

## ТЕМА 9\_ФОТОМЕТРИЧНИ ВЕЛИЧИНИ

### 1. Основни понятия.

Светлината е сложно явление, при което се наблюдава т. нар. **дуализъм (двойственост)**. В едни случаи светлината се проявява като електромагнитна вълна (вълнова представа), а в други – като поток от частици, наречени фотони (корпускулярна представа). За обяснение на светлинните явления се използват и двете представи.

За сега, в този параграф, ще охарактеризираме светлината като електромагнитна вълна. Както бе изяснено, електромагнитният спектър обхваща всички лъчения от гама-лъчите до радиовълните.

**Под светлина се разбира онази част от електромагнитното лъчение, което се възприема от човешкото око (с дължина на вълната във вакуум от 380 до 780 nm).** Скоростта  $c$  на светлината във вакуум е универсална физична константа и има стойност  $c = (299\,792\,458 \pm 1.2) \text{ m/s}$ . В прозрачно вещество скоростта на светлината  $v$  се представя с формулата  $v = c/n$ , където  $n$  се нарича **абсолютен показател на пречупване на средата**. Показателят  $n$  определя оптичестката плътност на средата, която нараства с увеличение на масовата ѝ плътност. Дължината на светлинните вълни във вакуум  $\lambda_0$  се определя от основната формула за вълните  $\lambda_0 = c/\nu$ , като  $\nu$  е честотата на светлината. За всяка друга прозрачна среда с показател на пречупване  $n$  дължината на светлинната вълна  $\lambda$  се определя от зависимостта  $\lambda = v/\nu = \lambda_0/n$ .

Линиите, по които се разпространява светлината енергия и които в изотропна среда са перпендикулярни на вълновия фронт се наричат

**светлинни лъчи.** При плоска вълна те образуват успореден сноп, а при сферична вълна – сходящ или разходящ сноп.

### 2. Енергетични характеристики на светлината.

Светлината може да бъде оценявана по енергията, пренасяна от електромагнитните вълни и по субективното психофизично усещане за светлина с помощта на "средното" човешко око. В първият случай за оценяване се използват енергетични (физични) величини, а във втория – фотометрични (светлинни) величини.

Енергетичните величини характеризират излъчването, разпространението и поглъщането не само при светлината, а и в целия спектър на електромагнитните вълни. Част от тези величини са разгледани вече в тема 6. Тук ще въведем още няколко енергетични характеристики.

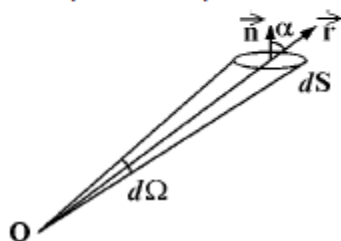
Енергетичен (лъчист) поток  $\Phi_e$ . Нека за време  $dt$  през определена повърхнина с площ  $S$  се пренася лъчиста енергия  $dW$ . Отношението

$$\Phi_e = \frac{dW}{dt} \quad (9.1)$$

се нарича **лъчист или енергетичен поток** през  $S$ . Той е числено **равен на енергията, която се пренася през  $S$  за единица време.**

Интервалът  $dt$  е толкова малък, че в рамките на това време  $\Phi_e$  е постоянен. Лъчистият поток е всъщност скоростта, с която се пренася през  $S$  лъчистата енергия. Единицата за енергетичен поток в SI е  $W$  (ват).

Енергетичен интензитет на лъчение  $I_e$ . Нека  $d\Omega$  е достатъчно малък пространствен ъгъл при върха  $O$  на конус с основа  $dS$  (фиг.9.1). Върхът на конуса съвпада с местоположението на източника на излъчване. Смятаме, че той е точков, т. е. размерите му се пренебрегват в сравнение с разстоянието до точки в пространството, за които ни интересува въздействието на лъчението. Векторът  $\vec{r}$  определя посоката на разпространение на лъчението, а  $\vec{n}$  е



Фиг.9.1.

нормален единичен вектор към  $dS$ . Под поток в пространствения ъгъл  $d\Omega$  се разбира потока през  $dS$ . От геометрията е известно, че

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} \cos \alpha, \quad (9.2)$$

като  $r$  е разстоянието от  $dS$  до точка  $O$ , а  $\alpha$  е ъгъла между векторите  $\vec{n}$  и  $\vec{r}$ .

