

VÝVIN NÁZOROV NA PROCES VIDENIA, ORGÁN ZRAKU A PODSTATU SVETLA

*„Filozofia bez histórie
je slepá.*

*História bez filozofie
je prázdna.“*

/J. W. Goethe/

Ľudia si vždy cenili oči ako najdôležitejší zmyslový orgán a stratu zraku pokladali za najväčšie nešťastie. Svedčí o tom napríklad aj zákonník babylonského kráľa *Chammurapiho* zo 4. tisícročia pred našim letopočtom. Ustanovil v ňom, že ak operácia oka dopadne úspešne a oko sa zachráni, má lekár dostať určenú odmenu - 10 šekelov striebra. Ale ak sa operácia nepodarí a človek o oko príde, možno lekára potrestať uťatím oboch rúk.

Už v antickej spoločnosti sa začali objavovať ľudia, ktorí hľadali odpovede na otázky týkajúce sa podstaty a mechanizmu zmyslových vnemov a svetla. Mechanizmus videnia priťahoval pozornosť mnohých gréckych filozofov.

V 6. storočí pred našim letopočtom panovala predstava *Pytagorejskej školy*. Stúpenci tohto učenia si mysleli, že z oka vystupujú neviditeľné výrony, ktoré neskôr nahradili predstavou zrkadlových „tykadiel“. Tie majú tvar priamych vlákien, ktoré vystupujú z oka a „ohmatávajú“ svet.

Starí Indovia sa nazdávali, že funkčnosť zrakových tykadiel zabezpečuje vnútorný oheň, prítomný v každej bytosti.

V 5. storočí pred n. l. *Empedokles z Akragantu (asi 493-433 pred n. l.)* vyslovil predpoklad, že výrony vychádzajú nielen z ľudského oka, ale aj zo svietiacich predmetov. Podľa jeho teórie boli svietiace predmety zdrojom určitého pôsobenia na oko. Obrazy vychádzajúce z predmetov sa zmiešali s lúčmi vychádzajúcimi z očí, a tak vyvolávali zrakový vnem.

Platón (427-347 pred n. l.) rozvinul Empedoklovu teóriu predpokladom, že predmety vyžarujú špeciálne fluidum, ktoré sa stretáva s „mäkkým svetlom dňa“, vychádzajúcim z našich očí. Keď sú obe „fluidá navzájom podobné“, potom sa pri stretnutí „silne spájajú“ a oko získa vnem videnia. V prípade, že fluidá nie sú si podobné „svetlo očí“ hasne a našim očiam neodovzdáva nijaké vnemy [5].

Demokritos z Abdéry (460-370 pred n. l.), mladší súčasník Empedokla, kategoricky zavrhol existenciu akéhokoľvek fluida vychádzajúceho z ľudského oka. Existenciu zrakového vnemu vysvetľoval pôsobením maličkých atómov, ktoré vychádzajú zo svietiacich predmetov a dopadajú na povrch oka. Tvrdil, že zrakové vnímanie predmetov je v značnej miere nezávislé od pozorovateľa.

Takéto hľadisko zastával aj najväčší antický filozof *Aristoteles zo Stageiry (384-322 pred n. l.)*. Prírodné javy skúmal pomocou špekulatívnych konštrukcií. Pravdepodobne prvý vyslovil pochybnosť v teórii videnia pomocou zrakových tykadiel: „Ak by malo byť príčinou videnia oko, prečo je potom noc?“

Keby videnie záviselo od svetla vychádzajúceho z ľudského oka ako z lampáša, prečo potom nevidíme aj v tme? Ako je možné, že zrakové tykadlá prebúdza k činnosti plameň fakle, sviečky alebo Slnka? Prečo bez týchto telies odchádzajú zrakové tykadlá na odpočinok?“ [6] Aristoteles vyslovil ešte niekoľko hypotéz o videní, pokúsil sa napríklad vysvetliť pôvod farieb miešaním svetla a tmy, pretože neuznával objektívnu existenciu farieb. Rozhodne popieral Empedoklovu a Platónovu teóriu videnia. Opísal aj jav lomú svetla. Môžeme ho považovať za prapôvodcu teórie éteru ako prostredia, v ktorom sa šíria svetelné vlny.

Euklides z Alexandrie (asi 365-300 pred n. l.) predpokladal, že človek vidí predmety pomocou „zrakových lúčov“ vychádzajúcich z oka. Tiež predpokladal, že tieto lúče sú priamočiare. Domnieval sa, že obrazec opísaný zrakovými lúčmi má tvar kužeľa, ktorého vrchol leží v ľudskom oku a základňa na predmete, na ktorý sa pozeráme. Podľa Euklida bola veľkosť predmetu určená zorným uhlom.

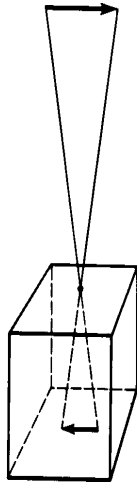
Tieň a jeho pohyb pri premiestňovaní predmetu vyvolávali postupne vznik predstavy, že videnie má vonkajšiu príčinu. Touto príčinou sa stali predmety, ktoré vyžarovali svetlo v priamych lúčoch. Svetlo teda nevystupovalo z oka, ale z predmetov, ako zo svetelných zdrojov. Teda aj Slnko vysielalo svetlo v priamych lúčoch utvárajúcich ohraničené tieňe v podobe obrysov telies, na ktoré dopadali. Takto sa zistilo, že oko nie je jediným nevyhnutným prvkom v procese videnia. Na videnie je nevyhnutné svetlo, bez svetla by sa oko stalo zbytočným. Podstatnou príčinou videnia sa stali svietiace telesá.

Človek si začal predstavovať svetlo ako dej, ktorý svojím pôsobením umožňuje videnie. „Nie oko bez zrakových tykadliel pretvára slepcovi deň v tmavú noc, ale oko neprijímajúce svetelné tykadlá“ [6].

Úlohu oka a zvlášť zrakového nervu v mechanizme videnia prvýkrát vysvetľuje *Galén z Pergama (2.-3. storočie)*. Galén predpokladal, že orgánom vnímania svetla je šošovka. (Odvtedy každá teória videnia berie do úvahy stavbu vnemového orgánu - oka.)

Stredovek vošiel do histórie ako jedno z najzložitejších a najzaujímavejších období. Možno ho považovať aj za éru zrodu praktickej optiky. *Alhazen (Abu Ali Mohammed Ibn al-Hasan Ibn al-Haitham) (965-1040)*, významný učenec arabského Východu, vychádzal z Galénových úspechov pri štúdiu anatómie oka. Prijal jeho teóriu anatomickej stavby oka, ale zavrhol myšlienku o „svetle očí“. Prvý základný postulát Alhazena hovorí: „Prirodzená farba a svetelné lúče pôsobia na oči“ [5]. Prirodzená farba podľa Alhazena bola farba slnečných lúčov, farebné svetlo bolo svetlo odrazené od farebných predmetov. Svoj postulát potvrdzoval bolestivými pocitmi pri dopade slnečných lúčov do oka. V teórii videnia vyvracal Platónov a Ptolemaiov názor, podľa ktorého oko vysiela lúče ohmatávajúce predmety. Alhazen vyhlásol: „Zrakový obraz vzniká pomocou lúčov, ktoré vychádzajú z viditeľných telies a dopadajú do oka“ [5]. Jeho hlavný prínos spočíva v tom, že rozložil proces videnia na množstvo elementárnych dejov. Základné tvrdenie jeho teórie znelo: „Každému bodu predmetu zodpovedá nejaký bod v oku“ [5]. Aby v jeho teórii neexistovali vybrané smery pozorovania predmetov, predpokladal, že z každého bodu pozorovaného predmetu vychádza nekonečné množstvo lúčov. Avšak zdôraznil myšlienku, že jediným

pôsobiacim lúčom zo všetkých lúčov prenikajúcich do oka je ten, ktorý je kolmý na šošovku oka. Vrstvy oka považoval za koncentrické. Nedostatkom jeho teórie bolo, že tak ako Galénos aj on predpokladal, že vnemovým orgánom je šošovka oka. Vedel však, že šošovka je priehľadná a taktiež poznal úlohu nervu vychádzajúceho zo sietnice.



