

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	12
1. Для кого написана эта книга.	12
2. О содержании отдельных глав.	14
3. Два маяка.	16
Глава 1. Основы основ	20
1.1. Об интуиции*	20
1.2. Пространство и время*	21
1.3. Материя и вещество*	21
1.4. Движение*	22
Глава 2. Единицы	23
2.1. Стандарты*	23
2.2. Окружность и углы*	23
2.3. Единицы времени и длины*.	23
Глава 3. Минимум математики	25
3.1. Царица, служанка и барьер*	25
3.2. Четыре действия школьной математики и мнимая единица*	25
3.3. Степени десяти*	26
3.4. Префиксы степеней десяти	26
3.5. Дифференцирование и интегрирование	26
3.6. Матрицы.	27
Глава 4. Поступательное движение	28
4.1. Свободная частица*	28
4.2. Максимальная скорость c^*	28
4.3. Энергия и импульс частицы*.	29

4.4. Кинетическая и потенциальная энергия в механике Ньютона*	30
4.5. Импульс в механике Ньютона*	30
4.6. Пространство и время в релятивистской механике*	32
4.7. Энергия и импульс в релятивистской механике*	34
4.8. Масса частицы*	35
4.9. Энергия покоя*	35
4.10. Безмассовый фотон*	36
4.11. Массы электрона и протона*	36
Глава 5. Вращение и квантование	37
5.1. Спиновое и орбитальное вращение*	37
5.2. О векторах и тензорах.	38
5.3. Орбитальный момент в теории относительности	38
5.4. Тожественность частиц*	39
5.5. Квантование \mathbf{S} и \mathbf{L} *	39
5.6. Еще о спине*	40
5.7. Фермионы и бозоны*	41
5.8. Элементарное квантовое состояние*	41
5.9. Связанные состояния*	42
Глава 6. Частицы как корпускулы и волны	43
6.1. Волновой вектор*	43
6.2. Волновая функция*	44
6.3. Амплитуда вероятности*	45
6.4. Роль случая при распадах*	45
6.5. Роль случая в опытах с двумя щелями	46
6.6. Соотношения неопределенности.	47
6.7. «Правильные» и «неправильные» вопросы*	47
6.8. Уравнение Шрёдингера	48

6.9. Уравнение Клейна–Фока–Гордона . . .	48
6.10. Уравнение Дирака	49
6.11. Действие	51
Глава 7. Опять про единицы	52
7.1. Единицы: эксперимент и теория*	52
7.2. О системе единиц СИ*	52
7.3. Электронвольт*	53
7.4. Единицы, в которых $c, \hbar = 1^*$	53
7.5. О выборе системы единиц*	54
Глава 8. Атом водорода	55
8.1. О потенциальной энергии*	55
8.2. Взаимодействие электрона и протона*	56
8.3. Главное квантовое число*	56
8.4. Масса квантового состояния*	57
8.5. Орбитальное квантовое число*	57
8.6. Проекции L и S*	58
8.7. Испускание и поглощение света*	58
Глава 9. Периодическая система химических элементов	59
9.1. От протонов к нуклонам*	59
9.2. Принцип Паули*	60
9.3. Горизонтальные периоды Таблицы элементов*	60
9.4. Первый период	61
9.5. Второй и третий периоды	61
9.6. Четвертый и пятый периоды	62
9.7. Шестой и седьмой периоды	62
9.8. 8 групп и 18 вертикальных столбцов Таблицы	63
Глава 10. Вещество	65
10.1. Молекулы*	65
10.2. Газы*	65

10.3. Число Лошмидта*	66
10.4. Температура*	66
10.5. Еще раз о мировых константах	67
10.6. Конденсированное вещество*	67
10.7. Кристаллизация	68
10.8. Фазовые переходы.	69
10.9. Сверхтекучесть и сверхпроводимость	69
10.10. Квазичастицы	70
Глава 11. Квантовая электродинамика	71
11.1. КЭД*	71
11.2. КЭД от Дирака до Фейнмана*	71
11.3. Лэмбовский сдвиг	71
11.4. Позитрон и другие античастицы*	72
11.5. Диаграммы Фейнмана*	72
11.6. Вспять во времени	74
11.7. Античастицы*	75
11.8. Позитроний*	76
11.9. Нормальный магнитный момент электрона	76
11.10. Аномальный магнитный момент электрона: $g - 2$.	77
11.11. Бегущая константа	77
11.12. Перенормируемость КЭД	78
Глава 12. Переход к классической теории	79
12.1. Частицы или поля?*	79
12.2. Квазиклассика и классический предел*	80
12.3. Напряженность поля и индукция.	80
12.4. Диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума*	81

Глава 13. Гравитация, Земля, Солнце, Галактика	82
13.1. Верх и низ*	82
13.2. Земля*	82
13.3. Внутреннее строение Земли*	83
13.4. Температура Земли*	83
13.5. Угол наклона земной оси*	84
13.6. Закон Ньютона*	84
13.7. Солнечная система*	84
13.8. Жизнь Солнца*	85
13.9. Звезды нашей Галактики*	86
13.10. Парсек	87
13.11. Сверхновые звезды	87
Глава 14. Другие галактики	89
14.1. Открытие галактик*	89
14.2. Разбегание галактик*	89
14.3. Красное и синее кинематическое смещение*	90
14.4. Гравитационное смещение*	90
14.5. Квазары и гамма-всплески.	91
Глава 15. Большой взрыв	92
15.1. Расширяющаяся Вселенная*	92
15.2. Остывающая Вселенная*	92
15.3. Космическое микроволновое излучение СМВ	93
15.4. Темная материя.	93
15.5. Темная энергия	94
Глава 16. Квантовая гравитодинамика	95
16.1. ОТО: три канонических эффекта*	95
16.2. Гравитон и КГД*	96
16.3. Неперенормируемость КГД	97

16.4. Гравитационный радиус и черные дыры.	98
16.5. Принцип эквивалентности?	99
16.6. Шкала Планка*	99
Глава 17. Внутрядерные силы.	101
17.1. Альфа-, бета- и гамма-лучи*	101
17.2. Сильное взаимодействие*	101
17.3. Изотопический спин	102
17.4. Слабое взаимодействие*	102
17.5. Нейтрино и четырехфермионное взаимодействие*	103
17.6. Деление ядер*	103
17.7. Слияние ядер*	104
17.8. От ядер к частицам*	104
Глава 18. Частицы в космических лучах	105
18.1. Позитрон*	105
18.2. Мюон*	105
18.3. Три пиона*	106
18.4. Странные частицы*	107
18.5. Странность	107
Глава 19. Частицы на ускорителях	109
19.1. Открытие барионных резонансов и антинуклонов*	109
19.2. Модель Сакаты	109
19.3. Модель трех сакатонов	110
19.4. Октет и синглет псевдоскалярных мезонов	111
19.5. Девять векторных мезонов	111
19.6. Октет барионов*	111
19.7. Декуплет барионов	112
19.8. ЦЕРН 1962	112
19.9. Три кварка*	112

Глава 20. Три дискретные симметрии	113
20.1. Операции C , P , T^*	113
20.2. Несохранение зеркальной симметрии P^*	114
20.3. Несохранение зарядовой симметрии C^*	115
20.4. Гипотеза о сохранении CP симметрии	115
20.5. Сохраняющийся векторный ток	115
20.6. $V-A$ ток и частицы с левой спиральностью	116
20.7. Спиральность и киральность*	117
20.8. Несохранение CP^*	117
20.9. Зеркальные частицы как первый вариант темной материи	117
Глава 21. Спустя полвека	119
21.1. Шесть кварков*	119
21.2. Шесть лептонов*	119
21.3. Три поколения*	119
21.4. Электрослабые бозоны*	120
21.5. Глюоны*	120
21.6. Все фундаментальные бозоны*	121
Глава 22. О квантовой хромодинамике	122
22.1. Цвет и $SU(3)$ симметрия*	122
22.2. Цветные кварки*	122
22.3. Цветные глюоны*	123
22.4. Конфайнмент*	123
22.5. Массы нуклонов	124
22.6. Киральный предел*	124
22.7. Массы пионов	125
22.8. Массы других кварков	125
22.9. КХД в физике коллайдеров	125

Глава 23. Об электрослабой теории . . .	126
23.1. Промежуточные бозоны*	126
23.2. Игрушечная модель $SU(2) \times U(1)$. . .	126
23.3. Фотон и Z -бозон в модели $SU(2) \times$ $\times U(1)$	127
23.4. Первый шаг к реалистичной модели	128
23.5. Второй и последний шаг	129
23.6. Дублет скалярных полей	130
23.7. Спонтанное нарушение симметрии $SU(2) \times U(1)$	130
23.8. Конденсат и массы фундаментальных частиц	131
23.9. Поиски хиггса*	132
23.10. Большой адронный коллайдер*	132
23.11. Лето 2011: результаты поисков хиггса	133
Глава 24. Суперсимметрия	134
24.1. Спинорный генератор	134
24.2. Спинорно-флейворные генераторы . . .	135
24.3. Лето 2011: Результаты поисков лег- ких суперчастиц	136
24.4. Перспективы	136
Глава 25. Великое объединение	137
25.1. Бег трех констант	137
25.2. $SU(5)$ -симметрия	138
25.3. Распад протона и нейтрона	138
25.4. Другие симметрии	139
Глава 26. Вблизи массы Планка	140
26.1. Суперструны	140
26.2. Десять измерений пространства	141
26.3. M -теория	142
26.4. Анти-де Ситтер	142

Глава 27. Заключительные замечания	144
27.1. «Солнце всходит и заходит»*	144
27.2. О преподавании физики*	145
27.3. О трагической судьбе SSC*	145
27.4. ЛНС и перспективы*	147
27.5. О сути и истине в науке*	148
Постскриптум 1	150
Постскриптум 2	152
Список литературы	153
Акронимы	158
Предметный указатель	159

Предисловие

1. Для кого написана эта книга

Эта книга посвящена основам («азам») физики — науки о природе (по-гречески фисис (*φυσις*) — природа). В XXI в. основой физики является так называемая Стандартная модель элементарных частиц, из которых по законам теории относительности и квантовой теории построено все сущее.

К сожалению, существующие введения в эти науки из-за их математической сложности недоступны не только школьникам, но и большинству преподавателей физики. Эта маленькая книжечка — попытка максимально просто и кратко изложить основы теории относительности (с ее главной константой c) и квантовой механики (с ее главной константой \hbar). Я отчетливо понимаю, что не могу написать ее так, чтобы она была понятна человеку, не знающему физики. Поэтому книжка адресована прежде всего профессиональным физикам (особенно молодым) в надежде на то, что кто-то из них использует изложенные в ней идеи при написании простых курсов современной физики и научно-популярных книг и статей.

В отличие от научно-популярных книг, эта книга широко использует математические формулы. Но в отличие от формул в университетских учебниках, форму-

лы, отобранные для этой книги, настолько просты, что для их понимания достаточно знания элементарной математики в объеме средней школы. Поэтому я уверен, что многие страницы книги будут понятны даже подросткам ¹⁾ и помогут тем из них, кто интересуется физикой, постепенно расширять свой научный кругозор. Для этого книга снабжена подробным указателем. Разумеется, из-за своего маленького формата путеводитель не может заменить учебника.

При очень больших скоростях поступательного движения, близких к скорости света c , и очень малых величинах, характеризующих вращательное и колебательное движение, близких к кванту Планка \hbar , элементарные частицы материи обладают совершенно необычными свойствами. Но именно необычность их свойств делает окружающий нас мир таким, каков он есть.

Одно из самых лучших научных описаний мира, основанных на теории относительности и квантовой механике, содержится в фундаментальных монографиях Вайнберга [1–3]. Чтобы рассказать о самом существенном в этих науках, мне пришлось не только отбирать самые простые формулы, но и отказаться от упоминания многих сложных понятий, разъяснению которых посвящены эти и многие другие курсы современной физики.

¹⁾ Соответствующие разделы помечены знаком *.

2. О содержании отдельных глав

В теории относительности фундаментальным является соотношение между энергией E , импульсом \mathbf{p} и массой m свободной частицы. Как подробно разъясняется в гл. 4, это соотношение позволяет с единой точки зрения понимать как свойства безмассовых частиц света — фотонов, так и свойства массивных частиц (масса которых отлична от нуля), например, электронов. Согласно квантовой механике, все частицы одного сорта, например, все электроны во Вселенной, абсолютно тождественны. Соответственно должны быть одинаковы их массы.

К сожалению, широко распространенное в научно-популярной литературе уравнение $E = mc^2$, интерпретируемое как зависимость массы частицы m от ее скорости v , дает ложное представление о том, что такое масса. Закрепляется это ложное представление тем, что массу называют массой покоя и обозначают m_0 , что разрывает связь между теорией относительности и механикой Ньютона, являющейся предельным случаем теории относительности при малых скоростях.

Фундаментальную роль в устройстве природы играет спин (т. е. собственный угловой момент) частицы. Как объясняется в гл. 5, величину спина обычно выражают в единицах \hbar . Частицы, спин которых равен целому числу \hbar , называются бозонами. Частицы, спин которых равен полуцелому числу \hbar , называются фермионами. Поведение

ние частиц в системе, состоящей из двух или большего числа фермионов, радикально не похоже на поведение частиц в системе, состоящей из двух или большего числа бозонов.

Как рассказано в гл. 9, свойства атомов в Периодической системе элементов определяются тем, что спин электрона равен $\frac{1}{2}\hbar$.

Спин фотона равен $1\hbar$. Электроны взаимодействуют друг с другом и с другими электрически заряженными частицами, обмениваясь фотонами. Теория взаимодействия фотонов с электронами называется квантовой электродинамикой (КЭД). КЭД является наиболее совершенной теорией, проверенной на опыте с точностью до десяти значащих цифр. Аналогично, обмен гравитонами — безмассовыми частицами со спином $2\hbar$ — объясняет гравитацию.

В отличие от изложения, принятого в большинстве учебников по квантовой механике, в основу нашего изложения положено не сравнительно сложное понятие волновой функции физической системы (например, атома), а гораздо более простое понятие элементарного квантового состояния этой системы (например, уровня атома), которое характеризуется значениями нескольких квантовых чисел. Смотрите гл. 5.

Как показано в гл. 6, это позволяет ввести амплитуду вероятности перехода между двумя квантовыми состояниями. Квадрат модуля амплитуды определяет вероятность перехода (распада возбужденного состояния

атома с испусканием фотона) для ансамбля одинаковых состояний. При этом распад конкретного атома — процесс абсолютно случайный, и момент времени, когда произойдет этот распад, в принципе предсказан быть не может. Такой подход устраняет многие трудности интерпретации квантовой механики, связанные с проблемой измерения (редукции волновой функции).

С другой стороны, он дает возможность выделить те квантовые аспекты, которые не связаны с процедурой измерения, и тем самым выйти за рамки представлений о квантовой механике как о науке, только связывающей результаты измерений.

Еще одно отличие этой книги заключается в том, что в ней обычное гравитационное взаимодействие рассматривается как квантовый процесс обмена гравитонами. Константа Ньютона G_N вместе с константами \hbar и c определяет так называемую массу Планка $m_P = (\hbar c/G_N)^{\frac{1}{2}} \approx 2,2 \cdot 10^{-5}$ грамм. Теория, описывающая гравитационное взаимодействие при энергиях порядка $m_P c^2$, пока не построена, но при всех доступных опыту энергиях правильность описания гравитации как обмена гравитонами подтверждается опытом. Смотрите гл. 16.

3. Два маяка

Я пишу эту книгу в надежде, что даже частичное знакомство с ней будет полезно молодым людям и поможет им найти свое

место в этом быстро меняющемся и во многом очень непонятном мире. Моя основная мысль заключается в том, что истина существует и к ней можно подойти гораздо ближе, чем это кажется многим. В физике есть несколько незыблемых и простых истин, доступных всем думающим людям. Эти истины добыты человечеством при изучении природы в основном в течение последних ста лет.

На первый взгляд, наука так разрослась, разветвилась и специализировалась, что усвоить ее основы неспециалисту, стремящемуся понять, как устроен мир, невозможно. Стремительное развитие интернета обрушивает на нас небывалые потоки информации и дезинформации. Разобраться в них нельзя, если не усвоить физический смысл констант c и \hbar . Эти две мировые константы, как две путеводные звезды, помогут Вам найти свой путь к пониманию природы. Выбор именно этих самых фундаментальных констант природы в качестве научных маяков позволит Вам постепенно находить единомышленников и устанавливать критерии истины в конкретных ситуациях.

Ньютон сравнивал себя с мальчиком, стоящим на берегу океана непознанного. С тех пор физика неизмеримо выросла, и область познанного стала огромной. Некоторые современные ученые считают, что область непознанного стала меньше области познанного. Не знаю, так ли это, но считаю очень важным отделить то, что твердо уста-

новлено, от того, что лишь кажется правдоподобным.

Необходимо отделять хорошо установленные и понятые явления и свойства (такие, например, как свойства атомов и их ядер или основные свойства Солнечной системы) от гораздо более сложных вопросов (таких, как возникновение Вселенной или поведение гравитационного взаимодействия на планковской шкале, где оно сильнее всех других взаимодействий). Такие теории, как механика Ньютона, электродинамика Максвелла, квантовая механика, теория относительности будут справедливыми всегда. Здесь возможны лишь такие прояснения, которые не меняют основных математических соотношений между физическими величинами, но уточняют область применимости этих соотношений и обосновывают выбор входящих в них величин. В отличие от этого, слишком далекие теоретические экстраполяции могут не подтвердиться дальнейшими измерениями.

Я благодарен Э. Г. Гуляевой и Б. Л. Окуню за неоценимую поддержку при написании этой книги, а проф. К. К. Фуа за приглашение опубликовать в издательстве World Scientific перевод книги на английский язык — ABC of Physics: A Very Short Guide — до того, как была начата работа над русским текстом.

Я благодарен также М. Я. Амусья, А. Е. Бондарю, М. Б. Волошину, С. И. Го-

дунову, Ю. Б. Данояну, Д. С. Денисову, А. Д. Долгову, Ю. М. Кагану, М. О. Карлинеру, А. Б. Кожевникову, О. В. Лычковскому, Н. А. Некрасову, М. Е. Пескину, Н. Г. Полухиной, Ж. М. Фреру, И. Б. Хриповичу, И. С. Цукерману и И. И. Цукерману, прочитавшим рукопись и сделавшим ряд очень полезных замечаний. Эти замечания помогли мне уточнить некоторые недостаточно продуманные формулировки.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации НШ-4172.2010.2, грантом РФФИ 10-02-01398 и контрактом № 02.740.11.5158 Министерства образования и науки Российской Федерации.

Москва,
Ноябрь 2011

Лев Окунь

Глава 1

ОСНОВЫ ОСНОВ

1.1. Об интуиции*

Цель этой книги — на ста с чем-то страницах объяснить, каким образом современная физика элементарных частиц позволяет понять, как устроен окружающий нас мир. В основе всего мироздания лежат две мировые константы: максимальная скорость прямолинейного равномерного перемещения c и минимальный квант вращательного и колебательного движения \hbar . Слова «прямолинейное равномерное» наводят на мысль о неограниченном, бесконечном движении в пространстве и о линейности времени (философия Запада). Вращение говорит нам о цикличности времени и ограниченности, финитности движения (философия Востока).

Я буду говорить не о философии, а о том, как физики количественно описывают свои наблюдения и опыты, опираясь на интуицию. Основная трудность современной физики заключается в том, что понятия максимальной скорости и минимального кванта для тех, кто не занимается фундаментальной физикой, крайне антиинтуитивны.

1.2. Пространство и время*

Наше пространство трехмерно: любой наблюдатель может представить себе систему координат — три взаимно ортогональных оси: сзади-вперед (x), слева-направо (y), снизу-вверх (z). Себя наблюдатель обычно помещает в начало координат.

Пусть наблюдатель следит за движущейся частицей. Положение частицы в момент времени t он характеризует радиусом-вектором \mathbf{r} с его тремя координатами: x , y , z . Систему координат плюс время t называют системой отсчета. Все точки в пространстве и времени равноправны: пространство и время однородны. Кроме того, пространство изотропно: тройку осей можно ориентировать произвольным образом. При этом модуль радиуса-вектора не меняется: $r \equiv |\mathbf{r}| = \text{const}$.

1.3. Материя и вещество*

Любое изменение в движении или поведении частицы — это акт проявления существования элементарных (т. е. самых маленьких и неделимых) частиц материи. Мы начнем с трех элементарных частиц материи: фотона γ , электрона e и протона p . Выясним сначала, как в результате их взаимодействия появляется простейший атом водорода. Затем рассмотрим другие атомы и, постепенно углубляясь, познакомимся с остальными элементарными частицами.

До сих пор в литературе нет единой точки зрения на то, что называть веществом, а что материей. Многие авторы называют материальными частицами только те частицы, у которых есть масса. Достаточно вспомнить термин «материальная точка», который широко используется многими авторами (см. например книгу Вайнберга [1]), когда речь идет о «массивных точках» — телах, размерами которых в той или иной задаче можно пренебречь. Фотоны для этих авторов — это частицы не материи, а радиации. Вопрос о том, что как называть, постепенно решится. Пока же я буду называть все частицы, включая фотоны, частицами материи. А веществом буду называть атомы и все, что построено из них.

1.4. Движение*

Движение — это перемещение частицы в пространстве. Если движение поступательное (т. е. равномерное и прямолинейное), то скорость \mathbf{v} перемещения определяется формулой $\mathbf{v} = \mathbf{r}/t$, где \mathbf{r} — пройденный путь, а t — время, затраченное на него. Определение скорости в случае произвольного движения будет дано немного позднее.

Глава 2

ЕДИНИЦЫ

2.1. Стандарты*

Всякое измерение есть сравнение того, что измеряют, с известным стандартом. Общепринятые стандарты, с которыми происходит сравнение, называют единицами.

2.2. Окружность и углы*

Углы измеряют в градусах (минутах и секундах) или в радианах. Угловой градус: (1°) — это угол, под которым из центра окружности видна дуга, равная длине окружности, деленной на 360 частей. Угловая минута: $1' = 1^\circ/60$. Угловая секунда: $1'' = 1'/60$. Как известно, отношение длины окружности к ее радиусу равно 2π , где $\pi \approx 3,14$. Один радиан = $360^\circ/2\pi \approx 57^\circ$ — это угол, отвечающий дуге, длина которой равна радиусу.

2.3. Единицы времени и длины*

Измерение времени производится сравнением с известными периодическими процессами. Исторически единицы времени связаны с суточным вращением Земли. Одни сутки = 24 часа. Один час = 60 минут. Одна минута = 60 секунд. Хотя в одном

часе, как и в одном угловом градусе, содержится 60 минут и 3600 секунд, но на этом сходство между угловыми и временными единицами заканчивается.

