

## ZGODOVINA RAZISKOVANJA LUMINISCENČNIH SNOVI (2.del)

Stanislav Južnič\*

### History of development of luminescent materials (Part II)

#### ABSTRACT

The development of the research of the luminescent materials is described from inventions to their use in Braun's cathode ray tube. Attention is put on the researchers and writing about luminescence in Austria, specially in its Slovene part. The second part of the discussion begins with Stokes' law in the middle of the last century. We describe in some detail only modern research in cathodoluminescence and electroluminescence.

#### POVZETEK

Obravnavamo raziskovanje luminiscenčnih snovi od odkritij do uporabe v Braunovi elektronki. Več pozornosti posvečamo raziskavam in pisanju o luminiscenci v tedanji Avstriji in še posebej v njenem slovenskem delu. Drugi del razprave sega od objave Stokesovega zakona sredi preteklega stoletja. Med sodobnimi raziskavami smo nekoliko podrobneje opisali le katodoluminiscenco in elektroluminiscenco.

#### 1 UVOD

Pesnik Goethe je takole opisal fluorescenco anilina: "Raztopina divjega kostanja v vodi se v najkrajšem času obarva nebesno modro, ko svetlečo steklenko opazujemo na temnem ozadju. Ko pa jo postavimo proti svetlobi, vidimo najlepšo rumeno (barvo)" (1810; Hoh, 1867, 659). Sredi 19. stoletja pa so raziskovali predvsem fluorescenco fluorita, po kateri je Stokes pojav tudi poimenoval.

#### 2 Raziskovanja luminiscence raztopin na Angleškem; Stokesov zakon

Na Angleškem rojeni profesor kemije in fiziologije John William Draper (1811-1882) je v New Yorku leta 1851 popisal značilnosti luminiscence fluorita, obsevanega s svetlobo električne iskre:

1. prostornina luminiforja se ne spreminja,
2. struktura luminiforja se ne spreminja,
3. površina luminiforja se spremeni, saj se v točkah sevanja spremeni kondenzacija živosrebrnih par,
4. luminifor poleg svetlobe nedvomno seva tudi toploto,
5. izoliran luminifor ne kaže naelektritve,
6. ob fosforescenci se izseva zelo malo svetlobe,
7. telo tem močnejše fosforescira, čim hladnejše je bilo ob obsevanju (Rosenberger, 1890, 472-473).

Škot Sir Brewster je leta 1833 opisal krvavo rdečo sled z lečo usmerjenega svetlobnega žarka v sicer zeleni

raztopini klorofila. Podoben pojav je opazil tudi v raztopini fluorita.

Angleški astronom Sir John Herschel (1792-1871) ni poznal Brewsterjevoga dela, saj se je v tem času ukvarjal z astronomskimi meritvami v Južni Afriki, kjer ga je junija 1936 obiskal tudi Charles Darwin (1809-1882) med popotovanjem z ladjo Beagle. Herschel je leta 1845 na zatemnjenem ozadju opazil nebesno modro barvo osvetljene površine prozorne raztopine sulfata kinina v žveplovni kislini na mestu, kjer vstopa svetloba. Razklon na prizmi je pokazal, da modra površina ne vsebuje rdečega spektra, s turmalinom pa ni zasledil polarizacije.

Herschel je napačno trdil, da "disperzivno odbita" svetloba ne more več pomodriti površine druge raztopine. Če bi uporabil svetlobo večje intenzitete ali manj koncentrirano raztopino, bi opazil modro svetlobo tudi v njeni notranjosti.

Leta 1846 je Brewster z močno lečo koncentriral svetlobo v kozarcu s fluorescentno raztopino. Opisal je "notranjo disperzijo", ki naj bi nastala zaradi domnevnega dvojnega loma na kristalih znotraj raztopine. Njen poseben primer naj bi bil Herschlov "disperzivni odboj". Luminiscenco v notranjosti fluorita so poznali že prej (Wilde, 1843, 399; Brewster, 1848, 544; Pisko, 1861, 11, 15; Stokes, 1888, 277, 279; Kayser, 1908, 851-852; Kudrjavcev, 1948, 501).

