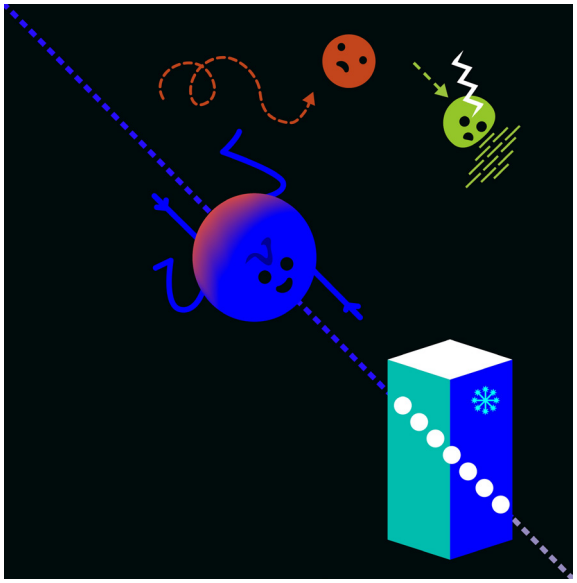
Sydpolens is avslöjar rymdens partikelacceleratorer

__Francis Halzen__ har lagt grunden för en helt ny sorts astronomi. Hans idé var att använda isen i glaciären på Sydpolen för att fånga de hemlighetsfulla partiklar som kallas neutriner. Resultatet blev IceCube Neutrino Observatory som kan spåra neutriner med ursprung långt ute i världsrymden.

Neutrinon är universums skyggaste partikel, utan elektrisk laddning och med mycket liten massa. I stort sett alla passerar obemärkt genom materia och endast ytterst sällan ger sig någon neutrino till känna genom att krocka med en atomkärna. Från solen strömmar bara genom din lillfingernagel 65 miljarder neutriner varje sekund, och du märker dem aldrig.



Neutriner kommer också från andra delar av rymden och de bär med sig ledtrådar till några av världsalltets gåtor. De forskare som lyckas fånga dessa mer sällsynta kosmiska neutriner får möjlighet att locka ur dem information om de extrema miljöer i universum där de har sitt ursprung.

Francis Halzen förstod redan på 1980-talet att isen på Antarktis skulle kunna vara det som behövdes för att snärja tillräckligt många av de hemlighetsfulla neutrinerna för att kunna förstå mer om deras avlägsna ursprung. Han övertygade snabbt många andra om potentialen i idén, och 1992 började en grupp ihärdiga forskare och ingenjörer de första försöken med att sänka ner ljussensorer i glaciären på Sydpolen. Ungefär tjugo år senare kom genombrottet: neutrinoteleskopet IceCube registrerade neutriner med enormt mycket energi. Dessa neutriners egenskaper övertygade forskarna om att de måste komma från avlägsna delar av rymden. Nu kunde sökandet efter universums neutrinokällor börja på allvar.

Partikelfysik möter astrofysik

Francis Halzen växte upp i Belgien. Han lockades till partikelfysiken av de framsteg som gjordes i fältet under 1960-talet och till att börja med fokuserade han på massiva partiklar som är uppbyggda av kvarkar. Inte långt efter sin doktorsexamen flyttade han till USA och University of Wisconsin–Madison. Med tiden fick han upp ögonen för vad partikelfysiken kan lära sig av partiklar som når oss från rymden – och vad astrofysiken i sin tur kan få ut av partikelfysiken.

Motiveringen till att söka efter just neutriner kommer från observationer av helt andra partiklar. Världsrymden genomkorsas ständigt av partiklar som med ett samlingsnamn kallas för kosmisk strålning. De typiska partiklarna i kosmisk strålning är protoner, det vill säga nakna atomkärnor av väte. Protoner från rymden kan ibland nå oss med förbluffande mycket energi, långt mer än det är möjligt att ge dem i partikelacceleratorer på jorden.

Nobelpriset® är av Nobelstiftelsen registrerat varumärke.

Ursprunget till de mest extrema energierna i den kosmiska strålningen är en av rymdens väl bevarade gåtor. Eftersom fysiken säger oss att processer som kan accelerera protoner till hög energi också ger upphov till neutriner med hög energi, skulle neutriner kunna ge avgörande ledtrådar till dessa kosmiska partikelacceleratorer.

Den som lyckas identifiera neutriner som bär på riktigt mycket energi kan skilja dem från de betydligt slöare neutrinerna som kommer från sönderfall av radioaktiva ämnen, eller från solen, eller som uppstår när kosmisk strålning slår in i jordens atmosfär. Neutriner som inte har uppstått i vår närmaste omgivning måste komma någonstans långt bortifrån – kanske från våldsamma processer i områden där stjärnor exploderat eller från avlägsna aktiva galaxer.

Blixtar i isen

När Francis Halzen arbetade med kosmiska partiklar på 1980-talet fick han höra att sovjetiska forskare hade planer på att använda radiomottagare för att fånga neutrinosignaler på Antarktis. Tanken var att en neutrino som krockar med en atomkärna i isen ger upphov till en elektrisk gnista som sänder ut radiostrålning. Om denna strålning var tillräckligt stark skulle den kunna fångas upp med en radioantenn. Francis Halzen funderade vidare och kom på att en annan möjlighet vore att installera ljussensorer nere i själva glaciärisen för att i stället spana efter ljusblixtar som visar att neutriner har kolliderat.

Redan omkring 1960 hade flera fysiker föreslagit att vatten skulle kunna vara ett bra material för att fånga neutriner från rymden. Vid de sällsynta tillfällen då en neutrino kolliderar med en atomkärna uppstår en laddad partikel som rör sig i samma riktning som den ursprungliga neutrinon. Den laddade partikeln ger ifrån sig ett blått ljus längs sin bana och eftersom vatten är genomskinligt kan ljuset fångas upp. Med rätt utrustning är det möjligt att avgöra ljusspårets riktning, och rentav se varifrån neutrinon kom. Det viktiga är att utrustningen övervakar en tillräckligt stor volym för att se spår av många neutriner.

Francis Halzen tänkte sig nu att naturlig is skulle kunna användas i stället för flytande vatten.

Han kontaktade sin forskarkollega John G. Learned som arbetade med projektet DUMAND, ett liknande projekt för att fånga ljussignaler från växelverkande neutriner men i det djupa och klara havsvattnet utanför Hawaii. Tillsammans diskuterade de båda fysikerna möjligheterna och svårigheterna kring att fånga neutriner på Antarktis. På en konferens i Polen 1988 presenterade de för första gången hur ett neutrinoobservatorium i Sydpolens is skulle kunna fungera.

Ett neutrinoteleskop på Sydpolen

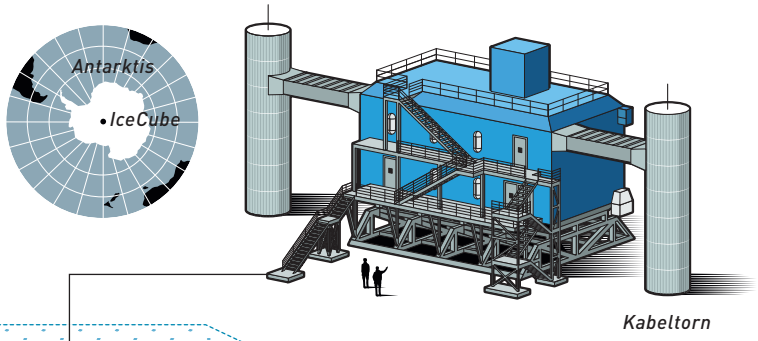
Francis Halzen insåg att det fanns många fördelar med att förlägga neutrinoobservatoriet just till den geografiska sydpolen. Där fanns redan en forskningsstation med en organisation för regelbundna transporter och allt annat som behövs för att ett arbetslag ska kunna vistas där.

Isen är också ett mycket tacksamt material. På tillräckligt stort djup är det ständigt mörkt. Till skillnad från miljön i havet slipper man störningar från levande varelser, och halten av radioaktiva ämnen är mycket låg. Isen är stabil och ger en fast yta att stå på för dem som arbetar med anläggningen. Området är geologiskt lugnt utan jordbävningar.

En nackdel är att kylan gör det omöjligt att färdas till och från Sydpolen under en stor del av året. Allt praktiskt arbete behöver utföras under den korta antarktiska sommarsäsongen mellan november och februari.

En anläggning i isen

IceCube består av en kubikkilometer is försedd med ljussensorer på långa kablar. På ytan finns en byggnad där signalerna från isen samlas in för att skickas vidare via satellit för analys.



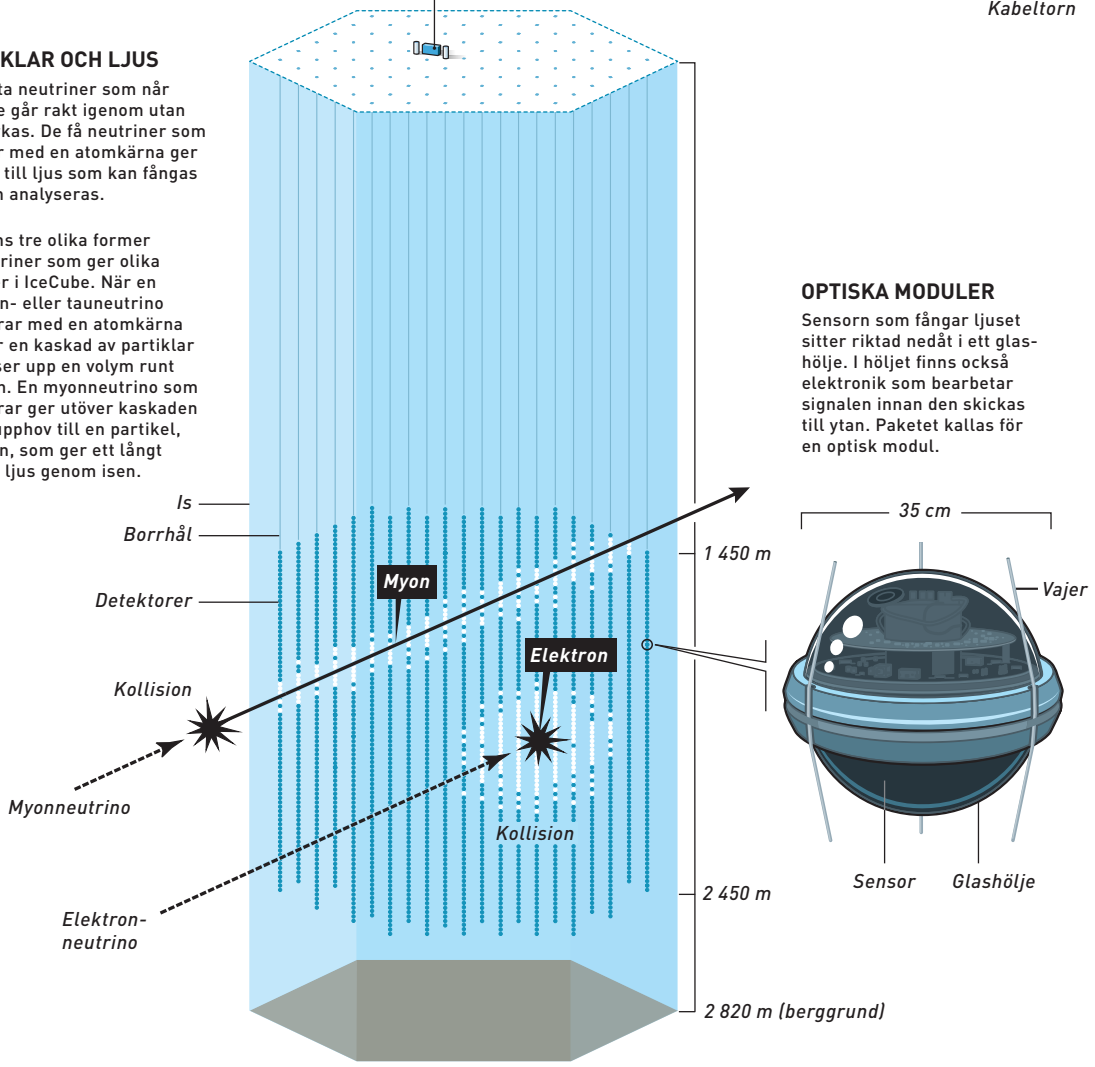
PARTIKLAR OCH LJUS

De flesta neutriner som når IceCube går rakt igenom utan att märkas. De få neutriner som krockar med en atomkärna ger upphov till ljus som kan fångas upp och analyseras.

Det finns tre olika former av neutriner som ger olika mönster i IceCube. När en elektron- eller tauneutrino kolliderar med en atomkärna uppstår en kaskad av partiklar som lyser upp en volym runt krocken. En myonneutrino som kolliderar ger utöver kaskaden också upphov till en partikel, en myon, som ger ett långt spår av ljus genom isen.

OPTISKA MODULER

Sensorn som fångar ljuset sitter riktad nedåt i ett glashölje. I höljet finns också elektronik som bearbetar signalen innan den skickas till ytan. Paketet kallas för en optisk modul.



Francis Halzen nöjde sig först med att göra teoretiskt arbete. John G. Learned å sin sida hade fullt upp med sitt eget projekt och återkom aldrig till tankarna om att fånga neutriner på Sydpolen. Där kunde denna historia ha slutat. Idén väckte ändå så stort intresse att ett antal forskare vid olika institutioner inom några år hade slutit upp kring Francis Halzen för att göra verklighet av ett neutrinoobservatorium på Antarktis.

Till att börja med behövde de lösa alla praktiska problem med att placera instrument långt ner i isen. De lärde sig av glaciärforskare hur kilometerdjupa hål kan borras med en sorts avancerat duschmunstycke som smälter isen med hett vatten. I ett sådant vattenfyllt hål kunde sedan en lång kabel sänkas ner med ett pärlband av ljussensorer. Francis Halzen brukar beskriva en sådan sensor som en omvänd glödlampa – den fångar upp ljus och omvandlar det till en elektrisk signal.

Bubblor i isen kunde bli ett hinder

Forskarlaget testade först att sänka ner sensorer i isen på Grönland för att se att de kunde registrera ljus från partiklar i isen. Sedan påbörjade de konstruktionen av det första neutrinoobservatoriet på Sydpolen, en föregångare till IceCube som kallades AMANDA.

Francis Halzen har själv skildrat hur han satt vid middagen på julafton 1993 med datorn i knät och väntade på meddelandet som bekräftade att den första kabeln med optiska moduler var installerad i isen.

Den övre delen av isen är full av bubblor som sprider ljuset i olika riktningar och suddar ut informationen om partiklarnas rörelse. Därför var de allra första försöken nedslående. Det visade sig att isen däremot är mycket klar och genomskinlig från 1 400 meters djup och nedåt. Där kan ljusblixtarna från neutrinerna färdas hela 300 meter innan de absorberas, mycket längre än någon hade väntat sig. En biprodukt av neutrinoprojektet är att forskarna har lärt sig mycket om isens egenskaper på olika djup.

AMANDA byggdes ut fram till januari 2000. Allt fungerade som tänkt men för att hitta de energirika neutrinerna från kosmiska partikelacceleratorer behövdes ännu större volym. Därför påbörjades arbetet med IceCube, en kubikkilometer is försedd med ljussensorer. Sedan 2011 är IceCube utbyggd till sin fulla storlek med 5 160 ljussensorer fördelade på 86 kablar.

Genom åren har Francis Halzen fortsatt att fungera som en katalysator för först AMANDA och senare IceCube. Som engagerad forskningsledare har han tagit dessa projekt från tanke till färdiga mätningar och vetenskapliga resultat.

Äntligen hittar IceCube kosmiska neutriner

I ett neutrinoobservatorium som IceCube syns inte bara de neutriner forskarna letar efter. De kosmiska neutrinerna måste urskiljas mot en bakgrund av signaler som orsakas av kosmisk strålning som faller in mot jordens atmosfär. Vissa sådana partiklar kan tränga ner till sensorerna som befinner sig på mellan 1 450 och 2 450 meters djup. Mer än hundra miljoner sådana partiklar från atmosfären över Antarktis registreras varje dag. Den kosmiska strålningen skapar också neutriner i atmosfären, och av dem når några hundra om dagen fram till IceCube efter att ha färdats rakt igenom jorden från norra halvklotet.

För att hitta de kosmiska neutrinerna måste forskarna sålla fram ett urval av de händelser då neutriner har växelverkat i isen. Även när de inte helt säkert kan avgöra om en enskild neutrino har sitt ursprung utanför jorden kan de titta på alla sina utvalda händelser och se om de tillsammans har egenskaper som passar ihop med vad de väntar sig av neutriner från kosmos, och som skiljer sig från neutriner från atmosfären. Redan 2013 rapporterade forskarlaget sina första belägg för att de faktiskt hittat kosmiska neutriner, och ett par år senare hade de samlat så mycket data att de kunde vara riktigt säkra på sin upptäckt.

Vad forskare hoppas lära av neutriner från universum

Neutrinoastronomin började i mindre skala redan på 1960-talet då Raymond Davis Jr observerade neutriner från solen. Det bekräftades av forskarlaget bakom neutrinoobservatoriet Kamiokande i Japan, som leddes av Masatoshi Koshiba, genom att de kunde avgöra neutrinernas riktning och spåra ursprunget.

1987 fångade Kamiokande en skur av neutriner som kunde kopplas till en exploderande stjärna, en supernova, i vår granngalax Stora magellanska molnet. Upptäckten kompletterades snart med neutrinomätningar som gjorts samtidigt i USA och Sovjetunionen.

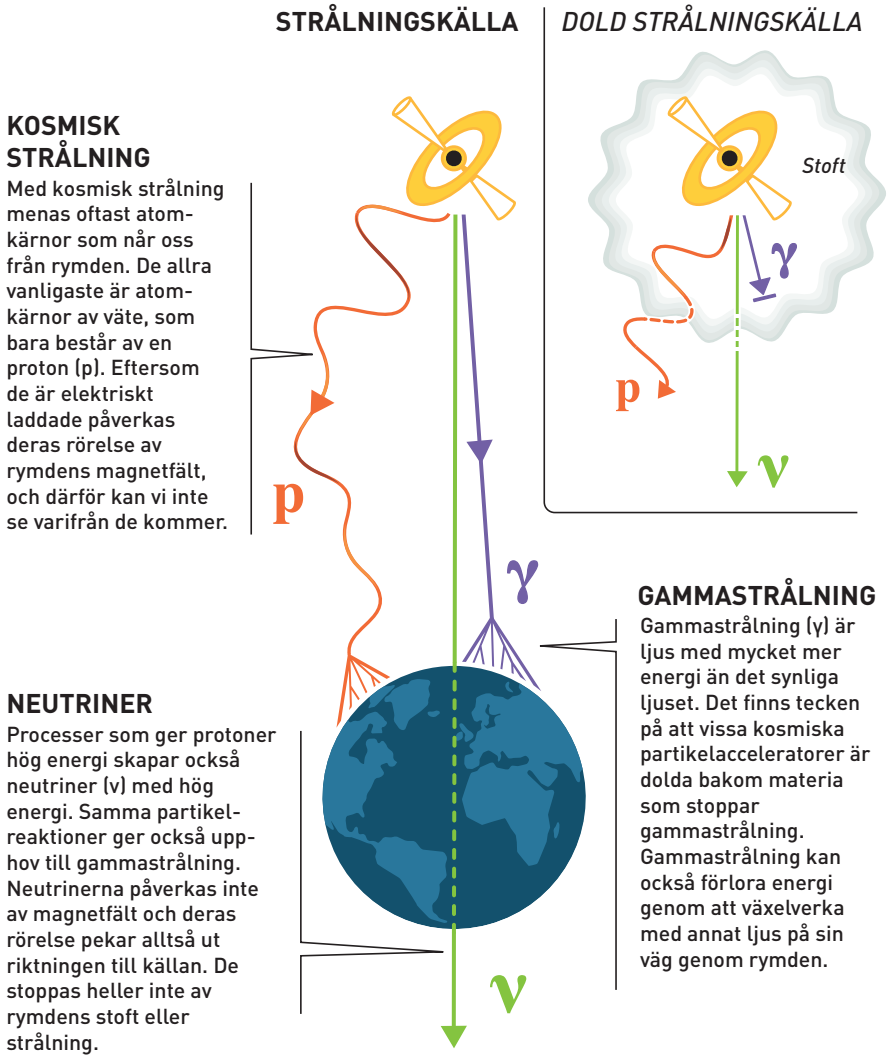
Raymond Davis Jr och Masatoshi Koshiba tilldelades Nobelpriset i fysik 2002 för de här genombrotten, som visade att det gick att använda neutriner för att studera fenomen ute i rymden.

Ett problem återstod: antalet neutriner som Raymond Davis Jr fångade motsvarade bara ungefär en tredjedel av vad som förväntades utifrån beräkningar av de reaktioner som borde ske i solen. Detta visade sig hänga ihop med att det finns tre olika sorters neutriner. Fysikerna visste till en början inte att neutrinerna kan skifta identitet så att en neutrino som skapas i en form kan anlända till instrument på jorden i en annan form. För att se de omvandlade neutrinerna krävs annan teknik än den Raymond Davis Jr använde. Neutrinons ombytliga natur avslöjades med hjälp av försök i Japan och Kanada, och Nobelpriset i fysik 2015 gick till Takaaki Kajita och Arthur B. McDonald för den här upptäckten.

Budbärare från rymden

I rymden finns objekt som frigör enorma mängder energi. Där sker processer som accelererar partiklar och som ibland kan ge partiklarna en miljon gånger mer energi än vad som går att åstadkomma i experiment på jorden.

Sådana våldsamma skeenden ger upphov till olika former av strålning som når oss som budbärare med information om processen där de uppstått. Neutrinernas egenskaper gör att de kan avslöja information om de kosmiska partikelacceleratorerna som andra former av strålning inte kan ge.



KOSMISK STRÅLNING
Med kosmisk strålning menas oftast atomkärnor som når oss från rymden. De allra vanligaste är atomkärnor av väte, som bara består av en proton (p). Eftersom de är elektriskt laddade påverkas deras rörelse av rymdens magnetfält, och därför kan vi inte se varifrån de kommer.

NEUTRINER
Processer som ger protoner hög energi skapar också neutriner (ν) med hög energi. Samma partikelreaktioner ger också upphov till gammastrålning. Neutrinerna påverkas inte av magnetfält och deras rörelse pekar alltså ut riktningen till källan. De stoppas heller inte av rymdens stoft eller strålning.

GAMMASTRÅLNING
Gammastrålning (γ) är ljus med mycket mer energi än det synliga ljuset. Det finns tecken på att vissa kosmiska partikelacceleratorer är dolda bakom materia som stoppar gammastrålning. Gammastrålning kan också förlora energi genom att växelverka med annat ljus på sin väg genom rymden.

Neutrinon har alltså hjälpt fysikerna att bekräfta de modeller de länge haft av processerna inuti solen respektive vad som händer i en supernova. Med IceCube är tanken att ta neutrinoastronomin till en ny nivå. Neutriner förväntas ge information om fenomen som är dolda bakom stoft, eller om objekt som befinner sig så långt bort att andra former av strålning har försvunnit på vägen. Målet är att få kunskap som inte går att få på annat sätt.

Jämfört med protonerna har neutrinerna fördelen att de inte är elektriskt laddade. De laddade protonernas bana genom rymden böjs av magnetfält som de färdas genom så att det inte går att lista ut varifrån protonerna kommer genom att spåra deras riktning. Däremot kommer processer som accelererar protoner också att ge upphov till neutriner som inte påverkas av magnetfält. Genom att titta bakåt i den riktning som neutriner med de högsta energierna kommer ifrån skulle det alltså vara möjligt att dra slutsatser om var protonerna i den kosmiska strålningen accelereras.

En annan typ av budbärare från de våldsammaste processerna i universum är gammastrålning. Även den tunnas ut eller förändras genom att växelverka med ljus och materia på sin färd genom rymden, medan neutrinerna fortsätter oberört förbi sådana hinder.

Fler resultat att vänta

Ett viktigt mål är att kunna urskilja enskilda neutrinokällor på himlen. Några möjliga sådana källor har pekats ut med hjälp av IceCube. En av dem är den aktiva galaxen NGC 1068 (som även betecknas M77). 79 neutriner som har registrerats i IceCube tycks komma från den riktning där den galaxen finns. Det räcker ändå inte för att ge tillräckligt starka belägg för att riktigt säkert identifiera NGC 1068 som en neutrinokälla. Ju fler neutriner som fångas av sensorerna desto större blir chansen att kunna peka ut deras ursprung.

De senaste åren har forskarna bakom IceCube också kunnat se att neutriner med hög energi kommer från vår egen galax, Vintergatan. Forskarna förväntar sig att dessa neutriner uppstår när kosmisk strålning kolliderar med atomer i den tunna gasen mellan stjärnorna.

Vi kommer säkert att få ta del av många nyheter om neutrinoastronomi framöver, när andra följer efter på den väg som stakats ut av IceCube. Det finns flera andra neutrinoteleskop på norra halvklotet i olika stadier av utveckling, men i vatten i stället för i is. Projektet DUMAND, som Francis Halzen inspirerades av på 1980-talet, lades ner 1995 – men lärdomarna därifrån lever vidare i flera olika projekt, till exempel i Baikalsjön, i Medelhavet, i Sydkinesiska havet och utanför Kanadas västkust. Samtidigt fortsätter IceCube att samla neutriner. Nu planeras nästa utbyggnad i isen på Sydpolen, där IceCube-Gen2 ska bli hela åtta kubikkilometer stor.

LÄS MER

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, *www.kva.se*, och på *www.nobelprize.org*. Där kan man också titta på presskonferenser, Nobelföreläsningar och annat videomaterial. Mer information om utställningar och aktiviteter kring Nobelprisen och Ekonomipriset finns på *www.nobelprizemuseum.se*.

Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela Nobelpriset i fysik 2026 till

FRANCIS HALZEN

Född 1944 i Tienen, Belgien.
Fil.dr 1969 vid KU Leuven, Belgien.
Professor vid University of Wisconsin–Madison, USA.

”för avgörande bidrag till IceCube-observatoriet och upptäckten av högenergetiska neutriner av astrofysikaliskt ursprung”

Vetenskapsredaktörer: Ulf Danielsson och Mark Pearce, Nobelkommittén för fysik
Text: Anna Davour
Illustrationer: Johan Jarnestad
Redaktör: Sara Gustavsson
©Kungl. Vetenskapsakademien