

О. П. Спиридонов

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
ФИЗИЧЕСКИЕ
ПОСТОЯННЫЕ**

О. П. Спиридонов

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Допущено
Государственным комитетом СССР
по народному образованию
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений



«Высшая школа»
1991

ББК 22.3
С 72
УДК 531.7

Рецензенты:

**кафедра общей физики Коломенского педагогического института
(зав. кафедрой — доц. А. Е. Аникин);
проф. Л. В. Тарасов**

С $\frac{1604010000(4309000000) - 436}{001(01) - 91}$ 93 — 91

ISBN 5-06-001957-8

© О. П. Спиридонов, 1991

ОТ АВТОРА

Одной из главных задач преподавания физики следует считать формирование представления об основах единой научной картины мира, базирующейся на достижениях современной теоретической и экспериментальной физики. Между тем именно эти вопросы не находят пока должного отражения в существующих учебниках. Естественное объяснение этого противоречия состоит в том, что целостная физическая картина мира создается буквально в наши дни, поэтому книги, в которых освещаются последние достижения науки, можно рассматривать как необходимое дополнение к вузовским руководствам. Однако это скорее уход от проблемы, нежели ее решение. Относительно малая доступность этих изданий затрудняет их изучение, а встречающаяся порой чрезмерная детализация знаний в отдельных специальных областях физики, на первый взгляд мало связанных друг с другом, затрудняет восприятие физики как единой науки. Наверное, поэтому появляются монографии, в которых с акцентом на тот или иной аспект физической теории прослеживается развитие и становление фундаментальных физических идей с момента их зарождения в Древней Греции вплоть до кардинально новых теорий современной науки [1—3]. В этой ситуации нужны достаточно веские основания для того, чтобы предложить вниманию читателей новое учебное пособие.

Эта книга посвящена анализу проблемы фундаментальных физических постоянных. Открытие этих констант следует считать одним из выдающихся достижений физической науки, поскольку они дают нам информацию о наиболее фундаментальных, основополагающих свойствах материи. В то же время физические постоянные представляют собой одну из крупнейших нерешенных проблем современной науки, так как, измеренные экспериментально с высокой степенью точности, они не имеют пока

сколь-либо убедительной теоретической интерпретации. Поискам путей решения проблемы фундаментальных постоянных уделяли внимание выдающиеся физики мира — А. Эйнштейн, М. Планк, В. Гейзенберг, П. Дирак и другие. Это сопровождалось серьезнейшими дискуссиями ученых о характере физических явлений и законов, коренным пересмотром в ряде случаев традиционно сложившихся представлений о свойствах природы.

В последнее время наметился принципиально новый подход к пониманию значения фундаментальных физических постоянных. Эти исследования вызывают повышенный интерес даже у весьма далеких от физики людей. Установлено, что устойчивость основных структурных элементов Вселенной — ядер, атомов, звезд и галактик — крайне критична по отношению к числовым значениям констант. Сравнительно небольшие их изменения могли бы привести к формированию качественно иного мира, в котором, в частности, стало бы невозможным образование крупных структур, высокоорганизованных форм живой материи, а в конечном счете и жизни. Проблема фундаментальных постоянных приобретает, таким образом, глобальное значение. Возникают вопросы принципиального плана: как могла сформироваться наша Вселенная с ее уникальным набором физических констант, при котором были обеспечены условия для возникновения и существования жизни? Единственна ли она и каковы свойства других возможных Вселенных? В повестку дня выдвигаются поражающие воображение вопросы взаимодействия различных Вселенных.

К сожалению, на этом фоне резким диссонансом выглядит сложившаяся практика изучения физических постоянных, которая явно не соответствует их действительно фундаментальному значению в науке. Пока все сводится к сообщению о них скупых и разрозненных данных в различных разделах курса физики. Мало внимания уделяется систематизации и объединению сведений о них, анализу связи констант между собой, исследованию их основополагающей роли в развитии и становлении физических теорий и построении современной научной картины мира. В учебной литературе совершенно не рассматривается диалектика возникновения, развития и формирования этого важнейшего структурного элемента физической науки. Отсутствует более или менее удовлетворительное определение понятия «фундаментальная физическая постоянная». Не удивительно, что этот термин часто ассоциируется с более или менее подробной таблицей физических констант, числовые значения которых следует применять при решении задач. Проблема фундаментальных постоянных еще не пришла на страницы учебников. Невольно формируется принципиально неверное представление о физических постоянных как о статичном справочном материале. Известно, что изменить

сложившиеся представления намного труднее, чем выучить предмет заново. Именно это и является главной задачей книги.

Ее тема дает редкую возможность, не отвлекаясь на частности, сколь бы важны они ни были, с единых позиций подойти к рассмотрению практически всех основных разделов курса физики. Фундаментальные постоянные как бы связывают ее воедино, являясь неотъемлемыми характеристическими параметрами всех важнейших физических теорий—тяготения и теории относительности, атомной и ядерной физики, квантовой механики и космологии. Понимание существа проблемы в целом немислимо без синтеза достижений всей физики и ее современных единых теорий взаимодействий, физики элементарных частиц, астрофизики. При таком анализе возникают имеющие самостоятельное значение вопросы общенаучного, методологического, мировоззренческого и философского характера.

Книга состоит из трех частей. В первой части обсуждаются принципиально важные для правильного понимания проблемы физических постоянных в целом вопросы методологического характера. Необходимость подобного анализа обусловлена многими факторами. В существующей научной, учебной и методической литературе до сих пор нет единого и четкого определения этого важнейшего физического понятия, можно встретить даже резко различные по физическому содержанию утверждения. Современное понимание фундаментальности констант и их числа резко расходится с содержанием опубликованных таблиц фундаментальных физических постоянных [4] и нормативных документов [5,6]. Во многих таблицах имеют место серьезные ошибки физического и методического планов. Например, ранг фундаментальных физических постоянных присваивают величинам, не являющимся константами природы и обязанным своим существованием всего-навсего лишь системе единиц,— таковы, например, магнитная постоянная μ_0 и электрическая постоянная ϵ_0 . В список фундаментальных констант вносят величины, связанные с наличием меняющихся время от времени международных соглашений между учеными,— такова, например, атомная единица массы. В число фундаментальных констант включают многие производные величины [например, $F=N_A e$, $R=N_A k$, $r_0=e^2/(m_e c^2)$ и т.п.] и даже значения некоторых физических параметров, определенных при весьма специфических, как правило, удобных с точки зрения человеческой практики, условиях эксперимента (например, объем моля идеального газа при нормальных условиях, т.е. при давлении 1 атм и температуре 273,15 К).

Существующее положение чрезвычайно затрудняет понимание проблемы констант и обуславливает необходимость методологического анализа самого понятия «фундаментальные постоянные». Этот анализ имеет самостоятельное научное значение,

поскольку позволяет наметить пути к решению проблемы в целом. Именно с этих позиций в первой части рассматриваются различные стороны понятия «фундаментальные постоянные» — анализ содержания существующих таблиц, терминологические вопросы, размерность физических констант и проблемы точного измерения их числовых значений. При детальном рассмотрении проблемы все эти отдельные ее грани оказываются тесно связанными между собой.

Следует особо остановиться на значении терминологического анализа проблемы, ибо отсутствие четкого определения того или иного физического понятия практически сводит к нулю попытки его обсуждения. Выше уже говорилось, что в настоящее время отсутствует единое определение понятия «фундаментальные постоянные», поэтому обсуждение терминологических вопросов представляется совершенно необходимым. Известно, что определения иногда решающим образом меняют содержание физической теории — достаточно вспомнить хорошо известный пример с определением понятия одновременности в классической физике и теории относительности. В некоторых случаях определения еще нуждаются в уточнении и доработке, как, например, понятия «элементарная частица» и «фундаментальная физическая постоянная». Автор понимает, что некоторые моменты выполненного в книге анализа могут быть предметом обсуждения, но для правильного понимания существа проблемы не следует забывать «...условного и относительного значения всех определений вообще, которые никогда не смогут охватить всестороннюю связь явления в его полном развитии» [7].

Трудности анализа важнейших физических понятий, разработки их определений являются отражением диалектически противоречивого характера процесса познания материального мира. В учебном плане этот анализ представляется весьма необходимым и полезным.

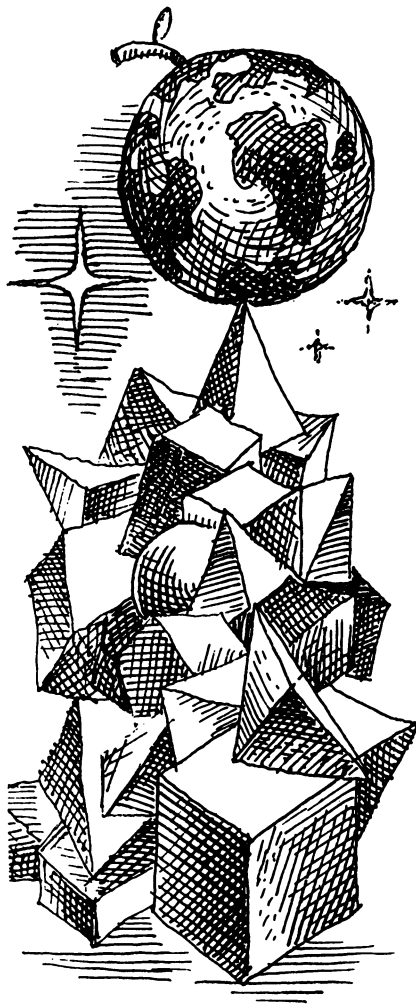
Решение проблемы фундаментальных постоянных в целом невозможно без четкого понимания физической сущности отдельных физических констант, поэтому вторая часть книги посвящена этим вопросам. Между возникновением той или иной постоянной и ее измерением, осознанием ее действительного значения в физике часто лежит долгий путь. Во второй части систематизированы и объединены сведения о физических постоянных, о методах экспериментального определения их значений, выявлена принципиальная роль констант в становлении и развитии физической науки. Все это представляет, говоря словами И. Ньютона, тот «запас опытов», который позволяет выполнить в дальнейшем (ч. III) анализ проблемы фундаментальных постоянных в целом. Отдельные параграфы второй части посвящены гравитационной постоянной G , константам молекулярной физики (постоянные

Авогадро N_A и Больцмана k), элементарному электрическому заряду e , скорости света c , постоянной Планка h , константам физики элементарных частиц (массы покоя электрона m_e , протона m_p и нейтрона m_n , константы сильного α_S и слабого α_W взаимодействий). Понимание физического содержания и роли отдельных постоянных, входящих в качестве характеристических параметров в структуры различных физических теорий, невозможно без краткого изложения существа данной теории. Например, исторически первая константа физики—постоянная тяготения G —вводит нас в круг проблем теории гравитации, крупнейшей и до сих пор еще не решенной проблемы современной физики. Изучение различных граней такой важнейшей физической постоянной, как скорость света c , нельзя представить без изложения основных идей специальной и общей теорий относительности А. Эйнштейна. Постоянная Планка h открывает путь к познанию физики микромира. Физика элементарных частиц требует обсуждения современных теорий объединения различных взаимодействий. При этом на авансцену выходят связанные с классическими размерными физическими постоянными новые фундаментальные безразмерные величины—константы сильного α_S , электромагнитного α_e , слабого α_W и гравитационного α_g взаимодействий, размерность физического пространства N . Решение проблемы фундаментальных постоянных в целом требует анализа последних достижений физики элементарных частиц и космологии, синтеза успехов этих наук. Изучение физических постоянных с необходимостью превращается в связанный единым сюжетом рассказ о путях развития и проблемах физики. Сюжет весьма волнующ—возникновение и эволюция Вселенной, происхождение жизни и разума. Мировоззренческий аспект подобного рассмотрения проблемы постоянных очевиден.

Третья часть книги посвящена анализу проблемы постоянных в целом, поискам путей решения проблемы формирования значенй фундаментальных констант на ранних этапах эволюции Вселенной. Отметим, что эта проблема еще не решена современной физикой. Характер анализа проблемы принципиально меняется в третьей части. В первой и второй частях изложение велось таким образом, что вопрос о том, почему та или иная константа имеет именно такое числовое значение, вообще не ставился. Это считалось раз и навсегда заданным. Вряд ли можно удовлетвориться такой постановкой вопроса, а это неизбежно приводит к обсуждению проблем формирования значений констант на ранних этапах эволюции Вселенной, связи ее характеристик со значениями фундаментальных постоянных. В анализ включаются совершенно новые вопросы, постановка которых до недавнего времени казалась абсурдной. Например, при каких изменениях

числовых значений констант сохраняются условия для возникновения и существования жизни, разума? Единственна ли наша цивилизация? Проблема фундаментальных постоянных приобретает совершенно новое значение и остроту.

Понимая, что это пособие является первой попыткой изложения проблемы фундаментальных физических постоянных в учебной литературе, автор будет благодарен всем читателям за критические и конструктивные советы по его улучшению.



ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

На ошибках учимся
(Народная мудрость)

1. ТАБЛИЦЫ И ФИЗИКА

Любое объективное исследование прежде всего требует знакомства с имеющейся на сегодняшний день информацией по обсуждаемой проблеме. Казалось бы, в нашем случае этот процесс максимально облегчен, поскольку во многих справочниках приводятся более или менее полные таблицы фундаментальных физических постоянных [4] и даже существует официальное издание [6], приводимое ниже (табл. 1). Эти документы имеют чрезвычайно важное значение для организации научных исследований, однако для правильного понимания существа проблемы фундаментальных физических постоянных к ним необходимо сделать несколько замечаний. О существовании констант читатели знают еще со школьной скамьи, но вряд ли кто из них

Таблица 1. Значения фундаментальных констант

Константа	Обозначение	Числовое значение	Размерность и единица физической величины	Относительное среднее квадратическое отклонение, 10^{-6}
Основные константы				
Универсальные константы				
Скорость света в вакууме	c	299 792 458	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	Точно
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} = 12,566\ 370\ 614\dots$	$\text{Н} \cdot \text{А}^{-2}$ $10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2}$	Точно
Электрическая постоянная	ϵ_0	$(\mu_0 c^2)^{-1} = 8,854\ 187\ 817\dots$	$10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$	Точно
Гравитационная постоянная	G	6,672 59(85)	$10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$	128
Постоянная Планка	h	6,626 0755(40)	$10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$	0,60
в электрон-вольтах $\hbar/\{e\}$		4,135 6692(12)	$10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}$	0,30
$h/(2\pi)$	\hbar	1,054 572 66(63)	$10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$	0,60
в электрон-вольтах $\hbar/\{e\}$		6,582 1220 (20)	$10^{-16} \text{ эВ} \cdot \text{с}$	0,30
Планковская масса $(\hbar c/G)^{1/2}$	m_p	2,176 71(14)	10^{-8} кг	64
Планковская длина	l_p	1,616 05(10)	10^{-35} м	64
$\hbar/(m_p c) = (\hbar G/c^3)^{1/2}$				
Планковское время	t_p	5,390 56(34)	10^{-44} с	64
$l_p/c = (\hbar G/c^5)^{1/2}$				
Электромагнитные константы				
Элементарный заряд	e	1,602 177 33(49)	10^{-19} Кл	0,30
	e/h	2,417 988 36(72)	$10^{14} \text{ Кл} \cdot \text{Дж}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	0,30
Квант магнитного потока $h/(2e)$	Φ_0	2,067 834 61(61)	10^{-15} Вб	0,30

Константа	Обозначение	Числовое значение	Размерность и единица физической величины	Относительное среднее квадратическое отклонение, 10^{-6}
Отношение Джозефсона	$2e/h$	4,835 9767(14)	10^{14} Гц·В ⁻¹	0,30
Квантовая проводимость Холла	e^2/h	3,847 046 14(17)	10^{-5} См	0,045
Квантовое сопротивление Холла				
$h/e^2 = \frac{1}{2} \mu_0 c/\alpha$	R_H	25 812,8056(12)	Ом	0,045
Магнетон Бора $e\hbar/(2m_e c)$	μ_B	9,274 0154(31)	10^{-24} Дж·Тл ⁻¹	0,34
в электрон-вольтах $\mu_B/\{e\}$		5,788 382 63(52)	10^{-5} эВ·Тл ⁻¹	0,089
в герцах μ_B/h		1,399 624 18(42)	10^{10} Гц·Тл ⁻¹	0,30
в волновых числах $\mu_B/(hc)$		46,686 437(14)	м ⁻¹ ·Тл ⁻¹	0,30
в кельвинах μ_B/k		0,671 7099(57)	К·Тл ⁻¹	8,5
Ядерный магнетон $e\hbar/(2m_p)$	μ_N	5,050 7866(17)	10^{-27} Дж·Тл ⁻¹	0,34
в электрон-вольтах $\mu_N/\{e\}$		3,152 451 66(28)	10^{-8} эВ·Тл ⁻¹	0,089
в герцах μ_N/h		7,622 5914(23)	МГц·Тл ⁻¹	0,30
в волновых числах $\mu_N/(hc)$		2,542 622 81(77)	10^{-2} м ⁻¹ ·Тл ⁻¹	0,30
в кельвинах μ_N/k		3,658 246(31)	10^{-4} К·Тл ⁻¹	8,5
Атомные константы				
Постоянная тонкой структуры				
$\frac{1}{2} \mu_0 ce^2/h$	α	7,297 353 08(33)	10^{-3}	0,045
	α^{-1}	137, 035 9895(61)		0,045

Константа	Обозначение	Числовое значение	Размерность и единица физической величины	Относительное среднее квадратическое отклонение, 10^{-6}
Постоянная Ридберга	R_{∞}	10 973 731, 534 (13)	м^{-1}	0,0012
$\frac{1}{2} m_e c \alpha^2 / h$				
в герцах $R_{\infty} c$		3,289 841 9499(39)	10^{15} Гц	0,0012
в джоулях $R_{\infty} h c$		2,179 8741(13)	10^{-18} Дж	0,60
в электрон-вольтах $R_{\infty} h c / \{e\}$		13,605 6981(40)	эВ	0,30
Боровский радиус $a/(4\pi R_{\infty})$	a_0	0,529 177 249(24)	10^{-10} м	0,045
Энергия Хартри $e^2/4\pi\epsilon_0 a_0 = 2R_{\infty} h c$	E_h	4,359 7482(26)	10^{-18} Дж	0,60
в электрон-вольтах $E_h / \{e\}$		27,211 3961(81)	эВ	0,30
Квант циркуляции $h/(2m_e)$	$h/(2m_e)$	3,636 948 07(33)	$10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	0,089
	h/m_e	7,273 896 14(65)	$10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	0,089
Электрон				
Масса покоя электрона	m_e	9,109 3897(54)	10^{-31} кг	0,59
в атомных единицах массы		5,485 799 03(13)	10^{-4} а.е.м.	0,023
в электрон-вольтах $m_e c^2 / \{e\}$		0,510 999 06(15)	МэВ	0,30
Отношение массы электрона к массе мюона	m_e/m_{μ}	4,836 332 18(71)	10^{-3}	0,15
Отношение массы электрона к массе протона	m_e/m_p	5,446 170 13(11)	10^{-4}	0,020

Константа	Обозначение	Числовое значение	Размерность и единица физической величины	Относительное среднее квадратическое отклонение, 10^{-6}
Отношение массы электрона к массе дейтрона	m_e/m_d	2,724 437 07(6)	10^{-4}	0,020
Отношение массы электрона к массе альфа-частицы	m_e/m_α	1,370 933 54(3)	10^{-4}	0,021
Отношение заряда электрона к его массе	$-e/m_e$	-1,758 819 62(53)	10^{11} Кл·кг $^{-1}$	0,30
Молярная масса электрона	$M(e)$	5,485 799 03(13)	10^{-7} кг/моль	0,023
Комптоновская длина волны электрона	λ_c	2,426 310 58(22)	10^{-12} м	0,089
$h/(m_e c)$				
$\lambda_c/2\pi = a_0 = \alpha^2/4\pi R_\infty$		3,861 593 23(35)	10^{-13} м	0,089
Классический радиус электрона $\alpha^2 a_0$	r_e	2,817 940 92(38)	10^{-15} м	0,13
Томсоновское сечение рассеяния $(8\pi/3) r_e^2$	σ_e	0,665 246 16(18)	10^{-28} м 2	0,27
Магнитный момент электрона	μ_e	928,477 01(31)	10^{-26} Дж·Тл $^{-1}$	0,34
в магнетонах Бора	μ_e/μ_B	1,001 159 652 193(10)		$1 \cdot 10^{-5}$
в ядерных магнетонах	μ_e/μ_N	1838,282 000(37)		0,020
Аномалия магнитного момента электрона $\mu_e/\mu_B - 1$	a_e	1,159 652 193(10)	10^{-3}	0,0086

Константа	Обозначение	Числовое значение	Размерность и единица физической величины	Относительное среднее квадратическое отклонение, 10^{-6}
g -фактор свободного электрона $2(1+a_e)$	g_e	2,002 319 304 386(20)		$1 \cdot 10^{-5}$
Отношение магнитного момента электрона к магнитному моменту мюона	μ_e/μ_μ	206,766 967(30)		0,15
Отношение магнитного момента электрона к магнитному моменту протона	μ_e/μ_p	658,210 6881(66)		0,010
Мюон				
Масса покоя мюона	m_μ	1,883 5327(11)	10^{-28} кг	0,61
в атомных единицах массы		0,113 428 913(17)	а.е.м.	0,15
в электрон-вольтах		105,658 389(34)	МэВ	0,32
$t_\mu c^2/\{e\}$				
Отношение массы мюона к массе электрона	m_μ/m_e	206,768 262(30)		0,15
Молярная масса мюона	$M(\mu)$	1,134 289 13(17)	10^{-4} кг/моль	0,15
Магнитный момент мюона	μ_μ	4,490 4514(15)	10^{-26} Дж·Тл $^{-1}$	0,33
в магнетонах Бора	μ_μ/μ_B	4,841 970 97(71)	10^{-3}	0,15
в ядерных магнетонах	μ_μ/μ_N	8,890 5981(13)		0,15

Константа	Обозначение	Числовое значение	Размерность и единица физической величины	Относительное среднее квадратическое отклонение, 10^{-6}
Аномалия магнитного момента мюона $[\mu_\mu/(e\hbar/2m_\mu)] - 1$	a_μ	1,165 9230(84)	10^{-3}	7,2
g -фактор свободного мюона $2(1 + a_\mu)$	g_μ	2,002 331 846(17)		0,0084
Отношение магнитного момента мюона к магнитному моменту протона	μ_μ/μ_p	3,183 345 47(47)		0,15
Протон				
Масса покоя протона	m_p	1,672 6231(10)	10^{-27} кг	0,59
в атомных единицах массы		1,007 276 470(12)	а.е.м.	0,012
в электрон-вольтах $m_p c^2/\{e\}$		938,272 31(28)	МэВ	0,30
Отношение массы протона к массе электрона	m_p/m_e	1836,152 701(37)		0,020
Отношение массы протона к массе мюона	m_p/m_μ	8,880 2444(13)		0,15
Отношение заряда протона к его массе	e/m_p	9,578 8309(29)	10^7 Кл·кг $^{-1}$	0,30
Молярная масса протона	$M(p)$	1,007 276 470(12)	10^{-3} кг/моль	0,012

Константа	Обозначение	Числовое значение	Размерность и единица физической величины	Относительное среднее квадратическое отклонение, 10^{-6}
Комптоновская длина волны протона $h/m_p c$	$\lambda_{c,p}$	1,321 410 02(12)	10^{-15} м	0,089
	$\lambda_{c,p}/(2\pi)$	2,103 089 37(19)	10^{-16} м	0,089
Магнитный момент протона	μ_p	1,410 607 61(47)	10^{-26} Дж·Тл $^{-1}$	0,34
в магнетонах Бора	μ_p/μ_B	1,521 032 202(15)	10^{-3}	0,010
в ядерных магнетонах	μ_p/μ_N	2,792 847 386(63)		0,023
Поправка на диамагнитное экранирование протонов в воде для сферического образца при 25 °С $1 - \mu'_p/\mu_p$	$\sigma(\text{H}_2\text{O})$	25,689(15)	10^{-6}	—
Магнитный момент протона (H ₂ O, сферический образец, 25 °С)	μ'_p	1,410 571 38(47)	10^{-26} Дж·Тл $^{-1}$	0,34
в магнетонах Бора	μ'_p/μ_B	1,520 993 129 (17)	10^{-3}	0,011
в ядерных магнетонах	μ'_p/μ_N	2,792 775 642 (64)		0,023
Гиромагнитное отношение протона	γ_p	26 752,2128(81)	10^4 с $^{-1}$ ·Тл $^{-1}$	0,30
	$\gamma_p/2\pi$	42,577 469(13)	МГц·Тл $^{-1}$	0,30
Гиромагнитное отношение протона (H ₂ O, сферический образец, 25 °С)	γ'_p	26 751,5255(81)	10^4 с $^{-1}$ ·Тл $^{-1}$	0,30
	$\gamma'_p/2\pi$	42,576 375(13)	МГц·Тл $^{-1}$	0,30

Константа	Обозначение	Числовое значение	Размерность и единица физической величины	Относительное среднее квадратическое отклонение, 10^{-6}
Нейтрон				
Масса покоя нейтрона	m_n	1,674 9286(10)	10^{-27} кг	0,59
в атомных единицах массы		1,008 664 904(14)	а.е.м.	0,014
в электрон-вольтах		939,565 63(28)	МэВ	0,30
$m_n c^2 / \{e\}$				
Отношение массы нейтрона к массе электрона	m_n/m_e	1838,683 662(40)		0,022
Отношение массы нейтрона к массе протона	m_n/m_p	1,001 378 404(9)		0,009
Молярная масса нейтрона	$M(n)$	1,008 664 904(14)	10^{-3} кг/моль	0,014
Комптоновская длина волны нейтрона	$\lambda_{c, n}$	1,319 591 10(12)	10^{-15} м	0,089
$h / (m_n c)$	$\lambda_{c, n} / (2\pi)$	2,100 194 45(19)	10^{-16} м	0,089
Магнитный момент нейтрона	μ_n	0,966 237 07(40)	10^{-26} Дж·Тл $^{-1}$	0,41
в магнетонах Бора	μ_n/μ_B	1,041 875 63(25)	10^{-3}	0,24
в ядерных магнетонах	μ_n/μ_N	1,913 042 75(45)		0,24
Отношение магнитного момента нейтрона к магнитному моменту электрона	μ_n/μ_e	1,040 668 82(25)	10^{-3}	0,24

Константа	Обозначение	Числовое значение	Размерность и единица физической величины	Относительное среднее квадратическое отклонение, 10^{-6}
Отношение магнитного момента нейтрона к магнитному моменту протона	μ_n/μ_p	0,684 979 34(16)		0,24
Дейтрон				
Масса покоя дейтрона	m_d	3,343 5860(20)	10^{-27} кг	0,59
в атомных единицах массы		2,013 553 214(24)	а.е.м.	0,012
в электрон-вольтах		1875,613 39(57)	МэВ	0,30
$m_d c^2/\{e\}$				
Отношение массы дейтрона к массе электрона	m_d/m_e	3670,483 014(75)		0,020
Отношение массы дейтрона к массе протона	m_d/m_p	1,999 007 496(6)		0,003
Молярная масса дейтрона	$M (d)$	2,013 553 214(24)	10^{-3} кг/моль	0,012
Магнитный момент дейтрона	μ_d	0,433 073 75(15)	10^{-26} Дж·Тл ⁻¹	0,34
в магнетонах Бора	μ_d/μ_B	0,466 975 4479(91)	10^{-3}	0,019
в ядерных магнетонах	μ_d/μ_N	0,857 438 230(24)		0,028
Отношение магнитного момента дейтрона к магнитному моменту электрона	μ_d/μ_e	0,466 434 5460(91)	10^{-3}	0,019

Константа	Обозначение	Числовое значение	Размерность и единица физической величины	Относительное среднее квадратическое отклонение, 10^{-6}
Отношение магнитного момента дейтрона к магнитному моменту протона	μ_d/μ_p	0,307 012 2035(51)		0,017

Физико-химические константы

Постоянная Авогадро	N_A	6,022 1367(36)	10^{23} моль $^{-1}$	0,59
Молярная постоянная Планка	$N_A h$	3,990 313 23(36)	10^{-10} Дж·с·моль $^{-1}$	0,089
Атомная единица массы 1 а.е.м. =	а.е.м.	1,660 5402(10)	10^{-27} кг	0,59
$\frac{1}{12}m(^{12}\text{C}) \equiv m_{\text{а.е.м.}}$ в электрон-вольтах $m_{\text{а.е.м.}} c^2/\{e\}$		931,494 32(28)	МэВ	0,30
Постоянная Фарадея	F	96 485,309(29)	Кл·моль $^{-1}$	0,30
Универсальная газовая постоянная	R	8,314 510(70)	Дж·моль $^{-1}$ ·К $^{-1}$	8,4
Постоянная Больцмана R/N_A	k	1,380 658(12)	10^{-23} Дж·К $^{-1}$	8,5
в электрон-вольтах $k/\{e\}$		8,617 385(73)	10^{-5} эВ·К $^{-1}$	8,4
в герцах k/h		2,083 674(18)	10^{10} Гц·К $^{-1}$	8,4
в волновых числах $k/(hc)$		69,503 87(59)	м^{-1} ·К $^{-1}$	8,4

Константа	Обозначение	Числовое значение	Размерность и единица физической величины	Относительное среднее квадратическое отклонение, 10^{-6}
Молярный объем идеального газа, RT/p при нормальных условиях ($T=273,15$ К, $p=101\,325$ Па) при $T=273,15$ К, $p=100$ кПа	V_m	22,414 10(19)	10^{-3} м ³ /моль	8,4
Постоянная Ломпшидта N_A/V_m	n_0	22,711 08(19)	10^{-3} м ³ /моль	8,4
Постоянная абсолютная энтропии $\frac{5}{2} + \ln \{ (2\pi m_{\text{в.с.м.}} \times k T_1 / h^2)^{3/2} \times k T_1 / p_0 \}$		2,686 763(23)	10^{25} м ⁻³	8,5
при $T_1=1$ К, $p_0=100$ кПа	S_0/R	-1,151 693(21)		18
при $T_1=1$ К, $p_0=101\,325$ Па		-1,164 856(21)		18
Постоянная Стефана—Больцмана ($\pi^2/60$) $k^4/h^3 c^2$	σ	5,670 51(19)	10^{-8} Вт·м ⁻² ·К ⁻⁴	34
Первая постоянная излучения $2\pi hc^2$	c_1	3,741 7749(22)	10^{-16} Вт·м ²	0,60
Вторая постоянная излучения hc/k	c_2	0,014 387 69(12)	м·К	8,4

Константа	Обозначение	Числовое значение	Размерность и единица физической величины	Относительное среднее квадратическое отклонение, 10^{-6}
Постоянная в законе смещения Вина $b = \lambda_{\max} T =$ $= c_2/4,96511423..$	b	2,897 756(24)	$10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$	8,4

сможет ответить на вопрос, что это такое. Одной из возможных причин этого может быть несовершенство учебной литературы, в которой о проблеме физических постоянных попросту ничего не говорится. Эти недостатки можно исправить, но есть другая сторона дела. В немалой степени иллюзию отсутствия проблемы создают многочисленные таблицы физических постоянных, к анализу которых мы сейчас и перейдем.

Таблица фундаментальных физических констант (табл. 1, [6]) выглядит весьма внушительно и вполне способна, на первый взгляд, вместо интереса к проблеме вызвать нежелание заниматься ею. Немного терпения, ибо мы намерены показать, что подавляющее большинство входящих в табл. 1 констант не имеет никакого отношения к истинно фундаментальным постоянным. Публикация же ее полного текста есть вынужденная мера, вытекающая из учебных и методических целей данного пособия.

Анализ проблемы уместно начать с хронологии. Сегодня трудно представить, что когда-либо науке не было известно вообще ни одной физической постоянной. Тем не менее исторические факты убеждают нас в этом. Первая постоянная G (гравитационная) была введена в физику И. Ньютоном в 1687 г., а ее числовое значение было впервые измерено Г. Кавендишем только в 1793 г. Столь хорошо известные сегодня величины элементарного электрического заряда e и массы покоя электрона m_e вошли в науку сравнительно недавно, после открытия в 1897 г. Дж. Томсоном первой элементарной частицы — электрона. Только в 1932 г. был открыт нейтрон и таблица фундаментальных постоянных пополнилась значением массы нейтрона m_n . Отношение Джозефсона $2e/h$, где h —введенная в 1900 г. М. Планком констан-

та (постоянная Планка), было включено в таблицу после экспериментального подтверждения предсказанных в 1962 г. английским физиком-теоретиком Б. Джоозефсоном двух связанных со свойствами сверхпроводников эффектов. Можно привести и еще более свежие примеры. «Стучатся» в таблицу фундаментальных постоянных значения масс обнаруженных экспериментально в 1983 г. промежуточных W^{\pm} - и Z^0 -бозонов: $m_{W^{\pm}} \approx 80$ ГэВ, $m_{Z^0} \approx 90$ ГэВ (1 ГэВ соответствует приблизительно массе $2 \cdot 10^{-24}$ г). По всей видимости, в недалеком будущем можно ожидать включения в таблицу значений масс нейтрино. Таблица фундаментальных физических постоянных непрерывно пополняется, следуя за ростом наших знаний об окружающем мире, и если бы это было единственной причиной ее «разбухания», то поводы для раздумий, хотя бы и были, носили бы чисто общенаучный характер.

К сожалению, это далеко не так. Чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить данные табл. 1 (1989) со списком физических констант, рекомендованных комиссией по символам, единицам и номенклатуре Международного союза чистой и при-

Таблица 2. Физические константы
(универсальные, или мировые, постоянные) [8]

Константа	Обозначение	Числовое значение
Скорость света в вакууме	c	$2,997925(3) \cdot 10^8$ м · с ⁻¹
Элементарный заряд	e	$1,60210(7) \cdot 10^{-19}$ Кл
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02252(28) \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Масса покоя электрона	m_e	$9,1091(4) \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	m_p	$1,67252(8) \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона	m_n	$1,67482(8) \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Фарадея	F	$9,64870(16) \cdot 10^4$ Кл · моль ⁻¹
Постоянная Планка	h	$6,6256(5) \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Постоянная тонкой структуры	α	$7,29720(10) \cdot 10^{-3}$
	α^{-1}	$1,370388(19) \cdot 10^2$
Отношение заряда и массы электрона	e/m_e	$1,758796(19) \cdot 10^{11}$ Кл · кг ⁻¹
Комптоновская длина волны электрона	λ_c	$2,42621(6) \cdot 10^{-12}$ м
	$\lambda_{c, p}$	$1,32140(4) \cdot 10^{-15}$ м
Постоянная Ридберга	R_{∞}	$1,0973731(3) \cdot 10^7$ м ⁻¹
Радиус Бора	a_0	$5,29167(7) \cdot 10^{-11}$ м

Константа	Обозначение	Числовое значение
Радиус электрона	r_e	$2,81777(11) \cdot 10^{-15}$ м
Гиромангнитное отношение для протона	γ	$2,67519(2) \cdot 10^8$ с $^{-1} \cdot$ Тл $^{-1}$
Магнетон Бора	μ_B	$9,2732(6) \cdot 10^{-24}$ Дж \cdot Тл $^{-1}$
Ядерный магнетон	μ_N	$5,0505(4) \cdot 10^{-27}$ Дж \cdot Тл $^{-1}$
Момент протона	μ_p	$1,41049(13) \cdot 10^{-26}$ Дж \cdot Тл $^{-1}$
Аномальный момент электрона	$\mu_e/\mu_B - 1$	$1,159615(15) \cdot 10^{-3}$
Зеемановская константа расщепления	$2\pi \mu_B/(hc)$	$4,66858(4) \cdot 10^1$ м $^{-1} \cdot$ Тл $^{-1}$
Газовая постоянная	R	$8,3143(12)$ Дж \cdot моль $^{-1} \cdot$ К $^{-1}$
Нормальный объем идеального газа	V_0	$2,24136(30) \cdot 10^{-2}$ м $^3 \cdot$ моль $^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1,38054(18) \cdot 10^{-23}$ Дж \cdot К $^{-1}$
Первая постоянная излучения	c_1	$3,7405(3) \cdot 10^{-16}$ Вт \cdot м 2
Вторая постоянная излучения	c_2	$1,43879(19) \cdot 10^{-2}$ м \cdot К
Постоянная закона смещения Вина	b	$2,8978(4) \cdot 10^{-3}$ м \cdot К
Постоянная Стефана—Больцмана	σ	$5,6697(29) \cdot 10^{-8}$ Вт \cdot м $^{-2} \cdot$ К $^{-4}$
Гравитационная постоянная	G	$6,670(15) \cdot 10^{-11}$ Н \cdot м $^2 \cdot$ кг $^{-2}$

кладной физики в 1963 г. (табл. 2, [8]). Прежде всего обращает на себя внимание существенно большее число физических постоянных. Что это? Свидетельство резкого прогресса научных исследований в указанный период? Это не совсем так. Включение в табл. 1 значений отношения Джозефсона, квантов магнитного потока Φ_0 действительно можно связать с достижениями науки. Однако настораживает другое. В таблицу 1989 г. включены значения констант, являющихся характеристиками такой элементарной частицы, как мюон, но следующий отсюда естественный вывод о том, что мюон мог быть открыт в указанное десятилетие, полностью расходится с фактами. Как известно, мюон был открыт Андерсоном и Неддермайером в 1936 г. Появление в табл. 1 мюонных констант, по всей видимости, можно рассматривать как косвенное свидетельство внимания ее составителей к бурно развивающейся в наши годы физике элементарных частиц. Но и это не снимает вопросов типа: что служило основанием для выделения в таблицу мюонных констант среди

характеристик уже довольно многочисленного семейства элементарных частиц?*

Еще одним поводом для беспокойства служат проявившиеся в табл. 1 тенденции совершенно иного плана. В нее включены нужные в ряде практических случаев отношения m_p/m_e , m_μ/m_e , μ_p/μ_N , μ_e/μ_p и т.п. По-видимому, на этих же основаниях она содержит значение массы дейтрона m_d . В таблицу фундаментальных констант почему-то включены измеренные в весьма специфических экспериментальных условиях «частные» константы, например молярный объем идеального газа при нормальных условиях (?) ($p = 101\,325$ Па, $T_0 = 273,15$ К) или постоянные γ'_p , μ'_p/μ_N , значения которых даны для «H₂O, сферический образец». Из приведенных примеров можно сделать весьма неутешительный вывод: таблица физических констант становится все и более и более полезной для практического использования, но... ее содержание вступает в резкое противоречие с содержащимся в ее названии термином «фундаментальные константы» и не выдерживает никакой критики с точки зрения вытекающих из этого определения научных, физических и логических требований. В самом деле, даже изучивший строение атома в старших классах современный школьник не назовет дейтрон фундаментальной частицей. Вполне допустимо сохранение табл. 1 в ее сегодняшнем виде, но при этом, на наш взгляд, ее название должно быть принципиально изменено, например на «справочные данные по физическим величинам».

Совершенно удручающим фактом является включение в табл. 1 в качестве фундаментальной константы значения атомной единицы массы (а.е.м.). Полезно обратиться к предыстории вопроса. Известно, что не столь давно за единицу а.е.м. принимались в физике $1/16$ массы изотопа кислорода ^{16}O , а в химии — $1/16$ атомной массы элемента кислорода. Поскольку кислород имеет три устойчивых изотопа ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , химическая а.е.м. при таких определениях была в 1,000272 раза больше физической,

*Своеобразным ответом на этот вопрос может служить следующая фраза: «После электрона мюон является элементарной частицей, свойства которой наиболее точно измерены и объяснены. Например, масса мюона известна с точностью до одной миллионной, а магнитный момент — с точностью до одной миллиардной. В лабораторных экспериментах, используя различные отклоняющие и фокусирующие системы, мы можем создать очень интенсивные пучки мюонов, имеющих почти одинаковые энергии. Эти пучки можно использовать в качестве зондов для исследования строения протонов и нейтронов, которое на сегодня известно нам значительно меньше, чем свойства мюонов и электронов. Но с мюоном связана одна серьезная проблема: пока остается абсолютно непонятным, зачем он существует, для чего он предназначен» [9]. Своеобразие ответа заключается в вопросе, содержащемся в конце цитаты. Эти вопросы обсуждаются во второй части книги.

что, естественно, вызывало большие неудобства на практике. Так как наиболее точные определения атомных масс выполнялись для атомов углерода, то в 1961 г. Международные союзы чистой и прикладной физики и химии приняли решение установить в качестве атомной единицы массы единую величину— $1/12$ массы изотопа углерода с массовым числом 12. Но при этом резонно спросить: имеет ли какое-нибудь отношение к фундаментальным константам природы величина а.е.м., устанавливаемая меняющимися время от времени соглашениями между людьми? Ответ очевиден—нет! Предметом изучения физики являются свойства объективной реальности. Все субъективные параметры, пусть даже и архиполезные с точки зрения развития науки, должны занять свое место в системе физических (и химических) величин.

Приведенных примеров, на наш взгляд, достаточно, чтобы сделать вывод о том, что содержащиеся в физических справочниках и официально утвержденные в качестве нормативных документов таблицы фундаментальных физических постоянных все более и более превращаются в таблицы, дающие исследователям и практикам значения всевозможных физических констант. Подтверждением этого является ничем не оправданное включение в [6] таблицы, содержащей «переводные энергетические множители»*. Также показательным в этом плане является включение в [6] первой c_1 и второй c_2 постоянных излучения. В настоящее время они представляют чисто исторический интерес, это архаика современной физики.

Физической нелепостью является включение в таблицу 1989 г. не имеющих никакого отношения к константам природы значений магнитной μ_0 и электрической ϵ_0 постоянных. Об этом уже говорилось в предисловии (см. также [10]). Этот факт можно рассматривать как своеобразную уступку требованиям Международной системы единиц (СИ), законодательно рекомендованной к применению во многих странах. Совершенно справедливо отсутствуют в таблице 1963 г. μ_0 и ϵ_0 (так же как и значение а.е.м.), поскольку в оригинале ее текст содержит значения всех входящих в нее констант также и в СГС-системе*, в которой значения μ_0 и ϵ_0 безразмерны и равны единице. В СГС-системе этих величин попросту нет! Поэтому, с одной стороны, их было бы бессмысленно вводить в табл. 2, а с другой — включение их явно обнажало бы то, что они являются константами всего-навсего выбранной на сегодняшний день системы единиц. Отметим, что в Физическом энциклопедическом словаре (1983) [11] магнитная постоянная μ_0 уже лишена статуса фундаментальности, это всего лишь «коэффициент пропорциональности, появляющийся в ряде

*Эти данные здесь не приводятся во избежание обилия цифр.

формул электромагнетизма при записи их в СИ». Тот же приговор вынесен и электрической постоянной ϵ_0 , которая «зависит только от выбора системы единиц. В СГС-системе $\epsilon_0 = 1$ ». Надо ли говорить о том, что между фундаментальными физическими постоянными, отражающими основополагающие свойства материи, и «коэффициентами пропорциональности, зависящими от выбора системы единиц», нет ничего общего. (Легко заметить и полезно проанализировать и другие отличия между данными табл. 1 и 2. Часть этой работы выполнена в дальнейшем.)

Приведенные в этом параграфе документы и их анализ ясно показывают, что существующие таблицы, хотя и содержат в своем названии термин «фундаментальные постоянные», составляются с полнейшим игнорированием действительного содержания этого важнейшего физического понятия. Таблицы представляют сводку всевозможных справочных данных по физическим константам, не более. Практические цели явно довлеют над общенаучными, которые «тонут» в обилии разнородных фактов. Нечего и говорить о том, что различным образом усеченные копии приведенных выше таблиц, содержащиеся в учебной и справочной литературе, выглядят совершенно статично и никак не способствуют осознанию учащимися существования проблемы фундаментальных констант. Ситуация располагает к тому, что примелькавшиеся на страницах учебников и справочников физические постоянные воспринимаются как некие неизменные сущности, все изучение которых состоит в их запоминании. Ситуация резко противоречит целям физического образования и всему процессу развития физической науки. Справедливости ради следует отметить, что проблема фундаментальных физических постоянных предельно сложна и не решена еще современной наукой. Скорее, она только возникает в качестве одной из ее актуальнейших проблем. Дискутируются проблемы числа «истинно фундаментальных» констант, рассматриваются возможные механизмы формирования их числовых значений на ранних этапах эволюции Вселенной. Трудности решения кардинальных проблем современной физики должны найти отражение в современной учебной литературе. Не абсолютизация относительных истин, не метафизический характер обучения, а его злободневность, острота, *проблемность*—вот что должно лежать в основе физического образования.

2. О ЗНАЧЕНИИ ТОЧНОСТИ

Продолжим анализ основных сторон понятия «фундаментальные физические постоянные». При изучении таблиц обращает на себя внимание то, что значения констант определены (изме-

рены) с очень большой точностью. В ряде случаев она достигает восьми — десяти значащих цифр, весьма невелика и приводимая в скобках погрешность измерений. Например, элементарный электрический заряд e определен с точностью до $e = 1,60217733(49) \cdot 10^{-19}$ Кл и т. п. Из сравнения данных табл. 1 и 2 видно, что точность определения значений констант непрерывно возрастает, что само по себе является свидетельством развития и совершенства техники физического эксперимента. Прецизионные исследования по измерению и уточнению значений постоянных и тщательная работа по согласованию данных, полученных различными методами и различными группами исследователей, ведутся и в наши дни [12].

Столь большая точность в определении значений постоянных на первый взгляд может показаться излишней. В учебниках и справочниках, как правило, приводятся округленные значения констант, которые мы и применяем в повседневной работе и при решении задач. На самом деле вопрос о точности измерений вообще и фундаментальных постоянных в особенности стоит гораздо серьезнее и затрагивает самые основания физики как науки. Коротко обсудим три принципиальных вопроса: 1) является ли физика точной наукой и какова в ней роль измерений; 2) в чем состоит сущность измерений; 3) измерения и эволюция физики.

Физические законы выражают в математической форме количественные связи между различными физическими величинами. Они устанавливаются на основе обобщения опытных, полученных экспериментальным путем данных и отражают объективные закономерности, существующие в природе. Принципиально важным является поэтому то, что физические законы не являются абсолютно точными, их точность возрастает с развитием науки и техники. Но это отнюдь не умаляет объективного значения законов. На каждом данном этапе своего развития физика дает нам приближенный снимок с действительности, со временем качество этих снимков — точность измерений — улучшается, они все лучше и полнее отражают объективные свойства окружающего нас мира. Опыт, эксперимент, измерение играют в науке принципиально важную роль. Об этом предельно четко писал У. Томсон (лорд Кельвин): «Если вы можете измерять и выражать в числах то, о чем говорите, то об этом предмете вы кое-что знаете; если же вы не можете сделать этого, то ваши познания скудны и неудовлетворительны. Быть может, они представляют собой первый шаг исследования, но едва ли позволительно думать, что ваша мысль продвинулась до степени настоящего знания» [13]. Строго говоря, сама физика получила статус точной науки благодаря тому, что измерения позволяют устанавливать точные количественные соотношения, в которых находят отражение закономерности природы.

В чем же состоит сущность измерений? Измерение какой-либо физической величины означает нахождение опытным путем отношения данной величины к единице измерения (эталоны) величины подобного рода. Точность установления этих эталонов имеет, следовательно, принципиальное значение. Работа в этом направлении является постоянной и важнейшей задачей метрологических служб мира. По мере развития науки эталоны непрерывно совершенствуются и в ряде случаев могут радикально меняться. Покажем это на примере основных единиц Международной системы (СИ).

Единица длины—метр—первоначально (1790 г.) была определена как 10^{-7} часть $1/4$ меридиональной окружности Земли. После триангуляционных измерений расстояния между Дюнкерком и Барселоной (около 1100 км) в 1799 г. в Париже был изготовлен прототип метра. Однако измерения, проведенные в 1837 г., показали, что эталон оказался короче метра на 0,2 мм. Такая низкая точность в измерении одной из основных единиц вряд ли могла удовлетворить ученых, и международное сообщество давно изыскивало способы установления более точного и воспроизводимого эталона метра. Развитие физики, совершенствование техники эксперимента позволили реализовать эту идею. С 1960 г. за 1 метр принимается величина, равная $1650763,7300$ длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $3p_2$

атома криптона с массовым числом 86. Криптоновые лампы, с помощью которых получают такое излучение, непрерывно охлаждаются жидким азотом. Давление криптона в лампах низкое, измерения эталона метра ведутся интерференционными методами с точностью $(2 \div 3) \cdot 10^{-9}$. Измерения, проведенные в 1964—1967 гг., показали, что эталон метра 1790 г. равен в действительности $1,00019545$ м. Работа по улучшению и уточнению эталона метра продолжается, выдвигаются и более радикальные способы. Поскольку погрешность в измерении скорости света очень мала, было предложено вообще отказаться от использования стандарта длины и определить вместо этого скорость света c как мировую постоянную. В октябре 1983 г. XVII Генеральная конференция мер и весов приняла новое определение метра, основанное на константе скорости света: *метр—это расстояние, проходимое в вакууме плоской электромагнитной волной за $1/299792458$ долю секунды* [14].

Во многом схожая ситуация имела место с определением единицы времени. Принятое в 1956 г. Международным комитетом мер и весов определение эфемеридной секунды гласило, что 1 секунда равна $1/31556925,9747$ длительности тропического года. (Тропический год равен числу средних солнечных суток, прошедших от одного весеннего равноденствия до другого.) Это определение секунды создавало немалые трудности, поскольку продолжительность тропического года больше, чем 365 дней, приблизительно на $1/4$ суток. Чтобы правильно учитывать это, каждые

четыре года в календаре появляется високосный год, а для уточнения десятичных знаков первый год столетия не считается високосным. Но и этих «мер спасения» оказывается недостаточно, чтобы связать концы с концами, и 1972 год был специально увеличен на 2 с, по 1 с добавили также 1 января 1973 и 1974 г. Наконец, в 1967 г. был принят более точный атомный стандарт времени: секунда—это продолжительность $9,192631770 \cdot 10^9$ колебаний излучения при квантовом переходе между линиями сверхтонкой структуры атома цезия с массовым числом 133, а именно невозмущенного перехода $F=4, m_F=0 \rightarrow F=3, m_F=0$ основного состояния $^2S_{1/2}$.

Эти два примера показывают, что введенные первоначально только из соображений практического удобства эталоны метра и секунды по мере повышения требований к точности оказались чрезвычайно уязвимыми, что привело к необходимости разработки новых атомных стандартов длины и времени. К сожалению, до сих пор значительно хуже обстоят дела при определении единицы массы. Это единственная основная единица, прототип которой был выбран абсолютно произвольно. Эталон 1 кг массы представляет собой находящийся в Международном бюро мер и весов в Севре под Парижем цилиндр из сплава платины (90%) и иридия (10%) диаметром около 39 мм и такой же высоты. Отдельные страны располагают копиями такого эталона, причем относительная точность воспроизведения копий составляет около $2,5 \cdot 10^{-9}$. Точность определения атомных масс пока ниже, что и обуславливает отсутствие атомного стандарта массы.

Значения физических постоянных, измеренные по отношению к эталонным данным, представляют собой точность наших знаний фундаментальных свойств материи. С одной стороны, очень часто проверка справедливости физических теорий определяется точностью измерения постоянных. С другой стороны, твердо установленные экспериментальные данные кладутся в фундамент новых физических теорий. Классическим примером этого является теория относительности А. Эйнштейна, одним из постулатов которой является установленный в экспериментах А. Майкельсона факт постоянства скорости света.

История физики показывает, что точные опыты, измерения приводят к открытию новых физических явлений, новых физических постоянных. Так, эксперименты Дж. Томсона (1897) по отклонению катодных лучей в электрическом и магнитном полях привели к открытию им первой элементарной частицы—электрона. В физике появились две новые фундаментальные постоянные—элементарный электрический заряд e и масса электрона m_e . Эти же данные разрушили бытовавшее еще со времен Древней Греции представление о том, что атомы представляют собой мельчайшие, не делимые далее структурные единицы материи. Постоянная Планка h обязана своим рождением точным измере-

ниям распределения энергии в спектре черного тела и теоретическому осмыслению полученных результатов М. Планком. Ее появление ознаменовало собой начало новой физики—физики микромира, физики XX столетия. Точные измерения атомных масс легких ядер позволили понять механизм термоядерных реакций, протекающих на Солнце и дающих энергию всему живущему на Земле. Открытие эффекта Джозефсона позволило провести новые прецизионные измерения постоянной Планка, в результате чего ее значение возросло на $88 \cdot 10^{-6}$ Дж·с. Одновременно с этим были уточнены значения и других констант. Отклонение значения магнитного момента электрона μ_e от боровского магнетона μ_B , рассчитанное теоретически, с фантастической точностью — вплоть до одиннадцатого знака! — согласуется с результатами экспериментальных измерений и является надежным доказательством справедливости теоретической концепции физического вакуума. Приведенных примеров вполне достаточно, чтобы оценить принципиальное значение для науки точных измерений величин фундаментальных физических постоянных.

3. К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОНЯТИЯ «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ»

В современной логике определение физического понятия означает четкое указание критериев, позволяющих «отличать, отыскивать, строить интересующий нас предмет, дающих возможность формировать значение вновь вводимого термина или уточнять значение уже существующего слова в науке» [15]. Термин «фундаментальные физические постоянные» давно уже стал привычным для науки, и, казалось бы, задача может быть сведена лишь к его уточнению. Однако анализ существующей научной и учебной литературы (см. ниже) показывает, что единого и четкого определения этого термина как физического понятия пока нет, в связи с чем терминологические вопросы приходится рассматривать в полном объеме. В связи с тем, что проблема определений физических понятий предельно сложна, нижеследующий анализ не может считаться полным и окончательным решением вопроса. Возможно, что некоторые его положения могут быть предметом дискуссий, столь необходимых с методической и научной точек зрения.

Никак нельзя согласиться с тем, что в существующих справочниках до сих пор вообще не разделяются понятия «физические константы» и «фундаментальные физические постоянные». Смысловое различие между ними очевидно, физическое содержание этих понятий принципиально иное. Например, плотность воды при нормальных условиях тоже является физической константой, но эта величина справедливо помещается в технических справочниках, поскольку, несмотря на ее широчайшее исполь-

зование, она никак не может быть отнесена к фундаментальным константам природы. Если с этой же точки зрения проанализировать значения входящих в табл. 1 некоторых других величин, например молярного объема идеального газа V_m , определенного при нормальных условиях (1 атм; 273,15 К), и скорости света c , то нетрудно заметить справочный характер константы V_m и фундаментальное значение для всей науки скорости света, как максимально возможной скорости передачи любых взаимодействий в природе. Сведение этих констант в одну таблицу является грубейшей физической ошибкой.

Необходимо обратить внимание и на то, что в ряде случаев не делается различия между понятиями «физические константы» и еще более обобщенным термином «универсальные, фундаментальные или мировые» константы. Покажем это на ряде примеров. Первым из них является претенциозное название табл. 2. Так же просто трактуется вопрос в [16]: «...принято считать, что универсальные, или мировые, фундаментальные — все три термина употребляются обычно как синонимы...» В превосходной монографии [17], к сожалению, читаем, что «коэффициенты пропорциональности, подобные гравитационной или инерционной постоянным и зависящие от выбора основных единиц (системы измерений.— О. С.) и определяющих соотношений, получили название универсальных или мировых постоянных». Анализ физической литературы показывает, что, по всей видимости, термин «универсальные постоянные» постепенно выходит из употребления, его можно считать устаревшим. Понятие же «мировые постоянные», напротив, еще только входит в «моду», но чрезвычайно важно отметить, что ему с самого начала придается иной, значительно более «вселенский» по своему содержанию физический смысл. Приведем в подтверждение этого цитату: «С современной точки зрения кажется очень удачным, что первые измерения величины c пришли из астрономии — это дало возможность определить скорость света в вакууме, т.е. действительно «мировую» постоянную» [18]. Более подробно эти вопросы обсуждаются в ч. 3.

В литературе можно встретить резко различающиеся по физическому содержанию определения термина «фундаментальные постоянные». Одно из них приведено в предыдущем абзаце [17]. В [19] можно найти следующее определение: «Это величины, которые используются при атомистическом описании в физике и химии, которые обычно могут быть измерены с большой точностью», и там же другой автор предлагает: «Это те постоянные, которые входят в выражения, описывающие атомные и квантовые явления, в качестве множителей, определяющих порядок величины: квант действия h (так иногда называют постоянную Планка.— О.С.), квант электрического заряда e , скорость света c и т.п.». Нетрудно заметить, что физическое содержание этих определений далеко не идентично. Определения [19] объём-

ляют фундаментальными только атомные и квантовые константы и поэтому исключают из числа фундаментальных такую макроконстанту, как гравитационная постоянная. В то же время в определении, данном в [17], трудно почувствовать фундаментальные постоянные, относящиеся к микромиру.

Наиболее часто встречается следующее определение: «Фундаментальные физические постоянные — это постоянные величины, являющиеся характеристиками микрообъектов или входящие в качестве коэффициентов в математические выражения фундаментальных физических законов» [8, 20]. Оно сразу же порождает массу вопросов. Все ли характеристики микрообъектов фундаментальны? Характеристикой какого микрообъекта является, например, магнетон Бора? Микрообъектов (элементарных частиц) в настоящее время известно несколько сотен, и каждый из них характеризуется несколькими параметрами — массой, зарядом, спином и др. Включение в таблицы всех этих характеристик предельно усложнило бы проблему. Но на этом вопросы к определению [8, 20] не кончаются. Нет ли в нем логической ошибки, когда одно понятие определяется через другое, которое также нуждается в определении? Конкретно: какие физические законы следует относить к фундаментальным? В какой фундаментальный физический закон входит, например, постоянная Ридберга? Следует ли считать закон Стефана — Больцмана $Q = \sigma T^4$ и соответственно постоянную σ фундаментальными?

Эти примеры со всей определенностью показывают, что в научной и учебной литературе нет единого и четкого определения понятия «фундаментальные физические постоянные». Имеющиеся определения недостаточно проработаны, противоречат друг другу. Отражением этих трудностей является то, что в сравнительно недавнем энциклопедическом издании [11] вообще нет ни этого термина, ни, естественно, его определения. Со всех точек зрения ситуация явно абсурдна. В [11] отдельные физические постоянные в комментариях к соответствующим статьям просто объявляются фундаментальными, например $G, h, k, c, R_\infty, F, N_A$. В то же время элементарный заряд в [11] лишен статуса фундаментальности, он назван лишь наименьшим электрическим зарядом.

Попробуем найти пути к определению понятия «фундаментальные постоянные». Используя в § 1 метод «исключения», мы изъяли из таблицы фундаментальных постоянных несколько констант: μ_0, ϵ_0 , а.е.м., $m_d, V_m, n_o, \gamma'_p, \mu'_p/\mu_N, 1 + \sigma(\text{H}_2\text{O})$. Заметим, что значения масс m_e, m_μ, m_p и магнитных моментов μ_e, μ_μ, μ_p даны отдельными позициями, что позволяет исключить из числа фундаментальных констант отношения $m_p/m_e, m_\mu/m_e, \mu_e/\mu_p$ и μ_μ/μ_p , как явно не имеющие самостоятельного значения. К тому же они относятся к различным микрообъектам и, следовательно, но удовлетворяют критериям определения [8,20]. Оно же требует включения в таблицы фундаментальных констант только характе-

ристик микрообъектов, поэтому значение магнетона Бора μ_B также должно быть изъято из табл. 1. Не имеют самостоятельного значения и входящие в табл. 1 отношения μ_p/μ_B , μ_p/μ_N и e/m_e .

Чрезвычайно важно обратить внимание на еще одну принципиальную сторону обсуждаемой проблемы. В табл. 1 приведены соотношения (формулы), в которых значение одной какой-либо константы определяется через другие постоянные. Например,

$$\sigma = \frac{e^2}{60} \frac{k^4 \cdot 8\pi^3}{h^3 c^2}. \text{ Число таких соотношений можно без труда увели-$$

чить с помощью любого учебника физики. Существование этих формул легкообъяснимо, оно логически вытекает из единства окружающего нас мира. Существует точка зрения, разделяющаяся многими выдающимися физиками, что в принципе возможно сведение всех фундаментальных постоянных к одной константе. То, что некоторые из этих связей еще не найдены, можно рассматривать как свидетельство наших неполных знаний свойств материи.

Наличие соотношений, связывающих константы друг с другом, позволяет поставить вопрос о том, какие постоянные можно считать первичными или истинно фундаментальными, а какие — вторичными или производными, которые, следовательно, можно исключить из списка фундаментальных. В принципе такое разделение постоянных может быть весьма произвольным, и не это является главным. Принципиально важным является вывод о том, что число независимых констант невелико. Может быть, именно несводимость констант друг к другу следует считать критерием их истинной фундаментальности? Такого мнения придерживался, в частности, Б. Рассел, говоря о фундаментальности констант: «Обычно (хотя и не всегда) считается, что ни одна из них не может быть выведена из других» [21].

Попробуем найти истинно фундаментальные постоянные, проанализировав соотношения между физическими константами. Выпишем их:

$$\begin{aligned} F &= N_A e, R = N_A k, c_1 = 2\pi h c^2, c_2 = hc/k, \alpha = e^2/(hc), \\ h &= h/(2\pi), R_\infty = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{ch^3}, a_0 = \frac{h^2}{m_e c}, r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2}, n_0 = \frac{N_A}{V_m}, \\ \lambda_c &= h/(m_e c), \lambda_{c,p} = h/(m_p c), \lambda_{c,n} = h/(m_n c), \Phi_0 = h/(2e), \\ R_H &= R_\infty(1 + m_e/m_p), R'_\infty = R_\infty c = 2\pi m_e e^4/h^3, \\ R'_H &= R_H c = \frac{2\pi m_e e^4}{h^3} \left(1 + \frac{m_e}{m_p}\right), \gamma_p = \frac{2\mu_p}{h}. \end{aligned}$$

$$\text{Отношение Джозефсона} = \frac{2e}{h},$$

$$\text{квант циркуляции} = h/(2m_e) \text{ и т.п.}$$

Постоянная зеемановского расщепления определяется как $e/(4\pi m_e c)$; постоянная Вина $b = ch/(4,9651k)$ [17].

Легко видеть, что приведенные соотношения определяют многие постоянные через сравнительно небольшое число других: $c, e, h, m_e, m_p, k, N_A$. В табл. 1 остались не связанные формулами еще несколько констант: $G, m_n, m_\mu, g_\mu, \mu_e, \mu_\mu, \mu_p$. Несводимость этих постоянных друг к другу кажется естественной, поскольку они являются характеристиками различных физических явлений и микрообъектов. И все же несводимость констант друг к другу никак не может быть критерием их истинной фундаментальности. Физика — бурно развивающаяся наука, в будущем возможно появление новых физических теорий, которые позволят установить новые связи между независимыми на сегодняшний день постоянными. Это вынуждает искать такие критерии фундаментальности постоянных, которые были бы не зависимы от общего уровня развития науки. Проблема определения физического понятия поднимается до уровня философской.

Рассмотрим философское определение понятия, константы [22]. Это «такой из объектов в некоторой теории, значение которого в рамках этой теории считается всегда одним и тем же. Наличие констант при выражении многих законов природы отражает относительную неизменность тех или иных сторон реальной действительности, проявляющуюся в наличии закономерностей». Однако последующую часть определения, относящуюся к понятию «мировая константа», трудно признать безупречной: «Те из констант, которые считаются в современной физике (в рамках соответствующих ее теорий) имеющими значение для всей наблюдаемой части Вселенной, называются *мировыми* (или универсальными); таковы c, h, G и др.». Вновь встречается смешение эпитетов — мировые или универсальные; список констант, приводимый в [22], не грешит определенностью. И все же об одном замечании к этой части хотелось бы поговорить особо.

Введение в определение важнейшего физического понятия столь расплывчатого термина, как «ее современные теории», вряд ли можно признать правильным. XX век подарил нам множество современных теорий — общая и специальная теории относительности, квантовая механика, атомная и ядерная физика, физика элементарных частиц и т.д. Значительно расширились границы «наблюдаемой части Вселенной», что связано с громадными достижениями техники физического эксперимента. Определение мировых постоянных [22] опирается в первую очередь на масштабный, пространственный фактор. Оно неявно предполагает постоянное существование «наблюдателя». Современные теории эволюции Вселенной включают в рассмотрение временной фактор и уверенно оперируют с такими моментами ее развития, когда все вещество Вселенной было сжато в сгусток сверхплотной раскаленной плазмы, состоящей из фотонов, квар-

ков, глюонов, электронов, нейтрино и соответствующих античастиц. К такой Вселенной понятие «наблюдателя» неприменимо. Все это оставляет проблему определения понятия «фундаментальные постоянные» открытой.

Тем не менее «вселенский» аспект проблемы фундаментальных постоянных приобретает в наши дни все большее значение и известность, причем отсутствие определения открывает широчайшие просторы для фантазии составителей различных списков фундаментальных постоянных. Это еще больше затрудняет понимание проблемы учащимися. Приведу некоторые примеры. В [23] можно прочесть: «Основными или фундаментальными физики считают сегодня девять постоянных величин. Вот они: скорость света, постоянная Планка, единица электрического заряда, масса протона, постоянная Ферми для слабых взаимодействий, постоянная тяготения, постоянная Хаббла, средняя плотность вещества во Вселенной и так называемая «космологическая постоянная».* В список фундаментальных постоянных включается ряд новых констант. Характерно, что авторы [23] не считают и этот список окончательным: «...молчаливо предполагается, что другие константы, если они имеются, могут быть выражены через основные. Однако это совсем не так. Сегодня известны еще по крайней мере два кандидата в наш список, характеризующие ядерные взаимодействия, которые выразить через перечисленные константы не удастся. Так что список фундаментальных констант в какой-то мере условен».

Интересной иллюстрацией к этому является таблица физических постоянных, данная в [24]. Ее название «Список фундаментальных констант и производных величин» является более корректным с физической точки зрения, но, к сожалению, автор не утруждает себя ни выработкой определения, ни разделением содержащихся в ней констант на эти принципиально различающиеся по своей значимости группы. Согласно [24], фундаментальными постоянными можно считать e , h , c , G , m_e , m_p , k и постоянную Хаббла H , космологическую постоянную Λ и «космическое отношение числа фотонов и протонов» S . Производные величины, приведенные в [24], мы пока обсуждать не будем, заметим все же, что среди них указываются сконструированные из вышеприведенных размерных постоянных безразмерные характеристики ядерных — сильного и слабого — взаимодействий, что отнюдь не является бесспорным.

Заметны новые тенденции в изменении содержания списков фундаментальных постоянных. В них все настойчивее включаются константы, являющиеся, с одной стороны, характеристиками Вселенной, с другой — характеристиками фундаментальных вза-

*Физический смысл некоторых вновь вводимых постоянных обсуждается в ч. 2, 3.

имодействий в микромире. Этим мы обязаны великолепным достижениям современной астрофизики и физики элементарных частиц и наметившемуся в наши дни впечатляющему синтезу их результатов. Но в настоящее время вопрос о фундаментальности констант «космологической группы» еще далеко не решен. Приведем в подтверждение этого авторский комментарий к таблице [24]: «Все постоянные не меняются. Но H , Λ и S —исключение. Как уже отмечалось, постоянная Хаббла вовсе не должна быть постоянной: H^{-1} —это приблизительно возраст Вселенной. Считают, что в современную эпоху Λ меняется крайне незначительно со временем. Однако вполне возможно, что на очень ранней стадии эволюции Вселенной изменения Λ были велики и важны. Отношение S изменяется, так как фотоны непрерывно испускаются и поглощаются. Но число первичных фотонов значительно больше числа фотонов, испущенных звездами, так что изменения S даже за космические времена малы». Открываются новые грани проблемы—постоянные могут быть не постоянны! Об этом вполне определенно говорил выдающийся советский ученый, академик Я. Б. Зельдович: «В понятие постоянной Хаббла вкладывается тот смысл, что она не зависит ни от направления, ни от длины отрезка, соединяющего частицы» [25], но зависит от времени. Так или иначе современная физика, по всей видимости, только еще испытывает на фундаментальность те или иные постоянные, характеризующие развитие Вселенной. В связи с этим кажутся преждевременными попытки объявить фундаментальными «константы, определяющие структуру Вселенной. Их не случайно называют иногда константами Вселенной» [26]. В числе таковых авторы [26] приводят G , e , m_e , h , c «и некоторые другие» (?!).

