Фотон - строение и свойства .

«Люби истину, но будь снисходителен к заблуждениям.»
Вольтер

Вместо введения приведем результаты усилий наших великих предков, а именно, запишем уравнения Максвелла в дифференциальной форме.

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial H_z}{\partial t}-\frac{\partial H_y}{\partial z}&=j_x+\frac{\partial D_x}{\partial t}\\ \frac{\partial H_x}{\partial z}-\frac{\partial H_z}{\partial x}&=j_y+\frac{\partial D_y}{\partial t}\\ \frac{\partial H_y}{\partial x}-\frac{\partial H_x}{\partial y}&=j_z+\frac{\partial D_z}{\partial t}\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

$$\left.\begin{aligned}-\frac{\partial B_x}{\partial t}&=\frac{\partial E_z}{\partial y}-\frac{\partial E_y}{\partial z},\\ -\frac{\partial B_y}{\partial t}&=\frac{\partial E_x}{\partial z}-\frac{\partial E_z}{\partial x},\\ -\frac{\partial B_z}{\partial t}&=\frac{\partial E_y}{\partial x}-\frac{\partial E_x}{\partial y}.\end{aligned}\right\}\qquad(2)$$

$$B=\mu\mu_0 H;D=\varepsilon\varepsilon_0 E$$

Теперь конкретизируем задачу (правильнее было бы сказать — упростим).

1. Среда — однородный, изотропный диэлектрик. Это означает, что *токи проводимости отсутствуют*: $j_x = j_y = j_z = 0$.

2. Будем рассматривать поля $\vec{E}$ и $\vec{H}$,зависящие только от одной координаты *x* и времени *t*. Это *одномерная задача*.

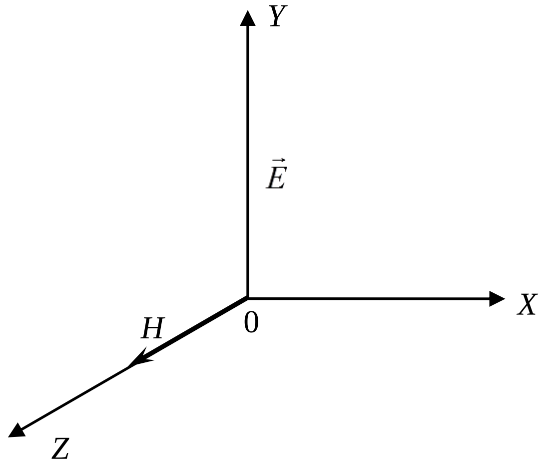

Рис.1

Для этого конкретного случая уравнения Максвелла (1) и (2) можно упростить и записать в таком виде

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial D_y}{\partial t} = -\frac{\partial H_z}{\partial x}, \quad \frac{\partial D_z}{\partial t} = -\frac{\partial H_y}{\partial x}, \\ \frac{\partial B_y}{\partial t} = -\frac{\partial E_z}{\partial x}, \quad \frac{\partial B_z}{\partial t} = -\frac{\partial E_y}{\partial x}. \end{aligned}\right\} (3)$$

Эти уравнения означают, что изменяющееся во времени электрическое поле D_y рождает магнитное поле H_z, направленное вдоль оси z. Переменное магнитное поле B_y является источником электрического поля, меняющегося вдоль оси z. И так далее. В любом случае эти поля — $\vec{H}$ и $\vec{E}$ — перпендикулярны друг другу.

Примем, для определенности, что электрическое поле направлено вдоль оси y ($E = E_y$, $E_z = 0$), а магнитное — вдоль оси z ($H = H_z$, $H_y = 0$). Тогда последняя система четырех уравнений упростится до двух:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial x} \\ \frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{\partial E}{\partial x} \end{aligned}\right\} (4)$$

Первое из этих уравнений продифференцируем по времени t, а второе — по координате x:

$$\begin{aligned} \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\frac{\partial^2 H}{\partial x \cdot \partial t}, \\ \mu\mu_0 \frac{\partial^2 H}{\partial x \cdot \partial t} = -\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}. \end{aligned} ;(5)$$

Сравнивая эти два уравнения, приходим к замечательному выводу:

$$\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu\mu_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}. ; (6)$$

Или еще понятнее:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}. ;(7)$$

Это *дифференциальное волновое уравнение*. Частным его решением является волна.Таким образом, решая совместно уравнения Максвелла, мы пришли к выводу, что в однородной изотропной среде электрические (и магнитные!) поля распространяются в виде электромагнитной волны, вопрос лишь в том, а всегда ли только в виде волны ?! Далее мы ответим на этот вопрос , а пока следуем академическим выкладкам.

Роль скорости в этом уравнении (6) играет величина

$$\mathrm{v} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}.$$

Здесь $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = \sqrt{\frac{1}{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 3 \cdot 10^8 \, м/с$ — скорость электромагнитной волны в вакууме (ε = 1 и μ = 1).

Это значение — c = 3·10⁸ м/с, как известно, великолепно подтверждается экспериментом.

Подобное уравнение можно получить и для магнитной составляющей волны:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu \mu_0 \varepsilon \varepsilon_0} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}. ;\quad (8)$$

Решения этих волновых уравнений — (7) и (8) — хорошо известны:

$$\begin{cases} E = \phi\left(t - \dfrac{x}{\mathrm{v}}\right), \\ H = \Psi\left(t - \dfrac{x}{v}\right). \end{cases} \quad (9)$$

Теперь найдем связь между мгновенными значениями напряженности электрического (E) и магнитного (H) полей. Для этого первое уравнение продифференцируем по t, а второе — по x:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E}{\partial t} = \varphi', \\ \dfrac{\partial H}{\partial x} = -\dfrac{1}{\mathrm{v}} \Psi'. \end{cases} \quad (10)$$

Эти уравнения подставим в первое уравнение системы (4) :

$$\varepsilon \varepsilon_0 \varphi' = \frac{1}{\mathrm{v}} \Psi'.$$

Проинтегрировав это равенство, получим

$$\varepsilon \varepsilon_0 \varphi = \frac{1}{\mathrm{v}} \Psi + C.$$

Поскольку речь идет о переменных полях, постоянную интегрирования можно положить равной нулю: C = 0. Тогда последнее уравнение можно будет представить так:

$$\varepsilon \varepsilon_0 E = \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0} H$$

или

$$\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E = \sqrt{\mu \mu_0} H ;\quad (11)$$

Этот результат означает, что напряженности электрического (*E*) и магнитного (*H*) полей в электромагнитной волне пропорциональны друг другу и меняются, следовательно, синфазно.

Подводя итог, сформулируем еще раз основные свойства электромагнитных волн.

1. Электромагнитные волны поперечны, то есть

$\vec{H} \perp \vec{E}, \quad \vec{E} \perp \vec{\mathrm{V}}, \quad \vec{\mathrm{H}} \perp \vec{\mathrm{V}}.$;(11.1)

2. Скорость распространения волны в однородной среде

$$\mathrm{V} = \frac{\mathrm{C}}{\sqrt{\varepsilon\mu}}.$$

Здесь $C = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}}$ — скорость электромагнитной волны в вакууме (ε = 1, μ = 1), ε_0 и μ_0 — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

3. Электрическое и магнитное поле в волне меняются в фазе. Мгновенные значения *E* и *H* пропорциональны друг другу:

$$E = \sqrt{\frac{\mu_0\mu}{\varepsilon_0\varepsilon}}H.$$

Разумно предположить, что энергия электромагнитной волны складывается из энергии электрического поля волны и магнитного. Тогда энергия единицы объема — объемная плотность энергии — может быть представлена такой суммой

$$\omega = \omega_E + \omega_H = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} \text{ ; (12)}$$

На этом разбор академических полетов окончим , и подведем свои итоги. Мы полностью согласны с вышеизложенными выводами 1 и 2 , а вот относительно последнего 3 у нас имеются веские возражения. **С какой стати поля,** в решении волнового уравнения,**обязательно меняются как у волны**?

Ведь выше было показано что общее решение волнового уравнения есть не менее чем дважды дифференцируемые функции (9) , в которых роль переменной играет функция $tv - x$, тем кто не понял объясним доходчивее . Напишите любую не менее дважды дифференцируемую функцию одного переменного , например d, в простейшем случае это просто квадратичная функция вида

$$y = ad^2 + bd + n \text{ ;(13)}$$

А теперь замените $d = x - vt$

$$y = a(x - vt)^2 + b(x - vt) + n \text{ ; (14)}$$

Прямой подстановкой в волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}v^2 - \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \text{ ; (15)}$$

можете убедиться что функция (14) является решением этого уравнения !? Вот только какое отношение к нему имеют волны ? Да никакого !?

Итог **. Свободные электромагнитные поля не обязательно распространяются только в виде суперпозиции волн.**

Остается выяснить , а в какой еще форме могут существовать свободные электромагнитные поля ?

