

KVANT December 4 1998

Fysisk Tidsskrift

9. årgang



- BRYDNINGSFÆNOMENER I JORDENS ATMOSFÆRE • REGNBUE •
- LYN OG TORDEN • NORDLYS • NOBELPRISERNE I FYSIK OG KEMI 1998 •
- DFS ÅRSMØDE 1999 • OVE NATHAN FÅR ØRSTED MEDALJEN •

LØSSALGSPRIS: 35 KR

KVANT

Fysisk Tidsskrift

c/o Ørsted Laboratoriet
Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

Telefax : 35 32 05 76
E-mail : kvant@nbi.dk
Giro : 5 84 31 46

Udgives af

Dansk
Fysisk
Selskab

Selskabet for
Naturlærens
Udbredelse



Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv.)
DCESS, NBI/AFG, KU

Jørgen Friis Bak
Aarhus Universitet

Jørn Johs. Christiansen
Roskilde Kathedralskole

Torsten Freltoft
NKT Research Centre

Mogens Esrom Larsen
Matematisk Institut, KU

Finn Berg Rasmussen
Ørsted Laboratoriet, KU

Ove Østergaard
Silkeborg Amtsgymnasium

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnementspris: 135 kr/år.

Annoncepriser

1/1 side	3000 kr
1/2 side	1600 kr
1/4 side	1000 kr
Farvetillæg	1800 kr

Priserne er excl. moms og gælder for reproklart materiale. Henvendelser om annoncer til Redaktøren, telefon 35 32 05 73, telefax 35 32 05 76.

Oplag: 2000

Tryk: P. J. Schmidt, Vojens

ISSN 0905-8893

Indhold:

Brydningsfænomener i Jordens atmosfære

Mike van der Poel, Anne Værnholt Olesen og Lars Lindberg Christensen 3
De mest utrolige lysfænomener kan dannes ved at brydningsindekset ændrer sig en lille smule.

Fysikernes rejsehold

Fysikforedrag i gymnasiet 12
Bestil et foredrag.

Regnbuen

Allan Bro Hansen 13
Regnbuen kender vi alle. Men hvordan opstår den?

Regnbuens farver

Raymond L. Lee 14
Et flot billede, der viser regnbuens farver.

H. C. Ørsted medaljen til Ove Nathan

Medaljen overrækkes den 12. januar 1999 22
Ove Nathans indsats som formidler af fysik anerkendes.

Årsmøde 1999 i Dansk Fysisk Selskab

Tilmelding til DFS og KIF årsmøder 23
NKT Forskerprisen går i 1999 til en fysiker.

Nobelprisen i fysik 1998

Poul Erik Lindelof og Per Hedegård 26
Den fraktionelle kvante Hall effekt.

Nobelprisen i kemi 1998

Aage E. Hansen 30
Udvikling af beregningsmetoder indenfor kemien belønnes.

Professor Richmanns sidste eksperiment

Henrik Leth 34
Om lyn og torden.

Nordlys

Lars Lindberg Christensen, Anne Værnholt Olesen og Mike van der Poel 39
Hvad er det for en fysik, der ligger bag de flotte nordlys?

Flot bog om naturens lys

Boganmeldelse 46
Julegaven til fysikeren, der har alt.

Tilbud til unge under uddannelse.

Læs om næste nummer af Kvant 47

Forsiden:

Dette nummer af Kvant er et temanummer om naturens lysfænomener. Fotografiet på Kvant's forside er taget af den finske fotograf Pekka Parvianen. Billedet er eksponeret flere gange og viser, hvordan solskiven ændrer farve fra hvidgul til orange og rød ved solnedgang. I artiklen side 3 kan du læse mere om afbøjning af sollyset i atmosfæren og se nogle af Pekka Parvianens bedste fotografier.

Brydningsfænomener i Jordens atmosfære

Mike van der Poel, Niels Bohr Institutet, Ørsted Laboratoriet, Anne Værnholt Olesen, Frederiksberg Studenterkursus, og Lars Lindberg Christensen, Tycho Brahe Planetarium



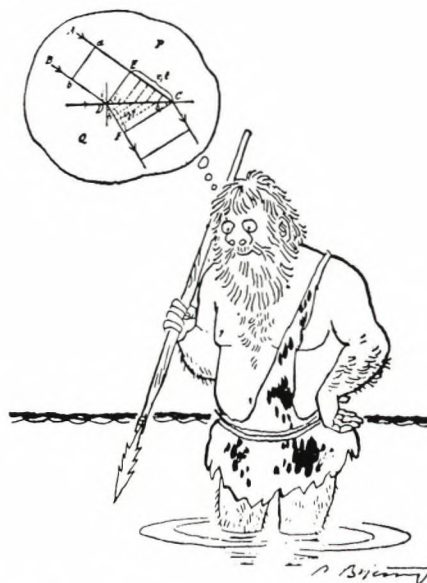
Figur 1. Isbjerget i forgrunden står på grund på ca. 200 meter vand og er ca. 60 meter højt. I baggrunden, formentlig 30–40 km væk ses yderligere en stribe isbjerger, som ser umådeligt høje ud, men de er sikkert kun 40–60 meter over havoverfladen. Billedet er taget af US Coast Guard, International Ice Patrol, den 3. juli 1998 i Labradorhavet på positionen $56^{\circ}34' \text{ N}$ og $58^{\circ}46' \text{ V}$.

Fra udsigtsposten i mastens top bliver luftspejlingerne ved med at give os falske alarmer. Alting har en fremtoning af uvirkelighed. Isbjerger hænger på hovedet på himlen; landet fremstår som lag af sølvfarvede eller gyldne skyer. Skybanker ligner land, isbjerger giver sig ud for øer eller nunatakker, og den fjerne barriere mod syd bliver synlig, selvom den i virkeligheden er ude af syne. Værst af alt er den bedrageriske tilsynekomst af åbent vand, skabt af refraction af fjernt hav, eller af Solen som skinner i en vinkel mod et område med glat sne eller på overfladen af isklipper under horisonten.

Sir Ernest Shackleton (1874-1922) fra kaptajnens log om bord på polarskibet "Endurance"

De mest utrolige lysfænomener kan dannes ved, at brydningsindekset¹ ændrer sig en smule i atmosfæren. Som mange vil være bekendt med, **afhænger størrelsen af den brydning, som lyset får ved passage mellem to lag** (forholdet mellem sinus til indfaldsvinklen og sinus til udfaldsvinklen), **af størrelsen af ændringen af brydningsindeks ved passagen fra lag 1 til lag 2** (forholdet mellem brydningsindices for det andet og første lag). Denne lovmæssighed kendes også som Snells lov, og den vil være det fysiske princip, som vi

bevæbner os med, når vi i det følgende kigger nærmere på nogle udvalgte refraktionsfænomener i Jordens atmosfære.



Figur 2. Snells lov i praktisk anvendelse. Fra Studiehåndbogen for det naturvidenskabelige fakultet, Københavns Universitet.

¹I artiklen benyttes ordene refraction og brydning i flæng. Med brydningsindeks underforstås absolut brydningsindeks.

Forskel på optisk og geometrisk virkelighed

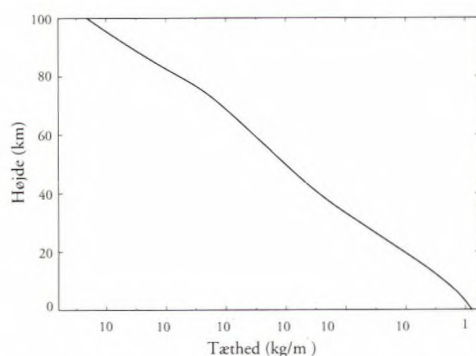
På figur 2 ses en tegning af en fortidsmand, der eftertænksomt overvejer Snells lov, før han kaster spydet efter fisken i vandet. Selv om det nok er tvivlsomt, om han har tænkt i tegningens notation, har det alligevel været livsnødvendigt for ham at vide, at fisken ikke er dér, hvor den ser ud til at være, men dér hvor Snells lov forudsiger, at den er! Hvis hulemanden lever i den vildfarelse, at lys altid går langs rette linier, får han svært ved at skaffe aftensmaden. Vores hjerne har en indbygget funktion, der konkluderer, at en genstand befinder sig i den retning, hvorfra vi modtager lys. Det er oftest ganske hensigtsmæssigt, men giver indimellem nogle fejlkonklusioner – f.eks. når vi ser igennem skillefladen mellem luft og vand, hvor forskellen i brydningsindeks ($\frac{n_2}{n_1}$) er relativt stor (rent vands brydningsindeks² er 1,332, og luftens brydningsindeks er 1,0003).

Snells lov:

Det relative brydningsindeks for lysets passage fra et medium 1 til et andet medium 2 er givet ved:

$$\frac{\sin i}{\sin b} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

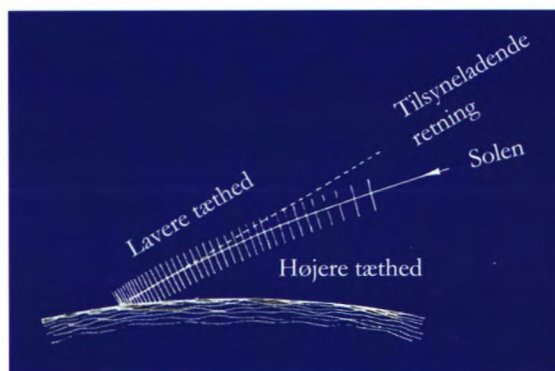
hvor i er indfaldsvinklen, b er udfaldsvinklen, $c_{1,2}$ lyshastigheden i det pågældende medium, c er lyshastigheden i vacuum og $n_{1,2}$ er det absolutte brydningsindeks for mediet.



Figur 3. Standardatmosfærens tæthedsprofil. Fra [2].

Refraktionens løft

Som jordbundne mennesker er vi henvist til at betragte Jordens omgivelser gennem et lag af atmosfære. Det påvirker naturligvis, hvad vi observerer længere ude. Som det vil være klart af det ovenstående, afhænger lys-

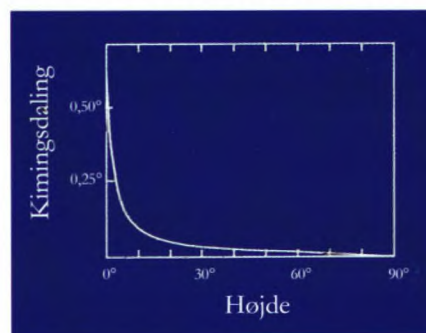


Figur 4. Kimingsdaling. Billedet af et objekt udenfor atmosfæren løftes højere over horisonten pga. brydning i atmosfæren. Jo mere atmosfære objektet ses igennem, desto stærkere bliver effekten. Fra [6].

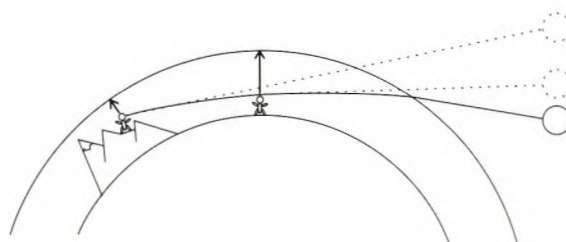
ets vej af brydningen, og dermed af brydningsindeksene. Atmosfærens lokale brydningsindeks afhænger af tætheden ρ :

$$n = 1 + k_1 \rho = 1 + k_2 \frac{P}{T} \quad (2)$$

hvor $k_{1,2}$ er konstanter, P er trykket, T er temperaturen og ρ er tætheden. I det sidste lighedstegn er idealgas-



Figur 5. Kimingsdalingen som funktion af et objekts højde over horisonten. Fra [5].



Figur 6. Fladtrykningen af objekter udenfor Jordens atmosfære bliver værre, når man befinder sig på et højt bjerg. Her skal man – når man ser på et objekt i horisonten – registrere lys, der har passeret en endnu større del af Jordens atmosfære end normalt. Omvendt har man på et højt bjerg mindre atmosfære lige over sig, og derfor placeres astronomiske observatorier oftest på højtliggende steder. Tegning: forfatterne.

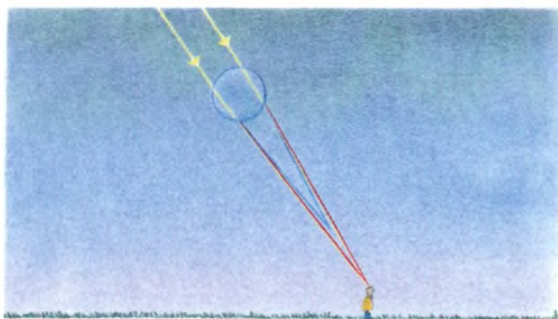
²Vi angiver brydningsindekser ved $\lambda = 6328 \text{ Å}$, som er HeNe laserens bølgelængde



Figur 7. En observatør, der befinder sig højt over jordoverfladen (her ombord rumfærgen), skal kigge gennem mere atmosfære. Derved forstærkes fladtrykningen af udstrakte objekter i horisonten. Foto: NASA.



Figur 8. Kolde og varme luftbobler opfører sig som hhv. samle- og spredelinser. Tegning: Claus Rye Nielsen.



Figur 9. Dispersion i luftbobler giver kromatisk aberration. Luftbobler, der i forskellige højder passerer mellem observatøren og stjernen, bevirker at stjernens farve varierer. Tegning: Claus Rye Nielsen.

ligningen brugt til at relatere tætheden til tryk og temperatur. Til overvejelser omkring atmosfærisk refraction bruges i dag tit en standardatmosfære [1], hvis tæthedsprofil er som vist på fig. 3.



Figur 10. Princippet i en normal luftspejling. Luftlaget over overfladen er varm i forhold til luften længere oppe. Dermed afbøjes de lysstråler fra træet, som strejfer dette luftlag, opad. De afbøjede lysstråler giver et spejlbillede af træet. Tegning: Claus Rye Nielsen.

Luftens brydningsindeks er proportional med dens tæthed, og da tætheden af atmosfæren falder med voksende højde over jordoverfladen, vil brydningsindekset aftage udefter. Dette bevirker, at atmosfæren gradvist afbøjer det lys, vi modtager fra verdensrummet. For eksempel flyttes solskivens tilsyneladende position: Jo tættere på horisonten Solen kommer, desto mere løftes dens position opad. Om natten kan den samme effekt ses på stjernernes positioner. I navigationen betegnes atmosfærens løftende effekt som **kimingsdaling**.

Netop for folk som astronomer og navigatører er kimingsdalingen vigtig at forstå. Allerede omkring år

1700, hvor en ny forståelse for optikken spirede, var der stor interesse for problemstillingen, og blandt andre arbejdede Ole Rømer med en teori for dette fænomen [4]. Også Christiaan Huygens beskæftigede sig med refractionen. Han skrev om "de refractioner som sker i luften" i sin berømte afhandling om lys fra 1678:

"... pga. dem ser vi ofte objekter hvilke Jordens krumning ellers burde skjule; som øer og bjergtoppe, når man er på havet. Og også på grund af dem ser Solen og Månen ud til at være stået op før end de faktisk er, og ser ud til at gå ned senere: Således at til tider har Månen været formørket, mens Solen stadig var at se over horisonten."

Rømers teori er simpel, idet den antager en atmosfære af given tykkelse med konstant tæthed (og dermed brydningsindeks), mens Huygens nævner, at atmosfæren har faldende tæthed og brydningsindeks op efter i atmosfæren.

Kimingsdalingens størrelse

En plan bølgefront, som bevæger sig ned igennem atmosfæren, afbøjes gradvist, således at en lysstråle (jvf. Snells lov, ligning (1)) ser ud til at blive "tiltrukket" af områder med højere tæthed. Den største del af brydningen finder sted indenfor atmosfærens nederste 50 km. I dette område er standardatmosfæren en god approksimation, og derfor kan kimingsdalingen tabellægges med god nøjagtighed (se figur 5).

Gør det selv - Bøj en lysstråle:

Ved at lave en mættet opløsning af sukker i vand, kan man skabe en minimodel af atmosfæren, med kraftig variation i n som funktion af højden over bunden. Dæk halvdelen af bundet af et fyldt vandkar med sukkerknaller. Vandkarret skal have gennemsigtige og plane sider. Efter ca. et døgn's tid, når sukkeret er opløst i vandet, haves en kraftig gradient i sukkerkoncentrationen, således at koncentrationen er størst ved bunden. Opløsningens brydningsindeks varierer tilsvarende. Nu sendes en laserstråle vandret ind gennem opløsningen, og strålen vil tydeligt ses at bøje nedad som et resultat af variationen af n i opløsningen. Strålens tegning i vandet kan forbedres ved at tilføje nogle dråber skummetmælk.

Effekten er som sagt stærkest for et objekt ved horisonten, og her bliver forskellen mellem den tilsyneladende position og den rigtige position, så meget som $0,6^\circ$! Da sol- og måneskivernes diameter begge er ca. $0,5^\circ$ betyder dette, at Solen og Månen faktisk er gået ned, når vi ser dem forsvinde under horisonten. Daglige variationer i luftens temperatur og tryk, og dermed brydningsindeks, kan forskyde det præcise tidspunkt for solskivens forsvinden bag horisonten med

flere minutter, hvorfor almanakkens [3] tider for den egentlige solnedgang i realiteten kun er vejledende.

Hvis en lysstråle går fra et medium til et andet og derefter tilbage til det første medium gennem parallelle grænseflader, er resultatet, at lysstrålens retning ikke ændres. Lysstrålen vil blot parallelforskydes. Denne effekt udnyttes ved meget præcise positionsmålinger indenfor den gren af astronomien, der hedder astrometri. Ved at placere en kikkert i vacuum kan man reducere atmosfærens brydning kraftigt, og refractionens effekt kan dermed udelades af beregningerne.

Forskellen på styrken af kimingsdalingen fra toppen til bunden af udstrakte objekter som sol- og måneskiven bevirker en forvrængning af billedet af disse objekter. Bunden af både måneskiven og solskiven vil blive løftet mere end toppen, hvilket fører til en ca. 20% **fladtrykning** af både måne- og solskiven. Ofte vil man ikke opdage fladtrykningen, hvis ikke man kigger efter den specielt, da hjernen har en fabelagtig evne til at lave geometriske korrektioner. Generelt gælder det, at de nævnte effekter af atmosfærisk refraction for objekter i horisonten bliver større, jo højere op over havets overflade observatøren befinder sig. Dette skyldes, at lyset så skal passere gennem mere atmosfære (figur 6).

I det ekstreme tilfælde, hvor man befinder sig i et rumskib over atmosfæren, skal lyset passere gennem dobbelt så meget atmosfære, som hvis man stod på jordoverfladen (figur 7). Set fra rummet bliver fladtrykningen derfor dobbelt så stor som set fra jordoverfladen. Men allerede fra et højt bjerg kan en betydelig forøgelse af Solens og Månens fladtrykning ses. Læg i øvrigt mærke til at det forholder sig omvendt for objekter højere oppe på himlen. For disse vil refractionens effekt blive mindre, fordi der er mindre atmosfære, lyset skal igennem.

Om luftbobler og tindrende stjerner

Står man en aften på en flad dansk villavej og studerer stjerner, vil man kunne se et andet refraktionsfænomen: **stjernernes tindren** eller scintillation. Med fare for at berøve en enkelt romantiker eller to et mysterium, så er forklaringen igen ganske simpelt Snells lov. Stjerner lodret over os vil meget sjældent ses blinke, mens stjerner der står i horisonten, ses både at blinke og at skifte farve. Scintillationen afhænger altså af stjernernes højde over horisonten, hvilket tydeligt viser, at den er et atmosfærisk fænomen. Det er små lokale variationer i temperaturen, der er på spil. For at gøre det lidt enkelt, kigger vi kun på kuglerunde luftvariationer (luftbobler) her, selvom de "rigtige" ikke nødvendigvis er kuglerunde. En varm luftboble vil bestå af luft med et lavere brydningsindeks end den omgivende koldere luft (jvf. ligning (2)). Dette vil gøre, at luftboblen virker som en spredelinse.

Omvendt består en kold luftboble af luft med et højere brydningsindeks end den omgivende luft, hvilket gør, at den virker som en samlelinse. På figur 8 er de to

typer af luftbobler illustreret, men man kan også forstå effekten ved at tænke på, hvorledes en glaskugle kan fungere som samlelinse. Effekten bliver, at stjernen vil stige og falde i lysstyrke, når forskellige luftbobler bevæger sig ind mellem os og stjernen.

Dispersion i atmosfæren kan forklare, hvordan klare stjerner i horisonten tilsyneladende skifter farve. De forskellige bølgelængder i stjernelyset vil brydes mere eller mindre (se også figurerne 14 og 19), og derfor vil luftboblens fokuspunkt ligge i forskellig afstand for lysets forskellige farver (jvf. figur 9). Dette er helt analogt med det, man kalder kromatisk aberration i sædvanlige linser.

Graden af stjernernes tindren påvirker mulighederne for at foretage astronomiske observationer fra jordoverfladen. Astronomernes term *seeing* er et mål for luftens ro eller "kvalitet" og er således et mål for, hvor store lokale variationer der er i luftens temperatur.

Luftspejlinger

Forholdsvis store lokale tæthedsgradienter kan opstå, hvor luften opvarmes eller afkøles i forhold til omgivelserne. Den tilsvarende variation i brydningen medfører, at lysstråler til tider ikke udbreder sig retlinet, selv over mindre afstande. Det er denne effekt, som ligger til grund for luftspejlinger og andre former for forstyrrelser i billedet af objekter i omgivelserne. Luftspejlinger er godt beskrevet i de to engelske standardværker om lysfænomener i naturen af Lynch og Livingstone [5] og Minnaert [6].

Den **normale luftspejling** (inferior mirage - se figur 10) er, som navnet antyder, meget almindelig. Den opstår, når et luftlag lige over en overflade er blevet opvarmet kraftigt i forhold til den omgivende luft. For os er det typiske eksempel luftspejlingen af en bil på en varm asfaltvej om sommeren. Men den normale luftspejling forekommer året rundt og er egentlig så normal, at den til tider ligefrem opfattes som en del af landskabet.

En lysstråle, der nærmer sig en opvarmet overflade i en strejfende vinkel, vil gradvist afbøjes opad, mens den kommer ned i lag med mindre tæthed. Hvis indfaldsvinklen er tæt på 90° afbøjes lysstrålen så meget opad, at den ikke rammer overfladen, men fortsætter op og væk fra overfladen igen. Resultatet er, at en observatør, foruden det direkte billede af et fjernt objekt, kan se et ekstra billede, som står på hovedet under det direkte billede, som om en spejlende overflade havde været mellem observatøren og objektet. En luftspejlings udstrækning er typisk ikke mere end $0,5^\circ$ og kan derfor med fordel observeres med en prismekikkert eller fotograferes med en kraftig telelinse.

Imidlertid er der flere detaljer i den normale luftspejling, som afviger fra spejlbilledet dannet af en simpel spejlende overflade. For det første findes en grænselinie over hvilken, lyset fra et fjernt objekt ikke spejles, fordi indfaldsvinklen for lysstråler herfra bliver for

lille. Mere bemærkelsesværdig er forsvindingslinien, som ligger under grænselinien. Det er ikke muligt at se dele af et fjernt objekt, som ligger under denne linie. Alle lysstråler som udsendes fra området under forsvindingslinien afbøjes så meget op, at de passerer over observatørens hoved. Luftspejlingen af det fjerne objekt optræder som en spejling i forsvindingslinien, og hvis denne ligger højt nok, kan objektet fremstå som løsrevet fra horisonten og tilsyneladende hænge frit i luften som vist på figur 11.

Løftes observatørens udsigtspunkt (f.eks. ved at han/hun går op på en stige) sænkes forsvindingslinien, og luftspejlingen fremstår mindre markant. Omvendt forstærkes effekten, hvis man går i knæ. Den nu afdøde hollandske astronom og biolog Marcel Minnaert anbefaler, at man tilføjer en ekstra dimension til strandturen ved at lægge sig ned på sandet: "*Når du ligger fladt på sandet med dine øjne så tæt på overfladen som muligt, ser du ikke noget klart reflekteret billede, men hvis du løfter hovedet en smule, ser det pludseligt ud som om, du er omgivet af en reflekterende sø, og du kan se 10–20 cm høje objekter 30 m væk reflekteret i den.*" [6]

En dybere forståelse af den normale luftspejling kan opnås ved at antage en given form for temperaturprofil af luften lige over overfladen og anvende denne som input for ray-tracing. En omskrivning af formel (2) giver, at brydningsindekset minus en er omvendt proportional med temperaturen, således for brydningsindeks n_1 og n_2 for to områder med temperatur hhv. T_1 og T_2 gives:

$$\frac{n_1 - 1}{n_2 - 1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (3)$$

Over en asfaltvej er det muligt en sommerdag at have et temperaturfald på $20\text{--}30^\circ\text{C}$ henover den første centimeter over vejbelægningen. Den store temperaturgradient giver anledning til konvektionsinstabilitet, hvilket gør luftspejlingen flimrende. Over enge og andre flade områder kan der opstå mere rolige luftspejlinger. En mulig temperaturprofil lige over sådanne overflader kan være eksponentielt aftagende med en skalafaktor eller henfaldskonstant på $5\text{--}20$ cm. En så dramatisk temperaturprofil giver i computerberegnet ray-tracing en forbløffende god overensstemmelse med mange observerede luftspejlinger. Under mere specielle forhold, når der f.eks. strømmer varm luft henover overfladen, kan andre temperaturprofiler observeres. Det vil i visse tilfælde være hensigtsmæssigt at anvende en temperaturprofil, der ligger tæt på en stepfunktion, dvs. hvor temperaturen falder brat i en vis højde. Detaljerne i temperaturprofilen kan gøre spejlbilledet langstrakt eller sammentrykket, og det er også muligt at have flere ekstra skiftevis omvendte og retvendte billeder under det direkte billede.

