указаний на «новую физику» получено не было. Это, вообще-то, уже начинает внушать тревогу: а правильно ли мы все понимаем?

Все напряженно ждут революции, «новой физики», радикального преобразования СМ, а всего этого не происходит.

Вполне возможно, однако, — продолжал тогда Рубаков, — что мы еще не добрались до «новой физики» по энергии и по количеству набранной статистики и что именно с ней будут связаны новые, революционные открытия. Основные надежды здесь возлагаются опять-таки на Большой адронный коллайдер, который через полтора года начнет работать на полную энергию 13–14 ТэВ и быстро набирать данные³⁴.

Но и эти надежды в общем пока не оправдались, несмотря на отдельные интересные результаты и интенсивные исследования.³⁵ И хотя в самой релятивистской астрофизике и космологии последние десятилетия были действительно золотыми³⁶, пока все эти «ужасно интерес-

³³ Троицкий С. В. Нерешенные проблемы физики элементарных частиц // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 1. С. 77.

³⁴ Рубаков В. А. К открытию на Большом адронном коллайдере новой частицы со свойствами бозона Хиггса // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 10. С. 1025.

³⁵ Дремин И. М. Некоторые новые открытия на коллайдерах // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 4. С. 437–445; Хайнман Б., Нир Й. Программа изучения бозона Хиггса и открытые вопросы в физике частиц и космологии // Успехи физических наук. 2019. Т. 189. № 9. С. 985–996.

³⁶ См. приведенную выше хронологию, а также: Верходанов О. В. Космологические результаты космической миссии «Планк». Сравнение с результатами WMAP и ВИСЕР-2 // Успехи физических наук. 2016. Т. 186. № 1. С. 3–46; Пустовойт В. И. О непосредственном обнаружении гравитационных волн // Успехи физических наук. 2016. Т. 186. № 10. С. 1133–1152; Долгов А. Д. Массивные и сверхмассивные черные дыры в современной и ранней Вселенной и проблемы космологии и астрофизики // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 2. С. 121–142; Муханов В. Ф. Квантовая Вселенная // Успехи физических наук. 2016. Т. 186. № 10. С. 1117–1125.

ные» вещи к революционной ситуации в физике элементарных частиц и фундаментальной физике в целом не привели.

Были и до некоторой степени продолжают сохраняться определенные надежды на чисто теоретические революционные прорывы со стороны теории струн, отличающейся математической глубиной, превосходящей СМ в эстетическом отношении и создающей перспективу синтеза СМ и ОТО, но далекой от эксперимента и однозначности. А. В. Маршаков в 2002 г., отметив «абсолютную удовлетворительность» СМ «с точки зрения описания всех известных экспериментов», указал на ее «совершенную неудовлетворительность» с точки зрения своего рода «принципа красоты» и добавил, что теория струн — это теория, «существование которой непроверяемо в опытах по физике элементарных частиц» и которая ближе к ОТО, для которой «внутренняя красота является одним из главных физических принципов»³⁷. Вайнберг в своей недавней книге так выразил свое отношение к этому подходу:

Теория струн довольно привлекательна, поскольку включает в себя гравитацию, не содержит бесконечностей [...] Я был поклонником теории струн, однако меня огорчает то, что пока никому не удалось найти решение, соответствующее наблюдаемому нами миру³⁸.

Серьезные надежды на близкую революцию в физике, иногда даже переходящие в уверенность в ее неизбежности, связаны также с концепцией «окончательной теории» (*final theory*)³⁹. Если, скажем, удастся объединить квантовополевую СМ с ОТО и, таким образом, построить единую теорию всех (четырех) фундаментальных взаимодействий и на этой основе заодно решить космологические проблемы «темных феноменов», барионной асимметрии и инфляционной концепции, а к этому и стремятся теоретики-фундаменталисты, то это и будет окончательная теория. И соответствующая революция в физике будет последней. «Мечты об окончательной теории» восходят к Ньютону и Лапласу, затем эстафету принимают Эйнштейн, а также Гильберт, Г. Вейль, Шрёдингер, Гейзенберг и др., во второй половине XX в. эти мечты вдохновляют творцов СМ — Вайнберга, А. Салама, Ш. Глэшоу и др. В 2000-е гг. возникает и укрепляется более трезвый взгляд на возможность достижения этой цели и, соответственно, на возможность близкой и окончательной революции в фундаментальной физике. Заслуживает внимания мнение такого противника идеи окончательной теории, как Дайсон:

³⁷ Маршаков А. В. Теория струн или теория поля? // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. № 9. С. 978.

³⁸ Вайнберг. Все еще неизвестная Вселенная... С. 77.

³⁹ Вайнберг С. Мечты об окончательной теории: физика в поисках самых фундаментальных законов природы. М.: УРСС, 2004.

Я нахожу саму идею окончательной теории отталкивающей, потому что она принижает как богатство и разнообразие природы, так и богатство и разнообразие человеческого предназначения. Я предпочитаю жить во Вселенной, полной неисчерпаемых загадок, и принадлежать к виду, у которого впереди лежат неисчерпаемые возможности для умственного роста ⁴⁰.

Интересные конкретные аргументы против возможности создания окончательной единой теории элементарных частиц приводит видный российский теоретик Б. Л. Иоффе:

После того как удалось сформулировать струнную теорию калибровочных полей, казалось, что путь к созданию такой теории открыт. Но выяснилось, что струнных теорий невероятно много [...] и нет никакой возможности выбрать между ними истинную. Более того, за все 30 лет их развития [...] не удалось получить ни одного физического предсказания. Поэтому такой путь к созданию единой теории я считаю закрытым ⁴¹.

С другой стороны,

характерные расстояния, на которых гравитационное взаимодействие становится сильным – порядка 10 в минус 33-й степени с[анти]м[етров]. Экспериментально область от 10 в минус 18-й степени до 10 в минус 33-й степени не будет пройдена никогда: сооружение ускорителя на энергии, соответствующие расстояниям 10 в минус 33-й степени, т. е. энергии 10 в 16-й степени ТэВ, не позволяют просто ресурсы Земли [...] Поскольку эта область экспериментально никогда не будет достижима [...] мы приходим к выводу о непознаваемости малых расстояний в физике элементарных частиц ⁴².

Иначе говоря, ожидать масштабной научной революции, связанной с созданием единой (или окончательной) теории частиц и фундаментальных взаимодействий, не приходится: на пути к этой теории стоят непреодолимые экспериментальные трудности, а недавние теоретические надежды, касающиеся теории струн, также не оправдались.

В результате, несмотря на впечатляющие достижения в области астрофизики и космологии в 1990–2000-е гг. и открытия, сделанные на Большом адронном коллайдере, а также теоретический прогресс в области теории струн, ожидаемых очертаний «новой физики», выходящей за пределы СМ и включающей в себя некий синтез СМ и гравитации, так и не появилось. Поэтому нынешняя ситуация соответствует, скорее, взглядам пессимистов: революции не случилось, и мы от нее весьма далеки. Похоже, что создание СМ в 1960–1970-е гг. в какой-то мере было такой революцией.

Это напоминает 1710–1720-е гг. Создание «Начал» Ньютона было завершением революции XVII в., а спустя 30–40 лет и дальше происходило лишь восприятие и развитие этой революции. В экспериментальной

⁴⁰ Дайсон Ф. Мечты о Земле и небе. СПб.: Питер, 2017. С. 207.

⁴¹ Иоффе Б. Л. Атомные проекты: события и люди М.: ЦСП и М, 2018. С. 197.

⁴² Там же. С. 198.