Измерение расстояния производится сравнением с известным эталоном длины. За единицу длины обычно принимают один метр.

Глава 3

МИНИМУМ МАТЕМАТИКИ

3.1. Царица, служанка и барьер*

Говорят, что математика является царицей и служанкой всех естественных наук. Она же является и мощным барьером при знакомстве с этими науками. Именно поэтому в научно-популярных книгах и статьях принято не пользоваться математическими обозначениями. Мне кажется, что объяснить современную физику без математики невозможно. Я постараюсь обойтись минимумом математических знаний. Но этот минимум необходим.

3.2. Четыре действия школьной математики и мнимая единица*

Для понимания законов природы нам понадобятся два типа арифметических действий: 1) сложение/вычитание, 2) умножение/деление; и два типа алгебраических действий: 3) возведение в степень и 4) логарифмирование. Последнее нам понадобится не скоро. Также необходимым будет понятие мнимой единицы $i = \sqrt{-1}$ и комплексного числа.

3.3. Степени десяти*

При изучении природы мы постоянно сталкиваемся с очень большими или очень маленькими числами, которые удобно изображать с помощью степеней десяти. Так, скорость света равна $3 \cdot 10^5$ км/с = 3×10^8 м/с, а размер атома порядка 10^{-10} м. В отличие от авторов научно-популярных книг, я не буду использовать выражения типа «тысячные миллионной доли», а буду писать 10^{-9} .

3.4. Префиксы степеней десяти

Многие физические термины включают в себя следующие префиксы:

Дека	10^1	da	Деци	10^{-1}	d
Гекто	10^2	h	Санتي	10^{-2}	c
Кило	10^3	k	Милли	10^{-3}	m
Мега	10^6	M	Микро	10^{-6}	μ
Гига	10^9	G	Нано	10^{-9}	n
Тера	10^{12}	T	Пико	10^{-12}	p
Пета	10^{15}	P	Фемто	10^{-15}	f
Экса	10^{18}	E	Атто	10^{-18}	a
Зетта	10^{21}	Z	Зепто	10^{-21}	z
Йотта	10^{24}	Y	Йокто	10^{-24}	y

3.5. Дифференцирование и интегрирование

При произвольном движении скорость движения определяется как производная от

расстояния по времени: $\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$. Величина dt означает достаточно маленькую («бесконечно малую») разность между двумя очень близкими моментами времени. Аналогичный смысл имеет $d\mathbf{r}$ — это разность между двумя близкими точками в пространстве. При этом бесконечно малое расстояние между двумя точками в пространстве делится на бесконечно малый промежуток времени, давая в результате конечную скорость движения. Эта операция называется дифференцированием. Интегрирование является операцией, обратной дифференцированию: $\mathbf{r} = \int \mathbf{v} dt$. Пока эти операции нам не понадобятся. Читателю, как знакомому с понятиями дифференцирования и интегрирования, так и не знакомому с ними, очень полезно время от времени заглядывать в замечательную книгу Якова Борисовича Зельдовича [4].

3.6. Матрицы

Еще при изучении квантовой механики нам придется познакомиться с матрицами. Особо важную роль играют матрицы Паули и матрицы Дирака.

Глава 4

ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

4.1. Свободная частица*

Представление о свободном теле или частице несомненно является идеализацией, абстракцией. Но исключительно плодотворной абстракцией. Свободной мы называем частицу, на которую не действуют внешние силы. Если она покоилась, то будет продолжать покоиться; если двигалась с некоторой скоростью, то будет продолжать двигаться по инерции с той же скоростью в том же направлении. То, что обычные тела вокруг нас останавливаются через некоторое время, обусловлено тем, что они не свободны, а тормозятся другими телами.

4.2. Максимальная скорость c^*

Замечательный результат последних двух-трех веков — установление того факта, что в природе существует максимальная скорость поступательного перемещения в пустоте, равная скорости света $c \approx 300\,000$ км/с (более точно $c = 299\,792\,458$ м/с; по существу это равенство связывает между собой определения метра и секунды).

4.3. Энергия и импульс частицы*

Прямолинейное и равномерное движение, каким является движение свободной частицы, характеризуется двумя сохраняющимися во времени величинами: ее энергией E и ее импульсом \mathbf{p} . Энергия является скалярной величиной, а импульс — векторной величиной, имеющей направление в пространстве. Сохранение энергии является следствием однородности времени, а сохранение импульса является следствием однородности пространства. Об этом в дальнейшем сказано более подробно.

Энергию обычно определяют как общую меру всех процессов, а импульс — как общую меру движения. Но эти определения недостаточно конкретны, чтобы с ними можно было работать. Все развитие математики и физики за последний век таково, что определения основных понятий становятся все более трудными, зато операции с ними и доказательства становятся все более легкими. Это в полной мере относится и к энергии и импульсу. По-видимому, оптимальный путь работы с ними заключается в том, чтобы выписать основные формулы для них и постепенно выяснять, как они согласуются с представлениями, привычными для читателя. Начнем с механики Ньютона.

4.4. Кинетическая и потенциальная энергия в механике Ньютона*

Кинетическая энергия свободного тела в механике Ньютона определяется как величина E_K :

$$E_K = m\mathbf{v}^2/2 = \mathbf{p}^2/2m. \quad (4.1)$$

Если тело не свободно, а находится в некотором силовом поле, то наряду с кинетической энергией E_K оно обладает потенциальной энергией U . Например, стоящая на столе кружка обладает потенциальной энергией, превышающей потенциальную энергию кружки на полу на величину $U = mgh$, где m — масса кружки, $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ — ускорение земного притяжения, а h — высота стола. При падении потенциальная энергия переходит в кинетическую, так что сумма обеих энергий $E = U + E_K$ остается неизменной. Аналогичным образом мельчайшая электрически заряженная частица — электрон — пройдя разность потенциалов в один вольт, изменит свою кинетическую энергию на один электронвольт: эВ.

4.5. Импульс в механике Ньютона*

Термин импульс имеет много различных смыслов, но нас будут интересовать два: 1) кратковременный толчок, приводящий тело в движение; 2) векторная величина \mathbf{p} , имеющая три компоненты p_x, p_y, p_z и ха-

рактически движущееся тело. Как было осознано Галилеем и Ньютоном, свободное изолированное тело, получившее импульс, двигалось бы в пустоте равномерно и прямолинейно неограниченно долго. (То, что в нашей каждодневной жизни импульс тел не сохраняется и тела не движутся неограниченно долго, а рано или поздно останавливаются, обусловлено воздействием на них других тел.)

В механике Ньютона импульс тела связан с его скоростью соотношением $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$.

Положение тела \mathbf{r}' в момент t связано с его положением \mathbf{r} в момент $t = 0$ преобразованием ¹⁾ Галилея :

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} + \mathbf{v}t. \quad (4.2)$$

Это преобразование явно исходит из молчаливого предположения о том, что время t не зависит от системы отсчета. Как мы увидим сейчас, это предположение противоречит существованию в природе предельной скорости движения.

Действительно, если тот же самый первоначальный импульс придать в 10 раз более легкому телу, то его скорость была бы в 10 раз больше, и за тот же самый отрезок времени оно прошло бы в 10 раз больший путь.

¹⁾ Здесь речь идет об активном преобразовании, когда меняется положение объекта, а не система координат.

Повторим теперь операцию по уменьшению массы частицы в 10 раз. Теперь ее скорость в механике Ньютона выросла бы в 100 раз. В механике Ньютона эту операцию можно производить все с тем же десятикратным увеличением скорости неограниченное число раз. Но примите во внимание, что в природе существует предельная скорость $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Тогда задолго до приближения к этому пределу приращение скорости должно начать уменьшаться. Должно измениться также и приращение кинетической энергии. И, следовательно, механика Ньютона должна уступить место какой-то иной механике. Ее называют релятивистской механикой или теорией относительности Эйнштейна. Основной вклад в ее создание внесли последовательно Лоренц, Пуанкаре, Эйнштейн и Минковский. Механика Ньютона (нерелятивистская механика) является частным случаем теории относительности при скоростях тел, малых по сравнению со скоростью света.

4.6. Пространство и время в релятивистской механике*

Итак, когда скорость тела приближается к максимальному значению c , нерелятивистская механика Ньютона становится совершенно неприменимой и должна уступить место релятивистской механике.

Преобразования координат Галилея были заменены на преобразования Лоренца:

$$\begin{aligned}\mathbf{r}' &= \gamma(\mathbf{r} + \mathbf{v}t), \\ t' &= \gamma(t + \mathbf{r}\mathbf{v}/c^2),\end{aligned}\quad (4.3)$$

где

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}. \quad (4.4)$$

Нетрудно видеть, что при $v/c \rightarrow 0$ преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея, в которых $t' = t$. Из преобразований Лоренца следовало, что при движении тела меняются не только его пространственные координаты, но и его временная координата. Как заметил Минковский, введший понятие четырехмерного пространства, ct и \mathbf{r} становятся компонентами одного четырехмерного вектора. Разность квадратов его временной и пространственной компонент определяет инвариантную величину, которую называют квадратом интервала s :

$$s^2 = c^2t^2 - \mathbf{r}^2. \quad (4.5)$$

Четырехмерное пространство в отличие от обычного трехмерного пространства называют не евклидовым, а псевдоевклидовым, поскольку инвариантна в нем не сумма, а разность квадратов. Заметим, что разность легко превратить в сумму, если вместо t рассмотреть it . В силу изотропности такого пространства Минковского, величина четырехмерного интервала s , определяемого формулой (4.5), не меняется не только при вращениях в трех пространственных

плоскостях xy , yz , zx , но и в трех пространственно-временных плоскостях xt , yt , zt . Как нетрудно увидеть, три последних «мнимых вращения» отвечают равномерным и прямолинейным движениям вдоль осей x , y , z .

4.7. Энергия и импульс в релятивистской механике*

Аналогично, в силу изотропности четырехмерного пространства, энергия и импульс частицы, E/c и \mathbf{p} , образуют четырехмерный вектор энергии-импульса, или, как говорят иначе, 4-импульс. Квадрат этого 4-импульса равен квадрату массы частицы, умноженному на c^2 :

$$m^2 c^2 = E^2/c^2 - \mathbf{p}^2. \quad (4.6)$$

То, что предложил более века тому назад Эйнштейн, для свободного тела с ненулевой массой m можно свести к простой формуле:

$$E = E_0 + E_K, \quad (4.7)$$

если наряду с понятием кинетической энергии E_K ввести также понятие энергии покоя $E_0 = mc^2$ и понятие полной энергии свободного тела E .

Скорость свободной частицы связана при этом с ее импульсом и энергией соотношением

$$\mathbf{p} = \mathbf{v}E/c^2. \quad (4.8)$$

Или, по-иному,

$$\mathbf{v} = \mathbf{p}c^2/E. \quad (4.9)$$

Так что с ростом полной энергии тела прирост его скорости становится все меньше, и она стремится к предельной величине c . Но это означает, что формула Ньютона для кинетической энергии (4.1) становится неприменима при $|\mathbf{v}| \approx c$.

Замечательным свойством формул (4.6)–(4.9) является то, что они применимы не только к массивным частицам, но и к сколь угодно легким частицам, и к частицам с массой, равной нулю.

4.8. Масса частицы*

Возникает и другой взгляд на массу тела или частицы. Все частицы данного типа (например, все электроны) абсолютно тождественны и имеют одну и ту же массу m . Для свободной частицы

$$m^2 = E^2c^{-4} - \mathbf{p}^2c^{-2}. \quad (4.10)$$

4.9. Энергия покоя*

Если свободная частица покоится, то энергия покоя этой частицы дается формулой

$$E(\mathbf{p} = 0) \equiv E_0 = mc^2. \quad (4.11)$$

Если частица движется медленно, то для нее $E \approx E_0$ и из формул (4.7) и (4.8) следует приближенное равенство $\mathbf{p} \approx m\mathbf{v}$, кото-

рое в ньютоновской физике приобретает вид $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$.

4.10. Безмассовый фотон*

Из астрономических наблюдений следует, что масса фотона очень мала: $m_\gamma < < 10^{-54}$ г. Поэтому принято считать, что масса фотона равна нулю. Тогда из уравнения (4.6) следует, что абсолютная величина импульса фотона прямо пропорциональна его энергии: $|\mathbf{p}| = E/c$, а из уравнения (4.9) — что его скорость всегда равна c . Свободный фотон покоиться не может, он всегда летит со скоростью света.

4.11. Массы электрона и протона*

Масса электрона m_e известна сейчас с точностью до стомиллионных долей (10^{-8}) и равна примерно $9 \cdot 10^{-28}$ г. Масса протона, известная со сравнимой точностью, примерно в две тысячи раз больше, чем масса электрона: $m_p \approx 1,7 \cdot 10^{-24}$ г.

Глава 5

ВРАЩЕНИЕ И КВАНТОВАНИЕ

5.1. Спиновое и орбитальное вращение*

Известны два типа вращения элементарных частиц: спиновое и орбитальное.

Спиновое (собственное) вращение существует у частицы независимо от того, как она перемещается в пространстве. Оно подобно вращению Земли вокруг своей оси. Спиновое вращение характеризуется величиной спинового углового момента \mathbf{S} .

Орбитальное вращение частицы похоже на вращение Земли вокруг Солнца. Оно характеризуется величиной орбитального углового момента \mathbf{L} , который равен векторному произведению радиуса-вектора \mathbf{r} от центра вращения до частицы и \mathbf{p} — импульса частицы:

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}, \quad (5.1)$$

или в компонентах:

$$\begin{aligned} L_x &= yp_z - zp_y, \\ L_y &= zp_x - xp_z, \\ L_z &= xp_y - yp_x. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Легко проверить, что если вектор \mathbf{r} параллелен вектору \mathbf{p} , то $\mathbf{L} = 0$. Во всех остальных конфигурациях $\mathbf{L} \neq 0$. Полный угловой

момент равен сумме орбитального и спинного: $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$.

Угловой момент называют псевдовектором или аксиальным вектором, поскольку при зеркальном отражении он, в отличие от обычных (полярных) векторов \mathbf{r} и \mathbf{p} , знака не меняет. Для \mathbf{L} это сразу же видно из приведенного выше определения.

Сохранение углового момента изолированной совокупности частиц обусловлено изотропией пространства: в пустом пространстве нет выделенного направления.

5.2. О векторах и тензорах

В трехмерном пространстве скалярное произведение двух векторов представляет собой скаляр, векторное произведение двух векторов представляет собой антисимметричный тензор (он же аксиальный вектор), имеющий три компоненты. Симметричный тензор, построенный из двух векторов, как нетрудно видеть, имеет 5 компонент, а не 6, поскольку не содержит скаляра: $3 \times 3 = 1 + 3 + 5$.

5.3. Орбитальный момент в теории относительности

В теории относительности три компоненты (5.2) являются частью антисимметричного четырехмерного тензора, три дру-

гие компоненты которого имеют вид:

$$\begin{aligned} N_x &= ctp_x - xE/c, \\ N_y &= ctp_y - yE/c, \\ N_z &= ctp_z - zE/c, \end{aligned} \quad (5.3)$$

или в векторной форме

$$\mathbf{N} = c\mathbf{t}\mathbf{p} - \mathbf{r}E/c. \quad (5.4)$$

Если векторы \mathbf{r} и \mathbf{p} не параллельны друг другу, то $\mathbf{N} \neq 0$. Если векторы \mathbf{r} и \mathbf{p} параллельны друг другу, то из (5.4) следует

$$c\mathbf{t}\mathbf{p} = \mathbf{r}E/c. \quad (5.5)$$

В случае поступательного движения $\mathbf{v} = \mathbf{r}/t$, и мы получаем формулы (4.8) и (4.9).

5.4. Тождественность частиц*

Все элементарные частицы данного типа (например, все электроны) абсолютно тождественны. (В частности, абсолютно одинаковы их массы.) Отсюда тождественность всех атомов данного сорта.

5.5. Квантование \mathbf{S} и \mathbf{L}^*

Замечательным свойством природы является то, что вращение квантовано. В первую очередь, это проявляется в том, что квантованы должны быть проекции орбитального углового момента и спина электрона на некую пространственную ось z . Проекции L_z и S_z могут принимать только эквидистантные значения с шагом \hbar , где $\hbar = h/2\pi$, а h — квант действия,

введенный в физику в начале XX века Планком при установлении спектра излучения черного тела. Максимальные значения L_z и S_z равны $L_z^{\max} = l\hbar$ и $S_z^{\max} = s\hbar$, где l и s называют орбитальным квантовым числом и спиновым квантовым числом соответственно.

Движение и взаимодействие частиц в условиях, когда квантование абсолютно существенно, описывается не механикой Ньютона, а квантовой механикой. Это относится не только к теории элементарных частиц, теории атомов, теории атомных ядер, но и к теории молекул, теории конденсированного состояния.

Согласно квантовой механике, квадрат орбитального углового момента \mathbf{L} должен удовлетворять соотношению

$$\mathbf{L}^2 = \hbar^2 l(l+1), \quad (5.6)$$

где $l = 0, 1, 2, \dots$ — орбитальное квантовое число. Каждому значению l соответствует $2l + 1$ проекций на некоторую ось в пространстве: 1, 3, 5, См. выше раздел 5.2.

5.6. Еще о спине*

Хочется сказать, что элементарные частицы похожи на малюсенькие волчки. Но обычный волчок может и не вращаться, а элементарная частица, если ее спин отличен от нуля, не вращаться не может. Спин отличается от углового момента орбитального движения тем, что спин имеется и у

абсолютно свободной частицы, не совершающей орбитального вращения. Спин частицы играет ключевую роль при образовании систем, содержащих много частиц.

5.7. Фермионы и бозоны*

Все частицы делятся на два больших класса: фермионы (с полуцелым спином s) и бозоны (с целым спином s). Электрон, спин которого равен $\frac{1}{2}$, является фермионом. Фотон, спин которого равен единице, является бозоном. Системы, состоящие из двух или большего числа одинаковых частиц, радикально не похожи друг на друга в зависимости от того, являются ли эти частицы фермионами или бозонами. В данном квантовом состоянии не может быть больше одного фермиона. В данном квантовом состоянии может быть сколь угодно много бозонов.

5.8. Элементарное квантовое состояние*

Очень важным в квантовой механике является понятие элементарного квантового состояния. Элементарное квантовое состояние свободной частицы полностью характеризуется ее импульсом и ориентацией ее спина. Элементарное квантовое состояние связанной частицы полностью характеризуется несколькими квантовыми числами (см. ниже). Высказанное выше утверждение о

тождественности атомов относится, разумеется, к изолированным атомам, находящимся в одинаковых элементарных квантовых состояниях. В дальнейшем я буду для краткости говорить просто о состоянии, хотя наверное лучше было бы вместо слов элементарное квантовое состояние ввести какой-то новый специальный термин, поскольку слово состояние имеет в квантовой механике около дюжины различных смыслов.

5.9. Связанные состояния*

Связанное состояние двух частиц с массами m_1 и m_2 характеризуется массой этого состояния $m = m_1 + m_2 - \varepsilon/c^2$, где ε — энергия связи. Величина ε/c^2 называется дефектом массы. В случае связанного состояния любого числа частиц ε — это минимальная энергия, которую необходимо затратить, чтобы освободить друг от друга все частицы.

Глава 6

ЧАСТИЦЫ КАК КОРПУСКУЛЫ И ВОЛНЫ

6.1. Волновой вектор*

Константа \hbar играет важнейшую роль не только во вращении элементарных частиц, но и во всем их поведении. Дело в том, что элементарные частицы, в отличие от обычных частиц (корпускул) классической механики, являются своеобразными «кентаврами», обладающими одновременно и свойствами корпускул, и свойствами волн.

В квантовой механике состояние свободной частицы характеризуется определенным значением волнового вектора \mathbf{k} , связанного с импульсом частицы \mathbf{p} соотношением де Бройля:

$$\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}. \quad (6.1)$$

Величина $k = |\mathbf{k}|$ называется волновым числом. Она связана с длиной волны λ соотношением

$$k = 2\pi/\lambda. \quad (6.2)$$

В пределе, когда длина волны становится пренебрежимо малой, мы возвращаемся к классической механике или геометрической оптике. (Разумеется, речь идет о явлениях, в которых несущественна интерференция.)

Формула, аналогичная (6.1), связывает энергию частицы E и присущую ей (ее волне) круговую частоту ω :

$$E = \hbar\omega. \quad (6.3)$$

(Частота ν связана с круговой частотой ω соотношением $\nu = \omega/2\pi$.)

6.2. Волновая функция*

Обычно знакомство с квантовой механикой начинают не с понятия квантового состояния, а с понятия амплитуды вероятности или волновой функции: $\psi(\mathbf{r}, t)$, где $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$ — это вероятность того, что частица имеет данное значение \mathbf{r} в момент времени t . При этом, однако, у многих возникает совершенно ложное впечатление, что в квантовой механике, в отличие от классической механики, все имеет вероятностный характер. На самом же деле, как мы убедимся, квантовая механика во многих отношениях несравнимо более жестка, чем классическая. Наиболее наглядно эта жесткость проявляется в строении Периодической таблицы химических элементов, для понимания которой достаточно лишь квантовых состояний, а понятие вероятности не нужно. Именно поэтому знакомство с параграфами 6.8–6.10 этой главы, описывающими волновые уравнения, для понимания Периодической системы не нужно.

6.3. Амплитуда вероятности*

В течение более двадцати лет квантово-механические амплитуды вероятности вычислялись только путем решения волновых уравнений, о которых более подробно будет сказано ниже в этой главе. Этот путь требует введения таких понятий, как гильбертово пространство и операторы, действующие в этом пространстве. Именно так и излагается квантовая механика в большинстве учебников.

В этой книжке я попытаюсь обойтись без этих понятий, используя диаграммы, которые придумал Фейнман в середине XX века для расчета амплитуд вероятности. С этими диаграммами мы познакомимся в главе, посвященной квантовой электродинамике КЭД. Их широко используют для расчета вероятностей различных процессов.

6.4. Роль случая при распадах*

Процессы распада элементарных частиц, атомных ядер и излучения фотонов атомами характеризуются величиной времени жизни τ , разумеется, разной для разных процессов. За время τ число нераспавшихся частиц (ядер, атомных уровней) уменьшается в $e \approx 2,7$ раз. (Часто вместо времени жизни используют время полураспада $\tau_{1/2}$, за которое число нераспавшихся частиц уменьшается в два раза: $\tau_{1/2} = \tau \ln 2 \approx 0,7\tau$.) На основе квантовой механики и теории отно-

сительности мы можем с высокой степенью точности предсказать величину τ , но когда распадется конкретная частица, мы в принципе предсказать не можем. Тут властвуют случай и описывающая случайные явления теория вероятностей.