Under specielle meteorologiske forhold kan en temperaturinversion i atmosfæren opstå. Når et lag af varm luft ligger over et koldere overfladelag, kan **svævende luftspejlinger** (superior mirage) opstå. Lysstråler, som



Figur 11. Normal luftspejling set over vand. Bemærk at øen til venstre næsten ser ud til at være løftet over horisonten. Dette skyldes at en del af den blå himmel er spejlet under øen. Foto: Pekka Parviainen.



Figur 12. Det klassiske eksempel på en normal luftspejling er "vandpytten" på en skolhed asfaltvej. At det også – som her – ses i ørkenen mere end antyder, at der er tale om et optisk bedrag. Foto: Lars Lindberg Christensen.

bevæger sig opad afbøjes nedad og kan returneres mod jorden. Øjnene registrerer altså lys fra et givet objekt, som om det kommer fra to steder – dels "det rigtige sted" og dels et sted, der opfattes som liggende over "det rigtige." Resultatet er, at man kan se et ekstra billede svæve over det direkte billede af et fjernt objekt (se figur 13 og 15).

Fysikken bag den svævende luftspejling er meget lig den, der ligger bag den normale luftspejling, men afbøjningen af lysstrålerne kan her forekomme flere hundrede meter over jordoverfladen. Som et resultat kan svævende luftspejlinger til tider ses over afstande på flere hundrede kilometer.

Svævende luftspejlinger er mest almindelige over havet og i polare egne, hvor varm luft kan strømme over en kold overflade. I flere tilfælde er norske fjelde observeret højt på himlen fra Hanstholm i Jylland. Man mener også, at opdagelsen af både Island og Grønland ikke var så stor en overraskelse for de opdagelsesrejsende, idet de havde observeret luftspejlinger af landmasser i den rigtige retning, allerede før de stævnede ud.

Luftspejlinger kan også give alvorlige problemer for skibsfarten, hvilket citatet i begyndelsen af denne artikel vidner om. Blandt sømænd eksisterer myten om kong Arthurs søster, Fata Morgana, som med sine luftkasteller skulle lokke søfolk i fordærv.



Figur 13. Princippet i en svævende luftspejling. Her giver en temperaturinversion anledning til at lysstråler sendt opad fra et objekt kastes tilbage mod Jorden. Tegning af Claus Rye Nielsen.

Lysfænomenet **fatamorgana** er en kombination af den normale og svævende luftspejling, som opstår, når temperaturprofilen over havoverfladen har et minimum i nogle meters højde. Fjerne objekter kan blive strukket kraftigt ud og fremstå som spir og tårne fra en

by. Udtrykket fatamorgana stammer oprindeligt fra Italien, hvor fænomenet jævnligt kan ses over Middelhavet.

Solnedgangen og det grønne glimt

Solnedgangen er en vidunderlig demonstration af atmosfæriske brydnings- og spredningseffekter. Meinel og Meinel [7] har faktisk skrevet en hel bog om fænomener i forbindelse med solnedgangen. Vi har allerede diskuteret, hvordan atmosfærisk refraktion giver en fladtrykt solskive, men forskellige temperaturvariationer i atmosfæren kan også forvrænge solskiven til ukendelighed. På figur 16 ses en lagdelt forvrængning af solbilledet, der af mere eller mindre indlysende årsager kaldes **den kinesiske lanterne-effekt**. Den skyldes stratifikation – lagdeling af atmosfæren i lag der hver især har forskellige temperatur og dermed brydningsindeks. En anden effekt er dannelse af en **modsol** pga. en normal luftspejling. Modsolen opstår under horisonten og stiger op efterhånden som Solen nærmer sig horisonten, som vist på figur 16. På et tidspunkt smelter de to billeder sammen, og de to solbilleder forsvinder samtidigt.

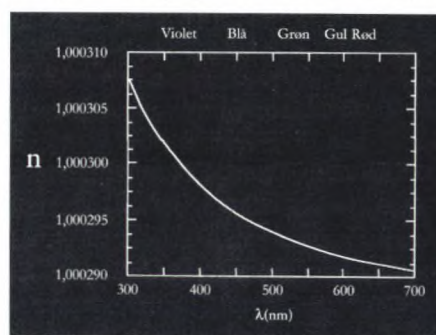
I arktiske egne kan man observere et ekstremt tilfælde af atmosfærens indflydelse på observation af Solen. Når Solen med en meget flad vinkel er ved at stå op (efter måneder under horisonten), kan atmosfærens afbøjning af sollyset gøre, at solen nogle gange står op uger for tidligt. Man har ligefrem givet fænomenet sit eget navn: **Novaya Zemlya fænomenet**. Det blev første gang observeret af William Barents i 1597. Solen blev under specielle forhold løftet 5° , så den kom til syne to uger før solopgangen var ventet. Johannes Kepler forsøgte uden held at give forklaring på fænomenet, og det er i nyere tid blevet studeret nærmere af Lehn og German i 1979 [8]. Fænomenet er beslægtet med luftspejlinger, og forklares ved, at solstråler ledes af et lag kold luft med stor tæthed til at følge Jordens krumning over et stykke. Denne form for ledning har lighedstræk med ledningen af lys i lyslederkabler.

Gør det selv – Lav din egen solnedgang:

Atmosfæren spreder det blå lys mere end den spreder det røde lys. En kunstig atmosfæremodel kan laves ved at hælde en smule skummetmælk i et vandkar. En bred hvid lysstråle, enten fra en diasprojektor eller fra en hvid lommelygte, sendes vandret ind i blandingen. Rødfarvningen af lyset som resultat af spredning af den blå del af lyset vil kunne ses tydeligt.

Det mest spændende og omdiskuterede fænomen i forbindelse med solnedgangen er nok **det grønne glimt**. Det fuldt udviklede grønne glimt er meget sjældent. Når det endelig optræder, er det som en klar, grøn flamme, der skyder op fra Solens toppunkt, net-

op som solskiven forsvinder under horisonten. Det hele varer højst et par sekunder. Jules Verne skrev i 1882 en bog med titlen "Det grønne glimt", hvor han beskriver den grønne farve således: "... en vidunderlig grøn som ikke findes noget andet sted i naturen. Hvis grønt findes i paradiset må det være denne grønne: Den sande håbets grønne farve!". Det grønne glimt opstår som resultat af et nøje afstemt samspil i atmosfæren mellem de fysiske processer refraktion, dispersion, spredning og absorption – det er næsten for godt til at være sandt. Kort fortalt er forklaringen på det grønne glimt således: Kimingsdalingen er ikke ens for alle farver. Pga. dispersion brydes det kortbølgede lys mere end det langbølgede (se figur 14 og 17). Et resultat af dette er, at dispersionen danner et kontinuum af delvist overlappende solskiver hver med sin farve. For den ihærdige observatør giver det mulighed for at se en tynd rand af grønblåt lys på den øverste del af solskiven.

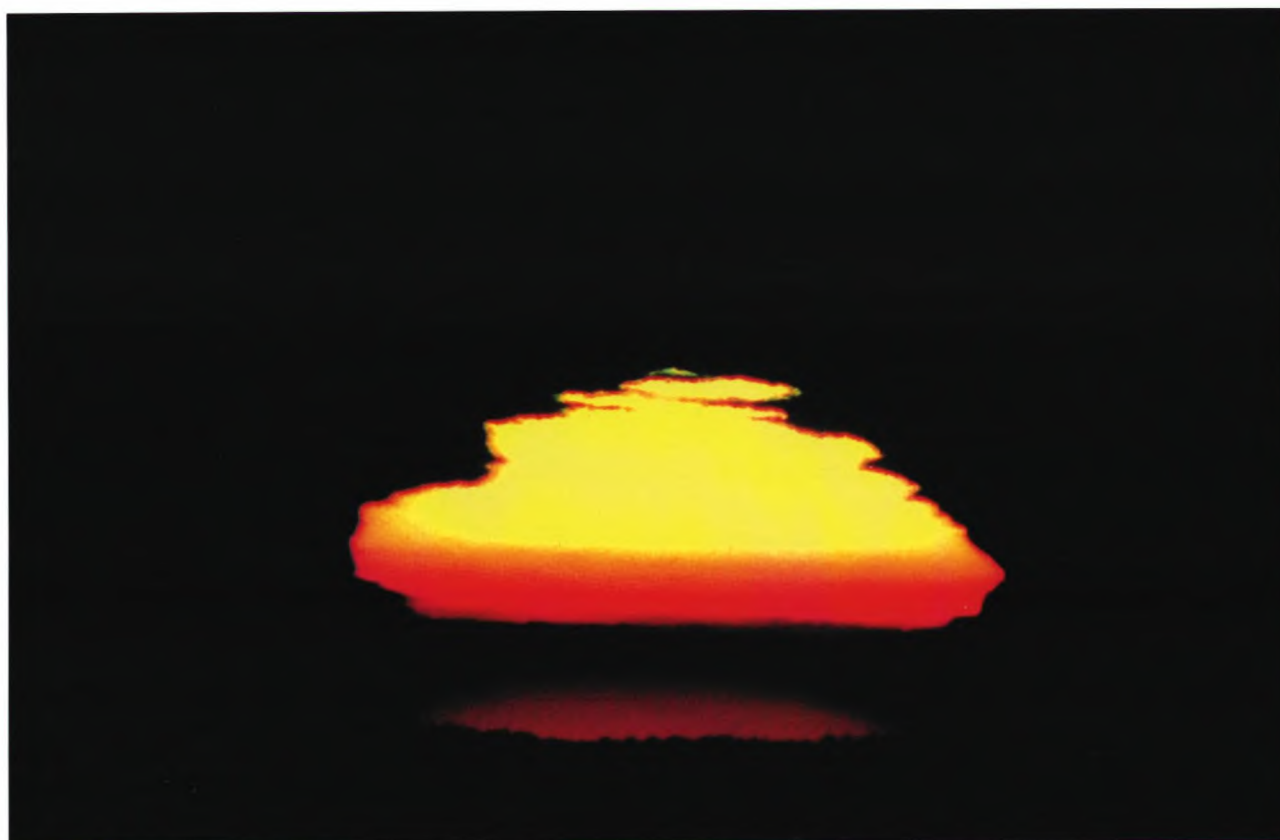


Figur 14. Dispersion - brydningsindekset varierer med bølgelængden. Ved normal dispersion mindskes brydningsindekset med stigende bølgelængde. Fra [5].

I princippet er der en tilsvarende en rød rand på den underste del af solskiven. Men denne kan være lidt sværere at observere, og mens Solen er ved at forsvinde under horisonten er den selvfølgelig skjult. Rayleighspredning på luftens molekyler bevirker, at en del af sollyset fjernes. Rayleighspredningens tværsnit er proportionalt med λ^{-4} , så den kortbølgede del af lyset svækkes mest. Resultatet er den velkendte **rødfarvning** af solskiven. Udover disse effekter er der også en vis absorption i vand- og O_3 -molekyler. Disse absorberer fortrinsvis dele af det gule og røde lys. Samspillet mellem disse processer giver en gang imellem mulighed for, at der øverst på solskiven opstår et såkaldt **grønt segment**, som er forløber for det grønne glimt. Segmentet er ikke særligt stort - omtrent $1/100^\circ$ – så det afsløres først ved omhyggelig iagttagelse. På figur 16 med billedet af solnedgangen med modsolen anes det grønne segment øverst på solskiven. I særlige tilfælde kan temperaturvariationer i atmosfæren bevirke en abnormal refraktion af lyset, der forstørrelser det grønne glimt kraftigt. I et sekund eller to lige idet solskiven forsvinder helt under horisonten, kan der skyde en grøn "flamme" op over Solen – det rigtige grønne glimt, som det kun er få forundt at se (figur 18).



Figur 15. Svævende luftspejling. Bemærk at skibet i mellemgrunden ikke spejles. Foto: Pekka Parviainen.



Figur 16. Solnedgang med modsol. Modsolen er en luftspejling af solskiven. Foto: Pekka Parviainen.



Figur 17. Dispersionen bevirker, at solskiven ved solnedgang består af en række overlappende solskiver med forskellige farver. Tegning af Claus Rye Nielsen.



Figur 18. Et sjældent billede af det grønne glimt. Foto: Pekka Parvianen.

Referencer:

- [1] J. M. Wallace og P. V. Hobbs (1972) "Atmospheric Science", Academic Press.
- [2] "CRC Handbook of Chemistry and Physics" (1998) 79th. edition, CRC Press.
- [3] Københavns Universitets "Skriv- og Rejsekalender".
- [4] E. Poulsen (1997) "Rømer og refraktionen", KVANT, oktober 1997, bind 8, nr. 2, side 24.
- [5] Lynch og Livingstone (1995) "Color and Light in Nature", Cambridge.
- [6] M. Minnaert (1993) "Light and Color in the Outdoors", Springer.
- [7] A. Meinel og M. Meinel (1983) "Sunset, twilights, and evening skies", Cambridge.
- [8] W. H. Lehn (1979) J. Opt. Soc. Am., bind 69 side 776, også: W. H. Lehn og I. I. Schroeder (1979) Polarforschung, bind 49 side 173.



Mike van der Poel Ph.d. studerende på Niels Bohr Institutet, Ørsted laboratoriet, Københavns Universitet. Arbejder med eksperimentel atomfysik.



Anne Værnholt Olesen Fysiker. Arbejder på Frederiksberg Studenterkursus. Koordinator for Tycho Brahe Planetariums skoleservice.



Lars Lindberg Christensen, har gennem næsten 10 år arbejdet på Tycho Brahe Planetarium med astronomisk formidling, produktioner og tekniske emner. Oversætter af flere populære værker om astronomi. Billedet er fra Tycho Brahe Ekspeditionen '98.

De tre forfattere er bidragsydere til, og udgør redaktionsgruppen for, den populærvidenskabelige bog "Lysfænomener i Naturen", som for nylig er udgivet på Høst & Søn's forlag. I forbindelse med udarbejdelsen af denne artikel ønsker de at takke Michael Cramer, Niels Bohr Institutet, for gode diskussioner.

Fysikernes rejsehold

Fysikforedrag i gymnasiet

En gruppe fysikstuderende fra Københavns Universitet tunerer under navnet "Rejseholdet" rundt på gymnasier for at oplyse om og skabe interesse for natuvidenskab i almindelighed og fysik i særdeleshed.

Studerne gør det på eget initiativ for at formidle deres begejstring for faget. I et diasunderstøttet foredrag besvarer de spørgsmålene:

1. Hvad er fysik?
2. Hvorfor skal man overhovedet beskæftige sig med fysik?
3. Hvordan er det at studere fysik på universitetet?
4. Hvad kan jeg blive?
5. Hvor rykker det i fysikken lige nu?

Studerne gør meget ud af, at sproget skal kunne forstås af en almindelig gymnasieelev - fysik på højt niveau er altså ikke en forudsætning. Foredraget kredser om fysikkens væsen og den naturvidenskabelige metode. Der gives også et indblik i den del af fysikken, der ikke behandles i gymnasiet. Det kan naturligvis kun blive på et populært plan - til gengæld

bliver det både underholdende og inspirerende.

I fysikfagbilaget til gymnasiebekendtgørelsen nævnes "fysikkens verdensbillede" og "fysikken i historisk og filosofisk betydning". Derfor forsøger foredraget delvist at belyse disse to dimensioner.

Initiativet er støttet af Niels Bohr Institutet, så foredraget er gratis. Der vil typisk være to personer til et foredrag, som varer en dobbelttime på 2 x 45 minutter med en pause imellem. Initiativet er primært rettet mod 2. og 3.g fysikklasser.

Hvis du gerne vil have rejseholdet til dit gymnasium, så kontakt en af deltagerne og foreslå et tidspunkt:

Bente Hansen (bhansen@nbi.dk)

Steen Eiler Jørgensen (sej@fys.ku.dk)

Frederik Bundgaard (bundgard@fys.ku.dk)

Anne-Marie Levy (levy@nbi.dk)

Postadresse:

Rejseholdet, Ørsted Laboratoriet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø.

Telefax 3532 0460 - mærket "Rejseholdet"

Regnbuen

Allan Bro Hansen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Regnbuen er et velkendt fænomen, der selvfølgelig har kunnet observeres siden tidernes morgen og givet anledning til meget undren og mystik. De mytologiske beskrivelser er mange. Mange mennesker og eventyrfigurer har f.eks. været på jagt efter guldet ved regnbuens ende, og i Biblen opfattes regnbuen som et symbol på Guds pagt med mennesket efter syndfloden. Dette ses i 1. Mosebog kap. 9 v. 13-14, hvor Gud under en tale til Noah siger: "Jeg sætter min bue i skyerne, og den skal være tegn på pagten mellem mig og jorden". Regnbuen gav dermed anledning til den første store diskussion mellem natur- og religionsvidenskaben, idet teologerne altså ikke mente, at regnbuen eksisterede før syndfloden. Uanset om dette er tilfældet eller ej, er det dog tankevækkende, at mennesket på trods af denne fascination gennem årtusinder først for nylig har fået indsigt i, hvordan regnbuen skal forstås!

Jeg vil i det følgende forklare, hvordan regnbuefænomenet opstår. Det første vigtige skridt på vejen er, at erindre at sollys er hvidt, fordi det består af alle farver, og at de enkelte farver er kendetegnet ved hver deres bestemte bølgelængde. Regnbuen må altså på en eller anden måde fremkomme ved at opsplutte sollyset i bestemte bølgelængder! Allerførst må vi dog gøre os klart, hvilke fænomener, der skal beskrives. Regnbuefænomenet består nemlig ikke blot af en bue med rød øverst og violet nederst. Under gunstige forhold kan man se følgende regnbuefænomener på himlen:

- * En primær regnbue, der observeres på himlen modsat solen i en buevinkel på ca. 42 grader. Buevinklen er defineret som vinklen mellem solstrålernes indfaldsretning mod Jorden og vores synsretning (se figur 1). Primærbuen har rødt lys øverst og violet nederst, mens de mellemliggende buer består af farverne orange, gul, grøn og blå.

- * En sekundærbue, der ses over den primære bue i en buevinkel på ca. 50 grader, med en mindre lysintensitet. Sekundærbuens farvesammensætning er modsat primærbuens, dvs. at sekundærbuen har violet øverst og rødt nederst.

- * Et mørkt område mellem den primære og sekundære regnbue. Området kaldes for Alexanders mørke bånd.

- * Tilstedeværelsen af ekstra regnbuer under primærbuen. Disse buer vil fremover blive omtalt som interferensbuer (den engelske betegnelse er supernumary arcs).

- * Når regnbuerne observeres gennem et par polaroid-solbriller vil den øverste del af buerne forsvinde!

De fleste har vel oplevet de to første punkter og ikke lagt mærke til det tredje. Regnbuen ud over Victoria-

faldene (se billedet på side 15) er et pænt eksempel på disse første 3 punkter. At observere regnbuens polarisation kræver så blot, at man går rundt med solbriller på en overskyet dag! Derimod skal man, som vi snart skal se, være overordentlig heldig, hvis man vil se interferensbuerne.

Historisk oversigt

Inden vi kaster os ud i en dybere regnbue-teori kan det være meget interessant at se, hvordan regnbuen er blevet beskrevet i tidens løb.

De første videnskabelige beskrivelser tillægges de græske filosoffer Anaximenes (585-525 f.v.t.) og Aristoteles (384-322 f.v.t.), der kun observerer den primære og sekundære regnbue. De mener begge, at regnbuerne skyldes refleksioner af sollys i skyer. Aristoteles fremsætter endda en egentlig teori baseret på geometriske betragtninger. Han er dog ikke i stand til at forklare sekundærbuen tilfredsstillende, men siger, at den blot bliver dannet "på samme måde" som den primære. Aristoteles er dog klar over, at en observation af regnbuen afhænger af observatørens position; regnbuen er altså ikke fasttømret på himlen, men skifter position, når observatøren gør det.

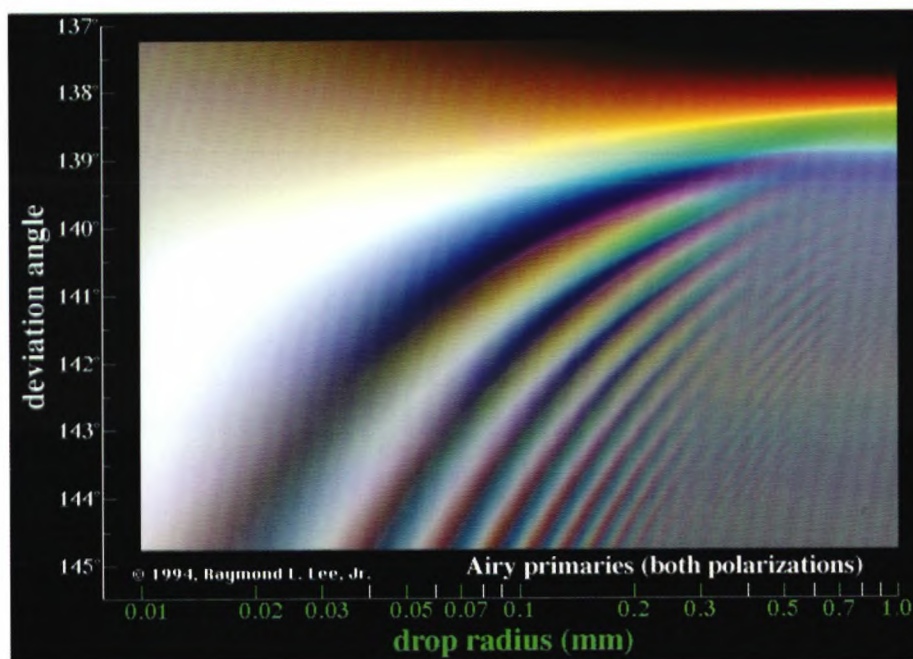
Det næste store skridt tages af den græske filosof Alexander (ca. år 200 e.v.t.), der observerer, at området mellem den primære og sekundære regnbue er mørkere end den omkringliggende himmel. Området kaldes derfor også meget naturligt for Alexanders mørke bånd. Alexander viser også, at Aristoteles' teori ikke kan forklare det mørke bånd, og konkluderer derfor, at Aristoteles' teori ikke kan være korrekt.

Alligevel sker der ikke rigtigt noget før år 1304, hvor en tysk munk kaldet Theodoric foreslår, at regnbuen kan beskrives ved refleksion i en enkelt regndråbe. Den primære regnbue kommer så fra lys, der reflekteres en gang i dråben, mens den sekundære bue hidrører fra lys, der er blevet reflekteret to gange. Desværre lægger ingen mærke til Theodoric's opdagelse, og der går faktisk over 300 år inden Descartes (1596-1650) indfører den samme teori. Både Theodoric og Descartes indser, at mange regndråber skal medvirke for at dække hele intervallet af regnbuevinkler.

En kvantitativ beskrivelse muliggøres med Snells lov fra 1621, der beskriver overgangen mellem to medier af forskellige brydningsindeks (brydningsindeks forklares i Box 1). Den egentlige baggrund for opdelingen i farver forstås dog først i 1666, hvor Newton udfører sit prismeeksperiment og opdager, at brydningsindekset afhænger af lysets bølgelængde! I 1700-tallet får man øjnene op for interferensbuerne. Man

Regnbuens farver

Af Raymond L. Lee, Jr.,
Oceanography
Department,
U. S. Naval Academy,
Annapolis, USA.



Farverne på dette billede er beregnet på grundlag af Airy's regnbueteori. Det viser hvorledes den primære regnbues farver ændrer sig som funktion af dråbestørrelse ("drop radius") og vinkel fra solen ("deviation angle" - en vinkel fra solen på 138° er lig med $180^\circ - 138^\circ = 42^\circ$ fra skyggen af iagttagers hoved). Hvis man følger en lodret linie på billedet ser man rækkefølgen af regnbuens (eller tågebuens) farver, som skyldes dråber af en given størrelse. Betragt f.eks. figurens øverste højre hjørne. Akkurat som i den naturlige primære regnbue ser man her, at farverne i den teoretiske regnbue øverst er røde og orange, og nederst er farverne grønne og violette. Når dråbestørrelsen aftager (gå til venstre på figuren), bliver regnbuen bredere og mere pastelfarvet, indtil den til sidst bliver en tågebue. Tåge består af ganske små vanddråber, og når dråberne bliver meget små, vil de enkelte farvebånd i regnbuen blive udbredt så meget, at alle farverne bliver blandet. Resultatet af farveblandingen bliver en bred, hvid regnbue. På figuren kan man se, at der sker når dråbestørrelsen bliver mindre end ca. 0,07 mm. Bemærk også de skiftende grønne og violette bånd under den primære regnbue. De skyldes interferenser og er en integreret del af regnbuen, men de er meget svagere og derfor vanskeligere at se i naturen. Den største chance for at se dem er nedenfor kraftige regnbuer. (Reproduceret fra Figur 14 i Raymond L. Lee, Jr., "Mie theory, Airy theory, and the natural rainbow" (1997) Applied Optics, bind 37, side 1506-1519.)

Software

Windows
Image acquisition
Image display and
data analysis
Control language

Platforme

Explorer
Discover
Aurora
Voyager
Universal

Åben
Arkitektur

Elektronik

ECU
CPU
Electrochemistry
Networking
Experimenter's tool kit

Hardware

AFM LFM
STM EFM
MFM SNOM

TOPOMETRIX
VISUALIZING THE MICRO WORLD

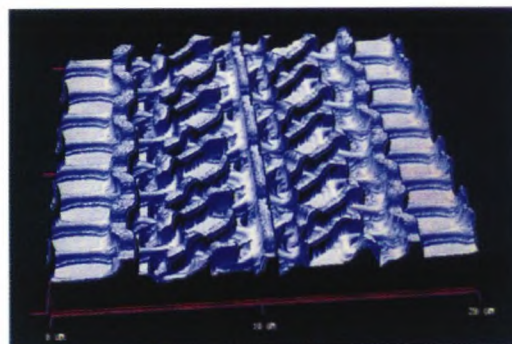
TopoMetrix er en af de førende producenter af **Scanning Probe Microscopes** i Silicon Valley, USA. **TopoMetrix** har været på forkant med udviklingen lige siden starten.

