

Stalno strokovno spopolnjevanje

Oddelek za fiziko, Fakulteta za matematiko in fiziko

Svetloba od antike do stimuliranega sevanja

Janez Strnad

Uvod

V vsakdanjem življenju z vidom dobimo večino podrobnih podatkov o okolici. Podatki, ki jih dobimo s sluhom, so manj podrobni, močno pa prispevajo k sporazumevanju. Imamo namreč le sprejemnik za svetlobo, a oddajnik in sprejemnik za zvok.

Svetloba je imela pomembno vlogo v razvoju fizike. Med drugim je odprla vrata vejama sodobne fizike, kvantni fiziki in posebni teoriji relativnosti. V zadnjem času večino podatkov svetloba prenese po optičnih vlaknih, kar imajo nekateri za del “komunikacijske revolucije”. Do tega je prišlo po odkritju laserjev, ki izkoriščajo stimulirano sevanje. Prispevek poskuša orisati mejnike v razvoju optike in spomniti na to, kako razvejena je optika.

Razvoj optike lahko razdelimo na več delov. Najprej je prevladovalo pojmovanje, da svetlobo sestavljajo delci, nato so jo po vrsti imeli za longitudinalno valovanje etra, za transversalno valovanje etra in za transversalno valovanje električnega in magnetnega polja. Pomembno vlogo je imelo raziskovanje sevanja črnega telesa. Pripeljalo je tudi do kvantne fizike. V njenem okviru so spoznali, da obstaja stimulirano sevanje, ki je pred petdesetimi leti uvedlo laserje in kvantno optiko. Pogosto optiko delijo na obdobje pred laserji in na poznejše obdobje.

Pustimo se voditi prispevkom raziskovalcev približno v časovnem redu. S tem dosežmo, da besedilo ne postane predolgo, a zgubimo nekaj možnosti da bi razčlenili povezave med njihovimi dosežki. Kljub temu so bo predavanje moralo omejiti in bo zajelo samo glavne misli iz sestavka. Ob tem se spomnimo W. McCutcheonovega svarila iz leta 1972, da je “urejena slika” o razvoju fizike, ki “si jo ustvarimo [...] z majhnim številom nezmotljivih velikanov, nepoštena in pusta. Očem zastre pravo dramo, uspehe in neuspehe sijajnih mož.”

Antika

Za svetlobo so se ljudje zanimali od nekdanj. Obdobje od davnine do začetkov fizike na začetku 17. stoletja samo preletimo. Tedaj so vedeli, da svetloba potuje premo in poznali odbojni zakon, sicer pa je prevladalo ugibanje. Kovinska zrcala so našli v egipčanskih grobovih in lečo iz prozornega kristala v asirskem grobu. Grki so uporabljali zrcala in “prozorni kamen, s katerim je bilo mogoče zanetiti ogenj”. Zanimale so jih barve, mavrica

ter zrcala. *Empedokles* (495 do 435 pred našim štetjem) je trdil, da nekaj izhaja iz oči, otipa predmete in se vrne v oči. *Demokrit* (470 do 380 pred našim štetjem) je zagotovil, da oddajajo telesa nekaj, kar sestavljajo atomi in zbudi v očesu vtis o obliki in barvi predmetov. Kot kaže, se ni želel opredeliti, za atome katerega elementa gre. Menil je, da so barve teles odvisne od atomov, ki sestavljajo telesa. *Platon* (427 do 347 pred našim štetjem) je razlikoval tri vrste svetlobe: dnevno svetlobo Sonca, nevidni tok iz oči proti predmetu in svetlobo iz teles, ki se sreča s tem tokom.

Aristotel (384 do 322 pred našim štetjem) je nasprotoval toku iz oči, češ da bi potem morali videti tudi ponoči. Mislil je, da barve nastanejo iz bele sončne svetlobe zaradi oslabitve. Najšibkejša oslabitev naj bi dala rdečo, nekoliko močnejša zeleno in najmočnejša modro. Mavrica naj bi nastala z odbojem sončne svetlobe na oblaku kot celoti in barve naj bi se pojavile zaradi oslabitve svetlobe v kapljicah. Že prej so pitagorejci mislili, da vse barve sestavljajo bela, črna, rumena in rdeča.

Evklid (rojen okoli 300 pred našim štetjem) je napisal dve knjigi o svetlobi. Knjigi nista dosegli njegovih *Elementov*, ker je znanje o svetlobi tedaj bilo še v povojih. Prva knjiga je vsebovala razpravo o toku iz oči, ki se širi v homogeni snovi premo in vedno z enako hitrostjo. Jasneje vidimo predmete pod večjim kotom kot pod manjšim, če je kot premajhen, pa jih sploh ne vidimo. Druga knjiga je obravnavala odboj svetlobe in samo tok, ki izhaja od predmeta.

Arhimed (287 do 212 pred našim štetjem) je odbojni zakon utemeljil z mislijo, da bi sicer ne mogli zamenjati predmeta in opazovalca. Poznal je krogelna zrcala in obvladal odboj na njih. *Heron* (najbrž v 2. stoletju pred našim štetjem) je odbojni zakon utemeljil s trditvijo, ki jo je mogoče razumeti kot zasnovano načela o najkrajšem času.

Klavdij Ptolemaj (90 do 168) je v petih optičnih knjigah obdelal oko in pogoje za to, da predmet vidimo ter odbojni zakon za ravna, izbočena in vdrtta krogelna zrcala. Lom je opisal s preglednico za odvisnost lomnega kota β od vpadnega kota α .

Alhazen (965 do 1039) je delal optične poskuse, ko poskusi še niso bili običajni. To velja tudi za *Rogerja Bacona* (1216 do 1294), ki je zagotovil, da je svetloba gibanje nečesa z veliko hitrostjo in da je hitrost v gostejši snovi manjša kot v redkejši. Poznal je goriščno razdaljo krogelnega zrcala in napako pasov. Slabovidnim je priporočil, naj uporabljajo steklene krogelne odseke. Poznal je kot med smerjo žarkov s Sonca in smerjo proti mavrici 42° in vedel, da opazimo mavrico tudi, ko razpršimo vodo. Umetniške slike kažejo, da so v 14. in 15. stoletju v naočnikih daljnovidni uporabljali zbiralne leče, v 16. stoletju pa so se pojavile razpršilne leče za kratkovidne.

Delci

Na začetka 17. stoletja so pomembno vlogo imeli izdelovalci leč za naočnike. Na Nizozemskem leta 1608 niso podelili patenta za daljnogled iz zbiralne in razpršilne leče, češ da ga je mogoče preprosto izdelati. *Galileo Galilei* (1564 do 1642) je naslednje leto zvedel za daljnogled, ga izpopolnil in z njim prvi sistematično raziskal nebo. Izum daljnogleda

je pomembno vplival na razvoj optike. Tudi mikroskop je bil nizozemski izum. Zaradi krajše goriščne razdalje objektiva so pri njem prišle do izraza neenakomernosti v steklu in napake leč. Zato so dobri mikroskopi prišli v rabo pol stoletja po daljnogledih.

Johannes Kepler (1571 do 1630) je kot nekateri drugi astronomi pomembno prispeval k razvoju optike. V letih 1604 in 1611 je objavil knjigi o svetlobi. Poznal je približek za lomni zakon $\alpha/\beta = n$ z lomnim količnikom n . Predlagal je daljnogled z dvema zbiralnima lečama in odkril *totalni odboj*.

