

COSINUSLOVEN I DEN KINETISKE LUFFTEORI.

AF

MARTIN KNUDSEN.

Betragter vi et Overfladeelement med Areal dS af et fast Legeme eller en Vædske, der befinder sig i en hvilende Luftmasse, vil det Antal Stød n' , som Luftmolekulerne meddeler Overfladeelementet i hvert Sekund i Middelværdi, være $n' = \frac{1}{4}N\bar{c}dS$, hvor N betyder Antallet af Luftmolekuler i hver cm^3 , og \bar{c} betyder Luftmolekulernes Middelhastighed. De stødende Molekuler kommer ind mod Fladeelementet, ligelig fordelte over enhver Azimuth, og Antallet af Molekuler, som kommer fra Rumvinklen $d\omega'$, der danner Vinklen x' med Fladeelementets Normal, maa være $\frac{1}{4\pi}N\bar{c} \cos x'd\omega'dS$ eller $\frac{1}{\pi}n' \cos x'd\omega'$. Paa Grund af Ligevægtsbetingelsen maa et ligesaa stort Antal Molekuler atter forlade Fladeelementet med Bevægelse i den betragtede Rumvinkel $d\omega'$. Herved er det imidlertid ikke blevet entydig bestemt, i hvilke Retninger en enkelt Molekulgruppe paa n Molekuler vil blive tilbagekastet, naar samtlige Molekuler kommer fra den betragtede Rumvinkel $d\omega'$.

MAXWELL¹ antog, at Luftmolekulernes Tilbagekastningsretning kunde være i væsentlig Grad afhængig af deres Indfaldsretning, og han har taget Hensyn hertil i sine Beregninger, idet han forudsatte, at en Brøkdelen f af hver Fladeenhed tilbagekaster Molekulerne, som om de kom fra en

¹ I. MAXWELL, Phil. Trans. 170, p. 251, 1879.

hvilende Luftmasse (absorbed and evaporated gas), medens Resten af Fladeenheden $1-f$ tilbagekaster Luftmolekulerne spejlende.

Af mine tidligere Forsøg over Luftarters Strømning gennem snævre Rør¹ har jeg draget den Slutning, at f maatte være lig med 1, eller med andre Ord, at samtlige n Molekuler, der træffer Fladeelementet kommende fra Rumvinklen $d\omega'$, atter gaar bort med Hastigheder, der er ligelig fordelte over enhver Azimuth og nærmere præciseret saaledes, at Antallet dn af de Molekuler, der har Bevægelsesretninger indenfor en Rumvinkel $d\omega$, kan sættes lig med

$$dn = \frac{1}{\pi} n \cos x d\omega.$$

Denne Sætning har jeg betegnet som Cosinusloven, men det synes, som om den ikke har vundet almindelig Anerkendelse, idet man hyppig ser Størrelsen f figurere i Arbejder om den kinetiske Teori og Diskussioner om, hvorvidt f har en anden Værdi, naar Luftmassen er i Temperaturligevægt med Fladeelementet dS , end naar den ikke er det. Jeg har derfor udført nogle Forsøg, som direkte tjener til at prøve Cosinuslovens Gyldighed.

Til disse Forsøg anvendte jeg en Metode af lignende Art, som L. DUNOYER² tidligere har benyttet med Natriumdamp. Jeg fandt det dog bekvemmere at bruge Kvægsølv damp, bl. a. fordi Kvægsølvets Damptryk er nøjagtigere maalt. Kvægsølv dampene strømmede ud gennem et Rør og fortættedes paa en Glasvæg, i hvilken der var en lille Aabning. Gennem denne Aabning strømmede Kvægsølv molekulerne som en Dampstraale, idet alle Molekuler meget nær bevægede sig i samme Retning. Dampstraalen traf en fast Væg, hvis Temperatur var almindelig Stuetemperatur, og Opgaven var nu at

¹ M. KNUDSEN, Ann. d. Phys. 28, p. 105, 1909.

— Ann. d. Phys. 35, p. 389, 1911.

