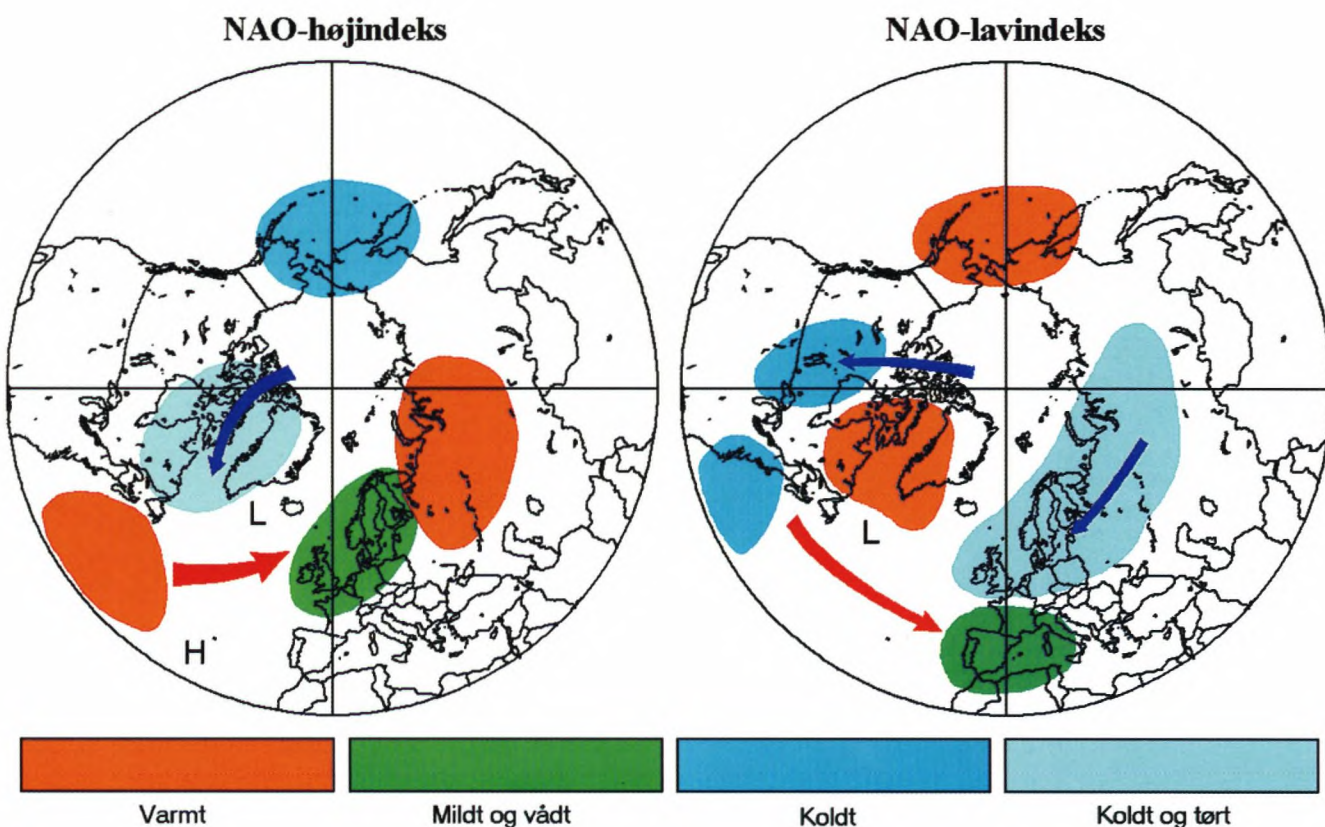




- TEMANUMMER OM JORDENS KLIMA, DEL 2 •
- SOLAKTIVITET OG KLIMAÆNDRINGER • DEN LILLE ISTID – NAO ELLER FAKTA? •
- KULSTOFKREDSLØBET • ATMOSFÆRENS KEMI OG GLOBALE KLIMAFORANDRINGER •
- NIELS BOHRS TEORI FOR α -PARTIKLERS NEDBREMSNING I ET MODERNE PERSPEKTIV •
- N. P. WIETH-KNUDSEN OBSERVATORIET •

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

Ørsted Laboratoriet, Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

E-mail : kvant@nbi.dk
Giro : 5 84 31 46

Udgives af
Astronomisk Selskab
Dansk Fysisk Selskab
Dansk Geofysisk Forening
Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Redaktion
Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.)
DCESS, NBIfAFG, KU
Michael Cramer Andersen (nyhedsred.)
Astronomisk Observatorium, KU
Camilla Bacher
Kemisk Institut, KU
Jørgen Friis Bak
Aarhus Universitet
Jørn Johs. Christiansen
Roskilde Kathedralskole
Torsten Freltoft
Sophion Bioscience A/S
Mogens Esrom Larsen
Matematisk Institut, KU
Finn Berg Rasmussen
Ørsted Laboratoriet, KU
Svend E. Rugh
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 for reproklart materiale. Henv. om annoncer til redaktøren, tlf. 35 32 05 73 / fax 35 32 05 76. Henv. vedr. abonnement til forretningsfører Lene Kørner tlf. 35 32 07 62 (koerner@math.ku.dk).

Oplag: 3.000. Tryk: P. J. Schmidt A/S, Vojens. ISSN 0905-8893



Produktionsplan
Nr. 1-02 udkommer ca. 15. februar
Nr. 2-02 udkommer ca. 15. april
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages mindst to måneder før.

Indhold:

Solaktivitet og klimaændringer <i>Sven Ove Thimm</i>	3
Kulstofkredsløbet, klimaet og Kyoto <i>Jens Olaf Pepke Pedersen</i>	10
Læserbrev	12
Niels Bohrs teori for α -partiklers nedbremsning i et moderne perspektiv <i>Peter Sigmund</i>	13
Fred Hoyle død <i>Michael Cramer Andersen</i>	21
Atmosfærens kemi og globale klimaforandringer <i>Camilla Bacher og Ole John Nielsen</i>	22
Dr. N. P. Wieth-Knudsen Observatoriet <i>Michael Quaade</i>	26
Nyt fra Dr. N.P. Wieth-Knudsen Observatoriet	31
Den lille istid – NAO eller fakta? En vigtig brik i forståelsen af den globale opvarmning <i>Aksel Walløe Hansen, Bo Møllersøe Vinther og Rune Vildhøj</i> Baksiden, (fortsættes side 29)	

Med dette – og det foregående – nummer af Kvant har vi forsøgt at give et eksempel på et tema, der forener Kvants emneområder: astronomi, fysik og geofysik, nemlig Jordens klima. De første tre artikler blev bragt i Kvant nr. 3, mens yderligere fire artikler findes i dette nummer. Derudover er der i de to numre en række artikler fra fysikkens, astronomiens og undervisningens verden samt nyheder fra Kvant og foreningerne. De to temanumre er udgivet med støtte af Copenhagen Global Change Initiative (COGCI).

Henvendelser vedrørende abonnement og adresseændring bedes ske til Lene Kørner (koerner@math.ku.dk, telefon 35 32 07 62). Bestilling af classesæt og ældre numre af bladet (20 kr. / stk.) kan ske på kvant@nbi.dk.

Forsiden:

DEN LILLE ISTID – NAO ELLER FAKTA?

Forsidebilledet viser vintervejret på den nordlige halvkugle henholdsvis under en situation med NAO-(den nordatlantiske oscillation)-højindeks og NAO-lavindeks. Læs artiklen af Aksel Walløe Hansen, Bo Møllersøe Vinther og Rune Vildhøj, der starter på baksiden af bladet.

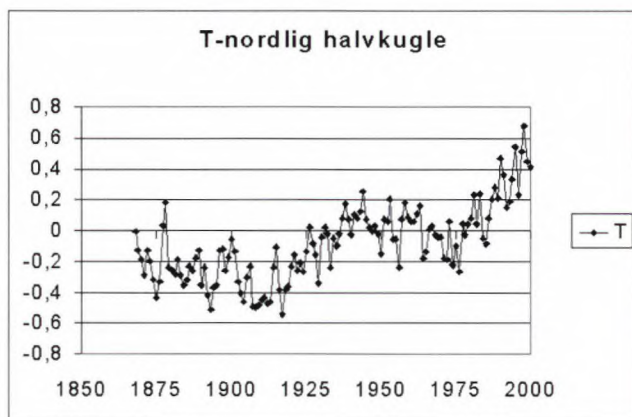
Solaktivitet og klimaændringer

Sven Ove Thimm, Hjørring Gymnasium.

Indledning

Det sidste årti har, bl.a. på grund af Jordens stigende temperatur (figur 1), været præget af en omfattende debat om Jordens klima og muligheden for menneskeskabt påvirkning fra udledning af drivhusgasser, en temperaturstigning som måske også helt eller delvist kan skyldes naturlige variationer. Med til disse hører ekstern påvirkning fra solaktiviteten, hvor fokus i Danmark har ligget på arbejdet af K. Lassen, E. Friis-Christensen og H. Svensmark. Internationalt har der været tale om en kraftigt forøget forskning indenfor dette område.

Det følgende er et forsøg på at give en kortfattet oversigt over nogle af de mekanismer, hvormed solaktiviteten kan tænkes at påvirke Jordens klima. Der vil ikke her blive redegjort for den historiske udvikling af sol-klima forskningen, men den er beskrevet i [1].



Figur 1. Den nordlige halvkugles temperaturanomali (afvigelse fra 1961–90 middelværdi) fra 1868 til 2000, uden udglatning. Tegnet med data fra Hadley Centre (www.met-office.gov.uk/research/hadleycentre/obsdata/globaltemperature.html).

Solaktivitet

For mange er solaktivitet synonymt med den karakteristiske 11-årige variation af antallet af solpletter, som beskrives ved hjælp af relativtallet, der udregnes ved at gange antallet af solpletgrupper med 10 og addere det samlede antal pletter (se bagsiden af Kvant 2-2000). Solaktivitet er dog et langt mere komplekst fænomen, der skyldes magnetfelter, som vedligeholdes og forstærkes af en dynamovirkning i Solens yderste dele i forbindelse med såvel konvektion som den differentielle rotation (se artiklen i Kvant 2-2000 af Jørgen Christensen-Dalsgaard og Kvant 3-2000 af Jesper Munk Jensen).

Dynamoen bevirker lokalt meget kraftige magnetfelter i langsgående bånd ved en breddegrad på ca. 30 grader, hvor magnetiske dipoler bryder frem i fotosfæren som en kæde af aktive områder med solpletter og fakler, ledsaget af øget UV-stråling fra atmosfæren ovenover (se figur 2). I løbet af den 11-årige periode bevæger disse bånd sig mod ækvator, som nås sidst i perioden. Næste periodes solpletter kan da sommetider allerede ses dukke op ved højere breddegrader.

Set udefra har Solen et generelt dipolfelt som fra en stangmagnet, samt kraftige, lukkede fluxrør fra de aktive områder. Solvinden, som er en strøm af ladede partikler (mest protoner og elektroner) fører noget af feltet ud i rummet omkring Solen (heliosfæren), så der også bliver åbne feltlinier. Heliosfæren kan, især ved solaktivitetsmaksimum, have en meget kompliceret struktur, med områder hvor magnetfeltet har forskellig styrke og retning.

Der forsvinder hele tiden magnetisk flux, bl.a. fører solvinden magnetisk flux ud i heliosfæren, og der sker en omfattende magnetisk "reconnection" i den indre korona, som derved får en temperatur på mange millioner grader. Af og til er energiuudladningerne meget kraftige og vi ser en såkaldt "flare". Især over aktive områder opvarmes koronaen meget, hvilket kan ses som lyse områder i UV-lys på billedet fra SOHO, der også viser magnetiske fluxrør i den indre korona.

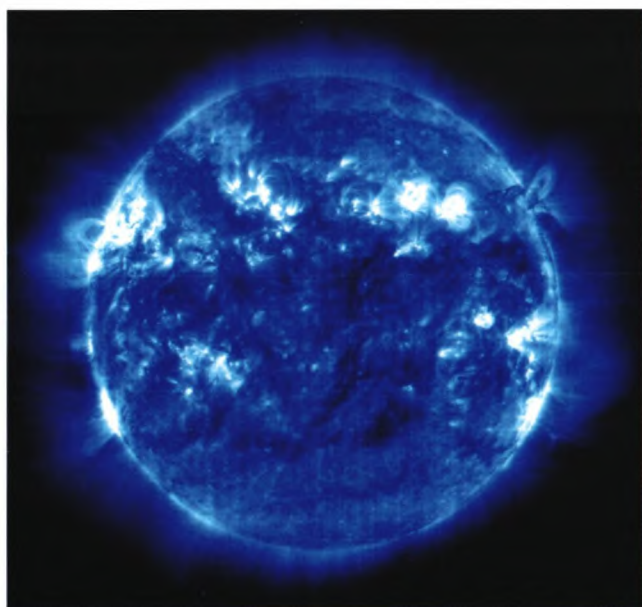
Det interplanetare magnetfelt ved Jorden varierer en del, men er mest af størrelsesordenen 5–10 nT. Til sammenligning er feltstyrken i Jordens magnetosfære under rolige forhold omkring 100 nT i en afstand af ca. 6 jordradier (målt af satellitter i den geostationære bane). Solens totale åbne flux er ca. 5×10^{14} Wb og er tilsyneladende vokset kraftigt indenfor de sidste 100 år [2]. Den lukkede flux er ca. dobbelt så stor ved solpletminimum, men op til 10 gange så stor ved maksimum. Den åbne flux varier ca. 2×10^{14} Wb mellem maksimum og minimum [3].

På grund af de høje temperaturer vil partikler i koronaen udvise en stor grad af ionisation (H og He nærmest fuldstændigt), og de vil derfor have svært ved at slippe væk fra lukkede magnetfelter, og der kan blive opsamlet ganske meget stof i den indre korona. Denne ustabile situation kan i forbindelse med de ovenfor nævnte ændringer af magnetfeltet bevirke at en stor mængde plasma bliver slynget ud i heliosfæren i form af en CME ("Coronal Mass Ejection"), der breder sig som en chockbølge gennem heliosfæren, hvilket f.eks. kan give sig til kende på Jorden ved forstyrrelser af magnetfeltet ("solstorm"), der bl.a. kan udløse kraftige nordlys.

Indikatorer for solaktivitet

Relativtallet (R) bestemmes dagligt og har som indikator den styrke, at det findes som en uafbrudt tidsserie over de sidste 300 år.

Den kraftige opvarmning af atmosfæren over de aktive områder giver sig udslag i udsendelse af radiostråling i dm området. Historisk er det blevet fluxen ved 10,7 cm (2800 MHz) der er blevet standardmålingen, og der måles også her daglige værdier. Når man midler over flere måneder følger R og 10,7 cm fluxen stort set hinanden.



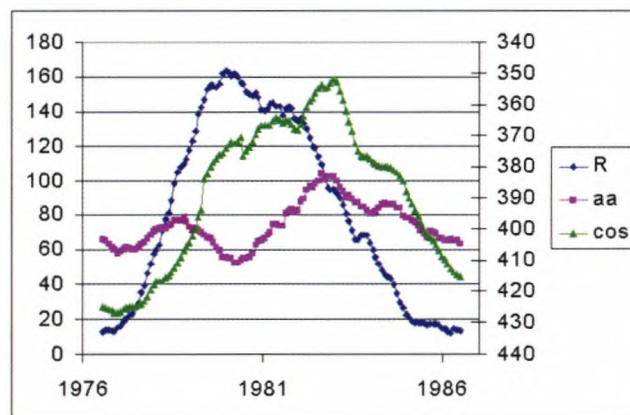
Figur 2. Solen taget i ekstrem UV-stråling (171 Å) af SOHO satellitten (ESA/NASA) den 6. januar 2001.

Forstyrrelserne af Jordens magnetfelt beskrives ved forskellige indices, bl.a Ap, som er et mål for hvor store variationer (i nT) der forekommer over et 3 timers interval. Det beregnes ud fra målinger fra 13 stationer, fordelt over Jorden, men på nogenlunde samme geomagnetiske breddegrad som Danmark; p står for "planetary". Aa indekset måles fra kun to stationer, der ligger antipodalt i forhold til Jordens magnetfelt (England og Australien). Aa har været bestemt siden 1868 [4]. Den ovenfor nævnte styrkelse af det interplanetare magnetfelt er netop fundet ud fra aa-indexet. Solstorme er ikke blevet hyppigere, men det stærkere magnetfelt har gjort stormenes virkning kraftigere [5]. R og aa (og Ap) følges dog ikke helt ad, bl.a på grund af at vekselvirkningen mellem heliosfæren og Jordens magnetfelt er meget afhængig af lokale forhold, ikke mindst retningen af det interplanetare magnetfeltet.

Jorden bliver bombaderet af ladede partikler, og betegnelsen kosmisk stråling har historisk været brugt også om højenergetiske partikler fra Solen, SEP ("Solar Energetic Particles"), men bruges nu mest om de "ægte" kosmiske partikler ude fra universet, GCR ("Galactic Cosmic Rays"). Partikelenergiene er meget varierende,

men for SEP er den typiske størrelsesorden MeV, mens det for GCR er GeV. Solen udsender flest SEP når den er aktiv, mens GCR fluxen er lavest ved høj solaktivitet, idet heliosfærens magnetfelt afskærmer Jorden. Fluxen af den kosmiske stråling bliver derfor også en indikator for solaktiviteten. Afbøjningen af GCR sker både langt ude i heliosfæren som en konsekvens af dennes generelle tilstand, og lige omkring Jorden, hvilket påvirkes af solstorme ("Forbush decreases").

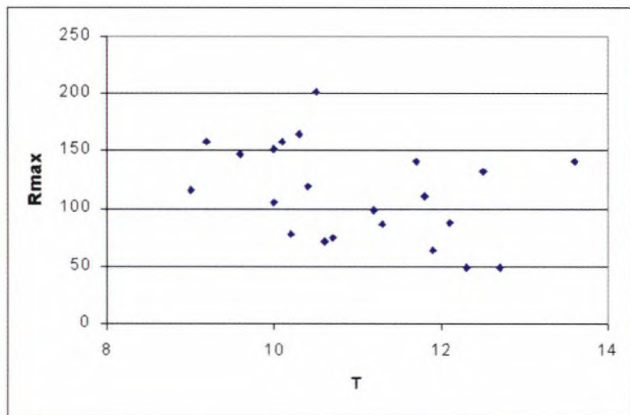
Vil man følge solaktiviteten over længere tid bruges middelværdier over måneder, år, årtier osv. En graf over nogle af disse indikatorer for cyklus 21 ses på figur 3, hvor den indbyrdes manglende korrelation er tydelig.



Figur 3. Solcyklus nr. 21. Venstre skala: Relativtal (R) og aa-index (gange med 3). Højre skala: kosmisk stråling, målt ved hjælp af fluxen af de neutroner som dannes når de højenergetiske partikler kolliderer med atmosfærens kerner (Climax tal i 1000/time). 13 måneders glidende middelværdier, tegnet med data fra SIDC (sidc.oma.be/index.php3) og NOAA (www.ngdc.noaa.gov).

En anden indikator for langtidsvariationer er periodelængden, der ikke er nøjagtig 11 år, men svinger med et par år, således at den aktive sol har kortere perioder end den sløve. Det var denne indikator, der blev sammenlignet med den nordlige halvkugles overfladetemperaturer af E. Friis-Christensen og K. Lassen i 1991 [6]. En forlængelse af analysen til også at omfatte 1990'erne viser dog knap så god korrelation [7].

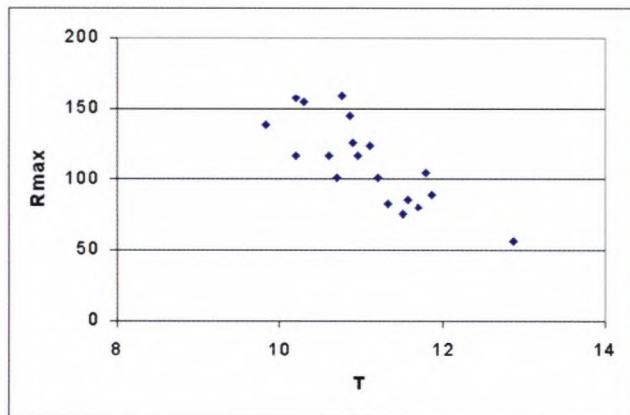
Sammenhængen mellem periodelængden og solaktiviteten er dog ikke nogen fast regel, kun en tendens, som det f.eks kan ses ved at sammenligne periodelængden med det maksimale relativtal (figur 4). Tendensen bliver tydeligere, hvis man sammenligner periodelængden med højden af den følgende cyklus, og endnu tydeligere, hvis man midler over flere cykler (figur 5). Periodelængden er således kun en grov indikator for solaktiviteten, når vi betragter mange årtier, og korrelationen mellem periodelængde og solaktivitet skal muligvis søges i plasmafysikken, hvor tingene går hurtigere i et stærkt magnetfelt. Korte perioder er simpelthen tegn på stærkere magnetfelter i Solen.



Figur 4. Sammenhængen mellem periodelængden T (min) og den tilhørende maksimale værdi af det udglattede relativtal ($R_{\max}$) for de sidste 22 cykler. Tegnet med data fra SIDC.

Betegnelsen “solaktivitet” dækker altså over en række fænomener, der alle har et tilfælles: Magnetfeltet. De aktive områders solpletter og fakler dannes, hvor særligt stærke magnetfelter gennembryder fotosfæren. Magnetfelter leverer energi til at opvarme koronaen, især over aktive områder, hvilket bevirker øget kortbølget stråling (UV og røntgen). Magnetfelter styrer soludbrud (flares og CMEer) og regulerer solvinden. Styrken af magnetfeltet i heliosfæren bestemmer påvirkningen af Jordens magnetfelt, og afbøjningen af den kosmiske stråling.

Da solaktivitet således er et komplekst fænomen kan ingen af de ovennævnte indikatorer siges at repræsentere solaktiviteten, men de skal alle betragtes som proxyer i en eller anden forstand!



Figur 5. Som fig 3, men periodelængden sammenlignes nu med højden af den følgende cyklus, og der beregnes glidende middeltal over 3 perioder.

Mekanismer til påvirkning af jordens klima

Vi kan her skelne mellem to typer. Den første er en direkte påvirkning fra observerbare overfladefænomener på Solen, såsom lysstyrkevariationer og UV-strålingen, og disse må forventes at følge størrelsen af relativtal-

let (eller 10,7 cm fluxen). Den anden type er indirekte påvirkninger fra solvinden og det interplanetare magnetfelt, såsom kosmisk stråling og atmosfærisk elektricitet, som er afhængige af forholdene i heliosfæren.

Lysstyrkevariationer

Solstrålingens samlede intensitet i Jordens afstand kaldes “solarkonstanten”, og har en værdi på 1366 Wm^{-2} , hvilket svarer til et gennemsnit på 342 W per m^2 jordoverflade, idet Jordens overfladeareal er 4 gange så stort som tværsnitsarealet. Da Jordens albedo (refleksion) gennemsnitlig er ca. 30% giver det en absorption på ca. 239 Wm^{-2} .

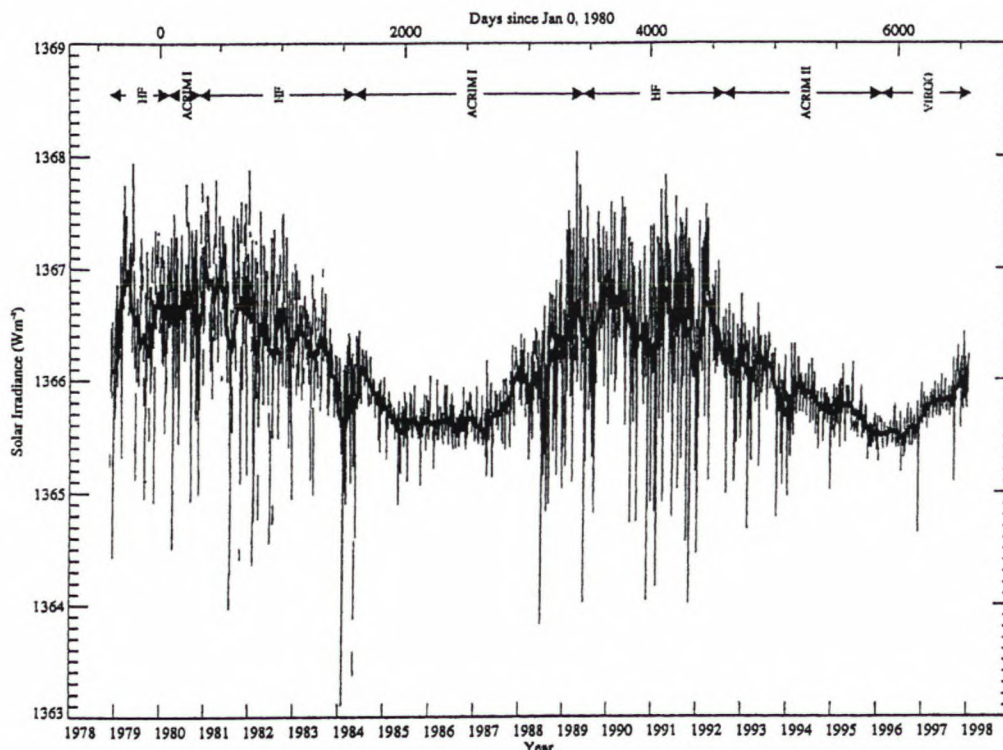
Alene navnet “solarkonstanten” indikerer, at man har betragtet den som en konstant størrelse, og en præcis måling har historisk været et stort problem[1]. Den seneste værdi skyldes målinger fra satellitter, og som så mange andre steder ved absolutte målinger er kalibrering et problem. Det må dog anses som en kendsgerning at solarkonstanten indefor en solpletperiode varierer ca. 0,1% (figur 6).

Figuren viser også at intensiteten er størst ved solpletmaksimum, skønt man kunne mene det modsatte med de mørke solpletter. Store pletgrupper kan da også over nogle dage give et fald i solarkonstanten, der dog lang opvejes af strålingen fra bl.a. de lyse fakkeldområder, samt den forøgede UV stråling. Det bemærkes i øvrigt, at selv om den gennemsnitlige variation fra min til max kun er på ca. 1 Wm^{-2} kan dag til dag variationerne ved den aktive sol komme helt op på ca. 4 Wm^{-2} , så man kan sige, at solen “blinker” en del ved solpletmaksimum. En variation af solarkonstanten på f.eks. $1,2 \text{ Wm}^{-2}$ giver dog kun en forcering på $0,3 \text{ Wm}^{-2}$ af klimaet.

Et er dog cyklusvariationer, men en egentlig klimapåvirkning kræver en længerevarende tendens. Forsøg på at vurdere langtidstendensen i solarkonstanten ud fra relativtal mm tyder på variationer af størrelsesordenen 0,2–0,4%, hvis vi betragter situationen over århundreder [9]. Det kræver dog tilsyneladende en stigning af størrelsesordenen 0,5% hvis ændring af Solens lysstyrke skal kunne forklare det meste af de sidste par hundrede års globale temperaturstigning, hvilket måske heller ikke er helt umuligt, hvis man sammenligner med sollygnende stjerner [10].

UV-stråling

Skønt størrelsesordenen for variation af den samlede strålingsflux fra Solen som nævnt kun er ca. 0,1%, er variationerne i UV området meget større (fra et par procent i blød UV til 100% i hård UV). Dette har stor betydning for ionisationen af Jordens øvre atmosfære, fra stratosfæren og op, der reagerer mere eller mindre øjeblikkeligt på ændringer i Solens UV stråling. K. Labitzke og H. van Loon har i en årrække beskæftiget sig med forholdene i stratosfæren, hvor absorptionen af UV i ozon giver en stor korrelation med den 11-årige cyklus, og for ca. 10 år siden fremkom det op-



Figur 6. Solarkonstanten over en 20-årig periode. Sammensat ved hjælp af data fra flere satellitter [8].

sigtsvækkende resultat, at vintertemperaturen i stratosfæren over nordpolen korrelerer henholdsvis antikorrelerer med 10,7 cm fluxen, afhængig af om QBO blæser fra vest henholdsvis øst. QBO ("Quasi-Biennial Oscillation") er en kraftig vind, der blæser i den nedre stratosfære over ækvator og skifter retning med en periode på 28 måneder. Når solaktivitetens indflydelse på forholdene over nordpolen afhænger af forholdene over ækvator, skyldes det, at retningen af QBO kan betragtes som indikator for den generelle cirkulation i den øvre atmosfære.

Senere har K. Labitzke og H. van Loon foretaget omfattende studier over den globale kobling mellem solaktiviteten og stratosfæren, f.eks. beskrevet ved trykfordelingen (figur 7), der viser størst korrelation i det subtropisk højtryksområde [11]. Mere om stratosfæren i [12].

Kan dette påvirke forholdene i troposfæren? D. Shindell m.fl. har ved klimamodelberegninger vist at forholdene i stratosfæren kan påvirke den meridionale cirkulation i troposfæren [13]. Opskriften er i grove træk følgende: øget opvarmning af stratosfæren ved høj solaktivitet giver kraftigere Hadley cirkulation, hvilket styrker de subtropiske højtryk. Dette medfører en ændring af den globale cirkulation, bl.a. skubbes de tempererede lavtryk længere nordpå. Dette ændrer i sig selv ikke den globale middeltemperatur, men kan forandre skydækket, hvilket kan ændre Jordens albedo.

Kosmisk stråling og skydække

Kosmisk stråling ioniserer luften, hvilket kan have ind-

flydelse på antallet af aerosoler, der virker som kondensationskerner ved dannelsen af vanddråber. En øget flux af kosmisk stråling vil derfor kunne føre til øget skydannelse, hvilket er den mekanisme, der blev foreslået af Eigil Friis-Christensen og Henrik Svensmark i 1997 [14]. Kosmisk stråling (GCR) kan på grund af den meget høje energi trænge ned til den nedre del af atmosfæren og påvirke skydannelsen her, selv ved lavere breddegrader. Dette er i modsætning til SEP der afskærmes af Jordens magnetfelt og derfor mest trænger ned ved højere breddegrader.

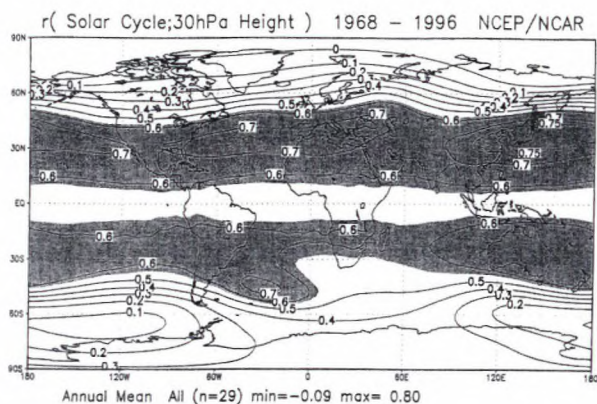
Skyer har stor betydning for klimaet, idet de spiller en rolle både for albedoen og for atmosfærens opacitet (absorptionsevne). Desuden er den med skydannelsen forbundne latente varme en vigtig del af energiudvekslingen i atmosfæren. Skønt disse forhold, ligesom de mikrofysiske skydannelsesprocesser, ikke er særligt godt kendte, tyder alt dog på at høje, tynde skyer giver en opvarmning og tykke skyer, især lave, en afkøling. Den samlede globale forcing fra de forskellige skytyper er vurderet til at være negativ med en størrelsesorden på $25\text{--}30\text{ Wm}^{-2}$, hvoraf lave skyer bidrager med ca. halvdelen [17].

Selv om det er solaktiviteten, der afbøjer den kosmiske stråling, følges de ikke helt ad, som det fremgår af figur 3. Svensmark har vist, at det netop er den kosmiske stråling og ikke 10,7 cm fluxen der korrelerer med skydækket (figur 8), og at det også er den størrelse, der korrelerer bedst med den globale temperatur [15].

Det har fra flere sider været rejst en del kritik af den oprindelige undersøgelse, dels af at de anvendte data fra

flere forskellige satellitter ikke var ensartede, og at de kun var fra havområder og for bestemte breddegrader, og at der ikke var skelnet mellem forskellige skytyper, der virker på hver sin måde, dels af tvivl om hvorvidt mekanismen for skydannelsen overhovedet virkede i tilstrækkelig grad, se f.eks [16].

I et senere arbejde af Nigel Marsh og Henrik Svensmark arbejdes der konsekvent med et datasæt fra ISCCP (International Satellite Cloud Project), som er baseret på infrarøde målinger fra skytoppe. Derved kan der skelnes mellem højderne af de forskellige skyer, og det vises at det netop er de lave skyer, der korrelerer med den kosmiske stråling (figur 9). Hvis den ændring af skydækket på ca. 2%, som kan ses på figur 8, primært skyldes ændringer i de lavere skyer, vil disse, da de udgør ca. 27% af alle skyer, ændres med 7%, hvilket så vil give en forcering på $1,2 \text{ Wm}^2$ [17].



Figur 7. Korrelationskoefficienter for sammenhængen mellem de årlige gennemsnit af solaktiviteten (10,7 cm fluxen) og 30 hPa højden for perioden 1968-1996. Toningen er for at fremhæve geografisk placering af de høje værdier [11].

En egentlig klimaforcering opstår selvfølgelig kun hvis der er en længerevarende tendens. En rekonstruktion af mængden af lave skyer (figur 10) viser en svagt voksende tendens fra ca. 1960-1975 og en stor aftagende tendens fra 1975-1995 [17].

Korrelationen mellem kosmisk stråling og skydækket kan eventuelt også være en sekundær effekt, der skyldes at den ovennævnte aerosoldannelse påvirker atmosfærens opacitet, hvilket giver en ændring i den absorberede energimængde og derved temperaturen. Dette ændrer trykfordelingen i atmosfæren og derfor cirkulationen. En ændret cirkulation kan, som tidligere nævnt, give en ændret skydannelse, der i øvrigt kan være breddegradsafhængig, fordi SEP også giver et bidrag til ionisationen ved høje breddegrader [18]. En god oversigt over vekselvirkningen mellem atmosfæren og den kosmiske stråling findes i [19].

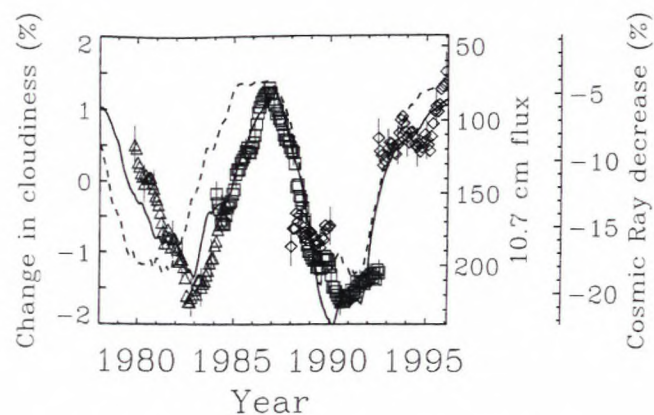
Atmosfærisk elektricitet

Jordens atmosfære udgør et omfattende elektrisk strømsystem med ionosfæren og jordoverfladen som ækvipotentiaflader på grund af deres gode ledningsevne. Kredsløbet opstår ved at kraftige tordenskyer

transporterer positive ladninger opad, hvilket giver ionosfæren et positivt potential i forhold til jordoverfladen. I den rolige atmosfære er der da en strøm nedad med en strømtæthed af størrelsesordenen 2 pAm^{-2} . Da tropenerne genererer de fleste tordenvejr er der i ionosfæren en strøm fra ækvator mod polerne. Kredsløbet kan illustreres ved figur 11 fra [21], der i øvrigt giver en god oversigt over emnet.

Strømmen mellem disse flader er i høj grad influeret af solaktiviteten, idet ioniseringen fra den kosmiske stråling forbedrer atmosfærens ledningsevne. Brian Tinsley har beskæftiget sig en del med dette emne [20], idet den ændrede strøm påvirker atmosfærens dynamik, bl.a fordi skyer har en lavere ledningsevne, hvorved en øget strømstyrke betyder ophobning af positiv ladning foroven (og negativ forneden), hvilket kan influere dannelsen af iskrystaller i toppen af skyen.

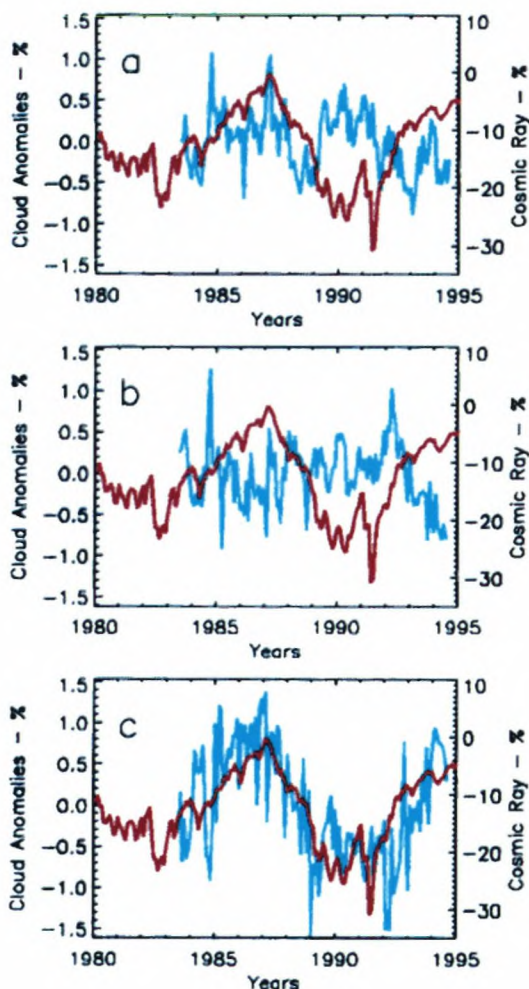
Geomagnetiske forstyrrelser kan tænkes at influere den atmosfæriske cirkulation på andre måder, f.eks ved at ændre ionosfærens potential, induktion af elektriske strømme i havet osv, og der er lavet talrige undersøgelser af korrelationer mellem solaktivitet og vejr/klima ad den vej, dog uden at kunne sætte tal på en egentlig klimaforcering. Muligvis spiller elektriske og magnetiske effekter en større rolle for vejr og klima, end man hidtil har forestillet sig, og atmosfærisk elektricitet skal tænkes hele vejen op, hvad også Thomas Allins artikel om "Feer og Elve" i Kvant 3-2000 vidner om.



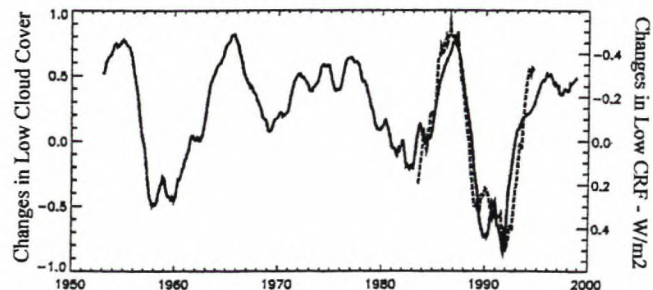
Figur 8. Sammenhængen mellem 10,7 cm fluxen (stiplet), kosmisk stråling (relativ fald i neutronflux, fuldt optrukket) og relativ ændring i det "globale" skydække for cyklus 21 og 22 (3- og 4-kanter for forskellige satellitter) [15].

Konklusion

Som det ses er der flere mekanismer, der kan bidrage til at give solaktiviteten indflydelse på udviklingen af Jordens klima, og den samlede effekt af disse ser også ud til muligvis at kunne give en forcering af klimaet af mindst samme størrelsesorden som den øgede CO2 mængde.



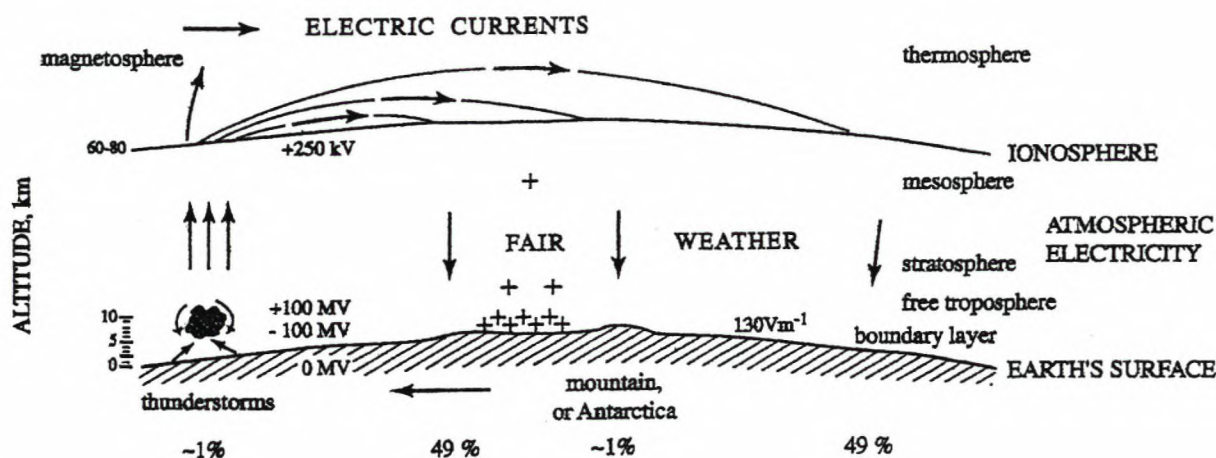
Figur 9. Månedlige anomalier af globalt skydække (blå) for henholdsvis høje skyer (>6,5 km)(a), mellemhøje skyer (b) og lave skyer (<3,2 km) (c) sammenlignet med den kosmiske stråling givet ved fald i neutronfluxen (rød) [17].



Figur 10. Rekonstruktion af mængden af lave skyer for de sidste 50 år ud fra ud fra den kosmiske strålingsflux (udglattede månedsmiddeltal). Til sammenligning er angivet målinger af det lave skydække (punkteret) [17].

Det er her nødvendigt at gøre sig klart, at solaktivitet er et komplekst fænomen, og at de enkelte mekanismer ikke følges helt ad; indikatorerne for de forskellige sider af solaktiviteten korrelerer i hvert tilfælde ikke særlig godt indbyrdes (figur 3), hvilket også kan ses på figur 12, der viser at skønt relativtallet var større i 50'erne end i 90'erne, var dette ikke tilfældet for de geomagnetiske forstyrrelser (aa), og fluxen af den kosmiske stråling aftager markant mere i sidstnævnte periode. En del forskere har ment at stigningen i den globale temperatur muligvis nok kan forklares ved stigning i solaktivitet i det meste af 1900-tallet, men ikke i de sidste par årtier. Dette er måske ikke helt korrekt, hvis det er den kosmiske stråling, der udgør hovedmekanismen for temperaturstigningen, som det ses af figur 12.

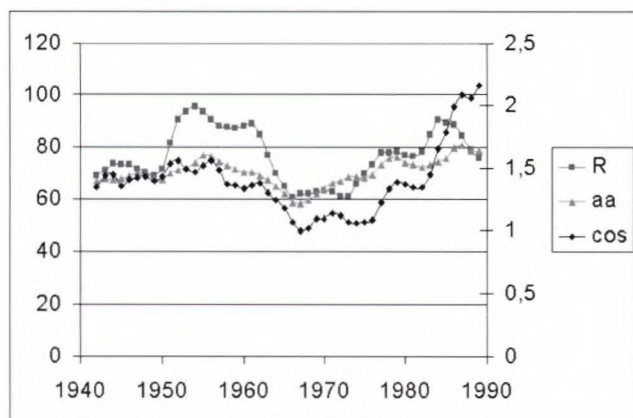
Det er ikke den 11-årige periode, der ses i de globale klimadata (men der er talrige eksempler på korrelationer lokalt i afgrænsede data) hvilket også kan illustreres af figur 1, der jo ikke følger den 11-årige cyklus.



Figur 11. Skitse af atmosfærens elektriske kredsløb [21].

Den globale sammenhæng kommer først frem ved langtidstendenser. Dette kan delvis skyldes den manglende korrelation mellem mekanismerne indbyrdes, hvor variationer af solarkonstanten følger overfladefænomener på Solen, mens variationer af skydækket følger den kosmiske stråling, hvilket udtværer signalet fra solaktiviteten. Vigtigere er dog nok at Jordens kaotiske atmosfære har en vis reaktionstid og sine egne interne oscillationer med varigheder på år og årtier, som solaktiviteten skal spille sammen med.

Vi har altså at gøre med meget komplicerede forhold, hvor ikke mindst skyer spiller en meget stor rolle, og det er f.eks. ud fra målinger af jord-skin på Månen blevet godtgjort, at store ændringer i skymønsteret har en indflydelse på Jordens gennemsnitlige albedo [22].



Figur 12. 11-års glidende middelværdier af R, aa og den kosmiske strålingsfluks. Data som for fig 2, dog er kosmisk stråling angivet ved relativ aftagen (%) for ionisationskammermålingerne fra [15]. Disse data går længere tilbage end Climax neutronmonitor data og viser højenergidelen af den kosmiske stråling.

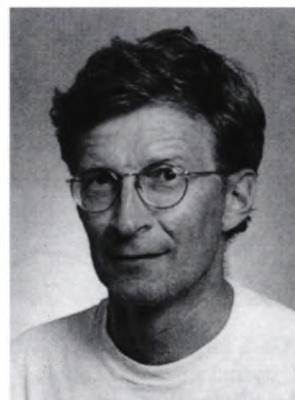
Der vil sikkert gå en del tid endnu, før man med nogenlunde sikkerhed kan besvare spørgsmålet om hvor store klimaændringer der er menneskeskabte, og hvor meget der er naturligt. Den nuværende cyklus tegner imidlertid til at blive den næstlaveste i over et halvt århundrede, så måske er solaktiviteten på vej ned! Hvis det er tilfældet, vil de næste årtiers globale temperaturudvikling give en del af svaret.

Referencer:

- [1] D. Hoyt og K. Schatten (1997) "The Role of the Sun in Climate Change", Oxford University Press.
- [2] M. Lockwood, R. Stamper og M. Wild (1999) "A doubling of the Sun's coronal magnetic field during the past 100 years", Nature, 3 juni, side 437.
- [3] Y. Wang, J. Lean og N. R. Sheeley (2000) "The long-term variation of the Sun's open magnetic flux", Geophys. Res. Lett. 15 februar, side 505.
- [4] www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23
- [5] Susanne Vennerstrøm (2000) "Long-term rise in geomagnetic activity-A close connection between quiet days and storms", Geophys. Res. Lett., 1. januar, side 69.

- [6] E. Friis-Christensen og K. Lassen (1991) "Length of the Solar Cycle: An Indicator of Solar Activity Closely Associated with Climate", Science, bind 254, side 698.
- [7] P. Thejll/K. Lassen: "Solar forcing of the Northern hemisphere land air temperature: New data" Journ. Atm. Solar-Terr. Phys. 1 Sep 2000, vol 62 p 1207
- [8] J.M. Pap/C. Fröhlich: "Total solar irradiance variations" J. Atm. Solar-Terr. Phys. Vol 61 1999 p 15
- [9] M. Fligge/S.K. Solanki: "The solar spectral irradiance since 1700" Geo. Res. Lett. July 15 2000 p 2157
- [10] W. Soon/S. Posmentier/S. Baliunas: "Inference of solar irradiance variability from terrestrial temperature changes, 1880-1993: An astrophysical application of the sun-climate connection" Astrophys. J. Dec 1 1996 p 891
- [11] H. van Loon/K. Labitzke: "The signal of the 11-year solar cycle in the global stratosphere" J. Atm. Solar-Terr. Phys. 61 1999 p 53
- [12] K. Labitzke/H. van Loon: "The Stratosphere" Springer 1999
- [13] D. Shindell et al: "Solar Cycle Variability, Ozone and Climate" Science April 9 1999 p 305
- [14] H. Svensmark/E. Friis-Christensen: "Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage-a missing link in solar-climate relationships" J. Atm. Solar-Terr. Phys. Vol 59 no 11 p 1225
- [15] Henrik Svensmark: "Influence of Cosmic Rays on Earth's Climate" Phys. Rev. Lett. 81 1998 p 5027
- [16] J. Atm. Solar-Terr. Phys. vol 62, 2000: Kommentarer fra T. Stockflet Jørgensen/Aksel Walløe Hansen på p 73 med svar fra H. Svensmark og E. Friis-Christensen på p 79
- [17] N. Marsh/H. Svensmark: "Cosmic rays, clouds, and climate" Space Science Reviews, preprint fra www.dsri.dk/hsv
- [18] S. Veretenenko/M. Pudovkin: "Latitudinal dependence of helio/geophysical effects on the solar radiation input to the lower atmosphere" J. Atm. Solar-Terr. Phys. vol 62 2000 p 567
- [19] G. Bazilevskaya/M. Krainev/V. Makhmutov: "Effects of cosmic rays on the Earth's environment" J. Atm. Solar-Terr. Phys. 62 2000 p 1577
- [20] Tinsley: "Correlations of atmospheric dynamics with solar-wind induced changes of air-earth current density into cloud" J. Geophys. Research Dec 27 1996 p 29701
- [21] M. Rycroft/S. Israelsson/C. Price: "The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change" J. Atm. Solar-Terr. Phys. vol 62 2000 p 1563
- [22] P.R. Goode et al: "Earthshine Observations of the Earth's Reflectance" Geophys. Res. Lett. Vol 28 no 9 (May 1, 2001) p 1671. (se også www.bbso.njit.edu/Research/EarthShine/)

En god oversigt findes i Proceedings fra konferencen "The Solar Cycle and Terrestrial Climate" på Tenerife i september 2000. Kan købes hos ESA som SP-463.



Sven Ove Thimm er leder af Solsektionen i Astronomisk Selskab. Lektor på Hjørring Gymnasium med Fysik, Astronomi, Matematik og Naturfag.

Kulstofkredsløbet, klimaet og Kyoto

Jens Olaf Pepke Pedersen, Center for Jordens Klima og Biogeokemiske Kredsløb, Københavns Universitet.

Kulstof er en afgørende bestanddel i alle organismer på Jorden, og det indgår i de fossile brændstoffer og i de vigtigste drivhusgasser. Det gør på samme tid kulstofkredsløbet meget komplekst og meget vigtigt for klimaet.

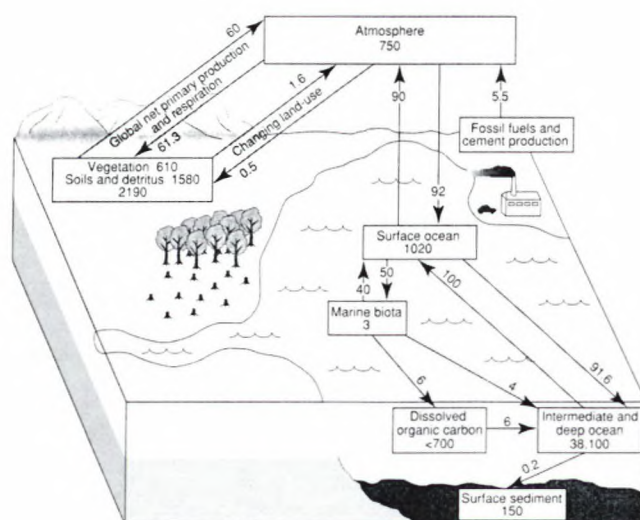
De vigtigste kulstofreservoirer er vist på figur 1, som også viser størrelsen af den årlige udveksling mellem reservoirerne. Tallene i kasserne viser kulstofmængderne i gigatons (Gt, det samme som en milliard tons) og tallene ved pilene viser transporten i Gt kulstof per år. I atmosfæren optræder kulstof især som CO_2 , og i mindre grad som CH_4 og CO , mens kulstoffet i den levende biomasse og i jordlaget er bundet i organisk materiale. Bemærk, at der er omtrent lige store mængder kulstof i atmosfæren og i den levende biosfære. I oceanerne optræder kulstof som opløst CO_2 , bikarbonat-ioner (HCO_3^-) eller karbonat-ioner (CO_3^{2-}), som under ét betegnes som DIC ("dissolved inorganic carbon"). Hertil kommer mindre mængder opløst organisk kulstof (DOC ("dissolved organic carbon")) og små partikler af organisk materiale (POM).

Oceanerne kan opdeles i et overfladelag og dybhavet. Vandmasserne i overfladelaget blandes af vindene og er konstant i kontakt med og udveksler CO_2 med atmosfæren. I forhold til mængden af kulstof i overfladelaget, der er af samme størrelse som kulstofmængden i atmosfæren, er der enorme kulstofmængder oplagret i dybhavet. Til gengæld er udvekslingen mellem overfladelaget og dybhavet beskednen i forhold til de andre udvekslinger, og det betyder, at mens f.eks. kulstoffet i atmosfæren udskiftes i løbet af fem år er opholdstiden i dybhavet flere hundrede år.

Menneskeskabte ændringer

De menneskeskabte påvirkninger af kulstofkredsløbet kommer især fra forbrænding af fossile brændstoffer samt fra ændringer i vegetationen. Afbrænding af kul, olie og naturgas frigiver årligt ca. 6 Gt kul, mens ændringerne i vegetationen, der hovedsageligt skyldes skovrydninger i troperne, bidrager med ca. 2 Gt årligt. Af det årlige menneskeskabte udslip på i alt ca. 8 Gt akkumuleres ca. 3,3 Gt i atmosfæren, mens det skønnes, at oceanerne netto optager ca. 2 Gt. Hvor resten af kulstoffet (ca. 2,7 Gt årligt) bliver af, har man ikke helt styr på, og det omtales ofte vittigt som "the missing sink". Naturligvis forsvinder kulstoffet ikke, så forklaringen må være, at det optages i biosfæren, men der er uenighed om, hvor optaget sker. Det er dog sandsynligt, at der optages store mængder i skovene på mellembreddegraderne på den nordlige halvkugle, specielt i Nordamerika. Optag af kulstof kan f.eks. ske

ved at skoven vender tilbage på landbrugsarealer, der ikke længere benyttes, ligesom den øgede mængde CO_2 i atmosfæren stimulerer fotosyntesen, således at biomassen optager mere kulstof. Den samme effekt kan være opnået ved at Jordens gennemsnitstemperatur er steget og endelig kan et (utilsigtet) resultat af luftforurening med kvælstofoxider (NO_x , som også bidrager til sur regn) være, at tilførslen af kvælstof virker som gødning på planteproduktionen og dermed øger kulstofoptaget.



Figur 1. Det globale kulstofkredsløb. Tallene i reservoirerne er i Gt kulstof og kulstof-transporterne i Gt pr. år. Tallene er gennemsnit for perioden 1980–89. I tiåret 1990–99 vurderes kulstoftransporten til atmosfæren fra afbrænding af fossile brændstoffer at være øget til ca. 6,3 Gt/år.

Opmærksomheden har i mange år været rettet mod CO_2 indholdet i atmosfæren, der som illustreret i figur 1 side 22 har været stigende lige så længe, vi har målinger heraf. Bemærk i øvrigt, at kurven viser tydelige årstidsvariationer. Om foråret, hvor fotosyntesen går i gang på den nordlige halvkugle, falder CO_2 koncentrationen, for atter at stige om efteråret, når træerne smider deres blade. Fra tiden før de direkte målinger har vi informationer om CO_2 koncentrationen i atmosfæren fra små luftlommer i iskerne fra borer i Grønland og Antarktis, og disse viser også en stigning siden industrialiseringens begyndelse. Der er ikke tvivl om, at stigningen skyldes menneskets aktiviteter, bl.a. fordi isotopsammensætningen afslører, at en stigende del af kulstoffet i atmosfæren kommer fra fossile brændstoffer.

Selvom der netto optages kulstof i oceanerne og i biomassen, fortsætter indholdet af kulstof med at stige i atmosfæren. Det har givet anledning til bekymring for, at den stigende koncentration af CO₂ (og andre drivhusgasser) kan udløse globale klimaændringer. Her er det desværre ikke nogen varig løsning, at en stor del af CO₂-udslippet optages i biomassen og oceanerne. For selvom der er uenighed om, hvor CO₂-optaget sker i biomassen, er der enighed om, at biomassen ikke er et uendeligt reservoir. Når en skov er udvokset, hører CO₂-optaget op, og hastigheden i fotosyntesen fortsætter ikke med at øges ikke i samme takt som stigningen i CO₂-koncentrationen. Hertil kommer, at en global opvarmning kan frigøre store mængder kulstof, som er oplagret i jorden på høje breddegrader, og ændringer i nedbørsmønstre kan skabe nye ørkenområder som reducerer biomassen. En opvarmning kan også stress eksisterende økosystemer, så de erstattes af andre, og denne overgang er ikke nødvendigvis CO₂-neutral.

For oceanernes kulstofoptag er en global opvarmning heller ikke en fordel, idet CO₂ opløses dårligere i varmt vand, og desuden kan en øget temperatur nedsætte den termohaline cirkulation og dermed transporten af kulstof ned i dybhavet.

Drivhuseffekten

CO₂ er en drivhusgas, og selvom der er uenighed om virkningen på klimaet af en øget koncentration af CO₂ i atmosfæren, giver det derfor mening at begrænse udslippene af CO₂. I medierne fremstilles problemstillingen ofte som et valg mellem drivhuseffekten eller solens indvirkning på klimaet. Klimasystemet er imidlertid ikke så enkelt. Solen har naturligvis afgørende indflydelse på klimaet, og variationerne i solens udstråling af energi og partikler påvirker derfor også klimaet. På samme måde er drivhuseffekten reel, og heldigvis for det, for uden en atmosfære ville gennemsnitstemperaturen være ca. 30°C lavere. Derfor påvirker det også klimaet, at atmosfærens indhold af drivhusgasser ændres.

At der er uenighed om størrelsen af fremtidige klimaændringer er ikke et argument for ikke at foretage sig noget, men burde snarere være et argument for, at der er god fornuft i at begrænse udslippene af drivhusgasser. Hvor stor indsatsen skal være, er som alt andet i den politiske verden et spørgsmål om prioriteringer, men det er ikke nødvendigvis en modsætning at ønske økonomisk vækst og samtidig en begrænsning i CO₂-udslippene. Der er i øvrigt mange sidegevinster ved at begrænse luftforureningen og ved at erstatte eller bruge fossile brændstoffer mere effektivt.

Aftalen i Kyoto

Den politiske proces er især foregået indenfor FN's rammer og er accelereret de sidste 10 år. FN's anden miljøkonference blev afholdt i Rio de Janeiro i 1992 og førte til vedtagelsen af en international kli-

makonvention, som siden er ratificeret af næsten alle klodens lande. En del af konventionens popularitet skyldes formodentlig, at den ikke forpligter medlemslandene særligt, og i erkendelse heraf aftalte man på en af de såkaldte partskonferencer, som fulgte efter Rio-konferencen, præcise begrænsninger i de industrialiserede landes CO₂ udslip. Aftalerne er beskrevet i Kyoto-protokollen fra 1997, der indeholder mål for hvor meget industrilanden udslip skal være reduceret i årene 2008–12 målt i forhold til niveauet i 1990. USA forpligtede sig således til en reduktion på 7% i forhold til 1990-niveauet, mens EU landene samlet forpligtede sig til en reduktion på 8%. Fordelingen af EU-landenes reduktion førte til, at Irland, Spanien, Grækenland og Portugal fik lov til at øge deres udslip med ca. 15–25%, mens Tyskland og Danmark forpligtede sig til en reduktion på 21%.

Grundideen i Kyoto-aftalen er de såkaldte fleksible mekanismer. Således indeholder aftalen bestemmelser om, at flere drivhusgasser skal medregnes, idet man omregner deres virkning til CO₂-enheder. Desuden skal optag af drivhusgasser, f.eks. i nye skovarealer, regnes med i den nationale kvote, det er muligt at få kredit for at financiere projekter, der giver begrænsninger af CO₂-udslip i et andet land, og endelig kan man handle med udledningstilladelser. Det sidste var særlig interessant for Rusland, som efter Sovjetunionens sammenbrud og lukning af store ineffektive industrianlæg har udsigt til udlede langt mindre CO₂ i 2008–12 end niveauet i 1990.

Arbejdet med at definere de fleksible mekanismer i opgørelsen af CO₂-virkningen var næsten ved at tage livet af aftalen, og på partskonferencen i Holland sidste år (som nok blev mest kendt for at den amerikanske forhandlingsleder fik en lagkage i hovedet) måtte man opgive at nå til enighed om beregningsmetoderne. Det lykkedes til gengæld næsten i juli i år i Bonn, og i starten af november faldt de sidste aftaler på plads i Marokko. I modsætning til den enorme medieopmærksomhed omkring forløbet hidtil, var der påfaldende lidt interesse for den afsluttende fase, som blev overskygget af valgkampen og krigen i Afghanistan. Som en del af prisen for at nå til enighed måtte man i øvrigt – både i juli og i november – tildele Rusland yderligere store udslipskvoter som kompensation for deres skovarealer.

I mellemtiden var der som bekendt valgt ny præsident i USA, og Bush erklærede kort efter sin tiltræden i ret kategoriske vendinger, at USA ikke længere planlagde at ratificere Kyoto-protokollen, der i høj grad havde været Al Gores projekt.

Uden USA, der alene tegner sig for 25% af verdens samlede CO₂-udslip, og med de ændringer, der blev resultatet af partskonferencerne i år bliver effekten af Kyoto-protokollen mere beskeden end den oprindelige ambition på en samlet reduktion omkring 5%, og slutresultatet vil måske vise sig at være nær nul.

Det skal dog ses i forhold til, at CO₂-udslippet uden Kyoto-aftalen sikkert ville have fortsat sin hid-

tidige stigningstakt, og det har hele tiden været meningen, at aftalen skulle følges op af nye reduktioner efter 2010. Kyoto-aftalen er således heller ikke løsningen på drivhusproblemet, men et vigtigt første skridt. For en ordens skyld skal det tilføjes, at aftalen ikke er trådt i kraft endnu, men det er sandsynligt, at det nødvendige antal lande vil ratificere aftalen i løbet af det næste halve år.

Aftalens svagheder

Aftalens komplicerede beregningsmetoder er en af dens svagheder. Den vil kræve en hær af kulstof-bogholdere, og det bliver svært at gennemskue virkningerne. En anden svaghed er, at USA ikke er med.

Inden man forfalder til den holdning, at USA atter er skyld i alverdens ulykker, er det værd at bemærke to forhold.

For det første har den økonomiske udvikling i USA i 1990'erne betydet, at USA ville skulle reducere sit udslip med omkring 25% i forhold til det forventede niveau, og uanset udfaldet af det amerikanske præsidentvalg ville det ikke kunne opfyldes på anden vis end ved at købe store emissionskvoter fra Rusland. Den forventede regning ville blive så enorm, at den aldrig ville blive godkendt af Kongressen, der med rette kunne argumentere for, at det ikke ville gøre nogen forskel for klimaet, men til alene have den virkning, at der blev overført store beløb fra USA til Rusland. Det burde til gengæld have været klart for de amerikanske forhandlere i 1997.

For det andet, så er der faktisk megen snusfornuft i den amerikanske holdning, at man vil beskytte mod ødelæggelser fra klimaændringer på lang sigt og samtidig beskytte mod økonomiske ødelæggelser på kort sigt. Der tegner sig nu konturerne af en amerikanske klimapolitik, som bygger på forskning, internationalt samarbejde og markedsmekanismerne.

Det er fornuftigt, at en god klimapolitik skal bygge på god forskning. Som beskrevet i artiklerne i Kvant nr. 3 side 9 og 21, er der tilbagekoblinger i klimasystemet, der vil modvirke en temperaturstigning og andre, som vil forstærke den. Men vi ved faktisk ikke, hvilke mekanismer, der vil dominere. Vil temperaturstigningen blot blive en lille forstyrrelse, eller sætter vi en dramatisk udvikling i gang? Udover grundlæggende klimaforskning er der brug for investeringer i anvendt forskning, udvikling af alternativer til fossile brændstoffer, bedre anvendelse af brændstoffer, vindkraft, solenergi og andre CO₂-frie energikilder. Markedsmekanismerne vil være nødvendige for at få udbredt og udviklet nye teknologier. Endelig er der også fornuft i det synspunkt, at udviklingslandene skal indgå i aftalerne om CO₂-reguleringer, således at de får et medansvar for at begrænse de globale udslip og at de har et incitament til at gøre det i takt med deres økonomiske udvikling.

