Волна де Бройля как амплитудно-модулированный сигнал

Самсоненко Н. В., Сёмин М. В.

Российский университет дружбы народов,
Институт физических исследований и технологий, Москва, Россия
nsamson@bk.ru, mvsemin@yandex.ru

Аннотация

В работе рассматривается механизм генерации волн де Бройля, являющийся амплитудной модуляцией внутреннего периодического процесса частицы её собственным импульсом.
Ключевые слова: волна де Бройля, амплитудная модуляция, структура частицы

1. Введение

На сегодняшний день нет единого мнения по вопросу интерпретации квантовой механики и физической природы волн де Бройля [1, 2].

Мы придерживаемся точки зрения де Бройля на то, что волны материи не абстрактны и существуют в нашем реальном физическом пространстве (x, y, z, t), в отличие от абстрактного конфигурационного пространства 3N измерений.

Основная идея работы заключается в том, чтобы на примере амплитудной модуляции в классическом радиоприемнике показать механизм возникновения волн де Бройля, как следствие модуляции несущей волны с частотой ω_0 импульсом частицы.

2. Волна де Бройля, как волна, модулируемая импульсом частицы.

Покажем, что волна де Бройля является волной амплитудно-модулированного высокочастотного процесса происходящего внутри частицы.

Волна де Бройля представляется выражением [4]:

$$\psi = e^{-\frac{i}{\hbar}(Et-\vec{p}\vec{r})} . \tag{1}$$

Формулу (1) можно разложить на множители:

$$\psi = e^{-\frac{i}{\hbar}Et} \cdot e^{\frac{i}{\hbar}\vec{p}\vec{r}} . \tag{2}$$

Для наглядности перейдем к случаю, когда импульс частицы стремится к нулю (случай малых скоростей). Тогда множитель $e^{\frac{i}{\hbar}\vec{p}\vec{r}}$ стремится к единице. В множителе $e^{-\frac{i}{\hbar}Et}$ полная энергия частицы E равна:

$$E = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = m_0c^2\left(\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\right)^{-\frac{1}{2}} . \tag{3}$$

Разложим (3) в степенной ряд, ограничиваясь первыми двумя членами:

$$E \approx m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2} . \tag{4}$$

Выражение (2) примет вид:

$$\psi = e^{-\frac{i}{\hbar}\left(m_0c^2+\frac{m_0v^2}{2}\right)t} = e^{-i\frac{m_0c^2}{\hbar}t} \cdot e^{-\frac{i}{\hbar}\frac{m_0v^2}{2}t} = e^{-\frac{ict}{\lambda_C}} \cdot e^{-\frac{i}{\hbar}\frac{m_0v^2}{2}t}. \tag{5}$$

Здесь $\boldsymbol{\lambda_C}$ – Комптоновская длина волны частицы – фундаментальный параметр, определяющий погрешность локализации частицы (может выступать как характерный размер частицы [3]).

Чтобы появилась волна, необходимо получить зависимость как от t, так и от $\vec{r}$. В случае покоящейся частицы волны нет, но есть колебания. Согласно де Бройлю внутри частицы существуют колебания, обусловленные встроенным механизмом неизвестной природы. В случае покоящейся частицы вместе с этим колебанием «пульсирует» вся Вселенная, но при этом никакой волны нет. Также можно сказать, что в этом случае волна распространяется мгновенно, что объясняет, казалось бы, не физический характер волны де Бройля. Первый множитель формулы (5) – высокочастотное колебание, второй множитель – модулирующий низкочастотный сигнал.

Например, для движущегося электрона волна де Бройля есть. После остановки волна де Бройля пропадает, а Комптоновская длина волны остается.

Важный вопрос состоит в том, что может выступать в качестве высокочастотного генератора внутри частицы. Главным кандидатом на данную роль можно принять массу покоя частицы.