Pot do *lomnega zakona* je bila dokaj zapletena. *Willebrord Snel van Royen (Snellius)* (1580 do 1626) je okoli leta 1621 oblikoval lomni zakon $\sin \alpha / \sin \beta = n$, a ga ni objavil. *René Descartes* (1596 do 1650) pa ga je objavil leta 1637. Izhajal je iz svoje slike sveta, ki naj bi ga sestavljal *eter* treh vrst. (Po Aristotelu je eter, peti "element", sestavljal telesa za Luno, medtem ko so telesa pod Luno sestavljali štiri "elementi", zemlja, voda, zrak in ogenj.) Najdrobnejši kosi etra svetijo kot zvezde. Malo večji kosi v prostoru med zvezdami so prozorni. Zelo velike kose kot planete nosijo vrtinci prozornih kosov, kot vrtinec vode nosi deščice. Descartes je odboj svetlobe pojasnil z odbojem prožnih kroglic na ravni podlagi. Komponenta hitrosti v smeri meje se ne spremeni, pravokotna komponenta pa spremeni znak. Tudi pri lomu naj bi se komponenta hitrosti v smeri meje ne spremenila, pravokotna komponenta pa bi se lahko zmanjšala ali zvečala. Iz zveze $v_1 \sin \alpha = v_2 \sin \beta$ je izpeljal lomni zakon z lomnim količnikom $n = v_2/v_1$. Hitrost svetlobe v gosti snovi naj bi bila večja kot v zraku. Z lomnim zakonom je opisal delovanje očesa in optičnih naprav ter nastanek mavrice. Za svetlobo je uporabljal več predstav, ki jih ni jasno razločeval, in mislil, da se svetloba razširi v trenutku.

Descartes je naredil poskus z veliko stekleno kroglasto posodo s tanko steno polno vode. Ugotovil je, da veliko več žarkov, ki se v kaplji dvakrat lomijo in enkrat odbijejo, pride do oči pri kotu med 40° in 41° kot pri manjšem kotu, a pri večjem kotu ni nobenega. Od žarkov, ki se dvakrat lomijo in dvakrat odbijejo, jih pride veliko do oči pri kotu med 51° in 52° . Tako je pojasnil, zakaj nastane glavna mavrica med 40° in 41° ter stranska med 51° in 52° . Barve je pojasnil z zamisljivo, da se delci bele svetlobe gibljejo translacijsko, a se pri trku s kapljo začnejo vrteti in se obarvajo. Najmočnejše se vrtijo rdeči delci, vse manj pa rumeni, zeleni in modri.

Pierre Fermat (1601 do 1665) je nasprotoval Descartesovi razlagi. Leta 1662 je postavil načelo, da svetloba pri lomu in pri odboju izbere pot z najkrajšim časom. Hitrost svetlobe je tem manjša, čim gostejša je snov in velja $n = c_1/c_2$. V drugi polovici 17. stoletja so se postopno navadili izračunati goriščno razdaljo leč. Lom na krogelni meji med snovem z različnima lomnima količnikoma je leta 1703 pojasnil *Christiaan Huygens* (1629 do 1695).

Do 17. stoletja je prevladovalo stališče, da se svetloba razširi v trenutku. Le posamezniki so mislili drugače. Galilei je razmišljal o končni hitrosti svetlobe in o poskusu, pri katerem bi jo izmeril. *Ole Rømer* (1644 do 1710) je leta 1676 ugotovil, da si mrki Jupitrove lune Io ne sledijo v enakih časovnih razmikih. Razmik med mrkoma je večji, ko se Zemlja

oddaljuje od Jupitra, in krajši, ko se mu približuje. Mrk se zakasni največ za deset minut. Zadovoljil se je z ugotovitvijo, da je hitrost svetlobe končna.

James Bradley (1693 do 1762) je v upanju, da bi zasledil paralakso, natančno opazoval lego zvezd na nebu v bližini smeri pravokotno na ravnino gibanja Zemlje okoli Sonca. Leta 1725 je ugotovil, da je lega zvezde v letu dni opisala krožec z vidnim polmerom okoli $20,2''$. Štiri leta pozneje je to *zvezdno aberacijo* pojasnil z razmerjem med hitrostjo Zemlje pri gibanju okoli Sonca in hitrostjo svetlobe v pravokotni smeri.

Svetlobo so večinoma imeli za curek hitrih delcev. Le posamezniki so mislili na možnost, da gre za motnjo, podobno valovom na vodi. Tedaj obeh opisov niso ostro razločevali. Descartes je omenil oba, a pri razlagi odboja in loma uporabil curek delcev. *Robert Hooke* (1635 do 1703) je svetlobo imel za "nihajoče gibanje" z zelo majhno amplitudo, a zamisli ni dalje razvil. Huygens je leta 1678 postavil zasnovo notranje skladne teorije svetlobe in jo objavil leta 1690. Zaradi zelo velike hitrosti ne gre za gibanje teles, ampak za potovanje "krogelnih površin in valov kot pri zvoku", torej valovnih čel. V mislih je imel bolj periodične motnje kot sinusno valovanje. Privzel je, da svetlobo prenaša eter, ki se razlikuje od zraka, saj svetloba potuje tudi po praznem prostoru. Delci etra so nevidni, se nenehno gibljejo in so tako majhni, da lahko predrejo celo trdna telesa. So zelo prožni, tako da se na majhne in velike motnje odzivajo enako in hitrost svetlobe ni odvisna od jakosti. Longitudinalna motnja se s trki prenaša od delca do delca.

Uporabljal je *Huygensovo načelo*: Vsaka točka valovnega čela je izvir elementarnih valov, novo valovno čelo dobimo kot ovojnico elementarnih valov. Poleg premege širjenja svetlobe je z načelom izpeljal odbojni in lomni zakon. Predstavljal si je, da se iz vsake točke valovnega čela širi elementarni val. Pojasnil je tudi potovanje svetlobe v nehomogeni snovi, na primer v ozračju, in totalni odboj. Raziskal je *dvojni lom*.

Erasmus Bartholinus (1625 do 1698) je leta 1669 opisal dvojni lom na kristalu kalcita iz Islandije. Ugotovil je, da za *redni curek* velja znani lomni zakon, za *izredni curek* pa ne. Huygens je privzel, da v rednem curku potuje motnja po snovi v vseh smereh z enako hitrostjo in so valovne ploskve krogle. V izrednem curku pa je hitrost odvisna od smeri in so valovne ploskve elipsoidi.

Isaac Newton (1643 do 1727) je pomembne poskuse s svetlobo naredil od leta 1669, ko je postal profesor za matematiko v Cambridgeu, do 1671. Da bi se znebil obarvanega roba pri opazovanju predmetov, je izdelal daljnogled s krogelnim zrcalom kot objektivom. Na drugi strani je posebej raziskal obarvani rob slike. Leta 1672 je poročal o odkritju *disperzije*, razklona, sončne svetlobe na stekleni prizmi. Barvo je povezal z lomnostjo, po naše z lomnim količnikom. Curek sončne svetlobe, ki je šel skozi prizmo, je na steni dal *spekter*, mavrico. Po tem je sklepal, da belo svetlobo sestavljajo spektralne barve.

Newtonu je med drugimi oporekal Hooke, češ da je po Boylovem zgledu že sam naredil večino poskusov. Newton je zato odložil objavo *Optike* do leta 1704, po Hookovi smrti. V njej ni mogel doseči ravni *Principov*, ker je optika bila tedaj precej manj razvita kot

mehanika. Gradil je na poskusih, enačb je bilo zelo malo in knjiga ni bila popolnoma notranje skladna. Na koncu je dodal vrsto vprašanj (queries) o različnih zadevah. Obravnaval je tudi barvo tankih plasti, ki sta jo opazovala že Boyle in Hooke. Na ravno stekleno podlago je postavil del steklene kroglice, tako da je med ploskvama nastala plast zraka z debelino, odvisno od razdalje od dotikališča in polmera kroglice. Na napravo je posvetil in raziskal nastale *Newtonove kolobarje*. Domneval je, da se curek svetlobe z določeno barvo na nekaterih krajih odbije, na drugih gre skozi plast in to pripisal "muham svetlobe". Zasedil je periodičnost, a je ni poskušal pojasniti.

