



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-61

P5-97-61

М.Д.Шафранов

ЭЛОММЕЛЬ И ЗАКОН ФОТОМЕТРИИ ЛАМБЕРТА

Направлено в журнал «Успехи физических наук»

1997

... Когда - нибудь монах трудолюбивый  
Найдет мой труд усердный, безымянный,  
Засветит он, как я, свою лампаду -  
И, пыль веков от хартий отряхнув,  
Правдивые сказанья перепишет, ...

*А.С.Пушкин*

## 1. Введение

История развития физики, как и история науки вообще, не обошлась без истинно драматических событий. Не случайно выдающийся физик современности Я.Б.Зельдович, посвятивший свою последнюю книгу развитию современной физики, назвал ее " Драма идей в познании природы (частицы, поля, заряды)" [1]. В книге Е.М. Кляуса ее автор пишет: "Развитие идей, связанных с теорией волн и квантов, борьба этих идей в процессе их развития - одна из самых захватывающих и драматических страниц истории физики" [2]. Но за каждой идеей стоял ее автор - ученый, поэтому за драмой идей скрывается драма человеческих судеб. Теперь можно только предполагать, что испытывал Фарадей, догадывавшийся по результатам своих исследований о существовании электромагнитных волн. Будучи уверенным, что не будет понят современниками, он свою идею об электромагнитных волнах изложил в письме, которое в 1832 г. отдал на хранение в архив Королевского общества. Этот конверт был вскрыт в 1938 году. В письме сообщалась суть его открытия:

- электрическая индукция распространяется подобно волнам с конечной скоростью;
- световые явления не отличаются от явлений электрической индукции.

Тем самым он предсказал существование электромагнитных волн.

Да и другой титан физики Дж.К. Максвелл не дождался торжества своей теории, в которой при его жизни ни одно из основных ее положений не было подтверждено опытом. Маститые физики отнеслись к теории с недоверием. Свою современную дифференциальную форму уравнения Максвелла получили в результате работ

Генриха Герца и Оливера Хевисайда, который, кстати, тоже не нашел должного признания в среде своих современников [3]. Некоторые ученые, не оцененные по достоинству современниками, в полной мере оценены последующими поколениями ученых-физиков. К ним в первую очередь необходимо отнести выдающегося австрийского физика Л. Больцмана [4].

Многие замечательные ученые были признаны при жизни, не забыты последователями. Они увековечены тем, что в их честь названы физические константы и законы физики. Имена многих других канули в Лету. Имя, по преимуществу, стали жесткие сторонники какой-либо теории, не нашедшей подтверждения в дальнейшем. Но здесь есть знаменательные исключения. Классический представитель механицизма Р.Г.Кирхгоф, считавший задачей физики объяснение всех природных явлений на основе законов механики, внес существенный вклад в исследования электромагнетизма, теорию дифракции, теорию теплового излучения. Кирхгоф ввел понятие "абсолютно черного тела" и предложил его модель [5]. Проблема излучения черного тела и ее разработка привела в конечном итоге к созданию квантовой механики [6].

К числу незаслуженно забытых ученых принадлежит немецкий физик Э.К.Й. Ломмель, чье имя по праву должно стоять рядом с именем И.Г. Ламберта. Именно Ломмель вывел уравнение распространения света в веществе, которое при определенных условиях переходит в известный закон Ламберта, считавшийся чисто эмпирическим.

## 2. Закон Ламберта и уравнения Ломмеля

Закон Ламберта устанавливает зависимость изменения силы света светящихся поверхностей  $I(\varepsilon)$  от направления  $\varepsilon$ , в котором производится наблюдение. В фотометрии вводится понятие поверхностной яркости или просто яркости протяженных источников  $B(\varepsilon)$ . Поверхностная яркость  $B(\varepsilon)$  характеризует излучение светящейся поверхности в данном направлении, определяемом углом  $\varepsilon$  с нормалью к выбранному участку поверхности  $\sigma$ . Характер изменения яркости  $B(\varepsilon)$  будет зависеть от свойств самой поверхности и особенно от того, является ли она гладкой или матовой, обладает ли она способностью сама излучать свет, пропускает или

