

В.В. Зуев

**НАНООПТИКА ЦВЕТА
В БИОЛОГИЧЕСКОМ МИРЕ**



**Санкт-Петербург
2020**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.В. Зуев
НАНООПТИКА ЦВЕТА
В БИОЛОГИЧЕСКОМ МИРЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 19.03.01 – «Биотехнология» и 12.03.04
«Биотехнические системы и технологии» в качестве учебно-методического
пособия для реализации основных профессиональных образовательных
программ высшего образования бакалавриата

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2020

Зуев В.В. Нанооптика цвета в биологическом мире: Учебно-методическое пособие. — СПб: Университет ИТМО, 2020. – 53 с.

Рецензент: Филиппов Александр Павлович, д.ф.-м.н., Институт высокомолекулярных соединений РАН

В учебно-методическом пособии изложены основные принципы возникновения окраски в животном мире, основные оптические явления, объясняющие этот феномен, и принципы создания в природе нанообъектов. Методические указания предназначены для бакалавров обучающимся по направлению подготовки 19.03.01 – «Биотехнология» и 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» Методические указания содержат изложение основ формирования цвета в живой природе.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020

© Зуев В.В., 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. СIE цветовая спецификация	6
2. Общие методы получения цвета	13
2.1. Цвета, генерируемые в результате интерференции	13
2.2. Цвета, вызываемые дифракцией	17
2.3. Окраска, связанная с рассеивание света	20
3. Цвет, возникающий на крыльях	22
3.1. Крылья бабочек	22
3.2. Решетку нулевого порядка	36
3.3. Блеск глаз бабочек	38
3.4. Оперение птиц	41
4. Окраска жуков	44
4.1. Окраска экзокутикул жука скарабея	44
4.2. Изменение окраски жуков	45
4.3. Дифракция цветов у жуков и других животных	46
4.4. Спецификация цветов и цветовое виденье	48
Заключение	49
Контрольные вопросы	50
Рекомендуемая литература	51

Введение

В нашем мире, которой поражает разнообразием и богатством цвета в природе, искусстве и в жизни, не является удивительным, что пышное многообразие расцветок различных существ, будь то жуки, бабочки, другие насекомые, рыбы и морские существа, птицы и звери, привлекало внимание таких гигантов мысли как Леонардо да Винчи, Ньютон или лорд Рэлей. Тем более удивительно, что природа возникновения окраски биологических существ до сих пор полностью не решена. Это учебное пособие поэтому является первичным введением в область восприятия цвета и его генерации в животном мире. В ней даётся первичное объяснение и описание того, как цвет генерируется в природе в результате таких физических явлений, как дифракция, интерференция и рассеивание света, как на эти явления сказывается присутствие органических красителей, воспринимаемых живыми организмами как хромофоры и пигменты, а также возникновение окраски в результате поглощения или эмиссии света.

Сияющая радужная окраска, присущая телам и крыльям птиц, насекомых и бабочек, связана с физическими структурами, образованными на поверхностях биологических объектов, и эти структуры исследуются уже многие столетия, начиная с античности, о чем студенты могут почерпнуть знания из курса философии. Первым, кто предположил возможность появления блестящей радужной окраски птиц и насекомых из-за присутствия физических структур, аналогичных тем, которые существуют в тонких плёнках, был Ньютон. С развитием волновой теории света стало ясно, что многие проявления окраски в живом мире связаны с явлениями интерференции. Исследования показали, что многие проявления окрашивания в природе появляются из-за эффектов дифракции и интерференция, а не как результат присутствия хромофоров, которые поглощают либо излучают свет. Такой блестящий сияющий свет обычно описывается как металлический благодаря его яркости и чистоте. Самыми яркими примерами появления окраски животных в результате физических эффектов являются крылья бабочек, кожный покров змей, оперение колибри, кутикулы членистоногих и разнообразные минералы, такие как опалы и кристаллы солей.

Что же такое окраска тела? Последнее издание Оксфордского словаря английского языка даёт следующие определение: индивидуальный цвет любого тела определяется молекулярным строением его поверхности, которая определяет характер отражения света и число рефлексов отражённого света. Соответственно, цвет может видаться как частная восприимчивость, обусловленная стимуляцией оптического нерва особыми световыми рефлексамии. Восприимчивость этого нерва может вызываться и другими воздействиями, например, давлением на глазное яблоко или стимуляция этого нерва электрическим током. Поэтому, чтобы мы видели

или воспринимали некий объект окрашенным, с физической точки зрения необходимы три вещи: источник света, объект, который его излучает или переизлучает, и глаз, который может воспринять этот свет. Для того, чтобы стандартизировать различные цвета, глаз заменяется на фотодетектор, чтобы количественно охарактеризовать тот свет, который может достигнуть глаза. При всем при этом следует помнить, что классификация цветов зависит от спектральной цветоподбирающей функции (спектральной трехцветки), которая определяется человеческим восприятием цветов.

Это пособие посвящено описанию цветовых явлений, наблюдающихся в живой природе. Понятие нанооптика вводится как раздел физических явлений, возникающих при взаимодействии цвета с наноразмерными объектами. Особое внимание уделяется таким интересным и занимательным явлениям и объектам, как крылья бабочек, оперение птиц (колибри, павлин и др.), чья окраска связана с явлениями интерференции, жуки (например, Геркулесы) и мотыльки, которые используют окраску для камуфляжа и изменение цветов у которых связано с комбинацией явлений дифракции и интерференции. Также будут рассмотрены интерференционные фильтры в комбинированных глазах бабочек и биологические аналоги холестерических жидких кристаллов (например, на крыльях жуков). Случай холестерических жидких кристаллов является забавным примером того, как металлический блеск надкрылков жуков может быть получен за счёт самоорганизации и фазовых превращений. Радужная окраска часто присуща различным окаменелостям. Удивительно, что окраска мира насекомых гораздо разнообразнее и богаче, чем окраска нашего мира людей. Это связано с тем, что многие животные и насекомые имеют по пять фоторецепторов, в отличие от нашей треххроматической зрительной системы. Будет сделана попытка описать возможность вхождения в столь богатый цветовой мир.

Общим звеном при описании столь разнообразного материала будут способы генерации светового потока от объекта. Во всех рассматриваемых в пособии системах цвет возникает при отсутствии определенных хромофоров в результате структурных вариаций, приводящих к появлению рассеивания света, либо его интерференции и дифракции. Так как в пособии рассматриваются физические основы генерации цвета, необходимо вкратце описать язык науки о цвете. Существуют три основных понятия, которые необходимо использовать при описании цвета и связанных с ним явлений: оттенки цвета, его насыщенность и, в случае самосветящихся объектов, яркость. Зная эти характеристики, можно примерно предсказать восприятие цвета или окраски средним наблюдателем. Разумеется, определенные проблемы связаны с тем, что восприятие цвета человеком и животными сильно различается.

Учебное пособие построено следующим образом: раздел, посвященный методам колориметрии, описание формирования цветов в

тонких плёнках, разделы, которые описывают структурные вариации, приводящие к появлению окраски крыльев бабочек, надкрылок жуков, перьев птиц и мотыльков, и раздел, описывающий появление окраски, обусловленной присутствием холестерических жидких кристаллов. Также присутствуют разделы, посвященные оптической системе бабочек, оптике глаза, и распознаванию цветов бабочками. Также обсуждается влияние восприятия цвета на поведение и биологическую активность различных животных.

Учебное пособие является изложением курса лекций по дисциплине «Молекулярная физика и спектроскопия» и предназначено для самостоятельной работы студентов.

1. СИЕ цветовые стандарты

Аббревиатура СИЕ обозначает *Commission Internationale de l'Eclairage* - международная комиссия по освещению. Описание цветности, принятое этой комиссией в 1931 году, является с тех пор общепринятым в науке и колориметрии. Система, разработанная СИЕ основана на психофизическом восприятии цвета, т.е. на восприятии цвета средним наблюдателем, угловое разрешение зрения которого составляет 2° . Эта система базируется на двух предпосылках: концепции Юнга-Гельмгольца о том, что все цвета могут быть получены смешением в определенных пропорциях трёх базовых цветов (с некоторыми исключениями, которые будут обсуждены ниже). При этом принимается, что ни один из базовых цветов не может быть получен в результате смешения оставшихся двух. Другим основополагающим положением является закон Грассмана для смешения цветов. Этот закон гласит, что яркость смеси световых цветных потоков является суммой яркостей каждого из них, независимо от распределения спектральных интенсивностей.

Аддитивное смешение световых потоком происходит, когда два световых потока различного цвета соединяются, прежде чем достигнут глаза наблюдателя. В общем случае аддитивное смешивание происходит на стадии освещения объекта, при котором два цветных луча смешиваются, давая другой цвет. Кроме того, существует так называемое субтрактивное смешивание, когда часть спектра светового потока удаляется объектом (например, красителем), прежде чем световой поток достигнет глаза наблюдателя. В любом случае, физическое описание светового потока достигшего глаза наблюдателя, вместе с описанием суммирования цветов является основой для количественного описания воспринятого цвета.

Восприятие изолированных цветов является физиологическим феноменом, и он имеет трёхмерную природу. Параметры, которые описывают цвет в трёхмерном пространстве, есть количественные характеристики, которые характеризуют цвет, в случае изолированных

цветов, это оттенок, яркость и насыщение. Оттенок – это такое качество, которое мы характеризуем словами красный, жёлтый, голубой, зелёный и т.д. Это то, что отличает один спектральный цвет от другого. Например, все голубое отличается по оттенку от всего жёлтого независимо от возможных особенностей подобных цветов. Яркость — это такое качество цвета, которое подобно освещённости для определенной серии образцов оттенков серого цвета в ряду от белого до черного. Яркость также отвечает чувствительности к общей освещенности от темной через тусклую к яркой и сияющей. Насыщенность соответствует качеству, которое характеризует отличие восприятие данного цвета при той же яркости от серого. Другими словами, насыщенность соответствует чистоте цвета. Самый насыщенный цвет соответствует наибольшей интенсивности света с длиной волны, соответствующей максимуму для данного цвета, тогда как менее насыщенный цвет имеет вклад от многих световых потоков с другими длинами волн.

Термин «изолированный цвет» используется для описания восприятия цвета единой одноцветной области, т.е. в случае живописи — это цвет такой области, на восприятие которой не влияют соседние окрашенные участки. На восприятие цвета часто влияет окружение данного участка, что приводит к физиологическому явлению, известному как одновременный контраст, который художники используют для достижения живописных эффектов. Как пример изолированного цвета можно привести сигнал зелёного цвета на железной дороге ночью в отсутствии других световых сигналов семафора. Однако возможно утверждение, что темнота действует как граница для источника цвета, вводя таким образом варьируемые во времени условия для восприятия светового сигнала. Хорошо известно, что истинно изолированный цвет не может быть получен в отсутствии варьируемого во времени или пространстве сигнала для глаза наблюдателя. Kaiser и Boynton описали простой эксперимент для подтверждения этого положения. Рассмотрим две половинки шарика для настольного тенниса, помещённого выше уровня глаз и освещённого светом одного цвета. Сразу цвет воспринимается, однако постепенно пропадает в течение нескольких секунд, повторяясь и исчезая с открытием и закрытием глаз, увядая с течением времени, таким образом показывая, что действительно изолированный цвет не может долго восприниматься. В данном пособии термин «изолированный цвет» используется только для описания экспериментов, в которых наблюдатели расположены напротив двухстороннего щита или круга, одна половина которого освещена монохроматическим светом определенного цвета с длиной волны λ , окружённым черным кругом для определения световоспринимающей функции. В этой ситуации можно использовать и термин цвет щита.

Как мы увидим, оттенок цвета и насыщенность цвета могут быть представлены хроматическим координатами x и y на хроматической

диаграмме, при этом яркость может быть отображена как координата Y в трёхмерной декартовой системе координат. Хроматическая диаграмма представлена на Рис.1. Если яркость (представленная как Y , световое отражение) равна единице, только один цвет может быть зафиксирован глазом, и этот цвет белый. Если яркость уменьшается, то, как следует из Рис.1 больше цветов может быть различимы. Возможность различить каждый цвет при данном значении Y определяется как предел Мак Адама.

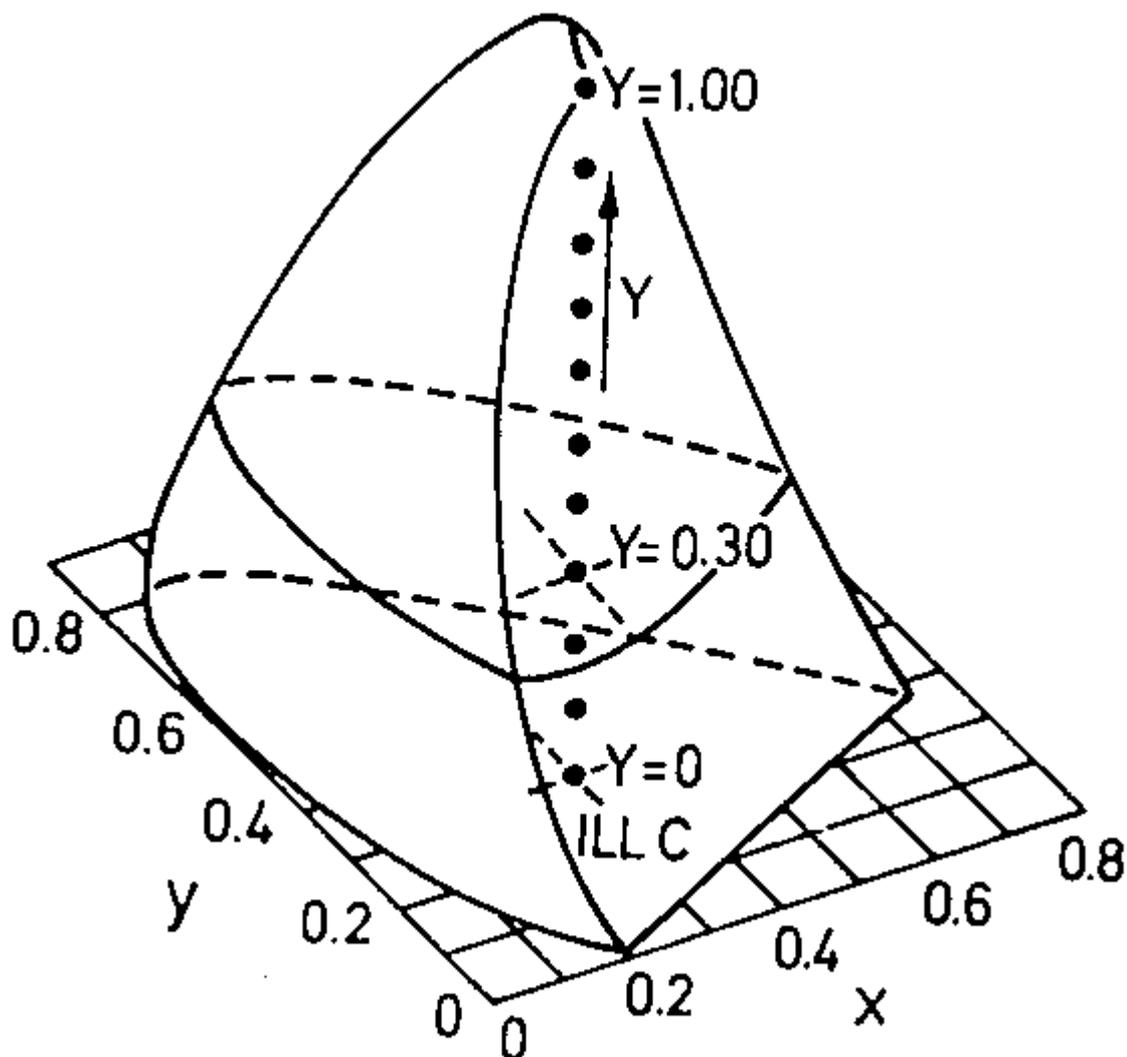


Рис.1. CIE диаграмма для несамосветящегося объекта, освещенного по CIE стандарту

Как должно быть ясно из Рис.1, при $Y=0$ предел Мак Адама сосуществует со спектральным годографом и цвета (при всех оттенках) достигают максимума на границе темнота- черный. Таким образом, низ

диаграммы представляет собой черную точку А не оттенки черного, как может показаться, если смотреть на рисунок.

Восприятие любых цветов наблюдателем зависит от природы цвета, который попадает в его глаз (что лучше описывается распределение спектральной силы) и чувствительностью наблюдателя к данному цвету. Тогда, если относительное распределение спектральной силы источника известно ($P(\lambda)$, где λ это длина волны), и если относительная отражательная способность объекта также известна ($R(\lambda)$) или известна его прозрачность, то относительное распределение света по цветам спектра, попадающего в глаз, может быть сравнительно легко рассчитано, просто как произведение спектрального распределения источника на отражающую способность объекта.

Аналитическое описание отклика наблюдателя-человека на цвет может быть дано в виде относительного количества трёх первичных цветов, которые аддитивно смешиваются, чтобы достичь цветового восприятия, вызываемого светом с определенной длиной волны. Такое описание может быть проиллюстрировано экспериментально, как показано на Рис.2.

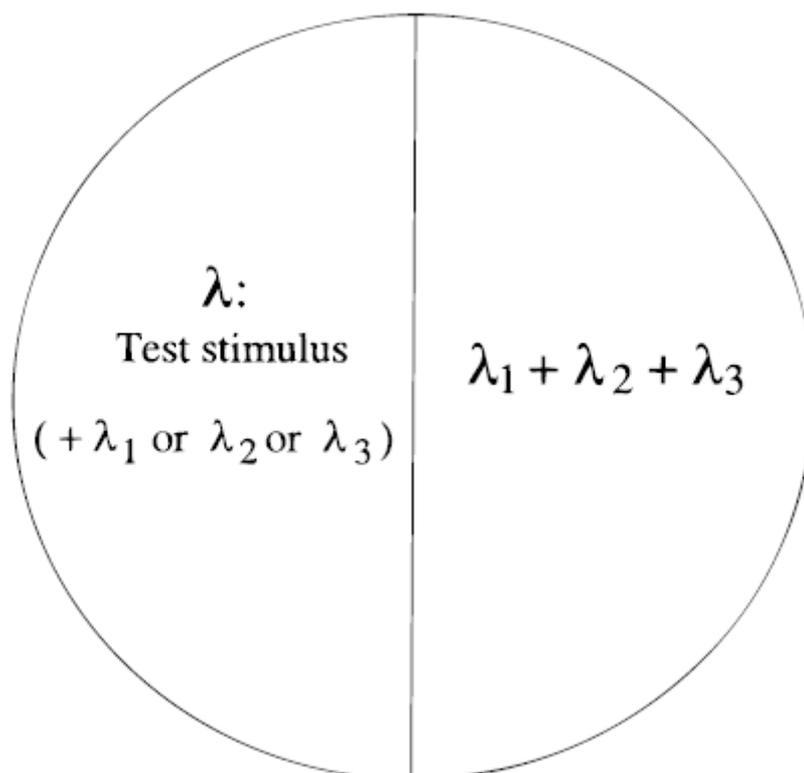


Рис.2. Наглядное представление построения свето-распределительной функции

На этом рисунке наблюдатель расположен напротив экрана, одна половина которого освещена светом того цвета, который должен быть оценён (обычно это монохроматический свет с длиной волны λ), а на другой

половине показан световой круг, составленный из трёх основных цветов. Задачей наблюдателя является добиться того, чтобы для монохроматического света с каждой длиной волны найти соответствующее смешение трёх цветов, варьируя их количество. Распределение по количеству первичных цветов для каждой длины волны называется свето-распределительной функцией.

