

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

535 (09)

ТРУДЫ КЕПЛера В ОБЛАСТИ ОПТИКИ *)

(К 400-летию со дня рождения)

В. П. Линник

Иоганн Кеплер был не только великим астрономом, разгадавшим истинные законы движения планет, он был и выдающимся физиком-оптиком. Значительная часть его работ (не менее четверти) посвящена оптике. В этих работах высказано так много положений и предположений, не всегда правильных, что краткое изложение их содержания является очень трудным и не исчерпывающим. Будучи астрономом, Кеплер всегда стремился указать приложения, которые может иметь оптика в астрономии. Первый труд Кеплера по оптике — это «*Paralipomena in Vitellionem*» (дополнения к «Оптике» польского ученого Вителлия, написанной в XIII веке и являвшейся основным сочинением по оптике во времена Кеплера). К нему было присоединено сочинение по оптике арабского ученого Аль-Хазена. В основном это были компиляции, использовавшие результаты древнегреческих ученых Евклида, Птолемея и др.

Вторым сочинением Кеплера является «*Astronomiae pars Optica*» («Оптическая часть астрономии»).

Третий труд, может быть самый интересный, — это «Диоптрика», где, между прочим, описывается и знаменитая астрономическая труба Кеплера. Наконец, много оптических вопросов разбирается в переписке Кеплера с разными учеными того времени.

«*Paralipomena*» открывается общими соображениями о природе света («*De natura lucis*»). Эти соображения носят отчасти философский характер, а иногда и просто теологический. Свет является одним из факторов, обуславливающих взаимодействие материальных тел, так как тела сами по себе не способны к движению. Скорость света бесконечна, так как он не имеет массы. Свет неуничтожаем в пространстве, распределен по поверхности сферы, поэтому отсюда следует закон обратной пропорциональности освещенности квадрату расстояния от источника. Изменение направления распространения света при попадании на материальное тело зависит от свойств поверхности тела.

Цвет — это свет, дремлющий в прозрачном теле и взаимодействующий с падающим, что вообще согласуется с Аристотелем.

*) Материалы статьи были использованы в докладе автора на Симпозиуме, посвященном 400-летию со дня рождения Кеплера (Ленинград, август 1971 г.), проходившем в рамках XIII Международного конгресса по истории науки.

При отражении света соблюдается равенство углов падения и отражения, а также нахождение обеих лучей в одной плоскости с нормалью к поверхности тела. Аналогично — при преломлении.

Свет согревает тела, иногда их разрушает, а также разрушает цвет тел.

В разделе «*De figuratione lucis*» («Об изображениях, даваемых светом») рассматривается зависимость четкости изображения в камере-обскуре от величины и формы отверстия, а также от формы и расстояния объекта изображения. Этот вопрос очень важен при наблюдении солнечных затмений в темном помещении, куда впускается солнечный луч через отверстие. Кеплер выяснил причину закругления рогов в изображении прикрытого луной солнечного диска и дал точный расчет увеличения видимого на экране солнечного диска.

«*De fundamentis catoptrici et loco imaginis*» («Об основаниях катоптрики и месте изображения») — этот раздел трактует об отражении от плоского и сферического зеркал и о месте отраженного изображения. Здесь, между прочим, опровергается утверждение Евклида о том, будто бы изображение вообще исчезает, если закрыта часть зеркала у нормали к нему, проходящей через предмет, а следовательно, и через изображение. Для доказательства Кеплер рассматривает наклонные лучи. При рассуждении о месте изображения рассматриваются возможности глазомерной оценки расстояния до изображения при зрении как двумя глазами, так и одним глазом.

Наконец, рассматривается место изображения в выпуклом и вогнутом зеркалах. Интересно, что Кеплер берет такой сложный случай, как рассмотрение изображения глазом, помещенным сравнительно близко от касательной к поверхности зеркала. Очевидно, поэтому здесь нет и намека на так знакомые нам соотношения расстояний между предметом, изображением и поверхностью зеркала на линии, соединяющей предмет, изображение и центр зеркала.

«*De refractionum mensura*» («Об измерении рефракции») — в этом разделе Кеплер пытается найти закон преломления на основании известных ему экспериментальных данных. Это — таблица Птолемея в передаче Вителлия и таблицы рефракции Тихо Браге.

Относительно преломления лучей в атмосфере существовали самые противоречивые мнения. Путь, который выбирает Кеплер, очень сложен и представляет интерес своей оригинальностью, но именно эта оригинальность помешала нахождению истинного закона, который позже был открыт Снеллиусом и Декартом. Кеплер пытается найти внутреннюю связь между законами преломления и отражения. Поводом к этому послужило известное явление уменьшения угловых размеров предмета, находящегося на дне сосуда с водой, по сравнению с размерами предмета в воздухе, находящегося на том же расстоянии. Это аналогично виду предмета, наблюдаемого в выпуклом зеркале.

