

ПОНЯТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАССЫ

Мысль о том, что инерция в конечном счете представляет собой электромагнитное явление и что инертная масса, в сущности, является эффектом индукции, имеет свое основание в исследовании электродинамики движущихся зарядов. Хотя тензор напряженности электромагнитного поля Максвелла в качестве пространственной составляющей тензора энергии-импульса электромагнитного поля в неявной форме содержал идею, ведущую к этому новому понятию, как это известно в настоящее время, но не было известно до появления теории относительности, тем не менее только в 1881 году Дж. Дж. Томсон в статье «Об электрических и магнитных эффектах, произведенных движением наэлектризованных тел»¹ рассмотрел возможность сведения инерции к электромагнетизму. Томсон исследует случай движения электростатически заряженной сферы через неограниченную среду с удельной индуктивностью (диэлектрической постоянной) ϵ . Для того чтобы подсчитать ток смещения, образованный движением заряда, Томсон предполагает, что (1) распределение заряда по поверхности носителя остается неизменным в процессе движения и (2) что электрическое поле, увлекающееся вперед с движущимся носителем, остается без искажения. То, что первое допущение является верным, а второе ошибочным, было показано только пятнадцать лет спустя Муртоном².

Так как, согласно теории Максвелла, электрическое смещение (то есть ток смещения) обуславливает те же самые эффекты, что и обыкновенный электрический ток, то возникает магнитное поле, которое может быть подсчитано на основании вектора-потенциала, соответствующего

¹ «Philosophical Magazine», 11, 229—249 (1881).

² «Philosophical Magazine», 41, 488 (1896).

току смещения. Из напряженностей электрического и магнитного полей Томсон, таким образом, смог вычислить энергию окружающего электромагнитного поля. Эта энергия, согласно принципу сохранения, должна быть восполнена за счет движения заряженного носителя. Так как движение этого носителя служит источником энергии, то ясно, что он должен испытывать сопротивление при движении сквозь диэлектрик. Поскольку рассеяние энергии при движении сквозь среду исключается, так как допускается, что среда не обладает электропроводностью, то испытываемое сопротивление должно быть аналогичным сопротивлению твердого тела, движущегося в идеальной жидкости. «Другими словами, оно должно быть эквивалентным увеличению массы движущейся заряженной сферы»³.

Для Томсона, как мы видим, возникающее сопротивление является только «эквивалентным увеличению массы»; он представляет себе процесс таким образом, «как если бы» масса увеличивалась. Он еще мыслит по аналогии с классической гидродинамикой; в данном случае сферическая частица с массой m , погруженная в несжимаемую жидкость, сквозь которую она движется со скоростью v , приобретает в добавлении к своей собственной кинетической энергии $\frac{1}{2}mv^2$ еще и энергию $\frac{1}{2}\mu v^2$; таким образом, общая энергия, сообщенная всей системе, может быть записана в виде $\frac{1}{2}(m + \mu)v^2$. «Наличие жидкости создает поэтому кажущийся эффект увеличения массы сферы»⁴, и μ в механике жидкостей часто называется «индуцированной массой»⁵.

Как показал Томсон в своей статье, возможное увеличение массы μ в случае сферы радиуса a и заряда e дается выражением

$$\mu = \frac{4}{15} \frac{e^2}{ac^2}. \quad (1)$$

³ «Philosophical Magazine», 11, 230 (1881).

⁴ D. E. Rutherford, Fluid mechanics (Oliver and Boyd, Edinburgh and London; Interscience Publishers Inc., New York, 1959), p. 103.

⁵ См., например, R. J. Seeger, Fluid mechanics, в: «Handbook of physics», ed. E. U. Condon and H. Odishaw (McGraw-Hill, New York, Toronto, London, 1958), p. 3—18.

Для оценки порядка величины μ по отношению к обычной инертной массе m движущегося тела Томсон подсчитал кажущееся увеличение массы Земли при ее движении по орбите вокруг Солнца, полагая, что Земля заряжена максимально возможным потенциалом. Он показал, что μ составляет только $7 \cdot 10^8$ г — «масса, величина которой совершенно незначительна в сравнении с массой Земли»⁶. Мы приводим этот пример и это высказывание для того, чтобы показать, что Томсон на этой стадии все еще далек от обобщения своих результатов и интерпретирует всю инертную массу как «индуцированную массу». Важно также заметить, что, согласно заключению Томсона, μ не зависит от скорости v движущегося тела.

Непосредственно после опубликования статьи Томсона Фитцджеральд указал⁷, что ток смещения Томсона, используемый в его расчетах, не согласуется с условием циркуляции Максвелла и что только ток, составленный из этого тока смещения и конвекционного тока, возникающего благодаря движению самого заряда, действительно удовлетворяет этому условию.

Важным улучшением результата Томсона было исследование Оливера Хевисайда «Об электромагнитных эффектах, возникающих при движении электрических зарядов через диэлектрик»⁸, опубликованное в 1889 году. Это исследование привело к результатам, которые включали в себя более высокие степени в выражении v/c . В современном варианте решение Хевисайда может быть представлено следующим образом. Точечный заряд q движется в положительном направлении оси x в системе координат (x, y, z) с постоянной скоростью v . Для того чтобы подсчитать энергию электромагнитного поля, обусловленную одним движением, то есть энергию избыточную в сравнении с энергией электростатического поля, соответствующей стационарному заряду, теория Максвелла требует подсчета величины $\frac{1}{8} \pi \iiint \mathbf{H}^2 d\tau$, где \mathbf{H} представляет

⁶ «Philosophical Magazine», 11, 234 (1881).

⁷ George Francis FitzGerald, The scientific writings of the late George Francis FitzGerald, collected and edited with a historical introduction by Joseph Larmor (Longmans, Green, London, 1902). Первоначально статья появилась в «Proceedings of the Royal Dublin Society», 3, 250 (1881).

⁸ «Philosophical Magazine», 27, 324—339 (1889).

собой вектор магнитного поля, определенный посредством уравнений Максвелла из токов конвекции и смещения, связанных с движением точечного заряда. Так как вектор скорости v направлен по оси x , то легко показать, что уравнения Максвелла налагают на вектор-потенциал A следующие условия:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} - \nabla^2 A_x = \frac{4\pi}{c} \rho v, \quad A_y = 0, \quad A_z = 0, \quad (2)$$

где ρ — объемная плотность заряда, которая в современных обозначениях может быть взята в отношении к q на основании уравнения $\rho = q\delta(r - r_0)$, где r_0 — положение вектора заряда, а δ обозначает функцию Дирака. Путем преобразования в новую координатную систему (ξ, η, ζ) , которая связана с движущимся зарядом и сокращается в направлении движения в соответствии с множителем $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$, так что

$$\xi = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} (x - vt), \quad \eta = y, \quad \zeta = z,$$

предыдущее уравнение для A_x превращается в простое уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 A_x}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 A_y}{d\eta^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial \zeta^2} = -\frac{4\pi}{c} \rho v, \quad (3)$$

которое может получить решение для A_x . Для единичного заряда q компонента x вектора-потенциала A_x — если осуществлено обратное преобразование в первоначальную координатную систему (x, y, z) — дается посредством выражения

$$A_x = \frac{q\beta}{[x^2 + (1 - \beta^2)(y^2 + z^2)]^{1/2}},$$

где $\beta = v/c$. Если компоненты вектора-потенциала известны, уравнение

$$\mathbf{H} = \text{curl } \mathbf{A}$$

определяет величину компонентов вектора магнитного поля \mathbf{H} . В таком случае легко проверить, что

$$H^2 = \frac{q^2 (1 - \beta^2) \beta^2 (y^2 + z^2)}{[x^2 + (1 - \beta^2)(y^2 + z^2)]^3} \quad (4)$$

или

$$H^2 = (q^2 \beta^2 \sin^2 \theta) / r^4,$$

где сферические координаты r и θ определяются посредством соотношений

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad \sin^2 \theta = \frac{y^2 + z^2}{x^2 + y^2 + z^2}$$

и остаются только члены порядка β^2 .

Хевисайд высказал предположение (ошибочное, как указал позднее Серль⁹), что приведенный только что расчет для H^2 остается верным и в том случае, когда q интерпретируется не как точечный заряд, но как заряд, распределенный по поверхности идеально проводящей сферы радиуса a . Дополнительная энергия ΔU электромагнитного поля вне движущейся сферы в результате ее движения дается выражением

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{1}{8\pi} \int \int \int H^2 d\tau = \\ &= \frac{q^2 \beta^2}{8\pi} \int_a^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{\sin^2 \theta}{r^4} r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr \end{aligned}$$

или окончательно¹⁰

$$\Delta U = \frac{q^2 v^2}{3ac^2}. \quad (5)$$

Сравнивая это выражение с $\frac{1}{2}\mu v^2$, Хевисайд получил для возрастания массы следующую величину:

$$\mu = \frac{2q^2}{3ac^2}. \quad (6)$$

Так как общая электромагнитная энергия U_0 вне стационарной сферы с поверхностным зарядом q и радиусом a

⁹ G. F. C. Searle, On the steady motion of an electrified ellipsoid, «Philosophical Magazine», 44, 329—341 (1897). См. также G. F. C. Searle, Problems in electric convection, в: «Philosophical Transactions of the Royal Society of London», [A], 187, 675—713 (1897).

¹⁰ Уравнение (5) может быть получено и элементарным путем из закона Био и Савара (иногда этот закон называют законом Лапласа или законом Ампера), согласно которому напряженность магнитного поля (в гауссовых единицах) на расстоянии r от заряда q , движущегося со скоростью v , равна $H = qv \sin \theta / cr$, где $\theta =$ угол между v и r . Энергия поля в элементарном объеме $d\tau$ дается выражением $dU = (1/8\pi)H^2 d\tau$. Подстановка величины H и интегрирование по всему пространству вне сферической частицы приводит к уравнению (5). Если допустить, что заряд q распределен по всему объему сферы, то результат будет другим, с множителем порядка единицы.

равна $q^2/2a$, как это легко показать простым интегрированием, то результаты Хевисайда могут быть выражены следующим образом: увеличение массы движущейся сферы с однородным распределением поверхностного заряда равно $4/3$ ее энергии стационарного поля U_0 , деленной на c^2 .

Для Хевисайда — в противоположность Томсону — это увеличение массы представляет собой физически значимое явление, не простую аналогию механической инерции, но инерциальный эффект *sui generis*. Действительно, Хевисайд ясно говорит об «электрической силе инерции»¹¹.

Публикация статьи Хевисайда положила начало оживленному соревнованию между механикой и электромагнитной теорией за первенство в физике. Эра механических интерпретаций электромагнитных явлений, начатая Вильямом Томсоном (лордом Кельвином) и Максвеллом в их поисках механических моделей эфира, достигла к этому времени своего расцвета. Научные журналы 90-х годов были наводнены статьями, в которых предпринимались попытки свести электромагнетизм к механике или гидродинамике. Вера в то, что все силы в природе в конечном счете только различные проявления одной и той же фундаментальной силы, вдохновляла многих ученых на поиски таких принципов унификации. Так, например, механическая теория электромагнитного поля Корна, базирующаяся на теории пульсирующих сфер К. А. Бьеркнеса¹² и первоначально опубликованная в книге под названием «Теория гравитации и электромагнитных явлений на основе гидродинамики»¹³, приобрела большую известность в мире науки того времени. В 1917 и 1918 годах журнал «Physikalische Zeitschrift» все еще продолжал публиковать статьи Корна и других авторов по поводу этой и подобных теорий¹⁴.

¹¹ «Philosophical Magazine», 27, 332 (1889).

¹² «Göttinger Nachrichten» (1876), S. 245; «Comptes rendus», 84, 1375 (1877); «Nature», 24, 360 (1881).

¹³ A. K o r n, Eine Theorie der Gravitation und der elektrischen Erscheinungen auf Grundlage der Hydrodynamik (Berlin, Aufl. 1, 1894; Aufl. 2, 1896; Aufl. 3, 1898).

¹⁴ Мы упомянем здесь только статьи Корна, опубликованные в течение 1917 и 1918 годов: «Механическая теория электромагнитных полей», в: «Physikalische Zeitschrift», 18, 323—326, 341—345, 504—507, 539—542, 581—584 (1917); 19, 10—13, 201—203, 234—237, 426—429 (1918).

Эти механические теории электромагнетизма натолкнулись теперь на соперничество электромагнитных теорий механики. Поиски концептуального единства были руководящей идеей многих теоретиков в начале столетия в исследовании методологических возможностей нового подхода, основанного на электромагнитном понятии массы. Более того, глубоко мыслящие теоретики, возможно, рассматривали огромное число публикаций предлагаемых механических теорий электромагнетизма как симптом несомненной бесполезности всех попыток движения в этом направлении и приветствовали новый подход в противоположном направлении. Так, например, Больцман в своих «Лекциях о принципах механики», ссылаясь на вновь развитую теорию электронов, замечает следующее:

«Эта теория не претендует на то, чтобы объяснить понятие массы и силы, закон инерции и т. п. из чего-то более простого, что само может быть легко понято. Фундаментальные понятия этой теории и ее основные законы, несомненно, останутся столь же необъяснимыми, как и с механической точки зрения. Однако польза выведения всей науки механики из понятий, так или иначе необходимых для объяснения электромагнетизма, может быть, столь же важна, как если бы, наоборот, электромагнитные явления объяснялись на основе механики. Возможно, что первый путь приведет к большим успехам»¹⁵.

