

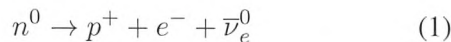
Den undvigende neutrino

Af Bernhard Lind Schistad, Viborg Tekniske Gymnasium

Neutrinoen er den elementarpartikel, der vekselvirker mindst med andre partikler. Den adskiller sig fra alle andre partikler ved, at den ikke opfylder højre/venstre-symmetri. Ifølge partikelfysikkens standardmodel skulle den ikke have masse, men det viser det sig, at den alligevel har det. Selvom hver kvadratmeter på Jorden rammes af 1000 billioner neutrinoer pr. sekund, ser det ud til, at halvdelen af dem, der bliver udsendt af Solen, på mystisk vis mangler, når de rammer Jorden. Dette viser sig at skyldes, at neutrinoen har evnen til at skifte type i flugt, så når Solen udsender en elektronneutrino, kan den ramme Jorden som en anden type.

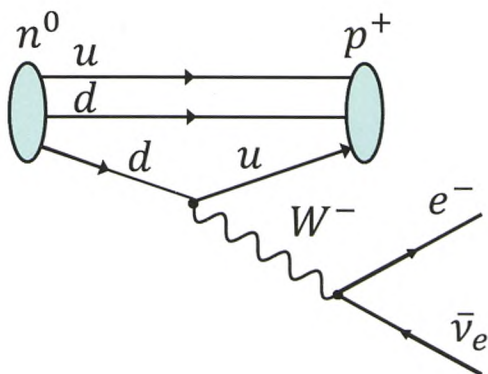
Neutrinoer udsendes i forbindelse med betahenfald, det vil sige processer, hvor en neutron forvandler sig til en proton eller omvendt. En fri neutron er ikke stabil, men henfalder med en levetid på ca. 15 min. At en fri neutron ikke er stabil, mens en neutron i en kerne kan være stabil, skyldes, at neutronerne er stærkere bundet i kernen, da de ikke frastøder hinanden elektrostatisk ligesom protonerne. En kerne med en ekstra proton vil derfor kunne have en højere energi end massedifferencen mellem neutroner og protoner.

Den frie neutron henfalder til en proton, en elektron og en antineutrino på følgende måde:



Vi ved nu, at neutronen består af en u -kvarke og to d -kvarker (udd). Det, der sker, når neutronen henfalder, er, at én af dens d -kvarker forvandler sig til en u -kvarke via den svage vekselvirkning ved at udsende en W -boson, som henfalder til en elektron og en elektron-antineutrino som vist på figur 1.

Neutrinoen er en lepton ligesom elektronen (en neutrino har leptontallet +1, mens en antineutrino har leptontallet -1). Den er en fermion, dvs. en partikel, der adlyder Fermi-Dirac-statistik, og den har halvtalligt spin: $s = \frac{1}{2}$. Den har ingen elektrisk ladning og mærker ikke den stærke vekselvirkning.

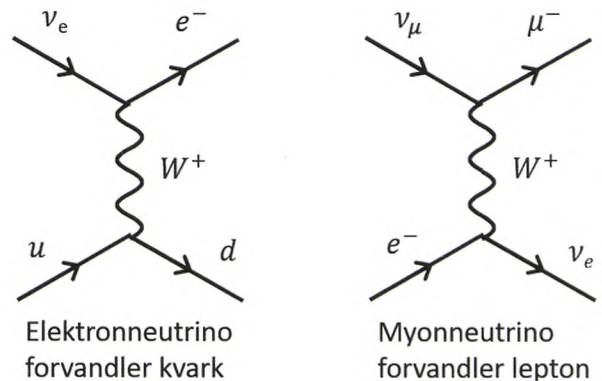


Figur 1. Neutronhenfald.

Neutrinoen er den kendte elementarpartikel, der vekselvirker mindst med omverdenen. Dette skyldes, at den hverken har elektrisk ladning eller farveladning. Den eneste mulighed, den har, er at "ramme" en kvark og få den til at skifte type (flavour) ved at udveksle en tung vektorboson eller forvandle en lepton til en anden

lepton ved at "smide" en vektorboson i hovedet på den (figur 1).

Da vektorbosonen (W^+ i dette tilfælde) har ekstremt høj masse, mens neutrinoen er (næsten) masseløs, sker disse reaktioner meget sjældent. Faktisk kan en neutrino passere igennem Solen uden at vekselvirke med noget som helst.



Figur 2. En neutrino forvandler en kvark eller en elektron ved at udveksle en vektorboson.

Neutrinoens helicitet

I 1957 gennemførte Maurice Goldhaber et eksperiment ved Alternating Gradient-synkrotronen i Brookhaven for at bestemme neutrinoernes helicitet [1]. Helicitet kan oversættes til "håndethed".

