

Das Neutrinoobservatorium ANTARES: ein neues Fenster in den Weltraum

Überblick

Neutrinos in der
kosmischen Strahlung

ANTARES

Neutrinoobservatorium
im Mittelmeer

Physik-Fragen

Neutrinoastronomie,
WIMPs, Oszillationen

Aufgaben

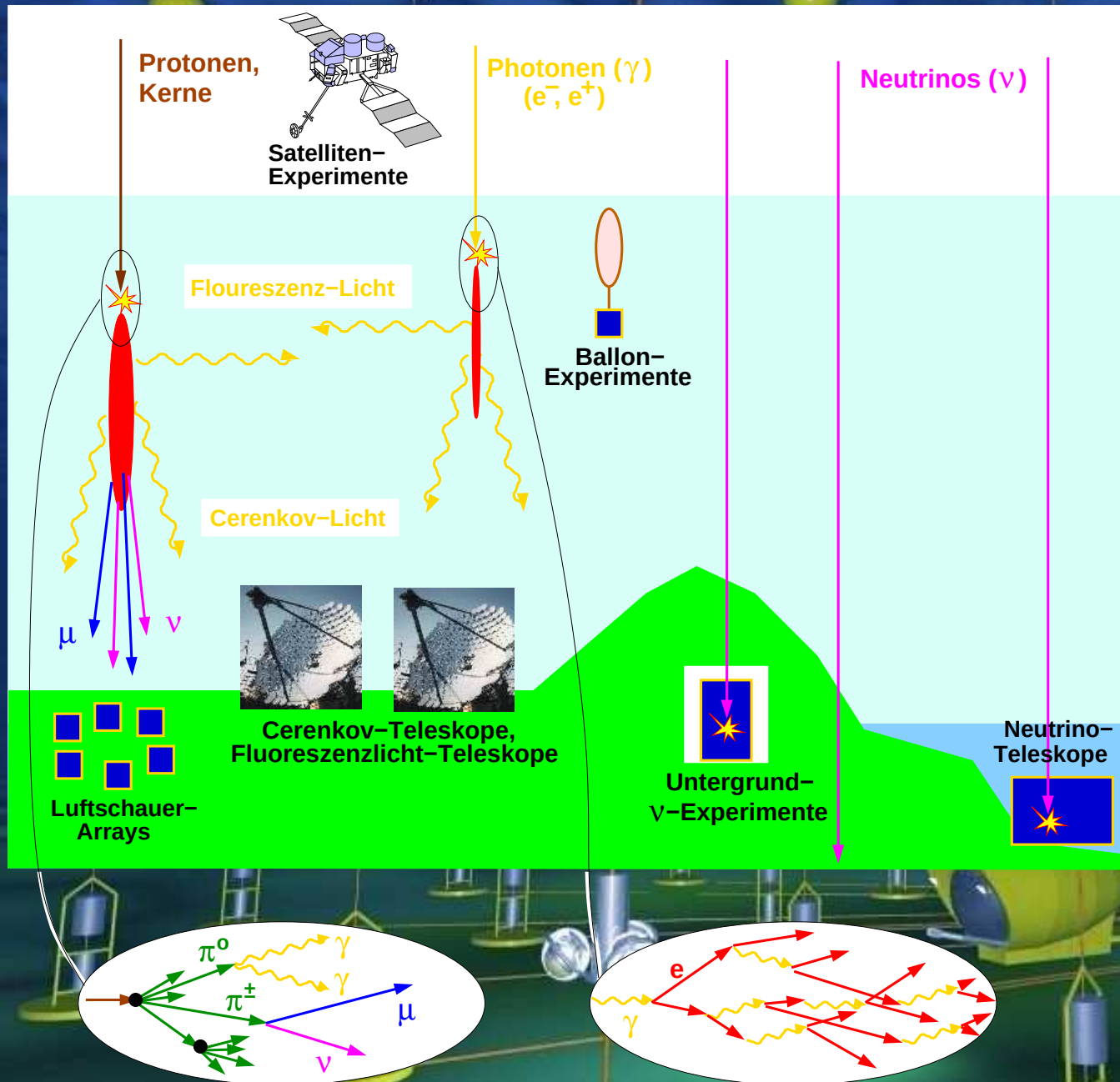
Verantwortlichkeiten und
Beiträge zu ANTARES

Zusammenfassung und Ausblick

Ulrich F. Katz
Universität Erlangen/
Universität Bonn
31. Mai 2002



Kosmische Strahlung



Protonen, Kerne

- Ablenkung in Magnetfeldern
→ Quelle unbekannt.
- Hadronischer Schauer in Atmosphäre.

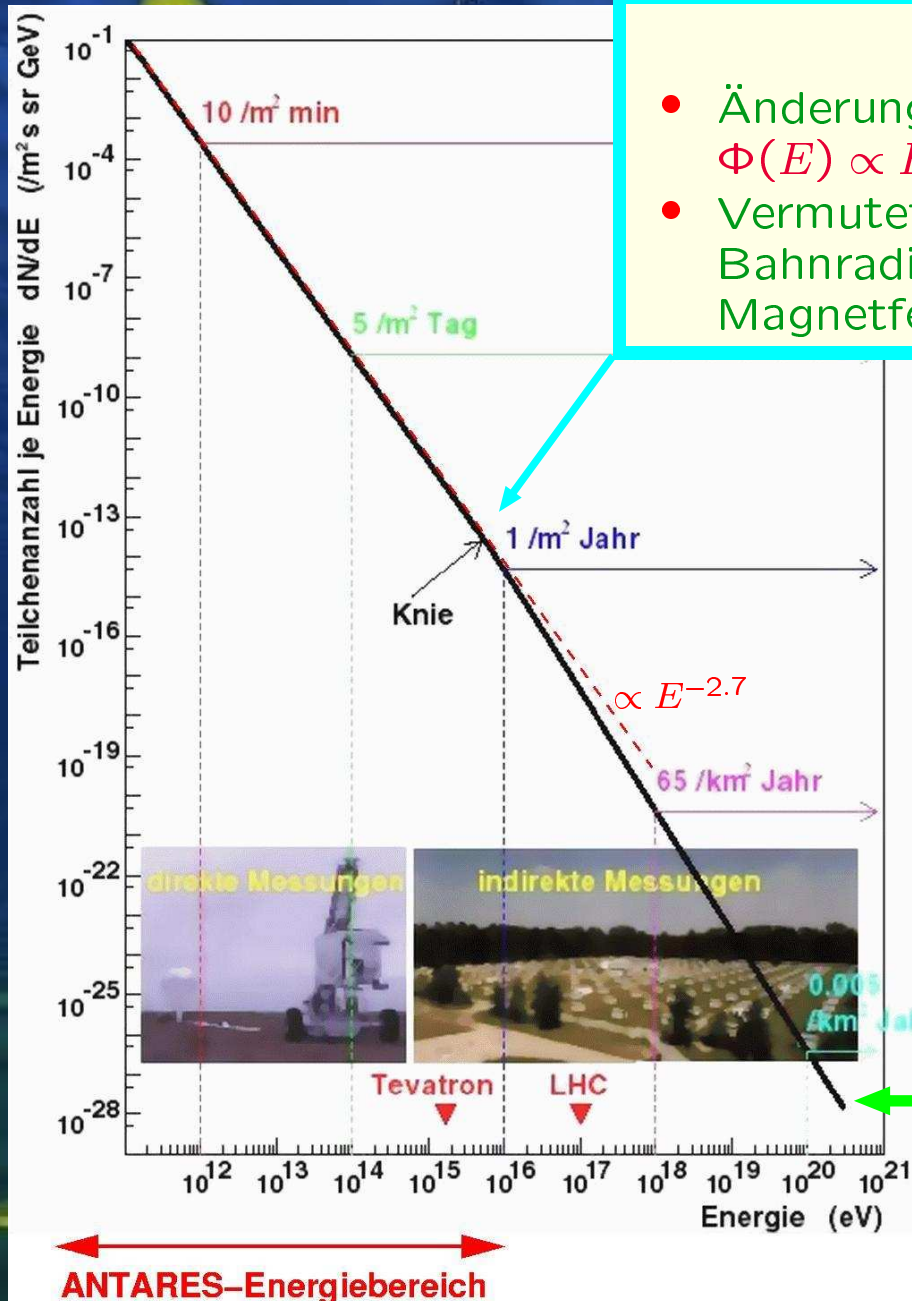
Photonen (γ)

- Keine Ablenkung.
- Niedrige Energie: Radio, Licht, Röntgen.
- Hohe Energie: teilchenartig, elektromagnetischer Schauer.

Neutrinos (ν)

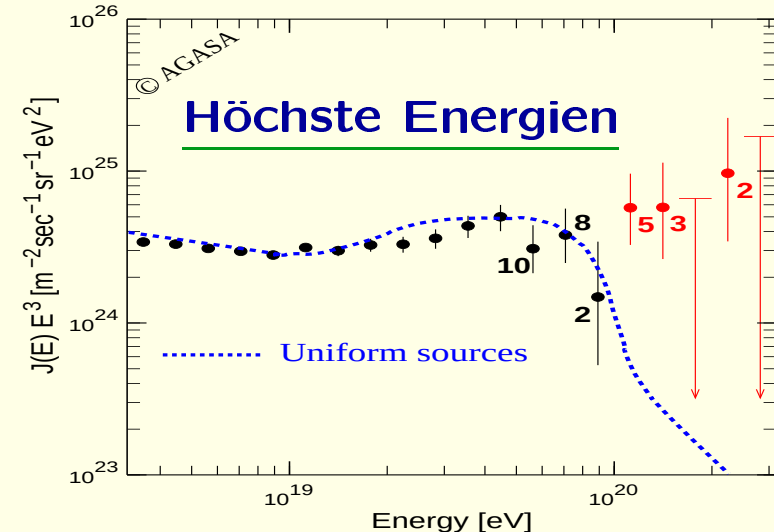
- Keine Ablenkung.
- Reaktionswahrscheinlichkeit sehr klein.
- Massive Detektoren, dicke Abschirmung.

Geladene Komponente: Energiespektrum und Fluss



Knie

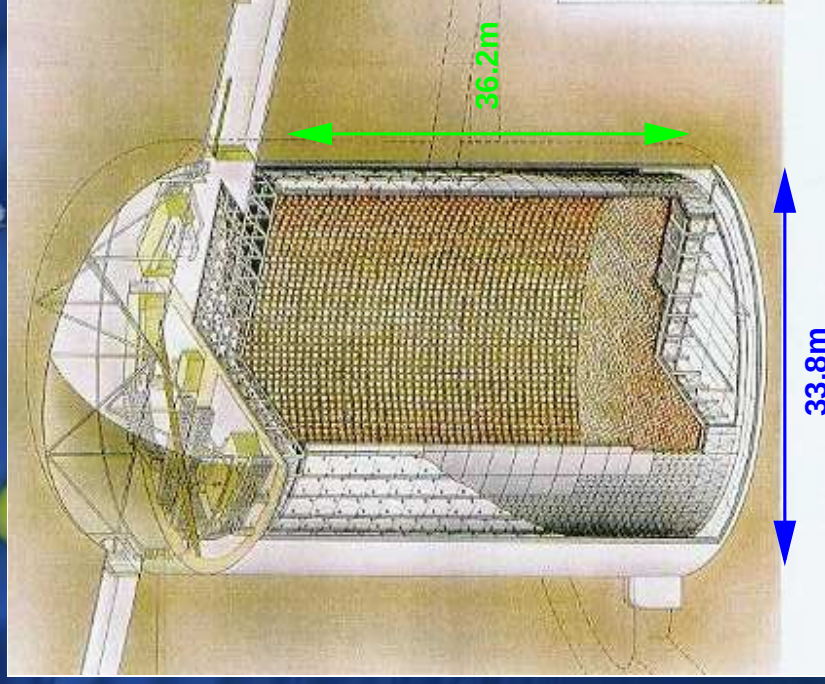
- Änderung des spektralen Index:
 $\Phi(E) \propto E^{-2.7} \rightarrow \Phi(E) \propto E^{-3}$.
- Vermutete Ursache:
Bahnradius im galaktischen Magnetfeld wird $\sim \mathcal{O}(\varnothing_{\text{Galaxie}})$.



Greizen-Zatsepin-Kuzmin-Cutoff (GZK)

- Reaktionen mit Hintergrundstrahlung:
 $p + \gamma \rightarrow p + \pi^0, n + \pi^+ (\rightarrow \nu, \mu, \gamma);$
 $A + \gamma \rightarrow A + e^- e^+.$
- Energieverlust $\rightarrow$ keine Ereignisse oberhalb $\sim 10^{20}$ eV erwartet.

Niederenergetische Neutrinos: Sonne und Supernovae



Experimente:

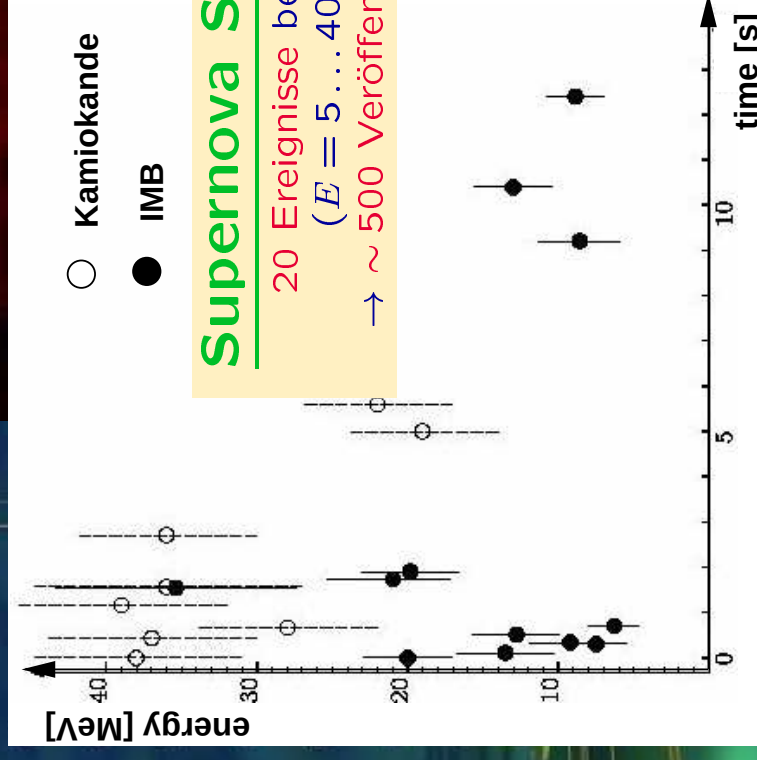
Super-Kamiokande (SK)

und viele andere
(Homestake, IMB, Gallex,
Sage, GNO, **SNO**, Borexino, ...)

Neutrino-Bild
der Sonne (SK)

Sonne:

- $\sim 3 \times 10^{10} \nu/\text{s}/\text{cm}^2$ auf Erde
($E \sim 0.1 \dots 10 \text{ MeV}$).
- SK: $\lesssim 1$ Ereignis/Tag/ $10^3 \text{ t H}_2\text{O}$.



Supernova SN1987a:

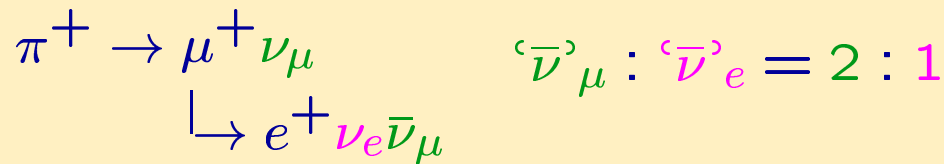
20 Ereignisse beobachtet
($E = 5 \dots 40 \text{ MeV}$)
→ ~ 500 Veröffentlichungen.

Neutrino-Oszillationen

Solare Neutrinos (ν_e)

- Exp. Fluss/Vorhersage $\sim 0.3 - 0.6$ (hängt von E_ν -Bereich ab).
- "Anpassung" der Vorhersage schwierig bis unmöglich.

Atmosphärische Neutrinos



Quantenmechanische Mischung

ν -Masseneigenzustände
 $\leftrightarrow$ ν -Flavor-Eigenzustände

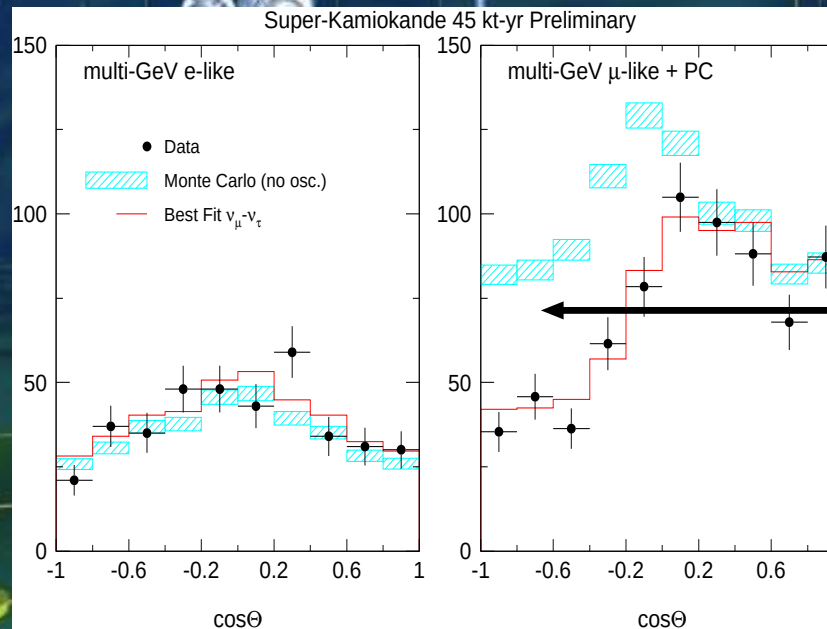
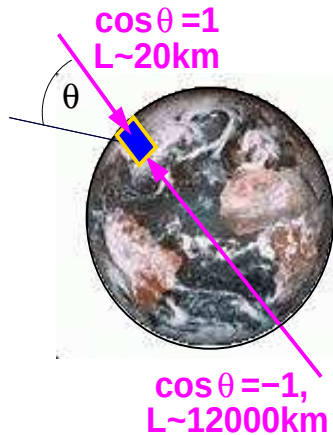
$\Rightarrow$ ν -Oszillationen

$$P_{a \rightarrow b} = \sin^2(2\theta_{ab}) \sin^2 \frac{1.27 L [\text{km}] \Delta m_{ab}^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]}$$

Mischungswinkel

Massen²-Differenz

SK:
 $E_\nu \sim 0.1 \dots 10 \text{ GeV}$



Interpretation

- $(\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau)$ -Oszillationen.
- Bester Fit:
 $\Delta m^2 \sim 0.0025 \text{ eV}^2$,
 $\sin^2(2\theta) = 1$.

Was wir (noch) nicht wissen

- Von welchen Objekten kommen die hoch-/höchstenergetischen kosmischen Strahlen?
- Wie funktioniert deren Beschleunigung, vor allem jenseits etwa 10^{15} eV?
- Was für Teilchen sind das bei $\gtrsim 10^{19}$ eV?
Wo kommen sie her?
Funktioniert der GZK-Effekt wie erwartet?

... und außerdem:

- Was ist die Natur der dunklen Materie?
- Alles über Neutrinos.

