



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

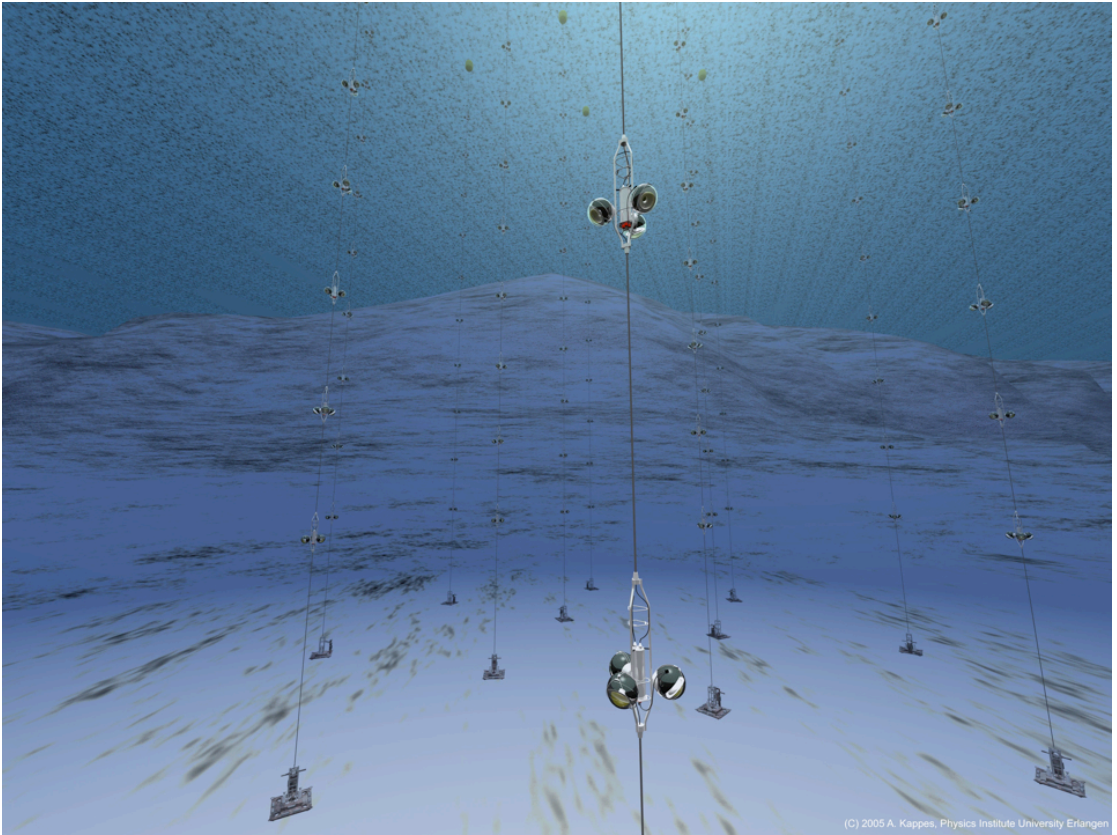
Issue Date: 2013-03-26

Ringkasan

DI DASAR Laut Tengah, pada kedalaman 2500 meter dari permukaan laut dan sekitar 40 km dari kota Toulon di Perancis Selatan, dapat ditemukan Teleskop Neutrino ANTARES. ANTARES adalah rangkaian detektor peka-cahaya yang diarahkan ke dasar laut untuk mendeteksi neutrino energi tinggi.

Neutrino adalah partikel yang berinteraksi sangat lemah dengan materi dan dengan demikian sangatlah sulit dideteksi. Neutrino energi-tinggi yang menembus seluruh Bumi dapat menghasilkan muon, yang akan bergerak dalam arah yang sama dengan neutrino asalnya. Muon tersebut akan bergerak lebih cepat dari kecepatan cahaya di air laut. Akibatnya, gelombang kejut elektromagnetik akan dihasilkan sepanjang jejak muon tersebut. Wujud gelombang kejut ini adalah pancaran radiasi koheren foton yang akan dipancarkan dalam sebuah sudut karakteristik relatif terhadap jejak muon tersebut. Radiasi koheren foton ini dinamakan foton Čerenkov. Detektor peka cahaya yang menyusun ANTARES dapat mendeteksi foton-foton ini. Dari posisi dan waktu saat foton-foton tersebut dideteksi, dapat direkonstruksi jejak muon yang menyebabkan gelombang kejut tersebut. Arah dari mana datangnya neutrino yang menghasilkan muon tersebut kemudian dapat ditentukan. Mendeteksi jejak yang bergerak naik menjauhi dasar laut akan memastikan bahwa partikel tersebut berasal dari neutrino, karena tidak ada partikel lain yang diketahui dapat menembus perut Bumi.

