



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Starlight beneath the waves : in search of TeV photon emission from Gamma-Ray Bursts with the ANTARES Neutrino Telescope

Laksmana-Astraatmadja, T.

Citation

Laksmana-Astraatmadja, T. (2013, March 26). *Starlight beneath the waves : in search of TeV photon emission from Gamma-Ray Bursts with the ANTARES Neutrino Telescope*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/20680>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/20680>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/20680> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Astraatmadja, Tri Laksmana

Title: Starlight beneath the waves : in search of TeV photon emission from Gamma-Ray Bursts with the ANTARES Neutrino Telescope

Issue Date: 2013-03-26

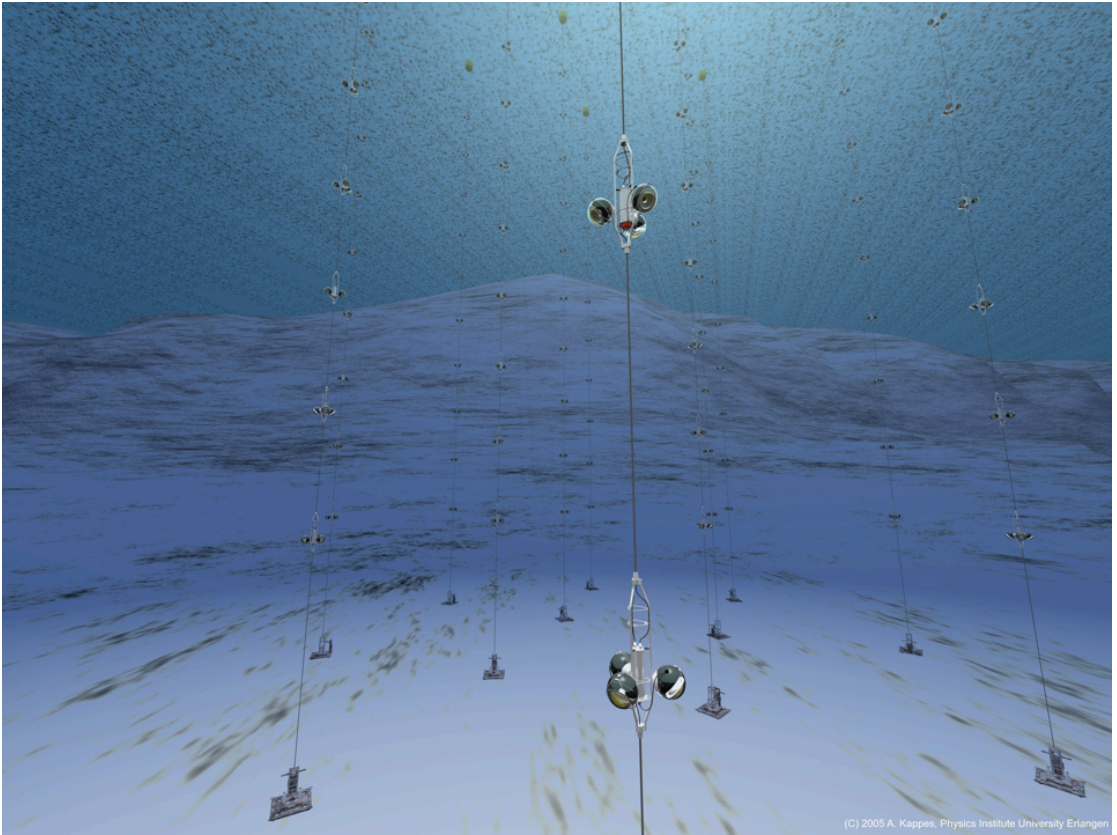
Samenvatting

OP DE BODEM van Middellandse Zee, op een diepte van 2500 meter en ongeveer 40 km van Toulon in Zuid-Frankrijk, staat de ANTARES neutrino-telescoop. Deze telescoop bestaat uit een verzameling lichtgevoelige sensoren. Neutrino's zijn deeltjes die heel zwak wisselwerken met materie en daarom erg moeilijk zijn waar te nemen.

Neutrino's met een hoge energie kunnen bij een interactie met het zeewater een muon produceren. Dit muon reist in nagenoeg dezelfde richting als het neutrino, en met een snelheid die de snelheid van licht in water overtreft. Hierdoor wordt een elektromagnetische schokgolf teweeggebracht. Deze schokgolf maakt een karakteristieke hoek ten opzichte van het muonspoor en wordt ook wel Čerenkov licht genoemd. Met de lichtgevoelige sensoren van de ANTARES telescoop kan het Čerenkov licht worden gedetecteerd. Uit de plaats en tijd van het gedetecteerde licht kan het muonspoor gereconstrueerd worden. Uit de richtingen van de muonen kan de herkomst van de neutrino's bepaald worden. Het bijzondere is dat neutrino's dwars door de aarde kunnen reizen. Geen enkel ander deeltje kan dat. Dus als een naar boven gaand muon wordt gedetecteerd dan zal dat door een neutrino gemaakt zijn.

Een van de doelen van een neutrino-telescoop is het vinden van de oorsprong van kosmische stralen. Kosmische straling bestaat uit volledig geïoniseerde atoomkernen. De aarde wordt continu en uit alle richtingen bestookt met kosmische stralen. De energie van de kosmische stralen varieert van 10^8 eV tot aan 10^{20} eV. De hoogste energie overtreft de energie die ooit bereikt zou kunnen worden met deeltjesversnellers op aarde. Hoe deze deeltjes kunnen worden versneld tot zulke extreem hoge energieën en waar de astrofysische deeltjesversnellers zijn, is nog steeds een vraag die de wetenschap bezig houdt. Het opsporen van de bron zou kunnen leiden naar het antwoord op de vraag hoe deze deeltjesversnellers werken.

De zoektocht naar de bron van kosmische stralen wordt echter bemoeilijkt omdat de kosmische stralen ten gevolge van hun elek-



trische lading worden afgebogen door (inter-)galactische magnetische velden. Hierdoor kan men uit de waargenomen richtingen niet direct de bron achterhalen. Alleen het traject van kosmische stralen met extreem hoge energieën blijft voldoende recht. Hun aantallen zijn echter te gering om binnen een redelijke termijn voldoende statistiek te kunnen verzamelen. Dit is het punt waar neutrino telescopen een bijdrage kunnen leveren.

Neutrino's kunnen ontstaan bij botsingen tussen de kosmische stralen en materie (of zelfs licht). Sommige atoomkernen kunnen ontsnappen uit hun versneller en zo waargenomen worden als kosmische straling op aarde. Andere atoomkernen kunnen botsen met de omringende materie en zo neutrino's produceren. Daar neutrino's elektrisch neutraal zijn worden ze niet afgebogen door

Figuur 12.4: Een schets van de ANTARES neutrino telescoop. Een beschrijving van de ANTARES neutrino telescoop is te vinden in Hoofdstuk 6. Met dank aan Alexander Kappes (Universiteit Erlangen).



magnetische velden. Ze worden slechts sporadisch geabsorbeerd in materie omdat ze zo zwak wisselwerken met materie. Dus wijzen neutrino's direct terug naar hun bron.