же сфере появлялись загадочные феномены (такие как электрические, магнитные явления или интерференционные эффекты в оптике), но тогдашним теоретикам-механицистам они были не по зубам. Так же как пока не по зубам нынешним теоретикам оказываются проблемы темной материи и темной энергии, несмотря на их квантово-релятивистскую мощь и математическую изощренность. Но оптимисты могут считать, что нынешняя ситуация близка, скорее, к 1610–1620-м гг., т. е. временам Галилея и Кеплера, когда было немало нового открыто и был какой-то теоретический задел, но до настоящей классической механики, развитой в «Началах» Ньютона, было еще далеко. И тогда мы присутствуем при начальной стадии революции в физике, которую также можно сравнить с 1890-ми гг., когда в физике четко обозначились проблемы с распределением энергии в спектре абсолютно черного тела и опытом Майкельсона, которые со временем привели к квантовой теории и теориям относительности, а также началась лавина экспериментальных открытий, связанных с вторжением в микромир, – рентгеновских лучей, электрона, радиоактивности и др. Аналогичными облачками (или, скорее, «тучками») на горизонте физики теперь являются «темные феномены», а экспериментально-наблюдательная лавина уже началась в космологии.

Заключительные замечания

Рассматривая эту серию революций (или их отдельных стадий, как правило начальных) от Коперника и Галилея – Кеплера до Эйнштейна – Бора и далее вплоть до 2010–2020-х гг., делая, так сказать, вековые срезы по 10–20-м гг., мы наблюдаем не только поразительный рост физики, но и наличие революционных периодов в ее развитии, и немалое разнообразие этих революций. Говоря о поразительном росте физики, мы имеем в виду и просто количественный рост участвующих в этих революциях: от буквально нескольких человек (Коперник и несколько его учеников) к дюжине (с двумя-тремя корифеями, такими как Галилей и Кеплер), затем к нескольким десяткам (с пятью-семью ведущими фигурами – Френелем, Ампером, Фурье, Карно и др.), далее к сотням физиков во главе с парой десятков бесспорных лидеров в XX в. (теоретиков Планка, Лоренца, Пуанкаре, Эйнштейна, Бора, Зоммерфельда, Гейзенберга, Борна, Паули, Шрёдингера, Дирака и др. и экспериментаторов Майкельсона, Рентгена, Беккереля, супругов Кюри, П. Н. Лебедева, Дж. Дж. Томсона, Резерфорда, Милликена и др.) и, наконец, к тысячам физиков на рубеже XX и XXI вв. (так, первые публикации об открытии бозона Хиггса в 2012 г. и открытии гравитационных волн в 2016 г. содержали по несколько сотен соавторов).

Бросается в глаза также важная или даже ключевая роль астрономии в некоторых из этих революций. Коперниканская революция – это вообще революция в астрономии. В галилей-кеплеровской стадии

революции XVII в. мы видим сильное взаимодействие астрономии и физики. В революциях XIX и XX вв. астрономия заметной роли не играла. А вот если начало XXI в. все-таки квалифицировать как начальную стадии революции, то здесь астрономия, точнее космология, снова выходит на передний план. Не следует недооценивать и взаимодействие физики и математики в исследуемых революциях. Фактически математика была важным фактором во всех рассмотренных нами революциях, хотя в первых двух она имела все-таки подчиненное значение. На второй стадии революции XVII в., прежде всего у Ньютона и Лейбница, взаимосвязь классической механики и математического анализа была определяющим фактором. То же можно сказать и о «французской революции» в физике, которую можно интерпретировать как «математико-аналитическое рождение классической физики». Казалось бы, в квантово-релятивистской революции XX в. роль математики снижается. Но это не так. Хорошо известна роль математиков Пуанкаре и Минковского в создании СТО, М. Гроссмана и Гильберта — в создании ОТО, того же Гильберта, Вейля, Дж. фон Неймана — в развитии квантовой механики. Кроме того, при создании квантовой механики математика во многом опережала физику, это касается как матричного варианта квантовой механики Гейзенберга и волнового варианта Шрёдингера, так и операторной формулировки ее Дираком и др. Что касается нынешней ситуации, то и здесь остаются весьма серьезными надежды на возможность прорывов математического характера, будь то теория струн или квантовая гравитация. Характерно в этой связи высказывание Р. Пенроуза:

Теоретики, занимающиеся квантовой гравитацией, не имея никакой надежды получить экспериментальное подтверждение или опровержение своих теорий, вынуждены полагаться на *математическую* (курсив Пенроуза. – В. В.) составляющую, и именно ощущение математической силы и красоты служит основным критерием для суждения о предмете и правдоподобии той или иной гипотезы⁴³.

Это во многом касается и струнного подхода.

Рассмотренные нами революции были либо однофазными (умещавшимися в один не слишком длительный интервал времени, не более тридцати лет), либо двухфазными (состоявшими из двух стадий, разделенных между собой примерно полувековыми интервалами). Квантово-релятивистская революция — характерный пример однофазного хода событий. Революция XVII и XIX вв. — это двухфазные революции с фазами, разнесенными по времени примерно на 40–50 лет. Революцию XVII в. можно даже расширить до трехфазной, если ее начальной фазой считать считать коперниканскую революцию, которая служила трамплином и для Галилея, и для Кеплера.

⁴³ Пенроуз Р. Мода, вера, фантазия и новая физика Вселенной. СПб.: Питер, 2020. С. 108.

Еще одно замечание. До сих пор мы говорили о революциях в физике или по крайней мере в науках физико-математического цикла. Но некоторые историки пытаются показать, что революции XVII и первой трети XX в. затрагивали все естественные науки и потому их можно считать общенаучными⁴⁴. Но есть и другой подход к общенаучным революциям, который делает упор на институциональных трансформациях науки. С этой точки зрения революция XVII в., связанная с учреждением академий наук, была «академической», а революция XIX в. — «университетской». «Французская» стадия этой последней во многом была обусловлена созданием новых образовательных учреждений, прежде всего Парижской политехнической школы, возникших на волне Великой французской революции. Что же касается квантово-релятивистской революции, то ее развитие уже через примерно 20 лет породило третью общенаучную революцию, связанную с переходом к, так сказать, «большой науке», когда она приобрела государственное значение и появились масштабные национальные наукоемкие проекты в промышленной и особенно военно-промышленной сферах. Финансовые затраты на науку при этом возросли в сто раз, а в послевоенные годы — даже в тысячи раз⁴⁵. Важнейшим примером такого рода были национальные «атомные проекты», т. е. программы по созданию ядерного и термоядерного оружия, относящиеся к 1940–1950 гг.

Эту статью автору хотелось бы посвятить памяти И. Ю. Кобзарева и В. С. Кирсанова, общение с которыми и труды которых были особенно важны для меня в этих «птичьих» набросках о научных революциях в физике. Вот два замечательных суждения о научных революциях, принадлежащих им (своего рода постэпиграфы). Кобзарев: «История физики, рассматриваемая с высоты птичьего полета, есть история смены парадигм»⁴⁶. Кирсанов: «Кажется уместным дать такое определение научной революции, которое будучи адекватным, было бы и метафорически емким. Таким определением может служить понятие научной революции как диалога с Природой»⁴⁷. В первом суждении просвечивает мысль о том, что понятие научной революции — сильная историко-научная идеализация, в которой фиксируются только начальное и конечное состояние физики, а сам процесс преобразования парадигмы остается за кадром. Во втором — Природа предстает как своего рода актер, участвующий в конструировании наших представлений о ней. Природа вступает в диалог с нами, когда мы научаемся задавать ей правильные вопросы на сложном

⁴⁴ *Визгин*. О проблеме научных революций...

⁴⁵ См. об этом: Там же.

⁴⁶ *Кобзарев И. Ю.* Присутствуем ли мы при кризисе базисной программы парадигмы современной теоретической физики? // *Философские проблемы физики элементарных частиц (тридцать лет спустя)* / Отв. ред. Ю. Б. Молчанов. М.: Институт философии РАН, 1995. С. 124.

⁴⁷ *Кирсанов*. Научная революция XVII века... С. 11.

экспериментально-математическим языке. Когда характер и способы формулировки «правильных» вопросов радикально меняются, происходит научная революция и тогда Природа вступает с нами в диалог, отвечая нам.

References

- Bashkanov, M., and Watts, D. P. (2020) A New Possibility for Light-Quark Dark Matter, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, vol. 47, no. 3, pp. 1–10.
- Cao, T. Iu. (1997) *Conceptual Development of the 20th Century Field Theories*. Cambridge: Clarendon University Press.
- Daison, F. (Dyson, F.) (2010) Ptitsy i liagushki v matematike i fizike [Birds and Frogs in Mathematics and Physics], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 180, no. 8, pp. 859–870.
- Daison, F. (Dyson, F.) (2017) *Mechty o Zemle i nebe [Dreams of the Earth and the Sky]*. Sankt-Peterburg: Piter.
- Diskussiiia o problemakh nauchnykh revoliutsii v tochnom estestvoznanii [Discussion about the Problems of Scientific Revolutions in Exact Sciences] (2003), *Istoriko-astronomicheskie issledovaniia*, vol. 28, pp. 85–154.
- Dmitriev, I. S., and Kuznetsova, N. I. (2019) *Akademiia blagikh nadezhd [Academy of Good Hopes]*. Moskva: NLO.
- Dolgov, A. D. (2018) Massivnye i sverkhmassivnye chernye dyry v sovremennoi i rannei Vselennoi i problemy kosmologii i astrofiziki [Massive and Supermassive Black Holes in the Modern and Early Universe and the Problems of Cosmology and Astrophysics], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 188, no. 2, pp. 121–142.
- Dorfman, Ia. G. (1974) *Vsemirnaia istoriia fiziki s drevneishikh vremen do kontsa XVIII veka [World History of Physics from Ancient Times to the End of the 18th Century]*. Moskva: Nauka.
- Dorfman, Ia. G. (1979) *Vsemirnaia istoriia fiziki s nachala XIX do serediny XX vv. [World History of Physics from the Early 19th to Mid-20th Century]*. Moskva: Nauka.
- Dremin, I. M. (2018) Nekotorye novye otkrytiia na kollaiderrakh [Some New Discoveries at Colliders], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 188, no. 4, pp. 437–445.
- Ginzburg, V. L. (1995) Kakie problemy fiziki i astrofiziki predstavliaiutsia seichas osobenno vazhnymi i interesnymi? [What Kind of Problems of Physics and Astrophysics Appear Particularly Important and Interesting Nowadays?], in: Ginzburg, V. L. *O fizike i astrofizike: stat'i i vystupleniia. 3-e izd. [On Physics and Astrophysics: Articles and Speeches. 3rd ed.]*. Moskva: Biuro Kvantum, pp. 5–158.
- Ginzburg, V. L. (2003) Kakie problemy fiziki i astrofiziki predstavliaiutsia osobenno vazhnymi i interesnymi v nachale XXI veka? [What Kind of Problems of Physics and Astrophysics Appear Particularly Important and Interesting in the Early 21st Century?], in: Ginzburg, V. L. *O nauke, o sebe i o drugikh: stat'i i vystupleniia. 3-e izd. [On Science, on Myself, and on Others. 3rd ed.]*. Moskva: Fizmatlit, pp. 11–74.
- Gorelik, G. E. (2013) *Kto izobrel sovremennuiu fiziku? Ot maiatnika Galileia do kvantovoi gravitatsii [Who Invented Modern Physics? From Galileo's Pendulum to Quantum Gravity]*. Moskva: AST.
- Grattan-Guinness, I. (1990) *Convolutions in French Mathematics, 1800–1840*. Basel, Boston, and Berlin: Birkhäuser, vol. 1–3.
- Hund, F. (1978) *Geschichte der physikalischen Begriffe*. Mannheim, Wien, and Zürich: B. I. Wissenschaftsverlag, Teil 1: Die Entstehung des mechanischen Naturbildes, Teil 2: Die Wege zum heutigen Naturbild.
- Il'in, V. A., and Kudriavtsev, V. V. (2014) *Istoriia i metodologiia fiziki: uchebnik dlia magistr. 2-e izd. [History and Methodology of Physics: A Textbook for Masters. 2nd ed.]*. Moskva: Iurait.
- Ioffe, B. L. (2018) *Atomnye proekty: sobytiia i liudi [Atomic Projects: Events and People]*. Moskva: TSSP i M.

