



Olga Botner

disputerade 1985 i Köpenhamn och är sedan 1986 verksam i Uppsala. Hon är professor i experimentell partikelfysik och forskade vid CERN innan hon år 1998 anslöt sig till AMANDA-projektet – den första satsningen på detektion av kosmiska neutriner i glaciäris vid Sydpolen och föregångare till IceCube. Olga Botner var vetenskaplig talesperson för IceCube-kollaborationen 2013–2017. Sedan 2001 är hon ledamot i Kungliga Vetenskapsakademien.

Varje sekund genomborras vi av tusentals miljarder av dem – ändå är det först under de senaste decennierna som forskare lyckats avtäcka en del av neutrinernas hemligheter. Olga Botner skriver här om utmaningarna att få denna spökpartikel att passa in bland de övriga elementarpartiklarna, och om hur den i framtiden kan bli en unik budbärare från universums ännu okända delar.

Bilden: Den blåa blixten från en neutrino detekterad av IceCube, djupt ner i Antarktis is. (Nicolle R. Fuller/NSF/IceCube)

Den besynnerliga neutrinon

*Neutrinos they are very small
They have no charge and have no mass
And do not interact at all.
The Earth is just a silly ball
To them, through which they simply pass ...*

Dessa inledande rader i John Updikes dikt *Cosmic Gall* (fritt översatt: ”Kosmisk fräckhet”) som publicerades i magasinet *The New Yorker* strax innan julen 1960, sammanfattar neutrinons märkliga egenskaper som i ett nötskal. Längre trodde vi att neutriner är masslösa – idag vet vi bättre: även om neutrinomassorna är små är de inte exakt noll! Vi vet också att neutriner visst växelverkar med materia, fast mycket svagt, och att de ibland stoppas upp på sin väg genom jorden!

Neutrinon är kanske den märkligaste byggstenen i partikelfysikens standardmodell och passar inte riktigt in. Dess existens förutsades år 1930 av den österrikiske fysikern Wolfgang Pauli i ett försök att förklara varför de elektroner som bildas vid betasönderfall av radioaktiva grundämnen, t.ex. radium, inte skickas ut med hela den tillgängliga energin. Paulis alternativ till att överge lagen om energins bevarande var att föreslå att elektronen delade sönderfallsenergin med en osynlig, lätt, subatomär partikel som alstrades samtidigt. Denna elektriskt neutrala kusin till den elektriskt laddade elektronen kallades logiskt nog för ”neutronen”, men fick bara behålla detta namn under ett par år. När James Chadwick år 1932, i sina studier av atomkärnor, upptäckte oladdade partiklar med ungefär samma massa som protoner, föll det sig än mer naturligt att döpa dessa till neutroner medan Paulis lätta partikel istället blev till ”den lilla neutronen” – neutrinon.

Fysikgiganten Pauli ansåg själv att han gjort något veten-

skapligt mycket tvivelaktigt – löst ett problem genom att införa en spökpartikel i teorin, en partikel som nästan aldrig reagerar med materia och därför aldrig skulle kunna upptäckas experimentellt. Hans farhågor kom dock på skam: år 1956 påvisade amerikanerna Clyde Cowan och Fred Reines reaktioner mellan neutriner som alstrats i en kärnreaktor och atomerna i en närbelägen detektor. *Project Poltergeist* hade demonstrerat spökpartikelns existens!

Idag vet vi att fissionsprocesserna i kärnreaktorer inte producerar neutriner utan deras antipartiklar: antineutriner. Detta är i sig inget märkvärdigt. Till varje slag av subatomära partiklar finns motsvarande antipartiklar, och oftast innebär det inga särskilda svårigheter att experimentellt särskilja partikel från antipartikel, fastän de har samma massa. Exempelvis har elektronen negativ elektrisk laddning medan laddningen för dess antipartikel, positronen, är positiv vilket gör att de enkelt kan särskiljas genom deras skilda rörelser i ett magnetfält. Men hur kan man skilja en neutrino från en antineutrino när båda har elektrisk laddning noll?

Enda möjligheten tycks vara att studera hur de två slagen reagerar med atomerna i en neutrinodetektor. Antineutrinerna från fissionsprocesserna som detekterades av Cowan och Reines producerade positroner i krockarna med detektorns atomer – och inte elektroner, vilket skulle ha förväntats för neutriner!

Neutriner bildas inte bara vid sönderfall av radioaktiva grundämnen eller vid fissionsprocesser i kärnreaktorer. Fusionsprocesserna i solen ger upphov till ett massivt flöde av neutriner – kring 100 miljarder passerar varje sekund genom varenda kvadratcentimeter av jordens yta. Även den kosmiska strålningen – protoner och andra atomkärnor som ständigt bombarderar jordens atmosfär – ger upphov till neutriner i krockar med atmosfärens atomer. Det bildas då skurar av kortlivade subatomära partiklar som på vägen mot jordytan sönderfaller till andra mer stabila partiklar, bland annat neutriner. Genom att studera dessa atmosfäriska partikelskuror upptäckte man år 1937 en tyngre släkting till elektronen, den 200 gånger mer massiva *myonen*, och insåg så småningom på 1960-talet att även Paulis neutrino hade en släkting – som utmärkte sig genom att den inte gav upphov till elektroner i sina reaktioner utan alltid myoner.

I mitten av 1960-talet kände vi alltså till två olika neutrala och till synes masslösa neutrinosorter som benämndes *elektronneutrino* respektive *myonneutrino*, och som var för sig verkade hänga

ihop med en specifik laddad släkting, elektronen eller myonen. För att enkelt kunna beskriva denna mångfald av partiklar och antipartiklar, infördes speciella markörer (s.k. kvanttal) liknande elektrisk laddning: *elektrontalet* med värdet -1 för elektronen och dess neutrino och med värdet $+1$ för positronen och den antineutrino som den var besläktad med. På motsvarande sätt infördes *myontalet* med värdet -1 för myonen och dess neutrino och värdet $+1$ för deras antipartiklar. Empiriskt tycktes dessa kvanttal vara bevarade i alla reaktioner, ett faktum som införlivades i partikelfysikens standardmodell som utvecklades gradvis under 1960- och 1970-talen av bl.a. Sheldon Glashow, Steven Weinberg och Abdus Salam (Nobelpris 1979).

Ordning i elementarpartiklarnas värld

Standardmodellen – i fortsättningen förkortat SM – beskriver tre av de fyra kända naturkrafterna och hur de påverkar materiens fundamentala byggstenar: *kvarkar* och *leptoner*. Kvarkar (beteckningen ”kvark” saknar betydelse; ordet myntades i anslutning till en rad i James Joyces roman *Finnegan’s Wake*) växelverkar så intensivt med varandra via den så kallade starka kraften att de alltid tvingas in i bundna flerkvarktillstånd, s.k. *hadroner* (från grekiskans ”ἀδρόζ” i betydelsen stadig eller solid). Välbekanta exempel är protoner och neutroner, beståndsdelarna i atomkärnor, som är bundna trekvarktillstånd.

