

№ 1922

**МИСиС**

---

Ю.А. Рахштадт

# **Физика**

Силовые поля

Учебное пособие  
Часть 3

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 1922

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ  
И СПЛАВОВ

МИСиС



Кафедра физики

Ю.А. Рахштадт

# Физика

Силовые поля

Учебное пособие  
Часть 3

Рекомендовано редакционно-издательским  
советом университета

УДК 537  
P27

Рецензент  
д-р техн. наук, проф. *К.Л. Косырев*  
(председатель НМСН *Металлургия*)

**Рахштадт Ю.А.**

P27 Физика: Силовые поля: Учеб. пособие. Ч. 3. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2009. – 218 с.

Учебное пособие состоит из пяти частей, соответствующих пяти разделам курса физики. В третьей части «Силовые поля» рассматриваются свойства гравитационного и электромагнитного поля с точки зрения современных физических представлений, методы расчета силовых полей, движение частиц в силовых полях, поведение проводников, диэлектриков и магнетиков в электромагнитном поле.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по направлению «Металлургия».

© Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (МИСиС), 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 8. Фундаментальные взаимодействия и фундаментальные силовые поля .....	6
Глава 9. Источники и основные характеристики силовых полей. наглядное представление полей. ....	10
9.1. Гравитационное поле .....	10
9.2. Электромагнитное поле .....	11
9.3. Силовые и энергетические характеристики полей.....	14
9.4. Наглядное представление полей .....	15
Контрольные вопросы.....	18
Глава 10. Постоянное гравитационное поле .....	19
Контрольные вопросы.....	24
Глава 11. Постоянное электромагнитное поле элементарных источников .....	25
11.1. Электрическое поле. Электрическая сила .....	25
11.2. Электростатическое поле неподвижного точечного заряда.....	26
11.3. Взаимодействие неподвижных точечных зарядов. Закон Кулона. Потенциальная энергия .....	29
11.4. Электрическое поле движущегося точечного заряда .....	31
11.5. Относительный характер компонент электромагнитного поля. Магнитное поле. Магнитная сила. Электромагнитная сила Лоренца.....	33
Контрольные вопросы.....	39
Глава 12. Методы расчета макроскопических полей .....	41
12.1. Принцип суперпозиции полей.....	41
12.2. Структура векторных полей .....	43
12.3. Поток и дивергенция векторного поля .....	43
12.4. Циркуляция и ротор векторного поля .....	47
Контрольные вопросы.....	52
Глава 13. Электрическое поле .....	53
13.1. Электростатическое поле точечного заряда.....	53
13.2. Электростатическое поле равномерно заряженной сферы (или проводящего шара) .....	54
13.3. Электростатическое поле равномерно заряженного непроводящего шара.....	56

13.4. Электростатическое поле равномерно заряженной бесконечно длинной нити.....	58
13.5. Электростатическое поле равномерно заряженной плоскости .....	60
13.6. Электростатическое поле электрического диполя (в вакууме).....	61
Контрольные вопросы.....	64
Примеры решения задач .....	65
Глава 14. Постоянный ток .....	70
14.1. Понятие об электрическом токе.....	70
14.2. Условия возникновения и поддержания постоянного тока в проводниках. Понятие ЭДС .....	71
14.3. Падение напряжения (или напряжение) на участке цепи .....	74
14.4. Величина и плотность тока.....	75
14.5. Основные законы постоянного тока .....	78
Контрольные вопросы.....	83
Примеры решения задач .....	83
Глава 15. Расчеты магнитостатических полей токов .....	86
15.1. Магнитное поле движущегося заряда (в вакууме).....	86
15.2. Закон Био – Савара – Лапласа .....	87
15.3. Магнитостатическое поле магнитного диполя .....	88
15.4. Магнитостатическое поле бесконечно длинного прямого проводника с током .....	90
15.5. Магнитное поле бесконечно длинного соленоида .....	91
15.6. Магнитное поле тонкого тороида .....	92
15.7. Проводник с током в магнитном поле. Сила Ампера .....	94
15.8. Магнитное взаимодействие параллельных токов. Закон Ампера .....	95
15.9. Электромагнитное взаимодействие потоков заряженных частиц (в вакууме) .....	96
Контрольные вопросы.....	97
Примеры решения задач .....	98
Глава 16. Движение в силовых полях.....	100
16.1. Движение в гравитационном поле .....	100
16.2. Движение в электромагнитном поле .....	107
Контрольные вопросы.....	112

