

- [3] K. T. Therkildsen and J. W. Thomsen, "Bose Einstein kondensation i atomare gasser – når atomer bliver til kvantebølger," *KVANT*, vol. 19, no. 2, pp. 20–23, 2008.
- [4] <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/the-coldest-place-in-the-universe-8121922/>.
- [5] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, "Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor," *Science*, vol. 269, no. 5221, pp. 198–201, 1995.
- [6] K. B. Davis, M. O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle, "Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 75, pp. 3969–3973, Nov 1995.
- [7] N. B. Jørgensen, L. Wacker, K. T. Skalmstang, M. M. Parish, J. Levinsen, R. S. Christensen, G. M. Bruun, and J. J. Arlt *Phys. Rev. Lett.*, p. 055302, Jul.
- [8] C. Kohstall, M. Zaccanti, M. Jag, A. Trenkwalder, P. Massignan, G. M. Bruun, F. Schreck, and R. Grimm, "Metastability and coherence of repulsive polarons in a strongly interacting fermi mixture," *Nature*, vol. 485, pp. 615–618, May 2012.
- [9] M.-G. Hu, M. J. Van de Graaff, D. Kedar, J. P. Corson, E. A. Cornell, and D. S. Jin, "Bose polarons in the strongly interacting regime," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 117, p. 055301, Jul 2016.
- [10] N.-E. Guenther, P. Massignan, M. Lewenstein, and G. M. Bruun, "Bose polarons at finite temperature and strong coupling," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 120, p. 050405, Feb 2018.
- [11] A. Camacho-Guardian and G. M. Bruun, "Landau effective interaction between quasiparticles in a Bose-Einstein condensate," *Phys. Rev. X*, vol. 8, p. 031042, Aug 2018.
- [12] A. Camacho-Guardian, L. A. Peña Ardila, T. Pohl, and G. M. Bruun, "Bipolarons in a Bose-Einstein condensate," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, p. 013401, Jul 2018.



Georg M. Bruun er teoretisk fysiker ved Aarhus Universitet og beskæftiger sig med ultrakolde atomare gasser. Hans forskning fokuserer på emner som superledning, transport, magnetisme og topologiske tilstande.

Røntgenstråling og CT-skanning for gymnasieelever

Af Ole L. Trinhammer, Nanoteket, DTU Fysik

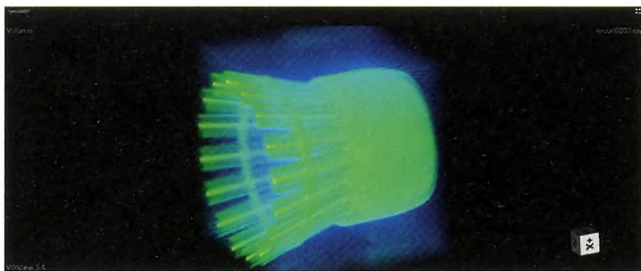
Tredimensionale billeder fra todimensionale skygger? Kan man prøve det selv? Ja, gymnasieklasser kan – med Nanotekets nye røntgenapparater. De fleste kender røntgenbilleder og forstår dem nemt som skygebilleder. Ved en CT-skanning drejes skanneren omkring personen, og skygebillederne sammenstilles ved hjælp af absorptionsloven til et tredimensionalt billede af den indre struktur.

Nanoteket er et undervisningslaboratorium under DTU Fysik for studerende ved DTU og for besøgende gymnasieelever fra hele landet. Det fik sit navn i 2004, hvor vi investerede i skanningprobemikroskoper til nanoteknologi. Siden er der kommet et væld af gymnasieøvelser til: Brændselsceller og solceller som knytter an til instituttets forskning i katalyse, plasmafysikøvelse med e/m -rør, skanningelektronmikroskoper, hvor elever kan se strukturen i sommerfugleskæl, kvanteoptikudstyr, hvor de kan bryde Bells ulighed, og røntgenudstyr, som jeg her vil koncentrere mig om.

Røntgenudstyret gør det muligt at "se det usynlige". Røntgen- og neutronspretningsgrupperne ved instituttet bruger metoderne især til materialeteknologiske formål. Det kan være at undersøge funktionen og strukturen inden i et batteri, mens det er virksomt. Neutronspretningsgruppen er tilknyttet den kommende spallationskilde ESS i Lund i Sverige, ligesom røntgengruppen er i gang med at udvikle en beamlinje, Danmax, ved synkrotronkilden, Max IV, sammesteds.

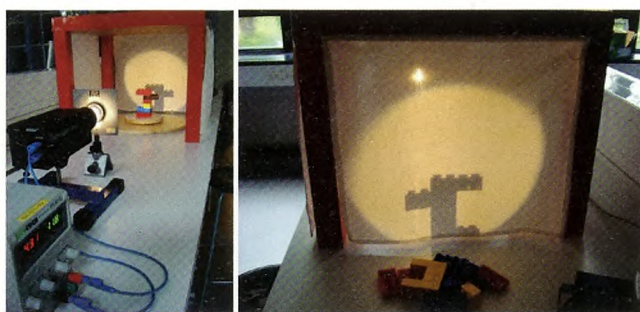


Figur 1. Et af Nanotekets røntgenapparater sat op til CT-skanning af fjerbold. Røntgenrøret sidder til venstre, og man aner katoden gløde orange. Bolden roteres, og man optager fx 200 projektioner fra forskellige vinkler. Disse behandles i computeren, og en 3D-rekonstruktion dannes.



Figur 2. Klip fra videoanimation af 3D-rekonstruktion af fjerbold.

Neutronspreddning er i høj grad komplementær til røntgenspreddning. Neutronerne “ser” spin og dermed magnetisme, og de “ser” bedst de lette grundstoffer, da neutronerne vekselvirker mest med de lette atomkerner. Røntgen “ser” bedst de tunge grundstoffer, da røntgenfotonerne vekselvirker med elektronerne, som der er flere af i de tunge grundstoffer.



Figur 3. Opstilling til illustration af 3D-rekonstruktion. Her virker hjernen som computer!

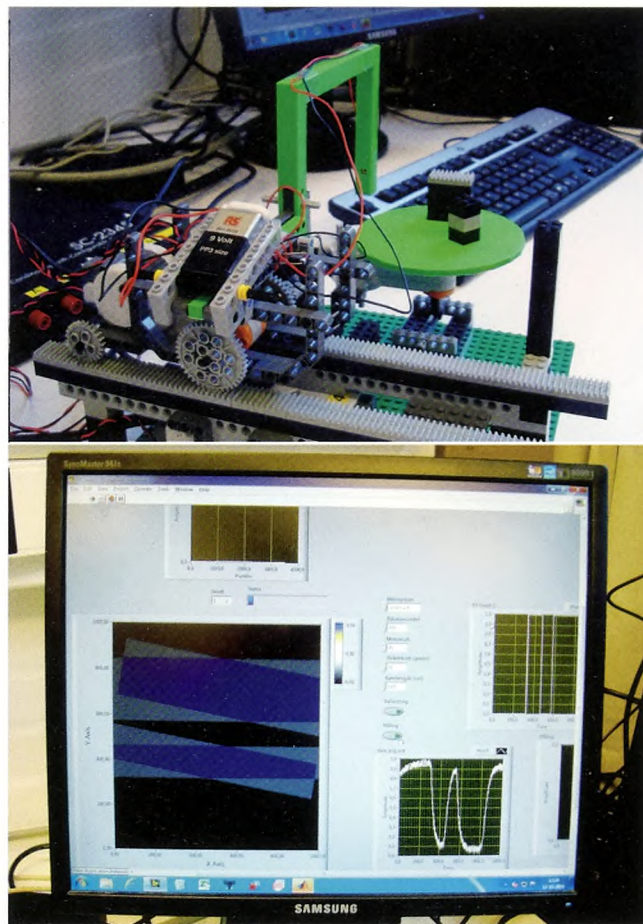
Ved at gennemlyse emnet fra mange forskellige retninger fås en 3D-rekonstruktion ud fra absorptionsloven

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}. \quad (1)$$

Her er I intensiteten efter passage af materiale med tykkelsen x og absorptionskoefficient μ . Derudover anvendes en såkaldt invers radontransformation.