Выше мы показали что любая не менее дважды дифференцируемая функция является решением волнового уравнения , и таких решений бесконечное множество !? Как из этого бесконечного множества решений отобрать те которые имеют отношение к реальности ? В данном случае без эксперимента не обойтись, а он гласит . Свободные электромагнитные поля (поля в отсутствии зарядов) могут существовать в виде фотонов , которые на опыте ведут себя как корпускулы и волны одновременно !? Это есть величайший парадокс и загадка современности, и на ее решение потеряна всякая надежда , просто постулировано что человеческий мозг не в силах это не то что понять , но даже вообразить.

Тем не менее существует простейшее корпускулярное решение волнового уравнения теории Максвелла

$$H\sqrt{\mu\mu_0} = E\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} = \rho(r - ct)^2 = R^2 \text{ ; (16)}$$

Имеющее смысл окружности радиуса R , движущейся со скоростью c , для трехмерного случая это будет сфера того же радиуса, движущаяся с той же скоростью, $\rho = const$ введена лишь из соображений размерности. Так что существование корпускул в решениях волнового уравнения … обязательно. Ясно что решения (16) синфазны, огорчает лишь тот факт что для корпускул обязательно условие

$$H\sqrt{\mu\mu_0} = E\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} = \rho(r - ct)^2 = R^2 = const \text{ ;(17)}$$

Так что скептики могут возразить , дескать корпускулярное решение (17) тривиально , и его можно вообще не рассматривать. Однако запишем решение волнового уравнения φ в виде монохроматической волны , то есть волны с постоянной амплитудой

$$\begin{aligned}&\varphi = A(\cos(x - ct) + \sin(x - ct)) = A\cos(x - ct + \alpha)\\&A = const\end{aligned} \text{ ; (18)}$$

Имея ввиду (17) мы вправе (18) написать в виде

1) $\varphi = A\left(\cos\left(x-ct\right)+\sin\left(x-ct\right)\right) = R^2\left(\cos\left(x-ct\right)+\sin\left(x-ct\right)\right) = \rho\left(x-ct\right)^2\left(\cos\left(x-ct\right)+\sin\left(x-ct\right)\right)$
$= \rho\left(x-ct\right)^2\cos\left(x-ct+\alpha\right);$
2) $A = const = R^2 = \rho\left(x-ct\right)^2;$

; (19)

Подстановка этой функции в волновое уравнение показывает что функция (19) есть решение волнового уравнения . Но это уже не волна (18), смысл решения изменился кардинально. В решении (19) величина амплитуды A зависит от координаты -x . Разница вот в чем. В решении (18) волна может существовать во всех точках $x-ct=2\pi n$ (точки периода косинуса и синуса), а так как при фиксированном t_0, и ввиду произвольности x , таких точек бесконечно много, то волна существует на всей оси x , и размер ее-длина, бесконечен. Другое дело решение (19). В нем амплитуда волны жестко привязана к координате x , и она не может существовать в произвольном месте, а лишь в области разрешенной вторым условием (19). Но раз в остальных точках оси x амплитуды нет, то и нет связанной с ней волны. Другими словами, наличие второго условия в (19) , стягивает волну в область ограниченную R .

Теперь перейдем к конкретным полям. Согласно (11) можем написать два решения волнового уравнения теории Максвелла, причем синфазных, это вытекает из этой теории

$$\begin{matrix} \varphi_1 = E_Y\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\cos\left(x-vt\right)+H_Z\sqrt{\mu\mu_0}\cos\left(x-vt\right) \\ \varphi_2 = -E_Z\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\sin\left(x-vt\right)-H_Y\sqrt{\mu\mu_0}\sin\left(x-vt\right) \end{matrix} ; (20)$$

Здесь учтено что направление пар векторов E_y, H_y и E_z, H_z противоположно. Эти решения могут быть вполне независимыми, но решением волнового уравнения есть сумма всех его решений, поэтому математически мы можем скомбинировать эту пару в одно уравнение

$$\begin{aligned} &1)\ \varphi = \varphi_1+\varphi_2 = \left(\overrightarrow{E_Y}\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\cos\left(x-vt\right)-\overrightarrow{H_Y}\sqrt{\mu\mu_0}\sin\left(x-vt\right)\right) \\ &+\left(\overrightarrow{H_Z}\sqrt{\mu\mu_0}\cos\left(x-vt\right)-\overrightarrow{E_Z}\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\sin\left(x-vt\right)\right); \qquad ;(21) \\ &2)\ \overrightarrow{E_Y}\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} = \overrightarrow{H_Y}\sqrt{\mu\mu_0} = \overrightarrow{H_Z}\sqrt{\mu\mu_0} = \overrightarrow{E_Z}\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} = \rho\left(x-ct\right)^2 = R^2 \end{aligned}$$

Знак минус здесь показывает лишь противоположность направления векторов.

