

ZGODOVINA RAZISKOVANJA TEKOČIH KRISTALOV 2. DEL: UVELJAVITEV TEKOČIH KRISTALOV

Stanislav Južnič*

The History of Liquid Crystals Research Part 2: The Recognition of the Liquid Crystals

ABSTRACT

Liquid crystals as the intermediate or even new states of matter were discovered by biologists. In the second part of the article we describe the acceptance of the discovery among the group of researchers of scientific areas that were called physical chemists.

POVZETEK

Biologi so odkrili tekoče kristale kot vmesno ali celo novo stanje snovi. V drugem delu razprave opisujemo sprejem njihovega odkritja pri skupini raziskovalcev novih področij znanosti, ki so se imenovali fizikalni kemiki.

5.5 Uvod

Praški biolog Reinitzer je odkril (termotropne) tekoče kristale v sodelovanju z številnimi drugimi pomembnimi znanstveniki tedanje habsburške monarhije. Na njegovo odkritje je močno vplivala tudi tehnika mikroskopskega fizika Lehmana.

Lehmann je poznal Reinitzerjeva raziskovanja mešanic amorfne snovi pri jedkanju stekla že pred začetkom njunega dopisovanja¹. Ko je leta 1888 od nekaj več kot dve leti mlajšega Reinitzerja sprejel poročilo o novi fazi s presenetljivimi lastnostmi, je bil ravno sredi priprav za ureditev svojega poklicnega statusa. Naslednje leto se je zopet lotil raziskav in začel desetletja boj za priznanje novega stanja snovi. Nekateri fizikalni kemiki in kristalografi, povezani s *Zeitschrift für physikalische Chemie*, so mu nasprotovali tudi zaradi Lehmannovih kritik koncepta kristalne mreže, ki je bil (skoraj) splošno uveljavljen že dolgo pred Münchenskim poskusom s sipanjem rentgenskih žarkov leta 1912. Vendar je bil Lehmannov opis novega agregatnega stanja splošno sprejet in je večinoma v veljavi še danes kljub veliki spremembi statusa tekočih kristalov iz laboratorijske posebnosti v vodilno tehnologijo. Lehmannova teorija molekul in kristalov pa danes ni le ovržena, temveč predvsem povsem pozabljena.

5.6 Reinitzerjevo odkritje termotropnih tekočih kristalov v Pragi

Heintz² je med letoma 1850 in 1855 raziskoval taljenje stearina. Poročal je o »dvojnem tališču«, torej o fazi, ki so jo štiri desetletja pozneje imenovali tekoči kristal: »Stearin postane moten med 51 in 52 °C. Pri višji temperaturi kaže prelivajoče se barve, pri 58 °C pa je popolnoma neprozoren. Nad 62,5 °C je staljen in povsem bister.«

Kemik Duffy je leta 1854 potrdil Heintzova opazovanja in pojav pripisal dvema tališčema pri 52 °C in 62,5 °C ter dvema modifikacijama stearina³. Pozneje je Frankenheim objavil, da do dvojnega tališča maščob pride zato, ker se ena od njihovih komponent stali pred drugimi⁴. Podoben opis je pol stoletja pozneje Tammann uporabil za kritiko homogenosti tekočih kristalov.

Tudi drugi biologi so opazili modro barvo pri ohlajanju spojin, pridobljenih iz holesterola, ki bi jih po dotedanjih izkušnjah lahko pričakovali le pri kristalih. Leta 1846 sta Nemca L. Schwendler in E. Meissner pridobila holesterilklorid. Nista mogla izmeriti tališča, saj sta ugotovila, da preide v amorfno fazo. Podobno je opazil Nemeč O. Lindenmeyer leta 1863. Tudi Berthelot⁵ je imel leta 1859 težave pri določevanju tališča spojin holesterola, ki so se med poskusi vedle podobno kot smole. Lehmann je pol stoletja pozneje trdil, da sta že Berthelot v Parizu in E. Schulze v Zürichu opazila motno raztopino spojin holesterola, kar je Reinitzer upravičeno branil kot svoje odkritje⁶.

Nemški profesor P. Planer je leta 1861 na univerzi v Lvovu v habsburški Galiciji opazil živo vijolično barvo upadajoče in rumeno-rdečo barvo prepuščene svetlobe pri ohlajanju raztopine holesterilklorida. Barva je ob strditvi izgubila. Podoben pojav je opazil tudi Nemeč W. Loebisch (Löbisch) pri holesterilaminu v laboratoriju profesorja Glasevetza na Dunaju leta 1872. Pri taljenju holesterilamina in holesterilklorida je opazil modro-vijolično barvo, podobno fluorescenci žlahtnega opala. Latschinoff je poročal o modri, jeklu podobni barvi srebrove soli holesterolske kisline⁷.

* Dr. Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehniške fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani, kjer je leta 1999 tudi doktoriral.

1 Reinitzer, 1885b, 781; Lehmann, 1888, 781

2 Wilhelm Heinrich Heintz je bil rojen leta 1817 v Berlinu, kjer je po doktoratu postal privatni docent. Leta 1851 je postal izredni profesor in leta 1856 redni profesor kemije na univerzi v Halleju. V svojem času je bil najboljši poznavalec kemije maščob (Kelker, 1988, 5; Kelker, 1986, 244)

3 Collings, 1990, 27; Vill, 4; Lehmann, 1888, 196

4 Lehmann, 1888, 751

5 Reinitzer, 1888, 181; Reinitzer, 1908, 217. Parižan Pierre Eugène Marcelin Berthelot (1827-1907) je doktoriral z raziskovanjem naravnih maščob na Collège de France po študiju pri Jeanu Baptistu Andréju Dumasu (1800-1894), Henriju Victorju Regnaultu (1810-1878) in Antoinu Jéromu Balardu (1802-1876). Leta 1859 je Berthelot postal profesor organske kemije na *École Supérieure de Pharmacie*, leta 1865 pa je prešel na *Collège de France*. V 1860-ih letih je Berthelot začel raziskovati v elektrokemiji in je razvil kalorimeter za merjenje toplote kemijskih reakcij. Leta 1889 je nasledil Pasteurja kot stalni tajnik francoske Akademije znanosti, uspešno politično pot pa je kronal leta 1895 z enoletnim imenovanjem za zunanjega ministra. S svojimi sintezami je Berthelot povsem onemogočil teorijo Stahlove »vitalne sile«, ki jo je načela že leta 1828 sinteza sečnine Friedricha Wöhlerja (1800-1882) s trgovske šole v Berlinu.

