

УДК 53.047

ДОКАЗАТЕЛЬСТВА КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОГО ДУАЛИЗМА СВЕТА НА ПРИМЕРЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н. М. Трубицин

МБОУ «Лицей № 69» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Свет представляет собой одновременно и волну, и поток частиц. Его корпускулярно-волновой дуализм подтверждается на различных биологических явлениях. Интерференция в крыльях насекомых и адаптации гидробионтов к дифракции являются доказательствами волновой теории происхождения света. В то же время фотоэффекты при фотосинтезе и химическое действие света при возбуждении сетчатки глаза говорят о его корпускулярном происхождении. Таким образом, законы квантовой физики работают как на благо человека, так и на благо природы.

Ключевые слова: дуализм, свет, частица, дифракция, дисперсия, волна, фотоэффект, интерференция.

EVIDENCE OF WAVE-PARTICLE DUALITY OF LIGHT ON THE EXAMPLE OF BIOLOGICAL SYSTEMS

N. M. Trubitsin

Lyceum No. 69 (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Light is both a wave and a stream of particles. Its wave-particle duality is confirmed by various biological phenomena. The interference in the wings of insects and the adaptation of hydrobionts to diffraction are proofs to the wave theory of light origin. At the same time, photo-effects during photosynthesis and the chemical effect of light upon excitation of the retina indicate its corpuscular origin. Thus, the laws of quantum physics work both for the good of man and for the good of nature.

Keywords: dualism, light, particle, diffraction, dispersion, wave, photoelectric effect, interference.

Введение. Природу света изучали многие учёные на протяжении нескольких веков. По результатам многочисленных опытов и экспериментов до сих пор нельзя с уверенностью сказать, что собой представляет видимое излучение — волну или поток частиц. Так, открытие Исааком Ньютоном явления дисперсии света, получение интерференционной картины Томасом Юнгом и исследования дифракции Огюстеном Френелем свидетельствуют в пользу волновой теории происхождения света. В то же время работы учёных в области квантовой физики, такие, как опыты Петра Николаевича Лебедева по измерению давления света и обнаружение фотоэффекта Генрихом Герцем (и его дальнейшее изучение Александром Григорьевичем Столетовым), а также различные примеры химического действия света говорят о том, что он состоит из частиц, обладающих энергией. Поэтому в нынешнее время принято говорить о корпускулярно-волновом дуализме света.

Стоит отметить, что явления, открытые и изученные в опытах перечисленных выше известных деятелей науки, также наблюдаются в окружающей среде без непосредственного участия человека. В различных биологических системах, подчинённых законам природы, выполняются и законы физики. Поэтому актуальность работы состоит в поиске новых доказательств двойственной теории происхождения света среди процессов, протекающих непосредственно с участием живых организмов.

Цель работы: исследовать природные явления, подтверждающие корпускулярно-волновой дуализм света.

Задачи работы:

1. Выявить биофизические процессы, в которых свет используется как волна.
2. Выявить биофизические процессы, в которых свет играет важную роль как поток частиц.
3. Исследовать механизмы природных явлений, подтверждающих ту или иную теорию происхождения света.
4. Сделать выводы о применении законов геометрической оптики и квантовой физики в природе.

Волновая теория происхождения света. Она основана на том, что видимое излучение обладает теми же свойствами, что и звуковые волны, и различные механические колебания. Например, явление интерференции можно наблюдать как при падении луча света на тонкую плёнку, так и при работе двух когерентных источников звука. Как и другие волны, свет представляет собой возмущение среды, распространяющееся с переносом энергии без переноса вещества. Действительно, солнечный луч не переносит вслед за собой молекулы воздуха, а поверхность, на которую он падает в течение длительного времени, постепенно нагревается, то есть энергия падающего луча превращается во внутреннюю энергию того или иного предмета. Помимо классических опытов интерференции Юнга, дисперсии Ньютона и дифракции Френеля, существует множество природных явлений, доказывающих справедливость волновой теории происхождения света.

