

**Seminarvortrag zur Astro- und Teilchenphysik  
am 21.01.2008**

„Quellen hochenergetischer Neutrinos und  
Neutrinoteleskope“

Alexander Enzenhöfer

# Inhalt

- Quellen hochenergetischer Neutrinos
  - Quellen hochenergetischer Kosmischer Strahlung
  - Beschleunigung geladener Teilchen
  - Erzeugung von Neutrinos
- Neutrino teleskope
  - Prinzip der Neutrino teleskope
  - Super-Kamiokande
  - AMANDA/IceCube
  - ANTARES/KM3NeT

# Quellen hochenergetischer Neutrinos

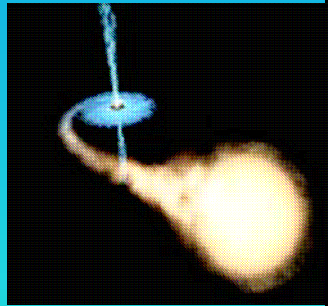
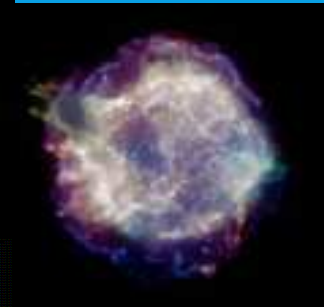
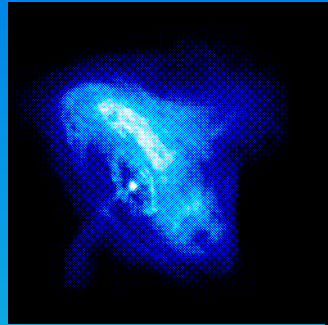
$\nu$ 's sind elektrisch neutral

⇒ Keine Beschleunigung auf direktem Weg möglich

⇒ Quellen hochenergetischer  $\nu$ 's  $\equiv$  Quellen hochenergetischer CR

# Quellen hochenergetischer Kosmischer Strahlung (CR)

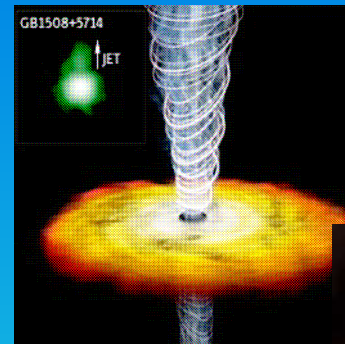
- Galaktische Quellen
  - Pulsare
  - Supernova Überreste (SNR)
  - Mikroquasare/ Magnetare
  - Doppelsternsysteme



# Quellen hochenergetischer Kosmischer Strahlung (CR)

- Extragalaktische Quellen

- Aktive Galaktische Kerne (AGN)
- Gamma Ray Bursts



- Dunkle Materie

- Annihilation von WIMPs in Gravitationspotentialen

# Beschleunigung geladener Teilchen

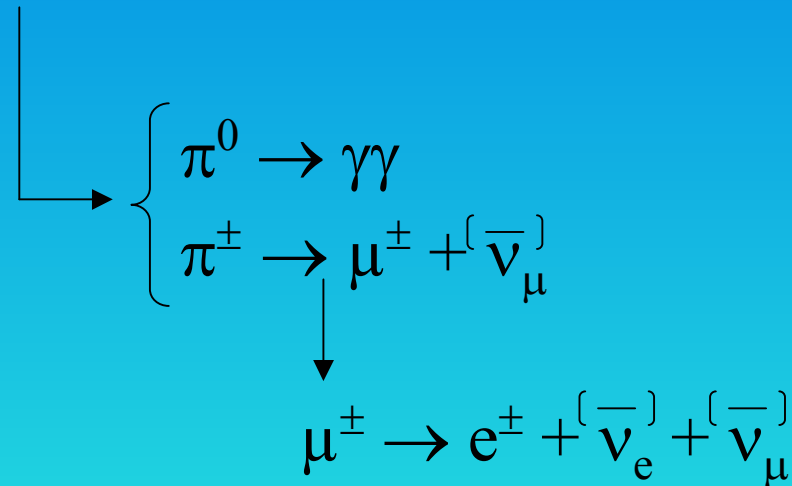
- Beschleunigungsmechanismen (siehe vorherige Vorträge):
  - Zyklotron-Mechanismus
  - Sonnenfleckepaare
  - Schockwellenbeschleunigung  
(Fermi-Beschleunigung 1.Art)
  - Fermi-Mechanismus (Fermi-Beschleunigung 2.Art)
  - Pulsare/Magnetare
  - Doppelsternsysteme
  - AGN

Beschleunigung der höchstenergetischen Teilchen vorwiegend in Pulsaren, Magnetaren, Doppelsternsystemen und AGN

# Erzeugung von Neutrinos

- Nahe des Beschleunigungsortes:

–  $p + A \rightarrow \text{Hadronen} + \text{Pionen}$



–  $p + \gamma \text{ (Synchrotron-Photon)} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow N + \pi^{+0}$

# Erzeugung von Neutrinos

- Entfernt von der Quelle:



- $\gamma$  aus 2,7 K Hintergrundstrahlung (CMB,  $400\text{cm}^{-3}$ )  
oder Infrarot-Hintergrund (IR)

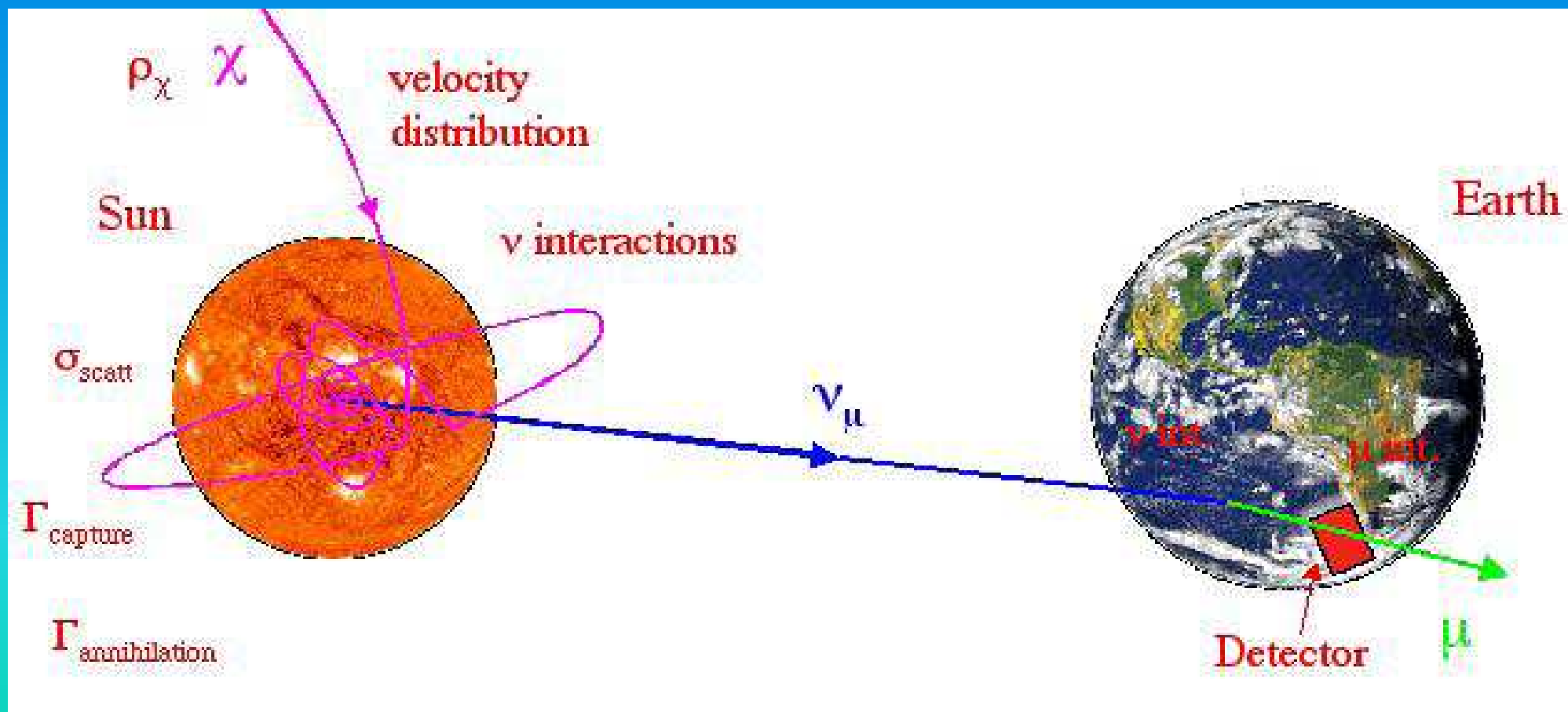
Schwellenenergie der Protonen für Wechselwirkung:

- CMB:  $E_p \geq 6 \cdot 10^{19} \text{ eV}$
  - IR:  $E_p \approx 10^{14} \text{ eV}$



