

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



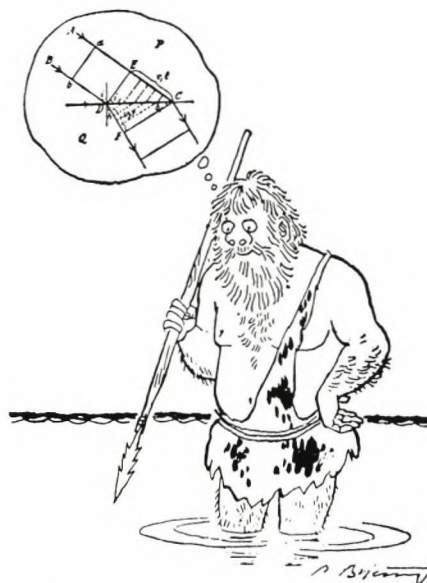
Figur 1. Isbjerget i forgrunden står på grund på ca. 200 meter vand og er ca. 60 meter højt. I baggrunden, formentlig 30–40 km væk ses yderligere en stribe isbjerger, som ser umådeligt høje ud, men de er sikkert kun 40–60 meter over havoverfladen. Billedet er taget af US Coast Guard, International Ice 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

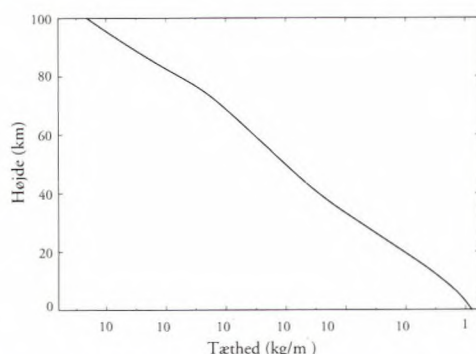
På figur 2 ses en tegning af en fortidsmand, der eftertænksomt overvejer Snells lov, før han kaster spydet efter fisken i vandet. Selv om det nok er tvivlsomt, om han har tænkt i tegningens notation, har det alligevel været livsnødvendigt for ham at vide, at fisken ikke er dér, hvor den ser ud til at 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:

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

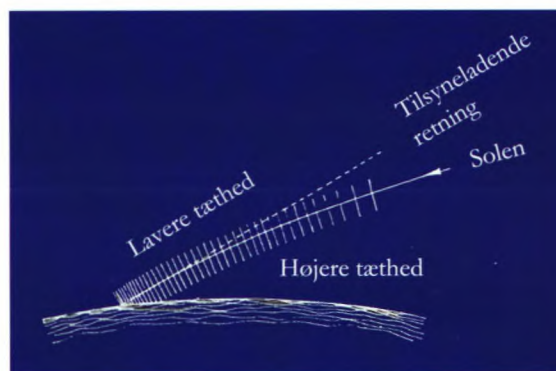
hvor i er indfaldsvinklen, b er udfaldsvinklen, $c_{1,2}$ lyshastigheden i det pågældende medium, c er lyshastigheden i vacuum og $n_{1,2}$ er det absolutte brydningsindeks for mediet.



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-

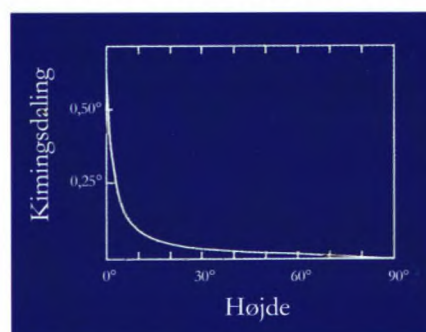


Figur 4. Kimingsdaling. Billedet af et objekt udenfor atmosfæren løftes højere over horisonten pga. brydning i atmosfæren. Jo mere atmosfære objektet ses igennem, desto stærkere bliver effekten. Fra [6].

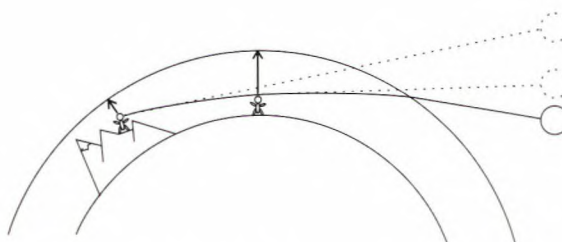
ets vej af brydningen, og dermed af brydningsindeksene. Atmosfærens lokale brydningsindeks afhænger af tætheden ρ :

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

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.