Flexibilitet er nøgleordet blandt ingeniørerne hos **TopoMetrix**. Det modulære design gør det muligt for brugeren at tilpasse software og hardware til egne nutidige og fremtidige behov. Dette indebærer en optimal udnyttelse af investeringen.

Fordele ved SPM: Mulighed for at se prøver ned til atomar størrelse. 3D-størrelse. Kan arbejde under vakuum, atmosfærisk tryk og i væsker. Ved SPM kræves der ingen forberedelse af prøverne.

Anvendelses områder: Biologiske undersøgelser under fysiologiske betingelser. Udvikling af mikroelektronik, elektrokemiske undersøgelser af materialer i deres oprindelige miljø. Materialeforskning, hvor der ses på fibre, ultraflade overflader, evaluering af overfladebehandling, etc.

**AFM
billede af
multilags
semi-
conductor
taget
med
TopoMetrix
Voyager.**



E-mail: dkbuchol@ibmmail.com

Buch & Holm A/S

Marielundvej 36 - 2730 Herlev ☎ 42 91 75 11 Fax 44 92 31 00

prøver i første omgang at forklare fænomenet ved at betragte flere refleksioner og ellipsoidiske dråber. Nogle mener også, at det skyldes refleksion på andre partikler som f.eks. svovl. Ingen er dog i stand til at finde en tilfredsstillende forklaring. I 1803 udfører Young sit velkendte dobbeltspalteeksperiment, der bekræfter lysets bølgenatur. Det muliggør interferens, der giver anledning til svingninger i intensiteten af lyset. Young ser selv sammenhængen med regnbuens interferensbuer, men må nøjes med en kvalitativ forklaring. I 1838 prøver Airy at give en kvantitativ beskrivelse af interferensfænomenet. En eksakt kvantitativ beskrivelse kommer dog først i 1908, hvor Mie og Debye ved hjælp af Maxwells ligninger løser problemet ved at beskrive brydningen af en plan bølge på en homogen sfære. Dermed er regnbueproblemet endeligt løst og forstået, men desværre kræver løsningen, at man beregner mange (ca. 1000) komplicerede led. Man arbejder i de følgende år derfor meget med at finde approksimative løsninger, der er lettere at håndtere, hvilket i 1965 lykkes for fysikeren Nussenzveig.

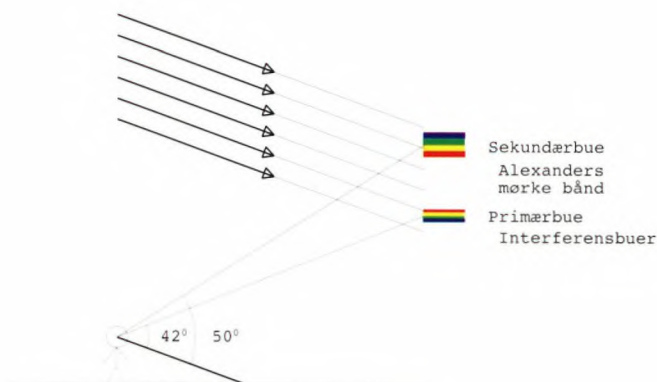


Regnbuen som den fremstod udover Victoriafaldene i Sydafrika en sommerdag i 1996.

Spejling og brydning

Jeg vil nu beskrive regnbue teorien, som den fremstår inden for geometrisk optik. Vi ser med andre ord bort fra lysets bølgenatur og opfatter solstrålerne som rette lini-

er. Alligevel er det muligt både at forklare primærbuen, sekundærbuen og Alexanders mørke bånd.



Figur 1. Fire af de observable fænomener: Beliggenheden af den primære og sekundære regnbue fastlægges ved buevinklen θ_{bue} , der er vinklen mellem solstrålerne og vores synsretning. Den primære bue ligger ved $\theta_{bue} \approx 42^\circ$, mens sekundærbuen findes ved $\theta_{bue} \approx 50^\circ$. Området mellem de to buer er mørkere og benævnes Alexanders mørke bånd. Endelig kan man være heldig og se de mindre interferensbuer under den primære regnbue.

Værktøjet:

Vi skal nu næsten udøve vold på følgende to vigtige love:

Refleksionsloven:

$$\theta_i = \theta_r$$

Brydningsloven:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

Vinklen θ_i er strålens indfaldsvinkel på en flade, mens θ_r er refleksionsvinklen efter en spejling i fladen. Spejlingsloven er altså blot den velkendte "indfaldsvinkel lig udfaldsvinkel". Brydningsloven, der også er kendt som Snells lov, gør brug af brydningsindekset n . Brydningsindekset for et stof er defineret som forholdet mellem lysets hastighed i vakuum og i det pågældende stof. Brydningsindekset n_1 refererer til brydningsindekset af det stof som strålen bevæger sig i indtil den med indfaldsvinkel θ_i møder et andet stof med brydningsindeks n_2 . Vinklen θ_t er så brydningsvinklen i grænsefladen mellem de to stoffer. Brydningsloven siger altså, at overgangen til et "langsommere" medie (dvs. $n_2 > n_1$) betyder, at brydningsvinklen vil være mindre end indfaldsvinklen (se også box 1).

Helt afgørende for regnbuens eksistens er dispersion. Dispersion er det grundlæggende fænomen, at brydningsindekset for en bølge i et medie ikke blot afhænger af mediet, men også af bølgelængden af den pågældende bølge. Brydningsindekset for udbredelse i vand ved temperaturen 20°C er vist i tabel 1.

Box 1. Overgang mellem medier :

Lys beskrives ved elektromagnetiske bølger, der igen beskrives ved bølgens elektriske og magnetiske felt. Bølgens udbredelsesretning er givet ved bølgevektoren $\mathbf{k}$, hvis størrelse angiver bølgelængden λ , idet $\lambda = 2\pi/k$.

Idet magnetfeltet er givet ved E-feltet og $\mathbf{k}$ nøjes man normalt med at beskrive de to sidstnævnte (det er også en vigtig faktor, at vekselvirkningen mellem en bølge og en partikel er styret af det elektriske felt). Den generelle situation ved en overgang mellem to medier fremgår af figuren nedenfor.

Spredningsplanet er planet udspændt af den indkomne bølgevektor $\mathbf{k}_i$ og normalen til grænsefladen (x-y plan) i punktet, der rammes af $\mathbf{k}_i$. E-feltet opdeles i en komponent liggende i spredningsplanet ($\mathbf{E}_P$, P for parallel) og i en komponent vinkelret på spredningsplanet ($\mathbf{E}_N$, N for normal).

Begge komponenter kan så behandles separat.

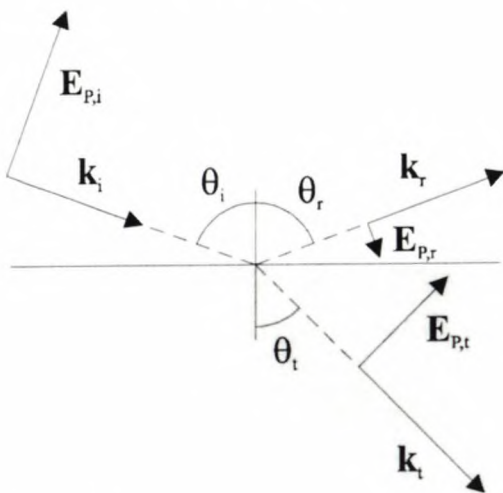
Et medie er karakteriseret ved dets brydningsindeks, der angiver forholdet mellem lysets hastighed i vakuum og i mediet. Dvs. jo hurtigere et udbredelsesmedie jo mindre brydningsindeks. Bølgevektoren beskrives ved brydnings- og spejlingsloven:

Refleksionsloven:

$$\theta_i = \theta_r$$

Brydningsloven:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$



Den generelle situation ved overgang mellem to medier. Her er situationen specielt udregnet for overgangen fra luft ($n = 1$) til vand ($n=1.33$) for en indfaldsvinkel på 70 grader. Idet figuren er tegnet i to dimensioner har jeg kun afbildet amplituden af E-feltets parallelkomponent; normalkomponenten vil være rettet ind i papiret.

θ_i , θ_r og θ_t er henholdsvis indfalds-, refleksions- og brydningsvinklen, der alle måles i forhold til en normal på overfladen, n_1 er brydningsindeks af medie 1, mens n_2 beskriver mediet strålen brydes ind i (se figur 11).

E-feltets størrelse beskrives ved Fresnels formler:

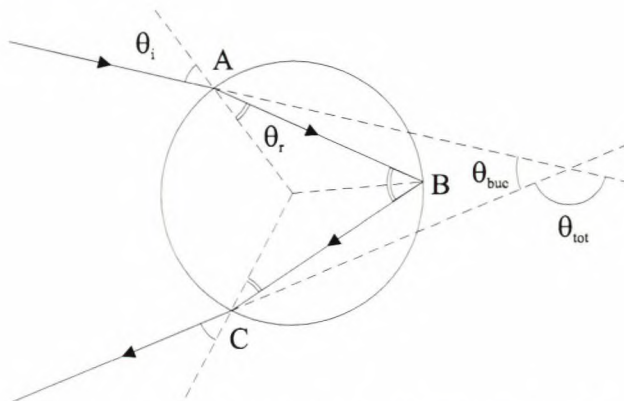
$$\begin{aligned} t_N &= \frac{E_{Nt}}{E_{Ni}} = \frac{2 \sin(\theta_t) \cos(\theta_i)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \\ r_N &= \frac{E_{Nr}}{E_{Ni}} = \frac{-\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \\ t_P &= \frac{E_{Pt}}{E_{Pi}} = \frac{2 \cos(\theta_i) \sin(\theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)} \\ r_P &= \frac{E_{Pr}}{E_{Pi}} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \end{aligned} \quad (1)$$

hvor t og r er refleksions- og transmissionskoefficienter for enten normal- eller parallelkomponenten.

Fresnels formler er ikke lige at gå til, men det bemærkes, at r_P er lig nul, hvis $\tan(\theta_i + \theta_t)$ bliver uendelig. Indfaldsvinklen, der opfylder dette, kaldes for Brewstervinklen θ_B og beregnes som $\arctan(n_2/n_1)$. Ved denne indfaldsvinkel vil den transmitterede E-felt altså kun bestå af normalkomponenten.

Primærbuen:

Fremgangsmåden består nu i at anvende brydnings- og refleksionsloven på figur 2, hvor en solstråle (med en bestemt bølgelængde) rammer en dråbe med indfaldsvinklen θ_i i punktet A og transmitteres ud af dråben i punktet C efter en refleksion på dråbens bagside i punktet B.



Figur 2. Den basale geometri bag den primære regnbue. En solstråle rammer regndråben i punktet A og transmitteres videre til B, hvor det reflekteres mod C for derefter at forlade dråbe igen.

Det er værd at bemærke, at vi kun arbejder i 2 dimensioner, idet vi nøjes med at behandle de stråler, der reflekteres fra en dråbe og rammer vores øjne (de øvrige stråler er uinteressante, idet vi ikke kan se dem!). Strengt taget er det pga. pupillens bredde muligt at definere flere spredningsplaner (se box 1 om spredningsplaner), der opfylder dette. Pupillens udstrækning er dog så minimal i forhold til de øvrige afstande, at det er en rimelig antagelse kun at arbejde med ét spredningsplan.

Idet vi sætter brydningsindekset af den omgivende luft til 1 kan vi umiddelbart finde brydningsvinklen θ_r ved hjælp af brydningsloven:

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{\sin \theta_i}{n}\right) \quad (2)$$

Pga. den ligebenede trekant, der opstår i den cirkulære regndråbe, vil θ_r være lig indfaldsvinklen i B på dråbens bagside, og da indfaldsvinkel er lig udfaldsvinkel, vil vi pga. endnu en ligebenet trekant også ramme punktet C med indfaldsvinkel θ_r . Endelig giver symmetrien, at den transmitterede vinkel i C blot er den oprindelige indfaldsvinkel θ_i .

Farve	Violet	Blå	Grøn	Gul	Rød
λ/nm	397	434	486	589	659
n	1.3435	1.3404	1.3372	1.333	1.3312

Tabel I: Brydningsindekset n i vand for forskellige farver ved temperaturen 20°C (λ er bølgelængden hørende til farverne, λ måles i nm = 10^{-9} m).

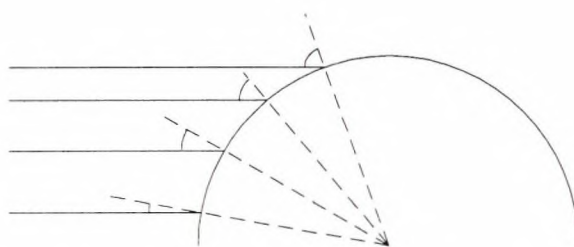
Regnbuens beliggenhed fastlægges som tidligere nævnt ved buevinklen θ_{bue} . Vinklen findes lettest ved at betragte den totale afbøjningsvinkel θ_{tot} for strålen, der er sammensat af tre retningsændringer på henholdsvis $\theta_i - \theta_r$ (i punktet A), $180^\circ - 2\theta_r$ (i B) og $\theta_i - \theta_r$ (i C), hvilket giver:

$$\begin{aligned} \theta_{tot} &= \theta_i - \theta_r + 180^\circ - 2\theta_r + \theta_i - \theta_r \\ &= 180^\circ - 4\theta_r + 2\theta_i \end{aligned} \quad (3)$$

På figur 2 ses, at buevinklen og afbøjningsvinklen tilsammen udgør 180 grader, og vi får dermed:

$$\theta_{bue} = 180^\circ - \theta_{tot} = 4\theta_r - 2\theta_i \quad (4)$$

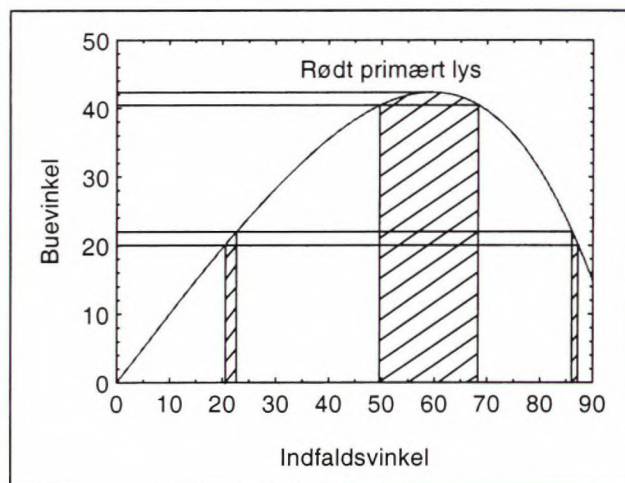
Vi bemærker, at forskellige indfaldsvinkler fremkommer ved at ramme dråben forskellige steder, hvilket er illustreret på figur 3. Alle indfaldsvinkler mellem 0 og 90 grader vil altså forekomme, uanset om solen står højt eller lavt på himlen.



Figur 3. Betydning af solstrålens indfaldshøjde på dråben: Forskellige højder svarer til forskellige indfaldsvinkler.

Ved hjælp af tabel 1 og ligning (2) er det nu muligt at afbilde buevinklen θ_{bue} som funktion af indfaldsvinklen θ_i for de forskellige farver, der er kendetegnet ved hver deres brydningsindeks. For rødt lys er resultatet vist i figur 4. Her kan vi umiddelbart konkludere, at vi i princippet kan se rødt lys i alle buevinkler fra 0 til 42.4 grader. Det altafgørende for vores iagttagelse af lyset er dog intensiteten af det pågældende lys. Den første tilgang er at observere, at et lille interval i buevinklen kan svare til et vidt forskelligt interval i indfaldsvinkler. Det er også illustreret på figur 4, hvor vi aflæser:

$$\begin{aligned} \theta_{bue} \in [40.4^\circ; 42.4^\circ] &\Leftrightarrow \theta_i \in [49.6^\circ; 68.3^\circ] \\ \theta_{bue} \in [20.0^\circ; 22.0^\circ] &\Leftrightarrow \theta_i \in [20.6^\circ; 22.6^\circ] \\ &\cup [86.0^\circ; 87.2^\circ] \end{aligned}$$



Figur 4. Buevinklen for primærbuen som funktion af indfaldsvinklen for rødt lys. Bemærk hvordan et lille interval omkring den maksimale buevinkel svarer til et stort interval af indfaldsvinkler.

Et buevinkelinterval fra 40.4 til 42.4 grader dækker altså over et langt større interval af indfaldsvinkler end intervallet fra 20.0 til 22.0 grader. Det kunne derfor være fristende at konkludere, at rødt lys er kraftigst omkring den indfaldsvinkel, der giver maksimal buevinkel. Tilsvarende betragtninger kan laves på de øvrige farver. For det violette lys finder man en maksimal buevinkel på ca. 40.6 grader. Det violette lys er således kraftigst ved en buevinkel på ca. 40.6 grader og de øvrige farver (orange, gul, grøn og blå) vil have maksimal intensitet mellem de to yderfarver rød og violet.

ler. Vi forventer altså at den sekundære regnbue har størst lysintensitet ved den minimale buevinkel. De præcise minimumsværdier kan igen findes ved differentiering af θ_{bue} . For rødt og violet lys bliver resultatet henholdsvis 50.4° og 53.6° , hvilket også er i overensstemmelse med vores grafiske aflæsninger.

Sekundærbuen er altså forstået: Ved en buevinkel på 50.4° ses det røde lys, fordi det er kraftigst ved denne vinkel og fordi ingen af de øvrige farver spredes i denne vinkel. Derefter følger det orange lys, der let kan vinde over det konkurrerende røde lys, der falder kraftigt i intensitet, når buevinklen overstiger 50.4° . Efter det gule, grønne og blå lys slutter vi endelig af med en violet bue, der ved buevinklen 53.6° vil overgå alle de øvrige farver i intensitet.

Vi bør slutteligt bide mærke i, at vi kun har betragtet en enkelt regndråbe. Det betyder dog ikke, at en regndråbe er ansvarlig for hele regnbuen. En enkelt regndråbe vil blot udsende alle regnbuens farver i forskellige buevinkler, men vi vil kun se den enkelte regndråbe under et lille buevinkelinterval. Det er derfor nødvendigt med mange regndråber for at dække hele regnbueintervallet (40.6° – 42.4° for primærbuen) i en enkelt stribe af regnbuen. Dertil kommer, at vi selvfølgelig betragter andre regndråber, når vi drejer vores blik for at se hele regnbuen. Derudover skal man huske, at regndråberne falder mod jorden, og derfor hele tiden skal erstattes af nye.

Ved at fastlægge regnbuens position ved hjælp af en vinkel er det også klart, at regnbuens position er et relativt begreb. To personer vil således ikke være enige om en regnbues beliggenhed, idet deres spredningsplaner dækker over forskellige regndråber. Desuden må solen ikke stå så højt på himlen, at dens stråler danner en vinkel med jordoverfladen på over 42 grader; så vil regnbuen nemlig dannes under jordoverfladen, og en observation er umulig (se evt. figur 1).

Alexanders mørke bånd

Ud fra vores behandling af primær- og sekundærbuen er det nu muligt at forklare Alexanders mørke bånd (det mørke bånd mellem primær og sekundærbuen).

Forklaringen følger umiddelbart af figur 7, der illustrerer, at der i princippet kan ses "primært" lys ved alle regnbuevinkler under 42.4 grader, mens "sekundært" lys ses ved alle regnbuevinkler over 50.4 grader. Vinkelintervallet mellem den primære og sekundære regnbue vil altså ikke oplyses af lys, der spredes efter en eller to refleksioner i regndråben og derfor vil dette område, der er døbt Alexanders mørke bånd, fremstå mørkere end områderne under den primære bue og over den sekundære bue. Når Alexanders mørke bånd ikke er helt sort skyldes det bidrag fra lys, der reflekteres direkte på regndråben og fra lys, der reflekteres i baggrundsskyer.

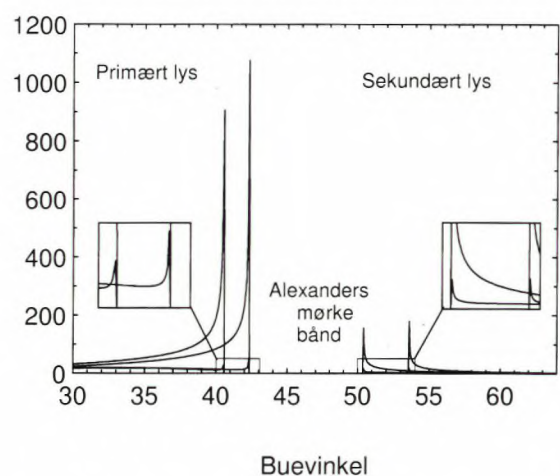
Flere regnbuer??

Vi har nu forklaret den primære og sekundære bue som hidrørende fra henholdsvis en og to indre refleksioner i regndråben. Det er derfor naturligt at spørge om flere refleksioner ikke vil give anledning til yderligere regnbuer?

Det vil de naturligvis! Lysintensiteten falder dog med antallet af refleksioner, hvilket besværliggør en observation af disse højere ordens regnbuer. Alligevel har man i laboratorieforsøg observeret op til 20 regnbuer. Ude i naturen eksisterer andre lyskilder såsom det direkte sollys, lys fra skyerne i baggrunden og lys, der reflekteres direkte på dråbens overflade. Det er disse lyskilder, der gør, at vi blot vil se to regnbuer på himlen (især det direkte sollys, idet 3. og 4. bue vil ligge i solens retning).

Lysintensitet og polarisering:

For at bestemme intensiteten af regnbuens farver må man tage hensyn til at lys er elektromagnetiske bølger med et elektrisk felt, der ligger vinkelret på udbredelsesretningen (bølgen siges, at være transversal). Det elektriske felt kan derfor opdeles i en komponent vinkelret på spredningsplanet (normalkomponenten) og i komponent parallel med spredningsplanet (parallelkomponenten). Disse komponenter behandles hver for sig ved kraftig brug af Fresnels formler (se box 1). Vi betragter så et strålebundt med intensitet I_0 , der rammer en regndråbe med radius a og følger dets forbreddning og svækkelse rundt i dråben og ned mod observatøren. Resultatet er gengivet grafisk i figur 8. Intensiteterne er afbildet i enhederne $I_0 \cdot (a/r)^2$, hvor r er afstanden mellem regndråben og os. Intensiteten aftager altså meget naturligt med kvadratet på afstanden, og større dråber vil give en kraftigere regnbue.



Figur 8. Intensiteten af både N- og P-komponenten af det røde og violette lys i primær- og sekundærbuen som funktion af buevinklen. De høje toppe gengiver normalkomponenten, mens de svage toppe, der er forstørret i de indsatte bokse, repræsenterer parallelkomponenten. Bemærk hvordan området mellem de to regnbuer slet ikke oplyses og derfor giver anledning til Alexanders mørke bånd.

Vi ser nu, at intensiteten af de enkelte farver er koncentreret tæt omkring et ekstremum i buevinklen. Dvs. at primærbuen vitterligt har rødt øverst ved den maksimale buevinkel på 42.4° , og at vi efter farverne orange, gul, grøn og blå slutter af med violet nederst i en buevinkel på 40.6° . Den primære regnbue vil altså sprede sig over en buevinkel på $42.4^\circ - 40.6^\circ = 1.8^\circ$. Sekundærbuen, der er langt svagere i intensitet pga. den ekstra refleksion i dråben, har derimod rødt nederst ved den minimale buevinkel på 50.4° og violet slutter buen af ved en buevinkel på 53.6° . Den sekundære regnbue spreder sig altså over en buevinkel på $53.6^\circ - 50.4^\circ = 3.2^\circ$ og er således bredere end primærbuen, hvilket også kan observeres på regnbuen over Victoria-faldene.

Det ses desuden, at intensiteterne af de forskellige farver under den primære regnbue er sammenlignelige. Lyset under primærbuen er derfor ikke udpræget violet eller rødt, men hvidt. Et tilsvarende argument gælder for lyset over sekundærbuen. Det skal dog bemærkes, at det hvide diffuse lys er kraftigst under primærbuen og at vi derfor må forvente, at overgangen til Alexanders mørke bånd er tydeligst, når vi kommer fra området under den primære regnbue. Omvendt er det hvide diffuse lys over sekundærbuen så svagt, at overgangen til Alexanders mørke bånd må være meget svær at se. At alt dette faktisk er også tilfældet ses tydeligt på vores regnbuebillede. I parentes skal det også bemærkes, at lysets bølgenatur faktisk udelukker en skarp grænse mellem lys og mørke, idet diffraktion altid vil skabe en blød overgang. (Diffraktion er blot et andet ord for interferens, der forklares i næste afsnit. Normalt bruges interferens dog til at beskrive overlappet mellem to eller flere bølger, mens diffraktion anvendes til at beskrive de skygger, der opstår, når én bølge rammer en genstand).

Figur 8 viser også, at normalkomponenterne af det elektriske felt er meget større end parallelkomponenterne. Regnbuelyset er med andre ord normalpolariseret. Det elektriske felt ligger dermed altid vinkelret på spredningsplanet, dvs. at E-feltet vil pege i retning af tangenten til regnbuen. På toppen af buen vil E-feltet altså pege i vandret retning og dette forklarer et af vores observable fænomener: Et par polaroid solbriller virker nemlig ved at fjerne den vandrette komponent af det elektriske felt og dermed vil den øverste del af regnbuen forsvinde. For at forstå denne polarisation af regnbuen kan man betragte Brewsters vinkel (se evt. box 1). Denne specielle indfaldsvinkel, der er kendetegnet ved, at E-feltets parallelkomponent slet ikke reflekteres, bliver for rødt lys 36.9° ved overgangen fra vand til luft. Denne vinkel er tæt på den vinkel, der i figur 2 vil ramme punktet B ved en indfaldsvinkel på 59.5° svarende til en buevinkel på 42.4° (en indfaldsvinkel på 59.5° giver en brydningsvinkel på 40.4°). Det er alene pga. dette "sammentræf", at vi får en stærkt reduceret parallelkomponent for primærbuen. Sekundærbuen er derimod ikke så udpræget polariseret, hvilket blot skyldes, at den transmitterede regnbuebuevinkel er længere fra Brewstervinklen.