Одним из первых горячих сторонников электромагнитного понятия массы был Вильгельм Вин. В статье «О возможности электромагнитного обоснования механики»¹⁶, опубликованной в знаменитой юбилейной книге Лоренца, Вин первоначально допускает, что Максвелл, Кельвин и Герц предпочли естественный путь и взяли механику в качестве основы для объяснения уравнений Максвелла. Однако в свете все возрастающей сложности механических моделей, предложенных с этой целью, Вин полагает, что более обещающим для будущего развития физической тео-

¹⁵ Ludwig Boltzmann, Vorlesungen über die Prinzipie der Mechanik (Leipzig, 1897); цит. по 2-му изданию (Лейпциг, 1904), часть 2, стр. 138—139.

¹⁶ Wilhelm Wien, Über die Möglichkeit einer elektromagnetischen Begründung der Mechanik, в: «Recueil de travaux offerts par les auteurs à H. A. Lorentz (The Hague, 1900), p. 96—107.

рии является рассмотрение электромагнитных уравнений как основы для выведения законов механики ¹⁷.

Ссылаясь на электрическую силу инерции Хевисайда, Вин обобщает этот результат и выражает свое твердое убеждение в выводимости механической теории из теории электромагнитной. «Инерция материи, которая, если не считать гравитации, дает независимое определение массы, может быть выведена без дополнительных гипотез из часто теперь применяемого понятия электромагнитной инерции» ¹⁸.

Вывод инертной массы у Вина основывается на расчетах Серля относительно энергии поля, произведенного движущимся эллипсоидом Хевисайда ¹⁹. Если U есть энергия поля, соответствующая такому эллипсоиду, движущемуся со скоростью v , и если U_0 есть энергия, соответствующая покоящемуся эллипсоиду, то на основе результатов Серля

$$U = U_0 \frac{1 + \frac{1}{3} \beta^2}{(1 - \beta^2)^{1/2} \arcsin \beta}. \quad (7)$$

Разлагая это выражение в ряд по степеням β , Вин получает

$$U = U_0 \left(1 + \frac{2}{3} \beta^2 + \frac{16}{45} \beta^4 + \dots \right). \quad (8)$$

Следовательно, возрастание энергии в результате движения электрического заряда равно в первом приближении

$$\frac{2}{3} U_0 \beta^2 = \frac{2}{3c^2} U_0 v^2 = \frac{1}{2} \mu v^2 \quad (9)$$

а инертная масса —

$$\mu = \frac{4}{3} \frac{U_0}{c^2}. \quad (10)$$

¹⁷ Ibid., S. 97: «Viel aussichtsvoller als Grundlage für weitere theoretische Arbeit scheint mir der umgekehrte Versuch zu sein, die elektromagnetischen Grundgleichungen als die allgemeineren anzusehen, aus denen mechanischen zu folgern sind».

¹⁸ Ibid., S. 101: «Die Trägheit der Materie, welche neben der Gravitation die zweite unabhängige Definition der Masse giebt, lässt sich ohne weitere Hypothesen aus dem bereits vielfach benutzten Begriff der elektromagnetischen Trägheit folgern».

¹⁹ Этот термин, введенный Сирли (см. сноску 9), обозначает сплюснутый сфероид, главные оси которого имеют отношение $(1 - \beta^2) : 1 : 1$. При движении со скоростью v его поле идентично с полем точечного заряда, величина которого и скорость такие же, как у сфероида.

Вин, таким образом, подтверждает результаты Хевисайда для небольших скоростей v , но отмечает, что для более высоких скоростей должны быть приняты во внимание другие члены ряда: электромагнитная масса зависит от скорости.

Последующее развитие электромагнитного понятия массы, в особенности как это описывается его наиболее красноречивым защитником Максом Абрагамом, внутренне связано с открытием в 1884 году Пойнтингом его знаменитой теоремы²⁰ относительно переноса энергии в электромагнитном поле, а также с понятием электромагнитного импульса, теоретическая важность которого была предсказана Пуанкаре²¹, но в деталях разработана только самим Абрагамом²².

Исследования электромагнитной природы инертной массы Абрагамом ограничивались механикой электрона, который в то время — в особенности в работах В. Кауфмана — был предметом многочисленных экспериментальных исследований. Однако молчаливо предполагалось, что полученные выводы могут быть применены к положительным зарядам и, таким образом, распространены на материю вообще. В главе своего известного учебника «Теория электричества»²³, носящей название «Основные гипотезы динамики электрона и электромагнитная картина мира», Абрагам указывает, что объектом его исследований является развитие динамики электрона, которая может объяснить эксперименты Кауфмана на чисто электромагнитной основе.

²⁰ John Henry Poynting, «Philosophical Transactions», 175, 343 (1884). Теорема Пойнтинга была самостоятельно открыта Хевисайдом, см. «The Electrician», 14, 178, 306 (1885). В русской научной литературе эта теорема часто связывается с именем Н. А. Умова*.