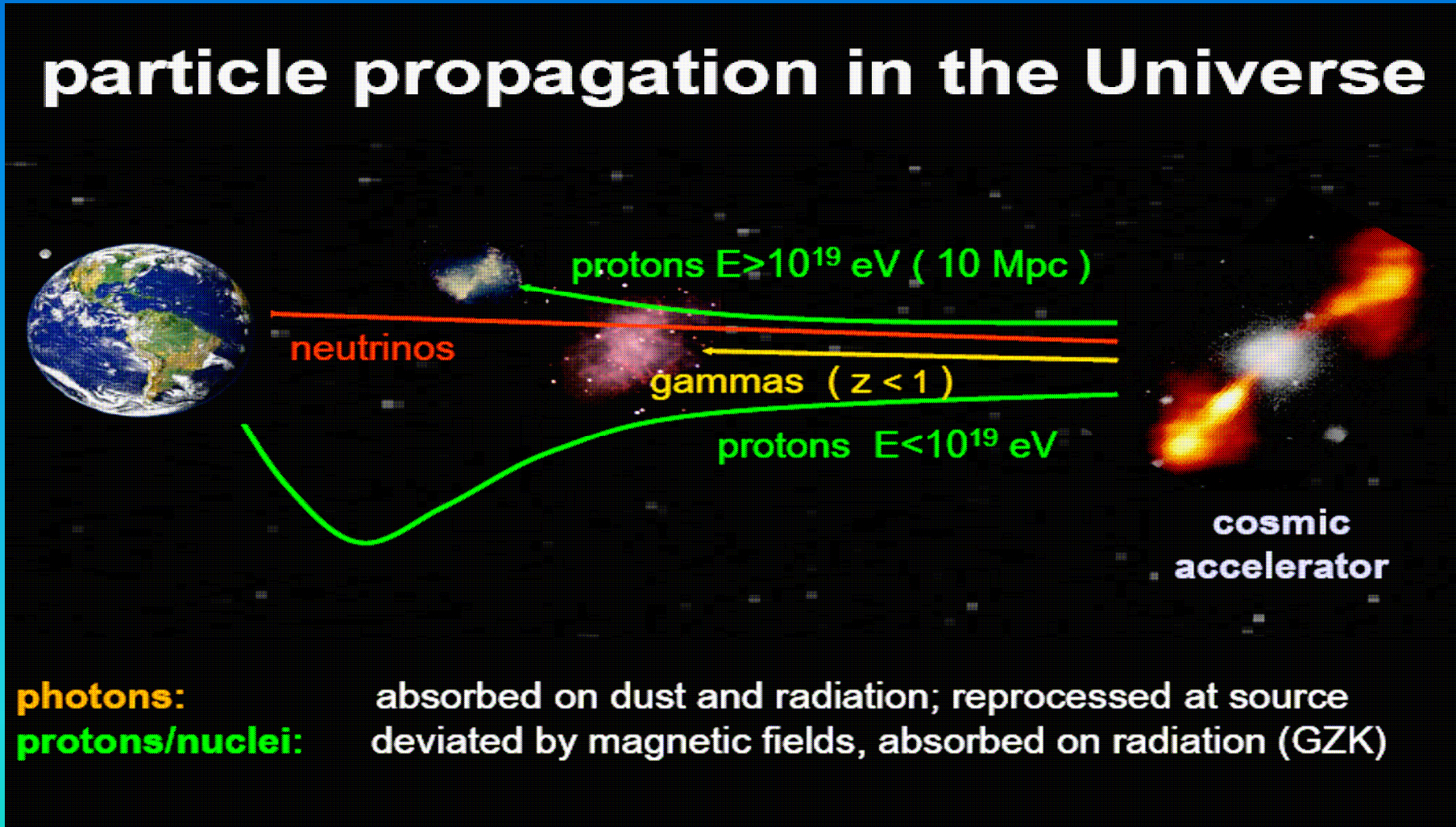
# Erzeugung von Neutrinos

- Dunkle Materie



# Neutrino teleskope

## particle propagation in the Universe



# Prinzip der Neutrinooteleskope

Keine direkte Messung von Neutrinos möglich

=> Indirekte Messung in Wasser oder Eis durch Cherenkov-Teleskope



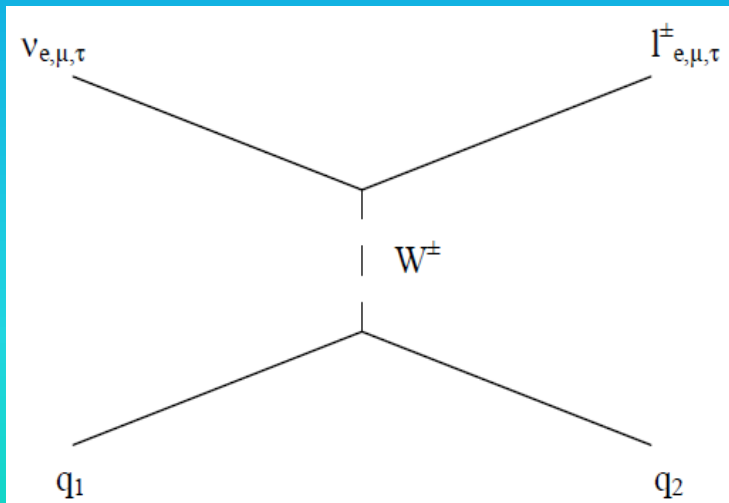
# Cherenkov-Effekt

## Neutrino-Reaktionen in Wasser:

CC (Geladene Ströme):

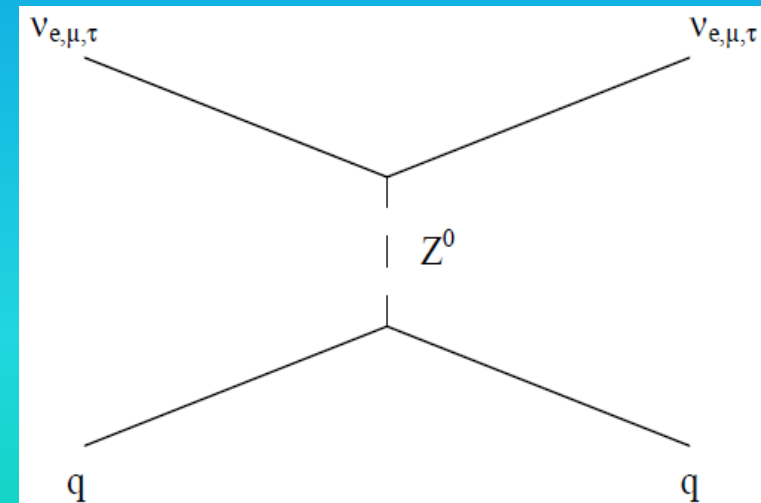
$$\nu_{e/\mu/\tau} + n \rightarrow e^{-}/\mu^{-}/\tau^{-} + X$$

$$\bar{\nu}_{e/\mu/\tau} + p \rightarrow e^{+}/\mu^{+}/\tau^{+} + X$$



NC (Ungeladene Ströme):

$$[\bar{\nu}_{e/\mu/\tau}] + N \rightarrow [\bar{\nu}_{e/\mu/\tau}] + X$$



# Cherenkov-Effekt

$\nu$ 's passieren Erde und erzeugen  $e^\pm/\mu^\pm/\tau^\pm$  mit  $v \cong c$

=> Emission von Cherenkovlicht

PMT messen Zeit und Ort sowie Intensität der Ereignisse

=> Rekonstruktion des Ausgangsereignisses

# Bestimmung des Neutrino-Typs

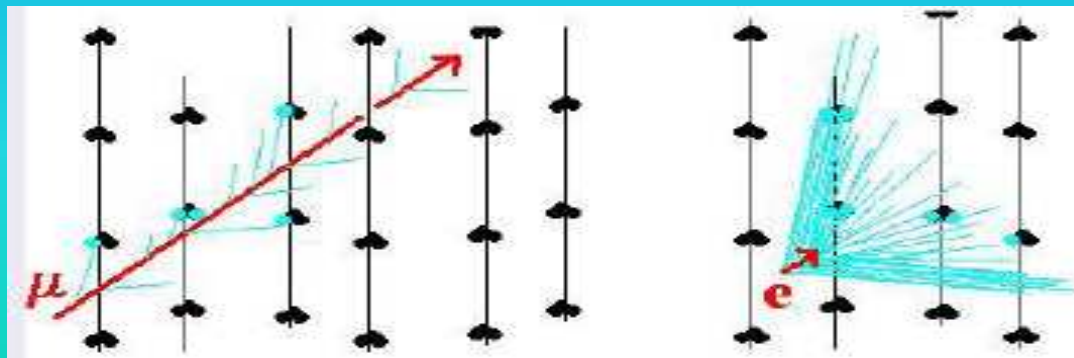
Der erzeugende Neutrino-Typ lässt sich aus der Signalform bestimmen:

$\nu_{\mu}$ :

- Erzeugt Muon
- langsamer Energieverlust  
(in Wasser etwa 0,2GeV/m,  
kaum Bremsstrahlung da Masse relativ hoch)
- große Reichweite (lange Spur, ~ km)

$\nu_e$ :

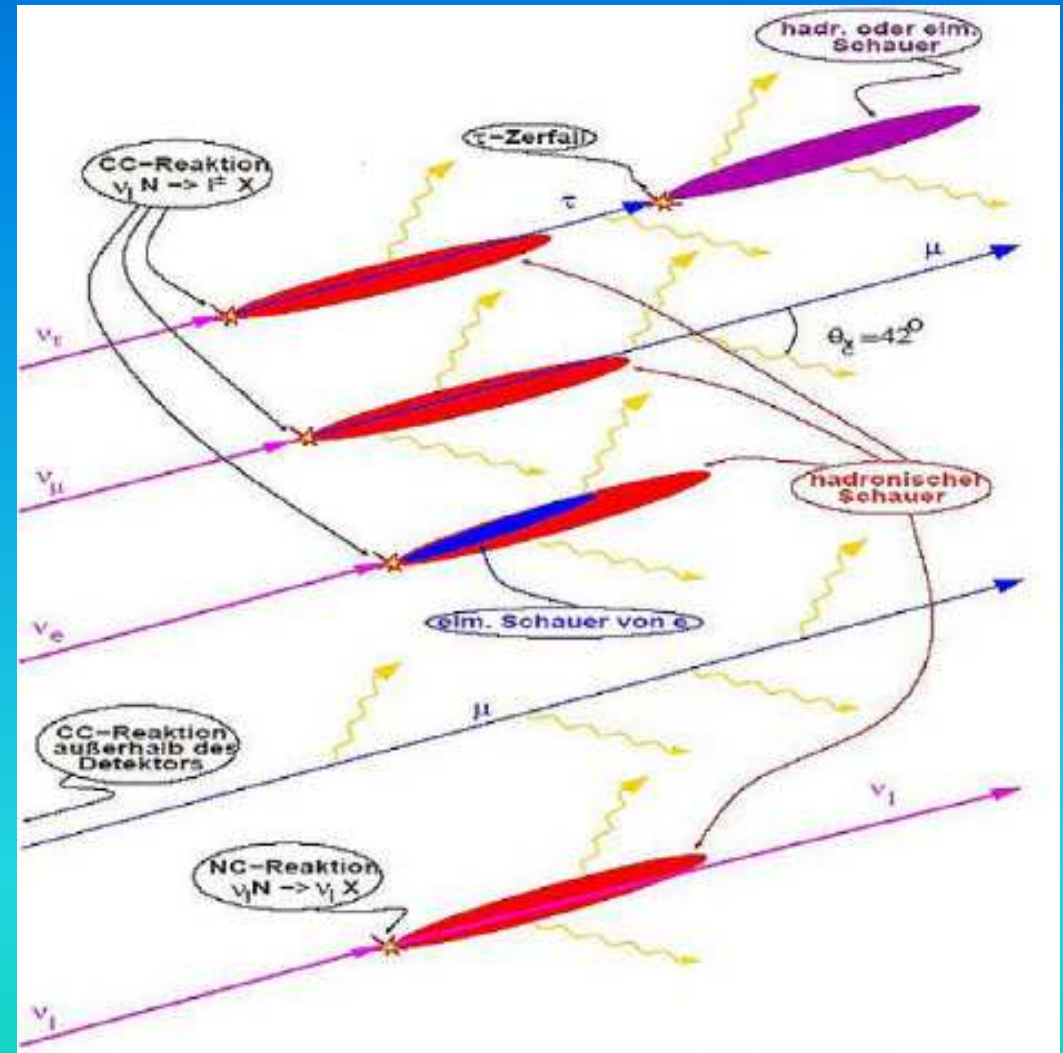
- Erzeugt Elektron
- Schneller Energieverlust  
(Bremsstrahlung)
- Relativ kurze Reichweite (~ 10m)



# Bestimmung des Neutrino-Typs

$\nu_\tau$ :

- Erzeugt Taon
- Taon zerfällt instantan  
 $\tau_\tau = (290,6 \pm 1,0) \cdot 10^{-15} \text{ s}$   
 $\sim 100\text{m}$   
und bildet Schauer wie Elektron
- Relativ kurze Reichweite ( $\sim 10\text{m}$ )





# Allgemeine Probleme

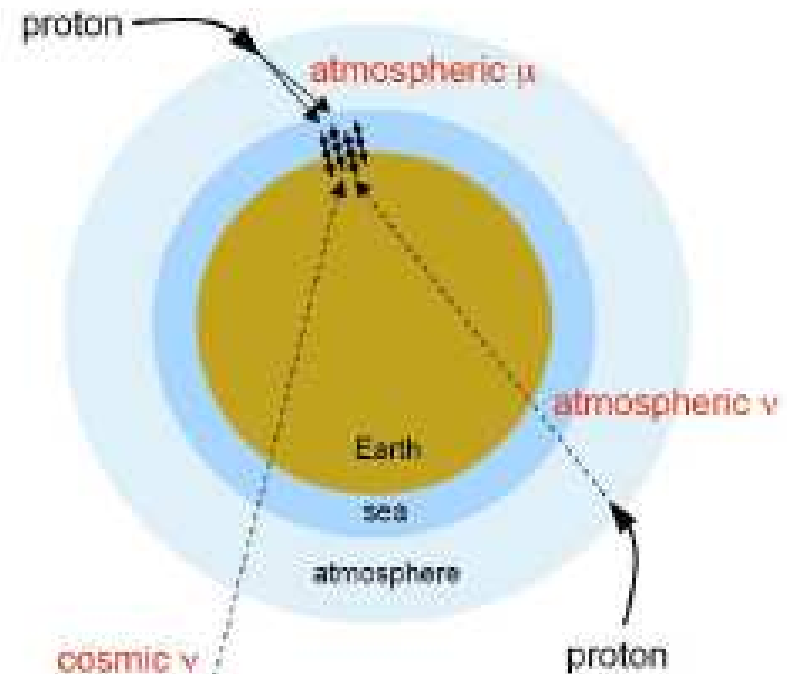
- Keine Unterscheidung zwischen Atmosphärischen und Kosmischen Teilchen möglich