Интерференция и дисперсия света в крыльях насекомых. Как известно, окраска крыльев насекомых очень разнообразна: она варьируется от едва заметной прозрачной до невероятно яркой, с переливами всех цветов радуги в многочисленных сочетаниях. Долгое время считалось, что цвет крыльев зависит от содержания в них тех или иных пигментов, наличие которых определяется видом насекомого. Однако сейчас учёными установлено, что окраска может быть обусловлена не только пигментами, но и наностроением крыльев, обеспечивающим определённое отражение света. Такой её тип называется структурной. Он основан не на химических реакциях, а исключительно на законах оптики и квантовой физики.

Крыло представляет собой тонкую плёнку. Часть падающего света отражается от наружного слоя плёнки, а другая часть — от внутреннего. Так сначала происходит дисперсия света — разложение на несколько монохроматических волн. После отражения пучков от внутренней поверхности они сливаются с пучками, отражёнными от наружной поверхности, то есть интерферируют (рис. 1). Если разность хода этих двух волн равна целому числу длин волн (то есть они совпадают по фазе), то достигается наибольшая амплитуда колебаний, и мы наблюдаем интерференционный максимум (конструктивная интерференция) — видим цветную окраску крыльев [1]. Если разность хода этих двух волн равна нечётному числу длин волн (то есть они находятся в противофазе), то достигается наименьшая амплитуда колебаний, и мы наблюдаем интерференционный минимум (деструктивная интерференция) — прозрачные крылья (рис. 2) [1]. В остальных случаях окраска представлена различными оттенками тех или иных цветов.



Рис. 1. Интерференция и дисперсия в тонком слое

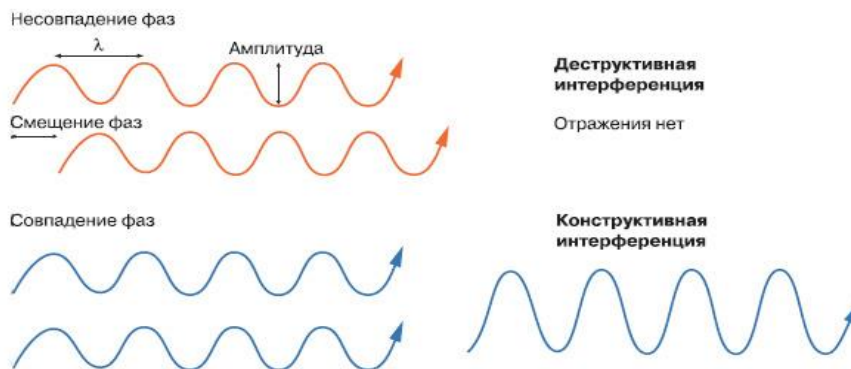


Рис. 2. Виды интерференции

Дисперсия и интерференция зависят от длины волны падающего света, угла освещения, толщины плёнки и коэффициента преломления, то есть наноструктуры крыла. Например, чешуйка бабочки морфиды похожа на дерево, в ярусах которого происходит интерференция (рис. 3а), а чешуйка моли состоит из пяти слоёв кутикулы (толщиной 400 нм каждый), разделённых между собой слоями воздуха (толщиной 100 нм) (рис. 3в).

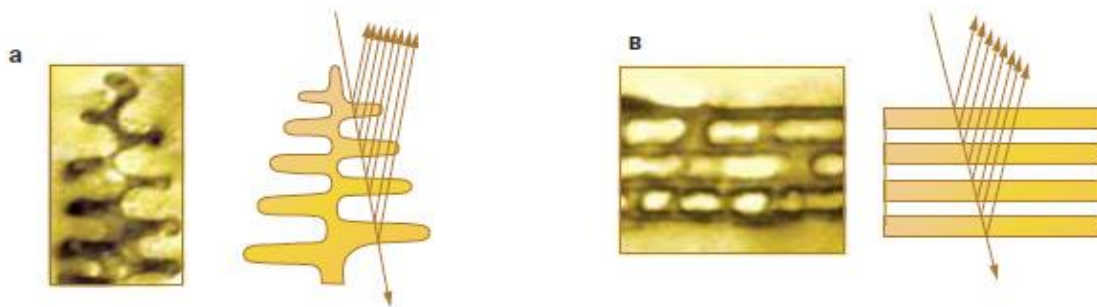


Рис. 3. Строение чешуек бабочек морфиды (а) и моли (в)

Если крыло представляет собой несколько тонких плёнок, то интерференция и дисперсия многократно усиливаются, создавая интенсивно яркую окраску. Важной характеристикой оптических свойств является периодическая структура плёнки: если поток падающего света может изменяться в одном или двух направлениях, возникает дифракционная решётка, а если в трёх — фотонный кристалл. Так, например, крыло жука-бронзовки представляет собой многослойный рефлексор, благодаря чему мы под разными углами видим отражение волн разной длины (рис. 4) [2].