I motsats till kvarkar påverkas inte leptoner av den starka kraften och kan observeras individuellt. Bland leptonerna (från grekiskans ”λεπτός” med innebörden snabb och lätt) återfinner vi elektronen och myonen tillsammans med de tillhörande neutrinerna. Neutrinerna utmärker sig speciellt i detta sammanhang: av de fyra kända naturkrafterna – den starka, den svaga, den elektromagnetiska och gravitationskraften – påverkas de endast av den svaga kraften och gravitationen. Den svaga kraften är i själva verket inte särskilt svag utan har fått namnet på grund av sin ultrakorta räckvidd, $\sim 10^{-18}$ m. Den är visserligen svagare än både den elektromagnetiska och den starka kraften, men oerhört mycket starkare än gravitationskraften mellan fundamentala partiklar. Exempelvis är gravitationskraften mellan två kvarkar på avståndet 10^{-18} m från varandra (t.ex. i protonens inre) cirka 40 storleksordningar svagare än den svaga kraften mellan dem. Gravitationen beskrivs inte av SM och ignoreras oftast i mikrokosmos.

SM inkorporerar tre olika neutrinotyper – förutom elektron- och myonneutrion också den så kallade *tauneutrion* som hänger ihop med den tyngsta av elektronens kusiner, *tauonen*, över 3 000 gånger tyngre än elektronen. Tauonen upptäcktes år 1975 men dess neutrino identifierades först år 2000.

Inom SM är neutriner masslösa och har dessutom ytterligare en unik egenskap: de är alltid vänsterhänta. Högerhänta neutriner, om de ens existerar, antas vara ”sterila” och växelverkar inte med andra partiklar. Hänthet, eller *kiralitet*, är en ”medfödd” egenskap för en elementarpartikel, på liknande sätt som den elektriska laddningen är det. Ordet kiralitet kommer från grekiskans ” $\chi\epsilon\rho$ ” som betyder hand, och precis som en högerhand skiljer sig från en vänsterhand, skiljer sig en högerhänt neutrino från en vänsterhänt.

För en masslös elementarpartikel är kiralitet detsamma som det mera välkända begreppet *helicitet*. Bildligt skulle man kunna säga att om en masslös neutrino var en liten snurra och man placerade vänsterhanden så att fingrarna pekade i rotationens riktning, så skulle tummen peka i neutrinos färdriktning (se figur 2). Anti-

Standardmodellen

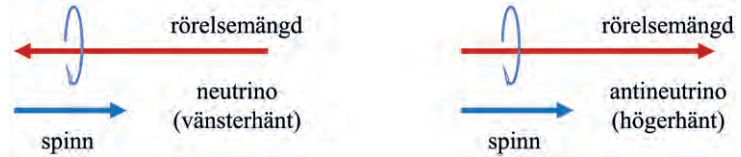
Figur 1 visar partikelfysikens standardmodell i ett nötskal. Modellen inkluderar tre generationer (eller familjer) av fundamentala materipartiklar som alla har spinnkvanttalet $\frac{1}{2}$. Dessa s.k. *fermioner* visas i figurens tre första kolumner, en kolumn för varje familj. Den första familjen utgörs av *u*- och *d*-kvarkarna, samt elektronen och elektronneutrion. Dessa fyra partiklar behövs för att förstå fenomen i vår omedelbara omvärld – atomerna, deras kärnor och processer såsom radioaktiva sönderfall. Varför det i naturen förekommer ytterligare två familjer av fermioner, vars partiklar är tyngre kopior av dem i den första familjen, är fortfarande en gåta.

Modellens fjärde kolumn visar kraftförmedlarpartiklarna för de tre naturkrafter som standardmodellen beskriver: den elektromagnetiska kraftens förmedlare fotonen (γ), gluonerna (*g*) som förmedlar den starka kraften, samt de två laddade *W*-partiklarna (W^\pm) och den neutrala *Z*-partikeln som alla förmedlar den svaga kraften. Slutligen syns Higgspartikeln (*H*) som spelar en fundamental roll för den process som förlänar partiklarna massor. Kraftförmedlarna har alla spinnkvanttalet 1, medan Higgspartikeln har spinn 0. Både kraftförmedlarna och Higgspartikeln är s.k. *bosoner*.

Rutorna innehåller information om de olika partiklarnas massor. Kvarkarnas massor är ungefärliga. Neutrinernas massor antas vara noll i standardmodellen. Det som listas är experimentella gränsvärden.

Massorna anges i enheterna MeV/c^2 eller GeV/c^2 , där M och G står

neutriner är högerhänta och man skulle istället behöva använda högerhanden för att definiera relationen mellan deras spinn och färdriktning. (I själva verket är spinnen dock en kvantfysikalisk egenskap, ett slags rörelsemängdsmoment som karakteriserar en elementarpartikel och som är svårtolkat i klassiska termer.)



Figur 2: Vänster- och högerhänta neutriner.

Teoretiskt skulle man kunna ha både höger- och vänsterhänta neutriner (liksom höger- och vänsterhänta antineutriner). Men medan neutrinernas kusiner – elektroner och myoner – uppträder både som vänster- och högerhänta, har man i naturen endast observerat vänsterhänta neutriner och högerhänta antineutriner. Detta avspglas även i SM:s matematiska formulering.

för en miljon respektive en miljard. Elektronvolt (eV) är en energienhet: En elektronvolt är energin hos en elektron som accelererats från vila över en spänningsskillnad om 1 Volt, dvs. $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. I enlighet med formeln $E=mc^2$ kan massa således anges i enheten eV/c^2 .

Elektrisk laddning ges i enheter av protonens laddning, $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Figur 1: Standardmodellens partiklar.

Tre generationer av materia (fermioner)					
	I	II	III		
massa	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0	=126 GeV/c ²
laddning	2/3	2/3	2/3	0	0
spinn	1/2	1/2	1/2	1	0
namn	u upp	c charm	t topp	γ foton	H Higgs boson
Kvarkar	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d ner	s sär	b botten	g gluon	
Leptoner	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	0	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1	1
	ν _e elektron neutrino	ν _μ myon neutrino	ν _τ tau neutrino	Z ⁰ Z boson	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e elektron	μ myon	τ taulepton	W [±] W boson	

BILD: WIKIMEDIA COMMONS

SM har visat sig vara en utomordentligt framgångsrik beskrivning av mikrokosmos. Framgångarna kröntes år 2012 med upptäckten av den förutspådda Higgspartikeln vars existens inom SM är en nödvändig förutsättning för den mekanism som frambringar partikelmassor. SM:s förutsägelser har bekräftats i precisionsmätningar vid bland annat CERN:s elektron-positron kolliderare LEP, där man har kunnat slå fast att beskrivningen med tre distinkta neutrino typer är korrekt, och att den dessutom stämmer väl överens med vad man kommer fram till genom kosmologiska mätningar.

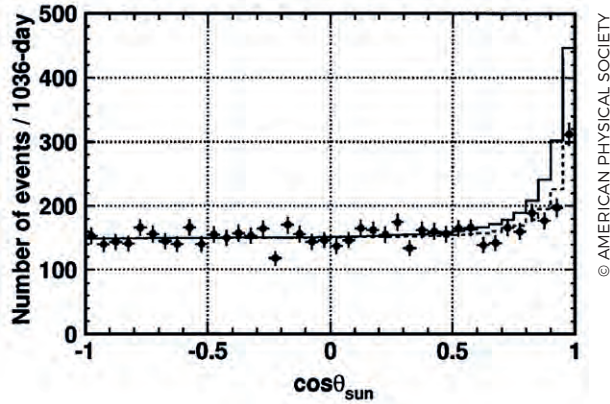
Men allt är inte frid och fröjd. De neutriner som vi observerar experimentellt kan inte vara masslösa såsom SM föreskriver! En första antydning om att allt inte stod rätt till uppmärksammades redan på 1970-talet.

Mysteriet med de försvunna solneutrinererna

Fusionsprocesserna i solens inre producerar inte bara energi – de alstrar även stora mängder neutriner. Den italienskfödde fysikern Bruno Pontecorvo insåg på 1940-talet att detta flöde av solneutriner kunde användas till att utforska solens inre regioner – till skillnad från de fotoner som skapas i solens kärna och bara hinner röra sig en kort sträcka innan de absorberas. Solens ljus som vi ser här på jorden skapas ytligt i solens fotosfär och bär inte med sig någon information om solens inre.

Den första detektorn för solneutriner konstruerades i början av 1960-talet djupt nere i Homestake-gruvan i South Dakota och tog data mellan 1968 och 1992. Tidigt insåg man att det observerade solneutrinoflödet var långt under det man förväntat sig baserat på teoretiska modeller för solens energiproduktion. Diskrepansen bekräftades så småningom av tre andra projekt: GALLEX och GNO i Gran Sasso-laboratoriet i Italien, och SAGE i Baksan, Ryssland. Alla fyra anläggningarna var konstruerade specifikt för detektion av elektronneutriner, vilket var vad man förväntade sig att se från solens kärnreaktioner. Ytterligare resultat rapporterades år 1989 från Kamiokande-observatoriet i Japan som, förutom att kunna mäta flödesnivån, även var riktningskänsligt – i motsats till de tidigare experimenten. Kamiokande använde sig av en annan detektionsprincip som medgav känslighet för alla tre neutrino typer, även om känsligheten var störst för just elektronneutriner. Man kunde nu slå fast att det observerade neutrino flödet verkligen

kom från solens riktning (se figur 3), vilket bekräftade att solen alstrade energi via fusionsprocesser. Detta var en stor framgång som belönades med 2002 års Nobelpris i fysik. Men solneutrino problemet bestod – neutrino flödet var lågt jämfört med det förväntade.



Figur 3: Diagrammet visar hur antalet detekterade neutriner beror på deras rörelseriktning i förhållande till solen, mätt med Kamiokande-detektorn under 1 036 dagar. (Den horisontella axeln visar cosinus för vinkeln mellan neutrino riktningen och en linje från solen, så att $\cos \theta_{\text{sun}} = 1$ motsvarar neutriner från solens riktning.) Den streckade linjen är en anpassning till data, medan den heldragna linjen representerar förutsägelsen från en solmodell. Notera att antalet detektioner har en tydlig topp i solens riktning, men inte så hög som den borde vara enligt förutsägelsen. (Figuren återpublicerad med tillstånd. Från Y. Fukuda et al, Phys. Rev. Lett. 77, 1683 (1996), DOI: 10.1103/PhysRevLett.77.1683).

Genom en stor arbetsinsats av främst John Bahcall och hans medarbetare verifierades solmodellerna än en gång. Nya mera raffinerade beräkningar gjordes och nya rön från helioseismologiska mätningar¹ inorporerades, men diskrepansen kunde ändå inte förklaras. Den enda logiska slutsatsen verkade vara att ett stort antal av de i solens kärna skapade elektronneutriner av något skäl aldrig nådde fram till detektorerna på jorden. Men hur kunde detta ske?

En av Pontecorvos idéer från slutet av 1950-talet började te sig mer och mer lockande: Kanske nådde neutriner faktiskt

¹ Helioseismologi är analys av ljudvågor som utbreder sig genom solens fotosfär. Ljudvågorna alstras av konvektionsprocesser inne i solen, och kan observeras bland annat som dopplerrörelser av spektrallinjer. Jämförelser mellan observationer av dessa ljudvågor och modellernas förutsägelser kan avslöja något om solens inre.

fram till jorden, men först efter att ha bytt identitet på vägen? Forskarna föreslog en kvantfysikalisk process, så kallade oscillationer, som skulle göra detta möjligt. Kunde en del av elektronneutriner från solen ha omvandlats till andra sorters neutriner som detektorerna inte var känsliga för?

Partiklar som byter skepnad

Neutriner alstras i en mängd olika kärnreaktioner som styrs av den svaga kraften. De är så lätta att deras eventuella massor inte spelar roll och därför inte utgör ett kännetecken som låter oss identifiera olika neutrintyper. Å andra sidan verkar den svaga kraften kunna särskilja neutriner enligt en inre egenskap som ingen annan naturkraft kan uppfatta, en egenskap som vi i avsaknad av ett bättre ord kallar för neutrinos "arom" (ibland "smak" från engelskans *flavour*). Detta är analogt till hur den elektromagnetiska kraften skiljer mellan elektroner och positroner på grundval av deras laddning, vilket exempelvis tar sig uttryck i olika banor i ett magnetfält. Genom att observera vilka laddade leptoner (elektroner, myoner eller tauoner) som neutriner detekteras tillsammans med, har tre olika aromer identifierats experimentellt: elektronneutriner " ν_e ", myonneutriner " ν_μ " och tauneutriner " ν_τ " (och motsvarande "anti-aromer" för antineutriner).

Oscillationshypotesen innebär aromomvandling: en neutrino kan endast produceras i en reaktion som drivs av den svaga kraften, och uppstår därför alltid med en viss välbestämd arom. Men denna arom bevaras inte! En ursprunglig elektronneutrino kan mycket väl ha omvandlats till en myonneutrino när den når fram till detektorn! Anledningen till detta är att de observerbara aromatiska neutriner inte är s.k. *stationära* kvantmekaniska tillstånd, utan kvantmekaniska superpositioner av sådana tillstånd. I kvantmekaniken är det de stationära tillstånden som har väldefinierade massor – inte de neutrino-tillstånd (med välbestämda aromer) som man faktiskt observerar. Dessa har inte väldefinierade massor utan är istället kombinationer av olika masstillstånd. Det visar sig att sannolikheterna för aromomvandling på ett avgörande sätt beror på masskillnaderna mellan de stationära kvanttillstånden – för hur detta fungerar, se sidorutan om neutrinooscillationer.

Neutrinooscillationer

Enligt teorin är det enbart tre kombinationer av aromer som är så kallade stationära tillstånd, dvs. förblir oförändrade över tid. Dessa neutrinotillstånd, som vanligtvis kallas ν_1 , ν_2 och ν_3 , har väldefinierade massor (m_i) som dock måste bestämmas experimentellt. Kvantmekaniskt kan dessa tre tillstånd skrivas som olika superpositioner av tillstånden för de tre aromerna ν_e , ν_μ och ν_τ :

$$|\nu_i\rangle = \alpha_i|\nu_e\rangle + \beta_i|\nu_\mu\rangle + \gamma_i|\nu_\tau\rangle, \quad i = 1, 2, 3$$

Här används standard "ket-notation" för att representera tillstånden. Omvänt kan aromtillstånden uttryckas som superpositioner av de tre massiva tillstånden ν_1 , ν_2 och ν_3 .

För att illustrera hur oscillationerna uppkommer kan vi resonera i termer av blott två aromer (t.ex. ν_e och ν_μ) och två massiva neutriner (ν_1 , ν_2) – en bild som visar sig kunna beskriva de oscillationsfenomen vi observerat så här långt ganska väl. Då kan vi skriva:

$$\begin{aligned} |\nu_1\rangle &= \alpha_1|\nu_e\rangle + \beta_1|\nu_\mu\rangle \\ |\nu_2\rangle &= \alpha_2|\nu_e\rangle + \beta_2|\nu_\mu\rangle \end{aligned}$$

Kvantmekaniken ger vid handen att andelen ν_e inom ν_i ($i = 1, 2$) ges av α_i^2 , medan andelen ν_μ ges av $\beta_i^2 = 1 - \alpha_i^2$. Man väljer därför att införa en parameter, en s.k. blandningsvinkel θ , så att ekvationerna ovan kan skrivas på formen

$$\begin{aligned} |\nu_1\rangle &= \cos\theta|\nu_e\rangle - \sin\theta|\nu_\mu\rangle \\ |\nu_2\rangle &= \sin\theta|\nu_e\rangle + \cos\theta|\nu_\mu\rangle \end{aligned}$$

Och omvänt

$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu\rangle &= -\sin\theta|\nu_1\rangle + \cos\theta|\nu_2\rangle \end{aligned}$$

Experimentellt kan man enkelt producera en specifik neutrinoarom genom att förlita sig på den svaga kraften – exempelvis en stråle av elektron-neutriner med rörelsemängden p , vid tidpunkten $t=0$. Det kvantmekaniska tillståndet för elektronaromen vid tiden $t=0$ ges av ekvationen för $|\nu_e\rangle$ ovan. Men allteftersom tiden går utvecklas de tids- och energiberoende fasfaktorer som, enligt standard kvantmekanik, beskriver tidsutvecklingen hos de två ingående massiva neutrinotillstånden: Dessa tillstånd multipliceras med fasfaktorn e^{-iEt} , där E är deras respektive energier, som – märk väl! – inte är samma eftersom de har olika massa. (För enkelhets skull sätts här Plancks reducerade konstant \hbar till 1.)

Detta gör att tillståndet för vår neutrino, som började som en elektron-neutrino, vid tidpunkten t inte längre representerar en specifik arom, utan ges av

$$|\nu(t)\rangle = \cos \theta \cdot e^{-iE_1 \cdot t} |\nu_1\rangle + \sin \theta \cdot e^{-iE_2 \cdot t} |\nu_2\rangle$$

Om man nu i detta sätter in uttrycken för $|\nu_1\rangle$ och $|\nu_2\rangle$ ovan inser man snabbt att $|\nu\rangle$ har både en elektrondel och en myondel. Amplituden för elektrondelen, dvs. den faktor som multiplicerar $|\nu_e\rangle$, vid tiden t ges av

$$\cos^2 \theta \cdot e^{-iE_1 \cdot t} + \sin^2 \theta \cdot e^{-iE_2 \cdot t}$$

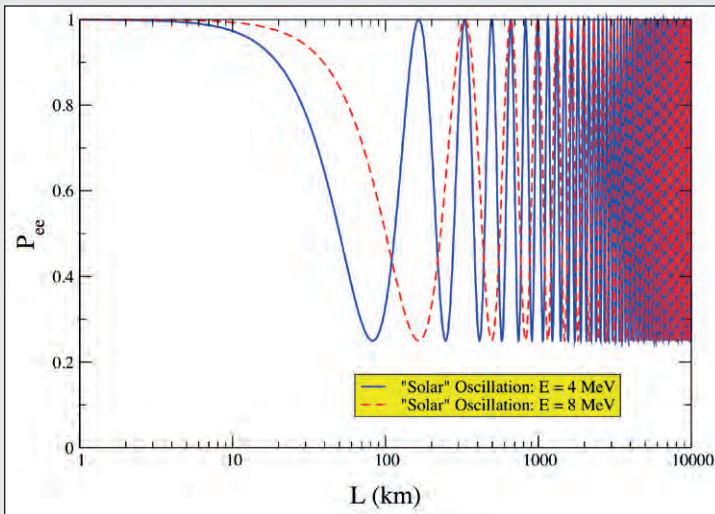
Sannolikheten för att återfinna elektronneutrinen som just en elektronneutrino efter tiden t ges, enligt kvantmekaniken, av absolutkvadraten på denna amplitud. Tillämpning av lite trigonometriska identiteter ger resultatet

$$P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2 \left(\frac{(E_2 - E_1) \cdot t}{2} \right)$$

Neutriner med sina små massor rör sig nästan med ljushastigheten, och deras energi och rörelsemängd är därför ungefär lika stora:

$$E \approx p + \frac{m^2}{2p}$$

(där ljusets hastighet c har satts till 1 för enkelhets skull).



Figur 4: Sannolikheten för att en neutrino som från början är en elektronneutrino detekteras som en sådan efter att ha färdats sträckan L . Två scenarier visas, motsvarande energierna 4 MeV och 8 MeV (typiskt för reaktorneutriner respektive solneutriner). De valda parametrarna är $\Delta m^2 = 6 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$ och $\theta = 30^\circ$ (att jämföras med de uppmätta värdena för solneutrinooscillationer: $\Delta m^2 = 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$ och $\theta = 33,6^\circ$). (Bild från C. Waltham, *Am. J. Phys.* 72, 742 (2004) (DOI: 10.1119/1.1646132). Återpublicerad med tillstånd av American Association of Physics Teachers.)

I uttrycket ovan kan därför $E_2 - E_1$ approximeras med

$$\Delta E = E_2 - E_1 \approx \frac{m_2^2 - m_1^2}{2p} \equiv \frac{\Delta m^2}{2p}$$

Av uttrycket för P_{ee} framgår att sannolikheten för att återfinna elektronneutrinen som just en elektronneutrino oscillerar som funktion av tiden – och därmed även som funktion av avståndet L från den punkt där elektronstrålen skapades. Förutsättningen är att $m_1 \neq m_2$. Såväl blandningsvinkeln θ som massorna m_1 och m_2 måste bestämmas experimentellt.

Figur 4 visar sannolikheten för att en elektronneutrino detekteras med samma arom efter att ha färdats en viss sträcka L . Sträckan är direkt proportionell mot tiden i uttrycket ovan, och oscillationsmönstret beror på de två parametrarna Δm^2 och blandningsvinkeln θ .

Notera att ingen aromomvandling väntas observeras i en detektor nära produktionspunkten för neutrinostrålen, inom ett avstånd på cirka 10 km. I en avlägsen detektor förväntar man sig att observera cirka 60% av det ursprungliga flödet.

Aromomvandling kan te sig konstigt men kan enkelt illustreras av ett exempel med endast två sorters neutriner. Vi tänker oss en urskiva med en timvisare och en minutvisare (motsvarande de två masstillstånden) och antar att etiketten ”elektronneutrino” innebär att de två visarna båda pekar i samma riktning, medan en ”myonneutrino” motsvaras av att visarna pekar i motsatta riktningar. Eftersom de båda visarna rör sig med olika hastighet kommer ett tillstånd som från början motsvarar en elektronneutrino efter en stund ha övergått till en myonneutrino, för att så småningom åter omvandlas till en elektronneutrino, och så vidare. Att visarna rör sig med olika fart motsvarar det kvantmekaniska faktum att tillstånd med olika energier (i detta fall de två masstillstånden) är associerade med olika frekvenser. När dessa olika frekvenser läggs samman uppstår växlingen mellan de två aromerna: ibland pekar visarna åt samma håll, ibland åt motsatta håll.

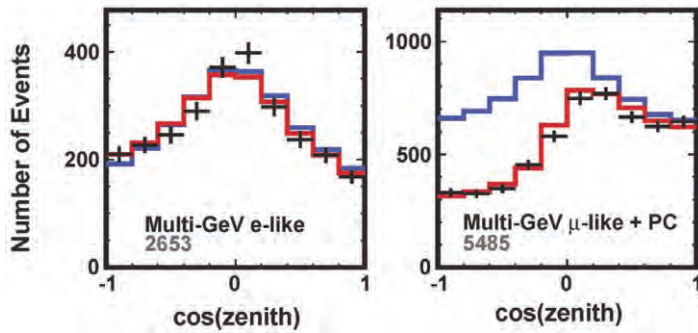
Med kvantmekanikens hjälp kan man beräkna sannolikheter för att aromomvandlingen ska ha ägt rum efter en viss tid (se sidorutan). Det blir lite mer komplicerat i det allmänna fallet med tre neutrinosorter än i fallet med två, men principen kvarstår.

Neutrinooscillationer – finns de?

Idén om neutrinooscillationer verkade lovande och i mitten av 1970-talet började man på allvar att utforska dess konsekvenser. Det behövdes alltså detektorer som var känsliga för mer än en neutrinosort, och kanske även sådana som skulle kunna detektera neutriner som färdats olika långa sträckor. En möjlighet var att testa hypotesen genom att studera atmosfäriska neutriner.

Som nämnts tidigare bildas atmosfäriska neutriner i de partikelskuror som har sitt ursprung i kollisioner mellan den kosmiska strålningen och atmosfärens atomer. Detta neutrinoflöde är teoretiskt relativt väl förstått, inom osäkerheter på 10 – 20%, och man förväntar sig att ungefär dubbelt så många myonneutriner som elektronneutriner når jordytan. I motsats till andra partiklar från dessa atmosfäriska skurar, tränger neutriner rakt igenom tjocka jordlager och kan identifieras med underjordiska detektorer som ligger i skydd för den övriga strålningen. I början av 1980-talet råkade flera lämpliga detektorer vara i drift. Egentligen hade de byggts i ett annat syfte, nämligen för studier av protoners eventuella sönderfall – en fascinerande men oerhört sällsynt process som förutsades existera enligt de vid tiden så populära *Grand Unified Theories* (GUT-teorier). I detta sammanhang var neutrinostrålningen en störning som måste kartläggas i detalj, eftersom den gav upphov till bakgrundsprocesser som liknade den signal man ville studera. Snart rapporterades oväntade underskott av atmosfäriska myonneutriner från flera anläggningar, bland annat Irvine-Michigan-Brookhaven detektorn i en saltgruva i Ohio och av japanska Kamiokande. Det dröjde dock ytterligare ett decennium innan efterföljaren till Kamiokande – Super-Kamiokande – år 1998 på ett övertygande sätt kunde demonstrera belägg för att neutriner saknades på grund av oscillationer.

Super-Kamiokande har en betydligt större volym än Kamiokande med ett detektormaterial bestående av 50 000 liter vatten. Detektorn kan skilja mellan de elektroner och myoner som uppstår när elektron- respektive myonneutriner krockar med vattenmolekylerna. Genom att bestämma elektronens (myonens) färdriktning kan man även sluta sig till färdriktningen hos den ursprungliga neutrinen, och på så sätt få information om hur antalet detekterade elektronneutriner och myonneutriner ändras med avståndet till produktionspunkten i atmosfären. Nedåtgående neutriner från atmosfären direkt ovanför detektorn tillrygga-



Figur 5: Data från Super-Kamiokande för elektronneutriner (vänster) och myonneutriner (höger). Diagrammet visar antalet detektioner som funktion av neutrinerernas färdriktning: $\cos \theta = +1$ motsvarar neutriner som kommer uppifrån medan $\cos \theta = -1$ motsvarar neutriner som kommer nerifrån (där θ är vinkeln till zenit). Endast neutriner med energier i GeV-området inkluderas. "PC" står för "partially contained events" och syftar på att den myon som skapas när en myon neutrino krockar med en atom oftast lämnar detektorn, vilket kan påverka energimätningen. För tydlighetens skull visar figuren data från 2015 som motsvarar 5 000 dagar av detektorns livstid, alltså omkring 10 gånger mera än vad som fanns att tillgå 1998, då den första datan presenterades. De statistiska osäkerheterna är små, och man ser tydligt att modellen endast överensstämmer med myonobservationerna om oscillationer inkluderas (röd linje) och avviker om man inte tar hänsyn till existensen av sådana oscillationer (blå linje). (Figur från Takaaki Kajitas Nobelföreläsning.)

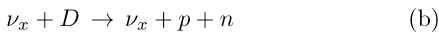
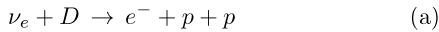
lägger nämligen en betydligt kortare sträcka än de uppåtgående neutriner, som måste ha passerat tvärs igenom hela jordklotet och därmed färdats tusentals kilometer innan de växelverkar och registreras i detektorn.

Exemplen i figur 5 visar hur det observerade elektronneutrinoflödet och myonneutrinoflödet varierar med vinkeln och därmed sträckan före detektion. Medan elektronneutrinoflödet inte är särskilt vinkelberoende, observeras klart färre myonneutriner som kommer nerifrån än som kommer uppifrån. Detta stämmer med förväntningarna enligt oscillationshypotesen: den långa sträckan – cirka 13 000 km innan detektion för uppåtgående neutriner, som passerat genom jordklotet – ökar kraftigt sannolikheten för att myonneutriner ska ha hunnit förändra sin arom på vägen. Eftersom elektronneutrinoflödet inte ökar i motsvarande grad, måste omvandlingen ha resulterat i tauneutriner för vilka Super-Ka-

miokande inte är särskilt känslig. Att elektronneutrinoflödet inte påverkas nämnvärt beror på de parametrar som styr omvandlingen av denna arom. De första resultaten presenterades vid den internationella neutrinokonferensen NEUTRINO '98 i Takayama och möttes av stående ovationer. Detta hade vi väntat på länge!

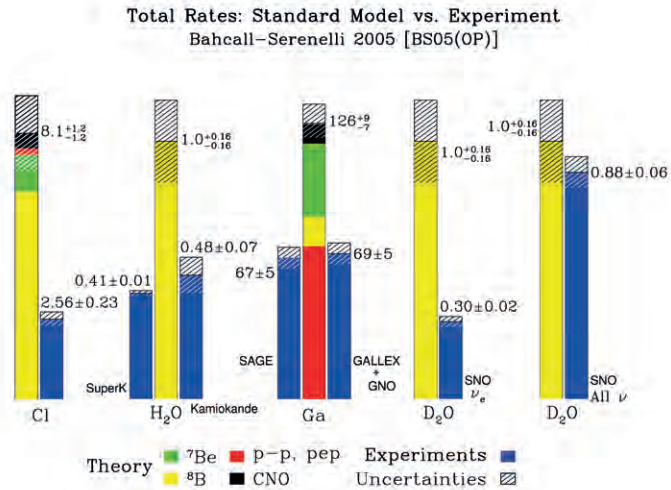
Snart kunde alternativa hypoteser som neutrinosönderfall uteslutas, och så småningom kunde även den förväntade sinusformen för sannolikhetsfördelningen påvisas. Minskningen i antal myonneutriner över långa avstånd bekräftades även av flera andra experiment – bland annat K2K och T2K i Japan samt MINOS i USA. OPERA-kollaborationen i Gran Sasso demonstrerade så småningom även uppkomsten av tauneutriner i en myonneutrinostråle från CERN.

Även mysteriet med solneutriner löstes genom neutrinoomvandling. Avgörande belegg fordrade dock effektiv detektion av alla tre neutrinotyper i samma experiment, vilket levererades av Sudbury Neutrino Observatory (SNO). Detta var en sfärisk detektor fylld med 1 000 ton ultrarent tungt vatten, D_2O . Neutriner identifierades genom tre olika reaktioner:



Här står ν_e för elektronneutrino, ν_x för elektron-, myon- eller tauneutrino, p för proton, n för neutron och e^- för elektron. Bindningen mellan protonen och neutronen i deuteriumkärnan (D) bryts isär vid krocken med en neutrino, och det som särskiljer elektronneutrinoreaktioner från andra neutrinoprocesser är att neutronen samtidigt omvandlas till en proton (reaktion (a) ovan) vilket kan detekteras. SNO kunde nu visa att medan elektronneutrinoflödet minskade, förblev summan av de tre neutrinoflödena konstant och i god överensstämmelse med solmodellerna.

Det framgår klart av figur 6 att SNO:s uppmätta totala neutrinoflöde (sista stapeln) överensstämmer med förväntningarna enligt solmodellen, medan elektronneutrinoflödet (näst sista stapeln) bara är omkring 30% av det förväntade flödet. Solen producerar endast elektronneutriner. SNO:s resultat visar därför att aromomvandling måste äga rum, att elektronneutriner verkligen förvandlas till myon- och tauneutriner under sin färd mot jorden.



Figur 6: En jämförelse mellan solneutrinomätningarna och förutsägelserna från en standardmodell för solen (Bahcall–Pinsonneault 2005²). De viktigaste processerna som alstrar solneutriner är den så kallade pp-kedjan och CNO-cykeln, som involverar kol (C), kväve (N) och syre (O). I båda dessa fusionsprocesser omvandlas väte till helium. Därefter bildas ^7Be och ^8B , isotoper som i sin tur alstrar neutriner vid elektroninfångning och betasönderfall. Staplarna visar experimentella mätningar i blått (för Homestake (Cl), Kamiokande/Super-Kamiokande (H₂O), SAGE/GALLEX/GNO (Ga) och SNO (D₂O)) och de olika beräknade bidragen till neutrinoflödet från solen i gult, grönt, rött och svart. För Kamiokande och SNO är resultaten normerade till solmodellens förutsägelser. För Homestake och SAGE/GALLEX/GNO visas mätningarna och solmodellens förutsägelser för neutrinoflödet i termer av enheten SNU³. Solmodellens förutsägelser tar hänsyn till experimentens känslighet.

Neutrinoevolution

Upptäckten av neutrinooscillationer är en av de viktigaste upptäckterna inom partikelfysiken under de senaste decennierna och har inneburit en revolution inom neutrinforskningen. Vi vet nu att även om neutrinomassorna kan vara obetydliga, kan de inte (alla) vara noll. Existensen av neutrinooscillationer kräver masskillnader, som vi såg i sidorutan tidigare. Genom teoretiska

² J. N. Bahcall, A. M. Serenelli, S. Basu, *Astrophys. J.* **621**: L85–L88, 2005.

³ Antalet solneutrinoreaktioner mäts i termer av solneutrinoenheter (SNU – *solar neutrino units*); 1 SNU motsvarar 1 neutrinoreaktion per sekund per 10^{36} atomer i detektormediet.

anpassningar vet vi dessutom att den masskillnad som är avgörande för solneutrinooscillationer, $\Delta m_{\text{sol}}^2 \approx 7,5 \cdot 10^{-5} (\text{eV}/c^2)^2$, är 30 gånger mindre än den som spelar roll för oscillationerna av atmosfäriska neutriner, $\Delta m_{\text{atm}}^2 \approx 2,5 \cdot 10^{-3} (\text{eV}/c^2)^2$. Men även om vi nu bestämt masskillnaderna har vi fortfarande inte lyckats fastställa själva neutrinomassorna. Experimentella övre gränser finns, till exempel från mätningar av tritiums radioaktiva sönderfall som ger vid handen att elektronneutrinomassan högst är $2 \text{ eV}/c^2$, alltså 250 000 gånger mindre än elektronmassan. Gränserna på massorna av myon- och tauneutrinon är betydligt mindre stringenta.⁴ Striktare gräns – eller i bästa fall en bestämning – av elektronneutrinomassan väntas från KATRIN-spektrometern i Karlsruhe som just påbörjat datatagning och siktar på att nå en känslighet på $0,25 \text{ eV}/c^2$. De första resultaten publicerades i sommar och leder till att massgränsen reducerats med en faktor två.

Samtidigt antyder kosmologiska modeller att neutrinomassorna verkligen ligger väldigt nära noll. Vi badar i en ocean av neutriner som bildades en sekund efter Big Bang och dessa är nästan lika talrika (330 per cm^3) som fotonerna i den kosmiska mikrovågsbakgrunden (410 per cm^3). Det faktum att ett så pass stort antal neutriner strömmade genom universum på ett tidigt stadium har givetvis haft betydelse för de strukturer som vi ser i universum idag. Därför kan även kosmologiska data ge oss ett hum om hur stora neutrinomassorna kan vara – och enligt de senaste rönen⁵ borde deras sammanlagda massor inte överstiga $0,17 \text{ eV}/c^2$.

Figur 7 sammanfattar det vi vet idag om neutrinernas massor. De tre massiva neutrinotillstånden skiljer sig från varandra främst genom andelen elektronneutrinoarom. Neutrinomasstillstånden ν_1 och ν_2 ligger nära varandra i massa, men kan båda ha större eller mindre massa än ν_3 . Bestämningen av neutrinernas massor och ordningen mellan dem är en av de stora utmaningarna inom neutrinofysiken idag.

