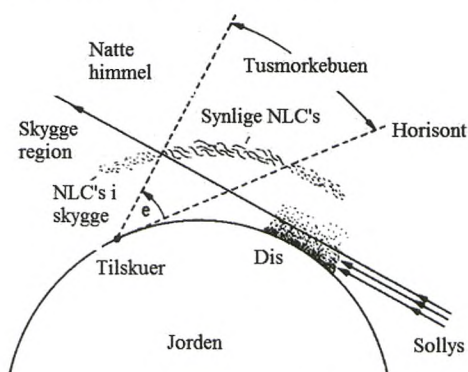


# Lysende natskyer og deres afsløringer af den øvre atmosfæres dynamik og link til globale ændringer

Af Kim Nielsen og Poul Flyvholm Jensen

Lysende natskyer [på engelsk: noctilucent clouds (NLCs) eller polar mesospheric clouds (PMCs)] er blandt de mest fascinerende fænomener man kan observere i naturen. For de fleste folkefærd er disse skyer ukendte da de normalt kun forekommer på forholdsvis høje breddegrader såsom over Skandinavien. Derudover dannes de som regel kun i sommermånederne og kræver specielle forhold for at kunne observeres med det blotte øje. Det er derfor kun naturligt at de mange steder bliver omtalt som *mystiske lysende natskyer*.

Skyerne, som består af små iskrystaller, er de højest forekommende skyer på Jorden idet de findes i et tyndt lag i en højde af omkring 83-88 km i den øvre mesosfære. Et stykke tid efter solnedgang fremstår alle troposfæriske skyer (op til ca. 10 km højde) mørke idet de ligger i Jordens skygge hvorimod lysende natskyer på grund af deres højde stadig er solbelyste og kan ses af en observatør på jordoverfladen i dybt tussmørke som lysende skyer mod en næsten mørk himmel. Skyerne er optisk tynde og kan ikke observeres med det blotte øje ved dagslys fordi den solbelyste atmosfære danner en "baggrund" (der rent faktisk er i forgrunden) som er betydeligt mere lysstærk end disse skyer.



Figur 1. Geometri for observation af lysende natskyer.

Figur 1 viser geometrisk hvordan lysende natskyer vil fremstå for en observatør på jordoverfladen efter solnedgang. Direkte over tilskueren er skyerne ikke belyste og er derfor ikke synlige. Skyerne under horisonten kan naturligvis heller ikke ses. Dette afgrænser et område på himlen kaldet tussmørkebuen hvor kun den øverste del af atmosfæren er belyst, og det er her lysende natskyer er synlige. De optimale betingelser for at se skyerne forekommer når Solen er mellem  $6^\circ$  og  $16^\circ$  under horisonten.

Når man sammenholder afhængigheden af Solens position med at forekomsten af lysende natskyer er begrænset til høje breddegrader i sommermånederne, så forklarer det hvorfor observationerne har været forbeholdt nordiske folkefærd i et bælte omkring Arktis. Hvis man bor for langt mod nord, når Solen ikke tilstrækkelig langt under horisonten om sommeren til at skyerne kan ses, og for langt mod syd er mesosfæren ikke kold nok til at skyerne kan dannes. Den ideelle breddegrad med optimale observationsbetingelser er  $\sim 58^\circ$  N (eller syd, hvis man bor på den sydlige halvkugle). Det betyder at vi i Danmark ( $\sim 56^\circ$  N) er privilegerede med nær optimale betingelser for at se disse skyer i vid udstrækning gennem det meste af juni og juli. Figur 2 viser et eksempel taget af K. Nielsen fra en baghave på Nordfyn d. 3. juli 2008 nær midnat.



Figur 2. Billede af kompleks bølgedynamik i lysende natskyer observeret fra Nordfyn.

På grund af den minimale mængde vanddamp i atmosfæren nær 85 km højde var skyernes eksistens et stort mysterium da de først blev opdaget i 1885 (første officielle observationsrapport). Det har senere vist sig, at netop i en højde af ~80-100 km finder vi de koldeste naturligt forekommende temperaturer på vores planet med temperaturer helt ned til omkring  $-170^{\circ}\text{C}$ . Jo koldere luften er, jo mindre vanddamp kan den indeholde før den når mætningspunktet hvor vandet kondenserer og danner skyer. De ekstremt kolde temperaturer forekommer kun om sommeren på høje breddegrader og hænger sammen med øget atmosfærisk tyngdebølgeaktivitet.