GAMMAFLITSEN (*Gamma-Ray Burst*, GRB's) kunnen mogelijk dienst doen als kosmische deeltjesversneller. Deze korte γ -flitsen worden ongeveer eens per dag waargenomen worden. Deze γ -flitsen geschieden op willekeurige tijden en plaatsen in de ruimte. Tot nu toe lijken GRB's zich niet te herhalen. Een GRB verschijnt gedurende korte tijd aan de gewoonlijk donkere hemel en overtreft dan alle andere astrofysische bronnen van γ -straling in helderheid. Over het algemeen wordt aangenomen dat een GRB ontstaat tijdens de laatste fase van de implosie van een zeer zware ster is, of bij een fusie tussen twee astrofysische objecten zoals zwarte gaten of neutronensterren. In beide gevallen bestaat het eindresultaat uit een ultrarelativistische vuurbal die zich uitbreidt door de interstellaire materie. In zo'n omgeving kunnen atoomkernen heel effectief versneld worden. Met het bereiken van voldoende

Figuur 12.5: Een schets van een Gammaflits (*Gamma-Ray Burst*, GRB). Een beschrijving van de theoretische en praktische aspecten van GRB's zijn te vinden in Hoofdstuk 1.2. De onderliggende mechanismen worden in Hoofdstuk 2.1 besproken. Met dank aan ESO/A. Roquette.

hoge energieën kunnen zij ontsnappen uit de vuurbal. Men heeft echter nog geen verband kunnen leggen tussen GRB's en de kosmische stralen. Veel modellen van GRB's voorspellen de productie van neutrino's die waargenomen kunnen worden met neutrino-telescopen. Het waarnemen van deze neutrino's zou dit verband onomstotelijk kunnen vastleggen.

Bij de botsingen van de atoomkernen kan ook licht geproduceerd worden. De golflengte van dit licht is zeer klein en komt overeen met een energie van 10^{12} eV of hoger. Bij deze energieën gedraagt het licht zich als een deeltje en wordt daarom ook wel γ -straal genoemd. Bereiken deze γ -stralen de aarde, dan zullen ze botsen met atoomkernen in de atmosfeer boven de ANTARES detector. Hierbij kunnen muonen geproduceerd worden. De muonen zullen een gedeelte van hun energie verliezen tijdens hun reis door de zee. Maar als ze genoeg energie bezitten kunnen ze de detector bereiken en kan de elektromagnetische schokgolf van Čerenkov licht gedetecteerd worden. Dus door omhoog te kijken, in plaats van omlaag, zou een neutrino-telescoop een tweede toepassing kunnen krijgen, namelijk als een γ -straal telescoop. Neutrino-telescopen hebben een groot blikveld en zijn 24 uur per dag en 7 dagen per week operationeel. Deze eigenschappen maken een neutrino-telescoop zeer geschikt om GRB's waar te nemen.

Het idee om een neutrino-telescoop als een γ -straal telescoop te gebruiken is oud, maar is voor het eerst toegepast met ANTARES. Met de veel grotere IceCube neutrino-telescoop op de Zuidpool en de toekomstige KM₃NeT neutrino-telescoop in de Middellandse Zee wordt de toepassing van dit idee relevanter. Een uiterst grote detector is vereist omdat de kans dat een detecteerbaar muon geproduceerd wordt klein is, en omdat de γ -stralen geabsorbeerd kunnen worden op hun reis van de bron naar de aarde.

DE EERSTE stap in het bepalen van het vooruitzicht van deze detectiemethode is een schatting van het aantal waarneembare muonen. Hierbij moet rekening gehouden worden met een aantal factoren, namelijk: (I) het aantal γ -stralen dat geproduceerd wordt in een GRB, (II) het aantal γ -stralen dat geabsorbeerd wordt door (infrarood) licht tijdens de reis van de bron naar de aarde, (III) het aantal muonen dat in de atmosfeer geproduceerd wordt en

(iv) het aantal muonen dat de detector bereikt.

In Deel I van deze dissertatie wordt uitgelegd hoe het aantal γ -stralen dat geproduceerd wordt in een GRB kan worden berekend voor een bepaalde afstand van de GRB (aangeduid door een roodverschuiving) en hoe het energiespectrum eruit ziet. Op basis van modellen kan de optische diepte van het heelal als functie van de energie van de γ -stralen en de afstand tot de bron berekend worden.

