

# ЭТА СОВРЕМЕННАЯ ДРЕВНЯЯ ОПТИКА

**Т.ХАННАНОВА, Н.ХАННАНОВ**

СМОМЕНТА ИЗОБРЕТЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ генераторов – лазеров – не прошло и полвека. Однако применение лазера оказалось столь разнообразным, что современный школьник с трудом верит, что всего 40 лет назад слова «лазер» просто не существовало. Малая расходимость светового пучка, большая интенсивность, когерентность и поляризованность излучения лазера позволяют создавать на его основе и «скальпель» для хирурга, и «циркуль» для астронома, и «носитель информации» для пользователей компьютера.

В настоящее время именно свет лазера играет огромную роль в передаче и переработке информации. Общеизвестно использование лазера в линиях оптоволоконной связи, в таких устройствах, как CD ROM и лазерный принтер. С постепенным переходом на магнитооптические диски он начинает использоваться и для записи информации на жесткий диск компьютера.

Выйдя из стен научных и военных лабораторий, лазер «примостился» на поясе современного тинэйджера в виде CD-плеера или брелока для ключей. Давайте попробуем использовать лазерный брелок или лазерную указку для простых, наглядных, но от того не менее интересных исследований в домашних условиях явлений геометрической и волновой оптики – явлений, открытых и изученных задолго до рождения даже самой идеи создания лазера.

Единственное, о чем необходимо напомнить перед экспериментом с лазером еще раз, – **НЕЛЬЗЯ ДОПУСКАТЬ ПРЯМОГО ПОПАДАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГЛАЗ!** Локализация на малом участке сетчатки глаза большой энергии может привести к разрушению этих участков. И еще – экономьте энергию батареек, для фиксации положения светового пятна достаточно лишь ненадолго включить его. Это, кстати, будет беречь и ваши глаза, так как отраженное лазерное излучение тоже может быть достаточно интенсивным.

## Почему ошибался Птолемей, или О чем говорят пластиковые бутылки?

Как вы уже догадались, помимо лазерного брелока (указки) нам понадобится еще пластиковая бутылка, заполненная водой, а также линейка (желательно длинная, около 100 см) и угольник.

Наша цель – исследовать явления преломления света на границе двух сред. Древнегреческий ученый Клавдий Птоле-

мей (ок. 90 – ок. 160) впервые описал закон преломления света, связывающий угол падения  $\alpha$  и угол преломления  $\gamma$  (рис.1). В его распоряжении были две линейки  $CM$  и  $DM$ , прикрепленные к диску и вращающиеся вокруг точки  $M$ . Опуская нижнюю часть диска с линейкой в воду, он добивался того, чтобы глазу казалось, что нижняя и верхняя линейки образуют прямую линию  $C'MD$ . Это означало, что нижняя линейка расположена так, что лучи, выходящие из точки  $C$  и формирующие ее мнимое изображение, преломляются на границе вода – воздух, и изображение точки получается в  $C'$ . Затем диск вынимался, и по делениям на диске измерялись соответствующие углы. Птолемию удалось довольно точно измерить эти углы и установить, что отношение углов падения и преломления остается величиной постоянной:

$$\alpha/\gamma = n.$$

В учебниках обычно приводится другой закон преломления, называемый законом Снеллиуса:

$$\sin \alpha/\sin \gamma = n.$$

Его формулировка была обнаружена в рукописях голландского астронома и математика Виллеброрда Снеллиуса (1580–1626) после его смерти.

Кто же прав? Может, Птолемей не знал, что такое синус угла? Или Снеллиус сомневался в том, что он прав, и поэтому не опубликовал свой результат? Попробуем ответить на эти вопросы с помощью ... лазерной указки и пластиковой бутылки с газировкой. Лучше выбрать бутылку побольше – и не только потому, что точность будет выше.

Как же, не раскрывая бутылки, найти плоскую поверхность, на которую можно пустить «луч падающий»? Посмотрите на осевое сечение бутылки (рис.2). Верхняя его часть похожа на сечение треугольной призмы, нижняя – на сечение плоскопараллельной пластины. Ход лучей в этих классических оптических системах хорошо известен (возможно, в школе вы даже выполняли лабораторную работу с этими специально изготовленными изделиями). Если найти на цилиндрической бутылке это осевое сечение, зафиксировать точки вхождения и выхода луча и измерить угол, под которым луч падает на плоскость, задача была бы решена. Но как найти это сечение?