Hvis vi forestiller os en lille boks af luft, som har den samme temperatur som den omkringliggende luft, er tyngdekraften på luften den samme som opdriften: de to kræfter er i ligevægt. Hvis luften pludselig påvirkes af en udefra kommende kraft, kan den "forstyrres" fra dens ligevægtsposition. Afhængig af den atmosfæriske stabilitet kan der opstå en oscillerende bevægelse idet tyngdekraften vil virke til at bringe luften tilbage til ligevægt, hvilket kan sammenlignes med at strække (eller komprimere) en fjeder for derefter at give slip. Det er denne oscillerende bevægelse som udgør tyngdebølger.

Tyngdebølger udbreder sig op i atmosfæren samtidig med at deres amplitude vokser på grund af faldende atmosfærisk tæthed. I en højde af 80-100 km har deres amplitude nået bristepunktet, og bølgerne brækker ligesom bølger ved strandkanten. Denne proces afsætter enorme mængder energi via impulsoverførsel til den omkringliggende luftmasse. Det overordnede resultat er en ændring i den "normale" vindretning og dannelse af en global cirkulationscelle med opstigende luft på sommerhalvkuglen og nedsynkende luft på vinterhalvkuglen. Den opstigende luft udvider sig adiabatisk med højden og bliver derved nedkølet hvilket resulterer i de ekstremt kolde temperaturer i den øvre mesosfære. Modsat er mesosfæren på vinterhalvkuglen forholdsvis varm på grund af at nedsynkende luft opvarmes som følge af komprimering.



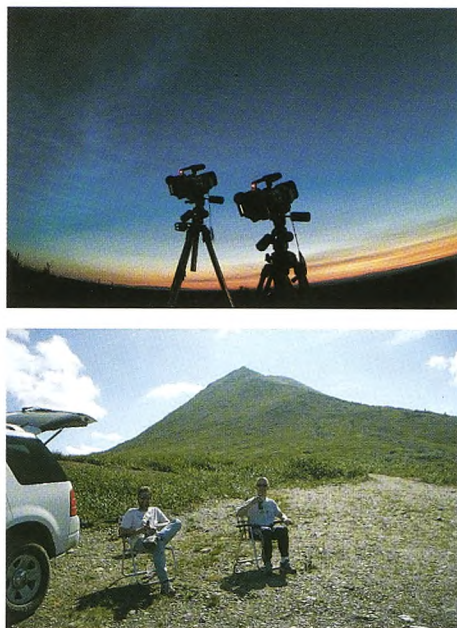
Figur 3. Van Goghs "Starry Night" med lysende natskyer?

Mysteriet omkring de kolde temperaturer var ikke det eneste der undrede forskerne. Et andet spørgsmål var hvorfor man ikke havde observeret disse skyer før 1885. Det er et problem som stadig driver gæk med os. Det er muligt at skyerne eksisterede før 1885, men der er ingen videnskabelig dokumentation som henviser til dem. Dette må siges at være overraskende eftersom f.eks. nordlys er dokumenteret gennem folkeminde og nordiske myter. Nogle mener at et af de første dokumenterede beviser af lysende natteskyer er Van Goghs berømte "Starry Night" som viser en nattehimmel med stjerner, halvmåne og utroligt nok bølgede hvide skyer (figur 3). Det er iøjnefaldende at de første officielle observationer skete få år efter det voldsomme vulkanudbrud på Krakatoa i 1883. Udover vand og ekstremt kolde temperaturer skal der også være små partikler til stede for at danne skyer, og udbruddet på Krakatoa kan muligvis have forårsaget en usædvanlig høj koncentration af mikroskopiske støvpartikler i mesosfæren. En af de mere opsigtsvækkende teorier angående lysende natskyer går ud på at den globale opvarmning i den nedre atmosfære vil føre til global nedkøling af den øvre mesosfære (en konsekvens af at en varmere jordoverflade vil føre til forøget tyngdebølgeaktivitet). Derudover vil forøgelse af drivhusgassen metan give anledning til mere vanddamp i mesosfæren fordi det her bliver spaltet af ultraviolet stråling og frigør hydrogen som reagerer med oxygen og danner vand. Skydannelsen afhænger eksponentielt af temperaturen og er derfor ekstremt følsom overfor temperaturændringer. Lysende natskyer har derfor potentiale som budbringer af globale ændringer i atmosfæren.