6 Reinitzer, 1888, 172; Reinitzer, 1908, 217

7 Reinitzer, 1888, 172, 174, 176; Reinitzer, 1908, 216; Sonin, 1988, 7

Raziskovanje holesterola se je tudi na obeh univerzah v Pragi začelo že desetletje pred Reinitzerjevim odkritjem. Pri njem je sodelovalo več raziskovalcev. Leta 1878 sta Karl Preis in Raymann⁸ raziskovala spojine holesterola. Raymann je leta 1887 opazil »fluorescenčne« barve pri taljenju holesterilacetata in holesterilklorida. Vendar je napačno menil, da se obarva strjena snov in ne talina. Naslednje leto ga je popravil Reinitzer⁹, ki je raziskoval v isti stavbi, vendar kot član druge, nemške univerze v Pragi. S polarizacijskimi poskusi se je ukvarjal tudi Reinitzerjev sodelavec Mach¹⁰. Tako je odkrivanje (termotropnih) tekočih kristalov v poslopju obeh univerz v Pragi potekalo tudi ob odkritih nacionalnih nasprotjih.

Številni opisi so napovedovali tekoče kristale, pri katerih fazni prehod povzroči sprememba temperature. Vendar starejši dosežki niso bili dovolj za odkritje, ki se je posrečilo komaj Reinitzerju¹¹ pri raziskovanju biološke vloge holesterola v rastlinah. Reinitzer se je temeljito pripravil na objavo odkritja, saj se je zavedal njegove pomembnosti. Pregledal je vso literaturo o podobnih starejših raziskavah in o njih poročal Lehmannu, ki je tudi sam dobro poznal raziskovanja biologov¹². Povezava z Lehmannom je bila po eni strani logična glede na Lehmannove uspehe pri raziskovanju fizikalne izomerije. Imela pa je tudi politično ozadje, saj se je nemška univerza v Pragi raje povezovala z nemškimi univerzami kot z avstrijskimi ali celo slovanskimi.

Reinitzer je prve rezultate svojih raziskovanj spojin holesterola objavil leta 1886. Nadaljeval je poskuse Augusta Husemanna in Arnauda, ki sta preučevala spojini holesterola v korenju. Poleg temno rdečega karotena je Husemann raziskoval tudi slabo obarvano snov, ki jo je imenoval hidrokaroten¹³. Husemann, Arnaud, Frönde in drugi so predložili različne enačbe za sestavo teh snovi.



Slika 5: Friedrich Richardt Cornelius Reinitzer (1857-1927)

Poldrugo leto pozneje se je Reinitzer odločil, da bo poleg rdeče barve raziskal še druge lastnosti holesterolovih spojin. Za svoje poskuse in opazovanje pod polarizacijskim mikroskopom je potreboval večje količine materiala, zato draga predelava korenja v Husemannov hidrokaroten ni prišla v poštev. Ko je dokazal, da je hidrokaroten podoben (ali celo enak) veliko cenejšemu holesterolu, se je odločil za poskuse s holesterolom. Predstojnik G. A. Weiss je Reinitzerju priskrbel priprave za poskuse in literaturo, medtem ko so zelo čist holesterol, obdelan z alkoholom, zanj proizvedli v tovarni H. Trommsdorfa¹⁴. Na Reinitzerjevo prošnjo je von Zepharovich opravil kristalografske raziskave. Pri nekaterih spojinah holesterola je imel precej težav zaradi majhnih kristalov¹⁵.

- 8 Bohuslav Raymann je bil rojen leta 1852 v Sobotni na Češkem. Med letoma 1872-1874 je študiral na Politehniku v Pragi, med letoma 1874-1876 v Bonnu in nato do leta 1877 v *École d. Médecin* v Parizu. Po končanem študiju je postal profesor splošne kemije na češki univerzi v Pragi in član češke akademije. Svoja dela je objavjal tudi v Parizu. Neposredno je vplival na odkritje mlajšega Reinitzerja, ki je raziskoval v isti stavbi, čeprav na drugi univerzi. Rayman je umrl leta 1910 v Pragi
- 9 Reinitzer, 1888, 175; Reinitzer, 1908, 216
- 10 Ernst Mach (1838-1916) je bil češkega rodu, čeprav češko ni znal prav dobro. Njegovi starši so živeli v okolici Novega mesta. Med letoma 1867-1895 je poučeval na univerzi v Pragi. Februarja 1875 je Mach predstavil Dunanski akademiji polarizacijski aparat, ki so ga po njegovih navodilih sestavili v Frankfurtu. Ko se je leta 1879 univerza razdelila na nemški in češki del, je Mach postal prvi rektor nemške univerze v Pragi. Univerzi sta še naprej delovali v isti stavbi (Lindley, 2001, 130; Šubic, 1876, 132)
- 11 Odkritelj (termotropnih) tekočih kristalov Nемец Friedrich Richardt Cornelius Reinitzer (1857-1927) je bil rojen v Pragi. Leta 1877 je tam končal nemško Tehniško visoko šolo in postal asistent na katedri za zoologijo in botaniko Nemške univerze v Pragi in obenem docent nemške Tehniške visoke šole v Pragi. Njegovo raziskovanje je usmerjal Gustav Adolf Weiss (1837-1891), profesor obče botanike na nemški univerzi v Pragi od leta 1872, direktor Instituta za fiziologijo rastlin in vladni svetnik. Reinitzer je pri njem razvil postopek za meritev toplotne prevodnosti kristalov za preučevanje povezanosti toplotne prevodnosti drevesne skorje od njene strukture. Leta 1878 je prešel v laboratorij za analitično kemijo, ki ga je vodil Gintl. Štiri leta pozneje se je Reinitzer vrnil k Weissu kot asistent na Institutu za fiziologijo rastlin, kjer je tudi odkril (termotropne) tekoče kristale (Janko, Tešinská, 1989, 65-78). Obenem je predaval mikroskopsko tehniko in gradiva na nemški Tehniški visoki šoli v Pragi. Med letoma 1895-1901 je bil profesor botanike, organskih surovin in mikroskopske tehnike na Tehniški visoki šoli v Gradcu, kjer je sodeloval tudi v botaničnem institutu. V začetku 20. stoletja je prenehal z raziskovanjem tekočih kristalov, čeprav je še leta 1908 sodeloval pri polemiki glede svojih in Lehmannovih zaslug pri odkritju. Reinitzerjevo raziskovanje tekočih kristalov je v Pragi nadaljeval profesor Rotmund, specialist za fizikalno kemijo emulzij, in za njim Zoher. Pred Reinitzerjem je v Pragi poučeval profesor mineralogije Franz Zippe, ki je bil leta 1791 rojen v Falkenau na Češkem in je pozneje poučeval na Dunajski univerzi (Sonin, 1988, 5-6, 108, 113, 161; Reinitzer, 1908, 216, 223). Raziskovalci z nemške Tehniške visoke šole v Pragi so veliko prispevali k raziskovanju razelektrov v vakuumu, predvsem Johann Puluj (1845-1918), ki je v 1880-ih postal profesor fizike in elektrotehnike na nemški Tehniški visoki šoli v Pragi. Pozneje je v Pragi pod Machovim vplivom raziskoval predvsem nihanje. Albert Einstein (1879-1955) je bil profesor na nemški univerzi v Pragi v šolskem letu 1911/12. Pomembni kristalografi so bili tudi Čehi v Pragi, med njimi je Jan (Johann) Krejčí (1825-1887) poučeval naravoslovje na višji realki v Pragi kot kustos mineraloške zbirke v češkem muzeju, pozneje pa je postal profesor na češki politehniku v Pragi. Leta 1856 je objavil teorijo molekulske sestave kristalov, ki naj bi se bolj prilagala amorfni telesom od Haüyjeve (Krejčí, 1856, 10, 15.)
- 12 Reinitzer, 1888, 168-174; Lehmann, 1889b, 482-532; Kelker, 1988, 5. Torej Reinitzerjevemu uspehu ni botrovalo le »ostro oko«, kot je zapisal de Gennes ob sedemdesetletnici Saupeja (Saupe, 1998, XV)
- 13 *Hydrocarotin* (Reinitzer, 1886, 719; Reinitzer, 1888, 167)
- 14 Reinitzer, 1886, 730; Reinitzer, 1888, 168; Reinitzer, 1908, 215

