

# Kosmiske partikler og skykim

*Forskere kan nu efterligne den kosmiske strålings effekt på dannelsen af skyer i Jordens atmosfære.*

*Ved hjælp af Danmarks største accelerator og et særligt klimakammer er det lykkedes at skabe de små partikler (aerosoler), som kan udgøre kimen til skyerne på himlen.*

Af Jens Olaf Pepke Pedersen, Martin Andreas Bødker Enghoff og Ulrik I. Uggerhøj

■ Jorden er under konstant bombardement fra rummet. Højenergetiske partikler hamrer imod toppen af atmosfæren og ioniserer luften helt ned til overfladen. Afsenderne af disse såkaldte galaktiske kosmiske stråler (som altså er partikler, så lad os kalde dem det!) er supernovaer i Mælkevejen, der kan accelerere partiklerne op til energier en milliard gange højere end den største menneskeskabte accelerator. Heldigvis beskyttes vi af vores egen stjerne. Solen udsender nemlig også partikler – Solvinden – der kolliderer med de udefrakommende partikler og afbøjer en stor del af dem. Mængden af kosmiske partikler, der når frem til vores atmosfære, er altså både afhængig af mængden af supernovaer og Solens aktivitet: Jo mere gang der er i solvinden, jo færre partikler slipper der forbi. Antallet af supernovaer ændrer sig kun over millioner af år, men Solen er langt mere livlig. Voldsomme soludbrud kan dæmpe mængden af kosmiske partikler fra dag til dag, mens variationer i Solens magnetfelt sørger

for cykliske ændringer med en periode på omtrent 11 år samt tendenser, der kan række over hundreder af år.

Hele ideen, om at vi bades i millioner af år gamle stjerne-rester, er fascinerende i sig selv, men meget tyder på, at det også kan være relevant for klimaet på Jorden. Mængden af kosmiske partikler gennem tiden kan rekonstrueres ud fra aflejringer af blandt andet kulstof-14 i træ samt beryllium-10 i iskerner, og studier har vist, at intensiteten

af kosmiske partikler korrelerer med monsunaktiviteten, mængden af driv-is i Nordatlanten og ikke mindst lavtliggende skyer. Skyerne har en stærkt afkølede effekt og en lille ændring i skydækket kan, i klimamålestok, sammenlignes med effekten fra menneskeskabt CO<sub>2</sub>.

## Fra aerosol til sky

Men hvad er forbindelsen fra kosmiske partikler til en sky? Den mest fremtrædende teori går via en anden form

for partikel, nemlig aerosoler. Aerosoler svæver i luften og fungerer som kerner for skyerne. Uden aerosoler har vandet ikke nogen overflade at kondensere på, og så ville det kræve hundredevis af procents overmætning af vand at danne dråber istedet for de maksimalt to procent, der skal til, når der er aerosoler i luften. Man opdeler aerosolerne i to kategorier. Primære aerosoler er skabt mekanisk og er typisk over en mikrometer i diameter, såsom sandkorn der hvirvles op i luften eller salt-partikler fra skumsprøjt over havet – disse aerosoler påvirkes ikke af de kosmiske partikler. Det gør de sekundære aerosoler til gengæld, som er aerosoler, der dannes som små klynger i atmosfæren, når forskellige gasser kondenserer. En vigtig ingrediens i disse klynger er svovlsyremolekyler, der har et lavt damptryk og derfor er tilbøjelige til at klumpe sig sammen med vandmolekyler til små partikler af nanometerstørrelse. Det anslås, at størstedelen af alle aerosoler dannes direkte fra gasfasen.

