

# Естество и характер на светлината. Научни теории. Основни принципи на геометричната оптика. Закони за отражение и пречупване. Пълно вътрешно отражение

## Естество и характер на светлината. Научни теории

Първите научни теории за природата на светлината и нейната същност датират от края на XVII в.: корпускулярната теория на Нютон и вълновата теория на Хюйгенс.

Нютон разглеждал светлината като поток от малки частици (корпускули), които се излъчват от източниците на светлина във всички направления и при попадане в окото предизвикват зрителни усещания. Различните цветове на светлината той свързвал с различната големина на частиците – най-малките при попадане в окото предизвиквали усещане за виолетов цвят, а най-големите – за червен. Белият цвят според Нютон бил резултат от едновременното действие на частици с различна големина. Теорията на Нютон дава задоволително обяснение на явленията отражение и пречупване, но от нея следва погрешният извод, че светлината се разпространява във вода с по-голяма скорост, отколкото във въздух. Това неправилно следствие било невъзможно да се провери, тъй като по това време скоростта на светлината още не била измерена.

Хюйгенс разглеждал светлината като вълна, която се разпространява в безтегловна, обхващаща всичко среда, наречена етер. Той твърдял, че всяка точка до която достигат светлинните вълни, става източник на нови вълни и по такъв начин светлината се разпространява във всички посоки на пространството, заобикалящо светлинния източник. Неговата теория обяснявала добре явленията отражение и пречупване, но не могла да даде цялостно разбиране на вълновия процес. По това време изглеждало невъзможно да се свърже праволинейното разпространение с вълновия процес. Идеята за безтегловния етер, в който се разпространяват светлинните вълни, също не намерила подкрепа сред по-голямата част от учените, а и Нютон имал много по-голям научен авторитет. Неговите принципи били основата на тогавашната наука. През целия XVIII в. корпускулярната теория на Нютон заемала господстващо положение. Нещата се променили едва в началото на XIX в., когато били наблюдавани явленията интерференция и дифракция на светлината. Резултатите от теоретичните и експерименталните изследвания на Юнг и Френел потвърдили вълновите свойства на светлината и теорията на Хюйгенс излязла на преден план. Тя била приета от всички физици. Оставал неясен само един въпрос – какво е естеството на светлинните вълни, т.е. кой извършва периодичните движения в тях.

През втората половина на XIX в. се появила електромагнитната теория на Максвел, който показал, че светлинните вълни са електромагнитни вълни с голяма честота. Максвел определил точно характера на трептенията при светлинните вълни – те се извършват от два вектора: интензитетите на електричното поле  $\vec{E}$  и на магнитното поле  $\vec{H}$  които трептят в две взаимноперпендикулярни равнини и поотделно са перпендикулярни на посоката на разпространение на светлината. Това била окончателната победа на вълновата теория за светлината. Въпреки успехите ѝ при обясняване на редица явления, като интерференция и дифракция, свързани с разпространението на светлината, тя не могла да даде задоволително обяснение на явленията топлинно излъчване и поглъщане, фотоелектричен ефект и др., които били свързани с взаимодействието на светлината с веществото.

Възникналите затруднения били преодоляни през 1900 г. с хипотезата на немския физик М. Планк, според която излъчването на електромагнитни вълни от веществата не става непрекъснато, а на определени части (порции), които били наречени кванти. Тези кванти се проявяват като частици с определена енергия. През 1905 г. Айнщайн обяснил законите на явлениято фотоелектричен ефект (фотоэффект), като допуснал, че светлината не само се излъчва, но се поглъща и разпространява също във вид на поток от светлинни кванти, които той нарекъл фотони. Теорията на Айнщайн се нарича квантова теория за светлината. Така в началото на XX в. науката достигнала до извода, че светлината е сложен обект и има двойствен характер. Тя не може да се разглежда нито само като вълни, нито само като частици. Светлината представлява единство на противоположни видове движения: от една страна, движение на частици (кванти), а от друга – движение на вълни с електромагнитна природа. В определени явления се проявяват нейните вълнови свойства, а в други – квантовите ѝ свойства. Тази двойствена същност на светлината се нарича корпускулярно-вълнов дуализъм.

Развитието на физиката е свързано и с многобройни опити за определяне скоростта на светлината с. Първите опити, направени от Галилей, не дават резултат, тъй като по това време науката разполагала с несъвършени технически средства.

Първото успешно определяне на скоростта на светлината е реализирано от датския астроном О. Рьомер в Парижката обсерватория през 1676 г. По астрономичен път, наблюдавайки затъмнението на един от спътниците на Юпитер, той получава за скоростта на светлината стойността  $c \approx 220\,000 \text{ km/s}$ . През 1849 г. френският физик А. Физо предлага по-директен метод за определяне на  $c$  при земни условия и получава стойността  $315\,000 \text{ km/s}$ . Неговият сънародник Ж. Фуко, използвайки подобен метод, определя за  $c$  стойността  $298\,000 \text{ km/s}$ , а малко по-късно успява да определи и скоростта на светлината във вода, която се оказва по-малка от скоростта на светлината във въздух. Американският физик А. Майкелсън усъвършенства метода на Фуко и в продължение на 50 години (1880–1930) провежда серия от опити за определяне скоростта на светлината във въздух и във вакуум. Получената от него стойност е  $299\,796 \text{ km/s}$ .

