Har neutrinoerne en endelig hvilemasse?

Jon Wulff Petersen, Institut for Fysik og Astronomi

Introduktion

Den uanselige — og næsten usynlige — elementarpartikel, neutrinoen, har siden trediverne spillet en vigtig rolle i bestræbelserne på at forstå den svage vekselvirkning, som bl.a. giver anledning til betahenfald. Men hvad der om muligt er endnu vigtigere er, at den måske — som den eneste — vil være i stand til at vise vejen for den næste generation af teorier om elementarpartikelfysik.

Omend imponerende fremskridt er blevet gjort, står flere fundamentale spørgsmål om neutrinoens egenskaber i dag stadig i et af fysikkens brændpunkter: Har neutrinoen en masse? Hvilken slags partikel er neutrinoen i kvantemekanisk henseende? Er de neutrinoer vi observerer f.eks. efter betahenfald kvantemekaniske ''rene'' tilstande eller blandinger af nogle os endnu ubekendte egentilstande.

Denne artikel forsøger at tage pulsen på forskningen på disse punkter, men forsøger også at give et bud på, hvor svarene vil komme fra i fremtiden. Hovedvægten vil ligge på eksperimentelle resultater med kun beskedne forsøg på at forklare de teoretiske udviklinger, som disse resultater kunne medføre.

Historien om neutrinoer begyndte i 1930 med et berømt brev fra Wolfgang Pauli til et møde i Tübingen, som han desværre ikke havde tid til at deltage i[1]. Heri gjorde Pauli rede for det paradoks, at energispektret af elektroner udsendt i betahenfald var kontinuerligt, i modsætning til f.eks. gammaspektre. De to eneste modeller, man havde, var, at energi og impuls ikke var bevaret i kernen, eller — og denne løsning foretrak Pauli, omend tøvende — at en hidtil ikke observeret tredjepart var involveret i betahenfaldet. Han døbte denne hypotetiske partikel neutronen, men måtte — da den neutron, vi kender i dag, senere blev fundet — omdøbe den til neutrinoen; et navn som Enrico Fermi havde fundet på. Pauli's brev førte på trods af udbredt skepsis overfor teorien til en intensivering af udviklingen af kalorimetriske eksperimenter til at lede efter en meget svagt vekselvirkende og meget let partikel. Disse anstrengelser kronedes dog først med held i 1953 i et eksperiment udført af Reines and Cowan[2]. Allerede i 1934 havde Fermi dog fremsat en komplet teori for betahenfald[3]; en teori, der så overbevisende redegjorde for formen af energispektret af de udsendte elektroner, at det medførte en gradvis anerkendelse af eksistensen af neutrinoer. Senere har det vist sig, at der er i alt tre forskellige slags neutrinoer, opkaldt efter de leptoner, de optræder sammen med, nemlig elektron-, myon-, og tau-neutrinoer. De seneste resultater fra LEP eksperimenterne på CERN synes i øvrigt at bevise, at vi ikke skal vente at finde flere nye neutrinoer (for nærmere detaljer, se artiklen af Dines Hansen foran i bladet).

Siden begyndelsen af tresserne har man udviklet et sæt teorier, som er i stand til at beskrive alle fænomener omkring den svage og den elektromagnetiske vekselvirkning, inklusive alle eksperimentelle resultater opnået ved de store acceleratorer rundt om i verden. Disse teorier, som ofte refereres til som Standardmodellen bruger som byggestene tre familier af partikler, hver bestående af 2 leptoner og 2 quarks. Desværre efterlader disse teorier også nogle fundamentale, åbne spørgsmål, hvoraf nogle af de mest påtrængende er: Hvorfor er der tre partikler af hver ''slags''? og hvorfor har partiklerne de masser de har? Derfor er der brug for en mere generel teori, som er i stand til a priori at besvare sådanne og lignende spørgsmål. Hvor Standardmodellen antager at alle netrinoerne er masseløse, får de i generaliserede modeller oftest helt naturligt en endelig masse. Forudsigelserne variere dog fra neV til GeV. En eksperimentel bestemmelse af mindst én endelig neutrinomasse vil give et kraftigt fingerpeg om, hvilke generaliseringer er de mest relevante. En interessant forudsigelse er, at neutrinomasserne skulle forholde sig til hinanden ligesom masserne af de tungere mesoner:

$$m(\nu_e) \,/\, m(\nu_\mu) \,/\, m(\nu_\tau) \;=\; m(e) \,/\, m(\mu) \,/\, m(\tau).$$

