

## Rymdens kameleonter

De löste en neutrino gåta och öppnade porten till ny fysik. **Takaaki Kajita** och **Arthur B. McDonald** var nyckelpersoner i var sin stor experimentgrupp, Super-Kamiokande och Sudbury Neutrino Observatory, som upptäckte neutrinernas förvandlingsnummer i flykten.

Jakten har pågått djupt under jorden i gigantiska anläggningar där tusentals konstgjorda ögon väntat på rätt ögonblick för att röja neutrinernas hemligheter. År 1998 presenterade Takaaki Kajita upptäckten att neutriner verkar genomgå en metamorfos. De växlar mellan olika neutrinoidentiteter på väg till detektorn Super-Kamiokande i Japan. Neutriner som fångats där skapas i reaktioner mellan kosmisk strålning och jordens atmosfär.



Neutrion i valet och kvalet mellan olika identiteter – tau-, elektron- eller myonneutrino?

På andra sidan jordklotet i Kanada studerade forskare vid Sudbury Neutrino Observatory, SNO, neutriner som anlände dit från solen. Och 2001 kunde forskargruppen med Arthur B. McDonald i spetsen bevisa att även dessa neutriner faktiskt byter identitet.

Tillsammans hade de båda experimenten upptäckt det nya fenomenet – neutrinooscillationer. Den långtgående slutsatsen var att neutriner, som länge ansågs masslösa, måste ha massa. Detta faktum har omvälvande konsekvenser för partikelfysikens bild av materia och kosmologins teorier om vårt universum.

### Motvilliga hjältar

Vi badar i en ocean av neutriner. Varje sekund strömmar tusentals miljarder neutriner genom din kropp. Du ser dem inte, du känner inget. Neutriner rasar rakt igenom rymden med nära ljusets hastighet och växelverkar nästan aldrig med materia. Varifrån kommer de?

En del skapades redan i big bang, andra bildas ständigt i allehanda processer i rymden och på jorden – från supernovaexplosioner, som är massiva stjärnors dödsögonblick, till reaktionerna i kärnkraftverk och naturligt förekommande radioaktiva sönderfall. Till och med inuti våra kroppar frigörs i snitt 5 000 neutriner i sekunden vid sönderfall av en isotop av grundämnet kalium. De flesta neutriner som anländer till jorden har sin källa i kärnreaktionerna i solens inre. Näst efter ljuspartiklarna, fotonerna, är neutriner talrikast i hela universum.

Länge var det inte ens säkert att de fanns. Snarare tvärtom; när partikeln föreslogs av österrikaren Wolfgang Pauli (Nobelpristagare 1945) var det mest som ett desperat försök att förklara hur energin kan bevaras i ett känt radioaktivt sönderfall, ett så kallat betasönderfall. I december 1930 skrev Pauli ett brev till sina fysikerkollegor som han titulerade *Kära radioaktiva damer och herrar*. I brevet föreslog han att en del av energin bärs bort av en elektriskt neutral, svagt växelverkande och mycket lätt partikel. Självtrodde Pauli knappast på partikelns existens. ”Jag har gjort något förfärligt. Jag har föreslagit en partikel som inte kan upptäckas”, lär han ha sagt.

Ganska snart kunde italienaren Enrico Fermi (Nobelpristagare 1938) presentera en elegant teori som omfattade även Paulis lilla neutrala partikel. Den döptes till neutrino. Att denna oansenliga partikel skulle bli omvälvande både för partikelfysiken och för kosmologin hade ingen kunnat förutse.

Det dröjde ytterligare ett kvarts sekel innan neutrinon faktiskt upptäcktes. Chansen dök upp i början av 1950-talet när neutriner började strömma i stora mängder från de då nybyggda kärnkraftverken. I juni 1956 sände ett par amerikanska fysiker, Frederick Reines (Nobelpristagare 1995) och Clyde Cowan ett telegram till Wolfgang Pauli – neutrinerna hade lämnat spår i deras detektor. Experimentet visade att *poltergeist*, som den spöklika neutrinon hade kallats, var en äkta partikel.

## En märklig trio

Årets Nobelprisbelönade upptäckt löste den neutrino gåtan som först uppenbarades på 1960-talet. Jämfört med teoretiska beräkningar för hur många neutriner som bildas i de kärnreaktioner som får solen att lysa, fattades det upp till två tredjedelar i mätningarna på jorden. Vart tog neutrinerna vägen?

