

Sternwarte Neumarkt/Opf. – Dem Himmel ein kleines Stückchen näher

Astroteilchenphysik und die Suche nach Neutrinos im Mittelmeer

Uli Katz
Univ. Erlangen
18.03.2005



KM3NeT

- Astroteilchenphysik
- Derzeitige Neutrino-Experimente
- Das ANTARES-Projekt
- Zusammenfassung und Ausblick

Womit beschäftigt sich die Astroteilchenphysik?

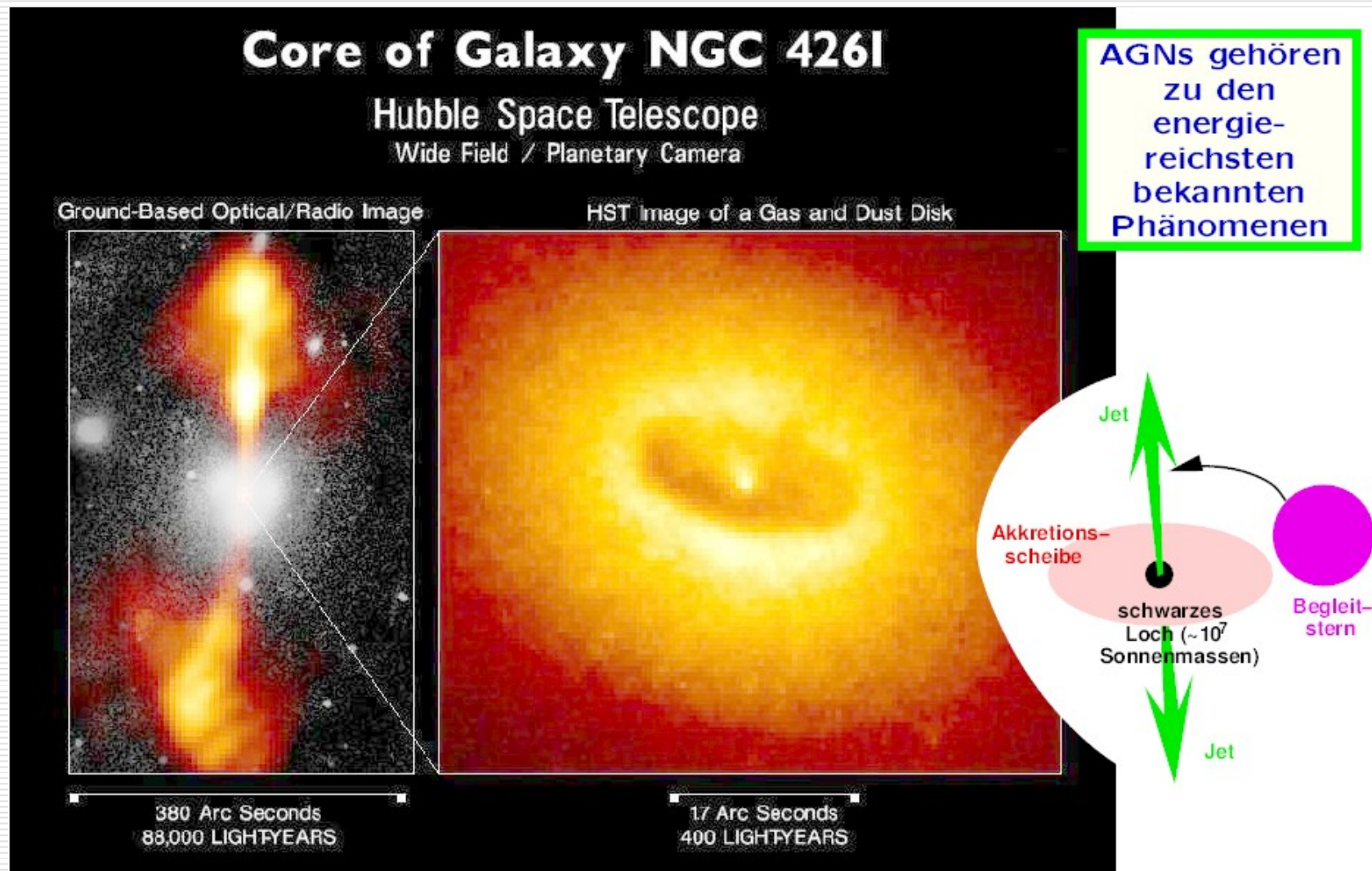
Was wird gemessen?

- **Teilchen aus dem Weltraum**
 - Energie, Richtung, Ankunftszeit
 - Teilchensorte
 - Fluss (wie viele Teilchen pro Zeit und Fläche)
 - Zusammenhang mit astronomischen Beobachtungen
- **Reaktionen der Primärteilchen in Atmosphäre und Erde**
 - Erlauben Teilchennachweis durch Erzeugung von (vielen) Sekundärteilchen

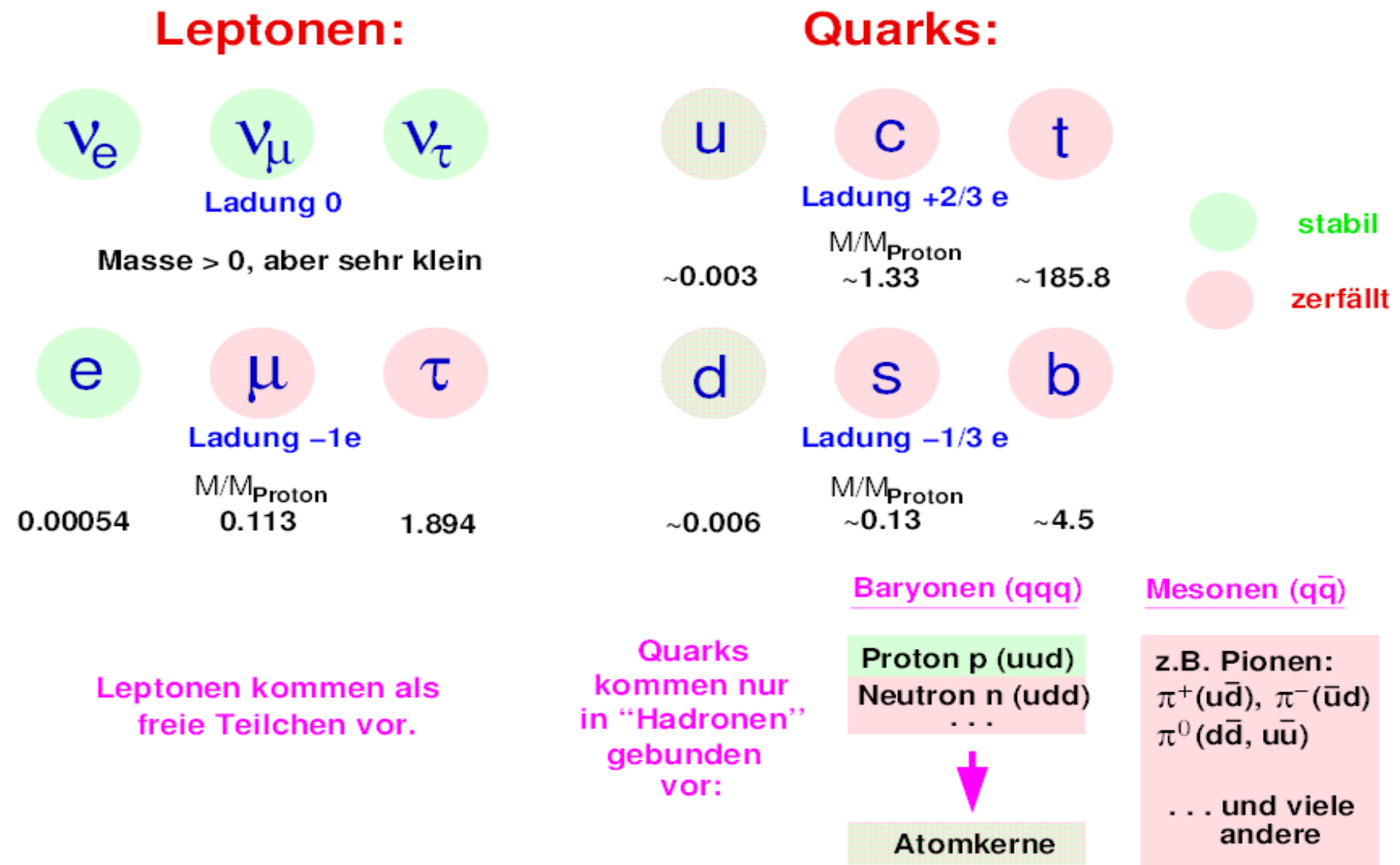
Was wird erforscht?

- **Vorgänge und Reaktionen in astrophysikalischen Objekten**
 - Aktive galaktische Kerne, Gamma Ray Bursts, (Mikro)quasare, Supernovae, Sterne, ...
 - Beschleunigungsmechanismen
- **Teilchenausbreitung im interstellaren Raum**
- **Teilcheneigenschaften**
 - Neue Teilchen und Wechselwirkungen
 - Neutrino-Oszillationen

Beispiel: Aktive galaktische Kerne



Die Darsteller: „Materieteilchen“



Die Darsteller: „Wechselwirkungsteilchen“

Wechselwirkung	Quanten	Bemerkungen
Elektromagnetisch	Photonen (γ) Ladung = 0 Masse = 0	Radiowellen, Mikrowellen, Licht, Röntgenstrahlen, Gamma-Strahlen
Stark ("Kernkraft")	Gluonen (g) Ladung = 0 Masse = 0	Gluonen kommen nicht als freie Teilchen vor
Schwach	$W^{\pm}$ – und Z^0 – Bosonen $M_W/M_p=85.7$ $M_Z/M_p=97.2$	Extrem massiv und instabil, in Labor- Experimenten erzeugt

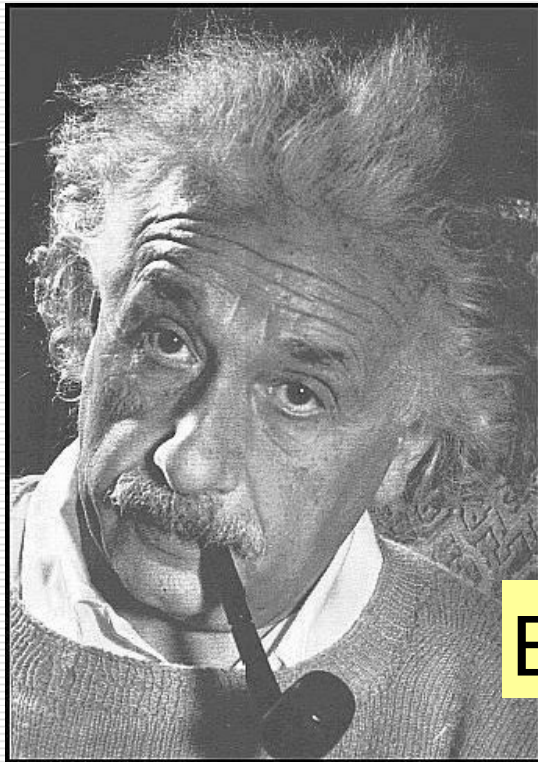
... und dann war da noch: Das Higgs-Teilchen (spielt hier keine entscheidende Rolle)

Welche Teilchen kommen aus dem Weltraum?

- Voraussetzung: Stabile freie Teilchen
- Alle bekannten solchen Teilchen werden beobachtet:
 - Protonen und schwerere Atomkerne (→ „Cosmic Rays“)
 - Photonen (→ Klassische, Radio-, Röntgen-Astronomie und Gamma-Astronomie)
 - Elektronen (geringe Reichweite)
 - Neutrinos (Neutrino-Astronomie)
 - Spekulativ: „Weakly Interacting Massive Particles“ (WIMPs) (neuartige Teilchen, für die es Hinweise, aber keine Beweise gibt)
 - ... und natürlich jeweils die Antiteilchen dazu.

In grün: Arbeitsgebiete der Astroteilchenphysik,
insbesondere bei hohen Teilchenenergien

Teilchenenergien: Beschleuniger vs. Weltall



$$E = mc^2$$

Hohe Teilchenenergien erlauben

- Erzeugung neuer Teilchen
- Untersuchung kleiner Strukturen

Energieskala:

1 eV = 1 Elektronvolt

Teilchen/Astroteilchenphysik:

1 GeV = 10^9 eV

(Protonmasse: 0.938 GeV/c²)

Beschleuniger/Weltraum

- Stärkster Teilchenbeschleuniger im Bau: Large Hadron Collider (LHC)

→ p (7 000 GeV) ← p (7 000 GeV)

„Nutzbare“ Energie: 14 000 GeV

- Teilchen aus dem Weltraum:

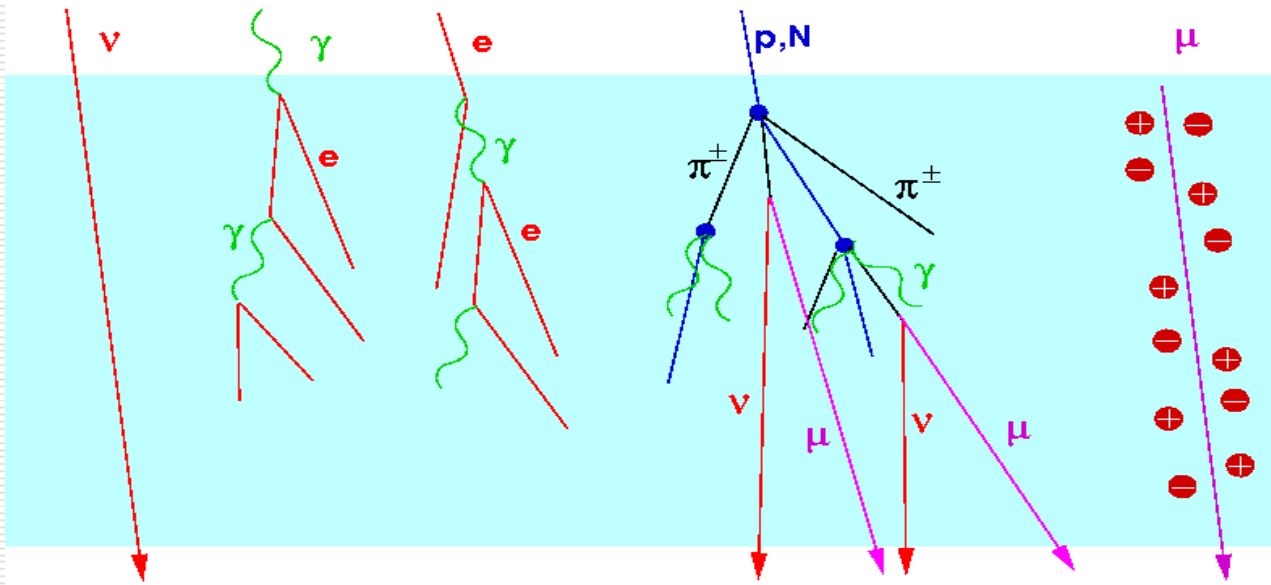
→ p (7 000 GeV) • p (0.938 GeV)

„Nutzbare“ Energie: 115 GeV

Aber: Teilchenenergien bis 10^{11} GeV

Teilchenwechselwirkung in der Atmosphäre

Vereinfachte, schematische Darstellung:

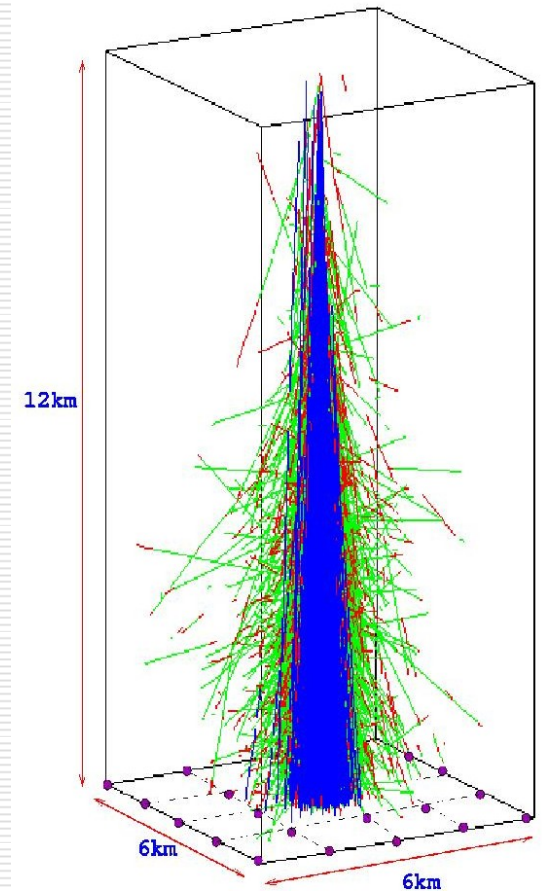


Neutrino: seltene Wechselwirkung
(kann z.B. Erde ohne Reaktion durchqueren)

Photon, Elektron:
elektromagnetische Kaskade durch Paarerzeugung und Bremsstrahlung

Protonen, Kerne: hadronische Kaskade mit Myonen und Neutrinos ($\pi^\pm$ -Zerfälle) und Photonen / elm. Kaskaden (von π^0 -Zerfällen)

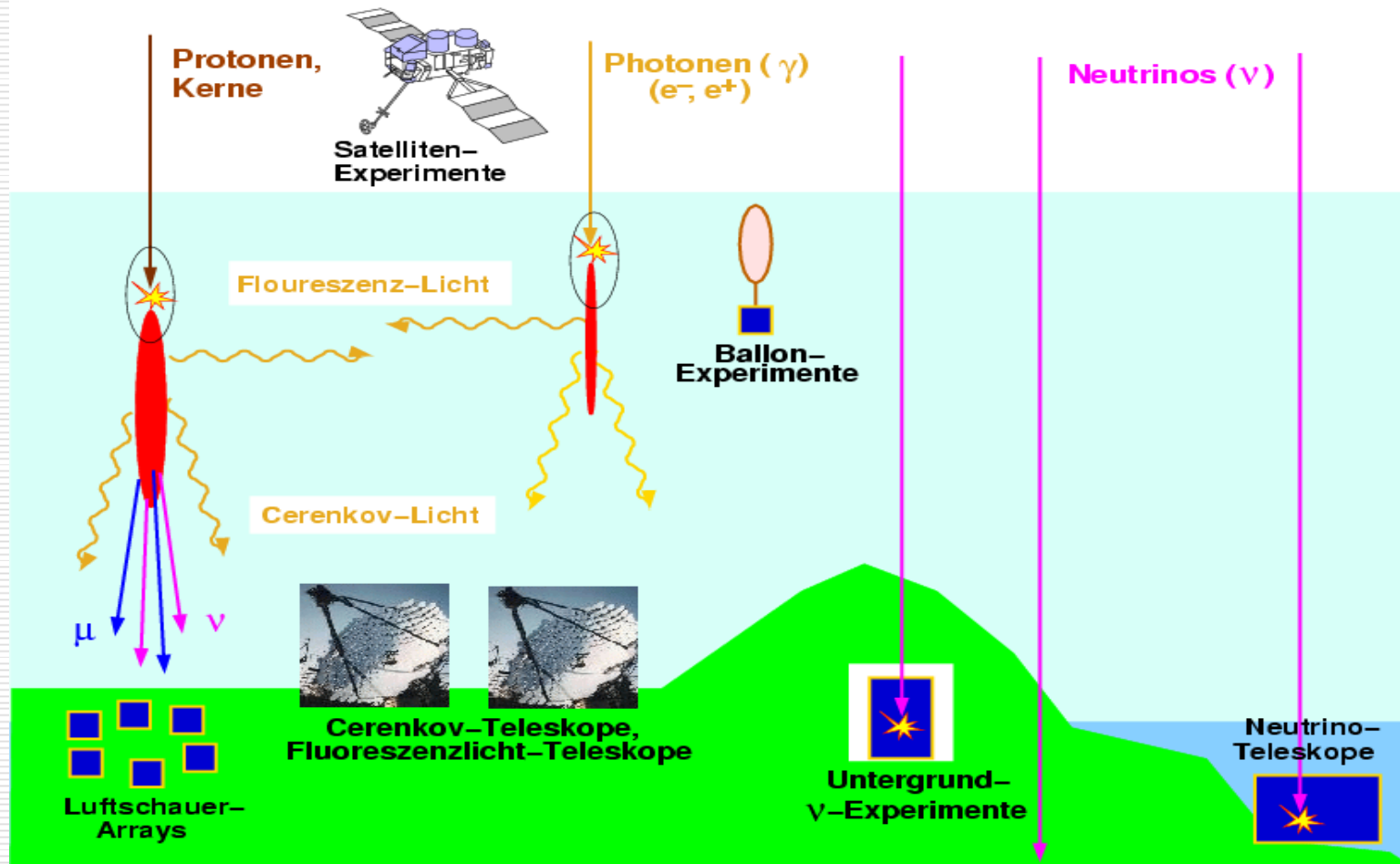
Myon: verliert Energie durch Ionisation, aber hat große Reichweite (bis mehrere km in H_2O)



Simulierter hadronischer Schauer, 10^{10} GeV, 10^{11} Teilchen am Boden

Nachweismethoden der Astroteilchenphysik

aus dem Weltall



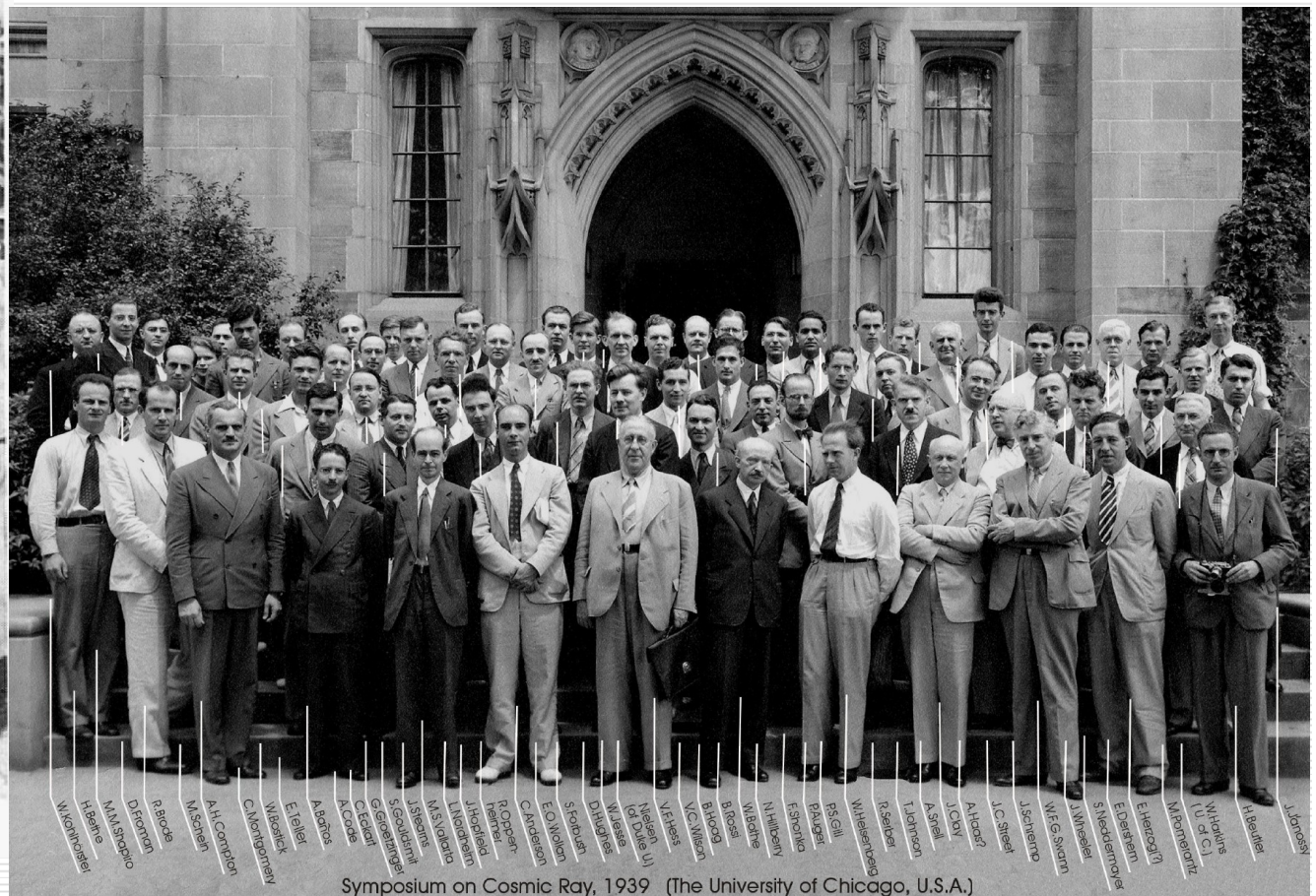
Wie alles begann



**Victor Hess (1912):
Entdeckung der
kosmischen Strahlung**

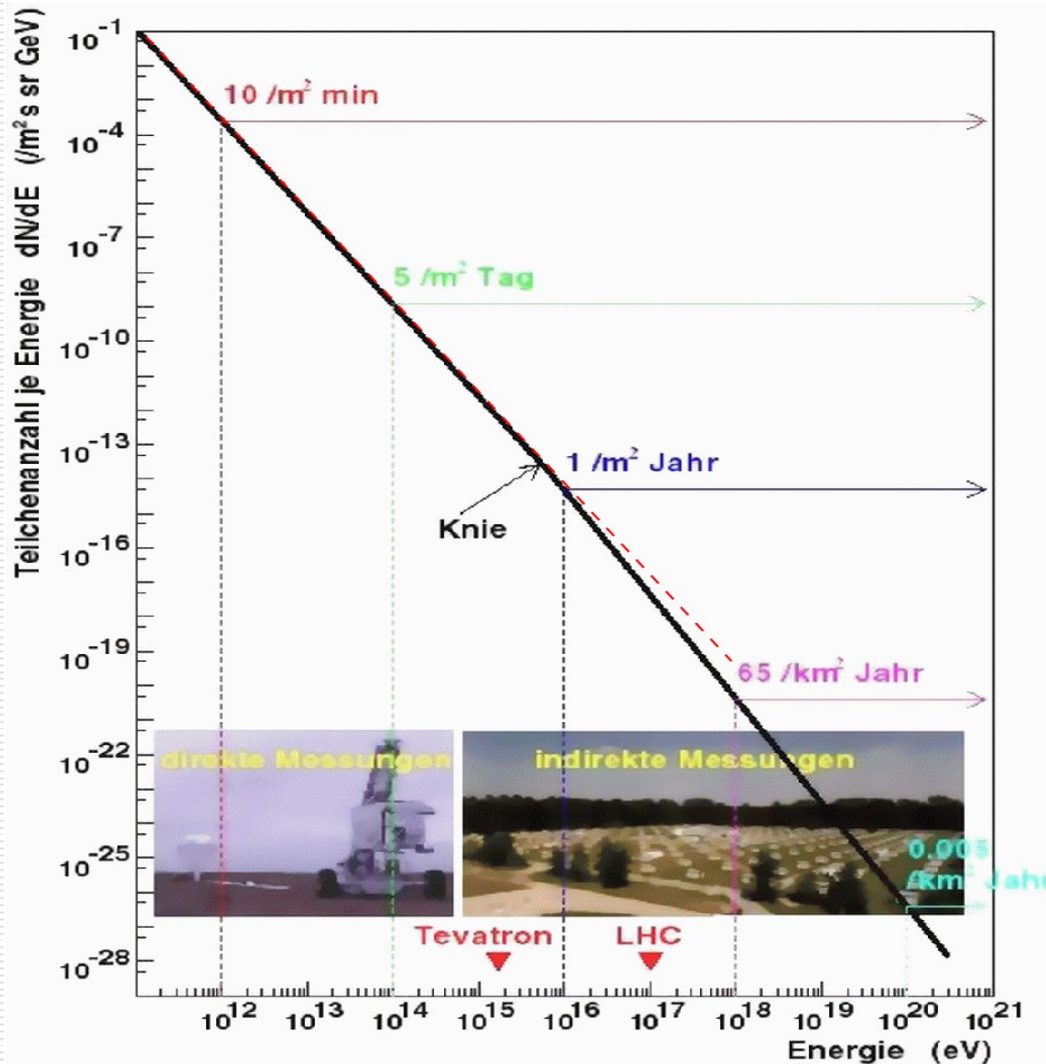
Hess bei Ballonlandung (1912).

Teilnehmer am *Symposium on Cosmic Rays, Chicago, 1939:*



Symposium on Cosmic Ray, 1939 (The University of Chicago, U.S.A.)

Kosmische Strahlung: Protonen und Kerne



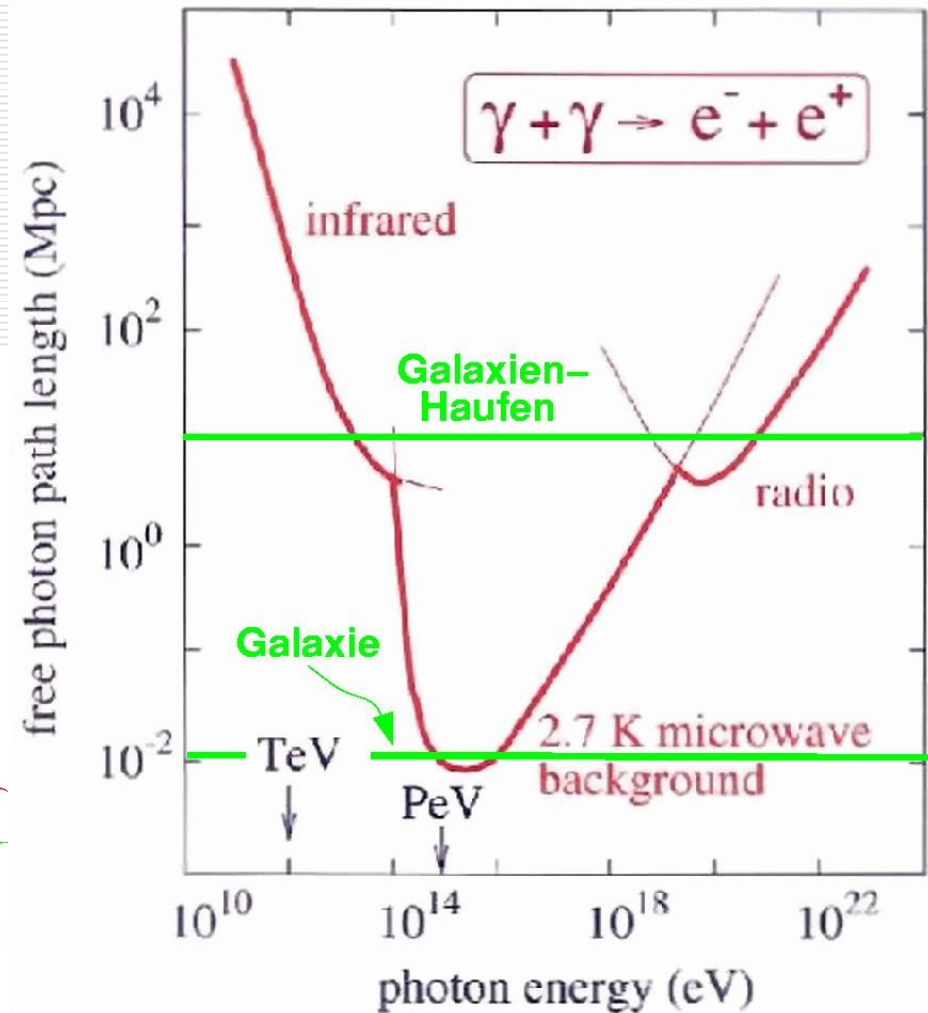
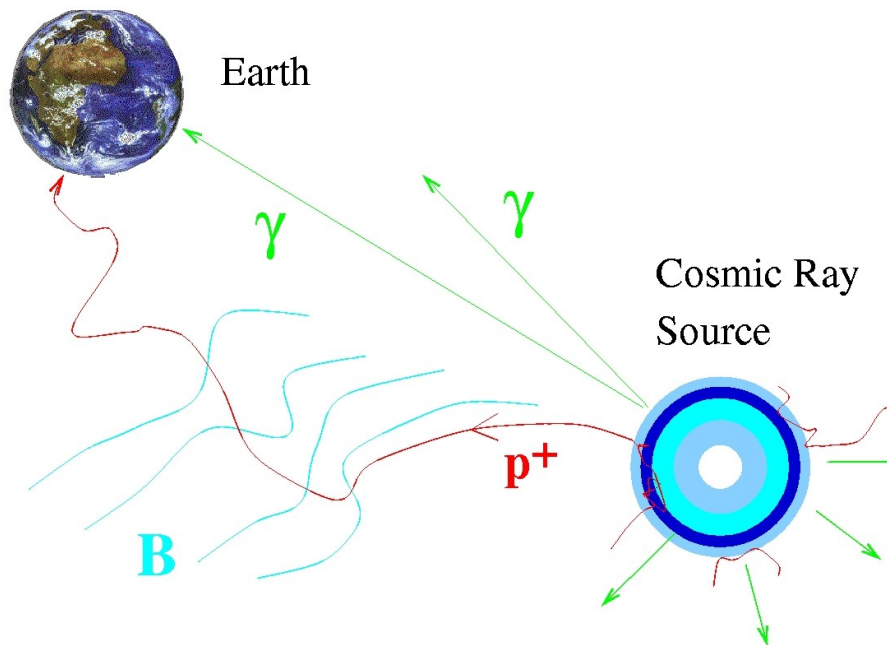
**Beobachtet: Energien
> 10^{11} GeV**

- Wie erfolgt die Beschleunigung?
- Warum „gehen die p/Kerne nicht kaputt“?
- In welchen kosmischen Quellen?
- Wie kommt das Spektrum zustande?

Neues Experiment im Aufbau:
Pierre-Auger-Observatorium
(Argentinien, 30 000 km²
Schauer-Array + Fluoreszenz-
Teleskope)

Gamma-Astronomie

- **Vorteil:** Quellidentifikation
- **Nachteil:** „Geringe“ Reichweite.



Gamma-Teleskope

Nachweis von
Gamma-Strahlung
mit Cherenkov-
Teleskopen
(~100–10000 GeV)

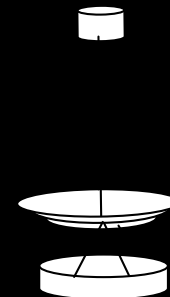
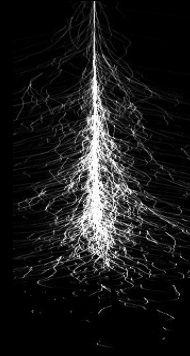
18.03.2005

Gamma
ray

Teilchen-
Schauer

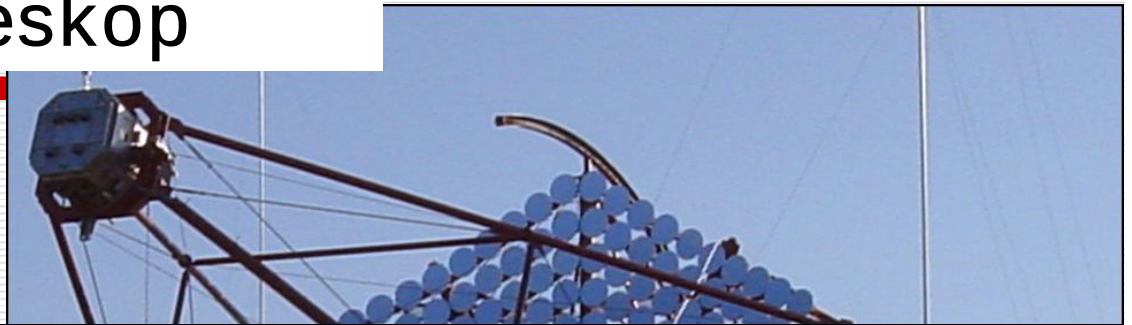
Cherenkov-Licht

~ 10 km



Das H.E.S.S.-Teleskop

**4 Teleskope in Namibia
(stereoskopische Beobachtung)**

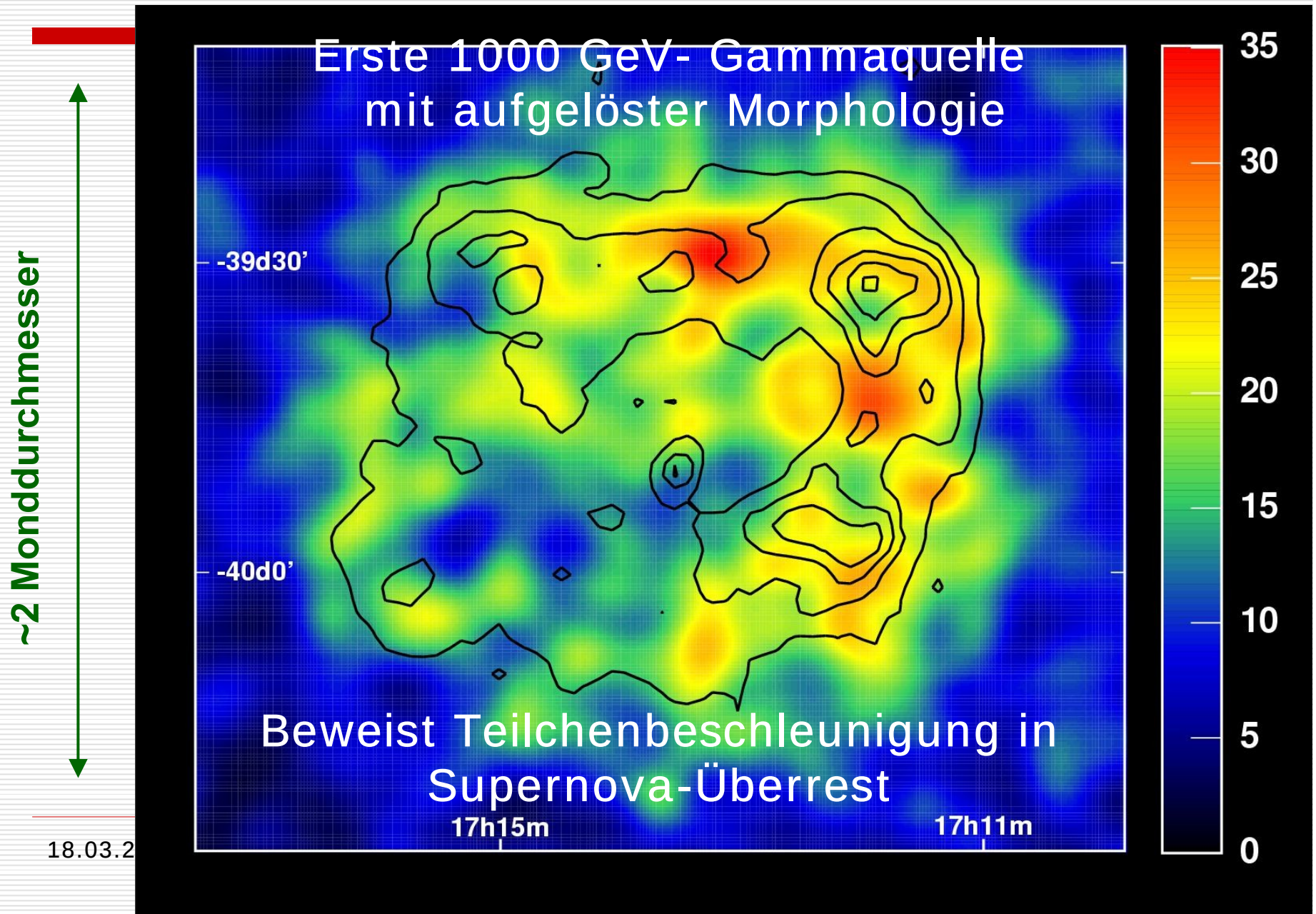


18.03.2005

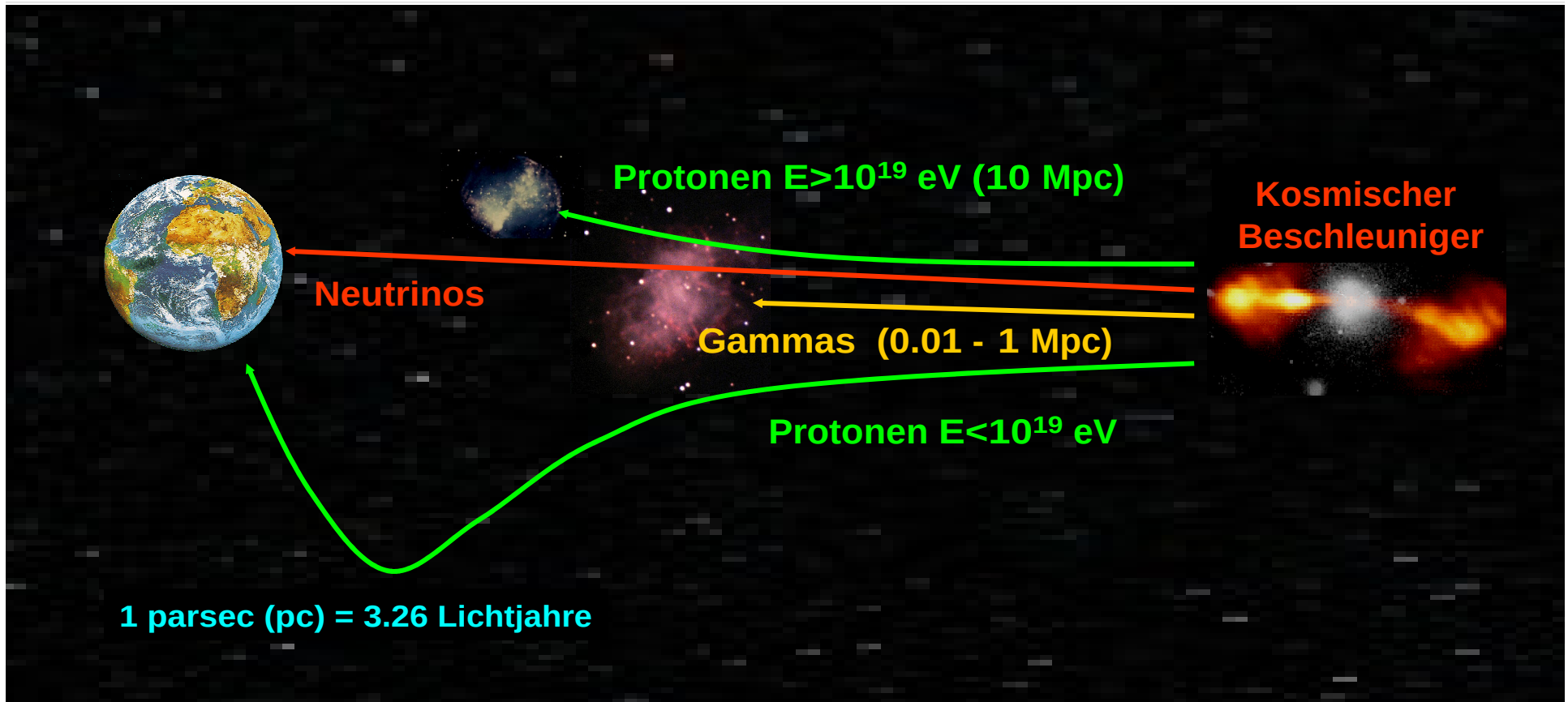
U. Katz: Astroteilchenphysik &
Neutrino-Teleskope

14

RXJ 1713 with H.E.S.S.



Warum Neutrinos nachweisen?



Photonen: absorbiert von Staub und Strahlung;
Protonen/Kerne: Ablenkung in Magnetfeldern, Reaktion mit Photonen (CMB)

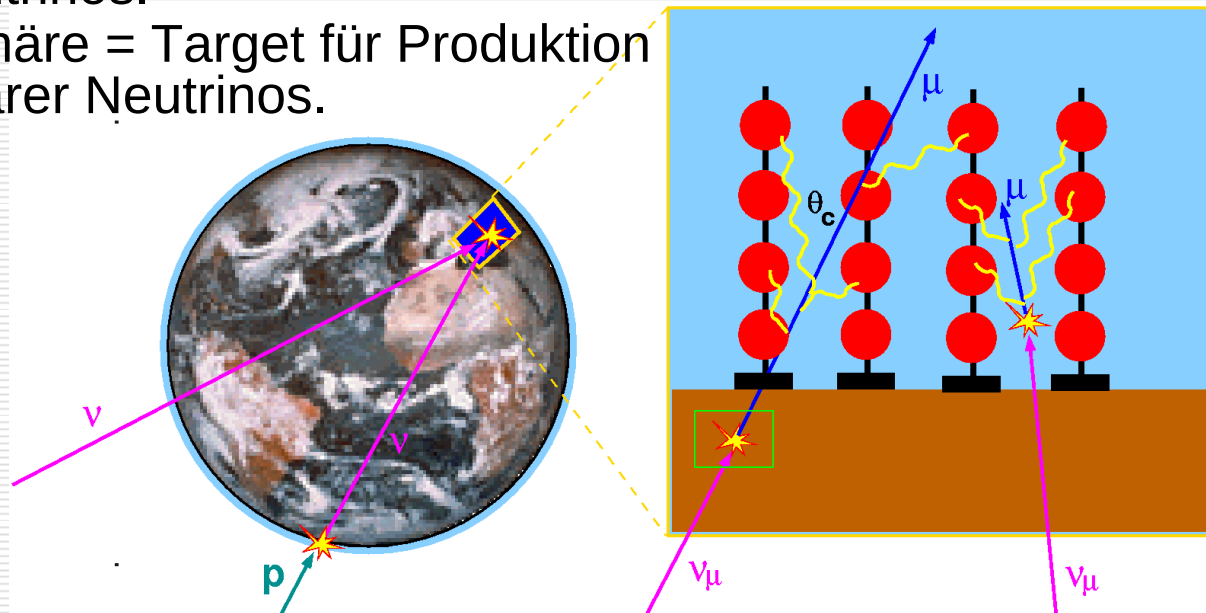
Neutrinos sind etwas Besonderes !

- Neutrinos durchqueren den Weltraum **ohne Ablenkung oder Absorption**
 - sie zeigen zu ihren **Quellen**;
 - sie erlauben es, **dichte Umgebungen** zu untersuchen;
 - sie ermöglichen Beobachtungen in **kosmologischen Abständen**.
- Neutrinos werden in hadronischen Prozessen produziert
→ Unterscheidung zwischen Elektron- und Proton-Beschleunigung.
- Neutrinos könnten bei WIMP-Annihilation erzeugt werden.
- Neutrino-Nachweis erfordert **riesige Target-Massen**
→ Verwendung natürlicher Vorkommen (Wasser, Eis).