Обратим внимание на то, что при всех разночтениях отдельные физические постоянные неизменно фигурируют во всех списках — [23, 24, 26]. Выпишем их: G , c , e , h , m_e *. Включение этих констант в самые различные списки фундаментальных постоянных предполагает наличие у них единого признака, который, на наш взгляд, может быть положен в основу определения понятия «фундаментальные физические постоянные». Общее, что объединяет эти константы,— это содержащаяся в них информация о наиболее общих, основополагающих — фундаментальных! — свойствах материи. Так, гравитационная постоянная G является количественной характеристикой универсального, присущего всем объектам Вселенной взаимодействия — тяготения. Скорость света c есть максимально возможная скорость распространения любых взаимодействий в природе. Элементарный заряд e — это минимально возможное значение электрического

*Отсутствие m_e в списке [23], по всей видимости, следует считать недоразумением.

заряда, существующего в природе в свободном состоянии (обладающие дробными электрическими зарядами кварки, по-видимому, в свободном состоянии существуют лишь в сверхплотной и горячей кварк-глюонной плазме). Постоянная Планка \hbar определяет минимальное изменение физической величины, называемое действием, и играет фундаментальную роль в физике микромира. Масса покоя m_e электрона есть характеристика инерционных свойств легчайшей стабильной заряженной элементарной частицы.

С этих же общих позиций целесообразно рассмотреть вопрос о фундаментальности характеристик протонов и нейтронов — их масс покоя m_p , m_n и магнитных моментов μ_p и μ_n . Чрезвычайно важно отметить то, что протоны и нейтроны образуются на определенной начальной стадии эволюции Вселенной, т.е. их характеристики являются параметрами начальной стадии «эры вещества». Поскольку электроны, протоны и нейтроны являются основными структурными элементами вещества Вселенной, их характеристики являются фундаментальными физическими постоянными «вещественного мира». Значения масс m_e , m_p и m_n дают информацию об инерционных характеристиках этих основных структурных элементов Вселенной. Аномально большой магнитный момент протона $\mu_p \approx 2,79\mu_N$ и магнитный момент нейтрона μ_n дают информацию о фундаментальном свойстве материи — существовании внутренней структуры нуклонов*. Время жизни нейтрона $\tau_n \approx 10^3$ с (этой характеристики нет в табл. 1) дает информацию о нестабильности свободного нейтрона. Аномальный магнитный момент электрона $\mu_e \neq \mu_B$ обусловлен его взаимодействием с физическим вакуумом, т.е. он также содержит в себе информацию о фундаментальнейшем свойстве материи.

Особого рассмотрения требует вопрос о фундаментальности постоянных Авогадро N_A и Больцмана k . Согласно [17], постоянная Авогадро — это число структурных элементов (атомов, молекул, ионов) в единице количества вещества, т.е. в моле. Моль — это количество вещества, содержащее столько же атомов, молекул или ионов, сколько их содержится в 0,012 кг изотопа углерода ^{12}C . Из этих определений видно, что N_A является характеристикой еще более поздней стадии эволюции Вселенной, эры образования в процессе космологического нуклеосинтеза вещества в его современном понимании (атомы, молекулы). Постоянная Авогадро N_A — фундаментальная характеристика этой «сформировавшейся» Вселенной.

В некоторых источниках (см., например, [24]) можно встретить упрощенную до тривиальности трактовку постоянной Больцмана k как всего лишь переводного коэффициента от энергетических

*Близость масс протона и нейтрона позволяет считать их различными зарядовыми состояниями одной элементарной частицы — нуклона. Эта идея принадлежит В. Гейзенбергу (1932) [27].

единиц к тепловым. С этим никак нельзя согласиться. Постоянная Больцмана связывает макрохарактеристики системы частиц — ее температуру T — с микрохарактеристиками движения составляющих ее микрочастиц — их средней кинетической энергией E . Так, средняя кинетическая энергия движения частицы, приходящаяся на одну степень свободы, равна $E = \frac{1}{2} kT$. Константа k связывает

воедино макро- и микромиры и поэтому играет в физике фундаментальную роль. Она же входит в полученный Л. Больцманом фундаментальный физический закон, связывающий энтропию системы S и термодинамическую вероятность W : $S = k \ln W$. Этот закон впервые выразил в математической форме фундаментальное свойство природы — направленность физических процессов от неравновесия к равновесию, от менее вероятных состояний физических систем к более вероятным.

Коротко подведем итоги обсуждения. Анализ показывает, что столь часто употребляемый в физике термин «фундаментальные физические постоянные» не имеет пока единого и четкого определения. Разные авторы совершенно различно подходят к его пониманию и составляют в связи с этим резко различающиеся друг от друга списки фундаментальных констант. Методологический анализ понятия отсутствует, проблема определения важнейшего физического термина является «белым пятном» физики. Ситуация совершенно недопустима с учебной точки зрения.

Разработка критериев истинной фундаментальности констант требует учета как современных научных, так и философских требований. На наш взгляд, *фундаментальными физическими постоянными следует считать константы, дающие информацию о наиболее общих, основополагающих свойствах материи*. Общность предлагаемого определения диалектически связана с его конкретностью, выявляющейся при анализе фундаментальности отдельных физических постоянных. Общность определения отражает объективные трудности, возникающие при разработке основных методологических понятий науки и являющиеся свидетельством диалектически противоречивого характера процесса познания материального мира.

Анализ показывает, что содержание существующих таблиц фундаментальных физических постоянных должно быть существенным образом скорректировано с целью приведения в соответствие приводимых в них данных с действительным значением термина «фундаментальные». Наряду с резким сокращением числа входящих в них постоянных в них должны быть дополнительно включены константы, являющиеся характеристиками взаимодействий в микромире, с одной стороны, и отражающие эволюцию Вселенной — с другой. Важную дополнительную информацию о содержании предполагаемой «коррекции» можно

получить, включив в рассмотрение еще одну характеристику физических постоянных, а именно их размерность.

4. МОГУТ ЛИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ ИМЕТЬ РАЗМЕРНОСТЬ?

Вопрос о размерности имеет чрезвычайно важное значение для понимания проблемы физических констант. Подавляющее большинство физических постоянных имеет размерность, т. е. помимо числового значения констант в таблицах указываются и их единицы. Например, скорость света $c = 2,997 \cdot 10^8$ метров (м), деленных на секунду (с) (приводится округленное значение c); элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ кулон (Кл), $1 \text{ Кл} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ ампер (А), умноженных на секунду; постоянная Планка $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ джоулей (Дж), умноженных на секунду, или, раскрывая размерность джоуля, $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$; масса покоя электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг и т. д. Размерность любой физической величины отражает ее связь с величинами, принятыми за основные при построении системы единиц. В приведенных выше примерах используется Международная система единиц (СИ), в которой основными единицами являются метр, килограмм, секунда, ампер, моль (для измерения количества вещества), кельвин (для измерения температуры) и кандела (для измерения силы света). В другой часто применяемой в физике системе — СГС — основными единицами выбраны сантиметр, грамм и секунда.

Как видно, выбор основных единиц в различных системах единиц может быть весьма произвольным. Об этом еще в 1766 г. писал Л. Эйлер: «При определении или измерении величин всякого рода мы приходим к тому, что прежде всего устанавливается некоторая известная величина этого же рода, именуемая мерой или единицей и зависящая исключительно от нашего произвола» [28]. В § 2 мы уже показали произвольность установления эталонов длины, времени и массы. Издавна считается, что выбор основных единиц диктуется соображениями практического порядка, однако этот критерий весьма условен. Например, некоторые широко применявшиеся ранее единицы (аршин, лошадиная сила) теперь устарели и не используются. Трудности выбора основных единиц обусловлены тем, что современная наука оперирует величинами, масштаб изменения которых грандиозен. Так, размеры микрообъектов — порядка 10^{-12} см, размеры видимой части Вселенной (Метагалактики) — порядка 10^{28} см. В этих случаях трудно выбрать основную единицу, одинаково удобную для всех исследователей, т. е. произвольность неизбежно будет иметь место. Набор основных единиц СИ — метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела — удобен прежде всего для пользования

ими в повседневной человеческой практике, однако выбор этих единиц совершенно произволен с научной точки зрения. В этом смысле их применение столь же оправдано, как и основных единиц СГС-системы — сантиметра, грамма и секунды.

При использовании различных систем единиц и их основных единиц могут меняться как размерности фундаментальных постоянных, так и их числовые значения. Например, величина элементарного заряда в СИ равна $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл = $1,6 \cdot 10^{-19}$ с·А, а в системе СГС $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ см^{3/2}·г^{1/2}·с⁻¹. Число примеров такого рода можно без труда увеличить взяв в руки любой справочник по физике. Размерность физической величины может зависеть также от того, какое определяющее уравнение для нее выбрано. Например, для определения силы F можно воспользоваться вторым законом Ньютона $F=ma$, при этом размерность единицы силы, очевидно, будет кг·м·с⁻² (ньютон или сокращенно Н). Но силу можно определить и по закону всемирного тяготения $F=m_1 m_2/r^2$. При этом размерность единицы силы кг²·м⁻². При определении силы физики условились пользоваться вторым законом Ньютона. Только такой выбор обуславливает размерность гравитационной постоянной G , а именно м³·кг⁻¹·с⁻². Все это поднимает важнейший вопрос: какова физическая сущность формул размерности фундаментальных постоянных?

В настоящее время общепринятой считается точка зрения М. Планка, который писал: «...размерность какой-либо физической величины не есть свойство, связанное с существом ее, но представляет собой некую условность, связанную с выбором системы единиц измерений» [29]. Противоположной точки зрения придерживался А. Зоммерфельд, считавший, что размерность связана с самой сущностью физической величины. С этим нельзя согласиться по довольно простой причине. Некоторые величины физики, по определению, безразмерны, но описывают совершенно различные физические явления. Например, безразмерны коэффициент трения и постоянная тонкой структуры α , являющаяся важнейшим структурным элементом квантовой электродинамики. Приводившаяся выше размерность величины элементарного заряда в системе СГС не вызывает никаких конкретных представлений о физической сущности этой величины.

В тесной связи с только что сказанным находится то, что фундаментальные постоянные не выводятся из физических теорий, а определяются исключительно путем эксперимента. Это кажется совершенно естественным, ибо вряд ли можно требовать от физических теорий того, чтобы они давали числовые значения констант, зависящие от произвола в выборе человечеством различных основных единиц системы физических величин. Однако и физику трудно назвать совершенной до тех пор, пока проблема фундаментальных постоянных не найдет теоретического решения. Эти обстоятельства придают обсуждаемой проблеме совершенно

новое значение и остроту. Интерпретация проблемы в рамках привычных представлений о размерности постоянных невозможна, ее решение требует разработки принципиально иных путей.

На один из них указывал Эйнштейн. В своей автобиографии (1949 г.) он пишет, что в идеальной научной картине мира не должно быть места произвольным постоянным. Из физики следует полностью исключить постоянные, выраженные в метрах, килограммах, секундах и т. п., заменив их безразмерными величинами. «Если представить себе это выполненным,— пишет Эйнштейн [30],— то в основные уравнения физики будут входить лишь «безразмерные» постоянные. Относительно этих последних мне хотелось бы высказать одно предположение, которое нельзя обосновать пока ни на чем другом, кроме веры в простоту и понятность природы. Предложение это следующее: таких произвольных постоянных не существует. Иначе говоря, природа устроена так, что ее законы в большей мере определяются уже чисто логическими требованиями настолько, что в выражения этих законов входят только постоянные, допускающие теоретическое определение (т. е. такие постоянные, что их числовые значения нельзя менять не разрушая теории)». Эвристическая сила идей Эйнштейна производит громадное впечатление. Позднее Д. Гильберт [31] отчетливо высказал мысль о возможности сведения всех физических констант к математическим.

Прежде чем начать предварительное обсуждение этих идей в применении к нашей проблеме, необходимо сказать несколько слов о взаимоотношении физической и математической наук. Казалось бы, предлагаемая Эйнштейном и Гильбертом математизация физики может привести к ее отрыву от реальности, поскольку в математических уравнениях символы представляют собой лишь отвлеченные числа (образы), правила обращения с которыми подчиняются только внутренней математической логике. Физическое описание в этом смысле представляется более полным, ибо входящие в уравнения физики символы суть физические величины, различающиеся в качественном отношении. Физические уравнения и законы описывают не только количественную сторону явлений, но в определенной мере и их качественную сторону. Однако подобная трактовка значимости в исследовании природы математического и физического методов являлась бы весьма поверхностной.

Уже в древности появление математики как науки было продиктовано исключительно практическими потребностями людей. Лишь много позже развитие абстрактного математического языка создало иллюзию ее полного отрыва от физической реальности. Однако вся история физики показывает, что физика постоянно находит в якобы абстрактных математических теориях адекватный аппарат для описания сложных физических явлений. В качестве примеров укажем использование теории многомерных криволинейных пространств

в общей теории относительности Эйнштейна или использование теории групп в физике элементарных частиц. Математическая и физическая формы мышления предельно взаимосвязаны и в своей совокупности представляют исключительно мощный аппарат, используемый человечеством для исследования тайн природы.

Попробуем взглянуть на физические постоянные, приведенные в табл. 1, так сказать, «глазами Эйнштейна». Безразмерных констант в ней не так уж и много — это отношения масс, отношения различных магнитных моментов, постоянная тонкой структуры α . По мнению проф. И. Л. Розенталя, безразмерные величины m_e/m_p и $m_n - m_p/m_N$, где m_N — усредненная масса нуклона, являются фундаментальными безразмерными величинами, определяющими сложную структуру Вселенной [32]. Постоянная тонкой структуры α является количественной характеристикой одного из четырех фундаментальных взаимодействий, существующих в природе, — электромагнитного, и нам еще предстоит обсуждение ее фундаментального значения в физике. Пока отметим следующее. Помимо электромагнитного взаимодействия другими фундаментальными взаимодействиями являются гравитационное, сильное и слабое. Существование безразмерной константы электромагнитного взаимодействия $\alpha_e = e^2/(\hbar c) \approx 1/137$ предполагает, очевидно, наличие аналогичных безразмерных констант, являющихся характеристиками остальных трех типов взаимодействий. Эти константы нам также еще предстоит обсудить, пока же выпишем выражения для них и их числовые значения:

константа сильного взаимодействия $\alpha_s \approx 1$;

константа слабого взаимодействия $\alpha_w = \frac{g_F m_p c^2}{\hbar^3} \approx 10^{-5}$, где ве-

личина $g_F = 10^{-5}/m_p \approx 10^{-61}$ Дж · м³ — постоянная Ферми для слабых взаимодействий;

константа гравитационного взаимодействия

$$\alpha_g = G m_p^2 / (\hbar c) \approx 10^{-39}.$$

Числовые значения констант α_s , α_e , α_w и α_g определяют относительную «силу» этих взаимодействий. Так, электромагнитное взаимодействие примерно в 137 раз слабее сильного. Самым слабым является гравитационное взаимодействие, которое в 10^{39} меньше сильного. Константы взаимодействий определяют также, насколько быстро идут превращения одних частиц в другие в различных процессах. Константа электромагнитного взаимодействия описывает превращения любых заряженных частиц в те же частицы, но с измененным состоянием движения, плюс фотон. Константа сильного взаимодействия является количественной характеристикой взаимных превращений барионов (см. ч. 2, § 8) с участием мезонов. Константа слабого взаимодействия α_w опре-

деляет интенсивность превращений элементарных частиц в процессах с участием нейтрино и антинейтрино. Таким образом, эти безразмерные константы следует считать фундаментальными физическими постоянными.

Анализ размерностей постоянных приводит нас к новому пониманию проблемы в целом. Отдельные «классические» размерные постоянные играют определяющую роль в структуре соответствующих физических теорий, и об этом уже говорилось. Когда же речь идет о выработке единого теоретического описания всех физических процессов, формирования единой научной картины мира, размерные физические постоянные сходят со сцены. Их место занимают фундаментальные безразмерные константы — α_s , α_e , α_W , α_g , m_e/m_p и $m_n - m_p/m_N$. Отметим, что роль этих постоянных в формировании структуры и свойств Вселенной настолько велика, что их не случайно называют «мировыми постоянными» (см. ч. 3).

Наконец, следует упомянуть еще об одной безразмерной физической константе, существование которой не очевидно и поэтому до сих пор она не рассматривалась. Речь идет о размерности физического пространства, которую обозначим N . Нельзя сказать, что этот вопрос является новым для физики, впервые он был поставлен еще в 1921 г. Т. Калуцей при попытке объединения электромагнитной теории и общей теории относительности. Для нас является привычным то, что физические события разыгрываются в трехмерном пространстве, т. е. $N=3$. Другие значения N кажутся невыносимыми. Однако развитие физики неоднократно приводило к появлению таких понятий, которые на первый взгляд кажутся неприемлемыми с точки зрения так называемого «здорового смысла» и которые тем не менее являются единственным адекватным отображением реальных процессов, существующих в природе. Примеров на эту тему можно привести достаточно много, вспомним лишь о замедлении течения времени в неинерциальных системах или о наличии у микрообъектов одновременно свойств и частицы и волны (корпускулярно-волновой дуализм) и т. д. Коротко обсудим логику основных положений, приводящих к необходимости рассмотрения вопроса о размерности физического пространства.

Существование четырех типов взаимодействий, о которых мы говорили выше, кажется естественным, поскольку они описывают различные физические процессы. Гравитационное взаимодействие (тяготение) присуще всем объектам Вселенной, будь то макротела или микрообъекты. Электромагнитное взаимодействие действует между заряженными телами. Сильное и слабое взаимодействия являются характеристиками процессов, происходящих в микромире и ведущих к взаимопревращениям частиц. Однако единство окружающего мира требует разработки теории, которая позволила бы описать все эти четыре взаимо-

действия единым образом. В настоящее время уже созданы теории объединения электромагнитного и слабого взаимодействий (электрослабое взаимодействие) и электрослабого и сильного (электроядерное взаимодействие). На повестке дня разработка теории, объединяющей все четыре типа взаимодействий (супергравитация). Оказывается, построить последовательную теорию супергравитации в пространстве трех измерений невозможно. Наименьшая размерность, при которой удастся справиться с трудностями теории, равна $N=10$ [33]. Размерность пространства является также одним из основных структурных элементов теорий возникновения метagalactic: «Согласно современным теориям, существует многомерное, фоновое, заполненное физическим вакуумом пространство, где происходят возмущения, дающие начало эволюции объектов типа метagalactic» [34]. Более подробно затронутые здесь вопросы обсуждаются в ч. 3, но несомненно то, что размерность физического пространства является одной из фундаментальных физических постоянных.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

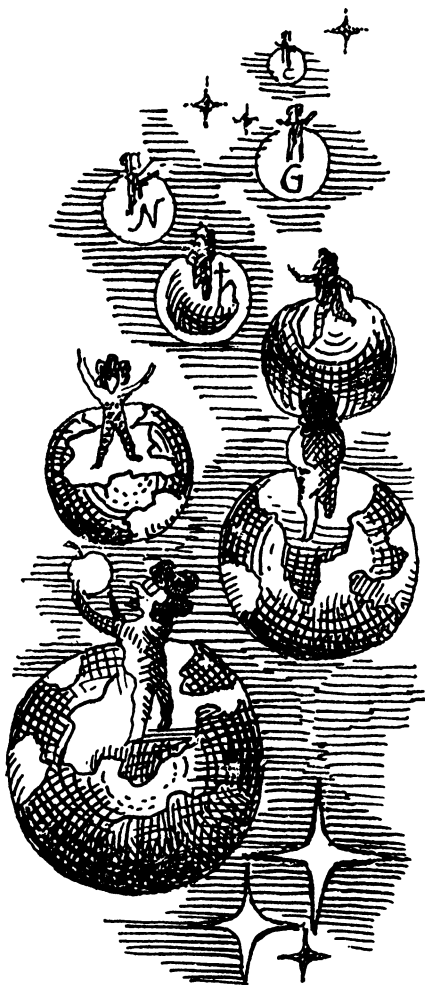
1. В существующей научной, учебной и методической литературе отсутствует единое и четкое определение понятия «фундаментальные физические постоянные».

2. Таблицы фундаментальных физических постоянных составляются без учета логических требований, вытекающих из реального содержания этого понятия, и содержат серьезные ошибки физического и методического планов.

3. Физические постоянные изучаются в курсах физики изолированно друг от друга, мало внимания уделяется связи констант между собой, их значению в формировании современной единой научной картины мира.

4. Анализ показывает, что критерием фундаментальности постоянных следует считать содержащуюся в них информацию о наиболее общих, основополагающих свойствах материи.

5. «Классические» размерные фундаментальные постоянные играют определяющую роль в структуре соответствующих физических теорий. Из них формируются фундаментальные безразмерные постоянные единой теории взаимодействий — α_s , α_e , α_W и α_g . Эти константы, размерность пространства N и некоторые другие определяют структуру Вселенной и ее свойства.



КОНСТАНТЫ И ФИЗИКА

Урок, который необходимо извлечь из новейшего развития физики: всякое слово или всякое понятие, каким бы ясным оно нам ни казалось, имеет все-таки довольно ограниченную область применения.

В. Гейзенберг

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Содержание этой части полностью определяется ее названием — «Константы и физика». Значение физических постоянных в развитии науки огромно, их можно уподобить вехам, своеобразным ориентирам, расставленным природой на том длинном и трудном пути человечества, который называется познанием. Хорошее знание ориентиров способно облегчить любой путь, поэтому в отдельных параграфах этой части раскрывается физическая сущность той или иной константы, ее роль в становлении физики как науки. Отбор материала определяется именно этими целями, и, хотя изложение касается практически

всех основных разделов физики, эту книгу нельзя рассматривать как учебник. Рассмотрение физического смысла отдельных постоянных дает возможность исследовать в третьей части книги проблему фундаментальных физических констант в целом.

1. ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ (НАЧАЛО ИССЛЕДОВАНИЯ)

Введение. Изучение фундаментальных физических постоянных естественно начать исторически с первой константы — гравитационной G . Ее ввел в физику в 1687 г. И. Ньютон, сформулировав в своих знаменитых «Математических началах натуральной философии» закон всемирного тяготения: два тела с массами M_1 и M_2 , находящиеся друг от друга на расстоянии R , притягиваются с силой F , равной

$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2}. \quad (1)$$

Входящий в (1) коэффициент пропорциональности G был назван Ньютоном постоянной тяготения. Синонимом этого понятия является принятое сейчас название «гравитационная постоянная».

Появление в науке ее первой физической постоянной неотделимо, таким образом, от исследования проблемы тяготения, поэтому понимание физической сущности гравитационной постоянной невозможно без систематического изучения его свойств. Сразу же следует сказать о том, что, несмотря на крупнейшие достижения современной теоретической и экспериментальной физики, полной теории гравитации до сих пор нет. Это объясняется исключительной сложностью проблемы. Можно выделить три этапа на пути изучения тяготения. Первый — это создание Ньютоном классической теории, фундаментом которой является закон всемирного тяготения (1). Со временем выявились факты, не находящие себе объяснения в рамках ньютоновской теории, и в начале XX в. А. Эйнштейн разработал новую теорию гравитации, известную под названием «общая теория относительности». В настоящее время мы являемся свидетелями третьего этапа исследования проблемы. Усилия ученых направлены на создание единой теории физических взаимодействий, в которой должен будет «работать» аппарат разрабатываемой сейчас квантовой теории гравитации. Эти исследования еще далеки от завершения. В одном параграфе невозможно изложить весь круг вопросов, так или иначе связанных с гравитационной постоянной. Естественным является ее изучение в продолжающих и дополняющих друг друга разделах, соответствующих углублению знаний свойств физического мира.

О роли гравитации. Тяготение является одним из известных к настоящему времени четырех фундаментальных физических взаимодействий — гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного. Оно действует между всеми без исключения физическими телами и обладает некоторыми принципиальными особенностями, резко выделяющими его среди остальных типов взаимодействий. Гравитационные силы пренебрежимо малы по сравнению с другими, пока мы рассматриваем поведение вещества на микроскопическом уровне. Например, сила взаимного притяжения двух электронов примерно в $5 \cdot 10^{42}$ раз меньше силы их кулоновского отталкивания. В случае двух протонов различие достигает 36 порядков. Сильное взаимодействие, связывающее внутри атомных ядер протоны и нейтроны и обеспечивающее стабильность ядер, существенно больше гравитационного, но радиус его действия ограничен размерами ядра и составляет примерно 10^{-13} см. Силы слабого взаимодействия также превышают силы тяготения, но радиус их действия еще меньше — 10^{-17} см. На больших расстояниях силы слабого и сильного взаимодействий становятся пренебрежимо малы и их можно не учитывать. Силы же гравитационного и электромагнитного взаимодействий убывают одинаково и довольно медленно, пропорционально квадрату расстояния между взаимодействующими объектами. Эти силы обладают, как говорят, дальним действием, но и в этом случае особенности гравитационного взаимодействия отличают его от электромагнетизма. Известно, что силы электрического происхождения могут быть как силами притяжения, так и силами отталкивания в зависимости от знака заряда взаимодействующих тел, в то время как силы тяготения — всегда силы притяжения. Электромагнитное (кулоновское) взаимодействие между крупными телами практически равно нулю из-за их электрической нейтральности, поскольку входящие в состав тел положительные и отрицательные заряды равны и взаимно компенсируют друг друга. В то же время при увеличении масс взаимодействующих объектов силы гравитационного взаимодействия резко возрастают. Проиллюстрируем это. Например, взаимное притяжение двух людей, разговаривающих друг с другом за столом, примерно равно 10^{-7} Н, что эквивалентно силе, с которой будет давить на чашу весов «микрогирия» массой около 10^{-8} г. Однако силы притяжения, действующие между обладающими огромными массами астрономическими объектами, чудовищно велики. Так, Земля ($M_3 = 6 \cdot 10^{24}$ кг) притягивает Луну ($M_{л} = 7 \cdot 10^{22}$ кг) с силой $F = 10^{20}$ Н и сама испытывает притяжение со стороны Солнца ($M_с = 2 \cdot 10^{30}$ кг), равное 10^{22} Н. Масса нашей Галактики равна примерно $10^{11} M_с$, масса видимой части Вселенной (Метагалактики) около $10^{21} M_с$, поэтому можно представить, насколько колоссальны силы, определяющие движение планет в Солнечной системе, движения целых

Галактик. Именно тяготение определяет прошлое и будущее Вселенной. Явление гравитации имеет поэтому исключительное и непреходящее значение для всей науки, что придает изучению гравитационной постоянной особую значимость.

Первые оценки и первые проблемы. История открытия и становления в физике закона всемирного тяготения достаточно хорошо известна [35—37]. Существенным является то, что она является одновременно и историей рождения первой фундаментальной постоянной. Пока о гравитационной постоянной G нам ничего не известно — ни ее числовое значение, ни ее зависимость от состава вещества, температуры, расстояния, времени. Неизвестно даже, существуют ли эти зависимости. Так скромно начинала свой путь в физике гравитационная постоянная.

Значение G допускает теоретическую оценку. Сила притяжения Землей шара, имеющего массу m и находящегося на ее поверхности, равна

$$F = G \frac{mM_3}{R_3^2},$$

где R_3 — радиус Земли ($R_3 = 6370$ км). По второму закону динамики Ньютона

$$\frac{d}{dt}(mv) = F \quad (2)$$

эта сила сообщит шару m ускорение a , равное

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F}{m} = G \frac{M_3}{R_3^2} \quad (3)$$

(направления скорости тела, его ускорения и действующей на шар силы в данном случае совпадают друг с другом). Ускорение a есть известное еще со времен Галилея ускорение свободного падения g_0 :

$$g_0 \approx 9,8 \text{ м/с}^2, \quad (4)$$

поэтому

$$G = \frac{g_0 R_3^2}{M_3} \approx 6,6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (5)$$

Эти оценки требуют комментария, поскольку их кажущаяся простота скрывает существование двух кардинальных физических

проблем. Во-первых, выполняя переход от (2) к (3), мы молчаливо предполагали, что масса шара не зависит от скорости его движения, что справедливо лишь при скоростях $v \ll c$, где c — скорость света. Пренебрежение зависимостью $m(v)$ характерно лишь для классической или ньютоновской механики. Во-вторых, принципиальное значение имеет то, что массы тел, входящие в уравнения (1) и (2), характеризуют совершенно различные свойства физических объектов.

В законе всемирного тяготения (1) масса определена как способность тел создавать тяготение и испытывать притяжение со стороны других объектов. Назовем эту массу гравитационной — $m_{гр}$. В законе динамики (2) масса характеризует инертные свойства тела, его способность изменять состояние своего движения под действием внешней силы. Эту массу естественно назвать инертной — $m_{ин}$. По существу, Ньютон ввел в физику два совершенно различных понятия массы тела, которые пока никак не связаны друг с другом. Повторяя выкладки для оценки величины G с учетом наличия у шара инертной и гравитационной масс, получим

$$G = \frac{m_{ин}^2 g_0 R^3}{m_{гр} (M_3)_{гр}}. \quad (6)$$

Поскольку отношение $m_{ин}/m_{гр}$ неизвестно, теоретическая оценка гравитационной постоянной не представляется возможной.

Инертная и гравитационная массы являются характеристиками любых физических объектов, следовательно, между ними должно существовать какое-то отношение. Является ли оно одним и тем же для тел, отличающихся химическим составом? Если отношение $m_{ин}/m_{гр}$ одинаково для всех веществ, то уравнения физики существенно упрощаются. Если нет, то в них должна включаться информация о составе вещества, что, безусловно, приведет к значительному усложнению уравнений. Вопрос о связи инертной и гравитационной масс приобретает, таким образом, принципиальное значение для науки.

Принцип эквивалентности. Первым, кто целенаправленно попытался обнаружить связь между $m_{гр}$ и $m_{ин}$, был Ньютон. Идея его опытов очень проста. Период колебаний математического маятника T связан с длиной l нити известным соотношением

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

(При выводе этой формулы принималось $m_{\text{ин}} = m_{\text{гр}}$.) В общем случае

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} \frac{m_{\text{гр}}}{m_{\text{ин}}}}. \quad (7)$$

Это соотношение указывает на возможность экспериментального изучения зависимости между $m_{\text{гр}}$ и $m_{\text{ин}}$. Для этого надо взять маятники с одинаковой длиной нити, но имеющие различные по химическому составу грузы, и измерить периоды их колебаний. Применяя в качестве грузов банки с водой, песком, подсолнечным маслом и другими веществами, Ньютон с точностью до 10^{-3} (0,1%) установил, что отношение $m_{\text{ин}}/m_{\text{гр}}$ одинаково для всех указанных веществ, и сделал на основании этого естественный вывод о том, что инертная и гравитационная массы любых тел пропорциональны друг другу:

$$\left(\frac{m_{\text{ин}}}{m_{\text{гр}}}\right)_1 = \left(\frac{m_{\text{ин}}}{m_{\text{гр}}}\right)_2 = \dots = \text{const}.$$

Не нарушая общности рассуждений, единицы инертной и гравитационной масс можно выбрать такими, чтобы их отношение было безразмерным и равным единице. При этом

$$m_{\text{ин}} = m_{\text{гр}}. \quad (8)$$

Равенство (8) отражает фундаментальный принцип эквивалентности инертной и гравитационной масс. Его справедливость неоднократно проверялась в дальнейшем. Была существенно увеличена точность измерений, расширен класс исследуемых веществ. В 1862 г. Ф. Бессель увеличивает точность до 10^{-5} . В конце прошлого века венгр Р. фон Этвеш улучшает точность до $5 \cdot 10^{-9}$, экспериментируя с пробными телами, выполненными из асбеста, талька, дерева, платины и др. В 1964 г. американские ученые Р. Дикке, П. Ролл и Р. Кротков довели точность измерений до 10^{-11} , а в 1971 г. советские ученые В. Брагинский и В. Панов улучшили и этот результат — в их опытах равенство (8) было проверено с точностью до 10^{-12} [38]. Принцип эквивалентности был проверен также в экспериментах с космическими объектами и микрочастицами (опыты Ф. Виттерборна и У. Фербэнка (США) с элементарными частицами и античастицами). В настоящее время можно считать, что совпадение инертной и гравитационной масс является надежно проверенным в эксперименте фундаментальным физическим фактом.

Измерение гравитационной постоянной. Принцип эквивалентности, оставляя невыясненной причину совпадения инертной и гра-

витационной масс, снимает логические запреты с экспериментов по измерению величины G . Проблема измерения имела в этом случае принципиальное значение для утверждения закона всемирного тяготения, ибо, несмотря на его пышное название и блестящее подтверждение его действия при изучении движения небесных тел, более ста лет все попытки обнаружить тяготение в лабораторных условиях были безуспешны. Некоторые скептики предлагали даже ограничить сферу действия закона (1) — он применим для расчетов движений небесных тел, но не выполняется в земных условиях. Однако путем несложных оценок можно установить, в чем заключается причина экспериментальных неудач. Если мы хотим измерить притяжение двух шаров массами, например, по 50 кг, находящихся на расстоянии 10 см друг от друга, то нам необходимо измерить силу притяжения между ними, равную примерно $1,6 \cdot 10^{-5}$ Н. Сила притяжения этих же шаров Земли равна $5 \cdot 10^2$ Н, т. е. приблизительно в 30 миллионов раз больше. Ясно, что обнаружение столь малых сил на фоне неизмеримо больших требует большого экспериментального искусства и разработки чрезвычайно чувствительной аппаратуры.

Впервые измерение гравитационной постоянной в земных условиях выполнил английский ученый Г. Кавендиш в 1798 г., применив для этого изготовленные Д. Мичелом крутильные весы (рис. 1). Угол закручивания φ нити весов определяется, очевидно, упругими свойствами нити и величиной гравитационного взаимодействия пробных масс m и M . В опытах Кавендиша использовались свинцовые шары $m = 730$ г и $M = 158$ кг. Полученное им числовое значение гравитационной постоянной было равно

$$G = (6,6 \pm 0,04) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1},$$

что совпадает с приведенной ранее теоретической оценкой.

Значение экспериментов Кавендиша трудно переоценить. Во-первых, они доказали всеобщность закона тяготения Ньютона, он стал, наконец, поистине всемирным. Знание величины

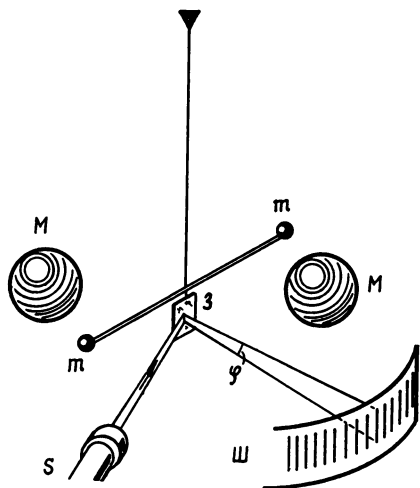


Рис. 1. Крутильные весы

M и m — пробные массы; S — источник света; $З$ — зеркальце; $Ш$ — измерительная шкала

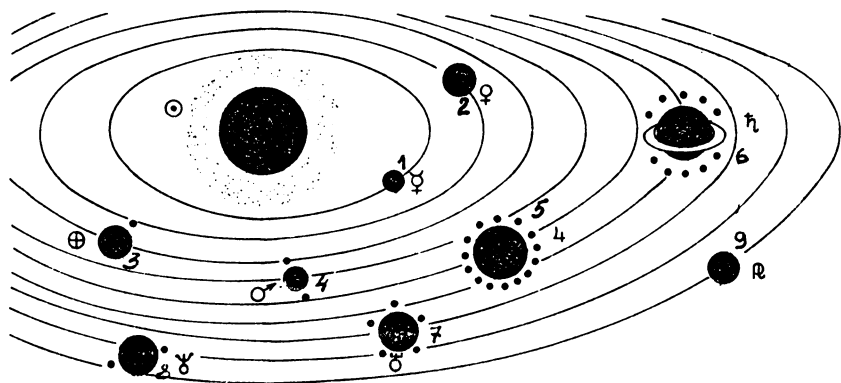


Рис. 2. Солнечная система

☉ — Солнце; планеты Солнечной системы: 1 — Меркурий, 2 — Венера, 3 — Земля, 4 — Марс, 5 — Юпитер, 6 — Сатурн, 7 — Уран, 8 — Нептун, 9 — Плутон

G позволило Кавендишу в том же 1798 г. вычислить абсолютное значение массы Солнца и планет, среднюю плотность Земли. Последовали и другие впечатляющие открытия. Еще со времени открытия в 1781 г. В. Гершелем планеты Уран (рис. 2) внимание ученых привлекал необычный, не согласующийся с расчетами по теории Ньютона характер ее движения. Для объяснения этого явления петербургский астроном А. И. Лексель предположил наличие не известной еще в то время заурановой планеты. Расчеты положения этой планеты выполнили независимо друг от друга английский астроном Д. Адамс и француз У. Лаверье. Получив данные Лаверье, немецкий ученый И. Галле в тот же вечер 23 сентября 1846 г. обнаружил в указанной точке неба новую планету — Нептун. Со временем оказалось, что движение Урана нельзя объяснить только влиянием притяжения Нептуна. В 1915 г. американские астрономы П. Ловелл и Э. Пикеринг рассчитали орбиту девятой планеты Солнечной системы — Плутона, — которая была обнаружена в 1930 г. К. Томбо.

Кавендишев метод измерения гравитационной постоянной с помощью крутильных весов в дальнейшем был усовершенствован. В середине XVIII в. немец Ф. Райх разработал динамический метод измерения G , суть которого сводится к следующему. Выведенные однажды из положения равновесия крутильные весы будут совершать затухающее колебательное движение, частота которого зависит от момента инерции весов и упругих свойств нити. Если к весам подвести дополнительную пробную массу M , то в колебательной системе появится дополнительная гравитационная жесткость, пропорциональная G . Точность измерения G по этому методу увеличивается почти на порядок. Дальнейшие усовершенствования метода используют более точную индика-

цию угловых перемещений, прецизионные измерения пробных масс, проведение измерений в вакууме и т. д. Одна из современных измерительных установок, разработанная в Государственном астрономическом институте им. Штернберга, показана на рис. 3 [39]. Коромысло длиной 35,5 см с цилиндрическими пробными массами на концах подвешивалось на вольфрамовой нити диаметром $32 \cdot 10^{-4}$ см и длиной 1 м. Массы пробных медных тел $m_1 = (29,89909 \pm 0,00003)$ г и $m_2 = (29,94050 \pm 0,00003)$ г. Период собственных крутильных колебаний весов равен приблизительно 2310 с. Время релаксации примерно 10^6 с. Измерения проводились в вакууме ($\approx 5 \cdot 10^{-5}$ тор). Эталонные образцы были выполнены из немагнитной стали в виде прямых круговых цилиндров диаметром 18 см и высотой 20 см. Их массы $M_1 = (39,72791 \pm \pm 0,00002)$ кг и $M_2 = (39,79718 \pm \pm 0,00002)$ кг. Колебания крутильных весов регистрировались с помощью двух независимых систем, основным узлом которых служил индикатор угловых перемещений, работающий по принципу оптического рычага. Разрешающая способность индикаторов порядка 10^{-8} рад. Первая система регистрации измеряла период крутильных колебаний (интервал времени между прохождениями положения равновесия). Вторая (локаторная) система регистрации содержала сканирующее зеркало и позволяла измерять в цифровом виде мгновенные значения угловой координаты колеблющегося зеркала с интервалом между измерениями 20 с. Эталонные массы могли быть установлены в четырех фиксированных положениях с помощью специально разработанной платформы, точность измерения линейных перемещений составляла $2 \cdot 10^{-4}$ см.

Результаты измерений гравитационной постоянной, выполненные в различное время и различными группами авторов, сведены в табл. 3 [40].

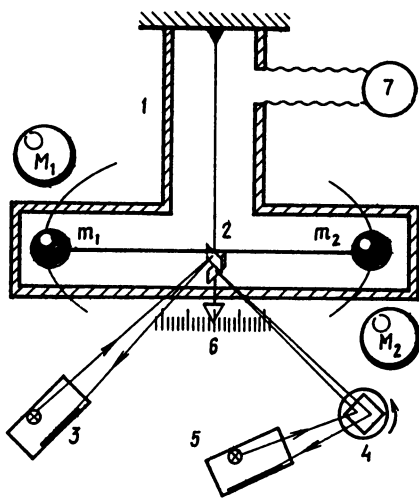


Рис. 3. Установка для прецизионных измерений гравитационной постоянной:

- 1 — корпус прибора; 2 — крутильные весы; 3, 5 — индикаторы малых угловых перемещений; 4 — вращающееся зеркало; 6 — прибор для линейных измерений; 7 — система вакуумирования; m_1 , m_2 — пробные массы; M_1 , M_2 — эталонные массы

Колебания крутильных весов регистрировались с помощью двух независимых систем, основным узлом которых служил индикатор угловых перемещений, работающий по принципу оптического рычага. Разрешающая способность индикаторов порядка 10^{-8} рад. Первая система регистрации измеряла период крутильных колебаний (интервал времени между прохождениями положения равновесия). Вторая (локаторная) система регистрации содержала сканирующее зеркало и позволяла измерять в цифровом виде мгновенные значения угловой координаты колеблющегося зеркала с интервалом между измерениями 20 с. Эталонные массы могли быть установлены в четырех фиксированных положениях с помощью специально разработанной платформы, точность измерения линейных перемещений составляла $2 \cdot 10^{-4}$ см.

Результаты измерений гравитационной постоянной, выполненные в различное время и различными группами авторов, сведены в табл. 3 [40].

Таблица 3

Автор(ы)	Значение $G \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}$
Ф. Райх (Германия, 1852)	6,64 ± 0,06
Р. Этвеш (Венгрия, 1896)	6,657 ± 0,013
П. Хел, П. Хржановский (США, 1942)	6,673 ± 0,05
Л. Фасси, К. Поиткикс (Франция, 1972)	6,6714 ± 0,0006
М. У. Сагитов, В. К. Милоков (СССР, 1978)	6,6745 ± 0,0008
Ж. Лазер, У. Тоулер (США, 1982)	6,6726 ± 0,0005

Сравнение данных табл. 3 и 1 показывает, что несмотря на то, что гравитационная постоянная G является исторически первой константой, точность ее измерения и в настоящее время является наиболее низкой по сравнению с точностью измерения других фундаментальных постоянных. Это обусловлено малыми значениями тяготения в лабораторных условиях и вытекающими отсюда трудностями постановки эксперимента.

Перигелий Меркурия. Многочисленные подтверждения теории тяготения Ньютона вызвали повышенный интерес к научному методу исследования явлений. В сознании людей постепенно формировалось убеждение в том, что наука является огромной силой, с которой нельзя не считаться. Были опровергнуты все астрологические попытки объяснения движения планет. Эксперименты Кавендиша сняли последние сомнения в справедливости теории. Однако оставался невыясненным главный вопрос: каков механизм тяготения? Формулы и уравнения никак не объясняли его природы.

На протяжении многих лет И. Ньютон пытался найти причину тяготения. Он обратил внимание на то, что силы притяжения действуют через сотни миллионов километров, казалось бы, совершенно пустого пространства. Интуитивно Ньютон не мог принять этого. «Предполагать, что тело может действовать на другое на любом расстоянии в пустом пространстве, без посредства, передавая действие и силу, — это, по-моему, такой абсурд, который не мыслим ни для кого, умеющего достаточно разбираться в философских предметах», — пишет он [41].

В поисках решения Ньютон обращается к предположению о существовании особой среды — эфира, по которому распространяется действие тяготения. Однако о его свойствах он не может сказать ничего определенного: «Нет достаточного запаса опытов, коими законы действия этого эфира были бы точно определены и показаны». После ряда безуспешных попыток он отказывается от гипотезы эфира: «Причину свойств тяготения я до

сих пор не мог вывести из явлений. Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным мной законам и вполне достаточно для объяснения движения всех небесных тел и моря».

Причину тяготения пытались понять и другие ученые. М. В. Ломоносов считал, что все пространство заполняет некая «тяготительная материя», взаимодействием которой с телами и объясняется притяжение тел друг к другу. В 1782 г. немецкий ученый Г. Лесаж предположил, что всю Вселенную заполняют очень малые «мировые» частицы, движущиеся хаотически с очень большими скоростями и передающие свой импульс при столкновениях с различными телами. Притяжение планет к Солнцу объясняется тем, что Солнце служит для мировых частиц естественным экраном, поэтому со стороны Солнца на планеты падает меньше этих частиц, что и создает силу притяжения их к Солнцу. Однако эту гипотезу пришлось отвергнуть из-за того, что столкновения мировых частиц с планетами должны приводить к замедлению движения планет, чего не наблюдается в действительности.

Отметим то, что закон всемирного тяготения недоказуем, так как он получен путем обобщения опытных фактов. Он выведен индуктивным путем, согласно которому после установления какого-либо факта и подтверждения его справедливости для других случаев распространяют действие закона на все подобные явления. При этом, естественно, абсолютная справедливость закона не может быть гарантирована до тех пор, пока не станет ясным механизм тяготения.

Нельзя ли, используя чувствительный метод Кавендиша, попытаться определить зависимость G от свойств среды, от природы тел, температуры и других факторов? Можно ли экранировать тяготение, управлять гравитацией? Однако все эксперименты, направленные на выяснение этих вопросов, принесли отрицательные результаты. Гравитационная постоянная не зависит от физических и химических свойств тел. Не обнаруживает влияния температуры на вес тел англичанин Д. Пойнтинг. Многочисленные эксперименты не позволили обнаружить экранирования тяготения. Более того, вопреки утверждению Ньютона о том, что его теории «вполне достаточно для объяснения движения всех небесных тел», вскоре нашелся факт, не находящийся в ней интерпретации.

В 1845 г. Леверье заметил, что движение ближайшей к Солнцу планеты Меркурий (см. рис. 2) не может быть рассчитано по ньютоновской теории. Орбиты всех планет представляют собой эллипсы, ближайшие к Солнцу точки которых (перигелии) смещаются по кругу. Наибольшее смещение наблюдается у Меркурия (рис. 4). Оно составляет $532''$ в 100 лет. Расчеты по формулам Ньютона дают величину, на $43''$ меньшую.

Малость расхождения между расчетом и наблюдениями не умаляет значения установленного факта. Любая теория проверяется наблюдениями, и поэтому один-единственный факт, не нахо-

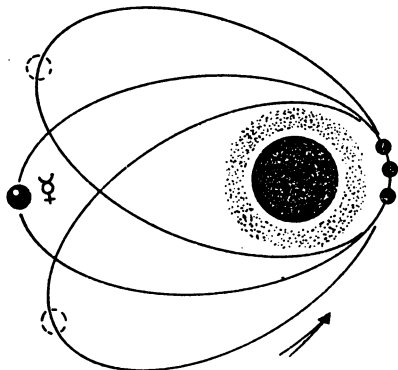


Рис. 4. Смещение перигелия Меркурия (сильно увеличено):
 ○ — Солнце; α — Меркурий

дящий себе объяснения в ней, может опровергнуть ее. В данном случае смещение перигелия Меркурия, не находя себе объяснения, свидетельствовало о несостоятельности теории Ньютона. Не спасли положения и многочисленные попытки «исправить» закон. Например, П. Лаплас выдвинул гипотезу о поглощении тяготения в межпланетной среде по закону

$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2} e^{-\lambda R},$$

где поправка λ должна быть равной 0,00000038. Если принять эту модификацию теории, то

сразу же возникали трудности с объяснением движения других планет. Необходимостью становится разработка новой теории, однако принципы ее построения пока совершенно не ясны. Пока же обратим внимание на то, что Меркурий является ближайшей к Солнцу планетой Солнечной системы, т. е. движется в более сильном гравитационном поле, чем другие планеты.

Гравитационное поле. Понятие гравитационного поля требует пояснений. Оно вводится по аналогии с понятием электромагнитного поля и означает, что каждая точка пространства, окружающего тело M_1 , приобретает способность действовать на любое тяжелое тело M_2 , попадающее в сферу действия поля сил тяготения. Это действие выражается во взаимном притяжении тел с силой F , определяемой выражением (1). Поскольку силы тяготения убывают с расстоянием пропорционально R^2 , радиус действия гравитационного поля практически бесконечен. В электростатике сила, с которой действует электрическое поле напряженностью E на заряд q , пропорциональна величине этого заряда и равна $F = qE$. В случае гравитационных полей сила $F_{гп}$ также пропорциональна определенной физической характеристике тела, а именно его гравитационной массе, которая, следовательно, может быть названа гравитационным зарядом. По аналогии с электростатикой запишем:

$$F_{гп} = (M_2)_{гп} E_{гп} = -G \frac{(M_1 M_2)_{гп}}{R^2} r. \quad (9)$$

Здесь $E_{гп}$ — напряженность гравитационного поля, численно равная силе, действующей на единичную точечную массу, помещенную в данную точку поля и направленную вдоль вектора этой

силы (\mathbf{r} — единичный радиус-вектор). Величина $E_{гр}$ определяется только характеристиками создающего данное поле тела:

$$E_{гр} = \frac{F_{гр}}{(M_2)_{гр}} = -G \frac{(M_1)_{гр}}{R^2} \mathbf{r}. \quad (10)$$

Потенциальная энергия тела M_2 в данном гравитационном поле

$$U_{пот} = -G \frac{(M_1 M_2)_{гр}}{R}. \quad (11)$$

Она равна работе (взятой со знаком минус), которую надо совершить, чтобы развести два покоящихся взаимодействующих тела на такие большие расстояния, где их взаимодействие друг с другом становится пренебрежимо малым.

Можно ввести и потенциал φ гравитационного поля. Он численно равен потенциальной энергии, которой обладает материальное тело массой, равной единице, помещенное в данную точку поля:

$$\varphi = \frac{U_{пот}}{(M_2)_{гр}} = -G \frac{(M_1)_{гр}}{R}. \quad (12)$$

Работа, которая совершается силами гравитационного поля при перемещении тела M_2 из точки A в точку B , равна

$$A_{AB} = (U_{пот})_A - (U_{пот})_B = (M_2)_{гр} (\varphi_A - \varphi_B). \quad (13)$$

Поскольку, по второму закону Ньютона, $\mathbf{F} = (M_2)_{ин} \mathbf{a}$, $\mathbf{F} = \mathbf{F}_{гр} = (M_2)_{гр} \mathbf{E}_{гр}$, можно записать

$$\mathbf{a} = \frac{(M_2)_{гр}}{(M_2)_{ин}} \mathbf{E}_{гр}. \quad (14)$$

Объединяя принцип эквивалентности (8) и результаты опытов Галилея, получаем, что напряженность гравитационного поля на Земле равна ускорению свободного падения:

$$\mathbf{E}_{гр} \equiv \mathbf{g}_0. \quad (15)$$

Резюмируя, можно сказать, что пространство, т. е. та арена, на которой разыгрываются физические события, перестает быть их пассивным свидетелем. Оно обладает некими характеристиками, например напряженностью гравитационного поля. Хорошо известна задача о движении тела, брошенного под углом к горизонту (рис. 5). Уравнение траектории движения тела

$$y = x \operatorname{tg} \alpha + \frac{g_0}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2. \quad (16)$$

Начальные условия — скорость v_0 и угол вылета α — зависят от

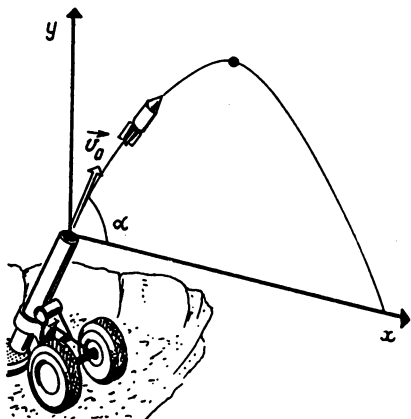


Рис. 5. Движение тела, брошенного под углом к горизонту

возможным, но на это впервые указали английские астрофизики Э. Милн и В. Маккри всего лишь в 1934 г., т. е. спустя почти 250 лет после Ньютона. Парадоксально, но модель динамики Вселенной могла быть построена еще Ньютоном. Вероятнее всего, это не было сделано в силу прочно укоренившегося еще со времен Древней Греции представления о неизменности, стационарности Вселенной. О динамике Вселенной долгое время никто даже и не догадывался. Поэтому излагаемая ниже космология «по Ньютону» появилась уже после создания А. Эйнштейном в 1917 г. общей теории относительности, после теоретического предсказания А. Фридманом в 1922 г. расширения Вселенной, после экспериментального подтверждения этого явления в 1929 г. американским астрономом Э. Хабблом. «Ньютоновская» космологическая модель дает первый набросок эволюции Вселенной, раскрывает новые грани в раскрытии физической сущности гравитационной постоянной.

Одним из надежно установленных астрофизикой фактов является однородность и изотропность видимой части Вселенной — Метагалактики. Это означает, что в каждый данный момент времени ее свойства одинаковы во всех ее точках и не зависят от выбора направления наблюдений. Казалось бы, это противоречит нашим непосредственным наблюдениям, ибо мы хорошо знаем, что в глубоком вакууме космического пространства движутся массивные образования типа планет, звезд. Однако в масштабах Метагалактики принцип однородности и изотропности выполняется достаточно хорошо, так как ее размеры невообразимо велики — порядка 10^{23} км, а размеры наиболее крупных обнаруженных неоднородностей (сверхскоплений Галактик)

экспериментатора, их можно произвольно менять. Движение тела (16) не зависит от его массы, траектория полностью определяется величиной g_0 ,

т. е. напряженностью гравитационного поля, в котором происходит это движение.

Космология «по Ньютону». Выше уже отмечалось, что силы тяготения определяют движения планет и Галактик, эволюцию Вселенной в целом. Нельзя ли, используя законы Ньютона, попытаться построить хотя бы приближенную модель динамики Вселенной? Это представляется воз-

порядка 10^{20} — 10^{21} км, т. е. на два порядка меньше. В таких случаях можно говорить, что Метагалактика однородна с точностью до 0,1—1%, и задача о ее динамике сводится к задаче о динамике однородного и изотропного шара в собственном гравитационном поле.

Для решения задачи воспользуемся известным из вузовских курсов физики результатом, а именно: на любое точечное тело массой m , находящееся внутри однородной гравитирующей сферы радиусом R (рис. 6), действуют лишь частицы, расположенные в сфере радиусом r , где r — расстояние от центра сферы до пробного тела массой m . Действие этих частиц эквивалентно тому, что вся масса сферы радиусом r сосредоточена в ее центре [42]. При этом на пробное тело m действует сила притяжения

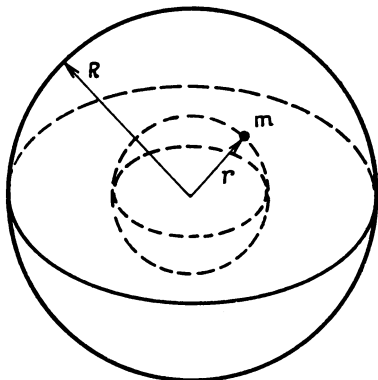


Рис. 6. Гравитирующая сфера

$$F = -G \frac{mM}{r^2}.$$

В дальнейшем под радиусом R будем понимать радиус Метагалактики, масса M — это масса Метагалактики, пробное тело находится на ее границе. Ускорение пробного тела

$$a = \frac{d^2R}{dt^2} = \frac{F}{m} = -G \frac{M}{R^2}. \quad (17)$$

Полагая, что $M = \text{const}$ (в дальнейшем показана справедливость этого предположения), получим после интегрирования

$$\frac{1}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{GM}{R} = E = \text{const}. \quad (18)$$

Если $E > 0$, то скорость пробной массы $v = dR/dt$ всегда больше нуля и однажды начавшееся расширение Метагалактики будет продолжаться. В этом случае принято говорить, что Метагалактика открыта. Если $E < 0$, то в какой-то момент времени скорость v станет равной нулю, расширение сменится сжатием. Это случай закрытой Метагалактики.

Одним из выдающихся достижений астрофизики нашего века является обнаруженное в 1929 г. американским астрономом

Э. Хабблом явление разлета Галактик, причем скорость разлета v пропорциональна расстоянию R между ними:

$$v = HR. \quad (19)$$

Коэффициент H в (19) получил название постоянной Хаббла. Подставляя в (18) соотношение Хаббла (19) и очевидное

$$M = \frac{4}{3} \pi \rho_{\text{ср}} R^3, \quad (20)$$

где $\rho_{\text{ср}}$ — средняя плотность вещества в Метагалактике, получаем

$$H^2 - \frac{8\pi\rho_{\text{ср}}G}{3} = \frac{2E}{R^2}$$

или

$$\frac{8\pi G}{3} \left[\frac{3H^2}{8\pi G} - \rho_{\text{ср}} \right] = \frac{2E}{R^2}. \quad (21)$$

Величина

$$\frac{3H^2}{8\pi G} = \rho_{\text{кр}} \quad (22)$$

имеет, очевидно, смысл некоей критической плотности $\rho_{\text{кр}}$. Значение $E > 0$ соответствует теперь случаю, когда средняя плотность вещества во Вселенной $\rho_{\text{ср}} < \rho_{\text{кр}}$. В этом случае расширение Метагалактики неограниченно (*открытая* Вселенная 1); при $E < 0$ $\rho_{\text{ср}} > \rho_{\text{кр}}$ — случай *закрытой* Вселенной 2 (рис. 7).

При $E = 0$ (физические основания для такого допущения приведены ниже) решение уравнения (18) дает ряд важных соотношений между зависимостью R , $\rho_{\text{ср}}$ и H от времени t [32]:

$$R = \sqrt[3]{\frac{9GM}{2}} t^2, \quad (23)$$

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{1}{6\pi G t^2}, \quad (24)$$

$$H = \frac{2}{3t}. \quad (25)$$

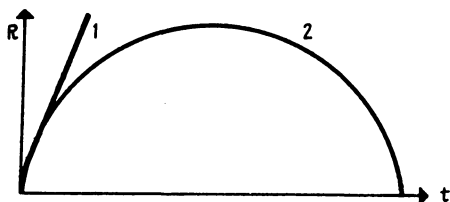


Рис. 7. Зависимость $R(t)$ в открытой (1) и закрытой (2) моделях Вселенной

Эти соотношения показывают, что важнейшие параметры Метагалактики меняют-

ся со временем. Вселенная не стационарна! В далеком прошлом (при $t \rightarrow 0$) ее радиус мог быть сколь угодно малым, плотность вещества неизмеримо большей, чем в нашу эпоху. При $R \rightarrow 0$ входящий в (18) член $GM/R \rightarrow \infty$, что и оправдывает допущение $E=0$.

Полученные результаты являются неординарными и требуют тщательной проверки справедливости взятых в основу расчета положений. Легко указать на несколько принципиальных недостатков модели эволюции Вселенной «по Ньютону». Корректный расчет гравитационной силы в рамках теории Ньютона возможен только при условии выделения гравитирующей сферы и рассмотрения поведения пробной массы на ее границе. При этом предположение об однородности задачи резко нарушается на границе сферы. При увеличении радиуса сферы скорость пробной массы может в принципе превысить скорость света, следовательно, полученные результаты справедливы только до расстояний $R < R_{кр}$. Значение $R_{кр}$ можно определить, полагая в (18) $dR/dt = C$:

$$R_{кр} = \frac{2GM}{c^2}.$$

Указанные недостатки свидетельствуют о несовершенстве модели, но не опровергают ее главного вывода о нестационарности Вселенной.

Гораздо труднее решить вопрос о справедливости той или иной модели эволюции Вселенной, т. е. является ли она открытой или закрытой. По данным астрофизики, значение постоянной Хаббла в нашу эпоху

$$H \approx (3 \div 5) \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}. \quad (26)$$

Это позволяет вычислить критическую плотность $\rho_{кр}$:

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G} \approx 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}. \quad (27)$$

Эти расчеты показывают, что гравитационная постоянная имеет чрезвычайно важное значение для решения судеб Вселенной. В настоящее время средняя плотность вещества излучающих областей Галактик достаточно хорошо измерена астрофизиками и составляет примерно $10^{-30} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Однако это не позволяет сделать однозначный выбор в пользу модели открытой Вселенной, поскольку значительная часть ее вещества может находиться в неизлучающем состоянии (нейтронные звезды, черные дыры, масса нейтрино и др.). Вопрос о судьбе Вселенной еще не решен окончательно. Если Вселенная открыта, то ее расширение будет продолжаться неограниченно и нас ждет медленное угасание в бескрайних просторах Космоса. Если же Вселенная закрыта, то

наблюдающееся сейчас расширение сменится сжатием. При этом будет выделена энергия

$$\Omega \approx \frac{3}{2} \frac{GM^2}{R}. \quad (28)$$

Примерно половина этой энергии излучается и столько же идет на повышение температуры вещества [43]. Сжатие сопровождается нагревом вещества до громадных температур. При этом состояние вещества качественно меняется. С атомов срываются электронные оболочки, происходит разрушение ядер атомов и составляющих ядра частиц. Законы, которыми описывается динамика этого сверхплотного и раскаленного космического сгустка, принципиально отличны от ньютоновских. С ростом температуры растут скорости частиц сгустка, растет и гравитационное взаимодействие между ними. При энергиях сталкивающихся электронов порядка 10^{19} ГэВ ($1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$) величины гравитационного взаимодействия, электромагнитного, сильного и слабого, примерно равны друг другу. Гравитационное взаимодействие становится по-настоящему сильным. Это уже совсем иная, неньютоновская, физика, раскрывающая новые грани исследования гравитационной постоянной. К рассмотрению этих вопросов мы вернемся после изучения физической сущности новых фундаментальных постоянных.

2. ПОСТОЯННЫЕ АВОГАДРО И ЛОШМИДТА

Две гипотезы о строении вещества. Разговор о постоянных Авогадро и Лошмидта является, по существу, разговором о строении вещества, и история появления этих констант в физике одновременно раскрывает их физическую сущность. Это история развития и становления атомистической теории строения материи, в которой нашлось место как для блестящих открытий, так и для тяжелых и драматических событий. Название постоянных является свидетельством выдающегося вклада ученых в развитие атомно-молекулярной теории строения вещества.

Еще в глубокой древности были сформулированы две взаимно исключают друг друга гипотезы о внутреннем строении тел. Согласно одной из них, вещество непрерывно и состоит из одного или нескольких «первичных» элементов, например земли, воздуха, воды и огня. Сторонники другой точки зрения утверждали, что все тела состоят из малых, не делимых далее частиц — атомов. Расхождение имело принципиальное значение для теории познания, для науки в целом. Если материя непрерывна, то задачи познания существенно сужаются — зачем делить воду, если при этом мы будем получать все то же химическое соединение с уже известными свойствами? Если же признать существование атомов, т. е. дискретность строения материи, то задачей науки становится изучение свойств этих мельчайших

гипотетических частиц. Спор о справедливости той или иной гипотезы длился более 2500 лет и завершился только в начале XX в. окончательным признанием атомистической теории.

Задолго до этого гипотеза о существовании атомов неоднократно доказывала свою плодотворность при объяснении самых различных физических и химических явлений. Тем не менее ее становление было сопряжено с громадными трудностями как научного, так и мировоззренческого порядка. Атомистическая гипотеза с самого момента своего возникновения стала предметом острейшей борьбы мировоззрений. Отголоски этих споров дошли до начала XX в. и нашли отражение в драматических судьбах многих ученых.

Один из творцов атомистической гипотезы Демокрит полностью отрицал существование любых нематериальных объектов. Даже боги состоят из атомов, утверждал он, и объяснял веру в них только беспомощностью людей перед объяснением грозных и непонятных в то время явлений природы. Бескомпромиссному материализму Демокрита противостояло пользовавшееся громадным авторитетом и поддержкой церкви учение Аристотеля, в котором признание объективной реальности мира и его познаваемости сочеталось с идеалистической верой в существование богов. Уже в Древней Греции борьба материалистического и идеалистического мировоззрений была настолько острой, что учитель Аристотеля Платон приказывал своим ученикам сжигать книги Демокрита.

Греки считали наилучшим способом познания истины метод дискуссий. К сожалению, в средние века, когда единственной владелицей человеческих душ становится религия, был объявлен крестовый поход против всего, что направлено против церковных догматов и в первую очередь против материалистических учений древних греков. Само слово «атом» исчезает из употребления. В 1626 г. во Франции пропаганда учения об атомах преследовалась наказанием вплоть до смертной казни. Отстаивать в этих условиях атомистические позиции, развивать теорию атомного строения вещества было настоящим научным подвигом.

Развитие корпускулярной теории. Впервые корпускулярную теорию строения материи развил английский ученый Р. Бойль. Он вводит в науку понятие «химического элемента как простого тела, не составленного из других». Бойль был убежденным сторонником экспериментального метода исследований явлений, подчеркивая, что только опыт может служить критерием правильности теорий. Он установил первый в истории газов закон, связывающий давление p и его объем V простым соотношением

$$pV = \text{const.} \quad (29)$$

Независимо от него позже этот закон установил Э. Мариотт, и теперь он имеет название закона Бойля — Мариотта.

Корпускулярной теории строения вещества придерживался выдающийся русский ученый М. В. Ломоносов. Он писал: «Корпускула есть собрание элементов; элемент — часть тела, не состоящая из каких-либо других меньших и отличающихся от него тел» [44]. В современном изложении элемент Ломоносова может быть уподоблен атому, корпускула — молекуле.

Развивая идеи Бойля, А. Лавуазье устанавливает, что воздух — один из основных «первичных» элементов — не является простым телом, а представляет собой смесь газов. «Стремление считать все тела природы состоящими из трех или четырех элементов происходит от предрассудка, перешедшего к нам от греческих философов», — пишет он [45]. В трудах английского химика Д. Дальтона атомистическая теория получила значительное развитие. Дальтон дал четкое определение атомного веса элемента как отношения массы атома данного элемента к массе атома водорода, как наиболее легкого элемента. (В настоящее время относительной молекулярной или атомной массой вещества называют отношение массы молекулы или атома данного вещества к $1/12$ массы атома углерода ^{12}C .) Высоко оценивал это предложение Дальтона Д. И. Менделеев: «Благодаря гению Лавуазье и Дальтона человечество узнало в невидимом планетном мире химических сочетаний простые законы того же порядка, каков указан Коперником и Кеплером в видимом планетном мире» [46]. В 1803 г. Дальтон открыл закон простых кратных отношений, согласно которому различные элементы могут соединяться друг с другом в соотношениях 1 : 1, 1 : 2 и т. п. На основании этого он составил первую в истории науки таблицу относительных атомных масс элементов. Ошибочно считая все газы одноатомными, Дальтон приписывал, например, воде химическую формулу OH , аммиаку — NH .

Парадоксом истории науки является полное неприятие Дальтоном закона простых объемных отношений, открытого в 1808 г. Ж. Гей-Люссаком. По этому закону, объемы как участвующих в реакции газов, так и продуктов реакции находятся в простых кратных отношениях. Так, соединение 2 л водорода и 1 л кислорода дает 2 л водяных паров. Этот факт не находил себе объяснения в теории Дальтона, так как в ней соединялись равные количества атомов. Закон Гей-Люссака, надежно установленный в эксперименте, противоречил атомистической теории Дальтона. После этого судьба атомной теории стала вызывать сомнения.

Гипотеза и постоянная Авогадро. Блестящий выход из этого кризисного положения был указан итальянским ученым Амедео Авогадро. В 1811 г. он нашел возможность объяснения полученных Гей-Люссаком результатов с атомистических позиций. Для этого он вводит в науку совершенно новое понятие молекулы как соединения атомов. Удивительное предвидение! Еще является

гипотезой существование атомов, но результаты исследований требуют объяснения и находят его в гипотезе Авогадро о молекулярном строении вещества. Но Авогадро идет еще дальше: «...количественные отношения веществ в соединениях, по-видимому, могут зависеть лишь от относительного числа молекул, образующихся из них. Необходимо, следовательно, принять, что имеются также очень простые соотношения между объемами газообразных веществ и числом молекул, из которых они состоят. Гипотеза, которая в этом отношении напрашивается в первую очередь и которая кажется единственно приемлемой, состоит в том, что число молекул всегда одно и то же в одинаковых объемах любых газов или всегда пропорционально объемам» [47]. Гипотеза об одинаковом числе молекул в равных объемах газов естественным образом объясняла результаты Гей-Люссака: содержащееся в 2 л водорода число частиц в соединении с частицами, содержащимися в 1 л кислорода, дает 2 л молекул водяных паров H_2O .