Det saknades inte förslag. Kanske var det fel på de teoretiska beräkningarna av hur solen alstrar neutriner? Ett annat förslag för att lösa solneutrino gåtan var att neutrinerna växlar identitet. Enligt standardmodellen för partikelfysik finns det tre slags neutriner – elektron-, myon- och tauneutriner. De hör ihop med var sin elektriskt laddad partner – elektronen och dess två tyngre och mycket kortlivade släktingar, myonen och tauleptonen, eller taonen. Solen alstrar endast elektronneutriner, men om de nu omvandlas till myon- eller tauneutriner på vägen till jorden så kan underskottet av de infångade elektronneutriner bli begripligt.

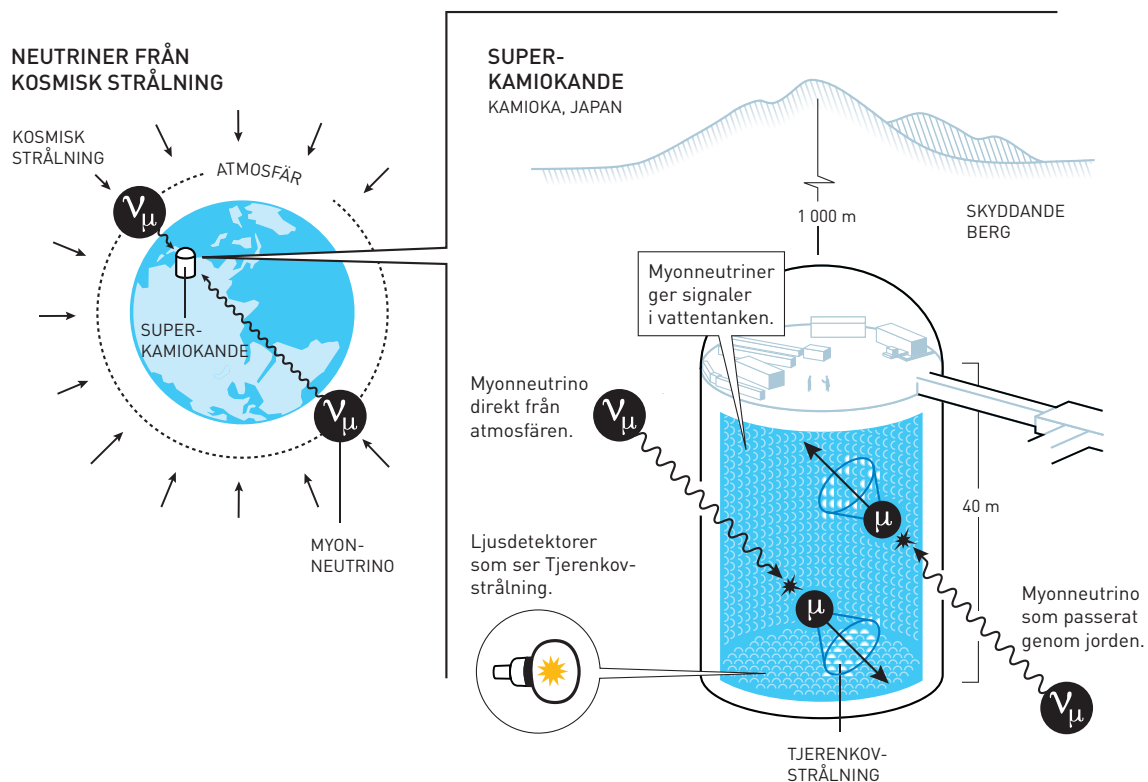
## På neutrinojakt under jorden

Spekulationerna om neutriner identitetsbyten förblev just bara spekulationer ända tills stora och sofistikerade anläggningar kom igång. Dag och natt pågick jakten på neutriner i gigantiska detektorer som byggdes djupt under jordytan för att skärma av brus från rymdens kosmiska strålning och från spontana radioaktiva sönderfall i omgivningen. Ändå är det en svår konst att skilja ut ett fåtal äkta neutrinosignaler från miljarder falska. Till och med luften i gruvorna och detektormaterialet innehåller naturligt förekommande radioaktiva ämnen som sönderfaller och stör mätningarna.

Super-Kamiokande startade sina mätningar 1996 i en zinkgruva 25 mil nordväst om Tokyo, medan Sudbury Neutrino Observatory, byggd i en nickelgruva i Ontario, började observationerna 1999. Tillsammans skulle de komma att avslöja neutriner kameleontlika natur, en upptäckt som alltså belönas med årets Nobelpris i fysik.