Ако  $d\Phi_e$  е енергетичният поток в пространствения ъгъл  $d\Omega$ , **енергетичният интензитет**  $I_e$  на лъчението по посока на  $\vec{r}$  се дефинира чрез израза

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (9.3)$$

и е **числено равен на потока в единица пространствен ъгъл**. В SI единицата за интензитет на лъчението е  $W/sr$  (ват на стерadian).

Зависимостта на  $I_e$  от честотата се нарича **спектр на лъчението**. Подобно на звуковия спектър, той също може да бъде **прекъснат** и **непрекъснат**. Прекъснат спектър излъчват атомите в изолирано състояние (под формата на пара), а непрекъснат - светещите повърхности на твърдите тела.

Енергетична осветеност (облъченост)  $E_e$ . Разглеждаме повърхнина с площ  $S$ , която се облъчва с лъчение. В най-общият случай облъчването е неравномерно. Делим повърхнината на достатъчно малки елементи  $dS$ , толкова малки, че да са равномерно облъчени. Енергетичният поток падащ върху  $dS$  е също достатъчно малък. Означаваме го  $d\Phi_e$ . Величината

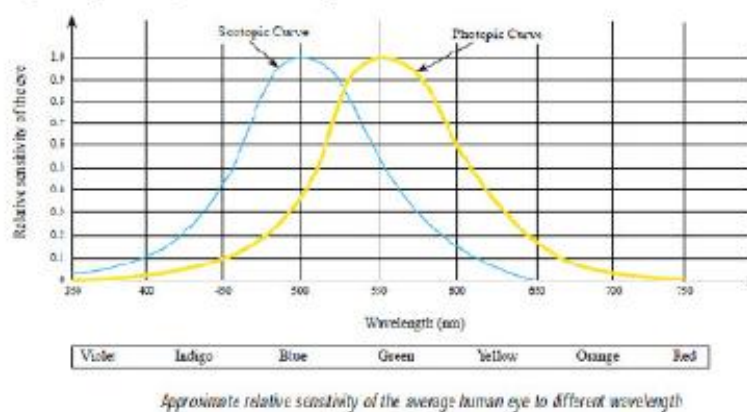
$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}, \quad (9.4)$$

която е **числено равна на енергетичният поток падащ върху единица площ** се нарича **облъченост на елемента  $dS$** . Единицата за облъченост е  $W/m^2$  (ват на квадратен метър).

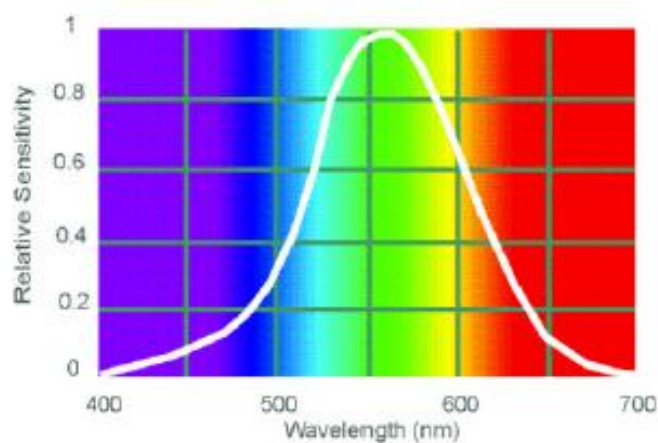
### 3. Фотометрични величини.

Фотометричните величини са основани, от една страна на енергетичните характеристики, а от друга страна от субективното светлинно усещане. Казахме вече, че "средното" човешко око възприема само електромагнитните вълни с дължина на вълната  $\lambda$  от 380 или до 780 nm, които се наричат светлинни вълни или накратко светлина. Извън този интервал човешкото око е нечувствително като приемник на електромагнитни вълни. Освен това окото е различно чувствително за различните  $\lambda$  от споменатия интервал. За характеризиране на спектралната чувствителност на окото се въвежда величината  $V_\lambda$  наречена относителна спектрална чувствителност (спектрална светлочувствителност). Тя се определя като отношение на чувствителността на окото при дадено  $\lambda$  от интервала 380 – 780 nm към максималната му чувствителност в този интервал. От това следва, че  $V_\lambda$  е безразмерна величина и се изменя от 0 до 1.

