

Een gevoelig oor voor neutrino's

Sinds de ontdekking van kosmische straling zijn veel verschillende detectoren ontwikkeld om dit fenomeen te onderzoeken. Nieuw in het rijtje is de optische hydrofoonsensor, waarmee naar hogenergetische neutrino's gespeurd kan worden. E.J. Buis, E.J.J. Doppenberg, D. van Eijk, R.A. Nieuwland, P.M. Toet

Het onderzoek aan kosmische straling heeft een hoog Jules Vernegehalte. In 1912 stapte de Oostenrijkse wetenschapper Viktor Hess in een heliumballon om de intensiteit van de achtergrondstraling te meten als functie van de hoogte van de ballon. Deze metingen toonden dat de intensiteit van de radioactieve straling toeneemt met de hoogte en leidde tot de conclusie dat de oorsprong van de straling buiten onze aarde moet liggen. Na Hess zijn er nog vele onderzoekers geweest die deze metingen hebben herhaald en er werd getracht om de metingen op steeds grotere hoogte uit te voeren. Het letterlijke toppunt moet de poging worden van de heren Schrenk en Masuch. Ze planden een ballonvlucht in 1934 waarbij de ballon met 10.000 m^3 waterstof gevuld werd en een hoogte moest bereiken van 12.000 m . De payload van de ballon bevatte naast een elektroscoop ook zuurstofmaskers om het werk

op grote hoogte mogelijk te maken. Helaas verongelukten de twee heren, waarschijnlijk door een fout in deademingsapparatuur [1].

Veel manieren voor neutrinodetectie

Waar de apparatuur van Hess – een simpele elektroscoop – nog eenvoudig was, is er in de honderd jaar sinds de eerste metingen een breed palet van technologieën ontwikkeld voor het onderzoek aan kosmische straling. Apparatuur om kosmische straling te meten vindt men inmiddels op de meest exotische plekken op aarde: op de Argentijnse pampa, in de woestijn van Namibië, in het ijs van de Zuidpool en astronauten hebben zelfs een complex detectorsysteem aan het International Space Station gehangen. Daarnaast wordt op dit moment hard gewerkt aan een grootschalig experiment gebaseerd op lichtgevoelige sensoren in de Middellandse Zee, ge-

naamd KM3NeT. Wetenschappers van het Nikhef in Amsterdam spelen een prominente rol in het ontwerp en de bouw van dit experiment [2].

Het energiespectrum van de kosmische straling blijkt een hooiberg met vele spelden. Sommige experimenten zijn gespecialiseerd in het zoeken naar donkere materie, andere hebben met succes aangetoond dat (zonnen)neutrino's inderdaad massa hebben. In dit artikel richten we ons op het detecteren van neutrino's met de allerhoogst denkbare en meetbare energie, in de orde van 10^{18} eV . Omdat het heelal gevuld is met infraroodstraling, afkomstig van de oerknal, is het ondoordringbaar voor protonen en ionen met deze energie. Extrem hogenergetische neutrino's worden in tegenstelling tot protonen niet of nauwelijks gestopt. Ze wijzen ons dus direct naar (onbekende) bronnen buiten ons Melkwegstelsel. Het grote probleem met neutrino's is dat ze moeilijk te detecteren zijn en vooral dat de verwachte flux erg laag is. De vraag is nu hoe men een zo groot mogelijke detector kan realiseren. In dit artikel gaan we in op de mogelijkheid van een akoestisch detectiesysteem.

Het geluid van neutrino's onder water

Wanneer hogenergetische neutrino's hun energie verliezen in water zal dat water lokaal iets opwarmen. Dat leidt tot een thermische expansie en een drukgolfje dat in principe te meten is met een hydrofoon. Dit ther-



Figuur 1 Foto van een mechanische sensor waarop een fiberlaser verlijmd is. Het potlood geeft een indicatie van de grootte van de sensor.



