Neutrino’s: de spookdeeltjes die de grootste mysteries van het universum kunnen ontrafelen

> *Het bestuderen van neutrino’s lijkt op het eerste gezicht misschien erg theoretisch: het zijn piepkleine deeltjes die bijna nergens mee reageren. Toch behoren ze tot de meest veelbelovende onderzoeksgebieden in de natuurkunde, omdat ze mogelijk antwoorden geven op enkele van de grootste vragen over het universum.*

Waarom zijn neutrino’s zo belangrijk?

Neutrino’s zijn extreem talrijk: biljoenen ervan vliegen elke seconde door je lichaam zonder dat je er iets van merkt. Het universum bevat ongeveer een miljard neutrino’s voor elk quark of elektron, en meer dan tien miljoen ervan bevinden zich in ieder mens op aarde[reference:0]. Toch weten we verrassend weinig over hen. We weten bijvoorbeeld nog steeds niet precies:

- Hoeveel massa neutrino’s hebben.
- Waarom ze überhaupt massa hebben.
- Of ze hun eigen antideeltje zijn (het zogenaamde Majorana-karakter)[reference:1].
- Waarom het universum bijna volledig uit materie bestaat en niet uit een gelijke hoeveelheid antimaterie.

Het feit dat neutrino’s massa hebben, was al een aanwijzing dat het huidige Standaardmodel van de deeltjesfysica onvolledig is. Het Standaardmodel voorspelt namelijk dat neutrino’s massaloos zijn, maar oscillatie-experimenten hebben onweerlegbaar bewijs geleverd dat ze kleine, maar niet-nul massa’s hebben[reference:2]. Deze massa’s stellen neutrino’s in staat om van “smaak” te veranderen tijdens hun

reis — een fenomeen dat neutrino-oscillatie wordt genoemd[reference:3]. Dit maakt neutrino's een mogelijke toegangspoort naar "nieuwe fysica"[reference:4].

Wat leren we er nu al van?

1. Het ontstaan van het universum

Een van de grootste mysteries is waarom er na de oerknal materie overbleef. Volgens eenvoudige modellen hadden materie en antimaterie elkaar volledig moeten vernietigen.

Sommige theorieën suggereren dat neutrino's hierbij een sleutelrol speelden via een mechanisme dat **leptogenese** wordt genoemd. De kleine massa's van neutrino's wijzen op een mechanisme dat niet alleen neutrino's massa geeft, maar ook de mogelijkheid biedt om de materie-antimaterie-asymmetrie van het universum te verklaren[reference:5]. Als dat klopt, helpen neutrino's ons te begrijpen waarom sterren, planeten en mensen überhaupt bestaan[reference:6].

2. Het binnenste van sterren

Neutrino's ontsnappen rechtstreeks uit de kern van de zon en andere sterren, terwijl licht er duizenden tot miljoenen jaren over kan doen om naar buiten te komen.

Daardoor kunnen wetenschappers letterlijk "in" sterren kijken en kernfusie bestuderen. De Borexino-samenwerking heeft bijvoorbeeld voor het eerst de CNO-fusiecyclus in de natuur aangetoond door zonne-neutrino's te detecteren die uit dit proces afkomstig zijn[reference:7]. Dit opent een nieuw venster op de processen die de energieproductie in sterren aandrijven.

3. Kosmische gebeurtenissen observeren

Neutrino's komen vrijwel ongehinderd uit supernova's, neutronensterren en gebieden rond zwarte gaten. Daardoor fungeren ze als unieke boodschappers uit delen van het heelal die met gewone telescopen nauwelijks zichtbaar zijn.

De IceCube-detector op Antarctica heeft hiervoor zelfs een geheel nieuw vakgebied geopend: **neutrino-astronomie**. IceCube heeft 5160 fotodetectors in een kubieke kilometer poolijs geplaatst om

hoogenergetische neutrino's uit de ruimte waar te nemen[reference:8]. In het afgelopen decennium heeft IceCube de neutrino-gloed van onze eigen Melkweg geobserveerd, de nabije Squid Galaxy in neutrino's gedetecteerd en neutrino's waargenomen van een blazar[reference:9].