Figur 4. Klassisk røntgenbillede taget med fluorescerende skærm monteret i apparatet i stedet for den elektroniske skærm i figur 1.



Figur 5. a) (Øverst): CT-skanner til 2D-rekonstruktion. Skannehovedet består af den portformede bjælkekonstruktion, som er sat fast på LEGO-bilen. I porten sidder en infrarød diode i venstre side over for en fotoreistor i den højre side. Hver gang skannehovedet har kørt frem og tilbage, drejes bordet et bestemt antal grader, og et nyt skan foretages. Begge motorer styres af robotten, mens signalet fra fotoreistoren sendes til computeren til videre behandling. b) (Nederst): På computerskærmen ses skyggestriber fra to skan drejet i forhold til hinanden.

Geometrisk tomografi

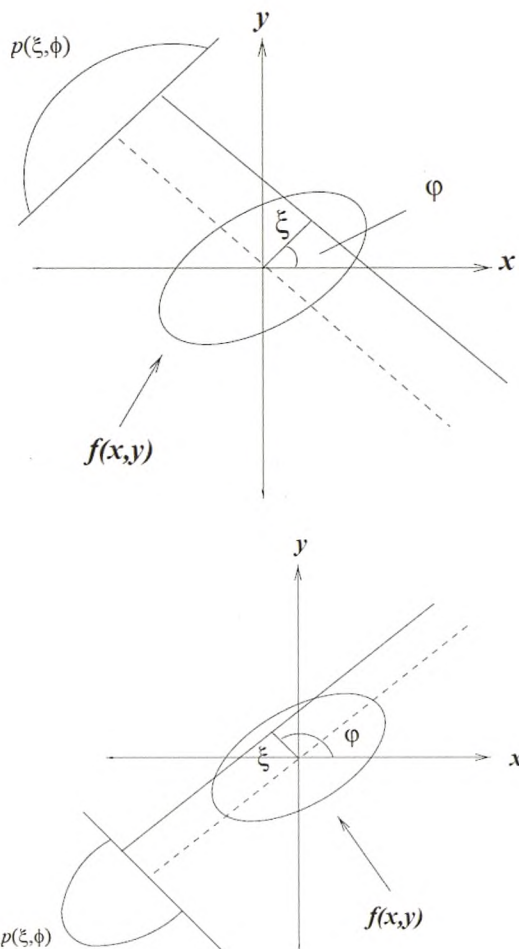
Hvordan ser figuren mon ud i 3D, hvis man kun kan se dens skygge fra forskellige sider? I denne indledende øvelse deles gruppen i to. En person bygger en model, som placeres bag et klæde og belyses bagfra. Modellen roteres bag klædet. Foran klædet er resten af gruppen, som skal prøve at bygge i 3D det, de forestiller sig ud fra skygebillederne, se figur 3.

Computed tomography

På rekonstruktionen af fjerbolden i figur 2 ser man intensitetsforskelle afhængig af materialernes gennemtrængelighed for røntgenstråling. Man nøjes ikke med kun at konstatere skygge eller ikke-skygge som i den geometriske tomografi i figur 3. At kunne se intensitetsforskelle som i figur 4 er karakteristisk for klassiske røntgenbilleder.

Ved at rotere emnet skannes skyggen fra forskellige vinkler og sammenstykes ved hjælp af en computer til et tredimensionalt tomogram. Databehandlingen er helt tilsvarende det, der foregår i hospitalernes CT-skannere. Den eneste væsentlige forskel er, at her ligger patienten

stille, mens apparatet roterer rundt om patienten! Den inverse radontransformation er en "tilbageregning" fra skyggen til det computerberegnete tomogram. Vi illustrerer princippet med en model med en LEGO-robot som vist i figur 5.