Interferens

For at give en kvalitativ forklaring af interferensbuerne, der ses som små regnbuer under primærbuen, må vi have fat i interferensfænomenet.

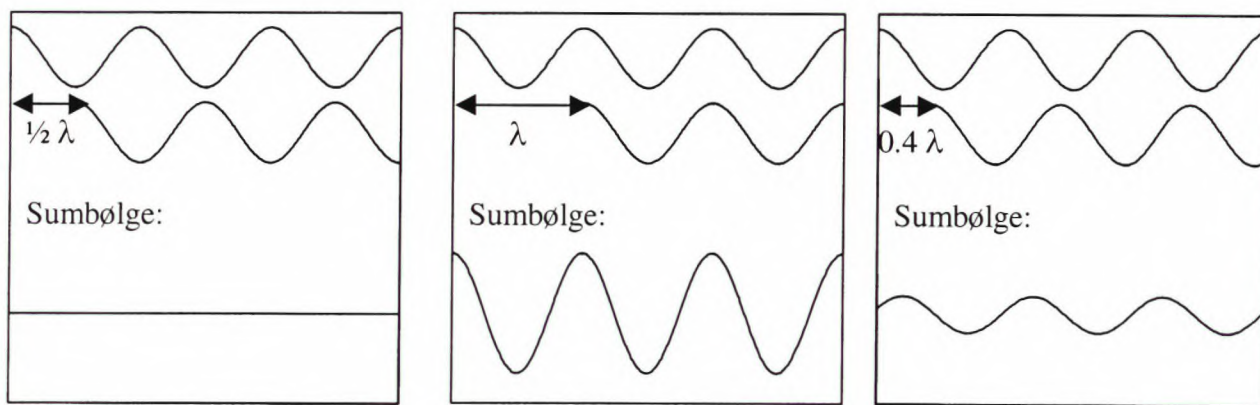
Interferens er det grundlæggende fænomen, at addition af to lysbølger med samme intensitet ikke normalt giver en ny bølge med den dobbelte intensitet. Faktisk kan den resulterende intensitet være alt fra ingenting (destruktiv interferens) til 4 gange så stor (konstruktiv interferens). Om vi får konstruktiv eller destruktiv interferens (eller noget midt imellem) afhænger af, hvor langt de to bølger har bevæget sig inden de interfererer: Hvis vejlængdeforskellen er et helt antal bølgelængder fås konstruktiv interferens, mens en vejlængdeforskel på $\frac{1}{2}$, $1\frac{1}{2}$, $2\frac{1}{2}$, ... bølgelængder giver destruktiv interferens. Dette følger direkte fra bølgenaturen af lys og er illustreret i figur 9.

For at bølger skal interferere skal de dog have samme bølgelængde. Det skyldes, at lyset har så stor en frekvens, at selv små bølgelængdeforskelle giver en stor forskel i frekvenser. Vores øje kan med andre ord ikke nå at opfatte interferensen.

Vi skal altså undersøge om to stråler med samme farve kan tilbagelægge forskellige vejlængder inden de rammer vores øje. Jeg vil nøjes med at behandle primærbuen, da interferensbuerne i praksis kun observeres under den primære regnbue. Ifølge figur 4 er det muligt at to stråler, der rammer en dråbe med to forskellige indfaldsvinkler, kommer ud i samme buevinkel, og dermed begge rammer vores øjne (f.eks. de markerede 49.6° og 68.3° , der begge svarer til en buevinkel på 40.4°).

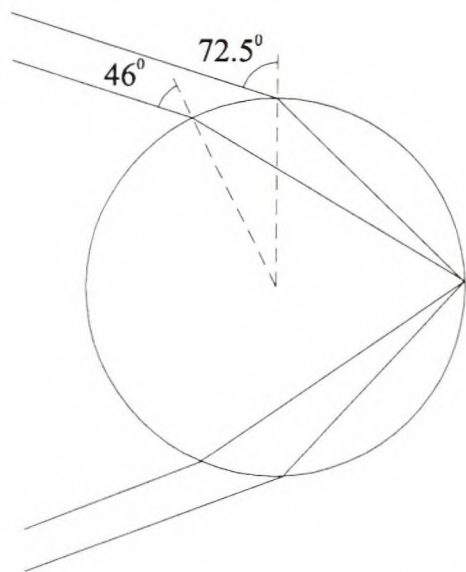
Situationen er gengivet på figur 10 for indfaldsvinklerne 46° og 72.5° grader, der begge giver en buevinkel på 38° grader. Vi ser nu, at en eventuel optisk vejlængdeforskel består af et bidrag fra vejen inde i dråben og to ens bidrag fra vejlængden i luft. Det er klart, at vi nu også tager hensyn til dråbens radius, der har direkte betydning for vejlængdeforskellen og dermed for beliggenheden af interferensbuerne. En større radius vil nemlig betyde, at to stråler ikke skal have så stor en forskel i indfaldsvinkel for at forskellen i tilbagelagt vejlængde bliver et helt antal bølgelængder. En stor regndråberadius vil med andre ord betyde, at interferenstoppene ligger tættere.

Jeg har endnu ikke redegjort for intensiteten af de forskellige interferenstoppe. Her vil det føre alt for vidt at gennemgå en korrekt kvantitativ behandling, som findes ved løsning af Maxwells ligninger. En sådan behandling vil vise, at de enkelte farver faktisk har større intensitet i interferensbuerne end i den egentlige primærbue. Alligevel vil interferensbuerne sjældent observeres i naturen. Dette skyldes, at buernes placering er fastlagt ved dråbestørrelsen. Interferensbuerne bliver med andre ord tværet ud medmindre alle regndråberne er lige store. I praksis vil interferensbuerne dog ses, hvis blot en mindre andel af dråberne har



Figur 9. Illustration af interferensfænomenet. Ved en vejlængdeforskel på en hel bølgelængde opstår der konstruktiv interferens, mens en halv bølgelængde giver anledning til destruktiv interferens.

samme størrelse, men intensiteten af buerne vil så være noget mindre end intensiteten af selve primærbuen.



Figur 10. Vejlængdeforskellen ved to indfaldsvinkler på 46° og 72.5° , der begge giver en buevinkel på cirka 38° (for rødt lys). Det ses, at stråle 2 vil løbe længere i luften, mens vejlængden i dråben til gengæld er kortere.

Afrunding

Ved at opfatte lyset som regulære stråler har vi nu ved hjælp af brydningsloven, spejlingsloven og dispersion forklaret:

- * Beliggenheden af primærbuen.
- * Beliggenheden af sekundærbuen.
- * Alexanders bånd Ved at udnytte lysets bølgenatur

og betragte spejling og brydning af både normal- og parallelkomponenten af lysets elektriske felt, så vi også,

at regnbuerne er normalpolariserede. Vi gik dog ikke over til udelukkende at betragte lyset som bølger, idet vi stadig lod lyset udbrede sig som stråler.

Denne strålebeskrivelse fastholdt vi også ved beskrivelsen af interferensbuerne, der fundamentalt set kan opstå, fordi to forskellige indfaldsvinkler kan lede til samme buevinkel. Jeg gik ikke dybere ind i en korrekt kvantitativ beskrivelse, men vi kan konkludere, at interferensbuerne sjældne optræder i naturen skyldes, at deres tilstedeværelse kræver regndråber af samme størrelse.

Alt dette blev forklaret ved at betragte en enkelt regndråbe. Som tidligere nævnt er det dog ikke ensbetydende med, at en regndråbe er ansvarlig for hele regnbuen: Det kræver mange dråber at dække hele buevinkelintervallet for alle spredningsplaner. Ved at fastlægge regnbuens position ud fra en vinkel er det som førnævnt også klart, at to personer aldrig vil se den samme regnbue. De ser måske en regnbue på samme tid, men deres buer vil stamme fra forskellige dråber! Samtidig sætter buevinklen en begrænsning på solens position på himlen: Hvis solen står højere end 42° vil regnbuen dannes under jordoverfladen, og vi kan derfor ikke se den!

Det er også bemærkelsesværdigt, at regnbuen mere eller mindre kan fremstå som et selvstændigt optikkursus! Vi har behandlet dispersion samt spejling og brydning af stråler ved overgangen mellem medier. Endvidere gjorde regnbuens polarisation det nødvendigt at beskrive lyset som transversale bølger og denne bølgebeskrivelse muliggjorde igen interferens, der kunne forklare interferensbuerne.

Regnbuens vinkelposition gør det pga. den matematiske logik, der siger, at alle udsagn om den tomme mængde er sande, også muligt at verificere den ofte fremsatte påstand:

“Der er guld ved regnbuens ende”.

Referencer:

- [1] H. Moyses Nussenzveig (1977) "The Theory of the Rainbow" Scientific American, bind **236**, april 1977 side 116-127.
- [2] Jearl D. Walker (1976) "Multiple rainbows from single drops of water and other liquids" American Journal of Physics, bind **44**, side 421-433.
- [3] Jørn Kræmmer Nielsen (1965) "Om regnbuens udvikling med særligt hensyn på den fysiske optiks bidrag" Speciale, Aarhus Universitet.



Allan Bro Hansen er stud.scient. ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

H. C. Ørsted medaljen til Ove Nathan

Medaljeoverrækkelse af Hendes Majestæt Dronningen den 12. januar 1999 på Geologisk Museum

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Direktionen for SNU udgøres af:

Professor Dorte Olesen (formand)
UNI-C
Vermundsgade 5
2100 København Ø

Lektor Jørn Johs. Christiansen (sekretær)
Aakjærs Alle 24 B
2860 Søborg
Tlf. 39 69 58 18

Lektor Finn Berg Rasmussen

Lektor Erik Schou Jensen

Professor Erik W. Thulstrup

Lektor Malte Olsen

Direktør Ole Mørk Lauridsen

Nærmere oplysninger om selskabets arrangementer fås hos Bente Egaa, tlf. 35 87 88 04 eller e-mail Bente.Egaa@uni-c.dk. Selskabet minder om, at alle interesserede er velkomne til selskabets foredrag. Det er ingen forudsætning, at man er medlem.

Direktionen for Selskabet for Naturlærens Udbredelse har besluttet at tildele H. C. Ørsted medaljen i sølv til fysikeren Ove Nathan. Tildelingen sker som en anerkendelse af Nathans store indsats som formidler af fysisk forskning og sammenhængen mellem naturvidenskab, teknologi og samfund.

Som ansat ved Niels Bohr Institutet siden 1953 og som rektor for Københavns Universitet har Ove Nathan gennem mange år ydet væsentlige bidrag til at fremme en bredere forståelse af den fysiske forskning og videnskabens almindelige situation.

I 1970'erne skrev Ove Nathan således artikler og holdt radioforedrag, som bidrag væsentligt til en bredere forståelse af atomkerneprocesser og i høj grad indgik i debatten om atomkraft. I 1980 redigerede han debatbogen "Tænk - og vælg".

I de seneste år har Ove Nathan gennem en lang række artikler i aviser og Danmarks Nationalencyklopædi skrevet alment forståeligt om væsentlige naturvidenskabelige gennembrud i nyere tid. Han er nu som tidligere en ivrig debattør, der med held kan gøre vanskelige emner tilgængelige for almindelige mennesker - også i TV.

Medaljeoverrækkelsen finder sted:

tirsdag den 12. januar 1999 kl. 16.00 på Geologisk Museum.

Ove Nathan vil holde en forelæsning i tilknytning til prisoverrækkelsen, som vil blive foretaget af Hendes Majestæt Dronningen.

Årsmøde 1999 i Dansk Fysisk Selskab

Tilmelding til DFS årsmøde – KIF-årsmøde – NKT Forskerprisen 1999

Dansk Fysisk Selskab

Hjemmeside: www.nbi.dk/dfs

Jens Olaf Pepke Pedersen (formand)
DCESS, NBIfAFG
Juliane Maries Vej 30
2100 København Ø

E-mail: jopp@dcess.ku.dk
Telefon: 35 32 05 73

Dorthe Posselt (næstformand)
E-mail: dorthe@mmf.ruc.dk

Nis Bjerre (kasserer)
E-mail: nis@ifa.au.dk

Preben Alstrøm
E-mail: alstrom@nbi.dk

Peter Bodin
E-mail: p-bodin@get2net.dk

Karsten W. Jacobsen
E-mail: Karsten.W.Jacobsen@fysik.dtu.dk

Ole Mouritsen
E-mail: ogm@fki.dtu.dk

Poul V. Thomsen
E-mail: pvt@dfi.aau.dk

DFS årsmøde 1999

Dansk Fysisk Selskab afholder sit årsmøde 1999 på hotel Nyborg Strand i dagene 3.–4. juni 1999. Som de foregående år afholdes det årlige astronomimøde, sponsoreret af SNF's Instrumentcenter for Jordbaseret Astronomisk Forskning (IJAF) sammen med DFS's møde. Dansk Geofysisk Forening deltager ligesom i 1998 i årsmødet med egne sessioner den 3. juni 1999. Mødet starter torsdag den 3. juni kl. 11 og slutter fredag den 4. juni kl. 17.

Årsmødet vil indeholde plenarforedrag af almen fysisk interesse samt parallelsessioner om astrofysik, atomfysik, faststoffysik, geofysik samt uddannelse og undervisning.

Sideløbende hermed vil forskningsresultater blive præsenteret som posters, og nyt apparatur vil blive

fremvist på en udstilling. NKT Forskerprisen 1999 vil blive overrakt, og endelig DFS afholder sin årlige generalforsamling under årsmødet fredag den 4. juni 1999.

Alle landets fysikere opfordres til at deltage i Dansk Fysisk Selskabs årsmøde med indlæg og posters og ikke mindst til at bidrage til en livlig diskussion. Især vil vi meget gerne give yngre forskere mulighed for at præsentere deres resultater for en bredere kreds.

Tilmeldingsfrist

Fristen for tilmelding til årsmødet er:
mandag den 22. marts 1999.

Program

En skitse af årsmødeprogrammet med angivelse af inviterede foredragsholdere og disses foredragstitler kan allerede nu ses på internettet (www.nbi.dk/dfs). Programmet vil løbende blive opdateret, og det endelige program, der sammensættes på basis af de indsendte abstracts, vil være tilgængeligt ca. 1. maj. Det foreløbige program vil blive bragt i næste nummer af Kvant.

Indkvartering, priser m.v.

Indkvartering foregår på hotel Nyborg Strand. Pris for mødedeltagelse, incl. evt. overnatning og diverse måltider, fremgår af tilmeldingsblanketten på side 25. Tilmelding sker ved at sende blanketten til hotel Nyborg Strand, der fremsender en opkrævning på beløbet. Tilmelding kan også ske via internettet på DFS's hjemmeside. For studerende, der ikke er indskrevet på Ph.D.-studiet, vil der være et antal fripladser. Ansøgning om en af fripladserne sker automatisk ved at afkrydse studenterrubrikken på tilmeldingsskemaet. Det er ikke en betingelse for at få friplads, at man er medlem af DFS. Fripladserne sponsoreres af IJAF, DFS og udstillerne, og i tidligere år er det lykkedes at give fripladser til alle rettidigt tilmeldte studerende. Fripladserne vil blive fordelt kort tid efter tilmeldingsfristens udløb. Hvis pladserne er brugt op, og man alligevel ønsker at deltage, opkræves betaling som anført på tilmeldingsskemaet.

Transport

Transport til/fra Nyborg sørger deltagerne selv for. Der bliver arrangeret bustransport mellem Nyborg Station og hotel Nyborg Strand i forbindelse med årsmødets start torsdag formiddag og årsmødets afslutning fredag eftermiddag. Angiv venligst på tilmeldingsblanketten, om der påregnes deltagelse i denne fælles bustransport.

Abstracts

Abstract sendes parallelt med tilmeldingen. De må højst være på 200 ord og skal indledes med bidragets titel, herefter indsenderens navn og den fulde adresse.

Man må gerne angive, om man foretrækker at præsentere sit bidrag som et foredrag eller som en poster.

Abstracts indsendes via DFS's hjemmeside (www.nbi.dk/dfs), eventuelt pr. e-post til en af følgende:

Astrofysik: Michael Linden-Vørnle, mykal@dsri.dk

Atomfysik og Generelt: Jens Olaf Pepke Pedersen, jopp@dcass.ku.dk

Faststoffysik: Henrik Bruus, bruus@nbi.dk

Geofysik: Irene A. Mogensen, iam@gfy.ku.dk

KIF: Dorthe Posselt, dorthe@ruc.dk

Uddannelse og undervisning: Poul V. Thomsen, pvt@dfi.aau.dk

Såfremt man ikke har adgang til internet eller e-post kan abstracts også indsendes til Jens Olaf Pepke Pedersen, DCESS, Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø, helst på en diskette.

Fristen for indsendelse af abstracts er 22. marts 1999. For geofysik-abstracts gælder dog en senere frist som Dansk Geofysisk Forening vil orientere sine medlemmer om i slutningen af januar.

DFS's sektioner, IJAF (SNF's Instrumentcenter for Jordbaseret Astronomisk Forskning) og Dansk Geofysisk Forening sammensætter programmet på grundlag af bl.a. de indsendte abstracts, og deltagerne vil få meddelelse herom, hvis deres bidrag er udvalgt til et foredrag. De øvrige bidrag (samt hvis man ikke ønsker foredrag) vil blive præsenteret i en posterudstilling.

Kort efter tilmeldingsfristens udløb vil de indsendte abstracts være tilgængelige på internettet. Abstracts, der indsendes efter tilmeldingsfristen vil blive tilføjet løbende på internettet, men man risikerer, at programmet for foredragene da er lagt fast, ligesom det ikke garanteres, at abstractet kan komme med i årsmødebogen.

Sprog

Årsmødets sprog er engelsk. Enkelte af sessionerne, f.eks. indenfor geofysik samt uddannelse og undervisning, vil foregå på dansk. Deltagerne bedes erindre, at hovedparten af tilhørerne er ikke-specialister i det behandlede emne og indrette præsentationen derefter.

Yderligere information

Information vedrørende det faglige program bedes indhentet hos de personer, der modtager abstracts. For andre oplysninger kan man kontakte Jens Olaf Pepke Pedersen.

KIF årsmøde 2. juni 1999

Netværk for Kvinder i Fysik (KIF) afholder sit årsmøde onsdag den 2. juni, ligeledes på Nyborg Strand. Mødet, der starter kl. 11, omfatter faglige foredrag af kvindelige danske fysikere samt et foredrag af en udenlandsk fysiker over et mere generelt "kvinder i fysik"-tema. Alle er velkomne til at overvære foredragene. Dagen afsluttes med et netværksmøde med yderligere udveksling af erfaring og diskussion. For yderligere information, kontakt venligst Dorthe Posselt, IMFUFA, Roskilde Universitetscenter, 4000 Roskilde. Telefon 46 74 26 07, fax 46 74 30 20, e-post: dorthe@ruc.dk. Tilmelding sker på tilmeldingsblanketten på næste side.

I næste nummer af Kvant skriver Trine Møgelberg om KIF's historie.

NKT Forskerprisen 1999

Medlemmer af Dansk Fysisk Selskab opfordres hermed til at indsende forslag til modtager af NKT Forskerprisen 1999.

Prisen er på kr. 100.000 og tildeles på ulige årstal en fysiker og på lige årstal en kemiker. Prisuddelingen i 1999 sker ved Dansk Fysisk Selskabs årsmøde den 3.-4. juni.

Tildelingen skal ifølge fundatsen udtrykke en anerkendelse af en forskningsindsats af betydelig international vægt inden for grundlæggende eller anvendt fysik. Forskningsindsatsen skal være af nyere dato, og der lægges vægt på at prismodtageren er aktiv forsker med tilknytning til dansk fysik. Både yngre og ældre forskere kan komme i betragtning som prismodtagere. Prisen tildeles normalt én person, men kan undtagelsesvis tildeles flere personer hvis disse har været fælles om, og alle har ydet afgørende bidrag til, den forskningsindsats der danner grundlag for tildelingen.

Nomineringer indsendes på et skema, der kan rekvireres fra DFS. Nomineringen skal indeholde en kort beskrivelse af den nomineredes forskning, et kort CV, de vigtigste publikationer samt navne på to eller flere personer, der kan fungere som "peer reviewer" for den nominerede. Derudover kan medsendes uafhængige støtteskrivelser. NKT Research Center A/S stiller sekretariat til rådighed for priskomiteen, der udpeges efter indstilling fra DFS. Materialet indsendes til NKT Research Center A/S, Priorparken 878, 2605 Brøndby, att.: Udviklingschef Henrik Morgen, senest den 1. marts 1999.

Tilmeldingsblanket - DFS Årsmøde 1999

DFS (IJAF, Dansk Geofysisk Forening) og KIF årsmøder

Navn: _____
Institut: _____
Adresse: _____
Postnr. og by: _____
Telefon: _____ E-mail: _____

DFS-årsmødet 3.-4. juni 1999

Tilmelding her gælder deltagelse i mødet, overnatning natten mellem torsdag og fredag samt alle måltider fra torsdag formiddag til fredag eftermiddag. Bemærk, at DFS-medlemmer får rabat på deltagergebyret.

- ☐ Deltager (incl. Ph.D. studerende) med overnatning på enkeltværelse; DFS-medlem; 1.875 kr.
- ☐ Deltager (incl. Ph.D. studerende) med overnatning på enkeltværelse; ikke-medlem; 2.200 kr.
- ☐ Deltager (incl. Ph.D. studerende) med overnatning på dobbeltværelse; DFS-medlem; 1.625 kr.
- ☐ Deltager (incl. Ph.D. studerende) med overnatning på dobbeltværelse; ikke-medlem; 1.950 kr.
- ☐ Studerende med overnatning på delt tre-sengs værelse; DFS-medlem; friplads eller 1.350 kr.
- ☐ Studerende med overnatning på delt tre-sengs værelse; ikke-medlem; friplads eller 1.425 kr.

Tilmelding her gælder deltagelse i mødet torsdag og fredag samt alle måltider fra torsdag formiddag til fredag eftermiddag (excl. morgenmad). Bemærk, at DFS-medlemmer får rabat på deltagergebyret.

- ☐ Deltager (også studerende) uden overnatning; DFS-medlem; 1.000 kr.
- ☐ Deltager (også studerende) uden overnatning; ikke-medlem; 1.200 kr.

Tilmelding her gælder alene deltagelse i mødet torsdag samt alle måltider torsdag (incl. aftenmiddag).

- ☐ Deltager (også studerende); 700 kr.

Tilmelding her gælder alene deltagelse i mødet torsdag samt formiddagskaffe, frokost og eftermiddagskaffe torsdag.

- ☐ Deltager (også studerende); 325 kr.

Ønske om bustransport mellem station og hotel:

- ☐ Jeg ønsker bustransport mellem station og hotel.

KIF-årsmødet 2. juni 1999

Tilmelding dækker deltagelse i KIF-mødet onsdag samt frokost og eftermiddagskaffe. Overnatning er natten mellem onsdag og torsdag (incl. morgenmad).

- ☐ Deltager med overnatning på enkeltværelse; 1.100 kr.
- ☐ Deltager med overnatning på dobbeltværelse; 900 kr.
- ☐ Deltager uden overnatning; 275 kr.

Denne blanket sendes senest 22. marts 1999 til Hotel Nyborg Strand, Vedr. DFS99, 5800 Nyborg. (Girokonto 801-9231). Bemærk, at tilmelding kan også ske via DFS's hjemmeside www.nbi.dk/dfs.

Nobelprisen i fysik 1998: Den fraktionelle kvante Hall effekt

Poul Erik Lindelof og Per Hedegård, Ørsted Laboratoriet

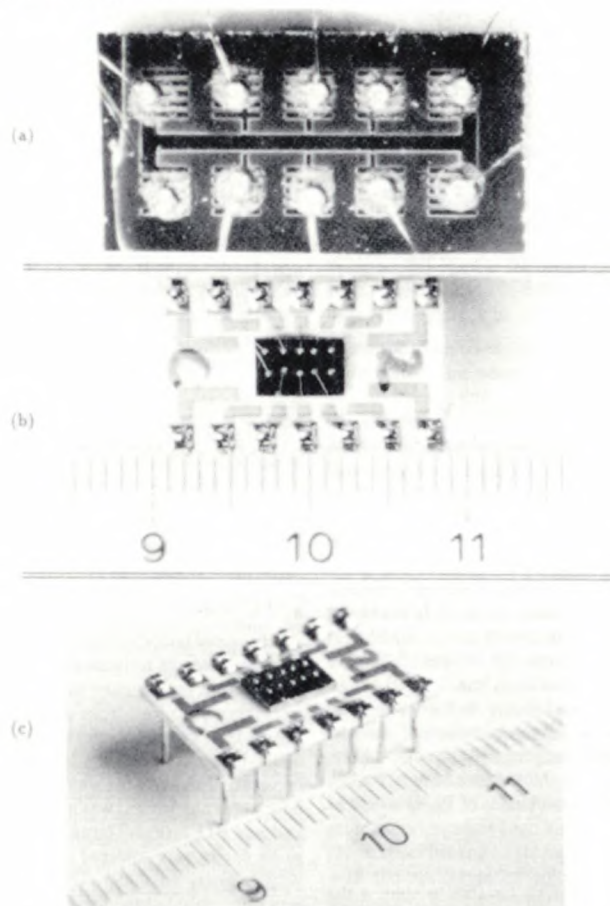
Nobelprisen, til hvem og for hvad?

