

## ОПТИКА

Оптика (от греческого *optike* – наука о зрительных восприятиях) является разделом физики, в котором изучаются процессы излучения света, его свойства, процессы распространения и поглощения в различных средах. Под светом понимают не только видимый свет, но и инфракрасную и ультрафиолетовую области электромагнитного излучения. Видимое, инфракрасное и ультрафиолетовое излучения составляют так называемую оптическую область спектра. Выделение этой области на шкале электромагнитных волн обусловлено не только их близостью, но и сходством методов и приборов, применяющихся для их исследований (линзы, зеркала, призмы, дифракционные решетки и т.д.). Оптический спектр занимает диапазон от условной границы инфракрасного излучения ( $\lambda=2$  мм,  $\nu=1,5 \cdot 10^{11}$  Гц) до условной коротковолновой границы ультрафиолетовой части спектра ( $\lambda=10^{-6}$  мм,  $\nu=3 \cdot 10^{16}$  Гц). Видимое излучение занимает область  $\lambda=400 - 760$  нм. В оптической области спектра частоты  $\nu$  перестают быть малыми по сравнению с собственными частотами колебаний атомов и молекул, а длины волн большими по сравнению с молекулярными размерами и межмолекулярными расстояниями. Благодаря этому в этой области спектра становятся существенными явления, обусловленные строением вещества. По той же причине, наряду с волновыми, проявляются и квантовые свойства света. Энергия кванта света определяется выражением  $\varepsilon = h\nu$ , поэтому на границах видимого спектра  $\varepsilon_{кр} = 1,6$  эВ,  $\varepsilon_{фл} = 3$  эВ. В области рентгеновского и гамма-излучения на первый план выступают квантовые свойства излучения.

Интерес к оптическим явлениям понятен. Около 80% информации об окружающем мире человек получает через зрение. Оптические явления всегда наглядны и поддаются количественному анализу. Очень многие основополагающие понятия, такие, как интерференция, дифракция, поляризация и др., в настоящее время широко используются в областях, далеких от оптики, благодаря их предметной наглядности и точности теоретических представлений.

Световое излучение в ряде явлений (интерференция, дифракция, дисперсия, поляризация) ведет себя как электромагнитная волна, а в других случаях (тепловое излучение, фотоэффект, эффект Комптона) свет проявляет себя как поток фотонов, т.е. квазичастиц (корпускул), обладающих определенными значениями энергии и импульса.

Природа света двойственна: он проявляет себя и как электромагнитная волна, и как поток частиц – фотонов (квантов света). В одних явлениях более выражены волновые свойства света, в других – корпускулярные.

Следует отметить, что волновые и квантовые закономерности являются общими для всего спектра электромагнитного излучения. Только в зависимости от длины волны, на первый план выступают разные явления, разные методы исследования и разные практические применения.

По традиции оптику принято подразделять на геометрическую, физическую и физиологическую.

**Геометрическая оптика**, не рассматривая вопрос о природе света, исходит из эмпирических законов его распространения и использует представления о световых лучах, преломляющихся и отражающихся на границе сред с различными оптическими свойствами и распространяющихся прямолинейно в оптически однородных средах. Методы геометрической оптики позволяют изучать условия формирования оптических изображений объектов как совокупность изображений его отдельных точек и объяснять многие явления, связанные с прохождением лучей в различных средах, в том числе и в неоднородных средах. Геометрическая оптика важна при конструировании оптических приборов – от очков до огромных астрономических инструментов.

**Физическая оптика** рассматривает проблемы, связанные с процессами пропускания света, природой света и световыми явлениями. Утверждение, что свет – это электромагнитная волна явилось результатом огромного числа экспериментальных исследований дифракции, интерференции, дисперсии и т.д. Совокупность явлений, в которых подтверждается волновая природа света, изучается в разделе физической оптики – волновой оптике. Математическим основанием волновой оптики являются общие уравнения электродинамики – уравнения Максвелла. Свойства среды при этом характеризуются материальными константами – диэлектрической и магнитной проницаемостью, входящими в уравнения Максвелла в виде коэффициентов. Волновая оптика позволяет объяснить все эмпирические законы геометрической оптики и границы ее применимости. Явления и эффекты, в которых при взаимодействии света и вещества проявляются квантовые свойства, рассматриваются квантовой оптикой методами квантовой механики и квантовой электродинамики.

