

ДИФФРАКЦИЯ СВЕТА

на запотевшем стекле



МАТЮНИН Виталий Игоревич – ученик 11 класса Новосибирской гимназии № 1. В течение 3-х лет участвует в ТЮФ в составе команды Школы Пифагора, дважды был капитаном сборной России на Международном турнире юных физиков *IYPT*. Увлечен физикой благодаря старшему брату



МАТЮНИН Вячеслав Игоревич – студент 3-го курса факультета общей и прикладной физики Московского физико-технического института, учится на кафедре физики элементарных частиц

В. И. МАТЮНИН, В. И. МАТЮНИН, А. И. ЩЕТНИКОВ



ЩЕТНИКОВ Андрей Иванович – заместитель директора по научно-методической работе ООО «Фарадей» (Новосибирск). Автор и соавтор 80 научных работ. Руководитель команды юных физиков Школы Пифагора (Новосибирск)

*Посмотрев в темноте через запотевшее стекло на уличный фонарь или луну, мы увидим вокруг источника света концентрические радужные кольца – венец. Задача исследовать это красивое оптическое явление была предложена на Международном турнире юных физиков *IYPT-2012*. Для этого авторам – юным физикам команды Школы Пифагора» и их руководителю, – потребовалось выполнить серию физических и компьютерных экспериментов по рассеянию света на нерегулярных микрообъектах*

На фото: концентрические радужные кольца вокруг луны – результат дифракции света на микроскопических водяных капельках запотевшего стекла

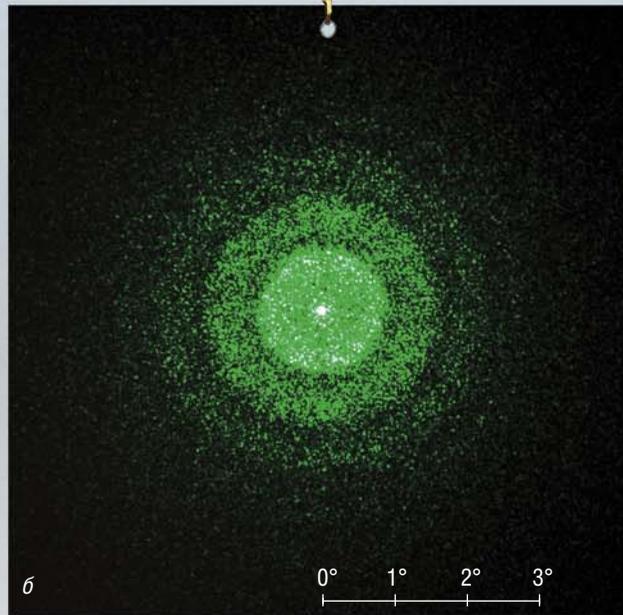
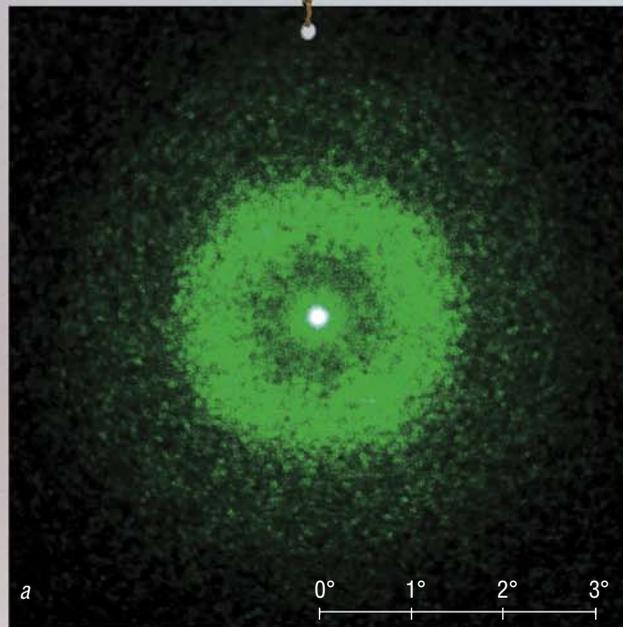
Ключевые слова: рассеяние света, дифракция Фраунгофера, запотевшее стекло, международный ТЮФ.
Key words: light scattering, Fraunhofer diffraction, misty glass, *IYPT*

Белый лунный свет, как известно, складывается из лучей разного цвета, поэтому кольца вокруг луны получаются радужными. Чтобы упростить наблюдаемую картину, мы посветили на запотевшее стекло монохроматическим лучом лазера – и получили на экране за стеклом аналогичные кольца.

