





Филип Болл

# ФЕЕРИЯ ЦВЕТА

Понимание сути семи хитроумных способов, используемых природой для создания ярких цветов, может стимулировать разработку новых сложных технологий

## ОБ АВТОРЕ

**Филипп Болл** (Philip Ball) — лондонский писатель, пишущий о науке. Его последняя книга «Любознательность: как наука стала интересовать всем» (*Curiosity: How Science Became Interested in Everything*) увидела свет в мае этого года.



**П**ереливы цветов на роскошных хвостовых перьях павлина всегда интересовали любознательные умы. Английский ученый XVII в. Роберт Гук (Robert Hooke) назвал их фантастическими — отчасти потому, что при смачивании перьев цвета исчезали. Для изучения перьев Гук использовал изобретенный незадолго до этого микроскоп и увидел, что они покрыты крошечными гребнями, которые, как он заключил, могли создавать яркие желтые, зеленые и синие тона.

Гук был на правильном пути. Насыщенные цвета птичьих перьев, крыльев бабочек и тел кальмаров часто создаются не поглощающими свет пигментами, а системами структур шириной всего в доли микрона. Размеры и шаг этих структур выделяют из всего солнечного спектра определенную длину волны. Яркие переливающиеся цвета, часто переходят, как по волшебству,

из синего в зеленый или из оранжевого в желтый, в зависимости от угла, под которым их видит наблюдатель. А поскольку создаются они в результате отражения света, а не поглощения пигментами его части, то могут быть более яркими. Бабочку *Morpho menelaus*, обитающую в Центральной и Южной Америке, можно заметить с расстояния до километра: она кажется светящейся, когда солнечные лучи, пронизав полог тропического леса, отражаются от ее крыльев.

Ученые начинают глубже понимать, каким образом манипулируют светом тонко организованные наноструктуры живых организмов, а это вдохновляет инженеров на моделирование биологических структур в новых рукотворных оптических материалах. Такие материалы могут привести к созданию более ярких дисплеев, новых химических датчиков и совершенных систем хранения, передачи и обработки информации.

Мы мало знаем о том, как возникли эти биологические структуры, но по крайней мере начинаем понимать, как они формируются и как создают такие удивительные цвета. Природа не располагает сложными технологиями вроде электроннолучевого травления тонких слоев материалов, поэтому ей приходится полагаться на изобретательность. И если инженеры смогут освоить это искусство, они научатся создавать недорогие ткани, меняющие внешний вид подобно маскирующимся кальмарам, или микросхемы, передающие информацию оптическим, а не электрическим способом, притом с огромной скоростью. Здесь мы рассмотрим некоторые из фокусов, применяемых природой для формирования структур, создающих цвета, и некоторые попытки использования этих ловких приемов изобретателями.

## ! ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Птицы, бабочки, кальмары и другие создания часто щеголяют яркими или переливающимися цветами, создаваемыми не пигментами, а сложными наноструктурами, которые еще только начинают исследовать ученые.
- Регулярная и нерегулярная геометрия этих наноструктур отражает только некоторые длины волн, создавая определенные цвета, которые в ряде случаев могут изменяться при намокании этих структур или изменении их размеров.
- Специалисты создают синтетические материалы, моделирующие подобные биологические структуры. В итоге могут появиться автомобили или одежда, цвета которых будут меняться при движении; датчики для обнаружения загрязнений в питьевой воде; эффективные оптические микросхемы для сотовых телефонов и крайне трудно поддающихся подделке опознавательные метки для платежных карточек.

## 1 МНОГОСЛОЙНОСТЬ

Гребни, обнаруженные Гуком, действительно рассеивают свет, но цвета обычно создаются лежащими под поверхностью наноструктурами, видеть которые ученый не мог. В цветных перьях птиц, чешуе у рыб и чешуйках крыльев бабочек обычно содержатся микроскопические организованные слои стерженьков плотного светорассеивающего материала. Поскольку расстояния между слоями и между стерженьками в слоях близки к длинам волн видимого света, в таких структурах возникает явление, называемое дифракцией. Падающие лучи некоторых длин волн отражаются от этих слоев и испытывают конструктивную или деструктивную интерференцию между собой, усиливая одни цвета в отраженном свете и подавляя другие. Те же явления создают переливающуюся радугу, когда вы наклоняете в разные стороны компакт-диск.

В крыльях бабочек отражающие слои состоят из природного полимера хитина и разделены заполненными воздухом пустотами, а вся эта структура помещается между твердыми внешними поверхностями чешуек крыла. В перьях птиц слои стерженьков состоят из меланина и заключены в матрицу из кератина — белка, входящего в состав наших волос и ногтей. Оригинальный вариант этого метода реализован у самцов синезатылочной паротии (*Parotia lawesii*), райской птицы из Новой Гвинеи. Открыл его в 2010 г. Докеке Ставенга (Doekele G. Stavenga) из Гронингенского университета в Нидерландах. В нитевидных бородавках грудных перьев самцов этой птицы содержатся слои меланина, шаг которых создает яркое желто-оранжевое отражение. Но сами бородачки имеют V-образное поперечное сечение, и их наклонные поверхности отражают синий цвет. Небольшие движения перьев во время брачных танцев вызывают резкие переходы между желто-оранжевым и сине-зеленым цветами, что не может не привлечь внимания самки.



**Переливчатые сине-зеленые** перья синезатылочной паротии могут внезапно приобретать желтый цвет в результате небольших движений птицы, изменяющих положение бородачек на концах ее перьев

Технологи пока не пытались воспроизвести этот эффект, но Ставенга верит, что как модельеры, так и автомобильная промышленность рано или поздно попытаются использовать эти изменения цветов. V-образные микрочешуйки в тканях могут менять цвет одежды при движениях человека, а такие же чешуйки в автомобильной краске могут резко менять цвет проезжающего мимо вас автомобиля.

JOHN MASON Ardea (bird); COURTESY OF DOEKELE G. STAVENGA University of Groningen (close-up)

## 2 ЭФФЕКТ ЕЛОЧЕК

Великолепная окраска бабочек *Morpho didius* и *Morpho rhetenor* создается не множеством слоев хитина, а более сложными наноструктурами в чешуйках крыльев: хитиновыми «елочками» на поверхностях чешуек крыльев. Параллельные «ветки» каждой «елочки» образуют еще один вид дифракционной решетки. Такие структуры способны отражать до 80% падающего синего цвета, а поскольку они не плоские, то отражают один и тот же цвет в разных направлениях, что в некоторой степени снижает переливчатость.

Организмам не всегда нужно менять цвет в зависимости от направления, с которого их видят.

Изменения цвета при смачивании, отмеченные Гуком у павлиньих перьев, свойственны и крыльям бабочек. Разные жидкости имеют разные показатели преломления, поэтому вызывают отражения разных цветов. Ученые из подразделения *Global Research* компании *General Electric* в сотрудничестве с коллегами из Университета Олбани и специалистом по крыльям бабочек Питом Вукусичем (Pete Vukusic) из Эксетерского университета в Англии

занимаются разработкой искусственных структур, моделирующих крылья морфид. Они поставили цель создать химические датчики, способные выявлять присутствие различных жидкостей, принимая при контакте с ними определенные цвета. Исследователи применяют методы микролитографии — те же, что изготовители микросхем. Такие датчики, возможно, позволят обнаруживать некоторые выбросы на электростанциях или примеси в питьевой воде.

### 3 СВЕТООТРАЖАЮЩИЕ ЛУНКИ

Ярко-зеленый цвет полос на крыльях бабочки *Papilio palinurus* из семейства парусников, широко распространенной в Юго-Восточной Азии, обусловлен вовсе не окраской. Крылья этой бабочки покрыты густой сеткой чашеобразных лунок размерами всего в несколько микронов. Эти лунки выстроены вдоль слоев хитина, разделенных воздушными зазорами, играющими роль селективных отражателей. Донные части лунок отражают только желтый цвет, а их края, окружающие желтые донца, — только синий. Наш глаз не в состоянии различить эти цвета в таком мелком масштабе и воспринимает их совокупность как зеленый цвет.

