# Под давлением лунного света

**А.СТАСЕНКО**

*Но если свет производит давление, то в темную ночь летать безопаснее, чем при полной Луне?*

Из рассуждений одной девочки

Кто же теперь не знает, что свет оказывает давление на освещенные тела. С этим явлением связаны имена замечательных ученых – Максвелла, Лебедева, Комптона. Но если вы станете спрашивать у прохожих, *почему* свет оказывает давление на поверхность, то ответы могут быть разными.

Школьный Хорошист, например, скажет, что свет состоит из частиц – фотонов, этаких маленьких, очень легких шариков массой $m$, движущихся со скоростью $c$, и при абсолютно упругом ударе о (зеркальную) поверхность каждый из них передаст импульс $mc-(-mc)=2mc$. А если вам повезет и встретится школьный Отличник, то он скажет, что свет – это ведь, с другой стороны, электромагнитная волна, а она поперечна в том смысле, что векторы ее импульса $\vec{p}$, электрического поля $\vec{E}$ и магнитного поля $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу и составляют правую тройку, как оси декартовой системы координат $x$, $y$, $z$, так что им можно приписать соответствующие индексы: $\vec{p}_x$, $\vec{E}_y$, $\vec{B}_z$ (рис. 1). А раз так, то, падая на проводник, электрическое поле вызовет в нем ток $I_y$, а он (будучи, по определению, потоком положительных зарядов, движущихся со скоростью $v_y$) испытает в магнитном поле той же волны силу Лоренца $\vec{F}_x$, направленную вдоль оси $x$, т.е. в направлении движения самой волны.

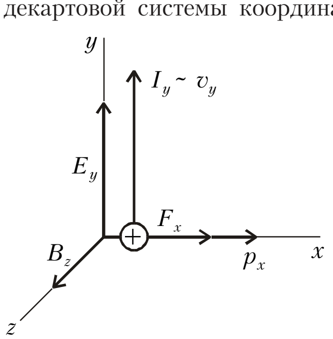

*Рис. 1*

Отличник, возможно, добавит еще, что, если уж говорить об импульсе и массе фотона, то они равны $h\nu/c$ и $h\nu/c^2$ соответственно.

Если же вам повезет еще больше и встретится Студент Московского физико-технического института (МФТИ) или Московского государственного университета (МГУ), то он расскажет нечто о векторном произведении $\vec{E}$ на $\vec{B}$, о плотности потока энергии Умова – Пойнтинга, о ... Но нам будет достаточно школьного Отличника.

Теперь, обладая такой богатой информацией, можно сделать и численные оценки. Пусть плотность потока энергии волны, а это и есть вектор Умова – Пойнтинга, равна $q$ (если вы не знаете или забыли, что такое плотность потока энергии, достаточно посмотреть на ее размерность: $\text{Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$). Поскольку импульс каждого фотона равен $h\nu/c$, то плотность потока импульса волны, т.е. всех фотонов, равна $q/c$ (размерность этой величины: $\dfrac{\text{Н}\cdot\text{м}/(\text{м}^2\cdot\text{с})}{\text{м/с}}=$ $=\dfrac{\text{Н}}{\text{м}^2}=\text{Па}$), а в случае зеркального отражения

$$p_x = 2\frac{q}{c}.$$

Известно, что на расстоянии $r_\text{С}$ от Солнца величина плотности потока энергии (так называемая солнечная постоянная) равна $q=1400\ \text{Вт/м}^2$. В частности, это значит, что, сфокусировав такой поток энергии при отражении от зеркала площадью $1\ \text{м}^2$ на сковороде, можно успешно приготовить яичницу или зажарить курицу. Но нам нужен поток импульса, т.е. сила на единицу площади (а это ведь есть давление!):

$$p_x = \frac{2q}{c} = \frac{2\cdot 1400\ \text{Вт/м}^2}{3\cdot 10^8\ \text{м/с}} \sim 10^{-5}\ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \frac{F_x}{S}.$$

Чтобы получить, например, силу 10 Н, нужна площадь $S=10^6\ \text{м}^2 = 1\ \text{км}^2$. Ясно, что такая сила не свалит с ног, но возможности космического полета при помощи солнечного паруса уже серьезно исследовались учеными. А на тяжелый авиалайнер с несущей площадью $s=500\ \text{м}^2$ действует сила давления солнечного излучения $F_\text{С}=0{,}005$ Н.