Похожее явление демонстрируется на лекциях по физике при описании дифракции Фраунгофера на непрозрачном диске. Для этого опыта на стеклянную пластинку наносится порошок ликоподия, который представляет собой сухие споры разных видов плаунов размером около 33 мкм. Если направить луч лазера на такую пластинку, то на экране за ней будут наблюдаться дифракционные кольца. Угловой размер темных колец приближенно определяется по формулы $\theta \approx n\lambda/d$ (n – порядковый номер темного кольца от центра, λ – длина световой волны, d – размер спор). Если свет рассеивается на нескольких случайно расположенных неперекрывающихся дисках одинакового размера, то картина рассеяния будет в точности такой же, как и для одного диска (Борн, Вольф, 1973).

На дифракционной картине света, прошедшего сквозь пластинку со спорами, отчетливо выделяется крупное яркое пятно, которое окружено менее светлыми кольцами. Однако в опыте с запотевшим стеклом на месте этого пятна располагается темный круг, лишь в центре которого видна небольшая яркая точка – она создается лучами, прошедшими через стекло практически без рассеяния.

© Виталий И. Матюнин, Вячеслав И. Матюнин, А. И. Щетников, 2014



Если на пути монохроматического лазерного луча, падающего на белый экран, поставить запотевшее стекло, то на экране мы увидим дифракционные кольца вокруг яркого центрального пятна, куда попадают прямые лучи. Внутри первого светлого кольца четко выделяется темное кольцо (а).

При дифракции света лазера на стекле, покрытом порошком ликоподия, это темное дифракционное кольцо практически неразличимо, так что первое светлое кольцо фактически превращается в круг (б).

Copyright 2011 by the Regents of the University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA

Задачи Международного турнира физиков IYPT предполагают, что команды сами определяют ход своего исследования. Мы решили, что ключевой частью нашего решения должно стать объяснение различий в двух случаях дифракционного рассеяния — на спорах и на каплях влаги из воздуха, покрывающих запотевшее стекло.

В соседском окружении

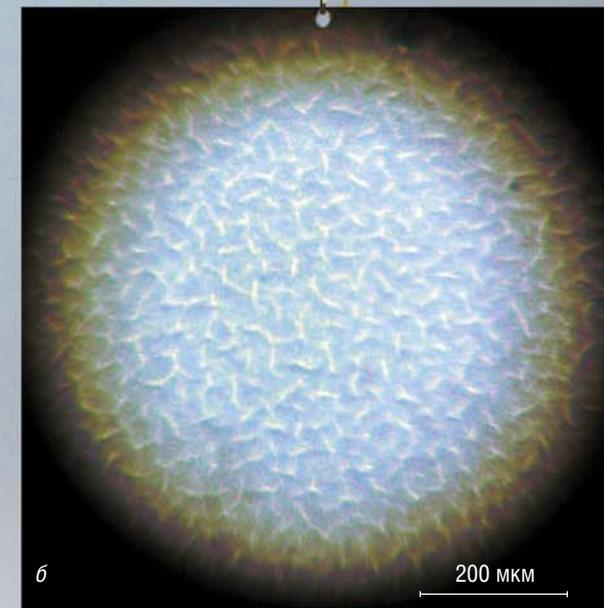
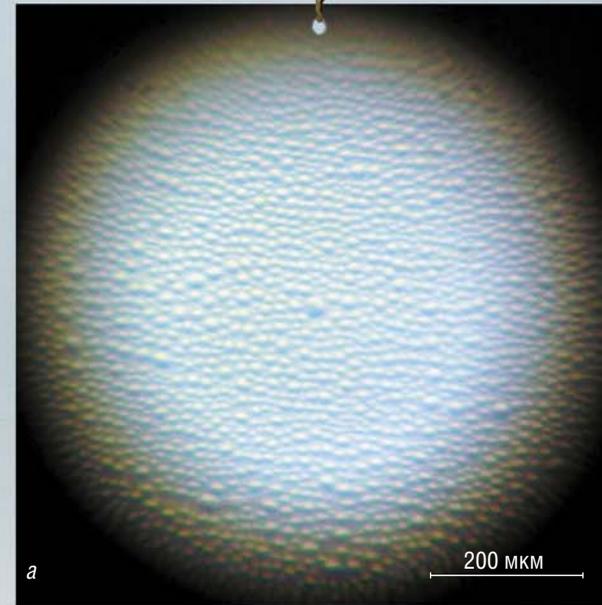
Сделав фотографию запотевшего стекла через микроскоп, нам удалось определить размер капель: он оказался в диапазоне 10–20 мкм. Согласно теории дифракции, для капель со средним диаметром ($d \approx 15$ мкм) и для зеленого лазерного луча (длина волны $\lambda = 0,55$ мкм) характерный угловой размер внутреннего кольца должен быть $\theta \approx \lambda/d = 0,037$ рад, т. е. около 2° . Внешний радиус первого светлого кольца на соответствующей дифракционной картине оказался действительно близок к этому значению.

