

Nu skal neutrinoens masse bestemmes

En af naturens mindst reaktive partikler er neutrinoen. Forskere ved i dag, at denne forunderlige partikel har masse, men ikke hvor stor den er. Det skal en enorm detektor nu give forskerne svaret på, og dermed føje en vigtig brik til partikelfysikkens beskrivelse af verden.

Af Anna Sejersen Riis

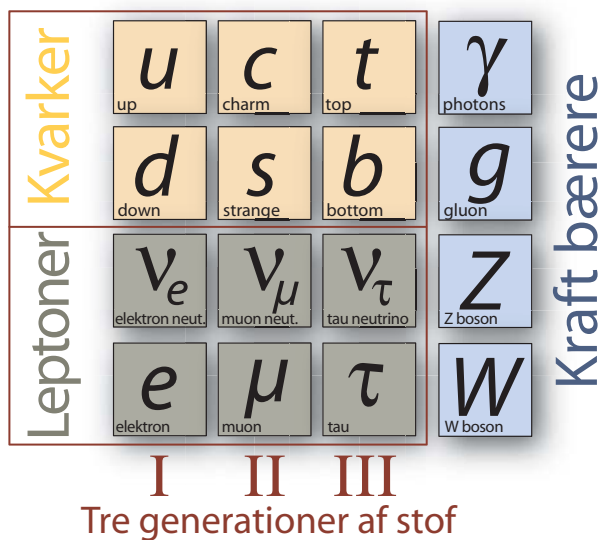
■ Mens du læser dette bliver hver kvadratcentimeter af dig bombarderet med milliarder af neutrinoer fra solen. Men du mærker det ikke, fordi de stort set alle sammen flyver tværs igennem dig, uden at påvirke din krop overhovedet.

Neutrinoer er elementarpartikler – dvs. de kan ikke deles op i mindre enheder. Ydermere er neutrinoer de letteste og også de svagest vekselvirkende elementarpartikler. Neutrinoer vekselvirker (eller reagerer) kun via den såkaldt svage vekselvirkning. Det er derfor, de ikke gør nogen skade idet de passerer igennem dig.

Neutrinoen blev teoretisk forudsagt i 1930, og blev første gang observeret eksperimentelt i 1953. Siden er det endvidere blevet fastslået, at neutrinoen har masse – men hvor stor denne masse helt præcis er, er et af de største spørgsmål inden for neu-

trinfysik. Et stort anlagt eksperiment i Forschungszentrum Karlsruhe i Tyskland skulle gerne inden for få år give forskerne svaret på netop det spørgsmål.

Neutrinoen – en vigtig brik
Når neutrinomassen er en interessant og vigtig parameter er det bl.a. fordi neutrinoer indgår i utroligt mange sammenhænge:



Figur 1. Oversigt over elementarpartiklerne. Der findes tre forskellige typer af neutrinoer, nemlig elektron-neutrinoen, muon-neutrinoen og tau-neutrinoen

Solen producerer store mængder af neutrinoer i fusionsprocesserne, som forgår der. Solen som kilde har været meget vigtig for vores forståelse af neutrinoer, og derfor kan større viden om neutrinoer også forbedre vores solmodeller. De eneste andre astronomiske kilder til neutrinoer, vi kan se, er supernovaer, som udsender helt enorme mængder energi båret af neutrinoer. Både supernovaer og Solen har stor betydning ikke bare som astronomisk interessante objekter, men også for vores forståelse af udviklingen af planeter og af liv på Jorden. Også i den kosmiske stråling, som hver dag rammer atmosfæren, er der neutrinoer. Kosmisk stråling menes bl.a. at have en vis indflydelse på vores klima som en medvirkende faktor i dannelse af skyer. Endelig spiller neutrinoer en stor rolle i kosmologi. I mange år troede man, at massive neutrinoer kunne være en kandidat til det såkaldte mørke stof, som



Foto: Forschungszentrum Karlsruhe

En god illustration af udfordringen ved at opbygge et kæmpe eksperiment som KATRIN, kan findes i transporten af hovedspektrometeret. Dette store monstret blev fremstillet nær München, men kunne ikke transporteres tværs over Tyskland på en lastbil, da det simpelthen var for stort til motorvejstransport. I stedet sejlede man spektrometeret uden om hele Vesteuropa. Først via floder til Sortehavet. Derefter igennem Middelhavet og op til den Engelske kanal, før man endelig nåede til Leopoldshafen via Rhinen. Den sidste del af transporten foregik med en eskorteret lastbil gennem Leopoldshafen og til sidst til Karlsruhe.

udgør langt hovedparten af al masse i universet. Det viste sig dog ikke at holde stik, idet neutrinoernes egenskaber i det tilfælde ville have givet universet en helt anden struktur end den, vi observerer i dag. Så neutrinoerne er stadig kosmologisk interessante for bl.a. forståelsen af strukturdannelse og for dannelsen af den grundstof-fordeling, vi observerer i universet. Med mere viden om neutrinoer vil vi kunne forklare og forstå mange fænomener langt bedre. Derudover er neutrinoens masse i sig selv en interessant størrelse og en vigtig brik i et komplet billede af verden på partikelfysik-niveauet.

