

Odin gör observationer av gaser och moln i atmosfären genom att titta längs jordens tangent och samtidigt svepa upp och ner. På så sätt kan vi få höjdinformation. Global täckning uppnås genom att jorden roterar samtidigt som satelliten cirkulerar i en bana som passerar över polerna.

# Odin håller ett öga på atmosfären

av Samuel Brohede

Den svenska satelliten Odin har under sin livstid – som blivit mycket längre än förväntat – lämnat värdefulla bidrag till vårt vetande om såväl kosmiska molekylnmoln som förhållanden i jordens atmosfär. Numera gör den observationer bara av jorden, men även här finns det åtskilligt att undersöka.

I snart tio års tid har Odin oförtröttligt vakat över jordens atmosfär, ständigt på jakt efter ozonets hemligheter och de mystiska nattlyssande molnen. Det är förstasatelliten Odin jag talar om, ett av Sveriges mest framgångsrika industriprojekt i modern tid. Odin har utvecklats av Rymdbolaget och är till stora delar byggd i Sverige, men hade inte blivit verklighet utan vårt samarbete med forskare i Kanada, Frankrike och Finland.

Odin skickades ut i omloppsbana den 20 februari 2001 från Svobodny i Sibirien med en rysk START-1 bärraket från kalla krigets dagar. Sedan dess är den jordens trogne följeslagare som kan ses susa förbi på

himlen strax efter soluppgång eller solnedgång. På en höjd av drygt 600 km har Odin en vidunderlig utsikt över vår planet och dess atmosfär, där den varje dygn hinner med 15 banvarv.

Själv började jag som doktorand ett halvår efter uppskjutningen, så jag har tyvärr inte haft förmånen att se satelliten med egna ögon eller följa den långa processen från idé till färdig satellit, en resa på över ett decennium. Däremot har jag fått vara med på den spännande delen då riktiga data börjar trilla in, en tid då själva frukten av projektet skall sköras.

Odin var designad att leva i två år, men är alltså fort-

farande vid god vigör efter drygt 52 000 banvarv och visar inga stora tecken på att ge upp, trots förlust av ett gyro för ett tag sedan. Under de första sex åren var Odins blick kluven, dels svepande genom atmosfären och dels stirrande ut i det interstellära mediet efter spår av livets molekyler. Nu för tiden är det i stort sett atmosfärsmätningar på heltid som gäller. *Populär Astronomi* har rapporterat om Odins astronomiobservationer (senast i nummer 2, 2007), men nu har turen kommit till att redovisa resultat från atmosfärsdelen, eller aeronomidelen som vi brukar säga.

Ombord på satelliten finns två instrument: en radiometer (SMR) som mäter emissionen från spårgasmolekyler som

ozon, vattenånga, salpetersyra, klormonoxid, koloxid och lustgas, i våglängder under en millimeter, samt en optisk spektrometer (OSIRIS), som observerar i huvudsak ozon, kvävedioxid, partiklar och moln genom analys av spritt solljus. I uppmätta spektra analyseras molekylernas unika fingeravtryck som sedan översätts till koncentrationer genom avancerad datorbehandling. SMR används till både astronomi- och aeronomiobservationer medan OSIRIS är helt avsedd för aeronomi. Båda instrumenten är upplinjerade och pekar i samma riktning.

Odin tittar ”tangentiellt”, längs med jordytans rand, samtidigt som hela satelliten svänger upp och ner så att instrumentens synfält långsamt sveper genom atmosfären. På så sätt kan högupplösta höjdprofiler av gaser/partiklar tas fram. Eftersom Odin befinner sig i en polär bana täcks hela jordytan in under ett dygn, eftersom jorden då hunnit snurra ett varv runt sin egen axel. Det är detta som är det revolutionerande i sammanhanget, dvs. att höjdupplösning och global täckning erhålles samtidigt (se också bilden på nästa sida), och Odin var tidigt ute med denna nya mätteknik. Tidigare var man tvungen att välja mellan global täckning (nadirmätningar) eller hög höjdupplösning (solockultationsmätningar). Odin skannar atmosfären mellan ungefär 10 km och 100 km, vilket täcker in mellanatmosfären, dvs. stratosfären och mesosfären som återfinns på 10–50 km respektive 50–80 km höjd.

För att undvika stora mätfel är det avgörande att satelliten pekar mycket exakt. Just peknoggrannheten är faktiskt en av Odins stora styrkor. Denna ligger till grund för Odins framgång när det gäller både den astronomiska och den atmosfärska missionen. Jag har i denna artikel valt ut tre områden där Odin har bidragit till en ökad kunskap inom aeronomi.

## Vad händer med ozonlagret?

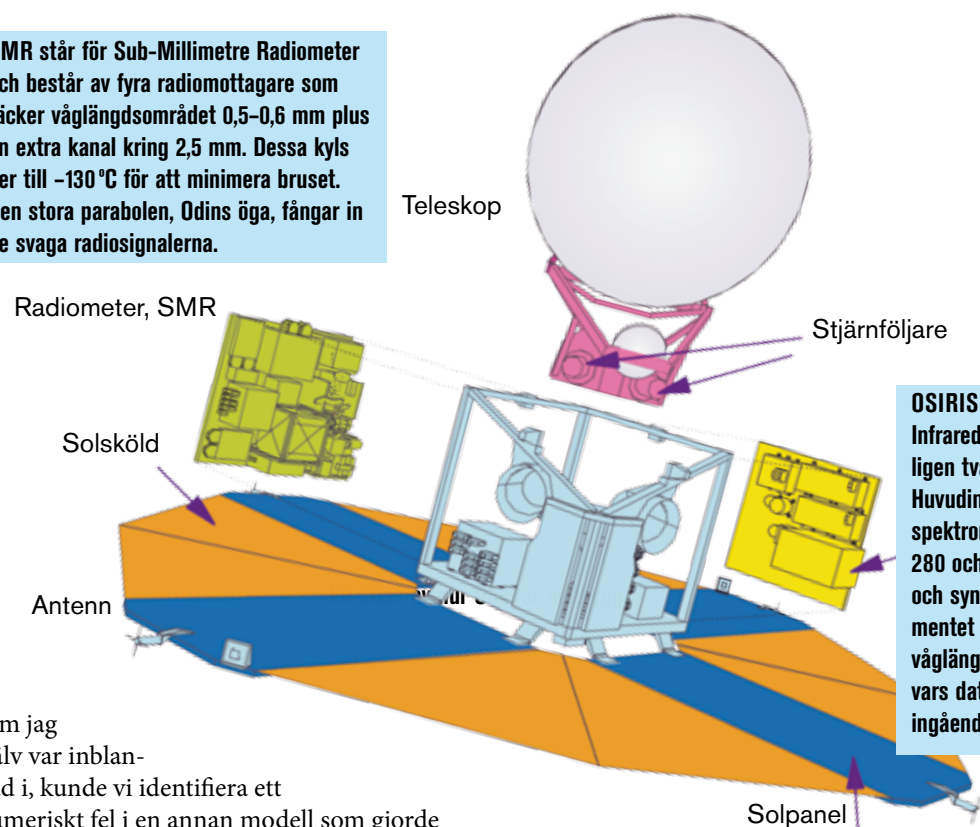
En viktig uppgift för Odin är att kartlägga kemiska och fysikaliska processer i det stratosfärska ozonlagret, det lager som skyddar livets organismer från solens skadliga ultravioletta strålar. Vi har sedan 1980-talet känt till att mänskliga utsläpp av vissa klorföreningar (t.ex. freoner) bidrar till att bryta ner det globala ozonlagret. Nedbrytningen under den antarktiska våren (september och oktober) är katastrofal när ozonet i stort sett utplånas helt vid vissa höjder varvid ett ”ozonhål” uppstår. Att fenomenet uppstår över sydpolen, och inte alls i samma omfattning över nordpolen, beror på att de lägre temperaturerna där gynnar bildningen av speciella molnpartiklar vilka utgör reaktionsyta för ozonnedbrytande processer. Odin har bidragit med ökad förståelse för ozonhålets dynamik och kemi genom sin höga rumsliga och tidsmässiga upplösning. Våra mätningar av klormonoxid visade även att något inte stämde med kemin i atmosfärsmodellen. Odin uppmätte nämligen avsevärt högre halter än vad modellerna simulerar över Arktis, vilket visade sig bero på ett felaktigt temperaturberoende i en avgörande kemisk reaktion.