Super-Kamiokande är en gigantisk detektor byggd 1 000 meter under jordytan. Den består av en tank, 40 meter hög och lika bred, fylld med 50 000 ton vanligt vatten. Vattnet är så rent att ljusstrålarna kan färdas 70 meter innan deras ljusstyrka halveras, jämfört med bara några få meter i en vanlig pool. På tankens väggar, botten och i taket sitter sammanlagt 11 000 ljusdetektorer som ska upptäcka, förstärka och mäta mycket svaga ljusblixtar i det rena vattnet.

De allra flesta neutriner passerar rakt igenom tanken, men då och då händer det att en neutrino kolliderar med en atomkärna eller en elektron i vattnet. Då bildas laddade partiklar – myoner från myonneutriner och elektroner från elektronneutriner. Runt om de laddade partiklarna alstras svaga blå ljusblixtar, så kallad Tjerenkovstrålning, som uppstår när en partikel rör sig snabbare än ljuset. Det sker inte i strid med Einsteins relativitetsteori, där inget får färdas snabbare än ljus i vakuum. I vattnet bromsas ljuset nämligen till bara 75 procent av sin maximala hastighet, och kan således bli "omsprunget" av de laddade partiklarna. Tjerenkovstrålningens form och intensitet avslöjar vilken sorts neutrino som orsakade den och varifrån den kom.



Super-Kamiokande fångar atmosfäriska neutriner. När en neutrino kolliderar med vattnet i tanken skapas en snabb elektriskt laddad partikel. Då uppstår Tjerenkovstrålning som fångas av ljusdetektorerna. Tjerenkovstrålningens form och intensitet avslöjar vilken sorts neutrino som orsakade den och varifrån neutrinoen kom. De myon neutriner som kom till Super-Kamiokande den kortaste vägen från atmosfären var mot förväntan fler än de som färdades dit genom hela jordklotet. Det tydde på att myon neutriner som färdats den längre sträckan hann omvandlas till en annan sort på vägen.

## En lösning på gåtan

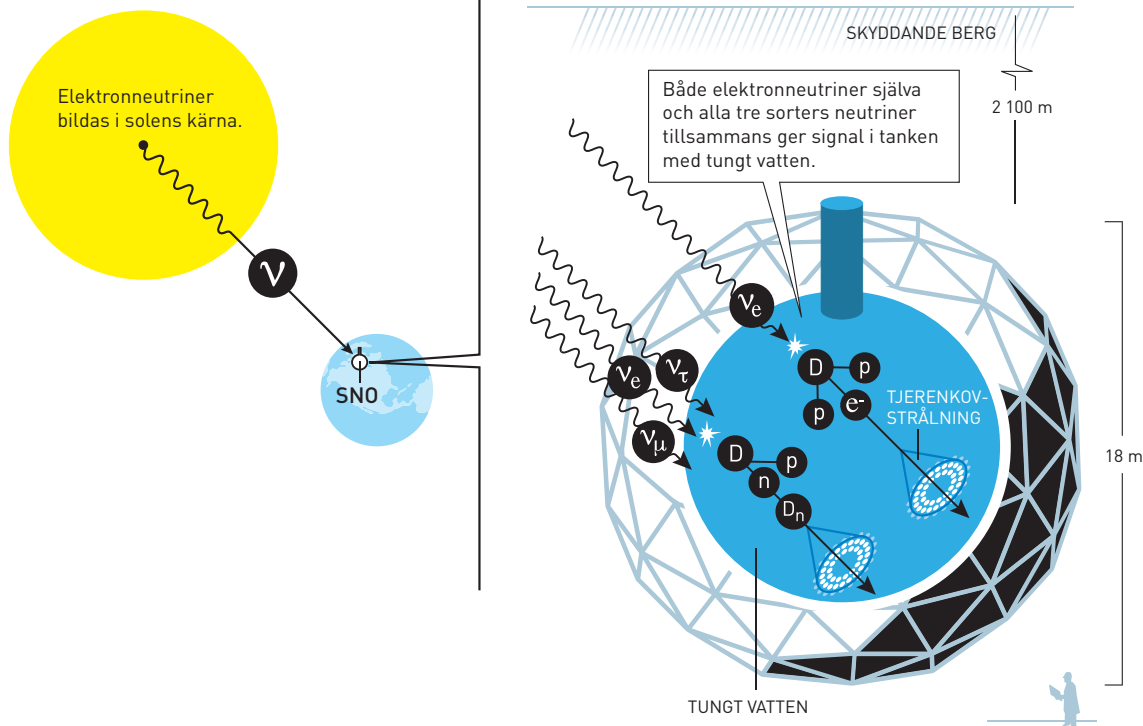
Under de första två åren sållade Super-Kamiokande fram omkring 5 000 neutrinosignaler. Det var många fler än i tidigare försök, men fortfarande färre än vad som teoretiskt förväntades när forskarna uppskattade antalet neutriner från den kosmiska strålningen. Partiklarna i den kosmiska strålningen kommer från alla håll i rymden och när de i hög fart kolliderar med molekyler i jordens atmosfär uppstår reaktioner som producerar skurar av neutriner.