Зависимостта на  $V_\lambda$  от  $\lambda$  е показана на фиг.9.2 (спрямо цветовете във видимата част на спектъра – на фиг. 9.3) за стандартно око, адаптирано на светло – жълтата крива (фотопично, дневно зрение) и такова адаптирано на тъмно (скотопично, нощно зрение) – синята крива.

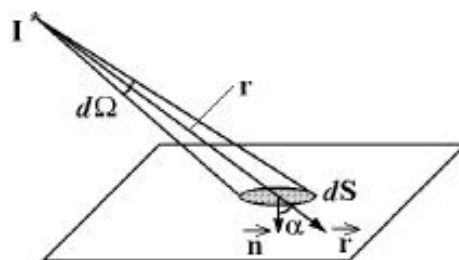


Фиг. 9.2.



Фиг. 9.3.

Както се вижда, максималната чувствителност на средно човешко око за дневно зрение е при дължина на вълната около 550 nm, а при нощно – на около 500 nm.



Фиг. 9.4.



Електромагнитната енергия, която се възприема от човешкото око се нарича **светлинна енергия**.

Аналогично, лъчистият поток, оценен по зрителното усещане на човешкото око се нарича **светлинен поток ( $\Phi$ )**. Светлинният поток е онази част от енергетичния поток, която се възприема от човешкото око.

**Интензитетът на светлината** се дефинира аналогично на енергетичния интензитет. Ако  $d\Phi$  е светлинния поток, излъчен от светлинен източник в пространствен ъгъл  $d\Omega$  (фиг. 9.1), величината  $I$ , определена от

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (9.5)$$

се нарича интензитет на светлината, излъчена от източника по посока на  $\vec{r}$ , около която е избран ъгъла  $d\Omega$ . Зависимостта на интензитета на светлината от дължината на вълната  $\lambda$  се нарича светлинен спектър. Видът на светлинния спектър определя и усещането за цвят. При непрекъснатият спектър има непрекъснато преливане на цветовете един в друг, като се почне от виолетовия (около 400 nm) и се стигне до червения (около 700 nm).

При изотропен източник ( $I$  не зависи от посоката)  $\Phi = \int I d\Omega = I \int d\Omega = I \Omega$ . За цялото пространство  $\Omega = 4\pi$ , откъдето  $I = \Phi/4\pi$ . Изотропен е например точковият светлинен източник (светеща точка).

Единицата за интензитет на светлината е кандела (cd). Тя е основна единица в SI. **Кандела е интензитет на светлината в дадена посока на**

**източник излъчващ монохроматично лъчение с честота  $540 \cdot 10^{12}$  Hz (отговаря на дължина на вълната 555 nm) и с интензитет на лъчението в тази посока  $1/683$  W/sr.** От (9.5) следва, че единицата за светлинен поток е cd.sr, която се нарича лумен (lm).

Ако върху елементарна площ  $dS$  от повърхността  $S$  пада светлинен поток  $d\Phi$ , то величината  $E$ , дефинирана чрез отношението

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (9.6)$$

**се нарича осветеност на  $dS$  и е числено равна на светлинния поток, падащ върху единица площ (плътност на светлинния поток).** Единицата за осветеност е лукс (lx)  $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} / \text{m}^2$ .

От (9.6) за потока, осветяващ цялата повърхност  $S$  се получава

$$\Phi = \int_S E \cdot dS, \quad (9.7)$$

като за равномерно осветяване ( $E$  е едно и също за всяка точка от  $S$ ) от (9.7) следва  $\Phi = E \cdot S$ , откъдето  $E = \Phi/S$ .