Такие определения с шагом в два градуса были сделаны, что и позволило ещё в 1931 получить эти функции. Они представлены на Рис.3.

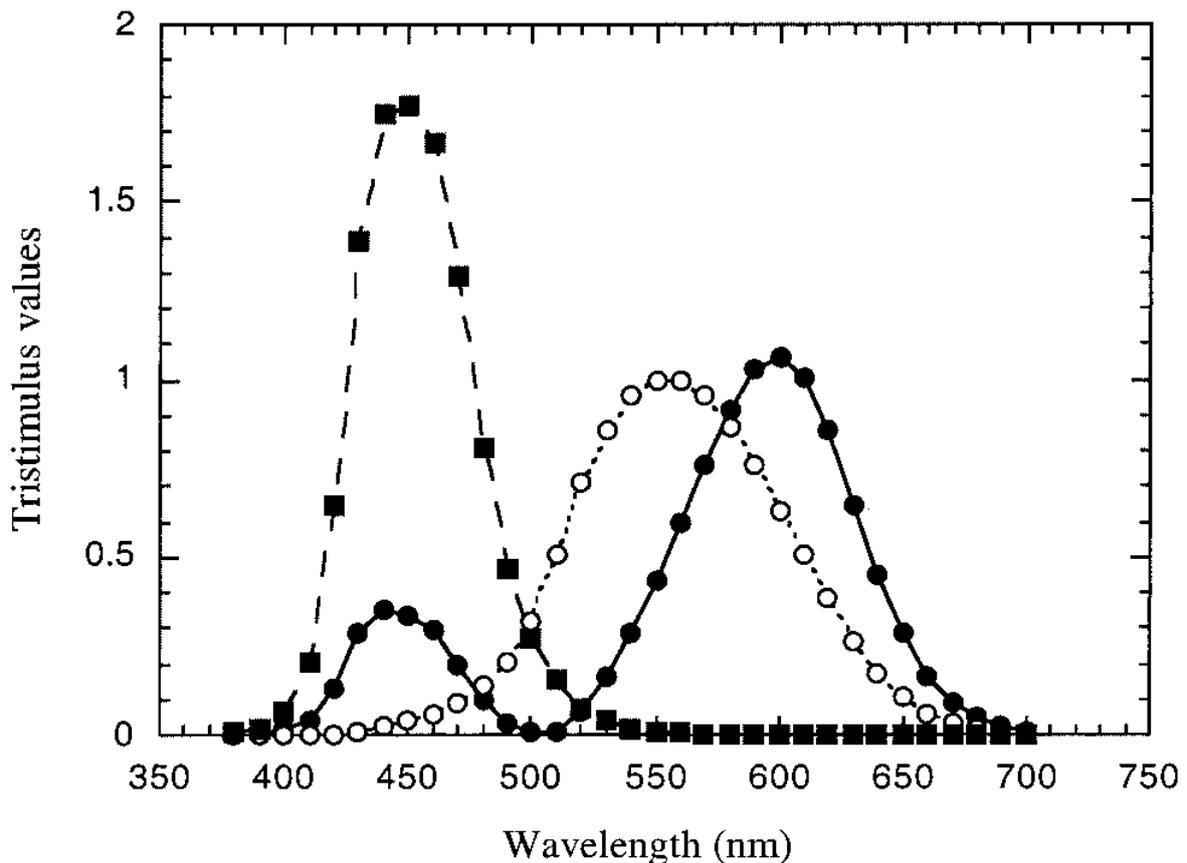


Рис.3. Цвет-соответствующие функции CIE стандарта 1931 года для наблюдателя с шагом 2° . Закрашенные кружки, открытые кружки и закрашенные квадраты соответствуют x,y,z

Для того, чтобы исключить использование отрицательных чисел, вводится специальный набор математических цветов X,Y, Z, которые заменяют красный, синий и зелёный цвета соответственно. Их значения всегда положительны, и цветоопределяющие функции обозначаются как \underline{x} , \underline{y} , \underline{z} соответственно. Количества света X,Y, Z необходимые для того, чтобы смодулировать цвет называются трёхцветными модуляторами цвета.

Цвет, воспринятый наблюдателем, затем представляется значением интеграла цветоопределяющих функций для стандартного наблюдателя,

видящего относительное отражение от объекта и спектральным распределением силы отражения. Этот процесс схематически представлен на рисунке 4.

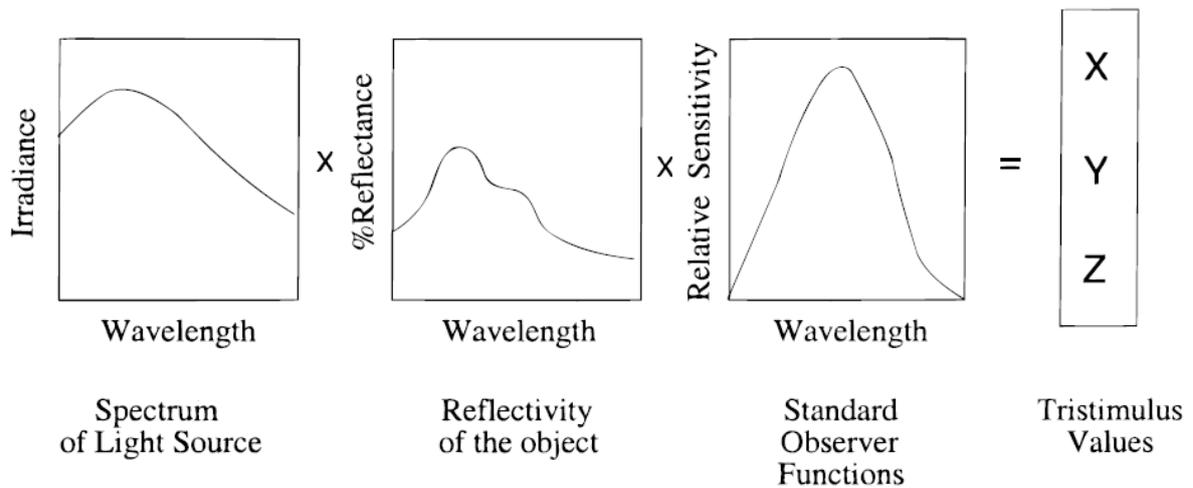


Рис.4. Процедура расчёта значений трёхцветного модулятора цвета

Результаты интегрирования называются трехцветными значениями и определяются по следующим уравнениям:

$$X = k \int R(\lambda)P(\lambda)x(\lambda)d\lambda \quad (1a)$$

$$Y = k \int R(\lambda)P(\lambda)y(\lambda)d\lambda \quad (1b)$$

$$Z = k \int R(\lambda)P(\lambda)z(\lambda)d\lambda \quad (1c)$$

где k есть нормирующий коэффициент, определяемый как $k=100/\int P(\lambda)d\lambda$ и $d\lambda$ есть шаг измерений, значения свето-определяющих функций и стандартные распределения основных источников света приводятся в виде таблиц во многих книгах и на интернет-ресурсах.

Следовательно, для того чтобы получить трёхцветную функцию объекта, который вас интересует, необходимо измерить его отражение или пропускание. Если каждое трёхцветное значение для определяемого цвета разложить на трёхкомпонентную сумму, будут получены значения цвето-определяющей функции для каждого цвета.

Учитывая систему уравнений (1), для полного описания необходимо знание двух компонент из трёх для описания «цветности» любого объекта. Эти доли называются хроматическими координатами и обозначаются строчными x, y, z .

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2)$$

В принципе можно использовать любые три хроматические координаты, однако на практике используются x и y . Если отобразить таким образом три чистых цвета, будут получены предельные локусы, называемые спектральными локусами, вне которых прочие цвета отсутствуют. Эти хроматические диаграммы показаны на рисунке 5.

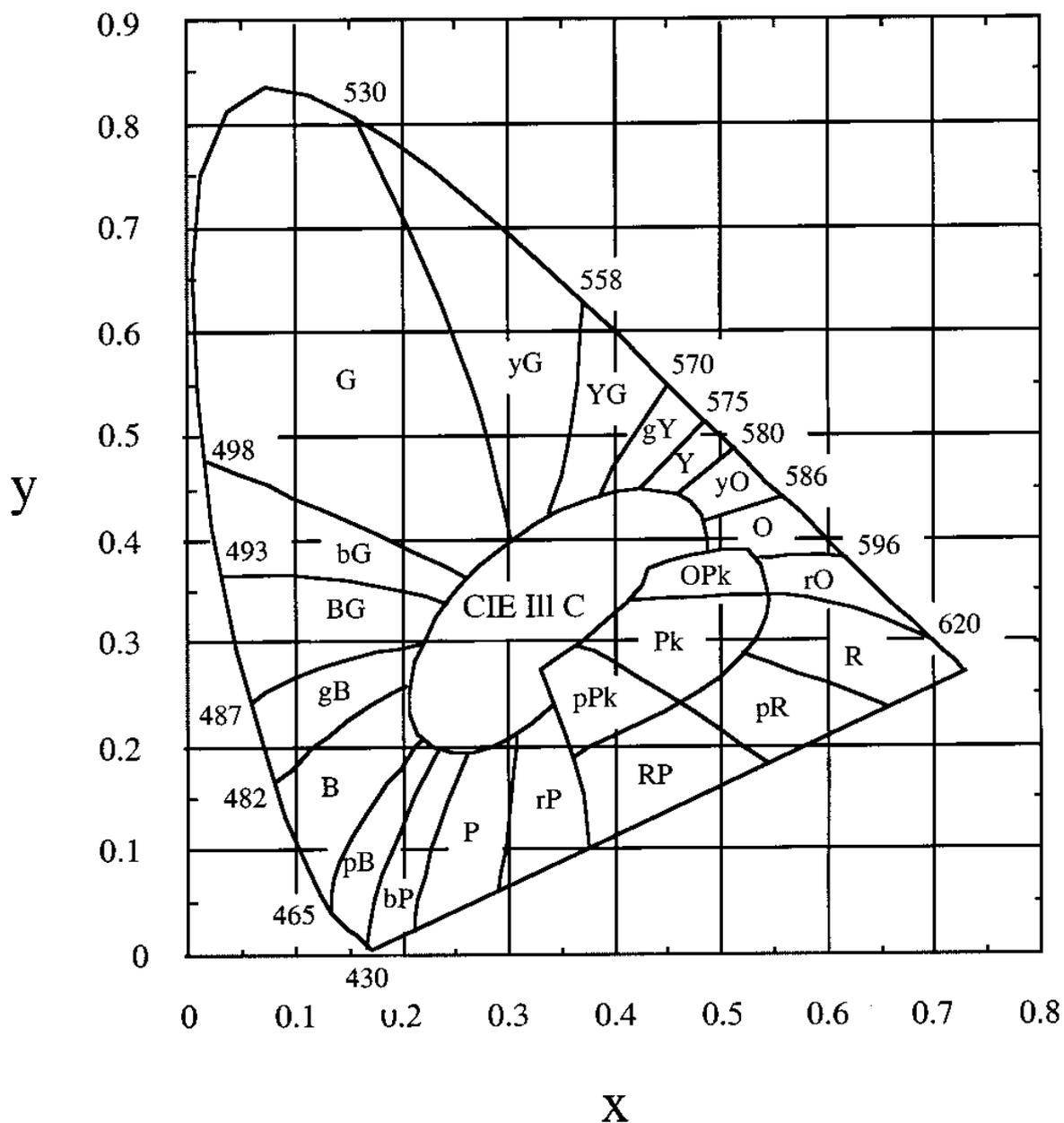


Рис. 5. Набор цветов, представленный на хроматической диаграмме
 pV: пурпурно-синий; V: голубой; gV: greenish blue; BV: зеленовато-голубой; G: зеленый; YG: желто-зеленый; gY: зеленовато-желтый; Y: желтый; yO: желто-оранжевый; O: оранжевый; OPk: розовато-оранжевый;

rO: красно-оранжевый; Pk: розовый; R: красный; pR: пурпурно-красный; pPk: пурпурно-розовый; RP: пурпурно-красный; rP: красновато-пурпурный; P: пурпурный; bP: синевато-пурпурный

Хроматические диаграммы могут быть использованы для того, чтобы показать линейную аддитивность при смешивании цветов. Рассмотрим два окрашенных световых луча, которые смешиваются, давая третий цвет. Значения x и y для смешанного цвета будут лежать на линии, соединяющей хроматические координаты исходных цветов. Если три окрашенных луча смешиваются аддитивно, то хроматические координаты всех цветов, которые могут получиться, будут лежать внутри сторон треугольника, и индивидуальные координаты x и y будут соответствовать тому цвету, который может быть получен. Этот треугольник определяется как цветовая гамма, которая может быть получена на основе трех использованных цветов. При расчёте хроматических координат для данного конкретного цвета цвет получается тем более насыщенным, чем ближе соответствующие координаты к спектральному локусу. Как будет показано ниже, цвета, производимые холестерическими жидкими кристаллами, являются насыщенными и близки к спектральному локусу.

Вышеприведённое описание количественной оценки цветов пригодно для животных с трёхцветным восприятием подобным стандартному человеческому наблюдателю. В этом пособии мы рассмотрим и животных с более богатым восприятием цвета, чем человек. Однако для таких животных, как, например, бабочки, очень сложно реально понять, каково на самом деле их цветовое восприятие. Наш личный опыт подсказывает нам, что цветовое восприятие дано нам именно для ощущения цветности окружающего нас мира.

2. Общие методы получения цвета

В этом разделе будут кратко рассмотрены те способы генерации цвета, которые используются в линейной оптике. Рассматриваются следующие методы: (а) интерференция; (б) дифракция; (в) дисперсия; (г) рассеивание и их комбинация. Мы рассмотрим все эти методы, за исключением дисперсии.

2.1. Цвета, генерируемые в результате интерференции

Цвета, возникающие в результате интерференции, можно наблюдать во множестве ситуаций, связанных с тонкими плёнками. Общеизвестный пример - радужная окраска мыльных пузырей в солнечном свете. Эти цвета возникают, когда световые волны интерферируют после отражения от двух поверхностей мыльной плёнки. Так, возникающие цвета доминируют в царстве животных.

Начнём наше обсуждение со случая когерентного света. Хотя доступные источники света могут быть некогерентными, если их сравнивать с лазером, однако некогерентность этих источников составляет всего порядка нескольких микрометров. Мы будем рассматривать получение цветности только для случая отражения от плёнок, толщина которых составляет несколько микрометров, и в этом случае мы можем использовать теорию интерференции света, развитую для когерентных источников.

Хорошо известно, что два некогерентных луча света, как свет от фар двух автомобилей, не дают интерференционной картинки. Это является результатом отсутствия фазовой корреляции между двумя источниками света, так как фазы световых лучей изменяются слишком быстро. Однако, общеизвестно., что мыльные плёнки производят богатые цвета. Это происходит потому, что солнечный свет, отражаясь от двух поверхностей, интерферирует как полученный от двух когерентных источников света. При этом интерференционные цвета будут наблюдаться только в том случае, если толщина мыльной плёнки оказывается порядка длины волны видимого света. Для того чтобы изменить цвет, необходимо либо изменить толщину плёнки, либо изменить угол зрения. Теоретическое основание для понимания явлений интерференции в тонких плёнках даёт уравнение Френеля.

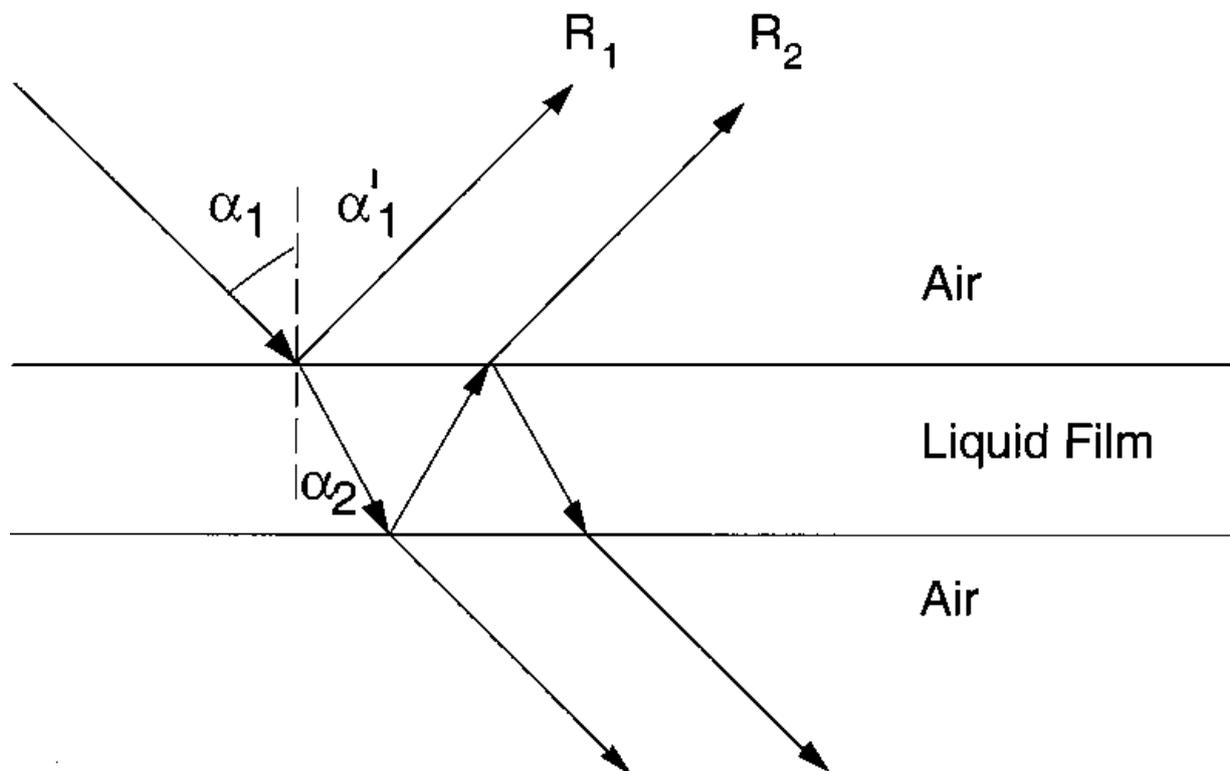


Рис.6. Интерференция при отражении от поверхности жидкость (мыльная плёнка)- воздух R_1 и R_2 отражённые лучи: α_1 – угол падения, α_2 – угол отражения, α_2 – угол преломления

Рассмотрим случай, показанный на Рис.6, причём толщина плёнки может меняться. Если отражение от двух поверхностей происходит в фазе или сопровождается интерференцией, образуется большой набор рефлексий, и эти отражённые лучи наблюдатель воспринимает как набор различных цветов. Конструктивная интерференция наблюдается по следующим причинам: френелевский коэффициент отражения является положительным для луча, отражённого от мыльной плёнки (жидкой) на границе жидкость-воздух, и отрицательным для отражения от поверхности воздух - жидкость. Отрицательный коэффициент отражения просто отражает сдвиг по фазе на 180° между падающим и отражённым лучом. Следовательно, 180° -ный сдвиг по фазе, происходящий на границе воздух - жидкость в сочетании с 180° -ным сдвигом по фазе в результате кругового прохождения через четвертьволновую плоскость (толщина плёнки составляет четверть длины волны луча падающего света) приводит к великолепной конструктивной интерференции для всех отражённых световых пучков.

