

Den lille neutron

En neutrino er en næsten masseløs elementarpartikel, der stort set ikke reagerer med noget. På baggrund af dette års Nobelpris i fysik fortæller Steen Hannestad her om neutrinoens historie og om dansk neutrino-forskning.

Af Steen Hannestad

■ Da fysikerne Raymond Davis Jr og Masatoshi Koshiba i år blev tildelt Nobelprisen for deres eksperimentelle påvisning af neutrinoer, var det anden gang inden for relativt få år, at fysikprisen blev tildelt forskere, der har bidraget til forståelsen af denne mystiske elementarpartikel. I 1995 blev Nobelprisen således givet til Frederic Reines for hans påvisning af neutrinoer i en atomreaktor. Neutrinoens historie er et godt eksempel på, hvordan teoretiske forudsigelser bekræftes af eksperimenter, som rejser nye spørgsmål, der kræver nye eksperimenter. Der venter således sandsynligvis endnu mange spændende neutrino-opdagelser i fremtiden.

Energi-regnskabet stemte ikke

De første spæde skridt mod opdagelsen af neutrinoen blev taget i 1899, da Ernest Rutherford opdagede den type radioaktivitet, der kendes som betastråling. I 1902 blev det påvist af Pierre og Marie Curie, at betastråling er elektroner med høj energi, der udsendes fra de radioaktive atomkerner.

Hvis betastråling bestod alene af elektroner skulle man forvente, at de udsendte elektroner fra et bestemt stof altid havde den samme energi. Denne energiforskel kunne beregnes ved hjælp af Einsteins formel $E=mc^2$, som masseforskellen mellem den oprindelige atom-

kerne og den producerede.

I 1914 påviste Chadwick dog, at betahenfald ikke opførte sig på denne simple måde. Elektronerne blev udsendt med alle mulige forskellige energier mellem 0 og den energi, som kunne beregnes fra masseforskellen. Der manglede altså energi i regnskabet og nogle forskere, blandt andet Niels Bohr, foreslog, at energi i den subatomare verden måske ikke var en absolut bevaret størrelse. Dette var selvfølgelig en kætersk tanke, da energibevarelse netop var en af hjørnestenene i den klassiske fysik. Men måske var det ikke tilfældet i den kvantemekaniske verden, som netop i de år var ved at blive afdækket.

Den lille neutron

Først i 1930 foreslog den tyske fysiker Wolfgang Pauli en anden mulig løsning på problemet. Hvis nu der i betahenfald blev udsendt en anden partikel sammen med elektronen kunne det forklare den manglende energi. Denne energi ville simpelt hen blive båret væk af den hypotetiske nye partikel. Den nye partikel måtte have egenskaber meget forskellige fra alle hidtil kendte partikler: Den måtte være elektrisk neutral og ikke have nogen form for elektromagnetisk vekselvirkning, ellers ville man have opdaget den med lethed. Samtidig måtte den have en masse, der var langt mindre end elektro-

nens, ellers passede elektronernes energispektrum ikke.

To år efter opdagede man faktisk en partikel, som opfyldte nogle af disse betingelser, neutronen. Desværre havde neutronerne en alt for stor masse, og kunne derfor alligevel ikke være identiske med de nye partikler. Inspireret af opdagelsen af neutronen døbte den Italienske fysiker Enrico Fermi den hypotetiske partikel "neutrinoen" (altså den lille neutron). Kort

tid efter formulerede Fermi også en kvanteteori for betahenfald, hvori neutrinoen indgik. Fermis teori passede fantastisk godt med alle eksperimenter, og efterhånden blev man mere og mere overbevist om neutrinoens eksistens.

Neutrinoen påvises

Desværre var man stadig langt fra en direkte eksperimentel påvisning af neutrinoen. Før dette kunne ske var man nødt

Neutrinoens "Hall of Fame"

Mange fysikere har gennem tiden bidraget til forståelsen af neutrinoen. Tre af dem har opnået den ypperste anerkendelse, nemlig Nobelprisen.

Raymond Davis Jr, 87 år, Nobelprismodtager år 2002 for sin eksperimentelle påvisning af neutrinoer fra Solen.