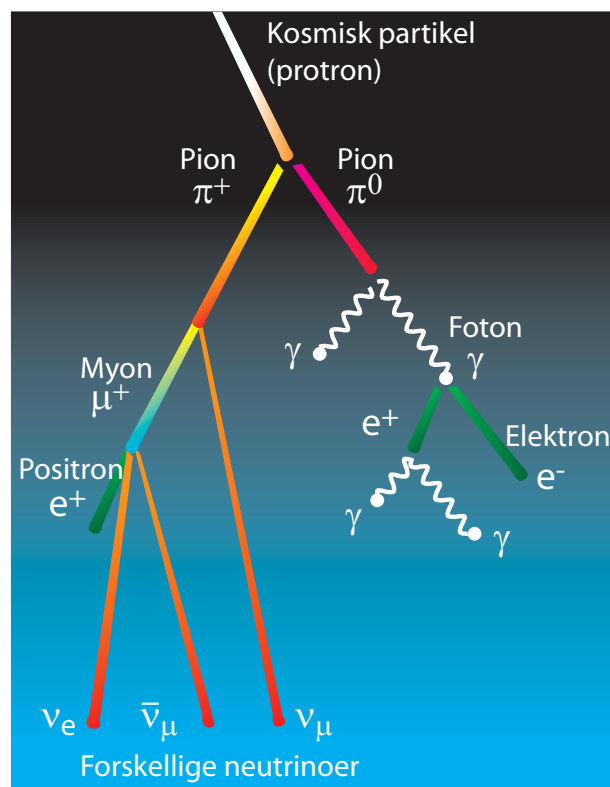
## Aerosoler

Omtrent halvdelen af de aerosoler, der når en størrelse, hvor de kan blive aktiveret til skydråber, er sekundære aerosoler – altså aerosoler dannet i gasfasen. Og der udledes langt flere af de sekundære aerosoler end af de primære (dem der dannes mekanisk, såsom fra havskum og støvkorn fra f.eks. Sahara). Det er også nødvendigt, da de små sekundære aerosoler, der er cirka 1 nm store, når de dannes, skal konkurrere med de store primære (> 1 µm). Mange af de sekundære aerosoler går således tabt, inden de når at vokse til brugbar størrelse.

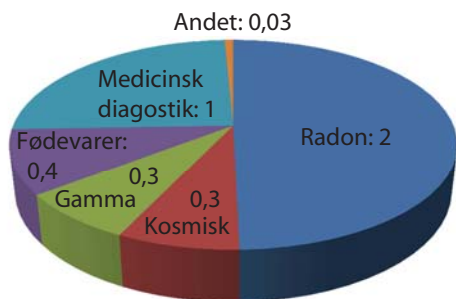
Men hvis man ser på massefordelingen er det lige omvendt. En enkelt primær aerosol på 10 µm vejer en milliard gange mere end en sekundær på 10 nm. Der udledes over 10 milliarder ton aerosoler om året og kun omkring 0,1 mia. ton per år udgøres af de sekundære aerosoler.

Illustration af en partikelbyge. Når en kosmisk partikel (her en proton) rammer et af luftens atomer, omdannes en del af deres kinetiske energi til nye partikler og anti-partikler ud fra Einsteins berømte ligning  $E = mc^2$ . Disse partikler kan igen skabe nye, og der udvikles derved ved gentagne processer en kosmisk byge med op til mange hundrede milliarder partikler.

I det viste eksempel skaber protonen en  $\pi^+$  (positiv pion) og en  $\pi^0$  (uladet pion) partikel (med levetider på hhv.  $2,6 \times 10^{-8}$  s og  $8 \times 10^{-17}$  s.  $\pi^0$  partiklen henfalder stort set øjeblikkeligt til to fotoner, hvor den ene skaber et elektron-positron par i en kollision med et andet atom i atmosfæren. Positronen kan ligeledes ramme en elektron længere nede, og derved skabe to nye fotoner.  $\pi^+$  partiklen henfalder til en neutrino og en såkaldt myon, der også er ustabil, med en levetid på  $2,2 \times 10^{-6}$  s. Den positive myon henfalder til en positron, fulgt af to forskellige neutrinoer.



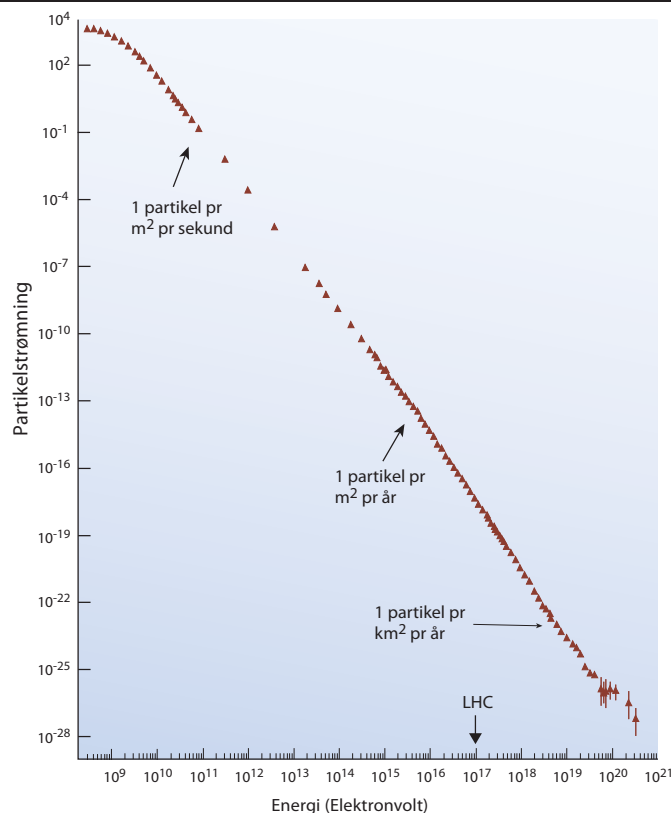
## Kosmiske partikler



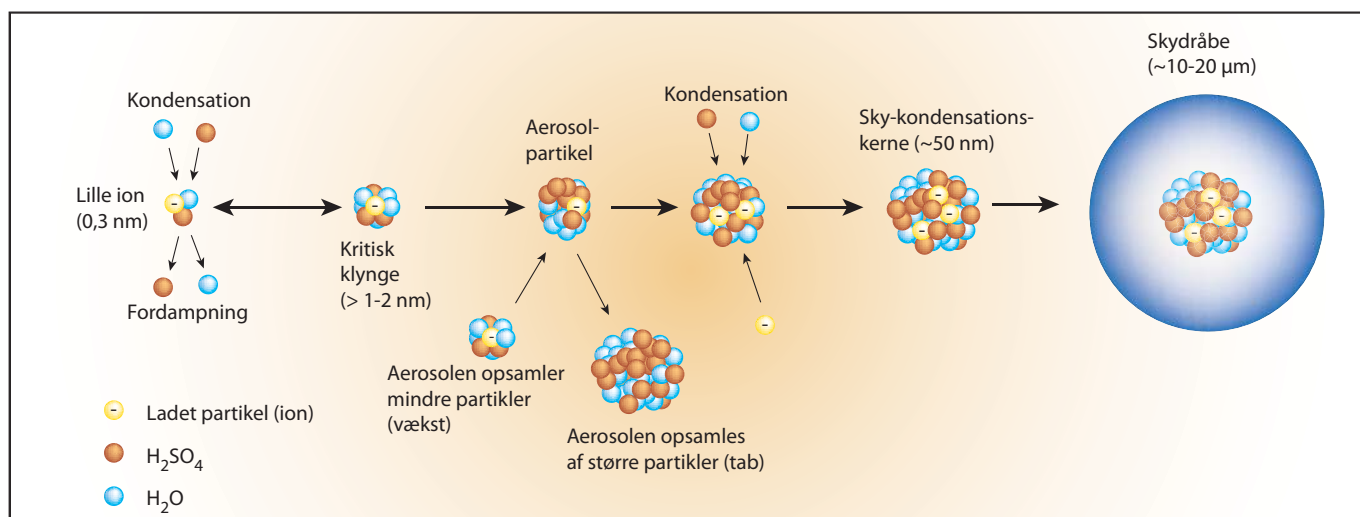
Figuren viser fordelingen af den baggrundsstråling, en gennemsnitlig dansker bliver udsat for. Som det fremgår udgør den kosmiske stråling kun en beskedne del af denne. Tallene på figuren er i enheden millisievert (mSv).

Kosmisk stråling består af energirige partikler, der rammer Jordens atmosfære. Bortset fra partikler udsendt i forbindelse med soludbrud, kommer partiklerne fra astrofysiske kilder udenfor vores eget Sol-system. Langt størstedelen af de kosmiske partikler er protoner, men tungere kerner bidrager også – f.eks. rammes Jorden af en jernkerne for hver ca. 14.000 protoner. I kollisionen med atomer i atmosfæren – typisk i 10 km's højde – skaber de kosmiske partikler nye partikler, der igen skaber nye, hvilket giver

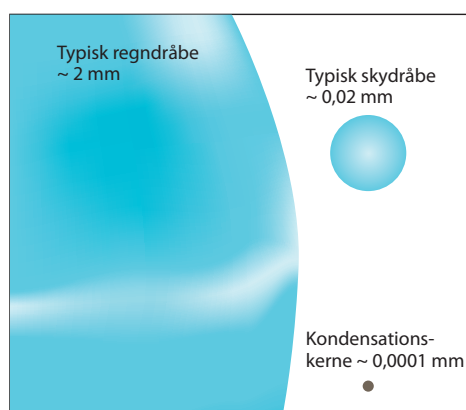
anledning til "partikelbyger" ved jordniveau. Blandt disse producerede partikler findes eksempelvis kosmiske myoner, der kan detekteres i laboratoriet. En tommelfingerregel er, at en detektor på jorden måler ca. 1 myon pr. kvadrantimeter pr. minut. Ved at måle blandt andet udstrækningen af sådanne byger kan man regne tilbage til primærpartiklens energi. Derved findes et spektrum som vist i figuren til højre hvor til sammenligning pilen viser de højeste menneskeskabte kollisionsenergier opnået ved CERNs LHC.



Figuren viser på Y-aksen antallet af ankomende kosmiske partikler i sekundet, pr. kvadratmeter og rumvinkelenhed, for hver milliard elektronvolt i energi. Denne partikelstrømning er angivet som funktion af partiklernes kinetiske energi i elektronvolt på X-aksen. Jo højere energier de kosmiske stråler har, jo sjældnere er de, og derved kræves der større detektorer for at måle dem. For hver tidobling i energi (afstanden mellem de store inddelinger på energiaksen), aftager hyppigheden cirka med en faktor  $10^{2,7}$ , dvs. omkring 500 gange (knap afstanden mellem inddelingerne på den lodrette akse).



Figuren viser skematisk dannelsen af kondensationskerner, som udgør grundlaget for dannelsen af skydråber.



Størrelsesforholdet mellem en typisk regndråbe, en skydråbe og så den kondensationskerne, der er nødvendig for at skydråben i første omgang kan dannes.

## Solen og klimaet

Siden afslutningen af sidste istid har der været en pæn sammenhæng mellem Solens aktivitet og en række såkaldte klimaparametre på Jorden. Hvis vi går meget mere end 100 år tilbage i tiden, bygger målinger af Solens aktivitet og Jordens klima dog på ofte på indirekte oplysninger fra f.eks. sedimenter, borer i Indlandsisen eller målinger af træernes årringe, og er derfor forbundet med betydelig usikkerhed.  $\text{CO}_2$ -koncentrationen har derimod været stort set konstant siden afslutningen af istiden og til sidst i 1800-tallet. Herefter har både  $\text{CO}_2$ -koncentrationen og temperaturen været stigende, men det har Solaktiviteten også været.

Et tilbagevendende tema i klimadebatten er derfor, hvor stor en del af de klimavariationer, vi ser i dag, der skyldes Solen (eller andre naturlige påvirkninger), og hvor meget, der skyldes menneskets aktiviteter. FN's klimapanel (IPCC) vurderer, at Solen kun er ansvarlig for 8 % af klimaændringerne, men angiver samtidig, at tallet er meget usikkert, eftersom kvantificeringen af Solens bidrag til klimaændringerne er meget ufuldstændig. De fleste store klimamodeller inkluderer således kun en brøkdel af de mange bidrag fra Solen til Jordens atmosfære. Typisk bruger modellerne den totale solindstråling og strålingen i UV-området som input, mens effekter af variationer i solvinden, magnetfeltet og kosmiske partikler negligeres.

