

Kig på Månen og forstå Jordens klima

Forskere fra Danmark og Sverige vil udvikle et system, der automatisk kan måle jordskinnet – dvs. det lys, der reflekteres fra Jorden op på Månen. Målingerne skal hjælpe forskerne med at forstå klimaændringer på Jorden.

Af Peter Thejll, Hans Gleisner, Lars William Pedersen, og Andrew Mattingly

■ Når solen kaster sit lys på Jorden, reflekteres lyset ud i rummet og noget af det falder på månen. Dette lys på den ellers mørke del af månen kaldes *jordskin*, eller *askelys* på grund af den svage grå farve, det har. Det kan især ses ved nymåne, hvor Jorden jo er "fuld" set fra Månen.

For forskerne er jordskin interessant, da målinger af jordskinnets styrke fortæller om Jordens reflektivitet, og reflektiviteten kan fortælle os meget om Jordens klima. Jordens klima er nemlig tæt bundet til strålingsbalancen – altså balancen imellem hvor meget energi, der kommer ind, og hvor meget, der slipper ud igen. Jo mere energi, der reflekteres ud i verdensrummet, jo koldere klima.

Jordens reflektivitet kaldes i fagsproget også for *albedo*, der er defineret som forholdet mellem tilbagekastet og modtaget stråling. Jordens albedo afhænger af mængden af skyer (fordi de er hvide, ligesom is og sne), af for-



Jordens overflade har varieret albedo. Arktisk is og skyer er hvide, ørkener er lyse og skovene er mørke. Mørkest er havet, hvor en stor del af strålingen fra solen optages. Se også faktaboksen om albedo.

delingen af land og hav (havet er normalt den mørke del, ørkerne er lyse), og af mængden af støv i luften.

Hvis Jordens albedo øges kastes mere lys tilbage i rummet – energi der så ikke kan varme Jorden op. Dette vil alt andet lige medføre en afkøling af Jordens klima. Omvendt vil en reduktion af Jordens albedo betyde en opvarmning. Man kan også forestille sig, at en klimændring vil medføre ændringer i albedoen – for eksempel kunne øget opvarmning og dermed fordampning medføre flere skyer – skyer der ville kaste mere lys ud i rummet og derved køle Jorden ned igen.

En måling af albedoen fortæller os altså direkte noget om klimaet. Men det er ikke nemt at måle Jordens albedo – vi er for tæt på!

Satellitter er i princippet ideelle til formålet, da de svæver ude i rummet og kan lave billeder af hele Jorden. Problemet er, at satellitter koster en formue, og når de først er ude i rummet, er de ikke til at reparere eller justere. Deres følsomhed aftager også med tiden og for at korrigere for dette, må man udstyre satellitten specielt fra begyndelsen, eller foretage observationer af uforanderlige områder på Jordens overflade. Nogle af de satellitter, man har målinger fra, er aldrig tiltænkt et liv som vogtere af Jordens albedo, og målinger fra disse er derfor af tvivlsom værdi. Andre er faktisk opsendt med denne slags målinger for øje, men alligevel er det ikke sikkert, at de måler nøjagtigt nok. Et billigere og bedre målesystem er derfor påkrævet. En gruppe astronomer og klimaforskere i Danmark og Sverige er nu gået i gang med at bygge et system til automatisk måneobservation – for at udlede Jordens albedo.

Nøjagtige målinger er nødvendige

Målinger af Jordens albedo skal være meget nøjagtige, før de for alvor kan bruges til noget. Hvor nøjagtige de skal være, kan man svare på ved at kigge i en model af klimaet. Ved at "skrue på" modellens albedo kan man se

