1.3. Поток импульса в электромагнитной волне. Давление света.

1.3.1. Импульс электромагнитного поля.

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

$$\frac{E^2}{c^2}-p^2=m_0^2c^2=inv. \tag{1.3.1}$$

где m_0 – масса покоя системы или одной частицы, E – полная энергия частицы или системы частиц (не путать с напряженностью электрического поля). Другими словами, энергия и импульс взаимосвязаны друг с другом и, в общем, неразделимы. Вспомним основные формулы для энергии и импульса в теории относительности, в которых устанавливается, что энергии присущи определенная масса и движение:

$$E=\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}, \tag{1.3.2}$$

а импульс является мерой переноса массы – энергии:

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

Рассматривая энергию электромагнитного поля W и связь между энергией и импульсом, запишем импульс, соответствующий электромагнитному полю (теперь здесь и далее $E\equiv W$):

$$\vec{p}=\frac{E\vec{v}}{c^2}=\frac{W\vec{v}}{c^2} \tag{1.3.4}$$

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

$$|\vec{p}|=\frac{W}{c}. \tag{1.3.5}$$

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

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

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 как произведение плотности импульса на скорость распространении:

$$\vec{j}_p=\vec{p}_0c=\frac{\vec{S}}{c}=\frac{1}{4\pi}\left[\vec{E},\vec{H}\right]. \tag{1.3.7}$$

Таким образом, плотность потока импульса электромагнитной волны равна плотности потока энергии, деленной на скорость света.

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, при этом при полном отражении волны имеем $\rho=1$, а при полном поглощении – $\rho=0$.

Пусть электромагнитная волна падает из вакуума под углом ϑ на поверхность непрозрачной среды с коэффициентом отражения ρ (рис. 3.1). По определению давление $\boldsymbol{P}$ равно:

$$\boldsymbol{P} = \frac{F_n}{\Delta s} = \frac{\Delta p}{\Delta t \Delta s}. \tag{1.3.8}$$

где F_n – нормальная к поверхности составляющая силы, Δp – импульс, переданный площадке Δs за время Δt. Рассмотрим по отдельности изменение импульса волны Δp при её отражении и поглощении. Понятно, что при нахождении давления $\boldsymbol{P}$ 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.

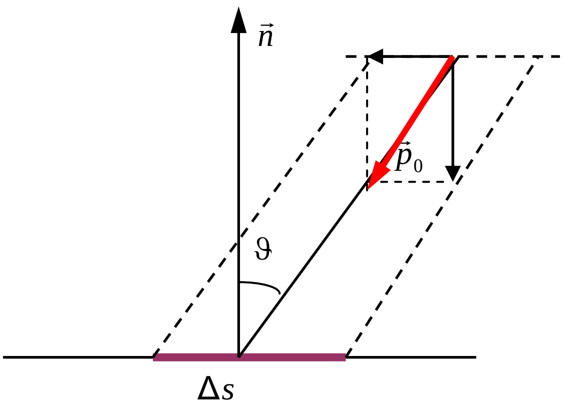

Рис. 3.1.

Отражение: переданный поверхности импульс равен

$$\Delta p_{отр} = 2 p_0 \cos\vartheta \cdot \Delta s \cdot c\Delta t \cos\vartheta \cdot \rho;$$

Коэффициент 2 учитывает, что перпендикулярный импульс электромагнитной волны меняется на обратный. Далее учитывая, что плотность импульса электромагнитной волны из (1.3.6) в вакууме равна $p_0 = w/c$, получаем:

$$\boldsymbol{P}_{отр} = \frac{\Delta p_{отр}}{\Delta t \Delta s} = 2c\rho \cdot p_0 \cos^2\vartheta = 2\rho \cdot w \cos^2\vartheta. \tag{1.3.9}$$

Поглощение: переданный поверхности импульс равен

$$\Delta p_{погл} = p_0 \cos\vartheta \cdot \Delta s \cdot c\Delta t \cos\vartheta \cdot (1-\rho);$$

$$\boldsymbol{P}_{погл} = \frac{\Delta p_{погл}}{\Delta t \Delta s} = c(1-\rho) \cdot p_0 \cos^2\vartheta = (1-\rho) \cdot w \cos^2\vartheta. \tag{1.3.10}$$

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

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{P}_{отр} + \boldsymbol{P}_{погл} = (1+\rho) \cdot w \cos^2\vartheta. \tag{1.3.11}$$

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 ($\vartheta = 0,\ \rho = 1$): тогда давление равно $\boldsymbol{P} = 2w$;

2. Нормально падающая волна полностью поглощается ($\vartheta = 0,\ \rho = 0$): для давления имеем $\boldsymbol{P} = w$.

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, т.е. плотность этой силы равна

$$f = \frac{1}{c}\left[\vec{j}, \vec{B}\right] = \frac{\sigma}{c}\left[\vec{E}, \vec{B}\right]$$

Сила Ампера направлена 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.

П.Н. Лебедев экспериментально показал, что свет оказывает давление на поверхность тел. В вакууме помещалась кварцевая нить, на которую наклеивались лепестки из материалов, полностью отражающих (светлые кружки на рис. 3.2) и полностью поглощающих ($\sim 90\%$) свет (на рис. 3.2 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 $F = \dfrac{M}{l}$, где l – плечо силы.

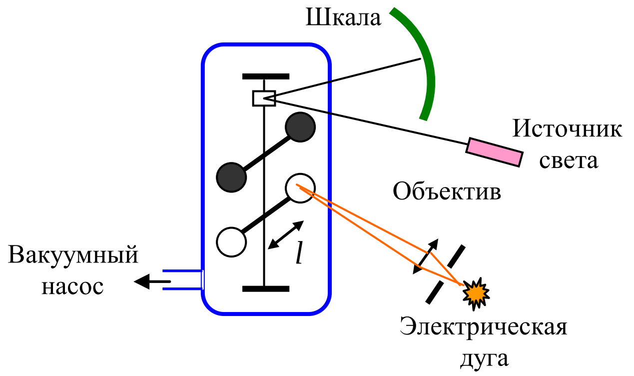

Рис. 3.2.

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 $1{,}4\ кВт/м^2$ 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 уравновешивается 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.

Примечание 2. *Петр Николаевич Лебедев, русский физик, 1866–1912*