Figuur 2 Akoestisch geïsoleerd bassin dat gebruikt is tijdens de karakterisatie van de hydrofoons.

mo-akoestische detectieprincipe is al in het begin van de jaren 1960 door de Sovjetgeleerde Gurgen Askayaran onderzocht en het effect werd in de jaren 70 ook gemeten door Sulak [3,4]. Hiertoe werd een bundel protonen van versnellers in Brookhaven en Harvard in een grote waterbak geleid. Het signaal van de vele protonen die hun energie verloren werd inderdaad met behulp van hydrofoons geregistreerd. Het signaal dat verwacht kan worden als een hoogenergetisch neutrino zijn energie verliest in water is uitermate laag. Het drukgolfje zal een verwachte amplitude hebben van slechts 1 tot 100 mPa [5]. Hydrofoons die dat kunnen meten, moeten net zo'n gevoeligheid hebben als het oor van een orka of dolfijn. Daarentegen is het voordeel van onderwaterakoestiek dat het signaal nauwelijks geabsorbeerd wordt. Een akoestisch signaal kan dus op een afstand van een kilometer nog te detecteren zijn. Daarom is het mogelijk om in de diepzee een grote experimentele opstelling (enkele kubieke kilometers) te maken met een relatief klein aantal detectoren. Een opstelling van dergelijke afmetingen is nodig omdat de flux van neutrino's met de allerhoogste energieën uiterst laag is. Met een detectievolume van enkele kubieke kilometers zal er maar een

handvol neutrino's per jaar geobserveerd kunnen worden.

Luisteren naar neutrino's: optische hydrofoonsensor

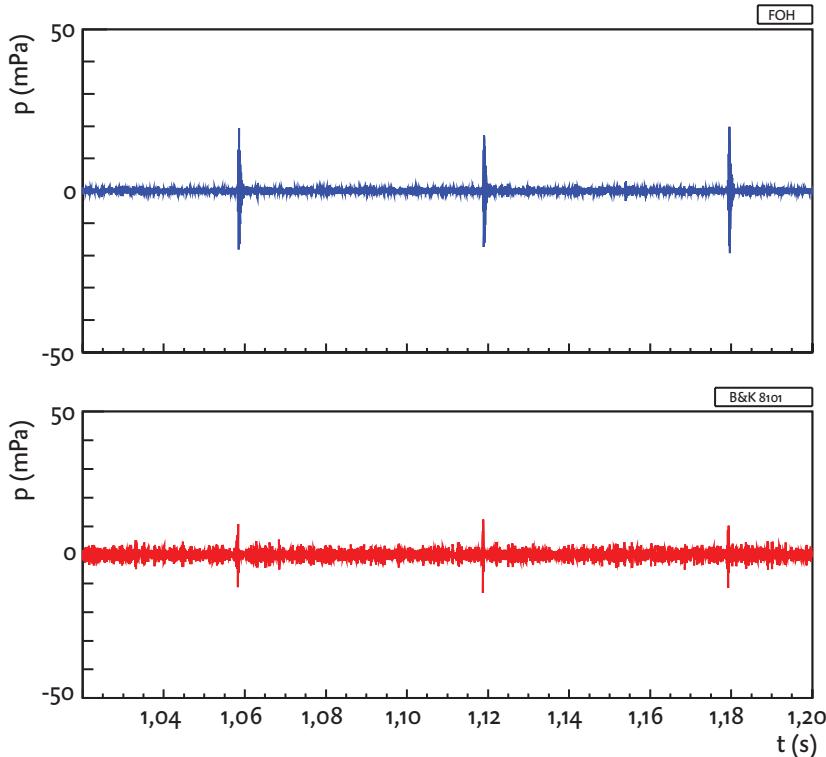
Bij sensoren denkt men veelal direct aan elektrische sensoren. In de afgelopen jaren heeft er echter veel ontwikkeling plaatsgevonden op het gebied van optische sensoriek. Voor vele fysische parameters als rek, temperatuur, druk, versnelling enzovoorts zijn er optische alternatieven. Binnen TNO worden sensoren ontwikkeld waarbij een glasvezel gebruikt wordt om deze parameters te meten. Met behulp van verschillende eigenschappen (bijvoorbeeld golflengte en amplitude) van het licht binnen in de glasvezel kunnen fysische parameters buiten de glasvezel gemeten worden. Het gebruik van optische glasvezelsensoren heeft verschillende voordelen:

1. klein en lichtgewicht,
2. geen elektriciteit nodig op de meetlocatie,
3. multiplexmogelijkheden (meerdere sensoren op één glasvezel) over grote afstanden.

Optische glasvezelsensoren kunnen gebaseerd zijn op verschillende technieken. De meest voorkomende technologie is een **Fiber Bragg Grating (FBG)**. Een FBG is een tralie die in de

kern van de glasvezel ($9\text{ }\mu\text{m}$ diameter) gemaakt is over een lengte van enkele millimeters. De belangrijkste eigenschap van deze grating is dat het selectief licht reflecteert van een bepaalde golflengte welke overeenkomt met de tralieconstante. Door stuik of rek aan te brengen ter plekke van de grating zal de tralieconstante en dus de gereflecteerde golflengte veranderen. Door de golflengte van het licht nauwkeurig te meten kan de rek (of stuik) op de glasvezel bepaald worden. Voor een optische hydrofoon is een mechanische sensor ontwikkeld die de inkomende drukgolven in water omzet in een rekverandering op de FBG-sensor. De gemeten golflengteverschuiving is een maat voor het geluidsniveau dat de sensor ondervindt. Een foto van de ontwikkelde sensor is te zien in figuur 1.

Het minimaal detecteerbare geluidsniveau wordt bepaald door de mechanische koppeling tussen het opvangen van geluidsgolven en het overbrengen naar rek op de glasvezel. Daarnaast is de technologie waarmee de golflengte gemeten kan worden een belangrijke parameter. Hoe nauwkeuriger deze golflengteverschuiving gemeten kan worden, hoe lager de te detecteren geluidsniveaus zijn. De ultieme detectiemethode om minieme golflengtever-



Figuur 3 Akoestische pulsjes gemeten door een fiberlaserhydrofoon (boven) en een B&K hydrofoon (onder).

schuivingen te meten maakt gebruik van interferentie. In een interferometer worden kleine golflengteverschuivingen ten gevolge van de drukgolf omgezet in intensiteitsvariaties op een fotogevoelige detector. Met behulp van deze technologie kan een golflengteverschuiving van ongeveer $0,1$ femtometer gemeten worden, wat overeenkomt met $0,1$ nanostrain of tewel $0,1$ -miljardste meter ($= 10^{-10}$ m) verlenging van de glasvezel over 1 meter lengte. Dit getal klinkt erg klein, maar is nog niet genoeg om de akoestische signatuur van een neutrino te kunnen detecteren. Om dit te verbe-

teren is een hydrofoon ontwikkeld die gebruikt maakt van een **next-generation FBG, de fiberlaser**. In dit geval is een FBG gemaakt in een speciale fiber, gedoteerd met een optisch actief materiaal, vergelijkbaar met het actieve medium in lasertechnologie. Door gebruik te maken van deze componenten ontstaat er een coherente laser binnen de glasvezel waarbij de emissiegolflengte van de laser afhankelijk is van de rek op de glasvezel. De smalbandige emissiepiek van de fiberlaser staat in schril contrast met de breedbandige reflectiepiek van de FBG. Golflengteverschuivingen zijn hier-