Årets Nobelpris i fysik er tildelt 3 amerikanske fysikere. Professor Horst Störmer, AT&T Bell Laboratories and University of Colombia og professor Daniel Tsui, Princeton University, får Nobel prisen for deres eksperimentelle opdagelse i 1982 af den såkaldte fraktionelle kvante Hall effekt. Professor Robert Laughlin får Nobel prisen for sin teoretiske forklaring året efter af Tsui og Störmers opdagelser. Mange vigtige eksperimentelle og teoretiske artikler har i de efterfølgende år på væsentlig måde bidraget til en mere fuldstændig forklaring af effekterne, der i 1982 kom som en fuldstændig overraskelse. Effekten observeres i 2-dimensionale elektronssystemer i meget perfekte felt-effekt GaAs type transistorer i høje magnetfelter. Den er en manifestation af at elektroner danner en helt ny og fremmed kvantevæske. I denne væske vil de ladede partikler ikke længere være elektroner, som vi kender dem, men være en slags hvirvler væsken — hvirvler der vel at mærke har elektriske ladninger, der er en brøkdel af elektronens ladning, f. eks. $q = e/3$ (her er e elektronens ladning). Vi har tidligere i KVANT givet en fyldig beskrivelse af denne kvantevæske[6] og skal henvise særligt interesserede hertil. I denne artikel vil vi kort forklare den eksperimentelle baggrund for opdagelsen og omtale de fremskridt, der er sket både eksperimentelt og teoretisk i de seneste år.

Høj elektron mobilitets transistoren (HEMT'en).

I årene inden opdagelsen af den fraktionelle kvante Hall effekt var AT&T Bell Laboratories førende i udviklingen af en ny type krystaldyrkningsudstyr, der tillod krystaller at blive dyrket med atomlags præcision, et såkaldt molekylstråleepitaksi (MBE) anlæg. Meget perfekte grænselag mellem GaAs og GaAlAs eenkrystaller kunne dyrkes og på grund af de to materials forskel i elektron-affinitet kunne man ved dotering skabe et meget tyndt elektronlag i GaAs tæt på en sådan grænseflade. Elektronlaget er så tyndt at kvantemekanikken kun tillader en elektrontilstand vinkelret på grænsefladen og man taler derfor om et 2-dimensionalt elektronlag. En voldsom forøgelse af mobiliteten af disse elektroner blev opnået i 1978 ved at adskille doteringen (med silicium) og grænsefladen, altså at anbringe donoratomerne et stykke inde i GaAlAs krystallen. Opdagelsen var lige så vigtig som den var simpel, og professor Horst Störmer spillede i øvrigt også i denne forbindelse en hovedrolle. Det blev herved opnået at de 2-dimensionale elektroner ved lave tem-

peraturer kan bevæge sig helt op til $\frac{1}{10}$ mm og i en tid på $\tau = 10^{-8}$ sekunder uden at blive spredt. Dette har som en vigtig konsekvens at usikkerheden (Heisenbergs) på energien af elektronerne tilsvarende bliver $h/(2\pi\tau) = 10^{-7}$ eV, hvilket er afgørende for observationen af den fraktionelle kvante Hall effekt. HEMT strukturen har i årene siden dens introduktion i 1978 givet en lang række af epokegørende opdagelser udover den fraktionelle kvante Hall effekt, og lur mig om ikke Nobelkomiteen om endnu en halv snes år giver præmie for en opdagelse vedrørende 1-dimensionale eller 0-dimensionale elektron gasser målt på disse højmobile elektron systemer.



Figur 1. (a) viser en GaAs HEMT struktur, der er ætset i overfladen, således der kun er 2-dimensionale elektroner i det lange rektangulære område i midten. Tynde ætsede tilledninger gør det muligt at sende strøm gennem den 2-dimensionale elektrongas og måle spændingerne på langs (ρ_{xx}) og på tværs (ρ_{xy}). (b) og (c) viser monteringen af kvante Hall prøven på en transistor sokkel. Prøven anbringes i et stærkt magnetfelt og ved temperaturer under 1K. Taget fra Ref. 7.

Kvante Hall effekten.

I 1980 fandt den tyske fysiker Klaus von Klitzing (nu professor ved Max Planck Institutet i Stuttgart) at Hall effekten for en 2-dimensional elektron gas (i en silicium MOSFET og umiddelbart efter og meget tydeligere i en HEMT) er anomal i høje magnetfelter og ved lave temperaturer. Han fandt at forholdet mellem Hall spændingen, V_H , målt vinkelret på en ledningsbane af 2-dimensionale elektroner, hvori der løber en strøm I , antog simple kvantiserede værdier, således at Hall modstanden var

$$R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{h}{\nu \cdot e^2} \quad \nu = 1, 2, \dots \quad (1)$$

omkring de værdier, som Hall modstanden normalt antager [13]

$$R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{B}{n_2 \cdot e}, \quad (2)$$

hvor n_2 er den 2-dimensionale fladetæthed for elektronerne og B er det påtrykte magnetfelt vinkelret på elektronsystemet. Som man let ser giver en kombination af disse 2 ligninger en sammenhæng mellem magnetfelt (positivt eller negativt) og elektrontæthed:

$$B = \pm \frac{n_2 h}{\nu e}. \quad (3)$$

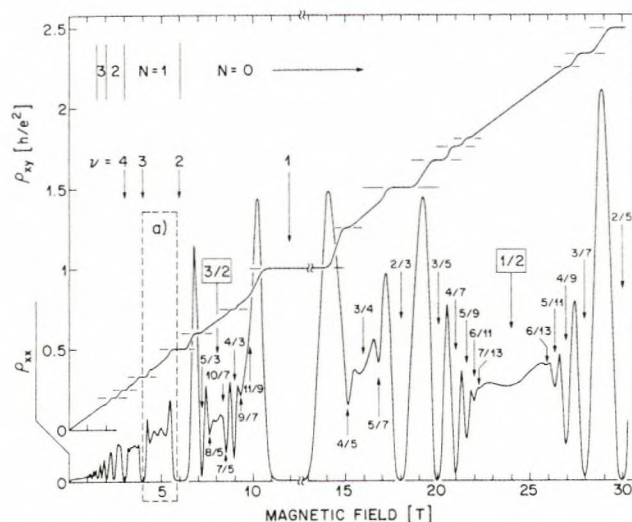
Størrelsen ν er et helt tal, $\nu = 1, 2, 3, \dots$

Den teoretiske forklaring på von Klitzings effekt er knyttet til de særlige kvante-orbitaler, som elektroner i et stærkt magnetfelt bevæger sig i — de såkaldte Landau-orbitaler. Orbitalerne er cirkelbaner, der kan opholde sig overalt i den 2-dimensionale plan. De har alle samme energi og deres areal er præcis så stort, at den magnetiske fluks, der gennemtrænger banen er netop et flukskvant h/e . Når antallet af bevægelige elektroner er så stort, at det samlede areal af de besatte Landau-orbitaler er lig et helt tal gange systemets areal, så antager Hall modstanden sin kvantiserede værdi. Det er i øvrigt grunden til, at tallet ν kaldes *systemets fyldningsgrad*. Det angiver jo, hvor stor den af den påtrykte magnetiske fluks, der er omsluttet af elektroner i deres Landau-orbitaler.

Den fraktionelle kvante Hall effekt.

Figur 2 viser Hall modstand $R_H(B)$ og magnetomodstand $R(B)$ målt som funktion af et magnetfelt B vinkelret på en 2-dimensional elektrongas i en HEMT (som den monterede prøve som er vist i figur 1). Målingen er foretaget ved en lav temperatur, $T = 30\text{mK}$, og op til et meget højt magnetfelt på $B = 30\text{T}$, der kun kan opnås med kobber/superleder hybrid magneter på særlige højfeltlaboratorier (her på Massachusetts Institute of Technology, MIT). Den 2-dimensionale elektrontæthed n er her ca. $1.3 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$. Målingen er fra 1987 af Willett, Störmer et al. og svarer til den måling Tsui og Störmer publicerede i 1982, men

har langt flere detaljer og er derfor valgt til denne artikel. Hall modstanden (her angivet som ρ_{xy}) i enheder af h/e^2 er vist som den øverste kurve som funktion af magnetfeltet i tesla (T). Det semiklassiske udtryk (2) giver den proportionale opførsel der ses ved de laveste magnetfelter.



Figur 2. Hallresistans, ρ_{xy} , og magnetoresistans, ρ_{xx} , for en 2-dimensional elektrongas plottet som funktion af det påtrykte magnetfelt. ρ_{xy} udviser vandrette plateauer for bestemte magnetfelter overlejret den semiklassiske Hall effekt, der vokser proportionalt med magnetfeltet. Der, hvor ρ_{xy} udviser vandrette plateauer, går modstanden ρ_{xx} til 0 eller udviser et kraftigt minimum. Den heltallige kvante Hall effekt er de vandrette plateauer ved magnetfelterne 12T, 6T, 4T osv. svarende til fyldningsgraderne $\nu = 1, 2, 3, \dots$. Den fraktionelle kvante Hall effekt er alle andre plateauer ved f.eks. $5/3, 8/5, 10/7$ etc. Bemærk specielt den flotte symmetri omkring $\nu = 1/2$. Her haves kompositte fermioner i et forsvindende effektivt magnetfelt. (Figuren er taget fra ref. 5)

Langs denne skrå linie ses en række plateauer. Ved de laveste magnetfelter ses plateauer svarende til ligning (1) med $\nu = \dots 4, 3, 2, 1$. Dette er von Klitzings opdagelse [3]. Som det ses er der en række yderligere plateauer der svarer til den opdagelse Tsui og Störmer gjorde i 1982 [13]. Disse ligger ved ulige brøker af fyldningsgraden ν . Der er f. eks. tydelige plateauer ved $\nu = \frac{2}{3}, \frac{4}{3}, \frac{2}{5}$. Den nederste kurve i figur 2 viser kvadratmodstanden (angivet på figuren som ρ_{xx}) som funktion af magnetfeltet. Hvert plateau modsvares i kvadratmodstanden ved et kraftigt minimum, hvor modstanden i visse tilfælde går helt til nul. Kvadratmodstanden antyder, at der er mange flere plateauer end man kan se direkte i Hall modstanden. De tilsvarende fyldningsgrader er angivet som brøker i figur 2. Det var Laughlins fortjeneste at lave et kvalificeret gæt på løsningen til Schrödingerligningen for elektroner i et magnetfelt når elektron-elektron vekselvirkning tages i betragtning. Nye grundtilstande ved fyldningsfaktorer på ulige brøker viste sig at have et energigab til de eksiterede ladningsbærere med et energigab proportionalt med brøkenes nævner. Det mest overraskende i Laughlins teori var, at formalismen kunne fortolkes derhen at disse

eksiterede ladningsbærere havde en fraktionel ladning. Ved $\nu = \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \dots$ er denne ladning $e/3$ og ved $\nu = \frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \dots$ er denne ladning $e/5$. En række eksperimenter har i de senere år mere og mere peget på rigtigheden af denne fortolkning. F.eks. har det for nylig været mulig at måle den såkaldte haglstøj fra ladningsbærerne ved disse fyldningsgrader [4]. Haglstøjen som man observerer når der sendes strøm gennem prøven skyldes at ladningen er kvantiseret. Som når hagl rammer et bliktag er støjen mest udpræget når haglene er størst. På samme måde fandt man at for fyldningsgrader på $\nu = \frac{1}{3}$ var støjen præcis 3 gange mindre end ved $\nu = 1$. Flere andre eksperimenter har på samme måde vist at ladningen på disse eksitationer er mindre end den sædvanlige elektronladning. Bekræftelsen af Laughlins ideer omkring fraktionel ladning baseret på Tsui og Störmers eksperiment har utvivlsomt været stærkt medvirkende til at Nobelkomiteen nu besluttede sig for at tiden var moden til at give Nobelprisen for denne interessante opdagelse.

Komposite fermioner.

En af kvantemekanikkens små særheder er, at udover elektrisk ladning, så kan man i 2 dimensioner udstyre elektronen med et uendelig tyndt magnetisk fluxrør, som bærer et helt antal af fluxkvantet - vel at mærke uden, at det ændrer noget i den fysiske virkelighed. Det kan derimod ændre voldsomt på forståelsen og beskrivelsen af selvsamme fysiske virkelighed. I reference 6 har vi tidligere forklaret, hvorfor man kan opfatte tilstande, som for eksempel den der opstår i nærheden af $\nu = \frac{1}{3}$, som en slags superleder, hvis vi udstyrer hver elektron med 3 fluxkvanter.

En af de ting som denne teori ikke kunne gøre tilfredsstillende rede for var alle de mulige brøker fyldningstallet ν på de forskellige plateauer kunne antage. Som det kan ses på figur 2 er der en særlig serie af brøker ordnet omkring fyldningstallet $\nu = \frac{1}{2}$ og omkring fyldningstallene $\nu = \frac{3}{2}$ og $\nu = \frac{5}{2}$. Disse sekvenser af brøker er nu forstået ved at indføre samme teoretiske trick som ovenfor nævnt, denne gang blot ved at hæfte et lige - 2 - antal fluxkvanter på hver elektron. Denne nye slags elektroner kaldes *komposite fermioner*. En elektron vil føle to slags magnetfelter, det udefra påtrykte samt det fiktive, vi har hæftet på elektronerne. Ved fyldningsgraden $\nu = \frac{1}{2}$ vil de to præcist udslukke hinanden, og systemet er i en tilstand, der minder meget om elektrongassen uden et påtrykt magnetfelt. Afviger fyldningsgraden fra $\nu = \frac{1}{2}$ vil der være et overskydende magnetfelt. Det overskydende magnetfelt kaldes B_{eff} og giver anledning til den sædvanlige kvante Hall effekt fra det nye nulpunkt ($\nu = \frac{1}{2}$) i det effektive magnetfelt (sammenlign med ligning (3)):

$$B_{eff} = B - 2n_2 \frac{h}{e} = \mp \frac{n_2}{i} \frac{h}{e}. \quad (4)$$

Fyldningsfaktorerne for kvante Hall effekten for disse

komposite fermioner bliver med

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, \dots \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{\pm i}{1 \pm 2i} \\ &= 1, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}, \frac{4}{7}, \frac{5}{9}, \frac{5}{11}, \frac{6}{11}, \dots \end{aligned} \quad (6)$$

Ved sammenligning af de fyldningsfaktorer omkring $\nu = \frac{1}{2}$ i figur 2 ses at disse beregnede fyldningsfaktorer, hvor der så forventes plateauer i Hall modstanden og minima i modstanden er helt i overensstemmelse med eksperimentet. Dette underbygger ideen omkring et fermisystem omkring $\nu = \frac{1}{2}$, med en ny type af fermioner med 1 elektronladning, men med 2 fluxkvanter bundet til sig. Disse nye såkaldt komposite fermioner er i de senere år blevet yderligere undersøgt og deres eksistens vel dokumenteret. F.eks. er der blevet udført eksperimenter hvor de komposite fermioners egenskaber er bestemt ved deres klassiske bevægelse i et elektrisk og et effektivt magnetisk felt.

Slutbemærkning

Faststoffysikken har spillet en rolle for den teknologiske udvikling der berettiger den til at indtage førerpositionen blandt fysikkens discipliner. Faste stoffers såvel som væskers fysik har imidlertid også førertrøjen på når det drejer sig om den grundliggende fysik. Den fraktionelle kvante Hall effekt er én blandt en række fysiske mangelegeme fænomener, hvis betydning sandsynligvis kommer til at række langt uden for faststoffysikken. Dette er sket med opdagelser som Bose-Einstein kondensation af flydende helium (med en ny spændende udvikling indenfor atomfysikken), BCS teorien for superledning (der havde stor betydning for partikelfysikkens standardmodel) og Josephson effekten (der har haft betydning for forståelsen af grundlaget for al kvantefysik). Måske vil de nye eksitationer i halvledere i høje magnetfelter blive en inspiration for andre grene af fysikken? De har i hvert fald givet en bedre forståelse af, hvordan partikler udstyret med tilsyneladende fundamentale egenskaber som ladning, spin og statistik (fermioner eller bosoner) kan opstå (på engelsk: emerge) fra en kompliceret underliggende verden af stærkt vekselvirkende suppe af ofte ukendte partikler.

Referencer:

- [1] D.C. Tsui, H.L. Störmer, and A.C. Gossard: "Two-Dimensional Magnetotransport in the Extreme Quantum Limit", Phys.Rev.Lett. **48**, 1559 (1982).
- [2] R.B. Laughlin: "Anomalous Quantum Hall Effect: An Incompressible Quantum Fluid with Fractionally Charged Excitations", Phys.Rev.Lett. **50**, 1395 (1983).

- [3] K.v. Klitzing, Dorda, and M. Pepper: "New method for High-Accuracy Determination of the Fine-structure Constant based on Quantized Hall Resistance", *Phys.Rev.Lett.* **34**, 2121 (1980).
- [4] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (Wiley, 7. edition, 1996) side 78 og 287
- [5] R. Willett *et al.*: "Observation of an Even-Denominator Quantum Number in the Fractional Quantum Hall Effect", *Phys.Rev.Lett.* **59**, 1776 (1987), Glatthli: "Observation of the $e/3$ Fractional Charged Laughlin Quasiparticle", *Phys.Rev.Lett.* **79**, 2526 (1997).
- [6] Per Hedegård: "Fermioner, bosoner, anyoner og kvante Hall effekten", *KVANT* no. 2 (1994). Findes også på Internettet på adressen <http://roemer.fys.ku.dk/Vinter96/kvant/tekst1.html>.
- [7] H. Bruus and P. E. Lindelof: "Quantum Hall Metrology Samples and Their Use for Resistance Calibration", *Physica Scripta* **44** 418 (1991).

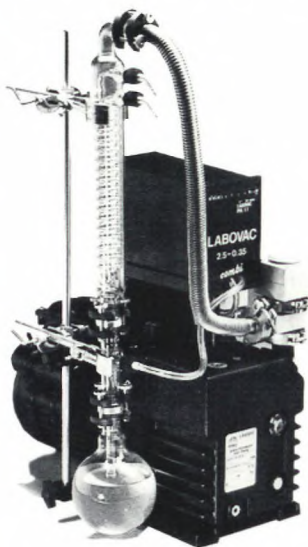


Poul Erik Lindelof Docent ved Ørsted Laboratoriet, KU. Leder til dagligt det eksperimentelle Nanofysik laboratorium.



Per Hedegård Lektor ved Ørsted Laboratoriet. Teoretisk faststoffysiker.

MODERNE VAKUUMTEKNIK TIL FORSKNING OG INDUSTRI



SASKIA HOCHVAKUUM- UND LABORTECHNIK GmbH I ILMENAU er et succesrigt resultat af øst-vest genforeningen i Tyskland. SASKIA's et- og to-trins finvakuumpumper fra 4 til 200 m³h⁻¹ har rotor-skiver af et nyt PTFE materiale som sænker støjniveauet med ca. 3 dBA og tillader pumperne at arbejde konstant ved højt tryk eller med aggressive gasser. Med en frekvensregulering kan pumpehastigheden fordobles, så man f.eks. hurtigt kan evakuere et anlæg og derefter anvende pumpen som holdepumpe ved lav hastighed. SASKIA's kemisk resistente membran-pumper har liniærdrevne membraner, hvilket sikrer en lang levetid og lavt effektforbrug. En membranpumpe på ca. 30 W kan med de store afgifter på brugsvand hurtigt tjene sig ind, hvis den erstatter en vandstråle-pumpe. SASKIA's TOWER pumpestande er kemipumpestande kombineret med kondensatorer og med instrumentering for indstilling af trykket. SASKIA leverer oliefri pumpestande kombineret med turbomolekularpumper i et handy design og rootspumpestande op til 20.000 m³h⁻¹.

ALLE FORMER FOR OLIEFRI & OLIESMURTE ROTATIONSVAKUUMPUMPER • FEDTSMURTE TURBOMOLEKULAR- SPIRO- & HYBRIDPUMPER • DIFFUSIONS- & CRYOPUMPER • VAKUUMMÅLEINSTRUMENTER, VENTILER, HV & UHV FITTINGS • HELIUMLØKSØGERE & MASSESPEKTROMETRE • SPUTTER- ELEKTRONKANON & ÆTSEANLÆG • RF & HV STRØMFORSYNINGER • RUSTFRI SPECIALKAMRE & DELE • OMBYGNING AF VAKUUMANLÆG

**WENZEL VAKUUM TEKNIK APS • NYBROVEJ 283 • DK-2800 LYNGBY • TLF. 45 87 97 35
SHOWROOM, SERVICE, LAGER • NYBROVEJ 193 • BIL 30 42 63 00 • FAX 45 93 32 93**

Nobelprisen i kemi 1998: Udvikling af beregningsmetoder indenfor kemien belønnes

Aage E. Hansen, Kemisk Institut, Københavns Universitet

Årets Nobelpris i kemi [1] er under overskriften "Udvikling af beregningsmetoder indenfor kemien belønnes" givet til Walter Kohn [2], som er professor i teoretisk fysik ved University of California i Santa Barbara, "for hans udvikling af tæthedsfunktionalteorien", og til John G. Pople [3], som er professor i kemi ved Northwestern University i Evanston, Illinois, "for hans udvikling af kvantekemisk beregningsmetodik". Prisen er dermed givet til to centrale personer i udviklingen af den del af den teoretiske kemi som går under navnet kvantekemi, d.v.s. kvantemekaniske metoder til beregning og forståelse af molekylers struktur og egenskaber. Priskomiteens begrundelse og en anbefalesværdig uddybende beskrivelse kan findes på den Internetadresse som er anført i reference [1]. Netadresserne i referencerne [2] og [3] fører til henholdsvis Kohns og Poles hjemmesider.

Den indsats de to prismodtagere er blevet belønnet for, kan sættes i perspektiv af tre citater. I en artikel fra 1925 udtrykker kemikeren Niels Bjerrum [4] det ønske at "Man tør måske uden at være for sangvinsk håbe, at den Tid ikke er fjærn, da det vil lykkes på det af Bohr givne Grundlag at beregne Forløbet af kemiske Processer". Mindre end fem år senere, da store dele af den moderne kvanteteori var faldet på plads, kølnede P. A. M. Dirac [5] dette håb med den ofte citerede betragtning: "The fundamental laws necessary for the theoretical treatment of large parts of physics and the whole of chemistry are thus fully known, and the difficulty lies only in the fact that application of these laws leads to equations that are too complex to be solved". Men ved overrækkelsen af Nobelprisen i Kemi i 1966 til Professor Robert S. Mulliken fra University of Chicago skiftede billedet igen. Robert Mulliken fik prisen for sin rolle i udviklingen af teoretiske og beregningsmæssige metoder til behandling af molekylers struktur, valensforhold, og spektre, og i sin takketale [6] ved prisoverrækkelsen sluttede han med ordene: "In conclusion, I would like to emphasize strongly my belief that the era of computing chemists, when hundreds if not thousands of chemists will go to the computing machine instead of the laboratory for increasingly many facets of chemical information, is already at hand".

Skiftet fra Dirac's pessimistiske betragtning 40 år tidligere er slående, og afspejler naturligvis, at fremkomsten af elektroniske datamaskiner i 1950'erne betød en afgørende ændring af mulighederne for kvantemekaniske beregninger. Ret beset var Mulliken dog nok noget "sangvinsk" i sin vurdering af omfanget af den beregningsmæssige indsats på det tid-

spunkt, og nærværende kronikør kom da også til at dreje betragtningen mere i retning af en profeti i et referat [7] af det foredrag Mulliken holdt i København på vej hjem fra prisoverrækkelsen. Med uddelingen af Nobelprisen i år markeres at Niels Bjerrums håb og Robert Mullikens profeti er kommet et langt stykke ad vejen mod opfyldelse.



Walter Kohn

Kohns og Poles Bidrag

Kernen i den indsats de to prismodtagere belønnes for, ligger indenfor teori og beregning af molekylernes elektroniske kvantetilstande, og dermed beregning af ændringer i disse kvantetilstande som funktion såvel af atomkernenes indbyrdes afstand som af ydre elektromagnetiske påvirkninger. Kendskab til ændringerne med hensyn til ydre elektromagnetiske påvirkninger er en forudsætning for beregning af intensiteten af spektre samt andre lineære og ikke-lineære optiske og magnetiske egenskaber, herunder kernemagnetiske resonansspektre (NMR), mens kendskabet til ændringerne med hensyn kerneafstande er en forudsætning for beregning af molekylernes struktur og spektre, samt af energiforløbet ved en kemisk reaktion.

Beskrivelsen af molekylers elektroniske kvantetilstande har traditionelt fulgt almindelig kvantemekanisk mange-elektron-teori baseret på bølgefunktioner opbygget af enkelt-elektron-bølgefunktioner (orbitaler). Box 1 skitserer grundlaget for beregning af sådanne orbitaler i den middelfelts-tilnærmelse som er formali-

BOX 1

Middelfelter, orbitaler og elektronudveksling.

I et atom eller molekyle med n elektroner, kan 1-elektronbølgefunktioner (orbitaler) bestemmes ved at kombinere en middelfelttilnærmelse med Pauli-Princippet, som medfører at den totale n -elektronbølgefunktion skal være antisymmetrisk under ombytning af et vilkårligt par af elektroner. En orbital $\phi_i(1)$ er dermed bestemt ved en Schrödingerligning, hvor det bidrag til den potentielle energi der repræsenterer frastødningen mellem elektronerne, er givet som

$$\int d\tau_2 \sum_{j=1}^n \phi_j^*(2) \left(\frac{e^2}{4\pi |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} \right) \times (1 - P_{12}) \phi_j(2) \phi_i(1) = \quad (1A)$$

$$\int d\tau_2 \sum_{j=1}^n \phi_j^*(2) \phi_j(2) \left(\frac{e^2}{4\pi |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} \right) \phi_i(1) - \int d\tau_2 \sum_{j=1}^n \phi_j^*(2) \phi_i(2) \left(\frac{e^2}{4\pi |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} \right) \phi_j(1) \quad (1B)$$

Her er antisymmetrikravet tilgodeset ved operatoren P_{12} der ombytter indices for elektronerne 1 og 2, som vist i lign. (1B), idet en orbital $\phi_i(1)$ er en funktion af såvel rumkoordinaterne som spinkoordinaten af elektron 1.