Das Prinzip von Neutrino-Teleskopen

Rolle der Erde:

- Abschirmung aller Teilchen außer den Neutrinos.
- Atmosphäre = Target für Produktion sekundärer Neutrinos.



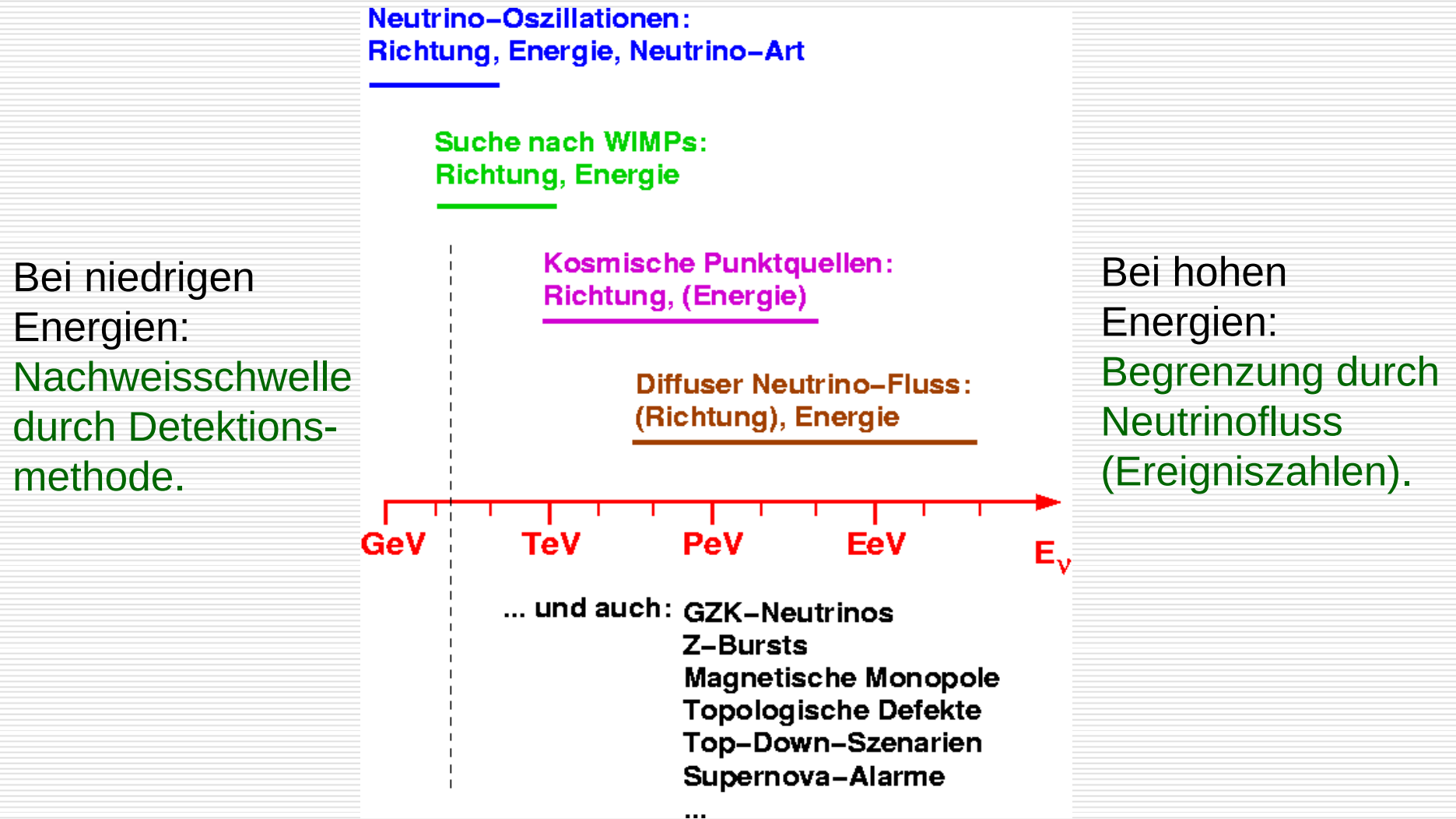
Cherenkov-Licht:

- In Wasser: $\theta_c \approx 43^\circ$
- Spektralbereich: $\sim 350\text{-}500\text{nm}$.

Neutrino-Reaktionen (Schlüsselreaktion: $\nu_\mu N \rightarrow \mu X$):

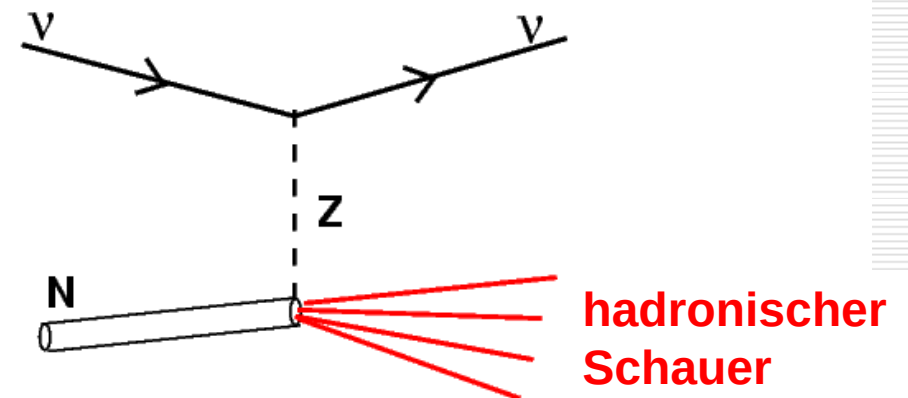
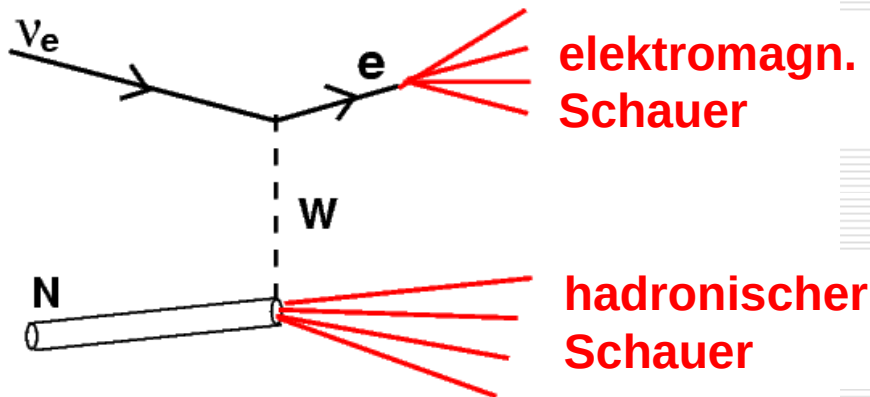
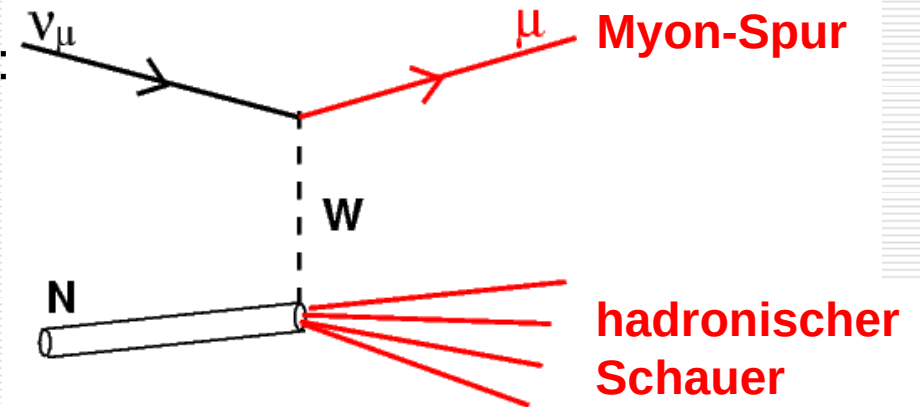
- Reaktionsparameter von Beschleuniger-Experimenten bekannt.
- Extrapolation auf höchste Energien ($> 100\,000\text{ GeV}$) unsicher.

Teilchen- und Astrophysik mit ν -Teleskopen



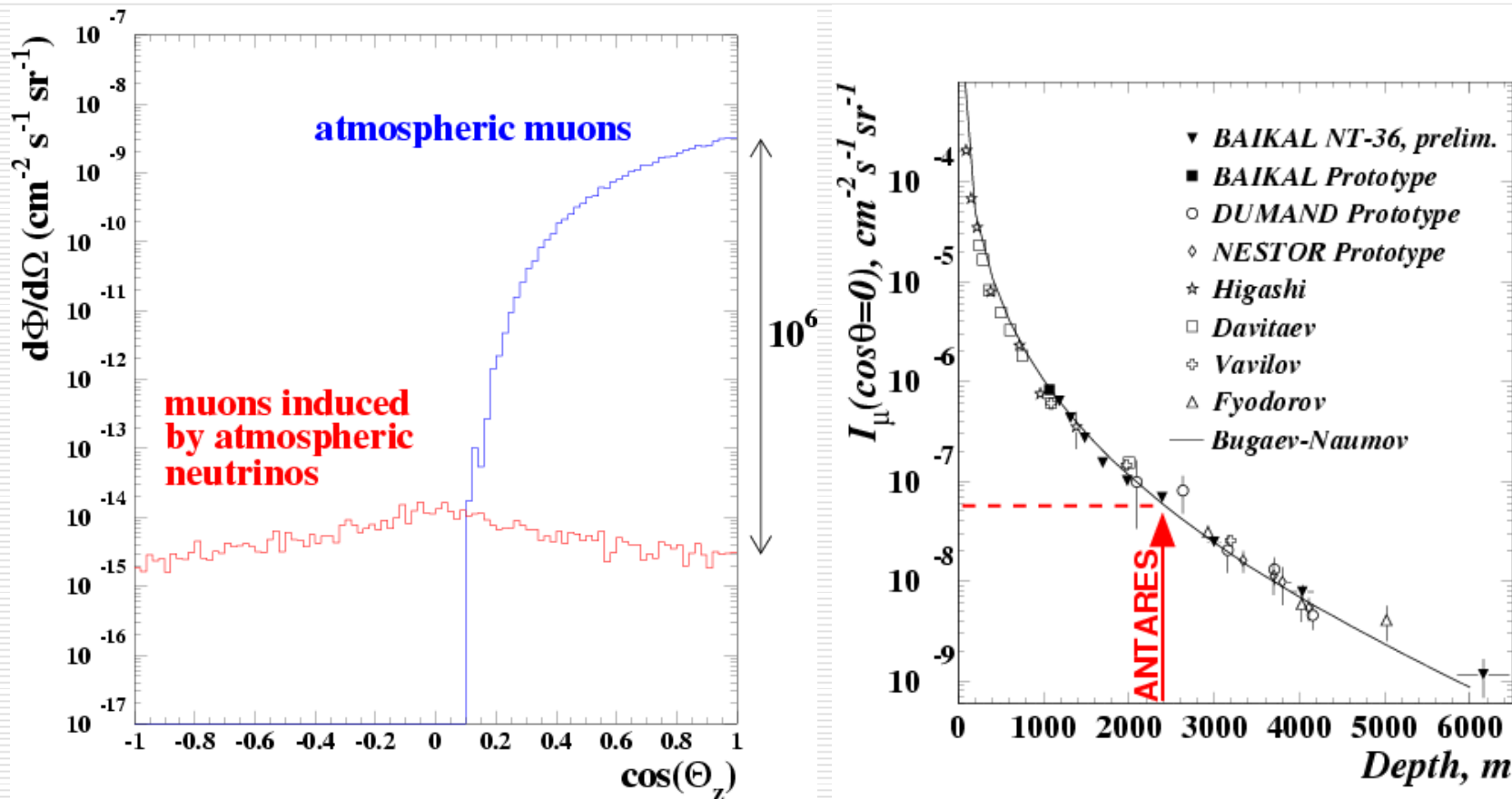
Neutrino-Wechselwirkungs-Signaturen

- Neutrinos meist von π - μ -e Zerfällen, etwa $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$;
- Ankunft auf Erde nach Oszillationen: $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \approx 1 : 1 : 1$;
- Schlüsselsignatur: Myon-Spuren von ν_μ -Reaktionen (einige 100m bis mehrere km lang);
- Elektromagnetische/hadronische Schauer: „Cherenkov-Punktquellen“