Разница оптического пути, наблюдаемая для двух конструктивно интерферирующих лучей, просто равна пути светового луча в среде. Если посмотреть на Рис.6, станет ясно, что эта разница равна $2n_2 d \cos\alpha_2$, где n_2 — это показатель преломления плёнки, а α_2 есть угол отражения. В добавок, к разнице оптического пути в $2n_2 d \cos\alpha_2$ прибавляется ещё добавочная разница в $\lambda/2$ из-за дополнительной разницы фаз в π , которая появляется на границе воздух-плёнка, когда падающий световой луч отражается от среды с большим показателем преломления, чем у среды падения. Таким образом эффективная разница светового пути между двумя лучами составляет $2n_2 d \cos\alpha_2 + \lambda/2$. Тогда, если разница светового пути будет $2n_2 d \cos\alpha_2 + \lambda/2 = n\lambda$, где n – целое число, два луча будут иметь эффективную интерференцию и дадут интенсивный максимум. С другой стороны, если $2n_2 d \cos\alpha_2 + \lambda/2 = (n + 1/2)\lambda$ будет наблюдаться негативная интерференция с нулевой интенсивностью. Для простоты принимаем амплитуды обоих лучей равными A , тогда амплитуда отражённой волны A_r будет равна $A_r = A + Ae^{i\delta}$ с разницей фаз δ , которая даётся выражением $\delta = (2\pi/\lambda)(2n_2 d \cos\alpha_2 + \lambda/2)$. Общая интенсивность отражения I_r будет равна $I_r = A_r A_r^*$ и она равна $4A^2 d \cos^2 \delta/2$. Это уравнение может быть записано в терминах отражения R как $4I_1 R \cdot \sin^2 \{(2\pi/\lambda) \cdot n_1 \cdot d \cdot \cos\alpha_2\}$, где есть I_1 – интенсивность падающего света. Конечно, гораздо проще исключить угол падения из приведённых формул, если найти зависимость интенсивности от угла падения.

Теперь надо найти уравнения для интенсивностей отраженного и прошедшего света. Уравнения Френеля предсказывают амплитуду (r) отраженного от тонкослойных структур света и могут быть записаны как

$$r_s = \frac{n_1 \cos \alpha_1 - n_2 \cos \alpha_2}{n_1 \cos \alpha_1 + n_2 \cos \alpha_2} \quad (3)$$

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \alpha_1}{n_1 \cos \alpha_1 + n_2 \cos \alpha_2} \quad (4)$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления сред, в которых распространяется свет, а r_s и t_s – амплитуды отражения и пропускания для S-поляризации входящего светового пучка. Здесь поляризация определяется по отношению к плоскости падения света. S-поляризации есть поляризация, перпендикулярная плоскости падения света, где плоскость падения определяется как плоскость, которая содержит как падающий так и отражённый лучи. Такую же формалистику можно применить и для P-поляризации. Интенсивности отражения для случая обеих поляризаций простым способом связаны с их амплитудами и могут быть записаны как $R_s = r_s^2$ и $R_p = r_p^2$. Путь световых волн может быть изображён просто как отражения по закону Шноля $n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2$, т.е. угол падения равен углу отражения.

В случае нормального падения света, когда $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, имеем $r_p = (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)$ и $t_p = 2n_1/(n_1 + n_2)$. При нормальном падении света результат для P-поляризации точно такой же, как для S-поляризации. Если используется неполяризованный свет, его интенсивность равна сумме интенсивностей двух поляризованных компонент. Интенсивность отражённого света даётся хорошо известным уравнением:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (5)$$

Уравнения 3-5 дают долю прошедшего и отражённого света в зависимости от угла падения α_1 , угла отражения и показателей преломления среды. Если исключить угол отражения (мы знаем закон отражения), то получим уравнения, зависящие только от угла падения. В интересующем нас случае это связано с тем, что цвет крыльев бабочек зависит от угла падения света. Уравнение Френеля для S-поляризации может быть записано следующим образом:

$$r_s = \frac{\cos \alpha_1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \sqrt{1 - \left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \sin \alpha_1\right]^2}}{\cos \alpha_1 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \sqrt{1 - \left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \sin \alpha_1\right]^2}} \quad (6)$$

Это уравнение превращается в уравнение (5), если угол облучения равен 0, что не может не радовать. Все наше предыдущее рассмотрение учитывало только две волны, которые являются наиболее важными. В общем случае имеется бесконечное число волн, которые вызывают интерференцию, и которые можно обозначить как $R_1, R_2, R_3 \dots$. И такое же число прошедших волн $T_1, T_2, T_3 \dots$ (см.Рис.7).

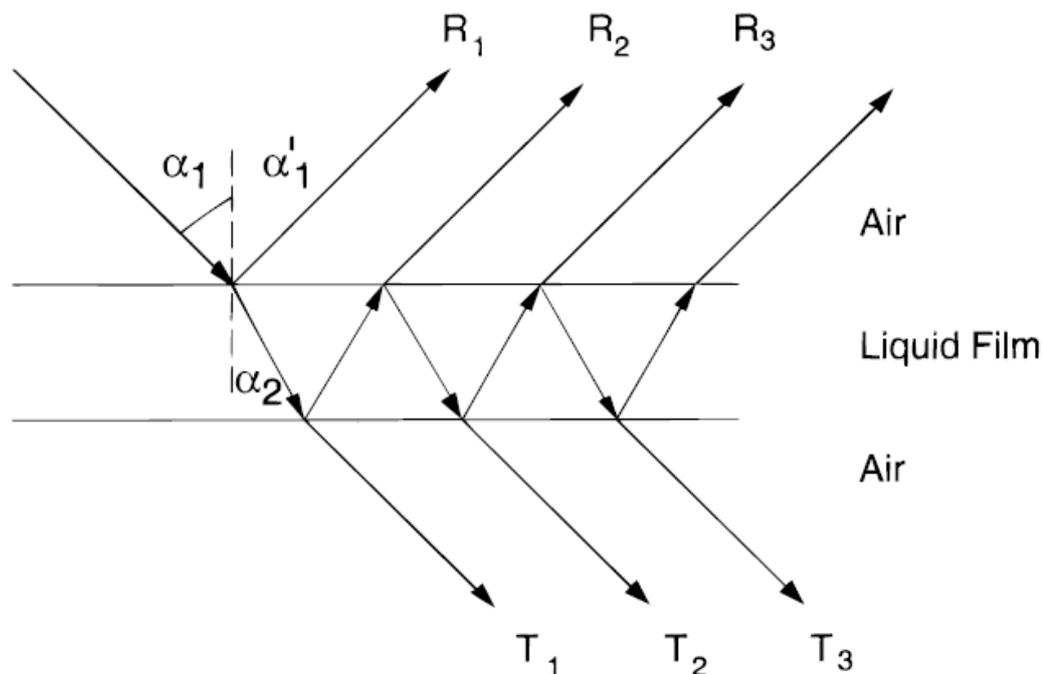


Рис.7. Интерференция, наблюдаемая при многократном отражении, пропускании и преломлении в n пленке

Для того, чтобы получить угловую зависимость, достаточно исключить угол отражения и записать оптический путь как разность в терминах угла облучения. Длина волны максимума отражения света дается уравнением:

$$\lambda_{\max} = \left(\frac{4n_2d}{2=1} \right) \left(1 - \frac{n_{12}}{n_{22}} \sin 2\alpha_1 \right) \quad (7)$$

Это уравнение ясно показывает, что отражение сдвигается в сторону коротких волн при увеличении угла облучения, что соблюдается для всех цветов, включая крылья бабочек.

2.2. Цвета, вызываемые дифракцией

Если луч света встречает на своём пути препятствие, часть энергии рассеивается. Однако если размер препятствия сравним с длиной волны

падающего света, эффект рассеивания наблюдать легче, так как световой пучок рассеивается под большими углами относительно линии распространения света. Если препятствие является периодической структурой или в нем периодическим образом меняется какое-нибудь свойство, влияющее на световой поток, энергия рассеивается, создавая определенные периодические структуры. Эти структуры определяются как дифракционные решётки. Результат дифракции зависит как от свойств дифракционной решётки, так и падающего луча — это приводит к появлению определенной дифракционной картинке. Дифракционная решётка действует подобно призме, но она оказывается гораздо более эффективной. В природе имеется масса примеров, когда при взаимодействии света с объектом появляется радужная окраска, появление окраски является результатом как рассеивания на периодических структурах, так и последующей интерференции. Интересующими нас случаями являются примеры из живой природы, когда размеры периодичности сравнимы с длиной волны видимого света, и это обозначается как дифракционные решётки нулевого порядка.

В простейшем случае дифракционная решётка — это набор штрихов на поверхности прозрачного материала, например стекла или полимерной плёнки. Дифракция падающего света тогда аналогична случаю двухщелевой интерференции. Рисунок 8 схематически представляет результат дифракции от решётки, состоящей из набора щелей шириной s на расстоянии d друг от друга, угол дифракции определяется уравнением решётки, которое записывается как $d \sin \theta = m\lambda$, где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$. Здесь m определяется как порядок дифракции. Если свет попадает на решётку под некоторым углом α , то уравнение дифракции записывается как $d(\sin \theta - \sin \alpha) = m\lambda$.

Если мы рассмотрим случай множества щелей, как это и имеет место в случае дифракционной решётки, распределение интенсивностей в дифракционной картинке для падающего луча будет даваться уравнением:

$$I_{\theta} = I_0 \frac{\sin^2 \left(N \left(\frac{\pi}{\lambda} \right) d \sin \theta \right)}{\sin^2 \left(\left(\frac{\pi}{\lambda} \right) d \sin \theta \right)^2} \quad (8)$$

где N — это число щелей. Общее распределение интенсивности лучей, участвующих в дифракции, даётся как произведение каждой составляющей.

После учёта интерференции получаем уравнение:

$$I_{\theta} = I_0 \frac{\sin^2 \left(\left(\frac{\pi}{\lambda} \right) s \sin \theta \right) \left(\sin^2 \left(N \left(\frac{\pi}{\lambda} \right) d \sin \theta \right) \right)}{\left(\left(\frac{\pi}{\lambda} \right) d \sin \theta \right)^2 \sin^2 \left(\left(\frac{\pi}{\lambda} \right) d \sin \theta \right)^2} \quad (9)$$

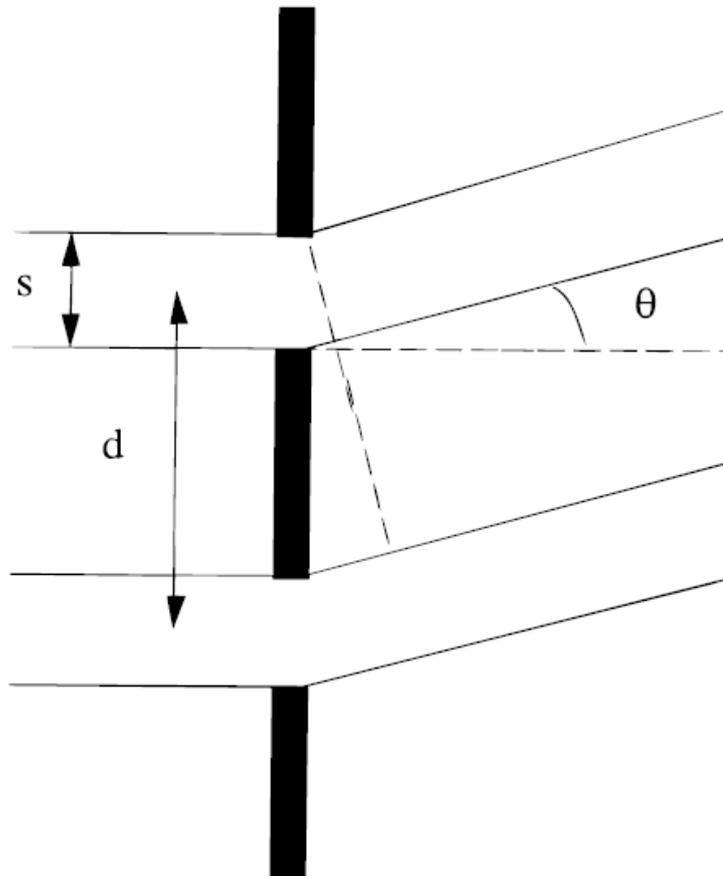


Рис.8. Схема дифракционной решётки

Следует отметить, что интенсивность пропорциональна $[\sin]^2 (N(\pi/\lambda)d\sin\theta)$, так что интенсивность основного максимума пропорциональна числу ячеек. С ростом числа ячеек основной максимум становится все выше и выше, и при этом более узким, тем самым разделяя свет от источника на составляющие его компоненты. Таким образом дифракционная решётка разлагает цвета в соответствии с рис.1. Хорошо известно подобное использование дифракционных решёток в спектроскопии. Обратите внимание, что при этом голубой цвет ближе к оси падающего светового пучка, чем красный, который максимально удалён, при этом исходный световой луч сохраняет нулевой порядок. Позднее мы обсудим эту ситуацию. Если разметка решётки по размерам сопоставима с длиной волны видимого света, то прошедший свет (нулевая дифракция) будет зависеть от длины волны, тем самым определяя окраску в биологических системах, в которых часто можно найти субмикронные по размеру структуры, ответственные за окраску. Позднее мы обсудим различия подобных дифракционных решёток, одни из которых работают на отражение, а другие на пропускание.

2.3. Окраска, связанная с рассеиванием света

Очень часто та голубая окраска, которая наблюдается в природе, как например, перья у голубой сойки, появляется в результате эффектов рассеивания света и никак не связана с пигментацией. Рассмотрим частицу, размеры которой малы по сравнению с длиной волны света облучающего её источника. Рассеивание света на такой частице пропорционально её объёму V . Этот параметр говорит о том, что частица в световом потоке может быть подразделена на набор элементарных осцилляторов, каждый из которых находится в фазе с волной света светового пучка, следовательно, напряжённость общего рассеивающего поля E_s пропорциональна объёму частицы. Таким образом, рассеивающая эффективность пропорциональна амплитуде переизлучённого света E_i . E_i должна быть пропорциональна E_s . Так как частицы малы, рассеивающая способность быстро убывает с расстоянием. Для того чтобы понять, почему это происходит, рассмотрим следующий пример. Пусть у нас есть сфера радиусом r , центрированная на частице, поверхность которой равна $4\pi r^2$. Общая энергия рассеивания на этой сфере не зависит от её радиуса. Это касается случая, когда плотность потока излучения убывает как $I \propto r^{-2}$. Так как энергия облучения пропорциональна E_s^2 , E_s должна убывать как $1/r$. Пространственное рассмотрение показывает, что напряжённость рассеивающего поля должна быть обратно пропорциональна квадрату длины волны, поэтому выполняется следующее уравнение:

$$E_s = KE_i V \lambda^2 r \quad (10)$$

где K есть константа, связанная с размерностью пространства. В то же время интенсивность рассеивания пропорциональна квадрату напряжённости рассеивающего поля, и уравнение может быть переписано как

$$I_s = K^2 I_i V^2 \lambda^4 r^2 \quad (11)$$

где I_i есть интенсивность облучающего света. Следует отметить, что K зависит от показателя преломления частицы. Уравнение (11) часто называют законом рассеивания Релея. Этот закон часто связывают с соотношением $I_s \propto I \lambda^{-4}$, с которым связывают наблюдаемый голубой цвет неба. Однако, зная, что длина волны фиолетового цвета короче, чем у голубого, ни один студент не может ответить на вопрос, почему небо все же не фиолетовое.

Как отмечают большинство учебников оптики, в которых рассматривается рассеивание света, цвет, который мы видим при рассеивании, зависит не только от свойств рассеивающей среды, но и от

воспринимающего его наблюдателя. Как отмечалось ранее, цвет, который мы видим, определяется тремя составляющими: количеством света, которое достигло наблюдателя, светом, излучаемым объектом, и спектральной восприимчивостью глаза. Таким образом, небо, воспринимаемое мозгом как голубое, есть результат солнечного спектра (Рис. 9), его рассеивания на молекулах атмосферы (Рис. 10) и восприимчивости глаза (Рис. 11). Хотя фиолетовый свет рассеивается более интенсивно, чем голубой, восприимчивость глаза к нему меньше, чем к голубому, и доля фиолетового в солнечном спектре меньше. В результате комбинации этих факторов в мозг поступает сигнал - небо голубое.