door nog veel nauwkeuriger te meten. De minimale golflengteverschuiving die gemeten kan worden is honderdmaal kleiner ten opzichte van een FBG tot ongeveer 1 attometer (10^{-18} m), wat overkomt met 1 picostrain (10^{-12} m verlenging over 1 meter). De combinatie van een gevoelig meet-systeem en een gevoelige sensor die de minimale druk omzet in een rek op de glasvezel geeft een systeem dat toepasbaar is voor akoestische neutrino-detectie. Het ruisniveau van meet-systeem die in zee gebruikt worden voor akoestische detectie wordt uitgedrukt in zogenaamde **sea states**. Het ruisniveau hangt samen met het weer aan het wateroppervlak. Wind- en golfoogte blijken gerelateerd te zijn aan het ruisniveau dat in de diepte te meten is. Deze conclusie is reeds getrokken door de Deen Knudsen, die in de jaren 1940 al vele studies aan het onderwerp wijdde [6]. Bij windstil weer aan het wateroppervlak blijkt er nog steeds een achtergrondruis aanwezig te zijn. Deze toestand wordt **sea state zero** genoemd. Akoestische signalen die lager zijn dan dit achtergrond-niveau zullen nooit gemeten kunnen worden doordat ze overschaduwd worden door ruis. De **fiberoptische hydrofoon en het bijbehorende meet-systeem is zo ontworpen dat het ruisniveau van het meet-systeem net onder deze sea state zero ligt.**

Testmetingen

In het afgelopen jaar is het hydrofoonsysteem uitgebreid getest om de geschiktheid als kosmische deeltjes-detector aan te tonen [7]. Hiervoor is gebruik gemaakt van het geluidsarme bassin in de TNO-vestiging in Den Haag zoals te zien is in figuur 2. Dit bassin is zo goed mogelijk akoestisch geïsoleerd en is behoorlijk groot. Dat heeft als voordeel dat eventuele echo's in het bassin te scheiden zijn van het signaal. Met behulp van een onderwaterluidspreker is de fiberhydrofoon vergeleken met gevoelige state-of-the-art(piëzo)-hydrofoons. De gebruikte referentie(piëzo)hydrofoon is van de firma Brüel & Kjaer (B&K 8101), een van de meest gevoelige types die commercieel verkrijgbaar is. Het is gebleken dat de gevoeligheid van de fiberlaserhydrofoon hoger is dan deze referentiehydrofoon. Dit heeft als voordeel dat de signaal-ruisverhouding beter is. Figuur 3 geeft

Het werk aan de hydrofoons wordt uitgevoerd op TNO (afdeling optica) door mensen met zeer uiteenlopende expertise. Vlnr.: Remco Nieuwland is optisch ingenieur en expert op het gebied van optische fibers. Daan van Eijk is recentelijk gepromoveerd als hoge-energiefysicus en sinds 2013 verbonden aan TNO. Ernst-Jan Buis is gepromoveerd in de hoge-energiefysica, maar werkte de laatste tien jaar voornamelijk aan ruimtevaartinstrumentatie. Optisch ingenieur Peter Toet heeft naast optische fiberhydrofoons ook vele andere toepassingen van optische fiberinstrumentatie ontwikkeld. Ed Doppenberg is expert op het gebied van akoestiek en signal processing.

