

## ГЛАВА 5. КОНЦЕПЦИИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

### Основное содержание главы

Классическое естествознание при описании полей базируется на концепции *близкодействия*, в рамках которой поле является некой средой, передающей действие одного материального объекта на другой от точки к точке с ограниченной скоростью. В рамках квантовой концепции *дальнодействия* полагается, что частицы вещества взаимодействуют между собой посредством обмена частицами полей. Микрочастицы полей образуют в мире элементарных частиц самостоятельную группу бозонов – частиц, имеющих целое значение спинового числа и передающих взаимодействия между фермионами (лептонами и кварками), которые имеют дробное значение спинового числа.

### 5.1. Концепции близко- и дальнодействия полей

В настоящее время в качестве основных в современном естествознании выделяют следующие физические поля, передающие взаимодействия частиц вещества (табл. 10).

Таблица 10

*Фундаментальные взаимодействия и переносчики*

Фундаментальные взаимодействия	Микрочастицы поля
Гравитационное	Гравитон (?)
Электромагнитное	Фотон
Электрослабое	Векторный бозон
Сильное	Глюон

Знаком вопроса в табл. 10 отмечена частица, существование которой еще не подтверждено в эксперименте.

По определению, в классическом естествознании полем называют область пространства, в каждой точке которого на помещенное туда пробное тело (имеющее свойства  $m$ ,  $q$ ,  $s$ ) действует однозначно определенная сила. Здесь поле понимается как область *физически измененного* пространства, чем-то заполненного. Поле начинается от его непосредственного источника и может простираться до бесконечности (дальнодействие!). Полагается, что при удалении на бесконечность от источника его действие на пробное тело убывает до нуля.

Считается также очевидной материальность поля. Иначе как бы передавалось действие одной материальной частицы вещества на другую

через нечто нематериальное? Таким образом, в концепции ближкодействия классического естествознания выделяются две противоположности (вспомним Аристотеля!). Им соответствуют принципиально различные понятия нашего сознания.

	(Объект-источник)	(Поле-среда)
Физико-математическая модель:	<i>материальная точка</i>	<i>материальная среда</i>
Подчеркивается свойство:	<i>локальность</i>	<i>безграничность</i>

Квантовая механика (основа неклассического естествознания) показала неправильность бинарной логики выбора – либо частица-точка, либо неограниченная волна. Действительно, опыты показали, что, при уменьшении массы объектов до значения масс микрочастиц, такие «материальные точки» проявляют свойства протяженности, свойства делокализации по пространству. В частности, проявлением таких свойств является дифракция микрочастиц на решетках кристаллов.

С другой стороны, при уменьшении длины волны электромагнитных излучений,  $\lambda \rightarrow 0$ , излучения проявляют корпускулярные свойства. Проявлением таких свойств является эффект Комптона и фотоэффект (о них позднее скажем подробнее). Поэтому образом квантовой физики является «кентавр» – частица-волна. Уместно будет привести здесь цитату из работы А. Эйнштейна «Эволюция физики»:

*Поле представляет энергию, вещество представляет массу. Но мы уже знаем, что такой ответ в свете новых знаний недостаточен. Из теории относительности мы знаем, что вещество представляет собою огромные запасы энергии и что энергия представляет вещество. Мы не можем таким путем провести качественное различие между веществом и полем, так как различие между массой и энергией не качественное. Гораздо большая часть энергии сосредоточена в веществе, но поле, окружающее частицу, также представляет собой энергию, хотя и в несравненно меньшем количестве. Поэтому мы могли бы сказать: вещество – там, где концентрация энергии велика, поле – там, где концентрация энергии мала. Но если это так, то различие между веществом и полем скорее количественное, чем качественное. Нет смысла рассматривать вещество и поле как два качества, совершенно отличные друг от друга. Мы не можем представить себе определенную поверхность, ясно разделяющую поле и вещество.*

Электромагнитные взаимодействия передаются путем обмена фотонами, схема этого процесса представлена диаграммой Фейнмана (см. рис. 38). Для гравитационного поля теоретики предполагают существование гравитона, как аналога фотона. Если поиски гравитационных волн приведут к успеху, гравитон обретет права «физического гражданства» в сообществе элементарных частиц. Кварки взаимодействуют посредством глюонов (см. рис. 38). Глюонное поле имеет парадоксальные свойства, даже с точки зрения квантовой механики. В отличие от гравитационного и электромагнитного полей, *действие глюонного поля возрастает при увеличении расстояния между кварками*. И наоборот, при сближении кварки получают асимптотическую свободу и слабо влияют друг на друга. На уровне макромира похожая ситуация возникает при растягивании руками резинового шнура или ленты.

Сравнительно недавно появилась гипотеза о существовании торсионных полей (полей кручения). Их проявление должно иметь связь с таким фундаментальным свойством микрочастиц, как спин. В настоящий момент слишком мало экспериментальных данных, чтобы судить об изменении этих полей с расстоянием. Однако, это не смущает некоторых людей, увлеченных гипотезой новых полей. Как в свое время атом Резерфорда стимулировал появление гипотез супра- и инфрамира, так в наше время с торсионными полями пытаются связать аномальные явления и телепатию.

## 5.2. Сопоставление свойств статических полей

Известны два статических поля, источниками которых служат неподвижные массы и заряды. Гравитационное поле описывается законом тяготения Ньютона, а электростатическое поле – законом Кулона. Оба закона сформулированы в результате обработки экспериментальных данных. При этом обычно вспоминают еще одну легенду о яблоке, как будто упавшем на Ньютона, что и помогло ему в размышлениях о тяготении.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (33)$$

Одинаковая зависимость от расстояния, обратно пропорциональная второй степени, не случайна. В последующем развитии физики было показано, что при степени расстояния  $r$ , равной единице, трем и больше трех, устойчивых орбит движения двух взаимодействующих тел не образуется. В гравитационном поле возможно только притяжение тел, в электрическом поле одноименные заряды отталкиваются.

Для этих полей введены одинаковые по физическому смыслу понятия:

напряженность поля  $\mathbf{E}$  – векторная величина, силовая.

потенциал поля  $\varphi$  – скалярная величина, энергетическая.

Определения для напряженности поля:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{m}, \quad \mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}. \quad (34)$$

Здесь в знаменателях стоят значения массы и заряда пробного тела. Условно принято, что для пробного тела  $m > 0$  и  $q > 0$ .

Графически поля представляются силовыми линиями. Это линии, касательные к которым указывают *направление* вектора  $\mathbf{E}$ , а относительную *величину* напряженности в данном месте выражают числом линий  $\mathbf{E}$ , проходящих через единичную площадь. Это не условная договоренность, а следствие фундаментальной теоремы Остроградского–Гаусса: полный поток линий вектора  $\mathbf{E}$  через замкнутую поверхность, охватывающую источники полей (либо  $q$ , либо  $m$ ), равен полной величине массы, либо алгебраической сумме зарядов, находящихся внутри. Используя определение  $\mathbf{E}$  и законы взаимодействия (33), легко получить выражения для напряженности поля точечной массы или заряда.

По определению, потенциалом называют физическую величину, равную работе перемещения единичной массы или единичного электрического заряда из бесконечности в данную точку пространства. Для бесконечно разделенных тел силы взаимодействия равны нулю, и потенциал здесь принимается равным нулю. Вычислив работу *переменной силы*  $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ , получим выражения для потенциалов точечной массы и точечного заряда:

$$\varphi = -G \frac{m}{r}, \quad \varphi = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (35)$$

Знак минус в (35) означает, что при сближении гравитирующих масс поле выполняет работу и энергия (потенциальная) системы убывает от начального значения, а оно равно нулю. В случае электрических зарядов следует учитывать знаки зарядов, убывает энергия разноименных зарядов и возрастает энергия системы одноименных.