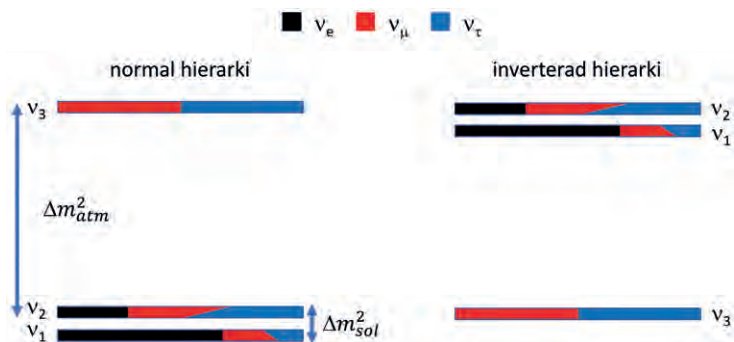
Sådana här obetydliga massor – miljonfalt mindre än elektronmassan, men ändå inte noll – passar inte riktigt in i vår nuvarande version av partikelfysikens standardmodell. Enligt stan-

4 De olika aromerna har som vi sett inga välbestämda massor, och nämnda massgränser är egentligen gränser på *förväntansvärdet* av massan hos respektive arom.

5 Rev. of Particle Physics, M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D98, 030001 (2018), *Neutrino masses, mixing and oscillations* (DOI: 10.1016/j.ppnp.2005.10.001).

dardmodellen borde nämligen neutrinernas massor uppkomma via den så kallade *Higgsmekanismen* genom växelverkan med Higgsbosoner, precis som är fallet för andra leptoner och för kvarkar. Men om neutriner är som andra fundamentala fermioner – borde inte deras massor också ligga relativt nära de andra materiepartiklarnas massor? Hur kan man förklara att neutriners växelverkan med Higgspartikeln är hela 12 storleksordningar svagare än toppkvarkens, men ändå inte noll?

Teoretiska idéer finns, men kräver vad man brukar kalla ”ny fysik”, alltså fysik som går bortom standardmodellen. Ett populärt förslag kallas *gungbrädemekanismen* (eng. *seesaw mechanism*) och studeras inom ramen för storförenade teorier (GUT-teorier). Modellen postulerar att ingen neutrino är ensam. För varje neutrino i standardmodellen finns en mycket tung partner, miljarder gånger tyngre än den tyngsta fundamentala partikeln vi känner till, toppkvarken. Denna partner växelverkar inte med några av standardmodellens övriga partiklar – den är vad man kallar *steril* – vilket förklarar varför den inte har kunnat skapas vid våra accelerators och inte kunnat observeras. Gungbrädemekanismen beskriver hur massorna för de i naturen observerade neutrinerna uppkommer genom växelverkan mellan standardneutriner och deras partners, och detta på ett sätt som kan inkorporeras i standardmodellens matematiska formalism. Ju tyngre partner desto lättare blir den i naturen observerade neutrino – därav namnet ”gungbrädemekanismen”. Neutrinerna får på så sätt massor av samma storleksord-



Figur 7: Neutrinomasspektrum i de två möjliga fallen, som kallas normal hierarki (där massan för ν_3 är större än massorna för ν_1 och ν_2) respektive inverterad hierarki (där massan för ν_3 är minst). Färgerna markerar hur stor andel av de olika neutrinoaromerna som ingår i respektive masstillstånd.

ning som elektronen och de andra leptonerna. De är då inte strikt vänsterhänta (i kiral mening), men eftersom deras massor är väldigt nära noll och de därmed rör sig mycket nära ljusets hastighet, befinner de sig mest i tillstånd med vänsterhänt helicitet.

Ett nytt fönster mot universums gåtor

De senaste 20 åren har ibland kallats för neutrinos tidevarv. Inte nog med att vi nu, 60 år efter neutrinos upptäckt, äntligen lyckats komma ett stort steg närmare att förstå egenskaperna hos denna märkligaste av materiens byggstenar – vi har också tagit ett stort kliv framåt vad gäller användandet av neutriner för att utforska universums hemligheter. År 2000 slutfördes installationen av det första isbaserade neutrinoteleskopet AMANDA på Antarktis, föregångaren till den gigantiska IceCube. Forskarsamarbetet kring AMANDA var till en början litet, med deltagande från tre amerikanska och två svenska universitet, Stockholm och Uppsala, men utvidgades efter hand. AMANDA-teleskopet bestod av 677 optiska sensorer i 19 kilometerdjupa hål i isen. Dessa registrerade de mycket svaga ljusblixtar som bildas då en neutrino kolliderar med en atom nere i den glasklara isen. År 2001 kunde man visa att det isbaserade konceptet fungerade. AMANDA var kapabel att detektera neutriner – även om de man såg hade sitt ursprung i vår egen atmosfär.

IceCube är idag världens största neutrinoobservatorium. Det togs i bruk år 2011, och redan efter 2 år kunde man rapportera att man för första gången hade identifierat ett flöde av mycket högenergetiska neutriner med ursprung bortom vår egen galax. Sådana neutriner väntas enligt teorierna alstras i närheten av kraftfulla kosmiska accelerators – exempelvis vid svarta hål i hjärtat av aktiva galaxer. Dessa objekt väntas ge upphov till gammastrålning i olika våglängdsområden, men även till kosmisk strålning (dvs. protoner och andra atomkärnor) med ultrahöga energier. Och visst – kosmiska partiklar med energier miljonfalt högre än de som vi kan åstadkomma här på jorden, ens med våra kraftfullaste accelerators, har observerats! Men varifrån kommer dessa så kallade ”Oh-My-God” (OMG) partiklar?

De partiklar som utgör den kosmiska strålningen är elektriskt laddade och deras färdväg böjs därför av i magnetfälten mellan galaxerna. Partiklarnas rörelseriktning när de observeras här på jorden säger därför inte något om var de uppstod. Dock tror vi

att vissa av dessa kosmiska kurirer kan krocka med gas eller stoft i närheten av källan och producera skurar av dotterpartiklar, däribland gammastrålning och högenergetiska neutriner. I detta sammanhang är neutriner unika budbärare om de processer som ägt rum: dels saknar de elektrisk laddning och böjs därför inte av i magnetfälten, dels växelverkar de sällan och stoppas därför inte upp av materia eller gas på vägen till jorden. De når oss i stort sett alltid, även från universums mest avlägsna avkrokar. Högenergetisk gammastrålning, däremot, har begränsad räckvidd på grund av växelverkan med bland annat den kosmiska mikrovågsbakgrunden. Dessutom är gammastrålningen, som ju består av högenergetiska fotoner, inte en tydlig indikator på produktion av kosmisk strålning utan skulle lika gärna kunna ha alstrats som synkrotronstrålning vid elektronacceleration i källan.

IceCube teleskopet utgörs av över 5 000 ljuskänsliga sensorer inbäddade i den antarktiska glaciären på djup mellan 1 450 och 2 450 meter, och jämnt utspridda över en kubikkilometerstor isvolym (se figur 8). Detektionsprincipen är densamma som för AMANDA: sensorerna fångar upp de blå glimtar av så kallat *Tjerenkovljus* som uppkommer när en neutrino krockar med en av

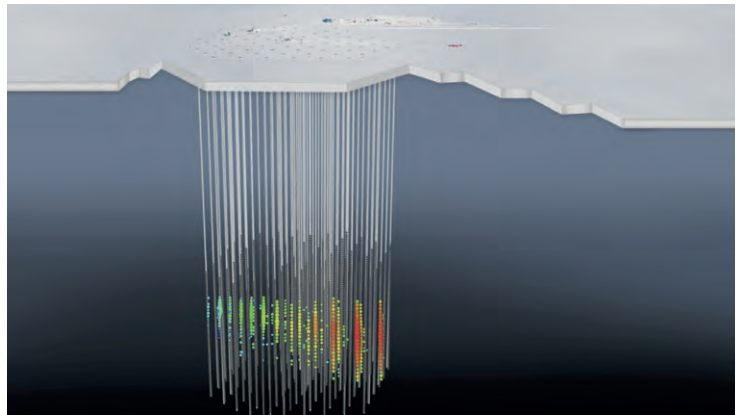


BILD: ICECUBE COLLABORATION/NSF

Figur 8: En skiss som visar IceCube-observatoriets 86 strängar av optiska sensorer inbäddade i glaciären vid Amundsen-Scott basen på Sydpolen. Den 22 september 2017 registrerade IceCube en neutrino med en energi på cirka $3 \cdot 10^{14}$ eV från en riktning som överensstämde med läget för den kända blazaren TXS 0506+056, fyra miljarder ljusår bort. Neutrinon krockade med en atom och det skapades ett spår av ljussignaler som detektorn observerade. Varje färgprick motsvarar en sensor med signal. Färgerna indikerar en tidsföljd – de första signalerna visas med rött, de senare är gula, gröna respektive blå.

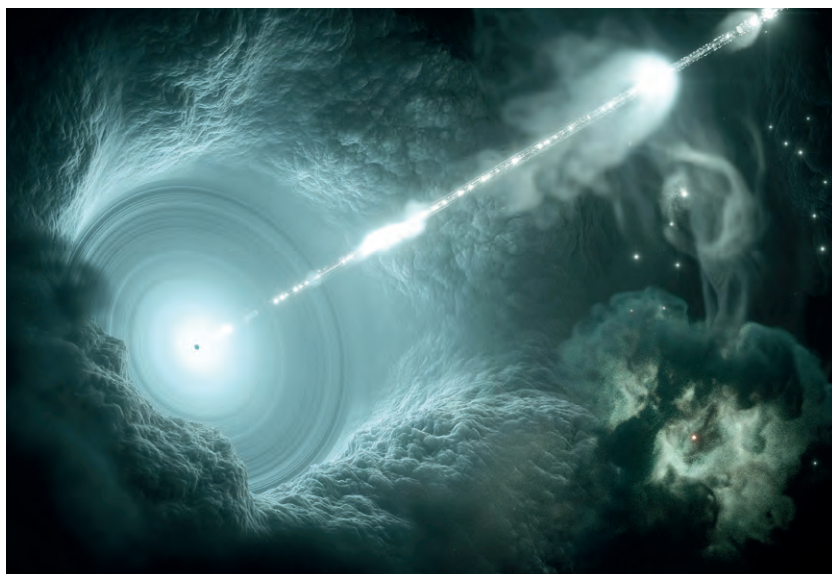


BILD: DESY SCIENCE COMMUNICATION LAB

Figur 9: Grafik föreställande en blazar, dvs. en exceptionellt ljusstark galaxkärna, med en jetstråle bestående av relativistiskt plasma som skjuts ut i riktning mot jorden. Ett näraliggande exempel, bara 400 miljoner ljusår bort, är blazaren Markarian 421 i stjärnbilden Stora björnen.

isens atomer. Neutrino själv förstörs, men energin som frigörs i krocken omvandlas till en skur av nya subatomära partiklar som rör sig framåt, i neutrinos riktning. Några av dessa är elektriskt laddade och på sin väg genom isen alstrar de en chockvåg av ljus (Tjerenkovstrålning). Sensorerna registrerar tidssekvensen och ljusintensiteten, och från dessa data kan neutrinos riktning och energi rekonstrueras.

En miljard ton is – 1 km³ omfattande 10³⁸ atomer – är en överväldigande ismängd, och visar hur utomordentligt svårt det är att fånga en högenergetisk neutrino. Det kosmiska neutrinflödet är litet och en neutrino måste komma oerhört nära en atom för att åstadkomma en reaktion som kan registreras. En enorm mängd atomer krävs för att ha en chans överhuvudtaget! IceCube har efter nästan tio års datainsamling endast lyckas att fånga ett par hundra högenergetiska neutriner från universum. Bestämningen av deras riktningar lider av mätosäkerheter som, även om de bara uppgår till bråkdelen av en grad, gör det svårt att entydigt identifiera ursprungskällorna. Men allt tyder på att IceCube åtminstone i ett fall lyckats peka ut en astrofysikalisk högenergiaccelerator. Den

22 september 2017 registrerades en högenergetisk neutrino vars rörelseriktning kunde rekonstrueras med god precision. Larm skickades ut till astronomiska observatorier runt om i världen i hopp om att neutrino emanerade från ett astronomiskt objekt som även alstrar gammastrålning. Vissa objekt varierar i strålningsintensitet med tiden och det finns teorier som förutspår att om intensiteten av gammastrålning ökar – ja, då ökar också intensiteten av neutrinostrålning. Därmed ökar förstås chansen att fånga en neutrino från just denna källa.

Snart kunde Large Area Telescope (LAT) ombord på Fermi-satelliten rapportera att neutrinos rörelseriktning pekade (inom en osäkerhet på $0,2^\circ$) på ett känt objekt – en så kallad *blazar* (se figur 9) – fyra miljarder ljusår bort, och att gammastrålningen från objektet hade högre intensitet än vanligt. Lite senare rapporterade MAGIC-teleskopet på La Palma att blazaren även skickade ut högenergetisk gammastrålning, i enlighet med teorierna.

Pusselbitarna börjar nu falla på plats! Med IceCube har ett nytt fönster mot universum öppnats på glänt. Samtidigt ger oss observationer av neutriner som färdats över kosmiska avstånd ett nytt verktyg för att utforska neutrinos unika egenskaper, eftersom fenomen bortom standardmodellen, såsom sterila neutriner eller effekter av kvantgravitation, skulle kunna ge sig till känna genom avvikelser i neutrinernas oscillationsmönster. Återstår att se vilka överraskningar naturen har på lut! ❖

För vidare läsning

Joanna Rose: *Neutriner*, Forskning och Framsteg nr 11 (2015).
 Artikeln finns tillgänglig via <https://fof.se/tidning/2015/11/artikel/neutriner>.

Scientific background on the Nobel Prize in Physics 2015: Neutrino Oscillations. Tillgänglig via <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/advanced-physicsprize2015-2.pdf>.

IceCube Collaboration: *IceCube neutrinos point to long-sought cosmic ray accelerator* (2018). Tillgänglig via <https://icecube.wisc.edu/news/view/586>.