

Neutrinos on the Rocks

Markus Ahlers og D. Jason Koskinen, Niels Bohr International Academy & Discovery Center, Niels Bohr Institutet

IceCube-projektet forvandlede en kubikkilometer naturlig antarktisk is ved Sydpolen til verdens største neutrinodektektor. Detektoren gør det muligt at observere neutrinoer fra kosmiske kilder og studere grundlæggende egenskaber ved disse "spøgelsesagtige" partikler. I 2013 opdagede IceCube-observatoriet kosmiske neutrinoer med meget høj energi, men med ukendt oprindelse. For nylig har IceCube fundet de første beviser for, at de højenergetiske neutrinoer udsendes i forbindelse med processer omkring et supermassivt sort hul i centrum af en fjern galakse. I forventningen om at spille en afgørende rolle for astropartikelfysik planlægger IceCube nu betydelige opgraderinger af det nuværende instrument samt en næste-generationsdetektor.¹

Kort efter opdagelsen af neutrinoen i 1956 opstod idéen om, at den repræsenterede en fremragende astronomisk budbringer. Neutrinoer er elementarpartikler med en meget lille (og endnu ukendt) masse og ingen elektrisk ladning. De vekselvirker kun svagt med stof, og de kan derfor undslippe astrofysiske objekter med høj densitet og krydse store kosmiske afstande uden at blive absorberet eller afbøjet. Neutrinoer er ikke alene potentielle budbringere fra nogle af de mest eksotiske fænomener i vores univers, men de udgør også en dør ind til forståelsen af fundamental partikelfysik på de allermindste skalaer. På Sydpolen overlapper neutrinoastronomi og partikelfysik gennem den forskning, der udføres med neutrinoobservatoriet IceCube.

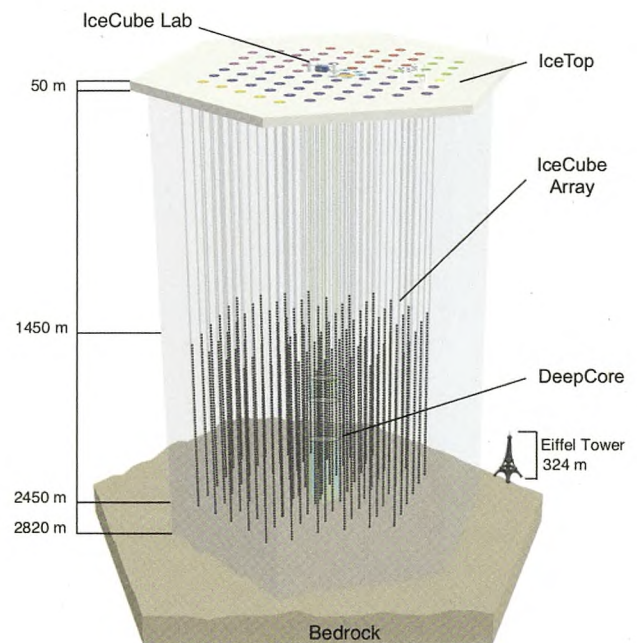
Vi forventer, at der sker udsendelse af neutrinoer fra mange forskellige processer i vores univers. Fx er det varme og tætte, tidlige univers ansvarlig for en lavenergetisk baggrund af ældgamle neutrinoer med en gennemsnitlig tæthed på ca. 336 neutrinoer i hver kubikcentimeter. Vores Sol og andre stjerner producerer konstant nye neutrinoer som et biprodukt fra kernefusion, og når tunge stjerner dør, udsendes samtidig et enormt udbrud af neutrinoer, som er ansvarlige for at transportere størstedelen af stjernernes gravitationelle bindingsenergi væk.

En af de vigtigste grunde til at udføre astronomi med neutrinoer er neutrinoens unikke mulighed for at udpege de mest energirige kilder til ikke-termisk stråling i vores univers. Disse kilder er ansvarlige for kosmiske stråler (ladede partikler, der rejser igennem universet) med ti millioner gange højere energi, end hvad der kan opnås i accelerators som Large Hadron Collider (LHC). Jordens atmosfære bliver konstant bombarderet med disse kosmiske stråler, som producerer enorme byger af sekundære partikler, der kan nå ned til jordoverfladen. Jordbaserede observatorier kan identificere intensiteten af disse partikler, men deres oprindelse har været et åbent spørgsmål i mere end et århundrede.