Общим для рассматриваемых полей является так же принцип суперпозиции полей. *Каждая точечная масса или точечный электрический заряд создают поле независимо от присутствия других источников полей.* Это позволяет использовать все законы и определения, введенные для точечных тел, для реальных объектов. Необходимо только сначала условно разбить реальное тело на столь малые части, чтобы

их можно было считать материальными точками или точечными зарядами, а затем использовать принцип суперпозиции полей. Как правило, при этом необходимо производить интегрирование по объему, поверхности или по линии. Совокупности одной векторной и одной скалярной характеристик,  $\mathbf{E}$  и  $\varphi$ , достаточно для полного описания свойств статических полей.

Поле передает действие одного заряда на другой. Как оно изменится, если источник поля будет двигаться с высокой скоростью? Для усиления предположим, что скорость релятивистская,  $V \rightarrow c$ .

В таком случае мы вправе использовать выводы специальной теории относительности Эйнштейна. СТО предсказывает сокращение продольных размеров всех материальных тел. Но поле тоже материально. Следовательно, необходим учет перераспределения в «сокращенном» пространстве линий напряженности поля  $\mathbf{E}$ . Этот процесс можно проиллюстрировать рис. 57.

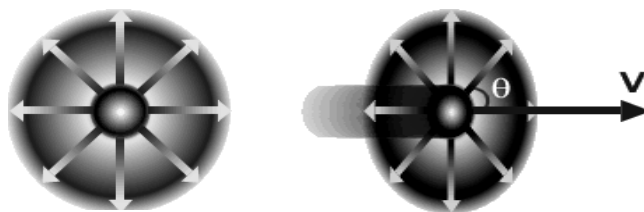


Рис. 57. Распределение силовых линий поля для неподвижного и движущегося зарядов

Если изотропное поле неподвижного заряда обозначить как  $E_0$ , то напряженность в точке, расположенной под углом  $\theta$  к направлению движения заряда, будет равна:

$$E = E_0 \frac{1 - \beta^2}{\sqrt{(1 - \beta^2 \sin^2 \theta)^3}}, \quad \beta = \frac{V}{c}. \quad (36)$$

Чтобы выделить различие между сравниваемыми полями, вычислим величину работы по какому-либо замкнутому контуру в статическом поле и в поле движущегося заряда. В изотропном поле неподвижного заряда работа по замкнутому контуру будет равна нулю (условия на пути туда и обратно по кольцу будут одинаковыми по густоте линий поля).

В случае движущегося заряда очевидно, что в области по вертикали напряженность поля выше, чем в области горизонтальной оси. Поэтому величина работы по переносу единицы заряда будет отлична от нуля (разные условия по густоте линий напряженности поля).

Это означает, что такое поле *непотенциально!*

Оно обладает дополнительными свойствами, отличающими его от статического поля. Естественно считать, что новые свойства являются проявлением какого-то другого, дополнительного поля, которым обладает движущийся заряд. Это поле известно под названием магнитного, оно передает магнитное взаимодействие зарядов.

Силы магнитного взаимодействия имеют противоположное действие по сравнению с действием сил электрических. Например, две параллельно движущиеся положительно заряженные частицы электрическими силами отталкиваются, а магнитными силами они притягиваются друг к другу.

Численное значение отношения магнитной силы к электростатической равно отношению скорости движения заряженной частицы к скорости света. Поэтому при обычных скоростях движения, когда скорость  $V$  много меньше скорости света  $c$ , сила магнитного взаимодействия зарядов пренебрежимо мала, по сравнению с кулоновской.

В частном случае параллельного движения одинаковых по знаку зарядов сила магнитного взаимодействия определяется зависимостью:

$$F_m = \frac{\mu_0 (qV)_1 (qV)_2}{4\pi r^2}. \quad (37)$$

Как и в формулах (33), зависимость магнитной силы от расстояния обратно пропорциональна второй степени  $r$ .

Входящие в формулы (37) и (33) магнитная и электрическая постоянные связаны со скоростью света в теории Максвелла:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}. \quad (38)$$

Обратим внимание на условие, при котором две силы (отталкивания и притяжения) становятся равными по величине. Для этого необходимо, чтобы скорость движения заряженной частицы стала равной скорости света. Для частиц с отличной от нуля массой покоя достижение скорости света невозможно по причинам, которые обсуждались выше. Тем не менее, отметим, как важный факт, ослабление общего результата взаимодействия по мере резкого увеличения кинетической энергии заряженной частицы при  $V \rightarrow c$ .

### 5.3. Первая концепция объединения полей

Магнитное поле постоянных токов или равномерно движущихся зарядов имеет неизменные во времени параметры. В этом смысле оно статично, как и электрическое поле неподвижных зарядов. Исчерпывается ли многообразие полей только статическими полями? Существуют ли в природе динамические поля  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ , переменные во времени и пространстве?

Если они существуют, то их появление должно наблюдаться в динамическом процессе изменения состояния движения электрического заряда, то есть в процессе изменения скорости заряженной частицы, её ускорения. Попробуем кое-что узнать об особенностях динамического электрического поля, не прибегая к сложным математическим выкладкам, пользуясь только одним фундаментальным положением: *источником линий напряженности  $\mathbf{E}$  является электрический заряд*.

В процессе ускорения ранее неподвижного заряда изотропное поле должно перейти к распределению «сжатых», как веер, линий напряженности поля движущегося заряда (рис. 58). Переход должен происходить так, чтобы линии не обрывались и число их не изменялось. Рассмотрим схему переходного процесса (рис. 58).

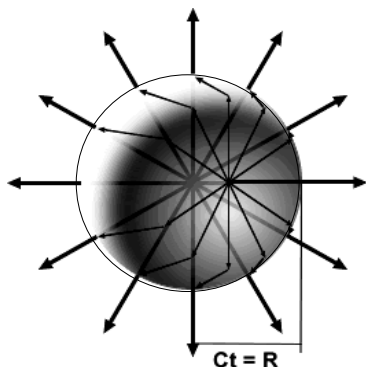


Рис. 58. Излом линий поля  $\mathbf{E}$

Схема представляет собой как бы мгновенный снимок состояния всех линий  $\mathbf{E}$  в пространстве для момента времени  $t$  после начала движения. Оно начинается с того, что за интервал  $dt$  неподвижный заряд ускорился до значения  $V = const$ , и далее с такой скоростью перемещается прямолинейно.

Сигнал об изменении состояния движения заряда распространяется со скоростью света  $c$ . За время  $t$  радиус области, в которой поле от изотропного изменилось до «сжатого», достигает величины  $R = ct$ . За пределами этой области все еще сохраняется центрально-симметричная конфигурация линий  $\mathbf{E}$ . Так как число линий не меняется и они не пересекают друг друга, то мы должны соединить соответствующие стрелки (хотя бы по прямой, в линейном приближении).

Излом линий происходит на самом деле в тонком шаровом слое толщиной  $dR = cdt$  на границе двух статических полей. Переходный динамический слой «стирает» со скоростью света потенциальное

статическое поле неподвижного заряда и оставляет за собой непотенциальное поле равномерно движущегося заряда.

В чем принципиальное отличие динамического поля от статического?

Обратите внимание, для статических полей вектор  $\mathbf{E}$  всегда направлен по радиус-вектору от заряда до точки наблюдения. А в переходном слое обязательно появляется компонента, перпендикулярная радиус-вектору (иначе излом не получится). Очевидно, что свойства такого поля нельзя свести к свойствам статических полей, это новый вид поля. Таковы выводы качественного анализа.