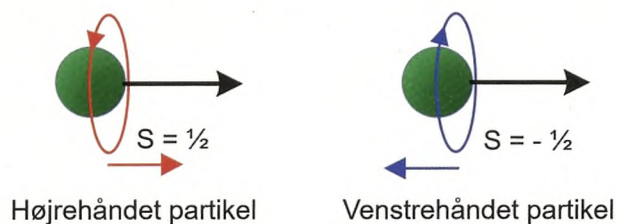
Eksperimentet viste, at neutrinoen har en meget mærkelig egenskab:

Alle neutrinoer er venstrehådede, og alle antineutrinoer er højrehådede!

Lad os se, hvad dette betyder. Hvis en partikel har elektrisk ladning, og den har spin forskelligt fra nul, har den også et magnetisk moment. Vi ved, at spinnet er kvantiseret i kvantemekanikken. Leptoner og kvarker har spin $s = \frac{1}{2}$. Dette medfører, at disse partikler har to mulige spintilstande: $s = +\frac{1}{2}$, svarende til, at spin og magnetisk moment peger i partiklens bevægelsesretning, og $s = -\frac{1}{2}$, svarende til, at de peger modsat bevægelsesretningen. Spinnets orientering i forhold til bevægelsesretningen kaldes partiklens helicitet.

Dette kan let konstateres ved partikler med ladning (og magnetisk moment), men for en partikel som neutrinoen, kan det kun observeres indirekte. Vi ved nemlig, at ved alle fysiske processer er det totale spin bevaret (ligesom energien og bevægelsesmængdemomentet), så

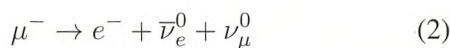
man summerer spinet for alle partikler før og efter en reaktion. Dette vil afgøre, hvilket spin neutrinoen havde, og svaret er altid det samme: Alle neutrinoer er "kejrhåandede", og alle antineutrinoer er højrehåandede. Neutrinoen er den eneste kendte partikel med denne egenskab. Kvarkerne, elektronen, myonen og taupartiklen kan have begge værdier af heliciteten.



Figur 3. Neutrinoens og antineutrinoens heliciteter er modsatte af hinanden. De sorte pile angiver partiklernes bevægelsesretning. De røde og blå pile angiver deres spin.

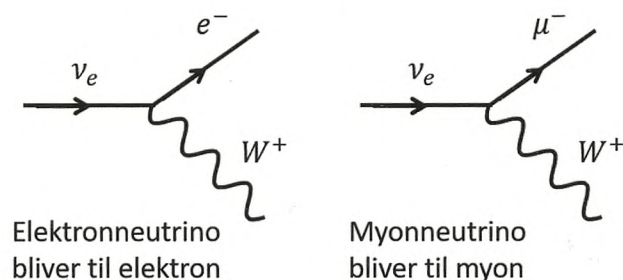
Flere slags neutrinoer

I starten kendte man kun én slags neutrino. Men efter opdagelsen af myonen, elektronens tunge storebror, viste det sig, at de neutrinoer, der opstår, når myonen henfalder, ikke alle er af samme slags som dem, der dannes ved normal radioaktivitet. En myon henfalder til en elektron, en elektron-antineutrino og en myonneutrino:



I 1962 kunne Leon Lederman, Melvin Schwartz og Jack Steinberger påvise, at de neutrinoer, der skabes ved henfald af myoner, danner nye myoner, når de vekselvirker med andre partikler [2]. For denne opdagelse fik de Nobelprisen i fysik i 1988.

Når neutrinoer danner elektroner eller myoner, sker det ved, at de udsender en vektorboson (figur 4).



Figur 4. Elektron- og myonneutrino.

I 1975 kunne Martin Perl og hans gruppe ved Stanford Linear Accelerator annoncere, at de havde opdaget en ny storebror til elektronen og myonen [3]. Den fik navnet tau-leptonen. Da elektronen og myonen har hver sin tilknyttede lepton, var det en oplagt tanke at lede efter en tilsvarende neutrino. Den blev fundet i år 2000 af Donut-gruppen ved Fermilab [4].

Ifølge standardmodellen er der tre generationer af elementarpartikler med hver deres neutrino, associeret med klassens lepton.