Примеры решения задач .....	113
Глава 17. Вещество в постоянном электромагнитном поле .....	118
17.1. Проводники .....	118
17.2. Диэлектрики .....	123
17.3. Магнетики .....	136
Контрольные вопросы.....	149
Глава 18. Электродинамика .....	151
18.1. Электромагнитная индукция .....	151
18.2. Механизм возникновения тока индукции .....	155
18.3. Вихревые токи .....	157
18.4. Физический принцип действия генератора переменного тока .....	160
18.5. Явление самоиндукции .....	163
18.6. Явление взаимоиנדукции. Физический принцип действия трансформатора .....	165
18.7. Еще один источник вихревого магнитного поля (в электродинамике). Ток смещения.....	167
Контрольные вопросы.....	169
Примеры решения задач .....	170
Глава 19. Законы электромагнитного поля – уравнения Максвелла.....	174
Контрольные вопросы.....	177
Домашние задания.....	178
Приложение.....	215
Библиографический список.....	217

## Глава 8. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ СИЛОВЫЕ ПОЛЯ

Материя существует не только в форме вещества. Пространство между телами никогда не является пустым: оно заполнено материей в форме силового поля. В определенном смысле поле является такой же составной частью любого макроскопического тела, как и элементарные частицы, образующие атомы этого тела. Например, собственный объем частиц составляет всего около  $10^{-15}$  полного объема макроскопического тела, остальной же объем занят полями этих частиц.

Поле является переносчиком взаимодействия тел. Образно говоря, каждое тело «узнает» о существовании других тел только через окружающие его поля.

Полям – так же, как и частицам вещества, – свойственно состояние движения. Но это движение не может быть сведено к простому механическому перемещению. Для описания полей непригодны модели механики: материальная точка, твердое тело, система тел и др. Действительно, что именно движется, когда в поле происходят какие-то изменения или когда оно передает воздействие одного тела на другое? Современная физика не может сопоставить этому движению столь же наглядные модели, как в случае перемещения тел или частиц.

Модель поля более сложна. Мы представляем себе поле как некий материальный объект, непрерывно заполняющий все пространство рассматриваемой области, причем состояние поля даже в двух соседних точках может быть различным. Поэтому физические величины, характеризующие поле, должны быть непрерывными функциями координат. Тогда, сопоставляя каждой точке пространства определенное значение соответствующей функции, получаем искомую модель поля.

В математическом отношении у такой модели может быть много разновидностей. Если функция, о которой шла речь, есть скаляр, то такое поле называется *скалярным*. Если же функция векторная, то это значит, что каждой точке пространства соответствует теперь не одно число, как в скалярном поле, а тройка чисел. Такое поле называется *векторным*. Может случиться и так, что одной векторной величины окажется недостаточно для однозначной характеристики состояния поля. Это – более сложные по своей математической струк-

туре поля (например, *тензорное* или *спинорное*). Электростатическое поле, например, можно описать с помощью скалярной модели – поля потенциала  $\Phi$ , или с помощью векторной модели – поля вектора электрической напряженности  $\vec{E}$ .

Указанные математические модели применяются и за пределами проблемы силовых полей, например: температурное поле, поле скоростей в жидкости, поле деформаций и механических напряжений тела и др. Эти поля принципиально отличаются от силовых: они не представляют собой какой-либо особой формы существования материи. Поле скоростей, температур и т.п. есть просто удобный способ наглядного изображения этих параметров для какой-либо пространственно протяженной вещественной среды (нагретый газ, поток жидкости и т.п.) По существу такие поля являются просто математическими моделями.

Моделирование *фундаментальных силовых* полей представляет собой значительно более глубокую по своему физическому содержанию проблему. В самом деле, что значит выбрать подходящую модель для описания какого-нибудь поля? Для этого, прежде всего, нужно выяснить, какой набор физических величин должен быть задан, чтобы состояние поля определялось столь же однозначно, как, скажем, определяется положение тела по его координатам.