Reinitzer je pri holesterilbenzoatu in drugih estrih holesterola opazil dve različni tališči, kar so za liotropne snovi objavili že pred njim. Za odkritelja je obveljal tudi zato, ker je z nenavadnim vedenjem bioloških spojin prvi seznanil fizike. 14. 3. 1888 je poslal dva preparata na vpogled Lehmannu, katerega raziskovanje fizikalne izomerije je poznal¹⁶. V spremnem pismu, dolgem 16 rokopisnih strani, se je skliceval na nasvet starejšega sodelavca von Zepharovicha, ki je že več let sodeloval z Lehmannom. Pošiljal mu je svoje preparate, da je Lehmann izmeril tališča¹⁷:

»Po predlogu dr. V. Zepharovicha si Vas drznem prositi, da podrobneje preučite fizikalno izomerijo dveh priloženih snovi. Obe snovi kažeta tako presenetljive in čudovite pojave, zato srčno upam, da bodo tudi Vas v veliki meri zanimala... Snov ima dva tališči, če se smem izraziti na ta način. Pri 145,5 °C se stopi v motno, vendar povsem tekočo talino, ki pri 178,5 °C nenadoma postane povsem bistra. Pri ohlajanju se pojavijo vijolični in modri pojavi, ki nato hitro izginejo in pustijo motno, toda še vedno tekočo snov. Pri nadaljnjem ohlajanju se vijolična in modra barva ponovno pojavita, takoj potem pa se snov strdi v belo kristalno maso. Motnost ob ohlajanju povzročajo zvezdasto oblikovani skupki. Motnosti pri taljenju trdnine ne povzročajo kristali, temveč kapljevina, ki tvori oljnate proge v talini¹⁸.«

Reinitzer je motno stanje, oljnate proge in polarizacijo v pismu 14. 3. izrecno pripisal tekočini in ne kristalu, kar je dve desetletji pozneje razglasil za svojo prvo omembo tekočega kristala¹⁹. Dva tedna po prejemu Reinitzerjevega pisma mu je Lehmann pojasnil, da njegov zvezdasti kristalni agregat ni kristal, temveč kapljevina, ki le pri visokih povečavah kaže ostro strukturo. Reinitzer mu je 2.4. odgovoril, da se pri temperaturah blizu tališča kristalni lističi med seboj zgnetejo in razpadejo na zelo majhne delce, ki se mešajo s tekočino. Reinitzer je skozi mikroskop opazil, da so holesterol in njegovi derivati blizu tališča v židkem smolastem stanju.

Lehmann je že 4.4.1888 poročal o snoveh, ki jih imel čas raziskati med letnim semestrom. Z Reinitzerjem sta imela različne poglede na polarizacijske lastnosti snovi, oba pa sta bila zelo blizu ideji tekočih kristalov. 10.4. je Reinitzer poslal skice svojih opazovanj oljnatih črt kristalnih agregatov. Menil je, da so se med ohlajevanjem ob obodu strdile in kot trdno telo plavale v izotropni tekočini. Kljub Reinitzerjevi opombi na koncu pisma Lehmann sprva ni imel Reinitzerjevih preparatov za kemijsko enotne snovi, čeprav je pozneje leta 1908 v sporu za prioriteto trdil nasprotno. Reinitzer je poslal Lehmannu na vpogled tudi svojo razpravo²⁰ o meritvah v Gintlovem laboratoriju.

