



Р. ФЕЙНМАН



Р. ЛЕЙТОН



М. СЭНДС

Р. ФЕЙНМАН

Р. ЛЕЙТОН

М. СЭНДС

ФЕЙНМАНОВСКИЕ
ЛЕКЦИИ
ПО ФИЗИКЕ

том 3

Электричество и магнетизм



Издательство АСТ
Москва

УДК 53
ББК 22.3
Ф36

Серия «Фейнмановские лекции по физике»

Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands

THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS:
THE NEW MILLENNIUM EDITION

Печатается с разрешения издательства Basic Books,
an imprint of Perseus Books, LLC,
a subsidiary of Hachette Book Group, Inc. (США) при содействии
Агентства Александра Корженевского (Россия).

Компьютерный дизайн *В.А. Воронина*

Перевод с английского *Г.И. Копылова, Ю.А. Симонова,*
под редакцией *Я.А. Смородинского*

Фейнман, Ричард.

Ф36 Фейнмановские лекции по физике. Т. III (5) / Ричард Фейнман, Роберт Лейтон, Мэтью Сэндс; [перевод с английского]. — Москва : Издательство АСТ, 2020. — 304 с. — (Фейнмановские лекции по физике).

ISBN 978-5-17-113011-4

Американский физик Ричард Фейнман — один из величайших ученых XX века, лауреат Нобелевской премии по физике.

В свое время преподаватели Калифорнийского технологического университета задумались о том, как можно было бы перестроить курс физики, чтобы сделать его более занимательным и современным. Ричард Фейнман с энтузиазмом подхватил эту идею и согласился прочитать авторский двухгодичный курс лекций по общей физике, но только один раз. Университет, для которого это событие стало историческим, организовал запись лекций, и затем команда физиков подготовила издание в нескольких томах, которое и поныне считается одним из лучших вводных курсов по физике.

В настоящий том вошли лекции, посвященные электричеству и магнетизму.

УДК 53
ББК 22.3

© California Institute of Technology, Michael A. Gottlieb,
and Rudolf Pfeiffer, 1964, 2006, 2010

© Перевод. Г.И. Копылов, наследники, 2018

© Перевод. Ю.А. Симонов, 2018

© Примечания. Я.А. Смородинский, наследники, 2018

© Издание на русском языке AST Publishers, 2020

От редактора

Этим выпуском мы начинаем печатание перевода второго тома лекций, прочитанных Р. Фейнманом студентам второго курса. Весь материал второго тома составляет 42 главы и займет три выпуска русского издания (5—7). Основное содержание этих глав-лекций — электричество, магнетизм, физика сплошных сред. Остальные лекции, в которых рассказывалось о квантовой механике, составили третий том и войдут в русском издании в вып. 8 и 9. Кроме того, вышли три тетради задач по курсу (по тетради к каждому тому).

О втором томе хотелось бы сделать два замечания. Первое относится к гл. 19 (вып. 6). Это не обычная лекция, а скорее доклад на научном семинаре; понять его смогут, по-видимому, лишь самые сильные студенты (и то, если хорошо поработают!) Фейнман рассказывает о том, как можно, посмотрев иначе на совсем разные разделы физики, увидеть между ними много общего. Это рассказ о принципе наименьшего действия, как его понимает Фейнман, а также замечания о близких по духу задачах, которые, как признает сам автор, не понимает даже он сам. Смотреть на все своими глазами — замечательное качество. Именно это и надо понять, читая гл. 19.

Второе замечание относится к гл. 30 (вып. 7). В американском издании в эту главу в качестве § 19 включена самая настоящая научная статья из журнала Английской Академии наук (или, как ее называют с давних пор, Королевского общества). Эта статья имеет непосредственное отношение к содержанию главы, она посвящена моделированию явлений в кристалле. Но рассказ о методе ведет не лектор, а сами авторы метода — английские физики Брэгг и Най. При этом создатели курса добивались еще одной цели — познакомить читателя с оригинальной научной работой из серьезного журнала. В русском издании перевод ее (немного сокращенный) помещен в конце вып. 7 в виде приложения.

Так, читая «Фейнмановские лекции по физике», вы будете понемногу общаться к живой, развивающейся науке.

Декабрь 1965 г.