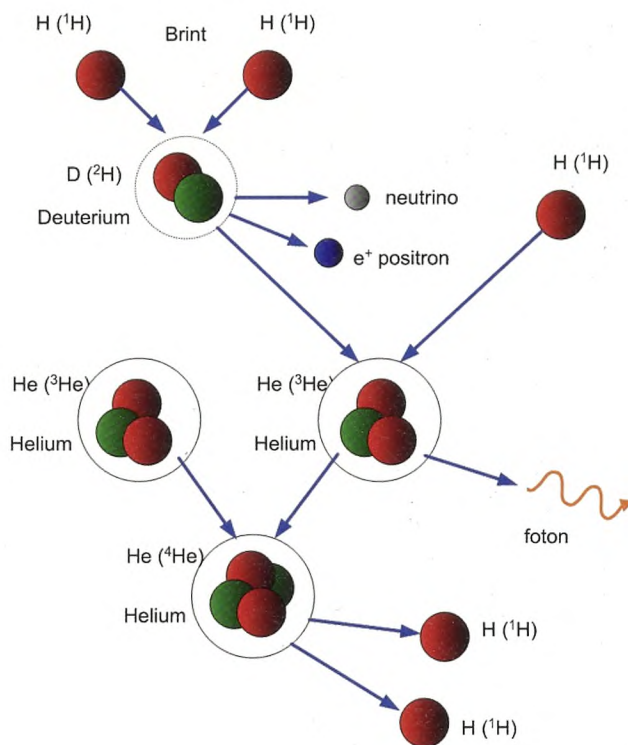
Forskellen på de tre neutrinoer er, at de kun kobler til deres associerede lepton ved den svage vekselvirkning:

En neutrino kan kun forvandle sig til en lepton af samme generation (ved at udsende en tung vektorboson).

| Gene-ration | Kvarker | Lepton | Neutrino |
|-------------|------------------|----------------|------------------------------|
| 1 | Up Down | Elektron (e) | Elektronneutrino (ν_e) |
| 2 | Charm Strange | Myon (μ) | Myonneutrino (ν_μ) |
| 3 | Top Bottom | Tau (τ) | Tauneutrino (ν_τ) |

Neutrinooscillationer

I 1960'erne begyndte man at lede efter neutrinoer fra Solen. Inde i Solen (og alle stjerner) foregår der en kædeproces, hvorved protoner fusionerer og til sidst danner helium. Processen kan foregå på grund af den voldsomme temperatur og det voldsomme tryk i Solens indre (15,7 millioner K). Denne reaktion danner også en neutrino (figur 5).



Figur 5. Neutrinoproduktion i Solens indre.

Neutrinoer fra denne reaktion samt andre, mere komplicerede reaktioner i Solen vil bombardere Jorden med et gigantisk antal neutrinoer. Teoretisk kan vi beregne denne neutrinostrøm til ca. 1000 billioner neutrinoer pr. m² pr. sekund. Selv om neutrinoer er svære at påvise, burde det være muligt at måle en så kraftig strøm.

På grund af neutrinoens uvilje mod at vekselvirke med andre partikler, er det ikke nogen nem sag at

måle neutrinostrømmen fra Solen. I årenes løb har man anvendt forskellige effekter til at påvise neutrinoerne:

- Når en neutrino vekselvirker med en nukleon, omdanner den en proton til en neutron eller omvendt. Dette gør, at en neutrinoreaktion vil ændre atomnummeret og altså skabe en transmutation til et andet grundstof. Man kan kalde det "omvendt" radioaktivitet. Antallet af neutrinoer kan derved måles indirekte ved at tage en stor beholder med en kendt koncentration af et grundstof, og så se om denne koncentration ændrer sig over tid på grund af neutrinoreaktioner. Sådanne forsøg har været udført med fx klor (Cl), som forvandles til argon (Ar), når en neutron bliver til en proton.

- En neutrino kan "skubbe" til en elektron ved at udveksle en neutral, tung vektorboson (Z^0). Denne effekt kan påvises ved fx at have en stor tank med vand (der vil være masser af elektroner i denne) og se efter Cherenkovlys¹ fra elektroner, som rammes af neutrinoer. Ved at måle vinklen på lyskeglen, kan energien i elektronen bestemmes, og det kan sandsynliggøres, om neutrinoen kom fra Solen.

Sidst i 1960'erne udførte Raymond Davis Jr. og John N. Bahcall [5] målinger af strømmen af neutrinoer fra Solen. Det lykkedes at påvise neutrinoer, men der var meget stor uoverensstemmelse mellem den teoretiske beregning og de praktiske målinger. Generelt viste alle målinger kun ca. det halve antal neutrinoer af, hvad de burde vise. Dette er i fysikken blevet kaldet "Solneutrino-problemet".

Der har været flere forslag til forklaring af Solneutrino-problemet. En af de mest originale var fra den italiensk-russiske fysiker Bruno Pontecorvo, som i 1969 foreslog, at en elektronneutrino kunne skifte type til en myonneutrino på sin vej fra Solen til Jorden [6]. Dette ville forklare, hvorfor der var underskud af neutrinoer, da myonneutrinoer ikke vekselvirker med elektroner og heller ikke skaber "omvendt radioaktivitet".

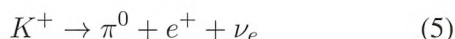
Den næste indikation på, at neutrinoer kan forvandle sig, kom fra analyse af neutrinoer fra Jordens atmosfære. I atmosfæren dannes K -mesoner og π -mesoner, når protoner og neutroner i atomkernerne rammes af kosmisk stråling. Disse mesoner er ustabile og henfalder til leptoner og neutrinoer. Eksempler på sådanne henfald er:



og



eller



Der findes en række tilsvarende henfald, som alle giver en eller flere neutrinoer i sluttetilstanden.

Når man summerer de forskellige mesoner, der produceres i atmosfæren, og deres forskellige henfaldskanaler, kommer man til, at der vil dannes ca. dobbelt så mange myonneutrinoer som elektronneutrinoer. Da man i 1992 offentliggjorde de første nøjagtige målinger af dette forhold [7], var der helt andre resultater. Man fandt, at:

¹Cherenkovlys udsendes af ladede partikler, der bevæger sig hurtigere end lyshastigheden i det aktuelle medium.

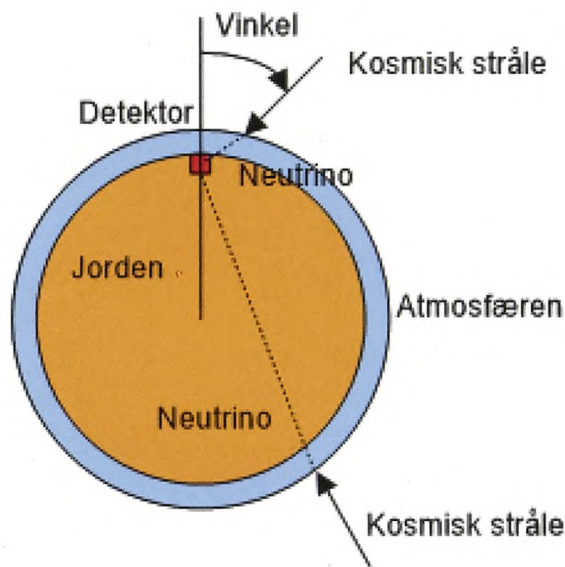
- Der måles ca. lige så mange elektronneutrinoer som myonneutrinoer i atmosfæren.

- Forholdet mellem elektronneutrinoer og myonneutrinoer er stærkt afhængigt af vinklen, hvormed den kosmiske stråling rammer atmosfæren.

- Sandsynligheden for at detektere en neutrino falder, desto længere den har bevæget sig, fra den blev skabt, til den rammer detektoren. Denne effekt er meget stærkere, end hvad neutrinoens sandsynlighed for absorption skulle tilsi.

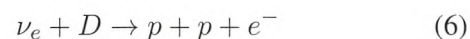
Alt dette tyder på, at der sker et eller andet med neutrinoer, når de bevæger sig, og at dette noget gør, at neutrinoen bliver sværere at detektere. Dette er konsistent med, at den ændrer type til én, der har meget mindre vekselvirkning med almindelige detektorer.

Årsagen til, at effekten afhænger af vinklen, er, at vejlængden fra neutrinoens skabelse til detektoren er afhængig af denne. Neutrinoer, som er skabt i atmosfæren lige over detektoren, vil have tilbagelagt en kort vejlængde (nogle få km). Det samme gælder neutrinoer fra kosmiske stråler i vinkler på mindre end 90° (fra lodret), mens større vinkler medfører, at neutrinoen har passeret gennem jordkloden (op til 13.000 km). På grund af vejlængden kan den nå at skifte type, se figur 6. Det skal lige nævnes, at den frie vejlængde for en atmosfærisk neutrino i Jordens indre er ca. 10^{12} m, så effekten har intet med absorption af neutrinoer at gøre.

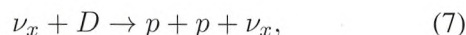


Figur 6. Detektion af neutrinoer i atmosfæren.