EU landene har erklæret, at de fortsætter Kyoto-processen med eller uden USA, men skal aftalerne give mening efter 2010, er det nødvendigt at der her – ligesom på alle andre vigtige områder – findes en fælles europæisk-amerikansk holdning.



Jens Olaf Pepke Pedersen er lektor og administrator på Center for Jordens Klima og Biogeokemiske Kredsløb (DCESS). DCESS er finansieret af Danmarks Grundforskningsfond.

Læserbrev

Kay Akselbo, *Vedbæk*.

I sin artikel i Kvant, nr. 2, 2001, om Planeten Mars og væksten af orden i Universet gør Jens Martin Knudsen sig tanker om "det største mysterium af alle", nemlig livets oprindelse og udvikling. Han betragter herunder følgende to alternativer:

1) En kausalt bestemt "Darwinsk" evolution, hvorunder universet udvikles med os som et tilfældigt biprodukt, som ikke ville komme igen, hvis vi forsvandt.

2) En "formålsbestemt" deterministisk eller selvorganiserende proces, hvor det nærmere er os, der udvikles med det øvrige univers som en nødvendig kon-

sekvens.

Hvad Jens Martin Knudsen ifølge sagens natur ikke har kunnet vide er, at de 2 scenarier er komplementære, og altså kun tilsammen giver den fyldestgørende betragtning. Der er jo her tale om en af de typiske modsætninger i biosfæren, som først er analyseret i min artikel i samme nummer: "Om bevidsthed, fysik og kosmologiske principper", jfr. specielt dennes sidste stykke, punkt 8.

Med venlig hilsen

Kay Akselbo

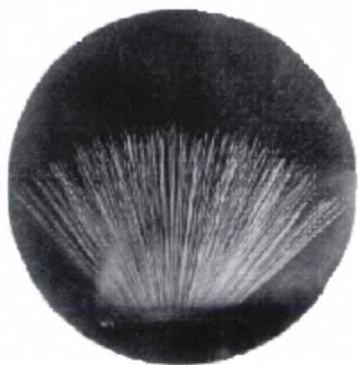
Niels Bohrs teori for α -partiklers nedbremsning i et moderne perspektiv¹

Peter Sigmund, Fysisk Institut, Syddansk Universitet.

Baggrund

1913 var året for Niels Bohrs videnskabelige gennembrud. Hans publikationsliste udviser ét arbejde per år fra 1909–12 men hele fem i 1913, heraf fire om den nye atomteori som udløste Nobelprisen i 1922. Lige forinden nåede Bohr at skrive “On the theory of the decrease of velocity of moving electrified particles on passing through matter” [1], et arbejde der er mindre kendt i den videnskabelige offentlighed men som har haft stor betydning for atom- og kernefysikkens udvikling.

Den historiske baggrund er for nylig blevet beskrevet af Jens Thorsen i dette blad [2]. Bohrs afhandling sammenfatter resultater fra det første projekt han kom i gang med under et længere ophold hos Ernest Rutherford i Manchester. Ved de i titlen omtalte elektrificerede partikler drejer det sig mest om α -partikler fra radioaktive henfald, men teorien fandt også anvendelse på β -partikler. α -partiklers gennemtrængning af gasser og metalfolier var blevet grundigt undersøgt eksperimentelt. Der havde også været forsøg på teoretisk forklaring for strålernes rækkevidde, som Bohr imidlertid ikke anså for holdbare.



Figur 1. Spor af α -partikler i tågekammer. Fra [3].

Figur 1, som er af lidt yngre dato, illustrerer problemstillingen. Billedet viser sporene af α -partikler i et tågekammer. Partiklerne ioniserer nogle af mediets atomer og sporene opstår ved kondensation af vand-

damp til små dråber ved de nydannede ioner. Ioniseringen koster energi, hvorfor partiklerne bremses ned. Sporene er stort set retlinede – en observation der gav anledning til Rutherfords erkendelse af at atomkernen måtte være meget lille – og de er omtrent lige lange. Det sidste skyldes dels at α -partikler fra radioaktive henfald har en veldefineret begyndelsesenergi, dels at den enkelte partikel har energi nok til at danne et stort antal ioner, hvorved fluktuationer bliver små i kraft af de store tals lov. Der er ganske vist målbare fluktuationer som Bohr fortolkede senere hen, men i første omgang gjaldt det om at forstå den information der lå i selve middellrækkevidden for partiklerne.

Modellen

En teori for ioniseringsprocessen² måtte nødvendigvis baseres på den klassiske fysik, dvs. primært Rutherfords atommodel. Også efter fremkomsten samme år af Bohrs atommodel forblev dennes forbindelse til stødprocesser uklar i mange år.

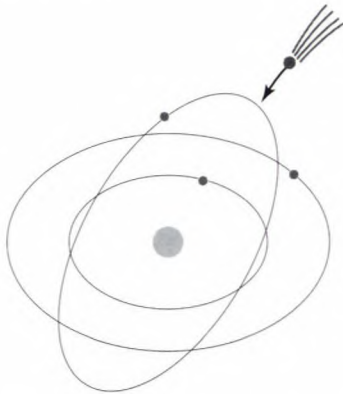
I Rutherfords atommodel ligner et atom et planet-system. Derved kan ionisering ved en α -partikel ansues som påvirkningen af en planet ved en gennemtrængende komet (figur 2). Planeten kan blive slået af banen af den meget tungere komet, når vekselvirkningen foregår på nært hold. Både gravitations- og Coulombkraften har dog en lang rækkevidde. Derfor skal også situationen skitseret i figur 3, hvor stødafstanden er stor, tages i betragtning. Beregnes middelenergioverførslen per vejlængde fra en α -partikel til mediets elektroner – beskrevet som frie partikler – ender man da op med et integral der divergerer ved store stødafstande. De argumenter der var blevet brugt for at bortdiskutere denne divergens gav Bohr sig ikke tilfreds med. Noget væsentligt manglede i teorien, nemlig elektronens binding til atomkernen, men den udgjorde da netop et af tidens uløste problemer.

Situationen skitseret i figur 3 kan sammenlignes med lysets brydning og absorption: I begge tilfælde er der tale om et ydre elektrisk felt der varierer langsomt i rummet men hurtigt i tiden og påvirker mediet. I modsætning til partiklers gennemtrængning vidste man en del om lysets vekselvirkning med stof. Navnlig forelå Paul Drudes klassiske elektronteori som på halvempirisk vis beskrev stoffernes optiske egenskaber. Det

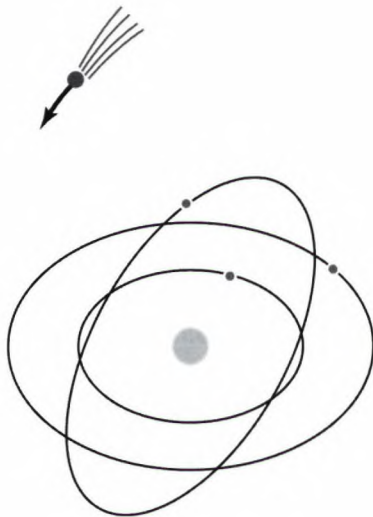
¹ Artiklen bygger på en meddelelse givet til Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab 22. februar 2001

² Der tales her om ionisering og ikke om eksitation, for sidstnævnte begreb eksisterede endnu ikke. Bohr skelnede imidlertid omhyggeligt mellem ionisering og energitab, og dette blev en væsentlig årsag til teoriens succes

er denne model, Bohr benyttede sig af til beskrivelse af de fjerne stød skitseret i figur 3, mens fri-Coulomb spredning blev fastholdt som en tilnærmet beskrivelse af de nære stød i figur 2.



Figur 2. Ioniseringsproces modelleret som nærkontakt mellem en komet og et planetsystem.



Figur 3. Samme proces som i figur 2 ved fjern vekselvirkning.

Næsten 20 år senere viste Bethe [4] og Bloch [5] at denne beskrivelse af fjerne stød i analogi med optiske overgange er en direkte konsekvens af kvantemekanikken. At Niels Bohr erkendte denne ækvivalens inden der forelå nogen som helst kvantebeskrivelse for atomet, er et af mange vidnesbyrd om hans legendariske fysiske intuition.

Stoppeformel

Efter omhyggelige beregninger – som udviser forfatteren som en særdeles habil matematiker – nåede Bohr frem til et udtryk for energitabet per vej længde som i

moderne notation kan skrives på følgende form,

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z_1^2 Z_2 e^4}{mv^2} N \sum_v f_v \log \frac{Cmv^3}{|Z_1|e^2\omega_v}. \quad (1)$$

Her er Z_1 og Z_2 kerneladningstallene for projektilet og for mediets atomer, $-e$ og m elektronens ladning og masse, v projektilhastigheden, N antallet af atomer per volumen i materialet og $C = 1.1229$. ω_v og f_v betegner materialets resonansfrekvenser og tilhørende dipoloscillatorstyrker, idet f_v opfylder sumreglen $\sum_v f_v = 1$. Den præcise definition af oscillatorstyrkerne bygger på kvantemekanikken, men tilstedeværelsen af flere resonansfrekvenser samt sumreglen er indbygget i klassisk elektronteori.

Bohr beregnede α -partiklers rækkevidde ud fra ligning (1) og fandt god overensstemmelse (inden for 5 %) med måleresultater for brint, helium og aluminium under antagelse af henholdsvis 1, 2 og 13 elektroner per atom som forudsat i Rutherfords atommodel. Der opstod diskrepanser for tunge stoffer som guld og bly som må tilskrives manglende kendskab til optiske data i røntgenområdet.

Bohrs omhyggelige diskussion af de antagelser der indgår i hans teori slutter med

It seems very difficult to account accurately for the alterations in the result, if the above assumptions are not satisfied,

en bemærkning som forfatteren for denne artikel godt kan tilslutte sig.

Den videre udvikling

Bohr mistede aldrig interessen for problemstillingen som han bl.a. viede sin sidste videnskabelige afhandling til, sammen med Jens Lindhard [6]. Men Bohr var ikke ene om interessen. I 1930 formulerede Hans Bethe sin berømte kvanteteori for partiklers energitab med Bohrs teori som det konceptionelle grundlag og Born-approksimationen som det matematiske redskab. Bethes teori erstatter logaritmen i ligning (1) med $\log(2mv^2/\hbar\omega_v)$. Da der tilmed opnåedes bedre overensstemmelse med målte rækkevidder syntes der ikke længere at være behov for Bohrs teori, som dog fik en vedvarende placering i lærebøger som f.eks. [7].

Lette og tunge ioner

I 1933 fandt Felix Bloch [5] det overraskende resultat at Bethes og Bohrs teorier kunne udledes som grænsetilfælde ved hhv. høj og lav hastighed af en mere generel formel. Den underliggende årsag blev nøje undersøgt af Bohr, især i samarbejde med E. J. Williams, og resultatet blev at Bohrs og Bethes teori har komplementære anvendelsesområder defineret ved parameteren

$$\kappa = \frac{2|Z_1|v_0}{v}, \quad (2)$$

hvor $v_0 = c/137$ er Bohr-hastigheden. Bethes teori, der er en perturbationsteori, gælder for $\kappa \ll 1$, dvs. for små ladninger og høj hastighed, mens en klassisk beskrivelse er adequat i den omvendte situation. Bohr viste at man for $\kappa > 1$ kan konstruere en bølgepakke med udstrækning mindre end støddiameteren i Coulombspredning, hvorved en klassisk Keplerbane bliver en realistisk model for spredningsprocessen.

Bohr tog konsekvensen af dette da han i 1941, efter kernespaltnings opdagelse, havde brug for at vurdere fissionsfragmenters rækkevidde [8]. Men Bethes teori – efter tilføjelse af nødvendige relativistiske korrektioner – blev den næsten universelt anvendte beskrivelse af partiklers nedbremsning i hele kerne- og partikelfysikken hvor projektiler med lavt ladningstal var dominerende.

Da man i 1960'erne, efter fremkomsten af tandem-acceleratoren som kilde til tunge ioner, havde brug for kortlægning og tabellering af de tilhørende energitabsfunktioner, tog man uden tøven Bethes teori som det teoretiske grundlag. Derved befinder vi os i den besynderlige situation, at samtlige eksisterende tabeller for tunge ioners energitab, i det omfang der indgår teori, er baseret på en teori der i det store og hele ikke gælder for tunge ioner.

Anvendelse af accelerators

Som en konsekvens af Bohrs pionerarbejde blev energitabsproblematikken en dansk specialitet som adskillige af landets mest ansete eksperimentalfysikere og teoretikere kom til at levere deres svendestykke i. Både den nationale og den internationale indsats fokuserede i mange år på lette partikler, som også i anvendelser uden for kerne- og partikelfysikken havde mest interesse.

Der står i dag adskillige tusind accelerators rundt omkring i verden, større og mindre, hvoraf kun et lille mindretal anvendes til grundlæggende fysikforskning mens hovedparten bruges som værktøjer i hospitaler, i elektronikindustrien, i miljøadministrationen og i materialeudviklingen. Jeg vil her skitsere to anvendelsesområder hvor hovedinteressen er gået over fra lette til tunge ioner i de senere år³.

Ionterapi

Inspektion af figur 1 viser at sporenes tykkelse ikke varierer dramatisk fra den ene til den anden ende, d.v.s. at ioniseringstætheden næsten er konstant over den synlige del af sporet. Hvis man nu øgede α -partiklernes energi til det dobbelte – ved en accelerator med tilstrækkelig stor accelerationsspænding – så ville man konstatere at sporene bliver omtrent hundrede gange længere. Det viser, at ioniseringstætheden i de første 99 % af sporet i middel er gået ned til en tiendedel. Dette er en konsekvens af faktoren $1/v^2$ i ligning (1), som kort sagt indebærer at ioniseringstætheden stiger med

faldende energi, dvs. stigende indtrængningsdybde. Det er af stor interesse for stråleterapi hvor det gælder om at standse væksten af en kræftsvulst ved ioniserende stråling. At ioniseringstætheden stiger henimod enden af banen betyder at skaden på det sunde væv, strålingen skal passere på vej ind til svulsten, er begrænset. Det betyder færre bivirkninger for patienten end ved konventionel stråleterapi baseret på røntgenstråler, hvor ioniseringstætheden som hovedregel *aftager* med voksende indtrængningsdybde.

Bestemmelse af strålingsdosis er en vigtig opgave hvor der skal findes en balance mellem den dosis der er nødvendig for at dræbe en svulst og den, patienten kan tåle. Når den sidste er mindre end den første kommer strålebehandling ikke i betragtning. Denne situation vil forekomme mindre hyppigt ved ion- end ved røntgenterapi. En anden væsentlig fordel er at strålernes virkning er skarpt afgrænset, som det kan ses i figur 1. Det indebærer at stråleterapi kan komme i betragtning også i tilfælde hvor en tumor grænser op til et livsvigtigt organ der ikke kan tåle bestråling.

Alligevel er man trods disse åbenlyse fordele ikke gået over til ionterapi overalt i verden, og det er der gode grunde til. For det første skal tumoren rammes præcist. Hvis ikke det lykkes sker der kun skade og ingen gavn på patienten. Ud over præcis diagnostik kræver det et nøje kendskab til partiklernes energitab i de dele, strålingen skal passere. Kravet er en præcision på 1 pct., og det er ikke nemt at opfylde.

Dertil kommer økonomien. Der findes p.t. et par håndfulde steder i verden hvor der udføres protonterapi og yderligere to med tungionterapi i hhv. Darmstadt (Tyskland) og Chiba (Japan). Tungionterapi anses for at være mest effektiv for dybtliggende svulster men kræver til gengæld maskiner af en størrelse som de færreste lande har mulighed for at finansiere. Maskinen i Darmstadt blev da heller ikke bygget med ionterapi som hovedformål men som en national facilitet til grundlæggende fysikforskning. Et udviklingsarbejde er i gang med konstruktion af mere overkommelige maskiner som mål.

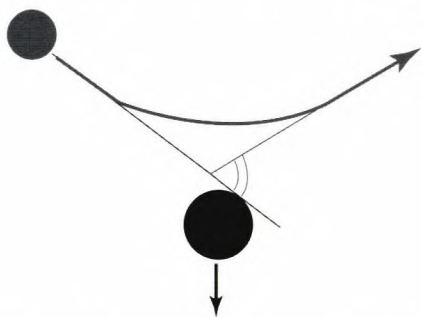
Materialeanalyse

Figur 4 viser et elastisk stød mellem to partikler. Hvis man kender energien af den indfaldende partikel og kan måle både afbøjningsvinklen og slutenergien kan man bestemme den ramte partikels masse og derved dens identitet. Dette enkle princip har i mange år været en standardmetode til materialeidentifikation, ikke mindst i tilfælde hvor andre metoder ikke kommer i betragtning. For eksempel har man på denne måde kunnet få oplysninger om den kemiske sammensætning af måneoverfladen fra den første ubemandede rumsonde der landede på månen i midten af 1960'erne. Det krævede ikke meget mere end en α -kilde og en detektor,

³Siden en meget stor del af den samlede eksperimentelle og næsten hele den teoretiske indsats vedr. hurtige partiklers energitab vedrører protoner og α -partikler, dækker udtrykket 'tunge ioner' i denne artikel alt fra lithium opefter.

begge anbragt på undersiden af landingsfartøjet.

Ud over elementbestemmelse kan teknikken også bruges til såkaldt dybdeprofilering, dvs. til udforskning af koncentrationsprofiler af materialer fra overfladen indad. Her udnyttes energitabet som et mål for dybden. At opnå god dybdeopløsning er af væsentlig betydning i overfladeteknologi, mikroelektronik, miljøforskning etc. Med α -partikler opnås en dybdeopløsning på 3-5 nanometer hvis man udnytter teknikken fuldt ud, men i de senere år er man begyndt på at anvende tunge ioner hvor energitabet er større og opløsningsevnen derved bedre. Man regner med at komme ned på en opløsningsevne på en enkelt atomafstand, og det vel at mærke i en dybde på måske 100 atomafstande. Men hvis denne forbedring skal kunne udnyttes må man kende disse ioners energitab med procents nøjagtighed. Det gør man ikke i dag, og slet ikke for alle de ioner og materialer der har interesse i den sammenhæng.



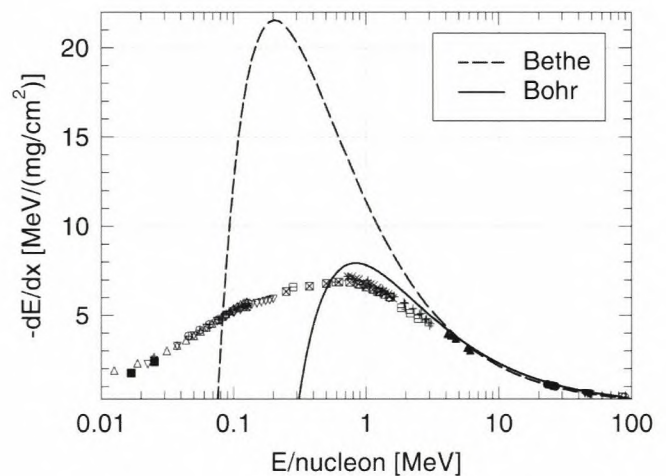
Figur 4. Elastisk stødproces mellem to partikler.

Et ICRU-projekt

Undertegnede blev for nogle år siden af den internationale strålekommission ICRU⁴ opfordret til at tilvejebringe et officielt tabelværk for tunge ioners stoppeevne i samarbejde med en lille ekspertkomite med både dansk og international deltagelse. For at vurdere opgavens omfang bør man holde sig for øje at der findes næsten hundrede elementer, hvoraf ca. halvdelen har interesse både som materialer og projektiler. Det giver tilsammen godt og vel 2.500 kombinationer. Dertil kommer at det relevante energiområde omfatter næsten 10 dekader fra lidt under 1000 til omtrent 10^{12} elektronvolt. Eksperimentel kortlægning ville altså kræve mange tusinde omfattende måleserier og det er der hverken folk, penge eller vilje til.

Med andre ord er der brug for en tilforladelig teori. Standardløsningen i moderne fysik er omfattende computersimuleringer baseret på de grundlæggende kvantemekaniske ligninger. Denne løsning kommer indtil videre ikke i betragtning her: Selv simple stødsystemer som brint på brint beherskes kun over et ret begrænset energiområde og alt arbejde med flerelektronsystemer er baseret på mere eller mindre simplificerede teoretiske modeller.

Problemer med Bohr-modellen



Figur 5. Stoppeevne for oxygen i aluminium: 16 sæt måledata kompileret af Helmut Paul [9] sammenlignet med Bohrs og Bethes stoppeformler.

