

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 opsplitte 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.

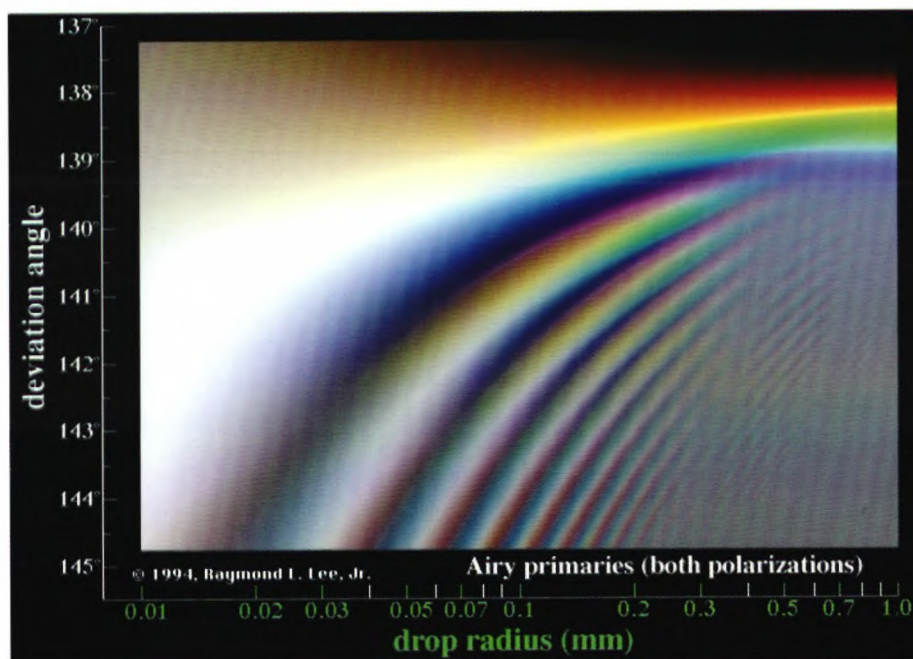
Det næste store skridt tages af den græske filosof Alexander (ca. år 200 e.v.t.), der observerer, at området mellem den primære og sekundære regnbue er mørkere end den omkringliggende himmel. Området kaldes derfor også meget naturligt for Alexanders mørke bånd. Alexander viser også, at Aristoteles' teori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

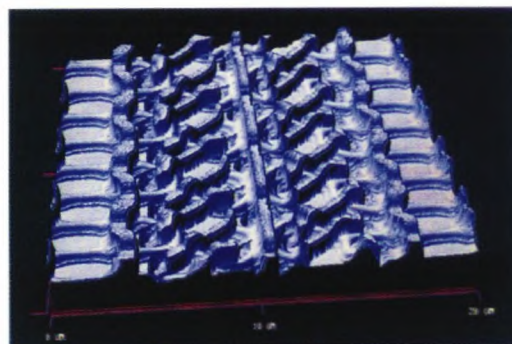
TopoMetrix er en af de førende producenter af **Scanning Probe Microscopes** i Silicon Valley, USA. **TopoMetrix** har været på forkant med udviklingen lige siden starten.

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.

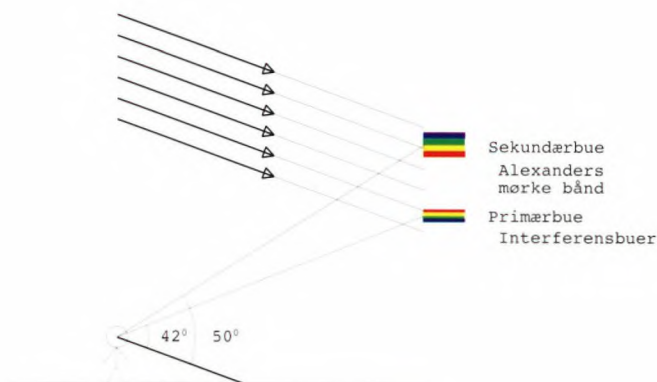


Regnbuen som den fremstod udover Victoriafaldene i Sydafrika en sommerdag i 1996.

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.