²¹ Henri Poincaré, La théorie de Lorentz et le principe de réaction, «Recueil de travaux offerts par les auteurs à H. A. Lorentz», p. 252—278, в особенности стр. 276—277.

²² Понятие «электромагнитного импульса» было введено Абрагамом в его статье «Динамика электрона», опубликованной в «Göttinger Nachrichten» (1902), стр. 20—41, и впервые в его статье «Принципы динамики электрона», «Annalen der Physik», 10, 105—179 (1903).

²³ Max Abraham, Theorie der Elektrizität (Teubner, Leipzig, 1905), Bd. 2, Abt. 16; «Die Grundhypothesen der Dynamik des Elektrons und das elektromagnetische Weltbild», S. 139.

Отталкиваясь от уравнений Максвелла и от так называемой формулы Лоренца для плотности силы \mathbf{f} (сила на единицу объема, направленная со стороны поля на материальную частицу)

$$\mathbf{f} = \rho \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{H} \right), \quad (11)$$

Абрагам показал, что, например, x -компонента плотности силы дается выражением

$$f_x = \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} - \frac{dg_x^{(f)}}{dt}, \quad (12)$$

где T_{xx} , T_{xy} , ... представляют собой компоненты электромагнитного тензора напряженности, а $g_x^{(f)}$ — плотность электромагнитного импульса поля, то есть ²⁴,

$$\mathbf{g}^{(f)} = \frac{1}{4\pi c} \mathbf{E} \times \mathbf{H}. \quad (13)$$

Общая сила \mathbf{F} , направленная со стороны поля на материальную систему, равна объемному интегралу по плотности силы

$$\mathbf{F} = \int \int \int \mathbf{f} d\tau \quad (14)$$

и, согласно закону Ньютона, может быть выражена как производная по времени от общего материального или механического импульса $\mathbf{G}^{(m)}$. Следовательно, x -компонента \mathbf{F} удовлетворяет уравнению

$$\frac{dG_x^{(m)}}{dt} = \int \int \int \left(\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \right) d\tau - \frac{dG_x^{(f)}}{dt}, \quad (15)$$

где $\mathbf{G}^{(f)}$, общий электромагнитный импульс поля, равен объемному интегралу плотности импульса поля. На основании теоремы дивергенции Гаусса можно показать, что интеграл по тензору дивергенции стремится к нулю (если ограничивающая поверхность выбрана достаточно удаленной). Абрагам, таким образом, получил закон сохранения линейного импульса для электромагнитного поля:

$$\frac{dG^{(m)}}{dt} = - \frac{dG^{(f)}}{dt}. \quad (16)$$

²⁴ Как показывает это уравнение, вектор Пойнтинга является носителем не только энергии, но и импульса — факт, который, как мы увидим в следующих двух главах, находит свое объяснение только в специальной теории относительности.

Абрагам далее подсчитал импульс поля $\mathbf{G}^{(f)}$ для электрона, движущегося со скоростью \mathbf{v} вдоль положительной оси x покоящейся координатной системы. Используя закон Био — Савара, $\mathbf{H} = (1/c) \mathbf{v} \times \mathbf{H}$ и элементарные векторные тождества, он получил для x -компоненты следующее выражение:

$$g_x^{(f)} = \frac{v}{6\pi c^2} E^2. \quad (17)$$

А так как при симметричном рассмотрении $G_x^{(f)}$ и $G_y^{(f)}$ равны нулю, то для общего импульса поля мы имеем:

$$\mathbf{G}^{(f)} = \frac{\mathbf{v}}{6\pi c^2} \int \int \int E^2 d\tau. \quad (18)$$

Таким образом, если U_0 означает общую энергию поля, а именно $\frac{1}{8} \pi \int \int \int E^2 d\tau$, то

$$\mathbf{G}^{(f)} = \frac{4}{3} \frac{U_0}{c^2} \mathbf{v}. \quad (19)$$

Из этих расчетов Абрагам сделал следующие выводы. Если скорость электрона \mathbf{v} постоянна по величине и направлению, то $\mathbf{G}^{(f)}$ точно так же постоянен, и его производная по времени равна нулю. Из уравнения (16), закона сохранения линейного импульса вещества и поля, следует в таком случае, что $\mathbf{G}^{(m)}$ также постоянен. Согласно Абрагаму, это и есть электромагнитная интерпретация закона инерции. В своей фундаментальной статье «Принципы динамики электрона» он дает формулировку электромагнитного варианта закона инерции в следующих словах:

«Если с самого начала движение электрона было равномерным и чисто переносным и если его скорость была меньше скорости света, то для продолжения равномерного движения не требуется никаких внешних сил или моментов вращения»²⁵.