Но что же Луна? Можно оценить сверху и силу давления лунного света. Если радиус Луны равен $R_\text{Л}$, то ее диск перехватывает долю солнечного излучения, равную $\left(q\pi R_\text{Л}^2\right)/\left(4\pi r_\text{С}^2\right)$ (рис.2). Конечно, часть этой энергии поглощается, но, если мы желаем получить оценку *сверху* (выше которой уже быть не может), предположим, что вся эта энергия отражается. Но как? Ясно, что не зеркально, – иначе Луна выглядела бы, как блестящий елочный шарик с характерным бликом. А ведь она представляется нам плоским диском – это случай так называемого *диффузного* отражения.

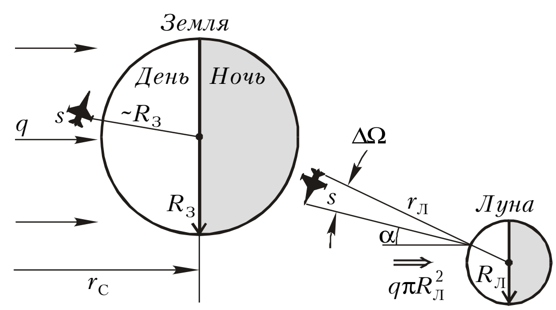

*Рис. 2*

При этом мощность, уходящая с элементарной кольцевой полоски АВ площадью

$$ds_\theta = 2\pi R_\text{Л}\sin\theta\cdot R_\text{Л} d\theta$$

(рис. 3) в телесный угол $d\Omega$ под углом $\theta$ к нормали, равна

$$dW = B ds_\theta \cos\theta\cdot d\Omega.$$

Это так называемый закон Ламберта, в котором коэффициент пропорциональности $B$ называется яркостью (Brightness) и, как легко

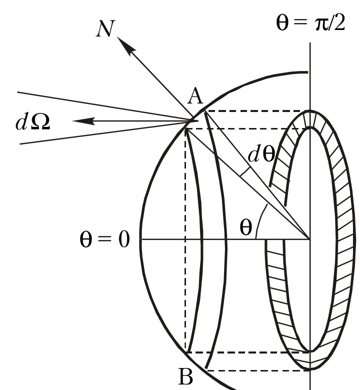

*Рис. 3*

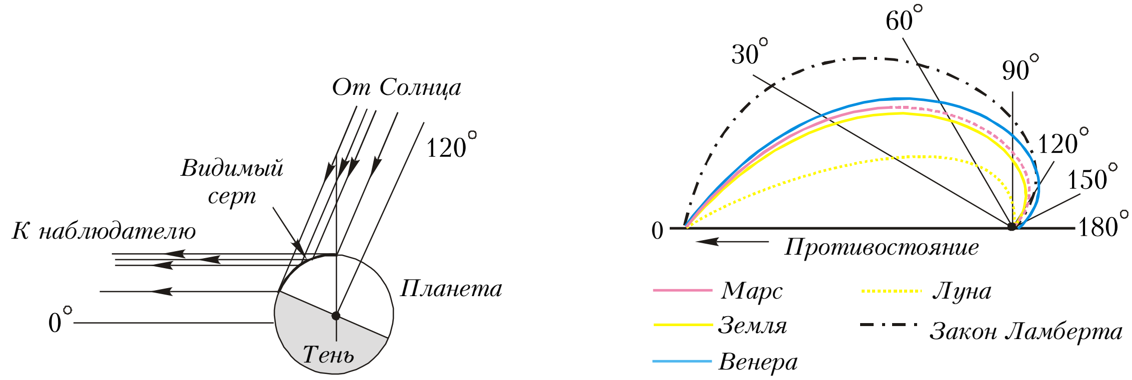


Рис. 4

видеть, имеет размерность $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{стер})$ (стер – единица телесного угла). Из этого закона видно еще, что $ds_\theta \cos\theta$ есть площадь проекции кольцевой площадки AB на диаметральную плоскость (она заштрихована на рисунке 3).

Интересно сравнить угловые зависимости – индикатрисы – отражения для различных планет с теми, которые следуют из закона Ламберта. Из рисунка 4 видно, что Марс, Земля и Венера отражают солнечный свет приблизительно одинаково, но, конечно, хуже, чем матовая поверхность по Ламберту. Обратим внимание на участок индикатрисы для Венеры, выходящий за пределы ламбертовского рассеяния. Видно, что при скользящих углах падения солнечного света $\gtrsim 120^\circ$ отражение становится частично зеркальным (при этом должен появляться блик, хотя и очень слабый). А вот Луна – ночное светило – оказывается темнее других: ее среднее альбедо (отражающая способность) равно $\rho = 0,073$, т.е. Луна отражает приблизительно $1/14$ долю падающего излучения с плотностью потока $q$.