Francesco Maria Grimaldi (1618 do 1663) je opazil, da nekaj svetlobe zaide v geometrijsko senco za noževno ostrino ali lasom. Pojav je poimenoval *difrakcija*, uklon. Poročilo o tem je izšlo leta 1665, po njegovi smrti. Pojav je preučil tudi Hooke in se zadovoljil s trditvijo, da se svetloba v zraku ne širi popolnoma premo. Tedaj so misli na svetlobo kot valovanje pogosto nasprotovali prav z ugotovitvijo, da "se ne širi okoli ogla kot zvok".

Kot drugi fiziki je Newton povezoval svetlobo z etrom. Ta prožna snov naj bi izpolnjevala ves prostor in drobne votline v telesih. Njena gostota naj bi bila nemerljivo majhna, a ne povsod enaka. Najgostejši naj bi bil v prostoru med planeti, manj gost pa v telesih. Ne bi imel enotne sestave in naj bi vseboval etrovo paro, podobno kot zrak vsebuje vodno paro. Za svetlobo je ponudil več razlag. Nekajkrat je opozoril na podobnost med lastnostmi svetlobe in pojavi, značilnimi za valovanje. Vendar se je odločil za gibanje zelo hitrih delcev. Lom svetlobe je pojasnil s privlačno silo snovi na svetlobne delce, ki deluje pravokotno na mejo. Zato naj bi svetlobni delec odklonil proti vpadni pravokotnici in se v gosti snovi gibal hitreje kot v redkejši. Newtonovi pristaši so veliko dosledneje zagovarjali delčno sliko kot on sam in se pri tem sklicevali na njegov ugled. Do začetka 19. stoletja so tako zavrli razvoj misli, da je svetloba valovanje.

Longitudinalno valovanje etra

Thomas Young (1773 do 1829) je razvil valovno sliko svetlobe in svetlobi priredil *periodično valovanje*. Leta 1800 je opozoril na težave delčne slike. Kako naj izsevani delci imajo enako hitrost v drobni iskri in na sončnem površju? Kako naj pri odboju in lomu samo nekaj delcev preide mejo, drugi pa se odbijejo? Pri valovanju naj ne bi bilo teh težav. Majhne in velike motnje po prožni snovi potujejo z enako hitrostjo. Tudi on je stavil na eter in njegov obstoj utemeljeval z električnimi pojavi. Dve leti pozneje je Newtonove kolobarje pojasnil v valovni sliki. Osnovno zamisel je navedel že Newton v *Principih*. V nekaterih zalivih so opazili, da je plimski val, ki je potoval po različno dolgih kanalih, v delu zaliva dosegel veliko višino. Podobno lahko po mirni jezerski gladini potujeta enaka valova, ki se sestavita na izbranem kraju. Odmik v sestavljenem valovanju je velik, če vrh v prvem pride na vrh v drugem. Gladina vode pa ostane pri miru, če vrh v prvem valovanju pride na dolino v drugem. Pojav je imenoval *interferenca*. Pri sestavljanju svetlobe se delna curka ojačita, če je razlika poti večkratnik "neke dolžine", oslabitev pa, če je razlika poti lih večkratnik polovične dolžine. Tako je pojasnil barve tankih plasti.

V središču kolobarjev je pričakoval svetlo pego, ker tam ni geometrijske razlike poti. Opazil pa je temno pego. Po trkih prožnih teles je sklepal, da se pri odboju na gostejši snovi pojavi dodatna zakasnitev za pol nihaja. Po Newtonovi ugotovitvi, da so kolobarji tanjši, če je snov v plasti gostejša, je presodil, da je valovna dolžina v gostejših snoveh krajša. Leta 1803 je Young začel raziskovati robove senc. Osvetlil je drobno odprtino v zaslonu in na oddaljenem zaslonu opazoval temne in svetle proge. V delčni sliki bi naj bil odklon svetlobe na robu sence odvisen od sile, s katero snov v oviri privlači delce svetlobe. Young pa je pokazal, da nastanejo pojavi ob robovih z interferenco. Proge za lasom so zginile, ko je zaprl pot svetlobi na eni strani lasu. Vendar je mislil, da pri tem nemoteno valovanje interferira z valovanjem, ki se odkloni zaradi prečne sile na stranskih ploskvah ovire.

Leta 1804 je z valovno sliko pojasnil Bradleyevo zvezdno aberacijo. Privzel je, da gre eter skozi telesa brez upora. Zemlja se giblje po etru, ki se ne udeležuje gibanja. Zato se daljnogled giblje glede na svetlobne valove. Slika zvezde v daljnogledu se premakne za toliko, za kolikor se je premaknil daljnogled v etru v času, v katerem je svetloba potovala po daljnogledu. Leta 1807 je opisal poskus, ki ga imenujemo po njem. Drobno svetilo je preslikal na zaslon skozi dve drobni odprtini. Na zaslonu je bilo mogoče videti interferenčne kolobarje, ki so nastali z interferenco delnih valovanj iz obeh odprtin. Po njih je ocenil valovno dolžino modre svetlobe na 4 desetisočine milimetra in rdeče na 7 desetisočin milimetra.

Younga je potem zanimala svetloba v kristalih. V Huygensovem opisu dvojnega loma je videl močno podporo valovni sliki. Toda leta 1808 je Pierre-Simon Laplace dvojni lom opisal v delčni sliki. Trdil je, da snov kristala deluje na svetlobne delce v izrednem curku tako, da postane njihova hitrost odvisna od smeri. Young je naslednje leto v valovni sliki temu nasprotoval, češ da je v kristalu eter bolj stisljiv v eni smeri kot v drugi. Tudi hitrost zvoka v lesu je odvisna od smeri potovanja glede na smer vlaken.

Etienne-Louis Malus (1775 do 1812) je leta 1808 skozi kos islandskega dvolumca opazoval okna, na katerih se je odbijala svetloba zahajajočega Sonca. Ugotovil je, da se jakosti rednega in izrednega curka spreminjata, ko je vrtel kristal. Podoben pojav je zasledil tudi pri odboju na drugih prozornih snoveh. Imenoval ga je *polarizacija*. Svetloba, ki se je odbila na gladini vode pri vpadnem kotu 53° , je dala sploh samo en curek.

Dominique Francois Arago (1786 do 1853) je leta 1809 ugotovil, da je polarizirana modra svetloba z neba. Naslednje leto je Malus uvidel, da je pri določenem vpadnem kotu odbita svetloba popolnoma polarizirana. *David Brewster* (1781 do 1868) je leta 1811 spoznal, da sta pri tem kotu odbiti in lomljeni žarek pravokotna drug na drugega. Za vodo z lomnim količnikom 1,33 iz lomnega zakona sledi $\tan \alpha = n$ in vpadni kot $53^\circ 8'$. Tega leta je Arago opazoval barve, ko je polarizirano svetlobo vodil skozi tanko ploščico kremenca. Barve so bile odvisne od debeline ploščice in so se spreminjale z njenim zasukom. Leta 1812 je Arago sestavil polarizacijski filter iz skladovnice šip.

Jean Baptiste Biot (1774 do 1862), vnet zagovornik delčne slike, je leta 1814 ugotovil, da je pri dvolomnih kristalih lomni količnik za izredni curek lahko večji ali manjši od lomnega količnika za redni curek. Spoznal je, da turmalin absorbira redni curek in ga uporabil kot polarizator. Opazil je tudi, da raztopine nekaterih soli sučejo ravnino polarizacije. Leta 1815 je Brewster ugotovil, da vsi dvolomni kristali niso *enoosni* kot islandski dvolomec in nimajo samo ene odlikovane smeri, v kateri ni dvojnega loma. Našel je veliko *dvoosnih kristalov* z dvema odlikovanima smerema. Leta 1816 je naredil izotropno prozorno snov dvolomno, ko jo je obremenil v izbrani smeri. To je bil prvi primer *umetnega dvojnega loma*. Pozneje so kot polarizator uporabljali sestave dvolomnih kristalov. William Nicol (1770 do 1851) je leta 1828 iz dveh kosov kremenca, zlepljenima s plastjo smole, sestavil *Nicolovo prizmo*.