Om de tre tunge leptoner ved man, at partiklerne er Diracpartikler, d.v.s. at hver partikel er forskellig fra sin antipartikel (eksempelvis elektronen og positronen). For neutrinoerne vides dette ikke; de kunne eventuelt tænkes at være deres egne antipartikler, såkaldte Majoranapartikler. For masseløse neutrinoer er forskellen af akademisk betydning, idet det ikke påvirker målelige størrelser; men så snart neutrinoen får en masse bliver dette til et nøglespørgsmål.

Hvis mindst en af neutrinoerne er massiv, bliver flere forskellige fænomener pludseligt mulige:

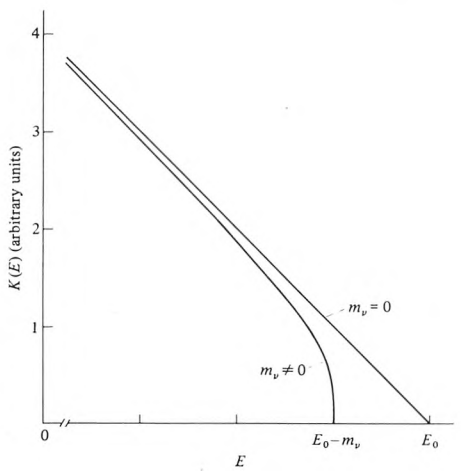
- De neutrinoer, vi ser, behøver ikke at være de sande egentilstande for den svage vekselvirkning i kvantemekanisk forstand; de kunne være en blanding af hidtil ukendte egentilstande.
- Neutrinoer kunne af samme grund skifte type fra at være f.eks elektronneutrinoer til at være myonneutrinoer.
- Neutrinoer kunne henfalde.
- Hvis neutrinoerne er massive Majoranapartikler, bliver dobbelt betahenfald uden neutrinoemission muligt.

I det følgende ser vi først på situationen for de direkte forsøg på at bestemme neutrinoers masse. Senere ser vi på forsøg på at eftervise de afledte fænomener, som blev skitseret ovenfor.

Kinematiske massebestemmelser

Det første man ville tænke på, når man skal bestemme en partikels masse, ville være at måle dens hastighed og energi uafhængigt af hinanden og derved bestemme dens masse. På

grund af neutrinoernes ringe vekselvirkning med stof (de passerer for eksempel relativt uhindret gennem Jorden!) er denne fremgangsmåde ikke mulig. I stedet kan man måle energispektret af elektroner udsendt i betahenfald. Dette spektrum kan lineariseres — det såkaldte Kurie-plot — som vist i figur 1. I nærheden af spektrets endepunkt får en endelig neutrinomasse en dramatisk indflydelse på spektrets form: spektret dropper lodret til nul ved en energi, som er endepunktsenergien minus neutrinoens masse (omregnet til ækvivalent energi). Denne effekt blev forudsagt af Fermi's teori i 1934, og har været jagtet stort set lige siden.