Согласно (11) это уравнение упрощается к виду

$$\varphi = \varphi_1+\varphi_2 = A\left(\vec{i}\cos\left(x-vt\right)-\vec{k}\sin\left(x-vt\right)\right)+A\left(\vec{m}\cos\left(x-vt\right)+\vec{n}\sin\left(x-vt\right)\right);(22)$$

, здесь $\vec{i},\vec{k},\vec{m},\vec{n}$ единичные вектора осей $OY, -OY, OZ, -OZ$

Энергия такой волны - E , согласно(11), (12) и общим формулам электродинамики, зависит лишь от квадратов функций полей, и есть

$$E_1 = \int\left\{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_y^2\cos^2(x-vt)}{2}+\frac{\mu\mu_0 H_y^2\sin^2(x-vt)}{2}\right\}dV = \int\varepsilon\varepsilon_0 E_y^2 dV = \int\mu\mu_0 H_y^2 dV = const_1$$

$$E_2 = \int\left\{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_z^2\cos^2(x-vt)}{2}+\frac{\mu\mu_0 H_z^2\sin^2(x-vt)}{2}\right\}dV = \int\varepsilon\varepsilon_0 E_z^2 dV = \int\mu\mu_0 H_z^2 dV = const_2$$

$$E = E_1 + E_2 = const$$

(23)

Сравним полученные результаты с опытом. Мы математически получили решение сочетающее в себе признаки волны и корпускулы одновременно, и с постоянной энергией, но опыт показывает что такими свойством обладает и фотон. Таким образом , функция (21) математически описывает самые трудно объяснимые свойства фотона, а именно, его корпускулярно-волновой дуализм и постоянство энергии.

Нам остается лишь нарисовать поля фотона, учтя что магнитное и электрическое поля по одноименным осям направлены противоположно. Электрическое поле изобразим красным , а магнитное синим. Сначала рисуем для момента времени когда все поля одинаковы по амплитуде.

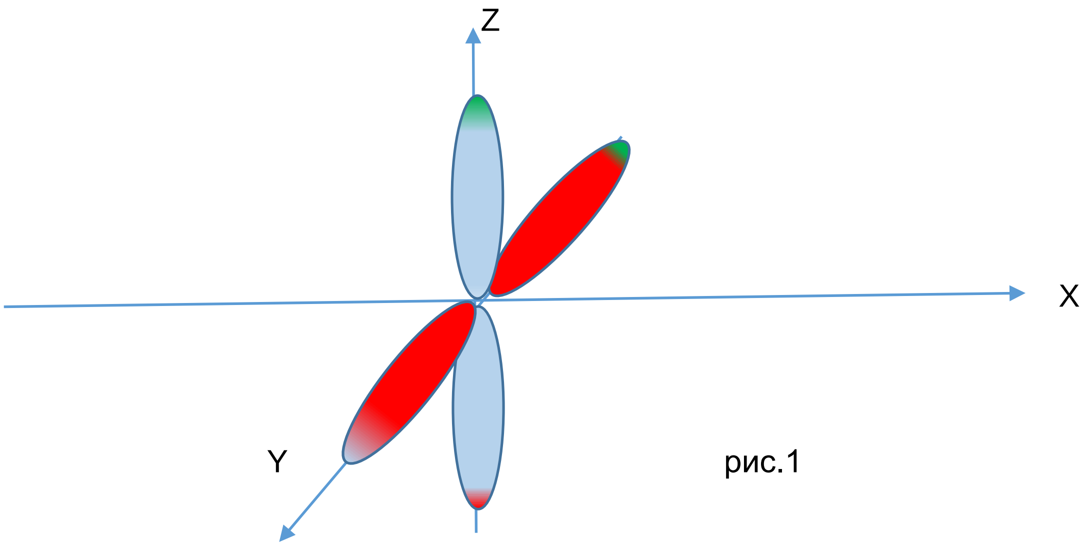

рис.1

Теперь изобразим эволюцию фотона во времени. Пусть в момент времени t_0 поля E_y, H_z максимальны, соответственно полей $-E_y, -H_z$ нет.