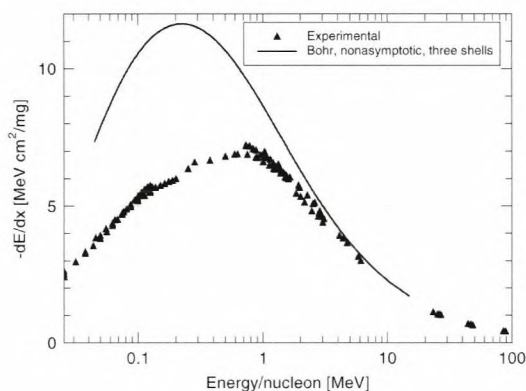
Efter en gennemgang af eksisterende teorier var der ikke tvivl om at inden for vore randbetingelser var det eneste brugbare udgangspunkt Bohrs teori fra 1913. At denne ikke er problemfri fremgår af figur 5 som viser stoppeevnen for oxygenioner i aluminium. Systemet er meget velundersøgt eksperimentelt med måledata fra 16 forskellige kilder. Sammenligning med de to teoretiske kurver viser at Bohrs formel stemmer bedre end Bethes i det vigtige område fra 0.5 til 5 MeV/nukleon, dvs. fra 8 til 80 millioner elektronvolt per ion. Men derunder falder Bohrs kurve hurtigt mod nul. Også Bethes formel giver en stoppeevne der går mod nul, men dels sker det ved lavere energi og dels har Bethe og medarbejdere allerede omkring 1950 foretaget de nødvendige korrektioner i teorien så stoppeevnen aldrig bliver negativ.

At Bethes teori forudsiger en for stor stoppeevne mellem 0.1 og 4 MeV har man i mange år tilskrevet det faktum at ionen er behandlet som en punktladning mens den i praksis medfører et stigende antal elektroner med faldende hastighed. Det har man så empirisk korrigeret for ved multiplikation af en faktor γ^2 , og γ blev fortolket som forholdet mellem ionens ladningstal q_1 og kerneladningstallet Z_1 . Vi kommer til at se om et øjeblik, at situationen ikke er så ligetil.

Der indgår ikke fysiske antagelser i Bohr-modellen der ville medføre negative energitab. I beregningerne optræder derimod en Besselfunktion som for lette hurtige partikler kan tilnærmes ved logaritmen i ligning (1). Denne tilnærmelse gælder ikke over en stor del af energiintervallet vist i figur 5. Undlader man at anvende den fås figur 6, hvor den teoretiske kurve nu er positiv overalt men til gengæld for høj i forhold til målingerne. Årsagen dertil er igen at ionen behandles som en punktladning i teorien, men i modsætning til Bethes kurve i

⁴International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda (Maryland, USA)

figur 5 ligger den reviderede Bohr-kurve mindre end en faktor 2 over måledataene.



Figur 6. Data fra figur 5 sammenlignet med Bohrs teori når asymptotisk udvikling for store værdier af $mv^3/Z_1 e^2 \omega_v$ er undgået.

Afskærmning

Det er en overkommelig opgave at indbygge afskærmningen af projektilets Coulombfelt ved medførte elektroner i Bohrs teori. Det kan ske⁵ ved at man erstatter Coulomb-potentialet $-Z_1 e^2/r$ med

$$V(r) = -\frac{q_1 e^2}{r} - \frac{Z_1 - q_1}{r} e^{-r/a}, \quad (3)$$

hvor r er afstanden mellem projektilets kerne og en af mediets elektroner og a en afskærmningsradius. Figur 7 viser resultater fra en beregning hvor ionens ladning er sat til henholdsvis 8 ('stripped') og 0 ('neutral'). Det ses at målepunkterne ligger mellem disse to kurver, som man måtte forvente.

Den aktuelle ladning ved given projektilhastighed er bestemt ved en ligevægt mellem ladningsskiftprocesser, hvor projektilet enten indfanger en elektron fra mediet eller mister en elektron til det. Bohrs arbejde med disse processer er for nylig beskrevet her i bladet [10]. Allerede i 1941 benyttede han Thomas-Fermi-modellen for atomet til at udlede et udtryk for ligevægtsladningen [8] der i en lidt modificeret form kan skrives som

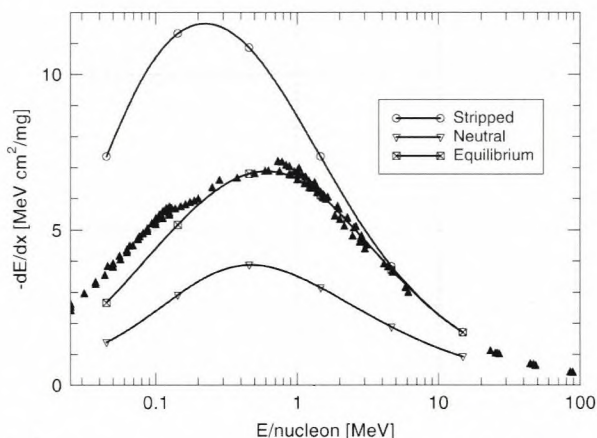
$$q_1 = Z_1 \left(1 - e^{-v/Z_1^{2/3} v_0}\right). \quad (4)$$

Benyttes dette udtryk i beregningen af stoppeevnen fås kurven 'equilibrium' i figur 7. Overensstemmelsen med målepunkterne synes nu meget tilfredsstillende helt ned til 0.2 MeV/nukleon.

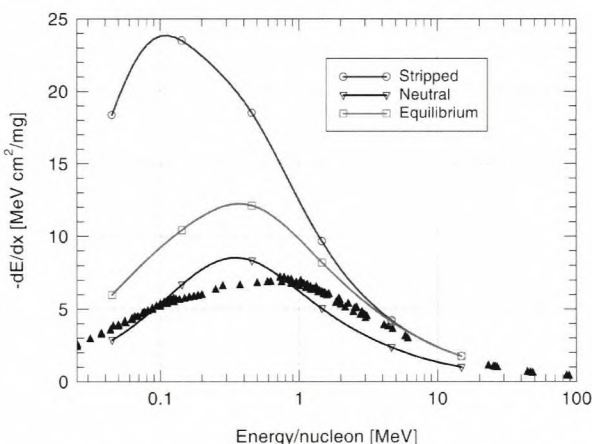
Desværre slutter historien ikke her. Der kendes en række korrektioner som har betydning for lette ioner. Når de i litteraturen stort set blev ignoreret for tunge ioners vedkommende skyldes det ikke at de forventes at være små, men dels at man for nogles vedkommende ikke vidste hvordan de skulle beregnes og dels at feltet i forvejen var så meget behersket af empiri at det

ikke gjorde megen forskel stiltiende at inkorporere disse effekter i den tidligere omtalte faktor γ^2 , som på den måde blev det universelle deponeringssted for manglende viden om hvad der foregik. Ikke desto mindre har den temmelig vildledende betegnelse 'effektivladning' for størrelsen γZ_1 holdt sig til den dag i dag.

Barkas-effekt



Figur 7. Samme system, men afskærmningen af projektilets ladning ved medførte elektroner taget i betragtning.



Figur 8. Samme som figur 7, men Barkaseffekten inkluderet i form af et led proportionalt med Z_1^3 .

Figur 7 lige som alt hvad der følger fra nu af er resultat af et samarbejde med Andreas Schinner fra J. Kepler - Universitetet i Linz (Østrig). Næste skridt i vort samarbejde var rettet imod Barkas-effekten der består i at en partikel ikke nødvendigvis oplever samme stoppeevne som dens antipartikel, som man skulle forvente det ifølge ligning (1). Effekten beskrives traditionelt ved et led proportionalt med Z_1^3 i ligning (1) eller rettere i Bethe-formlen. Deraf følger at Barkas-effekten også påvirker afhængigheden af stoppeevnen for positive ioner på kerneladningstallet. Det er da også sammenligning af præcisionsmålinger med helium- og brintioner og deraf afledte korrektioner [11] der gav anledning til en meget omfattende teoretisk aktivitet i ad-

⁵Jeg følger her traditionen i atomfysikken, hvor man helst bruger gaussiske i stedet for SI-enheder og sætter $4\pi\epsilon_0 = 1$

skillige år og mange steder.

På baggrund af vores erfaring med Barkaseffekten for lette ioner [12] blev det en overkommelig opgave at se hvad der sker for højere kerneladningstal Z_1 . Jeg skal ikke komme ind på detaljerne fordi resultatet – vist i figur 8 – var absolut nedslående: Samtlige tre kurver stiger til omtrent det dobbelte, og selv stoppeevnen for et neutralt projektil kommer til at ligge højere end det der er målt for en ion i ladningslignevægt.

I en sådan situation er der kun to valgmuligheder. Enten beregner man højere-ordens korrektioner eller går man tilbage til square # 1 og starter på et mere eller mindre modificeret grundlag. De fleste fysikere vil foretrække den sidste option, men den kræver at en alternativ løsning kan findes. I dette tilfælde går den ud på at undgå rækkeudvikling i Z_1 .

Binær stoppeteori

I dette afsnit skitseres kernen i en stoppeteori der i sit fysiske indhold ligger meget tæt op ad Bohrs model men hvis konkrete udformning adskiller sig ganske meget fra forbilledet. De væsentlige ingredienser skitseres, men for detaljerne henvises den interesserede læser til originalarbejdet [13].

I Bohrs teori indgår en klassisk elektron der er harmonisk bundet til kernen. Denne bindings mest fremtrædende virkning er at vekselvirkningen med projektilet begrænses til afstande mindre end den såkaldte adiabatradius

$$a_{ad} = \frac{v}{\omega_v}. \quad (5)$$

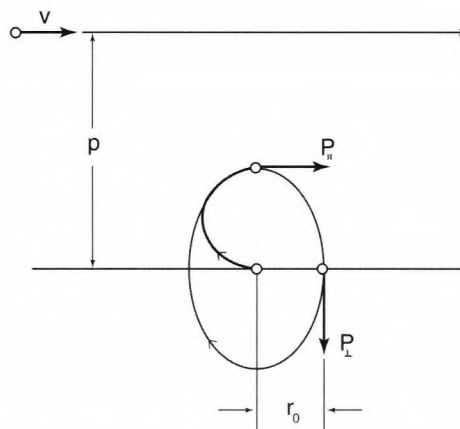
Tanken er derfor nærliggende – og ikke ny – at beskrive bindingens effekt ved en modifikation af vekselvirkningspotentialet. For ren Coulomb-vekselvirkning ville man for eksempel skrive [14]

$$V(r) = -\frac{Z_1 e^2}{r} e^{-r/a_{ad}}, \quad (6)$$

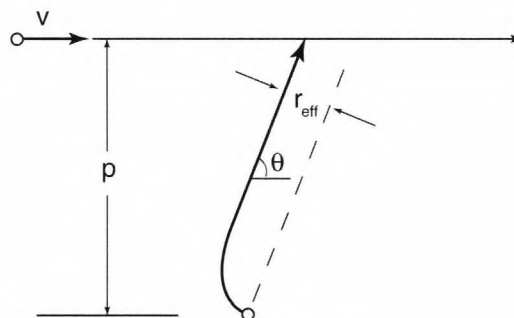
og for et afskærmet potential ville man modificere afskærmningsradius. Derved opnås en reduktion af problemet til en binær stødproces som kan løses ved hjælp af velkendt klassisk spredningsteori. Spredningsintegralerne skal evalueres numerisk, men man undgår at dele problemet op i nære og fjerne stød og Barkaseffekten er inkluderet fra starten.

Spørgsmålet er så hvor godt modellen reproducerer resultaterne i de to grænser for hhv. nære og fjerne stød hvor Bohr-teoriens resultater danner standard. Da bindingens effekt er fremtrædende for de fjerne stød er det denne grænse der kræver nærmere undersøgelse.

⁶Bemærk at så længe interessen fokuseres på energioverførslen fra projektilet til elektronen er det uden interesse hvordan elektronen siden hen kommer af med sin energi



Figur 9. Fjern vekselvirkning i Bohr-modellen.



Figur 10. Fjern vekselvirkning i binært stød.

Figur 9 viser banen af en elektron under og efter påvirkning af en ladet partikel. Når vekselvirkningen er afsluttet løber elektronen på en ellipsebane⁶, d.v.s. der er overført impuls fra projektilet til elektronen både parallelt med og vinkelret på projektilets bane.

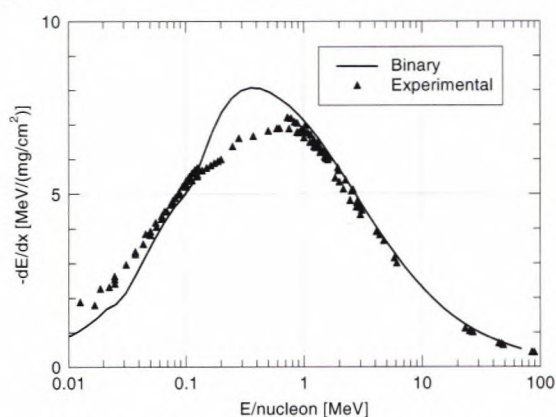
I et binært stød på stor afstand overføres impuls fortrinsvis vinkelret på banen. Som det første skridt viste vi at begge modeller forudsiger eksakt samme impulsoverførsel vinkelret på projektilbanen. Potentialets eksponentielle form i ligning (6) er essentiel i så henseende.

Næste spørgsmål er hvordan vi kan nå frem til den del af energioverførslen der skyldes impulskomponenten parallelt med projektilbanen fra en binær teori. Denne energi kan alternativt karakteriseres som en potentiel energi $\frac{1}{2} m \omega_v^2 r_0^2$ i en afstand r_0 defineret i figur 9 der samtidigt definerer det overførte impulsmoment $r_0 P_{\perp}$. Også i et binært stød overføres imidlertid et impulsmoment, og i dette indgår en afstand r_{eff} , som er indtegnet i figur 10. Beregning af denne afstand kræver lokalisering af banerne i laboratoriesystemet. Det går lidt ud over standard lærebogstof i klassisk mekanik men byder ikke på særlige problemer.

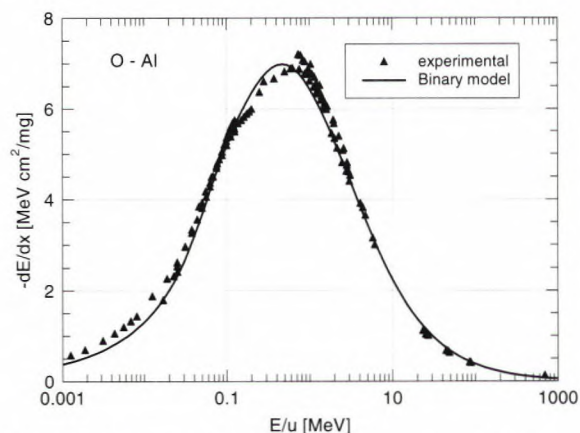
Det overraskende resultat er nu at r_{eff} i grænsen for fjerne stød bliver *eksakt* identisk med r_0 . Derved har vi en mulighed for at beregne overførslen af potentiel energi, på trods af at der ikke indgår nogen ekstern kraft i det binære spredningsproblem.

For at sikre at disse fjerne stød ikke er så fjerne at de ikke betyder noget for det samlede energitab er vi gået et skridt længere og har sammenlignet forudsigelser for Barkaseffekten som funktion af stødafstanden. Jeg vil her nøjes med at konstatere at disse sammenligninger blev mere end tilfredsstillende.

I den anden ende, for helt nære stød, går begge modeller over i Rutherfordspredning, men der er et mellemområde, hvor Bohr-modellens forudsigelser bliver tvivlsomme for lav projektilhastighed. I dette område kan vi i første omgang bare konstatere at den binære models forudsigelser ser mere troværdige ud, men en nærmere retfærdiggørelse må ligge i systematisk sammenligning med eksperimenter eller evt. med beregninger foretaget på basis af mere tilforladelige modeller end det foreliggende. Den sidste kategori mener jeg ikke findes for tunge ioner på indeværende tidspunkt.



Figur 11. Oxygen i aluminium: Binær teori uden skalkorrektion.



Figur 12. Oxygen i aluminium: Binær teori med skalkorrektion.

En sammenligning med eksperimenter er vist i figur 11. Det ses at man er på rette vej men at overensstemmelsen med måleresultaterne fortsat er dårligere end i figur 7.

Skalkorrektion

Elektronernes banebevægelse kan kun ignoreres for

høje projektilhastigheder og er ikke taget hensyn til i det der er refereret indtil nu. Denne effekt kaldes skalkorrektion fordi den er mest udpræget for indreskalselektroner. Der er skrevet meget om emnet fordi effekten er vanskelig at behandle indenfor konventionel stoppeteori, men med afbildningen på et binært spredningsproblem reduceres problemet til en koordinatstransformation af den type man kender fra kinetisk gasteori.

Praktisk beregning kræver kendskab til hastighedsfordelinger for elektroner i de enkelte skaller som kan bestemmes ud fra tabellerede atomare bølgefunktioner. Figur 12 viser at denne korrektion er væsentlig. Overensstemmelsen med måledata er nu *bedre* end i figur 7.

Kvantekorrektion

Som nævnt tidligere har Felix Bloch udledt Bohrs og Bethes stoppeformler som grænsetilfælde af en mere omfattende teori. Den såkaldte Bloch-korrektion bliver i litteraturen ofte anset som en lille korrektion til Bethe-formlen. Med udgangspunkt i Bohr-formlen kan Blochs teori imidlertid benyttes til at definere den inverse korrektion, d.v.s. en størrelse der er ubetydelig i det klassiske og væsentlig i Born-området. Dette giver mulighed for at udvide gyldighedsområdet af den binære teori. Et eksempel følger nedenfor.

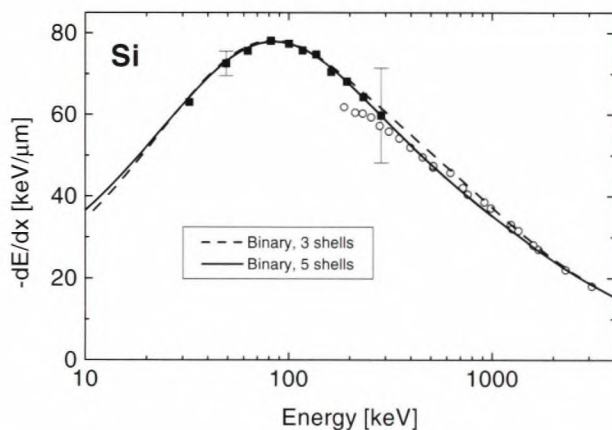
Øvrige korrektioner

Relativistiske effekter skal inkluderes ved høj hastighed. Den vigtigste korrektion er kinematisk og har allerede været udledt af Bohr selv i 1915, men man har længe været opmærksom på en relativistisk kvantekorrektion som blev behandlet overbevisende af Jens Lindhard og Allan Sørensen [15]. Indtil videre ser det ud til at denne teori er den definitive beskrivelse af tunge ioners nedbremsning i det høj- og ultrarelativistiske område.

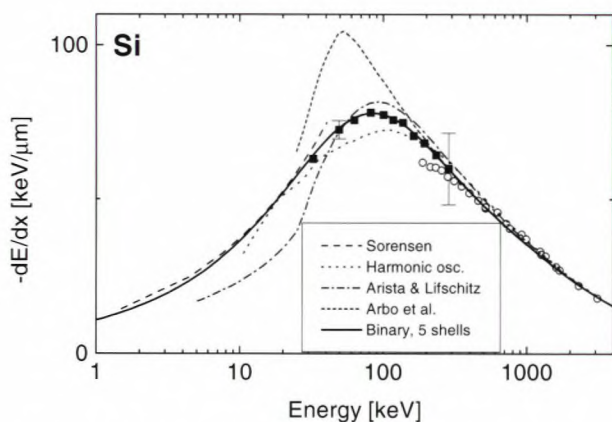
I lavhastighedsområdet skal der tages hensyn til energitab ved ladningsskiftprocesser, ved projektileksitation og ved elastiske stød med atomkernerne. Vi arbejder intensivt med de to første effekter. Bidraget fra elastiske stød er meget vel undersøgt og kan nemt inkluderes når der er behov for det.

Antiprotonstopning

For at teste kvaliteten af vor kvantekorrektion – som er en højhastighedskorrektion – er det ønskeligt ikke at blande den sammen med relativistiske effekter. Det opnås ved at man går over til lette ioner. Allan Sørensen har påpeget at antiprotoner har særlig interesse i kollisionsteorien fordi de forbliver punktladninger under gennemtrængning af stof. Derfor spiller effekter som afskærmning, projektileksitation og ladningsskift ikke nogen rolle og coulombekscitation af materialets elektroner bliver den dominerende proces over et meget stort hastighedsområde.



Figur 13. Antiprotoner i silicium: Binær teori med skal- og kvantekorrekction. Målinger fra [16].



Figur 14. Samme system som figur 13; sammenligning med beregninger fra litteraturen. Fra [17].

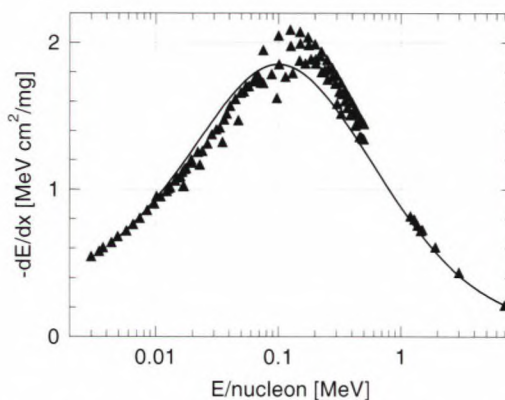
En gruppe ved Aarhus Universitet omkring Erik Uggerhøj og Søren Møller har udført omhyggelige målinger af antiprotonstopning ved CERN med de seneste data sammenfattet i [16]. Målet var oprindeligt at afgøre en kontrovers der var opstået omkring størrelsen af Barkaseffekten. Godt nok var denne kontrovers næsten afklaret da det ambitiøse måleprogram var kommet i gang. Til gengæld er der nu samlet en serie data for otte materialer som er helt ideel til at teste stoppeteori.