Количественное описание динамического поля дал английский физик Дж. К. Максвелл.

Для читателей, мало знакомых с математическими операциями дивергенции и ротора, скажем, что операция дивергенции дает количественную величину источника поля, а ротора – показывает причину закрученности, вихревого характера поля.

Для вакуума, где нет вещественных носителей заряда и токов, Максвелл теоретически получил следующую систему дифференциальных уравнений.

$$\begin{aligned} \operatorname{div}\mathbf{E} &= 0, & \operatorname{div}\mathbf{B} &= 0, \\ \operatorname{rot}\mathbf{E} &= -(\mathbf{dB}/dt), & \operatorname{rot}\mathbf{H} &= (\mathbf{dD}/dt). \end{aligned} \quad (39)$$

Здесь обозначено:

$\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  – векторы напряженностей полей,

$\mathbf{D}$  и  $\mathbf{B}$  – векторы индукции электрического и магнитного полей.

Прежде всего, эта система заслуживает эстетической оценки: она красива с математической точки зрения. Л. Больцман сказал о ней словами Фауста из одноименного произведения Гете:

*Не Бог ли начертал эти письма?*

Красота появляется как результат симметрии, завершенности и громадной концентрации рационального смысла. Какого же?

1. Достаточно только одного условия: чтобы  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{D}$  были переменными во времени, для существования самостоятельного электромагнитного поля. Однажды возникшее поле с  $\mathbf{dB}/dt \neq 0$  порождает переменное поле  $\mathbf{E}$ . В свою очередь,  $\mathbf{dD}/dt \neq 0$  обуславливает продолжение – появление переменного магнитного поля. И так далее и далее по пространству.
2. Переменные  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  являются полностью равноправными составляющими общего электромагнитного динамического поля. В нем линии напряженности охватывают линии индукции и наоборот, без разрывов.



3. Плоскости, в которых лежат кольца линий  $E$  и  $B$ , взаимно перпендикулярны. Для пояснения рассмотрим схему трех соседних замкнутых линий (рис. 59).

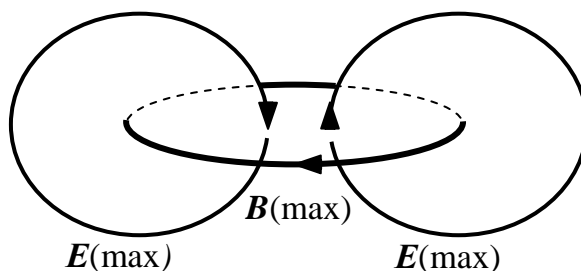


Рис. 59. Расположение линий вихревых полей

Различие в знаках при производных (минус в одном случае и плюс в другом) не является случайным фактом. Наоборот, это следует из закона сохранения энергии. В области, где магнитное поле достигает максимума, линии векторов электрического поля имеют противоположные направления, их суперпозиция дает в результате нулевое значение  $E$ . В тех областях, где напряженность электрического поля достигает максимального значения, индукция магнитного поля  $B$  стремится к нулю. Это обеспечивает последовательный переход энергии магнитного поля в энергию электрического и наоборот.

Легко предвидеть, что периодическое изменение в пространстве и во времени электрической и магнитной составляющих будет описываться периодическими функциями синуса и (или) косинуса, задолго до Максвелла уже использованными для описания волн. Действительно, простой подстановкой можно убедиться, что эти функции удовлетворяют системе уравнений Максвелла.

Таким образом, можно утверждать, что Максвелл сделал открытие – он теоретически предсказал новый вид поля – электромагнитные волны. Впоследствии их экспериментально наблюдал Г. Герц. Скорость их распространения оказалась равна скорости света, что стало важным аргументом в пользу волновой природы последнего.

Классическая электродинамика Максвелла позволила получить выражение для мощности излучения электромагнитных волн ускоренно движущимся зарядом. Оказалось, что зависимость от величины ускорения очень сильная – пропорционально второй степени ускорения!

В современной физике теория Максвелла используется во многих приложениях электродинамики, в частности для расчета спектров тормозного рентгеновского или синхротронного излучения электрона.

В первом случае оно возникает в результате резкого торможения электронов, падающих на поверхность твердого тела. Синхротронное

излучение – это следствие ускорения центростремительного. Оно возникает при движении электрона по круговой орбите в камере синхротрона и направлено по образующей конуса, осью которого служит касательная к орбите электрона. Потеря энергии на синхротронное излучение препятствует дальнейшему ускорению – кинетическая энергия, полученная при ускорении, переходит в энергию излучения электромагнитных волн.

Здесь теория Максвелла выполняется с высокой точностью, позволяя рассчитать и сравнить с экспериментальным спектральный состав синхротронного излучения.

Однако для описания движения электрона в атомах она не пригодна, так как предсказывает непрерывные потери энергии на излучение волн. Атом же излучает дискретно, только при переходах из одного энергетического состояния в другое.

#### 5.4. Свойства полей-волн

Волновым процессом (или волной) называют колебательный процесс, последовательно охватывающий пространство вокруг источника волн. Волны существуют на линейных материальных объектах (струнах, стержнях, трубах и т. д.), на поверхностях мембран, колоколов, раздела двух сред и в трехмерных средах. Различают волны продольные и поперечные: звук в газах является продольной волной, а электромагнитные волны – поперечные (вспомним излом на рис. 56 переходного процесса). В однородных средах волны распространяются с постоянной скоростью, называемой фазовой скоростью волны. Ее численное значение зависит от свойств среды.

Уравнение наиболее простой монохроматической волны имеет вид:

$$S = S_0 \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{V_\phi}\right)\right]. \quad (40)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$x$  – координата точки наблюдения;

$V_\phi$  – фазовая скорость фронта волны;

$\omega$  – круговая (циклическая) частота,  $\omega = 2\pi\nu$ ;

$S$  – какой-либо параметр волнового процесса;

$S_0$  – его амплитудное значение;

$t$  – время.

Смысл дроби  $(x/V_\phi)$  – это время запаздывания начала колебательного процесса в данной точке по сравнению с источником. Поэтому для

волны, бегущей от начала координат в положительном направлении оси  $x$ , стоит знак минус.

Что движется в волновом процессе?

Объект или состояние? Обратимся к хорошо известным волнам на поверхности жидкости. При пробегании волны нет переноса массы, поплавок удочки в озере колеблется на одном месте, волна от брошенного камня его не сносит. Смещается же фронт волны – геометрическое место точек среды, имеющих одинаковую фазу процесса. В рассматриваемом примере, наряду с фазовой, можно пользоваться еще понятием колебательной скорости, с которой происходит смещение поплавок по отношению к уровню спокойной поверхности воды. Колебательная скорость определит энергию колебания единицы объема воды. Эта энергия переносится вместе с фронтом волны.

Таким образом, волна описывает в общем случае перенос состояния какого-либо процесса (его фазы), а не движение объекта.

Важной характеристикой волнового процесса является величина  $\lambda$ , называемая длиной волны. По определению, это расстояние проходимое фронтом волны за время одного полного колебания (периодического изменения параметра  $S$ ):

$$\lambda = V_{\phi} T.$$

Иными словами, длина волны – это интервал периодичности в пространстве. В однородной среде монохроматическая, то есть имеющая постоянную частоту, волна не переносит какой-либо информации, так как бесконечное число совершенно одинаковых интервалов периодичности неразличимо, *ничем не выделено* друг от друга.