Figur 6. Radontransformation p for et ellipseformet snit gennem et emne set fra forskellige drejninger ϕ i forhold til et fast (x, y) -koordinatsystem i emnet. Figur redigeret fra [2]. Se evt. også [3].

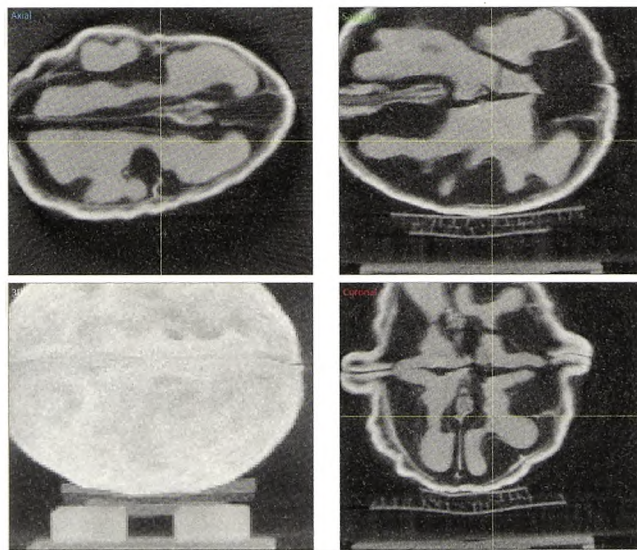
Radontransformationen i 2D

Tætheden af materiale i emnet i et plant snit beskrives ved en funktion f af to koordinater x og y i et koordinatsystem, som ligger fast i forhold til emnet, se figur 6. Tæthedens skygge kan opfattes som en projektion på en linje uden for emnet. Skyggens værdi ("dybde") findes ved at integrere langs sigtelinjen gennem emnet, vinkelret på den linje, der skal projiceres på. Projektionslinjens beliggenhed i forhold til emnets koordinatsystem beskrives ved en vinkel ϕ , og positionen langs linjen beskrives ved en længdekoordinat ξ . Transformationen p bliver da (se figur 6)

$$p(\xi, \phi) = \int f(x, y) \delta(x \cos \phi + y \sin \phi - \xi) dx dy \quad (2)$$

Skyggestriberne på skærmen i figur 5b kan opfattes som to tabeller skrevet på et gennemsigtigt, ternet papir og lagt oven på hinanden med samme drejning, som bordet foretog mellem de to skan. Ved geometrisk

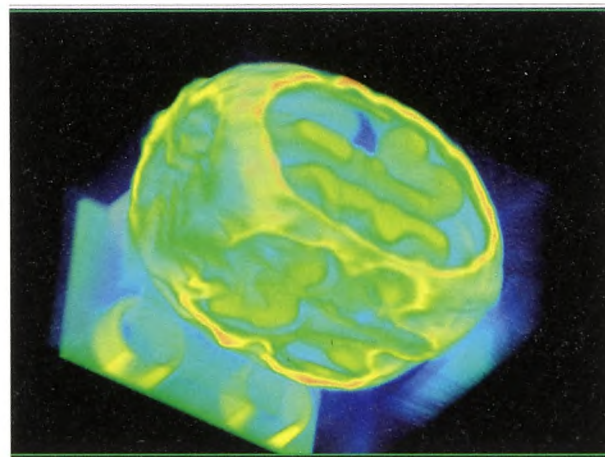
tomografi skriver man 1 i alle de tabelrækker, hvor der er mørke, og 0 i alle de tabelrækker, hvor der er lys. Laver man fx 100 skan, vil skyggerækkerne dreje i forhold til hinanden, og kun de tern, hvor emnet "er", vil vise skygge fra alle sider. Det betyder, at hvis 1-tallerne i disse tern adderes for alle 100 skan, kan stoftætheden sættes til 100 her og markeres på et tomogram. Hvis man vil tage højde for varierende stoftæthed, skal man skrive tal mellem 1 og 0 svarende til et varierende signal fra fotodetektoren ligesom projektionen i figur 6.