=> Erde als Filter +  
Detektoren in großen Tiefen

- Einzelereignisse müssen aus Untergrund herausgefiltert werden

=> Möglichst geringer Untergrund  
=> Große Tiefen

## Different types of background



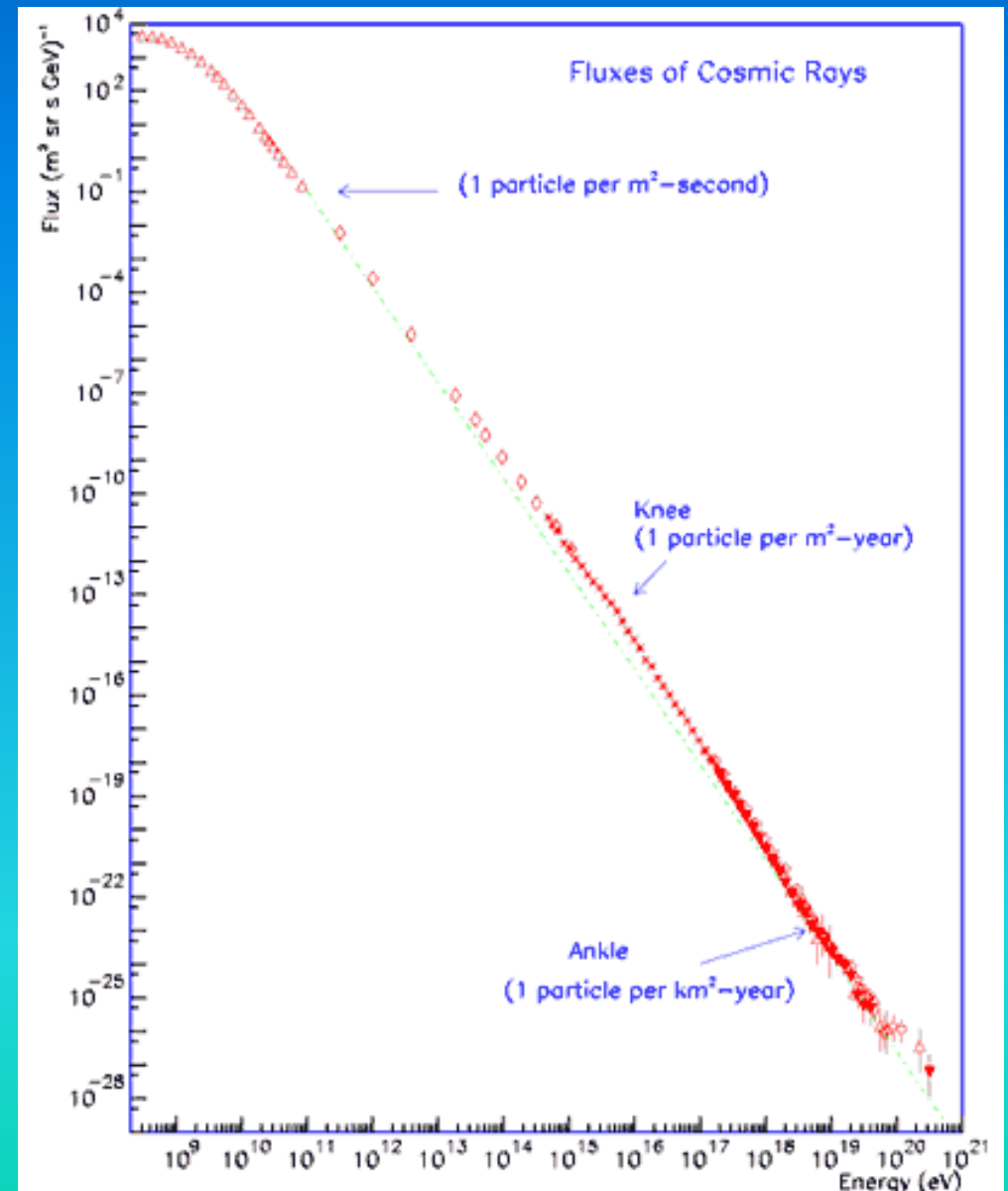
random background	100,000 hits/s per phototube
atmospheric $\mu$	$\sim 300/s$
atmospheric $\nu$	$\sim 10^{-3}/s$

# Allgemeine Probleme

- Sehr geringer Fluss hochenergetischer Teilchen (Protonen)

=> Ähnliches Verhalten erwartet für Neutrinos

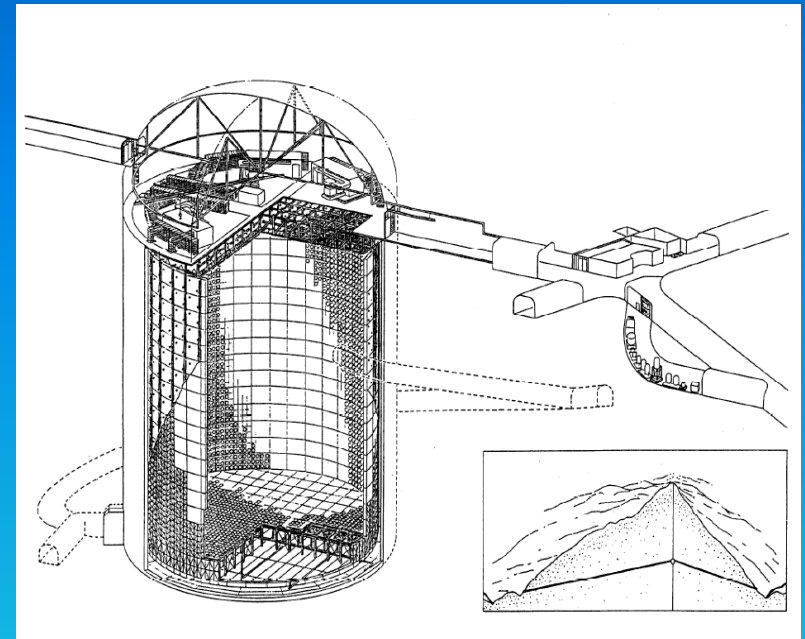
=> Große Detektorvolumina ( $\geq 1\text{km}^3$ )



# Super-Kamiokande (Kamioka Nukleon Decay Experiment)

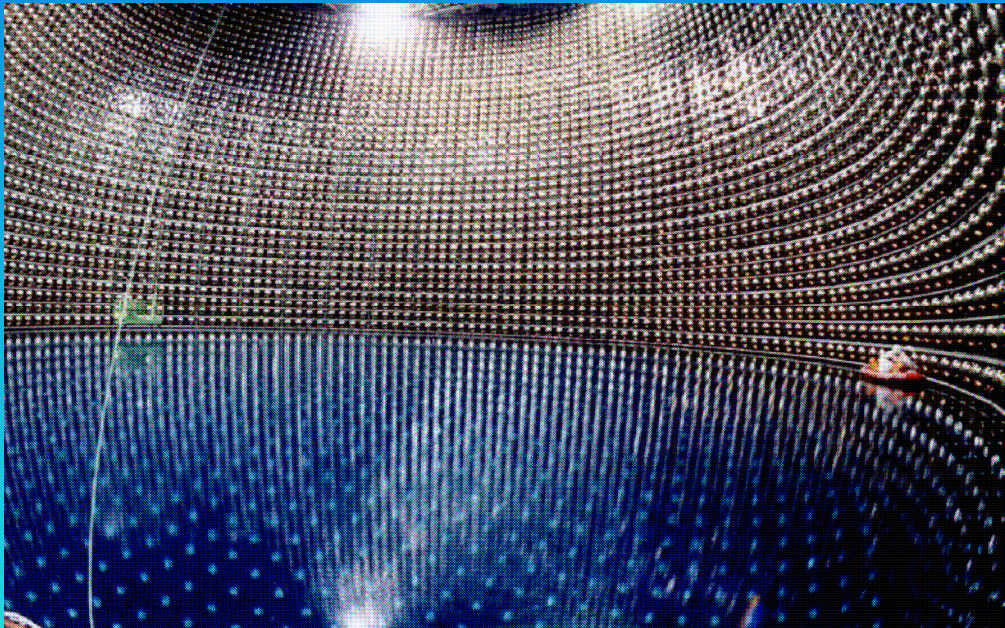
## Aufbau:

- Kamioka, Japan  
(1000m tief in der Mozumi Mine)
- Zweigeteilter Zylinder mit 41,4m Höhe und 39,3m Durchmesser
- 50.000t reines Wasser
  - 32 kt im äußeren Zylinder
  - 18 kt im inneren Zylinder
- 11.200 PMT (50 cm im Durchmesser)
  - Etwa 2000 im äußeren Zylinder
  - Etwa 9200 im inneren Zylinder

