

Глава 4. Микромир без микроскопа

**Исследовательская группа: Мария Бородина, Евгений Дзябура,
Антон Медведев
Научный руководитель: П.П. Григал**

Каждый из нас, так или иначе, имел дело с насекомыми. Кто-то бегал с сачком за бабочками и стрекозами по зелёным лугам, кто-то увлечённо наблюдал за работающими муравьями, кто-то собирал колорадских жуков, кто-то в походах отчаянно отмахивался от комаров и слепней, кто-то, в конце концов, уничтожал тараканов и мух...

Разнообразие насекомых поражает.

На сегодняшний день описано более миллиона их видов, а по оценкам некоторых учёных, всего их может быть 5-6 миллионов. Для сравнения – количество видов млекопитающих не превышает 5 тысяч. Одной из причин такого колоссального разнообразия насекомых послужил, наверное, их маленький размер. Скажем, те же млекопитающие из-за некоторых особенностей физиологии не могут быть меньше 1,5 – 2 грамм (карликовая белозубка). А вот насекомые – гораздо мельче. Соответственно, с точки зрения какого-нибудь муравья, пространства на нашей планете намного больше, чем с точки зрения какого-нибудь медведя или волка.

Насекомых просто больше. Намного больше, чем более крупных животных. Но это не стало бы причиной такого колоссального их разнообразия, если бы не дополнялось ещё рядом факторов. В частности, именно у насекомых и членистоногих проявились некоторые стратегически важные эволюционные находки, давшие этим видам колоссальное преимущество перед остальными. Например – общественный строй у муравьёв и пчёл. Шестиугольные соты пчёл (оптимальное соотношение объёма ячейки и количества затрачиваемого на неё материала). Развитое обоняние и зрение.

Мир глазами насекомых

Кстати, о зрении... Глаза насекомых устроены совершенно иначе, нежели глаза млекопитающих или птиц. В школьном курсе физики и биологии разбирается, как работает зрение человека – свет проходит в глаз через зрачок, преломляясь в роговице,



хрусталике и стекловидном теле, и в результате формирует изображение на сетчатке. Изменение формы хрусталика позволяет глазу «настраиваться» то на ближние, то на дальние предметы.

У насекомых все совсем не так. Нет ничего похожего на камеру-обскуру, скорее – много коллиматоров (узких трубок, каждая из которых имеет очень маленький угол обзора). Такие трубки в глазу насекомых называются омматидиями и состоят из довольно небольшого числа клеток, среди которых фоторецепторных (воспринимающих свет) очень мало. Для сравнения – в глазу человека более 100 миллионов фоторецепторных клеток (палочек и колбочек). В глазу же насекомых – несколько сотен омматидиев (у рекорсменов – хищных стрекоз – до 50 тысяч).

Каждый омматидий обеспечивает один «пиксел» изображения. В результате мир для насекомого – картинка с разрешением примерно как у сотового телефона, а для самых «глазастых» из них – примерно как экран среднего КПК (для оценки: 240×320 – это 76.800 точек, что в полтора раза больше 50.000 омматидиев стрекозы-коромысла).

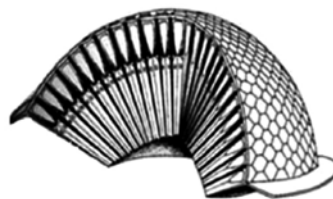


Рис.1. Схема строения фасеточного глаза насекомого

Согласились ли бы вы ограничить своё поле зрения экраном КПК? Вряд ли... Однако насекомым этого хватает. И не только им – фасетчатый глаз оказался настолько удачной эволюционной находкой, что был широко «внедрён» у других членистоногих, например, у ракообразных. В этом вы сами можете убедиться, если внимательно посмотрите в глаза раку или, скажем, замороженной креветке (последнюю сравнительно легко найти практически в любом продуктовом магазине).

Если бы подобным образом были устроены глаза человека, то для обеспечения того же качества изображения, что мы имеем с камерными глазами, потребовалось бы два фасетчатых глаза размеров практически с человеческую голову каждый. Пожалуй, это бы очень сильно изменило наши представления о красоте и гармонии...

А вот если бы насекомые захотели обзавестись глазами вроде тех, что у млекопитающих, то они были бы очень сильно разочарованы – на таких маленьких размерах большую роль играла бы дифракция и интерференция (картинка сильно размывалась бы), а в разрешении особо ничего не выиграли, хотя бы потому, что размер светочувствительных клеток ограничен снизу. Так что – каждому своё.