Spor je razrešil šele Stokes, najmlajši sin irskega župnika. Študiral je v Cambridgeu, kjer je 54 let, vse do smrti, obdržal tudi Lucasovo katedro za matematiko, na kateri je nekoč predaval Newton. Med letoma 1854 in 1890 je kot tajnik in nato predsednik RS močno vplival na razvoj britanske fizike v viktorijanski dobi. Stokes je pred Royal Society v Londonu maja 1852 predaval o raziskovanju luminiscence z dvema novima metodama: luminiscenco filtrirane svetlobe je opazoval skozi komplementarni filter ali pa je luminifor osvetlil z barvami, razdeljenimi v spekter, tako da je lahko opazoval razliko med absorbirano in izsevano svetlobo pri poljubni valovni dolžini. "Zanimivo je bilo videti cev, ki nenadoma zažari po potopitvi v nevidne žarke," pri katerih je, dobesečno, "tema postala vidna" (Harvey, 1957, 397).

Stokes se je zavedal pomena svojega odkritja, zato je s svojo avtoriteto zanj uveljavil tudi novo ime: "Naklonjen sem h kovanju novega pojma in ga imenujem fluorescenco, po fluoritu, analogno nazivu opalescenca, izpeljanem iz naziva minerala." Novi naziv ni bil odvisen od domnevnega poteka sevanja v Brewsterjevi ali Herschlovi teoriji (Harvey, 1957, 397; Pisko, 1861, 21). Rezultate je strnil v "Stokesov zakon": lomnost (frekvenca) fluorescenčne svetlobe je vedno manjša od lomnosti svetlobe, ki jo je povzročila. Za raziskavo je dobil Rumfordovo medaljo. 27.6.1856 je pisal Herschlu: "Vpadni valovi oceana so analogni žarkom, ki izzovejo fluorescenco, ladje delcem snovi, vpliv ladij na valove pa absorpciji vpadnih žarkov, do katere vedno pride ob fluorescenci. Valovi, ki potujejo proč od ladje, pa so podobni fluorescenčni svetlobi."

\* Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehnične fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral pa leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani.

Stokes je domneval, da je sila v enostavnem razmerju z odmikom delca snovi od ravnovesne lege. Odvisna je od sestave etra in razdalje med molekulami snovi. Amplituda nihanja je neskončno majhna v primerjavi z velikostjo molekul. Nihajni čas molekul je drugačen od nihajnega časa delcev etra, frekvenca fluorescirane svetlobe pa se zniža zaradi zmanjšanja amplitude (Sekulić, 1871, 80).

Sprva je Stokes na temelju svoje teorije etra "menil, da pri iskanju vzroka notranje disperzije lahko takoj zavržemo vse domneve o odboju ali lomu vibracij svetlobnega etra na molekulah telesa. Povsem v nasprotju z dinamičnimi principi je videti domneva, da bi bil lahko tak vzrok dovolj za nastajanje vibracij ene periode iz vibracij druge (periode)". Pozneje je mnenje spremenil, ne da bi se odrekel svojemu zakonu (Stokes, 1888, 300, 301; Wilson, 1987, 112).



Slika 5. Geoge Gabriel Stokes

### Razprave o veljavnosti Stokesovega zakona

Angstrom je leta 1853 neodvisno od Stokesa opravil podobne poskuse, vendar je prišel do nasprotnih ugotovitev. Po njem bi morali atomi etra nihati celo oktavo više in bi imela fluorescenčna svetloba zato višjo frekvenco od absorbirane (1855, 164; Sekulić, 1871, 80; Kayser, 1908, 866).

Direktor zvezdarne v Mannheimu Wilhelm Eisenlohr (1799-1872) je leta 1854 raziskoval fluorescenco v Geisslerjevi cevi in Helmholtzovo kombiniranje barv fluorescenčne svetlobe po analogiji z zvokom. Fluorescenco je opisal kot interferenco modro-vijolične in ultravijolične svetlobe (Bohn, 1867, 390).