Важнейшим следствием гипотезы Авогадро является закон, имеющий громадное теоретическое значение,— при одинаковых температурах и давлении равные объемы любых газов содержат одно и то же число молекул. Этот вывод закреплял в науке представление о дискретном строении вещества. Авогадро впервые указывает исследователям, что число молекул в заданном объеме является конечной величиной. Одной из первоочередных задач экспериментальной физики в XIX в. стало его измерение.

При жизни Авогадро его гипотеза не получила должного признания. Возможно, это произошло потому, что сам ученый не был химиком-экспериментатором и поэтому не мог сам доказать свое предположение. По замечанию М. Планка, «он был в то время среди физиков единственным теоретиком» [48]. Признание заслуг пришло к Авогадро только на I Международном конгрессе химиков в 1860 г., через 4 года после его смерти.

В современной физике и химии предложенное Авогадро понятие получило дальнейшее расширение и развитие. Постоянная Авогадро является теперь характеристикой не только газов, но и вообще любых форм вещества (жидкой, твердой, плазмы). В атомистической теории строения вещества вместо массы возникает понятие количества вещества, что обусловлено тем, что ряд явлений и закономерностей допускают особенно простое описание, если связать их с числом частиц вещества. Свойства отдельных частиц при этом в ряде случаев не имеют значения.

Одной из основных единиц СИ является моль, определяемый как количество вещества, содержащее столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в 0,012 кг углерода ^{12}C .

Именно это число структурных элементов и называется теперь постоянной Авогадро N_A . Подчеркнем, что единица количества вещества — моль — для разных веществ имеет разную массу, например для водорода моль примерно имеет массу 2 г, для воды — 18 г и т. д.

Постоянная Лошмидта. От гипотезы Авогадро до первых попыток определения числа молекул в заданном объеме газа прошло 50 лет. Они были годами разработки учеными основных представлений о внутреннем строении газов, основ молекулярно-кинетической теории, выяснения физической сущности газовых законов. К открытому Бойлем — Мариоттом закону (29) спустя почти 150 лет добавился закон Гей-Люссака, связывающий линейной зависимостью увеличение объема газов и повышение их температуры. Эти два опытных закона были объединены в один общий закон Менделеева — Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M}RT. \quad (30)$$

Здесь T — термодинамическая температура, m — масса газа, M — молярная масса, R — молярная газовая постоянная, равная

$$R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}. \quad (31)$$

Физический смысл постоянной R мы обсудим немного позже.

Законы (29) и (30) пока не имели теоретического обоснования и поэтому порождали массу вопросов. Например, почему они справедливы для всех газов независимо от их химического состава? Большие трудности были связаны с пониманием природы давления газов и их температуры. Их удалось преодолеть путем разработки представлений о газах как о коллективах движущихся атомов и молекул. Молекулярно-кинетическая теория объясняет давление газов соударениями движущихся молекул со стенками сосуда, в котором находится газ. Эти представления первым применил к расчетам свойств газов швейцарский ученый Д. Бернулли в 1738 г. и теоретически обосновал закон (29). Однако атомистические представления в это время были настолько непопулярны, что о замечательных результатах Бернулли попросту забыли почти на 150 лет.

Очередную попытку привлечения молекулярно-кинетических представлений к расчетам параметров газа выполнил в 1845 г. англичанин Уотерстон. Из его расчетов, как следствие, вытекали законы Бойля — Мариотта и Гей-Люссака. Но судьба и этой работы поразительна, о ней отзываются как о «пустой, если не бессмысленной, основанной на чисто гипотетических принципах». Только спустя почти 50 лет она была обнаружена в пыли

архивов и опубликована. Теперь о ней пишут совсем иное: «Фактически все основные идеи кинетической теории газов на первой стадии ее развития (за исключением максвелловского распределения по скоростям) содержались в этой работе» [49].

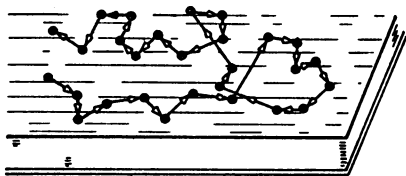


Рис. 8. Траектория движения частицы

Столь удивительная логика развития теории газов обусловлена в первую очередь имевшей место осторожностью по отношению к атомной гипотезе. Впервые всерьез была принята работа учителя немецкой реальной школы А. Кренига «Основания теории газов» (1856). Газ в представлении Кренига—совокупность мельчайших упругих частиц, движущихся «прямолинейно с известной и постоянной скоростью». Для давления газа он получил следующее соотношение:

$$p = \frac{Nmv^2}{6V}, \quad (32)$$

где N — число молекул газа. Работа Кренига была не безупречной. Утверждение о прямолинейности движения частиц не было обосновано, ошибочным оказался коэффициент $1/6$ в (32), не было ясно, как вычислять значение входящего в (32) квадрата скорости молекул v^2 .

В 1857 г. крупнейший немецкий физик Р. Клаузиус опубликовал большую работу по кинетической теории газов, в которой уточнил вывод Кренига и получил правильное соотношение для давления газа:

$$p = \frac{Nmv^2}{3V}. \quad (33)$$

Он же впервые вычислил скорости молекул газа, например для скорости молекул кислорода при нормальных условиях он получил значение 461 м/с, для водорода — 1844 м/с. Эти результаты были восприняты с большим недоверием. Они противоречили, на первый взгляд, хорошо известным фактам медленного распространения по комнате запаха цветов, табачного дыма и т. п. Клаузиус видит разгадку кажущегося противоречия в столкновениях частиц между собой и в 1858 г. вводит в физику газов важнейшее понятие средней длины свободного пробега молекул газа λ . Ее он определяет как путь, проходимый частицей между двумя последовательными столкновениями. Картина движения частиц газа существенно изменилась — траектория частиц из-за столкновений становится чрезвычайно запутанной (рис. 8), благодаря чему даже малый путь

в определенном направлении они проходят за довольно большое время. Средняя длина свободного пробега, по Клаузиусу, равна

$$\lambda = \frac{3l^3}{4\pi\sigma^2}, \quad (34)$$

где l — среднее расстояние между молекулами, σ — сфера действия молекулы, которая в первом приближении равна диаметру молекулы, если считать ее шариком.

В 1860 г. гениальный английский физик Дж. К. Максвелл публикует «Пояснение к динамической теории газов», где впервые выводит закон распределения молекул газа по скоростям. В этой же работе он получает выражение для коэффициента внутреннего трения в газах:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \lambda, \quad (35)$$

где ρ — плотность газа, \bar{v} — средняя скорость молекул газа. Из количественных экспериментов Максвелл определил, что средняя длина свободного пробега λ равна примерно 0,0001 мм.

«Непосредственный опыт всегда очевиден, и из него в кратчайшее время можно извлечь пользу», — мудро заметил позднее выдающийся австрийский физик Л. Больцман. Используя данные Максвелла, соотечественник Больцмана Й. Лошмидт в 1865 г. впервые в истории науки вычисляет размеры молекул воздуха и их число в 1 см³ при нормальных условиях. Впоследствии это число получило название постоянной Лошмидта n_0 . Проследим за ходом рассуждений ученого. Поскольку число молекул в 1 см³ n_0 и среднее расстояние l между ними связаны, очевидно, соотношением $n_0 l^3 = 1$, перепишем (34) в виде

$$\lambda = \frac{3}{4\pi\sigma^2 n_0}$$

Также очевидно, что

$$\sigma = \frac{4}{3} \pi \sigma^3 n_0 \lambda.$$

Но $V' = \frac{4}{3} \pi \frac{\sigma^3}{8}$, где V' — объем отдельной молекулы. С учетом этого

$$\sigma = 8V' n_0 \lambda = 8V \lambda, \quad (36)$$

где V — объем всех молекул. Эту величину Лошмидт нашел из

сравнения плотностей жидкости и пара в предположении плотной упаковки молекул в жидком состоянии. Для воды это отношение равно $\frac{1}{1155} = \frac{6V}{\pi}$, для воздуха оно неизвестно. Лошмидт предположил,

что это отношение остается таким же и для воздуха, и нашел, что диаметр молекул воздуха равен приблизительно $\sigma \approx 1,18 \cdot 10^{-6}$ мм. Зная σ и λ , можно оценить по (36) число молекул воздуха в 1 см^3 :

$$n_0 \approx 2,1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}. \quad (37)$$

Поскольку объем 1 моль идеального газа, согласно современным данным (табл. 1), равен $V_m = 22,41383 \text{ м}^3/\text{моль}$, знание постоянной Лошмидта позволяет вычислить постоянную Авогадро:

$$N_A \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}. \quad (38)$$

Эти же данные позволяют рассчитать и среднее расстояние между молекулами воздуха, которое оказывается примерно в 3 раза больше размеров молекул (эти данные будут уточнены в дальнейшем).

Судьбы открытий. Путь от первых гипотез о строении вещества, от полного отрицания атомистической теории до теоретических оценок размеров и числа молекул был, как мы видели, очень нелегким. Экспериментальное определение постоянной Авогадро N_A или числа Лошмидта n_0 имело принципиальное значение для судеб физики. Оно должно было дать решающие доказательства атомного строения вещества. Но сначала необходимо было найти метод измерения, выполнить опыты и, что, может быть, являлось самым главным, убедить скептиков в истинности полученных результатов.

Оценки Лошмидта впервые дали в руки экспериментаторов размеры молекул. В то же время эти результаты долгое время не признавались из-за большого числа предположений, лежащих в основе расчета. С другой стороны, они же вызывали и всеобщее восхищение среди ученых. Все шире распространялось убеждение, что эти доселе гипотетические частицы могут быть подсчитаны. На принципиальные стороны исследования Лошмидта указывал Л. Больцман: «Значение числа Лошмидта выходит далеко за пределы теории газов. Оно позволяет заглянуть глубоко в самую природу и дает ответ на вопрос о непрерывности материи. Когда мы имеем каплю воды объемом 1 мм^3 , то опыт показывает, что мы можем разделить ее на две части, и каждая из них тоже является водой. Каждую из этих частей можно снова разделить на две части. Число Лошмидта указывает нам пределы этой делимости. Когда мы разделим нашу каплю на триллион равных частей, то дальнейшее деление на равные части становится невозможным. Мы получим индивидуальные части, о точных свойствах

вах которых мы, правда, очень мало знаем. Мы полагаем, что их можно делить и дальше, но это деление совсем другое. Разделенные части уже не будут подобны имевшейся прежде воде» [50].

Первые измерения постоянной Авогадро. В 1873 г. нидерландский физик И. Ван-дер-Ваальс проводит оценку постоянной Авогадро, используя предложенное им же уравнение состояния идеального газа:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right) (V_m - b) = RT, \quad (39)$$

где b и a — поправки, учитывающие размеры молекул газа и возрастание сил межмолекулярного взаимодействия при больших давлениях газа. Они могут быть измерены на опыте, причем поправка b , очевидно, связана с собственным объемом молекул, что позволяет рассчитать N_A по методу Лопшидта. Оценки Ван-дер-Ваальса дали значение $N_A \approx 6,2 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Принципиально иной метод определения постоянной Авогадро предложил английский физик Рэлей. Предположив, что молекулы воздуха ведут себя как рассеивающие центры по отношению к падающему на них солнечному свету, он вывел формулу для отношения интенсивностей прямого и рассеянного света. Выполненные по этому методу измерения В. Томсона дали $3 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ $\leq N_A \leq 15 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Аналогичные измерения Л. Бриллюэна позволили уточнить значение постоянной Авогадро: $N_A \approx 6,0 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. (Согласно современным представлениям, рассеяние света происходит на флуктуациях плотности воздуха, возникающих в достаточно малых объемах на больших высотах.)

Другие способы определения N_A . К настоящему времени имеется более 20 способов определения постоянной Авогадро. Здесь и измерение N_A по данным электролиза с использованием соотношения, связывающего постоянную Фарадея F , заряд электрона e и N_A : $F = eN_A$, и вычисление N_A по данным радиоактивного распада, поскольку α -частицы вскоре удалось отождествить с ионами He^{++} . В 1908 г. англичанин Дж. Дьюар определил, что 1 г радия выделяет в год 164 мм^3 He , и вычислил $N_A = 6,0 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Об измерении постоянной Авогадро при исследовании броуновского движения рассказывается в следующем параграфе. Методы, относящиеся к самым различным областям физики, давали значения N_A , хорошо согласующиеся между собой, что придавало ученым уверенность в реальности существования атомов и молекул.

Считающийся наиболее точным метод определения N_A путем макроскопических измерений на кристаллах был разработан в 1974 г. [51]. Суть его состоит в следующем. Плотность кристалла равна $\rho = m/V = m_a N_A / V$, где m и m_a — массы кристалла и одного атома, V — объем кристалла. Величина V/N_A есть объем, занимаемый одним атомом, он может быть получен из теории строения данного кристалла. Если a — длина ребра элементарной ячейки кристалла, а f — число атомов в ней, то $V/N_A = a^3 / f$ и $\rho = m_a f / a^3$. Тогда по определению моля имеем

$$N_A = \frac{Mf}{\rho a^3}. \quad (40)$$

Постоянная решетки определяется путем дифракции рентгеновских лучей на кристалле с высокой точностью — относительная погрешность измерений $0,3 \cdot 10^{-6}$. Измерение плотности проводится с точностью $0,7 \cdot 10^{-6}$. Молярная масса M определяется масс-спектрометрическим путем. Об окончательной погрешности определения постоянной Авогадро N_A можно судить по данным табл. 1:

$$N_A = (6,0221367 \pm 0,0000036) 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Это позволило американскому физика Р. Милликену утверждать, что «в настоящее время постоянная Авогадро известна с гораздо большей точностью, нежели можно знать в какой-либо определенный момент времени количество жителей в таком городе, как Нью-Йорк» [52]. Вместе с постоянными Авогадро и Лошмидта в науку прочно вошли представления о дискретности строения вещества, его атомно-молекулярном строении.

Заканчивая этот раздел, следует подчеркнуть, что постоянные N_A и n_0 являются константами «вещественного» мира. Мы уже говорили о том, что само вещество начало формироваться на определенных этапах эволюции Вселенной. В этом смысле постоянные Авогадро и Лошмидта «моложе» Вселенной. Этим отнюдь не исчерпывается суть замечания. Речь идет о принципиально иных закономерностях, управляющих поведением Вселенной на ранней стадии ее развития и на более поздней, когда вступили в силу те законы, которые действуют и в наше время.

3. ПОСТОЯННАЯ БОЛЬЦМАНА

Уникальная константа. Среди фундаментальных постоянных постоянная k занимает особое место. Ее по праву называют постоянной Больцмана, хотя предложивший это название М. Планк писал: «...по моему глубокому убеждению, Больцман никогда не вводил этой константы и вообще не заботился об определении ее числового значения» [53]. Тем не менее его предложение было сразу же и безоговорочно принято всеми

учеными в знак признания огромного вклада Л. Больцмана в развитие физики. К сожалению, в литературе до сих пор можно встретить диаметрально противоположные оценки роли константы k в физике — от категорических утверждений ее фундаментального значения до сведения этой постоянной к переводному коэффициенту от энергетических единиц к тепловым [24]. С последним утверждением никак нельзя согласиться. В равной мере можно требовать и доказательств утверждений о фундаментальности k . Еще в 1899 г. М. Планк предлагал следующие четыре числовых константы в качестве фундаментальных для построения единой физики: скорость света c , квант действия h , гравитационную постоянную G и постоянную Больцмана k . «Среди этих констант k занимает особое место. Она не определяет элементарных физических процессов и не входит в основные принципы динамики, но устанавливает связь между микроскопическими динамическими явлениями и макроскопическими характеристиками состояния коллективов частиц» [54]. Она же входит в фундаментальнейший закон природы, связывающий энтропию системы S с термодинамической вероятностью ее состояния W : $S = k \ln W$ (формула Больцмана) — и определяющий направленность физических процессов в природе. Особое внимание следует обратить на то, что появление постоянной Больцмана в той или иной формуле классической физики всякий раз совершенно отчетливо указывает на статистический характер описываемого ею явления. Если можно так выразиться, константа k является своеобразной «лакмусовой» бумажкой физики, ее тестом на статистичность. Понимание физической сущности постоянной Больцмана требует вскрытия громадных пластов физики — статистики и термодинамики, теории эволюции и космогонии. Только при таком рассмотрении можно в полной мере оценить фундаментальную роль этой уникальной константы в науке.

Физика газов и начала статистики. Исследования свойств газов, о которых кратко говорилось в предыдущем параграфе, поставили перед учеными второй половины XIX в. весьма необычные задачи. Громадные успехи механики Ньютона при объяснении самых различных физических явлений привели к тому, что механистическое мировоззрение полностью владело умами ученых и казалось единственно возможным. Посмотрим, однако, к чему может привести последовательное распространение законов механики на весь окружающий нас мир. Если известны начальное положение тел и приложенные к нему силы, то на основании законов можно абсолютно точно вычислить их положение для любого последующего момента времени. Эти же рассуждения можно применить ко всем объектам Вселенной и вообразить, следуя Лапласу, существование некоего «сверхсущества», которому были бы досконально известны как прошлое, так и будущее мироздания. Столь жесткая детерминированность сво-

дила бы все происходящее в мире к повторению прошлого, исключало бы возможность его эволюционного развития.

Все попытки механического объяснения свойств газов с самого начала столкнулись с принципиальными трудностями. Для расчета движения частиц газа потребовалось бы составить и решить фантастически большое число уравнений, поскольку даже в 1 см^3 газа содержится примерно 10^{19} частиц. Если же учитывать столкновения частиц между собой, то все эти уравнения оказываются взаимосвязанными. Задача приобретает такую невероятную математическую сложность, что ее решение не под силу даже самым современным ЭВМ. Однако дело не только и не столько в возможностях вычислительных машин. Существует и иная принципиально важная особенность явлений в газах: задание начальных положений и скоростей всех частиц газа абсолютно невозможно. Это можно представить хотя бы из того, что стенки сосуда, содержащего газ, имеют совершенно нерегулярный микрорельеф, и поэтому столкновения частиц газа со стенками будут всякий раз неконтролируемым образом менять характер их движения. Механическое описание систем, состоящих из громадного числа частиц, оказывается принципиально невозможным. Перед учеными появились задачи разработки математического аппарата, адекватно описывающего свойства коллективов частиц. Пионером создания нового метода, получившего в дальнейшем название статистического, стал Дж. К. Максвелл.

Работы Кренига и Клаузиуса не позволяли вычислить входящий в (33) квадрат скорости молекул v^2 . Бернулли, Крениг и Клаузиус полагали скорость всех молекул одинаковой и равной некоей постоянной величине. Но молекулы газа сталкиваются, обмениваются энергией и, следовательно, имеют самые различные скорости. Вместо невыполнимой задачи расчета скорости отдельных молекул Максвелл в 1860 г. указал на принципиально иной путь расчета средних величин, характеризующих состояние газа. Он предложил распределить все молекулы по группам в соответствии с их скоростью и дал метод расчета числа молекул в таких группах. Максвелл использует механическую модель газа, состоящего из большого числа твердых и совершенно упругих шаров, действующих друг на друга только во время столкновений. «Если свойства подобной системы тел соответствуют свойствам газов,— отмечает он,— то этим будет создана важная физическая аналогия, которая может привести к более правильному познанию свойств материи». (Большинство цитат этого параграфа, за особо оговариваемыми исключениями, взяты из [49, 50].)

Рассмотрим решение Максвелла. Если N — число частиц газа, то число частиц, компоненты скорости которых лежат в пределах от v_x до $v_x + dv_x$, v_y до $v_y + dv_y$, и от v_z до $v_z + dv_z$, равно соответственно $Nf(v_x)dv_x$, $Nf(v_y)dv_y$, и $Nf(v_z)dv_z$. Функция $f(v_i)$,

имеющая смысл распределения частиц по компонентам скорости, еще подлежит определению. Для нахождения ее явного вида Максвелл предполагает статистическую независимость компонент скоростей, так как «все они находятся под прямыми углами друг к другу и существование скорости v_x никак не должно влиять на существование скоростей v_y и v_z ». Тогда число частиц в единице объема (рассматривается пространство скоростей) равно $Nf(v_x)f(v_y)f(v_z)$ и зависит лишь от расстояния до начала координат, т. е. от $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$. Таким образом, Максвелл пришел

к уравнению $f(v_x)f(v_y)f(v_z) = f\left(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2\right)$, решением которого является функция

$$f(v_i) = A \exp(-\beta v_i^2). \quad (41)$$

Константу A можно найти из условия нормировки

$$A \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\beta v_i^2) dv_i = A \sqrt{\frac{\pi}{\beta}} = 1.$$

Следовательно,

$$f(v_i) = \sqrt{\frac{\beta}{\pi}} \exp(-\beta v_i^2) \quad (42)$$

или

$$f(v) = \left(\frac{\beta}{\pi}\right)^{3/2} \exp(-\beta v^2). \quad (43)$$

Знание $f(v)$ позволяет вычислить средний квадрат скорости \bar{v}^2 :

$$\bar{v}^2 = \int_0^{\infty} v^2 f(v) 4\pi v^2 dv = \frac{3}{2\beta}. \quad (44)$$

Параметр β в явном виде можно найти воспользовавшись выражением (33):

$$p = \frac{Nm\bar{v}^2}{3V} = \frac{nm}{2\beta}.$$

Умножая обе части этого равенства на V_m , получаем

$$pV_m = \frac{nmV_m}{2\beta} \text{ или } RT = \frac{mN_A}{2\beta}; \quad \beta = \frac{mN_A}{2RT}. \quad (45)$$

Так как

$$p = \frac{1}{3} nm\bar{v}^2 = \frac{2}{3} n\bar{E}_x.$$

где \bar{E}_x — средняя кинетическая энергия частиц, то

$$\bar{E}_x = \frac{3}{2} \frac{p}{n} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T. \quad (46)$$

Так как N_A и R являются постоянными величинами, то

$$k = R/N_A \quad (47)$$

также постоянная величина, получившая затем название постоянной Больцмана.

Соотношение (46) вводит в физику представление о том, что макроскопический параметр — температура T газа — является мерой кинетического движения отдельных микрочастиц (атомов, молекул). С помощью постоянной Больцмана устанавливается связь между характеристиками двух различных миров — макро- и микромира:

$$\bar{E}_x = \frac{3}{2} kT. \quad (48)$$

Вполне осязаемая, легко измеримая температура дает нам наглядные представления о средней кинетической энергии движения невидимых существ — микрочастиц.

Однако до полного признания распределения Максвелла и вытекающих из него выводов было еще очень далеко. Предположение о статистической независимости компонент скоростей не было обосновано. Это сознавал и сам Максвелл, и в 1866 г. он опубликовал другой вывод распределения, в основу которого положено предположение о действии между молекулами сил отталкивания, пропорциональных r^{-5} , где r — расстояние между ними. Этот вывод был сразу отвергнут в связи с тем, что между молекулами действуют не только силы отталкивания, но и притяжения.

Значение идей Максвелла было совершенно исключительным. Они выявляли различие между механикой отдельных тел и механикой совокупности большого числа частиц. В больших коллективах действуют иные закономерности, статистические. Привлечение в физику основанных на представлениях теории вероятностей закономерностей не встретило поддержки у большинства ученых того времени. Казалось немыслимым, что допускающие известную неоднозначность вероятностные методы вообще применимы к науке о явлениях природы. Отчетливо видя трудности, стоящие на пути признания нового метода, Максвелл прозорливо указывал, что «возможно, благодаря применению этих пока еще малоизвестных и непривычных для нашего сознания методов будут достигнуты значительные результаты». Пока же распределение Максвелла нуждалось еще в строгом теоретическом обо-

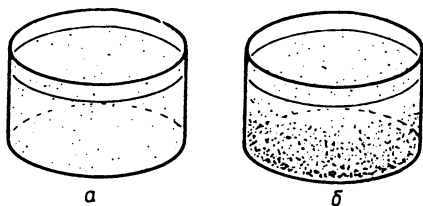


Рис. 9. Распределение молекул в случае отсутствия внешних сил (а) и в поле сил тяжести (б)

статистическая теория получает столь солидное обоснование, что превращается в подлинную науку о физических свойствах коллективов частиц. Сам Больдман справедливо считается одним из основоположников статистической физики.

Распределение (43) было получено Максвеллом для простейшего случая одноатомного идеального газа. В 1868 г. Больдман показывает, что и многоатомные газы в состоянии равновесия будут также описываться распределением Максвелла. В 1871 г. он обобщает и этот результат на случай газов, находящихся во внешнем потенциальном поле $U(x, y, z)$:

$$f(v_x, v_y, v_z, x, y, z) = \left(\frac{\beta}{\pi}\right)^{3/2} \exp \left[-\beta \left(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \right) + U(x, y, z) \right]. \quad (49)$$

При $U(x, y, z) = 0$ из (49) сразу же следует распределение Максвелла (43), которое можно рассматривать теперь как частный случай полученного Больдманом более общего распределения. Закон (49) получил в физике название распределения Максвелла—Больцмана.

Физические следствия, вытекающие из (43) и (49), принципиально различны. В отсутствие внешних сил различные положения частиц в пространстве равновероятны, и они с одинаковой средней плотностью заполняют весь предоставленный им объем (рис. 9, а). Если $U(x, y, z) \neq 0$, то средняя плотность молекул является функцией координат. В поле сил тяжести $U(h) = mgh$, где h — высота над поверхностью Земли, концентрация молекул уменьшается с высотой (рис. 9, б):

$$n_h = n_0 \exp(-\beta mgh), \quad (50)$$

где n_0 — концентрация молекул на уровне моря. Соотношение (50) называется барометрической формулой. Позднее с использованием этой формулы были впервые получены прямые экспериментальные доказательства реальности существования атомов, что говорит об исключительной важности полученных Больдманом результатов.

Работа 1872 г. «Дальнейшее изучение теплового равновесия газов» занимает совершенно исключительное место в научном

наследии Больцмана. В ней впервые дается строгий вывод распределения Максвелла, который до сих пор встречается без изменений на страницах многих учебников физики. В период, когда понятие функции распределения еще было предметом дискуссий среди физиков, Больцман ставит перед собой и решает задачу нахождения законов изменения функции распределения при переходе газа от первоначального неравновесного состояния к равновесному. Эти изменения обусловлены столкновениями молекул газа между собой:

$$\frac{df}{dt} = (\Delta f)_{ст.} \quad (51)$$

Так как в общем виде f является функцией $f(v_x, v_y, v_z, x, y, z, t)$, то

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial r} + F \frac{df}{dp}. \quad (52)$$

Каждое слагаемое в правой части (52) имеет четкий физический смысл: $\partial f / \partial t$ — скорость изменения функции распределения во времени, $v (\partial f / \partial r)$ — изменение f за счет перемещения частиц в пространстве; $F (\partial f / \partial p) = (F/m) (\partial f / \partial v)$ — изменение f под действием внешней силы F . В предположении статистической независимости молекул Больцман получает выражение и для интеграла столкновений $(\Delta f)_{ст.}$. Это сложное интегродифференциальное уравнение, полученное им для изменения функции распределения во времени, получило название кинетического уравнения Больцмана. Его значение не исчерпывается кинетикой идеального газа, оно широко используется в современной физике для изучения неравновесных систем и процессов переноса в них (электропроводность металлов и полупроводников, замедление нейтронов и др.). Больцман использует полученное им уравнение для решения принципиальных вопросов теории и доказывает, что в газе, предоставленном самому себе, произвольная функция распределения со временем будет приближаться к функции, описывающей равновесное состояние, т. е. к максвелловской. Тем самым он решил последнюю задачу, связанную с теоретическим обоснованием распределения, а именно его стационарность и единственность.

Больцман развивает высказанное в трудах Клаузиуса представление о том, что газовые молекулы нельзя рассматривать как отдельные материальные точки. У многоатомных молекул имеются еще вращение молекулы как целого и колебания составляющих ее атомов. Еще нет доказательств реальности существования атомов, но ученый уже видит физический образ молекулы. Он вводит в рассмотрение число степеней свободы молекул (термин был предложен позднее Максвеллом) как число «пере-

менных, требующихся для определения положения всех составных частей молекулы в пространстве и их положения друг относительно друга» и показывает, что из данных эксперимента по теплоемкости газов следует равномерное распределение энергии между различными степенями свободы. На каждую степень свободы приходится одна и та же энергия

$$E_i = \frac{1}{2} kT. \quad (53)$$

Приведенного материала вполне достаточно, чтобы дать негативную оценку попыткам сведения постоянной Больцмана к всего лишь переводному коэффициенту от энергетических единиц к тепловым. Да и физически это совершенно неверно. Соотношения (48) и (53) справедливы лишь при условии, что тело находится в тепловом равновесии. Если же состояние коллектива неравновесно (пучок частиц из ускорителя), то в этом случае средняя энергия частиц уже не может измеряться температурой. Возможные определения температуры отнюдь не исчерпываются этими соотношениями. Например, полость, заполненная излучением, имеет объемную плотность энергии Q , пропорциональную T^4 : $Q = \sigma T^4$. Здесь σ — постоянная Стефана—Больцмана, она определяется через другие фундаментальные константы. Определение температуры по этому закону является значительно более общим. Определения же (48) и (53) справедливы лишь для вещества, для тел, состоящих из молекул и атомов. Другие возможные определения температуры будут даны ниже.

Проблема теплоты. Физика и жизнь. Еще одной крупнейшей проблемой физики второй половины XIX в. была проблема сущности теплоты, процессов ее передачи и превращения. Так же как и в учении о строении материи по этому вопросу, были высказаны две противоположные точки зрения. Согласно одной из них, существует некое невесомое и неуничтожимое вещество—носитель теплоты, называемый теплородом. Этой гипотезе противостояла теория, связывающая теплоту с движением атомов и молекул.

Критерием правильности теорий всегда является опыт. В 1798 г. эксперименты англичанина Румфорда по сверлению орудийных стволов показали, что между механической энергией и теплотой существует связь. Эквивалентность теплоты и механической энергии позднее доказывают Ю. Р. Майер и Д. П. Джоуль. Термохимическая калория, согласно современным данным, равна 4,184 Дж. Опыты Джоуля убедительно показали, что в различных физических процессах сохраняется не количество теплорода как особого вещества, а количество теплоты. В 1847 г. Г. Гельмгольц дал окончательную формулировку фундаментального, охватывающего буквально все области естествознания закона сохранения и превращения энергии. В учение о тепловых явлениях он

вошел под названием первого начала термодинамики (термодинамика—наука о тепловых явлениях, в которой не учитывается внутреннее строение тел). Р. Клаузиус дал простую математическую формулировку первого начала: энергия, подводимая к газам в форме теплоты Q , расходуется на совершение газом работы над внешними телами A и изменение внутренней энергии тела ΔU :

$$Q = A + \Delta U. \quad (54)$$

Внутренняя же энергия, по Клаузиусу, равна суммарной энергии движения молекул и их взаимодействия между собой.

После крушения теории теплорода теплота окончательно рассматривается как энергия движения составляющих тело материальных частиц (атомов, молекул). Но между теплотой и механической энергией вскоре обнаружили принципиальные отличия. Например, при торможении автомобиля его тормозные колодки нагреваются, но обратный процесс абсолютно невозможен — сколько бы мы ни нагревали колодки, автомобиль все равно останется на месте. Закон сохранения и превращения энергии, раскрывая количественную сторону превращений энергии, ничего не говорит о принципиальных качественных отличиях между ее различными формами. Можно указать на другие принципиальные особенности тепловых явлений. Одним из самых очевидных наблюдений является то, что при различных видах работы часть энергии выделяется в виде теплоты. В природе существует тенденция к необратимому превращению различных видов энергии в теплоту, поскольку обратное превращение тепла в работу, за исключением изотермических процессов, невозможно. Другой, не менее очевидной особенностью тепловых явлений является то, что нагретые тела всегда стремятся прийти в равновесие с окружающей средой. Но и в этих процессах передачи теплоты существует односторонность, которую Р. Клаузиус сформулировал в качестве тепловой аксиомы: «Теплота не может сама собой переходить от тела холодного к телу горячему». Значение этого положения оказалось настолько важным, что его стали рассматривать как одну из формулировок второго начала термодинамики. Л. Больцман писал: «Наряду с общим принципом (законом сохранения и превращения энергии. — О. С.) механическая теория тепла установила второй, малоутешительным образом ограничивающий первый, так называемый второй закон механической теории тепла. Это положение формулируется следующим образом: работа может без всяких ограничений превращаться в теплоту; обратное превращение тепла в работу или совсем невозможно, или возможно лишь отчасти. Если и в этой формулировке второй принцип является неприятным дополнением к первому, то благодаря своим последствиям он становится гораздо фатальнее».

Простые соображения убедят нас в справедливости этого вывода. Тенденция к превращению различных видов энергии в теплоту, невозможность полного обратного превращения тепла в полезную работу, установление теплового равновесия между нагретыми телами — все это в совокупности приводит к представлению о том, что в некотором отдаленном будущем все виды энергии обратятся в теплоту, которая равномерно распределится между объектами. Наступит состояние «тепловой смерти», когда, несмотря на обилие энергии, нельзя заставить ее «работать». Изучение тепловых явлений привело к выводам, совпадающим с религиозными представлениями о «конце света». Физические исследования сомкнулись с философией, вопрос о тепловой смерти перестал быть только физической проблемой, он стал ареной острейшей борьбы мировоззрений. В научных исследованиях представители идеалистической философии увидели возможность опровержения основных положений материалистической философии, вплоть до «научного доказательства» существования бога. Приведем слова папы Пия XII: «Закон, открытый Р. Клаузиусом, дал нам уверенность в том, что в замкнутой материальной системе в конце концов процессы в макроскопическом масштабе когда-то прекратятся. Эта печальная необходимость свидетельствует о существовании Необходимого Существа».

Гипотеза тепловой смерти встретила энергичные возражения со стороны передовых физиков и философов-материалистов. К ней в полной мере можно отнести слова Ф. Энгельса: «Проблема не решена, а только поставлена, и это преподносится как решение» [55]. Полное понимание сущности второго начала термодинамики и вместе с этим решение проблемы тепловой смерти пришло на пути глубокого проникновения в сущность понятия теплоты, на пути уточнения основ и развития молекулярно-кинетической теории. И снова на переднем крае физики Л. Больцман. Его исследование сущности второго начала привело к глубочайшей революционной ломке взглядов на характер физических закономерностей.

Энтропия. Необратимость тепловых явлений логически противоречит попыткам их объяснения на основе корпускулярной теории, поскольку законы механики полностью обратимы. Следовательно, или не является правильным это объяснение, или не верен сам второй закон термодинамики. В первом случае возникшее противоречие можно связать с гипотетичностью существования атомов и усматривать в этом доказательство несправедливости атомной гипотезы. Во втором случае можно оспаривать справедливость второго начала, что безуспешно пытались делать некоторые ученые. Но был и третий путь — путь глубокого анализа сущности различий между обратимыми и необратимыми процессами.

Анализ особенностей тепловых процессов, выполненный Р. Клаузиусом, был далеко не очевиден, но логически безупречен. Обратив внимание на то, что формулировка второго закона термодинамики носит качественный характер, он задался целью найти его математическую форму. Он считал необходимым связать второй закон с некоторой характерной физической величиной, аналогично тому, как первый закон оказался связанным с существованием энергии, явился законом ее сохранения и превращения. Максимальный КПД идеальной тепловой машины, как впервые показал С. Карно, определяется соотношением

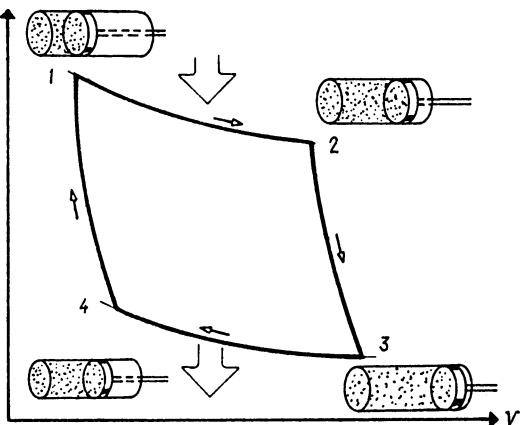


Рис. 10. Цикл работы идеальной тепловой машины

где T_1 — температура холодильника, T_2 — температура нагревателя. КПД можно записать также в виде

$$\eta = 1 - T_1/T_2, \quad (55)$$

Здесь Q_2 — теплота, переданная от нагревателя к рабочему телу; Q_1 — теплота, отданная холодильнику. Из (55) и (56) следует, что

$$\eta = 1 - Q_1/Q_2. \quad (56)$$

Из (55) и (56) следует, что

$$Q_1/T_1 = Q_2/T_2. \quad (57)$$

Воспользуемся этим результатом для анализа цикла работы идеальной тепловой машины (рис. 10). На участке 1-2 газ расширяется и производит при этом работу A . На этой стадии нагреватель отдает, а газ получает теплоту Q_2 , равную работе расширения газа. Сам газ при этом не нагревается и не остывает (изотермический процесс). Расширение газа происходит и на стадии 2-3, но работа при этом производится за счет уменьшения внутренней энергии газа, его охлаждения от температуры нагревателя T_2 до температуры холодильника T_1 . Следующим этапом

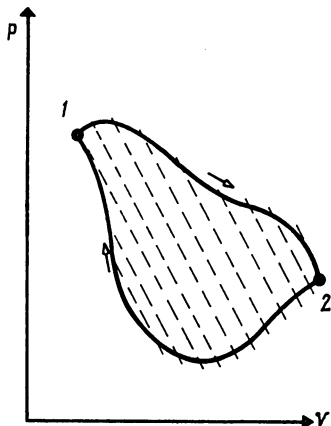


Рис. 11. Произвольный циклический процесс

является изотермическое сжатие газа — стадия 3-4. При этом сжатии совершается работа но вследствие изотермичности процесса она полностью переходит в теплоту Q_1 , передаваемую

холодильнику. Цикл работы машины заканчивается сжатием газа до исходного объема V_1 , затраченная при этом работа идет на нагревание газа до исходной температуры T_2 , т. е. на увеличение внутренней энергии газа.

Из (57) следует, что отношение Q/T одинаково для обеих изотерм цикла. Рассмотрим теперь произвольный циклический процесс (рис. 11), верхнюю и нижнюю половины которого можно рассматривать как два возможных, но различных пути перехода газа из состояния 1 в состояние 2. Рассечем этот произвольный цикл сетью адиабат (по определению, адиабатическими называются процессы, при которых газ не отдает и не получает теплоты). Каждый малый отрезок цикла между адиабатами можно в первом приближении рассматривать как изотермический и применять к нему соотношение (57). Тогда

$$\frac{\Delta Q_1}{T_1} = \frac{\Delta Q'_1}{T'_1}; \quad \frac{\Delta Q_2}{T_2} = \frac{\Delta Q'_2}{T'_2} \text{ и т. д.,}$$

где нештрихованные величины ΔQ и T относятся к верхней половине процесса, штрихованные — к нижней. Просуммировав эти равенства по всем отрезкам, получим:

$$\frac{\Delta Q_2}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} + \dots = \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i}; \quad \frac{\Delta Q'_1}{T'_1} + \frac{\Delta Q'_2}{T'_2} + \dots = \sum_i \frac{\Delta Q'_i}{T'_i}.$$

Очевидно, что

$$\sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} = \sum_i \frac{\Delta Q'_i}{T'_i}. \quad (58)$$

Полученный результат весьма интересен. Для произвольных,

но обратимых процессов изменение величины $\Delta Q/T$ при возвращении системы в исходное положение равно нулю:

$$\sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} - \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T_i} = \sum_1^2 \frac{\Delta Q}{T} - \sum_2^1 \frac{\Delta Q}{T} = 0. \quad (59)$$

При этом можно записать, что

$$\sum_1^2 \frac{\Delta Q}{T} = S_2 - S_1, \quad (60)$$

т. е. утверждать, что состояния 1, 2 (или любое другое) характеризуются значением некоторой величины S_1, S_2 , подобно тому, как оно имеет определенную энергию E_1, E_2 . Эту новую характеристику состояния Клаузиус назвал энтропией (от греч. «τροπή» — превращение). Для обратимых процессов имеет место закон сохранения энтропии:

$$\Delta S = 0. \quad (61)$$

Полностью обратимые процессы являются лишь физической идеализацией, поскольку в любых реальных процессах всегда существуют необратимые потери энергии. Это нагревание трущихся поверхностей, выхлоп части нагретого пара в окружающее пространство и т. п. Поскольку в таких процессах окружающая среда может считаться бесконечной, ее температура при передаче ей теплоты не изменяется, поэтому для необратимых процессов

$$\Delta S > 0. \quad (62)$$

Изменение энтропии можно рассматривать как меру необратимости совершившегося в системе процесса. Объединяя (61) и (62), запишем:

$$\Delta S \geq 0 \text{ или } dS = \int \frac{dQ}{T} \geq 0, \quad (63)$$

где знак равенства относится к обратимым процессам, знак неравенства — к необратимым. Именно так выглядит в формулировке Клаузиуса второй закон термодинамики.

Судьба новой физической величины — энтропии, введенной Клаузиусом в 1854 г., — оказалась удивительной. Физический смысл S долгое время оставался непонятным. В отличие от других параметров энтропия не могла быть непосредственно измерена, она определялась лишь расчетным путем. Некоторым физикам она казалась искусственной величиной, введенной лишь для математического анализа и поэтому лишенной физического содержания. Не менее существенной гранью проблемы энтропии являлась задача осмысления и логической увязки обратимости

механических процессов и необратимости тепловых. Решение этой проблемы принадлежит Л. Больцману.

Энтропия и характер физических закономерностей (исследования Л. Больцмана). Первую попытку теоретического доказательства второго начала термодинамики Больцман предпринял в 1866 г. Следует отдать должное пониманию молодым ученым (ему в это время было 22 года) актуальных задач физики. Само название работы «О механическом смысле второго начала термодинамики» говорит о многом. Больцман действует пока еще полностью в духе своего времени, поскольку механика и механистическое мировоззрение достигли в то время наибольшего расцвета. Однако анализ требовал построения механической модели нагретого тела, и ученый представляет последнее в виде системы материальных частиц — атомов, т. е. опирается на еще не доказанную экспериментально гипотезу. Характер теплового движения он представляет следующим образом. Атомы описывают замкнутые траектории, причем периоды их теплового движения по ним практически одинаковы. При медленном нагревании атомы переходят с одной орбиты на близко к ней расположенную другую. Несмотря на искусственность этих предположений, Больцману удалось теоретически доказать соотношение Клаузиуса для обратимых процессов (61). Однако расширить доказательство на необратимые процессы ему не удалось. В этой же работе Больцман намечает пути усовершенствования исследования — это программа более строгого рассмотрения процессов установления равновесия в газах. Естественно, что это приводит его к необходимости анализа и дальнейшей разработки максвелловского распределения, о чем говорилось выше. Можно сказать, что весь цикл работ Больцмана по развитию молекулярно-кинетической теории газов был для него все же необходимым подготовительным этапом для следующей попытки решения сложнейшей проблемы второго начала термодинамики.

Больцман отчетливо видит трудности анализа процессов в газах. Вследствие огромного числа молекул и их столкновений между собой наблюдению доступны лишь средние значения параметров, характеризующих систему в целом. Он устанавливает, что основные законы газов не могут опираться лишь на одну механику. «Проблемы механической теории тепла есть проблемы исчисления вероятностей», — со всей определенностью пишет Больцман. Но переход от строго динамических, описываемых уравнениями Ньютона закономерностей к статистическим есть качественный скачок, поскольку от рассчитываемых со всей строгостью однозначных характеристик мы переходим к допускающему известную неоднозначность вероятностному описанию. Это было революцией в науке. Но Больцман уверен в правильности такого подхода и с этих позиций вновь возвращается к проблеме доказательства второго начала. Он вводит

в рассмотрение функционал $E \sim f \ln f$ и строго доказывает, что $dE/dt \leq 0$. Это означает, что величина E со временем может только уменьшаться или, достигнув предельного значения, оставаться постоянной. Последний случай соответствует установлению в газе равновесия. Величина E определяет таким образом меру отклонения газа от положения равновесия.

Свойство функции E изменяться лишь в одном направлении наводило на мысль о существовании глубокой связи между ее односторонним изменением и возрастанием энтропии S при приближении системы к равновесию. Больцман выполнил прямые расчеты E для равновесного газа и показал, что с точностью до обратного знака значение E равно значению энтропии S . «Величина E имеет прямое отношение ко второму началу термодинамики,— пишет он. — ... Это есть аналитическое доказательство второго начала термодинамики, построенное на совсем ином пути, чем это до сих пор было».

В 1876 г. Й. Лошмидт выступил с возражениями против развитой Больцманом теории об одностороннем изменении E -функции (в дальнейшем ее стали называть H -функцией). Суть его замечаний сводилась к следующему. В первоначально неравновесной системе столкновения частиц приводят к тому, что с течением времени в ней установится равновесное максвелловское распределение частиц по скоростям. При этом, по Больцману, H -функция будет монотонно убывать. Если после достижения равновесия изменить все скорости частиц на противоположные, то эволюция системы будет происходить в сторону удаления ее от равновесия, причем H -функция будет возрастать. Мысленный парадокс Лошмидта приводил к тому, что у H -функции имеется столько же возможностей возрастать, сколько и убывать. Это логически противоречит тому, что механические уравнения описывают обратимые процессы, в то время как результаты Больцмана описывают необратимые процессы.

Отвечая Лошмидту, Больцман подчеркивает, что H -теорема вовсе не утверждает того, что значение H должно убывать при любых изменениях в системе. Ее уменьшение является наиболее вероятным: «Второе начало является законом вероятностным, и поэтому его вывод посредством уравнений механики невозможен».

Вероятностная трактовка энтропии. Вершиной творчества Больцмана является полученная им в 1877 г. вероятностная интерпретация энтропии. Генеральная идея решения — определение наиболее вероятного с термодинамической точки зрения состояния системы материальных точек. Больцман вводит в рассмотрение новую для физики величину — термодинамическую вероятность состояния системы. Для этого он располагает все частицы по группам, внутри которых они имеют одинаковую энергию. Перестановки частиц внутри группы не меняют термо-

динамического состояния системы, поэтому при определении термодинамической вероятности Больцман исключает их из полного числа перестановок в системе. Последнее, очевидно, равно $N!$, где N — число частиц в системе. Обозначая n_1, n_2, \dots — числа частиц в группах с энергиями $\epsilon, 2\epsilon$ и т. д. (ϵ — некоторая малая порция энергии), Больцман записывает термодинамическую вероятность системы в виде

$$W = \frac{N!}{n_1! n_2!} \quad (64)$$

Максимум W соответствует наиболее вероятному состоянию системы. Поскольку $n_i \sim f(\epsilon_i)$, где $f(\epsilon_i)$ — функция распределения частиц по энергиям, после преобразований Больцман получает, что $\ln W$ пропорционален $(-H)$ или

$$S \sim \ln W. \quad (65)$$

Этот результат имеет громадное физическое значение. Переход системы из неравновесного в равновесное состояние сопровождается возрастанием энтропии. Позднее М. Планк установил, что коэффициент пропорциональности в (65) равен k , и формула Больцмана приобрела свой окончательный вид:

$$S = k \ln W. \quad (66)$$

Динамические и статистические закономерности. Соотношение (66) показывает, что второй закон термодинамики теряет свою абсолютную достоверность, он переводится в ранг вероятностных законов. Учеными далеко не сразу была признана объективная необходимость существования вероятностных, статистических законов. Их пытались рассматривать как синтез отдельных динамических законов, которые не в силах охватить наше сознание из-за их множества. Вероятность рассматривалась как мера нашего незнания действительного положения вещей. Многие считали, что динамические законы являются первичными, а статистические — вторичными, производными от механических. Возможно, что одна из причин достаточно долгой живучести этих взглядов была в том, что сами статистические законы были впервые получены на основе динамических уравнений механики. Но особенно примечательным является то, что крушение механического миропонимания было подготовлено его же успехами — такова объективная диалектика процесса познания. Вероятностное описание вполне объективно, в нем выражается объективно существующая случайность. Не признающая категорий необратимости и случайности классическая механика является наукой о пассивном мире, ее недостаточно для понимания природы.

Существование статистических законов говорит о том, что системы, состоящие из большого числа индивидуальных частиц, «живут» своей особой жизнью, характеризуются новыми параметрами, аналогов которых нет у отдельной частицы. Связь между параметрами системы в целом носит однонаправленный характер, она определяет только будущее системы, а не ее прошлое. Направленное течение времени связано с необратимыми процессами.

Идеи Больцмана намного опережали свое время. Сведение статистических закономерностей к динамическим предопределяло бы повторяемость, неизменность одних и тех же видов движения, форм жизни. Случайности же, допускаемые природой, означают развитие, эволюцию. Больцман не случайно называл XIX век веком Дарвина. В биологии законы случая являются основными, наследственная изменчивость (случайные отклонения характеристик организма от наиболее часто встречающихся, средних) не затухает, если наследуемые признаки обеспечивают организму лучшие условия существования и размножения. Физическая система также эволюционирует в сторону максимума энтропии.

Флуктуации. После достижения равновесия в изолированной системе ее энтропия, считает Больцман, может незначительно отклоняться — флуктуировать — от своего максимального значения. Опираясь на флуктуационные представления, он предлагает первое научное решение проблемы тепловой смерти Вселенной: «Если представить себе Вселенную как механическую систему, состоящую из громадного числа составных частей и с громадной продолжительностью существования, так что размеры нашей системы неподвижных звезд ничтожны по сравнению с протяженностью Вселенной, и времена, которые мы называем эрами, ничтожны по сравнению с длительностью ее существования. Тогда во Вселенной, которая в общем везде находится в тепловом равновесии, т. е. мертва, то тут, то там должны существовать сравнительно небольшие области протяженности звездного пространства (назовем их единичными мирами), которые в течение сравнительно короткого времени эры значительно отклоняются от теплового равновесия... Если предположить, что Вселенная достаточно велика, то вероятность нахождения ее относительно малой части в любом заданном состоянии (удаленном, однако, от состояния теплового равновесия) может быть сколь угодно велика... Этот метод кажется мне единственным, при котором можно представить себе второе начало, тепловую смерть каждого единичного мира, без одностороннего изменения всей Вселенной от определенного начала к заключительному конечному состоянию».

Грандиозность нарисованной Больцманом картины впечатляет. Решение проблемы тепловой смерти Вселенной как целого — в теории возникновения, эволюции и смерти отдельных

миров, частей Вселенной. Одни миры погибают, другие — возникают, жизнь не прекращается и не может прекратиться. Теория Больцмана впервые выразила языком физики высказанные раньше идеи великого философа-материалиста Ф. Энгельса о вечном круговороте материи: «Но как бы часто и как бы безжалостно ни совершался во времени и пространстве этот круговорот... у нас есть уверенность в том, что материя во всех своих превращениях остается вечно одной и той же, что ни один из ее атрибутов никогда не может быть утрачен и что поэтому с той же самой железной необходимостью, с которой она когда-нибудь истребит на Земле свой высший цвет — мыслящий дух, она должна будет снова породить его в другом месте и в другое время» [55]. Когда сравниваешь высказывания Ф. Энгельса и Л. Больцмана, поражаешься тому, как наука в своем развитии неизбежно приходит к выводам, задолго до этого сделанным философами-материалистами.

Дискуссии вокруг флуктуационной гипотезы Больцмана продолжаются и в наши дни, что само по себе доказывает ее плодотворность. Сам же ученый скромно писал, что «никто, конечно, не станет считать подобные умозрения... высшей целью науки», но тем не менее относил их к «очарованию фантазии о Вселенной, не прибегая к пошлой гипотезе тепловой смерти». Со временем обнаружились слабые места гипотезы, заключающиеся в том, что вероятность такой гигантской флуктуации, как нахождение видимой части Вселенной в неравновесном состоянии, ничтожно мала. Выдвинуты другие теории, учитывающие гравитационное взаимодействие между объектами Вселенной, но, как справедливо замечает Г. Я. Мякишев, «теорию пульсирующей Вселенной можно рассматривать как современный аналог флуктуационной гипотезы Больцмана. В ней вместо флуктуационного механизма, возвращающего Вселенную к жизни, действует более глубокий механизм гравитационных взаимодействий современной теории поля. Общие же выводы о невозможности тепловой смерти Вселенной носят сходный характер» [56].

Атомы существуют! Первые решающие доказательства реальности существования атомов были получены группой французских ученых под руководством Ж. Перрена в экспериментах по исследованию броуновского движения (1908). Теоретическая база для этих исследований была разработана Л. Больцманом (имеется в виду его барометрическая формула (50)) и позднее А. Эйнштейном. В этих же опытах было измерено и значение постоянной Авогадро N_A .

Броуновское движение, открытое в 1827 г. английским ботаником Р. Броуном, является одним из самых интересных явлений природы. Наблюдая в микроскоп взвесь цветочной пыльцы в воде, Броун заметил, что мельчайшие частицы пыльцы находятся в непрерывном движении. Траектории частиц были весьма причу-

длины (см. рис. 8), их движение имело ярко выраженный хаотический характер. Причины этого движения долгое время не были ясны, но затем было установлено, что оно возникает в результате столкновений молекул жидкости с взвешенными в ней малыми частицами. Это объяснение носило принципиальный характер, ибо давало в руки исследователям первое наглядное свидетельство теплового движения частиц материи. Вырисовывались перспективы экспериментального доказательства реальности существования молекул (атомов). Задача состояла теперь в разработке количественной теории броуновского движения.

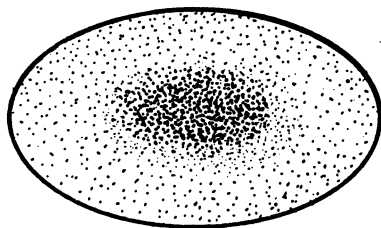


Рис. 12. Положение концов смещенных броуновских частиц

Ее создал в 1905 г. А. Эйнштейн. Он выбрал в качестве основной характеристики движения смещение броуновских частиц и, полагая, что их движение полностью хаотично, получил, что среднее квадратичное смещение частиц

$$\bar{x}^2 = \frac{Rt}{3\pi\eta r N_A} = \frac{kT}{3\pi\eta r} t. \quad (67)$$

Здесь t — время, r — радиус броуновской частицы, η — коэффициент вязкости жидкости, остальные параметры известны. Все величины, входящие в (67), могут быть определены экспериментально, поэтому анализ движения броуновских частиц мог дать значения N_A и k . Совпадение этих значений с данными измерений по другим методикам явилось бы веским аргументом в пользу справедливости молекулярно-кинетической теории.

Идею проверки постулата Эйнштейна о полной хаотичности движения броуновских частиц предложил французский физик П. Ланжевен. Для этого необходимо расположить в одной точке начала смещений броуновских частиц. Если их движение подчиняется законам случайности, то концы смещений должны располагаться вокруг их общего центра так же, как располагаются при стрельбе вокруг центра мишени попадания пуль (рис. 12). Ж. Перрен выполнил эти исследования. Постулат Эйнштейна о справедливости применения статистических представлений к анализу движения броуновских частиц получил полное подтверждение. Теперь можно было думать о постановке решающих опытов — *experimentum crucis*, непосредственно доказывающих реальность существования молекул.

Идея этих опытов Перрена кажется простой. Анализируя выводы молекулярно-кинетической теории, ученый заметил, что они относятся не только к молекулам жидкости, но и к самим

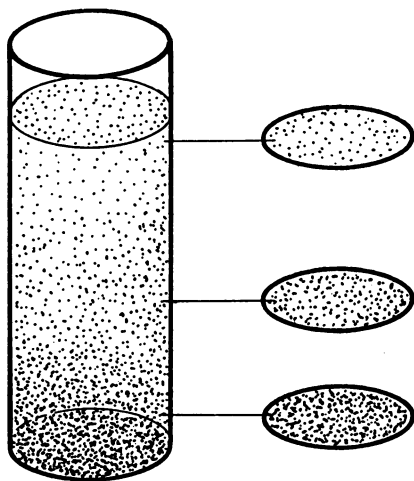


Рис. 13. К подсчету числа броуновских частиц в слоях, различающихся по высоте своего положения в жидкости

броуновским частицам, которые можно рассматривать как очень большие молекулы. Следовательно, к распределению броуновских частиц по высоте применима формула Больцмана (50) с заменой в ней массы молекул на массу броуновских частиц. Необходимо было проверить соответствие экспериментального распределения броуновских частиц по высоте теоретической формуле (50). Совпадение данных означало бы справедливость молекулярно-кинетической теории строения вещества, доказывало реальность существования молекул.

Эксперименты Перрена были весьма трудоемкими и требовали большой тщательности. В микроскоп можно было четко наблюдать уменьшение числа взвешенных частиц с высотой (рис. 13). Фокусируя микроскоп на отдельные слои взвеси, можно было сфотографировать, а затем подсчитать число частиц в каждом слое. Для пяти слоев, отстоящих друг от друга на 5, 35, 65 и 95 мкм, подсчет дал следующие цифры: 100, 47, 22, 6 и 12. Теоретически предсказанные значения были 100, 46, 23, 11 и 1 [50]. В нижних слоях взвеси, где число броуновских частиц велико, совпадение теории с экспериментом было полным. Расхождение в числах для верхних слоев объясняется тем, что по законам теории вероятностей именно в области малых чисел отклонения числа частиц от средних значений (флуктуации) в соответствии со статистикой могут быть значительными. Перрен пишет, что «он испытал сильное волнение, когда после первых попыток... получил те же числа, к которым кинетическая теория приходила совершенно другим путем. Теперь становится весьма трудным отрицать объективную реальность молекул. Атомная теория торжествует».

После этих экспериментов резко меняется отношение ученых ко всему созданному Больцманом. Его труды объявляются клас-

сическими, а созданная им и другими исследователями кинетическая теория газов становится *кинетической теорией материи*. Атомистическая теория побеждает окончательно. Ее значение для науки весьма выразительно охарактеризовал известный американский ученый Р. Фейнман: «Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались уничтоженными и к грядущим поколениям живых существ перешла только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию. Я считаю, что это атомная гипотеза» [57].

Флуктуационные методы определения постоянной Больцмана k . Наличие флуктуаций в ряде случаев устанавливает границы точности измерений тех или иных параметров и в то же время может быть использовано для экспериментального определения постоянной k . Рассмотрим несколько примеров.

Крутильные весы (см. рис. 1) имеют подвижную систему — зеркальце 3, подвешенное на тонкой кварцевой нити. Естественно, что чем меньше масса зеркальца и чем лучше упругие свойства нити, тем меньшие отклонения можно регистрировать. Но сама подвижная система подвергается ударам со стороны молекул воздуха. Число этих соударений хаотически меняется во времени, поэтому вся система подвержена слабым беспорядочным колебаниям. Средняя энергия этих колебаний равна энергии, приходящейся на одну степень свободы движения молекул газа:

$$\bar{E}_{\text{холос}} = \frac{1}{2} kT.$$

С другой стороны, средняя потенциальная энергия колебаний равна

$$\bar{E}_{\text{пот}} = \frac{1}{2} D \bar{\varphi}^2,$$

или

$$\bar{\varphi}^2 = kT/D.$$

Здесь $\bar{\varphi}^2$ — среднее значение квадрата угла отклонения; D — модуль кручения нити, определяемый ее длиной, поперечным сечением и ее упругой постоянной (все эти величины известны). Расчеты показывают, что при комнатной температуре и длине плеча 10 м флуктуационные колебания системы будут иметь размах $\sim 0,5$ см. Следовательно, на измерительной шкале нет смысла делать деления, меньшие 1 см. Величину $\bar{\varphi}^2$ можно выразить через собственную частоту крутильных колебаний системы ν_0 и ее момент инерции I :

$$\bar{\varphi}^2 = \frac{kT}{(2\pi\nu_0)^2 I}.$$

Таким образом, измеряя флуктуационные колебания подвижной системы, можно определить значение постоянной Больцмана k .

Вторым примером подобного рода является наличие флуктуационной ЭДС в цепи, лишенной источников напряжения. Эти флуктуации обязаны тепловому хаотическому движению электронов в проводниках. ЭДС определяется по формуле Х. Найквиста:

$$\varepsilon(\nu) = 4kTR(\nu),$$

где ν — частота, $R(\nu)$ — сопротивление цепи. Наличие электрических флуктуаций является одним из неустранимых источников шума в каналах связи и определяет предел чувствительности электроизмерительных приборов.

В § 2 уже говорилось о том, что рассеяние света на флуктуациях плотности воздуха в верхних слоях атмосферы определяет голубой цвет неба. Можно выполнить некоторые оценки этого явления. Средняя длина света (видимый диапазон) равна примерно $\lambda \approx 0,5 \cdot 10^{-4}$ см. Объем $\lambda^3 \approx 10^{-13}$ см³. В этом объеме содержится примерно $2 \cdot 10^6$ молекул. Относительная флуктуация пропорциональна $1/\sqrt{N}$, т. е. $\approx 0,001$. Таким образом, реально рассеивают свет флуктуации плотности в гораздо меньших объемах. Рассеиваемая энергия обратно пропорциональна λ^4 , благодаря чему синий цвет рассеивается сильнее, чем красный, что и объясняет цвет неба.

Заканчивая разговор о постоянной Больцмана, хочется еще раз подчеркнуть ее фундаментальное значение в науке. Она содержит в себе громадные пласты физики—атомистика и молекулярно-кинетическая теория строения вещества, статистическая теория и сущность тепловых процессов. Исследование энтропии «открыло путь от технологии (тепловая машина) к космологии (направление времени и судьба Вселенной)» [58]. Изучение необратимости тепловых процессов раскрыло природу физической эволюции, сконцентрировавшейся в замечательной формуле Больцмана $S = k \ln W$. Следует подчеркнуть, что положение, согласно которому замкнутая система рано или поздно придет в состояние термодинамического равновесия, справедливо лишь для изолированных систем и систем, находящихся в стационарных внешних условиях. В нашей Вселенной непрерывно происходят процессы, результатом которых является изменение ее пространственных свойств. Нестационарность Вселенной неизбежно приводит к отсутствию в ней статистического равновесия. «Тепловая смерть» не грозит Вселенной, ее судьбы определяют иные факторы, обусловленные гравитацией.

4. «ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ» ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД

Осторожно—определения! Постоянная $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл является, пожалуй, одной из наиболее привычных для большинства учащихся. Однако можно с уверенностью сказать, что это от-

нюдь не означает глубокого понимания ими физической сущности этой фундаментальной постоянной. Справедливо пишут авторы [2], что понятия «электрический заряд» и «электромагнитное поле» относятся к числу тех, которые «сначала не понимают, потом привыкают и используют, не отдавая себе отчета во всей глубине содержания». Эти трудности не есть результат недостаточного внимания к данному вопросу, они имеют под собой весьма солидные основания, лежащие в самой сути проблемы. Свойство материи организовываться в обладающие электрическим зарядом частицы (электроны, протоны и т. п.) является одним из наиболее «интимных» свойств природы, не раскрытых еще до конца современной физикой. Это одна из грандиозных задач науки. Попробуем внимательно разобраться в том, что же известно к настоящему времени об этой фундаментальной физической константе — элементарном электрическом заряде, вдохновляясь великой истиной Гете:

В том, что известно, проку нет,
Одно неведомое нужно.

Фауст

Начнем с анализа определений. При этом мы сразу же попадаем в очень трудное положение. В некоторых руководствах определения понятия «электрический заряд» попросту нет, другие определяют его через другие понятия, которые сами малоопределенны. Формулировки типа «тело, находящееся в состоянии электризации, обладает, как говорят, зарядом, служащим мерой наэлектризованности тела» сравнительно недавно встречались на страницах учебников физики для университетов. Вряд ли улучшает положение с пониманием сущности постоянной e содержащееся в [11] определение: «Элементарный электрический заряд — наименьший электрический заряд, положительный или отрицательный, равный величине заряда электрона». Оно порождает массу вопросов типа: что такое электрический заряд? почему существует минимальная порция заряда — элементарный электрический заряд? Ниже мы увидим, что приравнивать элементарный электрический заряд заряду электрона следует с известной оговоркой.

Трудности выработки определения обусловлены тем, что понятия «электрический заряд», «элементарный электрический заряд», «электромагнитное поле» сами по себе являются первичными, фундаментальными. Заметим, что все, что относится к электромагнитному полю, хорошо изучено, и в этом смысле поле является более простым физическим объектом. В вопросе о строении заряда имеются многочисленные трудности. Определение «первичных» понятий — дело весьма сложное, и поэтому следует с большой осторожностью относиться к попыткам подобного рода.

Когда мы говорим, что данное тело электрически заряжено, то это означает, что оно способно к определенного рода взаимодействию — электромагнитному. Сам же электрический заряд следует рассматривать как количественную меру этой способности. Вспомним в связи с этим о гравитационной массе тел (см. § 1) — она определяет способность тел к гравитационному взаимодействию, причем величина последнего прямо зависит от $m_{гр}$. Электрический заряд по сути является столь же важной характеристикой физических объектов, определяющей их поведение в окружающем мире*.

Эти предварительные замечания показывают громадную наукоемкость понятия «элементарный электрический заряд». Полезно поэтому хотя бы коротко ознакомиться с тем, как пришла физика к этому понятию.

Первые наблюдения. Еще за 600 лет до н. э. Фалес из Милета описал притяжение легких тел (пушинки, клочки бумаги) натертым янтарем. Этим наблюдением на протяжении более двух тысячелетий ограничивались все сведения об этом новом физическом явлении. Термин «электричество» впервые появился только в 1600 г. в книге В. Гильберта. По его определению, «электрические тела — те, которые притягиваются таким же образом, как янтарь» (янтарь в переводе на древнегреческий язык означает электрон). Гильберт обнаружил электризацию стеклянной палочки при натирании ее шелком. Характерным для исследований того времени было то, что, зная о существовании у ряда тел магнитных свойств, Гильберт не видел связи между электрическими и магнитными явлениями. Еще долгое время после него они исследовались как совершенно независимые друг от друга.

Работы, в которых качественно описывались те или иные электрические явления, появлялись вначале очень скупо. В 1698 г. английский ученый Вааль описал появление искры при электризации янтаря. Поскольку это сопровождалось треском, он предположил, что искра представляет собой миниатюрное подобие молнии и грома. В 1729 г. С. Грэй установил разделение тел на проводники электрического тока и изоляторы. Француз Ш. Дюфэ обнаружил, что сургуч, натертый мехом, также электризуется, но противоположно электризации стеклянной палочки. Он установил отталкивание однородно заряженных тел и притяжение тел, заряженных разнородным электричеством, и ввел в связи с этим понятия двух видов электричества — стеклянного и смоляного.

В 1745 г. американский ученый Б. Франклин начал свои опы-

*Заметим, что отсутствие электрического заряда у некоторых элементарных частиц не означает их неспособности к электромагнитным взаимодействиям. Например, нейтрон обладает магнитным моментом и способен испытывать воздействие со стороны электромагнитных полей.

ты по электрическим разрядам. Его исследования привели к ряду выдающихся результатов. В 1750 г. он изобретает молниеотвод, в 1753 г. в опытах со змеем доказывает электрическую природу молнии и тождественность земного и атмосферного электричества. Перу Б. Франклина принадлежит также первая работа (1747), в которой была предпринята попытка теоретического объяснения электрических явлений. Он впервые вводит понятия положительного и отрицательного электричества и обозначения «+» и «-». Обнаружив, что при трении друг о друга стекло и шелк электризуются по-разному, Франклин сделал вывод о том, что положительные и отрицательные заряды появляются одновременно и в равных количествах, т. е., по существу, сформулировал закон сохранения электрического заряда. Для объяснения электризации он предположил, что составной частью всех тел является некая «электрическая жидкость». Если в теле содержится избышек электрической жидкости, то оно заряжается положительно, если ее недостает — тело заряжается отрицательно. Недостатки теории были очевидны — она предполагала одновременное и независимое существование двух самостоятельных физических сущностей — материи и электрической жидкости (флюида).