Da $\sum_{j=1}^n |\phi_j(2)|^2$ repræsenterer den samlede elektron-tæthed, ρ , kan første led i lign. (1B) umiddelbart fortolkes som et bidrag der skyldes den Coulombske frastødning fra denne elektron-tæthed. Dette led har dermed det ufysiske træk, at den elektron hvis bølgefunktion vi søger, selv bidrager til middelfeltet. Elektronombytningen i andet led i lign. (1B) betyder at dette led ikke har nogen klassisk elektrostatiske fortolkning. Men for $i = j$ går bidragene til lign. (1B) ud imod hinanden, hvilket korrigerer for det ufysiske bidrag fra det Coulombske middelfeltled.

Det antisymmetriserede middelfeltudtryk forudsætter kendskab til det samlede sæt af orbitaler $\{\phi_j\}$ for $j = 1, n$. Orbitalerne for et n -elektronsystem må derfor findes iterativt, hvilket er kernen i den selvkonsistente procedure som er opkaldt efter Hartree og Fock. I praksis bliver orbitalerne oftest udviklet i en basis af 1-elektronbølgefunktioner centreret på de enkelte atomkerner i molekylet (atomorbitaler), som formaliseret af Roothaan og Hall, se reference [8].

seret i Hartree-Fock-Roothaan teorien, se f.eks. reference [8]. Det centrale i de arbejder af Walter Kohn som førte til Nobelprisen, er at fokus for den teoretiske og beregningsmæssige behandlingen af elektroners kvantetilstande flyttes fra bølgefunktionerne til elektron-tætheden.

Walter Kohn er teoretisk fysiker med hovedinteresser indenfor teorien for faste stoffers elektronstruktur, og grundstammen i de bidrag han citeres for i begrundelsen for pristildelingen, er publiceret i to artikler fra henholdsvis 1964 [9] og 1965 [10], se Box 2. I den første af artiklerne bevises at energien af et system af n elektroner eentydigt kan udtrykkes som en funktional af elektrontætheden $\rho(r)$, og i den anden artikel udledes en ligning til beregning af de n orbitaler, såkaldte Kohn-Sham orbitaler, som ved en iterativ procedure bestemmer systemets elektrontæthed. Brugen af elektrontætheden som grundlag går tilbage til Thomas' og Fermis model for atomer fra 1927-28, samt til Slaters $X\alpha$ teori for molekylers og faste stoffers elektronstruktur fra 1951. Men først med Kohns artikler forelå der et formelt bevis for at energien eentydigt kan udtrykkes som en tæthedsfunktional. Der restererede dog, og resterer for så vidt stadig, det problem at Kohns teori ikke i sig selv giver noget svar på hvilken form denne funktional har; i de udtryk der er givet i Box 2 ligger problemet i kendskab til den præcise form af leddet $E_{xc}(\rho)$. Eksistensen af et stringent grundlag for metoder baseret på en energifunktional teori gav imidlertid stødet til en omfattende fornyet interesse i sådanne metoder, og forskellige udtryk for det formelt ubekendte led er blevet opstillet på grundlag af en kombination af teori og parametrisering. Kohn har selv spillet en vigtig rolle i videreudviklingen indenfor behandlingen af faste stoffer, mens anvendelsen indenfor behandlingen af molekylære tilstande blev taget op af en række forskningsgrupper indenfor kvantekemien. En sammenfatning af teorien og dens kemiske anvendelser kan f.eks. findes i reference [11].



John Pople

John Pople har været en førende skikkelse i kvantekemien siden midten af 50'erne og har i høj grad

formet både fagets begrebsverden og dets beregningsmetoder og praktiske anvendelser, og han har været ledende forfatter til en af de mest benyttede monografier om kernemagnetisk resonans [12] samt til en indflydelsesrig monografi om anvendelsen af kvantekemiske beregninger [8]. I sine arbejder fra begyndelsen af 1950'erne udviklede Pople en parametriseret kvantemekanisk teori for beregning af molekylers elektronstruktur, og videreudviklede en teori formuleret i 1937 af Fritz London til brug for såkaldt gauge-invariante beregninger af molekylers magnetiske egenskaber. Den parametriserede teori førte, sammen med lignende arbejder af Rudolf Pariser og Robert Parr, til Pariser-Parr-Pople (P³) metoden som dominerede kvantekemiske beregninger for organisk kemiske forbindelse i en lang årrække. Senere forlod han de parametriserede modeller til fordel for "ab-initio" metoder, som er karakteriseret ved at alt beregnes "fra bunden" ved brug af numeriske metoder, og uden at der indføres empirisk bestemte parametre. Denne udvikling var i begyndelsen baseret på Hartree-Fock-Roothaan metodens middelfeltsteori, se Box 1. Men med henblik på at skabe et hieraki til systematisk forbedring under hensyntagen til fluktuationer i forhold til middelfeltet, tog Pople udgangspunkt i en artikel fra 1934 af Christian Møller og Milton S. Plesset [13], og udviklede på det grundlag en såkaldt Møller-Plesset approximationssteori, som blev formuleret til forskellige ordner i fluktuationerne. Til brug for de praktiske anvendelser af "ab-initio" metoder, skabte han i 1970 et banebrydende kvantekemisk programsystem GAUSSIAN-70, som er i fortsat udvikling, og som i sine senere udgaver også inddrager nogle af de tæthedsfunktional-metoder, som er udviklet på grundlag af Kohns arbejder. Den seneste udgave er GAUSSIAN-98 (fra 1998), og en undersøgelse, som blev foretaget for et par år siden på verdens førende cen tre for supercomputere, viste at GAUSSIAN programsystemet på det tidspunkt var det mest udbredte anvendelsesprogrammel.

En vigtig pointe i Poples bidrag har været en skelnen mellem to forskellige indfaldsvinkler. Den ene er at betragte hvert problem for sig, og at benytte det højst mulige teoretiske og numeriske beregningsniveau. Denne indfaldsvinkel, som i sagens natur søger at udnytte den seneste og mest slagkraftige computerteknologi til sin yderste grænse, anvendes med henblik på at opnå resultater af en nøjagtighed som kan blive sammenlignelig med, og i nogle tilfælde større end, nøjagtigheden for eksperimentelle data for den valgte kemiske problemstilling. Pople har selv i det væsentligste valgt en anden indfaldsvinkel, som han betegner som en teoretisk model [8]. Her fastlægges et veldefineret teoretisk niveau, som derefter anvendes uændret for alle molekyler op til en størrelse som, for det valgte teoretiske niveau, bestemmes af de tilgængelige computer ressourcer. Det er klart at et højere niveau i almindelighed vil føre til mere omfattende numeriske beregninger, og dermed stille større ressourcekrav,

BOX 2

Hohenberg-Kohn teoremet og Kohn-Sham orbitaler.

I artiklen fra 1964 beviste Hohenberg og Kohn [9] at energien af den laveste kvantetilstand af et mangeelektronsystem eentydigt kan udtrykkes som en funktional af elektrontætheden $\rho = \rho(\mathbf{r})$, d.v.s.

$$E(\rho) = T_s(\rho) + J(\rho) + \int v(\mathbf{r})\rho(\mathbf{r})d\mathbf{r} + E_{xc}(\rho) \quad (2)$$

Da $\rho(\mathbf{r})$ er en 3-dimensional funktion som angiver elektrontætheden i punktet $\mathbf{r}$, bliver energien en funktion af en funktion, d.v.s. en funktional. I ligning (2) er $T_s(\rho)$ en kinetisk energi, $J(\rho)$ står for den klassiske Coulombske selvvekselvirkning for elektrontætheden ρ , $v(\mathbf{r})$ er det bidrag til den potentielle energi der skyldes tiltrækningen til molekylets positivt ladede atomkerner samt vekselvirkningen med eventuelle ydre elektriske felter, og det såkaldte udvekslings-korrelations ("exchange-correlation") bidrag $E_{xc}(\rho)$ rummer de bidrag som repræsenterer konsekvenserne af antisymmetrikravet (se Box 1) samt elektron-korrelation, d.v.s. fluktuationer i forhold til en middelfeltsbeskrivelse. I artiklen fra 1965 viste Kohn og Sham [10] at elektrontætheden og det kinetiske energibidrag i lign. (2) for et n -elektronsystem kan beregnes ud fra et sæt af n 1-elektronbølgefunktioner (orbitaler), som bestemmes ved et sæt ligninger af samme form som middelfeltstilnærmelsen, men hvor lign. (1B) er erstattet af udtrykket

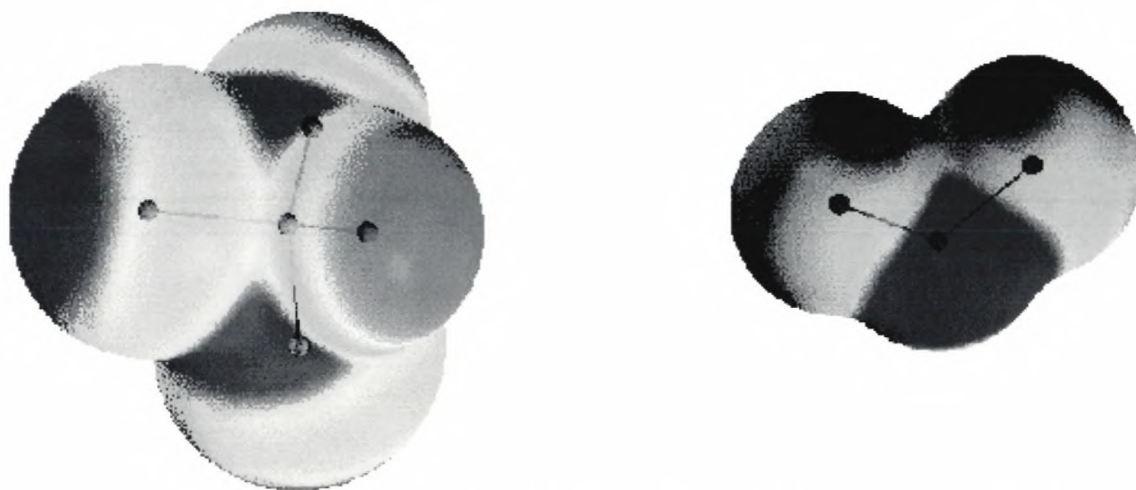
$$\int d\mathbf{r}' \rho(\mathbf{r}') \left(\frac{e^2}{4\pi |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} \right) \phi_i(\mathbf{r}) + v_{xc}(\mathbf{r})\phi_i(\mathbf{r}) \quad (3)$$

hvor

$$v_{xc}(\mathbf{r}) = \frac{\partial E_{xc}(\rho)}{\partial \rho(\mathbf{r})} \quad (4)$$

Første led i lign. (3) er dermed af samme form som første led i lign. (1B) hvor positionsvektorerne $\mathbf{r}_1$ og $\mathbf{r}_2$ er erstattet med de rumlige positionsvektorer $\mathbf{r}$ og $\mathbf{r}'$. I modsætning hertil er sidste led i lign. (1B), som kun repræsenterer konsekvensen af antisymmetrikravet, erstattet af et udtryk som både repræsenterer antisymmetrien og elektron-korrelation.

eller medføre en reduktion i størrelsen af de molekyler der kan behandles. Men styrken ved denne modelbetragtning er, at man på hvert niveau får en sammen-



Figur 1. Højt oppe i atmosfæren destrueres CF_2Cl_2 molekyler (freon, til venstre på figuren) af ultraviolet lys. Frie kloratomer dannes og reagerer med O_3 molekylet (ozon, til højre på figuren) og ødelægger dem. Processen kan studeres ved at bruge kvantekemiske beregninger. Fra [1].

lignelig beskrivelse af en række kemiske problemstillinger, og at der samtidig kan skabes et veldefineret hieraki af teoretiske modeller til opnåelse af en systematisk forbedring af resultaterne. Poples udvikling af Møller-Plesset approximationsteorien, og hele udviklingen af GAUSSIAN programpakken, afspejler ideen om brugen af denne teoretiske model som grundlag for at udvikle kvantekemien til et kemisk redskab.

Beregningskemi som Kemisk Redskab

Der udføres idag kvantekemiske beregninger på molekyler så forskellige som freon, som indgår i ozonlagets nedbrydning (Figur 1), aminosyrer og andre byggesten i den biologiske kemi, overgangsmetalkomplekser, som indgår i katalytiske processer, og "fodboldmolekylerne" (fullerenerne) C_{60} , C_{70} og C_{84} . Molekylers struktur og egenskaber beregnes i gasfase, væskefase og faste faser, de kvantekemiske resultater indgår i fortolkninger og beregninger af kemiske reaktioner, og de beregnede egenskaber spænder fra energiforhold og spektre af alle slags til lineære og ikke-lineære optiske og elektromagnetiske egenskaber. Til disse kvantekemiske beregninger er der udviklet programmer til stort set alle computertyper, fra bærbare pc'er til supercomputere og store klynger af parallelcomputere.

Udover de kvantemekanisk baserede metoder, er der også sket en betydelig udvikling af beregningsmetoder baseret på mere klassiske modeller for de kræfter der bestemmer molekylernes struktur og reaktioner, samt på statistisk mekaniske modeller. Videreudviklingen af de forskellige metoder er aktive og produktive forskningsområder, som er karakteriseret af stærke internationale netværk, hvor også en række danske grupper yder betragtelige bidrag. Så selvom der stadig er brug for nyskabelser, er det hverken "sangvinsk" eller over-

drevet at konstatere, at "beregningssmaskiner" nu indtager en meget synlig plads i udvalget af kemisk forskningsapparatur, og at meget tyder på at det er blevet naturligt for "tusinder af kemikere" at vende sig til computeren for at få belyst eller løst et kemisk problem.

I valget mellem de mange, der har bidraget til denne udvikling, har Nobelpris-komiteen ramt meget præcist ved at belønne netop Walter Kohn og John Pople for deres indsats.

Referencer:

- [1] <http://www.kva.se/eng/pg/prizes/nobel/-chemistry98.html>
- [2] <http://www.physics.ucsb.edu/kohn/>.
- [3] <http://www.chem.nwu.edu/brochure/pople.html>.
- [4] N. Bjerrum i T. Brodén, N. Bjerrum og E. Strømgren (1929) Matematikken og de Eksakte Naturvidenskaber i det nittende Aarhundrede (Gyldendal).
- [5] P. A. M. Dirac (1929) Proc. Roy. Soc., bind **A123**, side 714.
- [6] Nobel Lectures (1972) Chemistry 1963 - 1970, side 133-160 (Elsevier).
- [7] Aa. E. Hansen (1967) Molekyl-orbitaler, Dansk Kemi, bind **48**, side 45-47.
- [8] W. J. Hehre, L. Radom, P. v. R. Schleyer og J. A. Pople (1986) Ab-Initio Molecular Orbital Theory (Wiley-Interscience).
- [9] P. Hohenberg og W. Kohn (1964) Inhomogeneous Electron Gas, Phys. Rev. B, bind **136**, side 864.

- [10] W. Kohn og L. J. Sham (1965) Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation, *Phys. Rev. A*, bind **140**, side 1133.
- [11] T. Ziegler (1991) Approximate Density Functional Theory as a Practical Tool in Molecular Energetics and Dynamics, *Chem. Rev.*, bind **91**, side 651.
- [12] J. A. Pople, W. G. Schneider og H. J. Bernstein (1959) High Resolution Nuclear Magnetic Resonance (McGraw-Hill).
- [13] C. Møller og M. S. Plesset (1934) Note on an Approximation Treatment for Many-Electron Systems, *Phys. Rev.*, bind **46**, side 618.



Aage E. Hansen er dr.scient. og docent ved Kemisk Institut, Københavns Universitet. Arbejder med teoretisk strukturkemi, og med teori og beregning af molekylers elektriske og magnetiske egenskaber.

Professor Richmanns sidste eksperiment – om lyn og torden

Henrik Leth



Lyn og torden er naturligvis velkendte fænomener, og allerede meget tidligt har man gerne ville give en forklaring på dem. Det har givet udslag i en mængde vejr- og krigsguder, f.eks. Zeus med tordenkilen hos de gamle grækere, Thor med hammer og gedebukke i den nordiske mytologi, og i Biblen siges det, at Gud kan styre vejret. Enkelte som f.eks. Sokrates (469-399 f.Kr.) havde indset, at det ikke var Zeus, der lavede lyn og torden, og han mente, at det måtte være hvirvelstrømme af luft. Der skulle dog gå lang tid, før der kom en mere videnskabelig undersøgelse, og det var først i 1700-tallet, at der virkelig begyndte at ske noget.

Franklins drage og professor Richmanns endeligt

Allerede i 1708 havde den engelske fysiker William Wall foreslået, at lyn skulle være tæt forbundet med den statiske elektricitet, man kendte til. Da Benjamin Franklin (1706-1790) i 1746 begyndte at eksperimentere med elektricitet, kom han hurtigt til at tænke i de samme baner. Franklin var især interesseret i at lave en lynafleder, da der skete en del skader på bl.a. almindelige bygninger, skibe og ammunitionsdepoter. I et godt stykke tid var der dog en del, der ikke ville beskytte sig på denne måde, idet de mente, at lynene var gudernes retfærdige straf. I maj 1752 lykkedes det franskmænden Thomas-François D'Alibair (1703-1779)

Figur 1. Et flot lynnedslag, hvor både hovednedslag og sidegrene er tydelige. Foto: Weatherstock, Warren Faidley, USA.

at vise, at lyn og elektricitet virkelig er det samme. Han "fangede" et lyn i en såkaldt Leidnerflaske, hvor man kan opbevare statisk elektricitet, og demonstrerede, at han kunne trække en gnist fra flasken på samme måde, som hvis han havde opladet den vha. et stykke rav og et katteskind. Da postgangen ikke var så regelmæssig den gang, hørte Franklin ikke om det vellykkede eksperiment før noget senere. Han gik derfor selv i gang med at bevise sammenhængen, og i juni 1752 lavede han sit berømte drage-eksperiment.



Figur 2. Professor Richmann møder sin skæbne, da et lyn slår ned i hans stang til at trække gnister. Fra [3].

Franklin sendte en drage op i tordenvejr og hængte en nøgle på linen. Da dragen var kommet lidt op, kunne han trække gnister fra nøglen til sine knoer pga. potentialforskellen mellem skyer og jord. Dette var igen bevis for, at tordenskyer indeholder elektricitet. Nogle mener, at Franklin lod enden af linen hænge ned i en spand med vand, der skulle udgøre jordforbindelse, men det er tvivlsomt, om Franklin ville være sluppet godt fra et lynnedslag i dragen.

I Sankt Petersborg eksperimenterede professor Richmann med elektricitet. Han havde sat en metalstang ned gennem taget på sit hus, så han kunne stå inden døre og trække gnister fra den. Til at trække gnisterne brugte han en lille, dårligt isoleret metalstang. I 1753 forsøgte Richmann under et tordenvejr at trække gnister, da lynet pludselig slog ned og dræbte ham (som afbildet i figur 2) – han eksperimenterede virkelig til det sidste.

Franklin skrev flere artikler om lynafledere, men han patenterede aldrig sin opfindelse, da han mente, at det

var en menneskeret at kunne beskytte sig mod lyn.

Hvor kommer lynene fra, og hvad er sanktelmsild?

For at producere de gigantiske, elektriske udladninger må skyerne først opbygge et overskud af positive eller negative ladninger. Dette klares af cumulonimbuskyerne (bedre kendt som tordenskyer). Disse skyer er normalt 10–12 km høje, og pga. temperaturfaldet op gennem atmosfæren vil de indeholde både regn, sne, hagl og små iskrystaller [1].

I skyerne findes også op- og faldvinde, der kaster rundt med regn og is. Man har ikke forstået processen til fulde, men når disse forskellige partikler grides mod hinanden, virker det på samme måde som ravet og katteskindet, så der opstår nogle områder med positiv og nogle med negativ ladning. Endvidere vil ladningerne blive delt på en meget karakteristisk måde: bunden af skyen vil være overvejende negativ med et lille positivt område, midten af skyen vil være stærkt negativ, og toppen af skyen vil være positiv, se figur 3. Samlet vil der være en overvægt af negative ladninger (anslået til mellem -20 C og -300 C), så ni ud af ti lyn er negative, mens et af ti er positivt. At skyerne har områder med både positive og negative ladninger, giver også mulighed for lyn mellem skyerne.

Når skyen glider over landskabet, vil den negative overvægt drive en del elektroner på jorden væk, så jorden vil være positivt ladet lige under skyen. Potentialforskellen vil komme op på 10–100 MV, og det elektriske felt vil være 10 kV/m mod de normale ca. 150 V/m. Med så store elektriske felter vil der forekomme ionisering ved spidse punkter som kirkespir, mastetoppe og selv græsstrå. Ioniseringen vil give anledning til et svagt, grønt lysskær, der kendes som sanktelmsild efter sømændenes skytshelgen, Sankt Elm (se figur 4).

Lynkanalen dannes

Der er dog ikke grund til at tro, at man er specielt beskyttet, når man ser sanktelmsild – snarere tværtimod. Når potentialforskellen er stor nok, kan den lynskabende proces gå i gang (her beskrevet for et negativt lyn, der går fra sky til jord).

Elektronerne i bunden af skyerne vil blive accelereret ned mod jorden, og de første vil løbe ca. 50 m, før de stopper op et øjeblik. De vil dog hurtigt fortsætte endnu 50 m før en lille pause, og sådan går det hele vejen ned mod jorden. På vejen nedad vil elektronerne hele tiden søge i den retning, der tilbyder den mindste, elektriske modstand, afhængig af luftens fugtighed og ioniseringsgrad. Nogle gange vil flere retninger forekomme lige gode, så elektronvejen deles. Denne process er vist i figur 5.

Hver af vejene vil søge nedad mod jorden, og når en af dem er omkring 100 m over landskabet, vil der udgå de såkaldte streamers fra høje objekter. Disse streamers består af positive partikler og stiger op mod elektronerne. Når elektronerne fra skyen møder en streamer,

vil der skabes forbindelse mellem sky og jord, og lynkanalen er hermed dannet.

Torden og lynild

Så begynder det at gå stærkt! Elektronerne tættest på jorden bliver nærmest suget ud, og dem lidt længere oppe i kanalen følger hurtigt efter. På denne måde tømmes hele lynkanalen og noget af skyens overskud af elektroner. Når dette sker, vil elektronerne opnå en meget høj hastighed, og luften vil blive meget varm (bliver til såkaldt plasma). Dette giver et kraftigt lysglimt, og fordi det er de nederste elektroner, der suges ud og lyser op først, vil lynet se ud som gående fra jorden og op til skyen.



Figur 3. Tordensky over landskab. De elektriske ladninger i skyerne fordeler sig, så der er flest positive i toppen og flest negative i bunden. Foto: Weatherstock, Warren Faidley, USA.

Når luften opvarmes så hurtigt, vil den også udvide sig voldsomt, hvilket skaber chokbølger. Når disse chokbølger møder den kolde luft, vil de henfalde til lydbølger, der høres som torden. Da lydens hastighed er omkring 340 m/s i luft ved havoverfladen, kan vi beregne et lynnedslags afstand ved at tælle sekunder, fra vi ser lysglimtet, til vi hører det første skarpe tordenkald. For hver tre sekunder er lynnedslaget 1 km væk.

Den rumlen, vi hører i et tordenskrald, skyldes, at lydbølgerne fra hele lynkanalen bliver reflekteret både mod skyerne og mod jorden. Hvis braget er kraftigt nok, vil man kunne høre en langstrakt rumlen helt op til 25 km væk.

Lidt statiske oplysninger

Man har på forskellig måde målt en del af lynets egenskaber, og det er en imponerende liste. Hastigheden af elektronerne, når de forsøger at skabe kontakt fra skyen til jorden, er 400 km/s. Dette lyder af en del, men når elektronerne bliver suget ud af lynkanalen, kommer hastigheden op på 100.000 til 150.000 km/s eller en tredjedel til halvdelen af lysets hastighed!



Figur 4. Sanktelmsild på et skib. Sanktelmsilden ses om natten som et svagt, grønt skær ved spidse objekter, når det elektriske felt er meget stort. Fra Ellinger (1987) "Naturen og dens Kræfter".

Længden af et lyn vil normalt ligge mellem 300 m og 3 km, men radarmålinger har vist et sky-til-sky lyn på 150 km. Diameteren af hovednedslaget er typisk 2-5 cm, men man har målt op til 15 cm.

Når et lyn slår ned, overføres der en ladning på omkring -25 C , men man har målt op til $\pm 200\text{ C}$. Varigheden af et nedslag varierer en del; man har målt fra $50\text{ }\mu\text{s}$ til 10 ms. Den typiske strøm og spænding ligger omkring 30.000 A og 125 MV. Man har dog målt op til 345.000 A – til sammenligning løber der omkring 0,4 A og 230 V i en 100 W pære.

Denne høje strøm og spænding giver et lyn en top-effekt på 3.750 GW. Der går godt 75% af energien til varme, så luften bliver mellem 15.000 og 30.000°C varm – dette svarer til tre til seks gange temperaturen på Solens overflade. Den samlede energi, der overføres mens lynet slår ned, er 250 kWh eller 900 MJ. Med denne energi kan man få en 60 W pære til at lyse uafbrudt i næsten et halvt år eller løfte en elefant på 5 t mere end 18 km op i luften!

