

К 150-летию «Трактата об электричестве и магнетизме» Дж. К. Максвелла

Вл.П. Визгин, К.А. Томилин

В 2023 г. исполнилось 150 лет изданию основополагающего «Трактата об электричестве и магнетизме» Дж.К. Максвелла. В этом труде воплотилась важнейшая физическая теория XIX века – классическая электродинамика.

Значение максвелловской теории

На основе понятия электромагнитного поля максвелловская теория объединила все области учения об электричестве и магнетизме и дала обоснование электромагнитной природы света. Развитие максвелловской электродинамики привело к релятивистской революции, связанной с созданием СТО и ОТО и концепции четырехмерного пространства–времени. В результате обобщения понятий и уравнений классической электродинамики в 1954 г. были открыты уравнения Янга–

Миллса, легшие в основу так называемой стандартной модели (СМ), т. е. современной калибровочной теории трех фундаментальных взаимодействий микромира.

При построении максвелловской электродинамики, как отметил А. Эйнштейн, произошел переход в физике от ньютоновской модели материальных точек к концепции физических полей, ставшей базовой в XX в. [1, с. 138]. Ф. Дайсон подчеркнул, что максвелловская электродинамика позволила вскрыть двухслойную структуру мира, первый, по-настоящему фундаментальный слой которой (физические поля) «представляют собой абстракции, недоступные непосредственно нашим органам чувств», а во втором слое находятся «объекты, которые мы можем ощутить и потрогать». Поэтому максвелловская электродинамика, по его мнению, стала образцом для построения вообще всех физических теорий XX в. [2].

Релятивистской революции предшествовал переход от механической картины мира к электромагнитно-полевой картине мира. Это направление достигло своего пика в начале XX в., но ожидания на обоснование на этой основе структуры материи не оправдались и постепенно электромагнитная программа сошла на нет – в 1920-е гг. стала ясна необходимость учета квантовых явлений, а в 1930-е были открыты еще два взаимодействия – слабое и сильное. С середины 1950-х гг. на первый план вышла калибровочно-полевая программа, связанная с уравнениями Янга – Миллса и приведшая к созданию СМ.

Классическая электродинамика имела также огромное практическое значение, поскольку привела к «электромагнитной революции» в технологиях и практических устройствах современной цивилизации, прежде всего в средствах коммуникации и во всех сферах жизнедеятельности.

Максвелл: научно-биографическая часть

Джеймс Клерк Максвелл родился 13 июня 1831 в Эдинбурге (Шотландия), закончил Эдинбургский университет и Кембридж (1854). В декабре 1855 г. и феврале 1856 г. Дж.

Клерк Максвелл прочел две лекции в Кембриджском философском обществе, изданные под общим названием «О фарадеевых силовых линиях», в которых развивал идеи М. Фарадея «силовых линий» и «электротонического состояния» и представил систему понятий и уравнений электродинамики, справедливую для проводящих сред. С 1860 г. по 1865 г. Максвелл работает профессором кафедры натуральной философии в Кингс-колледже в Лондоне. Именно в этот период Максвелл публикует две основополагающие статьи по электромагнетизму. В 1861–1862 гг. в четырех частях публикуется его статья «О физических силовых линиях», в которой он делает решающую новацию – вводит «ток электрического смещения» в уравнение магнитостатики, что позволяет вывести волновое уравнение для электрических и магнитных полей и сопоставить его с аналогичным известным уравнением для света. Именно в этой статье содержались и дифференциальные уравнения для напряженностей электрического и магнитного полей \mathbf{E} и \mathbf{H} (в компонентной форме), получившие позже название уравнений Максвелла. Однако эти уравнения еще не были выделены Максвеллом в одну систему и содержали эмпирические константы ϵ и μ . В современной векторной форме это уравнения $\operatorname{rot} \mathbf{E} + \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0$, $\operatorname{div}(\mu \mathbf{H}) = 0$, $\operatorname{rot} \mathbf{H} - \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mathbf{J}$, $\operatorname{div}(\epsilon \mathbf{E}) = \rho$.

В докладе «Динамическая теория электромагнитного поля» в Лондонском Королевском обществе 8 декабря 1864 г. Дж.К. Максвеллом была впервые представлена система «двадцати уравнений», связывающих «двадцать величин» (опубликовано в 1865 г.). Векторная форма в этот период еще не применялась, поэтому векторные уравнения представлялись в виде трех уравнений для каждой компоненты векторов, причем каждая компонента обозначалась своим символом. Поэтому с современной точки зрения 20 максвелловских уравнений это 6 векторных уравнений и 2 скалярных, из ко-

торых два уравнения были линейными, а остальные – дифференциальными. Из этих восьми уравнений 4 содержали эмпирические константы, связанные с электрическими и магнитными характеристиками среды.

С 1865 г. Максвелл уходит из Кингс-колледжа, переселяется в свое имение Гленлэр в Шотландии и занимается чисто научной работой, в частности, подготовкой «Трактата об электричестве и магнетизме», отказываясь от предложений преподавательской работы. В 1871 г. он все же принимает приглашение возглавить физическую лабораторию Кембриджского университета, получившую название Кавендишской лаборатории. На этой должности Максвелл не только внес большой вклад в формирование экспериментальной базы этой лаборатории, но и в историю науки, подготовив и опубликовав труды выдающегося английского физика-экспериментатора Генри Кавендиша.

«Трактат об электричестве и магнетизме» и его значение

Сохранился первоначальный план «Трактата» из 4 частей и более 20 глав, относящийся к октябрю 1869 г. [3]. Как видно из списка глав, Максвелл к началу 1873 г. (предисловие было подписано 1 февраля) значительно расширил монографию, увеличив общее количество глав вдвое. Структура изданного в 1873 г. «Трактата» следующая: Предварительная глава. Об измерении величин. Часть 1. Электростатика (13 глав). Часть 2. Электрокинематика (12 глав). Часть 3. Магнетизм (8 глав). Часть 4. Электромагнетизм (23 главы) [4]. Указатель (Index) включал имена более 100 ученых и около 500 терминов. Под «электрокинематикой» Максвелл понимал теорию электрических токов.

«Трактат» имел двойную структуру – помимо стандартного разбиения на части и главы, все главы были составлены из отдельных пунктов (*articles*), причем нумерация этих пунктов была сплошной по всему «Трактату». В первом издании было 866 пунктов, еще 48 пунктов были добавлены Максвеллом при подготовке второго издания (чтобы не

менять нумерацию они были добавлены с индексами). Пункты различались по объему – от нескольких предложений до нескольких страниц. Такая форма была заимствована Максвеллом из «Экспериментальных исследований по электричеству» М.Фарадея (1839–1855), составленных из почти 3,5 тысяч таких пунктов.

Ключевым отличием «Трактата» Максвелла от других монографий по электромагнетизму того времени, как отмечал в предисловии сам автор, было то, что по каждому физическому явлению был указан метод его наблюдения, а по каждой физической величине – метод ее измерения.

При построении теории электродинамики Максвелл использовал различные модели – электрического тока как вообразимой несжимаемой жидкости, магнитных силовых линий как трубок вообразимой магнитной жидкости, вакуума как диэлектрической среды (*medium*), в которой распространяются электромагнитные колебания. Следует отметить, что Максвелл прагматично относился к использованию различных моделей, подчеркивая их ограниченный характер и рассматривая их как инструмент для получения с помощью математики физических законов и соотношений между физическими величинами. Такой подход существенно отличал Максвелла от общепринятого в то время поиска чисто механического обоснования электрических и магнитных явлений.

В монографии Максвелл представил систему 12 уравнений электродинамики (6 дифференциальных и 6 линейных). Как видим, с 1861 г. он последовательно расширяет систему уравнений и увеличивает число физических величин, что связано с математизацией определений физических величин – все эмпирические константы исключаются из дифференциальных уравнений и остаются только в линейных уравнениях (материальных уравнениях и законе Ома).

Наряду с использованием покомпонентной записи уравнений (латинскими буквами), Максвелл ввел обозначения для векторов (готическими буквами). Сами вектора как понятие

появились в теории кватернионов – обобщения комплексных чисел, развитой в 1843 г. У. Гамильтоном, а их значение для физики Максвелл оценил после выхода в 1867 г. книги П. Тэта. Векторная форма на основе кватернионного базиса позволила Максвеллу записать уравнения в более компактной форме.

Первоначально теория электромагнитного поля Максвелла встретила скептическое отношение, особенно со стороны физиков, сторонников механистического мировоззрения, в том числе со стороны таких крупных ученых как У. Томсон и Дж. Стокс. Если британские ученые не принимали максвелловскую теорию из-за ее отхода от механического истолкования электромагнитных явлений, то французскими учеными (Пуанкаре, Дюгем) она критиковалась, наоборот, как им казалось, за избыточный механицизм. По-видимому, французские физики первоначально воспринимали максвелловскую электродинамику не на основе «Трактата», а на основе его статьи «О физических силовых линиях», где, действительно, были в изобилии использованы механические модели – зубчатые колеса, рычаги и др., с соответствующими иллюстрациями. В «Трактате» же Максвелл лишь иногда прибегал к механическим моделям, подчеркивая их иллюстративный характер. В Германии, где властвовали теории дальнего действия, отношение к теории электромагнитного поля Максвелла было еще более скептическим, чем в Великобритании и во Франции.

Тем не менее, начинается процесс восприятия максвелловской теории. Положительную рецензию публикует в апреле 1873 г. Г. Тэт, отметивший, что основной целью «Трактата» помимо предоставления экспериментальных данных об электричестве и магнетизме было «полностью развенчать теорию дальнего действия» [5]. Одним из первых «апостолов» максвелловской теории стал голландский физик Х. Лоренц, применивший ее в 1875 г. в докторской диссертации к объяснению отражения и преломления света. В 1881 г. А. Шустер, изучавший до этого в Германии электромагнитные теории Вебера и Гельмгольца, читает в Манчестере первый курс

электродинамики на основе «Трактата» Максвелла. Хотя на этот его курс записалось всего три студента, одним из них оказался будущий нобелевский лауреат и редактор 3-го издания «Трактата» Дж.Дж. Томсон.

Максвелловскую электродинамику начинают применять и развивать в Великобритании Дж. Пойнтинг, А. Шустер, О. Хевисайд, О. Лодж, Дж. Фитцджеральд и Дж. Лармор, в России – А.Г. Столетов, О.Д. Хвольсон, Д.А. Гольдгаммер, Н.А. Умов, П.Н. Лебедев и др.

В 1886–1888 гг. Г. Герц по инициативе Г. Гельмгольца поставил опыты по передаче электромагнитных колебаний на расстояние и в статье 1889 г. сделал вывод о «преимуществе теории Максвелла перед другими теориями электродинамики» [6, с. 165]. Это открытие Герца инициировало технологическую революцию, прежде всего – развитие радиотехники, а статья Герца «Об основных уравнениях электродинамики покоящихся тел» (1890) стала образцом, как вспоминал А. Зоммерфельд, для представления основных дифференциальных уравнений максвелловской электродинамики. При этом Герц провозглашает, что «теория Максвелла – это система уравнений Максвелла» [6, с. 125] и тем самым уравнения выделяются из общей теории и принципов их обоснования.

Максвелловская электродинамика постепенно получает свое признание, и, соответственно, «Трактат об электричестве и магнетизме» как вершина научной мысли ставится в один ряд с ньютоновскими «Началами». Однако следующее поколение физиков изучают не оригинальные труды Максвелла, а статьи Герца, и начинают работать только с уравнениями, причем в упрощенной Герцем форме двух пар дифференциальных уравнений, связывающих напряженности электрического и магнитного полей \mathbf{E} и \mathbf{H} . В XX веке происходит постепенное восстановление максвелловских понятий – получают признание все четыре поля \mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{V} и \mathbf{H} , а также скалярный и векторный потенциалы, что приводит и к восстановлению системы максвелловских уравнений, представленных в «Трактате».

Также в некоторых современных учебниках используется и максвелловское понятие «полного тока».

В 1881 г. выходит второе издание «Трактата» под редакцией шотландского математика У. Нивена, в 1883 г. – публикуется первый перевод «Трактата» на немецкий язык, а в 1885 г. – на французский. В 1892 г. выходит третье, тщательно выверенное и снабженное комментариями, издание «Трактата» под редакцией Дж.Дж. Томсона, ставшее каноническим.

На русском языке первоначально были опубликованы фрагменты из «Трактата» в сборнике 1952 г. [7] Первый полный перевод максвелловского «Трактата» на русский язык вышел в серии «Классики науки» в 1989 г. [8] Его более 10 лет готовила команда физиков, редакторов и переводчиков, под руководством М.Л. Левина, М.А. Миллера, Е.В. Суворова, Б.М. Болотовского и И.Л. Бурштейна. В их «Послесловии» к «Трактату» выделяются «основные идеи» Максвелла «примерно в том же порядке, в котором они развиваются в “Трактате”» [8, с. 412].

Отечественная и мировая «максвеллиана»

Первая научно-биографическая книга о Максвелле была опубликована уже в 1882 г. Л. Кемпбелом и У. Гернетом. В 1893 г. Дж.Дж. Томсон на основе новых исследований и своих комментариев к 3-му изданию «Трактата» опубликовал обширный том, дополняющий максвелловский «Трактат». В 1910 г. вышел первый том фундаментального труда Э. Уиттекера «История теории эфира и электричества». В 1931 г. к 100-летию со дня рождения Максвелла был опубликован сборник работ выдающихся ученых о Максвелле – Дж.Дж. Томсона, М. Планка, А. Эйнштейна, Дж. Лармора, Дж. Джинса, О. Лоджа и др. В 2000 г. была издана книга О. Дарригола «Электродинамика от Ампера до Эйнштейна» – наиболее фундаментальная монография по истории электродинамики, включающая обширную библиографию классиков электромагнетизма и работ историков науки [9].

Среди русскоязычной «максвеллианы» следует отметить книги Б.Г. Кузнецова и В.П. Карцева, статьи И.С. Шапиро, М.Л. Левина и М.А. Миллера в УФН. Основательно занимались историей электродинамики в 1980-е и последующие годы в ИИЕТе, естественно, затрагивалась так или иначе и проблематика, связанная с «Трактатом». Историю проблемы эфира в оптике и электродинамике изучал В.С. Кирсанов, восприятие теории Максвелла в российской физике исследовала О.А. Лежнева (не только в эти годы, но и значительно раньше), в середине и конце 1980-х гг. были подготовлены диссертации Ю.Л. Менцина и Б.В. Булюбаша (и защищены, соответственно, в 1986 и 1987 гг.) о генезисе понятия поля и электродинамике дальнего действия. В итоговой коллективной монографии сектора истории физики по физике XIX в. под редакцией Л.С. Полака и Вл.П. Визгина, опубликованной в 1995 г., содержались обстоятельные главы по электродинамике, написанные Менциным и Булюбашем по материалам их диссертаций, а также статья О.А. Лежневой по домаксвелловской электродинамике.

150-летие со дня рождения Максвелла было отмечено в ИИЕТе проведением в декабре 1981 г. большой юбилейной конференции в академическом пансионате в Звенигороде, по материалам которой в 1985 г. был опубликован сборник «Максвелл и развитие физики» под редакцией одного из лидеров профессиональной истории физики Л.С. Полака [10]. В нем обсуждались различные аспекты истории максвелловской электродинамики и его «Трактата» (в статьях Б.И. Спасского, Н.Т. Маркчева, Б.М. Болотовского, Б.В. Булюбаша, Н.П. Коноплевой, Вл.П. Визгина, Н.В. Александровой и др.). На сборник, как содержащий «обильный материал, связанный с историей максвелловских открытий в электродинамике», обратили внимание и авторы «Послесловия» к «Трактату» [8, с. 417].

Литература

1. Эйнштейн А. Влияние Максвелл на развитие представ-

лений о физической реальности // Собр. научных трудов в 4-х т. Т.4. М.: Наука, 1967. С. 136–139.

2. *Dyson F.* Why is Maxwell's theory so hard to understand? In James Clerk Maxwell Commemorative Booklet, Fourth Int. Congress Industrial and Applied Mathematics, Edinburgh, Scotland, July 1999.

3. The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell. Vol.2: 1862–1873. Ed. P.M. Harman, Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 999 p.

4. *Maxwell J.C.* A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford, 1873. 2 vols. Vol.1, 464 p.; vol.2, 456 p. 2nd ed., 1881. 3rd ed., 1892. Reprint: 1904, 1954, 1955, 1994.

5. [Tait G.] A Treatise on Electricity and Magnetism // Nature 7, 478–480 (24 April 1873).

6. Из предыстории радио. Сб. статей и материалов. Сост. С.М. Рытов / под ред. Л.И. Мандельштама. М.-Л.: АН СССР, 1948, 481 с.

7 Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1952, 688 с.

8. Максвелл Дж.К. Трактат об электричестве и магнетизме. Пер. под ред. М.Л. Левина, М.А. Миллера, Е.В. Суворова М.: Наука, 1989, в 2-х т. Т.1: 415 с.; т.2: 440 с.

9. *Darrigol O.* Electrodynamics from Ampère to Einstein. Oxford, N.Y.: Oxford University Press, 2000. 532 p.

10. Максвелл и развитие физики XIX–XX веков. М.: Наука, 1985. 248 с.

Сведения об авторах: Визгин Владимир Павлович, ИИЕТ РАН, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук; Томилин Константин Александрович, ИИЕТ РАН, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук.