

Neutrinoastronomie: Experimente und ihre Ergebnisse

Benedikt Bergmann

15.07.2010

Scheinseminar: Astroteilchenphysik im Sommersemester 2010
an der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen

Neutrinoastronomie: Experimente und ihre Ergebnisse

Überblick:

1. Ziele der Neutrinoastronomie
2. Funktionsweise der Neutrino teleskope
3. Aktuelle Experimente und ihre Ergebnisse
4. Ausblick: Kubikkilometer Teleskop im Mittelmeer

Ziele der Neutrinoastronomie

Untersuchungen der Neutrinoastronomie

- Punktquellen
 - Ursprung und Beschleunigung der Kosmischen Strahlung
 - Entdeckung neuer Objekte
- Indirekte Dunkle Materie Suche (WIMP-Annihilation)
- Eigenschaften der Neutrinos (Oszillationen, etc.)
- Exotische Phänomene
 - Magnetische Monopole
 - Nuclearites
 - Verletzung der Lorentz-Invarianz
-

Woher kommen Neutrinos?

Extragalaktisch:

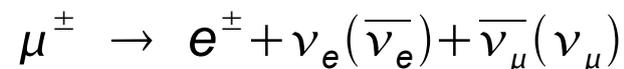
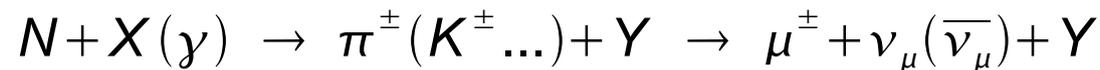
- Aktive Galaktische Kerne (AGN)
- Gamma Ray Bursts (GRB)

Galaktisch:

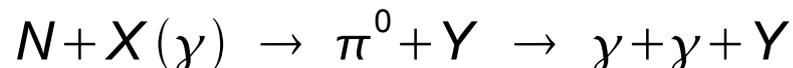
- Supernovaüberreste (SNRs)
- Pulsarwindnebel (PWNe)
- Galaktisches Zentrum (GC)
- Mikroquasare
- Magnetare

Wie entstehen dort Neutrinos?

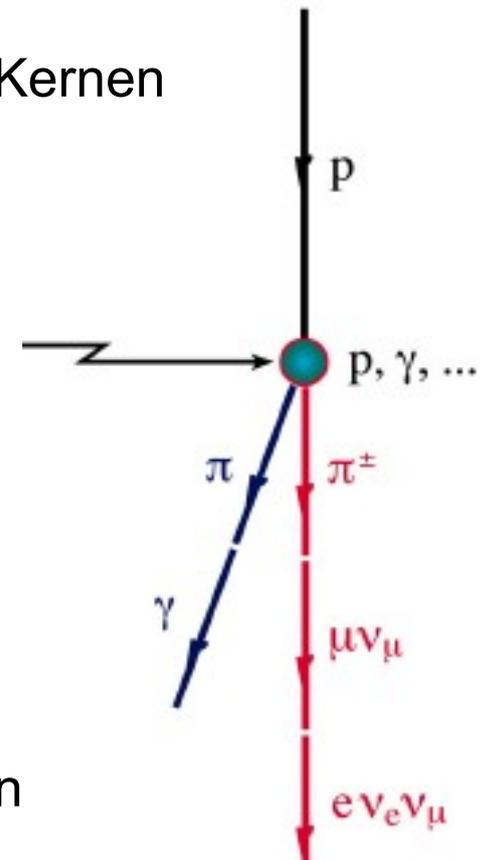
- Neutrinos aus Wechselwirkung von hochenergetischen Kernen mit Strahlung oder Materie (**hadronisches Modell**):



- Gleichzeitig findet γ -Produktion statt:

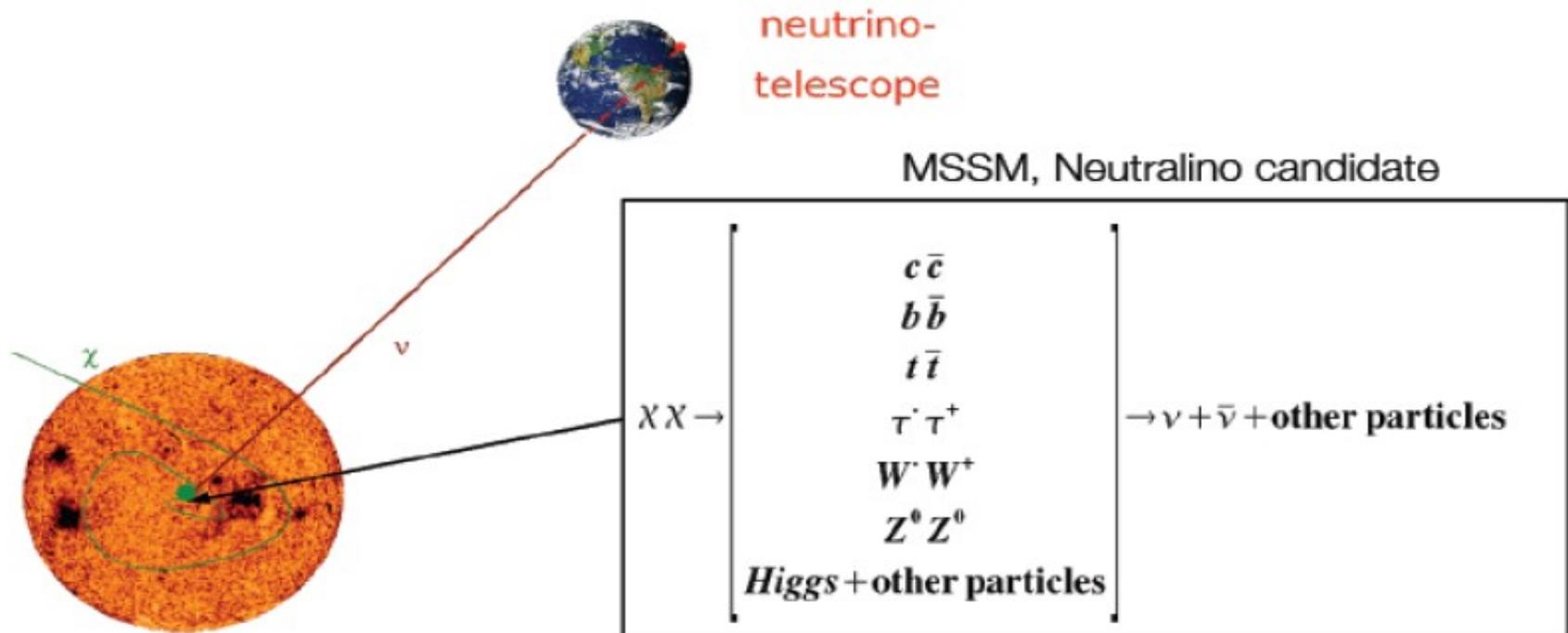


- Beschleunigung der kosmischen Strahlung erzeugt also Gammastrahlung und Neutrinos
- Gammastrahlung aber auch aus leptonischen Prozessen (inverse Comptonstreuung)

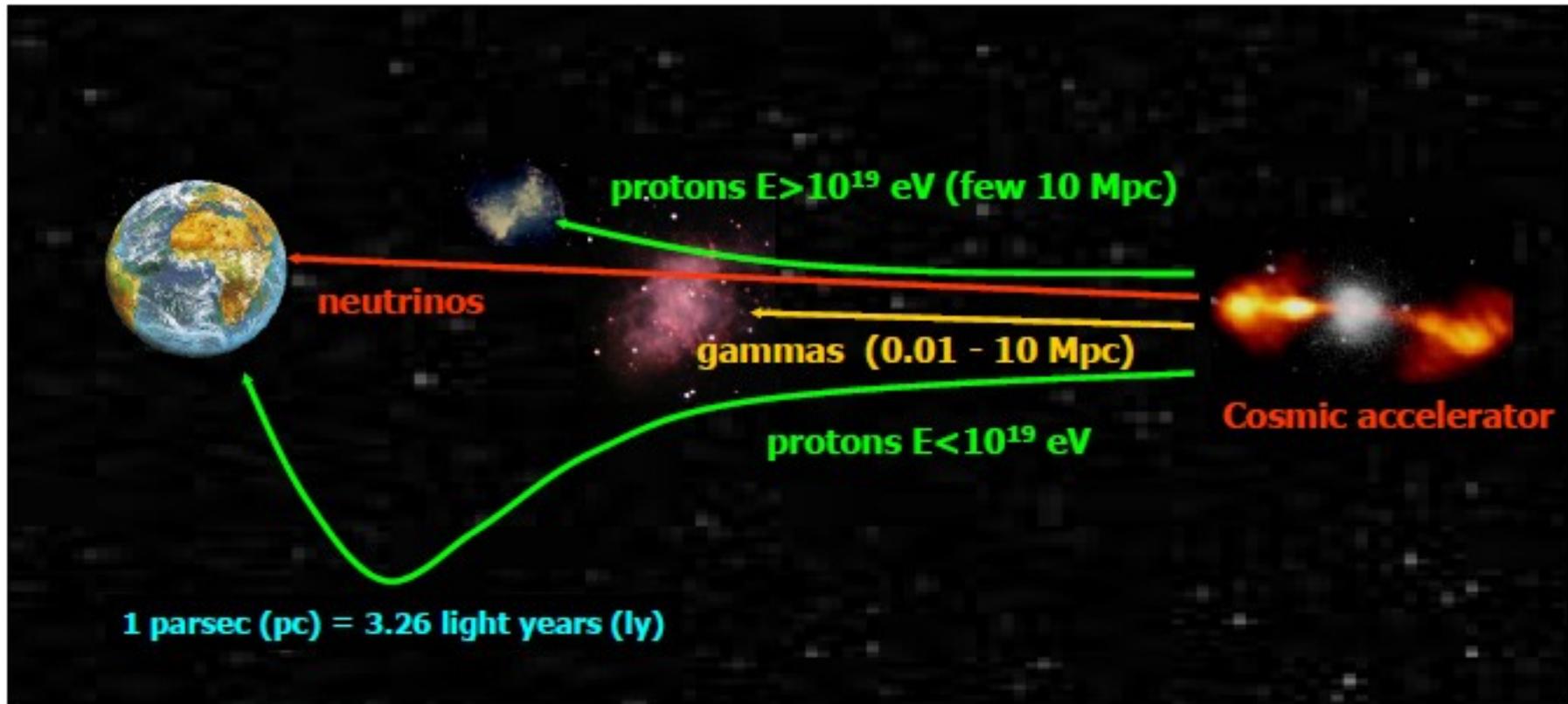


Dunkle Materie Annihilation

- Indirekte Suche: Neutrino als Zerfallsprodukt bei WIMP- Annihilation im Kern der Erde oder der Sonne
- Annihilationssignal: Statistisch signifikanter Überschuss von aufwärts fliegenden Neutrinos im Hintergrund der atmosphärischen Neutrino-induzierten Myonen aus Richtung Sonne oder der Erde
- Energie der Sekundärteilchen limitiert durch M_{WIMP}



Ausbreitung der Teilchen im Universum



- **Protonen und Kerne:** Ablenkung durch Magnetfelder; Reaktion mit Hintergrundstrahlung (GZK-Effekt)
- **Gammastrahlung:** Absorption durch Staub und Strahlung
- **Neutrinos:** Erreichen uns direkt von der Quelle, keine Absorption

Warum also Neutrinooteleskope?

Neutrinos weisen zurück auf die Quelle

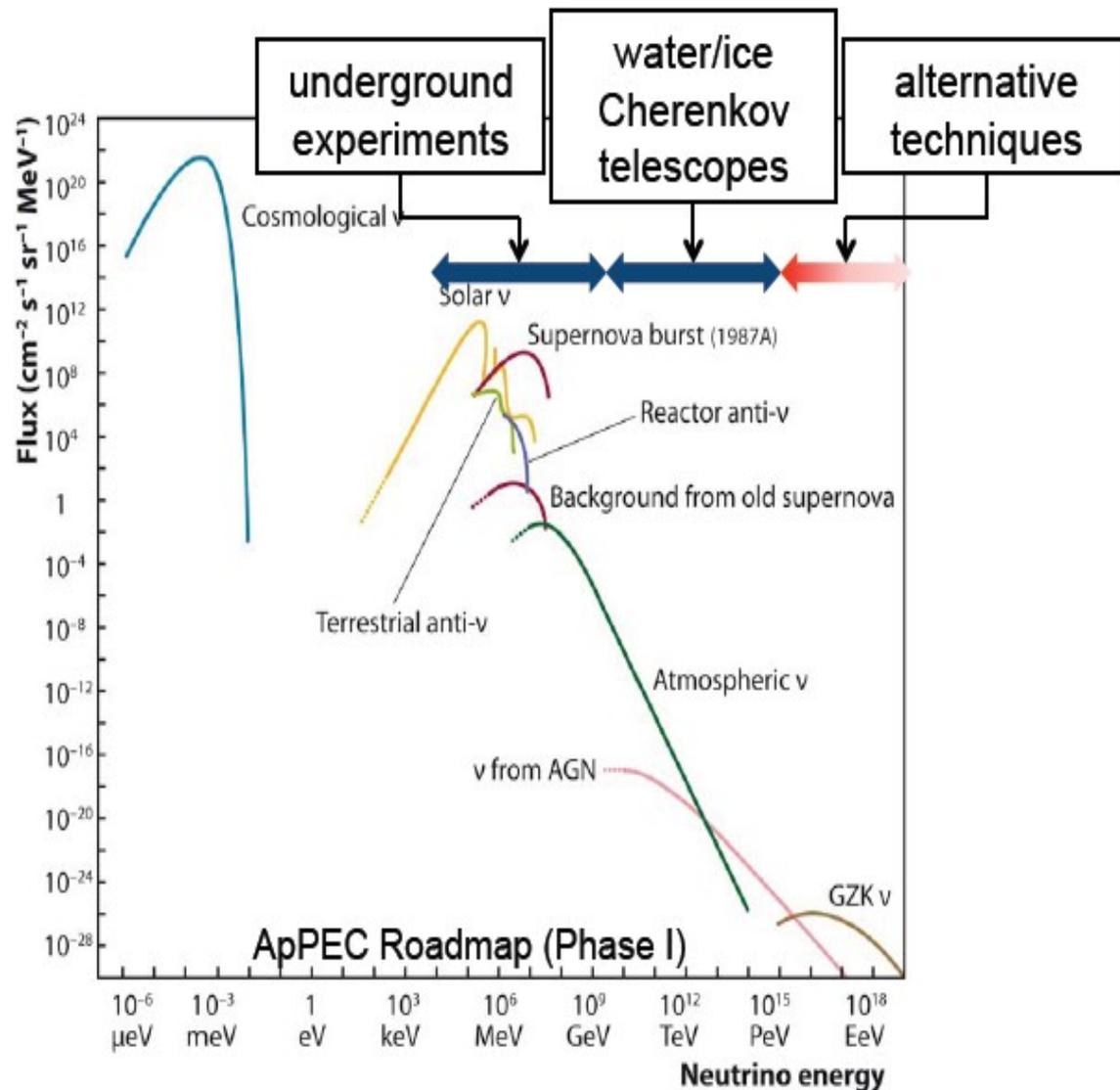
- Keine Absorption
- Keine Ablenkung durch Magnetfelder

Informationen über Vorgänge in der Quelle

- Entkommen aus dichten Regionen
 - Geringer Wirkungsquerschnitt (schwer detektierbar!)
- Photonen: nur Informationen über Photosphäre

Funktionsweise der Neutrinodetektoren

Nachweistechniken



Szintillatoren

- Reaktor-, solare Neutrinos
- Nachweis der γ aus e^+ -Annihilation

Radiochemische Nachweistechniken

- niederenergetische, solare Neutrinos
- Chlor-, Galliumdetektoren, u.a.

Cherenkovteleskope (Wasser, Eis)

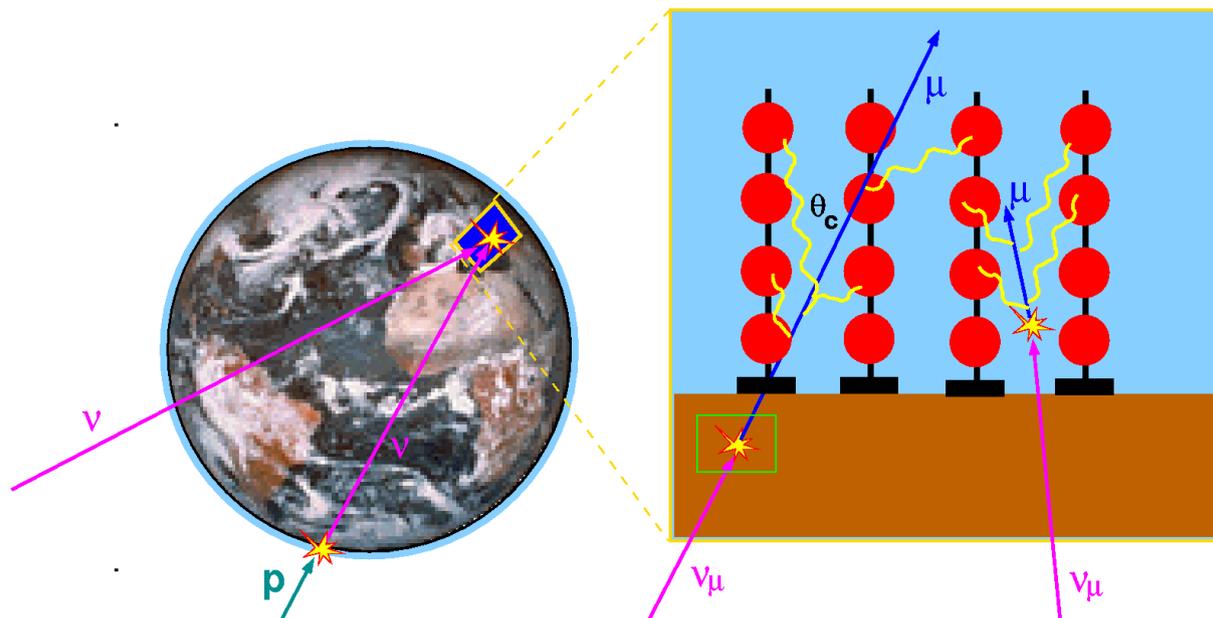
- Superkamiokande (SN 1987A), SNO
- Neutrinoastronomie

Alternative Methoden

- Radio
- Akustisch (aktuell getestet)

Funktionsweise der Cherenkovdetektoren

- Detektion des Cherenkov-Lichts der geladenen Sekundärteilchen beim Durchgang durch Wasser/Eis mittels einer Matrix aus Photomultipliern:
 - Spektralbereich: 350nm-500nm (Wasser transparent)
 - Abstrahlwinkel: $\theta_c = 43^\circ$ (Wasser) bzw. $\theta_c = 41^\circ$ (Eis)
- Rolle der Erde: Abschirmung gegen Teilchen aus Kosmischer Strahlung
- Atmosphäre: Hauptquelle der Entstehung weiterer Neutrinos (Hintergrund)



Einschub: Cherenkov-Strahlung

Emission von Cherenkovstrahlung:

- Geladenes Teilchen in transparentem Medium mit $V > c_{Medium}$
- Polarisation der Teilchen des Mediums entlang der Trajektorie (Dipolmoment)
- Für $V > c_{Medium}$ resultierendes elektrisches Dipolmoment das sich mit dem Teilchen mitbewegt (zeitlich veränderliches Dipolfeld)
- Kohärente Strahlung im Lichtkegel

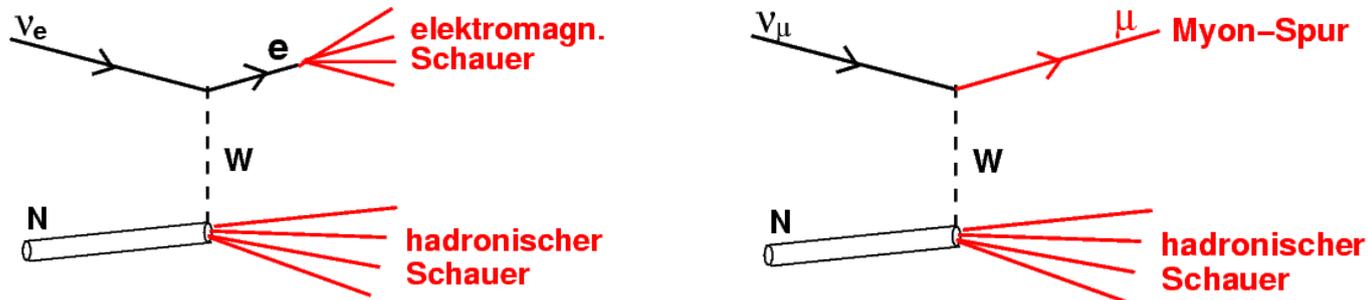
$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n} \quad (\beta \approx 1) \rightarrow \theta_c = 43^\circ (\text{Wasser}) = 41^\circ (\text{Eis})$$

- Anzahl der emittierten Cherenkov-Photonen:

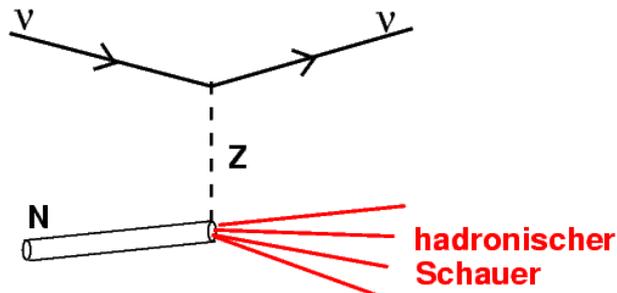
$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2} \right) \rightarrow \frac{dN}{dx} (\lambda = 300 - 600 \text{ nm}) = 3,5 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{m}}$$

Reaktionen der Neutrinos im Medium

- Neutrinos hauptsächlich aus π - μ -e-Zerfällen: $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$
- Auf Erde (nach Oszillation): $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1$
- CC (charged-current)-Reaktionen der schwachen Wechselwirkung $\nu_l + N \rightarrow l + X$

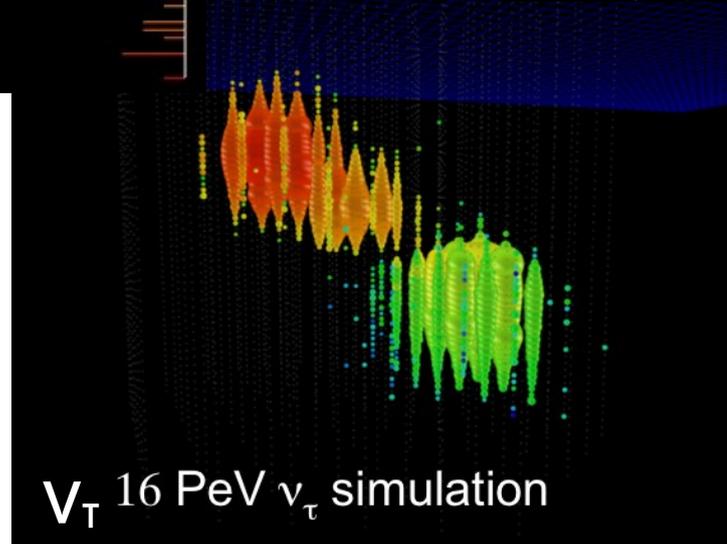
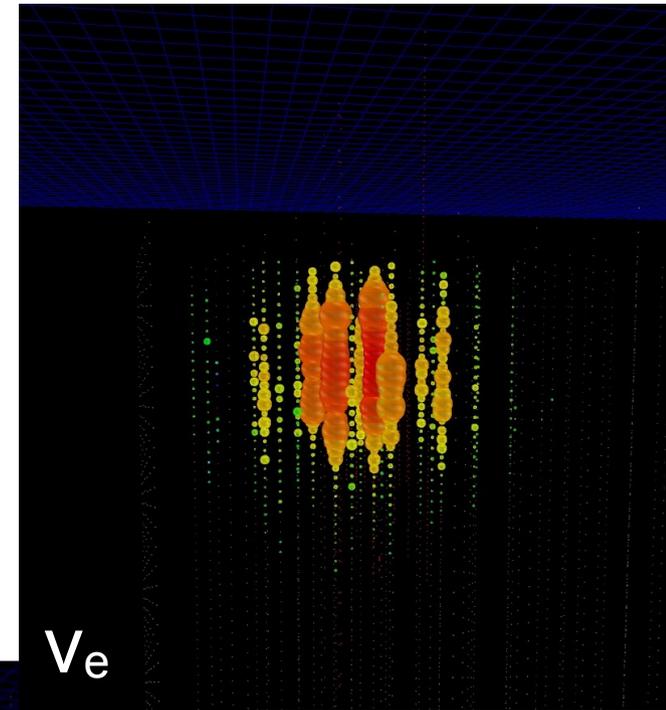
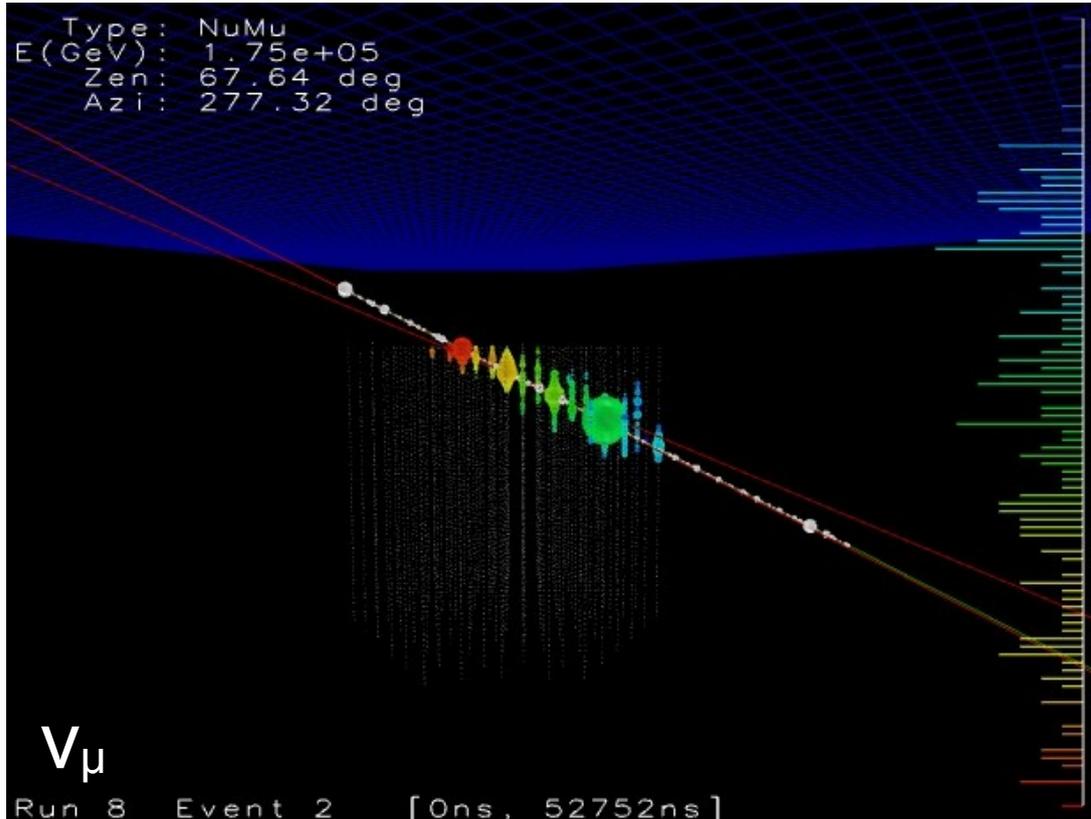


- NC (neutral-current)-Reaktionen der schwachen Wechselwirkung $\nu_l + N \rightarrow \nu_l + X$



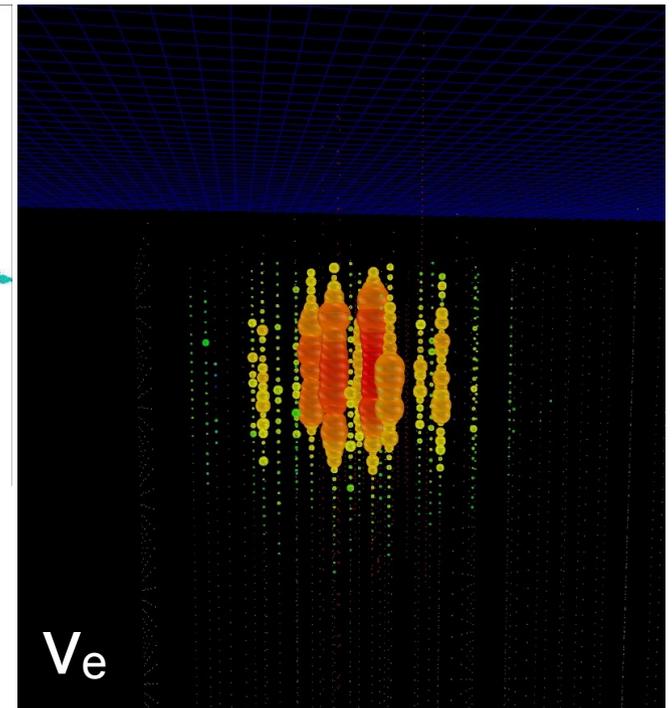
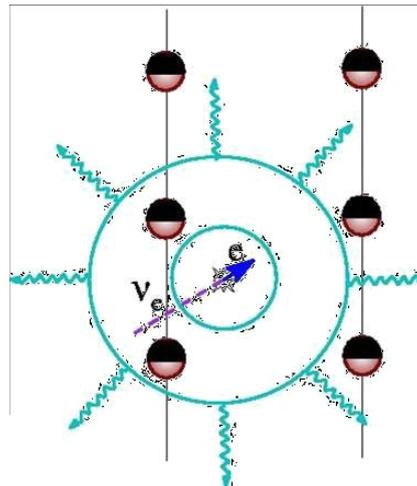
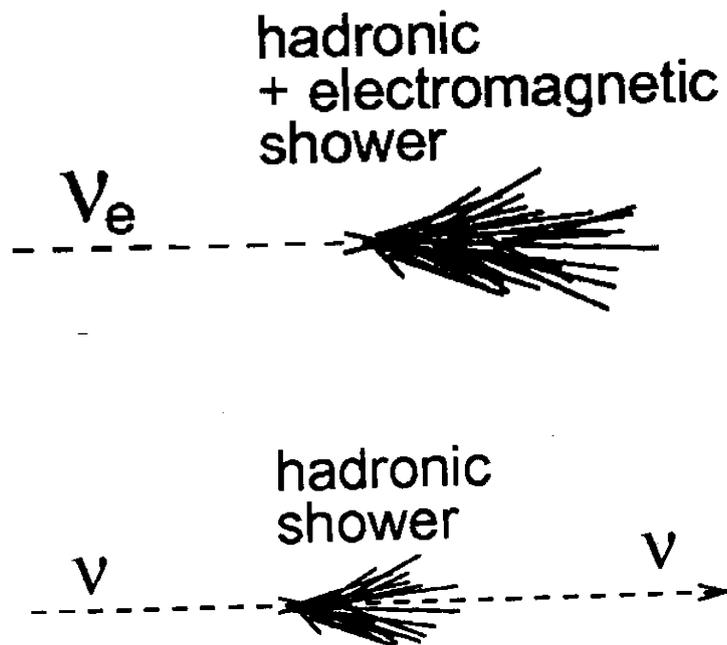
Flavor-Signaturen

IceCube-Simulationen (Übersicht)



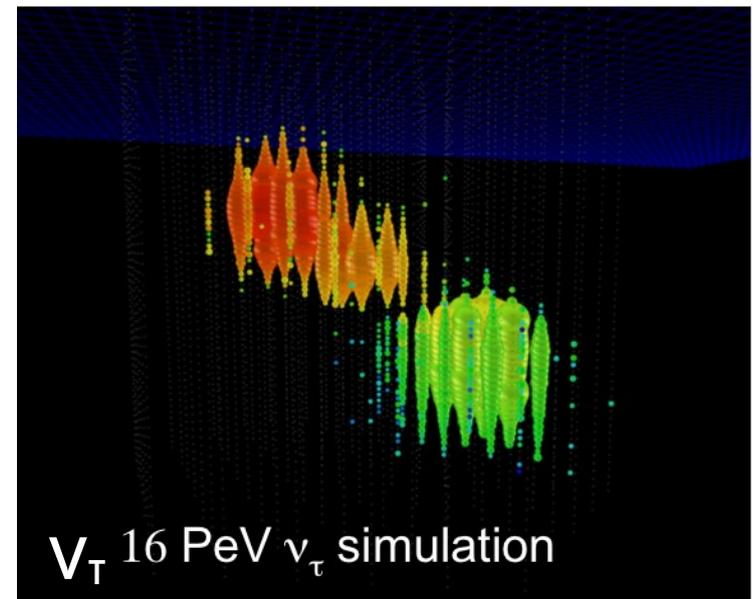
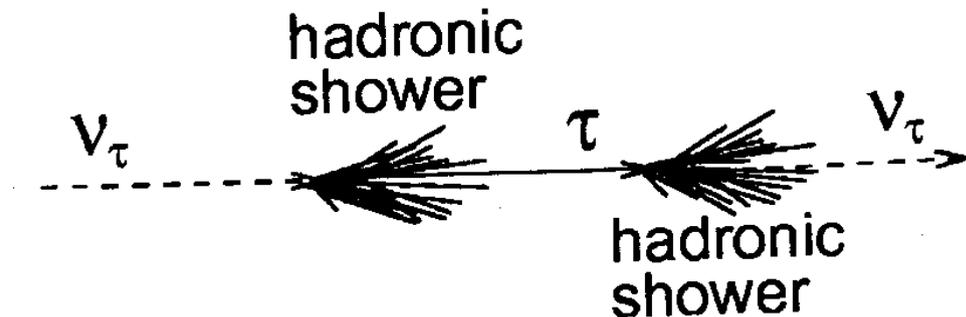
Elektron-Neutrino Detektion

- Elektromagnetische/Hadronische Schauer als Punktquelle der Cherenkov-Strahlung
- Richtungsauflösung $O(\text{einige } ^\circ)$
- Nicht unterscheidbar von NC-Kanälen



Tau-Neutrino-Detektion

- In ν_τ -CC-Reaktionen erzeugtes τ -Lepton legt Strecke (ja nach Energie im Bereich m-km) zurück und zerfällt anschließend (elm., hadr. Schauer)
 - Spur auflösbar für Energien größer als 1PeV
 - „double bang event“: beide Schauer vorhanden
 - „lollipop event“: Beginn oder Ende außerhalb des Detektors

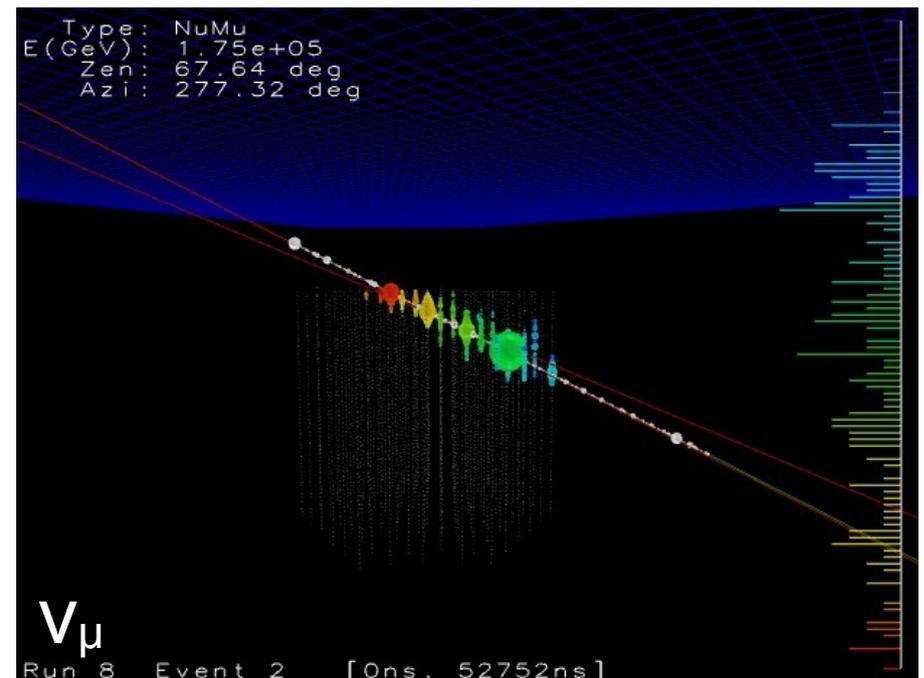
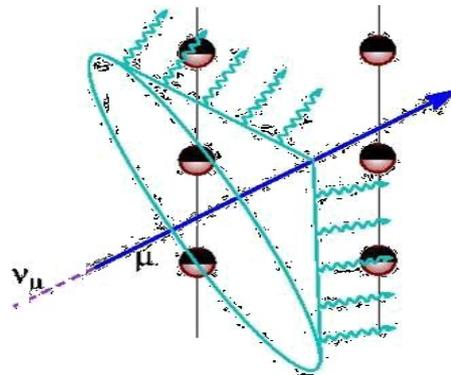


Myon-Neutrino Detektion

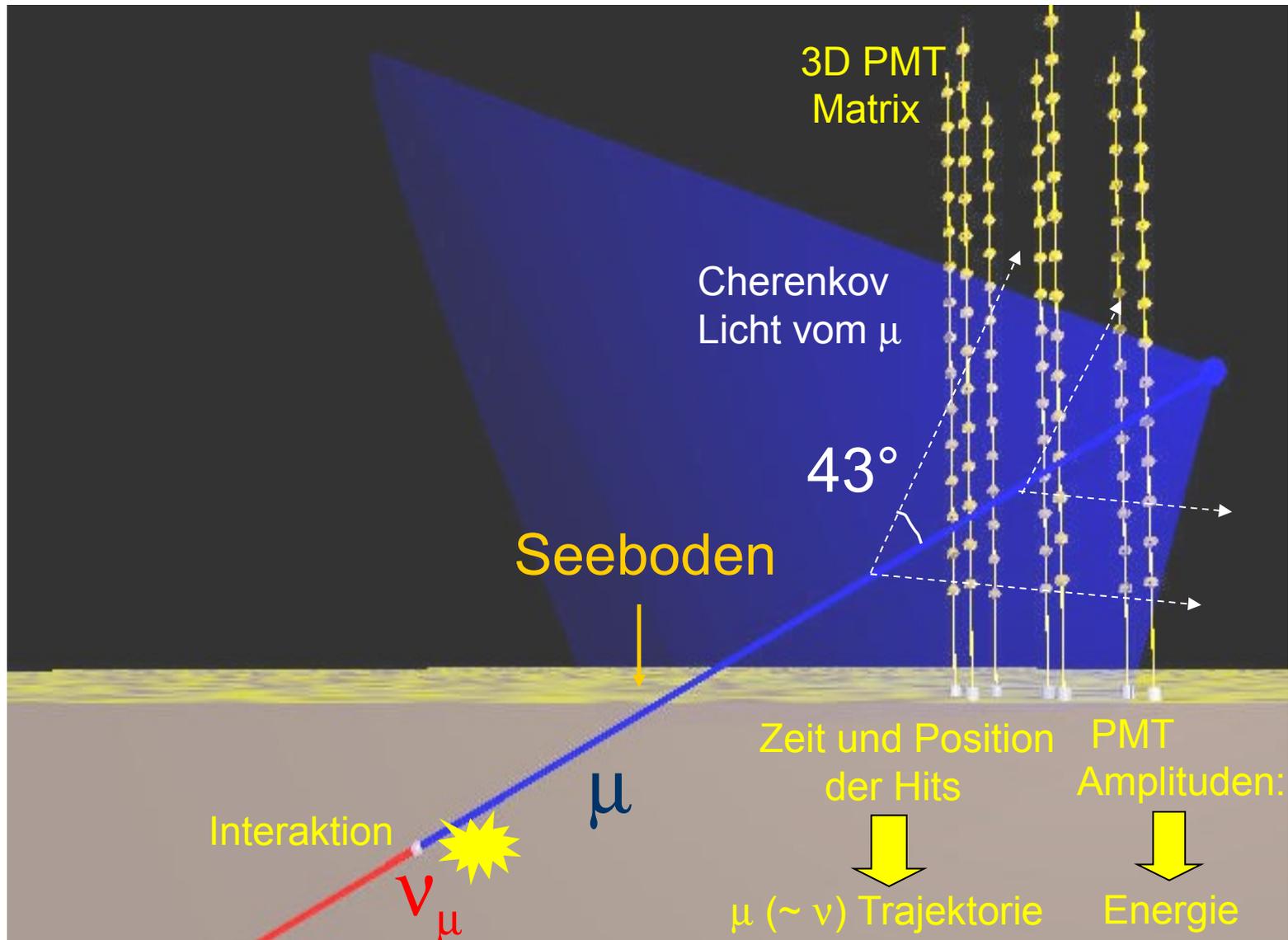
- Wichtigster Reaktionskanal für die Suche nach Punktquellen (Energien über $\sim 1\text{TeV}$), verwendet für Richtungs- und Energiebestimmung
- Durchschnittlicher Winkel zwischen einfallendem Neutrino und herauskommenden Myon kann genähert werden durch

$$\theta_{\mu\nu} \approx \frac{0,7^\circ}{E_\nu (\text{TeV})^{0,7}}$$

- Richtungsbestimmung auf $\sim 1^\circ$ (Eis) und $\sim 0,2^\circ$ (Wasser) möglich



Energie- und Richtungsbestimmung



Energie- und Richtungsbestimmung

Grobe Abschätzung der Myonen-Energie

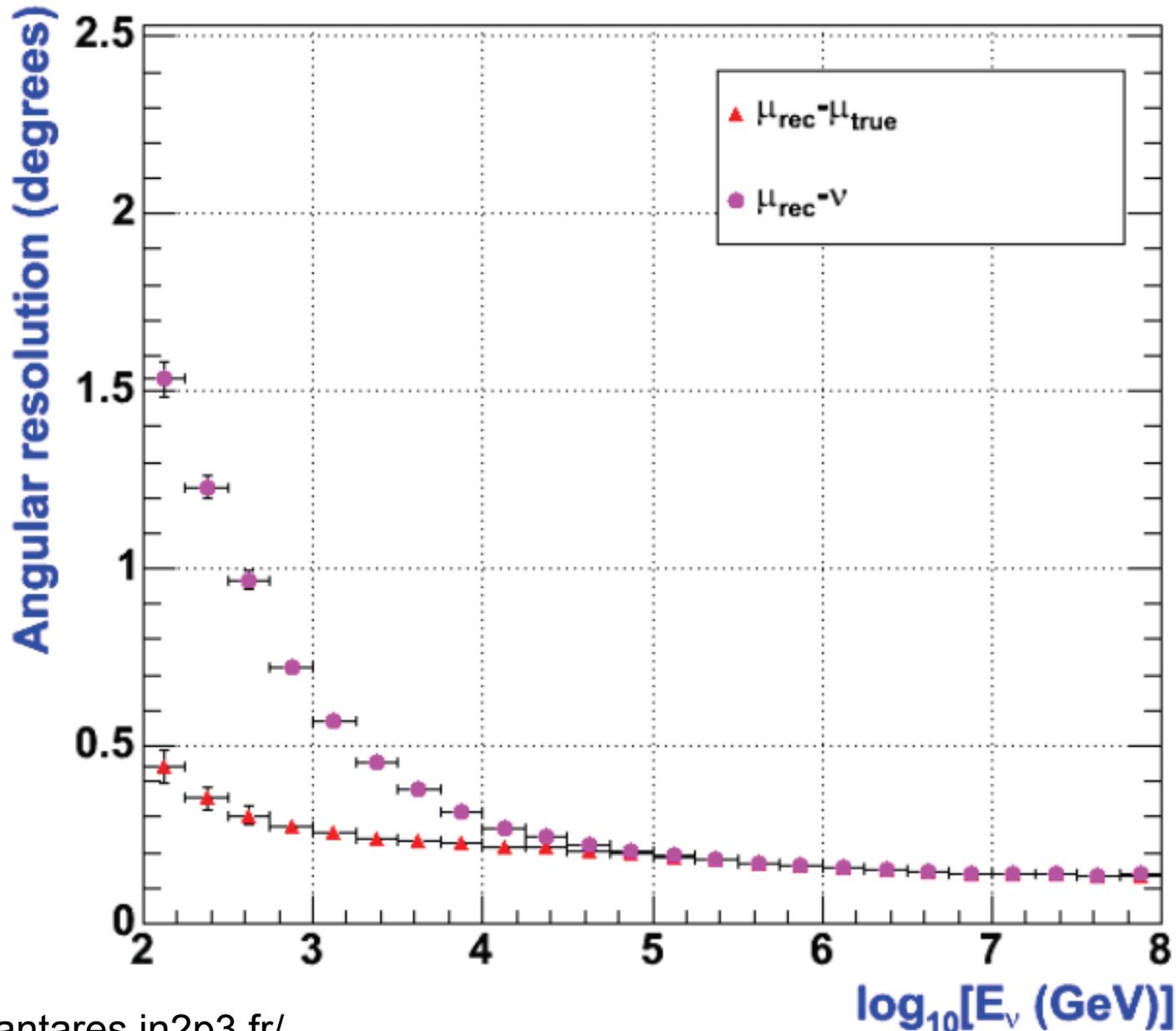
- Länge der Spuren (bis 100GeV, darüber nur Angabe einer Minimalenergie)
- Messen des spezifischen Energieverlusts für $E > 1 \text{ TeV}$:

$$\frac{dE}{dx} \propto E_{\mu} \propto \text{Cherenkov-Licht}$$

Richtungsrekonstruktion

- Messen der Ankunftszeiten, Amplituden und Photomultiplier-Positionen
- Modelle der Lichtausbreitung
 - Berücksichtigung der Streuung und Abschwächung im Medium
- Winkelauflösung beschränkt durch:
 - Winkel zwischen Myonen und Neutrinos
 - Vielfachstreuung der Myonen
 - Winkelauflösung des Detektors

Winkelauflösung für Wasser



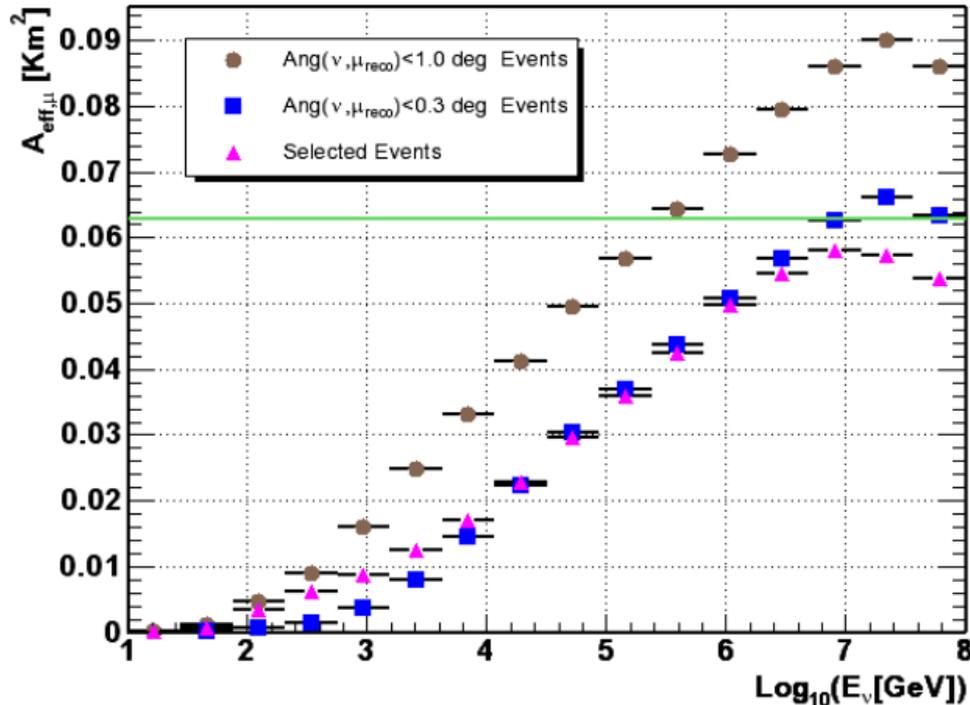
Effektive Flächen

- Definition (Effektive Fläche):

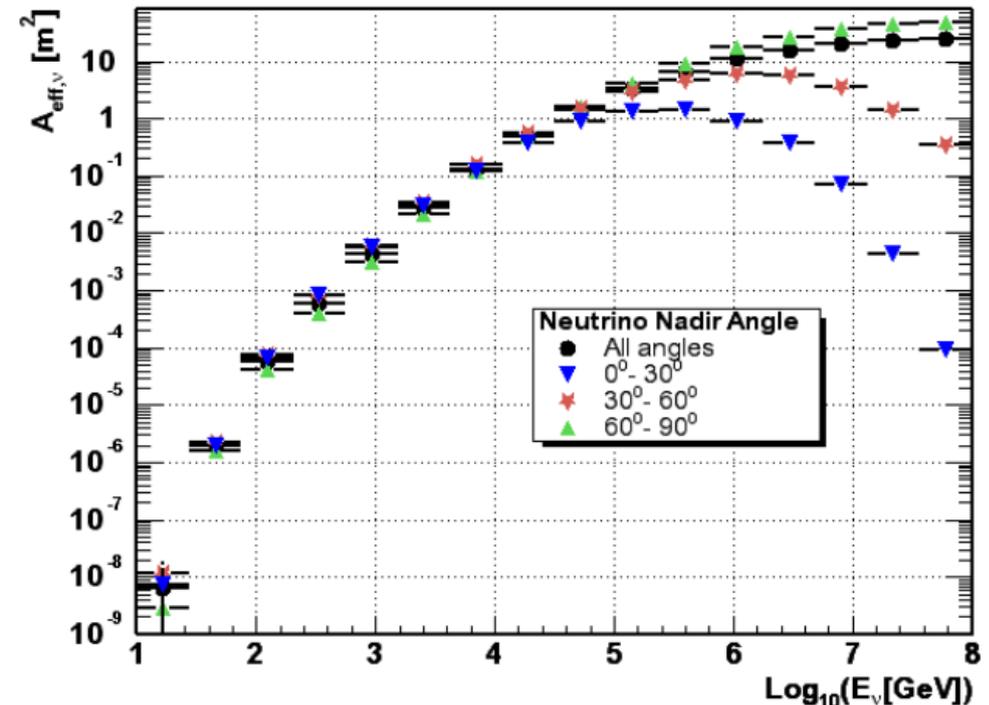
Die (Neutrino bzw. Myon) Effektive Fläche ist die Oberfläche, die ein Detektor hat, der alle ankommenden Neutrinos bzw. Myonen detektiert.

- Verhältnis der Rate der detektierten Ereignisse (s^{-1}) zum erwarteten Fluss ($s^{-1} cm^{-2}$)

Muon Effective Area



Neutrino Effective Area



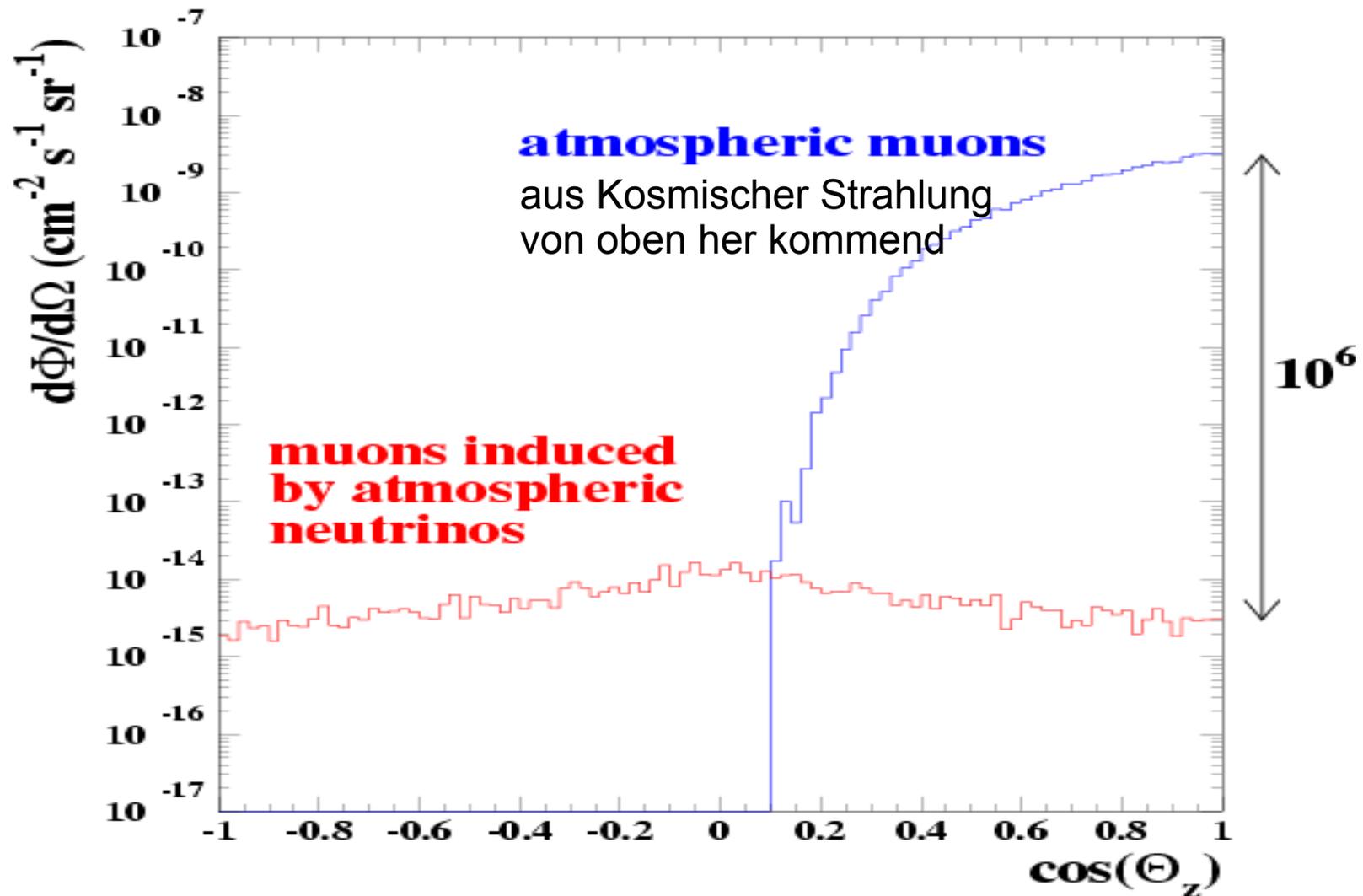
Neutrino Effektive Fläche

- Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit dass Myon-Neutrino Myon erzeugt
 - Wesentlich kleiner als Myon Effektive Fläche
- Vergleich der Detektoren über Effektive Flächen gut möglich
- Abschätzung der Zahl der erwarteten Ereignisse

$$\frac{N_{\mu}}{T} = \int dE_{\nu} \cdot \frac{d\Phi_{\nu}}{dE_{\nu}} \cdot A_{\nu}^{eff}(E_{\nu})$$

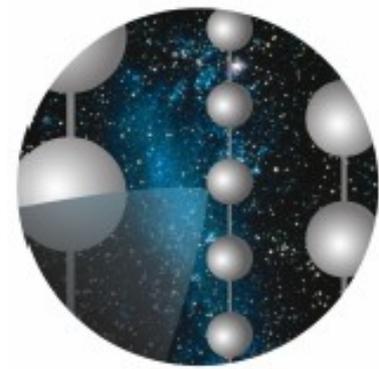
(T=Beobachtungszeit)

Atmosphärischer Hintergrund

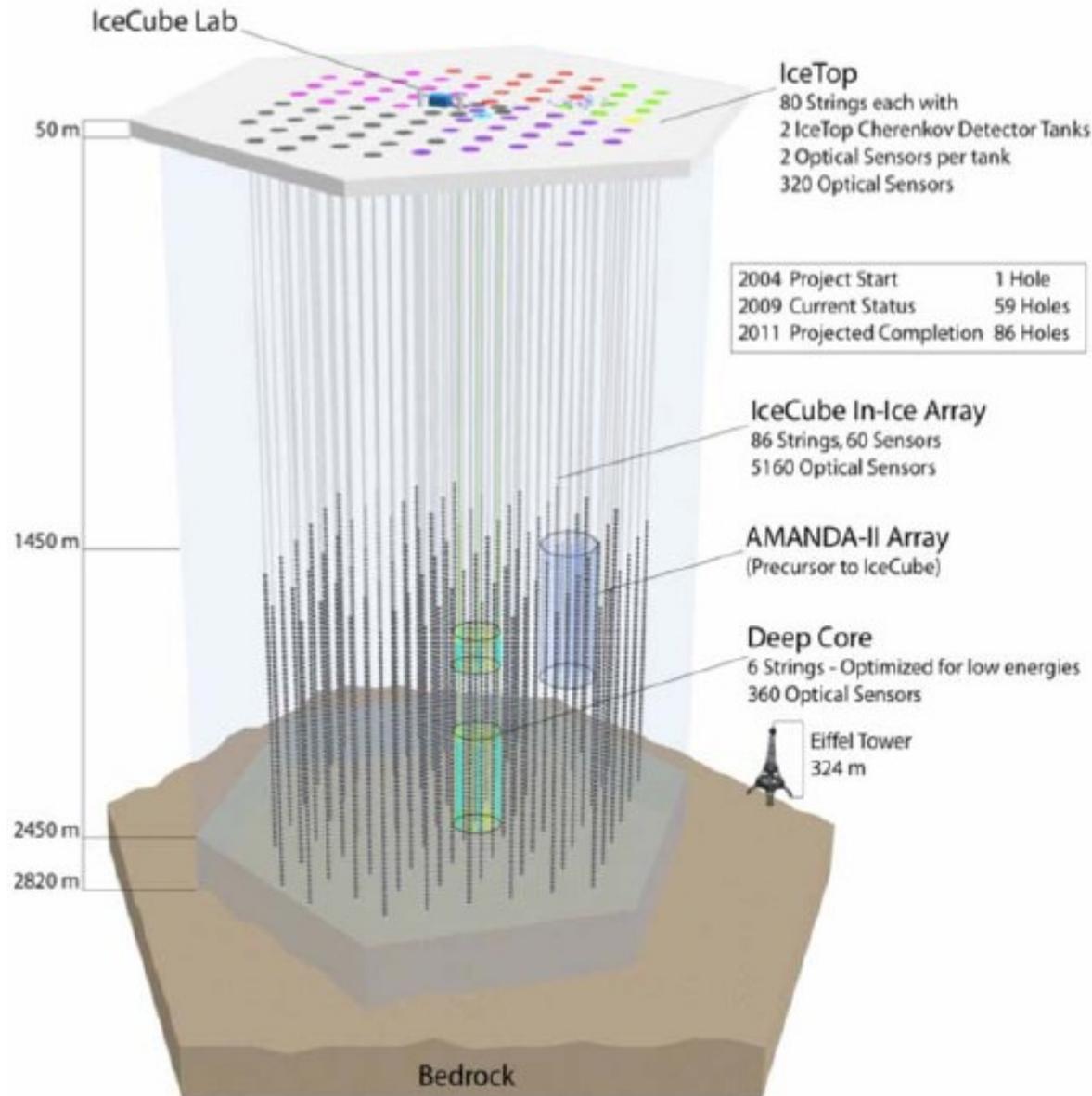


Aktuelle Experimente und ihre Ergebnisse

AMANDA / IceCube



IceCube



In-Ice Array:

- 80-86 Strings
- $A_{eff}^{\mu} > 1 \text{ km}^2 [10 \text{ TeV} - \text{PeV}]$

Ice Top:

- Kosmische Strahlung vom Knie bis Knöchel
- Antikoinzidenzen

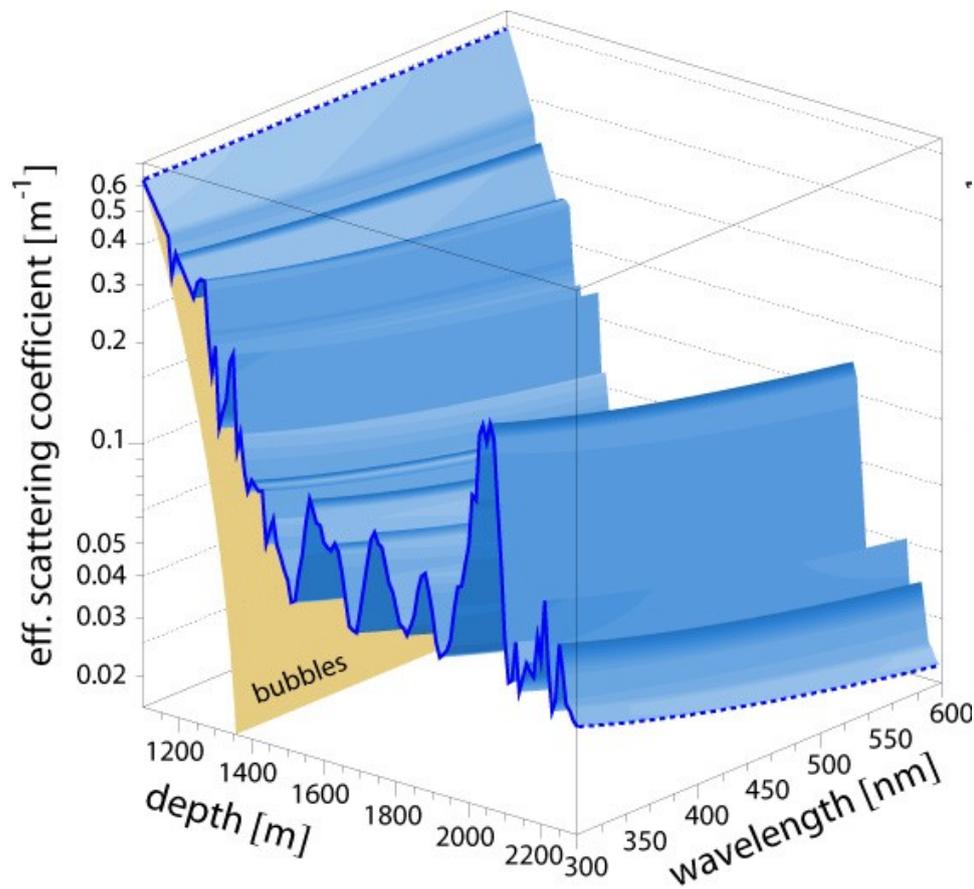
Deep Core

- 6-8 Strings
- $A_{eff}^{\mu} > 0,01 \text{ km}^2 [10 \text{ GeV} - 100 \text{ TeV}]$

Instrumentiertes Volumen:

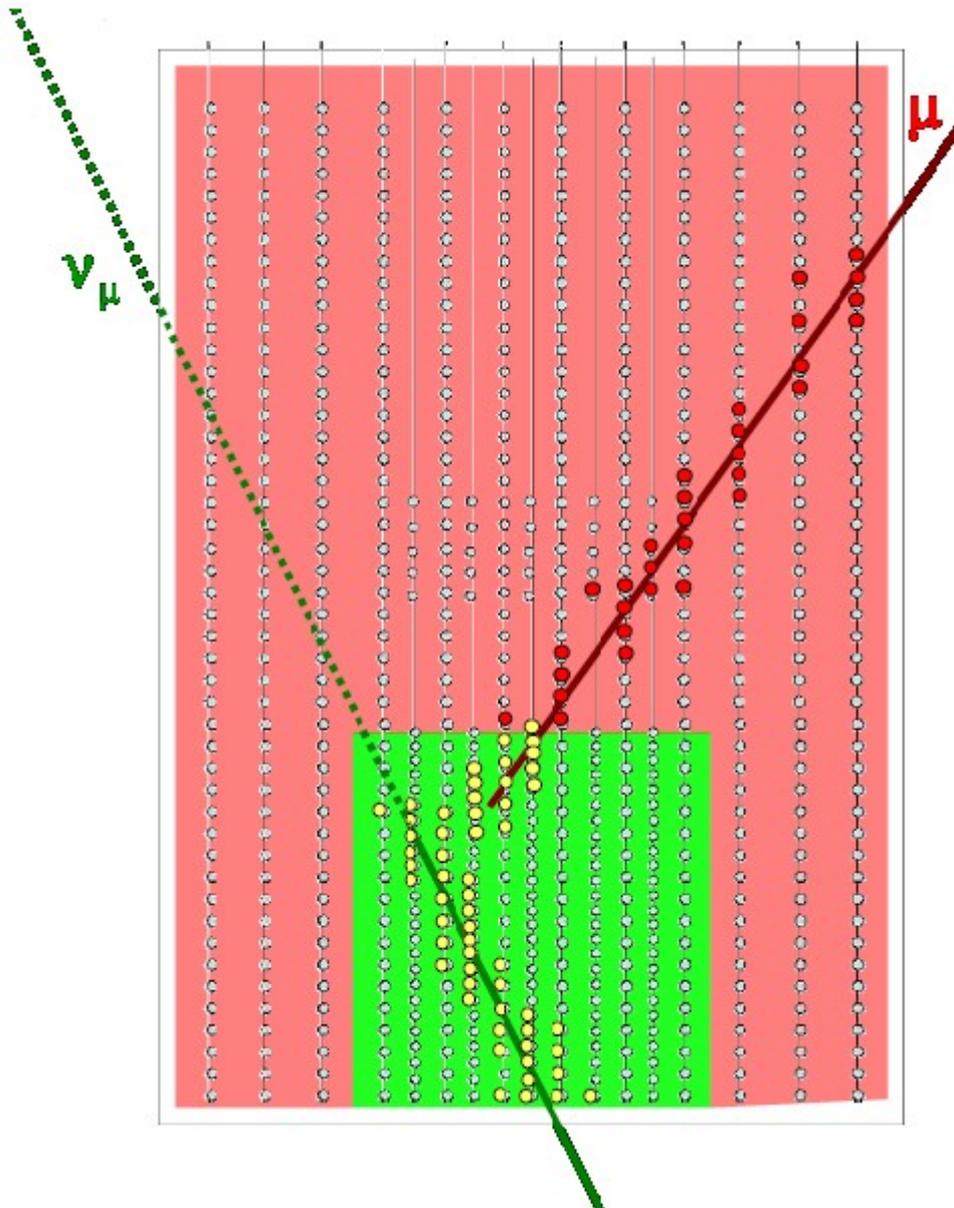
- 1 km^3

Eis-Eigenschaften



- Eis von Streuung dominiertes Medium
 - $\lambda_{\text{Streuung}} \sim 20 \text{ m}$
 - $\lambda_{\text{Absorption}} \sim 100 \text{ m}$
- Streuung an Luftblasen und Staub
- Modelle der Lichtausbreitung im Eis

Deep Core und Blick nach oben



Herausforderung:

Unterdrückung der Myonen von oben (Verhältnis: $\sim 10^6 \mu : 1 \nu$)

Strategie:

- Myon-Veto: äußerer Teil des Detektors
- Vertrauenswürdiges Volumen: Deep Core + innere IceCube Strings

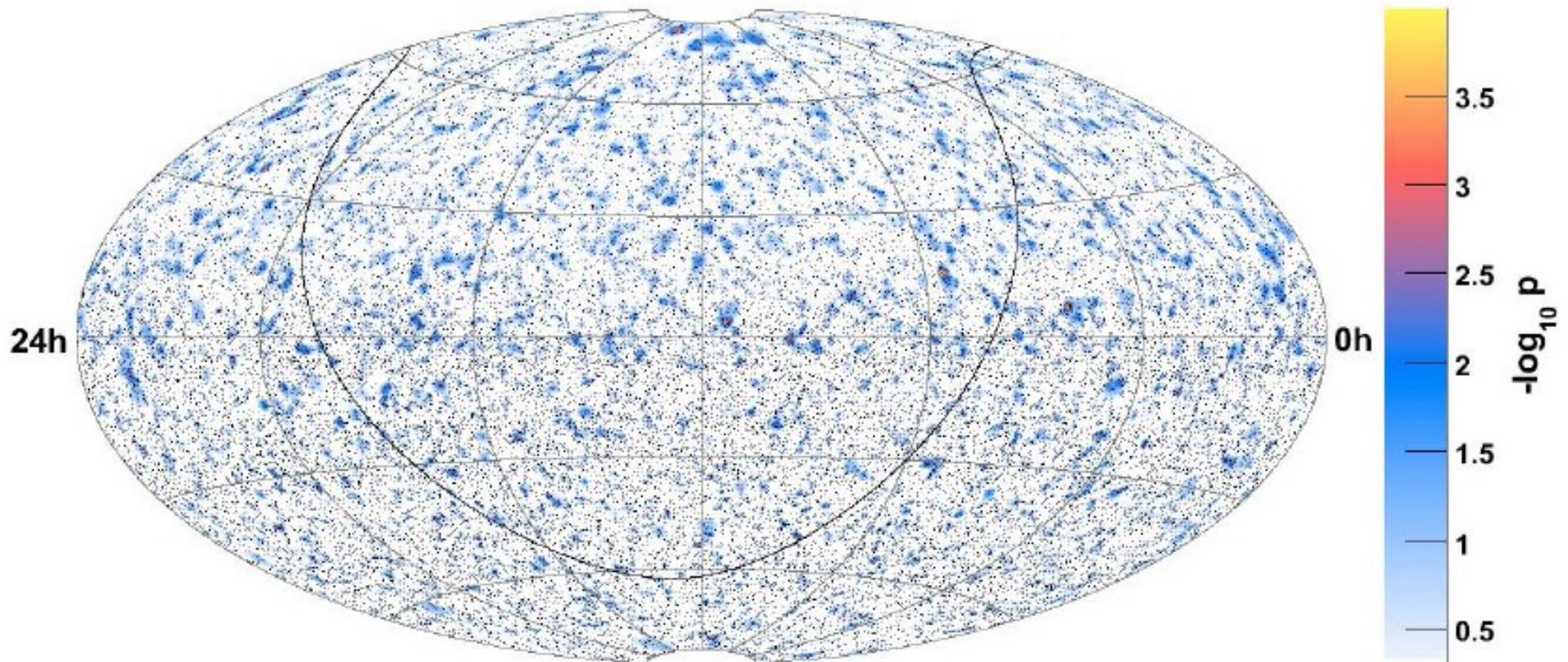
Anti-Koinzidenz:

- Veto Atmosphärische Myonen

Koinzidenz:

- Studien der Kosmischen Strahlung

IceCube 40: Punktquellensuche



- Übereinstimmung mit zufällig gewürfelten Punkten
- Keine Evidenz für Punktquellen
- Beinhaltet südliche Hemisphäre (für $E_\nu \geq 1$ PeV)

Ergebnisse (IceCube 22)

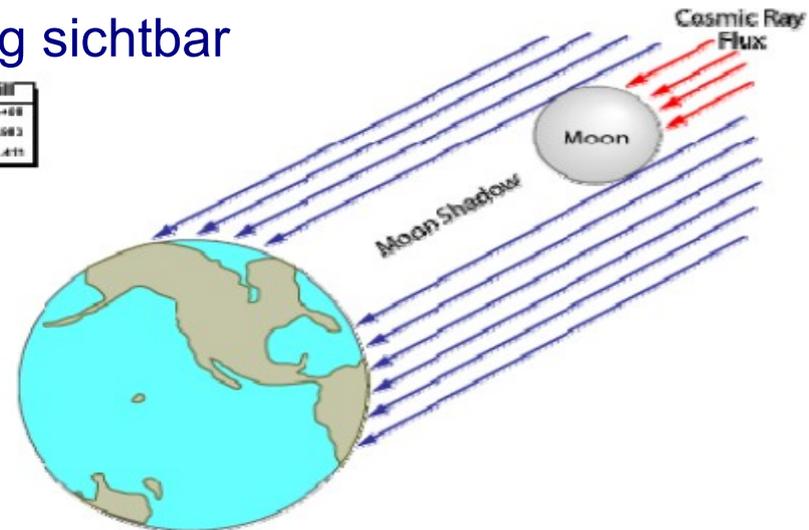
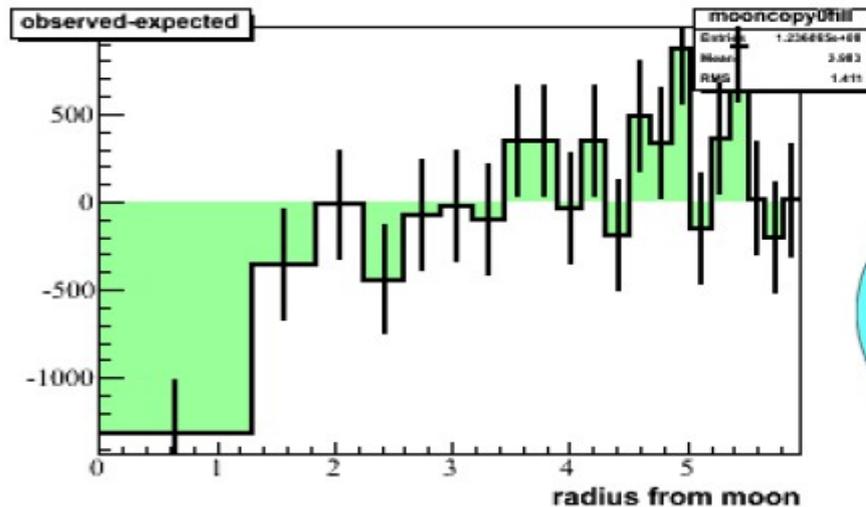
Fluss Limites (90% C.L.) (~Faktor 2 besser als AMANDA)