Augustin Fresnel (1788 do 1827) je izpopolnil valovno sliko. Leta 1815 je predložil razpravo o prednosti valovne slike in poročal o vrsti natančnih merjenj. V bakren list je naredil drobno odprtino, kanil vanjo kapljico medu in tako dobil lečo, s katero je naredil majhno sliko Sonca. To sliko je uporabil kot izvir in opazoval uklonsko sliko, na primer, na dveh odprtinah. Kolobarje je premeril z mikrometrskim vijakom. Ugotovil je, da gre za hiperbole, kar sta vedela že Grimaldi in Hooke.

Fresnel je najprej tako kot Young mislil, da nemoteno valovanje interferira z valovanjem, ki se odkloni na stranski ploskvi odprtine ali ovire zaradi sile, ki jo na svetlobo izvaja snov. Potem pa je opazil, da se uklonska slika ostrine noža ne razlikuje od slike tope strani. Leta 1816 se je prepričal, da ne gre za učinek sile, ampak za interferenco delov valovanja drugega z drugim. Interferenčna slika je nastala tudi po odboju svetlobe na dveh ravnih zrcalih, malo nagnjenih drugo proti drugemu.

Na predlog pristašev delčne slike je francoska akademija znanosti leta 1818 razpisala nagradno nalogo o uklonu. V obsežnem delu je Fresnel s Huygensovim načelom izračunal uklonske slike za razne odprtine. Valovno ploskev je razdelil na pasove, *Fresnelove zone*. Zone je razporedil tako, da je po vsej zoni upošteval konstantno fazo njene sredine, ki se je za pol nihaja razlikovala od faze v sosednji zoni. Valovanji iz sosednjih pasov z nasprotno fazo sta se oslabili. Zone so z oddaljenostjo od najkrajše poti postajale vse ožje. Jakost je postavil sorazmerno s kvadratom amplitude. Računi so se skladali z opazovanji. Danes govorimo o *Fresnelovem načinu*, če moramo pri obravnavanju uklona upoštevati, da delni curki niso vzporedni, in o *Fraunhoferjevem načinu*, če smemo vzeti, da so vzporedni. Delo je dobila v oceno komisija, v kateri so bili pristaši delčne slike. Eden od njih, *Simeon Denis Poisson* (1781 do 1840), je ugotovil, da enačba napove temno pego na osi slike za okroglo odprtino. To se mu je zdelo tako neverjetno, da je mislil, da bo pokopalo valovno sliko. Fresnel pa je z merjenji podprl napoved, dobil nagrado in za valovno sliko dosegel pomemben uspeh.

Transverzalno valovanje etra

Young se je zavedal, da je polarizacija valovno sliko prehodno spravila v zagato. Leta 1816 ga je Arago obvestil, da sta s Fresnelom opazila, da delna curka svetlobe, polarizirana v pravokotnih ravninah, nista dala značilne interferenčne slike. Young je izid pojasnil z domisljico, da je v svetlobi kot longitudinalnem valovanju etra primešano nekaj transverzalnega valovanja. Polarizacijo bi potem določala smer gibanja delov etra v ravnini, pravokotni na smer potovanja. Fresnel je že prej je razmišljal o tej možnosti, a je videl težavo, ker bi potem eter moral imeti lastnosti trdnine. Zdaj jo je sprejel in z njo pojasnil, zakaj pravokotno polarizirana delna curka ne interferirata. Privzel je, da je svetloba samo transverzalno valovanje in zamisli dal matematično obliko. Youngu se je zamisel zdela nenavadna, ker naj telo pri gibanju po trdnem etru ne bi čutilo nobenega upora, da je prenehal raziskovati svetlobo. Podobno se je godilo Aragoju. Fresnel pa je izpeljal *Fresnelove enačbe* in s transverzalnim valovanjem etra podrobno pojasnil odboj in lom. Do podobnih enačb je nekaj prej prišel Brewster pri opazovanjih. Fresnel je v letih 1821 in 1822 *linearno polariziranemu valovanju* dodal še *krožno* in *eliptično polarizirano valovanje* in raziskal potovanje valovanja v enoosnih in dvoosnih kristalih.

Arago je že leta 1810 ugotovil, da se zvezdna aberacija ni spremenila, ko je zvezde opazoval z daljnogledom, polnim vode. Tedaj je bil še pristaš delčne slike in je pričakoval, da se vsi delci svetlobe z zvezd na Zemlji ne gibljejo z enako hitrostjo. Ker naj bi bil lomni kot odvisen od hitrosti svetlobe glede na prozorno snov, ki miruje na Zemlji, je spomladi in ponovno jeseni izmeril odklon svetlobe z zvezd pri prehodu skozi prizmo. V okviru nenatančnosti so se jesenski odkloni ujemali s spomladanskimi. Pomislil je na možnost, da imajo sicer delci svetlobe različne hitrosti, a oko zaznava delce na ozkem pasu hitrosti, in ti se lomijo vedno enako.

Fresnel pa je izid Aragojevega poskusa pojasnil v valovni sliki. Eter z gostoto ρ_0 izpolnjuje prazen prostor in vso snov. V gibajočem se telesu del etra z gostoto ρ_0 še naprej miruje. Gostota etra pa se poveča na ρ in prirastek z gostoto $\rho - \rho_0$ se giblje s hitrostjo telesa v . Upošteval je, da je hitrost valovanja obratno sorazmerna s kvadratnim korenom iz gostote, in za hitrost svetlobe v gibajoči se snovi dobil $c/n + (1 - 1/n^2)v = c/n + k_F v$. Privzeti je moral, da ni upora pri gibanju telesa po trdnem etru. Poleg tega je moral za vsako valovno dolžino vpeljati poseben eter, ker je v prozorni snovi zaradi disperzije hitrost svetlobe odvisna od valovne dolžine.

Arago in Fresnel sta leta 1816 z *interferometrom* izmerila razliko lomnega količnika suhega in vlažnega zraka. Prvi delni svetlobni curek sta speljala skozi cev s suhim, drugega pa skozi vzporedno cev z vlažnim zrakom. Z lečo sta zbrala delna curka v njeni goriščni ravnini in opazovala interferenčne proge ter po njih določila razliko lomnih količnikov.

Joseph Fraunhofer (1787 do 1826) je izdelal *spektroskop*. Pred prizmo je postavil zbiralno lečo s svetilom v goriščni ravnini, in za prizmo daljnogled. V letih 1814 in 1815 je v sončnem spektru premeril več kot petsto temnih črt, ki jih imenujemo po njem. Z

njimi si je kot z znamenji v zveznem spektru pomagal pri natančnem merjenju valovne dolžine. Raziskal je spekter planetov in zvezd, petrolejke, sveče in razredčenih plinov, po katerih je pognal električni tok. Pozneje je namesto prizme v spektroskopu uporabil uklonsko mrežico. Naredil jo je tako, da je po več sto vzporednih rež na milimeter vrezal v stekleno ploščico. Pri mrežici je zadostoval račun in je odpadlo umerjanje. V letih 1821 in 1822 je natančno izmeril valovne dolžine številnih spektralnih črt in s tem začel *spektrometrijo*. Za rumeno natrijevo črto D je navedel valovno dolžino 588,6 nm. Danes vemo, da je ta črta dvojček z valovnima dolžinama 589,02 nm in 589,62 nm.

Jean Bernard Leon Foucault (1819 do 1868) je opazoval svetlo rumeno črto v spektru močnejše in šibkejše obločnice. Ko je šibko obločnico postavil pred močno, je postala črta temna. Po tem so sklepali, da Fraunhoferjeve črte nastanejo, ko se svetloba s sončnega povišja absorbira v plasteh hladnejšega plina.