**Физиологическая оптика** изучает строение и функционирование аппарата зрения – от глаза до коры мозга; разрабатывается теория зрения, восприятия света и цвета.. Результаты физиологической оптики используются в медицине, физиологии, технике при разработке разнообразных устройств – от осветительных приборов и очков до цветного кино и телевидения.

## **Из истории развития теории о природе света**

Первые представления *о природе света*, возникшие у древних греков и египтян, в дальнейшем, по мере изобретения и усовершенствования различных оптических приборов и инструментов, развивались и трансформировались.

Известно, что основные законы геометрической оптики открыты ещё в древности. Закон прямолинейного распространения света встречается в работах по оптике, которые приписывают Евклиду (300 г. до н.э.). Явление преломления света упоминается Аристотелем (350 г. до н.э.), Платон (430 г. до н.э.) качественно установил закон прямолинейного распространения света. Аристо-

тель и Птоломей изучали преломление света. Но точных формулировок *законов геометрической оптики* греческим философам найти не удалось.

В средние века стали известны эмпирические правила построения изображений, даваемых линзами. В 1590 г. З. Янсен построил первый микроскоп, в 1609 г. Г. Галилей изобрел телескоп. Количественный закон преломления света при прохождении границы раздела двух сред установил в 1620 г. В. Снеллиус. Математическая запись этого закона в виде  $\sin \alpha / \sin \beta = \text{const}$ , принадлежит Р. Декарту 1637 г., который попытался объяснить этот закон исходя из *корпускулярной теории*. Согласно корпускулярной теории (П. Гассенди) свет – это поток мелких световых частичек. Частицы эти разной величины и движутся в пространстве с огромной скоростью. Частицы определяют цветность света – попадая на сетчатку глаза, наибольшие частицы создают впечатление темно-красного цвета, наименьшие – фиолетового. Разные по величине частицы испытывают разное преломление при переходе из одной оптически плотной среды в другую. В 1672 году корпускулярная теория была поддержана И. Ньютоном. Согласно корпускулярной теории свет есть поток материальных частиц (корпускул), летящих с большой скоростью от источника света. В 1666 г. Ньютон показал, что белый свет является составным и содержит «чистые цвета» каждый из которых характеризуется своей преломляемостью, т.е. дал понятие дисперсии света. Эта особенность была объяснена различием масс корпускул.

В 1660 году французским физиком Ферма был сформулирован принцип Ферма, согласно *которому, свет распространяется между двумя точками по пути, для прохождения которого необходимо наименьшее время.*



**Ферма Пьер** (1601 – 1665) – французский математик и физик. Родился в Бомон-де-Ломань. Получил юридическое образование. С 1631 г. был советником парламента в Тулузе.

Физические исследования относятся в большинстве к оптике, где он установил в 1662 г. основной принцип геометрической оптики (принцип Ферма). Аналогия между принципом Ферма и вариационными принципами механики сыграла значительную роль в развитии современной динамики и теории оптических инструментов.

Формулировкой принципа Ферма (1660 г.) был завершен фундамент построения геометрической оптики.

Для широкой области явлений, которые наблюдаются оптическими приборами, законы геометрической оптики выполняются достаточно строго и важны для создания оптических инструментов.

Хотя основные законы оптики открыты достаточно давно, понимание данных законов менялось с течением времени.

Накопленные до конца XVIIв. факты – определение скорости света (О. Рёмер, 1676г), дифракция и интерференция (Ф. Гримальди, 1665г.), поляризация света (Х. Гюйгенс, 1690г.) – указывали на то, что геометрическая оптика не исчерпывает все оптические явления, и более того, не объясняет природу света.

Г. Гук, а затем Х. Гюйгенс (1690г.) предложили волновую теорию света, согласно которой свет – это быстрые колебания, выходящие из излучаемого тела как из центра и распространяющиеся через среду в виде сферических волн. Они считали, что по аналогии со звуковыми волнами свет нужно рассматривать как упругие импульсы, которые распространяются в особой упругой среде – эфире, заполняющем все пространство как внутри материальных тел, так и между ними. Слабым местом волновой теории является гипотетический «мировой эфир», реальность существования которого оставалось весьма сомнительной. Ньютон не принял теорию эфира, кроме того, теория Гюйгенса не объясняла явления дифракции и интерференции. Огромный авторитет Ньютона и незавершенность волновой теории привели к тому, что подавляющее большинство физиков отдавало предпочтение корпускулярной теории Ньютона, поэтому весь XVIII в. прошел под знаком корпускулярной теории.