Figur 13 viser data for silicium over et energiinterval på to dekader. De eksperimentelle symboler indikerer forskellige måleopstillinger. Der er god overensstemmelse mellem den binære teori og data, også for de øvrige syv materialer, der ikke er vist i figuren. Det bemærkes at der ikke er benyttet tilpasningsparametre i teorien. Figur 14 viser at den binære teori indtil videre er konkurrencedygtig også i sammenligning med andre. Årsagen hertil er den effektive behandling af Barkas- og skalkorrektion.

Andre systemer

Bortset fra de to sidste billeder har jeg her koncentreret mig omkring oxygen i aluminium for at illustrere de forskellige fysiske effekter. I praksis er der undersøgt

et stort antal systemer, og indtil videre har vi ikke identificeret situationer hvor teorien i sin seneste udformning tager helt fejl. For at kunne lave beregninger skal vi imidlertid have et tilforladeligt sæt oscillatorstyrker. Disse bestemmes fra eksisterende tabelværker med optiske data over et bredt spektralområde fra eV- til langt op i keV-området.



Figur 15. Helium i amorft kulstof. Måledata kompileret af H. Paul [9].

Jeg vil slutte denne gennemgang med α -partikler som historien begyndte med. Figur 15 viser data for helium i amorft kulstof. I lyset af spredningen mellem forskellige sæt eksperimentelle data rammer vi ret godt, men nærmere inspektion viser at den beregnede position for stoppemaksimet ligger noget lavt. Selv om vores teori slet ikke er konciperet med α -partikler for øje, så er der med figur 13 skabt en vis forventning om præcise forudsigelser også for andet end tunge ioner, d.v.s. at teorien kan bidrage til sortering af måledata efter kvalitet. Det kan vi ikke på baggrund af figur 15 inden input er optimeret. F.eks. kan heliums ladningstilstand næppe beskrives tilforladeligt ved Thomas-Fermi-udtrykket (4).

Afsluttende bemærkninger

Den teoripakke der er beskrevet her tager direkte udgangspunkt i Bohrs teori fra 1913. Selve stødteori er essentielt klassisk men suppleres ved en simpel kvantekorrekction der er uafhængig af stoppematerialet. Kvanteegenskaberne indgår indirekte via de optiske parametre samt via ladningstilstandene for de gennemtrængende ioner.

Når man bevæger sig i så traditionsrigt et forskningsområde kan man ikke undgå at forholde sig til en række hellige køer som man møder undervejs. Een af dem, den tidligere nævnte effektivladning, har vi gjort vort bedste for at aflive [18], men om det lykkedes er endnu uvist. Andre er vi kørt uden om, f.eks. den såkaldte lokaltæthedstilnærmelse som er manges foretrukne værktøj i denne branche. Vi har også fundet løsningen for et over 25 år gammelt paradoks, nemlig hvorfor Barkaseffekten kan skifte fortegn for kanaliserede tunge ioner, men af pladshensyn vil jeg nøjes med

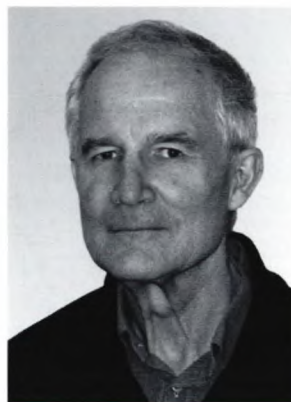
en henvisning til originalarbejdet [19].

Selv om man har lært meget om partiklers nedbrem-
sning siden 1913, hvoraf en del indgår i vores pakke,
så finder jeg det bemærkelsesværdigt at alle centrale
dele af Bohrs klassiske teori, især materialernes op-
tiske konstanter som hoved-input, kan opretholdes som
udgangspunkt for kvantitative beregninger 90 år senere.

Referencer:

- [1] N. Bohr, Philos. Mag. **25**, 10 (1913).
- [2] J. Thorsen, Kvant **10 no. 2**, 7 (1999).
- [3] L. Meitner, K. Freitag, Z. Physik **37**, 481 (1926).
- [4] H. Bethe, Ann. Physik **5**, 324 (1930).
- [5] F. Bloch, Ann. Physik **16**, 285 (1933).
- [6] N. Bohr, J. Lindhard, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. **28 no. 7**, 1 (1954).
- [7] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics* (Wiley, New York, 1975).
- [8] N. Bohr, Phys. Rev. **59**, 270 (1941).
- [9] H. Paul, *Stopping power for light ions*,
www.exphys.uni-linz.ac.at/stopping.
- [10] P. Hvelplund, Kvant **10 no. 2**, 3 (1999).
- [11] H. H. Andersen, H. Simonsen, and H. Sørensen, Nucl. Phys. **A125**, 171 (1969).

- [12] H. H. Mikkelsen, P. Sigmund, Phys. Rev. A **40**, 101 (1989).
- [13] P. Sigmund, A. Schinner, Europ. Phys. J. D **12**, 425 (2000).
- [14] J. Lindhard, Nucl. Instrum. Methods **132**, 1 (1976).
- [15] J. Lindhard, A. H. Sørensen, Phys. Rev. A **53**, 2443 (1996).
- [16] S. P. Møller, E. Uggerhøj, H. Bluhme, H. Knudsen,
U. Mikkelsen, K. Paludan, and E. Morensoni, Phys. Rev. A
56, 2930 (1997).
- [17] P. Sigmund, A. Schinner, Europ. Phys. J. D **15**, 165 (2001).
- [18] P. Sigmund, A. Schinner, Nucl. Instrum. Methods B **174**, 535
(2001).
- [19] P. Sigmund, A. Schinner, Phys. Rev. Lett. **86**, 1486 (2001).



Peter Sigmund er professor
ved Fysisk Institut på
Syddansk Universitet.

Fred Hoyle død

Michael Cramer Andersen, Kvant

Den engelske astrofysiker og forfatter Fred Hoyle døde 20. august 2001 i en alder af 86 år. Hoyle er mest kendt for Steady State teorien som et alternativ til Big Bang-teorien. Han forklarede også grundstofsyntesen i stjernerne og mente at livet kunne være spredt i Universet f.eks. via kometer. Allerede som 9-10 årig kunne han navigere efter stjernerne og han observerede hele nætter med teleskop fra han var 13 år.

I Steady State teorien (fra 1948) har Universet eksisteret altid og har ikke nogen begyndelse. Nyt stof skabes i det tomme rum og danner nye galakser. Den konkurrerende teori om en eksplosionsagtig begyndelse døbte Hoyle 'big bang-teorien' med tydelig ironi.

Hoyle var en glimrende popularisator og blev kendt i vide kredse gennem en serie radioforedrag om "The Nature of the Universe" i 1950. Han udbredte teorierne om kosmologi undertiden i heftig debat med fortalere for big bang teorien, George Gamow.

Men big bang blev mest populær da den kunne forklare flere ting og da den fik bekræftet en vigtig forudsigelse i 1965 – den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling – betød det reelt dødsstødet for Steady State. Baggrundsstrålingen kunne ikke passes naturligt ind i teorien trods ihærdige forsøg i slutningen af 1960'erne.

Hoyle ville ikke blindt acceptere en ortodoks kosmologi men var åben for alternativer. Der findes stadig tilhængere af Steady State teorien blandt hans elever, f.eks. Narlikar. Sammen med astronomerne Geoffrey og Margaret Burbidge

og kernefysikeren William Fowler forklarede Hoyle i 1957 hvordan grundstofferne bliver syntetiseret i stjerner. Hoyle argumenterede for, at alle kulstof-, silicium- og jernatomer i Jorden og vores legemer engang blev fremstillet af brint i fjerne stjerner der har levet og er døde længe inden vores Solsystem blev dannet. Dette arbejde står næsten uændret den dag i dag. Nobelprisen i 1983 gik til S. Chandrasekhar og W. Fowler for teoretiske og eksperimentelle studier af kernereaktioner af betydning for stjernernes struktur og (kemiske) udvikling. Mange følte at Fred Hoyle havde fortjent at dele denne ære. Det var Fred Hoyle der forudsagde en resonans i kulstofkernen som gør, at tre helium-kerner lettere kan fusionere til kulstof. Kulstof-resonansen blev senere fundet. Uden den ville der ikke være så meget kulstof og tunge grundstoffer og uden kulstof intet liv.

Hoyle var fascineret af livets oprindelse og udbredelse. Han skrev flere science fiction bøger, bl.a. "Den sorte tåge" (1957), om en interstellar gaståge der kommer tæt på Jorden og viser sig at indeholde (intelligent) liv. Hoyle mente, at kometer kunne være stedet hvor livet opstår og vi har kun observeret en lille hale af de komplicerede organiske molekyler som findes der. Om der virkelig er liv i kometerne er uvist, men man identificerer stadigt mere og mere komplicerede kulstof-forbindelser i kometer.

Fred Hoyle forskede i solens fysik, solsystemets dannelse, galaksernes struktur, kvasarer og han formulerede en ny teori for gravitation. I 1966 blev han direktør for Institute of Theoretical Astronomy, hvor en ny generation af astrofysikere blev udklækket bl.a. Stephen Hawking, Brandon Carter og Martin Rees. Hoyle vil blive husket som en original og dristig forsker ofte med kontroversielle idéer der gik på tværs af mainstream-forskningen.

Kilder: Nekrolog i *The Times* 22. august 2001. Hoyles bøger;
<http://members.tripod.com/~infini-3/Books/hoyles.htm>

Atmosfærens kemi og globale klimaforandringer

Camilla Bacher og Ole John Nielsen, Kemisk Institut, Københavns Universitet.

Vores syn på den atmosfære der omgiver os, har ændret sig ganske drastisk de sidste halvtreds år. Tidligere betragtede videnskabsfolk atmosfæren som værende en inaktiv kappe der omslutter Jorden. Man havde kvantificeret de hyppigst forekommende gasser i atmosfæren: Nitrogen, oxygen, ædelgasserne, kuldioxid, vand og ozon. Det er forholdsvis inaktive stoffer rent kemisk, og det regnede man derfor med at atmosfæren også var.

I 1960'erne kom de første systematiske målinger af CO_2 , som viste at koncentrationen var steget jævnt siden målingerne var påbegyndt i 1958. Sidenhen er tilsvarende stigninger konstateret for en lang række andre gasser som f.eks. metan og lattergas.

I begyndelsen af 1980'erne viste målinger af ozonsøjlen over Antarktis en kraftig formindskelse af ozonkoncentrationen i det Antarktiske forår. Det såkaldte ozonhul var forårsaget af menneskeskabte gasser. Nyere studier viser en sammenhæng mellem indholdet af luftbårne partikler i byluft og hyppigheden af lungekræft.

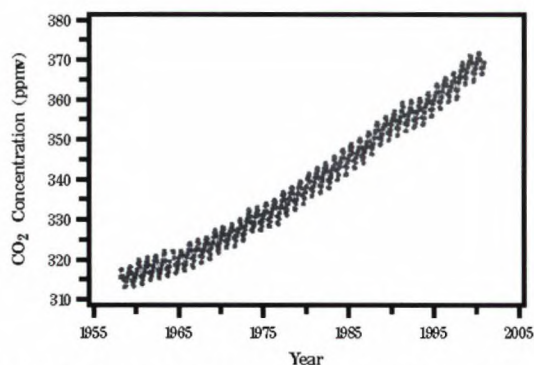
Fremkomsten af nye detektionsmetoder har afsløret et væld af kemiske forbindelser i atmosfæren, og vi begynder langsomt at forstå det komplicerede samspil der er mellem naturlige og menneskeskabte kemiske forbindelser, samt hvordan de nedbrydes – og det står fast, at atmosfæren ikke er en uendelig størrelse, men en størrelse som vi er i fuld gang med at ændre ved vore aktiviteter.

Drivhuseffekten

Solens gennemsnitlige energi-input ved toppen af Jordens atmosfære er 342 W m^{-2} . Der reflekteres ca. 107 W m^{-2} som giver 235 W m^{-2} til opvarmning af Jorden. For at opretholde energibalancen køler Jorden sig ved at udsende infrarød stråling som et sort legeme. Det har været kendt i over hundrede år at vanddamp, CO_2 og CH_4 , naturligt tilstede i Jordens atmosfære, bidrager til en opvarmning af Jorden ved deres absorption af Jordens varmestråling. Det er det, vi kalder for drivhuseffekten. I folkemunde har ordet fået en negativ klang, men uden drivhuseffekt ville gennemsnitstemperaturen ved jordoverfladen være ca. -20°C og verdenshavene være frosset til is. Vi skylder kort sagt drivhuseffekten vor eksistens!

Det er værd at bemærke, at de tre gasser der udgør 95% af atmosfæren (kvælstof, ilt og argon) slet ikke absorberer i det infrarøde område. De væsentligste drivhusgasser er vand og CO_2 , som indtager en fjerde og femteplads på listen over stoffers forekomst i atmosfæren. For at kunne absorbere i det infrarøde

kræver det, at molekylets dipolmoment ændrer sig, når molekylet vibrerer.



Source: Dave Keeling and Tim Whorf (Scripps Institution of Oceanography)

Figur 1. CO_2 indholdet i luften over Mauna Loa, Hawaii. Grafen viser en jævn stigning i CO_2 koncentrationen siden 1958 hvor målingerne påbegyndtes. Man ser desuden den sæsonafhængige variation der skyldes, at CO_2 om sommeren i stor stil optages i træer og græsser ved fotosyntese.

Menneskeheden har påvirket miljøet de sidste par tusinde år gennem afskovning og ændrede jordbrugsvaner, men det var først med den industrielle revolution i det 19. århundrede, at vores forandring af atmosfærens kemiske sammensætning for alvor tog fart. En af de første til at påpege, at udslippet af CO_2 ved afbrændingen af fossile brændstoffer kunne få den globale temperatur til at stige, var den svenske kemiker Svante Arrhenius, som i 1896 forudsagde, at en fordobling af indholdet af CO_2 i luften ville medføre en temperaturstigning på $5\text{--}6^\circ\text{C}$.

Siden 1958 har man foretaget systematiske målinger af atmosfærens indhold af CO_2 (se figur 1) som viser en jævn stigning af CO_2 -koncentrationen i atmosfæren. Også andre drivhusgasser forekommer hyppigere, f.eks. metan, lattergas, ozon (i troposfæren) og CFC/HCFC gasser (se figur 2).

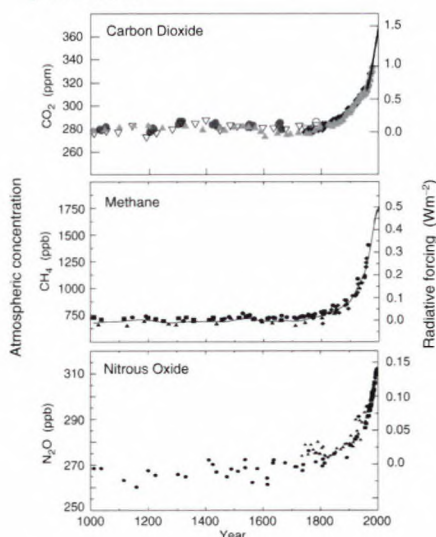
Isoleret set er der ingen tvivl om at stigningen i koncentrationen af drivhusgasser i atmosfæren vil få temperaturen til at stige.

Hvad gør en gas til en god drivhusgas?

For at bidrage til drivhuseffekten skal en gas helst absorbere i spektralområdet mellem $0,7$ og $1,5 \mu\text{m}$ hvor Jordens varmeudstråling topper. Men det betyder også meget, at absorptionen finder sted i områder, hvor der ikke findes stærke spektralbånd fra andre molekyler der i atmosfæren forekommer i høj koncentration, såsom CO_2 , O_3 , H_2O og CH_4 . Endvidere er det oplagt, at større koncentration giver mere absorption ligesom mole-

kylernes levetid spiller en afgørende rolle: Jo længere levetiden er, jo mere kan de nå at absorbere før de er forsvundet.

(a) Global atmospheric concentrations of three well mixed greenhouse gases



Figur 2. Den globale koncentration i atmosfæren af CO₂, CH₄ og N₂O over de sidste 1000 år.

Et eksempel på en "ny" drivhusgas er SF₅CF₃, der første gang blev identificeret i 2000. Med "ny" menes, at SF₅CF₃ ikke dannes naturligt, men formentligt er introduceret i atmosfæren som følge af menneskelige aktiviteter. På nuværende tidspunkt er det ikke klart hvad kilderne til SF₅CF₃ er.

Figur 3 viser det infrarøde spektrum af SF₅CF₃ sammen med en graf der viser Jordens varmestråling. Det meget stærke vibrationsbånd omkring 900 cm⁻¹ – falder netop i det spektralområde hvor varmestrålingen har maksimum. Endvidere er molekylet stort set inaktivt rent kemisk, og selvom levetiden endnu ikke er bestemt præcist, skønnes den at være mellem 100 og 1000 år – under alle omstændigheder meget lang! SF₅CF₃ er så stærk en drivhusgas, at den er i størrelsesordenen 20.000 gange mere effektiv som drivhusgas end CO₂ (per molekyle).

Molekylernes levetid

I atmosfæren er der – afhængigt af de pågældende molekylers kemiske egenskaber – adskillige måder hvorpå gasser fjernes. De vigtigste er

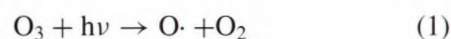
– optagelse i væskefasen

Stoffer der er opløselige i vand kan opløses i oceanerne og i dråber i atmosfæren som herefter udfældes som nedbør. CO₂, der stort set er kemisk inaktivt, forsvinder på sidstnævnte måde. Et andet eksempel er svovldioxid fra afbrænding af svovlholdigt kul, der omdannes til svovlsyre i atmosfæren. Svovlsyreholdig nedbør har på denne måde bidraget alvorligt til en forsurening af floder og søer op gennem 80'erne. I dag er problemet mindre,

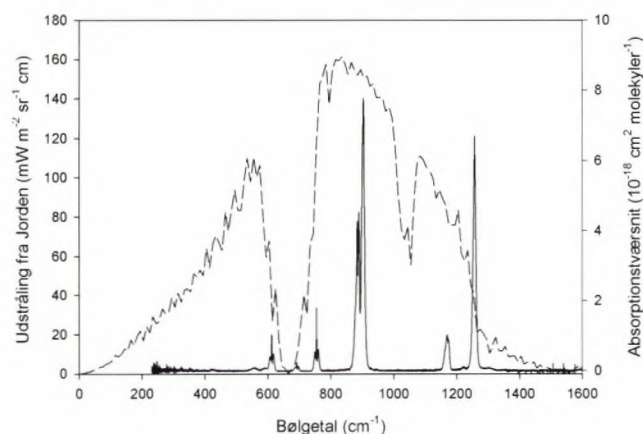
da miljøregulativer har ført til mindre udledning af SO₂.

– fotolyse

Mange kemiske bindinger kan brydes når de rammes af sollys. I stratosfæren absorberer ilt effektivt næsten al UV-stråling med en bølgelængde mindre end 250 nm. Ozon fotolyses af stråling med bølgelængde kortere end 310 nm. Selvom hovedparten af denne stråling fjernes i stratosfæren, trænger lys med denne bølgelængde langt nok ned i atmosfæren til at kunne spalte ozon i troposfæren. Det fraspaltede ilt-atom kan reagere med vand og danne to OH radikaler, der er særdeles reaktive:



Det er den vigtigste kilde til hydroxyl-radikaler, som initierer nedbrydningen af mange stoffer i atmosfæren.



Figur 3. SF₅CF₃ er et eksempel på en særdeles effektiv drivhusgas. Molekylet har stærke absorptionsbånd netop i det område, hvor Jordens varmestråling topper. De områder i jordudstrålingen hvor der mangler stråling, skyldes adsorption fra hhv. CO₂ (omkring 650 cm⁻¹) og O₃ (omkring 1000 cm⁻¹).

– reaktion med stoffer som OH, O₃, NO_x, og Cl

De fleste af de organiske molekyler der er til stede i atmosfæren indeholder brint, og for dem er reaktion med OH det væsentligste dræn i troposfæren. Hvis et stof ikke indeholder brint, er det stort set inaktivt med hensyn til reaktion med OH, og så får stoffet en lang levetid hvorved det kan transporteres op i stratosfæren.

Når atmosfæreforskere skal bestemme hvor meget de enkelte drivhusgasser hver især bidrager til at forøge drivhuseffekten, må man således kende gassernes strålingsegenskaber samt hastigheden hvormed stoffet fjernes fra atmosfæren. Sidstnævnte foregår bl.a. ved at bestemme hastighedskonstanterne for de enkelte reaktioner, hvilket foregår i eksperimentelle kamre i laboratoriet, hvor man undersøger reaktionerne under varierede tryk- og temperaturforhold for at efterligne forholdene forskellige steder i atmosfæren.

Ozonlaget og de "farlige" molekyler

Stoffer som udsendes som følge af menneskelig eller anden form for biologisk aktivitet, frigives ved jordoverfladen. Som en tommelfingerregel kan man regne med, at molekyler med en levetid på mindre end et år vil nedbrydes fuldstændigt i troposfæren. Øvrige molekyler vil transporteres op i stratosfæren hvor intensiteten af det mere kortbølgede UV-lys stiger, således at der til sidst bliver mulighed for at bryde bindinger der ellers ikke kunne brydes i troposfæren.