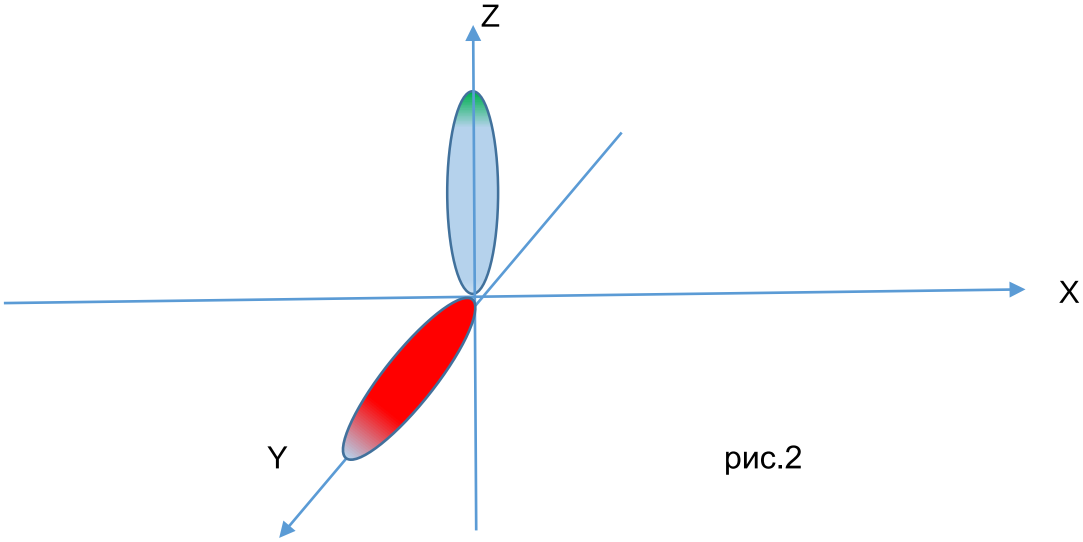

рис.2

Отметим что в классической радиоволне поля расположены также, но здесь есть существенное отличие, эти поля не связаны между собой (помечено разными цветами в верхушках эллипсов, эллипсы здесь изображены лишь постольку поскольку это позволяет сделать рис.,Word более менее понятным). В следующий момент времени t_1 поля E_y, H_z уменьшаются, причем поле E_y порождает поле $-H_z$, а поле H_z порождает поле $-E_y$.Здесь связаны именно пары полей $E_y, -H_z$ и $-E_y, H_z$, в классической радиоволне эти поля были бы с одним знаком.

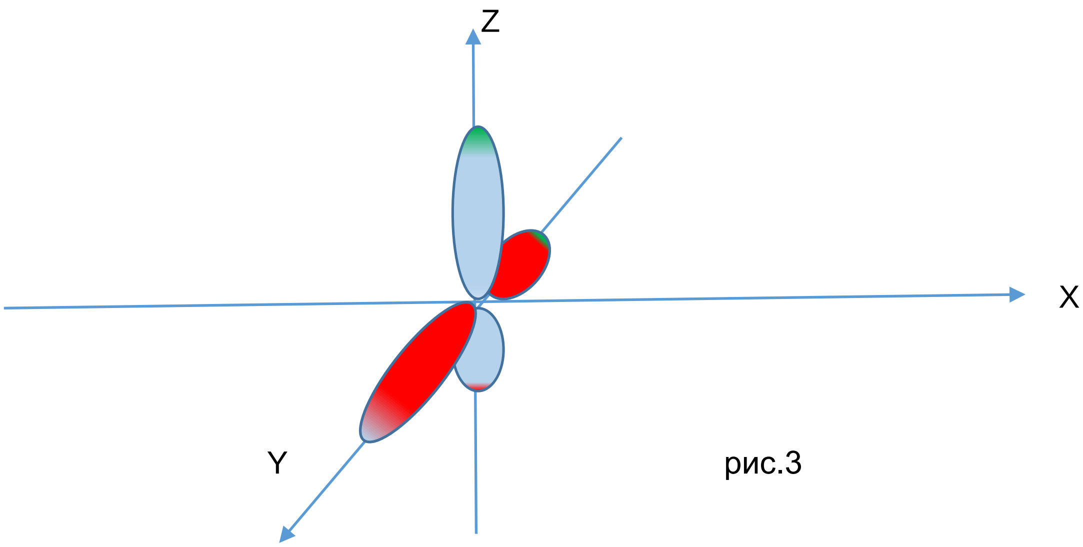

рис.3

Наконец в момент времени t_2 поля E_y, H_z вообще исчезают , зато поля $-E_y, -H_z$ достигают своего максимума