отражает падающее на нее излучение. Во многих случаях можно показать, что яркость мало зависит от направления излучения. В этом случае мы имеем дело с изотропным источником излучения. Если на светящейся поверхности выделить площадку  $\sigma$ , то в направлении  $\varepsilon$  наблюдается сила света  $I(\varepsilon)$ , тогда яркость  $B(\varepsilon)$  определится выражением  $B(\varepsilon) = I(\varepsilon)/\sigma \cos \varepsilon$ . Для изотропных источников излучения  $I(\varepsilon) = I_0 \cos \varepsilon$ ,  $I_0$  - сила света в направлении нормали к поверхности площадки  $\sigma$ . Соотношение  $I(\varepsilon) = I_0 \cos \varepsilon$  получило название закона Ламберта (закон косинусов). При выполнении этого закона мы имеем дело с диффузным излучением или диффузным отражением в соответствии с тем, имеет ли место излучающая или отражающая поверхность.

Закон Ламберта у обычных источников выполняется лишь приближенно. При не очень тщательных наблюдениях солнце кажется нам плоским диском равномерной яркости, потому что поверхность солнца излучает по закону, довольно близкому к закону Ламберта. Бугер экспериментально установил, что яркость солнца несколько падает от центра к периферии [7]. Для абсолютно черного тела излучательная способность равна поглощательной способности, а равновесное излучение изотропно. Следовательно, его излучательная способность одинакова по всем направлениям. Это означает, что излучательная способность абсолютно черного тела подчиняется закону Ламберта. При тепловом излучении она совпадает с поверхностной яркостью тела.

Тепловое равновесное излучение подчиняется закону Кирхгофа. В общем виде этот закон формулируется следующим образом. Отношение испускательной способности тела  $E_\omega$  к его поглощательной способности  $A_\omega$  является универсальной функцией частоты излучения и температуры тела равной испускательной способности абсолютно черного тела  $e_\omega$ , т.е.  $e_\omega = E_\omega/A_\omega$ . Тела, равномерно рассеивающие падающий свет во все стороны независимо от его направления, называются абсолютно матовыми. Для непрозрачного тела энергия падающего излучения равна сумме энергий поглощенного и рассеянного излучения, и, следовательно, для абсолютно матового тела поглощательная способность не зависит от направления. Если поглощательная способность тела не зависит от направления падающего излучения, то в соответствии с законом Кирхгофа тепловое

излучение абсолютно матовых тел следует закону Ламберта. Зависимости яркости раскаленных углерода и вольфрама для видимой области излучения с длинами волн 0,47 и 0,66 мкм от угла наблюдения приведены в [8]. Экспериментальные результаты исследования углового распределения излучения раскаленной металлической пластинки с тонко матированной поверхностью приведены в [9]. Незначительное отклонение от закона наблюдается для углов  $\varepsilon$ , близких к  $90^\circ$ .

В [9-13], как и в других монографиях и учебниках, затрагивающих в той или иной форме вопросы фотометрии и связанный с ней закон Ламберта, не указаны причины того, почему излучение одних светящихся тел достаточно хорошо подчиняется этому закону, а других нет. Закон Ламберта получил статус эмпирического закона, как основанный на наблюдениях. Автор целой серии прекрасных учебников по физике для высших учебных заведений Поль Р.В. утверждает: "Пропорциональность мощности излучения в направлении  $\varepsilon$  косинусу угла  $\varepsilon$  (закон Ламберта, 1760 г.) можно получить только из опыта" [9]. В данном случае, конечно, не идет речь об излучении абсолютно черного тела и абсолютно матовых тел и поверхностей. Такова и современная общепринятая точка зрения на закон Ламберта.

Справедлива ли она? В 1880 году была опубликована статья немецкого физика Ломмеля Э.К.Й. "О флюоресценции" [14]. В этой статье Ломмель дает вывод уравнения, описывающего излучение флюоресценции и нагретого тела, и показывает, при каких условиях это уравнение переходит в закон Ламберта.

Что известно об этом ученом? Эуген Ломмель родился в 1837 году, в 1858 году окончил Мюнхенский университет, в котором и работал. В 1868 был назначен профессором этого университета, а незадолго до смерти (1899 г.) - его ректором. Основные работы Ломмеля относятся к оптике, он исследовал явления интерференции, дифракции и дисперсии света, а также явления люминесценции [15]. В "Истории физики" [16] имеется упоминание о нем как редакторе трудов Фраунгофера. Ссылки на его работы по люминесценции можно найти в монографии [17].