Neutrino-Oszillationen

Richtung und Energie atmosphärischer ν 's

Neutrinos von WIMP-Annihilation?

z.B. wenn WIMPs supersymmetrisch sind

Neutrino-Astronomie

Richtung, Energie, unbegrenzte Sichtweite

Neutrinos von γ -Quellen?

wenn ja: hadronische Prozesse (π -Zerfall)

Neutrinos vom GZK-Effekt?

Erwartet: diffuser Fluss hochenergetischer ν 's

Die ANTARES-Kollaboration

ANTARES

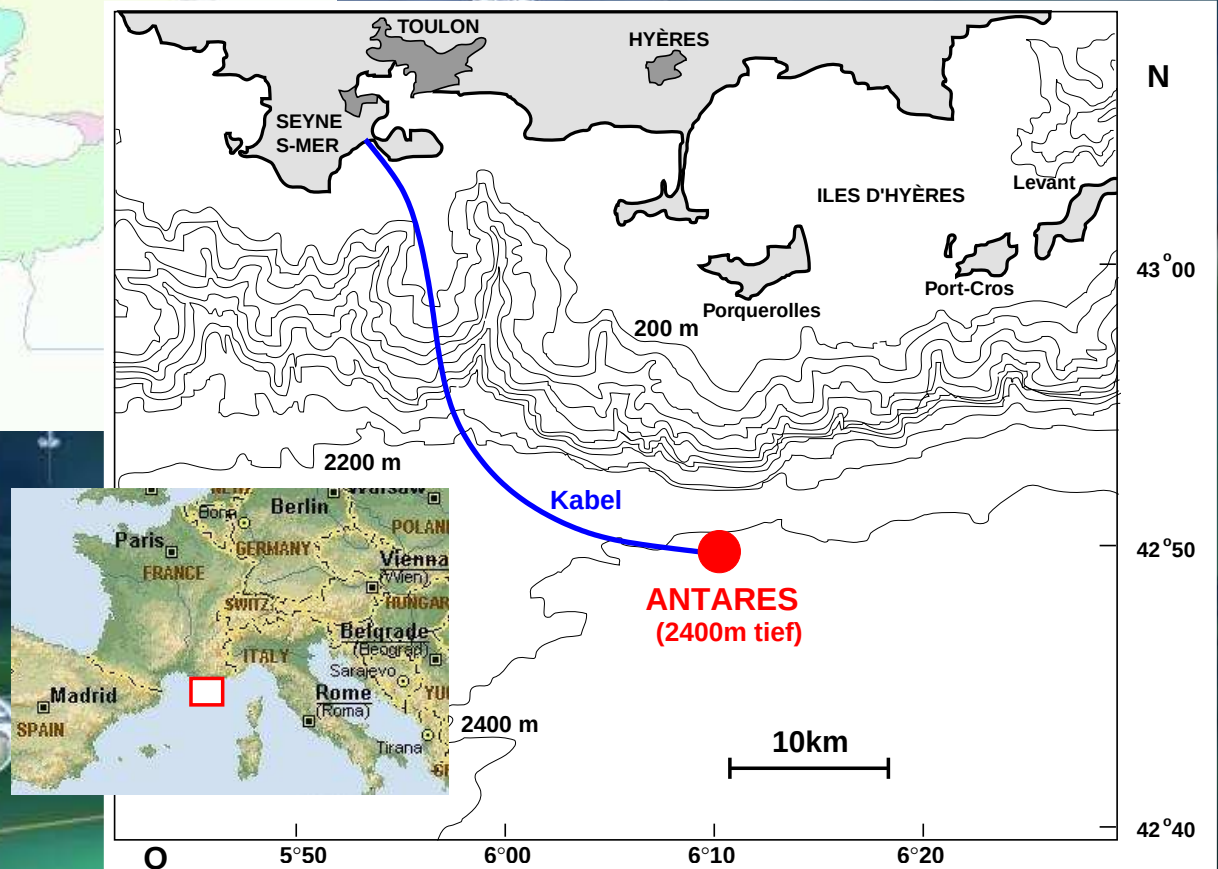
Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss Environmental Research

- Herausforderung:
High-Tech-Präzisionsexperiment im offenen Meerwasser in 2.4 km Tiefe.



Kollaboration

- 21 Institute, darunter
16 Teilchenphysik,
3 Astronomie/Astrophysik,
2 Meeresforschung.
- Erlangen (Phys. Institut)
Mitglied seit Nov. 2001.
- Insgesamt ca. 150 Autoren
(Wissensch., Ingenieure).



Der ANTARES-Detektor

Künstlerische
Darstellung
(nicht detailgetreu)

Messziele:

- Neutrino-Fluss;
- Neutrino-Energie;
- Neutrino-Richtung;
- Neutrino-Flavor;
- Ankunftszeit.

Optisches Modul

- Ankunftszeit (± 1 ns)
- Signalthöhe
- Signalform

elektro-optischer
Tiefseekabel

String

Ferngesteuertes U-Boot
(Kabelverbindungen)

Verbindungskabel

Junction Box

String-Verankerung

12 m

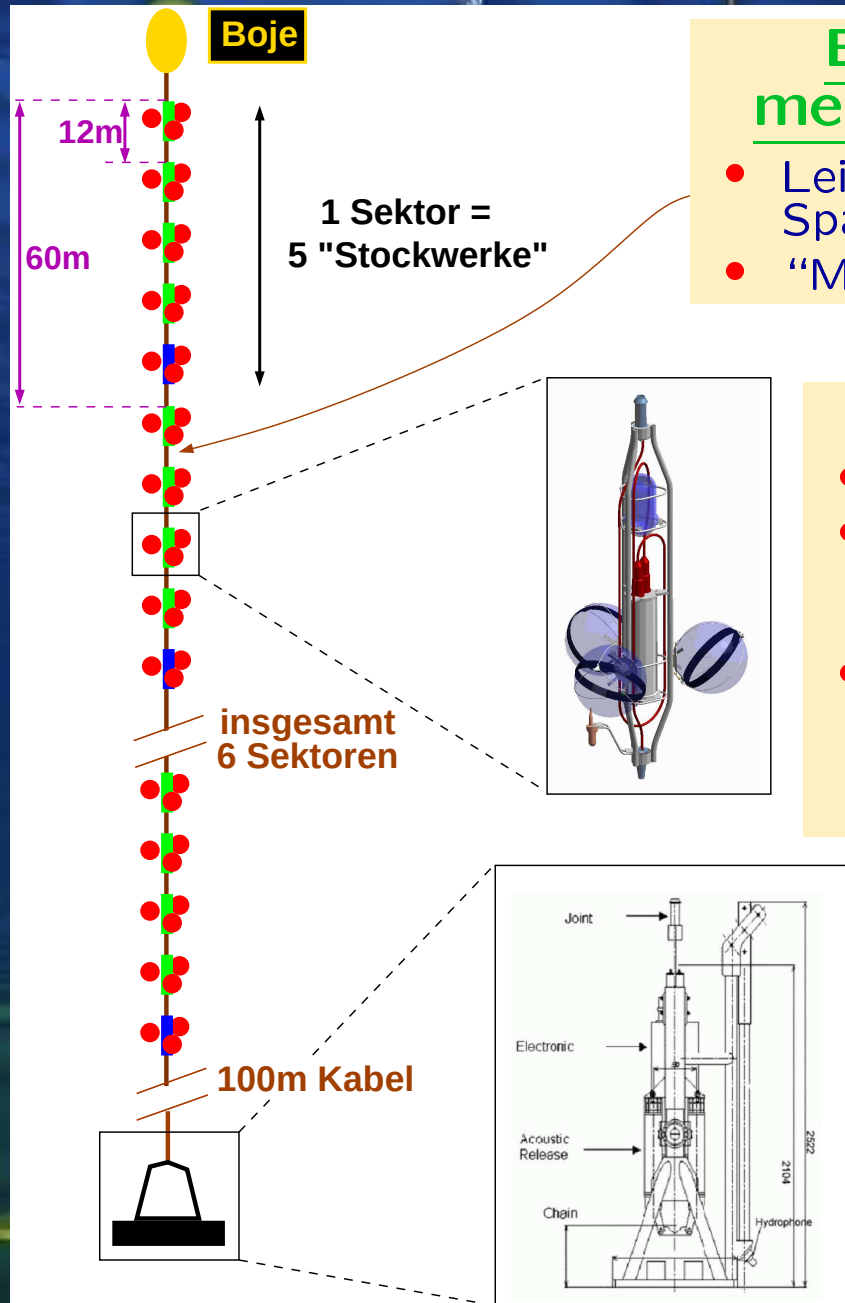
100 m

60 m

~ 460 m

Boje

Detektor-Strings

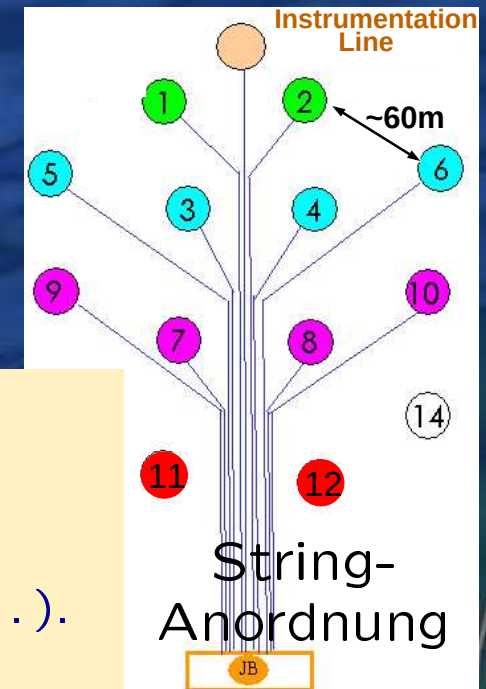


Elektro-optisch-mechanisches Kabel:

- Leitungen für Datentransfer, Spannungsversorgung, ...
- "Mechanisches Rückgrat".

Pro Stockwerk:

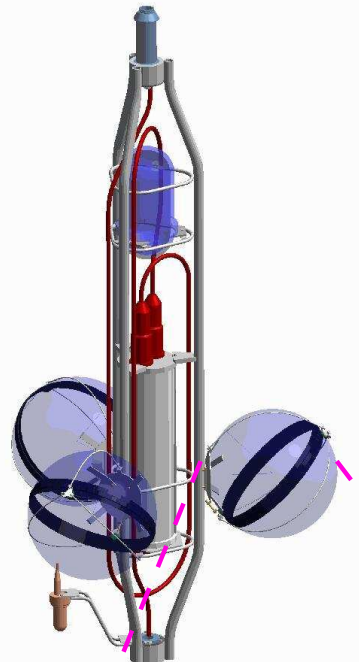
- 3 optische Module.
- Ausleseelektronik (Signal-Digitalisierung, Datentransfer, Trigger, ...).
- Kalibrationsinstrumente (Kompass, Neigungsmesser, optische und akustische Sender/Empfänger).



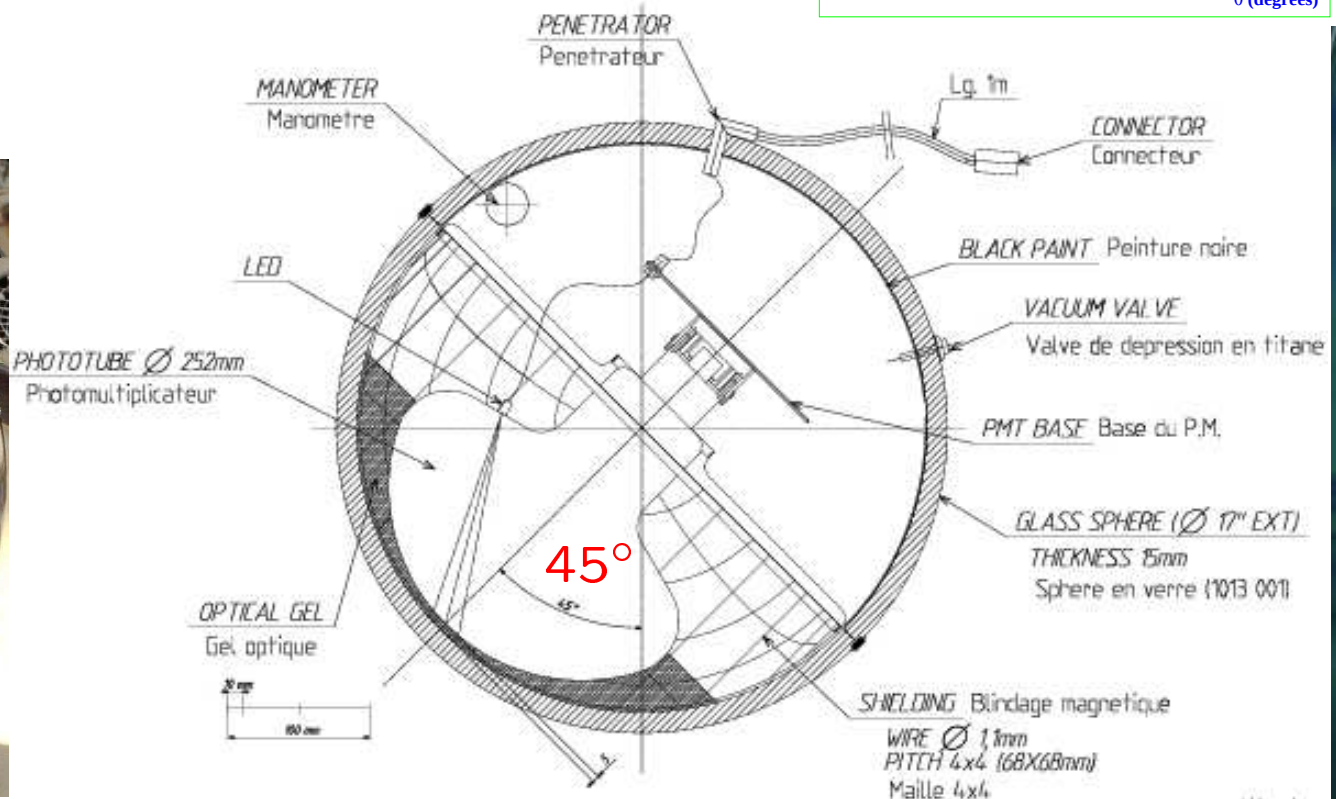
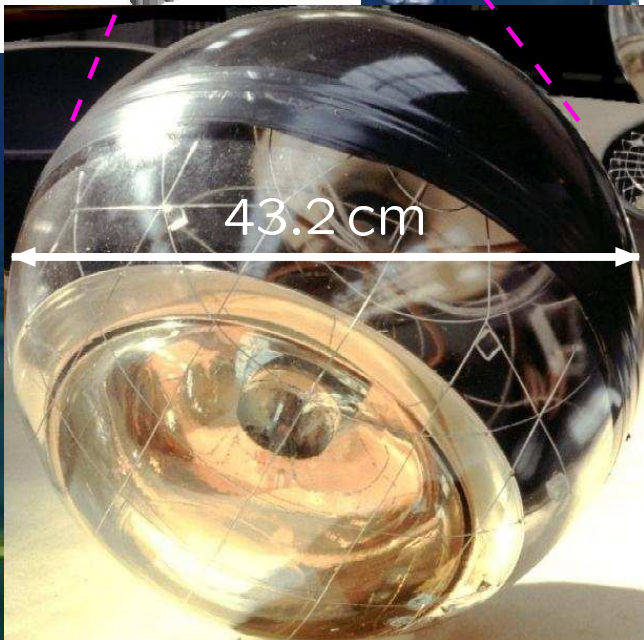
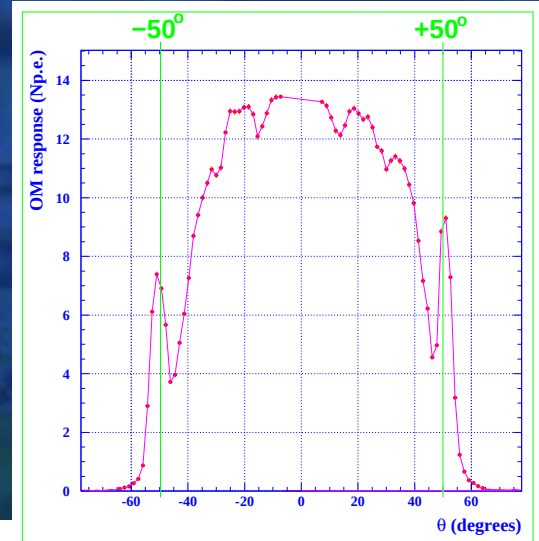
Am Boden:

- Elektronik.
- Schallgeschwindigkeits- und Druckmessung.
- Auslösemechanismus für String, akustisch gesteuert.
- Verbindung zur Junction Box.

Die optischen Module

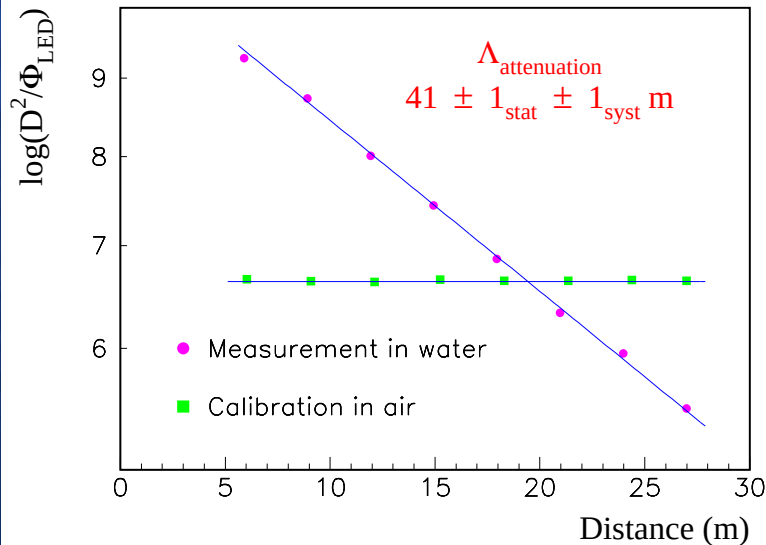


- **Photomultiplier-Röhren:**
 - Hamamatsu, 10", 550 cm²-Kathoden.
 - Quanteneffizienz > 20% @ 1760 V für 330 nm $\lesssim \lambda \lesssim$ 460 nm.
 - Transfer Time Spread 2.6 ns.
 - Winkel-Akzeptanzbereich: $\theta \lesssim 50^\circ$.
- **Glaskugeln:**
 - Getestet bis 600 bar.
 - Lichtverlust (Transmission) $\lesssim 5\%$.