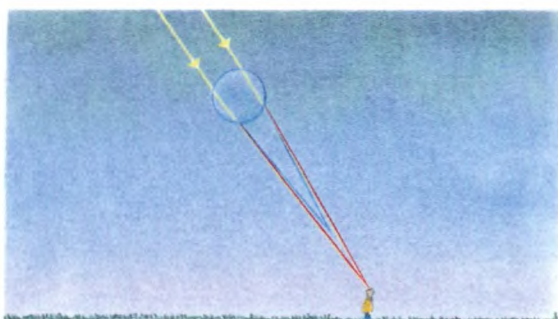
²Vi angiver brydningsindekser ved $\lambda = 6328 \text{ Å}$, som er HeNe laserens bølgelængde



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 tabel-lægges 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 tæthedsgradier 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 stævned 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.

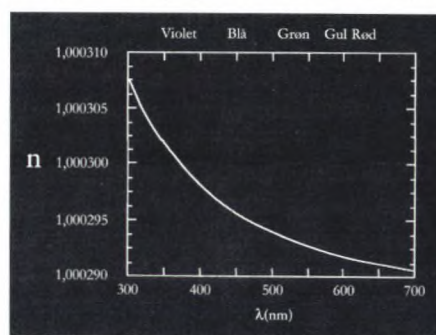
I arktiske egne kan man observere et ekstremt tilfælde af atmosfærens indflydelse på observation af Solen. Når Solen med en meget flad vinkel er ved at stå op (efter måneder under horisonten), kan atmosfærens afbøjning af sollyset gøre, at solen nogle gange står op uger for tidligt. Man har ligefrem 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.