Masatoshi Koshiba, 76 år, Nobelpristager år 2002 for sin eksperimentelle påvisning af kosmiske neutrinoer og påvisningen af neutrino-oscillationer.

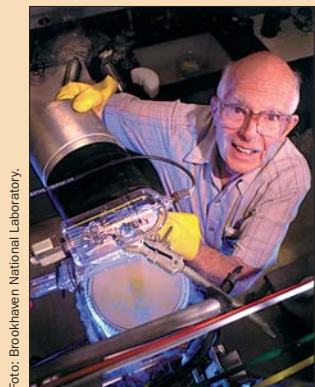
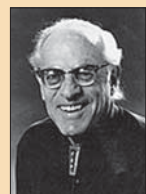


Foto: Brookhaven National Laboratory.



Frederick Reines (1918-1998) fik i 1995 Nobelprisen for sine observationer af neutrinoen.

Neutrinoeksperimenter

Raymond Davis eksperiment foregik i en tank fyldt med 615 tons af et almindeligt klorholdigt rengøringsmiddel (tetrachlorethylen) placeret i en guldmine. I tanken var der således et helt astronomisk antal klor-atomer – ca. 2×10^{30} . Ifølge hans beregninger ville ca. 20 neutrinoer hver måned reagere med klor-atomer, og

derved ville der dannes 20 argon-atomer. Davis store bedrift var, at han udviklede en metode, så han var i stand til at tælle disse argon-atomer – reelt som at finde et bestemt sandskorn i Sahara. Eksperimentet indsamlede data frem til 1994, og i alt blev der "talt" ca. 2.000 argon-atomer.

Raymond Davis' neutrinodetektor var 14,6 meter lang og 6,1 meter bred og indeholdt over 600 tons rengøringsmiddel!



Foto: Brookhaven National Laboratory.

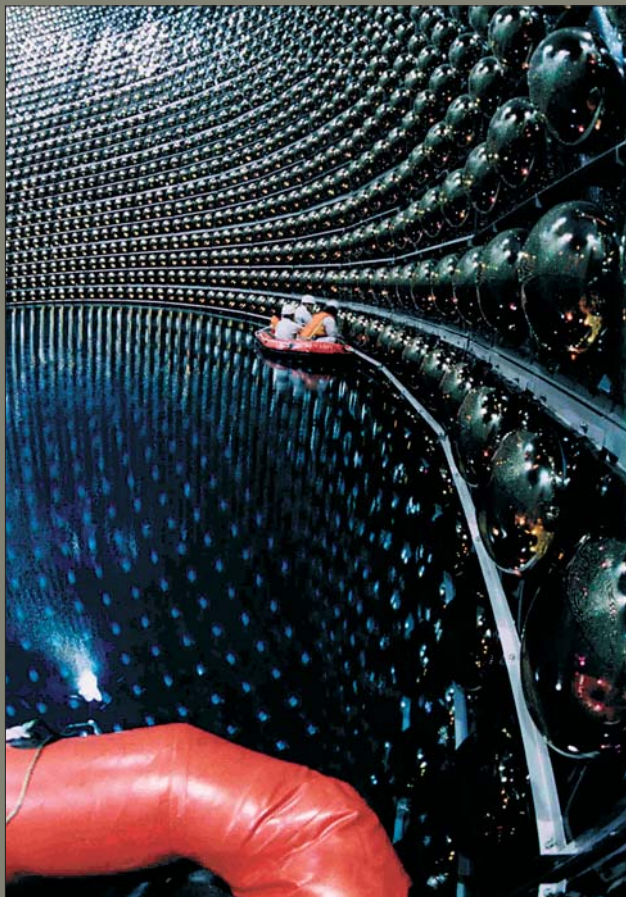


Foto: ICRR, The University of Tokyo.

Et kig ind i Super-Kamiokande med det imponerende arsenal af lysfølsomme detektorer.

Masatoshi Koshibas eksperiment, Kamiokande, foregik ligeledes i en mine. Her havde han placeret en enorm tank fyldt med vand. Når neutrinoer passerede gennem tanken kunne de reagere med atomkerner i

vandet. Ved sådanne reaktioner frigøres der en elektron, hvorved der opstår et svagt lysglimt (såkaldt Cherenkov-stråling) – og disse kunne Koshiba og hans kolleger opfatte med et større arsenal af lysfølsomme

detektorer. I modsætning til Davis eksperiment, kunne Koshibas eksperiment bestemme både tidspunktet og retningen af de enkelte reaktioner.