Исследования оптических явлений и занятие оптикой для Ломмеля не было случайным. Первая половина XIX века характеризуется крупнейшими открытиями

ученых по физике оптических явлений, приведшими к полному признанию волновой теории света. Начало века - работа Юнга 1801 г., в которой нашло объяснение явление интерференции света [18]. Открытие и установление закономерностей в явлениях поляризации отраженного света и объяснение двойного лучепреломления было сделано Малюсом в 1808 г. [19]. Позднее (1815 г.) Д.Брюстер в блестящих экспериментах установил связь угла полной поляризации с показателем преломления. Френель вместе с Араго исследовал интерференцию поляризованных лучей света и обнаружил, что лучи света, поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях, никогда не интерferируют [20].

Новую волну исследований вызвали работы Френеля по волновой теории света, выполненные в 1815 г. [21]. Они явились первыми из серии работ, полностью развенчавших корпускулярную теорию в течение нескольких лет. Теоретические исследования влияния движения тел, испускающих звук, были выполнены Доплером в 1842 г. Он сформулировал хорошо известный принцип, названный его именем [22]. В 1848 г. И.Л. Физо распространил принцип Доплера на оптические явления. В экспериментах Физо была определена скорость света (1849 г.). Стокс, один из наиболее блестящих продолжателей дела Френеля, делает открытие флюоресценции. Позже, в 1852 году, он формулирует один из основных ее законов: "Свет люминесценции имеет всегда большую длину волны, чем свет, применявшийся для возбуждения". В дальнейшем Ломмель уточнил и обобщил правило Стокса в виде закона Стокса - Ломмеля: "Спектр испускания в целом и его максимум всегда сдвинуты по сравнению со спектром поглощения и его максимумом в сторону длинных волн" [23]. Несмотря на то, что исследования природы поляризации света отодвинули другие работы по оптике, в это же время были сделаны открытия в области лучеиспускания нагретыми и раскаленными телами, и установлены важные законы.

Итак, после краткого исторического введения переходим к основному предмету нашего обсуждения. Явление флюоресценции, т.е. люминесценции, затухающей в течение короткого времени, привлекло внимание ряда исследователей, в том числе и Ломмеля. А его работа "Об интенсивности флюоресценции" [24] вызвала ряд возражений со стороны одного из оппонентов. Следующая публикация Ломмеля "О

флюоресценции” является, по существу, ответом оппоненту и дальнейшим развитием положений первой статьи [14]. Она состоит из трех разделов. Ломмель так излагает содержание своей публикации:

“ В первом разделе я освещаю новые фотометрические принципы, которые положены в основу моей статьи “ Об интенсивности флюоресценции”. Во втором разделе я знакомя с фотометрическими свойствами света флюоресценции, доказываю несправедливость теории, выдвинутой Гогенбахом, и опровергаю его возражения против некоторых моих положений. Третий раздел, наконец, посвящается обсуждению опытов, касающихся законов о веществе”.

Остановимся лишь на некоторых выводах первого раздела публикации. Ломмель, анализируя закон Ламберта и основы фотометрии, исходит из трех положений.

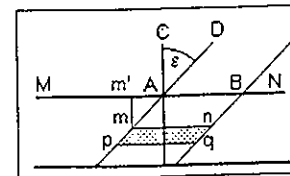
1. Количество света, падающее от элементарного объемчика на элементарную поверхность перпендикулярно, обратно пропорционально квадрату расстояния от светящегося объемчика до освещаемой поверхности.
2. Количество света, падающее от элементарного объемчика на элемент поверхности, пропорционально  $\cos$  угла падения.

Второе положение полностью соответствует двум основным положениям фотометрии, которые определяются характером распространения света. Относительно соотношения, получившего название закона Ламберта ( закон косинусов)  $I(\varepsilon) = I_0 \cos \varepsilon$ , Ломмель пишет, что этот закон имеет чисто эмпирическую природу и основывается только на наблюдениях: раскаленный шар в любых положениях кажется для глаза равномерно освещенным диском.

3. Для вывода соотношений, характеризующих излучение, автор исходит из рассмотрения “ не только внешней поверхности светящегося вещества, но также его элементарных объемчиков”, и того, “что свет, излучаемый элементарным объемчиком, претерпевает на своем пути поглощение соразмерно с известными законами поглощения”.

