

Камера-обскура

В. СУРДИН, М. КАРТАШЕВ

История

На латинском языке «камера-обскура» означает просто «темная комната». Эта забава известна с античных времен: закрывшись в солнечный день в темной комнате и проделав в шторе окна маленькую дырочку, вы можете увидеть на противоположной, желательно белой, стене изображение улицы и прохожих... вверх ногами (рис.1). Принцип действия камеры-обскуры, по-видимому, был известен еще древним грекам, ею пользовались арабские ученые, а в Европе ее впервые подробно описал Леонардо да Винчи (конец XV века). Однако широкого применения классическая камера-обскура не находила: если отверстие для света сделать большим, то изображение получается размазанным, а крохотное отверстие дает резкое, но очень тусклое изображение; кроме того, для наблюдений необходимы абсолютно темное помещение и адаптированные к мраку глаза.

Но уже к середине XVI века камеру-обскуру оснастили линзовым объективом и зеркалом, в результате чего изображение в ней стало ярким и прямым, и она приобрела большую популярность, в особенности среди

не очень умелых художников, использовавших ее для точной зарисовки пейзажей. Существовали крупные обскуры – в человеческий рост, а были и портативные. Сегодня мы называем этот нехитрый оптический прибор прототипом фотоаппарата (рис.2 и 3).

К сожалению, после введения линзового объектива камера-обскура не изменила своего названия. Поэтому некоторые исторические сообщения вызывают недоумение. Так, можно прочесть, что для первых опытов по фотографии в 20–30 годах XIX века использовались камеры-обскуры. Ну, тут уж совершенно очевидно, что речь идет о линзовых камерах. Однако встречаются и более туманные сообщения. Известно, например, что независимо от Галилея пятна на Солнце открыл в 1611 году немецкий астроном Й.Фабрициус, используя для наблюдений телескоп и камеру-обскуру. Если с телескопом все более или менее ясно, то как Фабрициус мог заметить солнечные пятна с помощью простой обскуры – непонятно. Впрочем, еще в 1609 году Кеплер опубликовал сообщение о наблюдении 18 мая 1607 года на изображении солнечного диска в камере-обскуре маленького темного пятна, принято-

го им по ошибке за Меркурий. Такая ошибка простительна: диаметр центральной темной части (так называемой тени) типичного солнечного пятна составляет около 15 тыс. км, т.е. немногим больше диаметра такой планеты, как Земля или Венера. Меркурий вдвое меньше Земли, но и располагается к нам (проходя перед Солнцем) почти вдвое ближе солнечной поверхности, так что угловой размер Меркурия в этот момент близок к размеру солнечного пятна, и оба они составляют около 0,3'. Вопрос в том, можно ли вообще заметить объект столь малого углового размера при помощи обыкновенной обскуры?

Конечно, простую обскуру можно использовать для наблюдения частных фаз солнечного затмения (рис.4). Тут и труда большого не нужно: даже шелки между листьями дерева успешно работают как настоящая обскура. Как-то раз одному из авторов этой статьи пришлось в утренние часы наблюдать затмение Солнца с помощью дырочки, проделанной кончиком карандаша в тетрадной обложке, – изображение было отличное. Но темные пятна – это довольно мелкая деталь на диске Солнца. Скорее всего, Фабрициус использовал линзовую обскуру. Иначе почему пятна на Солнце не были открыты задолго до появления телескопа? Линзовая обскура – это почти телескоп, это результат высоких технологий эпохи Возрождения. Ее необходимо отличать от простой, или классической, камеры-обскуры с объективом-дырочкой, изготовление которой было доступно людям во все века. Попробуем выяснить, на что способен именно такой, простейший прибор.

Практика

Сделайте обскуру и увидите сами, как это просто. Берете любую коробку сантиметров 15–30 в длину (годится жестянка от кофе или плотный пакет от молока). В доньшке делаете

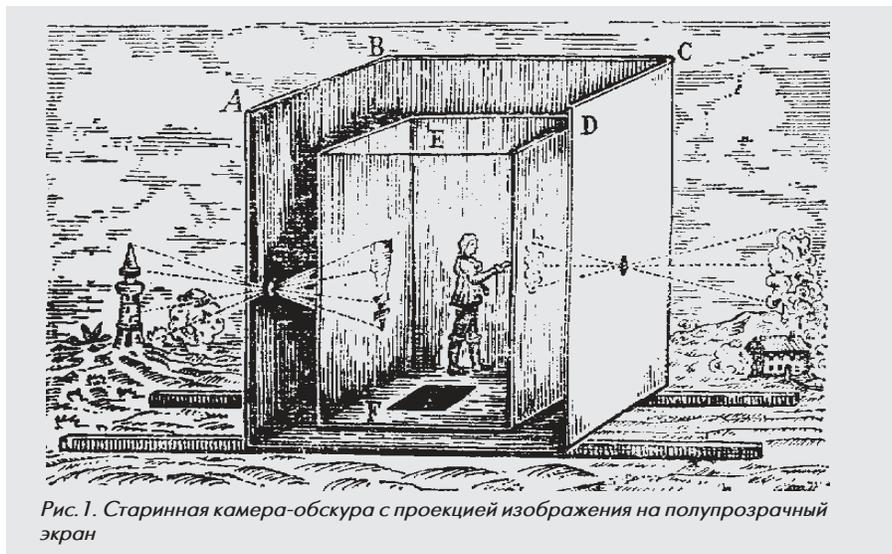




Рис.2. Камера-обскура с зеркалом (AB) и линзовым объективом (E), которую не изобрел, но подробно описал в своих книгах неаполитанский естествоиспытатель Дж.Порта

дырочку тонким шилом или толстой иглой (недаром американцы называют этот прибор не только «camera obscura», но и «pinhole camera»), а верхнее отверстие затягиваете промасленной бумагой. Идеально для этой цели подойдет круглая и длинная коробка от чипсов с белой матовой крышечкой – вам нужно только съесть чипсы и легким ударом шила проделать дырочку в доньшке.

Теперь, внимание: для наблюдений требуется яркий свет снаружи и темнота со стороны экрана. Поэтому лучше проводить опыт в солнечный день, находясь в помещении и тщательно изолировав экран от постороннего света. Для этого можно использовать трубу из плотной бумаги длиной 30–40 см, приставив ее одним концом к экрану, а другим – к лицу. Однако, если ваша камера круглая, лучше использовать пальто, накинув его на голову и вставив камеру в рукав. Для сравнения «объективов» сделайте в передней стенке несколько отверстий разных диаметров; каждый раз можно наблюдать с одним, закрывая остальные старой жевательной резинкой.

Итак, поэкспериментировав с обскурой, можно убедиться, что дырочка – неплохой объектив: все предметы, независимо от расстояния, получаются одинаково резкими, причем чем меньше отверстие, тем резче изображение. Правда, с совсем маленькой дырочкой трудно наблюдать: яркости не хватает. Но фотопленки сейчас очень чувствительные, уж они-то с этим справятся.

ры весьма ограничены. И вот почему.

Теория

Будем рассуждать так. От каждой светящейся точки удаленного объекта на нашу камеру падает пучок практически параллельных лучей света. Проходя сквозь отверстие диаметром D , пучок рисует на экране кружок такого же диаметра. Пусть расстояние до экрана F . Если угловое расстояние между двумя соседними точками объекта меньше чем D/F (в радианах, разумеется), то их кружки на экране будут частично перекрываться. При каком перекрытии кружков мы еще сможем различить соседние точки изображения – вопрос не простой. Многие зависит от контраста деталей исходного объекта, от яркости его изображения и т.п. Раз-