Я. Смородинский

Р. С. В ноябре 1965 г. Ричард Фейнман вместе с двумя другими физиками-теоретиками (Швингером и Томонага) за работы по квантовой электродинамике получил Нобелевскую премию.

ПРЕДИСЛОВИЕ ►

Много лет Ричард П. Фейнман размышляет о таинственных механизмах физического мира и упорно стремится найти порядок в кажущемся хаосе. Последние два года он отдавал свою энергию еще и лекциям для начинающих студентов. Для этих лекций он отобрал самое важное из того, что знал сам, и нарисовал физическую картину Вселенной так, что студенты могли надеяться в ней разобратся. В эти лекции он вложил блеск и ясность мысли, оригинальность и живость метода, заразительный энтузиазм рассказчика. Его рассказ доставлял истинную радость слушателям.

В основу первого тома легли лекции, прочитанные для студентов первого курса. Во второй том мы включили запись части лекций для второго курса*. Они были прочитаны в течение 1962/63 учебного года. Оставшиеся лекции для второкурсников войдут в третий том**.

Лекции для второго курса на две трети были посвящены весьма обстоятельному изучению физики электричества и магнетизма. При этом преследовалась двоякая цель. Во-первых, мы хотели дать студентам полную картину одного из самых больших разделов физики — от первых, сделанных ощупью шагов Франклина, через великий синтез Максвелла, до лоренцевой электронной теории свойств вещества, включая еще не решенные дилеммы электромагнитной собственной энергии. Во-вторых, мы надеялись ввести с самого начала исчисление векторных полей и дать таким образом солидное введение в математику полевых теорий. Чтобы подчеркнуть общую полезность математических методов, порой родственные вопросы из других областей физики анализировались одновременно с их электрическими двойниками. Мы пытались все время внедрять в сознание общность математики («одинаковые уравнения имеют одинаковые решения»). Это подчеркивалось характером упражнений, а потом и экзаменов.

* Выпуски 5—7. — *Прим. ред.*

** Выпуски 8 и 9, в них вошли и восемь дополнительных лекций. — *Прим. ред.*

После электромагнетизма две главы посвящены упругости, а две — течению жидкости. В первой главе каждой из этих тем обсуждаются лишь элементарные и практические вопросы, вторые главы посвящены попытке обзора всего сложного круга явлений, к которым ведет рассматриваемая задача. Эти четыре главы, впрочем, можно без особого ущерба опустить, поскольку они вовсе не обязательны для понимания материала.

Примерно вся последняя четверть второго курса была посвящена введению в квантовую механику. Она вошла в третий том.

Публикуя запись лекций Фейнмана, мы хотели осуществить нечто большее, нежели просто переложить на бумагу то, что было им сказано устно. Мы хотели, чтобы на бумагу как можно более ясно легли те идеи, на которых основывались лекции. Для некоторых лекций этого удалось добиться, пришлось внести лишь небольшую правку в стенографические записи, другие же потребовали значительной работы и довольно серьезного редактирования. Иногда мы чувствовали, что для большей ясности нужно включить добавочный материал. При этом мы прибегали постоянно к помощи и советам самого Фейнмана.

«Перевод» в столь сжатые сроки свыше миллиона устных слов в связный текст — работа громадная, особенно если к этому еще добавляются другие обязанности, сопровождающие обычно чтение нового курса, — подготовка к опросу, семинары, упражнения, экзамены и т. д. Потребовалось множество рук и голов. Я все же надеюсь, что в ряде случаев нам удалось верно отразить фейнмановский оригинал. В других же мы оказались очень далеки от идеала. Нашими успехами мы обязаны всем, кто помогал нам. Мы очень сожалеем о неудачах.

Как мы подробно объясняли в предисловии к первому тому, эти лекции были всего частью программы, которую наметил и за выполнением которой следил Комитет по пересмотру курса (Р. Лейтон — председатель, Г. Неер и М. Сэндс) КАЛТЕХа при финансовой поддержке фонда Форда. Кроме того, в подготовке текста лекций второго тома участвовали Т. Кохи, М. Клейтон, Д. Курцио, Д. Хартл, Т. Харвей, М. Израэль, В. Карзас, Р. Каванах, Д. Мэтьюс, М. Плессет, Ф. Уоррен, В. Уэйлинг, С. Уилтс и Б. Циммерман. В работе над лекциями помогали Дж. Блю, Дж. Чаплин, М. Клаузер, Р. Доллен, Г. Хилл и А. Тайтл. Мне хотелось бы особо сказать здесь о постоянной помощи профессора Нойгебауера. И все же если бы не выдающееся дарование и активность самого Фейнмана, то этот рассказ о физике, который вы сейчас читаете, никогда б не прозвучал.