Но чем отличается стекло с мелкими водяными каплями от стекла со спорами? Споры могут располагаться на стекле более хаотично: между положением отдельных частиц нет никакой связи, они могут пе-

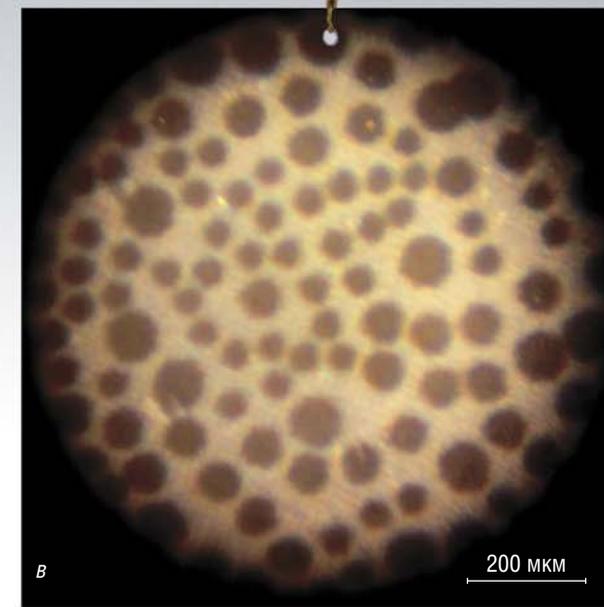
рекрываться. Но соседние капли не могут налагаться друг на друга, между ними всегда имеется какой-то промежуток. Это означает, что в расположении капель на стекле обязательно присутствует ближний порядок, схожий с ближним порядком в расположении молекул и атомов в жидкостях и аморфных веществах (Китайгородский, 1952).

Между каплями и спорами имеется еще одно различие: споры непрозрачны, а капли — это маленькие прозрачные линзы. Чтобы показать, что особенности дифракционной картины определяются в первую очередь наличием ближнего порядка в расположении капель, а не их прозрачностью, мы поставили эксперимент, техническая сторона которого была заимствована из статьи Cowley *et al.* (2005).

Мы импортировали фотографию капель на стекле в графический редактор и обвели каждую каплю по окружности. Таким образом был получен квадратный блок, в котором помещалось около 400 окружностей. Затем его масштабировали и размножили так, чтобы лист размера А4 был весь заполнен окружностями с диаметром 0,5–1,0 мм. После окраски фона в черный цвет изображение распечатали на лазерном принтере.