При осветяване на повърхност от точков светлинен източник може да бъде намерена осветеността за всяка точка от повърхността. Нека  $dS$  е произволен елемент от тази повърхност, толкова малък, че да е равномерно осветен,  $r$  е разстоянието от този елемент до източника с интензитет  $I$ ,  $d\Omega$  – пространствения ъгъл, съответстващ на елемента  $dS$ ,  $\vec{n}$  – единичния нормален вектор към  $dS$  а  $\alpha$  – ъгъла между  $\vec{r}$  и нормалата  $\vec{n}$  (фиг.9.4). От (9.6) за

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I d\Omega}{dS} = \frac{I dS \cos \alpha}{dS r^2} = \frac{I \cos \alpha}{r^2}.$$

осветеността на елемента  $dS$  се получава

При извода на този израз са използвани определения (9.2) и (9.5) съответно за пространствен ъгъл и за интензитет на светлината. Полученото съотношение

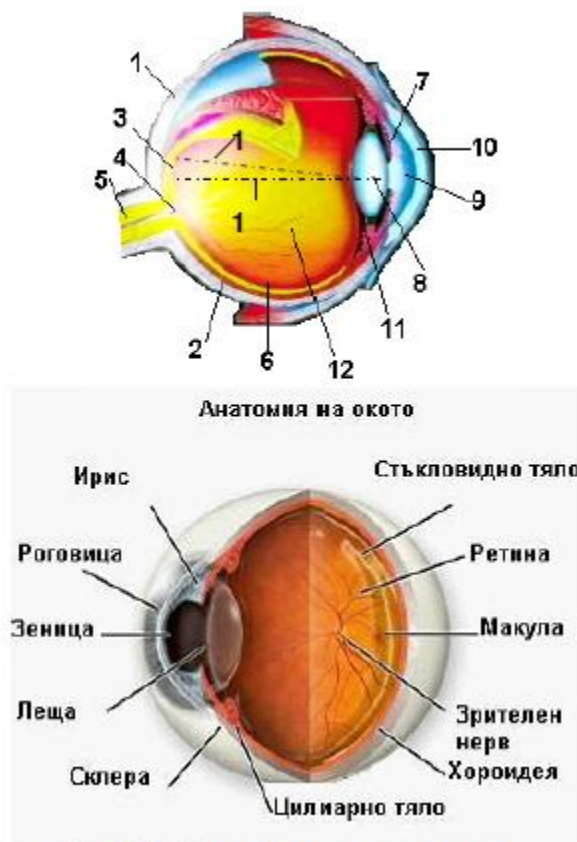
$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2} \quad (9.8)$$

е осветеността в точка, около която е избран елемента  $dS$  и е известно като **закон на Ламберт** за осветеност от точков светлинен източник. Вижда се, че осветеността е максимална когато площта  $dS$  е перпендикулярна към направлението на  $\vec{r}$  и нула, ако тя е тангенциална към него.

Светлината е един от основните фактори на средата, в която живее и работи човекът. В тази връзка се въвеждат определени норми за осветеност на работните места, които се регламентират от Международната комисия по осветлението (МКО).

#### 4. Психофизично възприятие на светлината. Особенности на човешкото зрение.

Окото представлява сложна оптична и физиологична система, която преобразува енергията на оптичното излъчване в зрително усещане.



Фиг. 9.5. Устройство на човешко око.

Външно органът на зрението ни (фиг. 9.5) представлява кълбовидно тяло-ябълка, почти напълно покрито с непрозрачна обвивка 1. В предната си част обвивката е по-изпъкнала и прозрачна, тази част се нарича роговица 10. Цветната обвивка – ирисът 7 изпълнява ролята на бленда, отворът на която е зеницата. През зеницата светлината преминава в окото. Кристалинът 8 представлява двойно изпъкнала еластична леща, върху която действа пръстеновидният мускул 11, като променя кривината на повърхността ѝ. Кристалинът разделя вътрешната кухина на окото на 2 камери: предна 9 (между роговицата и кристалина), запълнена с камерна течност, и задна 12, запълнена със стъкловидно тяло.

Вътрешната повърхност на задната камера е покрита с ретина 6. Между ретината и склерата 1 се намира тънката обвивка 2, представляваща мрежа от кръвоносни съдове.

Ретината представлява разклонение на зрителния нерв 5. Сляпото петно 4 представлява мястото на входа на зрителния нерв. В ретината са разположени светочувствителните елементи – пръчици и колбички, рецепторите които фактически представляват краищата на зрителния нерв. Пръчиците имат форма на цилиндър с диаметър около  $2\mu\text{m}$ , колбичките имат крушовидна форма с най-голям диаметър от 4,5 до  $6,5\mu\text{m}$ .