6.5. Роль случая в опытах с двумя щелями

В формировании квантовой механики важную роль сыграло установление волновых свойств у микроскопических частиц, проходящих через две щели первого экрана и создающих интерференционную картину на стоящем за ним втором экране. Картина эта тем точней, чем большее число частиц прошло через щели. При этом частицы могут проходить поодиночке, что доказывает наличие у индивидуальной частицы волновых свойств. А вот предсказать точку на втором экране, куда попадет данная частица, абсолютно невозможно. Тут опять властвует случай. Многие авторы, пишущие о квантовой механике, не сознают этого обстоятельства и пытаются оперировать классическим понятием траектории. Так была создана и обсуждается до сих пор теоретическая интерпретация квантовой механики как науки, описывающей сосуществование множества различных миров.

6.6. Соотношения неопределенности

В квантовой механике важную роль играют соотношения неопределенности Гейзенберга:

$$\begin{aligned}\Delta E \Delta t &\geq \hbar/2, \\ \Delta p_x \Delta x &\geq \hbar/2, \\ \Delta p_y \Delta y &\geq \hbar/2, \\ \Delta p_z \Delta z &\geq \hbar/2.\end{aligned}\tag{6.4}$$

Эти соотношения устанавливают связь между неопределенностями, с которыми можно измерять энергию частицы и время ее наблюдения, или импульс и координату частицы.

6.7. «Правильные» и «неправильные» вопросы*

Квантовая механика несравнимо жестче классической в ответах на «правильные» вопросы. И имеет только вероятностные ответы на «неправильные» вопросы. Пример правильного вопроса: «Какие квантовые числа имеет частица в данном состоянии?» Примером неправильных вопросов (в силу соотношения неопределенностей) являются вопросы «Где находится свободная частица с определенным импульсом?» или «Какова траектория частицы?» В результате такие очень важные понятия классической физики, как место в мире (в четырехмерном пространстве–времени) и величина поля, при-

обретают вероятностный, «размытый» характер.

6.8. Уравнение Шрёдингера

Волновая функция в нерелятивистском пределе удовлетворяет волновому уравнению Шрёдингера:

$$i\frac{\partial\psi}{\partial t} = \hat{H}\psi, \quad (6.5)$$

где \hat{H} — оператор Гамильтона, называемый гамильтонианом, равен сумме операторов кинетической и потенциальной энергий. Для заряженной частицы в электромагнитном поле ϕ , \mathbf{A} он имеет вид:

$$\hat{H} = \frac{1}{2m}(\hat{\mathbf{p}} - e\hat{\mathbf{A}})^2 + e\phi, \quad (6.6)$$

где $\hat{\mathbf{p}} = -i \cdot \partial/\partial\mathbf{r}$ — оператор импульса. Волновая функция ψ представляет собой совокупность (линейную суперпозицию) всех возможных квантовых состояний данной физической системы.

6.9. Уравнение Клейна–Фока–Гордона

Уравнение для релятивистской бесспиновой частицы было установлено в 1926 г. Клейном, Фоком и Гордоном. Для свободной частицы оно имеет вид

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} + m^2 \right) \psi = 0. \quad (6.7)$$

В четырехмерных обозначениях оно может быть записано в виде

$$\left(\frac{\partial}{\partial x^\mu} \frac{\partial}{\partial x_\mu} + m^2 \right) \psi = 0. \quad (6.8)$$

Здесь x^μ — контравариантный четырехмерный вектор, а x_μ — ковариантный четырехмерный вектор. По повторяющимся («немым») индексам подразумевается суммирование: $x_\mu = g_{\mu\nu} x^\nu$, где $g_{\mu\nu}$ — метрический тензор плоского пространства.

Релятивистски инвариантная волновая функция бесспиновой заряженной частицы в электромагнитном поле $A_\mu = (\phi, \mathbf{A})$ удовлетворяет уравнению

$$\left(\left(\frac{\partial}{\partial x^\mu} - ieA_\mu \right) \left(\frac{\partial}{\partial x_\mu} - ieA^\mu \right) + m^2 \right) \psi = 0. \quad (6.9)$$

6.10. Уравнение Дирака

Релятивистская волновая функция для свободной частицы со спином $\frac{1}{2}$ удовлетворяет уравнению Дирака:

$$(\hat{p} - m)\psi = 0, \quad (6.10)$$

где $\hat{p} = p_\mu \gamma^\mu = i \frac{\partial}{\partial x^\mu} \gamma^\mu$, а γ^μ — четыре матрицы Дирака размерностью 4×4 :

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 \gamma^1 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 \gamma^2 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 \gamma^3 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{6.11}$$

Эти матрицы Дирака можно компактно выразить через 2×2 матрицы, одна из которых трехмерный скаляр:

$$\mathbf{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

а три других матрицы, называемые матрицами Паули, являются компонентами трехмерного вектора $\boldsymbol{\sigma}$:

$$\sigma^1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma^2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \tag{6.12}$$

Так что:

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} \mathbf{1} & 0 \\ 0 & -\mathbf{1} \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\gamma} = \begin{pmatrix} 0 & \boldsymbol{\sigma} \\ -\boldsymbol{\sigma} & 0 \end{pmatrix}. \tag{6.13}$$

В дальнейшем (в гл. 20) нам понадобится также матрица $\gamma^5 = -i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$, которая,

как нетрудно проверить, имеет вид

$$\gamma^5 = - \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (6.14)$$

6.11. Действие

Среди всех физических величин имеется одна, занимающая центральное положение в физике. Эта величина — действие S . Центральная роль действия в физике обусловлена существованием фундаментального закона физики — принципа наименьшего действия. Этот принцип был впервые сформулирован Ферма. Но только в XX веке стала ясна универсальная и ключевая роль действия в физике.

В простейшем случае действие свободной частицы, пролетевшей за время t от начала координат до точки \mathbf{r} , определяют как

$$S = -Et + \mathbf{p}\mathbf{r}. \quad (6.15)$$

Если свободная частица покоится, то действие для нее равно $S = -E_0t = -mc^2t$.

Решение волнового уравнения можно представить в виде

$$e^{iS/\hbar}. \quad (6.16)$$

Дальнейшее обсуждение S лежит за пределами этой маленькой книжечки. Прекрасное объяснение физического смысла принципа наименьшего действия содержится в Фейнмановских лекциях [5].

Глава 7

ОПЯТЬ ПРО ЕДИНИЦЫ

7.1. Единицы: эксперимент и теория*

Разговор о единицах кажется здесь неуместным, но он необходим, потому что физика — это не только теоретическая, но и прежде всего экспериментальная наука: теория упорядочивает факты, установленные экспериментально. Согласно экспериментам, $\hbar = 1,054\,571\,628(53) \times 10^{-34}$ Дж·с, где 1 Дж означает один джоуль, а 1 с — одну секунду, а цифры в скобках (53) дают экспериментальную неопределенность в последних значащих цифрах.

7.2. О системе единиц СИ*

Первое Международное соглашение об установлении системы единиц СИ было заключено в XIX веке в ответ на запросы торговли, техники и науки. В системе СИ единица энергии один джоуль равна $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \times \text{с}^{-2}$. Другое определение джоуля в системе СИ через кулон и вольт: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Кл} \times 1 \text{ В}$. Совершенно очевидно, что ни килограмм, ни джоуль, ни кулон не являются

удобными единицами при обсуждении элементарных частиц.

7.3. Электронвольт*

В экспериментальной физике элементарных частиц за единицу энергии принята энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов один вольт. Эта единица называется один электронвольт — 1 эВ. Используются также производные этой единицы: милли-, кило-, мега-, гига-, тераэВ ($1 \text{ мэВ} = 10^{-3} \text{ эВ}$, $1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ}$, $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$, $1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$, $1 \text{ ТэВ} = 10^{12} \text{ эВ}$). Учитывая, что заряд электрона составляет $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, получим, что $1 \text{ Дж} = 6,2 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$. Откуда $\hbar = 6,582\,118\,99(16) \cdot 10^{-16} \text{ эВ} \cdot \text{с}$.

7.4. Единицы, в которых $c, \hbar = 1^*$

В физике элементарных частиц часто используется система единиц, в которой в качестве единицы скорости принята скорость света c , а в качестве единицы углового момента и действия — \hbar . При этом все уравнения очень упрощаются, так как в них можно и нужно положить $c, \hbar = 1$. В единицах, где $c = 1$, энергия, импульс и масса имеют одну и ту же размерность. В частности, масса частиц выражается в электронвольтах: $1 \text{ эВ} = 1,78 \cdot 10^{-36} \text{ кг}$, $m_e = 0,51 \text{ МэВ}$, $m_p = 938 \text{ МэВ} \approx 0,9 \text{ ГэВ}$. Также одну и ту же размерность имеют \mathbf{r} и t .

7.5. О выборе системы единиц*

Выбор системы единиц при решении той или иной физической задачи определяется вопросами удобства. Система единиц $c, \hbar = 1$ наиболее удобна при рассмотрении основополагающих вопросов в квантово-релятивистской физике. Поэтому знание ее необходимо всем, кто хочет понимать современную физику. Однако это знание отнюдь не подразумевает, что эта система единиц удобна всегда, например, в классическом или нерелятивистском пределах.

Глава 8

АТОМ ВОДОРОДА

8.1. О потенциальной энергии*

Известно, что самый легкий из атомов — атом водорода — состоит из протона и электрона. Масса атома водорода определяется в основном массой протона m_p , все остальные свойства определяются массой электрона m_e и его электрическим зарядом $-e$, который равен по абсолютной величине и противоположен по знаку заряду протона $+e$. Потенциальная энергия притяжения электрона и протона, находящихся друг от друга на расстоянии r , равна

$$U = -e^2/r = -\alpha\hbar c/r. \quad (8.1)$$

Ключевую роль в теории атома играет безразмерная величина $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137$. (Напомним, что $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл (см. 7.3), но мы не пользуемся системой СИ (см. 12.4).)

Заметим, что потенциальная энергия электрона зависит только от его положения, но не от его скорости. Потенциальную энергию можно ввести только в нерелятивистском приближении.

8.2. Взаимодействие электрона и протона*

Механизм взаимодействия электрона и протона заключается в том, что они обмениваются друг с другом фотонами. (Это будет разъяснено более подробно в дальнейшем.) При этом следует различать две ситуации: упругую и неупругую. В первом случае две свободные частицы сближаются, их исходные импульсы изменяются за счет их взаимодействия, и они разлетаются навсегда, чтобы больше никогда не встретиться, если не вмешаются окружающие частицы. Во втором случае электрон и протон образуют связанную систему и не смогут разлететься. Первый тип движения называют инфинитным, второй — финитным, так как движение происходит в конечной области пространства. (Чтобы из упругой, свободной ситуации перейти к неупругой, связанной, достаточно электрону испустить фотон, отдав ему излишнюю энергию. Обратный процесс, когда связанный электрон, поглотив фотон, становится свободным, называется ионизацией атома.)

8.3. Главное квантовое число*

Поведение связанных электрона и протона определяется законами квантовой механики. Их энергия связи ε может принимать лишь определенные (квантованные) значения. В наинишем приближении по α

энергия связи имеет вид:

$$\varepsilon_n = m_e c^2 \alpha^2 / 2n^2, \quad (8.2)$$

где n — так называемое главное квантовое число, которое может принимать только целочисленные значения от 1 до бесконечности. Чем больше n , тем меньше энергия связи в атоме и тем легче эту связь разорвать. Энергия связи электрона в основном состоянии атома водорода равна $\varepsilon_1 = m_e c^2 \alpha^2 / 2 = 13,6$ эВ. Она называется энергией Ридберга.

8.4. Масса квантового состояния*

Следует подчеркнуть, что ни определенного значения кинетической энергии, ни определенного значения потенциальной энергии квантовое состояние не имеет. Оно имеет только определенное значение полной энергии покоя данного состояния, или его массы. Так, масса основного состояния атома водорода равна $m_H = m_p + m_e - \varepsilon_1 / c^2$.

8.5. Орбитальное квантовое число*

Наряду с главным квантовым числом n , состояние электрона зависит также от его орбитального квантового числа l , причем $l \leq n - 1$. Орбитальное квантовое число характеризует орбитальный угловой момент электрона. Следует подчеркнуть, что представление о том, что электрон движется по орбите подобно, скажем, планете, справедливо (и то лишь приближенно) лишь при

очень больших значениях $l \gg 1$. При $l = 0$ электрон похож скорее на сферически симметричное облачко, чем на классическую частицу. Такие понятия, как положение в пространстве \mathbf{r} , импульс \mathbf{p} и скорость \mathbf{v} к нему неприменимы. Подчеркнем, что в наименьшем приближении по α масса состояния в атоме водорода зависит только от главного квантового числа n , а от других квантовых чисел (и в частности l) не зависит.

8.6. Проекция \mathbf{L} и \mathbf{S}^*

Наряду с квантовыми числами n и l состояние электрона в атоме описывается еще двумя другими квантовыми числами, характеризующими проекции орбитального углового момента и спина электрона на некую пространственную ось z . Проекция орбитального квантового числа может принимать $2l + 1$ значений: $l_z = l, l - 1, l - 2, \dots - l + 2, -l + 1, -l$; а проекция спина — два значения: $s_z = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$. Обычно направление оси z определяется внешним магнитным полем, в которое помещен атом. (Часто величину l_z обозначают буквой m_l , а величину $s_z - m_s$.)

8.7. Испускание и поглощение света*

Обычно переход атома из более возбужденного состояния в менее возбужденное или основное состояние сопровождается излучением фотона, а обратный переход происходит при поглощении фотона.

Глава 9

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

9.1. От протонов к нуклонам*

Элементарные знания по квантовой механике позволяют просто понять основные закономерности Таблицы Менделеева в ее современном виде (см., например, [6]) .

Понять устройство атомов более тяжелых, чем водород, с помощью только трех частиц (e, γ, p) нельзя, так как их ядра содержат наряду с протонами также и нейтроны. Нейтрон — это электрически нейтральная частица с массой, близкой к массе протона: $m_n - m_p \approx 1,29$ МэВ. Наличие нейтронов в атомных ядрах очень существенно для ядерной физики, но в значительно меньшей степени существенно для атомной физики. Ведь атомные свойства изотопов — элементов, содержащих в ядрах одинаковое число протонов, но разное число нейтронов, очень похожи.

В ситуациях, когда различия между протонами и нейтронами несущественны, их называют общим термином «нуклоны». Полное число нуклонов в ядре обозначают буквой A . Именно оно определяет массу ядра. Полное число протонов в ядре обозначают буквой Z . Именно оно определяет заряд

ядра. Поскольку атом электрически нейтрален, то число электронов в атоме тоже равно Z .

9.2. Принцип Паули*

Ключевую роль в строении атомов играет принцип Паули. Как уже отмечалось, спин электрона равен $\frac{1}{2}$. Электроны подчиняются принципу Паули, согласно которому в данном квантовом состоянии может находиться не более одного электрона.

9.3. Горизонтальные периоды Таблицы элементов*

Чтобы понять, как устроена периодическая система элементов, необходимо осознать, что состояние электрона в атоме описывается четырьмя квантовыми числами: 1) главным n , 2) орбитальным l , 3) его проекцией m_l , 4) проекцией спина m_s . Напомним, что главное число n может принимать целочисленные значения $1, 2, 3, \dots$. Орбитальное число l может принимать целочисленные значения от 0 до $n - 1$. Состояния с $l = 0, 1, 2, 3$ обозначают соответственно s, p, d, f . Проекция m_l может принимать $2l + 1$ значений от $-l$ до $+l$. Проекция спина m_s может принимать два значения: $-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$.

Заметим, что названия оболочек s, p, d, f возникли намного раньше, чем возникло представление об атомах и электронах. Этими буквами обозначали в XIX веке

термы оптических спектров различных химических элементов. Частота любой спектральной линии может быть представлена как разность двух термов. Здесь возможно уместно упомянуть, что о существовании гелия узнали в 1868 г., изучая спектры солнечных протуберанцев.

9.4. Первый период

Первый период периодической системы (у которого есть только одна электронная оболочка, $1s$) состоит из атомов двух элементов: водорода ${}^1\text{H}$ ($1s^1$) и гелия ${}^2\text{He}$ ($1s^2$). Здесь и в дальнейшем верхний левый индекс у обозначения атома указывает полное число электронов в атоме, равное числу протонов в ядре этого атома Z ; число, стоящее перед символом оболочки с данным l , указывает значение ее главного квантового числа n ; верхний правый индекс у обозначения оболочки указывает, сколько электронов размещаются на этой оболочке.

9.5. Второй и третий периоды

Второй период (у которого внутренняя электронная оболочка $1s$, а внешняя — $2s2p$) состоит из атомов восьми элементов: от лития ${}^3\text{Li}$ ($2s^1$) до неона ${}^{10}\text{Ne}$ ($2s^22p^6$). Напомним, что число электронов на любой заполненной s оболочке равно двум, а на любой заполненной p оболочке — шести. Третий период (у которого внешняя оболочка ($3s3p$) также состоит из атомов восьми

элементов: от натрия ^{11}Na ($3s^1$) до аргона ^{18}Ar ($3s^23p^6$).

9.6. Четвертый и пятый периоды

Четвертый период (у которого внешняя оболочка $4s3d4p$) состоит из атомов восемнадцати элементов: от калия ^{19}K ($4s^1$) до криптона ^{36}Kr ($4s^23d^{10}4p^6$). Пятый период (у которого внешняя оболочка $5s4d5p$) также состоит из атомов восемнадцати элементов: от рубидия ^{37}Rb ($5s^1$) до ксенона ^{54}Xe ($5s^24d^{10}5p^6$). Заметьте, что оболочки $4p$ и $5p$ начинают заполняться лишь после того, как заполнятся оболочки $3d$ и $4d$.

9.7. Шестой и седьмой периоды

Шестой период (у которого внешняя оболочка $6s4f5d6p$) состоит из атомов тридцати двух элементов: от цезия ^{55}Cs ($6s^1$) до радона ^{86}Rn ($6s^24f^{14}5d^{10}6p^6$). Заметьте, что оболочки $6p$ начинают заполняться лишь после того, как заполнятся оболочки $4f$ (лантаниды) и $5d$.

Седьмой период (у которого внешняя оболочка $7s5f6d7p$) также состоит из атомов тридцати двух элементов: от франция ^{87}Fr ($7s^1$) до элемента с номером 118 ($7s^25f^{14}6d^{10}7p^6$).

Элементы 89–103 называются актиноидами. У элементов 113–118 названий пока нет.

9.8. 8 групп и 18 вертикальных столбцов Таблицы

18 вертикальных столбцов Периодической таблицы нумеруются обычно арабскими цифрами. Кроме того, химики обозначают эти же столбцы римскими цифрами от I до VIII с последующими буквами А или В (см. [6]) и называют столбцы с одинаковыми римскими цифрами группами. (При этом группа VIII объединяет столбцы 8, 9, 10.) Первый столбец (IA) Периодической таблицы элементов занимают атомы водорода и щелочных металлов, у которых на внешней оболочке только один электрон. Во втором столбце (IIA) — щелочноземельные элементы с двумя электронами на внешней оболочке. Столбцы (IIIA), (IVA), (VA), (VIA) начинаются, соответственно, бором, углеродом, азотом, кислородом. Столбец (VIIA) составляют химически активные элементы, у которых не хватает одного электрона на внешней оболочке. Наконец, последний (восемнадцатый) столбец (VIIIA) занимают атомы благородных газов, у которых внешняя оболочка полностью заполнена.

У первого периода пустуют столбцы 2–17. У второго и третьего периодов пустуют столбцы 3–12.

У четвертого и пятого периодов ряды 3–12 заполнены переходными металлами (эти ряды обозначают соответственно IIIB, IVB, VB, VIB, VIIB, VIIIB, IB, IIB).

У шестого и седьмого периода в третьем столбце не по одному, а по 15 элементов: у них одинаковые внешние оболочки s^2d^1 , но различно заполнение их нижележащей оболочки f . Это химические аналоги лантана — лантаниды (от ^{57}La до ^{71}Lu) и, соответственно, актиния — актиниды (от ^{89}Ac до ^{103}Lr). Именно поэтому в них не по 18, а по 32 элемента: $32 = 18 + (14 = 15 - 1)$.

Глава 10

ВЕЩЕСТВО

10.1. Молекулы*

При сближении атомов они обмениваются электронами и связываются друг с другом, образуя молекулы. Число атомов в молекуле составляет от двух–трех (H_2 , O_2 , HCl , H_2O , CO_2) до сотен миллионов (как в случае молекул жизни — ДНК — дезоксирибонуклеиновой кислоты). Энергия связи атомов в молекулах измеряется электрон-вольтами.

10.2. Газы*

Отдельные молекулы существуют вокруг нас в газах: например, воздух содержит молекулы O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O . Молекулы благородных газов He , Ne , Ar , ... моноатомны. Однако при обычных значениях температуры и давления в большинстве явлений мы встречаемся с конденсированным веществом в виде твердых тел и жидкостей. Переходы между различными состояниями вещества при изменении температуры и давления называются фазовыми переходами. Такими переходами являются таяние льда и испарение воды.

10.3. Число Лошмидта*

Молекулы воздуха при нормальном давлении и температуре движутся со средней энергией порядка $\frac{1}{30}$ эВ. При этом расстояние между молекулами на порядок превосходит их диаметр. В одном кубическом метре воздуха при нормальных условиях примерно $2,7 \cdot 10^{25}$ молекул газа. Это число Лошмидта [7].

10.4. Температура*

Температура характеризует среднюю энергию частиц вещества. Обычно температуру измеряют градусами Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), обозначая ее t . За $t = 0^{\circ}\text{C}$ принимают температуру замерзания воды, а за 100°C — температуру ее кипения. Понятие температуры лучше всего обсуждать на примере идеального моноатомного газа, в котором взаимодействием частиц пренебрегают. В этом случае вся энергия сводится к кинетической энергии частиц: $\overline{E} = \frac{3}{2}kT$, где \overline{E} — средняя энергия частицы, T — абсолютная температура ($T = t + 273$), измеряемая в градусах Кельвина (К), а k — константа Больцмана: $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К. В отличие от фундаментальных постоянных c , \hbar , постоянная k является просто переводным множителем из температурных единиц в энергетические.

10.5. Еще раз о мировых константах

Здесь уместно еще раз подчеркнуть, в чем заключается особая роль мировых фундаментальных констант. Разумеется, и c , и \hbar , так же как и k , являются переводными множителями. (С помощью c можно, например, переводить световые годы в километры.) Но только при c , стремящемся к бесконечности, происходит переход от теории относительности к механике Ньютона, и только при \hbar , стремящемся к нулю, происходит переход от квантовой механики к классической. Ничего подобного нельзя сказать о константе k , которая связывает между собой среднюю энергию системы многих частиц с температурой этой системы. (Если измерять энергию и температуру в одинаковых единицах, то k не входит также и в определение энтропии.) Именно поэтому константа Больцмана, столь важная в термодинамике и статистической физике, не является мировой (фундаментальной и универсальной) константой.

10.6. Конденсированное вещество*

В конденсированном веществе атомы плотно упакованы. Они касаются друг друга. При этом в жидкой фазе молекулы могут перемещаться, обмениваться местами. В твердой же фазе молекулы или атомы строго зафиксированы и могут лишь

колебаться относительно точек среднего положения. Твердые тела подразделяют по-разному, например, на аморфные тела и кристаллы. Примером первых является стекло, оно состоит из молекул SiO_2 . Примером вторых — соль NaCl . Кристаллическую структуру при нормальных условиях имеют обычно металлы, хотя известно и исключение — ртуть Hg , которая при нормальных условиях жидкая. Иногда твердые тела подразделяются на проводники, диэлектрики и полупроводники. Проводники хорошо проводят электрический ток, из них делают провода. Диэлектрики не проводят ток, из них делают изоляторы. Проводимость полупроводников сильно зависит от внешних условий. На полупроводниках основана вся электроника.

10.7. Кристаллизация

В процессе кристаллизации происходит самоорганизация атомов, которые занимают определенные места в пространстве и создают пространственные решетки, структура которых определяется химическими свойствами атомов: их валентностью, т. е. способностью притягивать к себе электроны соседних атомов или делиться с ними своими электронами. При этом возникает устойчивое состояние огромного (макроскопического) числа атомов с минимальной полной энергией. Возникает то, что принято называть термином «дальний порядок».

10.8. Фазовые переходы

Взаимные превращения различных фазовых состояний при изменении температуры и/или давления называют фазовыми переходами. Наиболее горячие фазовые переходы в земных условиях: плавление вольфрама и его кипение. Некоторые холодные фазовые переходы: образование твердого водорода при $T = 14$ К, переход жидкого ${}^4\text{He}$ ($T = 2,17$ К) и жидкого ${}^3\text{He}$ ($T \approx 10^{-3}$ К) в сверхтекучее состояние.

10.9. Сверхтекучесть и сверхпроводимость

Впервые явление сверхпроводимости было обнаружено в 1911 г. у проволоки из ртути. При температуре ниже 4 К ее электрическое сопротивление обращалось в нуль. Явление сверхтекучести было открыто в 1938 г. в жидком гелии. При температуре ниже 2 К движение этой жидкости происходит без трения.

За истекшие 100 лет были найдены сотни веществ, являющихся сверхпроводниками. В 1986 г. были открыты первые высокотемпературные сплавы, у которых при понижении температуры сверхпроводимость наступала при температуре, превышающей 30 К. С тех пор верхняя граница высокотемпературной сверхпроводимости превзошла 125 К. Теоретическая модель сверхпроводимости была создана в 1957 г. В ее ос-

нове лежит представление о сверхтекучести так называемых куперовских пар электронов, образуемых электронами с равными по величине и противоположно направленными импульсами и антипараллельными спинами. (Электроны притягиваются друг к другу за счет своего взаимодействия с возбуждениями кристаллической решетки твердого тела.)

10.10. Квазичастицы

В квантовой теории многих частиц очень полезным оказывается понятие квазичастицы, которым обозначают коллективное квантовое возбуждение вещества, имеющее определенную энергию, импульс, спин. Примерами являются фононы, поляроны и экситоны в кристаллических решетках, магноны в спиновых системах магнетиков, фононы и ротоны в жидком гелии, плазмоны в плазме. Понятие квазичастицы позволяет свести сложные задачи взаимодействия частиц к более простому рассмотрению газа квазичастиц.

Глава 11

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

11.1. КЭД*

Все описанное выше разнообразие явлений возникает как следствие взаимодействия по существу двух частиц: фотона и электрона, поскольку атомные ядра играют в обсуждавшихся выше явлениях скорее роль пассивных архитектурных декораций. Полная теория взаимодействия фотона и электрона называется Квантовая электродинамика (КЭД).

11.2. КЭД от Дирака до Фейнмана*

КЭД была создана усилиями многих физиков. Но невозможно не упомянуть двух из них. Дирак в конце 1920-х гг. заложил основы КЭД, Фейнман в конце 1940-х придал ей ту простейшую форму, в которой сегодня ее можно объяснить начинающему физику.

11.3. Лэмбовский сдвиг

Важнейшим экспериментальным открытием было измерение в конце 40-х гг. так называемого лэмбовского сдвига $2s$ и $2p$ уровней атома водорода. Как было сказано в гл. 8, в наинизшем приближении по α эти уровни имеют одинаковые энергии: оба ле-

жат выше уровня $1s$ на величину $3\varepsilon_1/4$. Но опыт показал, что уровень $2s$ лежит выше, чем $2p$, на миллионные доли электронвольта и может распадаться на него с излучением микроволнового фотона с частотой 1058 мегагерц. Вскоре в рамках КЭД было показано, что это расщепление обусловлено более высокими приближениями теории возмущений по α и составляет примерно $\alpha^3\varepsilon_1$.

11.4. Позитрон и другие античастицы*

Важнейшим элементом КЭД является тот факт, что у электрона имеется античастица — позитрон, у которой точно такая же масса и такая же абсолютная величина электрического заряда, но знак заряда положительный, а не отрицательный. Античастицы есть у всех заряженных частиц (и фермионов, и бозонов) и у многих электрически нейтральных частиц, таких, например, как нейтрон. Нейтрон и антинейтрон — это разные частицы: их барионные заряды (или барионные квантовые числа) имеют противоположные знаки. Но есть частицы, которые абсолютно совпадают со своими античастицами. Их называют истинно нейтральными. Примером истинно нейтральной частицы является фотон.

11.5. Диаграммы Фейнмана*

Рассмотрим рассеяние электрона на протоне, происходящее за счет обмена фотоном. Стрелки на рисунке указывают направ-

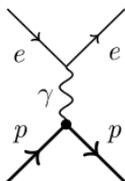


Рис. 11.1. Рассеяние электрона на протоне

ление течения времени для каждой частицы. Слева изображено начальное состояние, справа — конечное. 4-импульсы каждой из частиц изменяются в результате взаимодействия.

Линии электрона и протона отвечают свободным частицам; для них квадрат 4-импульса p равен квадрату массы: $p^2 \equiv E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$. (Мы пользуемся здесь системой единиц, в которой $c = 1$.) Про такие частицы говорят, что они находятся на массовой поверхности и что они реальные. Реальные частицы либо приходят с бесконечно далеких расстояний, либо уходят бесконечно далеко.

Линия фотона на рис. 11.1 отвечает фотону с 4-импульсом q , но не реальному, а виртуальному фотону, для которого бесконечность недоступна. Он находится вне массовой поверхности и для него $q^2 \neq m_\gamma^2 = 0$. (Заметим, что здесь и в дальнейшем прямые линии отвечают фермионам, а волнистые — бозонам.)

Каждой линии и вершине на фейнмановской диаграмме отвечает вполне определенное аналитическое выражение. Таким образом, диаграммы представляют собой свое-

образный «конструктор», предназначенный для вычисления квантовых амплитуд из «стандартных деталей».

11.6. Вспять во времени

Рассмотрим теперь другой процесс, который описывается диаграммой, получаемой из предыдущей поворотом на 90° (рис. 11.2). В левой части этой диаграммы электрон сталкивается с необычным электроном, летящим вспять во времени, и рождает виртуальный фотон. В правой части — виртуальный фотон рождает обычный протон и необычный протон, летящий вспять во времени. Какой физический процесс описывает эта диаграмма?

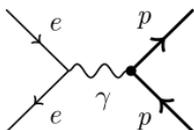


Рис. 11.2. Здесь две из четырех частиц движутся вспять во времени

Оказывается, что она описывает рождение пары протон–антипротон при столкновении электрона и позитрона (рис. 11.3). (Такой процесс возможен, если энергия сталкивающихся частиц превышает $2m_p c^2$.)

Здесь e^+ обозначает позитрон, а \bar{p} обозначает антипротон. Такую интерпретацию движения вспять по времени предложил

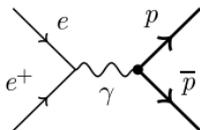


Рис. 11.3. Рождение пары протон–антипротон при столкновении электрона и позитрона

в 1949 г. Фейнман. Она очень упростила понимание физики.

11.7. Античастицы*

Релятивистски инвариантное описание бесспиновых частиц известно с 1926 г. Но впервые понятие античастицы было введено лишь в 1930 г. для электрона, обладающего спином $\frac{1}{2}$. Спустя несколько лет оно было распространено теоретиками и на бозоны. Однако первые элементарные бозоны были открыты экспериментаторами лишь в конце 1940-х гг. Возможно, поэтому в литературе очень часто понятие античастицы связывают с принципом Паули и с так называемым морем Дирака. Движение вспять по времени в равной мере применимо и к фермионам, и к бозонам. Оно делает ненужной и недостаточно правомерной интерпретацию позитронов как незаполненных состояний в море электронов с отрицательной энергией, к которой прибег Дирак, когда в 1930 г. ввел понятие античастицы. Ведь такого моря нет для бозонов, для которых неприменим принцип Паули. (Странно, что Фейнман не отметил этого, сказав в своей нобелевской лекции, что дираковское море

так же хорошо, как и движение вспять по времени.)

11.8. Позитроний*

Электрон и позитрон образуют атом, похожий на атом водорода, который называют позитроний. На рис. 11.4 изображено расщепление позитрония на свободные электрон и позитрон под воздействием фотона. (Спираль, обвивающая линии электрона и позитрона в позитронии, напоминает о том, что они связаны.)

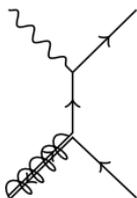


Рис. 11.4. Ионизация позитрония фотоном

Разумеется, есть и аналогичная диаграмма, на которой фотон поглощается не электроном, а позитроном.

11.9. Нормальный магнитный момент электрона

Отношение величины магнитного момента частицы к величине $es\hbar/2mc$, где e, s, m — заряд, спин и масса частицы, принято обозначать буквой g . Под вертикальной внешней фотонной линией диаграммы Фейнмана (рис. 11.5) удобно понимать линию фотона из внешнего магнитного поля.

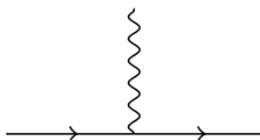


Рис. 11.5. Взаимодействие электрона с магнитным полем

В низшем порядке теории возмущений, отвечающем рис. 11.5, $g = 2$.

11.10. Аномальный магнитный момент электрона: $g - 2$

С учетом более высоких порядков теории возмущений $g - 2 \neq 0$. На рис. 11.6 показана первая петля, которая дает вклад в $g - 2$. Сейчас эта величина вычислена в пяти петлях и совпадает с результатами точных измерений.

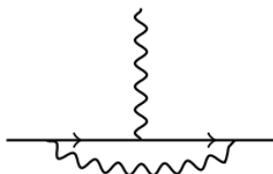


Рис. 11.6. Радиационная поправка к магнитному моменту электрона

11.11. Бегущая константа

Рассмотрим явление, изображенное на рис. 11.7, где фотон часть времени существует в виде электрон-позитронной пары. Оно получило название поляризация вакуума.

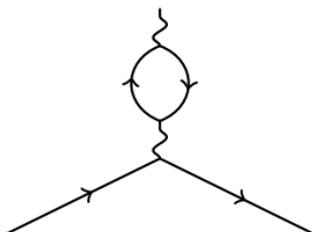


Рис. 11.7. Электрон-позитронная петля

Из-за поляризации вакуума виртуальные электрон-позитронные пары экранируют электрический заряд любой частицы на больших расстояниях, т.е. при малом квадрате импульса виртуального фотона q^2 . С ростом q^2 эта экранировка уменьшается и эффективный заряд частицы, $e(q^2)$, растет. Такой заряд, меняющийся с ростом q^2 , называют бегущим зарядом, а константу $\alpha = e^2/\hbar c$, значение которой зависит от q^2 , называют бегущей константой $\alpha(q^2)$. Аналогичным образом за счет петлевых диаграмм оказывается бегущей константой и масса электрона.

11.12. Перенормируемость КЭД

Благодаря тому, что α является безразмерной величиной, все результаты расчетов петлевых диаграмм Фейнмана в КЭД могут быть выражены через значения массы электрона и константы $\alpha(q^2)$ при $q^2 = 0$. Это свойство КЭД называют перенормируемостью.

Глава 12

ПЕРЕХОД К КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

12.1. Частицы или поля?*

Выше мы видели, что если пользоваться языком фейнмановских диаграмм, то понятие поля становится ненужным. Роль поля исполняют виртуальные частицы. Между тем, исторически понятие поля является предшественником как квантовой механики, так и самих элементарных частиц, которые в квантовой теории поля рассматриваются как кванты поля. Выбранный мною «бесполевого» путь фейнмановских диаграмм является предпочтительным при рассмотрении простых задач, которые можно решать по теории возмущений. Однако, как будет видно из последующих глав, понятие квантового поля необходимо при решении более сложных задач, требующих для своего решения выхода за рамки теории возмущений.

Замечу, что многие особенности квантовой механики, неприемлемые для Эйнштейна, и до сих пор для многих выглядящие как парадоксы (например, известный «ЭПР-парадокс»), возникают из-за того, что ψ -функцию рассматривают как физическое поле.

12.2. Квазиклассика и классический предел*

Квазиклассикой называют квантовое поведение частиц при больших значениях квантовых чисел. Чем меньше длина волны частицы по сравнению с характерными размерами той или иной системы, тем больше состояние частицы в этой системе напоминает классическую траекторию. Классические понятия являются пределом квазиклассических. (См. Раздел 6.1.)

12.3. Напряженность поля и индукция

Напряженность электрического поля в вакууме \mathbf{E} отличается от напряженности того же поля в среде, т. е. от электрической индукции \mathbf{D} в среде:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (12.1)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость среды.

Напряженность магнитного поля в вакууме \mathbf{H} отличается от магнитной индукции \mathbf{B} в среде:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (12.2)$$

где μ — магнитная проницаемость среды.

В вакууме по определению $\varepsilon_0 = \mu_0 = 1$.

Поле распространяется в среде со скоростью

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}. \quad (12.3)$$

12.4. Диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума*

Заканчивая обсуждение квантовой электродинамики, необходимо сказать несколько слов о терминологии, метрологии и международной системе единиц СИ. Как родимое пятно XIX века система СИ закрепила во всей литературе (и не только по физике) величины ϵ_0 и $\mu_0 = 1/\epsilon_0 c^2$, называемые соответственно диэлектрической и магнитной проницаемостями вакуума. Эти величины тесно связаны с понятием эфира, колебания которого проявляются, как считали тогда, в виде световых волн. С появлением теории относительности эфир оказался не нужен, а ϵ_0 и μ_0 пережили его на столетие. При последовательном изложении квантовой электродинамики эти величины не возникают. Поэтому ϵ_0 следует положить равной единице. А при $c = 1$ должно быть $\epsilon_0 = \mu_0 = 1$. (См., например, учебники [8, 9].) Но попытки убедить в этом метрологов наталкиваются на упорное сопротивление. Даже в последнем выпуске Таблиц физических констант в [10] величина ϵ_0 входит в определение α и основных констант атома водорода.

Сложности системы СИ связаны не столько с разнообразием явлений, сколько с разнообразием теорий, эти явления описывающих. Если все сводится к фейнмановской механике, то разнообразия теорий нет, и все выражается просто через механические единицы. Это очень важно!

Глава 13

ГРАВИТАЦИЯ, ЗЕМЛЯ, СОЛНЦЕ, ГАЛАКТИКА

13.1. Верх и низ*

С младенческих лет мы испытываем действие гравитационного притяжения Земли: подниматься вверх тяжело, падать вниз легко (хотя и не всегда безопасно). Но мы не сознаем, что понятия верха и низа обусловлены действием атомов Земли на атомы нашего тела. И только со временем мы узнаем, что Земля не плоская, а шарообразная, а для наших антиподов наш низ — это их верх.

13.2. Земля*

В детстве мы не думаем о радиусе Земли, потому что земной шар очень велик по сравнению с нашими размерами. Радиус Земли $6 \cdot 10^3$ км, масса Земли $6 \cdot 10^{24}$ кг. Масса водной оболочки $1,5 \cdot 10^{21}$ кг, следовательно, она легче самой Земли примерно в 4000 раз. (Площадь суши $1,5 \cdot 10^8$ км², площадь океанов $3,6 \cdot 10^8$ км², среднее возвышение суши над уровнем океана 0,9 км, средняя глубина океана 3,9 км.)

Масса воздушной оболочки (≈ 10 м водного эквивалента ≈ 750 мм ртутного столба) еще в 400 раз меньше. Воздушная и вод-

ная оболочки земного шара держатся только благодаря гравитационному притяжению их атомов к атомам шара. Это притяжение постоянно действует и на нас, и на наших антиподов на противоположной стороне земного шара.

13.3. Внутреннее строение Земли*

Толщина земной коры порядка 30 км, ее плотность примерно в три раза больше плотности воды. Ниже, до глубины примерно 3000 км расположена в два раза более плотная жидкая мантия. Еще ниже — еще вдвое более плотное ядро.

13.4. Температура Земли*

Средняя температура на поверхности Земли порядка 300 К обусловлена, в частности, тем, что Земля внутри очень горячая. На границе коры и мантии температура достигает 700 К, на границе мантии и ядра — 4500 К, в центре ядра — 6400 К.

Высокая температура внутри Земли обусловлена в основном исходной высокой температурой при ее образовании пять миллиардов лет тому назад и распадом радиоактивных элементов.

(Приведенные выше числа взяты из справочника К. У. Аллена [11], гл. 6: Земля.)

13.5. Угол наклона земной оси*

Сезонные изменения температуры обусловлены наклоном земной оси по отношению к плоскости эклиптики (т. е. плоскости земной орбиты, в которой лежит Солнце), так что лето и зима в Северном и Южном полушариях поочередно сменяют друг друга. Угол между плоскостью экватора и плоскостью эклиптики равен $23^\circ 27'$ (см. гл. 7 справочника [11]).

13.6. Закон Ньютона*

Потенциальная энергия универсального гравитационного притяжения между двумя телами с массами m_1 и m_2 , находящимися на расстоянии r друг от друга, дается законом Ньютона:

$$U = -G_N m_1 m_2 / r, \quad (13.1)$$

где константа Ньютона $G_N = 6,7 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$.

13.7. Солнечная система*

Формула Ньютона дает и энергию притяжения ньютонова яблока к Земле, и Земли к Солнцу, и всех остальных планет Солнечной системы к Солнцу и друг к другу. Масса Солнца $M_\odot = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$; радиус Солнца $R_\odot = 7 \cdot 10^5 \text{ км}$. Расстояние от Солнца до Земли — $150 \cdot 10^6 \text{ км}$. Свет проходит его за 500 секунд или примерно за восемь минут. Это расстояние называет-

ся астрономической единицей (а.е.). Земля движется по своей орбите вокруг Солнца со скоростью 30 км/с. (Именно из-за этого движения Земля, постоянно падая на Солнце, до сих пор не упала на него.)

Спутник Земли — Луна — в 80 раз легче Земли, радиус ее орбиты $380 \cdot 10^3$ км.

Самая большая планета Солнечной системы — Юпитер — примерно в 300 раз тяжелее Земли, а радиус ее орбиты в 5 раз больше, чем у земной орбиты.

Не все осознают, какую важную роль играет эта планета в нашей жизни, предохраняя Землю от опаснейших столкновений с астероидами.

13.8. Жизнь Солнца*

Рождение и дальнейшая эволюция Солнца, как и других звезд, обусловлены гравитационным притяжением частиц. Вначале по мере сжатия вещества газовой туманности, из которой возникло Солнце, происходит превращение гравитационной потенциальной энергии частиц в их кинетическую энергию и, следовательно, нагревание вещества. Это превращение потенциальной энергии в кинетическую с ростом температуры очень замедляется, когда вступают в дело ядерные взаимодействия, превращающие энергию покоя частиц в кинетическую энергию, и тем предотвращающие быстрый гравитационный коллапс. (О ядерных взаимодействиях

см. ниже.) Астрономы говорят, что нашему Солнцу около пяти миллиардов лет: оно прошло примерно половину своего жизненного пути (10^{10} лет). К концу своей жизни оно превратится последовательно в красного гиганта размером с орбиту Земли, в планетарную туманность и, наконец, в белого карлика размером с Землю.

13.9. Звезды нашей Галактики*

Солнце является одной из двухсот миллиардов звезд, составляющих нашу Галактику — Млечный Путь. Оно обращается вокруг центра Галактики со скоростью примерно 200 км/с на расстоянии от этого центра 25 тысяч световых лет. Ближайшая яркая звезда, похожая на наше Солнце, — α Центавра — находится на расстоянии 4,4 световых года от нас. (Она принадлежит Южному полушарию.) Самая яркая звезда всего неба — Сириус — находится на расстоянии 8,5 световых лет. Полное число звезд, видимых невооруженным глазом, порядка тысячи. Примерно треть из них лежит в ближайшей окрестности Солнца — шаре радиусом 250 световых лет. Диаметр Галактики — 100 тысяч световых лет, ее толщина — 7 тысяч световых лет, суммарная масса всех звезд в Галактике — $1,4 \times 10^{11} M_{\odot}$, масса самых тяжелых звезд в Галактике около $100 M_{\odot}$ (см. [11]). Звезды с массой, примерно равной M_{\odot} , живут примерно 10^{10} лет.

13.10. Парсек

До не слишком далеких звезд расстояния определяют по изменению их параллакса с разных точек земной орбиты. Один парсек — это расстояние, с которого а.е. видна как одна угловая секунда. Это значит, что $1 \text{ пс} = 2 \cdot 10^5 \text{ а.е.} = 3 \cdot 10^{13} \text{ км} = 3,3 \text{ световых года}$. 1 килопарсек (кпк) равен 3,3 тысячи световых лет. 1 мегапарсек (Мпк) = $3,3 \cdot 10^6$ световых лет. 1 гигапарсек (Гпк) = $3,3 \cdot 10^9$ световых лет.

13.11. Сверхновые звезды

Если звезда существенно тяжелее Солнца, то она живет существенно меньше Солнца и заканчивает свою жизнь так называемой вспышкой сверхновой звезды, в которой выделяется излучение, превосходящее излучение Солнца за всю его жизнь. Светимость сверхновой превосходит светимость целой галактики. Этот взрыв происходит в результате гравитационного коллапса, когда внутри звезды образуется достаточно массивное ядро негорючего железа, которое продолжает сжиматься под действием гравитации. В таких взрывах создаются элементы более тяжелые, чем железо. Последняя яркая вспышка, произошедшая недалеко от нашей галактики, наблюдалась в 1987 г. и получила название SN1987A.

Самые легкие сверхновые возникают тогда, когда две звезды близки друг к другу, и более тяжелая из них натягивает на себя вещество своей соседки. Когда она становится тяжелее Солнца в 1,4 раза, то происходит взрыв. Сверхновые с массами 1,4 солнечных масс послужили своеобразными «космическими свечками» при определении расстояний до далеких галактик (см. 15.3).

В результате вспышки легкой сверхновой образуется нейтронная звезда. Нейтронной называют звезду, в которой большинство электронов и протонов превратились в нейтроны и нейтрино. Быстро вращающаяся нейтронная звезда выглядит как пульсирующий источник излучения радиоволн — пульсар. Звезды с массами существенно большими превращаются в черные дыры. Что такое черная дыра, см. в разделе 16.4.

Глава 14

ДРУГИЕ ГАЛАКТИКИ

14.1. Открытие галактик*

На расстоянии примерно 200 тысяч световых лет находятся маленькие «спутниковые галактики» нашей Галактики — Магеллановы Облака. (Кстати, именно в Большом Магеллановом Облаке вспыхнула сверхновая SN1987A.) На расстоянии 2 млн световых лет находится ближайшая к нам большая галактика — Андромеда, которая видна невооруженным глазом как крошечное туманное пятнышко. В течение XX века в телескопы были открыты 350 миллиардов других больших галактик. Полное число звезд во всех галактиках порядка 10^{22} – 10^{23} [12].

14.2. Разбегание галактик*

В 1929 г. Хаббл обнаружил, что чем дальше расположена галактика, тем быстрее она удаляется от нас: $v = Hr$, где v — скорость удаления, r — расстояние до галактики, H — константа Хаббла. Затем более точные измерения показали, что $H \approx 70 \frac{\text{км}}{\text{с}} / \text{Мпк}$. Самые далекие галактики находятся от нас на расстоянии $1/H \approx 15$ миллиардов световых лет. Грубо говоря, расстояние до галактики определяют по ее

наблюдаемой яркости, а ее скорость — по красному смещению ее излучения.

14.3. Красное и синее кинематическое смещение*

Если покоящийся источник света испускает в нашу сторону фотон с энергией E , то тот же источник, приближающийся к нам со скоростью v (в единицах $c = 1$), испускает фотон с энергией $E\sqrt{\frac{1+v}{1-v}}$, а удаляющийся с той же скоростью источник испускает фотон с энергией $E\sqrt{\frac{1-v}{1+v}}$. Соответственно меняются частота и длина волны наблюдаемого нами фотона.

14.4. Гравитационное смещение*

Рассмотрим теперь источник и детектор излучения, покоящиеся во внешнем статическом гравитационном поле, например, в поле Земли. Такой опыт проводился в башне Гарвардского университета в 1960-х гг. В ней источник и детектор помещали попеременно один на чердаке, другой в подвале. Энергия и частота фотона, летящего в статическом поле, не меняются, но его импульс возрастает, когда он летит вниз, и уменьшается, когда он летит вверх. Фотон, летящий вверх, краснеет, а летящий вниз синееет. Такое смещение длины волны называется гравитационным. Подробное рассмотрение этого

явления можно найти в статьях [13]. Часто встречающееся в литературе утверждение, что в статическом гравитационном поле меняется частота фотона, основано на ошибочном применении к релятивистским частицам понятия потенциальной энергии. Частота и энергия фотона в статическом гравитационном поле неизменны, а длина волны изменяется.

14.5. Квазары и гамма-всплески

На расстояниях порядка миллиардов световых лет обнаружены самые мощные источники излучения во Вселенной — квазары и гамма-всплески.

Термин «квазар» был образован из слов «квази» и «звезда». Излучение квазара может в сотни раз превосходить излучение обычной галактики, а его размер при этом очень мал: сравним с размером Солнечной системы. Как полагают, излучение квазаров возникает при падении вещества на массивные черные дыры, находящиеся в центре далеких галактик. Квазары были обнаружены по их излучению в радиоволновом диапазоне.

Гамма-всплесками называют короткие всплески гамма излучения продолжительностью порядка секунд или минут.

БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ**15.1. Расширяющаяся Вселенная***

Примерно 15 миллиардов лет тому назад произошел Большой взрыв, в результате которого возникла наша Вселенная. В первые мгновения она расширялась экспоненциально быстро. Это была так называемая инфляция, которая обеспечила однородность и изотропию Вселенной. (Очень маленькие, порядка 10^{-5} , неоднородности привели много позже к образованию галактик.) Затем началась стадия более медленного, степенного расширения и охлаждения Вселенной. В начале этого расширения все частицы были релятивистскими, но через секунду только нейтрино (антинейтрино) и электроны (позитроны) имели скорости, сравнимые со скоростью фотонов.

15.2. Остывающая Вселенная*

В это время температура Вселенной T и ее возраст t были связаны соотношением

$$4\pi^3 G_N T^4 t^2 \approx 1, \quad (15.1)$$

или $10T^2 t/m_P \approx 1$. Учтем теперь, что $\hbar \approx 6,6 \cdot 10^{-22}$ МэВ·с и что $m_P \approx 10^{22}$ МэВ, и получим $t \approx T^{-2}$, где t выражено в секун-

дах, а T выражено в МэВ (простой вывод этой формулы см., например, в разделе 27.1 книги [14]).

Через три минуты Вселенная остыла до температуры $T \approx 10^9$ К $\approx 0,1$ МэВ и состояла в тот момент в основном из фотонов и нейтрино, а также малых количеств (порядка 10^{-9}) электронов, протонов и ядер дейтерия и гелия. Очень подробно и ясно это описано в замечательной книге Вайнберга [15]. Как возникла эта маленькая барионная и лептонная асимметрия, определившая характер эволюции Вселенной, мы пока не знаем.

15.3. Космическое микроволновое излучение СМВ

Через 300 000 лет электроны остыли до температуры 1 эВ и образовали вместе с ядрами водорода и гелия атомы этих элементов. Испущенные в то время фотоны дожили до нашего времени, остыв при этом до $2,3 \cdot 10^{-4}$ эВ $\approx 2,7$ К и превратившись в радиоволны. Это космическое микроволновое излучение (Cosmic Microwave Background — СМВ) было предсказано в 1940-х гг. и открыто в 1965 г.

15.4. Темная материя

С 1930-х гг. известно, что периферийные звезды в Галактике движутся быстрее, чем они должны были бы двигаться под воздействием видимого вещества Галактики. Это

объяснили тем, что в Галактике количество невидимого вещества — темной материи, природа которой неизвестна, примерно в пять раз превышает количество обычного вещества, излучающего свет. В 1960-х гг. на роль такой темной материи стали претендовать так называемые зеркальные частицы, которые взаимодействуют с зеркальными фотонами, а с обычными фотонами не взаимодействуют (см. ниже). В последующем наиболее вероятными претендентами на роль темной материи стали считать нейтральные массивные суперчастицы (см. ниже). Выяснить природу темной материи можно в экспериментах в низкофоновых подземных лабораториях по следу, который оставит обычная частица, если по ней ударит частица темной материи.

15.5. Темная энергия

Темной энергией, открытой в 1998 г., назвали явление, которое не может быть вызвано какими-либо частицами. ¹⁾ Оно заключается в том, что огромные пустоты между очень далекими скоплениями галактик продолжают ускоренно расти. Энергия этого загадочного роста пустого пространства, который часто называют антигравитацией, в три раза превышает энергию покоя темной и обычной материи вместе взятых.

¹⁾ Это открытие было отмечено Нобелевской премией в октябре 2011 г.

КВАНТОВАЯ ГРАВИДИНАМИКА

16.1. ОТО: три канонических эффекта*

Обычно, говоря об описании релятивистских эффектов в теории гравитации, имеют в виду Общую теорию относительности Эйнштейна (ОТО, 1916). Как известно, из этой теории следуют три следующие эффекта, ставшие теперь каноническими.

1) Отклонение луча света гравитационным полем, впервые наблюдаемое во время солнечного затмения 1919 г., а впоследствии в многочисленных гравитационных линзах.

2) Смещение длины волны фотона в гравитационном поле, измеренное в 1960-х гг.

3) Вековая прецессия перигелия Меркурия, известная еще с XIX века.

В рамках ОТО они объясняются тем, что гравитирующее тело искривляет вокруг себя пространство и время, а фотон или любая другая частица или тело движутся в этом кривом пространстве-времени, описываемом метрическим тензором $g_{\mu\nu}$, в соответствии с принципом наименьшего действия.

16.2. Гравитон и КГД*

Следует подчеркнуть, однако, что вот уже более полувека обсуждается и другое, квантовое, объяснение этих эффектов в рамках Квантовой гравитодинамики (КГД), аналогичной Квантовой электродинамике (КЭД). Согласно КГД, гравитационное взаимодействие возникает за счет обмена виртуальными гравитонами — безмассовыми частицами со спином 2, подобно тому, как электромагнитное взаимодействие возникает за счет обмена фотонами, частицами со спином 1. Все три канонических эффекта ОТО вычисляются в КГД элементарно по теории возмущений. При низких энергиях, характерных для этих эффектов, теория возмущений работает в КГД с гораздо более высокой степенью точности, чем в КЭД, поскольку роль α в КГД играет очень малое произведение константы Ньютона $G_N \approx 6,7 \cdot 10^{-39} \hbar c^5 \text{ ГэВ}^{-2}$ и квадрата энергии или импульса гравитона. Малость этого произведения естественным образом объясняет, почему отдельные гравитоны просто ненаблюдаемы, а гравитационные волны настолько трудно наблюдать, что это пока не сделано.

Здесь важно подчеркнуть, что в квантовой гравитодинамике учитываются не только так называемые лестничные гравитонные диаграммы, но и такие по-настоящему пет-

левые диаграммы, в которых виртуальные гравитоны взаимодействуют между собой.

16.3. Неперенормируемость КГД

Константа Ньютона G_N , в отличие от безразмерной α , имеет размерность m^{-2} . Поэтому все амплитуды растут как квадрат энергии, а КГД является неперенормируемой теорией, в отличие от КЭД. Рост амплитуд, вероятностей и сечений с ростом энергии приводит к тому, что при высоких энергиях пользоваться теорией возмущений нельзя. Когда гравитационное взаимодействие становится сильным настолько, что даже лучи света перестают быть прямыми линиями, мы вынуждены говорить о том, что исходно плоское пространство–время искривлено гравитацией. У нас не остается способа операционно определить понятие плоского пространства при наличии сильного гравитационного поля. Как показал Минковский в 1908 г., Эйнштейн в 1905 г. ввел в физику плоское пространство–время. В 1915 г. Эйнштейн ввел искривленное пространство–время и предсказал три канонических эффекта общей теории относительности. Поразительно, как он смог создать классическую теорию сильного гравитационного взаимодействия, располагая лишь одним малюсеньким пертурбативным эффектом (два других появились позднее, да и первый — прецессия Меркурия — был ему не очень нужен). Разумеется, клас-

сическая теория неприменима при планковских расстояниях, временах, импульсах и энергиях (см. ниже раздел «Шкала Планка»). Но в колоссальном диапазоне гравитационных явлений мы можем использовать язык ОТО и понятие метрического тензора $g_{\mu\nu}$.

16.4. Гравитационный радиус и черные дыры

Выражение для метрического тензора $g_{\mu\nu}$ на расстоянии r от тела с массой m , полученное в 1916 г. Шварцшильдом, имеет вид

$$g_{00} = (1 - r_g/r), \quad (16.1)$$

$$g_{rr} = -(1 - r_g/r)^{-1}, \quad (16.2)$$

где r_g — так называемый гравитационный радиус:

$$r_g = 2G_N m. \quad (16.3)$$

Для Солнца $r_g \approx 3$ км, для Земли $r_g \approx 1$ см. Радиусы и Солнца, и Земли много больше их гравитационных радиусов. Представим себе такое массивное и компактное тело, для которого его размер меньше его гравитационного радиуса. Такие тела были названы Уилером черными дырами: частица, как бы быстро она ни двигалась, не сможет вылететь за пределы сферы с радиусом r_g , окружающей черную дыру.

Самая крупная черная дыра в нашей Галактике находится в ее центре.

16.5. Принцип эквивалентности?

Знаменитый принцип эквивалентности Эйнштейна, согласно которому гравитационное поле неотличимо от равноускоренной системы отсчета, справедлив лишь постольку, поскольку поле может быть однородным. Поле любого небесного объекта не может быть однородным, так как размеры объекта конечны. На голову и ноги пассажира в знаменитом падающем лифте действуют приливные силы, обусловленные тем, что гравитационное поле Земли неоднородно: оно сильнее в ногах и слабей в голове. Подобные же лунные приливные силы вызывают приливы в мировом океане.

Математический аппарат ОТО безусловно правилен и не связан с принципом эквивалентности, который справедлив только в предельном и нереализуемом в природе случае, когда гравитационное поле можно считать абсолютно однородным. Мы должны быть благодарны этому принципу только за то, что в свое время он послужил тем трамплином, отталкиваясь от которого Эйнштейн открыл ОТО.

16.6. Шкала Планка*

На стыке XIX и XX веков Планк, введя квант действия, ввел также понятие о массе, определяемой константами G_N , \hbar и c , которая получила название массы Планка:

$$m_P = (\hbar c / G_N)^{1/2}. \quad (16.4)$$

Легко проверить, что $m_P = 1,220\,89(6) \times 10^{19} \text{ ГэВ}/c^2 \approx 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ г}$.

Аналогично определяются планковские энергия $E_P = m_P c^2$ и импульс $p_P = m_P c$, равные примерно $1,2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ}$ ($\text{ГэВ}/c$), а также планковская длина l_P и планковское время t_P : $l_P = \hbar/m_P c \approx 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ м}$ и $t_P = \hbar/m_P c^2 \approx 0,5 \cdot 10^{-43} \text{ с}$. Энергия гравитационного притяжения двух частиц, сталкивающихся с энергией, превышающей планковскую, может сравниться с их кинетической энергией и привести к образованию планковской черной дыры. Теория, описывающая физику на планковской шкале, пока не построена. Несомненно, что построение непертурбативной квантовой гравитации было бы великим этапом в развитии физики.

На этом мы закончим рассмотрение гравитационного взаимодействия и перейдем к короткодействующим сильному и слабому взаимодействиям.

Глава 17

ВНУТРИЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

17.1. Альфа-, бета- и гамма-лучи*

На стыке XIX и XX веков выяснилось, что существуют радиоактивные вещества, которые испускают α , β - и γ -лучи. В дальнейшем выяснилось, что α -лучи — это ядра гелия, β -лучи — это электроны, а γ -лучи — это фотоны очень высокой энергии, на много порядков большей энергии атомных фотонов.

17.2. Сильное взаимодействие*

В 1910 г., пропуская α -лучи через листочки золота, Резерфорд и его сотрудники обнаружили атомные ядра. Через 10 лет было установлено, что ядра содержат протоны, а еще через десять лет — нейтроны. Взаимодействие между протонами и нейтронами, приводящее к образованию ядер, было названо сильным. Оно гораздо сильнее электромагнитного взаимодействия и характеризуется энергиями связи, измеряемыми не электронвольтами, а мегаэлектронвольтами.

17.3. Изотопический спин

Открытие нейтрона привело к возникновению понятия изотопического спина и понятия изотопической инвариантности сильного взаимодействия. В условном изотопическом пространстве дублет протона и нейтрона отвечает двум проекциям изотопического спина нуклона: $+1/2$ и $-1/2$. Математики называют симметрии типа изотопической — $SU(2)$. Цифра 2 здесь отвечает дублету.

17.4. Слабое взаимодействие*

Исследование β -лучей привело к открытию слабого внутрядерного взаимодействия. Оно было названо так, потому что в ядрах оно значительно слабей электромагнитного взаимодействия, а вызванные им процессы протекают существенно медленнее электромагнитных процессов. Основной слабый процесс в ядре — это β -распад нейтрона n в протон p . В 1930-е гг. стало ясно, что этот процесс происходит с испусканием электрона e и долгое время остававшейся гипотетической частицы — нейтрино ν (более точно антинейтрино $\bar{\nu}$):

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}. \quad (17.1)$$

17.5. Нейтрино и четырехфермионное взаимодействие*

Гипотеза о существовании нейтрино была выдвинута в 1930 г. Паули. В 1934 г. Ферми предложил четырехфермионную теорию, согласно которой β -распад возникает в результате взаимодействия двух слабых токов: нуклонного $\bar{n}p$ и лептонного $\bar{e}\nu$ с константой взаимодействия $G_F/(\hbar c)^3 = 1,166\,37(1) \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2}$. То же взаимодействие должно приводить к реакции образования нейтрона и позитрона при столкновении антинейтрино с протоном: $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$. Наблюдение этой реакции под воздействием потока антинейтрино, испускаемых ядерным реактором, удалось впервые осуществить в 1956 г.

17.6. Деление ядер*

В конце 1930-х гг. было обнаружено явление деления некоторых тяжелых ядер на более легкие после попадания в них нейтронов с выделением энергии порядка ста МэВ. Поскольку при этом испускаются свободные нейтроны, которые могут приводить к делению других ядер, возникла идея о возможности осуществления цепной реакции деления. Эта цепная реакция была впервые осуществлена в ядерном реакторе в 1942 г. и атомной бомбе в 1945 г.

17.7. Слияние ядер*

Также в конце 1930-х гг. стало ясно, что совокупность процессов сильного и слабого взаимодействия приводит при высоких температурах к реакциям синтеза, слияния ядер с выделением энергии, в которых протоны и электроны превращаются в тяжелые изотопы водорода. А последние объединяются в ядра гелия, а затем и в более тяжелые ядра. Стало ясно, что именно благодаря этим термоядерным реакциям слияния ядер происходит излучение энергии в Солнце и звездах. В 1953 г. была взорвана первая термоядерная бомба.

17.8. От ядер к частицам*

Открытие и исследование ядерных взаимодействий дало человечеству новые мощные источники энергии и позволило понять, как светят звезды.

Важнейшим следствием этого исследования стало открытие элементарных частиц материи, к которым мы сейчас переходим.

Глава 18

ЧАСТИЦЫ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

18.1. Позитрон*

Первой частицей, открытой в космических лучах, был позитрон. Космические лучи — поток частиц, падающих на Землю из космического пространства, — были открыты в 1912 г. В 1932 г. Андерсон обнаружил, что космические лучи, сталкиваясь с веществом, рождают частицы, имеющие ту же массу, что и электрон, но противоположный знак заряда. Так была открыта первая античастица, предсказанная за два года до того Дираком.

18.2. Мюон*

В 1938 г. Андерсон и Недермейер открыли мюоны, μ^\pm -частицы, с массой примерно 105 МэВ, рождавшиеся космическими лучами высоко в атмосфере и долетавшие до Земли, несмотря на то, что, как выяснилось позднее, время жизни покоящегося мюона составляет две микросекунды. Таким образом, было открыто явление, предсказанное специальной теорией относительности: время жизни релятивистской частицы с энергией E и массой m возрастает в E/mc^2 раз. Это явилось яркой демонстрацией того,

что движение частицы в плоском пространстве–времени продлевает ее жизнь.

Вместе с тем, открытие мюона было первым шагом на пути открытия многочисленных элементарных частиц, которые на первый взгляд не играют роли ни в реакторах, ни в бомбах, ни в звездах. Но именно эти частицы позволили понять, как на самом деле устроены сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия.

18.3. Три пиона*

В 1947 г. были открыты сильновзаимодействующие заряженные π^\pm -мезоны с массой 140 МэВ. Установлено, что они распадаются по схеме $\pi \rightarrow \mu + \nu$ за счет слабого взаимодействия, и что мюон μ — это частица, не обладающая сильным взаимодействием, представляющая собой тяжелый аналог электрона. Существование пионов было предсказано еще в 1935 г. Обмен пионами между нуклонами ядра должен был объяснить ядерные силы. Ожидали, что наряду с заряженными пионами существует и нейтральный пион π^0 . Но его открыли лишь в начале 1950-х гг. Эта частица с массой 135 МэВ распадается на два фотона. Три пиона образуют изотопический триплет ($T_3 = +1, 0, -1$) подобно тому, как два нуклона образуют изотопический дублет. В 1949 г. Ферми и Янг предложили составную модель пионов, согласно которой они представляют собой связанные состо-

яния нуклона и (еще не открытого в то время) антинуклона.

18.4. Странные частицы*

Тогда же, в конце сороковых — начале пятидесятих годов, в космических лучах наблюдались первые так называемые странные частицы — K -мезоны с массой около 500 МэВ. А вслед за ними — первые странные барионы, получившие название гиперонов: Λ^0 , Σ^+ , Ξ^- . Странными эти частицы назвали потому, что рождались они часто и быстро (за счет сильного взаимодействия), а распадались на сильновзаимодействующие частицы медленно (за счет слабого). Были открыты дублет K^+ , K^0 с положительной странностью и дублет соответствующих античастиц K^- , \bar{K}^0 с отрицательной странностью. При столкновении нестранных частиц K -мезоны рождались совместно с анти- K -мезонами или с гиперонами, так что суммарная странность сохранялась.

18.5. Странность

Формально странность была определена формулой

$$Q = T_3 + B/2 + S/2, \quad (18.1)$$

где Q — заряд частицы, T_3 — проекция ее изотопического спина, B — ее барионное число (равно +1 для бариона, -1 для антибариона, 0 для мезона), S — странность.

Из этой формулы видно, что странность пионов и нуклонов равна нулю, странность K -мезонов равна $+1$, странность \bar{K} -мезонов и Λ^0 -, Σ^\pm -гиперонов равна -1 , а странность Ξ -гиперонов равна -2 .

ЧАСТИЦЫ НА УСКОРИТЕЛЯХ

19.1. Открытие барионных резонансов и антинуклонов*

С начала 1950-х гг. изучение элементарных частиц перемещается на специально построенные для этой цели ускорители.

В 1952 г. в рассеянии пионов нуклонами открыты первые резонансные состояния — четыре частицы Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^- с массами примерно 1230 МэВ, быстро распадавшиеся за счет сильного взаимодействия на нуклон и пион.

В 1955 г. на ускорителе рождены антипротоны \bar{p} . В следующем году произведены и наблюдаются антинейтроны \bar{n} .

19.2. Модель Сакаты

В 1956 г., обобщая модель Ферми–Янга, Саката предположил, что из всех известных в то время барионов и мезонов наиболее фундаментальными являются изотопический дублет нуклонов и изотопический синглет Λ^0 , а остальные построены из них и их античастиц (см., например, [16]).

19.3. Модель трех сакатонов

В 1957–58 гг. была выдвинута другая гипотеза о том, что все известные в то время барионы и мезоны, в том числе и сами p , n , Λ , построены из трех более фундаментальных частиц с квантовыми числами изотопического дублета и синглета барионов (и соответствующих античастиц). Эти более фундаментальные частицы — одна заряженная и две нейтральные — получили название сакатонов. Все мезоны в этой модели состояли из сакатона и антисакатона, все барионы — из двух сакатонов и одного антисакатона.

В рамках модели сакатонов были сформулированы правила отбора для процессов сильного и слабого взаимодействий. В частности, были предсказаны изотопические $SU(2)$ -свойства слабых токов, как не меняющих странности, так и меняющих ее. Была рассмотрена гипотеза о существовании более общей симметрии сильного взаимодействия, вскоре получившей наименование $SU(3)$. Эта симметрия предполагалась нарушенной тем, что масса двух первых сакатонов меньше массы третьего. Было предположено, что слабый ток, переводящий первый сакатон во второй (и потому сохраняющий странность), имеет константу слабого взаимодействия примерно в четыре раза большую, чем у слабого тока, переводящего первый сакатон в третий (и потому изменяющего странность).

19.4. Октет и синглет псевдоскалярных мезонов

В модели сакатонов было предсказано существование двух псевдоскалярных мезонов с изотопическим спином, равным нулю, получивших впоследствии название η и η' -мезонов. Первый из них — η -мезон с массой 548 МэВ был открыт в 1961 г. Вместе с тремя π -мезонами и четырьмя K -мезонами он образовал первый мезонный октет в рамках SU(3)-симметрии, в основе которой лежало предположение, что массы и сильные взаимодействия трех сакатонов приблизительно одинаковы. Мезон η' был открыт в 1964 г. Его масса оказалась равна 958 МэВ. Это был первый мезонный SU(3)-синглет.

19.5. Девять векторных мезонов

В 1961 г. появились первые экспериментальные данные о девяти векторных мезонах: изотопический триплет ρ -мезонов с $m \approx 770$ МэВ, синглетный ω -мезон с $m \approx 780$ МэВ, два дублета K^* и \bar{K}^* с $m \approx 890$ МэВ и вслед за этим ϕ -мезон с $m \approx 1020$ МэВ.

19.6. Октет барионов*

Успешно описав октет и синглет мезонов, модель сакатонов не смогла объяснить существование октета барионов со спином $\frac{1}{2}$: двух нуклонов ($m \approx 940$ МэВ) и шести гиперонов: одного Λ ($m \approx 1115$ МэВ),

трех Σ ($m \approx 1200$ МэВ), двух Ξ ($m \approx 1320$ МэВ).

19.7. Декуплет барионов

В 1960 г. в дополнение к четырем Δ -барионам с $m \approx 1230$ МэВ со спином и четностью $3^{+}/2$ был открыт Σ^{+} -гиперон с $m \approx 1385$ МэВ и теми же спином и четностью, и появились первые указания на существование Ξ^{-} с $m \approx 1535$ МэВ. Это дало основание Гелл-Манну в 1962 г. предсказать существование десятого бариона Ω^{-} с массой $m \approx 1685$ МэВ в декуплете с $J^P = 3^{+}/2$. Эта частица была открыта в 1964 г.

19.8. ЦЕРН 1962

В 1962 г. на конференции в ЦЕРНе было объявлено об открытии мюонного нейтрино ν_{μ} и появился термин «адрон».

19.9. Три кварка*

В 1964 г. Гелл-Манн и Цвейг выдвинули гипотезу о существовании трех кварков u , d , s с дробными электрическими зарядами ($+2/3$ у u и $-1/3$ у d и s) и барионным числом $1/3$. Это позволило им объяснить существование $SU(3)$ октета и декуплета барионов как связанных состояний трех кварков. Так, например, uuu представляет Δ^{++} , ddd — Δ^{-} , а sss — Ω^{-} . Протон в этой схеме состоит из uud , нейтрон — из udd , а Λ^0 -гиперон — из uds .

Глава 20

ТРИ ДИСКРЕТНЫЕ СИММЕТРИИ

20.1. Операции C , P , T^*

Экспериментальное изучение K -мезонов привело в 1956 г. к постановке экспериментов по проверке границ применимости трех дискретных симметрий: C , P , T .

Рассмотрим любой процесс, обусловленный каким-либо взаимодействием.

Мысленно произведем над ним одну из трех следующих операций:

1. Заменяем все участвующие в процессе частицы их античастицами. Эта операция называется зарядовым сопряжением и обозначается буквой C (от английского термина Charge conjugation — зарядовое сопряжение).

2. Отразим процесс в зеркале, или изменим знаки у всех трех пространственных осей. (Изменение знака у одной оси и вращение вокруг нее на 180° меняет знаки всех трех осей.) Эта операция называется пространственным отражением и обозначается буквой P (от английского термина Parity — четность). При этой операции векторы положения \mathbf{r} и импульса \mathbf{p} меняют знак (они нечетны), а псевдовекторы (их еще называют аксиальными векторами) углового мо-

мента **L** и спина **S** знака не меняют (они четны).

3. Обратим знак течения времени. Эта операция называется обращением времени и обозначается **T** (от английского термина Time reversal).

Электромагнитное взаимодействие инвариантно относительно каждого из этих трех преобразований: они переводят любой электромагнитный процесс в другой процесс, который также может происходить в природе.

В дальнейшем выяснилось, что тем же свойством обладают гравитационные и сильные взаимодействия. Но в 1956 г. было установлено, что слабое взаимодействие стопроцентно нарушает **P** и **C**, а в 1964 г. — что оно же несколько нарушает **CP**-инвариантность (см. ниже). Если сохраняется **CPT**-инвариантность, то это означает, что нарушена также и **T**-инвариантность.

CPT-инвариантность заложена в основы описываемой картины природы. Опыты пока не обнаружили ее нарушения.

20.2. Несохранение зеркальной симметрии **P***

В 1956 г. факт распада K^+ -мезона на два и три пиона заставил поставить вопрос о несохранении **P**-симметрии в слабых взаимодействиях. Специально поставленные опыты, предложенные Ли и Янгом, в начале 1957 г. показали, что эта симметрия на-

рушается в слабых процессах максимально возможным образом.

20.3. Несохранение зарядовой симметрии C^*

Тогда же стало ясно, что в слабых процессах стопроцентно нарушается и зарядовая симметрия C .

20.4. Гипотеза о сохранении CP симметрии

В 1957 г. Ландау высказал гипотезу о том, что в природе должна иметь место строгая симметрия относительно комбинированного CP преобразования.

20.5. Сохраняющийся векторный ток

В 1955 г. Герштейн и Зельдович выдвинули гипотезу сохраняющегося векторного слабого тока для нуклонов и π -мезонов. Согласно этой гипотезе, константа векторного слабого взаимодействия, переводящего нейтрон в протон, не модифицируется сильными взаимодействиями, подобно тому, как не модифицируется виртуальными частицами электрический заряд протона. На основе этой гипотезы константа β -распада пиона должна быть в $\sqrt{2}$ раз больше константы нуклона. Спустя три года эта же гипотеза была выдвинута Фейнманом и Гелл-Манном. Вскоре опыт подтвердил ее справедливость. Идея сохранения векторного тока сыграла важнейшую роль в создании Стандартной модели.

20.6. V-A ток и частицы с левой спиральностью

В 1958 г. Маршак и Сударшан, Фейнман и Гелл-Манн и независимо Сакураи выдвинули гипотезу о том, что все слабые процессы обусловлены взаимодействием различных слагаемых слабого универсального V-A тока с его эрмитово сопряженным током.

Например, электронное слагаемое имеет вид $\bar{e}\gamma^\alpha(1 + \gamma^5)\nu_e$, где \bar{e} представляет волновую функцию рождающегося электрона, ν_e — волновую функцию поглощаемого электронного нейтрино, $\bar{e}\gamma^\alpha\nu_e$ — векторная V часть тока, а $-\bar{e}\gamma^\alpha\gamma^5\nu_e$ — его аксиально-векторная A часть. Аналогичным образом выглядит и мюонное слагаемое, а в сакатонной модели — и слагаемые $\bar{p}p$ и $\bar{p}n$. В дальнейшем на смену сакатонным токам пришли кварковые токи $\bar{d}u$ и $\bar{s}u$.

Такой вид слабого тока означает, что в ультррелятивистском пределе, когда $E \gg \gg mc^2$, в слабом взаимодействии участвуют только так называемые левополяризованные частицы, спин которых направлен против их импульса. Про такие частицы говорят, что они имеют левую спиральность. Спиральность безмассовых частиц является точным квантовым числом. Спиральность же частиц, обладающих массой, — это понятие не лоренц-инвариантное. Нарушителем строгой спиральности является масса частицы m .

20.7. Спиральность и киральность*

Сильное нарушение зеркальной симметрии в слабом взаимодействии напоминает нарушение симметрии между левым и правым в живой природе. Напомню, что никакими перемещениями в пространстве левая и правая руки не могут быть совмещены друг с другом, как не могут быть совмещены тетраэдры с вершинами $ABCD$ и $ABDC$. Про них говорят, что у них противоположные киральности. Слово киральность (от греческого слова рука $\chi\epsilon\iota\rho$) ввел в 1904 г. лорд Кельвин. Как известно, все живое обладает диссимметрией — полнейшим нарушением симметрии между левым и правым.

20.8. Несохранение CP^*

В 1964 г. был открыт распад $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$. Поскольку до этого считали, что долгоживущий K_L^0 имеет отрицательную CP -четность, а система $\pi^+ \pi^-$ должна иметь положительную CP -четность, то заключили, что CP -четность нарушается. До этого считалось, что на $\pi^+ \pi^-$ может распадаться только короткоживущий K_S^0 -мезон.

20.9. Зеркальные частицы как первый вариант темной материи

Чтобы в какой-то мере восстановить симметрию между процессом и его зеркальным отражением, была выдвинута гипоте-

за о существовании т.н. зеркальных частиц, у которых нет ни электромагнитного, ни слабого, ни тем более сильного взаимодействия с обычными частицами. Но все эти взаимодействия существуют между зеркальными частицами, причем фаза, нарушающая CP симметрию, имеет у них иной знак. Очевидно, что обладать зеркальными двойниками должны, согласно этой гипотезе, все фермионы и бозоны. Единственным исключением является гравитон. Истинная природа темной материи пока экспериментально не установлена.

Глава 21

СПУСТЯ ПОЛВЕКА

Что произошло в физике элементарных частиц за годы, прошедшие после публикации гипотезы о существовании кварков?

21.1. Шесть кварков*

Начнем с того, что с трех до шести выросло число кварков: к u -, d -, s -кваркам добавились тяжелые c -, b -, t -кварки. Первые адроны, содержащие c -кварк, были открыты в 1974 г. Первые адроны, содержащие b -кварк, были открыты в 1977 г. Наконец, самый тяжелый кварк — t — был открыт в 1995 г.

21.2. Шесть лептонов*

С четырех до шести выросло число лептонов: к e , μ , ν_e , ν_μ добавился в 1975 г. тяжелый лептон τ , а затем и его нейтрино.

21.3. Три поколения*

В результате кварки и лептоны образовали три поколения фундаментальных фермионов со спином $1/2$:

$$\begin{array}{ccc} u & c & t \\ d & s & b \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \\ e & \mu & \tau. \end{array}$$

21.4. Электрослабые бозоны*

В 1967 г. была создана электрослабая теория, и в рамках этой теории было предсказано существование электрослабых векторных бозонов: W^+ , W^- и Z^0 со спином, равным единице. Обмен W -бозонами между заряженными слабыми токами приводит к обычным слабым взаимодействиям типа β -распада. Z -бозон осуществляет новый тип слабого взаимодействия между нейтральными токами. Взаимодействия нейтральных слабых токов были открыты в ЦЕРН в 1973 г. А затем там же был построен специальный коллайдер, на котором в 1983 г. были открыты W - и Z -бозоны.

Последний неоткрытый элемент электрослабой теории — скалярный бозон со спином, равным нулю. Этот бозон называют хиггсом и обозначают буквой H . Для поисков этого H -бозона и более глубокого выяснения природы электрослабого взаимодействия в ЦЕРН построен Большой адронный коллайдер LHC.

21.5. Глюоны*

В 1972 г. была сформулирована квантовая хромодинамика — теория сильного взаимодействия между кварками за счет обмена между ними новыми частицами со спином единица — глюонами, которые обозначают буквой g . Более подробному описанию квантовой хромодинамики и теории элек-

трослабого взаимодействия будут посвящены две последующие главы.

21.6. Все фундаментальные бозоны*

А пока перечислим все фундаментальные бозоны, с которыми мы познакомились: одна частица со спином 2 — гравитон; пять частиц со спином 1 (фотон, три электро-слабых бозона и глюон); и наконец, одна частица со спином 0 — хиггс.

Глава 22

О КВАНТОВОЙ ХРОМОДИНАМИКЕ

22.1. Цвет и SU(3) симметрия*

Только что (в конце предыдущей главы) упомянутые числа — шесть кварков и один глюон — должны быть немедленно исправлены. Дело в том, что каждый из шести кварков на самом деле существует в трех различных ипостасях, которые получили название цветов. А глюон существует в восьми различных цветовых ипостасях.

И то, и другое обусловлено существованием цветовой SU(3) симметрии гораздо более фундаментальной, чем приближенная симметрия между тремя легкими кварками u , d , s . Цветовая симметрия была открыта в результате сопоставления самых разных закономерностей сильных взаимодействий, установленных многочисленными экспериментами.

22.2. Цветные кварки*

Мы знаем, что есть 6 кварков с барионным числом $1/3$ у каждого и с электрическими зарядами $+2/3$ у u , c , t и $-1/3$ у d , s , b . Каждый кварк существует в виде трех цветовых разновидностей: желтый — ж, синий — с, красный — к. Аналогично

антикварки «покрашены» в дополнительные цвета: фиолетовый — ф, оранжевый — о, зеленый — з. Разумеется, никакого отношения эти «цвета» к цветам оптического спектра не имеют. Но ими удобно пользоваться для обозначения специфических «зарядов», характеризующих взаимодействия кварков. При этом состоящие из кварков адроны цветового заряда не имеют. Их называют бесцветными или белыми.

22.3. Цветные глюоны*

Кварки взаимодействуют между собой, обмениваясь восемью цветными глюонами: $8 = 3 \times \bar{3} - 1$. Сочетание жф + со + кз является белым. Белыми являются все адроны. Так что сильные взаимодействия между адронами (включая ядерные силы) похожи на силы между электрически нейтральными атомами. Так же и силы между адронами слабее по-настоящему сильных цветовых сил между цветными глюонами и кварками.

22.4. Конфайнмент*

Цветовые силы обладают замечательным свойством конфайнмента. Цветные частицы не могут вылететь из белых адронов, поскольку они не могут существовать в свободном состоянии.

Хотя все, что мы знаем об адронах, согласуется с гипотезой конфайнмента, последовательной количественной теории этого замечательного явления пока нет.

22.5. Массы нуклонов

Масса нуклона, грубо говоря, равна сумме кинетических энергий находящихся в нем ультрарелятивистских кварков, которые в силу конфайнмента вынуждены возвращаться вглубь нуклона. Поворот их импульса вблизи радиуса конфайнмента напоминает отклонение заряженных частиц магнитным полем.

22.6. Киральный предел*

В пределе, когда массами легких кварков (u, d) можно пренебречь и положить их равными нулю, масса нуклонов практически бы не изменилась. А вот масса пионов изменилась бы радикально: пионы стали бы безмассовыми частицами. При этом оказались бы вырожденными по энергии состояния с произвольным числом пионов нулевой энергии. Поскольку пионы псевдоскалярны, то это отвечало бы строгому сохранению аксиального тока (САС — Conserved Axial Current). Такой предел называют киральным, так как при этом по отдельности сохранялись бы токи лево- и правополяризованных легких кварков. На опыте, конечно, пионы не безмассовы, но они примерно в 7 раз легче нуклонов и примерно в 5 раз легче ρ -мезонов, также состоящих из легких кварков. Так что приближенно киральная симметрия имеет место. И этому соответствует частично сохраняющийся ак-

сиальный ток (PCAC — Partially Conserved Axial Current).

22.7. Массы пионов

Знание массы пионов позволяет оценить массы легких кварков $q = u, d$, если предположить, что

$$m_q/F_\pi = m_\pi^2/m_\rho^2, \quad (22.1)$$

где $F_\pi = f_\pi/\sqrt{2} \approx 93$ МэВ — константа, характеризующая взаимодействие пиона с аксиальным током. Обоснование этой формулы обсуждается в гл. 19 книги Вайнберга «Квантовая теория поля» [3]. Отсюда следует, что масса легких кварков порядка 10 МэВ.

Из того, что протон легче нейтрона, следует, что u -кварк легче d -кварка.

22.8. Массы других кварков

Из данных по массам странных частиц следует, что масса s -кварка $m_s \approx 100$ МэВ. Масса c -кварка $m_c \approx 1,3$ ГэВ, масса b -кварка $m_b \approx 5$ ГэВ, масса t -кварка $m_t \approx 170$ ГэВ.

22.9. КХД в физике коллайдеров

Сегодня КХД является основным рабочим инструментом при расчетах рождения адронов на Большом адронном коллайдере. Лекции о современной технике вычисления древесных (т. е. не содержащих петель) диаграмм Фейнмана в КЭД и КХД см. в [17].

ОБ ЭЛЕКТРОСЛАБОЙ ТЕОРИИ

23.1. Промежуточные бозоны*

Заряженные слабые токи взаимодействуют между собой, обмениваясь W^\pm -бозонами. Их масса $m_W \approx 80$ ГэВ. Нейтральные слабые токи взаимодействуют между собой, обмениваясь Z^0 -бозонами. Их масса $m_Z \approx 91$ ГэВ. Отношение $m_W/m_Z = \cos \theta_W$ определяет величину важного параметра электрослабого взаимодействия θ_W , который называют углом Вайнберга. Константа Ферми G_F (см. раздел 17.4) следующим образом выражается через массу W -бозона:

$$G_F = \pi\alpha/\sqrt{2} m_W^2 \sin^2 \theta_W. \quad (23.1)$$

Из этой формулы видно, что малость константы Ферми обусловлена большой величиной массы W -бозона. На опыте измерено $\sin^2 \theta_W \approx 0,22$.

23.2. Игрушечная модель $SU(2) \times U(1)$

Рассмотрим игрушечную модель, в данном случае безмассовую, электрослабого взаимодействия, в которой есть два безмассовых лептона e и ν и четыре безмассовых векторных бозона W^+ , W^- ,

W^0 и B^0 . Пусть W -бозоны представляют собой компоненты изотопического триплета относительно группы $SU(2)$, а B -бозон — синглет относительно групп $SU(2)$ и $U(1)$.

В соответствии с тем, что в слабом взаимодействии участвуют лишь левополяризованные частицы (см гл. 20), предположим, что левые лептоны образуют изотопический дублет, так что $T_3 = 1/2$ для ν_L и $T_3 = -1/2$ для e_L , а правые лептоны — изосинглеты: $T(\nu_R) = T(e_R) = 0$. Предположим, что источником триплета W -бозонов является изоспин T , а источником синглетных B^0 -бозонов является величина $Q - T_3$, равная 0 для ν_R , равная -1 для e_R , и равная $-1/2$ для ν_L и e_L . Предположим, наконец, что синглетный и триплетный «заряды» g_1 и g_2 относятся как $\sin \theta_W$ к $\cos \theta_W$.

23.3. Фотон и Z-бозон в модели $SU(2) \times U(1)$

Рассмотрим теперь комбинации

$$A = B^0 c + W^0 s, \quad (23.2)$$

$$Z = -B^0 s + W^0 c, \quad (23.3)$$

отвечающие фотону и Z-бозону соответственно. Тогда

$$B^0 = Ac - Zs, \quad (23.4)$$

$$W^0 = As + Zc, \quad (23.5)$$

где для краткости введены обозначения $s = \sin \theta_W$ и $c = \cos \theta_W$.

Из сказанного выше следует, что e_L взаимодействует с комбинацией

$$\begin{aligned} & - (B^0 s + W^0 c)/2 = \\ & \quad - (Ac - Zs)s/2 - (As + Zc)c/2 = \\ & \quad \quad - Acs - Z(c^2 - s^2)/2, \quad (23.6) \end{aligned}$$

а e_R взаимодействует с комбинацией

$$-B^0 s = -Acs + Zs^2. \quad (23.7)$$

Учтем теперь, что векторный и аксиальный токи равны соответственно сумме и разности левых и правых токов. Тогда из последних шести формул следует, что фотон взаимодействует только с векторным током электрона, причем с константой $-cs$. Z -бозон взаимодействует с векторным током электрона с константой $s^2 - \frac{1}{4}$ и с аксиально векторным током электрона с константой $\frac{1}{4}$. W^\pm -бозоны связаны с заряженными токами, переводящими нейтрино в электрон, а электрон в нейтрино, с константой c .

23.4. Первый шаг к реалистичной модели

Чтобы перейти к описанию электрослабых взаимодействий всех фундаментальных фермионов, нужно добавить к дублету (ν_e, e) два других лептонных дублета: (ν_μ, μ) и (ν_τ, τ) , а также кварковые дублеты.

В случае кварков очень существенным является то, что мы должны рассматривать

не только три основных дублета:

$$(u, d), (c, s), (t, b)$$

с константой примерно 1, но и шесть так сказать «смешанных» дублетов, обеспечивающих переходы между поколениями:

$$(u, s), (c, d),$$

с константой примерно 0,22;

$$(c, b), (t, s),$$

с константой примерно 0,05;

$$(t, d), (u, b),$$

с константами, меньшими 0,01.

23.5. Второй и последний шаг

Полуигрушечная модель, описанная выше, хороша тем, что единым образом рассматривает электромагнитное и слабое взаимодействия, претендуя тем самым на описание широчайшего круга явлений. Она плоха тем, что W - и Z -бозоны в ней безмассовы, в то время как в природе они на два порядка тяжелее нуклонов. Чтобы устранить этот недостаток, ряд теоретиков предложил использовать механизм спонтанного нарушения $SU(2) \times U(1)$ -симметрии, получивший название по фамилии одного из авторов, ранее рассматривавших его, — механизм Хиггса.

23.6. Дублет скалярных полей

Для объяснения этого механизма обычно используют понятие скалярного поля φ и плотности потенциала этого поля $V(\varphi) = \lambda^2(|\varphi|^2 - \eta^2)^2$.

Здесь

$$\varphi = \begin{pmatrix} \varphi^+ \\ \varphi^0 \end{pmatrix}, \quad (23.8)$$

φ — изотопический дублет, $|\varphi|^2 = \overline{\varphi^+} \varphi^+ + \varphi^0 \overline{\varphi^0}$ — изотопический скаляр, λ — безразмерный параметр, величина которого нам пока неизвестна.

Как будет показано чуть ниже,

$$\eta = 2^{-3/4} G_F^{-1/2} = 174 \text{ ГэВ}. \quad (23.9)$$

Параметр η является единственным размерным параметром теории. Через него выражаются массы всех частиц. (Замечу, что масса t -кварка равна 172 ± 2 ГэВ! Причина этого удивительного совпадения величин m_t и η пока неизвестна.)

23.7. Спонтанное нарушение симметрии $SU(2) \times U(1)$

В результате нарушения симметрии $SU(2) \times U(1)$ ¹⁾ из четырех скалярных полей

¹⁾ При этом нарушается не только сохранение киральности частиц, но нарушается также и так называемая калибровочная симметрия, которая в этой книге не рассматривается.

остается только одно — хиггсово поле χ на фоне постоянного вакуумного конденсата η :

$$\varphi = \begin{pmatrix} 0 \\ \chi + \eta \end{pmatrix}. \quad (23.10)$$

Три других скалярных поля присоединяются к трем векторным полям W и Z : ведь в отличие от безмассовых векторных полей, обладающих лишь двумя компонентами, массивное векторное поле должно иметь три компоненты. Заметим, что скалярный конденсат электрически нейтрален; именно поэтому фотон остается безмассовым.

23.8. Конденсат и массы фундаментальных частиц

Как уже отмечалось выше, массы нуклонов обусловлены в основном механизмом конфайнмента и относятся к компетенции квантовой хромодинамики. Скалярный же конденсат η электрослабой теории дает массы всем фундаментальным частицам: лептонам и кваркам, а также векторным W - и Z -бозонам и самому скалярному бозону H , который называют бозоном Хиггса или просто хиггсом:

$$m_W = g_2 \eta / \sqrt{2} = \sqrt{2\pi\alpha} \eta / \sin \theta_W, \quad (23.11)$$

$$m_Z = m_W / \cos \theta_W, \quad (23.12)$$

$$m_H = 2\lambda\eta. \quad (23.13)$$

Что касается лептонов и кварков, то масса каждой из этих двенадцати частиц равна

$f\eta$, где f — безразмерная константа, своя у каждой частицы. Для нейтрино она в районе 10^{-13} , для электрона — $3 \cdot 10^{-6}$, для t -кварка она равна единице. К выяснению того, почему эти константы именно такие, можно будет приступить после того, как будет открыт хиггс.

23.9. Поиски хиггса*

Поиски хиггса являются задачей номер один для физики высоких энергий вот уже более тридцати лет. Эту частицу пытались найти на всех крупнейших ускорителях. Она была главной целью проекта Сверхпроводящего суперколлайдера SSC, к сожалению, не осуществленного в США.

23.10. Большой адронный коллайдер*

Сейчас основные надежды на выяснение того, существует ли хиггс, связаны с Большим адронным коллайдером LHC в ЦЕРН. Если хиггс будет открыт, то это подтвердит описанную выше простую теорию. Если хиггс открыт не будет, то это будет еще интереснее, так как позволит на коллайдере выяснить, как на самом деле устроено электрослабое взаимодействие при энергиях порядка и выше 1 ТэВ. В этом случае взаимодействие электрослабых бозонов должно стать сильным при энергии порядка 10 ТэВ.

Длина кольца LHC — 27 км, энергия каждого из двух протонных пучков в нем —

3,5 ТэВ. (При этой энергии он работает с марта 2010 г. Планируется с 2014 г. перейти на энергию 7 ТэВ в каждом из пучков.)

23.11. Лето 2011: результаты поисков хиггса

Результаты поисков хиггсов и «новой» физики на коллайдерах LHC (в детекторах ATLAS и CMS) и Tevatron (в детекторах CDF и D0) были представлены и сопоставлены на Европейской конференции по физике высоких энергий в июле 2011 г. в Гренобле [18–20] и спустя месяц на конференции Лептоны–Фотоны 2011 в Мумбаи [21]. Пока эти бозоны не обнаружены.

Глава 24

СУПЕРСИММЕТРИЯ

В отличие от предыдущих двадцати трех глав, главы 24, 25, 26 посвящены теоретическим экстраполяциям и спекуляциям, пока не получившим никакого экспериментального подтверждения. Область этих экстраполяций простирается от энергий, доступных Большому адронному коллайдеру, до абсолютно недоступных энергий порядка планковских.

Пожалуй, второй целью Большого адронного коллайдера являются поиски гипотетических так называемых суперсимметричных частиц. Понятие суперсимметрии (Supersymmetry, SUSY) появилось впервые в 1971 г. и тесно связано с понятием спина. Число работ по суперсимметрии, опубликованных теоретиками за прошедшие сорок лет, составляет десятки тысяч. Ни одной частицы, предсказываемой на основе суперсимметрии, экспериментаторы пока не открыли.

24.1. Спинорный генератор

Ключевым понятием в суперсимметрии является понятие спинорного генератора Q , изменяющего спин частицы на $1/2$. Действуя на фотон, например, Q переводит его

в гипотетическую частицу фотино, спин которой равен $1/2$. Мы твердо знаем, что в природе безмассовых фотино нет. Следовательно, строгой суперсимметрии в природе нет, и она должна быть нарушена. Нет и фотино с массой порядка ГэВ, характерной для легких адронов. Многие ожидали, что массы суперсимметричных частиц существенно меньше ТэВ'а.

Оставив пока в стороне вопрос о нарушении суперсимметрии, рассмотрим сначала ненарушенную SUSY. Рассмотрим антикоммутатор двух спинорных генераторов:

$$[Q, \bar{Q}]_+ \equiv Q\bar{Q} + \bar{Q}Q = -2p_\mu \gamma^\mu, \quad (24.1)$$

где p_μ — генератор четырехмерного сдвига, а γ^μ — четыре матрицы Дирака. Мы видим, что перейдя от одной частицы к другим, а затем вернувшись к исходной, мы обнаруживаем ее в другой точке пространства–времени. Таким образом, суперсимметрия обобщает и углубляет специальную теорию относительности.

24.2. Спинорно-флейворные генераторы

Объединение геометрической и внутренней симметрии происходит, если «навесить» на спинорный генератор некий «внутренний» индекс i ($1 \leq i \leq N$), указывающий, в какую из частиц супермультиплетта переходит исходная частица. Выделенный случай представляет собой $N = 4$. Это так

называемая $N = 4$ -суперсимметрия. В этой теории одна частица с $J = 1$, четыре с $J = 1/2$ и шесть с $J = 0$. Всего восемь бозонных и восемь фермионных безмассовых состояний.

24.3. Лето 2011: Результаты поисков легких суперчастиц

Отрицательные результаты поисков легких (легче одного ТэВ) суперчастиц (и других проявлений «новой физики») были представлены в докладах на упомянутых выше конференциях в Гренобле и Мумбаи [19–21].

24.4. Перспективы

Каковы перспективы физики элементарных частиц после выяснения механизма нарушения электрослабой $SU(2) \times U(1)$ симметрии при энергиях порядка ТэВ и расстояниях порядка 10^{-19} м? Если суперсимметрия окажется непричастной к проблеме нарушения симметрии электрослабого взаимодействия, то вполне возможно, что ее нарушение проявится лишь на планковской шкале (см. гл. 27), а может быть, и никогда не проявится. В этом случае следующей проблемой после объединения электромагнитного и слабого взаимодействий будет их объединение с сильным взаимодействием.

Глава 25

ВЕЛИКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ

Можно ли ожидать, что на еще меньших расстояниях электромагнитное и слабое взаимодействия объединятся еще более сильно в том смысле, что они будут описываться одной константой взаимодействия, а угол Вайнберга будет фиксирован какой-то более высокой симметрией? Можно ли ожидать, что при этом к ним присоединится и сильное хромодинамическое взаимодействие? То есть, что лептоны и кварки на малых расстояниях образуют «единую семью»? На каких масштабах — пространственно-временных и энергетически-импульсных — этого можно ожидать?

25.1. Бег трех констант

Надежда получить положительный ответ на эти вопросы основывается на том, что на расстояниях порядка 10^{-19} м три константы не так уж сильно отличаются друг от друга и проявляют тенденцию к дальнейшему сближению. Существуют теоретические модели такого объединения, в которых эти константы «сбегаются» к единому значению

$$\alpha_{\text{GU}} = g_{\text{GU}}^2/4\pi \approx 1/40 \quad (25.1)$$

на расстояниях порядка 10^{-32} м. (Здесь индекс GU от английского словосочетания Grand Unification.)

25.2. SU(5)-симметрия

Простейшей моделью великого объединения является SU(5)-симметрия. В ней лептоны и кварки каждого поколения принадлежат двум мультиплетам: 5-плету и 10-плету. Так, в первом поколении 5-плет состоит из $(3\bar{d}_L, e^-_L, \nu_L)$, а 10-плет состоит из $(3d_L, 3u_L, 3\bar{u}_L, e^+_L)$; здесь индекс L означает левую киральность, коэффициент 3 означает три цвета.

В группе симметрии SU(5) имеется $5^2 - 1 = 24$ векторных бозона. Двенадцать из них — глюоны, W^+ , W^- , Z бозоны и фотон. Двенадцать других — очень массивные X и Y бозоны с массами порядка 10^{15} ГэВ. Шесть X бозонов имеют заряды $\pm\frac{4}{3}$; в 5-плете они осуществляют переходы между тремя \bar{d} -антикварками и электроном и обратно. Шесть Y -бозонов имеют заряды $\pm\frac{1}{3}$; в 5-плете они осуществляют переходы между тремя \bar{d} -антикварками и нейтрино и обратно.

25.3. Распад протона и нейтрона

Рассмотрим теперь переходы в 10-плете под действием X и Y бозонов. Здесь X бозоны могут переводить u -кварки в \bar{u} -антикварки и обратно, а Y -бозоны могут

переводить u -кварки в \bar{d} -антикварки и обратно.

Но это означает, что через X пара uu может превратиться в $e^+\bar{d}$, а через Y пара ud может превратиться в $\bar{\nu}\bar{d}$. Следовательно, мы получили переходы $p \rightarrow e^+$ и $n \rightarrow \bar{\nu}$.

Разумеется, в силу закона сохранения энергии и импульса одинокий нуклон не может превратиться в одинокий лептон. Поэтому речь идет о распадах типа $p \rightarrow e^+\pi^0$, $p \rightarrow e^+\pi^+\pi^-$, $n \rightarrow \bar{\nu}\pi^0$, $n \rightarrow e^+\pi^-$ и т. д. При этом должны стать нестабильными и обычные стабильные атомные ядра. Ожидаемое время таких распадов порядка 10^{30} лет.

Поиски таких распадов в огромных многокилотонных детекторах не обнаружили их на уровне 10^{32} лет и показали таким образом, что простейшая $SU(5)$ -модель не осуществляется в природе.

25.4. Другие симметрии

Идея великого объединения была рассмотрена с использованием других, более сложных групп симметрии: от $SO(10)$ до самой старшей из исключительных групп E_8 . Некоторые из этих моделей стимулировали поиски новых экзотических процессов, таких, например, как нейтрон–антинейтронные осцилляции в вакууме. Но пока эти поиски не привели к новым экспериментальным открытиям. Так что я не буду в этом кратком тексте обсуждать другие симметрии.

Глава 26

ВБЛИЗИ МАССЫ ПЛАНКА

Характерная энергия великого объединения ($\approx 10^{16}$ ГэВ) всего на три порядка меньше массы Планка, в районе которой гравитационное взаимодействие становится сильнее электрослабого и сильного взаимодействий. Так что здесь возникают условия для супервеликого объединения всех частиц и взаимодействий в рамках супергравитации.

Мультиплет $N = 8$ супергравитации содержит: 1 гравитон со спином 2, 8 гравитино со спином $3/2$, 28 ($= 8 \cdot 7 / 1 \cdot 2$) бозонов со спином 1, 56 ($= 8 \cdot 7 \cdot 6 / 1 \cdot 2 \cdot 3$) фермионов со спином $1/2$ и 70 ($= 8 \cdot 7 \cdot 6 \times 5 / 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4$) бозонов со спином 0; всего 128 бозонных и 128 фермионных безмассовых состояний. (Заметьте, что у частицы со спином ноль есть одно состояние, а у безмассовой частицы с ненулевым спином — два состояния.)

26.1. Суперструны

С начала 1980-х гг. большинство теоретиков, занимающихся физикой на планковской шкале, работают над теорией суперструн. Суперструны — это гипотетические одномерные объекты, имеющие раз-

меры l порядка планковской длины $l_P = = 1/m_P \approx 10^{-35}$ м и характерное натяжение (энергию на единицу длины) порядка m_P^2 , где m_P — масса Планка. Основному состоянию суперструны отвечают безмассовые (или практически безмассовые в масштабе m_P) частицы. Возбужденные состояния образуют бесконечный спектр уровней частиц с характерным шагом m_P .

Приставка «супер» указывает на то, что спектр частиц, описываемых суперструной, обладает суперсимметрией: числа фермионных и бозонных возбуждений одинаковы, а их массы вырождены. Незамкнутым, открытым суперструнам («палочкам») отвечают частицы со спином 1 и 1/2. Замкнутым суперструнам («колечкам») отвечают частицы со спином 2, 3/2, 1, 1/2 и 0.

26.2. Десять измерений пространства

Для построения теории суперструн оказалось необходимым в каждой точке нашего пространства ввести еще шесть (а с середины 1990-х гг. — семь) дополнительных пространственных измерений, но в отличие от \mathbf{r} и t не прямолинейных, а свернутых с радиусом кривизны порядка длины Планка. Впервые дополнительное пространственное измерение было введено Калуцей в 1919 г. для того, чтобы объединить классическую электродинамику Максвелла с общей теорией относительности Эйнштей-

на. Попытка эта не удалась так же, как попытка того же времени Вейля ввести классическую масштабную симметрию, которую он назвал калибровочной. В середине 1920-х гг. дополнительная пространственная координата была использована Клейном для построения релятивистски инвариантного квантового уравнения и Фоком для обнаружения, что это уравнение для электрически заряженной частицы обладает квантовой фазовой инвариантностью, которую через несколько лет Вейль назвал калибровочной.

26.3. М-теория

В середине 1990-х гг. было показано, что различные модели суперструн могут быть синтезированы в рамках единой теоретической схемы, получившей название М-теория. Она включает, кроме одномерных струн, также многомерные мембраны, которые называют бранами. Работа над М-теорией продолжается.

26.4. Анти-де Ситтер

В современной космологической литературе имя математика и астронома Де Ситтера (1872–1934) прочно связано с представлением о пустом пространстве–времени, но не плоском, а обладающем кривизной. Если кривизна положительна, то такое пространство–время называют деситтеровским (dS), ему отвечает положительная космо-

логическая постоянная Λ . Если кривизна и Λ отрицательны, то пространство–время называют антидеситтеровским (*AdS*). При этом обычно говорят о пятимерном суперпространстве AdS_5 , в которое погружен наш четырехмерный мир. Вводят такие понятия для того, чтобы в будущем на их основе построить теорию всего сущего — Theory of Everything (ТОЕ). К сожалению, я не понимаю, почему такая квантовая теория должна основываться на чисто классическом понятии искривленного пространства–времени.

Глава 27

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

27.1. «Солнце всходит и заходит»*

Недавние опросы населения в России и США обнаружили, что многие люди в обеих странах считают, что не только Луна, но и Солнце вращаются вокруг Земли. То, что Солнце всходит и заходит (вращается вокруг нас) это не ошибка, это поверхностная правда, которая во многом справедлива и для многих людей достаточна. Для человека, никогда не совершавшего далеких путешествий, во многом достаточно представление, что Земля плоская. Тот, кто совершил межконтинентальный перелет, мог убедиться, что Земля — шар, но по-прежнему может считать, что Солнце является ее спутником. Но есть и более глубокая правда: Земля — шар, Луна — меньший шар, который вращается вокруг Земли, и вместе они вращаются вокруг Солнца.

В повседневной жизни можно обходиться поверхностными правдами. Но это совершенно недопустимо при преподавании современной астрономии и физики. Когда профессор убеждает своих студентов, что в Большом адронном коллайдере масса протона возрастает в тысячи раз, он не пропове-

дует поверхностную правду о каждодневной жизни, а закладывает ложные понятия, основанные на пресловутой формуле $E = mc^2$, в представления своих студентов об основах теории относительности (см. книгу [25] и статью [26]).

27.2. О преподавании физики*

Современная техника, будучи квантовой и релятивистской, наглядно демонстрирует, что в основе своей квантовой и релятивистской является сама природа. Это — основной урок XX века. Все большее число людей сознает, что мы живем в эпоху квантовой и релятивистской цивилизации. Поэтому простой взгляд на мир, не противоречащий современной физике, должен быть доступен максимальному числу людей с самого раннего возраста, даже тем, кто никогда не станет физиком. Только так можно будет избежать глобальной катастрофы.

27.3. О трагической судьбе SSC*

В последние десятилетия XX века стало ясно, что основной нерешенной задачей физики высоких энергий является исследование хиггсовского сектора Стандартной модели. В регулярно публикуемом «Обзоре свойств частиц» в 1990 г. можно было прочесть на с. III.12 о планах физического пуска трех протон-протонных коллайдеров: 1) Ускорительно-накопительного комплекса УНК (3 ТэВ, 1995?), 2) Большого адронного

коллайдера LHC (8 ТэВ, 1996?), 3) Сверхпроводящего суперколлайдера SSC (20 ТэВ, 1999), которым предстояло решить эту задачу. У двух первых из них даты пуска сопровождались вопросительными знаками. У третьего — Сверхпроводящего суперколлайдера SSC, который должен был иметь самую высокую энергию — 20 ТэВ в каждом пучке, вопросительного знака не было. Строительство тоннеля для этого коллайдера — кольца диаметром 87 км шло полным ходом у городка Ваксахачи вблизи Далласа. Если бы этот проект был осуществлен, Стандартная модель элементарных частиц, возможно, перестала бы быть моделью, а стала бы законченной теорией. А может быть, что еще интересней, было бы обнаружено существование «новой физики», не укладывающейся в рамки Стандартной модели. Но в 1993 г. конгресс США при обсуждении бюджета на 1994 г. отправил на дно этот строившийся флагман физики высоких энергий, что нанесло сильнейший удар по развитию физики элементарных частиц (см. письмо Клинтона [22], так и не получившее статуса пресс-релиза Белого дома). В автобиографии Клинтона [23] обсуждение бюджета описано, но SSC не упоминается. Зато в 2011 г. он посвятил заключительную часть своей лекции в Давосе SSC(LHC)(см. [24]).

За пару лет до закрытия SSC в России были прерваны работы по строительству Ускорительно-накопительного комплекса УНК, в котором должны были сталкиваться

протонные пучки с энергией 3 ТэВ. Из тэвных машин долгие годы (1985–2011) успешно работал лишь Тэватрон в США. В нем сталкивались пучки протонов и антипротонов с энергией 1 ТэВ.

27.4. LHC и перспективы*

Как сказано выше (в главе об электрослабой модели), сейчас поиски хиггсов ведутся на Большом адронном коллайдере LHC. Пока обнаружить хиггсы не удалось. Возможно, что в ближайшем будущем их удастся найти на LHC. Это, конечно, будет триумфом электрослабой модели. Но в известном смысле гораздо интереснее будет, если на LHC будет доказано, что хиггсов с массами легче 1 ТэВ не существует. Это означало бы, что W - и Z -бозоны при энергиях существенно выше, чем 1 ТэВ, взаимодействуют по-настоящему сильно, и описать их поведение в рамках теории возмущений нельзя. Для экспериментального исследования таких взаимодействий понадобился бы коллайдер масштаба SSC или еще большей энергии. В существующей электрослабой модели, основанной на теории возмущений, существует около двух дюжин параметров, численные значения которых мы объяснить (т.е. вычислить) не можем. Возможно, это удастся сделать, если выйти за рамки теории возмущений.

27.5. О сути и истине в науке*

Мне кажется, что большинство людей не понимает сути современной науки не потому, что эта суть непостижима. Конечно, понять хоть что-нибудь до конца нельзя. Но иметь правильное представление о природе можно и нужно. Если отобрать в современной физике главные идеи, то можно объяснить ученику, как устроен окружающий его мир.

К сожалению, профессорам трудно договориться между собой о том, какие идеи в физике являются главными. Меня поражает неспособность многих профессиональных физиков признать, что в специальной теории относительности масса не зависит от скорости, и терпимость тех из них, кто не сомневается в том, что масса не зависит от скорости, к тому, чтобы их детей и внуков продолжали учить, что масса зависит от скорости.

Еще больше меня поражает почти всеобщее восприятие квантовой механики как науки, сквозь призму которой наш мир выглядит призрачно зыбким. А ведь именно благодаря квантовой механике он так прочно устроен.

Мне кажется предвзятым отношение многих физиков к вопросу о гравитации и гравитонах. Сегодня очень модно (см., например, [27, 28]) объяснять все — от свойств элементарных частиц до фазовых переходов — с помощью черных дыр и

суперструн. Возможно, что со временем такая Теория Всего (ТОЕ — Theory of Everything) и будет создана, но пока в ней еще слишком много недоделанного [29], и не существует экспериментальных данных, подтверждающих справедливость ТОЕ. Так что не с изучения этой недостроенной теории должен начинать свое знакомство с физикой школьник.

А вот начинать его с твердо установленных основных констант природы — скорости c и кванта \hbar — не только можно, но и нужно. Именно законы, содержащие эти константы, объясняют основные явления природы.

Очень важно понимание того, что истина существует, даже если нам не дано постичь окончательную истину. Что задача науки — стремиться к истине, все более приближаясь к ней.

