



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-2-137-140>

Поступила 11.05.2023

Received 11.05.2023

## КОРПУСКУЛЯРНО–ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ

Корпускулярно-волновой дуализм частиц впервые был обнаружен у фотонов [1, 2]. Экспериментально установлено, что они обладают такими волновыми свойствами, как дифракция, интерференция, поляризация. Также известно, что фотоны проявляют корпускулярные свойства: фотоэффект, эффект Комптона, давление [1, 2].

Французский физик Л. де Бройль выдвинул гипотезу о всеобщем характере корпускулярно-волнового дуализма частиц [1]. Было установлено, что волновыми свойствами обладают электроны, протоны, нейтроны [1–3]. Согласно Л. де Бройлю, движущейся частице с энергией  $E$  и импульсом  $p$  соответствует волна частотой  $E/h$  и длиной  $h/p$ , где  $h$  – постоянная Планка [1, 2].

Если фотоны движутся в пространстве с постоянными и предельными скоростями, то не ясен волновой механизм их кооперативного движения. Если волнового кооперативного движения фотонов нет, то не ясен высокочастотный (волновой) механизм движения фотона.

Согласно стандартной модели (СМ) – современной теории физики элементарных частиц, фотон имеет энергию, импульс и момент импульса (спин) [1]. Кроме того, согласно СМ, фотон является безмассовой частицей, в том смысле, что его масса покоя (масса) равна нулю. Стандартная модель не объясняет природу фотона, которая является противоречивой. Во-первых, фотон – элементарная частица без массы, но имеет энергию, причем не ясно какую. Во-вторых, у фотона есть импульс, но нет массы. В-третьих, у фотона есть момент импульса, но движется фотон прямолинейно и не может вращаться, не имея массы.

Частицей, аналогичной фотону, является нейтрино. Согласно СМ, нейтрино имеет энергию, импульс и момент импульса, но не имеет массы и движется со скоростью фотона [2, 3]. Но в 2015 г. было экспериментально установлено, что нейтрино имеет массу. А. Макдональд и Т. Каджита получили Нобелевскую премию по физике за «открытие нейтринных осцилляций, показывающих, что нейтрино имеют массу» [4]. Нейтринные осцилляции заключались в том, что виды нейтрино могли взаимно превращаться друг в друга. Экспериментально установлено, что средняя масса нейтрино составляет 0,51 эВ или  $9,1 \cdot 10^{-37}$  кг [5]. Это означает, что нейтрино в миллион раз легче электрона [2].

Известен процесс взаимопревращения (осцилляции) электронно-позитронной пары в фотоны. Такая осцилляция свидетельствует о наличии у фотона массы. Процесс поглощения и испускания фотонов электроном также говорит о том, что фотоны имеют массу. Поскольку фотон и нейтрино подобны, то следует полагать, что их массы примерно равны, то есть можно принять, что масса фотона в среднем составляет  $9,1 \cdot 10^{-37}$  кг.

Наличие масс у нейтрино и фотона означает, что уравнения специальной теории относительности (СТО) не распространяются на эти частицы. В противном случае фотон и нейтрино имели бы бесконечные массы и энергии. Уравнения СТО применимы к частицам, движущимся прямолинейно с постоянными скоростями (инерциальным частицам). Нейтрино и фотон не укладываются в рамки СТО только потому, что они являются неинерциальными частицами, движущимися не прямолинейно, но с постоянными скоростями, что соответствует вращательному орбитальному движению. Это подтверждается тем, что фотон и нейтрино имеют моменты импульса.

Фотон, обладающий импульсом и моментом импульса, как частица должен вращаться с постоянной тангенциальной скоростью по окружности с частотой света и при этом двигаться прямолинейно со скоростью света. Также должен перемещаться и нейтрино. В итоге траекториями движения фотона и нейтрино являются винтовые спирали (рис. 1). Наличие магнитного момента у электрона также доказывает, что траектория движения электрона – винтовая спираль. Все частицы, имеющие спин, движутся в пространстве по траекториям винтовых спиралей. Такое движение частиц объясняет их корпускулярно-волновой дуализм. Он заключается в том, что частица одновременно участвует в двух видах

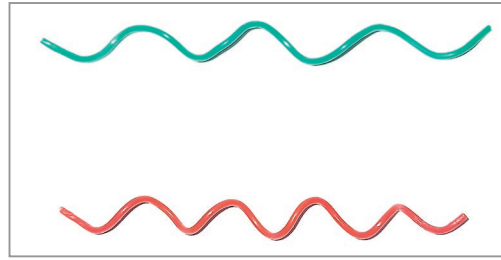


Рис. 1. Общий вид винтовых спиралей

движения – по окружности с частотой  $\nu$ , тангенциальной скоростью  $\omega_1$  и по направлению импульса частицы со скоростью  $\omega_2$ . Первый вид движения обеспечивает частице волновые свойства, а второй вид движения – корпускулярные свойства. Корпускулярно-волновые свойства частиц подтверждают движение этих частиц по траекториям винтовых спиралей.