² L. DUNOYER, Comptes rendus t. 152, p. 592, 1911.

bestemme, i hvilke Retninger Kvægsølv molekulerne tilbagekastedes. Dette kan afgøres ved at lade de tilbagekastede Kvægsølv molekuler fortættes paa en Glasvæg, der holdes afkølet til en saa lav Temperatur, at kun en forsvindende ringe Brøkdelen af de Molekuler, der træffer den afkølede Væg, atter bliver tilbagekastet. At dette er Tilfældet, naar Kondensationsvæggen har flydende Ilt's Temperatur, skal senere vises.

Ved mine første Forsøg over Cosinusloven lod jeg en Straale af Kvægsølv damp træffe en Metalflade under en Indfaldsvinkel af ca. 45° . Denne Metalflade var anbragt i Centrum af en Glaskugle, som var nedsænket i flydende Ilt. Ved et Par andre Forsøg erstattedes Metalfladen af en Glasflade og et Glimmerblad. Disse Forsøg, der udførtes i April 1915, skal imidlertid ikke omtales nærmere, da ganske lignende Forsøg vel omtrent samtidig blev udført af R. W. Wood, som har givet Meddelelse derom¹.

Ligesom Wood havde jeg Lejlighed til at iagttage et fuldstændig klart og gennemsigtigt Bælte ved Kvægsølvbeslagets Rand, men jeg har ikke tænkt mig, at dette Bælte behøvede at skyldes en Afvigelse fra Cosinusloven. Ved særlige Forsøg over Kvægsølv molekulerne's Tilbagekastning fra stærkt afkølet Glas har det vist sig, at et lignende Bælte fremkom, men at det blev smallere og smallere, efterhaanden som Destillationen fortsattes. Da Beslaget i det hele taget maa have en vis Tykkelse eller Overfladetæthed for overhovedet at kunne ses, maa der vise sig et saadant klart Bælte, hvis Cosinusloven har Gyldighed.

Idet Kvægsølv molekulerne ved de Forsøg, som Wood og jeg har udført, kommer ind mod den tilbagekastende Flade under en vis Indfaldsvinkel, tilbagekastes de i alle Retninger. Beslaget ses først paa Kuglen paa det Sted, hvor denne skæres af Normalen til den tilbagekastende Flade og breder sig ligelig til alle Sider, idet Beslaget stadig er tykkest,

¹ R. W. Wood, Phil. Mag. Vol. 30. Aug. 1915, p. 300.

hvor det først viste sig, og Tykkelsen eller Overfladetætheden aftager ud til den Storcirkel, som ligger i Plan med den tilbagekastende Flade. Heri er intet, som modbeviser Cosinusloven, men nogen sikker Bekræftelse paa dens Gyldighed faar man rigtignok heller ikke derved. For at opnaa dette har jeg anvendt følgende Raisonnement.

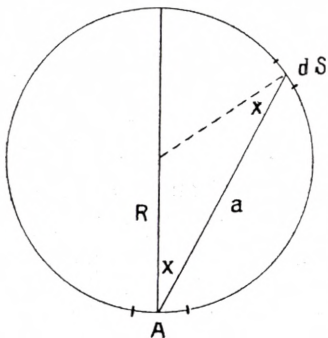


Fig. 1.

Skal man kunne faa en sikker Bekræftelse af Cosinuslovens Gyldighed ved at iagttage et Kvægsølvbeslags Gennemsigtighed eller Refleksionsevne, maa Forsøget indrettes saaledes, at Cosinusloven fordrer, at den Flade, paa hvilken Beslaget dannes, faar ligestor Overfladetæthed overalt. Dette vil være Tilfældet, hvis den fortættende Flade er en Kugleflade, naar den tilbage-

kastende Flade er en Del af den fortættende Kugleflade.