Постскриптум 1

22 сентября 2011 г. вышел препринт коллаборации ОПЕРА [30], в котором полторы сотни авторов из нескольких десятков институтов сообщили, что скорость мюонного нейтрино v_μ в пучке ЦЕРН — Гран Сассо превосходит скорость света в вакууме c . Согласно [30], $(v - c)/c = 2,48(0,28)[0,30] \cdot 10^{-5}$, где в круглых скобках указана статистическая неточность, а в прямоугольных скобках указана систематическая неточность. Согласно [30] нейтрино преодолевают расстояние 730 км между CERN и Gran Sasso на $60,7(6,9)[7,4]$ наносекунд быстрее, чем если бы они двигались со скоростью c . Свет при этом как бы отстал от нейтрино примерно на 20 м.

При первом, беглом чтении препринта я не понял, как с помощью спутниковой системы GPS можно было установить с такой точностью момент рождения нейтрино от распада пиона в километровом тоннеле CERN. При более внимательном чтении я осознал, что измерялось по существу время между детектированием протонного сгустка в кольце ускорителя в ЦЕРН перед сбросом пучка на мишень, где протоны рождали пионы, и детектированием нейтрино в Гран Сассо. Так можно было делать, поскольку все частицы имеют скорости, близкие

к с. Возможно, стоило бы привести и обсудить данные, полученные на детекторе мюонов, сопровождающих рождение нейтрино, в ЦЕРН.

Статья оказалась неудобочитаемой: она перегружена десятками акронимов, в которых тонут скупые разъяснения. А подробные разъяснения и тщательный анализ возможных систематических ошибок необходимы.

Замечу лишь, что все системы и прецизионные приборы, используемые авторами, основаны на теории относительности и квантовой теории. Статья, претендующая на проверку теории относительности, должна быть написана по-другому.

Постскрипtum 2

Заканчивая писать этот краткий путеводитель по физике, я хотел бы ответить тем моим коллегам, которые прислали мне свои критические замечания о рукописи и которых я благодарю в предисловии. Все они согласны с тем, что такой краткий путеводитель нужен, но многие из них считают, что написанный мной текст слишком краток, что необходимо его существенно расширить, упомянув большее число выдающихся физиков, внесших вклад в развитие физики, и существенно расширить список литературы. А с другой стороны, большинство из них считают, что текст должен быть сделан более популярным и что он должен быть снабжен иллюстрациями. К сожалению, выполнить эти во многом справедливые пожелания за отведенное мне время я не могу.

Список литературы

1. *Weinberg S.* Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity. John Wiley, 1972.
Вейнберг С. Гравитация и космология: принципы и приложения общей теории относительности. М.: Мир, 1975.
2. *Weinberg S.* The Quantum Theory of Fields, V.I. Foundations. Cambridge University Press, 2000.
Вейнберг С. Квантовая теория поля. Т. 1. Общая Теория. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
3. *Weinberg S.* The Quantum Theory of Fields, V. II. Modern Applications. Cambridge University Press, 2001.
Вейнберг С. Квантовая теория поля. Т. 2. Современные приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
4. *Зельдович Я.Б.* Высшая математика для начинающих и ее приложения к физике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
5. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. 6. Электродинамика. Гл. 19. УРСС. 2004
6. *Nakamura K. et al.* (Particle Data Group) // J. Phys. G. 2010. V. 37. P. 075021, Periodic Table.
<http://pdg.lbl.gov/2010/reviews/rpp2010-rev-periodic-table.pdf>
<http://periodic.lanl.gov/>
7. *Loschmidt J.* <http://www.chemteam.info/Chem-History/Loschmidt-1865.html>
Perrin J. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1926/press.html

8. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика. М: Наука, 1969.
9. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Введение в теорию квантованных полей. М: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
10. *Nakamura K. et al.* (Particle Data Group) // J. Phys. G. 2010. V. 37. P. 075021. Table 1.1; <http://pdg.lbl.gov/2010/reviews/rpp2010-rev-phys-constants.pdf>
11. Аллен К.У. Астрофизические величины. М.: Мир, 1977 (Единицы: § 12. Массы, светимости, радиусы и плотности звезд: § 100. Галактика: § 135).
12. *Richard Powell.* Atlas of the Universe <http://www.atlasoftheuniverse.com/index.html>
13. Окунь Л.Б., Селиванов К.Г., Телегди В.Л. Гравитация, фотоны, часы // УФН. 1999. Т. 169. С. 1141–1147. <http://www.itep.ru/theor/persons/lab180/okun/list25/8selivanovtelegdi99.pdf>
Okun L.B., Selivanov K.G., Telegdi V.L. On interpretation of the redshift in a static gravitational field // American J. of Physics. 2000. V. 68. P. 115–119. http://www.itep.ru/theor/persons/lab180/okun/em_13.pdf
Okun L.B. Photons and static gravity // Modern Physics Letters A. 2000. V. 15. P. 1941–1947. http://www.itep.ru/theor/persons/lab180/okun/em_14.pdf
14. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1990. Гл. 27 «Частицы и Вселенная».
15. *Weinberg S.* The first three minutes. Basic Books, Inc., Publishers, 1977.

- Вайнберг С.* Первые три минуты. М.: Эксмо, 2011.
16. Proceedings of International Simposium *pnΛ50* The Jubilee of the Sakata Model. November 25–26, 2006, Nagoya, Japan / Editors M. Harada, Y. Ohnuki, S. Sawada, K. Yamawaki. Progress of Theoretical Physics, Supplement No 167, 2007, which contains a contribution by L.B. Okun, The Impact of the Sakata Model (arXiv: hep-ph/0611298).
 17. *Peskin M.E.* Simplifying Multi-Jet QCD Computation. arXiv:1101.2414
 18. Results on higgs at Grenoble.
LHC searches for higgs:
<http://indico.in2p3.fr/materialDisplay.py?contribId=985&sessionId=16&materialId=slides&confId=5116>
Tevatron searches for higgs:
<http://indico.in2p3.fr/materialDisplay.py?contribId=984&sessionId=16&materialId=slides&confId=5116>
 19. New physics at Grenoble
New physics at Tevatron
<http://indico.in2p3.fr/materialDisplay.py?contribId=953&sessionId=16&materialId=slides&confId=5116>
Highlights and searches at CMS
<http://indico.in2p3.fr/materialDisplay.py?contribId=954&sessionId=16&materialId=slides&confId=5116>
Highlights and searches at ATLAS
<http://indico.in2p3.fr/materialDisplay.py?contribId=955&sessionId=16&materialId=slides&confId=5116>
 20. All talks at the Grenoble Conference
<http://indico.in2p3.fr/contributionListDisplay.py?trackShowNoValue=1&OK=1&sortBy=>

- number&sessionShowNoValue=1&selTracks=0&selTracks=1&selTracks=2&selTracks=3&selTracks=4&selTracks=5&selTracks=6&selTracks=7&selTracks=8&selTracks=9&selTracks=10&sc=21&selTypes=4&selSessions=6&selSessions=8&selSessions=9&selSessions=10&selSessions=11&selSessions=13&selSessions=14&selSessions=3&selSessions=1&selSessions=12&selSessions=15&selSessions=16&order=down&confId=5116#contribs
21. *Peskin M.E.* Summary talk at Lepton-Photon 2011.
arXiv:1100.3805
 22. President William J. Clinton on SSC (June 1993)
<http://www.presidency.ucsb.edu/ws/index.php?pid=46703#axzz1UqKNr5Bs>
 23. *Bill Clinton.* My life. N.Y.: Alfred Knopf, 2004.
Билл Клинтон Моя жизнь. М.: Альпина Бизнес Букс, 2005.
 24. *William J. Clinton* speaks at Davos 2011 about LHC. The last three minutes (54:30–57:00).
<http://www.youtube.com/watch?v=p2dT7xVS6-s>
 25. *Okun L.B.* Energy and Mass in Relativity Theory. World Scientific. 2009.
 26. *Okun L.B.* The «relativistic» mug. arXiv:1010.5400
Опубликовано в «Gribov-80 Memorial Volume: Quantum Chronodynamics and Beyond» / Yu.L. Dokshitzer, P. Levai, J. Nyri Editors // World Scientific. 2011. P. 439–448.

-
27. *Brian Greene*. The Hidden Reality. N.Y.: Alfred A Knopf, 2011.
Lecture at Boston Museum of Science March 2, 2011.
<http://www.youtube.com/watch?v=fJqpNudIss4&NR=1>
 28. *Brian Greene*. The Fabric of the Cosmos
<http://www.youtube.com/watch?v=4SYsDst5Sz0>
http://www.youtube.com/watch?v=5u_rYMdBfDo
 29. *Weinberg S*. Particle Physics, from Rutherford to the LHC // *Physics Today*. August. 2011. P. 29–33.
 30. *Adams T. et al*. Measurement of the neutrino velocity with OPERA detector in the CNGS beam; arXiv:1109.4897.

Акронимы

БАК (LHC) — Большой адронный коллайдер

КГД — Квантовая гравитодинамика

КХД — Квантовая хромодинамика

КЭД — Квантовая электродинамика

ОИЯИ — Объединенный институт ядерных исследований

ОТО — Общая теория относительности

СТО — Специальная теория относительности

ССК (SSC) — Сверхпроводящий суперколлайдер

УНК — Ускорительно-накопительный комплекс

ЦЕРН — Европейский центр ядерных исследований

CERN — (Centre) Organisation Européen de Recherche Nucléair

CAC — conserved axial current

PCAC — partially conserved axial current

Предметный указатель

- α Центавра 86
 α -лучи 101
 $\alpha \approx 1/137$ 55
 α_{GU} 138
 β -лучи 101, 102
 β -распад 102
 γ -лучи 101
 γ -матрицы 49
 γ — фотон 21
 ε — диэлектрическая проницаемость среды 80
 ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума 81
 \hbar — главная константа квантовой механики 12
 \hbar и квантование вращения 40
 \hbar — квант Планка 13
 \hbar — минимальный квант вращения 20
 μ — магнитная проницаемость среды 80
 μ_0 — магнитная проницаемость вакуума 81
 σ -матрицы 50
 $\varphi\upsilon\sigma\iota\varsigma$ — фисис — природа 12
- c — главная константа теории относительности 12
 c — максимальная скорость прямолинейного и равномерного движения 20
 c — скорость света 13
С — зарядовое сопряжение 113
САС — сохраняющийся аксиальный ток 124
СМВ — Cosmic Microwave Background, космический микроволновой фон 93
СРТ-инвариантность 114
 e — электрон 21
E₈ 139
GPS 150
 i — мнимая единица 25
LHC 146
LHC — Большой адронный коллайдер 132
 p — протон 21

- PCAC — частично сохраняющийся аксиальный ток 125
- P — пространственное (зеркальное) отражение 114
- s, p, d, f оболочки в атомах 60
- SO(10) 139
- SSC — Сверхпроводящий суперколлайдер 132, 146
- SU(5) 138
- Supersymmetry 134
- SUSY 134
- TOE — Theory of Everything 143, 149
- T — обращение времени 114
- UNK 146
- V-A слабый универсальный ток 116
- W -бозоны 126
- X - и Y - бозоны в SU(5) 138
- Z -бозон 126
- Абстракция в физике** 28
- Адроны 123
- Акронимы 158
- Аксиальный вектор 38
- Актиниды 64
- Актиний 64
- Аморфные тела 68
- Амплитуда перехода 15
- Ансамбль в квантовой механике 16
- Антидеситтеровское пространство 143
- Антикоммутатор 135 — спинорных генераторов 135
- Антинейтрон 72
- Антипротон 74
- Античастицы 72
- Аргон 62
- Астероиды 85
- Астрономическая единица (а.е.) 85
- Атом 22 — водорода 55
- БАК** — Большой адронный коллайдер 147
- Барионное квантовое число 72
- Бег трех констант 137
- Белый карлик 86
- Благородные газы 63
- Бозоны 41 — X и Y в SU(5)-симметрии 138
- Большой взрыв 92
- Валентность** 68, 69
- Вековая прецессия перигелия Меркурия 95
- Великое объединение 137

- Вещество 22
Взаимодействие электрона и протона 56
Виртуальные гравитоны 96
— частицы 73
Внутреннее строение Земли 83
Водная оболочка Земли 83
Водород 61
Волновая функция 48
Волновое число 43
Волновой вектор 43
Время жизни τ 46
— полураспада
 $\tau_{1/2} = \tau \ln 2$ 46
Второй период в периодической системе элементов 61
- Газы 65
Галактика 86
Галактики 86
Гамильтониан 48
Гамма-всплеск 91
Гелий 61
Гипотеза о сосуществовании множества миров 46
— — сохранении CP симметрии 115
— — сохраняющегося векторного тока 115
Главное квантовое число n 56
- — — в атомах периодической системы элементов 60
— — — в атоме водорода 57
— — — для многоэлектронных атомов 60
Глобальная катастрофа 145
Глюоны 123
Гпк 87
Гравитационное смещение длины волны фотона 95
Гравитационный радиус 98
Гравитон 16
Градус Кельвина 66
— Цельсия 66
ГэВ — гигаэлектронвольт 53
- ДНК 65
Дальний порядок 68
Две щели 46
Движение 22
Действие 51
Декуплет барионов 112
Деситтеровское пространство 143
Десятимерное пространство 142
Дефект массы 42
Джоуль 53

- Диаграммы Фейнмана 73
 — — для ионизации позитрония фотоном 76
 — — — нормального магнитного момента электрона 77
 — — — поляризации вакуума фотоном 78
 — — — радиационной поправки к магнитному моменту электрона 77
 — — — рассеяния электрона на протоне 73
 — — — рождения протона и антипротона при столкновении электрона и позитрона 75
 Дифференцирование 27
 Диэлектрики 68
 Длина Планка 141
 — волны 43
 Единицы 23
 — в которых $\hbar = 1$ 53
 — — — $c = 1$ 53
 — времени и длины 24, 28
 Жидкая мантия 83
 — фаза 67
 Жидкий гелий 69
 Жидкость 65
 Жизненный путь Солнца 86
 Закон Ньютона 84
 Земная кора 83
 Зеркальные частицы 118
 Изоляторы 68
 Изотопическая симметрия 102
 Изотопический спин 102
 Изотопы 59
 Изотропия пространства 21, 38
 Импульс в механике Ньютона 31
 Интегрирование 27
 Интервал 33
 Инфинитное движение 56
 Инфляция 92
 Ионизация атома 56
 — позитрония 76
 Испарение воды 65
 Испускание фотона 56
 Истинно нейтральные частицы 72
 КГД — квантовая гравитодинамика 96
 КХД — квантовая хромодинамика 123
 КЭД — квантовая электродинамика 15, 71

- Калибровочная ин-
вариантность
 Фока–Вейля 142
— симметрия 130
Калий 62
Квazar 91
Квазичастица 70
Квант Планка \hbar 13
Квантование спина и
 орбитального мо-
 мента 40
Квантовая и реляти-
 вистская природа
 145
Квантовое состояние
 15
Кинетическая энергия
 в механике Ньюто-
 на 30
Киральная симметрия
 124
Киральный предел
 124
Клинтон о SSC и LHC
 146
Книга Вайнберга
 «Первые три мину-
 ты» 93
— Зельдовича «Выс-
 шая математика
 для начинающих»
 27
Ковариантный вектор
 49
Комплексное число 25
Конденсированное ве-
 щество 65, 68
Константа α 55
— Больцмана 66
— Ньютона 16, 84, 96
— Ферми G_F 126
— Хаббла 89
Константы c и \hbar как
 путеводные звезды
 17
Контравариантный
 вектор 49
Космологическая по-
 стоянная Λ 142
кпк 87
Красное и синее гра-
 витацционное сме-
 щение 90
— смещение 90
Красный гигант 86
Кривизна простран-
 ства 142
Криптон 62
Кристаллизация 68
Кристаллы 68
Ксенон 62
КХД 125
кэВ — килоэлектрон-
 вольт 53
Лантан 64
Лантаниды 64
Линейная суперпози-
 ция 48
Литий 61
Лоренц 32
Луна 85
М-теория 142

- Магнитная индукция — сакатонов 110
В 80
 Магنون 70
 Максимальная скорость c 28
 Масса Луны 85
 — Планка 16, 141
 — покоя m_0 14
 — протона 36
 — Солнца M_\odot 84
 — частицы в теории относительности 35
 — фотона 36
 — электрона 36
 «Массивная точка» 22
 Массовая поверхность 73
 Массы кварков 125
 — пионов 125
 Масштабная инвариантность Вейля 142
 «Материальная точка» 22
 Материя 21
 Матрицы 27
 — Дирака 49
 — Паули 50
 Мембраны 142
 Металлы 68
 Метрический тензор Шварцшильда 98
 Минковский 32
 Модели суперструн 142
 Модель Сакаты 109
- Молекулы 65
 Море Дирака 76
 Мпс 87
 Мультиплет $N = 8$ супергравитации 140
 МэВ — мегаэлектрон-вольт 53
 мэВ — миллиэлектрон-вольт 53
- Натрий** 62
 Нейтральный ток 126
 Нейтрон 59
 Нейтронная звезда 88
 Неоднократное уменьшение массы частицы в 10 раз 31
 Неон 61
 Нерелятивистская механика как частный случай релятивистской механики 32
 Несохранение CP симметрии 117
 — зарядовой симметрии C 115
 — зеркальной симметрии P 115
 Неупругая ситуация 56
 Неупругое рассеяние 56
 Нуклоны 102
 Ньютон об океане непознанного 18

- ОПЕРА** 150
- Однородность времени 21, 29
 - пространства 21, 29
 - Октет барионов 112
 - Оператор Гамильтона 48
 - импульса 48
 - энергии 48
 - Опыт в башне Гарвардского университета 90
 - Опыты с двумя щелями 46
 - Орбитальное вращение 37
 - квантовое число l 60
 - — — — в атоме водорода 58
 - Орбитальный момент в теории относительности 39
 - Отклонение света гравитационным полем 95
 - Открытие высокотемпературной сверхпроводимости 69
 - сверхпроводимости 69
 - сверхтекучести 69
- Парсек** 87
- Первый период в периодической системе элементов 61
 - Периодическая система химических элементов 59
 - Плазмон 70
 - Планетарная туманность 86
 - Плоскость земной орбиты 84
 - Поверхностная правда 144
 - Повторяющиеся («немые») индексы 49
 - Поглощение фотона 56
 - Позитрон 72, 74
 - Позитроний 76
 - Поиски хиггса 132
 - Полупроводники 68
 - Поляризация вакуума 77
 - Полярон 70
 - Поступательное движение 22
 - Потенциальная энергия в механике Ньютона 30
 - — электрона в атоме водорода 55
 - Пояс астероидов 85
 - Преобразование Галилея 31, 33
 - Лоренца 33
 - Пресловутая формула $E = mc^2$ 145

- — — и зависимость массы частицы от ее скорости 14
- Принцип Ферма 51
- наименьшего действия 51
- Проводники 68
- Проекция орбитального квантового числа m_l 58, 60
- спина 58
- — m_s 60
- Промежуточные бозоны 126
- Пространство Анти-де Ситтера AdS 142
- Минковского 32
- де Ситтера dS 142
- и время 21
- — — в теории относительности 32, 34
- Протон 21
- Псевдовектор 38
- Пуанкаре 32
- Пульсар 88
- Пятимерное пространство-время Калуцы-Клейна 142
- Пятый период в периодической системе элементов 62
- Рад**иан 23
- Радиус Солнца 84
- Радиус-вектор r 21
- Радон 62
- Различные смыслы термина «импульс» 31
- Размерности массы, энергии и импульса одинаковы в единицах, в которых $c = 1$ 53
- Распады протонов и нейтронов 139
- Расстояние от Солнца до Земли 84
- Реальные частицы 73
- Редукция волновой функции 16
- Ротон 70
- Ртуть 68, 69
- Рубидий 62
- С**верхпроводимость 69
- «Сверхсветовые нейтрино» 150
- Сверхтекучесть 69
- Световой год 87
- Свободная частица 28
- Седьмой период в периодической системе элементов 62
- Семь периодов таблицы Менделеева 62
- Симметрия $SU(5)$ 138
- Сириус 86
- Система единиц СИ 53, 81
- Скорость 22
- Случай и теория вероятностей 46

- Событие 21
Солнечная система 84
«Солнце — спутник Земли?» 144
Соотношение $E^2/c^4 - p^2/c^2 = m^2$ 14
— де Бройля 43
Соотношения неопределенности Гейзенберга 47
Сохранение импульса 29
— энергии 29
Сохраняющийся аксиальный ток 124
Спин 41
Спиновое вращение 37
Спинорно-флейворные генераторы 135
Спинорный генератор Q в суперсимметрии 134
Спонтанное нарушение симметрии $SU(2) \times U(1)$ 130
Средняя энергия молекул воздуха 66
Стандартная модель элементарных частиц 12
Стекло 68
Степени десяти 26
Столбцы периодической таблицы элементов 63
Суперсимметрия 134
Суперструны 141
Таблица Менделеева 59
Таяние льда 65
Твердая фаза 68
Твердое вещество 65
Темная материя 94, 118
— энергия 94
Температура 66
— Земли 83
Термы оптических спектров 61
Тождественность атомов 39, 42
— частиц 39
Третий период в периодической системе элементов 62
Три канонических эффекта ОТО 95
— координаты в пространстве 21
— элементарные частицы материи: e , γ , p 21
ТэВ — тераэлектрон-вольт 53
Тэватрон 147
УНК — Ускорительно-накопительный комплекс 146
Угловые единицы 23
Угол Вайнберга 126
Упругая ситуация 56
Упругое рассеяние 56

- Уравнение Дирака 49
— Клейна–Фока–Гордона 48
— Шрёдингера 48
- Ф**азовые переходы 65, 69
- Фермионы 41
- Финитное движение 56
- Фонон 70
- Формула Эйнштейна
 $E_0 = mc^2$ 34
- Фотино 135
- Фотон 21
- Франций 62
- ЦЕРН** 132
- Цвета антикварков 123
— кварков 123
- Цезий 62
- Центр Галактики 86
- Ч**астота частицы-волны 44
- Черная дыра 88, 91, 98
- Четвертый период в периодической системе элементов 62
- Четыре действия школьной математики 25
— квантовых числа электрона в атоме n, l, m_l, m_s 60
- Четырехмерный интервал 33
- Число Лошмидта 66
- Ш**естой период в периодической системе элементов 62
- Шкала Планка 141
- Щ**елочноземельные элементы 63
- Щелочные металлы 63
- Эйнштейн 32
- Эклиптика 84
- Экситон 70
- Эксперимент ОПЕРА 150
- Электрическая индукция **D** 80
- Электрон 21
- Электронвольт 30, 53
- Электрослабая теория 126
- Элементарное квантовое состояние 41
- Элементарные частицы материи 21
- Энергия в механике Ньютона 30
— и импульс в теории относительности 34
— покоя E_0 34
— связи 42
- эВ — электронвольт 53
- Ю**питер 85
- Я**блоко Ньютона 84
- Ядро Земли 83