

Fritz-Weithas-Sternwarte Neumarkt, 28.10.2011

Kosmische Strahlung – Teilchen aus den Tiefen des Weltraums

Uli Katz
ECAP / Univ. Erlangen
28.10.2011

ERLANGEN CENTRE
FOR ASTROPARTICLE
PHYSICS

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



ERLANGEN CENTRE
FOR ASTROPARTICLE
PHYSICS

- Teilchen und ihre Wechselwirkungen
- Teilchen aus dem Weltraum
- Experimente und ihre Ergebnisse
- Zusammenfassung und Ausblick

Die Darsteller: „Materieteilchen“

Leptonen:



Ladung 0

Masse > 0, aber sehr klein



Ladung $-1e$

0.00054 M/M_{Proton} 0.113 1.894

Leptonen kommen als freie Teilchen vor.

Quarks:



Ladung $+2/3 e$

~ 0.003 M/M_{Proton} ~ 1.33 ~ 185.8



Ladung $-1/3 e$

~ 0.006 M/M_{Proton} ~ 0.13 ~ 4.5



Quarks kommen nur in „Hadronen“ gebunden vor:

Baryonen (qqq)

Proton p (uud)
Neutron n (udd)
...



Atomkerne

Mesonen (q $\bar{q}$)

z.B. Pionen:
 $\pi^+(u\bar{d})$, $\pi^-(\bar{u}d)$
 $\pi^0(d\bar{d}, u\bar{u})$

... und viele andere

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

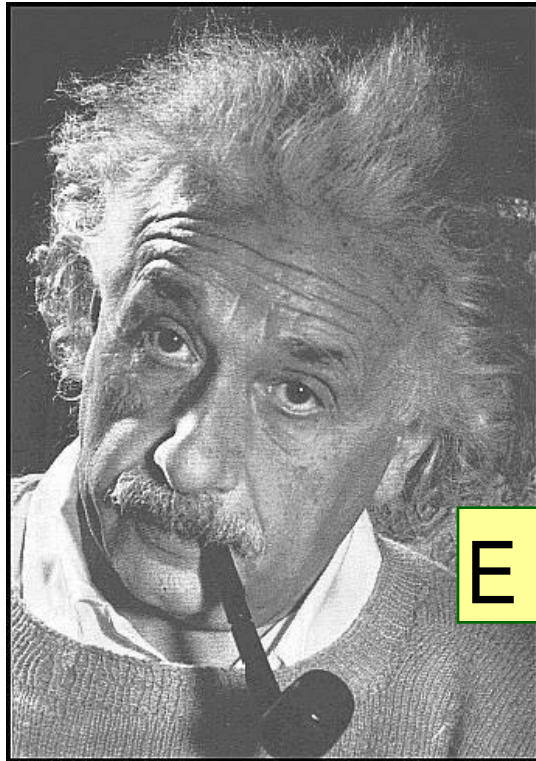
... und dann war da noch: Das Higgs-Teilchen (spielt hier keine entscheidende Rolle)

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)

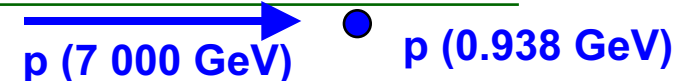
Beschleuniger/Weltraum

- Stärkster Teilchenbeschleuniger:
Large Hadron Collider (LHC)



„Nutzbare“ Energie: 14 000 GeV

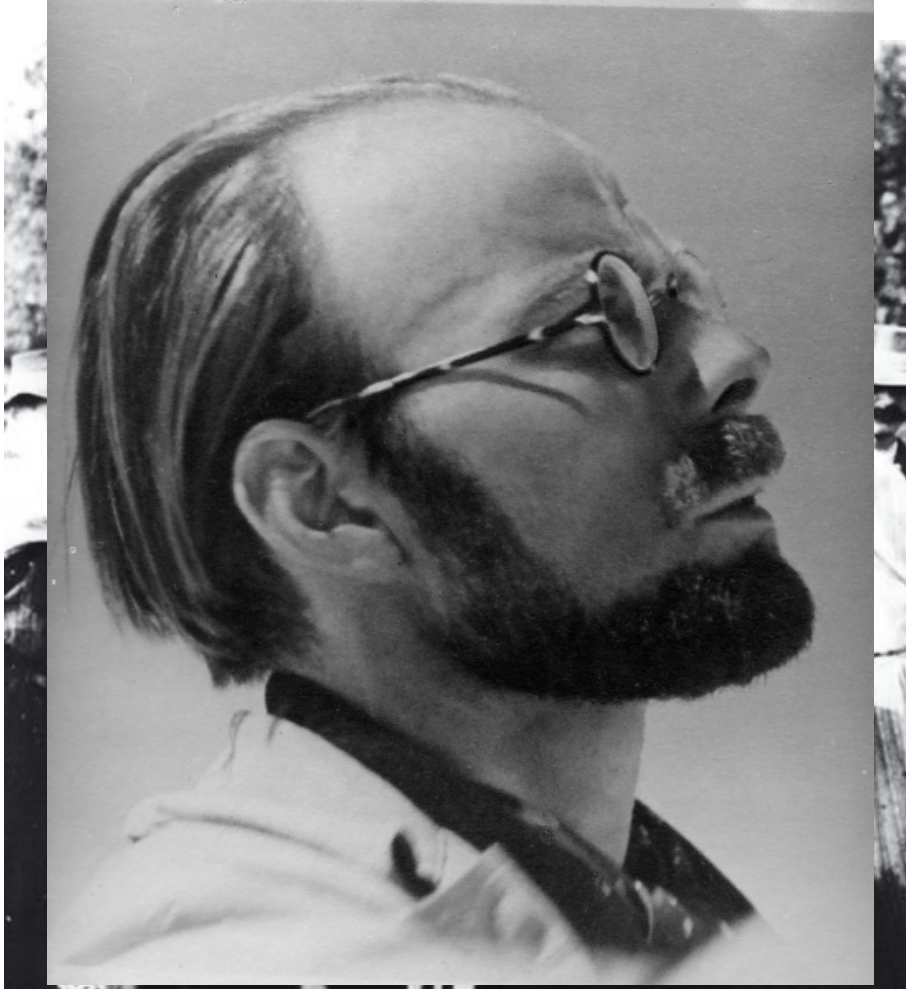
- Teilchen aus dem Weltraum:



„Nutzbare“ Energie: 115 GeV

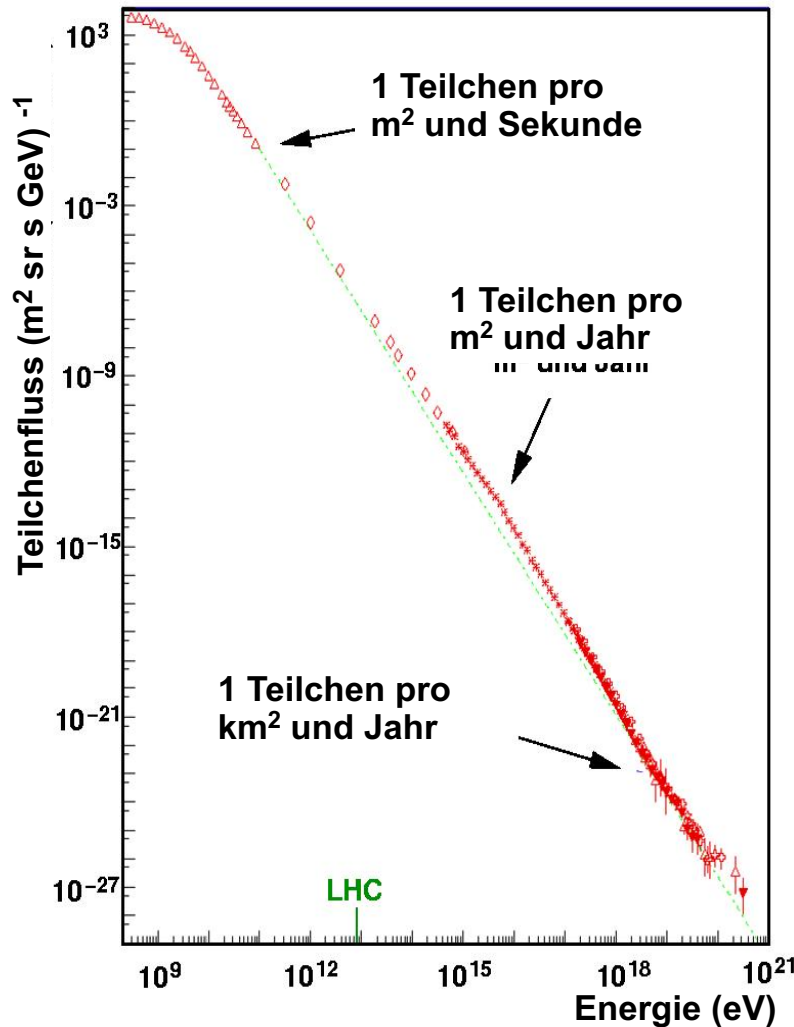
Aber: Teilchenenergien bis 10^{11} GeV

Kosmische Strahlung: wie alles anfang



- 1912: Victor Hess entdeckt ionisierende Strahlung aus dem Weltraum
- 1938: Pierre Auger zeigt, dass die Teilchen der kosmischen Strahlung immense Energie haben
 $1.000.000.000.000.000 \text{ eV}$
 $= 10^{15} \text{ eV} = 100 \text{ mal LHC !}$

70 Jahre später wissen wir mehr ...



- Protonen und Atomkerne aus dem 10^{21} Weltall haben Energien bis eV
- Davon aber nur einige pro km^2 und Jahrhundert!
- Die Energie eines Tennisballs beim Profi-Aufschlag vereint in einem Atomkern!
(der Tennisball hat 10^{23} davon ...)



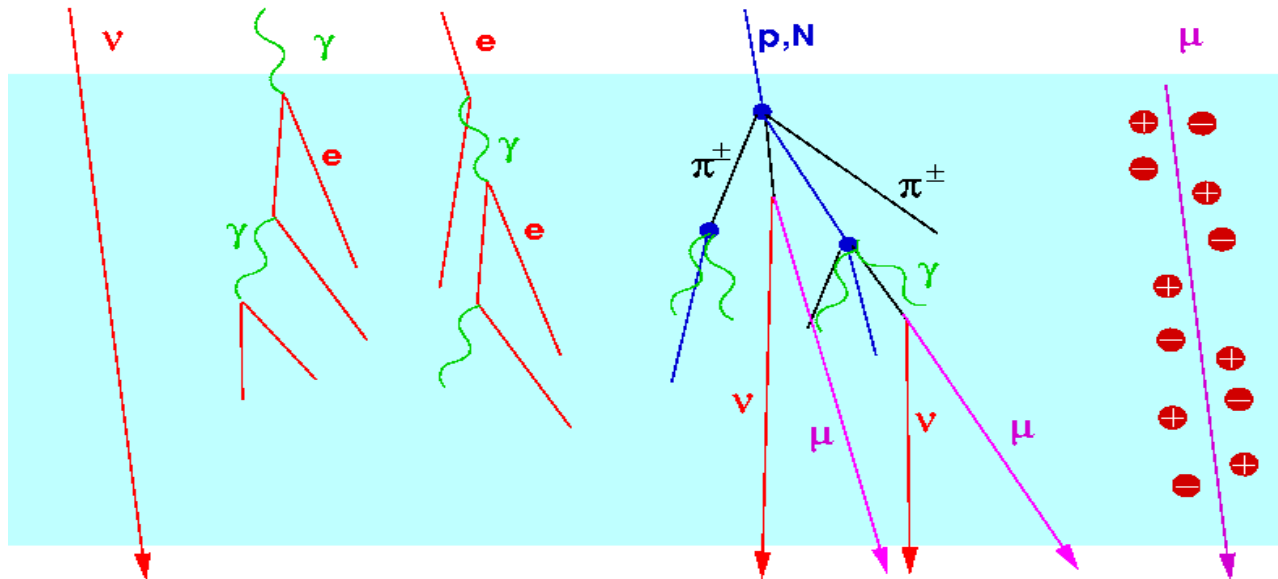
... aber bei Weitem nicht alles!

- Wie und wo werden diese Teilchen im Universum beschleunigt?
- Was verraten sie uns über ihre Quellen?
- Was verraten sie uns über Teilchenphysik bei Energien, die wir an Beschleunigern nie erreichen werden?

Wir wissen es nicht!

Teilchenwechselwirkung in der Atmosphäre

Vereinfachte, schematische Darstellung:

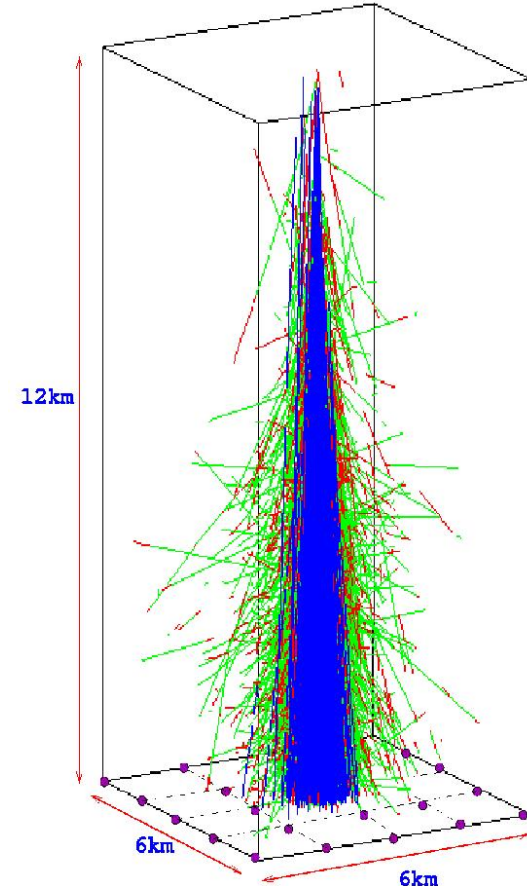


Neutrino: seltene Wechselwirkung (kann z.B. Erde ohne Reaktion durchqueren)

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)

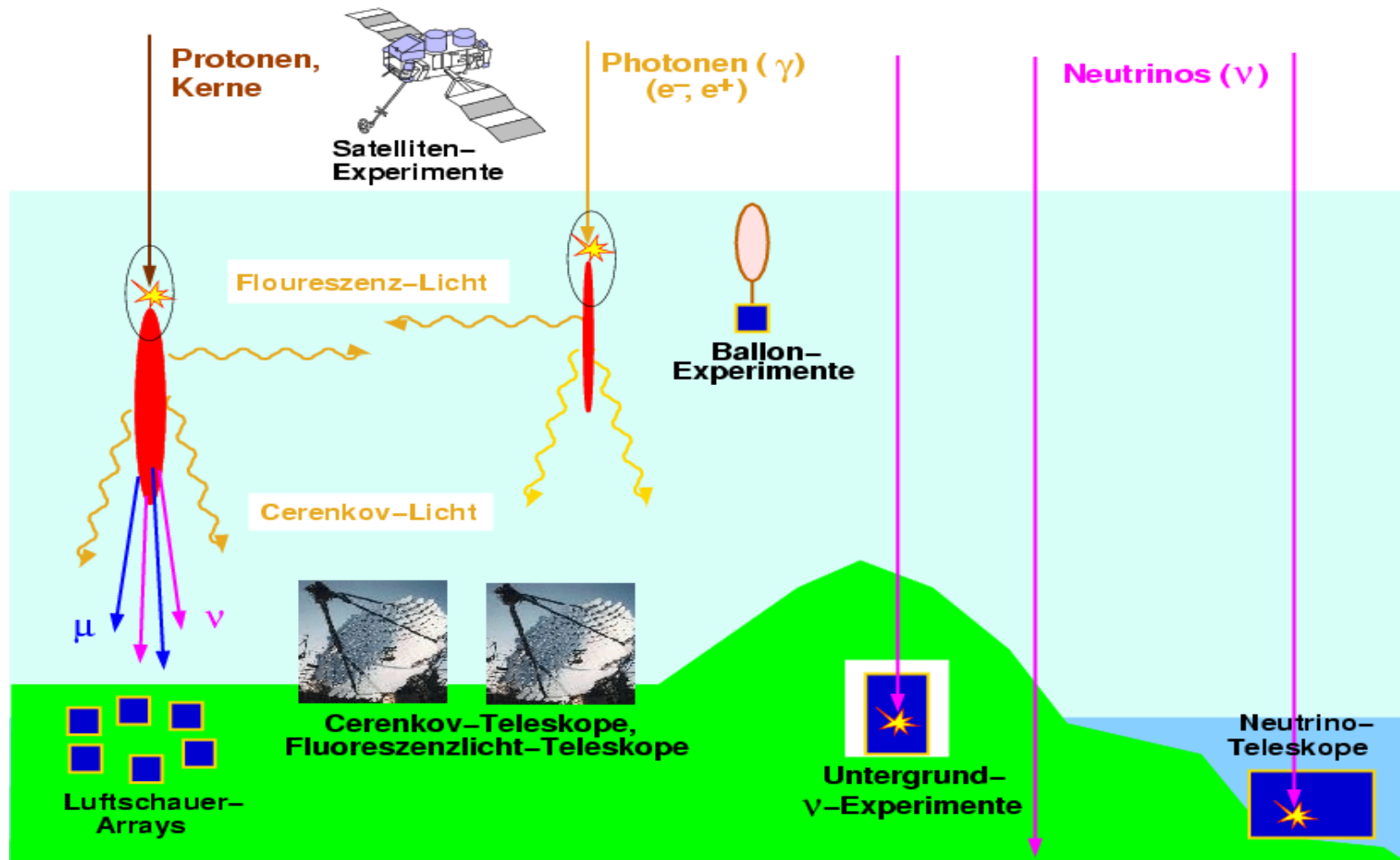
Myon: verliert Energie durch Ionisation, aber hat große Reichweite (bis mehrere km in H_2O)



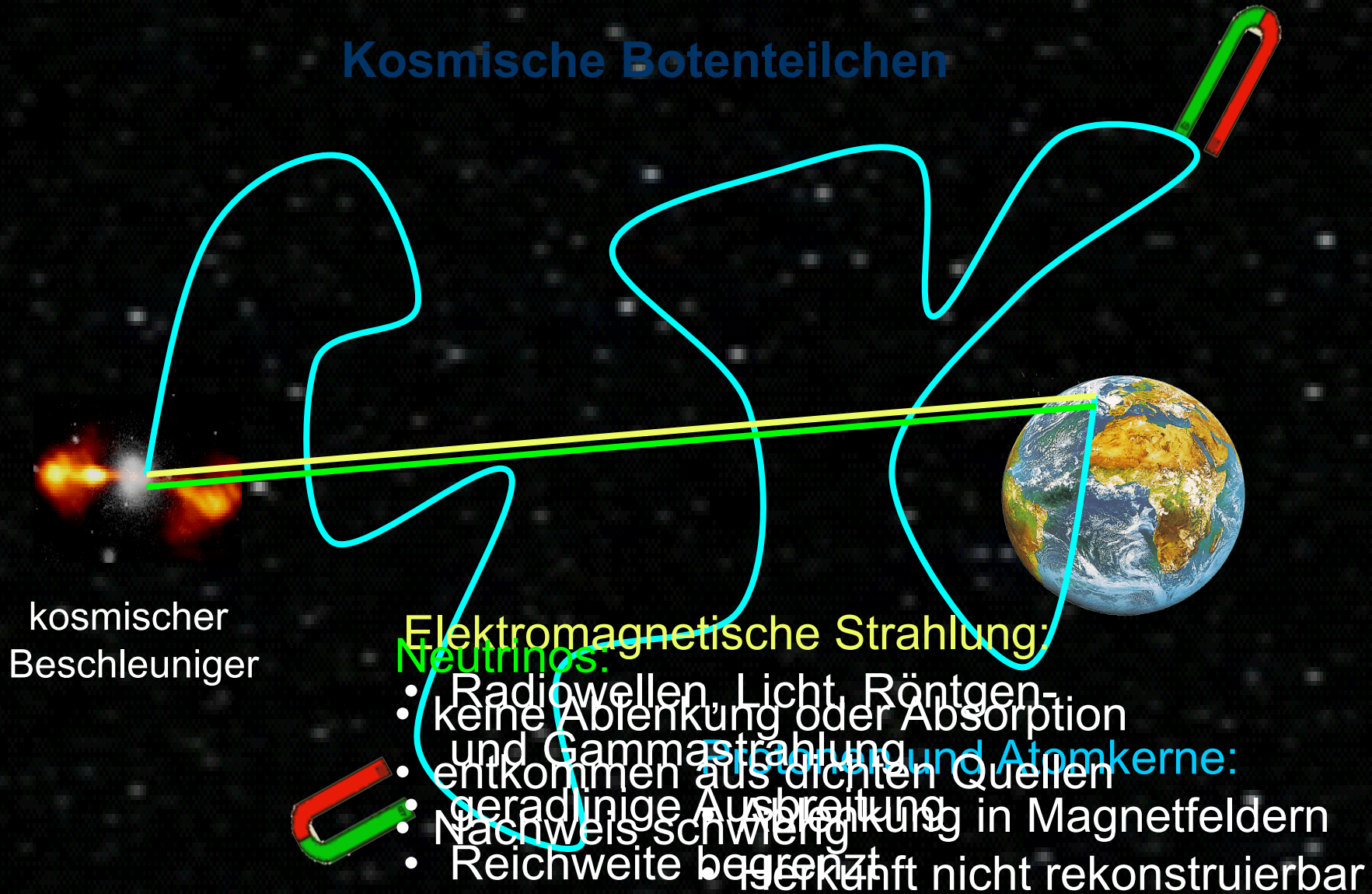
Simulierter hadronischer Schauer, 10^{10} GeV, 10^{11} Teilchen am Boden

Nachweismethoden der Astroteilchenphysik

aus dem Weltall



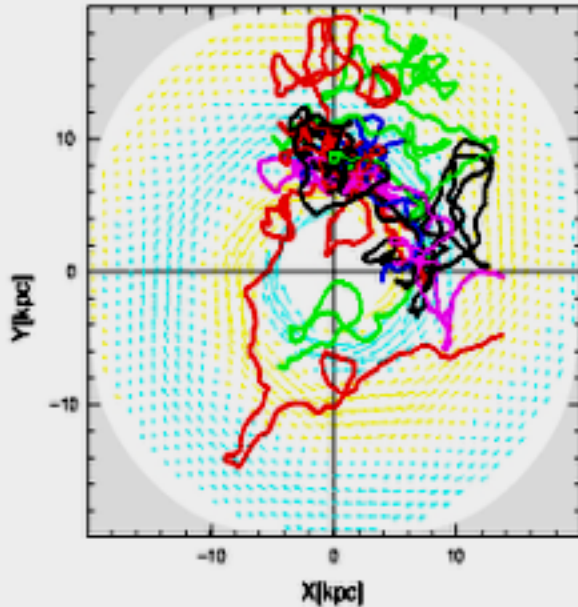
Kosmische Botenteilchen



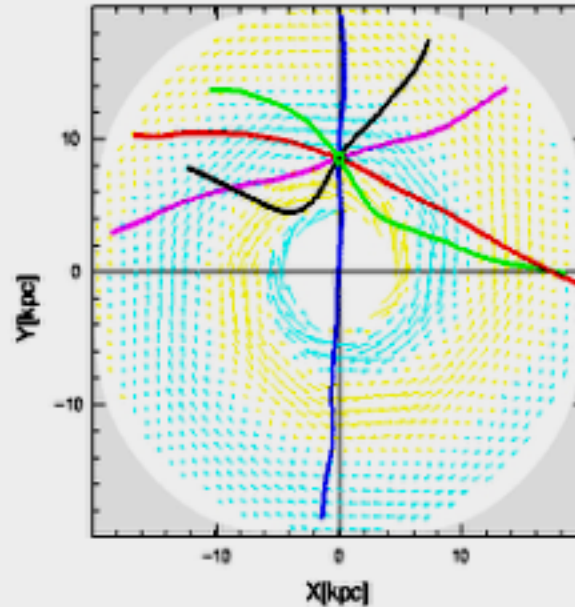
Astronomie mit Protonen?

M. Teshima, Astroteilchenschule Bärnfels, 2004

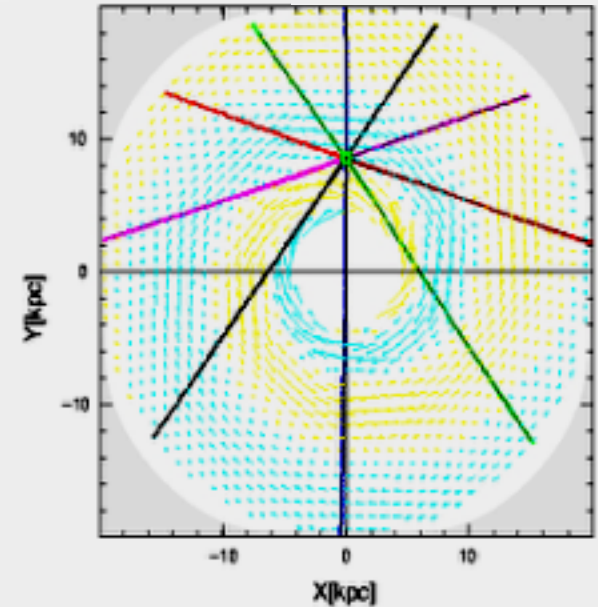
10^{18} eV



10^{19} eV

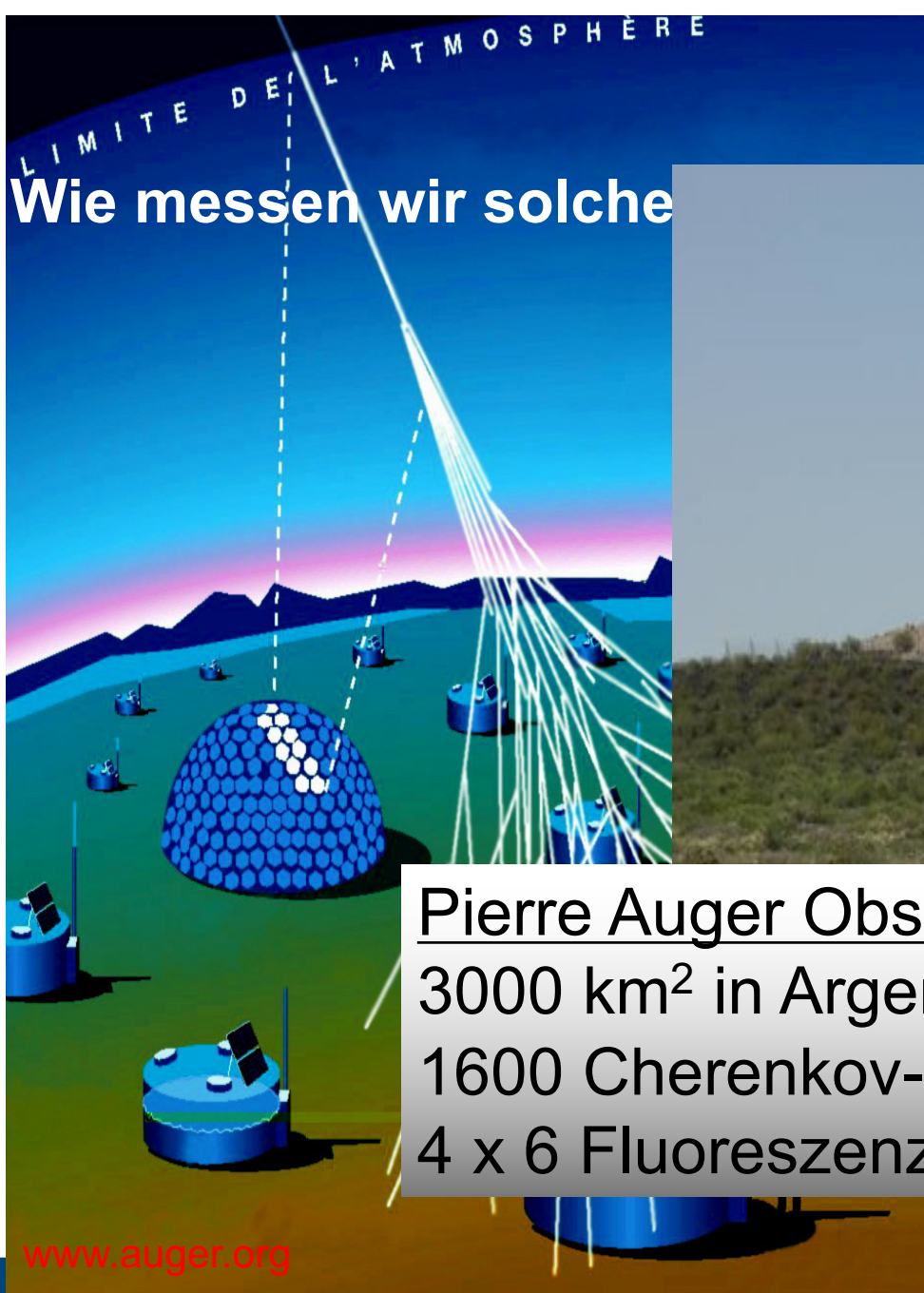


10^{20} eV



„Kleine“ Energien:
erratische Bewegung,
lange Verweildauer in Galaxis

Größte Energien:
fast geradlinige Bewegung,
Galaxis wird „nur einmal durchquert“



Wie messen wir solche

www.auger.org

Pierre Auger Observatory:
3000 km² in Argentinien
1600 Cherenkov-Detektoren
4 x 6 Fluoreszenz-Teleskope

