

En gigantisk isterning

– lysglimt fra Antarktis' dyb fortæller om kosmos

Forskere har omdannet dele af den antarktiske is til et kæmpemæssigt laboratorium for måling af neutrinoer fra verdensrummet. Og et endnu større er på vej.

Forfattere



Rune Elgaard Mikkelsen er cand. scient og er nu

ph.d.-studerende
rune@phys.au.dk



Ulrik Ingerslev Uggerhøj er lektor,

ulrik@phys.au.dk

Begge ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Hvert sekund rammes jorden af millionvis af partikler fra det ydre rum. Disse meget energirige partikler bevæger sig med næsten lysets hastighed, og har på deres vej passeret fjerne egne af universet. I marts 2013 blev det endelig vist, at de fleste kosmiske partikler skabes i galaktiske supernovaer, hvor en stjernes endeligt resulterer i en kæmpe eksplosion. I denne proces udsendes energirige partikler i alle retninger, og det omkringliggende kosmos fyldes med elektroner, protoner og tunge ioner som fx jern – de kosmiske partikler.

Men det er ikke hele historien. Endnu længere væk fra jorden, i centrum af ekstremt aktive galakser og steder hvor sorte huller kolliderer med hinanden, skabes kosmiske partikler med ultrahøj energi. Deres energi er så stor, at de har en milliard gange mere energi end de partikler, som kolliderer i eksperimenterne i verdens største accelerator, Large Hadron Collider ved CERN. Det er kun i sjældne tilfælde, at disse partikler med ekstrem energi udsendes. Her på Jorden kan man således kun måle én ultrahøjenergi-partikel pr. 10 år – og vel at mærke kun, hvis ens detektor er 100 km² stor.

Lige siden den første meget energirige kosmiske partikel blev målt i 1962, har man været interesseret i, hvordan disse partikler opnår deres energi, og hvor de kommer fra. Det har været meget vanskeligt at finde ud af, da partiklerne på deres vej mod jorden passerer igennem svage magnetfelter som fx det, der findes overalt i Mælkevejen. Da alle de kosmiske partikler er elektrisk ladede betyder det nemlig, at deres bevægelsesretning afbøjes i magnetfelterne. Når de rammer Jorden kan man altså ikke forvente, at deres ankomstretning peger tilbage i retning af, hvor partiklerne oprindeligt blev skabt.

Observatorium under is

Allerede i starten af 1970'erne fandt man en mulig løsning på dette problem. Det er nemlig sådan, at når kosmiske partikler bliver skabt, udsender de

neutrinoer langs deres bevægelsesretning. Da disse elementarpartikler er næsten masseløse og elektrisk neutrale, bevæger de sig langs rette linjer gennem universet. Neutrinoerne kan derfor bruges til at pejle sig tilbage til det sted, hvor de kosmiske partikler blev skabt.

Det var dog først ved udgangen af år 2010, at det blev muligt at udnytte denne erkendelse i praksis. Her stod verdens største neutrino-observatorium endelig færdigbygget efter knap 40 år med forarbejde og teknologisk udvikling. Den samlede konstruktion består af 5.160 detektor-moduler, som er koblet sammen i ét stort netværk. For at optimere observatoriets synsfelt er det placeret på Sydpolen, hvor det konstant er dækket af is. Observatoriet har derfor fået navnet IceCube. De 5.160 detektor-moduler er samlet på 86 lange kabler, som ved hjælp af kogende vand og glohede metalbor er sænket ned i 1,5-2,5 km's dybde. Her er isen så ren, at lys kan ses på flere hundrede meters afstand. Det er denne egenskab, der gør de ufremkommelige omgivelser på Antarktis til et perfekt sted at placere et neutrino-observatorie.

Støj-neutrinoer er en udfordring

Fordelen ved den iskolde placering af observatoriet er, at man ikke behøver måle neutrinoerne direkte. I stedet bruger man netværket af detektor-moduler til at måle det lys, neutrinoer medvirker til at producere, når de bevæger sig gennem isen. For at det kan lade sig gøre, har man måttet løse en lang række udfordringer af både teknisk og fysisk karakter. Fx skaber atmosfæren en hel del støj, som må sorteres fra i den endelige databehandling. Hver gang der måles en million signaler er der blot et af dem, som stammer fra en neutrino. De resterende signaler kommer fra partikler skabt i atmosfæren, som udsender lys, når de indfanges i den arktiske is. For at afskærme dette signal måler man kun efter neutrinoer, der kommer ind i detektoren nedefra – støj fra den nordlige del af atmosfæren kan nemlig ikke trænge hele vejen igennem Jorden.

Et typisk signal stammer fra en neutrino, der er udsendt af en døende stjerne et sted i verdensrummet, der flyver direkte igennem Danmark og ind i Jordens indre for til sidst at blive detekteret af IceCube på sydpolen. Neutrinoernes evne til ufortrødent at passere igennem en hel planet er årsagen til, at det har taget lang tid at udvikle en detektor, som effektivt kan måle dem.

I sommeren 2012 blev de første målinger offentliggjort, og lige siden har forskere været i gang med at fortolke dem. Det er endnu uklart, hvor de kosmiske partikler med ultrahøj energi kommer fra, men hver dag, hvor detektoren optager data, kommer vi et svar nærmere.

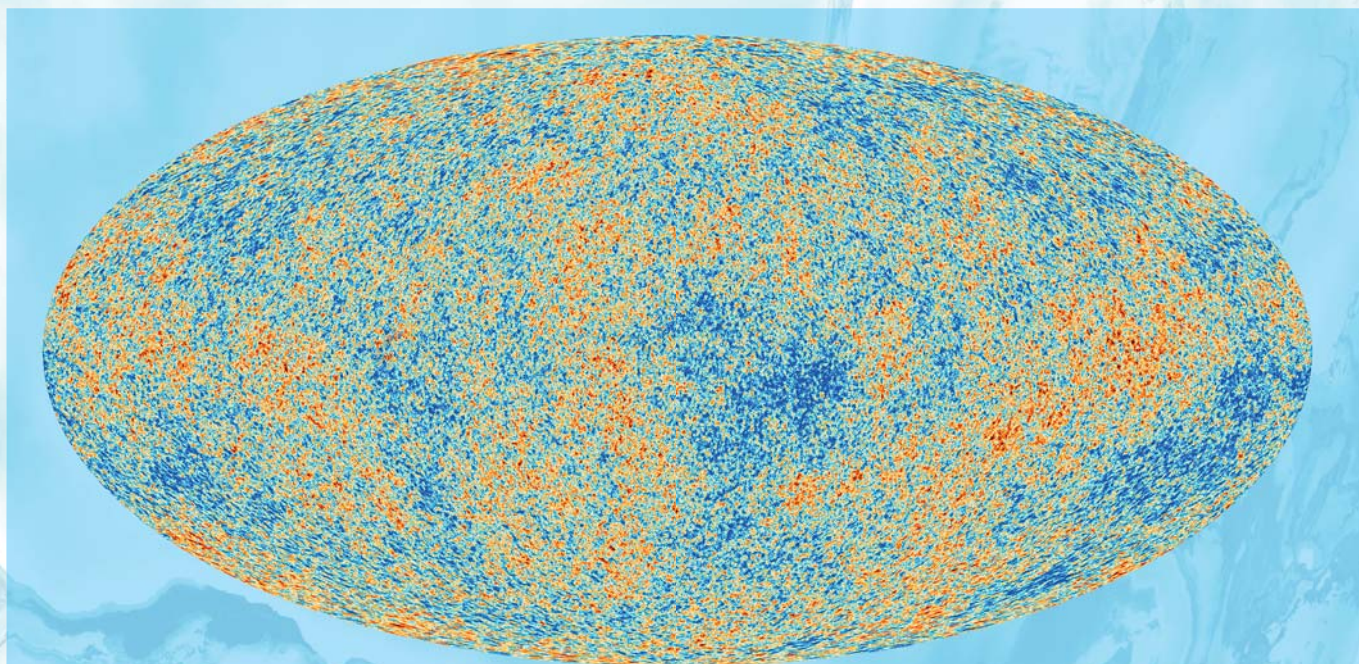
Intentionen med IceCube har været at kunne måle så mange kosmiske neutrinoer som muligt, og det er primært derfor, at detektoren er så stor, som den er. Det gør imidlertid, at den har svært ved at måle neutrinoer med lav energi, som ikke producerer særligt meget lys. Derfor har man i centrum af IceCube en separat detektor kaldet DeepCore, der består af 6 tætpackede strenge monteret med meget

sensitive detektorer, som kan måle helt ned til én foton ad gangen. Herfra kan man med resten af IceCube som afskærmning foretage præcisionsmålinger af neutrinoer og deres egenskaber.

Nyt kæmpeobservatorium på vej

Som en udbygning af IceCube og DeepCore planlægger man nu at bygge et nyt observatorium kaldet Precision IceCube Next Generation Update (PINGU). Dette observatorium skal være væsentligt mindre, og derfor kunne måle med meget højere præcision. PINGU vil kunne fortsætte DeepCores arbejde, og det vil være muligt at studere mange forskellige fænomener indenfor partikelfysik og helt andre videnskabelige discipliner. Fx vil man kunne lave et slags neutrino-røntgenbillede af Jorden, og på den måde bestemme densiteten af elektroner, protoner og neutroner helt ind til Jordens indre. Sådanne resultater vil kunne give geologerne helt nye muligheder for at vurdere egenskaberne af Jordens kerne.

Imens vi venter på afgørende resultater fra IceCube, DeepCore og PINGU, planlægges det næste store neutrino-observatorium. Det skal bygge på IceCu-



Kosmiske mikrobølger

Dette nye billede af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling blev målt af PLANCK-satellitten, og er blevet offentliggjort i 2013. Man har målt temperaturen af det meget svage lys, som er tilbage fra universets tidlige alder; på figuren er vist temperaturudsving på plus/minus 200 mikroKelvin, hvor blå farve er kold og rød er varm. Lyset kommer fra en meget vigtig overgangsfase i universets udvikling. Før dette tidspunkt var universet så tæt med materiale, at lys ikke kunne bevæge sig, i lighed med, at det lys, der produceres i Solens centrum, aldrig kommer ned til Jorden. Men ligesom den lavere tæthed af materiale på Solens overflade tillader lyset at rejse væk, så har universet siden det var 370.000 år gammelt været "tyndt" nok til, at lys kan rejse frit. Der-

for er temperaturfordelingen af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling et billede på tætheden af materialet, da lyset blev frigivet. I denne artikel har vi set, at neutrinoer rejser næsten uhindret igennem stof. Det betyder, at man forventer, at der findes en tilsvarende kosmisk neutrino-baggrund stammende fra et endnu tidligere tidspunkt i universets historie. Mere præcist forventer man, at neutrinoerne slap fri, da universet var blot 2 sekunder gammelt. Men disse neutrinoer har en meget lav energi – cirka 10^{20} gange lavere end, hvad ARIANNA skal måle efter. Man regner derfor ikke med, at vi kommer til at kunne måle denne neutrino-stråling.

Credit: ESA and the Planck collaboration

To forskere er her ved at installere en af teststationerne til ARIANNA - ca 500 km fra den geografiske sydpol hvor IceCube er placeret.

Foto: Spencer Klein



bes virke og måle kosmogene neutrinoer, en speciel kategori af kosmiske partikler, der er så sjældne, at observatoriet skal være kæmpestort: Det nuværende designforslag er på 900 km². Selve eksperimentet kaldes Antarctic Ross Ice-Shelf ANtenna Neutrino Array (ARIANNA) og kan være fuldt funktionsdygtigt indenfor få år. De kosmogene neutrinoer er altså endnu ikke blevet målt, men de forskellige teoretiske beregninger forudsiger, at man med ARIANNA skal kunne måle mellem 3 og 51 neutrinoer om året.

Neutrinoerne der bliver nødt til at være der

I de mange år, hvor man har målt kosmiske partikler, har man spekuleret over, hvor de stammer fra. Der har gennem tiden været mange bud, som har kunnet udelukkes på baggrund af forskellige typer af observationer. I dag er der stadig en række potentielle kilder tilbage, som man håber at detektere med de store neutrino-observatorier. Under et kaldes man disse neutrinoer for kosmiske neutrinoer. Hvis IceCube ikke måler kosmiske neutrinoer fra de kilder, man forventer, må man genoverveje teorierne om, hvor de kosmiske partikler bliver skabt. I modsætning til de kosmiske neutrinoer har man de kosmogene neutrinoer, som vi nævnte før. De skabes ikke ved kilden, men i løbet af de kosmiske partiklers rejse gennem universet. Der er to eksperimentelle grunde til, at man er meget sikker på, at de kosmogene neutrinoer findes: 1) Man har allerede gennem mange år målt de kosmiske partikler med ultrahøj energi. 2) Vi ved, at universet er fyldt af fotoner fra den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling (se boks). Kombinationen af disse to observationer gør, at man forventer at kunne måle kosmogene neutrinoer.

Det skyldes, at de kosmiske partikler på grund af deres høje energi vil mærke baggrundstrålingen som meget energirig, og når de kolliderer med denne, udsendes der kosmogene neutrinoer. Og disse kan måles med ARIANNA. I princippet

kan de kosmogene neutrinoer også måles med IceCube, men det observatorium er bare ikke stort nok til at kunne måle ret mange.

En væsentlig grund til, at man gerne vil måle de kosmogene neutrinoer er, at deres eksistens er nødvendig, hvis vores forståelse af universets udvikling er korrekt.

Danske overvejelser

Som det er fremgået, er der fuld fart på den eksperimentelle neutrinoastronomi. Allerede på nuværende tidspunkt har vi fået meget viden ud af de store observatorier, både om neutrinoer, kosmiske partikler, Sydpolens is og meget andet.

Desværre har man endnu ikke været i stand til med sikkerhed at sige, hvor de kosmiske partikler opnår deres ultrahøje energi. Men IceCube-forskerne konkluderede i 2012, at det er usandsynligt, at energiudvekslingen sker i de kataklysmiske gamma-glimt, der ellers længe har været en førende kandidat. De fleste forskere hælder derfor nu til, at de mest energirige kosmiske partikler bliver accelereret i aktive galaksekerner.

En af os (Rune) har bidraget til IceCube-projektet med en analyse af de herskende forklaringer på, hvordan de kosmiske partikler med ultra-høj energi bliver skabt. I lighed med IceCube-kollaborationens egen analyse viser vore resultater, at de fleste modeller forudsiger langt flere neutrinoer end IceCube indtil videre har målt. Dermed kan adskillige af disse modeller erklæres usandsynlige.

Når det forhåbentlig indenfor en årrække bliver muligt at måle de kosmogene neutrinoer med ARIANNA, vil de to eksperimenter IceCube og ARIANNA kunne understøtte hinanden. Men derudover har de vidt forskellige opdagelsespotentialer, så en succesfuld opførsel af ARIANNA vil kunne give mange spændende opdagelser indenfor astrofysik og elementær partikelfysik.

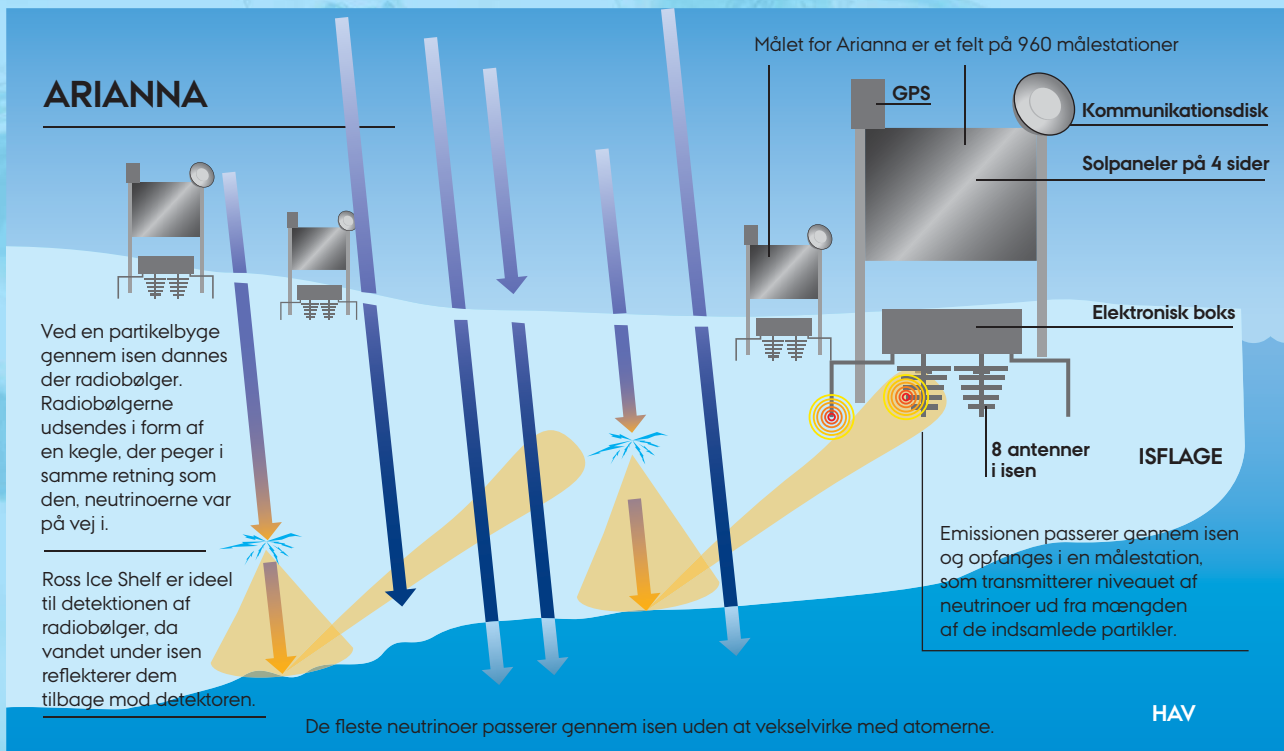
Derfor er det for tiden under overvejelse, hvorvidt Danmark skal tilslutte sig dette forskningsarbejde fra 2015 og frem. Forskere og studerende fra Aarhus og Københavns Universitet vil kunne bidrage med hardware-udvikling, software-programmering, installation af detektorer, analyse-arbejde og teoretiske beregninger.

Allerede nu er vi på Aarhus Universitet i gang med at lave målinger, som kan forbedre forståelsen af signalet i IceCube. Vi ser for tiden på, hvor meget lys en partikel laver, når den passerer igennem en uniaxial krystal, og hvordan det afhænger af partiklens bevægelsesretning gennem denne. Det kan have betydning for IceCube, da isen i 2,5 km's dybde kan være presset sammen til makroskopiske krystaller. ■

Læs mere

Steen Hannestad: Universet - fra superstrengte til stjerner. Aarhus Universitetsforlag.

Tina Ibsen: Gåden om kosmiske strålers oprindelse måske løst. videnskab.dk.



ARIANNA er det seneste forslag til en udbygget kosmisk neutrino-detektor. Den skal bestå af 900 enkelte målestationer spredt ud over 200 km² på Antarktis. Teststationer er allerede installeret og dataopsamlingen har indtil videre været succesfuld. Stationerne består primært af en 1 meter lang antenne gravet ned i 2 meters dybde. Herfra kan antennerne måle nedad mod den vandrette is-vand overflade 500 m nede, der er karakteristisk for hele den 800 km store flydende isflage, som ARIANNA skal ligge på. Neutrinoer med ultrahøj energi, som reagerer i atmosfæren, kan skabe en kæmpe lavine af partikler og radiobølger. Hvis disse radiobølger bevæger sig ned gennem isfla-

gen, vil de reflekteres på dens underside, og sendes direkte tilbage op mod ARIANNA. Ved hjælp af denne refleksionsteknik kan man med relativt få målestationer overvåge et meget stort areal for neutrinoer. Der er dog mange praktiske problemer knyttet til at tapesere den antarktiske is med spredte målestationer. For eksempel skal de hver især stå for deres egen forsyning af strøm, hvilket man har valgt at klare med solpaneler. Men med et betragteligt årligt snefald er det en stor udfordring at få solpanelerne til at virke, ligesom et andet pudsigt problem er, at man ikke kan få elektrisk "jord" til målestationerne.

IceCube måler neutriner døgnet rundt

Placeret ved den geografiske sydpol måler IceCube neutrinoer døgnet rundt. Detektoren er bygget rundt om den gamle detektor, AMANDA, og indeholder i midten en specialdetektor kaldet DeepCore.

Det har været en stor teknologisk udfordring at bygge IceCube, og der er blevet brugt mange mandtimer på først at udvikle teknikken og nu på stadig udvikling af analyse-software. Resultatet er et kæmpemæssigt laboratorium, som kan teste fysiske teorier ligefra de helt små partikelfysiske størrelser og op til de allerstørste kosmologiske skalaer. Man kan fx måle neutrinoernes masse og deres oscillation, svagt vekselvirkende massive partikler (såkaldte WIMP's), der er fanget i Solens og Jupiters tyngdefelt, magnetiske monopoler, stjerneudvikling og neutrinoindsendelse ved supernovaer og mange andre interessante fænomener.

Credit: IceCube Science team.