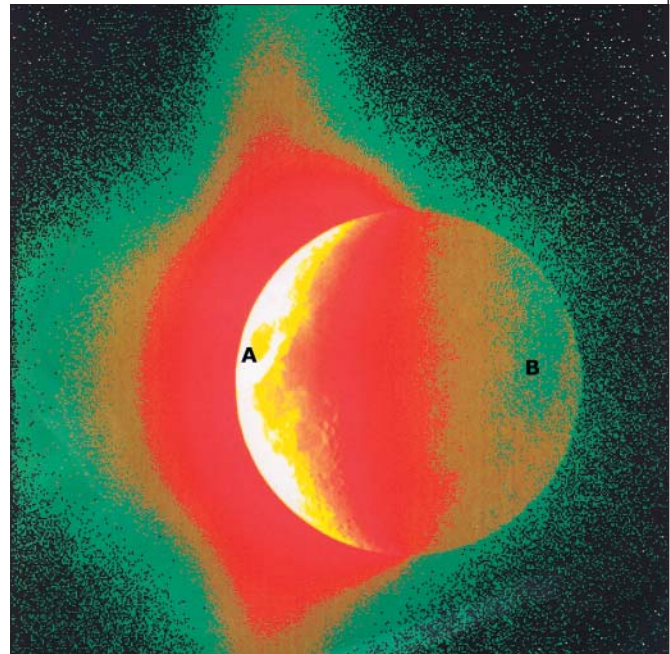
Månens belysning



Leonardo da Vinci's tegning af Månen, fra ca. 1506. Jordskinnets er gengivet.

Sollyset på Månen (dvs. måneskinnet) er omtrent 10.000 gange stærkere end jordskinnets, og det udgør det største praktiske problem for observationer, hvor man vil måle de to typers relative størrelse. Forholdet er mindst ved nymåne og observationer er derfor nemmest nær denne månefase. For at udføre en relativ måling af jordskin og måneskin, udvælger man faste områder på Månen – f.eks. krateret Grimaldi i den ene side og "havet" Crisium i den anden side. Disse to områder skal så befinde sig i forskellig belysning – det ene i jordskin og det andet i måneskin – og dette sætter en praktisk grænse for, hvornår man kan lave observationer inden for en Månecyklus. I praksis kan man observere, når Månen er imellem 20 og 80 % belyst af Solen.

Månens overflade har som bekendt mørke og lyse områder, og Månens egen albedo er derfor også en faktor i observationerne. Måneoverfladen ændrer sig meget langsomt på en menneskelig tidsskala, så vi kan tillade os at antage, at månealbedoen er konstant. Men vi har selvfølgelig brug for at vide, hvad den er i f.eks. Grimaldi og Crisium. Hertil benyttes kort af Månens overflade baseret på observationer fra rumsonden Clementine. Yderligere er det nødvendigt at kende



Månen lige efter nymåne, august 2006. 350 billeder af Månen er optaget med et 16-bit CCD kamera og lagt sammen – derved bliver det muligt, uden et filter over den stærkt lysende del, at se både sollyset i venstre side (ved A) og jordskinnets klart stærkere end himmelbaggrunden. Logaritmen af intensiteten vises her i falske farver.

Månens orientering og afstand til Jorden og Solen.

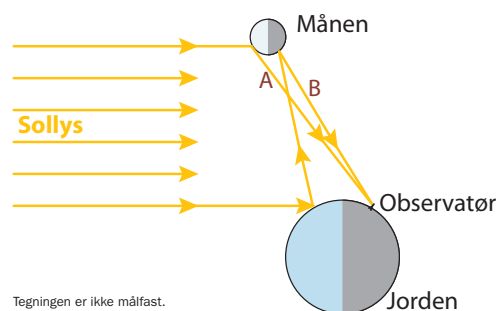
Jordskinnets selv varierer lidt, fordi Jordens albedo afhænger af de skiftende skyformationer. Lyset, der kastes på Månen fra Jorden, er jo et middel over den del af Jorden, der er belyst af Solen, som kan ses fra Månen. Man får således ikke albedo-information fra enkelte punkter på Jorden, men snarere fra seglformede områder, og dette skal

tages med i betragtningen, når man sammenligner med albedo-data opmålt på andre måder. F.eks. kan satellitbilleder af Jorden benyttes ved at udregne, hvilke dele af billederne der bidrager til jordskinnets på det pågældende tidspunkt. Sådanne "scenarier" for albedoen er blevet sammenlignet med jordskinsmålinger, og man har bemærket, at der er forskelle der må forklares.