När modellen uppdaterats stämde simuleringar och verkligheten mycket bättre överens. I en liknande studie,



BILD: RIMBOBJÄGET

SMR står för Sub-Millimetre Radiometer och består av fyra radiomottagare som täcker våglängdsområdet 0,5–0,6 mm plus en extra kanal kring 2,5 mm. Dessa kyls ner till  $-130\text{ }^\circ\text{C}$  för att minimera bruset. Den stora parabelen, Odins öga, fångar in de svaga radiosignalerna.



OSIRIS (Optical Spectrograph and Infrared Imager System) är egentligen två ihopbyggda instrument. Huvudinstrumentet är en optisk spektrometer för våglängder mellan 280 och 800 nm, dvs. ultraviolett och synligt ljus. Det andra instrumentet är en infraröd kamera för våglängder på 1,27 och 1,53  $\mu\text{m}$ , vars data inte analyserats speciellt ingående ännu.

som jag själv var inblandad i, kunde vi identifiera ett numeriskt fel i en annan modell som gjorde att simuleringarna för kväveoxider var uppåt väggarna fel i ozonhålsregionen. Det är naturligtvis av yttersta vikt att identifiera och rätta till sådana felaktigheter.

I september 2002 hände något som inte hänt vare sig förr eller senare, ozonhålet splittrades plötsligt upp i två separata delar, se bilden ovan. Jag minns hur jag som doktorand möttes av Donal Murtaghs (vetenskaplig ledare för Odinprojektet och tillika min handledare under doktorandtiden) exalterade uppsyn den där morgonen. Lyckligtvis befann sig Odin på första parkett för att i detalj studera detta sällsynta skådespel, och flera vetenskapliga artiklar har skrivits utifrån våra data för att förklara vad som egentligen hände.

Slutsatsen är att det hela berodde på ovanligt kraftiga dynamiska fenomen i stratosfären vid den tiden. Det är dock fortfarande oklart om atmosfären spelade oss till förfälligt spratt eller om fenomenet kan återkomma. Kanske kan liknande händelser rentav bli normalt till framtiden?

Odins mission sammanfaller med en mycket spännan-

**Nattlysande moln formas på 80 km höjd under sommaren vid höga latituder. De tunna molnstrimmorna går endast att se strax efter solnedgången då de belyses underifrån samtidigt som de lägre luftlagren**

FOTO: JACEK STEGMAN



de epok i atmosfärens historia, då halterna av ozonnedbrytande ämnen i stratosfären håller på att klinga av samtidigt som ozonlagret så sakteliga förväntas läka. Detta är i alla fall vad modellerna förutsäger. Frågan är bara om detta kan bekräftas av mätningar? För att övervaka det globala ozonlagret krävs satellitmätningar.

Problemet är bara att det är svårt att erhålla tillräckligt långa mätserier från satellitinstrument på grund av deras begränsade livstid. Odins mätserie, på närmare tio år, räknas i detta sammanhang som lång. Olyckligtvis dog tre viktiga satellitinstrument, som hållit koll på ozonlagret sedan 1980- och 1990-talen, nästan samtidigt år 2005. Men tack vare att Odin överlappar och förlänger dessa tidsserier kan kontinuiteten i mätningarna upprätthållas. En omtalad studie, utförd av min före detta rumskollega Ashley Jones (nu på University of Toronto), där data från Odin och andra satelliter sammanfogats, visar att den globala ozonhalten ökar

ligger i skugga. Odin kan dock observera nattlysande under hela dygnet. Bilden är tagen i Stockholm 30 juli 2007 av Jacek Stegman.

igen. Uppgången går dock ännu inte att statistiskt säkerställa på grund av mätosäkerheter och naturliga variationer. Vi behöver helt enkelt vänta några år till.