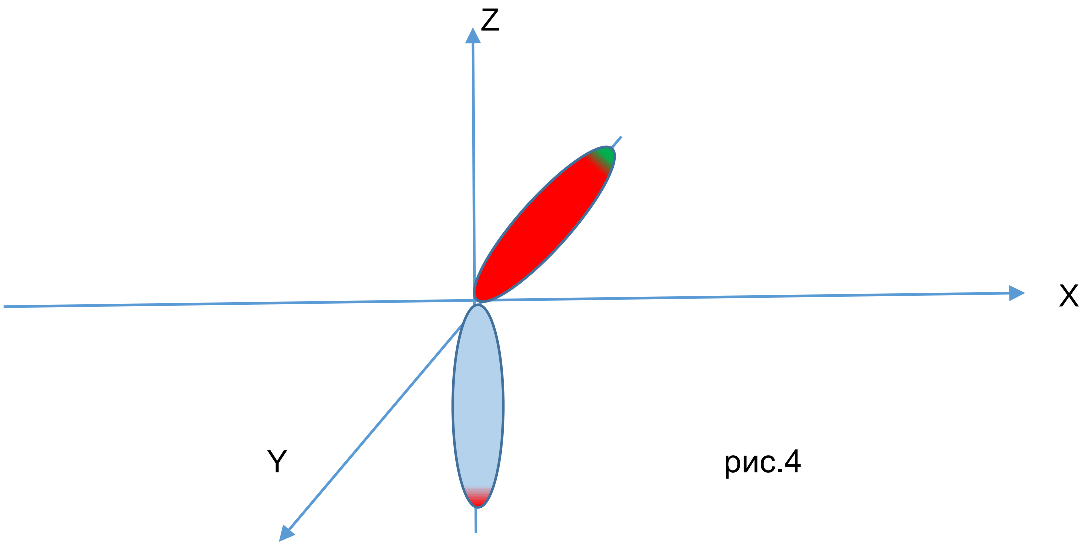

рис.4

Затем цикл повторяется. Легко понять что такая смена полей , Рис.2, Рис.4, создает кажущийся эффект вращения фотона как целого, наподобие иллюзии поступательного движения в цепи ламп, включаемых попарно через одну погасшую. И такая иллюзия вращения есть на самом деле - это спин фотона, причем «поворот», совмещающий фотон самим с собой, осуществляется скачком всегда строго на 360^0 , возможно поэтому его спин равен всегда 1.

Главная фишка фотона в том что он перекачивает энергию магнитного поля в энергию вихревого электрического поля , и все происходит в полном согласии с уравнениями Максвелла и квантовой теории , добытых в тяжких опытах, так что наши представления не расходятся с экспериментами. Образно говоря фотон представляет собой два скрещенных кольца , размеры одного их них меняются по закону синуса, а второго по закону косинуса, эдакий колеблющийся футбольный мяч, но только в двух плоскостях. На что способен колеблющийся футбольный мяч? Особливо занудные могут посмотреть подборку самых курьезных пенальти в инете. Там есть такой себе парадокс. Футболист с линии пенальти бьет по воротам. Мяч попадает в верхнюю штангу, и опускается за линией ворот. Далее мяч за линией ворот отскакивает от земли и…, внимание, возвращается в точку удара!??? Пенальти не засчитывают , ибо судья не может себе вообразить как ньютонова материальная точка-мяч, может повторить обратную траекторию. Но фишка в том что мяч в полете еще и колебался, сперва после удара незадачливого пенальтиста, а затем от удара и об штангу. Это наглядный пример проявления корпускулярно-волнового дуализма на арене стадиона полного публики, и пенальтист заслужил за это респект и уважуху от жрецов физики , ну и попутно оплеуху от своей команды. Ясно что намалеванный нами наспех фотон способен на то же самое, что он и демонстрирует на опыте сплошь и рядом , повергая в шок искушенных теоретиков.

Именно поступательное движение фотона, с одновременными его колебаниями поперек направления поступательного движения, и наделяет фотон удивительными свойствами корпускулярно-волнового дуализма, ну и что здесь непонятного?

