

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Д. Иваненко

СОДЕРЖАНИЕ

§ 1. Историческое введение. Таблица элементарных частиц	149
§ 2. Электрон	151
§ 3. Позитрон	158
§ 4. Электромагнитное поле и фотоны	160
§ 5. Нейтрино. Теория бета-распада	162
§ 6. Протон	167
§ 7. Нейтрон	169
§ 8. Модель атомного ядра	170
§ 9. Мезотрон	175
§ 10. Гравитационное поле	179
§ 11. Космические лучи. § 12. Распространённость частиц и элементов.	
§ 13. Общие вопросы релятивистской квантовой механики. § 14. Трудности теории.	

§ 1. ИСТОРИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ. ТАБЛИЦА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В 1895 г. была открыта первая элементарная частица — электрон. Открытие атомного ядра и создание планетарной модели атома (1911 г.) привело к обнаружению второй частицы — протона. Открытие третьей частицы — нейтрона — в 1932 г. и установление состава ядер показало, что всё вещество состоит в основном из электронов, протонов и нейтронов, к которым нужно присоединить электромагнитное поле, или сопоставленные ему частицы — фотоны, и гравитационное поле. Позднее в космических лучах были открыты три новые частицы — позитрон (1932 г.) и положительный и отрицательный мезотроны (1937 г.). Весьма вероятно также существование частицы нейтрино, и правдоподобно наличие нейтральных мезотронов (нейтретто).

При этом «элементарными» называются простейшие частицы и поля, не состоящие из других известных частиц и полей. Таким образом, элементарные частицы играют сейчас роль неделимых атомов Демокрита. Важно отметить, что изучение вещества за последние полвека пока что ни в одном случае не привело к дальнейшему дроблению на какие-то, скажем, «субчастицы», но «в значительной мере» было связано с открытием новых элементарных частиц и всё новых и новых их свойств.

ТАБЛИЦА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Наряду с массой указан атомный вес по шмале: $s_{\text{O}^{16}} = 16,000$; значение спина s дано в долях $\hbar/2\pi$;
 $e_0 = 4,80 \cdot 10^{-10}$ эл. стат. ед.; $\mu_B = \frac{eh}{4\pi mc}$ (магнетон Бора); $\mu_0 = \frac{eh}{4\pi Mc}$ (ядерный магнетон), μ -масса мезотрона;

$$f \sim g/x_0; f' \sim g'/x_0; x_0 = \frac{2\pi\mu c}{\hbar}; g \sim 5e; g' \sim 4 \cdot 10^{-17} \sim 10^{-8}e$$

Частица	Масса.	Тип волновой функции, спин, уравнение движения, статистика	Электрический заряд, магнитный момент	Мезотронный заряд и момент	Распространённость
1. Гравитон (квант слабого гравитационного поля)	0	Симметричный тензор 2-го ранга; уравнения Эйнштейна; $s = 2$; статистика Бозе	0 0	0 0	Гравитационное поле является искривлением пространства-времени, вызываемым всеми видами вещества
2. Фотон (γ) (квант электромагнитного поля)	0	Вектор-потенциал; уравнения Максвелла $s = 1$ статистика Бозе	0 0	0 0	Испускаются и поглощаются в разнообразных процессах. Плотность лучистой энергии в известной части вселенной $\rho \approx 10$
3. Нейтрино? (ν)	$m_\nu < 0,2 m$; $m_\nu = 0?$	Би-спинор; $s = 1/2$; уравнение Дирака; статистика Ферми	0 $\mu_\nu < \frac{1}{7000} \mu_B$	g' f'	Порождаются при β -распаде, K -захвате и распаде мезотронов; ввиду проникающей способности практически не поглощаются веществом. С окончательной достоверностью не открыты.
4. Электрон (e_-)	$m = 9 \cdot 10^{-28}$ $A_e = 5,48 \cdot 10^{-4}$	Би-спинор; $s = 1/2$. Уравнение Дирака; статистика Ферми	$-e_0$ $-\mu_B$	g' f'	Входят в состав всех атомов. В известной нам части вселенной примерно $N_e \sim 10^{73}$ электронов. Поглощаются и порождаются при разнообразных процессах большой энергии в ядрах атомов, кос-

					мических лучах и при различных взаимодействиях элементарных частиц. (β -распад, K -захват, распад мезотронов; рождение и аннигиляция пар)
5. Позитрон (e_+)	m	Би-спинор; $s = 1/2$; уравнение Дирака; статистика Ферми.	c_0 μ_B	s' f'	Порождаются в различных процессах большой энергии, в космических лучах и ядерных процессах. Ввиду избытка электронов, с которыми e_+ могут аннигилироваться, концентрация позитронов ничтожна
6. Мезотрон нейтральный? (μ_0)	$\mu \sim 20 m$	Скаляр, псевдоскаляр, вектор? Соответственно спин	0	-	Нейтретто с достоверностью не открыты. Повидимому, могут порождаться при столкновениях нуклеонов большой энергии
7. Мезотрон отрицательный (μ_-)	$\sim 200 m$	$s = 0$ или 1? Соответственно уравнение де-Бройля, псевдоскалярное уравнение или статистика Бозе;	$-e_0$	-	Заряженные мезотроны представляют жёсткую компоненту космических лучей. Порождаются в космических лучах. Радиоактивны. Время жизни $\tau_0 = 1,5 \cdot 10^{-6}$ сек. и поглощаются ядрами. Концентрация мезотронов ничтожна.
8. Мезотрон положительный (μ_+)	$\sim 20 m$	Скаляр, псевдоскаляр, вектор? Соответственно спин	$+e_0$	-	
9. Протон (p)	$M = 1836,5 m$ $A_p = 1,00758$	Би-спинор; $s = 1/2$; уравнение Дирака; статистика Ферми.	$\mu_p = +2,7896 \mu_0$	g f	Протоны и нейтроны составляют все атомные ядра. Число нуклонов в известной части вселенной, примерно равно $N \sim 10^{75}$. Повидимому, первичные космические лучи являются, в основном, протонами. В разнообразных реакциях протоны и нейтроны переходят друг в друга. Свободные нейтроны радиоактивны. Время жизни $\tau \sim 10^4$ сек.
10. Нейтрон (n)	$M_n = 1839 m$ $A_n = 1,008941$	Би-спинор; $s = 1/2$; уравнение Дирака; статистика Ферми.	$\mu_n = -1,985 \mu_0$	g f	

Итак, согласно современным физическим воззрениям, всё известное вещество на Земле, Солнце, звёздах и других астрономических объектах в межзвёздном пространстве и в потоке космических лучей, короче говоря, во всей известной части вселенной, состоит из элементарных частиц и полей следующих немногих типов:

а) Поля в узком смысле или частицы, лишённые массы покоя: 1) электромагнитное поле или фотоны, 2) слабое гравитационное поле или гравитоны.

б) Лёгкие частицы: 3) электроны 4) позитроны, 5) нейтрино.

в) Средние частицы: 6) положительные мезотроны, 7) отрицательные мезотроны, 8) нейтральные мезотроны (нейтретто).

г) Тяжёлые частицы или нуклеоны: 9) протоны, 10) нейтроны.

При этом, несмотря на то, что ряд свойств частиц ещё не изучен, и открытие новых частиц отнюдь не исключается, а теория во многих отношениях далека от завершения, всё же не вызывает сомнений, что в основном физические явления сводятся к процессам с перечисленными десятью типами вещества. Все известные процессы заключаются в движении элементарных частиц, их взаимодействии и образовании систем частиц (ядер, атомов и т. д.), взаимном порождении и уничтожении частиц.

Носителями основных свойств вещества: массы, заряда, магнитного момента и т. д., оказались элементарные частицы, движущиеся в пространстве, которое само подвержено воздействию вещества (в дальнейшем мы будем нередко писать «частица» без дальнейшего уточнения, т. е. подразумевая также поле в узком смысле).

Хотя мы во многом ещё далеки от естественной системы элементарных частиц, подобной, по законченности, «естественной периодической системе химических элементов» Менделеева и, очевидно, переживаем период, примерно аналогичный эпохе триад Деберейнера, но сейчас, благодаря установлению ряда глубоких соотношений, конечно, уже нет речи о каком-либо беспорядочном нагромождении частиц.

Число всевозможных реакций и типов движения, связанных с элементарными частицами, поистине огромно. Исследования последних десятилетий показали, что все известные эффекты объясняются наличием у частиц, кроме массы и электрического заряда, ряда новых свойств: магнитного момента, мезотронного заряда, вращательного момента (спина) и статистических свойств. Весьма существенным для всех частиц оказался квантовый характер их движения, описываемого волновыми функциями. Так как элементарные частицы весьма часто движутся с большими скоростями—порядка скорости света, их кинематика должна быть также релятивистской. Релятивистская квантовая механика достигла во многом замечательных результатов, но в ряде пунктов остаётся незаконченной теорией.

В дальнейшем будет выяснено, что тип волновых функций или спин и связанные с этим уравнения движения определяют ряд основных

свойств частиц: статистику, кинематический магнитный момент, характер взаимодействий и время жизни. Поистине, релятивистские квантовые уравнения движения описывают форму существования элементарных частиц, скажем мы, перефразируя известный тезис Энгельса.

Свойства элементарных частиц можно разделить на три основных класса: а) собственная масса (определяющая, так сказать, основную индивидуальность частицы), б) тип волновых функций (или спин) и уравнение движения, в) заряды (константы, определяющие интенсивность связи частиц друг с другом).

Если мы хотим дать описание вещества известной части вселенной в целом, то необходимо рассмотреть распространённость химических элементов, космические лучи, а также установить связь с космологическими проблемами. Целесообразно с самого начала представить основные сведения о частицах в виде таблицы, поскольку нам придётся рассматривать часто всю совокупность частиц одновременно. Пояснения будут даны в соответствующих параграфах.

§ 2. ЭЛЕКТРОН

Существование элементарной порции электрического заряда было предсказано Стони и Гельмгольцем в 1874 — 1885 гг. Носитель отрицательного электричества — электрон, был открыт Дж. Дж. Томсоном в 1895 г., выяснившим, что катодные лучи в разрядной трубке являются не чем иным, как потоком отрицательно заряженных частиц — электронов.

Многочисленные попытки найти частицу меньшей, но не исчезающей массы или меньшего заряда, не привели ни к каким результатам, в частности, оказались неверными эксперименты Эренхафта, объявившего о (мнимом) открытии «субэлектрона». Признание элементарности электрона быстро вошло в науку.

В 1925 — 1926 гг. открывается ряд новых свойств электрона. Ученики Эренфеста — Гаудсмит и Уленбек, на основании спектральных данных, доказали наличие у электрона собственного механического момента количества движения (вращательного момента) или, как его стали называть, по предложению Дирака, «спина», компонента которого по любому направлению может принимать только два значения: $s_z = \pm \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$. Как вскоре выяснилось, здесь не может

быть речи о реальном «вращении» электрона. Спин электрона следует считать проявлением новой внутренней степени свободы и характеризовать электрон четырьмя степенями свободы: тремя обычными, внешними, связанными с движением в пространстве, и четвёртой спиновой. Поэтому состояние электрона задаётся четырьмя квантовыми числами.

Тогда же выяснилось, что электрон обладает магнитным моментом, тесно связанным со спином и равным по абсолютной величине борровскому магнетону.

Далее, в 1925 г. Паули установил фундаментальный принцип, согласно которому в каждом энергетическом состоянии внутри атома, характеризуемом четырьмя квантовыми числами, может находиться не более одного электрона.