Voor de productie van muonen in de atmosfeer zijn twee dominante kanalen te identificeren. Het eerste kanaal verloopt via productie en verval van kortlevende pionen. Het energiespectrum van de muonen voortvloeiend uit dit kanaal is berekend voor een specifiek energiespectrum van γ -stralen door Drees, Halzen & Hikasa (1989) en later voor een algemener energiespectrum door Halzen, Kappes & Ó Murchadha (2009).

Het tweede kanaal verloopt via de directe productie van muonparen. De werkzame doorsnede voor de productie van elektronparen werd lange tijd geleden berekend door Bethe & Heitler (1934). Deze berekening is aangepast voor paren van muonen (Halzen, Kappes & Ó Murchadha, 2009).

Het energiespectrum van beide kanalen kan dus worden berekend. Bij lage energieën is het pionkanaal dominant. Echter, het aantal muonen dat geproduceerd kan worden via dit kanaal neemt af met toenemende energie terwijl de productie van muonparen juist toeneemt. Hierdoor is bij energieën hoger dan 10^{12} eV het paarproductiekanaal dominant.

Als het muon door het water reist, verliest het energie door ionisatie van het water en door uitstraling van γ -stralen en paren van elektronen. De laatste twee processen gedragen zich als een stochastisch proces en kunnen met Monte Carlo simulaties geëvalueerd worden. Het gemiddelde energieverlies kan simpelweg berekend worden door de standaard formule voor het energieverlies te nemen (Barrett et al., 1952). Door deze formule te gebruiken kan snel het verband tussen de muonenergie aan het zeeoppervlak en de energie op een bepaalde diepte worden berekend. Het is ook mogelijk om het energiespectrum te berekenen op de plek van de detector.

Met deze informatie kan, op basis van de roodverschuiving van

de GRB, het aantal muonen dat de detector bereikt bepaald worden. Uiteindelijk bepaalt de (effectieve) grootte van de detector het aantal muonen dat gedetecteerd wordt. Uitgaande van een gemiddelde GRB blijkt dat men met de ANTARES neutrino-telescoop energetische γ -stralen kan detecteren, mits de GRB relatief dichtbij heeft plaatsgevonden (roodverschuiving $z < 0.05$). Met de IceCube en KM₃NeT telescopen kan men verder kijken ($z < 0.1$).

OM DE RESPONS van de ANTARES neutrino-telescoop op muonen te begrijpen, wordt gebruik gemaakt van Monte Carlo simulatie software. Dit wordt beschreven in Deel II. Om de snelheid van de berekening te verhogen, wordt alleen het Čerenkov licht in de omgeving van de detector gesimuleerd. Dit volume wordt gedefinieerd door een cilinder rondom de detector. Er moet dan voldoende ruimte zijn tussen de wand van de cilinder en de detector, zodat het Čerenkov licht dat buiten de cilinder wordt geproduceerd geen detecteerbaar signaal kan opleveren.

In de atmosfeer kunnen meerdere muonen tegelijkertijd geproduceerd worden. Zo'n bundel muonen kan minder nauwkeurig worden gereconstrueerd dan een enkel muonspoor. Gebruikmakend van het CORSIKA software programma is aangetoond dat verreweg de meeste bundels die de detector bereiken uit een enkel muon bestaan. Daarom wordt een enkel spoor van een muon gesimuleerd om de respons van de detector te bestuderen.

Met deze simulaties is aangetoond dat de sporen van neerwaartse muonen nauwkeurig gereconstrueerd kunnen worden met de ANTARES neutrino-telescoop, maar dat de efficiëntie vergeleken met die van de opwaartse muonen relatief laag is. Dit komt doordat de lichtgevoelige sensoren naar beneden zijn gericht om zodoende de detectie-efficiëntie van neutrino's te maximaliseren. Het effectieve oppervlak van de ANTARES detector voor energetische γ -stralen is ongeveer 1 m^2 bij $5 \times 10^{12} \text{ eV}$. Als men de respons van de detector in rekening neemt komt de reikwijdte van de ANTARES detector voor GRB's overeen met een roodverschuiving van $z \sim 0.01$.