Dermed kunne han bevise, at neutrinoerne, som formodet, faktisk kom fra Solen.

I 1987 var Koshiba heldig, og hans detektor opfangede et neutrino-signal fra en såkaldt supernova (en voldsom energiuudladning fra en døende stjerne). Ved en sådan supernova udløses 99% af energien i form af neutrinoer. Det er blevet beregnet, at ca. 10^{58} neutrinoer er blevet frigivet ved denne begivenhed, hvoraf de 10^{16} (en million-milliarder) formodes at have passeret Koshibas detektor. Af disse registrerede Koshiba de 12!

I 1996 satte Koshiba en ny og endnu mere fintfølede detektor (Super Kamiokande) i drift, som for nylig har afsløret eksistensen af et helt nyt fænomen, neutrino-oscillationer, hvor en type af neutrino ændres til en anden.

Pudsigt nok, havde Koshiba et helt andet eksperiment i tankerne, da han oprindeligt designede Kamiokande, nemlig at undersøge, om protonen er stabil. Dette eksperiment viste sig imidlertid at være en blindgyde, men til alt held kunne Koshiba se mulighederne i at ændre eksperimentet til at detektere neutrinoer. Hans succes med påvisning af kosmiske neutrinoer kan således ses som fiaskoen, der blev vendt til en stor succes!

til at have meget kraftige neutrinoer til rådighed. Hver enkelt neutrino skulle ifølge teorien kun vekselvirke ganske svagt og derfor skulle der mange til, før man kunne gøre sig håb om at se blot en enkelt.

I 1942 byggede Fermi og hans studerende i Chicago den første fungerende atomreaktor, og ifølge Fermis teori skulle en sådan reaktor producere enorme mængder af neutrinoer, der med lidt held ville kunne måles. Der gik dog endnu omkring 15 år inden de to Amerikanske fysikere Fred Reines og Clyde Cowan endelig fik bevist neutrinoens eksistens, da de observerede neutrinoer udsendt fra atomkraftværket Savannah River i South Carolina (dette fik Reines nobelprisen for i 1995, Cowan var død allerede mange år tidligere).

Neutrinoer fra Solen

Samtidig med den eksperimentelle udvikling i neutrinfysikken havde den tyske fysiker Hans Bethe beregnet, hvordan Solen producerer energi via fusionsreaktioner. Selv om Bethes beregninger ikke inkluderede neutrinoer, ved vi nu, at disse fusionsreaktioner producerer masser af neutrinoer. Disse neutrinoer vekselvirker så svagt med omgivelserne, at de stort set alle sammen undslipper fra Solen. En uundgåelig konsekvens er derfor, at Jorden hele tiden bliver bombarderet med neutrinoer, omkring 10 mia. per cm^2 per sekund! Igen på grund af neutrinoernes svage vekselvirkning passerer langt de fleste neutrinoer blot igennem Jorden.

Det var netop disse neutrinoer fra Solen, som Ray Davis i 1968 var den første i verden til at observere med sit eksperiment i den amerikanske Homestake mine. Allerede efter et år stod det dog klart, at der var et fundamentalt problem med disse observationer. Mængden af neutrinoer fra Solen var kun omkring halvdelen af, hvad man forventede

ud fra teoretiske beregninger. Andre, senere eksperimenter, som det japanske Super-Kamiokande, bekræftede denne uoverensstemmelse, men gav ikke noget endeligt svar på, hvad årsagen var.