Både den solbelyste side (venstre) og den jordskins-belyste side (højre) af Månen ses her. Den venstre billedhalvdel er blevet dæmpet 4000 gange, for at gøre begge dele synlige samtidigt. Billedet er fra DMIs pilotprojekt på La Palma i 2004.



Foto: DMI



Tegningen er ikke målfast.

En observatør observerer Månens lyse og mørke side samtidig. I stråle A ses måneskin – dvs sollys reflekteret fra Månen, mens stråle B viser jordskin – dvs. sollys, der er reflekteret fra Jorden op på Månen og derfra ned til observatøren igen. Forholdet imellem intensiteterne i A og B er proportionalt til Jordens albedo.



Foto: DMI

Vores test-instrument testes ved det Nordiske Optiske Teleskop (kuplen bagved) på La Palma, maj 2004. Det automatiske teleskop (i forgrunden) er en 12 cm refraktor med 600 mm brændvidde.



Foto: DMI

Nyt teleskop

På billedet ses det lille test-instrument, som blev brugt ved DMIs pilotprojekt på La Palma i 2004. A er en 600 mm refraktor, der afbilder Månen i primærfokus på CCD'ens overflade. B er CCD kameraet (et 16 bit kamera, kølet med et Peltier-element, 1300x1020 pixels), der sidder i to store kuglelejer (C-C), således at det kan rotere om den optiske akse for derved at placere et filter over den lyseste del af Månen. Ækvatorialopstillingen styres af en PC og planetarie-programmet "SkyMap". Erfaringerne fra brugen af dette lille test-instrument skal nu anvendes til udviklingen af det nye instrument.

virksomheden på modellens gennemsnitstemperatur, og det viser sig, at ændringer på to procent i albedo, medfører ændringer på ca. 1 °C i modellens temperatur. Hvis dette passer i virkelighedens verden, så kan vi se, hvor nøjagtigt vi skal kende albedo for at forstå klimaændringer. Siden 1970'erne er Jordens gennemsnitstemperatur steget med ca. 0,6 °C. Selvfølgelig målenøjagtigheden på dette tal er omtrent 0,1 °C. Naturlige klimaudsving kan ses på målingerne – for eksempel svarede El Niño'en i 1998 til en stigning på 0,2 °C over det ellers stigende gennemsnit, og et kraftigt vulkanudbrud – som det fra Pinatubo i 1991 – kan afkøle Jorden mellem 0,2 og 0,4 °C. For at kunne se, om klimaændringen siden 1970'erne skyldes en ændring i albedo, skal vi altså kunne måle denne mere nøjagtigt end med en procent. De mindre variationer, der skyl-

des naturlige, men kortvarige fænomener, kræver endnu større nøjagtighed – bedre end 0,2 %. Kan man overhovedet måle så nøjagtigt?

Med de nye satellitter, der venter på at blive opsendt, kan man måle med 1 % nøjagtighed – 0,1 % med ekstremt god vilje, men kun ved laboratorietests. Når først instrumentet er i kredsløb om Jorden må man ty til målinger af kendte overflader for at kontrollere instrumentets nøjagtighed. Det kan man gøre ved at observere store, hvide områder på Jorden, som kan ses fra rummet – og her findes der indtørrede saltsøer i ørkenner, der er meget store og hvide. Set over en kort periode ændrer disse saltsøer sig ikke, men fra år til år er der faktorer, der påvirker saltets hvidhed – som f.eks. ændringer i saltets fugtighed eller støvstorme, der lægger et tyndt lag støv over saltet og gør det mørkere. Dermed ryger sikkerheden i målemetoden.