Физическая информация и физическое действие передаются группой волн. В результате суперпозиции группы волн возникает волновой пакет (немцы говорят – цуг волн, французы – волновой поезд). Волновой пакет представляет собой постепенное нарастание амплитуды колебания до максимума, после чего амплитуда снижается. Поэтому он выделяется на фоне отдельных монохроматических волн. Скорость его распространения может не совпадать с фазовой скоростью компонент, это еще одна величина  $V_{gp}$  – *групповая скорость*, которой пользуются при рассмотрении волновых процессов.

И еще один термин – волновой вектор. Это вектор, направление которого в данной точке перпендикулярно фронту волны. Он показывает направление луча, по которому волна проходит выбранную точку наблюдения. Модуль волнового вектора показывает, какое число волн укладывается на отрезке в  $1$  м, или чаще – на отрезке  $2\pi$ :

$$|\mathbf{k}| = 2\pi / \lambda.$$

С использованием введенных параметров, общее выражение для волны в трехмерной среде имеет вид:

$$S = S_0 \sin[\omega t - (\mathbf{k} \mathbf{r})]. \quad (41)$$

Электромагнитные волны в веществе распространяются с меньшей скоростью, чем в вакууме. Характеристикой замедления является показатель преломления вещества:

$$n = c/V_{\phi}.$$

#### **5.4.1. Взаимодействие электромагнитных полей с частицами вещества**

Наименьшими частицами вещества, сохраняющими химические свойства соединений и элементов, являются молекулы и атомы. Рассмотрим ряд процессов рассеяния и поглощения полей-волн этими частицами. Спектр электромагнитных излучений необычайно широк. Мы ограничимся диапазоном от видимого света (будем называть эту область длинноволновой) до рентгеновского и гамма-излучения (соответственно, это коротковолновая область).

##### *1. Классическое рассеяние на электронных оболочках атомов*

Падающая длинноволновая электромагнитная волна раскачивает легкую электронную оболочку атома, например, водорода. Массивное ядро не успевает следовать за быстрыми изменениями величины и направления вектора напряженности электрического поля и остается при этом практически неподвижным.

Колебания электронной оболочки (в основном – валентных электронов) происходят с частотой изменения вектора  $\mathbf{E}$ . В данном случае колебания происходят с знакопеременным ускорением  $\mathbf{a}$ . По теории Максвелла, колебания должны сопровождаться излучением электромагнитных волн.

Фактически атомы, ионы и молекулы вещества при действии на них длинноволнового электромагнитного излучения становятся вторичными источниками волн с той же частотой, что и у падающей волны. Несмотря на простоту, представленная схема процессов хорошо объясняет распространение и преломление света в веществе, явления поляризации света при отражении и преломлении.

##### *2. Фотовозбуждение оболочек атомов и ионов*

Фотовозбуждение является квантовым процессом, в котором оболочка атома или иона поглощает вполне определенную дискретную порцию энергии поля. Разности энергетических уровней атома или иона

определяют линейчатый спектр поглощения, характеризующий данный химический элемент, его своеобразную «визитную карточку». Чтобы поглощение произошло, необходимо выполнение квантового условия:

$$h\nu = W_2 - W_1. \quad (42)$$

Здесь обозначено:

$h$  – постоянная Планка,

$W$  – энергия состояния электрона в атоме, ионе, молекуле,

$\nu$  – частота излучения.

Последовательность процессов можно представить следующей схемой. Поглощая квант энергии поля, электрон в атоме переходит (на сравнительно короткий, порядка  $10^{-8}$  с, период времени) в возбужденное состояние.

При этом изменяется форма валентной электронной оболочки, а следовательно и химическая активность атома или иона. Становятся возможными варианты реакций, которые в обычных условиях не реализуются. В ряде случаев это приводит к нежелательным эффектам, например наблюдаются взрывы газовых смесей при вспышке ультрафиолетового света. Время жизни атома в возбужденном состоянии не превышает десятков наносекунд, после чего система возвращается в нормальное состояние. По закону сохранения энергии, излучаемый при обратном переходе квант света имеет такую же частоту и длину волны, что и ранее поглощенный квант поля.

Однако атом как бы «забывает» направление импульса поглощенного кванта, так что все направления вылета излучаемого кванта оказываются равновероятными. Поэтому только небольшая часть излучаемых квантов направлена по лучу света, падающему на вещество. Остальные рассеиваются по всем направлениям, что создает видимость поглощения энергии света. На самом деле происходит его квантовое рассеяние без изменения частоты и длины волны.

Многие сложные по составу и строению молекулы часто имеют несколько возможных форм расположения своих фрагментов. Говорят о *цис*- и *транс*-конформациях органических соединений. Различие в расположении частей молекулы обуславливает различие уровней потенциальной энергии *цис*- и *транс*-форм.

Если энергия квантов излучения равна разности энергии двух конформаций, то наблюдается фотовозбуждение оболочки молекулы. В качестве примера рассмотрим конформационные переходы в ретинале, показанные на рис. 60.

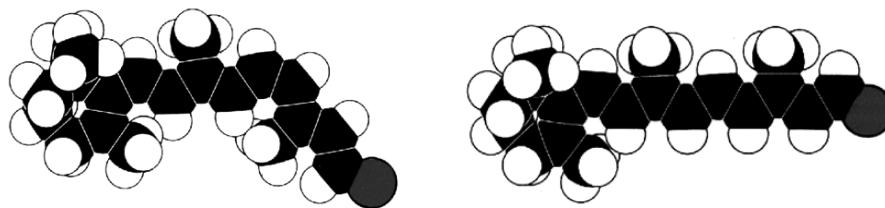


Рис. 60. Переход молекулы ретиналя из цис-формы в транс-форму

При поглощении света с длиной волны  $\lambda = 380$  нм молекула чистого ретиналя переходит из цис-формы в транс-форму: 11-ол-транс-ретиналь. При этом происходит поворот «хвоста» молекулы вокруг оси связи 11 и 12 атомов углерода так, что излом исчезает, молекула приобретает более симметричную форму.

Этот эффект лежит в основе восприятия света человеком. В настоящее время известно, что фотоприемником служит родопсин – белковое соединение, в центре которого встроена молекула ретиналя. В новом окружении переход в транс-конформацию происходит при поглощении света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм, это как раз соответствует максимуму спектра Солнца на уровне поверхности земли.

Изменение формы стимулирует начало цепи химических реакций с высоким коэффициентом усиления сигнала, и в конечном счете в нервной системе человека формируется электрический импульс, бегущий в мозг. Таким образом, в процессе эволюции Природа подобрала для человека химическое соединение, оптимальное для дневного зрения в солнечном свете.

Рассмотренные примеры показывают, *почему* многие произведения живописи «боятся» солнечного света, а фармацевты рекомендуют хранить лекарства в темноте. Ведь в спектре Солнца имеется интенсивная компонента УФ-излучения, способного вызвать фотовозбуждение молекул красок или лекарств и стимулировать тем самым начало таких химических реакций, которые в обычных условиях не происходят.

### 3. Фотоэлектрический эффект

Если энергия кванта превышает величину энергии связи электрона с ядром атома или иона, то происходит фотоэффект – явление вылета электрона из частиц вещества. Закон сохранения энергии можно записать в виде формулы А. Эйнштейна для фотоэлектрического эффекта:

$$h\nu = A + \frac{mV^2}{2}. \quad (43)$$

Здесь  $A$  обозначает работу выхода электрона из металла или энергию ионизации отдельного атома, когда фотоэффект происходит на свободной частице вещества. Само явление наблюдалось впервые в

начале двадцатого века, такие его особенности, как практическая безынерционность, независимость максимальной энергии электронов от освещенности и линейная связь энергии с частотой света не поддавались объяснению с позиций классической электродинамики Максвелла.