Так как в дальнейшем Кеплер пытается моделировать преломление с помощью конических сечений, то предпосылает параграф о конических сечениях, который является лучшим для того времени изложением вопроса. В нем впервые употребляется термин «фокус».

Затем Кеплер пытается найти зависимость между углами падения и преломления с помощью геометрической модели. Он строит у двух точек A и B (рис. 1), находящихся на некоторой оси, два угла α и β , которые будут соответственно углом падения и углом преломления луча при переходе из воздуха в воду. Пусть лучи пересекаются в некоторой точке C . Кеплер строит гиперболу, проходящую через точку C , у которой точки

A и *B* являются фокусами. Он надеется, что и другие точки гиперболы будут давать значения, соответствующие экспериментальным данным. Надежда оказывается напрасной. Тогда он пробует эллипс, затем вообще не связывает точки *A* и *B* с фокусами конического сечения. Тот же результат. Тогда он пишет: «*Inquisitionis methodus nulla geometrica est, periclitanda fortuna*» («геометрический метод не подходит, надо пробовать»). Затем он оставляет попытки моделирования и предполагает, что зависимость отклонения $\alpha - \beta$ луча вследствие преломления распадается на две: от плотности вещества и от углов падения и преломления. Если перефразировать словесное выражение зависимости угла отклонения луча от углов падения и преломления, данной Кеплером, в формулу, то получается $\alpha - \beta = \lambda \alpha \sec \beta$, где λ — постоянный коэффициент. Эта зависимость довольно хорошо согласуется с экспериментальными данными для воды, которые Кеплер взял у Вителлия.

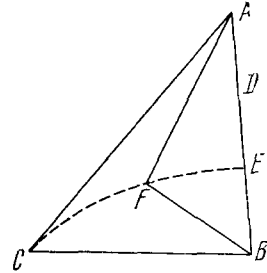


Рис. 1.

Приведем для иллюстрации таблицу значений, вычисленных по зависимости, данной Кеплером, и по закону Декарта, для воды, полагая, что для $\beta = 30^\circ$ результаты совпадают. Показатель преломления воды принят равным 1,33.

β	α	α_K	$\alpha - \beta$	$(\alpha - \beta)_K$	Δ
10°	$13^\circ 23'$	$13^\circ 18'$	$3^\circ 23'$	$3^\circ 18'$	$5'$
20°	$27^\circ 7'$	$27^\circ 1'$	$7^\circ 7'$	$7^\circ 1'$	$6'$
30°	$41^\circ 48'$	$41^\circ 48'$	$11^\circ 48'$	$11^\circ 48'$	0
40°	$58^\circ 57'$	$58^\circ 45'$	$18^\circ 57'$	$18^\circ 45'$	$12'$
45°	$70^\circ 29'$	$68^\circ 43'$	$25^\circ 29'$	$23^\circ 45'$	$1^\circ 46'$

Здесь α_K и $(\alpha - \beta)_K$ — значения, получаемые по зависимости Кеплера, Δ — разность углов отклонения луча по Кеплеру и Декарту. Она становится значительной только для $\beta = 45^\circ$, т. е. для угла падения $\alpha = 70^\circ 29'$. Интересно, что Кеплер дает крайние значения $\alpha = 90^\circ$ и $\beta = 53^\circ 30'$ для воды, т. е. границу, где начинается полное внутреннее отражение. Затем Кеплер переходит к атмосферной рефракции.

Тихо Браге составил таблицу атмосферной рефракции на основании своих наблюдений, но его данные не были достаточно надежными. Когда Кеплер пытается с помощью данных Тихо для рефракции при зенитном расстоянии 89° и 90° получить константы для своей формулы, у него не получается достаточно точной величины для зенитного расстояния 76° ; однако позже он находит другие цифры у Тихо, и его уверенность в своей теории растет.

Из своих соображений о зависимости преломления от плотности тела он получает плотность атмосферы $1 : 1177,7$. Таким образом, он впервые говорит о весе воздуха и оценивает его плотность для первого раза не очень уж плохо.

Таблица рефракции Кеплера для тех времен является достаточно точной.

В последней главе «*Raparipomena*» рассматривается глаз как оптический прибор. В ней Кеплер впервые рассматривает ход лучей в различных средах глаза и приходит к заключению, что на сетчатке образуется изображение объекта не как в камере-обскуре с простым отверстием (*stenopé*), а эквивалентно камере с линзой. Затем он рассматривает действие очков, улучшающих зрение, а также аккомодацию, указывая на существование ближней и дальней точек четкого изображения. Однако механизм аккомодации он видит либо в изменении расстояния хрусталика от сетчатки, либо в изменении плотности жидких сред в глазу. Изменение формы хрусталика ему не пришло в голову.

Все работы Кеплера по оптике в конечном счете имеют целью ее приложение к астрономии. Так, в случае глаза он рассматривает влияние его дефектов на качество астрономических наблюдений. Он рассматривает влияние положения глаза на точность измерений углов между звездами, говорит о кажущемся увеличении угловых размеров яркого объекта (иррадиация), об исчезновении слабого объекта вблизи яркого.

Второй значительный труд Кеплера — «*Astronomiae pars Optica*» («Оптическая часть астрономии»). Здесь три основных раздела: 1) Свечение и освещение небесных тел и отбрасываемая тень от несамосветящихся светил. 2) Изменение кажущегося местонахождения светила (вообще, параллакс). 3) Приложение оптики к наблюдению затмений. Кеплер считает самосветящимися Солнце, планеты и звезды. Луна и Земля — тела темные. Любопытны взгляды Кеплера на физическое строение Солнца в свете мировоззрения его времени. Солнце состоит из материи огромной плотности. Его масса равна сумме масс всех прочих светил, так как оно господствует над всем пространством. Структура солнечной материи простейшая и чрезвычайно однородная. Она имеет характер совершенно прозрачной жидкости. Солнце — сердце всей Вселенной. Оно излучает свет и тепло. Однако, наподобие тепловой отдачи сердца животного, излучение не происходит в виде процесса сжигания. Поэтому причину свечения Солнца можно искать лишь в наличии души (*anima*) или жизненной способности (*facultas vitalis*). Душа имеет своим местопребыванием все тело Солнца и потому заставляет светиться все его части. Показатель преломления Солнца необычайно велик, а потому выходящий из него луч исходит из центра, достигает поверхности по радиусу и распределяется ею по всем направлениям. Таким образом, мы имеем тройственность: центр, радиус, поверхность — символ божественной троицы (согласно Николаю Кузанскому).

Далее рассматривается освещение Луны Солнцем и положение терминатора в предельных случаях. Приводятся соображения относительно лунной поверхности, которая считается аналогичной земной: светлые места — моря, а темные пятна — континенты. В двух главах подробно рассматривается распределение освещения в тени Земли при лунных затмениях, принимая во внимание преломление лучей Солнца в земной атмосфере, которое укорачивает конус тени, а также способствует окраске Луны в красный цвет во время полной фазы затмения. Изучаются также причины солнечных полных и кольцеобразных затмений.

В раздел оптических явлений у Кеплера попадает и параллакс, который дан творцом человеку как средство для определения небесных расстояний. Для облегчения определения параллакса по высоте Кеплер составил таблицы для зенитных расстояний от 1° до 90° и для параллаксов от $1'$ до $66'$, а также наставление, как с помощью этих таблиц можно находить параллаксы по долготе и широте.

Следующий раздел посвящен кажущимся движениям планет, видимых с данного места. Здесь разбираются видимые условия перемещения наблюдаемых объектов как с неподвижного основания, так и при перемещении наблюдателя. Указывается на относительность понятия неподвижного наблюдателя. Кеплер говорит, что, находясь на Луне, мы бы рассматривали ее как неподвижное тело.

В конце труда «*Astronomiae pars Optica*» Кеплер описывает изобретенный им эклиптический инструмент, *instrumentum eclipticum*, и на ряде примеров показывает его применение. Инструмент представляет собой линейку, которой можно придавать различные направления перемещениями по азимуту и высоте. Эти перемещения могут отмечаться. На одном конце линейки установлена, перпендикулярно к ней, пластинка с отверстием. На некотором, довольно большом расстоянии от пластинки имеется экран, перпендикулярный линейке, который в случае надобности можно перемещать по линейке. Если мы направим линейку на Солнце, то на экране мы получим изображение Солнца, образованное лучами, проходящими через отверстие, как в камере-обскуре.

На экране мы можем измерить диаметр изображения Солнца в линейной мере и, зная расстояние от отверстия до экрана, можем найти угловой параметр Солнца.

Измерения диаметра Солнца с помощью эклиптического инструмента дали большую точность, чем прежние измерения Тихо и Местлина. Этот инструмент также оказывается полезным и для наблюдения солнечных затмений, для измерения различных фаз затмения. Хотя свет Луны значительно слабее, но все же инструментом можно пользоваться и для наблюдения Луны и ее затмений.