- Punktquellen (über Himmel gemittelte Sensitivität)

$$E^2 \frac{d\Phi}{dE} < 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ im Energiebereich 3TeV bis 3PeV}$$

Annahme eines E^{-2} -Flusses

Mond-Schatten in Kosmischer Strahlung sichtbar

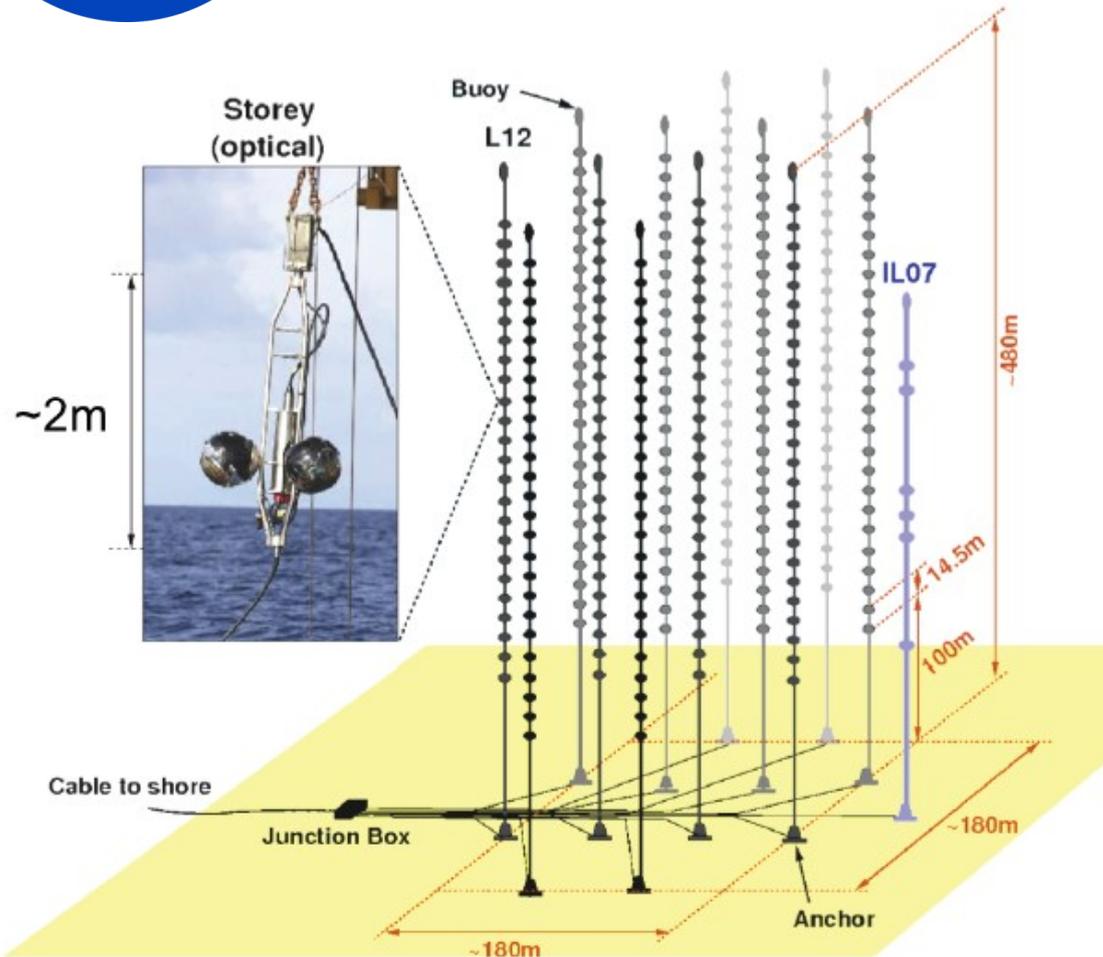


Kleine (<1%) Anisotropie der Myonen der Kosmischen Strahlung

- Ähnlich Beobachtung durch Milagro Gamma-Strahlungs Observatorium



ANTARES

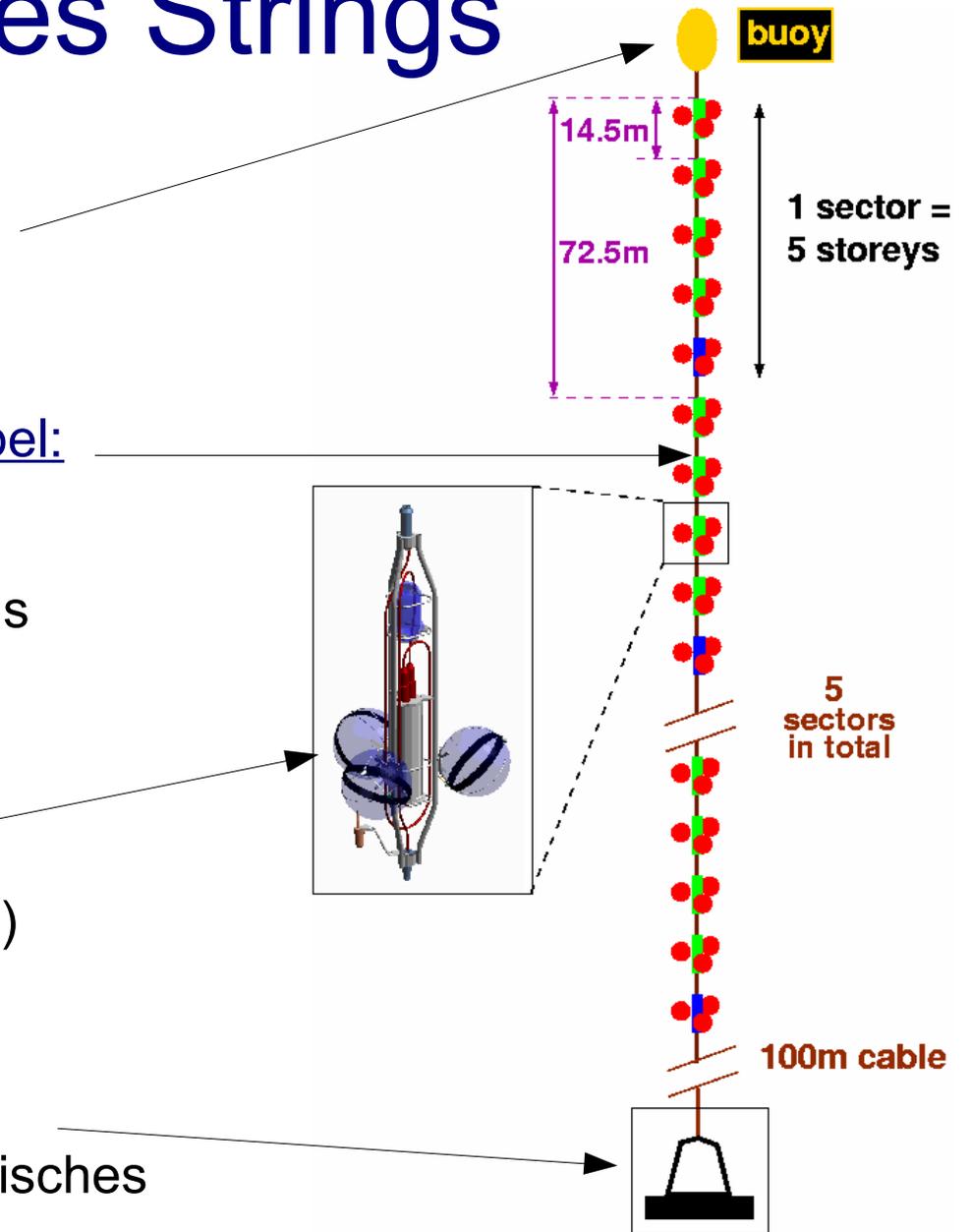


- Größtes Neutrino-Teleskop der nördlichen Hemisphäre
 - Blick ins Galaktische Zentrum
- Erstes Tiefsee-Neutrino-teleskop
- Fertigstellung im Mai 2008
- 12 Strings mit 25 Optischen Storeys
- Instrumentiertes Volumen $0,01 \text{ km}^3$
- Tiefsee-Forschung

Astronomy with a Neutrino Telescope and Abbyss environment RESearch project

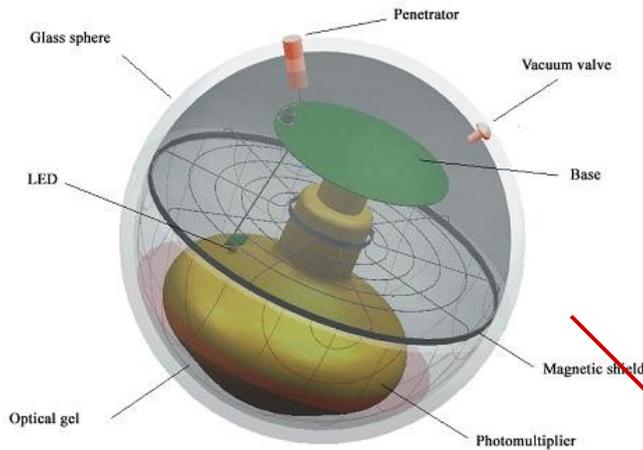
Skizze eines Strings

- Boje:
 - Auftrieb ~6400 N
 - Hält String senkrecht (weniger als 20m Abweichung)
- Elektro-optisches-mechanisches Kabel:
 - Metalldrähte für power supply etc.
 - Optische Fasern für Daten
 - mechanische Halterung des Strings
- Storeys:
 - 3 Optische Module pro Storey
 - Titanzylinder für Elektronik
 - Kalibrationsanlagen (Licht, Akustik)
- Anker:
 - Gewicht: hält String am Boden
 - Auslösemechanismus durch akustisches Signal von Oberfläche



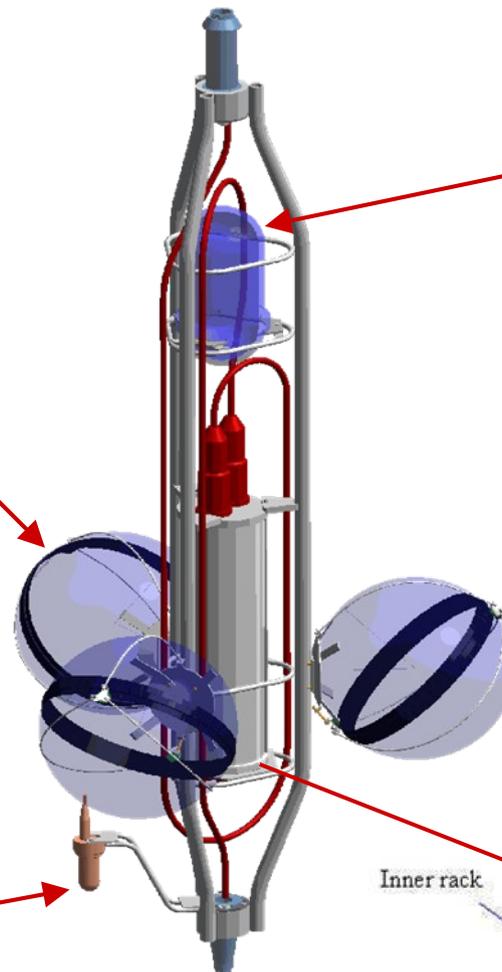
Komponenten eines Storeys

Optisches Modul

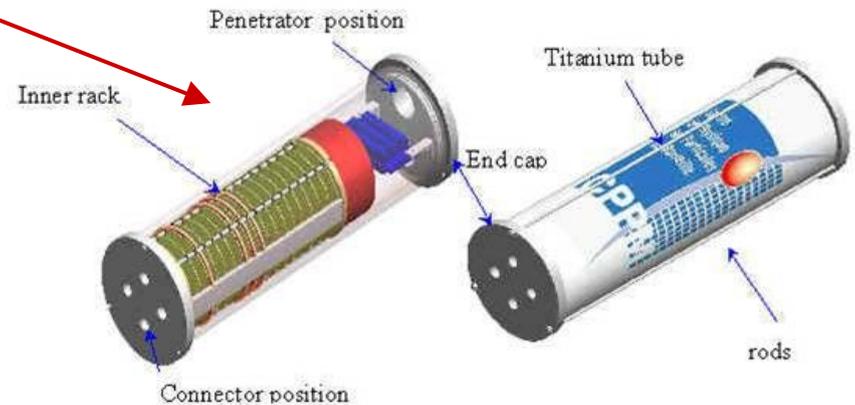


LED Lampe
für
Zeitkalibrierung

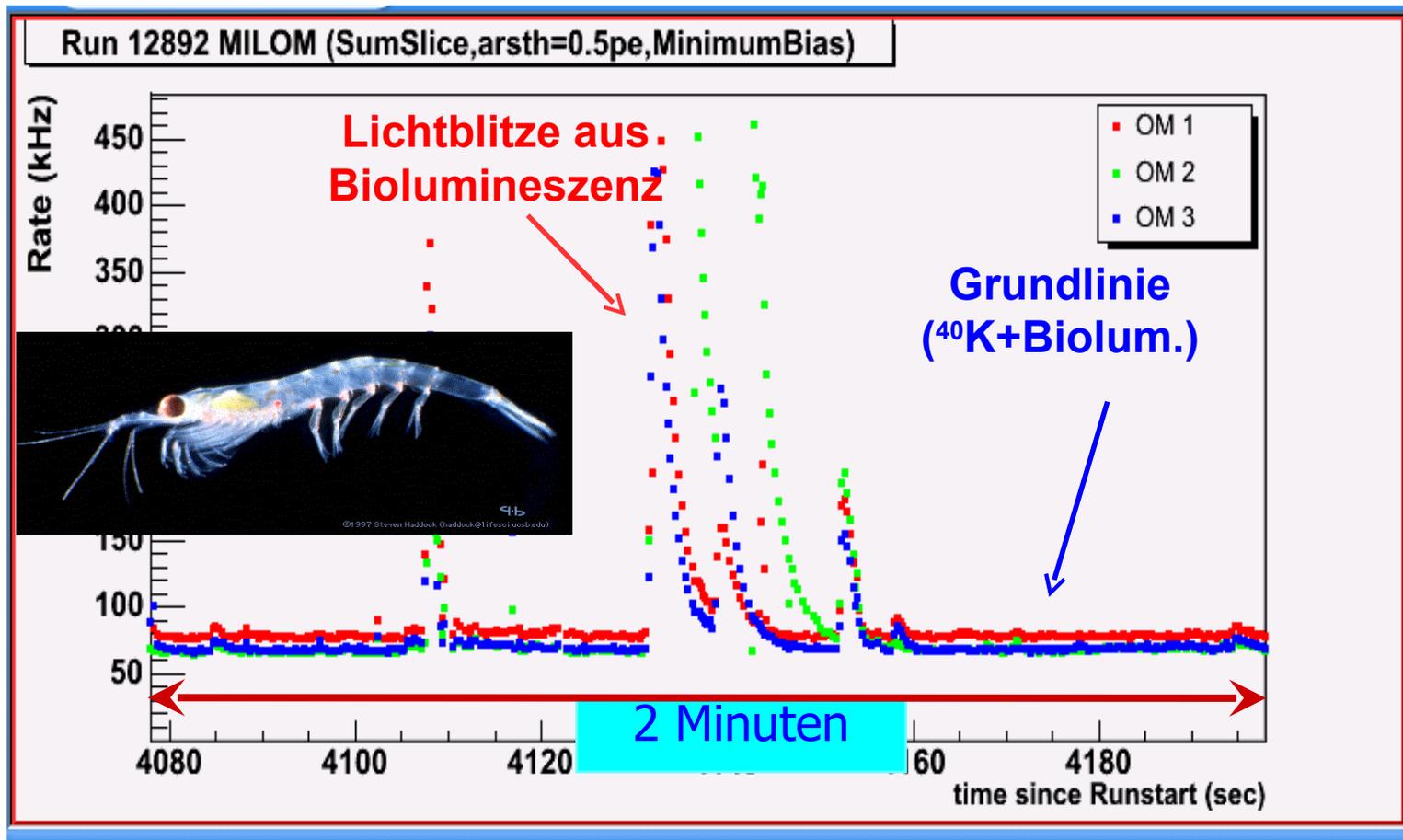
Hydrophon (RX) für Positionsbestimmung



Titanzylinder
beinhaltet Ausleseelektronik,
etc.