А. Эйнштейн применил для объяснения фотоэффекта гипотезу М. Планка о дискретности энергии электромагнитного поля  $W = h\nu$  и «все встало на свои места». В частности, фотоэффект прекращается тогда, когда выполняется условие: *энергия кванта меньше или равна работе выхода электрона из вещества.*

Некоторая связь с классическим процессом раскачивания электронной оболочки падающей волной все же сохраняется. Так, при малой энергии квантов (это соответствует более длинноволновому излучению) фотоэлектроны вылетают преимущественно под углом  $90^\circ$ , то есть по направлению вектора  $E$  падающей волны. Но по мере увеличения энергии квантов (увеличения частоты и уменьшения длины волны) фотоэлектроны вылетают под все меньшими углами, с явным направлением их импульса по направлению падения ультрафиолетового или рентгеновского излучения. В этих случаях все заметнее начинают проявляться корпускулярные свойства полей-волн.

#### 4. Эффект Комптона

При высокой энергии квантов электромагнитного поля (фотонов) наблюдается квантовое рассеяние с изменением длины волны – эффект Комптона. Оно также сопровождается вылетом электрона из оболочки атомов или молекул. Схемы процессов приведены на рис. 61.

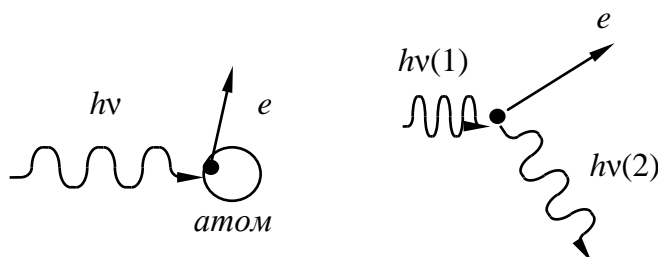


Рис. 61. Фотоэффект и эффект Комптона

Отметим различия. В результате фотоэлектрического эффекта квант полностью поглощается. Электрон связан с атомом или твердым телом, в состав которого он входит.

В результате эффекта Комптона квант только теряет часть своей энергии. После рассеяния длина волны возрастает, а частота уменьшается. Электрон считается свободным, т. к. величина энергии связи на много порядков меньше энергии кванта, ею можно пренебречь.

Самым удивительным с классической точки зрения было то, что в процессе рассеяния рентгеновское излучение «вело себя» как поток идеально упругих частиц. Взаимодействие их с электроном удавалось рассчитать по формулам удара упругих шаров!

Идея объяснения эффекта по Комптону состоит в том, чтобы рассматривать фотоны как частицы, имеющие динамическую массу, эквивалентную их энергии:

$$\begin{aligned} mc^2 &= h\nu, \\ m &= \frac{h\nu}{c^2}. \end{aligned} \quad (44)$$

Зная величину эквивалентной массы и скорость фотонов (она равна скорости света), можно определить импульс фотонов:  $P = h\nu / c$ .

После этого следует использовать фундаментальные законы сохранения импульса и энергии, чтобы рассчитать энергию и импульс вылетающего электрона или импульс и частоту рассеянного кванта.

За открытие и объяснение эффекта, столь наглядно демонстрирующего корпускулярные свойства динамических электромагнитных полей, Артуру Комптону в 1900 г. была присуждена Нобелевская премия по физике.

Несколько лет назад при исследовании релятивистских выбросов плазмы из области Черных дыр, был обнаружен обратный эффект Комптона. Он заключается в передаче энергии от высокоэнергетичного электрона плазмы кванту микроволнового электромагнитного излучения. В результате взаимодействия электрон теряет, а квант приобретает энергию. Из области микроволнового диапазона такие кванты переходят в область рентгеновского и гамма-излучения.

#### 5.4.2. Суперпозиция полей и частиц

*Интерференция света.* После того как мы рассмотрели взаимодействие между квантами электромагнитного поля и частицами вещества, встает вопрос о том, как же динамические поля взаимодействуют между собой?

Повседневный опыт использования осветительных приборов показывает, что в обычных условиях пучки света проходят друг через друга без какого-либо рассеяния или взаимовлияния, что свидетельствует о применимости для них *принципа суперпозиции*. В более простых ситуациях, для волн на поверхности жидкости, мы также наблюдаем независимое прохождение друг через друга волн с различной и одинаковой длиной волны.



В местах встречи складываются колебательные движения, вызванные волнами. Для поверхностных волн результатом суперпозиции могут быть:

- произвольное распределение энергии по пространству, изменяющееся с течением времени;
- периодически повторяющиеся во времени биения;
- стационарная картина упорядоченного распределения энергии волн по пространству.

Последний случай представляет наибольший интерес. Он реализуется только при определенных условиях, которые называются условиями когерентности (согласованности) волн. Их три:

- 1) должно выполняться равенство длин волн  $\lambda_1 = \lambda_2$ ;
- 2) разность фаз источников не должна изменяться со временем,  $\Delta\varphi = \text{const}$ ;
- 3) складываемые волны должны быть одного типа – либо продольные, либо поперечные, тогда будет сложение колебаний одного направления.

Во всем огромном диапазоне электромагнитных волн (от 1000 м до  $10^{-12}$  м) зрение человека различает только узенькую полоску спектра, от 0,41 мкм до 0,76 мкм.

Тем не менее, интерференцию света можно наблюдать непосредственно. Опыты Юнга и Френеля описаны в каждом учебнике физики, поэтому мы коснемся здесь только основных моментов.

1. Распространение и суперпозиция электромагнитных волн в пространстве не создает какого-либо механического движения. В данном случае изменяются *физические состояния* точек пространства – в одних напряженность электрического (и связанного с ним магнитного) поля возрастает до максимума, в других – убывает до минимума.

2. С помощью светофильтров можно создать два источника света с одинаковым цветом, то есть с одинаковой длиной волны. Почему такие источники не будут когерентными?

Дело в том, что невозможно согласовать процессы возбуждения и последующего испускания квантов света у атомов, принадлежащих различным телам, различным осветительным приборам. Поэтому в опытах Френеля, например, с помощью зеркал или бипризмы разделяют на две компоненты *каждую порцию излучения одного и того же атома*, заставляют компоненты-волны пройти различные пути для создания определенной разности хода и соединяют их в общей точке наблюдения. Важно только, чтобы соединялись две части одной и той же порции излучения атома, так как даже два последовательно излученных фотона

не будут когерентны между собой – у них не будут совпадать плоскости колебаний векторов  $E$ . А это одно из условий когерентности.

Из-за этого *интерференция световых волн* от естественных источников света требует дополнительного условия: разность хода не должна превышать примерно трех метров. Почему именно трех? Выше мы отметили, что от момента возбуждения до момента возвращения в нормальное состояние атому требуется примерно  $10^{-8}$  с. Будем считать эту величину временем излучения цуга волн. Тогда излученная волна займет в пространстве область с линейными размерами порядка трех метров  $L = c t = 3$  м ( $c = 3 \cdot 10^8$  м). Следующие 3 м будет занимать уже другая порция излучения. Поэтому при  $\Delta > 3$  м в точке  $N$  сойдутся две части *разных* фотонов, которые не будут когерентны.

3. При наблюдении интерференции световых волн мы встречаемся с явлением, где *Свет + Свет = Темнота* (по областям минимумов). Темнота отмечает отсутствие какой-либо энергии. Куда «исчезла» энергия? Не нарушается ли при интерференции закон сохранения энергии?