### Klynger med kritisk størrelse

Små klynger dannes konstant i atmosfæren, men om de vokser sig større er en konkurrence mellem fordampning fra og kondensering på klyngen. Og her er problemet, at så længe klyngen er lille, vil det energimæssigt være mere fordelagtigt for et molekyle at fordampe end at kondensere. Hvis det imidlertid lykkes klyngen at vokse sig over en kritisk størrelse, der ligger på omkring 1 nm, så er den stabil og kan fortsætte sin vækst, fordi det nu er attraktivt for nye molekyler at kondensere på dens overflade.

Der er flere måder, hvorpå klyngerne kan hjælpes til at nå den kritiske størrelse. For eksempel har målinger på CERN (som omtalt i Aktuel Naturvidenskab nr. 4-2011) vist, at tilstedeværelsen af ammoniak kan føre produktionen af stabile klynger med flere størrelsesordener, ligesom forskellige organiske stoffer også menes at kunne stabilisere klyngerne.

På samme måde kan en ladning på klyngen være med til at stabilisere den, fordi den elektriske tiltrækning forhindrer molekylerne i at fordampe og dermed reducerer størrelsen på den kritiske klynge. Selv efter at klyngen er blevet stabil kan det være en fordel for den at have ladning, fordi den elektrostatisk vekselvirkning måske får

den til at vokse hurtigere end de neutrale konkurrenter. Mekanismen kaldes ion-induceret nukleation og allerede den skotske fysiker og kemiker Charles Wilson havde i starten af 1900-tallet bemærket, at ioner var meget effektive til at danne klynger i en atmosfære med en overmættet vanddamp. Wilson brugte i øvrigt sin indsigt til at udvikle tågekammeret, som i årtier var et af partikelfysikkens vigtigste redskaber, og som i 1927 blev belønnet med nobelprisen i fysik.

I atmosfæren danner de energirige kosmiske partikler store mængder ioner, så hvis de kosmiske partikler kan styre mængden af aerosoler kan de også styre skydækket og dermed påvirke klimaet.

### Eksperimenter med aerosoler

Desværre er det umuligt at lave reproducerbare eksperimenter i selve atmosfæren, så for at studere mekanismen er man nødt til at efterligne forholdene i laboratoriet. Da det også er umuligt at styre, hvor og hvornår de kosmiske partikler rammer Jordoverfladen, er det desuden nødvendigt at benytte partikler fra en accelerator. Heldigvis er den energimængde, en hurtig ladet partikel afsætter i en passende afgrænset mængde stof, uafhængig af hvilken type partikel der er tale om – en



elektron, en proton eller sågar en af deres antipartikler. Dermed er antallet af dannede ioner uafhængigt af partikeltypen. Antallet er også stort set uafhængig af partiklens energi, hvis blot partiklen ankommer med en hastighed, der er tilstrækkeligt tæt på lysets, såkaldt relativistiske partikler. Så man kan forvente, at de partikler, der dannes i en kosmisk byge – som har vidt forskellige energier, og er af mange forskellige typer – i denne sammenhæng opfører sig fuldstændigt som de relativistiske elektroner fra Danmarks største accelerator, ASTRID (Aarhus STorage Ring Denmark). Og selvom ASTRID er en såkaldt lagring, hvor det er hensigten at lagre elektroner i meget lang tid, kan det alligevel lade sig gøre at "skubbe" elektronerne ud fra ringen i en veldefineret stråle.

For at efterligne atmosfæriske forhold så vidt muligt under kontrollerede betingelser benyttede vi et 50 liter stort kammer fyldt med syntetisk luft, som desuden blev tilsat vanddamp og små mængder svovlsyre. Eftersom det eksperimentelt er meget kompliceret at tilføre svovlsyre i tilstrækkeligt små mængder, udnyttede vi i stedet en fotokemisk proces med ultraviolett lys, ozon, vand og svovldioxid, som i øvrigt efterligner produktionen af svovlsyre i den rigtige atmosfære.

Fremgangsmåden for undersøgelserne var at belyse kammeret med UV-lys i 10 minutter for at danne svovlsyre, samtidig med at antallet af aerosoler med en diameter over 4 nm blev målt. Dette blev gjort en gang i timen, for at lade de dannede aerosoler forsvinde før næste "skud". Efter at have udført eksperimentet gentagne gange, hhv. med og uden belysning af kammeret med elektronstrålen, kunne vi sammenligne målingerne. Effekten af elektronstrålen gennem kammeret – svarende til de kosmiske partikler gennem atmosfæren – viste sig dog at være så stor, at vi faktisk kunne se resultatet med det samme: Vi kunne skrue op og ned



Udsnit af Danmarks største accelerator, ASTRID.

for aerosoldannelsen, ved at tænde og slukke for strålen fra ASTRID!

### Aerosoler og klimaet

Med eksperimentet i Århus har vi – sammen med tidligere eksperimenter ved DTU Space i København – vist, at selv under forhold, der ligger tæt på den naturlige atmosfære, er ioner med til at forøge produktionen af stabile aerosoler. Disse resultater er for nylig blevet bekræftet af omfattende forsøg udført på CERN, hvor man desuden har observeret, at ion-effekten bliver endnu større ved lavere temperaturer.

En gas, der kan medvirke til at danne aerosoler i atmosfæren, har stor betydning for klimaet. Aerosoler har nemlig en direkte påvirkning på klimaet, fordi de reflekterer en del af den indkommende solstråling og dermed virker afkølede på Jorden. Den helt store betydning får de, hvis de også påvirker skydannelsen, fordi lavtliggende skyer har en kraftigt afkølede effekt. For at få betydning for skydannelsen skal en aerosol vokse til en størrelse på omkring 80-100 nm, hvor vanddampen for alvor

begynder at kondensere på aerosolen, som herefter hurtigt bliver til en skydråbe, der er synlig for øjet. Man taler om, at aerosolen bliver "aktiveret", når den når til dette skridt i sin udvikling. Spørgsmålet er derfor hvor mange af de små aerosoler, der rent faktisk når at vokse til skydråbestørrelse, inden de går tabt, for eksempel ved at de bliver indfanget af større partikler og dermed ikke bidrager til at forøge antallet af store aerosoler.

Der er udført flere modeleringer af processen, blandt andet for at kunne inkludere det i globale klimamodeller, men resultaterne er meget forskellige, så der er et stort behov for eksperimenter, hvor man kan følge aerosolernes vækst gennem mange timer. Det kræver et stort aerosolkammer, så partiklerne ikke går tabt for hurtigt ved at kolliderer med væggene. Det er muligt, at de store kamre, som findes på CERN og DTU Space, og som har et volumen på henholdsvis 26.000 og 8.000 liter, er store nok til at udføre forsøget, og begge steder arbejder man nu på at komme først med disse målinger.

### Om forfatterne:



Jens Olaf Pepke Pedersen  
er seniorforsker, ph.d.  
DTU Space,  
Tlf.: 3532 5723  
jopp@space.dtu.dk



Martin A. Bodker Enghoff  
er forsker, ph.d.  
DTU Space  
Tlf.: 3532 5704  
enghoff@space.dtu.dk



Ulrik I. Uggerhøj er lektor,  
dr. scient  
Institut for Fysik og Astronomi  
Aarhus Universitet  
Tlf.: 2338 2373  
ulrik@phys.au.dk

### Videre læsning:

Videnskabelige afhandlinger:  
Enghoff, M.B., m.fl. (2011):  
Aerosol nucleation induced by  
a high energy particle beam.  
Geophysical Research Letters,  
vol. 38, L09805, 4 pp.

Artiklens "side" på Aktuel  
Naturvidenskabets website:  
<http://aktuelnaturvidenskab.dk/nyeste-numre/6-2011/kosmiske-partikler-og-skykim>  
Her kan du få mere information og finde links til filmklip, ekstramateriale mv. QR-kode:

