§ 9. Волновые процессы в физическом вакууме-эфире

В современной физике физический вакуум рассматривается как реальная материальная среда, наделенная определенными физическими свойствами, которые могут проявляться в эксперименте. Так, например, лэмбовский сдвиг уровней в атомах происходит за счет взаимодействия электрона с нулевыми колебаниями свободного электромагнитного поля, т.е. с электромагнитным вакуумом [6].

Взаимодействие с колебаниями вакуума приводит к тому, что электрон в атоме начинает "дрожать" на своей орбите. В результате он как бы размазывается в пространстве, и вследствие этого изменяется его кулоновское взаимодействие с ядром. Притяжение к ядру ослабевает, и уровни энергии стационарных состояний повышаются. В этом взаимодействии представление о физическом вакууме практически ничем не отличаются от классического представления об эфире как о реальной материальной среде с происходящими в ней внутренними колебаниями и другими процессами.

В современной физике наряду с электромагнитным вакуумом, т.е. нулевыми колебаниями поля, рассматривают электрон-позитронный вакуум. Это может означать, что в физическом вакууме-эфире предполагается присутствие электрон-позитронных пар, находящихся в некотором связанном состоянии. Физический вакуум-эфир обуславливает силовое взаимодействие между частицами. При этом электромагнитное взаимодействие рассматривается несколько абстрактно, а именно: один электрон испускает "псевдофотон", а другой его поглощает. Кулоновское поле рассматривается как возбужденное состояние электромагнитного вакуума. Однако такой упрощенной моделью удается объяснить далеко не все явления в электродинамике.

С другой стороны, физический вакуум рассматривается как своеобразный резервуар, откуда "извлекаются" реальные частицы при их порождении и куда они "переходят" в результате аннигиляции (или рекомбинации). Иными словами, физический вакуум-эфир можно рассматривать как строительный материал для формирования, т.е. синтеза более сложных частиц из частей более простых.

Считается общепризнанным, что в кулоновском поле вблизи частиц физический вакуум заметно поляризуется, как и любой диэлектрик, а именно, происходит некоторое смещение электронов и позитронов, находящихся в вакууме, от своих равновесных положений. Точно также проявлял бы себя и обычный классический эфир. Реально поляризоваться может материальная среда, содержащая в себе не виртуальные частицы, исчезающие по неведомому закону, а реальные электроны и позитроны, находящиеся в эфире в связанном состоянии.

При вычислении лэмбовского сдвига энергетических уровней в атомах производится усреднение электрического потенциала по области дрожания электрона, т.е. точно так же, как это происходит в обычной классической статистической физике.

Очень многие положения в современной теории поля или в квантовой электродинамике постулируютя на основе особых квантовых представлений. Однако это не является обязательным условием для вычислений, поскольку те же самые результаты могут быть получены и в классической электродинамике с учетом статистического, т.е. случайного характера взаимодействий между частицами.

Описание взаимодействия электронов с физическим вакуумом (эфиром) следовало бы начать с предпосылок самого общего характера. Известно, что различного рода частицы (или локальные неоднородности), находящиеся в некоторой непрерывной среде, рассеивают падающие на них волны любого типа. Если расстояние, с которого приходит волна, значительно больше характерных размеров частицы, то падающую волну с достаточной степенью точности можно считать плоской, а волну, рассеянную частицей, на значительном удалении от последней – сферической. Для данного процесса не являются особо существенными ни природа волн, ни природа частицы, важно лишь наличие между ними сколько-нибудь заметного взаимодействия, что в конечном итоге может характеризоваться величиной эффективного сечения рассеяния частицей энергии волн определенного типа.

Под волной в некоторой материальной среде следует понимать любое изменение физической величины u (возмущение), распространяющееся в пространстве с течением времени с определенной скоростью v, характерной для данной среды. Скорость распространения возмущения (скорость волны) определяется внутренними упругими и инерционными свойствами данной среды и при малых возмущениях является постоянной величиной. Для величин, характеризующих состояние среды при волновых процессах (например, плотность, смещение частиц, давление и т.п.), справедливо волновое уравнение

$$\Delta u = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\,. \tag{9.1}$$

В частности, выражение вида

$$u = f\left(t - \frac{\mathbf{rn}}{v}\right) \tag{9.2}$$

называют уравнением плоских волн. В уравнении (9.2) u - любая величина, характеризующая состояние среды, $\boldsymbol{r}$ - радиус-вектор точки пространства, в которой рассматривается изменение той или иной величины, $\boldsymbol{n}$ - единичный вектор, совпадающий с направлением распространения плоской волны.

Теперь уточним некоторую терминологию, а также определимся с основными понятиями из механики сплошной среды[1] [7]. Пусть в среде

[1] Достаточно подготовленный читатель может без ущерба для дальнейшего восприятия материала пропустить несколько страниц. Тем не менее, напоминание некоторых учебных прописных истин способно оказать определенную психологическую поддержку. Дело в том, что дискуссии иногда обретают нежелательные черты, когда одна из сторон прибегает к наивным аргументам, ссылаясь на “забывчивость” или “некомпетентность” в волновой физике.

выделен элементарный объем ΔV, обладающий некоторой кинетической энергией, $\Delta W_k = \frac{\rho}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)^2 \Delta V$, ($\rho\Delta V$ - масса объема, $\frac{\partial u}{\partial t}$ - его скорость), а также потенциальной энергией упругой деформации ΔW_p, тогда выражение

$$w = \frac{\Delta W}{\Delta V} = \frac{\Delta W_k + \Delta W_p}{\Delta V} \qquad (9.3)$$

дает плотность энергии в каждый момент времени в разных точках пространства. Например, для плоской синусоидальной (или гармонической) волны, описываемой уравнением

$$u(\mathbf{r},t) = a\cos(\omega t - \mathbf{kr} + \alpha), \qquad (9.4)$$

где a - амплитуда волны, α - начальная фаза, ω - угловая частота, $\mathbf{k} = k\mathbf{n}$ - волновой вектор, имеющий направление нормали к волновой поверхности и равный по модулю волновому числу $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (λ - длина волны), имеем [7]:

$$w = \rho a^2\omega^2 \sin^2(\omega t - \mathbf{kr} + \alpha), \qquad (9.5)$$

где учтено, что для гармонических колебаний $\Delta W_k = \Delta W_p$. Соответственно, среднее по времени значение плотности энергии в каждой точке среды

$$\langle w \rangle = \frac{\rho a^2 \omega^2}{2}. \qquad (9.6)$$

Таким образом, среда, в которой распространяются волны, обладает некоторой дополнительной энергией, доставляемой от источника волн в различные точки среды самой волной. Количество энергии, переносимое волной через некоторую поверхность в единицу времени, называют потоком энергии через эту поверхность. $\Phi = \frac{dW}{dt}$ - скалярная величина, имеющая размерность мощности. Для характеристики потока энергии в разных точках пространства вводится векторная величина, называемая плотностью потока энергии. Если через площадку $\Delta S_\perp$, перпендикулярную к направлению распространения волн, переносится за время Δt энергия ΔW, тогда модуль плотности потока энергии равен

$$J = \frac{\Delta \Phi}{\Delta S_\perp} = \frac{\Delta W}{\Delta S_\perp \Delta t}. \qquad (9.7)$$

Если рассматривать ориентированную площадку $d\mathbf{S} = \mathbf{n}dS_\perp$, то последнее соотношение лучше переписать в виде

$$d\Phi = \mathbf{J}d\mathbf{S} \qquad (9.8)$$

где $\mathbf{J}$ - вектор Умова, который может быть выражен через плотность энергии и скорость волн [8], $\mathbf{J} = w\mathbf{v}$. Когда говорят об интенсивности волны в данной точке, то имеют в виду среднее по времени значение плотности потока энергии, переносимой волной,

$$\langle \mathbf{J} \rangle = \langle w \rangle \mathbf{v}. \qquad (9.9)$$

Другими словами, под интенсивностью волны понимается средняя энергия, переносимая волной за секунду (или мощность) через волновую поверхность площадью 1 м^2. В частности, интенсивность звуковых волн имеет специальное название – сила звука.

Поскольку в дальнейшем рассматриваются волновые процессы в эфире, характеризуемые скоростью распространения света c, то удобно сразу перейти от обозначения v к стандартному c.

Для одномерного случая (плоская волна) волновое уравнение можно записать в общем виде

$$c^2 u_{xx} = u_{tt} \tag{9.10}$$

Решение такого уравнения записывается в виде линейной комбинации двух произвольных функций Φ и F, определяемых из начальных условий,

$$u(x,t) = \Phi(x-ct) + F(x+ct). \tag{9.11}$$

Функция $\Phi(x-ct)$ называется прямой бегущей волной, а функция $F(x+ct)$ – обратной бегущей волной. Данное естественное толкование непосредственно следует из физической интерпретации решений. Функцию $u(x,t)$ называют отклонением некоторой физической величины в точке x в момент времени t.

Процесс распространения волны, бегущей в прямом направлении, представлен на рис. 9.1 в системе координат u,x,t. Допустим, что в начальный момент времени при $t = 0$ в точке с координатой x_0 имелось некоторое отклонение $\Phi(x_0)$. Пусть из этой точки в положительном направлении оси OX в момент времени $t = 0$ начинает двигаться наблюдатель со скоростью c. В момент времени t_1 он окажется в точке $x_1 = x_0 + ct$, и величина отклонения, которую наблюдатель будет видеть в точке x_1 в момент времени t_1 , составит

$$u(x,t) = \Phi(x_1 - ct_1) = \Phi(x_0).$$

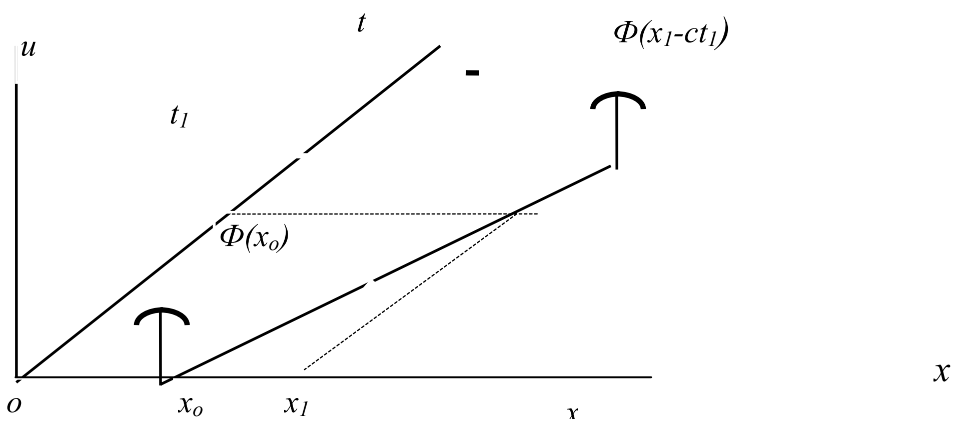

Рис. 9.1. Процесс распространения плоской волны (представлен в координатах u,x,t)

Таким образом, наблюдатель в любой момент времени будет видеть в точке, где он находится, одну и ту же величину отклонения. Следовательно, начальный профиль волны будет двигаться со скоростью c в положительном направлении оси OX как жесткая система, не изменяя формы.

Итак, пусть на частицу падают произвольные по форме однонаправленные волны, которым присуща интенсивность

$$\langle \mathbf{J} \rangle = \langle w \rangle \mathbf{c}. \tag{9.12}$$

Падающие с некоторого направления на частицу волны теряют при рассеянии поток энергии

$$\langle \mathbf{J} \rangle \sigma = \mathbf{c} \langle w \rangle \sigma, \tag{9.13}$$

где σ - полное эффективное сечение рассеяния волн. Рассеиваясь на частице, волны сообщают ей некоторый импульс ***p***, т.е. оказывают на нее давление со средней силой <***F***> (т.к. выбор направления при этом не играет решающей роли, можно говорить о скалярных величинах)

$$\langle \frac{dp}{dt} \rangle = \langle F \rangle = \frac{\langle J \rangle \sigma}{c} = \langle w \rangle \sigma. \tag{9.14}$$

Отметим, что соотношение (9.14), в силу законов сохранения импульса и энергии, выполняется универсально для волн любого типа, т.е. и в акустике, и в электродинамике [9,10].

§ 10. Сферические волны

В качестве примера рассмотрим звуковую волну, в которой распределение некоторого возмущения u в среде (давления, плотности, скорости и т.д.) обладает сферической симметрией. Такая волна называется сферической.

Найдем общее решение волнового уравнения для случая сферической симметрии

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \Delta u \tag{10.1}$$

Поскольку u есть функция только от расстояния r от центра и от времени t, то, воспользовавшись выражением для оператора Лапласа в сферических координатах, запишем

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial u}{\partial r} \right) \tag{10.2}$$

Положив $u = \frac{f(r,t)}{r}$, получим для функции $f(r,t)$ уравнение

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \tag{10.3}$$

т.е. обычное волновое уравнение в одном измерении, в котором роль координаты играет радиус r. Решение этого уравнения есть

$$f(r,t) = f_1\left(ct - r\right) + f_2\left(ct + r\right), \tag{10.4}$$

где f_1, f_2 – произвольные функции. Таким образом, для сферических волн общее решение волнового уравнения имеет вид

$$u(r,t) = \frac{1}{r}\left[f_1\left(ct - r\right) + f_2\left(ct + r\right)\right]. \tag{10.5}$$

Первый член представляет собой расходящуюся сферическую волну, распространяющуюся во все стороны из начала координат. Второй же член есть волна, сходящаяся к центру. В отличие от плоской волны, амплитуда которой остается постоянной, в сферической волне амплитуда падает обратно пропорционально расстоянию до центра.

При этом если энергия волны не поглощается средой, то средний поток энергии через сферу любого радиуса должен иметь одинаковое значение (закон сохранения энергии). Отсюда следует, что амплитуда незатухающей сферической волны обратно пропорциональна расстоянию r от источника волны. Соответственно средняя плотность потока энергии $\langle \boldsymbol{J} \rangle$ обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника.

Интенсивность волны, определяющаяся квадратом амплитуды, обратно пропорциональна квадрату расстояния, т.е. в соответствии с законом сохранения энергии, поскольку полный поток энергии в волне распределяется по поверхности, площадь которой растет пропорционально r^2.

Если в начале координат нет источника звука, то потенциал (10.5) должен при $r = 0$ оставаться конечным. Для этого необходимо, чтобы $f_1(ct) = - f_2(ct)$, т.е.

$$u(r,t) = \frac{1}{r}\left[f\left(ct - r\right) - f\left(ct + r\right)\right] \tag{10.6}$$

и мы имеем стоячую сферическую волну.

Если на частицу падает монохроматическая плоская волна, то частица будет колебаться с частотой, приблизительно равной частоте падающей волны (при отсутствии заметного движения частицы в направлении распространения волны). В случае же, если волны не являются гармоническими, а имеют характер случайных возмущений произвольной формы со случайной начальной фазой (всплески волн, импульсные воздействия), частотный спектр таких волн является сплошным. В этом случае частица будет совершать случайные колебания – “вздрагивать”,[2] рассеивая при этом соответственно случайные сферические волны с непрерывным спектром. Очевидно, в силе остаются выражения (9.12) - (9.14) для усредненных по времени величин, а также соотношения (9.1) - (9.4). Подобные случайные волны могут приходить от любых частиц и других объектов, находящихся в движении в непрерывной среде. Если поток энергии, который падает на отдельную частицу, является в среднем изотропным, то и рассеянный поток энергии в виде сферических волн при усреднении по времени будет также изотропным, т.е. обладать в среднем сферической симметрией.

В качестве квазинепрерывной среды, в которой распространяются различного рода случайные волны, рассматривается ***эфир***, а в роли частиц, рассеивающих волны, принимаются относительно свободные, дискретные, компактно локализованные частицы, отчетливо наблюдаемые в соответствующих физических экспериментах, – электроны и позитроны. Что касается реальной структуры эфира, то здесь пока можно было бы воздержаться от преждевременных гипотез, однако некоторые положения все-таки поддаются анализу.

Во-первых, эфир – это материальная среда, характеризующаяся чрезмерно малой диссипацией энергии, т.е. аналогом в этом отношении могла бы быть сверхтекучая жидкость. Во-вторых, эфир – это «обширная и однородная материальная субстанция» (по Максвеллу), характеризующаяся высокими упругими свойствами, поскольку они определяют величину скорости света.

Наконец, в состав эфира могут входить разнообразные частицы, находящиеся в непрерывном движении в связанном состоянии, имеющие нулевую эффективную массу и являющиеся, в целом, электронейтральными, как это показано в работах [3, 4] (в некотором отношении можно говорить об аналоге электронно-позитронного физического вакуума П.А.М. Дирака). Волновые процессы в эфире можно представить таким образом, что отдельная микрочастица является преобразователем случайных флуктуаций эфира во вторичные сферические волны рассеяния с тем же частотным спектром (т.е. выступает в роли точечной принимающей и одновременно излучающей антенны).

При этом энергия сферических волн рассеяния постоянно пополняется за счет флуктуаций эфира.[1]

---

[2] Если в качестве такой частицы иметь в виду электрон, то можно предложить следующий термин - “trembling electron” (дрожащий электрон).

[1] Можно предложить наглядный зрительный образ: поплавок, находящийся на волнующейся поверхности водоема, порождает, в свою очередь, вокруг себя “малые” концентрические волны, заимствуя энергию от “больших” волн водоема. В этой ситуации интересно задаться вопросом о соотношении запасов механической энергии у “поплавка-микрочастицы” и у “водоема-эфира”.