В границите на сляпото петно светочувствителни елементи няма. Малко над това петно се намира жълтото петно 3, във формата на овала с оси примерно  $1\text{mm}$  по хоризонталата и  $0,8\text{mm}$  по вертикалата ( $6^\circ$  зрително поле). В

средната част на жълтото петно се намира централната ямичка, светочувствителният слой на която се състои само от колбички, при това всяка от тях има собствено нервно влакно. Диаметърът на централната ямичка съответства ~ на  $2,5^\circ$  зрително поле. Централната ямичка е участъкът с най-ясно виждане. Линията 13, минаваща през центъра на жълтото петно и задната възлова точка на окото, се нарича зрителна ос. Тя е отклонена от оптичната ос 14 на окото на ъгъл около  $5^\circ$ . С отдалечаване от централната ямичка броят на колбичките намалява, а броят на пръчиците се увеличава. Броят на периферните колбички, свързани с едно нервно влакно, се увеличава с отдалечаване от жълтото петно. Броят на колбичките върху ретината възлиза на около 7 милиона, а броят на пръчиците е значително по-голям (75 милиона и повече).

Диаметърът на зеницата на окото на различните хора се движи в границите от 1,5 до  $8\text{mm}$ . Той се изменя в зависимост от условията на осветяване – при силно осветяване зеницата се свива и обратно. Очната ябълка под действието на мускулите може да се завърта на желаня ъгъл в границите на  $40^\circ - 50^\circ$ , изпълнявайки сканиране на наблюдаемия предмет.

Разстоянието между центровете на зениците, т.е. базата на очите, за възрастните хора лежи в границите от 56 до  $74\text{mm}$ . Средната големина на очната база е  $65\text{mm}$ . При наблюдаване на близко разположени предмети, очите се завъртат така, че зрителните им оси сключват известен ъгъл, наречен ъгъл на конвергенция. Максималната стойност на ъгъла на конвергенция е  $32^\circ$ .

Оптичната система на окото образува действително изображение на наблюдавания обект върху ретината, което се възприема от светочувствителните елементи. Физиологичната система на възприемане на светлинните дразнения на елементите на ретината благодарение на натрупания опит свързва действителното обърнато изображение, получено върху ретината с наблюдавания обект.



Фокусното разстояние на окото, определящо оптичната му сила, се изменя при наблюдаване на различно разположени по дълбочината на пространството обекти. Тези способности на окото се нарича *акомодация* ( $A$ ). Тя се осигурява от действието на пръстеновидния мускул, изменящ, както бе вече казано, кривината на повърхностите на кристалина. При акомодация на окото на безкрайност, задното му фокусно разстояние е най-голямо ( $22,785\text{mm}$ ) и задният фокус съвпада с ретината. Този случай съответства на спокойно състояние на окото, т.е. акомодационният мускул е ненапрегнат. Предметната точка, която окото вижда без напрежение на акомодацията, се нарича *далечна точка* на ясно виждане.

При максимално напрежение на акомодационните мускули задното фокусно разстояние се намалява до  $18,93\text{mm}$ . Това съответства на образуване върху ретината на изображението на предметна точка, лежаща на оптичната ос на разстояние  $92\text{mm}$  от върха на първата повърхност на роговицата. Тази точка се нарича *близка точка* на ясното зрение.

Разстоянието между близката и далечната точки на ясно зрение се нарича *дължина* или *област* на  $A$ , а изразено в диоптри, се нарича *сила* или *обем* на  $A$ . За нормално око обемът на  $A$  е равен на около 11 диоптъра.

За нормално око при добро осветление най-удобното разстояние за четене е разстоянието от  $250\text{mm}$ , което е наречено *разстояние на най-добро виждане*.

Окото има голям ъгъл на зрение, достигащ  $125^\circ$  по вертикалата и  $150^\circ$  по хоризонталата, но само в неголяма част от този ъгъл се осигурява ясно изображение. Тази част се определя от областта на жълтото петно ( $6^\circ - 8^\circ$ ). Периферната част на зрителното поле е за ориентация. Благодарение на голямата подвижност на окото изображението на наблюдаваните предмети се измества в областта на жълтото петно.

Една от основните хар. на окото е способността му да различава дребни детайли на обектите или т.нар. **острота на зрение**. Остротата на зрение  $k$  се характеризира с величината, обратна на най-малкия ъгъл  $\psi$  (в  $\text{min}$ ), под който окото може да възприеме разделно две близко разположени точки или линии :  $k = 1/\psi$

Поради това, че 2 близко разположени точки се различават само в случая, когато изображенията им се образуват на две съседни колбички, разделени с трета, разделителната способност на окото  $\psi \approx 1'$ . Разделителната способност на окото достига граничната си стойност при осветеност  $50/lx$  и излъчване с  $\lambda = 0,55\mu\text{m}$ . Човешкото око реагира на много широк диапазон от яркости. Тази негова способност да се приспособява към различни интензитети на светлинното въздействие, която се изразява в изменение на светлинната чувствителност, се нарича **зрителна адаптация**.

При преминаване от тъмно помещение в светло, отначало окото се заслепява и едва след известно време ( $20-30\text{s}$ ) придобива светлинна чувствителност. Това е процесът на светлинна адаптация. При преминаване от светло в тъмно помещение, едва след няколко минути окото придобива достатъчна чувствителност. Това е тъмновата адаптация. За пълната тъмнова адаптация е необходим около 1 час.

Адаптацията се осигурява първо от това, че при малки яркости на наблюдаемите обекти (до 0,01nt) светлинното дразнение действа само върху пръчиците, имащи висока чувствителност, но не различаващи цветовете – нощно зрение; при увеличаване на яркостта (до 10nt) заедно с пръчиците, в действие влизат и колбичките, различаващи цветовете – зрение в полумрак; при по-нататъшно увеличаване на яркостта действат само колбичките – дневно зрение. Второ - адаптацията се осигурява от изменение отвора на зеницата: при увеличаване диаметъра на зеницата от 2 до 8mm светлинният поток, постъпващ в окото се увеличава 16 пъти.

Освен това, като регулатор на светлинното дразнение се явяват изменението на концентрацията на зрителния пурпур ( светлочувствителното вещество) в рецепторите и преместването на тъмния пигмент в слоя на ретината, предпазващ рецепторите от излишъка светлинно дразнение.

Най-малката яркост, предизвикваща зрително усещане при дадени условия на наблюдение се нар. *прагова яркост* на окото, а обратната ѝ величина – *светлинна чувствителност*. Светлинната чувствителност се хар. с най-малкото количество светлинна енергия, предизвикващо светлинно усещане. При диаметър на зеницата около 8mm светлинният поток с големина  $2 \cdot 10^{-14} \text{lm}$  вече е способен да предизвика светлинно дразнение в пръчиците.

Спектралното разпределение на чувствителността на окото зависи от вида на адаптацията и се характеризира с кривата на относителна видимост  $k=f(\lambda)$ .

При малка яркост, когато светлинното дразнение действа само върху пръчиците, максимумът на светлинна чувствителност се измества в областта на по-късите от  $\lambda=0,555\mu\text{m}$  вълни. Новото положение на максимума е  $\lambda=0,51\mu\text{m}$ . Това изместване на кривата на видимост на окото се нарича явление на

Пуркинс. След прекратяване на светлинното въздействие, видимите зрителни образи не изчезват. Тези образи се наричат остатъчни и се запазват в продължение на 0,05-0,2 сек, в зависимост от яркостта на спектралния състав на излъчването, а също и от адаптацията на окото.

При възприемане на периодични светлинни дразнения съществуват т.нар. критична честота, при достигане на която наблюдаваното поле ще има постоянна (неизменна) яркост. Тази честота зависи главно от осветеността на фона на наблюдавания обект. При осветеност до 0,1lx критичната честота е равна на 10Hz, при 10lx – 30Hz, при 100lx – 40Hz.

#### **Окото като оптичен уред. Корекция на зрението.**

На фиг.9.5 е показана схема на напречно сечение на човешко око. Светлината влиза през роговицата (корнея) и преминавайки през кристалина, попада върху ретината. При стимулиране на рецепторите на ретината със светлина се създават нервни импулси, които достигат до мозъка и създават в него зрителни усещания.