Udgaar der n Molekuler fra et Arealelement A (Fig 1) af en Kugleflade med Radius R , skal i Følge Cosinusloven et Antal $dn = \frac{1}{\pi} n \cos x d\omega$ udgaa i Rumvinklen $d\omega$. Afskærer denne Rumvinkel et Arealelement dS af Kuglefladen, har man $d\omega = \frac{dS \cos x}{a^2}$ og altsaa $dn = \frac{1}{\pi} n \frac{\cos^2 x}{a^2} dS = \frac{1}{\pi} n \frac{1}{4R^2} dS$. Antallet af Molekuler paa hver Overfladeenhed af Kuglen er $\frac{dn}{dS} = \frac{1}{\pi} n \frac{1}{4R^2}$, og med dette Antal er Overfladetætheden ρ af Beslaget proportional, saa naar Vægtmængden Q af Kvægsølv damp tilbagekastes fra Arealet A , har man

$$\rho = Q \frac{1}{4\pi R^2}$$

eller lig med den hele tilbagekastede Mængde divideret med Kuglens hele Overfladeareal. Overfladetætheden ρ er altsaa konstant, hvis Cosinusloven har Gyldighed, og man ser let, at en Afvigelse fra Cosinusloven maa bevirke en Afvigelse fra den ligelige Fordeling af Kvægsølvet paa Kuglefladen.

Har Overfladeelementet A en endelig Størrelse, bliver gentagen Tilbagekastning mulig, og ρ bliver da lig med Q divideret med Arealet af den Del af Kuglefladen, som ikke tilbagekaster.

For at realisere denne Prøve anvendte jeg et Glasapparat, som Fig. 2 viser. Glaskuglen A blæstes saa nøjagtig kugleformet, som det lod sig gøre. Dens indre Diameter var 4,90 cm.

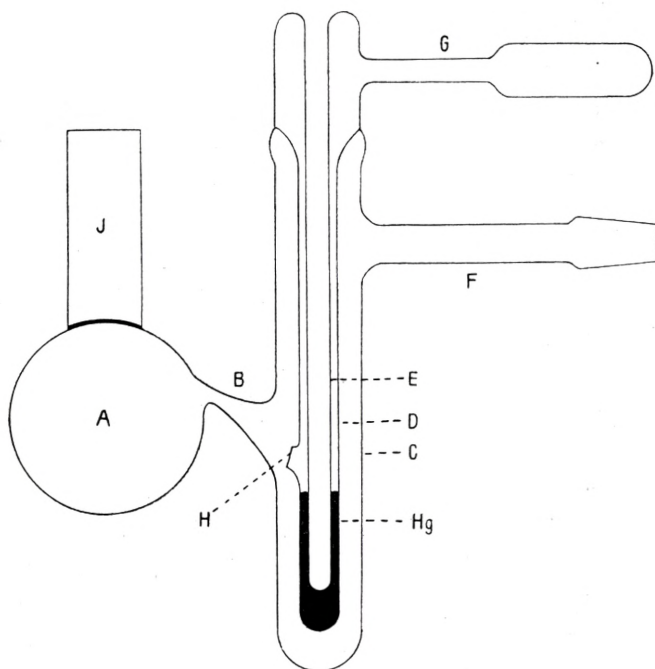


Fig. 2.

Ved det skraa Siderør B er Kuglen i Forbindelse med den Del af Apparatet, hvor Kvægsølv dampene dannes. Denne Del bestaar af 3 Glasrør C , D og E , der er anbragt indeni hinanden, lukkede forneden og sammenblæste foroven, saaledes som Figuren viser. Det ydre Rør C forbindes med Luftpumpen ved et Siderør F med Schliff, og Rummet mellem det inderste og det mellemste Rør er foroven forbundet

med det lukkede Siderør *G*, der i Virkeligheden viser lige fremad og ikke som vist paa Figuren er parallel med Schliffrøret *F*. I dette Siderør anbragtes Kvægsølvet, og naar Apparatet anbragtes paa Pumpen, var det drejet, saa Røret *G* vendte nedad. Under Udpumpningen blev Kvægsølvet udkogt i *G*, hvorpaa Apparatet drejedes om Schliffen til den i Figuren tegnede Stilling. Kvægsølvet løb derved ned i Mellemrummet mellem det mellemste og det inderste Rør (*Hg* paa Figuren). I det mellemste Rør var ved *H* anbragt et lille Hul, gennem hvilket Kvægsølv dampene kunde strømme over i Kuglen.

Foroven paa Kuglen afmærkedes den Kurve, gennem hvilken Randen af Hullet *H* kunde ses gennem Forbindelsesrøret *B*. Kurven begrænser det Areal af Kuglen, hvor de fra Hullet *H* kommende Kvægsølv molekyler kan træffe Kugleoverfladen, og Arealet dækkedes af Metalrøret *I*, hvis Metalbund er afdrejet, saa den passer til Glaskuglen, og fæstet paa denne med Picein. Det saaledes dannede lille Metalkar, 2 cm i ydre Diameter og 5 cm i Højde, tjener til at holde den tilbagekastende Glasflade varm under Forsøget. Metalkarret var omviklet med en Modstandstraad, saa det kunde opvarmes ved en elektrisk Strøm, og dets Temperatur kontrolleredes ved et Thermometer, som stod i Karret, der indeholdt lidt Vand. Under Forsøget viste Thermometret ca. 30°, saa den tilbagekastende Glasvæg kunde skønnes at have haft en Temperatur mellem 0° og 20°.

Apparatet var saaledes anbragt, at det netop var Glaskuglens øverste Del, som holdtes varm, medens hele Resten af Kuglen, Forbindelsesrøret *B* og en passende Del af det øvrige Apparat blev omgivet med flydende Ilt i et 10 cm vidt, uforsølvet Vacuumkar. Vacuumkarret kunde bekvemt sænkes og hæves, og derved og ved hyppig Paafyldning af flydende Ilt sørgedes for, at den flydende Ilts Overflade naaede næsten op til Metalkarret *I*.

For at give det fordampende Kvægsølv *Hg* en passende Temperatur hældtes lidt Vaselinolie i det inderste Rør, der, som Fig. viser, er helt aabent til Atmosfæren foroven. I dette Rør sattes en Glasstav, som forneden var omviklet med Platintraad, saa man kunde frembringe en passende Varmeudvikling med en elektrisk Strøm og saaledes holde Kvægsølvet *Hg* varmt.

Ved det første Forsøg, som udførtes med dette Apparat, begyndtes med en svag Opvarmning af Kvægsølvet, efter at den flydende Ilt var bragt paa Plads. I Løbet af ganske kort Tid under Kvægsølvet's Opvarmning blev det paa Røret *B* dannede Kvægsølvbeslag ganske uigennemsigtigt og efter nogle Minutters Forløb kunde der ses et Kvægsølvbeslag paa Kuglen. Det syntes at komme samtidig overalt, og det blev mere og mere uigennemsigtigt, men det var ikke muligt at se nogen Struktur eller Gennemsigtighedsforskel noget Sted paa Laget, undtagen paa et Bælte paa ca. 1 mm. Bredde, der omgav Varmekarret *I*, og som holdt sig fuldstændig klart og gennemsigtigt. Efter at Forsøget havde varet i godt 20 Minutter, var Kvægsølvbeslaget saa tykt, at man lige kunde skimte en Glødelampe gennem det. Forsøget afbrødes da, idet Opvarmningsstrømmene blev afbrudt, den flydende Ilt fjernet, og Apparatet blev fyldt med atmosfærisk Luft. Efter at Kvægsølvbeslaget var blevet flydende og Glaskuglen befriet for Rim, viste det sig, at Kvægsølvbeslaget havde en meget karakteristisk Opalescens, der var den samme overalt, hvor der fandtes Beslag, og de Bøjningsringe, som Kvægsølvdraaberne frembragte, naar en fjern Glødelampe spejledes i Glaskuglen, havde overalt paa Kuglen samme Udseende. Denne sidste Prøve anstilledes, efter at Kuglen havde ligget et Døgn, saa Kvægsølvdraaberne var blevet færre og større.

For at faa en kvantitativ Bestemmelse af Kvægsølvbeslagets Tæthed paa forskellige Steder af Kuglen gentoges Forsøget

med en stærkere Opvarmning end forrige Gang. Forsøget varede atter godt 20 Minutter, og Kvægsølvbeslaget fik en saadan Tykkelse, at det var fuldstændig uigennemsigtigt. Heller ikke denne Gang var det muligt at opdage nogen Forskel mellem de forskellige Arealelementer af Kuglen, hverken under Beslagets Dannelse, eller efter at Beslaget havde samlet sig i Kugler efter Forsøgets Afslutning. Kuglen blev nu skaaret fra den øvrige Del af Apparatet og en lille Kvægsølvdraabe bragt ind i den. Denne Draabe bragtes til at løbe rundt og opsamle Kvægsølvbeslaget undtagen paa tre

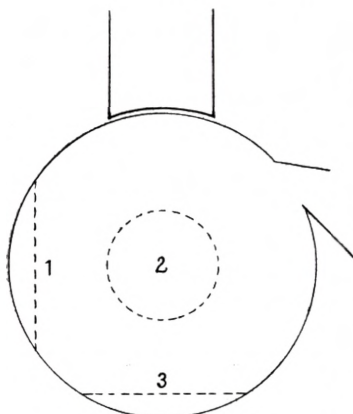


Fig. 3.

nogenlunde cirkelrunde Pletter, der var orienterede og nummererede, som Fig. 3 viser.

Plet Nr. 1 fandtes, hvor man skulde vente den største Overfladetæthed, hvis en Del af Molekulerne blev tilbagekastet spejlende fra den tilbagekastende Flade. Plet Nr. 2 laa paa den ene Side af Kuglen, og Plet Nr. 3 laa diametralt modsat den tilbagekastende Del af Kuglefladen.

Pletternes Størrelse udmaaltes,

og de opsamledes en efter en med den lille Kvægsølvdraabe, hvis Vægtforøgelse bestemtes. Derved fandtes Vægtmængderne af Kvægsølvet paa hver Plet. Maalingerne gav følgende Resultater:

	Plettens Areal	Kvægsølvbeslagets Vægt	Kvægsølvbeslagets Tæthed
Plet Nr. 1	5,00 cm ²	0,81 Milligram	0,162 mg/cm ²
Plet Nr. 2	7,60 —	1,25 —	0,164 —
Plet Nr. 3	11,24 —	1,62 —	0,144 —

Forskellen mellem disse Tætheder er saa lille, at den kan forklares ved Iagttagelsesfejl, og for øvrigt maatte man paa

Forhaand vente, at Beslaget paa Plet Nr. 3 skulde have en lidt mindre Tæthed end paa de øvrige, hvis Cosinusloven har streng Gyldighed, thi Kollisioner mellem indfaldende og tilbagekastede Kvægsølv molekyler maa foregaa i Kuglens øverste Del og ventelig bevirke en forøget Tæthed paa de Steder af Kugleoverfladen, som er nærmest Kollisionsstedet, altsaa en større Overfladetæthed foroven end forneden, hvor Plet Nr. 3 befinder sig.

Som Resultat af Forsøgene kan man altsaa slutte, at Cosinusloven har Gyldighed i hvert Fald med den ved disse Forsøg opnaaede Nøjagtighed. Ved den molekulare Strømning gennem Rør har jeg tidligere vist, at Loven gælder for det Tilfælde, at der er Temperaturligevægt mellem Luftarten og den tilbagekastende Flade, og Lovens Gyldighed er nu hermed vist for et Tilfælde, hvor Temperaturligevægt ikke er til Stede, thi Kvægsølv dampene har under Forsøget haft en Temperatur paa over 80° , medens den tilbagekastende Flades Temperatur var under 20° .

For Assistance ved dette Arbejde maa jeg takke Assistenterne VIGGO ANDERSEN og JOHANNES OLSEN, og Carlsbergfondets Direktion skylder jeg Tak for de mig bevilgede Midler til Arbejdets Udførelse.