

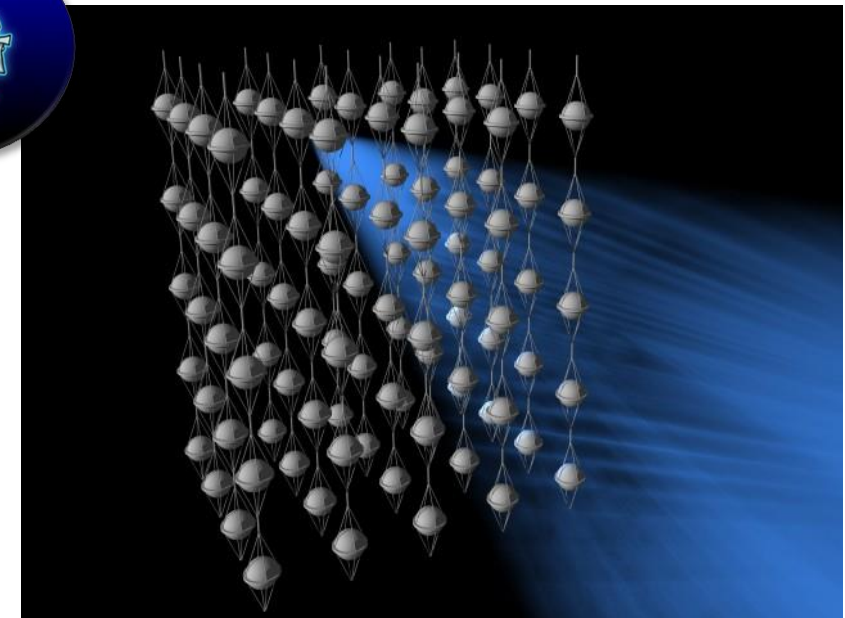
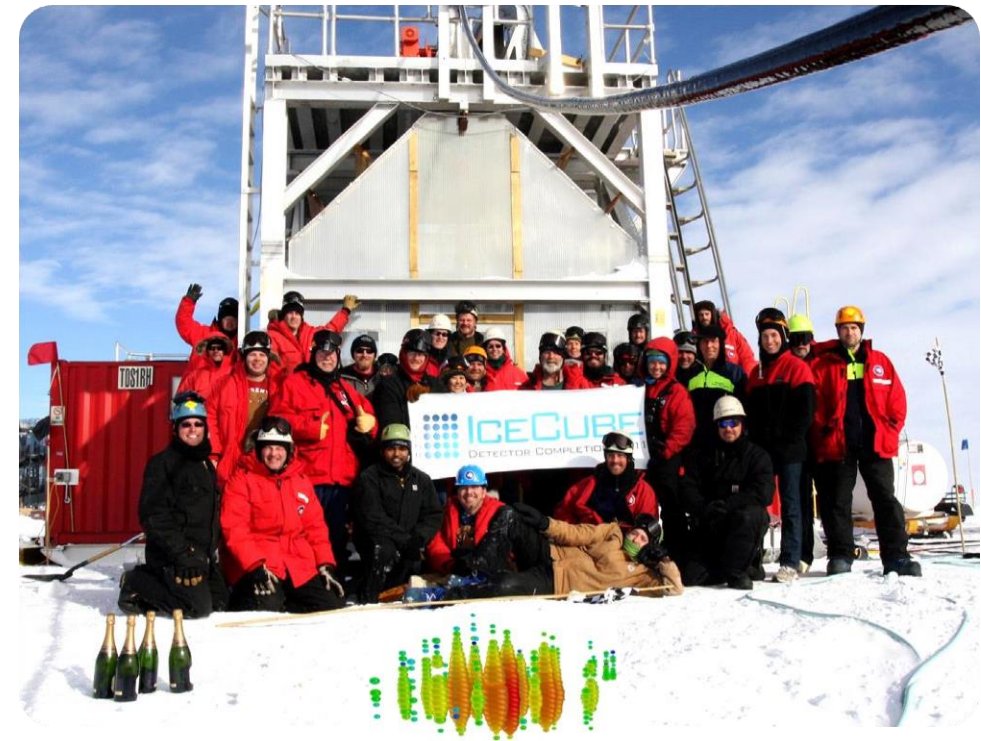
Astroteilchenphysik – I

Wintersemester 2013/14
Vorlesung # 08, 12.12.2013

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

Experimentelle Techniken

- CTA & Milagro
- **Neutrino-Teleskope:** Techniken
- Signal & Untergrund
- im Wasser & unter Eis
- Wasser-Cherenkov-Teleskope
- IceCube: Aufbau & Resultate

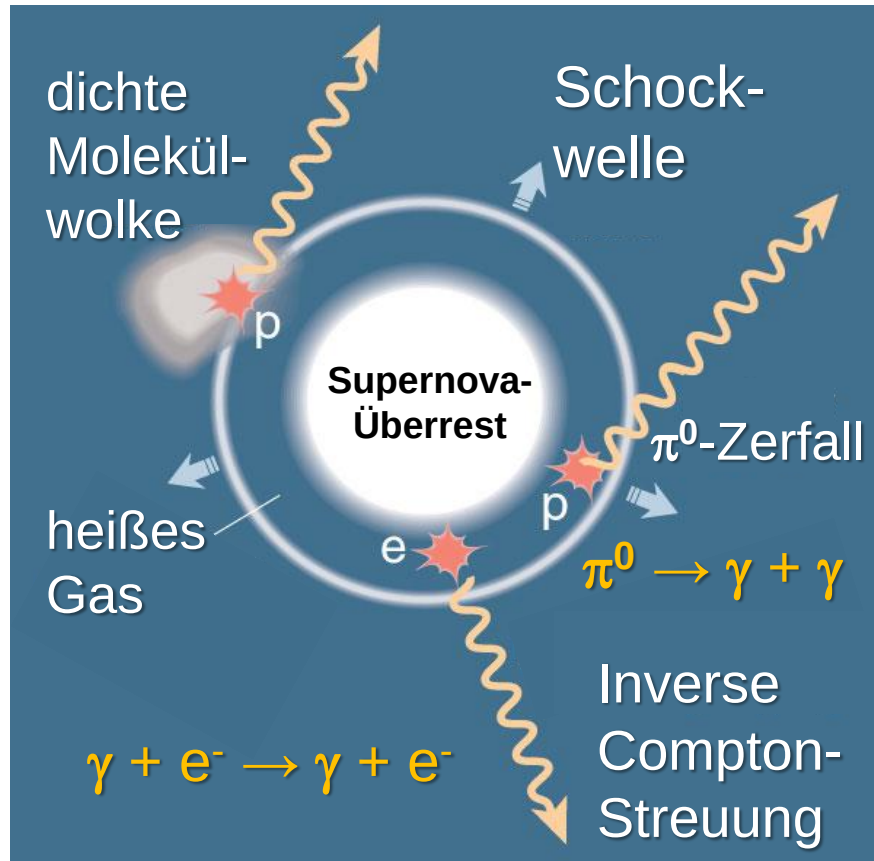


Gammaquellen & Erzeugungsmechanismen

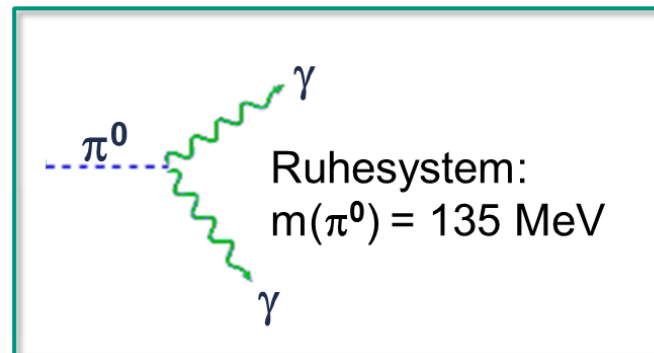


■ Erzeugung von hochenergetischen Gammas:

zwei grundlegende Erzeugungsmechanismen („LEP“ vs. „LHC“)



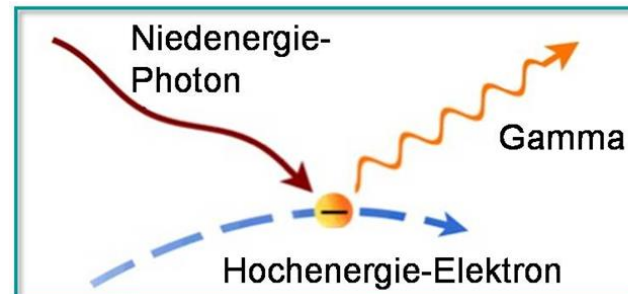
Pionzerfall



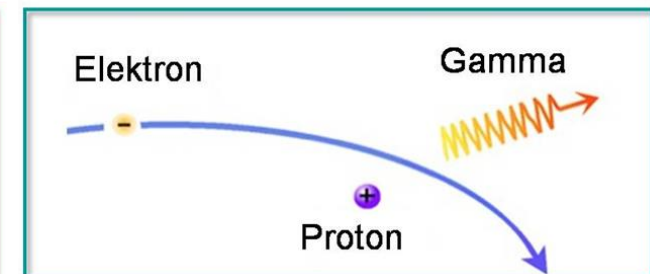
hadronisch

leptonisch

Inverser Compton Effekt



Bremsstrahlung



■ UHE-Gammaquellen:

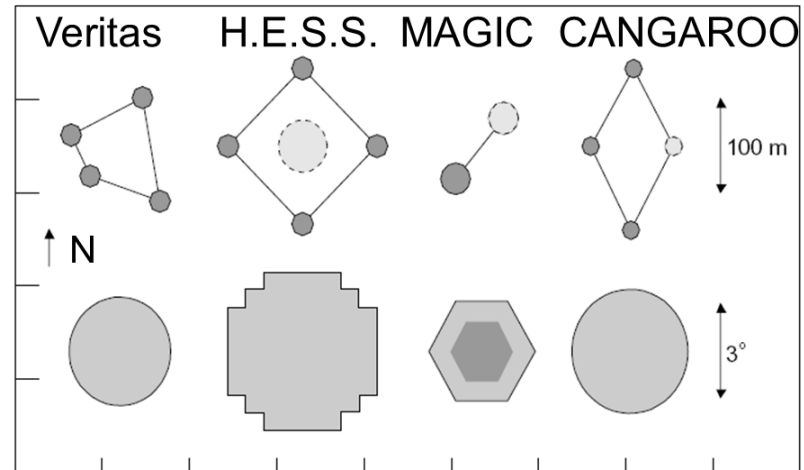
SN-Schocks, Pulsarwindnebel, diffuse Strahlung, AGNs (aktive Galaxien), ...

Gamma-Teleskope

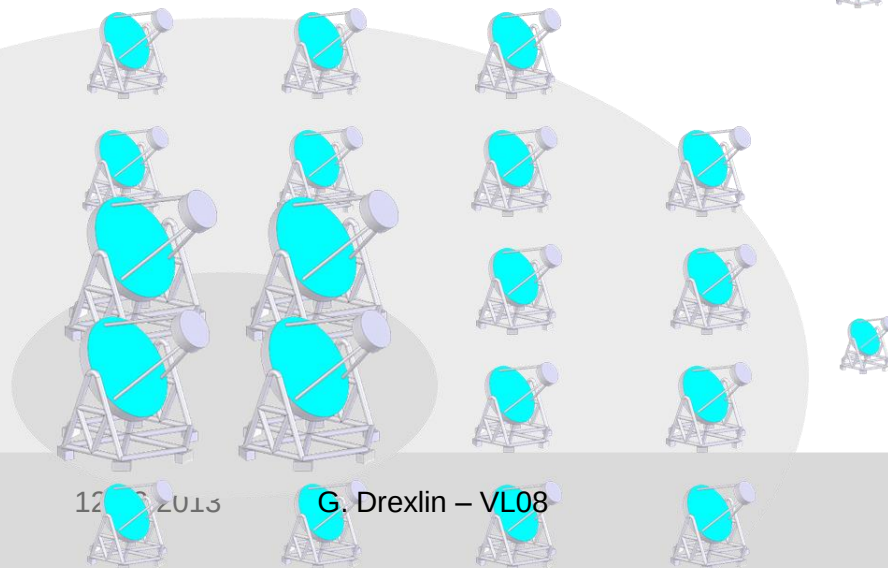


■ Aufbau großer Arrays von Cherenkov-Teleskopen:

- gute Untergrund-Diskriminierung
- Scan der galaktischen Ebene
- Individuelle Quellen:
 - ausgedehnte SN-Schocks
 - Pulsarwindnebel
 - aktive Galaxien (AGNs)



■ TeV-Gamma-Astronomie: neues Flaggschiffprojekt CTA

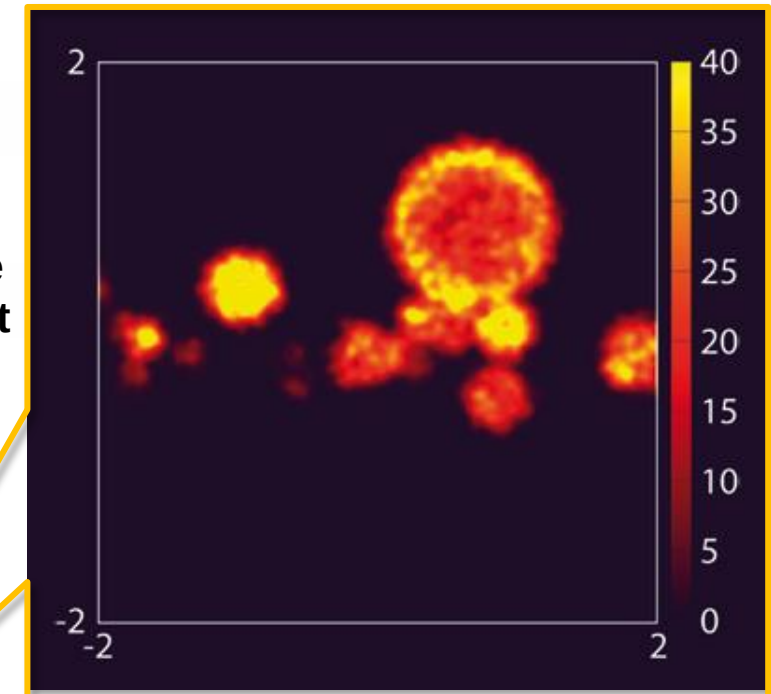
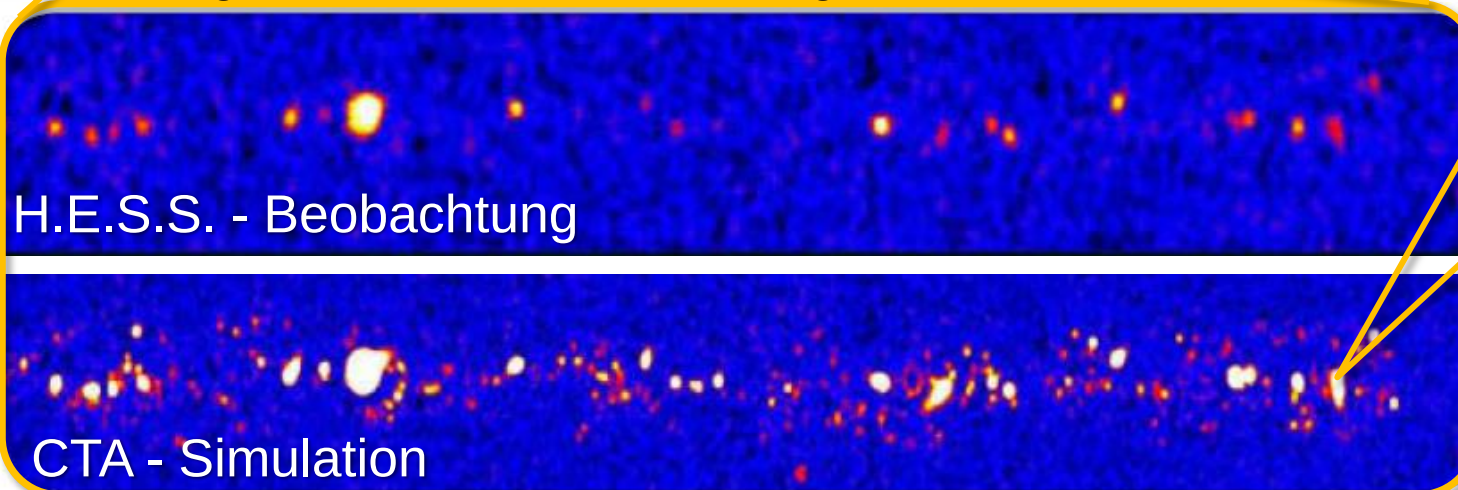
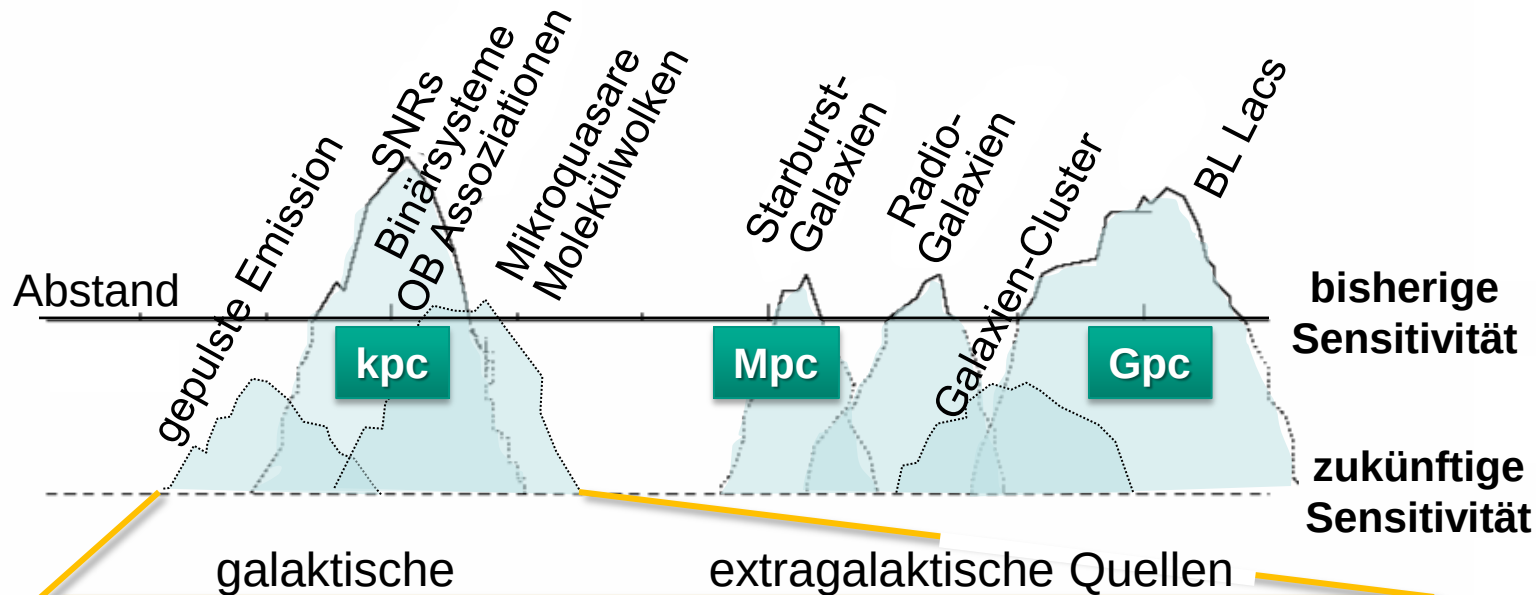


Nord-Süd Standortauswahl



CTA Observatorium – Quellen

- Abschätzung: ~ **1000 TeV Gamma-Quellen** in CTA Betrieb als 'klassisches Observatorium'



simulierte CTA Sensitivität
im Vergleich mit H.E.S.S.

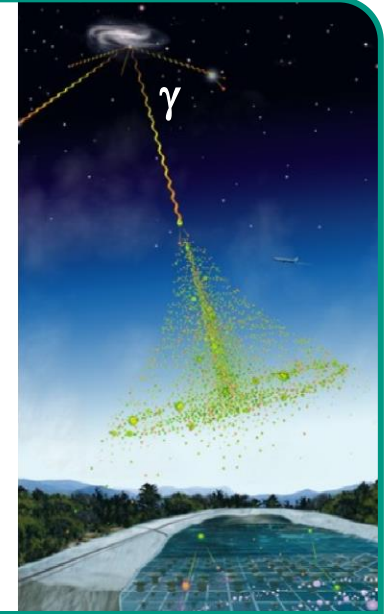
Milagro Experiment

- **Milagro**: ein Wasser-Cherenkov Detektor (2001-2008) als TeV Gamma (CR) -Observatorium mit **großem Gesichtsfeld**

H₂O Tank mit 723 PMTs

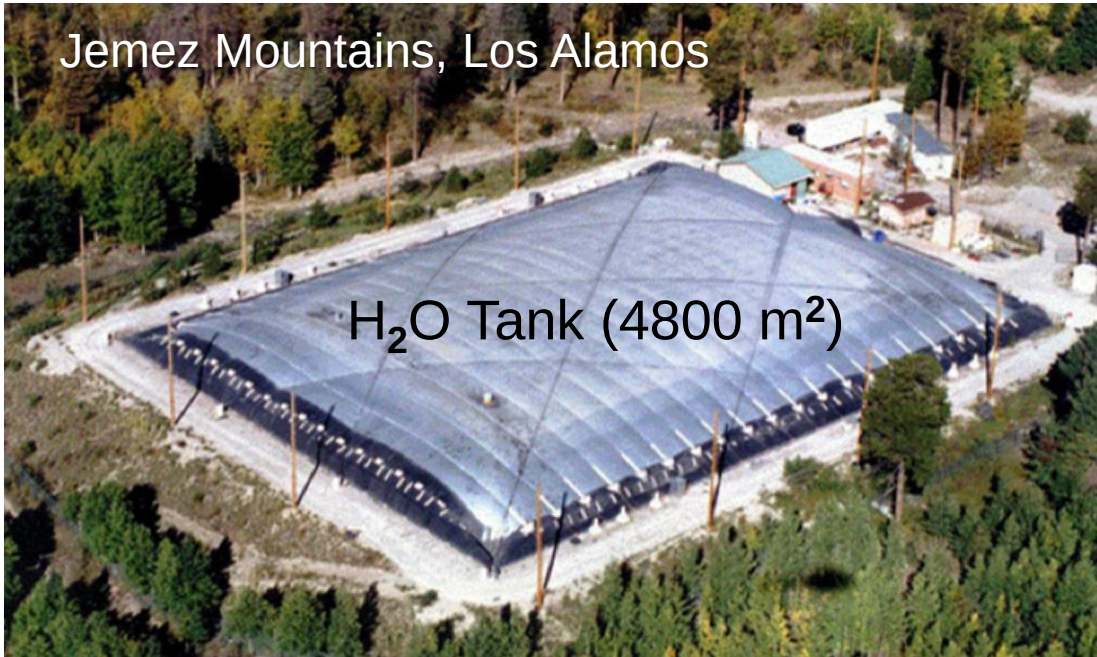


- **Anisotropie**: Nachweis von 2 hot spots nahe am Sternbild Orion - erhöhter Fluss an TeV Gammas

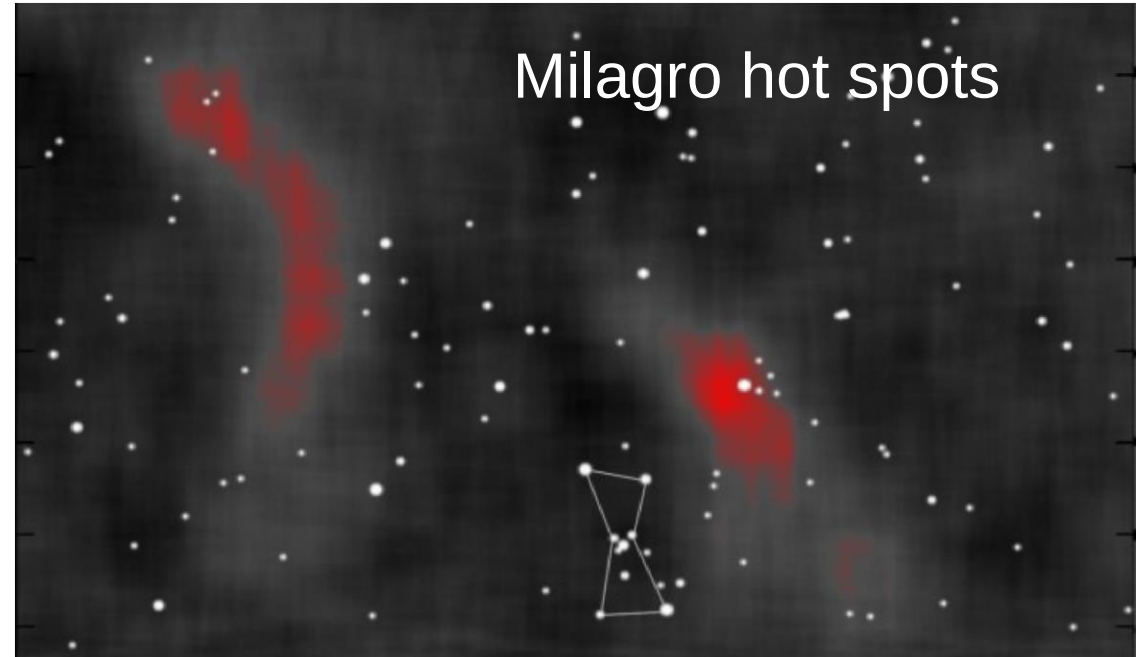


Jemez Mountains, Los Alamos

H₂O Tank (4800 m²)



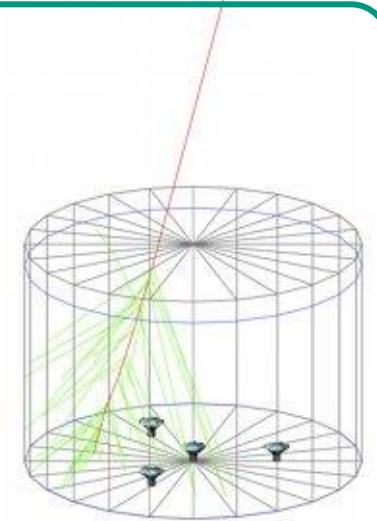
Milagro hot spots



HAWC Experiment

■ High-Altitude Water Cherenkov Observatorium (HAWC)

- Milagro-Nachfolge-Experiment in Puebla (Mexiko)
- 4100 m Höhe: niedrige Schwelle für Gammas
- 300 große Wasser-Cherenkov-Tanks auf 20.000 m²
- Ziele: Abdeckung eines großen Himmelsbereichs zur Beobachtung von AGNs, GRBs, diffuse Quellen

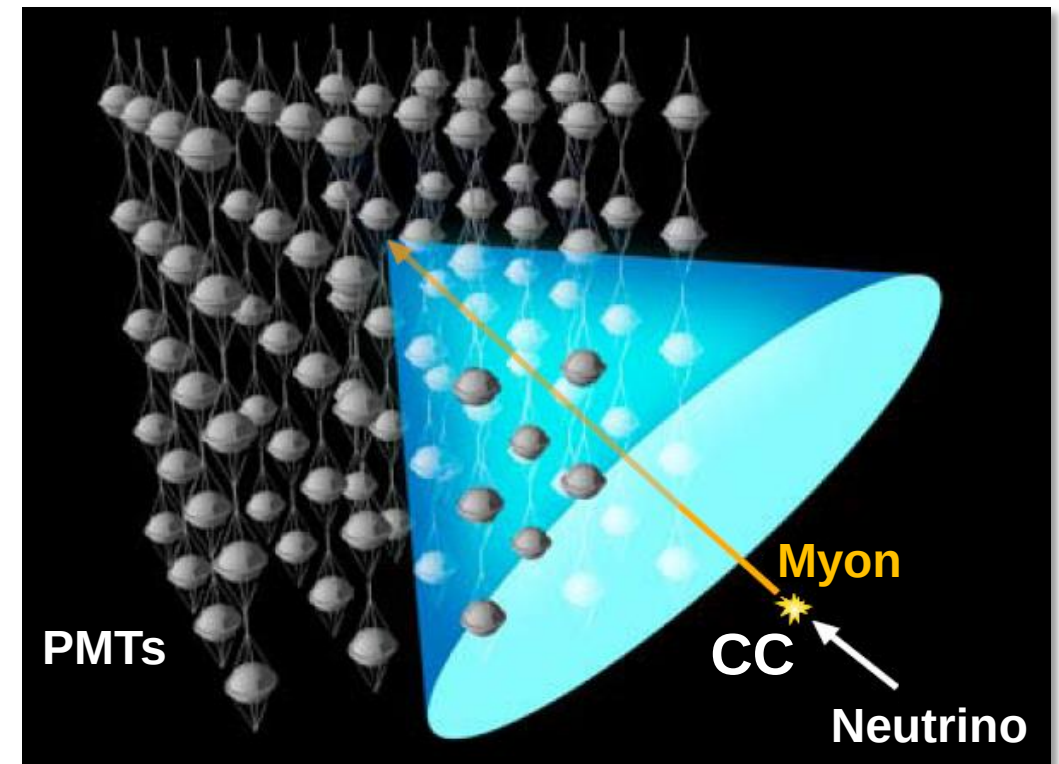


2.1.3 Neutrino-Teleskope

- **UHE Neutrinos:** Erzeugung in astrophysikalischen Beschleunigern
 - Nachweis über CC & NC Reaktionen in großvolumigen **Neutrino-teleskopen**
 - im Eis (IceCube)
 - unter Wasser (KM3NeT)



- **Nachweismechanismus:**
 - hochenergetisches ν_μ erzeugt relativistisches Myon mit großer Reichweite, das Cherenkovlicht emittiert
 - Detektion des Cherenkovlichts mit PMT-Array (3-dim) in einem **instrumentierten Volumen von $0.1 - 1 \text{ km}^3$**



UHE Neutrino-Punktquellen

■ Neutrino-Astronomie:

Quellen:

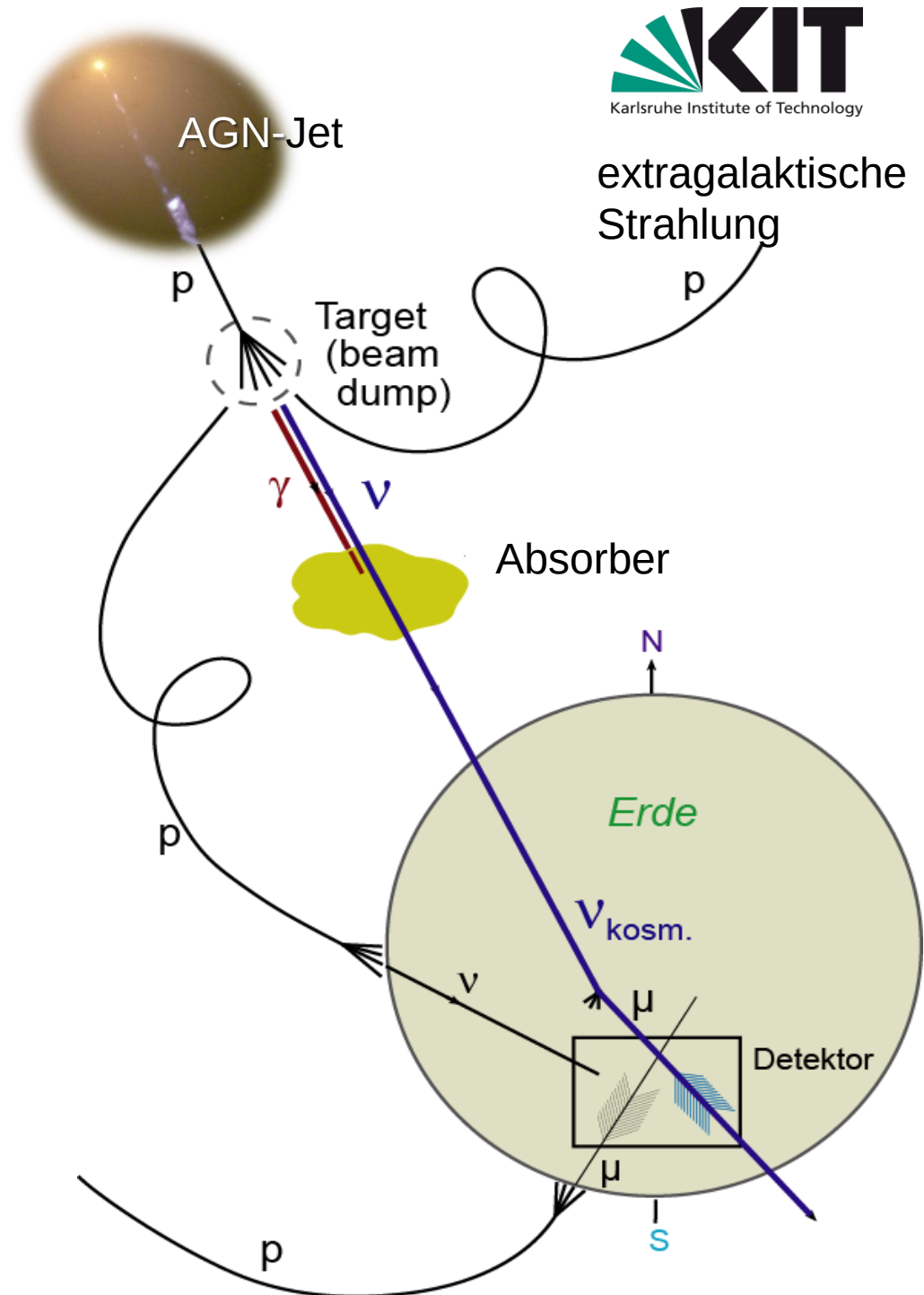
- AGN-Jets (aktive Galaxien)
- GRBs (Gammastrahlen-Burst)
- μ -Quasare (galaktisch)

Modell:

- UHE Protonenbeschleuniger
→ beam dump (Materiewolke)



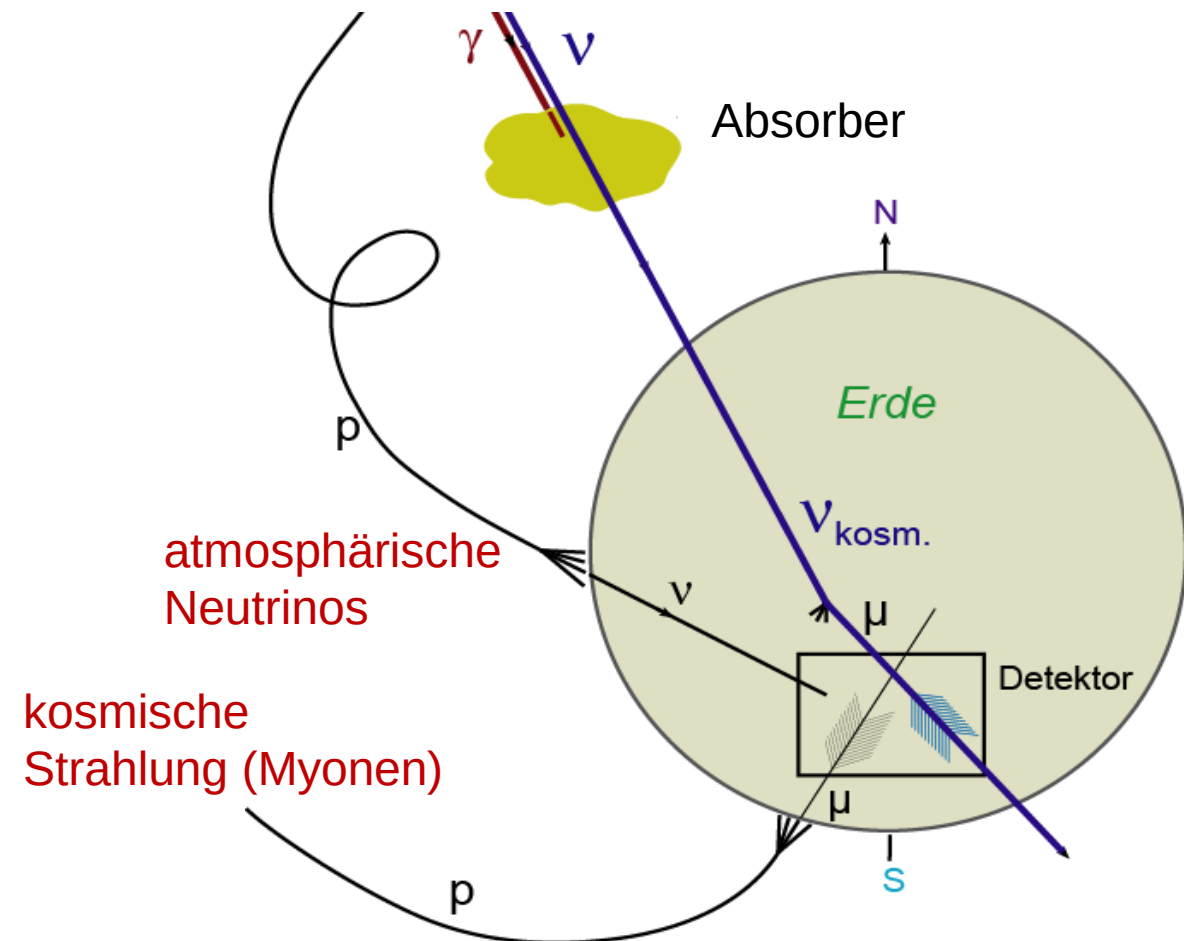
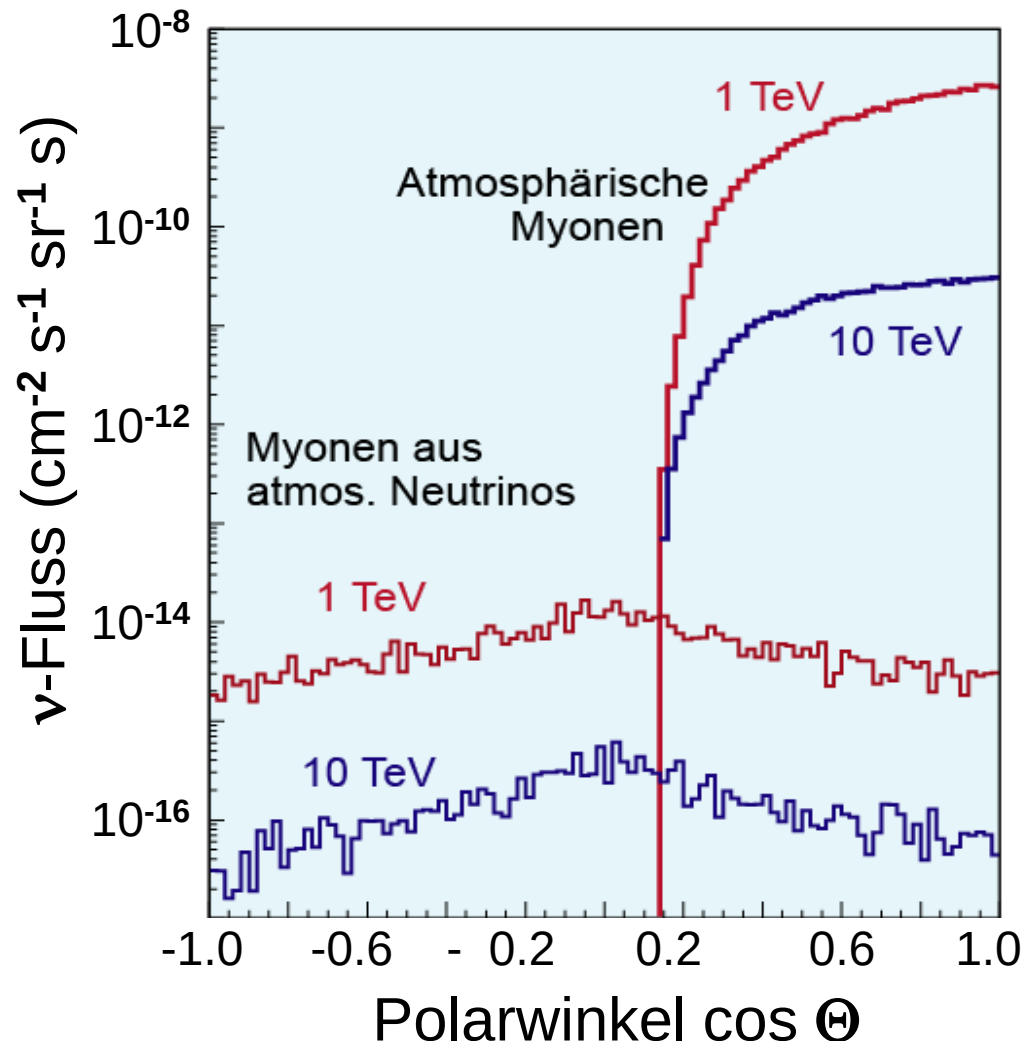
- UHE Neutrinos ν_μ , ν_e , aus Pion-Myon-Zerfallskaskade
- UHE Neutrinos werden nicht abgeschirmt (Dunkelwolken,...)
- Nachweis über Ww. in Erde



KIT
Karlsruhe Institute of Technology

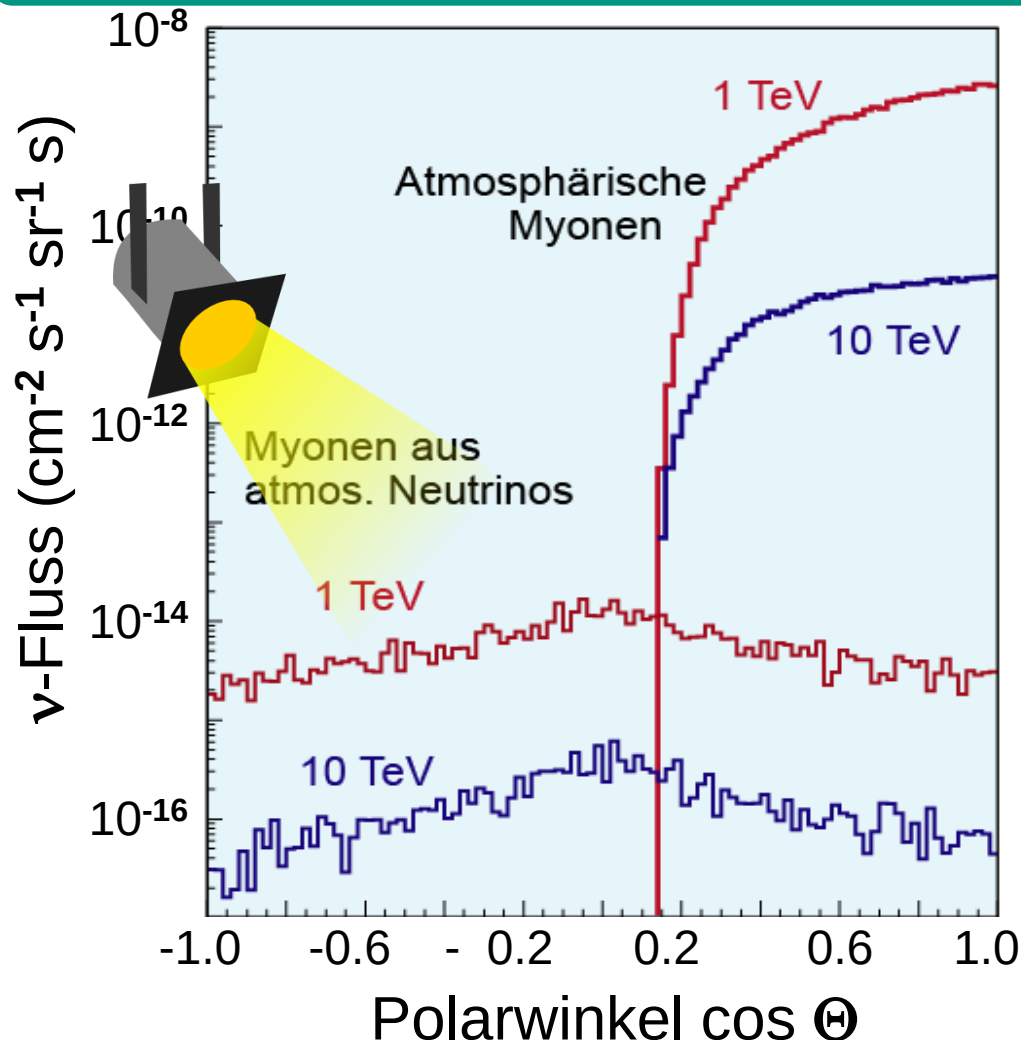
■ Hauptuntergrundquellen:

- **Myonen** aus Schauerprozessen der kosmischen Strahlung
- **atmosphärische ν_μ ν_e** aus Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung



■ Hauptuntergrundquellen:

- **Myonen** aus Schauerprozessen der kosmischen Strahlung laufen nach unten ($\cos \theta > 0$), $\sim 10^6$ häufiger als ν -induzierte Signale

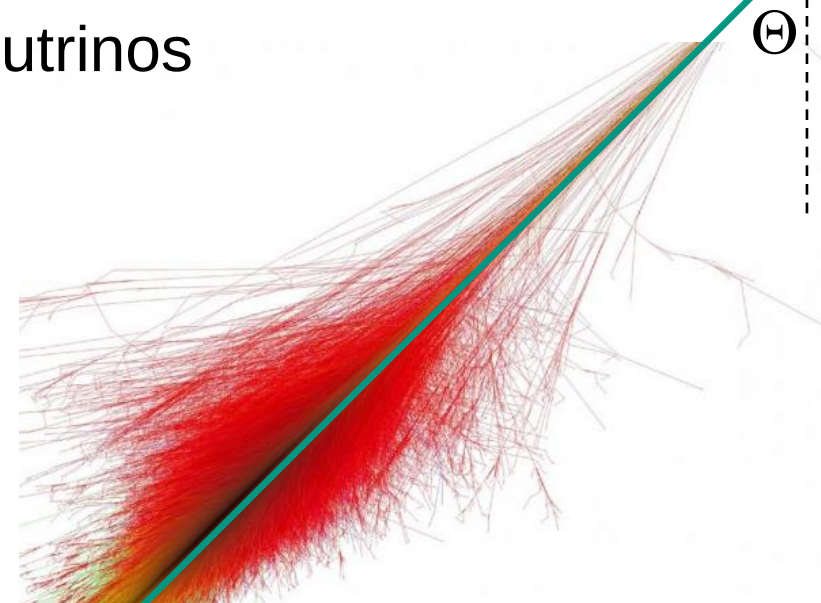


- Abtrennung der atmosphärischen **Myonen** (Untergrund) durch Polarwinkelschnitt

$$\cos \theta < 0$$

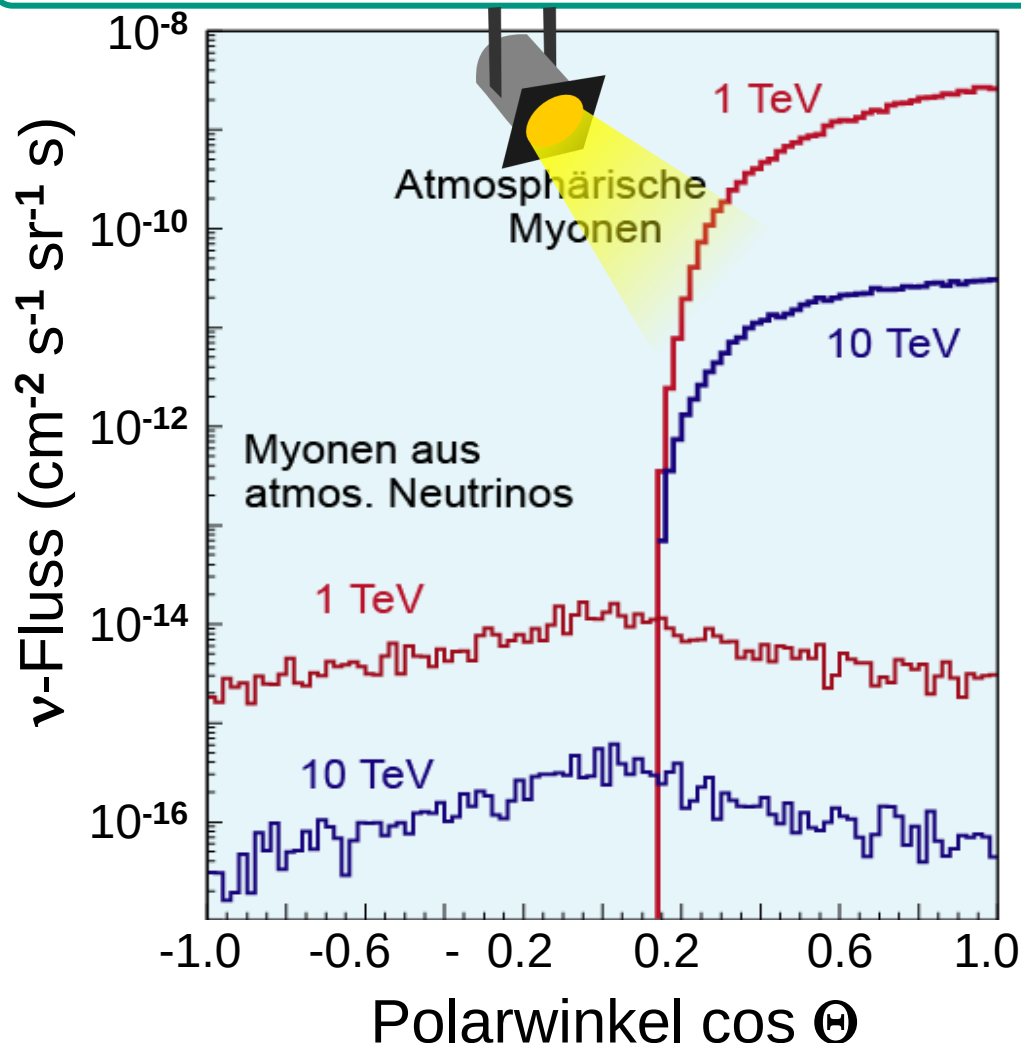
- selektiere **nach oben laufende Myonen**

- ↪ atmosphärische Neutrinos
- ↪ UHE Neutrinos



■ Hauptuntergrundquellen:

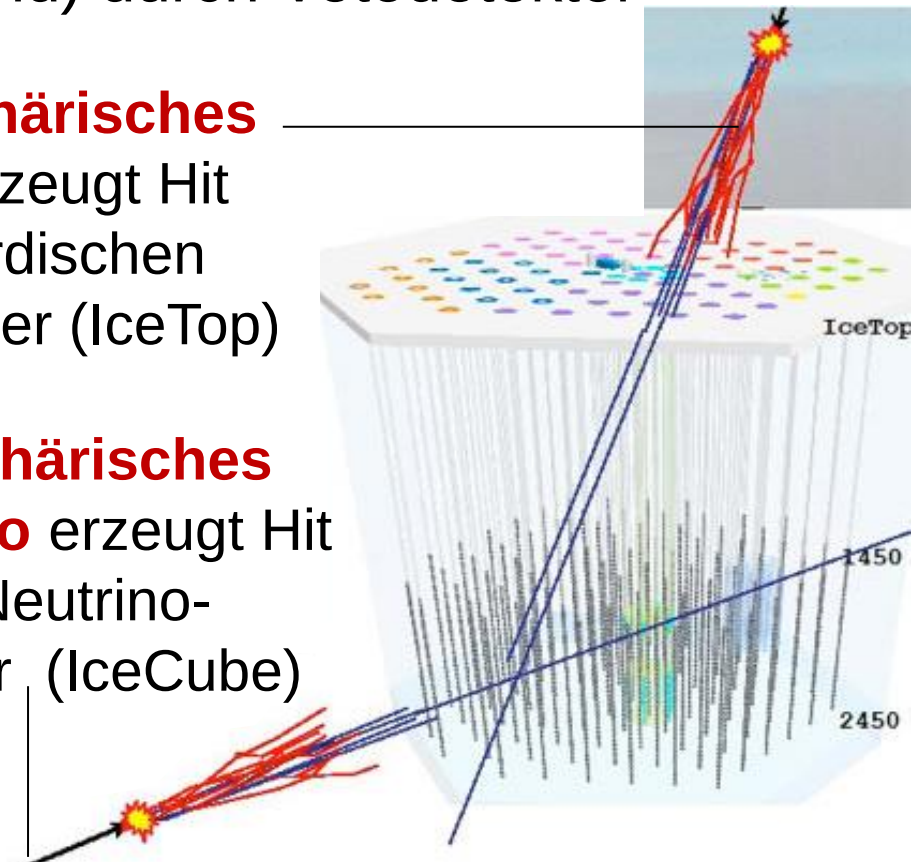
- **Myonen** aus Schauerprozessen der kosmischen Strahlung können durch einen Vetodetektor oberhalb des Experiments abgetrennt werden



- Abtrennung der atmosphärischen **Myonen** (Untergrund) durch Vetodetektor

atmosphärisches Myon erzeugt Hit im oberirdischen Veto­zähler (IceTop)

atmosphärisches Neutrino erzeugt Hit nur im Neutrino-Detektor (IceCube)



■ Neutrinos und Erd-Opazität:

- tiefinelastische Streuung $\sigma_\nu \sim E_\nu$ ($E_\nu = 100 \text{ TeV} \Leftrightarrow \sigma_\nu = 10^{-7} \text{ mbarn}$)
- ab 100 TeV beginnt die Erde opaque für ν 's zu werden

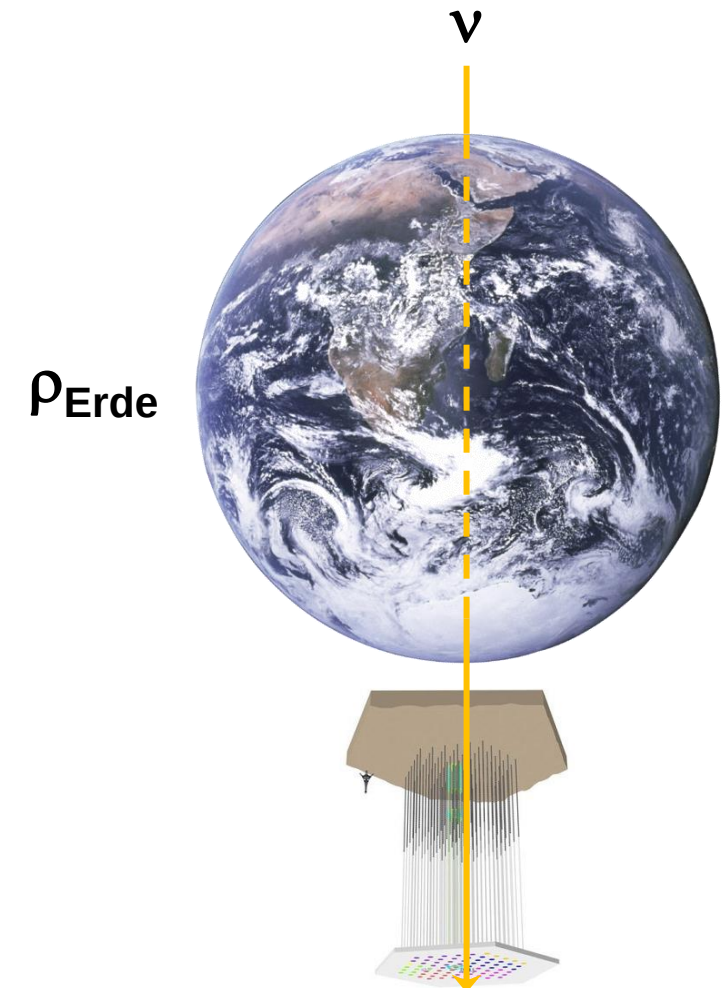


■ Neutrinowirkungsquerschnitte σ_ν & freie Weglänge λ_ν :

$$(1 / \lambda_\nu) = \rho_{\text{Erde}} \cdot N_A \cdot \sigma_\nu(E_\nu)$$

■ ν -Überlebenswahrscheinlichkeit P beim Durchgang (Strecke d) durch Erde

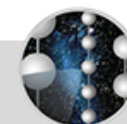
$$P(E_\nu) = e^{-(d/\lambda_\nu)}$$



THE
STUDENT

SURVIVAL GUIDE

Things to do:
buy a pen
go to lecture
take notes
remember (work out where lecture is)



UHE Neutrino-Energiespektrum

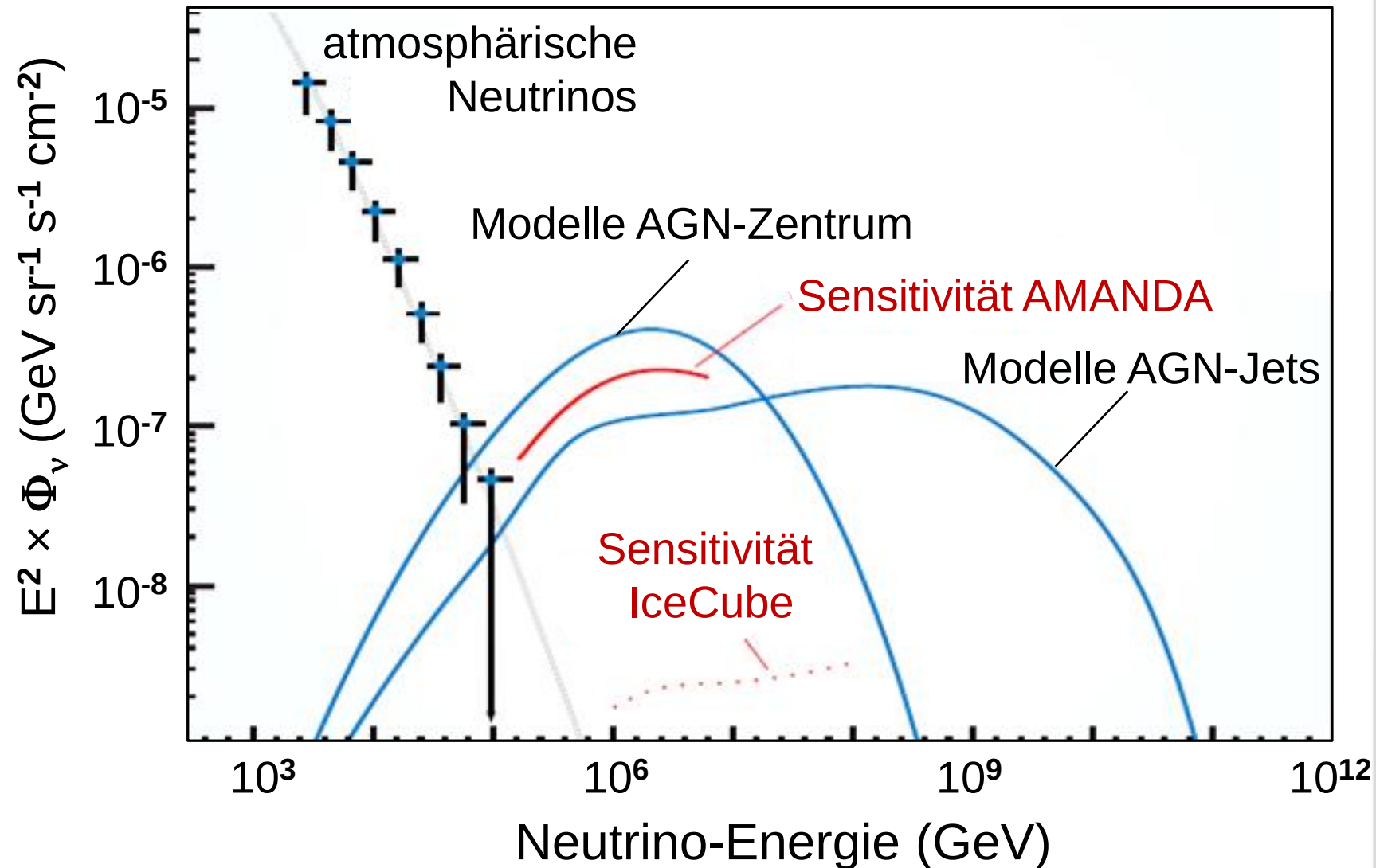
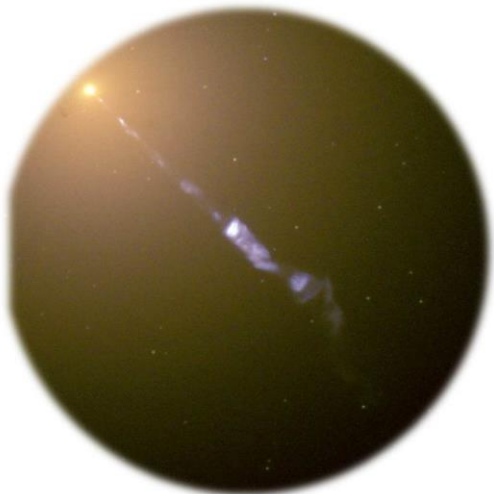
■ Hauptuntergrundquellen:

- **atmosphärische** ν_μ ν_e aus Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung

atmosphärische ν 's



AGN ν 's

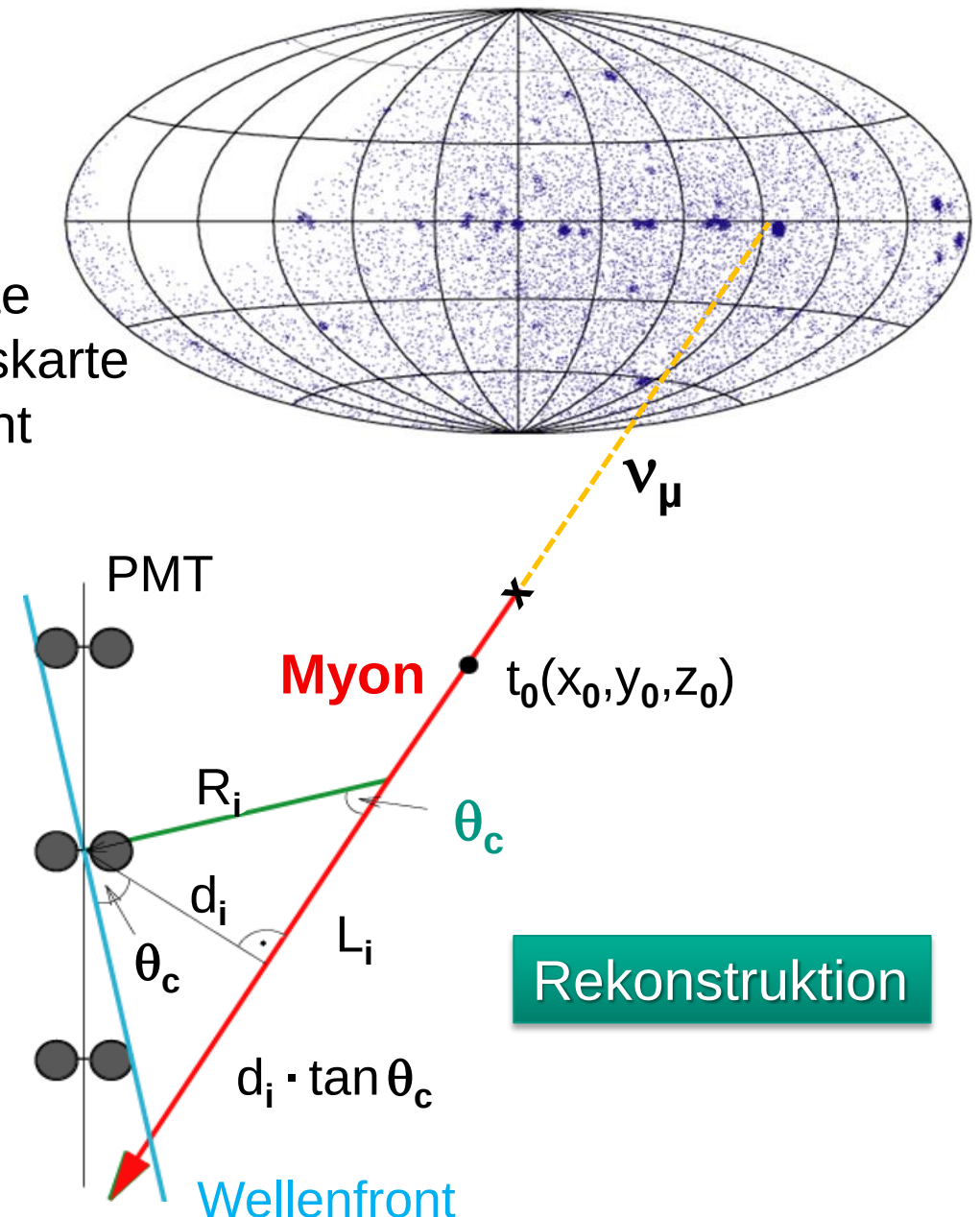


Nachweis von UHE Neutrinos

- CC Reaktionen von UHE ν_μ 's erzeugen hochenergetische GeV/TeV/PeV – Myonen
- $E(\mu) \sim 0.5 - 0.7 E(\nu_\mu)$
- Myonen haben große Reichweite in Eis/Wasser
1 PeV: $R_\mu = 1.7$ km
10 PeV: $R_\mu = 7$ km
- Emission von Cherenkov-Licht mit $\theta_c \sim 43^\circ$
- Spur-Rekonstruktion aus PMTs

$$\theta_{\nu-\mu} \sim \frac{0.7^\circ}{(E_\nu[\text{TeV}])^{0.6}}$$

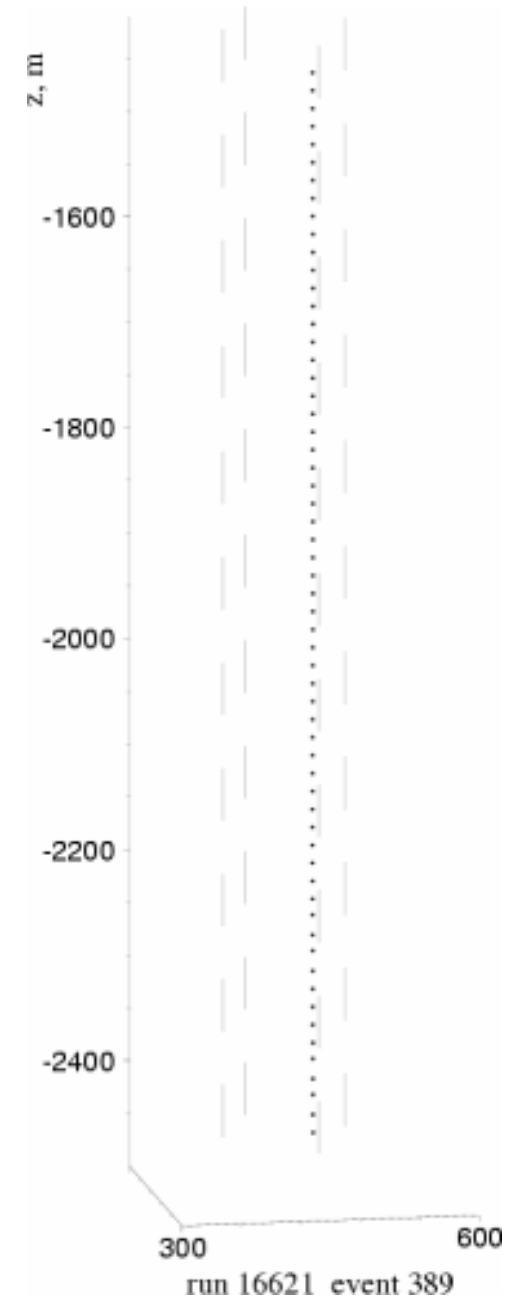
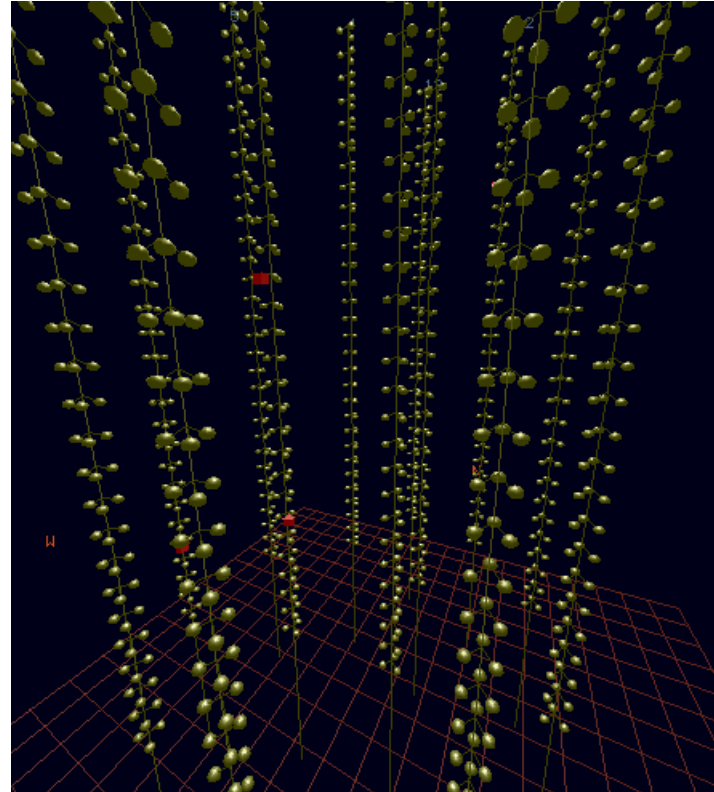
simulierte
Himmelskarte
im ν -Licht



Nachweis von UHE Neutrinos

- CC Reaktionen von UHE ν_μ 's erzeugen hochenergetische GeV/TeV/PeV – Myonen
- $E(\mu) \sim 0.5 - 0.7 E(\nu_\mu)$
- Myonen haben große Reichweite in Eis/Wasser
1 PeV: $R_\mu = 1.7$ km
10 PeV: $R_\mu = 7$ km
- Emission von Cherenkov-Licht mit $\theta_c \sim 43^\circ$
- Spur-Rekonstruktion aus PMTs

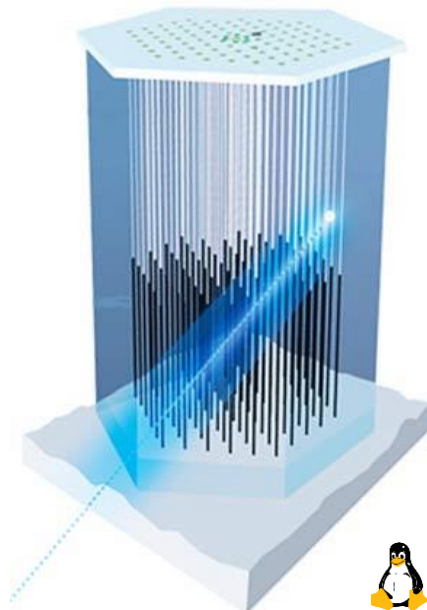
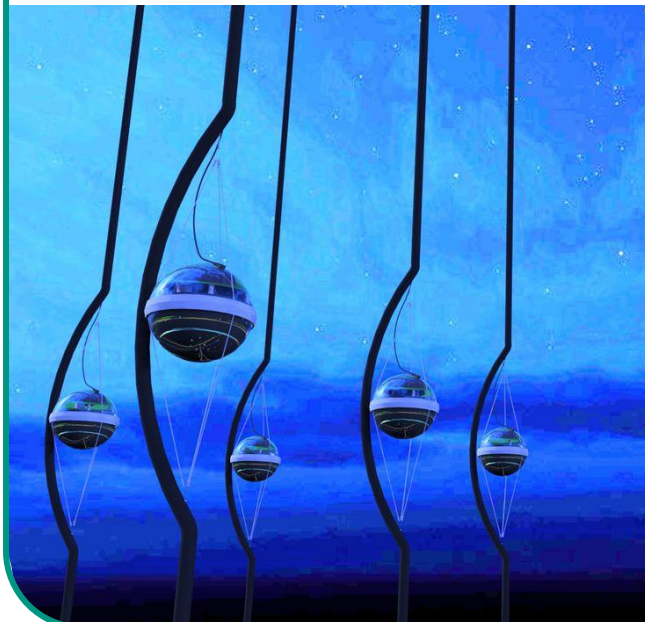
$$\theta_{\nu-\mu} \sim \frac{0.7^\circ}{(E_\nu [TeV])^{0.6}}$$



■ Neutrino-Teleskope im Eis & unter Wasser

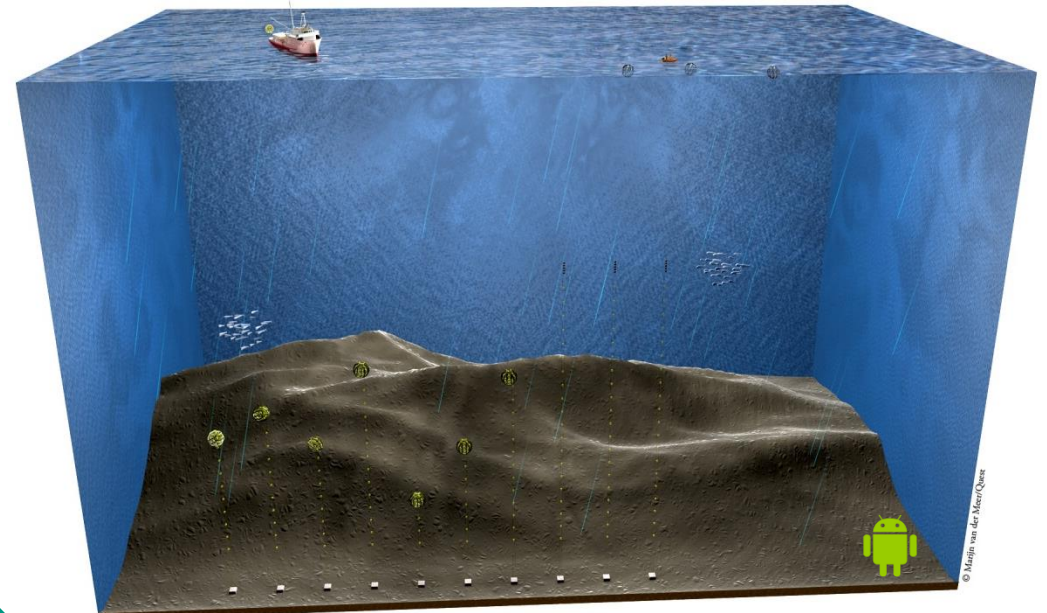
Teleskop im antarktischen Eis

- gute optische Transparenz ☺
- Streuung an Staubteilchen ☹
- PMTs niedrige Rauschrate ☺
- aufwändige Infrastruktur ☹
- Oberflächenveto ☺



Tiefsee-Teleskop im Mittelmeer

- optische Transparenz ☹
- Bewegung der PMT-Strings ☹
- PMTs hohe Untergrundrate ☹
- aufwändige Infrastruktur ☹
- Ozeanographische Studien ☺



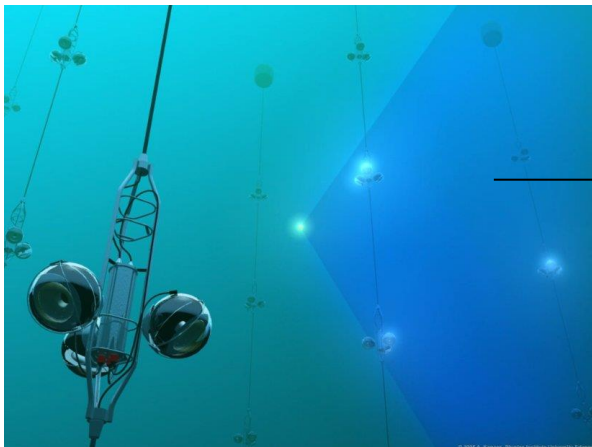
© Martin van der Meer/Quest

Beispiel: Lichttransport in Eis & Wasser

■ Neutrino-Teleskope im Eis & unter Wasser:

Nachweise der Cherenkov-Strahlung – Eis ist das bessere Medium

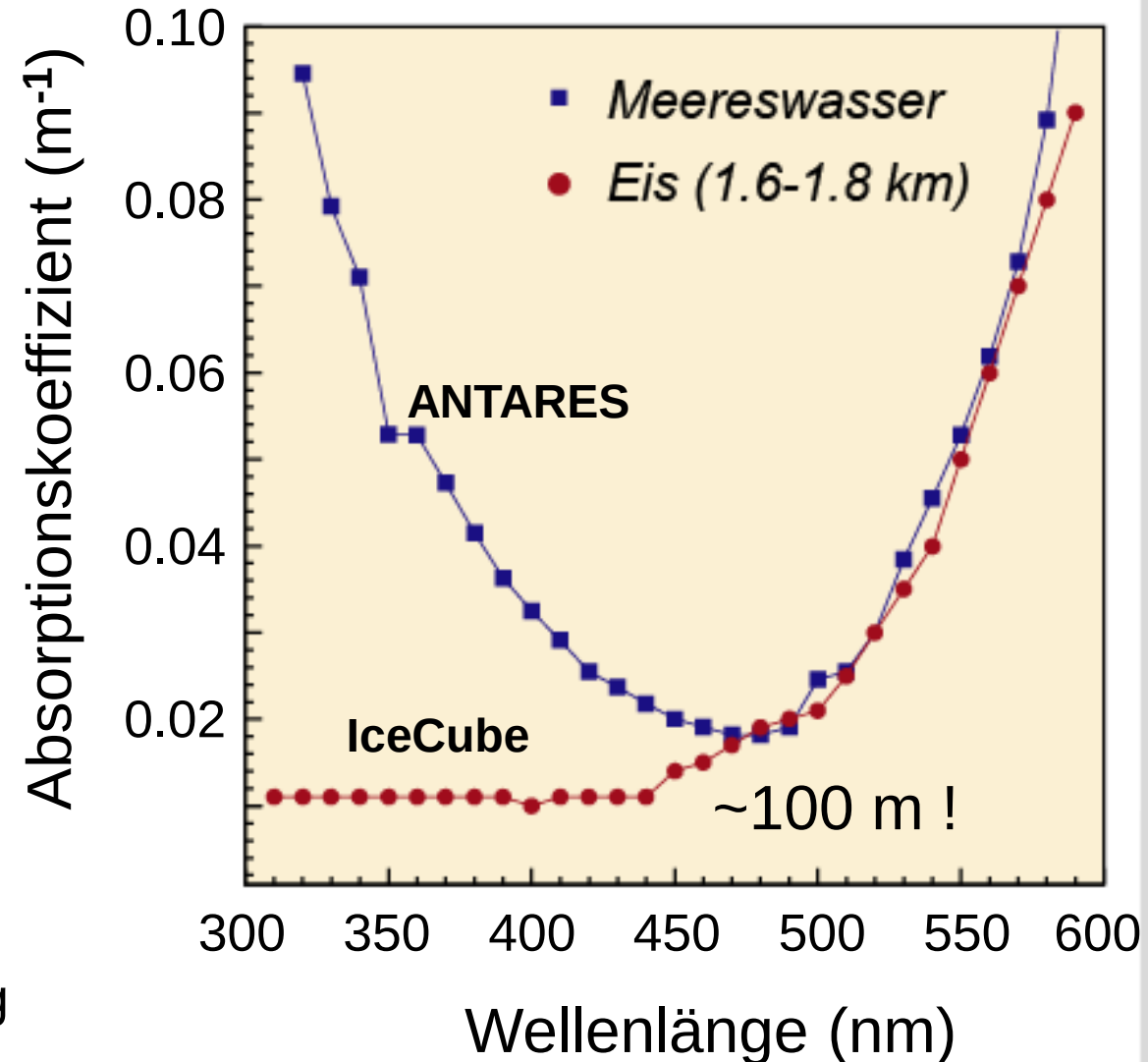
Parameter	Eis	Wasser
opt. Transparenz	Staub	variabel
Biolumineszenz	keine	ja
PMT Rauschrate	niedrig	kHz
Winkelauflösung	0.5°-1°	<0.3°



Intensität $I(\nu)$

$\sim$ Frequenz ν

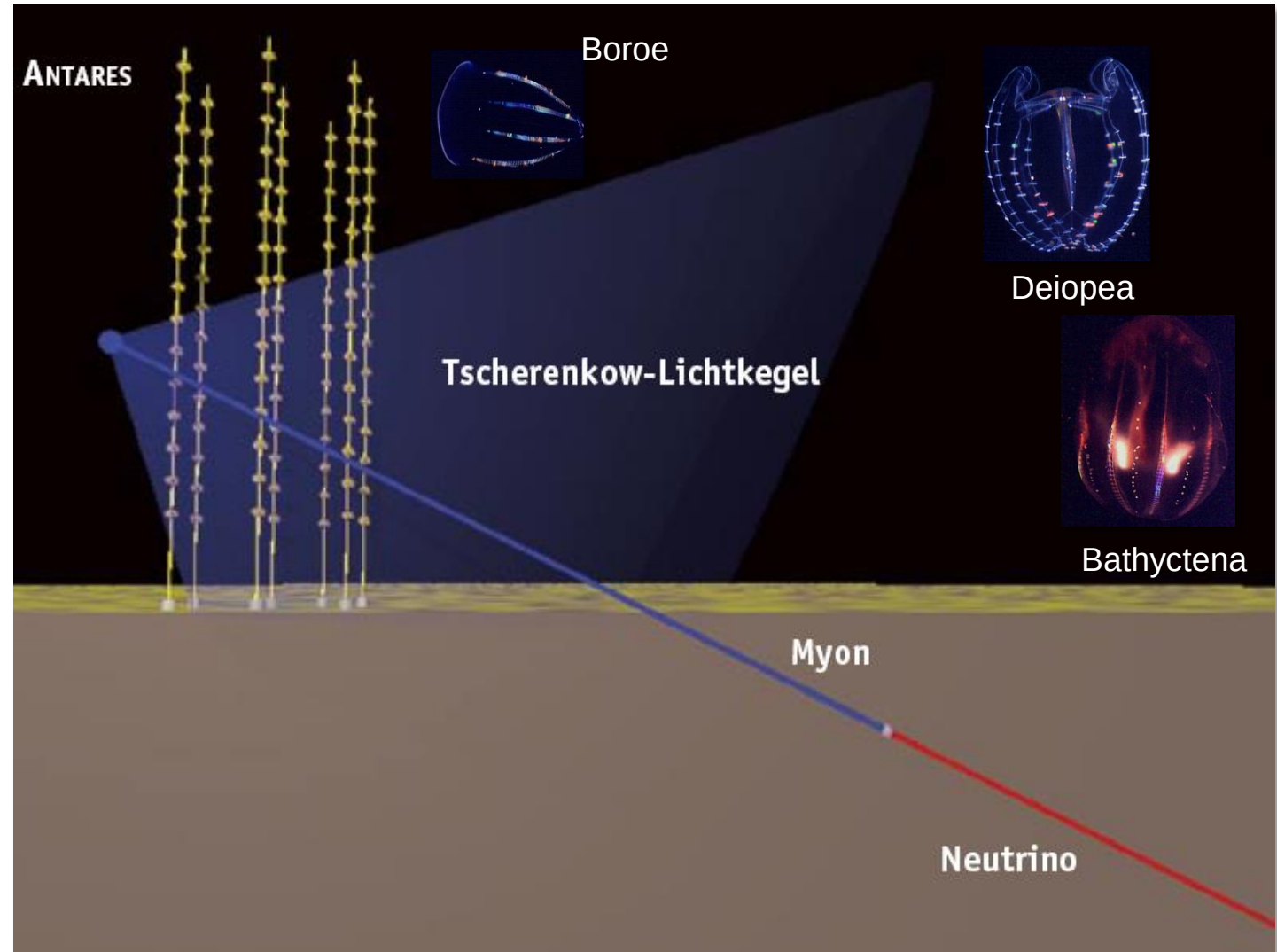
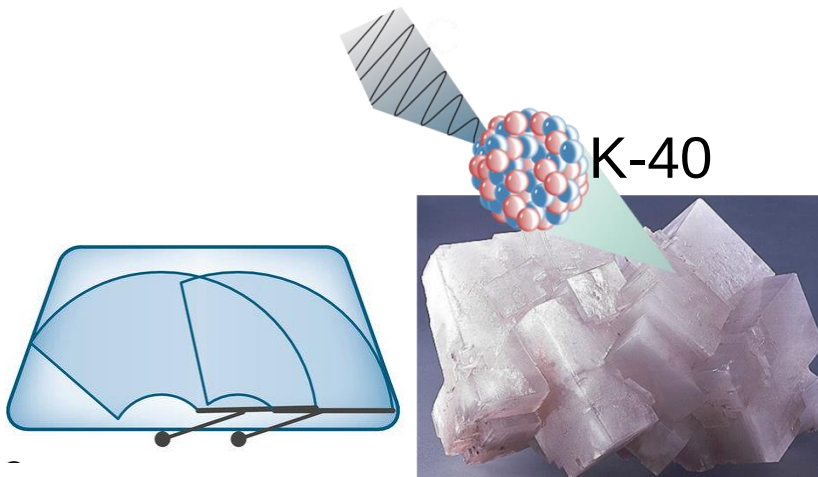
Transparenz im
blauen Bereich wichtig



Nachweis von UHE Neutrinos: Wasser

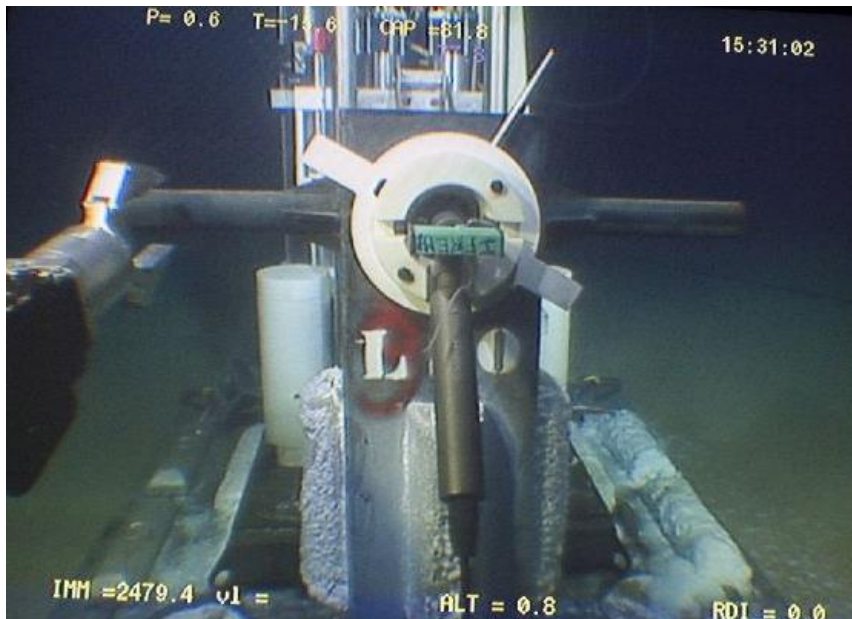
■ weitere Messungen für Standort-Auswahl:

- optische Streuung, Stärke der Meeres-Strömungen
- Biolumineszenz
- Sedimentation
- K-40 Untergrundrate
- Topologie Meeresboden
- Infrastruktur an Land



■ Tiefseetechnologie für 1km³ Wasserdetektor:

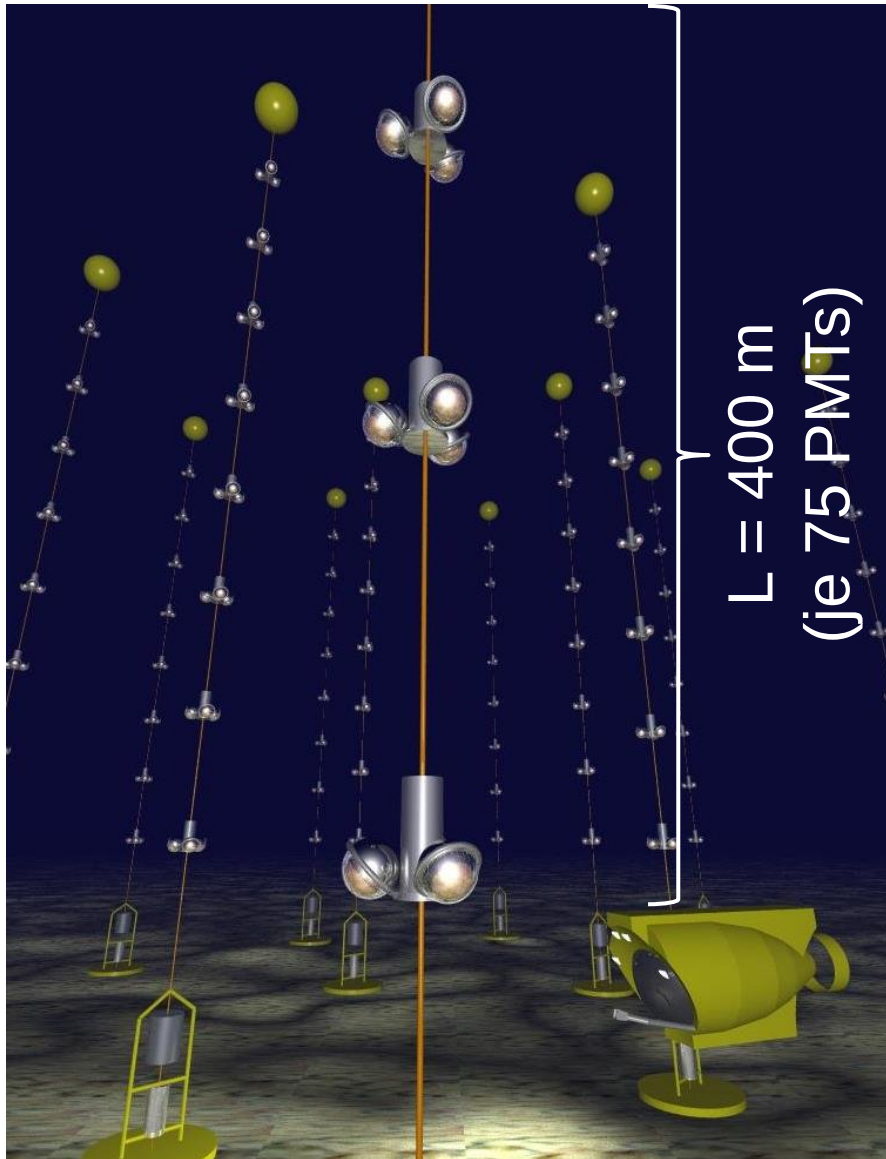
- Hochseeschiff (Verlegung)
- elektro-optisches Kabel (L = 20-100 km)
Verteilerbox, 50 kW für 10000 PMTs
Signal-Bandbreite > 100 Gb/s
- Hydrophone (Position)
- Tiefseetauchroboter



ANTARES



■ Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch

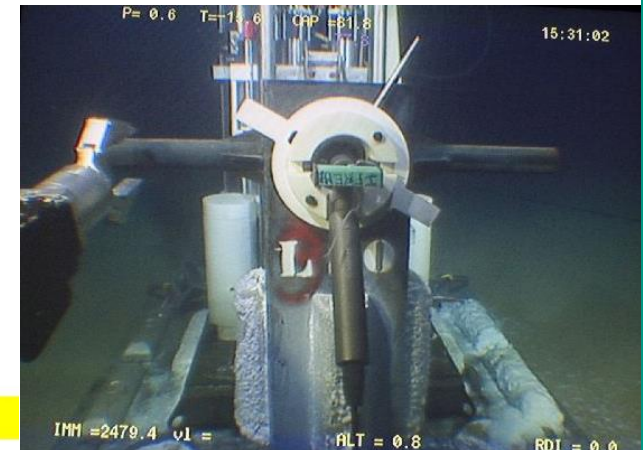


ANTARES

- ν -Teleskop: Mittelmeer vor Toulon (2-2.4 km)
- **Konzept:** flexible Strings mit PMT-Tripels, akustische Transponder (Position)
- Fläche $A = 200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ ($A_{\text{eff}} = 0.1 \text{ km}^2$)
- 1996: Beginn F&E, 2001: erstes Kabel
- 2008: 12 Strings, seither Datennahme, Nachweis Oszillationen von ν_{atmos}



Ifremer



NEMO



■ NEutrino MEDITERRANEAN Observatory:

- italienisches Pilotprojekt (F&E seit 1998)
- Vorbereitung & Tests für KM3NeT



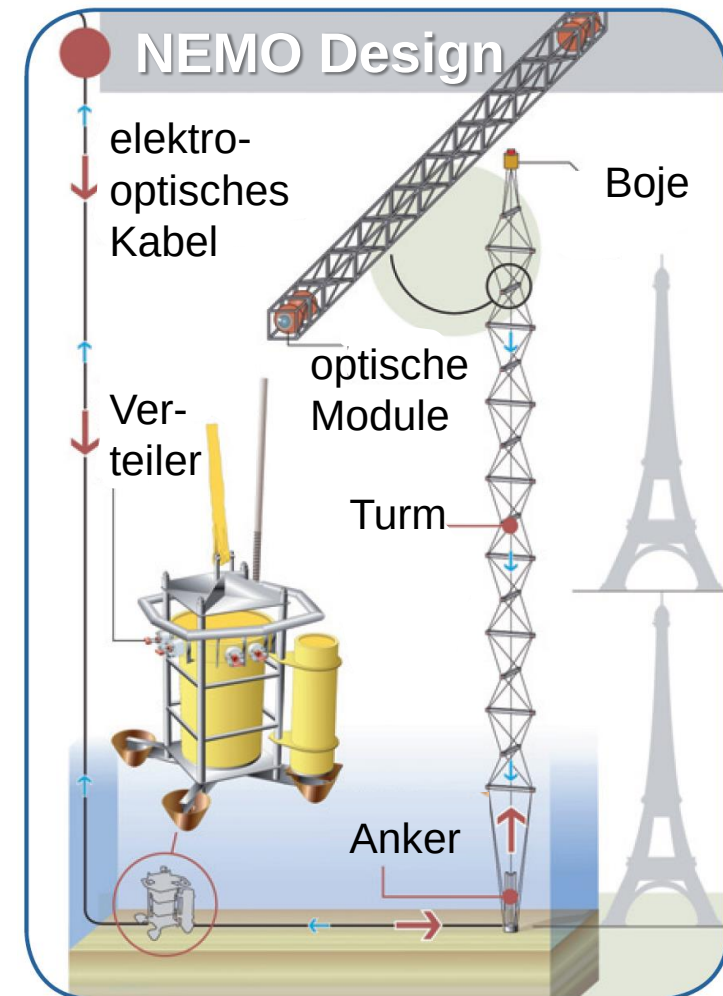
Phase-I:

- Prototyp Turm: 4 instrumentierte Alu-´bars´
- erfolgreicher Betrieb über mehrere (!) Monate



Phase-II

- 2013: erster Turm in 3500 m Tiefe installiert
- 80-100 km langes elektro-optisches Kabel
- instrumentierter Turm mit 16 Alu-Armen (4 PMTs)



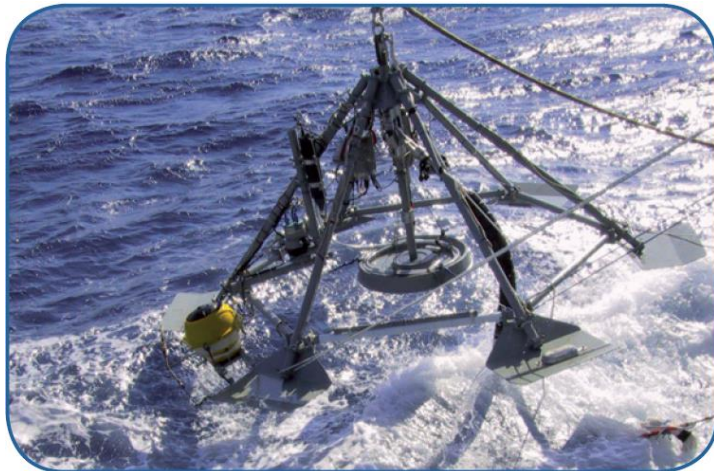


■ Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research:

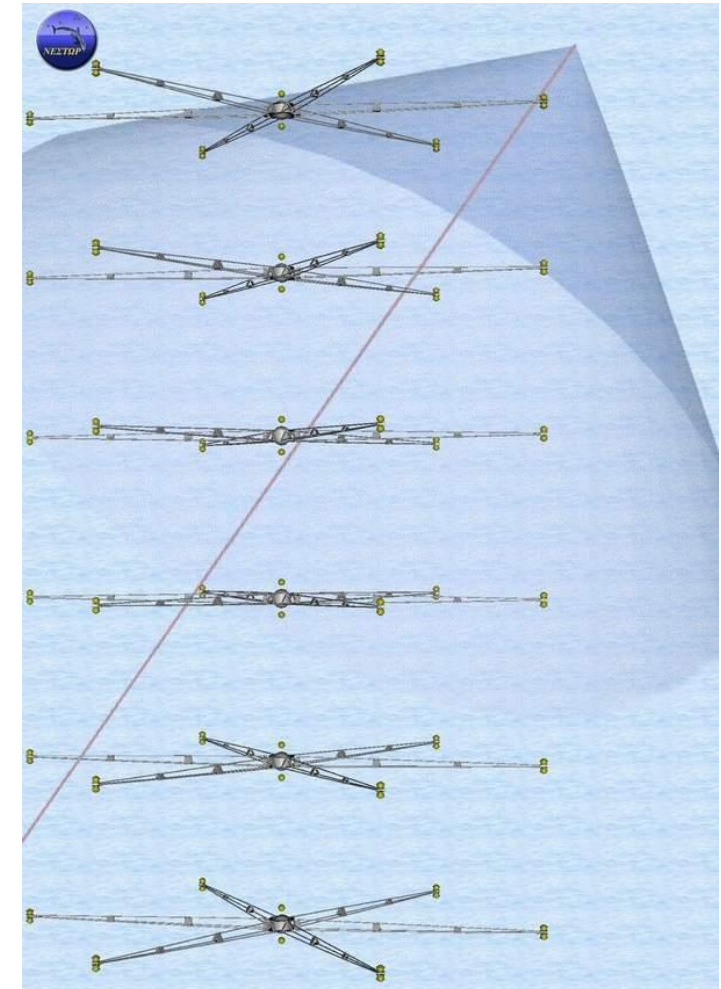
- griechische Pilot-Untersuchungen im ionischen Meer (F&E seit 1991)
- verschiedene Tiefsee-Standorte in $d > 3500$ m

Konzept: hexagonaler Stern aus Titan-Rohren
mit 2 PMTs an jedem Strahl

2004: Installation eines Prototyps
& erste Messungen



2008: Installation eines Turms mit 5 Sternen





- **KM3Net** – europäisches Konsortium für ein $\sim 5 \text{ km}^3$ großes „vernetztes“ **Neutrinoobservatorium im Mittelmeer** ($\sim 200 \text{ M€}$ Kosten)

Ziele:

- Abdeckung der südlichen Hemisphäre in UHE Neutrinos
- Punktquellen 1-100 TeV: galaktisches Zentrum,...
- bessere Sensitivität als IceCube angestrebt

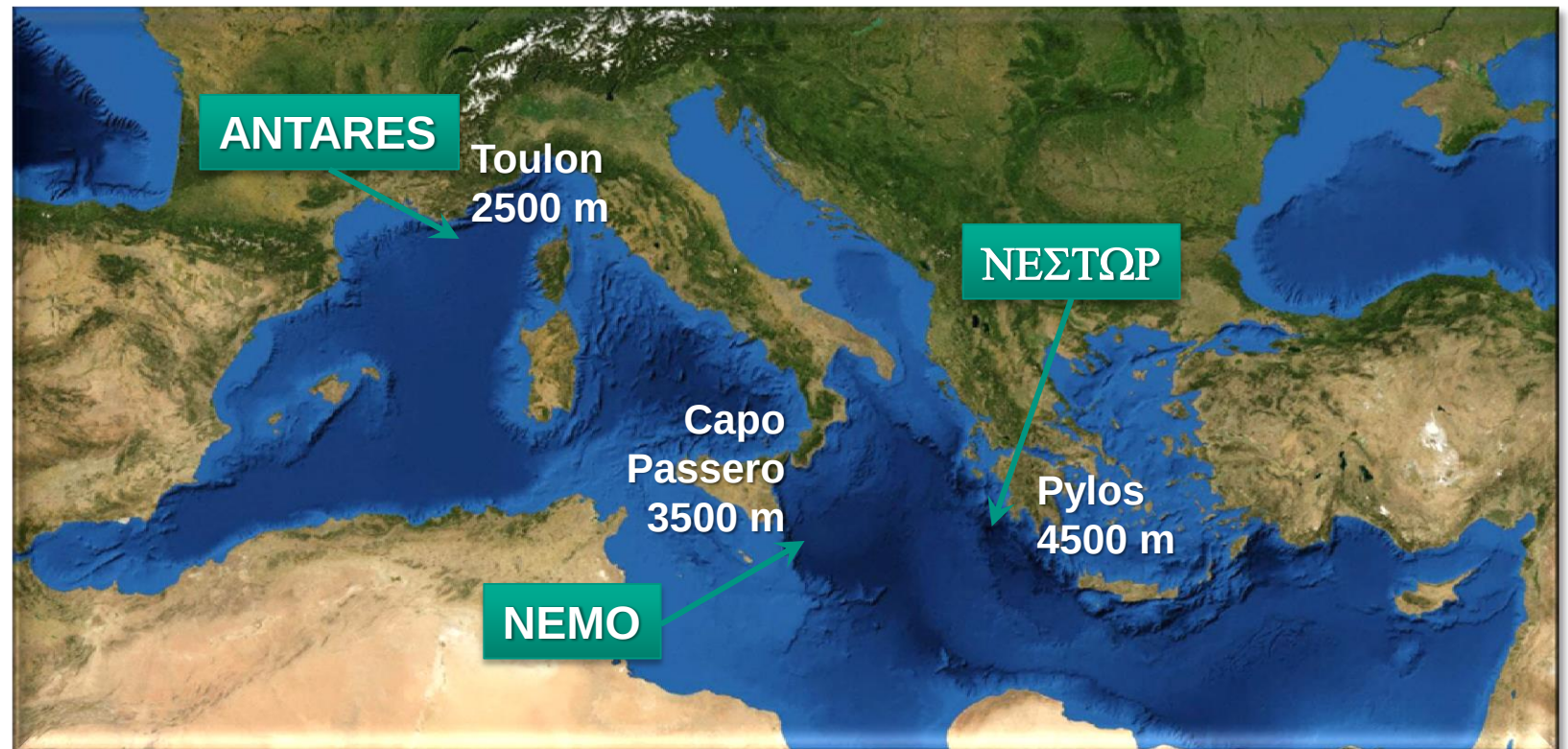


+

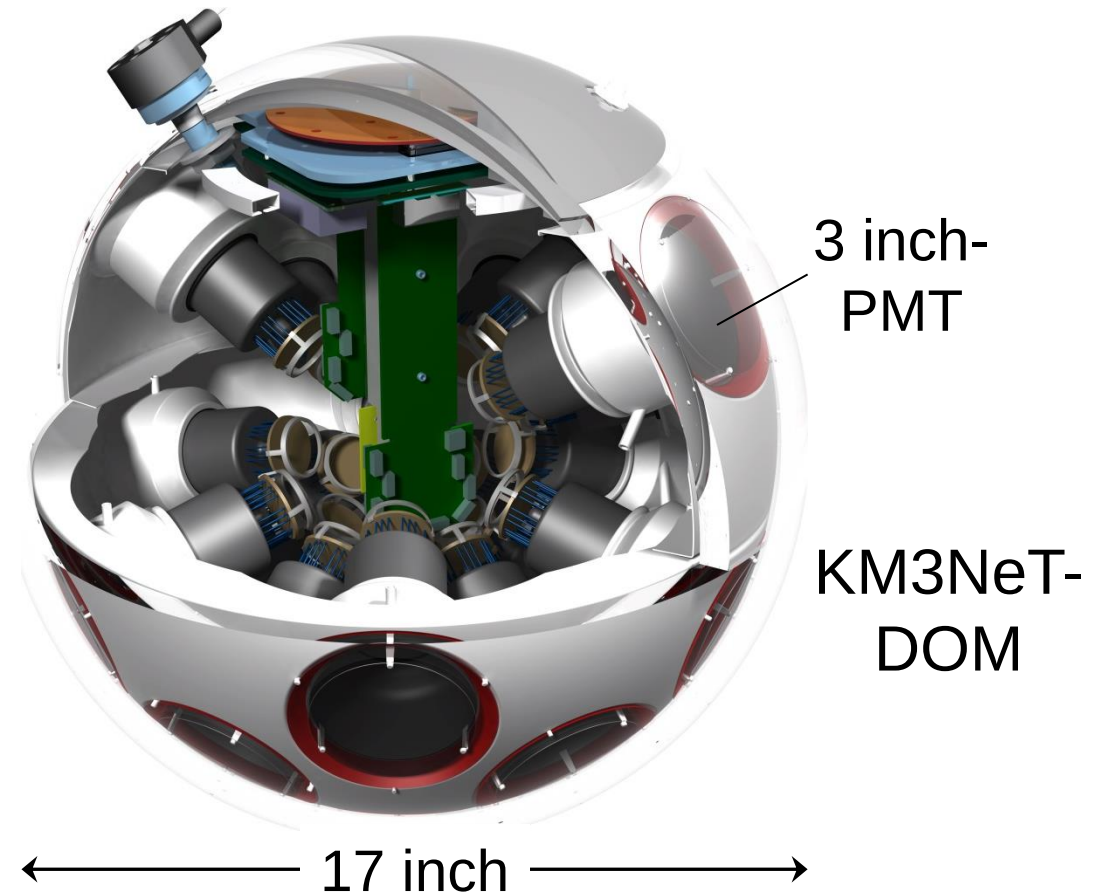
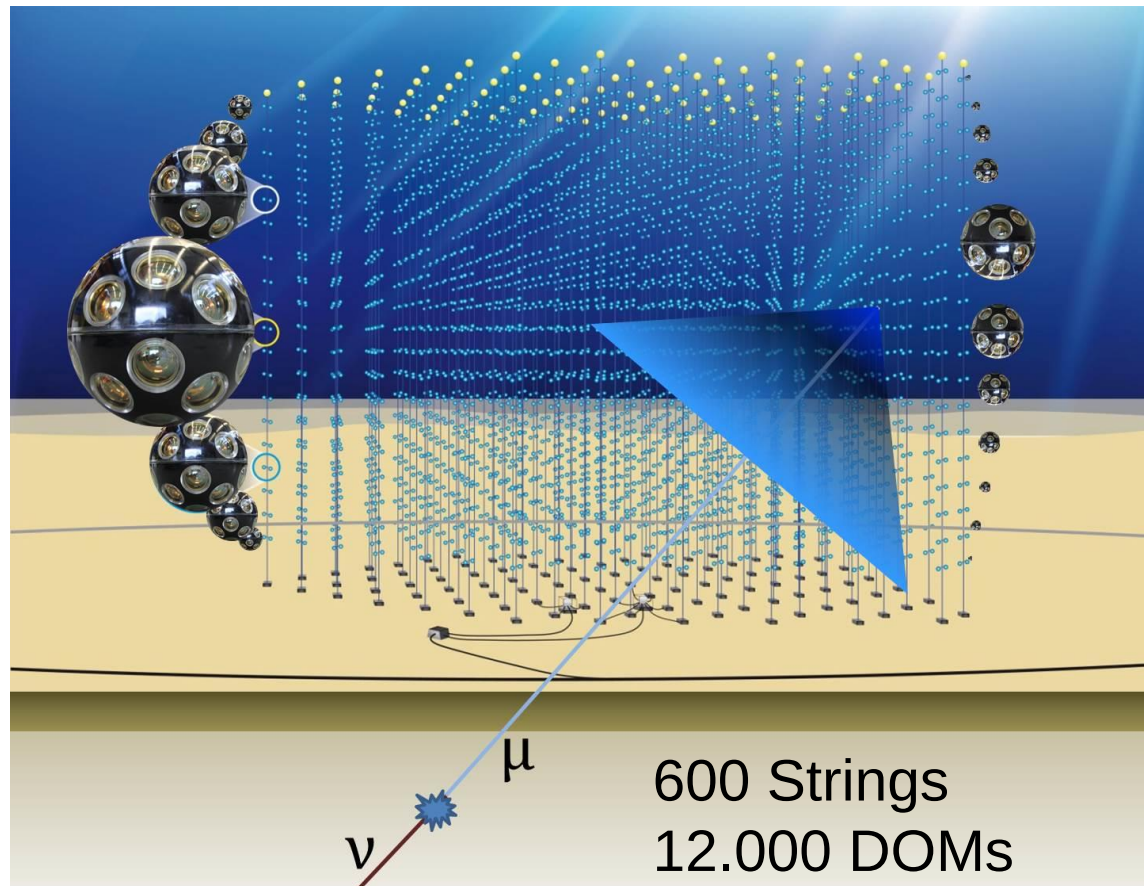
+

NEMO
NEUTRINO MEDITERRANEAN OBSERVATORY

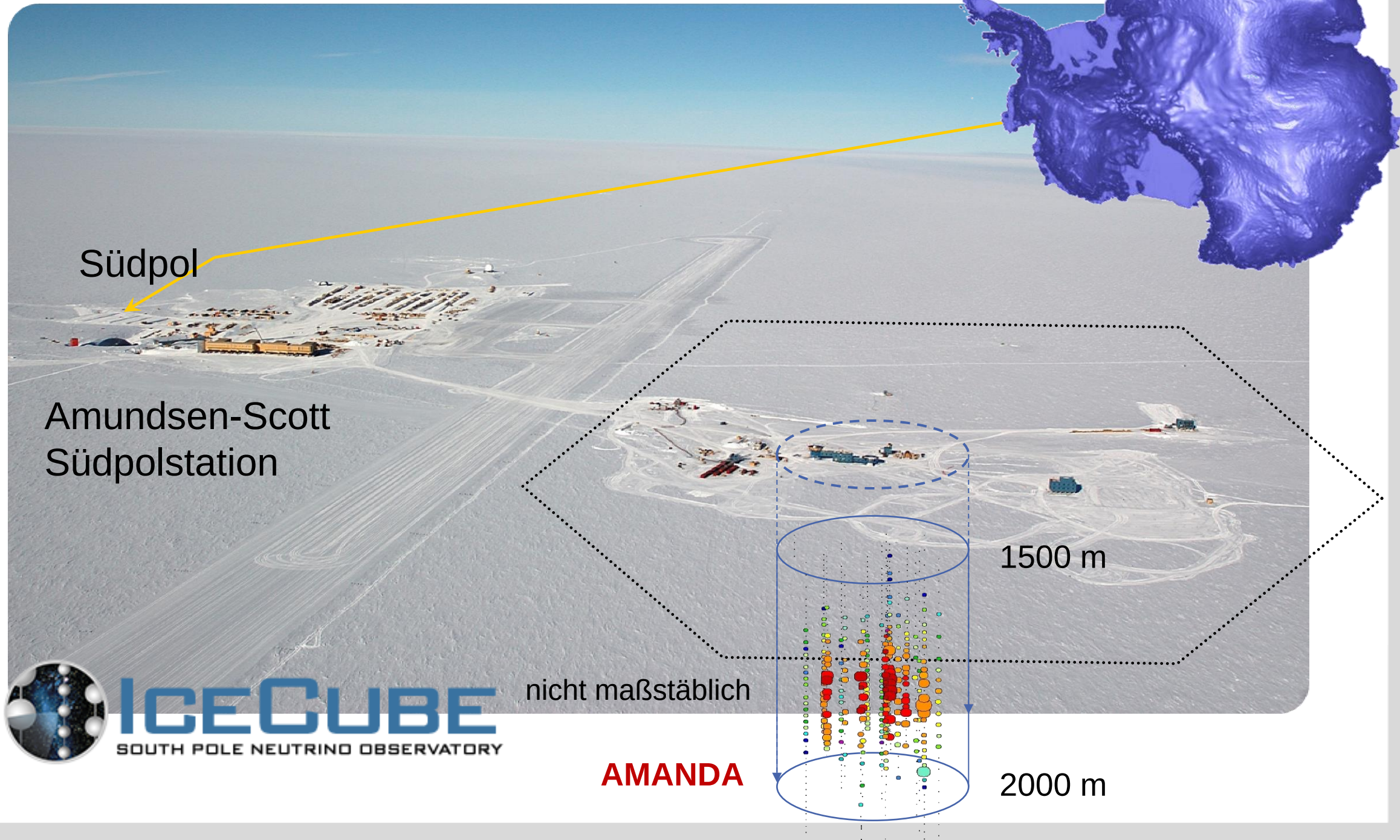
=



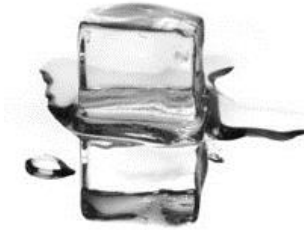
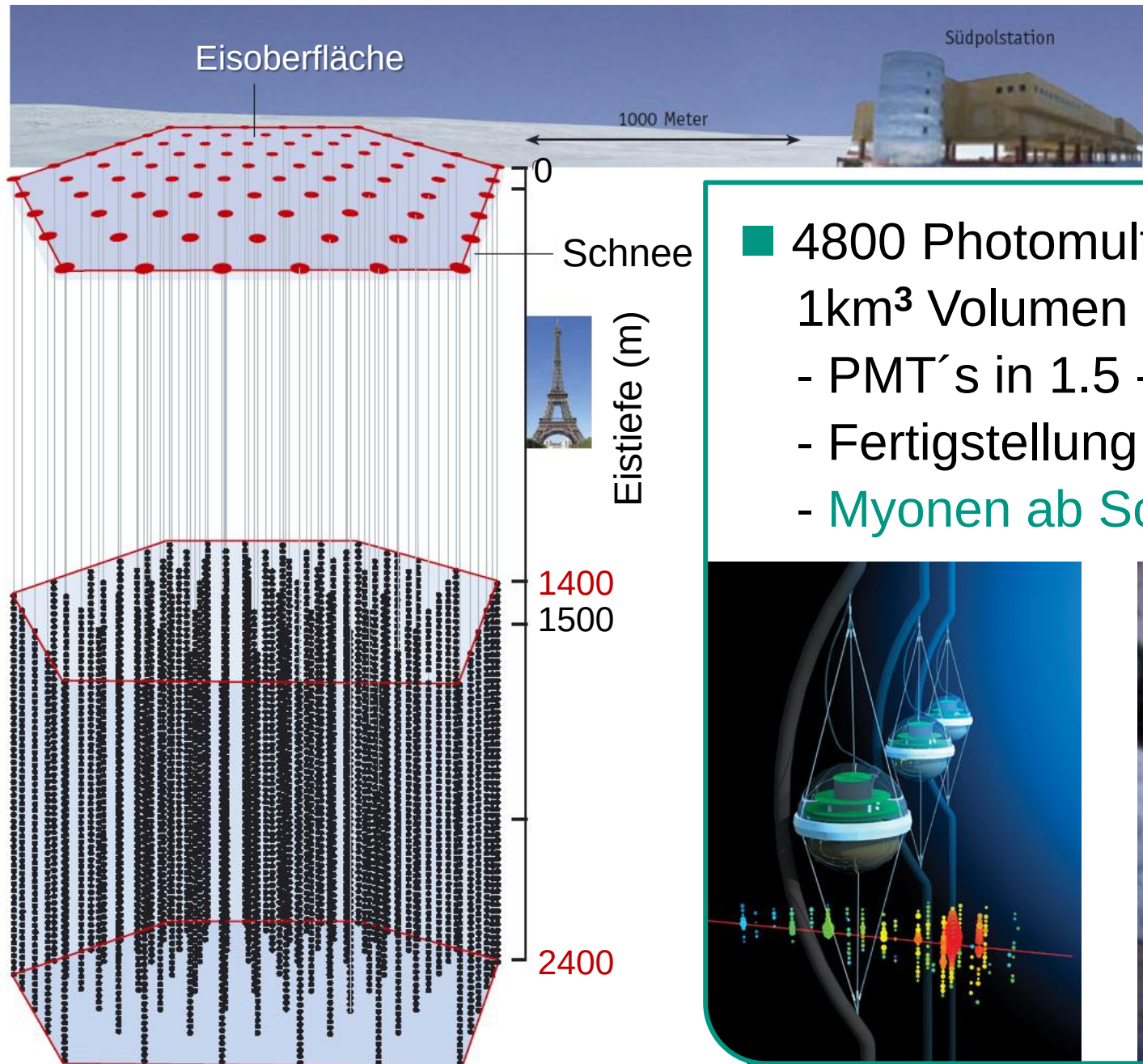
- **KM3Net** – F&E Arbeiten zur Entwicklung eines DOM
 - Digital Optical Module (17-inch Durchmesser) bestückt mit 31 3-inch PMTs zum Nachweis des Cherenkov-Licht
 - Km3NeT soll verteilt auf 3 Standorte aufgebaut werden



