

Некоторые замечания к электродинамике Максвелла

Анализируя научное творчество Д. К. Максвелла, М. Планк писал: «В физических теориях в последнее время сформировались два, по существу противоположных подхода, и именно со времен Максвелла они все четче стали обособляться: это физика дискретных частиц и физика непрерывного.

...В каждой из этих областей Максвелл поощрительно влиял своими плодотворными идеями на ход развития науки»¹.

Идея атомов и идея эфира, как идея дискретности и непрерывности, переплетались уже начиная с XVII в. весьма сложным образом. Замечание Вольтера, что в Париже считают Вселенную состоящей из вихрей тонкой материи, а в Лондоне ничего этого не признают, было, по существу, характеристикой отношения к двум физическим концепциям: эфира и атомизма, непрерывности и дискретности, и одновременно метко охватывало отношение «физики принципов» к «декартовым вихрям».

Гюйгенс, первый из физиков, давший стройную картину световых явлений на основе представлений о существовании упругого эфира, не отвергал атомистическую структуру самого эфира. Он писал, что если бы даже мы не знали истинной причины упругости, то все же мы постоянно видим, что этим свойством обладают многие тела, и нет ничего странного в предположении, что им обладают также и весьма маленькие невидимые частицы эфира. Он полагал, что в природе существует бесконечная иерархия частиц, различных по своей величине и по своим кинематическим характеристикам. У Ньютона иерархия частиц и эфир, неоднозначный по свойствам и структуре, носит иной характер, однако более существенно то, что уже в XVII в. совокупность фактов, подлежащих объяснению, не позволяла отвлечься ни от континуальных свойств материи, ни от ее дискретных особенностей. В XVII в. возник и другой вопрос, доминирующий в творчестве Максвелла, вопрос о том, какие свойства существенны для среды, способной передавать волны или переносить частицы со ско-

¹ М. Планк. Единство физической картины мира. М., «Наука», 1956, стр. 171.

ростью, близкой к скорости света. В качестве основных свойств рассматривали упругость и инерцию, но анализ первого из них был связан с атомистикой, поэтому вынуждены были ограничиваться моделированием эфира, не прибегая к более глубокому анализу самой природы упругости. В XVIII в. основные трудности, которые приходилось преодолевать эфирной теории, касались не структуры эфира, не противоречивости его свойств, хотя и они не были преодолены, а проблем подвижности и неподвижности. В 1725 г. Брайлей во время поисков годичных параллаксов звезд обнаружил изменение видимого положения звезды на небесной сфере. Это изменение было легко объяснить тем, что Земля движется вокруг Солнца и непрерывно меняет направление своего движения относительно звезд. Аберрация звезд существует как кинематический эффект, в котором движение эфира не отражается, и именно это, как это ни парадоксально, позволяло судить о некоторых его свойствах уже структурного характера. Если существует какое-нибудь скольжение слоев эфира, то это должно давать дополнительные аберрационные явления иного порядка, чем действительно наблюдаемые. Явление аберрации оказалось трудно объяснимым в модели подвижного эфира. Эти вопросы, как мы знаем, также привлекали к себе внимание Максвелла.

Три теории — корпускулярная теория Гассенди — Бошковича, теория Ньютона и волновая теория Гюйгенса — опирались в конце XVII в. на ограниченное число новых фактов, в начале же XIX в. был сделан ряд важных оптических открытий, потребовавших тщательного пересмотра имевших хождение к тому времени представлений о природе света и связанных с ними концепций эфира.