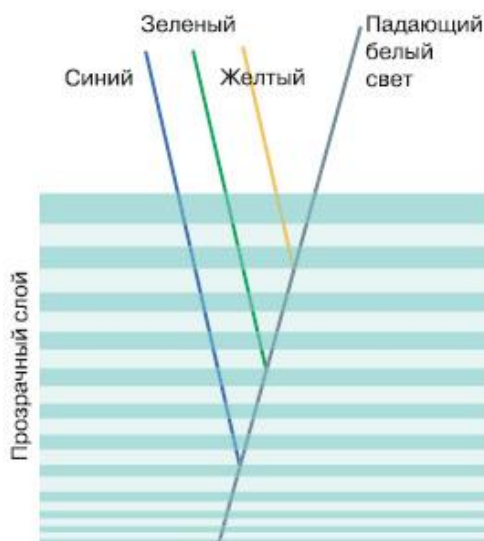


Рис. 4. Отражение света в крыле жука-бронзовки

Отражение дифракции света на адаптациях гидробионтов верхних слоёв водной среды. Дифракция света — это его отклонение от прямолинейного распространения при столкновении с тем или иным препятствием. Классический опыт по дифракции света поставил Томас Юнг, открывший в 1802 году явление интерференции (рис. 5). Суть опыта заключается в том, что свет от точечного источника S , проходящий сквозь два маленьких отверстия в ширме, образует два световых конуса при дальнейшем распространении и интерференционную картину напротив препятствия [3–4]. Таким образом, образуются два вторичных источника света — S_1 и S_2 , которые, согласно принципу Гюйгенса–Френеля, когерентны [5].

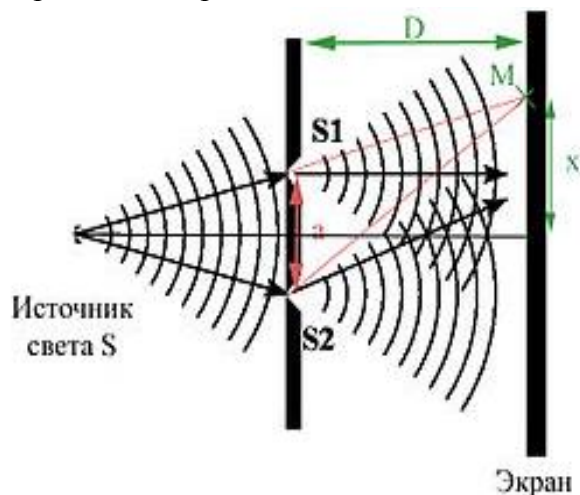


Рис. 5. Классический опыт Томаса Юнга по дифракции света

Подобное явление происходит в природе при попадании света на косяк рыб вблизи поверхности воды. Большая плотность скоплений в верхних слоях (что обусловлено наличием в них фитопланктона и зоопланктона) создаёт небольшие расстояния между особями, которые могут стать вторичными источниками света при попадании на них солнечного луча. Проходя через многочисленные слои косяка, когерентные волны многократно усиливаются и создают под ним интерференционный максимум — зону наилучшей видимости. Поэтому для уменьшения вероятности быть замеченными хищниками многие рыбы имеют покровительственную окраску брюшка — белого цвета. Поскольку в верхних слоях воды поглощение света не так выражено, как на значительной глубине, а из-за высокой плотности воды отсутствует дисперсия, то падающий поток не разлагается на монохроматические волны и остаётся сложным, то есть имеет белый цвет. Стоит отметить, что такая стратегия маскировки распространена и среди многих хищников, например, акул, чтобы не спугнуть жертв при охоте (рис. 6).