Dette er nøglen til forståelse af problematikken omkring CFC-gasserne og ozonlaget. CFC-gasser er kemisk inaktive, og nedbrydes først ved fotolyse efter at de er transporteret højt op i stratosfæren. De frigjorte klor-, og bromatomer deltager så i en kredsløb hvor de fungerer som katalysatorer for nedbrydningen af ozon. Eksempelvis kan man sammenligne to molekyler: CF_2Cl_2 har en levetid på 102 år, men erstatter man et kloratom med et brintatom (CF_2HCl) bringes levetiden ned på 13 år. I industrien har man netop erstattet CFC-gasserne med gasser med de samme gode kemiske egenskaber, men med brintatomer i molekylet således at de kan nedbrydes allerede i troposfæren.

Ozon giver et temperaturfald og stigning

Nedbrydningen af ozon har som bekendt konsekvenser for mennesker, dyr og planter gennem den forøgede mængde UV-stråling der når Jorden fra Solen, men også klimaet påvirkes af ozonnedbrydningen. Normalt omdannes en del af den energi der optages i ozonmolekylet ved fotolysen i stratosfæren til termisk energi i produkterne, men når ozonen fjernes sker der færre spaltninger. Dette giver anledning til en lokal nedkøling, som igen medfører at en mindre mængde varme ledes nedad.

Siden år 1750 er ozonkoncentrationen i troposfæren steget med 30-40% på grund af forøget udledning af

organiske forbindelser og nitrogenoxider. Dette har forøget strålingsbalancen med ca. $0,35 \text{ W m}^{-2}$ (figur 4). Denne forandring af strålingsbalancen varierer stærkt med tid og sted og vil ændre sig hurtigt med ændringer i udledningen af ozondannende stoffer.

Ændring i strålingsbalancen forårsaget af ikke-drivhusgasser

Figur 4 viser den gennemsnitlige relative ændring i strålingsbalancen siden 1750 forårsaget af drivhusgasser og andre mekanismer. Der er 4 kilder til ændring af strålingsbalancen som ikke direkte har noget med drivhusgasser at gøre: partikler, ændring i brug af landområder, variationer som skyldes Solen samt vulkanudbrud. De første to kilder har direkte menneskeskabte komponenter hvorimod de sidste to er en helt igennem naturlig ændringer af strålingsbalancen, som vi mennesker ikke kan påvirke.

Den største usikkerhedsfaktor i vores nuværende forsøg på at kvantificere de enkelte bidrag til den temperaturforøgning vi har set, kommer fra partikler. Partikler kan køle ved at reflektere den indkommende stråling, eller de kan absorbere varmestråling og dermed bidrage til drivhuseffekten. Endvidere er partikler involveret i skydannelse, der også er med til at regulere temperaturen.

Status over atmosfærens tilstand

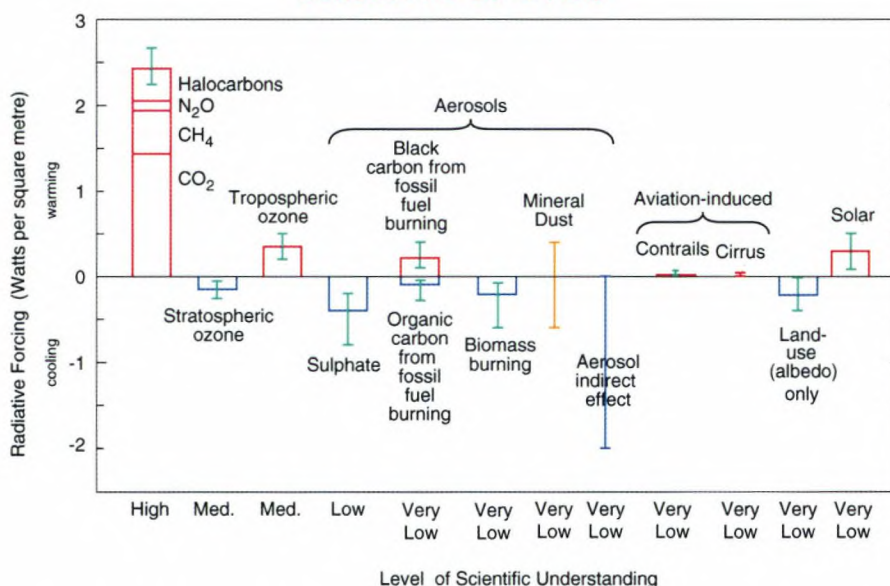
Der er mange forskellige måder hvorpå vores kemiske forandring af atmosfærens sammensætning påvirker det globale klima. I 1988 nedsatte de Forenede Nationer og den Internationale Meteorologiske Organisation et panel af højt anerkendte forskere med det formål at vurdere de informationer der er relevante for at opnå en vurdering af risikoen for at der faktisk finder en klimaforandring sted som følge af menneskelige aktivite-

Atmosfærens sammensætning.

Bestanddel	Kemisk formel	Indhold ¹	Kilder
Kvælstof	N_2	78,1%	Biologisk (fra bakterier)
Ilt	O_2	20,1 %	Biologisk (fotosyntese)
Vanddamp	H_2O	0-3%	Fordampning fra oceaner m.v.
Argon	Ar	0,93%	Fra Jordens indre
Kuldioxid	CO_2	360 ppm	Fra fossile brændstoffer, oceanerne og biosfæren
Neon	Ne	18,2 ppm	Fra Jordens indre
Helium	He	5,2 ppm	Fra Jordens indre
Metan	CH_4	1,7 ppm	Biogene og antropogene kilder
Brint	H_2	0,55 ppm	Biogene, antropogene og fotokemiske kilder
Lattergas	N_2O	0,31 ppm	Biogene og antropogene kilder
Kulmonooxid	CO	50-200 ppb	Fotokemiske og antropogene kilder
Ozon i troposfæren	O_3	10-500 ppb	Fotokemisk
Ozon i stratosfæren	O_3	0,5-10 ppm	Fotokemisk
Kulstofforbindelser (minus metan)		5-20 ppb	Biogene og antropogene kilder
Klorholdige stoffer		3,8 ppb	85% antropogene

[1] Tabellen viser atmosfærens sammensætning, og de intervaller, der er angivet under "indhold, afspejler den regionale og vertikale variation. F.eks. er mængden af vand meget varierende. Enheden ppm er "parts per million" altså millionte-dele per volumen hvor ppb tilsvarende er milliardte-dele. Koncentrationen angives i mol-brøk af gassen relativt til tør luft.

The Global Mean Radiative Forcing of the Climate System for the Year 2000, Relative to 1750



Figur 4. Strålingsforcingen der skyldes en række menneskeskabte og naturlige påvirkninger. Boksene angiver IPCCs vurdering af de enkelte størrelser, og bjælkerne usikkerhederne på de enkelte faktorer. Illustration fra IPCCs rapport fra 1996.

ter. Dette er *The Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)*, som i år udgiver deres tredje rapport. IPCC konkluderer i rapporten:

“der er nye og stærkere beviser for, at hovedparten af den temperaturstigning der er observeret de sidste 50 år kan tilskrives menneskelige aktiviteter”.

Samtidig står det fast at vi bliver flere og flere mennesker på Jorden, og at alle ønsker en højere levestandard hvilket vil forøge presset på de begrænsede ressourcer der er til rådighed. Det vil blive en stor opgave for fremtidens ingeniører og videnskabsfolk at sikre, at disse problemer ikke sker på bekostning af det miljø som vi er en del af.

Referencer:

- [1] “Introduction to Atmospheric Chemistry” – en glimrende bog skrevet af Harvard professor Daniel Jacob. Bogen udkom i en trykt udgave på Princeton University Press i 2000. www-as.harvard.edu/people/faculty/djj/book
- [2] The International Panel for Climate Changes hjemmeside, hvor man blandt andet finder deres rapport fra 2001 med en evaluering af status for vor viden om de globale klimaforandringer, den såkaldte “Third Assessment Report”. www.ipcc.ch
- [3] J. Seinfeld og S. Pandis: “Atmospheric Chemistry and Physics. Wiley Interscience, 1998. En god og omfattende bog som benyttes på grundkurset i atmosfærekemi på fjerde studieår på miljøkemistudiet på Københavns Universitet.



Camilla Bacher er kemistuderende på Københavns Universitet og skriver speciale ved Ford Research Laboratories i Dearborn, Michigan og ved National Center for Atmospheric Research i Boulder, Colorado.



Ole John Nielsen er forskningsprofessor på Kemisk Institut under “the Copenhagen Global Change Initiative” – CoGCI programmet. Han interesserer sig især for eksperimentelle studier af atmosfærekemiske processer.

Dr. N. P. Wieth–Knudsen Observatoriet

Michael Quaade, formand for Astronomisk Selskab.

Observatoriet er opkaldt efter Dr. Niels Palle Wieth–Knudsen, som arbejdede her helt frem til sin død i 1993. I dag videreføres det astronomiske arbejde i observatoriet af Astronomisk Selskab.

Placeringen af observatoriet er meget velvalgt. Tisvilde er et af de allerbedste steder i Danmark med hensyn til astronomiske observationer. Nattehimmelen oplyses ikke af større byer i nærheden og luften er efter danske forhold meget rolig, så gengivelsen af himmellegemerne i kikkerten ikke udtværes af lufturo eller drukner i baggrundslys. Enhver, der går udenfor under åben himmel en mørk og klar nat i Tisvilde, vil ikke kunne undgå at lægge mærke til den helt usædvanligt smukke stjernehimmel.



Figur 1. Wieth-Knudsen Observatoriet. Teleskopet er opstillet under den halvkugleformede kuppel på en muret sokkel, der går hele vejen ned gennem bygningen. Observatoriet er ikke ret stort – hele bygningen ville kunne stå på et af 8,2 m spejlene i ESO's *Very Large Telescope* næsten uden at stikke udenfor.

Observatoriets indretning

Det var Wieth–Knudsen selv, der stod for opførelsen af observatoriet i 1959. Takket være en omhyggelig planlægning er den lille bygning udnyttet til det yderste. Arbejdet blev udført af tømrermester Ove Westphal og hans daværende lærling Peter Svensson. I 1999 kom Peter Svensson atter på arbejde i observatoriet, denne gang var opgaven at lægge et nyt tag, da det gamle efterhånden var blevet utæt.

Bygningen er opført af gasbetonblokke og måler 7 x 7 meter. Indretningen er domineret af det, man i dag kalder et køkken–alrum. Her findes opholds- og arbejdsfaciliteter som køkken, spiseplads og skrivebord. Der er et soveværelse med to senge og et rummeligt

klædeskab. Sengene tjener også som opbevaringsplads, der i dag rummer to ekstra madrasser til at lægge på gulvet. Observatoriet rummer også et lille badeværelse med bruser og toilet.

Kuppelrummet er hævet med gulvet i to meters højde i et hjørne af bygningen. Kuppelen har en diameter på knap 3 meter og man kommer derop ad en trappe fra stuen. Midt i kuppelrummet er teleskopet anbragt på en solid, muret sokkel. Den drejelige kuppel har en lodret spalteåbning, så kikkerten kan rettes mod hele himmelhalvkuglen. Loftshøjden under kuppelrummet er lidt lavere end i resten af huset. I en del af dette areal – delvis inde under trappen, der fører op til kuppelrummet – er der indrettet et ganske lille mørkekammer til fotoarbejde. Ellers er denne del af huset udnyttet til køkkenskabe og et redskabsrum med adgang udefra.

Observatoriet ligger på en grund med et areal på 1600 m². Tisvilde Hegn ligger kun få hundrede meter fra grunden og der er omkring tre kilometer til Kattegat.

Wieth–Knudsens observationsarbejde

Wieth–Knudsen havde en doktorgrad i Astronomi fra Universitetet i Lund i Sverige. Emnet for hans doktordisputats var analyser af dobbeltstjerner baner. En dobbeltstjerne er to stjerner, der kredser omkring hinanden. De er ofte svære at observere, fordi de ses som to meget tætliggende lysprikker i kikkerten. Opgaven ved sådanne observationer er at måle de to stjernes indbyrdes position. Det er vigtigt at gentage observationerne med nogen tids mellemrum, fordi stjernerne på grund af banebevægelsen flytter sig i forhold til hinanden. Et omløb tager ofte adskillige år. Wieth–Knudsen foretog disse målinger med et specielt okular forsynet med mikrometerskruer.

Et andet af Wieth–Knudsens astronomiske virkefelter var måling af tidspunkter for måneokkultationer. Når Månen bevæger sig forbi en stjerne og skjuler den, kaldes det for en måneokkultation. Stjernernes position på himlen er forholdsvis velkendt, mens Månen på grund af tyngdekraften fra Solen, Jorden og de andre planeter bevæger sig på en måde, der ikke er så ligetil at forudberegne med stor præcision. Ved at måle, hvornår Månen passerer en stjerne med en kendt position, kan man få et bedre kendskab til dens banebevægelse. *IOTA* – *International Occultation Timing Association* – har indstiftet en pris, der bærer Wieth–Knudsens navn. Den tildeles personer, der har gjort en særlig indsats indenfor dette felt.

Wieth–Knudsens hustru, fru Inger Wieth–Knudsen tog del i meget af det astronomiske arbejde. Det kunne f.eks. være en del af tidtagningen ved observation af

måneokkultationer. Observatoriet rummer et pendulur, der er indbygget i væggen således at en ekstra sekundviser på urværkets bagside kan ses fra kuppelrummet. Pendulets længde er afpasset, så uret tikker netop en gang hvert sekund. Wieth-Knudsen havde opøvet evnen til at kunne bestemme tidspunktet for en okkultation med tiendedele sekunders nøjagtighed ved at vurdere hvornår i perioden mellem to tik, at stjernen forsvandt bag Månen. Viseren i kuppelrummet gav sekunderne og nede i stuen kunne fruhen holde øje med minutterne.

Observatoriets teleskoper

Det 20 cm Meade LX3 teleskop, der i dag er anbragt i observatoriet er den tredje kikkert, der er opstillet her.

Det første teleskop, der blev opstillet i 1959 var en Newton spejlkikkert med en spejldiameter på 11 cm og en længde på omkring 70 cm. Wieth-Knudsen havde selv bygget teleskopet og opstillingen, bl.a. med en motor fra en gramfon. Motoren drejer kikkerten langsomt, med én omgang i døgnet fra øst mod vest. På den måde korrigeres for Jordens rotation så kikkerten følger stjernerne når de bevæger sig hen over himlen i nattens løb.

Da Wieth-Knudsen fyldte 60 i 1969 fik han et 30 cm spejl i fødselsdagsgave. Teleskopet med dette spejl var ligeledes konstrueret af ham selv. Det stod i observatoriet frem til 1999. Dette teleskop var meget stort – næsten to meter langt – og kunne kun med nød og næppe være i det lille kuppelrum. Hertil kom et system af kontravægte, der var anbragt vinkelret ud til en afstand på over en meter fra midten af teleskopet. På spejlkikkerter af denne type er okularet anbragt nær kikkertens øverste ende. Når kikkerten rettedes mod objekter, der stod højt på himlen, var det derfor nødvendigt at stå på en stige for at kunne se ind i okularet. Disse omstændigheder resulterede i, at der var temmelig trangt i kuppelrummet. Dengang var observationer ved teleskopet derfor et typisk enmandsarbejde og Wieth-Knudsen var da også i almindelighed ene om at foretage observationerne, assisteret af fru Wieth-Knudsen når det var påkrævet. I dag er dette teleskop taget ned for at blive renoveret, bl.a. med ny aluminiumsbelægning på spejlet. I Astronomisk Selskab håber vi, at det i løbet af et par år bliver muligt at opføre en lidt større kuppelbygning, hvor det store teleskop kan blive opstillet under bedre forhold.

Siden 1999 har der stået et Meade LX3 Schmidt-Cassegrain teleskop, udlånt af Astronomisk Selskabs instrumentpulje. Dette teleskop har et spejl med en diameter på 20 cm. Optikken er en sindrig kombination af to spejle og en korrektionslinse, der giver en meget kompakt konstruktion. Selv om teleskopet har en optisk brændvidde på to meter, kan det alligevel være i et kikkertrør på mindre end en halv meter. Takket være den kompakte kikkert er der nu god plads i kuppelrummet – vi har en enkelt gang været 16 personer deroppe

på en gang. Der er en række okularer til teleskopet, så man kan variere forstørrelse og synsfelt alt efter hvilke objekter man vil observere. Teleskopet kan påmonteres et kamera eller et elektronisk fotometer til måling af stjerners lysstyrke.

Observatoriets aktiviteter i dag

I 1999 overdrog fru Inger Wieth-Knudsen observatoriet til Astronomisk Selskab. Dette fandt sted den 4. juli, netop på 40-års dagen for observatoriets indvielse i 1959. Astronomisk Selskab er den ældste og største af Danmarks 15–20 astronomiske foreninger. Foreningen har omkring 800 medlemmer og varetager landsdækkede formidlingsvirksomhed i form af bl.a. bladudgivelse og foredragsarrangementer. Som et væsentligt led i denne virksomhed har foreningen påtaget sig den opgave at videreføre Dr. N.P. Wieth-Knudsen Observatoriet som aktivt astronomisk observatorium.

Observatoriets virksomhed falder i dag indenfor tre områder:

Formidling overfor offentligheden.

Undervisningsmæssige sammenhænge.

Amatørastronomers observationsprojekter.

Formidlingsarbejdet er til stor glæde for mange mennesker. Et grundlæggende kendskab til det Univers, vi lever i, er et centralt led i moderne menneskers kulturelle baggrund. De alment tilgængelige observatorier som f.eks. Rundetårn i København og Urania Observatoriet i Aalborg spiller en helt central rolle i formidlingen af denne del af vores kultur, som ikke kan opnås på anden måde. På grund af de gode observationsforhold er Wieth-Knudsen Observatoriets et af landets bedste til dette formål. I Tisvilde er det muligt at se galakser i mange millioner lysårs afstand og de svagt lysende tåger i Universet, hvor stjernerne fødes og dør. Naturligvis kan man ikke få noget at se, der kommer i nærheden af de farvestrålende optagelser, som foretages ved de store observatorier med teleskoper på flere meters diameter i f.eks. Sydamerika og på De Canariske Øer, men det ændrer ikke ved den kendsgerning, at ingen billeder kan erstatte oplevelsen af at se de fjerne objekter med egne øjne.

Der er åbent hus i observatoriet den anden og sidste lørdag i hver måned, og til disse arrangementer kommer der mange gæster fra nær og fjern.

Astronomi er et populært emne i undervisningen, både i folkeskolen og gymnasiet. For et par år siden blev astronomi efter flere års forarbejde med forsøgshold mv. oprettet som egentligt valgfag i gymnasiet. Herudover indgår undervisningsforløb indenfor astronomi i mange andre fag, f.eks. fysik og naturfag.

En ekskursion til et observatorium kan være et højdepunkt i et sådant forløb. På denne måde kan eleverne komme til at se nogle af de objekter, de har arbejdet med i timerne. Wieth-Knudsen Observatoriet har kontakt til flere skoler på Sjælland samt Frederiksborg Gymnasium i Hillerød. På længere sigt er det planen, at

eleverne skal kunne få optagelser og andre former for observationer med hjem til brug i projektarbejde mv.

Danmarks Lærerhøjskole, Uni-C, Tycho Brahe Planetarium og Undervisningsministeriet, har søsat et projekt, *ION — Internetbaserede Observatorier i Naturfagsundervisningen*. Planen er, at elever skal kunne benytte teleskoper via fjernbetjening fra deres skole. Sammen med bl.a. Aarhus Universitets Ole Rømer Observatorium skal Wieth-Knudsen Observatoriet udrustes til at kunne indgå i dette projekt.

Wieth-Knudsen Observatoriet skal naturligvis også fremover kunne bruges af amatørastronomer til forskellige observationsprojekter. Det gælder naturligvis ikke mindst projekter, der kræver specialiseret udstyr, som enkeltpersoner normalt ikke har adgang til. Astronomisk Selskab har et par elektroniske fotometre til måling af stjerners lysstyrke. Et af disse er anbragt i observatoriet, hvor det kan bruges i forbindelse med 20 cm teleskopet. Dette instrument er i år bl.a. blevet anvendt til måling af lysstyrkevariationerne hos et antal variable stjerner.



Figur 2. Astronomisk Selskab fik i begyndelsen af 1980'erne to 20 cm Meade LX3 teleskoper med tilhørende fotoelektriske fotometre. Et af disse er opstillet i observatoriet. Takket være den kompakte Schmidt-Cassegrain optik er der god plads, selvom teleskopet har en brændvidde på to meter.

Planer for fremtiden

Et moderne astronomisk observatorium er altid i udvikling. Dette gælder også Wieth-Knudsen Observatoriet. De fremragende observationsforhold på stedet lægger naturligt op til, at vi i Astronomisk Selskab har planlagt en lang række forbedringer af udstyret.

Først og fremmest vil vi gerne have et større og mere moderne teleskop. Vi har indsendt ansøgninger til en række fonde om midler til et 40 cm teleskop af nogenlunde samme konstruktion som det, der i øjeblikket står i observatoriet. Dette teleskop vil have en brændvidde på fire meter og vil være velegnet til at studere et lille felt på himlen ved stor forstørrelse.