личить детали слабо контрастной картины удастся в том случае, если световые кружки совсем не перекрываются. Но поскольку пятна на Солнце выглядят весьма контрастно, будем считать картину различимой, если центры кружков раздвинуты на величину их радиуса. Тогда легко определить минимальный угловой размер различных деталей объекта, или, как говорят оптики, *пределный угол разрешения*, обусловленный конечным размером пучка:

$$\alpha_1 = \frac{D}{2F}. \quad (1)$$

До сих пор мы рассматривали свет как поток прямолинейно распространяющихся лучей. Такой подход характерен для геометрической оптики. Однако известно, что свет – это разновидность электромагнитных волн, и, как любая волна, он подвержен явлениям дифракции и интерференции. Если на входное отверстие инструмента падает волна с плоским фронтом (т.е. пучок параллельных лучей), то за отверстием фронт становится немного изогнутым (а пучок – расходящимся). Это – дифракция; именно она ограничивает применимость законов геометрической оптики. Пройдя сквозь малое отверстие

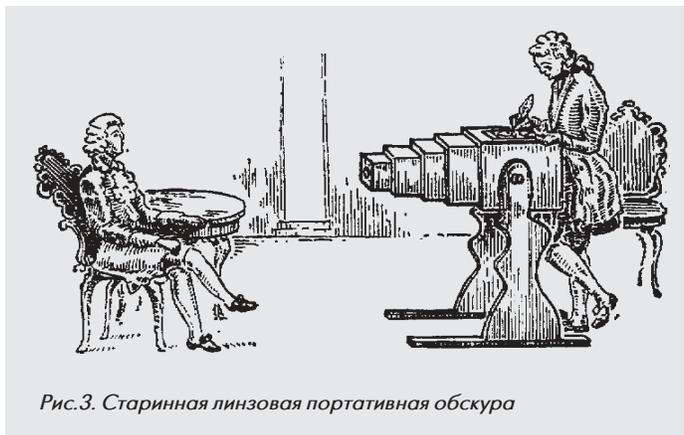


Рис.3. Старинная линзовая портативная обскура

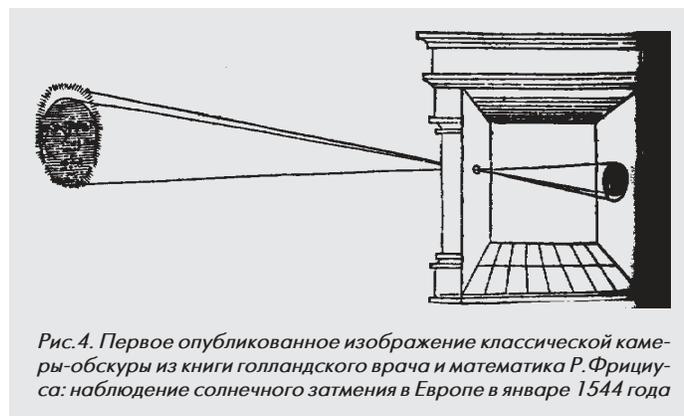


Рис.4. Первое опубликованное изображение классической камеры-обскуры из книги голландского врача и математика Р.Фрициуса: наблюдение солнечного затмения в Европе в январе 1544 года

камеры-обскуры, пучки света становятся расходящимися, картинка на экране – размытой. А чтобы узнать, насколько размытой, необходимо вспомнить способность света к интерференции, т.е. к взаимному сложению волн, приходящих в одну точку экрана от разных источников.

В нашем случае независимыми источниками света можно считать бесчисленное множество точек входной апертуры, ведь каждая из них из-за дифракции посылает свет во всех направлениях (принцип Гюйгенса – Френеля). Падающие на экран волны складываются друг с другом в соответствии со своими фазами, в некоторых точках усиливая друг дру-