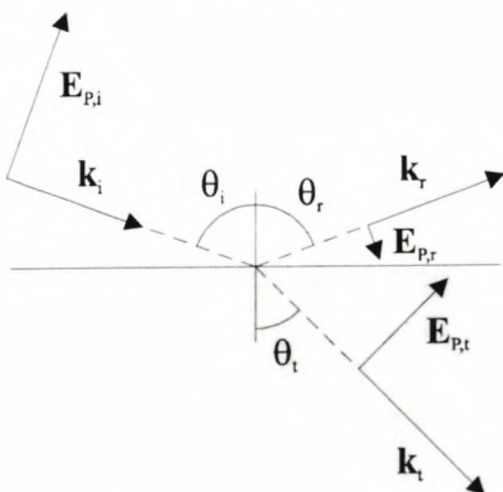
Et medie er karakteriseret ved dets brydningsindeks, der angiver forholdet mellem lysets hastighed i vakuum og i mediet. Dvs. jo hurtigere et udbredelsesmedie jo mindre brydningsindeks. Bølgevektoren beskrives ved brydnings- og spejlingsloven:

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:

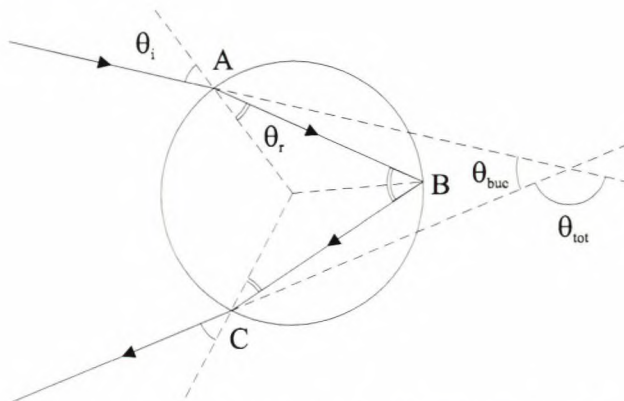
$$\begin{aligned} t_N &= \frac{E_{Nt}}{E_{Ni}} = \frac{2 \sin(\theta_t) \cos(\theta_i)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \\ r_N &= \frac{E_{Nr}}{E_{Ni}} = \frac{-\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \\ t_P &= \frac{E_{Pt}}{E_{Pi}} = \frac{2 \cos(\theta_i) \sin(\theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)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

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).

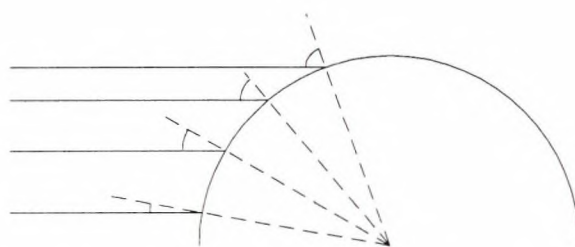
Regnbuens beliggenhed fastlægges som tidligere nævnt ved buevinklen θ_{bue} . Vinklen findes lettest ved at betragte den totale afbøjningsvinkel θ_{tot} for strålen, der er sammensat af tre retningsændringer på henholdsvis $\theta_i - \theta_r$ (i punktet A), $180^\circ - 2\theta_r$ (i B) og $\theta_i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

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

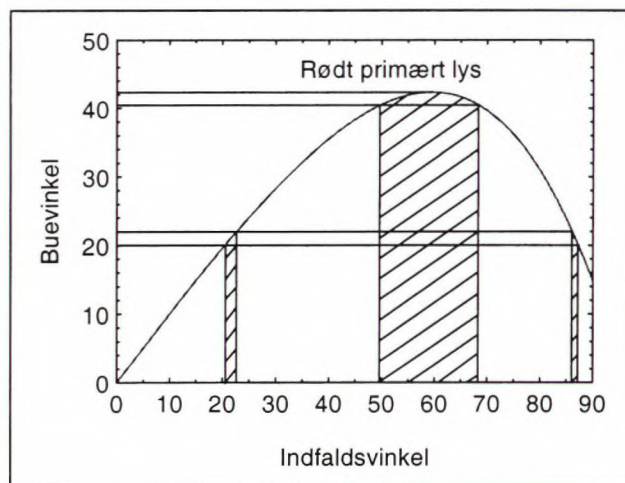
Vi bemærker, at forskellige indfaldsvinkler fremkommer ved at ramme dråben forskellige steder, hvilket er illustreret på figur 3. Alle indfaldsvinkler mellem 0 og 90 grader vil altså forekomme, uanset om solen står højt eller lavt på himlen.