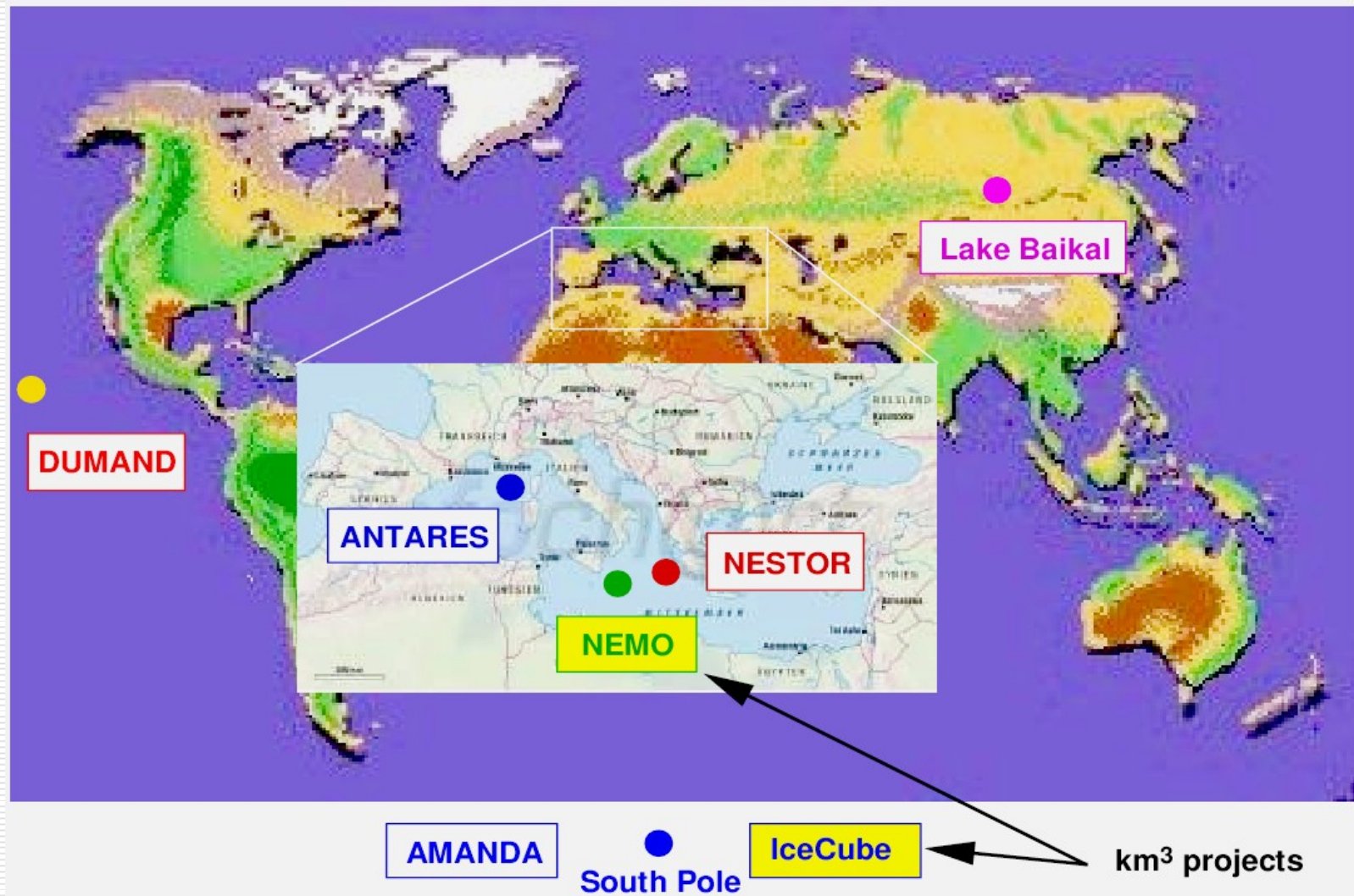


Myonen: Der Untergrund von oben

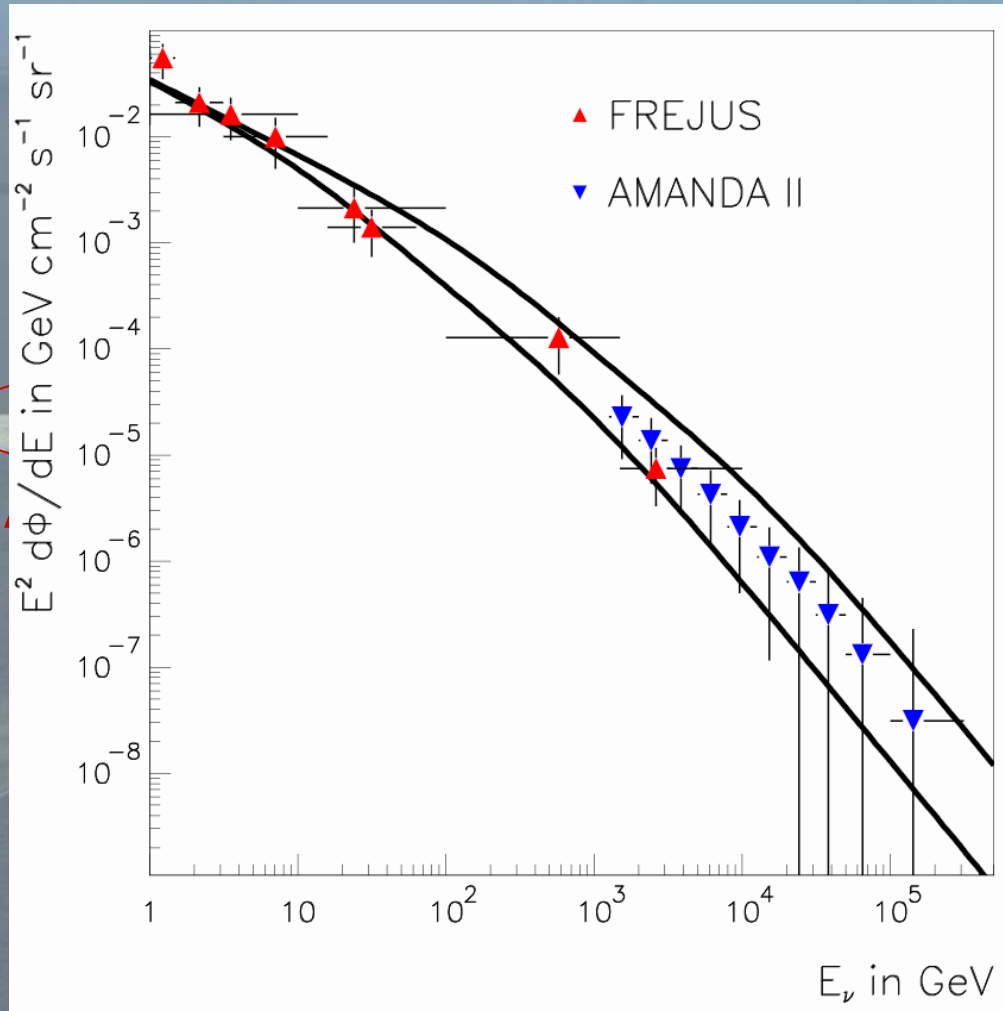
Myonen können mehrere km Wasser durchdringen, wenn $E_\mu > 1\text{TeV}$;
Identifikation kosmischer ν 's von oben: erfordert Schauer sehr hoher Energie.



Die Neutrino-Teleskop-Weltkarte



AMANDA: Neutrino-Daten aus dem Südpoleis

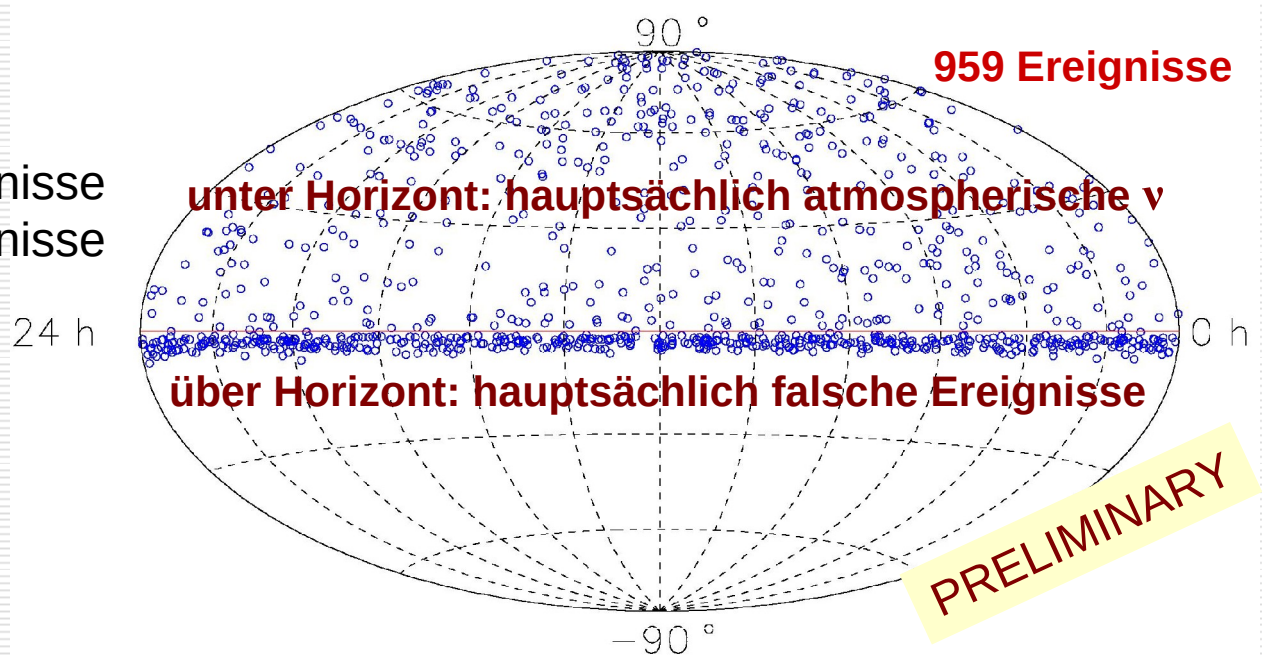


- Messung des Neutrino-Flusses;
- Übereinstimmung mit früheren Daten;
- Messwerte stimmen mit Erwartung für atmosphärische ν 's überein;

AMANDA: Suche nach ν -Punktquellen

Datennahmezeit

2000: 197 Tage
2001: 194 Tage
2000+2001: 959 Ereignisse
unter Horizont: 465 Ereignisse



Konsistent mit atmosphärischen ν :

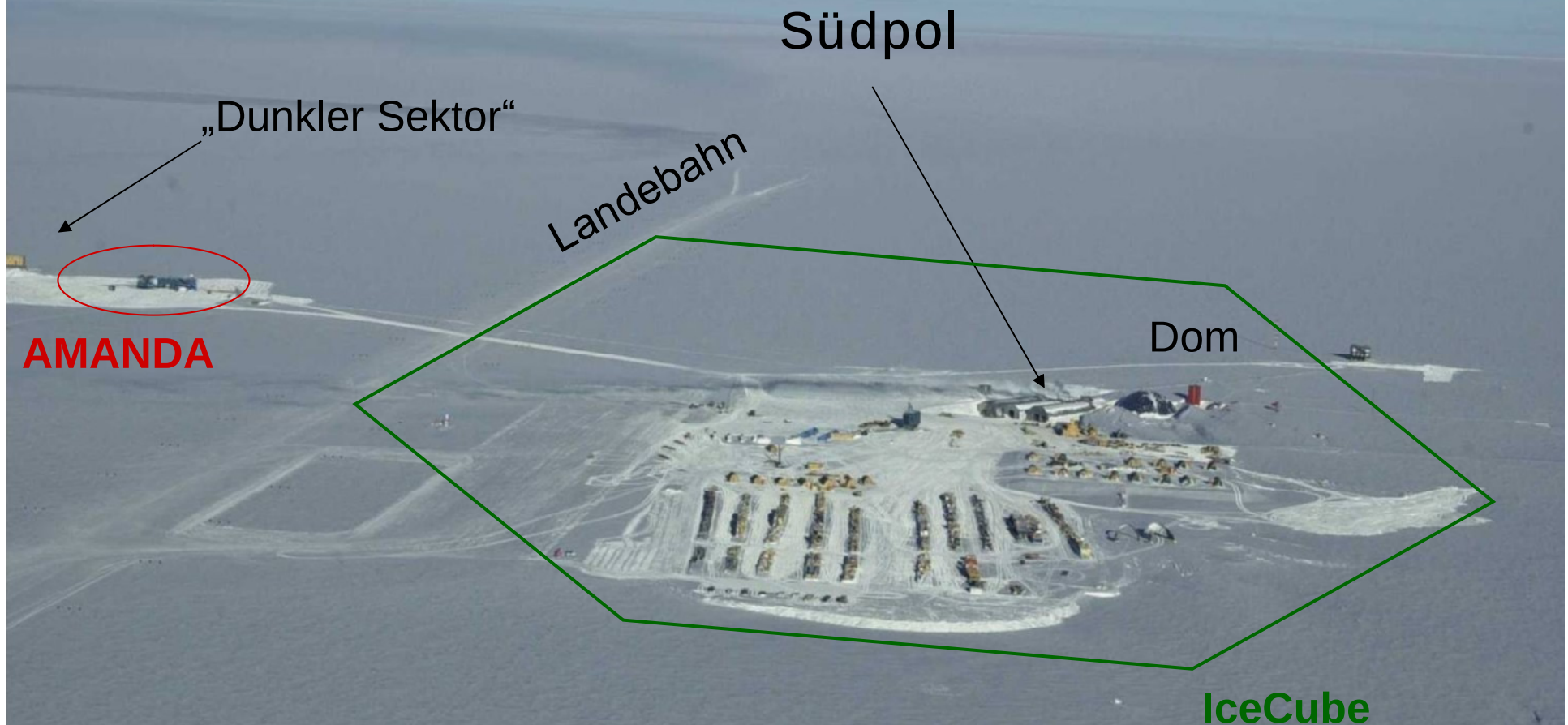
Kein Hinweis auf Punktquellen

in den ersten zwei Jahren AMANDA-Daten

... aber neue Daten mit viel höherer Statistik:

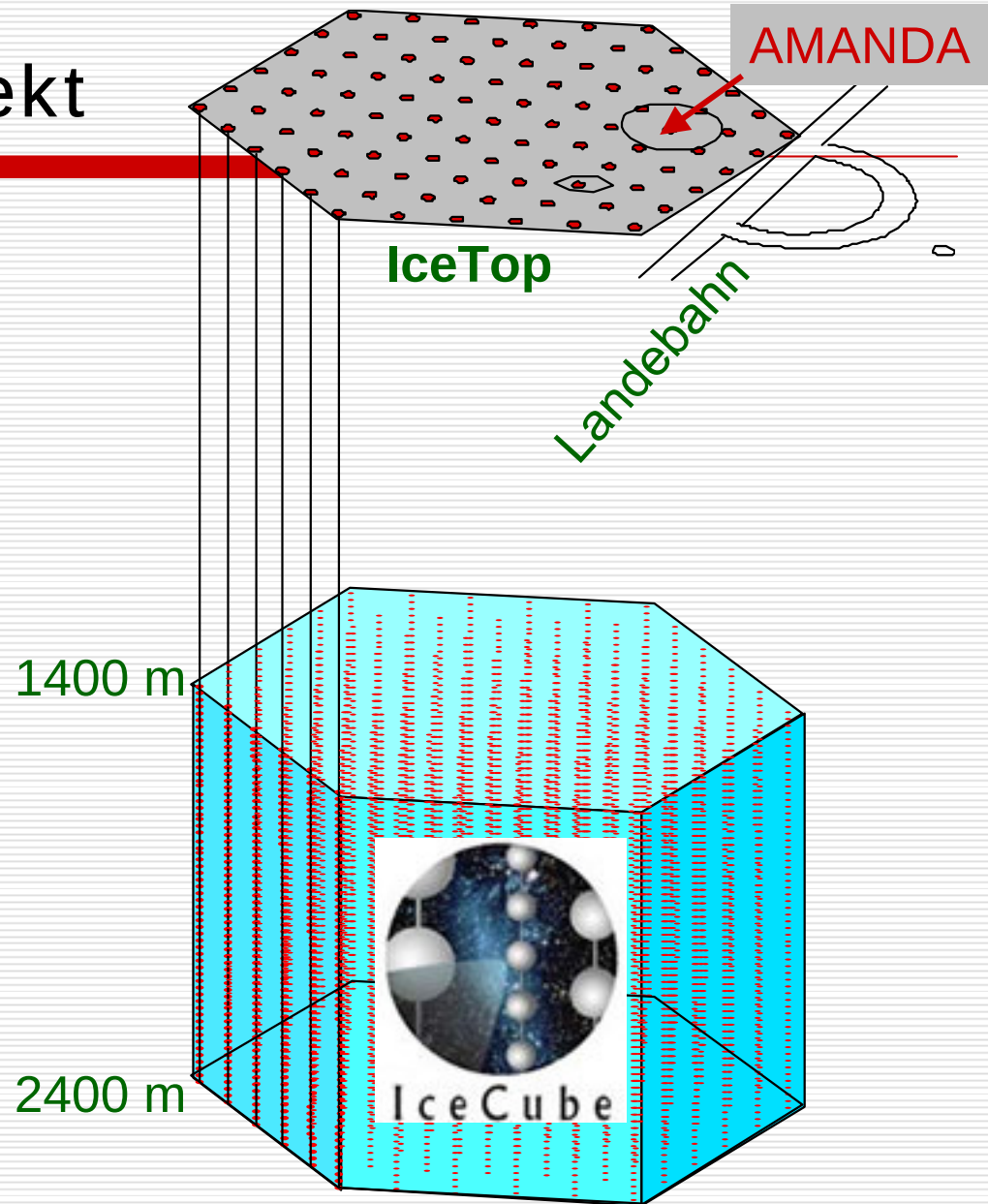
>3000 Ereignisse, Andeutung von Signal aus Richtung des Krebs-Nebels

IceCube: ein km^3 -Detektor im Antarktischen Eis



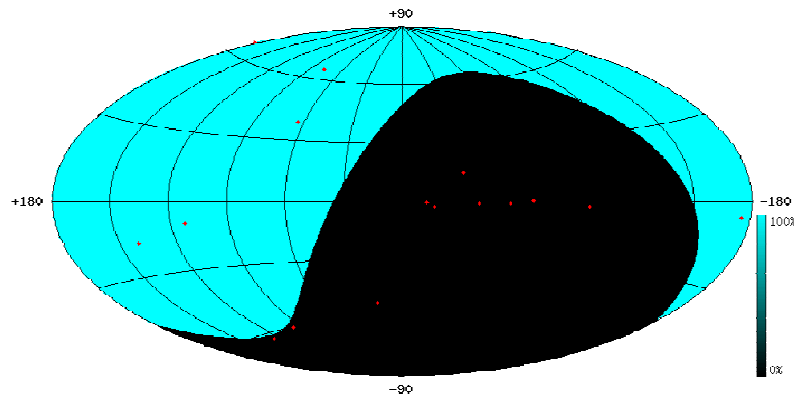
Das IceCube-Projekt

- 80 „Strings“;
- 4800 Photomultiplier;
- Instrumentiertes Volumen:
1 km³ (1 Gigatonne)
- IceCube soll Neutrinos aller Arten im Energiebereich von 10⁷ eV (SN) bis 10²⁰ eV nachweisen.