Франклин первым высказал предположение о дискретной природе электричества: «Электрическая субстанция состоит из чрезвычайно малых частиц» [59]. Во времена Франклина ни о каких экспериментальных доказательствах этой гипотезы, конечно, не приходилось и думать, она была, в сущности, интуитивной догадкой ученого, не повлиявшей сколь-либо заметным образом на дальнейшие исследования электрических явлений.

Основные понятия в науке об электричестве удалось сформулировать после того, как появились первые количественные исследования. Измеряя силу взаимодействия двух точечных электрических зарядов, французский ученый Ш. Кулон в 1785 г. установил закон взаимодействия электрически заряженных тел:

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (68)$$

Здесь q_1 и q_2 — электрические заряды взаимодействующих тел, r — расстояние между ними, F — сила взаимодействия между телами. Если заряды q_1 и q_2 одноименны, то F — сила отталкивания, в случае разноименных зарядов F — сила притяжения. [Формула (68) записана в системе СГС, в СИ в правой части ее появляется коэффициент $1/(4\pi\epsilon_0)$, где ϵ_0 — электрическая постоянная: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.]

Между атомистической теорией и теорией электрических явлений существует глубокая аналогия. В атомно-молекулярной фи-

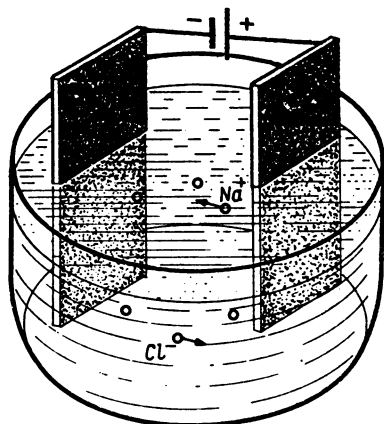


Рис. 14. Электролиз

зике свойства микрочастиц (атомов, молекул) определяют свойства газов, разнообразные электрические явления определяются свойствами мельчайших «частичек электричества». В обоих случаях были сначала открыты законы, определяющие поведение больших коллективов частиц (газовые законы, закон Кулона). Свойства самих индивидуальных частиц были установлены намного позднее.

Трудности с исследованием электрических явлений были связаны с тем, что долгое время в распоряжении ученых не было

простого и удобного источника тока. Такой источник в 1800 г. изобрел итальянский ученый А. Вольта. Это был столб из цинковых и серебряных кружочков, разделенных смоченной в подсоленной воде бумагой. С появлением «вольтова столба» интенсивность исследований резко возросла.

Объединение электричества и магнетизма. Уже в 1801 г. было установлено, что при прохождении электрического тока через растворы солей на электродах происходит выделение вещества (рис. 14). Это явление было названо электролизом, и его исследование сыграло очень важную роль в установлении дискретной природы электричества. Изучая явления газового разряда, русский ученый В. В. Петров в 1802 г. открывает электрическую дугу. В 1820 г. датский физик Х. Эрстед обнаружил, что электричество и магнетизм связаны друг с другом. Замыкая и размыкая цепь с током, он увидел колебания стрелки компаса, расположенного вблизи проводника. Впервые два до сих пор изучавшихся раздельно физических явления связываются друг с другом. Француз А. М. Ампер, выполнив множество экспериментов по изучению взаимодействия между электрическим током и магнитом, устанавливает основные законы взаимодействия токов и предлагает первую теорию магнетизма. Громадным вкладом в развитие теории и практики электромагнетизма явились исследования выдающегося английского физика-экспериментатора М. Фарадея. В 1821 г. он впервые создал лабораторную модель электродвигателя, осуществив вращение магнита вокруг проводника с током. В 1831 г. он открыл явление электромагнитной индукции и установил его законы. М. Фарадей впервые ввел понятие электромагнитного поля как передатчика взаимодействия между заряженными телами. Пространство, которое у Ньютона выступало как пассивный свидетель физических явлений, «оживает» и становится их участником.

Венцом исследований явилась разработка Дж. К. Максвеллом теории электромагнитных явлений. Он нашел уравнения, связывающие воедино электрические и магнитные характеристики поля:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}; \quad (69) \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho; \quad (71)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad (70) \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0. \quad (72)$$

Физический смысл этих уравнений довольно прозрачен. Уравнение (69) содержит информацию о том, что источником магнитного поля является ток (\mathbf{H} — напряженность магнитного поля, \mathbf{j} — плотность электрического тока). Уравнение (70) выражает в математической форме открытое Фарадеем явление электромагнитной индукции (\mathbf{E} — напряженность электрического поля, \mathbf{B} — вектор магнитной индукции). Электрическое поле появляется только тогда, когда изменение во времени магнитного поля $\partial \mathbf{B} / \partial t$ не равно нулю. Уравнение (71) устанавливает связь между плотностью электрических зарядов ρ и электрической индукцией \mathbf{D} и является математической записью того физического факта, что источником электрического поля являются электрические заряды. Уравнение (72) показывает, что магнитные заряды отсутствуют. Система уравнений (69) — (72) дополняется двумя уравнениями, учитывающими электрические и магнитные характеристики сред:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}; \quad (73) \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}. \quad (74)$$

Здесь ε — диэлектрическая постоянная, μ — магнитная проницаемость.

Уравнения Максвелла имеют громадное значение в связи с тем, что они дают возможность теоретическим путем получать очень важные результаты. Они и по сей день сохранили свое значение как основы для расчета электродинамических явлений. Приведем в качестве иллюстрации один пример, принадлежащий самому автору уравнений. Физически неочевидный коэффициент c сначала был введен Максвеллом чисто формально для сохранения размерностей правой и левой частей уравнений. Применяя свои уравнения к решению конкретных задач, Максвелл теоретически вычислил значение c : $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, т. е. оно совпало со значением скорости света. Ученый сделал из этого принципиальный физический вывод: свет является электромагнитной волной. Время показало правоту этого блестящего теоретического предвидения великого физика.

Подведем некоторые итоги исследований электромагнитных явлений. Изучены основные законы взаимодействия, установлена связь электричества и магнетизма. Разработан математический аппарат теории, и... в то же время остается совершенно невыяс-

ненным вопрос о природе электричества. Что это—жидкость Франклина или существует его элементарный носитель? Характеризуя это своеобразное положение, английский физик Дж. Томсон писал: «Физики и математики, которые больше всего сделали для развития теории электрических жидкостей, занимались вопросами, связанными только с законами действия сил между назлектризованными телами... Понятию же о самих электрических жидкостях они придавали все более и более абстрактный характер, так что в конце концов всякое упоминание об их физических свойствах стало казаться почти неделикатным» [60]. Весьма красноречивое признание!

Электролиз. Выделение понятия «электрон». Одним из важнейших направлений исследований Фарадея было изучение природы электрического тока. С этой целью он выполнил эксперименты по прохождению тока через растворы солей, кислот и щелочей (электролиты). В 1836 г. он устанавливает, что масса вещества, выделившегося на электроде при прохождении электрического тока, пропорциональна силе тока и времени. Для выделения одного моля одновалентного вещества через электролит должно пройти строго определенное количество электричества. Так в физике появилась новая физическая постоянная, получившая впоследствии название постоянной Фарадея F :

$$F = 96484,56 \text{ Кл/моль}^* \quad (75)$$

Во времена Фарадея никому не пришла мысль воспользоваться открытыми им законами электролиза для выяснения природы электричества. Интерес к ним возродился в конце столетия в связи с успехами атомно-молекулярной теории. Законы электролиза легко интерпретировались, если предположить, что в растворе, например, NaCl в воде с каждым атомом связан определенный заряд, причем эти заряды одинаковы и противоположны по знаку: Na^+ и Cl^- . Тогда при прохождении через раствор одного и того же количества электричества, равного 96484 Кл, на электродах выделится по молю вещества, т. е. по $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ атомов.

Носителем электричества являются не какие-то электрические жидкости, а сами частицы материи, утверждал Фарадей. Мысль о дискретности электричества впервые и предельно четко сформулировал в 1881 г. Г. Гельмгольц: «Если мы допускаем существование химических атомов, то мы принуждены заключить отсюда далее, что также и электричество, как положительное, так и отрицательное, разделяется на определенные элементарные

*Вышеприведенное значение F относится только к одновалентным веществам. Если же выделяется один моль n -валентного вещества, то через электролит должно быть пропущено количество электричества, равное nF Кл. В связи с этим размерность постоянной Фарадея целесообразно изменить на следующую: Кл/моль · валентность.

количества, которые играют роль атомов электричества» [60]. Вновь почти через 130 лет после Франклина ученые приходят к выводу об атоме электричества, об элементарном электрическом заряде.

Величину этого «атома электричества» впервые теоретически определил расчетным путем ирландский физик Дж. Стоней. Он предельно прост. Если для выделения одного моля одновалентного вещества при электролизе требуется заряд, равный 96484 Кл, а в одном моле содержится $6 \cdot 10^{23}$ атомов, то, разделив постоянную Фарадея F на постоянную Авогадро N_A , мы получим количество электричества, необходимое для выделения одного атома вещества. Обозначим эту порцию электричества через e :

$$e = \frac{F}{N_A} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.} \quad (76)$$

В 1891 г. Стоней предложил называть эту минимальную порцию *электроном*. Вскоре это было принято всеми. Впереди была еще громадная работа по выяснению смысла этого понятия. Обратим внимание на то, что электрон Стонея был введен без каких бы то ни было указаний на массу или инерцию, с которой могло быть связано это количество электричества. Речь шла еще не о частице материи, а лишь об определенной порции заряда или кванте заряда. В духе Франклина электрон Стонея был отделен от материи.

Теоретические предпосылки расчета Стонея также подвергались сомнению. Ведь по данным электролиза мы определяем количество заряда при переносе большого числа атомов, поэтому можно утверждать, что в действительности мы определяем лишь среднее значение заряда электрона. Вопрос о существовании определенной минимальной порции электричества еще оставался открытым. Но как бы то ни было, теоретическое открытие электрона состоялось и начало оказывать свое влияние на развитие физики. Физические постоянные F и N_A в соединении с интеллектуальными усилиями ученых привели к рождению еще одной постоянной—заряда электрона e . Развивавшиеся доселе раздельно столь различные области физики, как атомистическая теория и теория электромагнитных явлений, сблизились настолько, что это явилось еще одним убедительным подтверждением принципиального единства природы.

Открытие электрона. Факт существования электрона как элементарной частицы материи, обладающей единичным элементарным электрическим зарядом (отрицательным по модулю), был установлен в исследованиях совершенно иного плана, а именно при изучении явлений, связанных с прохождением электрического тока через газы. И снова мы должны отдать должное проницательности Фарадея, начавшего эти исследования в 1838 г. «Результаты, связанные с различными явлениями положитель-

ного и отрицательного разрядов, повлияют на теорию электричества сильнее, чем мы теперь думаем», — писал он. Именно эти исследования привели к открытию катодных лучей и в конечном счете к открытию электрона.

Развитие техники в середине XIX в. привело к созданию насосов, с помощью которых можно было откачивать из стеклянных трубок часть газа, создавая так называемый вакуум. В 1869 г. немецкий физик и математик Ю. Плюккер обнаружил, что электрический ток свободно проходит через вакуумированные трубки. При этом внутри них возникают не известные ранее невидимые лучи, заставляющие светиться расположенные напротив катода участки стекла. Эти лучи так и назвали — катодные. Начались интенсивные исследования природы этих лучей. Английский физик В. Крукс обнаружил прямолинейность их распространения. Под действием лучей легкая мельничка начинала катиться по рельсам, что заставляло приписать частицам, составляющим лучи, массу. К. Вэрли и Ж. Перрен устанавливают, что катодные лучи переносят отрицательный заряд. И. Гитторф обнаружил отклонение лучей в магнитном поле. Согласно первым измерениям, скорость частиц, входящих в состав лучей, была порядка $1/10$ скорости света и не зависела от рода газа и материала электродов. Это означало, что частицы катодных лучей являются непременной составной частью всех атомов. Опыт вел физиков к образу частиц материи, имеющих отрицательный электрический заряд. В 1874 г. Крукс выдвинул гипотезу: «... мы получаем в наше распоряжение мельчайшие элементарные частицы, которые с большой долей вероятности можно считать физической основой Вселенной».

Для того чтобы убедиться в том, что катодные лучи действительно представляют собой поток отрицательно заряженных частиц, необходимо было в прямых экспериментах определить массу этих частиц и их заряд. Эти опыты в 1897 г. выполнил Дж. Томсон. Частицы катодных лучей в одном из методов отклонялись в электрическом и магнитном полях. Напряженности полей подбирались так, чтобы отклонения вверх и вниз были скомпенсированы. Это имеет место при

$$Hev = eE,$$

где v — скорость частицы, равная, очевидно, E/H . Если выключить электрическое поле, то под действием магнитного поля частица будет двигаться по окружности радиусом R :

$$Hev = mv^2/R.$$

Подставив v , получим соотношение для определения величины e/m , часто очень неудачно называемой удельным зарядом электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{H^2 R}.$$

При измерениях по другому методу Томсон электрометром определял заряд, сообщенный цилиндру Фарадея за короткий промежуток времени катодными лучами $Q = Ne$. Затем такое же число частиц направлялось на термодару, их энергия $W = \frac{1}{2} Nmv^2$. Используя затем отклонение частиц в магнитном поле, можно было получить еще одно соотношение для определения e/m [61]:

$$\frac{e}{m} = \frac{2W}{H^2 R^2 Q}.$$

В результате измерений Томсон получил, что для частиц катодных лучей отношение e/m примерно в 1000 раз больше подобного отношения для самых легких ионов водорода. На основании этого он сделал вывод о том, что масса этих частиц в 1000 раз меньше массы иона водорода. Катодные лучи, утверждает Томсон,— это элементарные частицы, существующие в свободном состоянии отдельно от атомов и несущие отрицательный заряд. В физике произошло важнейшее событие: было открыто существование частиц, значительно меньших по массе, чем атомы. Атомы, трактуемые в значении, данном еще древними греками, как неделимые, утратили это свойство. Эксперименты Томсона показали, что электроны входят в состав всех атомов, электричество перестало существовать отдельно от материи.

Электроны обнаруживают себя в других явлениях. Задача исследований значительно облегчается, когда в руках ученых уже имеется путеводная нить, когда они точно знают, что искать. В случае с электроном это проявилось в полной мере — электроны были очень быстро найдены в ряде других физических явлений.

Еще в 1887 г. Г. Герц обнаружил явление фотоэффекта, т. е. эмиссии с поверхности металлов при их освещении заряженных частиц. Повторяя идею опытов Томсона, Ф. Ленард в 1899 г. установил, что при фотоэффекте испускаются частицы с тем же удельным зарядом, что и у электрона. Этим было еще раз доказано существование электрона как самостоятельной частицы.

В 1896 г. французский ученый А. Беккерель открыл явление радиоактивности, состоящее в испускании солями урана невидимых лучей. Исследования показали, что в магнитном поле H эти лучи разделяются на три компоненты, названные α -, β - и γ -лучами (рис. 15). α -Лучи отклоняются так, как должны были бы отклоняться положительно заряженные частицы, β -лучи—как отрицательно заряженные, γ -лучи не испытывают отклонения. В 1900 г. Беккерель провел измерения удельного заряда β -частиц и установил, что они представляют собой поток электронов. Отношение e/m неоднократно измерялось и в других явлениях

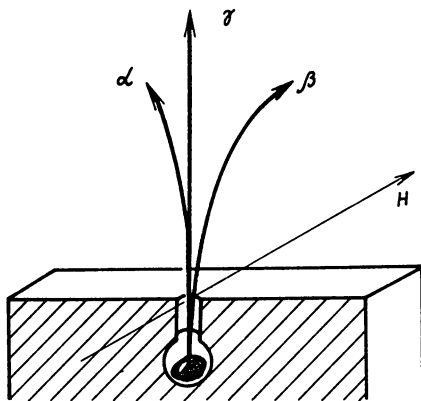


Рис. 15. Радиоактивность

ях — при испускании электронов нагретыми металлами, при исследовании эффекта Зеемана и др. Совокупность этих данных подтверждала вывод о существовании электрона как самостоятельной частицы и замечательную мысль Крукса об электронах как «физической основе Вселенной».

Однако место для сомнений все же оставалось. При изучении катодных лучей, как и в явлениях электролиза, мы имеем дело с множеством частиц, поэтому удельный заряд электрона или просто его заряд e мог

быть некоей усредненной величиной. Как точно измерить в отдельности заряд электрона и его массу? Эти проблемы еще ждали своего решения.

Первые попытки определения e . Первая попытка непосредственного определения величины элементарного заряда принадлежит ученику Томсона Д. Таунсенду. В 1897 г. он установил, что некоторые молекулы газа, выделяющиеся при электролизе с электродов, заряжены. Если пузырьки заряженного газа пропускать через воду, то при выходе его в воздух образуется устойчивое видимое облако. Полагая, что в насыщенном водяном паре каждый ион является центром конденсации и что число ионов равно числу капелек, Таунсенд определил электрический заряд в 1 см^3 газа и число капелек воды, т. е. число ионов. Деление полного заряда на число ионов дает средний заряд одного иона. Метод основывался на большом числе предположений, что не позволило определить величину элементарного заряда со всей определенностью.

В 1911 г. Ч. Вильсон изобрел прибор, позволяющий обнаруживать пути ионизирующих частиц в пересыщенных водяным паром газах. Камера Вильсона представляет собой герметически замкнутый объем, заполненный гелием, азотом или каким-либо другим неконденсирующимся газом. Объем насыщается парами жидкости, одна из стенок камеры делается подвижной. Непосредственно после прохождения через объем ионизирующей частицы (электрона, протона) происходит расширение газа и движущаяся через газ частица оставляет на своем пути след (трек).

Опыты Милликена. Прямое измерение заряда электрона было выполнено американским физиком Р. Милликеном. Идея его опытов проста. В пространство между пластинами конденсатора впрыскивались капельки масла из пульверизатора П (рис. 16).

В результате трения некоторые из капель приобретали электрический заряд, и поэтому характер их движения зависел от наличия электрического поля между пластинами. Если напряженность поля $E=0$, то из-за сопротивления воздуха скорость падения капелек является постоянной величиной:

$$v_1 = fP.$$

Здесь P — вес капли, f — коэффициент пропорциональности. Если $E \neq 0$, то скорость капли v_2 определяется из соотношения

$$v_2 = f(qE - P),$$

где q — заряд капли:

$$q = \frac{P}{Ev_1} (v_1 + v_2).$$

Для изменения заряда капли Милликен использовал открытое В. Рентгеном в 1895 г. ионизирующее свойство рентгеновских лучей. Ионы воздуха захватываются капельками масла, в результате чего заряд каплей изменяется. Если q' — заряд капли после захвата ею иона, а v_2' — ее скорость, то изменение заряда

$$\Delta q = q' - q$$

или

$$\Delta q = \frac{P}{Ev_1} (v_2' - v_2).$$

Величина $P/(Ev_1)$ для данной капли является величиной постоянной. Таким образом, измерение изменения заряда капли сводится к измерению пути, пройденного каплей, и времени, за которое был пройден этот путь. Эти данные можно было надежно и точно измерять. Движение капель наблюдалось в объектив, капли при этом освещались источником S .

Многочисленные измерения показали, что всегда, независимо от размеров капель, изменение заряда являлось це-

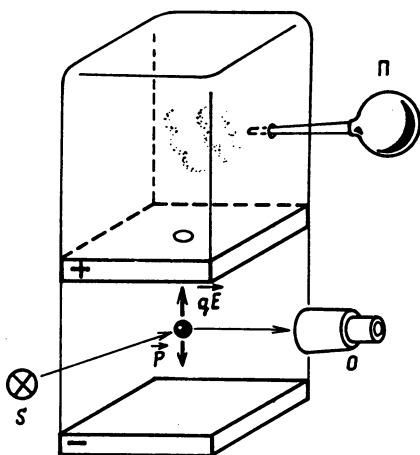


Рис. 16. Опыт Милликена

лым кратным по отношению к некоторому наименьшему заряду e :

$$\Delta q = ne,$$

где n — целое число. Расчеты Милликена позволили определить эту минимальную порцию электричества:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.} \quad (77)$$

Она оказалось равна заряду электрона. Милликен интерпретировал результаты эксперимента следующим образом. Положительные заряды прочно связаны с веществом, а отрицательные заряды принадлежат подвижным частицам — электронам, которые могут легко отделяться от вещества под действием ионизатора (рентгеновских лучей).

Реальность существования кванта электричества, его минимальной порции была неопровержимо доказана. Дискретное изменение величины электрического заряда было подтверждено в опытах известного советского ученого А. Ф. Иоффе. В его опытах капельки масла были заменены на пылинку металла. При освещении пылинки А. Ф. Иоффе наблюдал скачкообразное изменение ее заряда вследствие фотоэффекта.

Комбинируя данные Дж. Томсона и Р. Милликена, можно получить значение массы покоя электрона m_e :

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг.} \quad (78)$$

Прямые доказательства того, что электроны обладают массой, были получены в опытах американских физиков Стюарта и Толмена (1916). Они приводили в быстрое вращение обычную металлическую катушку и затем резко ее останавливали. Так как электроны обладают массой, то при резкой остановке катушки они должны в течение некоторого времени двигаться по инерции. Созданный при этом электрический ток действительно наблюдался.

Проблемы, проблемы... Рассказ об исследовании и выделении понятия «элементарный электрический заряд», об измерении постоянной e далеко не завершен. Остались невыясненными многие принципиальные вопросы. Можно надежно запомнить, что существует некоторая минимальная порция электрического заряда, и «смириться» с этим, но можно и поставить вопрос о том, почему электричество имеет дискретную природу, почему электрический заряд квантуется. Ответа на эти вопросы пока нет, это является одной из наиболее интригующих загадок природы, ее вызовом исследователям. Одновременно это является указанием на то, что квантованность электрического заряда является одним из фундаментальных свойств материи. Развитие кварковой гипотезы поставило под сомнение вопрос о том, действительно ли e является минимальной порцией электрического заряда. Этот вопрос более подробно обсуждается в § 9, но уже сейчас можно

сказать о том, что эксперименты по рассеянию электронов на протонах позволили установить сложную внутреннюю структуру протонов. Эти эксперименты подтвердили выводы кварковой гипотезы, согласно которой протон состоит из трех кварков—двух u -кварков и одного d -кварка, заряды которых соответственно равны $\frac{2}{3}e$ и $-\frac{1}{3}e$. Таким образом, можно считать, что минимальной порцией электричества, ее «элементарным электрическим зарядом» является величина, равная $\frac{1}{3}$ заряда электрона. Если бы кварки удалось обнаружить в свободном состоянии, то этот факт можно было бы считать установленным. Поскольку все поиски кварков в свободном состоянии были безуспешны, величина e в наше время пока сохраняет свой статус кванта электричества.

Открытие первой элементарной частицы — электрона, в свою очередь, поставило перед исследователями множество проблем. В первую очередь следует упомянуть о проблеме строения атома, неделимость которого была опровергнута существованием значительно меньшей частицы (см. § 7). Но сюрпризы, связанные с открытием электрона и исследованием его свойств, на этом не кончаются. Очень скоро удалось обнаружить, что масса электрона m_e зависит от его скорости (рис. 17). Считавшееся до сих пор

незыблемым понятие массы тела как характеристики его инертных свойств вдруг потеряло устойчивость. Объяснение этому явлению было найдено Дж. Томсоном еще в 1881 г., задолго до открытия электрона. Он высказал предположение, что инертные свойства тел определяются не только их массой в обычном смысле слова, но и их зарядом. При изменении скорости движения заряженного тела меняется сила электрического тока. Возникающее при этом изменение напряженности магнитного поля вызывает появление электродвижущей силы, препятствующей движению. Это эквивалентно появлению у заряженных тел добавочной массы, носящей электромагнитное происхождение. Расчеты показывают, что энергия движущегося электрона в этом случае равна

$$E = \frac{m_e v^2}{2} + \frac{e^2}{3r_e} \frac{v^2}{c^2},$$

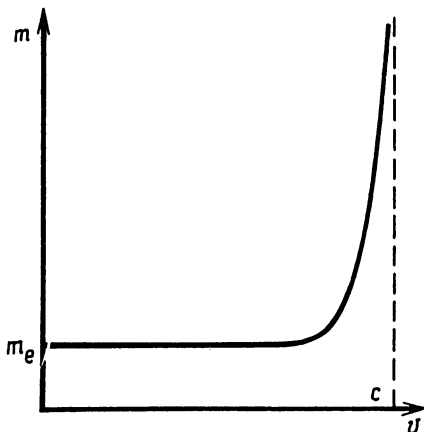


Рис. 17. Зависимость массы электрона от скорости

где r_e — «радиус» электрона. Приращение массы (электромагнитная масса) равно

$$\Delta m = \frac{2e^2}{3r_e} \frac{v^2}{c^2}.$$

При $r_e \approx 10^{-13}$ см ($r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} \approx 10^{-13}$ см — классический радиус электрона, см. табл. 1) дополнительная масса примерно равна m_e .

Эти результаты имели не только чисто физическое значение. Обнаружение электромагнитной массы привело некоторых ученых к гипотезе о том, что любая масса имеет «полевое» происхождение. При этом отпадает необходимость в гипотезе о существовании мельчайших частиц материи — атомов. Среди ученых и философов стало распространяться мнение о том, что понятие материи устарело, «материя исчезла». Философский анализ этих проблем дал В. И. Ленин в своем классическом труде «Материализм и эмпириокритицизм».

Зависимость массы электрона от его скорости потребовала разработки представлений о динамике электрона. В 1902 г. немецкий физик М. Абрагам, рассматривая электрон как круглый недеформируемый шарик и применяя законы классической механики, получил зависимость $m(v)$ в следующем виде:

$$m = \frac{3m_e}{4\beta^2} \left(\frac{1+\beta^2}{2\beta} \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} - 1 \right).$$

Здесь $\beta = v/c$. Другим был подход Г. Лоренца и Д. Фицджеральда. Они выдвинули гипотезу о деформируемом электроне, согласно которой размеры тел сокращаются в направлении движения в $\sqrt{1-\beta^2}$ раз. При этом движущиеся электроны принимают вид сплюснутых эллипсоидов вращения, а при $v=c$ превращаются в круглые диски, плоскости которых расположены нормально к направлению движения. Обоснование этой гипотезы нельзя назвать убедительным — поступательное движение изменяет взаимодействие между атомами и молекулами, а поскольку размеры и форма твердых тел обусловлены их взаимодействием, должно иметь место и изменение этих размеров при движении. Полученная ими зависимость $m(v)$ имеет вид

$$m(v) = m_e / \sqrt{1-\beta^2}.$$

Заметим, что при этих предположениях сокращение размеров тел должно зависеть и от химического состава тел, что не подтверждалось на опыте. Так или иначе теоретические работы

М. Абрагама и Г. Лоренца поставили вопрос о справедливости той или иной теории. Как всегда, критерием справедливости мог быть только опыт. Теоретическое решение проблемы динамики электрона было дано А. Эйнштейном в созданной им специальной теории относительности, коренным образом изменившей классические представления о свойствах пространства и времени (см. § 5).

Феномен электрического заряда. Электрический заряд является важнейшей характеристикой элементарных частиц. Обратим внимание на то, что независимо от частиц он не существует, обратное же возможно (наличие нейтронов, π^0 - и K^0 -мезонов и т. п.). Заряды большинства элементарных частиц равны по модулю и равны e , несмотря на то что многие частицы резко отличаются по другим физическим параметрам — массе, магнитным свойствам, наличию внутренней структуры и др. Наиболее известной иллюстрацией к этому являются свойства электрона и протона (см. табл. 1). Однако несмотря на все различия между характеристиками многих элементарных частиц, равенство по величине их электрических зарядов наводит на мысль о том, что между ними должно быть нечто общее, обусловленное в первую очередь их пока не известной нам внутренней структурой, что определяет их электрические свойства. Это нечто общее мы пока не знаем, оно представляется нам как свойства материи, обуславливающие ее организацию в электрически заряженные частицы. Представляется возможным, что именно эти пока неведомые свойства материи вкуче с остальными характеристиками элементарных частиц обуславливают их стабильность, а следовательно, в конечном счете создают условия для возникновения и существования жизни.

Причины возникновения и существования электрического заряда — одна из крупнейших проблем современной теоретической физики. Высказываются предположения о гравитационной обусловленности существования электрического заряда и его магнитного момента [62]. В этой работе доказывается, что само существование электрона и его магнитного момента вызвано гравитационным воздействием Метагалактики на материальную точку. Неучет этого взаимодействия приводит к некорректным оценкам масс Галактик. Этот же механизм обязан учитываться в теории взаимодействия электрона с электромагнитным полем. Намечаются связи между двумя важнейшими видами физических взаимодействий — гравитационным и электромагнитным.

Чему же равен заряд электрона? Этот вопрос, возможно, многим покажется излишним, поскольку везде в тексте данного параграфа мы отождествляли заряд электрона с величиной элементарного электрического заряда e . Последние теоретические и экспериментальные исследования показали, что ситуация гораздо тоньше. Установлено [63, 64], что многократно проверенный и, казалось бы, непогрешимый закон Кулона для взаимодействия

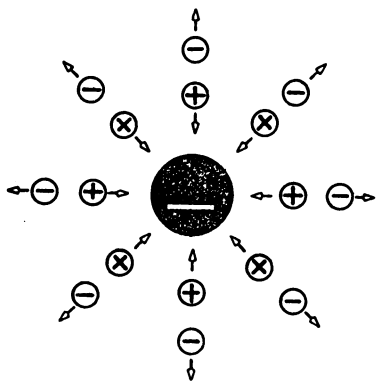


Рис. 18. Поляризация вакуума.

Реальный электрон — большой кружок,
малые кружки — виртуальные электро-
ны и позитроны

характеристики электрона, но обладающая положительным зарядом). Взаимодействие электрона с виртуальной парой будет приводить к необычному эффекту, известному как поляризация вакуума. Так как электроны заряжены отрицательно, то они отталкивают виртуальные электроны и притягивают виртуальные позитроны (рис. 18) [65]. Электрон оказывается окруженным облаком виртуальных позитронов, которое частично экранирует его заряд. Становятся возможными две ситуации. Если мы наблюдаем электрон с такого расстояния, когда эффекты экранировки незаметны, то в эксперименте мы имеем дело с электроном, окруженным облаком виртуальных электронов, как неким целым образованием. В данной ситуации невозможно разделить то, что мы называем электрическим зарядом, на заряд собственно электрона и на заряд облака виртуальных частиц. Такой объект получил в физике название физического электрона. Измеренный Р. Милликенем элементарный электрический заряд является зарядом сложного образования — физического электрона. Электрон же, лишенный облака вакуумной поляризации, называется голым электроном. Заряд голого электрона мы не знаем, но он, очевидно, больше заряда физического электрона и зависит от расстояния — растет с уменьшением того расстояния, с которого мы наблюдаем электрон. В этой связи хотелось бы дать оценку содержащимся в таблицах фундаментальных физических постоянных таких величин, как классический радиус электрона (табл. 1) и радиус электрона (табл. 2) $r_0 = e^2/(m_e c^2)$. Подобные названия являются совершенно неверными по своей физической сути, само наличие их в таблицах способно вызвать у учащихся принципиально невер-

двух точечных зарядов (68) на малых расстояниях нарушается. Объяснение этого факта потребовало детального анализа представлений о внутренней структуре электрона, разработки физической картины связи его характеристик со свойствами так называемого физического вакуума. Подробнее концепция физического вакуума будет обсуждаться ниже, пока же укажем, что одним из его свойств является возможность рождения в нем виртуальных, существующих в течение коротких промежутков времени частиц. Такими частицами, в частности, могут быть пары электрон — позитрон (позитрон — частица, имеющая характер-

ные представления об электро́не как о некоем сферическом объекте.

Существование у электро́на сложной внутренней субструктуры (рис. 18) является далеко не очевидным фактом. Установление его является одним из выдающихся достижений современной физики. Одновременно это оставляет открытым вопрос о том, что же является истинным элементарным электрическим зарядом.

О заряде «голого» электро́на. На конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А. Эйнштейна (Берлин, 1979), профессор Г.-Ю. Тредер, в частности, сказал: «Исходя из соотношения $e \sim \sqrt{hc}$ Эйнштейн в 1907 г. говорил: если у меня есть h и c , я должен получить и e . Констант h и c должно быть достаточно, чтобы объяснить существование элементарного заряда. В действительности квантовая физика оказалась не в состоянии это сделать... это было для Эйнштейна разочарованием». [54] Подчеркнем, что эти попытки великого теоретика относились к 1907 г., когда квантовая физика как наука не существовала. Достижения современной физики диктуют необходимость повторного анализа этих полузабытых исследований. Быть может, они были намного опережающими свое время интуитивными озарениями гения.

Для того чтобы понять первопричину творческих исканий Эйнштейна, надо обратить внимание на то, что одной из характернейших черт его научного метода была глубочайшая вера в «простоту и понятность природы». Доказательств этому немало. В физике известны удивительно простые соотношения между величинами, относящимися к самым различным ее областям. Так, величину элементарного заряда e можно получить при делении постоянной Фарадея $F = 96485,3$ Кл/моль, определяемой по данным электролиза, на известную из молекулярной физики постоянную Авогадро $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ 1/моль:

$$e = F/N_A.$$

Так как постоянные F и N_A являются характеристиками больших ансамблей микрочастиц, то и определяемое вышеприведенным соотношением значение e следует рассматривать как статистическую величину, дающую среднее значение заряда электро́на.

Открытие в 1897 г. первой элементарной частицы — электро́на, появление в 1900 г. кванта действия или постоянной Планка h , создание в 1905 г. Эйнштейном специальной теории относительности, в которой был впервые раскрыт глубочайший физический смысл скорости света c , ознаменовали начало новой физики — физики микромира. Веря в понятность природы, Эйнштейн дерзнул предложить наличие соотношения между квантово-механическими константами h и c и индивидуальной характеристикой

электрона — его зарядом, который в этом случае имеет смысл квантово-механического заряда q :

$$q^2 = hc.$$

Вопреки ожиданиям рассчитанная по этой формуле величина заряда q оказывается примерно в 30 раз большей известного значения e :

$$q = \sqrt{hc} \approx 4,7 \cdot 10^{-18} \text{ Кл} \approx 29,3 e.$$

Много позже «Паули считал, что именно по этой причине Эйнштейн так скептически высказался относительно завершенности квантовой теории» (Г.-Ю. Тредер).

Развитие квантовой теории и физики элементарных частиц позволяют сегодня предположить новые интерпретации эйнштейновского заряда q . Так, Г.-Ю. Тредер склонен видеть в нем заряд, отвечающий сильным или ядерным взаимодействиям, исходя из формального равенства единице значения $q^2/(hc)$ и безразмерной константы сильного взаимодействия. Эту трактовку вряд ли можно признать убедительной, поскольку электроны не входят в состав ядер и не принимают участия в сильном взаимодействии, в связи с чем нами предлагается новая интерпретация заряда q , основанная на концепции физического вакуума.

Согласно этой теории, в вакууме, прежде считавшемся «пустотой», непрерывно происходит рождение множества виртуальных, короткоживущих частиц (фотонов, электронов, позитронов и др.). Взаимодействие виртуальных частиц с реальными физическими объектами приводит к наблюдаемым физическим эффектам, например отклонению магнитного момента электрона от предсказываемого классической электродинамикой значения. В связи с этим принципиально иную трактовку получили, казалось бы, хорошо известные и прежде отождествлявшиеся понятия «элементарный электрический заряд» и «заряд электрона». Поясним физику явления. Внесенный в физический вакуум электрон оказывается окруженным облаком виртуальных электрон-позитронных пар (см. рис. 18), которое частично экранирует его заряд. Все такое образование в целом принято называть физическим электроном [65], а объект, лишенный облака вакуумной поляризации, — «голым» электроном. При наблюдении с больших расстояний измеряемый заряд оказывается вследствие экранирования меньшим заряда «голого» электрона, это и есть классический «элементарный» заряд e . По мере проникновения в глубь облака виртуальных электрон-позитронных пар экранировка уменьшается, и измеряемый заряд должен возрастать. Подтверждением этого являются известные факты нарушения закона Кулона на малых расстояниях. В пределе эксперимент мог бы дать значение заряда «голого» электрона, но энергии зондирующих частиц при этом становятся настолько большими, что

превосходят возможности экспериментальной физики. Это заставляет вновь и вновь анализировать теоретические пути определения q .

Попытки определения величины заряда A . Эйнштейном приобретают в теории физического вакуума принципиально иное значение. То, что квантово-механический заряд q оказывается большим классического значения e , получает естественное физическое объяснение: эйнштейновский заряд $q \approx 4,7 \cdot 10^{-18}$ Кл есть не что иное, как заряд «голого» электрона. Именно эту величину следует считать действительным квантом электрического заряда. Как глубоко прав был Эйнштейн, говоря, что «констант h и c должно быть достаточно, чтобы объяснить существование элементарного заряда». Природа «проста и понятна», но такой она становится лишь по мере развития науки.

5. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ВАКУУМЕ (СКОРОСТЬ СВЕТА)

Постановка задачи. Раскрытие сущности одной из важнейших фундаментальных постоянных—скорости света c —на протяжении долгого времени являлось одной из труднейших задач физики. Проблема оказалась чрезвычайно многогранной, в единый узел сплелись трудности выяснения природы света и измерения скорости его распространения, интерпретации этой абсолютной скорости. Теоретический анализ этих проблем привел А. Эйнштейна к необходимости радикального пересмотра казавшихся незыблемыми классических представлений о пространстве и времени, созданию специальной теории относительности. Новую трактовку получило явление гравитации, родилась космология как наука о происхождении и эволюции Вселенной. Человеческому анализу стали доступны не только земные и астрономические наблюдения, предметом научных исследований стали глобальные проблемы развития Вселенной.

С методической точки зрения отдельные стороны столь емкого понятия, как скорость света, целесообразно рассмотреть в подразделах данного параграфа. Их четыре: 1) природа света; 2) измерения скорости света; 3) интерпретация; 4) проблемные вопросы. Ввиду особого значения в физике общей теории относительности Эйнштейна, раскрывающей новые грани гравитационной постоянной, ей посвящен отдельный параграф (§ 6).

5.1. Природа света

Первые результаты. С самых древних времен тайна природы света была для человека одной из самых трудных загадок. В то же время именно при помощи света, оптических наблюдений он

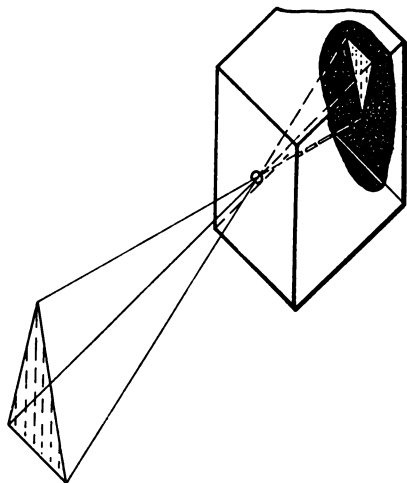


Рис. 19. Камера-обскура

познавал окружающий мир в гораздо большей степени, чем он мог бы это сделать при помощи всех других чувств. Вспомним, с чего начиналась механика, приведшая к величайшим открытиям Ньютона,— с оптических наблюдений за движением планет и звезд, систематизации и обработки этих данных, поиска в них первопричины движения и способа его описания — закона тяготения. В начале нашего века особенности строения атомных спектров стали для Н. Бора ключом к открытию тайны строения атомов.

Над природой света задумывались еще древние греки. Конечно,

из-за отсутствия каких-либо экспериментальных данных их суждения были чисто умозрительны. Например, свет представлялся им чем-то, что проистекает из наших глаз. Мы видим вещи, направляя на них поток света. Возражая против этого, Аристотель отмечал: «Если истечения дают видения, то почему мы не видим в темноте?». Последовательно отстаивающий свою гипотезу о существовании атомов Демокрит объяснял зрительные ощущения воздействием атомов, излучаемых светящимся телом на поверхность глаза.

Спор о природе света мог быть решен только на основе научных исследований оптических явлений. Накопление таких данных вначале шло очень медленно. Около 300 г. до н. э. Евклид установил, что свет распространяется прямолинейно. Во II в. н. э. экспериментальные исследования преломления света при переходе из одной среды в другую выполняет Птоломей, но он еще не смог дать формулировку закона преломления. В XIII в. Р. Бэкон впервые описал увеличение размеров предметов при разглядывании их через плосковыпуклую чечевицу. В XV в. появляется первый простейший оптический прибор — камера-обскура, позволивший получить изображение освещенного предмета (рис. 19). Главное, что принесло это изобретение,— это то, что оно «решительно отделило свет от зрения» (выражение С. И. Вавилова). В XVI в. оптика — в буквальном переводе «наука о зрении» — превратилась в самостоятельный раздел физики.

XVII век ознаменовался резким скачком в накоплении фактических знаний в оптике. Здесь и формулировка Р. Декартом

закона преломления* (1637), и описания опытов по дифракции света Ф. Гримальди (1665), и оптически исследования И. Ньютона и Х. Гюйгенса. Все это привело к необходимости разработки теории световых явлений, объясняющей весь комплекс экспериментальных данных. Основной трудностью при этом было то, что оптические явления можно было объяснять исходя из принципиально различных предположений о природе света. Сторонники одной гипотезы утверждали, что свет—это волновой процесс, другие же полагали, что свет — это распространяющийся прямолинейно поток частиц (корпускул). Покажем на небольшом примере, как выводится закон преломления в волновой и корпускулярной теории.

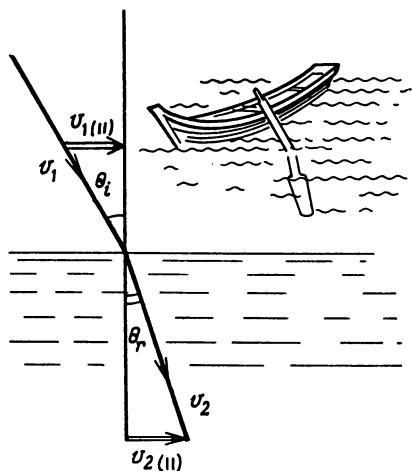


Рис. 20. Преломление света в корпускулярной теории

Преломление света в корпускулярной теории. Рассмотрим свет как поток частиц, падающих на поверхность раздела двух сред (рис. 20). Поскольку значение горизонтальной составляющей скорости при переходе из одной среды в другую не меняется, запишем:

$$v_1(II) = v_2(II)$$

или

$$v_1 \sin \theta_i = v_2 \sin \theta_r.$$

Отношение синуса угла падения θ_i к синусу угла преломления θ_r , является постоянной величиной:

$$\sin \theta_i / \sin \theta_r = v_2 / v_1 = \text{const.}$$

Так как скорость света в данной среде связана со скоростью света c в вакууме и показателем преломления n :

$$v = c/n, \tag{79}$$

то можно записать закон преломления в обычной форме:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_1}{n_2}.$$

*Раньше Декарта закон преломления установил Снеллиус, но его работа не была своевременно опубликована.

Закон преломления в волновой теории. Если представлять свет в виде волнового процесса, то явление преломления можно описать следующим образом. На рис. 21 AC — фронт падающей волны, отрезок EO есть длина волны λ_1 света, падающего на поверхность раздела. Когда при распространении волны точка E достигнет точки O , волна, возбужденная в точке A , пройдет во второй среде путь, равный длине волны λ_2 света в этой среде ($\lambda_2 = AF$). Углы падения θ_1 и преломления θ_2 определяются из выражений

$$\sin\theta_1 = \frac{\lambda_1}{AO}, \quad \sin\theta_2 = \frac{\lambda_2}{AO},$$

откуда закон преломления

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Так как $\lambda_1/\lambda_2 = v_1/v_2$, то

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Отношение синуса угла падения θ_1 к синусу угла преломления θ_2 легко измерить, например, при падении луча света из воздуха на поверхность жидкости (воды). Опыт показывает, что

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} > 1.$$

При этом, согласно корпускулярной теории света, скорость света v_1 в воздухе должна быть меньше скорости света v_2 и, наоборот, согласно волновой теории, $v_1 > v_2$. Измерьте эти скорости, и вы получите ответ, какая из этих теорий верна! Однако технические трудности этих измерений являются столь большими, что выполненные в 1862 г. первые попытки не принесли успеха той или иной теории.

Дискуссия. Полемика между сторонниками волновой

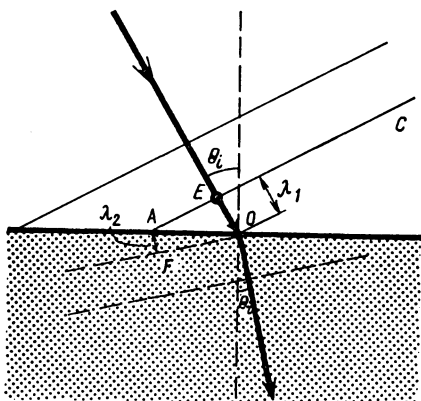


Рис. 21. Преломление света в волновой теории

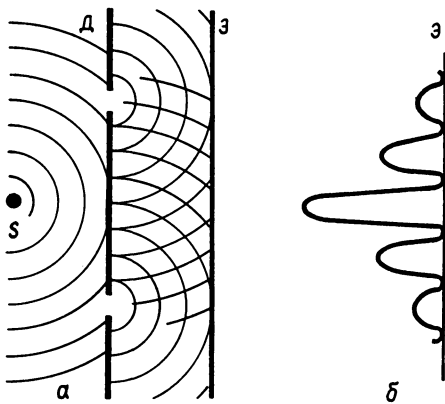


Рис. 22. Интерференционная картина в опыте Юнга (а); распределение интенсивности света на экране (б)

и корпускулярной теорий была, пожалуй, одной из наиболее интересных в истории физики. Голландский ученый Х. Гюйгенс развивал волновую теорию света. Возражая ему, Ньютон указывал, что всякое волновое движение должно распространяться в какой-либо среде. Гюйгенс допускал существование этой, пока еще не проявившей себя явным образом среды, которую он назвал эфиром. Отношение Ньютона ко всякого рода «эфирным теориям» мы уже знаем (с. 54). Частицы света, утверждал он, не нуждаются в чем-либо для своего распространения. Опираясь на акт отсутствия взаимодействия пересекающихся световых пучков, Гюйгенс утверждал, что это трудно совместить с корпускулярной теорией. Ньютон же, обращая внимание на прямолинейность распространения света, видел в этом противоречие с волновой теорией (распространяющиеся по поверхности воды волны огибают расположенные на их пути препятствия).

Следует отметить, что позиция Ньютона была более диалектической. Зная о явлении дифракции света, он понимал, что это трудно совместить с корпускулярной теорией. Ньютон оставлял вопрос о природе света открытым и был сторонником такой теории, которая сочетала бы в себе достоинства как волновых, так и корпускулярных представлений. Развитие науки показало, насколько глубоко был прав великий ученый в своем предвидении.

В 1801 г. английский физик Т. Юнг открывает явление интерференции света. Суть его состоит в том, что при прохождении света через две щели на экране наблюдается чередование светлых и темных полос (рис. 22, а). Юнг заключил, что световые возмущения обладают периодичностью, что они — волны, которые, накладываясь друг на друга, могут либо усиливаться, либо ослабляться (рис. 22, б). Волновую теорию света развил французский

ученый Ж. О. Френель. Ему удалось объяснить основные закономерности дифракционных процессов, объяснить с помощью волновых представлений прямолинейность распространения света. Волновая теория постепенно завоевывала признание физиков.

Но при этом снова и снова возникает вопрос о среде, в которой должны распространяться волны света. Свойства эфира оказываются весьма противоречивыми. Он очень тонок, так как входит во все тела, но обладает упругими свойствами, так как способен переносить световые колебания. Самым же главным затруднением было то, что эфир был абсолютно не наблюдаем. Проблема эфира становилась центральным нерешенным вопросом оптики, проблемы природы света.

Электромагнитная теория света. Идеи о существовании связи между оптическими и электрическими явлениями возникли в середине XVIII в. Эти догадки во многом подтвердило доказательство Б. Франклином электрической природы молнии. М. В. Ломоносов поднимал вопрос о проведении опытов по преломлению света в наэлектризованных телах. В 1846 г. М. Фарадей обнаружил вращение плоскости поляризации света при прохождении его через вещество, помещенное в магнитное поле (эффект Фарадея). Это наблюдение привело Фарадея к мысли о возможности существования электромагнитных волн и их связи со световыми волнами.

В § 4 говорилось о создании Дж. Максвеллом теории электромагнитных явлений. Впервые работа, в которой она была изложена достаточно полно, появилась в 1864 г. Одна из частей ее называлась кратко и емко: «Электромагнитная теория света». Этот вывод был сделан им на основании результатов совпадения числового значения входящего в уравнения (69) — (70) коэффициента c со значением скорости света. Максвелл уверенно пишет о том, что «свет и магнетизм являются проявлениями одной и той же субстанции и что свет является электромагнитным возмущением, распространяющимся через поле в соответствии с законами электромагнетизма» [18].

Опыты Г. Герца. Первые экспериментальные доказательства существования электромагнитных волн получил в 1887 г. Г. Герц. (Интересно отметить, что, приступая к этим исследованиям, он не разделял взглядов Максвелла.) Установка Герца в простейшем виде состояла из двух отполированных металлических шаров, разделенных небольшим воздушным зазором (рис. 23, [9]). При подведении к шарам высокого напряжения между ними проскакивала искра, т. е. через зазор проходил импульс переменного электрического тока, который, по теории Максвелла, должен был возбуждать электромагнитное поле. Его возникновение Герц обнаружил с помощью помещенного в соседней комнате аналогичного разрядника, между шарами которого синхронно с разрядом также проскакивала искра. Герц изучил законы отражения и преломления электромагнитных волн, доказал, что они

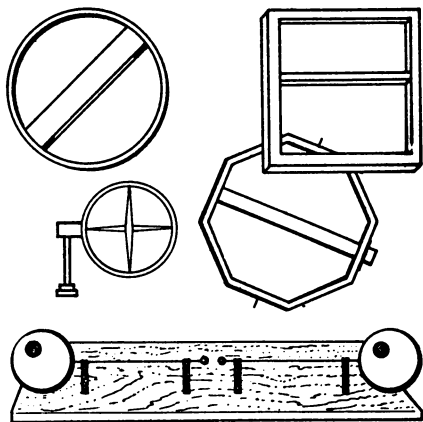


Рис. 23. Аппаратура Г. Герца

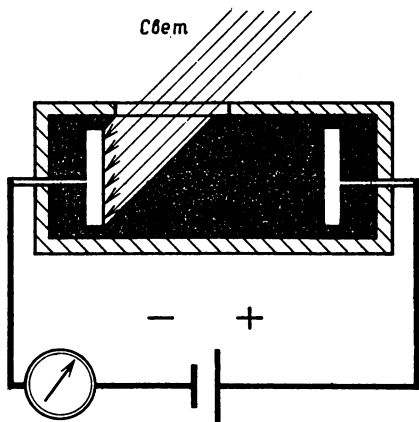


Рис. 24. Схема исследования фотоэффекта

обладают свойствами, характерными для световых волн (интерференцией и дифракцией), определил скорость их распространения, которая совпала со значением скорости света. «Описанные опыты доказывают тождественность света, теплового излучения и электродинамического волнового движения», — заключает Герц [67].

Электромагнитная теория света стала экспериментально обоснованной. Произошло еще одно событие—эфир, который со времен Гюйгенса называли светоносным, сменил свою природу. Он стал тем же эфиром, который вводил Фарадей для объяснения понятия электрического поля. Иронизируя, Максвелл писал: «Изобрели эфир для планет, в котором они могли бы плавать, эфиры для образования электрических атмосфер и магнитных истечений, эфиры для передачи ощущения от одной части нашего тела к другой и т. д., пока все пространство не было наполнено тремя или четырьмя эфирами» [68].

Фотоэффект. С установлением электромагнитной природы света волновая теория, казалось, победила окончательно. Однако мог ли автор ее экспериментального обоснования Г. Герц предполагать, что именно ему будет суждено обнаружить явление, которое будет противоречить волновой теории? Он заметил, что при освещении одного из шаров разрядника ультрафиолетовым излучением разряд между шарами возникает при значительно меньших напряжениях. Им было высказано предположение, что под действием излучения зазор между шарами становится более электропроводным. Полученное явление было названо фотоэффектом. Подробные исследования фотоэффекта по схеме, показанной на рис. 24, выполнил в 1888—1890 гг. профессор Московского университета А. Г. Столетов. Он показал, что ток в цепи

пропорционален интенсивности падающего света. Это соответствовало предсказаниям волновой теории: чем больше энергия светового пучка, тем эффективнее его действие.

Поскольку напряженность электрического поля световой волны увеличивается с ростом интенсивности, можно было ожидать, что это будет сопровождаться увеличением максимальной энергии фотоэлектронов. Если же поддерживать постоянной интенсивность света, но увеличивать его частоту, то при достаточно высоких частотах энергия фотоэлектронов должна была бы быть меньшей, так как, обладая массой (инерцией), они будут слабее реагировать на воздействие полей более высоких частот. Измерения дали прямо противоположные результаты! Максимальная энергия фотоэлектронов линейно увеличивалась с ростом частоты света и не зависела от интенсивности световой волны. Эти данные никак не могли найти объяснение в волновой теории света.

Фотоны. Выход из кризисного положения, сложившегося в физике света после открытия и исследования явления фотоэффекта, был найден в 1905 г. А. Эйнштейном. Он выдвинул гипотезу о существовании световых частиц, которые в дальнейшем получили название фотонов. Так как максимальная энергия фотоэлектронов увеличивалась с ростом частоты ν света, Эйнштейн установил, что энергия E пропорциональна частоте света:

$$E = h\nu. \quad (80)$$

В этом соотношении коэффициент пропорциональности h есть не что иное, как новая фундаментальная физическая постоянная—постоянная Планка (см. § 7). В теории фотоэффекта Эйнштейна все выглядело логично и просто. Фотоны, взаимодействуя с электронами металла, передают им свою энергию. Часть этой энергии электрон затрачивает на преодоление сил притяжения со стороны металла. Вышедший в вакуум электрон обладает кинетической энергией $mv^2/2$. Полученное Эйнштейном уравнение фотоэффекта выглядит так:

$$h\nu = A + mv^2/2. \quad (81)$$

В 1911 г. Р. Милликен выполнил экспериментальную проверку этого уравнения и показал его полную справедливость.

Корпускулярно-волновой дуализм. Исследования природы света привели к, казалось бы, противоречивым выводам. В явлениях интерференции и дифракции свет проявляет свои волновые свойства. В явлениях фотоэффекта, испускания и поглощения света атомами (см. § 7) свет проявляет свои корпускулярные свойства. Возникла довольно необычная с точки зрения нашего повседневного опыта картина: один и тот же реальный объект ведет себя одновременно и как частица, и как волна. Свет имеет, как теперь принято говорить, двойственную — корпускулярно-волновую — природу. Это новый для науки единый объект—частица-волна!

Необходимо сказать о том, что эти новые представления о природе света не сразу были приняты учеными. Уж очень необычными, отличными от человеческого опыта оказались свойства света. Однако в этом заключена глубокая философия процесса познания. Каждое новое явление всегда отличается от уже известных. Понятия «частица» и «волна» пришли в физику из окружающего нас видимого мира макроскопических тел (морские волны, бильiardные шары и т. п.). Недоступным нашему непосредственному восприятию явлениям микромира невозможно сопоставить какой-либо точный аналог из явлений макромира, понятия физики микромира должны быть принципиально иными. Сдвоенный образ частицы-волны, понятие корпускулярно-волнового дуализма есть следствие перенесения в мир микроявлений понятий, удобных и привычных нам в исследованиях макроявлений. Волновой и одновременно корпускулярный характер света—факт природы. Установление корпускулярно-волновой природы света является одним из громадных достижений науки.

5.2. Измерения скорости света

Конечна или бесконечна скорость света? Вплоть до XVI в. обсуждение этого вопроса не было связано с какими-либо опытами или достоверными наблюдениями. Аристотель полагал, что свет распространяется со сколь угодно большой скоростью. Примером бездоказательных утверждений является утверждение Дамиана [69]: «Распространение света глаз и света Солнца до самых внешних границ небесной сферы происходит мгновенно, потому что мы, как только бросим взгляд наверх, сейчас видим небо». Лишь в XI в. арабский ученый Альхазен высказал предположение о конечности скорости света.

При выводе закона преломления Р. Декарт представлял распространение света в виде потока частиц, движущихся с бесконечной скоростью. Для получения правильной формы закона он был вынужден предположить, что скорость света в более плотной среде больше, чем в менее плотной. Однако если скорость света бесконечна, то последнее утверждение бессмысленно. Теория Декарта была, таким образом, внутренне противоречивой. Современник Декарта П. Ферма вывел закон преломления исходя из выдвинутого им принципа наименьшего времени, суть которого заключается в следующем. Действительный путь распространения света, утверждал Ферма, есть путь, для прохождения которого свету потребуется минимальное время по сравнению с временем распространения его по любому другому мысленному пути между этими же двумя точками. Легко видеть, что этот принцип содержит в себе утверждение о конечности скорости света. Вопрос об измерении c приобретал решающее значение для признания справедливости различных теорий.

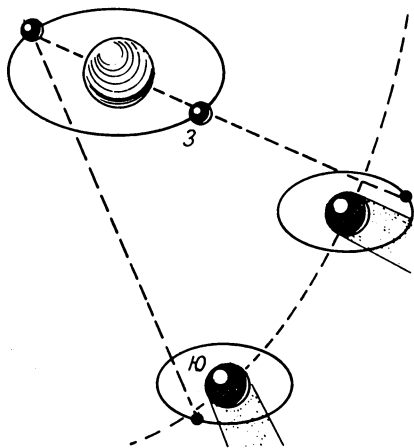


Рис. 25. Определение скорости света по О. Ремеру

Первые измерения. Впервые метод прямого определения скорости света предложил основоположник экспериментальной физики Г. Галилей. Его идея была очень проста. Один из наблюдателей, находящийся на расстоянии нескольких километров от другого, открывал заслонку на фонаре, посылая второму световой сигнал. Заметив свет, второй открывал заслонку своего фонаря, и свет распространялся по направлению к первому наблюдателю. Измеряя промежуток времени Δt между посылкой первого сигнала и моментом, когда был замечен свет от

второго наблюдателя, и зная расстояние s между наблюдателями, можно было рассчитать скорость света $c = 2s/\Delta t$. Однако первые измерения не дали результатов — уж очень малым и поэтому трудным для измерений оказался промежуток времени Δt .

Экспериментальное доказательство конечности скорости света впервые выполнил датский астроном О. Ремер (1676). Проанализировав результаты многолетних наблюдений затмения спутника Юпитера Ио, он заметил, что когда Земля $З$ находится на отдаленной от Юпитера $Ю$ точке своей орбиты (рис. 25), Ио появляется из тени Юпитера на 22 мин позже. За это время свет проходит расстояние, равное земной орбите. Поскольку диаметр в то время был известен лишь приблизительно, Ремер не привел конкретного значения скорости света. Более поздние оценки дали $c \approx 215\,000$ км/с.

Выводы Ремера были приняты с большим недоверием, сама мысль о существовании столь большой скорости была слишком непривычной для того времени. Даже предсказанное Ремером на основании своего открытия запаздывание затмения спутника не рассеяло сомнений. Дополнительные подтверждения справедливости его выводов были получены только после его смерти.

Исследования английского астронома Д. Брэдли были направлены на изучение видимых изменений положения небесных объектов (рис. 26), связанных с перемещением наблюдателя (параллактические смещения). Брэдли удалось объяснить смещение звезды γ -Дракона движением Земли по орбите и конечностью значения скорости света. В 1627 г. он нашел, что время распространения света от Солнца до Земли равно 8 мин 13 с (согласно современным данным, 8 мин 19 с). Оценки значения скорости света по методу Брэдли дали $c \approx 300\,000$ км/с. В конечности

значения c теперь уже мало кто сомневался, но еще долгое время полагали, что из-за его большой величины измерение скорости света в земных условиях невозможно.

Начало «земных» измерений.

Спустя почти 200 лет после Ремера французский ученый Л. Физо выполнил измерение скорости света в лабораторных условиях. Его метод в принципе не отличался от метода Галилея, но второй наблюдатель был заменен на отражающее зеркало, а вместо заслонки, открываемой рукой, было применено быстро вращающееся зубчатое колесо (рис. 27). Свет от источника S , отражаясь от полупрозрачного зеркала O , проходит между зубцами колеса, достигает зеркала A и после отражения от него вновь приходит к колесу. Если колесо повернется на такой угол, что свет, отраженный от зеркала A , пройдет через соседний промежуток между зубцами, то его увидит наблюдатель (точка B). Одно зеркало Физо поместил в доме своего отца, другое — на Монмартре в Париже. Расстояние между зеркалами примерно было равно 8,66 км, колесо имело 720 зубцов, свет достигал максимальной интенсивности при скорости вращения колеса, равной 25 об/с. Скорость света Физо определял по формуле Галилея $c = 2L/t$ и получил значение $c = (299870 \pm 50)$ км/с.

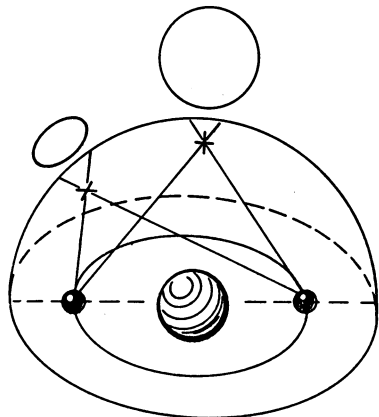


Рис. 26. Параллактическое смещение звезд

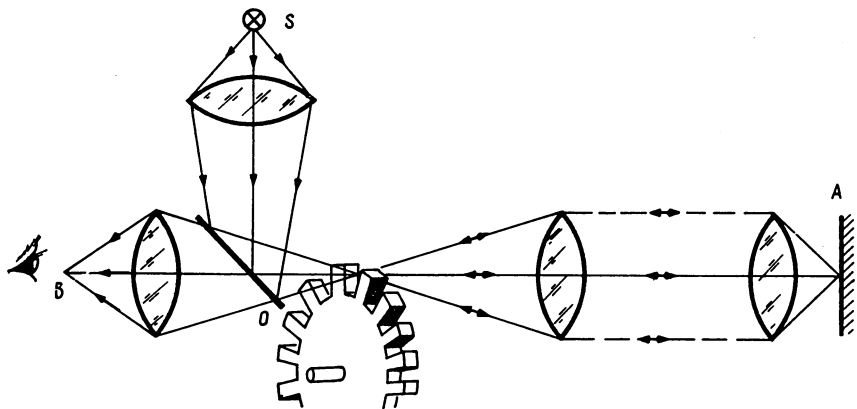


Рис. 27. Определение скорости света по Л. Физо

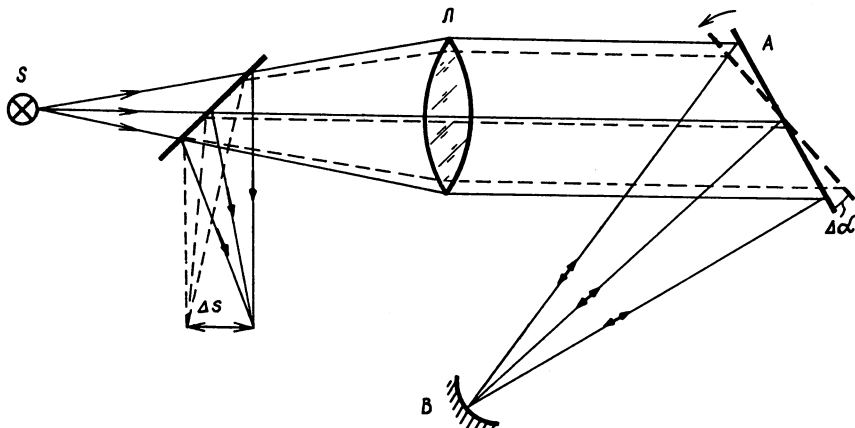


Рис. 28. Установка Фуко для измерения скорости света

Видоизменение метода предложил Ж. Фуко (1868). Он заменил зубчатое колесо вращающимся зеркалом (рис. 28). При достаточно быстром вращении зеркала A изображение источника S несколько смещается, поскольку за время t , в течение которого свет проходит от зеркала A до B и обратно, A успевает повернуться на некоторый угол $\Delta\alpha$. Зная расстояние от A до B ($L/2$), расстояние l между линзой L и местом образования изображения источника, скорость вращения ω зеркала и смещение ΔS изображения, можно рассчитать скорость света:

$$c = 4\omega l L / \Delta S.$$

Измерения Фуко дали значение $c = (299810 \pm 50)$ км/с. Интересно отметить, что метод Фуко позволял значительно уменьшить расстояние L — оно было равно всего 20 м.

В начале нашего столетия наиболее точные измерения c выполнил американский ученый А. Майкельсон. Он предложил метод, который сочетал в себе достоинства методов Физо и Фуко (рис. 29). Свет от источника S отражался от грани зеркальной призмы и с помощью плоских зеркал c и c' направлялся на вогнутое зеркало A . Далее он в виде параллельного пучка шел к вогнутому зеркалу B . Отражаясь от зеркал B и B' , свет вновь попадал на A и затем на плоские зеркала d и d' . Изображение фиксировалось в точке S' . Угловая скорость вращения призмы подбиралась таким образом, чтобы за время прохождения света туда и обратно призма успевала повернуться на $1/8$ оборота. В результате измерений Майкельсон получил $c = (299796 \pm 4)$ км/с.

Обратим внимание на следующее обстоятельство. Первые измерения скорости света были выполнены при астрономических наблюдениях, т. е. давали значение скорости света в вакууме. Измерения Физо, Фуко и Майкельсона проводились в воздухе,

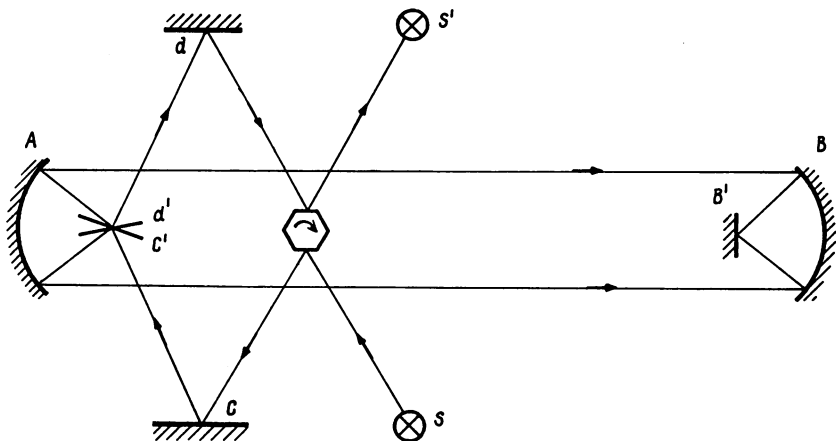


Рис. 29. Измерение скорости света по методу Майкельсона

и расчет скорости света в вакууме выполнялся по известному значению показателя преломления воздуха по формуле (79). Чтобы устранить возможную ошибку, связанную с неоднородностью воздуха, Майкельсон в 1932 г. вновь измерил скорость света методом вращающейся призмы, но свет при этом распространялся в вакуумированной трубе. Уточненное таким образом значение c было равно

$$c = (299774 \pm 2) \text{ км/с.}$$

Скорость распространения электромагнитных волн. До сих пор мы говорили о числовом значении скорости света. Важно отметить, что свет в обычном понимании этого слова есть только очень узкая часть всего диапазона электромагнитных волн (рис. 30). Хотя еще Герц в своих опытах определил скорость распространения открытых им волн и установил, что она была равна скорости света, заметим, что длина волн Герца составляла 0,6—10 м, т. е. соответствовала нынешнему радиодиапазону. Доказать то, что электромагнитное излучение любой длины волны обладает в вакууме одной и той же скоростью распространения, являлось весьма сложной задачей,

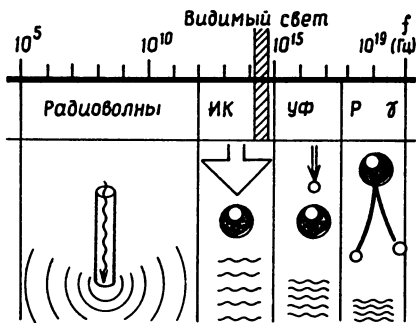


Рис. 30. Электромагнитный спектр: ИК—инфракрасный диапазон; УФ—ультрафиолет; Р—рентгеновское излучение; γ — γ -излучение

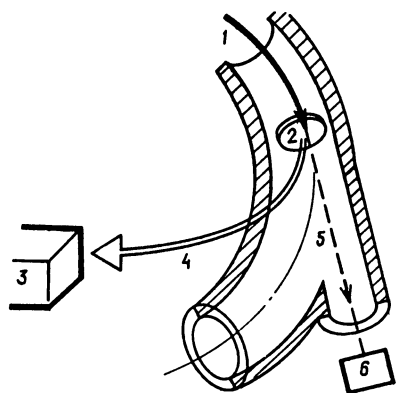


Рис. 31. Измерение скорости γ -квантов:
 1—пучок электронов; 2—мишень;
 3—счетчик электронов; 4—траектория заторможенных электронов; 5—тормозное излучение; 6—счетчик γ -квантов

поскольку при этом необходимо было исследовать огромный диапазон частот излучения — до 10^{25} Гц. Как способы генерации излучения, так и методы его регистрации сильно меняются при переходе от одного диапазона к другому. В наше время эту исключительно трудоемкую задачу можно считать выполненной.