Optische Eigenschaften des Meerwassers

Determination of $\Lambda_{\text{attenuation}}$



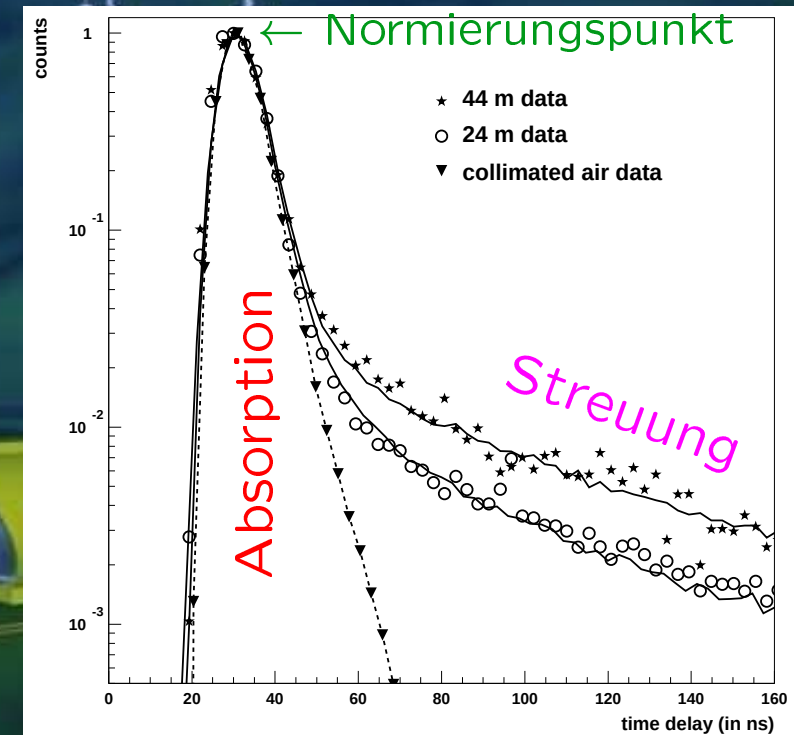
D: Distance between LED and PMT

Φ_{LED} : LED luminosity to obtain a constant current on PMT

- **AMANDA/IceCube:**
 Absorption kleiner, Streuung stärker
 → Hohe Lichtausbeute, aber Verlust in Richtungs- und Zeit-Information.
 → ANTARES hat bessere Winkel-Auflösung.
- **Baikal:**
 Absorptionslänge $\sim 20 \text{ m}$,
 Streulänge $\sim 16 - 70 \text{ m}$;
 → kleinerer PM-Abstand notwendig.

Lichtabschwächung:

- Messung der effektiven Abschwächlänge (jahreszeitabhängig!):
 $\Lambda_{\text{attenuation}} \approx 41 \text{ m}.$
- Messung der Photon-Ankunftszeiten mit gepulster Lichtquelle erlaubt Trennung von **Absorption** und **Streuung**.
 → **Streuung** liefert kleinen Beitrag zur Abschwächung.



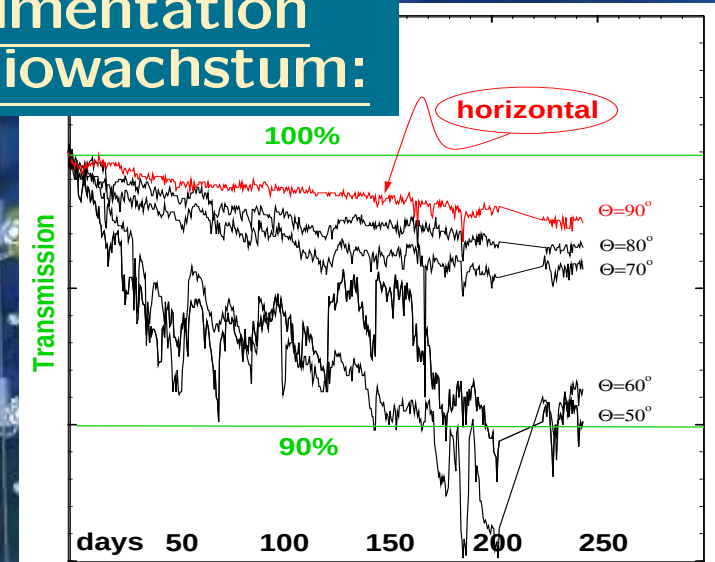
Umweltbedingungen und deren Kontrolle

Kontrollmessungen

Ständige höhenabhängige Messungen, u.a. in Instrumentierungs-String:

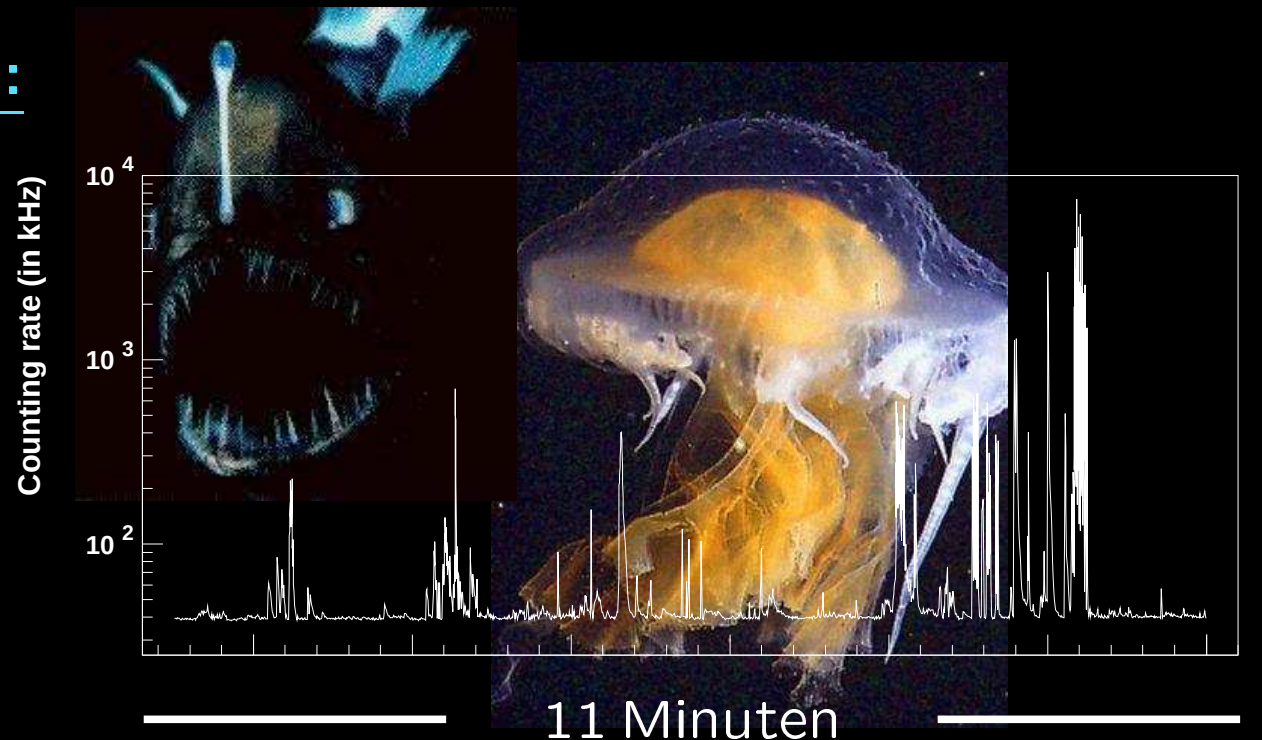
- Lichtabsorption;
- Strömungsgeschwindigkeit;
- Schallgeschwindigkeit;
- Salinität;
- Temperatur, Druck.

Sedimentation und Biowachstum:



Optischer Untergrund:

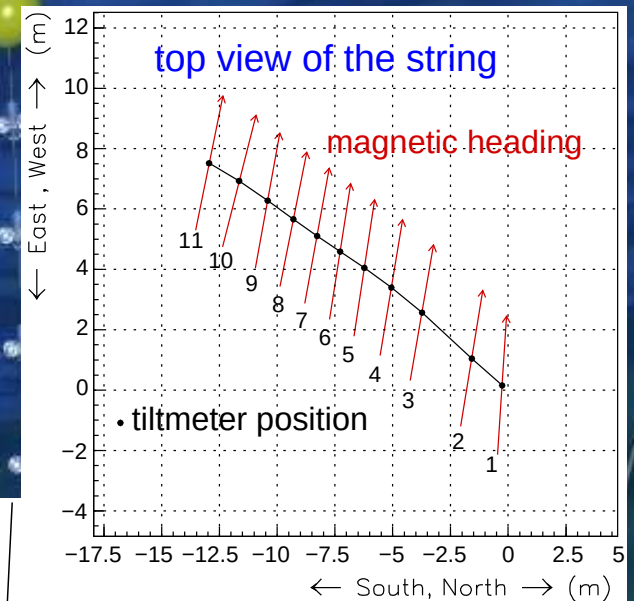
- Ständig etwa 70 kHz/PM von ^{40}K -Zerfällen, zeitlich konstant.
- Kurzzeitige lokale Raten im MHz-Bereich durch Biolumineszenz (Bakterien, Gallerten, Krebse, Fische, ...) → Totzeit/PM $\sim 5\%$.



Positions- und Zeit-Kalibration

Relative Positionierung:

- Akustische Laufzeitmessung zwischen Sendern an den String-Bodenelementen und 6 Empfängern pro String.
- 4 zusätzliche unabhängige Sender/Empfänger.
- Neigungs- und Kompass-Messung in jeder 3er-Gruppe optischer Module.
- Erreichte Genauigkeit (Triangulierung): 1–3 cm beim Prototyp-String (OM-Position).

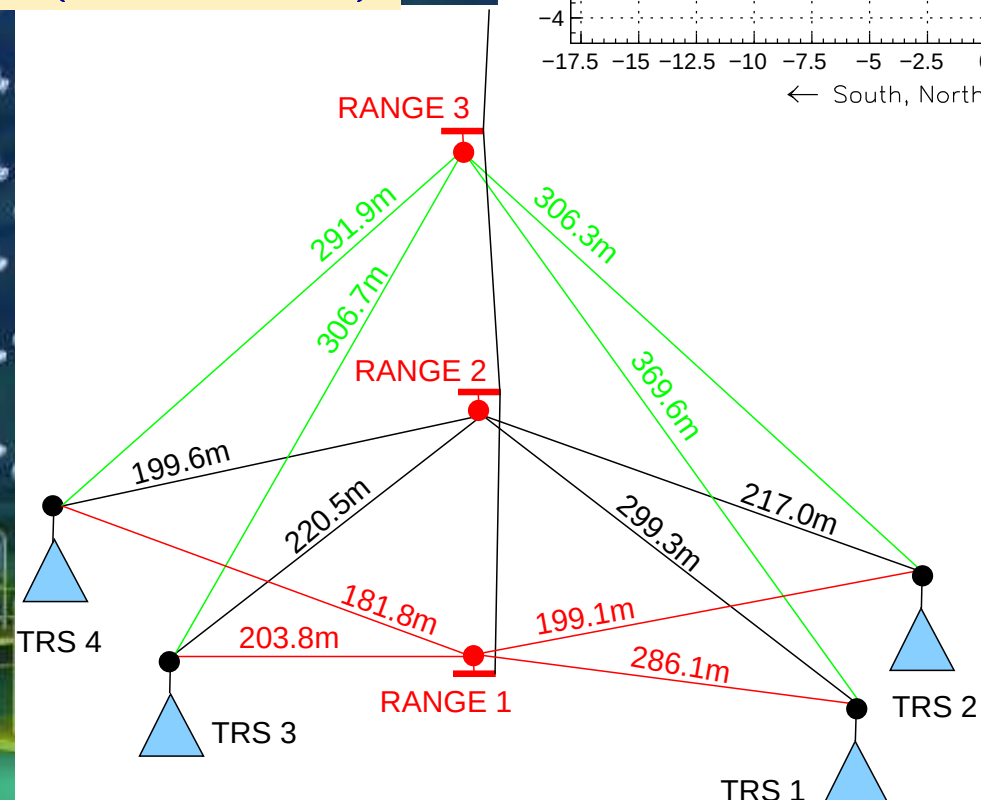


Absolute Positionierung:

- Wichtig: Genaue Orientierung des Teleskops.
- Akustische Triangulierung von Schiff mit GPS-Ankopplung.
- 0.2° Genauigkeit erreichbar.

Zeitkalibration

- Licht-Laufzeitmessung zwischen optischen Modulen (Laser, gepulste LEDs).
- 0.5 ns Genauigkeit erreichbar (entspricht 10 cm Lichtweg in Wasser).



Gegenwärtiger Status

Zeitplan

- Sommer 1998:
 - Erfolgreicher Prototyp-Test.
- Sommer 2002:
 - In-situ-Tests mit vollständigem Sektor (endgültiges Design).
 - Deployment von Junction Box und "Mini Instrumentation Line".
- 2003-2004/05:
 - Bau und Deployment der Strings.
 - Beginn der Datennahme.
- 2002-2004/05:
 - Entwicklung eines akustischen Testsystems für zwei Strings.

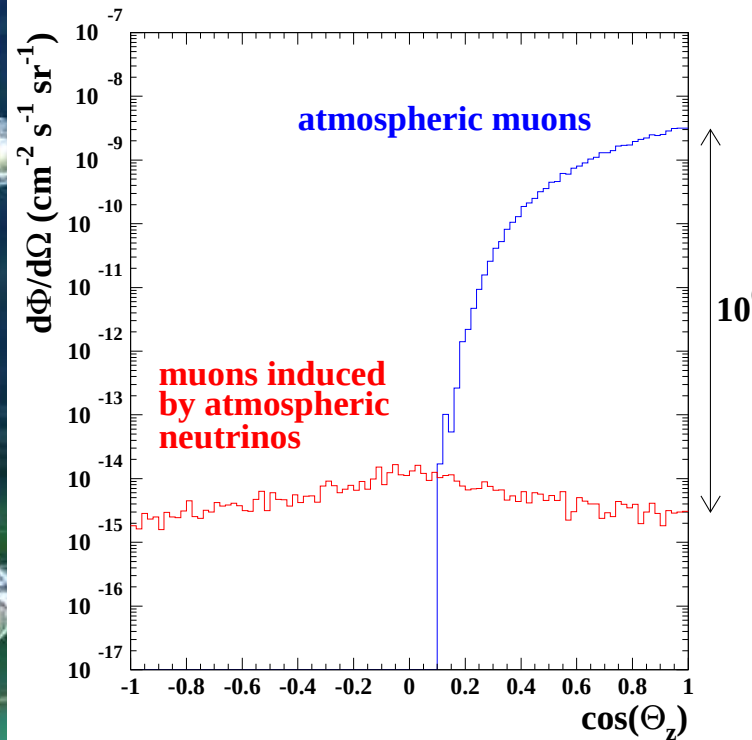
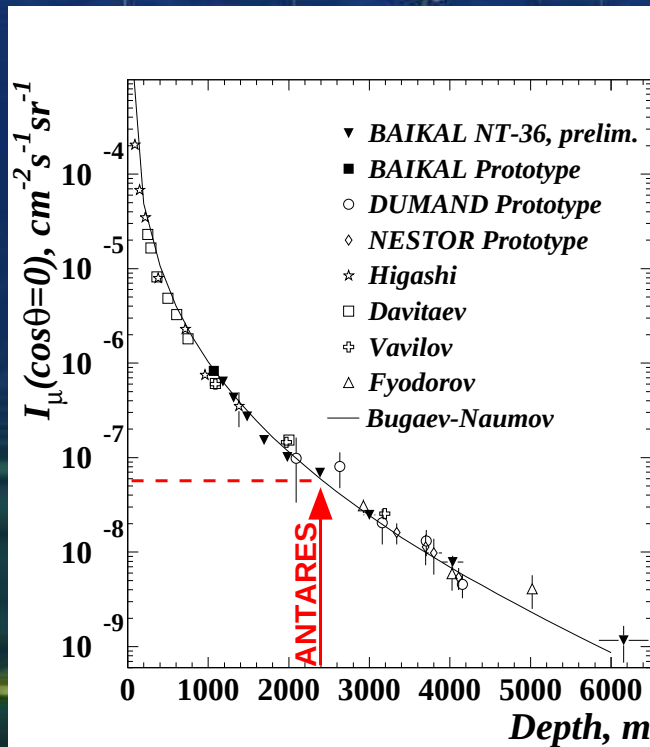
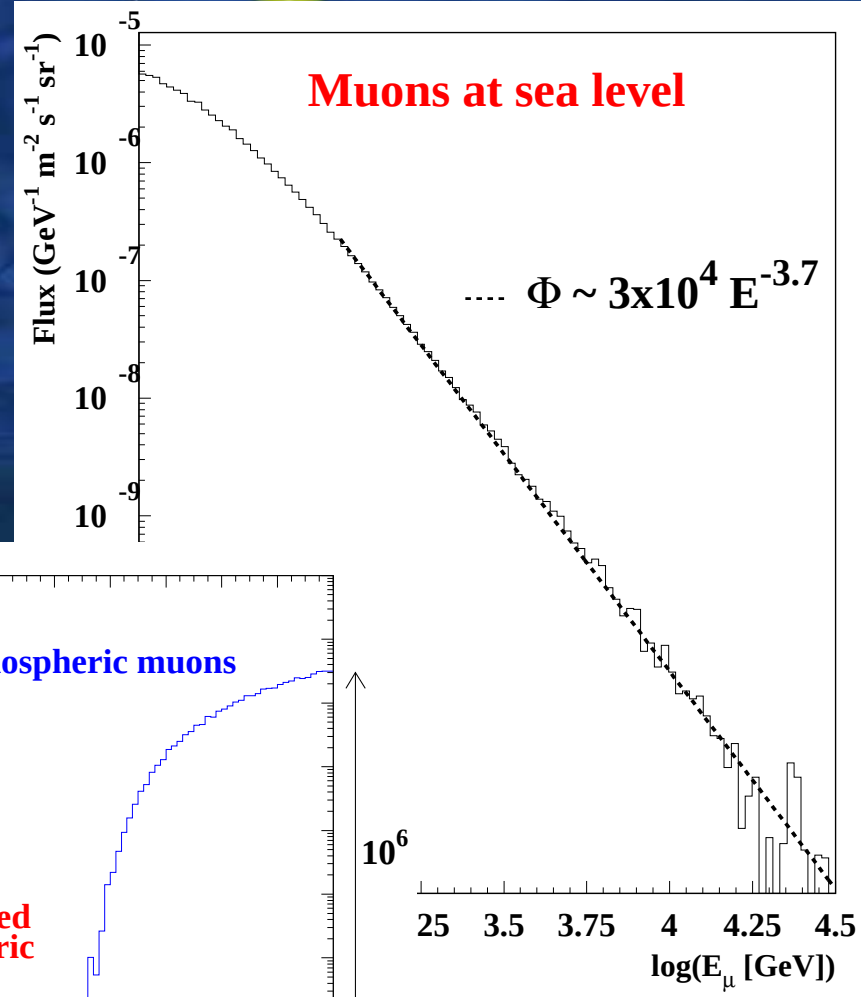
Kabelverlegung, Okt. 01