Obr. 1. Camera obscura [5]

Už v jeho prácach sa nachádzajú opisy pokusov s „camerou obscurou“ (tmavá komora (obr. 1)), predchodcom fotografického prístroja. Medzi dvoma zatemnenými miestnosťami bola štrbina, cez ktorú mohlo prechádzať svetlo. V jednej miestnosti pracovníci na jeho pokyn premiestňovali svietiace lampáše a na protiláhlej stene druhej miestnosti Alhazen registroval svetelné stopy. Nepoužil ju však na skúmanie videnia. Ukázalo sa totiž, že camera obscura prevracia obraz a to zrejme zabránilo Alhazenovi, aby oko považoval za cameru obscuru. Záver o podobnosti dejov prebiehajúcich v ľudskom oku a camere obscurae urobil až Leonardo da Vinci koncom 15. storočia.

V otázke mechanizmu videnia panovala v Európe teória „vidín“ a „podôb“, ktoré sa odtrhali od predmetov a prenikali do očí pozorovateľa. Alhazenova teória sa tu neuplatnila, hoci v tom čase bola dobre známa.

V 13. storočí sa objavujú okuliare. Ich objav však nemohol byť výsledkom teoretického výskumu, nakoľko v tom čase nebola ešte vypracovaná vyhovujúca teória videnia.

Začiatkom 14. storočia sa rozvíja teória perspektívy. Dnes môžeme povedať, že prvým učencom, ktorý získal pozoruhodné výsledky v optike v období renesancie, bol *Leonardo da Vinci (1452-1519)*. Často sa o ňom hovorí, ako o zakladateľovi experimentálnej metódy. Ako umelec venoval veľkú pozornosť štúdiu vlastností svetla a mechanizmu videnia. Vynašiel spôsob, ako študovať oko mŕtveho, pri ktorom nedochádzalo k anatomickým zmenám: „Pri štúdiu anatómie oka bez straty vnútornej tekutiny treba oko ponoriť do vaječného bielka, povariť ho, a tak ho spevniť; potom vajce i oko priečne rozrezať, aby sa stredná časť neporušila“ [5]. Pomocou tejto metódy sa mu podarilo zistiť, že základné časti ľudského oka sú: zrenica, šošovka, sietnica a zrakový nerv. Avšak v niektorých podstatných bodoch jeho teória neobstála. Pri varení oka v bielku šošovka nadobudla guľový tvar. Leonardo tiež predpokladal, že sa v šošovke obraz druhý raz prevráti (prvé prevrátenie prebehlo v zrenici, ktorú si predstavoval ako clonu). Preto na jednej strane, podrobne opisujúc cameru obscuru, vyriekol: „To isté prebieha vo vnútri oka!“ - na druhej strane - nerozhodol sa urobiť záver o tom, že obraz na sietnici je obrátený [5].

Treba poznamenať, že základom Leonardovej teórie videnia bola predstava „obrazov“, ktoré vychádzajú z predmetu a prichádzajú do oka. Presnú fyzikálnu podstatu „obrazov“ však nedefinoval.

Podobne ako Leonardo da Vinci porovnával *cameru obscuru* s ľudským okom aj *Giambattista della Porta*. V jej konštrukcii urobil jedno podstatné zlepšenie: do otvoru v jej stene vložil spojnú šošovku. Mýlil sa však pri určení úlohy šošovky. Omylom bolo aj jeho vysvetlenie úlohy oboch očí v procese videnia. Predpokladal, že každé oko pozerá iným smerom: pravé na veci na pravej strane a ľavé na veci na ľavej strane. Porta nepochopil význam svojho objavu. Hlavný význam *camery obscury* nespočíval v získaní zväčšeného obrazu, ale v skutočnom zobrazení predmetu mimo ľudského oka.

Od vynájdenia *camery obscury* sa otázka oka, ktorá dovtedy zaberala hlavné miesto v optike, zmenila na fyziologickú a medicínsku otázku. V 16. storočí sa optika (v presnom zmysle slova veda o videní) zmenila na učenie o svetle.

Druhým veľkým učencom - optikom renesančného obdobia bol Francúz *Francesco Maurolicius*, ktorý pôsobil až do polovice 16. storočia. Skúmal lom svetla na šošovkách. Došiel k záveru, že šošovka oka je jeho najdôležitejšia časť, ktorá pracuje ako spojka. Hovoril o tom, že pri anomálnom zakrivení šošovky človek trpí ďalekozrakosťou alebo krátkozrakosťou; nepochopil však úlohu sietnice, pretože tvrdil, že v oboch prípadoch musia lúče na ňu dopadať ešte pred svojím spojením.

Mnohí veľkí učitelia, zaoberajúci sa problematikou zobrazovania predmetu (*Alhazen*, *Leonardo da Vinci*, *Maurolicus*), mali veľmi blízko k správnejmu objasneniu mechanizmu videnia. Ale podarilo sa to až na začiatku 17. storočia *Johannesovi Keplerovi (1571-1630)*, ktorý sa rozhodol hovoriť o obrátenom obraze na sietnici. Študoval tiež otázku akomodácie oka a poukázal na existenciu blízkych a ďalekých bodov zobrazovania, vysvetlil funkciu šošovky, sietnice i príčiny krátkozrakosti a ďalekozrakosti. Mechanizmus akomodácie však videl buď v zmene vzdialenosti šošovky oka od sietnice alebo v zmene hustoty kvapalného prostredia v oku, a nie v zmene tvaru šošovky. (To ukázal až začiatkom 19. storočia *Thomas Young*.) Roku 1611 objavil Kepler úplný odraz svetla.

To, že obraz vzniká na sietnici, dokázal *Christoph Scheiner (1575-1650)* pri postupnom zrezávaní zadnej časti býčieho oka. Podľa jeho mienky sa šošovka len málo líšila od skla.

17. storočie prinieslo do optiky nové úlohy. Potreba hlbšieho preskúmania podstaty svetla bola podmienená praktickými dôvodmi: po použití ďalekohľadu vo vojenstve, námorníctve a vo vedeckom výskume vznikla túžba zdokonaľiť ho, k čomu boli potrebné hlbšie znalosti z optiky. Fyzikálna optika (oblasť fyzikálnych javov súvisiacich s povahou svetla) sa prakticky do konca 17. storočia podstatne nerozvíjala. Preto bola pochopiteľná snaha učencov 17. storočia prejsť k hlbšiemu skúmaniu vlastností svetla. V 17. storočí tiež bolo pozorovaných mnoho nových optických javov, napr. polarizácia. V súvislosti s týmito objavmi sa ocitla aj teória svetla. Pred ňou stála neľahká úloha, pretože každá nová teória musela vysvetliť všetky vlastnosti svetla súčasne (aspoň na ideálnom prípade).