Hvor længe går der da, før en sky kan aflevere så store mængder energi igen? Det har vist sig, at mekanismen, der deler ladningerne i en tordensky, er så effektiv, at skyen er genopladet efter kun ca. 5 s. Det skal dog bemærkes, at skyerne ikke nødvendigvis lyner hvert femte sekund. Hvis der f.eks. er en lille afstand

mellem sky og jord, vil der ikke blive opbygget så meget ladning, og lynet vil komme hurtigt og være svagt. Hvis afstanden derimod er stor, vil der gå længere tid, og lynet vil være kraftigere.

Kornmod og kuglelyn

Der findes flere ledsagefænomener til lyn og torden, og et par af dem skal da nævnes her. Kornmod er, når man ser nogle skyer langt væk oplyst af lyn, uden at man kan høre torden. Det sker som regel i sensommeren (deraf navnet kornmod), hvor nogle tordenskyer hænger i horisonten og bliver oplyst, uden at man kan se selve lynene.

Kuglelyn er et lidt mere dramatisk fænomen, der især kendes fra Tintin: "De syv Krystalkugler." Man ved ikke så meget om det, og det er vist aldrig lykkedes at tage et ordentligt billede af det. Der er dog ingen tvivl om, at kuglelyn rent faktisk eksisterer.

Et kuglelyn er en lille kugle med diameter på godt 25 cm, der lyser med en effekt som en 40 W pære. Det svæver rundt med 10 km/t i ca. 1 m højde og kan bevæge sig gennem vinduer og vægge. Det kan dog også kastes tilbage fra både vinduer og vægge. Man har i laboratorier skabt små kuglelyn, og der findes en del teorier (alle utilstrækkelige) for, hvordan de opstår.

En tredjedel af de observerede kuglelyn er endt i en eksplosion, resten er forsvundet uden spor. Hvis de eksploderer, kan de være ganske farlige. Der er bl.a. rapporteret et badekar med vand, der begyndte at koge og en bil, der fik ødelagt lakken.

Hvis man ser et kuglelyn skal man nok flytte sig i en fart, men tag lige et fotografi først! Alle observationer af kuglelyn skal desuden meldes til Dansk Meteorologisk Institut.

Forholdsregler

Hvis man rammes af et lyn, er der omkring 40% chance for at overleve, og hvert år dræbes der en til to af lyn i Danmark. Dette kan dog i flere tilfælde undgås, hvis man ved hvad man skal tage af forholdsregler, når der er tordenvejr.

Man skal under ingen omstændigheder gøre noget for at tiltrække sig et lynes opmærksomhed ved f.eks. at stå med en fiskestang af metal, bade (da vand leder strøm) eller flyve med drage. Metal er ikke så godt her, fordi det leder strøm meget bedre end de fleste andre ting. Hvis man befinder sig helt omsluttet af metal, er man dog sikret. Man siges at befinde sig i et Faraday-bur, opkaldt efter den engelske fysiker Michael Faraday (1791-1867). Et Faraday-bur kan f.eks. være en bil, et tog eller et metal-skib, og man er sikret, fordi det er så let for strømmen at løbe i overfladen og finde et sted at aflade, at der ikke er nogen grund til at løbe gennem passagererne.

Man skal holde sig fra træer. Det er typisk de største træer, der bliver ramt af lyn, fordi deres streamers når højest op. Der kan så ske det, at lynet løber ned langs stammen, så barken bliver kastet af og sårer én

grimt. Der kan også ske det, at lynet springer fra træet til én selv. Endelig kan strømmen løbe lidt rundt i jordoverfladen og derfor løbe gennem én. Der har i Utah været et eksempel, hvor jorden var meget dårligt ledende, og 500 får blev dræbt af et lyn.

Det burde ikke være så farligt at tale i telefon, da lynet typisk vil løbe hen til en fordele eller et måleskab. Hvis tordenvejret er lige over én, bør man dog afholde sig fra at bruge alle elektriske apparater, uanset om man har luftledninger eller nedgravede. Det er ufarligt at tale i mobiltelefon, så længe man ikke stiller sig et sted, hvor man er det højeste punkt i omegnen.

Liv og død

Hvis nogen er så uheldige at blive ramt af lynet, skal man ikke være bange for at røre dem, for strømmen forsvinder straks. Det er faktisk sandsynligt, at de har brug for hjælp, idet lynet kan lamme både hjerte og åndedræt. Man skal derfor skynde sig at undersøge, om én, der er ramt af lynet, har brug for kunstigt åndedræt eller hjertemassage.

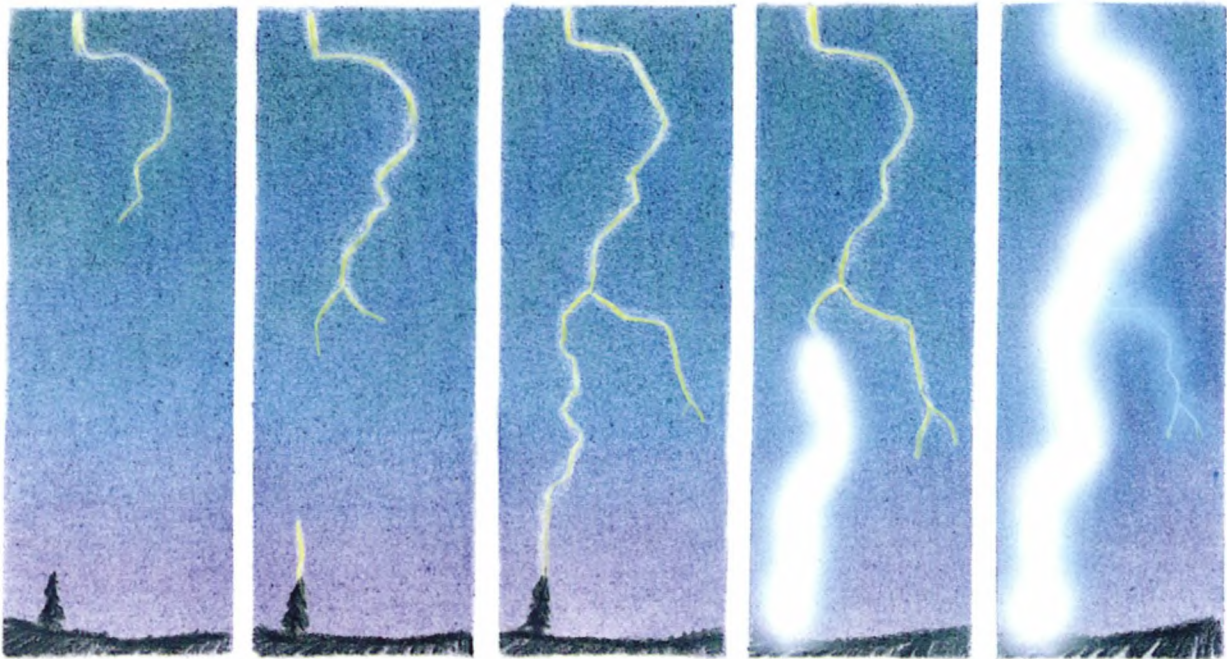
Der er dog begrundet mistanke om, at lyn også kan have været med til at skabe liv. I 1952 lykkedes det kemikeren Stanley Miller at simulere atmosfæren, som den så ud for længe siden før livets oprindelse. Når han lavede nogle elektriske udladninger, som skulle forestille lyn, begyndte organiske molekyler at samle sig til det, der kaldes aminosyrer. Man mener, at disse aminosyrer er grundlaget for liv, og de er i hvert fald vigtige for livet nu.

Referencer:

- [1] Lyn og torden hos NASA: <http://thunder.msfc.nasa.gov/>.
- [2] National Geographic, July 1993.
- [3] P. E. Viemeister (1972) "The Lightning Book", MIT Press.
- [4] Lidt om kuglelyn: <http://www.eskimo.com/~billb-/tesla/ballgtn.html>.



Henrik Leth er nyuddannet cand.scient. med hovedfag i fysik og speciale i eksperimentel atomfysik. Han har holdt foredrag om lyn og torden på Tycho Brahe Planetarium og er medforfatter af den populærvidenskabelige bog: "Lysfænomener i naturen".



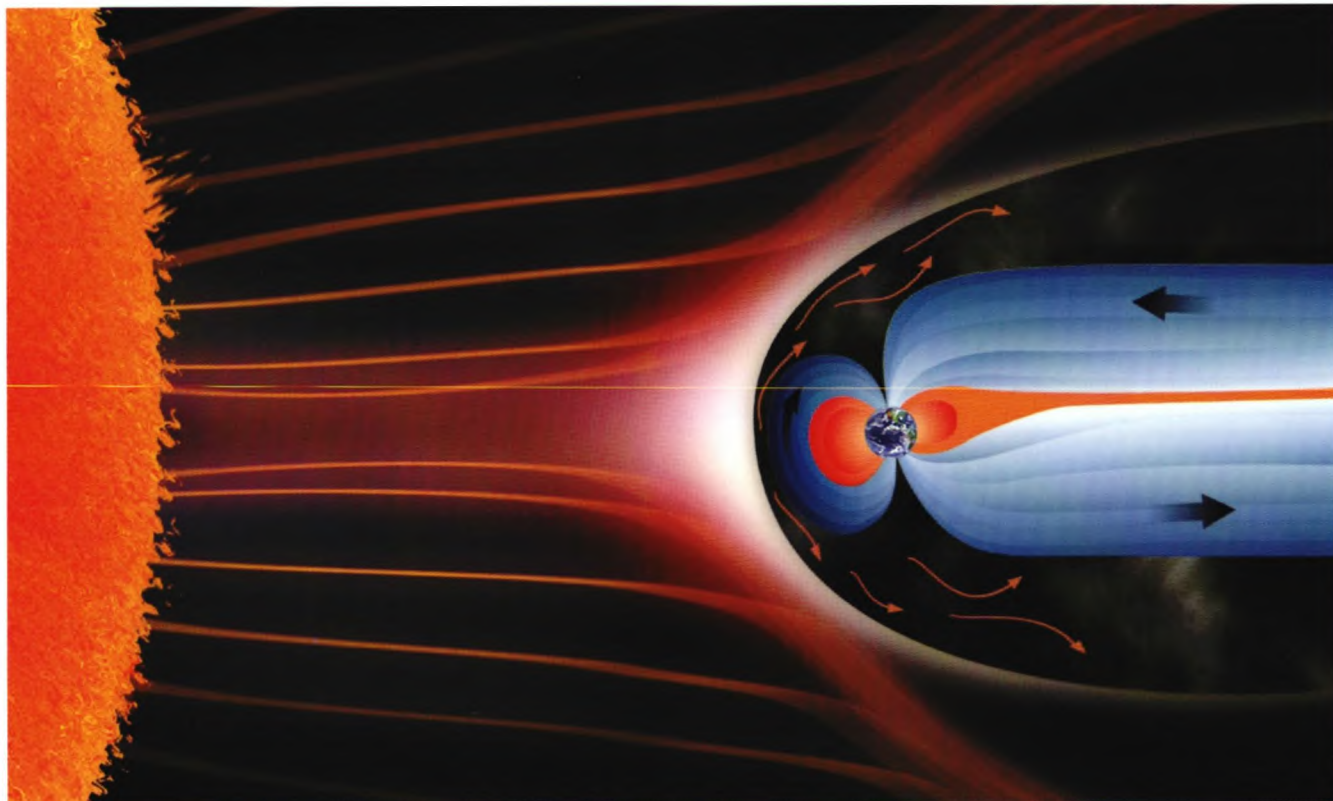
Figur 5. Et lynnedslag i slowmotion. Elektronvejen er ca. $1/200$ s om at løbe fra sky til jord (de første tre billeder). Elektronerne er ca. $1/10.000$ s om at blive suget ud, når der er forbindelse (de sidste to billeder). Tegning: Claus Rye Nielsen.



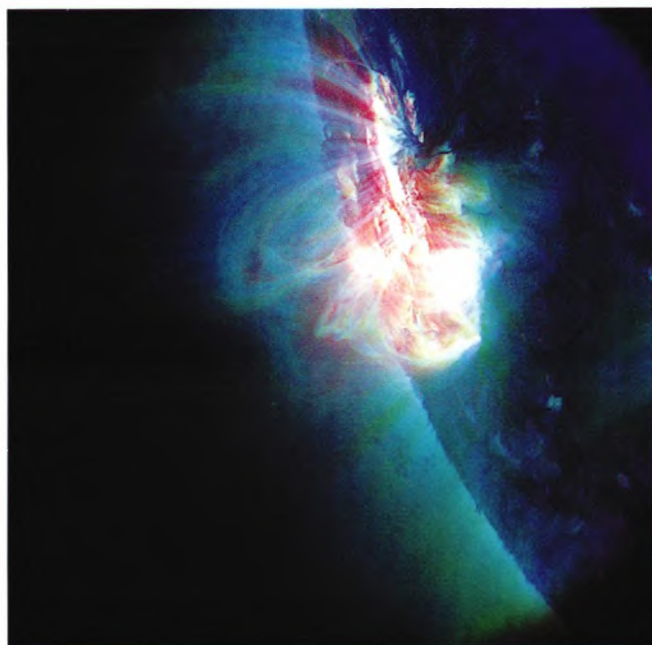
Figur 6. Lynnedslag ved aftentide. Foto: Weatherstock, Warren Faidley, USA.

Nordlys

Lars Lindberg Christensen, Tycho Brahe Planetarium, Anne Værnholt Olesen, Frederiksberg Studenterkursus, og Mike van der Poel, Niels Bohr Institutet, Ørsted Laboratoriet



Figur 1. Jordens magnetfelt deformeres kraftigt af den strøm af ladede partikler solvinden udgør. På dagsiden trykkes magnetfeltet fladt, og på natsiden trækkes det ud til en meget langstrakt dråbefacon. Tegning: Tycho Brahe Planetarium.



Nordlys er et af de lysfænomener i naturen, som har måtte vente længst tid på at få en tilfredsstillende forklaring. Dette hænger sammen med, at den dybere forståelse af nordlysets hovedtræk har måtte vente på udvikling af bl.a. atom-, geo-, og solfysikken. Den dag i dag er nordlys genstand for intens forskning, idet det for mange forskere fungerer som en form for laboratorium, hvor visse af frontforskningens elementer kan testes under forhold, som endnu ikke kan genskabes på Jorden. Det gælder eksempelvis for grenene plasmafysik og magnetohydrodynamik.

Nordlys og dets sydlige partner, sydllys, dannes i det komplekse samspil, der er mellem partikelstrømme fra Solen, Jordens atmosfære og Jordens magnetfelt.

Figur 2. Billede af plasmaløkke i solens overflade. Farverne er falske, rød er varmest og svarer til ca. 1,5 mio.°C, grøn lidt køligere med 500.000°C og blå køligst, svarende til 200.000°C. Foto: TRACE-satellitten (NASA).

Der har været mange gode artikler i Kvant om emner, som på forskellig vis har relevans for nordlys – se f.eks. [1–4]. I denne artikel vil vi forsøge at give et overblik over noget af den fysik, som ligger bag de flotte draperier, der af og til viser sig på nattehimmelen. Kivelson og Russell [5] beskriver også noget af fysikken bag nordlys. Af mere populære fremstillinger kan Brekke og Egeland [6] og Savage [7] fremhæves.

Solens aktivitet og rytme

Som nævnt spiller Solen en vigtig rolle i forståelsen af nordlys. Solen er en lidt almindelig gul stjerne, der lever et fredeligt liv som hovedseriestjerne. Det vil sige, at den er igang med den lange fase af sit liv, hvor brint i dens centrum fusionerer til helium. Når fire brintatomer smelter sammen til et heliumatom, bliver massen af heliumatomet en anelse mindre end massen af de oprindelige fire brintatomer. Ifølge Einsteins klassiske sammenhæng, $E = mc^2$, omdannes denne "massedefekt" til energi. Energien diffunderer i løbet af ca. en million år ud mod Solens overflade. Fra Solens overflade stråles lys ud i rummet, og en ganske lille del rammer Jorden og danner grundlaget for alt liv her.

Ud over lysstrålingen fra Solen, udsendes også en stadig "vind" af ladede partikler (fortrinsvis elektroner, protoner og heliumkerner), kaldet solvinden. Solvindens intensitet hænger nøje sammen med graden af aktivitet på Solens overflade.

Når vi her interesserer os for solvinden, er det fordi, der er en meget nøje sammenhæng mellem solvindens styrke og nordlysets hyppighed. Nordlyset er ganske enkelt resultatet af solvindens møde med Jordens magnetfelt og atmosfære. Ligesom Jorden har Solen et magnetfelt. Der er dog store forskelle på de to typer af magnetfelter. Gassen i Solens indre er så varm, at den er i plasmaform, hvilket igen betyder, at den kan lede elektrisk strøm. Solens magnetfelt hænger sammen med strømninger i plasmaet og med dens rotation. Solens rotation er differentiell – ved dens ækvator er rotationstiden ca. 25 døgn, mens den tæt ved polerne er op mod 35 døgn. Solens magnetfelt er "bundet" til plasmaet og plasmaets differentielle rotation gør, at magnetfeltet bliver filtret og nærmest ender med at ligne et filtret garnnøgle. Til tider kan magnetfeltet "knække" under den hårde behandling, og derved udløse store energimængder i form af soludbrud eller koronaludslyngninger. Under disse soludbrud bliver solvinden forøget – til tider ganske voldsomt. Der hvor magnetfeltlinierne stikker ud gennem soloverfladen dannes solpletter, og mellem disse forekommer protuberanser – kæmpeløkker af glødende gas (se figur 2).

Solpletterne optræder i par som hhv. magnetisk nordpol og sydpol. Antallet af solpletter og solvindens intensitet følges ad, da de begge er underlagt samme (endnu ikke helt forståede) fysiske mekanismer i Solens indre. Således vil mange solpletter være et sandsynligt tegn på høj intensitet af solvinden. Langvarige ob-

servationer af Solen har afsløret, at de begge følger en overordnet variation, der har maksimum ca. hvert 11. år.

Det næste solpletmaksimum var forventet i år 2001, men netop denne gang ser det ud til, at det indtræder i år 2000, lidt tidligere end forventet. Ved solpletmaksimum er det karakteristisk, at solpletterne fortrinsvis befinder sig omkring Solens ækvator. Idet solpletterne forud for maksimum vil vandre mod ækvator, kan solpletmaksimums indtræden forudsiges nogle år i forvejen. De samme forudsigelser kan man gøre ved at tolke observationer af emission fra Fe^{13+} ioner i Solens korona.

Solens magnetfelt og de mekanismer, der er forbundet med det, er ikke forstået i detaljer, og området er bl.a. et aktivt forskningsfelt på Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik ved Københavns Universitet, hvor en gruppe under ledelse af lektor Åke Nordlund forsøger at fravriste nogle af Solens øvre lag deres hemmeligheder. Ved Aarhus Universitet arbejder en gruppe under ledelse af professor Jørgen Christensen-Dalsgaard med bl.a. helioseismologi, "sol-skælv", som giver et vigtigt indblik i Solens indre. Et af de vigtigste aspekter i forståelsen af Solen er, hvordan dens magnetfelt til stadighed bliver opretholdt og gendannet. Tilsyneladende hersker en form for selvforstærkende "dynamo-effekt". En simpel analogi er bevægelsen af en leder i et magnetfelt (her rotationsbevægelse og konvektions- eller blandebevægelse af Solens elektrisk ledende plasma i Solens eget magnetfelt). Ifølge induktionsloven induceres en strøm i lederen (plasmaet), som igen vil give anledning til en forstærkning af det eksisterende magnetfelt. Selvom analogien er simpel, kan den måske åbne for et lille indkig i denne spændende problemstilling.

Samspelet mellem solvinden og Jordens magnetfelt

Jordens magnetfelt opstår, lidt i lighed med Solens, på grund af en selvforstærkende dynamo-effekt. Strømninger i den ydre del af Jordens metallerne iværksættes dels pga. jordrotationen og dels pga. boblende konvektionsbevægelser. Bevægelserne vekselvirker med magnetfeltet og forstærker dette. I Jorden og tæt på jordoverfladen vil variationer i disse bevægelser og i jordskorpens stofsammensætning give et kompliceret og uregelmæssigt magnetfelt. Set på afstand (hvis man ser bort fra solvindens indflydelse), er det imidlertid dipolfeltet som dominerer. Eller sagt på en anden måde: Jordens magnetfelt vil se ud som om, der var en kæmpemæssig stangmagnet placeret igennem Jorden. I nordlyssammenhæng er det relevant at betragte Jordens magnetfelt i 100 km's højde eller derover, og i dette område er dipolfeltet med god tilnærmelse dominerende.

Det område af Jordens omgivelser, der ligger indenfor det deformerede magnetfelt, kaldes magnetosfæren, og det er her nordlyset opstår. Energien til nordlyset leveres af solvindspartikler, men hvordan solvindspar-

tiklerne kommer ind i magnetosfæren, og om de overhovedet kommer ind, har i årtier været et mysterium.



Figur 3. Et solspektrum. Et kontinuert spektrum, med absorptionslinier, stammende fra stoffer i Solens ydre atmosfære. Tegning: Claus Rye Nielsen.



Figur 4. Et nordlysspektrum har få emissionslinier, svarede til bestemte grundstoffers overgange. Tegning: Claus Rye Nielsen.



Figur 5. Nordlys med komet Hale-Bopp i baggrunden. Måske er det natriumdublettens gule farve, der ses nederst i dette nordlys? Foto: Akira Fujii.

Solvindspartiklerne ankommer fra Solen med en hastighed på omkring 400 km/s, dvs. betragteligt hurtigere end lydens hastighed. En teori bygger på, at solvindspartikler kan accelerere magnetosfæreparkler (partikler fra magnetosfæren), måske specielt i den

chockzone der opstår på dagsiden, hvor Jordens magnetfelt sammentrykkes kraftigt af solvinden. Bagved chockzonen er der et område, der kaldes magnetopausen, hvor Jordens magnetfelt netop kompenserer solvindens tryk.

En anden teori, som man i dag hælder mere til, viser, at Jordens magnetfelt på natsiden bliver så langtrakt, at solvindspartikler kan "snige" sig baglæns ind, langt bagude, hvor magnetfeltet ikke er særligt kraftigt.



Figur 6. Nordlys over Sønderborg ved sidste solpletmaksimum i 1989. Foto: Sønderborg Amtsgymnasium.

Emissionsmekanismen

Efter disse indledende knæbøjninger er det vist på tide at tage fat på det egentlige nordlys. Mange spekulationer har i tidens løb gået på, at nordlyset var en form for refleks af sollys. Men i forrige århundrede blev det klart, at nordlyset måtte være af en anden natur. Det var den svenske astronom og fysiker Anders Ångström (1814-1879), som leverede det afgørende bevis. I sine banebrydende optagelser af nordlysets spektrum så han, at det var et emissionsspektrum. Denne opdagelse udelukker, at nordlys skulle stamme fra sollys, idet man fra reflekteret sollys vil forvente et kontinuert spektrum med absorptionslinier (Fraunhoferlinier).

Nordlyset er emission fra atomer, ioner og molekyler i atmosfæren i højden fra ca. 90 km til 600 km

over jordoverfladen. Spektret strækker sig fra det ultraviolette over det synlige område til infrarød. Uden at have fået fuldstændig afklaring på, hvordan solvinden trænger ned til disse højder, er det imidlertid klart, at solvindspartiklerne gennem inelastiske kollisioner¹ eksiterer visse partikler og ioniserer andre i Jordens øvre atmosfære. Nordlys opstår efter kollisionerne ved henfald af eksiterede atomer til lavere tilstande og ved rekombination mellem elektroner og ioner. Desuden giver henfald af eksiterede molekyler og rekombination af dissocierede (spaltede) molekyler anledning til emissionsbånd i nordlysspektret. Men forståelsen af nordlysspektret vanskeliggøres af, at de eksiterede partikler til tider kolliderer med andre partikler, og på den måde overfører energi til hinanden. Dermed bliver de faste energispring eller "signaturer" i nordlysets spektrum, der skyldes de forskellige processer beskrevet ovenfor, sløret noget. I alt haves et komplekst samspil mellem mange forskellige typer atomare kollisioner. I hovedsagen er det elektroner og protoner i solvinden, som er ansvarlige for nordlysets dannelse. Typiske energier af de indkomne solvindspartikler ligger fra 500 eV til 20 keV, og den enkelte partikel opbremses gradvist gennem en serie inelastiske kollisioner. Et par eksempler på udsendelse af nordlys er her på sin plads for at anskueliggøre den generelle den fysik, der ligger bag.

En meget almindelig nordlysfarve er grøn, udsendt af atomart ilt eksiteret ved sammenstød med en elektron. Da det er elektroner, som står bag eksitationen betegnes denne form for nordlys for elektronnordlys. Bølgelængden på 558 nm, svarer til den (dipol) forbudte $^1S \rightarrow ^1D$ overgang. Levetiden af det øvre niveau er 0,8 s. Dette lys udsendes typisk i højder mellem 100 og 300 km over jordoverfladen, hvor partikeltætheden er så lav, at atomet i den eksiterede tilstand kan undgå kollisioner med andre partikler før henfald. Den strengt forbudte overgang fra 1D tilstanden til 3P grundtilstanden giver anledning til et blodrødt lys med bølgelængden 630 nm. Den meget lange levetid af 1D tilstanden på 110 s gør imidlertid, at atomet ved højder under 300 km deeksiteres ved kollision med andre atmosfæreparkikler før udsendelse af lys. Derfor udsendes dette lys mest fra højdeområdet 300-600 km. Til gengæld er det blodrøde lys i denne højde et af de mest almindelige nordlysfarver. I den lavere højde fra 90 til 100 km er en kombination af karminrød og violet emission fra kvælstof molekyler N_2 og kvælstof ioner N_2^+ ioner dominerende. Det er tydeligt, at nordlysets farve hænger nøje sammen med højden, hvorfra det udsendes.