²⁵ M a x A b r a h a m, Prinzipien Dynamik des Elektrons, «Annalen der Physik», 10, 105—179 (1903): «Für das Elektron gilt demnach das erste Axiom Newtons in folgender Fassung: War die Bewegung des Elektrons von Anbeginn an eine gleichförmige, rein translatorische, und war die Geschwindigkeit kleiner als die Lichtgeschwindigkeit, so ist, um die Bewegung gleichförmig zu erhalten, keine äussere Kraft oder Drehkraft erforderlich» (S. 142).

Если скорость электрона увеличивается или уменьшается без изменения направления, то вектор $dG^{(f)}/dt$ точно так же сохраняет свое направление и его величина дается выражением:

$$\frac{dG^{(f)}}{dt} = \frac{dG^{(f)}}{dv} \frac{dv}{dt} = \mu w, \quad (20)$$

где w — кинематическое ускорение, а μ — электромагнитная масса. В таком случае из уравнения (16) следует, что электрон является объектом воздействия силы, которая направлена против движения и которая по величине равна ускорению, умноженному на электромагнитную массу.

Абрагам рассматривает электрон как жесткую сферу с однородным распределением заряда (независимо от того, объемный он или поверхностный). Он категорически возражает против идеи деформируемости электрона, так как такое допущение

«означает, что благодаря деформации была бы совершена механическая работа и, кроме электромагнитной энергии, необходимо было включить в описание и внутреннюю энергию электрона. В этом случае была бы невозможна электромагнитная интерпретация теории катодных или беккерелевых лучей — чисто электромагнитного явления — и необходимо было бы с самого начала отказаться от электромагнитного обоснования механики».

Для такого электрона Абрагам вычисляет лагранжиан L , проводя различие между магнитной и электрической энергиями, а из лагранжиана он определяет импульс точно таким же образом, как это делается в современной теории поля. Наконец, определяя продольную массу μ_{\parallel} как отношение производной по времени от импульса и ускорения в направлении движения, а поперечную массу μ_{\perp} как соответствующее отношение в направлении, перпендикулярном движению, Абрагам получает следующий результат ²⁶:

$$\begin{aligned} \mu_{\parallel} &= \frac{q^2}{2ac^2\beta^2} \left(\frac{2}{1-\beta^2} - \frac{1}{\beta} \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} \right), \\ \mu_{\perp} &= \frac{q^2}{2ac^2\beta^2} \left(\frac{1+\beta^2}{2\beta} \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} - 1 \right). \end{aligned} \quad (21)$$

²⁶ Подробное обоснование этих формул см. также в работах: K. S c h w a r z s c h i l d, Zur Elektrodynamik (Teil 3, «Über die Bewegung des Electrons»), в: «Göttingen Nachrichten» (1903), S. 245—278; A. S o m m e r f e l d, Zur Elektronentheorie, «Göttingen Nachrichten» (1904), S. 1—10.

Для малых скоростей

$$\mu_{\parallel} = \mu_{\perp} = \mu_0 = \frac{2q^2}{3ac^3}, \quad (22)$$

что было результатом Хевисайда [уравнение (6)].

Допустим теперь, что в добавление к вышеупомянутому действию силы имеет место другая внешняя сила \mathbf{K} , действующая на электрон, и пусть также электрон обладает вдобавок к электромагнитной массе еще и обыкновенной механической массой m (материальной массой Лоренца). В таком случае уравнение движения читается следующим образом:

$$\mathbf{K} - \mu \mathbf{w} = m \mathbf{w} \quad (23)$$

или

$$K = (m + \mu) w = M w, \quad (24)$$

где M в качестве коэффициента ускорения в уравнении силы является эффективной массой, равной, как мы видим, сумме механической и электромагнитной масс.

В более общем случае, когда ускорение направлено не в направлении движения, уравнение (24) должно быть заменено на более общее:

$$\mathbf{K} = (m + \mu_{\parallel}) \mathbf{w}_{\parallel} + (m + \mu_{\perp}) \mathbf{w}_{\perp} = M_{\parallel} \mathbf{w}_{\parallel} + M_{\perp} \mathbf{w}_{\perp}, \quad (25)$$

где μ_{\parallel} — продольная, а μ_{\perp} — поперечная электромагнитные массы, M_{\parallel} — продольная, а M_{\perp} — поперечная эффективные массы, а \mathbf{w}_{\parallel} и \mathbf{w}_{\perp} — компоненты ускорения в направлении, параллельном и перпендикулярном движению.