Observationer inden for de sidste årtier har vist at disse skyer er blevet mere intense hvilket tyder på enten flere mikroskopiske partikler til skydannelse, mere vanddamp, koldere temperaturer i mesosfæren eller en kombination af disse faktorer. Derudover er skyerne begyndt at blive observeret på lavere breddegrader, helt ned til  $\sim 40^{\circ}\text{N}$ . Især var sommeren 2009 speciel da et uhørt stort antal observationer blev gjort over store dele af Europa og det vestlige USA på breddegrader hvor disse skyer under normale omstændigheder ikke forekommer. Det viste sig at der var et nærmest "globalt" udbrud af kold luft som var tæt på mætningspunktet for vanddamp. Samtidigt bidrog en usædvanlig kraftig planet bølge (Rossbybølge) til at nedkøle mesosfæren yderligere over de regioner hvor skyerne blev observeret så mætningspunktet for vanddamp blev overskredet. De usædvanlige forekomster af lysende natskyer var derfor et resultat af en usædvanlig kold mesosfære ved disse breddegrader og en storskala Rossbybølge. Rossbybølger er et direkte resultat af en sfærisk væske i rotation, som f.eks. jordens atmosfære. Enhver "kugle" har sine egne Rossbybølger eller resonanser, som afhænger af variationer i den tangentielle hastighed af kuglens rotation. Et typisk eksempel på en Rossbybølge er den bølgeformede jetstrøm man til tider kan se på et vejrkort.

Som følge af at disse skyer gentagne gange har overrasket forskerne, den mulige forbindelse til globa-

le atmosfæriske ændringer og ønsket om en generelt forståelse af fænomenet valgte NASA at dedikere en satellitmission til at studere lysende natteskyer i hidtil uset detalje. Satellitten for denne mission, "*Aeronomy of Ice in the Mesosphere (AIM)*" blev opsendt i april 2007 og har til dato dokumenteret 6 "skysæsoner" (3 over hver halvkugle). Planen er at fortsætte missionen mindst indtil 2013 for at opnå indsigt i hvordan den 11-årige cyklus for solaktivitet påvirker skyerne [1,2].

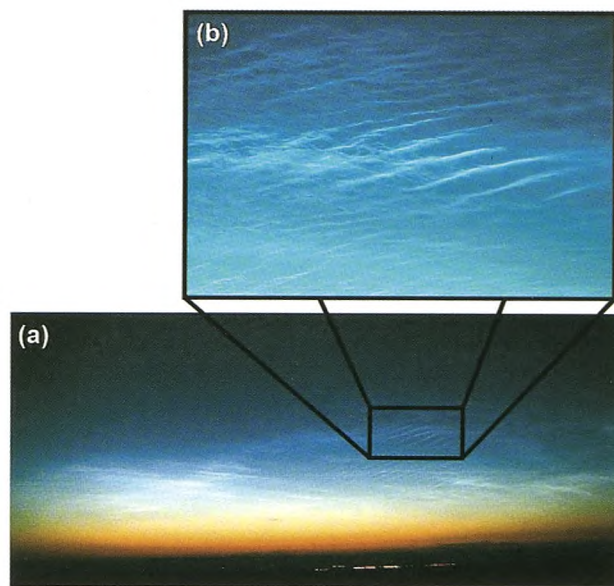


**Figur 4.** Instrumenter brugt til at observere lysende natskyer i Alaska (øverst) og forfatterne foran observationsstedet.

AIM-kampagnen omfatter også adskillige jord-baserede målinger koordineret med satellitmålingerne. Som et led i den forberedende planlægning udførte forfatterne et pre-AIM feltstudie af lysende natskyer i Alaska i 2005. Adskillige lokaliteter med de krævede observationsbetingelser blev fundet i øde områder nær Alaska Range, og forskellige optiske instrumenter blev testet. Figur 4 viser en del af instrumenterne under en kalibrering samt et af observationsstederne med forfatterne i forgrunden, fejrende den forrige nat succesfulde observationer.