Et teleskop alene er ikke tilstrækkeligt til moderne observationsprojekter. Vi har planer om at anskaffe et moderne højfølsomt elektronisk CCD kamera og med

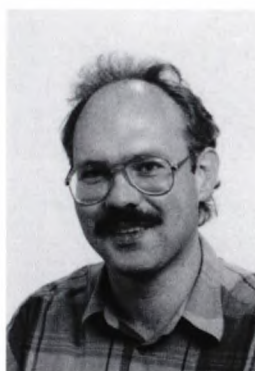
tiden vil vi også tage udstyr til optagelse af stjernespektre i brug.



Figur 3. Wieth-Knudsen Observatoriet er ikke begrænset til observerende astronomi, men rummer også fremragende faciliteter til teoretiske overvejelser. Her har forfatteren fundet sig til rette i Tisvilde afdelingen af Teoretisk Astrofysik Center.

I vore dage spiller computerteknologi en helt central rolle indenfor alle former for astronomi. Derfor har vi søgt at få førende computerfirmaer som sponsorer for teknisk udstyr. På den måde har vi opnået at få et computersystem, der indenfor dansk astronomi kun overgås af det udstyr, der findes på universiteternes forskningsinstitutter. Firmaerne *eHuset* og *Sun Microsystems* har doneret en kraftig, avanceret computer af typen *Sun Enterprise 3000* som er særdeles velegnet til astronomiske formål: styring af teleskoper og andre instrumenter, analyse og efterbehandling af observationer, databaser over himmelobjekter mv.

På trods af al begejstringen over de nye muligheder vil vi naturligvis ikke glemme de kvaliteter, der findes i ældre instrumenter. Dr. Wieth-Knudsens 30 cm teleskop er af fremragende optisk kvalitet og vi vil som nævnt forsøge at skaffe midler til at opføre endnu en kuppelbygning til dette teleskop. Det har en forholdsvis kort brændvidde, knap to meter, og vi derfor være en glimrende partner til det ovenfor omtalte 40 cm teleskop. 30 cm teleskopet vil være uovertruffent til at gengive større felter på himlen ved en forholdsvis lav forstørrelse.



Michael Quaade er cand.scient. i fysik og astronomi, og arbejder som systemkonsulent i TeleDanmark. Han er formand for Astronomisk Selskab siden 1999.

Wieth-Knudsen Observatoriet

Fortsat fra bagsiden:

snit, man kan f.eks. spørge om vinteren 2000/01 i middel var en høj- eller lavindeks vinter.

Hele ideen bag indekset er, at det beskriver væsentlige forhold ved vestenvindstrømningen over Nordatlanten. Som vist på figuren på forsiden af dette nummer af Kvant giver en situation med højt NAO-indeks en kraftig vestenstrømning mod Nordvesteuropa, hvorimod lavt indeks giver en svækket vestenstrømning rettet mod Sydeuropa, mens Nordeuropa får vind fra øst og nordøst.

Vestenstrømningen er især betydningsfuld for Nordvesteuropa om vinteren, hvor indstrålingen fra solen er så begrænset, at vedvarende mildt vejr kræver advektion af lun luft fra vest. Således vil en mild vinter i Nordvesteuropa kræve, at NAO-indekset er højt, mens en lavindeks vinter vil være domineret af kold luft fra øst – se figuren på forsiden. Derimod gør solindstrålingen, at indekset siger mindre om vejret på de andre årstider.

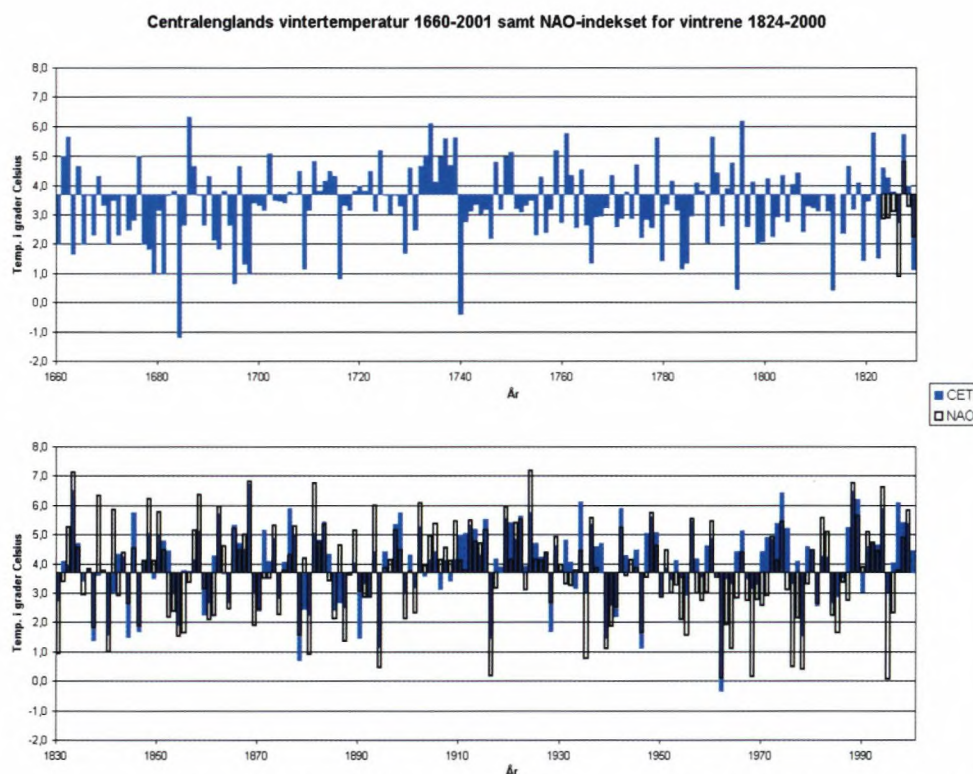
NAO-indekset rummer imidlertid information om langt mere end det Nordvesteuropæiske vejr. Betragter man figuren på forsiden af Kvant nøjere, ser man et af NAO'ens særlige kendetegn - den såkaldte temperaturvippe mellem Nordvesteuropa og Grønland. Er NAO-indekset højt, således at Nordvesteuropa har en

mild vinter, får Grønland en køligere vinter end normalt. Lavt indeks giver den omvendte situation, hvor kulden befinder sig over Nordeuropa. Som illustreret på figuren kan NAO-indeksets fase spores i anomalier for vintertemperaturen så langt væk som det nordlige Stillehav, således at det har betydning helt op på hemisfærisk skala. Overraskende når man ved, at indekset blot er baseret på to nordatlantiske stationer.

Havstrømmenes indflydelse på NAO

Det er netop NAO-indeksets evne til at beskrive vintervejret på store dele af den nordlige halvkugle, der gør det så interessant. Kunne man finde eventuelle årsager til skift i NAO'en, ville det give mulighed for forudsigelse af specielt vintervejret på nordlige breddegrader. Man kunne forestille sig, at havstrømsændringer i Nordatlanten kom forud for et skift i NAO-indekset – altså en situation som ENSO (El Niño – Southern Oscillation), men det er i den sammenhæng værd at erindre, at NAO modsat ENSO kan udvise lige så stor variation fra dag til dag som fra år til år – de to indekser er af helt forskellig natur.

Desuden er havstrømmene i oceanerne og herunder også Nordatlanten i høj grad vinddrevne. En ændring i NAO-indekset og dermed tryk- og vindmønsteret over Nordatlanten vil derfor igen påvirke havstrømmene.



Figur 2. Vintertemperaturen over Centralengland [1] skal her forstås som gennemsnittet af december, januar og februars temperaturer. NAO-indekset [2] er ligeledes givet ved middelen gennem de tre vintermåneder. Bemærk at NAO-indekset er normaliseret til at have samme middel og udsving som CET, men ikke har grader Celsius som enhed.

Det mest sandsynlige er derfor, at det gennemsnitlige NAO-indeks over en tidsskala som eksempelvis en vinter er koblet til, men ikke styret af, de Nordatlantiske havstrømme; en stor del af overfladestrømmene er drevet af vinden, men middelvindens styrke og retning bestemmes af trykfordelingen i atmosfæren. Da oceanerne imidlertid er et langt større og trægere varmereservoir end atmosfæren, vil dennes temperatur og dermed trykfordeling set over længere tidsskala være bundet til havene.

På nuværende tidspunkt tyder det dog ikke på, at vekselvirkningen mellem ocean og atmosfære udviser en form for systematik, der muliggør forudsigelse af NAO-indekset langt frem i tiden.

NAO og den globale opvarmning

Den væsentligste følge af NAO er en omfordeling af varme og kulde på den nordlige halvkugle. Dette ændrer ikke ved den globale middeltemperatur, men ved den præcision hvormed den kan bestemmes tilbage i tiden. Dette skyldes, at antallet af målestationer er ujævnt fordelt over klodens overflade; dækningsgraden af Europa og Nordamerika er langt større end de øvrige landmasser, for ikke at tale om oceanerne, hvor der stort set ikke er målestationer i de centrale dele. En inhomogenitet i placeringen af målestationer, der har været langt mere udtalt før i tiden. En NAO-højindeks situation, hvor de europæiske landmasser oplever en opvarmning, mens området ved Beringstrædet og de nordøstligste egne af Canada vil have koldere vejr end normalt, vil f.eks. registreres som en "global opvarmning", hvis man kun har målinger til rådighed fra Europa og det østlige USA.

Det er i dette lys, man skal betragte målte temperaturserier, som er mere end et århundrede gamle; selvom de er uden fejl, så giver de *ikke* et fyldestgørende billede af temperaturen på globalt endsige hemisfærisk plan, fordi fænomener som NAO har en regionalt opvarmende/nedkølede effekt hvis mønster dækker en hel halvkugle.

Som det burde være enhver bekendt, er der i disse år megen opmærksomhed på global opvarmning. Der hersker ingen tvivl om, at den globale middeltemperatur er steget over de seneste årtier. Det store spørgsmål er, hvorvidt denne stigning skyldes naturlige årsager og/eller er en antropogen effekt (udledning af drivhusgasser). For at kunne vurdere om temperaturstigningen er usædvanlig er det derfor væsentligt at vide om tilsvarende temperaturændringer er forekommet under tiden siden seneste istid.

Inden for historisk tid kendes begrebet "den lille istid" som har sat sit præg på Europa fra 1600- til 1800-tallet. Særligt huskes det, at vinteren 1683/84 i England var tilstrækkeligt kold til, at Themsens i London frøs til så man kunne holde marked på den.

Gennem årene har mange derfor argumenteret for, at der skulle være tale om kold periode i det globale

klima, hvilket i givet fald ville være et tegn på, at klimaet også havde varieret kraftigt, før udledningen af drivhusgasser begyndte.

At kunne rekonstruere det globale klima i denne periode er altså vigtigt for den aktuelle forståelse af klimaet og dets udvikling.

Har Centralenglands vintertemperatur været bestemt af NAO'en?

På globalt plan foreligger der som sagt kun et rimeligt antal målinger for de seneste godt hundrede år, men for det Nordatlantiske område strækker målingerne sig længere tilbage. Da man i NAO-sammenhæng kan nøjes med mindre end global dækning, kan det lade sig gøre at føre NAO-indekset godt 175 år tilbage i tiden [1].

Man kan sammenligne NAO-indekset med andre meteorologiske oplysninger, for at undersøge mulige korrelationer. Der er i denne forbindelse én meteorologisk tidsserie, der er særegen, hvad angår længde og kontinuitet – Centralenglands temperatur (CET). Gennem de sidste 342 år har man pålidelige temperaturmålinger fra det centrale England [2].

Betragtes forsiden nok en gang ses det, at vintertemperaturen i England er høj ved et højt NAO-indeks og lavere ved et lavt indeks. På figuren på Kvants bagside (figur 1) ser man da også, at vintre med høj henholdsvis lav CET på hemisfærisk skala udviser samme temperaturanomalier som år med højt henholdsvis lavt NAO-indeks. Dette viser sig ikke at være et tilfælde, idet de valgte år, hvor CET har været høj henholdsvis lav, også er år hvor NAO-indekset har været højt eller lavt. I figur 2 ses CET og NAO plottet mod hinanden for samtlige vintre, hvor der findes pålidelige målinger. For de 177 vintre, hvor der findes pålidelige data for både CET og NAO, har man en korrelation på 0,74, svarende til at NAO'en er årsag til over halvdelen af variationen i CET.

Den lille istid – et NAO fænomen?

Et interessant perspektiv er, hvorvidt kulminationen på den lille istid i slutningen af 1600-tallet var et NAO fænomen. Som det fremgår af figur 2, er perioden 1660–1700 præget af en overvægt af kolde vintre, om end der dog også er enkelte ret varme vintre. Såvel den koldeste vinter, 1683/84, som den femte varmeste, 1685/86 forefindes i netop denne periode.

Det er også interessant, at CET-kurven viser, at selvom vintrene under den lille istid var kolde, så har der ikke været tale om ekstremer, idet den koldeste vinter kun var 0,9 grader Celsius koldere end vinteren 1962/63, som var en typisk NAO-lavindeks vinter. Desuden er det kun to vintre der er koldere end vinteren 1962/63. Selv under den lille istid var det altså en usædvanlig begivenhed, at Themsens frøs til. Det er måske netop derfor, at så mange har valgt at forevige markedet på Themsens – man maler det ekstraordinære,

ikke almindeligheder.

Vintrene under kulminationen på den lille istid var dermed ikke væsentligt forskellige fra f.eks. det 20. århundredes vintre, der var blot flere kolde vintre i slutningen af 1600-tallet. Ydermere var det under den lille istids kulmination muligt at have meget varme vintre. Det forekommer mærkeligt, at man pludselig kan få år med så varme vintre under en global kuldeperiode.

Det virker mere sandsynligt, at selve kulminationen på den lille istid kan forstås som en periode med tendens til hyppige situationer med lavt NAO-indeks, og dermed en temperaturfordeling på halvkugleplan med plusser og minusser, som ofte favoriserer koldt vintervejr i Nordvesteuropa. Hvis den lille istid er stærkt NAO-relateret, må man derfor forvente, at temperaturgennemsnittet over den nordlige halvkugle ikke vil vise fænomenet så tydeligt (se Mann's rekonstruktion af de seneste 1000 års temperaturer [4]). Omvendt, hvis der er nogle dybereliggende og mere hemisfærisk dækkende årsager bag den lille istid, så skal vi netop forvente, at de slår kraftigt igennem i rekonstruktionerne.

Eller sagt på en anden måde: Forstås den lille istid som et NAO fænomen, så fremstår temperaturstigningen i løbet af det tyvende århundrede i højere grad som noget ekstraordinært i klimakurven for de seneste 500 år, hvilket styrker ideen om, at denne stigning er menneskabt.

Referencer:

- [1] P. D. Jones, T. Jónsson og D. Wheeler (1997) "Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observation from Gibraltar and South-West Iceland", *Int. J. Climate*, bind 17, side 1433–1450. Data stammer fra hjemmesiden: www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao.htm
- [2] Temperaturserien for Centralengland: G. Manley (1974) "Central England Temperatures: monthly means 1659 to 1973". *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, bind 100, side 389–405. D. E. Parker, T. P. Legg og C. K. Folland (1992) "A new daily Central England Temperature Series, 1772–1991". *Int. J. Climatol.*, bind 12, side 317–342. Data stammer fra Hadley Centre for climate prediction and research's hjemmeside: www.metoffice.com/research/hadleycentre/obsdata/CET.html
- [3] Figurene er udarbejdet vha. følgende hjemmeside oprettet af NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center Boulder, Colorado: www.cdc.noaa.gov/composite

- [4] Rekonstruktionen af den nordlige halvkugles middeltemperatur gennem de seneste 1000 år er udarbejdet af M. E. Mann, R. S. Bradley og M. K. Hughes og kan ses på følgende hjemmeside hos World Data Center for Paleoclimatology, Boulder, Colorado, USA: www.ngdc.noaa.gov/paleo/pubs/mann_99.html



Aksel Walløe Hansen er lektor ved Geofysik Afdeling Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik, og arbejder med klimaproblemer med en faglig baggrund inden for meteorologi.



Bo Møllesø Vinther er geofysik-studerende ved Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik og har i foråret 2001 sammen med Rune Vildhøj skrevet bachelorprojekt om sammenhængen mellem de troposfæriske canadiske vintervortexer og den nordatlantiske oscillation med Aksel Walløe Hansen som vejleder.



Rune Vildhøj er også geofysikstuderende ved Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik og medforfatter til bachelorprojektet ovenfor.

Nyt fra Dr. N.P. Wieth-Knudsen Observatoriet

Der er nu bedre muligheder for at besøge Wieth-Knudsen Observatoriet, idet Astronomisk Selskabs medlemmer i Tisvilde og Helsingør har dannet en kreds, der varetager drift og vedligeholdelse af observatoriet. Kredens formand er: Carl-Otto Jakobsen, Tisvilde Bygade 70, 3220 Tisvilde, e-mail: coj47@ofir.dk, tlf: 48 70 80 89.

Dermed er der nu åbent hus to gange om måneden. Den anden og den sidste lørdag hver måned kan man gratis og

uden forudbestilling besøge observatoriet uanset vejret. Det er naturligvis kun ved klart vejr at man kan se stjerner og andre himmellegemer gennem kikkerten, men observatoriet selv er da også et besøg værd.

Medlemmer af Astronomisk Selskab kan som hidtil bo nogle dage i observatoriet og have teleskop mv. til rådighed. Det koster 150 kr. i døgnnet og man får naturligvis den nødvendige instruktion i brug af udstyret. Der er to sengepladser samt to løse madrasser til at lægge på gulvet. Se også artiklen om observatoriet på side 26.

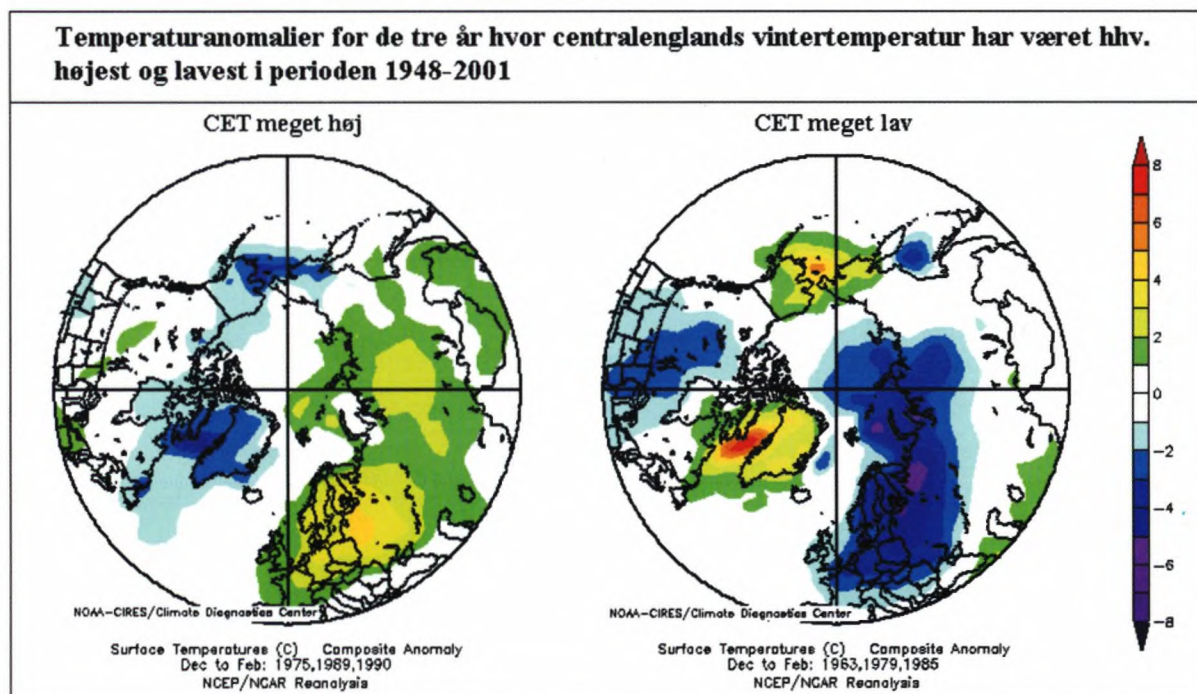
Den lille istid – NAO eller fakta? En vigtig brik i forståelsen af den globale opvarmning

Aksel Walløe Hansen, Bo Møllesøe Vinther og Rune Vildhøj, Geofysik Afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik, Københavns Universitet.

“I morgen forventes den nordatlantiske oscillation (NAO) at være i lavindeksfasen, så det bliver koldt og klart vejr, mens der senere på ugen antageligt vil ske et omslag til højt indeks, således at vi kan forvente mildning med en del nedbør.”

Dette er unægtelig en spøjs vejrudsigt, men ikke

desto mindre kunne man lige så godt lade NAO-indeksets værdi indgå i vejrudsigten som så meget andet såsom temperatur og tryk. Faktisk er NAO-indekset ikke andet end et udtryk for trykforskellen mellem en station på Island og en station på Azorerne eller i Lisabon/Gibraltar.



Figur 1. Vintertemperaturen over Centralengland [1] og temperaturanomalierne [3] er givet ved gennemsnittet af december, januar og februars temperaturer/anomalier.

Er lufttrykket lavt ved Island og højt ved Azorerne er NAO-indekset således højt, mens en situation med en sydligere placering af lavtrykket vil give et lavt NAO-indeks. Hermed er den indledende vejrudsigt mere forståelig - alt hvad der menes er, at et lavtryk som

passerer i nærheden af Island vil trække fronter og mildning op over landet. Almindeligvis finder man dog ikke i NAO-sammenhæng de daglige udsving særligt interessante. Det man bruger NAO-indekset til er gennem-

Fortsættes side 29.