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.

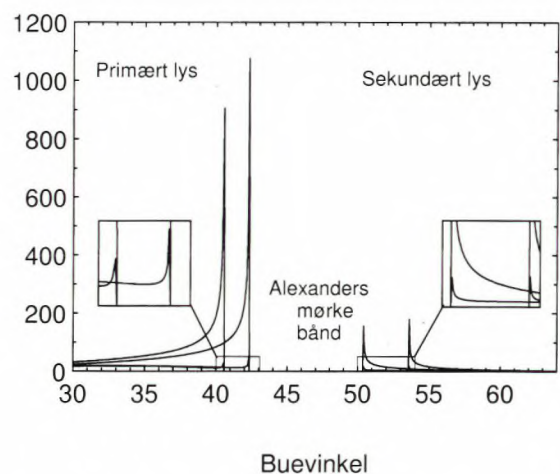
Flere regnbuer??

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 forbredning 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.

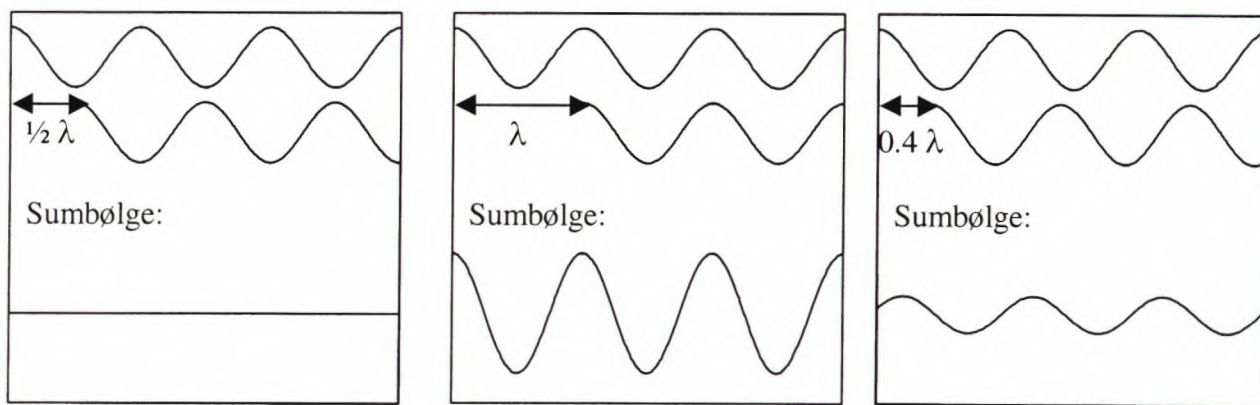
Interferens er det grundlæggende fænomen, at addition af to lysbølger med samme intensitet ikke normalt giver en ny bølge med den dobbelte intensitet. Faktisk kan den resulterende intensitet være alt fra ingenting (destruktiv interferens) til 4 gange så stor (konstruktiv interferens). Om vi får konstruktiv 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°).

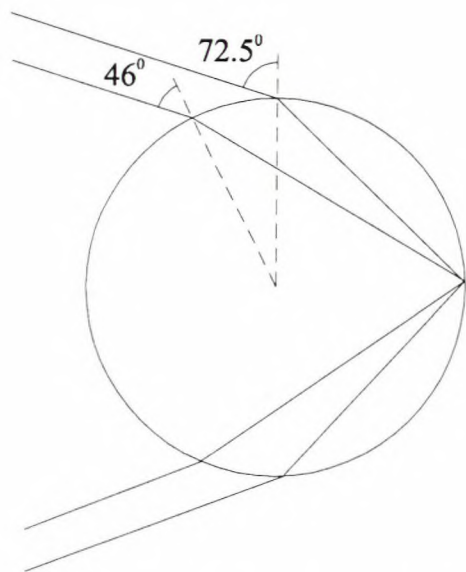
Situationen er gengivet på figur 10 for indfaldsvinklerne 46° og 72.5° grader, der begge giver en buevinkel på 38° grader. Vi ser nu, at en eventuel optisk vejlængdeforskel består af et bidrag fra vejen inde i dråben og to ens bidrag fra vejlængden i luft. Det er klart, at vi nu også tager hensyn til 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 med mindre 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.