Neutrino-oscillationer

Gennem de sidste næsten fyrrer år har der været to konkurrerende teorier for, hvorfor der observeres langt færre neutrinoer fra Solen end forventet. Den nemmeste forklaring kunne umiddelbart tænkes at være, at vi simpelt hen ikke forstår de fysiske forhold i Solens indre godt nok, og at Solen ganske enkelt kun producerer halvt så mange neutrinoer som forventet. I begyndelsen var dette en plausibel forklaring, men efterhånden som de astrofysiske modeller for Solen blev bedre forsvandt denne mulighed. Den eneste tilbageværende mulighed var, at neutrinoerne forsvandt undervejs fra dannelsesstedet i Solens indre til Jorden. Dette kunne ske på grund af de såkaldte neutrino-oscillationer. Neutrinoer eksisterer i tre forskellige typer: elektron-, muon- og tauneutrinoer. I Solens indre produceres kun elektronneutrinoer, og samtidig kan Jordiske detektorer også mestendels se elektronneutrinoer, men kun i mindre grad muon- og tauneutrinoer. Hvis de producerede elektronneutrinoer blev omdannet til muon- eller tauneutrinoer undervejs ville man derfor ikke kunne se dem, og man havde en naturlig forklaring på problemet.

Neutrino-oscillationer kan netop omdanne en type neutrino til en anden, men selv om meget tydede på, at dette måtte være forklaringen var det først i år 2000, at det canadiske SNO-eksperiment kom med den endelige bekræftelse: Solens elektronneutrinoer omdannes undervejs til muonneutrinoer og kan derfor næsten ikke ses af jordiske detektorer.

Ray Davis' oprindelige resultater blev derfor bekræftet

Neutrnotyper

Der findes tre forskellige typer af neutrinoer: elektronneutrinoen, muonneutrinoen og tauneutrinoen. Som navnet antyder matcher de hver især en specifik partikel, nemlig elektronen, muonen og taupartiklen. Alle disse partikler har ladningen -1 , mens den tilsvarende neutrino har ladningen 0 .

på spektakulær vis og har ført til tildelingen af årets nobelpris i fysik.

Kosmiske neutrinoer

Den anden tredjedel af årets nobelpris i fysik blev tildelt Masatoshi Koshiba for en anden fundamental opdagelse i neutrinfysik. Koshiba var manden bag den japanske Kamiokande neutrindetektor, der observerede neutrinoer fra kosmisk stråling. Ud over Solen er kosmisk stråling den største kilde til de neutrinoer, der kommer fra rummet. På samme måde som for solneutrinoerne, opdagede man hurtigt et problem med neutrinoerne fra kosmisk stråling. Forventningen var, at der skulle komme eksakt halvt så mange elektronneutrinoer som muonneutrinoer,

men eksperimenterne viste, at der kom omtrent lige mange. Dette kunne igen forklares med neutrinooscillationer, hvor halvdelen af muonneutrinoerne omdannes til tauneutrinoer. I 1998 beviste Kamiokandes efterfølger, Super-Kamiokande, at dette faktisk var tilfældet.

En fundamental egenskab ved neutrinooscillationer er, at de kun kan forekomme, hvis neutrinoerne har masse. Før 1998 vidste man ikke med sikkerhed, om dette var tilfældet, og Super-Kamiokandes opdagelse betød derfor en bekræftelse af, at neutrinoerne faktisk har masse. Det var netop denne opdagelse, Koshiba blev tildelt prisen for.

Dansk neutrinfysik

Det helt store problem for udforskningen af neutrinoernes

egenskaber er, at de ikke vekselvirker elektromagnetisk, og at de derfor er utroligt svære at "se". Derfor er der også mange spørgsmål, der endnu ikke er besvarede.

Danske fysikere er involveret i neutrinfysik på mange fronter. I Aarhus og Odense, samt på Nordisk Institut for Teoretisk Fysik, forskes der for eksempel i neutrinoers betydning for supernovaeksplosioner (altså eksplosioner af gamle, tunge stjerner). Neutrinoerne menes at have fundamental betydning for, at disse eksplosioner overhovedet kan forekomme, og omkring 99% af energien i en supernova bliver faktisk udsendt i form af neutrinoer.