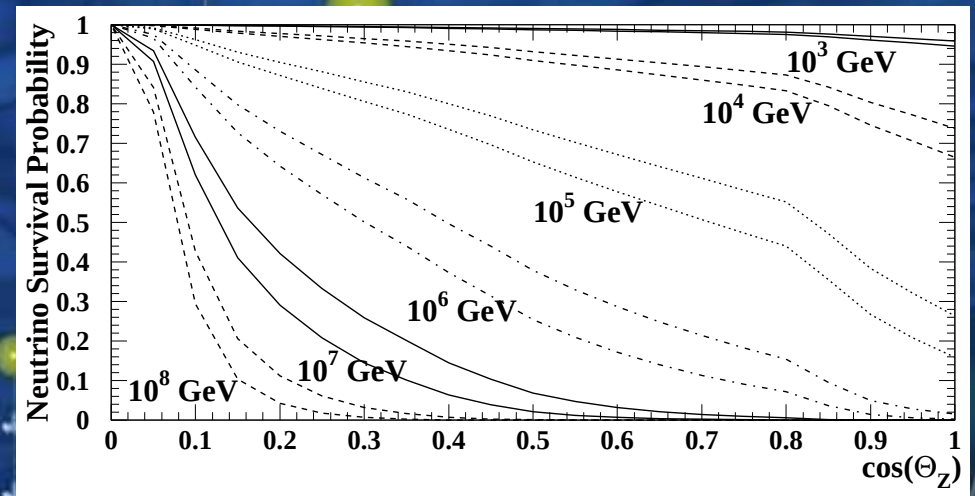
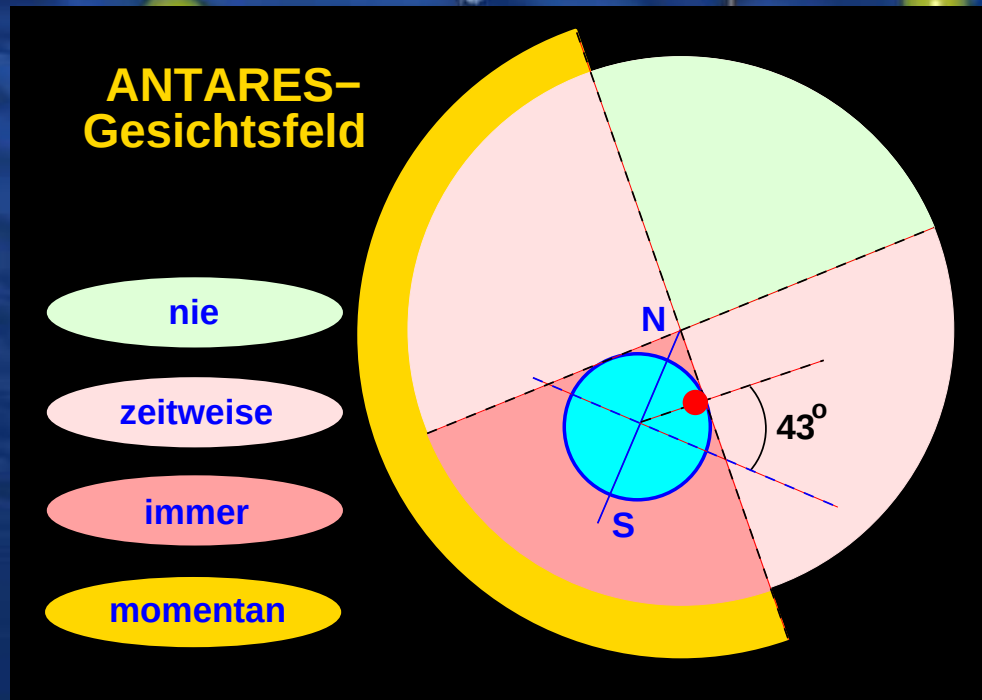
Deployment Test, 1.12.01

Der Untergrund von oben

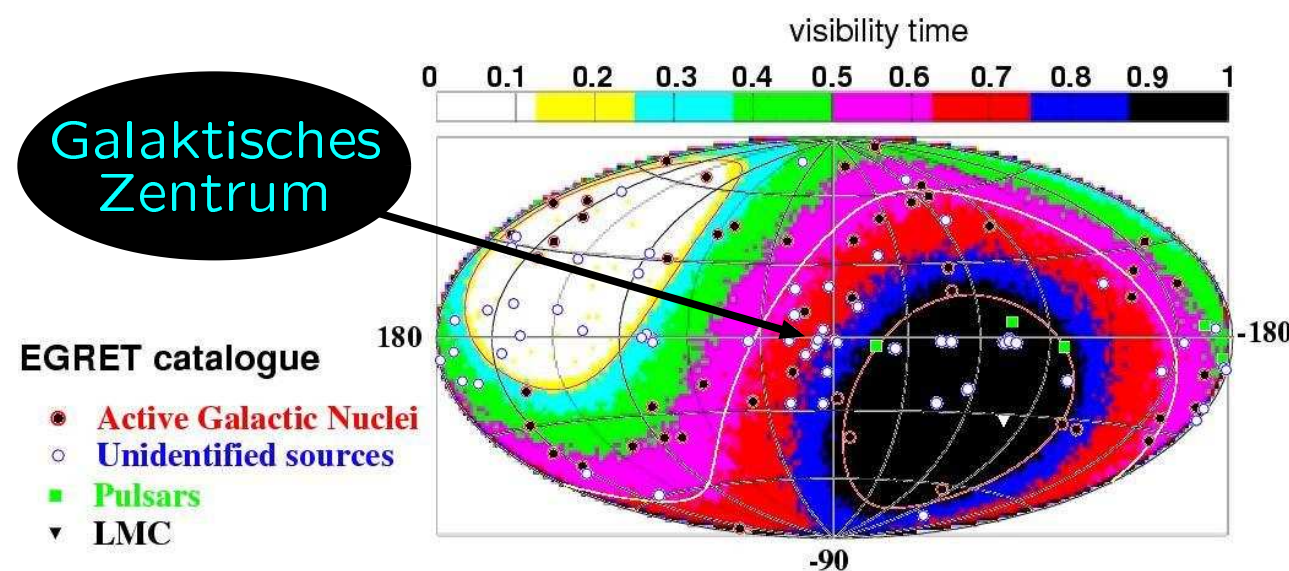
- Dominanter Untergrund:
Myonen aus atmosphärischen Schauern.
- Dringen auch in 2.4 km Wassertiefe vor
(minimal-ionisierende Teilchen).
- Neutrino teleskop braucht die Erde
als Abschirmung, außer
 - bei Nachweis der ν -Reaktion
(hadronischer Schauer);
 - evtl. bei höchsten Energien.



Das Gesichtsfeld von ANTARES



- 3.5π Gesichtsfeld, davon 0.5π ständig.
- Komplementär zu AMANDA/IceCube, 1.5π Überlapp.
- Galaktisches Zentrum und viele Punktquellen im Blickfeld.
- $E_\nu \gtrsim 100$ TeV ... 10 PeV: Erde schirmt ν 's ab $\Rightarrow$ Eingeschränktes Gesichtsfeld (nur horizontale ν 's).

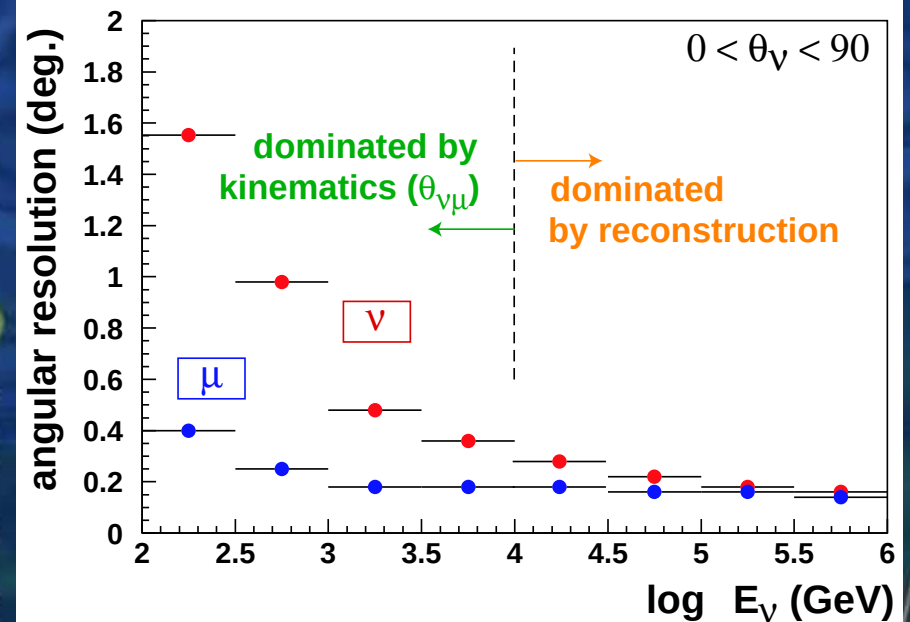
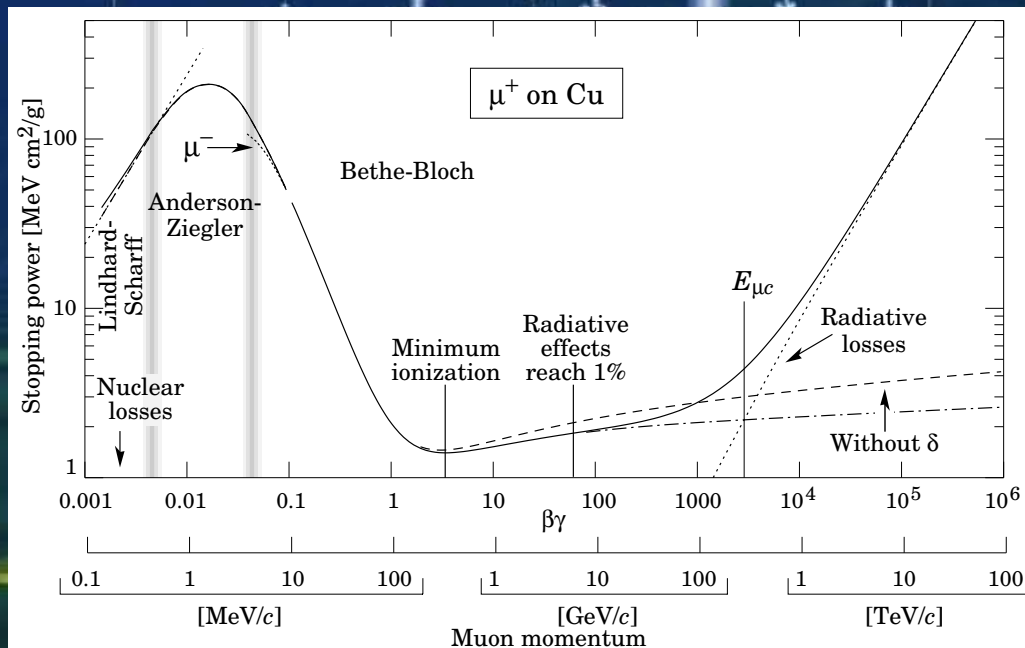


Winkel- und Energierekonstruktion (ν_μ CC)

Winkelauflösung

- Mittlerer Winkel $\theta_{\nu\mu}$ ist E_ν -abhängig:

$$\langle \theta_{\nu\mu} \rangle \approx 0.7^\circ / E_\nu [\text{TeV}]$$
- Unsicherheit des Myon-Winkels:
 - Detektorkalibration (Position, Zeit);
 - Vielfachstreuung.
- Suche nach ν -Punktquellen: $S/B \propto 1/\Delta\theta^2$
 $\Rightarrow$ großer Vorteil von ANTARES vgl. mit Eis-Experimenten ($\Delta\theta_{\text{AMANDA}} \sim 3^\circ$).



Energiebestimmung

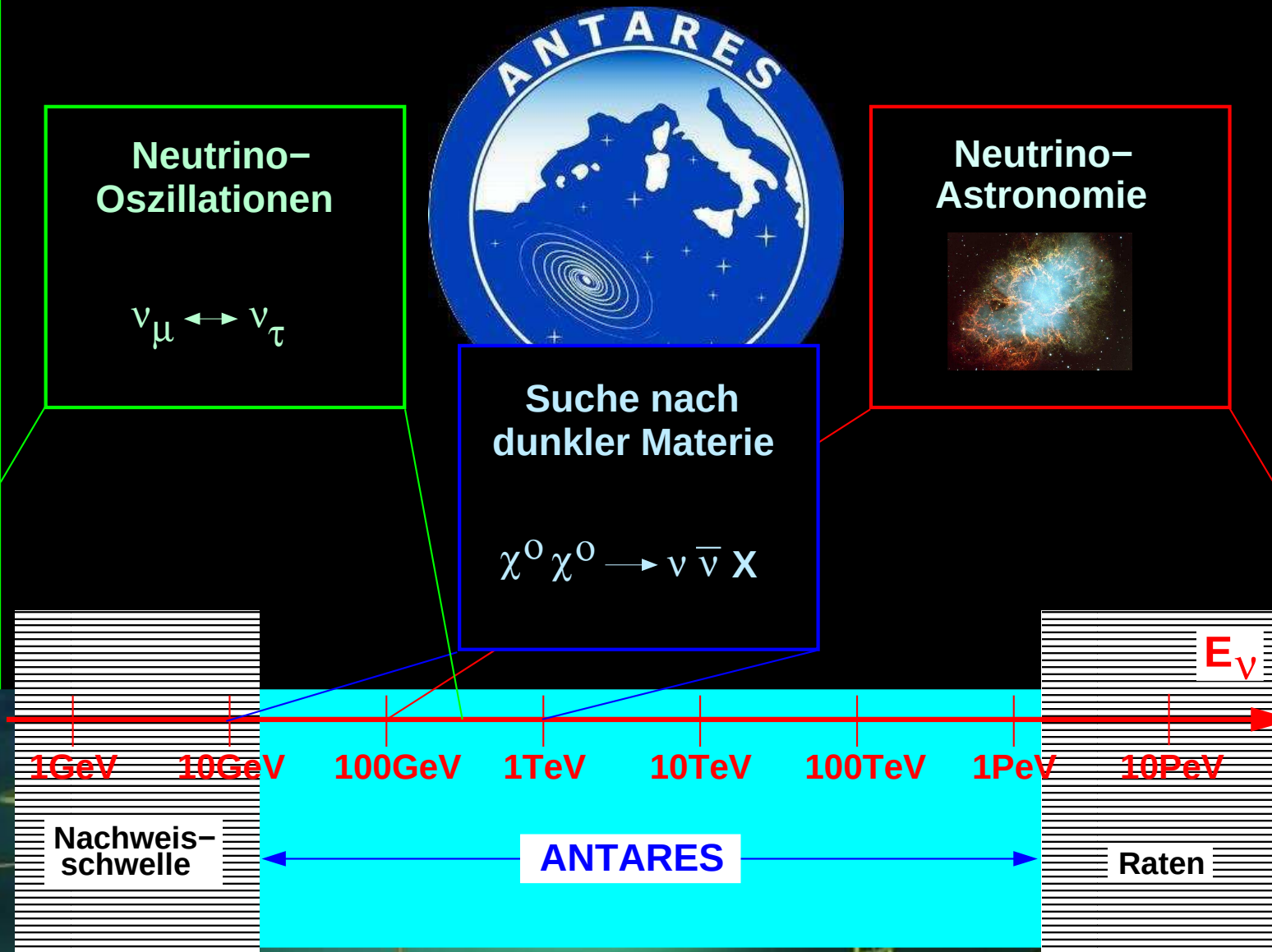
- $E_\mu \lesssim 100 \text{ GeV}$: μ -Reichweite.
- $E_\mu \gtrsim 1 \text{ TeV}$ (kosmische Quellen): Energie aus dE/dx (Signalhöhe).
- Auflösung:
Etwa Faktor 2–2.5 in E_μ für $E_\mu \sim 1 \text{ TeV} - 1 \text{ PeV}$.
- Neutrino-Energie E_ν :
 - $E_\nu > E_\mu$;
 - $\text{RMS}(E_\mu/E_\nu) < 1/\sqrt{12}$.

Astroteilchenphysik mit ANTARES

- Was lehrt uns die kosmische Strahlung über Astrophysik?
- Was lehrt uns die kosmische Strahlung über Teilchenphysik?
- Was lehren uns Teilchenphysik-Experimente über den Kosmos?

Teilchenphysik

Astrophysik



ν -Oszillationen: Was kann ANTARES beitragen?

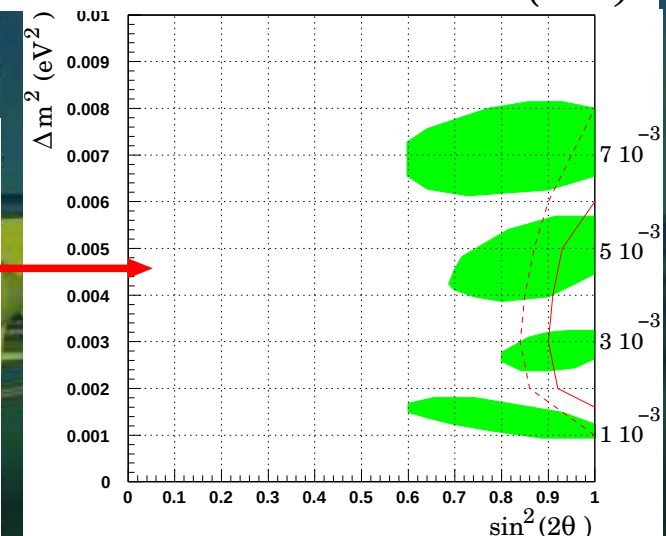
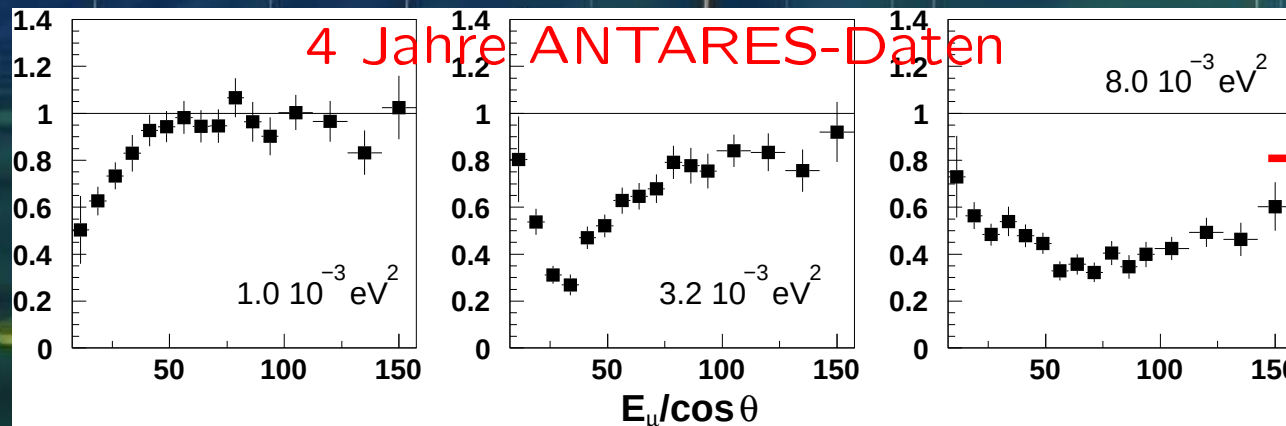
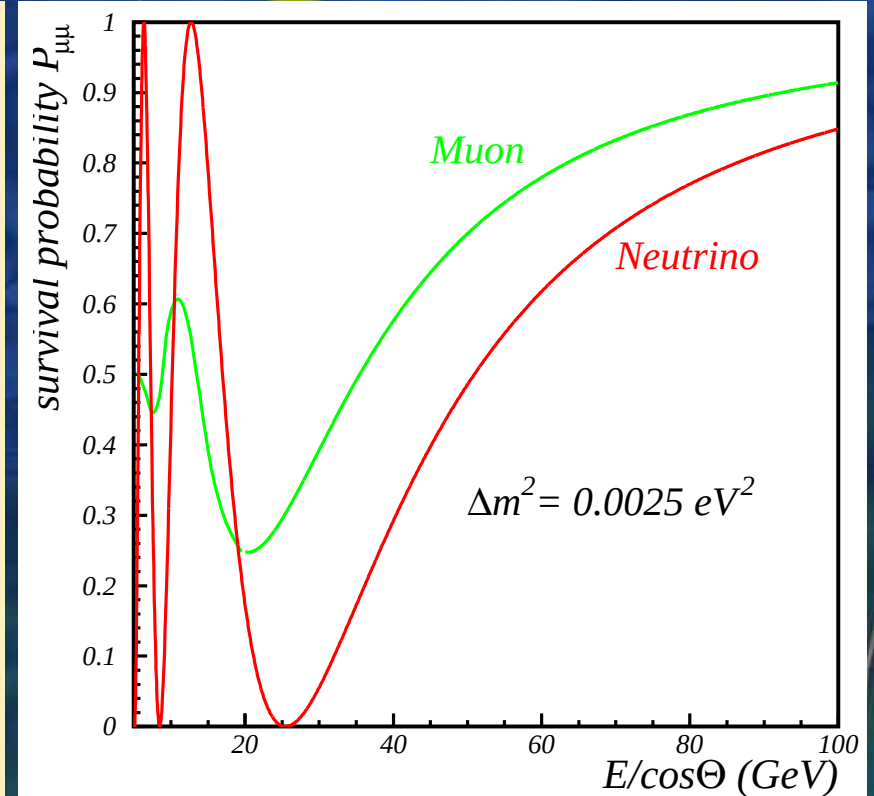
Oszillations-Signal:

$$P_{\mu\mu} = 1 - \sin^2(2\theta_{\mu\tau}) \sin^2 \frac{1.27 \cdot L/\text{km} \cdot \Delta m^2/\text{eV}^2}{E/\text{GeV}}$$

$$\Rightarrow \left. \frac{E/\text{GeV}}{|\cos\theta_Z|} \right|_{1. \text{ Minimum}} \approx 10^4 \Delta m^2/\text{eV}^2 \approx 25$$

ANTARES-Sensitivität:

- 1. Minimum in ANTARES-Akzeptanz.
- Überprüfung der Oszillationshypothese, genaue Messung von Δm^2 .
- Messgenauigkeit von $\theta_{\mu\tau}$ geringer (absolute Normierung).
- Beobachtung des Oszillationsminimums $\Rightarrow$ Ausschluss alternativer Erklärungen.