Кристофер Саммерз (Christopher Summers) и Мохан Сринивасарао (Mohan Srinivasarao) из Технологического института штата Джорджия воспроизвели этот метод «синтеза» цвета. Чтобы сформировать микроскопические лунки, они вызывают конденсацию водяного пара в виде микроскопических капель на пленке затвердевающего полимера. Капельки располагаются на ее поверхности рядами, как яйца в картонном поддоне, утапливаясь в ней. По мере отвердения полимера они испаряются, оставляя на поверхности пленки чашеобразные лунки. После этого ученые наносят на поверхности лунок чередующиеся слои оксидов титана и алюминия, создавая

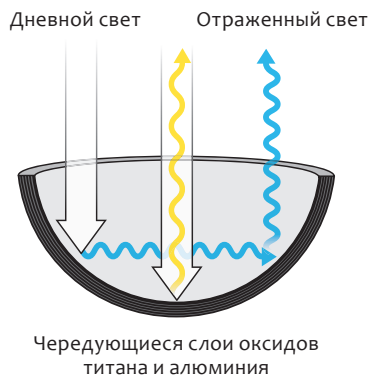
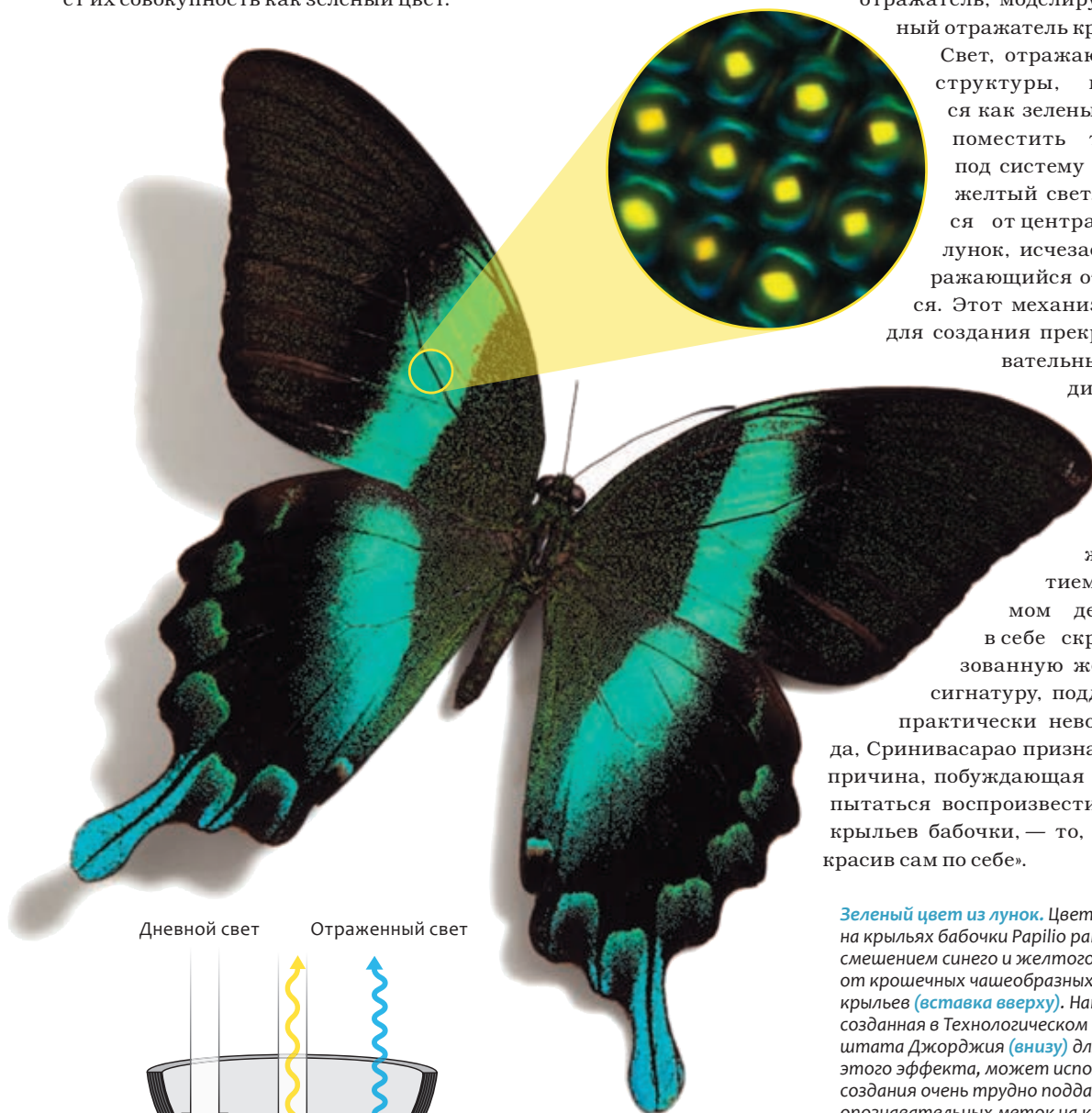
отражатель, моделирующий природный отражатель крыльев бабочки.