Det endelige bevis for neutrinooscillationer kom i 2002, da SNO-forskningssamarbejdet (Sudbury Neutrino Observatory) kunne rapportere direkte målinger af forholdet mellem strømmen af elektronneutrinoer og andre neutrinoer fra Solen [8]. De anvendte en detektor fyldt med 1000 tons tungt vand (D_2O) begravet dybt i en gammel mine for at skærme mod kosmisk stråling. Deuterium er "blind" over for hvilken neutrino type, der anvendes. De reaktioner, man observerede, var ladet-strøm-reaktionen:

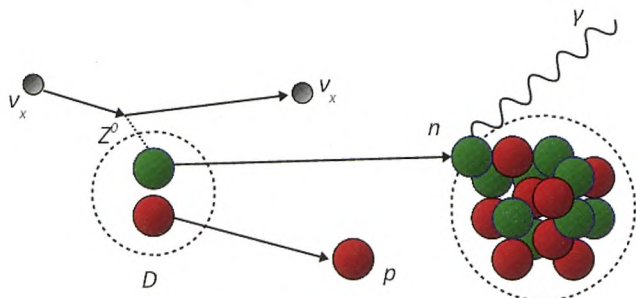


og neutral-strøm-reaktionen:

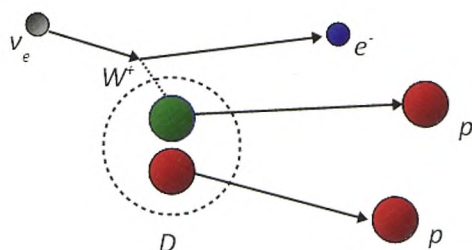


hvor x angiver neutrintypen, som kan være elektron-, myon- μ eller tau- τ .

Her vekselvirker neutrinoen med en af nukleonerne ved at udveksle en neutral vektorboson (Z^0), hvorved neutrinoen undslipper, eller ved at udveksle en ladet vektorboson (W^+), hvorved neutrinoen bliver til en elektron. De to reaktioner er vist her på figur 7 og 8.



Figur 7. Neutral-strøm-reaktionen.



Figur 8. Ladet-strøm-reaktionen.

Reaktionen i figur 7 slår en neutron ud af deuteriumkernen, og denne vil udsende en foton (gammastråling), når den indfanges af en anden kerne i detektoren. Denne foton registreres i detektoren.

Reaktionen i figur 8 skaber en elektron, som bevæger sig hurtigere end lyshastigheden i vand og derfor udsender Cherenkovlys, som kan observeres af en detektor, og mængden af lys er et direkte mål for neutrinoens energi.

SNO-observatoriet kunne måle den totale strøm af neutrinoer fra Solen. Deres måling viste nøjagtigt det totale antal neutrinoer, som man teoretisk forventer. Men ved at sammenligne forholdet mellem de to reaktioner, kunne man måle forholdet mellem elektronneutrinoer og de to andre slags neutrinoer. Vi ved, at Solen kun udsender elektronneutrinoer. Men målingerne viste hinsides al tvivl, at:

- Kun ca. 34% af de detekterede neutrinoer er elektronneutrinoer (figur 8).
- Der ser ud til at være ca. 1/3 af hver slags neutrino.
- Neutrinoerne har forvandlet sig, så efter rejsen fra Solen er der lige mængde af hver slags.

Konklusionen er derfor klar:

- Neutrinoer oscillerer mellem de tre typer.

Resultaterne fra SNO-forsknings Samarbejdet er senere bekræftet af en række eksperimenter.

Takaaki Kajita fra Japan og Arthur B. McDonald fra Canada fik i 2015 Nobelprisen i fysik for opdagelsen af, at neutrinoerne skifter type.

Neutrinoens masse

Ifølge standardmodellen har neutrinoen ingen hvilemasse. Som følge af det, bevæger den sig altid med lyshastigheden. Dette passer fint, hvis alle neutrinoer har samme helicitet. En partikel, der bevæger sig med lyshastigheden, kan nemlig ikke overhales af en observatør. Hvis den kunne overhales, kunne vi vælge et referencesystem, hvor den havde modsat helicitet, da hastigheden så ville skifte retning, mens spinnets retning ville beholdes. Dette ville medføre, at vi kunne forvente at finde både højrehåandede og venstrehåandede neutrinoer.

Opdagelsen af neutrinooscillationerne rokkede ved antagelsen om, at neutrinoen ikke har nogen masse. Lad os se lidt på, hvorfor dette er tilfældet.

Hvis neutrinoen oscillerer mellem tre typer, må den være i en form for superposition af tre tilstande, eller med andre ord, den "egentlige" neutrino er en blanding af en elektron-, en myon- og en tauneutrino-komponent. Sådanne tilstande er der masser af eksempler på i kvantemekanikken, for eksempel er en fri elektron en blanding af de to mulige spintilstande. Men, hvis alle tre komponenter er masseløse, vil de ikke oscillere, men der vil blot være 33% sandsynlighed for, at neutrinoen observeres i hver tilstand. Hvis derimod de tre komponenter har masse, og denne er en lille smule forskellig for hver type, vil de bevæge sig med en lille smule forskellig hastighed. Dette vil medføre, at faserne skifter i løbet af neutrinoernes flugt, og neutrinoerne vil ændre type i løbet af flugten.