Проекциями траектории движения частицы массой  $m$  на плоскость  $Z-Y$  является окружность радиуса  $R$ , а на плоскость  $Z-X$  – косинусоида (рис. 2). Проекция спина частицы ( $S$ ) на направление ее импульса определяется следующим уравнением [1]:

$$S = \frac{h}{2\pi} \cdot s, \quad (1)$$

где  $s$  – спиновое квантовое число.

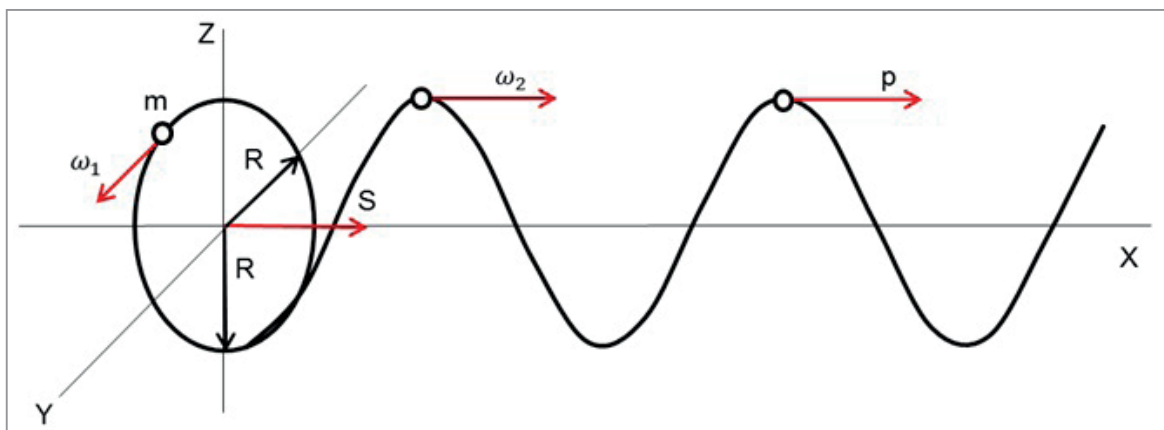


Рис. 2. Проекция движения частицы по винтовой спирали

Поскольку  $S = m\omega_1 R$ , то справедливо уравнение:

$$hs = 2\pi R m \omega_1. \quad (2)$$

Частота волнового движения частицы определяется по уравнению:

$$\nu = \frac{\omega_1}{2\pi R}. \quad (3)$$

Длина волны движущейся частицы ( $\lambda$ ) равна:

$$\lambda = \frac{\omega_2}{\nu}. \quad (4)$$

Из уравнений (2) – (4) получаем расчетную формулу для  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{\omega_2 h s}{m \omega_1^2}. \quad (5)$$

Из уравнений (2) и (3) имеем:

$$\nu = \frac{m \omega_1^2}{h s}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) получаем:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\nu h s}{m}}. \quad (7)$$

Из уравнений (3) и (6) имеем следующую расчетную формулу для  $R$  :

$$R = \frac{hs}{2\pi m\omega_1} \tag{8}$$

Фотон имеет  $\omega_2 = c$ ,  $s = 1$  [1]. Тогда, учитывая, что  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с (в вакууме),  $m_\gamma = 9,1 \cdot 10^{-37}$  кг,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, получаем значения  $\lambda$ ,  $\omega_1$  и  $R$  фотонов в зависимости от частоты корпускулярно-волнового излучения (см. таблицу) [1, 2].

Параметры корпускулярно-волнового движения фотонов

Корпускулярно-волновое излучение	$\nu$ , Гц	$\lambda$ , м	$\omega_1$ , м/с	$R$ , м
Радиоволновое	$10^5$	$3 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Микроволновое	$10^{10}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^6$	$4,3 \cdot 10^{-5}$
Инфракрасное	$10^{13}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
	$1,2 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^8$	$3,9 \cdot 10^{-7}$
Видимое	$4 \cdot 10^{14}$	$7,6 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^{-7}$
	$7,5 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$7,4 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
Ультрафиолетовое	$10^{16}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^9$	$4,3 \cdot 10^{-8}$
Рентгеновское	$10^{18}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$2,7 \cdot 10^{10}$	$4,3 \cdot 10^{-9}$
$\gamma$ -излучение	$10^{22}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$2,7 \cdot 10^{12}$	$4,3 \cdot 10^{-11}$

Из таблицы следует, что  $\omega_1 = c$  при частоте корпускулярно-волнового излучения фотонов  $\nu = 1,2 \cdot 10^{14}$  Гц. До этого значения  $\omega_1 < c$ , а при  $\nu > 1,2 \cdot 10^{14}$  Гц  $\omega_1 > c$ . При этом проекция  $\omega_1$  на направление импульса фотона равна нулю. Поэтому  $\omega_1$  не влияет на  $\omega_2$  и скорость прямолинейного движения фотона в вакууме всегда равна  $c$ .

Из таблицы следует, что до микроволнового излучения фотонов  $\omega_1 \ll c$ . Тогда энергия фотонов ( $E_{\gamma r}$ ) выражается следующей формулой:

$$E_{\gamma r} = \frac{m_\gamma c^2}{2} \tag{9}$$

В общем случае энергия фотонов определяется по формуле:

$$E_\gamma = \frac{m_\gamma \omega_1^2}{2} + \frac{m_\gamma c^2}{2} \tag{10}$$

Из (7) и (10) имеем расчетную формулу для  $E_\gamma$  :

$$E_\gamma = \frac{h\nu}{2} + \frac{m_\gamma c^2}{2} \tag{11}$$

При  $\omega_1 = c$  из (5) и (6) получаем формулы частоты ( $\nu_\gamma$ ) и длины ( $\lambda_\gamma$ ) волны корпускулярно-волнового движения фотонов:

$$\nu_\gamma = \frac{m_\gamma c^2}{h} = \frac{E_\gamma}{h}, \quad \lambda_\gamma = \frac{h}{m_\gamma c} = \frac{h}{p_\gamma} \tag{12}$$

где  $p_\gamma$  – импульс фотона.

Формулы (12) справедливы только для фотонов с частотой корпускулярно-волнового движения, равной  $1,2 \cdot 10^{14}$  Гц, то есть для инфракрасного излучения фотонов. В этом случае справедливы следующие основные формулы квантовой физики [1, 2]:

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h\nu}{c} \tag{13}$$

Электроны, протоны и нейтроны имеют  $s = \frac{1}{2}$  [1]. Если принять, что  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ , то по (5) и (7) получим формулы частот ( $\nu_p$ ) и длин ( $\lambda_p$ ) волн корпускулярно-волнового движения частиц:

$$\nu_p = \frac{2m\omega^2}{h} = \frac{2E_p}{h}, \quad \lambda_p = \frac{h}{2m\omega} = \frac{h}{2p} \tag{14}$$

Формулы (14) не соответствуют уравнениям Л. де Бройля для электронов, протонов и нейтронов. Соответствие будет наблюдаться только при следующих условиях:  $\omega_1 = \omega$  и  $\omega_1 = \frac{\omega}{\sqrt{2}}$ .

Частицы перемещаются в пространстве по спирально-винтовым траекториям благодаря эффекту вихревого движения. Это неинерциальный процесс, который происходит при ускоренном движении частиц. Известно, что когда молекулы ускоряются, то они движутся по винтовой спирали в сторону направленного движения (ускорения). Так, горячий воздух от пожара, ускоряясь вверх, движется по винтовой спирали, образуя вихревой смерч (рис. 3). Эффект вихревого движения связан с неинерциальными силами – силами пространства [6]. Они действуют на ускоренную частицу, заставляя ее вращаться по винтовой спирали. Наблюдается и обратный неинерциальный эффект. При вихревом движении частиц на них действует ускоряющая направленная сила пространства [6]. Ее действие можно наблюдать при вращении воды в стеклянном стакане, на дне которого находятся более тяжелые частицы. При этом они поднимаются вверх, собираясь в вихрь, по центру стакана (рис. 4). Чем больше тангенциальная скорость частиц, тем сильнее пространство сжимает их спирально-винтовое движение, уменьшая его диаметр.



Рис. 3. Вихревой смерч, возникший во время пожара



Рис. 4. Вихревое движение частиц тяжелее воды при ее вращении в стеклянном стакане

Электроны, протоны, нейтроны, фотоны, нейтрино, вылетая из атомов, ускоряются и движутся по винтовым спиральям. Также перемещаются ускоренные атомы и молекулы. Ускоритель заряженных частиц способствует их движению по винтовым спиральям. Причем это движение всегда направлено по вектору ускоряющей силы. После прекращения ее действия частицы движутся по винтовым спиральям с постоянными скоростями ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ).

Следует отметить, что спиновые квантовые числа частиц могут иметь как положительные, так и отрицательные значения [1]. При  $s > 0$  проекция спина частицы на направление ее импульса ( $m\omega_2$ ) совпадает с направлением. В результате частица движется по правовинтовой спирали. Если  $s < 0$ , то проекция спина частицы противоположна направлению ее импульса. В этом случае частица движется по левовинтовой спирали. Знак спина частиц, движущихся по винтовой спирали, определяет их поляризационные свойства.

Таким образом, корпускулярно-волновое движение частиц заключается в их перемещении по траекториям винтовых спиралей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия для школьников и студентов. Т. 2. Физика. Математика / Под ред. Н. А. Поклонского. Минск: Беларуская энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2010. 528 с.
2. Аксенович Л. А., Зенькович В. И., Фарино К. С. Физика в средней школе / Под ред. К. С. Фарино. Минск: Аверсэв, 2010. 1102 с.
3. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика. Учеб. пособ. М.: Наука, 1972. 672 с.
4. Герштейн С. С., Куденко Ю. Г. Лауреаты Нобелевской премии 2015 по физике – А. Макдональд и Т. Каджита // Природа. 2016. № 1. С. 59–64.
5. The KATRIN Collaboration. Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity. Nature Physics, 2022, vol. 18, pp. 160–166.
6. Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Силы пространства // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 117–120.

В. Ю. СТЕЦЕНКО, г. Могилев, Беларусь. E-mail: stetsenko.52@bk.ru