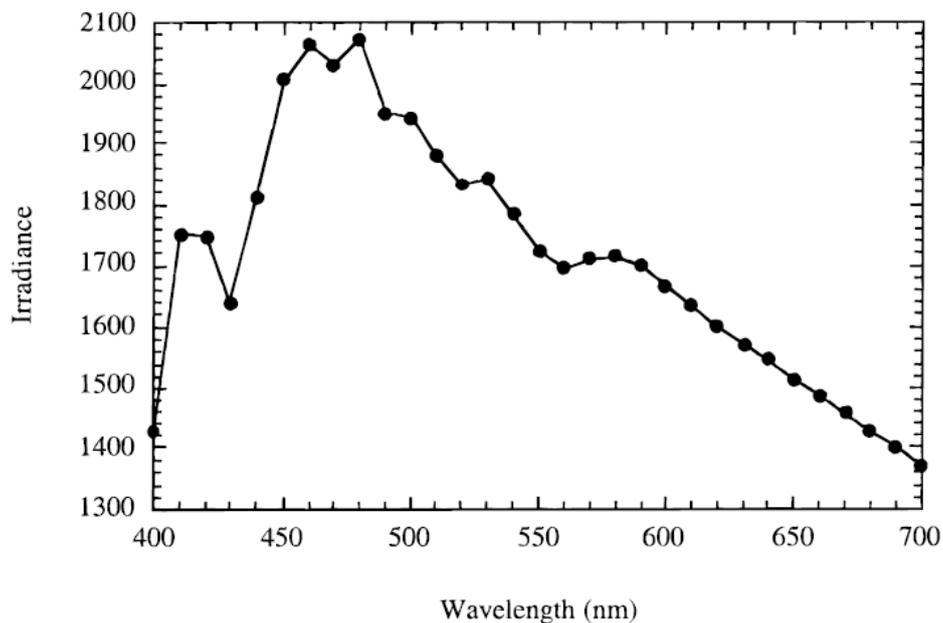


Рис.9. Спектр солнечного света вне атмосферы земли

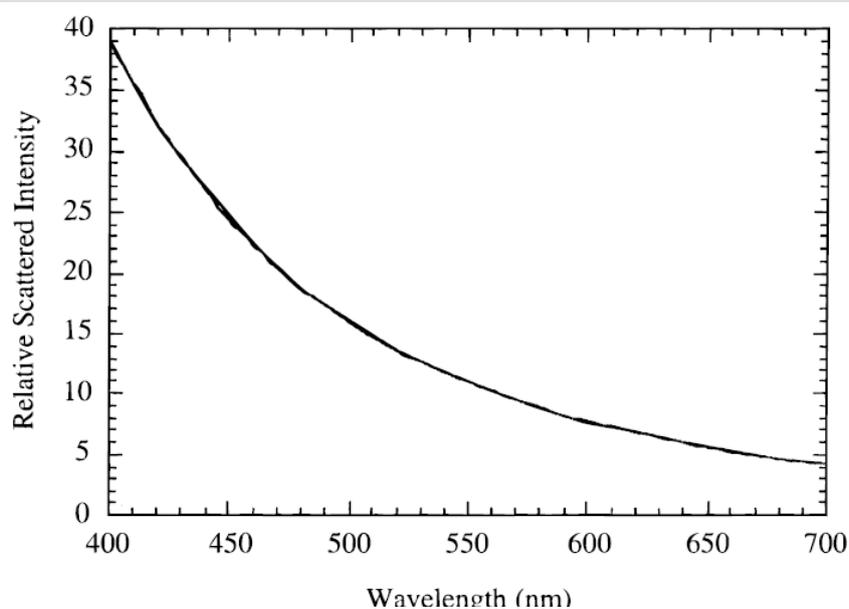


Рис.10. Зависимость интенсивности рассеивания света на молекулах атмосферного воздуха

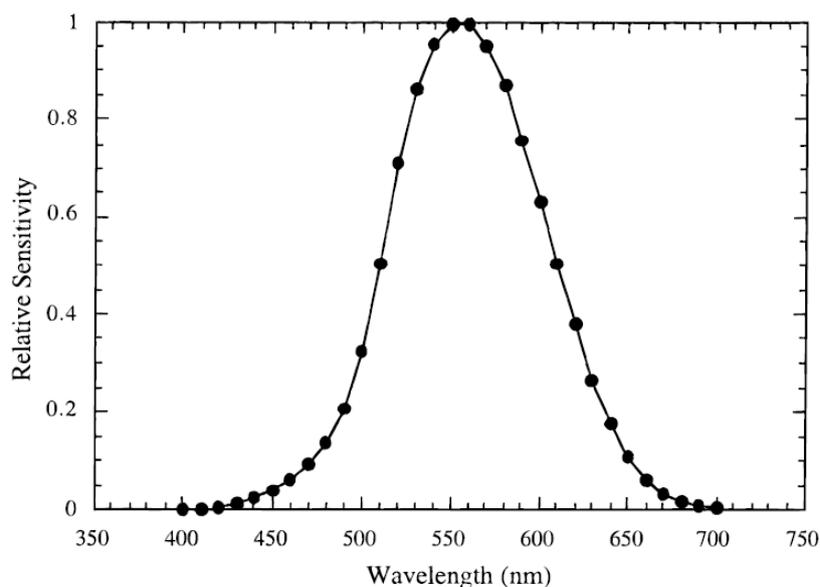


Рис.11. Чувствительность человеческого глаза к восприятию цвета в зависимости от его длины волны

Большинство случаев наблюдения голубого цвета в животном царстве связано с рассеиванием света. Зелёный цвет перьев попугая связан с пигментной окраской в комбинации с эффектами рассеивания. Чешуйки перьев попугая содержат жёлтый пигмент, что в комбинации с голубым светом от рассеивания и обеспечивает зелёную окраску перьев.

3. Цвет, возникающий на крыльях

3.1. Крылья бабочек

Как отмечалось ранее, крылья определенных бабочек и кутикулы жуков приобретают окраску благодаря матрицам точно организованных структур, давая тем самым поразительный пример надмолекулярной организации в биологических системах. Полученные таким образом надмолекулярные архитектурные ансамбли обеспечивают окраску насекомых и птиц. В большинстве случаев цвета возникают вследствие явлений интерференции или дифракции на тонкоплёночных структурах или, как в случае некоторых жуков, благодаря селективному отражению света. В случае интерференции на тонкоплёночных структурах (известных как тонкоплёночный рефлектор) цвет возникает благодаря чередованию тонких слоёв материалов с высоким и низким показателем преломления. Такие молекулярные ансамбли называют «брэгговскими рефлекторами». Такие молекулярные снопы или брэгговские рефлекторы могут быть использованы как оптические ограничители или переключатели. В подобных случаях используют терминологию фотонных кристаллов с запрещённой зоной (ФКЗК).

Разнообразие и красота рисунков крыльев бабочек и мотыльков поразительна, в живой природе, с ней может сравниться разве что разнообразие рисунков крыльев птиц. В царстве бабочек существует более ста тысяч видов, которые могут быть отличены друг от друга по узору крыльев. Это разнообразие цветов и узоров ещё более поражает, если рассмотреть, как они возникают. У бабочек над мембраной крыльев существует по крайней мере два молекулярных слоя, которые состоят из набора ячеек. Каждая ячейка имеет размер по крайней мере 100 μm в длину и 50 μm в ширину, эти ячейки покрывают мембрану, и, если смотреть в микроскоп, эта структура похожа на крышу, покрытую дранкой или черепицей.

Если посмотреть на крылья, становится очевидным, что имеется два или три типа ячеек, которые могут образовывать замысловатый узор. Большие верхние ячейки и маленькие нижние образуют сложный узор. Обычно узор верхних ячеек более сложен, хотя бывает и наоборот. Форма верхних и нижних ячеек может меняться в разных частях крыла. Плотность ячеек варьируется от 200 до 500 на квадратный миллиметр. Узор, определяющий цветовой рисунок, очень точен и чувствителен к внешним воздействиям. Любой, бравший бабочек в руки, помнит, как он легко разрушается и цвет исчезает, а пальцы оказываются запачканными бесцветной пылью.

Если посмотреть в микроскоп при высоком разрешении, видно, что цветной узор возникает как результат наличия мозаичной структуры, части которой наклонены относительно друг друга под определенным углом. Это показано на Рис.12.

В целом цветовой рисунок крыльев обычно определяется комбинацией простых окрашенных пластинок (ячеек), обычно комбинация трёх, как пример, рассмотрим тропическую бабочку *Morpho*, блестящая металлическая окраска крыльев которой обусловлена интерференцией на структурных элементах её крыльев. В зависимости от использованных ячеек надмолекулярные структуры производят из требуемых цветов, эти структуры обычно содержат красители – обычно тёмный меланин, который поглощает тот свет, который не отразился, так что отражённый свет даёт особенно яркую окраску. К его функциям также относится регулирование температуры тела бабочки.

Самым распространённым цветом у насекомых является белый. Это бывает тогда, когда отражающие кутикулы – мелкие, образуют нерегулярные структуры и отражают свет.

Все радужные цвета и большинство зелёных и голубых на крыльях возникают вследствие структурных вариаций. Существует по крайней мере шесть типов периодических структур, которые приводят к появлению окраски. Существует три типа структур, которые приводят к появлению радужной окраски. Они показаны на Рис.13.

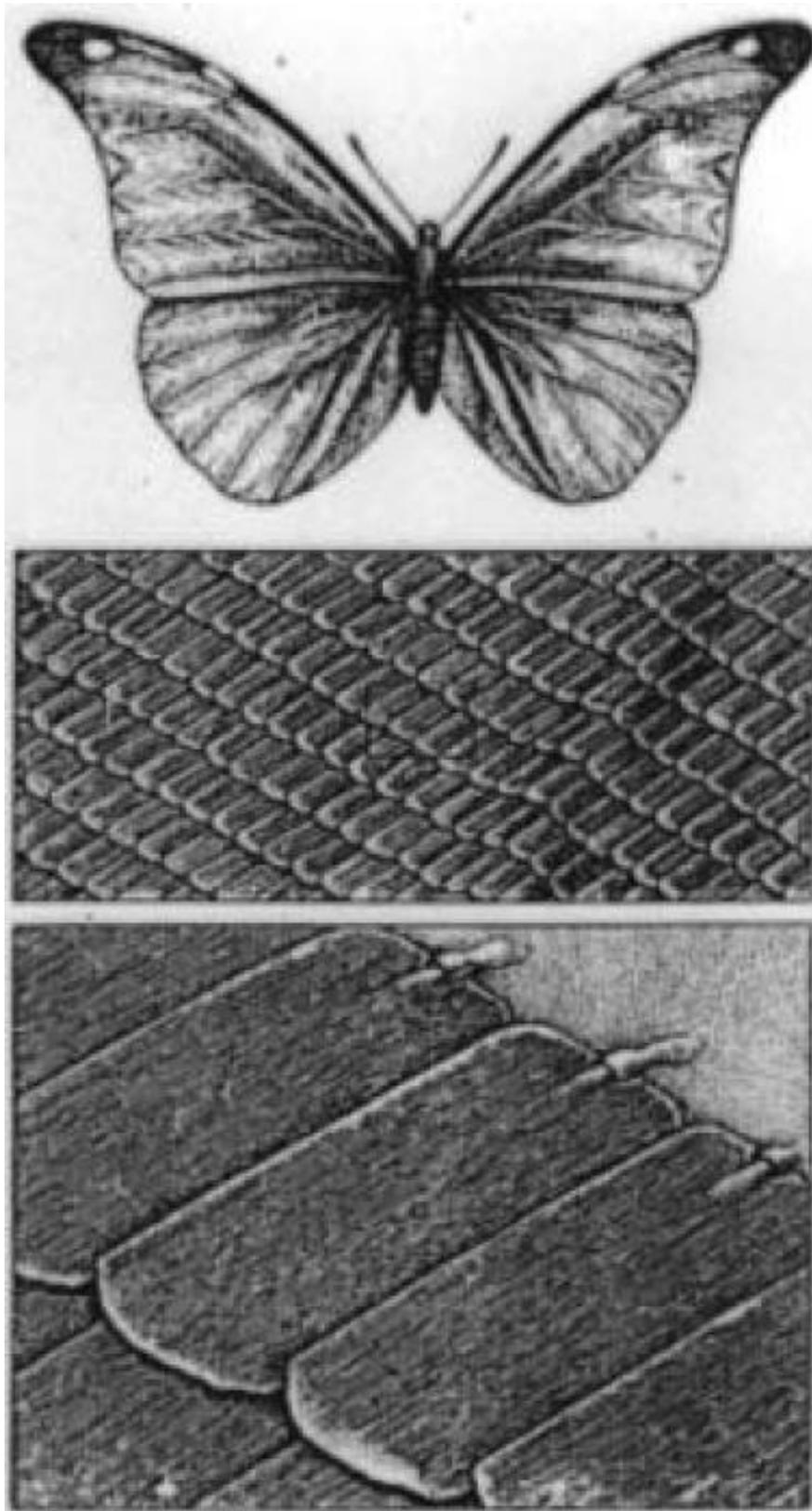


Рис.12. Структуры, дающие голубой цвет крыльев бабочки *Morpho rhetenor*

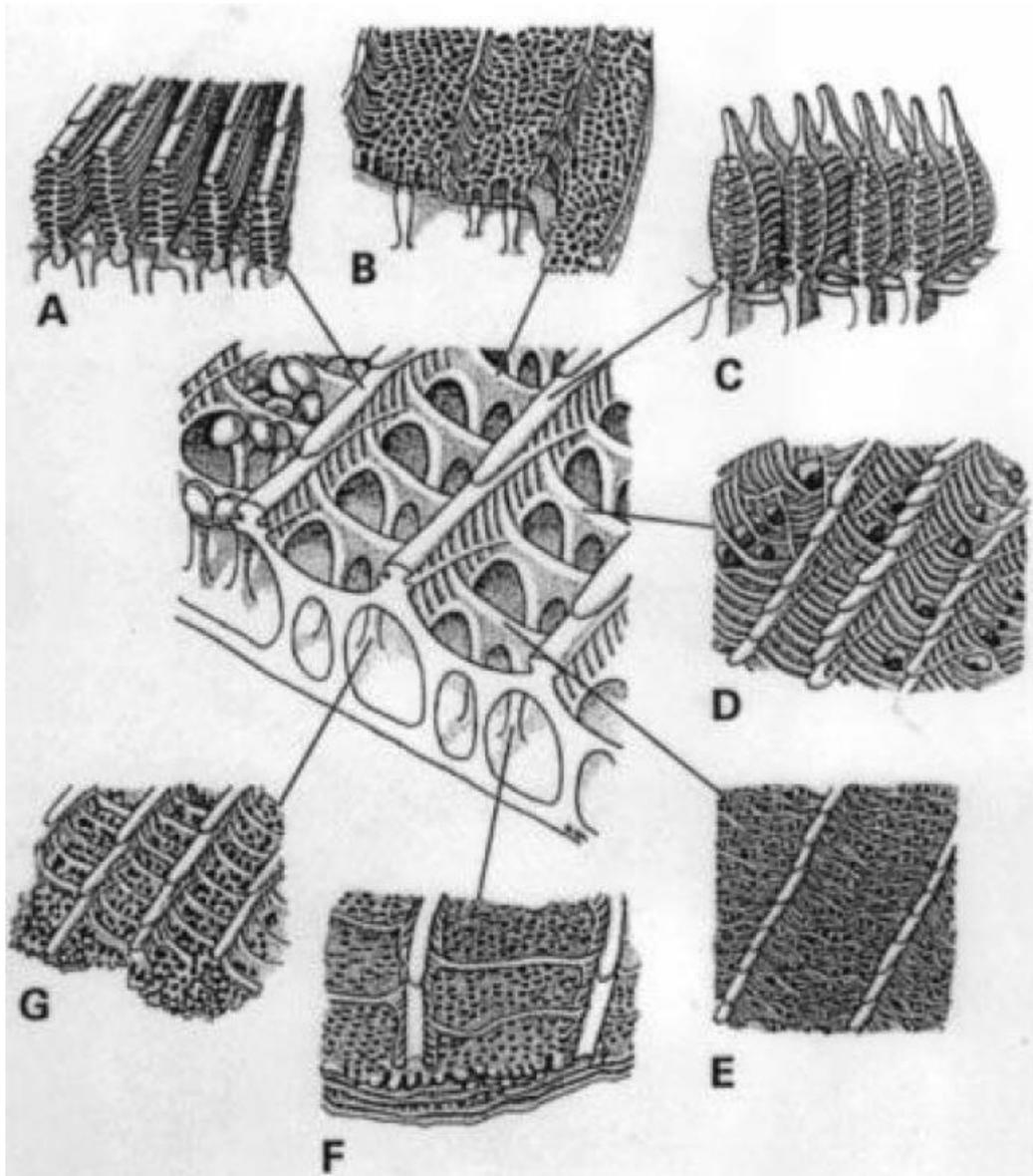


Рис.13. Структуры, приводящие к появлению окраски крыльев различных бабочек

Разнообразие и сложность тонких структур, которые существуют на крыльях бабочек, делает их одними из самых сложных клеточных структур, которые существуют в природе.

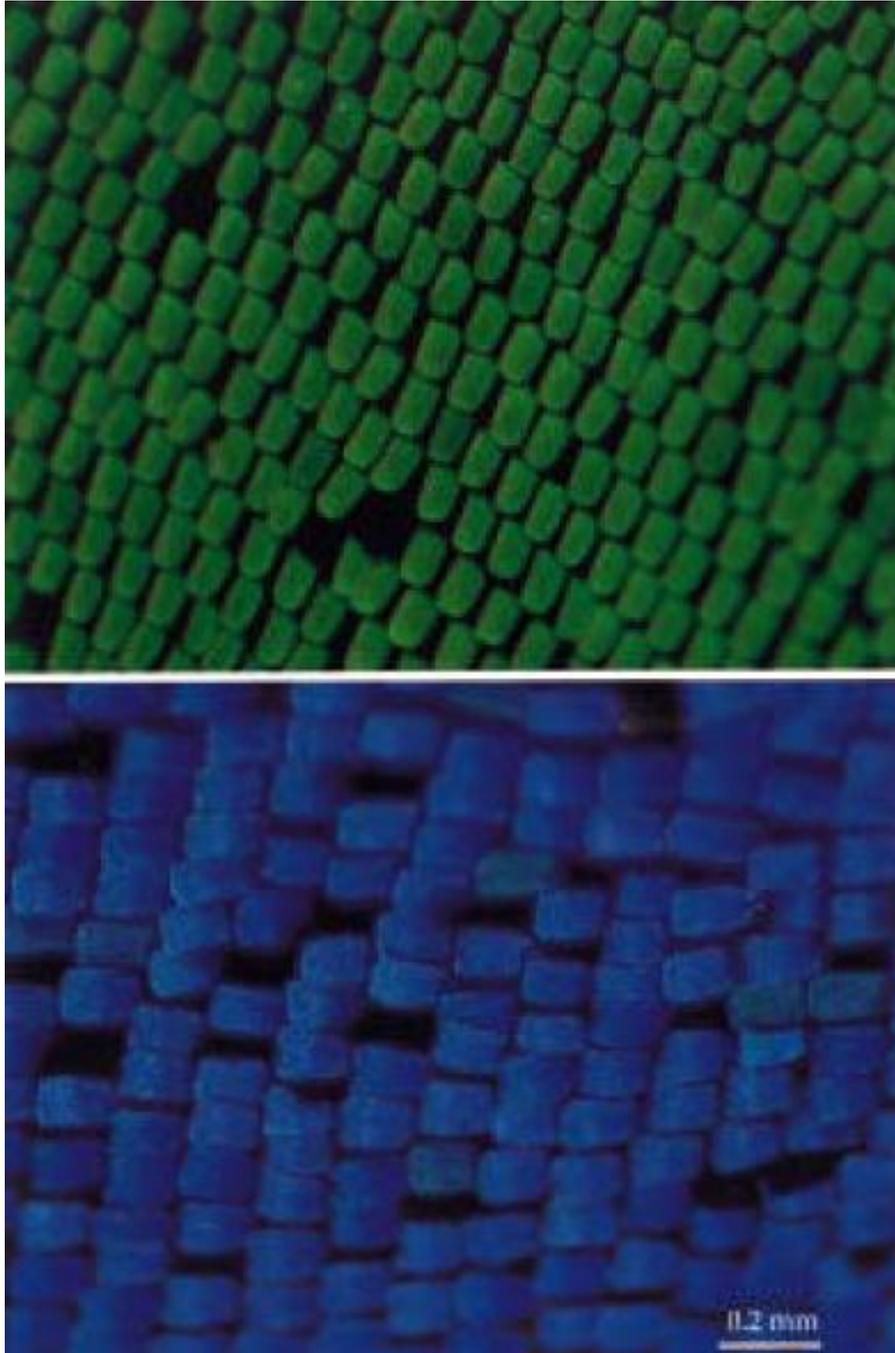


Рис.14. Крылья бабочек различного цвета. Сверху зеленые *Ornithoptera priamus*, снизу синие *Necyria duellona*

На Рис.14 представлены фотографии крыльев бабочек *Ornithoptera priamus* с зелёной окраской и *Necyria duellona* с голубой. Это показывает, с какой точностью помещены пластинки на крыльевой мембране, индивидуальный узор определяет видимый цвет. На Рис.15 представлен спектр отражения от подобной структуры.