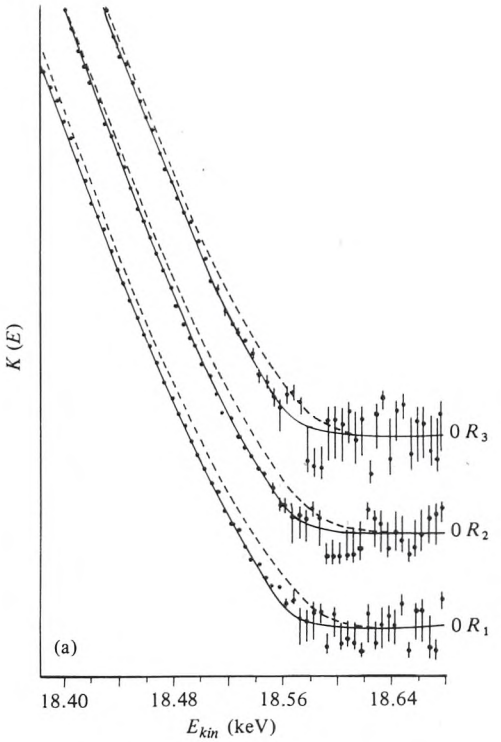


Figur 1. Indflydelsen af en endelig neutrinomasse på energispektret for elektroner i et beta-henfald.

I 1980 fik fysikken et mindre chok, da en russisk gruppe ledet af Prof. Lubimov fra ITEP Instituttet i Moskva rapporterede[4] at have set effekten af en endelig neutrinomasse i deres Kuriespektrum fra henfaldet af tritium til ^{3}He. Dette henfald har siden halvtredserne været det foretrukne til sådanne målinger, hovedsagelig p.gr.a. den lave endepunktsenergi på kun 18,8 KeV. Figur 2 viser tre spektre rapporteret i 1985. Man bemærker, at den dramatiske effekt forudsagt i figur 1 ikke eksisterer i en virkelig måling; dette skyldes at bestemmelsen af elektronens energi ikke kan foretages vilkårlig nøjagtigt. De russiske målinger mundede ud i en masse på ca. 30 eV for elektron antineutrinoen. Dette medførte naturligvis en voldsom aktivitet for at afeller bekræfte dette sensationelle resultat. Desværre er resultaterne indtil nu kun negative og forskellige eksperimenter, heraf et med dansk deltagelse, har sat øvre grænser på massen på mellem 10 og 18 eV.

Disse målinger er meget vanskelige og særdeles langvarige, og man kan ikke forvente, at resultaterne kan forbedres en faktor ti inden for en overskuelig fremtid.

Tilsvarende målinger for myon- og tau-neutrinoer har heller ikke resulteret i positive resultater; p.t. er de øvre grænser henholdsvis 250 KeV og 35 MeV. Disse resultater er i sagens natur mindre kritiske end målingerne på elektronneutrinoen, men selv hvis massernes forhold er som forudsagt i ligningen ovenfor, er tritium resultaterne de mest kritiske.



Figur 2. Tre målte elektron-spekte, vist som Kurie-plot, der indikerer en neutrinomasse på omkring 30 eV.

Neutrino oscillationer

De russiske resultater fra 1980 blev også startskuddet for intensiverede eftersøgninger af afledte effekter af eksistensen af massive neutrinoer. Den mest spektakulære af disse effekter er neutrino oscillationer[5]. De neutrinoer, vi ser, behøver nemlig ikke være de sande egentilstande. Derfor kan bølgefunktionen for en neutrino i fri flugt bestå af flere komponenter med faseforskelle imellem sig. Derfor vil en detektor, der er følsom overfor en bestemt type neutrinoer og som bevæges langs flyveretningen for en neutrinostråle, se et periodisk varierende tælletal; heraf navnet på effekten. Bølgelængden for disse oscillationer er givet ved:

$$L_{\text{osc}} = \frac{kE_\nu}{m_i^2 - m_j^2}$$

hvor k er en konstant, E_ν er neutrinoenergien, og $m_{i,j}$ er de to neutrinomasser. Som man ser af formlen, er det nok, hvis blot en af neutrinoerne har en masse.