Март 1964 г.

Мэтью Сэндс

Глава 1

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

§ 1. Электрические силы

Рассмотрим силу, которая, подобно тяготению, меняется обратно квадрату расстояния, но только в миллион биллионов биллионов биллионов раз более сильную. И которая отличается еще в одном. Пусть существуют два сорта «вещества», которые можно назвать положительным и отрицательным. Пусть одинаковые сорта отталкиваются, а разные — притягиваются в отличие от тяготения, при котором происходит только притяжение. Что же тогда случится?

Все положительное оттолкнется со страшной силой и разлетится в разные стороны. Все отрицательное — тоже. Но совсем другое произойдет, если положительное и отрицательное перемешать поровну. Тогда они с огромной силой притянутся друг к другу, и в итоге эти невероятные силы почти нацело сбалансируются, образуя плотные, «мелкозернистые» смеси положительного и отрицательного; между двумя грудями таких смесей практически не будет ощущаться ни притяжения, ни отталкивания.

Такая сила существует: это электрическая сила. И все вещество является смесью положительных протонов и отрицательных электронов, притягивающихся и отталкивающихся с неимоверной силой. Однако баланс между ними столь совершенен, что, когда вы стоите возле кого-нибудь, вы не ощущаете никакого действия этой силы. А если бы баланс нарушился хоть немножко, вы бы это сразу почувствовали. Если бы в вашем теле или в теле вашего соседа (стоящего от вас на расстоянии вытянутой руки) электронов оказалось бы всего на 1% больше, чем протонов, то сила

§ 1. Электрические силы

§ 2. Электрические и магнитные поля

§ 3. Характеристики векторных полей

§ 4. Законы электромагнетизма

§ 5. Что это такое — «поля»?

§ 6. Электромагнетизм в науке и технике

Повторить: гл. 12 (вып. 1) «Характеристики силы»

вашего отталкивания была бы невообразимо большой. Насколько большой? Достаточной, чтобы поднять небоскреб? Больше! Достаточной, чтобы поднять гору Эверест? Больше! Силы отталкивания хватило бы, чтобы поднять «вес», равный весу нашей Земли!

Раз такие огромные силы в этих тонких смесях столь совершенно сбалансированы, то нетрудно понять, что вещество, стремясь удержать свои положительные и отрицательные заряды в тончайшем равновесии, должно обладать большой жесткостью и прочностью. Верхушка небоскреба, скажем, отклоняется при порывах ветра лишь на пару метров, потому что электрические силы удерживают каждый электрон и каждый протон более или менее на своих местах. А с другой стороны, если рассмотреть достаточно малое количество вещества так, чтобы в нем насчитывалось лишь немного атомов, то там необязательно будет равное число положительных и отрицательных зарядов, и могут проявиться большие остаточные электрические силы. Даже если числа тех и других зарядов одинаковы, все равно между соседними областями может действовать значительная электрическая сила. Потому что силы, действующие между отдельными зарядами, изменяются обратно пропорционально квадратам расстояний между ними и может оказаться, что отрицательные заряды одной части вещества ближе к положительным зарядам (другой части), чем к отрицательным. Силы притяжения тогда превзойдут силы отталкивания, и в итоге возникнет притяжение между двумя частями вещества, в которых нет избыточного заряда. Сила, удерживающая атомы, и химические силы, скрепляющие между собой молекулы,— все это силы электрические, действующие там, где число зарядов неодинаково или где промежутки между ними малы.

Вы знаете, конечно, что в атоме имеются положительные протоны в ядре и электроны вне ядра. Вы можете спросить: «Если эти электрические силы так велики, то почему же протоны и электроны не налезают друг на друга? Если они стремятся образовать тесную компанию, почему бы ей не стать еще теснее?» Ответ связан с квантовыми эффектами. Если попытаться заключить наши электроны в малый объем, окружающий протон, то, согласно принципу неопределенности, у них должен возникнуть среднеквадратичный импульс, тем больший, чем сильнее мы их ограничим. Именно это движение (требуемое законами квантовой механики) мешает электрическому притяжению еще больше сблизить заряды.