Robert Wilhelm Bunsen (1811 do 1899) in *Gustav Robert Kirchhoff* (1824 do 1887) sta leta 1860 uvedla *spektralno analizo*. Element kot plin v plamenu, v električnem loku ali v električni iskri seva spektralne črte z značilnimi valovnimi dolžinami. Tako sta odkrila cezij in rubidij. Pozneje so po spektralnih črtah odkrili še nekaj drugih elementov.

Pokazalo se je, da valovne dolžine spektralnih črt kakega elementa med seboj niso v razmerju majhnih celih števil kot na primer pri struni. *Eleter Masquart* (1837 do 1908) je bil menda prvi, ki je predlagal, da bi poiskali zveze med valovnimi dolžinami spektralnih črt kakega elementa, čeprav bi bile bolj zapletene kot pri struni.

Najbolje je bilo začeti z vodikom, ki ima od vseh elementov najmanjšo atomsko maso. *Johann Jakob Balmer* (1825 do 1898) je leta 1885 dobil podatke o valovnih dolžinah štirih črt v vodikovem spektru, ki jih je izmeril *Anders Jonas Ångström* (1814 do 1874). Opisal jih je z enačbo: $\lambda = \lambda_0 n^2 / (n^2 - 2^2)$ z $\lambda_0 = 364,56$ nm.

Johannes Robert Rydberg (1854 do 1919) je leta 1890 našel splošnejšo enačbo, ki je veljala tudi za nekatere črte v spektrih drugih elementov. Črte so sestavljale *spektralne serije*. *Walther Ritz* (1878 do 1909) je z merjenjem leta 1908 ugotovil, da je obratno vrednost valovnih dolžin mogoče zapisati kot razlike dveh členov - *termov*. Termini sestavljajo nize, ki se stekajo k 0. *Serijo* črt dobimo, ko terme kakega niza sestavimo z določenim termom drugega niza.

Christian Doppler (1803 do 1853) je leta 1842 trdil, da vse zvezde sevajo enako belo svetlobo. Nekatere od njih se zdijo modrikaste, ker se približujejo, in druge rdečkaste, ker se oddaljujejo. Opazovalec naj bi zaznal frekvenco $\nu' = \nu(1 + v_s/c)/(1 + v_i/c)$, če bi izmeril frekvenco ν , ko bi glede na zvezdo miroval. Hitrost sprejemnika v_s je treba vzeti pozitivno, če se sprejemnik po zveznici približuje izvira, hitrost izvira v_i pa, če se izvir po zveznici oddaljuje od sprejemnika. Iz enačbe sledi linearni približek $\nu' = \nu(1 + (v_s - v_i)/c)$, v katerem se pojavi hitrost sprejemnika glede na izvir $v_s - v_i$. Do takega linearnega približka pridemo tudi za svetlobo, če upoštevamo, da po etru potuje valovanje s hitrostjo c in merimo hitrosti sprejemnika in izvira glede na eter.

Armand Hyppolite Louis Fizeau (1819 do 1896) je leta 1848 ugotovil, da Dopplerjeva trditev ne velja za zvezni spekter, a velja za spektralne črte. Črta se premakne proti modremu delu spektra, če se zvezda približuje, in proti rdečemu, če se oddaljuje. O tem se je leta 1868 prepričal astronom *William Huggins* (1824 do 1910), ko je ugotovil, da se v spektru Sirija rdeča vodikova črta premakne proti rdečemu delu spektra. Relativni premik $(\nu - \nu')/\nu$ v linearnem približku določa komponento hitrosti zvezde v smeri zveznice, deljeno s hitrostjo svetlobe. Dotlej se je fotografija toliko razvila, da je bilo mogoče po fotografijah spektrov ugotoviti komponento hitrosti vesoljskih teles v smeri zveznice.

Okoli leta 1840 je Arago Fizeauja in Foucaulta opozoril, da se v delčni sliki svetloba pri prehodu z območja z manjšo hitrostjo v snov z večjo lomi proti vpadni pravokotnici, po valovni pa od pravokotnice. Poskus, pri katerem bi izmerili hitrost svetlobe v vodi, bi ovrgel eno ali drugo sliko. Prvi je na Zemlji hitrost svetlobe izmeril Fizeau. Curek svetlobe iz močne svetilke je z lečo zbral in ga skozi zobe zobatega kolesa s pariškega griča usmeril na 8,6 km oddaljeni grič. Tam se je curek odbil in skozi zobe in polprepustno ploščico dospel v oko. Kolo je vrtil z naraščajočo frekvenco, dokler ni prepuščalo svetlobe. Tedaj je svetloba za pot do griča in nazaj porabila enak čas kot kolo, da se je zavrtelo za polovico kota med sosednjima zobema. Za hitrost svetlobe je dobil $3,13 \cdot 10^8$ m/s.

Foucault je leta 1851 izmeril hitrost svetlobe v vodi na poti 4 m. Zrcalce je poganjala majhna parna turbina na isti osi. Mirujoče zrcalce je poslalo svetlobni curek skozi režo na oddaljeno zrcalo, da se je odbil sam vase in se vrnil do reže. Slika reže pa se je premaknila, ko se je zrcalce zelo hitro vrtelo, ker se je zrcalce zasukalo v času, v katerem je svetloba prepotovala do zrcala in nazaj. Iz izmerjenih podatkov je dobil za hitrost svetlobe v zraku $2,89 \cdot 10^8$ m/s in v vodi 1,33-krat manj. To je ovrglo delčno sliko, ki pa so jo dotlej večinoma že opustili.

Fizeau je leta 1851 z interferometrom podprl Fresnelovo napoved o hitrosti svetlobe v gibajoči se snovi. Delna svetlobna curka sta potovala v smeri toka vode in v nasprotni smeri. *Albert Abraham Michelson* (1852 do 1931) in *Edward Williams Morley* (1838 do 1923) sta leta 1886 ponovila poskus z izpopolnjenim interferometrom. Za vodo z lomnim količnikom 1,33 da račun za Fresnelov koeficient $k_F = 1 - 1/n^2 = 0,438$, Fizeau je nameril 0,46, Michelson in Morley pa 0,434.

Z izpopolnjenim Foucaultovim načinom je Michelson izmeril hitrost svetlobe v snoveh v letih od 1902 do 1906. V ogljikovem sulfidu CS_2 je leta 1883 nameril $c/1,76$ pri lomnem količniku 1,64. To so pojasnili s *skupinsko hitrostjo* $c_g = (c/n)(1 + (\lambda/n)(dn/d\lambda))$, ki jo je ob *fazni hitrosti* c že leta 1877 vpeljal *John William Strutt, lord Rayleigh* (1842 do 1919).

Vse 19. stoletje so zaman poskušali izmeriti hitrost Zemlje v etru. Najznamenitejši poskus te vrste je z *Michelsonovim interferometrom* leta 1881 naredil Michelson sam in leta 1887 skupaj z Morleyem. Albert Einstein (1879 do 1955) je v posebni teoriji relativnosti leta 1905 ugotovil, da je predstava o etru nepotrebna in elektromagnetno valovanje potuje po praznem prostoru s hitrostjo, ki ni odvisna od hitrosti izvira.

Elektromagnetno valovanje

Michael Faraday (1791 do 1867) je bil prepričan, da so pojavi v naravi med seboj povezani. Po Ørstedovem odkritju leta 1820, da električni tok vpliva na magnet, si je prizadeval “spremeniti magnetizem v elektriko”. Arago je kmalu opazil, da se je nihajoča magnetnica v kovinski škatli ali v bližini kovinske plošče hitreje zaustavila. Krak z magnetnico na tehtnici se je odklonil iz ravnovesne lege, ko je pod magnetnico zavrtel kovinsko ploščo. Leta 1831 pa je Faraday naposled odkril *indukcijo*, ki so jo zaslužili Arago in drugi. Na lesen valj je navil tuljavi in na eno priključil baterijo, na drugo pa galvanometer. Galvanometer je zaznal šibek sunek, ko je vključil baterijo, in sunek na drugo stran, ko je baterijo izključil. Tok se je pojavil le ob spremembah. Sunek toka se je izdatno povečal, ko je tuljavi navil na železno jedro. Galvanometer se je odklonil na eno stran, ko je v tuljavo vtaknil magnet, in v drugo, ko ga je potegnil ven.