Кроме этого Ломмель предполагает равномерную нагретость тела, что приводит к изотропности излучения и независимости излучения от места внутри среды. Такой подход к излучению нагретыми телами использовал и Кирхгоф при выводе закона о тепловом равновесном излучении [5].

Рис. 1. Схема, поясняющая вывод уравнения прохождения излучения из объема  $m\rho q$  через поверхность MN



Рассмотрим ход рассуждений Ломмеля для вывода уравнений прохождения излучения от элементарного объемчика к поверхности светящегося тела с учетом поглощения. На рис. 1 показано сечение светящегося тела. MN - его внешняя поверхность. АВ - проекция элемента  $\sigma$ . AC - нормаль к поверхности.  $\rho$  - расстояние элементарного объемчика  $m\rho q$  от поверхности MN. Тогда величина этого объемчика  $dv = \sigma d\rho = \sigma \cos \varepsilon dr$ , где  $dr$  - расстояние вдоль направления AD. Пусть  $E_{dv}$  - сила излучения элементарного объемчика. С учетом поглощения в среде, характеризуемого коэффициентом поглощения  $k$ , до поверхности MN в направлении, определяемом углом  $\varepsilon$ , дойдет излучение  $\delta L = E_{dv} \cos \varepsilon e^{-kr} dr$ . Интегрирование  $\delta L$  в пределах от 0 до  $r$ , где  $r = R / \cos \varepsilon$ , а  $R$  - толщина излучающего слоя, дает

$$dL = E_{\sigma} / k \times \cos \varepsilon (1 - e^{-kR / \cos \varepsilon}). \quad (1)$$

При  $\varepsilon=0$  (излучение в направлении нормали)

$$dL_0 = E_{\sigma} / k \times (1 - e^{-kR}). \quad (2)$$

Тогда для силы света в относительных единицах в направлении  $\varepsilon$  Ломмель получает следующее уравнение:

$$I_{rel}(\varepsilon) = dL / dL_0 = \frac{(1 - e^{-kR / \cos \varepsilon}) \cos \varepsilon}{(1 - e^{-kR})}. \quad (3)$$

Для источников, слабо поглощающих собственное излучение, из (3) следует  $dL \cong dL_0$ . Угловое распределение излучения в этом случае сферически симметрично, сила света, излучаемая данным объемом, одинакова во всех направлениях. Яркость элемента поверхности с сокращением видимой поверхности растет как  $\sigma \times \cos \varepsilon$  (закон Ломмеля [25]). Для случая, когда источником излучения служит люминесцирующая жидкость или полированное стекло, охлаждаемому возрастающему

яркости поверхности с увеличением угла наблюдения частично противодействует отражение на поверхности раздела. Если явление отражения на границе раздела двух сред устранено подбором второй среды, то наблюдаемая яркость в зависимости от угла наблюдения должна следовать закону Ломмеля. Это следствие закона было проверено количественно в изящном эксперименте Вуда [25] и получило блестящее подтверждение.

Для случаев сильного поглощения (нагретое твердое тело) или большой толщины (атмосфера солнца), когда величина  $kR$  в уравнениях (1-3) такова, что возможно пренебречь величинами экспонент по сравнению с 1, из уравнения (3) следует:

$$dL = dL_0 \cos \varepsilon. \quad (4)$$

Таким образом, в этих двух крайних случаях угловое распределение излучения, приходящего из внутреннего объема излучающего тела на границу излучающей поверхности, подчиняется закону Ламберта.

### 3. Следствия из уравнений Ломмеля

Для иллюстрации следствий из уравнений Ломмеля для угловой зависимости силы света, а также создаваемой элементом поверхности яркости излучения, автором этой публикации выполнены расчеты в соответствии с уравнением (3). Из уравнений (1-3) следует, что угловое распределение силы света элемента поверхности  $I_{rel}(\varepsilon)$  зависит от произведения  $kR$ . На рис. 2 показаны угловые распределения силы света элемента, соответствующие следующим значениям  $kR$ : 0,001; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 2,0; 4,0.

