

Солнечные пятна и камера-обскура

СУРДИН В.Г.,
кандидат физико-математических наук
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга

ЗАГАДКА КЕПЛера И ФАБРИЦИУСА

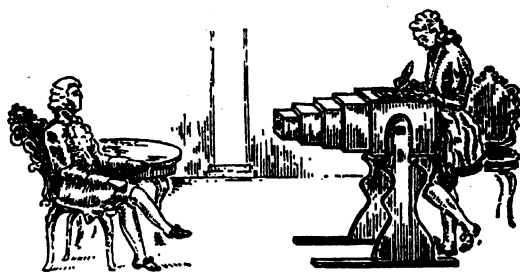
Систематические наблюдения поверхности Солнца, как известно, начались лишь после изобретения Галилеем телескопа. Однако в трудах по истории астрономии встречаются сообщения, что в начале XVII в. детали солнечной поверхности наблюдали с помощью камеры-обскуры. Известно, например, что независимо от Галилея пятна на Солнце открыл в 1611 г. немецкий астроном Иоханнес Фабрициус (1587-1616), используя для наблюдений "телескоп и камеру-обскуру" (Encyclopaedia Britannica). Впрочем, еще в 1609 г. Кеплер опубликовал сообщение о наблюдении 18 мая 1607 г. на изображении солнечного диска в камере-обскуре маленького темного пятна, принятого им за Меркурий (А.И. Еремеева "Астрономический календарь 1987", М., Наука, 1986, с. 271). Каковы конструкция и параметры тех приборов, которыми пользовались Кеплер и Фабрициус? Почему эти наблюдения были проведены только в начале XVII в.?

ЧТО ЖЕ ТАКОЕ "КАМЕРА-ОБСКУРА"?

В учебниках физики камера-обскура (лат. "темная комната") описана как затемненное помещение с маленьким отверстием в стене, создающим на противоположной стене перевернутую про-

екцию освещенного пейзажа. Принцип камеры-обскуры, по-видимому, был известен еще древним грекам. Ею пользовались арабские ученые, а в Европе нового времени ее впервые подробно описал Леонардо да Винчи (1452-1519). 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; необходимо абсолютно темное помещение и адаптированные к мраку глаза, чтобы его заметить.

Но уже к середине XVI в., когда техника изготовления очковых линз заметно усовершенствовалась, камера-обскура была оснащена однолинзовым объективом и зеркалом (Марио Льюцци "История физики", М., Мир, 1970, с. 60), в результате чего изображение в ней стало ярким и прямым. Она приобрела большую популярность, в особенности, среди художников, которые пользовались ею для точной зарисовки пейзажей. Существовали крупные обскуры – в человеческий рост; были и портативные. Фактически, этот нехитрый оптический прибор стал прототипом фотоаппарата. К сожалению, после введения линзового объектива камера-обскура не изменила своего названия. Во избежание путаницы ее следовало бы называть линзовой проекци-



Старинная линзовая портативная проекционная камера. До сих пор такие устройства по недоразумению называют камерами-обскурами (рисунком из книги "Краткий справочник фотолюбителя". Под ред. Н.Д. Панфилова и А.А. Фомина. М., Искусство, 1984)

онной камерой в отличие от классической камеры-обскуры, "объективом" которой служит лишь простое отверстие. Совмещение в одном термине двух принципиально различающихся приборов усложняет анализ технологического прорыва Нового времени, приводя иногда к полному непониманию ситуации.

Например, та же Encyclopaedia Britannica сообщает, что "для первых опытов по фотографии в 1820-х и 1830-х гг. использовались камеры-обскуры". Попытка отождествить названный прибор с классической камерой-обскурой вызывает лишь недоумение: при известных качествах изображения и чувствительности фотопластинок тех лет расчет необходимой экспозиции дает фантастические значения. Совершенно очевидно, что в первых опытах по фотографии использовались линзовые камеры. А вот с наблюдениями Солнца ситуация обстоит несколько сложнее и значительно интереснее.

КАКОВЫ ВОЗМОЖНОСТИ КЛАССИЧЕСКОЙ ОБСКУРЫ?

Каждый любитель астрономии знает, что простую камеру-обскуру можно использовать для наблюдения частных фаз солнечного затмения. Чтобы проверить это, даже нет нужды строить специальную камеру: щели между листьями деревьев успешно работают во время затмений как настоящая обскура, отбрасывая на землю изображения "серпиков". Но эти наблюдения не дают никакой дополнительной информации о природе Солнца – мы и так знаем, что оно круглое, а во время затмений де-

монстрирует фазы. А может ли классическая обскура показать нам детали солнечной поверхности, недоступные невооруженному глазу? Например – солнечные пятна.

Разумеется, изредка очень большие солнечные пятна в определенных условиях наблюдали невооруженным глазом, о чем сохранились исторические записи. Роль природного светофильтра при этом выполняли облака, дым пожара или толстый слой воздуха на восходе или закате. Угловой размер крупнейшей групп пятен достигает 3–4', т.е. вполне ощутим для невооруженного глаза при соответствующем ослаблении яркости света. Но такие пятна появляются крайне редко (в XX в. всего несколько случаев), а необходимые для их наблюдения условия сопутствуют им еще реже. Угловой размер рядового солнечного пятна около 0,3', т.е. оно совершенно недоступно даже самому зоркому глазу. Поэтому до изобретения линзовой оптики солнечные пятна не стали предметом научного анализа. Фактически, не обсуждался даже факт их существования. Вопрос – а можно ли заметить объект столь малого углового размера с помощью классической камеры-обскуры?

С одной стороны, дифракция света на входном отверстии диаметра D , подчиняясь закону волновой оптики, ограничивает разрешающую способность камеры, согласно критерию Рэлея, углом (в радианах)

$$\alpha_1 = 1,2 \lambda/D,$$

где λ – длина световой волны.

С другой стороны, в приближении геометрической оптики разрешающая способность обскуры ограничена диаметром входного отверстия. Если расстояние от "объектива" до экрана F , то предельный угол разрешения камеры составит $\alpha_2 = kD/F$, где константа $k < 1$

Предельный угол разрешения α камеры-обскуры в зависимости от диаметра ее отверстия (D) для $F = 10$ метров и $\lambda = 5500$ А. Пунктирными линиями показаны значения α_1 и α_2

должна быть определена экспериментально. Ее точное значение зависит от контраста деталей исходного объекта, яркости его изображения, и даже от геометрии характерных деталей изображения. (Например, контрастные линейные структуры, — “зебра”, — различаются и при весьма сильном наложении пучков света от соседних точек изображения.) Экспериментируя с лабораторной камерой-обскурой, мы выяснили, что для высококонтрастных объектов, подобных солнечным пятнам, можно принять $k \approx 1/4$.

Поскольку оба указанных эффекта — геометрический размер пучка и дифракция — накладываются друг на друга, можно, не мудрствуя лукаво, считать полный предельный угол разрешения камеры равным

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2.$$

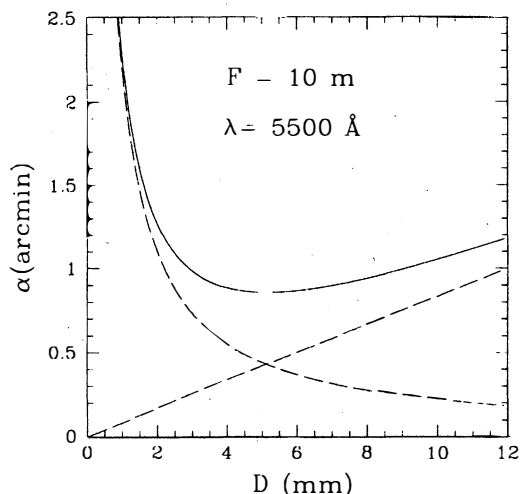
Существует оптимальный диаметр отверстия (D_{opt}), при котором достигается наилучшая разрешающая способность камеры данного размера F ; ее характеризует минимальное значение угла разрешения (α_{min}):

$$D_{opt} = \sqrt{4,8\lambda F} \text{ и } \alpha_{min} = \sqrt{1,2\lambda/F}$$

Приняв для визуальных наблюдений $\lambda = 5500$ А, получим удобные формулы оценки возможностей оптимальной камеры-обскуры:

$$D_{opt} = 1,6 \text{ мм} \times \sqrt{F/1 \text{ м}} \text{ м и } \alpha_{min} = 170'' \times \sqrt{1 \text{ м}/F}$$

Как видим, теоретически при оптимальном выборе входного отверстия обскуры длиной 20–30 м должна показать нам хорошо развитые солнечные пятна (диаметром около 30"), а со 100-метровой камерой можно было бы систематически наблюдать даже весьма мелкие пятна. Хотя указанные размеры впечатляют, вспомним, что древние со-



оружения порой имели весьма внушительные размеры: высота сводов готических храмов уже в XII в. достигала 50 м, а квадрант в обсерватории Улугбека (начало XV в.) имел радиус 40 м. К тому же это были весьма темные помещения, солнечный свет проникал в них лишь через небольшое отверстие.

Теперь самое время подумать о приемнике света: у древних наблюдателей, которые могли бы использовать камеру-обскуру, не было даже фотопластинок. А достаточно ли яркое изображение дает гигантская обскура для того, чтобы увидеть его глазом на белом экране?

Рассмотрим предельный случай. При длине камеры в 100 м диаметр изображения солнечного диска составит почти 1 м! На эту площадь распределится свет, прошедший сквозь 1,6-см отверстие объектива. Освещенность ослабеет почти в 4 тыс. раз! Как известно, в ясный день освещенность от Солнца составляет 10^5 люксов. Значит освещенность изображения в нашей камере будет около 25 люксов. Это в сто раз больше, чем от полной Луны, т.е. вполне достаточно, чтобы в темноте различить контрастное изображение на белом листе.

Итак, мы пришли к парадоксальному выводу: древние ученые задолго до изобретения линзовой оптики могли наблюдать солнечные пятна!

ПЕРВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ?

Я не историк науки и поэтому, к сожалению, не могу с полной ответственностью сказать, что никогда с помощью классической камеры-обскуры осознанно или случайно люди не наблюдали солнечных пятен. Во всяком случае, в литературе я упоминаний об этом не нашел. Даже если это происходило в силу случайного стечения обстоятельств, то никак не отразилось на развитии науки (иначе мы узнали бы о вращении Солнца задолго до открытий Галилея и Фабрициуса).

Поэтому мне показалось любопытным проверить на практике приведенные выше теоретические результаты и, может быть впервые, предпринять осознанные наблюдения деталей солнечной поверхности с помощью классической камеры-обскуры.

Первый эксперимент был поставлен 19 мая 1998 г. в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга (МГУ) при любезном содействии сотрудника отдела исследования Солнца И.Ф. Никулина. В здании ГАИШ

находится вертикальный солнечный телескоп, широкая труба которого длиной 18 м пронизывает здание института от крыши до подвала. Моя идея заключалась в том, чтобы, используя трубу и плоские зеркала этого инструмента (целостат и вторичное плоское зеркало), закрыв зеркало объектива дополнительным плоским зеркалом, получить "ломаную" обскуру с эквивалентной длиной около 40 м. Но полностью реализовать эту идею не удалось: качество зеркал оказалось недостаточно высоким для создания идеального изображения. Наибольшую "грязь" вносил дополнительное плоское зеркало, взятое от проектора для микрофильмов. Единственным результатом этого опыта оказалось то, что в 40-метровой обскуре с оптимальным входным отверстием (диаметром 1 см) яркость изображения Солнца вполне достаточна для его изучения даже в не полностью затемненном помещении.

Отказавшись от идеи "ломаной" обскуры (а жаль – можно было бы ввести новый термин: обскура-куде!), мы использовали лишь однократный проход света по трубе телескопа, получив классическую обскуру, лишенную каких-либо, – даже плоских, оптических элементов. Если не считать, что на вход вертикальной камеры солнечный свет подавался с помощью целостата. В наглухо закрытом входном проеме трубы было оставлено круглое отверстие диаметром 6 мм, а внизу, на расстоянии около 17 м от входа, располагался белый экран. На экране мы увидели яркое изображение Солнца диаметром 16 см с хорошо различимой группой из двух пятен. Солнечный телескоп-обскура действует!

Последующее изучение Солнца в нормальный оптический инструмент показало, что на поверхности светила действительно есть группа из двух пятен с диаметрами 15" и 17", разделенных расстоянием в 1.5', а также несколько ма-

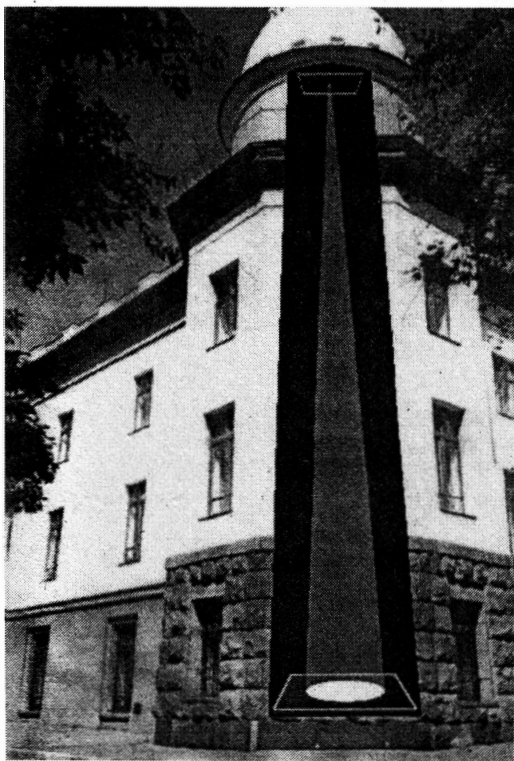
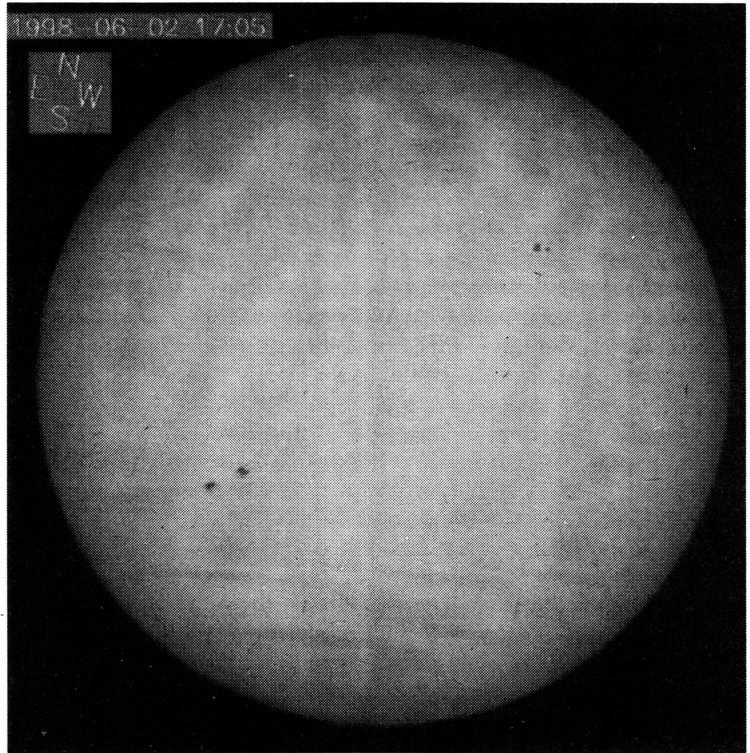


Схема вертикальной камеры-обскуры в здании Государственного астрономического института им. Штернберга

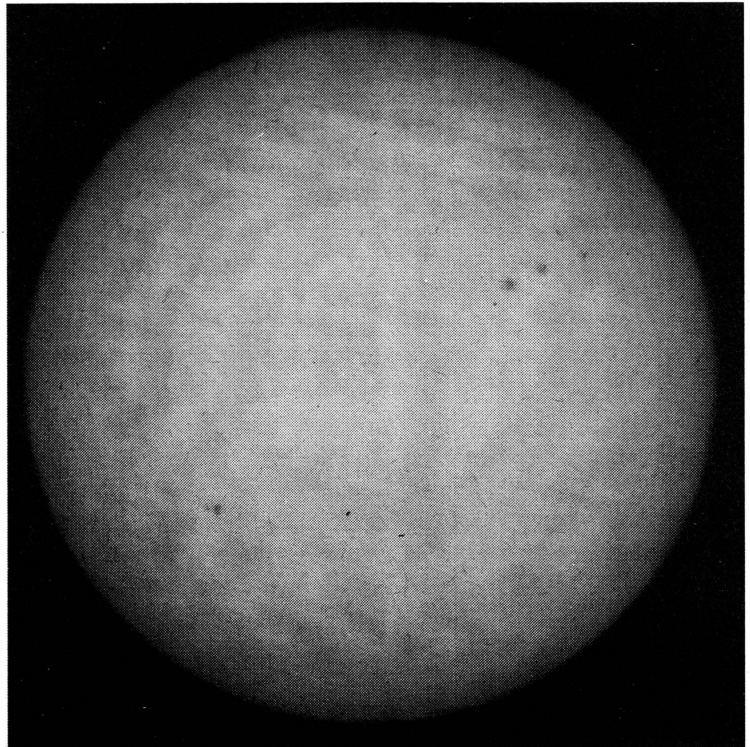
Изображения поверхности Солнца, полученные 19 мая и 2 июня 1998 г. с помощью оптического телескопа (а) и камеры-обскуры (б)

леньких пятен размерами 3–5", которых с помощью обскуры мы не заметили. Учитывая, что теоретическое разрешение нашей камеры около 40", можно считать такой результат весьма удовлетворительным. В следующие дни мы уверенно наблюдали развитие и гибель пятен, их перемещение по диску Солнца. Для иллюстрации качества изображения приводим фотографию Солнца в белом свете, полученную 2 июня в обсерватории Big Bear (США), и это же изображение, размытое численным методом до такого состояния, каким оно представлялось нам при наблюдении в этот же день на экране обскуры.

Конечно, убедительнее было бы сфотографировать полученное в обскуре изображение и продемонстрировать его читателям. Но как сделать камеру с затвором, но без оптических элементов под фотопластинку 18 × 18 см? Чтобы получить документальное свидетельство, вероятно, следует сделать фотографию с экрана; но от этого пострадает качество. Надеюсь, что читатели простят мне вольность с изготовлением электронного изображения, поскольку именно так, на мой взгляд, можно наиболее точно передать в печати образ Солнца, увиденный нами при помощи камеры-обскуры.



а



б

В принципе, можно предложить несколько модификаций проведенного эксперимента, которые позволят увеличить размер камеры и приблизить условия наблюдений к “доисторическим”. Например, использовать в качестве корпуса камеры лежащую на земле плеть труб для нефтепровода, глубокий колодец, ствол шахты, старую заводскую трубу или (идеальный вариант!) пещеру с узким входом.

Большое неудобство подобного прибора – его неподвижность. В этом случае идеальный выход, как мы убедились, – использовать целостат. Но, желая сохранить “историческую чистоту” эксперимента, от него следовало бы отказаться. Совместить функции примитивного целостата и входного отверстия, я думаю, можно, используя маленькое зеркало диаметром $D_{opt} \approx 1$ см, разумеется, если историки подтвердят, что такие крошечные зеркала высокого качества имелись в далекие времена.

Иную возможность эксперимента с гигантской обскурой дают крупные архитектурные сооружения – средневековые готические соборы или даже античные купольные сооружения, наподобие римского Пантеона, который, кстати, идеально подходит для создания обскуры с “фокусным расстоянием” около 50 м. В отличие от вытянутых готических зданий, у круглого Пантеона нет проблем с “наведением” и “гидированием” – в нем можно проводить наблюдения практи-

чески в любое время дня. Такая, лишенная окон конструкция, с единственным отверстием в верхней части купола, которое требуется лишь соответствующим образом “задиафрагмировать”, как будто бы специально создана для экспериментов с солнечным светом. Хотя я прекрасно понимаю, что подобное предложение было бы воспринято в Древнем Риме не лучше, чем высказанное в наши дни пожелание переоборудовать Большой Кремлевский дворец для экспериментов по физике высоких энергий.

Тем не менее, вполне возможно, что в некоторых гигантских сооружениях прошлого ситуация камеры-обскуры складывается произвольно. Мне вспоминается рассказ венгерского коллеги о том, что путешествуя по Италии, он обратил внимание в одном из соборов на эффект обскуры, причем диаметр изображения Солнца был 20–25 см. Не имея под руками чистого белого листа, мой знакомый не смог тогда проверить качество изображения и не попытался разглядеть детали солнечной поверхности. Быть может кому-то из читателей тоже приходилось наблюдать подобное? Рад буду узнать об этом.

Для меня эксперимент с гигантской камерой-обскурой оказался весьма захватывающим: он доказал, что древние ученые вполне могли бы открыть солнечные пятна и исследовать вращение и активность Солнца еще в незапамятные времена, если бы у них возникла такая идея.