В 1801 г. Вильям Хайд Волластон обнаружил за фиолетовой частью спектра химически действующее излучение, а Риттер — фотохимические свойства света. В том же году Т. Юнг в докладе «Теория света и цветов», прочитанном в Королевском обществе, дал объяснение ньютоновских колец с помощью принципа интерференции. В 1808—1811 гг. Малюс открыл явление поляризации света при отражении и преломлении, а в 1810 г. установил закон, определяющий зависимость интенсивности линейно-поляризованного света после прохождения его через анализатор от величины угла между плоскостью поляризации падающего света и плоскостью поляризации анализатора (закон Малюса). В 1811 г. Араго впервые наблюдал вращение плоскости поляризации света в кристаллическом кварце и обнаружил явление частичной поляризации света при отражении и преломлении. В 1816 г. Френель и Араго обнаружили явление интерференции поляризованных лучей. В 1817 г. Брюстер обнаружил явление эллиптической поляризации. Вся эта изумительная по разнообразию совокупность фактов не получила интерпретации на основе корпускулярных теорий. В 1818 г. Френель создал теорию дифракции, основанную на использовании принципа Гюйгенса, а в 1821 г. он разъясняет вопрос о цвете кристаллических пластинок, устранив теорию Био, базировавшуюся на эмиссионных представлениях. В 1822 г. Френель открыл круговую и эллиптическую поляризацию, объяснив эти явления с волновой точки зрения. В то время как работы Дальтона, Авогадро, Ампера, Берцелиуса утверждали атомистическую концепцию, в оптике усиливается роль волновой теории света и связанных с ней континуальных представлений.

Континуальная и атомистическая концепция были развиты Максвеллом в его исследованиях по электродинамике и кинетической теории материи. Те решения, которые давал им Максвелл, не только соответствовали наиболее глубоким запросам науки первой половины XIX в., но, как мы теперь знаем, прогнозировали ее развитие по крайней мере на целое столетие.

В XIX в. проблема эфира претерпела существенные изменения. Торжество максвелловой электромагнитной теории света исторически потребовало от всякой теории эфира дать объяснение электромагнитных явлений, хотя сама по себе система уравнений Максвелла, как теория замкнутая и по характеру своему феноменологическая, не требовала каких-либо механических или электромагнитных картин эфира. Однако это положение стало понятно лишь значительно позднее благодаря Герцу и Пуанкаре.

В то время казалось заманчивым объяснить явления света, электричества и магнетизма, как разнообразные проявления механических состояний всепроникающей среды — эфира.

Вопрос о том, стремился ли сам Максвелл дать строгую теорию электродинамических явлений, целиком опирающуюся на механическое объяснение электричества и магнетизма, отнюдь не решается однозначно.

«Так, открывая том Максвелла,— писал А. Пуанкаре,— француз ожидает там найти единую теорию, столь же логичную и столь же строгую, как физическая оптика, основанная на гипотезе эфира; в таком случае его ждет, однако, разочарование, от которого я хотел бы избавить читателя... Максвелл не дает механического объяснения электричества и магнетизма; он ограничивается тем, что доказывает возможность такого объяснения»¹.

Согласно Пуанкаре, основная идея Максвелла состояла в расчленении проблемы механической трактовки электродинамики. Доказательство возможности механического объяснения электричества отнюдь не должно быть связано с самим отысканием этого объяснения и построением модели. Доказательство возможности механического объяснения состоит: в нахождении выражения двух функций T и U — составных частей энергии, в образовании с их помощью уравнений Лагранжа и в сравнении полученных уравнений с экспериментальными законами. Уравнения электромагнитного поля Максвелл трактовал как результат применения законов механики к эфиру, но при этом полагал, что многие элементы этого эфирного механизма, скрыты от нас. Идеи Максвелла столкнулись, кроме трудности, указанной Пуанкаре и состоящей в неоднозначности механической интерпретации уравнений, еще со старой проблемой увлечения эфира движущимися телами и с вопросом о зависимости скорости света, измеренной по отношению к среде, относительно которой источник движется, от скорости самого источника. Проблема эфира не была разрешена в теории Максвелла, а была лишь своеобразно поставлена.

Концепция Пуанкаре о неоднозначности механической модели и возможности многих механических моделей могла быть выдвинута уже в 70-х годах XIX в., но исторически сложилось так, что она была высказана после сложных поисков этих моделей.

¹ А. Пуанкаре. Введение к кн. «Электричество и оптика». В сб.: «Вариационные принципы механики». Физматгиз, 1959, стр. 773.

Мак-Келлог выдвинул предположение, что потенциальная энергия есть квадратичная функция углов вращения.

При отсутствии сил, стремящихся вернуть смещенные части в состояние равновесия, упругости не существует. В модели Мак-Келлога, если энергия зависит только от вращений, то система противодействующих сил должна состоять из пар.

Объяснение этих пар сил требовало введения второй неподвижной среды, не принимающей участия во вращении первой среды, но действующей на первую своими восстанавливающими силами.

В. Томсон выдвинул идею о модели квазижесткого эфира, а также стремился представить эфир при посредстве модели несжимаемой жидкости, находящейся в турбулентном движении.

Анализируя большое число различных гипотез, относительно строения и свойств эфира, Лоренц писал: «Эти теории имели некоторый успех, но пужно признать, что они не дают особого удовлетворения, так как становятся все более искусственными по мере возрастания количества случаев, требующих детального объяснения. В последнее время механические объяснения происходящих в эфире процессов все более отступают на задний план. Для многих физиков основной частью теории является количественное описание явлений, как, например, данное в уравнениях Максвелла...»¹

В. Томсон стремился преодолеть затруднение, суть которого в том, что в эфире распространяются поперечные колебания и, следовательно, проявляются свойства твердых тел, но одновременно он не оказывает никакого сопротивления движущимся сквозь него телам. В. Томсон (Кельвин) утверждал, что эфир нельзя себе представлять сплошным. Эфир охвачен по всему объему сильными вихрями; он весь состоит из вращающихся масс, оси вращения которых находятся в хаотическом движении. Вращающиеся массы в силу свойств вихрей легко сдвигаемы друг относительно друга, в то же время невозможно повернуть отдельные ячейки около любой оси. Гиросtatическая модель эфира, в конечном счете исходит не из континуальных свойств, а из атомистических. В. Томсон выдвигал немало интересных модификаций эфира, но они не достигли цели. В 1910 г. Планк писал: «Чтобы постигнуть строение эфира, были исчерпаны все предложения и комбинации, какие только можно себе представить; на этом поприще самым деятельным среди великих физиков оставался до конца своей жизни лорд Кельвин. И обнаружилось, что из единой механической гипотезы невозможно вывести электродинамические процессы в свободном эфире...»² Наличие множества различных моделей в пределах одной теории казалось крайне парадоксальным. Эту трудность преодолел Анри Пуанкаре.

Он внес существенный вклад в обоснование максвелловой электродинамики и в выяснение ее принципиальных теоретических основ. Он показал, что если французские ученые, начиная с Лапласа и кончая Коши, исходили из точно высказанных гипотез и следствия из этих гипотез, выведенных с математической строгостью, сравнивали с опытом, то метод Максвелла был иным.

¹ Г. А. Лоренц. Статьи. Л., 1940, стр. 40.

² М. Планк. Единая физическая картина мира. М., 1966, стр. 61.

Максвелл, в отличие от многих физиков конца XVIII — начала XIX в. не давал механического объяснения электричества и магнетизма, он лишь доказывал возможность такого объяснения, и естественно, что уравнения Максвелла можно было идентифицировать с самой теорией. Из непосредственного опыта можно получить некоторое число параметров (q_1, q_2, \dots, q_n) и их измерить. Наблюдению дает нам законы изменения этих параметров. Законы эти можно представить в форме дифференциальных уравнений, связывающих параметры между собой и со временем.

Для механического истолкования явления его надо, отмечает Пуанкаре, объяснить при помощи движения обычной материи или гипотетических частиц. Уравнения движения частиц m_1, m_2, \dots, m_p имеют вид:

$$\begin{aligned} m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= - \frac{\partial U}{\partial x_i}, & m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= - \frac{\partial U}{\partial y_i}, \\ m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= - \frac{\partial U}{\partial z_i}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $(-U)$ — силовая функция от $3p$ координат.