I den almindeligt accepterede teori for neutrino-masser er de fysiske neutrinoer (dem, der vekselvirker i eksperimenter) en blanding af tre tilstande med forskellig masse. Disse tre tilstande svarer ikke til de tre neutrino-typer, men er egentilstande for masse (analogt med, at der findes bestemte spintilstande, isospintilstande osv.). Når en neutrino skabes, er den i en tilstand af en bestemt type (elektron-, myon- eller taunetype). Når den bevæger sig, splittes den op i de tre massetilstande. Den relative fase af disse komponenter skifter i løbet af flugten, og neutrinoens type vil oscillere, ligesom frekvensen gør, når tre toner interfererer med hinanden. Når neutrinoen detekteres, er den ikke længere i en tilstand af entydig type, men en blanding, hvor sandsynligheden for hver af typerne afhænger af faserne på observationstidspunktet.

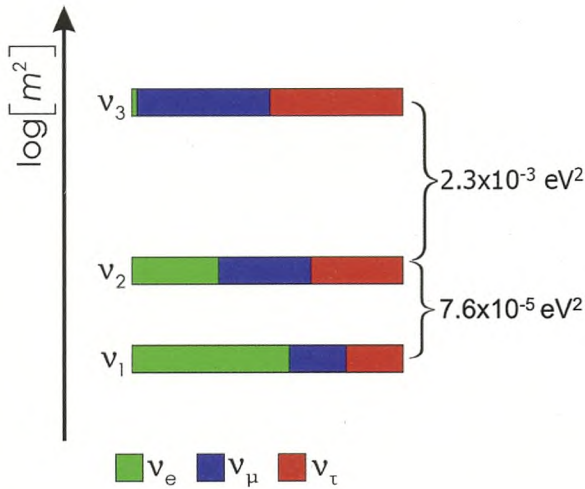
Frekvensen af oscillationerne vil være proportional med forskellen på massen imellem de tre tilstande. Observation af neutrinoer fra forskellige kilder (Solen, kosmisk stråling, acceleratore, atomreaktorer) gør det muligt at bestemme forholdet mellem de tre masser. For eksempel er oscillationslængden i vakuum lig med nogle hundrede kilometer. De data, vi har i dag, giver følgende blandingsforhold mellem neutrino-typerne i de tre masseegentilstande kaldet ν_1 , ν_2 og ν_3 :

$$\nu_1 = \sqrt{\frac{3}{4}}\nu_e - \sqrt{\frac{1}{8}}(\nu_\mu - \nu_\tau), \quad (8)$$

$$\nu_2 = \sqrt{\frac{1}{4}}\nu_e + \sqrt{\frac{3}{8}}(\nu_\mu - \nu_\tau), \quad (9)$$

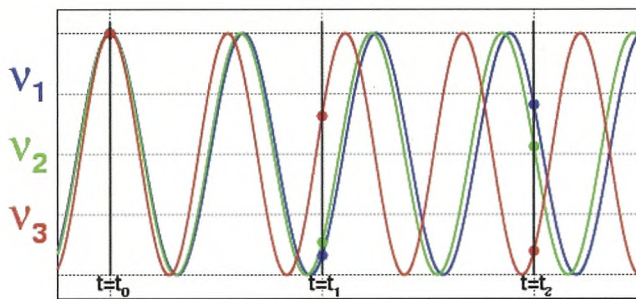
$$\nu_3 = \sqrt{\frac{1}{2}}(\nu_\mu + \nu_\tau). \quad (10)$$

Forholdet mellem masserne er illustreret i figur 9.



Figur 9. Illustration af blandingen af neutrino typer og massetilstande. De horisontale bjælker repræsenterer bidraget fra de tre neutrino typer i de tre massetilstande ν_1 , ν_2 og ν_3 . Den vertikale akse er logaritmen til kvadratet på massen.

De tilsvarende oscillationer er vist på figur 10. Ved $t = t_0$ udsendes neutrinoen som en elektronneutrino med lige meget af hver massekomponent. Ved senere tidspunkter vil der være varierende blandingsforhold mellem de tre massekomponenter og følgelig tilsvarende variationer i fordelingen af sandsynligheden for at observere neutrinoen i henholdsvis elektron-, myon- og tauneutrino-type-tilstanden.



Figur 10. Neutrinooscillationer.