Дальнейшее развитие оптики связано с открытиями *дифракции* и *интерференции* света (Ф. Гримальди 1665 г.), *двойного лучепреломления* (Э. Бартолини 1669 г.) и с работами И. Ньютона, Р. Гука, Х. Гюйгенса.



**Гюйгенс Христиан** (1629 – 1695), нидерландский ученый. В 1665 – 81 гг. работал в Париже. Изобрел (1657 г.) маятниковые часы со спусковым механизмом, дал их теорию, установил законы колебаний физического маятника. Опубликовал в 1690 г. созданную им в 1678 г. волновую теорию света, объяснил двойное лучепреломление. Усовершенствовал телескоп; сконструировал окуляр, названный его именем. Открыл кольцо у Сатурна и его спутник Титан. Автор одного из первых трудов по теории вероятностей (1657 г.).

**Волновая теория** Гука-Гюйгенса состоит о том, что *свет есть процесс распространения продольных деформаций в некоторой среде, пронизывающей все тело, – в мировом эфире*. Для анализа закона распространения этих деформаций Гюйгенс предложил простой и наглядный метод, названный в последствии **принципом Гюйгенса**.

Каждая точка, до которой доходит световое возбуждение, является в свою очередь центром вторичных волн; поверхность, огибающая в некоторый момент времени эти вторичные волны, указывает положение к этому моменту фронта действительно распространяющейся волны. Пользуясь этим методом Гюйгенс объяснил прямолинейность распространения света и вывел законы отражения и преломления света

В начале XIX века, благодаря исследованиям Юнга [Томас Юнг (1773-1829) - английский ученый, врач, астроном], который в 1801 году впервые объяснил явление интерференции и ввел в 1803 году термин «интерференция», и Френеля [О. Ж. Френель (1788-1827) - французский физик], впервые рассмотревшего дифракцию света и интерференцию поляризованного света, волновая теория была значительно развита и усовершенствована. В связи с этим, волновая теория Гюйгенса- Юнга- Френеля получила всеобщее признание, а корпускулярная теория Ньютона была отвергнута.

Начало XIX в. характеризуется интенсивным развитием математической теории колебаний и волн и ее приложением к объяснению ряда оптических явлений. В связи с работами Т. Юнга и О. Френеля, победа временно перешла к волновой оптике:

- 1801 г. Т. Юнг сформулировал принцип интерференции и объяснил цвета таких пленок;
- 1818 г. О. Френель получает премию Парижской Академии за объяснение дифракции;
- 1840 г. О. Френель и Д. Арго исследуют интерференцию поляризованного света и доказывают поперечность световых колебаний;
- 1841 г. О. Френель строит теорию кристаллооптических колебаний;
- 1849 г. А. Физо измерил скорость света и рассчитал по волновой теории коэффициент преломления воды  $n = 1,33$ , что совпало с экспериментом;
- 1848 г. М. Фарадей открыл вращение плоскости поляризации света в магнитном поле (эффект Фарадея);
- 1860 г. Дж. Максвелл основываясь на открытии Фарадея пришел к выводу, что свет есть электромагнитные, а не упругие волны;
- 1888 г. Г. Герц экспериментально подтвердил, что электромагнитное поле распространяется со скоростью света  $c$ ;
- 1899 г. П.Н. Лебедев измерил давление света;

Казалось бы, что спор полностью решен в пользу волновой теории света, так как в середине XIX в. были обнаружены факты, указывающие на связь и аналогию оптических и электрических явлений. Фарадеем, Максвеллом и другими учеными было показано, что свет – частный случай электромагнитной волны с  $\lambda = 400 \div 760$  нм. Только этот интервал длин волн оказывает воздействие на наш глаз и является собственно светом. Но и более длинные и более короткие волны имеют одну и ту же природу, что и свет.

В 60-е годы XIX столетия, когда Максвелл разработал теорию электромагнитного поля, необходимость в «мировом эфире» как особом носителе световых волн отпала. Выяснилось, что свет представляет собой электромагнитные волны и, следовательно, их носителем является электромагнитное поле. Видимому свету соответствуют электромагнитные волны длиной от 0,77 до 0,38 мкм, создаваемые колебаниями зарядов, входящих в состав атомов и молекул.

Важнейшими экспериментальными доказательствами справедливости электромагнитной теории света явились опыты Физо [А. И. Физо (1819-1896)- французский физик] по измерению скорости света в земных условиях и установлению влияния движения среды на скорость распространения света, опыты Фуко [Ж.Б.Л. Фуко (1819-1868)- французский физик- экспериментатор], опыты Майкельсона [А. А. Майкельсон (1852-1931)- американский физик], осуще-

ствившего серию экспериментов по точному определению скорости света  $(29979 \pm 4) \text{ км/с}$  с помощью изобретенного им интерферометра.