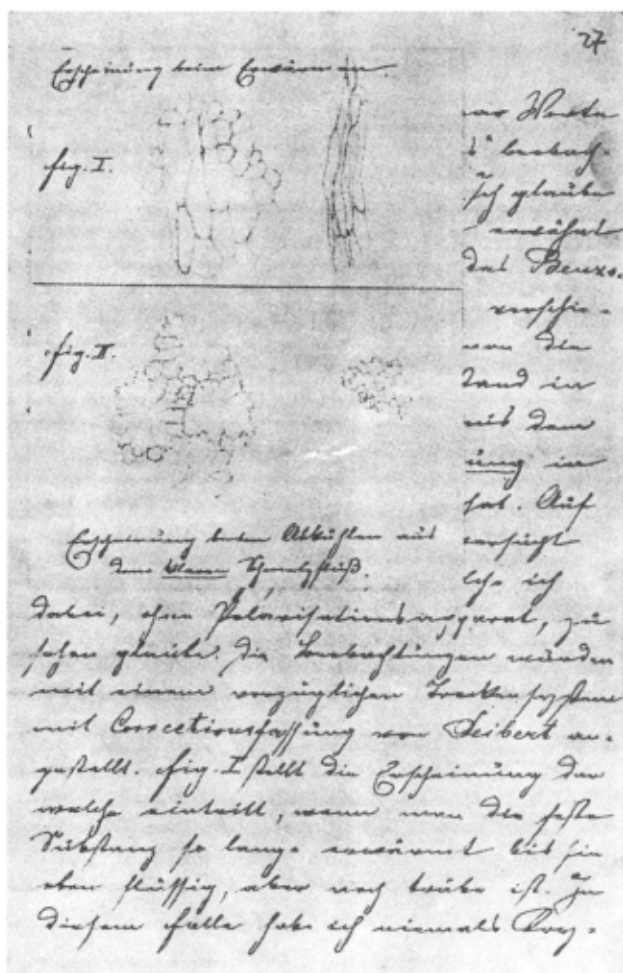
15 Reinitzer, 1888, 175, 177, 181

16 Reinitzer, 1888, 176; 184. Otto Lehmann (1855-1922) je bil rojen v mestu Konstanz v družini Franca Xaverja Lehmanna, ki je bil rojen v istem kraju leta 1823. Franc Xaver je bil učitelj na licejih v mestih Konstanz, Kreisschulle in Offenburg. Leta 1876 je postal direktor šolsko-učiteljskega seminarja v Ettligen in deželi Baden. Pozneje je postal učitelj matematike in prirodoslovja v Freiburgu. Objavil je več del, tudi o zgodovini Arhimedove spirale. Sinu Ottu je že zelo zgodaj podaril mikroskop. Mikroskopiranja se je tako dobro naučil po starem Ledermüllerjevem priročniku, da ga ni dosegal nihče med fiziki njegove dobe. Otto je študiral v Strasbourgu med letoma 1872-1876. Mesto je bilo po pravkar končani vojni priključeno Nemčiji, zato so na tamkajšnje univerze nastavili najboljše profesorje. Lehmann je eksperimentalne fizike učil Kundt, petrografije Rosenbuch, kemije pa med letoma 1872-1875 Jochann Friedrich Adolf Baeyer (1835-1917), sloviti organski kemik iz Berlina. Baeyer je leta 1875 odšel v München za naslednika Justusa Liebiga. Leta 1885 je bil povišan v plemiški stan. Leta 1905 je prejel Nobelovo nagrado iz kemije za raziskovanje sinteze barv in hidroaromatičnih spojin, predvsem za raziskovanje indiga. V Kundtovem laboratoriju, kjer sta leta 1874 asistiral Röntgen in tudi Puluj, je Lehmann gotovo delal poskuse z dvolomnimi snovmi, med njimi tudi s tekočinami in trdnimi snovmi pod visokim tlakom. Kot profesor fizike in elektrotehnike na nemški Tehniški visoki šoli v Pragi je Puluj pozneje pomagal sodelavcu Reinitzerju, da je začel sodelovati s Pulujevimi nekdanjim študentom Lehmannom. Kristalografijo je Lehmannu predaval urednik *Zeitschrift für Kristallographie* Paul Ritter von Groth (1843-1927), ki so ga pogosto imenovali »kralj evropske kristalografije.« Leta 1877 je Lehmann pri Grothu obrnil disertacijo o fizikalni izomeriji v kristalih. 16.9.1876 je postal suplent na Gimnaziji velikega vojvode v Freiburgu. 1.4.1877 je začel s šestletnim poučevanjem fizike, matematike in kemije na srednji šoli v mestu Mühlhausen v Alzaciji, kjer je moral skrbeti celo za šolsko prehrano. 1.10.1883 je bil izvoljen za docenta fizike na Tehniški šoli v Aachnu in asistenta Adolpha Wüllnerja, ki je bil pred tem med letoma 1865-1868 Plückerjev privatni docent v Bonnu. 21.7.1885 je Lehmann postal izredni profesor v Aachnu. Kmalu po prejemu Reinitzerjevega pisma je Lehmann spremenil delovno mesto in postal 1.10.1888 izredni profesor za elektrotehniko na Kraljevi politehniko v Dresdnu. 1.4.1889 je kot redni profesor prevzel fizikalni inštitut in katedro na Visoki tehniški šoli v Karlsruhe, ki jo je med letoma 1882-1885 zasedal Karl Ferdinand Braun (1850-1918) in za njim Heinrich Hertz. Tako je v Karlsruhe neposredno za Hertzovim odkritjem elektromagnetnih valov sledilo še odkritje tekočih kristalov. Lehmannu je tekoče kristale nabavljali tudi sodelavec profesor Scholl iz Karlsruhe. Leta 1897/98 je Lehmann sodeloval pri utemeljitvi elektrotehniškega inštituta v Karlsruhe, generator za elektriko pa je dal postaviti tudi za svojo počitniško hišico v Hundsbachu. Leta 1900/1901 je postal rektor v Karlsruhe, leta 1902 pa je postal tajni svetnik. V Mühlhausnu in Aachnu je začel objavljati tudi razprave o razelektritvah, ki jih je med letoma 1891-1904 v Karlsruheju dopolnil z več kot desetimi predvsem eksperimentalnimi raziskavami o katodnih elektronkah. Kljub J. J. Thomsonovem odkritju leta 1897 Lehmann ni uporabljal naziva »korpuskula« ali »elektron«. S poskusi v elektronkah, dolgih 70 cm in širokih 30 cm, z različnimi plini je dokazal, da ne Faradayeva »disruptivna« teorija ne Hittorffova elektrolitična teorija »prstanu podobne« razelektritve ne napovedujeta pravilno prevajanja elektrike pri zelo nizkih tlakih (Lehmann, 1904b, 290, 297, 298), ko je treba upoštevati tudi vpliv elektromagnetnega polja. Lehmannu je bila bližje domneva, da katodni prostor v elektronki slabo prevaja zaradi pomanjkanja ionov, kot je trdil Johannes Stark (1874-1957) iz Göttingena leta 1902. Leta 1919 je Stark dobil Nobelovo nagrado. Lehmann je bil prav tako predlagan za Nobelovo nagrado leta 1913 in dvakrat med letoma 1916-1919, vendar je ni dobil. Leta 1909 je dobil nagrado Sorbonne za eksperimentalno delo in je imel ob tej priložnosti tam tudi govor. Leta 1919 je bil upokojen kot dvorni svetnik po tridesetih letih poučevanja, v katerih je pouk popestril predvsem s številnimi poskusi, ki so jih študentje hudomušno imenovali »Lehmannov cirkus«. Umrli je v Karlsruheju. Njegov način dela je izključeval skupinsko delo. Zato ni imel študentov, ki bi sledili idejam njegove »šole«; morda z izjemo Gustava A. F. W. I. Mieja, ki je bil rojen v Rostocku leta 1868 in je doktoriral v Heidelbergu leta 1891. Med letoma 1905-1916 je bil Mie profesor fizike na univerzi v Greifswandu, med letoma 1917-1924 profesor eksperimentalne fizike na univerzi v Halleju, pozneje pa je predaval v Freiburgu. Lehmann je sodeloval tudi z naravoslovcem Haeckelom, katerega dela je našel že v očetovi knjižnici. Haeckel in Lehmann sta si pogosto dopisovala med letoma 1917-1919. Quincke je bil Haeckelov vrstnik in družinski mladostni prijatelj, kljub temu pa ga je Lehmann imel za enega svojih poglavitnih nasprotnikov (Lehmann, 1904a, 27; Lehmann, 1905b, 790; Lehmann 1906c, 11; Sonin, 1988, 10-12, 19-20, 30, 115; Kelker, 1973, 11; Knoll, Kelker, 1988, 2, 7, 10, 16, 19; Kelker, 1988, 5, 10, 15, 20-21, 35)

17 Kelker, 1988, 2, 21; Lehmann, 1888, 365. Victor Leopold von Zepharovich (Zepharowich, 1830-1890) je bil rojen na Dunaju. Med letoma 1852-1857 je bil področni državni geolog na Dunaju, med letoma 1857-1861 pa profesor mineralogije v Krakovu. Do leta 1864 je poučeval na univerzi v Gradcu, nato pa je postal profesor mineralogije na nemški univerzi v Pragi in dvorni svetnik. Leta 1865 je postal dopisni član Dunajske akademije. Raziskoval je tudi minerale iz idrijskega rudnika. V letih 1859, 1873 in (posmrtno) 1891 je izdal tri dele mineraloškega leksikona Avstrije

18 Kelker, 1973, 7; Lehmann, 1904a, 25-26

19 Reinitzer, 1908, 217



Slika 6: Reinitzerjeve skice tekočih kristalov v pismu Lehmannu 10.4.1888 (Knoll, Kelker, 1988, 59)

lavcev se je Reinitzer v razpravi skliceval tudi na Lehmannovo raziskovanje barv z mikroskopom, ki jih je medtem prejel po pošti²¹. Von Zepharovichova kristalografska in Lehmannova mikroskopska opazovanja so pri benzoatu in acetatu holesterola dokazovala obstoj treh modifikacij, ki so potrjevala fizikalno izomerijo²². Ob strani pisma je Reinitzer dodal: »Ta tekočina ni izotropna, temveč kristalna (pseudoizotropna) in enaka drugim kristalom, razen da je tekoča in ne trdna²³«.

Lehmann je tri dni pozneje odpisal, da ni še nikoli opazil tako lepih pravokotnih ostrih oblik kot na Reinitzerjevih skicah. Odkril je tudi krožno polarizacijo svetlobe, prepuščene skozi tekoči kristal ali odbite od njega. Največ pomislov je imel glede priprave kristala za razločno opazovanje meje med stanjema. »Trdna snov na steklu je bila kristal, vendar si ob njej moral pomisliti na tekočino,« je poročal, čeprav je ni še nikoli videl v značilni kroglasti obliki kapljice. Lehmann je Reinitzerjeve snovi pokazal tudi svojemu predstojniku, tajnemu svetniku Wüllnerju, ki problemov prav tako ni znal

Tabela 2: Pregled dopisovanja med Reinitzerjem in Lehmannom, ki je utemeljilo znanost o tekočih kristalih

Avtor pisma	Odposlano dne:	Mesec	Leto
Reinitzer	14	3	1888
Lehmann	27	3	1888
Reinitzer	2	4	1888
Lehmann	4	4	1888
Reinitzer	10	4	1888
Lehmann	13	4	1888
Reinitzer	20	4	1888
Lehmann	24	4	1888
Predstavitev Reinitzerjeve razprave	3	5	1888
Lehmann	20	8	1889

pojasniti²⁴. Lehmann se sprva še ni mogel znebiti tradicionalnega opisa kristala in sprejeti ideje o tekočih kristalih, čeprav naj bi naziv tekoči kristal že uporabljal v pogovorih z Wüllnerjem in Ambronnom. Lehmannova starejša študentska raziskovanja srebrovega jodida niso bila dovolj blizu idejam tekočih kristalov. Zato je bilo raziskovanje Reinitzerjevih spojin za Lehmannu povsem nekaj novega, čeprav je leta 1908 trdil nasprotno²⁵.

Reinitzer je 20.4. poročal Lehmannu o novih opazovanjih. Odkril je, da se holesterilbenzoat v zelo številnih raztopinah tako razkroji, da postane rahlo rumenkast. V talini postane židek in je ob strditvi nagnjen k steklasti obliki. Pri hitri ohladitvi se strdi v obliki zvezde s trajnimi modrimi črtami. Videti je kot kristal sredi raztopine. V drugi skici, priloženi pismu, je Reinitzer narisal mnogo lepih kotov in krajcev, ki so bili tako ostro razvidni, da v njihov obstoj ni bilo mogoče dvomiti. Da bi z Lehmannom zagotovo opazovala enak preparat, mu je Reinitzer poslal nosilec s snovjo in ga posebej opozoril na proge olja.

Lehmann mu je odgovoril štiri dni pozneje in zagotovil, da je gibljivost snovi tolikšna, da jo je treba imeti za tekočino. Posebno izrazite pojave je opazil v mešanici holesterilbenzoata in hidrokarotenbenzoata. Lahko je opazoval ves prehod med kristalnimi lističi in tekočimi progami, tako da je: »...nemogoče postalo mogoče. Wüllner je menil, da snov kaže povsem grozljiv vtis. In tudi meni se tako zdi.«

V pismih sta Reinitzer in Lehmann seveda veliko svobodneje pripovedovala o odkritju nove faze snovi kot v objavljenih delih. Oba sta se že močno približala poznejšemu pojmovanju tekočega kristala. V tisku si seveda nista upala novih snovi opisati kot »zdrob (Griess), sestavljen iz zelo mehkih kristalov, ki kažejo fizikalno izomerijo«. Dopisovanje med Reinitzerjem in

20 Knoll, Kelker, 1988, 58

21 Reinitzer, 1888, 187

22 Reinitzer, 1888, 177, 182

23 Knoll, Kelker, 1988, 61

24 Reinitzer, 1908, 217-220; Lehmann, 1910, 575

25 Reinitzer, 1908, 220; Knoll, Kelker, 1988, 63, 70

Lehmannom je pravzaprav utemeljilo znanost o tekočih kristalih, čeprav so še obstajale možnosti, da so nenavadne lastnosti Reinitzerjevih snovi povezane z biološkimi pojavi (tabela 2)²⁶.

Korespondenca je bila prekinjena zaradi Lemannovih menjav delovnega mesta. Dva tedna pozneje po Lehmannovem pismu je 3.5.1888 dvorni svetnik G. A. Weiss predstavil Reinitzerjevo razpravo Dunajski akademiji.

S citati iz pisem je Reinitzer dve desetletji pozneje prepričal znanstveno srenjo, da so bile njegove snovi za Lehmann nekaj popolnoma novega. Do ideje tekočih kristalov se ni mogel dokopati s svojim starim opazovanjem srebrovega jodida, kot sta dvajset let po odkritju trdila tako Lehmann kot Vorländer²⁷.

Reinitzer je svoje poznanje kristalov in bioloških raztopin črpal iz izkušenj svojih predhodnikov, še posebno v habsburški monarhiji. Kljub številnim različnim poročilom o molekulski masi holesterola je bil prepričan, da gre v vseh raziskovanih živalskih tkivih za eno in isto snov, ki kaže izomerijo²⁸.

Molekulska masa holesterola še ni bila natančno določena. Prav tako niso bile znane sestavine njegove molekule in tudi ne osnovna struktura kristala. Gmelinovo²⁹ domnevo je Reinitzer nadomestil z bolj zapleteno enačbo in v Gintlovem³⁰ inštitutu po šestih mesecih raziskovanj prvi pravilno določil kemijsko sestavo holesterola³¹.