Однако обнаружив в природе какое-то новое фундаментальное поле, мы еще не знаем, какие физические величины могут послужить его характеристикой, будут ли это скаляры, векторы или тензоры. Так или иначе, эти величины заранее неизвестны, это – новые физические величины, которые еще только предстоит найти. Найти же их можно только из опыта, из экспериментальных данных об основных свойствах вновь открытого поля. Конечно, можно попытаться и теоретически «сконструировать» модель поля, но тогда эксперимент должен подтвердить ее соответствие оригиналу. Найденная в результате модель силового поля не есть, следовательно, чисто математическое построение. Она отражает физическую реальность новой формы материи, т.е. является *физической моделью*.

*Физические поля* – физические системы, обладающие бесконечно большим числом степеней свободы. Относящиеся к такой системе физические величины не локализованы на каких-либо материальных частицах с конечным числом степеней свободы, а непрерывно распределены по некоторой области пространства. Примерами таких полей могут служить гравитационное и электромагнитное поля.



Пока речь идет о нерелятивистских процессах (классическая механика), понятие поля можно не вводить: поле является лишь некоторым способом описания физического явления – взаимодействия частиц. Можно считать, что пространство вокруг частиц не играет особенной роли в передаче взаимодействия<sup>1</sup> – такое представление соответствует концепции *дальнодействия*.

Модель силового поля была введена именно для объяснения механизма дальнодействия: поле рассматривается как материальная среда, являющаяся носителем взаимодействия. Примеры дальнодействующих взаимодействий приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Гравитационное взаимодействие	Электромагнитное взаимодействие	
<p>Взаимодействие точечных масс</p> $F_{\text{гп}} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} -$ <p><i>закон всемирного тяготения Ньютона.</i></p> <p>Здесь <math>\gamma</math> – гравитационная постоянная</p>	<p>Электрическое взаимодействие точечных зарядов</p> $F_{\text{э}} = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} -$ <p><i>закон Кулона.</i></p> <p>Здесь <math>k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}</math>, где <math>\epsilon_0</math> – электрическая постоянная, <math>\epsilon</math> – диэлектрическая проницаемость вещества</p>	<p>Магнитное взаимодействие параллельных токов</p> $F^* = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{d} -$ <p><i>закон Ампера.</i></p> <p>Здесь <math>F^*</math> – магнитная сила, действующая на единицу длины проводника с током («приведенная сила»), <math>\mu_0</math> – магнитная постоянная</p>

В теории же относительности при рассмотрении релятивистских процессов, благодаря конечной скорости распространения информации о взаимодействии положение вещей существенным образом меняется и говорить о дальнодействии уже нельзя. В этом случае изменение положения одной из частиц отражается на других частицах лишь спустя некоторый промежуток времени, т.е. поле, переносящее взаимодействие, является само по себе физической реальностью. Взаимодействие может происходить в каждый момент лишь между соседними точками пространства (*близкодействие*).

Соответственно *четырем* известным сейчас видам *фундаментальных сил* существуют *четыре* типа *силовых полей*: *гравитационное, электромагнитное, поле сильных (ядерных) взаимодействий и поле слабых взаимодействий* (табл. 8.2).

<sup>1</sup> В классической механике скорость передачи любого сигнала, в том числе и информации о взаимодействии, считается бесконечной.

Таблица 8.2

Параметры	Фундаментальные взаимодействия			
	гравитационное	слабое	электромагнитное	ядерное
Интенсивность, $G^2$	$10^{-39}$	$10^{-14}$	$10^{-2}$	1
Радиус $R$ , м	$\infty$	$10^{-15}$	$\infty$	$10^{-18}$
Носители	Гравитоны (?) (или гравитационные волны (?))	$W^{\pm}$ и $Z^0$ – бозоны	Фотоны (или электромагнитные волны)	Глюоны

Каждое из них ответственно за свой круг процессов и явлений в природе. Мы пока не знаем, почему фундаментальных полей именно четыре, существуют ли еще какие-нибудь виды силовых полей – или, напротив, все они есть только частные проявления какого-то одного, еще более фундаментального поля.

## ГЛАВА 9. ИСТОЧНИКИ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ ПОЛЕЙ. НАГЛЯДНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОЛЕЙ

### 9.1. Гравитационное поле

*Гравитационное поле* есть область пространства, в каждой точке которой задан вектор  $\vec{F}_{\text{Гр}}(\vec{r})$  – сила гравитационного взаимодействия (*гравитационная сила*) – являющийся функцией координат и характеризующий силовое взаимодействие поля и любого тела.

#### 9.1.1. Источник гравитационного поля

Источником гравитационного поля является масса.

*Масса* – скалярная физическая величина, количественно характеризующая *инертные* и *гравитационные* свойства тела.

*Инертная* масса характеризует способность тела сопротивляться изменению своего состояния (покоя или движения), например, во втором законе Ньютона

$$\vec{a} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{F}_i}{m}. \quad (9.1)$$

*Гравитационная* масса характеризует способность тела создавать гравитационное поле и взаимодействовать с внешними гравитационными полями, например, в законе всемирного тяготения

$$\vec{F}_{\text{Гр}} = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}. \quad (9.2)$$

Каждая масса является *одновременно* и инертной, и гравитационной.

#### 9.1.2. Свойства массы

1. Масса тела зависит от плотности вещества  $\rho$  и объема тела  $V$ :

$$m = \iiint_V \rho dV. \quad (9.3)$$

2. Масса не тождественна количеству вещества, так как (в отличие от количества вещества) масса зависит от скорости (рис. 9.1):

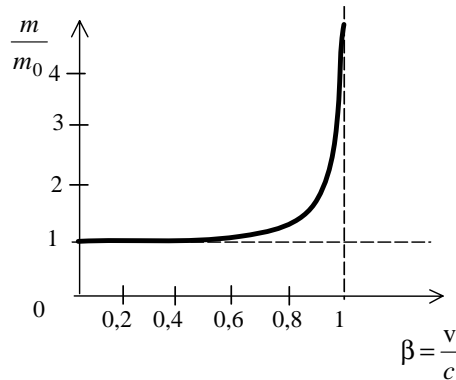


Рис. 9.1. Зависимость массы от скорости

$$m = \gamma m_0, \quad (9.4)$$

где  $\gamma$  – релятивистский фактор;  
 $m_0$  – масса покоя.

3. Понятие массы не тождественно понятиям веса и силы тяжести, так как не зависит от полей тяготения и ускорений.

4. Масса необходима и достаточна для описания поступательного движения, но недостаточна для описания вращательного движения.

## 9.2. Электромагнитное поле

*Электромагнитное поле* есть область пространства, в каждой точке которой задан вектор  $\vec{F}_{\text{ЭМ}}(\vec{r})$  – *электромагнитная сила* – являющийся функцией координат и характеризующий силовое взаимодействие поля и любого *заряженного* тела.

### 9.2.1. Источник электромагнитного поля

Источником электромагнитного поля является электрический заряд.

*Электрический заряд* – это свойство некоторых элементарных частиц вступать в электромагнитное взаимодействие.

### 9.2.2. Свойства электрического заряда

1. Двузначность электрического заряда.

Электрический заряд может быть *положительным* и *отрицательным*. Принято считать, что протон заряжен положительно:  $p^+$ ,  $q_p > 0$ , а электрон – отрицательно:  $e^-$ ,  $q_e < 0$ .

Эти названия условны. Они могли бы быть и другими. По существу, это два проявления одного и того же качества. Различаются эти виды зарядов характером взаимодействия: одноименные заряды отталкиваются, разноименные притягиваются (см. ниже рис. 11.2). Во всех формулах и уравнениях принято считать заряд величиной *алгебраической*: положительный заряд  $q > 0$  и отрицательный заряд  $q < 0$ <sup>1</sup>.

Других видов электрического заряда в природе не обнаружено. Любая заряженная частица ведет себя в электрическом отношении либо как электрон – тогда ее заряд считается тоже отрицательным, либо как протон – тогда ее заряд считается положительным. Частица, не являющаяся носителем заряда, называется нейтральной.

Положительные и отрицательные заряды способны компенсировать действие друг друга. Если в каком-либо теле находится одинаковое число частиц с зарядами того и другого знака, то тело ведет себя как электрически нейтральное. Большинство тел в обычных условиях электрически нейтральны как раз в силу очень высокой степени баланса между зарядом ядер и электронов, из которых все тела состоят. Вообще в природе существует глубокая симметрия между положительным и отрицательным электричеством.

Среди элементарных частиц одинаково часто встречаются заряды обоого знака.

2. Величина заряда зависит от плотности распределения заряда и от объема заряженного тела:

$$\left. \begin{aligned} q &= \iiint_V \rho dV, \\ q &= \iint_S \sigma dS, \\ q &= \int_{\ell} \lambda d\ell \end{aligned} \right\} \quad (9.5)$$

---

<sup>1</sup> Если иметь в виду значение модуля заряда, то можно записывать так:  $+|q|$  и  $-|q|$ .

В формулах (9.5)  $\rho$ ,  $\sigma$  и  $\lambda$  – *объемная, поверхностная и линейная плотности* распределения заряда в объеме  $V$ , по поверхности  $S$  и на длине  $\ell$  соответственно.

### 3. Квантованность электрического заряда.

Абсолютная величина заряда у всех элементарных частиц одинакова. Этот заряд называется *элементарным*. Равенство зарядов выполняется с поразительной точностью, и причина этого до сих пор непонятна. Частицы, резко отличающиеся друг от друга по всем остальным свойствам, имеют в точности одинаковый заряд. Поскольку элементарные частицы суть неделимые объекты (в свободном состоянии никогда не встречаются, например, половины электрона), то и электрический заряд у тел может изменяться не непрерывно, а лишь *дискретно*, конечными порциями. Минимальная возможная порция равна элементарному заряду. Это свойство заряда называют *квантованностью*. *Квант электрического заряда* – элементарный электрический заряд –

$$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Квант заряда, т.е. элементарный заряд, представляет собой естественную единицу заряда. Однако она слишком мала для практических целей. В системе СИ используют в качестве единицы 1 *кулон* (Кл) =  $6,25 \cdot 10^{18} \cdot |e|$ . Несмотря на столь малую величину кванта заряда, сам факт его существования и свойство универсальности имеют огромное принципиальное значение. С далеко идущими следствиями этого важнейшего закона природы мы еще не раз столкнемся.

В свободном состоянии все заряды кратны целому числу элементарных электрических зарядов:

$$q = \pm N|e|. \tag{9.6}$$

Элементарные частицы – кварки  $u$  и  $d$ , существующие только в *связанном* состоянии в составе *адронов*, обладают дробными зарядами:

$$q_u = +\frac{2}{3}|e| \text{ и } q_d = -\frac{1}{3}|e|$$

соответственно, и тогда, например, структуру *протона*  $p^+$  можно представить как  $uud$ , а структуру *нейтрона*  $n^0$  – как  $ddu$ .

#### 4. Закон сохранения заряда.

Со свойством квантованности заряда тесно связан закон сохранения заряда. Если состав частиц какой-либо системы со временем не изменяется, то сохранение неизменным полного заряда этой системы есть просто следствие неизменности самого кванта. Однако, как показывает опыт, полный заряд сохраняется и тогда, когда внутри изолированной системы происходят взаимные превращения частиц, так что состав системы изменяется. Закон сохранения заряда накладывает определенные ограничения на возможные типы превращений. А именно – могут совершаться только такие превращения, при которых суммарный алгебраический заряд исходных частиц равен суммарному заряду продуктов реакции. В частности, рождение и уничтожение заряженных частиц может осуществляться только парами. Разумеется, если система не является изолированной, т.е. в нее могут проникать посторонние частицы или, наоборот, из нее могут вылетать «свои» частицы, то закон сохранения заряда не выполняется.

#### 5. Инвариантность электрического заряда.

Электрический заряд принадлежит к числу тех физических величин, которые обладают *релятивистской инвариантностью*. Это значит, что во всех инерциальных системах отсчета (ИСО) величина заряда любой частицы или тела одинакова. Другими словами, заряд движущейся и покоящейся частиц одинаков. *Сохраняемость* и *инвариантность* – это равные по своему содержанию законы. Инвариантность заряда так же, как и все предыдущие его свойства, есть опытный факт. Если бы заряд зависел от скорости, то атомы и молекулы тел не могли бы сохранять свою нейтральность при изменении движения орбитальных электронов.