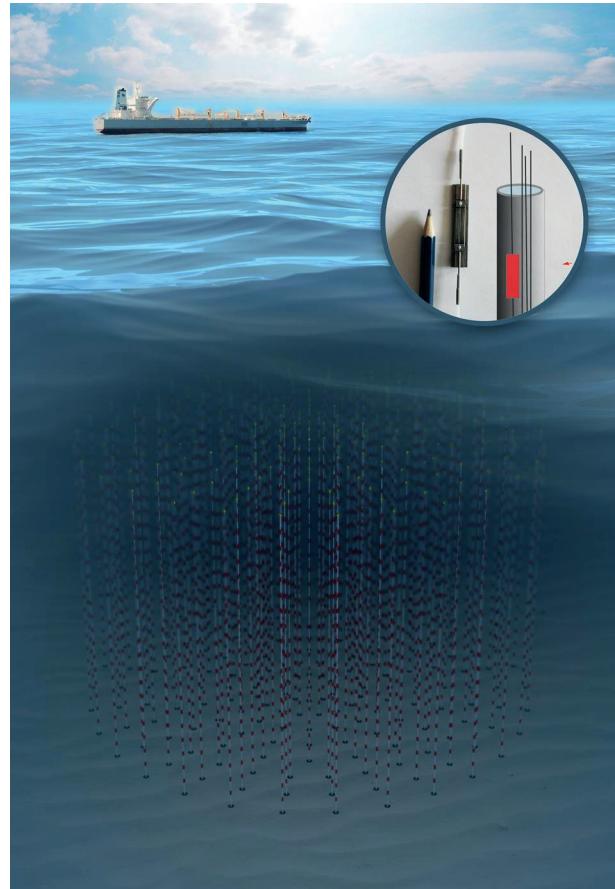
ernst-jan.buis@tno.nl



hiervan een voorbeeld. Deze illustratie toont een reeks van gesimuleerde pulsjes zoals die verwacht worden van kosmische neutrino's. Hiertoe is het verwachte signaal met een computer gesimuleerd en omgezet in een geluidsbestand. Deze 'beltoon' is daarna onder water afgespeeld en opgenomen met de fiberlaser en referentiehydrofoons. Uit het opgenomen signaal blijkt duidelijk dat de hydrofoons gevoelig genoeg zijn voor het meten van kosmische deeltjes. De fiberlaserhydrofoon meet in het bassin zelfs nog de echo's die een mPa amplitude hebben.

Conclusies en vooruitblik

Uit de resultaten van de optische hydrofoontechnologie kan geconcludeerd worden dat een technologie voorhanden is die de vereiste gevoeligheid heeft voor het akoestisch meten van hoogenergetische neutrino's. Daarnaast is de technologie relatief goedkoop en eenvoudig te implementeren in een grootschalige experimentele opstelling. Qua opzet zal zo'n experiment veel lijken op bestaande en geplande experimenten zoals IceCube en KM₃NeT. Het zal bestaan uit verticale strings van enkele honderden meters lang waarin enkele tientallen hydrofoons geplaatst zullen worden. Door de strings op honderd meter van elkaar te plaatsen kan een detectievolume gecreëerd worden van meer dan een kubieke kilometer zoals de schets in figuur 4 laat zien. Met zo'n experiment kan men geduldig naar het geluid van de zee luisteren. We zullen voornamelijk het gezang van walvissen en dolfijnen horen, maar hope-



Figuur 4 Een artistieke impressie van een experiment gebaseerd op hydrofoons.

lijk ook een paar duidelijke tikken die ons onschabare informatie opleveren over kosmische straling uit het heelal.

Referenties

- 1 J. Hoerandel, Early cosmic-ray work, Germany, <http://arxiv.org/abs/1212.0706>
- 2 A. Heijboer, Neutrino-astronomie op de bodem van de zee, *NTvN* **73-06**, juni 2013.
- 3 G. A. Askaryan, Hydrodynamic Radiation From the Tracks of Ionizing Particles in Stable Liquids, Sov. J. At. En. **3** (1957) 921, Russisch origineel: At. Energ. **3** (1957) 152.
- 4 L. Sulak et al., Experimental studies of the acoustic signature of proton beams traversing fluid media, *Nucl. Inst. and Meth.* **161** (1979) 203.
- 5 R. Lahmann, Ultra-High-Energy Neutrinos and Their Acoustic Detection in the Sea, *Habilitation Thesis*, Friedrich-Alexander Universitat Erlangen (2011).
- 6 V. O. Knudsen, R. S. Alford en J. W. Emling, Underwater ambient noise, *J. Mar. Res.* **3** (1948) 41.
- 7 E.J. Buis et al, Fibre laser hydrophones for cosmic ray particle detection, arxiv.org/abs/1311.7588.