Emsmann je s poskusi leta 1859 in 1866 raziskoval "negativno fluorescenco", pri kateri naj bi se lomnost (frekvenca) povečala. Leta 1861 je primerjal fluorescenco s histerezo železa. Obsevanje naj bi povzročilo gibanje atomov v telesu ob posebni "koercitivni sili", ki vzdržuje vsakokratno urejenost atomov. Ta koercitivna sila naj bi bila v fosforescentnih telesih močna, v fluorescentnih pa šibka (Emsmann, 1861, 654; Bohn, 1867, 386; Lommel, 1871, 40; Rosenberger, 1890, 474-475).

C.K. Akin je leta 1864 postavil fluorit na zrak, kjer je še eno do dve minuti po obsevanju s toplotnimi žarki seval v vidni svetlobi. John Tyndall (1820-1893) je istega leta samostojno opazil "negativno fluorescenco" v gorišču konkavnega zrcala, na katerega je padala le infrardeča svetloba. Akin je pojav imenoval calcescenca po analogiji s fluorescenco, Tyndall pa caloriscenca. Bohn jima je leta 1865 pripisal prioriteto in tako sprožil spor med Emsmannom (1866, 352) in Akinom (1867, 561).

Bohn je leta 1867 objavil, da pride do povišanja lomnosti (frekvence) pri "negativni fluorescenci" zaradi povišanja temperature in ne z neposrednim vplivom absorbirane infrardeče svetlobe. Tako naj ne bi bilo "negativne fluorescenci" in izjem Stokesovega zakona. Akin je trditvam ugovarjal in obenem citiral Tyndallovo trditev, da "koncept pretvorbe toplotnih žarkov v svetlobne žarke nedvomno pripada Akinu glede na prvo objavo". Danes se zdi, da sta Akin in Tyndall zgolj dokazovala, da je mogoče telo z infrardečimi žarki dovolj segreti, da seva v vidnem območju, kar pa ne zadeva luminiscence (Akin, 1867, 556; Harvey, 1957, 399-400).

Naslednje leto je Bohn objavil, da je fluorescenca odvisna od narave teles in od barve absorbirane svetlobe. Intenziteta absorbirane svetlobe ne vpliva na fluorescenco, vpliva pa na toplotno sevanje segrevanega telesa. Fluorescenco je opisal kot "nepravilen lom s spremembo frekvence" (Bohn, 1868, 173, 170).

Lommel je leta 1871 razvil Eisenlohrve ideje v Stokesovi nasprotno teorijo fluorescenco, po kateri lahko zaradi resonance med absorbirano svetlobo in lastnim nihanjem telesa frekvenca izsevane svetlobe tudi naraste. Leta 1875 in 1876 je zapisal, da "vsak temen pas absorpcijskega spektra ustreza svetlemu pasu fluorescenčnega spektra v razstopini ... Tako lahko postavimo splošno veljavno trditev, da telo fluorescira s pomočjo tistih žarkov, ki jih je absorbiralo ... Fosforescenca je prav tako kot fluorescenca učinek absorbirane svetlobe" (Lommel, 1871, 32, 50; Harvey, 1957, 404).

Eugen von Lommel (1837-1899) je studiral v Münchnu in habilitiral na politehniku v Zürichu. Med leti 1868 in 1886 je bil profesor na univerzi v Erlangnu in se je tam poročil s hčerko slovitega filozofa Hegla (1770-1831). Na Münchenski univerzi je organiziral nov fizikalni institut in za štiri leta tja zvalil tudi prijatelja Boltzmann. Leta 1893 je izdal izjemno uspešen učbenik eksperimentalne fizike, katerega 26. (dopolnjena) izdaja je izšla 27 let pozneje. Po smrti je Lommelovo katedro v Münchnu zasedel Röntgen.