Et typisk eksperiment består derfor i at anvende en stærk neutrinokilde, og måle tælletallet fra en bestemt process i en detektor som funktion af afstanden mellem kilde og detektor, hvorefter man leder efter afvigelser mellem det målte og det forventede tælletal. En kernereaktor er en meget stærk kilde af elektron-antineutrinoer med en energi op til 8 MeV. To meget følsomme eksperimenter af denne slags er blevet

udført ved en schweizisk og en fransk reaktor. Her blev reaktionen:

$$\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$$

anvendt, og begge reaktionsprodukter, positronen og neutronen, blev detekteret og energianalyseret. Lad os for simpelhed antage at den udsendte neutrino, ν_e, er en linearkombination af to egentilstande, ν_1 og ν_2, og at den kan konverteres til en myonneutrino:

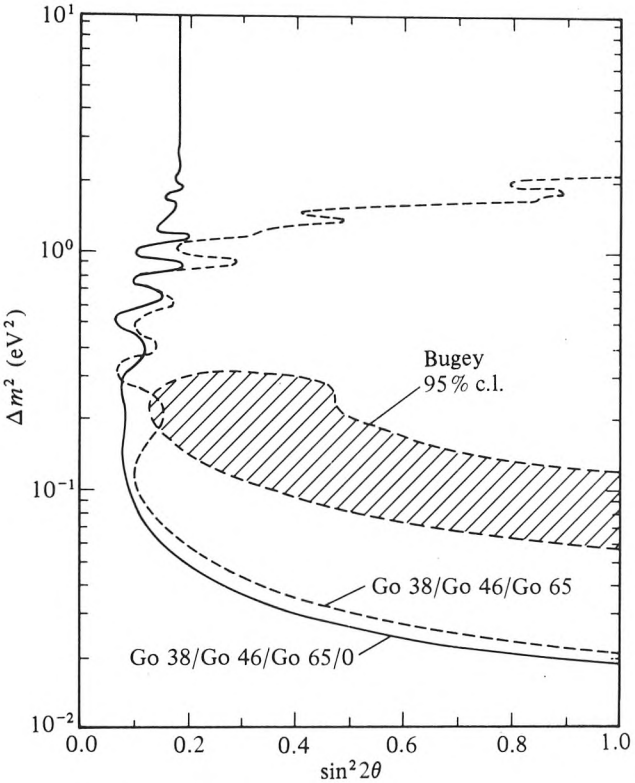
$$\nu_e = \cos\Theta\, \nu_1 + \sin\Theta\, \nu_2$$
$$\nu_\mu = -\sin\Theta\, \nu_1 + \cos\Theta\, \nu_2$$

Styrken af oscillationsprocessen kan nu måles ved størrelsen $\sin^2(2\Theta)$. Resultaterne af reaktoreksperimenterne kan så beskrives ved hjælp af todimensionale fremstillinger af tilladte, sammenhørende værdier af $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$ og $\sin^2(2\Theta)$, som vist på figur 3. Området ovenfor og til højre for den fuldtoptrukne linie er udelukket af det schweiziske Gosgen eksperiment, mens det skraverede område viser et område tilladt af de franske målinger i Bugey. De franske forskere så med andre ord en unormal afstandsafhængighed i deres resultater, som dog ikke kunne bekræftes af det andet eksperiment. Denne situation er stadig uafklaret, men flere målinger er undervejs. Det skal bemærkes, at disse eksperimenter er følsomme for masser helt ned til 0,1 eV, hvilket er bedre end de direkte målinger. Til gengæld ses en effekt kun for en oscillationsstyrke over ca. 10 %. Eksperimenter med neutrinostråler fra højenergiacceleratorer kan her være følsomme for betydeligt mindre oscillationsstyrker, helt ned til $\sin^2(2\Theta) = 10^{-3}$. En hel række eksperimenter har her givet negative resultater, som udelukker alle kombinationer af Δm^2 værdier over ca. 10 eV^2 og $\sin^2(2\Theta)$ over ca. 0,001.