De simulaties kunnen ook gebruikt worden om de resolutie van de detector te bepalen. De resolutie kan worden bepaald op basis van de hoekverdeling van gereconstrueerde sporen ten opzichte

van de positie van de GRB. De achtergrond bestaat voornamelijk uit muonen die worden geproduceerd in de interacties van kosmische stralen met de atmosfeer. De achtergrond kan worden bestudeerd door de meetgegevens te gebruiken die met de ANTARES detector zijn verzameld. Uit de meetgegevens van 2008, het jaar waarin ANTARES gereed kwam, is de hoekverdeling van de achtergrond bepaald. Op basis van de twee hoekverdelingen, één van het veronderstelde signaal en één van de gemeten achtergrond, kan een hypothesetest worden opgezet. De ene hypothese is dat er alleen achtergrond aanwezig is (H_0) en de andere hypothese is dat er een verondersteld signaal van een GRB is met daarbij achtergrond (H_1). De compatibiliteit van de meetgegevens met de twee hypothesen kan dan getest worden. Uit mijn analyse blijkt dat het detecteren van slechts 5 muonen al 90% waarschijnlijkheid biedt om een ontdekking te doen met een significantie die overeenkomt met 3σ .

IN DEEL III wordt de eerste poging beschreven om met de ANTARES neutrino telescoop energetische γ -stralen te detecteren die afkomstig zijn uit een GRB. Hiertoe is allereerst een lijst van GRB's samengesteld en het aantal detecteerbare muonen uit iedere GRB berekend. De meest kansrijke GRB's zijn die GRB's die het grootste aantal detecteerbare muonen opleveren. Echter, voor een optimale selectie moet naast het verwachte aantal muonen van een GRB ook de achtergrond worden bepaald. Na een evaluatie op basis van de hypothesetest met gesimuleerde experimenten wordt de uiteindelijke selectie bepaald. Tijdens de twee GRB's die zijn geselecteerd, werd er geen enkel muon in de ANTARES neutrino telescoop waargenomen. Daarom zijn er limieten bepaald op de intensiteit van hoogenergetische γ -stralen uit de GRB's. Deze limieten kunnen geformuleerd worden als $\nu f_{\nu,90\%}(10 \text{ TeV}) = 4 \times 10^{-4} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Hoewel de ANTARES detector veel minder gevoelig is dan daarvoor ingerichte observatoria zoals HESS, Milagro, of MAGIC, biedt deze een breed en continu zicht op het heelal. Dat maakt het toch interessant om met ANTARES naar GRB's te kijken. Twee intense GRB's vonden kort na elkaar plaats in het blikveld van IceCube. Gezien de grootte van IceCube is het zinvol om dezelfde

analyse toe te passen.

Met toekomstige neutrino telescopen zoals de Gigaton Volume Detector (GVD) in het Baikal-meer en KM₃NeT in de Middellandse Zee zullen nog betere limieten bepaald kunnen worden of kan er zelfs een ontdekking worden gedaan. KM₃NeT komt naar verwachting in 2020 gereed. Een ander instrument dat mogelijk de beste kansen heeft om energetische γ -stralen uit GRB's te kunnen waarnemen is HAWC, dat een effectief oppervlak heeft van 10^5 m^2 bij $\epsilon_\gamma = 10^{13} \text{ eV}$ (Abeysekara et al., 2012) en een verwachte gevoeligheid van $\nu f_\nu \sim 10^{-7} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Dit is nog altijd ~ 10 keer minder gevoelig dan MAGIC en ~ 100 keer minder gevoelig dan HESS, maar HAWC heeft een zeer breed blikveld en is continu operationeel. Het is dus goed mogelijk dat met HAWC de eerste ontdekking van energetische γ -stralen uit GRB's zal worden gedaan zodra het gereed komt in 2014.