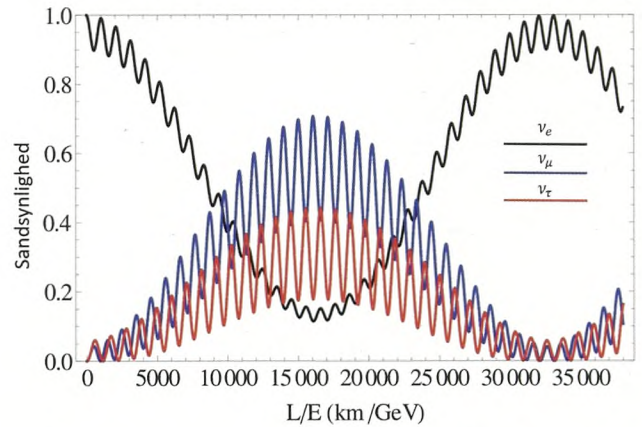
Vi kan bestemme forholdet mellem masserne ved at måle oscillationerne. Derimod er det meget sværere at måle den absolutte masse, da den er meget lille, og da neutrinoen ekstremt sjældent vekselvirker med andre partikler. Den bedste indikation får vi fra kosmologien, da en neutrino masse vil skabe en tyngdekraft, som vil få universet til at kollapse, hvis den er for stor, da der findes et ekstremt højt antal neutrinoer. Den nuværende øvre grænse er, at summen af de tre masser er:

$$m_1 + m_2 + m_3 \leq 0,28 \text{ eV}^2 \quad (11)$$

svarende til ca. 5×10^{-37} kg.

Dette gør neutrinoen til suverænt den mindste, kendte masse i universet. Den næstmindste partikel, elektronen, er ca. 2 millioner gange tungere.

For at se, hvad disse oscillationer konkret betyder for neutrinoer fra Solen, kan vi betragte figur 11. Her ser vi oscillationerne for en elektronneutrino fra Solen over store afstande. På grund af dispersion vil oscillationerne udtværes over kosmologiske afstande, og vi vil observere ca. samme sandsynlighed for alle tre neutrino typer.



Figur 11. Sandsynligheden for, at en solneutrino observeres som en af de tre neutrino typer i forskellige afstande.

Inden emnet om neutrinoens masse slippes helt, skal der gøres opmærksom på, at standardmodellen her kommer fuldstændig til kort. Ifølge standardmodellen får partikler masse ved at vekselvirke med Higgs-feltet. Men neutrinoen (ligesom fotonen) vekselvirker slet ikke med Higgs-feltet (den kobler ikke til Higgs-bosonen i kvantefeltteorien) og har derfor ingen hvilemasse.

Sterile neutrinoer

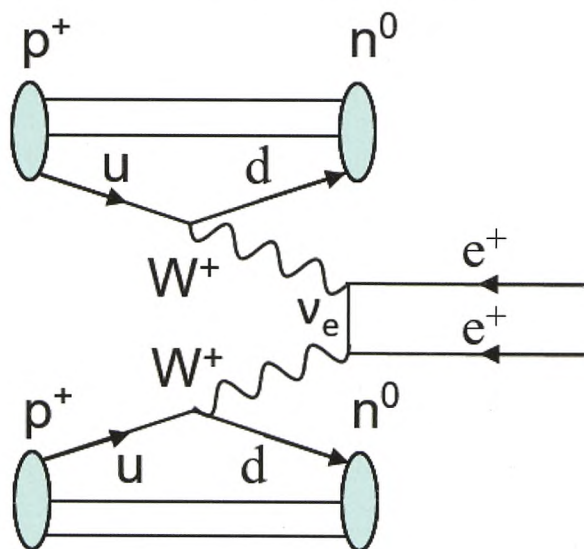
Vi har set, at alle neutrinoer er venstrehåandede, mens alle antineutrinoer er højrehåandede. Dette er i hvert fald den accepterede forklaring af observerbare neutrinoers helicitet. Men der findes en anden fortolkning af observationerne:

Måske eksisterer der også neutrinoer med "forkert" helicitet, men sådanne neutrinoer kan ikke deltage i den svage vekselvirkning ved at udsende og absorbere vektorbosoner. De kaldes derfor sterile neutrinoer. For at forklare, hvad der sker med sterile neutrinoer, må begrebet kiralitet introduceres. En partikels kiralitet angiver, hvorledes heliciteten opfører sig under en koordinatransformation. For masseløse partikler som fotonen er kiraliteten det samme som heliciteten, da den ikke kan overhales. Men hvis neutrinoer har masse, vil deres hastighed altid være lidt mindre end lyshastigheden, og vi kan vælge et referencesystem, hvor neutrinoen bevæger sig baglæns. Set fra dette koordinatsystem, vil neutrinoen se ud til at være venstrehådet. Den har nu skiftet kiralitet. I modsætning til helicitet er kiralitet ikke bevaret for partikler med masse. Faktisk vil kiraliteten for en partikel i hvile oscillere mellem L (venstrehådedhed) og R (højrehådedhed) kontinuert. Kiraliteten er tæt forbundet med vekselvirkning med Higgs-feltet, som giver partikler masse.

