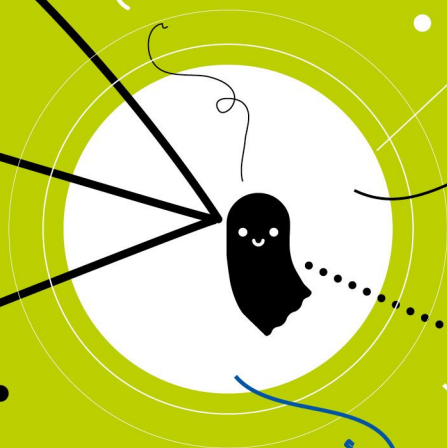


Dorine Schenk

SPOOK DEELTJES



Hoe neutrino's licht werpen
op kosmische vraagstukken

New Scientist
Pocket Science

6

Inhoud

Inleiding 7

1. Ondetecteerbaar 11
2. Project Poltergeist 17
3. Spannende smaken 24
4. Het zonnemysterie 34
5. Massa onbekend 44
6. Majorana's mysterie 52
7. De verdwenen antimaterie 58
8. Schaduw van een spook 66
9. Knallende kosmische kadootjes 74
10. Binnenin de zon kijken 82
11. Een spookachtige oerknal 89

Dankwoord 95

Index 97

Meer lezen? 103

Inleiding

Op een grijze, windstille zaterdagochtend in januari 2020 stap ik in de haven van het Zuid-Franse La Seyne-sur-Mer op het kleine werkschip Castor 02. Het voelt alsof tientallen ogen me aanstaren. Het zijn niet de fysici of ingenieurs die hun tassen de boot op tillen, omdat ze net als ik twee nachten aan boord zullen doorbrengen. Het zijn ook niet de langsvliegende vogels. Wat voelt als priemende ogen, zijn in werkelijkheid tientallen doorzichtige bollen ter grootte van een strandbal. Ze zijn verdeeld over twee lijnen van 200 meter lang die elk om een stalen frame gerold zitten.

De bollenlijnen die op het dek van de Castor 02 staan, zijn de reden dat ik twee dagen eerder halsoverkop een ticket naar Zuid-Frankrijk heb geboekt – pas op dat moment was het duidelijk dat het weer goed genoeg zou zijn om uit te varen. Ze zullen namelijk deel uitmaken van KM₃NET, een deeltjesdetector die gaat speuren naar de meest ongrijpbare, spookachtige deeltjes in het universum: neutrino's.

Als wetenschapsjournalist – en neutrino-fan – krijg ik de kans om mee te gaan met het plaatsen van deze twee lijnen. Veertig kilometer uit de kust bij Toulon zullen ze op tweeënhalve kilometer diepte in de Middellandse Zee worden uitgezet.

Neutrino's zijn superlichte deeltjes die ongemerkt bijna overal doorheen zoeven. Ze zijn overal om ons heen, in groten getale. Alleen al door je duim vliegen elke seconde honderd miljard neutrino's. Zonder dat je het merkt. Ze trekken zich namelijk nauwelijks iets aan van andere materiedeeltjes.

De spookdeeltjes komen vrij bij kernreacties in de zon en in kernreactoren op aarde. Ze ontstaan ook bij spectaculaire gebeurtenissen in het heelal, zoals wanneer sterren botsen of wanneer een ster aan het eind van zijn leven in een supernova-explosie uit elkaar spat. Daarnaast ontstaan ze in deeltjesversnellers en wanneer deeltjes uit het verre heelal op de atmosfeer botsen.

Neutrino's zijn na fotonen (lichtdeeltjes) de meest voorkomende deeltjes in het heelal. Toch is er verbazingwekkend weinig over bekend. Volgens Jordy de Vries, deeltjesfysicus bij de Universiteit van Amsterdam, zijn neutrino's het minst begrepen van alle deeltjes die we kennen. Fysici kennen zelfs een aantal van hun meest basale eigenschappen nog niet. Zo is de precieze massa van de spookdeeltjes nog onbekend, evenals de precieze smaken waarin ze kunnen voorkomen (hoofdstuk 3, 4 en 5). Dat komt doordat ze zo razend moeilijk te meten zijn (hoofdstuk 1 en 2).

Er zijn in de afgelopen decennia tientallen neutrino-detectoren gebouwd, de een nog groter en complexer dan de andere. Je vindt ze in oude mijnen, in bergen, onder het ijs en – zoals KM^3NET – diep in de zee. Maar telkens als neutrino's in zo'n experiment iets van zichzelf onthulden, riep dat allerlei nieuwe vragen op.

Daar zou de komende jaren weleens verandering in kunnen komen. Fysici proberen de laatste onbekende eigenschappen van neutrino's te achterhalen met een nieuwe generatie detectoren, zoals KM^3NET , de Duitse KATRIN , en de

toekomstige DUNE die onder de grond in de Verenigde Staten gebouwd zal worden.