Vi forventer en emission af højenergetiske neutrinoer fra vekselvirkningen mellem kosmiske partikler og gas eller stråling på deres lange rejse fra deres kilder til Jorden. Disse vekselvirkninger producerer pioner, der efterfølgende henfalder via $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ efterfulgt af

$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ og relaterede processer. Typisk modtager en neutrino fra denne produktionskanal ca. 5% af energien fra en nukleon i en kosmisk stråle. Disse neutrinoer er derfor et stensikkert tegn på den kosmiske stråling.

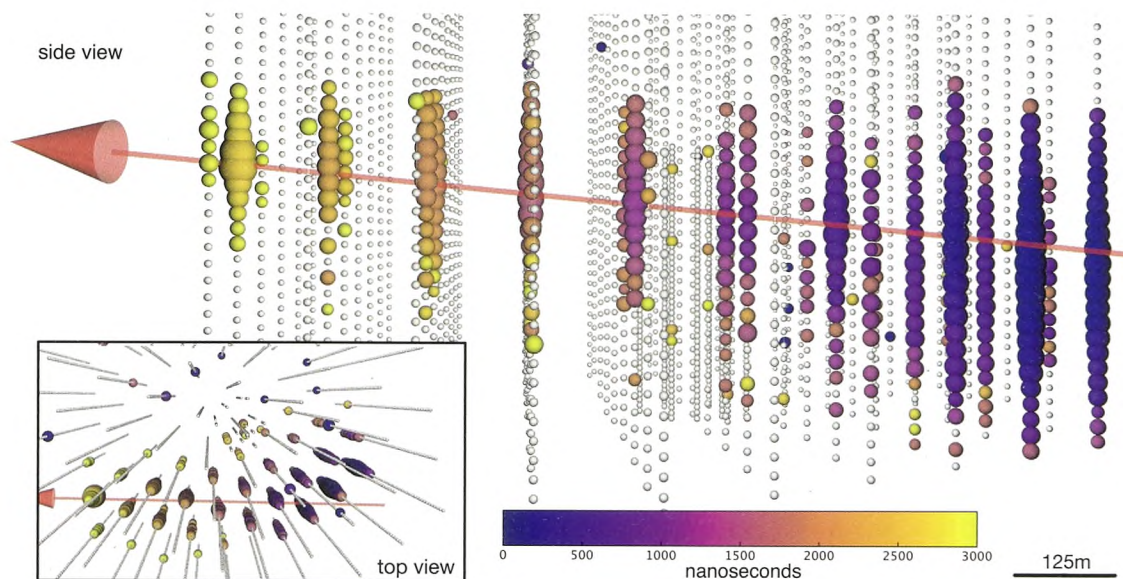
Neutrinoernes svage vekselvirkning, som gør dem i stand til at nå Jorden, giver en udfordring for den eksperimentelle detektion. For at give en idé om størrelsen af problemet, så kan en neutrino med en kinetisk energi² på 1 GeV passere gennem en blyplade med en tykkelse på en astronomisk enhed (afstanden fra Jorden til Solen!), før vi kan forvente, at den kolliderer med et af blyatomerne. Situationen bliver noget bedre ved højere energier, men det illustrerer det principielle problem: Neutrinoteleskoper skal som minimum være ekstremt store. De mest følsomme neutrinoobservatorier benytter sig derfor af store, naturlige reservoirer af egnede detektormedier, der gør det muligt at registrere de sjældne neutrinoekselvirkninger.



Figur 1. En skitse af IceCube-Observatoriet ved Sydpolen, som fremhæver de vigtigste komponenter: IceCube, IceTop og DeepCore (se teksten).

¹ Artiklen er oversat fra engelsk af Jens Olaf Pepke Pedersen og Morten Ankersen Medici.

² Vi bruger partikelfysikernes energienhed elektronvolt (eV). En energi på 1 GeV svarer omtrent til hvilemasseenergien af en proton.



Figur 2. En begivenhed med et højenergi-spør (en vekselvirkning mellem en myon og en neutrino) observeret den 22. september 2017. Den rekonstruerede retning af myon-sporet (omkring 6° under horisonten) og dens høje energi indebærer, at sporet er produceret ved en vekselvirkning med en astrofysisk neutrino.

IceCube-Observatoriet

I øjeblikket er det mest følsomme højenergi-neutrinoobservatorium (i energiområdet TeV-PeV) IceCube-Observatoriet, som er placeret ved Sydpolen. Figur 1 viser en skitse af hoveddetektoren, der består af en kubikkilometer ultraklar gletsjeris, som er udstyret med 5.160 moduler med fotomultiplikatorrør, som registrerer lyset fra hurtige, ladede partikler (den såkaldte Cherenkovstråling), der går gennem detektoren. Modulerne er fordelt langs 86 kabler (som kaldes strenge), som når mellem 1,5 km og 2,5 km ned under overfladen. De fleste strenge følger et trekantet gitter med en bredde på 125 m, med undtagelse af otte strenge i midten. Disse strenge danner sammen med det første lag af de omgivende "standardstrenge" en del-detektor med en lavere energitærskel, som kaldes DeepCore.

Den større IceCube-detektor er optimeret til neutrinoastronomi ved energier over 1 TeV, og DeepCore er konstrueret til at studere neutrinooscillationer og søge efter signaler fra mørkt stof i energiområdet mellem 10 GeV og 1000 GeV. Detektorerne nede i isen suppleres med en overfladedetektor, kaldet IceTop, som gør det muligt at identificere kosmiske stråler, som går igennem IceCube ovenfra. IceCube-Observatoriet har været fuldt instrumenteret og operationelt siden 2011.

Neutrinoer detekteres i IceCube via Cherenkovstrålingen fra de ladede partikler, som dannes i vekselvirkninger mellem neutrinoer og nukleoner i isen i detektoren. De mest værdifulde begivenheder med henblik på neutrinoastronomi er dem, der producerer højenergi-myoner, som krydser detektoren. Disse begivenheder kan være et resultat af kollisioner mellem myon-neutrinoer og nukleoner i isen, hvor den sekundære myon overtager det meste af neutrinoens oprindelige retning og energi. Sporene fra disse begivenheder giver mulighed for en god vinkelopløsning på $\lesssim 0.4^\circ$ for energier over 100 TeV. Et eksempel på en sådan

begivenhed er vist i figur 2. Alle andre neutrino-vekselvirkninger producerer enten elektromagnetiske eller hadroniske byger (kaskader), som ikke bevæger sig lige så langt igennem isen. Kaskaderne i disse begivenheder har en ringere vinkelopløsning i IceCube, med ca. $10^\circ - 15^\circ$, men tillader til gengæld et godt estimat af den oprindelige neutrinoenergi med en usikkerhed under 15%.

For neutrinoastronomi er den første udfordring for IceCube at udvælge en ren samling af neutrinoer, ca. 100.000 pr. år med en energi over 100 GeV, ud af en baggrund på ti milliarder kosmiske stråler (nærmere bestemt atmosfæriske myoner, skabt i bygerne fra de kosmiske stråler). Den anden udfordring er at identificere den lille del af disse neutrinoer, der har en astrofysisk oprindelse, hvilket er under hundrede begivenheder om året. Atmosfæriske neutrinoer udgør en overvældende baggrund for kosmiske neutrinoer, i det mindste ved neutrinoenergi under ~ 300 TeV. Over denne energi reduceres den atmosfæriske neutrino-flux til mindre end én begivenhed om året, selv i en kilometerstor detektor, og dermed er langt de fleste neutrinoer detekteret i dette energiområde af kosmisk oprindelse. De neutrinoer, der udgør baggrunden for de astronomiske eftersøgninger, udgør det vigtigste signal for forskningen i neutrinooscillationer. Her bruger vi DeepCore til at måle egenskaberne, der afgør, hvordan neutrinoerne overgår fra en type af neutrinoer til en anden type (fx fra elektron-neutrino til myon-neutrino).

For både den astronomiske og den fundamentale neutrinfysik kan vi eliminere baggrunden fra de atmosfæriske myoner ved at udvælge opadgående myon-spør, som kun kan komme fra myon-neutrinoer, da intet andet har mulighed for at rejse gennem Jorden. Derudover følger atmosfæriske neutrinoer en fordeling i energi, som kan skelnes fra fordelingen af kosmiske neutrinoer, og dermed kan de kosmiske neutrinoer udpeges gennem en statistisk analyse. En anden mulighed

består i at udvælge neutrinoer med høj energi, hvis spor/kaskade starter inde i IceCube (high-energy starting events, HESE). Disse neutrinoer udvælges ud fra, at det punkt, hvori de interagerer med nukleoner i isen, er inden for et virtuelt ydre vetolag af optiske moduler. Fordelen ved dette valg er, at atmosfæriske neutrinoer, der kommer fra et område oven for detektoren (det vil sige fra den sydlige halvkugle), kan registreres, da de ledsages af atmosfæriske myoner, som udløser dette veto, se [1].