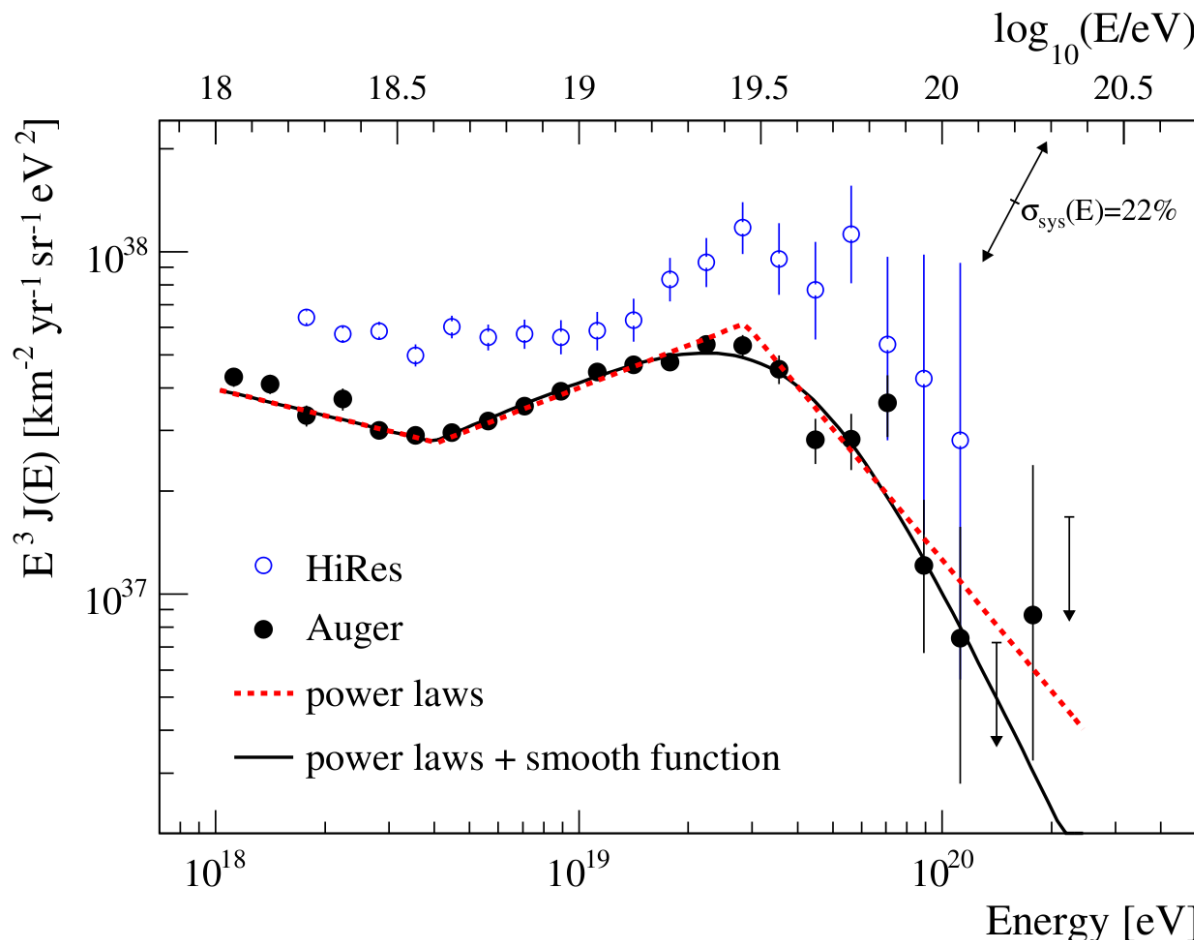
www.auger.org



Spektrum bei höchsten Energien

- Gibt es eine Maximalenergie der kosmischen Strahlung?
- Erwartung: Ja, weil für $E_p > 10^{19.7} \text{ eV}$

$$p_{\text{CR}} + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow p + \pi^0, n + \pi^+$$

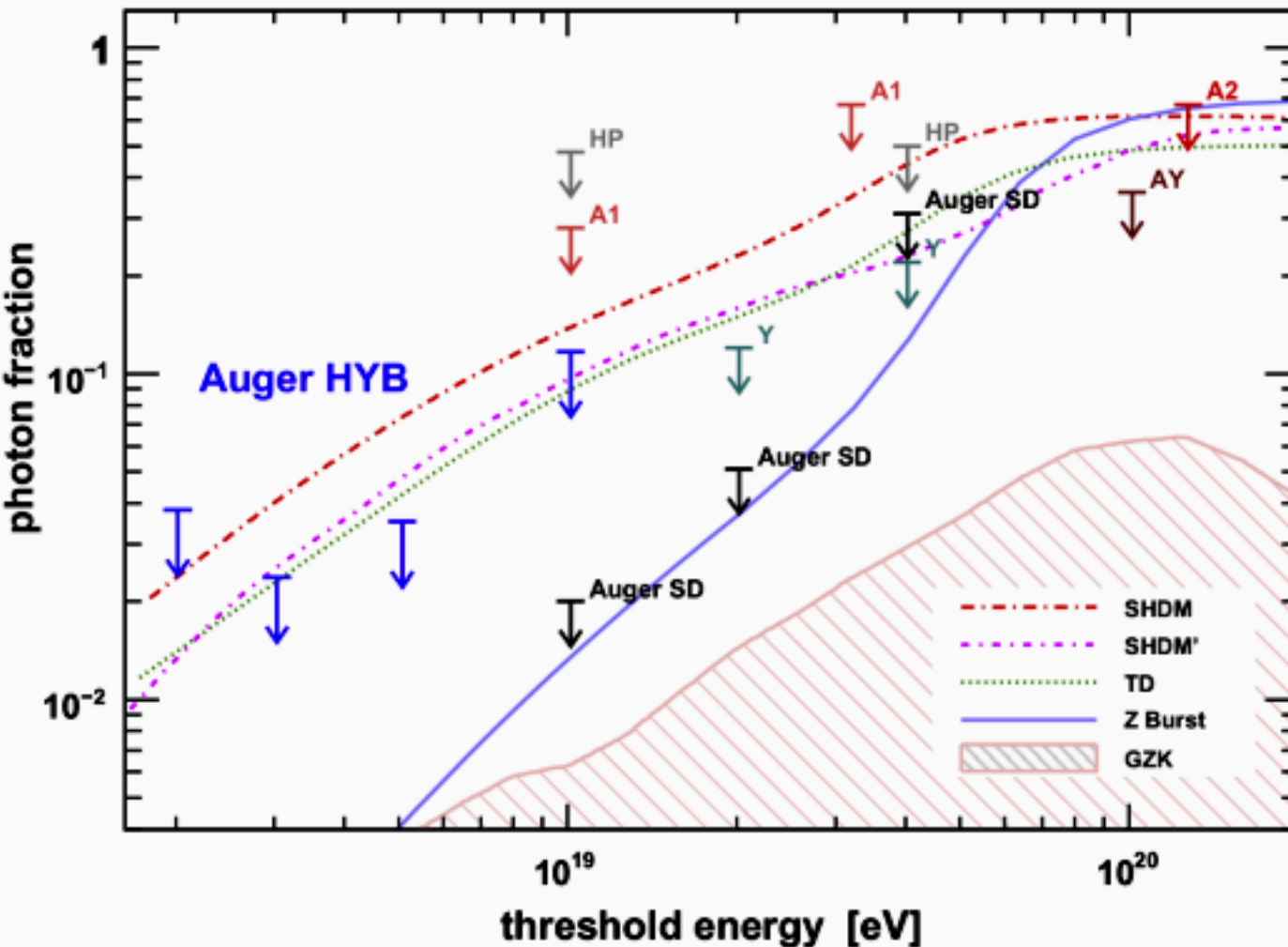


Effekt vorhergesagt
1966 von Greisen,
Zatsepin und Kuzmin
(GZK)

... oder geht den
Beschleunigern die
Puste aus?

Sehen wir die „GZK-Photonen“?

- Die π^0 zerfallen in 2 Photonen
→ hochenergetische γ erwartet

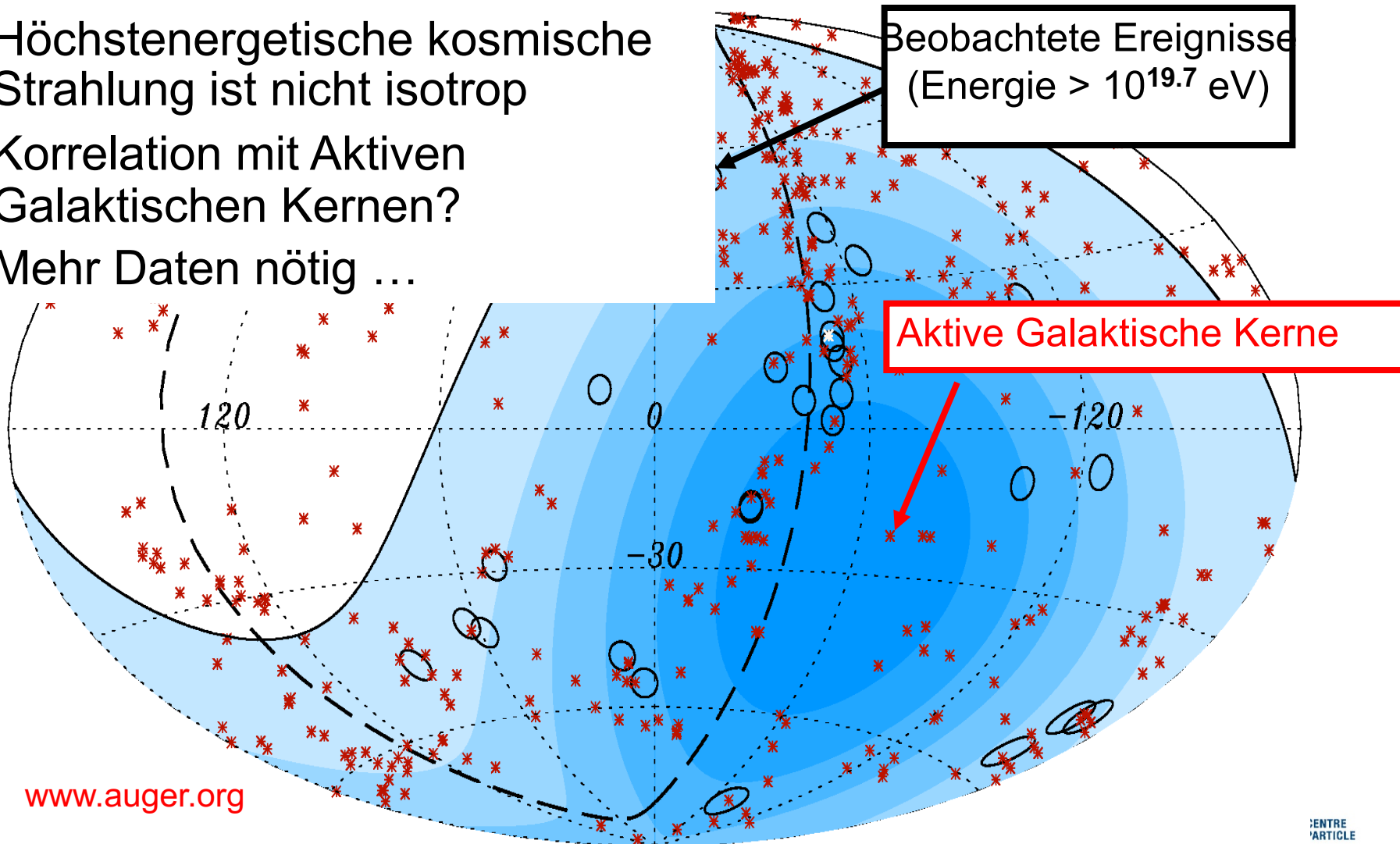


- Auger: Keine Anzeichen von solchen Photonen
- Empfindlichkeit reicht nicht für GZK
- Exotische Modelle ausgeschlossen

Astronomie mit Kosmischer Strahlung?

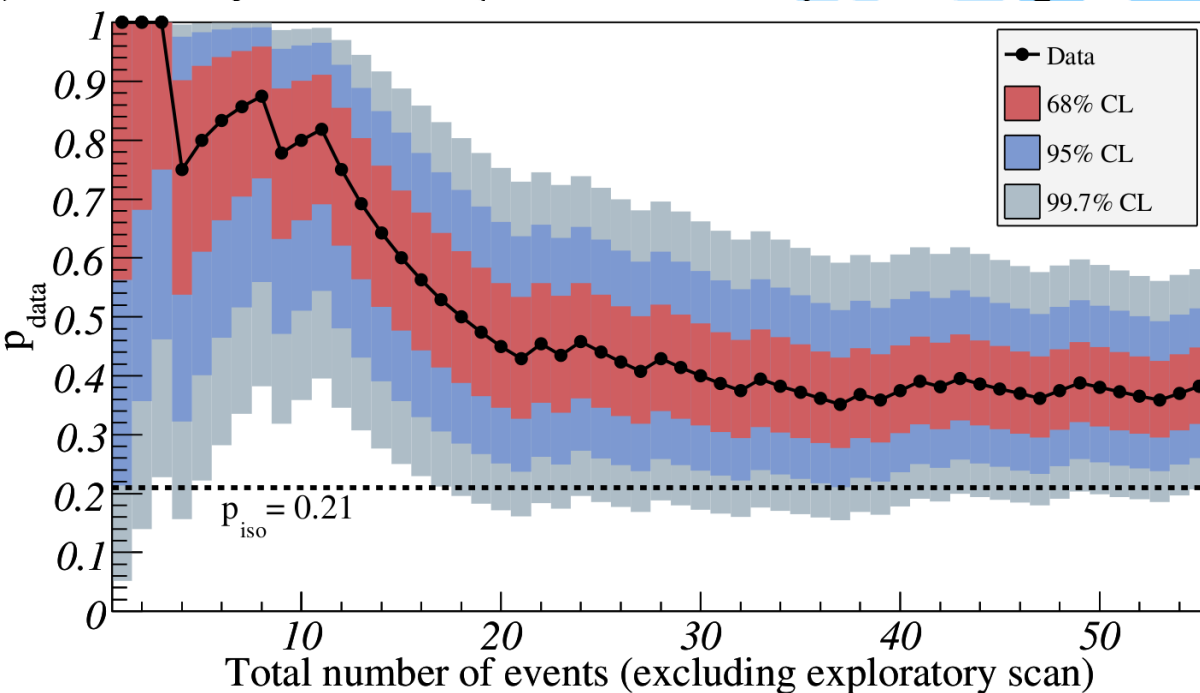
Erste Beobachtungen (2007) ...

- Höchstenergetische kosmische Strahlung ist nicht isotrop
- Korrelation mit Aktiven Galaktischen Kernen?
- Mehr Daten nötig ...



... und 3 Jahre später

- Mehr Daten (2009):
Korrelation ist nicht mehr so klar



Beobachtete Ereignisse
(Energie $> 10^{19.7}$ eV)

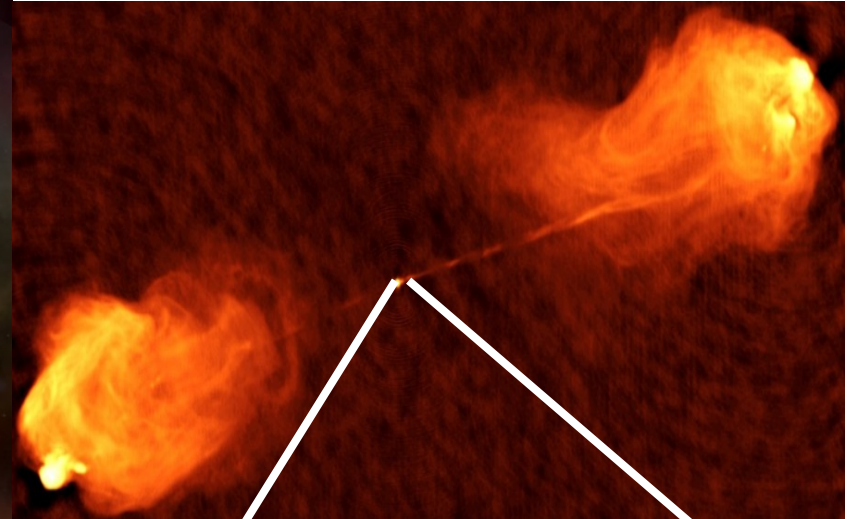
Aktive Galaktische Kerne

- Noch mehr Daten!

Was ist ein Aktiver Galaktischer Kern?

alle Bilder auf dieser Seite:
www.nasa.gov

Supermassives Schwarzes Loch
mit Akkretionsscheibe
Hochrelativistischer Materieausfluss



Offene Fragen ...

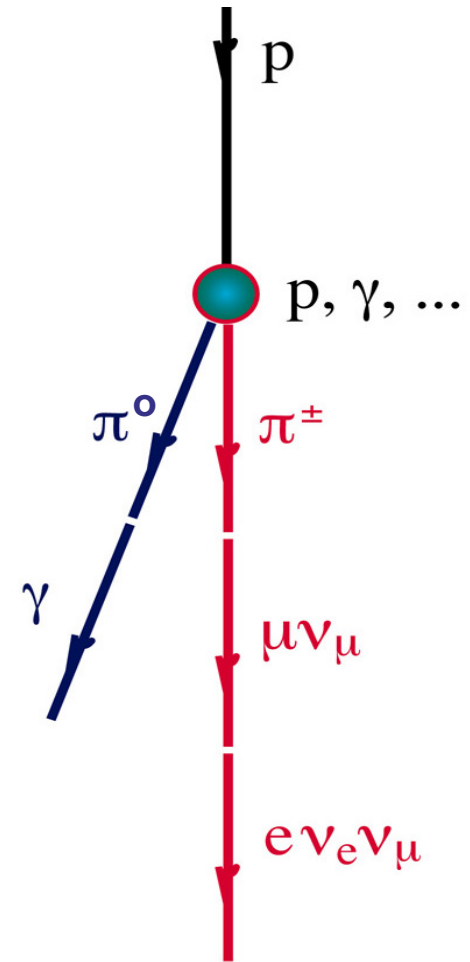
- Sind die Aktiven Galaktischen Kerne die gesuchten extragalaktischen Beschleuniger?
- Sind es die einzigen?
- Wie entstehen die Materie-„Jets“?

Wir wissen es nicht!

Wir brauchen mehr Information.

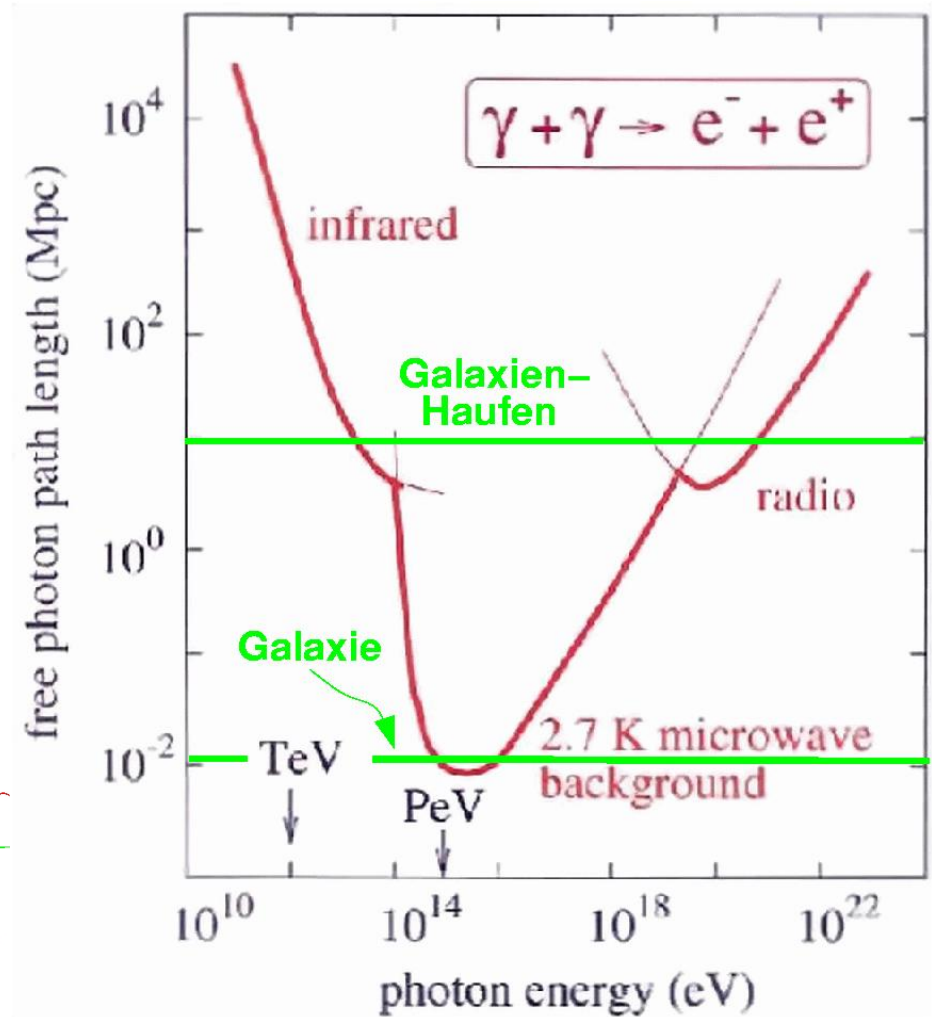
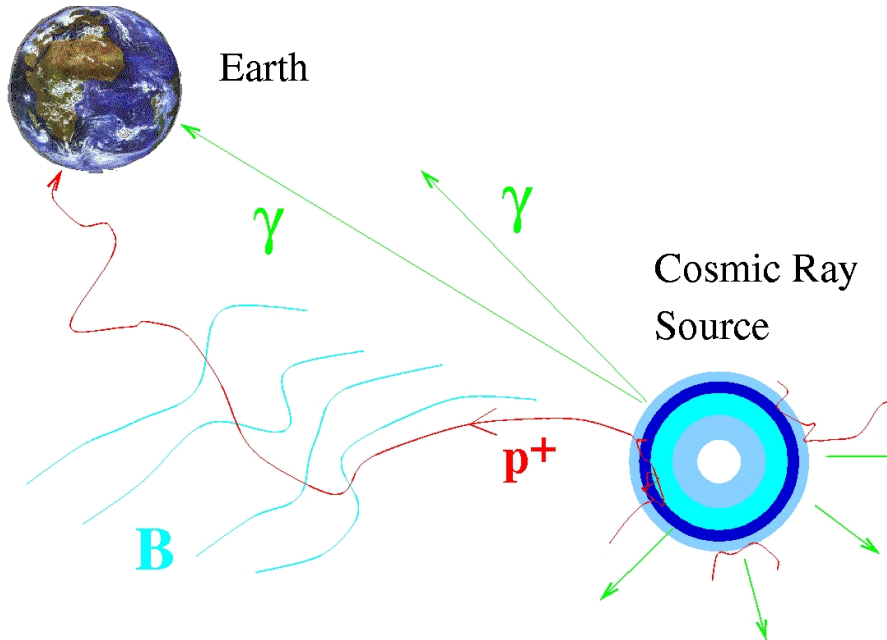
Protonen, Photonen und Neutrinos

- Hochenergetische Protonen und Kerne reagieren mit Teilchen (Protonen, Kerne, Photonen) in ihrer Umgebung
- Dabei entstehen instabile Teilchen (π^0 , $\pi^\pm$), deren Zerfall Photonen und Neutrinos freisetzt
- Photonen können auch von Elektronen erzeugt werden, nicht aber Neutrinos!



Gamma-Astronomie

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



Photon

Teilchenschauer

Nachweis von Gammastrahlung

~ 10 km

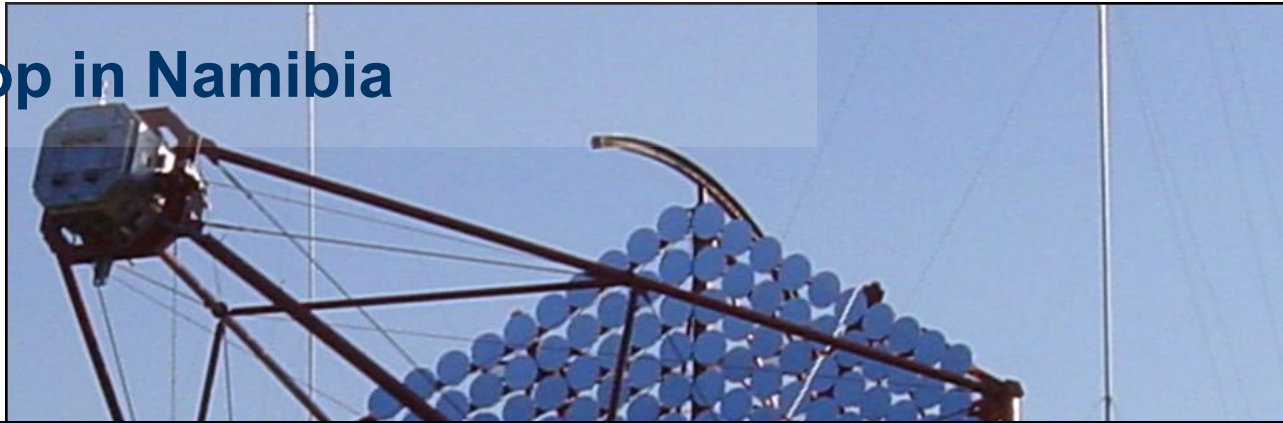
Cherenkov-Licht

- Nachweis ultrakurzer Lichtblitze
- Mehrere Teleskope verbessern Richtungsbestimmung
- Benötigt dunkle, klare Nächte
- Energiebereich: einige 10^{10} eV – ca. 10^{14} eV

H.E.S.S.-Kollaboration

Das H.E.S.S.-Teleskop in Namibia

4 x 108 m² Spiegel



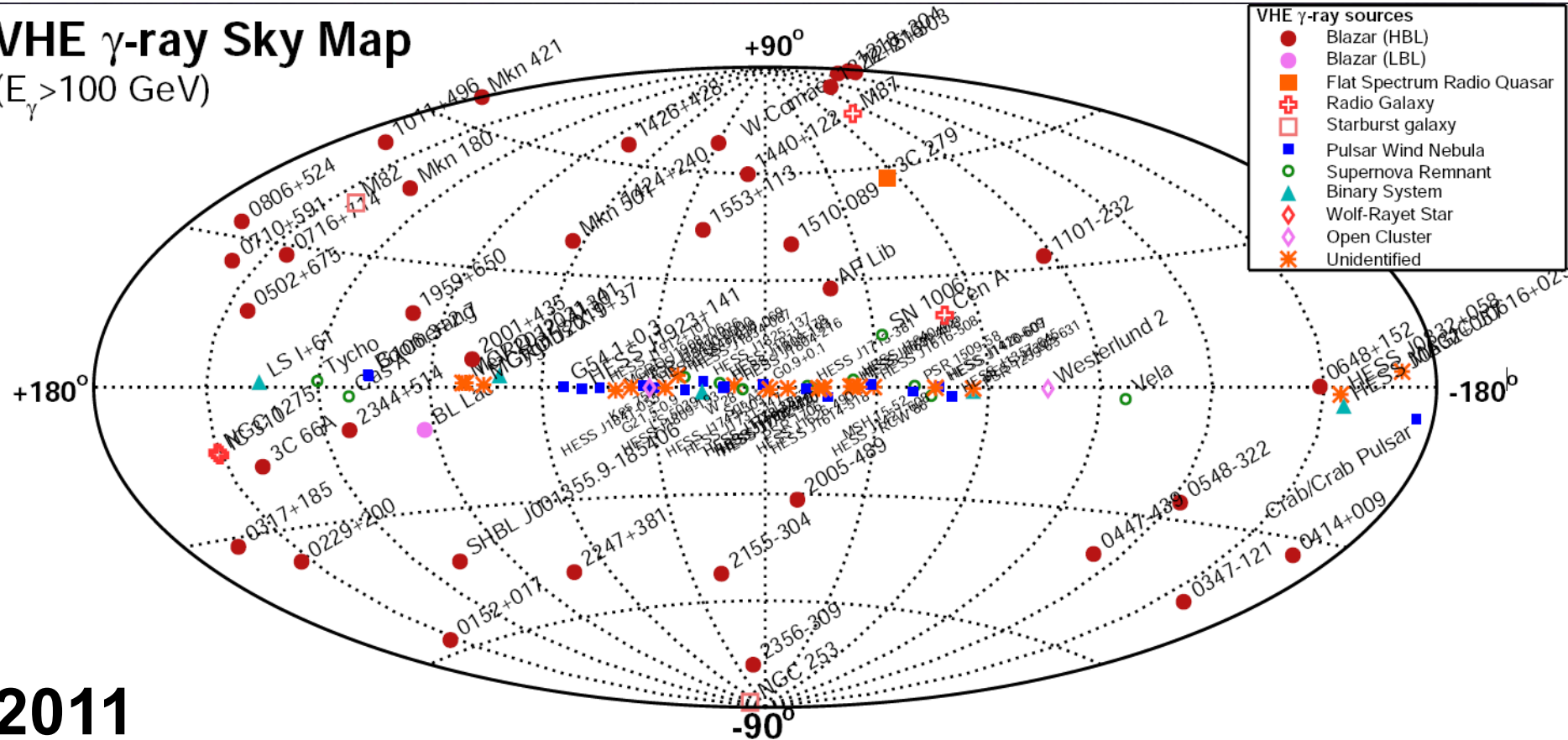
H.E.S.S.-Kollaboration



Montage: zentrales Teleskop mit 600 m² Spiegel (im Bau)

Die TeV-Gamma-Himmelskarte

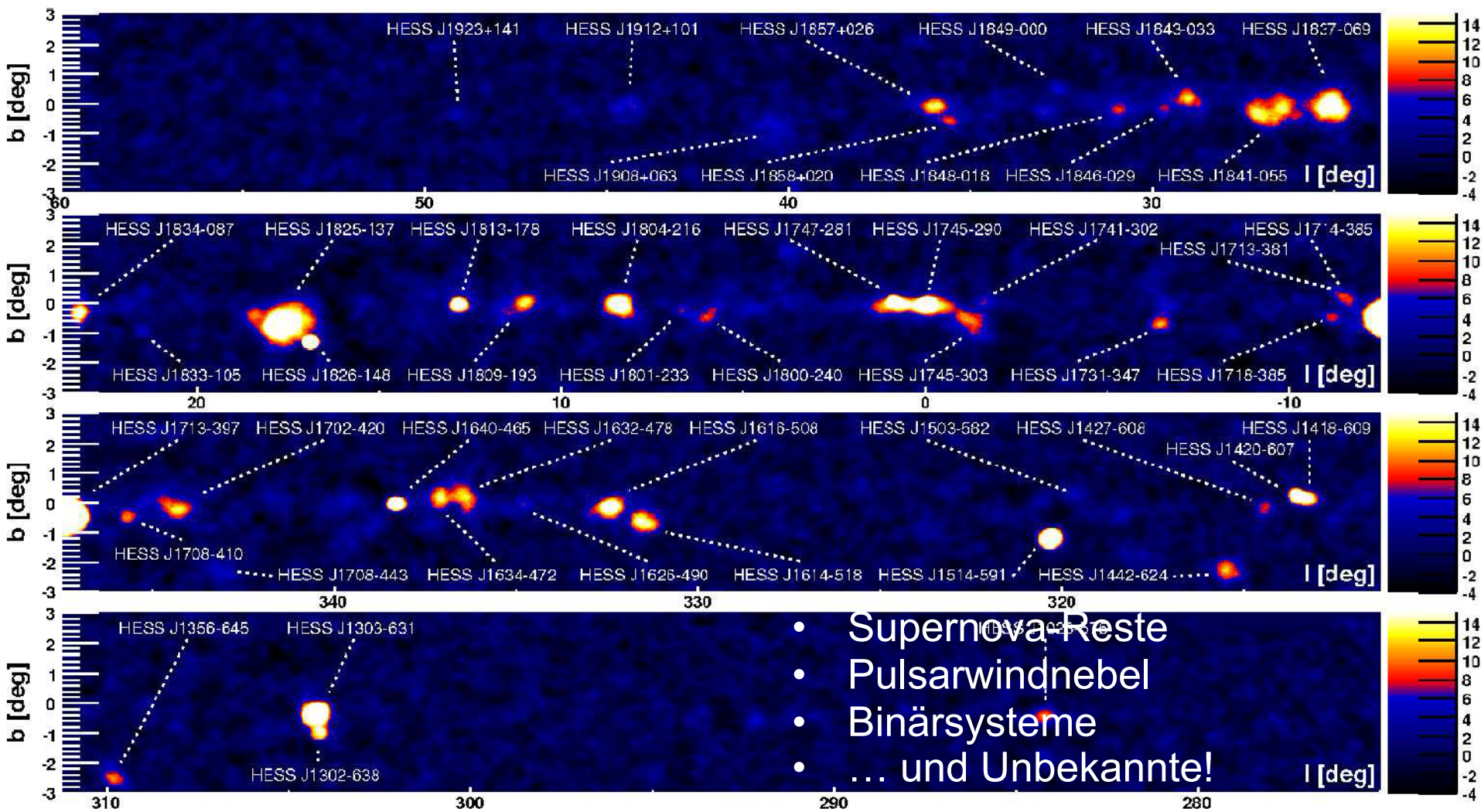
VHE γ -ray Sky Map ($E_\gamma > 100$ GeV)



2011-01-08 - Up-to-date plot available at <http://www.mpp.mpg.de/~rwagner/sources/>

.. viele Arten von Quellen, die meisten galaktisch

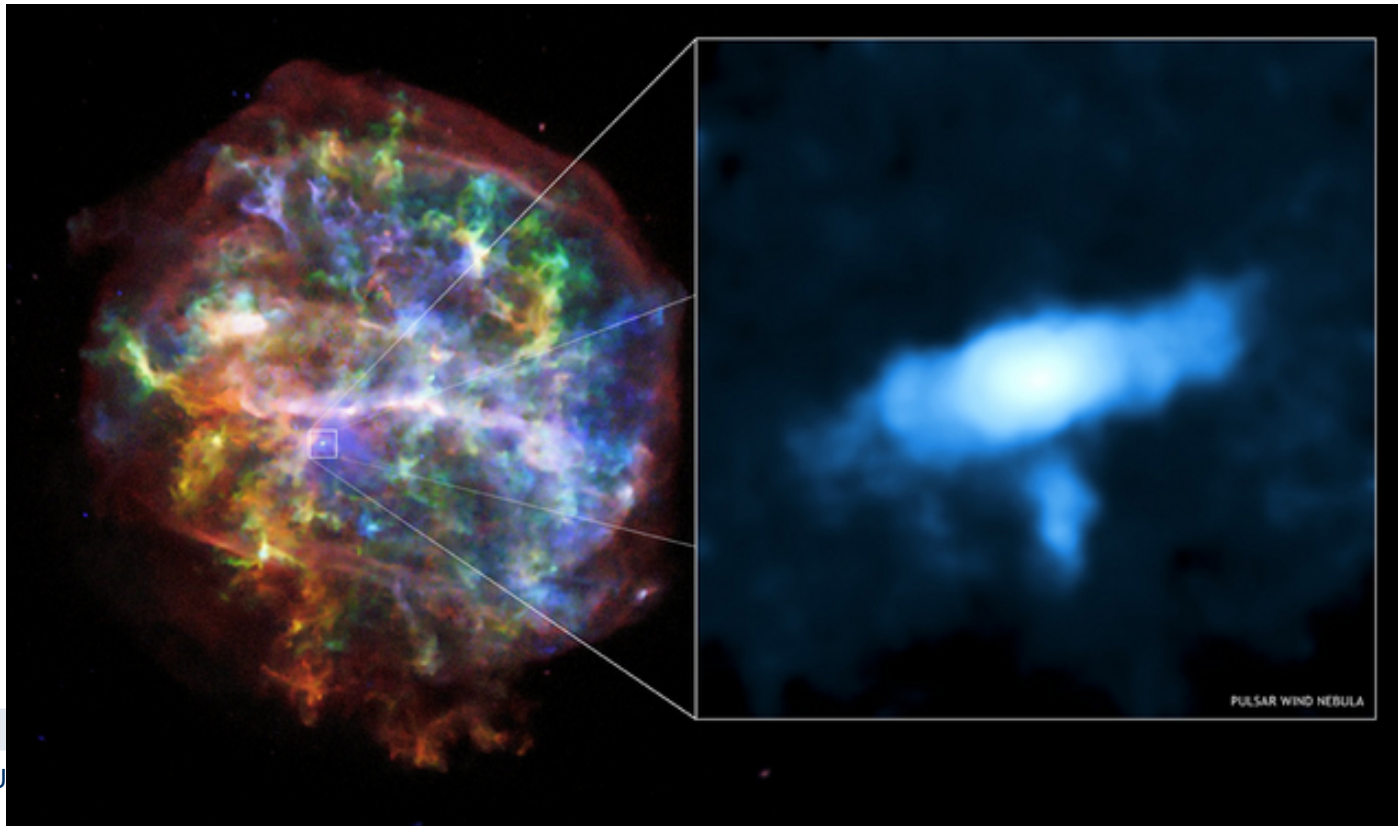
H.E.S.S.: Die galaktische Ebene



- Supernova Reste
- Pulsarwindnebel
- Binärsysteme
- ... und Unbekannte!

Was ist ein Pulsarwindnebel?

- Bei Supernova-Explosion entsteht extrem magnetisierter Neutronenstern
- Rotationsachse $\neq$ Magnetfeldachse
- Extreme elektrische Felder beschleunigen Teilchen
- Ausfluss trifft Supernova-Explosionswolke („Nebel“)



- Supernova-Remnant
RXJ1713-3946
(in der Milchstraße)

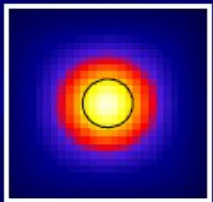
Ein weiteres wichtiges H.E.S.S.-Ergebnis

-39

-39.5

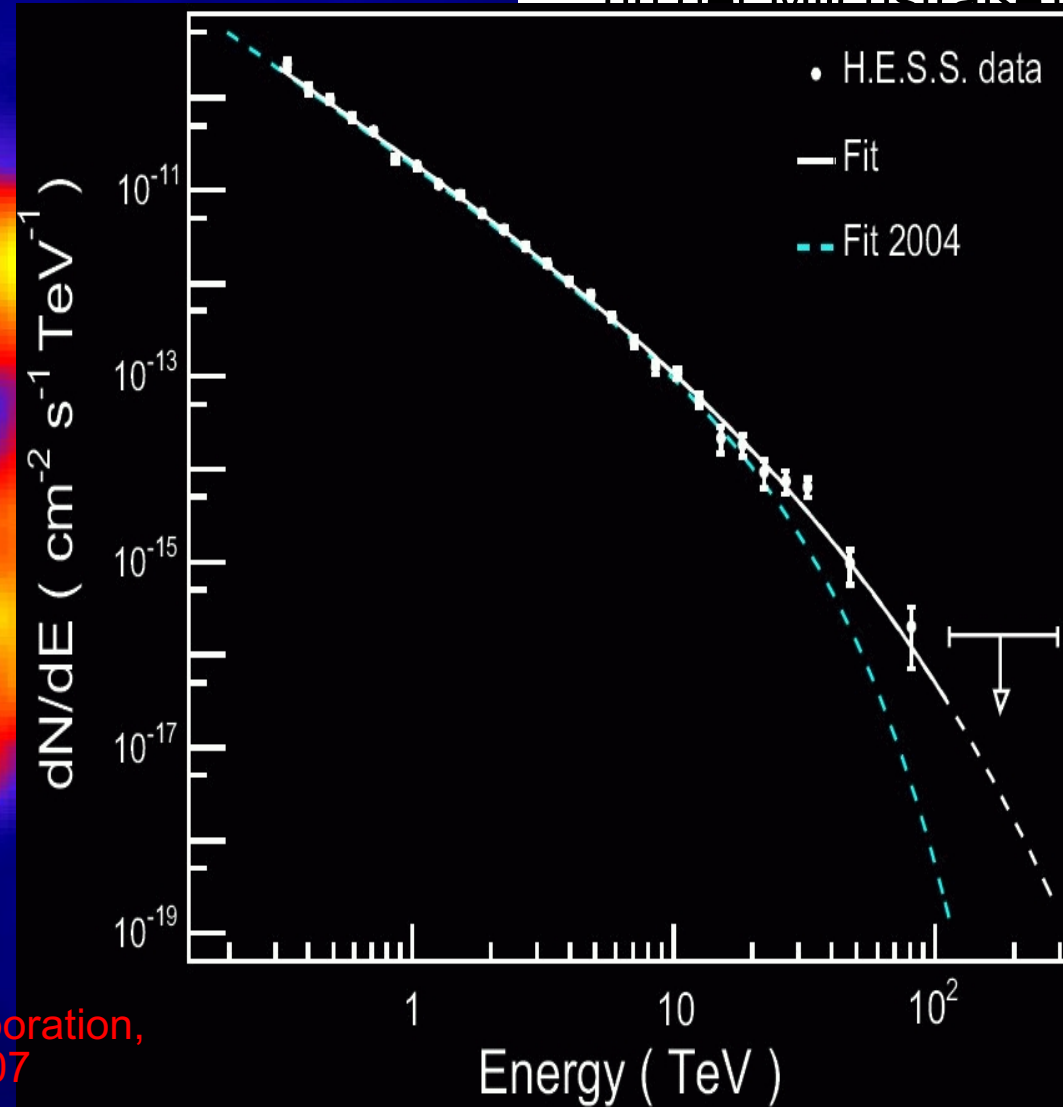
-40

PSF



17h15m

H.E.S.S.-Kollaboration,
ICRC 2007



Die Zukunft: Cherenkov Telescope Array (CTA)

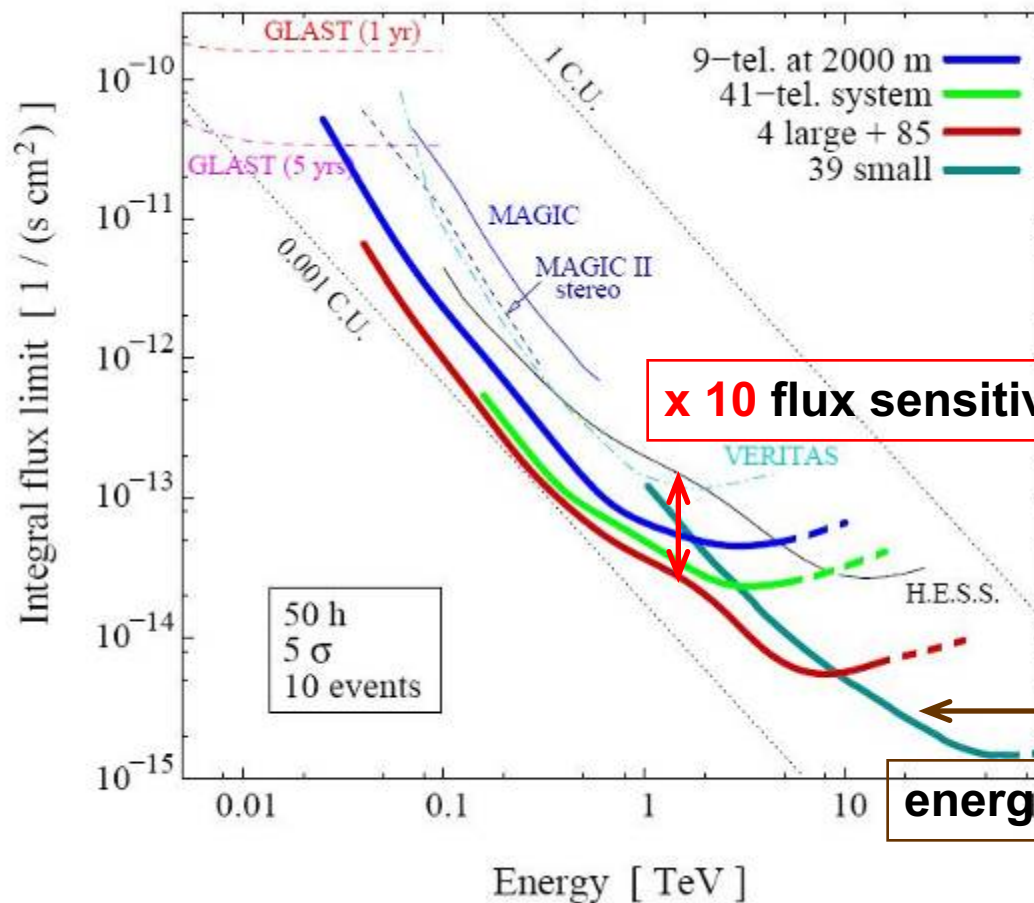
2 arrays: north+south

→ all-sky coverage

low energy
 $E_{\text{thresh}} \sim 10$
a few $\sigma=23$

core array

100 GeV-10 TeV



s

on

Was haben wir gelernt?

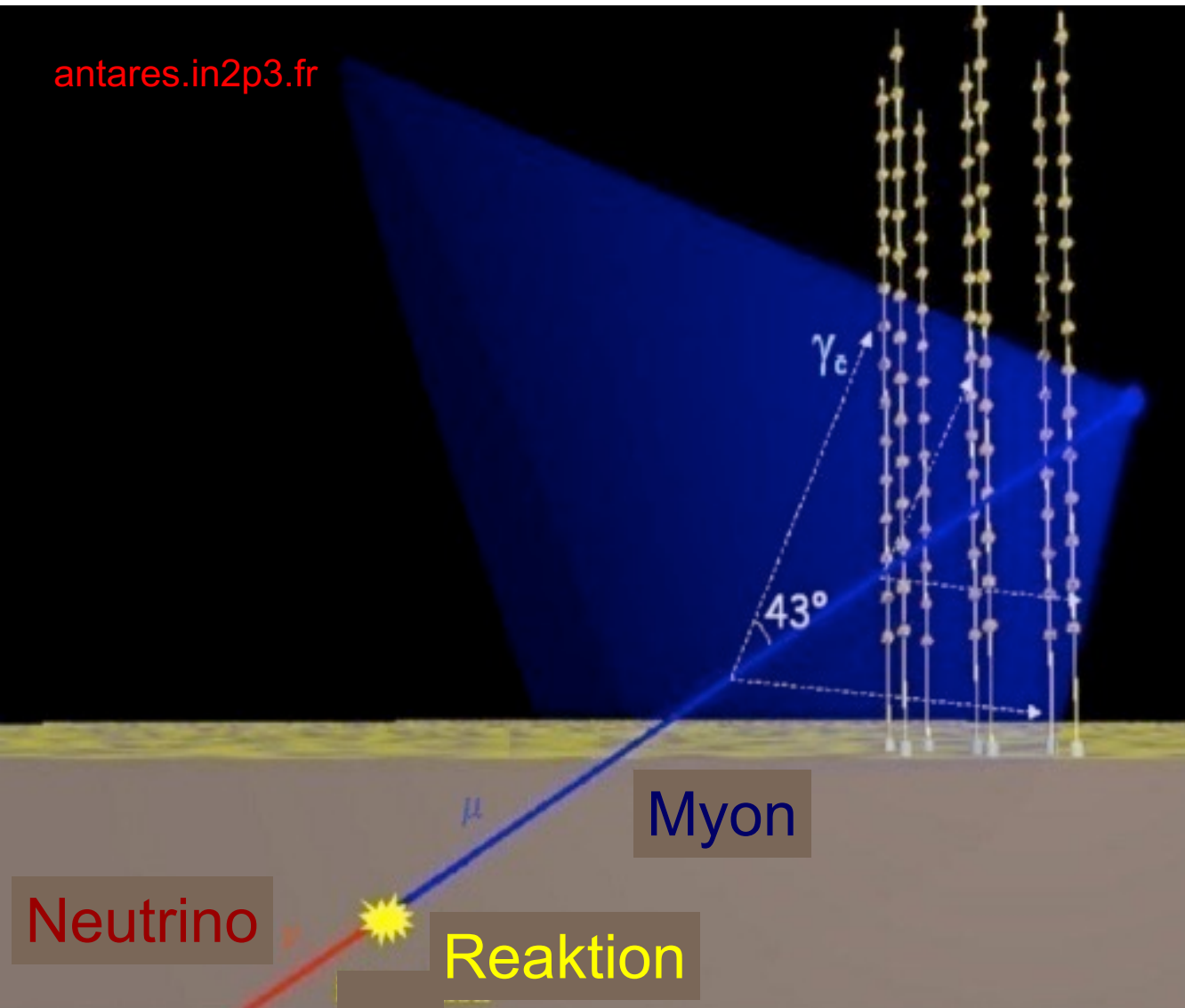
- Supernova-Reste sind gute Kandidaten für hadronische Beschleuniger, aber nicht bei höchsten Energien.
- Und Aktive Galaktische Kerne?
Emittieren tatsächlich Gamma-Strahlung ...
aber es ist unklar, wie diese entsteht.

Sind wir so schlau als wie zuvor?
Nein – aber Neutrinos wären gut!

Neutrinos – was ist das?

- Elektrisch neutrale Elementarteilchen fast ohne Masse, erzeugt bei radioaktiven Zerfällen und Kernreaktionen
- Extrem schwach wechselwirkend – können ohne Problem die ganze Erde durchdringen
- Hauptquelle: Sonne (jede Sekunde durchqueren uns $100.000.000.000.000 = 10^{14}$ solare Neutrinos!)
- Nachweis ausschließlich über Sekundärteilchen aus den seltenen Neutrinoreaktionen.

Wie ein Neutrinoteleskop funktioniert



- Neutrino-Reaktion erzeugt Myon
- Myon fliegt bis zu einigen km durch Wasser oder Eis
- Erzeugt kurzen blauen Lichtblitz (Cherenkov-Strahlung)
- Messung durch hochempfindliche Licht-Sensoren

Die Neutrinoteleskop-Weltkarte



AMANDA

●
South Pole

IceCube

Unter Wasser: ANTARES

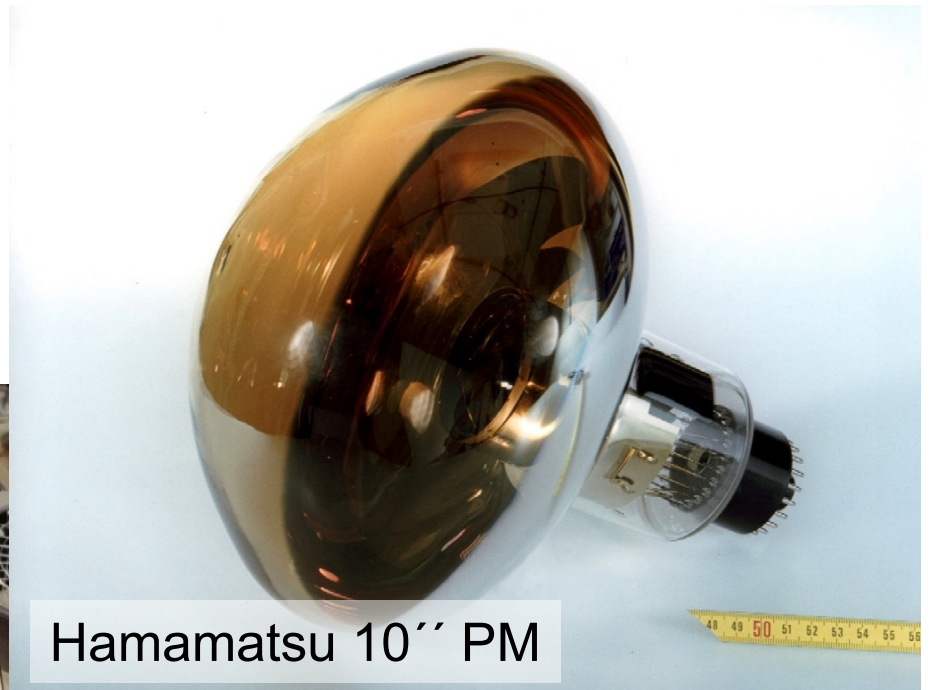
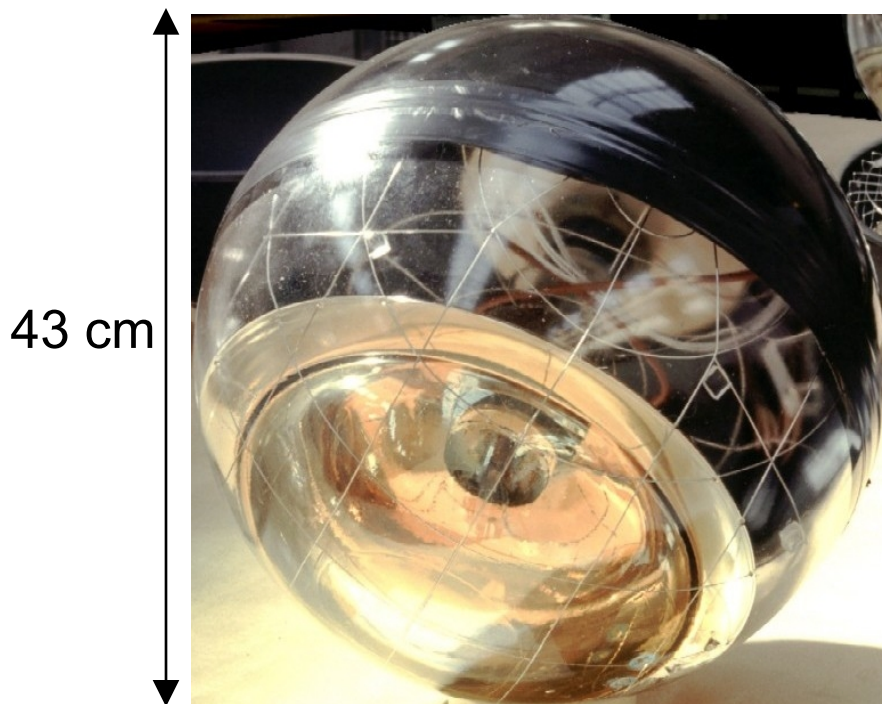
- Im Mittelmeer bei Toulon
- 2500 m Meerestiefe
- Etwa 0.03 km³
- 900 Photomultiplier

400 m

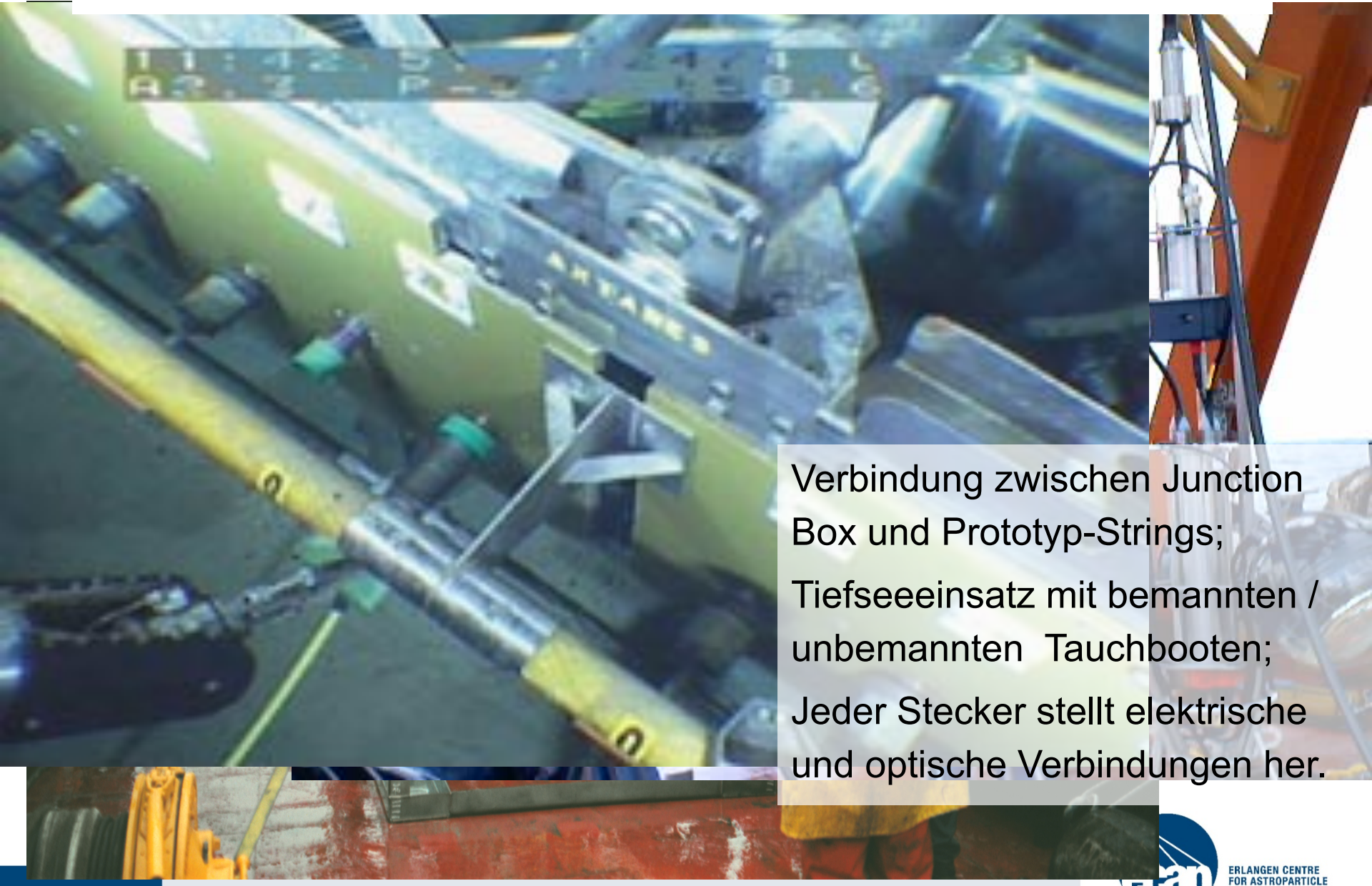
200 m

ANTARES: Optische Module

- Photomultiplier:
 - Zeitauflösung ~ 1 ns;
 - Quanteneffizienz $> 20\%$ für $330 \text{ nm} < \lambda < 460 \text{ nm}$;
- Glas-Kugeln:
 - getestet bis 600 bar;

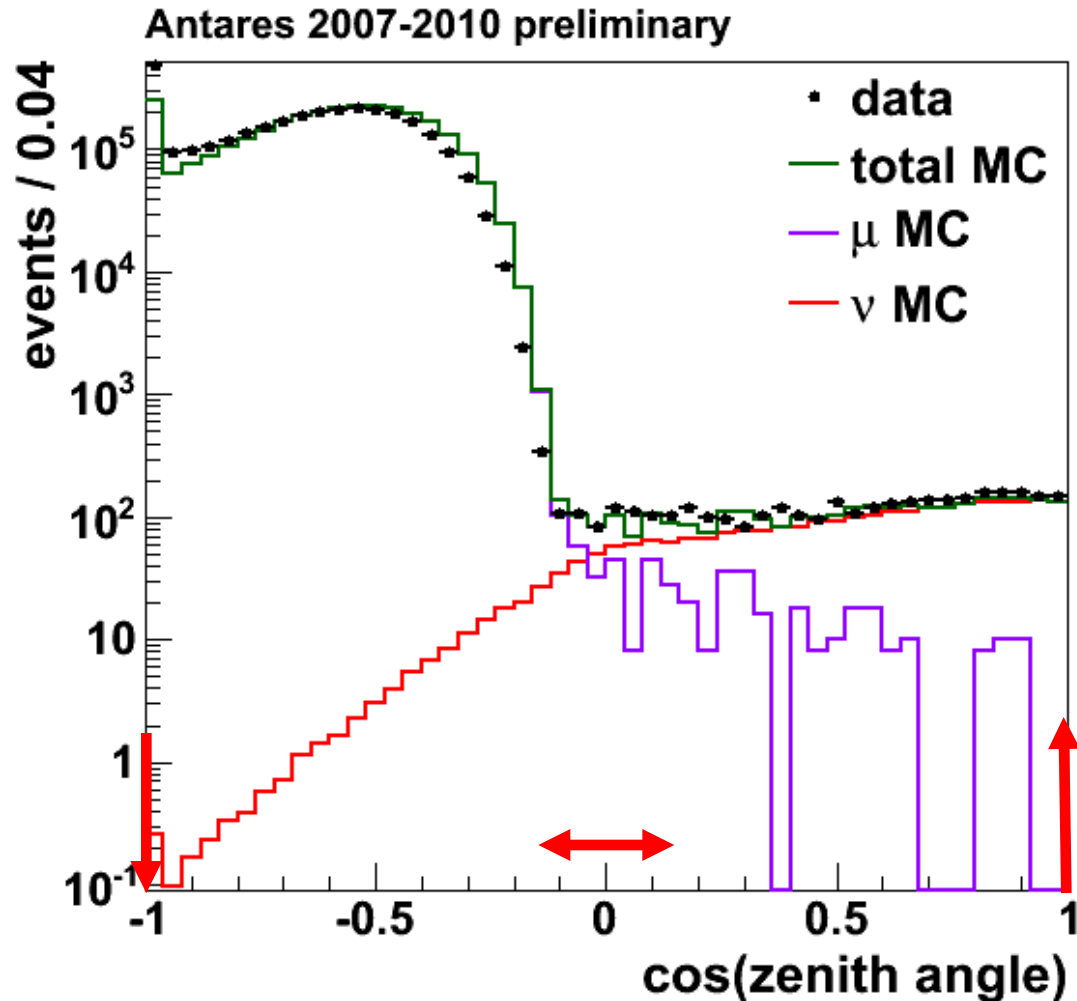


ANTARES: Meeresoperationen



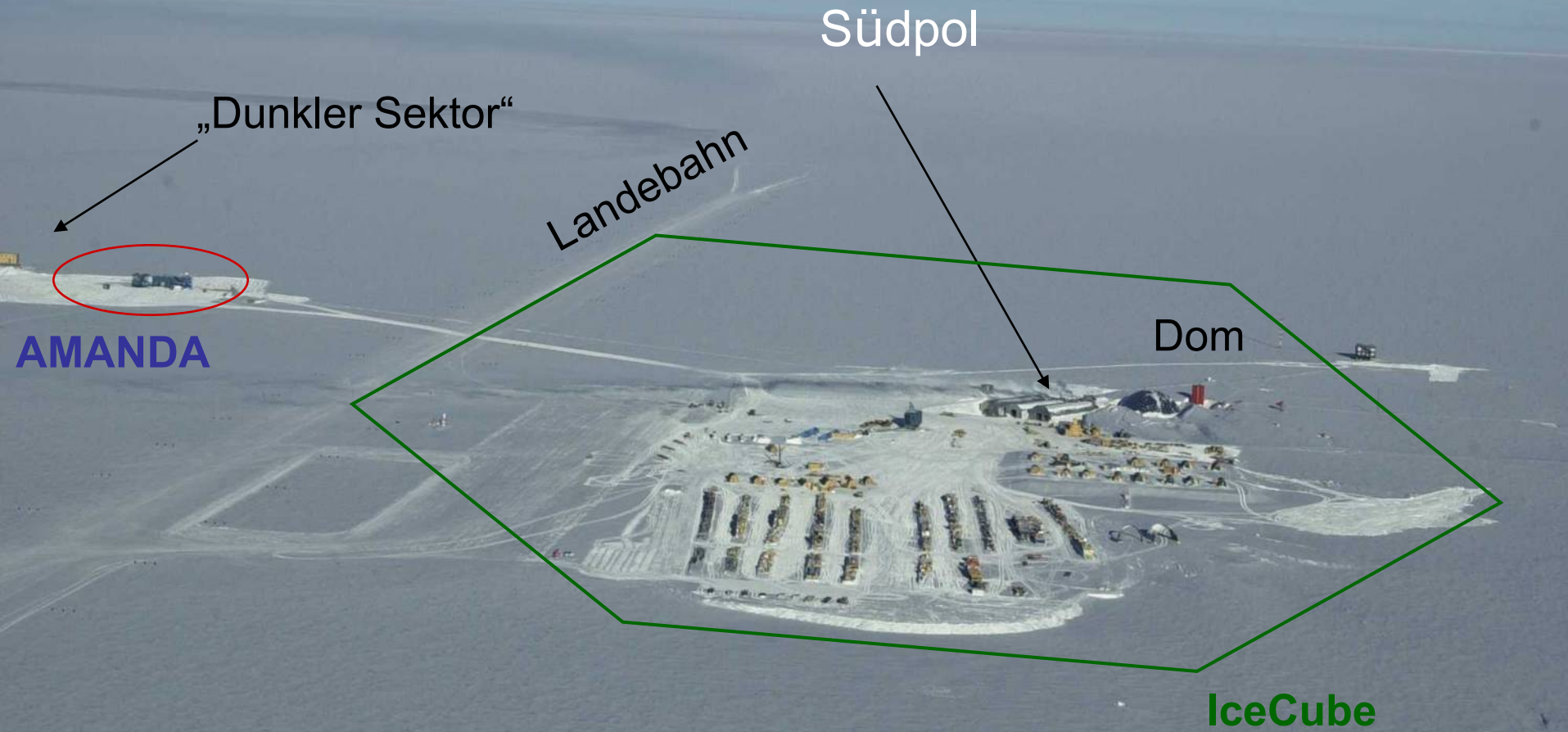
Verbindung zwischen Junction Box und Prototyp-Strings;
Tiefseeinsatz mit bemannten / unbemannten Tauchbooten;
Jeder Stecker stellt elektrische und optische Verbindungen her.

ANTARES: Neutrinos und Myonen

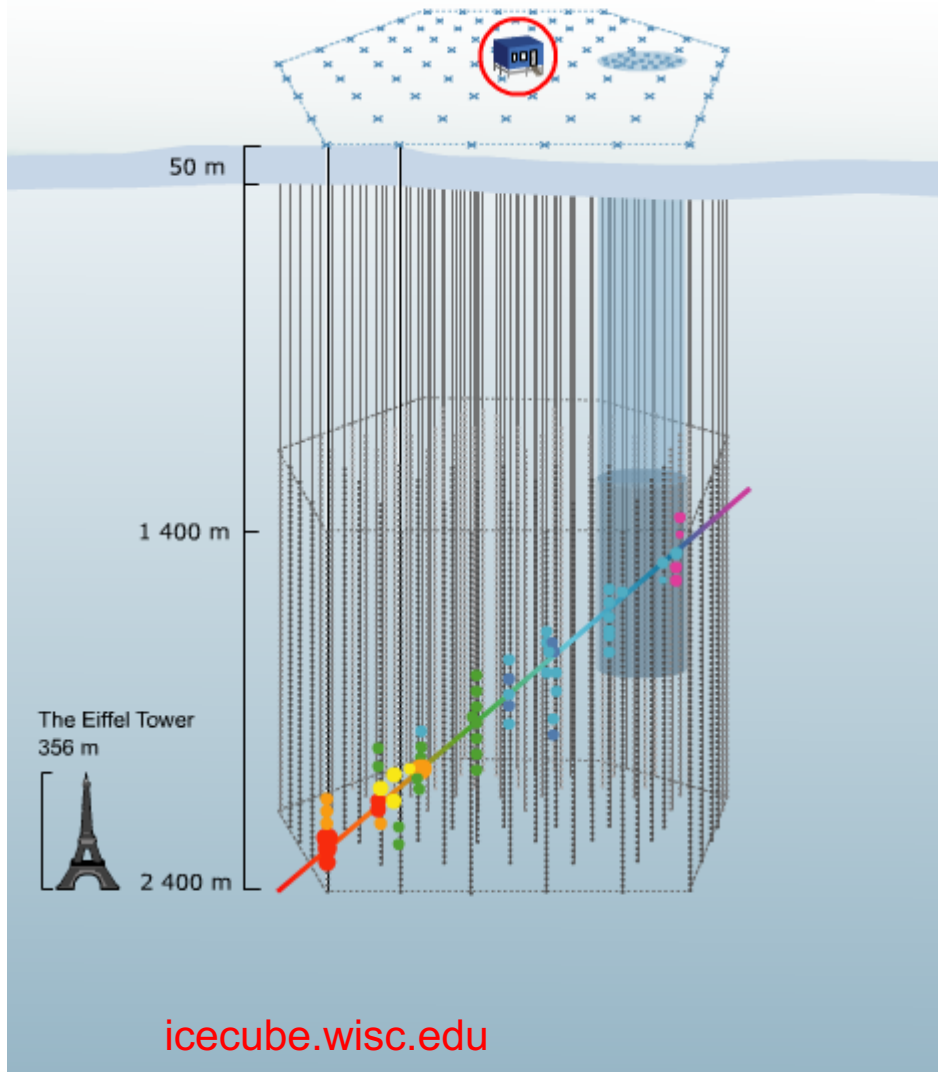


- Von unten: Neutrinos aus Reaktionen kosmischer Strahlung
- Von oben: Myonen aus Reaktionen kosmischer Strahlung (atmosphärische Myonen).
- Suche nach kosmischen Myonen:
 - Statistische Häufungen (Richtung, Energie)
 - Koinzidenz mit anderen Beobachtungen

Im Eis: IceCube



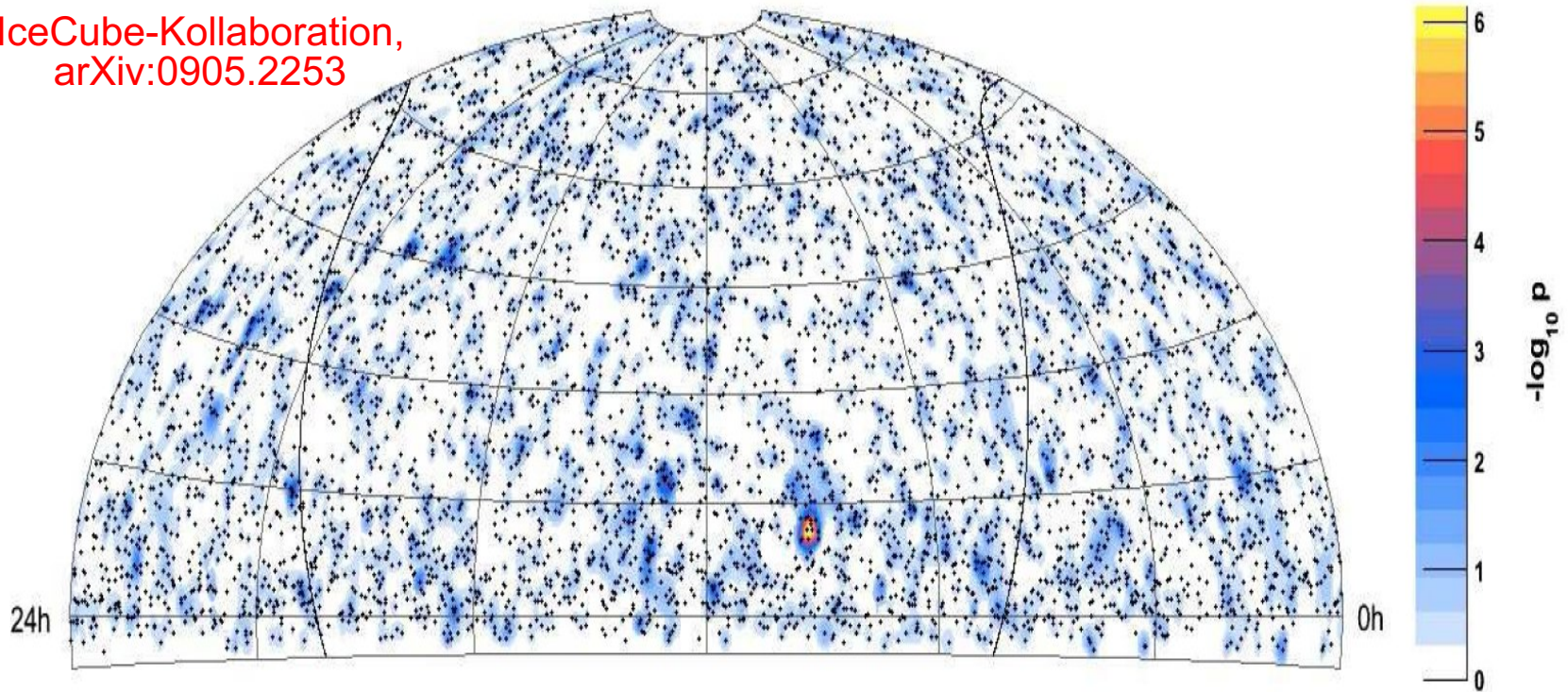
Ein IceCube-Ereignis



- Neutrino kommt von unten (Erde als Filter!)
- Myon wird erzeugt
- Präzise Messung der Ankunftszeiten des Cherenkov-Lichts an den Sensoren
- Rekonstruktion von Myon und Neutrino

Ergebnisse und doch keine

IceCube-Kollaboration,
arXiv:0905.2253



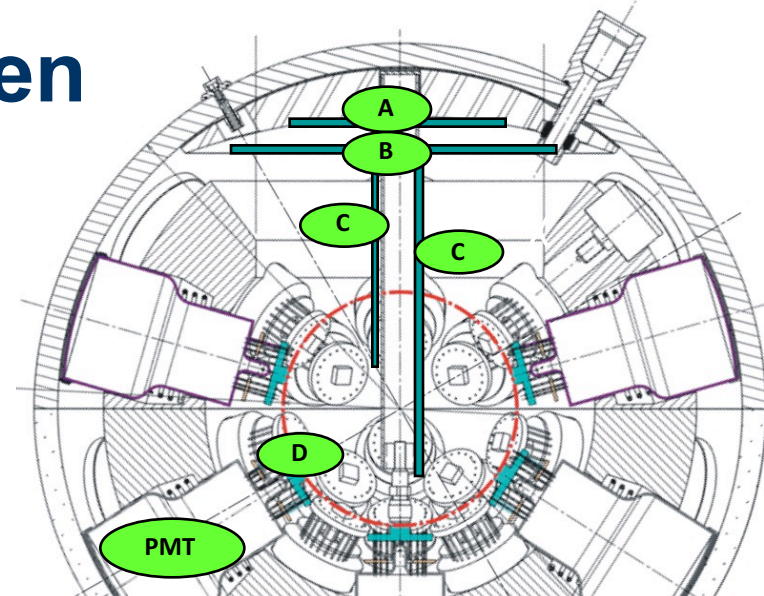
- „Himmelskarte“ von IceCube-Neutrino-Ereignissen
- Suche nach signifikanten Anhäufungen – noch nicht erfolgreich!

Die Zukunft: KM3NeT

- Instrumentiertes Wasservolumen etwa $3\text{-}6\text{ km}^3$
- 12000 optische Module
- 20GByte Rohdaten pro Sekunde
- Priorität: Galaktische Neutrinoquellen
- Kostenpunkt $\sim 200\text{ M€}$

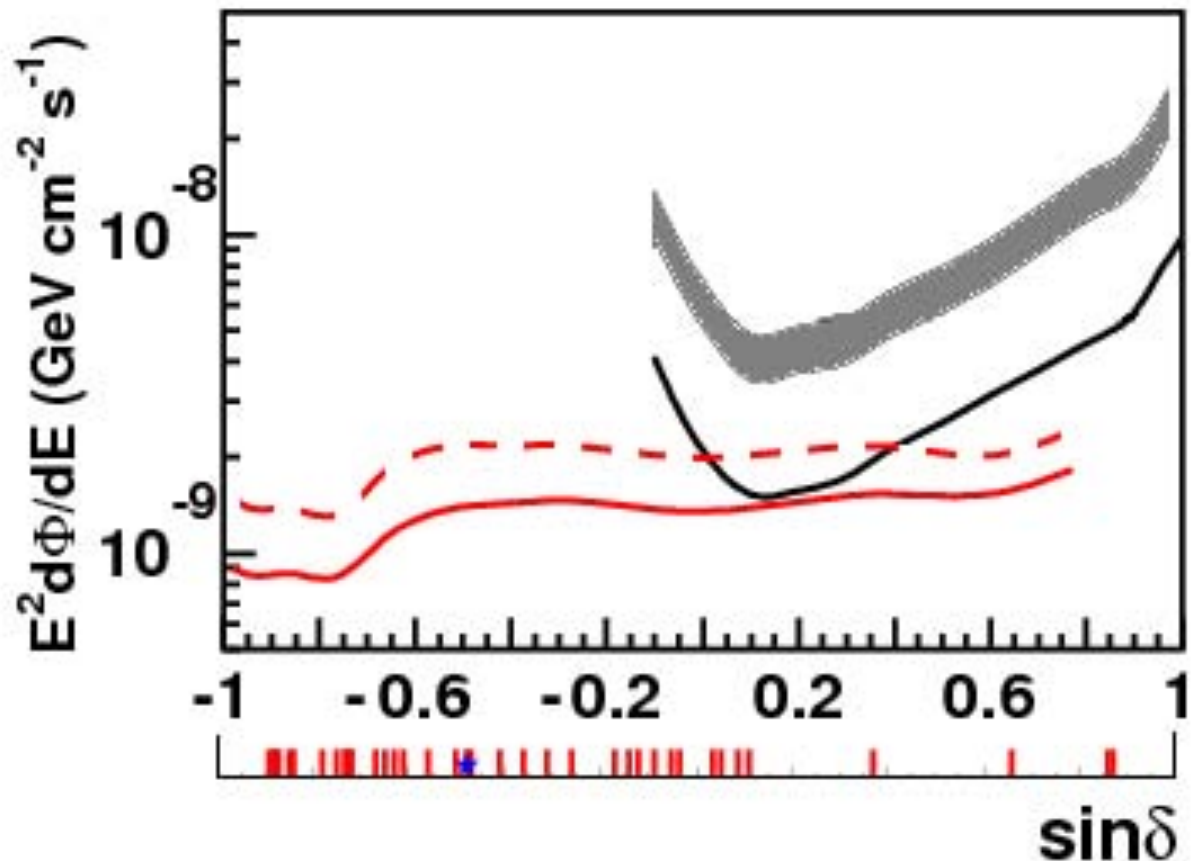
Optisches Modul mit vielen Photomultipliern

- 31 3-inch PMTs in 17-inch Glas-Behälter
- Hochspannungsversorgungen (insgesamt ~140 mW) **(D)**
- Elektronik **(B,C)**
- Aluminium-Kühlstruktur **(A)**
- Eine Kabeldurchführung
- 2mm optisches Gel



... und was kann KM3NeT?

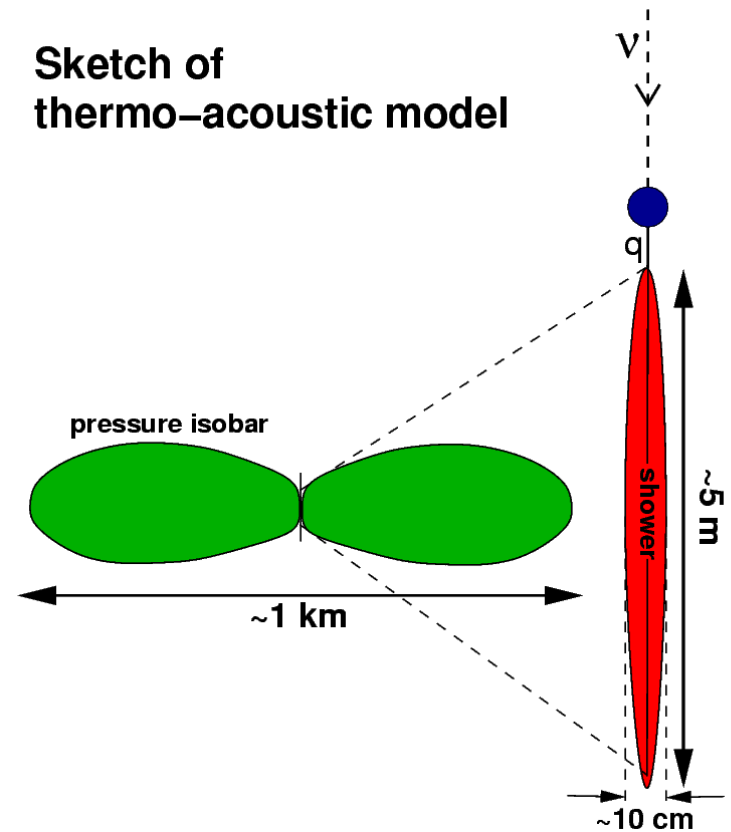
- Sensitivitätsabschätzung:
Wesentlich besser als IceCube
- Beobachtet
die gesamte
galaktische
Ebene
- Breite Himmels-
abdeckung



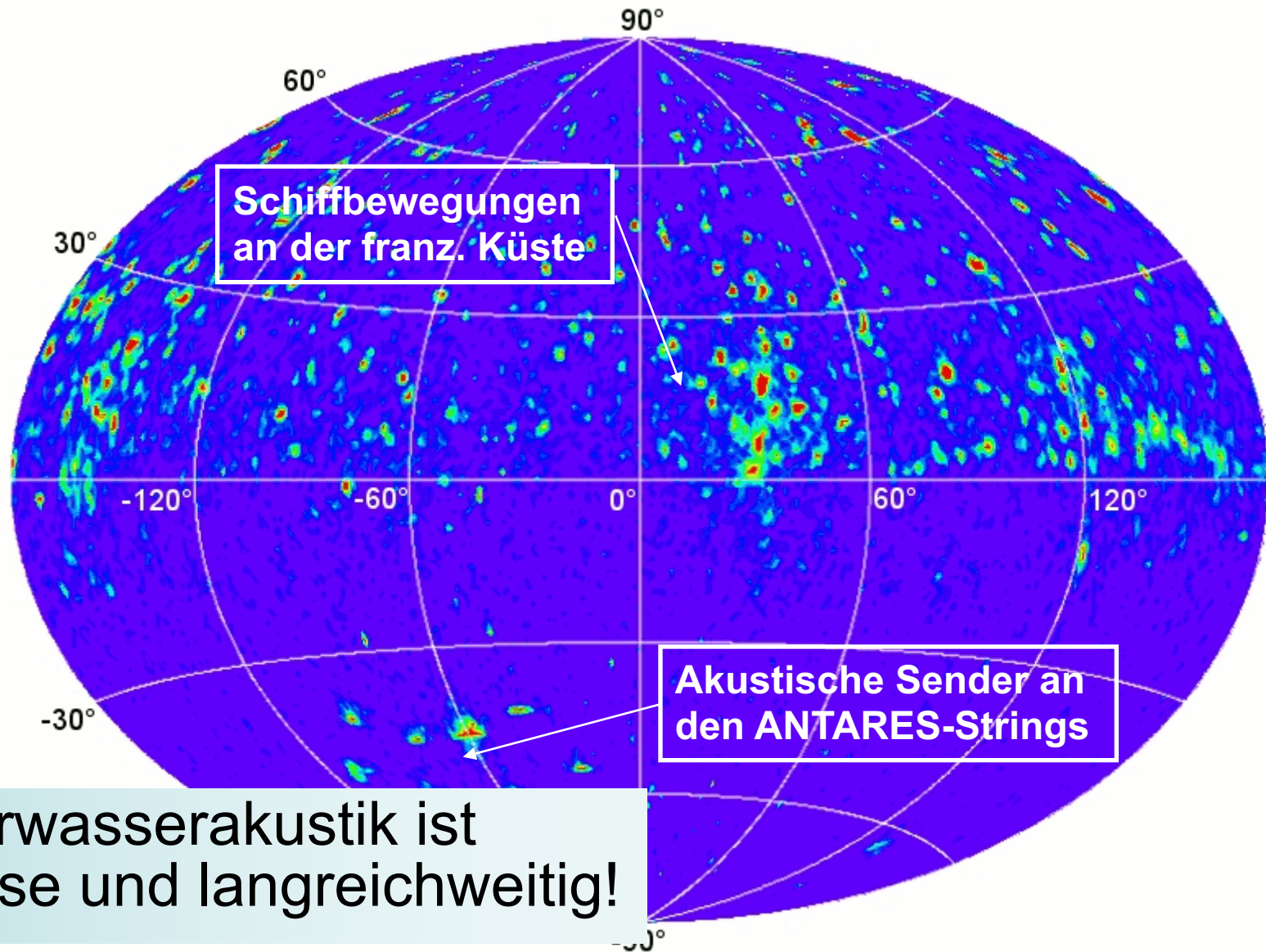
Weite Zukunft: Akustischer Neutrino-Nachweis

- 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 $\sim 1\text{ km}$);
- Option für ν -Nachweis bei Energien über $10^7 \dots 10^8\text{ GeV}$?

Sketch of thermo-acoustic model



Erste akustische Ergebnisse: Eine Meereskarte



Unterwasserakustik ist
präzise und langreichweitig!

Zusammenfassung und Ausblick

- Hochenergetische Teilchen aus dem Weltraum überbringen spannende Botschaften
- Ihr Nachweis und ihre Vermessung erfordert große experimentelle Anstrengungen – oft an entlegenen Standorten
- Laufende Experimente liefern aufregende Daten.
Neue, noch empfindlichere Detektoren werden vorbereitet
- Die Universität Erlangen ist in diesem Forschungsgebiet führend vertreten

Informationen und Kontakte:

- www.ecap.physik.uni-erlangen.de
(Erlangen Centre for Astroparticle Physics)
- antares.in2p3.fr
(ANTARES-Homepage)
- www.auger.org
(Auger-Homepage)
- www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS
(H.E.S.S.-Homepage)
- www.km3net.org
(KM3NeT-Homepage)
- uli.katz@physik.uni-erlangen.de
(Email Uli Katz)