К слову, самые маленькие млекопитающие в большинстве своём очень близоруки и активно пользуются другими органами чувств: мыши – вибриссами (очень

чувствительные усы на мордочке), слухом и обонянием; а если взять тех же маленьких летучих мышей, то у них на широкую ногу поставлена эхолокация.

Но вернёмся к насекомым. Или, скорее, к креветкам.

Вторая жизнь королевской креветки

Изучать глаза настоящих насекомых порой довольно сложно. Во-первых их надо еще поймать, во вторых, возникает ряд этических проблем, особенно если речь идет о бабочках, да ещё и красивых... Нет уж, пусть лучше радуют глаз такими, какие они есть. Тем более что многие красивые бабочки, обитающие в средних широтах, занесены в Красную Книгу.

А вот креветки – другое дело. Всё равно их уже поймали и заморозили. Так что, если вы захочется заняться исследованиями в духе описанных ниже, то креветки – Ваш выбор.

Омматидии – многочисленные конусы, отграниченные один от другого слоями непрозрачных клеток и содержащие на «дне» светочувствительные клетки, покрыты сверху плотной прозрачной оболочкой. И эту оболочку можно осторожно снять с глаза замороженной креветки (предварительно её разморозив), и использовать как... дифракционную решётку.

Экспурс в волновую оптику

Чтобы было понятно, о чём речь пойдёт дальше, остановимся на волновой природе света и объясним, что же такое дифракционная решётка. Сначала объясним, что такое интерференция на механической модели.

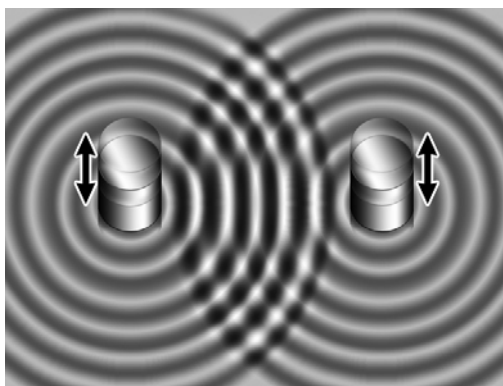


Рис. 2 Распределение гребней и впадин двух интерферирующих волн на воде

Опустим в воду два стержня и начнем колебать их с одинаковым периодом и постоянным сдвигом фаз. Такие источники волн называют когерентными. Известно, что у волны есть максимум (гребень) и минимум (впадина) отклонения от положения равновесия. При наложении двух волн есть места, где встречаются гребень с гребнем, тогда их суммарная амплитуда увеличивается и получается максимум отклонения от положения равновесия и максимум энергии.

Если же две волны встречаются гребень с впадиной, то они «гасят» друг друга и получается минимум энергии. Такая картина распределения энергии называется интерференционной. Главным условием интерференции является когерентность накладываемых волн.

Световые волны тоже дают интерференционную картину. Правда, получить два когерентных источника света очень сложно. Для этой цели Томас Юнг предложил использовать две малые щели. Он пропустил пучок света через узкое отверстие, затем с помощью двух щелей разделил этот пучок на два и получил на экране интерференционную картину. Таким образом, в опыте Юнга первичный пучок, полученный после первого отверстия, после прохождения сквозь щели интерферировал сам с собой.

Для получения накладывающихся когерентных колебаний световых волн часто используют дифракционную решётку. Дифракция света — это явление огибания светом препятствий. Огюстом Френелем было доказано, что дифракция, по сути, является следствием интерференции.

Простейшая дифракционная решетка представляет собой пластинку, на которой чередуются узкие одинаковые, прозрачные и непрозрачные полосы, параллельные между собой. Сумму ширины прозрачной и непрозрачной полосы принято называть периодом решетки и обозначать как d . Если на решетку направить узкий параллельный пучок света (рис. 3, а), то на краях отверстий свет отклонится от своего первоначального направления, и образуется множество когерентных источников. Они накладываются и дают на экране интерференционную картину.

Интенсивность светового излучения в данной точке экрана зависит от разности хода волн, сходящихся в ней. Разностью хода двух волн называют разность расстояний от источников этих волн до данной точки. Если разность хода равна четному числу полуволн, то будет максимум интенсивности. Если нечетному – минимум.