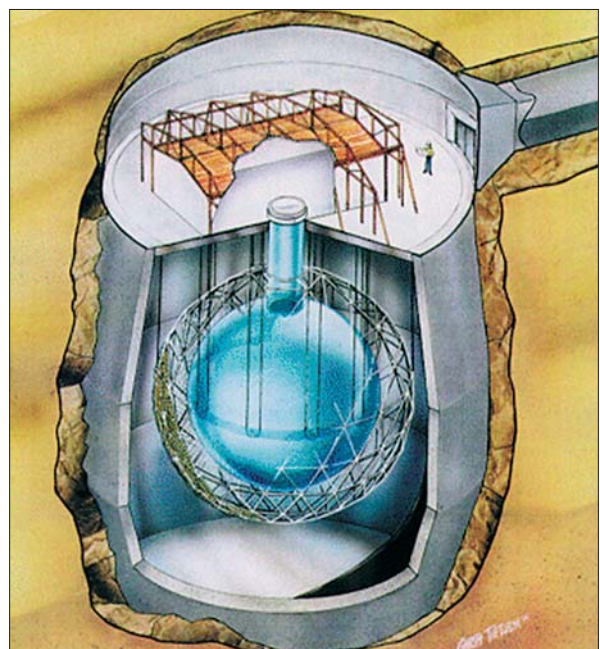
I Odense forskes der blandt andet i neutrinoernes betydning i kosmologien. Neutrinoer er, næst efter lyspartikler, de hyppigst forekommende partikler i universet, og de har derfor stor betydning både i det tidlige univers, og for dannelsen af de galakser vi ser i dag. Omvendt kan kosmologiske observationer også bruges til at undersøge neutrinoernes egenskaber på områder, hvor det ikke kan lade sig gøre i jordiske laboratorier.