За да се вижда ясно един предмет, той трябва да е фокусиран, т.е. оптичният му образ трябва да попадне в ретината. Това става с изменение на фокусното разстояние на кристалинната леща.

#### **Далечна точка**

Най-отдалеченото разстояние, на което окото може да фокусира, се нарича далечна точка.

#### **Разстояние на най-ясно гледане.**

Разстоянието до най-близкия предмет, който окото фокусира без да се напъня, се нарича разстояние на най-ясно гледане или близка точка. За стандартно око разстоянието на най-ясно гледане се приема за 25 cm. Това разстояние се изменя с възрастта.



### **Коригиране на зрението.**

#### **Късогледство.**

Дефект на окото, при който не се виждат ясно отдалечените предмети, се нарича късогледство (миопия).

За хора с нормално зрение, паралелни светлинни лъчи влизат в окото и са изкривени от корнеата и лещите (процес наречен рефракция) да фокусират точно върху ретината, давайки ясен и точен образ. При хора с миопия, силата на фокусирането на корнеата (главната рефрактираща структура в окото) и лещата е прекалено голяма спрямо дължината на окото. Светлинните лъчи са изкривени прекалено много и се разминават пред ретината, вместо да се фокусират върху нея. Тази неточност се нарича рефрактивна грешка. С други думи, прекалено фокусирани и замъглени образи се изпращат към мозъка. Хора с миопия виждат предметите много ясно когато са близко до окото, докато по-далечни предмети изглеждат замазано или неясно. Четене или работа от близо са ясни, но далечното виждане е замъглено. При късогледството, светлинните лъчи се фокусират пред ретината (вижте илюстрацията). В резултат от късогледството далечните предмети се виждат неясно или мъгливо. Близките предмети, обаче дават ясен образ.

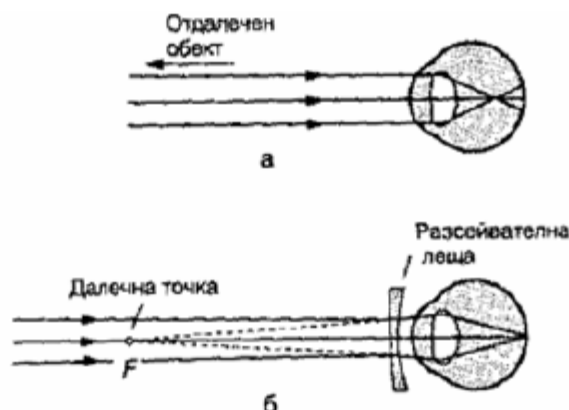
При този дефект образът на предмета се получава пред ретината. Коригирането на дефекта става с помощта на разсейвателни лещи (фиг.9.6, фиг. 9.7, фиг. 9.8).



Фиг. 9.6. Фокусиране при нормално зрение.



Фиг. 9.7. Фокусиране при късогледство (миопия).



Фиг. 9.8. Коригиране на късогледство.

### Далекогледство (Хиперметропия).

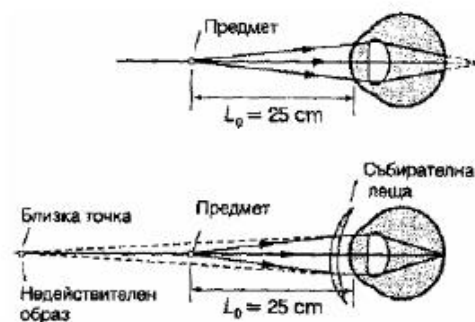
Дефект на окото, при който не се виждат ясно близките предмети, се нарича далекогледство или хиперметропия.

Хиперметропията или далекогледството е състояние при което роговицата и лещата имат малка плюсова диоптрична сила за съответното разстояние на гледане. В резултат на това светлинните лъчи се фокусират зад ретината

(образът на предмета се получава зад ретината). Хиперметропията води до оплаквания за неясно зрение от близо. Коригира се както с диоптрични очила (събирателни лещи), така и с контактни лещи – фиг. 9.9, фиг. 9.10.



Фиг. 9.9. Фокусиране при далекогледство.



Фиг. 9.10. Коригиране на далекогледство.