Советские ученые Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси выполнили в предвоенные годы тщательные измерения скорости распространения радиоволн диапазона 130—450 м. Результаты их измерений дали значение скорости распространения света, равное (299500 ± 80) км/с. Ускоренное развитие радиолокации в годы второй мировой войны открыло новые возможности

для измерения скорости распространения электромагнитных волн, и в 1948 г. Аслаксон (США) получил значение $c \approx (299792 \pm 1,4)$ км/с.

В 1952 г. американские физики Д. Лакли и Дж. Вейль провели на Корнеллском синхротроне (ускоритель электронов) измерения скорости распространения γ -квантов, т. е. наиболее высокочастотного излучения электромагнитного спектра. Схема эксперимента показана на рис. 31. Ускоренный пучок электронов 1 падает на мишень 2, при этом происходит их резкое торможение и испускание γ -квантов. Заторможенные электроны отклоняются в магнитном поле и попадают на счетчик 3, который регистрирует электроны определенной энергии. Тормозное излучение, созданное этой группой электронов, регистрируется счетчиком 6 с применением схемы запаздывающих совпадений. Исходный пучок электронов ускорялся до энергий $3,1 \cdot 10^8$ эВ (скорость их движения $v = 0,9999986 c$), регистрировались заторможенные электроны с энергией $1,4 \cdot 10^8$ эВ, энергия γ -квантов была равна $1,7 \cdot 10^8$ эВ. Измеряя время запаздывания при различных положениях счетчика 6, ученые определили скорость распространения γ -квантов: $c = 297400$ км/с. Точность измерений составила 1%. В 1973 г. другая группа американских ученых сравнила скорости распространения квантов электромагнитного излучения видимого диапазона (света) и γ -квантов с энергией ≈ 7 ГэВ (частота $\approx 1,7 \cdot 10^{24}$ Гц) и получила, что относительное различие в скоростях менее $(1,8 \pm 0,6) \cdot 10^{-6}$.

Совокупность описанных результатов позволяет сделать однозначный вывод об одинаковой скорости распространения электромагнитных волн вне зависимости от их частоты (длины волны). Именно поэтому название данного параграфа включает в себя скорость света, заключенную в скобки, как скорость электромагнитного излучения очень узкого — видимого — диапазона. На наш взгляд, целесообразно было бы внести соответствующие изменения названия константы c в соответствующие нормативные документы.

Метод интерференции микроволн. Развитие техники сверхвысоких частот в военные и послевоенные годы позволило значительно расширить возможности эксперимента и сделать резкий рывок в увеличении точности измерений скорости распространения электромагнитных волн. Именно в СВЧ-диапазоне (длины волн порядка 1 см) возможны очень точные и, главное, независимые измерения частоты излучения ν и его длины волны λ . Скорость распространения излучения $c = \lambda\nu$, таким образом, также определяется с высокой точностью.

К. Фрум (США) [70] опубликовал результаты своих измерений скорости распространения излучения с длиной волны $\lambda = 4,2$ мм и частотой 72,006 ГГц: $c = (299792,5 \pm 0,1)$ км/с. Это значение c долгое время считалось наиболее точным. Возможности дальнейшего увеличения точности возникали при проведении измерений в области больших частот (меньших длин волн) и были реализованы после создания лазеров.

Излучение лазеров обладает целым рядом особенностей, выгодно отличающих его от излучения других источников света. Оно существенно более монохроматично, т. е. область частот, в пределах которой происходит генерация, очень мала. Именно эта особенность позволяет резко повысить точность определения частоты. В настоящее время стабильность частоты лазеров доведена до фантастических пределов — различие в одновременно генерируемых лазером частотах составляет всего лишь 10^{-15} самой частоты. Измерения скорости света, выполненные различными группами исследователей, дали практически совпадающие результаты. Так, в США было получено значение $c = (299792,4574 \pm 0,0011)$ км/с, в Англии — $c = (299792,4590 \pm 0,0008)$ км/с. Точность измерений константы c по сравнению с измерениями Фрума увеличилась почти в 100(!) раз и составляет в настоящее время примерно $3 \cdot 10^{-9}$ *

Внимание! Захватывающая история измерений скорости распространения электромагнитного излучения (скорости света) на этом не заканчивается. Обратим внимание на одно принципиальное с теоретической точки зрения обстоятельство. До настоящего

*Указание в табл. 1 значения c с пометкой «точно» является уступкой метрологам и одновременно грубой физической ошибкой.

времени для скорости света c не получено пока однозначного значения. Увеличение точности измерений не снимает остроты проблемы: принцип постоянства скорости света пока нельзя рассматривать как прямой результат измерений. При анализе самого понятия «скорость» возникают большие трудности, рассмотрение которых необходимо для понимания существа постоянной c .

Существует ли абсолютная система отсчета? Все отлично знают, что скорость — понятие относительное. Это скорость самолета относительно Земли, скорость бегуна относительно сидящих на трибунах зрителей и т. д. Однако результаты, полученные при измерении скорости света, как-то не согласуются с этими привычными представлениями. Относительно чего, относительно какой среды она измеряется? Снова возникает эфир как носитель световых волн. Может быть, скорость света — это его скорость относительно неподвижного эфира? Но при этом неподвижный эфир становится очень удобной системой отсчета для всех остальных физических явлений, он приобретает статус абсолютной системы отсчета, оставаясь недоступным для эксперимента. Но при этом принципиальные трудности только возрастают.

Если эфир неподвижен, можно легко усмотреть большое отличие в астрономических определениях скорости света и «земных». В первых определяется скорость света, движущегося в одном направлении — от звезды к Земле. В земных опытах свет распространяется в противоположных направлениях — до и после отражения от зеркал. Наш повседневный опыт говорит о том, что скорость может зависеть от направления, как различна скорость лодки, идущей вверх и вниз по реке. Аналогом реки в экспериментах со скоростью света служит, очевидно, движение Земли по орбите со скоростью, равной примерно 30 км/с. Учтем это в опытах Физо. Пусть на пути от A к B свет распространяется в направлении, совпадающем со скоростью движения Земли. Тогда его скорость относительно неподвижного эфира равна $c+v$, где v — скорость движения Земли. При распространении луча в противоположном направлении скорость света относительно эфира равна $c-v$. Что же дают в таком случае измерения? Среднее значение скорости света! Почему же тогда ее принимают за одну из основных фундаментальных физических постоянных? Проблема обнаружения эфира вновь предстает перед учеными в виде мучительной головоломки.

Дж. Максвелл предложил идею постановки опыта по обнаружению неуловимого эфира. В статье «Эфир», опубликованной в Британской энциклопедии, он пишет [18]: «Если бы можно было определить скорость света, наблюдая время, употребляемое им на прохождение от одного пункта до другого на поверхности Земли, то, сравнивая наблюдаемые скорости

движения в противоположных направлениях, мы могли бы определить скорость эфира по отношению к этим земным пунктам». Он же приводит оценку разности времен, затрачиваемых светом на расстояния между пунктами туда и обратно. Время t_1 , затрачиваемое светом на путь туда и обратно, равно

$$t_1 = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2lc}{c^2 - v^2},$$

где l — расстояние между пунктами. Если бы движение Земли не сказывалось на скорости света, то соответствующее время было бы равно

$$t_2 = 2l/c.$$

Разность времен

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2l}{c} \frac{v^2}{c^2}$$

или

$$\frac{\Delta t}{t_2} = \frac{v^2}{c^2} \approx 10^{-8}.$$

Максвелл пишет, что оно «составило бы всего около одной стомиллионной доли всего времени перехода и было бы, следовательно, совершенно незаметно».

Скептицизм Максвелла в отношении возможности обнаружения эфира был вполне обоснован. Существующие в то время оптические приборы не позволяли обнаружить столь ничтожные эффекты. Это отчетливо понимал и американский физик А. Майкельсон, когда в 1880 г. приступил к постановке опытов по обнаружению эфира. Для получения надежных экспериментальных результатов ему пришлось изобрести принципиально новый оптический прибор — интерферометр, схема которого показана на рис. 32.

Опыты Майкельсона—Морли. При работе интерферометра свет от источника S падает

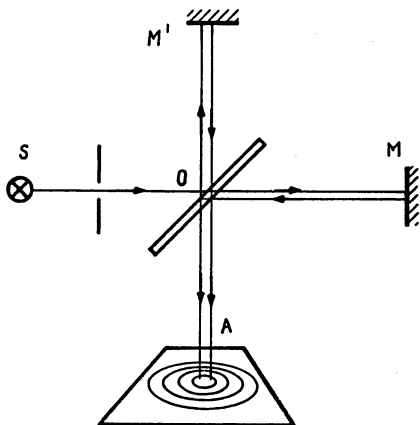


Рис. 32. Интерферометр Майкельсона (принципиальная схема)

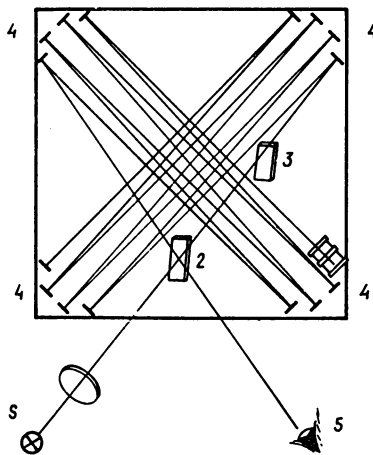


Рис. 33. Ход лучей в интерферометре Майкельсона — Морли: *S* — источник света; 2 — делительная пластинка; 3 — пластина-компенсатор; 4 — система зеркал; 5 — наблюдатель

ния в неподвижном эфире между лучами должна возникать разность хода, равная $\approx lv^2/c^2$. При повороте прибора на 90° разность времен равна $2\Delta t \approx 2lv^2/c^2$ и интерференционная картина должна была сместиться на такую часть полосы, которая соответствует отношению времени $2\Delta t$ к периоду световых колебаний T , т. е.

$$\frac{2lv^2}{c^2\lambda} = \frac{2lv^2}{c^3T}$$

где λ — длина волны света. По оценкам Майкельсона, ожидаемый сдвиг полосы был равен приблизительно 0,04 полосы, сама же установка позволяла регистрировать смещение полос, составляющее 0,01 их ширины.

Несмотря на то что в 1881 г. Майкельсону не удалось достоверно установить смещение интерференционных полос — оно было в два раза меньше точности установки, — Майкельсон все же отважился сделать принципиальный вывод: «Гипотеза эфира ошибочна». После переезда в США он совместно с Морли значительно усовершенствовал методику измерений. Интересны детали опытов. Интерферометр монтировался на массивной каменной плите, которая для обеспечения ее горизонтальности монтировалась на плавающем в ртути деревянном поплавке. Это же позволяло избавиться от вибраций. Ход лучей в интерферометре показан на рис. 33. В результате применения системы отража-

ющих зеркал общая длина светового пути была примерно в 10 раз больше, чем в первой установке.

Результаты измерений (рис. 34) Майкельсон и Морли опубликовали в 1887 г. Видно, что наблюдаемое смещение составляет не более $\frac{1}{20}$ теоретического и может быть объяснено колебаниями температуры, давления и других факторов. Многочисленные повторения опыта также не позволяли обнаружить и следов смещения полос. Эти результаты стали фундаментом для проверки и создания теорий, касавшихся свойств эфира. Первоначально же они не вызвали энтузиазма у подавляющего большинства физиков.

У. Стретт (лорд Рэлей) назвал их «истинным разочарованием». Г. Лоренц открыто писал о затруднениях, возникших из-за интерпретаций результатов опыта. Даже сам Майкельсон спустя много лет напишет: «Эксперимент кажется мне исторически ценным уже тем, что для решения этой проблемы был изобретен интерферометр... Его изобретение более чем скомпенсировало тот факт, что этот частный эксперимент дал отрицательный результат» [18].

Опыт Майкельсона не обнаружил присутствия эфирного ветра, дующего со скоростью, большей 5—7 км/с (такова была точность его методики). Выполнив ряд усовершенствований, Иллингворт в 1927 г. не обнаруживает эфирного ветра, дующего со скоростью 1 км/с. Не обнаруживают эфира французские исследователи Пикар и Стаэль, поднимая интерферометр Майкельсона в атмосферу на воздушном шаре. В опытах Эссена с интерференцией стоячих электромагнитных волн предполагаемая скорость ветра снижается до 0,24 км/с, но эфир по-прежнему не обнаруживает себя. Чемпни и его сотрудники показывают (1963), что нет эфирного ветра, дующего со скоростью, большей 5 м/с. В 1964 г. в экспериментах с лазерами Ч. Таунс получает, что возможная скорость эфирного ветра менее 1 м/с. За период с 1881 г. до нашего времени предел возможной скорости эфирного ветра был уменьшен почти в 5000 раз! Только теперь можно с полным основанием утверждать то, что эфира нет.

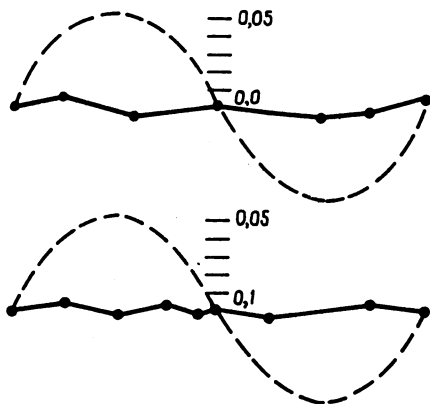


Рис. 34. Результаты измерений Майкельсона—Морли

Пунктиром показано смещение полос, рассчитанное по теории неподвижного эфира (уменьшено в 6 раз). Сплошная линия — экспериментальные точки

Одно перечисление опытов свидетельствует о том, насколько важен был для науки этот вывод. Нет среды, которая может служить абсолютной системой отсчета. Гипотеза о существовании эфира противоречит опытным фактам, она ошибочна. Опыт Майкельсона показывает, что скорость света в пустоте одинакова для всех систем отсчета, независимо от их движения. Только теперь можно с полной уверенностью говорить о том, что *скорость распространения электромагнитных волн в пустоте (скорость света)* — *фундаментальная физическая постоянная.*

5.3. Специальная теория относительности

Эксперименты и интерпретация. Изучение круга явлений, так или иначе связанных с проблемой скорости света, поставило перед физиками множество проблем. Напомним основные результаты исследований. Изучение природы света привело к новому взгляду на его природу. Свет — это частица-волна. В физику вошли новые понятия корпускулярно-волнового дуализма, остро ощущалось несовершенство классических представлений, их неадекватность описанию новых физических явлений. Не находили объяснения результаты опытов Майкельсона—Морли. Как объяснить существование абсолютной скорости? В гипотезах на этот счет не было недостатка. Некоторые полагали, что эфир может полностью увлекаться атмосферой, но анализ показал, что это не согласуется с наблюдениями за движением звезд. К тому же еще в 1851 г. Физо выполнил опыты по увлечению света движущейся водой, из которых следовало, что коэффициент увлечения зависит от показателя преломления вещества. Поскольку показатель преломления атмосферы практически равен единице, она не должна увлекать эфир. Было высказано также и предположение о том, что скорость света в эфире все же зависит от скорости движения источника света. Однако и это не согласуется с наблюдениями. В 1956 г. советские ученые А. М. Бонч-Бруевич и А. П. Молчанов, измеряя скорость света, испускаемого различными краями солнечного диска, показали, что вращение Солнца не сказывается на ее величине. Были высказаны и совсем курьезные гипотезы о том, что Земля покоится относительно эфира. Но тогда Солнце, Галактика и вся Вселенная должны вращаться вокруг Земли. Принятие этой гипотезы вернуло бы науку в докоперниковские времена.

Необходимо также было найти убедительную интерпретацию твердо установленному в эксперименте факту зависимости массы тел от их скорости, выяснить физический смысл существования в природе максимально возможной скорости — скорости света. И все эти данные необходимо было интерпретировать не поодиночке, а в едином комплексе. Неясные проблемы относились

к различным областям физики, построить единую теорию для их объяснения казалось невозможным. И все же развитие физики пошло по этому сверхтрудному пути. Гением физики XX века, создателем нового физического мира, в котором многие привычные понятия оказались несостоятельными, а многие нерешенные проблемы нашли естественное объяснение, стал Альберт Эйнштейн.

Прежде чем приступать к изложению идей специальной теории относительности Эйнштейна, процитируем замечание М. Планка о соотношении теории и эксперимента: «Экспериментатор — это тот, кто стоит на переднем крае, кто осуществляет решающие опыты и измерения. Опыт означает постановку вопроса, обращенного к природе, измерение означает принятие ответа, который дала природа. Но прежде чем поставить опыт, его нужно продумать, это значит — надо сформулировать вопрос, обращенный к природе, прежде чем оценить измерение, его нужно истолковать, т. е. надо понять ответ, который дала природа. Этими двумя задачами занимается теоретик» [71]. Именно в интерпретации результатов измерений выявляется фундаментальная глубина теоретических выводов Эйнштейна. Они привели к кардинальному пересмотру казавшихся незыблемыми со времен Ньютона представлений о физическом пространстве и времени.

Пространство и время по Ньютону. Точка зрения Ньютона на пространство и время на протяжении долгого времени считалась общепринятой. Он полагал, что пространство является своеобразной «ареной», на которой разыгрываются явления природы, не оказывая никакого действия на саму арену. Пространство Ньютона является абсолютной категорией. Такой же абсолютной категорией у Ньютона является и время, которое течет само по себе и также не зависит от внешних обстоятельств. Время так же бесконечно, как и пространство, но в отличие от него имеет лишь одно измерение.

Принцип относительности Галилея. Опыт не дает нам свидетельств существования абсолютного пространства. Физические явления протекают одинаково в системах движущихся равномерно и прямолинейно друг относительно друга. Такие системы получили название инерциальных. Повседневная жизнь убеждает нас в справедливости этого принципа. Например, во время поездки на теплоходе по реке нам приходится обедать как на берегу, так и в каюте. При этом все наши действия остаются прежними, привычными, ничто не выдает нам того, что в одном из этих случаев мы движемся. Даже случайно выпавший из рук предмет падает на пол каюты так же отвесно, как и на берегу. Только резкий рывок или торможение теплохода могут напомнить нам о том, что мы движемся по отношению к берегу. Принцип, согласно которому законы физики должны быть одинаковы

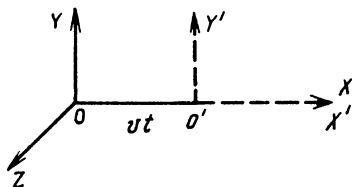


Рис. 35. К выводу преобразований Галилея

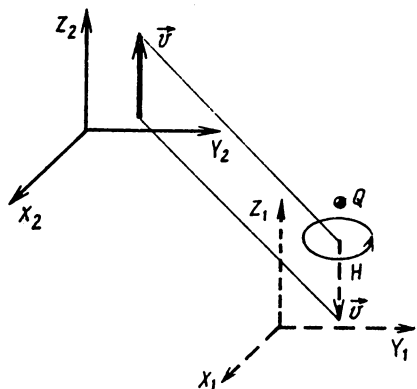


Рис. 36. К различию электромагнитных явлений, наблюдаемых в движущихся друг относительно друга системах отсчета

$d^2x/dt^2 = d^2x'/dt'^2$, а так как $F = F'$ (по определению), то $F' = md^2x'/dt'^2$. Вид уравнения движения при переходе от одной инерциальной системы к другой не меняется. Это свойство называется инвариантностью закона по отношению к преобразованиям Галилея.

Принцип относительности Галилея и электромагнитные явления. Нетрудно убедиться в том, что к электромагнитным явлениям принцип относительности Галилея неприменим. Рассмотрим простой пример. Пусть в системе 1 (x_1, y_1, z_1) (рис. 36) покоится электрический заряд Q . Согласно законам электростатики, он создает вокруг себя электростатическое поле. Для наблюдателя, находящегося в системе 2 (x_2, y_2, z_2), движущейся со скоростью v относительно первой системы, заряд Q движется и, следовательно, представляет собой электрический ток, который сопровождается появлением магнитного поля. В различных системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно одна относитель-

с точки зрения любого наблюдателя, движущегося с постоянной скоростью, называется принципом относительности Галилея. Координаты неподвижной и движущейся со скоростью v вдоль оси X систем отсчета (рис. 35) связаны простыми преобразованиями:

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t \quad (82)$$

Здесь x, y, z и t — координаты и время в неподвижной системе, x', y', z' и t' — соответствующие величины в движущейся системе. Согласно преобразованиям Галилея (82), движение не оказывает никакого влияния на течение времени (время абсолютно), размеры тела не зависят от того, покоится тело или движется (пространство абсолютно).

Согласно (82), все законы природы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета. Например, второй закон Ньютона в неподвижной системе имеет вид $F = md^2x/dt^2$. Если $x' = x - vt$ и $v = \text{const}$, то

льно другой, мы получаем различные физические поля, что никак не согласуется с принципом Галилея.

Существование скорости света также нельзя согласовать с этим принципом. В самом деле, если в одной системе свет распространяется со скоростью c , то в другой эта же скорость должна быть равной $c \pm v$. Это вступает в противоречие как с опытными данными (результаты Майкельсона), так и с теорией электромагнитных явлений Максвелла, в которой скорость распространения электромагнитных колебаний независимо от состояния движения системы всегда равна c . Более того, скорость света — строго определенная величина, равная $3 \cdot 10^8$ м/с, а в нашем примере она может быть сколь угодно большой, что также не соответствует опытным данным.

Неприменимость принципа относительности Галилея к электромагнитным явлениям долгое время являлась загадкой физики. Для ее решения предлагались различные, но недолговечные теории. Можно было попытаться ограничить применение принципа — он пригоден для механики и непригоден для электродинамики. Физика разделялась как бы на две области, в каждой из которых действуют свои законы. Это означало бы, что мы смирились с существованием внутренних противоречий в науке о явлениях природы, что не согласовывалось с представлениями о ее единстве. Была и другая точка зрения на разрешение возникших противоречий. Поскольку уравнения Максвелла (69)—(72) не инвариантны по отношению к преобразованиям Галилея, естественным казался вывод о том, что в найденной Максвеллом форме они не являются окончательными, что следует искать такую их запись, которая будет инвариантна по отношению к преобразованиям (82). Но эти попытки были безуспешны. Г. Лоренц показал, что уравнения Максвелла (69)—(72) инвариантны по отношению к преобразованиям следующего вида:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (83)$$

Эти соотношения получили название преобразований Лоренца. Автор преобразований не придавал им особого физического смысла, рассматривая их лишь как формальный математический прием.

Специальная теория относительности. А. Эйнштейн предложил принципиально новое решение задачи. В основу своей теории он положил твердо установленный факт постоянства скорости света, что еще раз подчеркивает фундаментальное значение этой константы для науки.

Решение Эйнштейна кажется очень простым — справедливы и принцип относительности, и законы электродинамики, в частности вытекающее из них подтвержденное на опыте постоянство

скорости света. А. Эйнштейн оформил эти два предложения в виде постулатов. 1. Все процессы природы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета. 2. Скорость света одинакова и конечна во всех инерциальных системах отсчета, не зависит от скорости движения источника и является предельной скоростью распространения какого-либо сигнала.

Сегодня эти постулаты кажутся вполне естественными. Однако следующие из них выводы были поистине революционны, и нужно было обладать громадной смелостью, быть глубоко убежденным в своей правоте, чтобы сделать эту революцию в физике.

Распространение принципа относительности на электромагнитные явления — на все физические явления! — означало, что необходимо было найти такие преобразования уравнений Максвелла, чтобы при переходе от одной инерциальной системы к другой их вид не менялся и скорость света оставалась постоянной. Эйнштейн строго показывает, что этим требованиям удовлетворяют преобразования Лоренца (83). При этом из формальных математических выводов они приобретают ясный физический смысл преобразований координат и времени при переходе от одной инерциальной системы к другой. Отметим разницу в пути, которым шли к соотношениям (83) Лоренц и Эйнштейн. Лоренц «нашел их... как гипотезу о сокращении размеров тел в процессе их движения. Эйнштейн показал, что в постулате относительности речь идет не только о гипотезе сокращения тел, но и о новой трактовке времени» [67]. Время, бывшее неизменным, абсолютным, меняет свое течение в различных системах отсчета. В движущихся системах течение времени замедляется в $\sqrt{1-v^2/c^2}$ раз. Два события, одновременные в одной системе координат, могут быть неодновременны в другой системе, движущейся относительно первой. Эйнштейн дает новое определение понятия одновременности: одновременными следует считать события, происходящие в различных точках пространства, когда посланные в момент каждого события световые лучи встречаются на середине отрезка, соединяющего эти точки. Фундаментальная физическая постоянная — скорость света — оказывается основой определения.

Вытекающие из специальной теории относительности следствия многим казались парадоксальными. Например, из нее следует несостоятельность классических представлений об абсолютном пространстве — в движущихся системах происходит изменение размеров тел. Теория относительности значительно расширила горизонты науки, она поставила в повестку дня такие фундаментальные философские и физические вопросы, как проблема связи между пространством, временем и материей. В данном пособии невозможно рассказать о вытекающих из нее многочис-

ленных физических следствиях, об этом написано множество прекрасных книг [72—74]. Мы обсудим более подробно лишь те важнейшие результаты, которые касаются выяснения физического смысла фундаментальной постоянной—скорости света.

Максимально возможная скорость распространения взаимодействий в природе. Из преобразований Лоренца—Эйнштейна можно получить соотношение для сложения скоростей в релятивистской механике. В классической механике относительная скорость \tilde{u} двух тел, движущихся навстречу друг другу со скоростями u и v (рис. 37), равна

$$\tilde{u} = u + v. \quad (84)$$

В релятивистской механике этот закон не выполняется. Согласно (83),

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2}. \quad (85)$$

Из (85) вытекает очень важное следствие. Если скорость движения тела в системе 1 равна c , то, как легко видеть, его скорость и в системе 2 будет также равна c . Скорость света при переходе от одной инерциальной системы к другой не меняется. Не зависит c и от скорости движения источника света. Вот почему опыт Майкельсона дал отрицательный результат, и объяснение этому лежит не в свойствах вымышленного эфира, а в свойствах реального пространства-времени.

С помощью специальной теории относительности был разрешен глубокий конфликт между ньютоновской механикой и релятивистской по своей сути теорией электромагнетизма Максвелла. По существу, Эйнштейном была создана новая механика, описывающая движение тел при $v \approx c$.

Принцип соответствия. Из (85) следует, что при $u' \ll c$ и $v \ll c$ можно пользоваться обычным классическим правилом сложения скоростей (84). Таким образом, механика Эйнштейна установила границы применимости классической механики, которая является частным случаем релятивистской. Механика Ньютона справедлива при движениях тел со скоростями $v \ll c$. С точки зрения развития науки это положение очень важно: любая новая физическая теория должна вбирать в себя все достижения старой,

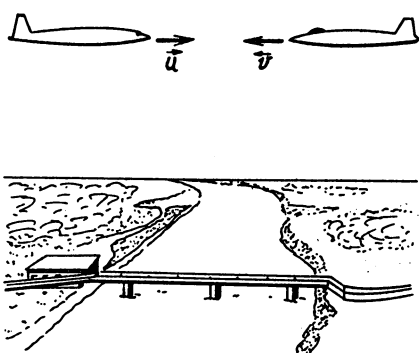


Рис. 37. Сложение скоростей в нерелятивистской механике: $\tilde{u} = u + v$.

указывая при этом границы ее применимости. Это правило получило название принципа соответствия.

Легко видеть, что преобразования Галилея (82) являются частным случаем более общих преобразований Эйнштейна (83). В самом деле, при $v/c \ll 1$ из (83) немедленно следует (82). Принцип соответствия работает и в этом случае.

Релятивистская масса. При движении тел со скоростями $v \approx c$ второй закон Ньютона в записи (3) перестает быть справедливым. Если $a = F/m$, то постоянная сила F , действуя продолжительное время, способна ускорить тело до сколь угодно больших скоростей, в том числе и до $v > c$, что запрещается релятивистской механикой. Закон динамики в теории Эйнштейна приобретает вид

$$F = \frac{dp}{dt}. \quad (86)$$

Здесь

$$p = mv / \sqrt{1 - \beta^2} \quad (87)$$

— релятивистский импульс тела. При этом физическое содержание понятия массы изменяется. Это уже не коэффициент пропорциональности между F и a (инертная масса), она не определяет действие на тело гравитационных сил (гравитационная масса). Масса движущегося тела зависит от его скорости:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (88)$$

где m_0 — масса покоящегося тела, или просто масса покоя. При $v/c \ll 1$ величина $\beta^2 \ll 1$ и (88) принимает обычный с точки зрения классической механики вид: $m = m_0$. Соотношение (88) показывает, почему на протяжении многих веков массу считали неизменной характеристикой тела. Обычно мы рассматриваем тела, движущиеся со скоростями $v \ll c$. Только получив в свое распоряжение такую легчайшую частицу, как электрон, ученые впервые смогли наблюдать явления, происходящие при $v \approx c$. Не удивительно, что новые релятивистские эффекты сразу же дали знать о себе.

Из соотношения (88) следует, что движение тел со скоростью $v > c$ невозможно. В самом деле, при $v \rightarrow c$ масса любого тела возрастает настолько, что дальнейшее ускорение его становится невозможным. Например, при скорости электрона $v = 0,99999992 c$ его масса превышает значение массы покоя в 2500 раз. Для дальнейшего ускорения электрона потребовались бы значительно большие силы, но и это не даст результа-

та—масса тела возрастает неограниченно. В этом глубокая физическая сущность фундаментальной постоянной c — скорость света в вакууме есть максимально возможная скорость в природе.

Масса и энергия. При относительно малых скоростях соотношение (88) можно записать в виде

$$m \approx m_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right).$$

Отсюда следует, что изменение кинетической энергии E_x тела на $m_0 v^2/2$ приводит к изменению его массы на Δm :

$$\Delta m = \frac{m_0 v^2}{2c^2} = \frac{E_x}{c^2}.$$

Эйнштейн широко обобщил этот результат. Из теории относительности следует, что энергия тела может быть записана в виде

$$E = mc^2 = m_0 c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (89)$$

При малых скоростях

$$E \approx m_0 c^2 + m_0 v^2/2.$$

Второе слагаемое этой формулы — обычная кинетическая энергия тела, первое определяет энергию тела при его скорости, равной нулю:

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (90)$$

Глубочайший результат! Любое тело, обладающее массой покоя, уже имеет энергию только благодаря факту своего существования. Например, энергия покоя 1 г любого вещества равна $9 \cdot 10^{13}$ Дж. Закон сохранения энергии теперь приобретает новый смысл — это объединенный закон сохранения массы-энергии. При этом необходимо четко понимать, что соотношение Эйнштейна (90) нельзя понимать как возможное превращение массы в энергию или наоборот, это всего лишь основание для количественного сопоставления этих величин. Масса и энергия — совершенно независимые по своей физической сущности понятия. Энергия строго сохраняется, меняется лишь форма, в которой она проявляется. Закон (90) позволил ученым понять много новых явлений в физике атома и атомного ядра, физике элементарных частиц и т. д.

Сколько весит свет? Из соотношений (80) и (90) следует, что кванты света — фотоны — должны также обладать массой

$$m_\phi = hv/c^2. \quad (91)$$

Она очень мала; например, масса фотона видимого света составляет всего $\approx 10^{-33}$ г. Обнаружение и исследование эффектов,

связанных с наличием m_ϕ , чрезвычайно трудно. И все же в 1900 г. профессор Московского университета П. Н. Лебедев экспериментально обнаружил световое давление. Другим фактом, подтверждающим наличие у фотонов массы, явилось предсказанное А. Эйнштейном искривление световых лучей в сильном поле тяготения Солнца. Этот эффект был экспериментально подтвержден в 1919 г. (см. § 6).

Масса покоя фотона в квантовой теории излучения считается равной нулю. Однако это лишь постулат теории, потому что ни один реальный физический эксперимент не может подтвердить этого. Наличие же у фотона конечной массы покоя приводило бы к тому, что скорость света в вакууме перестала бы быть универсальной постоянной, она зависела бы от энергии фотона. В результате скорость синего света была бы, например, больше скорости красного. Однако экспериментальные данные до сих пор не обнаружили этого. На сегодняшний день полученная из астрономических данных оценка массы покоя фотона дает $(m_\phi)_0 \leq \leq 3 \cdot 10^{-60}$ г. Если же масса покоя фотона будет порядка 10^{-66} г, то никаких эффектов, связанных с ее наличием, в эксперименте обнаружить не удастся [18].

5.4. В мире сверхсветовых скоростей

Название этого подраздела, казалось бы, противоречит всему сказанному в 5.3. Но, как было замечено в начале параграфа, пора обсудить и некоторые проблемные вопросы.

Противоречит ли движение со сверхсветовой скоростью специальной теории относительности? Нет, и это отмечал еще сам автор теории: «...этот результат с чисто логической точки зрения не содержит, по-моему, в себе никаких противоречий». И далее: «Он все же настолько противоречит характеру всего нашего опыта, что невозможность предположения $v > c$ представляется в достаточной степени доказанной. В этом случае мы вынуждены считать возможным механизм передачи сигнала, при использовании которого достигаемое действие предшествует причине» [18]. Таким образом, основной логический аргумент против существования сверхсветовых скоростей — нарушение причинности. Однако в очень малых пространственно-временных областях требование причинности, возможно, не является обязательным: «Некоторые опыты с элементарными частицами указывают на то, что в субмикроскопических областях пространства и времени однозначно разделить прошлое и будущее действительно нельзя» [75].

Итак, можно допустить существование внутри ультрамалых пространственно-временных интервалов частиц, движущихся со сверхсветовыми скоростями. Эти частицы получили название тахионов (от греч. «тахис» — быстрый). Обсудим вопрос

о том, каковы свойства этих частиц и можно ли обнаружить их взаимодействие с обычными досветовыми частицами.

Обычные частицы не могут перейти барьер скорости света вследствие непрерывного наращивания скорости из-за резкого увеличения их массы (см. рис. 17). Однако фотоны рождаются, сразу же имея скорость движения, равную скорости света. Тахионы тоже должны иметь сверхсветовую скорость с момента своего рождения, что означает, что мы имеем дело с совершенно новой формой материи, отделенной от обычной непреодолимым световым барьером. Если время жизни тахионов мало, то распад их произойдет сразу же вблизи точки, где они родились. Такие события невероятно трудно наблюдать в эксперименте. Поскольку в природе все взаимосвязано, возможно существование процессов в мире обычных досветовых частиц, которые сопровождаются рождением тахионов. Физики пока безуспешно ищут следы таких процессов в лабораториях.

Необычность тахионов еще более подчеркивает то обстоятельство, что в соответствии с (88) мы должны приписать им мнимую массу. Однако следует обратить внимание на то, что соотношение (88) получено на основе преобразований Лоренца (83), справедливость которых в мире малых пространственно-временных масштабов не доказана. Таким образом, тахионная гипотеза не противоречит ни физике, ни философии, о чем свидетельствует большое количество посвященных ей работ. Оказывается, можно построить внутренне непротиворечивую теорию, в которой на больших расстояниях взаимодействия происходят как обычно, а на малых — со сверхсветовыми скоростями. Так или иначе, возможное существование тахионов является предостережением против существования каких-либо физических догм, вызовом природы ее исследователям.

6. ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

Гравитация и относительность. Теперь можно снова вернуться к рассмотрению проблем, связанных с гравитационной постоянной. Напомним, что начатое в § 1 исследование осталось неоконченным—теория тяготения Ньютона не могла вскрыть причины явления. Расчеты по закону всемирного тяготения (1) не согласовывались с результатами наблюдений вращения перигелия Меркурия. Создателю специальной теории относительности А. Эйнштейну, выявившему фундаментальное значение скорости света как максимально возможной скорости распространения любых взаимодействий в природе, был ясен и другой принципиальный недостаток ньютоновской теории. Ведь в ней скорость распространения гравитационного взаимодействия считалась бесконеч-

ной, это была теория дальнего действия, что никак не согласовывалось со вторым постулатом специальной теории относительности. В течение 1905—1916 гг. А. Эйнштейн упорно работает над поисками нового решения проблемы тяготения.

При всем громадном значении выводов специальной теории относительности для развития науки она отнюдь не является ее высшим достижением. Легко заметить ограниченность ее выводов. Например, она рассматривает только системы, движущиеся равномерно и прямолинейно друг относительно друга (инерциальные системы), в то время как помимо таких систем существует множество других, движущихся с ускорением. Предпочтение, оказываемое специальной теорией относительности инерциальным системам, ничем не обосновано. Другим недостатком этой теории является то, что она не дала никакого объяснения причинам тяготения.

Неинерциальные системы и свойства пространства. Одним из самых важных следствий специальной теории относительности явилась замена ньютоновских представлений об абсолютных пространстве и времени на новую физическую сущность — единое четырехмерное пространство-время (пространство Минковского). Нет пространства отдельно от времени и нет времени отдельно от пространства — формулы (83) связали эти два прежде независимых понятия в единое целое. Но пространство Минковского является экстраполяцией классического трехмерного пространства на еще одно измерение и поэтому также имеет абсолютный характер. В специальной теории относительности пространство-время пассивно — оно является все той же «ареной», на которой разыгрываются физические процессы, не оказывая обратного воздействия на нее.

Использование в пространстве Минковского прямоугольных координат обусловлено тем, что в специальной теории относительности рассматривались только инерциальные системы, т. е. системы, движущиеся друг относительно друга равномерно и прямолинейно. На такие системы по первому закону Ньютона не действуют внешние силы. Однако такое плоское четырехмерное пространство является физической абстракцией, так как хорошо известно, что существует одна сила, которая действует везде и всегда, — это сила тяготения. От нее нельзя заслониться никакими экранами, как, например, это можно сделать в случае электромагнитного взаимодействия. Под действием силы тяготения все тела и системы отсчета движутся с ускорением. Напрашивается важный для понимания сущности гравитации вывод: инерциальные системы принципиально непригодны для описания тяготения. Для описания действия гравитационных сил надо отказаться от столь привычной нам евклидовой геометрии. Тяготение требует использования нового математического аппарата. Такой аппарат был уже создан. Громадный вклад в разработку

неевклидовых геометрий внесли русский ученый Н. Лобачевский, венгерский ученый Я. Бойяи и немецкий ученый К. Риман. Искривленное четырехмерное пространство Римана оказалось адекватным описанию явления гравитации.

Общая теория относительности. Глубинной основой исследований Эйнштейна является широкое обобщение им фундаментальных физических принципов. При разработке теории тяготения он отмечал, что первый постулат специальной теории относительности является ограниченным. Реальные системы движутся с ускорением, и великий теоретик формулирует общий принцип относительности: основные законы физики имеют для двух наблюдателей, движущихся произвольным образом и использующих произвольные, непрерывно преобразуемые одна в другую системы координат, одинаковый вид. Эйнштейн обращает внимание на фундаментальные структурные свойства физических законов. Законы природы имеют одно и то же выражение, пригодное для любого наблюдателя. Таким образом, общий принцип относительности содержит в себе в некотором смысле абсолютное знание.

Эйнштейн придавал принципу эквивалентности (8) глубочайшее физическое значение. Равенство инертной и гравитационной масс означает, что тяготение и инерция — одно и то же явление. Причина тяготения, разгадка его механизма — в свойствах пространства. Это уже не пассивная арена для физических процессов, структура пространства непостоянна, его свойства изменяются в соответствии с распределением и движением в нем материи. Наличие больших масс материи (Солнце) приводит к изменению свойств пространства. Эти неоднородности искривляют движение любых масс, которые оказываются вблизи притягивающего центра. Описание явления тяготения принципиально меняется. По Ньютону, это движение под действием силы тяготения, по Эйнштейну, это свободное движение тел в искривленном пространстве-времени. Загадка движения Меркурия находит при этом естественное объяснение — ведь Меркурий ближе к Солнцу, чем все другие планеты (см. рис. 2), т. е. движется в гораздо более сильном гравитационном поле. В таких полях теория тяготения Ньютона не «работает».

Эйнштейн вывел общие уравнения тяготения в криволинейном пространстве-времени, связывающие геометрические свойства пространства с распределением в нем материи:

$$R_{mn} - \frac{1}{2} g_{mn} R = \chi T_{mn}. \quad (92)$$

Здесь R_{mn} — тензор Риччи (отражает геометрические свойства пространства); R — скаляр кривизны, получаемый из тензора Риччи путем математической операции свертки; g_{mn} — метрический тензор; T_{mn} — тензор энергии-импульса, отражающий свой-

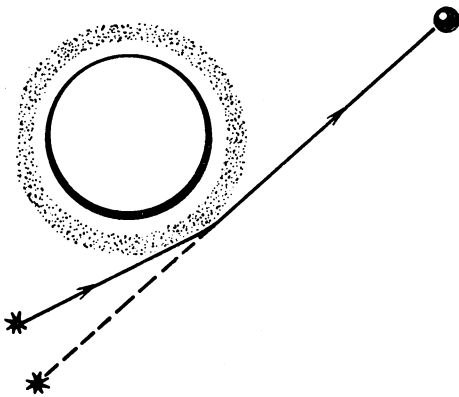


Рис. 38. Искривление световых лучей в поле тяготения Солнца

Пунктир — кажущееся направление на звезду

ства материи; m и n — целые числа, пробегающие значения 1, 2, 3 и 4. Входящий в правую часть уравнения (92) коэффициент χ есть гравитационная постоянная Эйнштейна, связанная с константами G и c :

$$\chi = \frac{2G}{c^4} = 2,08 \cdot 10^{-50} \text{ г}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2. \quad (93)$$

Уравнения Эйнштейна (92) представляют собой систему из десяти нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. (В теории тяготения Ньютона содержится, как известно, одно дифференциальное уравнение второго порядка.) Общего решения этих уравнений при произвольных начальных условиях нет.

Теория получает признание тогда, когда на ее основе находят объяснение непонятные факты или подтверждаются предсказываемые ею новые явления. Так было и с общей теорией относительности. Решая уравнения (92), Эйнштейн получил значение смещения перигелия Меркурия, точно соответствующее многовековым наблюдениям. Наиболее убедительным доказательством справедливости теории явилось экспериментальное подтверждение предсказанного Эйнштейном искривления световых лучей в сильном поле тяготения Солнца. Поскольку фотоны также обладают массой [см. (91)], они должны притягиваться Солнцем, что приводит к изменению кажущегося положения звезд, наблюдаемых вблизи Солнца во время солнечного затмения (рис. 38). В 1919 г. ученые выполнили измерения смещения положения звезд во время солнечного затмения. Этот же участок неба был сфотографирован тогда, когда Солнце ушло далеко от него. Наложение снимков четко

показало смещение положения звезд, причем его величина точно согласовывалась с расчетами по общей теории относительности.

Новый вид закона тяготения. В теории тяготения Эйнштейна закон тяготения (1) не выполняется. Сила притяжения двух тел определяется теперь выражением

$$F_3 = \frac{GMm}{R^2 \sqrt{1 - 2GM/(Rc^2)}} \quad (94)$$

Отметим разницу в выводах, которые следуют из сравнения формул (1) и (94). В теории тяготения Ньютона (1) сила F при уменьшении R растет и остается конечной при любом конечном расстоянии. В соответствии с (94) при некотором значении $R = r_g$

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}, \quad (95)$$

сила тяготения F_3 становится равной бесконечности ($F_3 = \infty$). Величину r_g называют гравитационным радиусом. Для Земли он равен 0,9 см ($R_z = 6400$ км), для Солнца $r_g = 3$ км ($R_c = 7 \cdot 10^5$ км). При $F_3 = \infty$ ни один сигнал не может выбраться из данной области пространства-времени. Даже свет не может преодолеть этого чудовищного притяжения. Все, что происходит внутри этой области, скрыто от глаз внешнего наблюдателя, такие объекты получили название черных дыр. Существование черных дыр существенно сказывается на свойствах Вселенной [76 — 78].

Вернемся еще раз к анализу определения фундаментальных физических постоянных (см. ч. 1, § 3), как «коэффициентов, входящих в выражения фундаментальных физических законов». Если проводить формальную аналогию между (1) и (94), то, согласно этому определению, коэффициент в (94) становится равным $G/\sqrt{1 - 2GM/(Rc^2)}^{-1}$, т.е. зависит от M и R . Стоит лишь применить новый вид закона тяготения, как беспомощность определения [8,20] становится очевидной.

Космология по Эйнштейну. Наброски динамики Вселенной, о которых шла речь в § 1, были выполнены на основе теории тяготения Ньютона, содержали в себе множество малообоснованных предположений и поэтому не могли быть признаны убедительными. Непреходящее значение теории тяготения Эйнштейна состоит в том, что она впервые позволила поднять занавес над тайной возникновения и эволюции Вселенной. Человечество стало постигать глобальные законы, управляющие ее поведением, ощутило ее живое дыхание. Эти исследования наполнили новым смыслом проблему гравитации.

Одно из первых решений уравнений тяготения (92) принадлежит их творцу. При расчете Эйнштейн применил допущение, которое в 1916 г. казалось естественным. Многовековые астрономические наблюдения наводили на мысль о том, что наша

Вселенная стационарна, что ее свойства не зависят от времени. Конечно, планеты и звезды движутся, звезды рождаются и гибнут, но в целом во всей Вселенной число частиц постоянно, а ее границы, как полагал Эйнштейн, не зависят от времени. Эйнштейн попытался найти решения уравнений поля тяготения в приложении к такому статическому пространству. Однако результаты расчетов обескуражили самого творца теории — статическое пространство не являлось решением уравнений (92). Эйнштейн попытался исправить положение введением поправок в созданные им уравнения, а именно предположил существование силы отталкивания, которая растет с расстоянием:

$$F_{от} = \Lambda r m c^2. \quad (96)$$

В (96) m — масса отталкиваемого объекта, r — его расстояние от отталкивающего тела, Λ — космологическая постоянная. Сила $F_{от}$ не зависит от отталкивающей массы. При $\Lambda \approx 10^{-53} \text{ м}^{-2}$ сила притяжения двух тел с $m = 1 \text{ кг}$ и $r = 1 \text{ м}$ превышает F_g в 10^{25} раз [24]. Но для двух Галактик массами по 10^{41} кг , находящихся на расстоянии $r = 10^6$ световых лет ($\approx 10^{22} \text{ км}$), сила отталкивания становится примерно равной силе притяжения. Введение в уравнения космологической постоянной, хотя и давало возможность получения в результате решения статической Вселенной, с физической точки зрения было мало обосновано. К тому же полученное решение было неустойчивым, и со временем Эйнштейн отказался от него. (Значение космологической постоянной до сих пор точно не измерено. Тем не менее нельзя априори исключить ее из теории. В современном понимании Λ -член описывает гравитацию физического вакуума.)

Возможны и другие решения уравнений (92), описывающие динамику нестационарной Вселенной. Одно из них принадлежит В. де Ситтеру. В его решении расстояния между двумя произвольными объектами со временем меняются очень быстро:

$$r = r_0 e^{Ht}, \quad (97)$$

где $r_0 = \text{const}$, H — постоянная Хаббла. При этом средняя плотность ρ вещества в этой модели остается постоянной. Решение де Ситтера до последнего времени практически не использовалось, однако новые исследования возродили интерес к этой модели (см. ч. 3).

Взяв принципиально иные начальные условия, советский математик и физик А. А. Фридман в 1922 г. нашел другое решение уравнений тяготения. В отличие от Эйнштейна, считавшего Вселенную статичной, Фридман исходил только из одного предположения — Вселенная в целом однородна. Обоснование этого предположения дано в § 1. Результат, полученный Фридманом, удивителен — границы Вселенной не могут быть неизменными.

В зависимости от средней плотности вещества во Вселенной они могут или расширяться, или сужаться.

Во времена Фридмана не существовало никаких экспериментальных данных, свидетельствующих о нестационарности Вселенной. Не удивительно, что решение Фридмана было воспринято с недоверием. Физиков смущала корректность исходного положения Фридмана об однородности Вселенной. Но со временем нашлись экспериментальные факты, подтверждающие основные выводы теории Фридмана, и сейчас она является фундаментом современной космологии.

Всего через семь лет после опубликования работ Фридмана американский астроном Э. Хаббл, работавший на крупнейшем в то время рефлекторе обсерватории Маунт Вильсон, сделал два открытия, составившие эпоху в развитии науки о Вселенной. Усредняя результаты исследований распределения небесных объектов по доступному для наблюдений космическому пространству, он установил, что Вселенная в целом однородна, т. е. не имеет резко отличающихся по свойствам точек пространства, и изотропна, т. е. ее свойства не зависят от какого-либо выделенного направления. Так были подтверждены основные положения, взятые Фридманом в основу расчетов. Казалось бы, его абстрактные математические выкладки, его до сих пор сугубо теоретическая модель Вселенной получила солидное экспериментальное подтверждение и сомкнулась с реальной астрономией. Но еще более значительным стало второе открытие Хаббла.

Австрийский ученый К. Доплер еще в 1842 г. открыл эффект изменения длины волны λ какого-либо источника колебаний при его движении относительно приемника. Изменение $\Delta\lambda$ зависит от скорости v движения источника и может быть легко подсчитано:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}.$$

Эффект Доплера является практически единственным методом определения скорости движения удаленных от нас звездных систем. Для этого необходимо получить фотографии спектров этих систем и сравнить положение спектральных линий систем и эталонного спектра. Хаббл обнаружил, что линии спектров всех удаленных систем смещены в «красную» сторону, т. е. в сторону больших длин волн. Это однозначно свидетельствовало о том, что все звезды удаляются от нашей Галактики. Смещение линий спектра для наиболее слабых по свечению Галактик (наиболее удаленных от нас) возрастает. На основании этого Хаббл сделал принципиальный вывод: чем дальше изучаемые системы находятся друг от друга, тем больше их относительная скорость. Оценки показали, что скорость разлета Галактик может достигать

240 000 км/с, т. е. сравнима со скоростью света. Смещение спектральных линий далеких Галактик пропорционально их удалению от нас:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = HR. \quad (98)$$

Здесь R — расстояние до изучаемой Галактики; H — коэффициент пропорциональности, получивший название постоянной Хаббла.

Космологическое красное смещение также предсказывалось теорией Фридмана, и для расчета H в ней была выведена теоретическая формула. Таким образом гипотеза о расширяющейся Вселенной, полученная сначала в тиши кабинета, а затем нашедшая экспериментальное подтверждение, стала фактом. В теории Фридмана как постоянная Хаббла, так и радиус Метагалактики зависят от времени:

$$H = a/t, \quad r = bt^a, \quad (99)$$

где a и b — постоянные. Это сразу же поставило перед учеными множество вопросов. Если стационарная модель Вселенной Эйнштейна не вызывала вопросов о ее прошлом или будущем, то в нестационарной модели Фридмана они сразу же выдвигаются на первый план. Что было со Вселенной раньше, что ждет ее — и всех нас! — в будущем?

Фантазия в «обратном времени». На вопрос о прошлом Вселенной отвечал, не придавая, впрочем, этому серьезного значения, уже сам Фридман. Ход его рассуждений легко понять. Если в данное время Вселенная расширяется, то в прошлом она была значительно меньше по размерам. Продолжая эти рассуждения, можно прийти к выводу, что когда-то Вселенная могла быть «собрана» в точку. А. А. Фридман писал: «Если подсчитывать ради курьеза время, прошедшее от момента, когда Вселенная создавалась из точки, до теперешнего ее состояния, начать определять, следовательно, время, прошедшее от создания мира, то получатся числа в десятки миллиардов наших лет» [23].

Возраст T_0 Вселенной оказывается равным обратному значению постоянной Хаббла:

$$T_0 = \frac{1}{H} \approx 1,7 \cdot 10^{10} \text{ лет.} \quad (100)$$

Этот полученный в теории результат также подтвержден экспериментально. Определяя возраст самых старых минералов, попадающих на Землю из Космоса, ученые определили, что он составляет примерно $1,4 \cdot 10^{10}$ лет, что поразительно хорошо согласуется с (100). Таким образом, постоянная Хаббла является важнейшим космологическим параметром нашей Вселенной, и не удивительно, что многие авторы причисляют ее к числу фундаментальных физических постоянных. Еще раз отметим своеобразие этой константы—она меняется со временем!

Основные явления, сопровождающие сжатие Вселенной, ко-

ротко описывались в § 1. Сближение больших взаимодействующих масс сопровождается выделением колоссальной энергии и ростом температуры системы. При этом происходит распад вещества на отдельные атомы, затем распад атомов, их ядер, составляющих ядра нуклонов. Плотность вещества может значительно превышать ядерную плотность. Законы, управляющие поведением вещества в таком состоянии, пока не известны. В [79] показано, что учет взаимодействия гравитационного поля с материей приводит к сильной модификации гравитационной постоянной G в ранней Вселенной, вплоть до изменения ее знака. Гравитационное притяжение сменяется гравитационным отталкиванием! Раскрываются новые грани вечной, как мир, проблемы тяготения, исследование гравитационной постоянной приобретает совершенно новое звучание.

Из сверхплотного состояния, характерного для раннего периода Вселенной, она эволюционировала к ее сегодняшнему состоянию. В настоящее время выполнены детальные расчеты хода эволюции [78, 80]. Представление об эволюции дает таблица 4 [9].

В последнее время найдены экспериментальные доказательства пребывания Вселенной в начальном сверхплотном и горячем состоянии. Речь идет об открытом в 1965 г. американскими учеными А. Пензиасом и Р. Вилсоном реликтовом излучении. В начальном состоянии Вселенная представляла сгусток плазмы и электромагнитного излучения одной и той же температуры. При последующем расширении и охлаждении происходило образование вещества (табл. 4), в то время как уменьшение температуры излучения шло по не зависящим от этих процессов законам. Расчеты показывают, что за время существования Вселенной температура излучения должна была снизиться до 3 — 4 К. Рассеянное фоновое излучение именно с такой температурой и обнаружили американские ученые. В полном смысле слова оно является свидетелем начального состояния Вселенной, это свет, оторванный от звезд!

Будущее Вселенной. Модель Фридмана представляет надежный теоретический фундамент для исследования будущего Вселенной. Если средняя плотность вещества во Вселенной меньше критической плотности (см. § 1)

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G} \approx 2 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3,$$

то расширение Вселенной будет длиться вечно. Если же $\rho > \rho_{кр}$, то с течением времени расширение Вселенной должно смениться ее сжатием. Материя в один из моментов эволюции вновь соберется в сверхплотное образование (рис. 39), возможен новый «большой взрыв» и новый разлет. Такая модель получила название пульсирующей Вселенной. Однако свойства Вселенной «нового

цикла» не будут похожи на свойства сегодняшней Вселенной,
Таблица 4

<i>Время</i>	<i>Событие</i>	<i>Температура, К</i>	<i>Характерная энергия</i>
10^{-45} с	?—сильные эффекты квантовой гравитации	10^{32}	10^{19} ГэВ
10^{-35} с	С и н т е з кварков — установилось преобладание вещества над антивеществами	10^{27}	10^{14} ГэВ
100 с	Я д е р н ы й синтез—создание гелия и дейтерия	10^9	0,1 МэВ
10^6 лет	Разъединение фотонов и вещества—возникновение космического фонового излучения	10^3	0,1 эВ
10^{10} лет (наше время)	Возникновение галактик, звезд и нас самих	3	$10^{-3} - 10^{-4}$ эВ

они будут определяться теми значениями фундаментальных физических постоянных, которые сформируются в начальный момент взрыва (см. ч. 3). Отметим, что существующие экспериментальные данные пока не позволяют сделать окончательный выбор в пользу той или иной модели эволюции Вселенной.

Наше исследование гравитационной постоянной на этом не завершается. Новые открытия в физике микромира, космологические и астрофизические исследования открывают новые грани проблемы. Лауреат Нобелевской премии С. Вайнберг написал поэтические строки, посвященные этим исследованиям, которые мне хочется привести полностью: «Как бы ни разрешились эти проблемы и какая бы космологическая модель ни оказалась правильной, ни в одной из них мы не находим утешения. Для человеческих существ почти неизбежна вера в то, что мы имеем какое-то особое отношение к Вселенной и что человеческая жизнь есть не просто более или менее нелепое

завершение цепочки случайностей, ведущей начало от первых трех минут, а что наше существование было каким-то образом predetermined с самого начала. Случилось так, что, когда я писал это, я находился в самолете по дороге домой из Сан-Франциско в Бостон и летел на высоте 30 000 футов над Вайомингом. Земля подо мной выглядела очень нежной и уютной — легкие облачка здесь и там, снег, ставший ярко-розовым, когда садилось Солнце, дороги, лентами протянувшиеся по всей стране от одного города к другому. Очень трудно осознать, что все это — лишь крошечная часть опепеляюще враждебной Вселенной. Еще труднее представить себе, что эта сегодняшняя Вселенная развилась из невыразимо незнакомых начальных условий и что ей предстоит будущее угасание в бескрайнем холоде или невыносимой жаре. Чем более постижимой представляется Вселенная, тем более она кажется бессмысленной.

Но если и нет утешения в плодах нашего исследования, есть, по крайней мере, какое-то утешение в самом исследовании. Мужчины и женщины не склонны убаюкивать себя сказками о богах или великанах или замыкаться мыслями в повседневных делах; они строят телескопы, спутники и ускорители и нескончаемые часы проводят за своими столами, осмысливая собранные данные. Попытка понять Вселенную — одна из очень немногих вещей, которые чуть приподнимают человеческую жизнь над уровнем фарса и придают ей черты высокой трагедии» [80].

7. ПОСТОЯННАЯ ПЛАНКА

История. В отличие от многих фундаментальных физических констант постоянная Планка h имеет точную дату своего рождения — 14 декабря 1900 г. В этот день профессор Берлинского университета Макс Карл Эрнст Людвиг Планк на очередном традиционном заседании Немецкого физического общества сделал доклад, в котором для объяснения излучательной способности черного тела была дана формула, в которой фигурировала новая для физики величина h . Постоянная Планка h — так она была названа впоследствии — имеет размерность действия (произведения энергии на время). Ее величину, исходя из экспериментальных данных, впервые вычислил сам М. Планк:

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

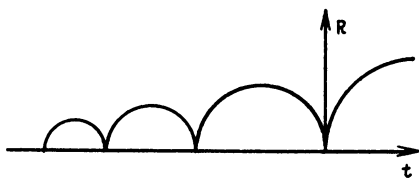


Рис. 39. Зависимость радиуса Метагалактики от космологического времени в пульсирующей модели Вселенной

Доклад Планка не вызвал особенного интереса у слушателей, уж слишком малоубедительны были основные предпосылки, положенные им в основу расчета. Ничто не предвещало той, в буквальном смысле слова, революции, которая впоследствии совершилась в физике после появления новой постоянной. Начало XX в. было ознаменовано рождением новой физики атома и атомного ядра, физики микромира. Но процесс осмысления значения новой константы, ее роли в науке, выявления ее физической сущности был далеко не так прост и занял по меньшей мере три десятилетия. Эти годы были для ученых периодом смены традиционных представлений классической физики на новые, непривычные и потому и казавшиеся подчас «безумными» представления квантовой физики. Рождение новой постоянной и процесс ее становления в физике чрезвычайно интересны и поучительны.

7.1. Рождение

Проблема теплового излучения. Постоянная Планка h обязана своим рождением исследованиям проблемы, о которой до сих пор не говорилось. Это проблема теплового излучения. Хорошо известно, что все нагретые тела излучают энергию. Это может быть видимый свет, испускаемый электрической лампой накаливания, слабое свечение спирали плитки или невидимое тепло хорошо протопленной русской печи. На Землю падает тепловое излучение Солнца, в недрах которого температура достигает миллионов градусов, оно является основой для протекания всех жизненных процессов на Земле. Различные тела обладают способностью в большей или меньшей степени поглощать и отражать свет. Сильно поглощающие тела кажутся нам черными (сажа). Ослепительное сияние снега в горах, прекрасно отражающего свет, доставляет много хлопот альпинистам. Ученые не могли пройти мимо проблемы объяснения закономерностей излучательной и поглощательной способностей различных тел.

Одним из пионеров ее исследования был выдающийся немецкий физик Г. Кирхгоф. В 1859 г. он показал, что отношение испускательной способности тел $E(\lambda, T)$ к их поглощательной способности $A(\lambda, T)$ является функцией длины волны излучения λ и температуры T и одинаково для всех тел:

$$\frac{E(\lambda, T)}{A(\lambda, T)} = \varepsilon(\lambda, T), \quad (101)$$

где $\varepsilon(\lambda, T)$ — введенная Кирхгофом универсальная, единая для всех тел функция. Найти ее явный вид означало решить важнейшую проблему в физике теплового излучения.

Кирхгоф сам предложил идею экспериментального определения функции $\varepsilon(\lambda, T)$. Для черного тела, т. е. тела, поглощающего

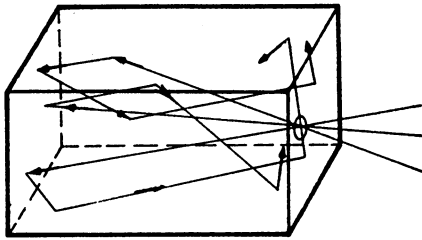


Рис. 40. Модель черного тела

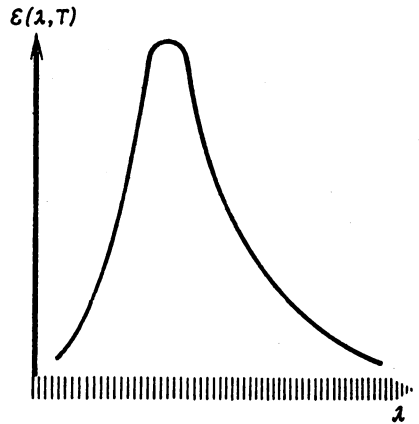


Рис. 41. Зависимость излучательной способности $\varepsilon(\lambda, T)$ для черного тела

всю падающую на него энергию независимо от длины волны и температуры, очевидно, справедливо соотношение

$$A(\lambda, T) = 1$$

и функция $\varepsilon(\lambda, T)$ приобретает физический смысл излучательной способности черного тела. В качестве хорошего аналога такого тела можно выбрать полость с небольшим отверстием (рис. 40). Попадающее внутрь полости излучение испытывает многократные отражения от стенок и в конце концов полностью поглощается. Таким образом, для экспериментального определения вида функции $\varepsilon(\lambda, T)$ необходимо вывести излучение из небольшого отверстия в стенке полости «абсолютно черного тела», разложить его в частотный спектр и измерить соответствующие энергии. К концу XIX в. физики уже знали экспериментальную зависимость $\varepsilon(\lambda, T)$ (рис. 41).

Все попытки теоретического определения этой функции долгое время были безрезультатны. Излучение представляло для ученых новый и трудный для изучения объект. Найти пути к теоретическому описанию излучения было не так-то просто, несмотря на то что со времен Максвелла было известно, что оно имеет электромагнитную природу. Для теоретического обоснования законов излучения применялись методы термодинамики. Еще Кирхгоф для доказательства закона (101) использовал правило, согласно которому достигнутое в изолированной системе равновесие сохраняется сколь угодно долго и не может быть нарушено теплообменом между частями системы. Следовательно, излучающую среду можно представлять заключенной в непроницаемую для излучения оболочку постоянной температуры. Теплообмен между оболочкой и средой приводит к выравниванию их температур.

Важное место в исследованиях теплового излучения занимают труды австрийского физика Й. Стефана. По мере развития кине-

тической теории газов в середине XIX в. резко возрос интерес к развитой Дж. Максвеллом теории теплопроводности газов. Стефан установил полное соответствие опытных данных с предсказаниями теории, что рассматривалось в то время как одно из важных доказательств справедливости молекулярно-кинетической теории. Логичным продолжением этих работ явилось опубликованное Стефаном в 1874 г. исследование «О связи между тепловым излучением и температурой», где он установил, что полное количество теплоты Q , излучаемое в единицу времени с единицы поверхности, пропорционально четвертой степени температуры. Это послужило поводом к определению функции Кирхгофа $\varepsilon(\lambda, T)$, поскольку Q есть результат интегрирования $\varepsilon(\lambda, T)$ по всем длинам волн:

$$Q = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) d\lambda \sim T^4. \quad (102)$$

Используя второе начало термодинамики и предсказываемое теорией Максвелла существование давления электромагнитного излучения (что, кстати, еще оспаривалось многими учеными), в 1884 г. аналогичный закон теоретически получил Л. Больцман. Короткий и изящный вывод Больцмана физики многих поколений рассматривали как образец теоретического мышления. Г. Лоренц, например, называл этот закон «жемчужиной теоретической физики». Выражение (102) называют законом Стефана — Больцмана и записывают в виде

$$Q = \sigma T^4, \quad (103)$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана. Позже было установлено, что она может быть выражена через другие фундаментальные физические константы:

$$\sigma = \frac{e^2}{60} \frac{8\pi^3 k^4}{c^2 h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}. \quad (104)$$

Первую теоретическую попытку определения вида функции Кирхгофа предпринял русский физик В.А. Михельсон в 1887 г. Для этого ему пришлось прибегнуть к определенным предположениям относительно механизма возникновения излучения. Михельсон считал, что излучение обязано своим происхождением колебаниям атомов излучающего тела, которые распределены по скоростям в соответствии с законом Максвелла — Больцмана (49). Статистические идеи впервые применяются к теоретическому анализу совершенно иного физического явления. Хотя Михельсону удалось получить зависимость $\varepsilon(\lambda, T)$, качественно совпадающую с экспериментальными данными, не все предположения его работы были достаточно обоснованы.

«Игра формул» продолжалась. Развивая идеи Михельсона, немецкий физик В. Вин распространил понятия температуры

и энтропии на тепловое излучение и получил для $\varepsilon(\lambda, T)$ следующую зависимость:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \varphi(\lambda) \exp\left(-\frac{C_1}{\lambda T}\right).$$

Здесь $\varphi(\lambda)$ — некая функция длины волны, C_1 — константа. Так как в соответствии со (103)

$$\int_0^{\infty} \varphi(\lambda) \exp\left(-\frac{C_1}{\lambda T}\right) d\lambda = \sigma T^4,$$

то Вин установил вид функции $\varphi(\lambda)$:

$$\varphi(\lambda) = \frac{C_2}{\lambda^5}.$$

В окончательной формулировке формула Вина для излучательной способности черного тела имеет вид

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{C_2}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_1}{\lambda T}\right). \quad (105)$$

Выполненная О. Луммером и Э. Принсгеймом в 1897 г. экспериментальная проверка закона Вина показала, что соотношение (105) хорошо описывает экспериментальные результаты только в области коротких длин волн, но резко расходится с опытными данными при больших λ . Эти неудачи не обескураживают исследователей. Английский физик Д. Рэлей делает очередную попытку найти теоретическим путем вид функции Кирхгофа. В основу расчета он взял доказанную Больцманом теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы, хотя правомерность ее применения к тепловому излучению еще оспаривалась. Предложенная Рэлеем картина установления теплового равновесия в полости черного тела качественно отличалась от интерпретации Вина. Он полагал, что при отражении излучения от стенок полости внутри нее возникает система стоячих волн — «степеней свободы» по Рэлею (рис. 42). При таком подходе в области малых длин волн (высоких частот) сосредотачивается бесконечно большая энергия. Чтобы получить результат, соответствующий экспериментальным данным, Рэлей ввел в окончательную формулу экспоненциальный множитель:

$$\varepsilon(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-4} \exp[-C_2/(\lambda T)].$$

Эта зависимость хорошо совпадала с экспериментальными данными теперь уже в области больших длин волн и расходилась с экспериментом при малых λ . Вывод Рэрея был уточнен впоследствии другим английским физиком Д. Джинсом. Полученная им зависимость получила впоследствии название формулы Рэрея—Джинса:

$$\varepsilon(\lambda, T) = 8\pi k \lambda^{-4} T. \quad (106)$$

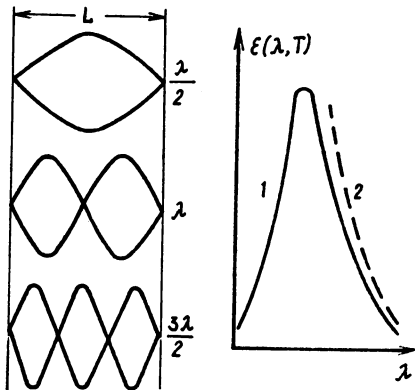


Рис. 42. Система стоячих волн в полости черного тела (по Рэлею)

Рис. 43. Излучательная способность черного тела:

1— экспериментальная зависимость; 2— теоретические данные

Аналогичное этому выражение, но исходя из предположения о возникновении электромагнитного излучения при столкновениях электронов с атомами металла получил позже Г. Лоренц. Однако формула Рэлея—Джинса (106) совпадала с экспериментом только при больших λ . При малых λ экспериментальные данные (1) и теоретические (2) зависимости резко отличались (рис. 43). Позже эту ситуацию П. Эренфест назвал «ультрафиолетовой катастрофой». Многочисленные, но безуспешные попытки теоретического определения функции $\epsilon(\lambda, T)$ постепенно привели к убеждению, что классическая физика не в состоянии решить проблему теплового излучения.

Исследования Планка. Ее решение нашел выдающийся немецкий ученый М. Планк. Основная идея его решения заключалась в том, чтобы чисто термодинамическим путем объяснить переход к равновесному состоянию системы излучателей (в принципе их можно связать с атомами), взаимодействующей с электромагнитным излучением замкнутой полости. Фактически это означало бы признание необратимого характера этого взаимодействия.

Много позже в своей «Научной автобиографии» Планк написал, что предположение о необратимости «вызвало энергичные возражения со стороны искушенного в этом вопросе Больцмана, который доказал, что по законам классической механики каждый из рассматриваемых мною процессов может протекать также в строго противоположном направлении». Больцман указал Планку, что в уравнениях электродинамики нет ничего такого, что исключало бы обратные процессы, и поэтому они не могут описывать необратимый переход излучения в равновесное состояние подобно тому, как законы механики не могут описать необратимый процесс установления равновесия в газах. Критика Больцмана была предельно конструктивной. В книге «По тропам науки» выдающийся французский физик Луи де Бройль вспоминает, что когда Планк сообщил Больцману о своих первоначальных и неудачных попытках найти формулу излучения, тот ответил ему, что правильную теорию теплового излучения нельзя построить без

введения в описание ранее не применявшегося элемента прерывности (дискретности) излучения. Именно на этом пути добился успеха М. Планк.

Однако способ, которым шел к нему Планк, был весьма необычным для теоретика. В письме 1931 г. американскому физiku Р. Вуду он писал: «...единственное, что меня занимало,— это любым способом получить положительный результат, чего бы это ни стоило» [81]. 19 октября 1900 г. он представил Немецкому физическому обществу работу, в которой «сконструировал совершенно произвольное выражение для энтропии» [49] и получил следующую двухконстантную формулу излучения:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp[C_2/(\lambda T)] - 1}, \quad (107)$$

«которая, как можно видеть, значительно лучше соответствует опубликованным опытными данным».

В своем Нобелевском докладе 2 июля 1920 г. Планк сказал: «Если бы даже формула излучения оказалась совершенно точной, то она имела бы очень ограниченное значение, исключительно как удачно подобранное интерполяционное выражение. Поэтому со дня установления этой формулы я поставил себе задачей сообщить ей реальное физическое содержание. Этот вопрос привел меня к изучению зависимости между энтропией и вероятностью, т. е. к больцмановскому ходу мыслей. После нескольких недель наиболее напряженной за всю мою жизнь работы потемки прояснились и передо мной забрезжил свет новых далей» * [82].

Чтобы придать формуле (107) реальное физическое содержание, Планк вводит гипотезу естественного излучения, аналогичную гипотезе молекулярного хаоса. Ее суть в том, что отдельные волны, из которых состоит электромагнитное излучение, полностью не когерентны, или, что то же самое, отдельные излучатели непосредственно не взаимодействуют между собой. Мерой энтропии построенной таким образом системы будет, следуя Больцману, число всевозможных электромагнитно различных размещений энергии между излучателями. Для того чтобы число таких размещений оказалось конечным, Планк вынужден был предположить, что полная энергия системы складывается из конечного числа элементарных порций энергии: «Мы рассмотрим, и в этом состоит самый важный момент всего расчета, что E может быть разделена на совершенно определенное число конечных равных частей, и введем при этом универсальную постоянную $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$ эрг·с. Эта постоянная, умноженная на частоту резонаторов ν , дает элемент энергии ε в эргах, и при делении E на ε мы получим число элементов энергии, которые

*Необходимость столь подробных цитат в том, что они точно показывают обстановку, в которой происходило рождение новой теории.

распределены между резонаторами» [49]. При этом предположении формула (107) приобретает вид

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp[h\nu/(kT)] - 1}. \quad (108)$$

Ее проверка показала прекрасное соответствие с опытными данными. В физике появилась новая фундаментальная постоянная. Пока ни сам Планк, ни кто-либо другой и не догадывался, что этим начиналась новая эпоха в науке. Физический смысл новой постоянной был еще не ясен, впереди было обсуждение тех поразительных следствий, которые вытекали из гипотезы Планка об элементах энергии. Их величина была связана с новой постоянной h и частотой ν лаконичной формулой

$$E = h\nu. \quad (109)$$

Значение h Планк вычислил из вида функции $\varepsilon(\lambda, T)$ (рис. 41). С помощью постоянной h он нашел значения и таких важнейших физических постоянных, как постоянная Больцмана k , постоянная Авогадро N_A и заряд электрона e . Из формулы излучения Планка (108), как следствие, вытекали законы Стефана—Больцмана и Рэлея—Джинса. Успех превзошел все ожидания, но вместе с ним начался заключительный и самый драматический для творца новой постоянной период осмысления полученных результатов и исходных предпосылок, взятых за основу.

«Драма идей» (Эйнштейн). Идеи Планка по многим причинам не привлекли сначала особого внимания физиков. Во-первых, теория излучения в эти годы не была центральной проблемой, внимание ученых было сосредоточено на таких крупнейших событиях, как открытие радиоактивности А. Беккерелем (1896) и открытие электрона Д. Томсоном (1897). Это было время острых нападков Э. Маха, В. Оствальда и других на основы молекулярно-кинетической теории. Во-вторых, немалую роль играла и необычность предположений, положенных Планком в основу вывода формулы. Они находились в полнейшем противоречии с законами классической физики, согласно которой обмен энергией между отдельными излучателями и электромагнитным полем мог быть только непрерывным (происходить в любых количествах). Планковская гипотеза трактовала его как прерывный, дискретный процесс. В то же время ученые не могли не замечать очевидного факта — формула (108), полученная на основе резко расходящейся с классической физикой гипотезы, прекрасно описывала опытные данные. Необходимо было по-новому осмыслить предпосылки вывода.

Единственным ученым, кто сразу же поддержал исследования Планка, был Л. Больцман. Планк писал позже о том большом моральном удовлетворении, которое испытал он, узнав об этом.

Тем не менее в период 1900—1905 гг. в научной литературе не появилось никаких откликов на работу Планка.

Квант действия. Физический смысл постоянной Планка h легко понять, проанализировав ее размерность. Из (109) следует, что h — произведение энергии на время, т. е. величина, давно получившая в физике название действия. Еще в XVIII в. француз П.-Л. де Мопертюи сформулировал принцип наименьшего действия, согласно которому процессы в природе происходят так, что необходимое для этого количество действия есть минимально возможная величина. Например, свободное падение тел происходит по наиболее экономной траектории — отвесной и т. п. Но согласно представлениям классической физики, минимальное количество физического действия могло быть сколь угодно малым и даже равным нулю. Из теории Планка следовало, что оно ограничено минимальным значением $6 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Конечно, эта величина очень мала, и ее следует учитывать, очевидно, скорее всего при исследовании явлений, происходящих в микромире. Однако малость h не снижает ее принципиального значения для физики как предела возможного действия в природе. Точно так же, как установление физического смысла скорости света как предельной скорости распространения любых взаимодействий в природе, сразу же подняло значение этой константы на уровень мировой постоянной, от другой предельной величины — постоянной Планка h — также можно было ожидать фундаментального значения в физике.

Но до подобных обобщений было еще очень далеко. Недостаточная обоснованность выводов Планка вызвала волну критики. В 1903 г. Г. Лоренц отмечал, что Планк совершенно не рассматривает механизм испускания электромагнитных волн, что является принципиальным недостатком всей теории. Различия между непрерывностью энергетического обмена в классической физике и его дискретностью в теории Планка ставили вопрос о возможности интерпретации новой постоянной в рамках классической теории. Эти попытки были безуспешны. Неудача, пишет М. Планк, «...не оставила более никаких сомнений в том, что квант действия играет фундаментальную роль в атомной физике и с его появлением в физической науке наступила новая эпоха, ибо в нем заложено нечто до того времени неслыханное, что призвано радикально преобразить наше физическое мышление, построенное на понятии непрерывности всех причинных связей» [82]. И все же Планк сомневается. Процессы испускания и поглощения в теории Планка принимались дискретными, а в теории Максвелла распространение света — непрерывный волновой процесс. Отражением глубочайшей внутренней борьбы являются слова Планка: «Когда думаешь о полном опытным подтверждении, которое получила электродинамика Максвелла при исследовании самых сложных явлений, когда думаешь о необычных трудностях, с которыми

придется столкнуться всем теоретикам при объяснении электрических и магнитных явлений, если они откажутся от этой электродинамики, инстинктивно чувствуешь неприязнь ко всякой попытке поколебать ее фундамент... Будем считать, что все явления, происходящие в пустоте, в точности соответствуют уравнениям Максвелла и не имеют никакого отношения к константе h » [52].

Напрашивается вывод о том, каким должен был быть физик, который первым подхватил бы вызов, брошенный работой Планка. Его должна была интересовать не сфера применения физического закона, а идеи, положенные в основу его вывода. Он должен был не бояться выступать в защиту проблем, выходящих за рамки классической физики. Всеми этими качествами обладал А. Эйнштейн, который первым расширил содержание понятия квантов и придал им новую физическую трактовку. Мы уже обсуждали выше (см. § 5) трактовку фотоэффекта, предложенную А. Эйнштейном. Теперь ясно, в какой обстановке она появилась. Это была первая (после Планка) работа, в которой новая физическая постоянная h была применена для объяснения физических явлений. Эйнштейн ввел в физику представление о фотонах (световых квантах), как о самостоятельных частицах света с энергией $E = h\nu$. Вместе с этим в физику вошли представления о том, что свет не только испускается и поглощается отдельными порциями, но и вообще состоит из дискретных частиц. Речь шла уже не о введении гипотезы световых квантов, а о поиске в физических явлениях новых квантовых представлений. По справедливому замечанию выдающегося советского ученого, академика Л. Д. Ландау, «Эйнштейн относился к теории Планка увереннее, чем сам автор» [48].

И все же Планк еще не делает из своей гипотезы глобальных выводов. В этой обстановке в 1911 г. в Брюсселе происходил форум ученых, получивший название «Первый Сольвеевский конгресс». Его тема «Излучение и кванты». Председательствующий на конгрессе Г. Лоренц назвал квантовые представления Планка и Эйнштейна всего лишь «изящной гипотезой». М. Планк в своем докладе на конгрессе выдвинул новый вариант теории — излучение является непрерывным процессом, а поглощение — дискретным. Гипотеза Эйнштейна о существовании фотонов вообще не нашла поддержки, так как ее принятие означало бы отказ от максвелловской электродинамики с ее непрерывным характером электромагнитного поля. Физический мир еще не готов к столь радикальным изменениям в своем мышлении. Характерным для того времени является высказывание немецкого физика А. Зоммерфельда: «Я думаю, что гипотезу квантов испускания, как и начальную гипотезу квантов энергии, нужно рассматривать скорее как форму объяснения, а не как физическую реальность... Ничто не может быть насущнее для современной физики, чем выяснение взглядов на этот вопрос. Здесь находится ключ

ситуации, ключ не только для теории излучения, но и для атомного строения материи, и этот ключ сегодня еще далеко запрятан» [83].

Появившись в науке в 1900 г. непонятной и нежеланной гостьей, постоянная Планка h постепенно завоевывала себе место в физике и со временем стала фундаментом физики XX столетия. Ученые были вынуждены привлекать ее для интерпретации все новых и новых физических явлений микромира. Становление постоянной Планка неразрывно связано с развитием науки.

7.2. Становление

Фотоны. Гипотеза Эйнштейна о существовании фотонов встретила, как мы уже знаем, сильные возражения. Это и не удивительно, ибо ряд явлений (интерференция, дифракция) нашел объяснение в волновой теории света. Анализу подвергалось и само соотношение Эйнштейна $E = h\nu$. О какой частоте колебаний идет речь, если свет состоит из частиц? Как можно связывать энергию и частоту? Волны, набегаящие на морской берег с одной и той же частотой, приносят разную энергию в зависимости от силы шторма. Лишь автор гипотезы А. Эйнштейн ни на секунду не сомневался в том, что свет действительно обладает и корпускулярными, и волновыми свойствами, имеет двойственную корпускулярно-волновую природу. Глубоко аргументированно он пишет: «Волновая теория света... прекрасно оправдывается при описании чисто оптических явлений и, вероятно, едва ли будет заменена какой-либо иной теорией. Но все же не следует забывать, что оптические наблюдения относятся не к мгновенным, а средним по времени величинам. Может оказаться, что теория света придет в противоречие с опытом, когда ее будут привлекать к явлениям возникновения и превращения света» [84].

Верховным судьей любой теории является опыт. В 1911 г. Р. Милликен выполнил экспериментальную проверку уравнения Эйнштейна (81) и доказал его справедливость. Он же независимым путем вычислил и значение постоянной Планка h , которое совпало с данными Планка, что доказывало обоснованность введения константы в физику. В дальнейшем корпускулярные свойства света были подтверждены в многочисленных опытах. А. Ф. Иоффе показал, что отдельные акты эмиссии электронов с пылинок висмута при их облучении светом следовали друг за другом через нерегулярные промежутки времени, что соответствовало предположениям о случайном попадании на пылинки фотонов. С еще большей убедительностью корпускулярные свойства света были продемонстрированы в опытах С. И. Вавилова по флуктуациям слабых световых потоков.

Прямые доказательства существования фотонов получил в 1922 г. американский ученый А. Комптон при исследовании спектрального состава рассеянных рентгеновских лучей. С клас-

сической точки зрения рентгеновские лучи представляют собой электромагнитные волны высокой частоты, поэтому можно было ожидать, что их рассеяние должно подчиняться тем же законам, что и рассеяние видимого излучения. Комптон обнаружил, что в рассеянном рентгеновском излучении есть лучи как с энергией первичного потока, так и с меньшей энергией.

Количественно эффект Комптона удается объяснить только с корпускулярных позиций. При соударениях с электронами вещества фотоны упруго отражаются от них, передавая им часть своей энергии. Применение законов сохранения энергии и импульса позволяет рассчитать изменение длины волны фотонов:

$$\Delta\lambda = \frac{2h}{m_e c} \sin^2 \frac{\varphi}{2}.$$

Проверка этого соотношения советским ученым Д. В. Скобельцыным подтвердила его справедливость.

Особое значение эффект Комптона приобрел в связи с тем, что он подтвердил особые индивидуальные свойства фотонов. Ранее считалось, что характеристики фотонов не меняются за время их жизни. Эффект Комптона показал, что фотоны, как и любые другие частицы, могут при взаимодействиях изменять свою энергию, т. е. подтвердил физическую реальность этих частиц.

Теория теплоемкости. Согласно закону Дюлонга и Пти, установленному еще в 1811 г., молярная теплоемкость тел равна ~ 25 Дж/К и не зависит от температуры. Известно, что этот закон является приближенным, особенно значительные отклонения от него наблюдаются в области низких температур. Теория теплоемкости, развитая на основе распределения Максвелла—Больцмана, давала хорошее совпадение с экспериментом лишь в области комнатных температур. Основной причиной этого служило то, что она опиралась на классический закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Формула Планка (108) представляла собой новый закон распределения энергии.

Эйнштейн применил идеи Планка для разрешения противоречий между классической молекулярно-кинетической теорией теплоты и опытом. В 1907 г. он рассмотрел очень простую модель твердого тела, все атомы которого колеблются с одной и той же частотой ν , и получил формулу, в которой теплоемкость зависит от температуры:

$$c = 5,94 \frac{[h\nu/(kT)]^2 \exp[h\nu/(kT)]}{\{\exp[h\nu/(kT)] - 1\}^2}.$$

Сравнение ее с экспериментом выявило некоторые расхождения. По Эйнштейну, при низких температурах теплоемкость c зависит от T экспоненциально, в то время как опыт давал кубическую

зависимость. В 1912 г. голландский физик П. Дебай сделал существенный шаг вперед в развитии идей Эйнштейна и получил общее выражение для теплоемкости, хорошо согласующееся с экспериментом (рис. 44).

Особенно ценное в теории теплоемкости Эйнштейна—Дебая то, что квантовые представления были перенесены на атомы твердого тела. На основании этого Эйнштейн пришел к весьма общему выводу: «...следует считать, что в свойствах любого периодического процесса есть нечто общее, что превращение энергии может происходить только определенными порциями» [84]. Успешное развитие теории теплоемкости показывало плодотворность применения квантовых представлений к еще одной области физики.

Атом Бора. Третьей областью, где так же уверенно о своем праве на место в физике заявила постоянная Планка, была проблема строения атома. После открытий А. Беккереля и Дж. Томсона стало очевидным, что электроны входят в состав атомов. Это и нашло отражение в первой модели внутреннего строения атомов, предложенной в 1904 г. Дж. Томсоном. Он предположил, что атом представляет положительно заряженную сферу (рис. 45), внутри которой как бы плавают электроны. Правда, оставалось неясным, как такое распределение зарядов может находиться в устойчивом состоянии. Молчаливо предполагалось, что внутри атома действуют какие-то специфические силы, обеспечивающие стабильность образования.

Эта модель оказалась неверной, но ее значение в физике было чрезвычайно значительным, поскольку речь шла теперь уже о внутреннем устройстве атомов. Гипотеза Томсона дала стимул к исследованиям структуры атомов. Из нее вытекали определенные следствия, которые можно было проверить на опыте. Подтвержденные экспериментом, они могли составить фундамент для дальнейших исследований.

Выдающийся английский физик Э. Резерфорд в 1909 г. поставил перед собой вполне определенную задачу прямыми экспериментами получить данные о распределении зарядов в атомах. Идея его опытов кажется очень простой — это бомбардировка атомов пучком положительно заряженных быстрых частиц. Такие частицы уже имелись в распоряжении экспериментаторов,

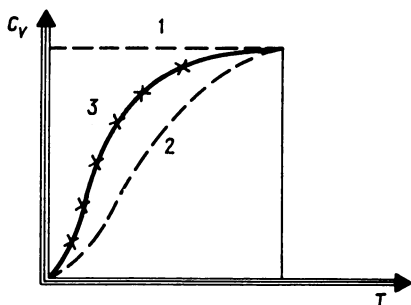


Рис. 44. Теплоемкость твердого тела: закон Дюлонга—Пти (1), Эйнштейна (2) и Дебая (3)

Крестиками обозначены экспериментальные данные

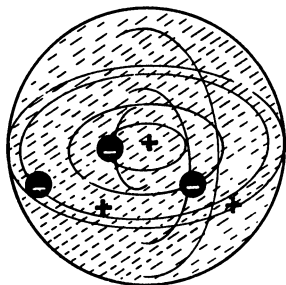


Рис. 45. Модель атома по Томсону

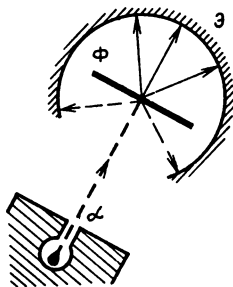


Рис. 46. Схема опытов Резерфорда:

Ф — золотая фольга;
Э — экран из ZnS

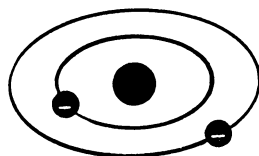


Рис. 47. Модель атома по Резерфорду

ими были α -лучи, возникавшие при радиоактивном распаде (рис. 46). Было известно, что это двукратно ионизированные атомы гелия, масса которых примерно в 8000 раз больше массы электрона. Резерфорд провел эксперимент, в котором пучок α -частиц направлялся на тонкую золотую фольгу Φ толщиной всего в 400 атомных слоев. Летящие со скоростью примерно $2 \cdot 10^4$ км/с частицы рассеивались в результате столкновений с атомами золота и попадали на затемненный экран \mathcal{E} из сернистого цинка (рис. 46), на котором при каждом попадании на него α -частицы наблюдалась яркая вспышка.

Резерфорд обнаружил поразительный факт — некоторые α -частицы рассеивались назад. Это казалось невозможным, если учитывать их массу и скорость движения. Но факт есть факт, и объяснение рассеяния в обратном направлении могло быть только одно: внутри атомов есть крохотный тяжелый центр, несущий положительный заряд. В науке впервые появилось понятие атомного ядра. В результате расчетов Резерфорд получил, что размеры ядра составляют всего $10^{-12} - 10^{-13}$ см. Он предложил планетарную модель атома (рис. 47), в которой вокруг положительно заряженного ядра на относительно больших расстояниях движутся электроны.

Надежно установленная в эксперименте модель атома Резерфорда встретила энергичные и аргументированные возражения. Согласно электродинамике, любой заряд, движущийся с ускорением, должен излучать энергию в форме электромагнитного излучения. Это относится и к электрону, движущемуся по круговой орбите вокруг ядра. Но при этом электрон должен непрерывно терять энергию на излучение и в конце концов приблизиться к ядру и упасть на него. Расчеты показывали, что этот процесс длился бы всего $\approx 10^{-8}$ с, что никак не согласовывалось с порази-

тельной устойчивостью атомов. Эта трудность не была единственной. Известно, что все атомы данного элемента одинаковы (изотопы тогда еще не были известны), но в случае излучающего электрона мы не должны были бы иметь их химической тождественности. Даже два атома водорода, например, имели бы в данный момент электроны, находящиеся на разном расстоянии от ядер.

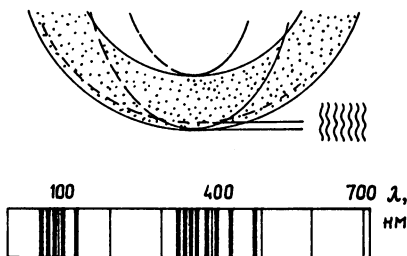


Рис. 48. Спектр атома водорода

Анализируя затруднения модели Резерфорда, ученые обратили внимание на еще один непонятный факт. Электроны, вращающиеся вокруг ядра, должны излучать с частотой, равной частоте их обращения. Но при падении электрона на ядро радиус орбиты электронов уменьшается, частота вращения возрастает, следовательно, спектр излучения резерфордовского атома должен был бы быть непрерывным. Между тем многочисленные исследования спектров различных атомов показывали, что они представляют совокупность дискретных линий, характерных для каждого атома (рис. 48). Этот своеобразный «паспорт» атомов составляет основу для химического анализа различных веществ. Были и первые попытки найти определенные закономерности в расположении спектральных линий. В 1885 г. швейцарский ученый И. Бальмер установил, что длины волн, соответствующих некоторым линиям спектра водорода, образуют серию, которая хорошо описывается с помощью формулы

$$\lambda = \lambda_0 n^2 / (n^2 - 4).$$

Здесь λ — длина волны, нм; n — целое число; $\lambda_0 = 364,56$ нм — постоянная величина. В 1890 г. шведский физик И. Р. Ридберг показал, что расположение линий в спектрах многих элементов подчиняется закономерностям, вытекающим из более общей формулы

$$\nu = cR_\infty \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right). \quad (110)$$

В (110) n и k — целые числа, $R_\infty = 10973371,5 \text{ м}^{-1}$ — постоянная Ридберга. При $n=2$ получим серию Бальмера, при $n=3$ — инфракрасную серию Пашена и т. д.

С самого начала исследований спектральных линий физикам было ясно, что соотношение Ридберга должно быть как-то связано с механизмом испускания спектральных линий атомами. Однако найти эту связь долгое время не удавалось никому. Решающий шаг

в этом направлении сделал молодой датский физик Н. Бор: «После многочисленных попыток использовать квантовые идеи в более строгой форме ранней весной 1913 г. мне пришло в голову, что ключом к решению проблемы атомной устойчивости, непосредственно приложимым к атому Резерфорда, являются изумительно простые законы, определяющие оптический спектр элементов» [85].

Путь, которым пользовался Бор при построении своей теории атома, был похож на тот, что был избран Планком при получении формулы излучения. Сначала создадим модель атома, удовлетворительно описывающую реально наблюдаемые спектральные закономерности, а затем будем искать в полученных соотношениях физический смысл. Бор сформулировал два постулата: 1) в атоме существуют орбиты, вращаясь по которым электрон не излучает; 2) излучение возникает при переходе электронов с одной стационарной орбиты на другую. При этом энергия $h\nu$ излученного фотона равна разности энергий электрона на различных орбитах:

$$h\nu = E_2 - E_1. \quad (111)$$

Постулаты Бора резко противоречили законам классической физики, поскольку он допустил возможность ускоренного движения электрона без излучения электромагнитных волн. Бор ввел также дискретные значения энергии электронов. Частота испущенного света в его теории свидетельствовала не об особенностях движения электронов, а об изменении энергии атомов. Оправдать эти необычные положения теории могло только совпадение теоретических выводов с экспериментальными данными.

Опираясь на свои постулаты, Бор развил теорию атома. Для определения стационарных орбит он применил следующее правило: орбитальный момент электрона $l = mvr$ кратен величине \hbar [$\hbar = h/(2\pi)$], т. е.

$$l = mvr = n\hbar, \quad (112)$$

где n — целое число. Поскольку при таком выделении орбит постоянная Планка h играет решающую роль, весь способ был назван квантованием. Оставляя в стороне детали расчета Бора (их можно найти в любом учебнике), укажем, что энергии стационарных орбит зависят от номера n (главного квантового числа) следующим образом:

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad (113)$$

откуда немедленно следует формула для частот излучения атома водорода:

$$\nu = \frac{me^4}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right). \quad (114)$$

Соотношение (114), полученное Бором, очень напоминало формулу Ридберга (110), поэтому Бор теоретически вычислил постоянную Ридберга:

$$R_{\infty} = \frac{me^4}{4\pi c \hbar^3}. \quad (115)$$

Величина R_{∞} , определенная по (115), совпала со значением, которое было известно из спектроскопических данных. Бор, рассчитывая радиус атома водорода в основном невозбужденном состоянии

$$r \approx \frac{\hbar^2}{me^2} \approx 0,53 \cdot 10^{-8} \text{ см}, \quad (116)$$

получил значение, согласующееся с выводами кинетической теории (см. § 2).

Успехи теории Бора произвели на современников громадное впечатление. Характеризуя положение, сложившееся в то время в теории атома, Эйнштейн писал: «Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы оказалось достаточно, чтобы позволить Бору — человеку с гениальной интуицией и тонким чутьем — найти главные законы спектральных линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для химии. Это кажется мне чудом и теперь. Это наивысшая музыкальность в области мысли» [86].

И все же Бор не нашел решения всех проблем физики атома. Его теория удовлетворительно описывала лишь атом водорода, точные спектры других атомов рассчитать не удавалось. Минусы теории были логически связаны с бездоказательностью ее основных положений. Мысль о том, что энергия атомов квантуется, была исключительно правильной, а вот почему — Бор объяснить не смог. Он лишь подправил квантовые законы. Но успехи его теории заставляли физиков снова и снова возвращаться к анализу этой столь мало обоснованной модели. Было ясно, что классические законы неприменимы к описанию внутреннего строения атомов.

Волны де Бройля. Условие квантования электронных орбит Бора (112) стало предметом исследований. Наибольшую по глубине мысли идею предложил в 1924 г. молодой французский физик Л. де Бройль: «Появление целых чисел в законах внутриатомного квантованного движения электронов, как мне казалось, указывает на существование для этих движений интерференции, аналогичной интерференции, встречающейся во всех разделах волновой теории...» [87]. Впервые к электрону, который до этого всеми отождествлялся с частицей, применялись волновые представления. Предложение де Бройля по своей революционности не уступало многим нововведениям Эйнштейна. Понятие корпускулярно-волнового дуализма переносится де Бройлем с фото-

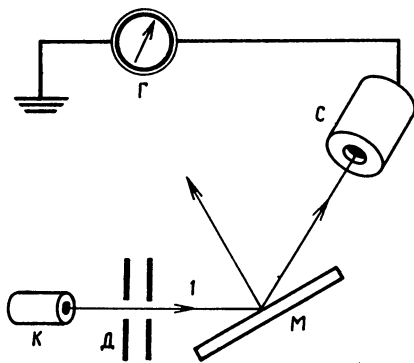


Рис. 49. Схема опыта по дифракции электронов:

K—катод; *D*—диафрагма; *I*—пучок электронов; *M*—мишень; *C*—коллектор электронов

ные орбиты таковы, что на их длине укладывается целое число «электронных волн», т. е. выполняются условия существования стоячих волн:

$$n\lambda = 2\pi r,$$

где n — целое число, r — радиус орбиты. Поскольку $p = mv$ и $\lambda = h/p$, получим боровское правило

$$2\pi mvr = nh,$$

которое с введением волновых представлений в физику движения электронов приобретает новый смысл — оно не только характеризует теперь свойства атомов, но и является характеристикой движения электронов. (Забегая вперед, заметим, что с точки зрения современной физики этот вывод является анахронизмом. Согласно соотношению неопределенности (см. с. 173), у электрона в атоме нет определенного импульса, а значит, и дебройлевской длины волны.)

Идею экспериментальной проверки своего предположения предложил де Бройль: поток электронов, проходящий через очень тонкую щель, должен дифрагировать (рис. 49). Прямое подтверждение волновых свойств электронов было экспериментально получено в 1927 г. американскими учеными К. Дэвиссоном и Л. Джермером, которые изучали рассеяние электронов на кристалле никеля. Во время одного из опытов в установку попал воздух и окислил поверхность никеля. Экспериментаторам пришлось отжечь мишень в высокотемпературной печи, но при этом произошла перекристаллизация никеля. Вместо большого числа

нов на электроны, вообще на все физические объекты.

Де Бройль нашел простое соотношение, связывающее длину волны частицы с ее импульсом. Проследим за ходом его рассуждений на примере кванта света — фотона. Энергия фотона $E = h\nu$, но она же может быть выражена через импульс p фотона и скорость света c : $E = pc$. Отсюда немедленно следовала знаменитая формула де Бройля:

$$\lambda = h/p. \quad (117)$$

Соотношение (117) позволило легко вывести условие квантования электронных орбит Бора. Стационарные разрешенные орбиты таковы, что на их длине укладывается целое число «электронных волн», т. е. выполняются условия существования стоячих волн:

мелких кристаллов возникло небольшое число монокристаллов. При этом в рассеянном пучке электронов стали наблюдаться ярко выраженные максимумы и минимумы, возникновение которых удалось объяснить только на основе волновых свойств электронов. При таком подходе к рассеянию электронов каждый атом становится источником вторичной волны. Если атомы расположены на расстоянии d друг от друга, то под углом θ к поверхности кристалла, определяемым известным соотношением $n\lambda = 2d \sin \theta$, должен наблюдаться максимум рассеянных электронов. Угол θ можно легко измерить, а d — вычислить, поэтому опытные данные позволяли определить длину волны λ электронов. С точностью до 1% экспериментально полученное значение длины волны совпало с теоретическим значением, полученным де Бройлем, что указывало на его справедливость.

В опытах советских ученых во главе с В. А. Фабрикантом было впервые показано, что волновые свойства присущи не только пучку электронов, но и каждой отдельной частице. Интересна идея этих экспериментов. Через прибор проходили одиночные электроны, точнее, время между двумя последовательными попаданиями рассеянных поверхностью кристалла электронов на фотопластинку в 10 000 раз превышало время пролета электронов через прибор. Опыты показали, что положение дифракционных колец не зависит от интенсивности пучка, что доказывало волновую природу индивидуальных электронов.

В настоящее время волновые свойства микрочастиц (электронов, протонов, нейтронов и др.) подтверждены экспериментально. Можно с уверенностью говорить, что волновая природа вещества является непреложным фактом. Отсюда следует, что описание движения микрочастиц должно принципиально отличаться от описания, приведенного в классической физике. Понятия «волна» и «частица» сливаются воедино, образуя единый образ объектов микромира — волна-частица.

Спин. Постоянная Планка h является единицей новой для нас характеристики микрочастиц — их спина. По мере увеличения точности спектральных измерений было обнаружено, что если излучающие атомы внести в электрическое или магнитное поле, то их спектральные линии расщепляются. В спектрах появляется «тонкая структура», так было названо это явление. С одной стороны, в этом не было ничего удивительного, поскольку эти поля не могли не влиять на движение заряженных частиц — электронов. С другой стороны, теория Бора не давала возможности расчета этих эффектов.

Немецкий физик А. Зоммерфельд расширил представление об электронных орбитах. В теории Бора электроны вращались вокруг ядра по кругу. В теории Зоммерфельда электроны, подобно планетам, движутся по эллипсам, которые различаются по степе-

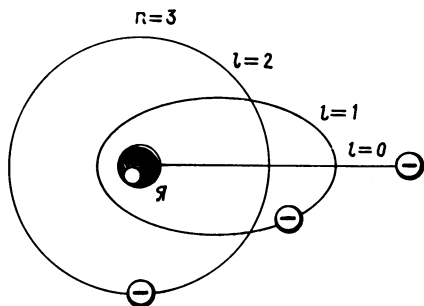


Рис. 50. Эллиптические орбиты Зоммерфельда

ни сплюснутости, т. е. по орбитальному квантовому числу l (рис. 50). Значение l меняется от 0 до $n-1$, где n — главное квантовое число. Орбитальная плоскость может поворачиваться в пространстве, для характеристики ее положения вводят еще одно — магнитное — квантовое число m . Пределы изменений магнитного квантового числа: $-l, \dots, 0, \dots, +l$. Однако и с помощью двух дополнительных квантовых чисел l и m не удавалось объяснить

все особенности расщепления D -линий натрия. Даже при отсутствии магнитного поля эта линия состоит из двух близко расположенных линий D_1 и D_2 с расстоянием между ними 0,6 нм. Включение магнитного поля приводит к тому, что линия D_1 расщепляется на четыре компонента, а линия D_2 — на шесть (аномальный эффект Зеемана).

Объяснение аномальному эффекту Зеемана нашел в 1924 г. В. Паули. Обе линии D_1 и D_2 соответствуют одному и тому же переходу с уровня $3p$ ($n=3, l=1$) на уровень $3s$ ($n=3, l=0$). Следовательно, должен существовать не один верхний уровень $3p$, а два уровня, различающихся между собой каким-то дополнительным квантовым числом (рис. 51, а). Паули назвал это число «неклассической двужначностью» электрона. Это число S может принимать только два значения: $+1/2$ и $-1/2$ (в единицах \hbar).

Возможно, аналогия с вращением Земли вокруг Солнца и вокруг собственной оси привела в 1927 г. американских физиков Д. Уленбека и С. Гаудсмита к гипотезе о том, что помимо орбитального момента l электрон может обладать внутренним моментом вращения, или спином S , равным по величине $1/2\hbar$. Полный момент электрона J может быть равен либо $J_1 = l + S$,

либо $J_2 = l - S$ в зависимости от взаимной ориентации векторов l и s . При этом уровень $2p$ натрия расщепляется на два уровня $3p_{1/2}$ и $3p_{3/2}$, различающихся значением полного момента. В магнитном же поле каждый из этих уровней расщепляется еще на $2J+1$ компонентов, т. е. возникает та система переходов, которая соответствует опытным данным (рис. 51, б).

Внутренний момент вращения электрона — спин — не имеет классического аналога. Если уподобить электрон вращающейся сфере, то при тех механических и магнитных моментах, которые он имеет в действительности, скорость вращения экваториальной

области будет превышать скорость света, что противоречит теории относительности. Споровое «вращение» микрочастиц нельзя ускорить или замедлить, можно лишь изменить его направление, да и то не произвольно. Проекция спина электрона на любую выбранную ось в пространстве может принимать только два значения: вдоль оси $+\hbar/2$ и против $-\hbar/2$. Все промежуточные значения запрещены. Некоторые микрочастицы (фотон, мезоны) обладают целым спином, равным \hbar .

Гипотеза спина нашла подтверждение в успешном объяснении многих явлений. Например, в 1915 г. А. Эйнштейн и голландский физик В. де Гааз выполнили опыты, подтверждающие дискретность изменений орбитального магнитного момента. Для этого цилиндр из мягкого железа подвешивался внутри катушки с током на тонкой нити. При изменении направления тока в катушке наблюдались крутильные колебания цилиндра. Эйнштейн выполнил анализ связи механических и магнитных свойств вещества. Представляя электрон вращающимся по орбите радиуса r со скоростью v , можно было определить его механический момент L :

$$L = m_e v r.$$

Одновременно вращающийся по орбите электрон представляет собой замкнутый электрический ток, собственный магнитный момент которого

$$P_m = \frac{IS}{c} = \frac{evS}{2\pi rc} = \frac{ev\pi r^2}{2\pi rc} = \frac{evr}{2c}.$$

Отношение P_m/L равно постоянной величине γ :

$$\gamma = \frac{e}{2m_e c}.$$

Так как в теории атома Бора $L = n\hbar$, то орбитальный магнитный момент электрона также оказывается квантованным:

$$P_m = \gamma L = \gamma n \hbar = n \frac{eh}{4\pi m_e c} = n \mu_B,$$

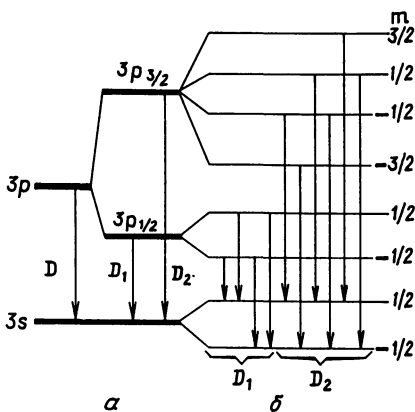


Рис. 51. Тонкая структура спектральных линий натрия

где постоянная величина μ_B получила название магнетона Бора:

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_e c} = 9,2741 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл.} \quad (118)$$

Значения γ , определенные в опыте Эйнштейна—де Гааза, были ровно вдвое больше теоретических. Это наводило на мысль, что в веществе могут быть моменты вращения и магнитные моменты, не связанные с орбитальным моментом L . Собственный момент электрона, складываясь с орбитальным P_m , дает значение γ , соответствующее опытным данным.

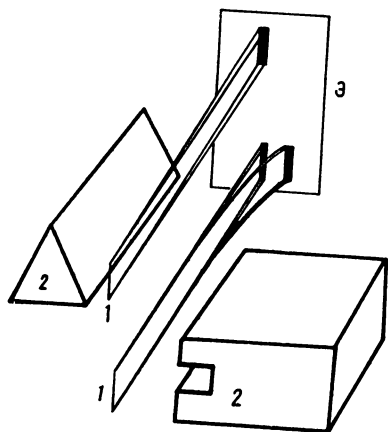


Рис. 52. Схема опыта Штерна—Герлаха:

1—пучок атомов; 2—магнит; 3—экран

В 1922 г. немецкие физики О. Штерн и В. Герлах осуществили опыт по отклонению пучка атомов в неоднородном магнитном поле (рис. 52). С точки зрения классических представлений атомарный пучок должен был создать на экране сплошное размытое пятно, однако эксперименты показывали, что пучки атомов водорода, натрия и т. д. делятся на два. Это удалось объяснить только наличием спина. Переходы между двумя возможными спиновыми состояниями порождают спектральные дублеты, что и приводит к расщеплению атомарных пучков в неоднородном магнитном поле на два.

Весьма своеобразен путь в науку постоянной Планка. Она шаг за шагом прокладывала себе пути к признанию, находя применение в объяснении все новых и новых явлений в микромире. Эта постоянная позволила выяснить многие принципиальные особенности физики микрообъектов, дала возможность глубже понять явления природы, привела к рождению новой физики, физики XX столетия — квантовой механики. Впоследствии Планк писал: «Постоянная h — это таинственный посол из реального мира, который вновь и вновь появляется на сцене при различнейших измерениях, который при этом все более и более настойчиво требовал себе места в физической картине мира, но вместе с тем так мало подходил к этой картине, что в конце концов сломал оказавшиеся слишком тесными рамки этой картины» [88].

7.3. Новая физика

Уравнение Шредингера. Ситуацию в физике 20-х годов нашего века легче понять, обратившись к исторически параллелям. Совокупность данных о свойствах микрочастиц требовала разработки закона их движения точно так же, как почти 250 лет назад законы Ньютона дали научное обоснование многочисленным разрозненным наблюдениям за движением планет. Своеобразие явлений микромира, потребовавшее отказа от многих традиционных представлений, предельно усложняло эту задачу. Ее решение было не только физической, но и психологической проблемой.

Идеи де Бройля о волновых свойствах микрообъектов были весьма плодотворны, именно на их основе был сформулирован основной закон движения микрочастиц. Его нашел в 1926 г. швейцарский физик Э. Шредингер:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + V(x, y, z) \psi. \quad (119)$$

В этом уравнении $V(x, y, z)$ — потенциальная энергия, m — масса микрочастицы, Δ (лапласиан) — сумма вторых производных по пространственным координатам, \hbar — постоянная Планка [$\hbar = h/(2\pi)$], $i = \sqrt{-1}$. Введенная Шредингером волновая функция $\psi(x, y, z, t)$ является основной физической характеристикой микрообъекта. Конечно, внешне уравнение (119) ничем не напоминает вид классических уравнений движения, но физический смысл уравнения Шредингера предельно ясен — в микромире оно играет ту же роль, что и ньютоновские законы в макромире. В стационарном, не зависящем от времени случае уравнение (119) выглядит так:

$$\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0, \quad (120)$$

где E — полная энергия микрочастицы.

Уравнение Шредингера является в настоящее время основным рабочим инструментом квантовой теории, но при его создании наибольшие трудности вызвал анализ физического смысла волновой функции $\psi(x, y, z, t)$. Ее свойства необычны — введенная для описания реально происходящих физических процессов, она, как это видно из (119), могла быть и комплексной. В 1927 г. М. Борн предложил интерпретацию $\psi(x, y, z, t)$, которая вскоре была признана всеми. Квадрат модуля волновой функции $|\psi|^2$ представляет вероятность обнаружения частицы в данной точке пространства в данный момент времени. При этом фундаментальным фактом становится то, что движение микрочастиц происходит по вероятностным законам.

Вероятностный подход к описанию явлений микромира совершенно не означает, что движение микрочастиц непредсказуемо и произвольно. Зная волновую функцию, можно определить

вероятность появления частицы в любом месте и в любое время. На смену жестко детерминированным законам классической физики, справедливым в макромире, пришли вероятностные законы, работающие в микромире. Они являются отражением специфики микрообъектов, проявлением новых свойств материи на уровне ее мельчайших структурных единиц. Принцип соответствия работает и здесь — при переходе к макрообъектам квантово-механический аспект движения становится неощутим из-за малости постоянной Планка h . Динамические законы есть предельный случай более общих вероятностных закономерностей. Последние не являются свидетельством неполноты нашего знания, а отражают глубокое понимание свойств материи на новом качественном уровне.

Уравнение Шредингера прекрасно работает при расчете свойств микрочастиц. Из него, в частности, довольно легко можно получить условие Бора (113) (детали расчета выходят за рамки пособия, они приведены во многих руководствах по квантовой механике, см., например, [89]).

Успехи волновой механики заставили физиков по-новому взглянуть на описание движения электронов в атомах. Приведем в качестве иллюстрации небольшой пример. Условие квантования электронных орбит Бора $2\pi mvr = nh$ позволяет вычислить радиус r_1 первой электронной орбиты, а соотношение де Бройля дает значение длины волны электрона $\lambda = h/(mv)$. Очевидно, что $\lambda = 2\pi r$, т. е. радиус атома водорода оказывается примерно в шесть раз меньше, чем длина волны электрона. Из этого следует, что представлять электрон в атоме частицей абсурдно, ибо тогда придется допустить, что атом построен из частиц, которые больше его самого. Но если электрон не частица, то теряет смысл и введение его траектории движения в атоме. Следуя логике, надо исключить из рассмотрения проблему устойчивости атомов (см. с. 163). При отсутствии траектории нет и ускоренного движения электронов по ним (орбитам, по Бору), следовательно, нет и потерь энергии электронов на излучение. Вопрос об устойчивости атомов решается просто, но, заметим, с полнейшим отказом от привычных понятий. Наивные представления Резерфорда—Бора о строении атомов принципиально меняются: вместо электронных орбит существует вполне определенное распределение вероятности W пребывания электронов на определенном расстоянии r от ядра (рис. 53, [89]). Максимумы функций отвечают в теории Бора соответственно первой (r_1), второй (r_2) и третьей (r_3) орбитам.

Уравнение Шредингера позволило выявить новые принципиальные особенности движения микрообъектов, которые также не имеют аналогов в классической физике. Решая задачу об отражении и прохождении микрочастицы через потенциальный барьер

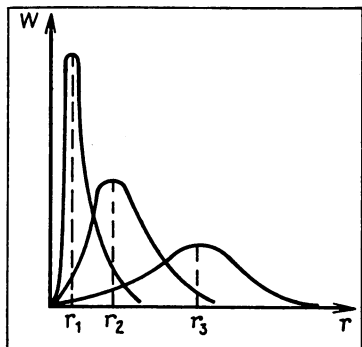


Рис. 53. Распределение вероятности нахождения электрона около ядра атома

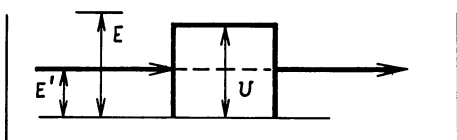


Рис. 54. Туннельный эффект

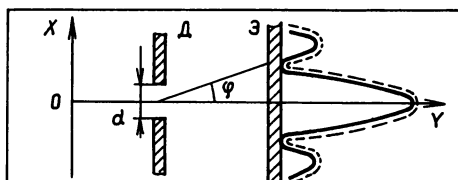


Рис. 55. К выводу соотношения неопределенности

(рис. 54), можно убедиться в том, что при энергии E микрочастицы большей высоты потенциального барьера U существует конечная вероятность отражения ее от барьера (*надбарьерное отражение*), а при $E < U$ также существует определенная вероятность прохождения микрочастицы через барьер (*подбарьерное прохождение*, или *туннельный эффект*). Эти свойства микрочастиц играют громадное значение в физике твердого тела и других областях физики.

Соотношение неопределенностей. Принципиальные особенности специфики микрообъектов раскрывает полученное В. Гейзенбергом в 1927 г. знаменитое соотношение неопределенностей:

$$\Delta x \Delta p_x \geq h. \quad (121)$$

Здесь Δx — неопределенность измерения x -координаты микрообъекта, Δp_x — неопределенность измерения проекции его импульса на эту ось. Аналогичные соотношения имеют место для других координат: $\Delta y \Delta p_y \geq h$, $\Delta z \Delta p_z \geq h$. Время Δt пребывания микрообъекта в состоянии с данной энергией связано с энергетической шириной состояния ΔE : $\Delta E \Delta t \geq h$.

Соотношение неопределенностей говорит о том, что при описании состояния микрообъекта с помощью привычных для нас понятий (координата, импульс) это можно сделать лишь с определенным приближением. Чем точнее мы будем определять координату, тем менее точно определяется ее импульс: $\Delta p_x \approx h/\Delta x$.

Соотношение неопределенностей можно получить из рассмотренного явления дифракции электронов на щели (рис. 55). Пучок электронов, распространяющийся вдоль оси Y , после прохождения

ния через щель D шириной d попадает на экран Э. Волновые свойства электронов приводят к тому, что распределение интенсивности свечения на экране описывается сложным законом. Максимум интенсивности лежит на оси OY , первый минимум наблюдается при $\sin \varphi = \lambda/d$.

Это же явление можно интерпретировать исходя из представления об электроне как о частице. Подлетая к диафрагме, электроны имеют в направлении оси X допуск, равный ширине щели: $\Delta x = d$. При дифракции меняется направление скорости частиц. Проекция p_x , которая до дифракции была равна нулю, для электронов центрального максимума будет, очевидно, лежать в пределах $0 \leq p_x \leq p \sin \varphi$. Неопределенность Δp_x с учетом $\sin \varphi = \lambda/d$ равна

$$\Delta p_x \approx p \frac{\lambda}{d}.$$

Используя соотношение де Бройля $\lambda = h/p$, получаем

$$\Delta x \Delta p_x \approx h.$$

Это соотношение показывает недостаточность, приблизительность, неполноту описания явлений в микромире с помощью обычных понятий. Нельзя одновременно измерить точно и координату, и импульс микрообъекта, отсюда еще раз следует, что у таких частиц не может быть определена траектория. В соотношении неопределенностей в полной мере проявилось фундаментальное значение постоянной Планка. Малость ее величины означает, что, пытаясь измерить более точно одну из характеристик микрообъекта, например его координату, мы изменяем его импульс [89].

Соотношение неопределенностей при своем появлении вызвало множество вопросов, поскольку невозможность одновременного точного измерения координат и импульсов можно на первый взгляд рассматривать как ограничение пределов познаваемости явлений. Конечно, это не так. Смысл соотношения (121) состоит в том, что оно выявляет объективные особенности, присущие микрообъектам. В частности, незнание этого соотношения не помешало ученым открыть электрон. В настоящее время оно является мощным рабочим инструментом физики. Убедимся на двух простых примерах, как соотношение неопределенностей работает в физике микромира.

С помощью (121) стабильность атомов можно объяснить по-новому. При падении электрона на ядро (если бы оно имело место) неопределенность положения электрона уменьшилась бы с 10^{-8} см (размеры атомов) до 10^{-13} см (размеры ядра). Соответственно на пять порядков увеличилась бы неопределенность импульса электрона и он, обладая такой энергией, не смог бы удержаться в ядре. Второй пример. Согласно классическим пред-

ставлениям, скорость электронов в атомах $\approx 10^8$ см/с. При размерах атомов 10^{-8} см неопределенность его скорости $\Delta v_x \approx 6,6 \cdot 10^8$ см/с, т. е. примерно равна по величине самой скорости. Ясно, что при этом понятие траектории частицы теряет смысл. Вероятностное описание движения микрочастиц является единственно возможным.

Виртуальные частицы. Физический вакуум. Вернемся еще раз к соотношению между наблюдением и измерением. Каждое наблюдение, которое мы производим в микромире, неизбежно вызывает изменение состояния микрообъекта. Например, мы не сможем наблюдать электрон не рассеяв на нем какого-либо количества света. В классической физике полагалось, что эти изменения состояния могут быть как угодно малы. В квантовой физике взаимодействие не может быть ниже определенного уровня, масштаб которого задается минимальной величиной действия — постоянной Планка h . С этой точки зрения, фундаментальное значение приобретает еще одно свойство микромира. Взаимодействия, происходящие в течение короткого промежутка времени Δt , сопровождаются изменением энергии системы на ΔE , причем $\Delta E \Delta t \approx h$. Закон сохранения энергии незыблем, но в течение времени Δt энергия системы может измениться на ΔE . Материализация этой порции энергии может быть какой угодно — ею могут обладать фотоны или она может пойти на образование (рождение) каких-либо частиц. Такие частицы получили название виртуальных, поскольку спустя короткое время Δt они «исчезают». Так как $\Delta t \approx h/\Delta E$ и скорость движения этих частиц не может превышать скорость света c , то за время своего существования виртуальные частицы смогут пройти путь $hc/\Delta E$. Поскольку для рождения виртуальной частицы с массой покоя, равной M , требуется, по Эйнштейну, энергия $E = Mc^2$, пройденный ею путь будет равен $h/(Mc)$ (комптоновская длина волны). Особенностью фотонов является отсутствие у них массы покоя, поэтому радиус действия виртуальных фотонов неограничен. Это находит подтверждение в бесконечно большом радиусе действия электромагнитных сил ($F \sim R^{-2}$).

Представление о виртуальных частицах радикально изменило привычные понятия о пустоте. Она оказалась весьма своеобразным физическим объектом, в ней непрерывно происходят процессы рождения и уничтожения виртуальных частиц. Ситуация из статической, мертвой превратилась в динамическую, пустота получила название физического вакуума. Естественное объяснение имеет при этом отсутствие траектории у микрочастиц, статистический, вероятностный характер их движения. Случайно, нерегулярно возникающие виртуальные частицы непрерывно взаимодействуют с реальными частицами. В результате параметры микрочастиц непрерывно меняются, флуктуируют. Непрерывно меняется их заряд из-за экранировки частиц виртуальными части-

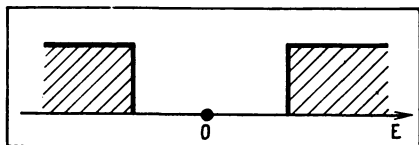


Рис. 56. Возможные значения энергии релятивистского электрона (заштрихованные участки)

меняет свое положение, как бы «танцует» вокруг положения равновесия.

Антимир Дирака. Труды выдающегося английского физика П. Дирака представляют собой значительный и принципиально новый по содержанию вклад в развитие квантовой теории. Уравнение Шредингера (119) при всем его громадном значении для науки не является релятивистским, т. е. описывает движение частиц со скоростями $v \ll c$. В микромире частицы могут двигаться с $v \approx c$, поэтому необходимо было найти релятивистское обобщение уравнения Шредингера. Его получил в 1928 г. П. Дирак. К сожалению, рамки пособия не позволяют остановиться на этом вопросе более подробно, ограничимся анализом следствий, которые вытекают из уравнения Дирака.

Первым и значительным успехом его теории было то, что при объединении квантовой механики и теории относительности в уравнении самым естественным образом учитывался спин микрочастиц. Другие следствия решения были не столь очевидны и потребовали от Дирака глубокого анализа. Из них вытекало, что электроны могут иметь как положительную, так и отрицательную энергию (рис. 56). Опираясь на принцип, выдвинутый В. Паули, который запрещает двум электронам находиться в состоянии с одинаковыми квантовыми числами, Дирак дал этому факту глубокое физическое объяснение. Он предположил, что все состояния с $E < 0$ полностью заняты электронами и поэтому электроны с $E > 0$ не могут переходить в эти состояния. Дирак идет и далее. Он утверждает, что γ -кванты с энергией $E \geq 2mc^2$ могут выбивать из такого «вакуума» электроны. При этом закон сохранения электрического заряда требует, чтобы одновременно появлялись частицы, несущие положительный заряд. Таких частиц физика еще не знала. Дирак условно назвал эту частицу «дыркой», как бы подчеркивая в этом названии механизм ее образования. В 1931 г. он писал: «Дырка должна быть новым типом частицы, не известным еще в экспериментальной физике, у нее должна быть та же масса, что и у электрона, а заряд — противоположен заряду электрона...» [90]. Впервые теоретически предсказано существование новой элементарной ча-

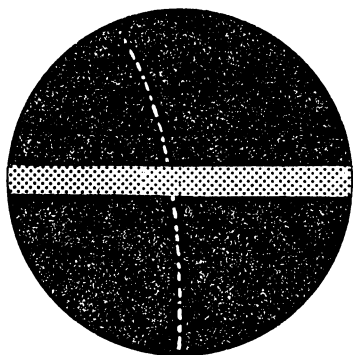


Рис. 57. Первая фотография трека позитрона

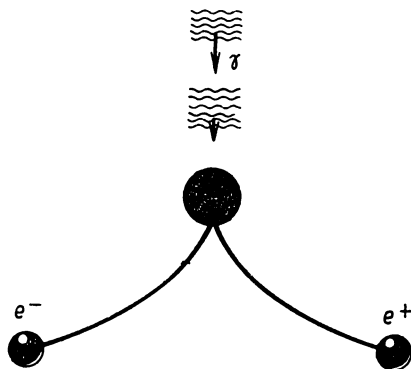


Рис. 58. Рождение электрон-позитронной пары при взаимодействии γ -кванта с полем атома

стицы, в науке впервые возникло новое понятие античастицы. Эти предсказания Дирака блестяще сбылись.

2 августа 1932 г. К. Андерсон получил в камере Вильсона необычную фотографию трека микрочастицы (рис. 57). Частица влетела в камеру снизу, большой изгиб ее трека вверху снимка означает, что она потеряла часть своей энергии при прохождении свинцовой пластины, расположенной в середине камеры. Андерсон определил, что эта частица имеет положительный заряд и ее масса приблизительно равна массе электрона. Так были получены четкие доказательства реальности предсказанной Дираком античастицы. Позже эта частица получила название «позитрон». В дальнейшем П. Блэккет и Дж. Оккиалини смогли впервые зарегистрировать рождение электрон-позитронной пары (рис. 58). По мере развития техники экспериментальных исследований были обнаружены и другие античастицы (Э. Сегре, 1955 г., антипротон).

Гипотеза Дирака о существовании античастиц подтвердилась. Не менее важным итогом исследований явилось то, что был обнаружен и обратный процесс: при встрече электрона с позитроном может происходить их взаимное уничтожение. При этом энергия и масса частиц переходят в энергию излучения. Этот процесс был назван аннигиляцией, он играет важную роль в физике микромира.

Квантовая электродинамика. Появление квантовой механики по-новому поставило вопрос о механизме взаимодействия заряженных частиц. В максвелловской электродинамике распространение электромагнитных волн представлялось в виде непрерывного процесса. Теперь было необходимо включить в теорию новую физическую реальность — фотоны. Эта теория была разработана Ю. Швингером, С. Томонагой и Р. Фейнманом и получила название квантовой электродинамики (КЭД).

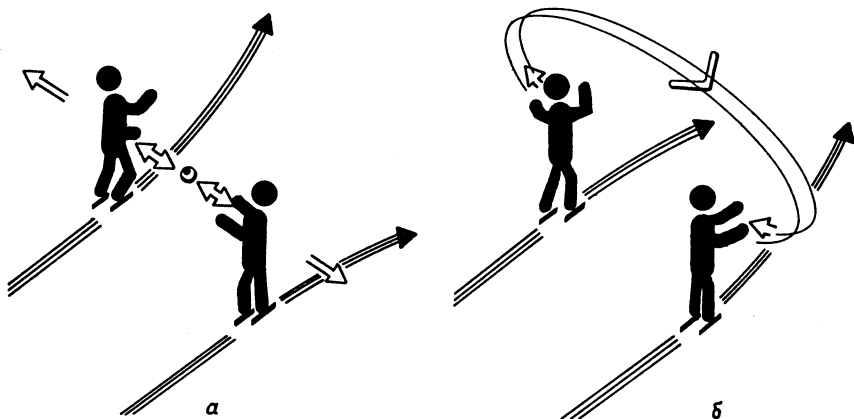


Рис. 59. Возникновение притяжения и отталкивания при обмене частицами-переносчиками

Одним из кардинальных вопросов теории является описание взаимодействия между заряженными частицами. Мало сказать, что заряды отталкиваются или притягиваются, необходимо предложить механизм этих взаимодействий. В нем должны учитываться требования концепции близкодействия, согласно которой любое взаимодействие распространяется с конечной скоростью, не превышающей скорости света. Теория физического вакуума позволила найти решение этой задачи.

В настоящее время считается общепринятым, что все силы природы возникают в результате обмена частицами-переносчиками между взаимодействующими частицами. Частицы-переносчики могут быть испущены как самими взаимодействующими частицами, так и быть рожденными из «кипящего» физического вакуума. Время существования виртуальных частиц определяется уже известным соотношением $\Delta t \sim h/\Delta E$. В случае рождения безмассовых частиц — фотонов — «одолженная» у вакуума энергия может быть очень мала, что означает большое время жизни виртуальных фотонов. При этом виртуальные фотоны могут передавать действие электромагнитных сил на большие расстояния ($c\Delta t$ велико), что и наблюдается в действительности. (Эти же представления элементарно объясняют убывание электромагнитных сил по закону R^{-2} , так как площадь сферы, в которой распространяются фотоны, растет пропорционально R^2 , а число виртуальных фотонов в ней постоянно.)

Представления о взаимодействии путем обмена частицами-переносчиками имеют хорошую образную аналогию, предложенную Д. Уилкинсоном [9]. На рис. 59 изображены два конькобежца. Если они перекидывают друг другу мяч, то, очевидно, они при этом будут удаляться друг от друга, что соответствует

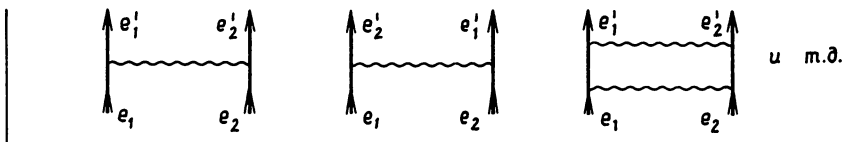


Рис. 60. Диаграммы Фейнмана для рассеяния электрона на электроне



Рис. 61. Диаграммы Фейнмана для рассеяния электрона на фотоне

отталкиванию одноименно заряженных частиц (рис. 59, а). Если же конькобежцы перебрасывают бумеранг (рис. 59, б), то при этом происходит их сближение, что соответствует притяжению разноименно заряженных частиц.

Согласно КЭД, два электрических заряда взаимодействуют путем обмена виртуальными фотонами-переносчиками. Их можно представить как бы окруженными облаками непрерывно излучаемых и поглощаемых фотонов. Наглядно взаимодействие заряженных частиц с излучением и между собой описывается с помощью диаграмм Фейнмана (рис. 60 и 61; сплошной линией изображены электроны, волнистой — фотоны). Правила построения диаграмм просты. Для рассеяния двух электронов все вершины диаграмм должны быть точно с тремя линиями, две из которых отвечают электрону, одна — фотону; число и тип линий, не связывающих две вершины, а просто входящих в нее, должны совпадать с числом и типом частиц в начале и конце реакции (рис. 60). Взаимодействие электрона с излучением может происходить как с участием одного фотона (рис. 61, а), так и двух, трех (рис. 61, б, в). Во взаимодействии могут принимать участие виртуальные электрон и позитрон (рис. 61, з).

Область применения КЭД — расчет электронных оболочек атомов, спектров излучения и поглощения света атомами, рассеяние рентгеновского излучения, движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, рассеяние электрона на электроне или позитроне и т. д. Выдающимся успехом квантовой электродинамики является объяснение отклонения магнитного момента электрона от предсказываемых классической электродинамикой значений.

В табл. 1 g -фактор — магнитный момент электрона, выраженный в единицах магнетона Бора $\mu_B = e\hbar/(2m_e c)$ и отнесенный

к спиновому моменту, выраженному в единицах \hbar . Таким образом, согласно классической электродинамике, значение g -фактора должно быть точно равно двум. Однако приведенные в табл. 1 данные свидетельствуют об отклонении значения g от двух. Причины этого отклонения объяснила КЭД. В классической электродинамике взаимодействие электрона с внешним фотоном описывается диаграммой, показанной на рис. 61, а. Для такого взаимодействия, не учитывающего виртуальные фотоны, g -фактор точно равен двум. Взаимодействие, в котором принимает участие один виртуальный фотон, может быть представлено диаграммой, показанной на рис. 61, б. Число вершин увеличилось на одну, но физика процесса изменилась самым радикальным образом. Так как магнитный момент электрона зависит от отношения e/m , то при испускании виртуального фотона масса электрона уменьшится и магнитный момент электрона станет больше. Обусловленная этим поправка к g пропорциональна вероятности излучения виртуального фотона и равна

$$g/2 = 1 + 0,5 (\alpha/\pi),$$

где $\alpha = e^2/(\hbar c) \approx 1/137$. Эта безразмерная постоянная называется постоянной тонкой структуры, так как она впервые возникла в физике в выполненных А. Зоммерфельдом расчетах тонкой структуры спектральных линий. Рассеяние с излучением двух виртуальных фотонов (рис. 61, в) и с излучением одного виртуального фотона, взаимодействующего с виртуальной электрон-позитронной парой (рис. 61, г), дает поправку к g , равную $-0,33 (\alpha/\pi)^2$.

Решение уравнения Шредингера в КЭД можно представить в виде бесконечной суммы членов геометрической прогрессии со знаменателем ее, равным α . До начала 40-х годов нашего века физики могли рассчитывать только первое слагаемое в этом ряду. К 1981 г. с помощью самых быстрых ЭВМ уже было вычислено 800 сложных фейнмановских графиков с семью вершинами, при этом поправки к g -фактору удалось рассчитать с фантастической точностью. Результаты теоретических вычислений (А) блестяще совпадают с данными эксперимента (Б):

$$g/2 = 1,00115965238 \pm 0,00000000026, \quad (\text{А})$$

$$g/2 = 1,0011596524 \pm 0,0000000002 \text{ [91]}. \quad (\text{Б})$$

Столь большое совпадение является наиболее убедительным доказательством справедливости квантовой электродинамики. Оно же свидетельствует о физической достоверности концепции физического вакуума, возникшей в результате развития квантовой теории.

Заключение. Разговор о постоянной Планка начался с обсуждения проблем теплового излучения, а заканчивается обсуждением проблемы элементарных частиц и концепции физического вакуума. Наука постепенно раскрывала тайны микромира. Многие привычные для классической физики оказались несосто-

тельными, в физику вошли принципиально новые понятия. Произошел революционный переворот во взглядах на природу, на сущность физических закономерностей. По сути дела, стала создаваться новая физика, описывающая явления в микромире. Толчок всему этому динамичному процессу дало открытие постоянной Планка h . В дальнейшем мы еще много раз будем возвращаться к этой удивительной постоянной, открывая все новые и новые грани ее физического содержания.

8. КОНСТАНТЫ СИЛЬНОГО И СЛАБОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Архаика современной физики. Этот параграф посвящен константам мира элементарных частиц. Прежде чем рассматривать чисто физические аспекты этой проблемы, остановимся на некоторых методических вопросах.

Рассмотрим постоянные табл. 1, относящиеся к микрообъектам. Данные таблицы вызывают по меньшей мере чувство удивления. В ней перечислены далеко не все характеристики только четырех (!) элементарных частиц (например, не указаны времена жизни мюона и нейтрона, спины частиц). В настоящее время любой грамотный человек знает, что элементарных частиц намного больше. Современный каталог элементарных частиц, издаваемый раз в два года Европейской организацией ядерных исследований, содержит уже более трехсот их наименований, так что несовершенство табл. 1 в этом плане очевидно. Она безнадежно отстала от современного уровня развития физики элементарных частиц. Это отставание можно даже измерить, оно равно... 50 годам! (Мюон был открыт в 1936—1938 гг.) Если говорить об элементарных частицах, то существование таблицы фундаментальных физических постоянных в ее сегодняшнем виде является нонсенсом, оно наносит прямой вред изучению физики.

Поднятые вопросы нельзя снять простым включением в таблицу всех элементарных частиц и перечислением их характеристик. Каждая частица описывается многими параметрами (масса, время жизни, спин и магнитный момент, кварковая структура и т. д.), поэтому выполнение такой программы привело бы к невероятному увеличению объема таблицы и окончательно затруднило бы понимание проблемы фундаментальных постоянных. В этой ситуации полезно и необходимо проанализировать некоторые методологические вопросы, относящиеся к применению понятия «фундаментальные физические постоянные» к элементарным частицам.