En vigtig del af dette teststudie var brugen af digital fotografi til at studere dynamikken i den øvre mesosfære. Som tidligere nævnt er det i denne region at tyngdebølgerne har deres største amplitude og brækker, hvilket gør regionen til en af de mest (hvis ikke den mest) dynamiske del af atmosfæren. Dette er illustreret i figur 5 der viser både bølger og instabilitet, nærmere bestemt Kelvin-Helmholtz instabilitet. Denne type instabilitet opstår generelt når der er tilstrækkelige hastighedsvariationer i en grænseovergang mellem to væsker. De to væsker kan være af samme form, men have forskellige stabilitetskriterier, som f.eks. kan opstå, hvis der er en pludselig forandring i væskens temperatur. Denne type instabilitet er ofte set i troposfæriske skyer. Bemærk i figur 3 hvordan skyerne malet af van Gogh danner et mønster der i høj grad ligner en bølge forårsaget af Kelvin-Helmholtz instabilitet (se figur 5), noget som har været med til at give næring til

teorien om at han rent faktisk malede lysende natskyer. Billederne i figur 5 er taget samme sted og tid (9. august 2005 nær Donnelly Dome, Alaska) med to kameraer med henholdsvis vidvinkelobjektiv (a) og zoomobjektiv (b). Hvert kamera optog en serie af billeder, og især billederne taget med zoomobjektiv viser dynamikken i skyerne i enestående detalje på en skala ned til få hundrede meter når de sættes sammen til video. I løbet af den ugelange testperiode blev adskillige dynamiske fænomener observeret. Nogle af dem er allerede blevet publiceret i den videnskabelige litteratur, mens andre stadig er under analyse.

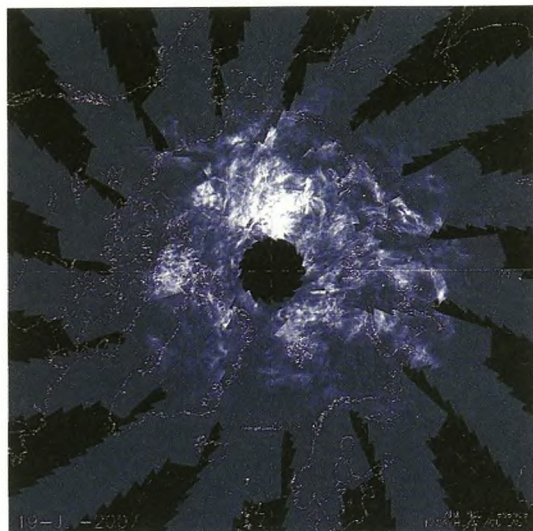


**Figur 5.** Eksempel på bølger og Kelvin-Helmholtz instabilitet i lysende natskyer over Alaska.

Det faktum, at skyerne kan ses med det blotte øje, gør skyerne unikke idet de er den eneste måde vi visuelt kan se de voldsomme dynamiske forhold der hersker mellem 80 og 100 km højde. Typisk er de dynamiske bølger observeret med radar eller specielt fremstillede kameraer, som kan observere den meget svage natteglød. En velkendt radar til dette formål er en meteorradar, som består af en sender (der sender radio bølger op igennem atmosfæren) samt en modtager, som måler de reflekterede signaler. I laget mellem ~65-105 km forekommer der et næsten kontinuerligt bombardement af indkomne meteoror. Meteorerne efterlader sig en hale af ioniseret støv efter sig, som reflekterer radiobølgerne tilbage til modtageren. Meteorstøvet er også påvirket af tyngdebølgerne, som derfor kan observeres med denne type radar. Natteglød er et meget svagt lyssignal, som udsendes af atmosfærens molekyler i et smalt lag i mesosfæren. I dagtimerne modtager molekylerne sollys og forekommer derved i exciterede tilstande. Efter solnedgang modtager molekylerne ikke længere sollys og henfalder til lavere energi tilstande. Det er denne proces som afgiver det svage natteglød. Tilstandsovergange i molekylerne afhænger af temperaturen, hvilket betyder at temperatursvingninger forårsaget af tyngdebølger giver anledning til et bølgemønster i nattegløden.



**Figur 6.** Billede fra et enkelt kredsløb over den nordlige halvkugle. Bemærk de forskellige strukturer i skyerne som illustrerer den komplekse dynamik i mesosfæren (NASAs AIM-mission).



**Figur 7.** Globalt billede af lysende natskyer over den nordlige halvkugle sammensat af billeder fra AIMs 15 daglige kredsløb (NASAs AIM-mission).