На языке современной волновой механики, выполнимость принципа Паули означает необходимость описания частиц функциями, антисимметричными относительно перестановки координат и спинов любой пары частиц. Подчеркнём, что подчинение, либо неподчинение, принципу Паули сперва ошибочно казалось особым свойством электронов, протонов или других частиц, которое требовалось явно постулировать. Ферми и Дирак, применив принцип Паули к электронному газу, построили новую квантовую статистику, отличную от классической.

С другой стороны, газ фотонов, атомов гелия или атомов аргона и т. д. подчиняется статистике Бозе-Эйнштейна, допускающей неограниченное число частиц в любом квантовом состоянии. Бозевские частицы описываются симметричными волновыми функциями.

Наконец, в те же годы было открыто важнейшее новое качество электрона, а также протона и всех других элементарных частиц, ядер, атомов, которое заключается, говоря наглядно, в наличии особых волновых свойств. Волновые свойства частиц были предсказаны в 1924—1925 гг. де-Бройлем. Длина волны λ де-Бройля для тела,двигающегося с импульсом p , равна $\lambda = \frac{h}{p}$ или при малых скоростях

$\lambda = \frac{h}{mv}$, где m — масса тела в состоянии покоя. Иначе говоря, движение электрона, как и других частиц, описывается волнами (обычно обозначаемыми буквой ψ), которые распространяются в пространстве согласно законам особой квантовой или волновой механики. Оказалось, что волны де-Бройля имеют вероятностный характер, именно, величина $p \, d\tau = \psi^* \psi \, d\tau$ даёт вероятность найти частицу в элементе объёма $d\tau$.

Квантовая механика замечательным образом объяснила явления дифракции электронов, гомеополлярную химическую связь, ферромагнетизм, радиоактивный α -распад и множество других явлений со свободными и связанными электронами и другими частицами, совершенно недоступных приближённой квантовой теории Бора, который, однако, ещё в 1913—1923 гг. удалось, в основном, правильно описать движение внутриатомных электронов и объяснить периодическую систему элементов. Нет ни малейшего сомнения в том, что нерелятивистская квантовая механика де-Бройля-Шредингера-Гейзенберга-Борна-Йордана даёт точное описание движений при не слишком больших скоростях.

Квантово-механические или волновые свойства движения особенно сильно сказываются в тех случаях, когда λ порядка размеров области, в которой совершаются процессы (например, для электронов в атоме $\lambda \approx 10^{-8}$ см). Иначе говоря, квантовая механика существенна для всех процессов, в которых величина «действия» (энергия $\times$ время) будет порядка кванта действия $h = 6,6 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек, что как раз

имеет место для элементарных частиц и простейших систем: ядер, атомов и т. п. обладающих малой массой.

Для классической ньютоновской и некантовой релятивистской механики характерен их универсализм, т. е. описание движения любых объектов одними и теми же уравнениями. Точно так же нерелятивистская квантовая механика описывает движения волн любых частиц и систем одним и тем же уравнением Шредингера.

Следует особо выделить вопросы кинематики, так как переход к синтезу релятивизма и квантовой механики — этих двух великих теорий первой половины XX века, чрезвычайно характерен для современного понимания элементарных частиц. Можно сказать, что теория элементарных частиц есть в значительной степени релятивистская квантовая механика.

Построение квантовой кинематики, удовлетворяющей требованиям теории относительности, привело к ошеломляющим успехам, но вместе с тем почти каждый шаг на пути этого синтеза достигается с трудом, напоминая этапы построения нерелятивистской квантовой теории или релятивистского обобщения электродинамики движущихся тел.

Весьма существенный шаг в теории элементарных частиц был сделан в 1928 г. Дираком, установившим релятивистское квантовое уравнение движения электрона. При этом для описания спина пришлось ввести волновую функцию с четырьмя компонентами, обладающую особыми трансформационными свойствами — так называемый спинор (точнее — би-спинор), четыре компоненты спинорной ψ -функции подчиняются системе четырёх дифференциальных уравнений, которые можно записать в виде одного матричного уравнения (см. § 13.5).

Вся относительная сложность дираковской теории окупается её успехами. Во-первых, уравнение Дирака автоматически приводит к значению спина $1/2$, или лучше сказать, спин $1/2$ соответствует именно дираковское уравнение. Во-вторых, как было показано Паули, выполнение его принципа и подчинение статистике Ферми следуют из полуцелого значения спина. Тем самым впервые выяснилось, что в релятивистской квантовой механике нет и не может быть универсального уравнения движения, пригодного для всех частиц, но каждая частица подчиняется своему индивидуальному уравнению, определяемому его спином и характером волновых функций.

В-третьих, у электрона, согласно теории, возникает магнитный момент требуемой величины без того, чтобы ему заранее приписывался какой-либо врождённый магнетизм. Наглядно можно сказать, что движение частицы, описываемой спинорными функциями, столь сложно, что она как бы «вращается» и приобретает, благодаря наличию заряда, эффективный магнитный момент, который следует назвать «кинематическим». Заметим, что релятивистская квантовая механика заряженных частиц со спином, отличным от нуля, всегда приводит к возникновению кинематического магнитного момента, равного борновскому магнетону, взятому с соответствующей массой. Таким образом,

спин, магнетизм и статистика электронов оказались объяснёнными релятивистской квантовой механикой.

Уравнение Дирака в прекрасном согласии с экспериментом смогло полностью описать взаимодействие электронов с электромагнитным полем и другими заряженными частицами и объяснить движение электронов в различных конкретных случаях, выяснив всевозможные детали структуры спектральных линий, дать полное объяснение эффекта Комптона, фотоэффекта, тормозного испускания фотонов электронами при их столкновении с ядрами и т. д., и т. д.

Далее, анализируя своё уравнение, Дирак обнаружил, что наряду с электроном оно может описывать «анти-электроны», частицы той же массы и спина, но положительного заряда, никогда ранее не наблюдавшиеся.

Дирак предсказал, что новые частицы смогут порождаться и уничтожаться одновременно с электронами. Отсылая за деталями к § 4, подчеркнём здесь, что действительно у электрона, а затем и у других частиц, в согласии с гипотезой Дирака, было открыто новое свойство: возможность порождаться и уничтожаться, подобно фотонам.

Относительно связи электрона, как и других элементарных частиц, с гравитационным полем, следует указать на незначительность для них всех эффектов тяготения, ввиду малой массы частиц. Ньютоновская энергия взаимодействия электрона с протоном будет примерно в 10^{40} раз меньше их кулоновской энергии связи

$$\frac{\kappa m M}{r} : \frac{e^2}{r} \sim 10^{-40}.$$

Поэтому, гравитационными эффектами для отдельных элементарных частиц можно пренебречь (см. § 10).

Наконец, в последние годы, у электронов, как и у других частиц, были открыты новые специфические свойства, обусловленные связью с особым — мезотронным — полем, иначе говоря, с мезотронами, новыми частицами с массой чаще всего $\mu = 200 m$, в свободном виде открытыми в космических лучах. В далеко идущей аналогии с зарядными — электрическими, и дипольными — магнитными свойствами у электрона обнаружен мезотронный квазиэлектрический заряд g' , по величине значительно меньший e , (и по природе, конечно, совершенно отличный от электрического заряда). Повидимому, электрон обладает также квазимагнитным моментом $f' \sim \frac{g'}{\kappa_0}$, примерно в 10^{10} раз меньшим боровского магнетона.

Благодаря связи с мезотронным полем электрон может порождаться (вместе с нейтрино) при распаде отрицательного мезотрона $\mu_- \rightarrow e_- + \nu$, а также порождаться при β -распаде радиоактивных ядер (см. § 5). Наблюдался также обратный процесс поглощения электрона ядром или ядерным протоном, называемый K -захватом (поскольку поглощаются чаще всего электроны с K -оболочки атомов). Следует предвидеть, что специфические мезотронные свойства электронов приведут

к возникновению сил притяжения между ними и нейтронами. Наличие таких сил должно помочь выяснению природы так называемого изотопического смещения спектральных линий у средних элементов (Иваненко). Вместе с тем, теория предсказывает, что ядерные эффекты должны несколько уменьшить кулоновское электрическое притяжение между протоном и электроном и вызвать сдвиг уровней тонкой структуры в ту же сторону, что и наблюдаемый на опыте (Гейтлер-Фрелих-Кан). Величину связи с электромагнитным и мезотронным полем можно характеризовать не зарядами, но соответствующими константами «тонкой структуры»: $\alpha = \frac{2\pi e^2}{hc} = \frac{1}{137,02}$ (постоянная Зоммерфельда), $\beta = \frac{2\pi g'}{hc} \sim \sim 10^{-18}$ (ядерная постоянная тонкой структуры). Незначительность α и β' играет весьма существенную роль, обуславливая возможность рассматривать воздействие электромагнитного поля или мезотронного поля, вообще говоря, как слабое возмущение, и применять теорию последовательных приближений. То же обстоятельство позволяет провести сравнительно резкую границу между заряженными частицами и электромагнитным полем. Если бы α было сравнимо с 1, связь с полем была бы значительной, и превращение электронов и позитронов в фотоны было бы весьма частым явлением. При этом различие между электромагнитным полем и частицами, порождающими это поле, в значительной мере оказалось бы стёртым.

С другой стороны существенно, что в области релятивистских квантовых эффектов задача одного изолированного тела, т. е. единственной элементарной частицы, строго говоря, теряет смысл, поскольку частицы переходят друг в друга, порождаются и уничтожаются. Тем самым теория элементарных частиц подсказывает желательность рассмотрения всей совокупности частиц одновременно.

Резюмируя, можно сделать вывод, что основным качеством электрона является электрический заряд, так как магнитные и мезотронные его свойства выражены гораздо менее ярко.

Несводимыми свойствами электрона, по современным данным, являются: масса, электрический и мезотронный заряды, а также спин или характер волновых функций, определяющий вместе с тем уравнение движения. Теория электрона относится к числу наиболее успешно разработанных глав физики элементарных частиц. Однако релятивистская квантовая механика электрона, как и всех других частиц, далеко не свободна от дефектов различного типа, из которых мы перечислим лишь главные, частью связанные между собой; во-первых, затруднения, связанные с бесконечной энергией электромагнитного поля, порождённого электроном; во-вторых, затруднения, обязанные новой трактовке вакуума и нелинейному обобщению электродинамики в связи с теорией позитрона и пар, и в-третьих, затруднения с бесконечностями, которые возникают в высших приближениях теории возмущений.

Как и для всех других частиц, значения массы и зарядов электрона берутся из опыта и не имеют, пока что, никакого объяснения. Таким

образом, задачей будущей, более совершенной теории, явится прежде всего устранение всех перечисленных трудностей и вывод констант массы и электрического и мезотронного зарядов.

§ 3. ПОЗИТРОН

В пределах экспериментальной точности все константы позитрона по абсолютному значению совпадают с электронными. Теории позитрона и электрона точно одинаковы и в значительной мере составляют части единого целого. Напомним обстоятельства открытия позитрона, явившегося первой элементарной частицей, предсказанной теоретически. При построении уравнения для электрона, Дирак отметил в нём трудность, связанную с наличием, наряду с положительными, отрицательных значений энергии. Вопрос об устранении этой «плюс-минус» трудности Дирак сперва оставил открытым. В дальнейшем выяснилось, что просто отбросить отрицательные значения энергии невозможно. Более того, оказалось, что любая релятивистская квантовая кинематика приводит к той же «плюс-минус» трудности, коренящейся ещё в классическом релятивистском соотношении между энергией и импульсом:

$$E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$$

(являющимся обобщением более привычной формулы $E = mc^2 + p^2/2m$ или $E_{\text{kin}} = \frac{p^2}{2m}$, пригодной лишь при малых скоростях). В некантовой

теории, частицы, обладавшие в начале движения положительными энергиями, не смогут, непрерывно изменяя энергию, перейти в состояние отрицательной энергии. Точно так же частицы, обладавшие отрицательной энергией, остаются для нас ненаблюдаемыми. Поэтому состояния с отрицательной энергией можно просто отбросить.

Иное положение вещей имеет место в квантовой механике, которая допускает скачки из одного состояния в другое. Для того чтобы запретить переходы в состояния с отрицательной энергией, Дирак сделал предположение, что все эти состояния уже заняты электронами по одному на каждом уровне с данным импульсом и значением спина. При этом бесконечное число электронов на уровнях отрицательной энергии постулируется ненаблюдаемым, однако под влиянием тех или иных внешних воздействий электроны могут переходить в состояние энергии положительной. Тогда одновременно с рождением обычного электрона возникает незаполненное состояние или «дырка» в распределении уровней отрицательной энергии, которая будет вести себя, как антиэлектрон с противоположным знаком заряда. Обратно, падение электрона в «дырку» будет означать его аннигиляцию вместе с позитроном. При этом будет испускаться два фотона.

Сперва Дирак предполагал, что антиэлектрон есть протон, но вскоре было показано, что масса антиэлектрона равняется электронной. С точки зрения современного метода вторичного квантования это обстоятель-

ство является очевидным (см. § 13.6). Первоначальный интерес к гипотезе Дирака, ввиду отсутствия положительных электронов, сравнительно быстро заглох, и наличие решений с отрицательной энергией в уравнении Дирака многие авторы, во главе с Бором и Паули, продолжали рассматривать, как некоторую трудность, свидетельствующую, якобы, даже о «кризисе» в квантовой механике и подлежащую устранению отнюдь не при помощи гипотезы Дирака. Не поддаваясь всеобщим сомнениям и попыткам модифицировать уравнение, например, исключить из него, согласно предложению Шредингера, «опасные» члены, ведущие к новым эффектам, Дирак рассчитал ряд явлений с новой частицей и указал, в частности, на возможность одновременного порождения и уничтожения пары: электрон и антиэлектрон.

Вне всякой связи с предсказанием Дирака позитрон был открыт в 1932—1933 гг. в космических лучах Андерсоном и Блеккетом. Блеккет наблюдал следы пар e_- , e_+ и даже ливни этих частиц. Вскоре порождение и уничтожение пар e_- , e_+ было обнаружено в лабораторных условиях, в точном согласии с предсказанием Дирака. Наиболее эффективными для образования пар оказались столкновения фотонов большой энергии $h\nu \gg mc^2$ с ядрами тяжёлых элементов [взаимодействие электромагнитного поля, с которыми растёт пропорционально квадрату заряда ядра $(Ze)^2$]. Энергия фотона полностью превращается в собственную и кинетическую энергию частиц пары, атомное же ядро, служащее как бы «катализатором», принимает избыток импульса. Один фотон сам по себе превратиться в пару, конечно, не может. Адиханову удалось наблюдать порождение пар от γ -лучей в поле порождающих их ядер. Пары наблюдаются также при столкновениях электронов с ядрами и принципиально могут возникать при самых разнообразных взаимодействиях фотонов и заряженных или даже только «намагниченных» частиц друг с другом в области высоких энергий.

Большой теоретический интерес представляет порождение пар при столкновении двух фотонов, обладающее крайне малой вероятностью и экспериментально до настоящего времени не наблюдавшееся*).

Открытый одновременно обратный процесс уничтожения или аннигиляции электрона и позитрона идёт с излучением двух фотонов:

$$e_- + e_+ \rightarrow \gamma + \gamma';$$

$$2mc^2 + E_{\text{kin}}^- + E_{\text{kin}}^+ \rightarrow h\nu + h\nu'.$$

Кроме порождения позитронов, как компонент пары при различных процессах, связанных с электромагнитным полем, они могут возникать, подобно электронам, в эффектах ядерного характера, благодаря наличию у позитронов мезотронного квазизаряда g' (и, вероятно, квази-

*) Отметим здесь, кстати, любопытную возможность образования стабильной системы: «позитрония» (Руарк) из электрона и позитрона, вращающихся вокруг общего центра тяжести в течение некоторого времени, равного по порядку величины $\tau \sim \alpha^{-5} \sim 10^{-10}$ сек (Иваненко и Соколов).

магнитного момента f'). К этим явлениям относится испускание позитронов при β -распаде искусственно радиоактивных ядер (${}_{7}\text{N}^{18}$, ${}_{8}\text{O}^{15}$ и других), а также при распаде положительных мезотронов: $\mu_{+} \rightarrow e_{+} + \nu$. Предсказание и открытие позитронов и порождения и уничтожения пар, несомненно, явилось одним из наибольших триумфов всей современной науки и смело может быть поставлено в один ряд с обнаружением планеты Нептуна или новых химических элементов в менделеевской системе. Позднее выяснилось, что все элементарные частицы, в согласии с релятивистской квантовой механикой, способны рождаться и уничтожаться, переходя в другие частицы, при строгом соблюдении законов сохранения энергии, импульса, момента количества движения (спина) и электрического заряда. Поэтому разделение частиц друг от друга является до некоторой степени условным, в особенности это относится к парам частиц и античастиц с противоположным знаком заряда.

С теоретической точки зрения, позитрон, обладающий спином $1/2$, описывается спинорными ψ -функциями электронного типа, подчиняется уравнению Дирака и удовлетворяет, в согласии с этим, статистике Ферми. Более того, полное решение уравнения Дирака всегда учитывает возможность участия позитронов в процессах, связанных с электронами, и обратно участие электронов в позитронных эффектах:

$$\psi = \psi_{el} + \psi_{pos}.$$

Лишь в области малых энергий можно отделить e_{-} от e_{+} . Взаимодействие позитронов со всеми полями и частицами во всём совершенно аналогично взаимодействию электронов. Несмотря на огромные успехи, теорию электрона и позитрона всё же нельзя считать законченной, ввиду наличия ряда трудностей, присущих релятивистской квантовой механике в целом (см. § 14).

§ 4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ФОТОНЫ

Теория электромагнитного поля, наряду с теорией электронов, относится к числу наиболее разработанных разделов физики элементарных частиц. Элементарной волне или «порции поля» сопоставляется частица — квант света или фотон. Ввиду отсутствия массы покоя у фотона, корпускулярные свойства в этом случае гораздо менее ярко выражены, чем у частиц, обладающих массой покоя. Неудивительно, поэтому, что исторически сперва была развита волновая теория электромагнитного поля (Гюйгенс-Френель-Максвелл).

С другой стороны, своеобразный ход развития физики привёл к тому, что квантовые свойства движения были обнаружены впервые не на электронах, но на более глубоко изученных в то время явлениях излучения. В 1900 г., при рассмотрении теплового излучения, Планк открыл квант действия h (размерность $\text{эрг} \cdot \text{сек}$). В 1905 г. при объяснении фотоэффекта Эйнштейн пришёл к понятию фотонов. Решающим

этапом в признании корпускулярной природы света явилось открытие Комптоном в 1923 г. особого рассеяния рентгеновских лучей, которое было интерпретировано как «столкновение» фотона с электроном.

Двойственный характер электромагнитных явлений послужил затем де-Бройлю основанием для предсказания волновых свойств электронов. Дальнейшее углубление аналогии света и частиц конечной массы покоя оказалось весьма плодотворным. Электроны и другие частицы оказались способными уничтожаться и порождаться, подобно фотонам; теория ядерных сил, переносимых мезотронами, обладающими конечной массой, также строится по аналогии с теорией сил электромагнитных, переносимых фотонами.

Следует различать, как и в случае других полей, во-первых, распространение свободного электромагнитного поля, во-вторых, испускание или порождение поля зарядами, в-третьих, воздействие поля на заряды, поглощение его зарядами и порождение заряженных частиц полем.

Свободное электромагнитное поле и порождение электромагнитного поля зарядами и магнитами описывается уравнениями Максвелла-Лоренца. Волновая функция электромагнитного поля состоит из 4-х компонент потенциала (скалярный A_0 и векторный потенциал A) и образует 4-мерный вектор. Само электромагнитное поле (электрическое поле E и магнитное поле H) представляет собой определённые комбинации производных от потенциалов. Наличие нескольких компонент потенциалов или напряжённостей электромагнитного поля позволяет описать поляризацию волн или спин фотона (см. § 13.3 и 13.4). Значение спина фотона равно 1^*).

Согласно теореме Паули (см. § 13.6), фотоны, как частицы, обладающие целым спином, подчиняются статистике Бозе, которая приводит к формуле Планка для распределения энергии в спектре равновесного («чёрного») излучения при различных температурах.

В теории Максвелла следует отметить следующие обстоятельства: 1) отсутствие магнитных полюсов; 2) вещественный характер всех величин, что соответствует нейтральности поля; 3) вырожденный, в известном смысле, характер уравнений Максвелла, соответствующий исчезновению массы покоя фотона. Обобщением уравнений Максвелла для случая конечной массы являются уравнения Прока (см. § 9 и § 13.5).

Воздействие электромагнитного поля на заряженные частицы учитывается добавочными членами в уравнениях релятивистской квантовой механики, соответствующими энергии взаимодействия частиц с полем (см. § 13.6).

Остаётся, наконец, учесть связь электромагнитного поля с гравитационным. Эренфест и Толман проанализировали гравитационное поле,

*) С наглядной стороны это вполне понятно на основе правила отбора, согласно которым, например, изменение квантового числа l , характеризующего момент количества движения при переходе электрона в атоме, равно $\Delta l = \pm 1$. Очевидно, это изменение момента количества движения атома передаётся испущенному фотону или приобретает атомом за счёт поглощённого фотона.

создаваемое узким пучком света. При этом было весьма наглядно выяснено, что электромагнитное поле вызывает гравитационные действия, как и всякий другой вид вещества; гравитационные действия фотонов, как и всех элементарных частиц, чрезвычайно слабы.

Отметим ещё не лишённую интереса, с точки зрения редукции частиц друг к другу, попытку де-Бройля построения нейтринной теории света, развивавшуюся также Иорданом, Кронигом и Соколовым. В простейшем варианте этой гипотезы фотон представлялся составленным из двух нейтрино. Развитие этой идеи не привело к каким-либо законченным результатам.

Уравнения Максвелла — вместе с уравнениями квантовой механики заряженных и «магнитных» частиц — полностью объясняют все разнообразнейшие явления испускания, поглощения и рассеяния света свободными и связанными в атомах, молекулах и т. д. электронами, испускание и поглощение γ -лучей протонами и ядрами, тормозное испускание фотонов электронами, протонами, мезотронами и т. д.; все спектральные эффекты, тонкую и сверхтонкую структуру спектральных линий атомов.

Среди электромагнитных эффектов особое место занимают испускание фотонов при аннигиляции e_- , e_+ , а также обратное явление порождения пары e_- , e_+ за счёт фотонов. Как уже указывалось, возможность подобных эффектов означает отсутствие резкой границы между электромагнитным полем и частицами. Аналогичные эффекты могут иметь место с парами противоположно заряженных мезотронов. Кроме того, связь с парами частиц приводит к необходимости обобщить обычную электродинамику нелинейным образом (см. § 14.2).

Одним из центральных пунктов теории электромагнитного поля является правильное сопоставление корпускул (фотонов) волнам. Это было проделано Дираком, давшим в 1927 г. так называемый метод вторичного квантования (см. § 13.7).

Резюмируя, можно сказать, что мы имеем глубоко разработанную квантовую теорию электромагнитного поля, которая даёт ответ на все принципиальные вопросы о спине и статистике фотонов, о сопоставлении фотонов волнам и общей структуре уравнений электромагнитного поля, а также, в замечательном согласии с экспериментами, описывает разнообразнейшие явления, связанные с излучением. Однако квантовую электродинамику, так же как и релятивистскую квантовую механику электрона и других частиц нельзя считать законченной, ввиду ряда трудностей, методы устранения которых ещё далеко не очевидны (см. § 14).