V prvej polovici 17. storočia sa objavuje francúzsky učenec *René du Perron Descartes (1596-1650)*, známy svojou svojráznosťou a protirečivosťou, podľa ktorého sa „vnm videnia“ vytvára tlakom častíc na oko, pričom tento tlak sa odovzdáva okamžite. Šírenie svetla si predstavoval ako šírenie tlaku častíc. Pohyb jemnej látky vo svietiacich telesách nazval svetlom. Teoreticky predpokladal nekonečnú

rýchlosť svetla. Jedným z jeho základných predpokladov bolo, že rýchlosť svetla v hustejšom prostredí je väčšia ako v redšom prostredí (jeden z jeho protikladov). Založil teóriu fluid. Správne predpokladal, že dúha vzniká lomom svetla na vodných kvapkách. Ako prvý dokázal, že farba je vlastnosťou samotného svetla.

Teoretické názory učencov veľmi ovplyvnil objav difrakcie svetla, ktorý urobil *Francesco Maria Grimaldi (1618-1663)*. Grimaldi v jednom prípade považuje svetlo za substanciu a v druhom za vlnu. Viac sa však prikláňal k vlnovej teórii svetla. Napísal: „Podobne ako okolo kameňa hodeného do vody vznikajú od centra kruhové vyvýšeniny vody, presne tak okolo tieňa nepriehľadného predmetu vznikajú lesklé pásy, ktoré sa podľa tvaru predmetu buď šíria po dĺžke alebo sa ohýnajú za súčasného vzniku dúhy. Ďalej, podobne ako sú kruhové vlny jednoduchým nahromadením vody, okolo ktorého sa z obidvoch strán tiahnu priehlbiny, tak aj lesknúce sa pásy nie sú ničím iným, ako nerovnomerne rozdeleným svetlom v dôsledku silného rozptylu, ktoré je prerezané medzerami tieňa“ [5]. Pomocou pokusov s dvoma štrbinami objavil interferenciu. V 22. teoréme svojho spisu uvádza: „Ak k svetlu prijatému osvetleným telesom dôjde ďalšie svetlo, môže osvetlené miesto stmaviť“ [38]. Podrobne opísal aj farby tenkých vrstiev.

Erasmus Bartholinus (1625-1698) objavil roku 1657 dvojlom svetla na islandskom vápenci.

Koncom 17. storočia boli objavené nové fyzikálne javy, súvisiace so základnými vlastnosťami svetla. V tomto období vznikli aj prvé vedecké teórie svetla. Bola to predovšetkým *Huygensova vlnová (undulačná) teória*, ktorá pokladá svetlo za pozdĺžne vlnenie veľmi riedkeho prostredia, nazývaného svetelný éter. Táto predstava o svetle vznikla ako obdoba zvukového vlnenia. Priamočiare šírenie svetla a zákon odrazu viedli *Isaaca Newtona* k názoru, že svetlo je zložené z rýchle letiacich častíc vysielaných zdrojom. Túto *Newtonovu emisnú (emanačnú) teóriu* dnes nazývame aj korpuskulárnou. Celkom dobre vysvetľovala najjednoduchšie zákony geometrickej optiky a aberácie, kdežto k vysvetleniu interferenčných javov ju bolo treba dodatočne prispôsobiť.

Všetkých súčasníkov diskusií o povahe svetla možno rozdeliť do dvoch skupín: na stúpcov korpuskulárnej teórie a stúpcov vlnovej teórie. Za uznávaného vodcu prvej skupiny sa obyčajne považuje *Isaac Newton* a za vodcov druhej – *Robert Hooke* a *Christian Huygens*. Avšak Newtonova pozícia nebola natoľko jednoznačná ako sa to niekedy zdá. Newtonova teória bola zložitým súhrnom korpuskulárneho a vlnového hľadiska. Newton neprijal vlnovú teóriu, pretože táto teória mala niektoré slabé stránky a pomocou nej nebolo možné vysvetliť veľmi dôležité javy. Hooke vyslovil ostrý nesúhlas s Newtonovou teóriou farieb a k tejto kritike sa neskôr pridal aj Huygens. Rozvinul sa dlhotrvajúci spor priaznivcov vlnovej a korpuskulárnej teórie svetla, ktorý spôsobil, že Newton sa čoraz viac odkláňal od vlnovej teórie. Najvýraznejšie námietky proti korpuskulárnej teórii svetla boli:

1) „Ako je možné, že na seba vzájomne nepôsobia dva pretínajúce sa zväzky korpuskúl (a presne tak sa chová svetlo)?“ (Huygensova námietka)

2) „Ako sa môžu hmotné telesá pohybovať s takou obrovskou rýchlosťou?“ (Hookova námietka)

3) „Prečo nepozorujeme zmenšenie hmotnosti Slnka, keď svetlo sú korpuskuly?“ (Hooke) [5]

K 60-tym rokom 17. storočia sa vzťahuje začiatok optických výskumov *Isaaca Newtona (1643-1727)*. Vo svojej najdôležitejšej práci *Optika* píše: „Mojou snahou v tejto knihe - nie je vysvetľovať vlastností svetla hypotézami, ale ich objasniť a dokázať pomocou úvah a experimentov“ [5]. Z Newtonových slov vyplýva, že bol zástancom teórie, ktorá podľa jeho mienky spájala prednosti tak korpuskulárnych, ako aj vlnových predstáv o svetle. V odpovedi Hookovi píše: „Dajme tomu, že neochvejne zotrávam na tejto hypotéze. Ani v tomto prípade však nerozumiem, prečo má môj odporca také námietky voči nej: táto hypotéza je oveľa bližšie k jeho vlastnej, ako si myslí. Kmity éteru sú rovnako užitočné a potrebné tak v jednej, ako aj v druhej teórii. Len za predpokladu, že svetelné lúče pozostávajú z malých čiastočiek, ktoré vysielajú všetkými smermi svietiace teleso, musia tieto čiastočky po dopade na lámajúce alebo odrážajúce povrchy vzbudiť kmitanie éteru tak nevyhnutne ako kameň hodený do vody“ [5]. V inom z listov adresovaných Hookovi, v ktorom reaguje na jeho námietky voči teórii svetla a farieb, Newton píše: „Kmitajúce častice svietiaceho telesa vzbudzujú kmity éteru rozličnej hĺbky a hrúbky v závislosti od ich rôznej veľkosti, formy a pohybu... Keď sa takéto kmity nerozdelia a prechádzajú prostredím do nášho oka, potom vzbudzujú vnem bieleho svetla, ak sa však nejakým spôsobom navzájom rozdelia v dôsledku ich nerovnakej veľkosti, potom vzbudzujú vnem rôznych farieb“ [5]. Polemiky medzi Newtonom a Hookom o princípoch optiky viedli k tomu, že Newton vydal svoje dielo *Optika* až po Hookovej smrti.