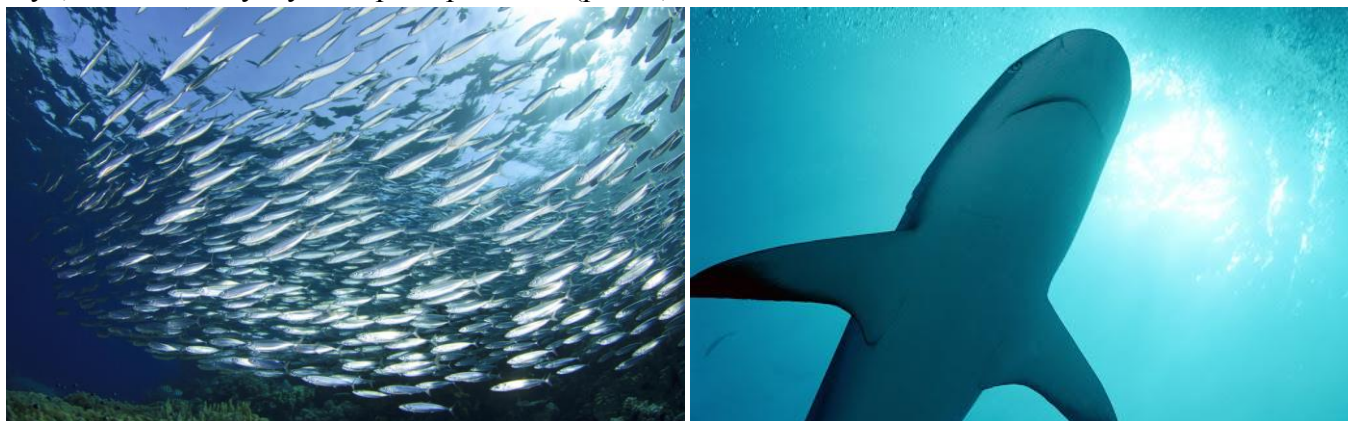


Рис. 6. Адаптации гидробионтов к дифракции света

Корпускулярная теория происхождения света. Помимо интерференции и дифракции света, также известны такие явления, как тепловое излучение и фотоэффект. Их можно объяснить только на основе представления, что свет — это поток частиц, называемых фотонами или квантами электромагнитного излучения. Преобразование энергии света в тепловую повсеместно встречается в природе: таяние снега, прогрев почвы осуществляются непосредственно в яркие солнечные дни. Наиболее интересны механизмы превращения энергии фотонов в энергию химических связей различных органических соединений, входящих в состав живых организмов. Именно они наглядно демонстрируют справедливость корпускулярной теории происхождения света.

Возбуждение сетчатки глаза. Получая каждый день информацию об окружающем мире с помощью зрения, мы не задумываемся о том, как наш глаз воспринимает информацию. А ведь именно в этом органе происходит невероятное превращение энергии и проявляется химическое действие света. Рассмотрим механизм возбуждения сетчатки. Процесс преобразования энергии электромагнитного излучения в энергию колебаний мембранного потенциала клетки проходит в пять этапов (рис. 7):

- 1) фотон поглощается молекулой светочувствительного пигмента и вызывает стереомеризацию цис-ретинала в трансформу, что сопровождается изменением конформации родопсина;
- 2) при взаимодействии трансдуцина с активированным родопсином молекула GDP заменяется на молекулу GTP;
- 3) молекула GTP активирует сGMP-фосфодиэстеразу;
- 4) сGMP гидролизуется до GMP;
- 5) снижение концентрации сGMP гиперполяризует мембрану рецептора.

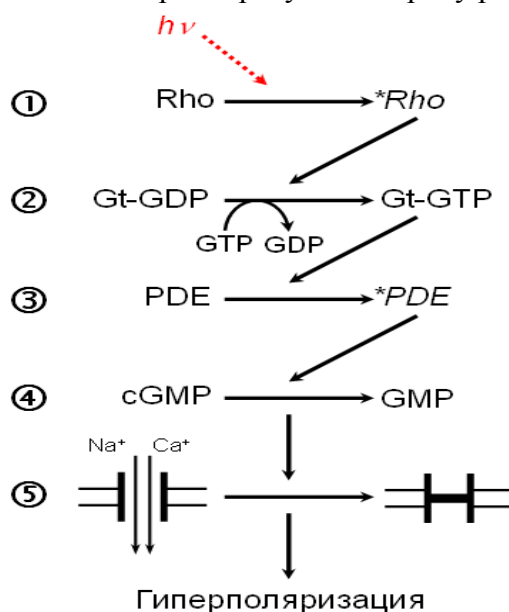


Рис. 7. Трансдукция светового сигнала в фоторецепторах сетчатки (Rho — родопсин, * Rho — фотоактивированный родопсин, Gt — трансдуцин, PDE — фосфодиэстераза, * PDE — активированная фосфодиэстераза)

Таким образом, химическое действие света проявляется в превращении его энергии в энергию химических связей, которая затем трансформируется в электрический импульс, передаваемый по нервным волокнам от мембраны клетки до зрительного центра мозга.

Фотоэффект в процессе фотосинтеза. Как известно, фотосинтез осуществляется за счёт энергии солнечных лучей. Рассмотрим механизм этого процесса, уделив большее внимание фотохимическим составляющим световой фазы.

У хлорофилла есть два уровня возбуждения: первый достигается путём перехода электрона системы сопряжённых двойных связей на более высокий энергетический уровень, а второй — возбуждением неспаренных электронов азота. Последнее состояние крайне нестабильно, из-за чего хлорофилл за 10^{-12} с. переходит на первый уровень с потерей 100 кДж/моль в виде тепла. Переход с первого уровня в основное состояние происходит с передачей энергии или электрона на другое соединение (рис. 8).

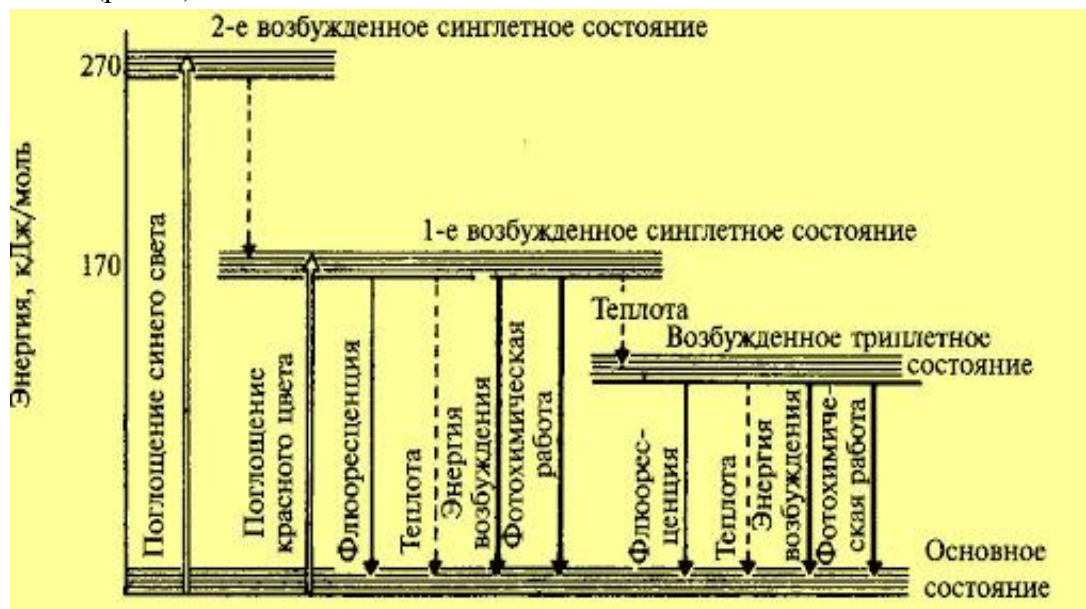


Рис. 8. Переходы между возбуждёнными состояниями хлорофилла после поглощения квантов света

После испускания хлорофиллом электрона идут переходы энергии между пигментами светособирающих комплексов. Они осуществляются по механизму Фёрстера (резонансно за счёт диполь-дипольного взаимодействия между донором и акцептором) с некоторыми потерями, которые зависят от работы выхода того или иного пигмента (согласно закону фотоэффекта, энергия кванта равна сумме работы выхода и кинетической энергии вылетевшего электрона: $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$, где h — постоянная планка, ν — частота волны, A — работа выхода, m — масса электрона, v — скорость электрона) [6]. Вследствие этого передача энергии происходит только к пигменту с максимумом поглощения при большей длине волны от пигмента с максимумом поглощения при меньшей длине волны [7]. Этот факт объясняет невозможность обратного перехода энергии и строго определённый порядок локализации элементов ССК.

В результате работы фотосистем происходит окисление двух молекул воды до одной молекулы кислорода и образование четырёх протонов за счёт четырёх квантов света. Образующиеся при этом протоны идут на восстановление углекислого газа, который связывается в темновой фазе и служит материалом для синтеза необходимых растению углеводов.

Таким образом, фотоэффект, происходящий в структурах светособирающих комплексов, не только ещё раз подтверждает корпускулярную теорию происхождения света, но и говорит о том, что природа, как всегда, находит достойное применение законам квантовой физики в биологических системах.

Заключение. Подводя итоги работы, можно сказать, что дуализм света наблюдается не только в опытах великих учёных, но и в естественной окружающей среде без непосредственного воздействия человека. Так, в пользу волновой теории происхождения света свидетельствуют его интерференция и дисперсия в крыльях различных насекомых и адаптации гидробионтов верхних

слоёв воды к дифракции. Корпускулярные свойства проявляются при химическом действии света, которое служит причиной возбуждения сетчатки человеческого глаза, а также при фотоэффекте в процессе передачи электронов в световой фазе фотосинтеза. Безусловно, при более углублённом изучении биологических явлений и подходе к ним с физической точки зрения можно обнаружить ещё множество доказательств корпускулярно-волнового дуализма света.

Стоит отметить, что свет в том или ином проявлении играет важную роль на различных уровнях организации биологических систем: благодаря ему животные могут ориентироваться в пространстве, а растения обладают фотопериодизмом. Каждый диапазон спектра выполняет свою функцию в биосфере: ультрафиолетовые лучи оказывают бактерицидное действие, видимое излучение даёт фотосинтетически активную радиацию, а инфракрасные лучи несут тепловую энергию. Совершенство природы не вызывает сомнений ни с точки зрения физики, ни с точки зрения биологии: в каждом явлении, происходящем с участием света, этот источник энергии используется как волна или поток частиц — в зависимости от результата, который нужно достичь. При этом в биологических системах безукоризненны законы как геометрической оптики, так и квантовой физики.

Библиографический список

1. Белинский, А. В. Интерференция света и отсутствие определённых значений измеряемых величин априори / А. В. Белинский // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. — 2017. — № 3. — С. 21–32.
2. Кричевский, Г. Е. Структурная окраска / Г. Е. Кричевский // Химия и жизнь. — 2010. — № 11. — С. 13–15.
3. Фок, В. А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн / В. А. Фок. — Изд. 2-е. — Москва : URSS, 1970. — 517 с.
4. Ваганов, Р. Б. Основы теории дифракции / Р. Б. Ваганов, Б. З. Каценеленбаум. — Москва : Наука, 1982. — 272 с.
5. Зражевская, И. Н. Принцип Гюйгенса-Френеля в строгой формулировке Фурье / И. Н. Зражевская. — Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2009. — Вып. 2. — С. 12–20.
6. Иродов, И. Е. Квантовая физика. Основные законы : Учебное пособие / И. Е. Иродов. — Москва : Лаб. базовых знаний ; Санкт-Петербург : Физматлит, 2001. — 271 с.
7. Чернавская, Н. М. Туннельный транспорт электронов в фотосинтезе / Н. М. Чернавская, Д. С. Чернавский. — Москва : Изд. Моск. ун-та, 1977. — 175 с.

Об авторе:

Трубицин Никита Михайлович, преподаватель МБОУ «Лицей № 69» (344038, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Ленина, 83а), trubitsin.nik@mail.ru

Author:

Trubitsin, Nikita M., teacher, Lyceum No. 69, (83A, Lenina str., Rostov-on-Don, 344038, RF), trubitsin.nik@mail.ru