§ 5. НЕЙТРИНО. ТЕОРИЯ БЕТА-РАСПАДА

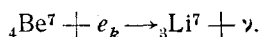
Гипотеза нейтрино родилась из попыток объяснить β -распад. Известно, что в противоположность α -частицам, испускаемым ядрами тех или иных элементов (U, Ra, Th и др.) с некоторыми определёнными энергиями, электроны и позитроны испускаются всеми естественно и искусственно радиоактивными элементами со всевозможными энергиями от нуля

вплоть до некоторой максимальной, характерной для каждого излучателя энергии, например: у ${}_{83}\text{Ra}^{210}$ $E_{\max} = 1,17 \text{ MeV}$; у ${}_{7}\text{N}^{13}$ $E_{\max} = 0,92 \text{ MeV}$. Непосредственно, как будто, имеет место нарушение сохранения энергии. Положение вещей иллюстрируется так называемыми кривыми β -спектров, дающими число e_- (или e_+) распада в зависимости от энергии. При некоторой энергии примерно $0,3 E_{\max}$ число испускаемых электронов достигает наибольшего значения. Число же частиц с энергией, близкой к максимальной, весьма незначительно.

По вопросу о β -распаде были высказаны две точки зрения. Бор предположил, что видимое несохранение энергии является реальным и что энергия действительно не сохраняется при β -распаде. Немногочисленные попытки развить эту идею (Дандау, Бек) не дали результатов.

С другой стороны, Паули предложил объяснить размазанность β -спектра испусканием, одновременно с электроном (или e_+), новой гипотетической частицы — нейтрино. Электрон и нейтрино вместе уносят всегда из β -радиоактивных ядер данного типа энергию, равную максимальной, но при испускании из каждого отдельного ядра та или иная частица, по закону случая, получает разные порции энергии. При этом нейтрино, обладающие огромной проникающей способностью, никак не регистрируются современными приборами и поэтому непосредственно, до сих пор, не могли быть наблюдаемы.

Прекрасное доказательство необходимости допущения нейтрино для выполнения также закона сохранения количества движения представил недавно Аллен, наблюдавший ядра отдачи при реакции K -захвата:

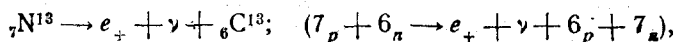


Импульс ядер, в пределах точности, соответствует испусканию нейтрино с массой покоя, близкой к нулю.

Дальнейшее развитие теории нейтрино сводится к более точному изучению β -распада, а также K -захвата и распада мезотронов. Под влиянием успехов теории β -распада Бор отказался от идеи несохранения энергии, и сейчас нет сомнений ни в универсальности законов сохранения энергии, количества движения и момента количества движения, ни в общей плодотворности и правильности гипотезы нейтрино.

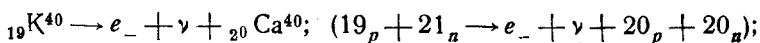
Независимо от того или иного уточнения теории, нейтрино характеризуется следующими свойствами:

1) нейтрино должен обладать спином $1/2$ и поэтому описываться дираковским уравнением, так же как электрон или позитрон. Действительно ядро целого или полуцелого спина сохраняет этот признак при β -распаде или K -захвате, которые можно интерпретировать как переход нейтрона в протон или протона в нейтрон в соответственных ядрах. Например:



т. е.





т. е.

$$n \rightarrow p + e_- + \nu.$$

Так как оба нуклона p , n и испускаемые e_- , e_+ имеют полуцелый спин, то для сохранения момента количества движения необходимо ещё испускание нейтрино с полуцелым спином. Никаких оснований в пользу полуцелого спина $\frac{1}{2}$ не имеется.

Нейтрино, как частицы, обладающие полуцелым спином, должны подчиняться статистике Ферми.

2) Относительно массы покоя нейтрино сейчас ещё нельзя сделать окончательного вывода. Массу нейтрино можно определить, вычисляя разность энергий β -излучателей, например ${}^1_1\text{H}^3 \rightarrow {}^2_2\text{He}^3 = e_- + \nu + E_{\text{max}}$, или учитывая условия стабильности изобар ядер соседних в периодической системе (согласно Маттауху и Сизо), а также анализируя вид кривых β -спектров. Масса нейтрино во всяком случае гораздо меньше массы электрона и возможно равна нулю: $m_\nu < 0,2m$. Однако нейтрино по своим свойствам спинорной дираковской частицы спина $\frac{1}{2}$ гораздо ближе стоит к электронам и позитронам, нежели к фотонам. Этот пример заставляет с осторожностью отнестись к распределению частиц по массам и говорит скорее в пользу классификации по значениям спинов *).

3) Нейтрино по всей вероятности не обладает магнитным моментом. Во всяком случае проникающая способность нейтрино указывает на то, что его возможный магнитный момент не может превышать $\frac{1}{7000}$ магнитного момента электрона ($\mu_\nu < \frac{\mu_B}{7000}$).

4) Нейтрино наряду с электроном и позитроном, обладает незначительным специфическим мезотронным зарядом g' , позволяющим ему взаимодействовать с мезотронным или с гравитационным полем, подобно e_- и e_+ . Распад мезотронов обусловлен наличием у лёгких частиц заряда g' .

Изложим теперь кратко основы теории β -распада, которая поконит на двух положениях: 1) ввиду того, что, как было нами указано, e_- , e_+ , ν не могут существовать в ядрах как таковые (готовые) в стабильном состоянии, β -распад является не чем иным, как порождением указанных частиц; здесь имеется точная аналогия с излучением фотонов.

2) По гипотезе Паули одновременно с электроном (или e_+) испускается нейтрино непосредственно не наблюдаемый и характеризующийся указанными выше признаками. Основываясь на этих двух положениях, Ферми построил в 1934 г. теорию β -распада, хорошо объяс-

*) Не исключено, однако, что e_- , e_+ , ν образуют «триаду» лёгких частиц, характеризующихся различными значениями добавочной внутренней координаты типа изотопического спина, аналогично, протону, нейтрону и гипотетическому антипротону. Тогда различие в собственных массах не будет столь существенно внутри триады.

нившую как основные факты, так и ряд деталей и предсказавшую новые явления, открытые позднее.

Самый факт испускания двух частиц качественно сразу объясняет, согласно Ф. Перрену, форму β -спектров.

Общий вид кривой спектра и зависимость времени жизни от энергии подтверждаются экспериментом. Правда, экспериментальные спектры дают наибольшее число электронов распада при энергии, равной не половине максимальной, как в простом подсчёте Перрена, но равной примерно одной трети граничной энергии. Полное объяснение этого факта представляет большие затруднения для теории. Наилучшее согласие с экспериментом получается, если положить массу нейтрино равной нулю.

Для того чтобы продвинуться дальше, необходимо установить энергию взаимодействия нуклеонов с полем пар (e_-, ν) или (e_+, ν) , испускаемых при β -распаде. Аналогично энергии связи покоящегося заряда с электромагнитным полем $U = eA_0$, Ферми взял за основу следующее выражение взаимодействия нуклеонов с парами (e_-, ν) и (e_+, ν)

$$U_F = g_F(\psi^* \psi + \psi \psi^*)$$

(ψ содержит волновые функции электронов и позитронов). Здесь константа g_F определяется сравнением с опытом:

$$g_F = 4 \cdot 10^{-50} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3.$$

В дальнейшем выяснилось, что это простое выражение следует обобщить, введя члены, зависящие от спинов лёгких частиц, что не меняет общей структуры теории. Наиболее общее выражение энергии взаимодействия нуклеонов с полем пар лёгких частиц определяется инвариантными требованиями (см. § 13.6). Сравнение с опытом позволяет выбрать из общего выражения ряд членов, наилучшим образом соответствующих описанию β -распада. Если задать энергию взаимодействия, квантовая механика однозначно выводит выражение вероятности β -распада и среднего времени жизни β -излучателя. При более точном подсчёте следует ввести добавочный фактор, учитывающий взаимодействие e_- , e_+ с электрическим полем ядра. В самом деле e_- , порождённые ядром, притягиваются к нему, а e_+ отталкиваются.

Одним из наибольших успехов теории является объяснение групп β -излучателей, обнаруженных Сарджентом чисто эмпирическим путём. Оказывается, что при одной и той же энергии $E_{\max}$ вероятность распада может принимать у разных β -излучающих ядер различные значения, резко отличающиеся друг от друга (примерно в 100 раз). Теория β -распада, естественно, приводит к подобному разделению на группы, ввиду того, что испускание (e, ν) может быть связано либо с «разрешёнными» (${}^7\text{N}^{18}$, ${}^{29}\text{Cu}^{64}$, ${}^6\text{C}^{11}$ и т. д.), либо с «запрещёнными» в разной степени (${}^{15}\text{P}^{32}$, ${}^{11}\text{Na}^{24}$, ${}^{83}\text{RaE}^{210}$ и т. д.) переходами нуклеонов друг в друга. Вероятность запрещённых переходов разного порядка будет меньше, чем для переходов разрешённых.

Кроме ядерных реакций, нейтрино должны возникать при самопроизвольном распаде свободных мезотронов, наблюдаемых в космических лучах. Исходя из веского предположения о целом спине мезотрона, получим для нейтрино вновь полуцелый спин из реакции распада (см. § 9):

$$\mu_{\pm} \rightarrow e \mp + \nu.$$

С другой стороны, тот же процесс распада может идти на мезотронах, переносящих взаимодействие в атомных ядрах между нуклонами. Согласно гипотезе Юкава это является объяснением β -распада как вторичного процесса. Тем самым феноменологическая теория β -распада получает модельное обоснование. Представлявшееся непосредственным, испускание нуклонами лёгких частиц оказывается обязанным, во-первых, виртуальному испусканию нуклонами мезотронов (благодаря квазизаряду g) и, во-вторых, распаду мезотронов на ($e_{\pm}$, ν) (благодаря квазизаряду g').

Нейтрино, не имеющие электрического заряда и заметного магнитного момента, практически лишённые массы покоя, не взаимодействующие электромагнитным путём с другими зарядами и полями и связанные лишь с мезотронным полем незначительным квазизарядом, обладают огромной проникающей способностью. Нейтрино имеет шансы расщепить ядро лишь при прохождении слоя вещества толщиной примерно с земной шар. Таким образом, современная теория удовлетворительно объясняет неудачу попыток непосредственного наблюдения нейтрино.

Резюмируя теорию нейтрино, можно сказать, что релятивистская квантовая механика смогла дать удовлетворительное объяснение основным свойствам гипотетической частицы, а успехи теории β -распада и K -захвата, являющейся одним из прекрасных достижений современной физики атомного ядра, служат лучшим подтверждением гипотезы нейтрино. Однако положение вещей, конечно, далеко неудовлетворительно, ввиду отсутствия прямого экспериментального подтверждения наличия нейтрино. В конце концов, не исключена возможность различных неожиданностей в этом пункте, например, того, что нейтрино будет как-то существенно отличаться от других частиц, подобно тому, как, скажем, слабое гравитационное поле отличается от других типов вещества.