Isaac Newton tvrdil, že zo svietiacich telies sa rovnomerne šíria častice rôznej veľkosti. Najmenšie vytvárajú fialovú farbu, najväčšie červenú. Svetelný lúč, ktorý prechádza cez tenkú vrstvu, odrazí sa od druhého povrchu alebo ním prejde, podľa toho, či tam narazí na miesto zriedenia alebo zhustenia éteru. Prechod a odraz svetla teda závisí od hrúbky tenkej vrstvy. Takto Newton vysvetlil farby tenkých vrstiev pomocou periodicity (zhusťovania a zriedovania) éteru. Neskôr Newton nahradil teóriu éteru teóriou dynamických síl vzájomného pôsobenia svetelných častíc a telies, do ktorých vnikajú tieto častice. Pôsobením týchto síl sa rýchlosť svetla v hustejšom prostredí zväčšuje. Farby tenkých vrstiev v rámci korpuskulárnej teórie svetla Newton vysvetľoval tak, že pri prechode cez lámavú plochu vzniká v svetelnom lúči periodicky sa obnovujúca dispozícia ľahkej reflexie (lúč sa odrazí) a ľahkého prechodu (lúč prejde cez tenkú vrstvu). Časový interval medzi týmito stavmi je najväčší pre červenú farbu, najmenší pre fialovú. Dvojlom na islandskom vápenci vysvetľoval Newton tým, že každá molekula svetla má štyri póly, z ktorých dva a dva ležia proti sebe. Iba jedna dvojica protilahlých pólov umožňuje mimoriadny lom. Podmienkou pre mimoriadny lom je vhodný smer týchto pólov vzhľadom na kryštál. Vytvorenie mimoriadneho lúča tak spôsobuje silové pôsobenie kryštálu a vhodne orientované častice svetla. Riadny a mimoriadny lúč sa po výstupe z kryštálu líšia orientáciou svojich pólov.

Newton experimentoval s disperziou svetla pomocou hranola. Tiež experimentálne zdôvodnil objektívnosť farby ako jednej zo základných vlastností svetla. Objavil, že rôzne indexy lomu na tom istom rozhraní súvisia s rôznymi farbami. Podľa Newtona biele svetlo a všetky odtiene sivej medzi bielou a

čiernou sa môžu zložiť z farieb a biele slnečné svetlo sa skladá zo všetkých prvotných farieb, ktoré sú zmiešané v danom pomere.

Roku 1672 Newton dokázal:

- 1) Farby nie sú premenou svetla, ktorá sa odohráva pri lome alebo odraze, ale sú prvotnými, vrozenými vlastnosťami svetla.
- 2) Biele svetlo je zložené zo svetiel rôznych farieb tvoriacich dúhu.
- 3) Svetlo danej spektrálnej farby sa už nedá ďalším lomom rozložiť.
- 4) Farby prirodzených telies majú pôvod v rôznej schopnosti odrážať určitý druh svetla [38].

Za hlavný nedostatok vlnovej teórie Newton pokladal to, že pomocou nej nemožno vysvetliť priamočiarosť šírenia sa svetla. *Christian Huygens (1629-1695)*, Newtonov súčasník a oponent, ovplyvnený analógiou svetla a zvuku predpokladal, že svetelné kmity sú pozdĺžne. Jeho teória bola založená na predstave o určitom mechanizme šírenia sa svetla, ktorý učenec objasňuje na príklade vyžarovania svetla plameňom sviečky. Každý bod plameňa odovzdáva kmitavý pohyb okolitým bodom éteru tak, že vytvorí vlnu a každá častica éteru, po ktorú vlna došla, vytvorí novú menšiu vlnu. Tak v éteri vznikajú vlny, ktoré sa vo väčšej vzdialenosti spoja do jednej mohutnej guľovej vlny. Svetelné lúče sú kolmé na vlnoplochu. Keď čelo vlny narazí na rozhranie opticky redšieho a hustejšieho prostredia, každý bod rozhrania je samostatným zdrojom elementárnych vln. Tak bol sformulovaný *Huygensov princíp*. Podľa tejto teórie rýchlosť svetla v hustejšom prostredí je menšia ako v redšom. Veľmi dôležitým bodom v Huygensovej teórii je predpoklad konečnej rýchlosti svetla. Pokusmi s dvoma islandskými vápencami objavil Huygens polarizáciu, ale ju nevedel vysvetliť. Predpokladal totiž, že vlnenie v éteri je pozdĺžne. Huygens napriek tomu, že bol Newtonovým protivníkom, nadchýnal sa jeho experimentálnym majstrovstvom.

Robert Hooke (1635-1703) skúmal dva problémy: povahu svetla a príčiny vzniku farieb na tenkých vrstvách. Nadväzujúc na Descarta považoval svetlo za vlnenie éteru. Podobne ako vlny na hladine vody, keď do nej hodíme kameň, tak sa zo zdroja šíria guľové vlny, pričom svetelné lúče sú kolmé na vlnoplochy. V teórii farieb sa prikláňal Aristotelovmu učeniu. Predpokladal dve základné farby – červenú a modrú. Ostatné farby vznikajú z týchto farieb spolupôsobením tmy.

Najpodstatnejší prínos pre rozvoj optiky v 18. storočí zaznamenal veľký matematik *Leonhard Euler (1707-1783)*. Začiatkom 40-tych rokov 18. storočia publikoval sériu prác zameraných proti korpuskulárnej teórii svetla. Kriticky rozvinul Newtonovu teóriu farieb, pričom ju reinterpretoval z hľadiska vlnovej teórie svetla. Postuloval tiež závislosť farby svetla od vlnovej dĺžky. Prvý v dejinách charakterizoval monochromatické svetelné vlny ich konštantnou frekvenciou. Ako prvý tiež vyslovil *princíp superpozície*. Ukázal, že svetelné lúče sa nehatene prelínajú, čo je v rozpore s klasickou teóriou korpuskúl. Podľa Eulera sa svetelné vlny šíria v éteri. Éter považoval za mimoriadne riedke a pružné prostredie. Nemal námietky priamo proti Newtonovým experimentom, ale uviedol iba jeden protiargument: „Ľudské oko je hotový prístroj, v ktorom prebieha lom svetla, avšak tu nedochádza ku

chromatickej aberácii“ [5]. Euler to vysvetľoval tým, že oko sa skladá z niekoľkých lámavých prostredí s rôznym indexom lomu a s rôznou disperziou.

Bratislavský rodák *Ján Andrej Segner (1704-1777)* vo svojom spise *O zvláštnosti svetla* navrhol výpočet na určenie medzier medzi letiacimi časticami svetla. Dospel k záveru, že ak by boli častice svetla vo vzájomnej vzdialenosti až päť pozemských polomerov, vytvorili by spojité vnem na sietnici ľudského oka.

Benjamin Thompsom (1753-1814), neskorší *gróf Rumford*, patril medzi prvých, ktorý sa snažili vyjadriť súvislosť medzi teplom, tepelným žiarením a svetlom. Motivovali ho k tomu názory o svetle ako kmitavom pohybe čiastočiek éteru. Teplo považoval za kmitavý pohyb častíc látky.