Свет, отражающийся от этой структуры, воспринимается как зеленый. Однако если поместить такую пленку под систему поляризаторов, желтый свет, отражающийся от центральных частей лунок, исчезает, а синий, отражающийся от краев, остается. Этот механизм будет хорош для создания прекрасных опознавательных меток на кредитных и банковских картах.

То, что представляется простым зеленым отражающим покрытием, будет на самом деле содержать в себе скрытую поляризованную желтую и синюю сигнатуру, подделать которую практически невозможно.

Правда, Сринивасарао признает, что главная причина, побуждающая его с коллегами пытаться воспроизвести зеленый цвет крыльев бабочки, — то, что «он просто красив сам по себе».

**Зеленый цвет из лунок.** Цвет зеленых полос на крыльях бабочки *Papilio palinurus* обусловлен смешением синего и желтого отражений от крошечных чашеобразных лунок на чешуйках крыльев (вставка вверху). Наноструктура, созданная в Технологическом институте штата Джорджия (внизу) для моделирования этого эффекта, может использоваться для создания очень трудно поддающихся подделке опознавательных меток на кредитных карточках.



## 4 НАНОГУБКИ

Другая бабочка из того же семейства, *Parides sesostris*, создает зеленый цвет с помощью иной наноструктуры (и также без помощи пигментов). Чешуйки ее крыльев содержат микроскопические регулярные системы отверстий. Эти так называемые фотонные кристаллы способны полностью отражать свет в пределах некоторой спектральной полосы. Подобные же кристаллы — это опалы, состоящие из крошечных шариков оксида кремния, которые рассеивают свет, придавая камню переливающиеся радужные цвета. Фотонные кристаллы можно использовать для удержания света внутри узких каналов, создавая волноводы, которые, возможно, позволят проводить свет по тесным пространствам внутри микросхем.

Под электронным микроскопом на чешуйках крыльев этой бабочки видны зигзагообразные структуры —

пятна губки, состоящей из хитина с упорядоченно расположенными отверстиями поперечником около 150 нм. Каждое из них представляет собой фотонный кристалл, немного разориентированный по отношению к соседним. Это позволяет чешуйке отражать свет в зеленой области спектра в широком диапазоне углов падения. Зеленый цвет некоторых долгоносиков и других жуков также обусловлен фотонными кристаллами из хитина.

Группа биолога Ричарда Прама (Richard Prum) из Йельского университета пытается создать такого рода структуры с нуля. Образовывать упорядоченные губки способны, например, липидоподобные молекулы, называемые сурфактантами, и так называемые блоксополимеры. Ульрих Визнер (Ulrich Wiesner) из Корнеллского университета использовал такие сополимеры для упорядоченного размещения

наночастиц оксида ниобия и титана с образованием структур типа «наногубки».

Подобные пористые твердые материалы могут найти применение в широком диапазоне областей, включая недорогие солнечные элементы с более высоким КПД. Более того, по расчетам Визнера, наногубки из таких металлов, как серебро или алюминий, возможно, обладают таинственным свойством отрицательного показателя преломления, т.е. отклоняют свет «не в ту сторону». Такие материалы, если попытки создать их увенчаются успехом, станут основой для изготовления суперлинз для оптических микроскопов, дающих возможность отображать объекты с размерами меньше длины световой волны, на что обычные микроскопы неспособны.

## 5 КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА

Природа образует фотонные кристаллы различными путями. Шипы некоторых морских червей, например морской мыши, или афродиты (*Aphrodita*), содержат шестигранные структуры из полых хитиновых волокон поперечником в несколько десятых микрометра. Они отражают свет в красной части спектра, что и обуславливает переливающийся красный цвет этих животных.