Чисто электромагнитная теория массы должна теперь показать, что введение механической массы m было ничем не оправдано. С точки зрения Абрагама, эксперименты Кауфмана, о которых сейчас пойдет речь, подтверждают этот вывод. Аргументы Абрагама состоят в следующем. Механическая масса m , согласно динамике Ньютона, не зависит от скорости, в то время как электромагнитная масса благодаря множителю $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ зависит от скорости. Если же экспериментальные данные обнаруживают для эффективной массы M ту же самую зависимость

gen Nachrichten», (1904), S. 99—130, 366—439; там же (1905), стр. 201—235; см. также Г. А. Л о р е н ц, Теория электронов, М., 1953, стр. 65—74.

от скорости, что и для электромагнитной массы μ , то механическая масса m с необходимостью равна нулю.

В более точном виде эти аргументы могут быть представлены следующим образом. Из уравнения (21) мы знаем, что

$$\mu_{\perp} = \frac{3\mu_0}{4\beta^2} \left(\frac{1+\beta^2}{2\beta} \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} - 1 \right), \quad (26)$$

то есть μ_{\perp} есть функция от v . Из экспериментов с электронами, движущимися с различными известными скоростями v_1 и v_2 , может быть найдено отношение r соответствующих эффективных поперечных масс

$$r = \frac{m + \mu_{\perp}(v_1)}{m + \mu_{\perp}(v_2)}. \quad (27)$$

В то же время из уравнения (26) может быть подсчитано отношение s двух соответствующих электромагнитных поперечных масс:

$$s = \frac{\mu_{\perp}(v_1)}{\mu_{\perp}(v_2)}. \quad (28)$$

Исключая $\mu_{\perp}(v_2)$ из последних двух уравнений, получаем

$$\frac{m}{\mu_{\perp}(v_1)} = \frac{s-r}{s(r-1)}. \quad (29)$$

Таким образом, если экспериментально найденное отношение r совпадает — в пределах возможных ошибок опыта — с теоретическим отношением s , то масса m должна рассматриваться как равная нулю. Более того, если электромагнитная масса равна сумме масс системы отдельных зарядов или, другими словами, если предполагается аддитивность массы, о которой Лоренц сказал, что наудачу взятые поля зарядов не накладываются друг на друга, тогда достигается чисто электромагнитное объяснение кинетической реакции электрона или любой другой частицы с подобным строением. Второй закон движения Ньютона будет в этом случае следствием теории электромагнитного поля Максвелла.

Действительно ли знаменитые эксперименты Кауфмана в физическом институте Гёттингена по отклонению электронов одновременно электрическим и магнитным полями и его определение отношения e/m подтвердили вывод Абрагама? В первом сообщении о своих эксперимен-

тах ²⁷, суммируя результаты, Кауфман устанавливает, что электромагнитная масса μ , которую он называет кажущейся, имеет тот же порядок величины, что и механическая масса m , которую он называет реальной; однако с возрастанием скорости кажущаяся масса значительно превосходит по величине реальную массу. Ввиду этих результатов Кауфман полагает, что допущение различного распределения заряда на (или в) электроны может вести к заключению, что реальная масса равна нулю. Во второй статье, озаглавленной «Об электромагнитной массе электрона» ²⁸, он уточняет свои рассуждения и приходит к выводу, что масса электрона представляет собой электромагнитное явление. Между тем в статье, озаглавленной «Динамика электрона» ²⁹, Абрагам возражал против терминологии Кауфмана. «Частое употребление терминов «кажущаяся» и «реальная» массы ведет к путанице, — предостерегал он, — так как кажущаяся масса в механическом смысле является реальной, а реальная масса, очевидно, нереальной» ³⁰. На этом основании указывалось, что, строго говоря, электромагнитная масса является не скаляром, а тензором с симметрией эллипсоида вращения ³¹. Ссылаясь на эксперименты Кауфмана, Абрагам заканчивает свою статью следующими словами: «Инерция электрона возникает из электромагнитного поля».

В том же году в выступлении на научной конференции в Карлсбаде Абрагам торжественно провозгласил: «Масса электрона имеет чисто электромагнитную природу» ³².

Генрик Антон Лоренц, приветствовавший этот вывод как «несомненно один из наиболее важных результатов современной физики» ³³, допускал, однако, что «мы свободны приписать каждому электрону весьма малую материаль-

²⁷ Walter Kaufmann, Die magnetische und elektrische Ablenkbarkeit der Becquerelstrahlen und die scheinbare Masse der Elektronen, «Göttingen Nachrichten» (1902), S. 143—155.

²⁸ Walter Kaufmann, Über die elektromagnetische Masse des Elektrons, «Göttinger Nachrichten» (1902), S. 291—296.