Зафиксируйте место падения лазерного луча на стену, проведите соответствующую вертикальную линию, затем двигайте бутылку по горизонтальному столу до тех пор, пока луч, прошедший сквозь бутылку, не попадет на ту же вертикаль. Дальнейшее измерение углов падения и преломления является делом техники. Угол падения равен углу, под которым луч выходит из бутылки (что хорошо известно для плоскопараллельной пластинки). Нужно зафиксировать точки входа и выхода луча, измерить расстояния  $H_1$  и  $H_2$  от

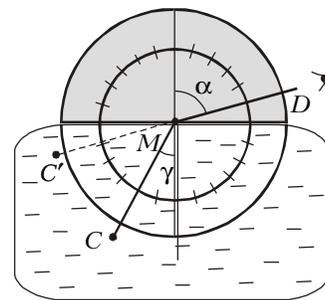


Рис. 1

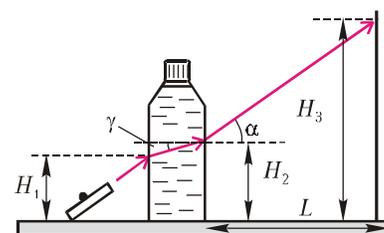


Рис. 2

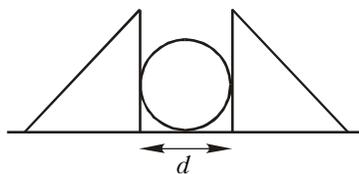


Рис. 3

Теперь надо провести несколько измерений и заполнить таблицу:

$d$ , мм	$H_1$ , мм	$H_2$ , мм	$H_3$ , мм	$L$ , мм	$\alpha = \arctg \frac{H_3 - H_2}{L}$	$\gamma = \arctg \frac{H_2 - H_1}{d}$	$\sin \alpha$	$\sin \gamma$
$99 \pm 1$	$174 \pm 2$	$215 \pm 2$	$508 \pm 5$	$574 \pm 2$	$\alpha_{\text{мин}} = 26,4^\circ$ $\alpha_{\text{макс}} = 27,7^\circ$	$\gamma_{\text{мин}} = 20,3^\circ$ $\gamma_{\text{макс}} = 24,6^\circ$	0,44–0,46	0,35–0,42

Отметим, что после смены очередного угла падения легче не целиться в предыдущее осевое сечение, а искать его заново, двигая бутылку.

Получив данные при нескольких углах, постройте график зависимости угла преломления от угла падения (по Птолемию) и график зависимости синуса угла преломления от синуса угла падения (по Снеллиусу). Не забудьте отложить на этих графиках ошибки измерений. Не вдаваясь в теорию экспериментальных ошибок, будем считать, что значение угла может иметь максимальное и минимальное значения. Если, скажем, угол падения вы определяете по его тангенсу, то оцените, в каких пределах могут лежать длины катетов (цена деления прибора плюс ошибка процедуры фиксирования начала и конца измеряемого отрезка) соответствующего треугольника. Максимальное значение тангенса угла получается делением максимальной длины противолежащего катета на минимальное значение прилежащего катета. По таблицам или на калькуляторе находится соответствующее максимальное значение угла  $\alpha$ . Аналогично рассчитывается и минимальное значение угла  $\alpha$ .

На рисунках 4 и 5 приведены типичные графики, получаемые в таких измерениях. Видно, что отклонение от закона преломления Птолея превышает экспериментальную ошибку

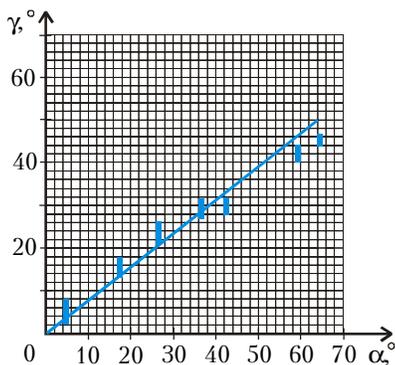


Рис. 4

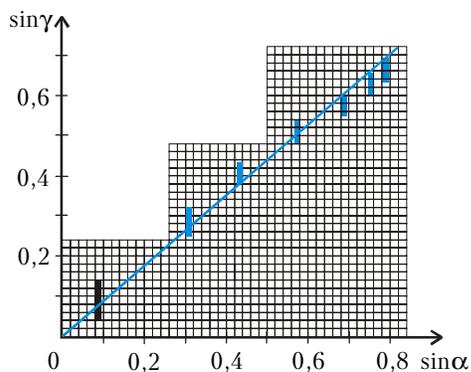


Рис. 5

стола до этих точек, расстояние  $L$  от бутылки до стены, куда падает луч, и высоту  $H_3$  (см. рис.2). Для расчетов понадобится и диаметр бутылки  $d$ , который проще всего измерить с помощью угольника и линейки (рис.3).

ку только при больших углах падения. Если этих измерений недостаточно или они проведены с большой ошибкой, то следует подумать, как уменьшить эту ошибку. Как видно из графика, ошибка особенно велика при определении угла преломления в воде. Это связано с тем, что луч лазера имеет конечную ширину. При малых  $\gamma$  для определения тангенса этого угла приходится использовать разность высот  $H_2 - H_1$ , которая мала (луч слабо отклоняется по вертикали внутри бутылки). Сами же значения  $H_2$  и  $H_1$  имеют конечную ошибку, связанную с шириной луча. При больших значениях  $\gamma$  разность  $H_2 - H_1$  растет, но при этом выходное пятно

на высоте  $H_2$  существенно уширяется. С этим увеличением расходимости выходящего пучка света связана точность в определении  $H_3$ , а следовательно, и  $\tg \alpha$  при больших углах падения. Исправить ситуацию можно, увеличив диаметр бутылки, например взяв десятилитровую бутылку (они сейчас тоже появились в продаже).