Neutrino-massebestemmelse

At måle neutrinoens masse er på ingen måde en enkelt sag. Umiddelbart er der tre forskellige indgangsvinkler til at finde neutrinoens masse. Én metode er at bruge vores astronomiske

Neutrinoen

Neutrinoen blev i første omgang foreslået som en sidste udvej for at forstå teorien bag betahenfald. I et betahenfald omdannes en neutron til en proton under udsendelse af en elektron. Analyserer man henfaldet ville man ifølge energibevarelsesprincippet forvente, at elektronen blev udsendt med en ganske bestemt energi, nemlig masseforskellen (da masse og energi er ækvivalente ifølge Einsteins velkendte formel $E=mc^2$) mellem den oprindelige kerne og den nye. Målinger viste imidlertid, at elektronen blev udsendt med alle mulige energier mellem nul og den forventede værdi. Den østrigske fysiker Wolfgang Pauli foreslog i et berømt brev fra 1930, at en 3. partikel, neutrinoen, bar den manglende energi væk. Neutrinoer detekteres oftest netop som "manglende energi" og først i 1953 lykkedes det fysikerne Frederick Reines og Clyde Cowan at påvise neutrinoen eksperimentelt.

Siden er der blevet forsket meget i neutrinfysik. Man ved nu eksempelvis, at der findes en

neutrino-partner til såvel muonen og tau-partiklen som til elektronen. Man ved hvordan de vekselvirker, og hvordan deres egenskaber ændrer sig i stof i forhold til i vakuum. En af de ting, man har fundet ud af, er, at neutrinoer ikke er masseløse, som f.eks. fotoner er det. Man ved imidlertid ikke, hvor stor deres masse er.

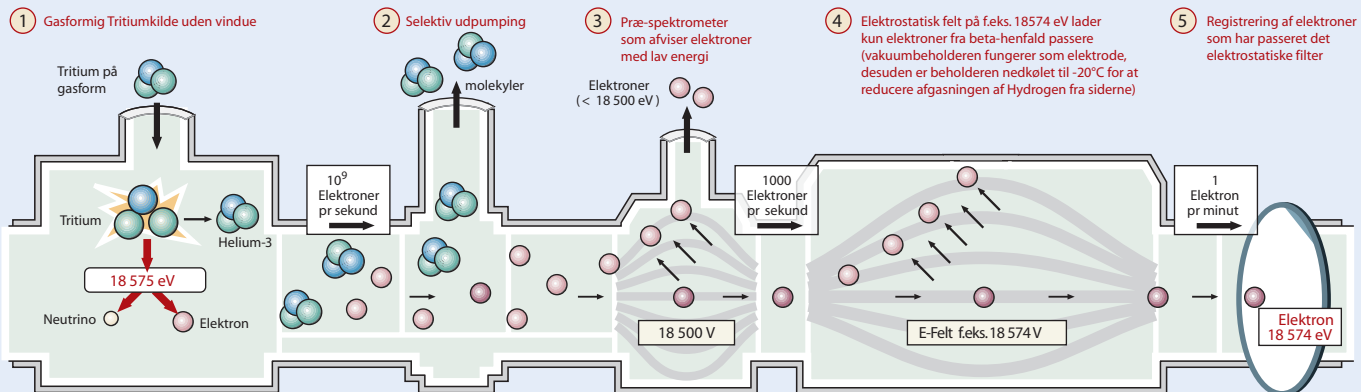
Ud fra vores viden om fusionsprocesserne i Solens indre, kan man regne ud, hvor mange elektron-neutrinoer, vi bør detektere i et givent eksperiment. Man detekterede for få neutrinoer i de første mange eksperimenter. Resultaterne kan imidlertid forklares, hvis en elektron-neutrino kan blive

til en muon- (eller tau-) neutrino: såkaldt neutrino-oscillation.