²⁹ Max Abraham, Die Dynamik des Elektrons (сноска 22).

³⁰ Ibid., S. 24.

³¹ Ibid., S. 28.

³² «Physikalische Zeitschrift», 4, 57 (1902), «Verhandlungen der 74. Naturforscherversammlung in Karlsbad»: «Die Masse des Elektrons ist rein elektromagnetischer Art».

³³ Г. А. Лоренц, Теория электронов, стр. 76.

ную массу, например равную одной сотой доле электромагнитной массы». Хотя Лоренц и сознавал неубедительность экспериментального обоснования утверждения Абрагама, тем не менее он, по-видимому, полностью присоединился к его точке зрения на основе принципа простоты.

Таким образом, программа электромагнитной теории массы получила полное обоснование; некогда весомые атомы и молекулы были сведены к положительным и отрицательным зарядам, а их инерционное поведение объяснено на основе электромагнетизма. Предстояло обобщить и распространить этот метод на молекулярные и гравитационные силы. Вся физическая Вселенная была бы тогда простой суммой положительных и отрицательных зарядов и их магнитных полей, все процессы в природе сводились к конвекционным токам и их излучениям, а «вещество» мира лишалось бы своей субстанциальности.

Теория электромагнитной массы вскоре обратила на себя внимание ученого мира. И хотя едва ли эта теория считалась когда-либо общепринятой, тем не менее многие выдающиеся физики выразили ей свое одобрение. Так, Пуанкаре в своей книге «Наука и метод» заявляет следующее: «То, что мы называем массой, есть одна лишь фикция; всякая инерция — электромагнитного происхождения»³⁴. Бухерер, повторивший эксперименты Кауфмана с целью проверки, считал, что «масса телесных атомов в конечном счете окажется просто фиктивной»³⁵. Конвей, профессор математической физики университетского колледжа в Дублине, в статье, озаглавленной «Электромагнитная масса»³⁶, развил на основе понятия кватернионов теорию тензора электромагнитной массы, или «квадратичной массы». Комсток³⁷, Гаркинс и Вильсон³⁸ рассматри-

³⁴ А. Пуанкаре, Наука и метод, СПб, 1910, стр. 170.

³⁵ А. Н. Бухерер, Mathematische Einführung in die Elektrophysik (Teubner, Leipzig, 1904), S. 2.

³⁶ Arthur William Conway, Selected papers (Dublin Institute for Advanced Studies, Dublin, 1953), p. 45. Первоначально статья была опубликована в: «Scientific Transactions of the Royal Dublin Society» [12], 9, 51 (1907).

³⁷ Daniel F. Comstock, The relation of mass to energy, «Philosophical Magazine», 15, 1—21 (1908).

³⁸ William D. Harkins, Ernst D. Wilson, Wechselseitige Elektromagnetische Masse und die Struktur des Atoms, «Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie», 95, 1—19 (1916).

вают физику атома на основе электромагнитного понятия массы.

Первоначальный энтузиазм, с которым была встречена эта теория, вскоре, однако, пошел на убыль, так как становилось все яснее, что электромагнитная теория массы не в состоянии дать плодотворные обобщения, справедливые для материи, построенной не только из электронов. Более того, экспериментальное обоснование зависимости массы электрона от скорости его движения, которое до сих пор было основным подтверждением электромагнитной концепции, нашло новую интерпретацию в теории относительности, революционизировавшей науку.

Для развития понятия массы и, следовательно, для развития физической теории вообще электромагнитная теория материи имела особенно важное значение. До ее появления и физики и философы придерживались того, что называлось субстанциальным понятием физической реальности. Физическое тело, согласно этой точке зрения, есть прежде всего то, чем оно является; поведение физического тела непосредственно проявляется в его действии исключительно на основе его внутренней, инвариантной и постоянной природы, физическим выражением которой служит масса, а количественной мерой — величина инертной массы. Электромагнитная концепция лишила материю этой внутренней природы, ее субстанциальной массы. Хотя заряд до некоторой степени и выполняет функцию массы, тем не менее реальное поле физической активности составляют не тела, но, как показали Максвелл и Пойнтинг, окружающая среда*. Поле есть местонахождение энергии, и материя перестает быть капризным диктатором физических событий, так как первенство субстанции устранено, интерпретация массы как количества материи или, точнее, рассмотрение инертной массы как меры количества материи утратило всякий смысл. Понятие электромагнитной массы было не только одной из ранних полевых концепций в современном смысле этого слова, но это понятие достаточно полно выражало фундаментальный принцип современной физики и современной философии материи: материя делает то, что она делает не потому, что она есть то, чем она является, но она есть то, чем она является потому, что она делает то, что она делает.