- Grigor'ian, A. T., and Pogrebysskii, I. B. (ed.) (1971) *Istoriia mekhaniki s drevneishikh vremen do kontsa XVIII v. [History of Mechanics from Ancient Times to the End of the 18th Century]*. Moskva: Nauka.
- Khaineman, B., and Nir, I. (Heinemann, B., and Nir, Y.) (2019) Programma izucheniia bozona Khiggsa i otkrytye voprosy v fizike chastits i kosmologii [The Higgs Program and Open Questions in Particle Physics and Cosmology], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 189, no. 9, pp. 985–996.
- Kirsanov, V. S. (1987) *Nauchnaia revoliutsiia XVII veka [Scientific Revolution of the 17th Century]*. Moskva: Nauka.
- Kobzarev, I. Iu. (1995) Prisutstvuem li my pri krizise bazisnoi paradigmy sovremennoi teoreticheskoi fiziki? [Are We Witnessing a Crisis in the Basic Paradigm of Modern Theoretical Physics?], in: Molchanov, Iu. B. (ed.) *Filosofskie problemy fiziki elementarnykh chastits (tridsat' let spustia) [Philosophical Problems of Elementary Particle Physics (Thirty Years Later)]*. Moskva: Institut filosofii RAN, pp. 124–128.
- Kobzarev, I. Iu., and Manin, Iu. I. (1997) *Elementarnye chastitsy. Dialogi fizika i matematika [Elementary Particles. The Dialogues between a Physicist and a Mathematician]*. Moskva: FAZIS.
- Koire, A. (Koyré, A.) (2001) *Ot zamknutogo mira k beskonechnoi Vselennoi [From a Closed World to an Infinite Universe]*. Moskva: Logos.
- Kuznetsova, N. I. (1989) Sotsiokul'turnyi eksperiment Petra I i formirovanie nauki v Rossii [Sociocultural Experiment of Peter I and the Formation of Science in Russia], *Voprosy filosofii*, 1989, no. 3, pp. 49–60.
- Marshakov, A. V. (2002) Teoriia strun ili teoriia polia? [String Theory or Field Theory?], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 172, no. 9, pp. 977–1020.
- Mukhanov, V. F. (2016) Kvantovaia Vselennaia [Quantum Universe], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 186, no. 10, pp. 1117–1125.
- Pais, A. (1986) *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford: Clarendon Press and New York: Oxford University Press.
- Penrouz, R. (Penrose, R.) (2020) *Moda, vera, fantaziia i novaia fizika Vselennoi [Fashion, Faith, Fantasy, and the New Physics of the Universe]*. Sankt-Peterburg: Piter.
- Pustovoit, V. I. (2016) O neposredstvennom obnaruzhenii gravitatsionnykh voln [On the Direct Detection of Gravitational Waves], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 186, no. 10, pp. 1133–1152.
- Pyenson, L. R. (1981) History of Physics, in: Lerner, R. G., and Trigg, G. L. (eds.) *Encyclopedia of Physics*. London: Addison-Wesley Publ. Comp., pp. 404–414.
- Rubakov, V. A. (2012) K otkrytiiu na Bol'shom adronnom kollaidere novoi chastitsy so svoistvami bozona Khiggsa [Towards the Discovery of a New Particle with the Properties of the Higgs Boson at the Large Hadron Collider], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 182, no. 10, pp. 1017–1025.
- Stepin, V. S. (2000) *Teoreticheskoe znanie [Theoretical Knowledge]*. Moskva: Progress-Traditsiia.
- Troitskii, S. V. (2012) Nereshennye problemy fiziki elementarnykh chastits [Unsolved Problems of Elementary Particle Physics], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 182, no. 1, pp. 77–103.
- Vainberg, S. (Weinberg, S.) (2004) *Mechty ob okonchatel'noi teorii: fizika v poiskakh samykh fundamental'nykh zakonov prirody [Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature]*. Moskva: URSS.
- Vainberg, S. (Weinberg, S.) (2020) *Vse eshche neizvestnaia Vselennaia. Mysli o fizike, iskusstve i krizise nauki [Third Thoughts]*. Moskva: Al'pina non-fikshn.
- Vainberg, S. (Weinberg, S.) (2016) *Ob'iasniata mir: istoki sovremennoi nauki [To Explain the World: The Discovery of Modern Science]*. Moskva: Al'pina non-fikshn.
- Verkhodanov, O. V. (2016) Kosmologicheskie rezul'taty kosmicheskoi missii "Plank". Sravnenie s rezul'tatami WMAP i BICEP-2 [Cosmological Outcomes of the Planck Space Mission. Comparison with the Findings of WMAP and BICEP-2], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 186, no. 1, pp. 3–46.
- Vizgin, V. P. (1995) Matematika v klassicheskoi fizike [Mathematics in Classical Physics], in: Vizgin, V. P., and Polak, L. S. (eds.) *Fizika XIX – XX vv. v obshchenauchnom*

