



Ereignisrekonstruktion für das ANTARES Neutrino-teleskop

GISELA ANTON, RALF AUER, BETTINA HARTMANN, JÜRGEN HÖSSL, ALEXANDER KAPPES, ULI KATZ, CLAUDIO KOPPER, MELITTA NAUMANN-GODÓ, CHRISTOPHER NAUMANN

<http://www.antes.physik.uni-erlangen.de/>

Physikalisches Institut, Universität Erlangen-Nürnberg, Erwin-Rommel-Str. 1, 91058 Erlangen



Die ANTARES-Kollaboration baut derzeit vor der französischen Mittelmeerküste ein Teleskop zur Messung hochenergetischer Neutrinos aus kosmischen Quellen auf. Wechselwirkung eines dieser Neutrinos mit Materie, so werden Myonen, Elektronen und/oder Teilchenschauer erzeugt. Da sich diese Teilchen im Wasser schneller als das Licht fortbewegen, emittieren sie Cherenkov-Strahlung, die dann mittels einer Reihe von Photomultipliern gemessen werden kann.

Unsere Studien konzentrieren sich auf die Rekonstruktion des Wechselwirkungspunktes, der Richtung des Neutrinos und dessen Energie. Verschiedene Strategien berücksichtigen die unterschiedlichen Geometrien der Ereignistypen, kausale Zusammenhänge, Amplitudeninformationen und Treffer-Korrelationen. Dadurch ist eine effiziente Rekonstruktion, auch bei Vorhandensein von optischem Untergrund, möglich.



bmb+f - Förderschwerpunkt

Astroteilchenphysik

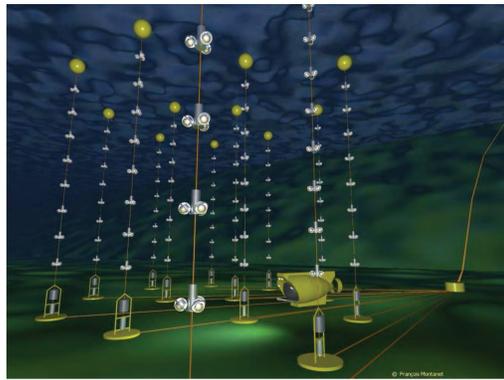
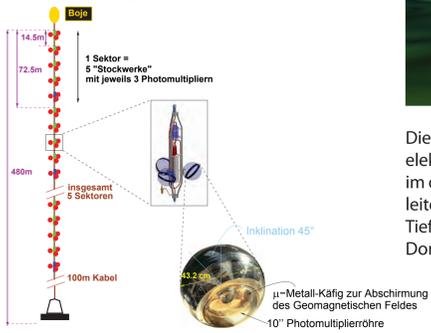
Großgeräte der physikalischen Grundlagenforschung

Das ANTARES Neutrino-teleskop

Das ANTARES Unterwasser-Neutrino-teleskop wird derzeit 40 km vor der französischen Mittelmeerküste (bei Toulon) in einer Tiefe von 2400 m aufgebaut.

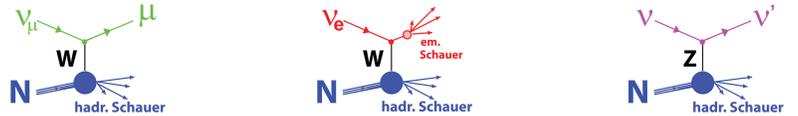
900 „optische Module“ (OMs) werden an 12 sog. Strings angebracht, um den Cherenkov-Lichtkegel zu messen, welcher von Sekundärteilchen aus Neutrino-Reaktionen stammt, die sich schneller als das Licht durch das Wasser bewegen.

ANTARES-String

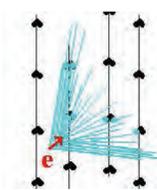
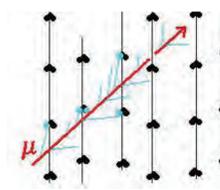


Die erzeugten Photonen werden von jedem Photomultiplier in elektrische Signale gewandelt. Diese Signale werden dann direkt im optischen Modul digitalisiert und an die Verteiler-Box weitergeleitet, von wo aus sie wiederum über Glasfaserleitung in einem Tiefseekabel an die Küstenstation gesendet werden. Dort findet dann die Weiterverarbeitung der Daten statt.

