Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. Ашкинази, Прозрачное и непрозрачное, *Квант*, 2019, номер 8, 10–14

DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20190801>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.89.56.158

26 апреля 2023 г., 02:22:31

жизнь без телефона и телевизора. Самолет и радиоволны изменили ощущаемые размеры земного шара. Восхищен телевизором и компьютером. Я не знаю точно, как они устроены. Плохо знаю конкретное устройство значительно более простых механизмов – тепловоза или автомобиля. Я представляю себе общие принципы, лежащие в основе инженерных разработок, и искренне благоговею перед теми, кто может наладить бесперебойную работу приборов, которыми успешно пользуюсь.

Но, откровенно говоря, не менее острое восхищение у меня вызывает другое – понимание того, как все устроено в природе. Понимание не обязательно мною. Мои

знания конкретных подробностей весьма ограничены. Но я знаю, что есть те, кто знают. Нет такого человека, который знает о мире все. Знание распределено по многим. Хранитель знания – человечество. Трудом отдельных людей созданы монографии и энциклопедии. В них собрано знание о мире. Никакого простого знания не существует. Никто не владеет простой формулой, содержащей разгадку мироздания.

Сумма знаний, накопленных человечеством, внушает уважение и надежду на будущее. Очень хочется верить, что человечество в конце концов окажется достойным той удивительной картины мира, которую создало.

Прозрачное и непрозрачное

Л. АШКИНАЗИ

И тут помещение озарилось ее визгом.

Из интернета

КАК ВЫ, НАВЕРНОЕ, ДОГАДЫВАЕТЕСЬ, свет нужен для того, чтобы видеть. Деление веществ и вообще всего, что нас окружает, на прозрачное и непрозрачное возникло исторически. Человеку было важно увидеть объект, т.е. нечто непрозрачное, светорассеивающее, отражающее или излучающее, причем увидеть через прозрачную среду – атмосферу (всегда) и иногда плюс через вакуум (чтобы любоваться Луной) или воду (при охоте с берега острогой). Потом, по мере развития оптики (лупы, очки, телескопы) и индустрии красоты (зеркала), это деление упрочилось. Поэтому в учебнике все вещества делят на прозрачные и прочие. Оптические свойства прозрачных сред характери-

зуют коэффициентом преломления и упоминают про его зависимость от длины волны, т.е. про *дисперсию света*. А о прочих, т.е. непрозрачных, веществах в учебнике ничего не говорится, лишь упоминаются зеркала – как элемент оптических систем. Хотя зеркальных поверхностей в природе почти и нет, но вот два примера и связанный с ними вопрос.

Вопрос 1. Что изображено на рисунках 1 и 2 и почему изображения такие?

Редкость в природе зеркальных поверхностей – наше счастье: мы видим объекты в результате рассеивания ими света, реже в результате излучения (Солнце, молния, светлячки). Единственное, когда нашим предкам было нужно отражение, это чтобы увидеть глаза животных в темноте. Мир, в котором у поверхностей зеркальное отражение преобладает над рассеиванием (попробуйте себе это представить), был бы весьма сложен для ориентации.

Мозгу пришлось бы все время разбираться: то, что мы видим, оно там, где мы видим, или где-то в другом месте (например, о ужас, позади нас), или на полпути? В такой «комнате смеха» нам было бы не до смеха. Или мозг построил бы внутри себя мощный программный пакет для работы с такими изображениями?

Вопрос 2. Как можно было бы действовать в таком мире?

Но как же было бы страшно инопланетянину, попавшему из своего преимущественно зеркального мира в наш обычный бедный преимущественно рассеивающий мир! В мире без отражения и без рассеивания вполне можно было бы жить при условии сверхширокополосного зрения – от нашего видимого диапазона до, скажем, длины волны 50 мкм. Тогда бы мы видели все объекты в их собственном тепловом излучении (вспомним *закон Вина*).

Представление об окружающем мире человек на протяжении всей истории со-

здавал в основном с помощью зрения в диапазоне длин волн примерно от 0,38 мкм до 0,76 мкм. Могло ли оно быть устроено как-нибудь иначе, работать на других принципах? Например, змеи и летучие мыши имеют другие «зрения» – инфракрасное и ультразвуковое соответственно.

Вопрос 3. Может ли человек воспользоваться их методами? А может быть, существуют еще какие-то «зрения», которые не освоил никто?

Змеи пошли по пути *камеры-обскуры* именно потому, что для инфракрасного (ИК) диапазона с длиной волны, грубо говоря, от микрона до миллиметра, нет оптических материалов, из которых можно было бы сделать линзы (см. в интернете *инфракрасное зрение змей*). Рентген не поглощается атмосферой, но генерация рентгеновского излучения не доступна биологическому объекту и для рентгеновского диапазона нет доступных оптических материалов. Что касается акустической локации, то, если укоротить волну (т.е. поднять частоту) порядка на четыре, разрешающая способность такого гиперзвукового зрения могла бы стать лишь на порядок хуже, чем электромагнитного, но гиперзвук с такими частотами поглощается в воздухе.

Зрение вообще, т.е. возможность получать информацию об окружающих объектах, определяется двумя главными параметрами – дальностью действия и разрешающей способностью. Для того чтобы видеть далеко, нужна высокая чувствительность глаза – чем объект дальше, тем слабее сигнал. Чувствительность глаза имеет предел – сами клетки реагируют на одиночный квант, мозг же для борьбы с шумами обрабатывает сигналы так, что фиксирует вспышку, если в течение 0,1 с на разные клетки глаза попадет 5–7 фотонов. Увы, эффективность оптической системы глаза около 15% – глаз пропускает не все фотоны и чувствительные клетки поглощают не все кванты, которые в них попали. Иными словами, чтобы мозг что-то «увидел», до глаза в течение указанного времени должно долетать несколько десятков фотонов. Кстати, многие ночные

Рис. 1

Рис. 2

животные имеют сзади чувствительных клеток отражающий слой. Так поступили, например, наши друзья – кошки (рис.3).

Рис. 3

Вопрос 4. А зачем?

Люди пошли по другому пути, создали *усилители яркости и приборы ночного видения*. Но все равно есть внешние ограничения. В чистом воздухе человек видит горизонт, до которого (если стоять на поверхности идеального шара) примерно пять километров (а на Луне?). Более того, человек видит горизонт, поднявшись на самую высокую гору, а в этом случае до него более трехсот километров. В идеальном чистом воздухе за счет рассеивания света на флуктуациях плотности дальность зрения ограничена примерно такой же величиной, но это случайное совпадение. Иными словами, рассеивание света в атмосфере, то самое, из-за которого небо голубое, при расстоянии в триста километров создает такой фон, что объекты не будут видны в этом мареве. А была бы толщина атмосферы в 30 раз больше, чем сейчас, и не было бы у нас астрономии, и картина мира еще долго была бы иной. Именно этим – рассеиванием на флуктуациях плотности – определяются минимальные потери в оптоволокне, в световодах, так называемые *релеевские потери*. Вообще, потери в световодах – актуальная и активно исследуемая область. По одной простенькой причине: по оптоволоконным линиям перекачивается большая часть всей – вообще всей! – информации, которую пересылает человечество.

В космическом пространстве зрению раздолье – самые далекие звезды, которые человек видит без применения оптических инструментов, находятся на расстоянии около десяти тысяч световых лет. Но между Землей и Космосом в смысле применения зрения есть принципиальная разница. То, что мы видим на Земле, дало возможность построить хоть и ограниченную, но правильную картину мира. Там, где человек видел гору, действительно было трудно влезать, а где видел реку, там были вода, рыба и голодные крокодилы. Но чтобы разобраться хотя бы в самых общих чертах в том, что мы видим в Космосе, потребовалось создать телескопы и другие оптические инструменты. Главное – потребовалась физика.

А что было бы, если бы дальность действия зрения была существенно меньше? Например, не километры, а метры – вследствие, скажем, меньшей прозрачности атмосферы? Изменилась бы тактика освоения земной поверхности – никаких плаваний по морям, тем более никаких полетов. Человек стал бы строить свои сооружения (и здания, и дороги) последовательно и по возможности непрерывно «наползая» цивилизацией на поверхность Земли и лишь потом надстраивая свои сооружения вверх. Общество могло бы развиваться, техника и наука тоже, но представление о планете в целом если бы и возникло, то много позже. А представление о Космосе не возникло бы вообще – до момента, когда цивилизационная кожа доросла бы до границ атмосферы. Что по причине ограниченной прочности стройматериалов вообще было бы проблематично. Мы видим, что возможность «дальновидения» существенно влияет на облик цивилизации.

Нам повезло – Солнце излучает в диапазоне прозрачности земной атмосферы. Свети оно в той части ультрафиолетового или инфракрасного диапазона, в которых атмосфера не прозрачна, мы жили бы в темноте. Или свети оно, как светит, но атмосфера состояла бы из газов, не прозрачных в указанном диапазоне, – результат был бы тот же. Излучай Солнце на

существенно больших длинах волн, трудно было бы создать чувствительный «глаз» (энергия кванта меньше), но даже если бы это произошло, проблемно было бы получить большое пространственное разрешение. Словом, нам крупно повезло. А как обстоят дела у инопланетян?

Для начала ограничимся рассмотрением газовой или жидкой среды. В твердой среде процессы идут существенно медленнее, и жизнь скорее всего не успела бы развиваться и за астрономические времена. Солнце – любое солнце – это широкополосный источник излучения, а поглощение излучения газами всегда захватывает какую-то часть спектра. Поглощение электромагнитного излучения атомами и молекулами основано на переходах электронов с орбиты на орбиту и на резонансе при колебаниях молекул, поэтому у разреженных газов спектральные линии (и поглощения, и излучения) относительно узкие (в проводниках и полупроводниках излучение поглощается еще из-за наличия

свободных электронов). При увеличении концентрации линии расширяются, но до какой степени – это зависит от рода газа, типа колебаний и концентрации. Существуют *окрашенные газы*, т.е. заметно поглощающие излучение в пределах оптического (для нас с вами) диапазона. Таких газов немного, все они (для нас с вами) ядовиты, а наиболее хороший и широкополосный поглотитель – это бром Br_2 . Он поглощает все оптическое длиннее 0,35 мкм.

Вопрос 5. Какое «солнце» желательно иметь в этом случае?

Кстати, насчет поглощения в обычной атмосфере. Если нас интересует широкий диапазон длин волн, то он представлен на рисунке 4. Чисто газовая атмосфера (смысл этой осторожной оговорки скоро узнаем), состоящая из газов, не противоречащих жизни, прозрачна. Что касается жидких сред, то ситуация довольно смутная. Потому что окрашенные жидкости, которые мы встречаем в быту, например

Рис. 4

чернила, кровь, некоторые овощные и фруктовые соки, окрашены не сами по себе, а красителями – т.е. малыми добавками красящих веществ к воде. Особая ситуация с нефтью – это смесь углеводородов, из которых одни прозрачны, а другие поглощают излучение, вот от концентрации вторых и зависит цвет. Про то, какие вещества – красители и как от структуры молекул зависит поглощение света, химики могут долго и интересно рассказывать (начало рассказа – опять же, про резонанс), но так или иначе непрозрачные жидкости, в которых жизнь возможна, существуют. Чем, например, вам плох как среда обитания смородиновый или гранатовый сок? Отрастить жабы – и вперед, юные *Ихтиандры*!

Но это все в однородной среде, а бывают неоднородные. А что вы скажете об атмосфере с таким сочетанием температуры и давления, что для какого-то из ее веществ – да хотя бы для воды H_2O – мы как раз попадаем на линию раздела газ–жидкость на диаграмме состояний? Например, атмосфера в основном кислородная, давление, 0,05 атм и температура 40 °С? Для нас немного жарковато и кислорода меньше, чем хотелось бы, но вода в морях-океанах все время потихому кипит и в воздухе висят (потому что веет слабый ветерок от горячей почвы) микрокапли воды. Жизнь вполне возможна, даже белковая. А как насчет видимости?

Вопрос 6. Кстати, если у нас в воздухе имеются какие-то частички, например капли, то от чего зависит расстояние видимости и как его посчитать?

А еще лучше, если мы, двигаясь по линии контакта жидкости и газа, доберемся до *критической температуры*, когда разница между ними исчезает. В этой точке у нас будет такая *критическая опалесценция*, что вообще носа своего не увидим – одни флуктуации плотности и рассеяние излучения. Такое же рассуждение применимо к рассеиванию в неоднородных жидкостях, например эмульсиях, когда в одной жидкости плавают маленькие капельки другой, или в суспензиях, когда плавают твердые частицы, или в пене,

когда много пузырьков. Но во всех случаях нам нужно знать оптические свойства всех материалов – участников ситуации.

Вопрос 7. А если коэффициенты преломления, например, совпадают, то что?

Есть совсем простой общеизвестный пример эмульсии, которая прекрасно рассеивает свет, – это молоко. Рассеивают свет и твердые тела, если они неоднородны, причем размер неоднородностей сравним с длиной волны или больше. Пример – стекло. Обычное аморфное стекло прозрачно (если в него не добавлены светорассеивающие частички). Если же стекло кристаллизовать, оно станет светорассеивающим, матовым, свет будет рассеиваться на границах кристаллов. Но если кристаллизовать стекло так, чтобы кристаллики были очень мелкими, в десятки нанометров и менее, т.е. много меньше длины волны, то при соблюдении еще некоторых условий оно станет прозрачным. Сейчас его называют «наноситалл», пишут о нем всякие глупости и – если он цветной – рекламируют как ювелирный «камень».

Рассеивание излучения характеризуют *диаграммой направленности*, т.е. зависимостью мощности от угла; рисуют ее, естественно, в полярных координатах. При чисто зеркальном отражении – это узкая «игла» под тем же углом, под которым прилетело излучение. При чисто диффузном отражении от хаотично шероховатой поверхности мощность пропорциональна косинусу угла относительно нормали (*закон Ламберта*). В реальной ситуации всегда имеется смесь того и другого, даже идеально полированная поверхность отражает не чисто зеркально. В некоторых источниках указывается, что идеально полированное стекло рассеивает 10^{-3} процента, идеально полированный металл – 10^{-2} – 10^{-1} процента. Наверное, конкретная цифра зависит от степени и смысла «идеальности».

(Продолжение следует)