К определению понятия «элементарная частица». Этот вопрос имеет давнюю историю. У древних греков элементарными считались стихии — огонь, воздух, вода и земля, из которых состояли все остальные вещества. Предложенная еще Демокритом атомистическая гипотеза нашла со временем убедительное подтверждение. В начале нашего века объектом изучения стала внутренняя структура неделимого, как представлялось раньше,

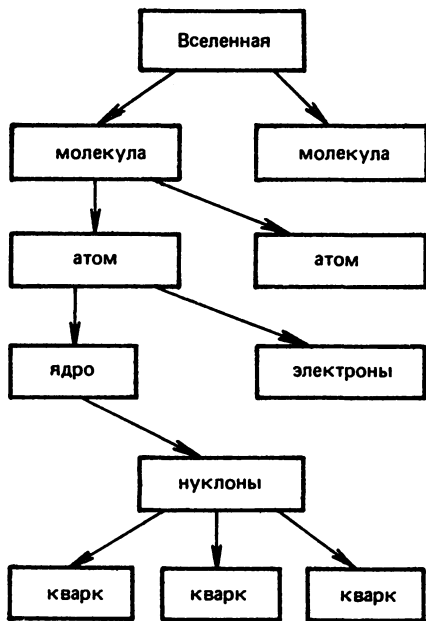


Рис. 62. Уровни структурной организации вещества во Вселенной

атома; в науке появилось понятие атомного ядра. Открытие протона (1919) и нейтрона (1932) еще более понизило уровень элементарности основных структурных единиц вещества. И, наконец, в последнее время множество экспериментальных данных, относящихся к вновь и вновь открываемым элементарным частицам, было упорядочено в их систематике, предполагающей наличие внутренней кварковой структуры многих микрочастиц. Основными структурными единицами материи теперь считаются лептоны и кварки* (рис. 62).

Достижения науки приводят к уточнению существовавших ранее понятий и к формированию новых определений. Это наблюдается и в физике элементарных частиц. К сожалению, общепринятого и четкого

определения термина «элементарная частица» пока нет. В подтверждение этого приведу несколько примеров. Так, в [92] читаем: «Под элементарной частицей подразумевают не только геометрически неделимый объект, но и нечто, ведущее себя как единое целое во всех физических опытах». Рассмотрим это определение в применении, например, к протону. Как известно, расщепить протон на составные части пока не удастся, предсказываемый теорией распад протона (см. ниже) также пока не наблюдался, и все же этот «геометрически неделимый объект» не ведет себя как «единое целое» в экспериментах по рассеянию электронов на протонах. Повышение энергии зондирующих электронов дало четкие свидетельства существования внутренней структуры нуклонов, никак не проявлявшей себя при низких энергиях ядерных реакций. В результате появляются не согласующиеся с определением, данным в [92], категорические утверждения типа: «протон — составная частица, он состоит из трех кварков» [93] или «протон состоит из частиц размером менее 10^{-15} см, т. е. он в основном пуст» [9]. В [65] можно найти основанное на последних достижениях физики элементарных частиц определение: «Частицу называют элементарной, если она

*Эти понятия разобраны ниже в данном параграфе.

не обладает внутренней структурой, т. е. не состоит из еще меньших объектов». Эта точка зрения разделяется и другими авторами [32, 93]. В соответствии с определением [65] его автор считает элементарными бесструктурные объекты — кварки и лептоны. И все же основывающееся на понятии бесструктурности определение элементарности частиц вряд ли можно признать методически безупречным. Вся история науки есть история изучения все более и более малых по размерам объектов. Не исключено, что развитие техники экспериментальных исследований позволит со временем ответить на вопрос: «Существуют ли частицы, представляющие более глубокий уровень организации материи, чем кварки и лептоны?» [94].

Если принять определение [65], то из таблицы фундаментальных физических постоянных (см. табл. 1) следовало бы изъять все константы, характеризующие протон, нейтрон и мюон, и включить в нее характеристики кварков и других, кроме электрона, лептонов. Конечно, делать это нецелесообразно, но и оставлять таблицу в ее сегодняшнем виде нельзя. Характеристики протона, нейтрона и электрона, безусловно, имеют фундаментальное значение в науке, поскольку эти частицы являются основными структурными единицами вещества Вселенной. Полные же данные об «элементарных частицах», возможно, следовало бы публиковать в виде отдельной таблицы с соответствующим названием.

Фундаментальные константы мира элементарных частиц. Положение с определением фундаментальных констант, относящихся к миру микрообъектов, еще сложнее. Самые привычные понятия на поверку оказываются весьма неопределенными, достаточно вспомнить, например, обсуждавшиеся в § 4 этой части книги проблемы заряда физического и голого электрона. Тогда какие константы можно рассматривать в качестве фундаментальных в физике элементарных частиц?

Рассматривая вопросы об организации материи на низшем на сегодняшний день уровне, физика элементарных частиц исследует фундаментальные для всего естествознания проблемы. Изучение свойств элементарных частиц выявило еще два (помимо гравитационного и электромагнитного) типа взаимодействия — сильное и слабое. Фундаментальными постоянными науки являются константы этих взаимодействий — сильного α_s (от англ. strong — сильный) и слабого α_w (от англ. weak — слабый). Принципиально важно отметить, что эти константы зависят от энергии взаимодействия, это «бегущие» константы. Их непостоянство (в буквальном понимании этого слова) также имеет фундаментальное значение в науке, поскольку открывает пути к объединению различных взаимодействий, т. е. пути к решению глобальной научной проблемы — построению единой научной картины мира.

8.1. Константа сильного взаимодействия

Мезонная теория ядерных сил. Представление о сильном взаимодействии вошло в науку о строении атомного ядра в 1934 г. сразу же после того, как советским ученым Д. Д. Иваненко и В. Гейзенбергом была предложена протонно-нейтронная модель ядра. Оно явилось естественным ответом на вопрос: что удерживает частицы ядра вместе? Между протонами ядра действует кулоновское отталкивание, во много раз превышающее силы гравитационного притяжения. Тем не менее ядра атомов являются устойчивыми системами, а это означает, что между ядерными частицами должны действовать новые силы не известной пока природы. Они во много раз больше электростатических и удерживают вместе как одноименно заряженные протоны, так и нейтроны. Эти силы были названы ядерными, а взаимодействие между нуклонами в ядре — сильным. Заметим, что если названия гравитационного и электромагнитного взаимодействий связаны с их механизмом, то название «сильное взаимодействие» всего лишь качественное. О нем известно не много. Поскольку это взаимодействие существует между частицами, входящими в состав атомного ядра, оно является короткодействующим. Его радиус действия сравним с размерами ядра, т. е. примерно равен 10^{-12} см. Раскрытие механизма сильного взаимодействия, природы ядерных сил потребовало от теоретиков и экспериментаторов разработки принципиально новых представлений о структуре нуклонов.

Идея о том, что силы взаимодействия между частицами являются результатом обмена между ними частицами-переносчиками, уже обсуждалась. В 1934 г. советские ученые И. Е. Тамм и Д. Д. Иваненко высказали гипотезу о том, что короткодействующие ядерные силы возникают в результате обмена частицами с ненулевой массой между нуклонами. В духе своего времени они предложили рассматривать в качестве таких частиц-посредников электроны. Позднее выяснилось, что это предположение не обеспечивает нужной для сохранения стабильности ядер величины обменных сил.

Развивая предложение И. Е. Тамма и Д. Д. Иваненко, японский физик Х. Юкава в 1935 г. выдвинул гипотезу о том, что частицы-переносчики могут иметь значительно большую массу, чем электрон. Возвращаясь к рис. 59, можно утверждать, что взаимодействие между конькобежцами будет тем сильнее, чем более тяжелыми частицами они перебрасываются. Необходимо отметить, что предложение Юкавы было смелым теоретическим предвидением — такие частицы в то время еще не были известны. Их массу можно оценить из соотношения неопределенностей. Время жизни виртуальной частицы-посредника $\Delta t \approx h/\Delta E$,

путь, который она проходит за это время, приблизительно равен $c \Delta t$ и равен размерам ядра. Принимая $\Delta E = mc^2$, получаем

$$m \approx \frac{h}{Rc} \approx 250 m_e.$$

Частицы с такой массой получили название мезонов.

Любая гипотеза нуждается в экспериментальной проверке. Ее идею предложил сам Юкава. Энергию, соответствующую массе покоя мезона и равную примерно 125 МэВ ($m_e \approx 0,511$ МэВ), необходимо сообщить системе нуклон — нуклон, чтобы выбить из нее мезон. В известных в то время процессах радиоактивного распада изменения энергии были значительно меньшими, поэтому они не могли быть использованы для обнаружения мезонов.

Примерно в это время физики обнаружили, что на Землю из космического пространства непрерывно падает поток частиц, обладающих огромной энергией (космические лучи). С их помощью были найдены экспериментальные доказательства существования мезонов. В 1936—1938 гг. К. Андерсон и С. Неддермайер получили в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле, необычные треки частиц. По искривлению треков они определили их массу. Она оказалась меньше, чем следовало из теоретических оценок, $\approx 207 m_e$. Частица была названа мюоном. Различие между теоретической и экспериментально полученной массой пока не вызывало беспокойства. Благодушно считалось, что с помощью известных к этому времени частиц — электрона, протона, нейтрона и мюона — можно построить вполне удовлетворительную картину строения материи на субатомном уровне.

Число элементарных частиц резко возрастает. Увы, это было скорее желаемым, чем действительным. После окончания второй мировой войны в 1947 г. группой английских физиков под руководством С. Пауэлла в космических лучах была найдена еще одна элементарная частица, имеющая массу примерно $273 m_e$. Выяснилось, что именно эти частицы, названные пионами или π -мезонами, являются переносчиками ядерного взаимодействия, а ранее предназначавшийся на эту роль мюон вообще не принимает в нем участия (мюоны — слабо взаимодействующие частицы).

Открытие пионов было началом интенсивных исследований. Одна за другой обнаруживались все новые и новые частицы: 1947 г. — K -мезоны, или каоны; 1951 г. — лямбда-гипероны Λ ; 1953 г. — сигма-гиперон Σ (в космических лучах), он же был открыт в 1974 г. в реакциях на ускорителе протонов в Брукхейвене (США) и т. д. Список элементарных частиц стал очень быстро пополняться. Подробно об этих исследованиях превосходно рассказано в ряде книг (см., например, [92]).

Поражает как обилие элементарных частиц, так и их разнообразие. Резко различаются между собой их массы, времена жизни (напомним, что это далеко не все характеристики частиц). Почти у каждой частицы имеется ее двойник — античастица, в связи с чем их число сразу же должно быть увеличено почти вдвое. В ряде случаев частицы имеют различные зарядовые состояния, например под символом кси-гиперона Ξ скрываются две частицы — нейтральный Ξ^0 и отрицательно заряженный кси-минус-гиперон Ξ^- , под символом K следует понимать две частицы — нейтральный каон K^0 и положительно заряженный K^+ -каон. Большие группы частиц объединены под названием «резонансы». Характерным для этих частиц является их малое время жизни ($\approx 10^{-23}$ с), все они рассматриваются как различные возбужденные состояния одной частицы, например нуклона. И здесь символы отдельных резонансов больше указывают на их существование, нежели на действительную картину наличия множества частиц, принадлежащих данному резонансу и отличающихся друг от друга зарядовыми состояниями, массой и временем жизни. Так, нуклонный резонанс Δ^* , открытый в 1951 г. Э. Ферми в опытах по рассеянию пионов на протонах, включает в себя следующие частицы.

Т а б л и ц а 5

Частица	Античастица	Масса, МэВ	Время жизни, с
$(\Delta^*_1)^{++}; (\Delta^*_1)^+;$ $(\Delta^*_1)^0; (\Delta^*_1)^-$	$(\bar{\Delta}^*_1)^{++}; (\bar{\Delta}^*_1)^+;$ $(\bar{\Delta}^*_1)^0; (\bar{\Delta}^*_1)^-$	1232	$\sim 0,6 \cdot 10^{-23}$
$(\Delta^*_2)^{++}; (\Delta^*_2)^+;$ $(\Delta^*_2)^0; (\Delta^*_2)^-$	$(\bar{\Delta}^*_2)^{++}; (\bar{\Delta}^*_2)^+;$ $(\bar{\Delta}^*_2)^0; (\bar{\Delta}^*_2)^-$	1650	$\sim 0,7 \cdot 10^{-23}$
$(\Delta^*_3)^{++}; (\Delta^*_3)^+;$ $(\Delta^*_3)^0; (\Delta^*_3)^-$	$(\bar{\Delta}^*_3)^{++}; (\bar{\Delta}^*_3)^+;$ $(\bar{\Delta}^*_3)^0; (\bar{\Delta}^*_3)^-$	1890	$\sim 0,38 \cdot 10^{-23}$
$(\Delta^*_4)^{++}; (\Delta^*_4)^+;$ $(\Delta^*_4)^0; (\Delta^*_4)^-$	$(\bar{\Delta}^*_4)^{++}; (\bar{\Delta}^*_4)^+;$ $(\bar{\Delta}^*_4)^0; (\bar{\Delta}^*_4)^-$	1950	$\sim 0,4 \cdot 10^{-23}$

Символ \sim (тильда) применяется для обозначения античастиц.

Барнионная асимметрия Вселенной. Говоря о том, что почти каждой частице соответствует своя античастица, необходимо остановиться на одном поразительном факте, имеющем для дальнейшего изложения очень важное значение. Астрофизические исследования показывают, что Вселенная состоит только из вещества, т. е. из образующих атомы протонов, нейтронов и электронов, а не из их

античастиц. Этот вывод был сделан на основании многих наблюдений. Например, если бы во Вселенной вещество соседствовало с антивеществом, то на границе их соприкосновения происходили бы процессы аннигиляции. Однако излучения с характерной для этих процессов энергией не наблюдается. Можно предположить, что скопления Галактик, отделенные друг от друга громадными расстояниями, могут состоять как из вещества, так и из антивещества. Однако ни одна из космологических моделей не предложила еще такой модели развития Вселенной, которая объясняла бы наличие таких крупномасштабных неоднородностей. Античастицы очень редко наблюдаются в приходящих из Космоса лучах.

Наблюдаемое в настоящее время во Вселенной отношение числа антинуклонов к числу нуклонов оказывается приблизительно равным $10^{-9 \pm 1}$. Указанное свойство получило название барионной асимметрии Вселенной. Эта же величина характеризует и отношение среднего числа фотонов в единице объема космического пространства к числу нуклонов в этом же объеме. Объяснение этих данных было найдено сравнительно недавно и является одним из крупнейших достижений интенсивно развивающейся физики элементарных частиц.

Основы систематики элементарных частиц. Обилие элементарных частиц, разнообразие их характеристик поставили перед учеными очень трудную задачу разработки их систематики. Вспомним химию. Острейшая проблема прошлого века, когда открытие все новых и новых элементов затрудняло их классификацию, была решена в гениальном творении Д. И. Менделеева. Аналогичная ситуация сложилась в наше время и в физике элементарных частиц. Для поиска путей их систематики необходимо было вновь и вновь анализировать имеющиеся данные — ведь это не что иное, как своеобразная «подсказка» природы, правда, полученная от нее в результате колоссального труда ученых.

Основой классификации элементарных частиц является деление их на два больших класса — адронов и лептонов. Адроны — это элементарные частицы, принимающие участие в сильных взаимодействиях, в то время как лептоны участвуют в слабых и электромагнитных взаимодействиях. Класс адронов в свою очередь делится на два семейства (барионы и мезоны). Под барионами подразумеваются все адроны, которые в реакциях между элементарными частицами могут превращаться в протоны или получаться из них. По существу это означает следующее. Протоны, т. е. ядра атома водорода, кажутся совершенно неуничтожимыми, достаточно вспомнить о стабильности атома водорода. В принципе же возможен процесс аннигиляции протона и электрона, так как при этом не нарушался бы ни один из известных законов сохранения. То, что этот процесс не имеет места, может означать существование еще одного закона со-

хранения, который можно сформулировать как закон сохранения барионного числа (заряда) B . При этом всем барионам приписывается значение B , равное $+1$, антибарионам — $B = -1$. Введенный таким образом закон сохранения барионного числа лишь отражает, но не объясняет устойчивость протона. В последнее время она подвергается сомнению в связи с предсказаниями теории Великого объединения (см. ниже). Спин всех барионов (в единицах \hbar) полуцелый. Мезоны же в отличие от барионов могут рождаться и уничтожаться поодиночке, их спин равен 0 или единице.

Для разработки систематики элементарных частиц большое значение имеет следующее обстоятельство. В реакциях, протекающих между элементарными частицами, каоны и гипероны рождаются обязательно парами, например

$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0; \pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^-; \pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+.$$

Вторым удивительным свойством этих частиц оказалось их большое по ядерным масштабам время жизни: 10^{-8} с для каонов и 10^{-10} с для гиперонов. И эта «подсказка» природы была замечена. Американский физик М. Гелл-Ман и японский К. Нишиджима предположили, что парное рождение каонов и гиперонов и их долгоживучесть связаны с сохранением некоторой новой характеристики элементарных частиц, которую они назвали странностью S . (Это далеко не последний пример экзотических названий.) Был установлен новый закон сохранения — суммарная странность мезонов и барионов, участвующих в сильных и электромагнитных взаимодействиях, сохраняется. В табл. 6 приводятся значения странности некоторых элементарных частиц и античастиц [95].

Таблица 6

	$S=3$	$S=2$	$S=1$	$S=0$	$S=-1$	$S=-2$	$S=-3$
Частицы				$\pi^+; n; p;$	$\Lambda^0; \Sigma^+;$ $\Sigma^0; \Sigma^-$	$\Xi^0; \Xi^-$	Ω^-
Античастицы	$\bar{\Omega}^-$	$\bar{\Xi}^0; \bar{\Xi}^-$	$\bar{\Lambda}^0; \bar{\Sigma}^+;$ $\bar{\Sigma}^0; \bar{\Sigma}^-$	$\pi^0 \eta^0$ $\pi^-; \bar{p}; \bar{n}$	$\bar{K}^0; K^-$		

О симметрии физических законов. Одним из направляющих принципов при разработке систематики элементарных частиц были идеи симметрии физических законов. В неявном виде они уже обсуждались в книге. Симметрия физических законов означает их неизменность (инвариантность) по отношению к тем или иным преобразованиям. При обсуждении специальной теории относительности отмечалось, что физические законы инвариант-

ны относительно замены одной инерциальной системы отсчета другой. Можно привести примеры и других симметрий. Физические законы инвариантны по отношению к пространственным переносам (иначе бы при переносе в другое место замедляли или ускоряли свой ход часы), что свидетельствует об однородности пространства. Физические законы инвариантны по отношению к поворотам в пространстве (изотропность пространства), к переносам во времени (однородность времени). Особую важность идеи симметрии приобретают в связи с тем, что каждому виду симметрии соответствует свой закон сохранения (теорема Э. Нетер). Так, из однородности пространства следует закон сохранения импульса, из его изотропности — закон сохранения момента импульса, из однородности времени — закон сохранения энергии. Область применимости всех этих законов выходит далеко за рамки частных теорий. Они справедливы как в макро-, так и в микромире, несмотря на то что законы движения в классической и квантовой механике принципиально иные. Не случайно эти законы сохранения названы фундаментальными.

Изотопический спин. Обсудим идеи симметрии на одном далеко не очевидном примере из физики элементарных частиц. Непосредственный опыт дает весьма ограниченные представления о природе, например очевидным фактом является вращение Солнца вокруг Земли и не очевидно обратное. Речь сейчас пойдет о новой характеристике элементарных частиц, называемой изотопическим спином или изоспином.

Давно замечено, что ядерные силы не зависят от электрического заряда частиц. Подтверждением этого являются практически одинаковые свойства зеркальных ядер, например ядра Li^7 (3 протона и 4 нейтрона) и Be^7 (4 протона и 3 нейтрона). В связи с этим протон и нейтрон можно рассматривать как два различных зарядовых состояния одной и той же частицы — нуклона. Протон и нейтрон образуют изотопический дублет. Изотопические дублеты образуют также два кси-гиперона Ξ^0 и Ξ^- и два каона K^0 и K^+ . В изотопические триплеты объединяются три сигма-гиперона, а также пионы π^+ и π^0 и антипион π^- (табл. 7). Каждый изотопический мультиплет можно характеризовать изоспином I : $I = (n - 1)/2$, где n — число зарядовых состояний в мультиплете. Например, изоспин нуклонного дублета равен $I = 1/2$, его проекции на некоторое «направление» в воображаемом пространстве изоспина принимают значения $I_z = +1/2$ для протона и $I_z = -1/2$ для нейтрона. Следовательно, физические законы инвариантны относительно поворотов в пространстве изоспина, т. е. существует закон сохранения изоспина. Этот закон не является абсолютным, он нарушается при переходе от сильного взаимодействия к электромагнитному и слабому.

Таблица 7

Изотопические мультиплеты	Частицы	Изоспин
Синглеты ($n=1$)	$\eta^0; \Lambda^0; \Omega^-$	$I=0$
Дублеты ($n=2$)	$p, n; K^0, K^+; \Xi^0, \Xi^-$	$I=1/2$
Триплеты ($n=3$)	$\pi^+, \pi^0, \pi^-; \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$	$I=1$
Квадруплеты ($n=4$)	$(\Delta^*)^{++}, (\Delta^*)^+, (\Delta^*)^0, (\Delta^*)^-$	$I=3/2$

Порядок в мире элементарных частиц. С помощью введенных выше, казалось бы, совершенно абстрактных величин (барионного числа B , странности S и изоспина I) удалось выявить порядок в мире элементарных частиц. Если на координатной плоскости, осью абсцисс которой является множество значений проекций изоспина I_z , а на оси ординат откладываются значения $B+S$ (гиперзаряд), расположить барионы со значением спина $s=1/2$, то точки их расположения на плоскости образуют правильный шестиугольник (рис. 63). Аналогичное построение получится и для восьмерки мезонов со спином $s=0$ (рис. 64). Резонансы со спином $s=3/2$ образуют на этой плоскости треугольник (рис. 65). Интересно отметить, что одна из частиц, образующих его, была сначала открыта теоретически М. Гелл-Маном в 1961 г. Ее существование было подтверждено экспериментально только через три года (1964), причем характеристики частицы точно соответствовали предсказаниям теории, что сразу же доказывало ее справедливость. Была установлена связь между электрическим зарядом мезонов и барионов Q и другими их характеристиками:

$$Q = I_z + (B+S)/2 \quad (122)$$

(формула Гелл-Мана и Нишиджимы).

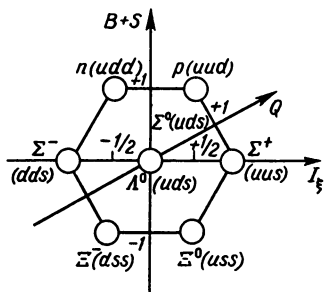


Рис. 63. Восьмерка барионов со спином $s=1/2$

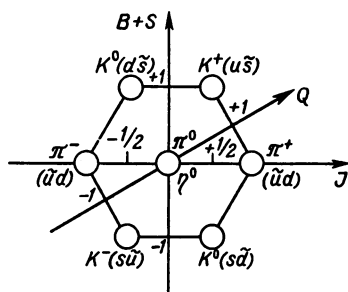


Рис. 64. Восьмерка мезонов со спином $s=0$

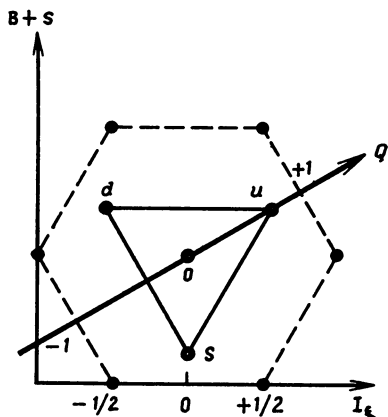
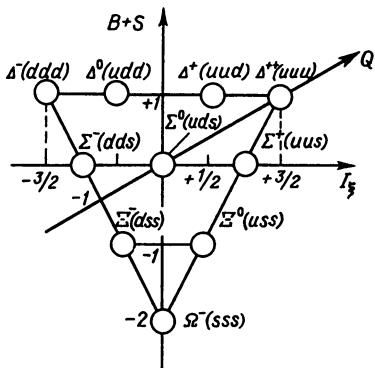


Рис. 65. Декуплет гиперонов со спином $s=3/2$

Рис. 66. Характеристики кварков

Кварки. Объединение частиц с различными странностями, входящие в различные изотопические мультиплеты (в восьмерки барионов и мезонов, десятку барионов), свидетельствует о наличии внутренней связи между ними. Это нашло отражение в выдвинутой в 1964 г. Гелл-Маном и Дж. Цвейгом гипотезе: все адроны состоят из более мелких частиц, получивших название «кварки». Исходя из соображения симметрии можно было найти характеристики кварков (рис. 66; табл. 8).

Антикварки u , d и s отличаются от кварков u , d и s изменением знака соответствующей характеристики на противоположный.

Развитие кварковой гипотезы. «Рецепт» изготовления адронов из кварков оказался удивительно прост: барионы состоят из трех кварков (антибарионы — из трех антикварков), мезоны — из кварка и антикварка. На рис. 64, 65 в скобках приведена кварковая структура частиц.

Экзотические свойства кварков и в первую очередь наличие у них дробного электрического заряда явились стимулом для

Таблица 8

Вид кварка	Электрический заряд	Барионный заряд	Проекция изоспина	Странность
u	$+2/3$	$+1/3$	$+1/2$	0
d	$-1/3$	$+1/3$	$-1/2$	0
s	$-1/3$	$+1/3$	0	-1

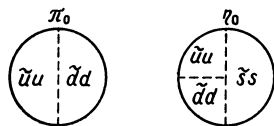


Рис. 67. Смешанная кварковая структура нейтральных мезонов

многочисленных экспериментальных попыток обнаружения кварков в свободном состоянии. Оценки показывали, что при постановке опыта в стиле Милликена наличие свободных кварков можно было бы зарегистрировать при наличии всего лишь одного кварка на 10^{21} атомов (примерно такое количество атомов содержится в капле масла диаметром 1 мм).

Хотя результаты экспериментов не дают оснований для утверждений о существовании кварков в свободном состоянии, детали опытов интересны сами по себе. Вместо капель масла в опытах группы Фербанка (США) были использованы маленькие шарики из сверхпроводника — ниобия. Так как сверхпроводники являются идеальными диамагнетиками, они способны «плавать» в вакууме на границе области, занятой магнитным полем. Если шарики наэлектризовать, то они будут совершать колебания в переменном электрическом поле, что и позволяет измерить величину находящегося на них электрического заряда.

Все новые и новые данные подтверждали справедливость кварковой гипотезы. Это измерение спина Σ -гиперона, который в соответствии с предсказаниями теории должен был быть равен $1/2$, предсказание η -мезона, предсказание существования возбужденных состояний гиперонов со спином $3/2$ и др. [92]. Все это способствовало полному признанию кварковой теории. Ее триумфом явилось открытие в 1974 г. J/Ψ -мезона, составленного из новых, так называемых «очарованных» кварков c и \bar{c} . Различные уровни системы $c\bar{c}$ (чармоний) стали рассматриваться как отдельные мезоны. Были открыты новые мезоны — D^+ (кварковая структура $c\bar{d}$), D^0 ($c\bar{u}$), F^+ ($c\bar{s}$) и др. В дальнейшем были открыты еще два кварка: b и t . Массы кварков (в единицах МэВ) приведены в [93]: $m_u \approx 5$, $m_d \approx 7$, $m_s \approx 150$, $m_c \approx 1,3 \cdot 10^3$, $m_b \approx 5 \cdot 10^3$ и $m_t \approx 4 \cdot 10^4$.

Развитие кварковой теории шло не только вширь, но и вглубь. Кварковая структура Ω^- -гиперона находится в противоречии с принципом Паули, который запрещает двум фермионам с одинаковыми квантовыми числами находиться в одном и том же состоянии*. Указанную трудность удалось обойти, предполо-

*Фермионами называются частицы, обладающие полуцелым спином (электроны, протоны и т. п.). Свое название они получили от статистики Ферми—Дирака, которая описывает свойства коллективов таких частиц. Частицы, обладающие целым спином (или спином, равным нулю), подчиняются статистике Бозе—Эйнштейна и называются бозонами. Принцип Паули запрещает находиться в одном энергетическом состоянии двум фермионам с одинаковыми квантовыми числами. Свойства бозонов таковы, что вероятность нахождения их в состоянии с данной энергией тем больше, чем больше частиц уже находится в этом состоянии.

жив, что кварки различаются по еще одному дополнительному параметру. Он был назван «цветом». К реальным цветам этот термин не имеет никакого отношения точно так же, как типы кварков (u, d, s, c, b, t) условно принято называть «ароматами». В настоящее время принимается, что каждый кварк существует в трех цветовых разновидностях: красной, желтой и синей. Поскольку в состав каждого бариона входят кварки разных цветов, они рассматриваются как бесцветные (белые) объекты. Мезоны тоже бесцветны, так как они состоят из кварка и компенсирующего его по цвету антикварка. Кварковая структура нейтральных π^0 - и η -мезонов показана на рис. 67 [65, 94].

Теория взаимодействия цветных кварков получила название квантовой хромодинамики, а наблюдаемая в мире элементарных частиц симметрия называется унитарной симметрией или сокращенно SU (от англ. special unitary group — специальная унитарная группа). Группа SU(3) представляет собой описание всех возможных комбинаций трех кварков, необходимых для построения легких адронов. Группа SU(2) образована преобразованиями, переводящими друг в друга пары состояний.

Глюоны. Хромодинамические силы. Успехи, достигнутые в систематике элементарных частиц на основе кварковой гипотезы, по-новому поставили вопрос о природе ядерных сил. Теперь необходимо было разработать механизм взаимодействия кварков внутри нуклонов, причем одной из самых существенных его особенностей должно было быть удержание кварков в пределах нуклонов, исходящее из ненаблюдаемости кварков в свободном состоянии. В научной литературе термин «удержание» заменяется словом *конфайнмент* (от англ. confinement — пленение). Переносящие взаимодействие между кварками частицы-посредники называются глюонами. Основные свойства глюонного взаимодействия можно понять, учитывая то, что нам известно к настоящему времени о кварках. Мы должны исходить из того, что между тремя кварками различных цветов возникает притяжение, причем сила притяжения действует на три разных цвета с разной интенсивностью. В противном случае мы не различали бы цветовые синглеты от состояний, не являющихся таковыми. Полученная картина представляет некий аналог квантовой электродинамики, правда, в ней частица-переносчик всего одна—фотон, а в квантовой хромодинамике необходимо ввести восемь различных глюонов. В самом деле, в случае трех цветовых разновидностей кварков имеется девять возможностей связи глюонов с кварками (красный-зеленый, красный-синий, зеленый-синий и т. п.). Суперпозиция красный-красный + синий-синий + зеленый-зеленый полностью симметрична по отношению к цветовому квантовому числу, является цветовым синглетом и поэтому должна быть исключена из рассмотрения. Оставшиеся восемь

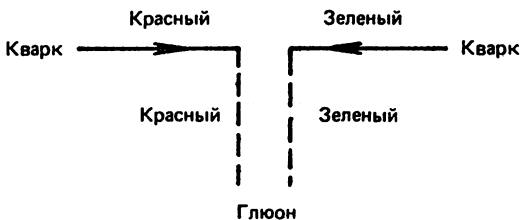


Рис. 68. Схема кварк-глюонного взаимодействия

возможностей образуют восемь «зарядов» цветовой группы $SU(2)$. Масса покоя глюонов равна нулю, спин глюонов равен 1 (в единицах \hbar).

Принципиальным отличием квантовой электродинамики от квантовой хромодинамики является то, что фотон как физический объект, ответственный за существование электрической силы между заряженными частицами, сам по себе электрически нейтрален. Глюоны же сами несут цветовой заряд, они способны менять цвет кварка. На рис. 68 приведена схема кварк-глюонного взаимодействия, глюон изображен красно-зеленой линией, в результате взаимодействия красный кварк превращается в зеленый. Глюоны являются как бы «пестрыми» объектами. По этой причине существует прямое взаимодействие не только между кварками и глюонами, но и между самими глюонами. Одним из самых поразительных следствий этого взаимодействия является то, что глюон-глюонное взаимодействие непременно объясняет конфайнмент кварков. Облако виртуальных глюонов, окружающее цветной кварк, за счет рождения новых виртуальных глюонов растет с увеличением расстояния. Это означает, что на больших расстояниях хромодинамические силы становятся настолько большими, что разлет кварков, появление их в свободном состоянии становится невозможным. И наоборот, на малых расстояниях хромодинамические силы настолько малы, что кварки можно считать свободными. Это свойство сильного взаимодействия получило название асимптотической свободы.

Теория квантово-хромодинамического взаимодействия радикально изменила сложившееся со времен Юкавы представление о механизме сильного взаимодействия. Теперь это уже не взаимодействие между нуклонами, а гораздо более фундаментальное взаимодействие между кварками внутри нуклонов. По мере сближения нуклонов кварки одного нуклона начинают чувствовать кварки другого. Притяжение нуклонов друг к другу рассматривается теперь как своеобразная «утечка» более фундаментального взаимодействия. Сильное взаимодействие между нуклонами рассматривается сейчас как аналог ван-дер-ваальсовой силы, действующей между атомами.

Константа сильного взаимодействия. Только после выяснения механизма сильного взаимодействия (многие интересные детали которого опущены за недостатком места) можно перейти к его количественному описанию. В этом нам поможет уже неоднократно проводившаяся аналогия с квантовой электродинамикой. Как известно, взаимодействие в ней определяется зарядом e . В безразмерной записи константа электромагнитного взаимодействия равна постоянной тонкой структуры $\alpha = e^2/(\hbar c) \approx 1/137$. Аналогично можно ввести представления о цветовом заряде q_s и безразмерную константу сильного взаимодействия $\alpha_s = q_s^2/(\hbar c)$. Теперь уже под зарядом понимается в гораздо более общем смысле константа, аналогичная электрическому заряду в теории электромагнитного поля. Ее принято называть константой связи, и ее значение определяет интенсивность силового поля. Известно, что $\alpha_s \gg \alpha_e$ или $q_s \gg e$. Чрезвычайно важно, что в отличие от электромагнитного взаимодействия сильный заряд q_s с уменьшением расстояния падает и соответствующая константа α_s также уменьшается. При $m \gg m_p$, где m_p — масса протона,

$$\alpha_s \sim \frac{a}{\ln(m/m_p)}, \quad (123)$$

причем $a \approx 1$. Из (123) следует, что $\alpha_s \rightarrow 0$ при $m \rightarrow \infty$, т. е. частицы становятся асимптотически свободными [32]. В противоположном случае $\alpha_s \rightarrow \infty$ при $m \approx m_p$ (конфайнмент). Для многих практических случаев константу α_s можно приближенно считать равной единице.

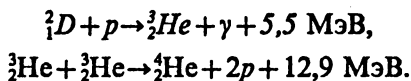
8.2. Константа слабого взаимодействия

Лептоны и слабое взаимодействие. Исследование элементарных частиц позволило обнаружить еще один вид фундаментального взаимодействия, получивший название слабого. Его интенсивность существенно меньше интенсивности сильного и электромагнитного взаимодействий. Процессы, обусловленные слабым взаимодействием, протекают также значительно медленнее. Частицы, участвующие в слабом взаимодействии, были выделены в особый класс лептонов. К ним относятся электрон e , мюон μ , τ -лептон* и три типа нейтрино — электронное ν_e , мюонное ν_μ и τ -лептонное ν_τ . Название «лептоны» происходит от греч. leptos — легкий, что сейчас имеет больше историческое, чем физическое, значение, поскольку масса недавно открытого

*Недавно появились сообщения об открытии еще одного сверхтяжелого лептона — ϵ . Его масса примерно равна десяти массам протона [75].

тяжелого τ -лептона примерно равна двум массам протона. Самый легкий из лептонов — электрон — является стабильной частицей, время жизни мюона равно $2 \cdot 10^{-6}$ с, τ -лептона — около $5 \cdot 10^{-13}$ с. Долгое время считалось, что нейтрино не имеет массы покоя, однако последние измерения и оценки позволили определить (на пределе точности) массу электронного нейтрино: $m_{\nu_e} \approx 30 \text{ эВ} \approx 5 \cdot 10^{-32}$ г. Массы мюонного и τ -лептонного нейтрино пока имеют лишь ограничения сверху: $m_{\nu_\mu} < 0,5 \text{ МэВ}$ и $m_{\nu_\tau} < 150 \text{ МэВ}$.

Слабое взаимодействие ответственно за распады частиц, и в повседневной жизни его проявления кажутся пренебрежимо малыми. Самый известный пример реакции слабого взаимодействия — распад свободного нейтрона: $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$. Время жизни свободного нейтрона примерно равно 1000 с, что позволяет считать нейтрон долгожителем в мире элементарных частиц. Однако при всей своей малости слабое взаимодействие чрезвычайно важно для существования жизни на Земле. Процесс энерговыделения на Солнце имеет в своей основе реакцию с участием нейтрино: $p + p \rightarrow {}^2_1D + \nu_e + e^+$. Энерговыделение в этом процессе очень мало, всего 0,4 МэВ, но слабость этого процесса обеспечивает ровное и устойчивое длительное горение Солнца. Основная же часть энергии Солнца выделяется в реакциях, идущих с участием сильных и электромагнитных взаимодействий:



Экспериментально установлено, что каждый из заряженных лептонов принимает участие в слабых взаимодействиях только со своим типом нейтрино, т. е. все лептоны можно разбить на пары — (e, ν_e) , (μ, ν_μ) и (τ, ν_τ) . Нейтрино — участники только слабых взаимодействий, в то время как заряженные лептоны принимают участие и в электромагнитных взаимодействиях.

Уникальные свойства слабого взаимодействия. Особенности слабого взаимодействия резко выделяют его среди других типов фундаментальных взаимодействий. В процессах, идущих с участием слабого взаимодействия, нарушаются зарядовая (C), пространственная (P) и временная (T) четности, а также законы сохранения странности и изоспина. Ввиду того что эти понятия встречаются в данном пособии впервые, остановимся на них несколько более подробно.

Зарядовая симметрия или зарядовая четность (C) означает действие одних и тех же законов как для частиц, так и для античастиц. Это правило нарушается в распадах нейтрального

К-мезона. Нейтральные К-мезоны бывают двух типов — короткоживущий K_S^0 -мезон с временем жизни примерно 10^{-10} с и долгоживущий K_L^0 -мезон с временем жизни примерно $5 \cdot 10^{-8}$ с. Экспериментально установлено, что распад K_L^0 -мезона происходит с нарушением зарядовой симметрии — отношение вероятностей реакций $K_L^0 \rightarrow e^+ + \pi^- + \nu_e$ и $K_L^0 \rightarrow e^- + \pi^+ + \bar{\nu}_e$ равно $1,0067 \pm 0,0003$ [9].

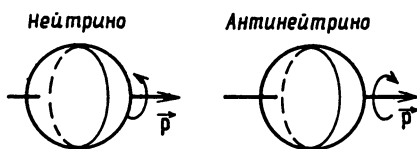


Рис. 69. Левовинтовое нейтрино и правовинтовое антинейтрино

Существование таких процессов объясняет происхождение барионной асимметрии Вселенной (см. ч. 3). Поскольку в слабых взаимодействиях e , ν_e , μ^- и ν_μ рождаются левополяризованными, а e^+ , $\bar{\nu}_e$, μ^+ и $\bar{\nu}_\mu$ — правополяризованными (рис. 69), в процессах распада K_L^0 -мезона нарушаются зеркальная симметрия (пространственная четность), а также временная (T) четность.

Нарушение закона сохранения странности в слабых взаимодействиях естественным образом объясняет довольно большие времена жизни каонов и гиперонов. Например, каон является самой легкой частицей, имеющей странность $S = +1$. Ни за счет сильных, ни за счет электромагнитных взаимодействий распад каона не может происходить, так как при этих взаимодействиях странность сохраняется. Таким образом, распад каона контролируется слабыми взаимодействиями, несмотря на отсутствие лептонов в процессах распада: $K^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ или $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$. Аналогичные соображения приводят к выводу о долгоживучести гиперонов Λ^0 , Σ^\pm , Σ^0 , Ω^- и др.

Наиболее наглядным примером нарушения закона сохранения изоспина является реакция распада свободного нейтрона: $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$. На кварковом языке β -распад нейтрона сводится к β -распаду d -кварка: $n (udd) \rightarrow p (uud) e^- \bar{\nu}_e$ или $d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$. Изоспины d - и u -кварков различны (см. табл. 8). Слабое взаимодействие оказывается способным менять ароматы кварков и лептонов.

Константа слабого взаимодействия. Безразмерная константа слабого взаимодействия определяется выражением

$$\alpha_W = \frac{g_F m^2 c}{\hbar^3}. \quad (124)$$

Она является бегущей константой, так как ее значение зависит от массы частицы. При $m = m_p$, числовое значение $\alpha_W \approx 10^{-5}$ [32].

Входящая в выражение (124) константа $g_F = 1,4 \cdot 10^{-62}$ Дж·м³ или

в несколько иной записи $g_F \approx 1,2 \cdot 10^{-5} \hbar^3 c^3 \text{ ГэВ}^{-2}$ — это константа Ферми, названная в честь выдающегося итальянского физика Э. Ферми, создавшего первую теорию β -распада.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

1. В отдельных параграфах последовательно обсуждаются история появления физических постоянных, обсуждаются методы измерения их значений. Раскрыт физический смысл фундаментальных постоянных.

2. Показана принципиальная роль фундаментальных констант в развитии физики в целом и ее важнейших теорий — гравитации, атомно-молекулярной теории, электромагнетизма, специальной и общей теорий относительности, квантовой механики, физики элементарных частиц, космологии.

3. Анализируется семейство входящих в таблицы физических постоянных многочисленных констант — характеристик микрочастиц. Для понимания проблемы постоянных в целом принципиально важным является то, что они раскрывают существование в природе двух фундаментальных взаимодействий — сильного и слабого. Введены безразмерные характеристики этих взаимодействий.



МИРОВЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Как прекрасно почувствовать единство целого комплекса явлений, которые при непосредственном восприятии казались разрозненными

А. Эйнштейн

1. ГЛОБАЛЬНАЯ ПРОБЛЕМА СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

Вторая часть книги была посвящена раскрытию физической сущности отдельных фундаментальных физических постоянных. Со всей определенностью было показано, что появление той или иной константы и осознание ее значения в физике неразрывно связано с развитием определенных областей физической науки. Роль постоянных нельзя преуменьшить, они являются для ученых как бы своеобразными ориентирами в труднейшей задаче исследования природы. Но тем не менее, оглядываясь назад, можно почувствовать какое-то ощущение неудовлетворенности — уж очень, на

первый взгляд произвольно расставлены эти ориентиры. Физика может показаться некоторым читателям всего лишь неупорядоченным «набором» физических явлений и законов, дающих им более или менее удовлетворительное описание. Между отдельными чертами этого набора видны кое-какие связи, но многое еще разрозненно.

Небольшие шаги к достижению конечной цели — построению единой научной картины мира, этой сверхзадачи физики,— уже сделаны. Выявлена фундаментальная роль отдельных констант, уточнено значение других. Начавшееся с обсуждения древней, как мир, проблемы тяготения изложение проблемы констант привело нас к захватывающим воображение космогоническим вопросам. Физика как наука стала несравненно более сложной, ее развитие обязательно сопровождается выработкой все более и более абстрактных, в начале непривычных и поэтому трудно воспринимаемых с точки зрения нашего повседневного опыта понятий, которые в то же время все более точно описывают новые физические явления. С высоты приобретенных нами научных знаний посмотрим на проблему фундаментальных постоянных в целом. Так, альпинисту, стоящему на покоренной вершине, яснее видны новые манящие дали и новые трудные вершины, которые еще надо покорять.

Первостепенной задачей теории является нахождение единой причины существующих частных явлений или законов и уменьшение числа независимых исходных положений. Этот процесс давно уже идет в физике. Достаточно вспомнить объединение земного и космического тяготений в законе всемирного тяготения Ньютона, объединение электричества и магнетизма в электродинамике Максвелла, установление связи между микро- и макропараметрами систем Больцманом, связь геометрии физического пространства с теорией гравитации в общей теории относительности Эйнштейна и т. п. Удивительнейший пример единства природы открывает связь явлений, происходящих в микромире и Вселенной, о чем идет речь в этой части книги. Многие свойства Вселенной определяются характеристиками фундаментальных взаимодействий, происходящих в микромире. И, напротив, происходящие во Вселенной процессы дают много для понимания свойств элементарных частиц и необходимы для построения правильной теории. Но все же впереди очень и очень много работы.

В процессе развития физики несколько раз менялись, уточнялись, приобретали новый смысл некоторые принципиальные понятия науки. Существующие раздельно друг от друга абсолютные пространство и время Ньютона оказались связанными в специальной теории относительности Эйнштейна в новую физическую сущность — единое пространство-время. В теории тяготения было установлено, что его свойства (геометрия пространст-

ва-времени) зависят от распределения масс входящих в него объектов. «Пустое» пространство то наполнялось эфирами, то освобождалось от них, пока не сменилось принципиально новой концепцией физического вакуума как полного жизни физического объекта, в котором непрерывно рождаются и уничтожаются виртуальные объекты.

И, наконец, предмет нашего особого внимания — фундаментальные физические постоянные. Изучение отдельных констант (см. ч. 2), конечно, необходимо, но это только первый, начальный этап исследования проблемы физических постоянных в целом. Некоторые характерные особенности проблемы все же удалось выявить. Так, числовые значения фундаментальных постоянных пока не находят себе объяснения ни в одной из физических теорий. Они определяются только из опыта и поэтому кажутся совершенно произвольными, случайными. Парадоксально, что именно эти «случайные» величины играют определяющую роль в структуре соответствующих физических теорий, отражают наличие связи между различными физическими явлениями и теориями, связи между процессами, происходящими в микро-, макро- и Мегамире. Стоит осознать это, и проблема фундаментальных физических постоянных в целом становится в ряд глобальных проблем современной физики. Без решения этой проблемы построение единого физического здания не может считаться законченным. «Я глубоко убежден, что в будущем теория позволит рассчитать все константы физики так, как геометрия позволяет найти отношение длины окружности к ее диаметру, т. е. число π », — справедливо пипет об этой сверхзадаче физики выдающийся советский ученый академик Я. Б. Зельдович [96].

Для решения этой проблемы необходимо выяснить множество принципиальных вопросов. Постоянны ли постоянные и сколько их? Как числовые значения констант сказываются на устройстве Вселенной и возможности существования разума? Единство природы требует, чтобы физическая проблема была связана с вопросами происхождения жизни, что поднимает ее до уровня общечеловеческой проблемы. Вопросы будущего Вселенной не есть одна из частных задач физики, ее решение волнует все человечество. Проблема фундаментальных физических постоянных еще ждет решения. Трудности неимоверно велики: «В великих тайнах Биг Бэнга (*Большого Взрыва* — с англ.) и дальнейшей судьбы Вселенной, наверное, многое прояснится после того, как будет создана теория, объясняющая значения мировых постоянных — скорости света, заряда электрона и др. Сегодня все они берутся из опыта, и мы не знаем, почему они таковы. Науку не удовлетворяет такое положение вещей. Она должна перейти на следующий, более глубокий уровень. Хотя, честно говоря, пока у нее нет никаких идей, как совершить этот переход» [75].

Однако ясная постановка проблемы — уже шаг к ее решению, так что можно считать, что физики уже начали этот нелегкий

путь. По-разному, с различных позиций ищут они подходы к ее решению, и хотя этот процесс еще бесконечно далек от завершения, некоторые вопросы сняты, в понимании проблемы вскрыты новые горизонты. В этой части мы расскажем об этих исследованиях. Нет ничего более увлекательного, чем этот бесконечный штурм Человеком великих тайн Природы.

2. НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

2.1. Проблема и анализ

Обсуждение проблемы фундаментальных физических постоянных в целом требует резкого изменения характера исследования. Отдельные классические размерные константы — G, N_A, e, c, h и др., анализом которых мы занимались в ч. 2, являются неотъемлемыми характеристическими элементами соответствующих физических теорий, но... их числовые значения не выводятся из них. Парадоксальность ситуации требует разработки принципиально новых путей решения проблемы. Один из них был намечен в § 4 ч. 1. Это переход к безразмерным фундаментальным постоянным. К их числу были отнесены константы сильного α_s , электромагнитного α_e , слабого α_W и гравитационного α_g взаимодействий. Они получены из обычных размерных констант, сводные данные о них приведены в табл. 9.

Таблица 9

<i>Взаимодействие</i>	<i>Константа</i>	<i>Числовое значение</i>
Сильное	α_s	~ 1
Электромагнитное	$\alpha_e = e^2/(\hbar c)$	$\approx 1/137$
Слабое	$\alpha_W = g_F^2 m^2 c/(\hbar^3)$	$\approx 10^{-5}$
Гравитационное	$\alpha_g = Gm^2/(\hbar c)$	$\approx 10^{-39}$

Числовые значения констант α_W и α_g даны для значений $m = m_p$ по причинам, которые будут указаны ниже.

Выполненный во второй части книги анализ позволяет по-новому подойти к оценке значения этих фундаментальных взаимодействий. Они принципиально необходимы для существования жизни на Земле. Так, гравитационное притяжение удерживает планеты на их орбитах и нас самих на поверхности Земли. Электрические силы удерживают электроны в атомах и соединяют атомы в молекулы, из которых состоим и мы. Сильное

взаимодействие ответственно за существование ядер. Слабое взаимодействие обеспечивает длительное и ровное горение Солнца, дающего энергию для протекания всех биологических процессов на Земле. Числовые значения констант этих взаимодействий, как показано ниже, нельзя менять, не разрушая устойчивости одного или нескольких основных структурных элементов Вселенной.

Вещество Вселенной состоит из молекул и атомов, которые, в свою очередь, образованы из протонов, нейтронов и электронов. Массы этих частиц m_p , m_n и m_e имеют фундаментальное значение для науки. Из них образуются две фундаментальные безразмерные постоянные m_e/m_p и $m_n - m_p/m_N$ (m_N — усредненная масса нуклона), числовые значения которых имеют важное значение с точки зрения формирования основных свойств вещества Вселенной. Еще одним необходимым элементом набора фундаментальных постоянных является размерность N пространства (см. ч. 3, § 3).

Таким образом, анализ проблемы фундаментальных постоянных в целом проводится для следующего набора безразмерных констант: α_s , α_e , α_W , α_g , m_e/m_p , $m_n - m_p/m_N$, N , как постоянных, определяющих свойства Вселенной.

2.2. Постоянны ли постоянные?

Вопрос, вынесенный в подзаголовок, чрезвычайно важен для понимания проблемы фундаментальных постоянных. В приложении к отдельным константам он уже частично обсуждался в ч. 2. Очевидно, что в зависимости от его решения дальнейшее исследование проблемы может пойти в кардинально различных направлениях.

Имеется громадное число экспериментальных фактов, свидетельствующих о неизменности физических постоянных во времени. И все же вопрос настолько важен, что его нельзя обойти молчанием. Его возникновение можно отнести к 1937 г., когда П. Дирак высказал очень интересную гипотезу о том, что развитие Вселенной сопровождается уменьшением гравитационной постоянной во времени. Интересна логика его рассуждений. Он заметил, что отношение безразмерной константы электромагнитного взаимодействия α_e к безразмерной константе гравитационного взаимодействия α_g примерно равно 10^{40} . Это же число он получил и для безразмерного возраста нашей Вселенной, который определялся следующим образом. Возраст нашей Вселенной порядка 10 — 20 млрд. лет, или примерно 10^{17} с. Поскольку ни год, ни секунда не являются для Вселенной в целом фундаментальными величинами, можно выразить ее возраст в безразмерных единицах времени. В качестве последней возьмем единицу,

полученную от деления размеров нуклона $\approx 10^{-12}$ см на скорость света $3 \cdot 10^{10}$ см/с, т. е. примерно 10^{-23} с. В этих единицах времени безразмерный возраст Вселенной равен 10^{40} . Дирак считал, что совпадение фундаментального для физики отношения констант взаимодействий α_e/α_g и безразмерного возраста Вселенной не может быть случайным. Вывод, который он сделал из этого, заключается в следующем: поскольку возраст Вселенной увеличивается, то гравитационное взаимодействие со временем уменьшается. Расчеты показывают, что это уменьшение составляет около одной десятиллиардной доли константы G за год, и поэтому, к сожалению, гипотезу Дирака невозможно проверить прямыми измерениями, точность которых пока существенно ниже.

Безразмерное число 10^{40} до сих пор занимает воображение ученых. Было замечено, что отношение размеров Метагалактики ($\approx 10^{28}$ см) к размерам нуклона тоже приблизительно равно 10^{40} . Число тяжелых частиц во Вселенной равно квадрату этой величины:

$$N = \left(\frac{\hbar c}{G m^2 p} \right) \approx 10^{80}.$$

Встречающееся вновь и вновь «магическое» число 10^{40} , авторитет имени и оригинальность идеи Дирака обеспечили ей довольно-таки долгую жизнь в науке. Это же вызвало многочисленные и тщательные попытки поиска следов непостоянства констант.

Интересные возможности исследования стабильности фундаментальных постоянных во времени дает работа естественного уранового реактора в Окло (Африка) [97]. По геологическим данным, его возраст около 10^9 млрд. лет. Из стабильности работы реактора вытекает возможность получения следующих ограничений на вариации следующих констант:

$$\left| \frac{1}{\alpha_e} \frac{d\alpha_e}{dt} \right| \leq 10^{-17} \frac{1}{\text{год}}; \quad \left| \frac{1}{\alpha_g} \frac{d\alpha_g}{dt} \right| \leq 5 \cdot 10^{-19} \frac{1}{\text{год}}; \quad \left| \frac{1}{\alpha_W} \frac{d\alpha_W}{dt} \right| \leq 10^{-13} \frac{1}{\text{год}};$$

$$\left| \frac{1}{\alpha_g} \frac{d\alpha_g}{dt} \right| \leq 10^{-10} \frac{1}{\text{год}}; \quad \left| \frac{1}{\hbar c} \frac{d(\hbar c)}{dt} \right| \leq 10^{-12} \frac{1}{\text{год}}.$$

Из этих соотношений вытекает, что за время работы реактора величина α_e , например, изменилась бы не более чем на 10^{-8} , константа α_g — не более чем на 10^{-9} , что означает практическую стабильность этих постоянных в течение миллиардов лет.

Экстраполировать неизменность констант на еще большие промежутки времени можно лишь на основании косвенных дан-

ных. Расчеты космологического содержания гелия на основе стандартной модели Вселенной [78] и хорошее совпадение результатов расчетов и экспериментальных данных свидетельствует в пользу стабильности постоянных вплоть до времен порядка $0,1$ с с момента ее «рождения». Объединение различных взаимодействий (см. ч. 3, § 3) поднимает этот предел до значений 10^{-35} с. Это позволяет сделать окончательный вывод о стабильности фундаментальных физических постоянных. Особо следует оговориться, что при временах 10^{-43} с, когда свойства Вселенной определяла квантовая гравитация, о стабильности констант нельзя делать определенных выводов.

2.3. Числовые значения фундаментальных постоянных и устойчивость основных структурных элементов Вселенной

В последние годы внимание ученых всего мира приковано к еще одной интереснейшей грани проблемы физических констант. Свойства Вселенной, в том числе устойчивость ее основных структурных образований — ядер, атомов, звезд и галактик, — оказались тесно связанными с числовыми значениями постоянных и формой физических законов. Эти два факта обеспечили в процессе эволюции Вселенной возникновение таких условий, при которых становится возможным формирование сложных систем и в конечном счете возникновение жизни. Анализ показывает, что все структурные образования Вселенной чрезвычайно чувствительны к изменениям — конечно, воображаемым, гипотетическим — числовых значений констант. В этом смысле реализуемый в нашей Вселенной набор фундаментальных констант следует считать уникальным.

Небольшие изменения одной или нескольких постоянных кардинально изменили бы ее свойства. Эти выводы сделаны на основе многочисленных исследований свойств атомов и атомных ядер, астрофизических исследований, изучения активности Солнца и т. д. Полная информация по этим вопросам содержится в работах профессора И. Л. Розенталя [32, 34, 98]. Приводимые ниже для иллюстрации вышесказанного примеры взяты из указанных работ.

Возможность изменения массы электрона. Атом водорода обязан своей стабильностью закону сохранения энергии в реакции

$$p + e \rightarrow n + \bar{\nu}_e \quad (125)$$

В самом деле, масса электрона $m_e \approx 0,5$ МэВ меньше разности масс нейтрона m_n и протона m_p , равной $\Delta m_N \approx m_n - m_p \approx 1,3$ МэВ. Увеличение массы электрона втрое привело бы к коллапсу атома водорода, исчезновению водородсодержащих молекул. Водород — основа сложных органических соединений. Без существова-

ния молекул воды трудно представить возникновение жизни. При осуществлении реакции (125) Галактики и звезды целиком состояли бы из нейтронов, сложные формы вещества в них отсутствовали бы.

Анализируя энергетический баланс образования дейтрона в солнечном цикле



можно получить еще более сильные ограничения на возможные изменения массы электрона. Для протекания реакции (126) необходимо, чтобы

$$2m_p > m_p + m_n - \varepsilon_d + m_e$$

или

$$m_e < \varepsilon_d - \Delta m_N.$$

Энергия связи протона и нейтрона в дейтроне ε_d мала: $\varepsilon_d \approx 2,2$ МэВ, следовательно, масса электрона не может быть больше 0,9 МэВ. Выше (см. ч. 2, § 8) говорилось, что реакция (126) обеспечивает ровное горение Солнца, дающего энергию для протекания всех биологических процессов на Земле.

Возможность изменения α_e . Если бы константа сильного взаимодействия α_e была всего на 40% меньше, то такая слабосвязанная система, как дейтрон, не смогла бы быть стабильной со всеми вытекающими отсюда последствиями. Однако и увеличить α_e также нельзя, так как при этом стало бы возможным образование такой экзотической стабильной системы, как бипротон: $p + p \rightarrow {}^2\text{He} + \gamma$. Эта реакция обусловлена сильным взаимодействием, скорость ее велика. Ее осуществление привело бы к тому, что водород выгорел бы на ранних стадиях эволюции Вселенной и ее основным элементом стал бы инертный гелий.

Возможность изменения α_e . Электростатическое отталкивание протонов в ядрах должно быть, очевидно, меньше энергии связи нуклонов в ядре, которая равна в среднем примерно 8 МэВ на нуклон. Энергия электростатического взаимодействия

$$\varepsilon_e \sim \frac{e^2}{r_N} \sim \alpha_e m_\pi c^2,$$

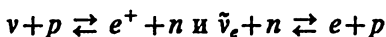
следовательно,

$$\alpha_e < \frac{8}{m_\pi c^2} \sim \frac{1}{20}.$$

Теория объединения взаимодействий накладывает еще большие ограничения на возможные изменения константы электромагнитного взаимодействия:

$$\frac{1}{170} < \alpha_e < \frac{1}{80}.$$

Возможность изменения α_W . Изменение константы слабого взаимодействия α_W также привело бы к катастрофическим последствиям для Вселенной. При увеличении α_W в 10 раз во столько же раз уменьшится время жизни свободного нейтрона. При этом в ранней Вселенной не образовывался бы гелий, отсутствовала бы реакция тройного слияния α -частиц, ведущая к синтезу углерода $3\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$. Вселенная в этом случае была бы чисто водородной. Если бы α_W уменьшилась в 10 раз, равновесие в реакциях



нарушилось бы в сторону образования нейтронов и в конечном счете все протоны оказались бы связанными в α -частицах.

Возможность изменения α_g . Анализ предсказываемой теорией Великого объединения нестабильности протона приводит к соотношению $\ln \alpha_g \geq -(\alpha_e)^{-1}$, которое в нашей Вселенной выполняется на пределе. Анализ модели закрытой Вселенной ограничивает возможные изменения α_g :

$$\alpha_g^{1/4} < \alpha_e^2 \frac{m_e}{m_p}.$$

Резюмируя, можно сказать, что в нашей Вселенной осуществляется довольно-таки точная «подгонка» числовых значений фундаментальных констант, необходимая для существования ее основных структурных элементов — ядер, атомов, звезд и галактик. Их устойчивость создает в конечном счете условия для формирования более сложных неорганических и органических структур, а в конечном счете и жизни. При этом возникает довольно интересный и сложный со всех точек зрения вопрос о причинах существования такой «подгонки».

Чрезвычайно интересный анализ, являющийся развитием вышеприведенных идей, выполнен в работе советских ученых И. Д. Новикова, А. Г. Полнарера и И. Л. Розенталя [99]. Исследование неустойчивости структурных свойств Вселенной к изменению одной из констант оставляло открытым вопрос о возможном изменении всего набора фундаментальных постоянных. Естественным ограничением для изменений набора констант

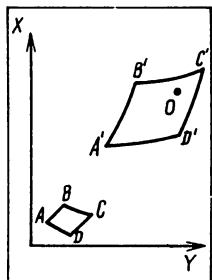


Рис. 70. «Острова устойчивости» по

[99]

O — наша Вселенная

$$\alpha_g \geq \alpha_e^{20}; \quad \alpha_g < \alpha_e^{16}; \quad \alpha_g < e^{-\alpha_e^2}; \quad \alpha_g > \alpha_e^{2-\alpha_e^2}.$$

Разрешенные области параметров $x = \log \alpha_e^{-1}$ и $y = \log \alpha_e^{-1/4}$ образуют два «острова устойчивости структур» (рис. 70). Точка O соответствует нашей Вселенной. Расчеты показывают, что в области ABCD образование сложных структур и жизни невозможно, так как минимальная масса объекта в этой области порядка 10^{-3} г (масса пылинки). Вселенные же, в которых значения фундаментальных постоянных несколько отличаются от таковых в нашей Вселенной, но в которых также возможно существование жизни, могут существовать (область A'B'C'D'). В ней выполняются необходимые для образования сложных структур условия, область же необходимых и достаточных условий может быть существенно меньшей.

2.4. Константы как флуктуации

К интересным результатам приводит анализ распределения элементарных частиц по их массам [32, 34] (рис. 71). Видно, что пределы изменений значений m_e , при которых осуществлялась бы «нормальная Вселенная», весьма малы. Ниже горизонтальной линии происходил бы коллапс атома водорода. Заметим, что отношение m_μ/m_e является необычно большим по сравнению с другими аналогичными отношениями. Несколько иной подход к анализу распределения масс приводит к рис. 72. И. Л. Розенталь, аппроксимируя это экспериментальное распределение простейшими степенными функциями, оценивает вероятность появления частицы с массой, примерно равной массе электрона. Эта вероятность оказывается очень малой — менее 10^{-5} . Малая величина энергии связи нуклонов в дейтроне (~ 1 МэВ) также оказывается флуктуацией в ряду подобных величин. На основа-

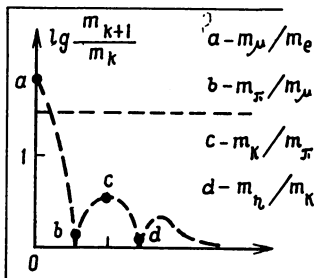


Рис. 71. Распределение элементарных частиц по массам

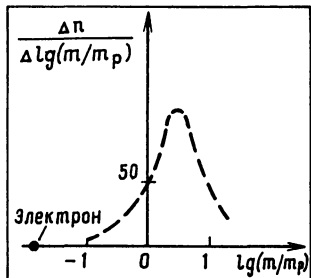


Рис. 72. Распределение масс элементарных частиц

нии этого автор пишет: «...можно сказать, что Метагалактика — флуктуация в ряду себе подобных» [34].

Отметим, что хотя этот вывод был сделан на основе анализа распределения элементарных частиц по массам, гипотеза флуктуационного происхождения всех фундаментальных физических постоянных давно известна и широко обсуждается в научной литературе. Об этом говорил еще Л. Больцман (см. ч. 2, § 3). Симптоматично название одной из книг, посвященных вопросу о роли фундаментальных постоянных в наблюдаемой структуре Вселенной, — «Случайная Вселенная» [24]. Флуктуационная гипотеза происхождения констант признана как советскими [100, 101], так и зарубежными [102] авторами. Существует и другая точка зрения. В предисловии к [24] отмечается, что «оценки типа рассматриваемых в книге характеризуют лишь вероятность случайного совместного выпадания нескольких событий. Эти оценки не применимы к причинно-связанным событиям, а как показывают приведенные примеры, рано или поздно причинная связь обнаруживается, и вероятностные соображения теряют всякий смысл».

Так или иначе оценки вероятности появления того или иного числового значения фундаментальной постоянной заставляют взглянуть на проблему констант под несколько иным углом зрения. Физические теории дают более или менее удовлетворительное описание физических явлений исходя из определенных начальных условий и значений фундаментальных констант. Вопрос о том, почему данная константа имеет именно такое значение, в этих теориях вообще не ставится. Однако в науке о происхождении и развитии Вселенной — космологии — фундаментальные постоянные, как мы видели, определяют структуру Вселенной и ее важнейшие свойства. Значения этих констант, возможно, были обусловлены состоянием той сверхплотной и горячей плазмы, в результате расширения которой и сформировалась

наша Вселенная. Рассмотрение вопросов «рождения» Вселенной может дать ответ на эти волнующие вопросы.

3. сколько должно быть постоянных?

От единой теории поля к единой теории взаимодействий

Введение. Проведенный в предыдущем параграфе анализ показывает, что весь набор физических постоянных в целом и совокупность физических законов имеют фундаментальное значение для формирования свойств Вселенной и ее структуры. Принципиальное значение имеет переход от анализа роли отдельных постоянных в соответствующих физических теориях к «вселенскому» аспекту всей проблемы констант, что требует радикального изменения характера ее исследования в дальнейшем. Теперь уже решение проблемы постоянных неотделимо от исследования вопросов происхождения и эволюции Вселенной. Напомним, что остались невыясненными относящиеся к этой проблеме вопросы — барионная асимметрия Вселенной, изотропность реликтового излучения. Они относятся к интерпретации фундаментальных свойств материи и поэтому вряд ли могут решаться изолированно от проблемы постоянных. Общее решение скорее всего может быть найдено в рамках генеральной задачи науки — построения единой физической картины мира. В этом направлении учеными всего мира уже было предпринято немало усилий.

Попытки создания единой теории поля. Еще в 1899 г. М. Планк обращает внимание на следующее важное свойство фундаментальных констант. Он заметил, что, вообще говоря, требуется три алгебраически независимых размерных величины, чтобы образовать основные единицы измерений для пространства и времени и физических взаимодействий. В качестве таковых он предложил скорость света c , квант действия h и гравитационную постоянную G . Основные единицы длины, времени, массы образуются из них следующим образом:

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 10^{-33} \text{ см}; \quad t_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 10^{-44} \text{ с}; \quad m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ г}. \quad (127)$$

Большие надежды на создание единой теории поля породил успех общей теории относительности Эйнштейна. Введение четвертого измерения позволило единообразно описать механические и электромагнитные явления, а с помощью геометрических свойств четырехмерного пространства (его кривизны) — тяготение. Громадные усилия были затрачены А. Эйнштейном на попытки создания единой геометрической теории поля. Исходным пунктом его поисков было то, что подлинно физическое значение имеют только два макроскопических поля — гравита-

сионное и электромагнитное. Синтез эйнштейновской и максвелловской теорий на базе геометризации теперь уже максвелловского поля требует введения нелинейных поправок к электродинамике в областях сильных напряженностей поля. Эти поправки Эйнштейн хотел получить из микроскопических квантовых эффектов. При таком подходе основными фундаментальными постоянными становятся, по Эйнштейну, c , G и элементарный заряд e . Неудача программы Эйнштейна обусловлена тем, что в то время еще не были достаточно полно исследованы свойства двух других типов фундаментальных взаимодействий — сильного и слабого.