Salah satu tujuan pembangunan teleskop neutrino adalah untuk mencari sumber sinar kosmik berenergi tertinggi. Sinar kosmik adalah inti atomik yang telah terionisasi sepenuhnya. Setiap saat sinar kosmik menghujani Bumi dari segala arah, dengan energi merentang dari 10^8 eV hingga 10^{20} eV. Energi yang sangat ekstrim ini melebihi kemampuan akselerator partikel terbesar yang pernah dibuat manusia. Bagaimana partikel-partikel ini dapat dipercepat hingga mencapai energi yang begitu ekstrim dan dimanakah lokasi akselerator alami ini, hingga kini masih diperdebatkan. Menemukan lokasi akselerator alami ini akan dapat membantu kita memahami mekanisme pemercepatannya.



(C) 2005 A. Kappes, Physics Institute University Erlangen

Mencari lokasi dipercepatnya sinar kosmik dipersulit oleh kenyataan bahwa sinar kosmik memiliki muatan listrik dan oleh karena itu dapat dibelokkan oleh medan magnet (antar-)galaksi. Dengan demikian arah datangnya sinar kosmik tidak menunjuk balik ke sumbernya. Di lain sisi, sinar kosmik berenergi ekstrim tidak banyak terbelokkan dan akan menunjuk balik ke sumber asalnya. Persoalannya adalah jumlah mereka sangat kecil dan dibutuhkan waktu lama untuk dapat mendeteksinya dalam kurun waktu yang masuk akal.

Di sinilah bagaimana teleskop neutrino akan dapat membantu. Neutrino berenergi ultra-tinggi dapat muncul dari tumbukan sinar kosmik dengan materi di sekitar lokasi akselerasi. Proton yang dipercepat pada sumbernya dapat melesat dari gumpalan

Gambar 12.6: Sebuah gambaran pelukis mengenai Teleskop Neutrino ANTARES. Diskusi teknis mengenai ANTARES ditulis di Bab 6. Sumber: Alexander Kappes (Institut Fisika, Universitas Erlangen).



materi ini dan akan diamati di Bumi sebagai sinar kosmik, namun sebagian akan berinteraksi dengan gumpalan materi tersebut dan menghasilkan neutrino berenergi ultra-tinggi. Neutrino tidak bermuatan listrik dan oleh karena itu tidak terbelokkan oleh medan magnet. Mereka juga tidak diserap oleh materi karena berinteraksi sangat lemah. Oleh karena itu neutrino yang diamati di Bumi akan menunjuk balik ke lokasi di mana mereka dihasilkan.

KANDIDAT lokasi pemercepatan sinar kosmik yang paling menarik adalah Semburan Sinar Gamma (GRB). GRB adalah kilatan singkat sinar- γ , terjadi sekitar 1 kali sehari pada waktu dan lokasi di langit yang tak bisa diramalkan dan juga tak berulang kembali di lokasi yang sama. Di saat yang singkat ini radiasi sinar- γ dari GRB tersebut lebih terang dari sumber-sumber sinar- γ lainnya. Asal muasal GRB telah dipahami sebagai hasil dari kematian bintang masif atau bisa juga hasil penggabungan objek-objek kompak seperti lubang hitam atau bintang neutron. Apapun progenitor GRB, hasil akhirnya tetap sama yaitu sebuah bola api relativistik

Gambar 12.7: Sebuah gambaran pelukis mengenai Semburan Sinar-Gamma (GRB). Deskripsi aspek-aspek pengamatan dan teoritis GRB dapat ditemukan di Bab 1.2, sementara mekanisme produksi foton berenergi tinggi dari GRB didiskusikan di Bab 2.1. Sumber: ESO/A. Roquette.

yang mengembang di dalam materi antar bintang. Di dalam bola api ini, proton dipercepat hingga mencapai kecepatan relativistik dan melesat dari bola api tersebut sebagai sinar kosmik. Kaitan antara sinar kosmik dengan GRB hingga kini masih belum dapat dibuktikan. Banyak model GRB meramalkan penciptaan neutrino energi-tinggi yang dapat dideteksi oleh teleskop neutrino skala besar. Menemukan sumber-sumber yang memancarkan neutrino berenergi tinggi dapat memastikan sumber pemercepatan sinar kosmik.