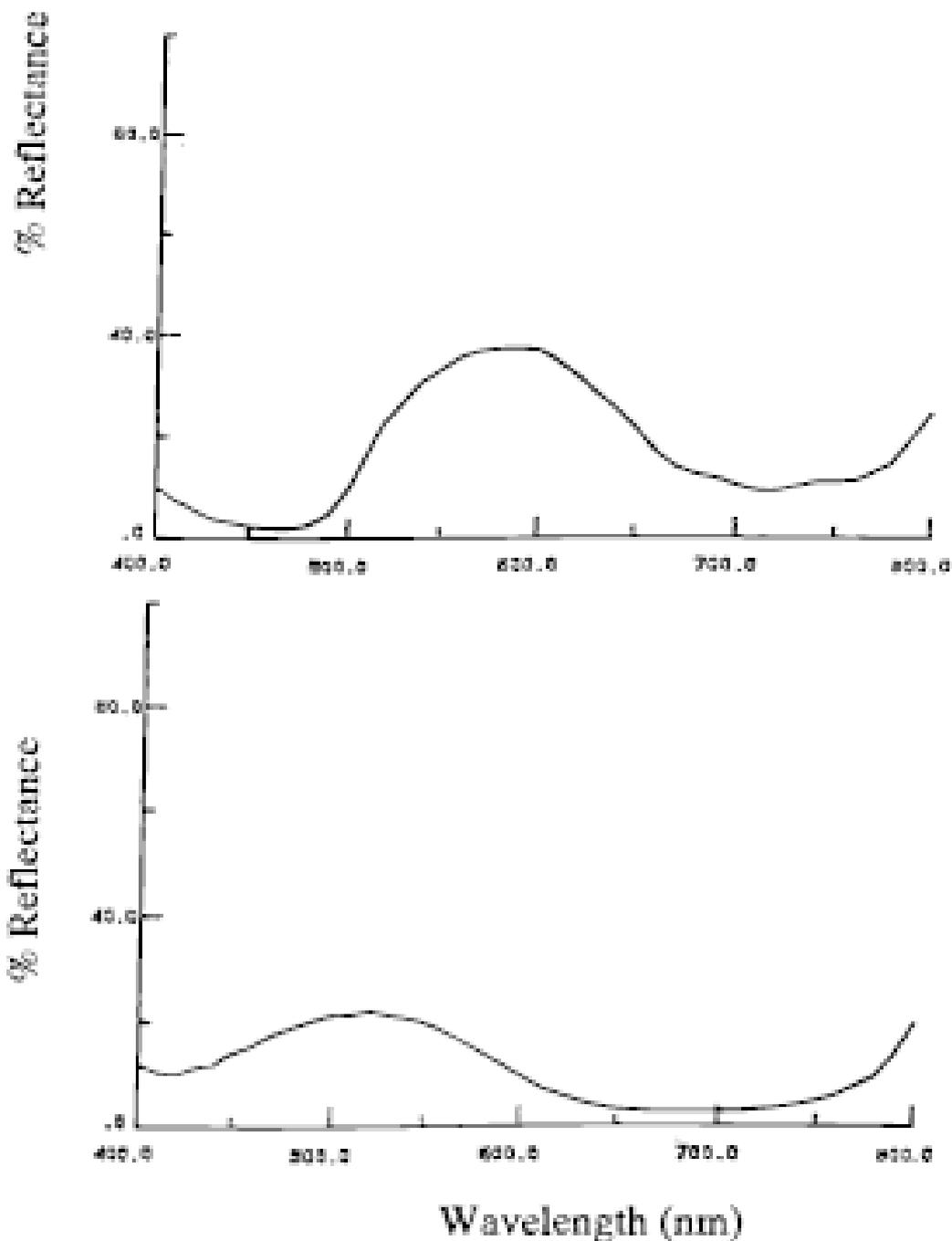


Рис.15. Спектры отражения от крыльев бабочек, показанных на Рис.14

Ясно, что структуры отражают именно зелёный или голубой цвет, попадающий в глаз наблюдателя.

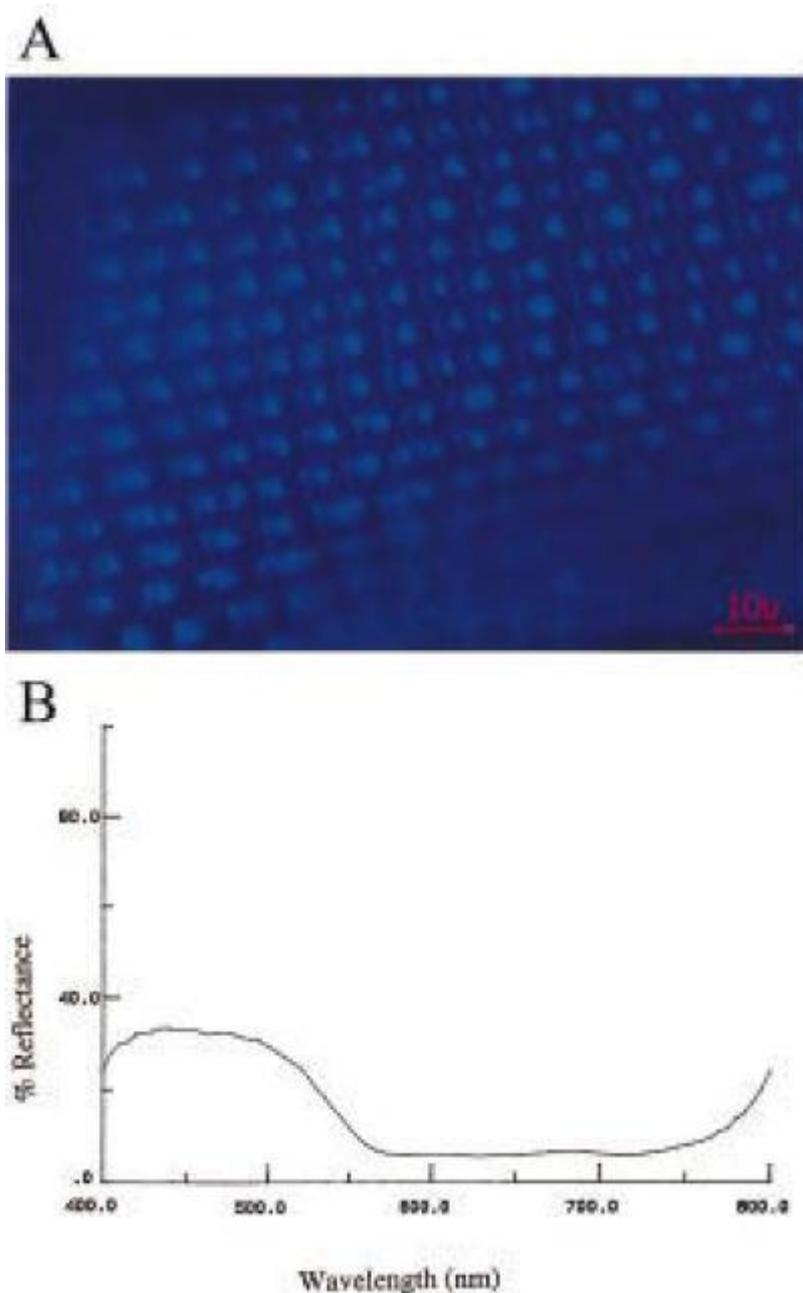


Рис.16. Голубые крылья бабочки *Papilio daedalus* и их спектр отражения

Спектр, представленный на рисунке 16, даёт фото другой структуры (у крыла бабочки *Papilio Daedalus*), которая также отражает голубой цвет. Как видно, эта структура сильно отличается от предыдущих, здесь показан и спектр отражения. Хотя максимум отражения не такой чёткий, тем не менее доминирующий отражённый цвет – голубой.

Интересным эффектом является следующий. На мембране существуют отдельные ячейки, которые остаются видимыми в ярко-зелёном или голубом свете. Этот эффект называется ассимиляцией или распространяющимся эффектом Безольда и наблюдается тогда, когда

структура поверхностных слоёв очень запутанная. Ассимиляция наблюдается тогда, когда цвета, отражённые разными структурами, различны, но могут смешиваться друг с другом.

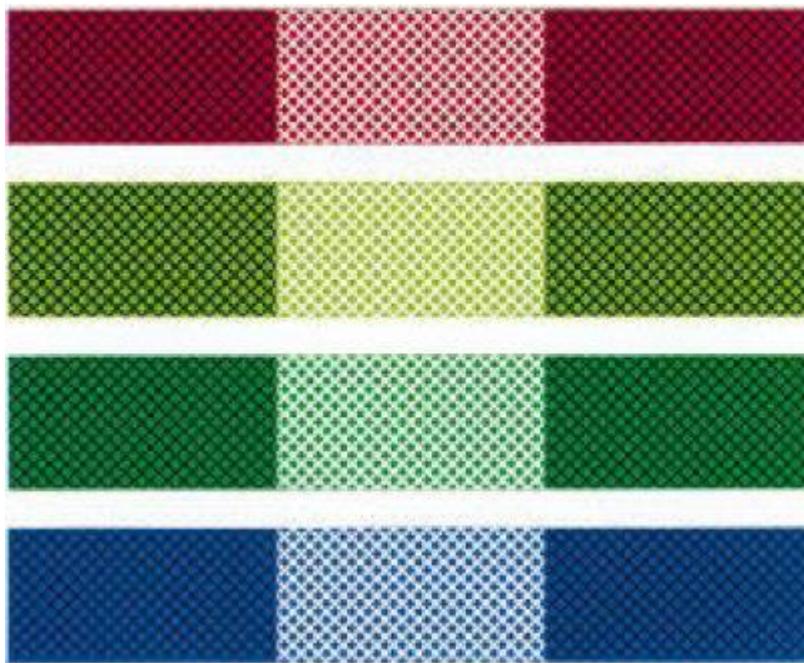


Рис.17. Иллюстрация ассимиляции. Яркость основы одинакова, однако цвет кажется ярче в тех местах, где под ним расположена тёмная клетка, а не белая

Это показано на Рис.17, где эффект ассимиляции связан с четырьмя различными цветами или яркостями, которые возникают от заштрихованных черных и белых структур с наложением цветов. Даже если яркость основы такая же, как у других структур, она проявляется различно в зависимости от наложения черно-белой штриховки.

Ассимиляция часто используется художниками для того, чтобы производить различные зрительные эффекты на наблюдателя. Следует отметить, что этот эффект недостаточно понятен даже для наблюдателя-человека. При этом известно, что это не может быть объяснено эффектами рассеивания на различных областях изображения. Если штриховка точно подобрана относительно восприятия глазом наблюдателя, наблюдается дополнительное смещение цветов, хотя сама штриховка не видна. Если, с другой стороны, элементы штриховки малы по сравнению с пострецепторами наблюдателя, будет иметь место эффект ассимиляции. Таким образом, варьируя расстояние от наблюдателя до наблюдаемого объекта и тем самым меняя относительные размеры структурных элементов объекта, мы можем наблюдать смещение цветов или ассимиляцию. Интересно попытаться представить наблюдательную систему бабочки,

которая должна иметь весьма специфическое цветовое восприятие, так как восприятие цвета весьма важно для жизненного поведения бабочки. Её визуальная система должна иметь специфические особенности. Встречаются ли цветовая ассимиляция у бабочек? В чем может быть преимущество подобных цветовых эффектов? Получить ответы на эти вопросы очень непросто.

В радужных областях крыльев, каждая отдельная область, как хорошо известно, генерирует свой индивидуальный цвет, и исследования показали, что существуют три вида индивидуальных структур, производящих цвет: гребни решётки, плоскости между гребнями и внутренние люмены - все они могут приводить к изменениям оттенков цвета. Гребни-ламели образуют снопы по 5-10 штук в каждом, в зависимости от вида бабочек и генерируемого цвета крыльев. Эти снопы действуют как тонкие плёнки, и вместе с пузырьками воздуха между ламелями они формируют четвертьволновой интерференционный фильтр, который отражает свет, отвечающий условиям конструктивной интерференции.

Обычно необходимо мультиплицировать слои тонких плёнок для получения радужного цвета, так что отражение может достигать единицы для данной длины волны. Хотя отражение от отдельного крыла не достигает единицы, оно оказывается вполне достаточным для восприятия цвета определенным наблюдателем. Имеется доминирующая длина волны, при отражении которая и определяет восприятие определенного цвета, при этом она не обязательно соответствует максимуму отражения. Например, голубой цвет неба не может достигнуть 42%, другими словами, в цветовой гамме неба присутствуют и другие длины волн. Однако из-за доминирования голубого света с длиной волны 476 нм небо воспринимается голубым.

Рисунок 18а показывает фотографии структур, которые дают радужную окраску, рис.18б даёт структуру крыльев *Morpho*, рисунок 18в показывает структуры, ответственные за генерацию цвета. Структура получается на основе кутикулы насекомых, построенных из биополимеров и пузырьков воздуха. Хотя точная структура образующих их материалов неизвестна, тем не менее понятно, что они образованы из хитина и многих других субстанций, включающих, например, белки.

Наглядный пример того, что цвет крыльев обусловлен именно структурными эффектами представлен на Рис.19. Представлены структуры, обуславливающие появление голубого цвета, а ниже – они же, помещённые в ацетон, который вытеснил из них воздух. Замещение воздуха ацетоном приводит к увеличению оптического пути, результатом чего является сдвиг окраски от голубой к зелёной. После испарения ацетона голубая окраска восстанавливается.

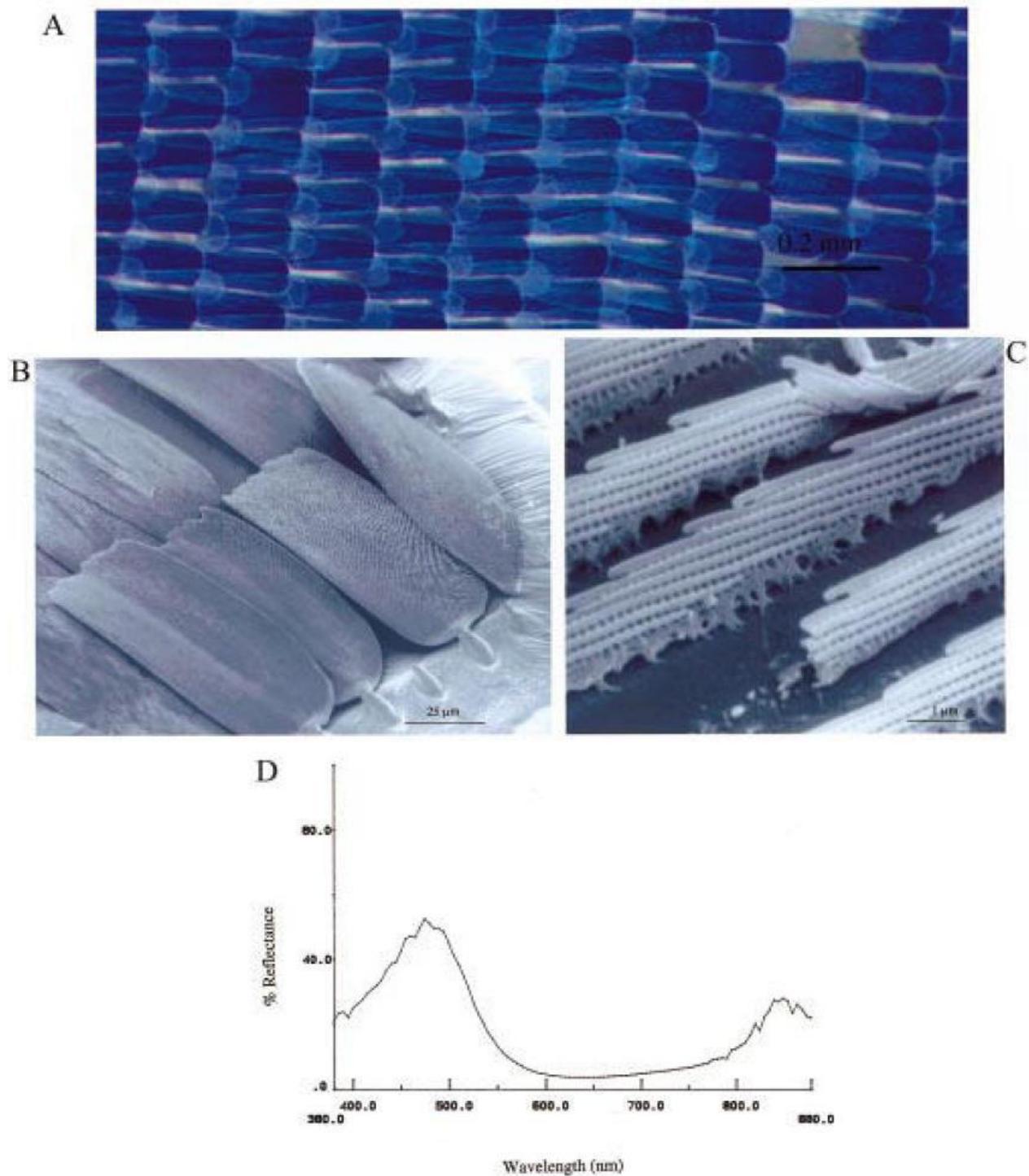


Рис.18. Фотографии крыльев бабочки *Morpho menelaus* при различном увеличении: (а) фотография с микроскопа, (Б) с электронного микроскопа; (в) с электронного микроскопа пачки крыльев и (д) спектр отражения от крыла

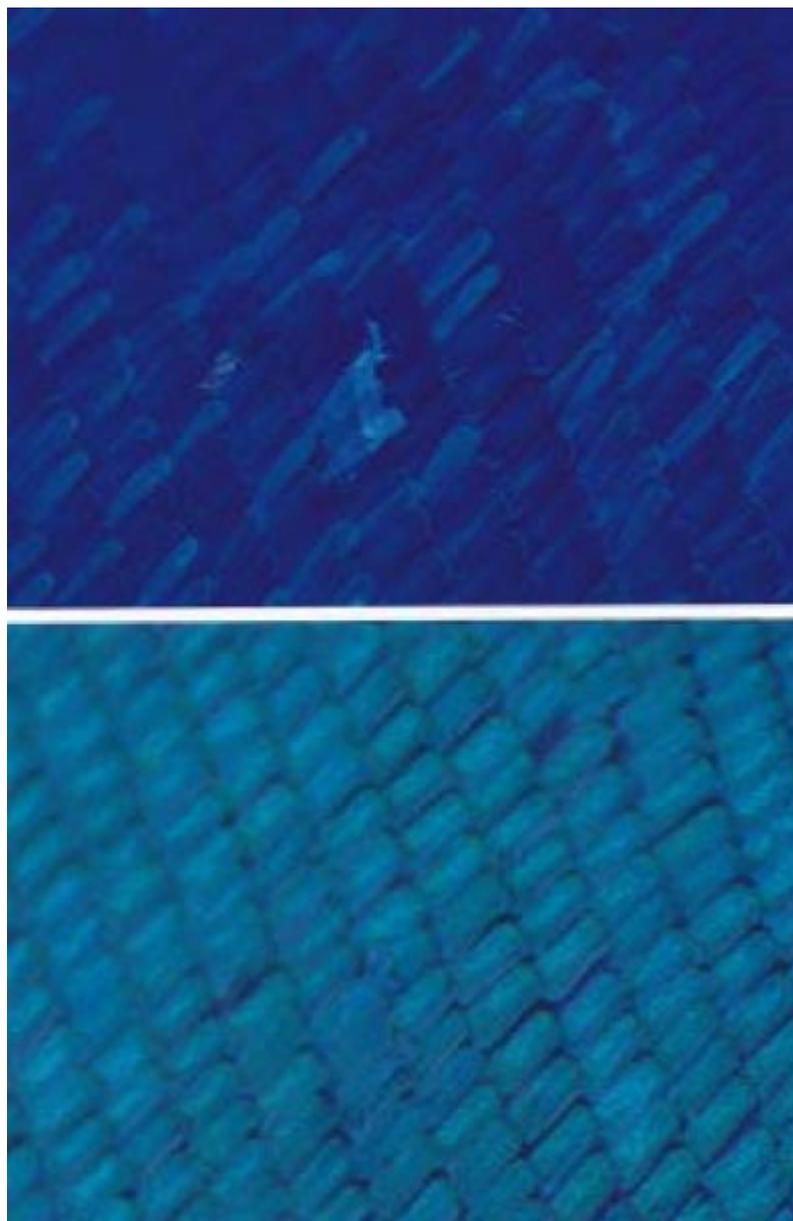


Рис.19. Эффект заполнения пустот. Вверху заполнены воздухом, внизу-ацетоном

Как видно из Рис.18в и 18д, ячейки упорядочены в форме полос. Между полосками можно увидеть цвет ячеек, а в том случаях, если ячейки прозрачные, то цвет подстилающего слоя. В этом случая мы видим два цвета - один, возникающий вследствие дифракции на гребнях решётки, и второй, обусловленный пигментами либо ячеек, либо подстилающего слоя. Это в реальности приводит к формированию цветного узора. Это в принципе может приводить к ассимиляции, как это уже обсуждалось выше, однако мы не знаем, участвует ли в подобных процессах зрение бабочек. Вообще, это очень интересный вопрос, участвует ли явление ассимиляции в цветовом зрении насекомых.