Dunkle Materie: WIMPs und Supersymmetrie

Supersymmetrie (SUSY)

- “Beliebtestes theoretisches Modell” jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik.
- Ordnet jedem SM-Teilchen einen SUSY-Partner zu:

Fermion $\leftrightarrow$ Boson .

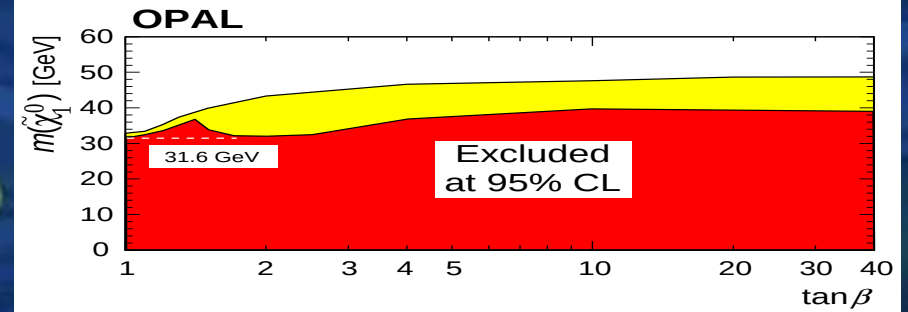
- Neue Quantenzahl R -Parität:

$$R_P = \begin{cases} 1 & \text{für SM-Teilchen} \\ -1 & \text{für SUSY-Teilchen} \end{cases}$$

- WIMP-Kandidat: **Neutralino** χ_1^0 (Mischung der Z -, γ und Higgs-Partner):
 - ✓ schwach wechselwirkend;
 - ✓ stabil (wenn R_P erhalten ist und χ_1^0 leichtestes SUSY-Teilchen ist);
 - ✓ massiv
- Bis jetzt kein direkter experimenteller Hinweis auf SUSY ...

LEP: Suche nach $e^+e^- \rightarrow \chi_1^0 \chi_2^0$

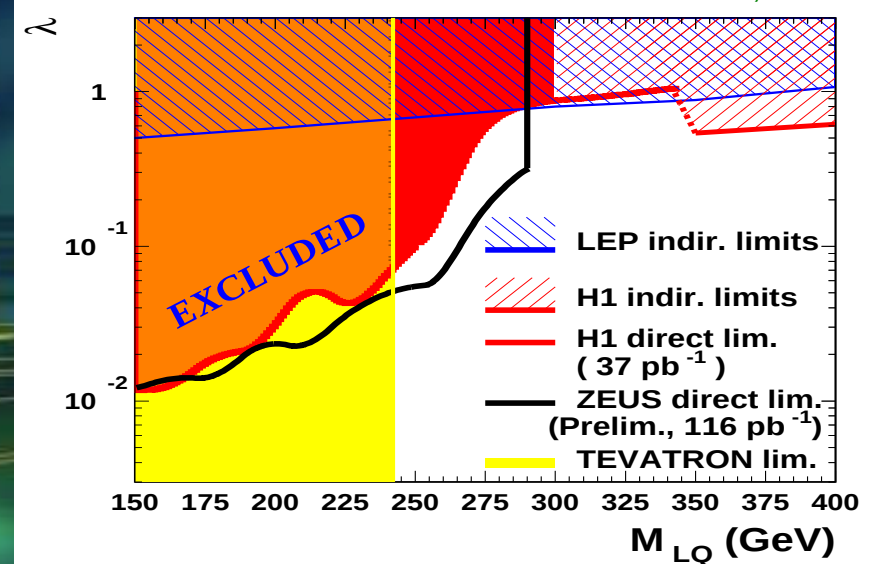
OPAL: Masse $M_{\chi_1^0} > 31.6 \text{ GeV}$.



HERA: Suche nach R_P -SUSY

Wenn R_P verletzt: $eq \rightarrow \tilde{q}$;
kein Anzeichen dafür gefunden.

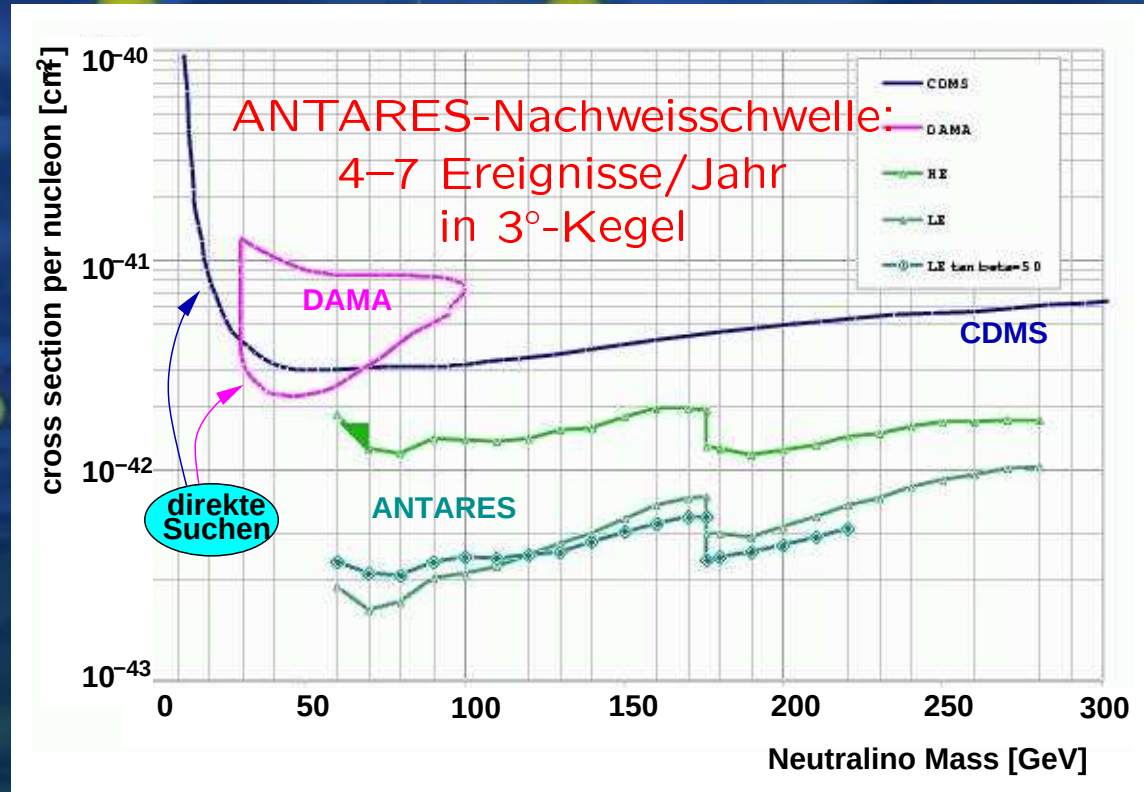
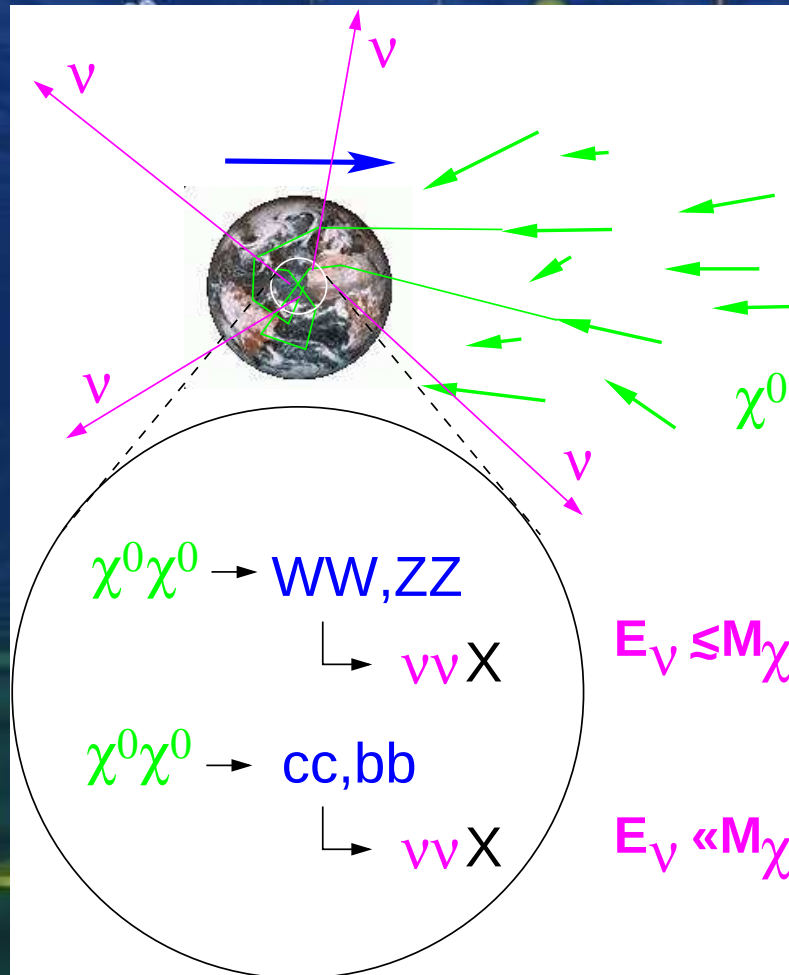
HERA Leptoquark Limits ($e^+ p$) $\tilde{S}_{1/2,L} (F=0)$



Annihilation gravitativ gefangener Neutralinos

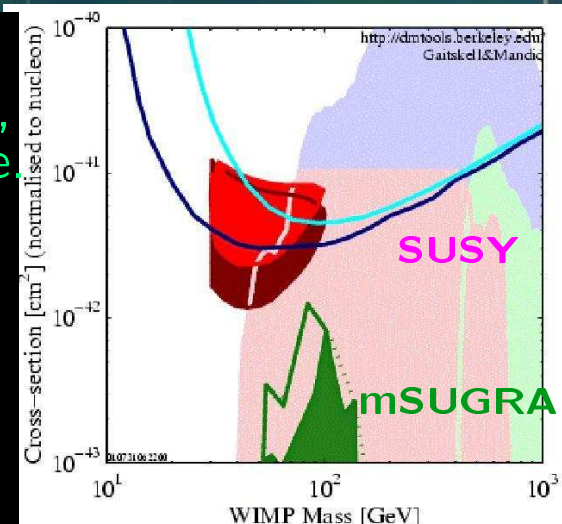
Gravitativer Einfang in ...

- Erde;
- Sonne;
- Galaktischem Zentrum (schwarzes Loch !?)
→ unsichtbar für AMANDA.

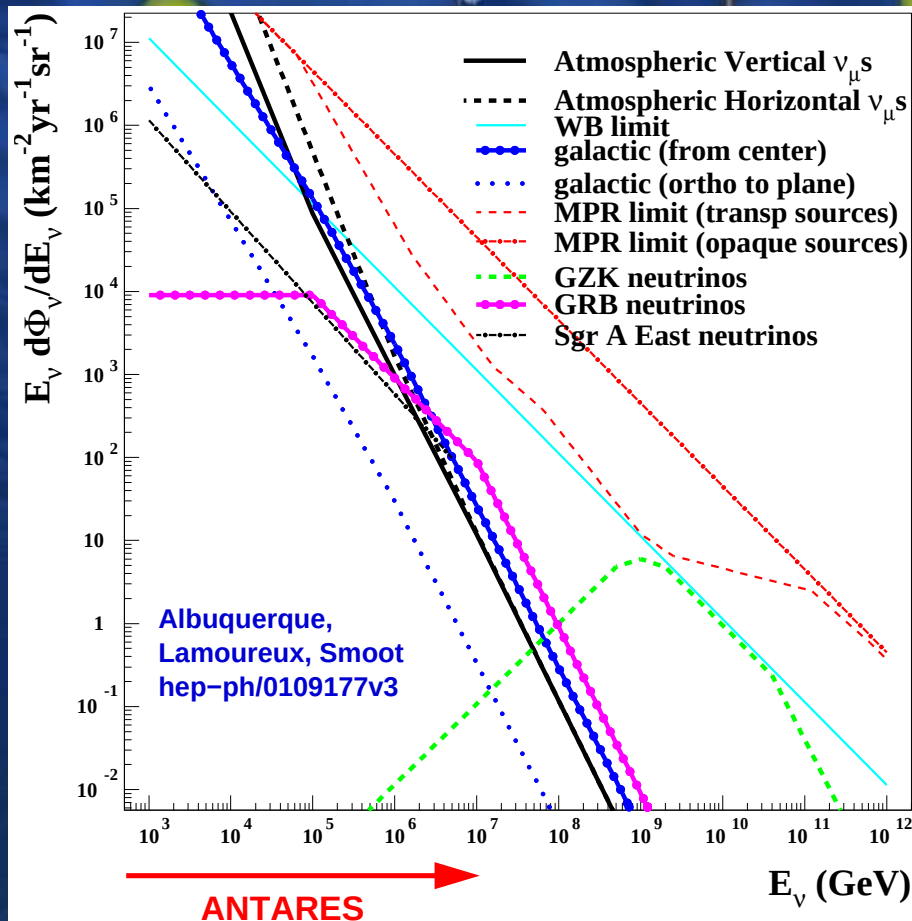


ANTARES-Suche:

- Gal. Zentrum, Sonne, Erde als ν -Punktquelle.
- Von lokaler χ -Dichte unabhängig.
- Interpretation modellabhängig.
- Ähnliche Sensitivität wie direkte Suche.



Hochenergetische Neutrinos aus dem Weltall



Fluss-Obergrenzen:

- Annahme: ν 's werden dominant in hadronischen Reaktionen produziert
 → Obergrenze für ν -Fluss folgt aus Hadron- und Photon-Flüssen.
- Rechnungen mit etwas unterschiedlichen Annahmen und Daten:
 Waxman&Bahcall, Phys.Rev.D59(1999)023002;
 Mannheim&Protheroe&Rachen, Phys.Rev.D63(2001)023003.

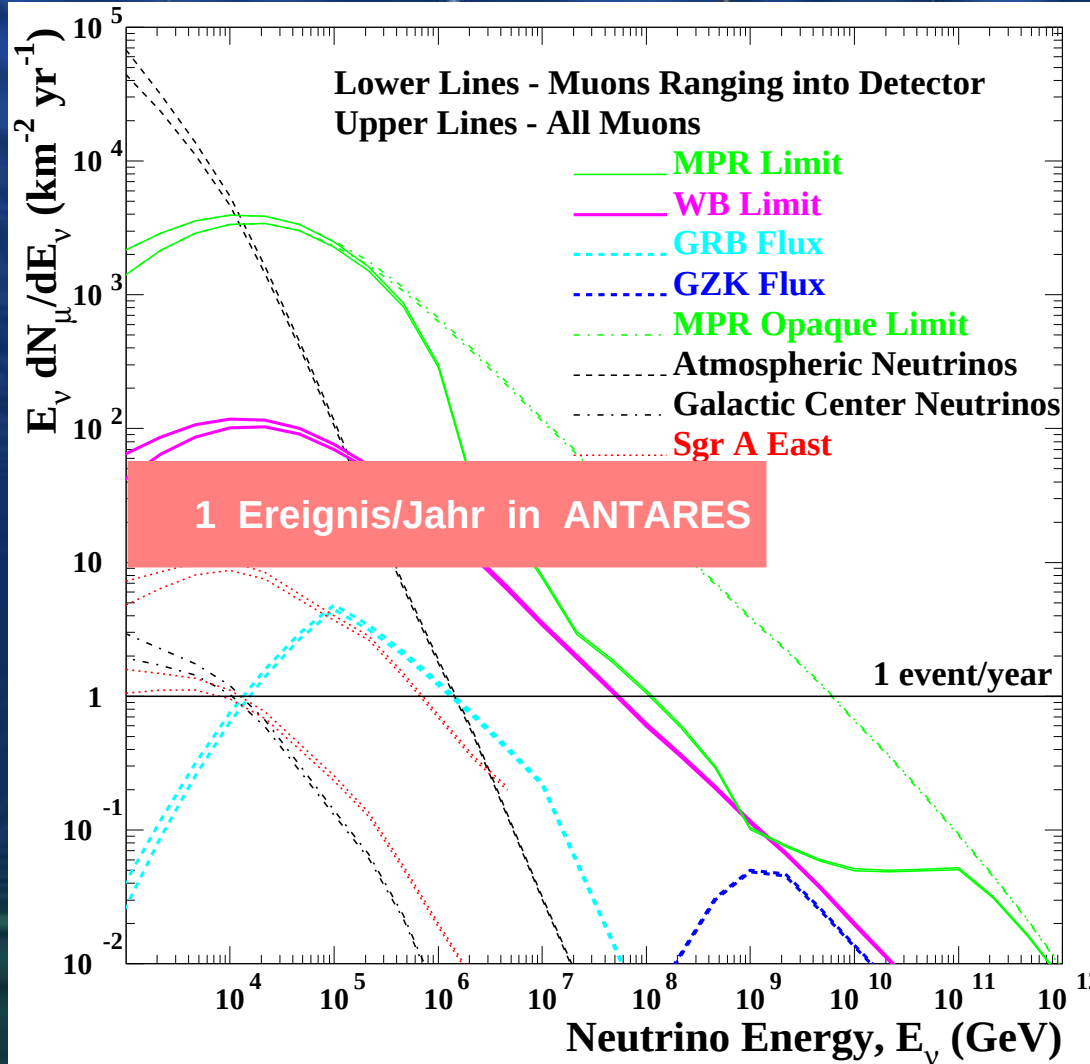
Fluss-Abschätzungen:

- Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK)
 ν 's aus Reaktionen von p, A mit der kosmischen Hintergrundstrahlung.
 Engel&Stanew, astro-ph/0101216
- Neutrinos aus Gamma Ray Bursts (GRB).
 Waxman&Bahcall, Phys.Rev.Lett.78(1997)2292
- ν 's von Sgr A East (galaktische Radioquelle).
 Crocker et al., Astr.Phys.J.S310(2000)339

Atmosphärische Neutrinos:

- Hier: irreduzibler Untergrund.
- Abschätzung von Volkova, Sov.J.Nucl.Phys.31(1992)2697.
- Unsicherheit: etwa 20%.

