

Datormodeller och Antarktisk moln – nycklar till klimatets gåtor

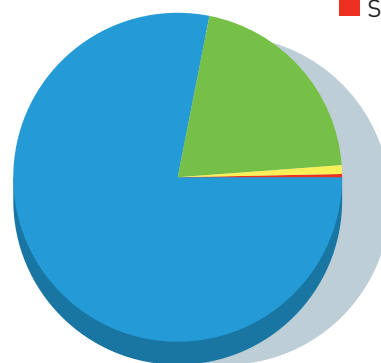
Atmosfärens dynamik och jordens klimat har länge studerats. De gåtor som forskarna grubblat över har till exempel handlat om hur jordens temperatur och klimat påverkas av människans utsläpp av växthusgaser. Eller varför det sedan slutet av 1970-talet uppstått ett hål i ozonlagret över Antarktis varje vårvinter. Och hur påverkar uppkomsten av ozonhålet i sin tur klimatet? I detta forskningsfält har **Syukuro Manabe** och **Susan Solomon** spelat en dominerande roll. De belönas med Crafoordpriset i geovetenskaper 2018 för deras fundamentala bidrag till förståelsen av atmosfäriska spårgasers roll i jordens klimatsystem.

Jordens atmosfär är ett tunt hölje av gaser som hålls kvar runt klotet tack vare jordens dragkraft. Atmosfären är i ständig rörelse som en följd av solens värmande effekt och jordens rotation. På jorden förnimmar vi rörelserna i atmosfärens nedersta skikt genom vädrets oavbrutna skiftningar. Men hur hänger atmosfärens dynamik ihop med luftens kemiska sammansättning och jordens klimatutveckling?

Utforskandet av atmosfärens dynamik och jordens klimat har pågått i mer än ett sekel men ända fram till slutet av 1950-talet var forskningen deskriptiv, det vill säga den grundades i princip på mätningar och observationer kopplade till exempelvis solinstrålning, luftens temperatur, nederbörd och vegetationens utbredning.

Att på ett realistiskt sätt beräkna atmosfärens cirkulation och framtida klimatutveckling var ännu inte möjligt. En insikt som började gro var att det måste krävas nya angreppssätt för att lösa de komplexa problemställningar som uppstår när man betraktar jorden och dess atmosfär som ett integrerat system. Något som hade gäckat forskarna allt sedan 1800-talet var frågan om i vilken utsträckning en ökning av koldioxid i atmosfären påverkar jordens temperatur. När mätresultaten från den nya mätstationen på Hawaii, som öppnades 1958, visade på att det sker en fortlöpande ökning av koldioxid i atmosfären – och en möjlig förklaring till denna ökning är människans utsläpp av koldioxid och andra växthusgaser – blev frågan om sambanden mellan koldioxid och temperatur högaktuell.

Den torra
atmosfärens
beståndsdelar



■ KVÄVE 78 %
■ SYRE 21 %
■ ARGON 0,9 %
■ SPÅRGASER < 0,1 %

Kraftfulla verktyg i forskningens tjänst

1958 flyttade den japanska atmosfärfysikern Syukuro Manabe till USA. Han hade doktorerat vid Tokyo universitet. Vid National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA's) Geophysical Fluid Dynamics Laboratory i Princeton, New Jersey, fanns vid denna tid en forskningsmiljö som lockade. Dess ledare Joseph Smagorinsky skapade förutsättningar för forskare att i team arbeta med storskalig numerisk modellering, med hjälp av den senaste och kraftfullaste datorteknologin. Syukuro Manabe kom här att under 1960-talet tillsammans med sina kollegor göra en serie av banbrytande studier. Han utforskade till att börja med vilka fysikaliska beräkningar som behövs för att skapa en realistisk cirkulationsmodell för jordens atmosfär.

Ett av de första stegen tog Manabe tillsammans med Robert Strickler (1964). Han studerade varför temperaturen i atmosfären ser ut som den gör. Varför finns det en troposfär och en stratosfär? Varför är temperaturen olika på olika breddgrader och under olika tider på året? Med cirkulationsmodellens hjälp gick det att visa att atmosfärens innehåll av vattenånga och spårgaser som koldioxid och ozon är avgörande för dess temperatur och vertikala temperaturskiktning. Men för att få realistiska resultat måste hänsyn också tas till konvektion, det vill säga luftens värmestyrda omblandning. Detta visade sig vara nyckeln till en genomgripande förståelse.

Därefter utvecklade Manabe tillsammans med Richard Wetherald (1967) de fysikaliska beräkningarna ytterligare ett steg. Han kunde visa att luftens relativa fuktighet är en viktig faktor. Den möjliggör realistiska beräkningar av till exempel hur atmosfärens temperatur påverkas av ändringar i koldioxidhalten. Med hjälp av modellen beräknades att en fördubbling av halten av koldioxid i atmosfären motsvarade en temperaturökning på cirka två grader.

Den första riktiga klimatmodellen såg dagens ljus

Syukuro Manabe och Kirk Bryan (1969) tog ytterligare kliv framåt när de kopplade ihop de processer som sker i atmosfären och vid jordytan med havens rörelser och värmebalans. Nu fanns en modell som kunde beskriva återkopplingen mellan de två huvudkomponenterna i klimatsystemet: havet och atmosfären. Den första fullständiga klimatmodellen var född.

I globala klimatmodeller delas atmosfär, land och hav in i ett tredimensionellt rutnät. Klimatmodellen körs sedan under en given tidsperiod; historisk, i nutid eller i framtid. I varje del av rutnätet beräknas, baserat på fysikens grundlagar, utvecklingen av de meteorologiska, hydrologiska och oceanografiska parametrarna. Datorn som användes för att utveckla och köra den första globala klimatmodellen hade en minneskapacitet på 0,5 Mb, vilket var i framkant på den tiden. Trots den starka utvecklingen gällande datateknik sedan dess är principerna för dagens klimatmodeller desamma. De fysikaliska samband som Syukuro Manabe och hans kollegor beskrev utgör fortfarande fundamentet i våra nuförtiden långt mer avancerade och högupplösta numeriska modeller för prognoser om jordens klimatutveckling, kopplat till exempelvis människans utsläpp av koldioxid och andra växthusgaser.

Syukuro Manabe har en unik förmåga att formulera de rätta frågorna och sedan angripa dessa genom att på ett optimalt sätt förenkla frågornas matematiska beskrivningar och dra upp strategier för klagörande simuleringar med utnyttjande av tidens tillgängliga datorresurser. Han har under lång tid varit en världsledare i utvecklingen av fysikaliskt baserade numeriska klimatmodeller.

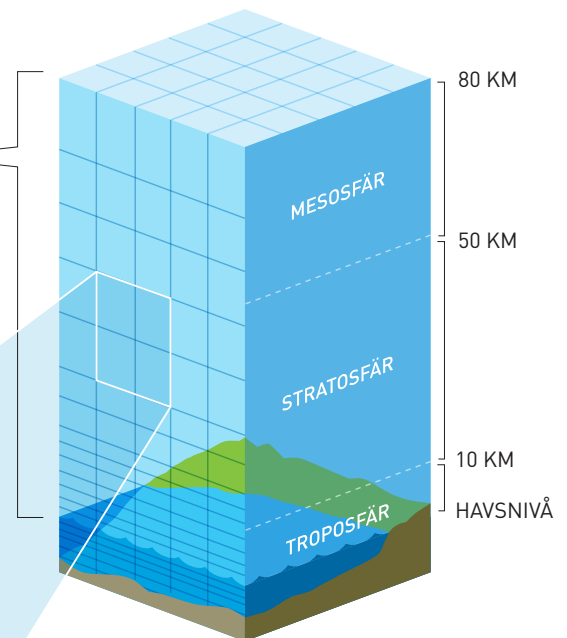
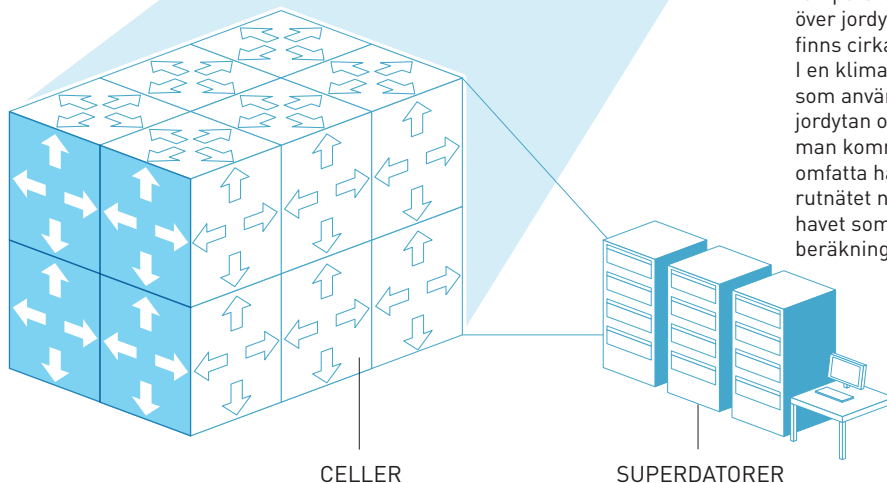
Faktorer som påverkar jordens klimat

Klimatet kan förenklat ses som uppbyggt av klimatkomponenterna: atmosfär, markyta, vegetation, hav, och isar. Det sker en ständig omfördelning av energi och materia när klimatkomponenterna samverkar med varandra genom olika processer. Påverkan sker också från yttre faktorer som vulkanism, ändringar i solaktivitet, med mera. Påverkar gör även människans utsläpp av växthusgaser i atmosfären.



Klimatmodellering

I en klimatmodell är atmosfären uppdelad i ett tredimensionellt rutnät längs med jordytan och upp i luften. Atmosfärens rörelser och bevarandet av energi, vatten och massa följer fysikaliska lagar som beskrivs med matematiska formler. Klimatmodelleringen innebär sedan att för varje cell i rutnätet beräknas utvecklingen för parametrar som temperatur, nederbörd och vind. Beräkningarna görs stegvis framåt i tiden.



Atmosfären på höjden

Atmosfären delas in i olika lager beroende på hur temperaturen i genomsnitt förändras med höjden över jordytan. I det lägsta skiktet, troposfären, finns cirka 70–80 procent av atmosfärens massa. I en klimatmodell är det tredimensionella rutnät som används vid beräkningar också tätast nära jordytan och glesare ju högre upp i atmosfären man kommer. En klimatmodell kan också fullt ut omfatta havet. Då fortsätter det tredimensionella rutnätet ned i havet så att även de processer i havet som påverkar klimatet kan tas med i beräkningarna.

Helt ny teori fokuserade på molnen i Antarktis stratosfär

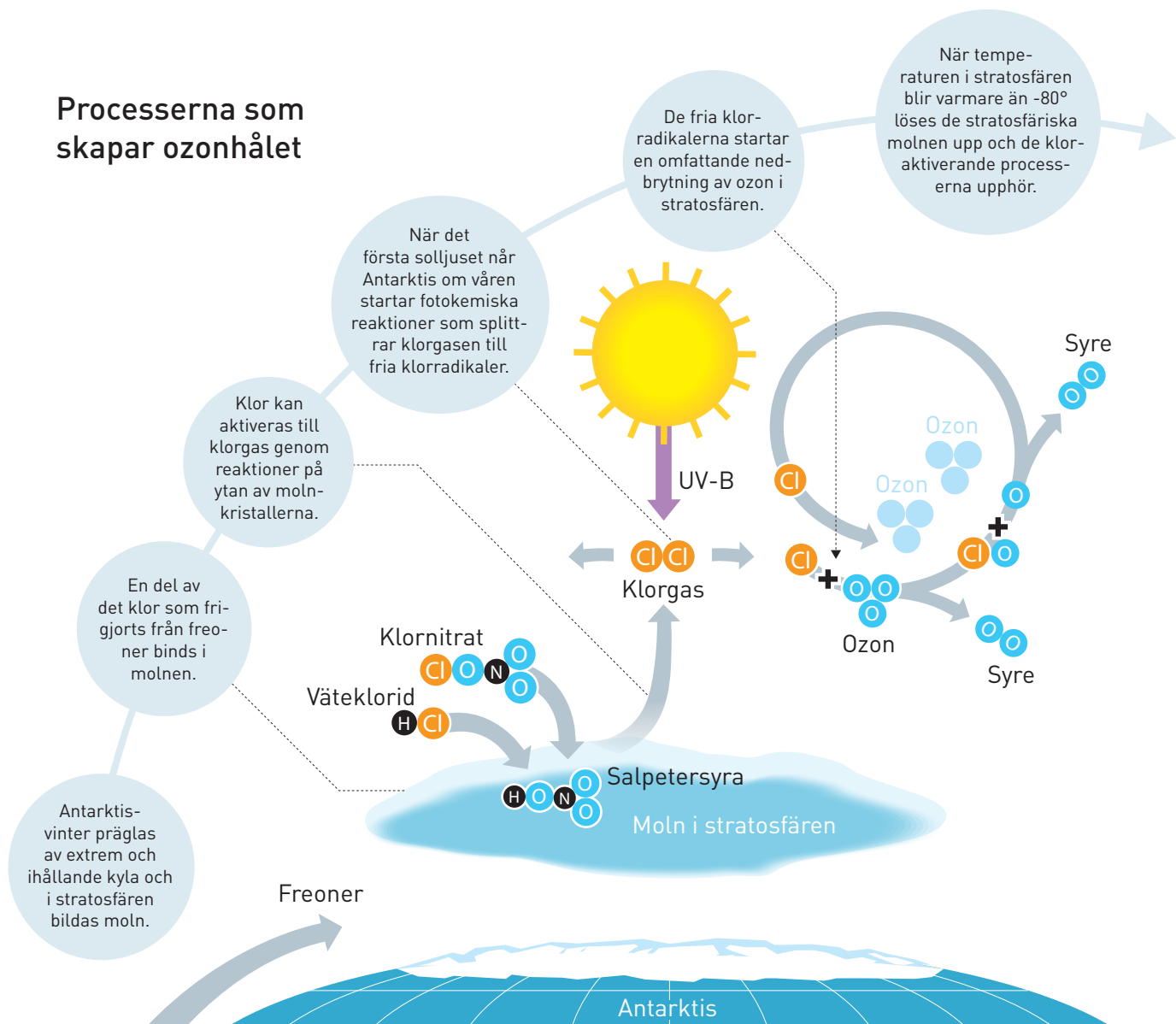
Upptäckten av ozonhålet över Antarktis är en annan avgörande händelse inom atmosfärvetenskapen. Forskare i både Storbritannien och USA kunde i mitten av 1980-talet, oberoende av varandra, visa att det sedan slutet av 1970-talet, varje vår, skett en förtunning av jordens ozonlager över Antarktis. Men vad berodde fenomenet på? Redan tidigare hade forskare visat att freon bryter ner ozon, men den nedbrytning som nu uppmättes var långt mer omfattande än vad som förväntades. Det gick inte heller att förklara varför hålet bara fanns över Antarktis, dessutom endast en viss tid på året. Stora resurser sattes in i arbetet med att söka förklaringen. Här kom atmosfärkemisten Susan Solomon att spela en nyckelroll.