Едно от най-прецизните измервания на скоростта на светлината във вакуум е направено през 1972 г. в Националното бюро за стандарти в Булдър, Колорадо, чрез използване на съвременни източници на кохерентна светлина – лазери. В тези експерименти са измерени дължината на вълната  $\lambda$  и честотата  $f$  на лазерен лъч поотделно, а след това по формулата  $c = \lambda f$  е получена стойността  $c = 299\,792\,458.2 \pm 1.1 \text{ m/s}$ .

Обикновено за случаите, в които не се изисква голяма точност, тази стойност се закръглява на  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Скоростта на светлината във всички прозрачни среди, различни от вакуум, е по-малка и се определя от формулата  $v = c/n$ .

### Основни принципи на геометричната оптика. Закони за отражение и пречупване. Пълно вътрешно отражение

Дължината на вълната на видимата светлина е много малка ( $\sim 10^{-7} \text{ m}$ ), затова в повечето случаи можем да не отчитаме вълновия ѝ характер, т.е. да считаме че  $\lambda \rightarrow 0$  и да приемем, че тя се разпространява като лъч. В този случай всички закономерности се получават на базата на геометрично разглеждане, затова този раздел от оптиката се нарича геометрична оптика.

Основните принципи на геометричната оптика са два.

Принципът за независимостта на светлинните лъчи гласи, че разпространението на всеки лъч е независимо от останалите и при пресичане на лъчите те не си взаимодействат, т.е. всеки лъч продължава разпространението си независимо от другите. Този принцип не е валиден при големи интензитети на светлината (напр. при лазерните лъчи);

Принципът на Ферма, според който светлината се разпространява по такъв път, за изминаването на който ѝ е необходимо най-малко време. По-голямо практическо приложение има друга формулировка на този принцип. Нека в дадена среда светлината се разпространява със скорост  $v = \frac{c}{n}$ , където  $c$  е скоростта на светлината във вакуум, а  $n$  е коефициентът на пречупване на средата. За изминаване на път  $ds$  ще ѝ е необходимо време  $dt$ :

$$dt = \frac{ds}{v} = \frac{1}{c} n ds.$$

Светлината ще достигне от т. 1 до т. 2 за време:

$$(1) \Delta t = \int_1^2 dt = \frac{1}{c} \int_1^2 n ds = \frac{1}{c} l.$$

Величината

$$(2) l = \int_1^2 n ds$$

се нарича оптичен път на светлината. Тъй като  $c$  е универсална константа, от (1) следва, че за да бъде минимална стойността на  $\Delta t$ , трябва да бъде минимален оптичният път  $l$ . Така принципът на Ферма може да се формулира по следния начин: светлината се разпространява по такъв начин, че оптичният ѝ път да е минимален. От тази формулировка на принципа следват всички познати ни закони на геометричната оптика.

Законът за праволинейното разпространение на светлината гласи, че в еднородна среда светлината се разпространява праволинейно. От (2) можем да получим оптичния път за еднородна среда ( $n = \text{const}$ ) –  $l = ns$ , т.е. оптичния път  $l$  е пропорционален на геометричния  $s$ , а най-малкото геометрично разстояние между две точки е по права линия.

Законът за обратимостта на лъчите също следва от принципа на Ферма – ако оптичният път на светлината има минимална стойност  $l$ , когато тя се движи от т. 1 към т. 2, то и при обратното движение, от т. 2 към т. 1, същата стойност на оптичния път  $l$  ще е минимална.

Законите за отражение и пречупване на светлината при достигане на границата между две среди, с коефициенти на пречупване спрямо въздуха съответно  $n_1$  и  $n_2$ , също могат да се изведат от принципа на Ферма. Законът за отражението гласи, че ъгълът, който сключва падащият лъч с перпендикуляра, издигнат в точката на падане (ъгълът на падане), е равен на ъгълът, който сключва отразеният лъч с този перпендикуляр (ъгълът на отражение). Според закона за пречупването (законът на Снелиус), ако ъгълът на падане е  $\alpha$ , а ъгълът на пречупване (ъгълът, който сключва пречупеният лъч с перпендикуляра) е  $\beta$ , в сила е равенството:

$$(3) \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Третият закон е общ и за двете явления и гласи, че падащият лъч, отразеният лъч, пречупеният лъч и перпендикулярът към граничната повърхност, издигнат в точката на падане, лежат в една равнина.

От (3) може да се направи изводът, че ако втората среда има по-голям коефициент на пречупване от първата ( $n_2 > n_1$ ), пречупеният лъч се приближава към перпендикуляра ( $\sin \alpha > \sin \beta \Rightarrow \alpha > \beta$  тъй като  $\alpha$  и  $\beta$  са остри ъгли). Обратно, ако  $n_1 > n_2$ ,  $\beta > \alpha$  и пречупеният лъч се отдалечава от перпендикуляра. В този случай (преминаване на светлината от оптично по-плътна към оптично по-рядка среда, напр. от стъкло във въздух) е възможно да се наблюдава явлението пълно вътрешно отражение – при достигане на светлината до границата между две среди, във втората среда не се разпространява пречупен лъч, т.е. наблюдава се само отражение на лъча в първата среда. Това е възможно при ъгли на падане по-големи от т.нар. граничен ъгъл  $\alpha_0$ , който се получава от условието ъгълът на пречупване  $\beta$  да е  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ), т.е.  $\sin \beta = 1$ :

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$