Тут возникает другой вопрос: «Что скрепляет ядро?» В ядре имеется несколько протонов, и все они положительно заряжены. Почему же они не разлетаются? Оказывается, что в ядре, помимо электрических сил, еще действуют и неэлек-

трические силы, называемые *ядерными*. Эти силы более мощные, чем электрические, и они способны, несмотря на электрическое отталкивание, удержать протоны вместе. Действие ядерных сил, однако, простирается недалеко; оно падает гораздо быстрее, чем $1/r^2$. И это приводит к важному результату. Если в ядре имеется слишком много протонов, то ядро становится чересчур большим и оно уже не может удержаться. Примером может служить уран с его 92 протонами. Ядерные силы действуют в основном между протоном (или нейтроном) и его ближайшим соседом, а электрические силы действуют на большие расстояния и вызывают отталкивание каждого протона в ядре от всех остальных. Чем больше в ядре протонов, тем сильнее электрическое отталкивание, пока (как у урана) равновесие не станет столь шатким, что ядру почти ничего не стоит разлететься от действия электрического отталкивания. Стоит его чуть-чуть «толкнуть» (например, послав внутрь медленный нейтрон) — и оно разваливается надвое, на две положительно заряженные части, разлетающиеся врозь в результате электрического отталкивания. Энергия, которая при этом высвобождается, — это энергия атомной бомбы. Ее обычно именуют «ядерной» энергией, хотя на самом деле это «электрическая» энергия, высвобождаемая, как только электрические силы превзойдут ядерные силы притяжения.

Наконец, можно спросить, чем скрепляется отрицательно заряженный электрон (ведь в нем нет ядерных сил)? Если электрон весь состоит из вещества одного сорта, то каждая его часть должна отталкивать остальные. Тогда почему же они не разлетаются в разные стороны? А точно ли существуют у электрона «части»? Может быть, следует считать электрон просто точкой и говорить, что электрические силы действуют только между *разными* точечными зарядами, так что электрон не действует сам на себя? Возможно. Единственно, что можно сейчас сказать, — что вопрос о том, чем скреплен электрон, вызвал много трудностей при попытке создать полную теорию электромагнетизма. И ответа на этот вопрос так и не получили. Мы займемся обсуждением его немного позже.

Как мы видели, можно надеяться, что сочетание электрических сил и квантовомеханических эффектов определит структуру больших количеств вещества и, следовательно, их свойства. Одни материалы — твердые, другие — мягкие. Некоторые из них — электрические «проводники», потому что их электроны свободны и могут двигаться; другие — «изоляторы», их электроны привязаны каждый к своему атому. Позже мы выясним, откуда появляются такие свойства, но вопрос этот очень сложен, поэтому рассмотрим сначала электрические силы в самых простых ситуациях. Начнем с изучения

одних только законов электричества, включив сюда и магнетизм, так как и то и другое в действительности суть явления одной и той же природы.

Мы сказали, что электрические силы, как и силы тяготения, уменьшаются обратно пропорционально квадрату расстояния между зарядами. Это соотношение называется законом Кулона. Однако этот закон перестает выполняться точно, если заряды движутся. Электрические силы зависят также сложным образом и от движения зарядов. Одну из частей силы, действующей между движущимися зарядами, мы называем *магнитной силой*. На самом же деле это только одно из проявлений электрического действия. Потому мы и говорим об «электромагнетизме».

Существует важный общий принцип, позволяющий относительно просто изучать электромагнитные силы. Мы обнаруживаем экспериментально, что сила, действующая на отдельный заряд (независимо от того, сколько там еще есть зарядов или как они движутся), зависит только от положения этого отдельного заряда, от его скорости и величины. Силу \mathbf{F} , действующую на заряд q , движущийся со скоростью \mathbf{v} , мы можем написать в виде

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}); \quad (1.1)$$

здесь \mathbf{E} — *электрическое поле* в точке расположения заряда, а \mathbf{B} — *магнитное поле*. Существенно, что электрические силы, действующие со стороны всех прочих зарядов Вселенной, складываются и дают как раз эти два вектора. Значения их зависят от того, *где* находится заряд, и могут меняться со *временем*. Если мы заменим этот заряд другим, то сила, действующая на новый заряд, изменится точно пропорционально величине заряда, если только все прочие заряды мира не меняют своего движения или положения. (В реальных условиях, конечно, каждый заряд действует на все прочие расположенные по соседству заряды и может заставить их двигаться, так что иногда при замене одного данного заряда другим поля *могут* измениться.)