Ответим. Конечно не нарушается! Просто при интерференции происходит *перераспределение энергии* из мест минимумов в места максимумов. Поэтому можно сказать, что потоки когерентных фотонов все же взаимодействуют между собой в процессе суперпозиции так, что *происходит пространственное перераспределение энергии общего динамического поля*. Его энергия-масса концентрируется в отдельных местах пространства и эти состояния могут быть стационарными.

*Суперпозиция структур микрочастиц*. В разных разделах нашего курса мы отмечали дуализм свойств микрочастиц. Вводя динамическую массу, мы начинаем описывать изменения состояния динамического поля как движение объектов, как поток частиц. С другой стороны, используя волну Дебройля, мы сопоставляем потоку микрообъектов динамическое волновое поле состояний.

Вольно или невольно, но образы интерференции и дифракции электромагнитных полей дали толчок к возникновению концепции микрочастиц как полей энергетических состояний в пространстве.

С этой точки зрения каждая элементарная частица представляет собой небольшой участок энергетического поля, в пределах которого мощность поля достигает громадных величин. Здесь, в очень малом объеме пространства, сосредоточена огромная энергия. Такой сгусток энергии-массы четко выделяется на фоне остального поля, подобно максимуму интерференции или дифракции.

Поскольку для динамических полей «естественна» суперпозиция, то и микрочастицы можно описывать как суперпозицию нескольких

динамических полей. Причем каждое динамическое поле имеет свою структурную частицу. В итоге, суперпозиция полей эквивалентна суперпозиции структурных частиц этих полей. Таким образом, современное естествознание развивает общую идею (принцип) суперпозиции, от ее применения для сложения сил в механике до сети структур-процессов.

Новые эксперименты показывают, что протон может превращаться в другие элементарные частицы по разным каналам реакций. Более полное описание, которое это учитывает, дает несколько упрощенная схема, приведенная на рис. 62 (здесь не показаны нейтрино и антинейтрино, чтобы не перегружать деталями рисунок).

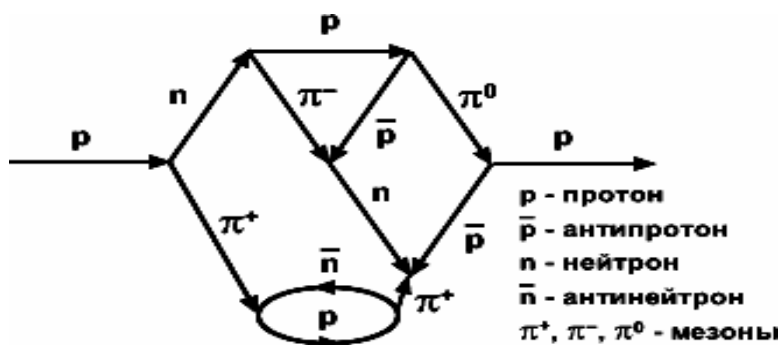


Рис. 62. Схема виртуальных структур (состояний) протона

Точки разветвления сети обозначают частные реакции превращения элементарных частиц. Например:

$$n \Rightarrow p + \pi^-, \quad \pi^0 + \bar{p} \Rightarrow p, \quad \bar{n} + p \Rightarrow \pi^+. \quad (45)$$

Античастицы отличает также обратное направление стрелок на схеме. Частицы  $\pi^-$  и  $\pi^+$  являются античастицами по отношению друг к другу,  $\pi^0$ -мезон тождествен своей античастице.

То, что мы привыкли называть стабильной микрочастицей, может быть устойчивым (стационарным) состоянием суперпозиции нескольких динамических структур. При определенных условиях эксперимента мы наблюдаем такие свойства протона, как его масса покоя, заряд, спин. Но это описание является неполным, односторонним, как микрочастицы-объекта.

Концепция суперпозиции структур микрочастиц, на новом уровне понимания, возвращает нас к античным представлениям о всеобщей взаимосвязи частиц всего сущего. Классическое представление микрочастицы как объекта, изолированного от всего остального окружающего мира, есть грубая модель, дружеский шарж (если не сказать карикатура) на действительное положение вещей. Более адекватное представление

дает концепция микрочастиц как сети динамических процессов, сети виртуальных состояний для каждой данной частицы. Рассматривая *пи-плюс-мезон*, необходимо иметь в виду возможность его виртуального превращения в антинейтрон и протон, с последующим восстановлением исходного состояния. Но и сеть структур протона включает в себя  $\pi^+$ -мезон. Так что действительно есть связь «всех со всеми».

В какой-то мере преувеличивая, можно сравнить виртуальную сеть динамических процессов отдельной микрочастицы с живым организмом. Чтобы пояснить аналогию, приведем слова Н. Бора. В статье «Свет и жизнь» он замечает:

*Непрерывный обмен веществ между организмом и окружающей средой необходим для поддержания жизни, вследствие чего четкое выделение организма как физико-химической системы не представляется возможным. Поэтому можно считать, что любая попытка провести резкую грань, позволяющую осуществить исчерпывающий физико-химический анализ, вызовет изменение обмена веществ в недопустимой для жизни организма степени....*

Согласно принципу суперпозиции структур, невозможно провести резкую грань, позволяющую дать исчерпывающий анализ какой-либо элементарной частицы, не вызвав изменений всей сети обмена виртуальными состояниями.

### **5.5. Концепции объединенных фундаментальных взаимодействий**

В п. 3.2 мы говорили о протоне, как об устойчивой частице, состоящей из двух верхних (*u*) и одного нижнего (*d*) кварков. Теперь привели образ протона в виде сети виртуальных процессов. Как согласовать всё это? Из чего же «сделан» протон?

По Фоку, для микрочастиц существует принцип относительности к условиям их наблюдения. При одних условиях мы «видим» один образ. При других, с иной точки зрения, «вид» частицы будет другим. Самым главным условием наблюдения свойств микрочастиц является диапазон доступных энергий. Чем выше энергия микрочастицы, тем вероятнее образование облака (или «атмосферы») виртуальных партнеров вокруг неё. Согласно соотношению неопределенностей для энергии и времени, на очень малое время энергия движущейся элементарной частицы может стать достаточной для рождения даже более массивной виртуальной частицы, чем исследуемая нами частица.

Ускорение микрочастиц, осуществляемое наблюдателем с помощью сложного оборудования, повышает энергию и делает виртуальные

процессы все более эффективными. Если за короткое время жизни виртуальной частицы ничего особенного не произойдет, она исчезнет, вернув свою энергию-массу. Если же протон в этот период испытает столкновение с другой реальной частицей, то одна из виртуальных частиц может перейти в реальную форму существования. Столкновения помогают виртуальным частицам приобрести «права гражданства» в мире реальных частиц.

Наоборот, в диапазоне низких энергий, протон все больше походит на бесструктурную, «элементарную» частицу. Именно при таких условиях наблюдения мы измеряем обычно массу покоя протона, его заряд и спин. Можно сказать, что в этом проявляется относительность движения, о которой мы говорили в главе 4.

В области релятивистских скоростей и огромных энергий ускоренных частиц ослабевает зарядовое взаимодействие, так как силы кулоновского действия все более компенсируются силами магнитного взаимодействия зарядов (см. п. 5.2). И тогда на смену им приходят другие законы взаимодействия. Для протона это будут взаимодействия с участием пи-мезонов.

По идее Худеки Югавы, высказанной ещё в 30-е гг. XX в., именно эти частицы «связывают» протоны с нейтронами и другими протонами в ядрах атомов.

### **Основные положения концепции электрослабых взаимодействий**

Нуклеарно-планетарная модель атома Резерфорда поставила перед классическим естествознанием две проблемы. Первая из них, проблема стабильности электронной оболочки, нами уже обсуждалась. Второй является проблема стабильности атомного ядра.