Sinar kosmik juga dapat berinteraksi dengan bola api tersebut dan menghasilkan foton berenergi sangat tinggi. Foton ini, yang berenergi 10^{12} eV ke atas, juga dapat dideteksi oleh teleskop neutrino. Saat mencapai Bumi, foton-foton ini akan berinteraksi dengan atmosfer dan menghasilkan muon, yang akan bergerak menembus kedalaman laut. Mereka akan kehilangan energinya saat menembus laut, namun apabila cukup enerjik mereka masih akan dapat menimbulkan gelombang kejut elektromagnetik. Dengan demikian, dengan melihat ke langit sebagaimana biasa dilakukan astronom foton dan bukan ke tanah seperti yang dilakukan astronom neutrino, sebuah teleskop neutrino memiliki fungsi sekunder sebagai teleskop sinar- γ . Teleskop neutrino memiliki medan pandang yang sangat luas dan beroperasi terus-menerus mengambil data 24 jam sehari, 7 hari seminggu. Dua kemampuan ini menjadikan mereka instrumen yang cocok untuk mengamati GRB.

Ide untuk mengoperasikan sebuah teleskop neutrino sebagai teleskop sinar- γ sudah dicetuskan semenjak lama, namun baru pertama kalinya diterapkan untuk ANTARES. Dengan adanya teleskop neutrino bervolume sangat besar seperti IceCube di Kutub Selatan dan pembangunan teleskop neutrino KM₃NeT di masa depan, maka penerapan ide ini menjadi lebih relevan. Detektor berukuran besar dibutuhkan tidak hanya karena di dalam hujan partikel di atmosfer yang diakibatkan oleh foton, muon yang dihasilkan sangat kecil jumlahnya, namun juga karena foton-foton berenergi tinggi diserap oleh foton inframerah dalam perjalanannya ke Bumi.

LANGKAH pertama dalam menjelajahi prospek penggunaan teleskop neutrino sebagai teleskop sinar- γ adalah dengan memperki-

rakan jumlah muon yang dapat dideteksi detektor. Sejumlah faktor harus diperhitungkan: Jumlah intrinsik foton berenergi tinggi yang dihasilkan oleh GRB itu sendiri, jumlah foton yang diserap oleh foton inframerah sekitar dalam perjalanan dari sumber ke Bumi, jumlah muon dihasilkan dalam interaksi foton tersebut dengan nukleus di atmosfer Bumi, dan hilangnya energi muon dalam penjalanan di laut.

Bagian Pertama disertasi ini difokuskan untuk menjawab langkah pertama ini. Jumlah intrinsik foton energi tinggi yang dihasilkan dari sebuah GRB bergantung dari jaraknya, dinyatakan dengan pergeseran merah (*redshift*) z , dan bagaimana wujud spektrum energi foton GRB tersebut. Dari model dapat diperkirakan pula kedekatan alam semesta terhadap foton berenergi tinggi sebagai fungsi energi dan jarak sumber.

Produksi muon dalam hujan partikel yang diakibatkan oleh foton dihitung dengan mengidentifikasi dua saluran yang paling dominan. Saluran pertama adalah melalui produksi dan peluruhan pion. Spektrum energi muon yang berasal dari saluran ini telah dihitung oleh Drees, Halzen & Hikasa (1989) untuk spektrum energi foton yang menaati fungsi ϵ_γ^{-2} , dan telah digeneralisir untuk sembarang indeks spektrum oleh Halzen, Kappes & Ó Murchadha (2009).

Saluran kedua adalah produksi langsung pasangan muon dari interaksi foton energi tinggi dengan nuklei atmosfer. Penampang silang untuk produksi pasangan lepton telah dihitung oleh Bethe & Heitler (1934) untuk kasus elektron. Perhitungan ini telah diterapkan untuk kasus muon oleh Halzen, Kappes & Ó Murchadha (2009).