Andre metoder til instrumentkalibrering består i indirekte observation af Solen eller af Månen. Der er dog ikke god grund til at tro på, at man med de nyeste instrumenter, der skal op i rummet, på lang sigt kan måle Jordens albedo nøjagtigere end til 1 eller en halv procent – og det er altså kun nok til at se på de større udsving i klimaet.

Jordskinsmålinger

Situationen råber derfor på en uafhængig metode til at måle Jordens albedo – og det er her jordskinsmålingerne kommer ind i billedet, for de har vakt håb om billige og nøjagtige målinger.

Det er længe siden, man for første gang forstod, at Jorden reflekterede sollys op på Månen. Det er klart dokumenteret af Leonardo da Vinci, der for 500 år siden lavede den skønneste tegning af fænomenet. Men én ting er at erkende, hvad jordskinnet er, noget helt andet er at måle det nøjagtigt.

Med fotometri kan man måle styrken i lysstråler, og ved at rette et fotometrisk teleskop mod Månens jordskinsbelyste del burde man kunne

måle styrken af dette. Det går bare ikke, af flere grunde. Dels skal det være et meget nøjagtigt instrument for at det fra år til år bibeholder sin følsomhed (samme problem som for satellitterne i kredsløb), og dels ville man alligevel være afhængig af ukontrollable forhold, der har at gøre med små mængder skyer og støv i luften over teleskopet. Støv på instrumentets linse ville også kunne forhindre nøjagtige målinger. Absolutmålinger er derfor ikke vejen at gå – man må tage relative målinger i brug og foretage dem på en sådan måde, at de ting, der uværgeligt ændrer et systems følsomhed, påvirker to målinger på samme måde, sådan at forskellen imellem de to målinger – eller forholdet imellem dem – er uændret. Det er dét princip, man vil anvende ved jordskinsmålinger!

Måler man lysets styrke både i den lyse del af Månen (belyst af Solen) og i den mørke del (belyst kun af Jordens reflekterede sollys), kan man udregne Jordens albedo ekstremt nøjagtigt. Forholdet imellem disse to målinger er nemlig uafhængig af både små ændringer i selve sollysets styrke (det varierer jo lidt hver gang, der er solpletter), atmosfærens gennemsigtighed, og fotometrets følsomhed. Endnu bedre nøjagtighed opnås ved at udføre de to målinger samtidigt.

Praktiske målinger af jordskinnet

Man har længe forsøgt at måle jordskinnets styrke. Fra 1926 og frem igennem 60'erne forsøgte franskmændene Danjon og Dubois at udføre målinger. De brugte den tids simple instrumenter til at lave en imponerende lang måleserie. Desværre har nutidig analyse af målingerne vist, at de ikke er nøjagtige nok til klimaforskning. Siden 1990'erne har en gruppe astronomer i USA, sammen med kolleger i Kina og Spanien, udført målinger af jordskinnet med moderne metoder og fremstillet en måleserie for Jordens albedo. Andre forskere, der brugte satellitdata, sammenlignede astronomernes målinger med deres egne

Albedo

Albedo er et udtryk for en overflades refleksionsevne. Albedo beregnes som forholdet mellem intensiteten af den tilbagekastede og den modtagne stråling. Albedo er afhængig af lysets bølgelængde, men normalt bruger man synligt lys som udgangspunkt. Man kan bruge en procent-skala, hvor 0% svarer til sort, dvs. et legeme helt uden tilbagekastning, mens 100% svarer til hvid, altså et legeme, der tilbagekaster al den elektromagnetiske stråling, det modtager. I hverdagen opfattes en overflade som hvid, når den reflekterer mindst 80% af lyset fra en hvid lyskilde. Omvendt opfattes overflader som sorte, hvis de tilbagekaster mindre end 3% af det modtagne lys.