Почему столь малое по размерам ядро не разрывается электростатическим отталкиванием положительно заряженных протонов? И почему некоторые ядра все же распадаются? Чтобы ответить на эти вопросы, потребовалось немало времени. Только к середине нынешнего столетия удалось разработать теории новых двух взаимодействий, которых не знало классическое естествознание. Речь идет о теории сильных и слабых взаимодействий элементарных частиц.

Термин *сильные* относится к взаимодействиям, передаваемых  $\pi$ -мезонами на коротких расстояниях (в пределах ядра). *Слабые* взаимодействия ответственны за нестабильность нейтрона и его превращение в протон с испусканием антинейтрино и электрона (или  $\beta$ -частицы, что и определяет  $\beta$ -распад ядер). Эти взаимодействия происходят на ещё более коротких расстояниях – в пределах одного нуклона.

Для пояснения происхождения терминов полезно сравнить интенсивность взаимодействий, например двух протонов, находящихся на расстоянии порядка размеров ядра. Примем за единицу кулоновское отталкивание. В табл. 11 приведены оценки относительной интенсивности фундаментальных взаимодействий.

Таблица 11

*Интенсивность взаимодействий*

Взаимодействие	Относительная интенсивность	Область действия
1. Гравитационное	$10^{-37}$	не ограничена
2. Электрическое	1	не ограничена
3. Сильное	100	$10^{-15}$ м
4. Слабое	0,001	$10^{-17}$ м.

К началу 60-х гг. прошлого века теория сильных взаимодействий была хорошо разработана и описывала многие свойства ядер и ядерных реакций.

Считалось, что нуклоны являются источниками мезонного поля (поля Юкавы). Все известные к тому времени и вновь открываемые элементарные частицы стали классифицировать на адроны и лептоны. Первые способны участвовать в *сильных* взаимодействиях, тогда как вторая группа частиц участвует только в *слабых* взаимодействиях. Что же двигало физиками-теоретиками, когда они пытались создавать концепции объединенных взаимодействий?

Философы говорят, что в человеческой практике Мир предстает как многообразие форм и процессов движения материи. Наше сознание, интуитивное и рациональное, ищет и находит закономерности в процессах движения, устанавливает определенное единство за фасадом разнообразия структур и форм. Каждое открытие нового многообразия стимулирует поиски нового внутреннего единства и порождает гипотезы, теории и концепции нового объединения.

Первой концепцией объединения можно считать теорию гравитации Ньютона. Все тела, по Ньютону, создают поле гравитации независимо от их формы и состояния (температуры например). Наличие динамической массы у фотонов приводит к их взаимодействию с гравитационным полем.

Второй объединительной теорией в физике стала электродинамика Максвелла. Она объединила, ранее рассматривавшиеся отдельно, поле электрическое и поле магнитное.

Объединительной концепцией в биологии была классификация К. Линнея. Л. Пастер открыл многообразие микроорганизмов (микробов). Д.И. Менделеев объединил в стройную систему многообразие химических элементов. Так что поиск общих начал, как выражение интегративной тенденции, был всегда характерен для естествознания, включая и физику. С поиска элементарных частиц – кварков и попыток создания теорий объединения электромагнитных и слабых ядерных взаимодействий условно начинается период постнеклассического (современного) естествознания.

В течение 1962–1968 гг. Ш. Глэшоу, С. Вайнберг и А. Салам, независимо друг от друга, опубликовали первые варианты теории электрослабых взаимодействий (в 1979 г. они получили Нобелевскую премию по физике за эти работы). К настоящему времени теория прошла определенный период «увязки» спорных моментов и её основные положения можно представить следующим образом.

1. В области энергии частиц  $mc^2 > 100\,000$  МэВ существуют четыре векторных динамических поля и одно скалярное, более фундаментальное, чем электромагнитное и слабое ядерное. Разделение на векторные и скалярное поля связано с наличием спина у квантов первых полей и с равенством его нулю у частиц второго поля.

2. Возбужденным состояниям полей соответствуют свои частицы-волны.

*Векторным полям* соответствуют безмассовые частицы (их масса покоя равна нулю). Этим они похожи на фотоны и глюоны. Отличаются от них тем, что имеют электрический заряд. Если глюоны можно назвать окрашенными фотонами, то кванты векторных полей следует назвать заряженными фотонами.

*Скалярному полю* соответствуют очень массивные частицы-волны, получившие имя бозонов Хиггса (поиск этих частиц запланирован на введенном в 2008 г. суперколайдере CERN).

3. Скалярные бозоны Хиггса взаимодействуют с безмассовыми частицами, и в результате суперпозиции полей происходит следующее. Стационарными состояниями становятся три частицы – векторные бозоны и одна частица безмассовая – обычный фотон.

Теория электрослабых взаимодействий предсказывала величину масс новых частиц: примерно 80 ГэВ для бозонов  $W^+$  и  $W^-$  и около 90 ГэВ для  $Z^0$ -бозона. Электрические взаимодействия характерны для электронов или  $\beta$ -частиц, а нейтрино всегда присутствует в слабых взаимодействиях. Объединенная теория дала их связь между собой, предсказывалось превращение электрона в электронное нейтрино при испускании векторного бозона по реакции (46).

$$\beta \Rightarrow W^- + \nu_e. \quad (46)$$

Согласно объединенной теории, диаграммы Фейнмана для реакций распада нейтрона и рассеяния нейтрино на электроны выглядят следующим образом (рис. 63).

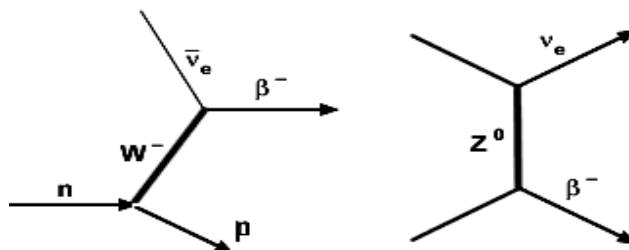


Рис. 63. Диаграммы Фейнмана для реакций распада нейтрона и рассеяния нейтрино

Сначала нейтрон испускает бозон  $W^-$  и превращается в протон, затем бозон  $W^-$  распадается на антинейтрино и электрон (бета-частицу). При рассеянии нейтрино испускает нейтральный  $Z^0$ -бозон, электрон его поглощает, что меняет направления импульсов частиц.

В 1983 г. в Европейском центре ядерных исследований (CERN) экспериментально было установлено существование векторного бозона с массой 81 ГэВ. Позднее была определена и масса нейтрального бозона:

$$m_0 c^2(Z^0) = 91,3 \text{ МэВ.}$$

Следует заметить, что это самая массивная из открытых элементарных частиц, ее масса сравнима с массой атома серебра! Прекрасное совпадение теоретических значений предсказываемых масс покоя и экспериментально определенных послужило решающим доводом в пользу полного признания теории объединенных электрослабых взаимодействий.

Распад объединенного электрослабого взаимодействия на слабое и электромагнитное, происходящее при энергиях ниже  $10^{11}$  эВ (округленно), иногда называют пороговым понижением симметрии фундаментальных взаимодействий.

### **Перспектива дальнейшего объединения фундаментальных взаимодействий**

Подтверждение реальности существования векторных бозонов (их ещё называют промежуточными бозонами) стимулировало теоретический анализ их возможной роли во взаимодействиях сильных. Для сильных взаимодействий современная физика не отрицает теорию пимезонного поля Юкавы, как СТО Эйнштейна не отрицает механику



Ньютона. На более глубоком, более фундаментальном уровне  $\pi$ -мезоны состоят из кварков. Поэтому взаимодействие промежуточных бозонов теперь рассматривают именно с кварками, а не с мезонным полем.

Современная теория сильных взаимодействий показывает, что имеется определенная аналогия в процессах взаимодействия промежуточных бозонов с лептонами и с кварками (табл. 12).

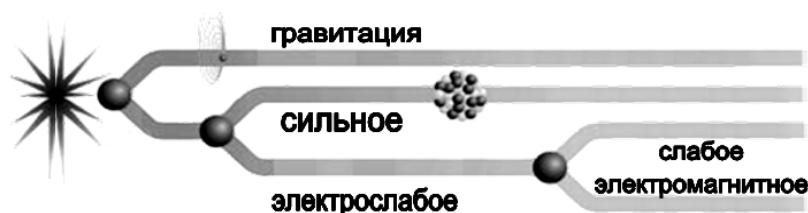
Таблица 12

*Аналогия в реакциях превращения фундаментальных частиц*

Лептоны	Кварки
$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + W^-$	$d \rightarrow u + W^-$
$\beta^- \rightarrow \nu_e + W^-$	$u \rightarrow d + W^+$

Реакции взаимопревращений происходят внутри выделенных семейств с участием векторных бозонов, эти частицы входят в обе теории. На основании аналогии этих и многих других более сложных взаимодействий, возникла идея о дальнейшем объединении, получившая образное название Великого объединения. Предварительные теоретические проработки, выполненные за последние годы, показали, что последующие этапы объединения электрослабых и сильных взаимодействий возможны только при достижении энергии порядка  $10^{24}$  эВ. При таких энергиях частицы одного семейства (лептонов) смогут превращаться в частицы другого семейства (кварков).

Возможности современных ускорителей на встречных пучках протонов и антипротонов (суперколлайдер LHC) в ближайшей перспективе не превысят  $10^{15}$  эВ. Как видим, вопрос об экспериментальной проверке теории Великого объединения пока не ставится. Тем не менее, следует привести схему границ, при достижении которых не исключено повышение симметрии фундаментальных взаимодействий (табл. 13, рис. 64).



*Рис. 64. Схема этапов понижения симметрии взаимодействий*

Считается, что Великое объединение может описать квантовая теория калибровочных полей, развивающая современную квантовую хромодинамику.

Отметим, что вся экспериментальная база современной физики микромира подтверждает существование лишь трех поколений фундаментальных частиц, таблица которых уже приводилась выше.

Таблица 13

*Энергетические пороги объединения взаимодействий*

Название объединительной теории	Достижение симметрии во взаимодействиях частиц	Энергетический порог объединения, эВ
Электрослабое взаимодействие	Лептонов	$10^{11}$
Великое объединение	Лептонов и кварков	$10^{24}$
Супергравитация	Лептонов, кварков и гравитонов	$10^{28}$

Последняя проверка этого положения была проведена сравнительно недавно в экспериментах на встречных пучках электронов и позитронов (на ускорителе LEP, который несколько лет назад был разобран, чтобы дать жизнь новому, более мощному ускорителю LHC). Анализу подвергли резонансные кривые, предсказываемые для  $Z$ -частицы по различным вариантам теории, их сравнили с данными по более десяти тысячам событий образования  $Z$ -бозонов, наблюдавшихся в CERN.

При увеличении энергии соударяющихся электрона и позитрона меняется выход  $Z$ -частиц, так что амплитуда распределения и ширина пика на полувысоте зависят от числа поколений фундаментальных составляющих вещества. По тому теоретическому распределению, на которое «укладываются» экспериментальные результаты, можно сделать вывод о числе поколений фундаментальных частиц. Оказалось, что все экспериментальные данные согласуются с предположением о существовании трех поколений фундаментальных частиц вещества.

Кроме того, согласно теории Великого объединения протон не является стабильной частицей и может распадаться на позитрон и нейтральный пион либо на положительный пион и нейтрино. Время распада по первоначальному варианту составляло  $10^{30}$  лет. Попытки обнаружить распад протона не увенчались успехом, так что время стабильности протона, по крайней мере, больше  $10^{32}$  лет. Таким образом, ясно, что теория пока ещё далека от завершения. Если распад обнаружат, это будет свидетельством верности идеи Великого объединения.

В последние годы активно развивается идея микрочастиц-струн. Она связана с одной из особенностей энергии взаимодействия, с её обратно пропорциональной зависимостью от расстояния. Когда расстояние стремится к нулю, величина энергии стремится к бесконечности, что приводит к потере физического смысла. Если же рассматривать некоторый линейный, а не точечный объект, то энергия взаимодействия стремится к большой, но конечной предельной величине. Таким путем расходимость энергии на малых дистанциях устраняется.

Следует отметить, что энергии порядка  $10^{28}$  эВ в принципе недостижимы для человечества, поскольку такой уровень энергии элементарные частицы имели только в первые мгновения после рождения Вселенной. По мере ее расширения плотность энергии уменьшалась и происходило пороговое понижение симметрии фундаментальных взаимодействий.

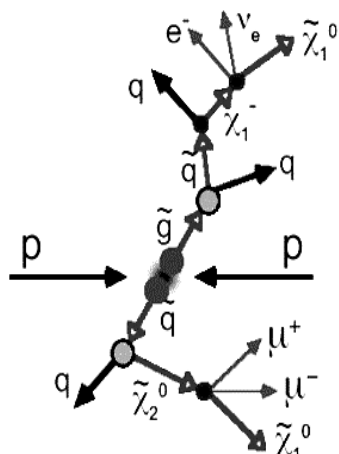


Рис.65. Реакции рождения бозонов Хиггса

Первоочередной задачей экспериментальных исследований микромира, которые планируют в ближайшие годы проводить на встречных пучках протонов (суперколлайдер LHC), является поиск бозонов Хиггса.

Для их обнаружения теория предсказывает некоторые возможные варианты реакций с их участием. На рис. 65 бозоны Хиггса обозначены греческой буквой  $\chi$ , кварки обозначены символом  $q$ , а глюоны –  $g$ .

Участие России в реализации экспериментов на суперколлайдере заключается в разработке, изготовлении и поставке в CERN детектора с рекордными параметрами регистрации микрочастиц – 800 000 000 частиц в секунду.

Другой проблемой для решения на ускорителе LHC является поиск очень массивных и очень слабо взаимодействующих частиц, которые могут остаться во Вселенной с первых мгновений ее эволюции. Это частицы так называемой «темной материи», которой, судя по ряду наблюдений, выполненных при исследовании Вселенной, на порядок больше, чем известного вещества в ней. Как предполагают теоретики, частицы «темной материи» смогут проявить себя в реакциях с другими частицами очень высоких энергий, достижимых на суперколлайдере LHC.

Таким образом, в современном естествознании исследования микромира объединяются с проблемами исследования мегамира, в космологии оказываются необходимыми сведения о свойствах и поведении элементарных частиц.

### *Задания для самостоятельной работы*

1. Приведите пример использования термина «потенциал» в гуманитарной области.
2. Запишите, в каких случаях мы замечаем инерционность нашего тела. Приходилось ли Вам испытывать чувство невесомости или ослабления Вашего веса?
3. Приведите пример электризации каких-либо тел (желательно Вашего). Можно ли считать, что при электризации происходит рождение зарядов противоположных знаков?
4. На основании материала п. 5.4.1 дайте объяснение выцветания картин и обоев на солнечном свете. Какие процессы происходят при этом в красках?
5. Можно ли наблюдать явление интерференции света в повседневной жизни? Приведите пример наблюдения интерференции света в тонких пленках.