В случае голубой бабочки *Morpho* насыщенный голубой цвет обусловлен содержащими меланин основными ячейками, тогда как радужный цвет связан с мерцающими бликами покровных ячеек. Имеется много примеров такого взаимодействия пигментной и структурной окрасок.

Основная структура крыльев может быть также связана с присутствием кутикулы. Кутикулы содержат меланин, который поглощает часть света, прошедшего сквозь покровные тонкослойные структуры, ответственные за появление радужной окраски, и на пасущемся скоте, например, насекомые выглядят как имеющие тусклый оттенок или темно-зелёные, что характерно для окраски меланина. В попытке объяснить возникновение окраски модели, основанные на рассмотрении тонкоплёночных структур, рассматривались несколькими авторами, и все они пришли к выводу, что эти структуры могут быть описаны как набор кутикулы, разделённых пузырьками воздуха, организованные определенным образом. Для простоты их рассматривают как набор плоскопараллельных слоёв, хотя подобная модель и очень простая, она имеет высокую предсказательную силу.

Структурный цвет может также возникать в углублениях между зубьями гребёнки. Цвет может возникать вследствие оптических эффектов в наборе подобных микрогребёнок. Отнюдь не редкость, когда набор подобных гребёнок играет роль дифракционной решётки, что и приводит к возникновению окраски. Чешуйки мотылька, *Trichoplusia orichalcea*, являясь примером такой дифракционной решётки, как это показано на Рис.20.

Дифракция падающего света на структуре, изображённой на рисунке, ответственна за появление металлической жёлтой окраски и зеркального отражения, а также за поляризацию отражённого / рассеянного света. У некоторых бабочек набор скрещённых или периодических решёток трансформировался в набор периодических пор (с диаметром 200- 400 нм), которые производят голубую окраску.

Структурное окрашивание может быть также связано с масштабом просветов между структурами. Известны по крайней мере три семейства чешуекрылых (*Lycaenidae*, *Papilionidae*, *Uranidae*), окраска которых обусловлена присутствием четвертьволновой плоскости, которая ответственна за интерференцию различных цветов и появление соответствующей окраски. Эти структуры ответственны за то, что тела этих насекомых непрозрачны и обладают высокой отражательной способностью, скрывая таким образом любые структуры, лежащие под ними. Первые два семейства обладают также другими цветопроизводящими элементами, а именно трёхмерно организованной решёткой пузырьков воздуха, помещённой в мягкую полимерную матрицу. Этот элемент даёт сверкающий зелёный цвет. Постоянная решётки для таких структур равна примерно половине длины волны видимого света (примерно 520 нм), и она

таким образом попадает в категорию субмикрометровых структур, дающих дифракционную решётку нулевого порядка, делая более высокие порядки быстро исчезающими и тем самым препятствуя дальнейшему распространению пучка света.

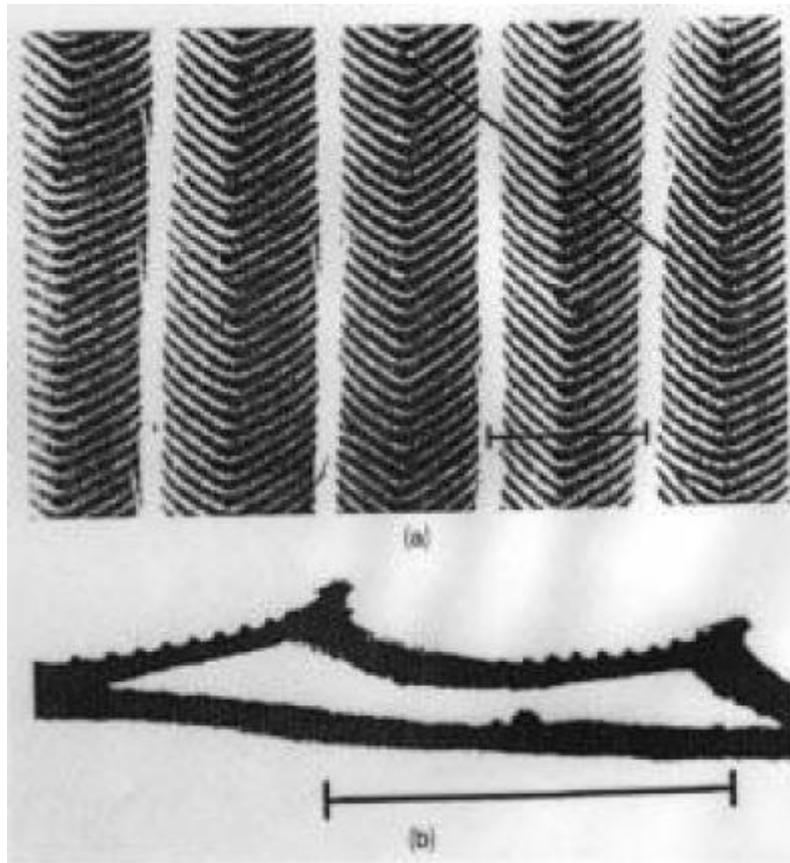


Рис.20.Электронная микрофотография крыла мотылька (вид сверху (a) и разрез ребра

Многие из тех структур, которые были обсуждены выше, схематически представлены на Рис.13. Это наглядно демонстрирует, как различные модификации исходных основных структур крыльев позволяют получать множество различных структур через самоорганизацию, что исследуется уже многие десятилетия. Несмотря на весь прогресс этих исследований, мы все ещё очень далеки от того, чтобы понимать, как клетки организма способны давать такое множество разнообразных структур, обеспечивающих удивительное богатство расцветок и узоров крыльев многочисленных бабочек.

Примером, когда цвет получается в результате эффекта дифракции, являются крылья бабочек семейства Lycaenidae (Lepidoptera).

Представитель этого семейства Зеленый Хвостаток (*Callophrys rubi*) имеет однородную зелёную блестящую окраску всей поверхности крыльев. Исследование в микроскопе показали, что поверхность крыльев покрыта

мозаикой из чешуек в виде неоднородных полигональных зёрен, исследования в электронном микроскопе показали, что каждое зерно, в свою очередь имеет сложно организованную структуру.

Это представлено на Рис.21, каждое зерно является системой взаимопроникающих кубических структур. Индивидуальные зерна имеют размер $5.4 \mu\text{m}$ с постоянной решётки $0.257 \pm 0.025 \mu\text{m}$, На Рис. 22 представлен спектр отражения от этой структуры, видно, что максимум попадает в зелёную область спектра. Это соответствует и теоретически рассчитанной кривой отражения по формуле $I/I_0 = \sin^2 x$, где $x = 2\pi t/\lambda - \lambda_0$, где t – это толщина стенок структур на Рис.21. Здесь λ_0 определяется как $2/g \sin \theta$, где g есть параметр обратной решётки для оптического пути, а 2θ – это угол между падающим лучом и лучом после дифракции. Оптический путь g немного больше, чем размеры структуры, и доля превышения зависит от состава крыла на пути луча. Видно, что экспериментальная и рассчитанная спектральные зависимости хорошо соответствуют друг другу, отличаясь только по магнитуде.

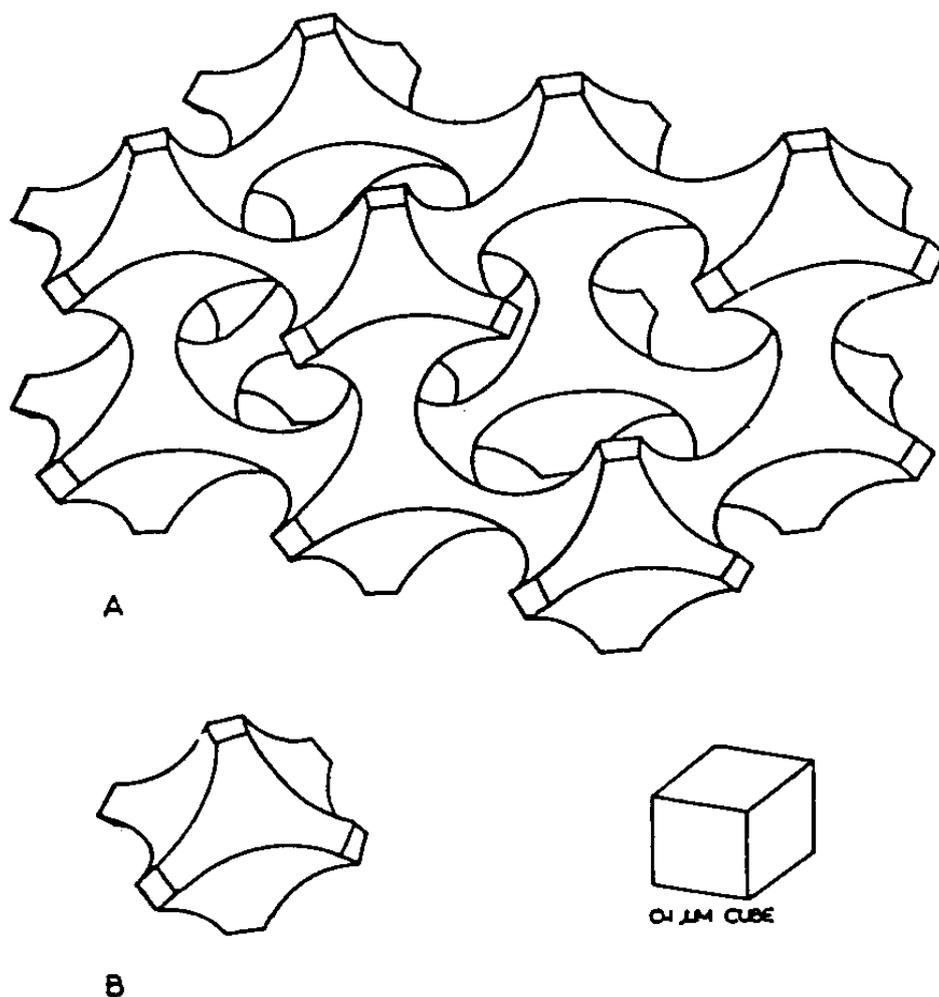


Рис.21. Модель крыла бабочки

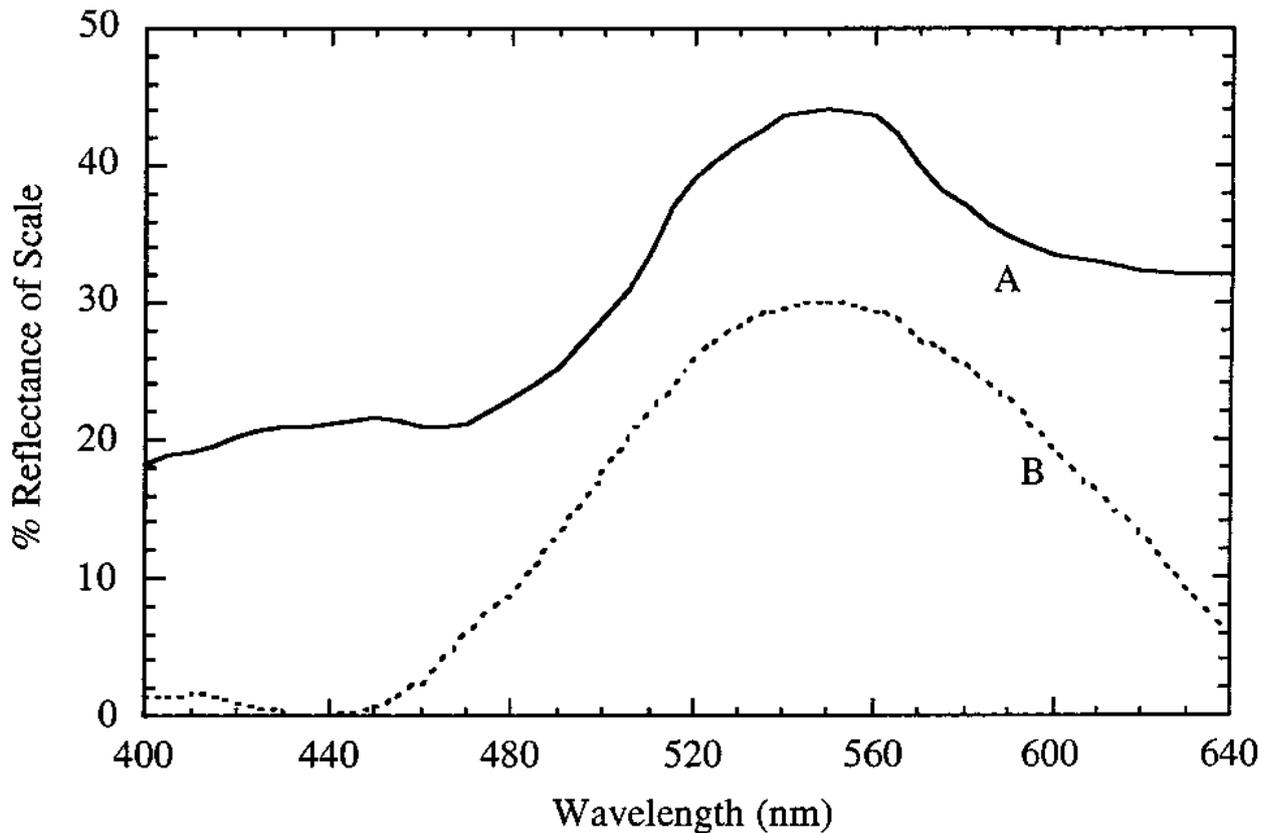


Рис.22. Экспериментальный и рассчитанный спектр отражения от крыла бабочки

3.2. Решётки нулевого порядка

Дифракционные решётки с шагом, сравнимым с длиной волны видимого света или меньше, рассматриваются как решётки нулевого порядка. Это связано с тем, что световой луч, попадая на такую решётку, испытывает дифракцию первого либо более высокого порядка и, таким образом, не участвует в отражении. Подобные структуры весьма распространены в природе, рассмотрим подобную структуру (Рис. 23). Если решётка состоит из двух материалов с показателями преломления n_1 (обычно воздух) и n_2 , при нормальном падении света дифракция не будет наблюдаться ни для прошедшего, ни для отражённого лучей, если $p < \lambda/n_1$ (λ/n_2). Это наблюдается для крыльев бабочки *Callophrys rubi*. Цвет, который отражается и пропускается, будет зависеть от показателя преломления, глубины рельефа и длины волны падающего света.

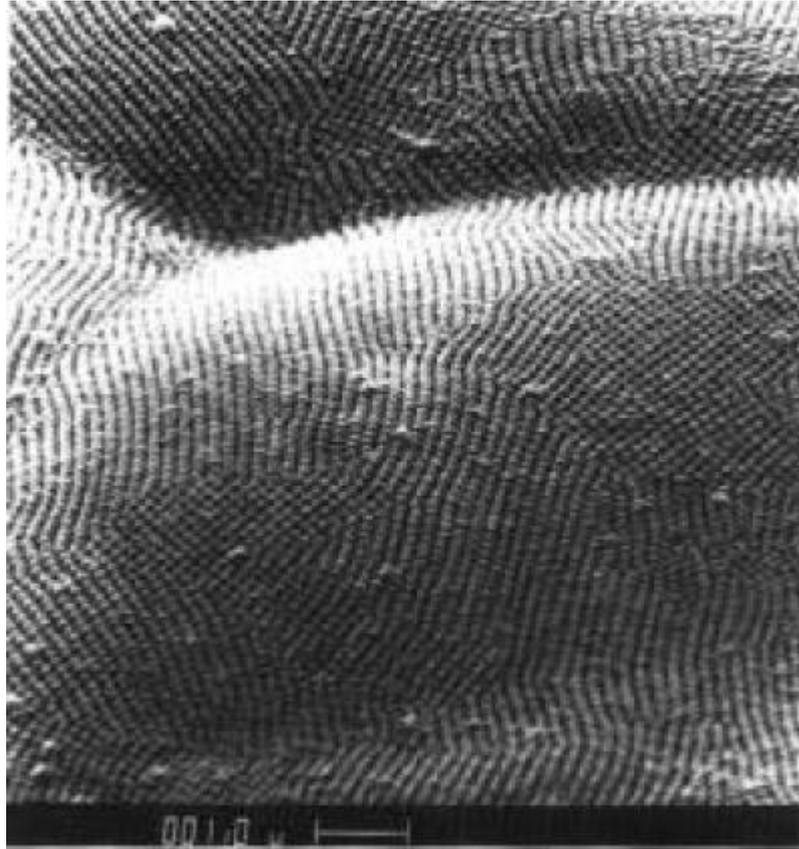
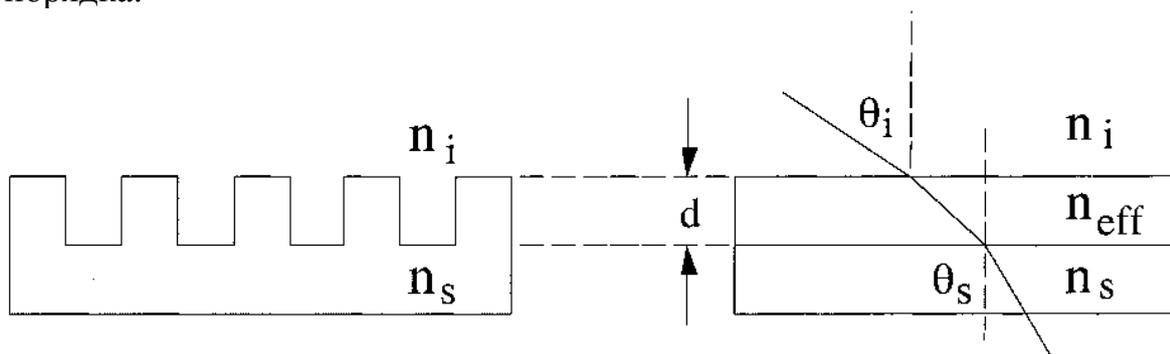


Рис.23. Электронная фотография фронтальной поверхности крыла бабочки

Очень интересно исследовать эффекты отражения и пропускания от субволновых структур, встречающихся в природе. Пример – Рис.18в: у данной структуры размер пузырьков воздуха между рёбрами составляет $01=02 \mu\text{m}$, т.е. она удовлетворяет всем параметрам решётки нулевого порядка.



n_i, n_s, n_{eff} : the refractive indices of the air, substrate, and effective scale area, respectively

Рис.24. Модель крыла бабочки как структуры нулевого порядка.