Susan Solomon gjorde sin grundutbildning i kemi vid Illinois Institute of Technology och doktorerade 1981 vid University of California, Berkeley. Hon började sedan arbeta vid NOAA's Aeronomy Laboratory i Boulder, Colorado. Susan Solomons djupa förståelse av kemiska och fysikaliska processer och förmåga att kombinera teoretiska studier med experimentellt fältarbete kom att bli det som gjorde skillnad i arbetet med att lösa frågan om ozonhålens uppkomst över Antarktis.

Susan Solomon (1986) utgick tillsammans med kollegor från en ny teori. Forskarna vände blicken mot iskristallerna i de moln som på grund av extrem kyla bildas i stratosfären över Antarktis varje vinter vid temperaturer lägre än -80°C . De antog att iskristallerna i dessa moln gör att andra kemiska processer än de man tidigare utgått ifrån kan initieras. Istället för att anta att det bara är kemiska reaktioner i gasfas som spelar roll föreslog forskarna att heterogena reaktioner också kommer in i bilden, det vill säga reaktioner som involverar olika faser (fast, flytande, gas). På ett nytt sätt gick det nu att beräkna vad som händer över Antarktis när molekyler från freonutsläpp vid markytan så småningom nått stratosfären och freonernas klor frigjorts. Det mesta av detta klor uppträder i de stabila formerna klornitrat och saltsyra som inte själva förmår bryta ner ozon. Med stöd av den nya teorin kunde Susan Solomon påvisa: A) Hur en del av dessa stabila klorföreningar på vintern binds i Antarktis stratosfäriska moln. B) Hur klorret kan aktiveras, så kallad kloraktivering, genom kemiska reaktioner som sker på ytan av iskristallerna i molnen och som ger klorgas. C) Hur solljuset på våren startar foto-kemiska reaktioner som gör att klorgasen splittras till fria klorradikaler. D) Att det är närvaron av fria klorradikaler som orsakar den omfattande nedbrytningen av ozon i de stratosfäriska molnen. En fri klorradikal kan bryta ner 100 000 ozonmolekyler innan den lämnar stratosfären. E) Att kloraktivering pågår fram tills att våren kommit så långt att temperaturen är högre än -80°C och de stratosfäriska molnen löses upp.

Susan Solomon ledde två expeditioner till Antarktis, 1986 och 1987, där forskarna gjorde omfattande fysikaliska och kemiska mätningar i stratosfären med hjälp av flygplan och ballongsonder för att testa teorin. De noterade bland annat att de lägre halterna av ozon som uppmättes i stratosfären, från augusti till oktober, sammanföll med tillika låga halter klornitrat. När ozonhalterna började stiga igen i oktober noterades även en motsvarande ökning av halten klornitrat. Korrelationen mellan halterna ozon och halterna klornitrat bekräftade Susan Solomons beräkningar — och att det finns ett samband mellan människans utsläpp av freoner och nedbrytningen av ozonlagret i Antarktis. De av Susan Solomon föreslagna kemiska reaktionerna utgör idag en av hörnpelarna för all modellering av stratosfärens kemiska sammansättning. I en viktig tillämpning av teorin kunde Susan Solomon och David Hofmann (1989) förklara hur stora vulkanutbrott kan ge en påverkan på ozonskiktet genom utsläpp av svavelföreningar i stratosfären.

Processerna som skapar ozonhålet



Ozonskiktet påverkar även klimatet

Även efter expeditionerna i Antarktis har Susan Solomon fortsatt med världsledande forskning om stratosfärens ozonskikt. Inte bara om orsaker till dess uttunning, utan även om hur förändringar i ozonlagrets tjocklek är en viktig komponent i jordens klimatsystem. I ett flertal arbeten under 2000-talet har hon tillsammans med andra forskare visat hur förändringar i ozonlagrets tjocklek över Antarktis påverkar atmosfärens strömning på södra halvklotet. Ändringarna i luftströmmarna påverkar i sin tur temperaturförhållandena vid markytan, med exempelvis förändringar i sommartemperaturer över Antarktis och Södra oceanen, Nya Zeeland, Patagonien och de södra delarna av Australien. Atmosfärskemisten Susan Solomon har i mer än 30 års tid publicerat arbeten i forskningens absoluta frontlinje när det gäller ozonskiktet och klimatförändringar. Hennes bidrag till kunskapsuppbyggnaden inom detta område är unikt.

LÄNKAR OCH LÄSTIPS

Mer information om årets pris finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, <http://kva.se/crafoordpriset> och www.crafoordprize.se

NOAA:s beskrivning av Syukuro Manabes globala klimatmodell, den första globala klimatmodellen. https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/welcome.html#vision

Mer fakta om globala klimatmodeller. <https://www.gfdl.noaa.gov/climate-modeling/>

Den så kallade Keelingkurvan med dagliga mätningar sedan 1958 av koldioxidhalten i atmosfären på Hawaii. <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>

Film från NASA om moderna globala klimatmodeller (från 2010). <https://www.youtube.com/watch?v=jj0WsQYtT7M>

Ozonnedbrytning i stratosfären. Vetenskaplig artikel i *Reviews of Geophysics*, 1999. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/1999RG900008/abstract>

NOAA:s beskrivning av betydelsen av Susan Solomon och hennes forskning. <https://celebrating200years.noaa.gov/historymakers/solomon/welcome.html>

Fakta om forskningen kring ozonhålet och arbetet med att förbjuda freoner. <http://www.theozonehole.com/twentyyear.htm>

Vetenskaplig artikel i *Science*, 2016, om tecken på att ozonlagret över Antarktis börjar återhämta sig. <http://science.sciencemag.org/content/early/2016/06/30/science.aae0061>

Nyhet från NASA om ozonmätningar i Antarktis stratosfär 2017. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/warm-air-helped-make-2017-ozone-hole-smallest-since-1988>

PRISTAGARNA

SYUKURO MANABE

Född 1931. Senior meteorolog vid The Atmospheric and Oceanic Sciences Program (AOS), Princeton University, NJ, USA. <https://www.princeton.edu/aos/people/faculty/manabe/index.xml>

SUSAN SOLOMON

Född 1956. Lee and Geraldine Martin Professor of Environmental Studies vid The Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences (EAPS), Massachusetts Institute of Technology, MIT, Cambridge, MA, USA. <https://eapsweb.mit.edu/people/solos/bio>

Redaktion:

Sakkunniga: ledamöter av Kungl. Vetenskapsakademien, text: Anna Kim-Andersson, illustrationer: Johan Jarnestad/Infographics.se, redaktör: Jessica Balksjö Nannini, ©Kungl. Vetenskapsakademien.