Tegelijkertijd draagt neutrino-onderzoek bij aan een nieuw tijdperk in de astronomie. Zoals de ondertitel van dit boek al verraaft, kunnen de spookdeeltjes namelijk ook licht werpen op kosmische vraagstukken. Zo zijn er theoretici die menen dat er meer soorten neutrino's bestaan dan de drie die de afgelopen decennia gevonden zijn. Die extra neutrino's zouden een verklaring kunnen bieden voor een aantal van de grootste onbeantwoorde vragen in de moderne natuurkunde, zoals: wat is donkere materie? En waarom bestaan wij en alles om ons heen uit materie, waar is alle antimaterie heen? Over die extra neutrino's en hun verband met kosmische kwesties lees je in hoofdstuk 6, 7 en 8.

Terwijl ik dit boek schrijf, is de bouw van KM₃NET nog in volle gang. Op windstille dagen varen werkschepen de Middellandse Zee op om, met behulp van een duikrobot, de bollenlijnen uit te zetten.

KM₃NET gaat naast het uitpluizen van neutrino-eigenschappen ook dienst doen als 'neutrino-telescoop'. Net als de al bestaande neutrino-telescoop IceCube, gelegen in het zuidpoolijs, zal KM₃NET gaan zoeken naar neutrino's van buitenaardse oorsprong. Daarmee kunnen astrofysici bijvoorbeeld achterhalen wat er acht minuten geleden gebeurde in het hart van de zon (hoofdstuk 10). En extreem energieke neutrino's die van ver buiten het zonnestelsel komen, kunnen iets vertellen over de spectaculaire gebeurtenissen waarbij ze ontstaan.

Ten slotte dromen neutrino-onderzoekers over het waarnemen van spookdeeltjes die één seconde na de oerknal werden uitgezonden. In hoofdstuk 11 lees je hoe deze oerneutrino's fysici in staat zouden stellen om een babyfoto te maken van het pasgeboren heelal.

De detectorbollen die mij aanstaarden toen ik die grijze januariochtend het dek van de Castor 02 op liep, deinen nu heen en weer op de bodem van de Middellandse Zee. Hun eerste neutrino's hebben ze al gemeten. Voor het neutrino-onderzoek breekt er dankzij deze en andere experimenten een spannende tijd aan. Ik hoop dat dit boek een gids kan zijn in het grotendeels onontdekte land van die bijzondere spookdeeltjes waarvan er, terwijl je dit leest, miljarden tegelijkertijd met bijna de lichtsnelheid door je lichaam razen.

Dorine Schenk

Augustus 2022

1

Ondetecteerbaar

‘Vandaag heb ik iets gedaan dat geen enkele theoretisch natuurkundige ooit in zijn leven zou moeten doen: ik heb een deeltje voorspeld dat nooit experimenteel zal worden gedetecteerd!’ Dat schreef de Oostenrijkse natuurkundige Wolfgang Pauli op 4 december 1930 in een brief aan een collega. Hij wedde er zelfs een kist champagne om dat het deeltje, dat later de naam ‘neutrino’ zou krijgen, zich nooit in een experiment zou laten zien. Gelukkig bleek Pauli ongelijk te hebben.

Van alle bekende deeltjes die door het heelal krioelen zijn neutrino’s – na lichtdeeltjes – de meest voorkomende. Maar tegelijkertijd zijn het de minst opvallende. Alleen al door je duim razen er elke seconde honderd miljard. Daar merk je niets van, omdat het verleggen deeltjes zijn die zich zelden met andere bemoeien. Ondanks hun grote aantallen laten ze zich vrijwel nooit zien. Ze wegen bijna niets en omdat ze geen elektrische lading hebben, trekken ze zich niks aan van elektrische of magnetische velden. Ze vliegen overal ongemerkt doorheen, als een spook door een muur. Zelfs de aarde vormt voor neutrino’s nauwelijks een barrière.

Veel spookdeeltjes komen van de zon. Elke seconde produceert de zon biljoenen en biljoenen neutrino’s – meer

dan het aantal zandkorrels op alle stranden op aarde samen. Ze ontstaan bij de kernfusiereacties die onze ster van energie voorzien. Terwijl je deze zin leest, vliegen er neutrino's door je heen die ongeveer acht minuten geleden geproduceerd zijn in het binnenste van de zon. Over een paar seconden zijn ze door de gehele aarde gereisd en doorkruisen ze het bed van iemand die aan de andere kant van de wereld nietsvermoedend ligt te slapen. Deze constante stroom neutrino's is gelukkig volstrekt ongevaarlijk. Hij overspoelt de aarde al sinds die bestaat.

Ook uit andere richtingen komen voortdurend spookdeeltjes tevoorschijn. In alle andere sterren aan de hemel vinden dezelfde kernfusiereacties plaats als in de zon, zodat ook daarbij neutrino's ontstaan. Net als bij andere kosmische gebeurtenissen, zoals wanneer sterren samensmelten of uiteenspatten in een supernova – het explosieve einde van een ster. Ook kachelen er nog grote aantallen neutrinoveteranen door het heelal, die ruim dertien miljard jaar geleden ontstonden, vlak na de oerknal.

Dichter bij huis vind je eveneens neutrinobronnen. Kernreactoren produceren ze als bijproduct. Onder je voeten komen ze vrij bij het natuurlijke radioactieve verval van uranium en thorium in de bodem. Op de fruitschaal vind je bananen die neutrino's uitzenden doordat ze een klein beetje radioactief kalium bevatten. Zelf straal je ook neutrino's uit. Ze ontstaan in je lichaam bij het radioactieve verval van kalium en calcium in je botten en tanden.

Het was het radioactieve verval waardoor Pauli zich genooddaakt voelde om het bestaan te voorspellen van een 'ondetecteerbaar deeltje'. In het begin van de twintigste eeuw werden natuurkundigen dankzij het onderzoek van onder meer Henri Becquerel, Pierre en Marie Curie en Ernest Rutherford bekend met het verschijnsel radioactiviteit.

Daarbij verandert een atoomkern spontaan in een of meerdere lichtere atoomkernen onder het uitzenden van straling.

Rutherford ontdekte dat radioactieve straling drie vormen kent. De eerste soort straling, die hij alfastraling noemde, bleek gemakkelijk tegen te houden met een velletje papier. We weten nu dat deze straling bestaat uit heliumkernen. Ze komt bijvoorbeeld vrij bij het verval van uranium. De tweede soort straling staat bekend als bètastraling. Om die tegen te houden, had Rutherford meerdere velletjes aluminium nodig om een barrière te maken van in totaal een paar millimeter dik. Deze straling, die bijvoorbeeld uitgezonden wordt door kalium, bestaat uit elektronen. Wat later ontdekte Rutherford een derde soort straling, die hij de originele naam gammastraling gaf. Voor het afschermen van deze straling moet je met grover geschut komen. Enkel een dikke laag van een zwaar materiaal zoals lood houdt haar tegen. Gammastraling is net als zichtbaar licht, uv-licht en röntgenstraling een vorm van elektromagnetische straling, maar dan met hogere energie. Deze straling bestaat dus uit lichtdeeltjes, oftewel fotonen.

Toen deze drie vormen van radioactiviteit ontdekt waren, kon nog niemand vermoeden dat het bètaverval een spookachtige verrassing in petto had. Dat bleek pas toen natuurkundigen de energierekening gingen opmaken.

Bij radioactief verval geldt altijd de wet van behoud van energie: de totale hoeveelheid energie voor het verval is gelijk aan de totale hoeveelheid energie erna. Op het eerste gezicht lijkt die wet geschonden, want het gaat over schijnbaar energieloze atoomkernen die spontaan uit elkaar vallen en energierijke straling uitzenden. Maar dat is niet het hele verhaal. De beroemde formule $E=mc^2$ van Albert Einstein speelt namelijk ook een rol. Deze formule vertelt je dat er een verband is tussen energie (E) en massa (m). Energie is gelijk

2

Project Poltergeist

Een atoombom met een kracht van 20 kiloton, vergelijkbaar met die bij Hiroshima in 1945, laten ontploffen in de woestijn in Nevada. Dat was het plan waarmee de Amerikaanse onderzoekers Clyde Cowan en Frederick Reines in de jaren vijftig neutrino's wilden meten. Op het laatste moment zagen ze hier vanaf en kozen ze een andere strategie. Die bleek in 1956 succesvol, zoals we straks zullen zien. Maar eerst: hoe vang je een spookdeeltje?

Volgens de theorie die Enrico Fermi ontwikkelde, is de kans dat een neutrino zich in een detector laat zien ongelofelijk klein. Maar zelfs iets met een ongelofelijk kleine kans is mogelijk, vond de Italiaanse natuurkundige Bruno Pontecorvo, die in de jaren dertig in Fermi's onderzoeksgroep werkte. Hij kreeg gelijk.

Als je een bron zou hebben die precies één neutrino produceert, dan zou het zo goed als onmogelijk zijn om precies dat ene neutrino in een detector te vangen. Maar als je een bron neemt waar miljoenen, miljarden of biljoenen neutrino's per seconde vandaan komen, dan moet het met een voldoende grote detector lukken om enkele spookdeeltjes te betrappen. Dit heeft te maken met kans. Stel je het vangen van een neutrino voor als de kans dat jij tien keer

achter elkaar een zes gooit met een dobbelsteen (in werkelijkheid is de kans om een neutrino te meten nog veel kleiner). De kans dat het je lukt om in één poging tien keer achter elkaar een zes te gooien is ontzettend klein. Maar als je iedereen in Nederland vraagt om dit een dag lang steeds opnieuw te proberen, dan zal het een paar mensen lukken.