Кроме того, теория β -распада содержит ряд трудностей, в частности, не вполне согласован вопрос о распаде свободных мезотронов с распадом мезотронов, переносящих ядерные силы, т. е. β -распадом. Время жизни для свободных мезотронов, согласно наблюдениям, в космических лучах $\tau_0 = 2 \cdot 10^{-8}$ сек, тогда как теория β -распада, согласно Юкава, даёт для времени жизни $\tau \sim 10^{-8}$ сек. Одним из возможных выходов из этого затруднения является неоднократно обсуждавшаяся гипотеза, согласно которой ядерные силы переносятся главным образом мезотронами одного определённого (например, векторного) типа, тогда как в космических лучах наблюдаются пре-

мущественно мезотроны другого, например псевдоскалярного, типа (см. § 9).

Отметим, наконец, что недавно было обращено внимание на возможную роль нейтрино в звёздных и космических явлениях. При образовании α -частиц в звёздах из водорода нейтрино уносят до 60% энергии. С другой стороны, Ватагин отметил, что в условиях сверхвысоких температур $T \sim 10^{12}$ градусов (которые возможно имеют место, например, в «особом» предзвёздном состоянии, см. § 12) процессы порождения мезотронов, а следовательно, и распада мезотронов с испусканием нейтрино и электрона начинают играть существенную роль. Поскольку нейтрино, обладающие большой проникающей способностью, уходят из системы, практически не взаимодействуя с другими частицами, обратные процессы поглощения нейтрино можно не принимать в расчёт. Тем самым нейтрино не участвуют в установлении и поддержании статистического равновесия. Это может указывать на то, что самое понятие температуры, характерное для термодинамического равновесия, теряет свой смысл при столь высоких температурах.

§ 6. ПРОТОН

После рассмотрения лёгких частиц удобнее перейти, для соблюдения некоторой исторической последовательности, к частицам тяжёлым. Протон, как ядро водородного атома, был открыт при установлении Резерфордской планетарной модели атома в 1911 г. Основные свойства протона общеизвестны. Масса протона в 1836,5 раз больше массы электрона.

Спин протона равен $s = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{h}$; протоны подчиняются статистике Ферми.

Значение спина протона $1/2$ однозначно определяет его релятивистскую квантовую кинематику. Именно: движение протонов, как и электронов, позитронов и нейтрино, должно описываться спинорными волновыми функциями, подчиняющимися дираковскому уравнению. Здесь следует, однако, сделать ряд дополнений. Во-первых, дираковское уравнение автоматически приводит к наличию у любой заряженной частицы кинематического магнитного момента, равного по абсолютной величине боровскому магнетону, взятому с соответствующей собственной массой. Следовательно, для протона мы получили бы так называемый нуклеарный (ядерный магнетон $\mu_0 = \frac{eh}{4\pi Mc}$). Эксперимент же даёт магнитный момент, равный $\mu_p = +2,7896\mu_0$, который, очевидно, не сводится полностью к кинематическому, но содержит некоторую долю врождённого магнитного момента. Во-вторых, уравнение Дирака, как всякая релятивистская квантовая кинематика, приводит к предсказанию существования античастиц противоположного знака заряда, в данном случае отрицательных антипротонов (p_-). Несмотря

на усиленные поиски, антипротоны до сих пор не были открыты. Следует оговориться, что систематическое изучение тяжёлых частиц в космических лучах начато было только в самые последние годы, и до сих пор удалось с достоверностью обнаружить лишь вторичные протоны и нейтроны, выбитые из ядер, тогда как наличие первичных протонов, падающих на земную атмосферу, доказано только косвенным путём. Таким образом, нельзя сказать с полной достоверностью, что в потоке космических лучей антипротоны отсутствуют. Для получения же антипротонов в земных условиях ещё не имеется технических средств, например, в виде ускорителей, дающих энергию порядка двух миллиардов электрон-вольт, требуемую для порождения пары p, p_- .

Итак, хотя нет особых оснований сомневаться в возможности существования антипротонов, всё же следует считаться с некоторой возможностью довольно радикального изменения кинематики в случае получения доказательства отсутствия антипротонов. Указанная осторожность диктуется третьим, наиболее важным обстоятельством, которое следует иметь в виду, применяя уравнение Дирака для протонов.

Атомные ядра составлены из протонов и нейтронов, причём при β -распаде и других процессах обе эти элементарные частицы переходят одна в другую (см. §§ 5 и 8). Кроме того, протон и нейтрон имеют равные спины, подчиняются одинаковой статистике, обладают близкими массами и имеют близкие или равные значения мезотронных зарядов (см. § 8). Короче говоря, оба нуклеона весьма подобны друг другу. Согласно идее Гейзенберга, следует считать протон и нейтрон двумя состояниями одной и той же частицы «нуклеона», причём нейтрон является возбуждённым высшим состоянием. С математической точки зрения нуклеону можно приписать новую, пятую, внутреннюю координату, характеризующую так называемым изотопическим спином τ , значение которого, например, $\tau_z = +1$ указывает на то, что мы имеем дело с протоном, а значение $\tau_z = -1$ на то, что речь идёт о нейтронном состоянии.

Нетрудно связать дираковские уравнения для протона и нейтрона (каждое для 4-х компонент ϕ_i) в одно уравнение для волновой функции с 8-ю компонентами. Однако это будет только поверхностное объединение, никак не учитывающее глубокого родства протона и нейтрона и вместе с тем не позволяющее описать изменение массы при переходе одной частицы в другую.

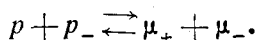
Отсутствие каких-либо признаков подобной глубокой связи обоих нуклеонов и является, на наш взгляд, наиболее слабым пунктом общепринятой гипотезы о возможности описания нуклеонов уравнением Дирака без каких-то более существенных его видоизменений.

Ядерные свойства протонов и нейтронов, очевидно, должны характеризоваться сравнительно большими значениями каких-то специфических ядерных квазизарядов и, возможно, дипольных моментов, поскольку в атомных ядрах протоны и нейтроны весьма сильно связаны друг с другом. По современным представлениям протонам и нейтронам сле-

дует приписать мезотронный квазиэлектрический заряд g по абсолютному значению примерно в пять раз больший электрического заряда, если их измерять величинами одной и той же размерности и, кроме того, вбро-
 ждённый мезотронный квазимагнитный момент величины $f \sim \frac{g}{x_0}$, где $x_0 = \frac{2\pi mc}{h}$ (μ — масса мезотрона)*). По абсолютному значению f в несколько десятков раз превосходит ядерный магнетон. Благодаря наличию мезотронных зарядов и моментов, протон (и нейтрон) может взаимодействовать с мезотронным полем, иначе говоря, поглощать и испускать мезотроны, точно так же, как благодаря наличию электрического заряда и магнитного момента протоны способны излучать и поглощать фотоны.

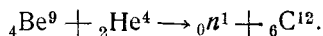
При этом, в противоположность другим частицам: e_- , e_+ , ν , μ_- , μ_+ , γ , которые могут порождаться и уничтожаться, протоны и нейтроны при всех известных процессах либо сохраняются, либо переходят друг в друга, так что их общее число не меняется. Однако теория указывает на возможность порождения и уничтожения p и n в разнообразных процессах при участии электромагнитного поля или мезотронов. Если существуют антипротоны p_- , то возможны, например, процессы превращения пары (p, p_-) в два фотона или порождения пары (p, p_-) при столкновении двух фотонов.

Аналогичные процессы могли бы иметь также место с испусканием мезотронов



§ 7. НЕЙТРОН

Поиски нейтральной частицы типа протона производились в лаборатории Резерфорда ещё в 20-х годах, но безуспешно. Анализ поведения электронов в условиях атомного ядра привёл к мысли, что электроны не могут существовать в ядрах. Согласно первоначальным представлениям электроны должны были быть весьма тесно связаны с протонами. Однако нейтрон, независимо от всяких предположений, был открыт Чадвиком в начале 1932 г., смело допустившим испускание новых нейтральных частиц, обладающих массой покоя, для объяснения противоречивых свойств излучения, обнаруженного ещё в 1928 г. Боте при бомбардировке бериллия α -частицами



Масса нейтрона была определена из анализа расщепления различных ядер. После того, как выяснилось, что нейтроны выбиваются из

*) Соответственная константа тонкой структуры

$$\beta = \frac{2\pi g^2}{hc} \approx 0,2.$$

самых различных ядер, не оставалось сомнений в том, что во всех ядрах имеются нейтроны. Однако лишь после установления нуклеонной модели ядра выяснилась необходимость признать нейтрон элементарной частицей, обладающей спином $1/2$ и подчиняющейся в согласии с этим статистике Ферми.

Нейтрон обладает магнитным моментом, значение которого с определённой точностью было выяснено Блохом: $\mu_n = -1,985 \mu_0$. Излишне подчёркивать некинематический врождённый характер магнитного момента нейтрона.

Врождённая часть магнитного момента нейтрона, как и протона, согласно современным представлениям, обязана мезотронному полю (см. § 14.1).

В противоположность протону, свободный нейтрон не стабилен, но радиоактивен и должен спонтанно распадаться на протон, электрон и нейтрон: $n \rightarrow p + e_- + \nu$. Это связано с тем, что масса покоя нейтрона больше суммы масс протона и электрона. Подобный распад ядерных нейтронов проявляется как обычный β -распад.

Экспериментальное определение времени жизни свободного нейтрона и наблюдение его распада до сих пор не удалось, так как нейтрон имеет весьма большую вероятность поглотиться одним из окружающих атомных ядер раньше, чем он успеет распасться.

Радиоактивный распад исключает нейтроны в качестве возможных первичных космических частиц, так как они несомненно успевали бы распасться до их попадания в земную атмосферу.

Кинематика нейтрона и связь с полями других частиц вполне аналогична протонной. Нейтрон как частица, обладающая спином $1/2$, описывается спинорными волновыми функциями и подчиняется уравнению Дирака.

Ввиду отсутствия электрического заряда гипотетические антинейтроны, предсказываемые теорией, должны отличаться от нейтронов лишь знаком магнитного момента.

Ядерные свойства нейтронов, также, во всём подобны свойствам протонов. Ясно, что нейтрон, ещё в большей мере, чем протон, является по преимуществу ядерной частицей. Как известно, нейтроны являются весьма эффективными агентами для расщепления всех атомных ядер и благодаря реакциям с нейтронами ядерные процессы впервые приобрели техническое значение.

§ 8. МОДЕЛЬ АТОМНОГО ЯДРА

А. Состав ядра

Так как построение модели ядра ещё не закончено, полезно провести сравнение её с моделью атома. После открытия электронов, как составных частей всех атомов, выяснение природы внутриатомных сил было произведено Резерфордом и Бором в 1911—1913 гг. Оказалось, что e_- притягиваются к ядру электрическими силами по закону

Кулона, известному из макроскопической физики, а заряд ядра и число e_- определяются номером элемента в периодической системе. С другой стороны, построение квантовой механики даже в нерелятивистском приближении представляло большие затруднения и было закончено лишь в 1927—1928 гг.

Модель ядра развивается в иной последовательности. Наиболее трудная часть атомной теории, именно квантовая кинематика, берётся в готовом виде для ядерных частиц. При этом для нуклеонов в основном, повидимому, достаточно нерелятивистское приближение (хотя весьма желателен дальнейший анализ релятивистских поправок). Вторая часть модели: состав ядер окончательно выяснился в 1931—1933 гг.

Напомним коротко обоснование строения ядра из одних нуклеонов.

Прежде ядра считались состоящими из обоих известных тогда сортов элементарных частиц: p и e_- . Однако, такое представление не могло объяснить ряда свойств ядер. В особенности отчётливо противоречия выступали при анализе спина, статистики и магнитного момента. Например, магнитные моменты всех ядер в сотни раз меньше электронных. Совершенно непонятно, каким образом магнитные моменты могли оказаться полностью скомпенсированными. Открытие нейтрона ускорило разрешение всех трудностей и довольно быстро, хотя, вопреки нередким утверждениям, отнюдь не немедленно, привело к окончательной формулировке.

