

Введение. ПРЕДМЕТ КЛАССИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Содержание каждой физической теории во многом и существенном определяется классом рассматриваемых физических систем. *Физическая система* есть целостная совокупность материальных объектов с многообразием их взаимосвязей и связей с окружением. Это понятие включает такие компоненты: природа материальных объектов, считааемых «элементарными», и их число; характерные для них скорости; характерные масштабы; главенствующие взаимодействия, которые определяют существенные связи объектов друг с другом и с окружением. Указанные классификационные признаки физических систем сведены в табл. 1.

Таблица 1

0. Число частиц		
α . Малое ($N \sim 1$)		
β . Большое ($N \gg 1$)		
I. Скорости	II. Масштабы	III. Взаимодействия
А. Большие ($v \sim c$) Б. Малые ($v \ll c$)	а. Большие ($R \gtrsim 100 \text{ млн. св. лет}$) б. Обычные ($R \sim 1 \text{ м}$) в. Малые ($R \lesssim 10^{-8} \text{ м}$)	1. Сильное 2. Электромагнитное 3. Слабое 4. Гравитационное

Если число частиц в системе мало, то она является динамической, если велико – статистической. Если скорости большие, то физические системы относят к релятивистским, в противном случае – к нерелятивистским. Если характерные масштабы большие, то говорят, что мы имеем дело с мегамиром (космология), если «обычные» – с макромиром, если малые – с микромиром (квантовая физика). О типах взаимодействий будет сказано ниже.

В *классической механике* изучается поведение физических систем из небольшого числа нерелятивистских макроскопических частиц. В качестве переменных состояния системы выступают здесь координаты и скорости частиц. Они изменяются за счет разного рода сил, обусловленных взаимодействиями между частицами и воздействиями на них внешнего окружения. Сила считаются заданными, и в рамках самой механики их природа не обсуждается. Силы взаимодействия в классической механике являются парными, и каждая из них зависит только от расстояния между частицами и не зависит явно от времени. Это означает, в частности, что взаимодействия считаются распространяющимися мгновенно, без запаздывания, и это позволяет ввести важное понятие потенциальной энергии.

В *релятивистской механике* ситуация иная. Здесь уже приходится учитывать, что взаимодействия не могут распространяться со скоростью, превышающей c , т.е. существенными оказываются эффекты запаздывания. Для последовательного описания взаимодействий необходимо вводить понятие поля, расширяя класс физических систем и выходя тем самым за рамки механики. Именно поэтому круг задач, рассматриваемых в релятивистской механике, весьма ограничен. В ее рамках не допускает строгого и полного решения даже проблема двух тел.

Одним из разделов физики, в которых детально изучаются свойства взаимодействий с полевой точки зрения, и является электродинамика. Всего в настоящее время известно

четыре фундаментальных взаимодействия¹⁾, к которым сводятся все известные силы. Две главные их характеристики, вместе с наиболее известными непосредственными проявлениями этих взаимодействий, указаны в табл. 2.

Таблица 2

Взаимодействие	Сильное	Электромагнитное	Слабое	Гравитационное
Проявления	Ядерные силы	Силы Кулона и Ампера	Бета-распад	Всемирное тяготение
Интенсивность	~ 1	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-10}$	$\sim 10^{-38}$
Радиус, м	$\sim 10^{-15}$	∞	$\sim 10^{-18}$	∞

В принципе каждое взаимодействие могло бы проявляться на всех масштабных уровнях материи: в микромире, макромире и мегамире. Однако сильное и слабое взаимодействия имеют очень малые радиусы, а потому макроскопически и космологически непосредственно не проявляются. Их теория с самого начала должна быть квантовой. Гравитационное взаимодействие обладает очень большим радиусом (формально $R = \infty$), но чрезвычайно малой интенсивностью и непосредственно проявляется лишь макроскопически и космологически, т.е. на тех уровнях материи, которые характеризуются огромными «гравитационными зарядами» (массами) соответствующих тел. Приблизительно это взаимодействие описывается ньютоновой теорией тяготения, а более точно – эйнштейновой общей теорией относительности.

Электромагнитное взаимодействие имеет чрезвычайно большой радиус и в то же время весьма интенсивно. Поэтому оно проявляется на всех масштабных уровнях. Так, все макроскопические силы (трения, упругости и т.п.), кроме силы тяжести, имеют в конечном итоге электромагнитную природу. Соответственно сказанному существует два раздела теории электромагнитного взаимодействия²⁾ – квантовая электродинамика и классическая электродинамика. В данном разделе курса теоретической физики мы будем заниматься только последней³⁾:

Классическая электродинамика есть теория электромагнитного взаимодействия в его макроскопических проявлениях.