Hagenbach ni sprejel Lommelovih domnev in je podprl splošno veljavnost Stokesovega zakona (Hagenbach, 1872, 81). Domnevno "negativno fluorescenco" je povezoval z nečistočami in nehomogenostjo vpadne svetlobe.

Leta 1878 je Lommel opisal absorpcijo svetlobe kot trenje, podobno interakciji med molekulami etra in snovi. Zaradi nepoznavanja lastnosti domnevnega etra se mnogi raziskovalci še niso znali odločiti med Stokesovo in Eisenlohr-Lommelovo teorijo (Rosenberger, 1890, 479-480).

## Sodobna teorija Stokesovega zakona

Stokesov zakon z možnima izjemama je pojasnil šele Einstein leta 1905, ko mu je prisodil prvo mesto med tremi primeri uporabe fotona v kvantni teoriji (Einstein, 1905, 142). Danes "negativno fluorescenco" opišemo z anti-Stokesovimi črtami in upoštevamo Lommlerov popravek Stokesovega zakona, po katerem je maksimum spektra luminiscence premaknjen k nižjim frekvencam glede na maksimum absorbiranega spektra.

Leta 1887 so ugotovili, da sulfidi niso luminiforji v čistem stanju, temveč morajo vsebovati majhno količino aktivne kovine. Lenard je leta 1890 prvi opisal porazdelitev ionov aktivatorja v Sidotovi svetlici in drugih kristalnih gostiteljih. Ioni aktivatorja so obkroženi z ioni gostitelja in tvorijo luminiscenčna središča, kjer se odvija proces vzburjanja in sevanja. Ti centri ne smejo biti preblizu skupaj, zato je treba za visoko učinkovitost luminiforja v gostitelja vstaviti le sled aktivatorja. V letih 1917 in 1918 je objavil, da naj bi vsako skupino črt v spektru luminiforja povzročalo različno luminiscenčno središče. Dvajset let pozneje je Nikolaus Riehl s tehniške univerze v Münchnu kritiziral Lenardove domneve in skupaj z M. Schönom leta 1939 razvil temelje sodobnega kvantnomehanskega modela kristalnih luminiforjev, ki je bila že predstavljena v Vakuumistu (Mežnar, 1996, 14-15).

18.6.1903 je Lenard v Kielu objavil enačbo za intenzivnost katodoluminiscence v odvisnosti od števila in hitrosti pospeševanih elektronov. Istega leta je Arthur Wehnelt (1871-1944) opazil v Erlangnu, da enačba ne daje sprejemljivih napovedi pri nizkih pospeševalnih napetostih, saj naj bi Lenard meril s kar  $10^{-7}$ -krat manjšo gostoto elektronov od Wehneltove (Kayser, 1908, 700-701; Fritz, 1940, 117, 121). V letih 1938 in 1939 sta F. Seitz in Mott razvila elektronski konfiguracijski diagram, na osnovi katerega je bilo mogoče razumeti Stokesov zakon.

E. Becquerel je priznaval Stokesov zakon. Ni pa razlikoval med fluorescenco in fosforescenco tako kot Stokes, ki je iskal različna mehanizma razpada za obe, a ju leta 1885 na predavanju v Aberdeenu ni znal prepričljivo razmejiti. E. Becquerel za razliko od večine sodobnikov sploh ni sprejel Stokesovega izraza fluorescenca, čes da ne zaznamuje posebne vrste pojavov. E. Wiedemann je leta 1892 pritrdil E. Becquerelu z ugotovitvijo, da je mogoče s samim spreminjanjem temperature zvezno spremeniti fosforescenco v fluorescenco. Pred tem je E. Wiedemann leta 1888 napačno domneval, da je fluorescenca značilna za kapljevine, fosforescenca pa za trdnine. Takšno mnenje je prevladovalo še 20 let pozneje, saj razen Dewarjevega opisa fosforescence tekočega kisika iz leta 1894 (skoraj) niso poznali fosforescence kapljevina. Vavilov je leta 1925 z izboljšanim fosforoskopom opazoval nezvezen prehod fluorescences v fosforescenco v trdninah in zelo gostih tekočih raztopinah in tako kronal Stokesova prizadevanja. Objavil je, da je fosforescenca "prepovedan" in zato počasnejši prehod iz vzburjenega v osnovno stanje (Harvey, 1957, 353, 355, 390, 408; Kayser, 1908, 600, 646, 1025; Vavilov, 1925, 925). V sodobnih knjigah pogosto preberemo tudi Becquerelovo trditev, da sta fluorescenca in fosforescenca enak pojav različnega trajanja.