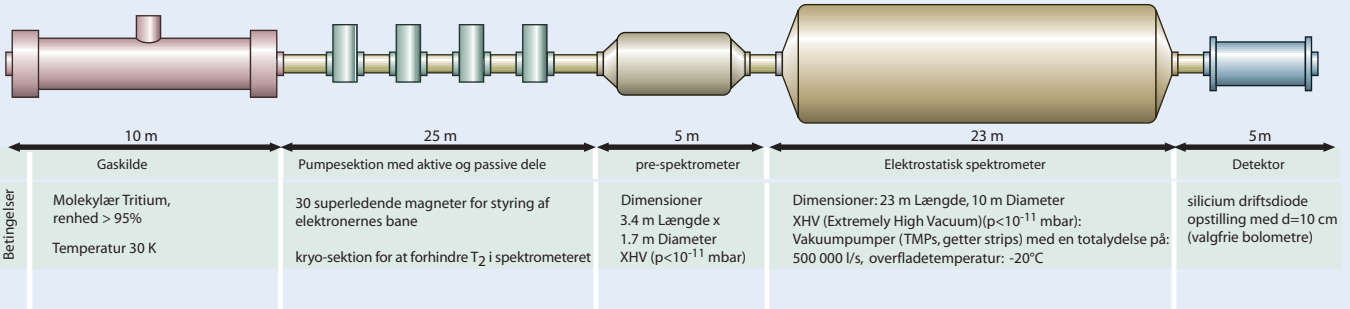
For at en sådan oscillation imellem tilstandene (teknisk set tilstande under den svage vekselvirkning) kan finde sted, må neutrinoerne imidlertid have masse (neutrinoerne bevæger sig fra Solen til Jorden i rene massetilstande med bestemt energi). Oscillationseksperimenter med sol-neutrinoer og neutrinoer i kosmisk stråling fortæller os, hvad masseforskellen er imellem de tre kendte massetilstande. Oscillationseksperimenter kan dog ikke afgøre, hvad den absolutte masse er, eller hvilken tilstand der er den tungeste.

Fermion	Symbol	Masse
Generation 1 (elektron)		
Elektron-neutrino	ν_e	< 2.2 eV
Elektron-anti-neutrino	$\bar{\nu}_e$	< 2.2 eV
Generation 2 (muon)		
Muon-neutrino	ν_μ	< 170 keV
Muon-anti-neutrino	$\bar{\nu}_\mu$	< 170 keV
Generation 3 (tau)		
Tau-neutrino	ν_τ	< 15.5 MeV
Tau-anti-neutrino	$\bar{\nu}_\tau$	< 15.5 MeV

KATRIN



Grafik omarbejdet efter R. Gumbshaimer, M. Noe, J. Wolf, the KATRIN collaboration og Forschungszentrum Karlsruhe, Inst. für Kernphysik samt Inst. für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe.



KATRIN er opbygget af 4 grundlæggende dele: En kraftig radioaktiv beta-kilde, et transportsystem, to spektrometre og en detektor.

Selve kilden er Tritium; en isotop af brint med to neutroner og en proton som kerne. Tritium er valgt pga. sin meget lave slutpunktsenergi, da fraktionen af elektroner nær slutpunktet er proportional med $(1/E_0)^3$, hvor E_0 er slutpunktsenergien. Desværre er Tritium temmelig svært at fremstille. Forschungszentrum Karlsruhe er det eneste sted, der producerer tilstrækkelige mængder af Tritium (40g Tritium om dagen) til denne type eksperiment.

Efter kilden følger et transportsystem, som ved hjælp af forskellige pumpe- og afkølings-mekanismer søger at indfange eventuelle Tritium-molekyler og andre for forsøget irrelevante molekyler og atomer før spek-

trometer- og detektor-systemet. Bl.a. superkølede vægge dækket med frossen Argon anvendes, idet Tritium har stor sandsynlighed for at reagere med Argon på disse overflader og dermed blive fanget.

Elektronerne når herefter et såkaldt for-spektrometer, som laver en grovsortering af de mest energirige elektroner. Efter dette kommer hovedspektromeret, som er en imponerende stor cylinder; 23m lang og 10m i diameter. Dette meget store spektrometer gør det muligt at sortere elektronerne i meget præcise energiintervaller. Basalt set ensretter spektromeret vha. magnetiske felter de indkommende elektroner, så de alle bliver sendt vinkelret mod en elektrostatisk barriere, hvor elektroner med for lav energi simpelt hen ikke kan komme over.

