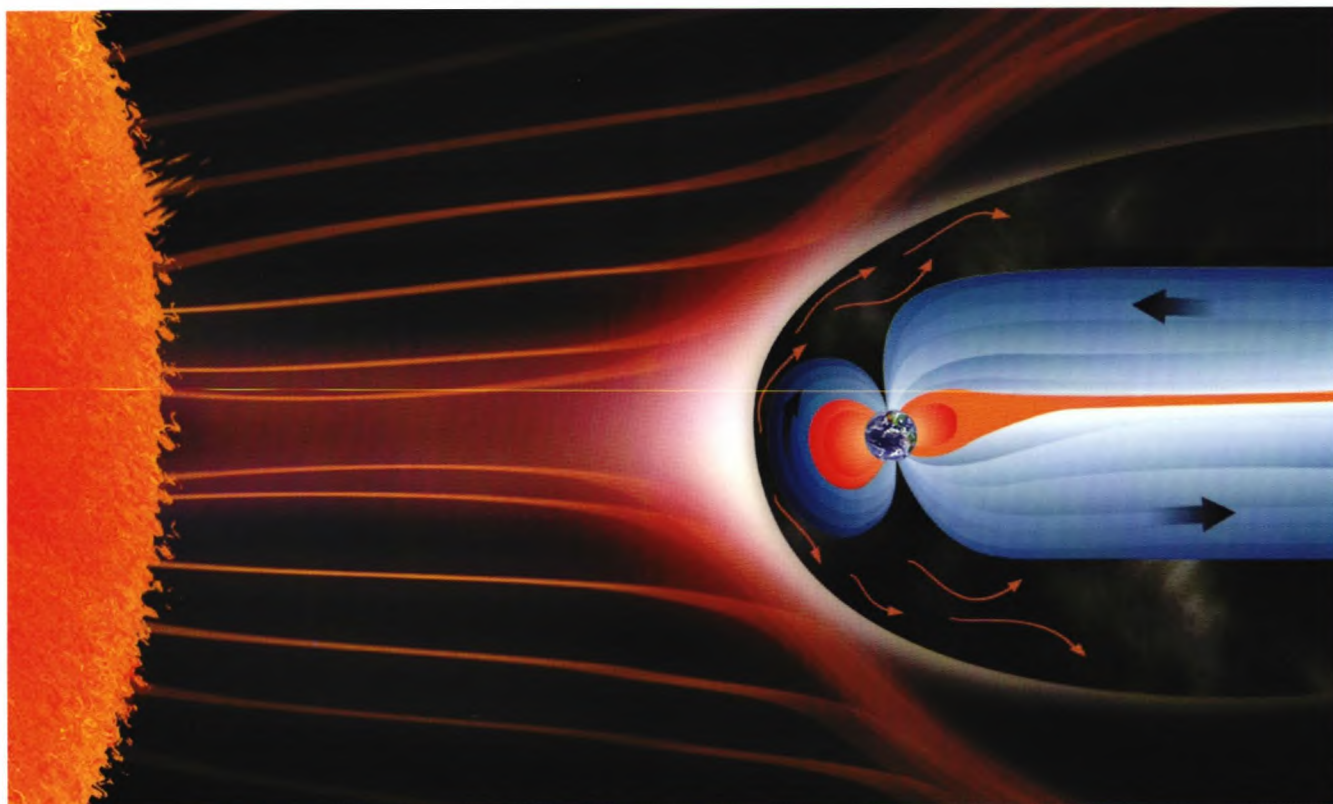
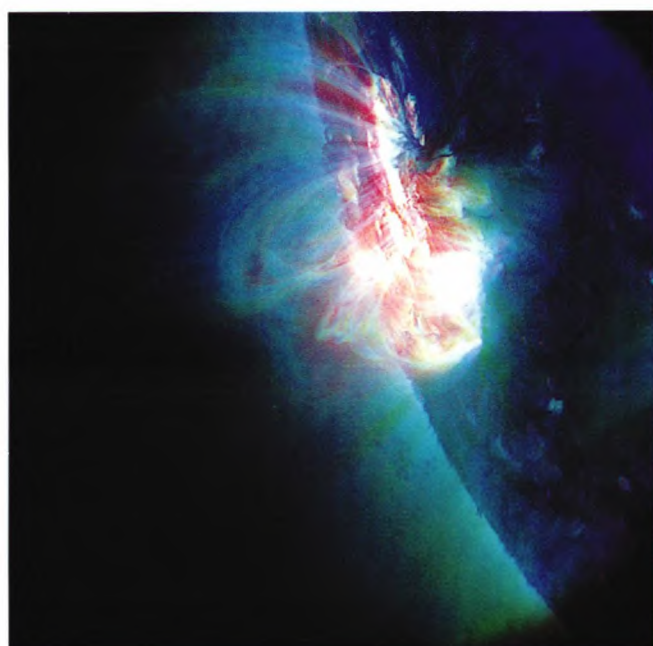