С учетом вышеизложенного, функцию фотона можно написать в виде системы уравнений

$$\begin{aligned}
&1)\ \varphi = \left(\overrightarrow{E_Y}\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\cos(x - vt) - \overrightarrow{H_Y}\sqrt{\mu\mu_0}\sin(x - vt)\right) \\
&+\left(\overrightarrow{H_Z}\sqrt{\mu\mu_0}\cos(x - vt) - \overrightarrow{E_Z}\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\sin(x - vt)\right); \qquad ;(24) \\
&2)\ \left|\overrightarrow{E_Y}\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\right| = \left|\overrightarrow{H_Y}\sqrt{\mu\mu_0}\right| = \left|\overrightarrow{E_Z}\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\right| = \left|\overrightarrow{H_Z}\sqrt{\mu\mu_0}\right| = R^2 = \rho(x - ct)^2 = const;
\end{aligned}$$

, здесь ρ постоянный множитель для учета размерности.

Итог. В функции (24) сочетаются как признаки волны , первое уравнения системы , так и признаки корпускулы ,второе уравнение системы , оба эти признака наделяют систему функций (24) признаками корпускулярно-волнового дуализма фотона .

Для фотона справедливо уравнение для его энергии E ,

$$E = \hbar 2\pi \frac{c}{\lambda} = const \quad ;(25)$$

здесь $\hbar$ постоянная Планка (но не в смысле той постоянной планки, которую не могут взять прыгуны выше своей головы) , λ длина волны. Легко убедиться что в случае (25), $\lambda = R$. Энергия поля и объемная плотность энергии(12) связаны равенством

$$E = \omega V = V(\omega_E + \omega_H) = V\left(\frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_0^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H_0^2}{2}\right) = const \ ;(26)$$

здесь $V = const$ объем, в котором заключено поле. С учетом (23) пишем

$$E = \omega V = V(\omega_E + \omega_H) = V\left(\varepsilon\varepsilon_0 E_0^2 + \mu\mu_0 H_0^2\right) = const \ ;(27)$$

А так как $V = const$, это следует из (24) , то окончательно

$$\left(\varepsilon\varepsilon_0 E_0^2 + \mu\mu_0 H_0^2\right) = const \ ; (28)$$

С учетом связи между полями (11), равенство (25) имеет место лишь при условии

$$E_0 = R^2 \sin(x - ct) \ ;(29)$$

Ибо тогда

$$\left(\varepsilon\varepsilon_0 E_0^2+\mu\mu_0 H_0^2\right)=\left(\varepsilon\varepsilon_0 E_0^2+\varepsilon\varepsilon_0 E_0^2\right)=\left(R^2\sin^2\left(x-ct\right)+R^2\cos^2\left(x-ct\right)\right)=R^2=const\text{ ;(30)}$$

Исходя из уравнений (25),(26) и (30) можно, для случая вакуума, написать

$$E=\hbar 2\pi\frac{c}{\lambda}=V\left(\varepsilon\varepsilon_0 E_0^2+\mu\mu_0 H_0^2\right)=V\varepsilon\varepsilon_0 R^2\text{ ;(31)}$$

Следует учесть что в квадрат у нас возведена амплитуда, а она согласно(24) сама есть квадрат, скажем от r .Так как поля у нас одномерные –плоские, то можно приближенно заменить объем трехмерной фигуры на площадь плоской с бесконечно малой толщиной, тогда (31) перепишется в виде

$$E=\hbar 2\pi\frac{c}{\lambda}=V\frac{\varepsilon\varepsilon_0 R^2}{2}=4\pi r^2\varepsilon\varepsilon_0 r^4=4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^6\text{ ;(32)}$$

В данном случае $\lambda=r$, поэтому для радиуса корпускулы фотона, или что то же самое его амплитуды, имеем

$$r=\left(\frac{2}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{7}}\left(\frac{\hbar c}{\varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{7}}=\left(\frac{2}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{7}}const\text{ ;(33)}$$

Радиус корпускулы фотона гиперболически зависит от диэлектрической проницаемости вещества ε ,чем она больше, тем меньше радиус корпускулы фотона. Это можно трактовать следующим образом . Диэлектрическая проницаемость играет для фотона роль потенциальной стены, как для мяча стена кирпичная . Но чем сильнее вещество препятствует движению фотона, тем меньше становятся его поперечные размеры, он сжимается в бронебойную иглу, и пробивает любую стену !? Так наглядно можно объяснить непостижимый в классической физике Ньютона туннельный эффект, являющийся рядовыми буднями физики квантовой.