Имея в руках лазер, можно добиться еще более четкого доказательства отклонения от закона Птолея  $\alpha/\gamma = n$ . Например, изучив преломление на границах, образованных стеклянными торцами стекла для книжных полок, где при достаточной прозрачности торца можно умудриться одновременно увидеть и луч падающий, и луч преломленный (рис.6). На рисунках 7 и 8 приведены графики, демонстрирующие, насколько данные, полученные при преломлении луча лазера на торцевых гранях листа оргстекла размером  $35 \times 40$  см, соответствуют закону Птолея и Снеллиуса. За счет значительных расстояний, которые луч проходит внутри оргстекла, удается существенно снизить ошибку измерения угла преломления  $\gamma$ . По этим графикам можно утверждать, что начиная с  $\alpha = 45^\circ$  наблюдается отклонение от закона Птолея. При меньших углах для отклонения от этого закона требуется проведение измерений углов с точностью выше 1%, что с данным оборудованием невозможно.

Если вы пришли к выводу, что закон Снеллиуса более соответствует экспериментальной зависимости, то из графиков на рисунках 5 и 8 логично получить коэффициенты преломления  $n$  воды (или другой жидкости, заполняющей бутылку) и оргстекла. Проведение прямых, прохо-

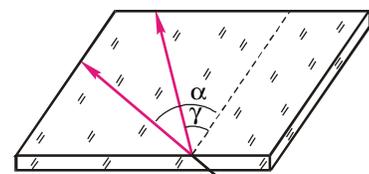


Рис. 6

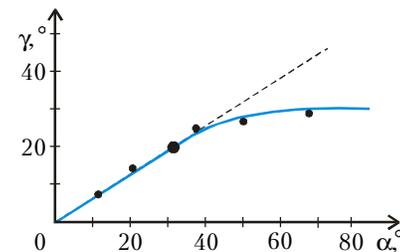


Рис. 7

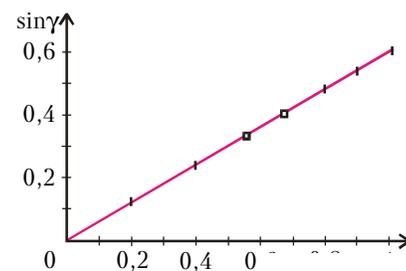


Рис. 8

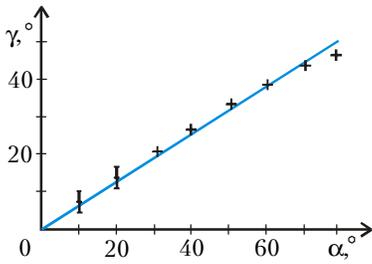


Рис. 9

Теперь попробуем ответить на вопрос исследования: почему ошибался Птолемей? Птолемей измерил углы  $\alpha$  и  $\gamma$  в 10 точках интервала  $0 - 90^\circ$  через каждые  $10^\circ$ . Построим теоретическую зависимость  $\alpha$  от  $\gamma$ , считая известным коэффициент преломления воды  $n = 1,33$  (рис.9). «Позволим» Птолемею ошибаться в изме-

дениях через все точки с наибольшим и наименьшим наклоном, дает возможность оценить ошибку полученного значения  $n$ . У нас получилось  $n = 1,31 \pm 0,02$  для воды в бутылке и  $n = 1,49 \pm 0,02$  для оргстекла. А у вас?

рени углов на  $1$  градус ( $\pm 1^\circ$ ). При такой ошибке все точки, кроме углов  $\alpha = 70^\circ$  и  $\alpha = 80^\circ$ , ложатся на прямую. А теперь вспомним, как Птолемей измерял угол  $\gamma$ . Попробуйте сами опустить в воду линейку так, чтобы угол между ней и поверхностью воды составил  $70 - 80^\circ$  (что соответствует птолемеевским углам  $\alpha = 10 - 20^\circ$ ). «Излом» линейки, хорошо видный при больших углах, почти неразличим при малых. Поэтому скорее всего ошибка в измерении  $\gamma$  при малых  $\alpha$  может быть увеличена до  $\pm 3^\circ$ . В таком случае все точки, кроме  $\alpha = 80^\circ$ , ложатся на прямую. Анализ дошедшей до нас оригинальной таблицы результатов Птолемея подтверждает, что точка  $\alpha = 80^\circ$  действительно выпадает из линейной зависимости  $\gamma = k\alpha$ . Однако позволим великому естествоиспытателю самому решать, как интерпретировать зависимость, на которой девять точек из десяти ложатся на экспериментальную прямую, а одна «выпадает» из нее.