Neutrino-Wechselwirkungen



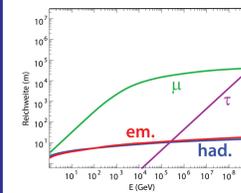
Wechselwirkung eines Myon-Neutrinos über den geladenen Strom -> Myon-Spur und hadr. Schauer
Wechselwirkung eines Elektron-Neutrinos über den geladenen Strom -> elektromagnetischer und hadr. Schauer
Neutralstrom-Prozess -> hadronischer Schauer



Ziel bei allen Ereignistypen: **Rekonstruktion der Energie und der Richtung** (unter Verwendung des rekonstruierten Vertex/Wechselwirkungspunktes)

Myon-Ereignisse: Rekonstruktion der relativ langen Myon-Spur

Elektron- bzw. Neutralstrom-Ereignisse: Hier ist die Rekonstruktion nur über die Rekonstruktion der Geometrie des Cherenkov-Kegels möglich



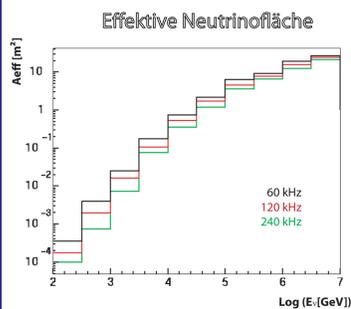
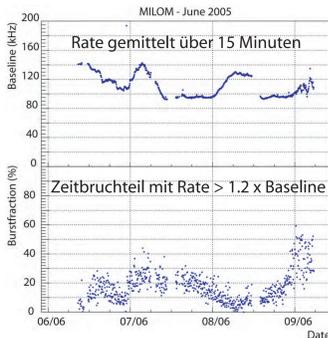
Die Reichweite von Myonen in Wasser ist bis zu 1000 mal größer als diejenige von elektromagnetischen oder hadronischen Schauern. => Schauer können als praktisch „punktartige“ Ereignisse im Detektor betrachtet werden, da der Stringabstand ca. 60m beträgt.

Optischer Untergrund

Der optische Untergrund in der Tiefsee besteht aus einer kontinuierlichen Komponente (⁴⁰K-Zerfälle und Mikroorganismen)



und der **Burst-Komponente** aufgrund von Biolumineszenz-Aktivität.

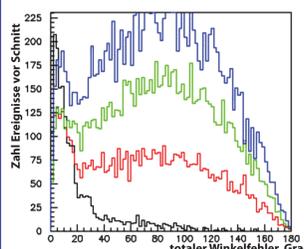


Durch an den aktuellen Untergrund angepasste Rekonstruktionsalgorithmen und Schnitte kann der optische Untergrund herausgefiltert werden. Dies führt jedoch bei hohen Rauschraten und insbesondere niedrigen Energien zu leichten Einbußen in der effektiven Detektorfläche.

Unterdrückung des optischen Untergrunds für elektromagnetische und hadronische Schauer

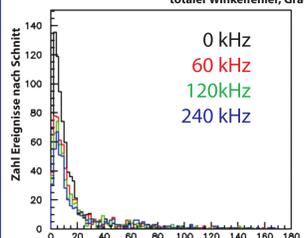
für elektromagnetische und hadronische Schauer

- 1) Vor-Rekonstruktion mit mehreren reduzierten Treffer-Sätzen
- 2) Untersuchung der übrigen Ereignistreffer auf **Kausalität**
- 3) Vollständige Rekonstruktion mit erweitertem Hit-Sample
- 4) Schnitt auf **Qualitätsparameter** (Trefferverteilung, Konsistenz) beseitigt schlechte Ereignisse nachträglich



Beispiel: MC-Winkelfehler für ν_e CC bei 1TeV und - ohne Untergrund - 60 kHz, 120kHz und - 240 kHz Einzelrate pro Photomultiplier (= "Baseline")

Stark dominiert durch Untergrundereignisse!



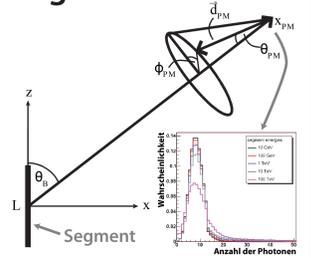
Dasselbe Ereignissample nach Qualitätsschnitten:

Rekonstruktionsqualität nahezu **unabhängig** von Untergrundrate bis mindestens 240 kHz

Gesamtwinkelfehler unter 10° so möglich

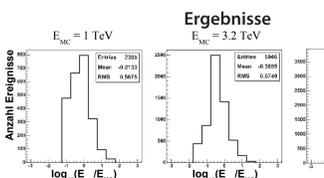
Strategie zur Rekonstruktion der Myon-Energie