Super-Kamiokande fångade både de myon neutriner som kom direkt uppifrån atmosfären, och de som kom nerifrån och som hade färdats till detektorn tvärsigenom hela jordklotet. Neutrinerna borde vara lika många, jordklotet utgör inget större hinder för dem. Men de myon neutriner som kom raka vägen ner till detektorn var fler än de som passerat genom jorden.

Det tydde på att de myon neutriner som for den längre sträckan hade tid att byta identitet till skillnad från de myon neutriner som kom direkt uppifrån och bara hade färdats några tiotal kilometer. Eftersom antalet elektron neutriner som anlände till detektorn stämde väl oberoende vilket håll de kom ifrån, torde myon neutriner ha omvandlats till den tredje sorten – tauneutriner. Deras passage kunde dock inte upptäckas av detektorn.

En avgörande pusselbit föll på plats när Sudbury Neutrino Observatory, SNO, genomförde sina mätningar av neutriner från solen, där kärnprocesserna bara skickar iväg elektron neutriner. Två kilometer under markytan bevakades elektron neutriner framfart av 9 500 ljusdetektorer i en tank fylld med 1 000 ton tungt vatten. Det skiljer sig från vanligt vatten genom att varje väteatom i vattenmolekylen också har en neutron i sin kärna och bildar väteisotopen deuterium.

## NEUTRINER FRÅN SOLEN



Sudbury Neutrino Observatory, SNO, fångar neutriner från solen. Där produceras bara elektronneutriner. De reaktioner med tankens tunga vatten som neutrinerna gav upphov till, ledde till att både elektronneutriner och alla tre sorters neutriner tillsammans kunde mätas. Då visade det sig att elektronneutriner var för få, men summan av alla tre slags neutriner stämde med förväntningarna. Slutsatsen var att en del av elektronneutriner omvandlats till en annan sorts neutrino.

Deuteriumkärnan ger fler möjligheter för neutrinerna att kollidera i detektorn. Vissa reaktioner lät forskarna mäta antalet av alla tre slags neutriner utan att skilja dem åt, andra tillät endast mätning av antalet elektronneutriner.

I och med att solen bara alstrar elektronneutriner förväntas båda sätten att mäta neutriner i SNO ge samma svar. Var antalet elektronneutriner lägre än summan av alla tre sorter tillsammans skulle det tyda på att något har hänt med elektronneutriner under deras cirka 150 miljoner kilometer långa resa från solen.

Av alla de drygt 60 miljarder neutriner per kvadratcentimeter som varje sekund kommer till jorden från solen hade SNO-detektorn under sina första två år lyckats fånga bara tre om dagen. Det motsvarar en tredjedel av den förväntade mängden elektronneutriner som borde ha fångats i detektorn. Två tredjedelar har alltså försvunnit. Summan däremot, om man räknar alla tre varianter tillsammans, stämmer överens med det ursprungliga förväntade antalet neutriner. Slutsatsen blir att elektronneutriner måste ha ändrat identitet på vägen.

## Kvantfysikens metamorfoskonst

Genom de två experimenten hade misstanken om att neutriner byter från en identitet till en annan nu bekräftats. Upptäckten ledde till att flera nya experiment sattes igång, och partikelfysikerna fick tänka nytt.

Tillsammans ledde experimentresultaten också till en omvälvande slutsats: metamorfosen kräver att neutriner har massa. Annars kan de inte förvandlas. Hur går då denna förändring till?

Det krävs kvantfysik för att förklara neutrinernas förvandlingsnummer. I kvantvärlden är partikel och våg olika aspekter av samma fysikaliska tillstånd. En partikel med viss energi motsvaras av en våg med viss frekvens. Enligt kvantfysiken representeras elektron-, myon- och tauneutrinerna av överlagrade vågor som motsvarar neutrinotillstånd med olika massor.

När vågorna är i fas går det inte att skilja mellan de olika neutrinoidentiteterna. Men när en neutrino färdas genom rummet kommer vågorna ur fas. Längs vägen överlagras vågorna på ett skiftande sätt med varandra. Hur det förhåller sig på en given plats ger sannolikheten för vilken sorts neutrino som är mest trolig att finna där. Sannolikheterna varierar från en plats till en annan, de oscillerar, och neutrinerna dyker upp i sina olika identiteter.