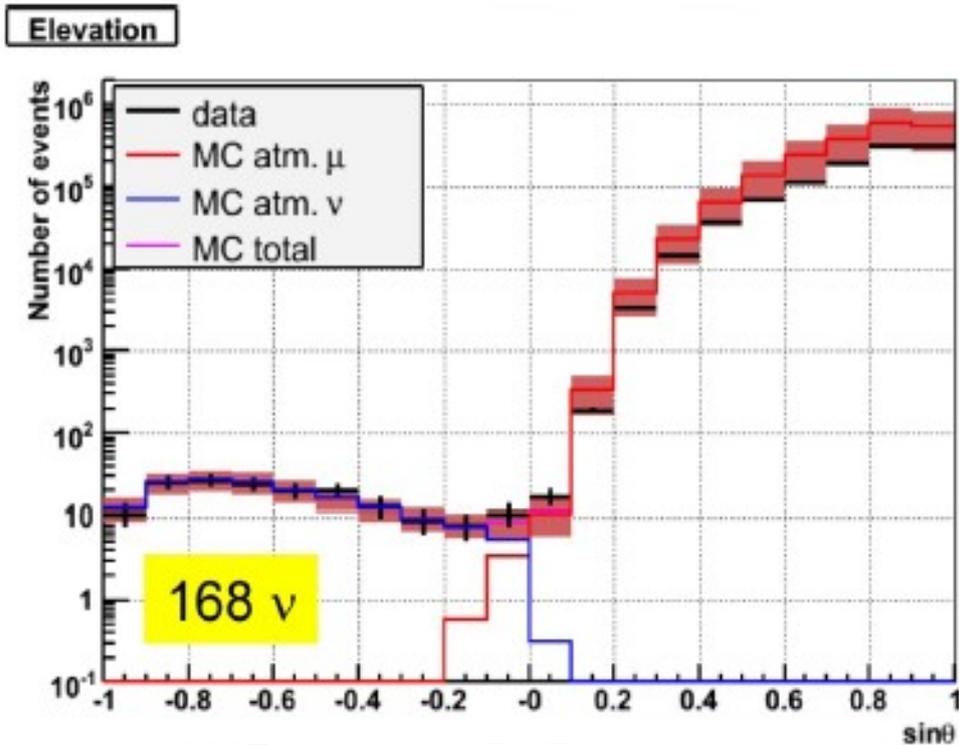


Optischer Hintergrund im Wasser

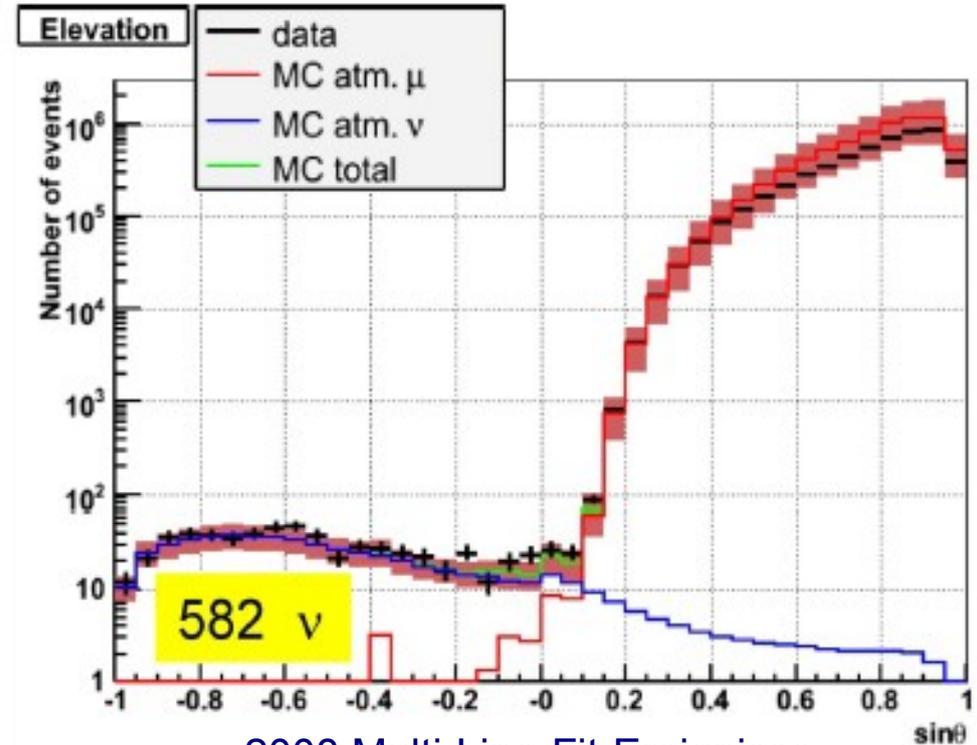


- Zerfall von ^{40}K (~30-40kHz)
- Biologische Quellen (ständige Quellen und Lichtblitze)

Messung atmosphärischer Myonen und Neutrinos



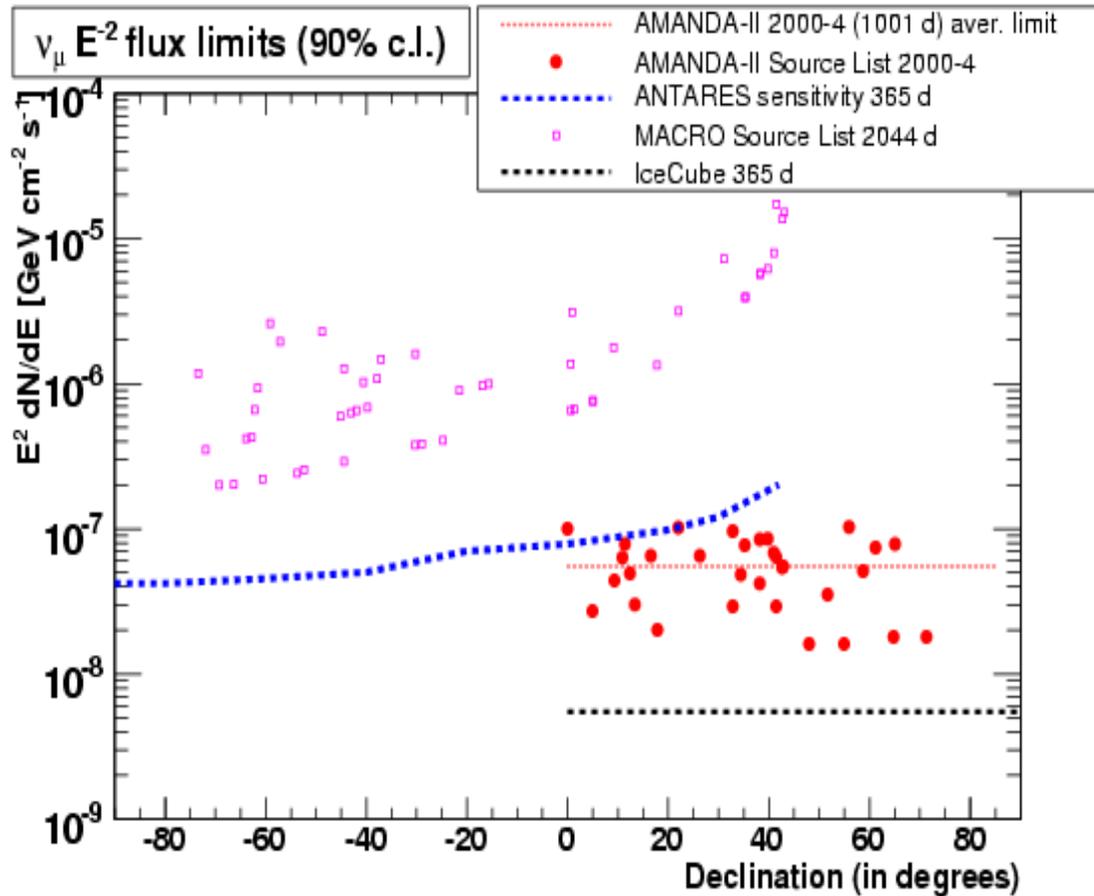
2007 Multi-Line-Fit-Ereignisse



2008 Multi-Line-Fit-Ereignisse

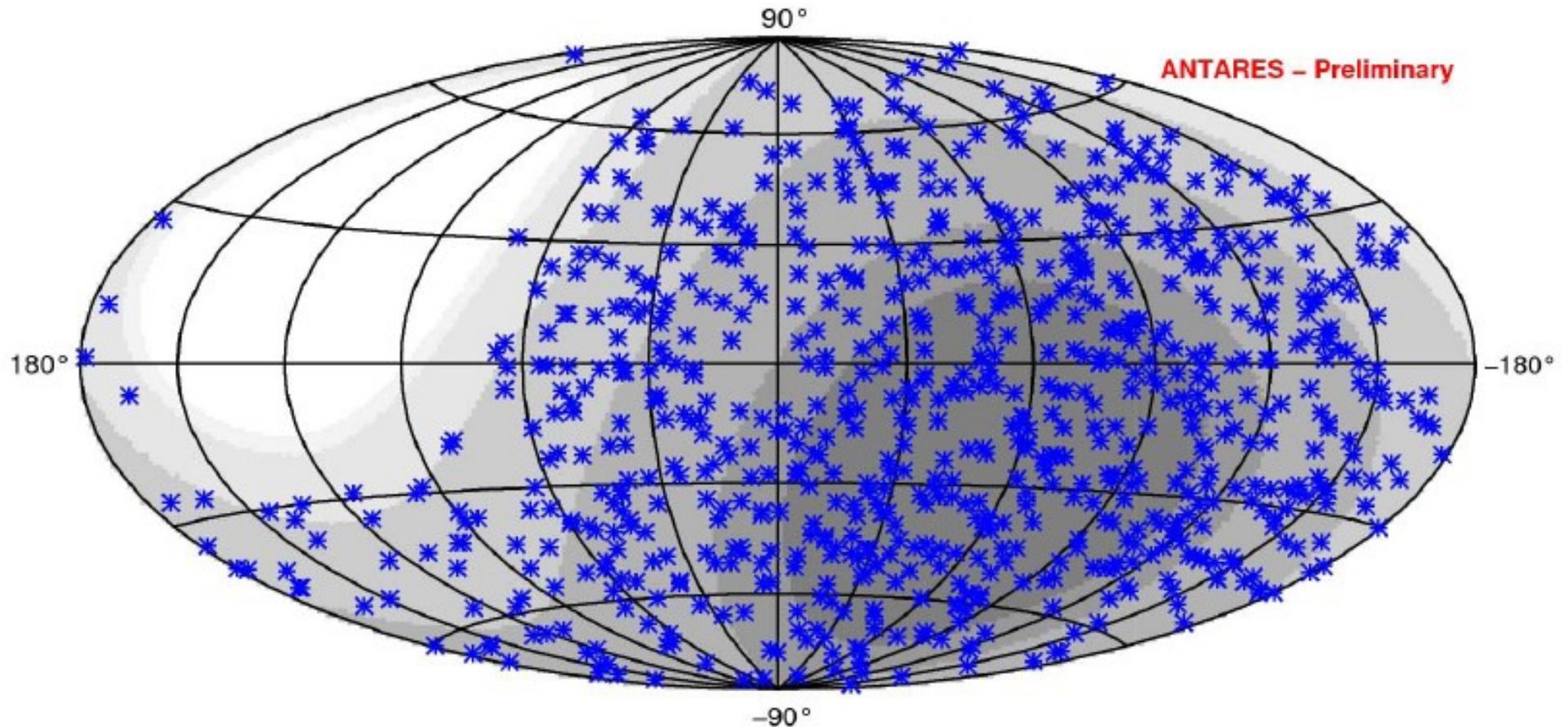
- 2007 (5-Line-Betrieb): 243 Ereignisse
- 2008 (9/10/12-Line-Betrieb): 749 Ereignisse
- 2009 Analyse noch nicht abgeschlossen: >1500 Ereignisse

Punktquellensensitivität



- Beste Werte für die Beobachtung der Südlichen Hemisphäre
- Energieabschätzung durch gemessene PMT-Amplituden
- Energieauflösung $\sigma(\log_{10} E) = 0,2 - 0,3$ für Myonen mit $E_\mu > 1$ TeV

ANTARES Neutrino Himmelskarte



Daten von 2007 und 2008, 750 ausgewählte „multi-line“ Events,
Positionen zufällig verteilt