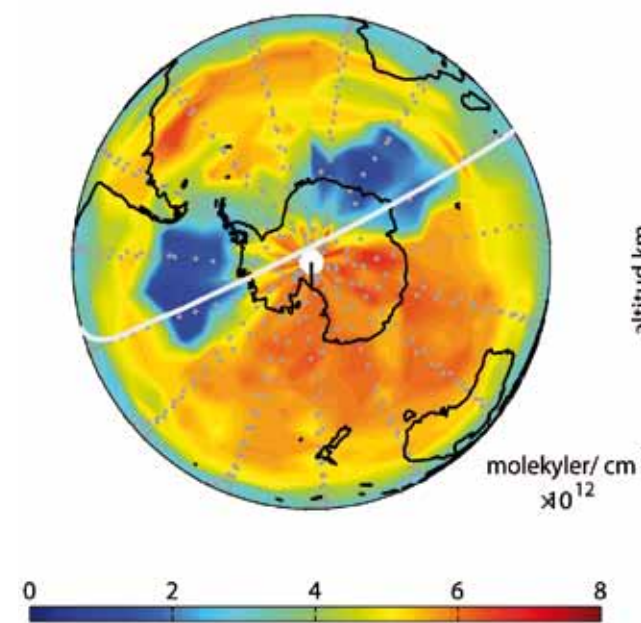
Ett stort problem i sammanhanget är att koncentrationen av många molekyler i atmosfären, däribland ozon, påverkas av solens utstrålning, som i sin tur varierar cykiskt med en period på ungefär elva år. För att mer tillförlitliga trender ska kunna beräknas är det därför angeläget av Odin håller sig vid liv i ett par år till så att en hel solcykel kan tackas in.

### Nattlysande moln

Nattlysande moln uppstår vid drygt 80 km höjd, dvs. betydligt högre upp än våra vanliga vädermoln som sällan når högre än 10 km. På dessa höga höjder finns det extremt lite vatten. För att molnen skall bildas däruppe behövs därför mycket låga temperaturer, på  $-140\text{ }^\circ\text{C}$  eller lägre, som endast kan uppstå i mesosfären under sommartid vid höga latituder. Att det blir så kallt just här beror på den globala cirkulationen som driver luften uppåt vid sommarpolen, varvid den transporteras över hela jordklotet till vinterpolen, där den sjunker igen. Temperatursänkningen beror helt enkelt på att den luftmassa som lyfts uppåt i atmosfären under sommaren kyls genom expansion (lufttrycket minskar ju kraftigt med höjden). Därför är det, paradoxalt nog, kallare i mesosfären under sommaren, vilket skapar förutsättningar för de nattlysande molnen att bildas.

Eftersom Sverige ligger så långt norrut går det utmärkt att se nattlysande moln här under sommaren. Bilden nedan till höger visar ett exempel. Lättast är det att få syn på dem

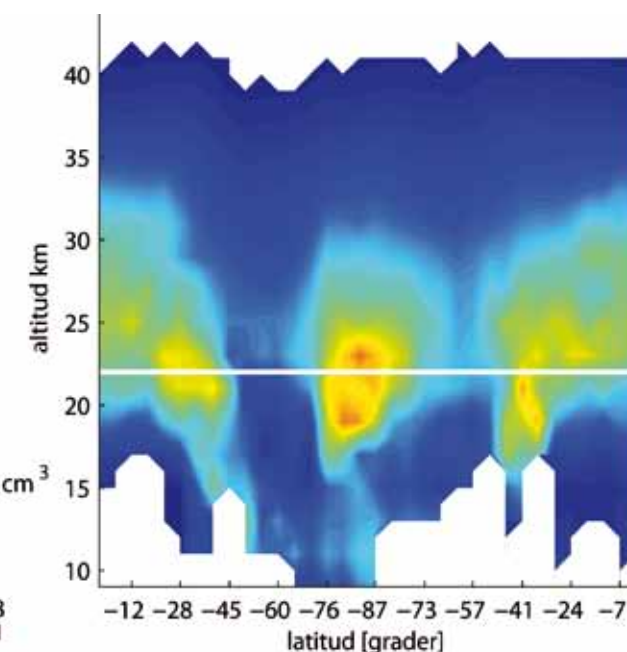
**Ozonmätningar över Antarktis den 26 september 2002 med Odin/OSIRIS-instrumentet. Vid denna tid spittrades ozonhålet upp i två mindre delar, något som varken hänt förr eller senare. Den vänstra figuren visar en sammanställning av ett dygns observationer för den södra hemisfären vid 22 km höjd. Varje grå punkt motsvarar en mätning.**