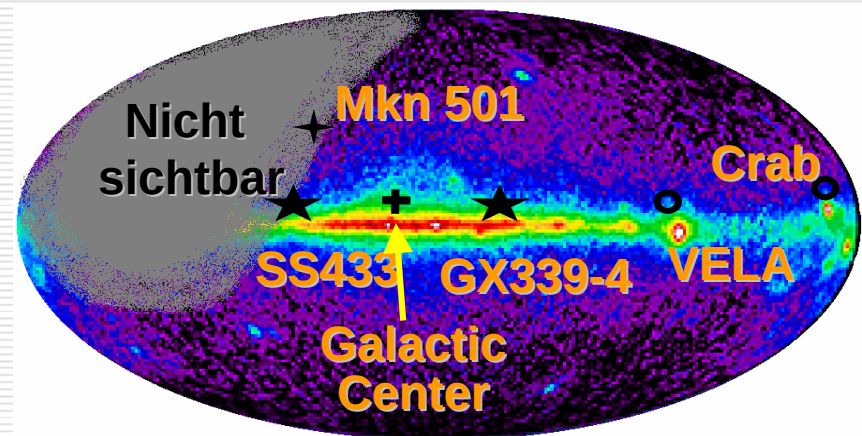
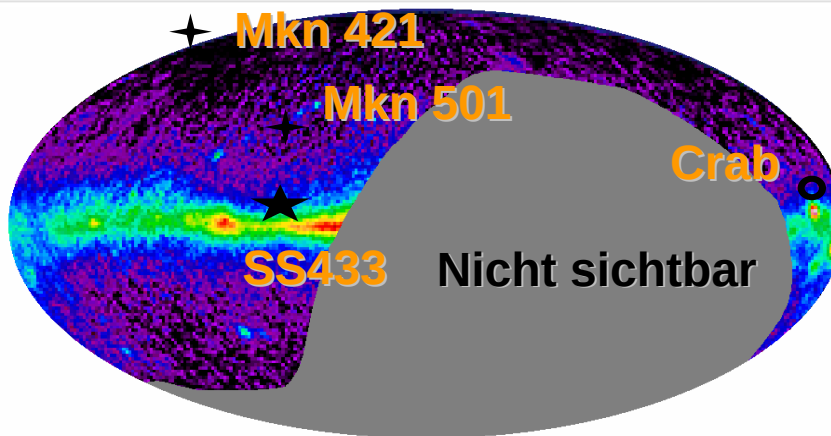
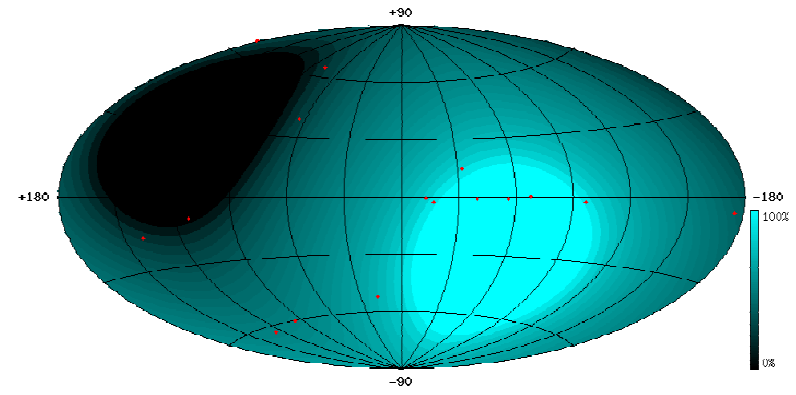


Himmelsabdeckung der Neutrino-Teleskope

Südpol



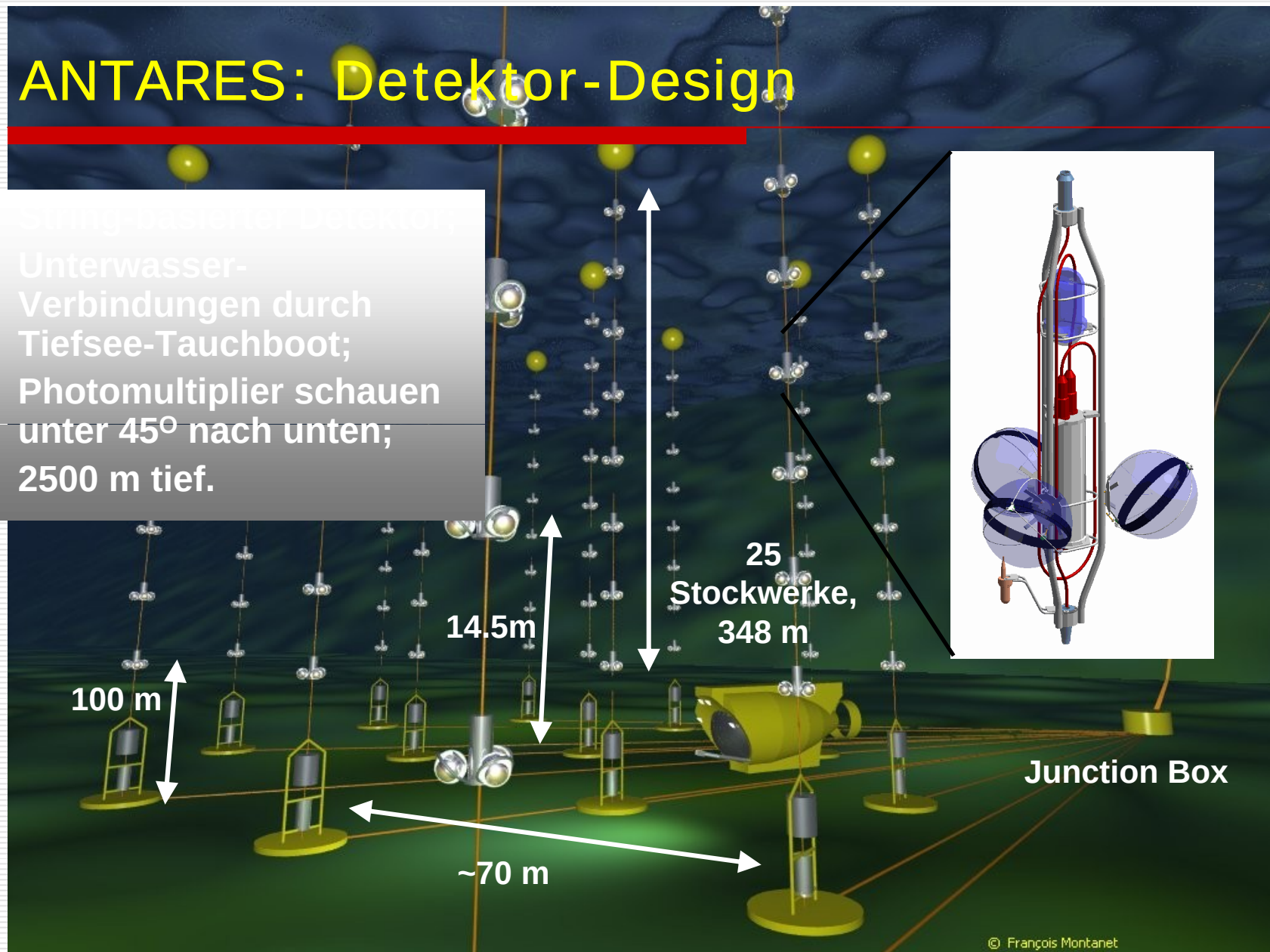
Mittelmeer



→ Wir brauchen ν -Teleskope in beiden Hemisphären

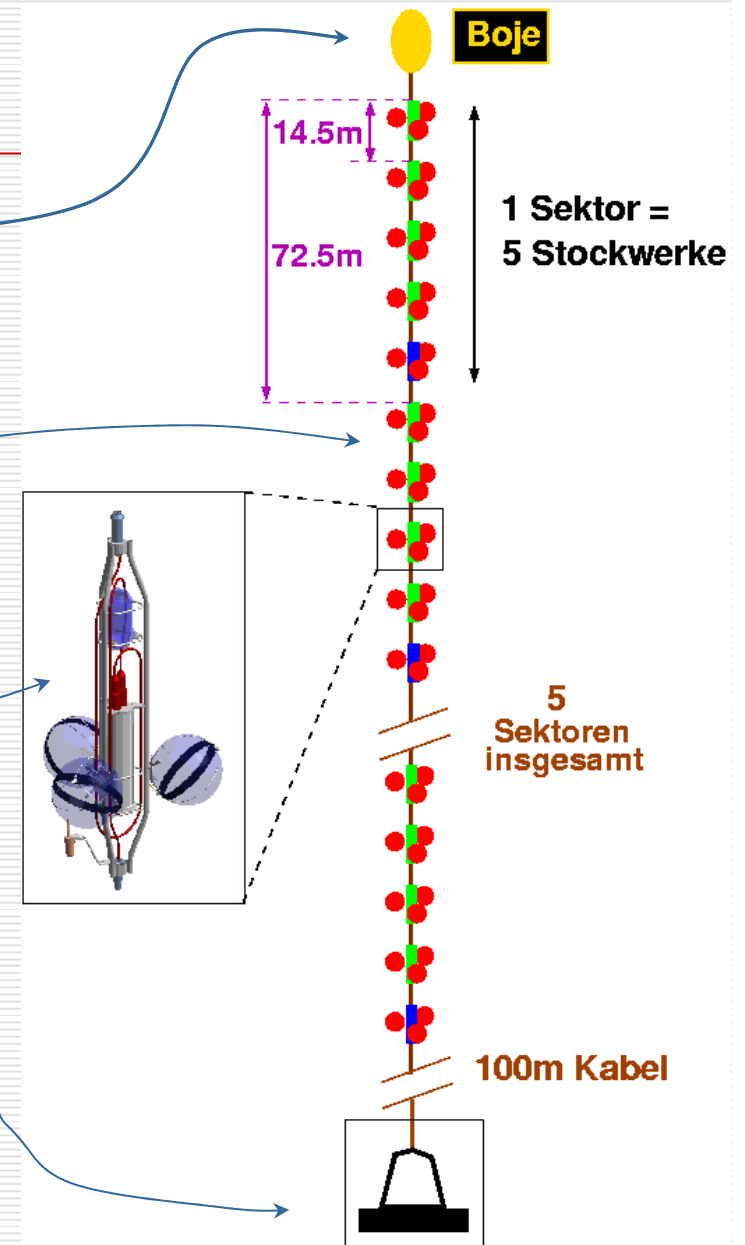
ANTARES: Detektor-Design

- String-basierter Detektor;
- Unterwasser-Verbindungen durch Tiefsee-Tauchboot;
- Photomultiplier schauen unter 45° nach unten;
- 2500 m tief.



ANTARES: Detektor-Strings

- Boje:
 - Auftrieb ~6400 N;
 - hält String vertikal (weniger als 20m Versatz am oberen Ende);
- Electro-optisch-mechanisches Kabel:
 - Metallleitungen für Stromversorgung etc.;
 - Glasfasern für Daten;
 - Mechanisches “Rückgrat”;
- Stockwerke:
 - 3 optische Module pro Stockwerk;
 - Titan-Zylinder für Elektronik;
 - Kalibrationsgeräte (Licht, akustisch);
- Anker:
 - Gewicht, um String an Boden zu halten;
 - Auslöse-Mechanismus, akustisch von Oberfläche aktivierbar;



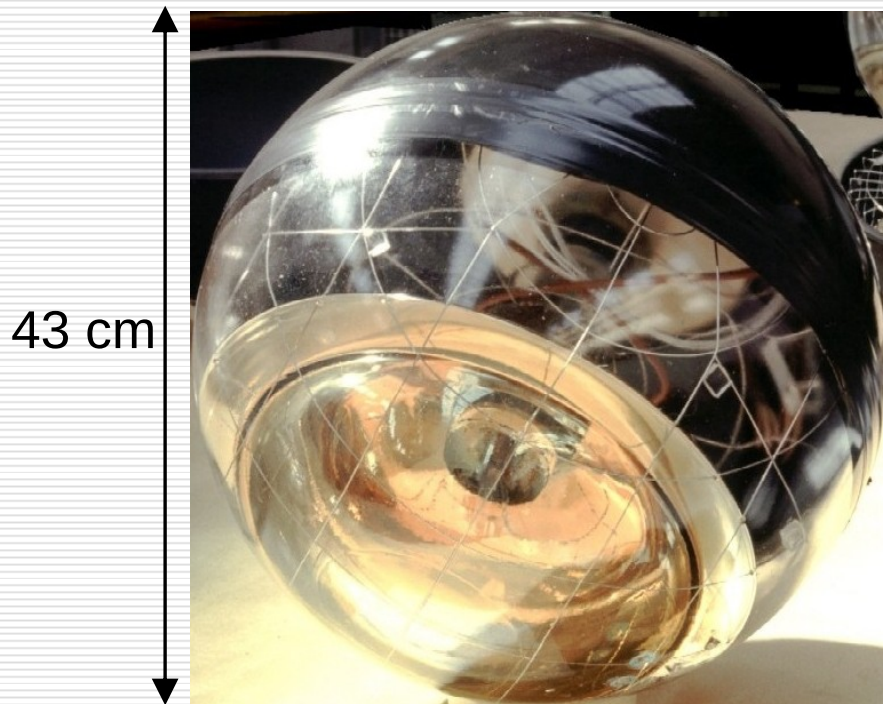
ANTARES: Optische Module

■ Photomultiplier:

- Zeitauflösung ~ 1 ns;
- Quanteneffizienz $> 20\%$ für $330 \text{ nm} < \lambda < 460 \text{ nm}$;

■ Glas-Kugeln:

- getestet bis 600 bar;



Hamamatsu 10'' PM



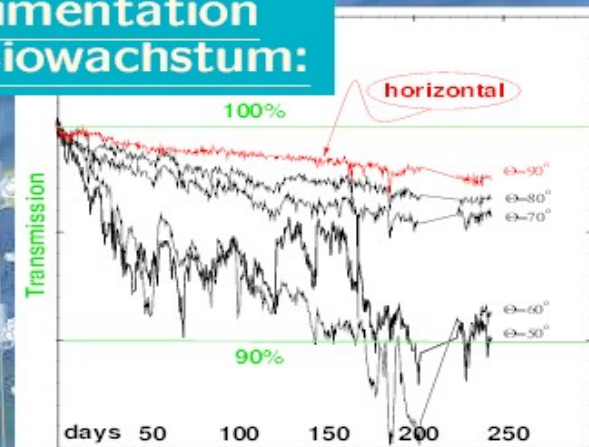
Kontrolle der Umweltbedingungen

Kontrollmessungen

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

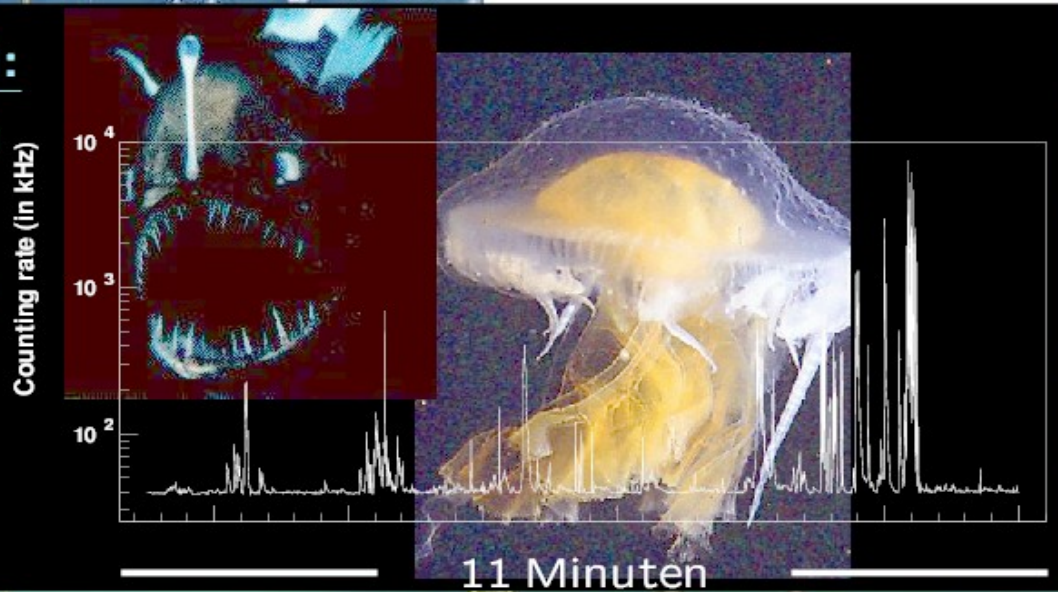
- Lichtabsorption;
- Strömungsgeschwindigkeit;
- Schallgeschwindigkeit;
- Salinität;
- Temperatur, Druck.