3.3. Блеск глаз бабочек

Мы уже обсудили цвет крыльев бабочек и структуры, которые ответственны за появление этого цвета. Глаза многих насекомых содержат структуры, размер которых сравним с длиной волны видимого света. Рассмотрим некоторые примеры подобных структур. Обсуждённые выше оптические эффекты наблюдаются в глазах многих насекомых.

Сложный глаз насекомых состоит из набора маленьких глаз, которые называются *ommatidia* и которые плотно упакованы на поверхности головы насекомого. Каждый маленький глаз позволяет видеть лишь маленькую долю обзора, обычно несколько градусов относительно его центральной оси. Каждый глазок обладает оптикой, необходимой для фиксации и трансформации попадающего в него света. Эта оптическая система включает фотодетектор, состоящий из восьми клеток. Вне этих сетчатых клеток (из-за возможности переизлучения) располагается нейтральная часть этой оптической системы. Глаза бабочки воспринимают свет с длиной волны 0.3- 0.65 $\mu\text{м}$, что перекрывает лишь часть спектра, воспринимаемого человеком, т.е. ближний ультрафиолет с длиной волн 0.3- 0.4 $\mu\text{м}$, поэтому бабочки не видят дальнюю часть видимого света. У бабочек чувствительность к ультрафиолету связана с наличием специальных фоторецепторов. Известно, что у насекомых есть по крайней мере пять фотопигментов/ фоторецепторов.

На Рис.25 представлен типичный фотоэлемент глаза насекомого. Секции расположены перпендикулярно к поверхности глаза. Оптические характеристики глаза зависят от сигналов, которые генерирует нейтральная часть оптической системы. Показатели преломления хрусталика и сетчатки выше, чем у окружающей среды, они играют роль волноводов. Хрусталик представляет из себя длинный прозрачный цилиндр, несколько сот микрометров в длину и диаметром несколько микрометров. Он функционирует как волновод, тогда как сетчатка действует только как фотодетектор, но и как волновод. Свет, несущий информацию, проходит через хрусталик и попадает на сетчатку как фотодетектор. Хрусталик действует как волновод без оптических потерь, либо эти потери зависят от взаимодействия с имеющимися в глазе.

Если вторичный пигмент активируется попавшим на него светом (в сравнении к тёмному режиму, адаптированному к темноте), этот пигмент перекрывает волновод, из-за чего затухающие волны возвращаются назад из волновода, тем самым заставляя волны распространяться вне этого канала. Это приводит к тому, что меньше информации об объекте поступает к фотодетектору, тем самым затрудняя дневное видение насекомого. Мы не ставим здесь эволюционных проблем, связанных с этим явлением, хотя они, конечно, существуют.

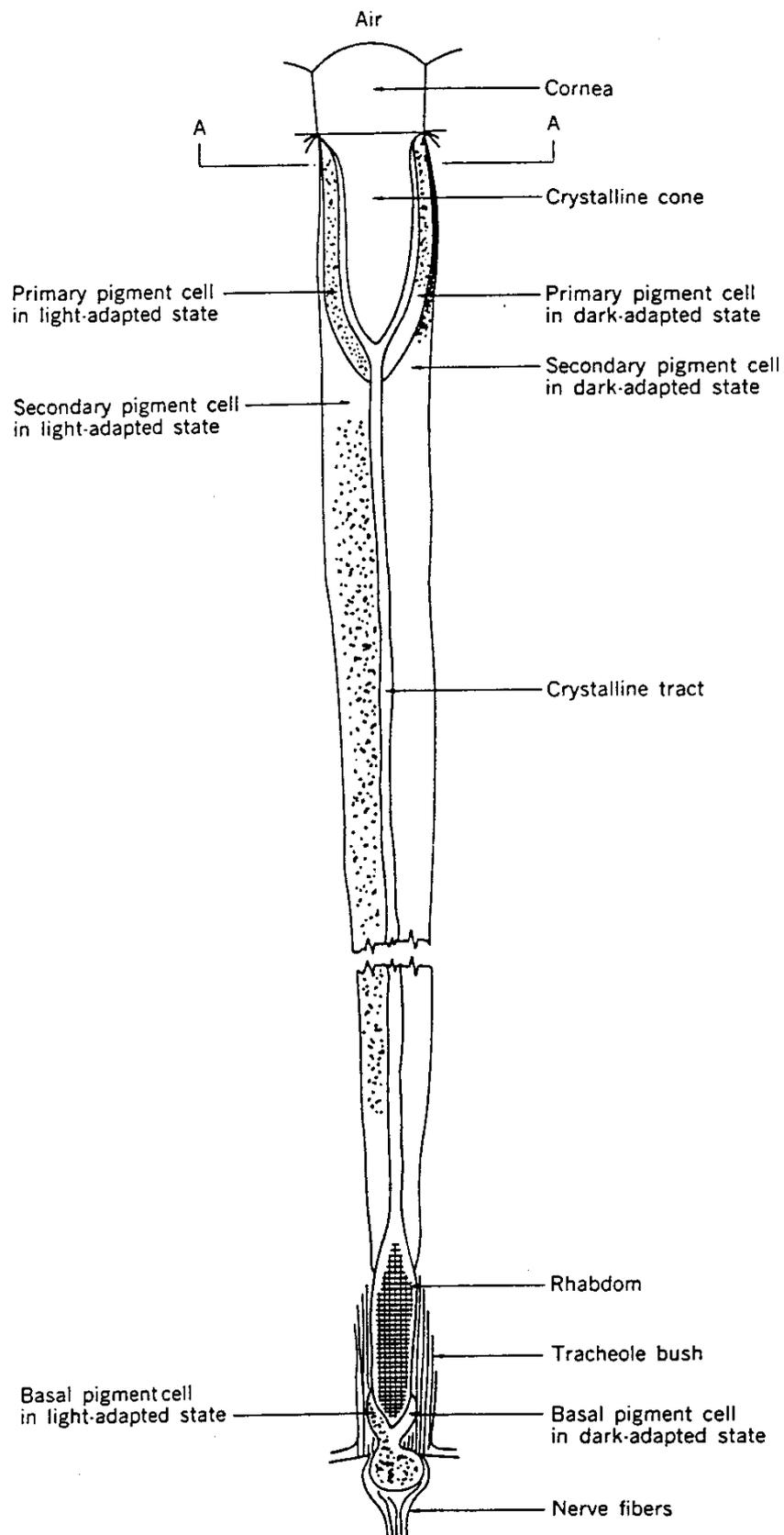


Рис.25. Схема типичного малого глаза насекомого. Левая часть показывает активное днём состояние, правая- адаптированное к ночи

Сейчас мы обсудим такое явление, как блеск глаз. Это наблюдается ночью, когда мотылёк или бабочка попадают в луч света, при этом их глаза ярко сверкают. Это происходит из-за наличия в глазах отражающего слоя или интерференционного фильтра, так называемого зеркальца, которое является частью пучка трахеол (см.Рис.25). Пучок трахеол – это плотно упакованный набор трубок, наполненных воздухом, которые служат отражающими слоями, зеркальцем, которое и вызывает блеск глаз. Другим примером блеска глаз, связанным с отражением, который, конечно, всем известен, является блеск глаз кошки. Бабочки тоже имеют такое зеркальце. Это сияние глаз у бабочки Монарх схематично представлено на Рис.26.

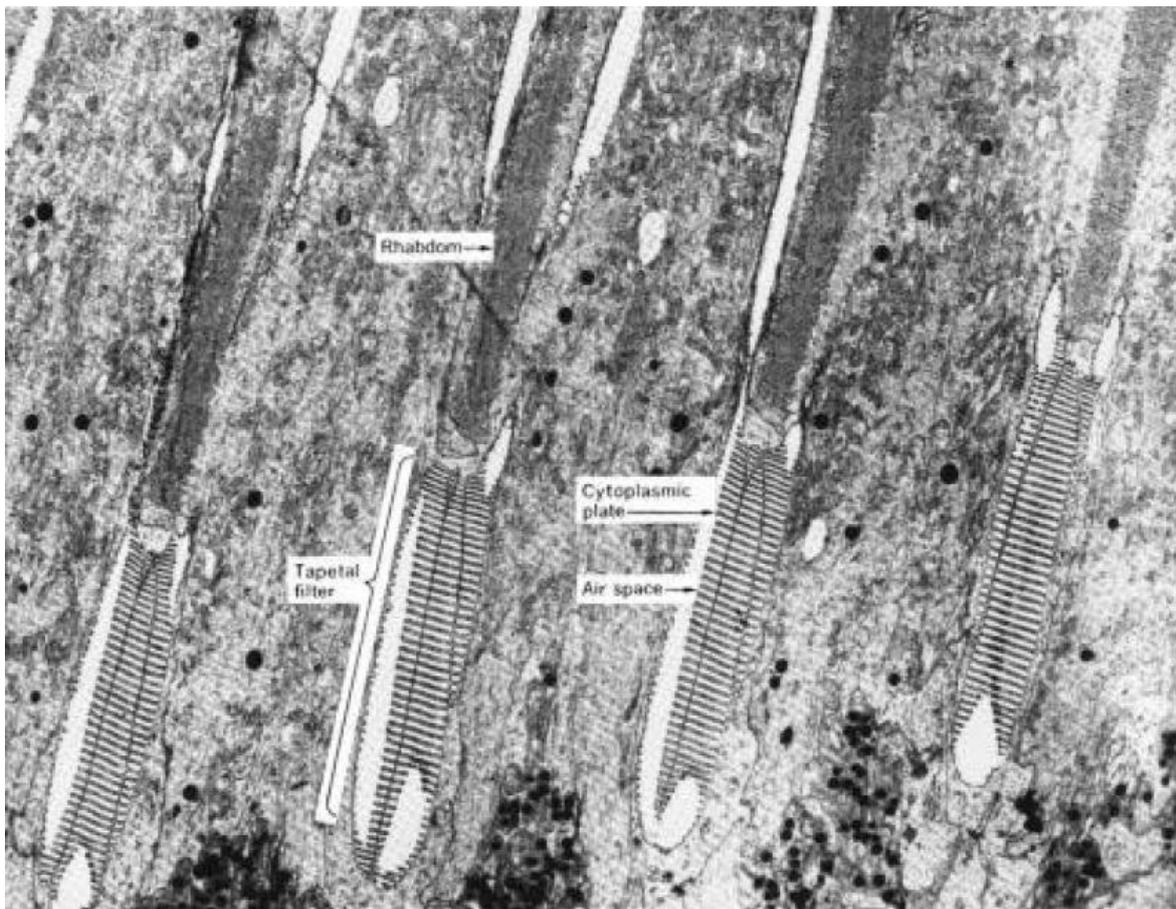


Рис.27. Электронная фотография сечения малого глаза бабочки

Этот эффект обусловлен тем, что у всех бабочек глаз имеет так называемый фильтр отражения (интерференционный), расположенный на нижнем слое сетчатки. Это было показано с помощью электронной микроскопии. Рисунок 27 иллюстрирует почти продольный разрез нескольких омматидий глаза бабочки. На этом рисунке показаны рабдомы и отражающий фильтр. Стоит обратить внимание, что зеркальце глаза бабочки представляет из себя структуру с периодически изменяющимся показателем преломления из-за повторяющейся сетки цитоплазматических

плоскостей, разделённых слоями воздуха. Это даёт четвертьволновую плоскость, превращающуюся в интерференционный фильтр, который отражает свет, попадающий на сетчатку, и выводит его вне глаза, так что мы наблюдаем цветное сияние глаз. Волны, соответствующие полосе пропускания фильтра, попросту проходят через стопку фильтров и поглощаются нижними пигментами.

Необычным аспектом системы фильтров глаза бабочки является то, что каждое зеркало сетчатки имеет собственные характеристики как фильтр, что делает их отличными от находящихся в соседних радомерах, и они взаимодействуют, как это показано на Рис.28. Очевидно, что имеется огромное разнообразие интерференционных фильтров в визуальных системах бабочек.

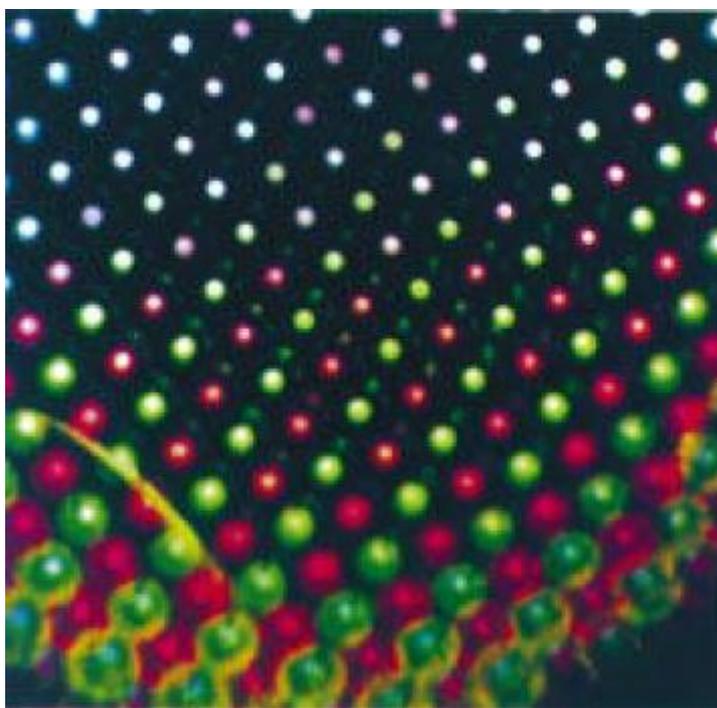


Рис.28. Фотография глаза бабочки, имеющей сразу четыре фильтра.

3.4 Оперение птиц

Оперение многих птиц имеет радужную окраску, что возбуждало интерес учёных ещё во времена Ньютона. Экспериментально было очевидно, что ключ к решению загадки появления радужной раскраски лежит в области тонких плёнок: отсутствие пигментов, сдвиг максимума отражения или цвета к коротким длинам волн с увеличением угла падения света и смещением окраски перьев в сторону красного цвета, если их помещают в среду с большим показателем преломления, чем у воздуха.

Хотя причины появления радужной окраски оперения были поняты достаточно давно, структурные факторы, которые и определяют появление

этой окраски, стали проявляться только начиная с 1960-х годов. Рис.29 даёт фотографию с микроскопа оперения колибри *Heliangelus viola*, которая имеет радужную окраску, а именно, голубой горжетки.



Рис.29. Фотография мозаичной структуры пера колибри.

Фотография показывает набор эллиптических пластинок, примерно 2-3 μm в длину и 1-1,5 μm в ширину, образующих удивительную мозаику, подобную скошенному полу. Пластинки организуются в кластеры или клетки, разделённые диагональными меняющейся ширины, которые иногда называют усиками. Пластинки встроены в тёмную матрицу, и именно они приводят к появлению радужной окраски. При измерении отражения как функции угла падения было показано, что показатель преломления для разных перьев меняется от 1,85 для красных до 1,5 для голубых. Возникает вопрос, с чем связано подобное изменение показателя преломления? Оно может быть обусловлено набором причин, например, каждый цвет связан с материалом, имеющим определенный показатель преломления, или цвет возникает благодаря интерференционной плёнке, построенной из двух материалов: один с высоким, а другой с низким показателем преломления, и показатель преломления плёнки будет меняться при изменении соотношения компонентов. С точки зрения природы последний путь является очень изобретательным, и это было реализовано, так что используются два вещества – воздух и кератин. Как это делается, показано на Рис.30. Пластинки состоят из тонких пузырьков воздуха, разделённых плёнками кератина, формируя не менее восьми слоёв. Эта структура ответственна за тонкоплёночную интерференцию и обеспечивает окраску оперения колибри. Эта простая система работает и многих других птиц.

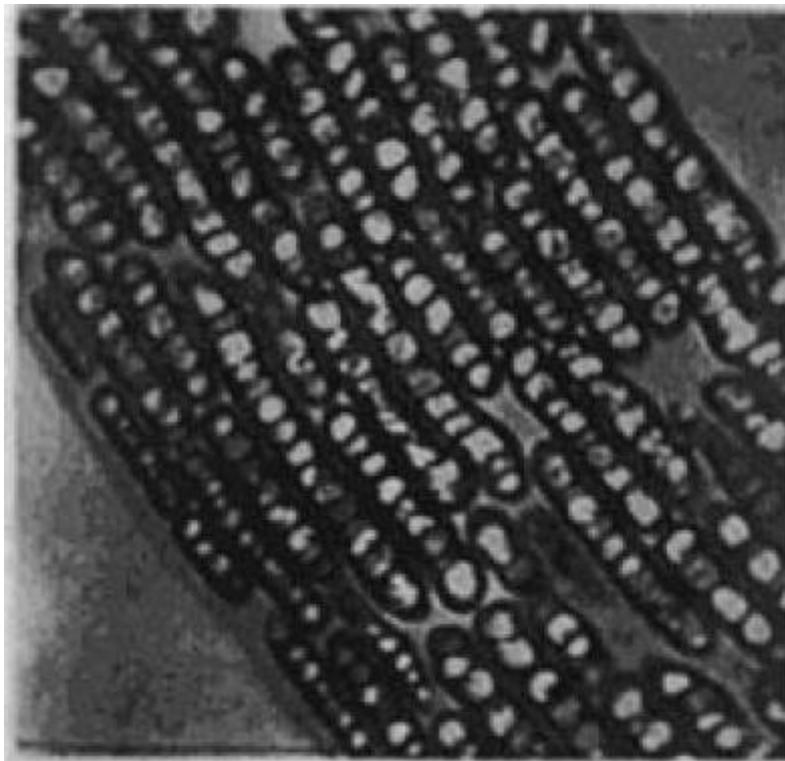


Рис.30. Фотография пера колибри, имеющего радужную окраску.