Idee: Wenn die Wahrscheinlichkeit $P(n|E)$ zur Messung einer bestimmten Anzahl von Cherenkov-Photonen in jedem Photomultiplier in Abhängigkeit von der Myon-Energie E bekannt ist: => Likelihood-Maximierung in Abhängigkeit von E => Bestimmung von E



Voraussetzung: Spur (Richtung und Startpunkt) ist bereits rekonstruiert

Zunächst: Wahrscheinlichkeitsverteilungen für ein „Segment“ der Myon-Spur mit Länge $L=1m$. **Dazu:** Simulation vieler (ca. 10000) Segmente gleicher Energie mit GEANT4-basierter Simulation. Wahrscheinlichkeiten zur Messung einer bestimmten Zahl von Photonen werden in festgelegten Abständen und Orientierungen zum Segment festgehalten, Zwischenwerte durch Interpolation erzeugt. Die Simulation erfolgt bei verschiedenen Energien. Anschließend wird aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Segmente die Verteilung für eine komplette Spur durch diskrete Faltung erzeugt.



Rekonstruktion ist auch unter Einbeziehung des Untergrundes aus z.B. ⁴⁰K-Zerfall möglich.

Rekonstruktionsstrategie für Neutralstrom-Ereignisse

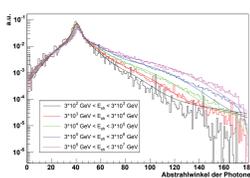


Abbildung 1: Photonabstrahlwinkel für verschiedene Schauerenergien, und zugehörige Fitfunktion.

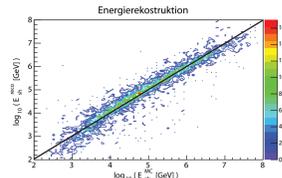


Abbildung 2: Ergebnisse der Energie- und Winklerekonstruktion, nach Schnitt auf Rekonstruktion im instrumentierten Volumen.

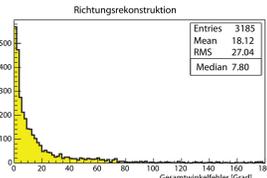


Abbildung 3: Effektives Volumen, nach der Rekonstruktion und nach dem Schnitt.

- Ereignissample: 4500 Ereignisse von 10² - 10⁸ GeV im instrumentierten Volumen
- 60 kHz Untergrund, Unterdrückung durch Selektion lokaler Koinzidenzen
- berechne Ereignisschwerpunkt => Ort der Interaktion
- Startwerte für Richtung und Energie aus sehr grobschichtiger Rasterung
- für gegebene Richtung und Energie: berechne für jedes Optische Modul (OM) **erwartete Hitamplitude**
- Vergleich mit **gemessenen Amplituden** in den OMs
- Iteriere Richtung und Energie => **Maximum Likelihood Fit (MINUIT)**
- bei Berechnung zu berücksichtigen: Abstrahlrichtung der Photonen; Absorption; Winkelleffizienz der OMs
- Problem: Photonabstrahlung in Bezug auf Schauerachse nicht auf Cherenkovwinkel (wie bei Myonen), sondern breit verteilt (wegen Transversalbeiträgen des Schauers) und energieabhängig (siehe Grafik) => energieabhängige Parametrisierung der Verteilung erstellt.

Alternativer Ansatz zur Schauer-Rekonstruktion: Die Raster-Strategie

- kombinierte Energie- und Richtungsrekonstruktion mittels Log-Likelihood-Methode (L) unter Verwendung eines speziellen Minimierungsverfahrens:
 - $L(E, \theta, \phi)$ zeigt i.A. große Anzahl an Minima
 - Minimierungs-Strategie muss trotzdem **absolutes** Minimum finden. Dazu Ausnutzung der Tatsache, daß kleine Änderungen in θ, ϕ, E nur kleine Änderungen der Log-Likelihood bewirken können, d.h. es gibt keine δ -artigen Minima, sondern relativ weiträumige Minimumsregionen (blaue Bereiche um violette Minima)
 - Einteilung des gesamten Parameterraumes in Unterräume und iterative Reduzierung selbiger anhand von Stichproben der Likelihood-Werte bis nur noch ein beliebig kleiner Bereich um globales Minimum übrig bleibt!
- **Ortsrekonstruktion** nicht per algebraischer Rekonstruktion, sondern ebenfalls via Likelihood-Fit!
 - gleiches Minimierungsverfahren kann verwendet werden
 - Orts-, Richtungs- und Energierekonstruktion können später zusammen gefittet werden (d.h. ein schlecht rekonstruierter Ort führt nicht zwingend zu schlechter Energie- und Richtungsrekonstruktion, sondern wird ebenfalls iterativ verbessert!)
- **Derzeitige Ergebnisse:**