## 3 Raziskovanje luminiscenčnih snovi na Francoskem: Becquerelov fosforoskop

Podobno kot Heinrich je tudi E. Becquerel raziskoval pet vzrokov za fosforescenco:

1. navadno dviganje temperature, pogosto še pod rdečim žarom,
2. mehanski vplivi,
3. elektrika (v katodnih elektronkah),
4. spontana fosforescenca pri živalih in rastlinah,
5. sončna svetloba.

Zadnji, najbolj navadni vrsti fosforescence je pripisal še posebna pravila:

1. vijolični in ultravijolični žarki so najbolj učinkoviti,
2. luminiforji se razlikujejo po širini in legi spektrov,
3. barva fosforescence je značilna za luminifor in ni odvisna od barve absorbirane svetlobe,
4. absorbirana ultravijolična svetloba povzroči fosforescenco manjše lomnosti (frekvence),
5. če postavimo luminifor v temo, se bo fosforescenca oslabila, pri povišanju temperature pa se bo povečala,
6. povišanje temperature med obsevanjem s sončno svetlobo zmanjša poznejšo fosforescenco,
7. če spekter svetlobe pade na papir, prekrit s kalcijevim sulfidom, se poveča število njegovih črt, kot je ugotovil že Herschel leta 1842.

E. Becquerel je leta 1859 opisal prvo inačico fosforoskopa, ki sta ga sestavljali dve plošči z odprtinama za vpadno svetlobo in za opazovanje, vrtljivi okoli skupne osi. Odprtini si nista bila nasprotni, temveč zamaknjeni. Plošči je postavil v zatemnjen boben. Znotraj vmesnega prostora med ploščama v smeri zveznice obeh odprtin je postavil luminifor. Ob vrtenju ročice je preko zobatih koles zavrtel tudi plošči, da je lahko meril zakasnitev fosforescence do 1/2000 s po obsevanju s sončno svetlobo. Fosforoskop je izpopolnil E. Wiedemann, vendar tudi on ni mogel izmeriti zakasnitve pri fluorescenci (1888, 450-460; Kayser, 1908, 706-709; Harvey, 1957, 355). Z mehanskimi fosforoskopi je bilo mogoče meriti trajanje fosforescence le do  $10^{-5}$  s, danes pa uporabljamo fotoelektrične metode.

E. Becquerel je s fosforoskopom opravil prve kvalitativne meritve. Že leta 1859 je objavil, da fosforescenco sestavljajo zelo ozki pasovi ali črte nezveznega spektra. Njegove natančne meritve luminiscenčnih spektrov so botrovale mnogim odkritjem (Kayser, 1908, 647-648).

Leta 1860 je odkril, da intenziteta fosforescence eksponentno pada s časom. Po njegovi smrti je z meritvami nadaljeval njegov sin Henri leta 1891 in 1892, vzporedno pa je tudi E. Wiedemann objavljala nekoliko drugačne rezultate. Pomen odkrija so spoznali šele, ko je H. Becquerel med raziskovanjem fosforescence kalijevega uranovega sulfata leta 1896 odkril radioaktivnost, za katero velja enako pravilo. Poznejši raziskovalci so predlagali bolj zapletene zakone razpada,

saj se je izkazalo, da sevajo različne luminiscenčne črte z različnimi razpadnimi časi (Kayser, 1908, 717-718; Harvey, 1957, 356).