Endelig bliver elektronerne ledt via magnetfelter til en elektrondetektor.

observationer og efterhånden ganske omfattende viden om universet til at sætte kosmologiske grænser for, hvad neutrinos masse kan være. Et eksempel på en simpel grænse kan være at konstatere, at universet ikke er kollapsed igen efter Big Bang. Det betyder, at neutrinomassen må være mindre end 8 elektronvolt (enheden elektronvolt bruges flittigt i partikelfysik, idet $1\text{eV} = 1,783 \times 10^{-36}\text{kg}$ er noget mere besværligt at skrive hele tiden), for ellers ville det ganske store antal af neutrinoer have forårsaget netop et nyt kollaps. Denne type teknik afhænger dog i nogen grad af, hvilken model for universet man går fra.

En anden ide er at prøve at observere et fænomen kaldet neutrinoløst dobbeltbeta-henfald. Forudsætningen for at kunne observere dette er, at neutrinoen er sin egen antipartikel. Alle elementarpartikler har en antipartikel, der har samme masse, men ellers har modsatte egenskaber, såsom den positivt ladede positron, der er elektronens antipartikel. Når en partikel og dens antipartikel mødes vil de udslættes – annihilere – under udsendelse af energi. Hvis neutrinoen er sin egen antipartikel vil to neutrinoer, der mødes udslættes hinanden. I et beta-henfald omdannes en neutron til en proton under udsendelse af en elektron, og i denne

proces udsendes der samtidig en antineutrino. Neutrinoløst beta-henfald kan således kun finde sted, hvis neutrinoen er sin egen antipartikel. Det man konkret leder efter ved neutrinoløst dobbeltbeta-henfald er udsendelse af to elektroner med en samlet energi, der er lig med masseforskellen mellem den oprindelige og den nye kerne. Observation af denne type processer fortæller noget om henfaldsraten, som igen giver informationer om neutrinomassen.

Den tredje mulighed er at studere spekteret for beta-henfald. I sin tid kom man på sporet af neutrinoen ved studier af denne proces, idet man forventede, at elektronen blev udsendt

med en ganske bestemt energi, der svarede til masseforskellen mellem den oprindelige kerne og den nye. Denne forventning bygger dels på et af fysikkens vigtigste principper – energibevarelse. Og dels på Einsteins berømte formel $E=mc^2$, som fortæller os at masse og energi er ækvivalente størrelser. Målinger viste imidlertid, at elektronen blev udsendt med alle mulige energier mellem nul og den forventede energi. Forklaringen viste sig at være, at noget af energien blev båret væk af en hidtil ukendt partikel, nemlig neutrinoen.

Hvis neutrinoen har masse må der være en minimal energi (nemlig en neutrinomasse),

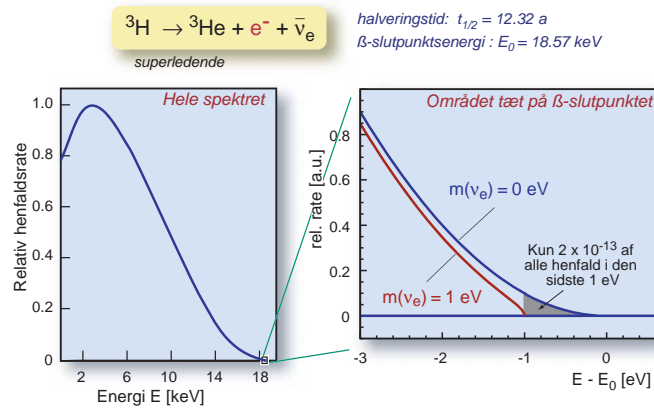
som kan bæres væk af neutrinoen. Studerer man slutpunktet i betaspektret – dvs. antallet af udsendte elektroner med de højeste energier – bør det derfor stoppe eksakt en neutrino-masse før maksimalenergien (se figur 2).