«Мы будем иметь полное механическое объяснение явлениям, если будем, с одной стороны, знать силовую функцию $(-U)$ и, с другой стороны, сумеем выразить $3p$ координат x_i, y_i, z_i через n параметров q »¹.

Заменив координаты их выражениями через параметры, мы переходим к законам движения в форме Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial U}{\partial q_k} = 0. \quad (2)$$

«Итак, — пишет Пуанкаре, — для того чтобы механическое объяснение явления было возможным, нужно, чтобы оказалось возможным найти две функции U и T , зависящие: первая — только от параметров q , вторая — от этих параметров и их производных; нужно, далее, чтобы T была однородной функцией второго порядка по отношению к этим производным и чтобы дифференциальным уравнениям, выведенным из опыта, могла быть придана форма (2). Справедливо и обратное предложение: всякий раз, когда можно найти эти две функции T и U , есть уверенность, что явление поддается механическому объяснению»². Далее Пуанкаре доказывает, что при наличии функций $U(q_k)$ и $T(\dot{q}_k, q_k)$ можно найти бесконечное множество механических объяснений явлений, и все они соответствуют частным особенностям опыта. «Теперь нетрудно понять основную идею Максвелла. Чтобы доказать возможность механического объяснения электричества, нам не нужно затруднять себя отысканием этого самого объяснения, достаточно знать выражения для двух функций T и U , которые обе являются составными частями энергии, образовать с их помощью уравнения Лагранжа и затем сравнить эти уравнения с экспериментальными законами»³.

¹ А. Пуанкаре. Введение к кн. «Электричество и оптика». В сб. «Вариационные принципы механики». Физматгиз, 1959, стр. 775.

² Там же, стр. 775.

³ Там же, стр. 776.

Пуанкаре принадлежит также глубокий анализ амперовой электродинамики, ее связи с гельмгольцевой электродинамикой и обоснование необходимости перехода к электродинамике Максвелла.

Наряду с этим Пуанкаре глубоко оценил сложнейшие проблемы электростатики Максвелла, внося значительный вклад в обоснование ряда проблем ее. Мы вкратце остановимся лишь на некоторых из них.

Глубокая связь электростатики и теории потенциала, возникшая после открытия закона Кулона, оказалась плодотворной для обеих сторон; электростатика получила математический аппарат и методы, сложившиеся в теории притяжения, а сама эта теория, благодаря специфике проблем электростатики, обогатилась новыми задачами, новыми методами. Можно без преувеличения сказать, что начиная с работ Пуассона и Грина и кончая работами Ляпунова и Стеклова, все важнейшие исследования по теории потенциала прямо или косвенно были связаны с задачами электростатики.

Уже первые электростатические опыты Кулона (1786) позволили принципиально правильно поставить первую краевую задачу для уравнения Лапласа и стимулировали исследования Пуассона по решению этой задачи для сферы. Теорема Пуассона о разрыве нормальной производной потенциала простого слоя (1814) также была предвосхищена опытами Кулона.

Исследования Грина, приведшие к его знаменитым формулам и к так называемому методу функций Грина, были предприняты в связи с решением чисто электростатической задачи об отыскании связи между «потенциальной функцией» объемных зарядов и соответствующей ей плотностью распределения электричества на поверхности проводника.

Метод электрических изображений В. Томсона обязан своим происхождением поискам путей, направленных на преодоление трудностей, встретившихся при рассмотрении некоторых задач электростатики, относящихся к сферическим проводникам¹.

Исследования Гаусса, Томсона, Дирихле и Римана, связанные с проблемами существования и единственности, возникли вместе с постановкой краевых задач и, таким образом, их генетическая связь с электростатикой очевидна. Эти проблемы были в сфере интересов Максвелла. Последующее их развитие привело к замкнутости теории в целом.

Метод арифметических средних К. Неймана был первым общим методом решения краевых задач теории потенциала, применимым ко всем достаточно гладким выпуклым поверхностям; потребности электростатики были вызваны и исследования Неймана, связанные с распространением метода арифметических средних на поверхности, обремененные плоскими частями, ребрами и угловыми точками². Примерно к тому же времени относятся и исследования Робэна о распределении электричества на проводниках, при-

¹ См.: М. Г. Шраер. Учение о потенциале в работах В. Томсона. «Труды Института истории естествознания и техники», т. 34. М., 1960, стр. 103—109.

² См.: М. Г. Шраер. К истории математических методов электростатики во второй половине XIX в. «Вопросы истории естествознания и техники». М., изд-во «Наука», 1964, вып. 17, стр. 76—82.

ведшие к так называемому методу Робэна. Значение методов Неймана и Робэна состоит в том, что они не только устанавливали существование решения краевых задач теории потенциала, но и давали конструкцию, алгоритм самих этих решений. Поэтому они оказались в центре внимания всех исследований по теории потенциала последней трети XIX в. Эти исследования предпринимались с целью распространения методов Неймана и Робэна на класс поверхностей, более широкий, чем выпуклые, ибо выпуклые поверхности не удовлетворяли требованиям математической общности и, главное, представляли собой класс поверхностей, слишком узкий с точки зрения приложений теории потенциала, в частности приложений к электростатике.

С именем Анри Пуанкаре связан важный этап истории теории потенциала, лежащий на стыке классического направления этой теории, идущего от Грина и Гаусса, и нового теоретико-множественного и теоретико-функционального направления в математике. Три больших мемуара Пуанкаре¹, появившиеся один вслед за другим на протяжении короткого отрезка времени, сыграли благодаря богатству содержащихся в них новых идей выдающуюся роль и оказали огромное влияние на дальнейшее развитие теории потенциала и математической физики в целом.

Пуанкаре был одним из творцов метода, известного под именем «метода Шварца — Пуанкаре», с помощью которого ему удалось установить существование и свойства решений широкого класса краевых задач математической физики. Идеи, лежащие в основе этого метода, проложили путь к распространению методов Неймана и Робэна на все поверхности Лиapunова. Пуанкаре принадлежит открытие так называемого метода фундаментальных функций, обобщающего классические методы решения частных задач теории потенциала с помощью специальных функций, и, наконец, открытие замечательного метода доказательства существования решения первой краевой задачи (задачи Дирихле), свободного от ограничений, связанных с выпуклостью рассматриваемой поверхности. Речь идет о методе, названном самим автором «методом выметания» («methode de balayage») и опубликованного в первом из указанных мемуаров.

Метод выметания явил собой пример поразительного сочетания математических и физических идей, какой история теории потенциала уже имела в работах Грина и Гаусса.

Еще со времен Пуассона и Грина было известно, что если единственный заряд, сосредоточенный в какой-нибудь точке P внутри сферы, распределить по его поверхности так, чтобы на ней образовался так называемый слой Грина, то такое преобразование (как раз и названное Пуанкаре «операцией выметания» изнутри сферы) не приведет к каким-либо изменениям поля вне данной сферы, Пуанкаре обратил внимание на то, что из этого утверждения, дополненного указанием о действии слоя Грина на точки внутри

¹ H. Poincaré. Sur les équations aux dérivées de la Physique mathématique. «American Journal of mathematics». 1890, vol. XII, N 3, p. 211—294.— Sur les équations de la physique mathématique. «Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo», tome VIII, 1894, p. 57—186.— La méthode de Neumann et le problème de Dirichlet. «Acta Mathematica», t. 20, 1896, p. 59—142.

данной сферы, можно извлечь весьма далеко идущие следствия. Такого рода дополнение и делает сначала Пуанкаре, доказав, что операция выметания положительных масс изнутри сферы приводит к ослаблению поля внутри этой сферы. Это предложение Пуанкаре составляет, так сказать, первую, классическую основу его «метода выметания».

Вторая основа этого метода имеет чисто математический характер и связана с новыми в то время направлениями в математике, относящимися к области теории множеств. Пуанкаре показывает, что для любой замкнутой поверхности (σ) всегда можно построить счетное множество сфер (S_n) , покрывающих область вне (σ) и не пересекающихся с самой поверхностью (σ) .

Если теперь представить проводник (σ) , окруженный сферой (Σ) центра O и радиуса R , равномерно заряженный положительным электричеством плотности, равной $\frac{1}{4\pi R^2}$, то внутри некоторых

из сфер (S_n) счетного покрытия, области, внешней к (σ) , попадут электрические заряды. Начиная с какой-нибудь из таких сфер (S_i) , произведем в любом порядке последовательные выметания, но так, чтобы каждая из сфер покрытия выметалась бесконечно много раз. Из сказанного выше следует, что каждая операция выметания может привести разве лишь к уменьшению потенциала в любой точке M пространства по сравнению с его первоначаль-

ным значением V_0 , равным $\frac{R}{OM}$ в любой точке M вне (Σ) и равным

1 внутри (Σ) . Таким образом, внутри каждой из сфер (S_i) определится некоторая невозрастающая последовательность $V_1^{(i)}$, $V_2^{(i)}$, ..., $V_n^{(i)}$ положительных функций, гармонических внутри (S_i) , имеющая, следовательно, некоторый конечный предел $V^{(i)}$. Согласно теореме Гарнака, этот предел также является функцией гармонической внутри (S_i) , а совокупность этих последних, взятая во всем i , определяет некоторую функцию V , гармоническую вне (σ) . Так как каждая из $V_n^{(i)}$ удовлетворяет условию $0 \leq V_n^{(i)} < V_0$, то таким же свойством обладает и функция V , которая в силу этого оказывается регулярной на бесконечности.

Согласно построению, каждая из функций $V_n^{(i)}$ обращается в 1 на (σ) . Для доказательства того, что таким же свойством обладает и предельная функция V , Пуанкаре вынужден наложить некоторое ограничение на поверхность проводника (σ) . Именно, он предполагает, что в каждой точке этой поверхности существует определенная касательная плоскость и два определенных отличных от нуля радиуса кривизны. Эти ограничения позволяют для любой точки M_0 поверхности проводника (σ) построить сферу (S) , целиком лежащую внутри (σ) , и касательную к (σ) в точке M_0 .

Если C — центр сферы (S) и r — ее радиус, то функция $\frac{r}{MC}$, рассматриваемая как функция от M , гармонична вне (S) и обращается в 1 на (S) .

Поэтому функция $u(M) = V_n(M) - \frac{r}{MC}$, где $V_n(M)$ — потенциал точки M , получающийся из $V_0(M)$ после n операций выметания, будет потенциалом в точке M поля, порождаемого положительными зарядами, лежащими вне (S) , и от-

Теория цветов в исследованиях Максвелла

рицательного заряда $-r$, сконцентрированного в центре сферы (S) . В силу этого вне (S) функция u может иметь лишь максимумы, и так как $U|_{(S)}=0$, то вне (S) $U>0$, т. е. $V_n(M) > \frac{r}{MC}$. Таким образом, вне (S) $\frac{r}{MC} < V_n \leq V < 1$, и при $M \rightarrow M_0$ будет $V(M) \rightarrow V(M_0) = 1$. Тем самым доказано существование функции, гармонической вне заданного проводника (σ) и обращающейся в 1 на поверхности этого проводника, т. е. установлено существование решения основной задачи электростатики для указанного класса поверхностей.

С помощью метода изображений Томсона эта задача дает возможность установить существование функции Грина, а значит, и решить внутреннюю задачу Дирихле.

