Von IceCube zu IceCube-Gen2.

R&D Aktivitäten in der IceCube Gruppe

Timo Karg

Technisches Seminar
24. März 2015

Programm

> Der IceCube Detektor

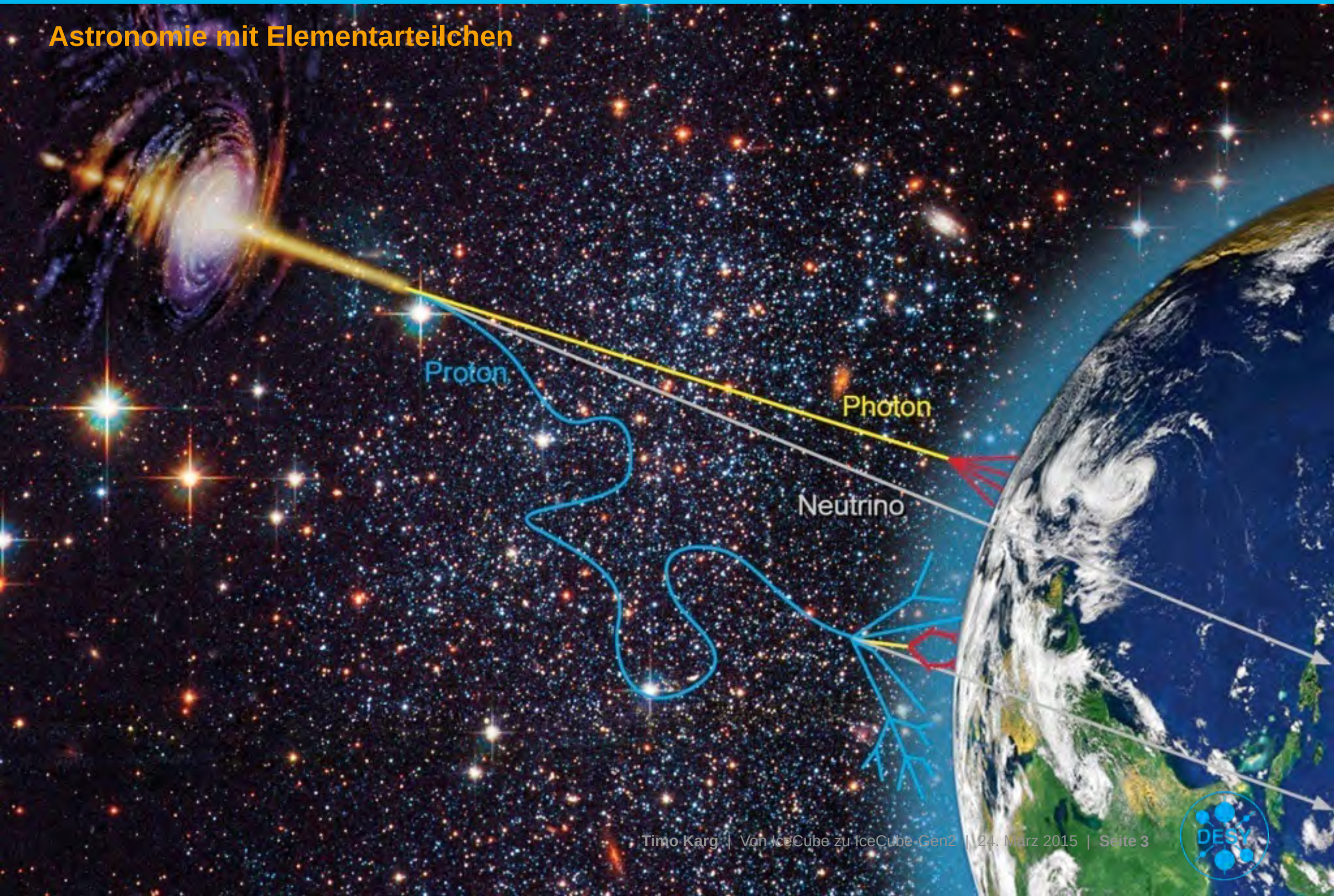
> Ergebnisse — Warum IceCube-Gen2?

> Das IceCube-Gen2 Konzept

> R&D Aktivitäten bei DESY

Astroteilchenphysik

Astronomie mit Elementarteilchen



Astroteilchenphysik

Astronomie mit Elementarteilchen

Astroteilchenphysik

Astronomie mit Elementarteilchen

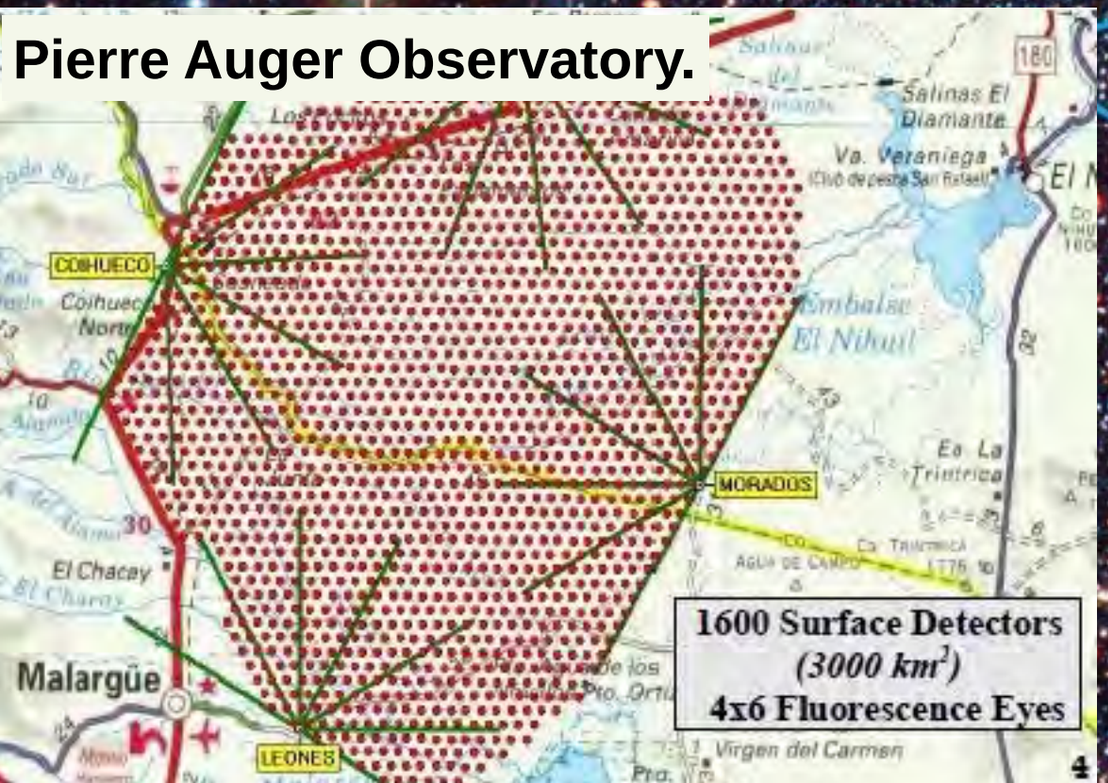
Proton

Photon

Neutrino

Timo

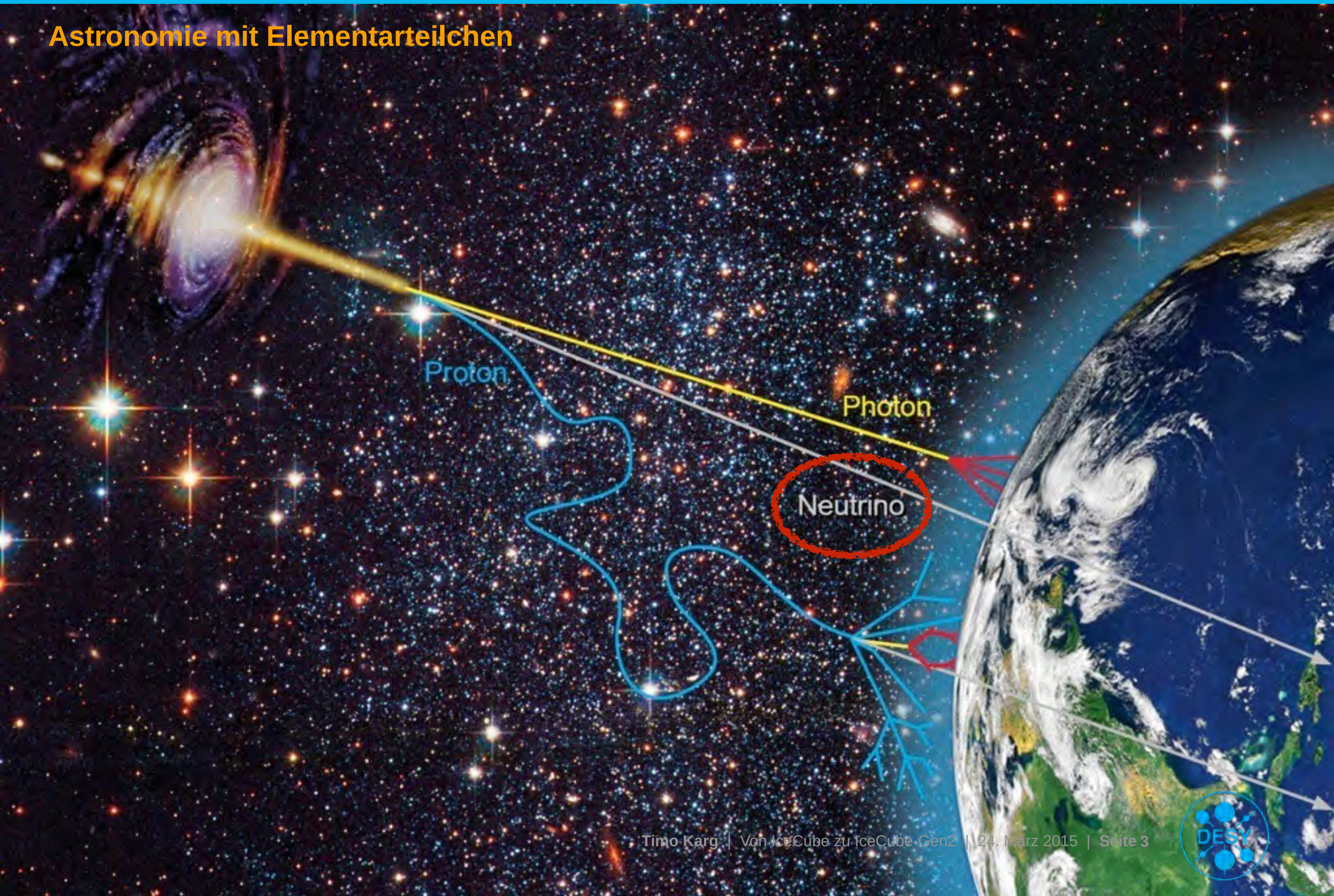
Pierre Auger Observatory.



KASCADE

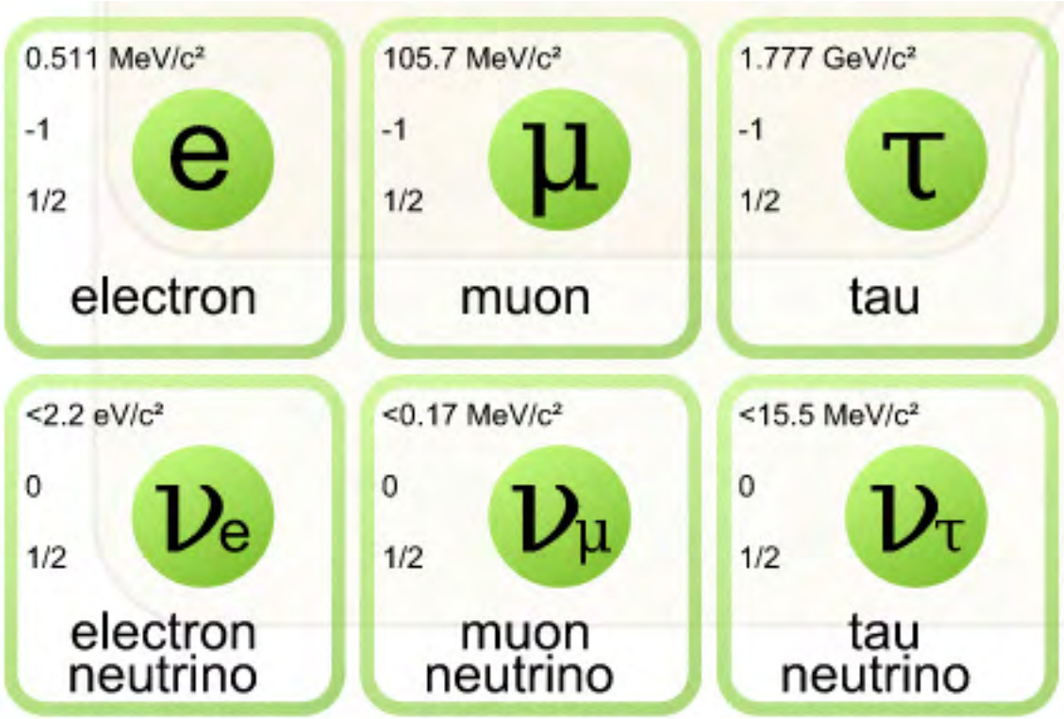
Astroteilchenphysik

Astronomie mit Elementarteilchen



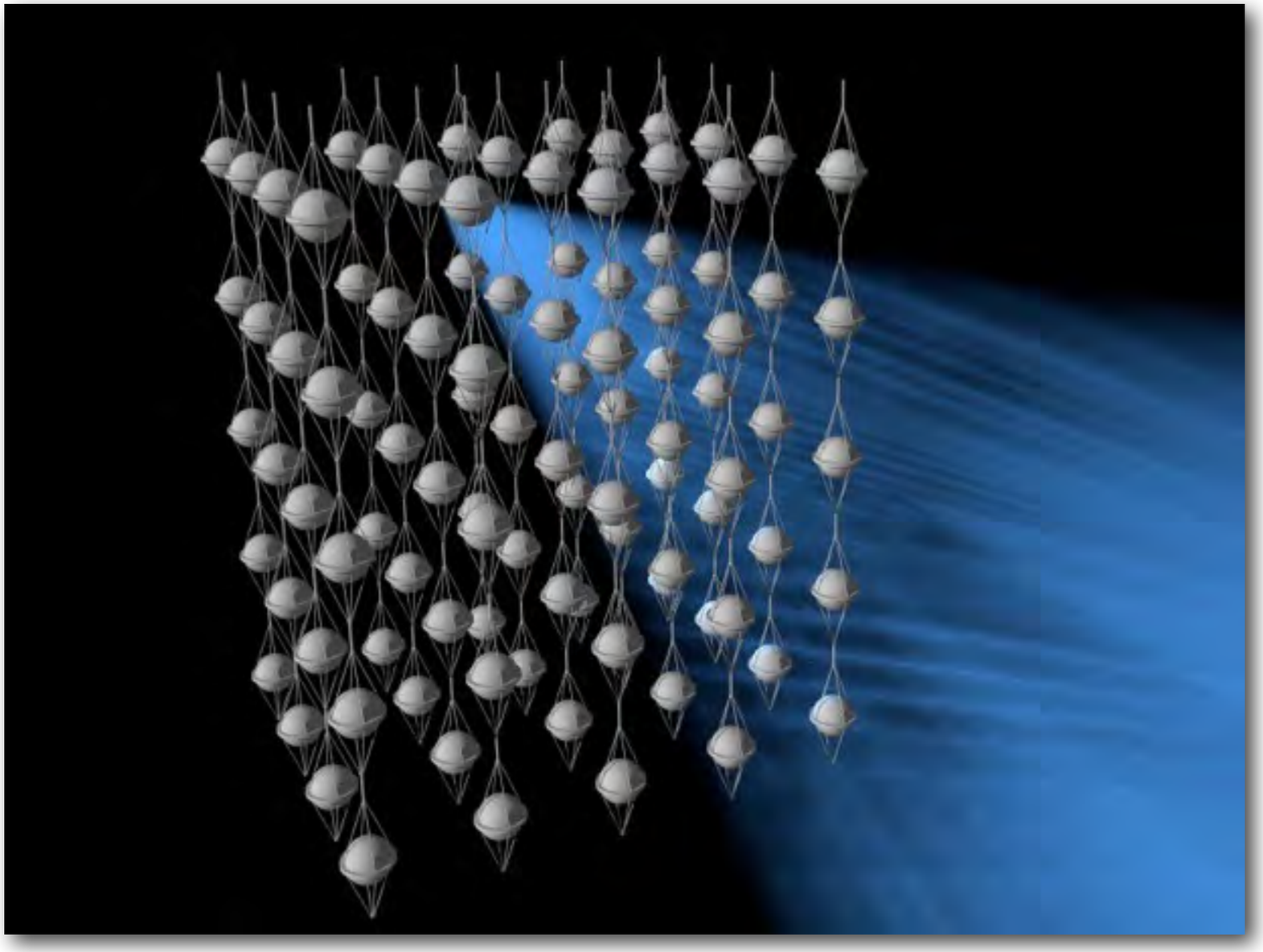
Neutrinos

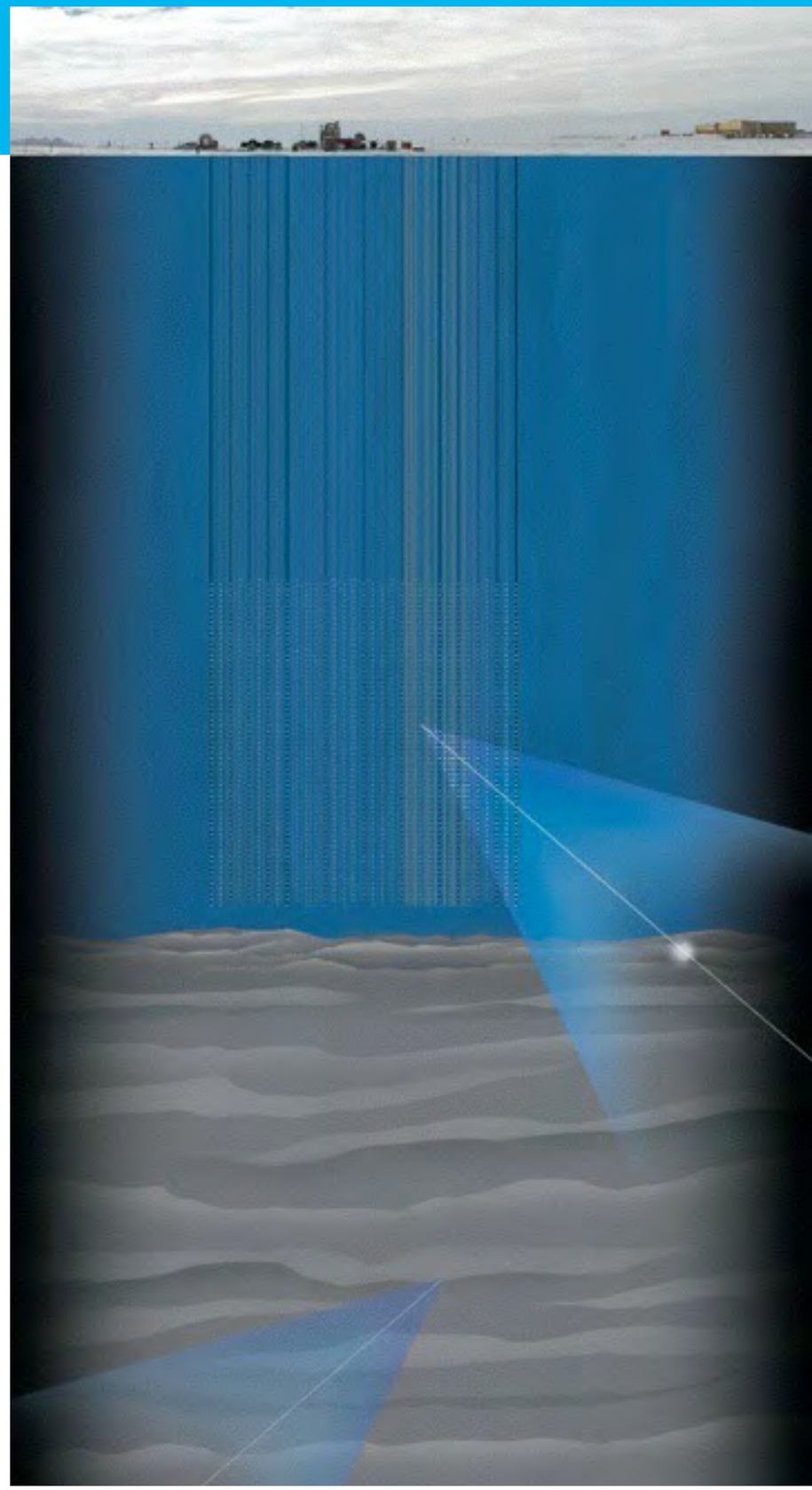
- Keine elektrische Ladung
  - Keine Ablenkung in elektromagnetischen Feldern!
- Sehr kleine Masse
- Nur schwache Wechselwirkung
  - sowohl im Sinne “unterliegt nur der schwachen Wechselwirkung”
    als auch im Sinne “wechselwirkt fast nicht”
- Erzeugt bei Wechselwirkung ein Elektron, Myon oder Tau



Neutrinonachweis

- Suche nach Cherenkov-Licht von Elektronen oder Myonen, die in Neutrinowechselwirkungen erzeugt werden
- Benutze großes, transparentes Medium
- Benutze Erde als Filter gegen geladene kosmische Strahlung

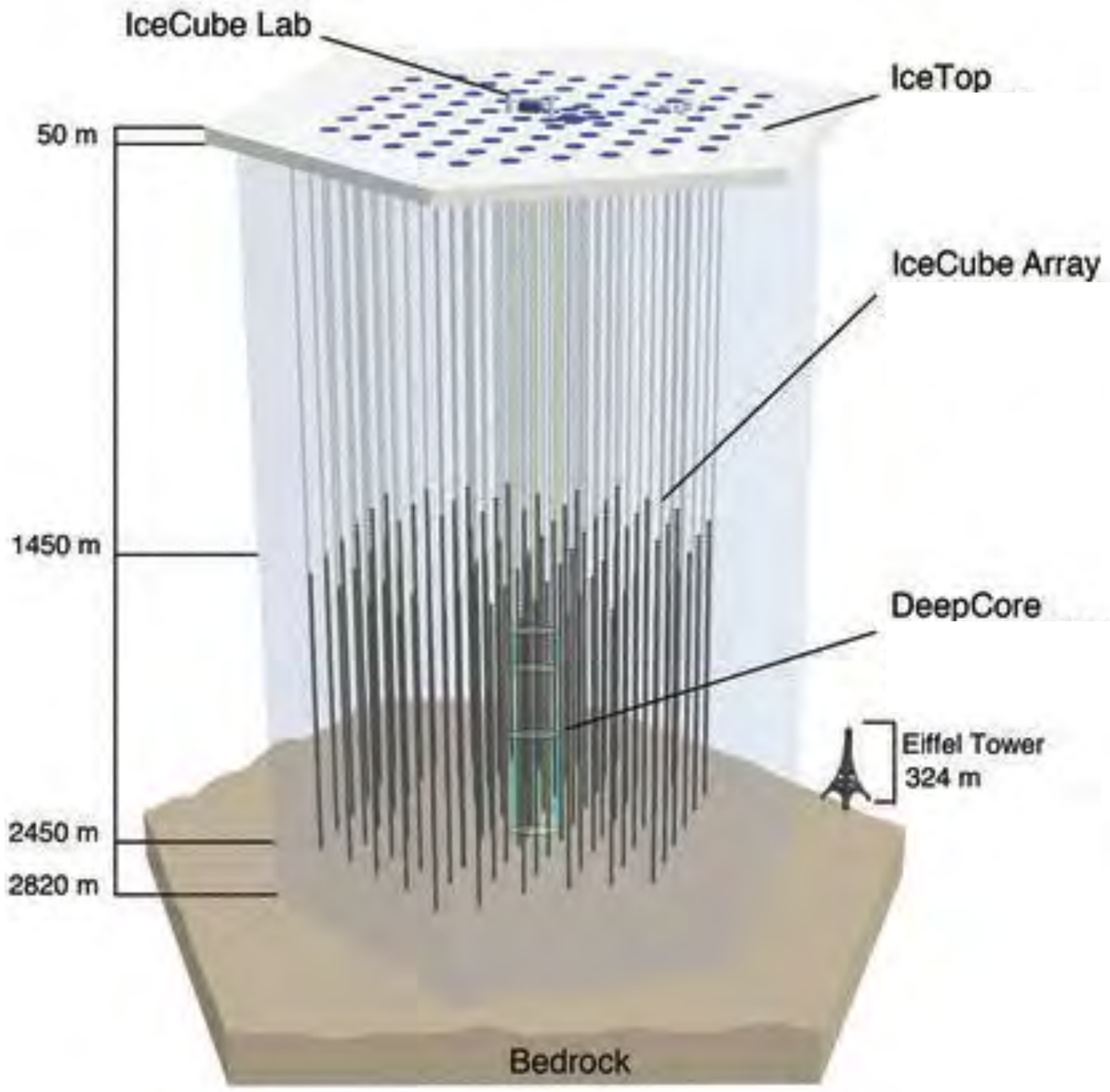




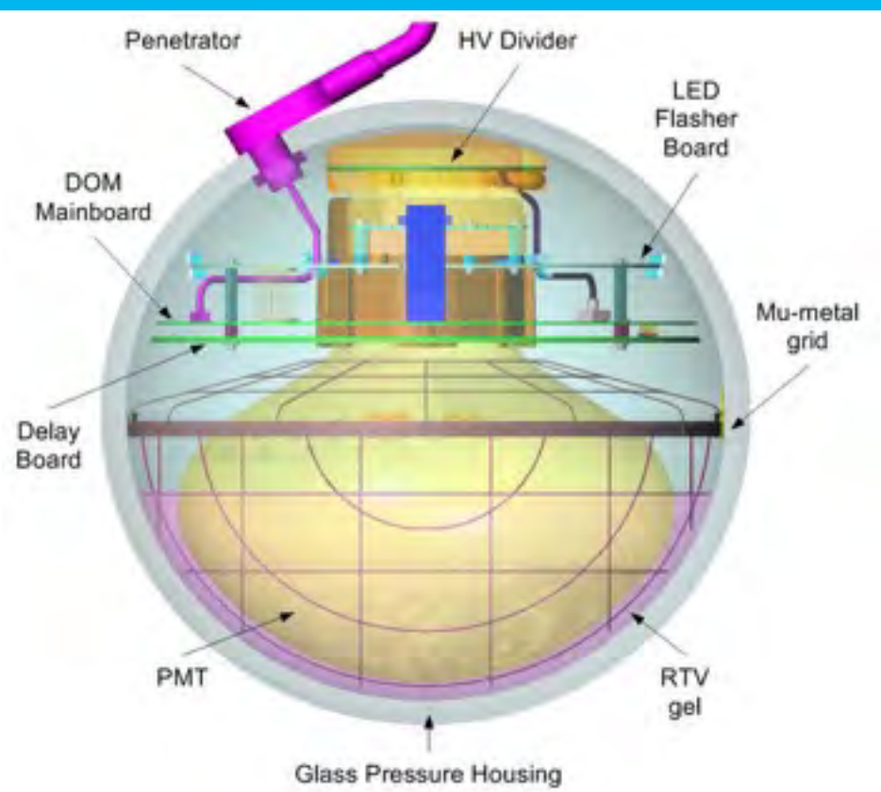
Der IceCube Detektor

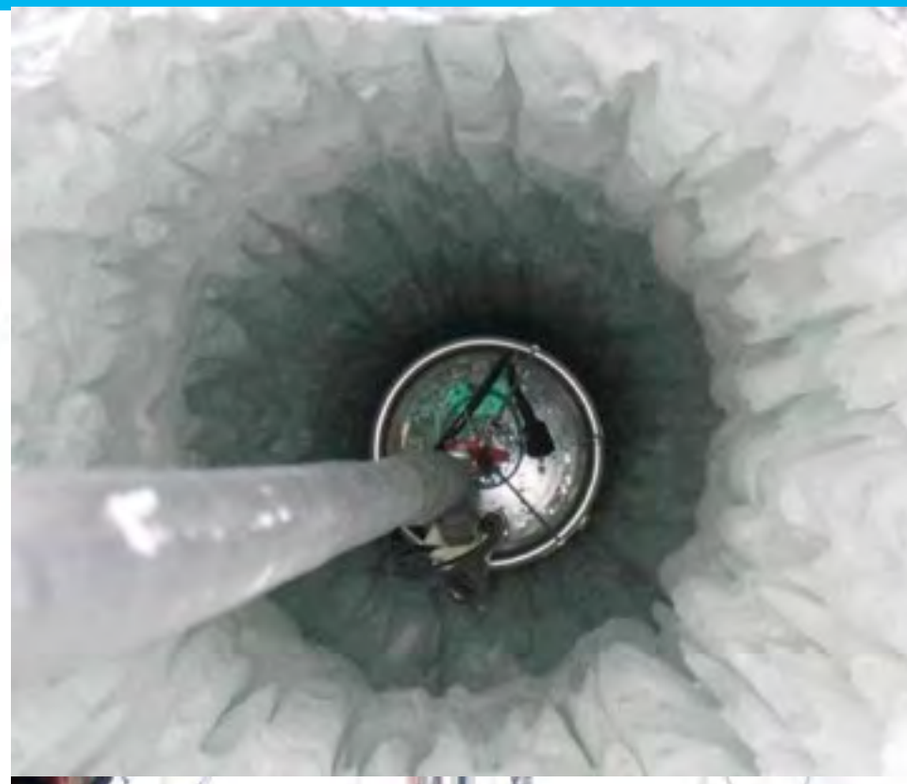
Das IceCube Observatorium

- 86 Strings
  à 60 optische Module
- 5160 optische Module
- 125 m Abstand zw. Trossen
- 17 m vert. Abstand
  zw. optischen Modulen
- Tiefe: 1450 to 2450 m
- Volumen: 1 km³
- 81 IceTop Detektorstationen
- Fertigstellung: 18. Dez. 2010



DOMs: Die Augen des IceCube Teleskops





- DOM – **D**igitales **O**ptisches **M**odul
  - Photomultiplier
  - Digitalisierungselektronik
  - Messung von Lichtankunftszeit und Intensität

The IceCube Collaboration

Funding Agencies

Fonds de la Recherche Scientifique (FRS-FNRS)
Fonds Wetenschappelijk Onderzoek-Vlaanderen (FWO-Vlaanderen)
Federal Ministry of Education & Research (BMBF)
German Research Foundation (DFG)
Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)
Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)
Knut and Alice Wallenberg Foundation
Swedish Polar Research Secretariat
The Swedish Research Council (VR)
University of Wisconsin Alumni Research Foundation (WARF)
US National Science Foundation (NSF)

Installation: Heisswasserbohren

Bohrgeschwindigkeit ~2 m/minute
~40 Stunden für ein Loch
~12 Stunden zum Einbringen der Trossen

Der Blick in die Tiefe

courtesy E. Jacobi

Verkabelung

courtesy E. Jacobi

IceCube Lab (ICL)

courtesy E. Jacobi

Verkabelung

courtesy E. Jacobi

Südlichstes Rechenzentrum der Welt

courtesy E. Jacobi

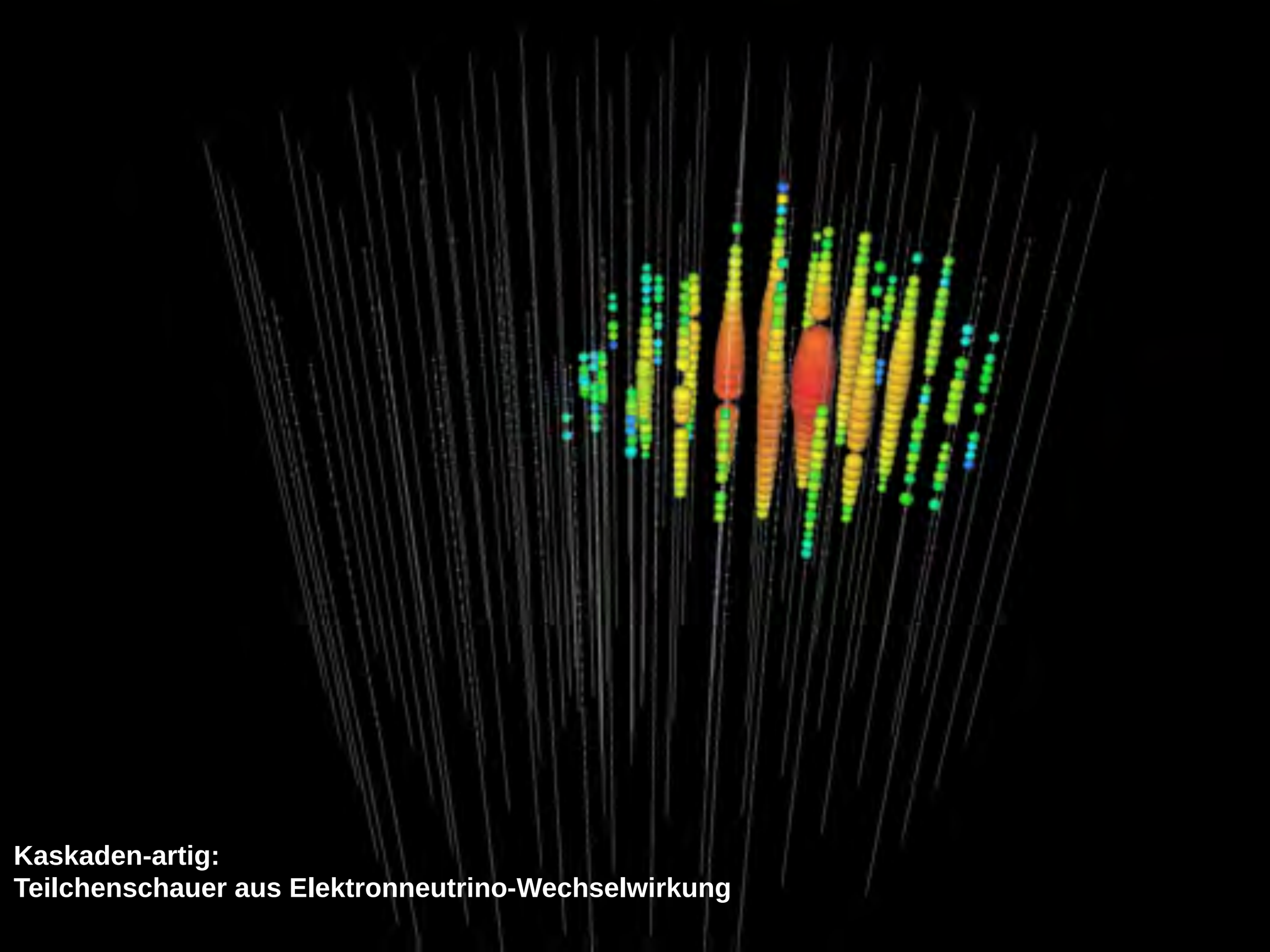
IceCube Ergebnisse

Warum IceCube-Gen2 ?

Abwärtslaufend:
Luftschauer

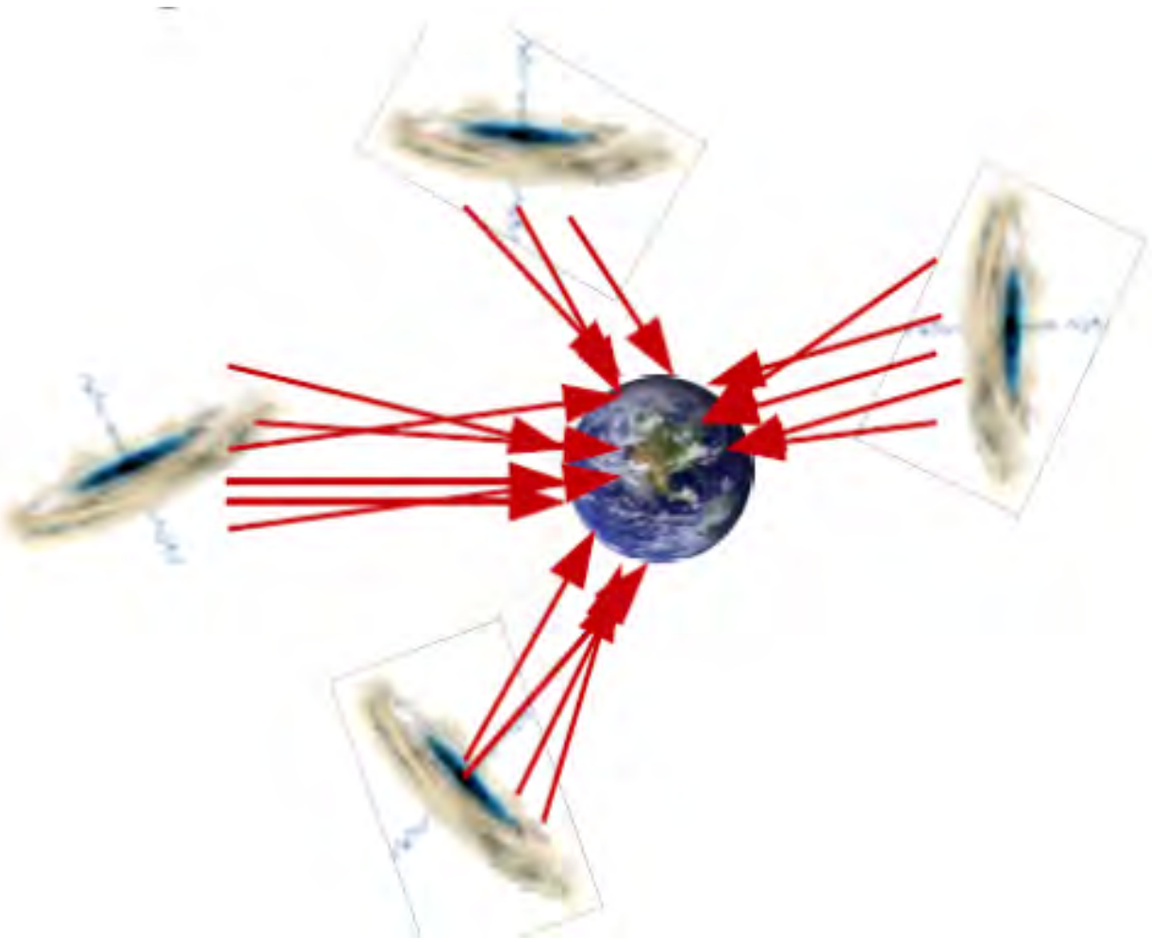
aufwärtslaufende Spur:
Myon aus Myonneutrino-Wechselwirkung

vent 8886812 [0ns, 39197ns]

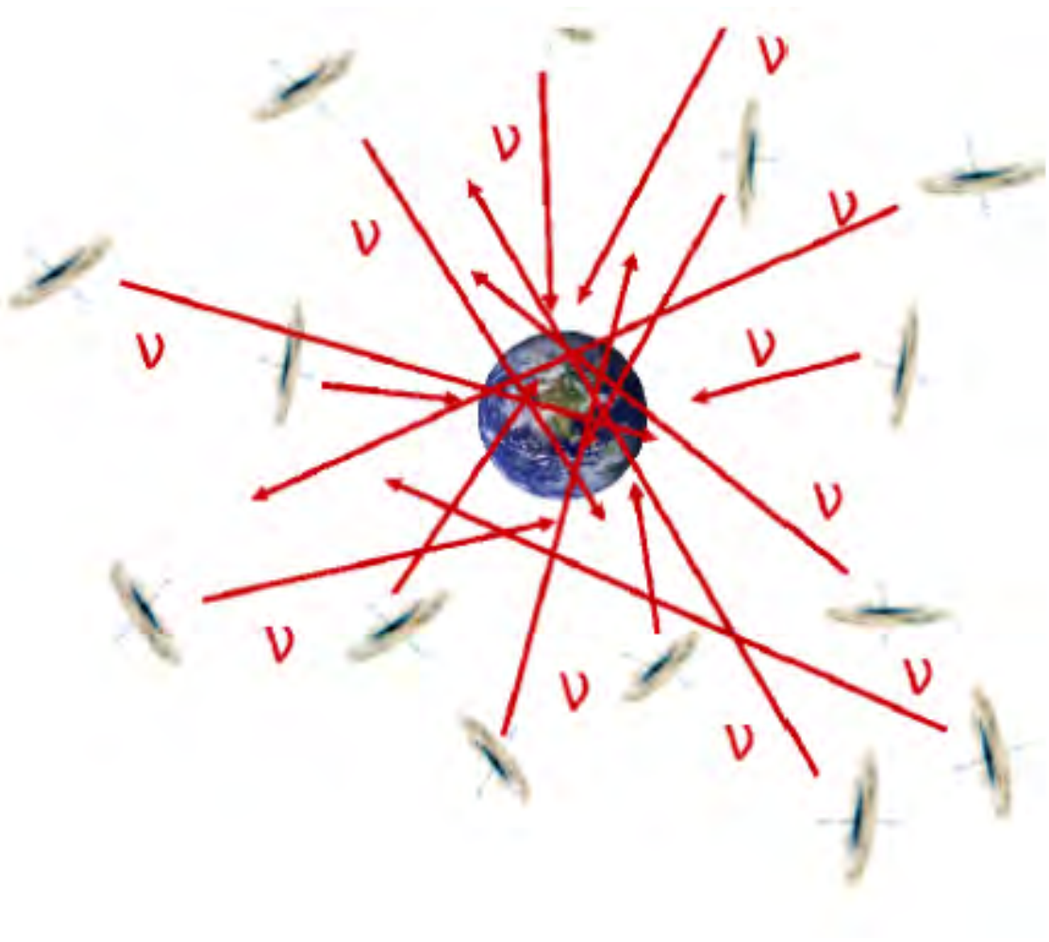


Kaskaden-artig:
Teilchenschauer aus Elektronneutrino-Wechselwirkung

Wie findet man kosmische Neutrinos?

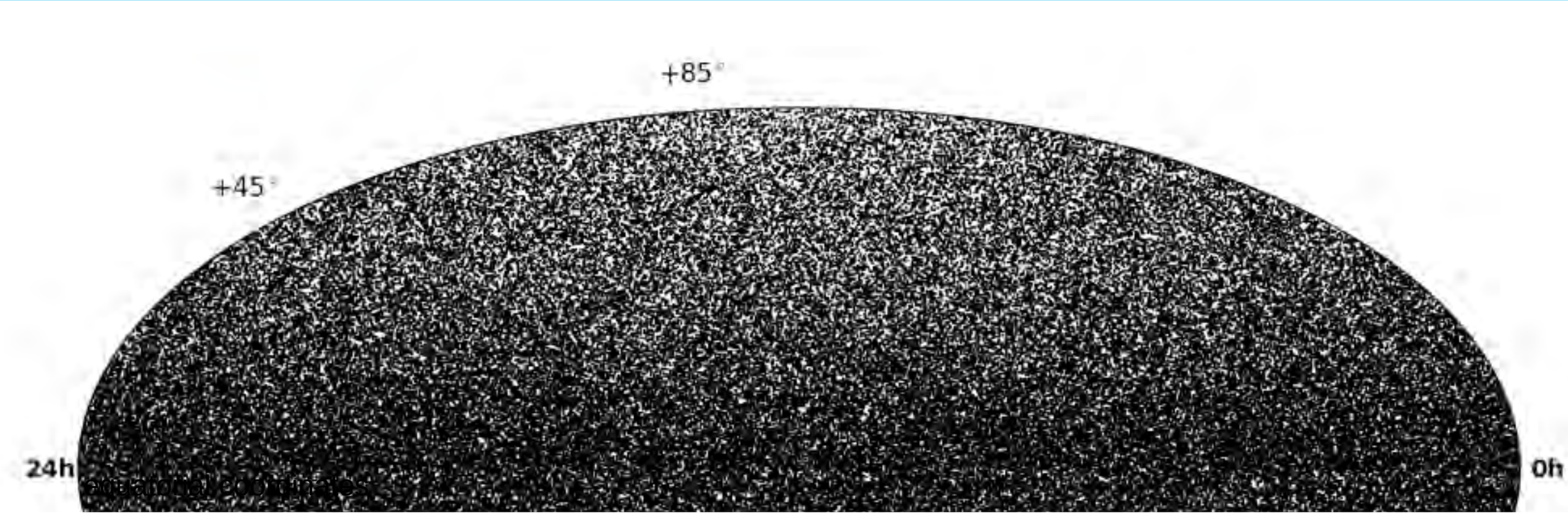


Punktquellen:
Aus einer Richtung
(von einer Quelle)
werden mehrere Neutrinos
nachgewiesen.



Diffuser Fluss:
Überlagerung vieler
schwacher Quellen.
Identifikation über Energie
der Neutrinos.

Der Himmel im Neutrinolicht



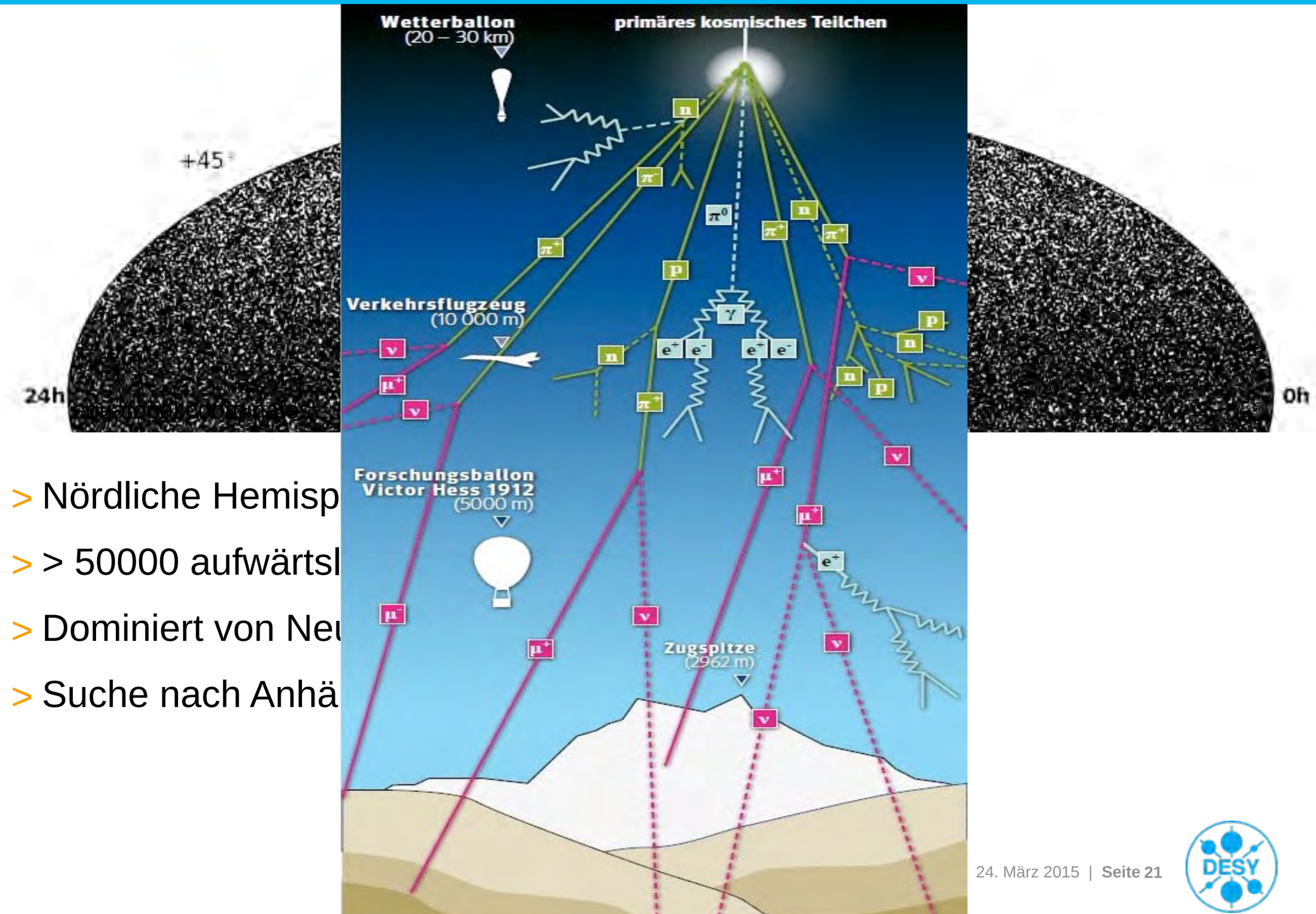
> Nördliche Hemisphäre

> > 50000 aufwärtslaufende Ereignisse

> Dominiert von Neutrinos aus Luftschauern

> Suche nach Anhäufungen von Neutrinos!

Der Himmel im Neutrinolicht



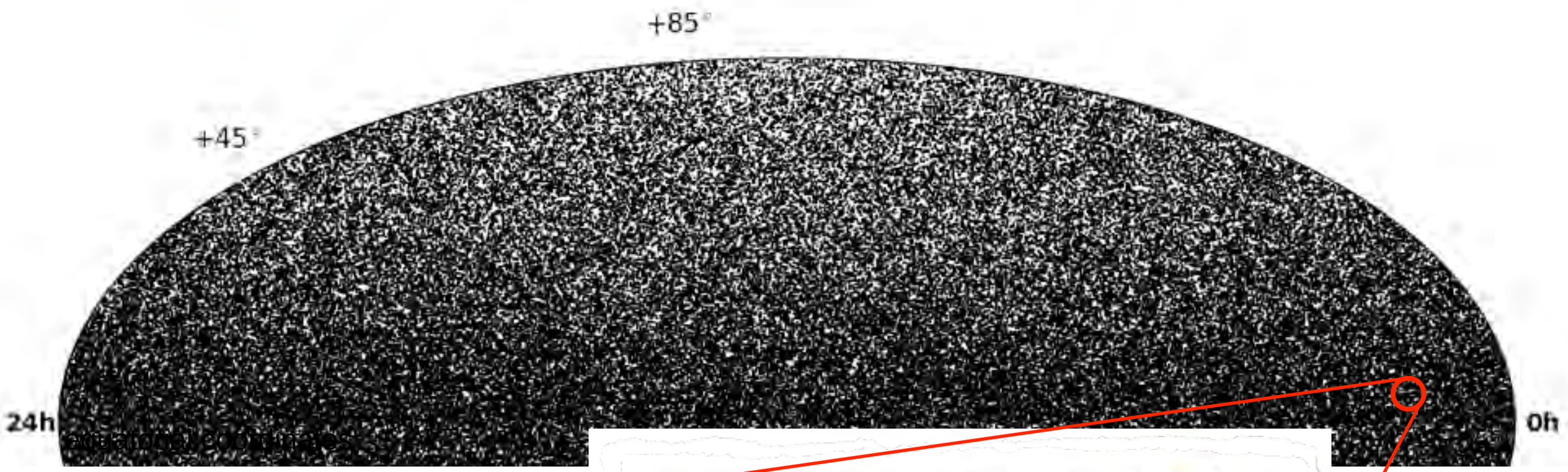
> Nördliche Hemisp

> > 50000 aufwärtsl

> Dominiert von Neu

> Suche nach Anhä

Der Himmel im Neutrinolicht

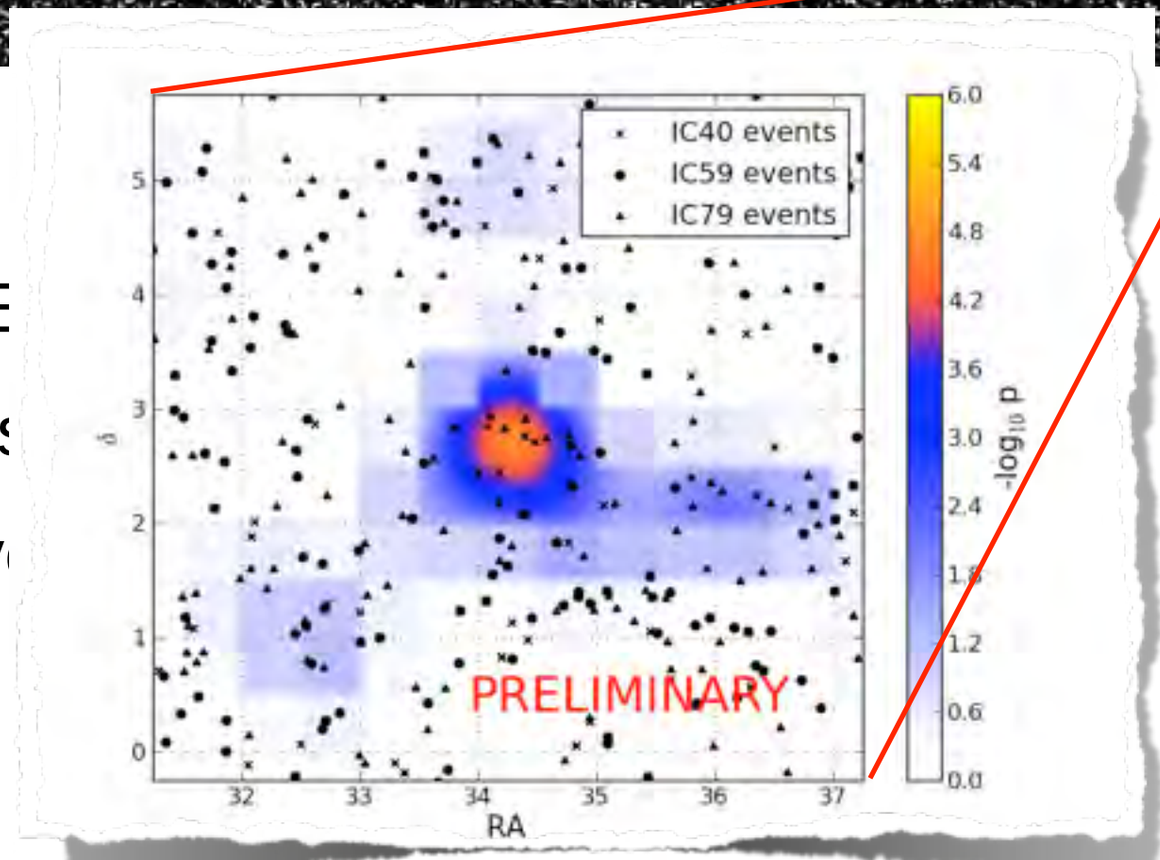


> Nördliche Hemisphäre

> > 50000 aufwärtslaufende E

> Dominiert von Neutrinos aus

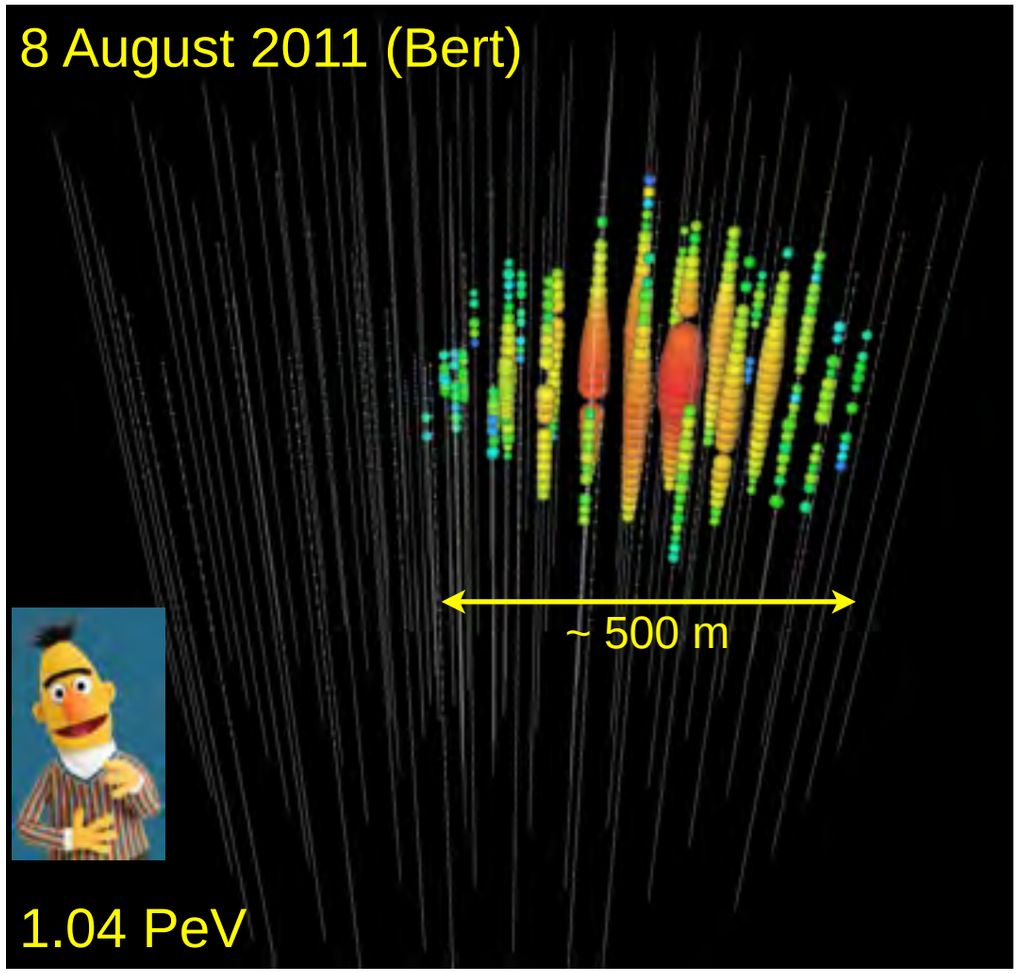
> Suche nach Anhäufungen v

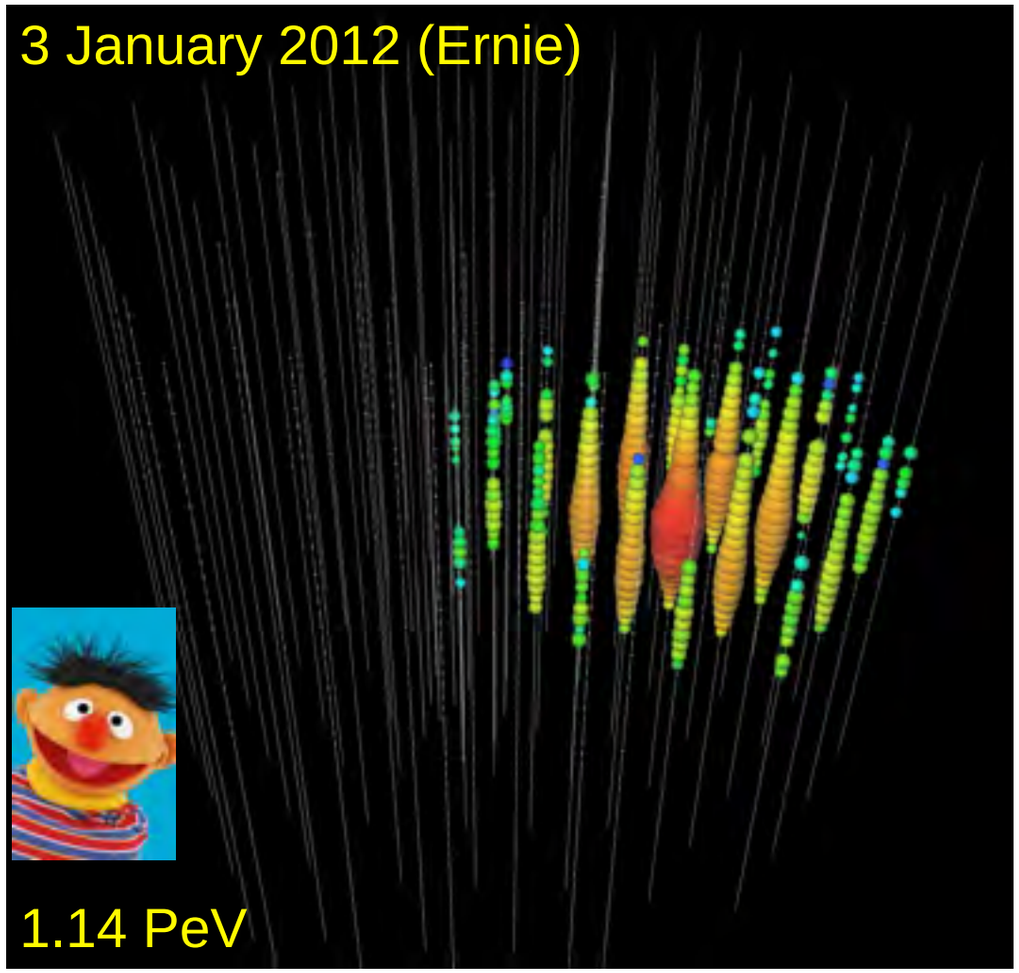


Zufalls-wahrscheinl.: 56.8%

Keine Anzeichen für astrophysikalische Neutrinos

Dann kamen Bert & Ernie...



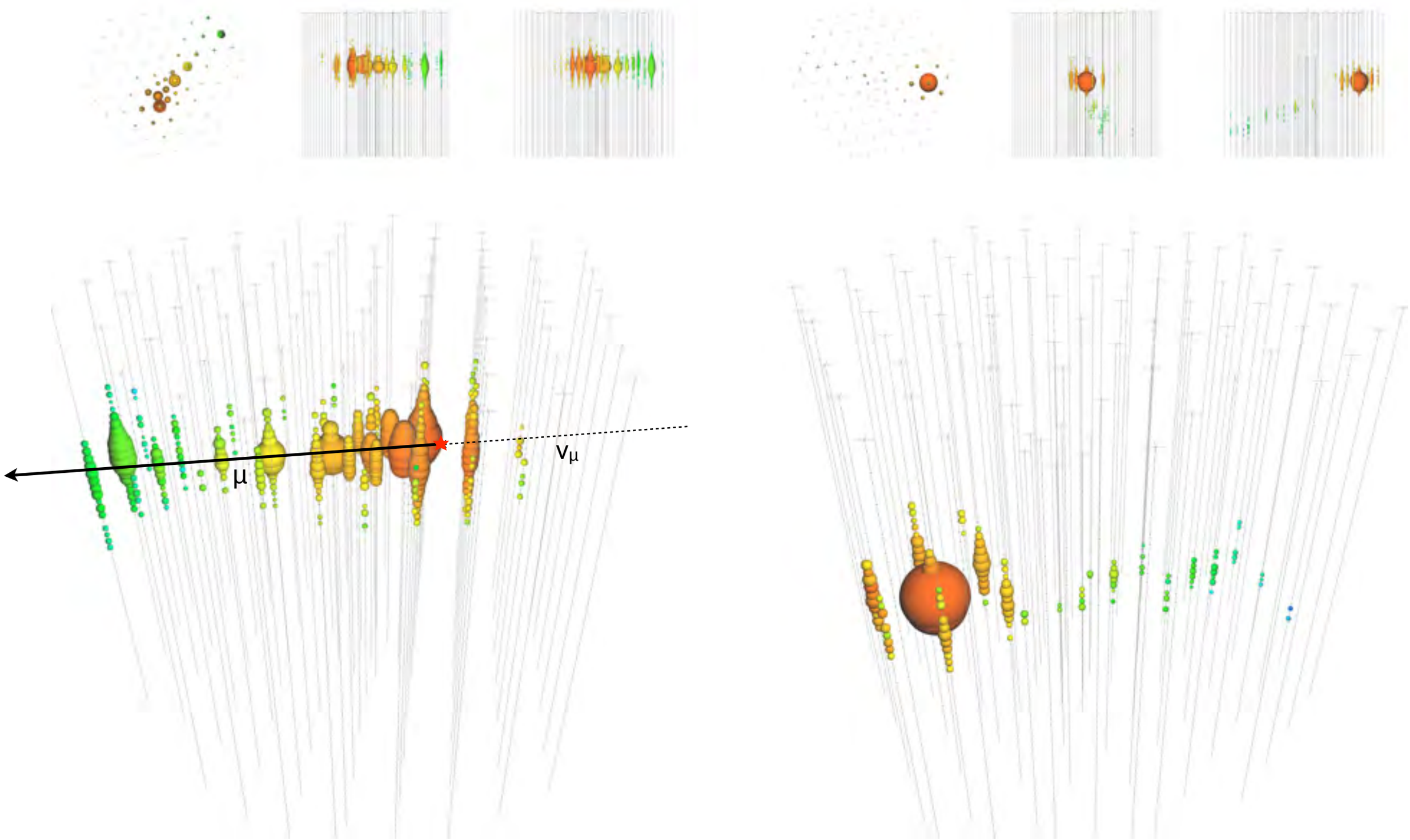


> Kaskaden-artig: (Elektron(?)-)Neutrinos, die in IceCube wechselwirken

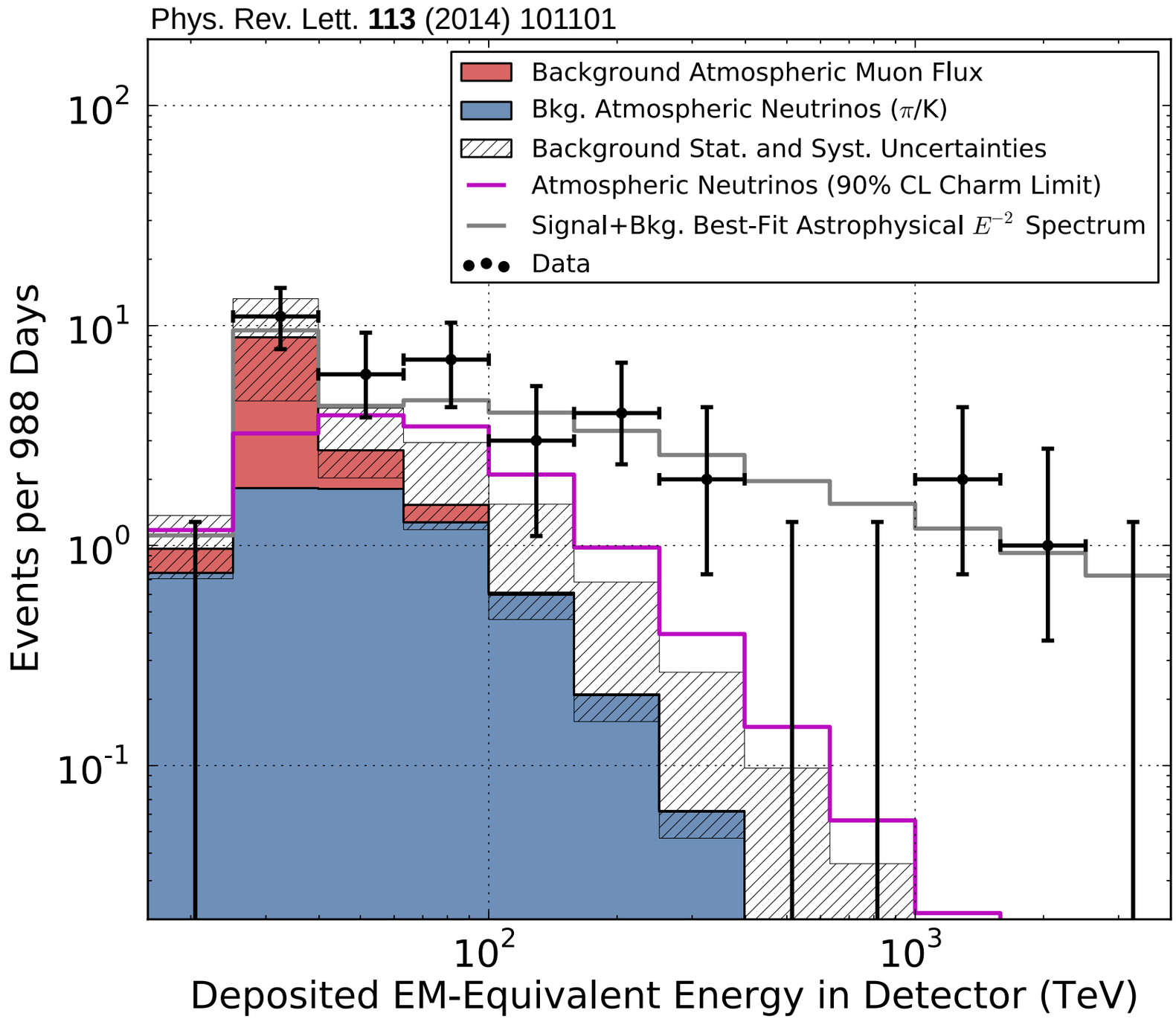
> Höchstenergetische Neutrinos, die jemals gemessen wurden!

> Zu energiereich für Luftschauerneutrinos

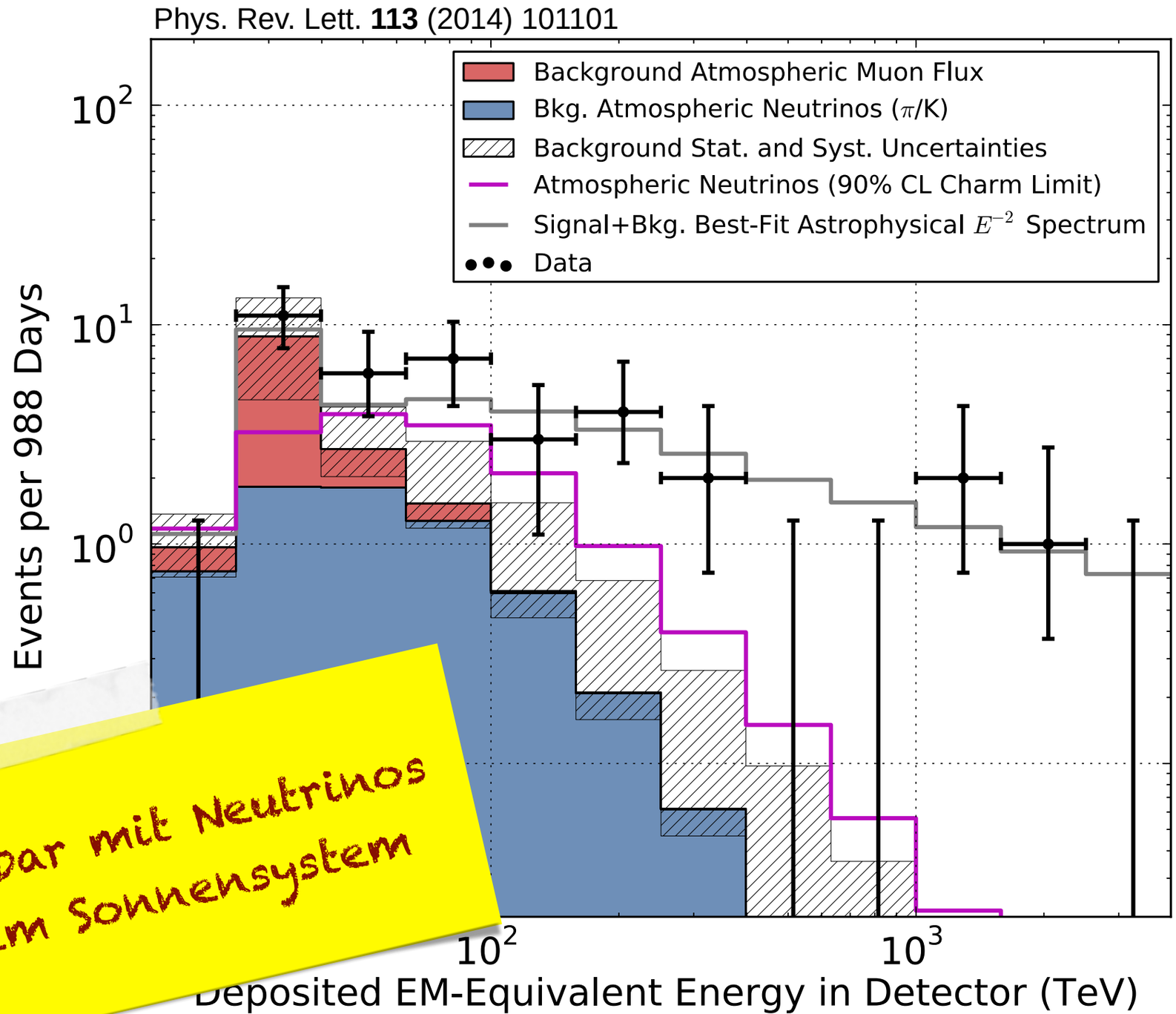
...und 35 weitere “High Energy Starting Events”



Energieverteilung



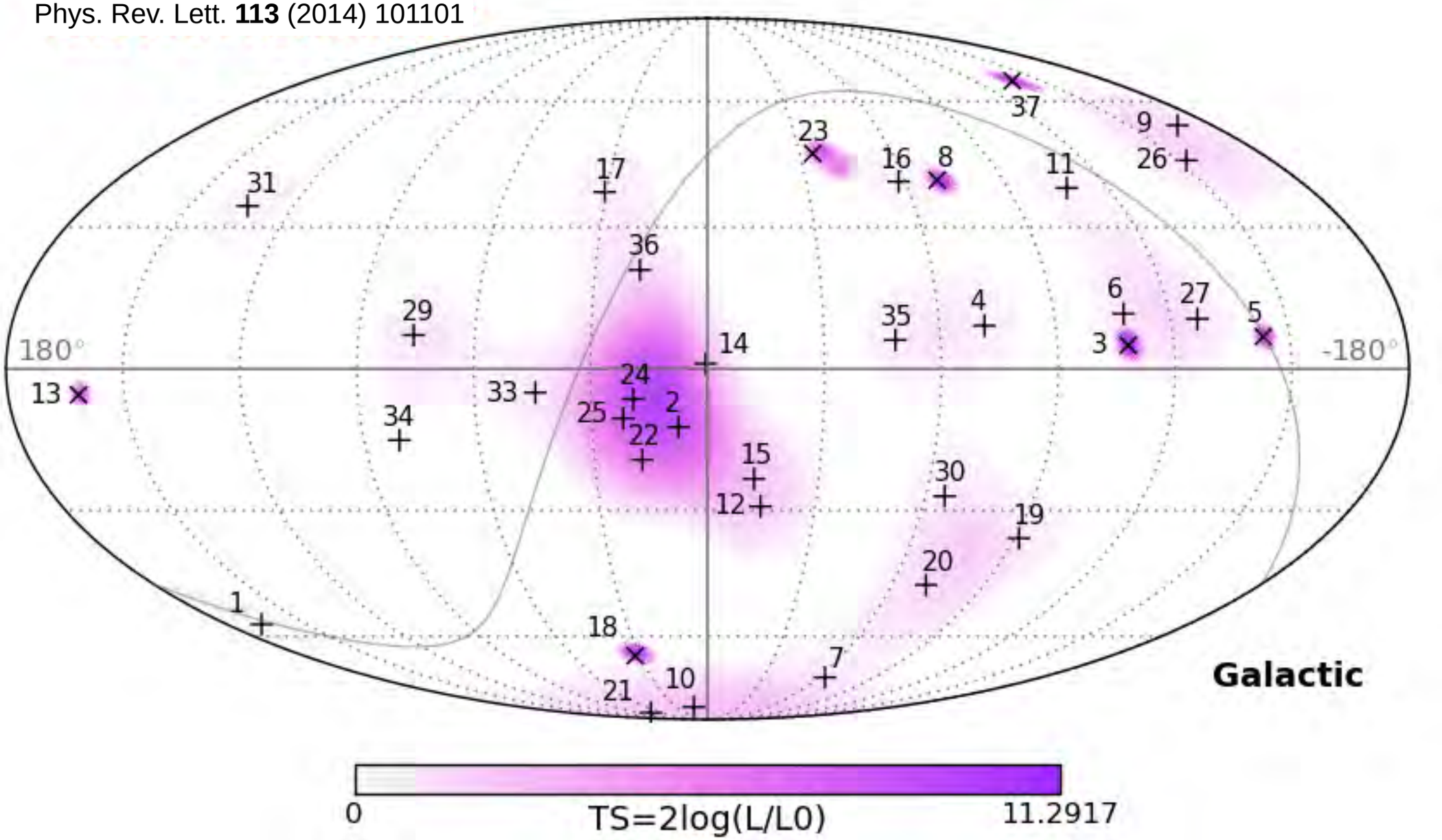
Energieverteilung



Nicht erklärbar mit Neutrinos aus unserem Sonnensystem

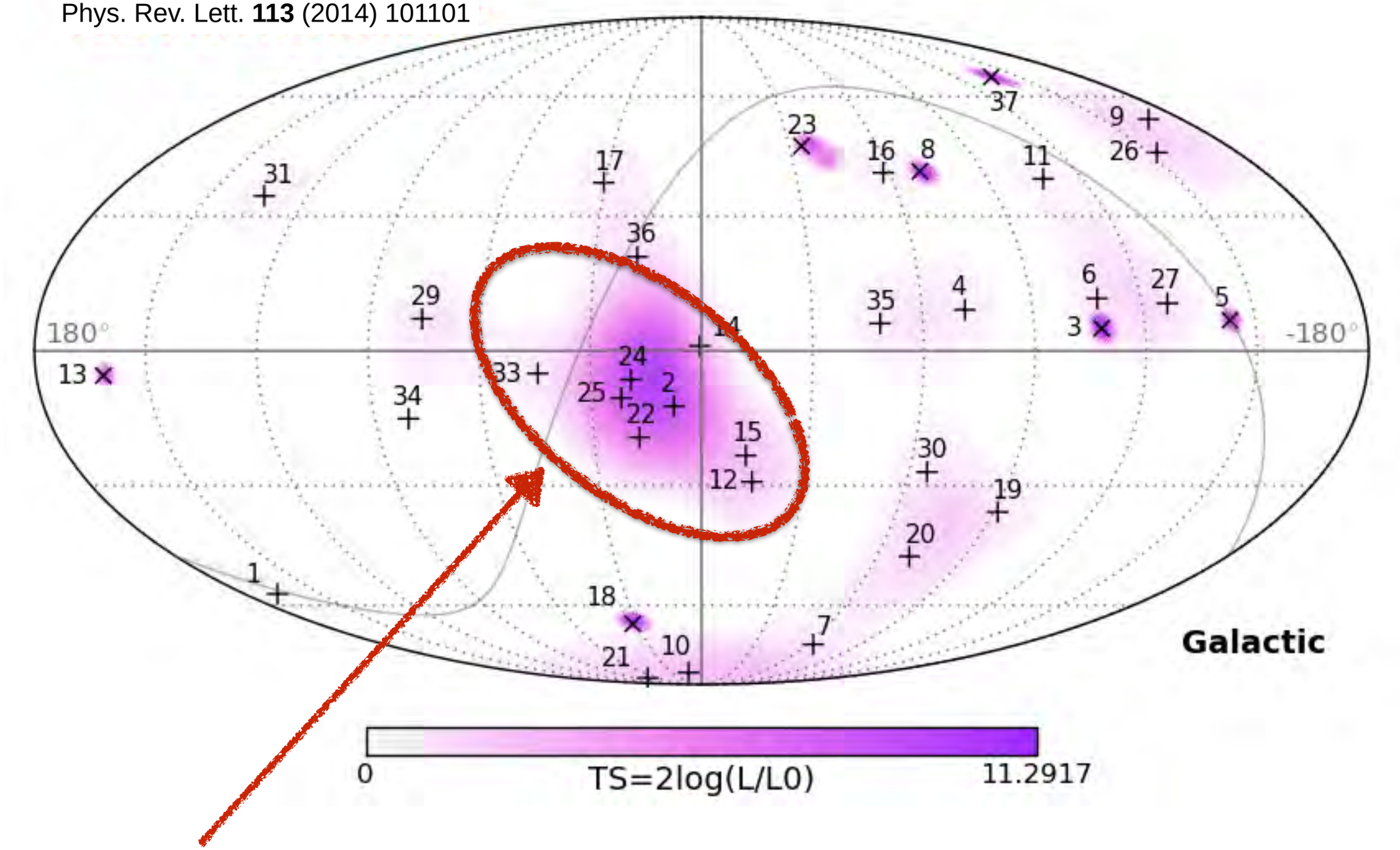
Himmelskarte

Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 101101



Himmelskarte

Phys. Rev. Lett. **113** (2014) 101101



Zufallswahrscheinlichkeit: 84%

physicsworld

BREAKTHROUGH OF THE YEAR 2013

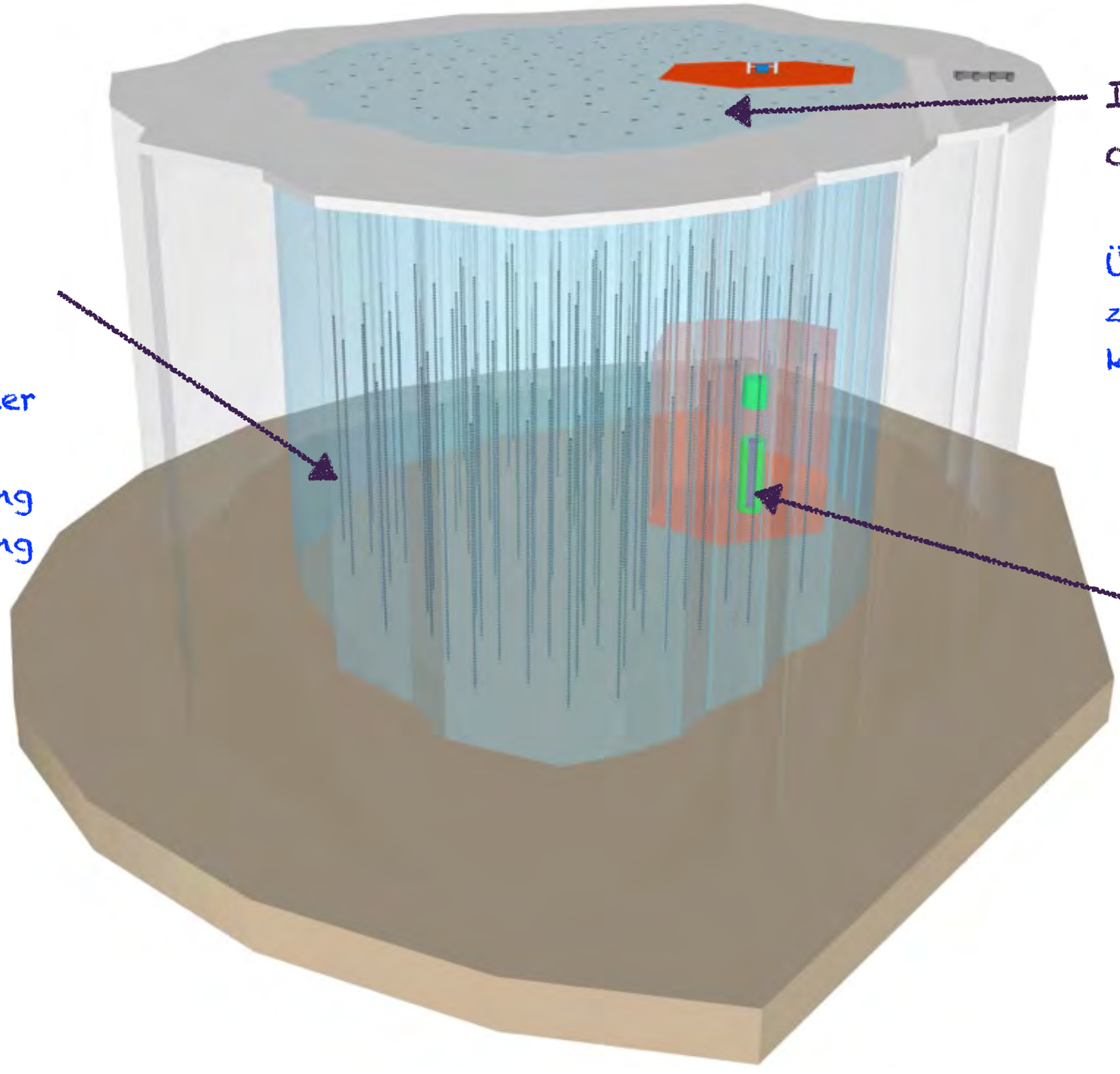
“for making the first observations of high-energy cosmic neutrinos”

Das IceCube-Gen2 Konzept

Unsere Vision: IceCube im Jahr 2027

High Energy Array (HEA) o(10 km³)

- Entdeckung der Quellen der kosm. Strahlung
- Präzise Messung von Energie-spektrum und Flavor



IceTop++ o(10 km²)

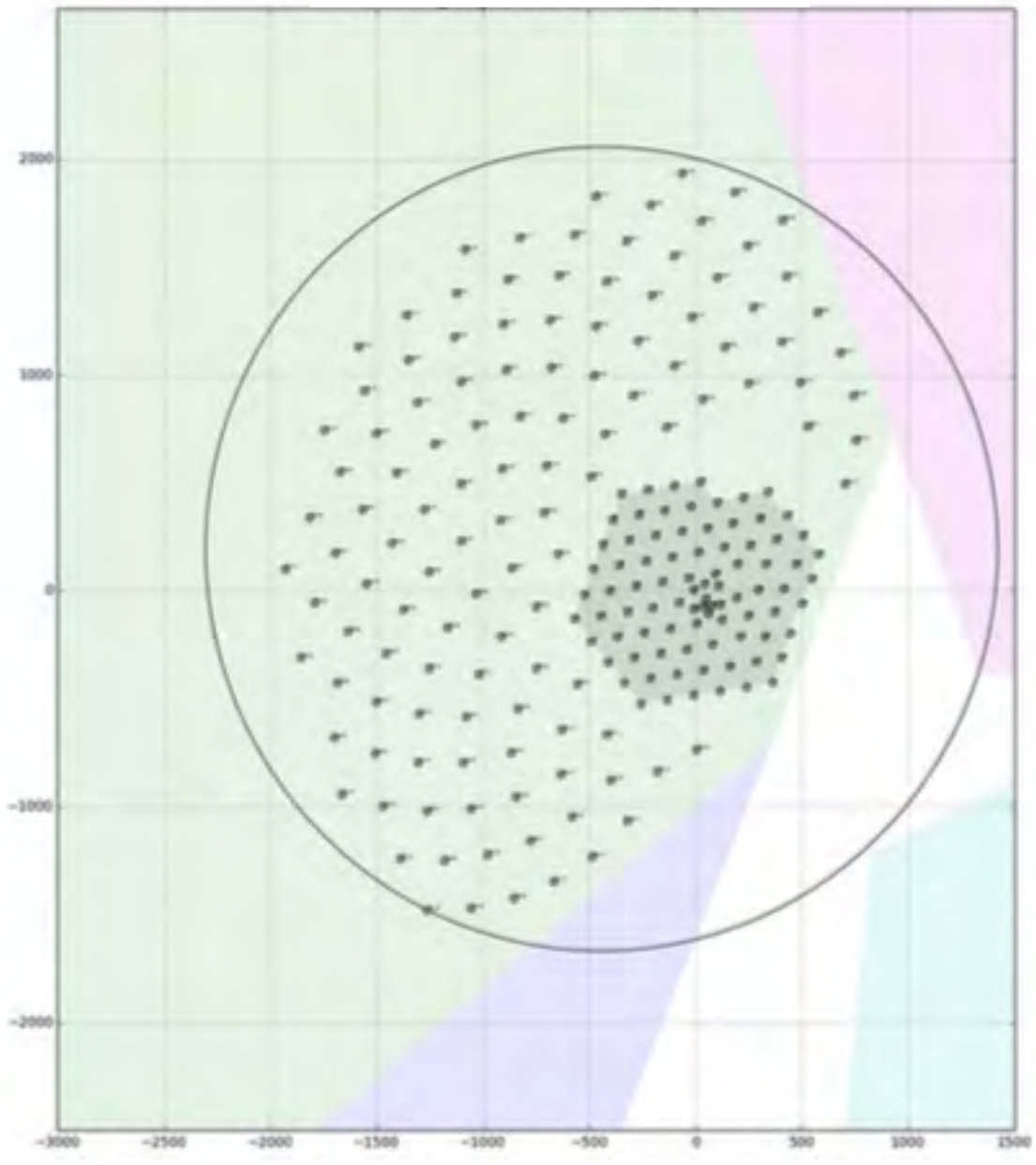
Übergang von gal. zu extra-gal. kosm. Strahlung

PINGU o(40 strings)

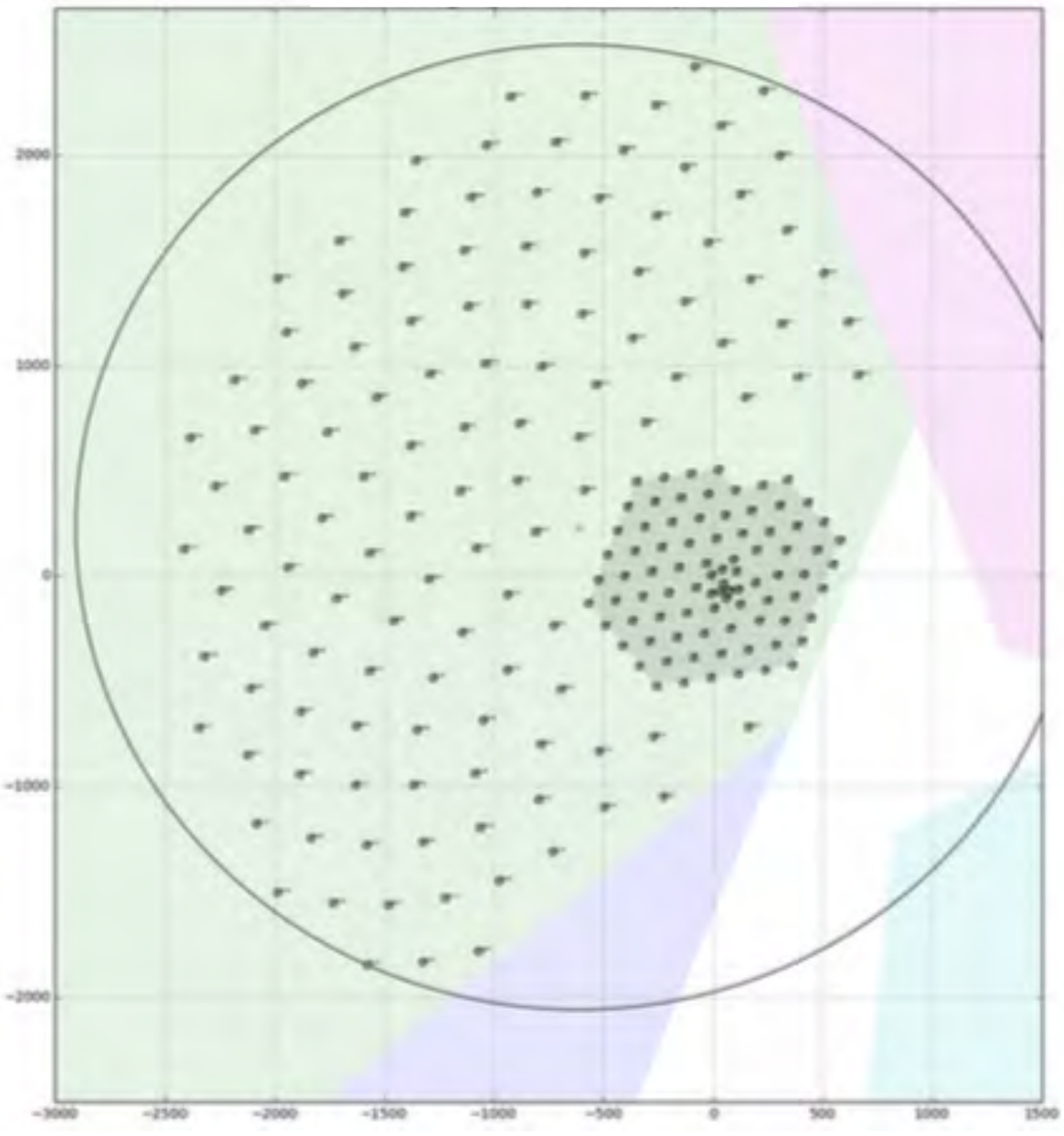
Ordnung der Neutrinomassen

High Energy Array (HEA): Geometrie

240 m Stringabstand

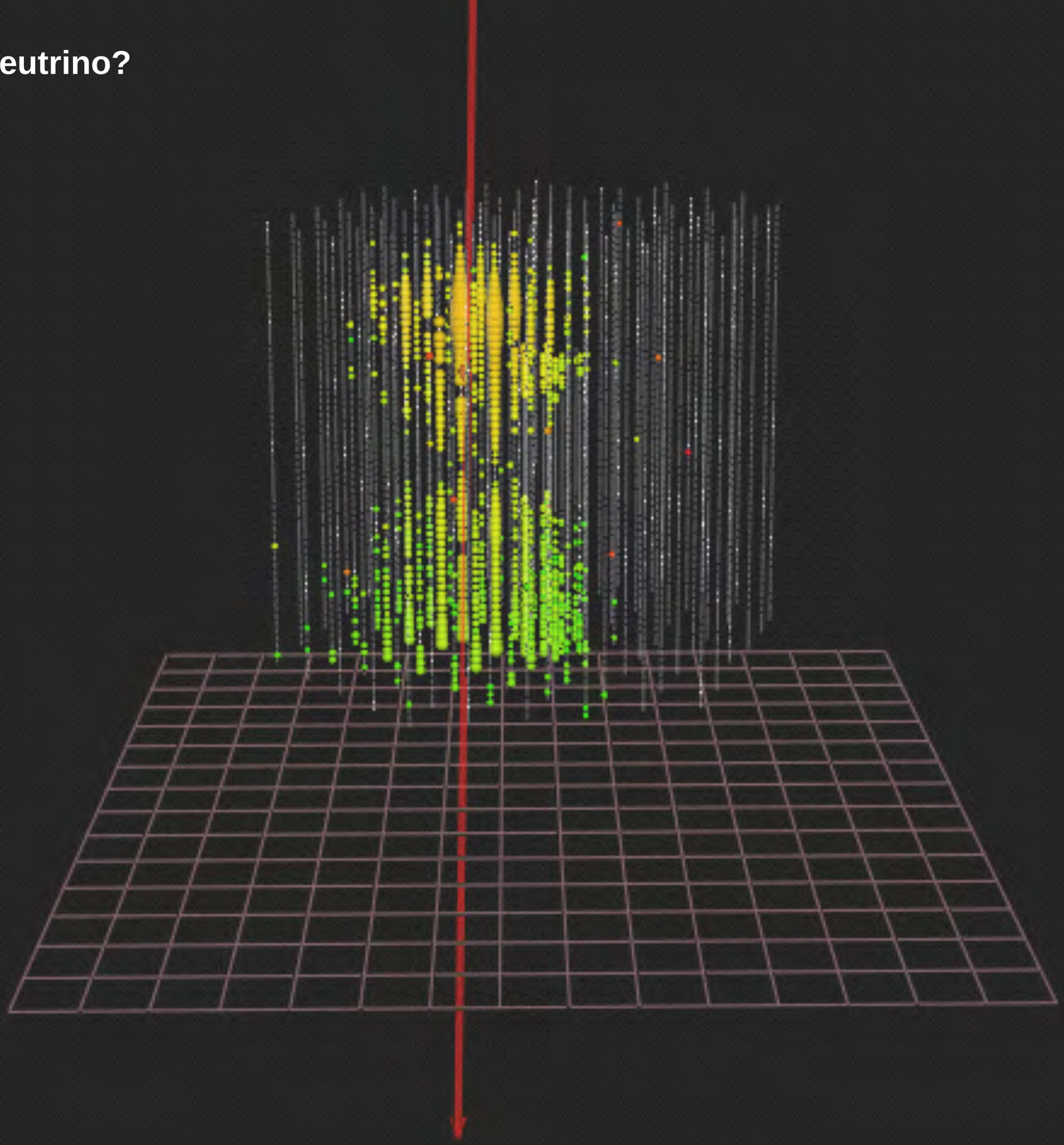


300 m Stringabstand



Optimale Geometrie wird zzt. untersucht

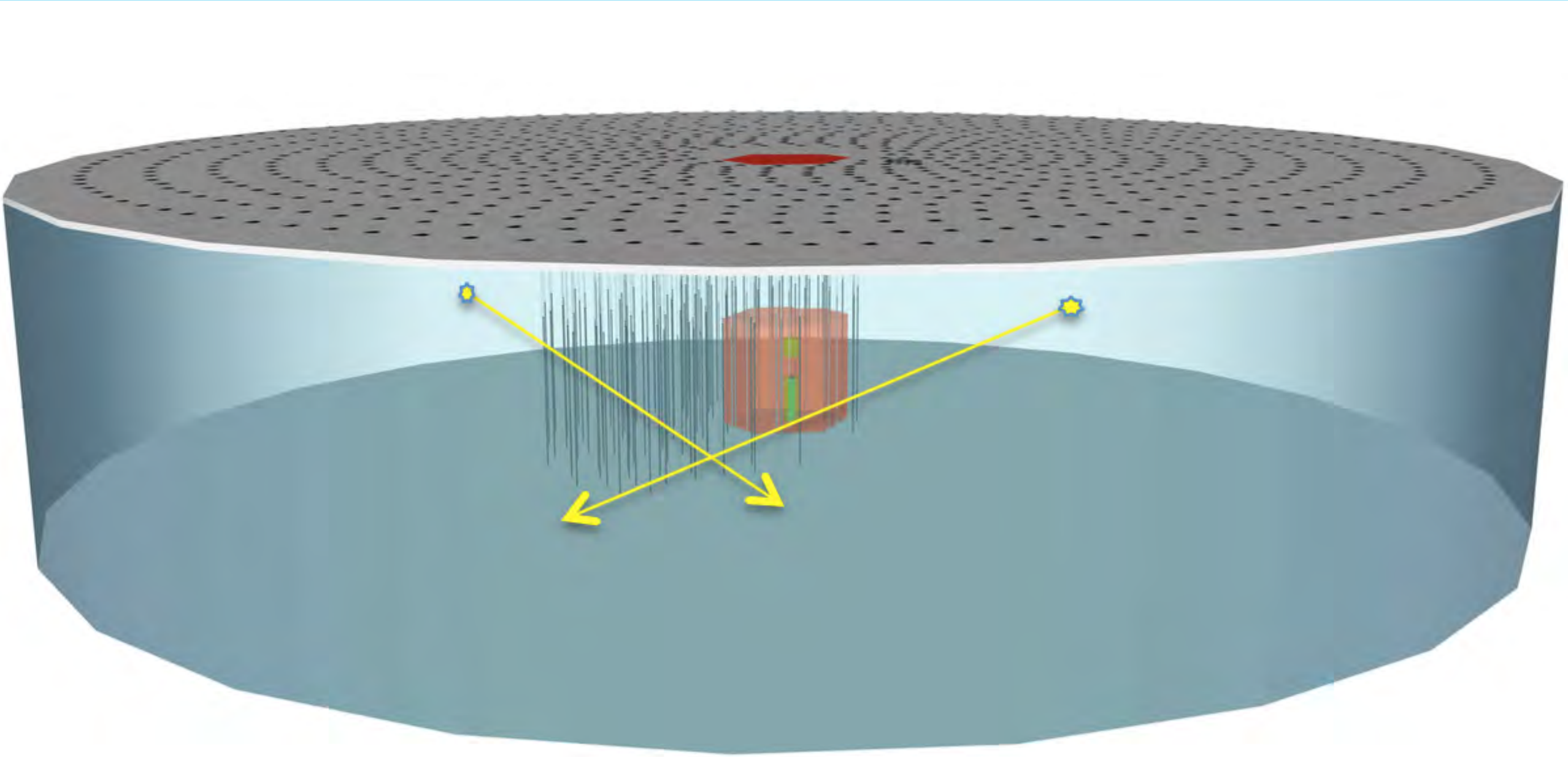
Kosmisches Neutrino?



Kosmisches Neutrino?

Ja! Kein Luftschauersignal in IceTop

Vetodetektor an der Oberfläche



> Ein Luftschauer-Detektor an der Oberfläche erzeugt zusätzliches sensitives Volumen

> 7 km Radius decken den Zenitwinkelbereich bis 70° ab (Galaktisches Zentrum!)

> Aber: Niedrige Energieschwelle ist eine technische Herausforderung

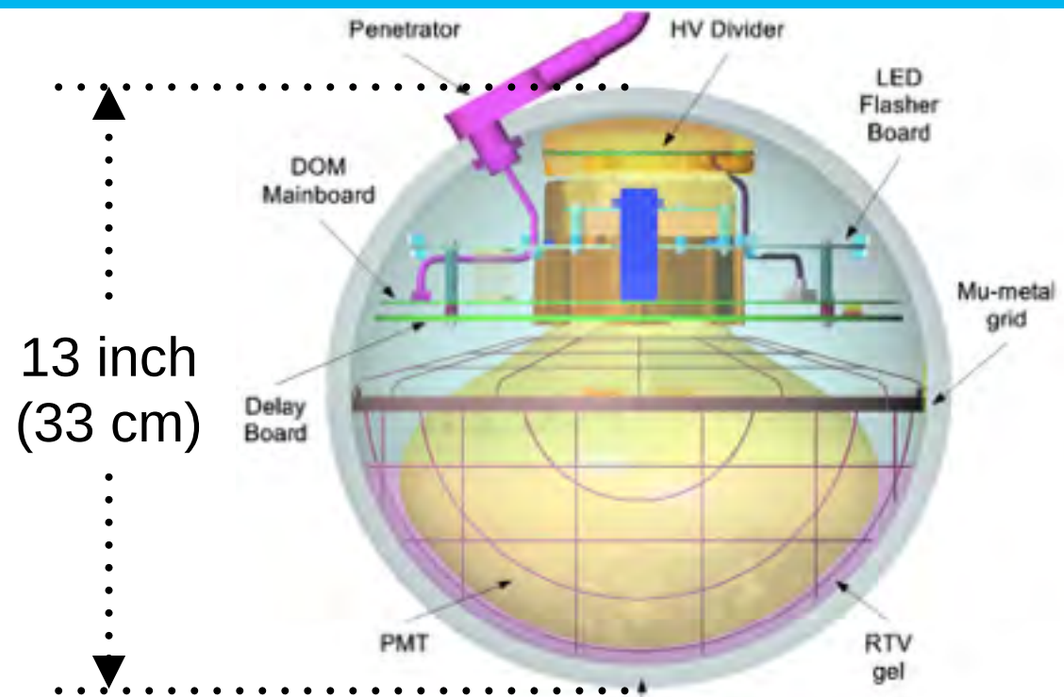
R&D Aktivitäten bei DESY

Optische Module

IceCube Digital Optical Module (DOM)

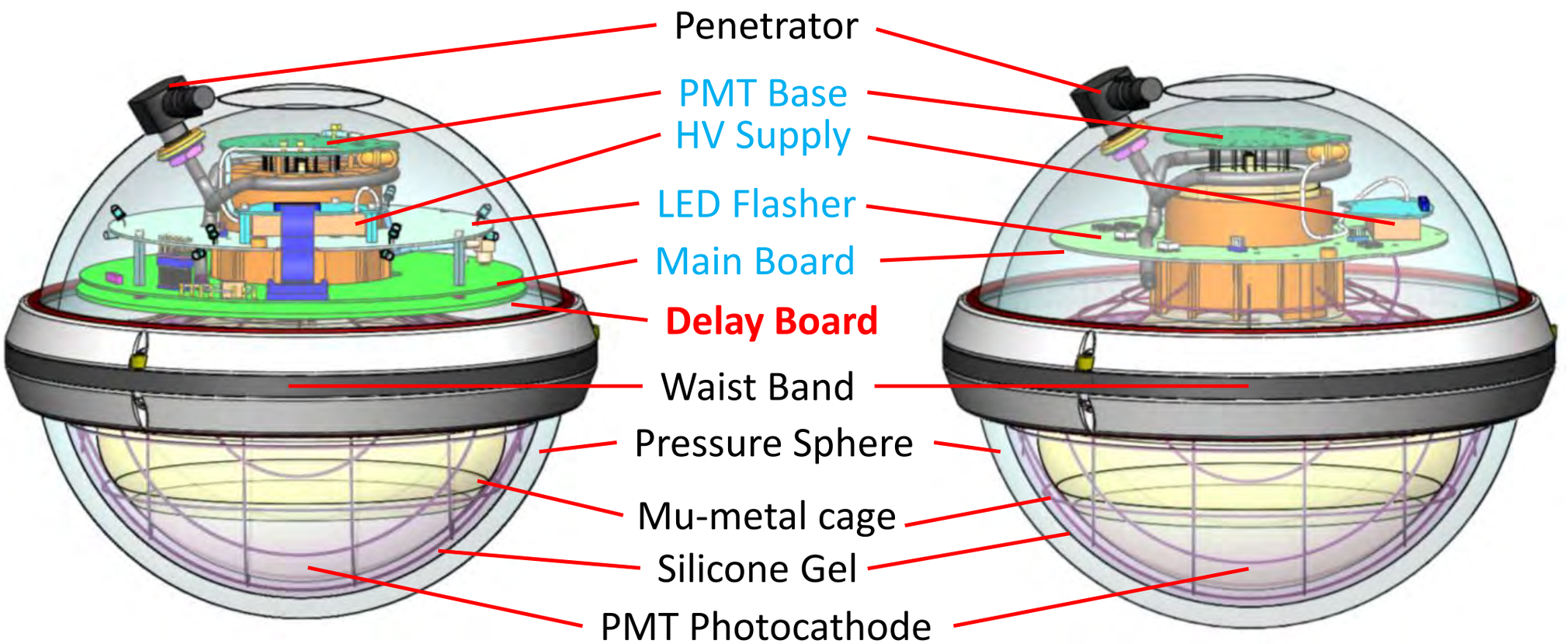
- Zeichnet PMT-Signal jedes “Hits” auf
  - 300 MHz Sampling
- Zeitsynchronisation aller DOMs besser als 2 ns
- Daten/Zeitsignal/Strom über 3.3 km Twisted-Pair Kupferkabel
- Verbrauch ~3 W
- > 550 bar stat. Druck während des Einfrierens
- Erschütterungsunempfindlich; Transport per Schiff, Flugzeug, Schlitten
- 99% funktionieren heute noch!

NIM A **601** (2009) 294



Baseline Design: Gen2 DOM

Grundprinzip: Möglichst nahe am IceCube DOM bleiben



IceCube DOM

Gen2 DOM

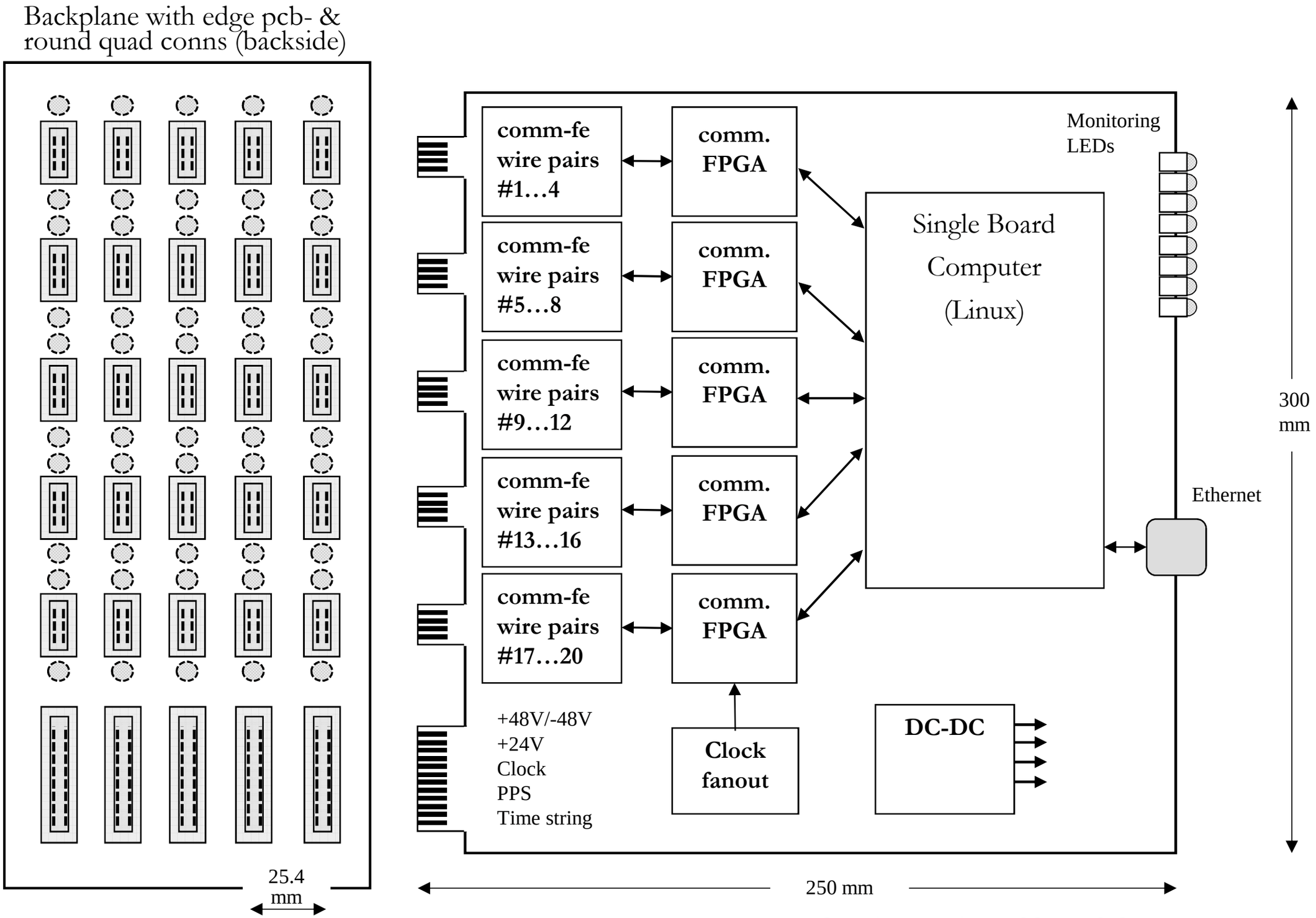
KEY:

Component identical

Component eliminated

Component re-designed

DOM Auslese an der Oberfläche (K.-H. Sulanke)



Gibt es bessere Ansätze als das DOM?

Wunschliste:

Mehr Licht / Ereignis

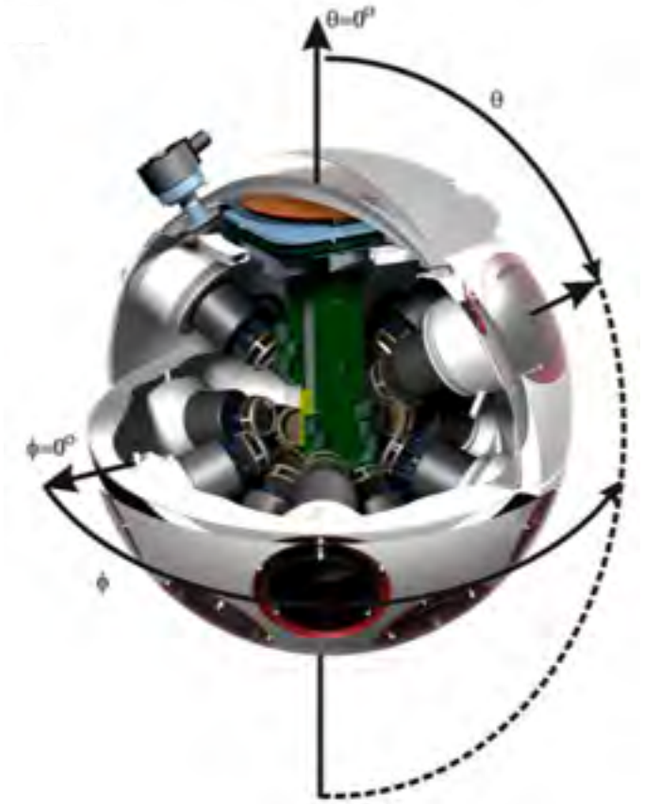
- Größere lichtsensitive Fläche
- Vergrößerter Wellenlängenbereich

Weniger Rauschen

Richtungsauflösung

Beispiel: KM3NeT Multi-PMT DOM

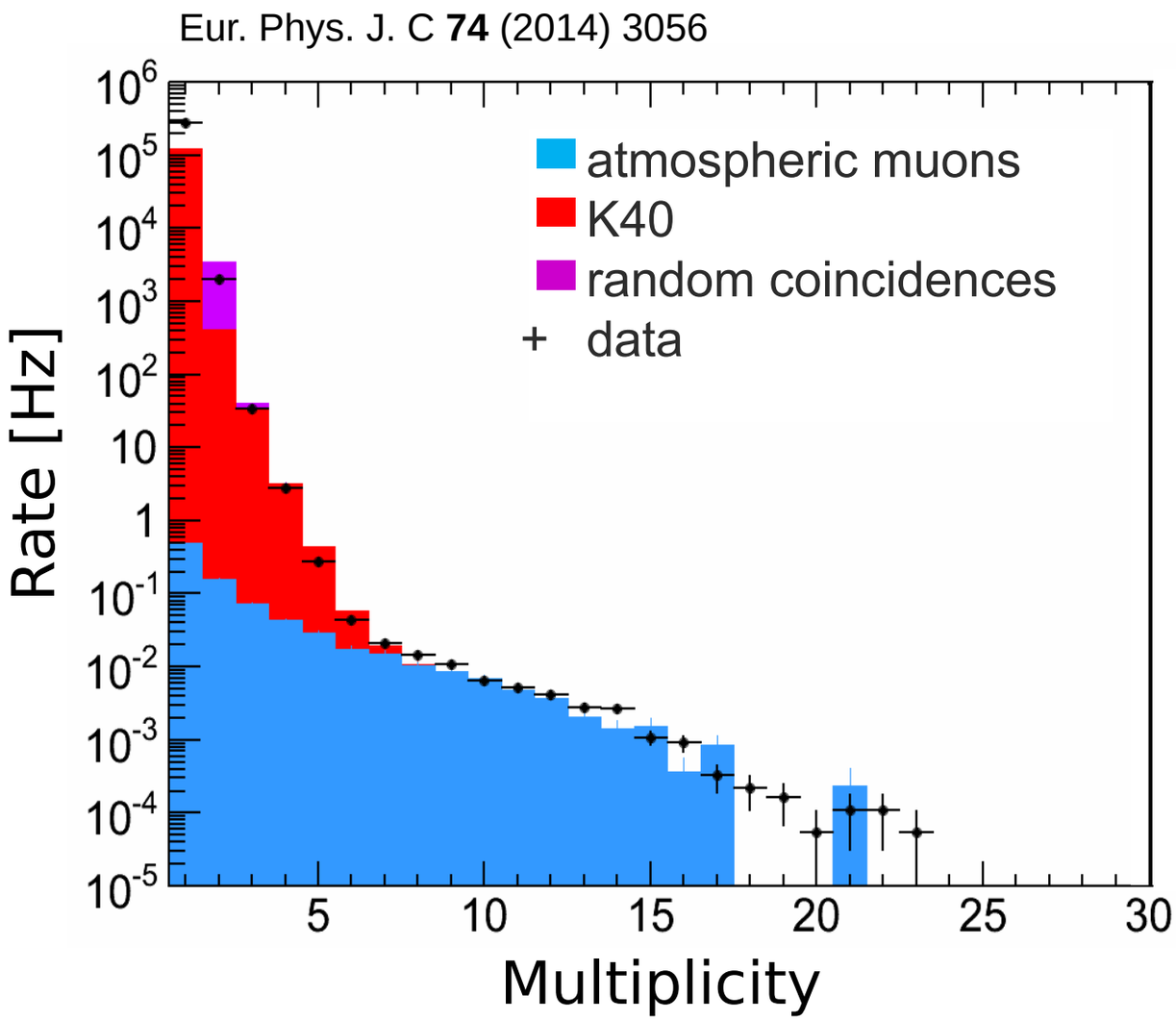
- 31 × 3-inch PMTs in 17-inch Glaskugel
  - ~ 2.8-fache Photokathodenfläche verglichen mit 10-inch PMT
  - geringere Kosten pro Photokathodenfläche
- Richtungsauflösung für Photonen
- Gute Trennung von 1 p.e. und 2 p.e., … Signal
- Gute Zeitauflösung



Eur. Phys. J. C **74** (2014) 3056

Prototyp seit 17 Monaten im Mittelmeer Betrieben

KM3NeT Multi-PMT DOM: In-Situ Messungen



Myonen können in einzelnem OM
an Hand der Zahl der getroffenen PMTs
identifiziert werden

KM3NeT Multi-PMT DOM: Funktioniert das für IceCube?

> Große Kugeln sind gut für Wasser: Auftrieb

> Große Kugeln sind schlecht für Eis: Bohren größerer Löcher

- Energieverbrauch skaliert mit Volumen (Fläche) des Bohrlochs

24 × 3-inch PMTs in 14-inch Glaskugel

Raum für Elektronik & Konnektor

ERLANGEN CENTRE FOR ASTROPARTICLE PHYSICS

A. Kappes et al.

Multi-PMT DOM für IceCube

> Mechanisches Design (Erlangen)

- Größe & Gewicht ähnlich zu IceCube DOM
  keine neuen Prozesse für Logistik und Installation

> Elektronik und Auslese (DESY)

- Interface zu IceCube
- Maximale Signalinformation bei vorgegebener Leistungsaufnahme
- ≲ 3 W für Hochspannung, Verstärkung, Digitalisierung, Prozessierung, Kommunikation
- Zeitpunkt der ansteigenden Flanke und Time-over-Threshold für alle Kanäle
- Waveforms für alle Kanäle, analoge Summe aller Kanäle?
- Waveforms für alle “Hits”, “Hits” mit > 1 Photon?

Gibt es bessere Ansätze als das DOM?

Wunschliste:

Mehr Licht / Ereignis

- Größere lichtsensitive Fläche
- Vergrößerter Wellenlängenbereich

Weniger Rauschen

Richtungsauflösung

Wavelength-Shifting Optical Module — WOM

M. Kowalski et al.

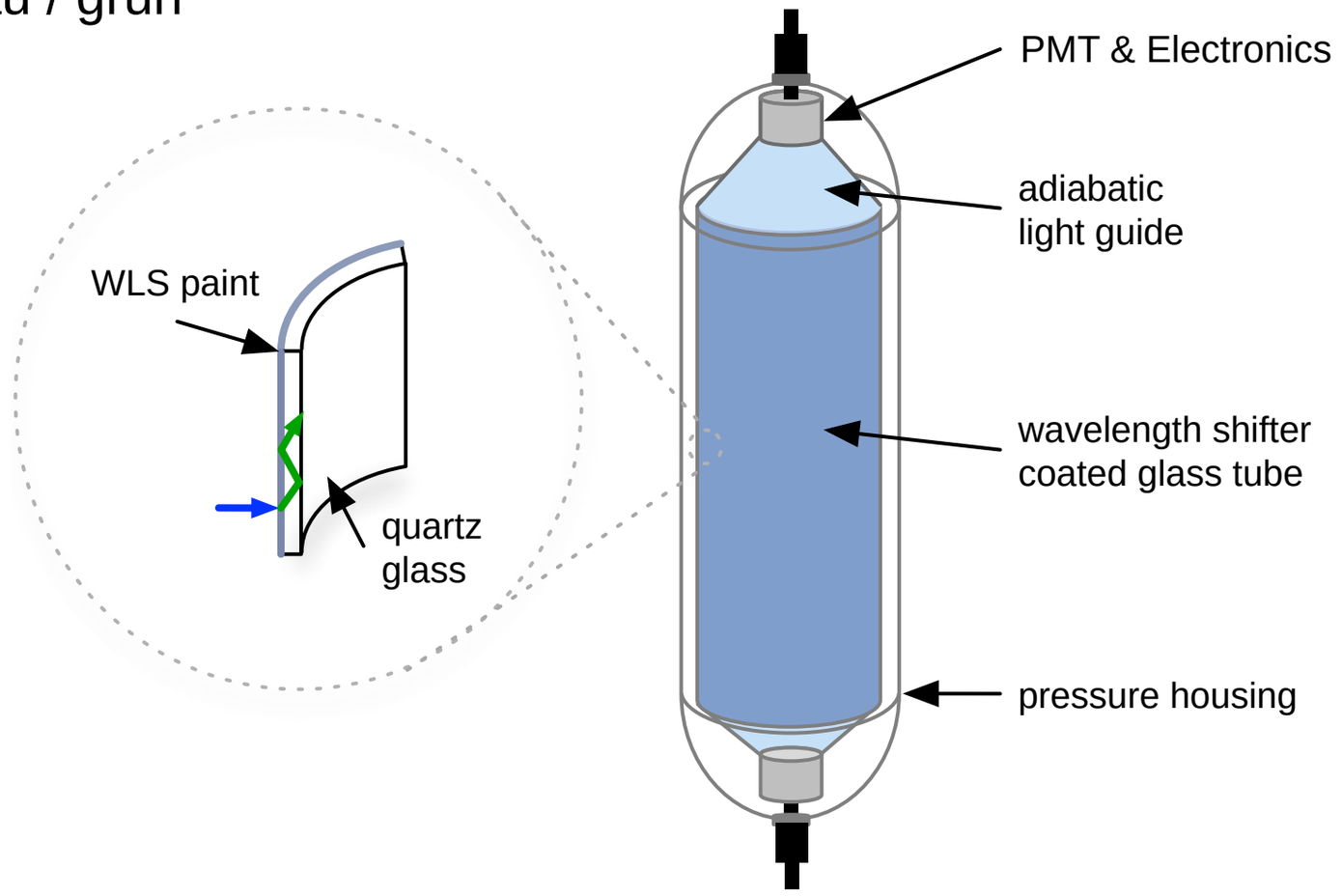
S. Böser, L. Köpke et al.

> Konzept:

- Wellenlängenschieber UV nach blau / grün
- Lichtleitung durch Totalreflexion

> Eigenschaften

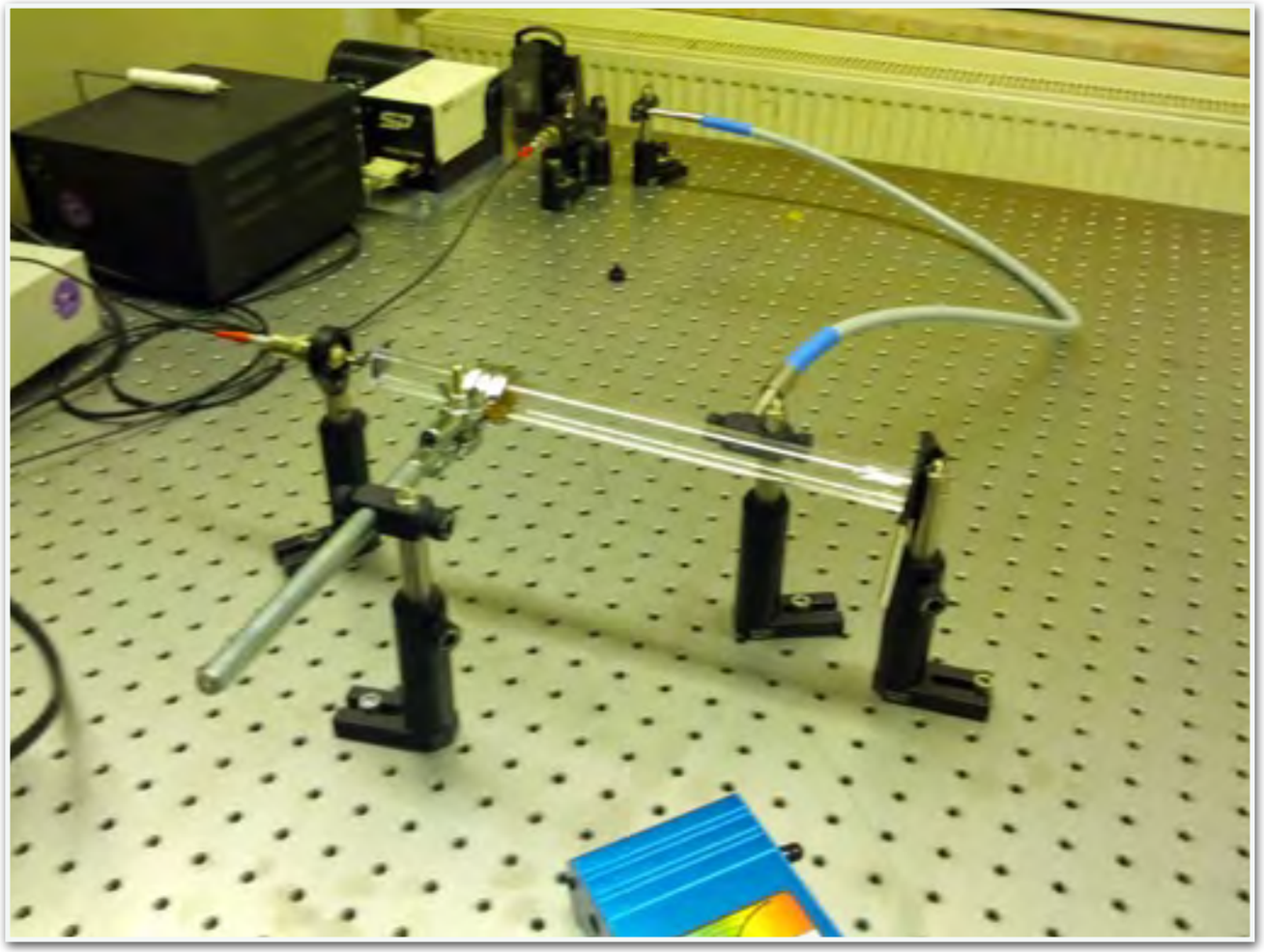
- große Sammelfläche für Licht
- geringes Rauschen
- hohe UV Sensitivität
- kostengünstig



ICRC 2013, arXiv:1307.6713 [astro-ph.IM]

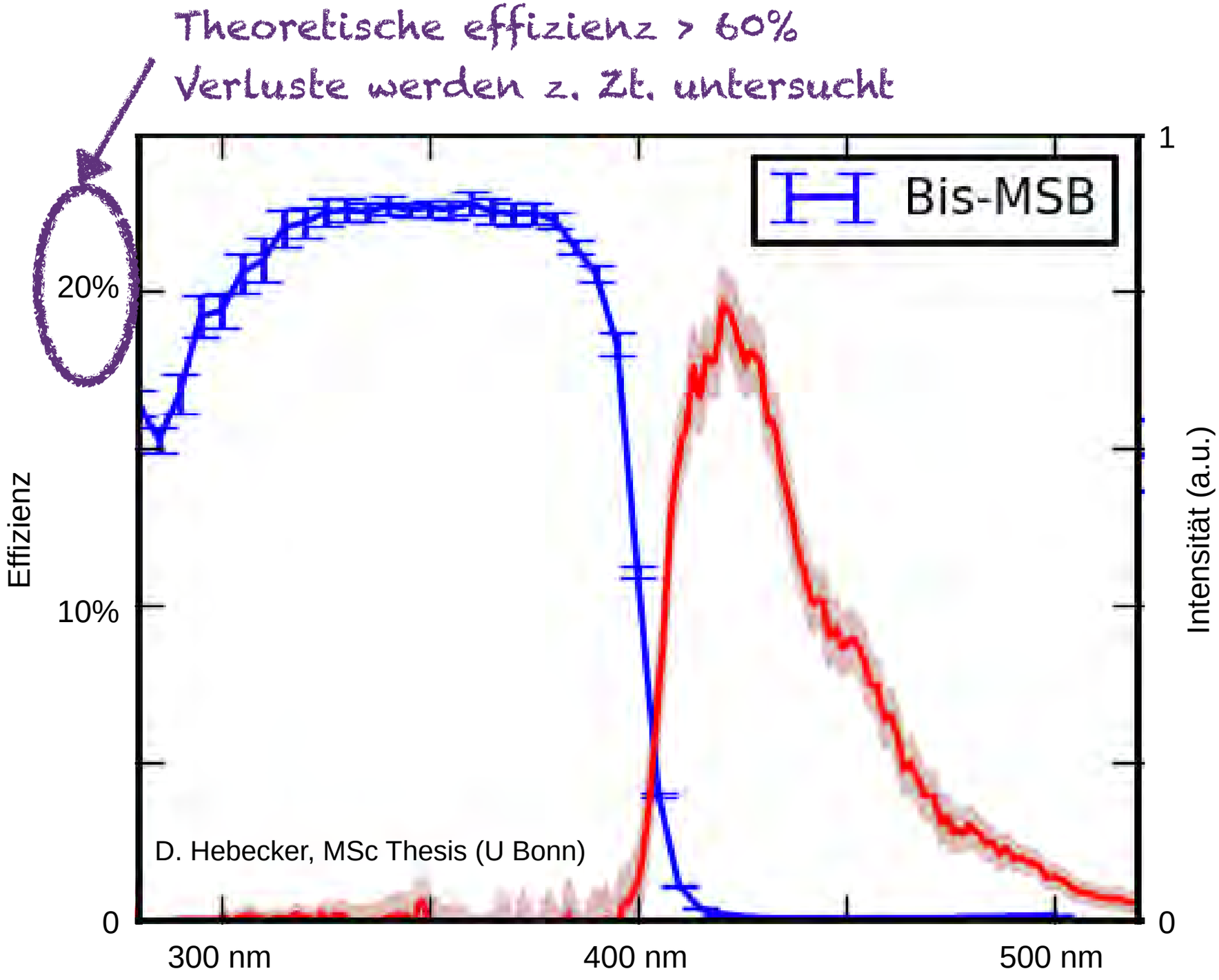
DESY Labor

Dip-Coater zum
beschichten der Röhren



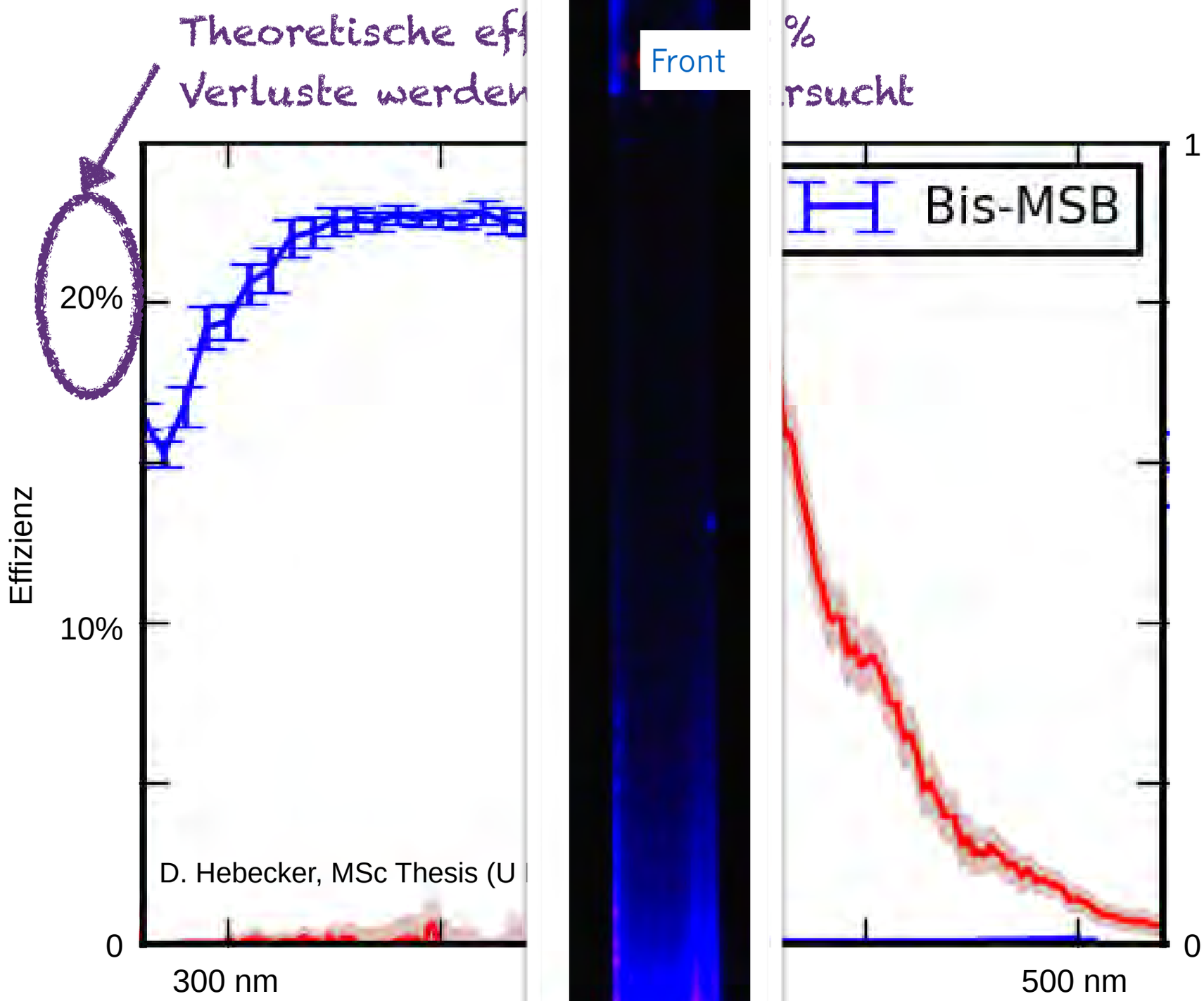
Messplatz zur Charakterisierung
der Röhren

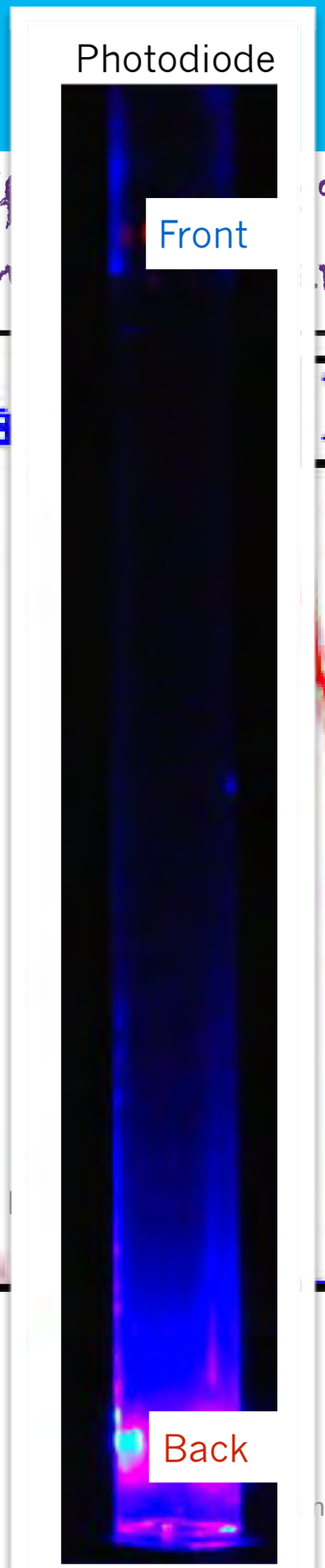
Wellenlängenschieber



Effizienz beinhaltet Absorption,
Re-emission und Lichtleitung

Wellenlängenschieber

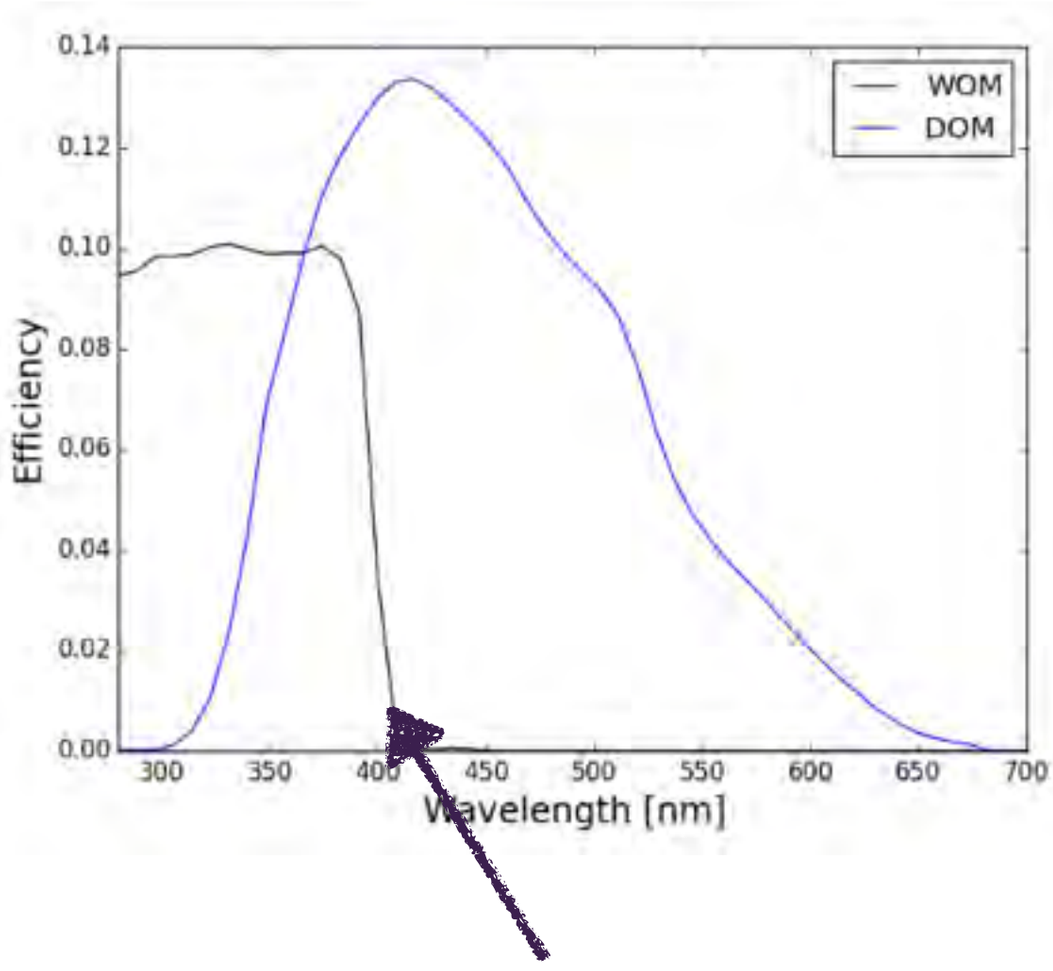




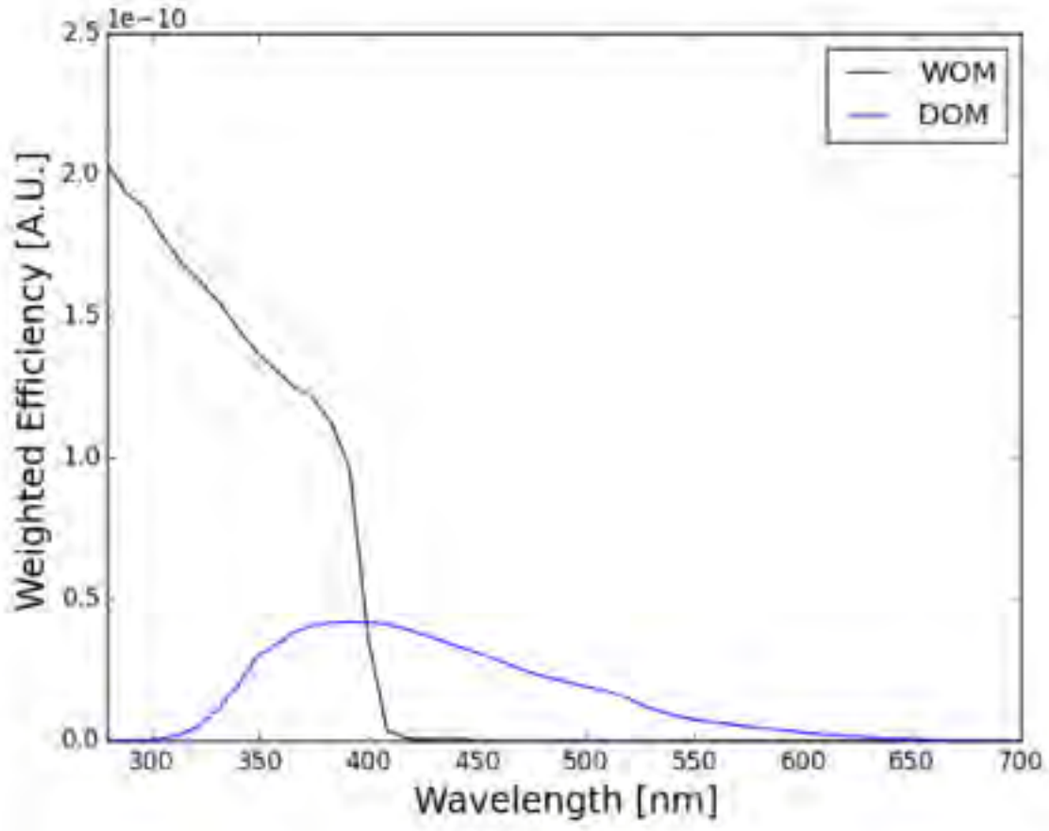
Effizienz beinhaltet Absorption, Re-emission und Lichtleitung

Vergleich mit DOM

D. Hebecker, MSc Thesis (U Bonn)



beinhaltet Empfindlichkeit des PMT

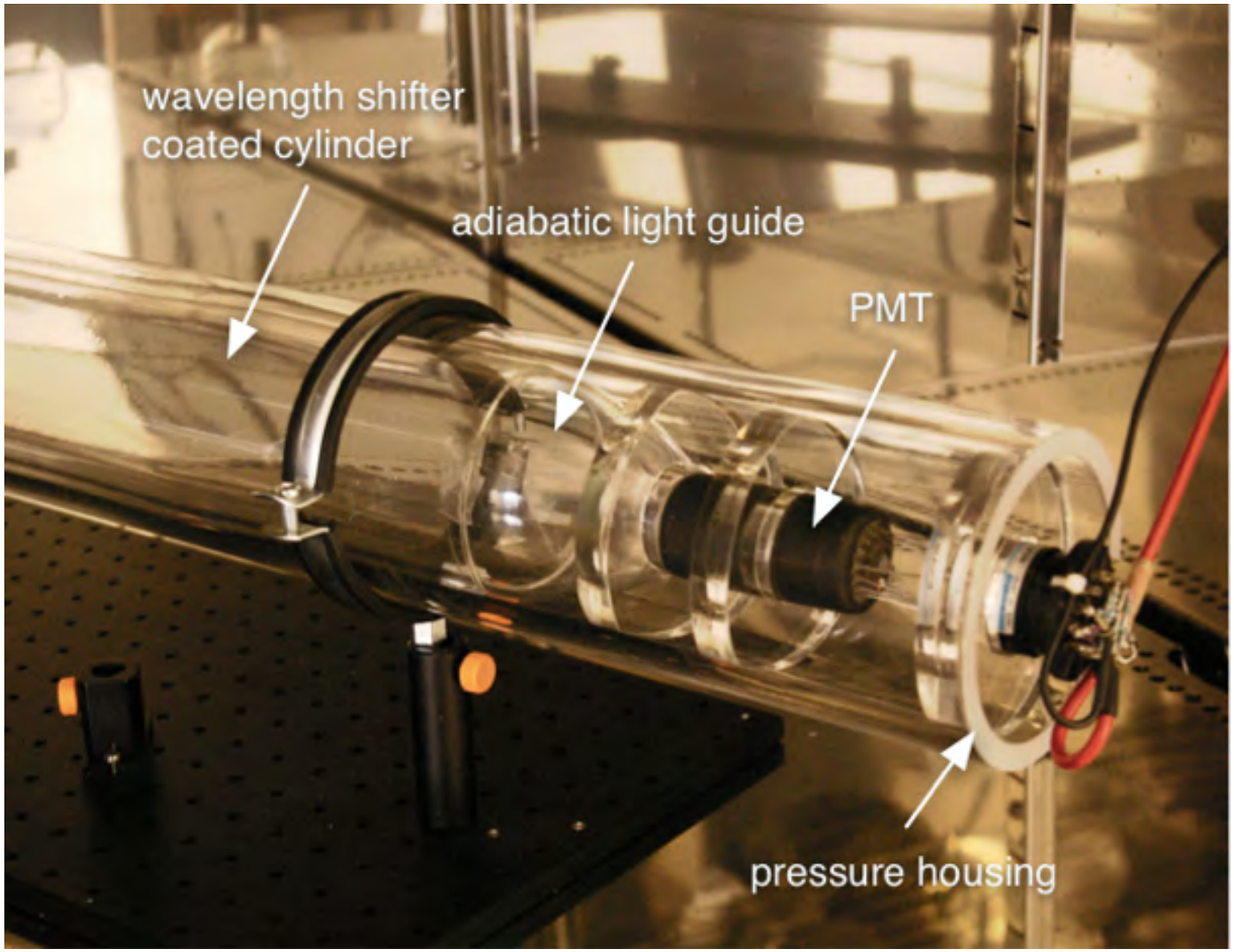


gefaltet mit Cherenkov-Spektrum

Nächste Schritte

> Untersuche Lichtvervulste

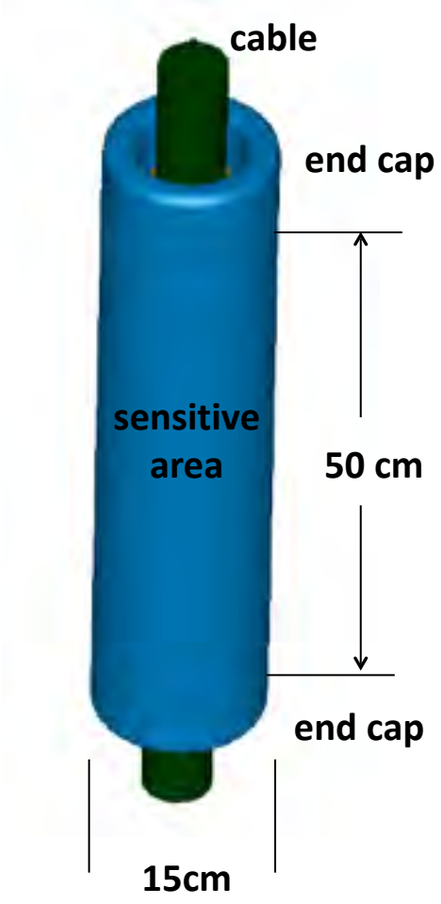
> Bau eines Prototypen zusammen mit U. Mainz



Alternatives Konzept: ZOMBI

Zeuthen Optical Module for Boreholes in Ice (R. Nahnhauer, TK)

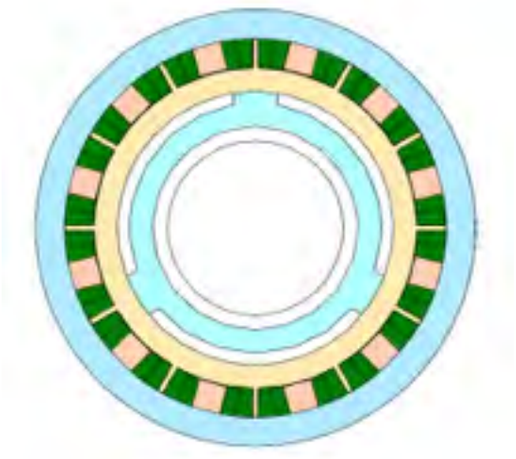
Ziel: Zylindrischer, segmentierter, wellenlängenschiebender Sensor



Hohlzylinder:

- **Durchmesser 15 cm**
- **Höhe 60 cm**
- **zwei Endkappen, je 5cm**
- **lichtempfindliche Fläche, Höhe 50cm**
- **lichtempfindliche Fläche 2356 cm²**
- **Hauptkabel kann mittig durchgeführt werden**

kein großer PMT



kein Druckgehäuse

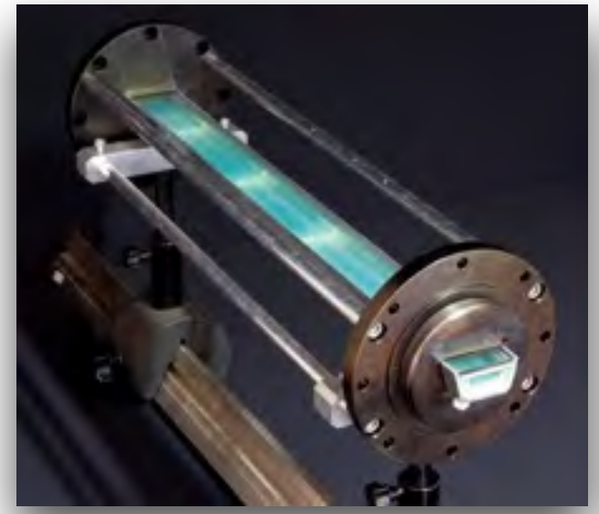
- **äußerer Zylinder UV-transparent**
- **innerer Zylinder: Stahl (?)**
- **Unterteilung in (12) Kammern**
- **Kammern gefüllt mit flüssigem Wellenlängenschieber: UV nach blau / grün**
- **Stirnseiten der Kammern werden mit APD, SiPM, o.ä. ausgelesen**

Warnung:
alle Abmessungen vorläufig

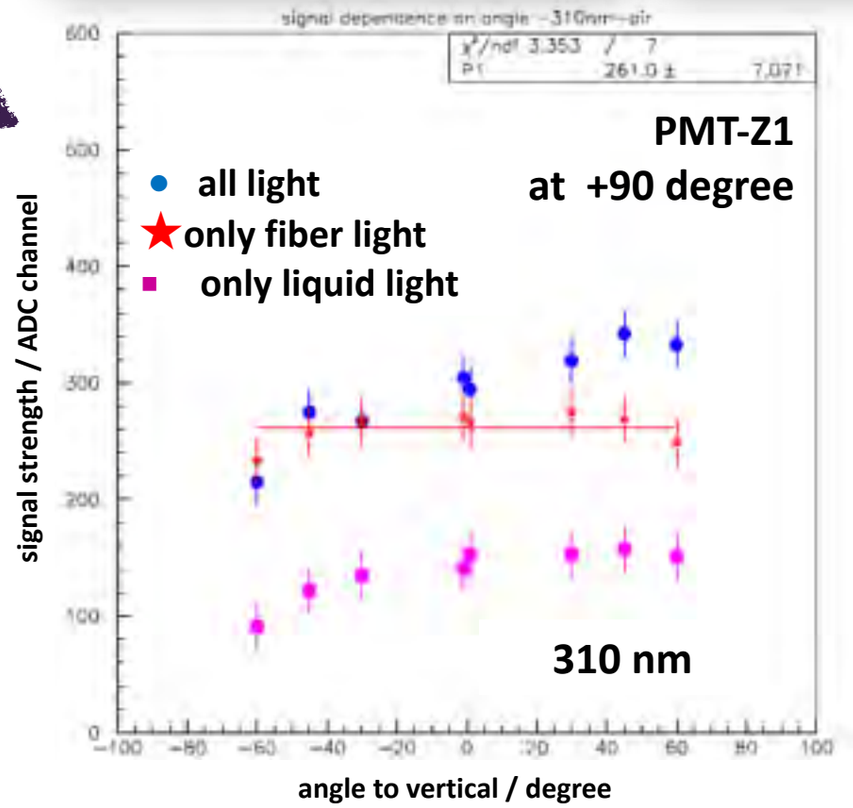
ZOMBI

Status:

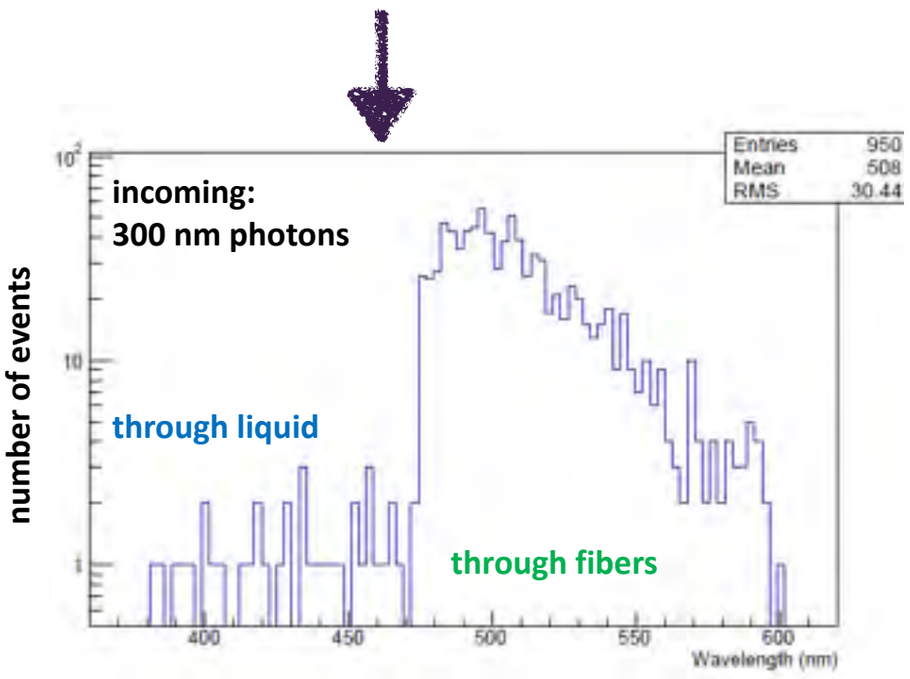
> Vier verschiedene Test-Zellen gefertigt



> Charakterisierung in Arbeit



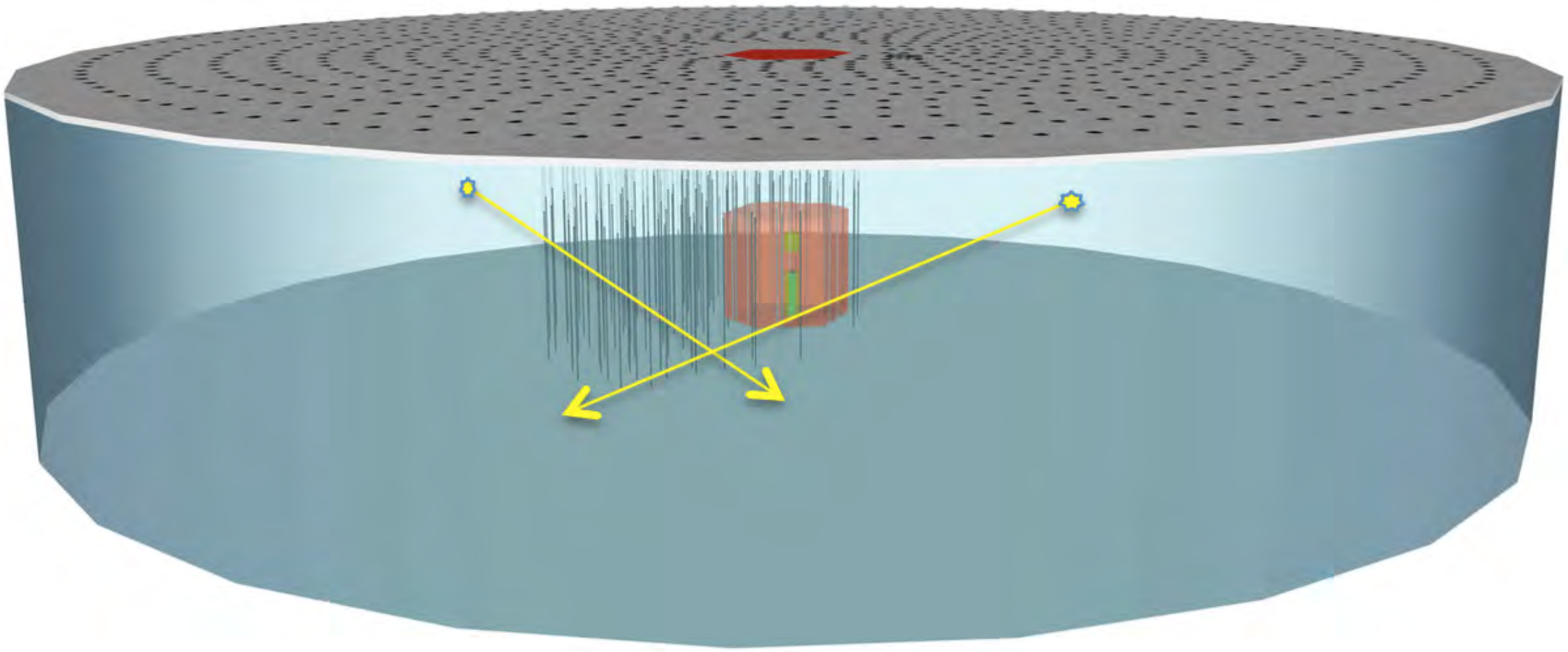
> Geant4 Simulationsmodell entwickelt



R&D Aktivitäten bei DESY

Oberflächendetektoren

Was ist die beste Technologie hierfür?



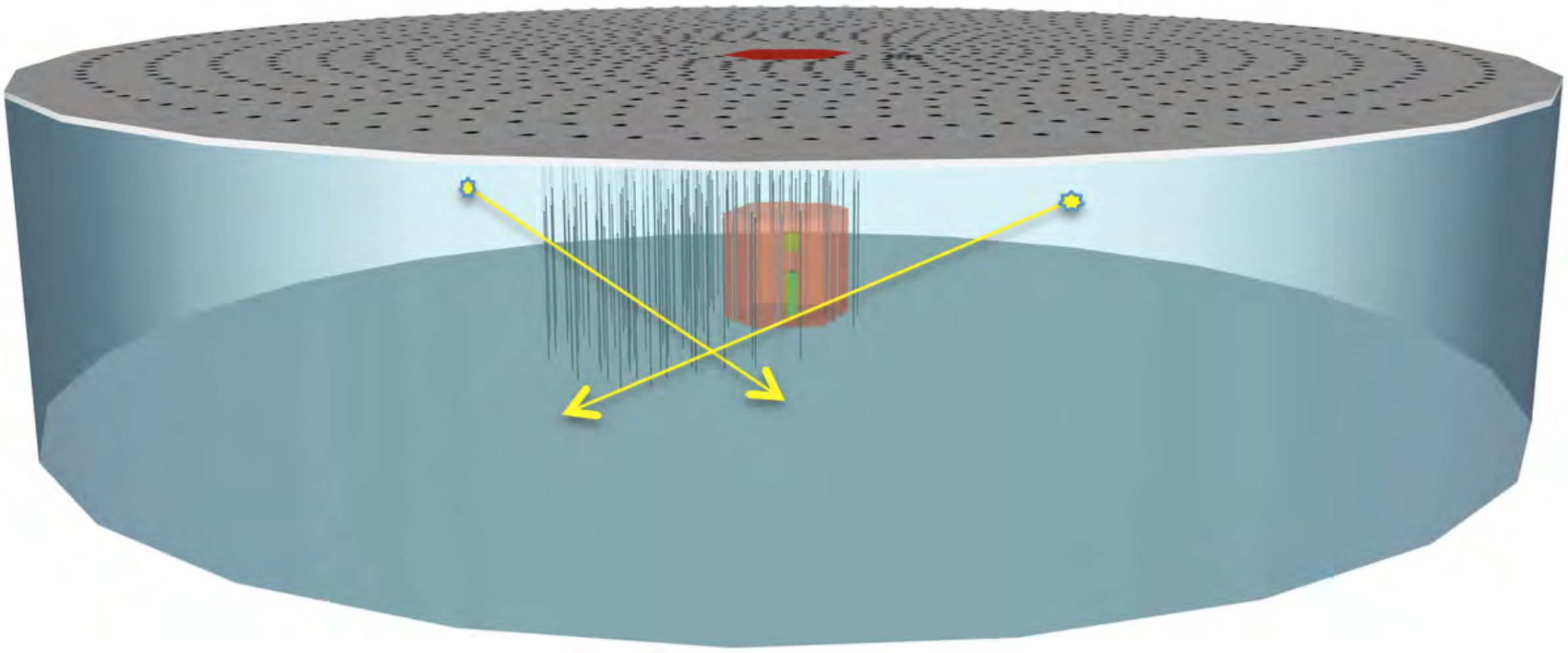
> Welche Arten von Sensoren?

> Stromerzeugung und -verteilung?

> Kommunikation?

> Zeitsynchronisation?

Was ist die beste Technologie hierfür?



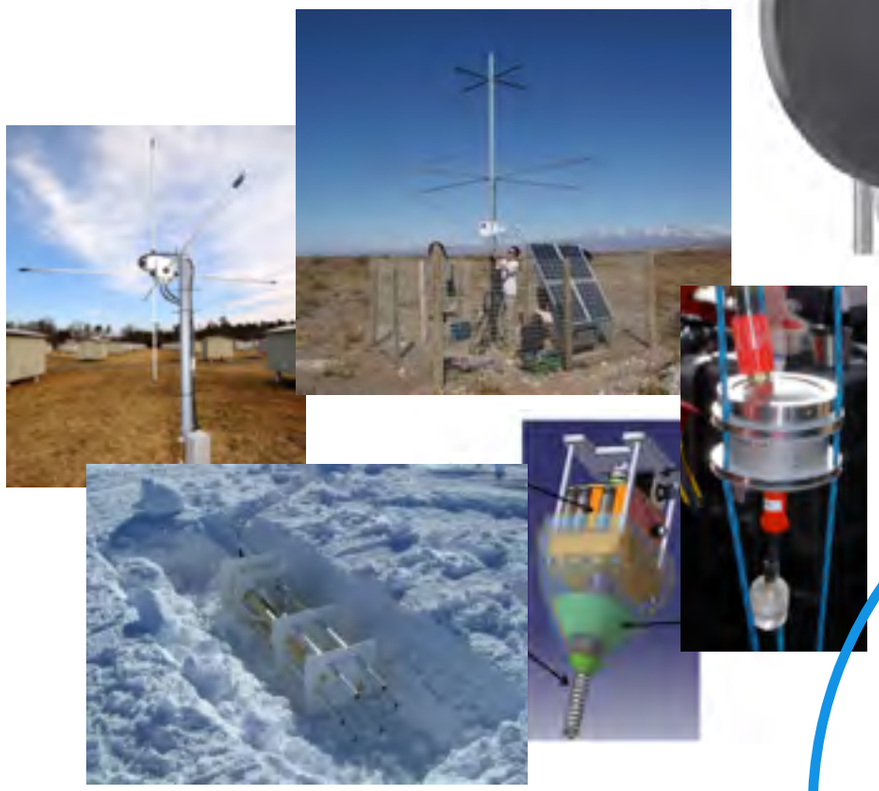
> Eine Antwort: lange Kabel!

> Funktioniert.

- ~400 km Kabel ≃ 6 M$ (= 2/3 der geschätzten Gesamtkosten)

> Andere Ansätze?

Sensoren

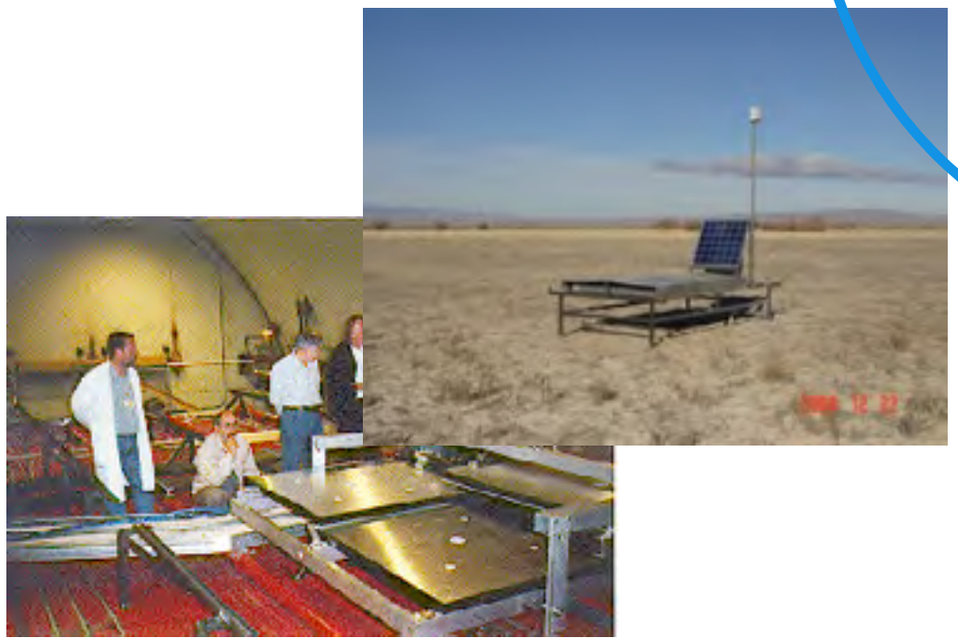


Kommunikation

TAXI

Transportable Array for eXtremely large area Instrumentation studies

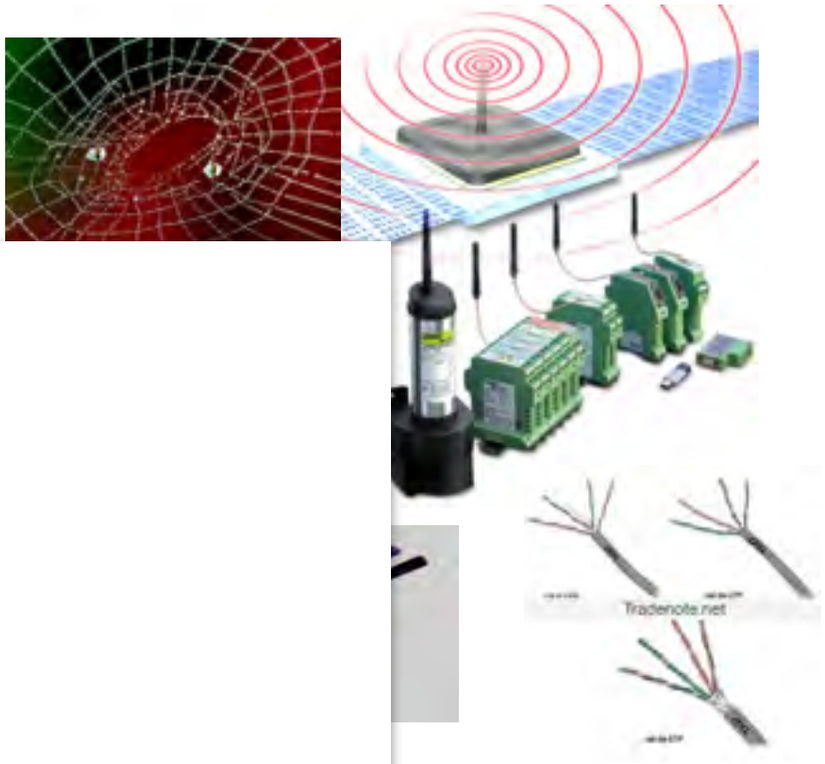
Referenzdetektoren



Energiequelle

Sensoren

Kommunikation



HELMHOLTZ ASSOCIATION

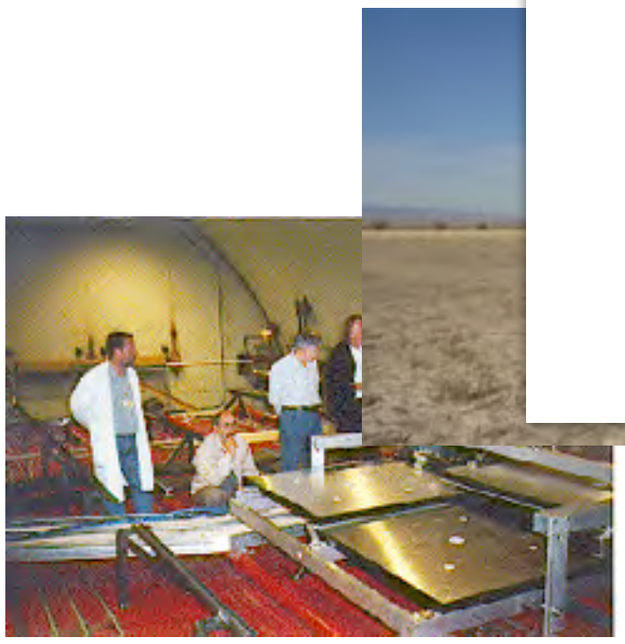
Alliance for Astroparticle Physics

KIT Karlsruhe Institute of Technology

DESY

Referenzdetekt

uelle



DESY

TAXI @ DESY

Transportable Array for eXtremely large area Instrumentation studies

> Test von Sensoren und Infrastruktur

> Wohlverstandene Referenzdetektoren

- Plastikszintillator

> Station 1 seit Juni 2013 erfolgreich Betrieben

> Stationen 2 bis 4 bis Ende 2015

TK, R. Nahnhauer, K.-H. Sulanke et al., arXiv:1410.4685 [astro-ph.IM]

Zusammenfassung und Ausblick

> Studien zu IceCube-Gen2 haben begonnen

- Sowohl Detekordesign als auch verbesserte Hardware

> Vielversprechende Konzepte für neue Photodetektoren

- größere Lichtsammelfläche
- Richtungsauflösung
- geringeres Rasuchen
- größerer Wellenlängenbereich

> Entwicklung eines Teststandes für Infrastruktur von Oberflächendetektoren

> Zeitplan

- Förderanträge Ende 2015 / Anfang 2016
- Erste Installationen am Südpol 2019/2020