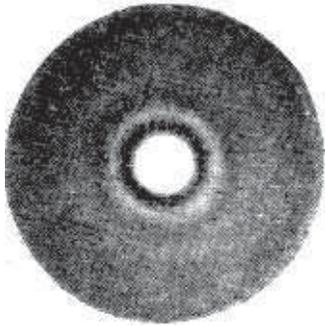


Рис. 5. Дифракционная картина изображения точечного источника круглым объективом

га, а в некоторых ослабляя. В результате получается следующая картина: пройдя сквозь маленькое круглое отверстие, пучок параллельных (вначале) лучей даст на экране светлое пятнышко, окруженное концентрическими темными и светлыми кольцами спадающей яркости (рис.5). Можно считать, что камера-обскура отображает на экране каждую точку светящегося объекта в виде такого светлого пятна, окруженного «зеброй» колечек. Обычно считается, что изображения двух соседних точек объекта можно различить на экране, если центры их светлых пятен раздвинуты не менее чем на радиус первого темного кольца (критерий Рэлея). Угол α_2 , под которым этот радиус виден от входного отверстия, можно оценить из тех соображений, что разность путей света от ближайшей и наиболее удаленной точек объектива до любой из точек на темном кольце должна быть порядка длины волны света λ . Тогда мы получим $\alpha_2 \approx \lambda/D$. А точный расчет дает следующее значение предельного угла разрешения, обуслов-

ленного дифракцией:

$$\alpha_2 = 1,22 \frac{\lambda}{D}. \quad (2)$$

Поскольку оба указанных эффекта – геометрический размер пучка и дифракция – накладываются друг на друга, можно считать, что полный предельный угол разрешения камеры составляет $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$. В зависимости от размера отверстия он изменяется так, как показано на рисунке 6. Очевидно, что при некотором оптимальном диаметре отверстия ($D_{\text{опт}}$) достигается наилучшая разрешающая способность камеры данного размера (F), которую характеризует минимальное значение угла разрешения ($\alpha_{\text{мин}}$). Найти эти параметры нетрудно. Тем, кто знаком с производной, ясно, что своего минимального значения α достигает в точке, соответствующей условию $\alpha' = 0$. А для остальных тоже вполне очевидно из рисунка 6, что минимум достигается в той точке, где $\alpha_1 = \alpha_2$. Оба эти условия тождественны. Из них мы получим

$$D_{\text{опт}} = \sqrt{2,4\lambda F} \text{ и } \alpha_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{2,4\lambda}{F}}. \quad (3)$$

На что же способна оптимальная классическая камера-обскура? Для визуальных наблюдений примем длину волны видимого света $\lambda = 5500\text{\AA}$. Тогда можно представить наш результат в удобном для оценок виде:

$$D_{\text{опт}} = 1,2 \text{ мм} \cdot \sqrt{\frac{F}{1\text{м}}} \text{ и } \alpha_{\text{мин}} = 4' \cdot \sqrt{\frac{1\text{м}}{F}}, \quad (4)$$

где F измеряется в метрах. Как видим, у камеры «человеческого» размера ($F = 2-5$ м) предельный угол разрешения больше, чем у здорового глаза (около $1'$). Значит, с ее помощью мы не увидим на поверхности Солнца более мелких деталей, чем позволяет видеть наш невооруженный глаз – разумеется, защищенный плотным светофильтром. В прежние времена роль такого светофильтра с успехом выполняли облака, дым пожара или просто толстый слой воздуха, сквозь который мы видим Солнце на восходе и на закате. В летописях некоторых народов упоминается о пятнах на Солнце, наблюдавшихся сквозь облака или дым и выглядевших «аки гвозди». В принципе, это возможно: хотя среднее солнечное

пятно имеет угловой размер около $0,3'$, изредка на Солнце появляются очень крупные пятна или их группы. Например, в марте 1947 года наблюдалась группа пятен размером около 200 тыс. км; похожие группы пятен наблюдались в 1957 и 1968 годах. Их угловой размер – $4'$ – без труда ощутим даже для не очень зоркого глаза, что и было доказано наблюдениями сквозь плотный светофильтр.

Внимание! Мы не зря уже второй раз упомянули о светофильтре – без него на Солнце смотреть нельзя! При этом это должен быть очень темный фильтр, а вовсе не солнечные очки. Подойдет стекло сварщика или алюминированный целлофан, в который заворачивают букеты цветов.