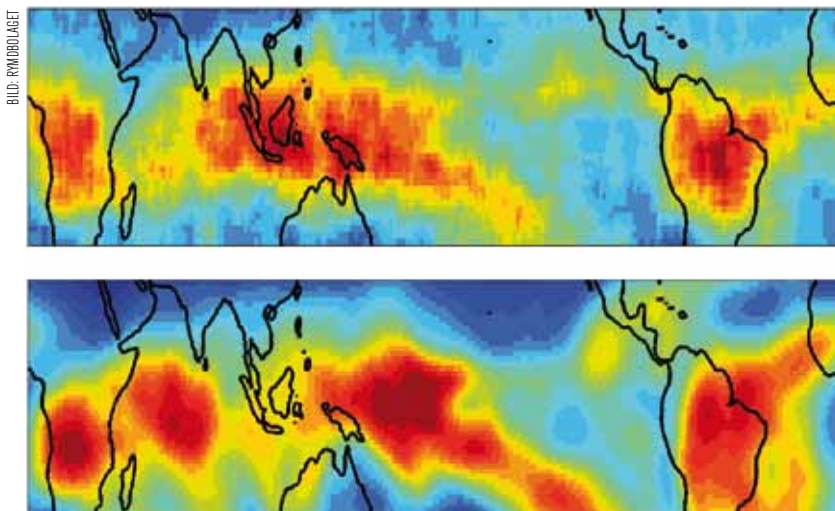
i skymningen, alltså när solen står några grader under horisonten. Då ligger de nedre delarna av atmosfären i jordens skugga, medan nattlysande moln på sin höga höjd fortfarande nås av solljuset och syns som ljusa mönster på natthimlen. Det är därför molnen kallas "nattlysande". Odins observationer av nattlysande moln är å andra sidan inte begränsade till skymningsförhållanden. Odin kan också ge mer än en kartläggning av förekomsten av nattlysande moln. Eftersom OSIRIS mäter ljus vid många olika våglängder kan spektralberoendet av molnens ljusspridning undersökas, vilket är relaterat till molnpartiklarnas egenskaper. På så sätt kan vi bestämma molnpartiklarnas storlek och mikrofysik med Odins hjälp från rymden.

Det stannar dock inte vid undersökningen av själva molnen. Kombinationen av SMR och OSIRIS ger oss fler relevanta parametrar såsom vattenånga, temperatur eller förekomsten av metaller som molndropparna kondenserar på. På så sätt ger Odin forskarna en omfattande bild av processerna bakom nattlysande moln. Genom Odins mätningar av nattlysande moln kan kopplingen mellan vinterpolens stratosfär och sommarpolens mesosfär analyseras. Mätningar gjorda vid Stockholms universitet, under ledning av Jörg Gumbel, visar att det finns en närmast perfekt antikorelation mellan vågaktiviteten (ungefär ett mått på transporten) i stratosfären under vintern och storleksfördelningen av molnpartiklar under sommaren i mesosfären. Detta över en distans av 20 000 km! Nattlysande moln är mycket känsliga för ändringar i sin atmosfäriska omgivning, vilket betyder att de fungerar som en indikator för klimatförändringar. Ungefär som kanariefågeln i kolgruvan alltså.

**Den högra bilden visar atmosfären i genomskärning längs en utvald bana som motsvaras av den heldragna linjen i den vänstra figuren. Tack vare Odins tangentiella mätningar går det att få både global täckning och hög höjdupplösning samtidigt.**







Medelvärde av relativ luftfuktighet från december till maj över tropikerna vid 13 km höjd. Den övre bilden visar Odin/SMR-mätningar och den nedre bilden simuleringar från modellen EC-Earth. Halterna och de allmänna geografiska dragen är liknande i de båda fallen, men lokala avvikelser förekommer.

**Validering av klimatmodeller**

En ökad halt växthusgaser i atmosfären bidrar otvetydigt till en ökad strålningsdrivning ( $W/m^2$ ). Klimatkänsligheten är ett mått på hur denna drivning bidrar till en ökad marktemperatur och uttrycks vanligtvis i hur många grader temperaturen förväntas öka med en fördubblad koldioxidhalt (relativt förindustriella värden). Klimatmodellerna ger tyvärr ett stort spann på uppskattningar av denna klimatkänslighet, vilket gör förutsägelser om framtidens klimat osäkra.