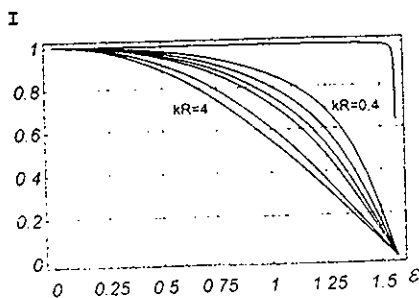
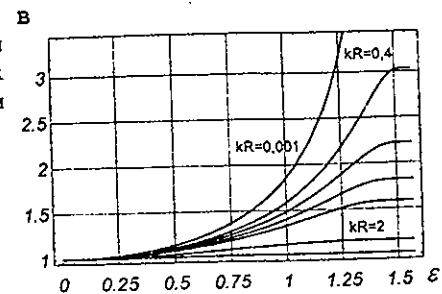


Рис. 2. Угловая зависимость силы света элемента поверхности в относительных единицах для следующих значений  $kR$ : 0,001; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 2,0; 4,0. Верхняя кривая соответствует  $kR=0,001$ . Значения угла показаны в радианах

Рис. 3. Угловая зависимость яркости элемента поверхности в относительных единицах для тех же значений  $kR$ , как и на рис. 2



На рис. 3 показана зависимость относительной яркости излучения элемента поверхности  $B(\varepsilon) = I_{rel}(\varepsilon) / \cos \varepsilon$  в направлении  $\varepsilon$  и тех же значений  $kR$ , как и для рис. 2. На рис. 2 и 3 верхние кривые соответствуют значению  $kR=0,001$ . Это соответствует случаю прохождения излучения через вещество практически без поглощения. Для случая  $kR=4$  по сравнению с предельным ( $kR \rightarrow \infty$ ) отличие в распределениях не превышает 0,1%. При неинструментальных наблюдениях глазом, которые не очень тщательны, практически невозможно заметить плавного изменения яркости излучения в 1,5 раза. Такому изменению соответствуют кривые, представленные на рис. 2 и 3, начиная с  $kR > 1$ . Поэтому ничего нет удивительного в том, что во многих случаях мы воспринимаем излучение как изотропное, подчиняющееся закону Ламберта.

Проведем анализ уравнений, полученных Ломмелем, на основании рис. 2 и 3. Для этого рассмотрим следующий пример: пусть в некоторых единицах показатель поглощения излучающей среды  $k=1$ . Тогда если  $kR=1$ , то этому значению  $kR$  соответствует одна длина поглощения  $l=1/k$ . В этом случае происходит ослабление излучения в  $\varepsilon$  раз. Для  $kR=4$ , т.е. при толщине излучающего слоя, равной 4-м длинам поглощения, излучение источника полностью следует закону Ламберта, как это видно из рис. 2 и 3 (вторые кривые снизу на рисунках). Незначительные отклонения от закона Ламберта для  $2 < kR < 4$  можно наблюдать только точным инструментальным методом. Таким образом, если толщина источника излучения превышает двойную длину поглощения, то излучение источника уже хорошо согласуется с законом Ламберта.

С чем могут быть связаны отклонения от расчетов, следующих из уравнений (1-3)? Во-первых, с тем, что не выполнены предположения самого Ломмеля, которые использовались им при выводе уравнений. Далее, возможно влияние таких явлений, как поляризация излучения, рассеяние излучения при прохождении через излучающую среду, влияние спектрального состава излучения, изменение показателя преломления в самой излучающей среде, а также при переходе из среды излучения в среду, в которой ведется наблюдение.

#### 4. Сравнение с экспериментом

Проведем сравнение выводов, следующих из уравнений (1-3) по зависимости яркости от угла излучения с экспериментальными данными. Количественные исследования соответствия излучения флюоресценции закону Ламберта выполнены Вудом [25]. В эксперименте одна из сторон прямоугольной стеклянной призмы облучалась УФ. Регистрировалось излучение флюоресценции, проходящее через вторую грань, образующую с первой прямой угол. Излучение, идущее по нормали к облучаемой поверхности, после отражения от поверхности грани, образующей в сечении призмы гипотенузу, служило для сравнения. Экспериментальные результаты были скорректированы с учетом прохождения излучения из стекла в воздух и отражения от поверхностей внутри призмы. На рис. 4 точками показаны данные из работы Вуда. Кривая - расчет автора настоящей публикации по уравнениям Ломмеля. Горизонтальная прямая в нижней части рисунка - расчет при условии выполнения закона Ламберта.