4. De structuur van de aarde

Zogenaamde **geoneutrino's** ontstaan diep in de aarde door radioactief verval. Door ze te meten kunnen wetenschappers meer leren over de warmteproductie en samenstelling van de aardkern en mantel.

De KamLAND– en Borexino-experimenten hebben de geoneutrino-flux van de U-238- en Th-232-vervalketens in het inwendige van de aarde direct gemeten[reference:10]. Deze metingen geven een gezamenlijke radiogene warmteschatting van ongeveer 20 TW (met een onzekerheid van ruwweg 12 tot 28 TW), wat een belangrijk deel van de totale warmteflux van de aarde (ongeveer 47 TW) verklaart[reference:11]. Door deze geoneutrino's te bestuderen, krijgen we inzicht in de thermische evolutie van onze planeet.

Mogelijke toekomstige toepassingen

Hier wordt het speculatiever, maar er zijn wel serieuze onderzoeksprogramma's.

Monitoring van kernreactoren

Kernreactoren produceren enorme aantallen neutrino's. Detectoren kunnen daardoor op afstand controleren:

- Of een reactor actief is.
- Hoeveel vermogen hij levert.
- Mogelijk zelfs of splijtstof wordt verwijderd of vervangen.

Dit kan belangrijk worden voor nucleaire veiligheid en non-proliferatie. De Internationale Atoomenergieagentschap (IAEA) heeft haar interesse uitgesproken in de mogelijkheden van antineutrino-detectie als een nieuw hulpmiddel voor waarborgen[reference:12]. Recent onderzoek naar hoogzuivere germaniumdetectoren versterkt met ^{73}Ge toont aan dat real-time monitoring van reactoroperaties,

inclusief plutoniumgehalte en thermisch vermogen, haalbaar is[reference:13].

Ondergrondse beeldvorming

Omdat neutrino's door gesteente heen gaan, zou men in de verre toekomst misschien grote geologische structuren kunnen onderzoeken.

Denk aan:

- Ondergrondse ertslagen.
- Vulkanen.
- De diepere aardkorst.

De techniek staat echter nog in de kinderschoenen.

Communicatie door obstakels heen

Radiogolven worden tegengehouden door water, bergen of de aarde zelf. Neutrino's niet.

Er zijn daarom ideeën voor:

- Communicatie met onderzeeërs. Onderzoek toont aan dat een neutrino-bundel van een muonopslagring een one-way communicatielink met een ondergedompelde onderzeeër mogelijk kan maken, met datasnelheden in de orde van 1 tot 100 bps[reference:14][reference:15].
- Communicatie door de aarde heen zonder satellieten.

Momenteel zijn de benodigde detectoren echter gigantisch en duur, waardoor dit nog geen praktische technologie is.

Misschien nog belangrijker: onverwachte technologie

De geschiedenis laat zien dat fundamenteel onderzoek vaak toepassingen oplevert die niemand vooraf kon voorspellen.

Voorbeelden:

- Onderzoek naar elektronen leidde uiteindelijk tot elektronica, computers en internet.
- Onderzoek naar kernfysica leidde tot medische beeldvorming zoals PET-scans[reference:16].
- De ontwikkeling van deeltjesfysica droeg bij aan de uitvinding van het World Wide Web bij CERN[reference:17].

Het is daarom goed mogelijk dat de grootste praktische opbrengst van neutrino-onderzoek nog onbekend is. De detectoren, sensoren, data-analyse en cryogene technieken die nu worden ontwikkeld kunnen later toepassingen krijgen buiten de natuurkunde. In Nederland werkt Nikhef bijvoorbeeld aan innovatieve detectiemethoden, zoals het luisteren naar het geluid dat neutrino's maken in zeewater[reference:18].