Выполняют ли данные оптические свойства какие-то биологические функции, неясно. Но в оптических технологиях применение для них несомненно найдется. Филип Расселл (Philip Russell), работающий сегодня в Институте наук о свете им. Макса Планка в Эрлангене, ФРГ, нагревал и вытягивал пучки стеклянных капилляров, превращая их в тонкие волокна, прошитые каналами, образующими шестигранные структуры. Если в середину исходного пучка волокон поместить капилляр с более широким каналом, он создаст в системе каналов дефект, пропускающий свет, который отражает окружающий фотонный кристалл. В итоге получается оптическое волокно с оболочкой, практически непроницаемой для света в определенной полосе длин волн.

«Утечка» света из волокон, состоящих из фотонного кристалла, меньше, чем из обычных, поэтому они могут заменить стандартные оптические волокна в телекоммуникационных сетях. Они потребуют меньше энергии, что позволит обойтись без дорогостоящих усилителей при передаче сигналов на большие расстояния. Максимальная утечка из обычных волокон происходит в местах резких изгибов, где отражения, удерживающие свет внутри волокна, становятся менее эффективными. Фотонные кристаллы свободны от этого недостатка, поскольку удержание света в них обеспечивается другим способом. Поэтому они более пригодны для применения в ограниченных пространствах, что может привести к разработке оптических микросхем для компьютеров и сотовых телефонов с более высоким быстродействием.

## 6 НЕРЕГУЛЯРНЫЕ МАТРИЦЫ

Для создания цветов некоторые организмы формируют нерегулярные губчатые матрицы. Структурные вариации создают великолепное синее и зеленое оперение многих птиц, лишенное переливов, свойственных колибри и павлинам. Поскольку губчатые кератиновые структуры в данном случае нерегулярны, рассеяние света оказывается диффузным, близким к синеве неба, а не зеркальным и переливающимся, и цвет выглядит одинаковым со всех направлений.

У попугая сине-желтого ара (*Ara ararauna*) и ошейникового зимородка (*Halcyon pileata*) полости в матрице бородачек перьев образуют извилистые каналы поперечником около 100 нм. Подобная нерегулярная сеть в кутикуле жука *Cyphochilus* придает ей ослепительную белизну. У синеголовой пипры (*Lepidothrix coronata*) полости представляют собой не каналы, и маленькие соединенные друг с другом пузырьки.

Прам полагает, что каналы и пузырьки формируются, когда кератин спонтанно отделяется, как масло

от воды, от жидкости в образующих крылья клетках на ранних стадиях развития. Он думает также, что в процессе эволюции у птиц сформировался способ управления скоростью отделения кератина, обеспечивающий остановку процесса образования каналов или пузырьков по достижении ими определенного размера. Этот размер и определяет длину волны рассеиваемого света, т.е. цвет перьев.

Диффузное рассеяние света наблюдается и у других природных и искусственных материалов. Так, в молоке взвешенные капельки жира с широким диапазоном размеров рассеивают все длины волн видимого диапазона, что и придает ему непрозрачную белизну.

Вукусич создал подобие кутикулы жука *Cyphochilus* с нерегулярной пористой матрицей карбоната кальция или диоксида титана в полимере, позволяющее получать покрытия ослепительной белизны. Прам и инженер-биотехнолог Эрик Дюфрель (Eric Dufresne), также из Йельского университета, смоделировали нерегулярные губки птичьих перьев с помощью случайно упакованных микроскопических шариков полимера, получив сине-зеленые цвета. Такие подходы могут привести к созданию чрезвычайно тонких совершенно непрозрачных и не выцветающих цветных покрытий.

## 7 ОБРАТИМЫЕ БЕЛКИ

Один из самых интересных природных оптических фокусов — обратимые изменения цвета. Кальмар из семейства *Loliginidae* использует белок рефлектин для создания и изменения цвета своей кожи. Молекулы этого белка образуют стопки пластинок в клетках, называемых иридофорами, которые отражают определенные цвета. Биологи считают, что изменения цвета служат для маскировки, а также в качестве средства коммуникации, например при спаривании или для выражения агрессии.

Изучением того, как иридофоры изменяют цвет, занимается Дэниел Морс (Daniel Morse) из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре. Белки рефлектины скручиваются в наночастицы, из которых образуются пластинки. Эти пластинки размещаются между складками мембраны клетки-иридофора. Когда нейротрансмиттер активирует биохимический процесс, нейтрализующий электрический заряд рефлектинов, белки сближаются. Это увеличивает отражательную способность пластинок и изменяет их шаг, что вызывает изменение цвета. При восстановлении электрического заряда рефлектинов изменение цвета обращается.