Волна де Бройля – универсальная волна, которая существует у любого объекта в том числе и у макроскопического (нет зависимости от постоянной Планка):

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{\cancel{\hbar}}{\cancel{\hbar}k} = \frac{1}{k}\,. \tag{6}$$

Как только что было показано выше, в качестве модулятора может выступать само движение частицы. Таким образом, генератор высокочастотных колебаний – масса в совокупности с движением дают промодулированный сигнал – частицу.

Но что является генератором массы? Ответ на данный вопрос даст понимание того, что является волной де Бройля.

Де Бройль в работе 1925 года [4] предложил рассмотреть «электромагнитную» величину A_0, распространяющуюся со скоростью света в вакууме согласно волновому уравнению, решением которого является плоская волна. Отличие от общепринятой волновой функции состоит в том, что амплитуда данной «электромагнитной» величины не является константой, но зависит от пространственных переменных и времени. В системе отсчета неподвижной массивной частицы де Бройль получает выражение для величины A_0, описывающей стоячую волну, образованную двумя бегущими навстречу друг другу волнами со скоростью света:

$$A_0 = \frac{K}{r_0}\left\{\cos\left(2\pi\nu_0\left(t_0 + \frac{r_0}{c}\right) + \alpha_0\right) + \cos\left(2\pi\nu_0\left(t_0 - \frac{r_0}{c}\right) - \alpha_0\right)\right\}. \tag{7}$$

Здесь ν_0 является частотой внутренних колебаний покоящейся массивной частицы:

$$\nu_0 = \frac{m_0c^2}{h}\ . \tag{8}$$

«Все происходит так, как если бы имелась суперпозиция сходящейся волны и расходящейся со скоростью света. Данный результат позволит, может быть, более точно определить периодическую величину, которая, кажется, тесно связана с существованием самой материи. Во всяком случае определенно кажется, что существование фазовой скорости, превышающей скорость света не является несовместимым с электромагнитным уравнением распространения волн» [4].

Подчеркнём еще раз, что величина A_0 представляет собой стоячую волну для покоящейся частицы с массой ($m_0c^2 = h\nu_0 \neq 0$), в то время как каждое слагаемое в (7) по отдельности удовлетворяет волновому уравнению для безмассовых частиц (например, фотонов) в любой системе отсчёта, покоящейся, либо движущейся относительно наблюдателя с произвольной скоростью. Однако, де Бройль не рассмотрел случай движущейся частицы.

Рассмотрим стоячую волну, образованную в неподвижной системе отсчета $o'(t', x')$ суперпозицией двух встречных бегущих волн, одинаковых по частоте и амплитуде. Сумму двух косинусов, согласно известному тригонометрическому соотношению, запишем в виде произведения двух сомножителей:

$$\cos\alpha + cos\beta = 2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}\,. \tag{9}$$

Перейдем в систему $o(t, x)$, относительно которой целиком перемещается со скоростью v пакет из двух волн, представляющий стоячую волну в неподвижной системе $o'(t', x')$. Получим «идущую волну» [5], в которой частоты обеих волн изменятся согласно эффекту Доплера:

$$\omega_1 = \omega_0\sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} = \omega_0\frac{1+v/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}, \quad \omega_2 = \omega_0\sqrt{\frac{1-v/c}{1+v/c}} = \omega_0\frac{1-v/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\,. \tag{10}$$

В этой системе $o(t, x)$ суперпозицию двух волн с изменившимися частотами можно представить в виде произведения двух сомножителей:

$$cos(\omega_1 t - k_1 x) + cos(\omega_2 t + k_2 x) = 2\,cos(\omega t - Kx)\,cos(\Omega t - kx), \tag{11}$$

где

$$\frac{\omega_1+\omega_2}{2} = \Omega, \qquad \frac{\omega_1-\omega_2}{2} = \omega, \qquad \frac{k_1+k_2}{2} = K, \qquad \frac{k_1-k_2}{2} = k. \tag{12}$$