Als je dit terugvertaalt naar neutrino's, dan betekent het dat je kans om een neutrino te vangen groter wordt als je een grote detector hebt die constant probeert een paar van die miljarden of biljoenen neutrino's die uit een atoombom, kernreactor of de zon komen, te meten. Het is dan alsof je ongelofelijk veel mensen hebt, die steeds opnieuw proberen tien keer achter elkaar een zes te gooien. Voor een neutrino-detector geldt dus: *bigger is better*.

Maar hoe meet een dergelijke giga-detector een neutrino? Dat gaat eigenlijk altijd indirect. Je moet een spookdeeltje betrappen op het zeldzame moment dat het even niet oplet en op een atoom botst. Er zijn verschillende soorten botsingen: een neutrino kan op een elektron in een atoom botsen, of op een neutron of proton in een atoomkern: het zogeheten 'omgekeerde bètaverval'. Er zijn verschillende detectietechnieken ontwikkeld om die botsingen waar te nemen.

Ten eerste kan een neutrino dus op een elektron botsen dat om een atoomkern cirkelt. Dan krijgt dat elektron een flinke zet en vliegt het met hoge snelheid weg. Dat wegvliegende elektron kun je meten. Maar elk materiaal zit vol met elektronen. Dat maakt het moeilijk om een enkel, extra elektron te herkennen. De enige manier waarop zo'n elektron eruit springt, is door zijn hoge snelheid, die hij mee heeft gekregen tijdens de botsing. Hier kun je gebruik van maken als de neutrinobotsing plaatsvond in een transparant materiaal waarin dergelijke supersnelle elektronen sneller gaan dan licht, bijvoorbeeld water.

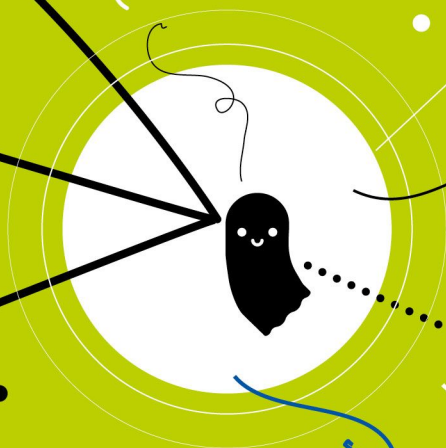
Je denkt nu misschien: Wat?! Niets kan toch sneller dan het licht? Dat klopt, in vacuüm. Maar in een materiaal kan licht worden afgeremd. In water wordt licht zelfs dusdanig afgeremd dat het ingehaald kan worden door supersnelle elektronen. Als dat gebeurt, dan ontstaat er een soort schokgolf, vergelijkbaar met een straalvliegtuig dat door de geluidsbarrière heen vliegt. Alleen uit dit zich hier niet als een harde knal, zoals bij het vliegtuig, maar als een blauwige lichtflits, genaamd tsjerenkovstraling. Terwijl het elektron door het water schiet, produceert het dus licht. Gevoelige lichtdetectoren kunnen dat opvangen.

Voor deze techniek heb je een enorme hoeveelheid water (of ijs) nodig, want de kans dat een neutrino op een atoom in een watermolecuul botst is ontzettend klein. Er zijn een paar moderne detectoren die hier gebruik van maken. Een voorbeeld is Super-Kamiokande in Japan. Dit is een vat met 50.000 ton water, omringd door lichtdetectoren, dat een kilometer onder de grond verstopt zit. Onderzoekers maken ook gebruik van natuurlijke watervolumes. Zo gaan de honderden meters lange KM3NET-lijnen met lichtdetectoren die ik in januari 2020 in de Middellandse Zee zag zakken, die tsjerenkovstraling in de zee opvangen in een gebied van een kubieke kilometer groot. Deze experimenten zullen in latere hoofdstukken nog voorbijkomen.

In plaats van op een elektron kan een neutrino dus ook op een kerndeeltje van een atoom botsen. Als het een botsing met een ladingloos neutron is, dan kan dat veranderen in een positief geladen proton. Door de energie die daarbij vrijkomt, kan het neutrino veranderen in een negatief geladen elektron. Ook hierbij komt dus een elektron vrij. Deze botsing kan ervoor zorgen dat het atoom waar het neutrino op botste ineens een ander atoom wordt. Een atoom kenmerkt zich namelijk door het aantal protonen in zijn kern. Doe je er een

Dorine Schenk

SPOOK DEELTJES



Hoe neutrino's licht werpen
op kosmische vraagstukken

New Scientist
Pocket Science

6