«*Диоптрика*». Третий, наиболее значительный и, пожалуй, самый интересный труд Кеплера — это «*Диоптрика*». Можно сказать, что стимулом к написанию этой работы были замечательные астрономические открытия, сделанные Галилеем с помощью зрительной трубы и опубликованные им в книге «*Nuncius Sidereus*» («Звездный вестник»).

По прочтении этой книги Кеплер печатает послание Галилею под названием «*Dissertatio cum Nuncio Sidereo*» («Рассуждение с N.S.»), где он говорит, что делает новую работу по оптике, в ней также рассматривается и зрительная труба.

«*Диоптрика*» Кеплера отличается от предыдущих двух работ по оптике своим строгим, объективным стилем, несколько напоминающим «*Геометрию*» Евклида. Она состоит из 141 пункта, носящих названия: «*Definitio*» («*Определение*»), «*Axioma*», «*Problema*» и др. В них четко излагается какое-нибудь свойство, например линзы, и дается его объяснение.

Сначала рассматривается преломление лучей в прозрачных телах, ограниченных плоскостями. После трех пунктов, характеризующих преломление, предлагается задача: как измерить преломление луча в твердом теле, ограниченном плоской поверхностью? Затем следует решение этой задачи в двух вариантах. Далее следует ряд положений, выводимых из опыта. Например, преломление в стекле и кварце приблизительно одинаково. До угла падения 30° отклонение луча пропорционально этому углу. Отклонение луча до указанной границы втрое меньше угла падения. Точно измеренное отклонение луча не строго пропорционально углу падения.

Наибольшее отклонение луча в кристалле — около 48° . Луч, идущий внутри кристалла и попадающий на его поверхность, не выходит из кристалла (полное внутреннее отражение).

Далее рассматривается прохождение лучей через призму, имеющую в сечении равнобедренный треугольник, и указывается на окрашенность выходящего луча. Рассмотрение линз начинается с определений сходящегося и расходящегося пучков линз — двояковыпуклых, двояковогнутых, плоско-выпуклых, плоско-вогнутых и, как он называет, «смешанных».

Фокусное расстояние двояковыпуклой линзы с одинаковой кривизной с обеих сторон равно радиусу кривизны поверхностей; для плоско-выпуклой линзы оно вдвое больше радиуса кривизны. В промежуточных случаях фокус находится в другом месте, которое указывается качественно. Количественных указаний в алгебраической форме вообще нет.

«О действии линзы». Здесь рассматриваются свойства изображения, даваемого положительной линзой. Изображение, даваемое линзой, перевернуто относительно предмета. Размеры предмета и изображения обратно

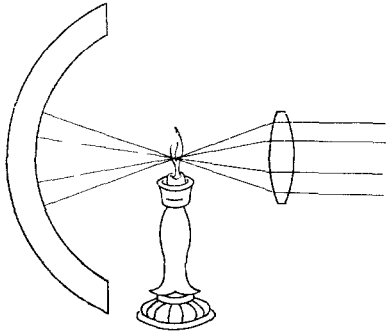


Рис. 2.

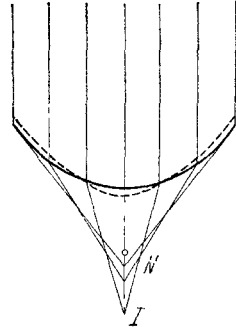


Рис. 3.

пропорциональны их расстояниям от линзы. Далее предлагаются экспериментальные задачи: найти радиус кривизны равносторонней линзы. Для этого нужно измерить расстояние от линзы изображения далекого предмета: это и будет искомый радиус. Некоторые из этих задач очень любопытны: например, произвести огонь с помощью двояковыпуклой линзы; произвести огонь с помощью плоско-выпуклой линзы; ночью, при наличии яркой звезды, осветить с помощью выпуклой линзы текст так, чтобы его можно было прочесть; ночью с помощью выпуклой линзы отбросить свет по возможности далеко. Для этого пламя свечи помещается в фокусе выпуклой линзы. Это — прообраз современного прожектора. Замечательно то, что кроме выпуклой линзы предлагается за свечой поместить вогнутое зеркало так, чтобы свеча находилась в центре его кривизны. Это — полная схема осветительной системы современных проекционных аппаратов (рис. 2). Далее предлагается система дальномера, в которой с помощью измерения расстояния от линзы до изображения предмета определяется расстояние предмета от линзы. И, наконец, доказывается невозможность зажигания удаленного предмета путем проекции на него изображения раскаленного тела. Это опровержение предложения Порты (Porta) — современника Кеплера.

