

Dannelsen af skyer er en af de store ubekendte faktorer i klimasystemet. Men for at undersøge dem skal man ikke nødvendigvis stige til vejrs. Man kan også tage langt ned under jorden.

# Rejsen under jorden



## Forfatter



Jens Olaf  
Pepke  
Pedersen,  
seniorforsker

DTU Space,  
jopp@space.dtu.dk

En af de ældste danske romaner er *Niels Klims Underjordiske rejse*, som Ludvig Holberg udgav i 1741 på datidens verdenssprog latin. Bogen fortæller historien om den nyuddannede teolog Niels Klim, der under udforskningen af en hule i Bergen falder ned i Jordens underverden. Her begynder hovedpersonen en forunderlig rejse gennem Jordens indre, som Holberg har befolket med en række besynderlige og sære folkeslag. Holberg havde dog næppe forudset, at vi i vores generation faktisk kan finde små underjordiske samfund i form af forskere, der arbejder i dybtliggende laboratorier verden over. En af faciliteterne er det britiske *Boulby Underground Laboratory*, som ligger i 1100 meter under jorden, og det blev min og min kollega Martin Eng-hoffs arbejdsplads i en lang række perioder (typisk på 1-2 uger) fordelt over halvandet år.

## Fysikere i kaliumminen

Boulby, der som navnet antyder, har haft tidlige besøg af danskere, ligger ved den engelske Nordsø-kyst omkring 50 km syd for Newcastle og er hjem-

sted for en kommerciel kaliummine. Siden 1973 har mineselskabet Cleveland Potash udvundet kaliumklorid (en type potaske), og minen producerer nu over halvdelen af det kalium, der bruges til gødning i Storbritannien, og derudover en stor mængde til eksport. Potasken er oprindeligt aflejret sammen med salt i forbindelse med fordampningen af en stor saltsø, der for omkring 200 millioner år siden dækkede et område omkring det nuværende Nordsøen og Østersøen. Siden er saltlagene begravet under andre aflejringer, så de i dag ligger op til 1,5 km under overfladen, og en stor del af udvindingen foregår nu mange kilometer ude under Nordsøen.

Mineselskabet har stillet en nedlagt minegang til rådighed for opbygningen af et laboratorium, der i 10 år har været hjemsted for astrofysiske forskergrupper, som har ledt efter det mystiske mørke stof, som en stor del af universet menes at bestå af. En af kandidaterne til mørkt stof er "WIMP"s – Weakly Interacting (svagt vekselvirkende) Massive Particles, som omfatter flere mulige partikler, herunder en

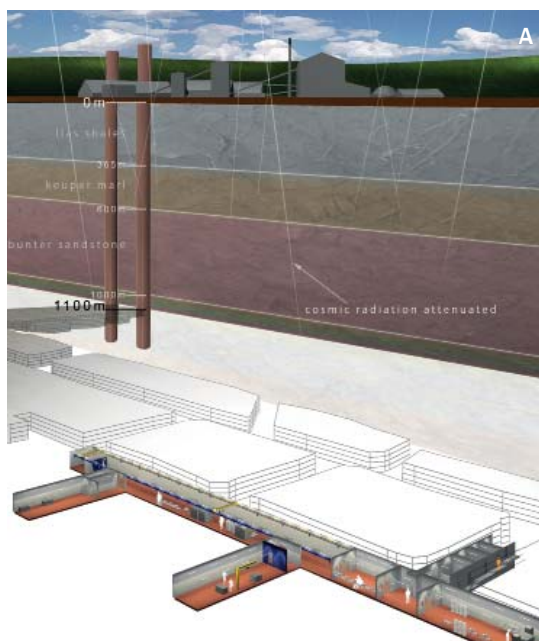
Artiklen kommer fra tidsskriftet *Aktuel Naturvidenskab*: [aktuelnaturvidenskab.dk](http://aktuelnaturvidenskab.dk)

kandidat med navnet neutralino, som igen findes i flere varianter, og hvoraf den letteste har den tiltalende egenskab, at den er stabil og – i hvert fald i nogle modeller – er produceret i det tidlige univers. Desuden vekselvirker den kun med andre partikler via tyngdekraften og de svage kernekræfter, hvilket også passer på karakteristikken af det mørke stof.

Hvis WIMPs skulle vise sig at eksistere, betyder den svage vekselvirkning med normalt stof, at det vil være ekstremt vanskeligt at finde dem i eksperimenter, og derfor er det en stor fordel at gå under jorden, hvor den generende baggrund fra kosmiske partikler for eksempel i Boulby-laboratoriet er reduceret næsten en million gange.

### Fri for kosmiske partikler

Netop muligheden for at slippe af med en baggrund af kosmiske partikler var også vores motivation



**A.** Illustrationen viser bygningerne med to skakter, hvoraf det ene bruges til mandskab og udstyr og det andet til at hente postaske op.

**B.** Bygningerne til Cleveland Potaske.

**C.** Transport til laboratoriet foregår sammen med minearbejderne.

**D.** Laboratoriet under jorden.



Foto: DTU



Foto: DTU

for at benytte det underjordiske laboratorium. I en årrække har vi studeret, hvordan kosmiske partikler medvirker til at danne aerosoler og dermed skyer i atmosfæren, og vi har udført eksperimenter, hvor vi simulerer de kosmiske partikler, for eksempel ved hjælp af hurtige elektroner. Vi har imidlertid ikke nogen kontrol over de naturlige kosmiske partikler, som konstant kommer ned til os fra verdensrummet, og tilmed har så stor energi, at de trænger flere hundrede meter ned i undergrunden, og dermed også permanent bestråler vores opstilling i laboratoriet i kælderen på DTU Space.

Ved at kunne "slukke" helt for de kosmiske partikler ville vi derfor få en enestående mulighed for præcist at skelne deres rolle i dannelsen af aerosoler i atmosfæren fra alternative mekanismer, som ikke involverer de kosmiske partikler. I princippet (som med så mange andre eksperimenter) et meget enkelt forsøg, men i praksis skulle det vise sig at være en hel del mere besværligt at arbejde 1100 meter under jorden i forhold til vores normale kælderlaboratorium.

### Fysikere og minearbejdere

Et af problemerne er således blot at komme frem til laboratoriet. Minen har to skakter, hvoraf den ene bruges til mandskab og udstyr, den anden til at hente potaske op. Transporten sker ved hjælp af to elevatorer, der hænger i samme kabel, når den ene kører ned, kører den anden op. Eftersom minen er i drift og vi helst ikke skal forstyrre produktionen, kører vi ned og op igen sammen med minearbejderne. Det betyder, at man normalt kun kan komme ned på et tidspunkt omkring kl. 8.30 om morgenen og op igen ved 17-tiden om eftermiddagen.

Nedturen foregår i buldrende mørke og varer små ti minutter. Stemningen er gerne koncentreret og fåmælt, men når arbejdsdagen er slut, er stemningen en del mere løssluppen hos minearbejderne, hvor turen op igen er en oplagt anledning til at drille forskerne.

Umiddelbart ligner vi minearbejdere, for vi er alle klædt i de samme orange overalls og sorte støvler samt udstyret med samme hjelm, lamper og sikkerhedsudrustning, men efter en lang arbejdsdag, kan man alligevel nemt se, hvem der har tilbragt dagen inden i et airconditioneret laboratorium, og hvem, der har arbejdet med boremaskinerne i kaliumlagene, hvor den naturlige temperatur ligger på omkring 42 grader. I mange af minearbejderens øjne sidder forskerne i årevis i et meget rent rum og drikker kaffe, mens de bruger løn af skatteyderens penge og foregiver at lede efter mørkt stof. Alligevel er de nysgerrige efter at finde ud af, hvad der foregår i laboratoriet, og vi blev som regel spurgt mindst en gang på hver tur, om vi nu havde fundet noget mørkt stof i dag. Det måtte vi desværre altid benægte, men det var naturligvis en anledning til at gengælde interessen og høfligt spørge, om de måske var stødt på noget potaske.

### I laboratoriet

Fra elevatorskakten har minearbejderne en længere køretur til deres arbejdsplads under Nordsøen, men vi går de 800 meter gennem de mørke minegange til laboratoriet. Tunellerne er bygget i lag af stensalt, og brede nok til, at to landrovere kan passere hinanden, så turen er ikke specielt klaustrofobisk. Men de første mindst 50 gange skal man ledsages på vejen, da der med det labyrintiske net af minegange, som er mere end 1000 km langt, er gode muligheder for at fare vild. Kraftige ventilatorer sender konstant frisk luft ned i gangene, og om foråret kan der endda lugte ganske landligt, omend man altid har en svag smag af salt på læberne fra det saltholdige støv, der ligger overalt.

Når man er fremme ved laboratoriet og får blæst støvet af tøj og sko, samt via en sluse bliver klædt om til en rentrumsdragt, og der er adgang til både telefon og internet, kan man dog hurtigt glemme, at man befinder sig en kilometer under jorden. I hvert fald lige indtil det tidspunkt, hvor man savner noget udstyr, som ligger på overfladen eller opdager, at man har glemt sin madpakke.

### Bly og kokosnødder

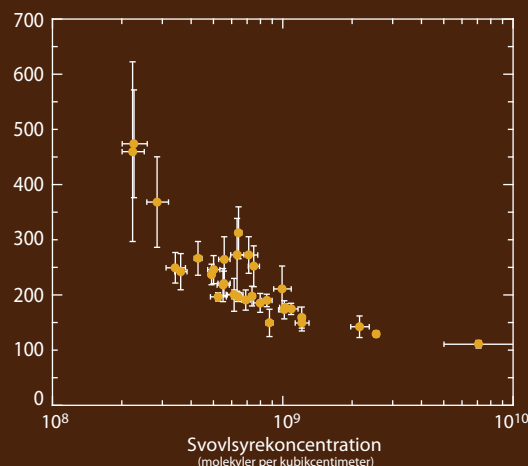
Selvom laboratoriet med hensyn til de kosmiske stråler er et af de mest stille steder i universet, er der til gengæld en svag baggrundsstråling fra radioaktive stoffer i undergrunden, som vil genere eksperimentet. Det er imidlertid en stråling, som man kan beskytte sig imod, og astrofysikerne, som med deres mørkt-stofeksperimenter har stor erfaring med den slags, havde også lovet at forsyne os med bly- og kobberklodser til at bygge en afskærmning omkring vores opstilling. Hvad de ikke havde fortalt var, at materialerne havde ligget i en minegang i flere år, så de første 14 dage under jorden foregik med at skrubbe og skure flere ton bly og kobber. Det var nok allede her, vi kom i tvivl om, hvorvidt det var et privilegium eller en straf at få adgang til at arbejde under jorden.

Radon udgjorde et særligt problem, som også ville forstyrre eksperimentet, og her kunne astrofysikerne oplyse, at aktivt kul nedkølet med flydende kvælstof var særlig velegnet til at filtrere radon. Og for yderligere at undgå radioaktivitet fra de aktive kul, anbefalede de kul fremstillet af kokosnødder fra Sri Lanka, som udmærker sig ved en særligt lav naturlig radioaktivitet.

### Resultater fra minen

I eksperimentet i minen simulerede vi i et reaktionskammer produktionen af aerosoler, som kondenserer fra vanddamp og svovlsyre-dampe, som også menes at være en vigtig kilde til aerosoler i den rigtige atmosfære. Ved hjælp af vores egne

Øget aerosolproduktion (%)



Figuren viser på X-aksen svovlsyrekoncentrationen i reaktionskammeret. Y-aksen viser, hvor meget ionerne forøger aerosolproduktionen i forhold til neutrale partikler alene. I Jordens atmosfære vil svovlsyrekoncentrationerne typisk være en størrelsesorden lavere end i eksperimenterne.

radioaktive kilder kunne vi "tænde" og "slukke" for ionerne i reaktionskammeret. Eksperimentet viste nu, at selvom vi fjerner stort set alle ioner fra vores reaktionskammer, så foregår der stadigvæk en betydelig aerosolproduktion fra neutrale mekanismer, som dermed ikke kan have noget med den kosmiske stråling at gøre, men vi kunne også se, at når vi tilsatte ioner, steg produktionen af aerosoler.

Ud fra målingerne kunne vi desuden konkludere, at ionerne bidrager til aerosolproduktionen på flere måder: For at klumpe sig sammen til en aerosol skal de deltagende molekyler først overvinde en potentialbarriere, og her hjælper ionerne molekylerne med at komme over barrieren, og holde aerosolen samlet. Men herefter hjælper ionerne også aerosolerne med at vokse hurtigere lige efter, at de er dannet, og det reducerer risikoen for at de falder fra hinanden igen. Begge dele gør det således mere sandsynligt, at en aerosol vil overleve, hvis der har været en ion involveret.

Ionernes rolle – som også var forudsagt inden eksperimentet – kan forklares med, at både svovlsyre- og vandmolekyler er polære molekyler, hvilket vil sige at de har en meget ujævn ladningsfordeling. Derfor vil en positiv ion tiltrække den nega-

## Eksperimentet

Ved overfladen producerer den kosmiske stråling og andre radioaktive kilder hvert sekund ca. to ionpar i hver kubikcentimeter af vores reaktionskammer, men i minen lykkedes det at få reduceret strålingen så meget, at ionproduktionen faldt med næsten tre størrelsesordener til mindre end 0,003 ionpar per kubikcentimeter per sekund. Det blev derfor muligt at lave meget fine sammenligninger mellem de ion-inducerede og de neutrale aerosolmekanismer (se boks).

En begrænsning i eksperimentet var størrelsen af vores reaktionsvolumen på 50 liter, som betød, at vi for at få et tilstrækkeligt stort signal måtte arbejde med højere koncentrationer af svovlsyre end i den naturlige atmosfære. Vi konstaterede dog, at desto tættere vi kom på en realistisk atmosfæresammensætning, desto større blev effekten af ionerne. Ved de laveste svovlsyrekoncentrationer i eksperimentet gav ionerne næsten en femdobling af aerosolproduktionen, så i de områder af Jordens atmosfære, hvor luften er meget ren, hvilket vil sige over de store oceaner, forventer vi, at ionerne helt vil dominere produktionen af små aerosoler. Resultatet har også motiveret os til at vende tilbage til laboratoriet med et større reaktionskammer på omkring 1.000 liter, som blev fremstillet i i England sidste år og nu ved at blive afprøvet på DTU Space.

## Tilbage til Boulby

Det nye reaktionskammer, som er finansieret af Forskningsrådet for Natur og Univers, vil gøre det muligt at opnå forhold, der både temperaturmæssigt og koncentrationsmæssigt er tæt på forholdene over verdenshavene, og hvor vi samtidig kan se aero-

tive ende af svovlsyre- og vandmolekylerne, og sørge for at de kommer tættere på hinanden. Det øger chancen for at få dannet en aerosol, og for at den vokser i de førte kritiske faser af dens tilværelse. Men efterhånden som aerosolen bliver større, får det mindre betydning, at den har en ladning. Eksperimentet viste i øvrigt også, at det udover vand kun kræver et eller to svovlsyremolekyler at få dannet en aerosol under de betingelser, vi havde i reaktionskammeret.

## Forsøgsopstillingen i minen i Boulby

Med regelmæssige mellemrum renses kammeret ved at strømme høje ozonkoncentrationer gennem kammeret samtidig med at det konstant belyses med UV-stråling.

- A Reaktionskammeret
- B Lyskilde til ultraviolet lys, der simulerer en del af solstrålingen
- C Radioaktivt cæsium-137 kilde, der simulerer den kosmiske stråling
- D Rør til indblæsning af gasblanding
- E Udtag til analyseinstrumenter
- F Afskærmning af bly (yderst) og kobber (inderst)

solerne vokse i længere tid. Samtidig har vi etableret et større samarbejde med nye britiske partnere, der omfatter universiteterne i Sheffield, Manchester, Birmingham og Oxford, og disse partnere vil deltage i eksperimenterne med ekspertise og udstyr, som vi ikke selv råder over.

Planen er at vende tilbage under til Boulby i 2014, og det bliver helt sikkert med Niels Klim i håndbaggen. Holberg skrev bogen mens han var professor ved Københavns Universitet, og han ønskede blandt andet at udfordre datidens faste forestillinger om samfundets indretning. Selvom bogen er skrevet for mere end 270 år siden, er den imidlertid stadig aktuell, og mange læsere vil utvivlsomt kunne nikke genkendende til bogens kritik af den konstante stræben efter forandring, hvor vi i stedet for besindig omtanke kaster os ud alskens projekter, eller som Holberg i beskrivelsen af et af de underjordiske samfund sarkastisk skriver: »Den Anseelse, Projektmagere her staae i, gaaer over al Forestilling, og jo urimeligere og umueligere et Forslag er, jo sikkrere er det paa almindeligt Bifald.«

### Videre læsning

Pedersen, J.O.P. m.fl.: Kosmiske Partikler og skykim, *Aktuel Naturvidenskab*, 2011 nr. 6, side 10

Pedersen, J.O.P.: Solaktivitet og klimaændringer, *Kvant*, 22, årg, 2011, nr. 4, side 22,

Pedersen, J.O.P. m.fl. Aerosol nucleation in an ultra-low ion density environment, *Journal of Aerosol Science*, bind 50, 2012 side 75-85



A. Indvielse af et nyt reaktionskammer på DTU Space, 31. januar 2013.

Foto: DTU.

B. På arbejde i laboratoriet.

Foto: DTU.