- i sotsiokul'turnom kontekstakh: fizika XIX veka [Physics of the 19th – 20th Century in General Scientific and Sociocultural Contexts: Physics of the 19th Century]. Moskva: Nauka, pp. 6–72.*
- Vizgin, V. P. (1997) Matematika v kvantovo-relativistskoi revoliutsii [Mathematics in the Quantum-Relativistic Revolution], in: Idlis, G. M. (ed.) *Fizika XIX –XX vv. v obshchenauchnom i sotsiokul'turnom kontekstakh. Fizika XX veka i eie sviaz' s drugimi razdelami estestvoznaniia [Physics of the 19th – 20th Century in General Scientific and Sociocultural Contexts. Physics of the 20th Century and Its Connections to Other Branches of Natural Science]. Moskva: Ianus-K, pp. 7–30.*
- Vizgin, V. P. (1999) “Frantsuzskaia revoliutsiia” v fizike: “matematicheskoe rozhdenie” klassicheskoi fiziki i S. Karno [The “French Revolution” in Physics: “Mathematical Birth” of Classical Physics and S. Carnot], *Issledovaniia po istorii fiziki i mekhaniki. 1995–1997.* Moskva: Nauka, pp. 15–38.
- Vizgin, V. P. (2004) O probleme nauchnykh revoliutsii i ikh tipologii [On the Problem of Scientific Revolutions and Their Typology], in: Kasavin, I. T. (ed.) *Chelovek. Nauka. Tsvilizatsiia. K semidesiatletiiu akademika V. S. Stepina [Man. Science. Civilisation. Towards the Seventieth Anniversary of Birth of Academician V. S. Stepin]. Moskva: Canon+, pp. 179–195.*
- Vizgin, V. P. (2015) Frantsuzskaia revoliutsiia v fizike XIX veka [The French Revolution in the 19th Century Physics], in: Lipkin, A. I. (ed.) *Filosofiia nauki: uchebnik dlia magistratury. 2-e izd. [Philosophy of Science: A Textbook for Masters. 2nd ed.]. Moskva: Iurait, pp. 47–50.*

Received: July 13, 2020.