4. Окраска жуков

4.1. Окраска экзокутикул жука скарабея. Селективное отражение

При исследовании оптических свойств экзокутил жуков было обнаружено много интересных эффектов: селективное отражение лево циркулярно-поляризованного света, высокое оптическое вращение для отражённого света и сияющий металлический блеск. Все эти оптические свойства подобны тем, что наблюдаются у холестерических жидких кристаллов. Тем самым оптические свойства экзокутикул и холестерических жидких кристаллов совершенно аналогичны. Начнём с обсуждения последствий этих наблюдений для прояснения появления окраски.

Так, увеличение угла падения света на кутикулы приводит к сдвигу отражения к меньшим длинам волн. Это ясно указывает на доминирование эффектов интерференции. Мы уже детально обсудили подобные эффекты, однако при этом отсутствовало появление циркулярно-поляризованного света. При этом наблюдается интересный эффект. Цвет прошедшего света отличается от цвета отражённого света, его поляризация имеет противоположную направленность, то есть цвет света при пропускании не соответствует цвету вследствие двулучепреломления.

Было найдено, что отражённый цвет является не только циркулярно-поляризованным, но имеет и право-поляризованную компоненту. Так, для золотистых жуков пик отражения составляет примерно 560 нм для лево-поляризованного света, и широкий пик отражения для право-поляризованного центрированный между 575 и 624 нм, с небольшой компонентой в области голубой части видимого света. Основная причина этих оптических свойств - холестерическое состояние экзокутикул.

Холестерические жидкие кристаллы с шагом спирали, попадающим в область длин видимого света, селективно отражают свет в соответствии с уравнением $\lambda_{max} = np$, где n – это показатель преломления. Ширина пика будет составлять $\Delta\lambda = \Delta np$, где Δn – это двулучепреломление. Отражённый таким образом свет является очень насыщенным и имеет металлический блеск. При этом этот цвет более насыщен и ярк, чем у красителей.

У жуков спиральные или геликойдные структуры образуют молекулы хитина, что приводит к селективному отражению с металлическим блеском. Для усиления этого эффекта используются структуры, подобные чередующимся слоям холестерических и нематических жидких кристаллов. Для создания нематических слоев жуки используют молекулы мочевой кислоты.

4.2. Изменение окраски жуков

Существует не так много насекомых, способных быстро изменять свой цвет, за исключением хорошо известных примеров миграции пигментов в радужной оболочке глаза. Но такие примеры все же есть, например, жук Геркулес, *D. Hercules*, быстро изменяет свой цвет с жёлто-зелёного на тёмный и обратно на жёлтый всего за несколько минут. На Рис. 31а показаны два таких живых жука.

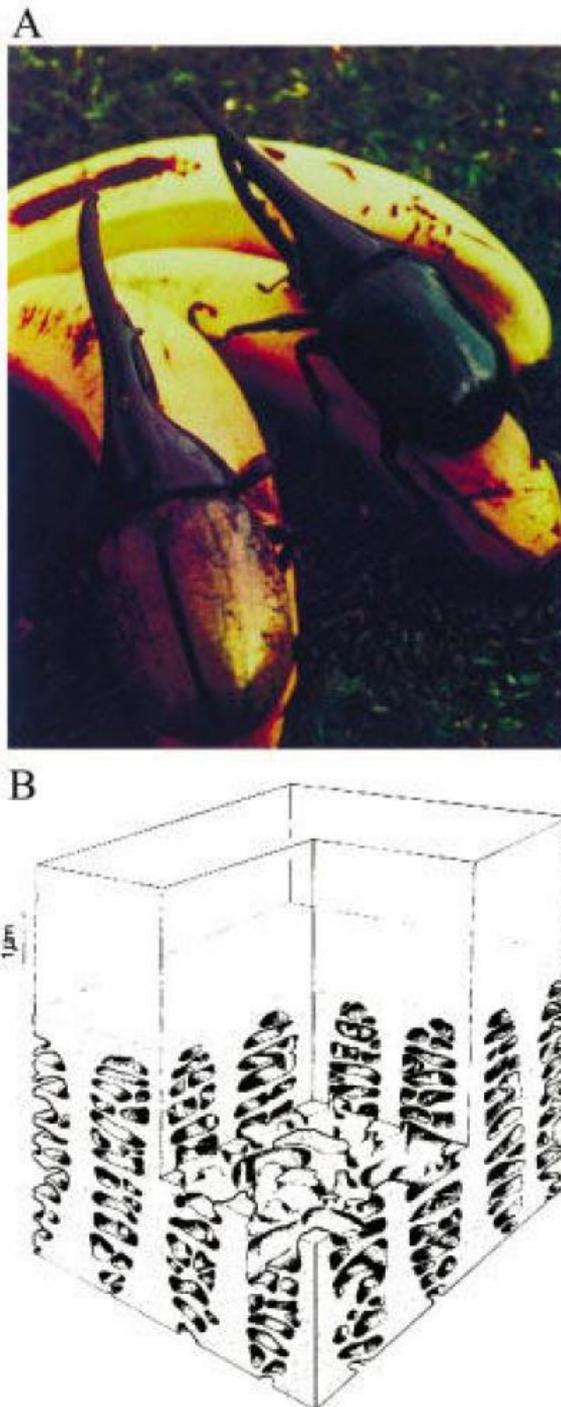


Рис.31. Живые жуки Геркулесы и структуры их надкрылок, обеспечивающая появление окраски

У одного надкрылья жёлтые, у другого тёмные. Есть и другие насекомые, способные быстро изменять свой цвет, например, жуки подсемейства Cassidinae, способные быстро изменять цвет в зависимости от степени гидратации надкрыльев. Радужная окраска этих жуков появляется вследствие интерференции при отражении от тонкослойных структур. Это явление уже обсуждалось, изменение в степени гидратации вызывает изменение толщины плёнок, что и ведёт к изменению цвета.

Внешний слой кутил жука Геркулес прозрачен и имеет толщину порядка 3 μm , ниже которого лежит жёлтый губчатый слой толщиной 5 μm , ниже этого лежит тёмный слой, отражающий свет. Электронная микроскопия показала, что губчатый слой состоит из колонок или столбиков, перпендикулярных к поверхности кутикулы, их толщина составляет примерно 0,5-1 μm , которые связаны нерегулярными перемычками, перпендикулярными к их поверхности (Рис.31б), кутикулы смотрятся жёлтыми, когда трубки заполнены воздухом, и становятся темными при заполнении водой. Это вызвано тем, что гидратированное состояние характеризуется однородным показателем преломления, что приводит к тому, что виден именно нижний слой.

4.3. Дифракция цветов у жуков и других животных

Дифракционные решётки производят цвет. Чем тоньше решётка, тем более она способна производить белый цвет. Кутикулы многих жуков имеют дифракционные решётки, так же, как и змеи, например индиговая змея. Рис.32 даёт пример цветов, наблюдаемых у различных жуков.

Дифракционная решётка, ответственная за появление подобного цвета, показана на Рис.33.

Видно, что решётка совершенная. Следует отметить, что при отражении от этих решёток наблюдается и поляризация света. У подобных цветов может быть несколько назначений. Например, яркий цвет предупреждает хищников о несъедобности жертвы, особенно эффективен сияющий металлический блеск, меняющийся в зависимости от угла зрения. Кроме того, при изменении яркости, цвета и чёткости в зависимости от угла зрения хищнику трудно оценить размер и расстояние до жертвы.

У насекомых встречаются два типа решёток – дифракционные и брэгговские. На поверхности насекомых они производят радужную окраску, расщепляя падающий свет на компоненты по длинам волн и управляя его направлением.

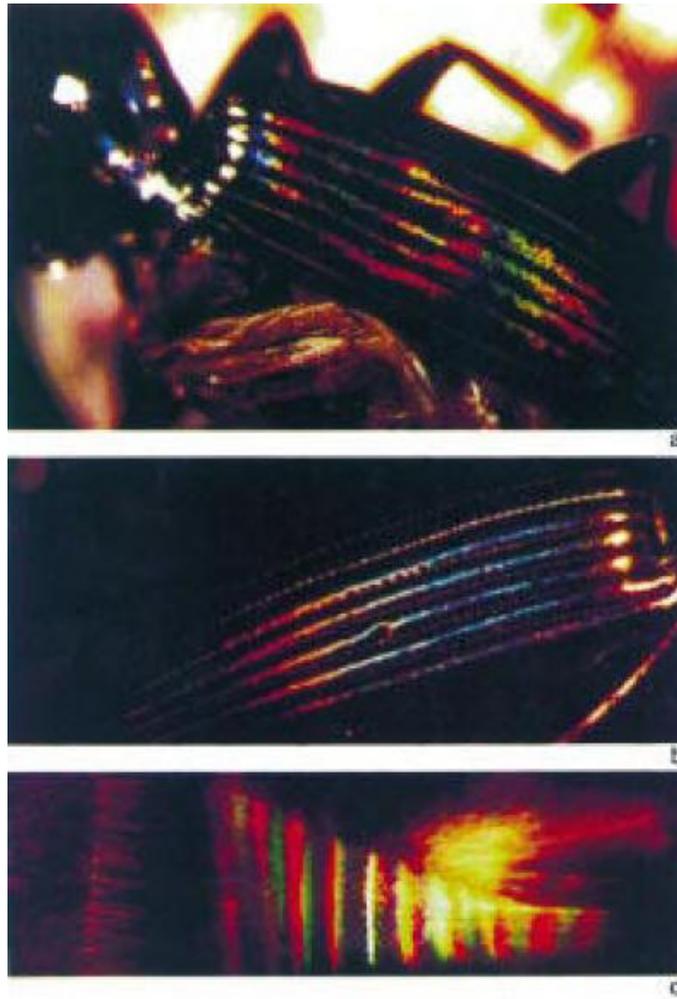


Рис.32. Расцветки жуков в природе

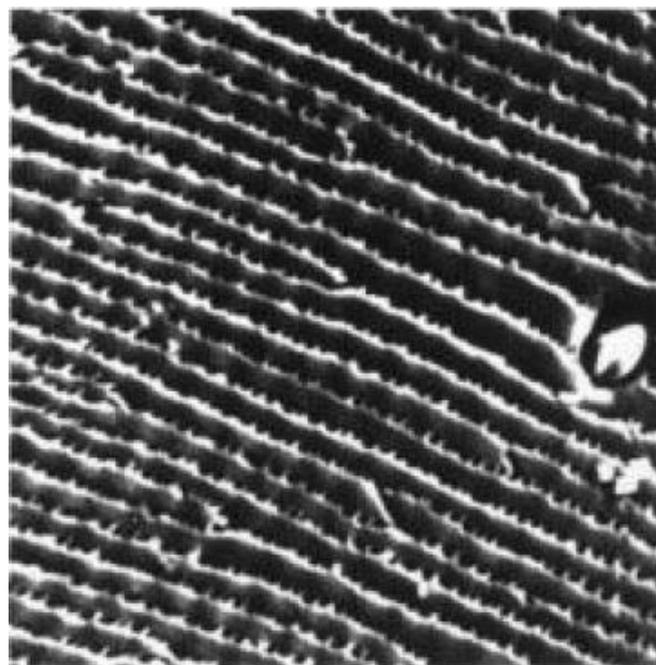


Рис.33. Дифракционная решётка кутикулы жуков.

4.4. Спецификация цветов и цветовое видение

Итак, мы обсудили те структуры, которые обеспечивают появление разнообразной окраски бабочек, жуков и птиц. Понятно, что точный контроль структуры крыльев и определяет их цветность. Набор структур, обеспечивающих такое разнообразие цветов, с биологической точки зрения обеспечивает выполнение разнообразных функций, включая маскировку, ухаживание, затаивание и охоту, предупреждение и, возможно, регулировку температуры тела. Мы до сих пор не рассматривали вопрос, как квалифицировать наблюдаемые цвета. Вспомним, что голубой цвет крыльев бабочек сдвигается к фиолетовому в зависимости от угла наблюдения, для наблюдателя человека этот сдвиг увеличивается с углом наблюдения. Это характерно для всех крыльев, цвет которых обусловлен наличием тонкопленочных структур. Часто говорят, что крылья отражают чистый голубой цвет, хотя точной классификации не приводится.

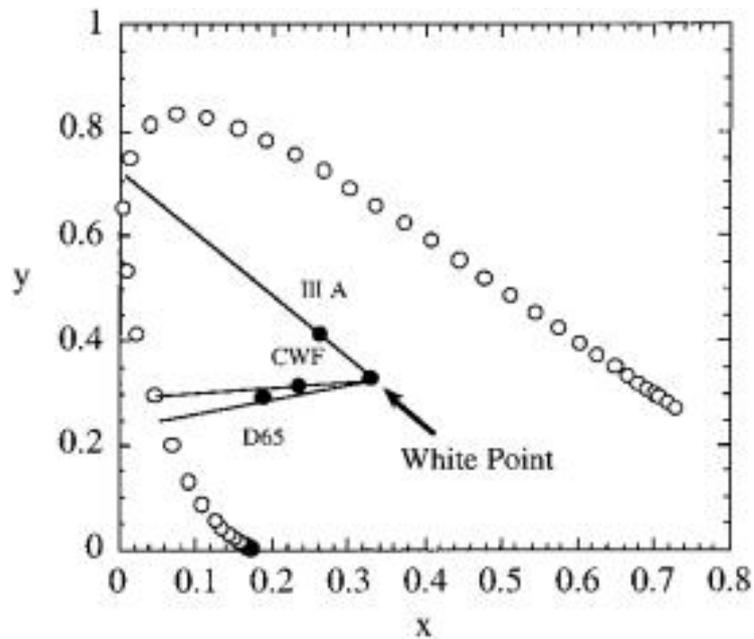


Рис. 34. Хроматическая диаграмма крыльев бабочки *Morpho*

На Рис.34 представлена хроматическая зависимость цветности крыльев бабочки *Morpho*, рассчитанная для трёх различных освещённостей. Каждой освещённости соответствует своя спектральная плотность, тем самым обеспечивая различное восприятие окраски крыльев бабочки при различном освещении. Расчёт сделан в соответствии со стандартной процедурой сочетания функции восприятия света стандартным наблюдателем с отражательной способностью крыльев бабочки и силой света от источника освещения. Из рисунка видно, что чистота голубого цвета не особенно высока. Под чистотой цвета понимают отношение расстояния от освещённой точки к общему расстоянию между освещённой точкой и

локусом, при этом рассчитанные хроматические координаты попадают в область голубого цвета. Т.е. чисто голубой цвет крыльев этой бабочки с обыденной точки зрения подобен чисто голубому цвету неба. Это подчёркивается тем, что мы видим этот цвет на фоне темной основы, высланной меланином.

Восприятие цвета бабочкой может быть более сложно, так как её глаз содержит более трёх фоторецепторов или фотопигментов, так что цвет, который видит бабочка, может сильно отличаться от цветового восприятия человека. Исследования цветового восприятия насекомых проводятся, но они ещё далеки от завершения.

Предположим, что сетчатка содержит более двух рецепторов с разной светочувствительностью. Наличие множественных светорецепторов усиливает световосприятие. Это также расширяет спектральный диапазон восприятия. Однако наличие множества светорецепторов отнюдь не обеспечивает цветового видения. Обычно присутствие световосприятия у животных доказывают через соответствующие тесты. Однако эта методика достаточна спорна.

Традиционно, этот вопрос сводится к следующему – могут ли животные различать свет разной интенсивности и соответствующий разным длинам волн. Наш личный опыт говорит, что различать цвета, значит видеть мир цветным. Однако распределение цветовых детекторов у животных может сильно отличаться от нашего, и передача информации о цвете у животных может также сильно отличаться от нашего. Однако для физического описания может быть полезным знание спектральных характеристик пигментов светорецепторов. Проблема состоит в том, что если человек имеет трихроматическое зрение, то бабочка – тетра- или даже пентахроматическое.

Заключение

В этом учебном пособии сделана попытка объяснить те чудесные и захватывающие цветовые эффекты, которые можно наблюдать в мире животных. Хотя мы стремились к определенной полноте описания, все же оно осталось далеко не полным. Остаётся масса вопросов, которые предстоит решить будущим исследователям. Молодых исследователей должно вдохновлять то, что над этой проблемой работали такие гиганты как Ньютон, Ломоносов, Максвелл и лорд Релей.

Успехов !

Контрольные вопросы для самостоятельной работы студентов.

1. Фотометрические величины.
2. Определить понятия силы света, яркости, светимости. В каких величинах измеряются эти характеристики.
3. Единицы измерения световых величин.
4. Размерность нанообъектов.
5. Связь между люменом и ваттом. Чувствительность человеческого глаза.
6. Методы измерения световых величин. Субъективные фотометры.
7. Отражение и преломление света на границе двух диэлектриков.
8. Интенсивность отраженного и преломленного света.
9. Явление полного внутреннего отражения в биологических объектах.
10. Отражение света от поверхности металла.
11. Поляризация света при отражении и преломлении света от биологических структур.
12. Когерентность света как его способность к интерференции.
13. Сущность явления интерференции.
14. Влияние немонохроматичности света на интерференцию.
15. Интерференционные оптические явления.
16. Использование явления интерференции для изучения структуры поверхности биологических объектов.
17. Дифракция света.
18. Условие подобия дифракции.
19. Дифракция на круглом препятствии.
20. Влияние немонохроматичности света на дифракционную картинку.
21. Дифракционные решетки.
22. Наклонное падение лучей на дифракционную решетку.
23. Поляризация света при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков.
24. Интерференция поляризованного света.
25. Рассеивание света.
26. Наноразмерные дифракционные решетки.
27. Холестерические жидкие кристаллы.
28. Текстуры жидких кристаллов.
29. Отражение света от холестерических жидких кристаллов.
30. Физические основы появления окраски у колибри.
31. Почему возникает окраска надкрыльев жуков.
32. Физические основы окраски крыльев бабочек.

Рекомендуемая литература

1. Халиуллин Ф.А., Валиева А.Р., Катаев В.А. Инфракрасная спектроскопия в фармацевтическом анализе. ГЭОТАР-Медиа, 2017, 160 с.
2. Ефимова А.И., Зайцев В.Б., Болдырев Н.Ю., Кашкаров П.К. Оптика: инфракрасная фурье-спектрометрия. Учебное пособие для вузов. Юрайт, 2018, 143 с.
3. Купцов А.Х., Жижин Г.Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. Техносфера, 2014, 696 с.
4. Астапенко В.А. Оптические информационные технологии. МФТИ, 2015, 181 с.

Зуев Вячеслав Викторович

Нанооптика цвета в биологическом мире

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО**

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49