Reinitzer je postal pozoren na lastnosti holerilbenzoata, katerega kemijske sestave še ni poznal. Holesterol se je vedel podobno kot Heintzov stearin: pri 145,5°C se je stalil v motno kapljevino, ki je pri 178,5°C postala prozorna³². Kljub temu pa Reinitzer ni nikoli omenjal Heintzovega dela, čeprav je tako leta 1888 kot dve desetletji pozneje navajal dosežke vseh svojih pomembnejših predhodnikov. Heintzova in Duffujeva opazovanja stearina iz leta 1854 ter številna druga opazovanja večkratnih tališč je Lehmann povzel še preden ga je Reinitzer obvestil o svojem odkritju³³: »Pri ohlajanju staljenega holesterilacetata pred strditvijo (in ne po njej, kot je trdil Raymann) dobimo občudovanja vreden pojav zelo lepih barv. Ta pojav lahko dobimo

tudi v dolgih kapilarah, ki jih uporabljamo za določanje temperature tališča, vendar je lepše, če snov talimo med steklom. Pri opazovanju odbite svetlobe se ponekod pojavlja živa smaragdna barva, ki se hitro razširi čez ves vzorec in nato preide v modro-zeleno, rumeno, oranžno, rdečo in, končno, v temno rdečo³⁴«.

Reinitzer je opazil, da imata holesterilacetat in holesterilbenzoat po tri modifikacije (faze), pri drugih spojinah holesterola pa je opazil le po dve. Holesterilbenzoat je v drugi fazi tvoril »igle ali ozke romboidne lističe na površini³⁵«. To je bil prvi objavljeni opis termotropnega nematskega tekočega kristala.

Že štiri desetletja pred Reinitzerjem so raziskovalci poročali, da se pri ohlajanju prozorne kapljevine za kratek čas pojavi modra barva pri temperaturi faznega prehoda v motno kapljevino; tik pred temperaturo prehoda v trden kristal pa so opazili modro-vijolično barvo. Reinitzer je poročal o holesterilbenzoatu³⁶:

»Z ohlajanjem povsem raztopljene spojine dobimo vijoličasto-modro barvo po celotni masi snovi ..., ki ob nadaljnjem ohlajanju postane motna. Nadalje kažejo barvite snovi, kot je acetat, tudi kromatično polarizacijo, vendar ta ni tako močna in nima veliko barv.«

Barvni pojavi, ki jih je prebral v poročilih predhodnikov in jih je pri spojinah holesterola opazil tudi sam, so Reinitzerja prepričali, da ima opraviti z izomerijo, s katero se je tisti čas ukvarjal predvsem Lehmann³⁷.

Leta 1906 je Lehmann objavil svoj opis »modre faze«. Stoletje po Reinitzerju so »modro fazo« temeljito raziskali in ugotovili, da gre za tri različne realne faze v zelo ozkem temperaturnem področju med izotropno in holesterično fazo³⁸.

5.7. Lehmann v Aachnu, Dresdnu in Karlsruheju: raziskovanje tekočih kristalov znotraj nove veje znanosti, fizikalne kemije

Nekdanji Kundtov³⁹ učenec Lehmann je bil pravi naslov za Reinitzerjevo odkritje, saj je do tedaj objavil že okoli 20 del o fizikalni izomeriji in mikroskopiranju kris-

26 Lehmann, pismo Reintzerju 24.4.1888; Knoll, Kelker, 1988, 65; Kelker, 1988, 21; Donald, Windle, 1992, 1; Vill, 7.

27 Reinitzer, 1908, 220-222

28 Reinitzer, 1888, 173

29 L. Gmelin, 1848

30 Wilhelm Friederich Gintl (1843-1908) je bil asistent Ferdinanda Lippicha (1838-1913), profesorja mehanike na visoki šoli v Pragi med letoma 1874-1913. Lippich je 29.3.1870 objavil razpravo o spektralnih črtah plina v Geisslerjevi cevi. Gintl je bil med letoma 1867-1870 privatni docent na nemški univerzi v Pragi, nato pa od leta 1870 redni profesor kemije na Tehniški visoki šoli v Pragi. Leta 1880 je Gintl kritiziral Crookesovo idejo o katodnih žarkih kot četrtem agregatnem stanju snovi

31 Reinitzer je kemijsko enačbo »cholesterina« zapisal kot C₂₇H₄₆O namesto danes običajnega C₂₇H₄₆OH (Reinitzer, 1888, 168, 171; Demus, 1988, 46; Kelker, 1988, 2-3; Sonin, 1988, 7). Strukturno enačbo holesterola sta ugotovila šele Windaus in Z. Hoppe-Seylors po meritvah z rentgenskimi žarki 44 let pozneje, leta 1932. Adolf Windaus je leta 1928 prejel Nobelovo nagrado za tri desetletja raziskovanja sestave stearinov in njihove povezanosti z vitamini

32 Pravilni temperaturi sta 146,6°C in 180,6°C

33 Collings, 1990, 28; Lehmann, 1888, 196, 749-751; 687-695; Sonin, 1988, 8

34 Reinitzer, 1888, 175

35 Reinitzer, 1888, 183

36 Reinitzer, 1888, 183-184; Reinitzer, pismo Lehmannu 10.4.1888; Knoll, Kelker, 1988, 65

37 Reinitzer, 1888, 176

38 Dubois, 1988, 151

39 Leta 1884 je August Adolf Kundt (1839-1894) objavil meritve vrtenja polarizacijske ravnine svetlobe po prehodu skozi tanke feromagnetne plasti Fe in Ni (Grünberg, 2001, 31, Kelker, 1988, 10) v času, ko je tudi Lehmann raziskoval polarizacijo. Kundta je pozneje leta 1886 presenetilo odkritje dvojnega loma svetlobe odbite na meji med kovino in stekleno podlago zrcala. Problem je rešil tako, da je tanko plast opisal kot kristalno elastično membrano, ki je neenakomerno napeta zaradi naboja razpršenih delcev in zato povzroča dvojni lom (Bunshah, 1994, 939).

talov⁴⁰. Prav tedaj je v prvem delu svoje fizike molekul z difuzijo opisal tudi z domnevno neposrednim opazovanjem molekul, ki ga je leta 1827 opisal angleški zdravnik in botanik Robert Brown (1773-1858)⁴¹. Brownovo gibanje je bilo po Hookovih odkritjih naslednji resnejši prodor mikroskopskih opazovanj biologov v fiziko, pred Reinitzerjevim odkritjem tekočih kristalov.

Lehmann je s svojo tehniko mikroskopiranja, poznavanjem kristalografije in poročili skoraj brez enačb⁴² med vsemi tedanjimi fiziki vlival največ zaupanja biologom, ki seveda niso radi brali razprav, polnih višje matematike. Med prvimi si je pri mikroskopiranju pomagal tudi s fotografijo, ki je pozneje omogočila velikanski uspeh drugemu Kundtovemu učencu Röntgenu. Tudi pozneje je Lehmann sledil sodobnim tehnikam, tako da sta leta 1920 skupaj z Liesegangom prvič predvajala kinoprojekcijo prehoda kristala v fazo tekočega kristala⁴³. Že pred sodelovanjem z Reinitzerjem je Lehmann domneval, da ima tudi srebrov jodid fazo, značilno za snovi, pozneje imenovane tekoči kristali, kar se je izkazalo za napako. Leta 1867 je Fizeau v sodelovanju s Saint-Claire Devilleom⁴⁴ za opis amorfne modifikacije srebrovega jodida uporabil model, podoben Forbesovim ledenikom. Srebrov jodid je Lehmannov poznejši učitelj Kundt raziskoval že leta 1864, vendar ni bil pozoren na njegove polarizacijske lastnosti, podobno kot pozneje V. von Ebner na Dunajski akademiji. Amorfne oblike srebrovega jodida v bližini tališča je Lehmann že leta 1884 spodbujal z dodajanjem posebnih snovi, ki so jih tudi pozneje uporabljali za izdelavo tekočih kristalov⁴⁵.