Микроскопическое исследование позволило определить размер капель влаги на запотевшем стекле и установить наличие ближнего порядка в их расположении (а). На фотопленке, испорченной в результате неправильной обработки, видна сеть трещин, которые также обладают ближним порядком (б). На правильно обработанной фотопленке (в) изображение заштрихованных капель получилось без особых искажений



Эту распечатку затем сфотографировали на черно-белую негативную пленку высокого разрешения, в результате чего белые круги на распечатке превратились в темные круги на фотопленке. Размеры кадра меньше размеров бумажного листа в десять раз, поэтому темные круги на фотопленке имели размер 50–100 мкм — в пять раз крупнее, чем диаметр исходных водяных капель.

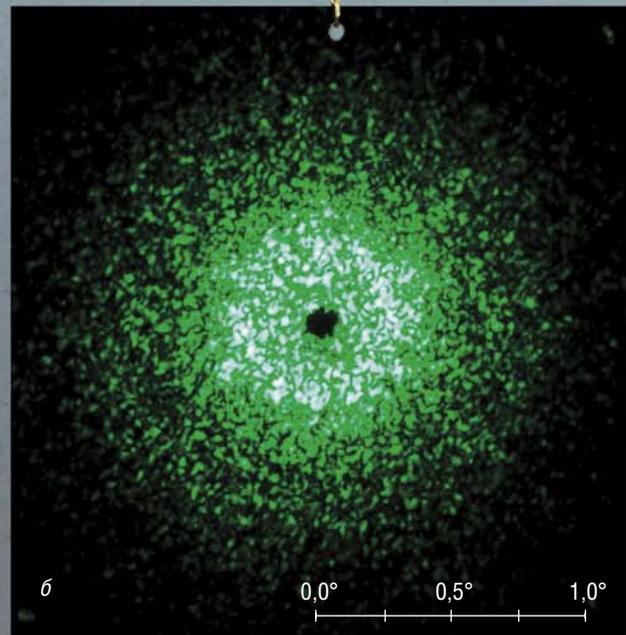
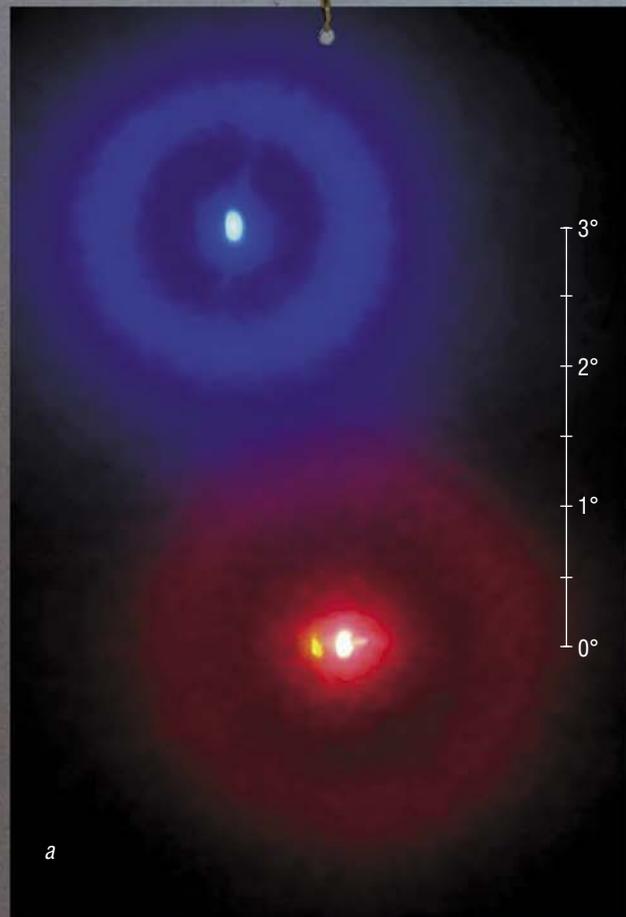
Мы ожидали, что, посмотрев через эту фотопленку на источник света, увидим все ту же картину рассеяния, только угловые размеры дифракционных колец будут соответственно меньше по сравнению со случаем стекла с ликоподием.

Здесь надо признаться, что правильно провести эксперимент редко удается с первого раза. Поэтому контрастность нашей первой проявленной пленки оказалась такой, что темных кружков на ней вообще не было видно. Но самое неожиданное произошло тогда, когда мы глянули через эту «испорченную» пленку на источник света: к своему удивлению, мы увидели вокруг них точно такие же кольца, как и прежде!

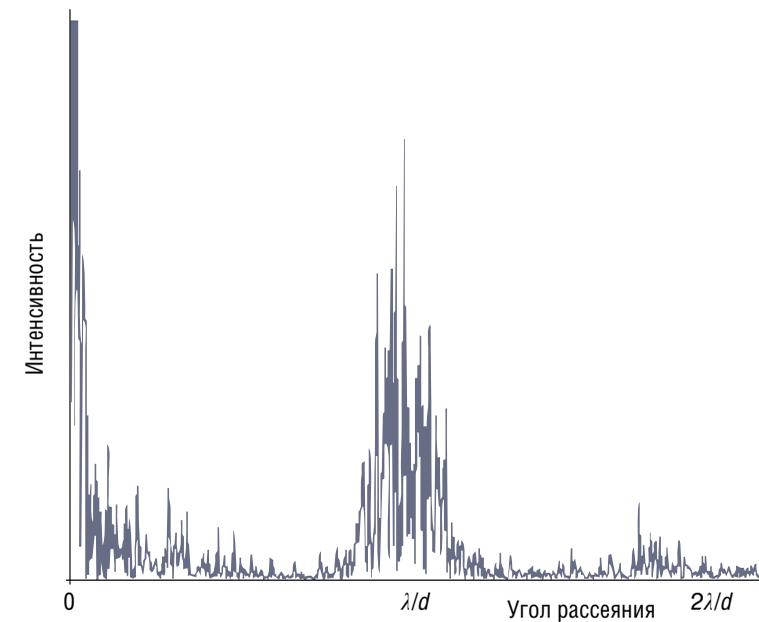
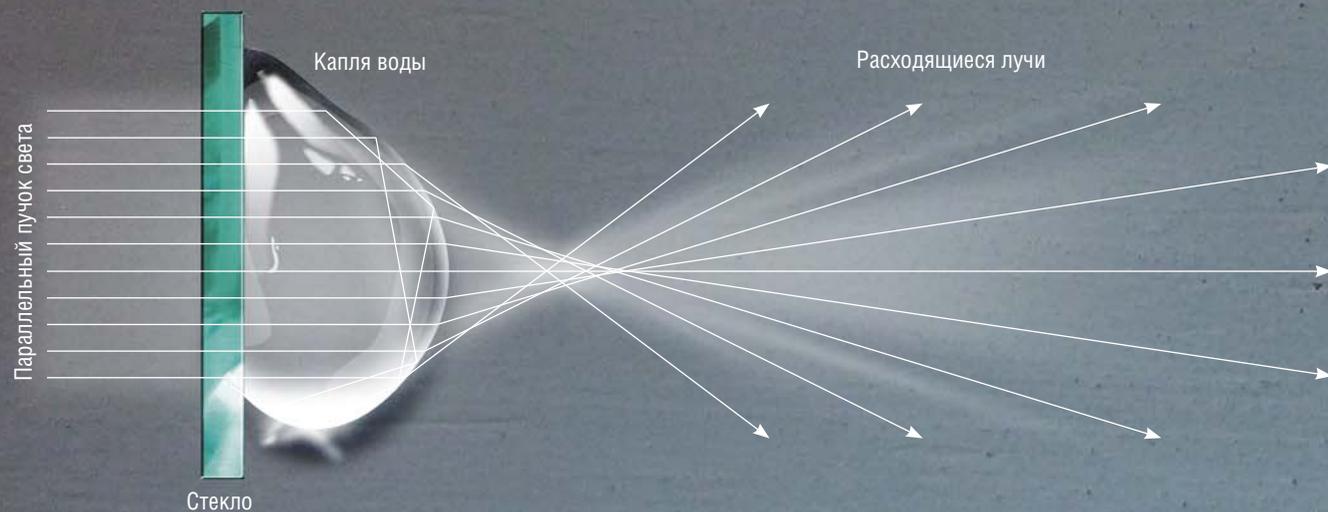
Исследовав эту пленку под микроскопом, мы обнаружили, что она была вся покрыта «червячками» шириной

около 25 мкм. Оказалось, что при неправильной обработке желатиновый слой, нанесенный на пленку, может ретикулироваться — на высохшем желатине образуется множество мелких трещин. Поскольку прозрачность трещин выше прозрачности желатина, пленка становится оптически неоднородной, и свет дифрагирует на этих неоднородностях. Они обладают ближним порядком, поэтому полученная дифракционная картина оказалась схожей с той, что была получена через запотевшее стекло.