Следует подчеркнуть, что обнаружение n в различных, или всех, ядрах само по себе ещё не решало вопроса. Проще всего было предположить, что в ядрах имеются все три типа элементарных частиц: электроны, протоны, нейтроны. Подобная модель ядра была действительно предложена Ф. Перреном и Ожэ вскоре после открытия Чадвика. Очевидно, подобная феноменологическая модель никак не могла устранить перечисленных выше глубоких трудностей.

Очевидно, к вопросу следовало подойти с принципиальной точки зрения, рассмотрев все частицы и выяснив окончательно, какие из них способны входить в состав ядра.

После более тщательного анализа самой возможности существования e_- внутри ядра, предпринятого нами совместно с Амбарцумяном, стало выясняться, что e_- , повидимому, теряют здесь свою индивидуальность. Решающим является следующий аргумент: для того чтобы вообще иметь возможность находиться в системе столь малых размеров как ядро, частица должна подвергаться действию достаточно больших сил притяжения.

Однако, если энергия взаимодействия превосходит собственную энергию, например электрона, $E = mc^2$, то последний не может, очевидно, существовать в ядре, сохраняя свою индивидуальность. Тот же аргумент относится ко всем лёгким и средним частицам: e_- , e_+ , γ , μ , μ_+ , μ_- . В самом деле, в то время как энергия связи электрона в атоме имеет порядок в 10—100 электрон-вольт, что гораздо меньше собственной энергии $E = mc^2 = 0,5 \cdot 10^6$ эВ, масс-дефект (энергия

связи) в ядрах, рассчитанный на одну частицу, достигает значений в несколько миллионов электрон-вольт. С другой стороны, в ядре, составленном из нуклеонов на один p или n , приходится энергия связи в 7—8 MeV (кроме самых лёгких ядер, где масс-дефект меньше), что гораздо меньше собственной энергии нуклеонов $E = 1837 mc^2 \sim \sim 900$ MeV. Поэтому нуклеоны могут существовать в ядрах, сохраняя свою индивидуальность.

Итак, электронов, позитронов и мезотронов в ядрах нет. Число p равно заряду ядра Z , число n — разности атомного веса и заряда $A - Z$.

Из эмпирических соображений ясно, что нейтрон имеет спин $1/2$ и подчиняется статистике Ферми (см. § 7). Конечно, n должен быть признан элементарной частицей, отнюдь не состоящей из или $p + e_- + \gamma$ или $p + \mu_-$ и т. д. Подобные представления о сложном n оставили бы неразрешёнными все прежние трудности, перенеся их только со всего ядра на нейтрон.

Испускание e_- и e_+ ядрами при β -распаде и излучение мезотронов при столкновении нуклеонов друг с другом следует трактовать тогда в точной аналогии с испусканием света атомом или ядром, что является, бесспорно, одним из самых важных и нетривиальных следствий новой теории ядра. Хотя о реальном существовании фотона в атоме или ядре до его испускания никому не пришло бы в голову говорить, однако привыкнуть к мысли о порождении электронов или позитронов при β -распаде или уничтожении при попадании в ядро (K -захват) оказалось делом менее лёгким. При этом следует напомнить, что ядерная модель была предложена до открытия позитрона и обнаружения уничтожения и порождения пар.

Устранение противоречий старой модели, обнаружение эмпирических закономерностей, к которым приводило новое представление, и, наконец, открытие порождения e_+ и e_- — всё это сравнительно быстро сделало новую модель общепризнанной. Никакие последующие попытки вернуться к сложному нейтрону или сложному протону успеха не имели.

В. Проблема ядерных сил

Нуклеонная модель ядра приводит к вопросу о силах, действующих между протоном и нейтроном. Эта третья, динамическая, часть модели ядра оказалась наиболее трудной и до сих пор остаётся не решённой до конца.

Прежде всего легко убедиться, что никакие обычные, до сих пор известные силы непригодны для объяснения ядерных взаимодействий. В самом деле, силы тяготения отпадают для атомных и ядерных частиц ввиду своей чрезвычайной малости. Электрические силы между нуклеонами отпадают ввиду нейтральности n . Возникает мысль использовать магнитные силы. Однако эти силы также недостаточны.

Все взаимодействия в атомах, молекулах, твёрдых и жидких телах и газах сводятся в конце концов к электрическим и, отчасти, магнитным силам. Напомним, что электрические кулоновы силы, благодаря квантовой кинематике и сложности систем частиц, подчиняющихся в случае электронов статистике Ферми, приводят к появлению эффективных обменных, дисперсионных ван-дер-ваальсовских и химических сил. Для больших скоплений атомов начинает играть роль тяготение. Таким образом, мы стоим перед фундаментальной задачей понять природу, или построить модель ядерных сил, обусловленных каким-то полем, или частицами или комбинациями частиц нового типа. В 18-м веке подобная проблема не вызвала бы, вероятно, особого смущения, и в науку были бы введены чисто феноменологически новые «ядерные» силы (или соответствующая ядерная «жидкость»), наряду с электрической, магнитной, тепловой и световой (эфиром) жидкостями и флогистонем. Задача заключалась бы в подборе удачного математического выражения новых сил (подобно ньютоновскому закону тяготения). Не отказываясь от подбора удачных выражений для сил, сейчас, однако, мы должны связать ядерное поле с какой-либо новой комбинацией известных частиц или допустить существование новых частиц, сопоставленных ядерному полю. Начнём с модели электрических сил. Два заряда e и e' связаны друг с другом благодаря тому, что один из них порождает вокруг себя электрическое поле, а другой это поле поглощает и, обратно, первый заряд поглощает электрическое поле, порождённое вторым зарядом.

Квантовая теория взаимодействия формулирует то же положение вещей несколько иначе, говоря о виртуальном испускании фотонов, т. е. квантов электромагнитного поля одной частицей и поглощении их другой частицей. Хотя квантовый вывод в данном случае не даёт ничего нового, но он обладает огромной эвристической силой. Действительно, можно вообще сделать заключение, как было впервые указано автором этой статьи и Амбарцумяном, что всевозможные взаимодействия могут переноситься также разными частицами конечной массы, а не только квантами поля с массой покоя нуль, как фотоны. Эта идея лежит в основе всей современной теории взаимодействия, в частности теории ядерных сил.

Сформулируем свойства новых сил:

1) Ядерные силы являются специфическими силами, несводимыми к другим ранее известным силам.

2) Ядерные силы в согласии с данными о размерах ядер и т. д. должны быть силами короткого действия, с радиусом действия порядка $r \sim 10^{-13} - 10^{-12}$ см; на больших расстояниях они быстро убывают и становятся ничтожными по сравнению с силами электрическими.

3) Ядерные силы на основании данных о масс-дефектах и т. д. соответствуют энергиям связи нуклеонов порядка нескольких миллионов электрон-вольт на частицу.

4) Ядерные силы существенно зависят от спина частиц.

5) Ядерные силы существенно зависят от ориентации спинов относительно взаимного расстояния. Иначе говоря, ядерные силы имеют нецентральный характер, подобно, например, силам магнитным. Это особенно убедительно проявляется в наличии у дейтерона (ядра тяжёлого водорода) в основном состоянии электрического квадрупольного момента (с эффективной площадью $Q = +2,7 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$).

6) Ядерные силы должны привести к некоторому насыщению, выражаемому тем фактом, что энергия связи, рассчитанная на один нуклеон, остаётся примерно постоянной (7—8 MeV) в громадном диапазоне изотопов от α -частицы до конца системы элементов. Это свойство ядерных сил сближает их с силами химическими, обязанными квантовому обменному эффекту. В связи с этим укажем, что ядерное вещество, или нуклеонная «жидкость», несжимаемо в хорошем приближении.

7) Важное свойство ядерных сил заключается в равенстве сил: протон — протон и протон — нейтрон, а также, повидимому, нейтрон — нейтрон.

8) Теория ядерных сил должна объяснить основные закономерности β -распада.

9) Поскольку, как выяснилось в настоящее время, ядерное поле оказывается обязанным мезотронам, теория должна выяснить вопросы взаимодействия мезотронов с нуклеонами и лёгкими частицами.

Так как все возможности описания ядерных сил известными полями оказались неудачными, мы предложили сперва объяснить взаимодействие между нуклеонами обменом парами частиц электрон и нейтрино: (e_-, ν) и (e_+, ν) , которые могут не только виртуально испускаться и поглощаться нуклеонами, но реально испускаются при β -распаде (Тамм, Иваненко, 1934 г.). Так как поле пар фермиевских частиц не имеет классического аналога, теория парных сил может быть только квантовой. Беря за основу фермиевскую энергию связи нуклеонов с полем пар (см. § 5), получаем во втором приближении энергию взаимодействия между нуклеонами

$$V = a \frac{g_F^2}{\hbar c r^5} P$$

(где a — числовой коэффициент ~ 1 , зависящий от различных уточнений теории; оператор P указывает на переход p, n друг в друга при взаимодействии, т. е. обмен зарядом или эквивалентный обмен координатами и спинами). На больших расстояниях V быстро убывает в особенности ввиду добавочного множителя $e^{-\chi r}$; $\chi = \frac{2\pi mc}{\hbar}$. Построение теории парных ядерных сил, в которой впервые был доказана возможность переноса взаимодействия частицами конечной массы, несомненно, явилось немалым успехом. Были получены обменные силы короткого действия; в дальнейшем спинные и нецентральные силы также оказались естественно вклю

чёнными в теорию. Однако величина взаимодействия нуклонов, обязанная переносу парами лёгких частиц, оказалась ничтожной и парные β -силы являются лишь «копией» главных ядерных сил. Перво-родный грех теории парных сил заключался, очевидно, в связи с β -распадом, так сказать «геологически» редким в жизни ядер явлением, вероятность которого определяется малой константой g_F . Попытки объяснить ядерные силы полями, соответствующими другим комбинациям известных частиц, например e_- , e_+ , успеха также не имели.

§ 9. МЕЗОТРОН

А. Предсказание мезотрона и мезотронные ядерные силы

Второй этап теории ядерных сил связан с работой Юкава, который, сохраняя основную идею переноса сил частицами конечной массы, предложил объяснить ядерные взаимодействия новым, гипотетическим в то время, мезотронным полем или частицами: мезотронами. Несмотря на незавершённый характер теории ядерных сил, сейчас нет сомнений, что взаимодействие между нуклеонами действительно обусловлено мезотронами, либо заряженными, либо нейтральными. Протон, превращаясь в n , испускает μ_+ , поглощаемый нейтроном, и обратно, n испускает μ_- , поглощаемый p :

$$\begin{aligned} 1) & p \rightarrow \mu_+ + n, \quad n + \mu_+ \rightarrow p, \\ 2) & n \rightarrow \mu_- + p; \quad p + \mu_- \rightarrow n. \end{aligned}$$

Предполагая, что $\mu_{\pm}$ имеют целый спин и, следовательно, могут переносить взаимодействие «по одиночке», получим в простейшем случае скалярных нейтральных мезотронов спина 0, описываемых уравнением де-Бройля, для энергии взаимодействия двух нуклонов:

$$V = -\frac{g^2}{r} e^{-x_0 r}.$$

На малых расстояниях вновь получаем взаимодействие кулоновского типа:

$$V \approx -g^2/r.$$

На основании эмпирических сведений о величине ядерных сил определим g :

$$g \approx 5e.$$

На больших расстояниях $r \gg \frac{1}{x_0}$ ($x_0 = \frac{2\pi\mu c}{h}$) V быстро убывает; отсюда определяем массу новой частицы, т. е. мезотрона, полагая $\frac{1}{x_0}$ равным радиусу действия ядерных сил ($\frac{1}{x_0} \approx 10^{-13} \text{ см} \approx \frac{e^2}{mc^2}$);

$$\mu \sim 137 m.$$

Кроме того, Юкава предположил, что μ_- , μ_+ могут быть связаны с лёгкими частицами так же как с тяжёлыми, т. е. что e_- , e_+ , γ обладают квазизарядами g' , обеспечивающими их связь с мезотронным полем (см. § 5). Это даёт возможность мезотронам распадаться на пары частиц по схеме:

$$\mu_- \rightarrow e_- + \gamma; \quad \mu_+ \rightarrow e_+ + \gamma.$$

Распад заряженных мезотронов, переносящих ядерное взаимодействие, будет воспринят как β -распад. В самой теории β -распада ничего не изменяется благодаря подобной модели, но замечательным образом предсказывается возможность распада свободного мезотрона по той же схеме (заметим, что гипотетические нейтретто, вероятно, распадаются по схеме $\mu_0 \rightarrow e_- + e_+$, что должно привести к возможности испускания пар: e_- , e_+ ядрами).