V 18. storočí prevládala korpuskulárna teória svetla. (Vplyv Newtonovej mechaniky na svetonázor učencov.) Newtonovi nasledovníci boli ortodoxnejšími stúpecami jeho názorov ako sám Newton. Hoci Newton nikdy nevyriekol definitívny názor na podstatu svetla, jeho nasledovníci, najmä *Jean Baptiste Biot (1774-1862)*, *Étienne Louis Malus (1775-1812)*, *Sir David Brewster (1781-1868)*, *William Molyneux (1656-1698)*, *Nicolas Fatio de Duillier* považovali korpuskulárnu teóriu svetla za jedinu možnú. Viacerí Holanďania sa v spore o povahe svetla medzi svojím krajanom Huygensom a Newtonom postavili na Newtonovu stranu. Dokonca aj vydavateľ Huygensových spisov profesor leidskej univerzity *Willem Jacob Storm van's Gravesande (1688-1742)* sa priklonil k emisnej teórii. Avšak takí významní učitelia ako *Benjamin Franklin (1706-1790)*, *Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716)*, *Johann Bernoulli (1667-1748)* a *Leonhard Euler (1707-1783)* boli stúpecami vlnovej teórie svetla. Nedostatkem všetkých teórii svetla, ktoré vznikli v 17. storočí bolo to, že boli formulované iba kvalitatívne, bez použitia matematiky. Toto sťažovalo ich experimentálne overenie.

Začiatkom 19. storočia nastal rýchly rozvoj optických výskumov a tým aj vlnovej teórie svetla. Predstava o svetle ako o letiacich časticách chápaných ako malé guľôčky, ktoré podliehajú zákonom klasickej mechaniky sa zmenila na predstavu svetla ako kmitania jemného fluida – éteru. Hlavnú úlohu v utvrdzovaní vlnovej teórie svetla zohral Angličan *Thomas Young* spolu s Francúzom *Augustinom Jeanom Fresnelom*.

Thomas Young (1773-1829), obdivuhodný svojou univerzálnosťou (bol lekárom, fyzikom, astronómom, mechanikom, metalurgom, egyptológom, oceánografom, botanikom, filológom, maliarom, dokonca aj nevšedným gymnastom a povrazolezcom, znalcom hudby a zručným hudobníkom, ktorý hral vari na všetkých vtedajších hudobných nástrojoch), mal len 20 rokov, keď presvedčivo dokázal, že akomodácia oka súvisí len so zmenou zakrivenia šošovky a nie so zmenou dĺžky oka, ako to v tom čase predpokladali mnohí učitelia. Young sa presvedčil o správnosti vlnovej teórie svetla skúmaním akustických javov a hľadaním analógie medzi svetlom a zvukom. Na základe analógie so zvukom zaviedol interferenciu svetla a vysvetlil Newtonove krúžky. Vo svojich *Prednáškach z prírodnej filozofie* píše: „Aby sa pôsobenie dvoch prúdov svetla mohlo zložiť, je nutné, aby pochádzali z jedného zdroja a aby dosiahli ten istý bod rôznymi cestami v smeroch, ktoré sa navzájom príliš neodlišujú. Rozdiel v dráhe možno dosiahnuť pomocou difrakcie, odrazu, lomu alebo pomocou ľubovoľnej kombinácie týchto javov“

[38]. Young ako prvý presne vypočítal vlnové dĺžky hlavných farieb svetla. Pre červené svetlo našiel vlnovú dĺžku $1/36\,000$ anglického palca, t. j. asi 700 nm, pre fialové svetlo $1/60\,000$ palca, asi 420 nm. Pomocou interferencie svetla vysvetlil farby tenkých vrstiev a vyslovil myšlienku, že možnosti optických prístrojov sú v dôsledku vlnovej povahy svetla obmedzené.

William Frederick Wilhem Herschel (1738-1822) v roku 1800 ako prvý odlišil žiarivý tok od svetelného toku, ktorý vyjadruje schopnosť žiarivého toku vyvolať zrakový vnem.

V roku 1806 *Étienne Louis Malus (1775-1812)* objavil *polarizáciu svetla* pri odraze, keď sa pozeral cez kryštál islandského vápenca z okna svojho bytu v Paríži na okno Luxemburského paláca. Ku koncu svojho života zistil, že jav polarizácie nemožno vysvetliť ani pomocou vlnovej, ani pomocou korpuskulárnej teórie. Vlnová teória ho nevedela vysvetliť dovtedy, kým sa nepreorientovala z predstavy o pozdĺžnom vlnení éteru na hypotézu o priečnom vlnení.

Francúzski fyzici *Jean Baptiste Biot (1774-1862)* a *Pierre-Simon Marquis de Laplace (1749-1827)* sa snažili vysvetliť jav polarizácie na základe korpuskulárnej teórie. Biot teoreticky zdôvodnil Snellov zákon lomu. Z jeho teórie však vyplynulo, že rýchlosť svetla v opticky hustejších prostrediach je väčšia. Laplace vypracoval teóriu, podľa ktorej na častice riadneho lúča pôsobí v kryštále nezmenená sila a na častice mimoriadneho lúča pôsobí premenlivá sila v závislosti od uhla medzi lúčom a optickou osou. Častice riadneho a mimoriadneho lúča sa pohybujú rôznou rýchlosťou, pričom v hustejšom prostredí sa oba lúče pohybujú rýchlejšie ako v redšom.

V roku 1811 *Dominique François Jean Arago (1786-1853)* prvý pozoroval *chromatickú polarizáciu*, keď pozeral na oblohu cez islandský vápenec, pred ktorým držal sľudovú platničku. Ak bola obloha čistá, pozoroval pekné farebné javy, ktoré zmizli, keď na kryštál dopadlo difúzne svetlo rozptýlené na oblakoch. Intenzita zafarbenia závisela od uhla, pod akým bolo Slnko nad obzorom. Čiastočne polarizované modré svetlo oblohy rozptýlené na molekulách vzduchu sa rozštiepilo na lúče, ktoré boli rôzne zafarbené.

V roku 1815 *sir David Brewster (1781-1868)* uverejnil článok, v ktorom uviedol, že svetlo odrazené od prostredia je v ideálnom prípade úplne polarizované v rovine dopadu, keď odrazený a lomený lúč zvierajú pravý uhol. Polarizované lúče sa odrážajú s maximálnou intenzitou, ak polarizačná rovina splýva s rovinou dopadu. Neodrážajú sa vôbec, keď je polarizačná rovina kolmá na rovinu dopadu.

V roku 1817 *Joseph von Fraunhofer (1787-1826)* experimentálne dokázal, že oko má chromatickú aberáciu.