Nordlys

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.



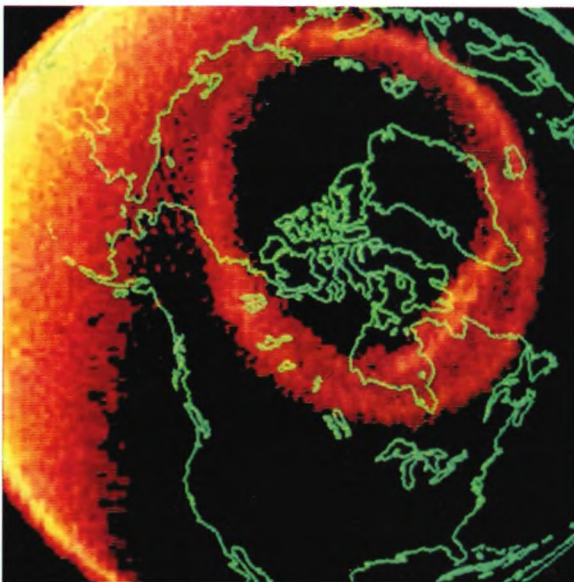
Mike van der Poel Ph.D. studerende på Niels Bohr Institutet, Ørsted laboratoriet, Københavns Universitet. Arbejder med eksperimentel atomfysik.

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.

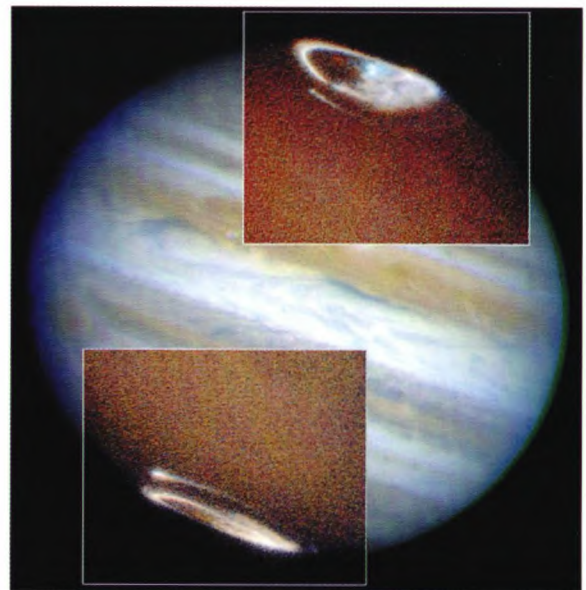
Figur 7-9 findes på næste side. På Kvants bagside ses et billede af nordlyset "sidelæns" fra rummet. I forgrunden ses dele af rumfærgen. Den smalle grønne stribe langs hele horisonten er luftlys som udsendes i højder på omkring 100 km. I billedets centrale område ses grønt nordlys nederst (fra iltatomer)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