ANTARES und die diffusen Neutrinos



ANTARES-Sensitivität:

$$E_\nu^2 \frac{d\phi_\nu}{dE_\nu} \sim \frac{2 \times 10^{-8} \text{ GeV}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}}$$

Waxman/Bahcall-Limit

$$E_\nu^2 \frac{d\phi_\nu}{dE_\nu} \sim \frac{1 - 4 \times 10^{-8} \text{ GeV}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}}$$

Weitere mögliche diffuse ν -Quellen:

- Topologische Defekte.
- Zerfälle superschwerer Teilchen ("Relics", WIMPzillas, ...) → Top-Down-Modelle.
- Z Bursts ($\nu\nu \rightarrow Z$).
- Nicht-hadronische ν -Erzeugung.
- ...

Suche nach Punktquellen

ANTARES-Sensitivität:

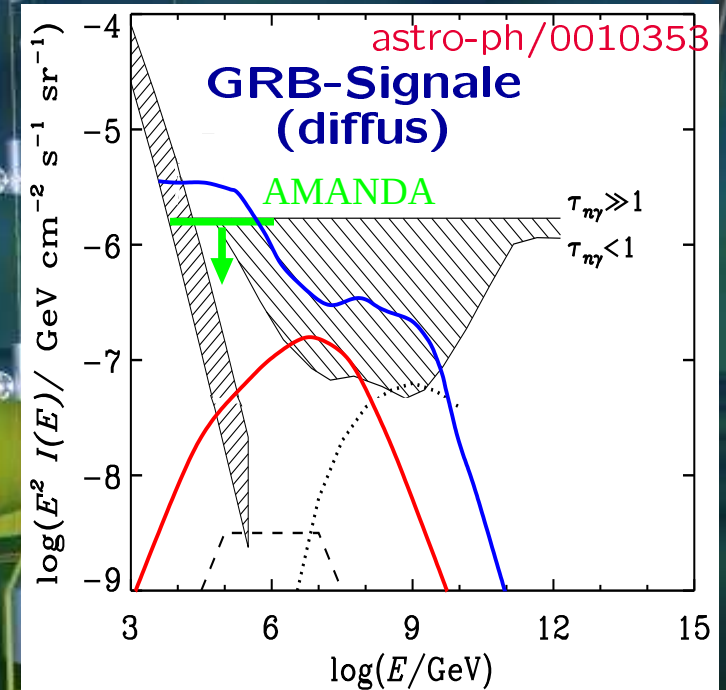
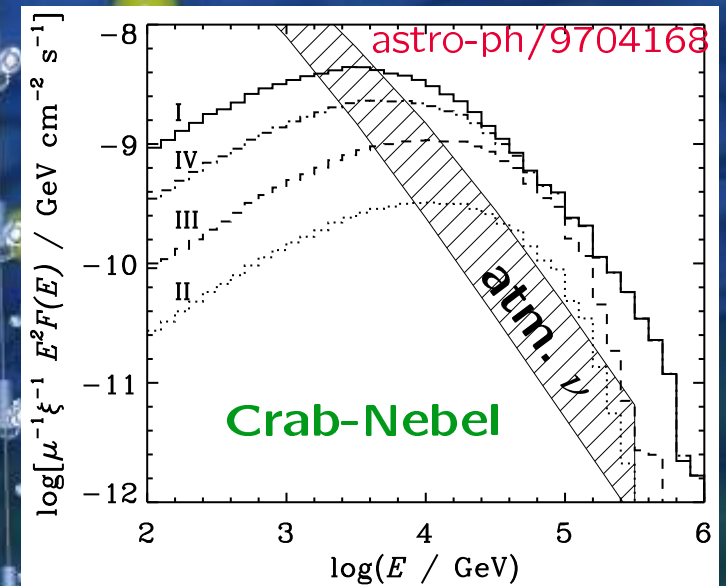
$$E_\nu^2 \frac{d\phi_\nu}{dE_\nu} \sim \frac{1.5 \times 10^{-8} \text{ GeV}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

- Enorme Untergrundreduzierung aufgrund der guten Winkelauflösung ($\Delta\theta = 0.3^\circ$).
- 50% Beobachtungszeit angenommen.

Mögliche Quellen

Signale sind für viele Quelltypen möglich bis erwartet:

- Aktive galaktische Zentren (AGN)
Supermassives schwarzes Loch, Akkretion, Jets.
- Mikroquasare
ähnliche Konstellation,
aber ~ 7 Größenordnungen leichter.
- Gamma Ray Bursts
extrem energiereiche Quellen,
signifikante Zeitstruktur.
- Supernova-Reste
z.B. Crab-Nebel.
- ...

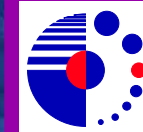


Aufgaben in und Beiträge zu ANTARES

Einbindung in ANTARES:

- ANTARES-Mitglied seit Nov. 2001.
- Beiträge zur Detektorausstattung (beantragt, Bundesmittel).
- F&E mit Zielrichtung akustischer Neutrino-Nachweis.
- Physikalische Analyse und Simulation:
 - Untergrundsimulation (Diplomarbeit F. Sukowski);
 - Positionskalibration mit Akustik-System;
 - Simulation von ν -Reaktionen in Wasser einschließlich akustischer Signale;
 - Rekonstruktion von ν_e -Ereignissen;
 - Physik-Analyse.

demnächst...

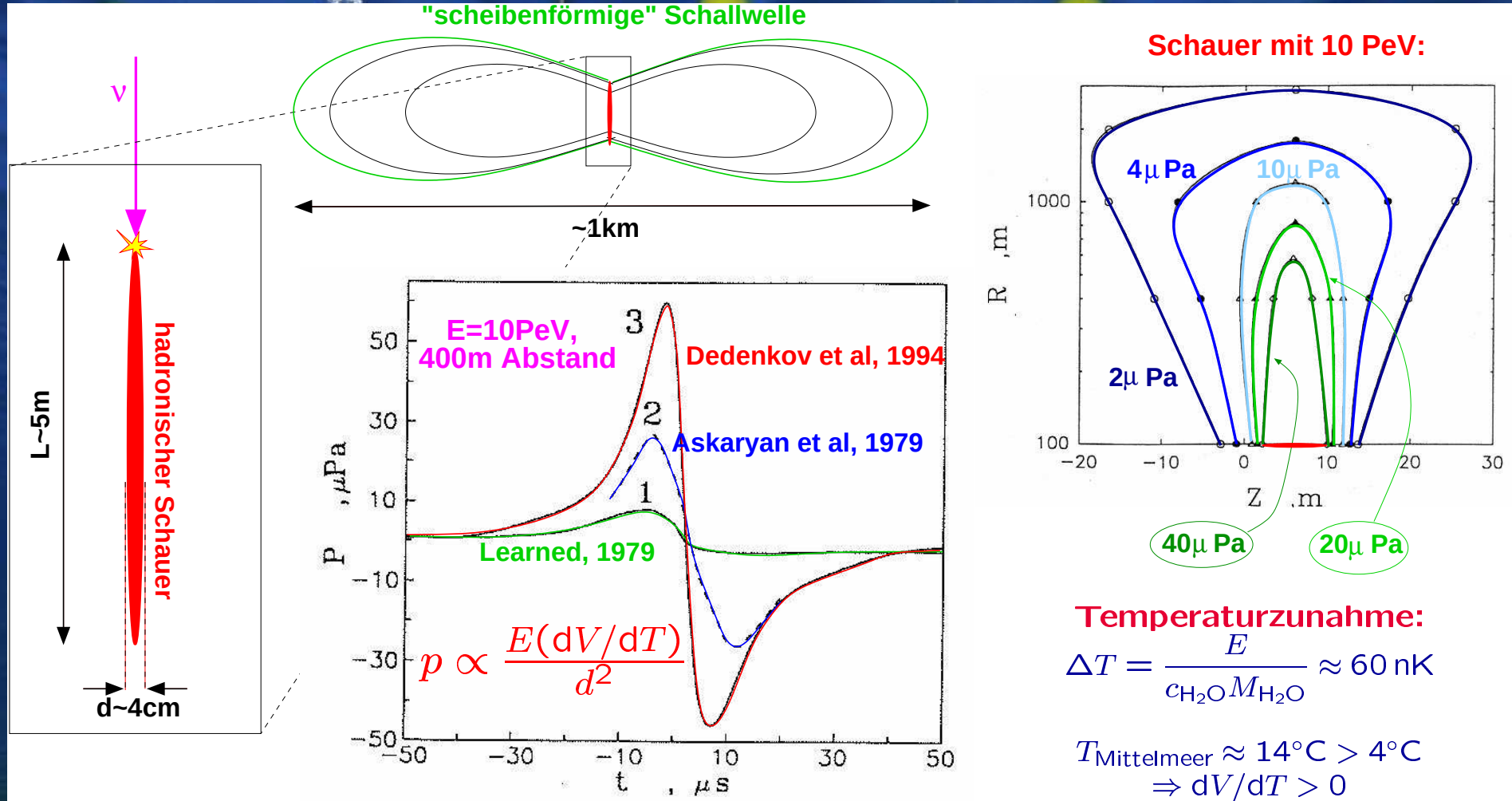


bmb+f - Förderschwerpunkt
ANTARES
Großgeräte der physikalischen
Grundlagenforschung

Fördersituation:

- BMB+F-Förderantrag, Jan. 2002
 - Personalmittel;
 - ANTARES-Detektorausstattung;
 - Akustische Detektion.
- Mündliche Zusage des BMB+F, das Projekt zu fördern und die Detektorausstattung in vollem Umfang zu gewährleisten.
- Bewilligung für 7/2002 in Aussicht.
- Langfristige führende Mitarbeit auch bei Nachfolgeprojekten erwünscht.

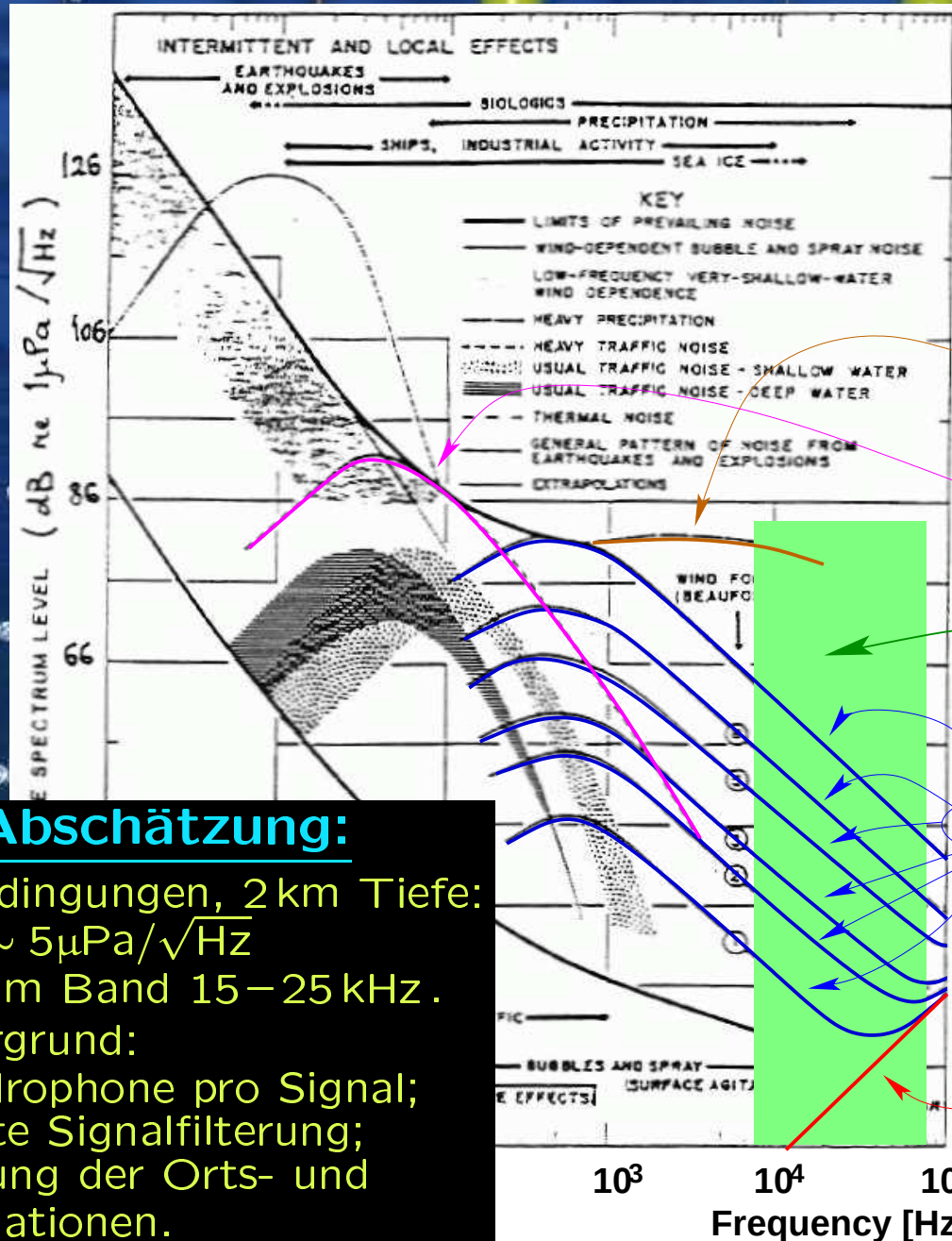
Kann man Neutrinos hören?



Motivation:

- Große Reichweite von Schall in Wasser → großvolumige Detektoren.
- Nachweis des hadronischen Schauers → 4π Akzeptanz.
- Sensitiv auf alle aktiven Neutrino-Flavors.
- Komplementär zu Radio-Čerenkov-Methode in Eis (RICE-Experiment @ AMANDA).

Akustische Detektion: Untergrundbedingungen



G.M. Wenz,
J.Acoust.Soc.Am.34(1962)1936

Grobe Abschätzung:

- Optimale Bedingungen, 2 km Tiefe:
Untergrund $\sim 5 \mu\text{Pa} / \sqrt{\text{Hz}}$
 $\Rightarrow \sim 500 \mu\text{Pa}$ im Band 15–25 kHz.
- $\text{Signal} \lesssim \text{Untergrund}$:
 - Viele Hydrophone pro Signal;
 - Geschickte Signalfilterung;
 - Verwendung der Orts- und Zeitkorrelationen.

Akustische Detektion: Forschung und Entwicklung

Anforderungen:

- **Hydrophone**
Hochempfindlich, druckfest, niedriges Rauschen, langzeitstabil, billig.
- **Kalibration**
Für jedes Hydrophon: Zeit, Ort, Signalhöhe, Frequenzgang, Richtcharakteristik.
- **Datenauslese**
(Vor)verstärkung, Digitalisierung, Datentransfer, Trigger.
- **Umfelderkundung**
Detekturtests in situ, Messung der Untergrundbedingungen.
- **Datenauswertung**
Simulation, Signalfilterung, Ereignisrekonstruktion, Untergrundbestimmung.

Entwicklungsschritte:

- 12/02: Teststand für Hydrophone.
- 04/03: Testmessungen im Labor.
- 07/03: Messungen an Beschleuniger-Strahl.
- 10/03: In-situ-Messungen.
- 09/04: Ausrüstung von 2 Strings mit Hydrophonen.

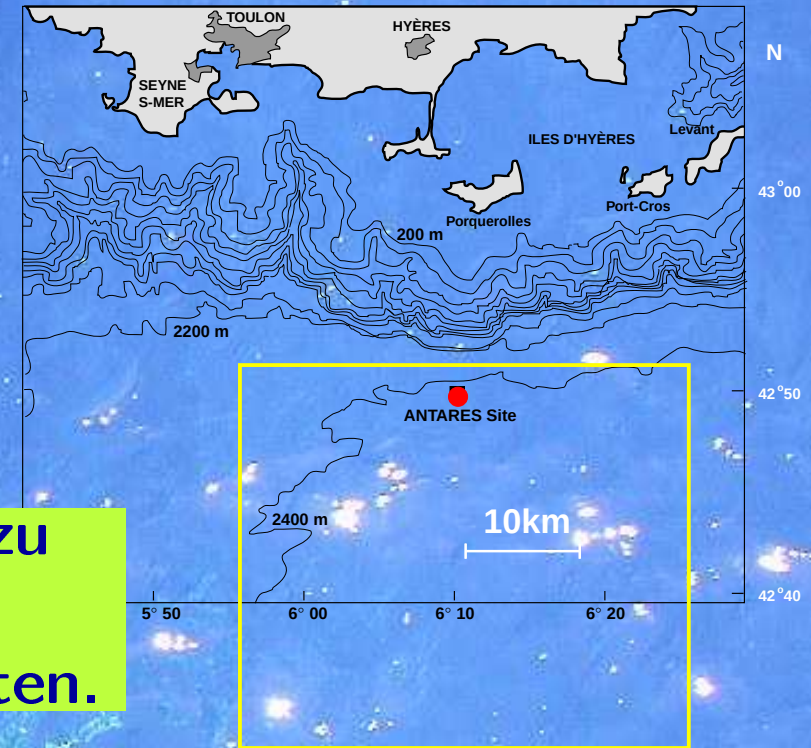
Andere Projekte zur akustischen Detektion:

- **AUTEC (Bahamas)**
(astro-ph/0104033)
- **SADCO (Kamchatka)**
(astro-ph/9705189, ICRC2001)
- **Baikal-Experiment**
(Nucl.Phys.Proc.Suppl.91(2000)438)
Erste Korrelationen Luftschauer-Hydrophonsignal berichtet.

Zusammenfassung und Ausblick

Neutrinos aus dem Weltraum sind ein Schlüssel zu entscheidenden Fragen in Astrophysik und Teilchenphysik.

ANTARES bietet den Zugang zu diesem Schlüssel und läßt entscheidende Fortschritte erwarten.



Die Zukunft beginnt gerade erst!

- Nächster Schritt: der km^3 -Detektor.
- Neue Nachweistechiken, z.B. akustische Detektion.
- 10^3 km^2 könnten machbar sein!

