Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. Ашкинази, Загадка плоского стекла, *Квант*, 2021, номер 9, 43–45

DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20210907>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.234.156.22

26 апреля 2023 г., 16:01:49

Рис. 9

сти, т.е. соответствующий конус является цилиндром, а секущие сферы – плоскостями, перпендикулярными его оси.

Другой интересный и давно известный случай получается, когда точка O лежит на сфере Ω и касательный конус с вершиной в ней вырождается в плоскость (рис.9). Предположив, что радиус большей секущей сферы равен r , а меньшей 0 , получаем, что площадь высекаемой на Ω шапочки равна площади высекаемого на плоскости круга, т.е. πr^2 . Неожиданно замечательная формула, не правда ли?

Загадка плоского стекла

Л.АШКИНАЗИ

И он показал Харберту прибор, заменивший ему линзу. Это были два стекла, снятые с часов инженера и Спилета. Наполнив их водой и скрепив их края с помощью глины, Сайрес Смит сделал настоящее зажигательное стекло, которое сосредоточило лучи солнца на охапке сухого мха и воспламенило его.

Жюль Верн. Таинственный остров

Мы видим мир через оконное стекло и на вопрос, искажает ли это стекло картинку, улыбнемся и ответим – конечно, нет. А теперь посмотрим на ситуацию более внимательно, начав со школьного учебника.

Все мы знаем, что такое линза. Объектив фотоаппарата и микроскопа – это линзы, лупа и очки – тоже линзы, и даже на передней панели радиостанции (рис.1 и 2) мы видим линзы. При этом одна относится к более редкой категории «асферической оптики», впрочем, такое бывает и в очках – видели на рецептах слово «цилиндр»? Увеличивать, уменьшать, отдалять, приближать, переворачивать – все, что ухитряется делать линза с изображениями, ей удастся потому, что луч света, проходящий через линзу, попадает на

Рис. 1

Рис. 2

переднюю и заднюю ее поверхности, наклоненные к оси линзы, под разными углами – рисунок 3, ситуация 1, луч 1. Кроме, разумеется, случая, когда луч проходит через центр линзы и, в первом приближении, падает на обе поверхности под одинаковыми углами.

Рис. 3

Тогда он не поворачивается и, соответственно, не смещается – ситуация 1, луч 2.

Если же у нас не линза, а плоский лист стекла, то углы наклона поверхностей к оси одинаковы и поворот луча, который происходит при входе из воздуха в стекло, в точности компенсируется поворотом в противоположную сторону при выходе – ситуация 2, луч 3. В результате при прохождении луча через плоское стекло он просто смещается вбок и радостно летит себе дальше. Кроме, разумеется, ситуации, когда он падает на поверхность по нормали, т.е. перпендикулярно. Тогда он не поворачивается и, соответственно, не смещается – ситуация 2, луч 4. Поэтому иногда говорят и пишут, что плоский лист прозрачного материала не изменяет того, что

мы видим. Действительно, достаточно посмотреть в окно, чтобы в этом убедиться.

Однажды слушатели задали мне вопрос – а искажает ли изображение иллюминатор? Причем такой, в котором стекло не плоское, а выпуклое. Попутно заметим, что такое стекло выдерживает большее давление, нежели плоское, если это давление – с выпуклой стороны. Например, как в случае иллюминатора батискафа. Это ситуация 3, где штриховой линией показано, как стекло деформируется при давлении, и видно, что все слои «работают на сжатие». В отличие от ситуации 4, когда все слои «работают на растяжение». Стекла, как и многие другие материалы, выдерживают «на сжатие» большие нагрузки, нежели «на растяжение».