### 9.3. Силовые и энергетические характеристики полей

Таблица 9.1

Поле	Источник поля	Силовые характеристики	Энергетические характеристики	Взаимосвязь характеристик
Поля потенциальных сил				
Гравитационное поле	Масса (гравитационный заряд)	$\vec{G}$ – напряженность	$\varphi$ – гравитационный потенциал	$\vec{G} = -\text{grad}\varphi$
Взаимодействие в гравитационном поле		$\vec{F}_{\text{Гр}} = m\vec{G}$ – гравитационная сила	$U = m\varphi$ – потенциальная энергия	$\vec{F} = -\text{grad}U$

Электростатическое поле	Электрический заряд	$\vec{E}$ – напряженность	$\varphi$ – электрический потенциал	$\vec{E} = -\text{grad}\varphi$
Взаимодействие в электростатическом поле		$\vec{F}_э = q\vec{E}$ – электрическая сила	$U = q\varphi$ – потенциальная энергия	$\vec{F} = -\text{grad}U$
Вихревые поля				
Магнито-статическое поле	Движущийся электрический заряд	$\vec{B}$ – индукция		
Взаимодействие в магнитном поле		$\vec{F}_М = q[\vec{V}\vec{B}]$ – магнитная сила		

Характеристики полей приведены в табл. 9.1.

*Напряженность силового поля* – скрытая силовая характеристика поля, которая проявляется при внесении в поле пробного тела (массы, заряда). Напряженность поля – векторная величина.

Размерность напряженности:

$$\text{гравитационного поля } \vec{G} - \left[ \frac{\text{Н}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right];$$

$$\text{электрического поля } \vec{E} - \left[ \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{м}} \right].$$

*Потенциал поля*  $\varphi$  – это скрытая энергетическая характеристика поля, которая проявляется при внесении в поле пробного тела (пробной массы или пробного заряда) и зависит от источника поля и от расстояния от него до точки в поле. Потенциал  $\varphi$  – скалярная величина.

Размерность потенциала:

$$\text{электрического поля } \varphi - \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В (вольт)} \right];$$

$$\text{гравитационного поля } \varphi - \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right].$$

#### 9.4. Наглядное представление полей

Силовые поля могут быть представлены с помощью линий напряженности – так называемых *силовых линий* (рис. 9.2).



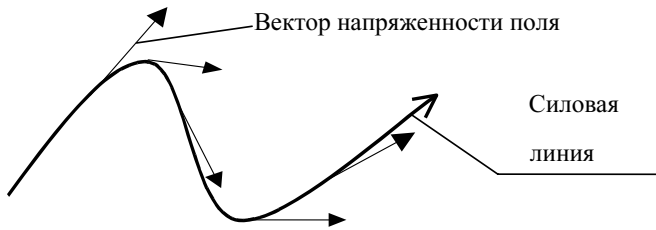


Рис. 9.2. К понятию силовой линии

Длина силовой линии не имеет физического смысла. Физический смысл имеет лишь *густота* силовых линий. По картине силовых линий поля можно разделить на *однородные* и *неоднородные*.

Поле называется *однородным*, если его напряженность во всех точках одинакова. Силовые линии такого поля параллельны друг другу и равномерно распределены в пространстве. Например, однородными являются гравитационное поле Земли вблизи ее поверхности и электростатическое поле в плоском конденсаторе (вдали от краев) – рис. 9.3.

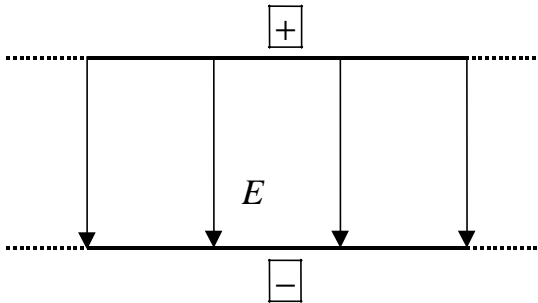


Рис. 9.3. Однородное электростатическое поле

В *неоднородных* полях напряженность зависит от величины и направления радиуса-вектора, проведенного от источника поля в исследуемую точку. Силовые линии неоднородных полей, в частности, могут быть *расходящимися* (например, электрическое поле неподвижного положительного точечного заряда (рис. 9.4) или *сходящимися* (например, электрическое поле неподвижного отрицательного заряда или гравитационное поле неподвижной точечной массы – рис. 9.5), а также *вихревыми* – с замкнутыми силовыми линиями (например, магнитное поле прямого тока – рис. 9.6).