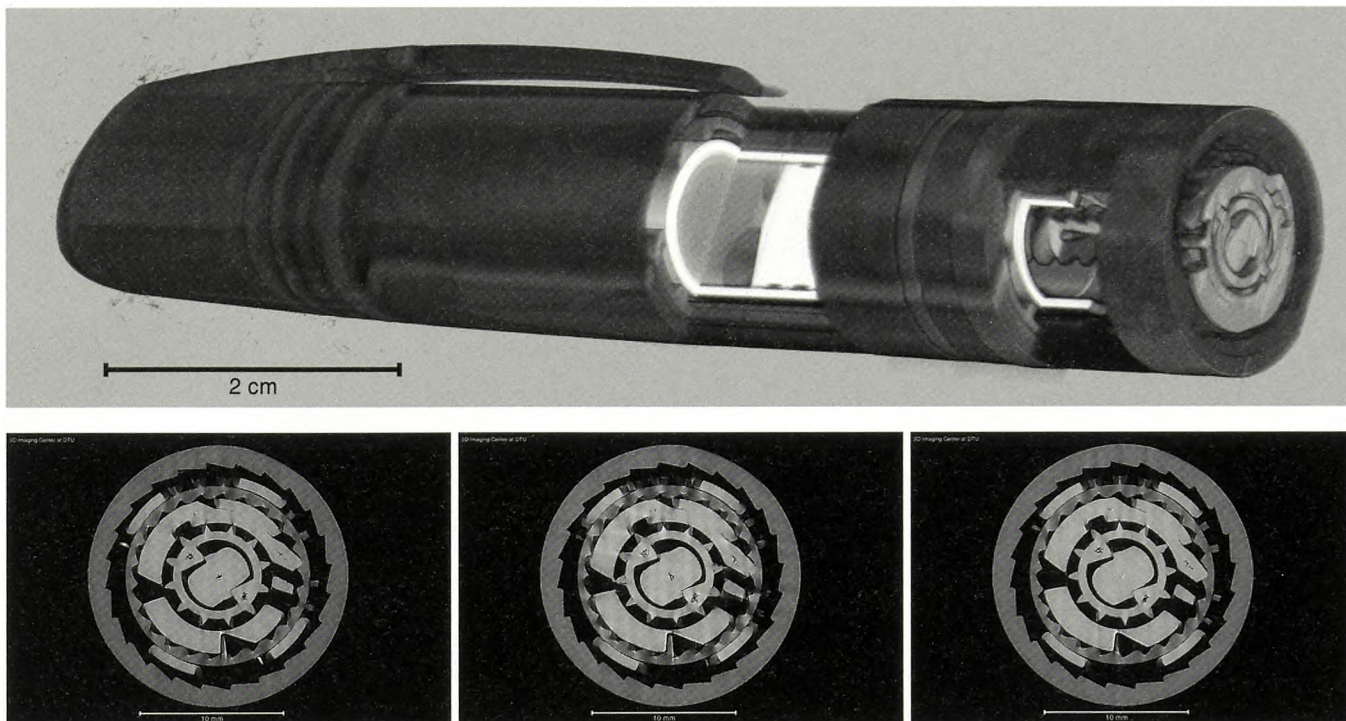
Figur 7. Rekonstruktion af en valnød med snit i tre vinkelrette planer.

Transformationen (2) bærer sin opdagers efternavn, Radon [1]. Bemærk, at $\mathbf{n} = (\cos \phi, \sin \phi)$ er normalvektor til sigtelinjen, så deltafunktionen plukker funktionsværdier ud, som ligger i afstanden ξ fra sigtelinjen gennem $(0,0)$, idet $\mathbf{n} \cdot (x, y) = \xi$ er ligningen for sigtelinjen. Sluttelig adderes funktionsværdierne langs denne linje ved hjælp af integralet.