Последний аргумент скептиков может перевесить все наши рассуждения. Ведь есть резонный вопрос. Почему все сводится к решению вида ?

$$\begin{cases} E=\phi\left(t-\dfrac{x}{\mathrm{v}}\right), \\ H=\Psi\left(t-\dfrac{x}{v}\right). \end{cases}\quad(9.1)$$

Существует же решение волнового уравнения вида

$$\begin{cases} E=\phi\left(t+\dfrac{x}{\mathrm{v}}\right), \\ H=\Psi\left(t+\dfrac{x}{v}\right). \end{cases}\quad(9.2)$$

Если решение (9.1) описывает волну исходящую из точки, то есть источника волны , то решение (9.2) описывает волну приходящую в точку из бесконечности, то есть источника не имеющую. Это вообще говоря нарушение принципа причинности, фундаментального принципа всей науки , и физики в частности, с точки зрения здравого смысла. Но, согласно здравому смыслу Земля плоская , что доказывает только плоскость самого здравого смысла. Так что здравый смысл не аргумент , нужны более весомые соображения.

Не менее фундаментальным чем принцип причинности является принцип относительности. В физике принято эволюцию системы во времени описывать функцией времени t и координат r , зависящих от времени $r(t)$. Саму функцию эволюции можно , в наиболее общем виде, записать символически как функцию зависящую от указанных переменных $\psi(r(t),t)$. Этот прием обкатан , и при правильном применении никогда не приводил к расхождению с опытом, так что мы вправе им воспользоваться.

Принцип относительности гласит что в замкнутой системе все физические явления протекают одинаково , если система как целое движется прямолинейно с постоянной скоростью, или покоится. Общим признаком таких систем является отсутствие ускорения , но ускорение - a , это всего лишь вторая полная производная от функции времени и координат, или в нашем случае

$$\frac{d^2\psi(r(t),t)}{dt^2} = \frac{\partial^2\psi}{\partial r^2}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + 2\frac{\partial^2\psi}{\partial r\partial t}\left(\frac{dr}{dt}\right) + \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = a \text{;(34)}$$

Учтя что $\left(\frac{dr}{dt}\right) = v$ есть скорость перепишем (34) в виде

$$\frac{d^2\psi(r(t),t)}{dt^2} = \frac{\partial^2\psi}{\partial r^2}v^2 + 2\frac{\partial^2\psi}{\partial r\partial t}v + \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = a \text{;(35)}$$

А так как ускорение инерциальных систем должно быть равно нулю, то принцип относительности легко выражается математически .

$$\frac{d^2\psi(r(t),t)}{dt^2} = \frac{\partial^2\psi}{\partial r^2} + 2\frac{\partial^2\psi}{\partial r\partial t} + \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = 0 \text{;(36)}$$

Далее уравнение ПО (принципа относительности).

Уравнение ПО весьма напоминает волновое уравнение , но имеет существенное отличие от него . Дело в том что решениями уравнения ПО (36) являются только функции от переменной вида $(r-vt)$, Например приходящая волна вида $\psi = A\cos(r+vt) + B\sin(r+vt)$, решением уравнения ПО не является, это автоматически приводит к сохранению принципа причинности и необратимости времени. Поясним последнее.

Пусть время у нас идет (течет, плывет … вопрос терминологии) в прямом, положительном направлении t , тогда решения уравнения ПО зависят только от функций переменного $(ct-x)$. В решениях уравнения ПО, мы можем математически сделать время отрицательным $-t$, для этого достаточно математически произвести замену переменной с $(ct-x)$ на $(x-ct)$, но физически это ничто не меняет. Физически это просто сводится к замене координаты x на $-x$, математически это есть перенос начала координат, но перенос начала координат на свободные вектора , коим является и направление движения, влияния не оказывает. То есть замена переменной $(ct-x)$ на $(x-ct)$ не приводит к обращению движения вспять даже математически, а стало быть не приводит и к обращению времени . В рамках уравнения ПО время необратимо.

Последнее до сих пор иначе доказать не удавалось. Так что не только физическим , но даже математическим смыслом в уравнении ПО обладают только функции от переменной $(r-vt)$, но в частном случае это как раз и есть функция фотона. Так что требование такой зависимости функции фотона от времени вытекает из куда более общих соображений чем электродинамика.

Уравнение ПО , как и следовало ожидать , является лоренц-инвариантным, так что не противоречит теории относительности. Физики потратили немало времени чтобы подружить электродинамику с принципом относительности, что привело к уточнению классической механики в теории относительности. Не исключено что попытки поженить классическую электродинамику и уравнение ПО тоже приведут к уточнениям, но нашей целью здесь было другое.

Мы надеемся что изложенный материал поможет понять структуру элементарных частиц более сложных чем фотон.

Сметанников А.И. 3.IX.2019 aic61@yandex.ua