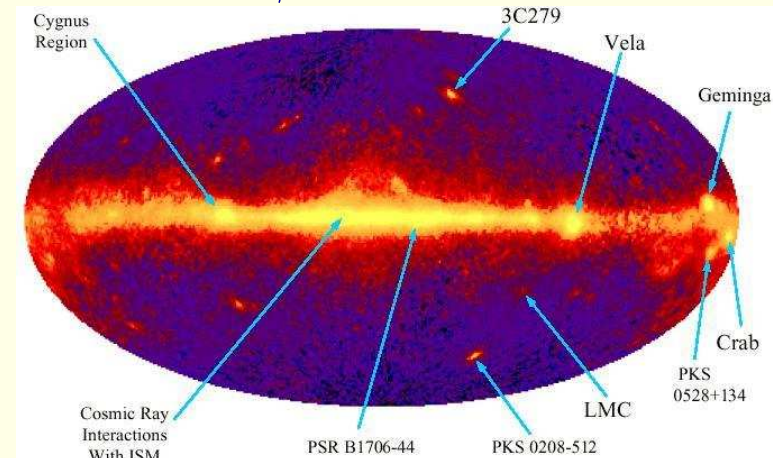
Photonen: “klassische” Astronomie und darüber hinaus

Neue Energiebereiche = neue Erkenntnisse

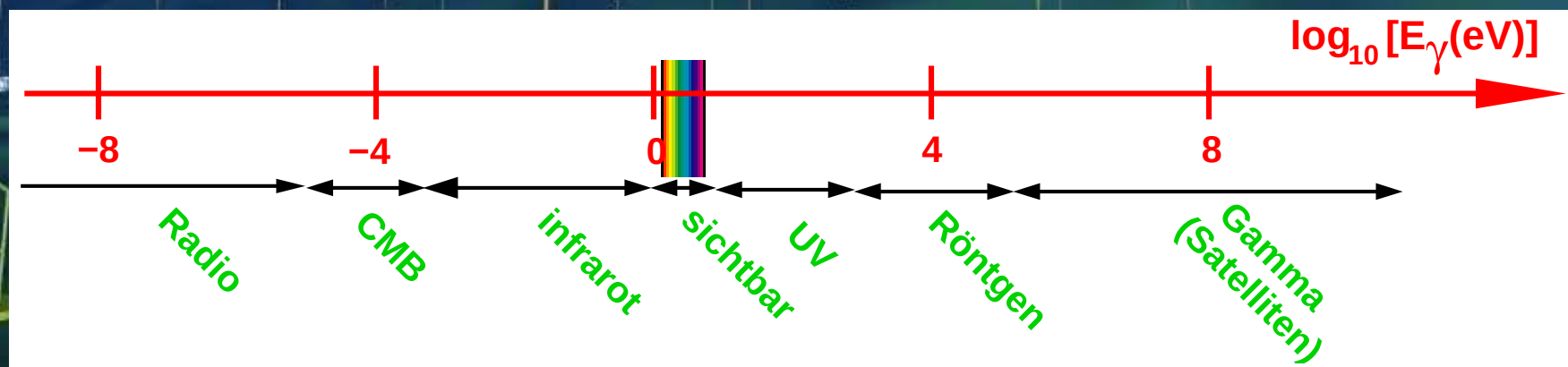
(Beispiele)

- Kosmische Hintergrundstrahlung
Eigenschaften des frühen Universums, Kosmologie.
- Röntgen-Astronomie
Astrophysikalische Prozesse bei hohen Teilchenenergien.
- γ -Rays
Aktive galaktische Kerne (AGN),
Gamma Ray Bursts (GRB),
Quasare, Supernova-Reste, ...

Der γ -Himmel von EGRET ($E_\gamma > 100$ MeV)



- Viele Punktquellen (u.a. AGNs), viele nicht identifiziert.



Breaking news:
CANGAROO:
 γ 's aus π^0 -Zerfällen
Nature 416(2002)823

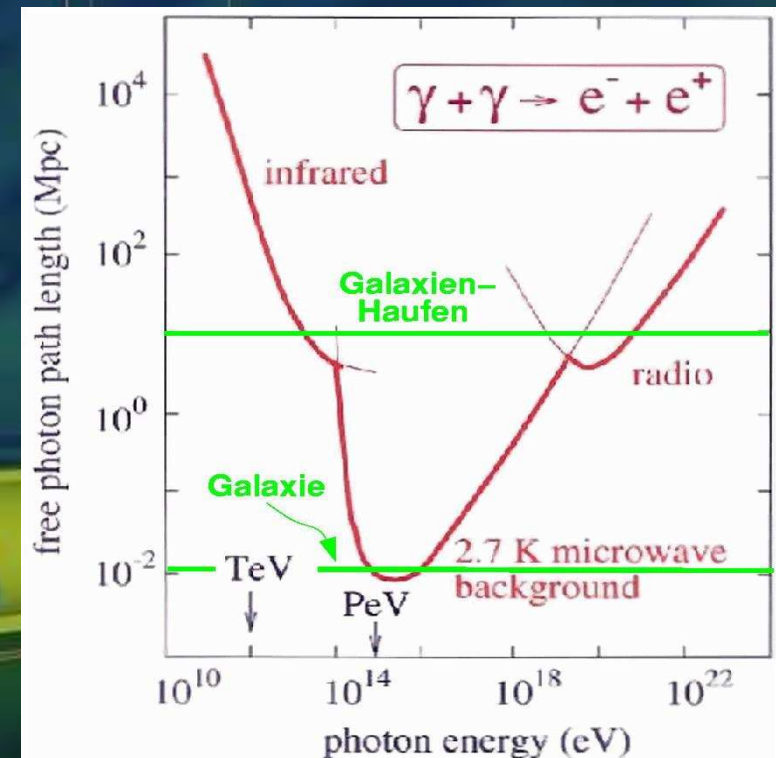
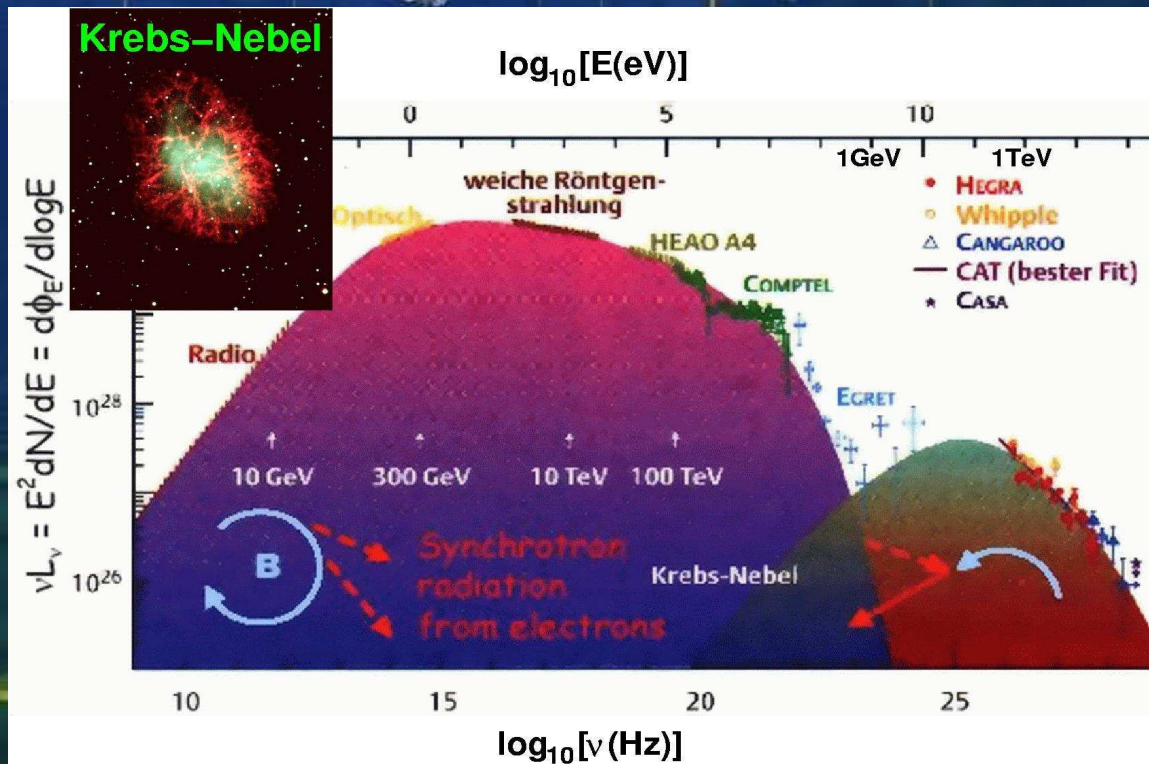
Hochenergetische Gamma-Strahlen

Messungen

- Punktquellen bis $E_\gamma \sim 100$ TeV:
 - **Galaktisch**
Beispiel: Krebs-Nebel (Supernova im Jahr 1054);
 - **Extragalaktisch**
Beispiel Makarian421 (AGN).
- Diffuser Hintergrund ($\gtrsim 1$ TeV): $\lesssim 10^{-4} \Phi_{p,A}$.

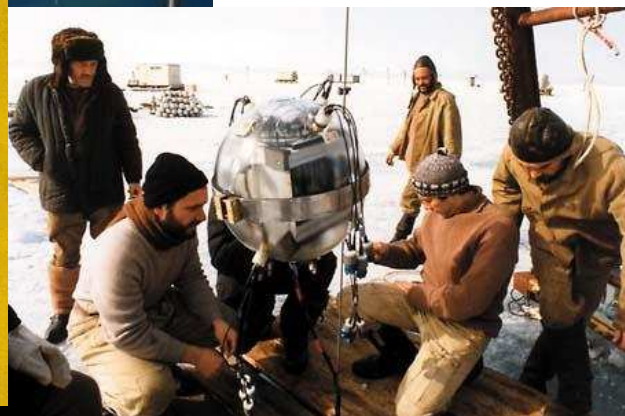
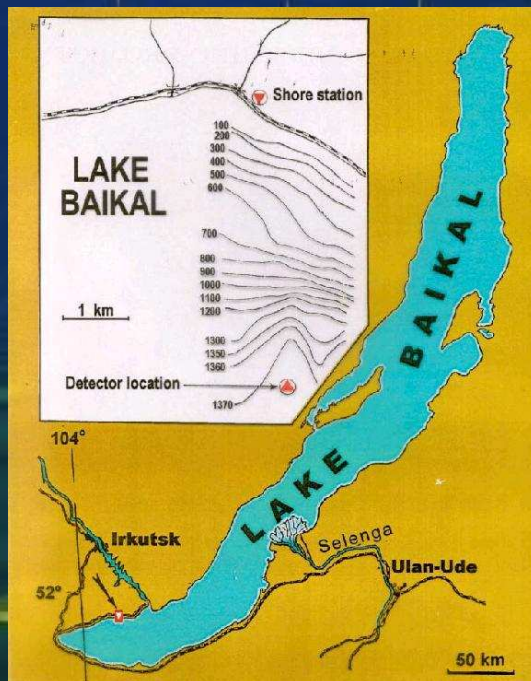
Interpretation:

- Spektren verträglich mit "Elektron-Quellen" (Synchrotron-Strahlung, Compton-Effekt).
- Kein Aufschluß über hadronische Beschleunigung.
- γ -Reichweite begrenzt.

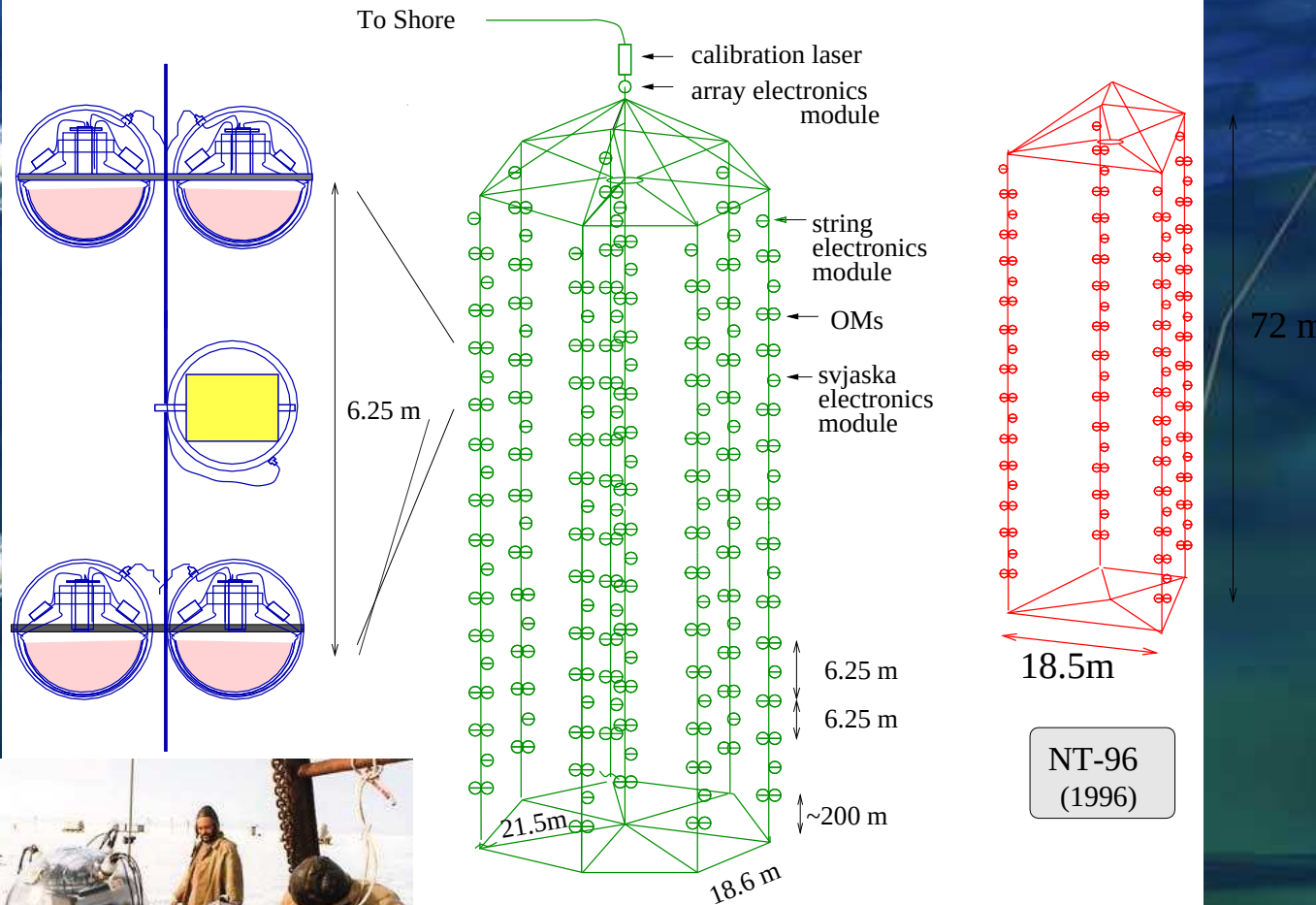


Baikal: Ein Neutrino-teleskop im Süßwasser

- Pioniere der Unterwassertechnik für Neutrino-teleskope.
- Beobachtung atmosphärischer ν 's.
- Erste Tests von akustischen Nachweismethoden.
- **Aber:** Trotz geplanter weiterer Ausbaustufe klein, Skalierung auf km^3 schwierig.



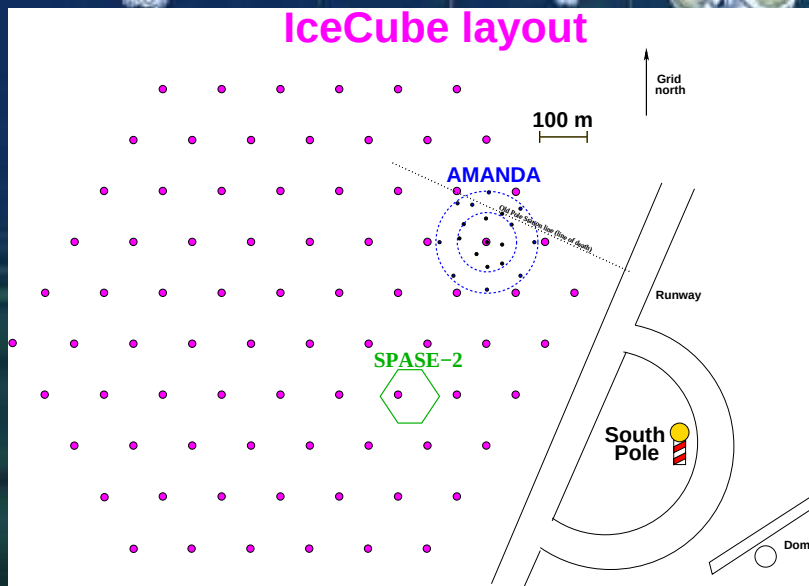
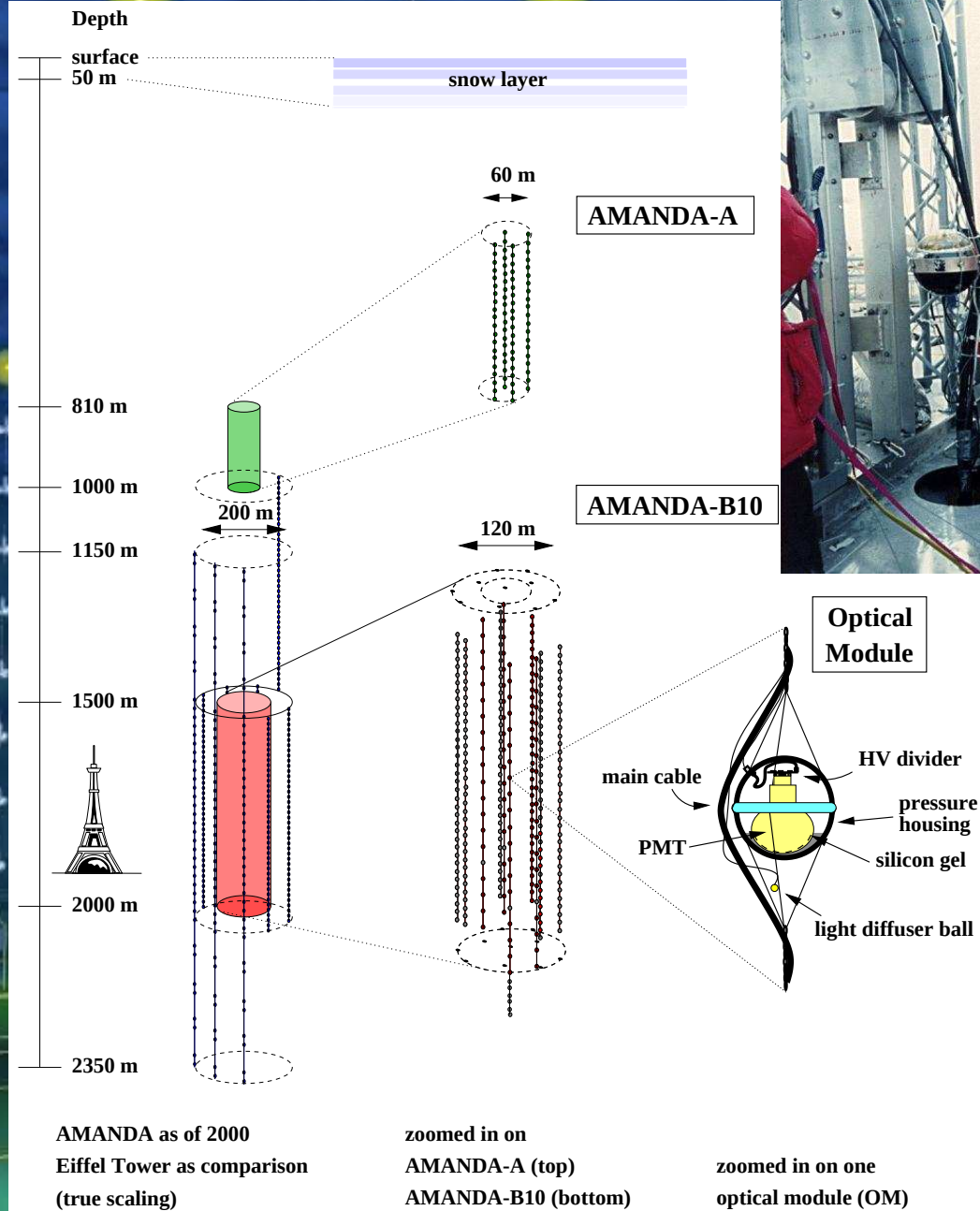
The BAIKAL NT-200 Neutrino Telescope



Winter:
Zugang über's Eis.