Рассмотрим две щели дифракционной решетки (рис. 3,б). Разность хода двух показанных на рисунке волн будет $AB = d \cdot \sin \alpha$. Расстояние до экрана (приблизительно 5 - 7 метров) намного больше периода решетки (например, для решетки 25 штрихов на один миллиметр – $d = 0,04$ мм). Значит, угол α – мал, и, если измерять его в радианах, оказывается, что величина угла примерно равна его же синусу и тангенсу:

$$\sin \alpha \approx \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha, \quad \operatorname{tg} \alpha \approx x/L$$

где L – расстояние до экрана, а x – расстояние от центрального максимума (самого яркого) до данной точки. Центральный максимум получается там, где разность хода двух волн равна нулю, т.е. это просто неотклоненный пучок.

Итак, $d \cdot \alpha = n\lambda$,

$$n\lambda = \frac{d \cdot x}{L} \Rightarrow d = \frac{nL\lambda}{x}$$

где n – номер максимума от центрального (центральный считается нулевым).

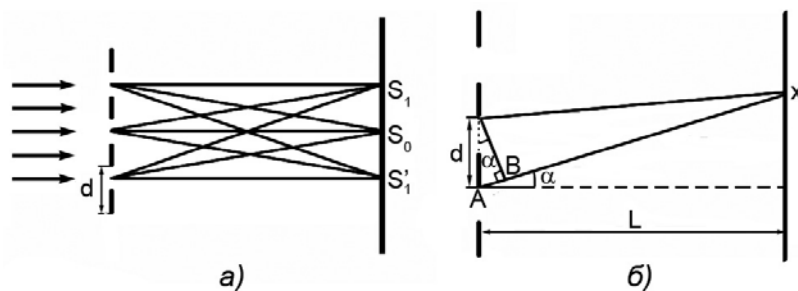


Рис. 3. Интерференция световых волн, прошедших сквозь дифракционную решетку.

... и снова о криветках и не только о них

Но причём здесь криветки? Дифракционная решётка – структура сугубо регулярная, к тому же линейная, иначе все приведённые выше выкладки просто бесполезны...

Однако не всё так плохо. Под микроскопом (или просто мощным увеличительным стеклом можно увидеть, что поверхность глаза криветки как бы составлена из шестиугольников. Каждый такой шестиугольник является линзой, прикрывающей свой омматидий. Впрочем, у тех же криветок мы как-то раз столкнулись с ситуацией, когда шестиугольники были настолько деформированы (одна пара сторон сильно укорочена по сравнению с другими двумя), что больше походили на квадраты... Но это скорее исключение, чем правило.

Итак, поверхность фасетки весьма регулярна и построена из правильных многоугольников. Так почему бы не предположить, что в ряде случаев такая фасетка эквивалентна трём дифракционным решёткам, каждая из которых имеет период, равный ширине шестиугольника?

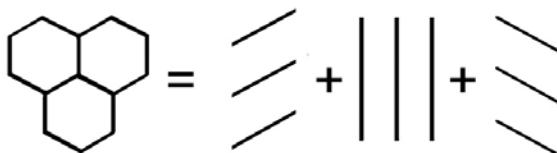


Рис. 4. Структура из правильных шестиугольников как суперпозиция трёх решёток.

Проверим предположение на практике. Для этого достаточно взять тот самый криветочный глаз и аккуратно снять с него фасеточную плёнку (или, скорее, очистить плёнку от содержимого). После этого останется лишь расправить плёнку на плоской

прозрачной поверхности (например, предметном стекле) и просветить лазером. Да, лазерная указка вполне подойдёт.

Подобные эксперименты были поставлены школьниками летней школы «Исследователь», автор этой статьи тогда был руководителем соответствующей исследовательской работы. Причём сначала в качестве экспериментального материала использовались насекомые, и только позже мы обнаружили, что такими же свойствами обладают ткани креветок, и потому рекомендуем работать с ними. Помимо креветок можно использовать и растительные препараты – кожицу лука (там практически одномерная решётка), срезы трубочки гриба-трутовика (можно и обычных трубчатых грибов вроде подосиновика или белого, но с ними сложнее, т.к. трубочка у них довольно мягкая).

На рисунке 5 приведены микрофотографии препаратов и показана схема эксперимента. Итак, лазерная указка, стекло с распластанным на нём образцом фасетки (чтобы избежать лишнего преломления/отражения, препарат стоит расправить в капле воды и прижать другим стеклом), и экран. Лучше белый, ровный и в затемнённой комнате. Впрочем, обычный оштукатуренный потолок вполне сойдёт – если нужно лишь убедиться в самом существовании эффекта. Если же необходимо измерить размеры дифракционной картины, то лучше уже такой экран, чтобы можно было подойти к нему с линейкой. А препарат и лазер следует разместить на штативах или зафиксировать в неподвижном положении как-то иначе, главное – не держать в руках. Последние, как известно, дрожат, а попытки измерения дрожащей и постоянно меняющейся картины могут излишне напрячь глаза (измерения проводятся в темноте, что утомляет зрение само по себе).