En særlig interessant neutrinokilde er solen. Solen er en meget stærk neutrinokilde, specielt for ganske lave energier (op til 0,4 MeV). Siden 1970 har en amerikansk gruppe under ledelse af R.Davis[6] målt på neutrinoer fra solen ved hjælp af en 380.000 liter stor detektor, anbragt i en mineskakt 1400 meter under havets overflade. Man anvender her reaktionen (omvendt betahenfald) :

$$\nu_e + {}^{37}\mathrm{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\mathrm{Ar}$$

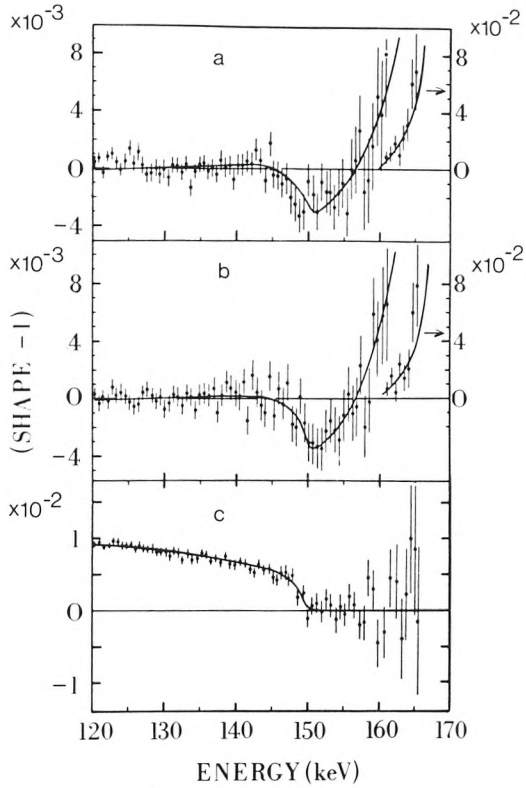
som producerer cirka en radioaktiv ^{37}Ar kerne per dag. En gang hver anden måned tømmes tanken ved en kemisk rensning for de producerede Ar kerner (cirka 50 !!), som derefter tælles ved hjælp af deres henfald. Denne process har en selektivitet på cirka 10^{29}, hvilket er ganske formidabelt. Det observerede antal begivenheder er over en lang årrække konsekvent lavere end, hvad man ville forvente ud fra en modelberegning af processerne i solen. Disse beregninger er ganske komplicerede, og neutrinoerne, som bidrager til den observerede reaktion, udgør kun en meget lille del af det samlede solneutrinospektrum. Derfor har man kun tøvende overvejet, om denne mangel på neutrinoer kunne skyldes en oscillationsprocess, som får



Figur 3. Grænser for neutrinomassen for forskellig styrke af neutrinooscillationerne.

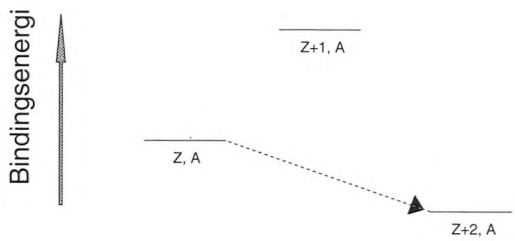
elektronneutrinoer til at forsvinde på vej herned til os til fordel for f.eks. myonneutrinoer, som ikke ville give noget signal i Davies' eksperiment. Disse overvejelser er blevet forstærket af teoretiske modeller, der postulerer at kraftige forstærkninger af oscillationprocesserne kan forekomme p.gr.a. den lange flyvevej i solen, hvor tætheden af materiale er meget højere end i vacuum. Dette har ført til starten på to gigantiske eksperimenter i hhv. USA og USSR, hvor en anden reaktion, nemlig med ^{71}Ga anvendes. Denne reaktion er følsom overfor de væsentlige energiskabende processer i solen, og skulle være meget lidt følsom for små fejl i de teoretiske modeller for solen. De første resultater fra disse eksperimenter viser også her en markant mangel på ankommende neutrinoer; altså en bekræftelse af Davis' resultat! For at opnå disse markante effekter har man p.gr.a. den lange flyvevej kun brug for oscillationsstyrker af størrelsesorden 10^{-4} og Δm^2 værdier 10^{-4} to 10^{-7} eV^2. Så små værdier kan man ikke forestille sig at kunne måle med laboratorieteknikker.