SMR-instrumentet observerar både relativ fuktighet och ismoln i övre troposfären, ett område som har stor betydelse för Jordens strålningsbalans. Jämförelser med klimatmodellen EC-Earth, som utförts av min kollega Bengt Rydberg, visar att modellen i stora drag återskapar verkligheten, men att det finns avvikelser (se bilden ovan). Ett exempel är dygnsvariationer över land som avviker både i amplitud och fas. En djupdykning i sådana avvikelser görs nu för att utröna om det går att förbättra modellens beräkningar så att dess förmåga att förutsäga framtidens klimat ökar.

Moln är i detta sammanhang en nyckelfaktor. Trots att dessa har en dominerande effekt i atmosfären, så hanterar klimatmodellerna fortfarande moln bristfälligt. En så grundläggande omständighet som medelmängden av vatten i molnen är i somliga modeller fem gånger så hög som i andra. Vidare förväntas en stigande temperatur på jordytan, till följd av förhöjda halter av koldioxid och andra så kallade växthusgaser, bidra till att andelen vattenånga i atmosfären ökar. Denna effekt antas fördubbla den ursprungliga klimatstörningen eftersom även vattenånga är en växthusgas – faktiskt den mest betydande. Vattenånga kan här sägas ge en positiv återkoppling i klimatsystemet.

Halten vattenånga förväntas stiga också i mellanatmosfären på grund av ökad transport mellan troposfären och stratosfären i takt med att jordytan värms upp. Odin har redan detekterat en sådan ökning. Det är dock fortfarande en försvinnande liten del av vattenångan som kan överleva transporten in i stratosfären, eftersom det allra mesta kondenseras till vattendroppar vid de låga temperaturer som råder vid tropopausen. Tropopausen fungerar alltså som en köldfälla för vattnet. Temperaturen vid tropopau-

sen påverkas också av halten växthusgaser, och den kan faktiskt sjunka framöver.

Bilden kompliceras ytterligare av att vattenånga även bildas lokalt i mellanatmosfären genom oxidation av metan, som obehindrat kan passera genom tropopausen. Det finns ännu inga modeller som korrekt kan återge vattenkoncentrationens utbredning i tid och rum, såsom Odin ser den. Det betyder att kunskapen inom området fortfarande är besvärande låg. Odin är dock ett viktigt redskap för att ställa diagnos på modellernas "sjukdomar" så att de kan förbättras.