Lehmann je prvi segreval in ohlajal tekoče kristale pod mikroskopom s pretokom zraka, pri višjih temperaturah z zbiralnikom vrelega olja. Kristale je preučeval v električnem polju. Izumil je tudi kontaktno pripravo za hkratno opazovanje različnih stadijev mešanja dveh čistih snovi, ki jo je pozneje dopolnil H. Sackmann v Halleju. Na številnih demonstracijskih predavanjih je sliko z mikroskopa preslikal tudi na zaslon. »Kristalizacijske mikroskope« z Lehmannovimi izboljšavami sta sestavljali podjetji Voigt U. Hochgesang v Göttingenu in Carl Zeiss v Jeni⁴⁶.

Lehmann je našel veliko nazivov za nove pojme. Poldrugo leto dni po prvem Reinitzerjevem pismu mu je Lehmann iz Karlsruheja pisal v Prago 20.8.1889, potem ko se mu je opravičil za prekinitev dopisovanja zaradi dela ob dvakratni spremembi delovnega mesta⁴⁷: »... moji novi rezultati potrjujejo vaše (prej)

zapisano stališče, da zdrob (Griess) sestavljajo zelo mehki kristali, ki jih je treba imeti za fizikalno izomerno modifikacijo snovi. Je absolutno homogena in v njej ni prisotna druga tekočina, kot ste sprva domnevali... Za fizike je zelo zanimivo, da obstajajo kristali, ki so tako mehki, da jih lahko skoraj imenujemo tekočino.«

Lehmann je uporabil naziv »fliessender Kristall« in »leicht flüssige kristallinische Substanz« v razpravi, ki jo je poslal v objavo 30.8.1889. V njej se je povsem zavedal težav, ki ga čakajo: »Kristali, ki tečejo! Ali ni to nasprotje samo po sebi - se bo spraševal bralec tega naslova⁴⁸...«

Nato je Lehmann dokazoval, da so amorfne trdne snovi pravzaprav tekoče, posebej pa je opisal tudi deformacijo mehkejših kristalov in mikroskopske kristale, ki se sami po sebi upognejo brez zunanje sile, tako kot kofein. Deformacije je povzročal tudi z velikimi tlaki v vijačni stiskalnici in jih opazoval z mikroskopom⁴⁹.

V nadaljevalju je Lehmann opisal Reinitzerjevo odkritje⁵⁰. Poročal je, da je Reinitzer sprva menil, da bo mejo med kristalom in tekočino lahko razločno določil z opazovanjem polarizirane svetlobe in tako določil točno temperaturo tališča. Vendar je ugotovil, da to ni mogoče, saj je bilo vmesno stanje videti, kot da bi kristali plaval v tekočini.

Leta 1889 je Lehmann že ugotovil psevdoizotropnost (dvolomnost) navidez izotropne tekočine⁵¹. Uporabljal je tudi izraz »pseudokristal«⁵². V istočasno objavljenem drugem delu svoje molekulske fizike je raziskal tudi sipanje svetlobe na Reinitzerjevem preparatu pod vplivom električnega polja. Meritve v polju je nadaljeval šele Frederiks pol stoletja pozneje. Lehmann je v drugem delu svoje molekulske fizike opisal tudi anizotropno obnašanje taline, ki so jo pozneje imenovali holesterična faza⁵³: »Čudovita tekočina z mrežastimi belimi trakovi, podobnimi enoosnim kristalnim iglam, ki potemni, ko jih postavimo vzporedno glavnim smerem Nicolove prizme. Vzroka za ta presenetljiv polarizacijski pojav ni mogoče pojasniti, toda bele proge očitno ponazarjajo tokovnice. Če se tekočina giblje, se med obstoječimi progami pojavljajo nove in nastaja širši trak.«

Leta 1890 je Lehmann pisal o »kristalnih kapljevinah (krystallinische Flüssigkeiten, tropfbarflüssige Krystalle)«. Končno je leta 1900 ponovno skoval že pozabljeni Forbesov naziv »tekoči« (flüssige) kristal, ki se je kljub kritikam obdržal do današnjih dni⁵⁴.

40 Knoll, Kelker, 1988, 48.

41 Rosenberger, 1890, 638.

42 Kelker, 1988, 20-21.

43 Film hranijo Lehmannovi potomci (Knoll, Kelker, 1988, 45). Po drugih podatkih sta že leta 1911 Vulf in H. Deisch snemala tekočo kristalno fazo za kinematograf (Tammann, 1925, 283).

44 Parižan Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) je zaslovel s svojimi natančnimi meritvami hitrosti svetlobe, raziskoval pa je tudi temperaturno raztezanje kristalov. Henri Étienne Sainte-Claire Deville (1818-1886) je bil profesor na Ecole Normale Supérieure od leta 1851 in po letu 1884 profesor kemije na Sorbonni. Raziskoval je difuzijo in prepustnost kovin za plin.

45 Kelker, 1973, 7; Lehmann, 1908c, 1099.

46 Kelker, 1986, 243; Kelker, 1973, 9-10; Sonin, 1988, 14-15; Kelker, 1988, 20; http://www.lci.kent.edu/lc_history.html

47 Vill, 9; Kelker, 1988, 24-25; Reinitzer, 1908, 222.

48 Lehmann, 1889, 462.

49 Lehmann, 1889, 463-464, 466-467.

50 Lehmann, 1889, 467-468.

51 Knoll, Kelker, 1988, 72; Kelker, 1988, 25.

52 Rinne, 1933, 1031.

53 Kelker, 1988, 22.

54 Lehmann, 1890, 401; Kelker, 1973, 9; Kelker, 1988, 25

Kmalu po objavi prve Lehmannove razprave o tekočih kristalih leta 1889 je Gattermann sestavil še druge podobne snovi, ki so se dvakrat »talile« pri točno določenih temperaturah. Naslednje leto sta Gattermann in A. Ritschke s tehniko separacije sestavila prvi termotropni tekoči kristal s povsem znano kemijsko strukturo, derivat azoksobenzena. Gattermannove snovi so bile sestavljene brez bioloških sestavin in so bile še bolj fluidne od Reinitzerjevih. Gattermann jih je poslal Lehmannu v podrobnejšo raziskavo. Odkritje je Lehmann napejalo 24.3.1890 k skovanki »Krystalline Flüssigkeiten«, ki je bila že zelo blizu nazivu tekoči kristal⁵⁵. Tako kot Wöhlerjeva šest desetletij starejša sinteza sečnine je Gattermannova odstranila še zadnje dvome o morebitnih življenjskih procesih v tekočih kristalih, o katerih je bil govor v zgodnjem dopisovanju med Reinitzerjem in Lehmannom.