Rekonstruktion består dermed i at bestemme $f(x, y)$ ud fra måling af $p(\xi, \phi)$. Rekonstruktion er altså kort sagt en invers radontransformation.



Figur 8. Billedbehandling med beskæring i 3D. Toppen er åben, fordi nødden rager ud af billedfeltet (figur 7 nederst til venstre). Derudover er billedet beskåret i to herpå vinkelrette planer for et kig ind i nødden.



Figur 9. Skanning af NOVO-insulinpen med 0,3 sekunders mellemrum. Det lyse felt øverst i midten er stemplet, som trykker insulinen ud. Billederne nederst viser en tandhjulsmekanisme, som drejer sneglen, der presser stemplet. Tak til Novo Nordisk for tilladelse til at vise skanningerne, som blev optaget på European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) i samarbejde med 3D Imaging Centret på DTU som en del af Innovationsfond-projektet LINX.

Billedbehandling – ind i nødden

For at kigge ind i emnet, kan rekonstruktionen billedbehandles med snit i tre forskellige planer som vist for en valnød i figur 7. Endvidere kan man lave beskæring i 3D og således kigge ind i nødden som vist i figur 8.

Den fjerde dimension, skanning i 4D

Med kraftige røntgenkilder kan man få den fjerde dimension med, nemlig tiden. Det vil sige, at man fx kan visualisere mekanismen i en insulinpen og se, om den virker som tiltænkt, se figur 9.

Litteratur

- [1] Johann Radon (1986) "On the Determination of Functions From Their Integral Values Along Certain Manifolds", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, bind **MI-5**, nr. 4, december 1986. Oversættelse af P. C. Parks fra originalen "Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten", offentliggjort i *Berichte der Sächsischen Akademie der Wissenschaft*, bind **69** (1917), side 262–277.

- [2] "Tomographic Image Reconstruction", <https://aapm.org/meetings/99AM/pdf/2806-57576.pdf> (Forfatter: riviere@imaging.bsd.uchicago.edu). 25. juni 1999.

- [3] Gengsheng L. Zeng, Ya Li og Alex Zamyatin (2013) "Iterative total-variation reconstruction versus weighted filtered-backprojection reconstruction with edge-preserving filtering", *Physics in Medicine and Biology*, bind **58**, side 3413–3431.



Ole L. Trinhammer er cand. scient. Leder af Nanoteket, DTU Fysik. Nanoteket tilbyder ca. 15 forskellige gymnasieøvelser til forskellige klassetrin og niveauer.

Den danske Lorenz

Anja Skaar Jacobsen, Københavns VUC

Det er ukendt for mange, at Danmark i 1800-tallet havde en betydningsfuld og internationalt anerkendt teoretisk fysiker ved navn Ludvig Valentin Lorenz (1829-1891). Hans vigtigste bidrag var inden for optikken og elektrodynamikken. Hans navn forveksles ofte med den samtidige og langt mere kendte hollandske fysiker og senere nobelpristager, Hendrik Antoon Lorentz, som tilmed arbejdede inden for de samme områder af fysikken som den danske Lorenz. Årsagen til forvekslingen er dels navnesammenfaldet, dels at den danske Lorenz er ret ukendt, og dels misforståelser i forhold til prioriteten af en række videnskabelige opdagelser. Det er derfor på sin plads, at der kastes nyt lys over den betydningsfulde, men ofte glemte, danske Lorenz i form af en biografi, skrevet af Helge Kragh [1]. Biografien bør stå på enhver dansk fysikers hylde. Der findes en anden biografi om Lorenz, skrevet på tysk af fysikhistorikeren Mogens Pihl helt tilbage i 1939. Derudover findes der en række artikler af Kragh, Pihl og andre fysikhistorikere om Lorenz' forskellige fysiske arbejder, alle nævnt i bogens omfattende bibliografi. Kraghs biografi er skrevet på engelsk for at udbrede kendskabet til Lorenz ikke bare i Danmark men også blandt fysikhistorikere internationalt.