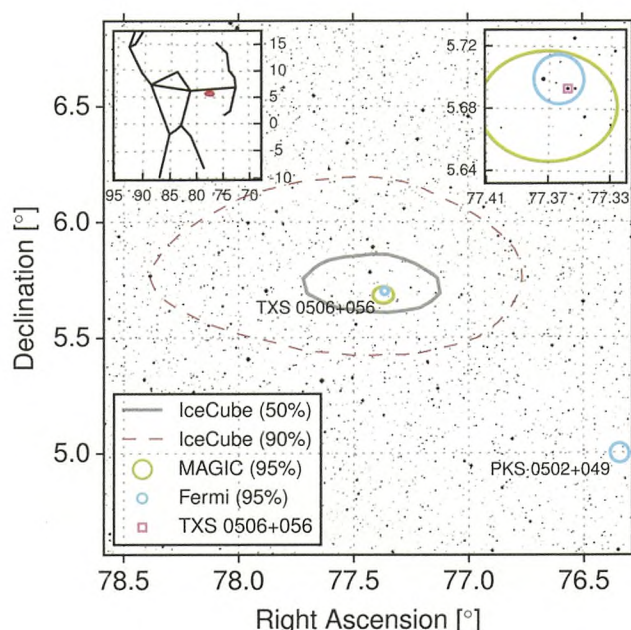
Neutrinoastronomi med IceCube

I 2013 rapporterede IceCube-Observatoriet det første bevis på detektion af TeV-PeV-neutrinoer af kosmisk oprindelse i en analyse af to års data baseret på HESE-udvælgelsen [2,3]. Oprindelsen til denne neutrinoemission er for tiden ukendt. Ankomstreningen af de astrofysiske neutrinoer er dog i overensstemmelse med en isotrop fordeling af neutrinoer, når vi har taget højde for den vinkelafhængige absorption i Jorden samt detektorresponsen af IceCube. Dette er en indikation på, at den diffuse flux består af en population af svage, ekstragalaktiske kilder. Forskellige muligheder er blevet overvejet, men vi afventer stadig en afgørelse [1].

En af de hovedmistænkte er aktive galakser – kæmpe, elliptiske galakser, der er vært for et supermassivt sort hul i deres centrum, som vejer mere end en million gange mere end vores egen Sol. I nogle tilfælde producerer disse galakser to stråler af lys og andre elementarpartikler, der udsendes fra polerne langs rotationsaksen på det sorte huls tilvækstskive, og disse partikler får hastigheder tæt på lysets. En underklasse af disse kilder er blasarer, hvor en af jetstrålerne peger direkte ned mod Jorden. Blasarer er kendt for at producere et intenst og bredt spektrum af fotoner, som gør, at vi fra Jorden kan se meget fjerne objekter.

Den 22. september 2017 registrerede IceCube en højenergi-myon, der kom ind i detektoren fra en retning nogle få grader under horisonten (se figur 2) [4]. Disse sjældne detektioner udløser alarmer, der sendes ud til partnerobservatorier for at tjekke, om de ser elektromagnetisk emission fra samme del af universet. Efter en uge rapporterede Fermi-satellitten, at neutrinoalarm IC-170922A var sammenfaldende med en kendt kilde til gammastråling, nemlig blasar TXS 0506+056, der i samme periode havde en periode med forøget γ -emission. Denne blasar er placeret lige under armen på stjernebilledet Orion (se figur 3) og er omkring 3,7 milliarder lysår fra Jorden.

Motiveret af korrelationen, som Fermi havde set, undersøgte IceCube også arkivdata for at finde beviser på tidligere neutrinoemissioner fra TXS 0506+056. Denne analyse afslørede, at i en periode fra september 2014 til marts 2015 viste kilderne et langvarigt udbrud med anslået 13 ± 5 neutrinoer. En tilfældig korrelation af denne type neutrinoudbrud kan udelukkes med et konfidensniveau på $3, 5\sigma$. Sammen med observationen i 2017 giver dette et overbevisende bevis for, at denne blasar er en kilde til neutrinoer med høj energi.



Figur 3. Blasaren TXS 0506+056 findes lige ved siden af den venstre skulder af konstellationen Orion (øverst til venstre på det indsatte plot). Konturerne indikerer positionen for kilden set med γ -stråler (Fermi & MAGIC) og neutrinoer (IceCube). (Figur fra [4]).

Udbruddet af neutrinoer i 2014/15 er ikke ledsaget af en forøget γ -emission fra Fermi-satellitten. Den målte neutrinoemission er ca. fire gange større end den forventede γ -emission fra blasar TXS 0506+056 i normal tilstand. Der er dog antydning af, at Fermi-spektret i løbet af neutrinoudbruddet viser et spektralindeks, der kunne indikere et uopdaget udbrud af TeV-gammastråler. Under alle omstændigheder er de forskellige foton- og neutrinoemissioner i henholdsvis 2014/15- og 2017-observationerne for tiden den største udfordring for at finde en samlet model for neutrinoemissionen.

Er blasarer også ansvarlige for den diffuse emission af TeV-PeV-neutrinoer? Dette spørgsmål blev behandlet i en tidligere undersøgelse fra IceCube, hvor fokus var på den tidsintegrerede emission af blasarer observeret i γ -stråler. Denne undersøgelse kunne ikke finde beviser for neutrinoemission og satte en øvre grænse for blasarernes relative bidrag til den diffuse neutrinoflux. Afhængigt af neutrinospektret ligger denne øvre grænse omkring 30%. I lyset af de seneste resultater er det derfor plausibelt, at blasarer bidrager, men det er usandsynligt, at de dominerer den observerede diffuse neutrinoflux. Fremtidige analyser med IceCube data vil yderligere teste denne hypotese ved at kigge efter tidsbegrænset neutrinoemission fra blasarer.

Neutrinooscillationer med IceCube

Det primære mål for neutrinoobservatoriet IceCube var at finde kilden/kilderne til de højenergetiske astrofysiske neutrinoer, samt at hjælpe med at besvare de århundredgamle spørgsmål om de kosmiske strålers natur og det ikke-termiske univers. Ud over den astrofysiske historie har IceCube med DeepCore været i stand til at undersøge, hvordan neutrinoer oscillerer. Oscillationerne er vigtige, fordi de er det endelige bevis på, at neutrinoerne har en (meget, meget lille) masse.

Den generelle måde, hvorpå subatomære partikler har en masse (forskellig fra nul), er ved at interagere med Higgs-feltet og ved at have en højre- og venstrehånds-version af hver partikel. Men alle de neutrinoer, der endnu er blevet detekteret, har altid været venstrehåandede.

Selv om DeepCore er mindre, er det stadig på højde med Eiffeltårnet og samler derfor et stort antal atmosfæriske neutrinoer, der har oscilleret fra myon-tilstand til tau-tilstand på deres rejse gennem Jorden. Der er kun tre eksperimenter, der nogensinde har målt tau-tilstanden, hvoraf den seneste måling fra IceCube er den bedste [5]. Et problem med tau-neutrinoer er, at selv blandt neutrinofamilien er tau-neutrinoen det sværeste at håndtere eksperimentelt. Den har en lavere sandsynlighed for at kolliderende elektronen eller myon-tilstanden, den genererer mindre Cherenkovstråling efter kollisionen, og en tau-neutrino-kollision ser næsten ud som en elektron-neutrino-kollision, hvilket gør det vanskeligt at identificere tau-neutrinoer præcist.

For bedre at måle oscillationen fra myon- til tau-tilstanden og for at mindske de systematiske usikkerheder, der for øjeblikket begrænser neutrinoastronomien, vil IceCube implementere nye strenge ved Sydpolen i 2022/2023. Denne IceCube-opgradering bruger nye og mere følsomme lyssensorer til at instrumentere omkring 1% af det samlede 1 km³ IceCube-volumen.

Fordi astronomiske neutrinoer også oscillerer, vil den store forbedring i neutrinooscillationsmålingerne hjælpe os med at forstå ikke blot neutrinoens grundlæggende natur, men også de kosmiske motorer, der er kilden til de højenergetiske kosmiske stråler.

Litteratur

- [1] M. Ahlers og F. Halzen (2018) Prog. Part. Nucl. Phys., bind **102**, side 73–88, arXiv:1805.11112.
- [2] M. Aartsen m.fl. (2013) (IceCube Collaboration), Phys.Rev.Lett., bind **111**, side 021103, arXiv:1304.5356.
- [3] M. G. Aartsen m.fl. (IceCube Collaboration), (2013) Science, bind **342**, side 1242856, arXiv:1311.5238.
- [4] M. G. Aartsen m.fl. (IceCube, Fermi-LAT, MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S., INTEGRAL, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool Telescope, Subaru, Swift NuSTAR, VERITAS, VLA/17B-403 Collaboration) (2018) Science, bind **361**, side eaat1378, arXiv:1807.08816.
- [5] M. G. Aartsen m.fl. (IceCube Collaboration) (2019) arXiv:1901.05366.



Markus Ahlers er adjunkt ved Niels Bohr Institutet og medlem af IceCube-samarbejdet. Hans forskning er koncentreret omkring astrofysik, herunder modellering af kilderne til højenergi-multibudbringere.



D. Jason Koskinen er lektor på Niels Bohr Institutet og leder af instituttets gruppe ved IceCube-Neutrinoobservatoriet.

PFEIFFER  **VACUUM**

Vacuum pumper



To-trins olielamelpumper
Promotionpris fra DKK 8.000

Tlf. 3166 8708
Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com