В качестве приближенной оценки примем, что доля $\rho$ падающего излучения отражается равномерно в телесный полуугол $2\pi$. Тогда для яркости получим величину порядка $B = \rho q/(2\pi)$. Теперь, чтобы узнать, какая сила давит на тот же авиалайнер в полнолуние, надо найти угол, под которым его площадь видна с Луны (см. рис.2):

$$\Delta\Omega = \frac{s}{r_Л^2}\,.$$

Наибольшее значение косинуса угла $\alpha$ равно, конечно, единице (когда Луна стоит в зените над самолетом). Заметим, что рисунок 2 сделан не в масштабе, так что в реальности угол $\alpha$ может быть очень малым.

Итак, согласно закону Ламберта, сила давления лунного света на ночной лайнер будет равна

$$F_Л = \frac{\rho q R_Л^2 s}{c r_Л^2} = F_С\,\rho\left(\frac{R_Л}{r_Л}\right)^2.$$

Отношение геометрических величин можно выразить через значение угла, под которым радиус Луны виден с Земли:

$$\frac{R_Л}{r_Л} = \frac{D_Л}{2r_Л} = \frac{\alpha_Л}{2} \approx \frac{0,5^\circ}{2} \approx 5\cdot 10^{-3}\ \text{рад}\,.$$

Таким образом, искомая сила еще порядков на пять $\left(25\cdot 10^{-6}\right)$ меньше, чем сила давления Солнца в зените:

$$F_Л = F_С\,\rho\cdot 2,5\cdot 10^{-5} = 5\cdot 10^{-3}\ \cdot 0,073\cdot 2,5\cdot 10^{-5}\ \text{Н} \sim 10^{-8}\ \text{Н}\,.$$

С чем бы сравнить такую малую силу? С весом самолета

$$G \sim (250-400)\ \text{т}\cdot 10\ \text{м/с}^2 = (2,5-4)\cdot 10^6\ \text{Н}\,?$$

Тогда

$$\frac{F_Л}{G} \sim 10^{-15}\,.$$

Смешно.

Давайте лучше сравним с разностью значений его веса $\Delta G$ при полете днем и в лунную ночь – ведь днем он ближе к Солнцу, но дальше от Луны, а ночью наоборот. Из рисунка 2 видно, что

$$\frac{G_{\text{день}} - G_{\text{ночь}}}{G} = \frac{\Delta G}{G} = \frac{M_Л}{M_З}\left(\left(\frac{R_З}{r_Л + R_З}\right)^2 + \left(\frac{R_З}{r_Л - R_З}\right)^2\right) -$$

$$- \frac{M_С}{M_З}\left(\left(\frac{R_З}{r_С - R_З}\right)^2 + \left(\frac{R_З}{r_С + R_З}\right)^2\right).$$

Заметим, что здесь пренебрегается высотой полета в сравнении с астрономическими масштабами, а $r_Л$ и $r_С$ – расстояния между центрами небесных тел.

Выпишем нужные данные:

$$\frac{M_Л}{M_З} = \frac{7,36\cdot 10^{22}\ \text{кг}}{6\cdot 10^{24}\ \text{кг}} = 1,2\cdot 10^{-2}\,,\quad \frac{M_С}{M_З} = \frac{2\cdot 10^{30}\ \text{кг}}{6\cdot 10^{24}\ \text{кг}} = \frac{10^6}{3}\,,$$

$$\frac{r_Л}{R_З} = \frac{384000\ \text{км}}{6,4\cdot 10^3\ \text{км}} = 60\,,\quad \frac{r_С}{R_З} = \frac{150\cdot 10^6\ \text{км}}{6,4\cdot 10^3\ \text{км}} = 2,3\cdot 10^4$$

и получим

$$\frac{\Delta G}{G} = 1,2\cdot 10^{-2}\left(\left(\frac{1}{1+60}\right)^2 + \left(\frac{1}{(60-1)}\right)^2\right) -$$

$$- \frac{10^6}{3}\left(\left(\frac{1}{2,3\cdot 10^4 - 1}\right)^2 + \left(\frac{1}{2,3\cdot 10^4 + 1}\right)^2\right) \sim -10^{-3}\,.$$

Итак, даже разность значений веса самолета под Солнцем днем и под Луной ночью, связанная с гравитацией, во много больше, чем сила давления лунного света. Поэтому летайте спокойно и темной ночью, и в полнолуние. И даже днем, когда само Солнце, казалось бы, позволяет авиакомпании взять на борт на несколько пассажиров больше, чем ночью (если бы при этом не изменялась и плотность атмосферы, от которой зависят и подъемная сила, и сила сопротивления, и, следовательно, потребная мощность двигателей, и... но это отдельный разговор).