Bogen er primært en videnskabelig biografi, dvs. den handler først og fremmest om Lorenz' videnskabelige og teknologiske arbejder, og det synes også at være det mest interessante ved ham. Lorenz var den første egentlige matematiske fysiker i Danmark, for der var på det tidspunkt ingen tradition i Danmark for matematisk fysik. Tværtimod cementerede den magtfulde H. C. Ørsted sin ikke-matematiske tilgang til fysikken gennem sin efterfølger på universitetet og den Polytekniske Lærestanstalt, C. V. Holten. Lorenz fulgte bl.a. Ørsteds forelæsninger i fysik og kemi på den Polytekniske Lærestanstalt og var matematisk autodidakt. Der skulle et studieophold i Paris til at omvende Lorenz til matematisk fysik. På det tidspunkt var Lorenz omkring 30 år gammel. Han fik sin første stilling på den Kongelige Militære Højskole som 35-årig og blev, som 37-årig, medlem af det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Som 58-årig fik han tildelt Carlsbergfondets livslange støtte, som blev givet til "Mænd af anerkendt Dygtighed", hvilket gav ham mulighed for at forske på fuld tid (Niels Bohr modtog dette stipendium i 1924).

Hvis man ser bort fra Lorenz' videnskabelige arbejder, giver biografien et indtryk af ham som en usædvanligt kedelig mand: En introvert og sky, selvleret videnskabsmand uden ambitioner; en ikke særlig god studerende og en uninspirerende lærer. Han havde ingen vennekreds og tog ikke del i det københavnske sociale liv. Ægteskabet med den smukke Agathe Fogtmann i 1862 beskrives i en enkelt sætning. Der er intet om, hvordan de mødtes eller deres barnløse liv sammen. Det sidste skyldes, ifølge Kragh, at der ikke længere

findes arkivmateriale til den del af Lorenz og Agathe Fogtmanns liv. Til gengæld spænder biografien bredt over Lorenz' forskelligartede videnskabelige bidrag; fra den rene matematiske fysik til de eksperimentalfysiske opdagelser og endelig til Lorenz' teknologiske opfindelser. Kragh bevæger sig elegant og ubesværet mellem de forskellige fagområder, som optog Lorenz, og Kragh får samtidigt sat Lorenz' bidrag ind i den rette fysik- og kemihistoriske kontekst i det 19. århundrede. Kragh er måske den eneste, der er i stand til at spænde så vidt, og biografien hænger derfor rigtig godt sammen. Bogen indeholder bonusmateriale i form af tre meget interessante tekster fra Lorenz' egen hånd: en upubliceret selvbiografi skrevet af Lorenz i 1877; en kort, upubliceret forelæsningsnote om matematikkens betydning for den del af fysikken, hvor sanserne ikke rækker, dvs. i beskrivelsen af lys, varme, elektricitet, magnetisme samt stofs atomare opbygning. Endelig er der en artikel fra 1867 om Lorenz' elektriske teori for lys.



Figur 1. Ludvig Valentin Lorenz (1829–1891).

I optikken har Lorenz slået sit navn fast med Lorenz-Lorentz-loven og Lorenz-Mie-spredning. Lorenz fremsatte i 1863 en elastisk lysteori, og på den baggrund udledte han en brydningslov, der viser sammenhængen mellem brydningsindeks og densiteten af stof. Lorenz publicerede denne lov i 1875. Den hollandske fysiker H. A. Lorentz udledte den samme lov i 1878, men ad en anden vej. Kragh argumenterer for, som andre før ham, at loven bør kaldes Lorenz-Lorentz-loven, men historisk blev rækkefølgen af de to fysikers navne vendt om i takt med den stigende berømmelse af den hollandske Lorentz i starten af det 20. århundrede. Formlen nævnes således også som Lorentz-Lorenz-formlen i Jan W. Thomsens forelæsningsnoter: *A First Course in Optics* [2]. I 1890 udviklede Lorenz en matematisk teori for spredning af lys på en gas af kugleformede molekyler. Med teorien bestemte han som en af de første en værdi