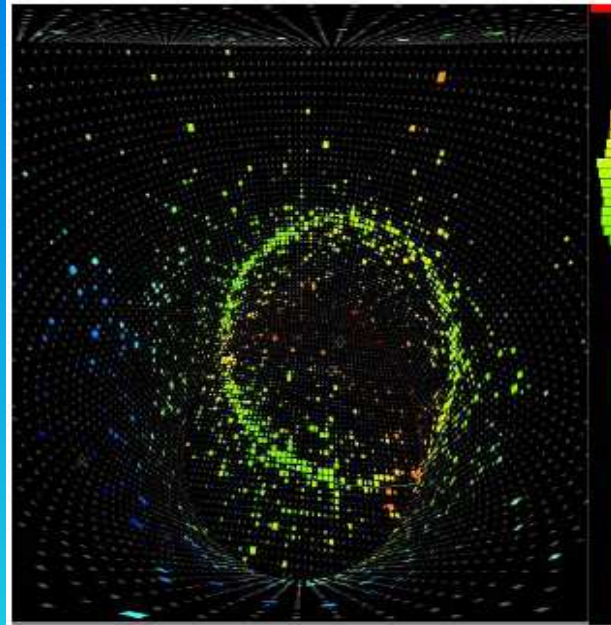




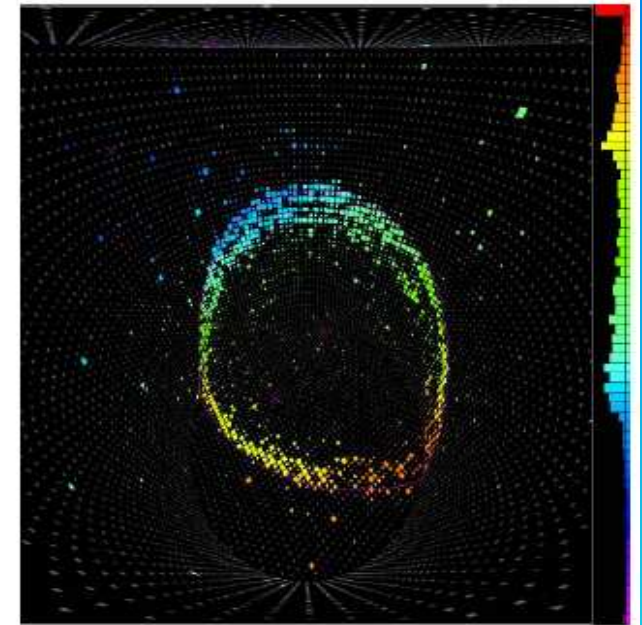
# Super-Kamiokande bei der Befüllung



# Auswertung der Ereignisse



Elektron-Ereignis



Myon-Ereignis

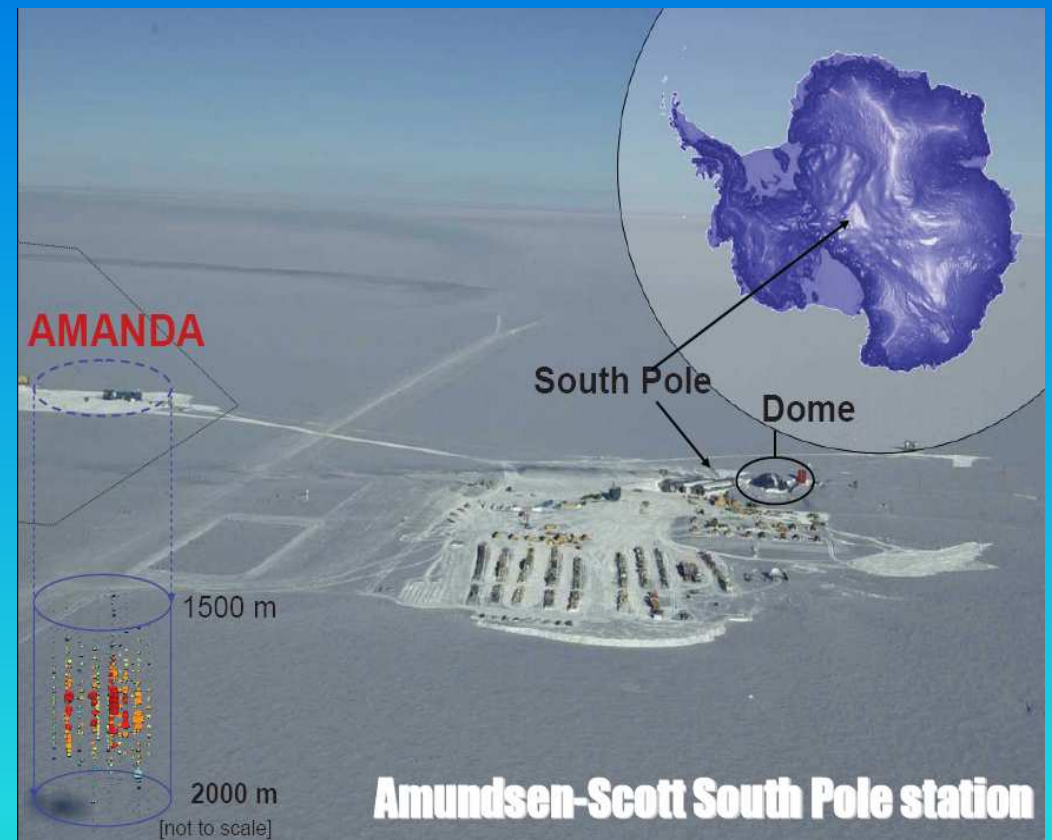


# AMANDA/IceCube

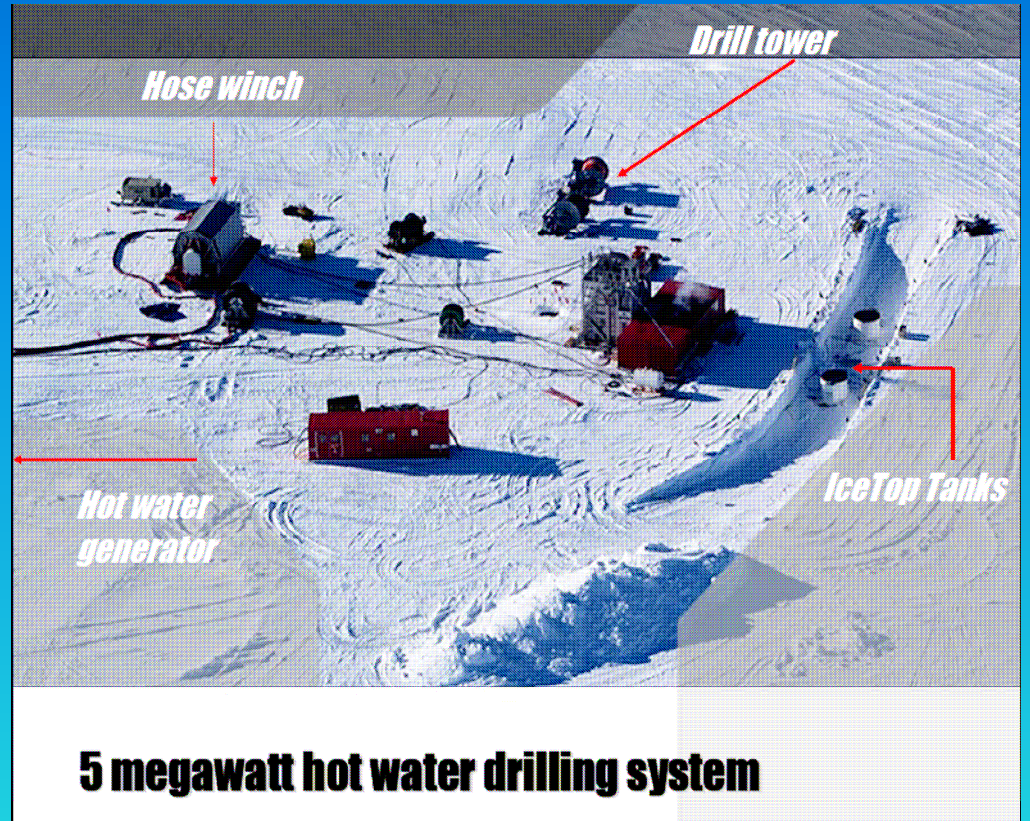
## AMANDA II (Antarctic Muon and Neutrino Detektor Array)

### Aufbau:

- Antarktis
- Zylinder mit 200m Durchmesser
- 400m Höhe in 1500-2000m Tiefe
- $\approx 0,015 \text{ km}^3$  Detektorvolumen
- 677 optische Module (OM)
- 19 Strings mit je 30 – 40 OM
- Abstände der OM:
  - Vertikal 10-20m
  - Horizontal 55-75m
- Weiterentwicklung von AMANDA A und AMANDA B10
- fertiggestellt 2000

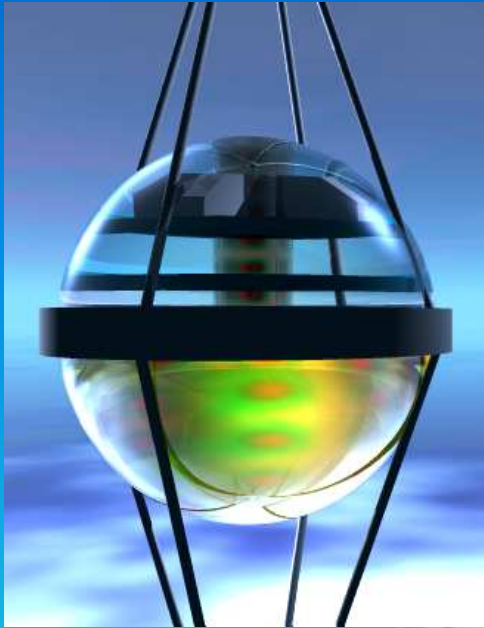


# AMANDA II



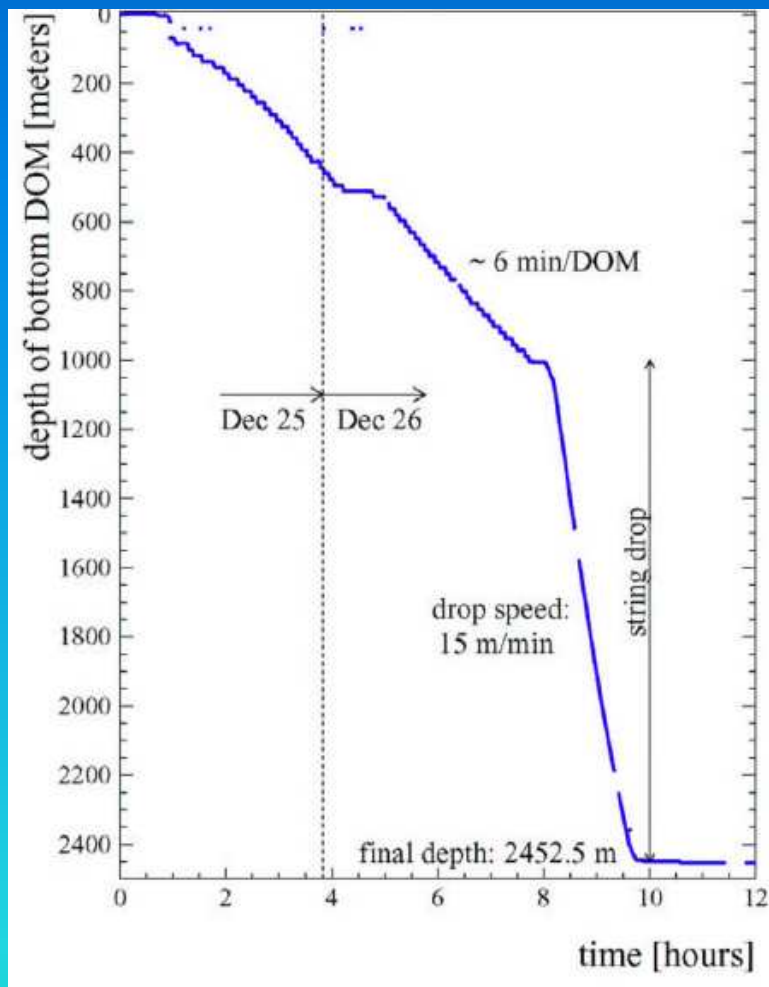


# Einbringen der Strings

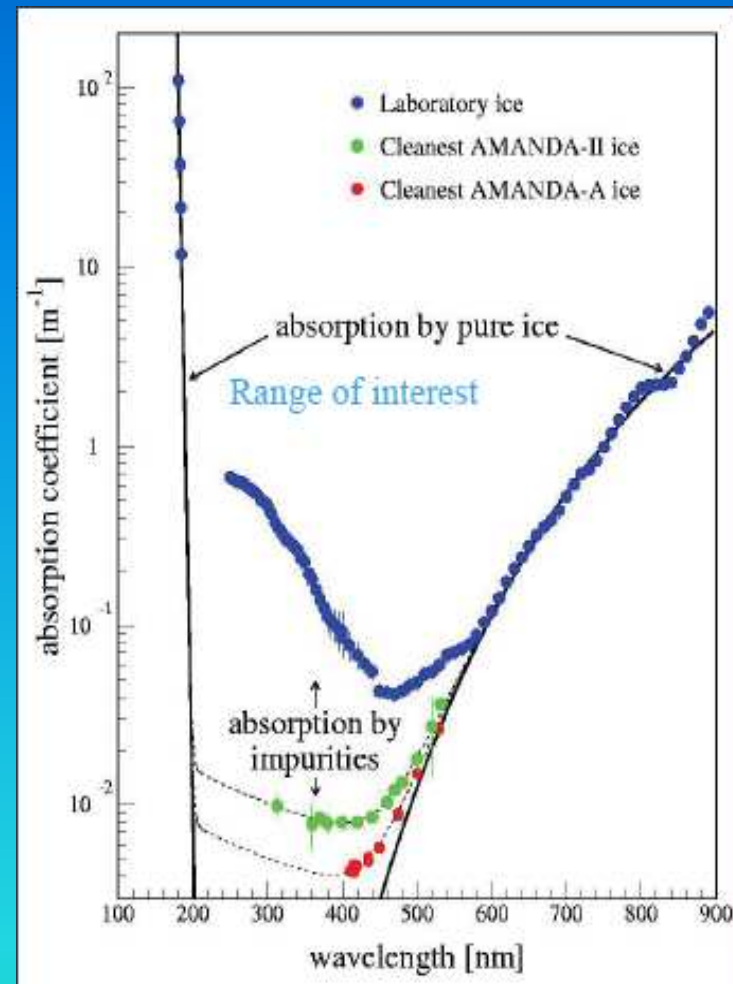




# Einbringen der Strings

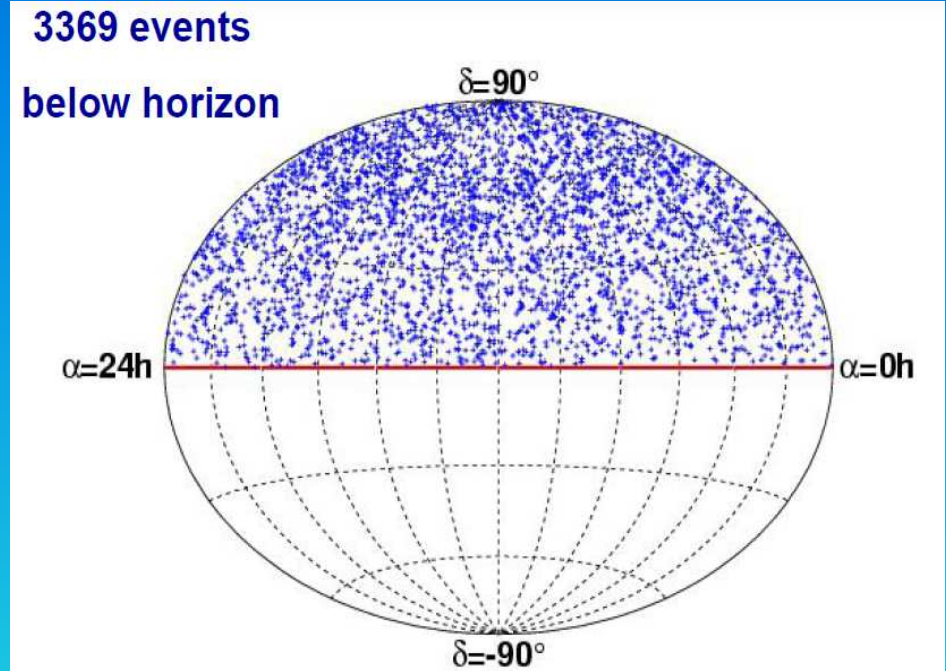
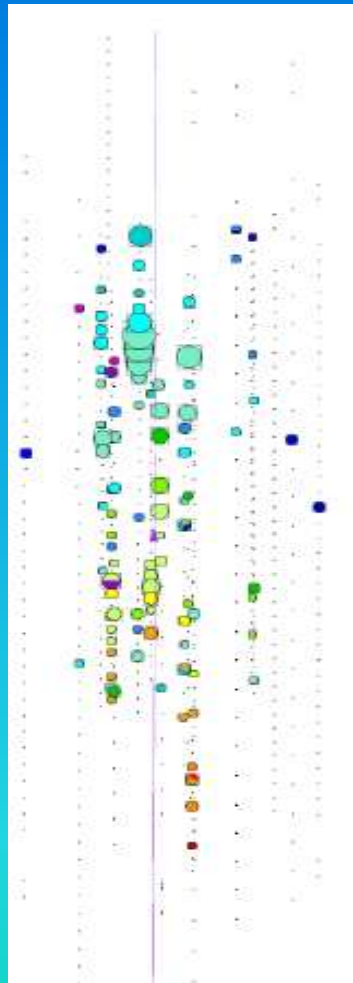
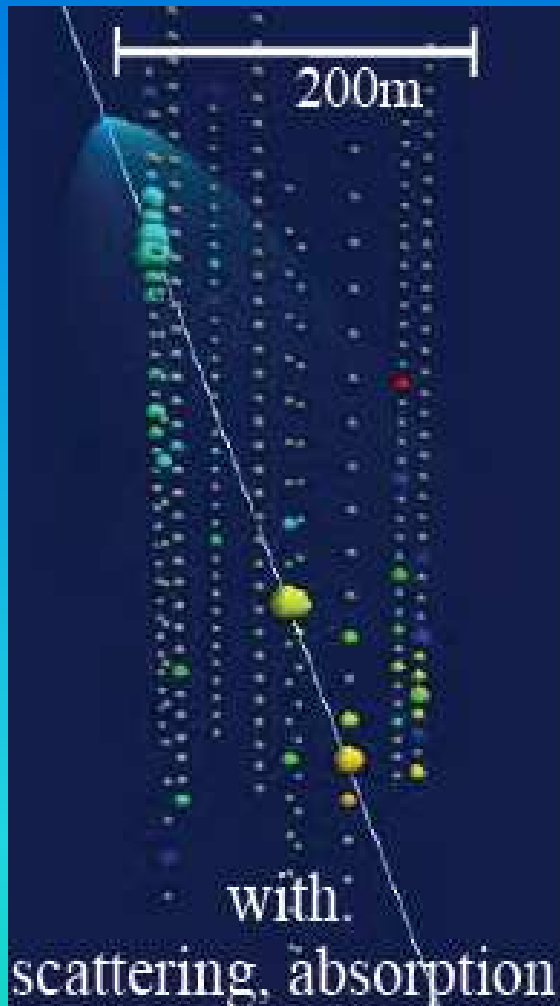


Beispiel einer Bohrung



Absorptionskoeffizient des Eises

# Messergebnisse

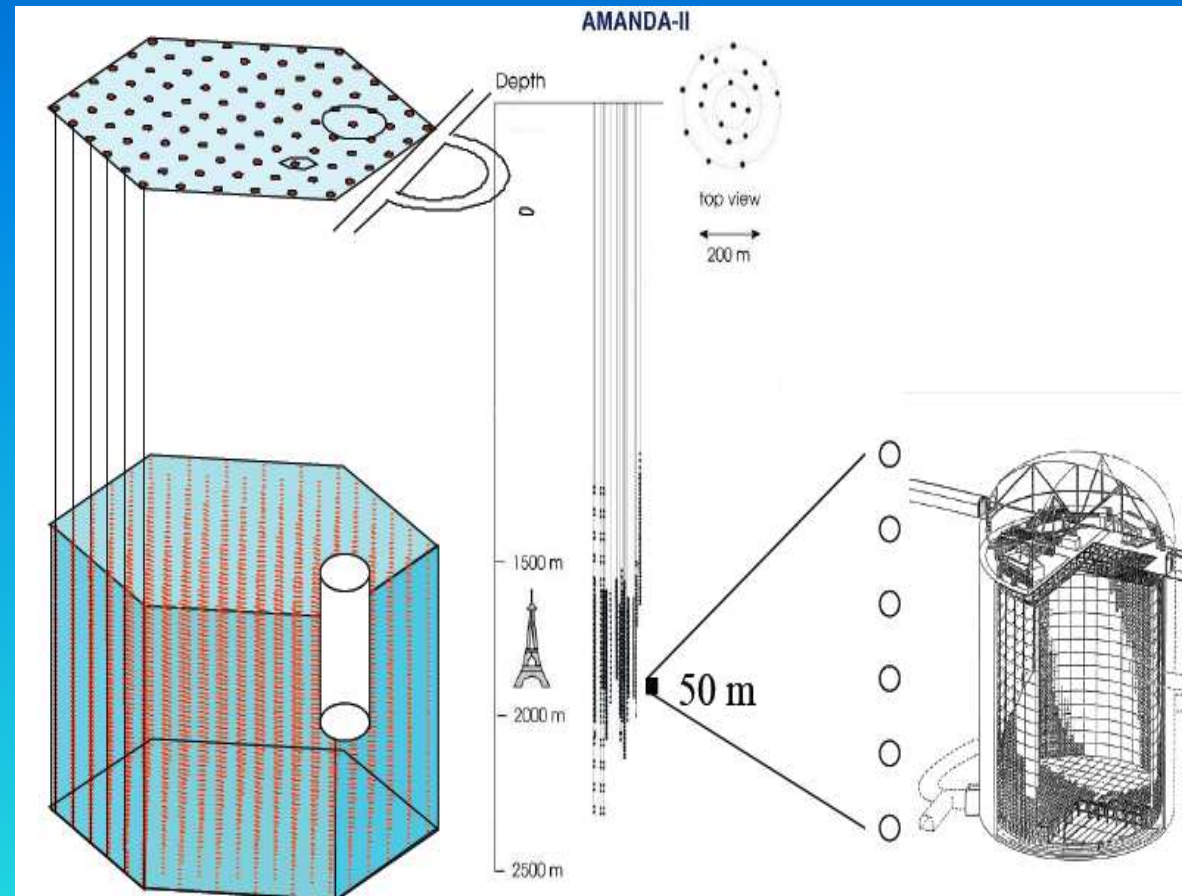


2000-2003

# IceCube

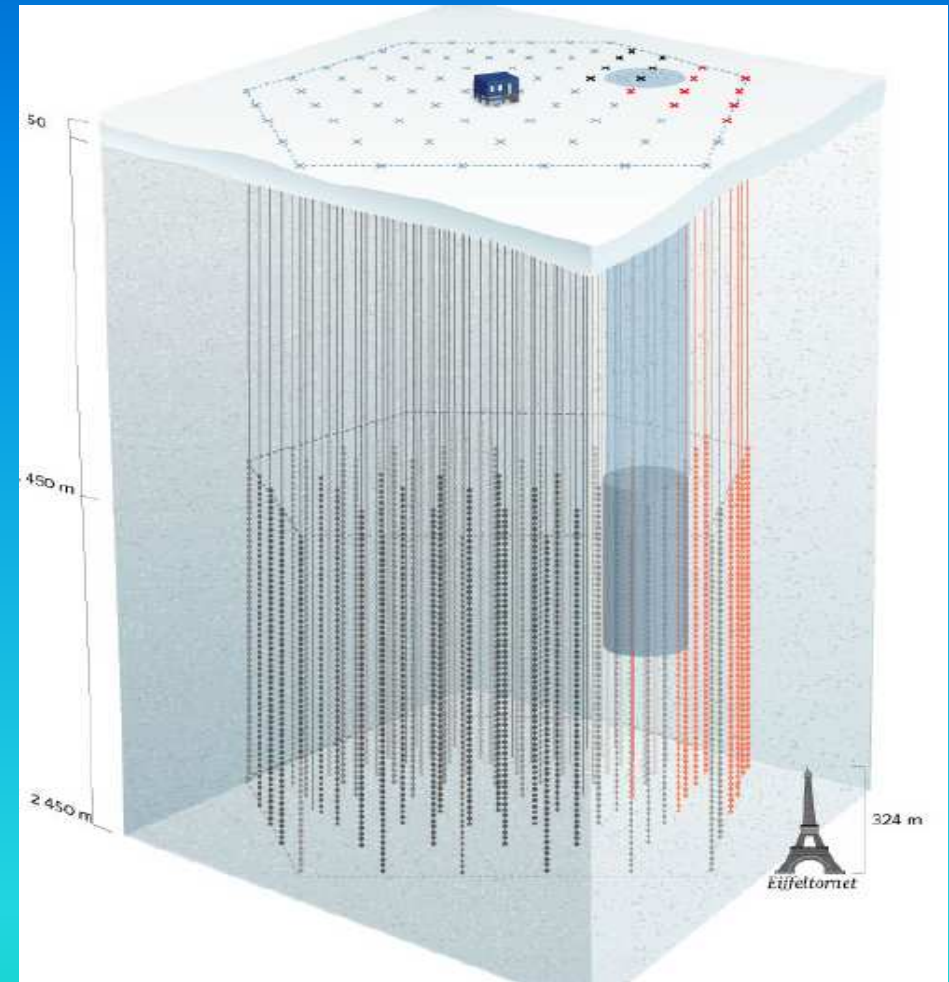
## Aufbau:

- Areal um AMANDA
- Sechseck mit 625m Seitenlänge
- 1450-2450m tief
- $\approx 1 \text{ km}^3$  Detektorvolumen
- 4800 OM
- 80 Strings mit je 60 OM
- Abstände der OM:
  - Vertikal 17m
  - Horizontal 125m
- Erweiterung von AMANDA II
- Januar 2008: 40 Strings im Eis
- Fertigstellung 2011



# IceCube

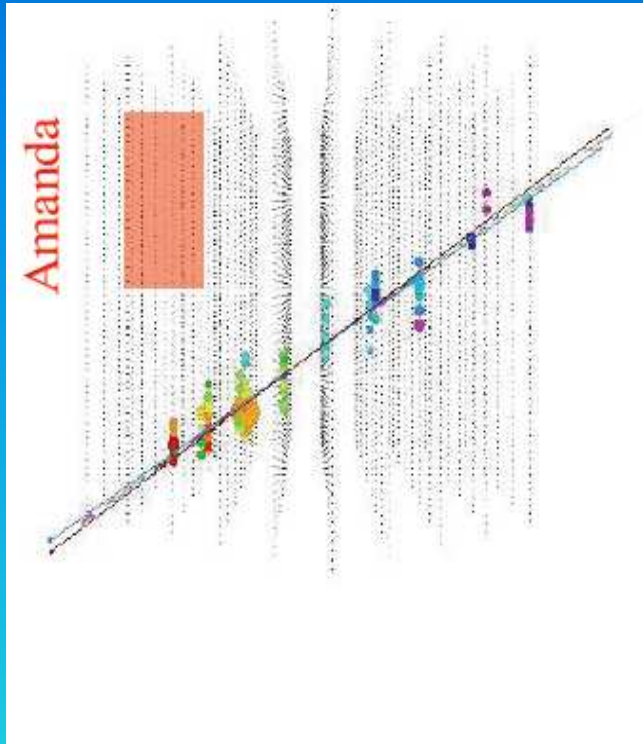
- Zusätzlich zu IceCube im Eis noch 80 Stationen mit zwei Wasser-Tanks und je zwei OM pro Tank an der Oberfläche zur Kalibration  
=> IceTop



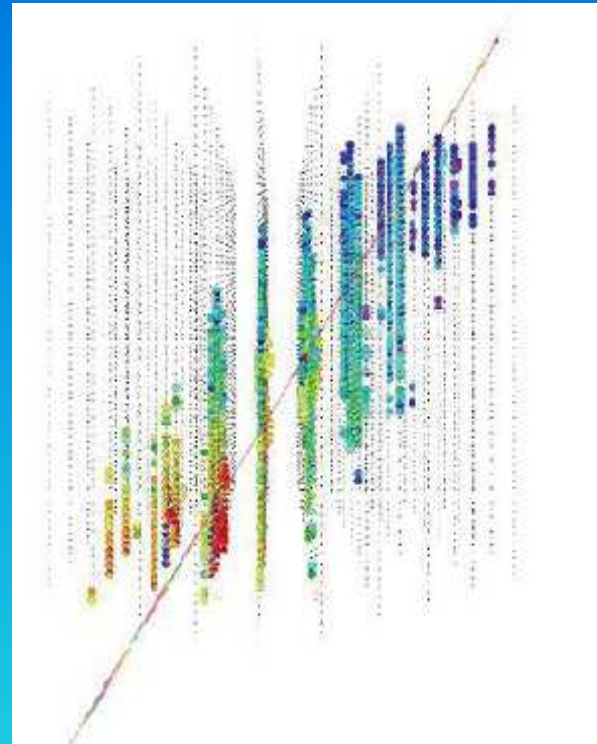
Stand Februar 2006 (9 Strings)



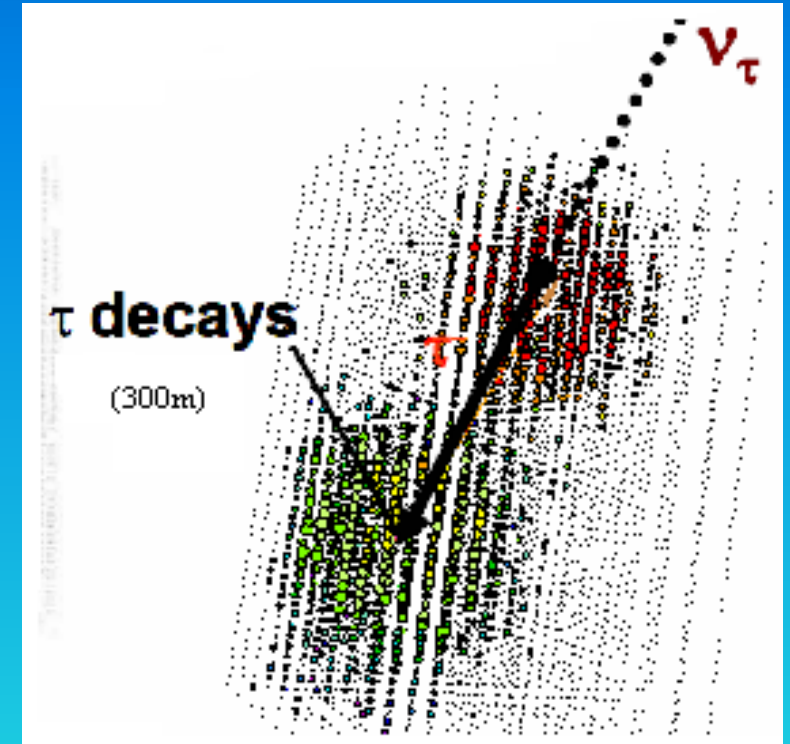
# Erwartete Ergebnisse



$E_{\mu} = 10 \text{ TeV} \approx 90 \text{ hits}$



$E_{\mu} = 6 \text{ PeV} \approx 1000 \text{ hits}$



$\nu_{\tau}$  „Double bangs“

# Erwartete Anzahl an Ereignissen

In den nächsten 10 Jahren werden

weniger als  $10^6$  Neutrinos mit Energien zwischen 0,1 und 1000 TeV

und weniger als 10 Neutrinos mit Energien  $> 10^6$  TeV

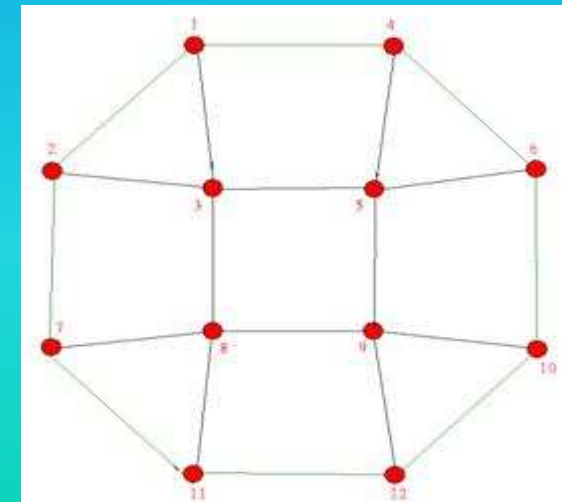
erwartet

# ANTARES/KM3NeT

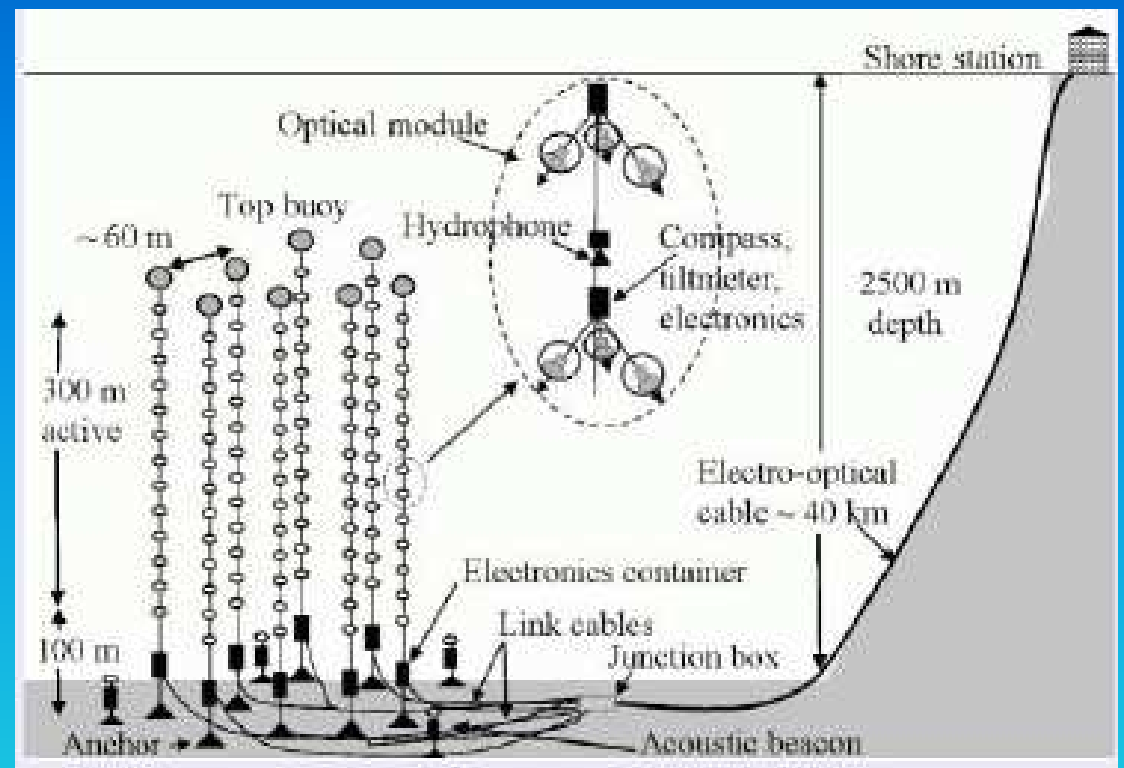
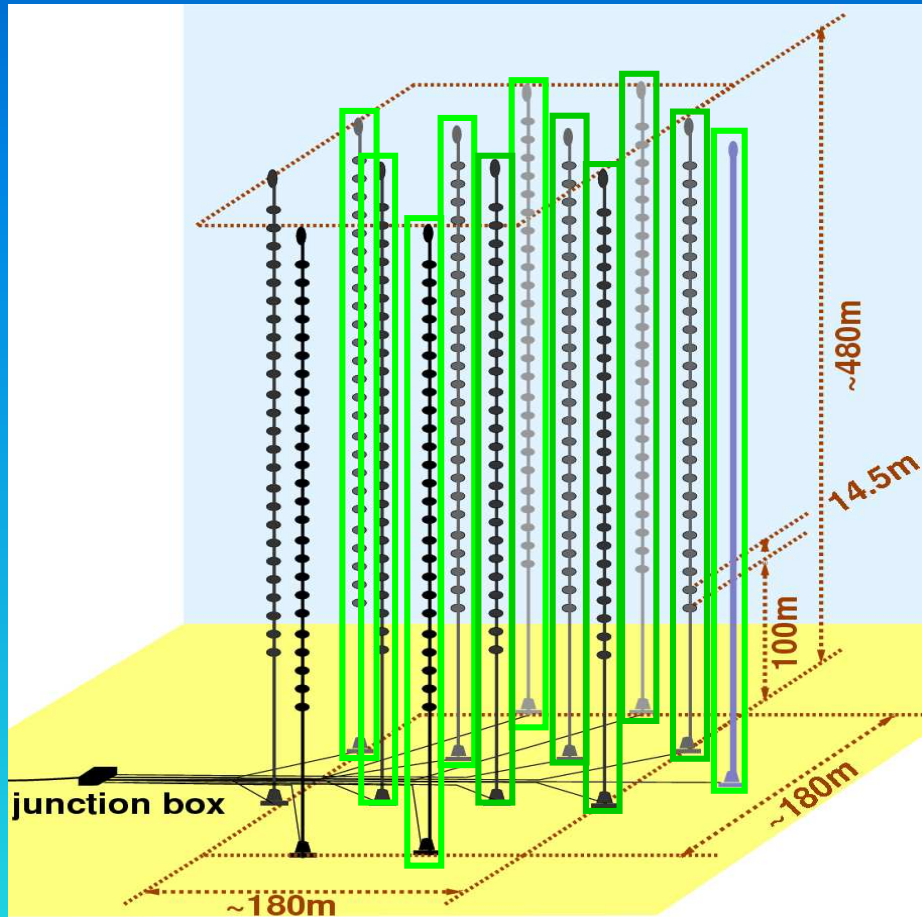
ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abys environmental Research)

## Aufbau:

- Toulon , Frankreich
- Achteck mit 60 –70 m Seitenlänge
- 350 m Höhe in 2500m Tiefe
- $\approx 0,02 \text{ km}^3$  Detektorvolumen
- 900 OM
- 12 Lines mit 25 storeys
- Jedes storey trägt 3 OM
- Abstände der OM:
  - Vertikal 14,5m
  - Horizontal 60-70m
- Januar 2008: 10 Lines + IL in Betrieb
- Fertigstellung 2008

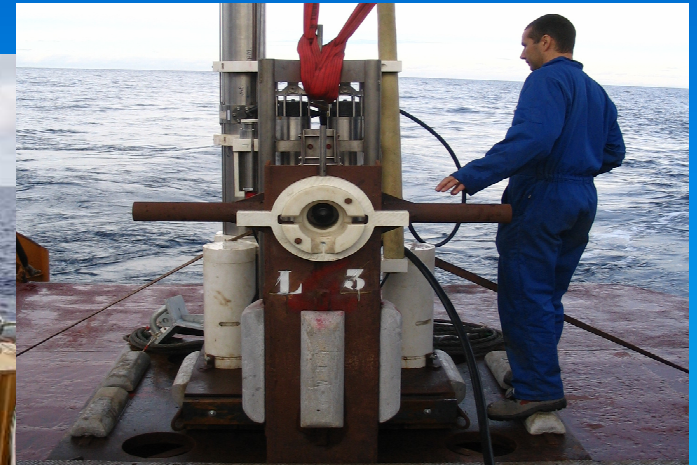


# Aufbau

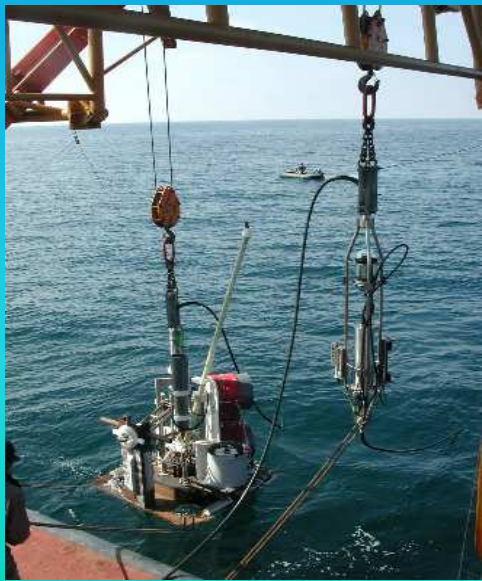




# Installation der Lines



Bodenstück  
Boje



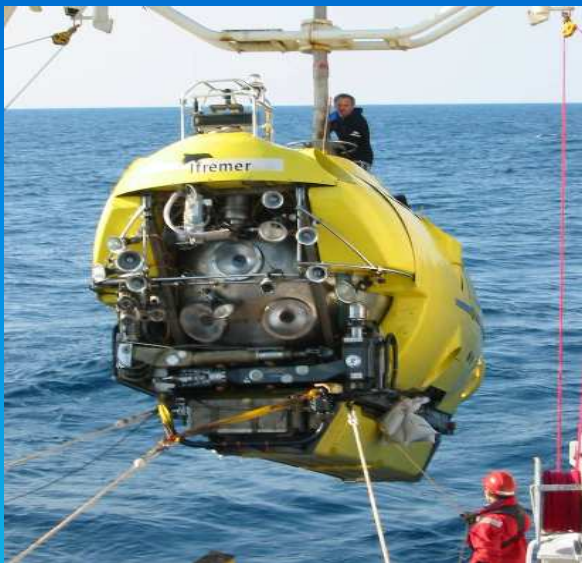
21.01.2008

Alexander Enzenhöfer

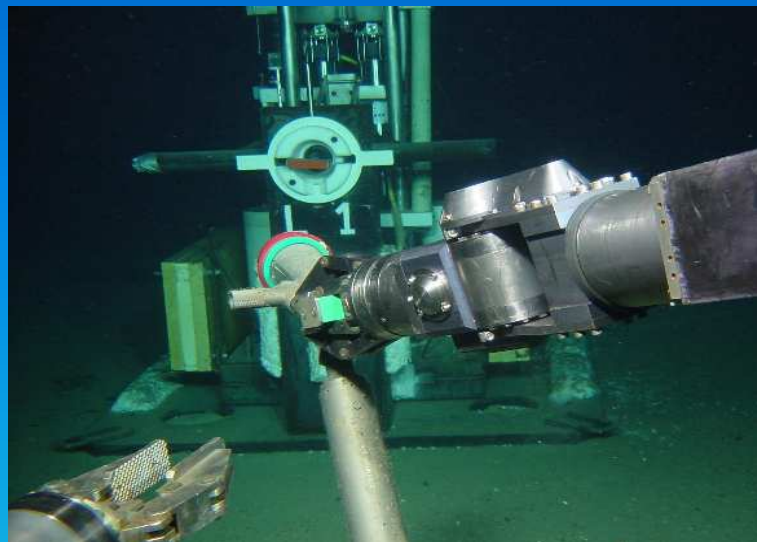
33



# Verkabelung mit der Junction-Box



Zuerst wurde ein bemanntes U-Boot eingesetzt



Verbinden mit dem Bodenstück

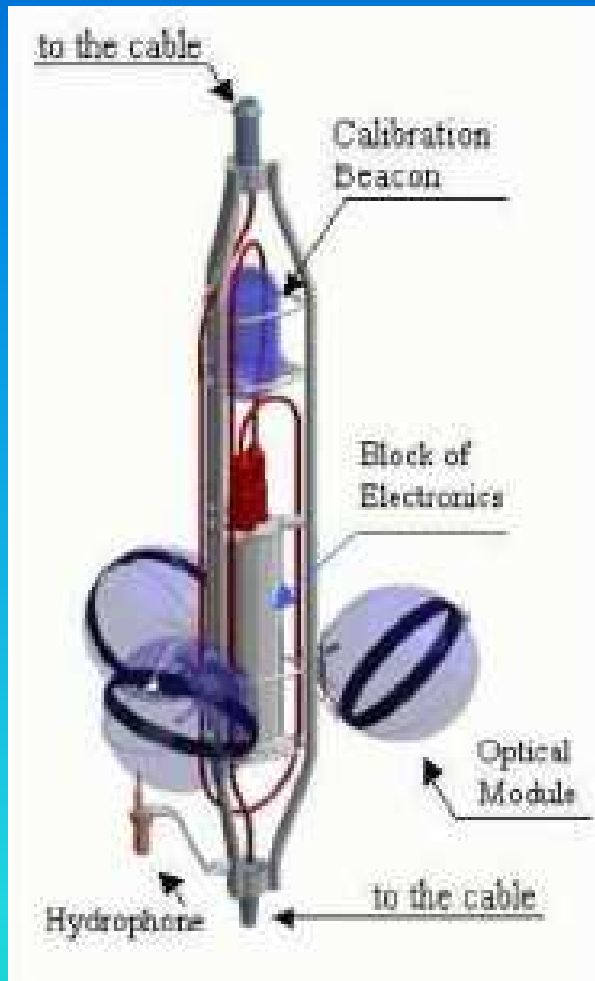


Jetzt wird das U-Boot ferngesteuert



Verbinden mit der Junction-Box

# Storey



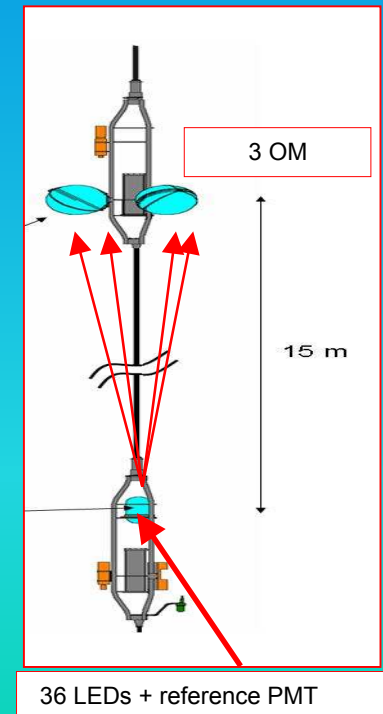
# Positionierung

Rekonstruktion der Myonspur erfordert exakte Zeit- und Ortsbestimmung der registrierten Lichtpulse, aber Wasserbewegung ändert Position der OM ständig.

=> Regelmäßige Positionsbestimmung sowie Zeitmesskalibration notwendig

Dazu enthalten die Storeys verschiedene Instrumente:

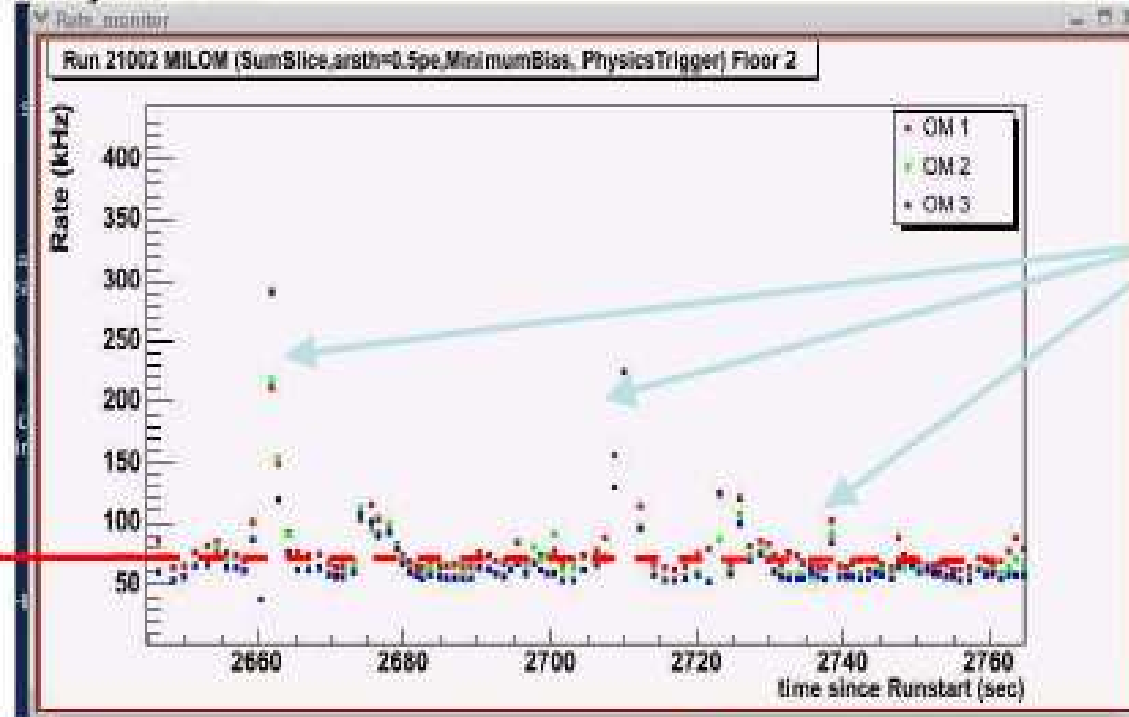
- Kompass : Ermittlung der Verdrehung
- Tiltmeter : Ermittlung der Verkippung
- Hydrophone : Ermittlung des relativen Abstands
- LED-beacons : Zeitmesskalibration



# Probleme in der Tiefsee

- Störung durch Biolumineszenz und Radioaktivität

Analysis Plot



$^{40}\text{K}$  decays (rate ~40-45 kHz)

Bioluminescence : microorganisms

Bursts from macroorganismes  
(strongly affected by current  
velocity)



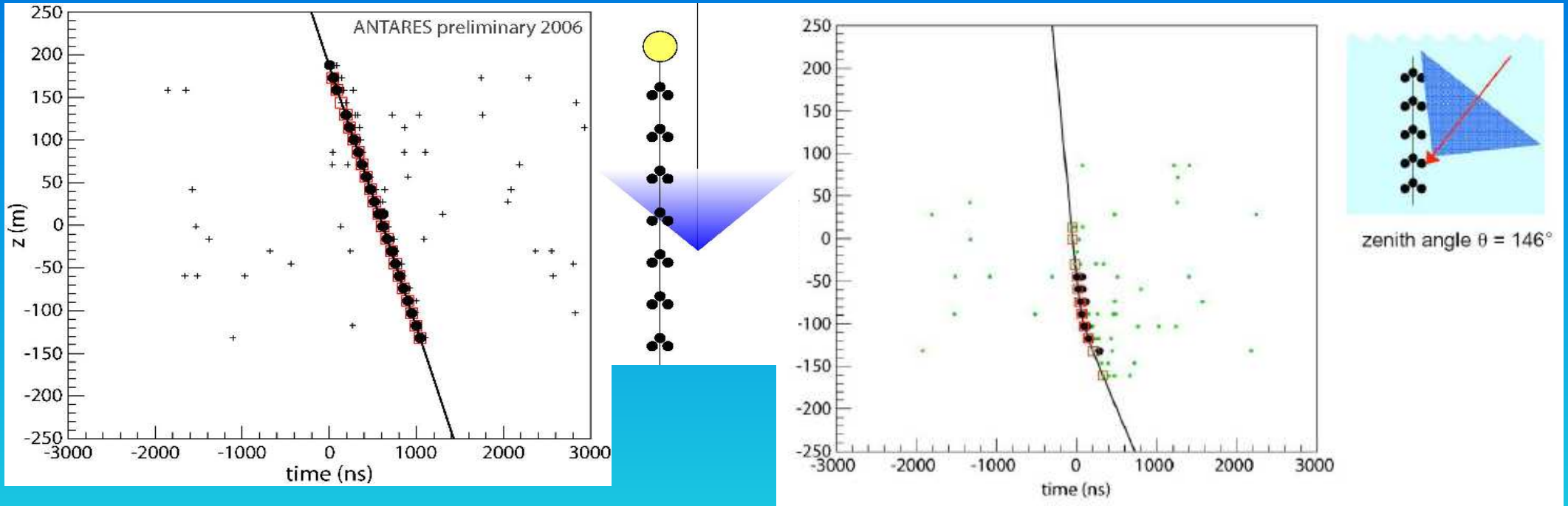
# Probleme in der Tiefsee

- Ablagerungen auf den OM können Sensitivität verringern

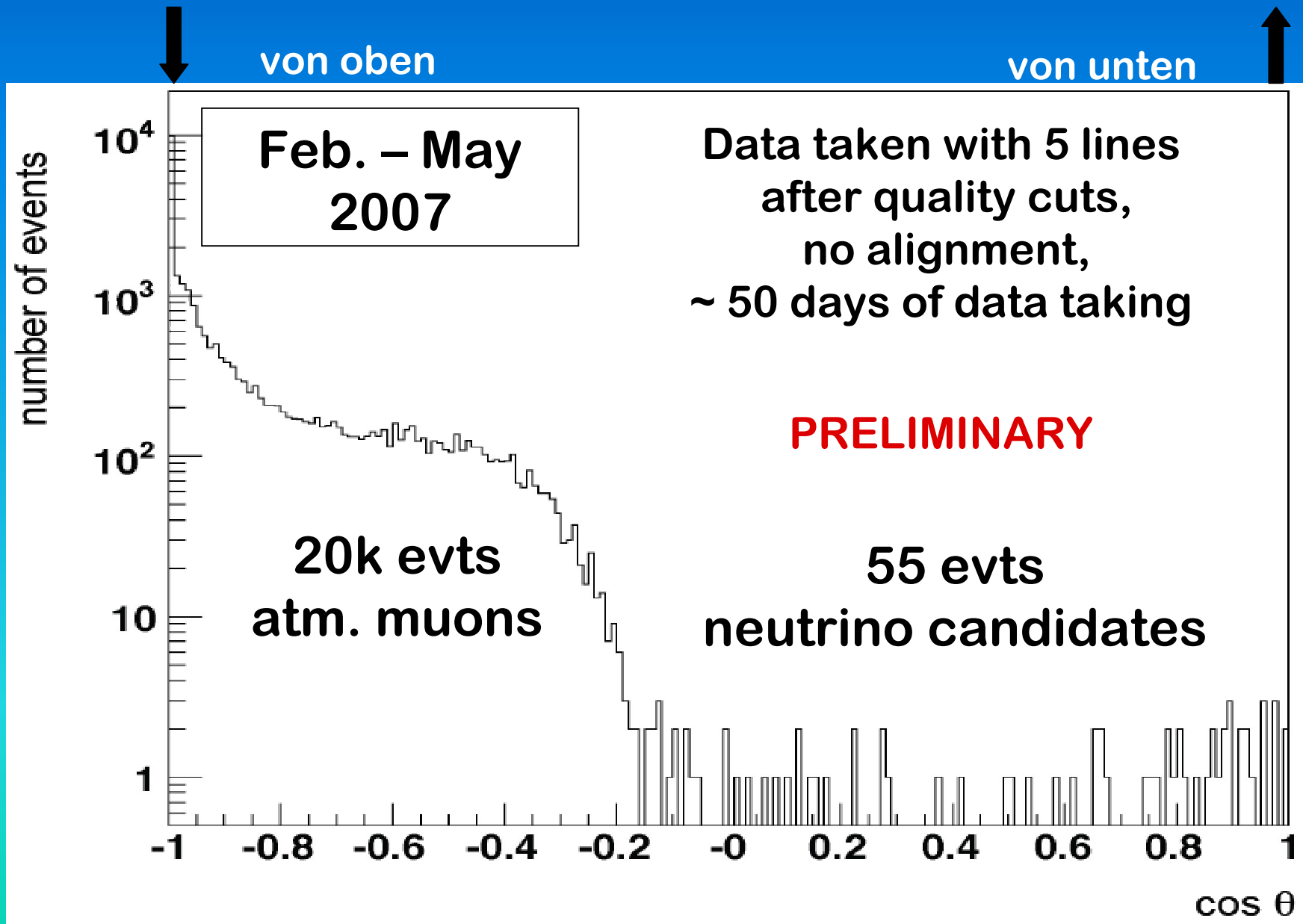




# Messergebnisse



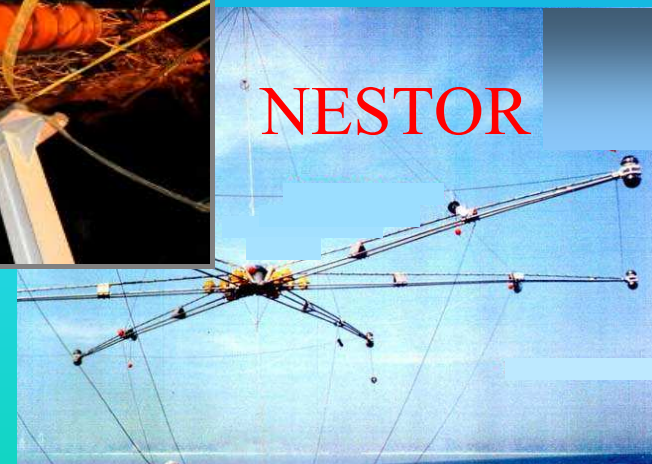
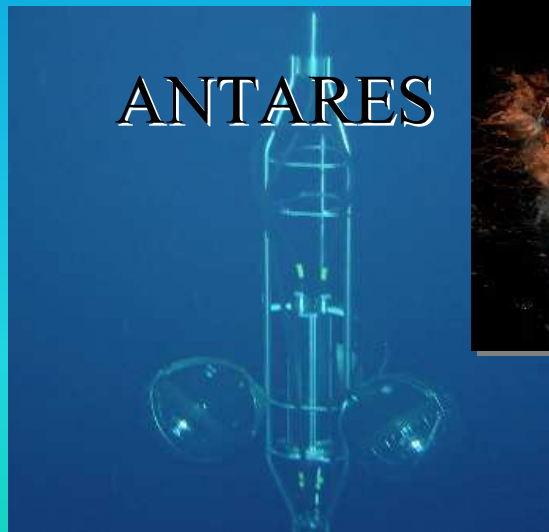
# Messengergebnisse





# KM3NeT (Cubic kilometer sized (km<sup>3</sup>) sea water neutrino telescope)

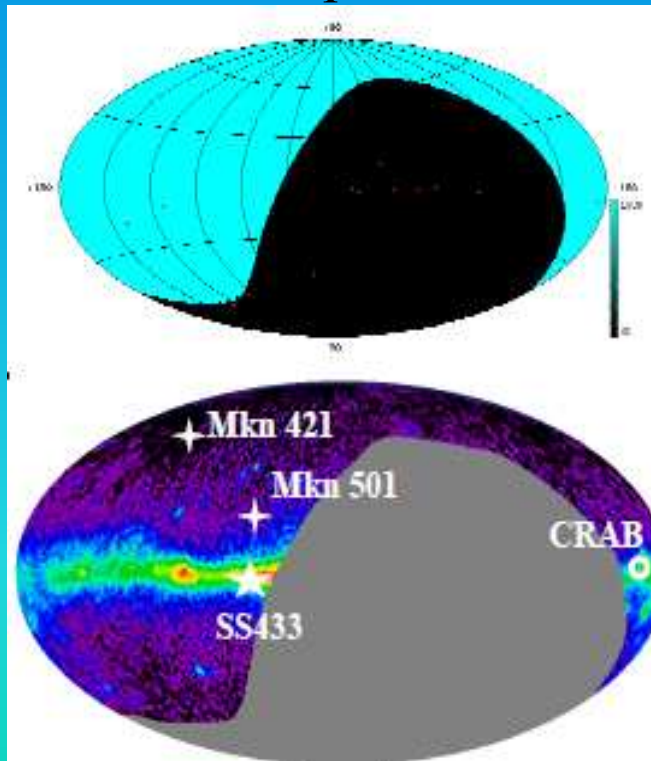
- EU-Design Study
- Projektinitiative 2002
- Datennahme ab 2011 geplant
- Folgeprojekt der europäischen Neutrino teleskope
- Detektorvolumen  $\sim 10\text{km}^3$



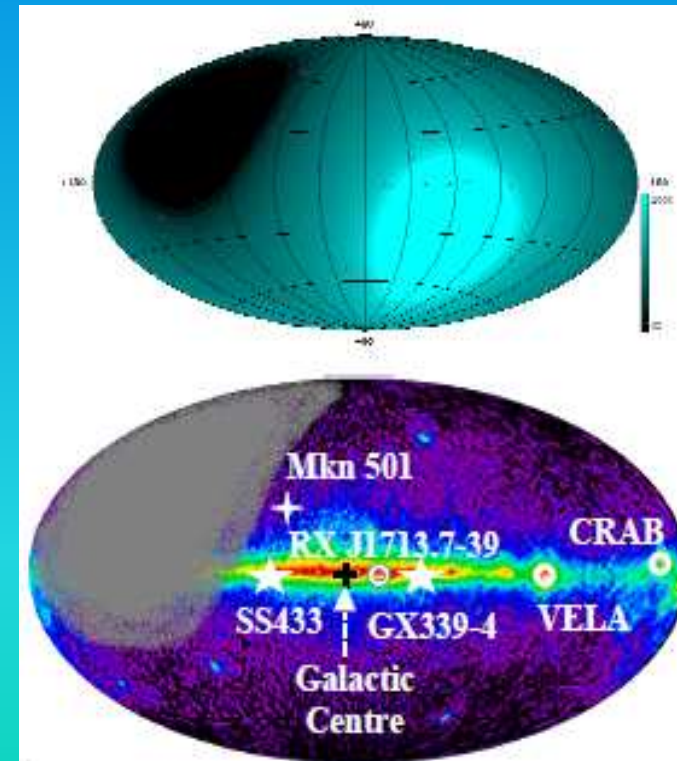
# Zusammenfassung

- Durch Teleskope am Südpol und im Mittelmeer ist eine Beobachtung des gesamten Universums möglich
- ANTARES/KM3NeT sehen dabei das Galaktische Zentrum

Südpol



Mittelmeer



Vielen Dank

für ihre Aufmerksamkeit

# Literatur

- Kosmische Strahlung: <http://www.astroteilchenschule.physik.uni-erlangen.de>
- Super-Kamiokande: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/index.html>
- AMANDA: <http://amanda.uci.edu/>
- IceCube: <http://icecube.wisc.edu/>
- ANTARES: <http://antares.in2p3.fr/>
- KM3NeT: <http://www.km3net.org/>