En anden måde at detektere oscillationsfænomenet på består i at lede efter udsendelse af ''forkerte'' neutrinoer i f.eks. betahenfald. Også her har man gjort sig store anstrengelser for at lede efter sjældne begivenheder med andre neutrinoer end de forventede, hovedsagelig i eksperimenter ved de store acceleratorer. Besynderligt nok er den mest opsigtsvækkende effekt dog kommet fra et ganske enkelt eksperiment, udført af J.Simpson og hans medarbejdere[7]. Her blev elektronspektret fra betahenfald af tritium og ^{35}S målt meget omhyggeligt med henblik på at finde et over-



Figur 4. Spektre fra Simpsons eksperiment, der antyder eksistensen af en tung neutrino med en masse på omkring 17 keV.

lejret betaspektrum med en lavere endepunktsenergi og et ganske lille forgreningsforhold. Dette ville nemlig være signaturen for en ''forkert'', tung neutrino udsendt i konkurrence med det normale henfald. Figur 4 viser for to sæt data (a og b), at spektret kan analyseres ved at antage, at en neutrino med en masse på 17 KeV udsendes med en sandsynlighed på 0,8 % per henfald. Figur 4c viser spektret afbildet normeret til et spektrum uden udsendelse af tunge neutrinoer, og man ser tydeligt overlejringen med et betaspektrum med et helt andet endepunkt. Denne tilsyneladende uskyldige effekt, som ikke har kunnet reproduceres i alle eksperimenter, har voldsomme konsekvenser, hvis den viser sig at være ægte: For det første har man herved fundet den første massive neutrino. For det andet er de neutrinoer vi observerer ikke egentilstande; d.v.s. oscillationer forekommer. For det tredje må den udsendte, tunge neutrino hovedsagelig være tauneutrinoen. Denne kan derfor ikke være stabil, idet astrofysiske begrænsninger — nemlig at universet masse ikke kan være domineret af disse neutrinoer — udelukker at en sådan partikel kan have en levetid sammenlignelig med eller længere end universets alder. Sidst men ikke mindst beviser det entydigt at Standardmodellen ikke er tilstrækkelig. Der er altså rigelig motivation for at af- eller bekræfte eksistensen af dette fænomen. En gruppe danske fysikere forsøger at gøre dette ved måling på intern bremsestråling, som er en proces, der er analog til betahenfald. Eksperimentet opnår derved den fordel at detektere fotoner i stedet for elektroner. Eksperimentet udføres ved hjælp af radioaktive kilder fremstillet på CERN.