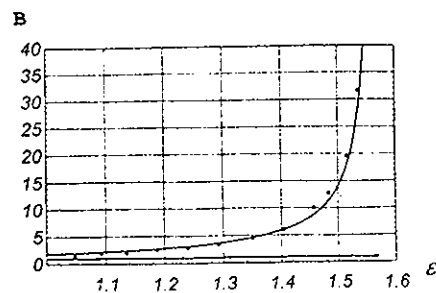
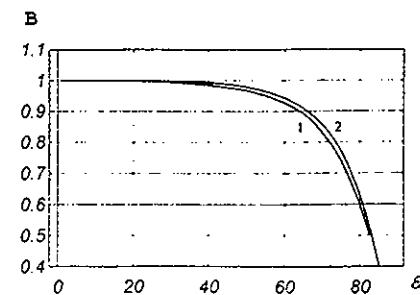


Рис. 4. Зависимость яркости флюоресценции стекла от угла излучения. Точки на расчетной кривой - экспериментальный результат из [25]. Прямая горизонтальная линия при значении  $V(\epsilon) = 1$  - яркость при выполнении закона Ламберта. Значения угла даны в радианах

Рис. 5. Зависимость яркости углерода от угла излучения. Кривая 1 - экспериментальный результат. Кривая 2 - расчетная кривая по уравнениям Ломмеля и формулам Френеля. Значения угла показаны в градусах



Экспериментальные данные по зависимости яркости излучения углерода и вольфрама приведены в [8]. На рис. 5 кривой 1 показана зависимость яркости углерода от угла излучения. Яркость раскаленного углерода в зависимости от направления  $\epsilon$ , в котором ведется наблюдение, постепенно убывает с увеличением угла наблюдения, а в интервале углов, больших  $60^\circ$ , резко падает, приближаясь к нулю около  $90^\circ$ . Как можно объяснить такую зависимость? В соответствии с уравнениями Ломмеля излучение, падающее на границу раздела, для больших значений  $kR$  подчиняется закону Ламберта, оно изотропно. Медленный спад в условной зависимости яркости углерода для небольших углов объясняется частичным отражением собственного излучения углерода на границе раздела. В большей степени отражение сказывается с увеличением угла вплоть до угла полного внутреннего отражения. Это приводит к быстрому спаду яркости для углов, больших  $60^\circ$ . На этом же рисунке показана кривая 2 - результат вычисления по формулам Ломмеля и Френеля с учетом отражения на границе раздела в предположении, что показатель преломления углерода  $n_c = 1.7$ . При значении  $n_c = 1.75$  расчетная кривая полностью совпадает с экспериментальной. В расчетах по формулам Френеля предполагалось, что излучение, падающее на границу раздела, не поляризовано.

Для вольфрама яркость поверхности в зависимости от угла увеличивается, при угле  $75^\circ$  она достигает максимума, а затем быстро падает (кривая 1 рис. 6).

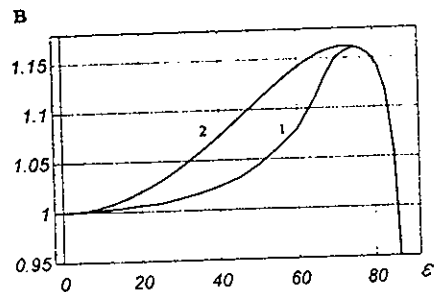


Рис. 6. Зависимость яркости вольфрама от угла излучения. Кривая 1 - экспериментальный результат. Кривая 2 - расчетная кривая по уравнениям Ломмеля и формулам Френеля

Качественно зависимость яркости поверхности вольфрама с учетом отражения на границе раздела соответствует уравнениям Ломмеля. Из рисунка следует, что поглощение излучения в среде мало. Следствием этого является увеличение яркости поверхности в соответствии с уравнениями Ломмеля до тех пор, пока не начинает сказываться отражение на границе раздела вплоть до угла полного внутреннего отражения. Вторая кривая, показанная на этом рисунке - результат расчета по уравнениям Ломмеля и формулам Френеля. Расчет выполнен в предположении  $kR=1,5$ , а показатель преломления  $n_w=1,01$ . Такие предположения привели к полному согласию экспериментальной зависимости яркости с расчетом для углов излучения  $\epsilon \geq 75^\circ$ .