Итак, хотя в древние времена люди изредка могли наблюдать солнечные пятна невооруженным глазом, научным фактом эти эпизодические наблюдения не стали: мало ли что может привидеться! Надежных и систематических наблюдений поверхности Солнца в древности не проводили (или сведения об этом не дошли до нас). Ну а в принципе могли бы астрономы, например, Древней Греции систематически наблюдать солнечные пятна при помощи классической обскуры? Как видно из формул 4, сделав камеру длиной 20–30 метров, можно получить прибор более зоркий, чем человеческий глаз. А со 100-метровой камерой можно было бы наблюдать солнечные пятна систематически. Уж не упустили ли древние греки свой шанс?

Вспомним, что с удалением экрана от объектива возрастает угловой размер изображения и, следовательно,

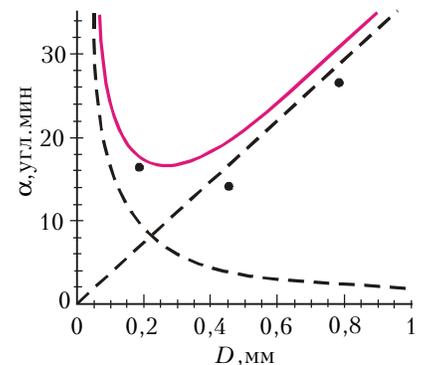


Рис. 6. Предельный угол разрешения α камеры-обскуры в зависимости от диаметра ее отверстия D . Расстояние от экрана до отверстия $4,6$ см; длина световой волны $\lambda = 4300\text{\AA}$. Пунктирные линии соответствуют уравнениям (1) и (2), сплошная линия – их сумма, черные точки – экспериментальные значения

падает яркость. Видимый диаметр солнечного диска около $0,5^\circ$, точнее – $32'$, диаметр его изображения на экране простой камеры-обскуры составит $F/107$. При размере камеры в 100 м диаметр изображения солнечного диска будет около 1 м. Сюда придет свет, прошедший сквозь отверстие объектива диаметром 1,2 см, значит, освещенность ослабнет почти в 10 тысяч раз. Не слишком ли тусклым будет изображение? Как известно, освещенность земной поверхности Солнцем составляет 10^5 лк; следовательно, освещенность нашего изображения будет около 10 лк. Это в десятки раз больше, чем когда Луна освещает Землю в полнолуние. Без особого труда можно различать буквы в тексте, а ведь размер солнечных пятен на метровом изображении его диска будет около 1 см – такие детали трудно будет не заметить.

Итог: теоретически древние греки могли бы использовать классическую обскуру для изучения поверхности Солнца!

Опыт

Для проверки наших теоретических представлений о качестве изображения в камере-обскуре мы поставили опыт: заменили объектив у фотоаппарата «Зенит» кусочком фольги с булавочным отверстием и сфотографировали с помощью этого «объектива» специально изготовленную таб-

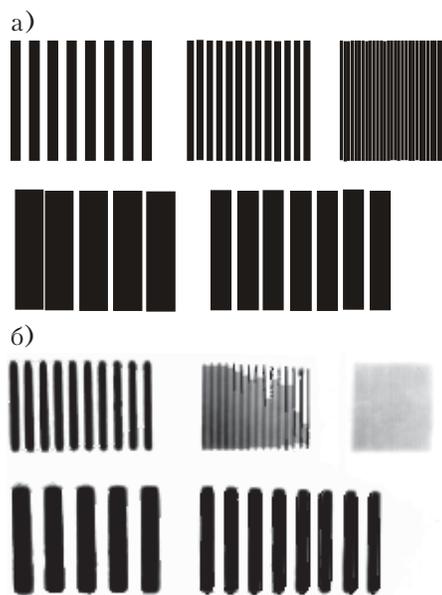


Рис. 7. Тестовая таблица (а) и ее изображение (б), сфотографированное камерой-обскурой на основе фотоаппарата «Зенит» ($D = 0,42$ мм, $F = 4,6$ см)

лицу (рис. 7). Расстояние от таблицы до отверстия было 30 см, а от отверстия до пленки – 4,6 см. Мы испытали три отверстия с диаметрами 170, 420 и 840 мкм. Таблица освещалась настольной лампой, чувствительность фотопленки была 64 ед., а экспозиции составляли от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от диаметра отверстия. Сделав отпечатки с негативов, мы определили по видимости линий таблицы на фотографиях предельный угол разрешения камеры. Он оказался даже немного меньше расчетного, что, по-видимому, объясняется очень высокой контрастностью исходного изображения и его линейным характером: прямые линии легче выявляются среди шумов изображения, чем точки. В целом же наша простая теория, как видим, вполне согласуется с экспериментом.