Še naprej je iskal povezave med pojavi v naravi. Leta 1846 je ploščo iz svinčenega stekla dal med pola preluknjane magneta in skozi odprtino v magnetu usmeril curek linearno polarizirane svetlobe. Ob tem se je zasukala polarizacijska ravnina. Učinek je bil največji, ko je imelo magnetno polje smer svetlobnega curka, in ga ni bilo, ko je bilo magnetno polje pravokotno na curek. Ta *Faradayev pojav* je pokazal, da je svetloba povezana z magnetnim poljem. Tega leta je Faraday prvič uporabil ime *magnetno polje*, zagotovil, da ga je mogoče opisati z *magnetnimi silnicami* in jih ponazoriti z železnimi opilki.

Povezavo elektrike in magnetizma s svetlobo je razkril *James Clerk Maxwell* (1831 do 1879). Leta 1865 je na podlagi Faradayevih dognanj postopno razvil teorijo elektrike in magnetizma. Najprej je izhajal iz mehanske analogije, ki ga je pripeljala do valovanja. Pozneje pa je vpeljal električno in magnetno polje. Sledimo Maxwellovi poti na današnji način. V praznem prostoru električno in magnetno polje nimata izvirov. Spremenljivo magnetno polje se obda z vrtincem električnega polja in spremenljivo električno polje z vrtincem magnetnega polja. Spremenljivi polji se vzajemno vzdržujeta. Izhajamo iz štirih *Maxwellovih enačb* v praznem prostoru:

$$\operatorname{div}\vec{E} = 0, \quad \operatorname{div}\vec{B} = 0, \quad \operatorname{rot}\vec{E} = -\partial\vec{B}/\partial t, \quad \operatorname{rot}\vec{B} = \varepsilon_0\mu_0\partial\vec{E}/\partial t.$$

Polji se v enačbah javljata simetrično, če izvzamemo minus v tretji enačbi. Navidez kazi simetrijo le to, da električno polje opišemo z jakostjo, magnetno pa z gostoto. V rotorju tretje enačbe zamenjamo vrsti red: $\operatorname{rot}\partial\vec{B}/\partial t = \partial\operatorname{rot}\vec{B}/\partial t$ in upoštevamo četrto enačbo. Vektorska enačba pripelje do $\operatorname{rot}\operatorname{rot}\vec{E} = \operatorname{div}\operatorname{grad}\vec{E} - \operatorname{grad}\operatorname{div}\vec{E} = \varepsilon_0\mu_0\partial^2\vec{E}/\partial t^2$. S prvo enačbo sledi *valovna enačba*:

$$\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}, \quad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}.$$

Za hitrost valovanja c je izračunal vrednost, ki se je ujemala z izmerjeno hitrostjo svetlobe v praznem prostoru. V valovanju sta bili električno in magnetno polje pravokotni drugo

na drugo in na smer potovanja. Po tem je sklepal, da je svetloba transverzalno elektromagnetno valovanje. To je bilo eno od velikih poenotenj v fiziki, po katerem je elektriko, magnetizem in optiko zajela enotna teorija. Lahko bi rekli, da je optika iz mehanike – svetlobo so dotlej obravnavali kot mehanično valovanje etra – prešla v elektrodinamiko.

Električne in magnetne učinke je sprva še vedno prenašal eter. Potem so ga namesto za rahlo snov z nenavadnimi lastnostmi postopno začeli imeti za odlikovani opazovalni sistem, v katerem veljajo Maxwellove enačbe v zapisani obliki in v katerem svetloba v praznem prostoru potuje s hitrostjo c . Ni bilo smiselno privzeti, da Zemlja miruje v etru, a hitrosti Zemlje v etru niso mogli ugotoviti. Omenili smo, da je težavo rešila posebna teorija relativnosti.

Sevanje črnega telesa

Do 18. stoletja so svetlobo zaznavali le neposredno z očmi in niso mogli primerjati med seboj dveh svetil. *Pierre Bouguer* (1698 do 1758) je leta 1740 sestavil *primerjalni fotometer*. Ugotovil je, da gostota svetlobnega toka v absorbirajoči snovi pojema eksponentno. *Johann Heinrich Lambert* (1728 do 1777) je leta 1760 opredelil količine, ki jih v *fotometriji* z drugimi imeni uporabljamo še danes. Tedaj so razločevali *svetlo sevanje*, ki ga oddaja žareče telo, od *temnega sevanja* segretega telesa, ko ne žari. Leta 1681 je z zrcalom zbral temno sevanje in zažgal smodnik. Ugotovili so, da se temno sevanje širi premo, enako kot svetlo sevanje. *William Herschel* (1738 do 1822) je leta 1800 svetlobo razstavil na spekter in ugotovil, da se termometer odzove onstran rdeče svetlobe. Pogosto mu pripišejo odkritje *infrardeče svetlobe*. *Johann Wilhelm Ritter* (1776 do 1810) je s srebrovim kloridom ugotovil kemijski učinek onstran vijoličnega območja. Njemu pogosto pripišejo odkritje *ultavijolične svetlobe*.

John Leslie (1766 do 1832) je razločeval tri načine za prenašanje toplote: prevajanje, konvekcijo v tekočinah in sevanje. *Pierre Prevost* (1751 do 1839) je po letu 1792 uvidel, da sevajoče telo doseže toplotno ravnovesno stanje pri določeni temperaturi, ko toliko seva kot absorbira. Telo se ohlaja, če več seva, kot absorbira, ali segreva, če več absorbira, kot seva. Sevanje je odvisno od temperature telesa, ne od teles v okolici. Hitrost ohlajanja je sorazmerna z razliko gostote izsevanega svetlobnega toka $j^*(T)$ in gostoto vpadnega svetlobnega toka iz okolice $j^*(T')$ takole: $-dT/dt \propto j^*(T) - j^*(T')$. Pri tem je T temperatura sevajočega telesa in T' temperatura teles v okolici. Upoštevali smo, da opazovano telo vse vpadno sevanje absorbira in ga nič ne odbije ter imajo vsa telesa v okolici enako temperaturo. Vedeli so, da $j^*(T)$ izrazito narašča z naraščanjem temperature T .

Pierre Louis Dulong (1785 do 1838) in *Alexis Thérèse Petit* (1791 do 1820) sta leta 1817 postavila *zakon o sevanju*. Segret živosrebrni termometer z veliko okroglo bučko sta namestila na sredo okrogle posode s konstantno temperaturo in merila hitrost ohlajanja. Iz posode sta izčrpala in merila pri znižanem zračnem tlaku. Mislila sta, da sta z ekstrapolacijo na tlak 0 izločila prevajanje in konvekcijo in da se bučka ohlaja samo s sevanjem. Temperaturo sta merila v stopinjah Celzija in postavila $-d\vartheta/dt \propto 1,0077^\vartheta - 1,0077^{\vartheta'}$.