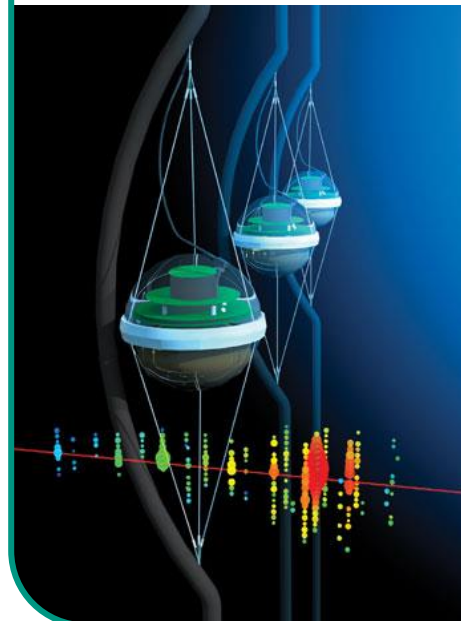
IceCube an der Südpolstation



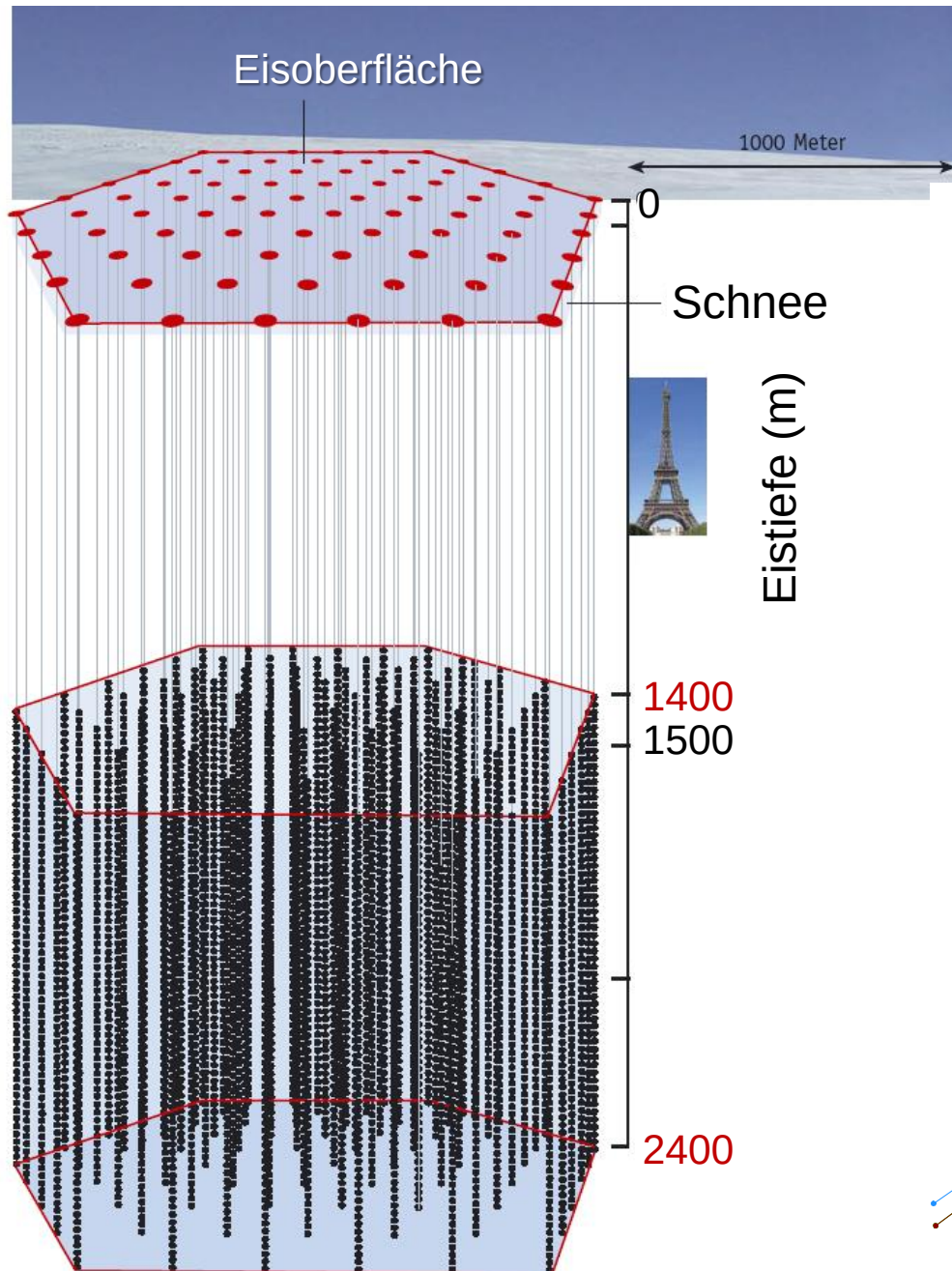
IceCube Neutrinoobservatorium



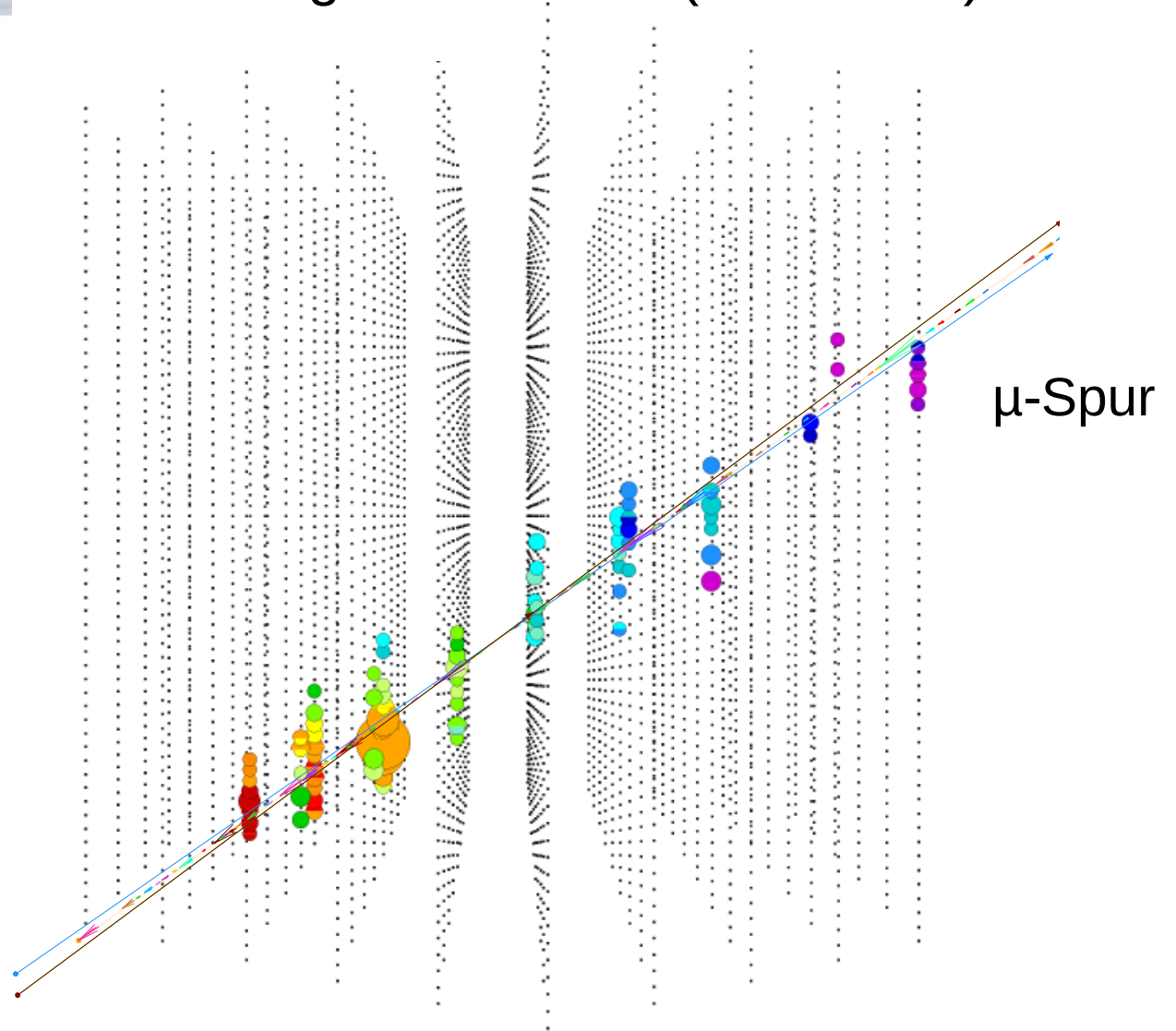
- 4800 Photomultiplier verteilt in einem 1km^3 Volumen in 80 PMT-Strings
 - PMT's in 1.5 - 2.5 km Tiefe
 - Fertigstellung im März 2010
 - Myonen ab Schwelle $E_{\text{thres}} = 100 \text{ GeV}$



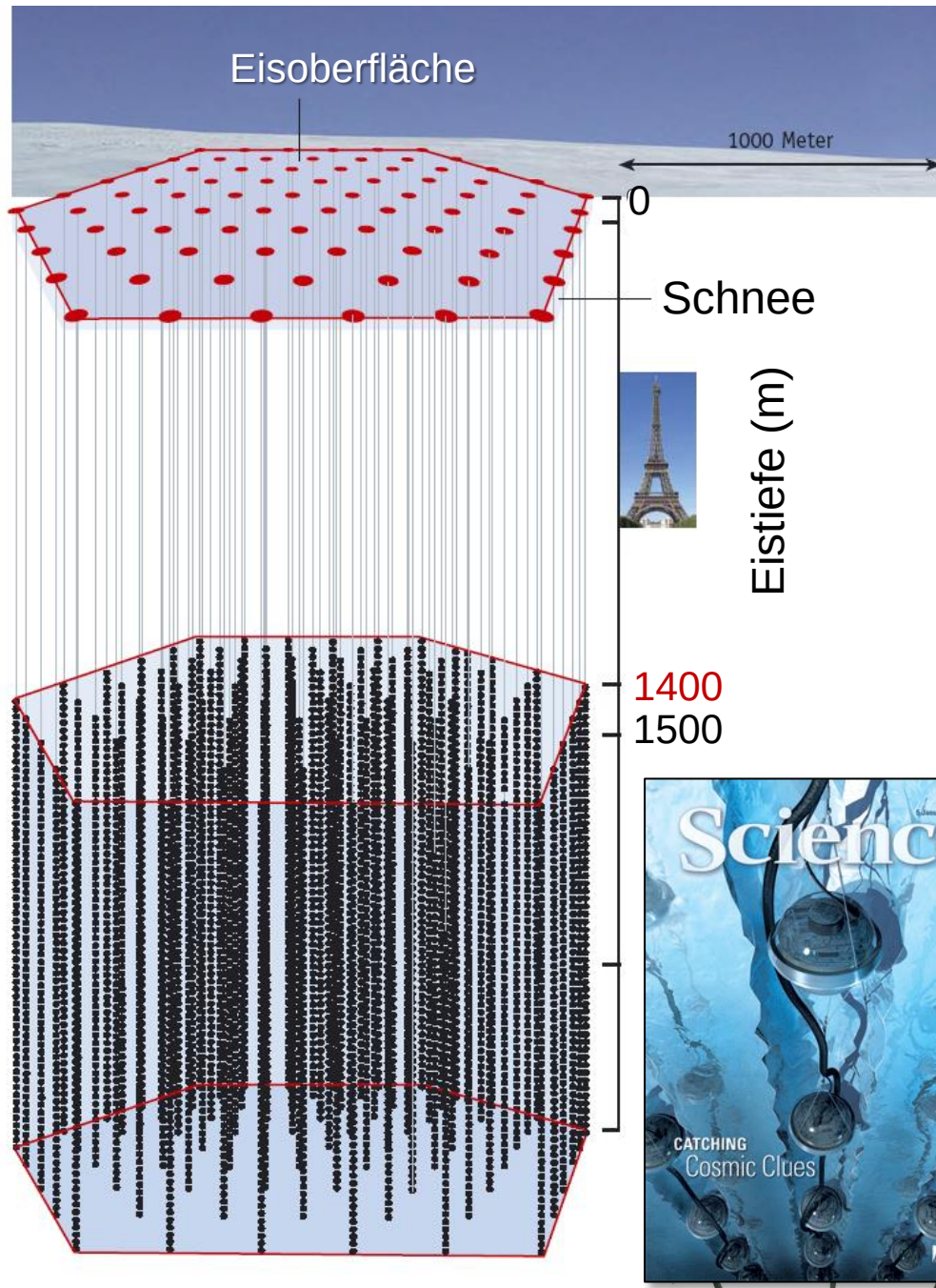
IceCube Neutrino Telescope



■ **80 Strings** mit 60 PMTs (DOM) in hexagonalem Grid ($d = 125\text{ m}$)

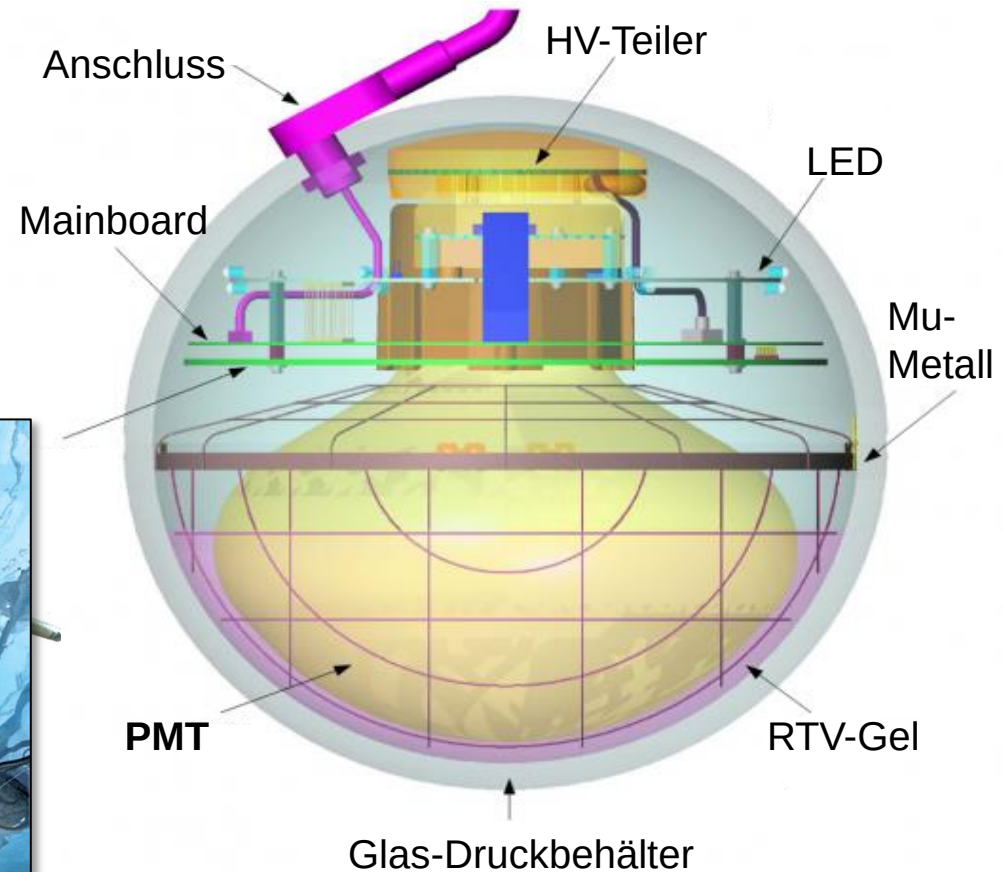


IceCube Neutrino Telescope



■ aus dem Zeitverhalten der PMTs:
Bestimmung der Myon-Richtung

Digitales Optisches Modul $p > 200 \text{ atm}$



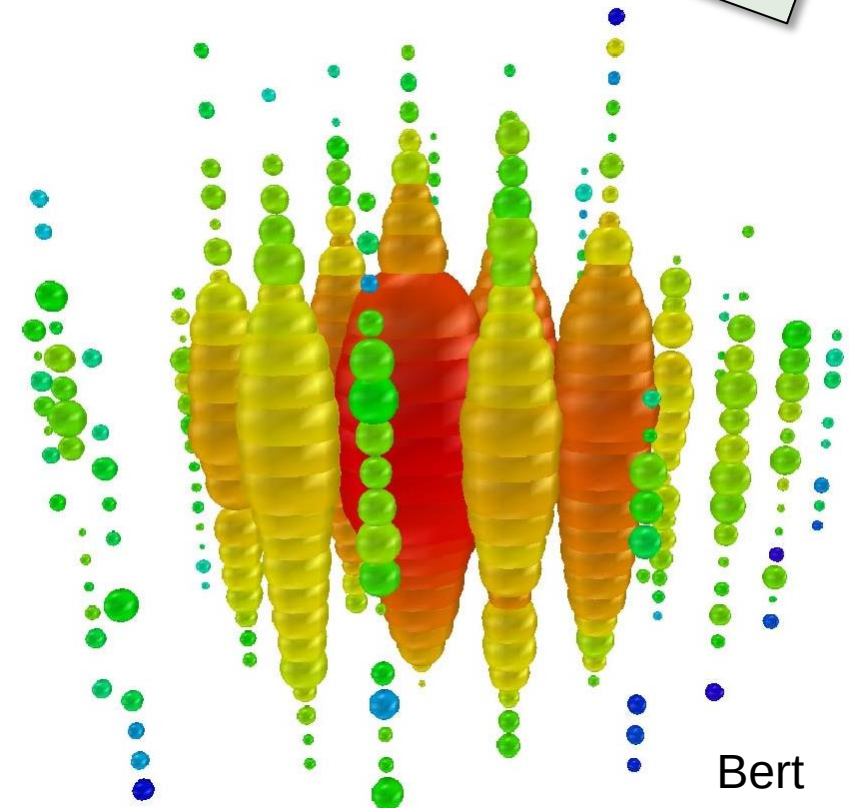
KIT
Karlsruhe Institute of Technology

-

M. G. Aartsen,² R. Abbasi,²⁷ Y. Abdou,²² M. Ackermann,⁴¹ J. Adams,¹⁵ J. A. Aguilar,²¹ M. Ahlers,²⁷
D. Altmann,⁹ J. Auffenberg,²⁷ X. Bai,^{31,*} M. Baker,²⁷ S. W. Barwick,²³ V. Baum,²⁸ R. Bay,⁷ J. J. Beatty,^{17,18}
S. Bechet,¹² J. Becker Tjus,¹⁰ K.-H. Becker,⁴⁰ M. Bell,³⁸ M. L. Benabderrahmane,⁴¹ S. BenZvi,²⁷ J. Berdermann,⁴¹
P. Berghaus,⁴¹ D. Berley,¹⁶ E. Bernardini,⁴¹ A. Bernhard,³⁰ D. Bertrand,¹² D. Z. Besson,²⁵ G. Binder,^{8,7}
[†]Bindig,⁴⁰ M. Bissok,¹ E. Blaufuss,¹⁶ J. Blumenthal,¹ D. J. Boersma,³⁹ S. Bohacik,²⁰ C. Bonaldi,³
[‡]Bondarenko,³² J. Boroson,³³ P. Brack,⁴¹ A. M. Brown,³⁴



Ernie



Bert

IceCube – weitere Neutrinos

- 22.11.2013 – IceCube beobachtet **UHE Neutrinos**
 - astrophysikalischer Ursprung
 - 2-jährige Messungen von Mai 2010 – Mai 2012

Suchkriterien:

- minimale Energie 30 TeV
- alle Raumrichtungen

Resultate:

- 28 Ereignisse
- $(10.6 \pm 5.0 - 3.6)$ Ereignisse durch atmosphärische ν 's
- **4σ Evidenz für astrophysikalische Neutrinos**

AKTUELL