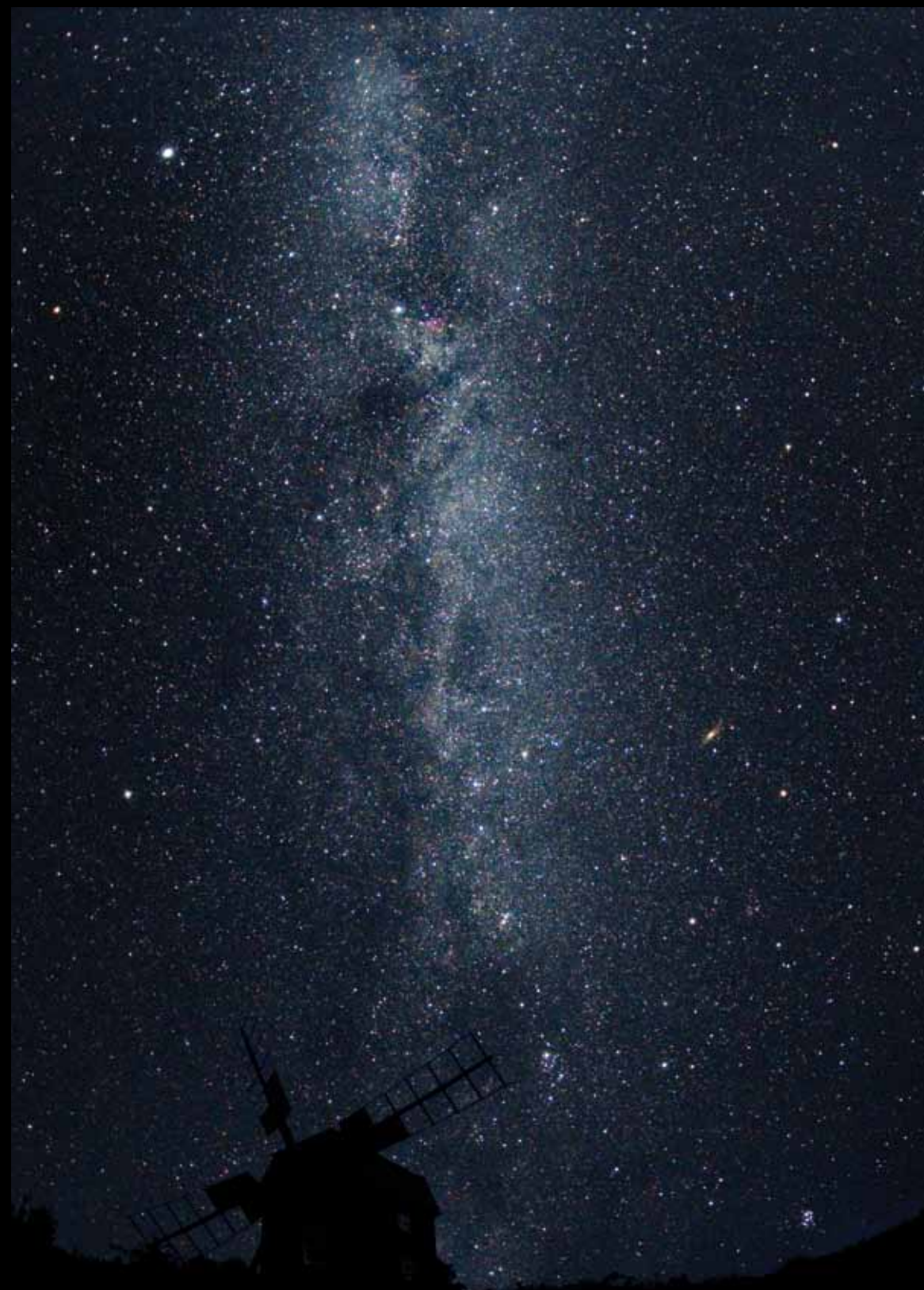
**Odins framtid**

Odin har trots sin litenhet, med en matchvikt på endast 250 kg, mycket pålitligt producerat högkvalitativa data under snart ett decennium. Data som kommer mänskligheten till gagn genom en ökad förståelse för globala miljöproblem såsom ozonnedbrytning och klimatförändringar. Ibland har Odin hamnat i skuggan av de riktiga tungviktarna bland miljösatelliter, såsom ESA:s ENVISAT på över 8 ton. Vikten avspeglar här vilken ekonomi och administration som ligger bakom projekten. Odinprojektet är alltså en lättviktare även vad gäller driftskostnader och vi producerar därför "mycket data för pengarna". Liten är också smidig som det brukar heta. Min personliga åsikt är dock att Odindata är underutnyttjade och borde kunna användas av betydligt fler forskargrupper världen över.

I bästa fall överlever Odinsatelliten i ytterligare några år, men det är trots allt bara en tidsfråga innan någon avgörande komponent havererar. Då kommer pipen att tystna på rymdstationen Esrange när all kommunikation med Odin upphör. Odins fysiska död inträder långt senare när den slutligen brinner upp i atmosfären, när banan förlorat alltför mycket höjd. Kunskapen och tekniken från Odin lever dock vidare i nya satellitprojekt och våra data kommer förhoppningsvis användas under lång tid framöver.

Tack till Patrick Eriksson, Donal Murtagh, Jörg Gumbel, Jacek Stegman, Ashley Jones och Bengt Rydberg. \*

*SAMUEL BROHEDE är fil.dr och forskningsingenjör i Global miljömeteknik och modellering vid Chalmers tekniska högskola*



Vintergatan över Öland. Bilden tog jag i samband med mitt Ölandsbesök i somras. Jag var där på semester och passade på att besöka Sagittariusmötet som GAF anordnade. Bilden består av 15 st enminuters exponeringar för bakgrunden och en 30 sekunders exponering av förgrunden som var en gammal väderkvarn. Tyvärr lyckades jag inte fånga några Perseider i bilden, som togs två dygn efter Perseidernas maximum. Jag använde min Nikon D300 med ett 10,5mm/f2,8 fisheye-objektiv vid ISO 1600. Göran Strand, Frösön