Kirchhoff je razmišljal o *črnem telesu*, ki vse vpadlo sevanje absorbira in pri dani temperaturi najmočneje seva. Razmerje med izsevanim in vpadnim sevanjem je vpeljal kot *emisijsko moč* ter med absorbiranim in vpadnim sevanjem kot *absorpcijsko moč*. Leta 1859 je ugotovil, da telo močno seva pri valovni dolžini, pri kateri močno absorbira. Po *Kirchhoffovem zakonu* je pri določeni valovni dolžini razmerje med gostoto izsevanega energijskega toka $dj^*(\lambda)$ na ozkem pasu valovnih dolžin $d\lambda$ in gostoto absorbiranega energijskega toka $dj(\lambda)(1 - a(\lambda))$ za vsa telesa enako. $a(\lambda)$ je *albedo*, to je razmerje med gostotama odbitega in vpadnega energijskega toka pri določeni valovni dolžini. Primerjajmo sevanje kakega telesa s sevanjem črnega telesa z albedom 0: $dj^*/d\lambda = [1 - a(\lambda)](dj^*/d\lambda)_0$. Za črno telo je spektralna gostota $(dj^*/d\lambda)_0$ odvisna le od temperature in frekvence. Gostota energijskega toka v sevanju črnega telesa $j = \frac{1}{4}cw$ je povezana s povprečno gostoto energije w .

Z merjenji so poskušali ugotoviti, pri kateri temperaturi "začne telo sevati". *John Tyndall* (1820 do 1893) je leta 1864 raziskal nekaj pojavov, povezanih s temnim sevanjem. Z električnim tokom je segrel platinasto žičko in z lečo in prizmo iz kamene soli razstavil svetlobo v spekter in meril onstran rdečega dela. Uporabil je baterijo termočlenov in temperaturo opisal z barvo. Med drugim je ugotovil, da je odklon galvanometra pri belem žaru bil 11,6-krat večji kot pri temnordečem žaru. *Adolph Wüllner* (1835 do 1908) je v učbenik vključil nekaj Tyndallovih podatkov in barvi priredil temperaturo, belemu žaru 1200 °C in temnordečemu žaru 525 °C.

Jožef Stefan (1835 do 1893) je leta 1872 prvi izmeril toplotno prevodnost plinov in podprl Maxwelllovo napoved, da ni odvisna od tlaka. Tako je vedel, da sta se *Dulong* in *Petit* z znižanjem tlaka znebila konvekcije, ne pa prevajanja. V želji, da bi popravil njuno enačbo, je po Tyndallovih podatkih z Wüllnerjevimi temperaturami upošteval, da je odklon galvanometra pri temperaturi 1473 K 11,6-krat večji kot pri temperaturi 798 K. Iz kinetične teorije je poznal pomen absolutne temperature. Ugotovil je, da je razmerje četrkih potenc absolutnih temperatur zelo blizu 11,6. Po tem je leta 1879 sklepal, da je gostota izsevanega izsevanega svetlobnega toka sorazmerna s četrto potenco absolutne temperature: $j^* = \sigma T^4$. Tako je s precej sreče odkril *Stefanov zakon*. Ugotovil je tudi sorazmernostni koeficient, *Stefanovo konstanto*. Z zakonom je izračunal temperaturo Sončevega površja.

Ludwig Boltzmann (1844 do 1906) je Stefanov zakon povezal s sevanjem črnega telesa. Najprej je razčistil vprašanje svetlobnega tlaka. Pred časom so zagovorniki valovne slike svetlobe delčni sliki očitali, da bi morala svetloba na zrcalo izvajati tlak, ki pa ga niso mogli izmeriti. Po Maxwellovi elektrodinamiki je z gostoto usmerjenega svetlobnega toka j povezana gostota toka gibalne količine j/c . Na steno črnega telesa pade svetloba v vseh mogočih smereh in stena seva v vseh mogočih smereh. Povprečje po polovici prostorskega kota poveže povprečno gostoto energije v sevanju črnega telesa w s tlakom $p = \frac{1}{3}w$. Za toplotni stroj z valjem in batom, ki ponavlja Carnotovo krožno spremembo s sevanjem črnega telesa, je izpeljal Stefanov zakon.

Stimulirano sevanje

Koraka naprej v teoriji je naredil *Wilhelm Wien* (1864 do 1928), ki je obravnaval spektralno gostoto v sevanju črnega telesa $u = dw/d\nu$. Leta 1893 je raziskoval sevanje v valju z idealno odbojnimi stenami in s premičnim batom. Ugotovil je, da je kvocient frekvence, pri kateri ima spektralna gostota vrh, in absolutne temperature T konstanten. Dalje je uvidel, da je v splošnem spektralna gostota odvisna od funkcije kvocienta ν/T , pomnožene s tretjo potenco frekvence ν . Tri leta pozneje je to funkcijo izrazil po zgledu Maxwelllove porazdelitve molekul po hitrosti:

$$u = \frac{dw}{d\nu} = \nu^3 f(\nu/T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} e^{-h\nu/(kT)}. \quad (1)$$

h je Planckova in k Boltzmannova konstanta, ki ju Wien še ni poznal.

Posezimo v poznejši čas in obdelajmo sodelovanje sevanja s snovjo. V množici atomov danega elementa v plinu se omejimo na dve stanji. Opis velja tudi za dve stanji molekul v plinu in atome primesi v kristalu izolatorja. Velja na primer tudi za elektrone v stanju na dnu prevodnega pasu in v stanju primesi pod dnom prevodnega pasu v kristalu polprevodnika. Prvo stanje naj ima manjšo energijo W_1 , drugo pa večjo W_2 . Atom v stanju z večjo energijo seva sevanje s frekvenco $\nu_{12} = (W_2 - W_1)/h$. Atom v stanju z manjšo energijo v sevanju s spektralno gostoto $u = u(\nu_{12})$ absorbira sevanje s frekvenco ν_{12} . Naj bo N_2 atomov v stanju z večjo energijo in N_1 atomov v stanju z manjšo. V časovni enoti $N_2 A_{21}(u_{12})$ atomov s sevanjem iz stanja z večjo energijo preide v stanje z manjšo in $N_1 B_{12}(\nu_{12})u(\nu_{12})$ atomov z absorpcijo iz stanja z manjšo energijo v stanje z večjo. $A_{21}(u_{12})$ ima vlogo verjetnosti na časovno enoto za prehod atoma s sevanjem in $B_{12}(\nu_{12})u(\nu_{12})$ verjetnosti na časovno enoto za prehod atoma z absorpcijo.

Kdo bi utegnil izvajanju ugovarjati, da je $u = dw/d\nu$ zvezna porazdelitev in da v njej na sevanje z dano frekvenco ne odpade nič energije. Prehod atomov med stanjema z energijama W_1 in W_2 posreduje elektromagnetno valovanje. Valovanje opiše resonančna krivulja $g(\nu - \nu_{12})$ z vrhom pri frekvenci ν_{12} . Krivulja je normirana $\int g(\nu - \nu_{12})d\nu = 1$ in velja $\int g(\nu - \nu_{12})u(\nu)d\nu = u(\nu_{12})$, če leži frekvenca ν_{12} na integracijskem intervalu. Tako pojasnimo, da v zapisani enačbi upoštevamo spektralno gostoto pri dani frekvenci $\nu_{12}c$.

V toplotnem ravnovesju toliko atomov s sevanjem iz stanja z večjo energijo preide v stanje z manjšo, kolikor jih v tem času z absorpcijo preide iz stanja z manjšo energijo v stanje z večjo:

$$N_2 A_{21}(\nu_{12}) = N_1 B_{12}(\nu_{12})u(\nu_{12}). \quad (2)$$

V ravnovesju je po Boltzmannovem zakonu v stanju z večjo energijo manj atomov kot v stanju z manjšo: $N_2/N_1 = e^{-(W_2-W_1)/(kT)} = e^{-h\nu_{12}/(kT)}$. To upoštevamo v zvezi (2) in iz enačbe (1) razberemo: $A_{21}(\nu_{12})/B_{12}(\nu_{12}) = 8\pi h\nu_{12}^3/c^3$. Poudarimo, da poti, na kateri bi se skliceval na Wienovo enačbo (1) in na zahtevo po ravnovesju (2), ob svojem času ni ubral nihče.

Vrnimo se na konec 19. stoletja. Tedaj so vse natančneje merili spektralno gostoto v sevanju črnega telesa. Najprej se je zdelo, da merjenja podpirajo *Wienovo enačbo* (1). Potem pa so pokazala, da je pri dovolj majhni frekvenci spektralna gostota pri konstantni frekvenci sorazmerna s temperaturo. Po tem podatku je Max Planck leta 1900 preko entropijskega zakona Wienovo enačbo dopolnil v *Planckov zakon*:

$$u = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (3)$$

Še isto leto je zakon pojasnil z zamisljivo, da sevanje v votlini s steno energijo izmenjuje v *energijskih kvantih* $h\nu$. Wienova enačba je približek zakona za $h\nu/(kT) \gg 1$, kar smo upoštevali in po tem naravnali konstante v (1). Približek zakona za $h\nu/(kT) \ll 1$ je *Rayleigh-Jeansova enačba* $u = 8\pi\nu^2 kT/c^3$, po kateri je pri konstantni frekvenci spektralna gostota sorazmerna s temperaturo.

Na začetku 20. stoletja je večina fizikov upala, da se bo mogoče izogniti Planckovim energijskim kvantom, ki so nasprotovali klasični fiziki. Tako je spočetka upal tudi Planck. Zaupal je Maxwellovi elektrodinamiki in za nasprotje krivil sodelovanje med atomi in sevanjem, češ da ga še ne razumemo. Prvi se je oglasil Einstein. Leta 1904 je v okviru klasične statistične mehanike izpeljal splošno zvezo $\langle W^2 \rangle = \langle W \rangle^2 + kT^2 \partial \langle W \rangle / \partial T$. Ostri oklepaji zaznamujejo povprečje po množici. Sklepi, do katerih se je po enačbi dokopal, niso obveljali. Ugotovil pa je, da je enačbo mogoče preizkusiti “le na sevanju črnega telesa”. V svojem “čudovitem letu” 1905 je za sevanje v Wienovem približku s *svetlobnimi kvanti* pojasnil fluorescenco, fotoefekt in ionizacijo plinov s kratkovalovno svetlobo. Kaže, da se je tedaj za razliko od Plancka sprijaznil z misljo, da Maxwellova elektrodinamika v svetu atomov ne bo obveljala. Pozneje pa je nekajkrat poskusil sevanje pojasniti brez kvantov. Leta 1910 se je sploh odvrnil od svetlobnih kvantov, ne pa od kvantov pri nihanju atomov v kristalih, s katerim je leta 1907 pojasnil odvisnost specifične toplote kristalov od temperature.

Planck je leta 1911 razkril svojo “drugo teorijo”, po kateri atomi zvezno absorbirajo sevanje, a ga nezvezno, torej v kvantih, sevajo. Ta teorija ga je pripeljala do *ničelne energije* $\frac{1}{2}h\nu$. Einstein se je na to teorijo odzval le s pripombo, da bo čas pokazal njen pomen. Leta 1916 pa se je vrnil k svetlobnim kvantom. Po Maxwellovi enačbi za gibalno količino W/c sevanja z energijo W je previdno zagotovil, da mora izsevani kvant atom odriniti, če je nezvezno. V nadaljevanju je še tega leta v dveh člankih obdelal sevanje in pri tem brez veliko besed vpeljal *stimulirano sevanje*, čeprav ne s tem imenom. Odtlej ni več dvomil v kvante. Večina fizikov kvantov ni sprejela niti po eksperimentalnem preizkusu Einsteinove enačbe za fotoefekt leta 1915 Roberta Andrews Millikana (1868 do 1953) niti po Einsteinovih računih. To se je dogodilo šele po letu 1922, ko je Arthur Holly Compton (1892 do 1962) premeril in pojasnil Comptonov pojav. Ime *foton* je Gilbert Newton Lewis (1875 do 1946) leta 1926 predlagal na podlagi zgrešene predstave.

Nadaljujmo razpravo v zastavljeni smeri. Zveza (2) je po meri Wienove enačbe, ne pa po meri Planckovega zakona. Po tem sklepamo, da s sevanjem in absorpcijo nismo izčrpali vseh vrst sodelovanja sevanja in snovi, ampak obstaja še tretji pojav. Znak minus pred Planckovim dodatkom kaže, da gre za prehod iz stanja z večjo energijo v stanje z manjšo. Doslej smo obravnavali sevanje samega sebi prepuščenega atoma, zato to imenujemo *spontano sevanje*. Nova vrsta prehoda je stimulirano sevanje. Z imenom poudarimo, da to sevanje nastane zaradi sevanja s frekvenco ν_{12} , kakršno povzroči tudi absorpcijo. Zvezi (2) zato dodamo število atomov $N_2 B_{21}(\nu_{12})u(\nu_{12})$, ki v časovni enoti s stimuliranim sevanjem iz stanja z večjo energijo preide v stanje z manjšo:

$$N_2 A_{21}(\nu_{12}) + N_2 B_{21}(\nu_{12})u(\nu_{12}) = N_1 B_{12}(\nu_{12})u(\nu_{12}). \quad (4)$$

$B_{21}(\nu_{12})u(\nu_{12})$ imamo za verjetnost na časovno enoto za prehod atoma s stimuliranim sevanjem. Enačba (4) ustreza Planckovemu zakonu, če poleg zapisane zveze velja še:

$$B_{12}(\nu_{12}) = B_{21}(\nu_{12}), \quad \frac{A_{21}(\nu_{12})}{B_{21}(\nu_{12})} = \frac{8\pi h \nu_{12}^3}{c^3}. \quad (5)$$

Stanji smo vzeli za nedegenerirani, se pravi, da dani energiji ustreza eno samo stanje. Zvezi (5) je izpeljal Einstein leta 1916. A_{21} in B_{21} sta *Einsteinova koeficienta*. Ob robu kaže omeniti, da je Niels Bohr (1885 do 1962) leta 1913 po Planckovem zgledu kvantno pojasnil stanja vodikovega atoma in prehode med njimi. Zgodovinski razvoj smo ponaredili, da bi pokazali, kako je stimulirano sevanje povezano s Planckovim dodatkom Wienovi enačbi. Na drugi strani pa stimulirano sevanje navadno pojasnimo v polklasičnem približku, če ne želimo uporabiti kvantne elektrodinamike. V tem približku obravnavamo sevanje klasično, atome pa kvantnomehnično.

Energijski tokovi, ki ustrezajo spontanemu in stimuliranemu sevanju ter absorpciji, so sorazmerni z $N_2 A_{21}(\nu_{12})$, $N_2 B_{21}(\nu_{12})u(\nu_{12})$ in $N_1 B_{12}(\nu_{12})u(\nu_{12})$. Tako sta tokova spontanega in stimuliranega sevanja v razmerju $A_{21}(\nu_{12})/(B_{21}(\nu_{12})u(\nu_{12})) = e^{h\nu_{12}/(kT)} - 1$ in tokova absorpcije in stimuliranega sevanja v razmerju $N_1/N_2 = e^{h\nu_{12}/(kT)}$. Eksponentni faktor je pri sobni temperaturi za vidno svetlobo zelo velik, tako da je delež stimuliranega sevanja zanemarljiv. Spočetka so mislili, da je stimulirano sevanje teoretična posebnost brez praktičnega pomena. V ravnovesju zagotovo ni mogoče doseči, da bi se ta delež povečal. Atome je treba neprekinjeno motiti od zunaj, tako da je v stanju z večjo energijo več atomov kot v stanju z manjšo. V taki *obrnjeni zasedenosti* se poveča delež stimuliranega in spontanega sevanja v primeri z deležem absorpcije. Poleg tega je treba doseči veliko gostoto energije v valovanju s pravo frekvenco, kar poveča delež stimuliranega sevanja in absorpcije v primeri z deležem spontanega sevanja.

Trajalo je do leta 1960, da so izdelali prve laserje, ki so izkoristili stimulirano sevanje. S tem se je v optiki začelo novo obdobje.

Za nasvete se zahvaljujem Gorazdu Planinšiču in Alešu Mohoriču.