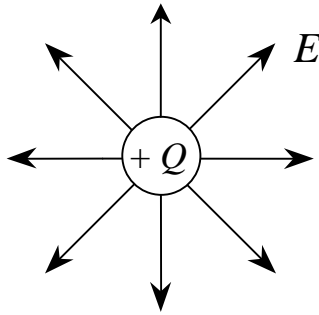


Рис. 9.4. Электростатическое поле точечного положительного заряда

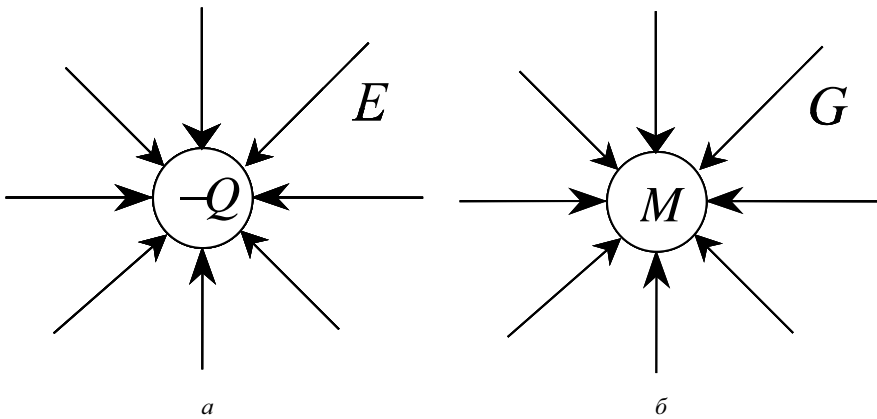


Рис. 9.5. Электростатическое поле точечного отрицательного заряда (а) гравитационное поле точечной массы (б)

Линии напряженности гравитационных и электростатических полей являются именно *силовыми*, так как касательная к силовой линии в любой точке совпадает с вектором напряженности поля и с вектором силы, действующей на пробное тело в данной точке поля.

Линии напряженности вихревых магнитных полей (см. рис. 9.6), строго говоря, силовыми не являются, так как не показывают направление силы, действующей на элементарный ток или движущийся заряд, находящиеся в данной точке поля. Как будет показано ниже (см., например, рис. 11.7), вектор магнитной силы перпендикулярен к вектору индукции магнитного поля  $\vec{B}$ , который направлен по касательной к силовым линиям.

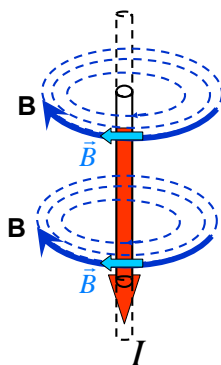


Рис. 9.6. Вихревое магнитное поле прямого тока

### Контрольные вопросы

1. Верно ли утверждение: «Сила линия электростатического поля есть траектория движения положительного заряда»?
2. В каком случае напряженность электрического поля в некоторой точке и сила, действующая на заряд в той же точке, противоположны по направлению?
3. Верно ли утверждение: «Сила линия магнитного поля есть траектория движения положительного заряда»?
4. В каком гипотетическом случае магнитные силовые линии могли бы быть расходящимися (сходящимися)?
5. Назовите возможные источники однородного электростатического поля.
6. Назовите возможные источники однородного магнитостатического поля.
7. Может ли электрическое поле быть вихревым? Если «да», то в каком случае?

## Глава 10. ПОСТОЯННОЕ ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ<sup>1</sup>

Сила гравитационного взаимодействия – первая из фундаментальных сил, которая была исследована количественно.

В настоящее время можно считать установленным экспериментально, что все тела подвержены гравитационному взаимодействию. Ускорения, которые испытывают различные тела в заданном гравитационном поле, одинаковы – они не зависят от массы и других свойств тел. Сила гравитационного взаимодействия  $\vec{F}_{\text{Гр}}(\vec{r})$  зависит явно от масс взаимодействующих тел и от расстояния между ними, а от скоростей этих тел – только через  $m(v)$ . Поскольку все тела обладают массой (даже если масса покоя  $m_0 = 0$ ), то гравитационное взаимодействие универсально.