Из материала, изложенного в первом томе, мы знаем, как определить движение частицы, если сила, действующая на нее, известна. Уравнение (1.1) в сочетании с уравнением движения дает

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{m\mathbf{v}}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} \right] = \mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (1.2)$$

Значит, если \mathbf{E} и \mathbf{B} известны, то можно определить движение зарядов. Остается только узнать, как получаются \mathbf{E} и \mathbf{B} .

Один из самых важных принципов, упрощающих полученные величины полей, состоит в следующем. Пусть некоторое количество движущихся каким-то образом зарядов создает

поле E_1 , а другая совокупность зарядов — поле E_2 . Если действуют оба набора зарядов одновременно (сохраняя те же свои положения и движения, какими они обладали, когда рассматривались порознь), то возникающее поле равно в точности сумме

$$E = E_1 + E_2. \quad (1.3)$$

Этот факт называется *принципом наложения полей* (или *принципом суперпозиции*). Он выполняется и для магнитных полей.

Принцип этот означает, что если нам известен закон для электрического и магнитного полей, образуемых *одиночным* зарядом, движущимся произвольным образом, то, значит, нам известны все законы электродинамики. Если мы хотим знать силу, действующую на заряд A , нам нужно только рассчитать величину полей E и B , созданных каждым из зарядов B , C , D и т. д., и сложить все эти E и B ; тем самым мы найдем поля, а из них — силы, действующие на A . Если бы оказалось, что поле, создаваемое одиночным зарядом, отличается простотой, то это стало бы самым изящным способом описания законов электродинамики. Но мы уже описывали этот закон (см. вып. 3, гл. 28), и, к сожалению, он довольно сложен.

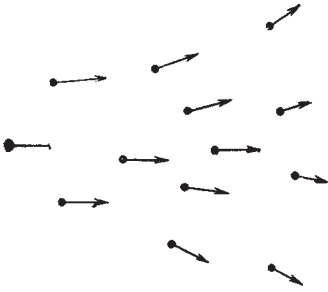
Оказывается, что форма, в которой законы электродинамики становятся простыми, совсем не такая, какой можно было бы ожидать. Она *не* проста, если мы захотим иметь формулу для силы, с которой один заряд действует на другой. Правда, когда заряды покоятся, закон силы — закон Кулона — прост, но когда заряды движутся, соотношения усложняются из-за запаздывания во времени, влияния ускорения и т. п. В итоге лучше не пытаться строить электродинамику с помощью одних лишь законов сил, действующих между зарядами; гораздо более приемлема другая точка зрения, при которой с законами электродинамики легче управляться.

§ 2. Электрические и магнитные поля

Первым делом нужно несколько расширить наши представления об электрическом и магнитном векторах E и B . Мы определили их через силы, действующие на заряд. Теперь мы

НАИБОЛЕЕ ЧАСТО УПОТРЕБЛЯЕМЫЕ ГРЕЧЕСКИЕ БУКВЫ

α	— альфа
β	— бета
$\Gamma\gamma$	— гамма
$\Delta\delta$	— дельта
ϵ	— эpsilon
ζ	— дзета
η	— эта
$\Theta\theta$	— тэта
ι	— йота
κ	— каппа
$\Lambda\lambda$	— ламбда
μ	— мю
ν	— ню
$\Xi\xi$	— кси
\omicron	— омикрон
$\Pi\pi$	— пи
ρ	— ро
$\Sigma\sigma$	— сигма
τ	— тау
$\Upsilon\upsilon$	— ипсилон
$\Phi\phi$	— фи
χ	— хи
$\Psi\psi$	— пси
$\Omega\omega$	— омега



Ф и г. 1.1. Векторное поле, представленное множеством стрелок, длина и направление которых отмечают величину векторного поля в тех точках, откуда выходят стрелки.