Убедившись в этом, мы решили, что пора наблюдать Солнце и попытаться с помощью камеры-обскуры увидеть на нем пятна. Эксперимент был поставлен 19 мая 1998 года в Астрономическом институте им. П.К.Штернберга (МГУ) при любезном содействии старшего научного сотрудника отдела исследования Солнца И.Ф.Никулина. Создать камеру длиной 100 и даже 50 метров нам, к сожалению, не удалось. Мы использовали в качестве корпуса обскуры трубу вертикального солнечного телескопа длиной 17 м. Зеркальный объектив этого инструмента находится в его нижней части, поэтому труба до объектива представляет просто светозащищенный объем без оптических элементов. Удобно и то, что система плоских зеркал (целостат) перед трубой телескопа постоянно поддерживает направление его оптической оси на Солнце. Входное отверстие трубы мы закрыли плотной крышечкой с круглой дырочкой диаметром 5 мм. В нижней части трубы на листе белой бумаги мы увидели яркое изображение Солнца диаметром 16 см с хорошо различимой группой из двух пятен. Это был момент торжества – солнечный телескоп-обскура действует!

Последующее изучение Солнца в нормальный оптический инструмент показало, что в этот день на поверхности нашего светила действительно были пятна: группа из двух больших пятен с размерами $15''$ и $17''$, разделенных расстоянием в $1'$, а также

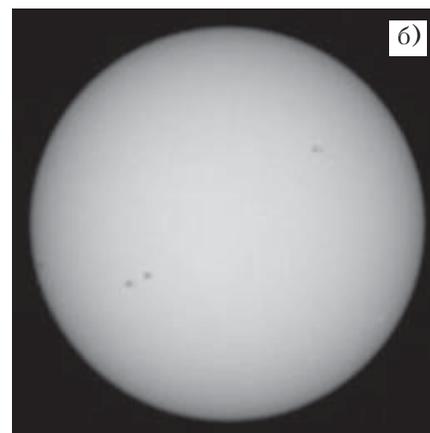
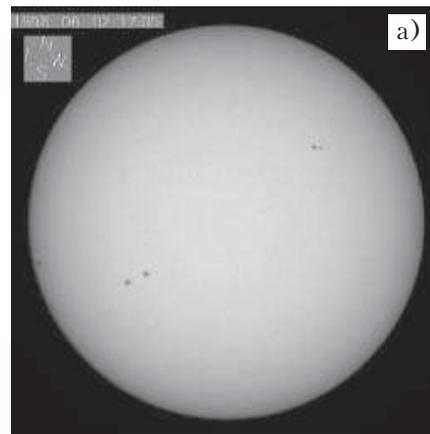


Рис. 8. Изображения поверхности Солнца, полученные 2 июня 1998 года с помощью оптического телескопа (а) и камеры-обскуры (б)

несколько маленьких с размерами $3 - 5''$. Маленьких пятен с помощью обскуры мы не заметили, а два больших пятна (впрочем, вполне рядовых для Солнца) были весьма отчетливо видны по отдельности. Мы продолжили наблюдения и в последующие дни, отмечая по движению пятен вращение Солнца. На фото на рисунке 8 показана поверхность Солнца в день 2 июня 1998 года, сфотографированная с помощью солнечного телескопа (а) и полученная на экране нашего телескопа-обскуры (б).

Галилей и Фабрициус открыли солнечные пятна лишь после изобретения оптического телескопа, хотя, как мы теперь видим, такая возможность существовала еще во время египетских пирамид. Быть может, эта мысль натолкнет читателей «Кванта» на размышления о неиспользованных возможностях нашего времени? Кстати, Фабрициусу, когда он открыл солнечные пятна, было немногим более 20 лет.