Sedimentation und Biowachstum:



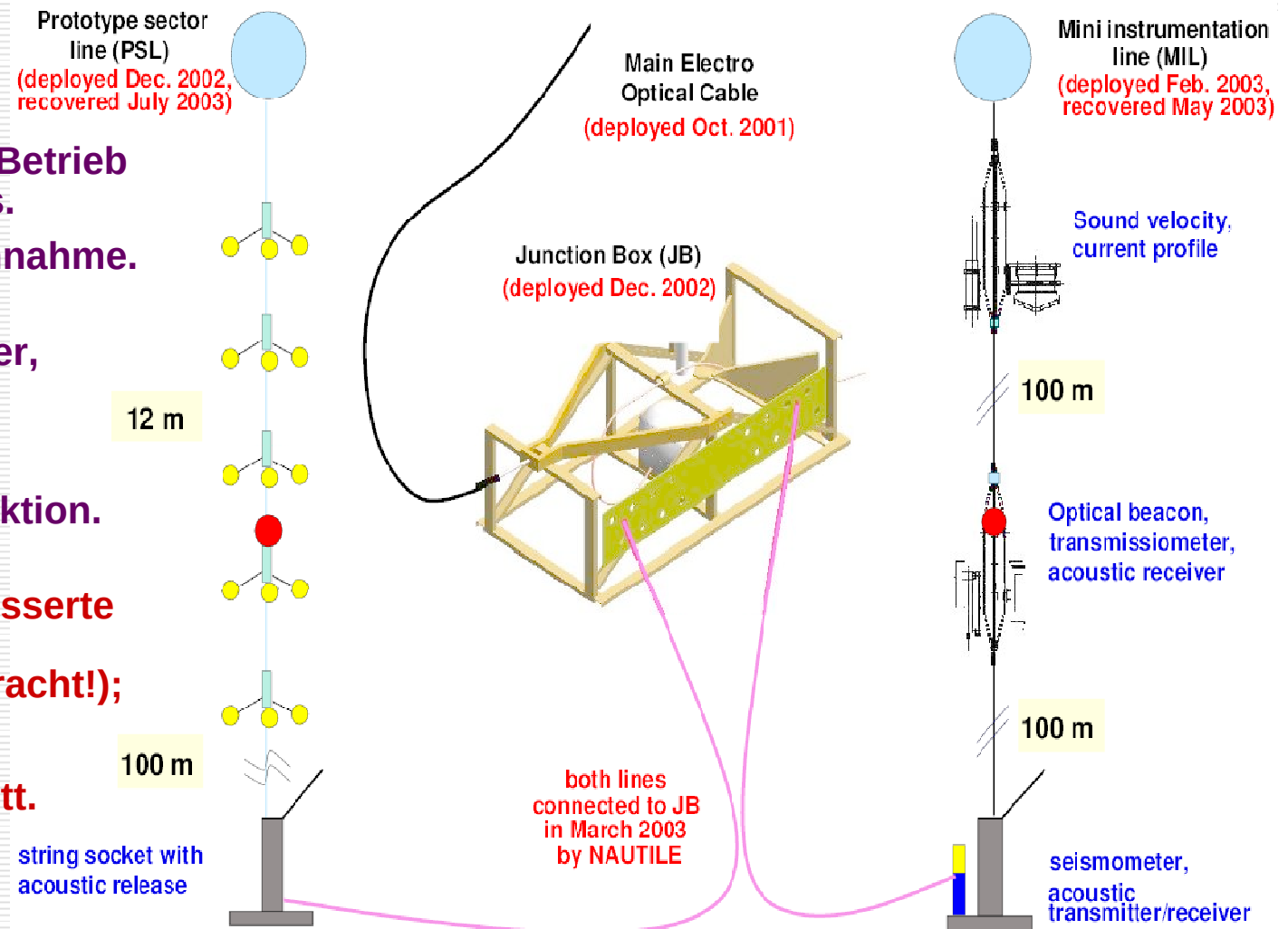
Optischer Untergrund:

- 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 $\sim 5\%$.



ANTARES: Status und Pläne

- **2003: Installation und Betrieb von 2 Prototyp-Strings.**
- **Mehrere Monate Datennahme.**
- **Technische Probleme (gebrochene Glasfasser, Wasserleck)**
 - keine genaue Zeitmessung, keine μ -Rekonstruktion.
- **Frühjahr 2005: 2 verbesserte Prototyp-Strings (gestern/heute eingebracht!);**
- **Mitte 2005: String 1;**
- **2007: Detektor komplett.**



ANTARES: Meeresoperationen

März 2003:

Verbindung zwischen Junction Box und Prototyp-Strings;

Tiefseeinsatz eines bemannten Tauchbootes (Nautilo);

Jeder Stecker stellt elektrische und optische Verbindungen her.

Unterwasser

überwachen

Triangulation

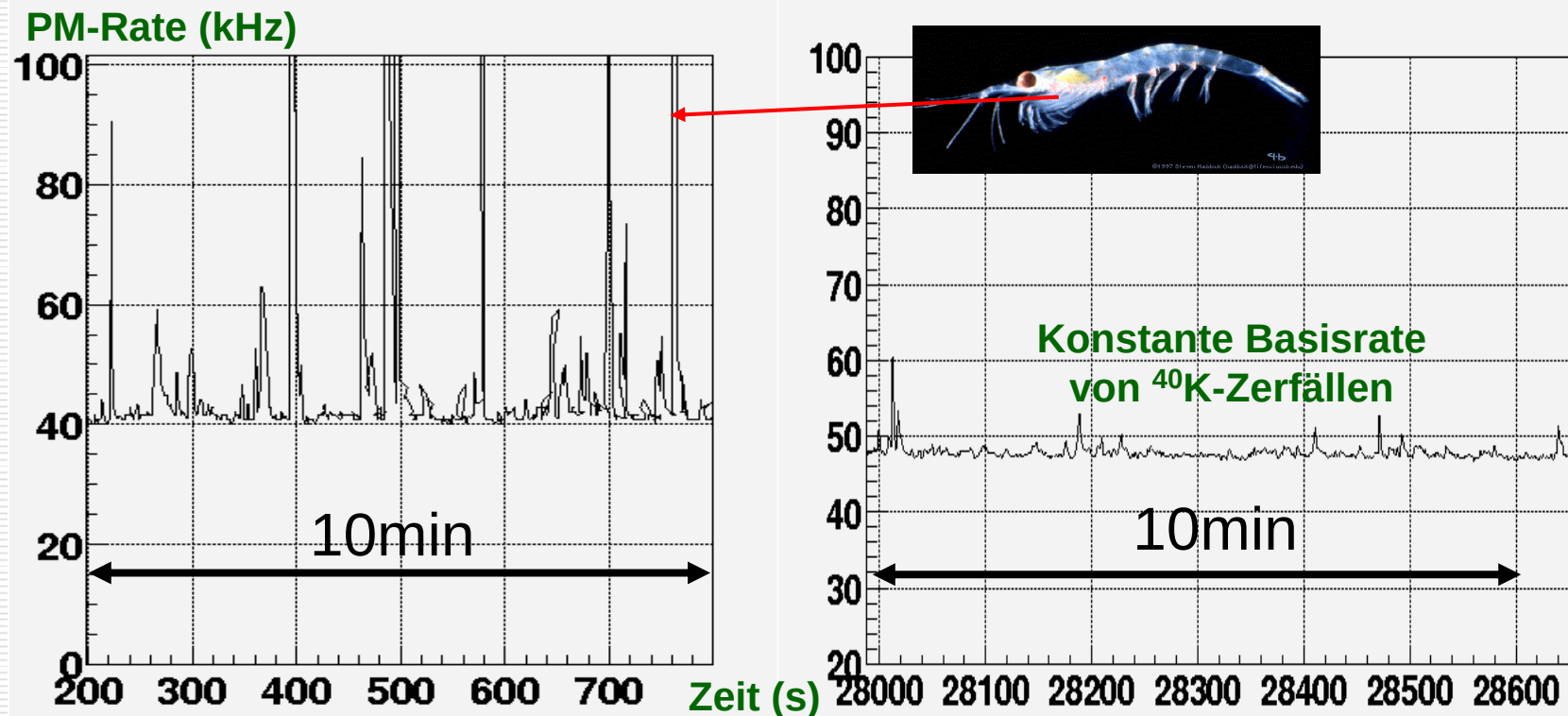
Genauigkeit

einige Meter



ANTARES: Erste Tiefsee-Daten

- Raten-Messungen: Starke Fluktuationen des Biolumineszenz-Untergrundes beobachtet



NESTOR: „Türme“ aus steifen Ebenen

- Trockene Verbindungen (bergen-verbinden-abseken).
- Photomultiplier schauen nach oben und unten.
- 3800 m tief.
- Erste Ebene (reduzierte Größe) 2003 installiert und betrieben.

Plan: Türm(e) mit 12 Stockwerken

- 32 m Durchmesser
- 30 m Abstand der Ebenen
- 144 Photomultiplier pro Turm

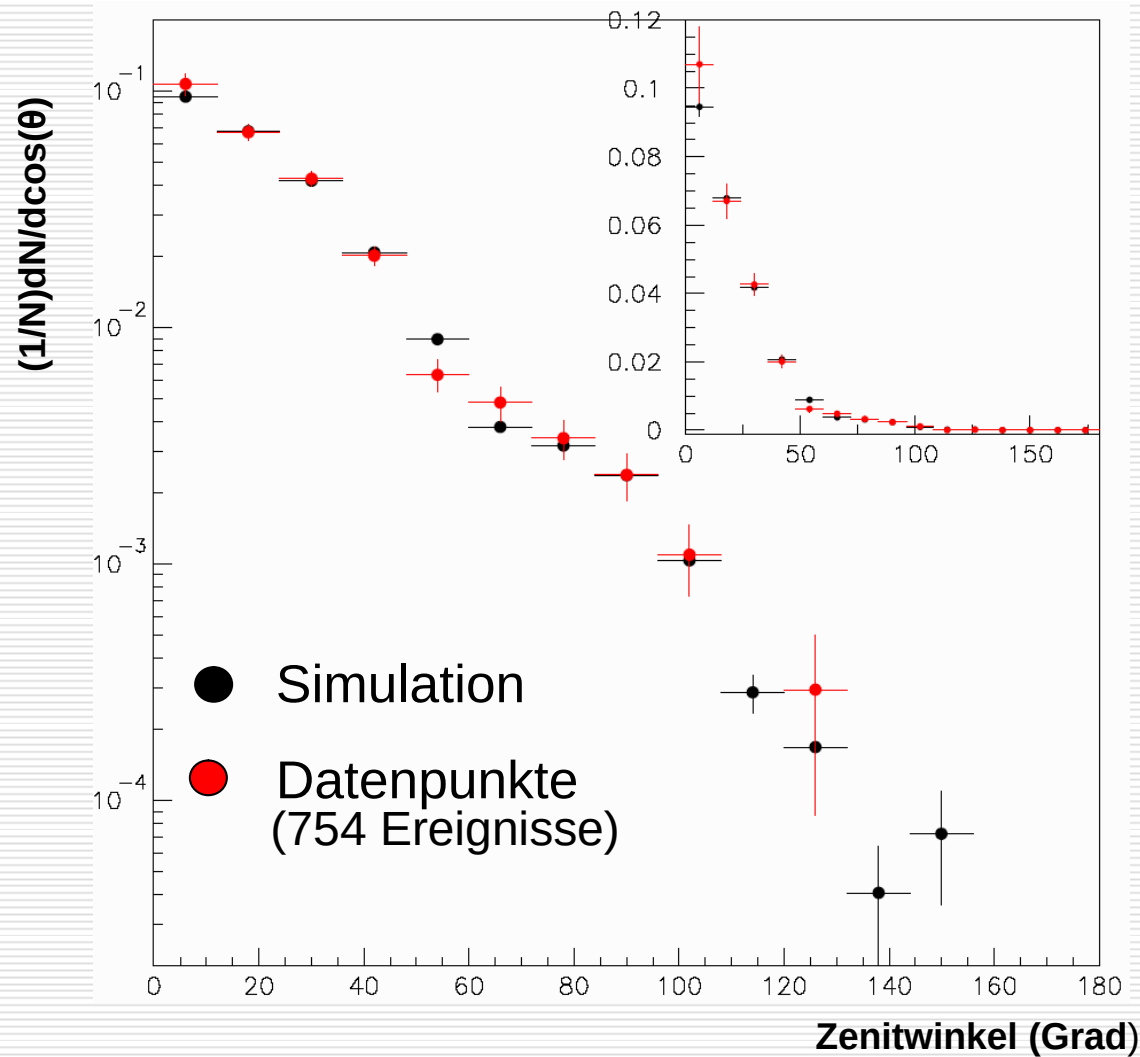


18.03.2005

U. Katz: Astroteilchenphysik &
Neutrino-Teleskope

35

NESTOR: Messung des Myon-Flusses



Bestimmung des atmosphärischen Myon-Flusses durch Anpassung folgenden Ansatzes:

$$\frac{dN}{d\Omega \cdot dt \cdot ds} = I_0 \cdot \cos^\alpha \theta$$

Ergebnisse in guter Übereinstimmung mit früheren Messungen.

