

1.3. Поток импульса в электромагнитной волне. Давление света.

1.3.1. Импульс электромагнитного поля.

Из области релятивистской физики (СТО) нам известно, что энергия замкнутой системы сохраняется, но не является инвариантом относительно преобразований Лоренца. Инвариантной величиной является 4^х-вектор энергии - импульса $\left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right)$:

$$\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m_0^2 c^2 = \text{inv}. \quad (1.3.1)$$

Другими словами, энергия и импульс взаимосвязаны и неразделимы. В теории относительности (вспомним основные формулы для энергии и импульса) устанавливается, что энергии присущи определенная масса и движение

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1.3.2)$$

а импульс

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1.3.3)$$

является мерой переноса массы - энергии. Рассматривая энергию электромагнитного поля W и связь между энергией и импульсом, запишем импульс, соответствующий электромагнитному полю ($E \equiv W$):

$$\vec{p} = \frac{E \vec{v}}{c^2} = \frac{W \vec{v}}{c^2} \quad (1.3.4)$$

Здесь \vec{v} - скорость распространения электромагнитной волны в среде. В вакууме $v = c$ и импульс равен

$$|\vec{p}| = \frac{W}{c}. \quad (1.3.5)$$

Введем понятие *плотности импульса* электромагнитного поля \vec{p}_0 :

$$\vec{p}_0 = \frac{\vec{p}}{V} = \frac{W}{V} \frac{\vec{v}}{c^2} = w \frac{\vec{v}}{c^2} = \frac{\vec{S}}{c^2} = \frac{1}{4\pi c} [\vec{E}, \vec{H}], \quad (1.3.6)$$

где плотность энергии w определяется формулой (1.2.11) для изотропной и однородной среды, а вектор Пойнтинга – из соотношения (1.2.14). Таким образом, импульс бегущей электромагнитной волны направлен в сторону распространения волны.

Часто вводят *плотность потока импульса* электромагнитной волны

$$\vec{p}_0 c = \frac{\vec{S}}{c}. \quad (1.3.7)$$

1.3.2. Давление электромагнитных волн (света).

При поглощении или отражении электромагнитных волн среде сообщается импульс, равный разности импульсов электромагнитной волны до и после поглощения или отражения (по аналогии с механикой эти процессы можно рассматривать как неупругое и абсолютно упругое взаимодействия, соответственно). Поэтому среда должна испытывать *давление электромагнитной волны*!

Если среда непрозрачная, то волна частично отражается и частично поглощается ею. Введем для характеристики среды коэффициент отражения ρ (полное отражение $\rho = 1$, полное поглощение $\rho = 0$).

Пусть электромагнитная волна падает из вакуума под углом ϑ на поверхность непрозрачной среды с коэффициентом отражения ρ . По определению давление равно:

$$\mathbf{P} = \frac{F}{Ds} = \frac{Dp}{DtDs}. \quad (1.3.8)$$

Рассмотрим по отдельности изменение импульса волны Dp при её отражении и поглощении. Понятно, что при нахождении давления \mathbf{P} на поверхность среды нас будет интересовать лишь нормальная составляющая импульса волны p_0 , которая, не изменяясь по модулю, меняет знак на противоположный при отражении и становится равной нулю при поглощении.

Отражение:

$$Dp_{\text{отр}} = 2p_0 \cos \vartheta \cdot Ds \cdot cDt \cos \vartheta \cdot \rho;$$

Учитывая, что плотность импульса электромагнитной волны из (1.3.6) в вакууме равна $p_0 = \frac{w}{c}$, получаем:

$$\mathbf{P}_{\text{отр}} = \frac{Dp_{\text{отр}}}{DtDs} = 2c\rho \cdot p_0 \cos^2 \vartheta = 2\rho \cdot w \cos^2 \vartheta. \quad (1.3.9)$$

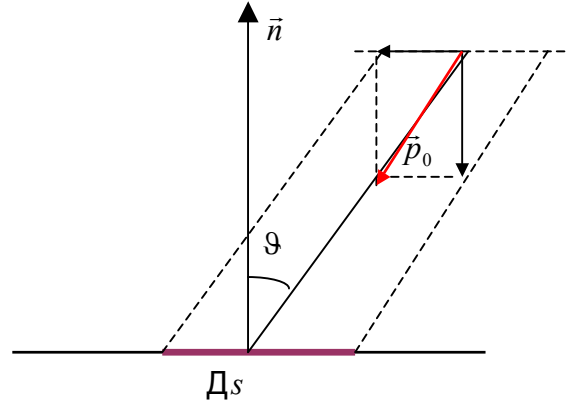
Поглощение:

$$Dp_{\text{погл}} = p_0 \cos \vartheta \cdot Ds \cdot cDt \cos \vartheta \cdot (1 - \rho);$$

$$\mathbf{P}_{\text{погл}} = \frac{Dp_{\text{погл}}}{DtDs} = c(1 - \rho) \cdot p_0 \cos^2 \vartheta = (1 - \rho) \cdot w \cos^2 \vartheta. \quad (1.3.10)$$

Таким образом, давление, оказываемое электромагнитной волной, падающей под углом ϑ на среду с коэффициентом отражения ρ , равно сумме

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_{\text{отр}} + \mathbf{P}_{\text{погл}} = (1 + \rho) \cdot w \cos \vartheta. \quad (1.3.10)$$



Примечание 1. Заметим, что если электромагнитная волна проходит сквозь среду, не поглощаясь и не отражаясь, то она не оказывает давления на среду.

Рассмотрим частные случаи:

1. Нормально падающая волна полностью отражается ($\rho = 1$): тогда давление равно $\mathbf{P} = 2w$;
2. Нормально падающая волна полностью поглощается ($\rho = 0$): для давления имеем $\mathbf{P} = w$.

Давление, которое оказывают электромагнитные волны, отражаясь или поглощаясь в телах, можно рассматривать как результат воздействия магнитного поля волны на электрические токи, возбуждаемые электрическим полем той же волны.

Пусть электромагнитная волна распространяется в однородной среде, обладающей поглощением. Наличие поглощения означает, что $\sigma \neq 0$, т.е. поглощающая среда обладает проводимостью. Электрическое поле волны в такой среде возбуждает электрический ток плотностью $\vec{j} = \sigma \vec{E}$. Поэтому на единицу объема среды действует сила Ампера (плотность силы) $f = \frac{1}{c} [\vec{j}, \vec{B}] = \frac{\sigma}{c} [\vec{E}, \vec{B}]$, направленная в сторону распространения волны. Этой силой и обусловлено давление электромагнитной волны. Отсутствие поглощения означает, что проводимость $\sigma = 0$ и $f = 0$, т.е. в этом случае электромагнитная волна не оказывает давления на среду. В рамках этой модели отражение можно рассматривать как поглощение с дальнейшим переизлучением электромагнитной волны в обратную сторону.

1.3.3. Опыты Лебедева П.Н.

(Пётр Николаевич Лебедев, русский физик, 1866–1912) В вакууме помещалась кварцевая нить, на которую наклеивались лепестки из материалов, полностью отражающих (светлые кружки) и полностью поглощающих ($\sim 90\%$) свет (на рисунке темные кружки). На образец направлялся пучок света от электрической дуги. Величина передаваемого импульса (давления) определялась по углу α скручивания

нити, который измерялся с помощью простой оптической системы. Если известна жесткость нити на закручивание k , то момент вращающей силы находится как $M = -k\alpha$, а сила, действующая на лепесток, равна $F = \frac{M}{l}$, где l – плечо силы.

Результаты опытов П.Н. Лебедева оказались в согласии с выводами теории Максвелла. Давление электромагнитного излучения обычно бывает очень малым. Например, при потоке солнечной энергии на орбите Земли приблизительно $1,4 \text{ кВт/м}^2$ световое давление составляет 5 мкПа , что в 10^{10} раз меньше атмосферного давления.

Точность опыта по измерению давления света удалось повысить, используя модулированное электромагнитное излучение. Частота модуляции выбирается равной частоте собственных колебаний механической системы. Чувствительность установки возрастает при этом в Q раз, где Q – добротность механической системы.

Давление и импульс излучения проявляются в двух противоположных по масштабам областях: астрономической и субатомной. Например, притяжение верхних слоев звезд к их центру в значительной степени уравнивается давлением излучения, идущего от центра звезды наружу. Световое давление приводит к некоторому предельному значению массы, при котором звезда еще остается устойчивой. Этот вывод согласуется с астрономическими данными, согласно которым звезды с массой, превосходящей некоторый известный предел, не наблюдаются.

Из явлений микромира отметим эффект Комптона (который подробнее будет рассмотрен выше), когда рентгеновское излучение передает часть своего импульса электронам, на которых оно рассеивается, и тем самым сообщает этим “электронам отдачи” большие скорости. Импульс излучения обнаруживает себя также в “отдаче”, которую испытывает атомное ядро при испускании гамма-лучей.