Det ovenfor beskrevne elektron-nordlys er det oftest forekommende. Det vil typisk kunne ses som tynde strukturer på himlen, idet de elektroner, som er ansvarlige for eksitationen, vil spiralere tæt omkring en bestemt magnetfeltslinie. De mere sjældne protonnordlys er mere diffuse. Protonnordlys blev første gang

beskrevet af Vegard i 1939. Her er der tale om, at et neutralt brintatom dannes i en eksiteret tilstand, ved at en indkommende proton indfanger en elektron fra en anden atmosfæreparkikel. Den dominerende farve i et sådant nordlys er den røde H_α linie på 656 nm.

Vores øjne vil tit opfatte nordlys som hvide eller grå. Det skyldes, at lysudsendelsen kan være for svag til, at det menneskelige øje kan registrere lysets farver. Af denne grund træder farverne ofte tydelige frem, når nordlyset fotograferes. Er der kraftig nordlysaktivitet, kan grunden til det hvidlige udseende være en anden, nemlig at der udsendes nordlys fra flere forskellige stoffer, og dermed med flere forskellige farver. Farveblandingen vil kunne skabe et indtryk af hvidligt lys.

Den røde farve fra ilten optræder kun, hvis nordlysaktiviteten er ret høj. Da den er lokaliseret ganske højt i atmosfæren, er det også den farve, man kan se i sydligere egne, hvor nordlyset ellers normalt ikke observeres. Det har givet anledning til en del myter, mange med temaet "himlen bløder".

Udover de farver vi her har omtalt, findes der ganske mange linier, der er set i nordlyset, uden dog at blive observeret særligt ofte. Både linier fra helium og natriumdubletten på 589,0 nm / 589,6 nm er blevet observeret. Herudover findes som allerede nævnt en del både infrarøde og ultraviolette linier, som naturligvis kun lader sig observere med lidt mere specielt udstyr.

Nordlysobservationer

Nordlyset observeres lettest ved at rejse mod nord. Der er størst chance, for at se nordlys indenfor det man kalder nordlys-ovalen. Som navnet antyder, er det et ovalt område, centreret omkring dipolfeltets akse. Skæringerne mellem dipolaksen og jordoverfladen definerer den geomagnetiske syd- og nordpol, og disse udgør Jordens egentlige magnetiske poler. Man skal bemærke, at disse afviger fra Jordens "dip-poler", som er de steder på Jorden, hvor en magnetnål stiller sig lodret. Disse steder er bestemt dels af Jordens dipolfelt og dels af lokale variationer i jordskorpens beskaffenhed. Den nordlige dip-pol ligger i Canada, mens den nordlige geomagnetiske pol ligger omkring Qaanaaq (Thule)². Nordlys-ovalen er bredest på natsiden og smallest på dagsiden, som det tydeligt ses på figur 8 af nordlys set fra rummet.

For at observere nordlys er det altså en god ting at rejse nordpå, men det er dog stadig ikke helt umuligt her fra Danmark. I gennemsnit er her nordlys ca. 10 gange om året, så skal man bare være heldig, at det ikke er overskyet. Chancerne er størst, når der er solpletmaksimum og dermed kraftigere solvind. Ved sidste solpletmaksimum i 1989 optog man ved Sønderborg Amtsgymnasium et bemærkelsesværdigt billede (figur 6), hvilket må være det bedste eksempel på, at flotte nordlys også forekommer i Danmark. Også selvom

¹ Inelastiske kollisioner: Kollisioner hvor den kinetiske energi helt eller delvist overføres til en anden energiform.

² Forvirringen øges ved at den nordlige geomagnetiske pol iøvrigt er en magnetisk sydpol.

forfatterens bedste nordlys-oplevelser i det danske strækker sig til nogle svage hvidlige tågelignende klat-
ter.

De bedste tidspunkter på året for nordlysobservationer er forår og efterår, men det er lidt med nordlyset som med vejret - det svinger i perioder mellem godt og skidt. Det kan være svært at vide, hvornår det er værd at rykke ud i kulden og se efter nordlys. Derfor laves der dagligt udsigter over nordlysaktiviteten. Disse udsigter laves på baggrund af magnetometermålinger og kan findes mange steder på internettet [8].

Nordlysets former er ganske mangfoldige. Der eksisterer et større begrebsapparat, der beskriver de forskellige morfologiske aspekter af nordlyset. Uden at komme ind på detaljerne kan vi generelt sige, at der er to ting, der styrer formen af nordlyset. Dels nordlysaktiviteten, hvor større aktivitet giver flere folder og større detaljeringsgrad i nordlysets former, og dels perspektivet. Står man lige under nordlyset, kan man eksempelvis se en såkaldt nordlyskorona (figur 7).

Nordlyset er altså et samspil mellem Jordens magnetfelt og atmosfære og solvinden. Solvinden strømmer gennem hele Solsystemet, og Jorden er langt fra den eneste planet med et magnetfelt og en atmosfære. Faktisk er der mange ting der tyder på at, den omtalte dynamoeffekt er en meget almindelig egenskab hos planeter. Nordlys er derfor ikke forbeholdt Jorden, som det kan ses af billedet af det flotte (og temmeligt komplicerede) Jupiter-nordlys på figur 9, men muligvis et fænomen man i en fjern fremtid vil kunne observere på planeter i kredsløb om andre stjerner.

Referencer:

- [1] T. Moretto og N. Olsen (1998) "Jordens magnetfelt set fra rummet", Kvant, bind 9, nr. 2, side 1.
- [2] N. Abrahamsen (1998) "Den geomagnetiske sekularvariation i Danmark", Kvant, bind 9, nr. 2, side 8.
- [3] S. A. Andersen (1992) "Kunstigt Nordlys", Kvant, bind 3, nr. 4, side 11.
- [4] H. Pésceli (1997) "Vejrforudsigelser i det ydre rum", Kvant, bind 8, nr. 3, side 18.
- [5] M. G. Kivelson og C. T. Russell (1995) "Introduction to Space Physics" (Cambridge University Press)
- [6] A. Brekke og A. Egeland (1979) "Nordlyset - Fra mytologi til romforskning" (Grøndahl & Søn).
- [7] C. Savage (1994) "Aurora - the Mysterious Northern Lights", (Greystone Books).
- [8] www.astro.ku.dk/lys_under_nordlys.



Lars Lindberg Christensen
Astronom, har gennem næsten 10 år arbejdet på Tycho Brahe Planetarium med astronomisk formidling, produktioner og tekniske emner. Oversætter af flere populære værker om astronomi. Billedet er fra Tycho Brahe Ekspeditionen '98.



Anne Værnholt Olesen
Fysiker. Arbejder på Frederiksberg Studenterkursus. Koordinator for Tycho Brahe Planetariums skoleservice.



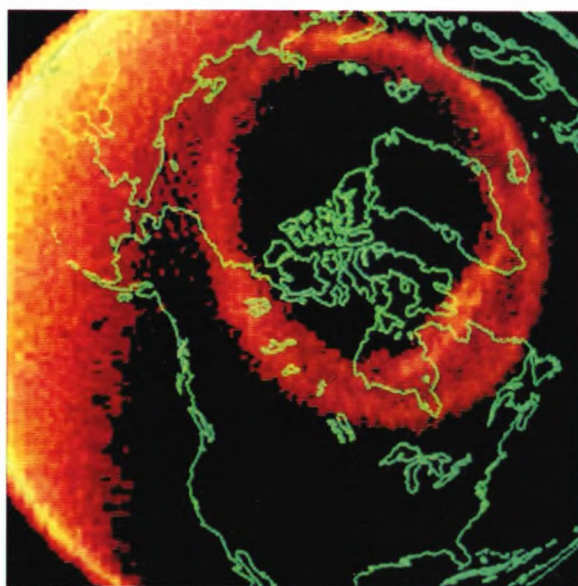
Mike van der Poel Ph.D. studerende på Niels Bohr Institutet, Ørsted laboratoriet, Københavns Universitet. Arbejder med eksperimentel atomfysik.

De tre forfattere er bidragsydere til, og udgør redaktionsgruppen for, den populærvidenskabelige bog "Lysfænomener i Naturen", som for nylig er udgivet på Høst & Søn's forlag.

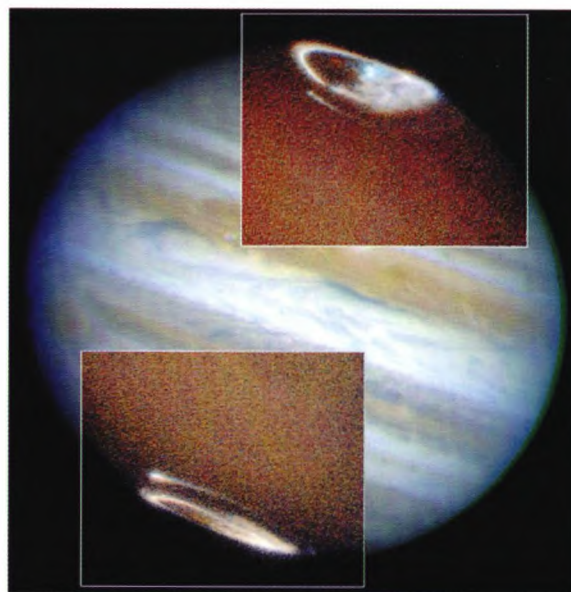
Figur 7-9 findes på næste side. På Kvants bagside ses et billede af nordlyset "sidelæns" fra rummet. I forgrunden ses dele af rumfærgen. Den smalle grønne stribe langs hele horisonten er luftlys som udsendes i højder på omkring 100 km. I billedets centrale område ses grønt nordlys nederst (fra iltatomer) og blodrødt højere oppe (igen fra iltatomer).



Figur 7. Står man lige under nordlyset, kan man se en nordlyskorona. Foto: Lauri Mala.



Figur 8. Nordlysaktiviteten optaget i ultraviolet lys. Nordlysovalen ses tydeligt at være bredere på natsiden end på dagsiden. Grunden til at det er svært at se nordlys om dagen, er altså ikke kun, at det er lyst om dagen. Foto: POLAR satellitten (University of Iowa).



Figur 9. Nordlys på Jupiter optaget i ultraviolet lys med Rumteleskopet Hubble. Dette nordlys kompliceres af vekselvirkningen med jupitermånen Io, der i sin bane omkring Jupiter laver en plasmatorus. Foto: STScI og NASA.

Melles Griot makes OPTICS, OPTO-MECHANICS, LASERS, INSTRUMENTS, and FIBER OPTICS



Contact Melles Griot for a fast response to your photonics needs. Our vast product selection described in our detailed product literature will provide solutions for a successful product or experiment.

Whether you need a single lens, or thousands of laser assemblies, Melles Griot is ready to deliver. From a single prototype to full-scale production, we can ship to your schedule. Melles Griot has earned a 25 plus year reputation as a quality manufacturer of optics, opto-mechanics, lasers, instruments, and fiber optics.

We have facilities in North America, Europe, and the Asia Pacific staffed with applications engineers ready to fulfill your requirements. You can reach us by phone, FAX, or the INTERNET.

From simple lenses to advanced fiber optics — Melles Griot is your *first choice* in photonics!

**Call, FAX, or E-mail us today
for your photonics solutions!**

Melles Griot Danmark
Stenagervej 13 • DK-4100 Ringsted
Phone: 53 61 50 49 • Fax: 53 61 60 49
E-mail: 101456.567@compuserve.com



■ OPTICS

- Beam Expanders
- Beamsplitters
- Coatings
- Custom OEM Optics
- Custom Optical Assemblies
- Cylindrical Optics
- Diode Laser Optics
- Filters
- Invaritar Lenses
- Lenses
- Micro Optics
- Mirrors
- Optical Design Software
- Polarizers
- Prisms
- Shutters & Irises
- YAG Lenses

■ OPTO-MECHANICS

- Breadboards
- Optical Tables & Isolators
- Opto-Mechanical Mounts
- Positioning Equipment
- Workstations

■ LASERS

- Diode Lasers & Assemblies
- Helium Neon Lasers

■ INSTRUMENTS

- Amplifiers
- Beam Position Measurement
- Beam Profilers
- Diode Laser Drivers
- Diode Laser Controllers
- Optical Spectrum Analyzers
- Power & Energy Meters
- Power Supplies
- Wavefront Analyzers

■ FIBER OPTICS

- Reflective Fiber Gratings
- Circulators
- Isolators
- Tree Couplers
- Attenuators
- Fiber Collimators

MELLES GRIOT

Canada
(613) 226-5880

France
(01) 3012-0680

Germany
(06251) 84060

Japan
(03) 3407-3614

Netherlands
(0316) 333041

Singapore
743-5884

Sweden
(08) 630-8950

Taiwan
(035) 729-518

United Kingdom
(01223) 420071

United States
(714) 261-5600

Flot bog om lyset i naturen

Jens Olaf Pepke Pedersen, KVANT

Vi kender alle oplevelsen af en smuk solnedgang, en kraftig regnbue eller en stor fuldmåne en klar nat. Men naturen byder på mange flere lysende fænomener, som vi måske ikke lægger mærke til eller kikker efter, fordi vi aldrig har hørt om dem. Selv nogle af de velkendte fænomener, som vi alle har kikket på utallige gange - f.eks. solnedgangen og regnbuen - har nogle detaljer, som mange nok først bemærker, når de er gjort opmærksom på dem.

Nu er der kommet en bog på dansk, som beskriver - og forklarer - en række af naturens lysfænomener. Ideen til bogen er udsprunget af et ph.d. kursus på Københavns Universitet om "Optical Phenomena in Nature". Undervejs i kurset opdagede deltagerne, at der næsten ikke fandtes noget materiale på dansk, der på en lettilgængelig måde beskrev lysfænomenerne. Derfor besluttede en gruppe af deltagerne selv at skrive bogen. Efter halvandet års arbejde er bogen netop udgivet på forlaget Høst & Søn, og det er næppe set før, at et ph.d. kursus resulterer i et så et flot resultat.

Bogen indledes naturligt nok med en gennemgang af øjet og synssansen. I de følgende 11 kapitler gennemgås et utal af lysfænomener i naturen som f.eks. regnbuen, lyn, haloer, solens lys, nordlys, skyer, luftspejlinger, solnedgange, nattens lys samt lys i dyre- og planteriget. Teksten er velskrevet og letlæst, og opfylder ønsket om at skrive en alment tilgængelig bog om fænomenerne. Desuden er bogen gennemillustreret med fantastiske farvebilleder, hvilket i høj grad er med til at øge værdien af bogen.

Det har ikke været nogen let opgave at skrive en bog uden at bruge formler eller henvise til, hvad læseren har (eller burde have) lært på universiteternes førsteårs fysikkurser. Kvants læsere kan f.eks. ved at læse Allan Bro Hansens velskrevne artikel om regnbuen på side 13 nemt overbevise sig om, at alene forsøget på at forklare regnbuens farver nemt fører til i et videregående optikkursus. Det er i bogen i høj grad lykket at give lettilgængelige forklaringer på lysfænomenerne, bl.a. takket være en række instruktive tegninger af Claus Rye Nielsen.

For den meget fysikinteresserede er bogen et godt udgangspunkt for fordybelse i nogle af fænomenerne. I dette nummer af Kvant uddyber redaktionsgruppen bag bogen desuden et par af fænomenerne, nemlig brydning i atmosfæren og nordlys, i artiklerne side 3 og 39. Her (samt i Henrik Leths artikel om lyn side 34) kan læserne nyde nogle af bogens fotografier og tegninger, som vi har fået lov til at bringe i Kvant.

Bogen er desuden udstyret med en ordliste og har i disse internettider naturligvis sin egen web-side

(www.astro.ku.dk/lys), hvorfra man kan hente dele af bogen, læse om de forskellige fænomener og finde links til andre sider om lysfænomener.

Bogen krydres med små citater fra litteraturen, og man kunne godt ønske sig, at de alle var oversat til dansk. Det er næppe mange af bogens læsere, der kan forstå citaterne uden adskillige ordbogsopslag. Til gengæld er bogen behageligt fri for trykfejl. Jeg bemærkede, at ordet "dugbue" ikke er med i registeret, selvom det optræder i ordlisten og på et af bogens billeder, men som ansvarlig for tryk- og andre fejl i Kvant skal jeg hurtigt tilgive forfatterne dette.

Prisen er desværre på samme niveau som alle andre dansksprogede bøger, men alligevel kan jeg varmt anbefale bogen, f.eks. hvis man vil give en god gave til en fysikinteresseret kæreste. Naturligvis er der den oplagte risiko, at bogen kan ødelægge lidt af den romantiske stemning ved at betragte solnedgangen eller stjernehimlen, men til gengæld bliver der måske tid til flere fælles iagttagelser i naturen.

"Lysfænomener i naturen. Om lys og farver nat og dag." Redigeret af Lars Lindberg Christensen, Anne Værnholt Olesen og Mike van der Poel. Illustreret af Claus Rye Nielsen. Forlaget Høst & Søn, 208 sider, indbundet, 298 kr. Udkom den 27. november 1998.

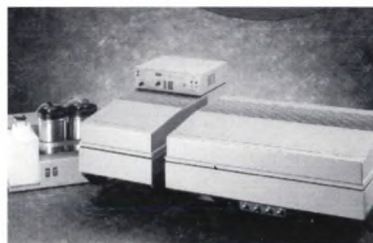


optilas

Optilas Danmark, den lokale internationale leverandør med specialer indenfor:

Optik og lasere til forskning og industri

Continuum, Inc. - Corion Corp. - CVI Laser Corp. - Ion Laser Technology, Inc. - Labsphere, Inc. - Laservision - Optical Surfaces Ltd. - Physical Optics Corp. - Research Electro Optics - Santa Fe Laser Co. - Synrad, Inc. - m.fl.



Spektroskopisk udstyr

Chromex, Inc. - McPherson Milton Roy - Photek Ltd. m.fl.



Elektronik

Directed Energy, Inc. - Maxwell Laboratories, Inc. - Quantum Design, Inc. - Stanford Research Systems, Inc. - Trek, Inc. - m. fl.

Optilas Danmark

Billedvej 2

DK-2100 København Ø

Telefon: 3543 0133

Fax: 3543 8334

E-mail: optilas@inet.uni-c.dk

Tilbud til unge under uddannelse:

Bliv medlem af DFS / SNU og få Kvant for 75 kr.

Kvant udkommer næste gang ca. 1. marts 1999 og vil bl.a. beskæftige sig med Niels Bohrs berømte artikel fra 1948 om "Penetration of Atomic Particles through Matter". Afhandlingens tilblivelse og indflydelse vil således blive beskrevet i indlæg af Johannes M. Hansteen, Preben Hvelplund, Peter Sigmund og Jens Thorsen. Den tidligere annoncerede artikel af Thomas Døssing, Benny Lautrup og Andrew Jackson, hvor forfatterne vil diskutere om dommedagen er nær, måtte desværre udgå af nærværende nummer af pladshensyn, og bringes derfor i næste nummer. Dommedagen er således i hvert fald udsat indtil marts 1999. Der kommer også en artikel af Trine Møgelberg om historien bag Netværk for Kvinder i Fysik, ligesom vi bringer nogle af højdepunkterne fra DFS's Sorødag for 2g'ere gennem 10 år.

Kvant udkommer ialt fire gange om året og et årsabonnement koster 135 kr. Medlemmer af Dansk Fysiks Selskab (DFS) og Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) modtager Kvant som medlemsblad. Hvis du er under uddannelse, kan du blive ungdomsmedlem af DFS eller SNU vil da modtage bladet som medlemsblad, dækket af årskontingentet på kun 75 kr. Det ordinære kontingentet til DFS udgør 325

kr. pr. år (dog 75 kr. for pensionister). Det ordinære kontingent til SNU udgør 150 kr. pr. år.

Tegning af abonnement eller indmeldelse i foreningerne kan ske ved at udfylde og indsende kuponen nedenfor og får virkning så snart kuponen er modtaget. Opkrævning af abonnement eller medlemskontingent sker i foråret 1999.

Hvis du ikke vil klippe i bladet, må du gerne fotokopiere kuponen. Du kan også tegne abonnement på Kvant eller melde dig ind i DFS via DFS's hjemmeside (www.nbi.dk/dfs).

Hvis du mener, at du allerede har abonnement, men ikke får bladet, har du måske glemt at melde flytning (det skal meddeles postvæsenet eksplicit!) eller glemt at betale for abonnementet. Du opfordres derfor til at kontakte Lene Körner, Matematisk Institut, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (koerner@math.ku.dk) for at få opklaret sagen.

Kvant udsendes gratis til alle landets gymnasier, HF-kurser, tekniske skoler, seminarier m.fl. Hvis du er lærer et af disse steder og din arbejdsplads ikke modtager Kvant opfordres du også til at rette henvendelse til Lene Körner.

Navn: _____
Stilling: _____
Adresse: _____
Postnr. og by: _____
Telefon: _____
E-mail: _____

Jeg er ☐ under uddannelse ☐ pensionist

Jeg ønsker

- ☐ abonnement på Kvant
☐ medlemsskab af SNU
☐ medlemsskab af DFS

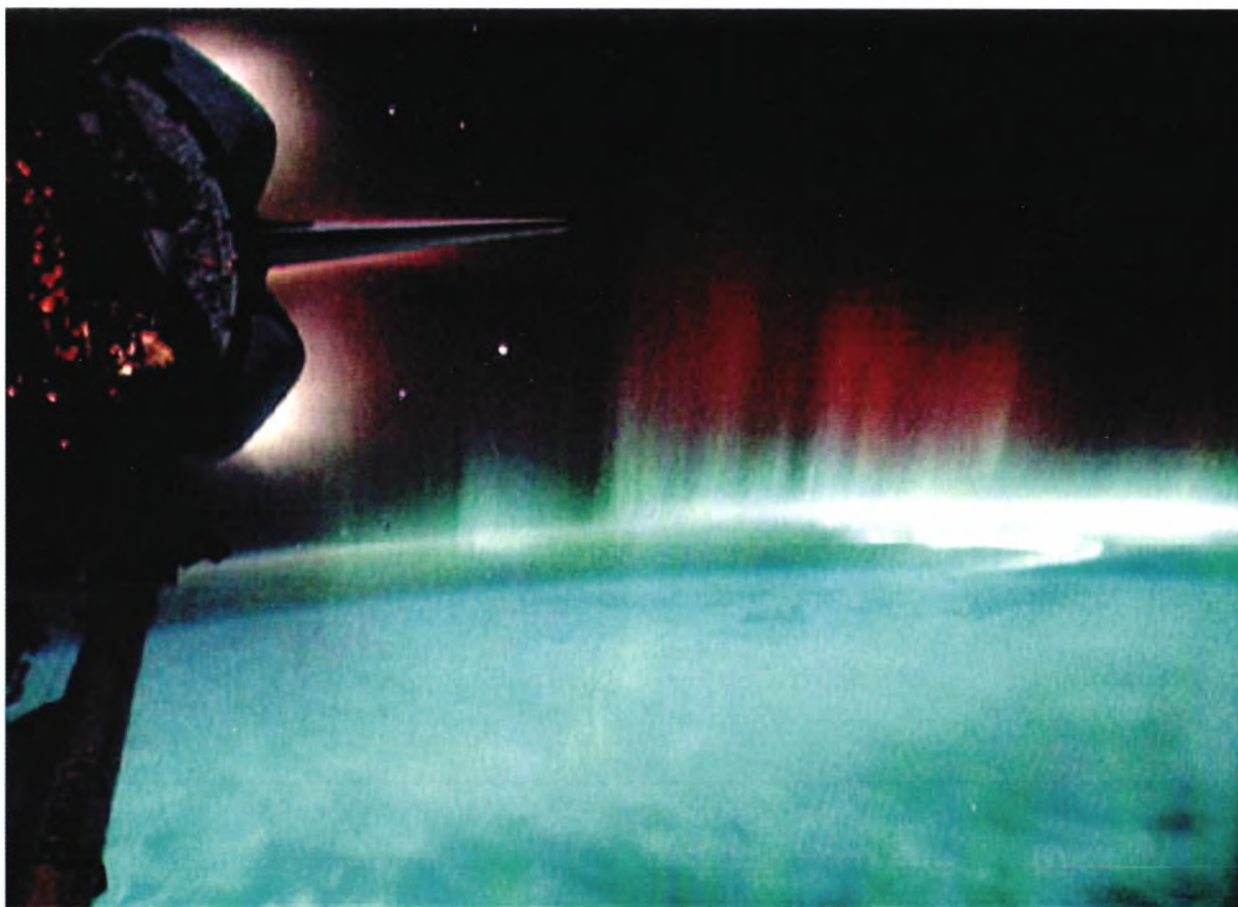
Ved DFS-medlemsskab: Angiv evt. ønske om tilknytning til sektionerne for:

- ☐ atomfysik
☐ faststoffysik
☐ uddannelse og undervisning
☐ netværk for kvinder i fysik (KIF)



KVANT
Ørsted Laboratoriet
Universitetsparken 5
+++ 1385 +++
2100 København Ø

Læs om nordlys og andre af naturens lysfænomener:



Nordlys fra rummet. På billedet ses nordlyset fotograferet "sidelæns" fra rummet i en højde af ca. 500 km. I forgrunden ses dele af rumfærge. Det glødende skær på rumfærge skyldes at motorerne har været tændt kortvarigt under eksponeringen af billedet. Den smalle grønne stribe langs hele horisonten er luftlys som udsendes i højder på omkring 100 km. I billedets centrale område ses grønt nordlys nederst (fra iltatomer) og blodrødt højere oppe (igen fra iltatomer). Foto: NASA. I artiklen side 39 inde i bladet kan du læse mere om nordlys. Du kan også læse om nogle af naturens andre lysfænomener i artikler om lysets brydning i atmosfæren, om regnbuen samt om lyn og torden.