Bez ohľadu na úspechy korpuskulárnej teórie pri vysvetľovaní javov súvisiacich s polarizáciou svetla, boli jej dni zrátané. Postaral sa o to francúzsky optik *Augustin Jean Fresnel (1788-1827)*. Fresnel nezávisle od Younga formuloval *princíp interferencie*. Spojil Huygensov a interferenčný princíp a sformuloval *Huygensov - Fresnelov princíp*, ktorý vyriešil jeden z najdôležitejších problémov vlnovej teórie - problém príčiny priamočiarosti šírenia sa svetla. Ukázal, že pri rozklade svetelnej vlny treba brať do úvahy vlny od všetkých elementárnych zdrojov, ktoré v danom okamihu a na danom mieste

odovzdávajú kmitavý pohyb éteru. Skladanie týchto kmitov ukazuje, že pohyb, ktorý sférická vlna odovzdáva vonkajšiemu bodu sa redukuje na pohyb, ktorý jej odovzdala malá časť vlny so stredom ležiacim na priamke prechádzajúcej cez zdroj a osvetlený bod. Fresnel aplikoval tento princíp na problematiku difrakcie. Interferenciu polarizovaného svetla však nedokázal vysvetliť, pokiaľ zastával stanovisko o pozdĺžnom charaktere svetelných kmitov. Fresnelovi pomohla túto prekážku prekonať Ampèrova poznámka: „Dve sústavy vln, v ktorých je postupný pohyb častíc fluida ovplyvnený kolmým priečnym pohybom s rovnakou intenzitou, nemusia na seba pôsobiť, ak koordinovanosť postupných pohybov zodpovedá nekoordinovanosti priečných pohybov a naopak“ [38]. Fresnel pochopil, že ak sa nevzdá pozdĺžnosti svetelných kmitov, bude jeho vlnová teória vyvrátená. Preto ako prvý vyslovil a teoreticky zdôvodnil myšlienku priečného vlnenia. Podľa neho svetlo nie je nič iné ako priečne kmity pružného prostredia. Pomocou vlnovej teórie dokázal vysvetliť čiastočný prechod svetla cez rozhranie priezračného prostredia. Tiež zistil, že rýchlosť šírenia sa vln závisí od vlnovej dĺžky a pri danej vlnovej dĺžke je tým menšia, čím väčší je absolútny index lomu prostredia, t. j. čím je prostredie hustejšie, teda „lámavejšie“.

Po Fresnelových prácach sa vlnová teória stala dominantnou. Prispeli k tomu aj *Fraunhoferove* pokusy s difrakčnými mriežkami a práce francúzskeho matematika *Augustina Louisa Cauchyho* (1789-1857), ktorý na báze vlnovej predstavy vyriešil problém disperzie.

V podstate možno povedať, že v polovici 19. storočia po dvestoročnom spore o povahe svetla zvíťazila vlnová teória nad korpuskulárnou. Zásľuhu na tom má aj elektromagnetická teória, ktorá spolu s vlnovou teóriou svetla prekonala krízu mechanického modelu éteru. Aby mohla vzniknúť elektromagnetická teória svetla, bolo nevyhnutné nájsť súvis medzi optickými a elektromagnetickými javmi. To sa v roku 1845 podarilo *Angličanovi Michaelovi Faradayovi* (1791-1867), ktorý objavil rotáciu polarizačnej roviny svetla v magnetickom poli, ktoré prechádza látkovým prostredím (*Faradayov jav*). Bol to prvý experimentálny dôkaz súvislosti medzi svetlom a magnetizmom. Tento objav prinútil Faradaya zamyslieť sa nad povahou svetelných vln. Zaujímalo ho tiež, či nesúvisia kmity, ktoré tvoria svetlo aj s elektrickými a magnetickými siločiarami. V roku 1852 vyslovil názor o všeobecnej súvislosti medzi svetelným žiarením a magnetizmom. Svoju poslednú prácu z roku 1868 zamerail na vzťah medzi svetlom a elektromagnetizmom.

Faradayove myšlienky spracoval druhý vynikajúci anglický fyzik - *James Clerk Maxwell* (1831-1879). Maxwell vychádzajúc zo svojich rovníc vyslovil predpoklad, že viditeľné svetlo je elektromagnetické vlnenie určitej vlnovej dĺžky. Predpokladal aj to, že žiarenie pôsobí tlakom. Jeho zdôvodnenie elektromagnetickej povahy svetla súvisí s myšlienkou elektromagnetického poľa. Prvý významný dôsledok tejto teórie spočíva v tom, že elektromagnetické vlny sú priečne. Maxwell v duchu starej undulačnej teórie predpokladal, že svetlo aj elektromagnetické vlnenie sa šíria ako obyčajné priečne vlny v neohraňenom tuhom telese: „Sotva môžeme odmietnuť myšlienku, že svetlo pozostáva z priečných kmitov toho istého prostredia, ktoré zapríčiňuje aj elektrické a magnetické javy“ [38]. Druhým dôsledkom je, že rýchlosť šírenia sa vln je určená elektrickými a magnetickými vlastnosťami

prostredia. V čase publikovania Maxwellových prác celý rad výsledkov poukazoval na totožnosť svetla a elektromagnetických vln.

Elektromagnetická teória svetla sa stretávala s ťažkosťami od svojho vzniku. Pri pokusoch s vibrátorom a rezonátorom objavil *Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)* elektromagnetické vlny. Taktiež zmeral ich dĺžku a určil, že rýchlosť ich šírenia je totožná s rýchlosťou svetla. Okrem toho pozoroval interferenciu, odraz, lom a polarizáciu elektromagnetických vln, čím dokázal, že sú totožné so svetlom. Teda svetlo je určitý druh elektromagnetického vlnenia. Hertzov objav elektromagnetických vln vo voľnom priestore potvrdil Maxwellovu teóriu. Hertz hovorí: „Mne sa zdá úplne pravdepodobné, že opísané experimenty dokazujú identickosť svetla, tepelných lúčov a elektromagnetického vlnového pohybu“ [5].

V roku 1851 fyziológ *Ernst Brücke (1819-1891)* pozoroval zmenu farby rozptýleného svetla.

George Gabriel Stokes (1819-1903) formuloval roku 1852 pravidlo, podľa ktorého je pri luminiscenčných javoch vlnová dĺžka vyžiareného svetla väčšia ako vlnová dĺžka svetla, ktoré fosforeskujúca alebo fluoreskujúca látka pohlcuje.

V roku 1853 vyslovil *Anders Jöns Ångström (1814-1874)* postulát, podľa ktorého v termodynamickej rovnováhe sa rovnosť vyžiarenej a pohltenej energie týka nielen celkového žiarenia, ale platí aj pre jednotlivé druhy žiarenia, čiže aj pre jednotlivé vlnové dĺžky emitovaného a absorbovaného svetla. K podobným záverom na základe experimentov prišiel roku 1858 aj *Balfour Stewart (1827-1887)*. Na spoločnú podstatu tepelného a svetelného žiarenia poukázal tiež *Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887)*. Roku 1859 a 1860 uverejnil dva články, v ktorých pojednával o vzťahu medzi absorpciou a emisiou svetelného a tepelného žiarenia.

Roku 1869 *John Tyndall (1820-1893)* objavil rozptyl svetla na časticách, ktoré sú menšie ako vlnová dĺžka svetla prechádzajúceho cez nehomogénne prostredie. Jav, pri ktorom sa v dôsledku rozptylu biele svetlo premení na modré nazvali *Tyndallovým efektom*. V roku 1874 *Michail Petrovič Avenarius (1835-1895)* publikoval článok, v ktorom uvádza, že rozptyl svetla prechádzajúceho plynom pri teplotách blízkych ku kritickej teplote je oveľa výraznejší. Tento jav dostal názov *kritická opalescencia*. Závislosť intenzity svetla rozptýleného na neinteragujúcich dielektrických časticách od vlnovej dĺžky zistil roku 1877 *lord Rayleigh (1842-1919)*. Podľa neho je intenzita rozptýleného svetla nepriamoúmerná štvrtrej mocniny vlnovej dĺžky. Ak necháme na plyn dopadať biele svetlo, v rozptýlenom svetle bude prevládať modrá farba. Takto bol objasnený Tyndallov efekt a modrá farba oblohy.

Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) a *Jean Bernard León Foucault (1819-1868)* zistili, že rýchlosť svetla vo vode je menšia ako vo vzduchu, čo potvrdilo vlnovú teóriu svetla. Fizeau určil aj rýchlosť svetla v stojatej a tečúcej vode. Roku 1877 zlepšil Foucaultovu aparátúru *Albert Abraham Michelson (1852-1931)* a pomocou nej zmeral rýchlosť svetla vo vzduchu. Získal hodnotu 300 092 km/s. Pri meraní rýchlosti svetla vo vzduchu a vo vode potvrdil Fizeauove a Foucaultove merania, a teda aj Fermatovu teóriu, podľa ktorej rýchlosť svetla v prostredí je menšia ako vo vákuu.

Roku 1899 *Piotr Nikolajevič Lebedev (1866-1912)* experimentálne dokázal existenciu tlaku žiarenia a stanovil, že je úmerný veľkosti toku energie svetla. Séria Lebedevových experimentov potvrdila, že elektromagnetické pole má všetky charakteristiky materiálneho objektu. V 19. storočí dosiahlo experimentálne štúdium vlastností svetla vysokú úroveň vďaka Maxwellovej elektromagnetickej teórii. Výsledkom úsilia vedcov bola vlnová teória svetla založená na predstavách o jeho elektromagnetickej povahe.

Druhá polovica 19. storočia priniesla protirečenia, ktoré vznikli pri výskume vzájomného pôsobenia svetla a hypotetického látkového prostredia. V rámci elektromagnetického obrazu sveta sa nepodarilo vybudovať teóriu interakcie žiarenia s látkou. Ťažkosti vznikli aj pri formulovaní elektrodynamiky pohybujúcich sa telies v rámci predstáv klasickej fyziky.

Na začiatku 20. storočia očakávali optiku revolučné zmeny dotýkajúce sa jej samotných základov - otázky podstaty svetla. Už koncom 19. storočia začali fyzici hlbšie skúmať vzájomné pôsobenie svetla a látky. Zistili, že svetlo má ešte iné zvláštne vlastnosti, ktoré sa klasickej teórii vymykajú. Pri snahe odvodiť platnosť vyžarovacieho zákona, ktorý bol v súlade s experimentom, dospel *Planck* k poznatku, že klasická teória svetla nevystihuje skutočnosť. To priviedlo *Maxa Plancka* v roku 1900 k vysloveniu kvantovej hypotézy. *Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947)* dokonale ovládal metódy klasickej fyziky. Zamýšľal sa nad mechanizmom vyžarovania, pohlcovania a šírenia sa svetla. Tu sa ale stretávali jeho predstavy o diskretnosti vyžarovania a Maxwellove predstavy o spojitosti šírenia a absorpcie svetla. Takáto hypotéza Plancka neuspokojovala. Snažil sa teóriu sformulovať tak, aby zapadala do klasických predstáv. Ani séria Einsteinových prác však nepresvedčila Plancka o existencii svetelných kvánt. Planckovi sa ani po viacročnom úsilí nepodarilo zosúladiť myšlienku kvantovania s dovtedy platnými fyzikálnymi zákonmi, takže až v dvadsiatych rokoch sa týchto svojich pokusov vzdal.

James Franck (1882-1964) a *Gustav Ludwig Hertz (1887-1975)* predpokladali, že pri zrážkach elektrónov s atómami vedúcich k ionizácii vzniknú aj také zrážky, pri ktorých atóm stratí energiu hv, ktorá sa prejaví vyžarením svetla s frekvenciou ν .

Na Hertzove výskumy fotoelektrického javu nadviazal *Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947)*. V roku 1902 uverejnil prácu *O fotoelektrickom účinku*, v ktorej ukázal, že energia emitovaných fotónov nezávisí od intenzity svetla, ale od jeho vlnovej dĺžky.

Hranicu klasickej predstáv o poli a energii prekročil vynikajúci nemecký fyzik *Albert Einstein (1879-1955)*. Vo svojej práci píše: „Avšak keď sa monochromatické žiarenie vzhľadom na závislosť entropie od objemu správa ako nespojitý prostredie pozostávajúce z energetických kvánt, nabáda nás to, aby sme skúmali, či aj zákony vzniku a premeny svetla nie sú také, ako keby svetlo pozostávalo z takýchto energetických kvánt“ [5]. Einstein vyšiel z predpokladu, že svetelná energia „nie je v priestore rozložená spojito, ale pozostáva z konečného počtu v priestore bodovo lokalizovaných energetických kvánt, ktoré sa pohybujú bez toho, aby sa delili a ktoré môžu byť vyžiarené len ako celky“ [39]. Na rozdiel od Plancka sa Einstein dôsledne vyhýba klasickej elektrodynamike. Einsteinova teória používala klasickú štatistiku a termodynamiku. Pomocou nej sa podarilo zdôvodniť Planckov vzorec pre žiarenie absolútne čierneho

telesa. To znamenalo, že kvantové predstavy o svetle nie sú len matematickým formalizmom, ale odrážajú fyzikálnu skutočnosť. Einstein ukázal, že Planck pri odvodení svojho rozdeľovacieho zákona implicitne použil teóriu svetelných kvánt. Píše: „Nové odvodenie Planckovho zákona žiarenia si zasluhuje pozornosť nielen vzhľadom na to, že je jednoduché, ale najmä preto, lebo sa zdá, že prináša jasno do procesu absorpcie a emisie svetla hmotou“ [39]. Einstein odmietol však existenciu éteru a vychádzajúc z postulátu konečnej a hraničnej rýchlosti svetla vo vákuu formuloval špeciálnu teóriu relativity. Na základe svojej hypotézy o svetelných kvantách formuloval v roku 1905 *teóriu fotoefektu*, ktorá bola v súlade s Lenardovými závermi. Objaviteľský aspekt spočíval v tom, že sa na žiarenie začal pozerat' ako na konečný počet energetických kvánt. Predpokladal, že elektrón pri interakcii so svetelným kvantom absorbuje časť jeho energie. Takto Einstein atomizoval elektromagnetické pole. Einsteina tiež fascinovalo Bohrovo tvrdenie, že frekvencia vyžiareného svetla nie je totožná s frekvenciou elektrónu viazaného v atóme.

V roku 1909 sa Einstein vrátil k Planckovmu zákonu žiarenia a odvodil výraz pre fluktuáciu energie fotónov priradených k danému frekvenčnému intervalu žiarenia. Roku 1910 Einstein vypočítal rozptyl svetla v nehomogénnom prostredí, pričom predpokladal, že svetlo sa v ňom neabsorbuje.

Johannes Stark (1874-1957) patril medzi prvých, ktorí prijali Einsteinovu hypotézu svetelných kvánt. Boli však aj takí, ktorí ju nechceli prijať. V roku 1913 napísali Planck a Nernst doporučenie, v ktorom sa v súvislosti s hypotézou svetelných kvánt drasticky vyjadrili, že „Einstein v tejto otázke prestrelil“ [39]. Planck sa dištancoval od Einsteinovej fotónovej teórie. *Max Theodor Felix von Laue (1879-1960)*, *Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951)* a dokonca aj *Robert Andrews Millikan (1868-1953)* sa viac ráz vyjadrili tak, ako keby sa Einstein bol vzdal svojej teórie svetelných kvánt. Vari najdlhšie odolával hypotéze svetelných kvánt *Niels Henrik David Bohr (1885-1962)*. Niektorí experimentátori ako *Arthur Llewellyn Hughes (1883-1978)* v Cambridgei, *sir Owen Williams Richardson (1879-1959)* a *Arthur Holly Compton (1892-1962)* v Princetone sa pokúšali overiť Einsteinov zákon pre fotoelektrický jav, ale ich výsledky neboli presvedčivé. Millikan svojimi presnými meraniami však potvrdil Einsteinovu rovnicu. V marci 1916 vyšiel jeho článok, v ktorom dokázal tento Einsteinov vzťah pre fotoelektrický efekt.