Таким образом, исходя из теории ядерных сил, предсказывается новая частица средней массы, целого спина и, следовательно, бозевского типа, порождаемая нуклеонами, а также лёгкими частицами и воздействующая на них, и притом радиоактивная.

Вряд ли кто-либо, кроме самого узкого круга теоретиков, обратил внимание на подобное довольно фантастическое, по смелому уточнению деталей, предсказание, которое, однако, во всех основных пунктах подтвердилось после открытия мезотрона в космических лучах в 1937 г. Андерсоном и Неддермейером.

Тщательные наблюдения над жёсткой компонентой показали, что проникающие частицы действительно обладают массой μ гораздо большей, чем у e_- , e_+ и, следовательно, не теряют столь много энергии на тормозное испускание фотонов, как лёгкие частицы.

Перечислим основные свойства мезотронов:

1. Заряд. Открыты μ_- , μ_+ обоих знаков заряда, причём μ_+ встречаются в космических лучах чаще. Неоднократные попытки обнаружить μ_0 ещё не привели к окончательному успеху. Грецингер, Ллойд-Смит и Кригер объявили год назад об открытии нейтретто в лабораторных условиях, в результате бомбардировки различных ядер дейтеронами, что, однако, требует добавочного подтверждения.

2. Масса. Большинство мезотронов имеет массу $\mu \sim 200 m$. В последнее время с достоверностью обнаружены более лёгкие и более тяжёлые мезотроны с массами в диапазоне 100—700, даже 990 m (Нишина, Лукирский, Юз, Алиханян, Лепренс-Ренге). Вопрос о спектре масс μ ещё далеко не выяснен.

3. Спин мезотронов, повидимому, целый и равен 0 или 1, как можно заключить из удовлетворительного объяснения β -распада и распада космических μ_- , μ_+ , а также на базе теории ядерных сил, подсказывающей большую естественность целого спина. Тем самым статистика $\mu_{\mp}$ должна быть бозевской. Что касается кинематики, то ввиду отсутствия более точных сведений о характере ψ -функций мезотронов, приходится испытывать все варианты описания, пригод-

ные при целом спине: 1) скалярное ϕ (спин 0); уравнение де-Бройля; 2) псевдоскалярное ϕ (спин 0), псевдоскалярное уравнение; 3) векторное ϕ (спин 1); уравнение Прока; или, наконец, 4) псевдовекторное ϕ , подчиняющееся соответствующему уравнению (спин 1). Никаких оснований предполагать у мезотронов спин больше 1 не имеется.

4. Радиоактивный распад мезотрона определён в космических лучах многими способами. Для покоящегося мезотрона время жизни $\tau_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ сек, для быстрых $\mu_{\pm}$ в согласии с теорией относительности время жизни увеличивается, в зависимости от скорости $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$. Разетти смог определить τ_0 при исследовании распада μ_{-} , μ_{+} , заторможенных в блоке свинца в лабораторных условиях.

В камере Вильсона следы продуктов распада мезотронов не обнаружены, повидимому ввиду диффузии медленных $\mu_{\pm}$ в сторону, где они распадаются, ускользая от наблюдения; возможно, при этом происходит образование своеобразного атома «мезотрония» благодаря рекомбинации μ_{+} и e_{-} (Померанчук и Мигдал, Иваненко). Открытие мезотронов и подтверждение гипотезы Юкавы ~~явились новым триумфом физики элементарных частиц и теории ядерных сил.~~

Воздействие электромагнитного поля на мезотрон описывается обычным образом путём добавления к импульсам и энергии соответствующих компонент потенциалов

$$P \rightarrow p \mp \frac{e}{c} A; \quad E \rightarrow E \pm e\varphi.$$

С другой стороны, уравнения Максвелла дополняются в правых частях членами, описывающими распределение зарядов и токов мезотронов, порождающих электромагнитное поле. О магнитном моменте мезотронов экспериментально ничего не известно. Гравитационные воздействия для мезотронов, очевидно, ничтожны.

В. Современная теория ядерных сил

Описание ядерных сил посредством скалярных мезотронов, заряженных или нейтральных, оказалось слишком упрощённым. Для того чтобы получить спиновые и нецентральные ядерные силы, необходимо связать нуклоны с мезотронным полем, обладающим дипольными спиновыми свойствами и описываемым несколькими компонентами. Наилучшим способом оказалось описание μ посредством уравнений Прока (спин 1) или псевдоскалярного уравнения (спин 0). Таким путем удаётся придти к спиновым и нецентральным силам, в частности, вычислить, квадратный момент дейтерона. Равенство сил: $p-p$, $p-n$, $p-p$ настойчиво требует введения наряду с заряженными также нейтральных мезотронов в качестве частиц, переносящих взаимодействие. Поэтому обычно теория развивается на базе использования смеси μ_{-} , μ_{+} , μ_0 , чаще всего в равной пропорции (Кеммер). Кроме того,

естественно предположить, что ядерные силы переносятся мезотронами разных масс. Наконец, неоднократно обсуждались всевозможные смеси, например, векторных и псевдоскалярных мезотронов, которые одновременно реализуют, согласно гипотезе Меллора и Розенфельда, ядерное поле. Другие авторы использовали только заряженные μ_- , μ_+ (Юкава, Гейтлер) или только нейтральные μ_0 (Бете, Иваненко и Соколов), или брали μ_0 с небольшой добавкой μ_- , μ_+ (Хультен, Тамм). Однако удовлетворить всем требованиям теории ядерных сил не удаётся. В теории ядерных сил имеются две фундаментальные трудности:

1) Расходимость высших приближений, что заставляет, в частности, допустить гипотетические μ_0 для обеспечения взаимодействия между одинаковыми нуклеонами ($p-p$; $n-n$).

2) Эффективная дипольность мезотронного поля (векторного и псевдоскалярного) приводит к появлению в энергии взаимодействия, вычисляемой классическим путём в случае нейтральных μ_0 и квантовым путём в случае мезотронов любого знака заряда, членов имеющих квазимагнитный вид

$$V \approx \frac{-f^2}{r^3} e^{-\kappa_0 r} \approx \begin{cases} -\left(\frac{g}{\kappa_0}\right)^2 \frac{1}{r^3} & \text{при малых } r, \\ 0 & \text{при больших } r. \end{cases}$$

При таком быстром возрастании энергии взаимодействия на малых расстояниях нуклеоны упали бы друг на друга и стабильные орбиты были бы невозможны. Дипольность мезотронов проявляется также при разнообразных эффектах рассеяния μ на нуклеонах и различных частиц и фотонов на мезотронах. При этом эффективные сечения безгранично растут с ростом энергии, что, конечно, нелепо. В векторном случае подобные трудности возникают как при электромагнитных, так и при специфически ядерных взаимодействиях, тогда как в псевдоскалярном случае к трудностям приводят лишь ядерные эффекты.

Таким образом, несмотря на общий успех в понимании мезотрона, связанный с предсказанием самой частицы, её роли в ядре и спонтанного распада, а также на удачное описание некоторых эффектов, общее положение теории ядерных сил и теории мезотронов далеко неудовлетворительно. Ввиду такой ситуации разнообразные ядерные эффекты приходится вычислять с искусственно подобранными энергиями взаимодействия, передающими основные признаки ядерных сил, в частности, их короткодействующий характер. К счастью, многие явления не зависят от более точного вида взаимодействия; сюда относятся, например, α -распад и деление урана.

Проблема построения ядерных сил является, очевидно, одной из важнейших во всей современной физике. Знание точного закона взаимодействия между нуклеонами, подобного ньютоновскому или кулоновскому, позволило бы рассчитать любые ядерные эффекты с

любым изотопом. Сейчас ещё неясно, коренятся ли трудности теории ядерных сил, главным образом, в недостаточном знании свойств мезотрона, или они связаны с трудностями, свойственными всей релятивистской квантовой механике (см. § 14).

§ 10. ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ

Гравитационное поле занимает своеобразное место в теории элементарных частиц. На первый взгляд представляется, что гравитации здесь вообще нет места, так как гравитационные воздействия частиц друг на друга ничтожно малы.

Однако мы должны дать по возможности наиболее полное описание строения вещества и поскольку гравитационное поле является некоторым, хотя и особым видом вещества, то нужно решить вопрос, к каким элементарным частицам можно свести гравитацию, и допустимо ли это вообще.

Далее, довольно неожиданным образом, Паули и его сотрудник Фиртц выяснили, что уравнения поля частиц спина 2, лишённых масс покоя, в точности совпадают с уравнениями Эйнштейна для слабого гравитационного поля.

В понимании тяготения следует различать три этапа. Первый из них связан с классической теорией Ньютона, второй с общей теорией относительности Эйнштейна, с третьим этапом мы соединяем все проблемы квантовой общерелятивистской теории.

Сам Ньютон, как известно, подчёркивал отсутствие какой-либо модели гравитационных сил и выдвинул свой закон взаимодействия в качестве феноменологической формулы (см. § 13.6). Неоднократные попытки Лесажа, Ломоносова и многих других учёных 18-го и 19-го веков объяснить тяготение ударами каких-то частиц и иными способами оказались безрезультатными и влияния в науке не имели.

Одной из существенных сторон классической физики явилось то обстоятельство, что тяготение осталось в стороне от объединения различных разделов науки в 19-м веке (свет — электричество — магнетизм и т. д.) и продолжало рассматриваться, как свойство, не связанное с другими проявлениями вещества и, наряду со всеми прочими свойствами, никак не связанное с пространством и временем.

Перейдём ко второму этапу понимания тяготения. Согласно общей теории относительности, установленной нашим великим современником в 1916 г., для полного описания гравитационного поля следует обобщить ньютоновскую теорию в трёх направлениях. Во-первых, тяготение, как и все другие явления, следует описывать в четырёхмерном мире, т. е. в пространстве — времени.

Во-вторых, ньютонова теория тяготения пригодна лишь как приближение для слабого поля. Для описания гравитационного поля оказалось недостаточно одной компоненты потенциала, но потребовалось ввести 10 компонент потенциала. Иначе говоря, волновая функция

поля тяготения имеет 10 компонент. Сам же ньютонов потенциал φ оказывается лишь добавкой к одной из 10-ти компонент гравитационного потенциала, правда самой существенной добавкой: $g_{44} = 1 + \frac{2\varphi}{c^2}$.

Совокупность 10-ти компонент гравитационного потенциала, преобразующихся определённым образом при переходе в различные координатные системы, составляет так называемый симметричный тензор 2-го ранга: $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$ ($\nu, \mu = 1, 2, 3, 4$). Этот пункт значительно более характерен для тяготения, поскольку другие поля описываются спинорами, скалярами, векторами и т. д., но не представляют всё же ничего выходящего из рамки волнового релятивистского обобщения теории разных полей.