Заметим, прежде всего, что выпуклый иллюминатор может быть устроен по-разному. Если толщина «по радиусу» в пределах иллюминатора одинакова, то сами радиусы оказываются различными, их разность как раз равна толщине линзы. А центры, из которых, прочерчены радиусы, совпадают – ситуация 5. Другой вариант – радиусы одинаковы, но прочерчены из разных центров – ситуация 6. Точки «равного наклона» *a* и *b* в первом случае расположены на одном радиусе, а во втором – на одном и том же расстоянии от оси. Реальная геометрия иллюминатора зависит от технологии изготовления, а таких технологий несколько. В частности, если лист размягчается и изгибается на оправке, то это ситуация 5, а если иллюминатор штампуются, размещаясь между двумя формами – пуансоном и матрицей, то скорее всего это ситуация 6.

Однако ни в том, ни в другом случае луч, пришедший в точку *a*, совершенно не обязан попадать в точку *b*! Так будет вести себя только тот луч, который показан на рисунке, а другие лучи, пришедшие в точку *a* с разных направлений, придут на вторую поверхность не в точку *b*, а в другие точки с другими наклонами. Иными словами, изогнутый лист оптически ведет себя не как плоский лист, т.е. заведомо искажает изображение. Но обычное плоское оконное стекло, с которого мы начали разговор, оно-то ведет себя хорошо?

Посмотрим на ситуацию повнимательнее. Пусть у нас есть плоский прозрачный лист, по одну сторону от него, причем вплотную или близко к нему, находится объект *ОБ*, а наблюдение ведется с противоположной сто-

Рис. 4

роны – ситуация 7. Объект мы наблюдаем благодаря тому, что в наш прибор (глаз, фотоаппарат и др.) попадает либо собственное излучение объекта, либо рассеянное им излучение других источников. То, где мы видим объект, определяется именно этими лучами – мозг получает сигнал от глаз и восстанавливает ход лучей и говорит, что объект находится там, где пересекаются продолжения лучей, пришедших в глаз. Вот почему лупа и «увеличивает» – лучи, идущие от близко расположенного к ней объекта, расходятся веером, а их продолжения пересекаются на большем расстоянии от оси и объект *ОБ* кажется увеличенным. Но это, конечно, только изображение *ИЗ* (его еще называют «мнимым») – ситуация 8.

Из ситуации 7 на рисунке 3 ясно, что лучи света, исходящие от объекта более широким веером, после преломления в плоском стекле расходятся еще шире, а их продолжения пересекаются ближе к наблюдателю. Продолжения лучей группы *С* пересекаются в точке *С'*, продолжения лучей группы *В* – в точке *В'*, продолжения лучей группы *А* – в точке *А'*. Таким образом, чем более широкий веер лучей мы перехватываем, тем ближе нам будет казаться объект. Правда, эта «лупа» будет слабая, причем плохая – поскольку она будет собирать лучи всех групп, то изображение будет размытым. Чем ближе глаз или объектив фотоаппарата будет находиться к объекту, тем более широкий веер

лучей мы перехватим и тем ближе нам будет казаться объект. Эффект будет ослабевать при удалении объекта от стекла, поскольку при фиксированном размере зрачка изображение далекого объекта формируется более узким пучком лучей.

На рисунке 4 показан реальный эксперимент – черная линейка фотографировалась при приближении аппарата к объекту с расстояний от 25 см до 0,5 см через слой воды (коэффициент преломления 1,33, толщина 4 см) и через слой стекла (коэффициент преломления 1,5, толщина 4,5 см). Мы видим, что линейка, видимая через воздух, от кадра к кадру в обоих случаях кажется шире – потому, что она рассматривается фотоаппаратом с все меньшего расстояния. Линейка, видимая через воду или через стекло, естественно, тоже увеличивается, но она увеличивается сильнее. Причем для стекла (вверху) эффект больше, чем для воды (внизу). Другими словами, толстый плоский слой воды или стекла работает как лупа, но плохая – слабая и дающая размытое изображение.

Мораль этой истории такова. Некоторые физические задачи кажутся нам простыми потому, что мы решаем их для каких-то, принимаемых «по умолчанию», условий. Но для других условий ответ может оказаться совсем другим. Так, мир, рассматриваемый через толстое стекло, может быть совсем не похож на мир за окном.