Основные понятия электродинамики – электромагнитное поле и электрический заряд. Под *электромагнитным полем* понимается определенный вид материи, являющийся переносчиком электромагнитного взаимодействия. Оно может существовать и самостоятельно, независимо от взаимодействующих частиц. *Электрический заряд* – это внутренняя характеристика частицы (тела), характеризующая ее способность участвовать в

¹⁾ В современной фундаментальной физике электромагнитное и слабое взаимодействия рассматриваются как проявления единого электрослабого взаимодействия. Не исключена возможность, что число принципиально различных фундаментальных взаимодействий может быть уменьшено до двух («великое объединение») или даже до одного (суперструны и супергравитация). Эти вопросы обсуждаются в физике атомного ядра и элементарных частиц.

²⁾ Крупномасштабные проявления электромагнитного взаимодействия рассматриваются в астрофизике и космологии.

³⁾ Основные идеи квантовой электродинамики кратко обсуждаются в физике атомного ядра и элементарных частиц.

электромагнитном взаимодействии, т.е. испытывать воздействие со стороны электромагнитного поля и, в свою очередь, порождать это поле. На данном этапе более содержательных определений дать пока невозможно. Указанные понятия будут конструктивно формироваться по ходу последующего изложения.

Заметим, что в рамках квантовой теории поля они вводятся очень естественно. Электромагнитное поле – это совокупность определенных частиц (реальных или виртуальных), называемых фотонами и обладающих целым рядом вполне конкретных характеристик: масса 0, спин 1 и т.д. Заряженные частицы – это частицы, способные поглощать и испускать фотоны. Электрический заряд – это физическая величина, значение которой задает вероятность поглощения или испускания фотона рассматриваемой частицей. С этой точки зрения электромагнитное взаимодействие есть результат обмена заряженных частиц фотонами.

Электромагнитное поле распространяется в вакууме со скоростью c . Поэтому электродинамика должна быть релятивистской теорией. Однако она была создана М. Фарадеем и Дж. Максвеллом до построения теории относительности. Естественно, что в той форме, которую они придали основным уравнениям классической электродинамики, требование релятивистской инвариантности явным образом не учитывалось. Именно с такой формулировки электродинамики, на первый взгляд нерелятивистской, мы и начнем ее изучение. Затем покажем, что все уравнения максвелловой электродинамики могут быть переписаны в явно ковариантной форме, чем и будет установлено, что она автоматически (!) удовлетворяет требованиям специальной теории относительности.

Обсудим кратко класс физических систем, рассматриваемых в классической электродинамике. В самой общей ситуации ему принадлежат системы, включающие некую совокупность заряженных частиц и порождаемое ими электромагнитное поле, которое, в свою очередь, изменяет механическое состояние этих частиц. Частицы могут быть как нерелятивистскими, так и релятивистскими, поле всегда является релятивистским (см. выше). Но при трактовке указанной физической системы квантовые соображения не привлекаются. Здесь нужно четко различать два случая.

Первый случай – это теория электромагнитных явлений в вакууме, т.е. «микроскопическая» электродинамика¹⁾. Ему соответствуют системы с небольшим числом заряженных частиц. Сюда же относятся системы, в которых число частиц не является малым, но их механическое состояние или его изменение во времени считается заданным и не подверженным влиянию электромагнитного поля. В такой ситуации переменные состояния самих частиц выступают всего лишь в качестве параметров системы – заданных плотности заряда ρ и плотности тока \vec{j} . В итоге основной физической системой, рассматриваемой «микроскопической» электродинамикой, оказывается электромагнитное поле, состояние которого задается двумя векторными полями $\vec{E}(\vec{r}|t)$ и $\vec{B}(\vec{r}|t)$. Поведение поля при заданных ρ и \vec{j} описывается уравнениями Максвелла в вакууме. Они имеют чрезвычайно широкую область применимости, и потому относятся к числу фундаментальных физических законов. Формулировке этих уравнений, анализу их общих свойств и извлечению из них некоторых важнейших следствий и посвящена первая часть нашего курса.

Второй случай – это теория электромагнитных явлений в веществе, т.е. электродинамика сплошных сред, или «макроскопическая» (в узком смысле слова) электродинамика. Ему соответствуют системы, в которых число заряженных частиц макроскопически велико, причем их пространственное распределение подвержено влиянию электромагнитного поля. При полном и последовательном описании подобных систем нужно обязательно привлекать идеи статистической физики. Однако в ряде простейших случаев переменные состояния частиц вещества удается эффективно исключить из рассмотрения. Достигается это путем удвоения числа переменных состояния самого электромагнитного

¹⁾ Здесь употребляется несколько жаргонный, но общепринятый в физике язык.

поля – введением наряду с векторами \vec{E} и \vec{B} двух вспомогательных векторов \vec{D} и \vec{H} . Для этого набора переменных тоже удастся сформулировать динамические уравнения, но с привлечением разного рода модельных представлений и приближений. Такие уравнения имеют узкую область применимости, и они не могут быть отнесены к фундаментальным законам физики. Анализ электромагнитных явлений в веществе посвящены две последние главы курса.