Морс надеется смоделировать данный механизм в оптических устройствах, возможно — с использованием самих рефлектинов. Его группа ввела ген, кодирующий образование рефлектина у кальмара *Loligo pealeii* в бактерии *Escherichia coli*. При экспрессии белок сжимается в наночастицы, размером которых можно управлять с помощью солей, контролируемых взаимодействием зарядов в белках. Благодаря этому материал может набухать и сжиматься, меняя цвет под воздействием химических активаторов.

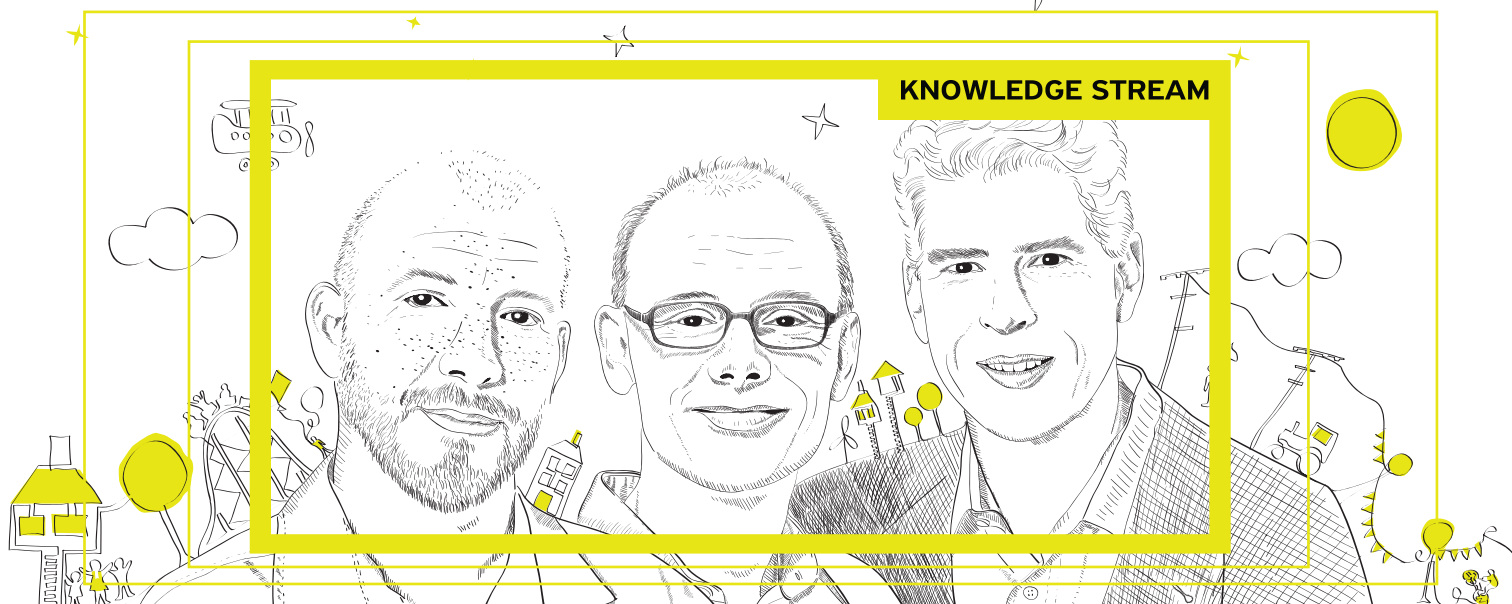
Морс разработал также полимер, способный переходить из непрозрачного состояния в прозрачное под действием электрического напряжения, которое изменяет его отражательную способность и вызывает разбухание полимерной пленки в результате введения в нее соли. Устройства на основе таких материалов можно изготавливать простыми методами, не требующими использования высоких технологий. Группа Морса сотрудничает с компанией *Raytheon Vision Systems*, работая над превращением этих материалов в быстродействующие затворы для инфракрасных камер, которые должны сделать возможной высокоскоростную ночную съемку путем регистрации ИК-излучения вместо видимого. ■