Leta 1888 je E.Wiedemann vpeljal naziv luminiscenca za vse "svetlobne pojave, ki jih ne povzročajo le vihanje temperature", kar je bila že uveljavljena definicija fosforescence (Wilde, 1843, 384; Wiedemann, 1888, 446, 448).

Več generacij pariške družine Becquerelov in Wiedemannov iz Nemčije se je zelo uspešno ukvarjalo s fizikalno kemijo. Poznejši profesor fizike na konservatoriju za mere in uteži E.Becquerel, sin predsednika pariške akademije Antoina Charlesa (1788-1878), je zaslovel že leta 1839 z opisom električnega toka, ki ga svetloba povzroča v nekaterih elektrolitih. Pojav je dobrih trideset let pozneje uporabil Ernst Werner von Siemens (1816-1896) pri iznajdbi prve selenske fotocelice.

Istega leta 1839 je E.Becquerel objavil raziskovanje prehoda svetlobe iskre skozi barvast zaslon skupaj z očetom in profesorjem pariške univerze Jeanom Baptistom Biotom (1774-1862), nasprotnikom Fresnelove optike, raziskovalcem polarizacije in dobitnikom Rumfordove medalje leta 1840. Takšni podporniki so devetnajstletnemu A.E.Becquerelu omogočili, da je v naslednjih 30 letih spravljal raziskovanje luminiscence na višjo eksperimentalno raven, ne da bi se poglobljajal v teorijo, ki se ji je izognil s frazo o "motnji molekulskega ravnovesja".

Eilhardt Ernst Gustav Wiedemann (1852-1928) je bil sin profesorja fizikalne kemije v Leipzigu Gustava Heinricha (1826-1899), ki mu je od leta 1879 pomagal tudi pri urejanju vodilne nemške fizikalne revije *Ann.Phys.* v Leipzigu. Njegova mati Clara Laura je bila leta 1827 rojena v znani družini kemikov Mitscherlichov in je prevajala Tyn-dallove knjige o fiziki in tudi o planinskih pohodih v Alpe. Tako je E. Wiedemann podobno kot Becquerel z raziskovanjem luminiscence nadaljeval družinsko tradicijo.

#### 4 SKLEP

Raziskovanje luminiscence je iz pogosto skrivnostnih alkimističnih navodil "dalo fizikom oči za opazovanje nevidne svetlobe". Morda je Stokes prezgodaj umrl, da bi povsem dojel, kako prav je imel, saj je (katodo)luminiscenca ob napredku fotografije najprej botrovala odkritjem novih kemijskih elementov, med leti 1895 in 1897 odkritju rentgenskih žarkov, radioaktivnosti, elektronov in Braunove elektronke, leta 1911 pa je omogočila tudi odkritje atomskega jedra.

Sodobna fizika je bila utemeljena na opazovanjih luminiscence. Sodobna industrija zabave in računalništva pa je tudi predvsem opazovanje luminiscenc, saj je "slika boljša od tisočeri besed", kot lahko preberemo na reklamah za britanski televizijski sprejemnik Pye iz leta 1939.