AMANDA/IceCube: am Südpol im Eis

- AMANDA-Datennahme seit '97.
- Komplementär zu ANTARES: sieht **nördliche Hemisphäre**.
- **Ergebnisse**: atmosphär. ν 's, Grenzen auf kosm. ν 's, WIMPs.
- Erweiterung auf **km³** in Vorbereitung (**IceCube**).
- Eis und Wasser bieten sehr unterschiedliche Experimentierbedingungen: Untergrund, optische Eigenschaften, Zugang, Stabilität, ...



Neutrino-Ereignisklassen

Myon-Neutrinos

Myon (CC-Reaktionen)

- $E_\mu \lesssim 100 \text{ GeV}$
 E_μ -Messung mit Reichweite:
 $R_\mu \lesssim \varnothing_{\text{ANTARES}}$
 ("contained events").
- $E_\mu \gtrsim 1 \text{ TeV}$:
 E_μ -Messung mit dE/dx
 Eff. Detektorvolumen
 $\propto R_\mu / \varnothing_{\text{ANTARES}}$.

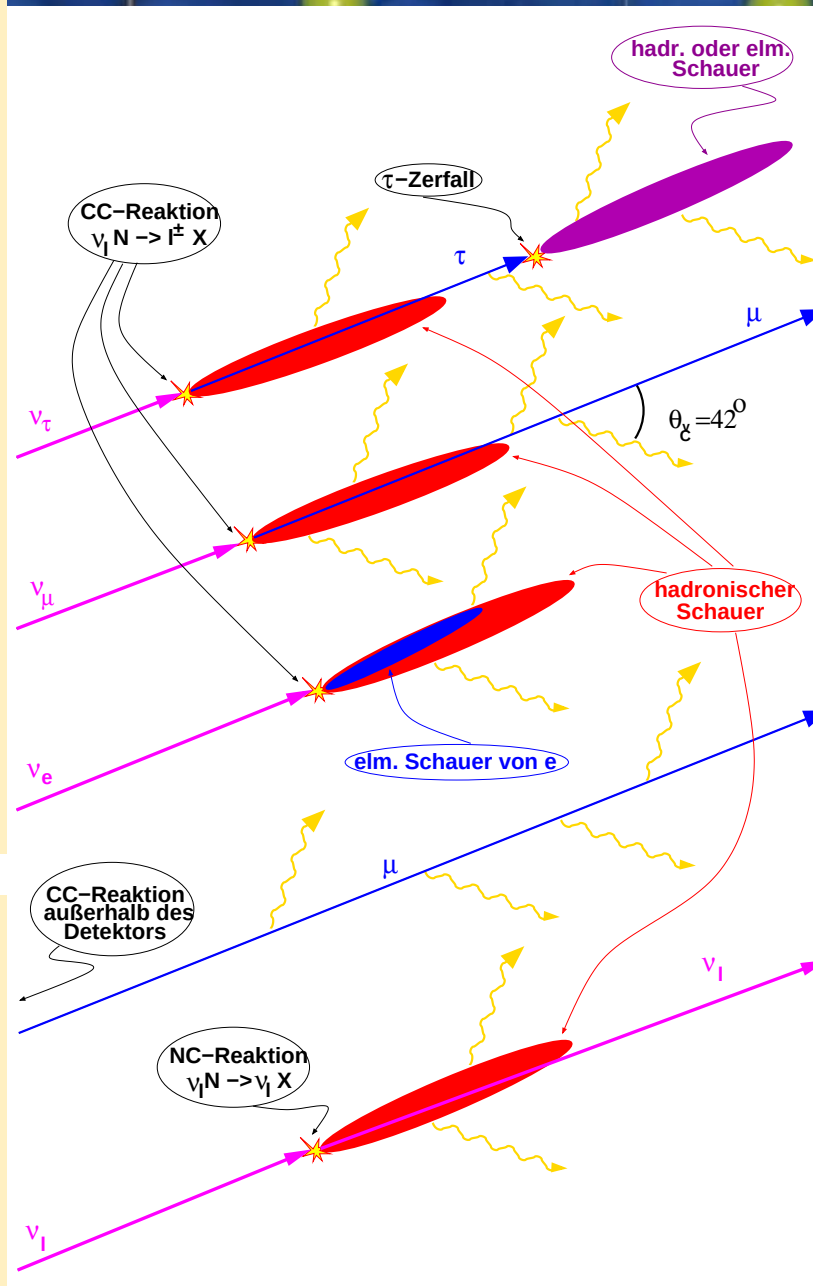
Hadronischer Schauer

- $\mathcal{O}(5 \text{ m})$ lang, am Wechselwirkungsort.
 Hilft bei kleinen E_ν .

Elektron-Neutrinos

Kombinierter elm./hadronischer Schauer

- Großes Lichtsignal.
- "contained" events.
- Richtungsbestimmung schwierig.



Tau-Neutrinos

$\tau^\pm$ (CC-Reaktionen)

- τ -Lebensdauer:
 $2.9 \times 10^{-13} \text{ s}$;
 $R_\tau \sim 5 \text{ cm} \cdot E_\tau / \text{TeV}$.
- "Double bang"
 nur bei $E_\tau \gtrsim 1 \text{ PeV}$
 auflösbar.
- Bei kleineren E_τ :
 $\tau \rightarrow \mu \nu \nu$ wie ν_μ CC
 $\tau \rightarrow e \nu \nu$ wie ν_e CC
 $\tau \rightarrow \text{Had.} + \nu$ wie NC

NC-Reaktionen

Hadronischer Schauer

- Rekonstruktion und Trennung von Untergrund schwierig.

Neutrino-Wirkungsquerschnitte

$$\frac{d^2\sigma^{\nu N}}{dx dy} = \frac{G_F^2(s - M_N^2)}{\pi} \frac{M_W^4}{(Q^2 + M_W^2)^2} \left[\left(1 - y + \frac{y^2}{2}\right) F_2(x, Q^2) \pm \left(y - \frac{y^2}{2}\right) xF_3(x, Q^2) \right]$$

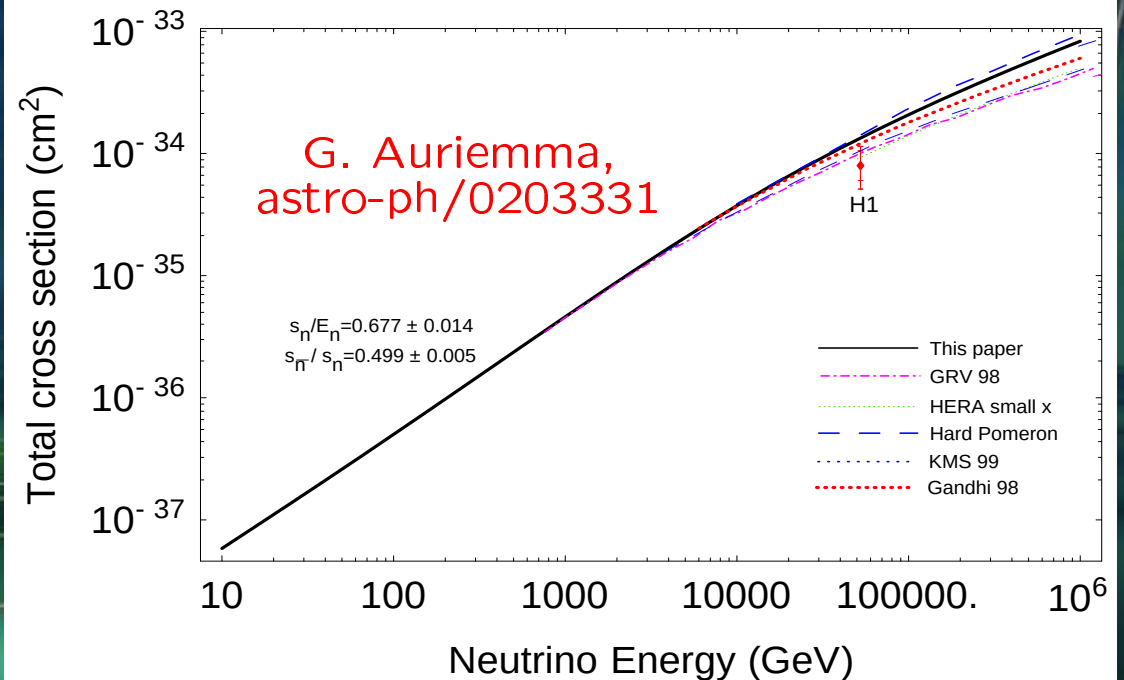
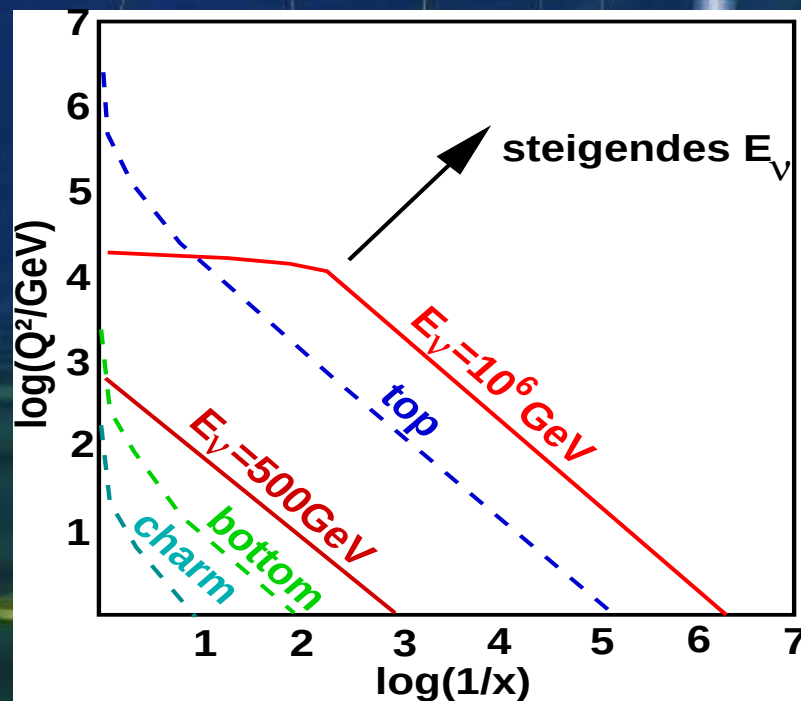
$$F_2^{\nu} = (u + \bar{u} + d + \bar{d} + 2s + 2c + 2b + 2t)$$

(isoskalares

$$xF_3^{\nu} = (u - \bar{u} + d - \bar{d} \pm 2s \mp 2c \pm 2b \mp 2t)$$

Target)

- Strukturfunktionen und Quarkverteilungen bis $Q^2 \lesssim 10^4 \text{ GeV}^2$ und $x \gtrsim 10^{-5}$ gemessen (HERA).
- $E_\nu \gtrsim 50 \text{ TeV}$: Extrapolation zu kleineren x und größeren Q^2 notwendig.
- Unbekannt: Bottom- und Top-Quarkverteilungen.
- Insgesamt Unsicherheit von Faktor 5–10 bei $E_\nu \gtrsim 10 \text{ PeV}$.

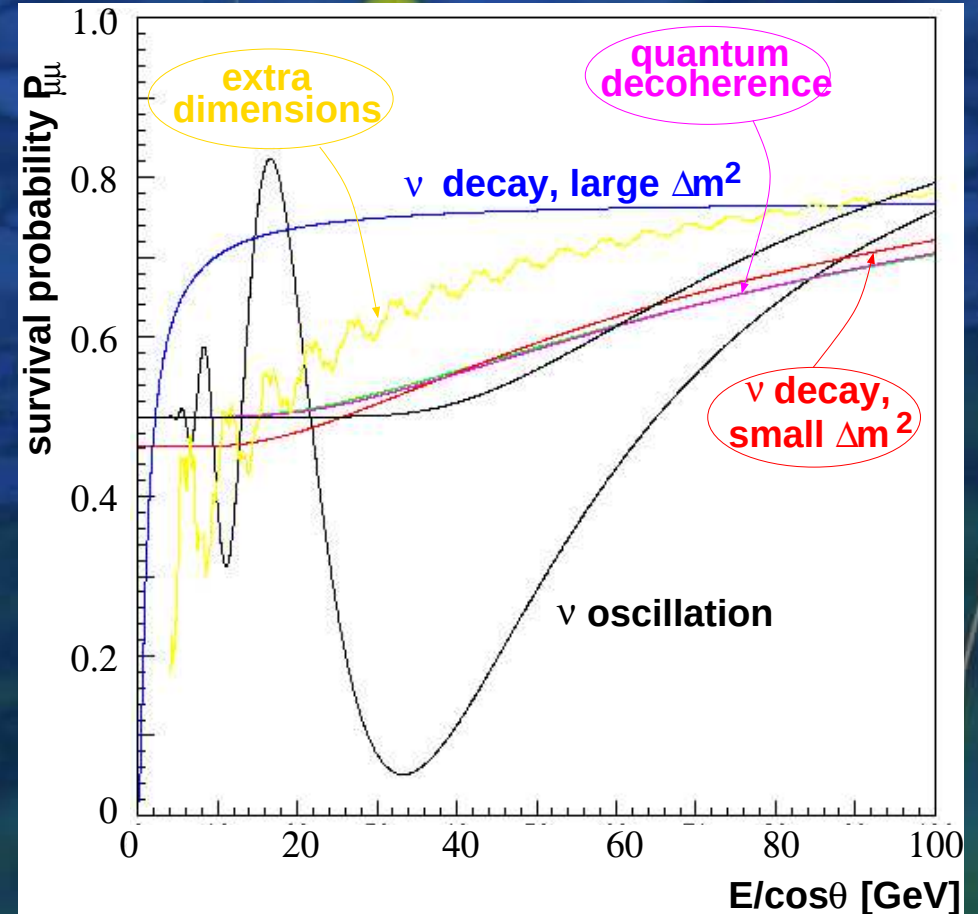
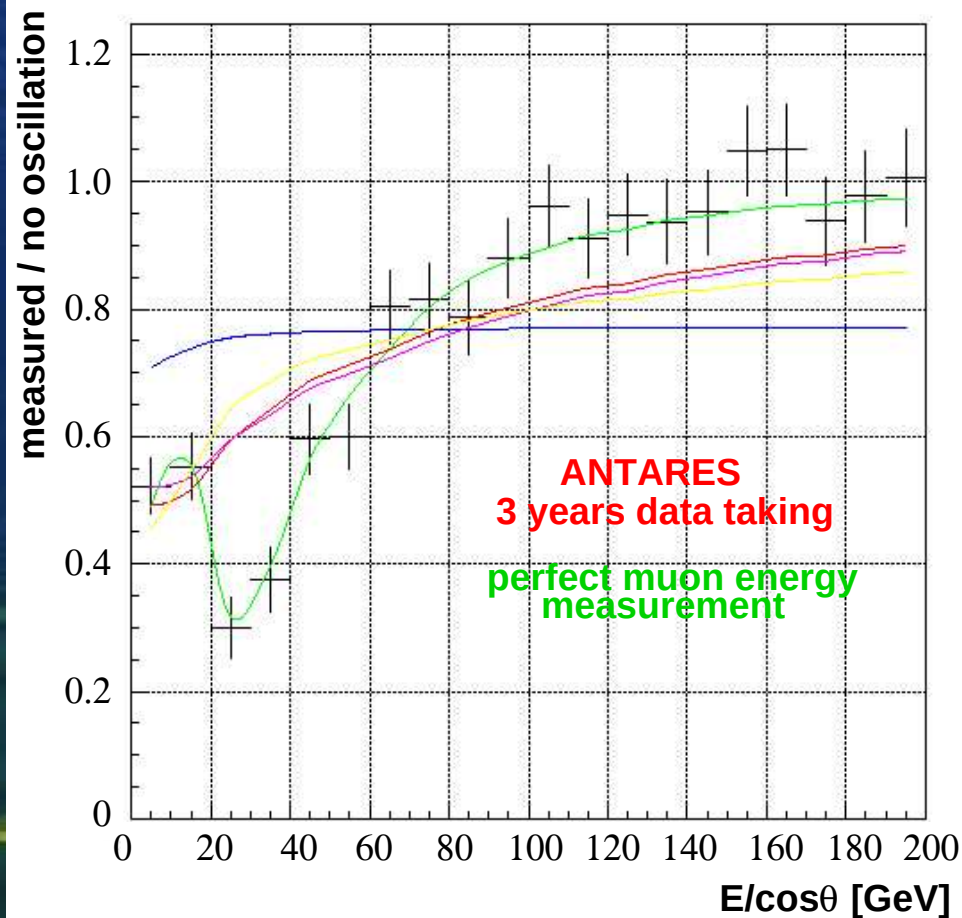


Alternativen zu ν -Oszillationen?

Messung des 1. Oszillationsminimums in ANTARES



Überprüfung verschiedener Modelle, die zur Zeit noch mit allen Daten verträglich sind.



- Neutrino-Zerfälle:
V. Barger et al, hep-ph/9907421
- Quanten-Dekohärenz
E. Lisi, A. Marrone, D. Montanino, hep-ph/0002053
- Large Extra Dimensions
R. Barbieri, P. Creminelli, A. Strumia, hep-ph/0002199

Dunkle Materie und WIMPs

Dunkle Materie:

- Viele unabhängige Hinweise auf “unsichtbare” Materie im Weltraum:
 - Rotationskurven von Galaxien und Galaxienhaufen;
 - Kosmologie: Hintergrundstrahlung, Supernovae(Ia), Nukleosynthese.
- Alle Beobachtungen vereinbar mit

$$\frac{\Omega_{\text{Baryon}}}{\Omega_{\text{Materie}}} \approx 0.15 .$$

→ 85% der Materie ist uns unbekannt (keine ν , e , ...)!

WIMPs:

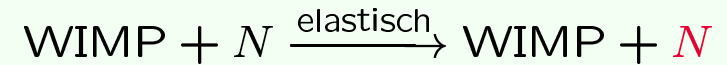
- Gute Kandidaten: “Weakly Interacting Massive Particles” .
- Beitrag zu Ω :

$$\Omega_{\text{WIMP}} \propto \frac{1}{\langle v \sigma_A \rangle} .$$

Ergibt etwa den gesuchten Beitrag, falls $\sigma_A \sim \sigma_{\text{schwach}}$.

WIMP-Suchen:

- Indirekte Suchen:
Z.B. WIMP-Annihilation zu Neutrinos.
- Direkte Suchen:



→ Nachweis des Rückstoßkerns.