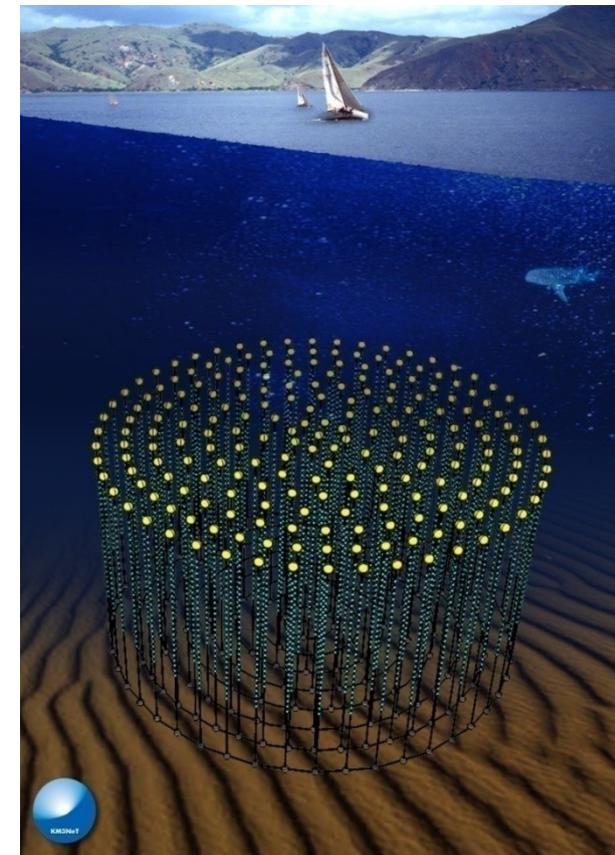
Ausblick: Kubikkilometer Teleskop im Mittelmeer



KM3NeT

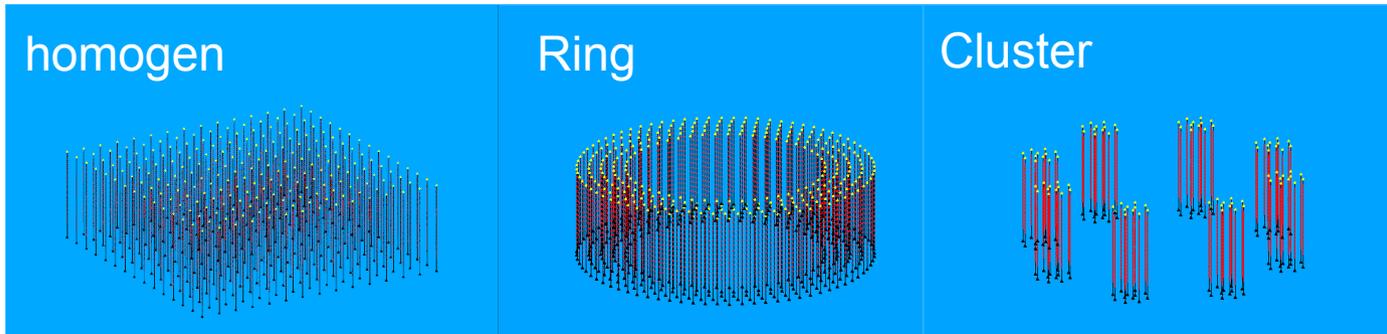
Geplante Tiefsee Forschungsinfrastruktur

- 6 Kubikkilometer großes Neutrino-teleskop im Mittelmeer
 - Übertrifft die Sensitivität der Teleskope der nördlichen Hemisphäre um ~ 50
 - ~ 6 mal sensitiver als IceCube
 - Neutrinoastronomie im Bereich 1-100TeV
 - Suche nach Neutrino-Punktquellen
 - Zu IceCube komplementäres Blickfeld
- Observatorium für Klimatologie, Geophysik und Unterwasserforschung

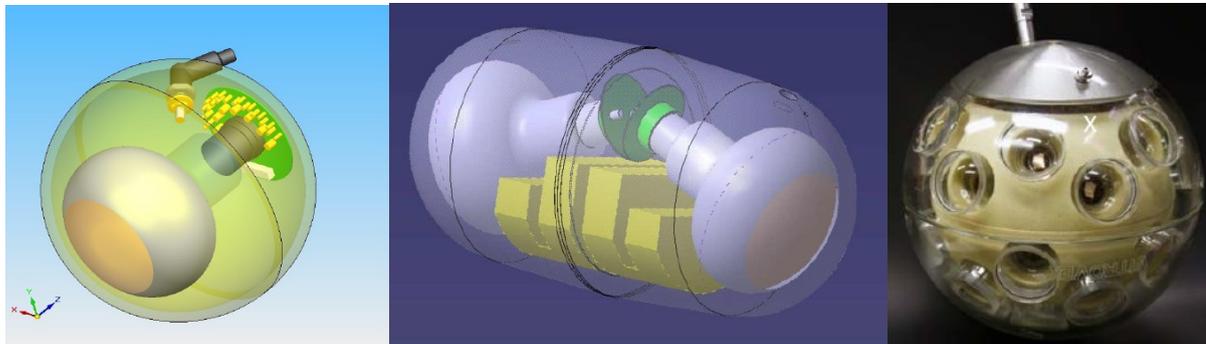


Technische Designs

- Detektorgeometrien



- Optische Module

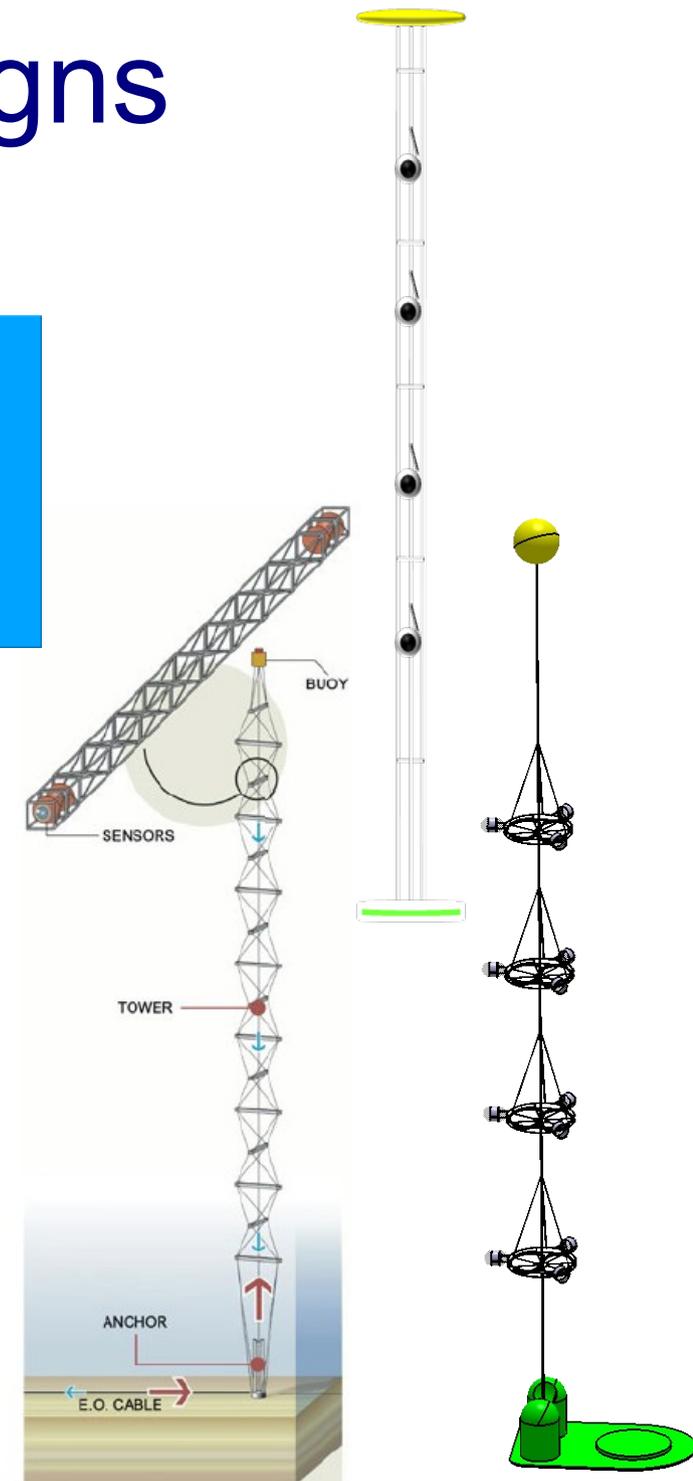


Klassisch

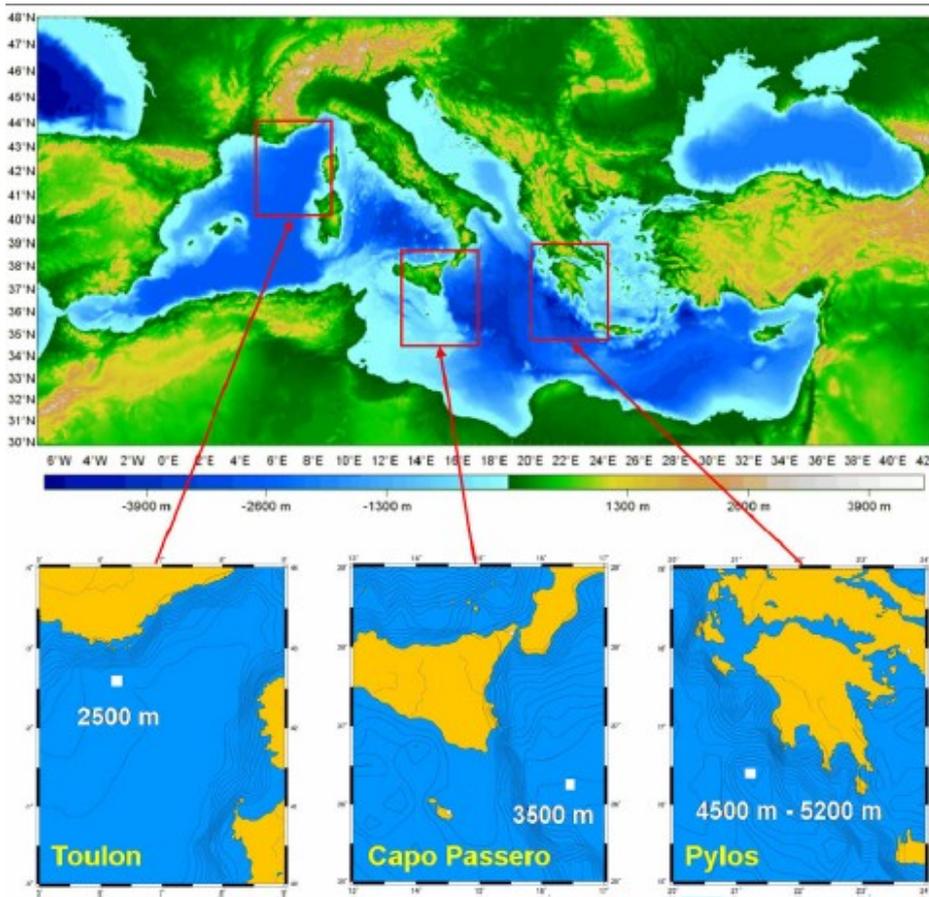
Kapsel

Multi-PMT

- Tower und Stringvarianten

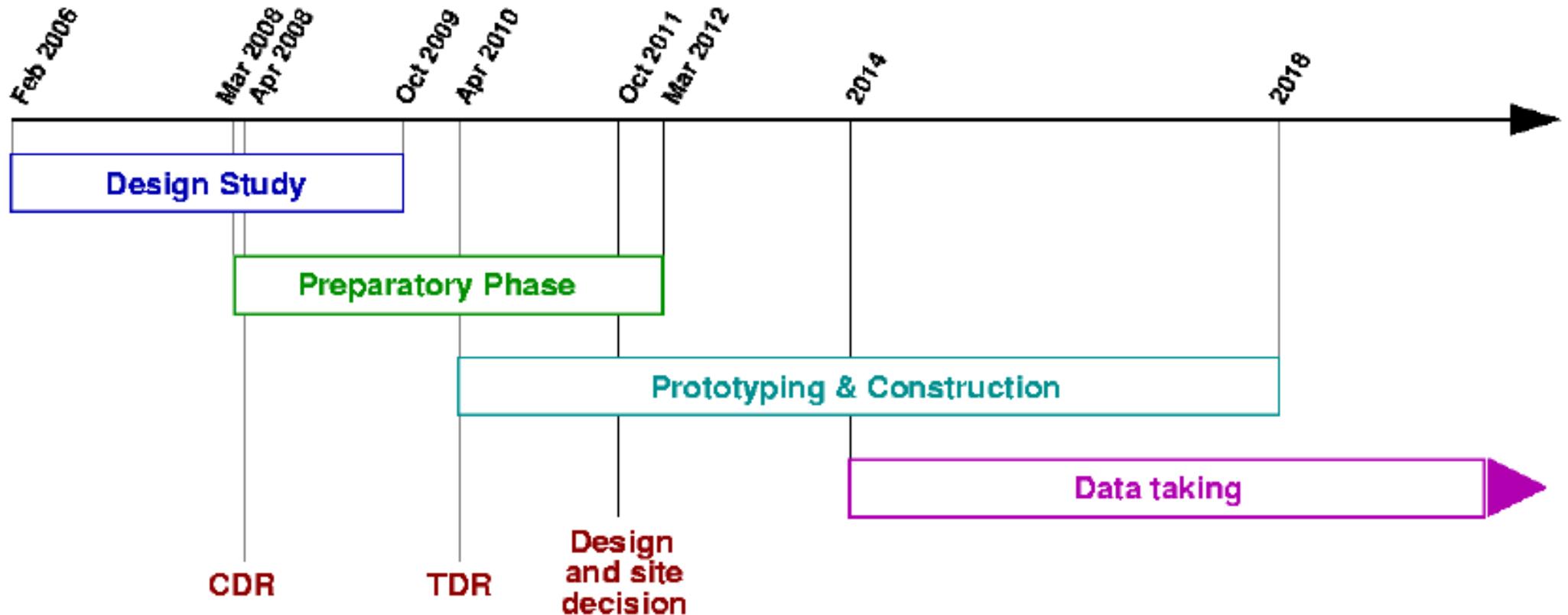


Mögliche Standorte



- Orte der 3 beteiligten Projekte:
 - ANTARES: Toulon
 - NEMO: Capo Passero
 - NESTOR: Pylos
- Langzeitmessungen zur Charakterisierung der Orte
- Politische und wissenschaftliche Interessen abwägen

KM3NeT: Zeitplan



CDR=Conceptual Design Report

TDR=Technical Design Report (seit 03.07.2010 verfügbar)

Quellen

(1) www.astroteilchenschule.physik.uni-erlangen.de

- Vortrag von Elisa Resconi 2009
- Vortrag von Alexander Kappes 2008

(2) Uli Katz' Unfamous Home Page (www.ecap.uni-erlangen.de/~katz)

- Vortrag an der Universität Heidelberg vom 6.-9. April 2010

(3) arxiv.org

- „High-Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes“, T. Chiarusi and M. Spurio, arXiv:0906.2634v2 [astro-ph.HE] 27.Nov 2009

(4) www.wikipedia.org

(5) Bachelorarbeit-Einführungsveranstaltung:

- Vortrag von Dr. Kay Graf zur akustischen Neutrinodetektion
- Vortrag von Dr. Oleg Kalekin zum KM3NeT-Projekt

(6) <http://antares.in2p3.fr/>

(7) www.km3net.org