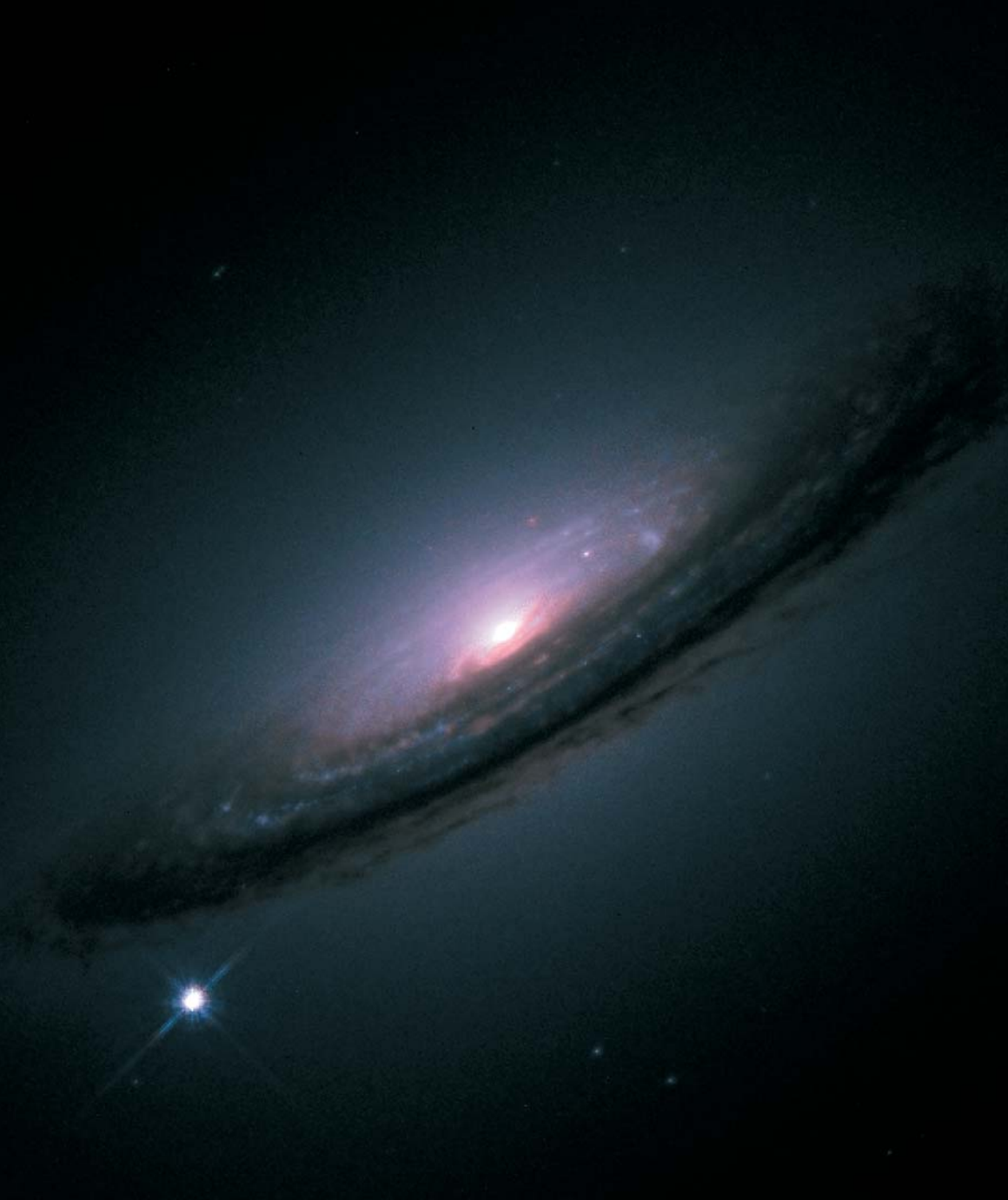
Et andet væsentligt aspekt

SNO – The Sudbury Neutrino Observatory

Det canadiske Sudbury Neutrino Observatory minder om Koshibas Kamiokande-eksperimenter. Det består således af en stor tank fyldt med vand og et større arsenal af lysfølsomme detektorer. Hele molevitten er installeret i en mine over 2 km. under Jordens overflade. I tanken er der 1000 tons tungt vand (deuterium), og også her måler man de lysglimt, Cherenkov-strålingen, der opstår, når neutrinoer reagerer med det tunge vand. SNO-eksperimentet kom i år 2000 med den endelige bekræftelse af, at Solens elektronneutrinoer omdannes til muonneutrinoer på deres vej mod Jorden.

Illustration: The Sudbury Neutrino Observatory





Om forfatteren
Steen Hannestad er lektor ved
Fysisk Institut
Syddansk Universitet
Campusvej 55
5230 Odense M
Tlf.: 6550 3503
E-post:
hannestad@fysik.sdu.dk

Foto: Hubble Space Telescope/Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

En supernova (1994D) i galaksen NGC 4526. Supernovaen er den klare stjerne nederst til venstre. Ved en supernovaeksplosion frigøres en enorm energimængde, hvoraf de 99% udgøres af neutrinoer. Dette skal ses i forhold til, Hvor meget en sådan supernova lyser op i forhold til galaksen øvrige stjerner – dette kraftige lys repræsenterer faktisk kun ca. 1% af den energi, der frigøres.

i neutrinforskningen er en mere fundamental model for neutrinoens egenskaber. Hvorfor har neutrinoerne for eksempel en masse, der er kun omkring 1/1.000.000 af den letteste partikel, man ellers kender: elektronen? Specielt på Niels Bohr Institutet har man været interesseret i dette spørgsmål.

En stor del af den nye viden om neutrinoer, der formodes at komme i de næste 10-20 år vil stamme fra en række nye laboratorieeksperimenter.

Et af stederne, hvor sådanne eksperimenter vil finde sted, er det fælles europæiske partikelfysiklaboratorium, CERN, hvor også Danmark er medlem. Af speciel interesse kan for eksempel nævnes eksperimentet CERN-Gran Sasso, hvor man vil skyde en strøm af neutrinoer, produceret i CERNs acceleratorer, mod et mål i Gran Sasso laboratoriet øst for Rom. Med dette eksperiment vil man kunne opklare nogle af de uløste spørgsmål om neutrinooscillationer.

Neutrinfysik i udvikling

Tildelingen af nobelpriserne i fysik i 1995 og 2002 for opdagelser inden for neutrinfysik har på mange måder været fortjent. Selvom priserne er givet for opdagelser, der ligger 30-40 år tilbage i tiden, viser det netop, at neutrinfysikken i øjeblikket er inde i de fantastiske udvikling. I de kommende år vil en mængde nye eksperimenter begynde at samle data, og der vil uden tvivl komme nye overraskende opdagelser. ■

Videre læsning:
Om nobelprisen i fysik:
www.nobel.se

Om neutrinoeksperimenter:
SNO-eksperimentet:
www.sno.phy.queensu.ca/
Super Kamiokande:
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp>