



МЕДИЦИНСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ПЛОВДИВ

ФАКУЛТЕТ „Фармация“

ЦЕНТЪР ЗА ДИСТАНЦИОННО ОБУЧЕНИЕ

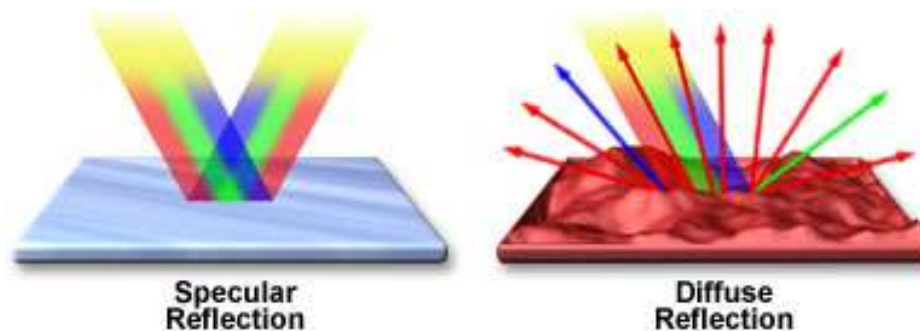
Лекция №11 *Медицинска физика*

Оптични явления. Отражение на светлината, цвят на телата. Пречупване на светлината, пълно вътрешно отражение. Поглъщане на светлината, закон на Буге-Ламберт-Беер. Молекулен абсорбционен спектрален анализ. Поляризация на светлината. Естествена и поляризирана светлина. Получаване на поляризирана светлина, оптично активни вещества. Поляриметрия.

проф. Константин Балашев, д.х.н.

ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЧУПВАНЕ НА СВЕТИНАТА

Тъй като фотоните на светлината имат електромагнитна природа, а веществата притежават както електрични, така и магнитни свойства, те активно си взаимодействат. Тези взаимодействия обуславят всички известни оптични явления.



При попадане на светлинен поток върху границата между две среди с различна оптична плътност, там възниква нов светлинен поток, който се разпространява обратно в първата среда. Този процес се нарича **отражение**. Отражението бива огледално и дифузно; селективно и неселективно.



Огледално отражение се извършва, когато граничната повърхност, разделяща двете среди, е гладка (или по-точно, когато размерите на неравностите ѝ са малки в сравнение с дължината на светлинната вълна, която е от порядъка на 0,1 микрона). Този тип отражение се характеризира с това, че отразеният лъч лежи в равнината, определена от падащия лъч и нормалата към граничната повърхност, и че ъгълът на падане е равен на ъгъла на отражение. Количественото отношение между потока отразена светлина $\Phi_{отр}$ и потока паднала $\Phi_{пад}$ се дава с коефициент на огледално отражение $r = \frac{\Phi_{отр}}{\Phi_{пад}}$. За метали $r > 99\%$, а за диелектрици - около $r = 10\%$.

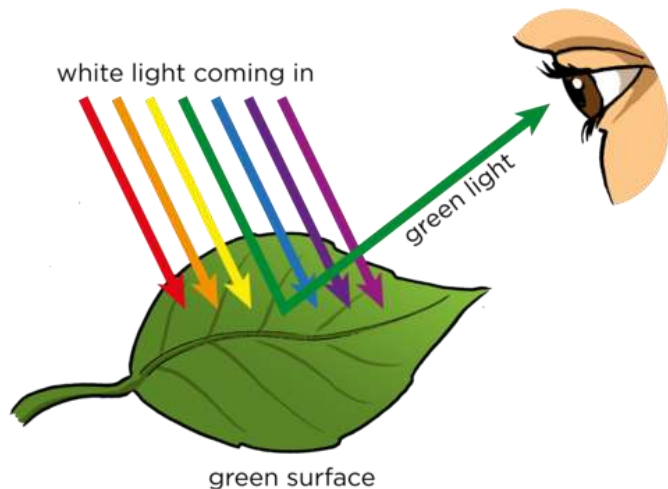


Дифузно отражение се осъществява, когато не са изпълнени условията за огледално отражение. При него отразената светлина се разпространява във всички възможни посоки. Коефициентът на дифузно отражение се нарича *алbedo*:

$$A = \frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi_{\text{пад}}}$$

Неселективното отражение се характеризира с това, че отразената светлина има честотен състав еднакъв с този на падналата. При *селективното отражение* се отразяват избирателно (селективно) само фотони с определени честоти (дължини на вълната, т.е. само светлина с определен цвят).

Цвят на телата



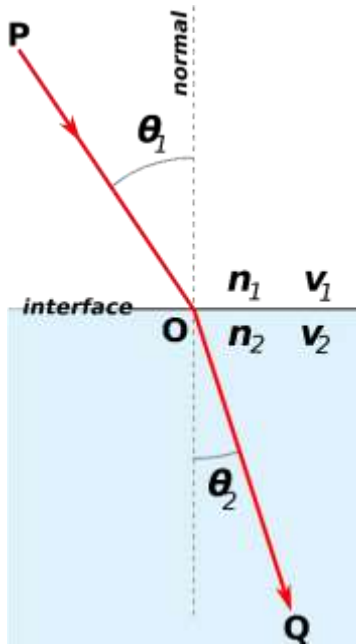
В резултат на отражението всички тела, които сами не излъчват светлина, при външно осветяване стават видими и имат някакъв цвят. Цветът на телата зависи от характера на отражението (дали е селективно или неселективно) и разбира се - от спектралния състав на светлината, с която те са облъчвани. Например при осветяване с бяла (полихроматична) светлина неселективно отразяващите тела ще имат ахроматичен цвят (това са всички нюанси на сивото - от черно до бяло), а селективно отразяващите ще се виждат в т.нар. хроматични цветове (червен, оранжев, жълт, зелен и т.н.).

Всеки цвят се характеризира с три основни показателя - цветен тон, яркост и наситеност. Само когато тези техни показатели са идентични, цветовете са напълно еднакви.

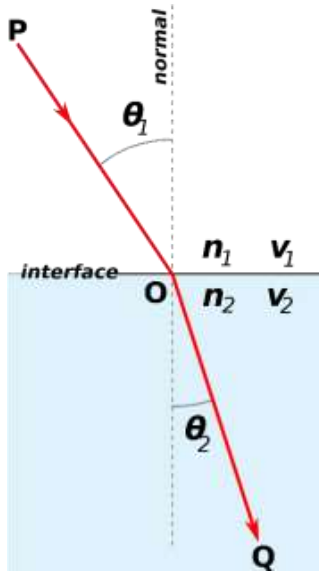
- *Цветния тон* зависи от дължината на вълната (например *син тон* при *425 nm*, *зелен тон* при *550 nm*)
- *Яркостта* зависи от общия интензитет на възприеманата светлина (т.е. от броя светлинни фотони, възприемани от зрителните рецептори за единица време).
- *Наситеността* зависи от количественото съотношение между хроматичния и ахроматичен цвят (например небесно-синьото и кобалтово-синьо се различават по стойността на това съотношение).

Пречупване на светлината

Пречупване на светлината се нарича процесът, при който светлината, преминавайки от една среда в друга, променя своята посока на разпространение. При пречупването са в сила следните геометрични закони:



1. Пречупеният лъч лежи в равнината, определена от падащия лъч и нормалата към граничната повърхност.



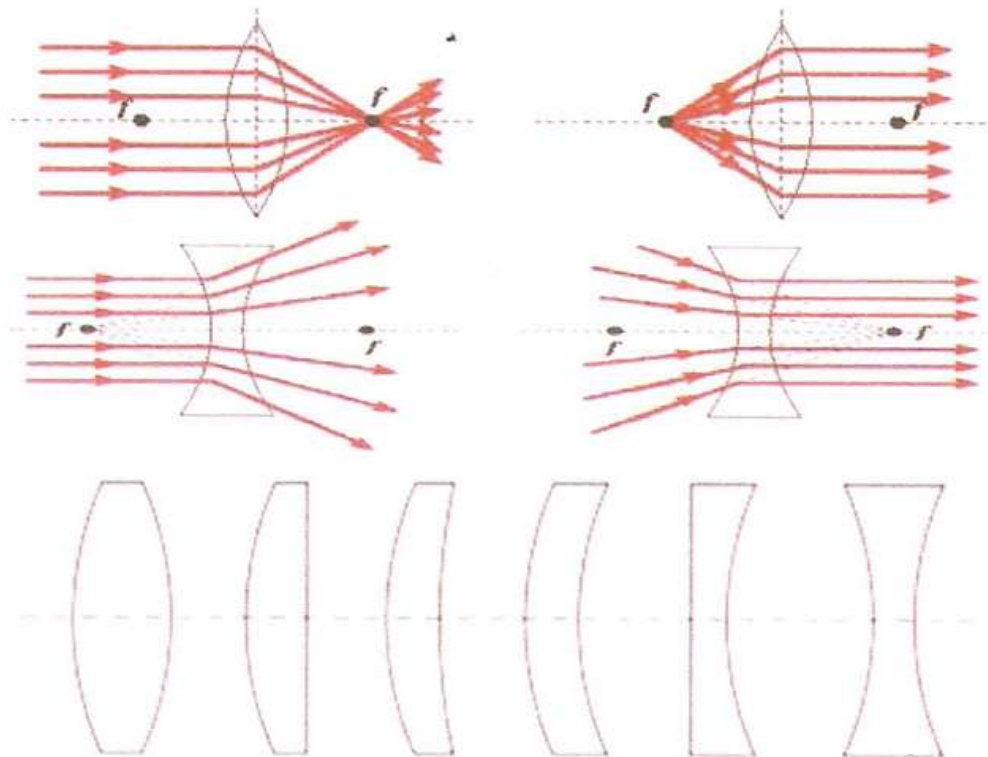
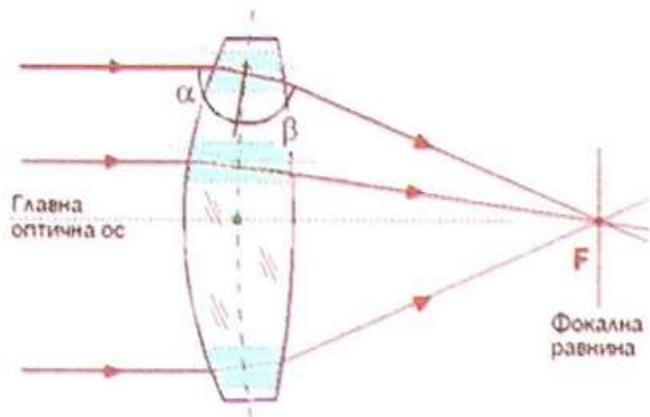
2. Ъгълът на падане θ_1 и ъгълът на пречупване θ_2 са свързани със зависимост, известна под името **закон на Снелиус**:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

n_1 и n_2 са абсолютните показатели на пречупване на двете среди спрямо вакуум, а n_{21} - относителният показател на пречупване на втората спрямо първата.

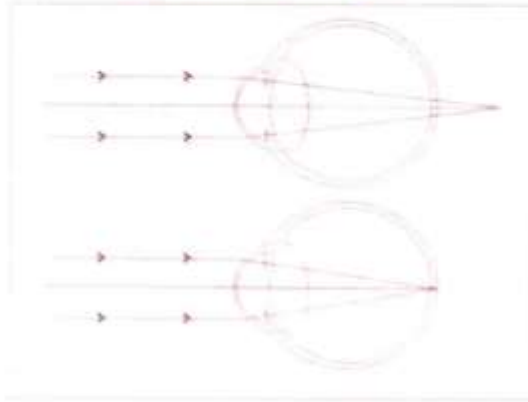
Показателят на пречупване на светлината в дадена материална среда (n) е важен оптичен параметър, който показва колко пъти скоростта на светлината във вакуум (c) е по-голяма от скоростта ѝ (v) в тази среда: $n = \frac{c}{v}$. Среда с по-голям показател на пречупване се нарича оптично по-плътна и в нея светлината се движи с по-малка скорост. Отношението между показателите на пречупване на две среди n_1 и n_2 се нарича относителен показател на пречупване на едната спрямо другата:

$$n_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\frac{c}{v_1}}{\frac{c}{v_2}} = \frac{v_2}{v_1}$$

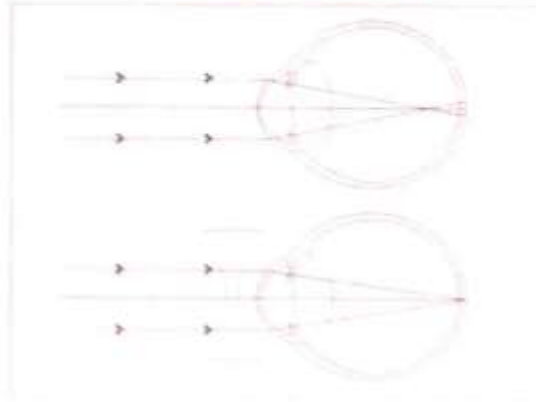


Пречупването на светлината е в основата на оптичните лещи. Има събирателни и разсейвателни лещи.

хиперопия (далекогледство)
се коригира с изпъкнала леща

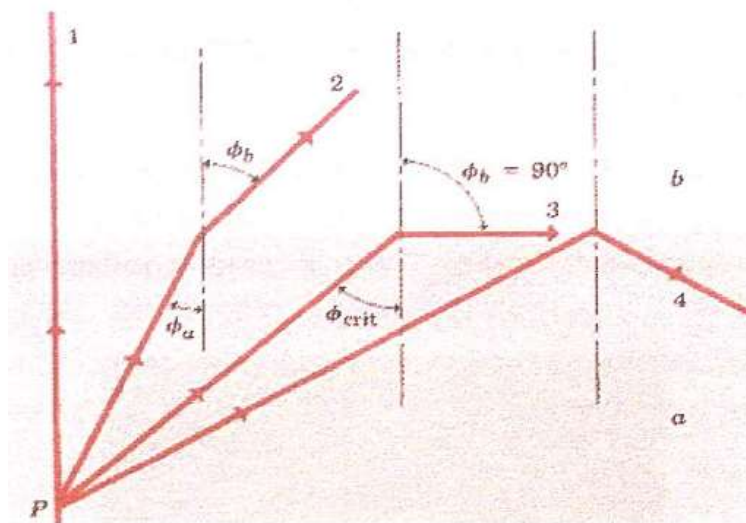


миопия (късогледство)
се коригира с вдлъбната леща

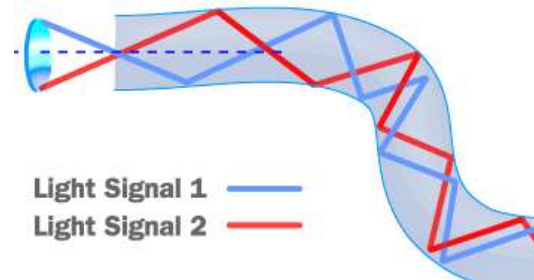
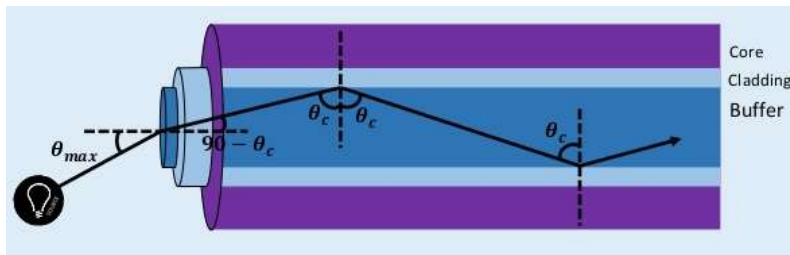


Някои недостатъци на зрението могат да се коригират със събирателни и разсейвателни сферични лещи. Това са лещи, които имат една или две сферични повърхности, изпъкнали или вдлъбнати. Оптометристите, които се занимават с това, използват концепцията за *пречупвателна сила* на лещите, която показва в каква степен те пречупват светлината. Пречупвателната сила се измерва в диоптри и е реципрочна на фокусното разстояние, измерено в метри (1 диоптър е равен на 1/метър). Тъй като събирателните лещи имат положително фокусно разстояние, а разсейвателните отрицателно, диоптрите са положителни и отрицателни. Освен сферични, има и цилиндрични лещи с цилиндрични повърхности. Използват се за корекция на астигматизъм.

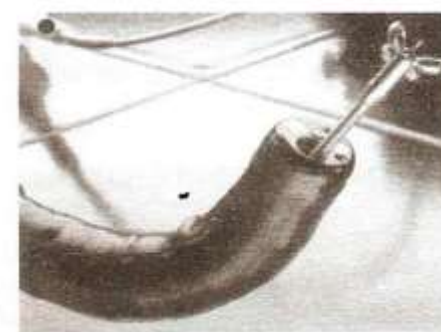
ПЪЛНО ВЪТРЕШНО ОТРАЖЕНИЕ



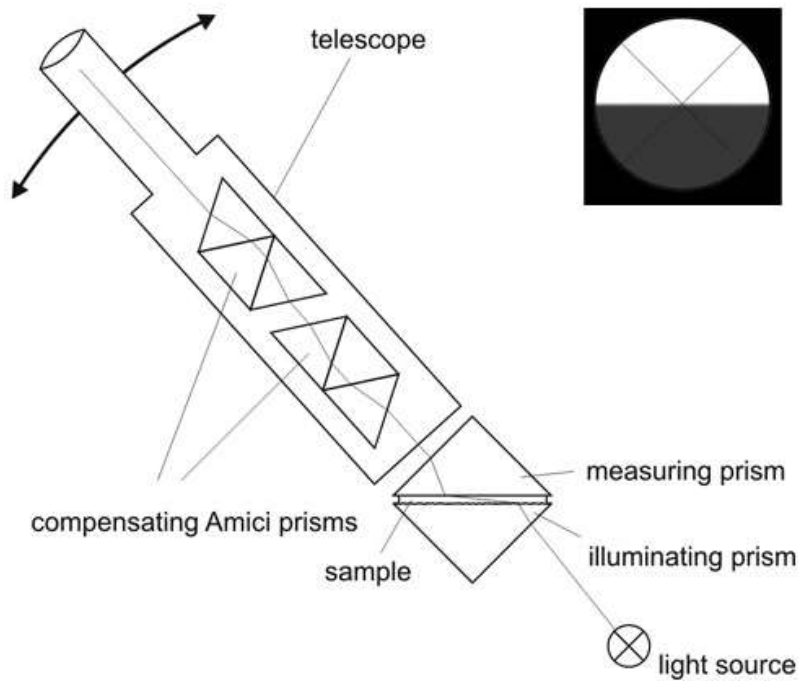
Когато светлината преминава от една среда (a) с показател на пречупване n_a в друга (b), която има по-малък показател на пречупване n_b (например от стъкло във въздух), то с увеличаване на ъгъла на падане ϕ_{α} ъгълът на пречупване ϕ_b расте по-бързо. Съществува такъв критичен ъгъл на падане ϕ_{crit} , за който ъгълът на пречупване $\phi_b = 90^\circ$. При ъгли на падане, по-големи от граничния, пречупеният лъч се движи заедно с отразения, т.е. осъществява се пълно връщане на светлината в първата среда. Този процес се нарича *пълно вътрешно отражение*.



Явлението пълно вътрешно отражение намира приложение за направата на устройствата, които могат да провеждат светлина и не по права линия - т.нар. световоди (vlakнеста или нишкова оптика). Световодите се състоят обикновено от стотици хиляди тънки стъклени нишки и могат да пренасят на разстояние не просто светлина, но и образи.



Медицинското им приложение е в прибори, наречени ендоскопи, които се използват за наблюдение вътрешността на стомаха, правото и дебелите черва, кръвоносната система и други кухини в организма без хирургична намеса.

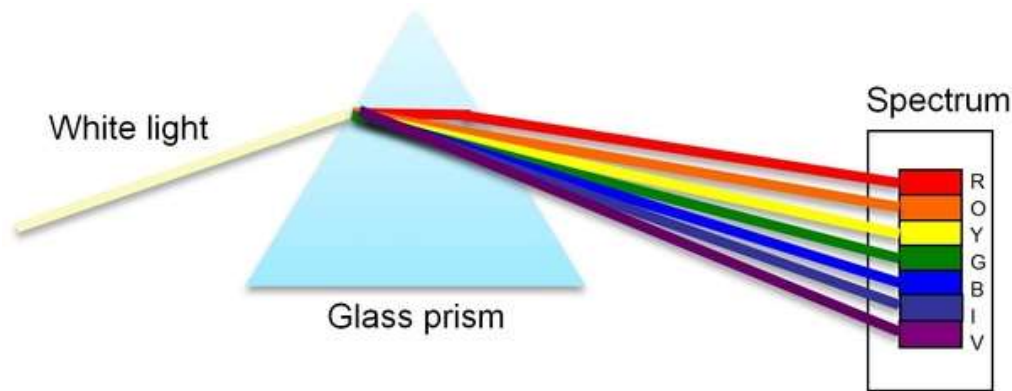


На пълното вътрешно отражение е основан и принципът на действие на рефрактометрите (прибори за измерване показателя на пречупване). Използва се закона на Снелиус за граничния случай, когато ъгълът на падане

$$\phi_a = \phi_{crit} \Rightarrow \frac{\sin \phi_{crit}}{\sin 90^\circ} = \sin \phi_{crit} = n_{21}$$

По ϕ_{crit} се определя n_{21} а от там и неизвестния показател на пречупване n_2 , при условие, че стойността на n_1 е известна.

ДИСПЕРСИЯ НА СВЕТЛИНАТА



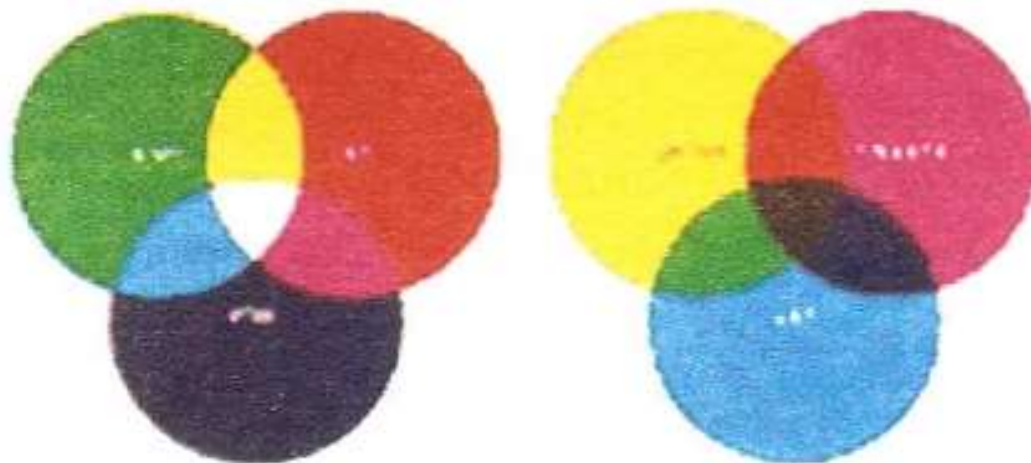
Бялата светлина е съвкупност от електромагнитни вълни с дължини в диапазона от 350 до 750 nm. Във вакуум те се движат с еднаква скорост $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, но във веществата скоростта им v е по-малка и зависи от честотата на вълната. Това се дължи на взаимодействието на светлинните вълни с електрическите заряди в атомите и молекулите на веществата. Зависимостта на скоростта на светлината от честотата ѝ $v = f(\nu)$ се нарича *дисперсия на светлината*.

Тъй като $v = \frac{c}{n}$ (n е показателят на пречупване на светлината за съответното вещество), а $c = \text{const}$, то и n ще зависи от честотата на вълната. Ето защо дисперсия на светлината се нарича още и зависимостта на показателя на пречупване от честотата $n = f(\nu)$.

С други думи, показателят на пречупване n е постоянен за дадено вещество, но различен за различните честоти ν на преминаващата светлина. Винаги когато поток от фотони се пречупва, това става под различен ъгъл за фотоните с различна дължина на вълната. Така бялата полихроматична светлина се разлага на съставлящите я цветове.



Явлението дисперсия е открито през 1672 г. от Нютон. Разлагайки бялата светлина с призма той установява, че тя е съставена от различни цветове, чието едновременно въздействие върху окото предизвиква усещането за бял цвят.



Бялата светлина може да бъде разложена на съставлящите я цветове, а *при събирателното смесване на излъчени цветове* отново се получава бяла. Въпреки, че цветовете са много, **основни цветове** са 3 - червен, син и зелен, защото при тяхното смесване се създава усещане за бяла светлина. Ако възприемаме светлина, излъчена от самостоятелно светещи обекти **първични цветове** са червения, синия и зеления, защото когато се смесят и трите заедно в съответните пропорции те създават усещане за бяла светлина. (Телевизионният образ например се получава по този начин.) Ако тези цветове се комбинират по двойки се формират **вторични цветове** - жълт, светлосин (циан) и виолетов (магента).

В отразена светлина цветовете се виждат по друг начин. Един пигмент поглъща само един първичен светлинен цвят и отразява другите два първични цвята. Първичен цвят за него ще бъде сместа от отразените два. Ето защо жълтият, светлосиният и виолетовият са първични в отразена светлина. Жълтият се получава от отразените червен и зелен, светлосиният от зеления и синия, а виолетовият от червения и синия. Вторични цветове на пигмент в отразена светлина са червения, синия и зеления, защото той поглъща два първични светлинни цвята и отразява своя собствен цвят обратно.

Обикновено с повишаване на честотата показателят на пречупване се увеличава (това е т.нар. *нормална дисперсия*). Обаче в някои диапазони от честоти, в които веществото силно поглъща светлината, се наблюдава обратната зависимост - намаляване показателя на пречупване с увеличаване на честотата (*аномална дисперсия*).

Дисперсията на светлината намира приложение в прибори за получаване на монохроматична светлина (монохроматори), които са важни компоненти на апаратурата за спектрален анализ.

ПОГЛЪЩАНЕ НА СВЕТЛИНАТА

Поглъщането на светлината представлява процес на намаляване на нейния интензитет при преминаването ѝ през материална среда. Този процес е съпроводен и с промени в спектралния състав на светлината, тъй като степента на поглъщане зависи от честотата на светлинните вълни. (За обяснение на механизма на поглъщане на електромагнитна енергия виж *Лазери, отслабване и усилване на електромагнитните лъчения при взаимодействия с веществата*)

Поглъщането на енергия от светлинната вълна може да предизвика следните ефекти:

- отделяне на топлина (увеличаване молекулно-механичната енергия на частиците на веществото),
- възбуждане на молекули (преход на електрони на по-високи енергетични нива),
- йонизация (откъсване на електрони от молекулите),
- разкъсване на ковалентни връзки в молекулите (образуване на свободни радикали).

Закон на Буге-Ламберт-Беер

Основният закон, описващ количествено поглъщането, е установен експериментално през 1729 г. от френския физик Буге (*Pierre Bouguer*, 1698-1758), а изведен теоретично през 1760 г. от немския физик Ламберт (*Johann Heinrich Lambert*, 1728-1777) и носи името **закон на Буге-Ламберт**: Интензитетът (I) на светлината, разпространяваща се в дадено вещество, намалява с увеличаване на изминатия от нея път (x) по експоненциална зависимост:

$$I(x) = I_0 e^{-kx}$$

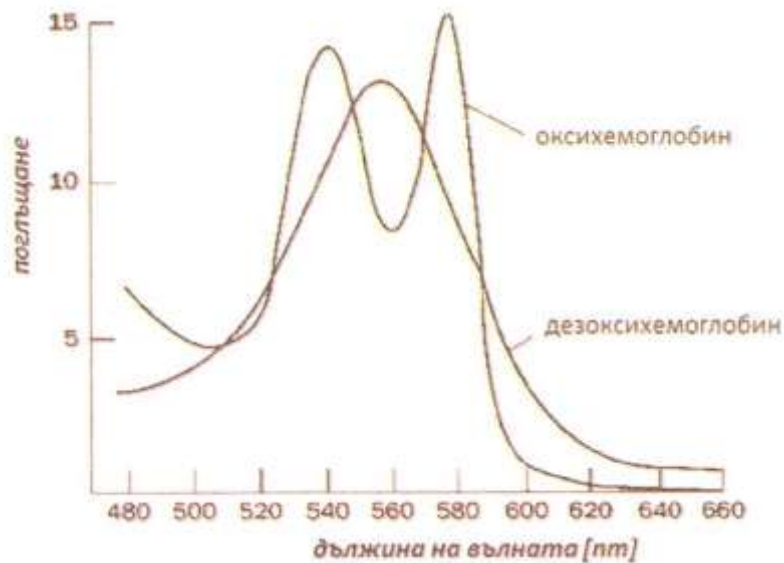
където I_0 е интензитетът на светлината при навлизането ѝ във веществото (т.е. при $x = 0$), $I(x)$ - стойността на светлинния интензитет след изминаване на оптичен път x във веществото, а k е линеен коефициент на отслабване.

Коефициентът на отслабване зависи от дължината на светлинната вълна, т.е. $k = f(x)$ и е специфичен за всяко вещество. Поради това и интензитетът на преминалата светлина I зависи от дължината на вълната и е различен за различните вещества, т.е. $I = f(x, \lambda)$.

За разтвори на вещества коефициентът на поглъщане k зависи и от концентрацията на разтвореното вещество, т.е. $k = f(x, c)$ и се определя от открития през **1852** г. **закон на Беер** (*August Beer, 1825-1863*):

$$k(\lambda, c) = \varepsilon(\lambda)c ,$$

където c е моларната концентрация на разтвореното вещество, а $\varepsilon(\lambda)$ се нарича моларен коефициент на поглъщане или *моларен екстинкционен коефициент* и зависи само от λ . Този закон е валиден при ниски концентрации на разтворените вещества.



Моларният коефициент на поглъщане $\epsilon(X)$ всъщност е поглъщането от разтворено вещество с концентрация 1 mol/l. Той зависи от дължината на вълната и тази зависимост е силно специфична за различните вещества. По-долу са показани абсорбционни спектри на оксигемоглобин и дезоксигемоглобин, които специфично се различават по максимумите в диапазона 500-575 nm.

Поглъщането на светлината от субстанции в разтвор се дава от обобщения **закон на Буге-Ламберт-Беер**:

$$I(\lambda, x, c) = I_0 e^{-\varepsilon(\lambda)cx}$$

На базата на този закон е дефинирана величината *екстинкция* (или *оптична плътност*), която зависи от оптичния път x , от дължината на вълната λ на светлината, преминаваща през разтвора и от концентрацията c на разтвореното вещество:

$$E(\lambda, x, c) = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon(\lambda)cx$$

Ако оптичният път е постоянен (например $x = 1 \text{ cm}$) и през разтвора преминава монохроматична светлина с определена дължина на вълната λ , т.е. $\varepsilon(\lambda)$ има определена конкретна стойност за дадено вещество ε_λ , тогава екстинкцията ще зависи само от концентрацията c на това вещество в разтвора:

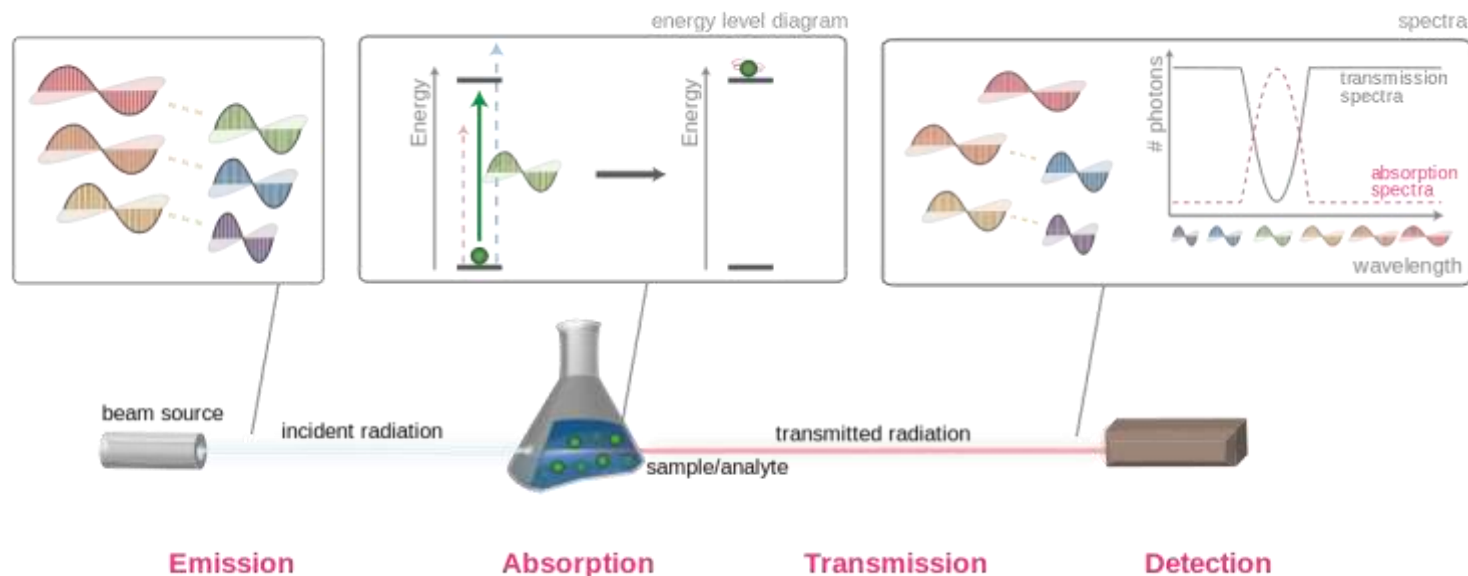
$$E_\lambda(c) = \varepsilon_\lambda c = \text{const} \times c$$

Тази зависимост позволява чрез измерване на екстинкцията E_λ при определена дължина на вълната да се определи моларната концентрация c на разтвореното вещество.

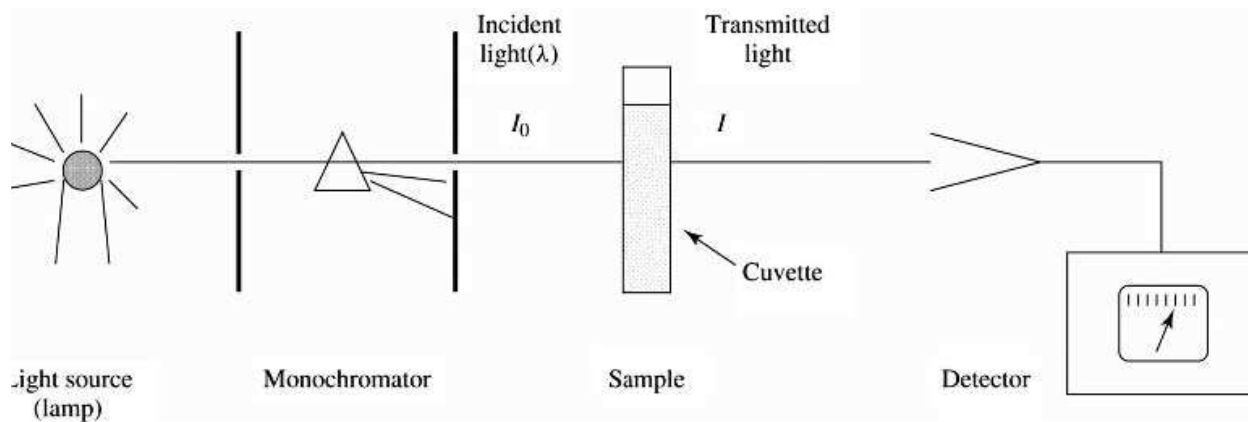
Грешки при прилагането на *закона на Буге-Ламберт-Беер* могат да се получат ако се използва немонохроматична светлина, ако молекулите на разтворителя също поглъщат светлина с използваната дължина на вълната, ако молекулите на изследваното вещество взаимодействат помежду си или с молекулите на разтворителя и степента на взаимодействие зависи от концентрацията, а така също при разтвори с по-високи концентрации.

Когато разтворът не е хомогенен (например е мътен), този закон не е валиден, тъй като в такъв случай намаляването на светлинния интензитет ще се дължи не само на поглъщане, но и на разсейване на светлината.

Молекулнен абсорбционен спектрален анализ



Молекулният абсорбционен спектрален анализ е комплекс от физически методи за определяне качествения и количествен състав на веществата чрез изследване на техните абсорбционни спектри. Абсорбционният спектър е много важна характеристика на веществата, защото е еднозначно свързан с техния строеж. Приборите, с които се извършват измервания на поглъщането на светлината, се наричат *спектрофотометри*.



С помощта на спектрофотометър могат да бъдат направени следните типове измервания:

При фиксирана дължина на вълната :

- да се измери в даден момент екстинкцията E_λ ,
- да се измери изменението във времето на екстинкцията $E_\lambda(t)$.

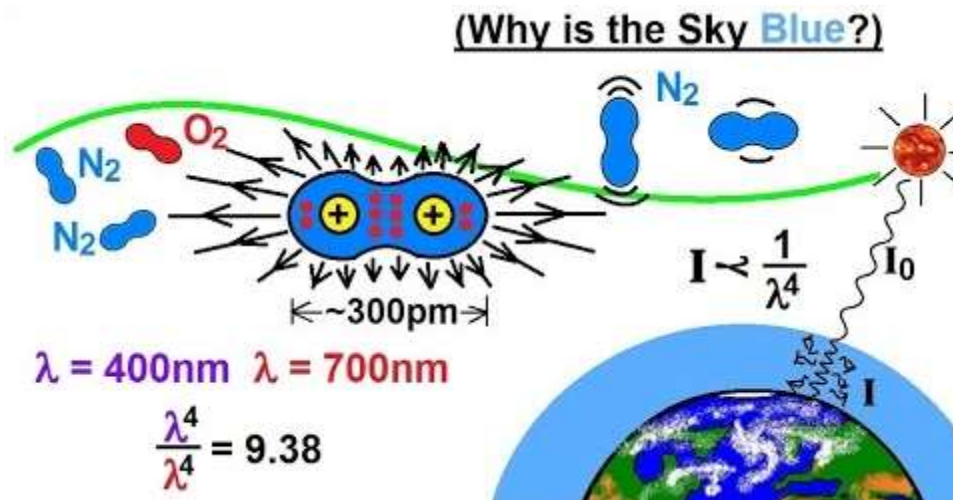
С променяща се в определен диапазон дължина на вълната :

- λ да се заснеме в даден момент абсорбционният спектър $E(\lambda)$,
- да се проследи изменението във времето на абсорбционния спектър $E(\lambda, t)$, като спектрите се заснемат последователно в различни моменти.

Молекулният абсорбционен анализ бива:

- *качествен* (сравняването на даден спектър с еталонен на определено вещество показва наличието на това вещество в разтвора без да се определя неговото количество),
- *структурен* (по наличието и разположението на абсорбционните максимуми в спектъра на поглъщане могат да се направят заключения за наличието на определени функционални групи в структурата на анализираното вещество)
- *количествен* - по закона на Буге-Ламберт-Беер количествено се определя концентрацията на дадено вещество.

РАЗСЕЙВАНЕ НА СВЕТИНАТА



При разпространяване на светлинен лъч в оптично нееднородна среда светлината се отклонява в различни посоки и променя честотния си състав. Това явление се нарича разсейване на светлината. Оптично нееднородна среда е такава среда, в която има пространствени области с различен коефициент на пречупване. Размерите на тези области трябва да са съизмерими с дължината на вълната на преминаващата светлина (за видимата светлина - в диапазона от 0,3 до 0,8 микрона).

Оптично нееднородна среда може да се получи по следните причини:

1. Възникване на временни (краткотрайни) оптични нееднородности в хомогенно вещество вследствие флуктуации на плътността му, дължаща се на топлинното движение на неговите молекули. Разсейването на светлината от такава среда се нарича *молекулно разсейване* (такова е например разсейването на светлината в атмосферата).
2. Наличие на малки частици от някакво вещество, диспергирани в друго прозрачно хомогенно вещество (хетерогенни среди - суспензии, емулсии, аерозоли). Разсейването на такива среди е известно като *ефект на Тиндал* (например разсейването на светлинен лъч в цигарен дим).

Степента на разсейване (интензитетът на разсеяната светлина I_s) зависи от дължината на вълната λ (респективно от честотата ν) на преминаващата светлина. Това е открито от Джон Рейли (*John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh*, 1842-1919), британски физик, носител на Нобеловата награда по физика за 1904 г. Според закона на **Рейли**:

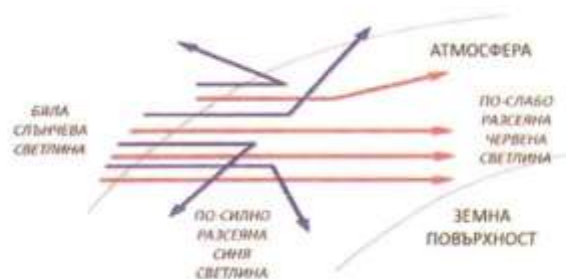
$$I_s = I_0 \frac{9\pi^2 n^2 (n_1^2 - n^2) N V^2 (1 + \cos^2 \theta)}{2(n_1^2 + 2n^2) \lambda^4 R^2}$$

където I_0 е интензитетът на падащата светлина; N и V - концентрацията и обема на частиците, които разсейват; θ - ъгълът между падащия и разсеяния потоци светлина; n и n_1 - съответно показателите на пречупване на средата и разсейващите частици; R - разстоянието до приемника на разсеяната светлина.

Тази сложна зависимост може приближено и опростено да се представи така:

$$I_s \propto \nu^2 \div \nu^4$$

Конкретният ѝ вид се определя от съотношението между геометричните размери на оптичните нееднородности и дължината на вълната:



1. Ако размерите на оптичните нееднородности не надвишават $0,2$ от дължината на вълната, то $I_s \propto \nu^4$. Когато през такава среда преминава полихроматична бяла светлина, ще се разсейват по-силно по-късовълновите ѝ компоненти, т.е. сините и виолетови лъчи (на това например се дължи синият цвят на небето), а ще преминават по-дълго вълновите (червено-оранжевият цвят на атмосферата при залез слънце). По-слабото разсейване на по-дълговълновите лъчи (жълти и червени) е в основата на използването им за сигнални светлини, а на инфрачервените лъчи - за прибори за виждане в мъгла и дим (за военни цели).

2. Ако оптичните нееднородности са с размери, по-големи от $0,2$ от дължината на вълната на преминаващата светлина, то $I_s \propto \nu^2$. С други думи, различните цветове ще се разсейват в по-еднаква степен (например, запрашената атмосфера и облаците имат бял цвят, тъй като диаметърът на суспендираните в нея частици и водни капчици е по-голям).

3. Ако оптичните нееднородности са частици с размери, съизмерими с дължината на вълната, то степента на разсейване зависи и от геометричните им параметри, ориентацията им в пространството, показателя на пречупване и плътността им. В този случай степента на разсейване е различна в различните посоки на пространството.

Интензитетът на преминалата след разсейване светлина се изразява чрез закон, който е аналогичен на закона на Буге-Ламберт-Беер:

$$I(x) = I_0 e^{-\beta x}$$

където I_0 е интензитетът на светлината при навлизането ѝ в разсейващата среда (при $x = 0$), $I(x)$ - стойността му след изминаване на оптичен път x , а β е *линеен коефициент на разсейване на светлината*. При среди, които имат едновременно и поглъщащи, и разсейващи свойства, общото отслабване на светлината се дава с обобщен закон: $I(x) = I_0 e^{-\mu x}$. μ е *линеен коефициент на отслабване* (сума от коефициентите на поглъщане и разсейване).

Турбидиметрия и нефелометрия

Разсейването на светлината намира приложение за определяне концентрацията на частици в хетерогенни системи. Използват се два метода:

- *нефелометрия* (концентрацията на диспергирани частици се определя посредством измерване интензитета на светлината, разсеяна под някакъв ъгъл спрямо преминаващата),
- *турбидиметрия* (концентрацията на диспергираните частици се определя по намаляването интензитета на светлината, която е преминала през разсейващата среда).

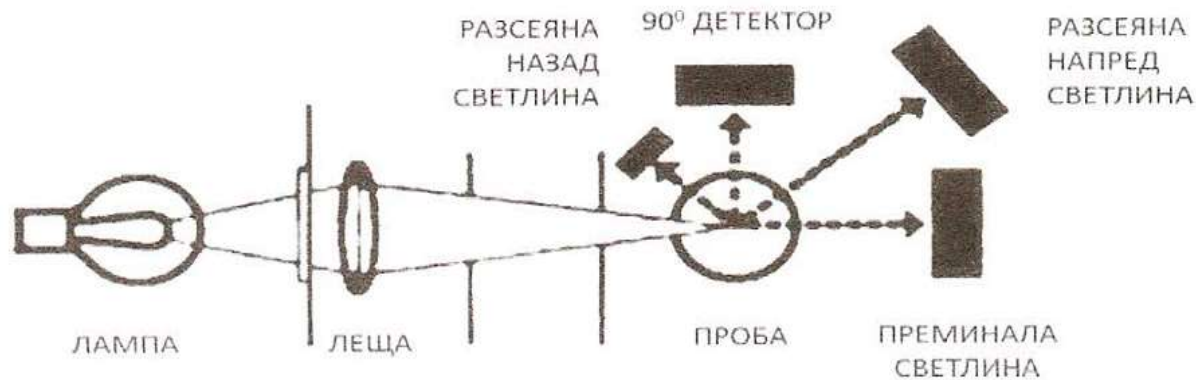


Схема на апарат, чрез който може да се измерва разсейването и по двата метода.