Detta besynnerliga beteende beror alltså på att neutrinernas massor är olika. Experimenten pekar mot att skillnaden är oerhört liten. Neutrinernas massa uppskattas också vara väldigt liten, utan att den hittills kunnat mätas direkt. Fast med den enorma mängden neutrinor i universum blir till och med en mycket liten massa rätt betydelsefull. Sammanlagt uppskattas neutrinerna väga ungefär lika mycket som alla rymdens lysande stjärnor tillsammans.

## Öppnar för ny fysik

För partikelfysiken är upptäckten av neutrinernas massa epokgörande. Dess standardmodell av materiens innersta hade varit oerhört framgångsrik och i drygt 20 år stått emot alla experimentella utmaningar. Men modellen förutsätter att neutrinerna är masslösa. Nu har de båda experimenten avslöjat den första påtagliga sprickan i standardmodellen. Det har blivit uppenbart att standardmodellen inte kan vara den kompletta teorin för hur universums fundamentala beståndsdelar fungerar.

Innan nya teorier bortom standardmodellen kan fullbordas behöver flera nyckelfrågor om neutrinernas natur besvaras. Vilka massor har neutrinerna? Varför är de så lätta? Finns det flera varianter än de tre redan kända? Är neutrinor sina egna antipartiklar? Varför är de så olika andra kända elementarpartiklar?

Den i år Nobelprisbelönade upptäckten gav en avgörande inblick i den nästan helt dolda neutrinovärlden. Nu fortsätter experimenten och en febril verksamhet pågår världen över för att fånga neutrinerna och närmare utforska deras egenskaper. Nya avslöjanden om neutrinernas djupaste hemligheter förväntas ändra våra föreställningar om universums historia, uppbyggnad och framtida öde.

---

## LÄNKAR OCH LÄSTIPS

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, <http://kva.se>, och <http://nobelprize.org>. Där och på <http://kvatv.se> kan man också titta på presskonferenser, Nobelföreläsningar och annat videomaterial. Mer information om utställningar och aktiviteter kring Nobelpriset och Ekonomipriset finns på [www.nobelmuseum.se](http://www.nobelmuseum.se).

### Böcker

**Jayawardhana, R.** (2013) *Neutrino hunters: The Thrilling Chase for a Ghostly Particle to Unlock the Secrets of the Universe*, Scientific American/Farrar, Straus and Giroux

**Close, F.** (2010) *Neutrino*, Oxford University Press

### Populärvetenskapliga artiklar

**Hulth, P.O.** (2005) High Energy Neutrinos from the Cosmos, [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/themes/physics/hulth/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/themes/physics/hulth/)

**Bahcall, J.N.** (2004) Solving the Mystery of the Missing Neutrinos, [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/themes/physics/bahcall/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/themes/physics/bahcall/)

**McDonald, A. B., Klein, J. R. och Wark, D. L.** (2003) Solving the Solar Neutrino Problem, *Scientific American*, vol. 288, nr 4, april

**Engström, U.** (2002) Gåtan om solens neutriner äntligen löst, *Forskning & Framsteg*, nr 6

**Kearns, E., Kajita, T. och Totsuka, Y.** (1999) Detecting Massive Neutrinos, *Scientific American*, vol. 281, nr 2, augusti

**Rose, J.** (1998) Japanskt superteleskop löser neutrinernas gåta, *Forskning & Framsteg*, nr 2

### Länkar

Super-Kamiokande Official Homepage: [www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html](http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html)

Sudbury Neutrino Observatory Homepage: [sno.phy.queensu.ca](http://sno.phy.queensu.ca)

---

## PRISTAGARE

### TAKAAKI KAJITA

Japansk medborgare. Född 1959 (56 år) i Higashimatsuyama, Japan. Fil.dr 1986 vid University of Tokyo, Japan. Director of Institute for Cosmic Ray Research och professor vid University of Tokyo, Kashiwa, Japan.

[www.icrr.u-tokyo.ac.jp/about/greeting\\_eng.html](http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/about/greeting_eng.html)

### ARTHUR B. MCDONALD

Kanadensisk medborgare. Född 1943 (72 år) i Sydney, Kanada. Fil.dr 1969 vid California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA. Professor emeritus vid Queen's University, Kingston, Kanada.

[www.queensu.ca/physics/arthur-mcdonald](http://www.queensu.ca/physics/arthur-mcdonald)