По опыту проведённых исследований, наилучшие результаты дают именно водные препараты. Увы, они со временем высыхают и не могут быть использованы долго. А для постоянных препаратов (скажем, чтобы перевозить их и кому-то показывать) надо использовать уже более сложные составы – например, канадский бальзам. Такой препарат гораздо меньше водного боится времени и тряски, но дифракционную картину даёт хуже. Если на водном препарате фасетки креветки мы получали до 22 максимумов, то тот же препарат, но после заливки канадским бальзамом давал в пределах 9 максимумов. Хотя, конечно, как указку повернёте...

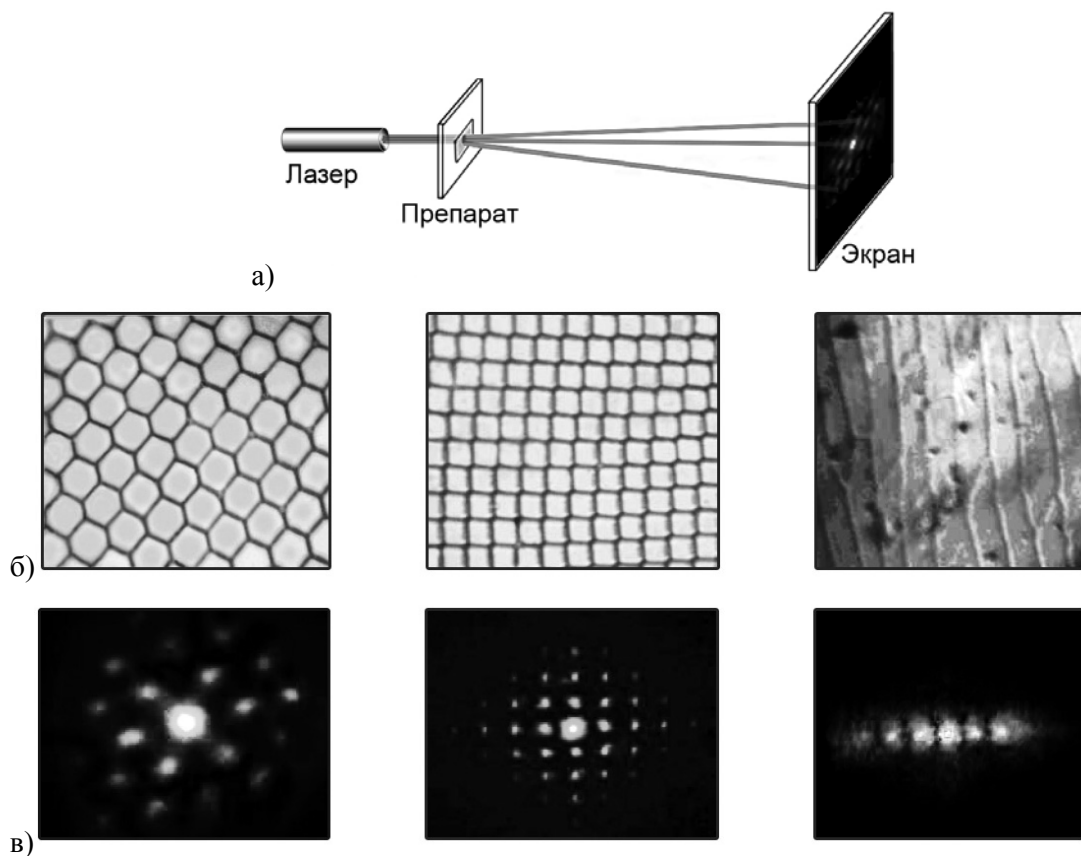


Рис. 5. Экспериментальная установка (а), микрофотографии препаратов (б, верхний ряд) и соответствующие им полученные на установке дифракционные картины (в, нижний ряд). Слева направо (б, в): фасетка глаза стрекозы (коромысло большое), фасетка королевской креветки, кожица лука.

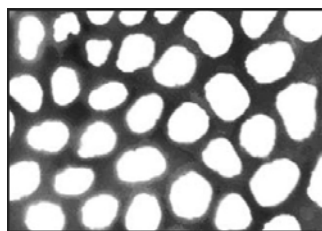


Рис. 6. Микрофотография среза трубочки трутовика (срез поперёк трубок).

Внимание вопрос: На рисунке 5 приведены фотографии самих препаратов и то, какие получаются дифракционные картины. Невооружённым глазом можно заметить, что все препараты имеют какую-то регулярную структуру. А как вы думаете, какая картинка получится для препарата, приведённого на рисунке 6? Можно ли здесь говорить о какой-то регулярной структуре? Ответ вы сможете найти в конце статьи.

Впрочем, зачем, собственно, что-то измерять?

А очень просто – измеряя расстояние между максимумами (см. рис. 7), мы можем легко оценить период решётки, а значит – размер шестиугольника фасетки, ширину клетки, или диаметр трубки трубочки. На рисунке 7 показано одно такое расстояние (x), в эксперименте для уменьшения погрешности измеряется сразу несколько таких расстояний и усредняется.

Для вычислений можно использовать уже фигурировавшую

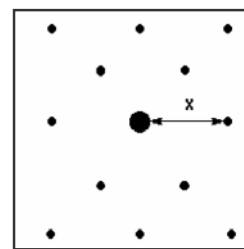


Рис. 7. Схематичное изображение дифракционной картины. Измеряется расстояние между соседними максимумами.

ранее формулу: $d = nL\lambda/x$, получаемое значение d и будет

искомым характерным размером решётки.

Чтобы не быть голословным, приведём некоторые результаты наших измерений, проведённых на летней школе в практически полевых условиях (хотя, заметим, пара штативов, лазерная указка и более-менее затемнённое помещение у нас имелись). В основном они относятся к насекомым.

Обратите внимание на то, что для двух видов стрекоз (коромысла) приведены два результата, причём существенно отличающиеся. Как вы думаете, с чем это связано?

Исследуемый объект	Характерный размер периодического элемента структуры, мкм
Шмель земляной (<i>bombus hupnorum</i>)	18 ± 1
Стрелка красивая (<i>coenagrion pulchellum</i>)	60 ± 3
Коромысло большое (<i>aeschna grandis</i>)	50 ± 2
	32 ± 1
Коромысло синее (<i>aeschna cyanea</i>)	37 ± 1
	41 ± 2
Шершень (<i>vespa crabro</i>)	31 ± 1
Королевская креветка	54 ± 3
Алоэ комнатное	40 ± 4

Результаты измерений со стрекозами – вовсе не следствие использования разных экземпляров, из которых один, к примеру, «мало каши ел», а другой «с жиру бесился». Более того, эти результаты были получены на фасетке одного и того же глаза.

Оказывается, размеры фасеток различаются в нижней и верхней части глаз стрекозы. Это связано с тем, что разные части у неё предназначены для разных целей: верхней она высматривает хищных птиц, от которых следует убегать, а нижней – ищет мелких насекомых, коими питается. Следовательно, в нижней части глаза выгодно иметь несколько большее разрешение, чем в верхней – насекомые, особенно съедобные для стрекозы, в большинстве своём несколько меньше птиц. Верхние и нижние омматидии даже видят в разных спектрах. Так что неудивительно, что размеры фасеток разные.

И напоследок – ответ на вопрос по рисунку 6.

Как ни странно, но и такая хаотичная структура, которую даже решёткой-то назвать сложно, будет давать дифракционную картинку. И выглядеть эта картинка будет как кольцо вокруг центрального максимума. Порой, если препарат удачно приготовлен и затемнение достаточно хорошо, можно заметить и второе, а то и третье кольцо, но на тех

препаратах, что делали мы, уже второе кольцо заметно распадалось на перекрывающиеся пятнышки. Тем не менее, даже по такой картинке можно примерно оценить размеры трубочек трутовика, хотя и со значительной погрешностью – порядка 20-30%.

Что же, подведём итоги.

Простая лазерная указка в ряде случаев даёт возможность исследователю прямо в полевых условиях оценивать размеры микроскопических структур. Далеко не всяких, а лишь довольно регулярных. Помимо лазерной указки хорошо бы иметь рулетку и пару предметных стёкол, но вряд ли подобный набор представляет для кого-то проблему. А если у исследователя глаз намётан, как у хорошего фотографа, то он вполне может обойтись и без рулетки.

Если же речь идёт о школьной или домашней лаборатории, то наличие простой лазерной указки и упомянутого набора даёт широкие возможности для исследований, которые раньше могли быть поставлены только в оборудованной лаборатории. Хотите ли вы посмотреть, насколько отличаются размеры фасеток креветок из одной упаковки, оценить толщину волос с разных мест шкуры медведя, или просто поразить воображение друзей или учеников красивой демонстрацией... Просто определите цель – и дерзайте!