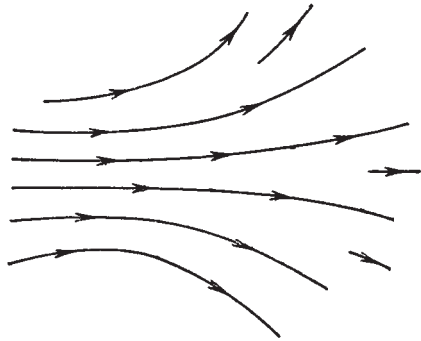
намереваемся говорить об электрическом и магнитном полях в точке, даже если там нет никакого заряда. Следовательно, мы утверждаем, что раз на заряд «действуют» силы, то в том месте, где он стоял, остается «нечто» и тогда, когда заряд оттуда убрали. Если заряд, расположенный в точке (x, y, z) , в момент t ощущает действие силы \mathbf{F} , согласно уравнению (1.1), то мы связываем векторы \mathbf{E} и \mathbf{B} с точкой (x, y, z) в пространстве. Можно считать, что $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ и $\mathbf{B}(x, y, z, t)$ дают силы, действие которых ощутит в момент t заряд, расположенный в (x, y, z) , при условии, что помещение заряда в этой точке не потревожит ни расположения, ни движения всех прочих зарядов, ответственных за поля.

Следуя этому представлению, мы связываем с каждой точкой (x, y, z) пространства два вектора \mathbf{E} и \mathbf{B} , способных меняться со временем. Электрические и магнитные поля тогда рассматриваются как *векторные функции* от x, y, z и t . Поскольку вектор определяется своими компонентами, то каждое из полей $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ и $\mathbf{B}(x, y, z, t)$ представляет собой три математические функции от x, y, z и t .

Именно потому, что \mathbf{E} (или \mathbf{B}) может быть определено для каждой точки пространства, его и называют «полем». Поле — это любая физическая величина, которая в разных точках пространства принимает различные значения. Скажем, температура — это поле (в этом случае скалярное), которое можно записать в виде $T(x, y, z)$. Кроме того, температура может меняться и во времени, тогда мы скажем, что температурное поле зависит от времени, и напомним $T(x, y, z, t)$. Другим примером поля может служить «поле скоростей» текущей жидкости. Мы записываем скорость жидкости в любой точке пространства в момент t в виде $\mathbf{v}(x, y, z, t)$. Поле это векторное.

Вернемся к электромагнитным полям. Хотя формулы, по которым они создаются зарядами, и сложны, у них есть следующее важное свойство: связь между значениями полей

Фиг. 1.2. Векторное поле, представленное линиями, касательными к направлению векторного поля в каждой точке. Плотность линий указывает величину вектора поля.



в некоторой точке и значениями их в соседней точке очень проста. Нескольких таких соотношений (в форме дифференциальных уравнений) достаточно, чтобы полностью описать поля. Именно в такой форме законы электродинамики и выглядят особенно просто.

Немало изобретательности было потрачено на то, чтобы помочь людям мысленно представить поведение полей. И самая правильная точка зрения — это самая отвлеченная: надо просто рассматривать поля как математические функции координат и времени. Можно также попытаться получить мысленную картину поля, начертив во многих точках пространства по вектору так, чтобы каждый из них показывал напряженность и направление поля в этой точке. Такое представление приводится на фиг. 1.1. Можно пойти и дальше: начертить линии, которые в любой точке будут касательными к этим векторам. Они как бы следуют за стрелками и сохраняют направление поля. Если это сделать, то сведения о *длинах* векторов будут утеряны, но их можно сохранить, если в тех местах, где напряженность поля мала, провести линии пореже, а где велика — погуще. Договоримся, что *число линий на единицу площади*, расположенной поперек линий, будет пропорционально *напряженности поля*. Это, конечно, всего лишь приближение; иногда нам придется добавлять новые линии, чтобы их количество отвечало напряженности поля. Поле, изображенное на фиг. 1.1, представлено линиями поля на фиг. 1.2.

§ 3. Характеристики векторных полей

Векторные поля обладают двумя математически важными свойствами, которыми мы будем пользоваться при описании законов электричества с полевой точки зрения. Представим себе замкнутую поверхность и зададим вопрос, вытекает ли из нее «нечто», т. е. обладает ли поле свойством «истечения»?