Dette vil i så fald kunne være med til at forklare, hvorfor neutrinoer har masse. Standardmodellen forklarer, at partikler får masse ved at vekselvirke med Higgs-feltet ved at absorbere og udsende Higgs-bosoner. Når en partikel gør dette, skifter den kiralitet. Man er gået

ud fra, at siden neutrinoer ikke skifter kiralitet, så vekselvirker de ikke med Higgs-feltet. Men hvis der findes sterile neutrinoer, vil neutrinoens helicitet kunne oscillere, og den kan vekselvirke med Higgs-feltet.

Der findes en tilsvarende analogi med myonen. Myoner med R -kiralitet er sterile og kan ikke henfalde, da de ikke mærker den svage vekselvirkning. Hvis neutrinoen opfører sig på samme måde, vil vi ikke kunne observere neutrinoer med R -kiralitet.



Figur 12. Neutrinoløst dobbelt betahenfald.

Majorana-neutrinoer

I 1937 foreslog den italienske fysiker Ettore Majorana, at der findes fermioner, som er deres egen antipartikel [9]. Majoranas udgangspunkt var en alternativ bølgligning for fermioner. I standardmodellen er fermioner løsninger af Dirac-ligningen, som beskriver partikler med halvtalligt spin og elektrisk ladning ved hjælp af komplekse firekomponents-bølgefunktioner, kaldet Dirac-spinorer. Majorana foreslog en alternativ bølgligning, hvor løsningerne er reelle funktioner. I en sådan teori er partikler og antipartikler identiske.

Majoranas bølgligning beskriver ikke elektroner eller kvarker, da de har antipartikler med modsat ladning. Men det er foreslået, at den kunne beskrive neutrinoerne, da de ikke har elektrisk ladning. Det ville så give en alternativ forklaring på neutrinoernes masse, da masse opfører sig anderledes for majorana-partikler. For eksempel er massen af partikler med L - og R -kiralitet totalt uafhængige. Vi kan derfor forestille os, at den ene masse er meget lille (som de observerede neutrinomasser), mens den anden er meget stor.

Hvis neutrinoerne er majorana-partikler, vil dette kunne observeres ved dobbelt betahenfald. Dette er en proces, hvor en tung kerne transformerer to protoner til neutroner eller vice versa. Kernen udsender to positroner (eller elektroner) og to neutrinoer. Men hvis neutrinoen er sin egen antipartikel, vil de to neutrinoer kunne annihilere, og der udsendes kun to positroner (figur 12).

Der pågår flere eksperimenter, som forsøger at opdage neutrinoløst dobbelt betahenfald. En påvisning af denne proces ville være et bevis på, at neutrinoerne er majorana-partikler.

Litteratur

- [1] M. Goldhaber, L. Grodzins og A. W. Sunyar (1958) "Helicity of Neutrinos", *Physical Review*, bind **109**, side 1015–1017.
- [2] G. Danby, J.-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. B. Mistry, M. Schwartz og J. Steinberger (1962) "Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos", *Physical Review Letters*, bind **9**, side 36.
- [3] M. L. Perl m.fl. (1975) "Evidence for Anomalous Lepton Production in $e^+ - e^-$ Annihilation", *Physical Review Letters*, bind **35**, side 1489.
- [4] K. Kodama m.fl. (2001) "Observation of tau neutrino interactions", *Physics Letters B*, bind **504**.
- [5] B. T. Cleveland m.fl. (1998) "Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector", *Astrophysical Journal*, bind **496**, side 505–526.
- [6] V. Gribov og B. Pontecorvo (1969) "Neutrino astronomy and lepton charge", *Physics Letters B*, bind **28**, side 493–496.
- [7] R. Becker-Szendy m.fl. (1992) "Electron- and muon-neutrino content of the atmospheric flux", *Phys. Rev. D*, bind **46**, side 3720–3724.
- [8] R. Ahmad m. fl. (2002) "Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory", *Phys. Rev. Lett.*, bind **89**, side 011301.
- [9] E. Majorana (1937) "Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone", *Il Nuovo Cimento*, bind **14**, side 171.



Bernhard Lind Schistad er cand.real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han har i de sidste fem år undervist i fysik og matematik på Viborg Tekniske Gymnasium.