Экспериментальное значение скорости распространения света совпало с теоретическим значением скорости распространения электромагнитных волн, полученных из электромагнитной теории Максвелла. Важным подтверждением электромагнитной теории явились опыты П. Н. Лебедева [П.Н. Лебедев (186-1912)- русский физик- экспериментатор], который в 1899г. экспериментально доказал существование давления света на твердые тела, а в 1907г. на газы.

Представление об электромагнитной природе света оставалось неизменным вплоть до конца XIX века.

Однако, не смотря на огромные успехи в электромагнитной теории света к концу XIX в. начали накапливаться новые факты, противоречащие волновой теории света. Волновая теория не смогла объяснить распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, и не смогла объяснить фотоэффект, который в 1890 г. исследовал А.Г. Столетов.



**Макс Планк** (1858 – 1947). С 1874 г. он изучал физику у Густава Кирхгофа и Германа Гельмгольца в Мюнхенский университете. В 1930 г. Макс Планк возглавил Институт физики кайзера Вильгельма (теперь Институт Макса Планка) и занимал этот пост до конца жизни. В 1900 г. в работе, посвященной равновесному тепловому излучению, Планк впервые ввел предположение о том, что энергия осциллятора принимает дискретные значения, пропорциональные частоте колебаний, чем положил начало квантовой физики. Также Макс Планк внес большой вклад в развитие термодинамики.

Работы Планка и Эйнштейна явились началом развития *квантовой физики*.

Изучение данных о спектрах свечения химических элементов, о распределении энергии в спектре теплового излучения черного тела, о фотоэлектрическом эффекте и некоторых других явлениях привело к необходимости предположить, что излучение, распространение и поглощение электромагнитной волны носит дискретный (прерывистый) характер, т.е. свет испускается не непрерывно (как это следовало из волновой теории), а порциями (квантами). Исходя из этого немецкий физик- теоретик М. Планк (1858-1947) в 1900г. создал квантовую теорию электромагнитных процессов. В 1900 г. Макс Планк показал, что излучение абсолютно черного тела можно объяснить, если предложить, что свет излучается не непрерывно, а порциями, квантами с энергией  $E_0 = h\nu$ , где  $\nu$  – частота,  $h$  – постоянная Планка.

Выдающийся физик- теоретик А. Эйнштейн (1879-1955) в 1905г. разработал квантовую теорию света, согласно которой свет представляет собой поток световых частиц - фотонов. Эйнштейн объяснил закономерности фотоэффекта на основе представления о световых частицах – «квантах» света, «фотонах», масса которых

$$m_{\text{ф}} = \frac{E_0}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}.$$

Это соотношение связывает *корпускулярные характеристики излучения – массу и энергию кванта* – с *волновыми – частотой и длиной волны*.

Таким образом, в начале XX столетия возникла новая теория о природе света - квантовая теория, возрождающая в известном смысле корпускулярную теорию Ньютона. Однако, фотоны существенно отличаются от обычных материальных частиц: все фотоны движутся со скоростью равной скорости света, обладая при этом конечной массой («масса покоя» фотона равна нулю).

Важную роль в дальнейшем развитии квантовой теории света сыграли теоретические исследования атомных и молекулярных спектров, выполненные датским физиком - теоретиком Н. Бором в 1913г., австрийским физиком- теоретиком Э. Шредингером в 1928г., английским физиком- теоретиком П. Дираком в 1930г., американским физиком-теоретиком Р. Фейнманом в 1949г., советским физиком- теоретиком В. Фоком в 1957г.

По современным представлениям свет - сложный электромагнитный процесс, обладающий как волновыми так и корпускулярными свойствами. В некоторых явлениях (интерференция, дифракция, поляризация) обнаруживаются волновые свойства света. Эти явления описываются волновой теорией. В других явлениях (фотоэффект, люминесценция, атомные и молекулярные спектры) обнаруживаются корпускулярные свойства света. Такие явления описываются квантовой теорией. Таким образом, волновая (электромагнитная) и корпускулярная (квантовая) теории не отвергают, а дополняют друг друга, отражая двойственный характер света. Диалектическое единство противоположностей: свет является волной и частицей. Подобный дуализм присущ, не только свету, но и микрочастицам (электронам, протонам и др.)