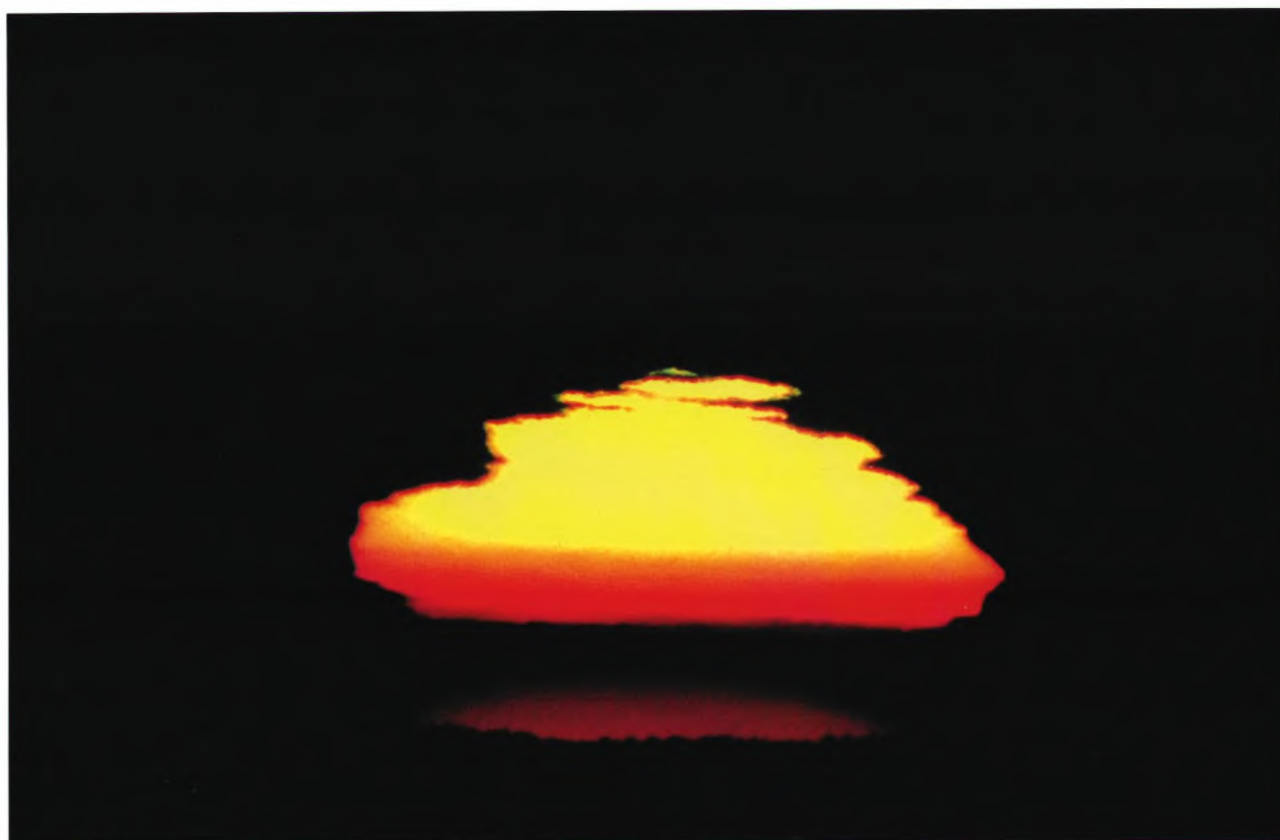


Figur 14. Dispersion - brydningsindekset varierer med bølgelængden. Ved normal dispersion mindskes brydningsindekset med stigende bølgelængde. Fra [5].

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).



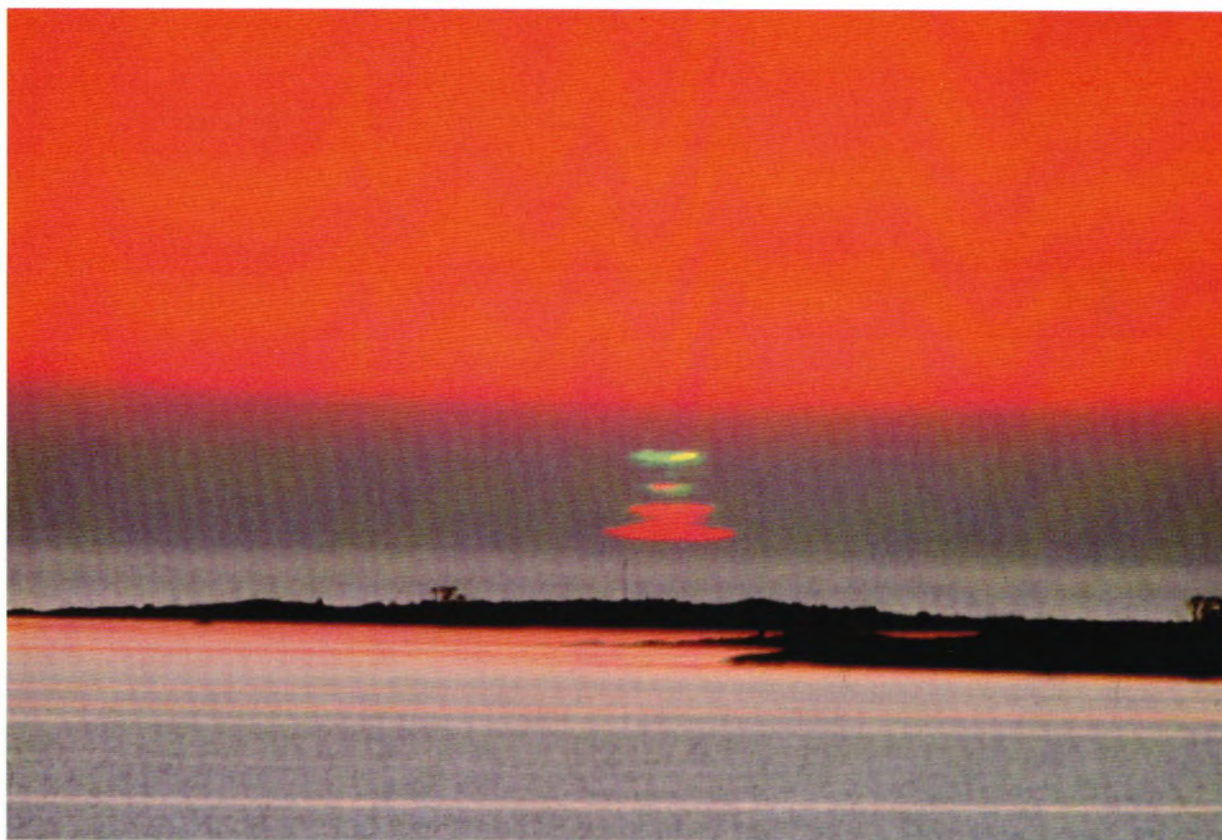
Figur 15. Svævende luftspejling. Bemærk at skibet i mellemgrunden ikke spejles. Foto: Pekka Parviainen.



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"