> **Wist je dat?** De geschiedenis van het neutrino zelf begon in 1930, toen Wolfgang Pauli het bestaan postuleerde om het continue spectrum van bèta-verval te verklaren. Pas in 1956 werd het deeltje daadwerkelijk gedetecteerd door Frederick Reines en Clyde Cowan[reference:19]. Sindsdien is het neutrino uitgegroeid van een theoretische noodoplossing tot een van de meest onderzochte deeltjes in de moderne natuurkunde.

Samengevat

Het directe nut van neutrino-onderzoek vandaag is vooral fundamentele kennis: begrijpen hoe het universum werkt, waarom materie bestaat en wat er gebeurt in sterren en extreme kosmische objecten. Mogelijke toekomstige toepassingen liggen in kernreactorbewaking, geologische beeldvorming en speciale communicatiesystemen. Maar net zoals niemand in 1900 kon voorspellen dat elektronenonderzoek zou leiden tot smartphones, kan neutrino-onderzoek technologieën opleveren die we ons vandaag nog niet kunnen voorstellen.

Bronnen

1. Barenboim, G. (2025). *Neutrino physics*. CERN Yellow Reports: School Proceedings. Geraadpleegd van https://cds.cern.ch/record/2963689
2. Deppisch, F. (2025). *Neutrino Astrophysics, 2025 Update: Neutrino Masses and Mixings*. Springer. Geraadpleegd van https://rd.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-83387-8_7
3. Huber, P. (2009). *Submarine neutrino communication*. arXiv:0909.4554. Geraadpleegd van https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/0909.4554
4. Kayser, B., & Parke, S. (2009). *The Neutrinos*. Briefing for William Brinkman, Fermilab. Geraadpleegd van https://indico.fnal.gov/event/2613/attachments/48331/57991/BrinkmanBriefingNeutrinoWriteup.pdf
5. Martell, B. (2026). *PUH Geoneutrino Lead Note: Earth's Heat Budget Partition*. Zenodo. Geraadpleegd van https://zenodo.org/records/20361119
6. Science.org. (2025). *Cosmic neutrinos' kink could help explain origins of the elusive particles*. Geraadpleegd van https://www.science.org/content/article/cosmic-neutrinos-kink-could-help-explain-particles-origins
7. ScienceDirect. (2026). *Transforming Antarctic ice into a Cherenkov neutrino detector: From concept to discovery*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. Geraadpleegd van https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900226000987
8. APS Physics. (2025). *Potential of ^{73}Ge High-Purity Germanium Detectors for Reactor Neutrino Detection and Nuclear Monitoring*. APS Division of Nuclear Physics Meeting. Geraadpleegd van https://schedule.aps.org/dnp/2025/events/T02/3
9. INIS/IAEA. (2012). *Study of the prospective usefulness of the detection of antineutrinos to monitor nuclear power plants for non proliferation purpose*. Geraadpleegd van https://inis.iaea.org/records/p2tnm-t1668
10. ESA NAVISP. (2019). *PNT using Neutrino Particles*. Geraadpleegd van https://navisp.esa.int/project/014-pnt-using-neutrino-particles
11. Nikhef. (2025). *Neutrino-onderzoek bij Nikhef*. Geraadpleegd van https://www.nikhef.nl/
12. CERN. (z.d.). *The birth of the web*. Geraadpleegd van https://home.cern/science/computing/birth-web
13. FZ Jülich. (2020). *A Missing Piece of the Puzzle for the Solar Engine*. Geraadpleegd van https://www.fz-juelich.de/en/news/archive/press-release/2020/a-missing-piece-of-the-puzzle-for-the-solar-engine

14. NIBIB. (z.d.). *Positron Emission Tomography (PET)*. Geraadpleegd van https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/positron-emission-tomography-pet