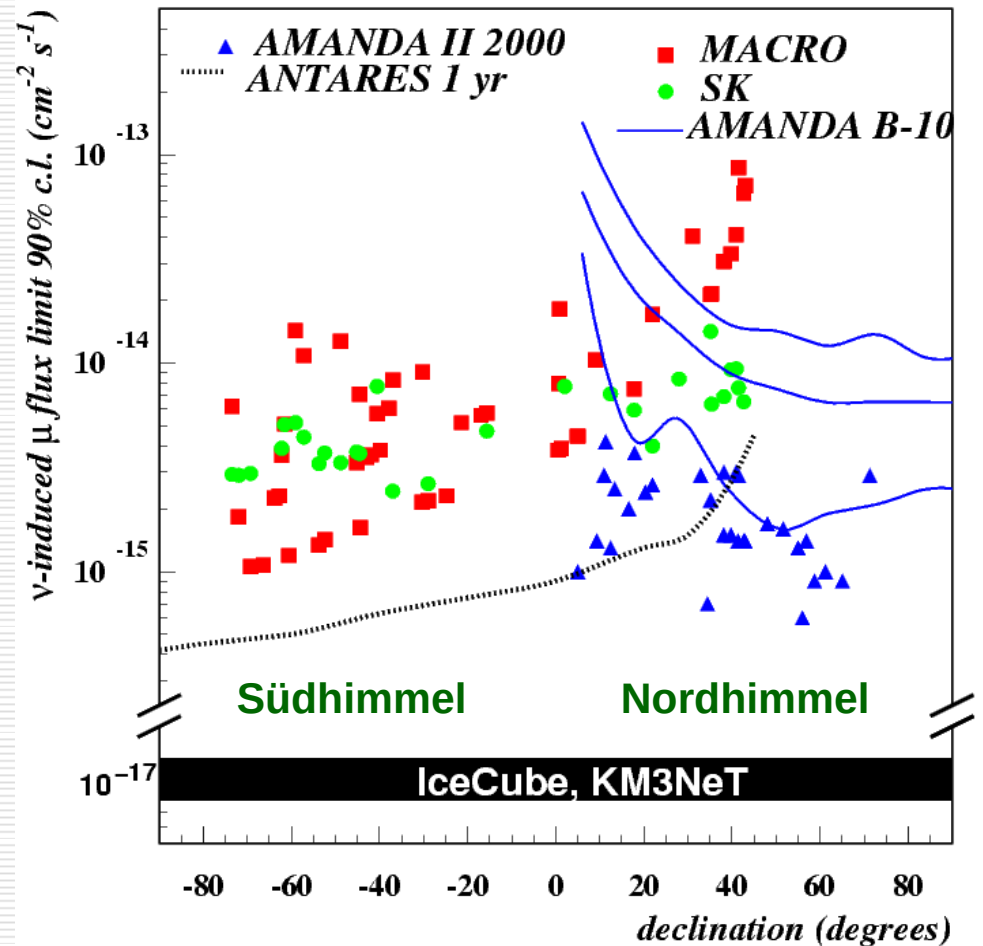
Neutrinoteleskope heute: Zusammenfassung

- AMANDA, Baikal: Datennahme läuft, Machbarkeitsbeweis für Neutrino-Teleskopie;
- ANTARES + NESTOR: erste Installationsschritte erfolgreich abgeschlossen, Prototyp-Module installiert und betrieben;
- ANTARES-Aufbau in Vorbereitung, Detektor soll 2007 fertig sein.
- Entdeckungspotential für kosmische Neutrinos und WIMPs ... Überraschungen erwünscht!

KM3NeT: ein km³-Detektor im Mittelmeer

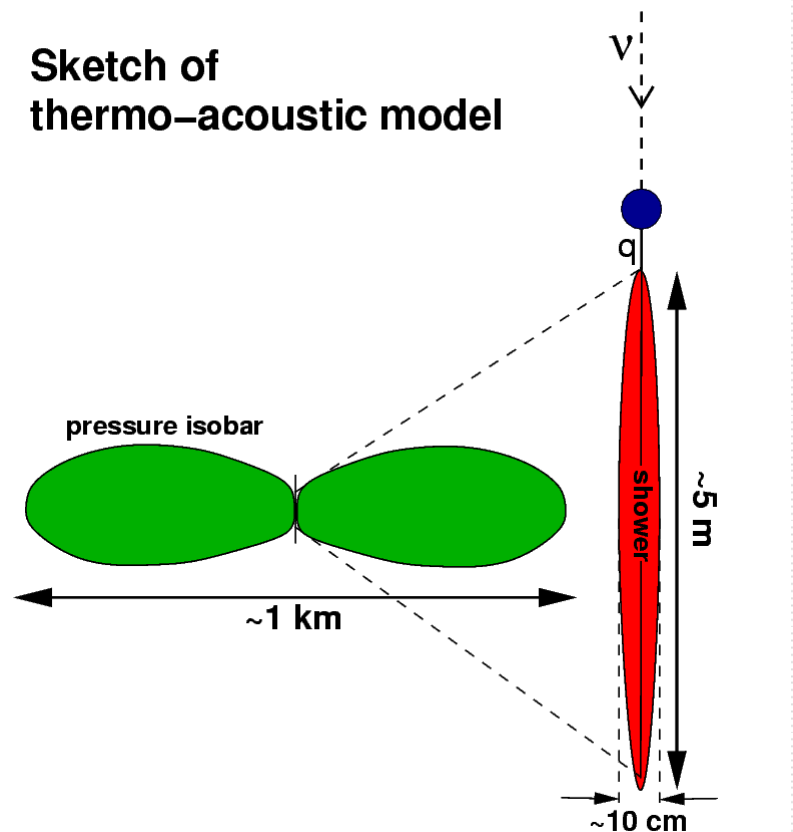
- Ausschöpfen des Potentials der Neutrino-Astronomie erfordert km³-Detektoren.
- Mittelmeer-Detektor soll IceCube ergänzen.
- EU-finanzierte Designstudie (KM3NeT) in Vorbereitung.
- Optimistische Erwartung: Detektordesign & Finanzierung erlauben Baubeginn 2009.
- Koordination der Designstudie in Erlangen.

ν -Punktquellensuche:

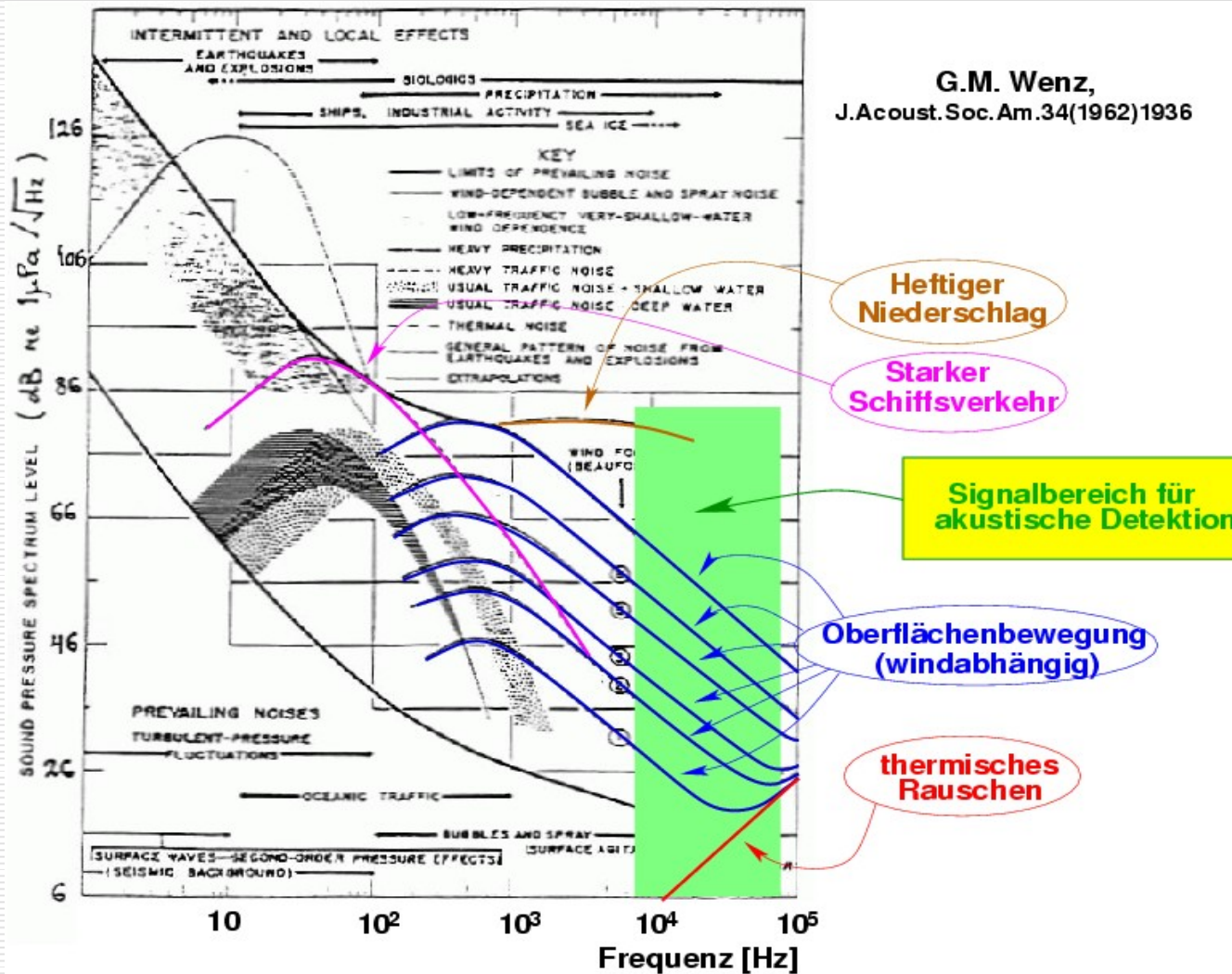


Weite Zukunft: Akustischer Neutrino-Nachweis

- Prinzip: Lokale Erwärmung des Mediums im Bereich eines Teilchenschauers erzeugt Ausdehnung → Druckwelle (**Thermoakustisches Modell**);
- Bipolares Signal, etwa **$10\mu\text{s}$** lang; Amplitude **$\sim 10\mu\text{Pa} \cdot E/(10^6\text{GeV})$** in 400m Abstand (in Wasser);
- Könnte sehr große instrumentierte Volumen ermöglichen (Abschwächlänge $\sim 1\text{ km}$);
- Wachsendes Interesse in Europa, USA; mehrere Gruppen aktiv (Eis, Wasser, Salz);
- Option für ν -Nachweis bei Energien über **$10^7 \dots 10^8\text{ GeV}$** ?



Untergrundbedingungen in der Tiefsee



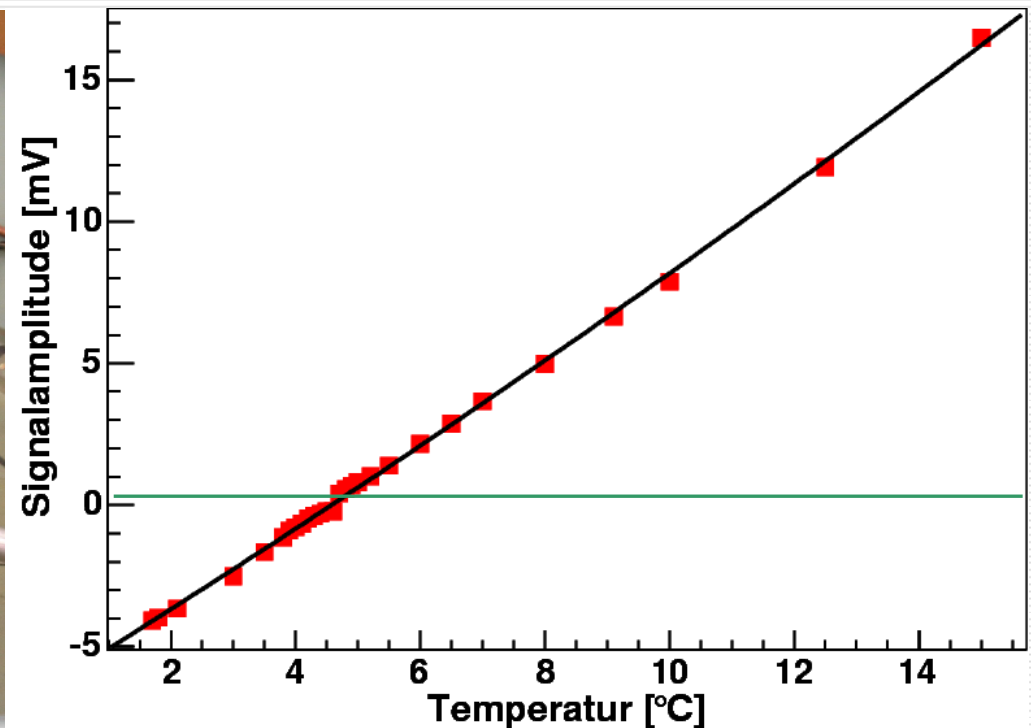
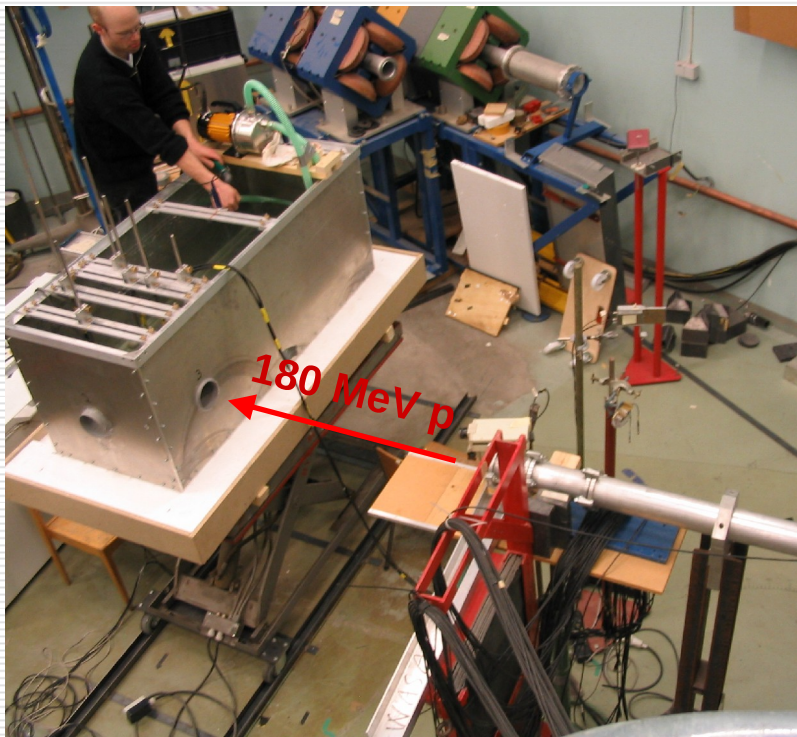
Grobe und optimistische Abschätzung:

**Signal $\approx$
Untergrund
bei 0.1-1 mPa**

**(Schauer mit
10⁷-10⁸ GeV
@ 400m)**

Arbeiten zur akustischen Detektion in Erlangen

- Sensor-Entwicklung, Untersuchung und Simulation der Signalerzeugung, Testmessungen (auch *in situ*), ...
- Beispiel: Teststrahlmessungen in Uppsala (Kooperation Zeuthen/Erlangen): Bestätigung der erwarteten T-Abhängigkeit.



Informationen und Kontakte:

- www.astroteilchenphysik.de
(deutsches Astroteilchenphysik-Portal)
- antares.in2p3.fr
(ANTARES-Homepage)
- www.km3net.org
(KM3NeT-Homepage)
- www.antares.physik.uni-erlangen.de
(Erlanger ANTARES-Gruppe)
- uli.katz@physik.uni-erlangen.de
(Email Uli Katz)

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.