При увеличении выдержки (времени экспозиции) и соблюдении всех условий проявки нам удалось



При дифракции света на ретикулированной фотопленке (а) хорошо заметно темное кольцо между первым светлым кольцом и центральным пятном, что характерно для дифракции на запотевшем стекле. При рассеивании лазерного луча на фотопленке с затемненными кружочками вместо капель мы видим схожую дифракционную картину. Меньший угловой размер колец обусловлен тем, что кружочки на фотопленке в несколько раз крупнее, чем капельки влаги на стекле (б; черное пятно в центре – отверстие в экране для нерассеянного центрального луча, сделанное для устранения засветки изображения)



получить хорошее контрастное изображение с четкими кругами. Дифракционная картина для такой пленки сохранила основные характерные особенности: центральный узкий нерассеянный пучок света был окружен темной круговой областью, а угловой размер первого светлого кольца ($0,3^\circ$) также совпал с теоретической оценкой.

В дополнение к этому эксперименту мы создали компьютерную модель фраунгоферовского рассеяния света, которая позволяет получить зависимость интенсивности света от угла рассеяния. В этой модели рассеяние происходило на дифракционной решетке, в которой ширина прозрачных щелей и непрозрачных промежутков между ними случайно менялась в заданных пределах. Кстати, неравномерности интенсивности света, которые видны как на фотографиях картин рассеяния, так и в компьютерных экспериментах, — так называемые *спеклы* — появляются благодаря ограниченному числу рассеивающих неоднородностей (капелек, кружочков, дифракционных щелей), из-за чего суммирование фазы взаимодействующих световых волн может давать значительные статистические выбросы.

Таким образом, характерные особенности дифракционной картины, наблюдаемой в опытах с запотевшим стеклом, обуславливаются наличием ближнего порядка в расположении капель. В такой дифракционной картине обязательно имеется центральная темная область, в отличие от дифракции на случайно расположенных рассеивающих частицах.

Капля воды на стекле представляет собой короткофокусную линзу, которая собирает параллельный пучок света в широкоугольный световой конус, расходящийся за фокусом. Значительная доля рассеянного таким образом света оказывается потерянной для наблюдателя, как если бы вместо прозрачных капель на стекле были нарисованы темные кружки

Компьютерное моделирование дифракции Фраунгофера на микроскопических неоднородностях позволяет получить зависимость интенсивности света от угла рассеяния. На графике показан результат расчета для неравномерной дифракционной решетки с 200 параллельными щелями шириной d , в расположении которых имеется ближний, но отсутствует дальний порядок

Н адо сказать несколько слов о том, какую роль в исследуемом нами явлении играет прозрачность капелек влаги на запотевшем стекле. Каждая капля — это собирающая линза. В приближении геометрической оптики такая линза превращает плоскопараллельный пучок света в световой конус, расходящийся за фокусом. Если линза является толстой и короткофокусной (а капли именно таковы), величина угла при вершине конуса будет велика в сравнении с относительно малыми углами дифракционного рассеяния. Поэтому такую линзу в нашей задаче вполне можно было заменить непрозрачным кружком, что мы и делали.

Литература

Cowley L., Laven P., Vollmer M. *Rings around the sun and moon: coronae and diffraction* // *Physical Education*. 2005. V. 40. P. 51–59.

Борн М., Вольф Э. *Основы оптики*. М.: Наука, 1973.

Китайгородский А.И. *Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и аморфных тел*. М.: ГИТТЛ, 1952.

Миннарт М. *Свет и цвет в природе*. М.: Наука, 1969.

Авторы благодарят кинооператора С. Шуберта за техническую помощь в эксперименте с фотопленкой