Следующий раздел посвящен глазу и соединению глаза с линзой, свойствам очков и лупы, рассматриванию глазом изображения, даваемого линзой. В этом разделе очень интересным оказывается рассуждение о сходимости лучей в фокусе плоско-выпуклой линзы или фокусировка

параллельного пучка лучей, идущего из преломляющей среды через ограничивающую ее сферическую поверхность. Показывается, что лучи не собираются в одной точке, а что разные зоны имеют разные фокусы, причем центральная зона имеет фокус дальше от поверхности, а крайняя — ближе. Иначе говоря, описывается явление сферической аберрации. Кеплер ищет форму кривой, которая бы собирала все лучи в одну точку. Такой кривой он считает гиперболу (рис. 3).

Покончив со свойствами одной линзы, Кеплер переходит к системе из двух линз и в первой же задаче раздела дает описание своей трубы. Задача читается так: с помощью двух выпуклых линз получить увеличение предмета с полной четкостью, но в перевернутом положении. С помощью чертежа показывается, как нужно установить линзу, чтобы получить четкое изображение. Однако никаких числовых указаний не делается. Сам Кеплер этой системы не воспроизвел. Она была сделана и приспособлена к астрономическим наблюдениям Шейнером и описана в его труде «*Rosa Ursina*».

Одна из следующих задач: с помощью двух выпуклых линз получить прямое изображение удаленного предмета на бумаге. Этот способ, который теперь используются для наблюдения Солнца на экране, но об этой возможности Кеплер не говорит.

Следующая задача гласит: с помощью выпуклых линз получить увеличенное изображение предмета, отчетливое и прямое. Это так называемая теперь земная труба, но впервые она была воспроизведена Шейнером.

Далее качественно описываются свойства вогнутых линз, главным образом в комбинации с глазом.

В следующем разделе говорится о совместном действии выпуклых и вогнутых линз. Здесь уже с самого начала подробно говорится о зрительной трубе (Галилея).

51-е определение «Диоптрики» говорит: зрительная труба (*tubus*) представляет собой темный полый цилиндр, оба конца которого закрыты прозрачными стеклами, т. е. это такой инструмент, с помощью которого удаленные предметы кажутся расположенными близко.

52-е определение: одно из отверстий с его стеклом обращено к глазу, а другое — к предмету.

53-й постулат: линии, которые проходят через центры выпуклостей и вогнутостей обеих линз, должны совпадать, чтобы стекла были вставлены в трубу перпендикулярно оси. Далее указывается, что передняя линза (выпуклая) дает изображение предмета, но на пути к этому изображению ставится вогнутая линза, через которую при известных условиях конвергентности выходящего пучка глазом можно видеть увеличенное прямое изображение. Так действует труба Галилея.

Следующая задача гласит: получить на бумаге отчетливое обратное изображение удаленного предмета с помощью системы из положительной и отрицательной линз. Из толкования этой задачи можно сделать заключение о том, что Кеплер пришел умозрительно к схеме современного телеобъектива.

Из следующих пунктов этого раздела интересны:

1. Провержение мнения Порты, что можно получить с помощью оптической системы очень тонкий луч, распространяющийся на большое расстояние.

2. В центральной части поля зрительной трубы изображение резче, чем в краевой.

3. Изображения, даваемые небольшой частью объектива, резче, чем при полном отверстии (действие диафрагмы). Однако нигде не говорится о зависимости поля зрения от отверстия объектива галилеевской трубы.

4. Способ определения увеличения зрительной трубы с помощью одновременного наблюдения какого-нибудь предмета одним глазом непосредственно, а другим через трубу. Этот способ предложен и Галилеем, вероятно раньше.

В последнем разделе «Диоптрики» рассматриваются разные комбинации выпуклых и вогнутых линз, а также менисков.

Последний, 141-й пункт «Диоптрики» представляет задачу: построить зрительную трубу, в которой линза, обращенная к глазу, — выпуклая, а обращенная к предмету — вогнутая. Сейчас эта система употребляется для уменьшения фокуса объектива киноаппарата.

Кеплер жил в очень тяжелых материальных условиях и потому не мог испытать на практике ряд своих интересных идей. В частности, самая известная из его оптических идей, так называемая теперь кеплерова труба, не была им воспроизведена и достаточно изучена, и потому ее замечательное визирующее свойство не было замечено Кеплером. Только почти через сорок лет после смерти Кеплера Озу и Пикар введением нити в фокус объектива трубы Кеплера начали новую эпоху в измерительной астрономии.