Мы не станем останавливаться на некоторых остроумных усовершенствованиях метода выметания, сделанных Пуанкаре в этом же мемуаре. Укажем лишь, что Пуанкаре удается снять некоторые ограничения на рассматриваемые им поверхности и предложить такое видоизменение метода выметания, которое позволяет непосредственно (т. е. минуя построение функции Грина) доказать принцип Дирихле для указанного выше класса поверхностей при условии непрерывности функции, входящей в краевое условие задачи Дирихле.

Высказанные в связи с этим идеи Пуанкаре привели к глубокому проникновению в теорию потенциала методов теории функций, связанных с понятиями меры и емкости множеств, с теорией суб- и супергармонических функций, благодаря чему теория потенциала обогатилась новыми обобщениями в постановке и решении ее задач.

В третьем из упомянутых выше мемуаров, вышедшем в 1896 г., Пуанкаре определяет некоторый класс поверхностей, содержащий выпуклые поверхности, для которого методы Неймана и Робэна сохраняют еще свою силу. Для этих поверхностей Пуанкаре устанавливает следующее: если W — потенциал двойного слоя с непрерывной плотностью $v \neq \text{const}$, то отношение $\frac{J}{J'}$ интегралов вида $\int (\Delta W)^2 di$, взятых соответственно по внутренности и внешности (S) , заключено в конечных и отличных от нуля пределах, не зависящих от v . Опираясь на это предложение, Пуанкаре установил принцип Неймана для всех введенных им поверхностей.

Заслуга Пуанкаре в том, что он впервые обратил внимание на связь между принципом Неймана и существованием конечных и отличных от нуля пределов отношения $\frac{J}{J'}$.

Именно эта связь послужила исходным пунктом в исследованиях Стеклова и Зарембы, которые, опираясь на основополагающие работы Ляпунова, смогли обосновать применимость методов Неймана и Робэна ко всем поверхностям Ляпунова. Метод Пуанкаре, как и многие другие методы решения электростатических задач, которыми Максвелл непосредственно не занимался, дополняли стройное здание электродинамики, понимаемой в широком смысле.

У. И. Франкфурт, М. Г. Шраер

В первые годы своей научной деятельности Д. К. Максвелл активно интересовался проблемами, связанными с теорией цветов.

Следует отметить, что в то время теория цветов только складывалась. Первые работы в этой области относятся, правда, еще к XVII в. и были выполнены в основном Ньютоном. XVIII век не внес ничего существенного в изучение этой проблемы. И только в XIX в. возрождается интерес к ней и появляются многочисленные теоретико-экспериментальные работы. Еще короче была история вопросов, связанных с цветовой слепотой: она впервые была описана в XIX в. известным английским химиком Дальтоном, который обнаружил у себя недостаток в цветовом восприятии.

Основы теории цветов были заложены И. Ньютоном. Он поставил перед собой задачу создать математическую теорию цветов¹ и выполнил ее. Он показал на опыте, что «лучам с равной преломляемостью отвечают разные цвета»², что «цвет белый и черный, а также пепельный или более темные промежуточные цвета создаются беспорядочным смешением лучей всякого рода. Таким же образом прочие все цвета, не являющиеся первоначальными, производятся различными смесями этих лучей. Отсюда не удивительно, что при разъединении разнородных лучей неравным преломлением мы видим, что слова возникают из них различные цвета. ...Первоначальные цвета при смешении лучей одного с другим могут проявлять смежные цвета; так, зеленый — из желтого и синего, желтый — из прилежащего зеленого и лимонного и также из других. Под первоначальными цветами я разумею... какие угодно... проявляемые каким-либо однородным видом лучей»³. Ньютон от-

¹ И. Ньютон. Лекции по оптике (перевод, комментарии и редакция акад. С. И. Вавилова). Изд-во Академии наук СССР. М., 1946.

² Там же, стр. 146.

³ Там же, стр. 145.