#### LITERATURA

- C.K. Akin iz fizikalnega kabineta akademije znanosti v Pešti, Über Calcescenz und Fluorescenz, *Ann. Phys.* **131** (1867) 554-561  
Erwiderung auf eine Notiz des Hrn. Emsmann, *Ann. Phys.* **131** (1867) 561-564
- Johann Conrad Bohn (1831-1897), profesor matematike na osrednjem gozdarskem zavodu v Aschaffenburgu, Über negative Fluorescenz und Phosphorescenz, *Ann. Phys.* **130** (1867) 367-392  
Über negative Fluorescenz, *Ann. Phys.* **133** (1868) 165-174
- Sir David Brewster (1781-1868), profesor fizike na univerzi St. Andrews, Über die Zerlegung und Zerstreuung des Lichts innerhalb starrer und flüssiger Körper, *Edinburgh Transactions*, **16** (1846) 111, ponatis v: *Ann. Phys.* **73** (1848) 531-548
- Albert Einstein (1879-1955), Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Ann. Phys.* **17** (1905) 132-148
- August Hugo Emsmann (1810-1889), profesor fizike na realki v Stettinu, Prioritätsansprüche in Betreff der negativen Fluorescenz oder Calorescenz oder Calcescenz, *Ann. Phys.* **129** (1866) 352  
Positive und negative Fluorescenz. Phosphorescenz und Fluorescenz, *Ann. Phys.* **114** (1861) 651-657  
Zur Geschichte der Fluorescenz, *Ann. Phys.* **133** (1868) 175-176
- Dipl.ing. Felix Fritz, Leuchtfarben, Geschichte, Herstellung, Eigenschaften und Anwendung, Berlin, 1940
- Jacob Eduard Hagenbach-Bischoff (r.1833), profesor fizike na univerzi v Baslu, Versuche über Fluorescenz, *Ann. Phys.* **146** (1872) 65-89, 232-257, 375-405, 508-
- Theodor Hoh, Zur Geschichte der Fluorescenz, *Ann. Phys.* **131** (1867) 658-569
- Heinrich Gustav Johannes Kayser (1853-1940), profesor fizike in direktor fizikalnega instituta na univerzi v Bonnu, Handbuch der Spectroskopie, IV Band, Leipzig, 1908. Poglavlje o fluorescenci na straneh 839-1214 je napisal Heinrich Konen, izredni profesor na univerzi v Münstru.
- Eugen Cornelius Joseph von Lommel (1837-1899), profesor fizike na univerzi v Erlagenu, Versuch einer Theorie der Fluorescenz, *Ann. Phys.* **117** (1862) 642-645  
Über Fluorescenz, *Ann. Phys.* **143** (1871) 26-51  
Über Fluorescenz, *Ann. Phys.* **159** (1876) 514-536  
Theorie der Absorption und Fluorescenz, *Ann. Phys.* **3** (1878) 251-283  
Theorie der Fluorescenz, *Ann. Phys.* **25** (1885) 12 strani  
Beobachtung über Phosphorescenz, *Ann. Phys.* **30** (1887) 14 strani  
Lehrbuch der Experimentalphysik, Leipzig, 1893, 26: 1920
- Lea Županc Mežnar, luminiscečne snovi (I. del), *Vakuumist*, **16/3** (1996) 14-19
- Franz Joseph Pisko (1827-1888), Lehrbuch der Physik für Unterrealschulen, Brün, 1859  
Die Fluorescenz des Lichtes, Izvestja dunajske realke Weiden, 1860, 40 str. Razširjena knjižna izdaja: Wien, 1861
- Dr. Ferdinand Rosenberger (r.1845), Die Geschichte der Physik in grundzügen mit synchronistischen Tabellen, III del, Braunschweig 1890
- Martin Sekulić (1833-1905), profesor na realki v Rakovcu, Fluorescencija i calcescencija, Rad Jugoslovenske akademije, Zagreb, **15** (1871) str.76-86
- Sir George Gabriel Stokes (1819-1903), Das Licht, predavanja v Aberdeenu 1883-1885, avtorizirani nemški prevod O. Dziobeka, Leipzig, 1888
- Sergej Ivanovič Vavilov (1891-1951) in Vadim Leonidovič Levšin (1896-1969) z instituta za fiziko in biofiziko v Moskvi, Die Beziehungen zwischen Fluorescenz und Phosphorescenz in festen und flüssigen Medien, *Zeitschrift für Physik* **35**(1926) 920-932
- Eilhardt Ernst Gustav Wiedemann (1852-1928), profesor fizike v Leipzigu in Erlangenu, Ueber Fluorescenz und Phosphorescenz, *Ann.Phys.* **34** (1888) 1. del, 446-463
- David B. Wilson. Kelvin and Stokes. Adam Higler, Bristol, 1987