Det fælles træk mellem meteorstøv og natteglød er, at de kan ikke ses med det blotte øje. Desuden har både radar og natteglødkameraer deres begrænsninger med hensyn til rum- og tidsopløsning. Visuelle observationer af dynamikken i lysende natteskyer kan med moderne digitale kameraer foretages med opløsninger, som er helt op til 10 gange bedre end hvad man kan opnå med radar og natteglød kamera. Den højere opløsning har åbnet nye muligheder for at studere de dynamiske forhold i mesosfæren. Vores data fra Alaska har vist bølge-lignende strukturer ned til få hundrede meter samt tidskalaer under et minut. Disse observationer står i stærk kontrast til den nuværende mikrofysiske model for dannelse af iskrystaller i mesosfæren. Ifølge teorien tager det timer (endda op til en dag eller mere) for at forme synlige iskrystaller i en højde nær 90 km. Tilsvarende har billeder fra AIM har afsløret dramatiske ændringer i skyerne på alle skalaer observeret med AIM (fra få km til tusinder km og få timer), hvilket ligeledes udfordrer den eksisterende mikrofysiske model for dannelsen af lysende natskyer.

I teorien afhænger skydannelsen eksponentielt af temperaturen og en af forklaringerne på observationerne er, at den lokale baggrundstemperatur samt temperaturvariationerne fra tyngdebølgerne er større end hidtil antaget i modellerne. Denne effekt har forklaret, hvorfor de lysende natteskyer til tider er observeret uger efter skysæsonen normalt er ovre. En avanceret numerisk vejrmødel fra den amerikanske flåde har sammen med AIMs observationer bevist at store Rossbybølger kan forlænge sæsonen for lysende natskyer

med flere uger selvom den gennemsnitlige temperatur er højere end hvad der svarer til mætningspunktet.

Næste udfordring bliver at studere, hvordan skyerne påvirkes af varierende solaktivitet over en længere periode. Siden AIMs opsendelse har vi haft den laveste solaktivitet observeret nogensinde, men nu begynder vi endelig at se stigende aktivitet igen. I løbet af de næste år kan AIM derfor give et nyt indblik i, hvordan ændringer i solaktivitet påvirker skydannelser i mesosfæren. Med den udvidede mission håber vi at få svar på nogle af de udestående spørgsmål vi stadig har angående lysende natskyer såsom eventuel indflydelse fra den 11-år solcyclus og, hvorfor skyerne kan dannes væsentligt hurtigere end teoretiske modeller forudsiger.

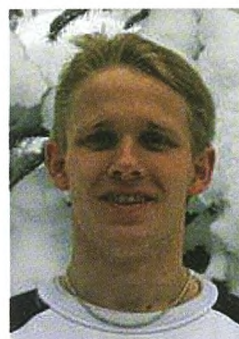
Så hold øje med himlen mod nord hvis du er ude en sen sommeraften/nat. Hvis du er heldig kan du blive belønnet med synet af et af naturens smukke og vidunderlige mysterier. For de interesserede ildsjæle kan det varmt anbefales at læse "Observing Noctilucent Clouds" af Michael Gadsden og Pekka Parviainen. Denne lille (39 sider) bog [3] giver en detaljeret, ikke-matematisk beskrivelse af lysende natteskyer og, hvordan man bedst observere dem.

## Litteratur

- [1] NASA AIM, [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/aim/](http://www.nasa.gov/mission_pages/aim/)
- [2] AIM Satellite Mission, <http://aim.hamptonu.edu>
- [3] Michael Gadsden og Pekka Parviainen, Observing Noctilucent Clouds, [http://www.iugg.org/IAGA/iaga\\_pages/pdf/ONC\\_Sep06.pdf](http://www.iugg.org/IAGA/iaga_pages/pdf/ONC_Sep06.pdf)



*Kim Nielsen, ph.d.* Har været ansat ved Computational Physics Inc. som forsker siden 2007. Hans forskningsområde er primært atmosfærisk dynamik med speciale i tyngde- og Rossbybølger. I forbindelse med AIM arbejder han med udvikling af software samt analyse af dynamiske fænomener i lysende natskyer.



*Poul Flyvholm Jensen, ph.d.-studerende* i rumfysik ved University of Alaska Fairbanks med en B.Sc. i geofysik fra Københavns Universitet.