В угловой зависимости яркости вольфрама не исключается и влияние поляризации, достигающей в некоторых металлах почти 100% при углах, близких к  $90^\circ$  [27]. Для инфракрасного излучения коэффициент поглощения уменьшается и увеличивается прозрачность. Это приводит к увеличению яркости для всего интервала углов, больших  $30^\circ$  [28].

В соответствии с металлооптикой задача о распространении и отражении света в металле, падающего на поверхность, сводится к учету проводимости металла [9-11]. Интенсивность света убывает по мере проникновения излучения в металл по закону  $I = I_0 \exp(-kR)$ . В металлооптике вместо величины  $k$  удобнее использовать другую величину, характеризующую поглощение  $k = k\lambda/4\pi$ , где  $\lambda$  - длина волны света в веществе, а  $\lambda_0 = n\lambda$  - длина волны света в вакууме,  $n$  - показатель преломления вещества. Тогда показатель поглощения  $k = 4\pi kn/\lambda_0$  и  $I = I_0 \exp(-4\pi knR/\lambda_0)$ .

Оптические постоянные металла и его электрические характеристики (электропроводность  $\sigma$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ ) связаны между собой соотношениями  $n^2(1 - \kappa^2) = \epsilon$ ,  $n^2\kappa = \sigma/\nu$ , где  $\nu$  - частота света [29]. Оптические постоянные вольфрама для света с длиной волны  $\lambda_0 = 589,3$  нм получены по методу Друде [30] и равны  $n_w = 3,46$ , а  $\kappa = 3,25$ . Пусть  $kl = 4\pi kn/\lambda_0 = 1$  (ослабление в  $e$  раз), то в этом случае длина поглощения  $l = \lambda_0 / 4\pi\kappa = 14,35$  нм и  $k = 1/l \approx 0,07$  1/нм. Если предположить, что коэффициент поглощения при нагреве вольфрама изменяется не существенно, тогда из полученной оценки для  $kR = 1,5$  следует, что толщина излучающего слоя  $R = 1,5/k \approx 20$  нм. При этом показатель преломления этого очень тонкого излучающего слоя  $n_w = 1,01$ !

Оставаясь в рамках классической оптики и металлооптики, трудно объяснить такую большую разницу в показателях преломления вольфрама, полученных двумя способами. Первый - из исследования состояния поляризации света при отражении от поверхности методом Друде ( $n_w = 3,46$ ). Второй - из описания яркости вольфрама с помощью уравнений Ломмеля и формул Френеля ( $n_w = 1,01$ ). Из формул Френеля следует, что показатель преломления  $n_w$  в соответствии с положением максимума яркости вольфрама (рис. 5) должен быть близок к  $n_w \sim 1$ . Для точного описания яркости вольфрама необходимы исследования зависимости поляризации его излучения, которые помогут пролить свет на происходящие явления излучения. Но ясно одно - для объяснения яркости излучения раскаленных тел необходимо учитывать поглощение в среде по Ломмелю.

Можно объяснить, почему выводы Ломмеля о связи полученных им уравнений с законом Ламберта выпали из поля зрения историков физики. Его публикация [14] не только по названию, но и по содержанию более чем на 90% посвящена не выводу уравнений, а явлениям, описанию опытов и выводов в области флюоресценции. Вуд в своей публикации, названной им "Флюоресценция и закон Ламберта", пишет, ссылаясь на указанную публикацию Ломмеля:

" В своей статье Ломмель выводит закон Ламберта для среды с большим поглощением, излучающей свет из-за нагревания до высокой температуры. Применяя



тот же метод к частично прозрачной среде и флюоресцирующей среде, он приводит к заключению, что в этих случаях эмиссия не пропорциональна косинусу угла, а является определенной функцией косинуса, которая равна 1 для излучения по направлению нормали и равна 0 для излучения под углом в  $90^\circ$  [25]. Это скорее всего единственная работа, в которой говорится о *выводе Ломмелем закона Ламберта*. Но и работа Вуда в рассматриваемом вопросе осталась вне поля зрения физиков и историков физики. Это подтверждается приведенной выше цитатой из учебника Р.Поля [9].