Lehmann je tudi po koncu študija pri Grothu še leta 1877 zagovarjal Grothove ideje o povezanosti geometrije kristalov s fizikalnimi lastnostmi in z notranjo zgradbo. Groth je med prvimi sprejel temeljno vlogo osnovne celice pri opredelitvi kristala, vzporedno z Lehmannom pa je raziskoval tudi kristale organskih snovi. Osnovno celico je imel za fizikalno realnost. To učiteljevo idejo je Lehmann še posebej poudarjal in osnovno celico opisal kot poglavitno lastnost, ki loči kristale od kapljev. Pozneje je Lehmann ideje svojega učitelja razvil v smer, ki se je številnim sodobnikom zdela prevratna. Lehmannovi poskusi so bili zelo zapleteni in jih številni v mikroskopiranju manj izvedeni sodobniki niso znali ponoviti⁵⁶. Obstoj osnovne celice kot pogoj za obstoj kristala je nadomestil z manj zahtevno lastnostjo anizotropnosti. Leta 1890 kristal definiral kot »kemijsko enotno telo, ki pod notranjo ali zunanjo napetostjo zaradi tlaka postane anizotropno in lahko raste v prenasajenih raztopinah.« Deset let pozneje je zapisal »kristal je anizotropno, z molekulsko usmerjeno silo obdarjeno telo ... Značilno za trdno agregatno stanje je obstoj meje elastičnosti. V nasprotju s tem pa so tekočine tiste, katerih meja elastičnosti je enaka nič.« To je bila seveda pomembna sprememba teorije kristalne mreže, ki je številni sodobniki niso mogli sprejeti⁵⁷.

Te opredelitve so bile zelo različne od Grothovih, ki pa je leta 1890 vseeno strpno dovolil objavo Lehmannove razprave v *Zeitschrift für Kristallographie*, katerega glavni urednik je bil⁵⁸. Kljub temu pa Groth tudi v svoem učbeniku kristalografije iz leta 1895 ni niti z besedo omenil tekočih kristalov, kristal pa je definiral kot homogeno anizotropno trdno telo⁵⁹. 18.3.1890 je Lehmann menil, da so vsa trdna in tekoča telesa mešanica

kristalnih modifikacij. Molekule tvorijo večje strukture v trdninah, manjše pa v tekočinah. Trditve je podkrepil s 117 slikami⁶⁰.

Lehmann je nasprotoval teoriji kristalne mreže tudi po Lauejevih poskusih z rentgenskimi žarki leta 1912 in je zagovarjal teorijo, utemeljeno na sočasnem obstoju faz v različnih agregatnih stanjih. Za Lehmannovo bistvo kristalov ni bilo v (Boškovičevi) geometrični porazdelitvi molekul, določeni z elastičnimi silami, saj to lahko poruši zunanja sila. Za Lehmannovo je bila bistvena struktura fizikalne molekule, ki je v Boškovičevi teoriji točkastih središč sil ni bilo. Lehmann je s strukturo molekule pojasnjeval tudi lastnosti kristala, kot je dvojni lom. Vendar se je z napredkom kristalografije zapletal v vedno globlja nasprotja⁶¹, čeprav sta bila Vorländerjev model podolgovatih molekul in Bosejevi roji v veliki meri nadaljevanje Lehmannovih teorij. Lehmann je odkril več kot sto vrst tekočih kristalov in je med njimi raziskoval dva tipa: »tropfbar« (kapljaste), poznejše nematike s strukturo, urejeno v eni dimenziji, in »schleimig« (sluzaste), poznejše smektike z značilnimi dvojnimi kroglami ali palicami v stožčasti strukturi.

Leta 1900 je Lehmann odkril po njem imenovano lastnost kapelj holesteričnih tekočih kristalov. Pod vplivom temperaturnega gradienta, približno vzporednega lastnim heličnim osem, holesteriki kažejo enakomerno rotacijo okoli lokalne molekulske osi⁶². Lehmann je z dvojnimi lomom pri majhni elastičnosti tekočih kristalov pojasnjeval tudi elastičnost etra nekaj let, preden je ta začel postajati odvečen v Einsteinovi teoriji relativnosti. Z vplivom močnih magnetnih polj na anizotropne molekule pa je pojasnjeval delovanje živih organizmov⁶³. Leta 1904 je s polarizacijskim mikroskopom raziskoval kapljice nematskih tekočih kristalov v viskoznem izotropnem mediju. Ugotovil je posebnosti ob robu kaplje, ki so šest desetletij pozneje postale zelo pomembne v prikazovalnikih⁶⁴. Leta 1933 je pojav raziskal še Oseen⁶⁵.

Lehmann je lastnosti tekočih kristalov povezoval tudi z življenjem samim, kar ima v sodobni biofiziki še poseben pomen. Menil je, da raziskovanje tekočih kristalov vodi k razumevanju meja med fiziko in fiziologijo in omogoča raziskovanje delovanja možganov⁶⁶. Veliko svojih idej o tekočih kristalih in faznih prehodih je prevzel po Frankenheimu⁶⁷. Vendar pa so pred letom 1908 holesterične tekoče kristale le malo raziskovali in jim je Lehmann v svoji knjigi iz leta 1904 posvetil le dve od 264⁶⁸ strani prve monografije, v celoti posvečene tekočim kristalom. Pet let pozneje je Prins uspešno zagovarjala prvo doktorsko disertacijo o faznih diagramih nekaterih tekočih kristalov.

55 Vill, 9; Kelker, 1988, 26; Demus, 1988, 46. Nemški organski kemik Ludwig Gattermann (1860-1920) je bil leta 1890 izredni profesor na univerzi v Heidelbergu, leta 1900 pa je postal redni profesor v Freiburgu.

56 Knoll, Kelker, 1988, 77.

57 Lehmann, 1900, 696, 698; Tammann, 1902, 104; Reinitzer, 1908, 224.

58 Sonin, 1988, 12-13, 30-31.

59 Lehmann, 1900a, 649, 654.

60 Lehmann, 1889, 467-468.

61 Vill, 6; Kelker, 1988, 18; Jungnickel, McCormach, 1986, 2: 101-102.

62 Lehmann, 1900, 657, 664.

63 Lehmann, 1900, 705.

64 Crawford, Žumer, 1996, 1; Slavinec, 1999.

65 Blinc, Žekš, 1974, 258.

66 Kelker, 1973, 13.

67 2; Lehmann, 1904a, 188.

68 Kelker, 1973, 16.