Расширение эйнштейновского пространства-времени, с тем чтобы в нем появились новые степени свободы, которые можно было бы сопоставить электромагнитному полю, является вопросом глубокой теории. Дело в том, что все степени свободы эйнштейновского пространства без остатка тратятся на описание гравитационного поля. Дополнительные степени свободы появляются в нем при использовании выдвинутого в 1918 г. немецким математиком Г. Вейлем принципа: на характере физических законов не сказывается изменение в каждой точке пространства длины. При этом допустимы неоднородные замены с меняющимся от точки к точке отношением масштабов. Такую замену масштабов называют *калибровочным преобразованием*, а построенное таким путем пространство — *пространством Вейля*. Однако эта интересная теория не нашла приложения [103].

В 1921 г. Т. Калуца, а затем О. Клейн развили теорию, согласно которой электромагнитное поле, аналогично гравитационному, можно рассматривать как геометрическое свойство пятимерного пространства-времени. Однако у введенного таким образом пятимерного пространства осталось недоиспользованным еще одно свойство и было не ясно, какую характеристику реального мира оно отражает. Теория Калуцы — Клейна явилась формальным расширением идей Эйнштейна, и ее неудачи связаны с тем, что она, как и общая теория относительности, опиралась на фундаментальный физический принцип — принцип эквивалентности. Теория Калуцы — Клейна, хотя и объединила гравитацию и электромагнетизм, но не могла быть проверена и не предсказывала ничего нового. Поэтому-то и она также была оставлена. Интерес к ней возродился недавно в связи с успехами теории объединения взаимодействий. Возможно, пятое измерение действительно существует, но мы не замечаем его потому, что оно компактифицировалось («свернулось в кольцо») очень малого радиуса — менее 10^{-33} см. Напомним, что 10^{-33} см — это планковская длина l_p . Это скрытое от нас измерение косвенным образом проявляется в заряде.

Другая идея принадлежит Уилеру и Шембергу, которые предположили, что при переходе к масштабам 10^{-33} см пространст-

во-время перестает быть непрерывным, возможно и изменение его топологии [9].

Обе эти идеи нуждаются в проверке, но пока не ясно, как это можно сделать.

Малозамеченными остаются работы советского ученого Р. Л. Бартини [104, 105], в которых он, полагая мир шестимерным, вывел соотношения для получения числовых значений фундаментальных констант.

В противоположность этим теориям, в основе которых лежат свойства макроскопических полей, единые квантовые теории поля (например, нелинейная теория поля Гейзенберга) исключают из исходных принципов макроскопические явления. Новой фундаментальной константой в теории Гейзенберга является комптоновская длина волны протона $\lambda_{p,c} = h/(m_p c) \approx 10^{20} l_p$. При этом поле сильного взаимодействия взято фундаментальным, а его свойства симметрии экстраполированы и обобщены.

Трудности в создании единых теорий поля, как теперь стало ясно, связаны с тем, что имеется несколько типов фундаментальных взаимодействий, различающихся как константами взаимодействий, так и типами симметрий. Успеха можно было добиться на пути объединения различных взаимодействий.

Не слишком ли расточительна природа? Мы знаем, что существует четыре вида взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое. Они существенно различаются (табл. 9). Это различие является колоссальным препятствием при поиске единой причины всех физических явлений, и homo sapiens (существо разумное — лат.) вправе задавать, на первый взгляд, «безумные» экстравагантные вопросы типа: не слишком ли расточительна природа, зачем ей целых четыре взаимодействия? Неужели только для того, чтобы на Земле существовала жизнь, люди? (С позиций антропоцентризма «оправдание» наличия четырех фундаментальных взаимодействий уже обсуждалось в начале этой части книги.) Не есть ли они различные проявления единого, но глубоко спрятанного природой механизма?

Природе можно задавать любые вопросы, не опасаясь изменения ее свойств от того, правильны эти вопросы или нет. На страницах данной книги описывалось множество гипотез, которые на поверку оказывались не соответствующими действительности. Чем сложнее вопросы, тем труднее найти на них правильные ответы, поэтому для того, чтобы ответить на сформулированные в предыдущем абзаце вопросы, следует еще раз и в более общем виде проанализировать то, что известно к настоящему времени о фундаментальных взаимодействиях. Эти данные сведены в табл. 10.

При самом беглом взгляде на табл. 10 можно отметить громадные различия в свойствах фундаментальных взаимодействий

и обилие содержащихся в ней вопросов. В этих условиях поиск единой причины всех взаимодействий является неизмеримо трудной проблемой.

Таблица 10

Взаимодействие	Частицы, участвующие в нем	Свойства	Радиус действия, см	Значение константы взаимодействия	Частица-переносчик	Масса покая частицы-переносчика	Спид частицы-переносчика
Гравитационное	Все частицы	Притяжение	∞	10^{-39}	?	?	?
Электромагнитное	Электрически заряженные	Притяжение и отталкивание	∞	1/137	Фотон	0	1
Сильное	Адроны	Не зависит от электрического заряда	10^{-13}	~ 1	Глюоны	0	1
Слабое	Лептоны, лептоны+адроны, адроны	То же	10^{-16}	10^{-5}	?	?	?

Объединение взаимодействий. Диалектичность процесса познания еще раз в полной мере проявилась в том, что идеи объединения взаимодействий возникли при анализе... различий их свойств. Эти идеи не лежат на поверхности, и тем не менее о них в неявном виде уже говорилось на страницах книги. Поясним это. Константы различных взаимодействий отличаются друг от друга весьма значительно — на 40 порядков! Но, и это самое главное, их значения зависят от энергии взаимодействия («бегущие константы»), и зависят по-разному. На малых расстояниях сильносвязанные в нуклонах кварки ведут себя как почти свободные (асимптотическая свобода), следовательно, константа сильного взаимодействия α_s уменьшается с ростом энергии взаимодействия. С ростом энергии зондирующих электронов возрастает заряд электрона (см. рис. 18). Следовательно, константа электромагнитного взаимодействия α_e должна возрастать. С ростом энергии взаимодействия или, что то же самое, с ростом массы взаимодействующих частиц резко возрастает гравитационное взаимодействие, следовательно, возрастает и константа взаимодействия α_g . Ниже будет показано, что и слабое взаимодействие α_w также возрастает с ростом E .

Легко видеть, что тенденции изменений всех констант (табл. 11) с ростом энергии взаимодействия таковы, что при некоторых значениях E константы двух, трех и даже четырех

взаимодействий могут оказаться равными друг другу. Заметим, что возможность существования единой константы взаимодействий предполагает их единое описание.

Таблица 11

Константа	α_s	α_e	α_W	α_g
Значение константы	~ 1	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-39}$
Тенденция изменения с ростом энергии взаимодействия	Уменьшается	Растет	Растет	Растет

Электрослабое взаимодействие. Исторически первым (впрочем, вряд ли тут уместно говорить об истории, поскольку описываемые события относятся к 60-м годам нашего столетия) было объединение электромагнитного и слабого взаимодействий, теория которого была разработана американскими физиками С. Вайнбергом и Ш. Глэшоу и пакистанским ученым А. Саламом. Это объединенное взаимодействие в дальнейшем получило название *электрослабого*. Идеи, высказанные при разработке теории, очень интересны.

Типичным примером процесса, идущего с участием слабого взаимодействия, является β -распад нейтрона: $n \rightarrow p e \bar{\nu}_e$. Описание этого процесса в духе диаграмм Фейнмана выявляет его характерную особенность — это четырехвершинное взаимодействие (рис. 73, а). Этот же процесс можно представить происходящим следующим образом (рис. 73, б): нейтрон сначала переходит в протон, при этом испускается виртуальная частица, называемая W^- . W^- -частица обладает следующими свойствами: в отличие от фотона в квантовой электродинамике она заряжена отрицательно, ее спин как частицы-переносчика взаимодействия равен единице. Слабая интенсивность процесса распада нейтрона обуславливает малую вероятность появления этой виртуальной частицы; поэтому из соотношения неопределенностей следует, что масса этой промежуточной частицы должна быть значительной. В дальнейшем промежуточный W^- -бозон порождает электрон и антинейтрино (рис. 73, б).

Мы не можем останавливаться здесь на деталях этой теории, отметим лишь, что в ее основу положен калибровочный принцип, т. е. инвариантность физически измеряемых величин относительно преобразований других, не измеряемых на опыте (например, потенциалов).

Идеи Г. Вейля о калибровочной инвариантности являются одной из основ объединения взаимодействий. В результате разработки теории электрослабого взаимодействия выяснилось, что объединение взаимодействий происходит при энергиях $E \approx 100$ ГэВ, что соответствует температуре $\sim 10^{15}$ К. Теория предсказала существование трех промежуточных бозонов — двух

заряженных W^\pm и нейтрального Z^0 . По известному радиусу действия при слабом взаимодействии $r_{\text{сл}} \sim 10^{-17}$ см и соотношению неопределенностей можно произвести оценку массы частиц-переносчиков, $m_W \sim \hbar/(r_{\text{сл}}c) = 80$ ГэВ. Точнее, $M_{W^\pm} = 80$ ГэВ, $M_{Z^0} = 90$ ГэВ. Время жизни промежуточных бозонов порядка 10^{-25} с.

Несмотря на то что свойства W^\pm - и Z^0 -бозонов были предсказаны раньше, их экспериментальное открытие состоялось только в 1983 г., когда в Европейском центре ядерных исследований (Швейцария) был запущен протонный ускоритель на 500 МэВ. (Вспомним, что мюон был обнаружен в экспериментах с космическими лучами, энергия которых превышала порог процесса.)

Экспериментальное подтверждение теории электрослабого взаимодействия позволило дать новую трактовку слабым процессам. По аналогии с электродинамикой можно формально ввести «слабый» заряд g_W : $\alpha_W = g_W^2 / (\hbar c)$. Тогда оказывается, что g_W больше элементарного электрического заряда e , так что слабость слабого взаимодействия связывается не с малостью g_W , а с малой вероятностью появления тяжелых промежуточных бозонов при обычных энергиях. Наконец, отметим, что обнаружение W^\pm - и Z^0 -бозонов расширило спектр наблюдаемых элементарных частиц и дало прямые указания на то, что при высоких температурах состав вещества Вселенной может претерпевать значительные изменения.

Теория Великого объединения. Такое название получила теория, объединяющая сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия, и для ее разработки «потребовались не сумасшедшие идеи, как ожидали классики, а всего лишь ремесленная разработка деталей калибровочных теорий» [106]. Некоторые выводы теории Великого объединения (ТВО) имеют для будущего Вселенной глобальное значение.

Согласно ТВО, объединение сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий наступает при энергиях взаимодействия порядка 10^{15} ГэВ. Константа объединенного взаимодействия примерно равна $1/40$, частица-переносчик — лептокварк — имеет массу порядка $10^{14} \div 10^{15}$ ГэВ ($\sim 10^{-10}$ г). В ТВО единым об-

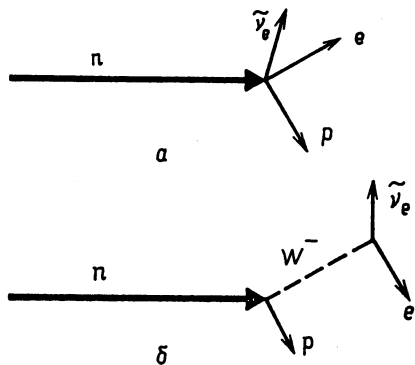


Рис. 73. Распад нейтрона:
а — четырехвершинное; б — трехвершинное взаимодействие

разом описывается и слабое, и сильное взаимодействие, а это означает, что лептоны могут переходить в кварки, и наоборот. Однако кварки обладают барионным зарядом (см. с. 191), барионный заряд лептонов равен нулю. Отсюда следует, что в кварк-лептонных взаимных превращениях нарушается закон сохранения барионного заряда. Таким образом, стабильность протона оказалась под сомнением. Оценки показывают, что время жизни протона $\tau_p = 10^{31 \pm 1}$ лет. Это время значительно превышает возраст Вселенной (10—20 млрд. лет), но значение факта нестабильности протона преуменьшить нельзя. Из него вытекает нестабильность вещества Вселенной! Несмотря на чрезвычайно большое значение τ_p , ученые всего мира сейчас ищут следы распада протона. Для этого вовсе не нужно ждать столько лет, достаточно взять большое количество водородсодержащего вещества, чтобы наблюдать распады. Например, в 10 т воды содержится 10^{31} нуклонов, а это значит, что в год в среднем может распасться один протон. Поиски распада протона идут в США, Индии, СССР. Для уменьшения вредного фона исследования ведутся глубоко под землей.

Несмотря на колоссальную разницу в значениях времен жизни свободного нейтрона $\tau_n \approx 10^3$ с и протона $\tau_p \approx 10^{31 \pm 1}$ лет, теории электрослабого взаимодействия и Великого объединения объясняют их аналогично, связывая с массой частицы-переносчика — W -бозона в теории электрослабого взаимодействия и лептокварка в ТВО. При малых энергиях вероятность появления этих частиц мала, причем вероятность появления лептокварка неизмеримо меньше вероятности появления W -бозона. Обнаружение распада протона имело бы принципиальное значение, означая, во-первых, что ТВО правильна и, во-вторых, что верны уравнения квантовой хромодинамики, а также то, что до сих пор не наблюдаемые в свободном состоянии кварки действительно являются фундаментальными частицами.

Супергравитация (суперсимметрия). Включение в развиваемую схему объединения взаимодействий гравитационного взаимодействия получило название теории супергравитации или суперсимметрии. При этом объединяются внутренняя, связанная с квантовыми числами элементарных частиц симметрия ТВО и пространственная симметрия общей теории относительности. Теория показывает, что это объединение происходит при энергии взаимодействия, равной 10^{19} ГэВ. Частицами-переносчиками при этом являются безмассовые частицы со спином, равным 2, называемые гравитонами. Таким образом, спектр фундаментальных частиц расширяется, включая частицы высших спинов. Классическая теория гравитации — общая теория относительности Эйнштейна — не содержит постоянной Планка, ее обобщение предполагающее включение в теорию квантовых эффектов (квантовая теория гравитации), является актуальной проблемой сегодняшней физики.

Основные качественные выводы квантовой теории гравитации таковы. Рождение в физическом вакууме виртуальных частиц

создает в данное время и в данном месте дополнительную массу, которая, как и всякая масса, обуславливает возникновение дополнительного тяготения. При этом, согласно общей теории относительности, изменяются геометрические свойства пространства-времени, они претерпевают постоянные и нерегулярные изменения (флуктуации). В подчиненной квантовым законам гравитации ранней Вселенной кривизна пространства-времени и даже его топологическая структура должны флуктуировать. Согласно такой модели, гравитон — это квант флуктуирующего пространства-времени, сочетающий в себе свойства элементарной частицы и волны искривления, бегущей по четырехмерному миру. Эффекты, связанные с ними, обнаруживаются на расстояниях порядка планковской длины l_p и планковского времени t_p , поэтому их экспериментальное наблюдение невозможно.

Таким образом, в «начале» Вселенной пространство-время было дискретным, квантованным. В связи с этим необходимо проанализировать понятия l_p и t_p . Подчеркнем, что в настоящее время их статус в физике является весьма неопределенным. Наряду с категорическими утверждениями типа «промежуток времени t_p разделить на части уже принципиально нельзя» [107] или «...невозможны расстояния, меньшие планковской длины l_p . Аналогично можно сделать вывод о бессмысленности промежутков времени, меньших 10^{-43} с» [37] можно встретить как более осторожные высказывания: «В принципе не исключено, что предела нет вообще, но все же значительно более вероятно существование какой-то фундаментальной (элементарной) длины...» [108], так и сакраментальное: «Для тех, кто верит в элементарную длину...» [109]. В качестве теоретического аргумента в пользу существования l_p рассматривается то, что квантование пространства позволяет устранить существование УФ-расходимостей в стандартной квантовой теории поля, не избавляя ее, впрочем, от других недостатков. Современная экспериментальная физика не может дать каких-либо доказательств наличия или отсутствия l_p , так что очевидны и острота проблемы, и преждевременность включения понятий l_p и t_p в таблицы фундаментальных физических постоянных. В этой ситуации представляется целесообразным углубленный анализ теоретических посылок введения их в физику.

Квант единого пространства-времени. Уже отмечалось, что t_p и l_p были предложены еще в начале века М. Планком на основе весьма формальных преобразований, основанных на соображениях размерности. Он же высказал предположение, что эти величины могут играть существенную роль в физике. Последующие успехи квантовой механики исподволь укрепили веру в то, что l_p и t_p могут быть квантами пространства и времени. Поразительно, что кардинальный вывод общей теории относительности А. Эйнштейна о существовании единого четырехмерного простран-

ства-времени до сих пор никак не отразился на судьбе l_p и t_p . Например, в [110] вопреки названию раздела «квантование пространства-времени» речь идет о квантовании отдельно взятых пространства $x = n_1 l_p$, $y = n_2 l_p$, $z = n_3 l_p$ и времени $t = n_4 t_p$, что является серьезным внутренним противоречием работы. Требования логики нарушаются и в [111]: «Правильнее говорить о распаде на кванты *единого* (подчеркнуто мною.— О. С.) пространственно-временного многообразия. При этом пространственные (?! — О. С.) размеры этих квантов равны планковской длине — 10^{-33} см». То, что было естественным для Планка, вряд ли может быть сохранено без изменений после создания ОТО. В связи с этим нам представляется логически оправданным выдвинуть следующие положения:

— рассмотрение не зависимых друг от друга квантов пространства и времени физически не корректно;

— предполагается существование кванта единого пространства-времени, называемого далее st (space-time)-квантом.

Следуя Планку, сконструируем st -квант из фундаментальных констант h , c и G :

$$st = \hbar^2 G^2 / c^7 \approx 10^{-148} \text{ м}^3 \cdot \text{с}.$$

Вытекающие из гипотезы о существовании st -кванта некоторые следствия представляются нам принципиальными:

1. В четырехмерном пространстве-времени st -квант играет столь же фундаментальную роль, что и постоянная Планка h в двумерном фазовом пространстве. Так же как не имеет смысла уточнять положение микрочастицы внутри ячейки фазового пространства h , невозможно определить раздельно пространственные и временные характеристики события внутри st -кванта. В «объеме» st -кванта нарушены причинно-следственные связи, можно полагать, что все события в нем происходят одновременно.

2. Конечность величины st -кванта означает, что происходящие в нем события могут быть растянуты во времени, но сжаты в пространстве, и наоборот. Из этого логически вытекает неправомочность гипотезы о существовании отдельных квантов пространства l_p и времени t_p . Отметим, что подобный подход неявно уже используется в решеточных теориях [112], где физические результаты могут быть достигнуты «только при предельном переходе к малым параметрам решетки». Введение st -кванта требует принципиальной корректировки указанных теорий, так как одновременное минимизирование пространственных и временных параметров решетки становится недопустимым.

3. События, укладываемые в бесконечно малые промежутки времени, происходят одновременно в значительных объемах трехмерного пространства. Из соотношения неопределенности $\Delta E \Delta t \approx \hbar$ следует, что они характеризуются значительной вели-

чиной неопределенности энергии ΔE . На основании этого можно предполагать возможность непрерывного рождения множества виртуальных вселенных. Эти соображения могут быть учтены при анализе начального этапа эволюции нашей Вселенной и, в частности, существующей в современной космологии проблемы горизонта.

4. Поскольку величина st -кванта конечна и не равна нулю: $st = Vt \neq 0$, то ни пространственный объем V , ни время t не могут быть в принципе равны нулю. Физически это понятно, ибо обратное означало бы отсутствие события. Не менее важны и философские следствия, вытекающие из этого положения. Пространство и время, являющиеся формами существования материи, неуничтожимы, как вечна и сама материя. Условие $st = Vt \neq 0$ является краткой математической записью этого философского положения. На уровне st -кванта происходит вечное «кипение» материи, пространство-время динамично, оно непрерывно творит само себя с меняющимися в каждом акте топологией, физическими законами и свойствами.

5. Гипотеза о существовании st -кванта позволяет предложить новую интерпретацию начального этапа эволюции Вселенной. Можно представить, что рождающаяся при $\Delta t \rightarrow 0$ Вселенная представляет собой сферу большого радиуса, однородно заполненную раскаленным первичным веществом и эволюционирующую дальше по известной схеме. При таком подходе начальная фаза «раздувания» Вселенной (см. с. 229) может отсутствовать, а проблема горизонта событий находит естественное объяснение (см. с. 228).

6. Если st -квант существует, проблема связи между удаленными друг от друга мирами решается принципиально иначе, чем в классической и релятивистской физике. Для начала приведем одну цитату из Лионской лекции академика А. Д. Сахарова: «Мы сейчас рассматриваем такую фантастическую возможность, что области, разделенные друг от друга миллиардами световых лет, имеют одновременно связь между собой при помощи дополнительных параллельных ходов, называемых часто «кротовыми норами», т. е. мы не исключаем, что возможно чудо — мгновенный переход из одной области пространства в другую, почти мгновенный, за короткое время, причем в этом новом месте мы появимся совершенно неожиданно или, наоборот, кто-то появится рядом с нами совершенно неожиданно» (см.: Огонек. 1991. N 21). Если принять гипотезу о существовании st -кванта, такая возможность связи становится уже не «фантастической». В самом деле, события, укладываемые в короткие промежутки времени, происходят одновременно в больших объемах трехмерного пространства. На форму этого объема не накладывается никаких ограничений, поэтому можно представить себе имеющую конечный объем, но очень тонкую и бес-

конечно длинную «иглу» («кротовая нора», по А. Д. Сахарову), которая соединяет далекие друг от друга миры. Это и означает наличие мгновенной связи между ними, длящейся очень короткое время.

Спонтанное изменение геометрических свойств пространства-времени приводит к тому, что на малых расстояниях оно может искривляться, скручиваться, иметь раковины и пузыри. Все это отражается в современной концепции пенистой структуры пространства-времени. Из этих представлений вытекают весьма необычные следствия. Согласно теореме Нетер, закон сохранения энергии есть следствие однородности времени, но если возможны спонтанные флуктуации пространства-времени, то можно ожидать, что при определенных условиях может не соблюдаться закон сохранения энергии. В эти особые моменты времени и мог произойти Большой Взрыв и последующее расширение Вселенной.

Проблема масс элементарных частиц. Коротко обсудим состояние проблемы, которая до сих пор только упоминалась. Это проблема масс элементарных частиц. Разработка единой теории фундаментальных взаимодействий существенно расширила как спектр масс, так и их возможные характеристики. Были теоретически предсказаны и экспериментально найдены W^\pm и Z^0 -бозоны, предсказано существование лептокварка, гравитона и некоторых других тяжелых частиц. Любая теория формирования масс элементарных частиц должна учитывать эти результаты.

Полной теории масс пока нет. Надежды теоретиков на ее решение связаны с разработкой теории релятивистской спиновой струны. Ее физическое основание в следующем. Проблема невылетания (конфайнмента) кварков находит объяснение в том, что глюонное поле, создаваемое кварком и скрепляющее кварки между собой, сосредоточено в узкой трубке — струне [113]. Энергия взаимодействия растет пропорционально расстоянию, и, чтобы раздвинуть кварки, нужна громадная энергия. Таким образом, вместо движения обладающей спином точечной частицы в пространстве-времени рассматривается движение струн, каждая точка которых обладает дополнительной спиновой степенью свободы. Из теории следует, что состояния замкнутой струны с нулевой массой описывают частицы со спинами 2 (гравитоны), $3/2$ (гравитино), 1, $1/2$ и 0. Взаимодействие между гравитонами, в частности, описывается уравнениями Эйнштейна [33]. Особенности струнной структуры проявляются на планковских расстояниях и пока недоступны наблюдению. Хотя законченная теория иерархии масс еще не создана, существует убеждение [32] в том, что постоянные фундаментальных взаимодействий и массы элементарных частиц взаимосвязаны. Таким образом, последние не являются независимыми параметрами будущей единой теории.

Десятимерное пространство. Из теории супергравитации следует, что построение единой теории взаимодействий в рамках «привычного четырехмерного пространства-времени» невозможно. Ранее упоминалось, что введение пятого измерения позволило геометрическим образом описать электромагнетизм. Теперь объединяются четыре взаимодействия, и их единое описание возможно только в 10-мерном пространстве-времени [33]. Девять координат этого пространства являются пространственными, одна координата — время. Фундаментальные заряды отдельных взаимодействий являются проявлениями скрытых (компактифицированных) размерностей этого пространства.

Десятимерное пространство оказывается также необходимым при рассмотрении движения струн. Требования совместной инвариантности движения относительно координатных преобразований и квантования выполняются только при условии существования струны в 10-мерном пространстве-времени.

Сколько должно быть постоянных? Коротко подведем итоги обсуждения. Рис. 74 иллюстрирует изменение значений констант различных взаимодействий при увеличении энергии взаимодействия [90]. Изменения α_c относительно изменений других постоянных являются малыми и поэтому не показаны на рисунке. При $E > 10^{19}$ ГэВ все взаимодействия объединяются и характеризуются единой константой α_u . Возникает естественный вопрос о проверке полученных в теории результатов. Напомним, что предсказания теории электрослабого взаимодействия были проверены в прямых экспериментах на мощных ускорителях. Однако ускорители с энергиями 10^{15} ГэВ (характерная энергия ТВО) и выше создать на Земле практически невозможно, поэтому проверка выводов теории Великого объединения по исследованию распада протона является косвенной. Каким образом можно проверить данные, относящиеся к еще большим энергиям? На выручку теории элементарных частиц приходит космология. Вспомним, что в начальные мгновения расширения Вселенной (см. ч. 2, § 1, 6) ее температура, а значит, и энергии взаимодействия частиц достигали громадных значений. Поэтому на верхней шкале рис. 74 и отложено время, прошедшее с начала расширения Вселенной. Выводы космологической

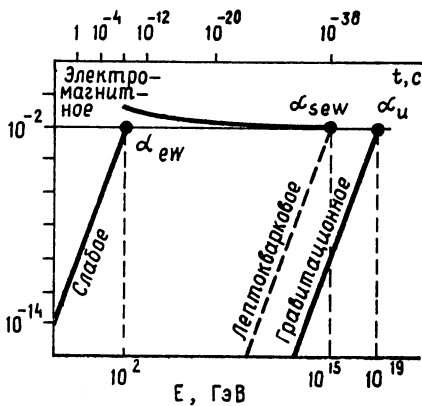


Рис. 74. Изменение констант различных взаимодействий в зависимости от их энергии (по [90])

модели эволюции Вселенной, о которых мы расскажем в § 4, являются одновременно проверкой результатов теории элементарных частиц. Космология сомкнулась с физикой элементарных частиц, Мегамир — с микромиром. Единство природы нашло отражение в единстве науки о природе — физике!

Независимыми константами, определяющими свойства Вселенной, являются всего две постоянные — константа объединенного взаимодействия α_u и размерность пространства N [32]. По мере расширения Вселенной объединенное взаимодействие расщепляется на гравитационное, сильное, слабое и электромагнитное. При низких энергиях эти четыре взаимодействия стали выглядеть как совершенно самостоятельные сущности. Конкретная схема этого процесса предложена в работе советских физиков Д. А. Киржница и А. Д. Линде [114].

Таблица 12

Энергия взаимодействия, ГэВ	Температура, К	Время от начала расширения, с	Физический процесс
$> 10^{19}$?	?	Единое взаимодействие α_u
10^{19}	10^{32}	10^{-43}	Отщепляется гравитационное взаимодействие α_g и α_{gW}
10^{15}	10^{28}	10^{-35}	Отщепляется сильное взаимодействие α_s , α_1 и α_{sW}
10^2	10^{15}	10^{-11}	Расщепляется электромагнитное и слабое взаимодействие α_e , α_w , α_W и α_e

4. МНОЖЕСТВЕННОСТЬ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МИРОВ. РАЗУМ

Наш мир. Об общих чертах эволюции нашей Вселенной уже не раз говорилось в книге, на с. 148 приведена ее конкретная схема, известная также как стандартная космологическая модель Вселенной. Подробнее с этими вопросами можно ознакомиться в ряде работ [24, 25, 90, 116, 78, 80], мы же коротко обсудим исходные положения модели и ее основные результаты.

Любая модель Вселенной должна исходить из наблюдающегося в настоящее время ее расширения и объяснять три достоверно установленных факта — наличие барионной асимметрии Вселенной, космическое отношение числа фотонов к числу барионов, примерно равное 10^9 , однородность и изотропность реликтового излучения. Теория Большого Взрыва в наши дни считается общепринятой. Согласно этой теории, наша Вселенная развилась из первоначального состояния, которое можно представить в виде сгустка сверхплотной раскаленной материи. Излучение и вещество в нем находились в тепловом равновесии. Равновесные системы,

согласно термодинамическим правилам, забывают свою историю, поэтому пока не будем обсуждать проблемы первых мгновений Вселенной. В этой ранней Вселенной фотоны эффективно взаимодействовали с веществом, число частиц было равно числу античастиц. Состав вещества Вселенной был резко отличен от вещества, с которым мы имеем дело в современную эпоху. Например, при $T \sim 10^{28}$ К вещество сгустка состояло из фотонов, кварков, глюонов, W - и Z^0 -бозонов, лептокварков и некоторых тяжелых частиц. Ниже этой температуры равновесие лептокварков с излучением нарушалось.

Для объяснения барионной асимметрии Вселенной предполагается, что распад лептокварков происходит с превышением числа рождающихся кварков над антикварками. Теория дает конкретные данные. Исходя из наблюдающейся сейчас барионной асимметрии, число кварков должно относиться к числу антикварков как 1000000001:1000000000. Физическим обоснованием такого предположения является существование в микромире процессов, идущих с нарушением зарядовой симметрии (распад K^0 -мезона, с. 197). Ценность теории барионной асимметрии, предложенной советскими теоретиками, в том, что она не зависит от начальных условий. Родившиеся в результате распада лептокварков антикварки и кварки аннигилируют, небольшой же избыток кварков выживает и является тем материалом, из которого строится вещество Вселенной. Нейтроны и протоны — эти основные строительные элементы нашего вещества — появляются лишь через 10^{-6} с после Большого Взрыва. До времени $t' \sim 10^{-11}$ с подавляющая часть энергии сгустка заключена в излучении (*эра излучения*), после этого момента, в связи с образованием протонов, — в веществе (*эра вещества*). По мере дальнейшего расширения и остывания Вселенной в момент времени $t = 3$ мин 44 с начинается образование стабильных ядер легких элементов — *эра космологического нуклеосинтеза*. Правда, длительность этой «эры» невелика — всего полчаса. Рассчитанная по этой модели теоретически концентрация гелия во Вселенной (около 25% по массе) совпадает с данными астрофизических наблюдений, что является прямым доказательством справедливости стандартной модели. Состав вещества Вселенной в это время еще раз радикально меняется.

После эры космологического нуклеосинтеза Вселенная в течение почти 30 000 лет тихо остывает. Ее температура снижается настолько, что электроны начинают соединяться с ядрами, образуя атомы. Энергии фотонов не хватает для их разрушения, с этого момента излучение отрывается от вещества. Дальнейшая эволюция излучения происходит в полном соответствии с законами теплового излучения. Теоретическое значение температуры этого «реликтового» излучения, дожившего до наших дней, прекрасно соответствует экспериментальным данным (см. с. 147). Таким образом, только около 25% всей материи — водород

и гелий — образуются собственно в Большом Взрыве. Тяжелые элементы образуются позднее в недрах звезд и рассеиваются в пространстве благодаря звездным взрывам — образованиям сверхновых звезд. Богатство и разнообразие химических элементов на Земле, которому мы обязаны своей жизнью, является свидетельством звездных катастроф.

Как видим, эволюцию Вселенной как целого нельзя рассматривать в отрыве от физики микромира. По образному выражению Д. Эллиса [9], вещество нашей Вселенной — это «реликт Большого Взрыва, танцор без пары, исполняющий свой первый (и, почти наверное, единственный) танец».

Антропологический принцип. Разум. Возьмем две цифры — 10—20 и 4 млрд. лет. Первая, как уже известно, — это время существования Вселенной. В первые ее мгновения сформировался весь тот набор физических закономерностей и фундаментальных постоянных, который обусловил ход ее эволюции в дальнейшем. Вторая цифра — время существования жизни на Земле. Сравнение цифр показывает, что появлению жизни, разума предшествовала длительная фаза существования лишенной наблюдателя Вселенной. В ней неоднократно менялся состав вещества, рождались и умирали звезды, образовывались планетные системы, галактики. Возникновение разумной жизни явилось, таким образом, плодом длительных усилий природы.

Мы уже обсуждали вопрос о существующей в природе довольно точной «подгонке» числовых значений фундаментальных постоянных, благодаря которой во Вселенной существуют ядра, атомы, звезды, планеты и жизнь. Что определило эти значения, мы не знаем, но при их незначительном изменении исчезает сама возможность возникновения познающего природу Человека. Нами ставился вопрос и о причине возникновения этой «подгонки», ведь мы не можем найти утешение в наивной философии вольтеровского Панглоса, уверявшего, что мы живем в лучшем из возможных миров.

Как ни странно, но между биологической эволюцией и эволюцией Вселенной есть много общего. Формирование биологических видов и создание планет — это создание новой информации в результате случайного выбора, возникающего при неустойчивости исходного состояния. Конкуренция и естественный отбор присущи как живой, так и неживой природе. Гравитационные неоднородности, давшие толчок формированию звезд и планетных систем, конкурировали друг с другом за конденсируемый материал. Название основного труда Ч. Дарвина «Происхождение видов путем естественного отбора» говорит само за себя. Не так уж наивен был Эмпедокл, который задолго до теории Дарвина объяснял происхождение различных видов животных результатом отбора. По его курьезной теории, случайные комбинации различных органов (ног, хвостов, туловищ) подверга-

лись действию двух противоположающихся сил — Любви и Вражды. Неудачные комбинации уничтожала Вражда, удачные сочетания брала под свою защиту Любовь, наделяла их признаками пола, давая им тем самым способность к размножению.

В современной науке эти идеи находят отражение в концепции самоформирующегося, саморазвивающегося мира. Каждый человек состоит из сотен тысяч миллиардов клеток, своеобразных молекулярных сообществ, возникших в результате случайных мутаций нуклеотидов и приобретших возможность воспроизводства. Возникшее около 2 млрд. лет тому назад разделение полов позволило двум организмам обмениваться целыми фрагментами своего генетического кода. Возникающие при этом новые разновидности организмов были тут же просеяны сквозь безжалостное сито естественного отбора.

Жизнедеятельность растений привела к радикальному изменению химического состава земной атмосферы. Первозданная водородная среда уступила место кислородной, что резко ускорило развитие новых форм жизни на Земле. Несколько миллионов лет тому назад по Земле прошел первый человек. Совершенствование человеческого общества, появление и развитие науки изменили ситуацию. Теперь к создавшей человека Природе обращен его вопрос о причине, обусловившей ее свойства.

Естественным ответом на этот вопрос является антропологический принцип, согласно которому Вселенная обладает наблюдаемыми свойствами потому, что эти свойства допускают возможность существования человека-наблюдателя. С позиций этого принципа уже обсуждалась необходимость существования всех четырех видов фундаментальных взаимодействий, числовых значений фундаментальных постоянных. Антропологический принцип требует, чтобы средняя плотность вещества во Вселенной была близка к критической $\rho \approx \rho_{кр}$, так как при $\rho \ll \rho_{кр}$ не было бы конденсации вещества в звезды и галактики, а при $\rho \gg \rho_{кр}$ время существования Метагалактики было бы настолько малым, что в ней не успела бы развиться жизнь. При $\rho \approx \rho_{кр}$ геометрия пространства псевдоевклидова, число пространственных измерений равно трем, что исключительно важно для существования того реального мира, в котором мы живем. Еще в 20-е годы нашего столетия П. Эренфест показал, что если бы число пространственных координат N было равно четырем, то не существовало бы замкнутых орбит планет и, естественно, Солнечной системы и человека. При $N=4$ была бы невозможна также атомная структура вещества.

Познание человеком свойств Вселенной тоже эволюционный процесс, зависящий от уровня развития человеческого общества и в первую очередь от уровня развития науки. Образы Вселенной на каждом историческом этапе были различны, примеров этого достаточно приведено в ч. 2 книги. Всех свойств нашей Вселенной

мы еще не знаем, но фантазия теоретиков уже блуждает в запутанных лабиринтах предположений о свойствах других возможных Вселенных. Антропологический принцип отнюдь не исключает возможности их существования. Их свойства могут быть таковы, что возникновение жизни в них будет невозможно, и их эволюция будет проходить «без свидетелей». В [116] приводятся оценки возможного числа цивилизаций нашего технологического уровня, которые показывают, что их число довольно велико — порядка 10^7 . Иной позиции придерживается известный американский ученый К. Саган: «Процесс развития жизни у нас на Земле может быть более или менее типичным для эволюции во многих других мирах; но в таких узких областях биологии, как белковый состав и нейрология мозга, история жизни на Земле, возможно, уникальна во всей Галактике Млечного пути» [117].

Был ли Большой Взрыв единственным? Коль скоро мы заговорили о возможном существовании других цивилизаций, полезным было бы более подробное обсуждение проблемы возникновения жизни на Земле. Известный всем сценарий происхождения жизни эволюционным путем долгое время был практически единственным. Сейчас этого утверждать нельзя, так как новые исследования и открытия заставили взглянуть на эту проблему принципиально по иному. Эти в высшей степени интересные исследования пока еще очень далеки от исчерпывающего объяснения, но в них уже закладывается основа для достаточно обоснованного физико-механического анализа вопроса о зарождении жизни на Земле и ее распространенности о Космосе.

Еще в 1847 г. выдающийся французский микробиолог Л. Пастер сделал выдающееся открытие, которое долгое время не находило объяснения и потому недооценивалось. Он обнаружил, что такие биохимически важные соединения, как аминокислоты и сахара, являются оптически активными, что обнаруживается по вращению плоскости поляризации падающего на них света. Самое удивительное заключается в том, что все природные аминокислоты являются левыми стереоизомерами (плоскость поляризации света вращается влево), и все природные сахара — правыми. При синтезе же в этих веществ в лабораторных условиях образуются смеси, не обладающие оптической активностью, так как они содержат равные количества левых и правых молекул. Отметим, что образование оптически неактивных смесей является термодинамически более выгодным процессом, поэтому существование в живой природе оптической асимметрии требовало научного объяснения. Так или иначе открытие состоялось, и очень скоро получило статус одного из основных свойств, принципиально отличающих живое от неживого. Стало очевидным, что любая попытка объяснения происхождения жизни должна включать в себя объяснение возникновения стереоизометрии аминокислот и сахаров. Одновременно с установлением этого факта откры-

лись многообещающие возможности анализа условий возникновения жизни как процесса формирования системы с нарушенной симметрией (киральной системы) из первоначально симметричной. Этим исследованиям были посвящены работы замечательного советского ученого Л. Л. Морозова, к сожалению, рано ушедшего из жизни. Ниже мы очень коротко расскажем о его идеях, базируясь в основном на его посмертной публикации в журнале «Природа» (1984, N 12).

Основной вывод, к которому приходит Л. Морозов при исследовании возможных механизмов проникновения кирально чистой системы, кажется неожиданным — нет таких механизмов, в результате действия которых этот удивительный феномен живой природы мог сформироваться эволюционным путем! Остается единственная возможность формирования системы с нарушенной зеркальной симметрией в результате скачкообразного процесса. Этот класс явлений изучает так называемая теория бифуркаций, катастроф. В настоящее время общепризнано, что в природе возможно протекание таких процессов, когда в результате взаимосвязи усиливающих друг друга процессов эволюционное развитие системы сменяется скачкообразным изменением ее свойств. Трагическими доказательствами этого могут слкжить землетрясения. Возникновение жизни с этой точки зрения является благоприятной катастрофой. При таком подходе центр тяжести исследований смещается в вопросы физики конденсированного вещества и кооперативных явлений. Проблемы формирования кирально чистых систем, возникновения самовоспроизведения на молекулярном уровне (это является вторым отличительным признаком живого) становятся проблемами физического механизма того своеобразного фазового перехода, который мог иметь место в условиях ранней Вселенной.

В науке о происхождении жизни происходят революционные перемены — эволюционные гипотезы уступают место теориям скачка. Вполне в духе излагавшихся выше космологических теорий возникновения Вселенной в Большом Взрыве, позволяющих рассчитать возраст Вселенной, впервые открываются возможности научных расчетов времени происхождения жизни. Эта гипотеза получила название «Биологического Взрыва».

Нельзя не упомянуть о том, что эволюционный механизм происхождения жизни на Земле принимался далеко не всеми. Еще Дж. Бернал считал очень маловероятным возникновение жизни от одной — единственной молекулы ДНК. Эта же мысль красочно выразил астроном Ч. Викрамасингхе: «Скорее ураган, пронсящийся по кладбищу старых самолетов, соберет новехонький супер лайнер из кусков лома, чем в результате случайных процессов возникнет из своих компонентов жизнь». Усиленное внимание привлекли к себе идеи о внеземном происхождении жизни, тем более что исследования оптического состава изомеров ами-

нокислот, содержащихся в метеоритном веществе, показали избыток левых аминокислот над правыми. С большим энтузиазмом писал Л. Морозов об открывающихся перед наукой перспективах: «...возможно еще более значительное «Великое объединение», способное соединить открытые нами тени законов живой и неживой материи, включить возникновение и развитие жизни в единую цепь эволюции Вселенной».

К первым мгновениям. Процесс эволюции Вселенной определялся, как мы видели, совокупностью физических законов и значениями фундаментальных постоянных. Проблема формирования их числовых значений вновь и вновь приводит нас к анализу первых мгновений жизни Вселенной. Фридмановская модель эволюции при всех ее очевидных достоинствах не может быть основой такого анализа. Это очевидно, так как она выросла из классической общей теории относительности и так же, как и она, не содержит в своей структуре постоянной Планка h . Она принципиально не квантовая теория, а первые мгновения жизни Вселенной определялись квантовыми эффектами.

Трудности модели Фридмана не исчерпываются только этим. Зависимость радиуса Вселенной от времени в ней дается соотношением $r \sim t^a$ [99], где величина $a < 1$. Это поднимает очень интересную проблему горизонта событий. По определению, *горизонтом* называется величина, равная произведению скорости света c на время t , и это есть предельное расстояние, на которое может быть передана информация за время t . Таким образом, причинно-связанными между собой могут быть только такие области, расстояние между которыми $r \leq ct$. В настоящее время в Метагалактике горизонт событий примерно равен ее размерам, что хорошо согласуется с наблюдаемым фактом изотропии реликтового излучения. Но так как размеры Метагалактики при $a < 1$ меняются медленнее, чем размеры горизонта, в меньшие моменты времени горизонт был меньше размеров Метагалактики. Вывод, который следует из этого, таков: экспериментально установленные факты изотропии реликтового излучения не согласуются с моделью Фридмана, так как она приводит нас к модели ранней Вселенной, состоящей из множества причинно-несвязанных областей.

Согласно модели Фридмана, в начальный момент времени все вещество Вселенной было сконцентрировано в точке (см. рис. 39). При этом плотность энергии в точке должна стремиться к бесконечности. Но при $\varepsilon \rightarrow \infty$ в веществе всегда должны происходить какие-то фазовые превращения, приводящие к радикальному изменению его свойств. Об этих свойствах нам пока ничего не известно. Предсказываемая теорией Фридмана сингулярность также является одним из ее недостатков.

Обратим внимание на то, что все указанные трудности модели возникают при анализе времен жизни Вселенной, близких к нулю. Среди других моделей Вселенной, о которых говорилось в § 6,

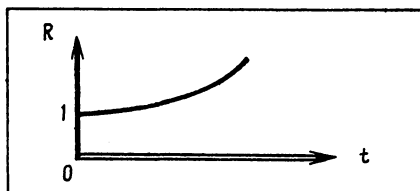


Рис. 75. Зависимость размера Метагалактики от времени в модели де Ситтера

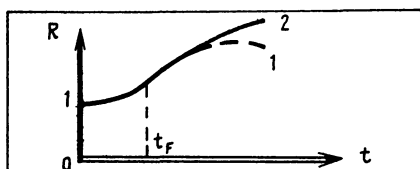


Рис. 76. Зависимость радиуса Метагалактики от времени в модели де Ситтера — Фридмана:

t_F — фридмановское время

была и модель де Ситтера. Для нее характерно экспоненциальное изменение расстояния со временем: $R \sim \exp(Ht)$ [97] (рис. 75). Физически это означает конечные размеры Вселенной при $t=0$ и быстрое увеличение ее размеров с ростом t . Легко видеть, что свойства этой модели таковы, что в ней отсутствуют две из трех указанных выше трудностей фридмановской модели — отсутствие сингулярности и, во-вторых, на начальном этапе расширения все области Вселенной, которые теперь находятся на громадных расстояниях, были близки и обмен сигналами между ними был возможен. Это объясняет изотропию реликтового излучения.

Удовлетворительно описывающая свойства ранней Вселенной модель де Ситтера и модель Фридмана для более поздних промежутков времени должны быть согласованы между собой. Возникающая при этом зависимость размеров Вселенной от времени может быть примерно описана кривой, показанной на рис. 76. Время перехода от деситтеровской стадии расширения (1) к фридмановской (2) обозначено на рис. 76 через t_F . Смысл t_F теперь принципиально иной, нежели в модели Фридмана. Это уже не начало момента рождения Вселенной, а момент радикального изменения ее закона расширения. Переход же от одного закона к другому всегда означает радикальное изменение основных свойств Вселенной в этот момент, изменение ее фазового состояния.

Модель экспоненциального роста размеров Вселенной на начальной стадии ее эволюции получила название модели «раздувающейся Вселенной» [118]. Согласно этой модели, при $t \rightarrow 0$ вся энергия мира была заключена в его вакууме. Плотность энергии вакуума можно подсчитать, используя постоянные c , h и G [34]. Деситтеровская стадия расширения длилась примерно 10^{-35} с. Все это время Вселенная быстро расширялась, заполняющий ее вакуум как бы растягивался без изменения своих свойств. Образовавшееся состояние Вселенной было крайне неустойчивым, энергетически напряженным. В таких случаях достаточно возникновения малейших неоднородностей, играющих роль случайной затравки, чтобы вызвать переход в другое состо-

яние (в качестве примера можно привести явление кристаллизации). При переходе вакуума в другое состояние мгновенно выделилась колоссальная энергия за счет разности его начального и конечного состояний. Примерно за 10^{-32} с пространство раздулось в громадный раскаленный шар с размерами почти большими видимой нами части Вселенной. При этом произошло рождение из вакуума реальных частиц, из которых со временем сформировалось вещество нашей Вселенной.

В последнее время усиленно обсуждаются причины того «первотолчка», который был началом расширения нашей Вселенной. Один из возможных механизмов, основанный на гипотезе о существовании кванта единого пространства — времени (*st*-кванта), предложен в этой книге (см. с. 217). Этой же теме посвящены работы советских и американских физиков, в которых разработана теория инфляционной Вселенной. Рассмотрим ее основные положения и выводы.

Как Вы уже знаете, А. Эйнштейном была выдвинута идея о существовании космического отталкивания. Если учесть эти силы в уравнениях динамики Вселенной, то полное ускорение a оказывается равным:

$$a = a_{\text{тяг}} + a_{\text{отт}}.$$

Ускорение тяготения $a_{\text{тяг}}$ равно (см. с. 59):

$$a_{\text{тяг}} = -GM/R^2, \quad (17)$$

а ускорение отталкивания $a_{\text{отт}}$ в соответствии с гипотезой Эйнштейна (С. 144) пропорционально R :

$$a_{\text{отт}} = \text{const} \cdot R.$$

Числовое значение константы в этой формуле можно найти, определив среднюю плотность вещества ρ во Вселенной. В настоящее время считается, что ρ очень близко к 10^{-29} г/см³ и

$$a_{\text{отт}} = \frac{\Lambda c^2}{3} \cdot R, \quad (128)$$

где Λ — космологическая постоянная, равная примерно 10^{-56} см⁻².

Рассмотрим случай, когда во Вселенной нет вещества, она «пуста». При этом в формуле (17) $M=0$, и динамика Вселенной описывается только уравнением (128). При этом две свободные пробные частицы (две Галактики), помещенные в такую пустую Вселенную, будут удаляться друг от друга с ускорением, прямо пропорциональным расстоянию R между ними. Интегрируя (128), можно показать, что в этом случае зависимость R от времени t будет выражаться следующим образом:

$$R = R_0 \exp(\sqrt{\Lambda/3} ct). \quad (129)$$

В этой модели Вселенной, предложенной де Ситтером в 1917 г., имеет место чрезвычайно быстрый рост R от t .

На страницах этой книги неоднократно говорилось о том, что «пустоты» в современном понимании нет, ее место занимает физический— вакуум, в котором непрерывно происходят процессы рождения и уничтожения виртуальных частиц. Это своеобразное «кипение» вакуума нельзя устранить, ибо оно означало бы нарушение одного из основных законов квантовой физики, а именно, соотношения неопределенностей Гейзенберга. Как показал академик Я. В. Зельдович в 1967 г., в результате взаимодействия виртуальных частиц в вакууме появляется некоторая плотность энергии ϵ и возникает отрицательное давление P , по абсолютной величине равное плотности энергии: $p = -\epsilon$. (Отрицательное давление можно уподобить натяжениям, возникающим в твердом теле при его растяжении). В 1972 г. советские физики Д. А. Киржниц и А. Д. Линде показали, что подобное состояние может возникать во Вселенной при понижении ее температуры от очень больших значений, превышающих температуру Великого объединения. Считается, что вакуумноподобное состояние возникает тогда, когда время от начала расширения равно планковскому:

$$t = t_p \approx 10^{-44} \text{ с}$$

и плотность вещества

$$\rho \approx \rho_p \approx 10^{94} \text{ г/см}^3.$$

При этом

$$R = R_0 \exp(3 \cdot 10^{43} t),$$

где t — в секундах. Вакуумноподобное состояние неустойчиво, с течением времени оно распадется, превратившись в обычную горячую материю. Это происходит через промежуток времени Δt , равный $10^9 t_p = 3 \cdot 10^{-35} \text{ с}$ [122]. За это время все расстояния во Вселенной вырастут, согласно (129), в $e^{10^9} \approx 10^{4 \cdot 10^8}$ раз. Энергия вакуумноподобного состояния перейдет в энергию обычной материи, гравитационное отталкивание сменится обычной гравитацией, замедляющей расширение. Вселенная начнет развиваться по уже рассмотренной выше горячей модели.

Распад вакуумноподобного состояния является типичным квантовым процессом, подверженным случайным флуктуациям. В силу этого в одном месте этот распад происходит чуть раньше, чем в другом. Поэтому и переход к горячей Вселенной также происходит раньше. Возникают небольшие флуктуации плотности материи, из которых по мере их роста вырастают Галактики и их системы.

Изучение прошлого нашей Вселенной помогает понять ее настоящее и будущее. «Анализ будущего Вселенной принципиально отличается от изучения прошлого. Прошлое уже было, оно оставило свои следы, и, изучая эти следы, мы проверяем правиль-

ность наших знаний о нем. Будущее только будет. Его изучение всегда является экстраполяцией. Прямая проверка здесь невозможна» [121]. Прогнозы здесь кажутся не утешительными. В расширяющейся Вселенной через 10^{32} лет распадется все ее вещество, через 10^{100} лет испарятся черные дыры, всю Вселенную заполнит электрон-позитронная плазма ничтожной плотности. В закрытой Вселенной расширение со временем сменится сжатием, и через несколько десятков миллиардов лет Вселенная вновь соберется «в точку». Означает ли все это невозможность существования в будущем каких-либо систем, разума? Конечно, нет! Надо всегда помнить о том, что речь идет только о нашей Вселенной, точнее, ее наблюдаемой части — Метагалактики. Во всей Вселенной жизнь нашего типа будет существовать всегда.

Множественность и взаимодействие миров. «Как Фауст перед мировым духом, так смертный трепещет перед абстрактной наукой; ее бездонные глубины устрашают его, он может достигнуть лишь того, чтобы окинуть взором звездные пространства, помыслить об изначальных законах бытия, и только», — писал в конце прошлого века Л. Больцман. Но вся история науки есть блестящий пример того, как в неустанном стремлении к познанию человек преодолевал этот страх. «Звездные пространства» и «изначальные законы бытия» — все становилось объектом изучения. Идеи множественности миров никогда не были чужды человечеству. Еще в Древней Греции фантазия уводила Анаксагора в мир гомеомерий, мельчайших частиц, состоящих из множества еще более мелких. Он считал, что каждая из гомеомерий содержит в себе все свойства Вселенной, на каждой из них есть Солнце, люди, звезды. Не отрешившись от веры в множественность миров, пошел на костер инквизиции Джордано Бруно. Уже в нашем веке появились вдохновенные строки В. Брюсова:

Быть может, эти электроны—
Миры, где пять материков,
Искусства, знания, войны, троны
И память сорока веков!
Еще, быть может, каждый атом—
Вселенная, где сто планет,
Там все, что здесь, в объеме сжатом,
Но также то, чего здесь нет.

Причудливо меняются на уровне микромасштабов свойства материи и пространства-времени. Рождается множество Вселенных, обладающих своими законами, физическими постоянными и судьбами. Диалектика учит нас признанию всеобщей связи между существующими в природе явлениями. Не может быть абсолютно изолированных друг от друга областей пространства, не может быть явлений, принципиально недоступных познанию. Все миры взаимодействуют друг с другом. Какими бы поразжающими воображение ни были расстояния между ними, на уровне

микроявлений они связаны между собой, образуя единое пространство-время. Согласно выводам общей теории относительности, обладающий изнутри вселенскими свойствами наш мир снаружи может выглядеть как микрочастица. Такие объекты академик М. А. Марков называет фридмонами [119, 120]. Находясь внутри нашей Вселенной, мы лишены возможности непосредственного исследования других миров, об их свойствах мы можем судить на основании выводов теории.

Современная физика уже приступила к изучению «того, чего здесь нет». Мы исследуем тайны одной из Вселенных, подарившей нам разум, и одним из наиболее ценных результатов исследований являются фундаментальные постоянные, раскрывающие сокровенные свойства материи. Механизм формирования их значений пока еще не ясен, впереди много работы...

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

1. Обсуждаются важные для понимания проблемы фундаментальных постоянных в целом вопросы: а) постоянны ли постоянные? б) устойчивость основных структурных элементов Вселенной по отношению к возможному изменению числовых значений констант; в) проблема формирования набора констант в первые мгновения возникновения Вселенной.

2. Показано, что свойства нашего мира полностью определяются существующим набором значений фундаментальных постоянных.

3. Обсуждаются проблемы объединения взаимодействий и различные космологические модели ранней Вселенной, проблемы множественности и взаимодействия миров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мороз О. П. В поисках гармонии. М., 1978.
- [2] Григорьев В. И., Мякишев Г. Я. Силы в природе. М., 1983.
- [3] Пономарев Л. И. Под знаком кванта. М., 1984.
- [4] Бурдун Г. С., Базакуца В. А. Единицы физических величин. Харьков, 1984.
- [5] Обозначения, единицы и терминология в физике // УФН. 1979. Т. 129. Вып. 2. С. 289.
- [6] Фундаментальные физические константы. ГСССД 1-87. М., 1989.
- [7] Ленин В. И. ПСС. Изд. 5-е. Т. 27. С. 386.
- [8] Физический энциклопедический словарь. Т. 5. М., 1964.
- [9] Фундаментальная структура материи. М., 1984.
- [10] Сивухин Д. В. О международной системе физических величин // УФН. 1979. Т. 129. Вып. 2. С. 335.
- [11] Физический энциклопедический словарь. М., 1983.
- [12] Труды II Всесоюзного совещания «Квантовая метрология и фундаментальные константы». Л., 1985.
- [13] Милликен Р. Электроны «+» и «-». М., 1939.
- [14] Широков К. П., Богуславский М. Г. Международная система единиц. М., 1984.
- [15] Проблемы логики научного познания. М., 1964.
- [16] Аракелян Г. Б. Фундаментальные безразмерные величины. Ереван, 1981.
- [17] Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. М., 1977.
- [18] Филонович С. Р. Самая большая скорость. М., 1983.
- [19] Квантовая электроника и фундаментальные константы. Сб. статей. М., 1981.
- [20] Болсун А. И. Краткий словарь физических терминов. Минск, 1979.
- [21] Рассел Б. Человеческое познание. М., 1957.
- [22] Философская энциклопедия. Т. 3. М., 1964.
- [23] Васильев М. В., Климоштович Н. Ю., Стаиокович К. П. Сила, что движет мирами. М., 1978.
- [24] Дэвис П. Случайная Вселенная. М., 1985.
- [25] Зельдович Я. Б. Почему расширяется Вселенная // Природа. 1984. N 2. С. 66.

- [26] *Комаров В. Н., Пановкин Б. Н.* Занимательная астрофизика. М., 1984.
- [27] *Савельев И. В.* Курс общей физики. Т. 3. М., 1982.
- [28] *Камке Д., Кремер К.* Физические основы единиц измерения. М., 1980.
- [29] *Планк М.* Введение в теоретическую физику. Ч. 1. М.-Л., 1932.
- [30] *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов. Т. 4. М., 1967.
- [31] *Гильберт Д.* Основания физики // Сб.: А. Эйнштейн и теория гравитации. М., 1979.
- [32] *Розенталь И. Л.* Элементарные частицы и структура Вселенной. М., 1984.
- [33] *Казаков Д. И.* Микромир за пределами воображения // Сб.: Будущее науки. М., 1987.
- [34] *Розенталь И. Л.* Проблемы начала и конца Метагалактики. М., 1985.
- [35] *Кудрявцев П. С.* Курс физики. М., 1982.
- [36] *Спаский Б. И.* История физики. Ч. 1. М., 1977.
- [37] *Владимиров Ю. С., Мицкевич Н. В., Хорски Я.* Пространство, время, гравитация. М., 1984.
- [38] *Брагинский В. Б., Полнарев А. Г.* Удивительная гравитация. М., 1985.
- [39] *Милюков В. К.* Экспериментальная проверка закона тяготения для лабораторных расстояний // ЖЭТФ. 1985. Т. 82. Вып. 2.
- [40] *Милюков В. К., Сагитов М. У.* Гравитационная постоянная в астрономии. М., 1985.
- [41] *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии // Сб. трудов академика А. Н. Крылова. М.-Л., 1936.
- [42] *Савельев И. В.* Курс общей физики. Т. 1. М., 1982.
- [43] *Климшин И. А.* Астрономия наших дней. М., 1985.
- [44] *Крицман В. А., Р. Бойль, Дж. Дальтон, А. Авогадро:* создатели атомно-молекулярного учения в химии. М., 1976.
- [45] *Фигуровский И. А.* История химии. М., 1979.
- [46] *Кедров Б. М.* Атомистика Дальтона. М.-Л., 1949.
- [47] *Быков Г. В.* Амедео Авогадро. М., 1970.
- [48] Сб.: М. Планк, 1858—1958. М., 1958.
- [49] *Гельфер Я. М.* История и методология термодинамики и статистической физики. М., 1981.
- [50] *Больцман Л.* Статьи и речи. М., 1970.
- [51] *Deslattes R. D., Henins A. et al.* Determination of the Avogadro constant // Phys. Rev. Lett. V. 33, N 8, 1974, p. 463.
- [52] *Льоци М.* История физики. М., 1970.
- [53] *Кудрявцев П. С.* История физики. Т. II. М., 1956.
- [54] Сб.: Проблемы физики: классика и современность. М., 1982.
- [55] *Энгельс Ф.* Диалектика природы. М., 1964. С. 22.
- [56] *Мякишев Г. Я.* Динамические и статистические закономерности. М., 1973.
- [57] *Фейнман Р.* Лекции по физике. Вып. 1. М., 1976.
- [58] *Волькенштейн М. В.* Энтропия и информация. М., 1986.
- [59] *Франклин Б.* Опыты и наблюдения над электричеством. М., 1956.
- [60] *Дуков В. М.* Электрон. М., 1966.
- [61] *Франкфурт К. И., Френк А. М.* У истоков квантовой теории. М., 1975.

- [62] Зорин Г. Н. Препринт ОИЯИ, P18—84—483, 1984.
- [63] Берестейский В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Квантовая электродинамика. М., 1980.
- [64] Милоков В. К. Изменяется ли гравитационная постоянная // Природа. 1986. N 6.
- [65] Фритш Г. Основа нашего мира. М., 1985.
- [66] Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм. ПСС. Изд. 5-е. Т. 18. М., 1961. С. 277.
- [67] Франкфурт У. И., Френк А. М. Оптика движущихся тел. М., 1972.
- [68] Купер Л. Н. Физика для всех. Т. 1—2. М., 1973—1974.
- [69] Вафиади В. Г., Попов Ю. В. Скорость света и ее значение в науке и технике. Минск, 1970.
- [70] Фрум К., Эссен Л. Скорость света и радиоволн. м., 1979.
- [71] Планк М. Единство физической картины мира. М., 1966.
- [72] Ландау Л. Д., Румер Ю. Б. Что такое теория относительности. М., 1981.
- [73] Гинзбург В. Л. О теории относительности. М., 1979.
- [74] Шмутцер Э. Теория относительности, современное представление. М., 1981.
- [75] Барашенков В. С. Кварки, протоны, Вселенная. М., 1987.,
- [76] Новиков И. Д. Черные дыры во Вселенной. М., 1977.
- [77] Фролов В. П. Введение в физику черных дыр. М., 1983.
- [78] Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. М., 1975.
- [79] Линде А. Д. Калибровочные теории и переменность гравитационной постоянной в ранней Вселенной // Письма в ЖЭТФ. Т. 30. Вып. 7. 1979. С. 479.
- [80] Вайнберг С. Первые три минуты. М., 1981.
- [81] Франкфурт У. И., Френк А. М. У истоков квантовой теории. М., 1975. С. 52.
- [82] Планк М. Единство физической картины мира. М., 1966.
- [83] Кудряцев П. С. История физики. Т. III, М., 1971.
- [84] Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. III. М., 1966. С. 93.
- [85] Бор Н. Избранные научные труды. Т. II. М., 1970. С. 551—552.
- [86] Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. IV. М., 1967. С. 265.
- [87] Де Бройль Л. По тропам науки. М., 1962.
- [88] Кляус Е. М., Франкфурт У. И. М. Планк. М., 1980.
- [89] Тарасов Л. В. Основы квантовой механики. М., 1978.
- [90] Сапожников М. Г. Антимир — реальность. М., 1963.
- [91] Розенталь И. Л. Эволюция физики и математика. М., 1982.
- [92] Дубовой Э. И. По следам невидимок. М., 1985.
- [93] Окунь Л. Б. α , β , γ , ..., z . М., 1985.
- [94] Намбу Е. Кварки. М., 1984.
- [95] Тарасов Л. В. Этот удивительно симметричный мир. М., 1982.
- [96] Зельдович Я. Б. Современная космология // Природа. 1983. N 9.
- [97] Чечев В. П., Крамаровский Я. М. Радиоактивность и эволюция Вселенной. М., 1978.
- [98] Розенталь И. Л. Физические закономерности и числовые значения фундаментальных констант // УФН. 1980. Т. 131. Вып. 2. С. 239.

- [99] Новиков И. Д., Полнарёв А. Г., Розенталь И. Л. Числовые значения фундаментальных постоянных и антропный принцип // Изв. АН ЭССР. 1982. Т. 31. N 3.
- [100] Гуревич Л. Э. Об одной фундаментальной проблеме в космологии // В кн.: Эвристическая роль математики в физике и космологии. Л., 1975.
- [101] Шкловский И. С. Что было, когда «ничего» не было // Земля и Вселенная. 1984. N 4.
- [102] Рис М., Руффини Р., Уилер Дж. Черные дыры, гравитационные волны и космология. М., 1977.
- [103] Утияма Р. К чему пришла физика. М., 1986.
- [104] Бартини Р. Некоторые соотношения между физическими константами // ДАН СССР. 1965. Т. 163. N 4. С. 861.
- [105] Бартини Р. Соотношения между физическими величинами // В сб.: Проблемы теории гравитации и элементарных частиц. М., 1966.
- [106] Березинский В. С. Объединенные калибровочные теории и нестабильный протон // Природа. 1984. N 11. С. 24.
- [107] Либшер Д.-Э., Новиков И. Д. Река времени // Природа. 1985. N 4. С. 14.
- [108] Гизбург В. Л. О физике и астрофизике. М., 1985.
- [109] Розенталь И. Л. О существовании физических пространств с размерностью $N \neq 3 + 1$. Препринт ИКИ-400. М., 1978.
- [110] Физическая энциклопедия. Т. 2. М., 1990.
- [111] Новиков И. Д. Как взорвалась Вселенная. М., 1988.
- [112] Кройц М. Кварки, глюоны и решетки. М., 1987.
- [113] Мигдал А. Б. Пустота-эфир-вакуум // В сб.: Будущее науки. М., 1986.
- [114] Киржниц Д. А., Линде А. Д. Фазовые превращения в физике элементарных частиц и космологии // В сб.: Наука и человечество, 1982. С. 165.
- [115] Новиков И. Д. Эволюция Вселенной. М., 1983.
- [116] Марочник Л. С., Мухин Л. М. Галактический «пояс жизни» // Природа. 1983. N 11. С. 52.
- [117] Саган К. Загадка жизни // Курьер ЮНЕСКО. 1984. X. С. 31.
- [118] Линде А. Д. Раздувающаяся Вселенная // УФН. 1984. Т. 144. Вып. 2.
- [119] Марков М. А. Проблемы осциллирующей Вселенной. М., 1983.
- [120] Марков М. А. О природе материи. М., 1976.
- [121] Новиков И. Д. Как взорвалась Вселенная. М., 1988.

СОДЕРЖАНИЕ

От автора	3
Часть I. Постановка проблемы . . .	9
1. Таблицы и физика (9) 2. О значении точности (26) 3. К определению понятия «фундаментальные постоянные (30) 4. Могут ли фундаментальные постоянные иметь размерность? (39) Краткие выводы (44)	
Часть II. Константы и физика . . .	45
Предварительные замечания (45)	
1. Гравитационная постоянная (начало исследования) (46) 2. Постоянные Авогадро и Лошмидта (62) 3. Постоянная Больцмана (71) 4. «Элементарный» электрический заряд (92) 5. Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме (скорость света) (111) 6. Гравитационная постоянная в общей теории относительности (продолжение) (139) 7. Постоянная Планка (149) 8. Константы сильного и слабого взаимодействий (181) Краткие выводы (198)	
Часть III. Мировые постоянные . . .	199
1. Глобальная проблема современной физики (199) 2. Некоторые принципиальные вопросы (202) 3. Сколько должно быть постоянных? (От единой теории поля к единой теории взаимодействий) (210) 4. Множественность и взаимодействие миров. Разум (222) Краткие выводы (233)	
Литература	234

Учебное издание

Спирядонов Олег Павлович

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Зав. редакцией учебно-методической литературы
по физике и математике *Е. С. Гридасова*

Редактор *Г. Н. Чернышева*

Художественный редактор *В. И. Пономаренко*

Технический редактор *И. В. Резникова*

Программист *И. А. Грохочинская*

Корректор *Г. И. Кострикова*

ИБ N 9009

Изд. N ФМ-972. Сдано в набор 21.12.90. Подп. в печать 26.09.91. Формат 60×88¹/₁₆.
Бум. офс. N 2. Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Объем 14,70 усл. печ. л. 14,95
усл. кр.-отт. 15,14 уч.-изд. л. Тираж 21000 экз. Зак. N° 1564 . Цена 1 руб. 60 коп.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Издание подготовлено с использованием компьютеров издательства.

Отпечатано в Московской типографии N° 8 Министерства печати и массовой
информации РСФСР, 101898, Москва, Хохловский пер., 7.

Спиридонов О. П.

С 72 **Фундаментальные физические постоянные: Учеб. пособие для вузов.— М.: Высш. шк., 1991.— 238с.: ил.**
ISBN 5-06-001957-8

В книге в хронологической последовательности рассказывается о фундаментальных физических постоянных, излагается история развития и становления основных физических теорий. Раскрыт физический смысл фундаментальных постоянных, рассмотрены методы точного измерения их значений. Подробно изложены связи между физическими постоянными и проанализированы различные подходы к решению проблемы фундаментальности физических постоянных.

С 1604010000(4309000000) — 436 93 — 91
001(01) - 91

ББК 22.3
531.7