### 5. Заключение

На основании анализа уравнений (1-3) и экспериментальных результатов вытекают следующие выводы:

- соотношение (4), описывающее закон Ламберта, является частным случаем уравнений Ломмеля;
  - в свете уравнений Ломмеля с единой точки зрения объясняются результаты многочисленных наблюдений и экспериментов, связанных с излучением нагретых тел, пламени горящих газов, светящихся газоразрядных источников света, а также люминесцирующих сред и сцинтилляторов под действием ионизирующих излучений.
- Уподобляя себя трудолюбивому монаху, автор настоящей публикации надеется на следующее. Авторы учебников, монографий, затрагивающих теоретические вопросы фотометрии, а также авторы специальных статей о законе Ламберта в различных энциклопедиях приведут вывод уравнений Ломмеля и укажут их связь с законом Ламберта. Или иначе: они дадут объяснение, почему излучение одних тел подчиняется закону Ламберта, а других - нет. Только тогда будет должным образом оценена заслуга Ломмеля Эугена Корнелиуса Йозефа перед наукой.

### Литература

- [1] Зельдович Я.Б., Хлопов М.Ю. - Драма идей в познании природы. М.:Наука. 1988.

- [2] Кляус Е.М. - Открытия и поиски. М.: Наука. 1986.
- [3] Болотовский Б.М. - Оливер Хевисайд. М.:Наука. 1985.
- [4] Полак Л.С. - Людвиг Больцман. М.: Наука. 1987.
- [5] Kirchhoff. G. - Ann. Phys., 19, 1860, p. 275. Перевод приведен в книге [6]. с. 124.
- [6] Шерфю Х.-Г. - От Кирхгофа до Планка. М.: Мир. 1981.
- [7] Бугер П. - Оптический трактат о градации света. Л., 1950.
- [8] Гуревич М.М. - Фотометрия. Л.: Энергоатомиздат. 1983. с. 104.
- [9] Поль Р.В. - Оптика и атомная физика. М.: Наука. 1966. с. 102, 109.
- [10] Борн М., Вольф Э. - Основы оптики. М.: Наука. 1973.
- [11] Ландсберг Г.С. - Оптика. М.: Наука. 1976.
- [12] Сивухин Д.В. - Общий курс физики. Оптика. М.: Наука. 1985.
- [13] Матвеев А. Н. - Оптика. М.: Высш. шк. 1985.
- [14] Lommel E. - Ann. d. Phys., 10, 1880. p. 440.
- [15] Храмов Ю.А. - Физики. Биографический справочник. М., 1983.
- [16] Льюи М. - История физики. М., 1970.
- [17] Принсгейм П. - Флюоресценция и фосфоресценция. М.: ИЛ. 1951.
- [18] Young T.A. - A course of lecture on natural philosophy and mechanical arts. London, 1897. lecture XXXIX. Перевод лекции приведен в книге [26].
- [19] Малюс Е. - Sur une propriété de la lumière réfléchie par les corps diaphanes. Mémoires d'Arcueil. II, 1809.
- [20] Френель О. - Мемуар о действии, которое оказывают друг на друга лучи поляризованного света. Избранные труды по оптике. М., 1955. с. 292.
- [21] Френель О. - Мемуар о дифракции света. Избранные труды по оптике. М., 1955. с.140-291.
- [22] В кн.: Физический словарь. М.: ОНТИ НКТП. 1937. т. II. с. 215-220. Допплера принцип.
- [23] А.А. Шишловский. - Прикладная физическая оптика. М.: ФМ. 1961. с. 531.
- [24] Lommel E. - Ann. d. Phys., 1876., 166. p. 75.

- [25] Wood R.W. - Phil. Mag., 1906. 11, p. 782.
- [26] Голин Г.М., Филонович С.Р. - Классики физической науки. М.: Высш. шк. 1989. стр. 292.
- [27] Forsythe W.E., Worthing A. G. - Astrophys. Journ., 1925, v. 61.
- [28] Sully et al. - Brit. Journ. Appl. Phys, 1952, v. 3.
- [29] Дженкинс Ф. - В кн.: Основные формулы физики. Физическая оптика. М.: И.Л. 1957. Гл. 17.
- [30] Drude P. - Lehrbuch der Optic. Leipzig. 1912.  
Друде П. - Оптика. Л-М. 1935.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 февраля 1997 года.