Зато третий пункт означает коренную ломку всех известных представлений о пространстве, времени и тяготении, в нём заключается основная сущность гигантского достижения Эйнштейна. Именно, оказывается, что компоненты гравитационного потенциала совпадают с компонентами так называемого метрического тензора $g_{\mu\nu}$, характеризующего геометрию 4-мерного мира, т. е. пространства — времени *). Отступления метрических величин от их постоянных галилеевских или псевдоэвклидовых значений, т. е. от $g_{44}^0 = +1$, $g_{rs}^0 = -\delta_{rs}$ ($\delta_{rs} = 0$ при $r \neq s$ и $\delta_{rs} = 1$ при $r = s$; $r, s = 1, 2, 3$), с одной стороны характеризуют искривление пространства — времени, которое описывается в этом случае римановой геометрией, и, с другой стороны, соответствуют появлению гравитации. Таким образом, наличие гравитации полностью сводится к искривлению четырёхмерного пространства — времени. Так как, согласно Эйнштейну, искривление геометрии вызывается любым веществом, то, тем самым, впервые пространство — время оказывается связанным с другими видами вещества и подверженным их воздействию.

Наряду с уравнениями, описывающими порождение гравитационного поля веществом или, в частном случае, свободное поле, необходимо иметь закон воздействия гравитационного поля на движение вещества, т. е. обобщение ньютоновой силы. Ввиду указанного выше совпадения компонент гравитационного потенциала с компонентами метрики, решение этой части задачи в конце концов относительно просто: необходимо лишь переписать все уравнения в так называемом общековариантном тензорном виде, заменяя, в частности, обычные производные на ковариантные, учитывающие кривизну пространства.

Добавочного исследования потребовало уравнение Дирака для частиц спина $1/2$, поскольку ковариантная производная спинора (или семи-вектора) ранее не была известна. Как было нами показано (Фок и Иваненко, 1929 г.), понятие ковариантного дифференцирования может быть обобщено также на спиноры, точнее, — би-спиноры. Тем самым удалось записать уравнение Дирака в любых криволиней-

*) Именно, «интервал» между двумя бесконечно близкими событиями $ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu$ (подразумевается суммирование по индексам μ, ν от 1 до 4).

ных координатах и одновременно обобщить его на случай наличия тяготения. Интересно, что при этом электромагнитное поле включается без какого-либо добавочного искажения римановой метрики. Это обстоятельство представляется весьма существенным с точки зрения критики слишком упрощённых попыток построения «единой» теории поля, стремившейся вслед за гравитацией также электромагнитное (а, может быть, даже и мезотронное поле) свести к каким-то геометрическим свойствам пространства. Поскольку переход от псевдо-евклидовой плоской геометрии к римановой искривлённой метрике дал объяснение сил тяготения, в момент подобного триумфа общей теории относительности представлялось почти очевидным, что электромагнетизм также подлежит геометризации, которая потребует дальнейшего обобщения или, если угодно, искажения самой римановой геометрии типа, например, учёта кручения пространства, наряду с искривлением и т. д.

Впервые Вейль (в 1918 г.), затем Эддингтон, Эйнштейн, Скаутен и многие другие предложили огромное число всевозможных обобщённых геометрий, пытаясь построить двуединую или даже триединую (с учётом мезотронного поля) (Шредингер, 1944 г.) теорию поля. Эти попытки, все без исключения, несмотря на своё, нередко, математическое изящество и подкупающую общность, оказались физически совершенно безрезультатными. После 1927—1928 гг., когда интересы нашей науки сосредоточились на квантовой механике и ядре, космических лучах и элементарных частицах, появление новых вариантов «единой» теории поля почти совсем прекратилось. Сейчас ясно, что все эти попытки были весьма преждевременны. Кроме того, стало ясно, что возможное будущее объединение должно произойти лишь после надлежащего квантования самого поля тяготения.

Как бы то ни было, наш результат 1929 года, со своей стороны, указал на возможность включения электромагнитных сил геометрическим путём без всякого искажения римановой геометрии.

Сложные нелинейные уравнения гравитационного поля Эйнштейна были решены лишь в немногих случаях.

Наибольшее значение имеет центрально симметричное решение Шварцшильда, отыскавшего по уравнениям Эйнштейна искривление метрики под воздействием тела массы M , например Солнца (см. § 13.4 f). Это позволяет уточнить движение планет по сравнению с ньютоновой теорией и предсказать два других эффекта: отклонение света и красное смещение спектральных линий в поле тяготения *).

*) Поправки, вообще говоря, лежат за границей точности наблюдений, за исключением Меркурия, для которого эйнштейновская теория объясняет незначительное смещение перигелия орбиты на $42''$,9 в столетие. Отклонение луча света, проходящего у края Солнца, гравитационным полем Солнца на величину $1''$,75, по порядку величины согласуется с последующими наблюдениями; красное смещение спектральных линий в поле тяготения подтверждено особенно убедительно наблюдениями над сверхплотными звёздами (например, над спутником Сириуса).

Нельзя не заметить, что три предсказания общей теории относительности касаются весьма малых эффектов. При этом отклонение света получается также из ньютоновой теории, но будет там в два раза меньше, что явно опровергается опытом. В сущности, лишь красное смещение является полностью новым эффектом. Ещё раз приходится удивиться исключительной точности ньютоновой теории. Много, весьма много, изменилось в физике за 250 лет со времени появления *Principia*; глубоким образом модифицировалось и понимание тяготения, но конкретные, наблюдаемые следствия из новых — эйнштейновских — представлений оказались чрезвычайно незначительными и немногочисленными.

Подтверждения трёх незначительных эйнштейновских эффектов оказалось достаточным, чтобы убедиться в согласии с опытом грандиозной картины общерелятивистской теории, без которой мы не можем представить себе современной физической картины мира, почти так же, как без квантовой теории, несмотря на несравненно большую, осязательную, повседневную значимость и применимость последней. Здесь, конечно, следует ещё иметь в виду, что общая теория относительности является, в сущности, единственной теорией, способной продвинуть нас вперёд, также в решении космологических проблем (см. § 12).

Сейчас нас интересует отыскание гравитационного поля, порождённого элементарными частицами. Ясно, что для последних существенную роль будут играть квантовые эффекты, поэтому решения, полученные с помощью уравнений Эйнштейна для элементарных частиц, могут иметь лишь самое приближённое значение, но вероятно передают некоторые стороны действительности. Для точечной частицы вновь получается решение Шварцшильда.

Почти всегда гравитационные поля оказываются слабыми, соответствующими незначительному искажению псевдоевклидовой метрики. Можно показать, что волнам слабого гравитационного поля, согласно правилам вторичного квантования, сопоставляются частицы-гравитоны, так же как фотоны сопоставляются полю электромагнитному (см. § 13.5).

Подобно фотону, гравитоны не имеют массы покоя. Спин гравитона равен 2. Гравитоны, очевидно, должны подчиняться статистике Бозе.

С помощью гравитонов можно прежде всего решить задачу испускания гравитационной энергии движущимся веществом *).

Ввиду малости постоянной тяготения κ и масс элементарных частиц, излучение гравитационной энергии ничтожно даже при больших частотах колебаний. С другой стороны, для астрономических

*) Интересно, что, ввиду значения спина гравитона 2, излучение гравитационных волн является не дипольным, как у фотона, или векторного мезотрона, но квадрупольным.

Величина излучённой энергии определяется в связи с этим не второй но третьей производной по времени. За секунду испускается гравитацион-

объектов, несмотря на большую величину их масс, ввиду малости частот колебаний, испускание гравитационной энергии также ничтожно. Для двойных звёзд за год излучается примерно 10^{-12} доля их полной энергии, т. е. потеря энергии на гравитационное излучение становится заметной лишь за космологические промежутки времени порядка 10^9 — 10^{10} лет.

Действие отдельного гравитона заметить практически невозможно в противоположность фотону, так как число гравитонов высокой частоты ничтожно мало.

С помощью гравитонов можно также решить задачу взаимодействия частиц. Квантовый подсчёт энергии взаимодействия двух частиц совершенно аналогичен вычислению взаимодействия двух зарядов через фотоны. Пусть частица A испускает гравитоны, частица B их поглощает, и обратно; в результате такого двухтактного процесса обмена гравитонами, между A и B возникает взаимодействие, в точности ньютонова вида.

Ценность полученных результатов пока что ещё лежит исключительно в принципиальной области, реальные же гравитационные воздействия сказываются лишь для тел большой массы, для которых квантовая трактовка не нужна.

В связи с этим нельзя не указать, что обратный эффект поглощения энергии гравитационного поля, а также порождение частиц за счёт энергии гравитационного поля и аннигиляция частиц с испусканием гравитонов до сих пор вообще не рассматривались. Несмотря на весьма малую вероятность подобных процессов они представляют несомненно принципиальный интерес. Рассмотрение таких эффектов сможет ещё более стереть разницу между гравитационным полем, понимаемым, согласно Эйнштейну, как свойство пространства и времени, и другими типами элементарных частиц и полей.

История физики учит нас плодотворности сближения и объединения представлений о различных типах вещества, к чему следует стремиться и в данном случае; при этом лишь нужно учитывать весь неудачный опыт «единой» теории поля, с одной стороны, и успехи релятивистской квантовой механики, объединяющей все виды частиц и полей, с другой.

Следует указать, что если для электронов и электромагнитного поля, а также нуклонов и мезотронного поля, в области высоких энергий, в известной мере теряется различие между полем и частицами,

ная энергия:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{\kappa^2}{c^5} \left| \ddot{\ddot{J}}_{\mu\nu} \right|^2,$$

где $\ddot{\ddot{J}}_{\mu\nu}$ есть тензор квадрупольного момента.

Гравитационное лучистое трение или затухание (выражаемое членом, содержащим 5-ю производную по времени от квадрупольного момента) совершенно ничтожно.

ввиду относительно значительной величины постоянных тонкой структуры α , β и превращения частиц в друг друга, то в случае тяготения частицы и гравитационные поля, порождаемые ими, чрезвычайно резко различаются. Ввиду малости гравитационной константы тонкой структуры $\gamma = \frac{2\pi\kappa m^2}{hc}$ для всех масс m элементарных частиц, частицы

и системы частиц: ядра, атомы, молекулы — можно рассматривать «погружёнными» в пространство — время и лишь весьма незначительно искажающими последнее. Не следует, впрочем, забывать, что это незначительное искажение для макроскопических и астрономических объектов приводит к эффективным силам, превосходящим все прочие.

Поскольку гравитационное поле, в общем случае, не может коренным образом отличаться от слабого поля, его также следует рассматривать как особый вид вещества, хотя никаких частиц нелинейному полю сопоставить непосредственно нельзя.

Отметим, что неоднократно высказывавшаяся мысль о родстве нейтрино с гравитонами непосредственно не может быть верной ввиду различия в спинах. В духе нейтринной теории света де-Бройля, не приведшей, как указывалось, к законченным результатам, следовало бы строить гравитон, по меньшей мере, из 4-х нейтрино или из четвёрок нейтрино.

Таким образом, резюмируя вопрос о гравитации, можно сказать, что трактовка слабого гравитационного поля закономерно включается в теорию элементарных частиц. Вместе с тем гравитоны относятся к особому роду вещества, так как гравитационное поле является искривлением пространства — времени. Проблемы же квантовой геометрии элементарных частиц, с одной стороны, и квантовое рассмотрение общей теории относительности, т. е. сильного гравитационного поля, вероятно, частью связанные с космологическими вопросами, находятся ещё в стадии самой первоначальной разработки.

(Окончание в следующем выпуске.)