

Защо стъклото е прозрачно, а хартията не е?¹

Юджин Хехт

Голямата част от химичните и оптичните свойства на атомите на едно вещество се определя само от външните валентни електрони. Остатъкът от електронния облак на атома образува “затворени”, не реагиращи на външни въздействия обвивки, здраво свързани с атомното ядро. Въпреки че по същество не е съвсем ясно какво точно става в един атом, когато той излъчва, ние с определена увереност знаем, че светлината се излъчва по време на промени в разпределението на зарядите във външната част на електронния облак. Обикновено един атом с принадлежащите му електрони пребивава в определена стабилна конфигурация, в която енергията на системата е минимална. Всеки електрон се намира на допустимото за него най-ниско енергетично ниво и атомът се намира в така нареченото основно състояние. Ясно е, че всеки механизъм, който може да предаде енергия на атома, повече или по-малко ще промени основното състояние. Например удар с друг атом, фотон или с електрон може да промени из основи атома. Ние “знаем” от квантовата механика, че атомът може да съществува само в определени специфични конфигурации на неговия електронен облак и на всяка от тях съответства точно определена стойност на енергията. Така, в допълнение към основното състояние, съществуват добре определени, по високи нива на енергията, **възбудени състояния**, всяко от тях свързано с определена конфигурация на електронния облак и определена енергия.

В зависимост от честотата ν на падащата светлина (или съответно – в зависимост от енергията на фотоните, $E = h\nu$) един атом може да реагира по два типични начина. Основното състояние може да разсее светлината или, алтернативно, ако енергията на фотона съвпада с енергията на едно от възбудените състояния, атомът ще “погълне” фотона и ще направи квантов скок до това по-високо енергетично ниво. Това възбуждане на един изолиран атом представлява едно краткотрайно резонансно явление, което протича при определени енергии, т.е. при определени честоти на падащата светлина. Когато е налице не един, а огромно количество атоми, които са разположени близо един до друг, така че да си взаимодействат силно, всяко подобно енергетично ниво се отмества малко и в резултат се получават множество близко лежащи енергетични нива, които образуват нещо като разширени енергетични зони. По такъв начин системата може да бъде възбудена от цяла редица честоти. В пълната съвкупност от атоми в едно твърдо тяло или в една течност е много по-вероятно енергията на възбуждане да се предаде чрез удари на хаотичното движение на атомите (топлинна енергия), отколкото да бъде преизлъчена във вид на лъчение, когато атомът се връща в основното си състояние: падащият фотон изчезва, а неговата електромагнитна енергия се превръща в края на краищата във вътрешна енергия на средата. Този процес (улавянето на фотона и преобразуването на енергията му във вътрешно енергия) по-рано бе широко известен като “поглъщане”, но днес този термин се използва по-често за обозначаване само на “улавянето”, като за по-голяма точност целият процес се нарича **дисипативно поглъщане**.

За разлика от този процес на възбуждане, разсейването от основното състояние, или още нерезонансното еластично разсейване, протича при падаща светлина с честоти, различни от резонансните. Да си представим атом в най-ниското му състояние и да предположим, че той взаимодейства с фотон с честота ν , която не е достатъчна за възбуждане на атома до кое да е от по-високите състояния. В този случай можем да си

¹ Превод от *TPT*.

представим, че електромагнитното поле на светлината принуждава електронния облак да осцилира като цяло, без да променя конфигурацията му. При това положение не протичат преходи между различните енергетични нива на атома, той остава в основното си състояние, докато облакът леко трепти с честотата на падащата светлина. Електрон, който започва да трепти, представлява ускорено движещ се заряд, и незабавно започва да преизлъчва светлина със същата честота ν . Тази разсеяна светлина представлява фотон, който отнася в дадена посока същото количество енергия, както и падащият фотон. В резултат ние си представяме атома като малък диполен осцилатор. Точно този нерезонансен механизъм на разсейване на светлината обуславя голямата част от видимия образ на заобикалящия ни свят.

Когато върху петно от червена боя попадне бяла светлина, молекулите, които имат резонансни честоти в синьо-зелената област, дисипативно поглъщат по-високите честоти и отразяват (разсейват) честотите от червения край на спектъра. Черното мастило дисипативно поглъща всички честоти от видимия спектър, отразявайки нищожно малка част. Един банан изглежда ярко жълт, защото притежава резонанс в синята област и дисипативно поглъща синята светлина, отразявайки силно червената и зелената, поради което за нашите очи е жълт. По такъв начин повечето вещества, които (при достатъчна дебелина) са непрозрачни, са такива, защото те поглъщат определен интервал честоти и отразяват останалите, пропускайки много малко. Конкретният въпрос за стъклото и хартията (по предположение – бяла), която е тънка, стеснява дискусията до ситуация, в която ролята на дисипативното поглъщане е пренебрежима – и стъклото, и хартията нямат резонанси във видимата област. И въпросът всъщност става друг: “Защо някои вещества отразяват силно, а други – не?”. По-специално, как така една система от атоми в слой стъкло и друга система от атоми в слой хартия при предположение, че и двете системи не поглъщат дисипативно светлината, изглеждат толкова различно? Отговорът се крие в различното крупномасштабно подреждане на атомите.

Когато сноп светлина попадне върху вещество, което няма съответните на светлинните честоти резонанси, светлината се разсейва без загуби. Можем да си представим как слабите вълнички, излъчвани от отделните атоми, последователно се комбинират, интерферират и образуват разсеяната вълна. Следвайки въпроса, поставен в заглавието, ние се ограничаваме с разглеждането на материали, които са достатъчно плътни. Следователно всяко кубче от средата, чиито ръб е равен на дължината на вълната λ , съдържа огромен брой молекули и тогава казваме, че имаме значителна **оптическа плътност** – за дължините на видимите светлинни вълни даже най-долните атмосферни слоеве при нормални налягане и температура съдържат около три милиона молекули в такъв куб с ребро λ . Слабите вълнички ($\lambda \approx 500 \text{ nm}$), преизлъчени от източници, разположени толкова близко един до друг ($\approx 3 \text{ nm}$), имат възможността да интерферират по един стабилен начин.

Премаинавайки през такова вещество, сноп от успоредни светлинни лъчи среща една ефективно еднородна среда (напомняща еднородността на вакуума) без големи скокове в свойствата. По посока на разпространението на снопа отделните разсеяни вълнички интерферират конструктивно, т.е. – усилват се, и това по същество не зависи от подредбата на молекулите, но поради голямата плътност във всички други посоки преобладава деструктивната интерференция. Колкото по-непрекъсната, по-еднородна и “по-безструктурна” изглежда средата, колкото по-плътна оптически и по-подредена е, толкова по-пълна е деструктивната интерференция и толкова по-малко е разсеяната встрани светлина. Доколкото енергията не се разсейва встрани, снопът се движи напред, преминавайки през средата и ние казваме, че тя е прозрачна и (тъй като това е независимо от честотата) че също така е безцветно. По такъв начин прозрачните

аморфни твърди тела, като стъкла и пластмаси, разсейват светлината съвсем слабо, докато кристали, като кварц и слюда, с тяхната почти идеална структура, разсейват светлината още о-слабо. Разбира се, недостатъци от всякакъв вид (прах или мехурчета в течностите, дефекти и примеси в твърдите тела) играят роля на разсейватели.

В случая на преминаване през непрекъсната среда разсеяните вълнички се унищожават взаимно във всички посоки с изключение на посоката напред и само продължаващият или **пречупен** сноп продължава – цялата енергия се разпространява с него. Но това се случва само ако няма места, в които свойствата на средата се изменят със скок, така че средата е еднородна. Със сигурност това не е случаят на границата между две среди с различен показател на пречупване. Там, в зависимост от показателите и от ъгъла на падане, някои от разсеяните вълнички не интерферираат деструктивно в посока назад – част от светлината се **отразява** обратно в средата, от която идва. За границата въздух–стъкло около 4% от снопа, падащ перпендикулярно, се отразява обратно и това е вярно и когато светлината се разпространява в стъкло и достигне тази граница. По такъв начин светлината “е способна да премине през дебел слой стъкло”, губейки само няколко процента поради комбинацията от отражения на граничните повърхнини, разсейването от дефекти и дисипативното поглъщане от примеси.

Светлината се възприема като бяла, когато носи приблизително равни количества енергия на всяка честота от видимата област на спектъра. По такъв начин всяка точка от повърхността на един пространствен източник на бяла светлина можем да си представяме като източник, изпращащ във всяка посока поток от светлина с всяка от видимите честоти. По същия начин една отразяваща повърхност, която прави същото, ще изглежда бяла: един честотно независим, дифузно отразяващ обект при осветяване с бяла светлина би изглеждал бял. Тази страница е бяла. Такива са солта и снегът, пяната в чаша бира, водната пара и сапунените мехурчета, тебеширът и захарта – и цялото това разнообразие споделя едно подобие в структурно отношение. Всички споменати материали са изградени или от зърна, или от нишки, или от мехурчета, чиито размери са големи в сравнение с дължината на вълната, но за нашите човешки мащаби са съвсем малки. Въпреки разпространеното мнение, че белите тела са непрозрачни, всяко зрънце или нишка всъщност е прозрачно. Не съществува такова нещо като отделна частица бяла боя, която от само себе си е непрозрачно бяла. Разпръснетите единичен слой сол или захар върху тази страница – текстът може да се чете и през него. Строшете прозрачно стъкло на малки частици – подобно на пясъчинките, те изглеждат бели. Водата е прозрачна, но снегът, водната пара и облаците са бели.

Белотата възниква, когато падащата бяла светлина се отразява обратно от средата във всички посоки, както от безброй точкови източници, от разсейватели, които не показват избирателно поглъщане. Всички цветове, съставляващи бялата светлина, падат и всички цветове се разсейват. Когато средата е изградена от множество малки прозрачни частици, подобно на сплъстените нишки на тази страница или безпорядъчно струпаните в лъжицата кристалчета захар, всяко от тях отразява, пропуска и отново отразява. И това се случва още и още, слой след слой, граница след граница, докато по-голямата част от светлината се отрази дифузно назад в средата, от която идва. Повдигнете леко няколко листа хартия и погледнете през тях – твърде много светлина преминава през хартията, но като през облак. Ако хартията е достатъчно дебела, през нея преминава малко светлина и тя изглежда сива или черна.

Честотата на лъчистата енергия, която се отразява от границата на две среди, зависи от разликата между техните показатели на пречупване – ако няма разлика, границата по същество изчезва. **Колкото по-близки една до друга са стойностите на**

показателите на пречупване, толкова по-малко светлина се отразява и толкова по-малко светла ще бъде повърхнината. Следователно, за да направим бяла боя, ние трябва само да смесим прахообразен прозрачен материал (пигмента) с прозрачен разтворител (например минерално масло). Ако показателите на пречупване са равни, пигментът просто изчезва и “боята” ще бъде прозрачно безполезна. Ако показателите се различават съществено, голяма част от светлината ще се отразява от множеството повърхности на частиците на пигмента и боята ще изглежда блестящо бяла. Една действително разкошна бяла повърхност може да отрази обратно до 98% от падналата светлина. Поради малкия показател на пречупване на въздуха, малки частици от сол, талк и захар, както и всички видове небоядисани нишки, заобиколени от въздух, изглеждат бели. Това положение се променя рязко, ако тези нишки се потопят в течност, подобна на водата, чиито показател на пречупване има стойност между тази на въздуха и на нишките. Какво става с блестящата непрозрачна белота на “тънък къс хартия”, когато се намокри?

Еlegantен начин за демонстриране същността на разглежданите процеси е да се покаже, че ние лесно можем да гледаме през пет сантиметра дебел къс стъкло, но пет сантиметра дебело снопче от прозрачни микроскопски стъкла е напълно непрозрачно.