KATRIN-eksperimentet

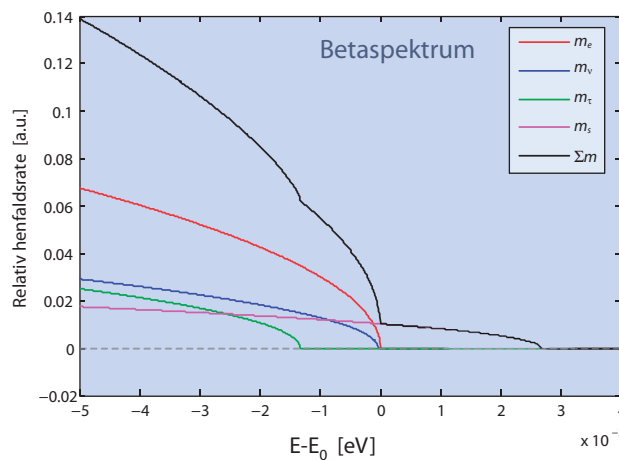
At studere spekteret for beta-henfald er netop hvad KATRIN (KARlsruhe TRItium Neutrino) eksperimentet går ud på. Det er imidlertid ikke så simpelt som det lyder. Det er nemlig uhyre få elektroner, der udsendes ved maksimalenergien (nærmere bestemt en andel på 2 ud af 10 billioner). Derfor må man måle utroligt mange beta-henfald og ydermere sortere kraftigt ud af de laveste energier for at kunne få informationer om slutpunktet. Desuden må man også tage højde for alle de effekter, der kan gå ind og forstyrre eksperimentet og give falske datapunkter.

Eksperimenterne med KATRIN forventes at gå i gang i år 2011. Ambitionen er, at resultatet af eksperimenterne – betaspektret – kan anvendes til at bestemme neutrinoens masse inden for 0,2 elektronvolts præcision.

I virkeligheden dækker betegnelsen neutrino over tre forskellige typer af neutrinoer, nemlig elektron-neutrinoen, muon-neutrinoen og tau-neutrinoen. Umiddelbart er det den vigtigste af disse massetilstande, elektron-neutrinoen, som KATRIN-eksperimentet sigter på at måle, men det er i teorien muligt at måle neutrinoens øvrige massetilstande. De tre tilstande blander sig nemlig med hinanden, og derfor kan massetilstandene for tau- og muon-neutrinoen også være at finde i spektret. Formen af spektrene vil være den samme, men højden (dvs. antallet af detekterede elektroner) vil afhænge af størrelsen af blandingen tilstandene imellem. Den totale graf vil være en sum af de andre grafer. Og fordi de repræsenterer forskellige massetilstande og dermed har forskellige slutpunkter vil tilstedevæ-



Figur 2. Beta-henfaldsspektret: Figuren illustrerer beta-spektrrets form, og zoom-in boksen viser spektrrets slutpunkt. Man kan lægge mærke til, at kun meget få henfald indgår i slutpunktet. Spektret er konstrueret for en neutrino-masse på 1 eV, og stopper dermed netop 1 neutrino-masse før det masseløse tilfælde.



Figur 3. Et eksempel på et betaspektrum med mere end en neutrino-tilstand. I princippet kan andre massive partikler også have del i betaspektret. Det kunne f.eks. være såkaldte sterile neutrinoer, som kan blandes med de andre neutrinoer, men ellers ikke vekselvirker. Eller det kunne være meget tunge såkaldt højrehåndede neutrinoer eller helt andre elementarpartikler.

relsen af flere tilstande optræde som små hak i totalspektret. Med en passende analyse kan man derfor hive mere end en enkelt masse ud af spektrene.

Programmet, der skal give resultatet

KATRIN-eksperimentet er bakked op af en meget stor kollektion af universiteter og forskningsinstitutioner. Man må tage højde for en særdeles grundig gennemtestning af alle eksperimenterets enkeltdele, såvel som tests efterhånden som det hele samles. Dette kan sagtens betyde designændringer og blindgyder på vejen.

Min forskningsgruppe er indtil videre involveret i analysen af resultaterne. Ud fra tidligere erfaringer (fra de mindre eksperimenter i Mainz og Troitsk)

prøver vi at bygge et analyseprogram, der kan håndtere de endelige data. Og der er masser af faldgruber i analysen. Eksempelvis er det ikke fuldstændig afklaret, hvordan man bedst undgår, at programmet giver os negative masser. Set fra "computerens synsvinkel" er der jo bare tale om tal i et matematisk program; men set fra vores synsvinkel er negative masser u-fysisk.

Vi har altså brug for et robust program, der kan tage hensyn til alle eventualiteter. Derudover vil vi gerne have muligheden for at undersøge resultaterne for andre partikler end elektron-neutrinoen. Dette program bliver således forhåbentlig det, der i sidste ende beregner neutrinoens masse ud fra KATRINs målinger. ■

Om forfatteren



Anna Sejersen Riis er ph.d. studerende ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet
Tlf.: 8942 3633
E-mail: asr@phys.au.dk

Videre læsning:

Om Kosmologi: Barbara Ryden, *Introduction to Cosmology*. Addison Wesley.

Om Neutrinoer: Der er masser af informationer på Wikipedia og de har nyttige links. <http://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino>

Hjemmeside for KATRIN-projektet: www-ik.fzk.de/~katrin/