Тогда:

$$\frac{\Omega}{k} = \frac{\omega_1+\omega_2}{k_1-k_2} = V > c, \tag{13}$$

$$\frac{\omega}{K} = \frac{\omega_1-\omega_2}{k_1+k_2} = v < c\,. \tag{14}$$

Переписывая (11) как сумму косинусов, получим выражение для боковых частот:
$$2\,cos(\omega t - Kx)\,cos(\Omega t - kx) = cos\big((\omega - \Omega)t - (K - k)x\big) + cos\big((\omega + \Omega)t - (K + k)x\big). \qquad (15)$$
То есть, боковыми частотами являются ω_1 и ω_2, определяемые формулой (10), так как с учётом (12) имеем $\Omega + \omega = \omega_1$ и $\Omega - \omega = \omega_2$.
При малых скоростях $\left(\frac{v}{c} \ll 1\right)$ для боковых частот имеем простые выражения:
$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega_0\left(1 + \frac{v}{c}\right), \\ \omega_2 &= \omega_0\left(1 - \frac{v}{c}\right). \end{aligned} \qquad (16)$$
Очевидно, что при $v \to 0$ модуляция исчезает и волна де Бройля тоже исчезает. Остаются только высокочастотные колебания с несущей частотой $\omega_0 = \frac{m_0 c^2}{\hbar}$.

Результат сложения (11) можно истолковать следующим образом. Есть суперпозиция двух волн, представляющих собой произведение двух волновых сомножителей – высокочастотного (Ω), распространяющегося со скоростью V большей скорости света – волна де Бройля, и низкочастотного (ω), распространяющегося со скоростью v меньшей скорости света – «энергетическая» волна. Рассматривая множитель $|2\,cos(\omega t - Kx)|$, как амплитуду колебаний заметим, что она зависит от времени и перемещается в пространстве, то есть суммарный пакет (15) является высокочастотной волной, промодулированной самим движением частицы (движением системы отсчета).

3. Заключение

Рассматривая в некоторой системе отсчёта стоячую волну (одномерную или трёхмерную), а потом переходя в новую систему отсчёта, движущуюся относительно исходной со скоростью v, мы получим в новой системе отсчёта волну, в которой узлы и пучности перемещаются со скоростью v. Через параметры волны могут быть выражены и волновые (длины волн де Бройля и Комптона), и корпускулярные (4-вектор энергии-импульса и масса покоя) характеристики микрочастицы. Можно сделать вывод, что точечная микрочастица представляет собой некоторый волновой процесс, занимающий все пространство. Волновая функция микрочастицы является суперпозицией процессов, имеющих световую, а не сверхсветовую скорость [6].

Литература

[1]. Ю. С. Владимиров. Основания физики. 4-е изд., электрон. – М. : Лаборатория знаний, 2020. - 458 с.

[2]. Н. В. Самсоненко. Интерпретация квантовой механики 100 лет спустя после её создания. Метафизика, 2018, No2 (28), с. 59-62.

[3]. Лаптухов А.И., Рухадзе А.А. Замечание о характерном размере электрона// *Инженерная физика.* 2015. №3. с. 19-23.

[4]. Louis de Broglie Sur la frequence propre de l'electron. – Compt. Rend. 1925. 180. P.498. Имеется перевод на русский язык: Луи де Бройль. О собственной частоте электрона. Избранные научные труды. Т.1. Становление квантовой физики: работы 1921-1934 годов. – М.: Логос, 2010. - 556 с.

[5]. Goryunov A. V. Walking Wave as a Model of Particle //arXiv preprint arXiv:1006.0016. – 2010

[6]. Louis de Broglie. Recherches sur la théorie des quanta. – Ann. De Physique. Série X. 1925. 3. P. 22. Имеется перевод на русский язык: Луи де Бройль. Исследования по теории квантов. Избранные научные труды. Т.1. Становление квантовой физики: работы 1921-1934 годов. – М.: Логос, 2010. - 556 с.