Spektrum energi muon yang diproduksi dari kedua saluran ini dapat dihitung. Untuk muon berenergi rendah, saluran yang dominan adalah peluruhan pion, namun jumlah muon energi tinggi yang dapat dihasilkan melalui saluran ini menurun drastis seiring meningkatnya energi. Untuk energi lebih tinggi dari 1 TeV, saluran produksi muon yang dominan adalah produksi pasangan karena penampang silang reaksi ini meningkat seiring dengan meningkatnya energi foton, sebelum dicapai titik saturasi pada $\epsilon_\gamma \gtrsim 10$ TeV.

Ketika muon merambat di kedalaman laut, mereka akan kehi-

langan energi melalui proses ionisasi dan radiatif. Ini adalah proses stokastik yang dapat dievaluasi dengan simulasi Monte Carlo, namun laju rata-rata hilangnya energi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan standar hilangnya energi muon (Barrett et al., 1952). Dengan formula ini, hubungan antara energi muon di permukaan laut dan energi pada kedalaman tertentu dapat dihitung. Dengan demikian kita dapat menghitung spektrum energi muon pada kedalaman detektor.

Dari hitungan teoritis ini, tiga faktor terpenting dalam mendeteksi foton berenergi tinggi dari GRB telah diidentifikasi. Pergeseran merah z GRB menentukan jumlah foton berenergi tinggi yang masih tersisa dan tiba di Bumi, kerasnya spektrum energi foton menentukan apakah hujan partikel yang ditimbulkan akan berkembang atau menyusut, dan akhirnya ukuran detektor menentukan jumlah muon yang dapat dideteksi. Apabila kita menggunakan GRB dengan parameter fisis rata-rata, ditemukan bahwa teleskop neutrino berukuran ANTARES dapat mendeteksi foton berenergi tinggi apabila GRB tersebut terletak pada $z \lesssim 0.05$. Teleskop yang berukuran lebih besar, dengan permukaan efektif muon $A_{\mu}^{\text{eff}} = 1 \text{ km}^2$ dapat mengamati hingga $z \sim 0.1$.

UNTUK memahami bagaimana respons ANTARES terhadap sinyal muon yang bergerak ke bawah, dibutuhkan simulasi Monte Carlo. Ini adalah pembahasan utama Bagian Kedua. Untuk meningkatkan waktu komputasi, simulasi dilakukan hanya di lingkungan sekitar detektor. Volume ini didefinisikan sebagai sebuah silinder yang berpusat pada detektor. Ukuran silinder ini mencakup seluruh detektor dengan batas beberapa kali panjang penyerapan cahaya. Dengan definisi ini, foton Čerenkov yang berada di luar silinder tidak dapat mencapai detektor dan demikian tidak perlu disimulasikan.

Di atmosfer, beberapa muon dapat diproduksi sekaligus dalam bundel. Bundel muon ini bergerak bersanding dan direkonstruksi dengan kualitas yang lebih rendah dari jejak muon tunggal. Seberapa sering bundel muon berenergi tinggi ini muncul, dapat ditentukan dengan menggunakan paket simulasi produksi muon di atmosfer, misalnya paket CORSIKA. Simulasi CORSIKA menunjukkan bahwa kemunculan bundel muon yang dapat menembus

kedalaman detektor sangatlah jarang. Sebagian besar muon yang mencapai detektor adalah muon tunggal. Oleh karena itu studi respons detektor dilakukan dengan menggunakan muon tunggal.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa ANTARES dapat dengan akurat merekonstruksi jejak muon yang bergerak ke bawah, meskipun dengan efisiensi yang lebih rendah apabila dibandingkan dengan rekonstruksi jejak muon yang bergerak ke atas. Ini karena detektor peka cahaya yang menyusun ANTARES diarahkan ke bawah untuk memaksimalkan pendeteksian cahaya dari jejak yang bergerak ke atas. Luas permukaan efektif foton ANTARES ditemukan sekitar 1 m^2 pada energi 5 TeV. Apabila efek detektor diikutkan, kepekaan ANTARES terhadap GRB rata-rata hanya sampai $z \sim 0.01$.