Roku 1919 Eddingtonove výpravy na ostrov Principe v Guinejskom zálive a do Sobralu v severnej Brazílii potvrdili Einsteinove výpočty o zakrivení svetelných lúčov v blízkosti Slnka.

V roku 1923, ako výsledok štúdia fotoefektu, Einsteinovej teórie žiarenia, prác *Nielsa Bohra (1885-1962)* o stavbe atómu, sa objavil pred fyzikmi problém, ktorý môžeme nazvať antitéza vlna - častica. Pripomínalo to spor zo 17. storočia o povahe svetla. Avšak v 17. storočí prebiehal spor prívržencov dvoch teórií na báze javov, ktoré bolo možné vysvetliť v rámci jednej teórie, teraz však fakty nezapadali do rámca nejakých určitých predstáv vlnových alebo korpuskulárnych. Rozpor nebol medzi fyzikmi, ale v samotnej fyzike. Pokus zachrániť klasickú fyziku urobil Bohr. Prezentoval dualistické stanovisko, podľa ktorého atóm vysiela diskkrétne kvantá žiarenia, ale žiarenie vysiellané zo zdroja sa

správa podľa zákonov klasickej teórie elektromagnetického poľa. Predpokladal, že zákony zachovania sú splnené pre celé žiarenie, a nie pre jednotlivé akty emisie alebo absorpcie.

Nemecký fyzik *Arnold Sommerfeld (1868-1951)* kritizoval túto teóriu. Prišiel k záveru, že na vytvorenie vyhovujúcej teórie svetla je nevyhnutná zmena klasických predstáv o elektromagnetickom poli.

Mladý francúzsky fyzik *Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987)* premýšľal o paradoxoch vlnovo-korpuskulárnych vlastností svetla a vyslovil myšlienku, že nielen svetelné vlny majú korpuskulárne vlastnosti, ale aj elektróny majú vlnové vlastnosti.

Rakúšan *Erwin Schrödinger (1887-1961)* odvodil v explicitnom tvare rovnicu pre de Broglieho vlny.

Interpretácia *Comptonového efektu* potvrdila kvantovú štruktúru elektromagnetického žiarenia.

Wolfgang Pauli (1900-1958) tvrdil, že nastolené problémy si vyžadujú úplne nový prístup, než je kombinácia klasickej mechaniky a kvantových podmienok.

John Clarke Slater (1900-1976) prišiel s návrhom, ktorý zodpovedal interpretácii svetelných kvánt v duchu neskoršie navrhnutých vln – pilotov (teória vln – pilotov pochádzala od L. de Broglieho). Kvantá žiarenia reálne existovali a elektromagnetické žiarenie ich len „navádzalo“, kde bola amplitúda poľa veľká, tam sa kvantá vyskytovali častejšie.

Z kvantovej hypotézy sa za niekoľko rokov vyvinul základný princíp kvantovej fyziky. Pokiaľ ide o žiarenie, viedol k pojmu fotón, ktorý je základom dnešných predstáv o podstate svetla. Tak sa fyzika do istej miery vrátila k emisnej Newtonovej teórii - pokladá svetlo za súhrn nesmierného počtu fotónov, z ktorých každý má energiu rovnú kvantu $h\nu$ a letí priestorom rýchlosťou svetla. Aj keď dosiahla kvantová teória svetla veľké úspechy (vysvetlenie žiarenia absolútne čierneho telesa, fotoefektu, luminiscencie), bola podrobená kritike, pretože mnohé javy (interferencia, difrakcia atď.) nemohli byť vysvetlené z hľadiska svetelných kvánt. Einstein však problém interferencie svetelných kvánt nevidel nijako tragicky: „... interferenčné javy by asi nebolo tak ťažké zahrnúť do kvantovej teórie, a to z týchto dôvodov: nedá sa predpokladať, že by sa žiarenie skladalo z neinteragujúcich kvánt, to by totiž nedovolilo vysvetliť interferenčné javy. Predstavujem si kvantum ako singularitu obkolesenú silným vektorovým poľom. Z veľkého počtu kvánt by sa dalo zostrojiť vektorové pole, ktoré by sa len málo odlišovalo od toho poľa, ktoré považujeme za svetlo... Nepredpokladám, že musíme podstatne zmeniť názory na interferenčné javy v porovnaní s tými, ktorých sa doteraz pridŕžame...“ [39]. Niektoré Einsteinove názory sa však ukázali ako neudržateľné, pretože interferencia totiž nezávisí od intenzity svetelného zväzku.

Fyzika sa na začiatku 20. storočia len veľmi ťažko vyrovnávala s korpuskulárno-vlnovým dualizmom. Po formulovaní princípov kvantovej mechaniky v rokoch 1925 a 1926 sa situácia ešte väčšmi skomplikovala. Vtedy však už bola blízko k víťazstvu kvantová teória svetla. Nemožno si ale predstavovať, že všetky problémy svetla boli vyriešené v rokoch 1926 až 1928. Neprotirečivá a vyhovujúca teória svetla mohla vzniknúť až po prepracovaní základných predstáv o elektromagnetickom poli. Predstava o fotónoch bola doplnená tým, že každý fotón má tiež svoju hmotnosť pri pohybe a že

svetlo má zároveň povahu vlnového a korpuskulárneho žiarenia. Pri šírení svetla priestorom má prevahu časticový charakter, pričom pri styku s prostredím sa viac uplatňuje vlnový charakter.

V súčasnosti vznikajú v optike nové smery, ktorých rozvoj by nebol možný bez vytvorenia kvantových optických generátorov svetla - laserov. Rozvoj laserovej techniky umožnil objaviť celý rad nových efektov, ktoré súvisia so vzájomným pôsobením svetla a látky.

Dnes sa v optike používa Maxwellova elektromagnetická teória svetla, podľa ktorej svetlo je elektromagnetické vlnenie s vlnovými dĺžkami od 380 nm do 780 nm (s frekvenciami od $7,8 \cdot 10^{14}$ Hz po $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz), ktoré spôsobuje v našom oku fyziologický vnem nazývaný videnie. Šíri sa z bodových svetelných zdrojov spojitou na všetky strany.

Inokedy sa výklad svetla opiera o predstavu kvantovú, podľa ktorej svetelná vlna obsahuje množstvo fotónov, ktoré majú aj časticové aj vlnové vlastnosti, ale nie sú ani vlnami ani časticami. „Svetlo má v istom zmysle vlnové (interferencia) aj časticové (fotóny) vlastnosti. Svetlo nemožno považovať ani za vlny ani za častice klasickej fyziky“ [1]. Úlohou dnešnej fyziky je odstrániť rozpor medzi obidvoma týmito predstavami.