Перевод: И.Е. Сацевич

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Photonic Structures in Biology. Pete Vukusic and J. Roy Sambles in *Nature*, Vol. 424, pages 852–855; August 14, 2003.
- Natural Photonics. Pete Vukusic in *Physics World*, Vol. 17, No. 2, pages 35–39; February 2004.
- Optical Filters in Nature. H.D. Wolpert in *Optics and Photonics News*, Vol. 20, No. 2, pages 22–27; February 2009.
- A Protean Palette: Colour Materials and Mixing in Birds and Butterflies. Matthew D. Shawkey et al. in *Journal of the Royal Society Interface*, Vol. 6, Supplement No. 2, pages S221–S231; April 6, 2009.
- Изображения переливающихся картин, меняющих цвета, которые создала с помощью красок на основе наночастиц художница Франциска Шенк (Franziska Schenk), см. по адресу: [ScientificAmerican.com/may2012/schenk](http://ScientificAmerican.com/may2012/schenk)





Проект центра  
DIGITAL OCTOBER  
при поддержке журнала  
«В мире науки»



# КОНФЕРЕНЦИЯ ДЛИННОЮ В ГОД

С сентября 2011 года образовательный проект Knowledge Stream представляет лекции-телемосты из ведущих лабораторий и университетов мира. Вы узнаете о технологических инновациях и научных достижениях из первых уст и сможете получить ответы на любые вопросы в прямом эфире. В продолжение интерактивных видеоконференций происходят дискуссии с участием российских специалистов.

Программа Knowledge Stream состоит из нескольких тематических циклов и каждый из них предполагает от 3 до 5 лекций. На сегодняшний день уже открыты такие

циклы, как «Будущее коммуникаций», «Технологические тренды», «Спортивные технологии», «Здоровье в цифровом веке», «Биотехнологии», «Стиль жизни» и другие. В течение года в конференц-зале центра Digital October пройдет более 80 мероприятий, участие в которых совершенно бесплатно.

Вы можете смотреть прямые трансляции лекций на сайте [www.digitaloctober.ru](http://www.digitaloctober.ru) и участвовать в дискуссии через twitter с хэштегом #knowledgestream. Видеоархив проекта находится в открытом доступе на сайте [knowledgestream.ru](http://knowledgestream.ru).

## ЭНТОНИ ГАРРЕТ ЛИСИ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ПРОСТАЯ ТЕОРИЯ ВСЕГО

Из цикла «Наука для гиков»

Энтони Гаррет Лиси – выдающийся исследователь, который представил «Исключительно простую теорию всего». Лиси, американский физик-теоретик, официально не работает ни в одном институте. Свободный художник, живет на острове Мауи, исследует мир элементарных частиц сквозь призму дифференциальной геометрии и в свободное время занимается серфингом и сноубордингом. Энтони рассказывает о физике простым языком без сложных формул, на примере ярких кораллов. Персональный вклад Лиси в науку — разработка «Теории E8».

## ТОМАС ФАНДНАЙДЕР АРХИТЕКТУРНАЯ МОТИВАЦИЯ КРЕАТИВА

Из цикла «Стиль жизни»

Томас Фанднайдер – основатель и генеральный директор компании theLivingCore. Томас Фанднайдер и его коллега Маркус Пешл на базе Венского Университета разработали теорию пространства, влияющего на сознание человека. На основе их работы были спроектированы ряд объектов, включая офисы компании Google в Цюрихе. Архитектурное пространство рассматривается не только как физическое место, а раскладывается на несколько измерений: социальное, познавательное, эмоциональное, технологическое и пр. Гармоничное сочетание всех этих измерений позволяет создать социальную систему, культивирующую и поддерживающую творческие процессы, обмен знаниями, рождение новых идей.

## ПОЛ ЗАК МОЛЕКУЛА ВЫСОКОЙ МОРАЛИ

Из цикла «Биотехнологии»

Пол Зак — ученый, объединившего математику, экономику и неврологию для объяснения человеческого поведения. Он изобрел термин «нейроэкономика», основал и возглавил Центр нейроэкономических исследований при Клермонтском университете последипломного образования. Пол Зак утверждает, что на желание человека вести себя в соответствии с правилами морали оказывает влияние гормон окситоцин, который он называет «молекулой морали». Помимо этого, исследования ученого направлены на изучение механизмов, управляющих современной экономикой, на разработку новых принципов процесса деловых переговоров и даже на помощь людям, страдающим неврологическими и психическими заболеваниями.