Dari simulasi ini kita juga dapat menentukan resolusi detektor. Resolusi detektor dapat ditentukan dengan cara menghitung sudut ruang antara jejak sinyal muon yang direkonstruksi dengan posisi GRB. Derau, yaitu muon yang diproduksi dari interaksi sinar kosmik dengan nuklei atmosfer, dapat dipelajari dengan menggunakan data yang telah diambil ANTARES. Dengan menggunakan set data yang diambil pada tahun 2008, ketika ANTARES mengambil data dengan kemampuan maksimal, ditemukan bahwa distribusi anguler dari kejadian-kejadian derau dapat didekati dengan fungsi konstan, dengan asumsi hanya bukaan sudut yang kecil yang dipertimbangkan. Dengan menggunakan dua bahan ini, dapat dilakukan pengujian hipotesis untuk menguji kesesuaian data dengan hipotesis hanya-derau atau hipotesis sinyal-tambah-derau. Dari analisis ini ditemukan bahwa hanya dengan mendeteksi 5 kejadian sinyal, maka sudah diperoleh 90% kebolehjadian untuk membuat penemuan dengan signifikansi 3σ .

USAHA pertama untuk menemukan foton berenergi tinggi dari GRB dengan menggunakan teleskop neutrino dijabarkan dalam Bagian Ketiga. Pertama-pertama dari berbagai sumber dikumpulkan daftar GRB yang selama ini telah dideteksi semenjak pendirian ANTARES. Selanjutnya jumlah muon yang dapat dideteksi dari GRB-GRB ini kemudian dihitung. GRB yang paling prospektif adalah mereka yang diharapkan memancarkan sinyal dalam jumlah terbesar.

Untuk memperoleh seleksi kualitas optimum yang dapat memaksimalkan potensi deteksi, kita harus memperkirakan jumlah kejadian sinyal dan derau. Jumlah kejadian sinyal dapat diperkirakan dengan melakukan simulasi Monte Carlo penuh dari atas atmosfer hingga volume detektor di bawah laut, sementara jumlah kejadian derau diperkirakan dengan menganalisis data yang diambil ANTARES pada saat terjadinya GRB yang dianalisis. Setelah seleksi kualitas optimum telah ditemukan, data yang beririsan dengan terjadinya GRB kemudian diamati.

Dari dua GRB yang diamati, tidak ada kejadian apapun diamati pada saat GRB terjadi. Sebuah limit dengan tingkat keyakinan 90% telah diberikan, yaitu $\nu f_{\nu,90\%}(10 \text{ TeV}) = 4 \times 10^{-4} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Hasil ini menunjukkan bahwa ANTARES masih jauh kurang sensitif dibandingkan observatorium sinar- γ landas-Bumi lainnya seperti HESS, *Milagro*, atau MAGIC.

Dua GRB yang sangat dekat terjadi dalam medan pandang IceCube. Sebagai teleskop neutrino terbesar di dunia, IceCube harus mengamati kedua GRB ini. Dengan kapabilitas IceCube, mereka akan memperoleh limit yang menarik.

Teleskop-teleskop neutrino di masa depan, seperti *Gigaton Volume Detector* (GVD) di Danau Baikal dan KM_3NeT di Laut Tengah akan memiliki kesempatan yang lebih serius untuk menaruh limit yang lebih ketat terhadap pancaran foton berenergi tinggi dari GRB, atau bahkan membuat sebuah penemuan. KM_3NeT diharapkan akan selesai dibangun pada tahun 2020 dan diperkirakan akan mencakup volume sekitar $5\text{--}8 \text{ km}^3$. Instrumen lain yang kemungkinan memiliki kesempatan lebih baik untuk mengamati foton berenergi tinggi dari GRB adalah HAWC, yang memiliki luas permukaan efektif foton $A_{\gamma}^{\text{eff}} \sim 10^5 \text{ m}^2$ pada $\epsilon_{\gamma} = 10 \text{ TeV}$ (Abeysekera et al., 2012), dan kepekaannya diharapkan mencapai $\nu f_{\nu} \sim 10^{-7} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Ini masih ~ 10 kali lebih lemah daripada MAGIC dan ~ 100 kali lebih lemah daripada HESS, namun HAWC memiliki medan pandang yang sangat luas dan siklus kerja yang sangat tinggi. Boleh jadi HAWC akan membuat penemuan pertama foton berenergi tinggi dari GRB setelah penyelesaian pembangunannya pada tahun 2014.