Forskellige overflader har vidt forskellig albedo:

Havoverflade	3,5%
Lava	4%
Sumpområder	9-14%
Løvfældende skov	ca. 13%
Bar jord mellem	5-40% (snit = 15%)
Græsområder	20%
Sand	25-30%
Jordens overflade	(gennemsnit) 37-39%
Is	30-50%
Overfladen af Antarktis	81 %
Sne	op til 90%

Månen har meget lav albedo – højlandene har højere albedo (lysere) end "havene", der er mørke. I gennemsnit er Månens albedo nær 10%, men afhænger af vinklen overfladen ses under – albedoen er højest ved lav vinkel dvs. nær fuldmåne. Denne vinkelafhængighed skyldes skygger bag klipper, sten og grus på overfladen. Ved lav vinkel ses skyggerne ikke mens de kan ses ved sideindfald og sænker da overfladens lyshed.

og fandt, at der var stor forskel. Astronomerne fastholder, at det er satellitmålingerne, der ikke er gode nok, og der står diskussionen så i dag. Der er brug for bedre og uafhængige målinger af albedo for at afklare problemet.

I 2004 fik klimaforskere ved DMI støtte fra det Naturvidenskabelige Forskningsråd (SNF) og det Offentlige udvalg til Forskning i Rummet (OFR) i Danmark til at bygge et test-instrument til måling af jordskinnet, der udnyttede de sidste landvindinger inden for relativmålinger, og med automatisering i sinde. Er man astronom kan man bede astronomi-studerende om at optage måne-målingerne, men til brug i langvarig forskning og klimaovervågning behøves et automatisk system, der både er billigt i drift og driftsikkert. Erfaringer fra dette pilotprojekt viser, at det er muligt at måle albedoen med præcision på 0,1- 0,2 %.

Nu vil forskerne fra DMI i

samarbejde med astronomer i Lund bygge et automatisk system til Måneobservation, med fem millioner kroner i støtte fra det svenske forskningsråd VINNOVA. Støtten skal bruges i en treårig periode fra 2007 til at udvikle og bygge et automatisk system. En række teleskoper skal bygges og opstilles på steder, hvor der er gode forhold – for eksempel ved et af observatorierne på Kanarieøerne eller ved andre bjergobservatorier rundt om i verden.

Har man kun ét teleskop kan man kun se lys, der kastes på Månen fra ét begrænset område. Således kan et teleskop på La Palma se jordskin, der er reflekteret fra områder så langt vestpå som USA og så langt østpå som mellemøsten – men ikke hele Jorden rundt. Vi vil derfor opstille 3 til 6 teleskoper på udvalgte steder Jorden rundt, og derved opnå en dækningsgrad, der gør det muligt at udregne den globale albedo. ■

Om forfatterne:



*Peter Thejll er klimaforsker ved Danmarks Klimacenter ved Danmarks Meteorologiske Institut, og astronom.
E-mail: pth@DMI.dk*



*Lars William Pedersen er instrumentbygger i sektionen for Geomagnetisme og Rumfysik ved DMI
E-mail: lwp@DMI.dk*



*Hans Gleisner er forsker i sektionen for Geomagnetisme og Rumfysik ved DMI.
E-mail: hgl@DMI.dk*



*Andrew Mattingly er software arkitekt for IBM Australien. Han driver et fjernstyret observatorium i Australiens "outback"
E-mail: andrew@mattingly.com*

*DMI, Danmarks Meteorologiske Institut, Lyngbyvej 100
2100 København Ø*

*Forslag til yderligere læsning:
Peter Thejll, "An automatic earthshine telescope. A pilot project", DMI teknisk rapport No. 04-18. <http://ghwww.dmi.dk/f+u/publikationer/tr/2004/Tr04-18/index.htm> (2004)*

Pallé, E., et al., "Changes in Earth's Reflectance over the Past Two Decades", Science, Volume 304, Issue 5675, pp. 1299-1301 (2004).

Bruce A. Wielicki, et al., "Changes in Earth's Albedo Measured by Satellite", Science 6 May 2005: Vol. 308. no. 5723, p. 825.