Пусть тела с массами  $m_1, m_2, m_i, \dots$  создают гравитационное поле. Рассмотрим действие этого поля на материальный объект массой  $m$ , находящийся в точке, к которой проведен радиус-вектор  $\vec{r}$ . Условимся рассматривать только медленные движения тела:  $v \ll c$  ( $m_i = m_{i0}$ ).

Тело массой  $m$  называется *пробным* телом. Пробное тело мало, т.е.: 1) масса  $m$  настолько мала, что своим присутствием пробное тело не нарушает гравитационного поля; 2) протяженность тела массой  $m$  мала по сравнению с расстояниями до других тел (вектор  $\vec{r}$  имеет смысл радиуса-вектора м.т.). Помещая пробное тело массой  $m$  в различные точки пространства, т.е. меняя  $\vec{r}$ , будем получать всякий раз различные по величине и направлению силы  $\vec{F}_{\text{Гр}}(\vec{r})$ . При любом  $\vec{r}$  сила  $\vec{F}_{\text{Гр}}(\vec{r})$  пропорциональна  $m$ .

Очевидно, что гравитационное воздействие происходит не непосредственно при контакте двух тел (как, например, удар), а на расстоянии (дальнодействие).

Пространство, окружающее тела  $m_1, m_2, m_i, \dots$ , заполнено *гравитационным полем*. Количественной характеристикой воздействия этого поля на материальные объекты следует считать отношение  $\vec{F}_{\text{Гр}}(\vec{r})$  к массе пробного тела:

---

<sup>1</sup> Предлагается факультативно – для самостоятельного изучения.

$$\vec{G}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}_{\text{гр}}(\vec{r})}{m}. \quad (10.1)$$

Векторная физическая величина  $\vec{G}(\vec{r})$ , характеризующая состояние гравитационного поля в каждой точке пространства, называется *напряженностью* гравитационного поля. Вектор напряженности  $\vec{G}(\vec{r})$  определяет силовое действие поля на помещенные в него тела: величина  $\vec{G}(\vec{r})$  не зависит от массы пробных тел. В связи с этим массу пробного тела  $m$  называют *гравитационным зарядом* (по аналогии с электрическим зарядом), а тела  $m_1, m_2, m_i, \dots$  – *источниками поля*.

Необходимо отметить, что понятие массы, введенное ранее как мера инертности тела, и понятие массы как гравитационного заряда (меры гравитационного взаимодействия) могли бы в принципе быть совершенно различными понятиями. Согласно второму закону Ньютона под действием силы любого происхождения  $\vec{F}$  тело приобретает ускорение

$$\vec{a}_{\text{гр}} = \frac{\vec{F}}{m_{\text{ин}}}. \quad (10.2)$$

В частном случае гравитационных сил

$$\vec{a}_{\text{гр}} = \frac{m_{\text{гр}} \vec{G}}{m_{\text{ин}}}. \quad (10.3)$$

Из опыта известно, что все тела в данном поле  $\vec{G}(\vec{r})$  обладают одним и тем же ускорением  $\vec{a}_{\text{гр}} = \text{const}$  (у поверхности Земли  $\vec{a}_{\text{гр}} = \vec{g}$ ).

Отсюда можно сделать вывод, что  $\frac{m_{\text{гр}}}{m_{\text{ин}}} = \text{const}$ , т.е.  $m_{\text{гр}} \cong m_{\text{ин}}$ . Коэффициент пропорциональности зависит от выбора системы единиц. В системе СИ  $m_{\text{гр}} = m_{\text{ин}}$  (проверка опытами Этвеша и Дикка показала, что равенство справедливо с точностью до  $10^{-14} \gamma$ ). Этот факт назван *принципом эквивалентности* гравитационной («тяжелой») и инертной масс и лежит в основе построения *общей теории относительности*.

Итак,  $\vec{G}(\vec{r})$  – общая характеристика гравитационного поля безотносительно к виду его источников, она определяется эксперимен-