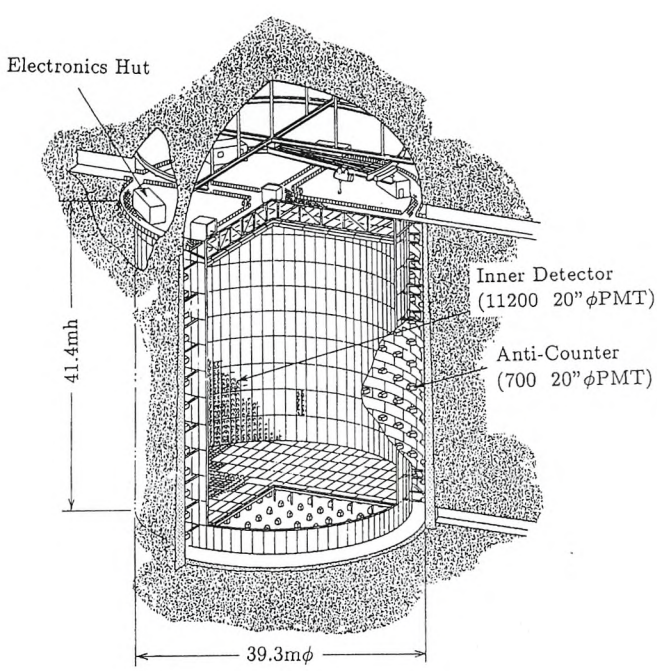


Figur 5. Skematisk henfaldsdiagram, der viser situationen, hvor almindeligt beta-henfald er forbudt, mens dobbelt beta-henfald er muligt.

Den eneste type eksperiment, som i øjeblikket er i stand til at skelne Diracneutrinoer fra Majorananeutrinoer er dobbelt betahenfald. For nogle kerner er almindeligt betahenfald energetisk forbudt, hvorimod dobbelt betahenfald er muligt (se figur 5). Dette kan nu foregå enten som en anden ordens proces, d.v.s som to betahenfald i forlængelse af hinanden med udsendelse af det dobbelte antal partikler, eller ved den alternative proces skitseret her:

$$n_1 \rightarrow p_1 + e^- + \text{``}\nu\text{''}$$
$$\text{``}\nu\text{''} + n_2 \rightarrow p_2 + e^-$$

Her kræves selvfølgelig at neutrinoen er sin egen antipartikel, dvs en Majorananeutrino, for at reaktionen kan



Figur 6. Tegning af den planlagte japanske Super Kamiokanda neutrino detektor.

forløbe således. Herved udsendes altså ingen neutrinoer og energispektret af de udsendte elektroner har en meget karakteristisk signatur. Denne proces eftersøges i en lang række eksperimenter, som indtil nu ikke har fundet tegn på at denne kanal er åben; men det kan bestemt ikke udelukkes at man engang i fremtiden vil være i stand til ad den vej at løse mysteriet om, hvilken type neutrinoer vi egentlig har med at gøre.

I forbindelse med den synlige supernova i Den Lille Magellanske Galakse i 1987, blev der på jorden for første gang detekteret ankomsten af neutrinoer fra en ikke kontinuert kilde. Dette har betydet starten på en ny epoke, som man kan betegne som neutrinoastronomiens tidsalder. Konstruktionen af en række gigantiske, underjordiske neutrinodetektorer til detektion af neutrinoer fra fremtidige supernovaeksplosioner eller andre astrofysiske megaprocesser planlægges i øjeblikket. Den mest imponerende af disse kommende detektorer er den japanske Super-kamiokande, som er vist skematisk på figur 6. Med sådanne detektorer kan man f.eks. forestille sig, at bestemme neutrinomasser ved hjælp af forskelle i deres ankomsttidspunkter, på grund af den lange flyvevej fra en anden galakse og hertil, altså et galaktisk flyvetidsspektrometer!

Referencer.

1) L.M.Brown, Physics Today, September 1978, s.23 og referencer heri.
2) F.Reines, C.L.Cowan, Nature **178**, s.446 (1956).
3) E.Fermi, Z.Physik **88**, s.161 (1934).
4) V.Lubimov et.al., Phys.Letters **B94**, s.266 (1980).
5) se f.eks. J.L.Vuilleumier, Rep.Prog.Phys. **40**, s.1293 (1986).
6) J.K.Rowley et.al., AIP Conf.Ser. **126** (1985).
7) A.Hime, N.A.Jelly, Phys.Letters **B257**, s.441 (1991) og referencer til A.Himes arbejder sammen med John Simpson refereret heri.



Jon Wulff Petersen er uddannet på Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet, hvor han også har gennemført et licentiatstudium indenfor faststoffysik. Siden har han arbejdet med bestemmelse af neutrinoers masse, som post-doc ved universitetet i Zürich, senere som seniorstipendiat ved Acceleratorudvalget i tilknytning til CERN.