

# Große Fragen der (Teilchen-)Astronomie

Stefan Hackstein

2nd year PhD student @



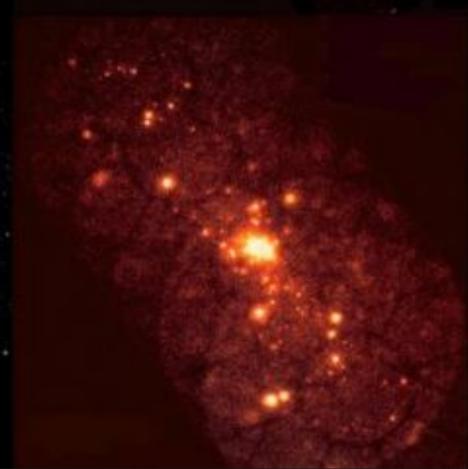
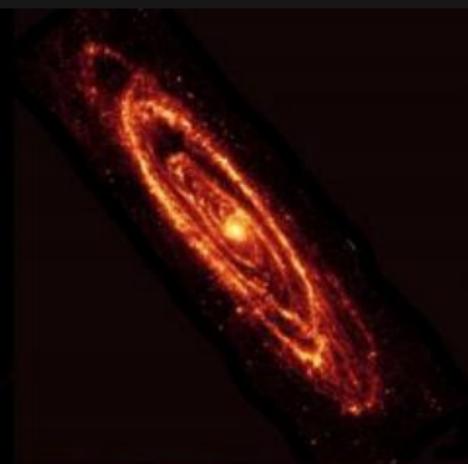
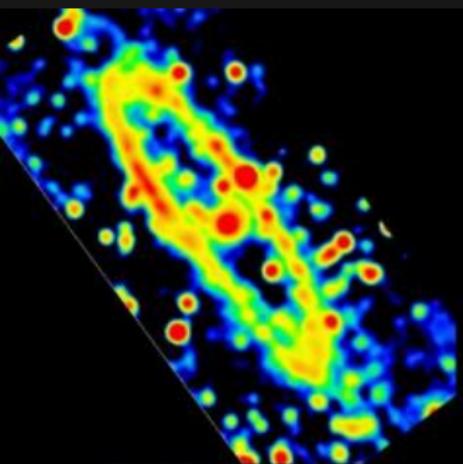
*stefan.hackstein@hs.uni-hamburg.de*

Supervisors: Marcus Brüggen, Franco Vazza

2018-10-25

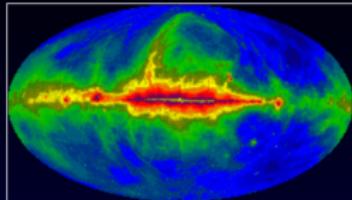
Astronomie = Licht der Sterne



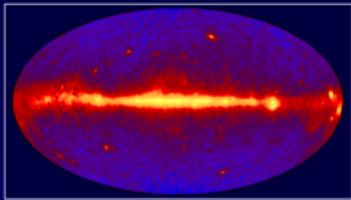
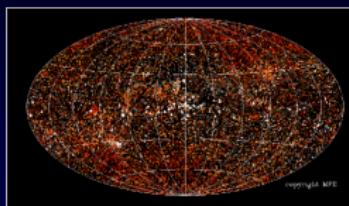


# Elektromagnetische Wellen: Bilder des Universums

Radio

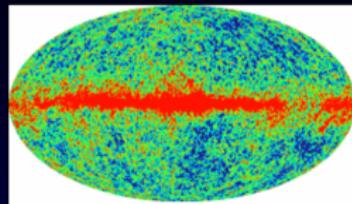


Röntgen-  
Strahlen

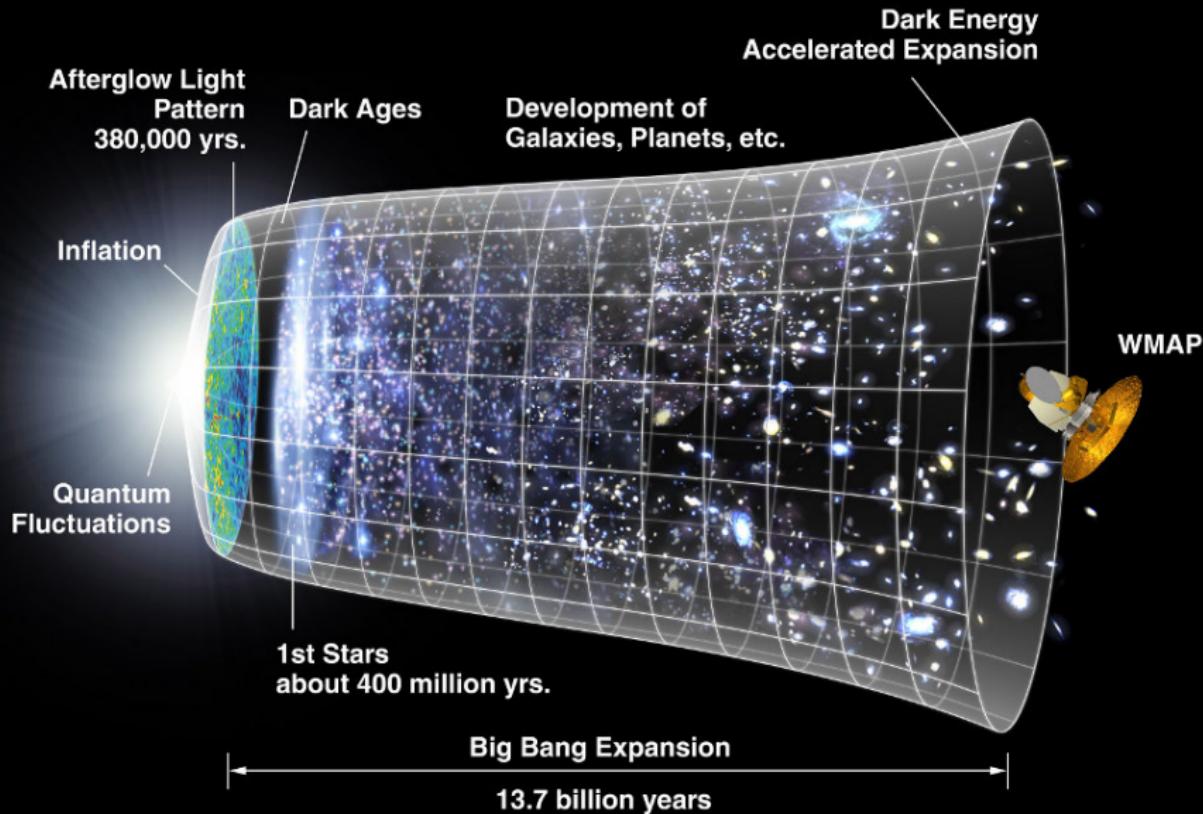


$\gamma$ - Strahlen

3-Kelvin  
Strahlung



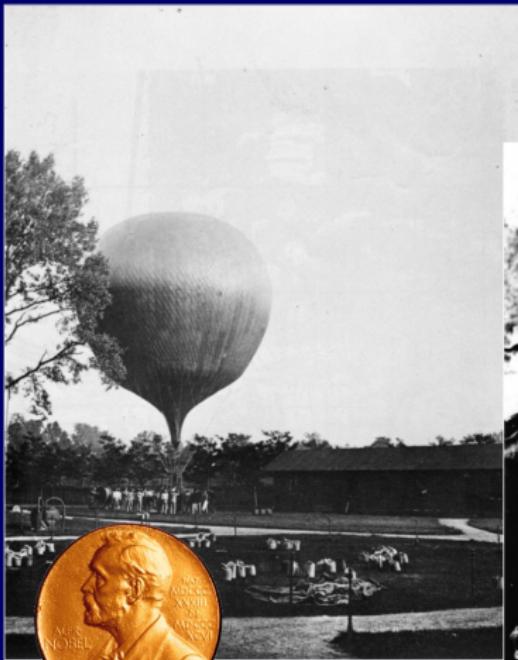
Sichtbares  
Licht



??? Astronomie = Licht ???

... die noch nie ein Mensch zuvor  
gesehen hat.

# Astronomy Früher



Nobelpreis 1936

**Victor Hess**  
**1912**



...und Heute...



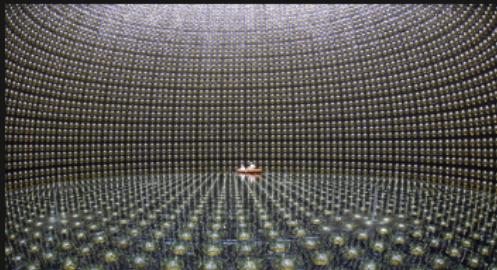
# Früher vs. Heute



→



→



→



# Neue Fenster der Astronomie



# Neutrinos

# Was sind Neutrinos?



Wolfgang Pauli

- ▶ Masse nahezu Null
- ▶ reagieren extrem schwach

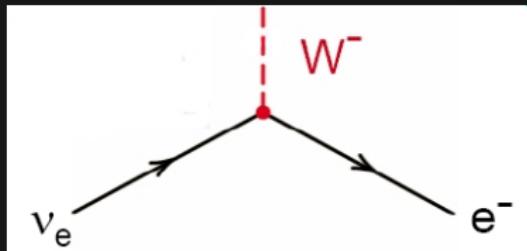
Postuliert: 1930

Nachweis: 1956

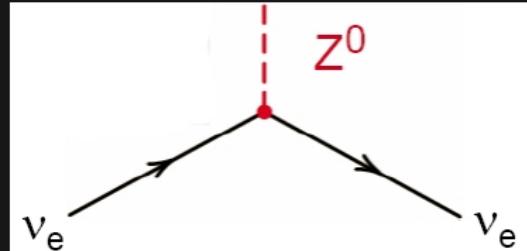
“Ich habe ein Teilchen postuliert, das man nicht nachweisen kann.”

# Neutrino-Wechselwirkungen

Lepton, das nur schwach oder gravitativ interagieren kann



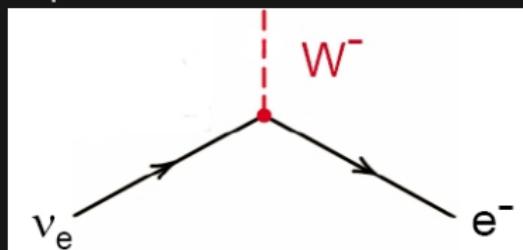
charged current (CC)



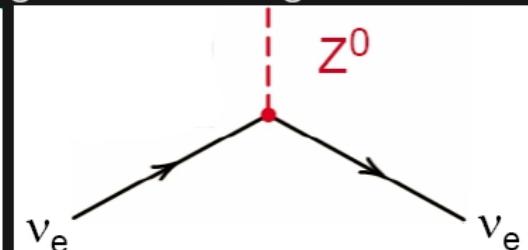
neutral current (NC)

# Neutrino-Wechselwirkungen

Lepton, das nur schwach oder gravitativ interagieren kann



charged current (CC)



neutral current (NC)

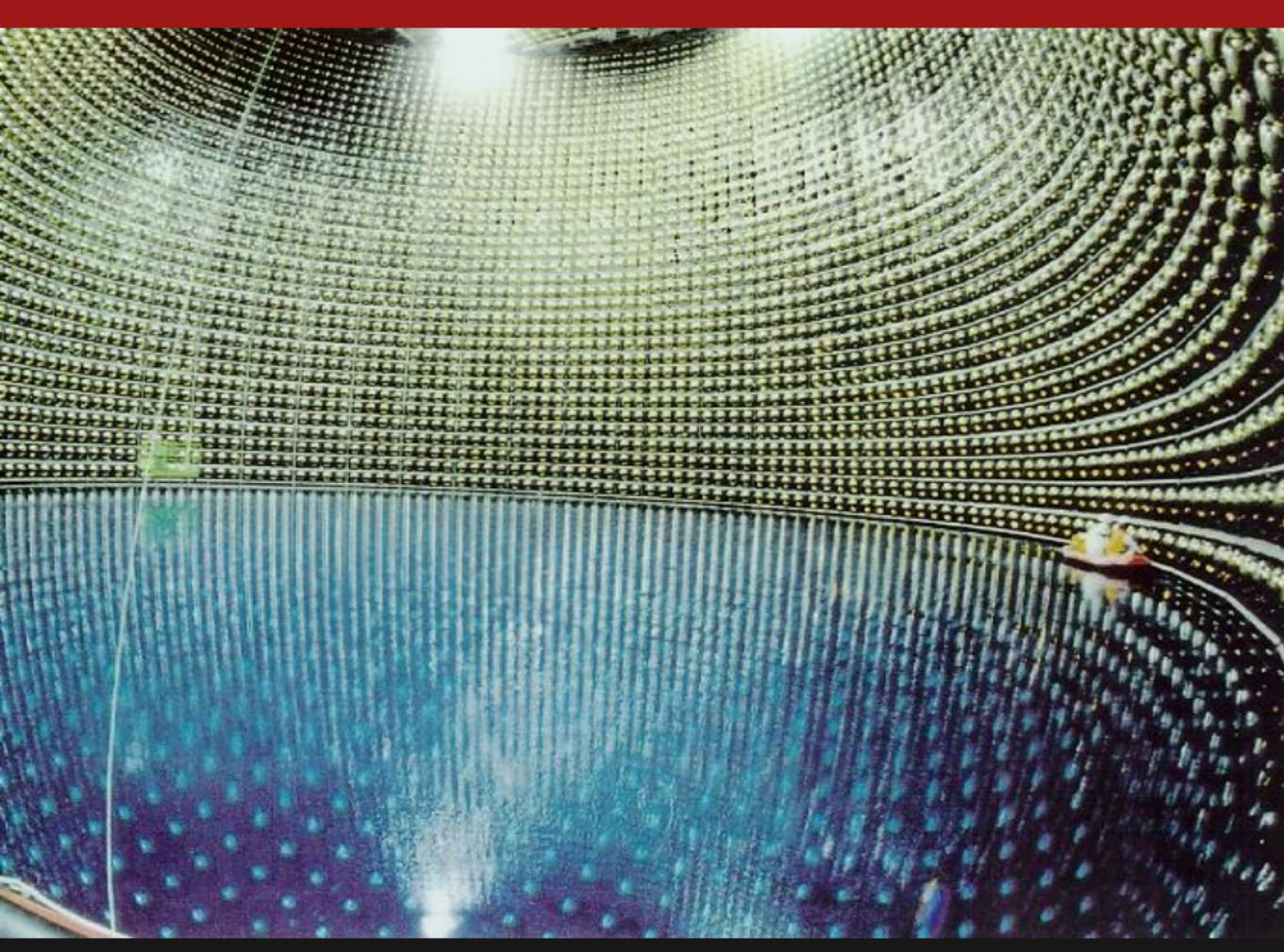
- ▶ Wirkungsquerschnitt extrem niedrig  
z. B. Elektronenneutrino auf Eisentarget

$$\sigma_{\text{tot}} = 1,7 \cdot 10^{-41} \text{ cm}^2 \frac{E_\nu}{\text{GeV}}$$

entspricht (bei  $E_\nu = 1 \text{ MeV}$ ) einer Wechselwirkungslänge von

$$L = \frac{1}{n\sigma} = 30 \text{ ly}$$

- ▶ steigende Energie  $\Rightarrow$  steigende Kopplungskonstante  
Erde für PeV-Neutrinos nicht mehr transparent.



# KamiokaNDE



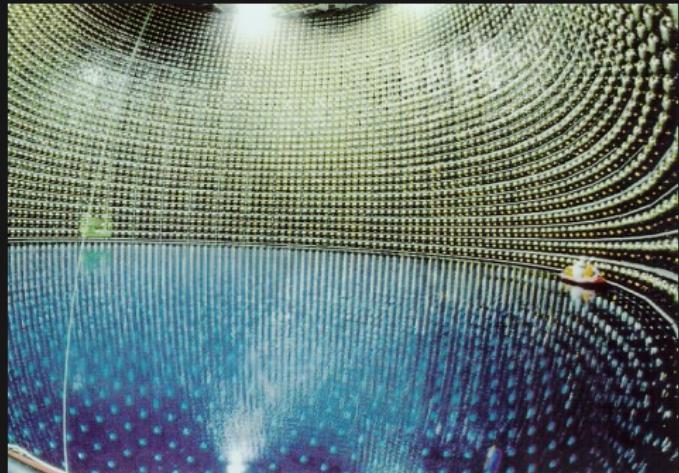
- ▶ Erbaut: 1982
- ▶ damals größter Tscherenkov Detektor der Welt
- ▶ 3.000 Tonnen Wasser, 1.000 Detektoren

# KamiokaNDE



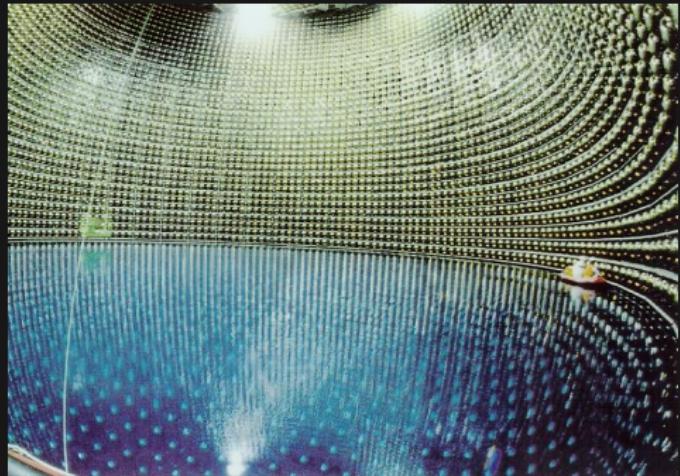
- ▶ mißt Lebensdauer von Protonen
- ▶ Beste Abschätzung:  
 $> 10^{31} \text{ yr}$
- ▶ Nobelpreis 2002

# Super-KamiokaNDE



- ▶ Erbaut: 1996
- ▶ derzeit größter Tscherenkow Detektor der Welt
- ▶ 50.000 Tonnen Wasser, 10.000 Detektoren
- ▶ 1 km unter Erdoberfläche

# Super-KamiokaNDE



- ▶ mißt Neutrinos
- ▶ daher: Abschirmung gegen andere Teilchen  
⇒ in einer alten Mine erbaut

# Astro2Go: die KamioKanne

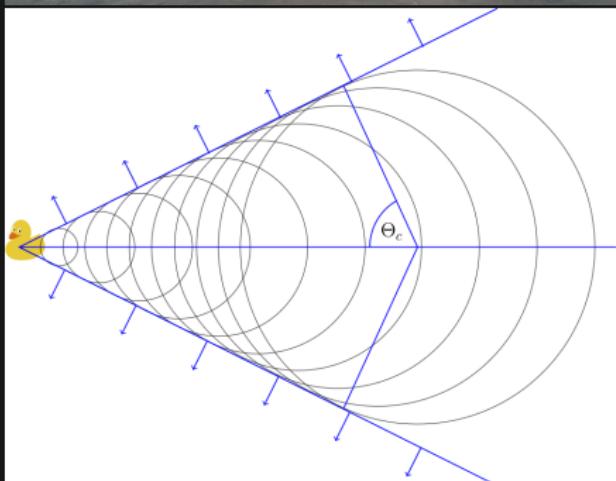


# Tscherenkov Strahlung

- ▶ geladenes Teilchen mit Überlichtgeschwindigkeit in einem Medium strahlt Licht entlang eines Machkegels aus
- ▶ Abstrahlwinkel bestimmt durch Geschwindigkeit  $\beta$ :

$$\cos \Theta_c = \frac{1}{n\beta}$$

- ▶ Strahlung breitbandig, Messung meist im optischen Bereich



# Anforderungen an das Medium

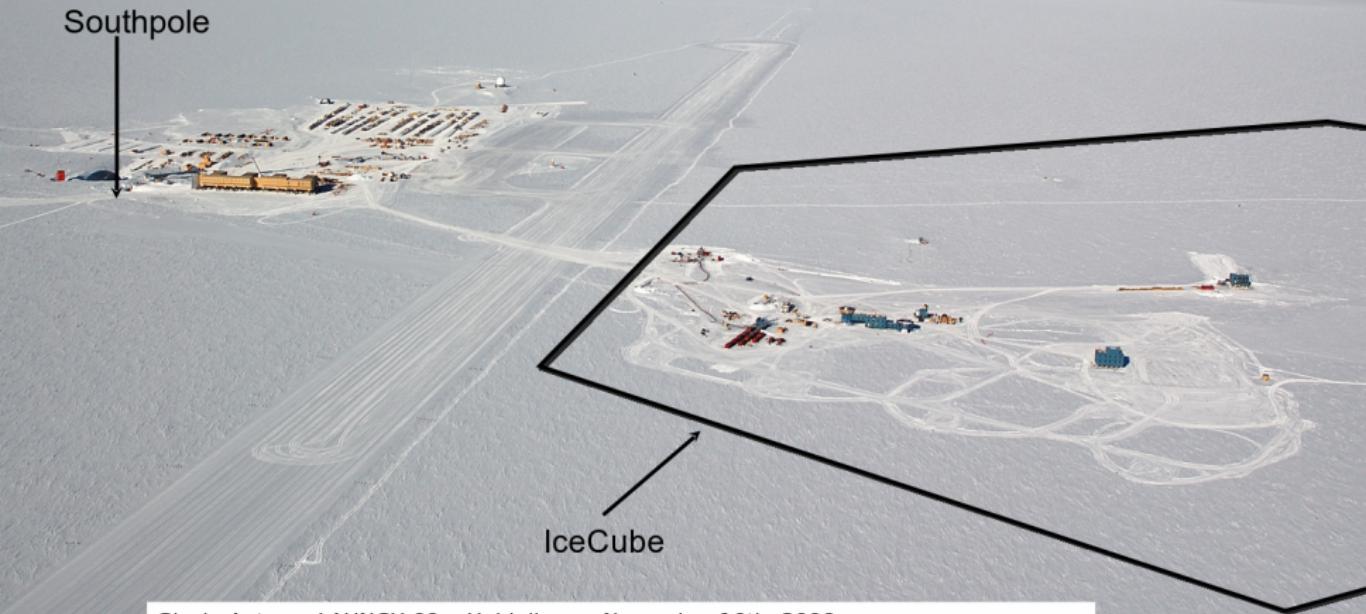
- ▶ möglichst transparent
- ▶ großer Brechungsindex
- ▶ in großen Mengen (günstig) verfügbar
- ▶ idealerweise abgeschirmt von atmosphärischen Myonen

Gut geeignet sind Wasser & Eis

# Technische Probleme

- ▶ Wasser:
  - ▶ Biolumineszenz im Meerwasser
  - ▶ Verschmutzung der Detektoren durch Pflanzen
  - ▶ Licht von radioaktiven Zerfällen (v. a.  $^{40}\text{K}$  in Salzwasser)
- ▶ Eis:
  - ▶ schwierige Verhältnisse in Antarktis
  - ▶ Streuung im Eis (Schichtung, Lufteinschlüsse)
  - ▶ Nur bis etwa 2.500 m Tiefe möglich
- ▶ Eis & Wasser:
  - ▶ hohes Untergrundsignal von atmosphärischen Myonen und Neutrinos

# IceCube at the Southpole





# The IceCube Collaboration

University of Alberta  
Clark Atlanta University  
Georgia Institute of Technology  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Ohio State University  
Pennsylvania State University  
Southern University and A&M College  
Stony Brook University  
University of Alabama  
University of Alaska Anchorage  
University of California-Berkeley  
University of California-Irvine  
University of Delaware  
University of Kansas  
University of Maryland  
University of Wisconsin-Madison  
University of Wisconsin-River Falls

Chiba University  
University of Oxford  
Université Libre de Bruxelles  
Université de Mons  
University of Géant  
Vrije Universiteit Brussel  
University of Adelaide  
University of Canterbury

Stockholm University  
Uppsala Universitet

Deutsches Elektronen-Synchrotron  
Humboldt Universität  
Ruhr-Universität Bochum  
RWTH Aachen University  
Technische Universität München  
Universität Bonn  
Universität Dortmund  
Universität Mainz  
Universität Wuppertal

Ecole Polytechnique  
Fédérale de Lausanne  
University of Geneva

## International Funding Agencies

Fonds de la Recherche Scientifique (FRS-FNRS)  
Fonds Wetenschappelijk Onderzoek-Vlaanderen  
(FWO-Vlaanderen)

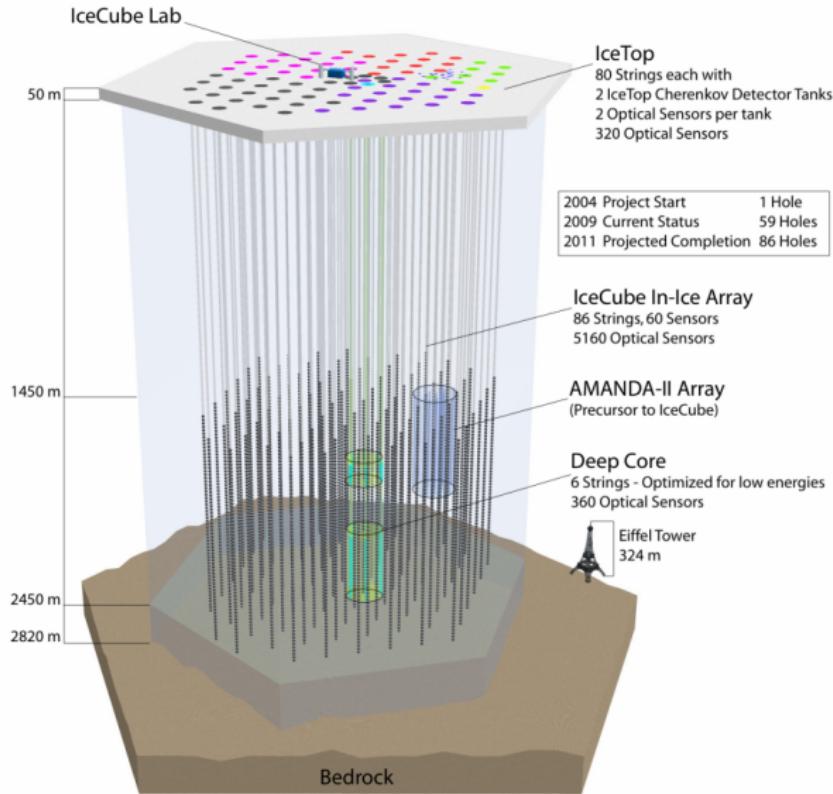
Federal Ministry of Education & Research (BMBF)  
German Research Foundation (DFG)  
Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)

Knut and Alice Wallenberg Foundation  
Swedish Polar Research Secretariat  
The Swedish Research Council (VR)

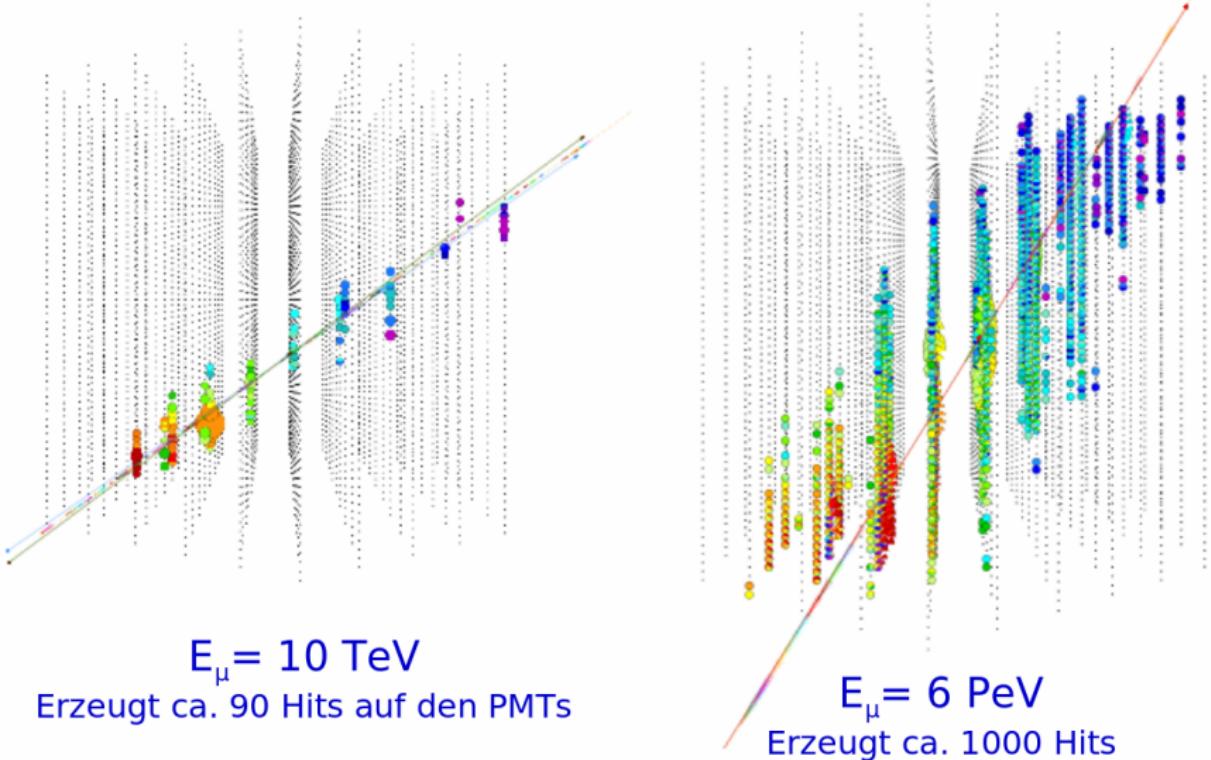
University of Wisconsin Alumni Research Foundation (WARF)  
US National Science Foundation (NSF)

45 institutes and ~300 physicists

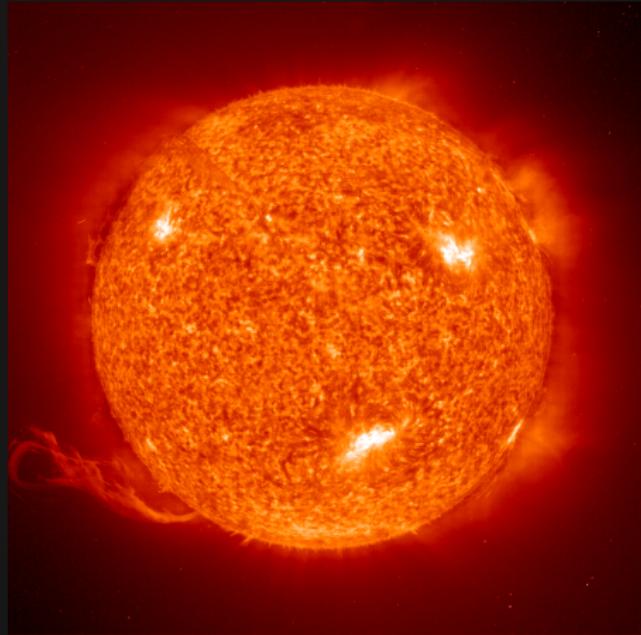
# IceCube



# typische $\nu_\mu$ -Events



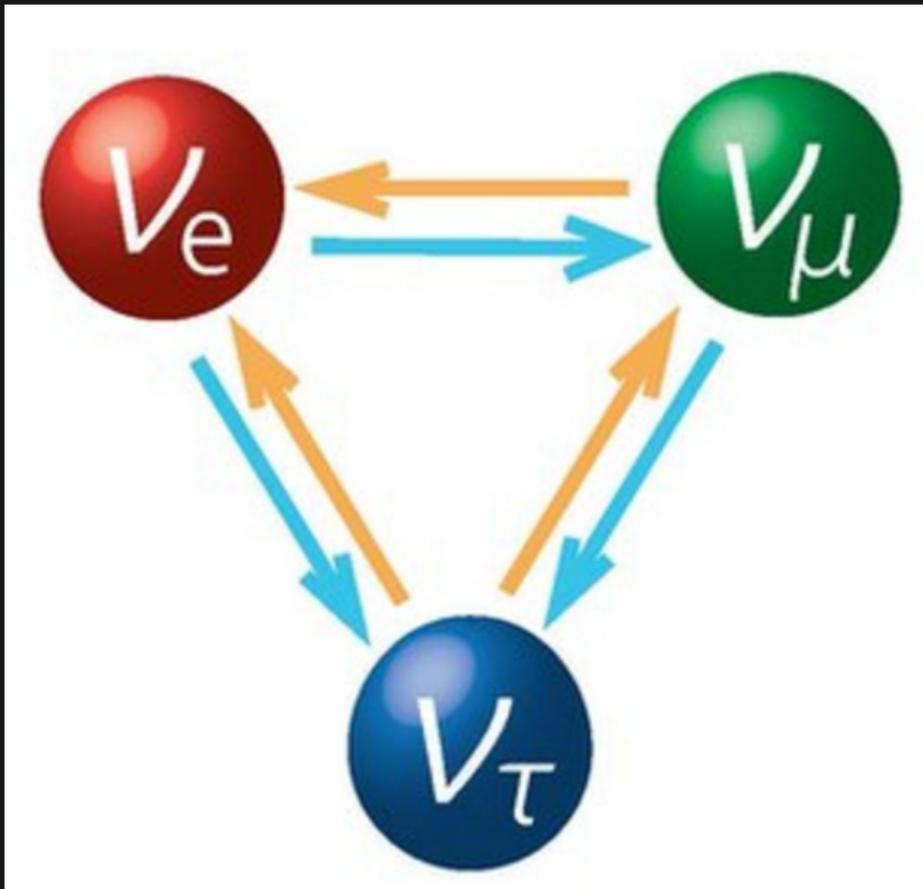
# Was lernen wir von Neutrinos?



SOHO

- ▶ Beobachtung solarer Neutrinos
  - ▶ Nachweis für Fusionsprozess im Inneren der Sonne
  - ▶ Bestätigung der Sonnenmodelle
  - ▶ Nachweis der Neutrino Oszillation

# Neutrino Oszillation



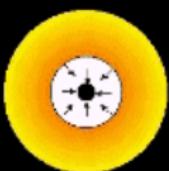
# Was lernen wir von Neutrinos?



Hubble Space Telescope

- ▶ 1987: Supernova in Magellanscher Wolke
- ▶ ~ 20 Neutrino Ereignisse am KamiokaNDE-II konnten dieser Supernova zugeordnet werden.
- ▶ Beobachtung der Neutrinos vor Supernova  
⇒ Bestätigung der Supernova-Modelle

Pre-supernova star



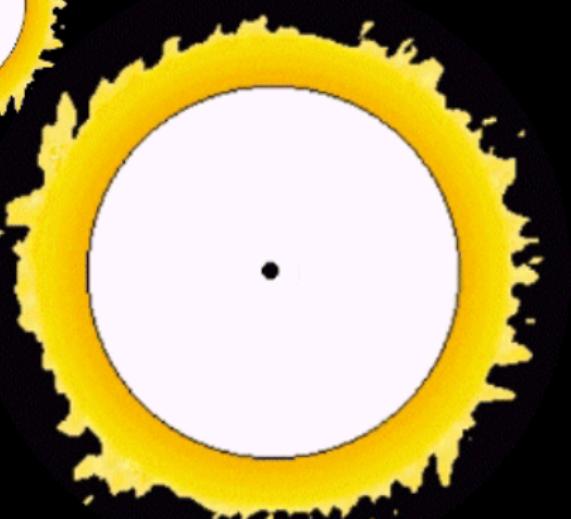
Collapse of the core



Interaction of shock  
with collapsing envelope



Explosive ejection of envelope

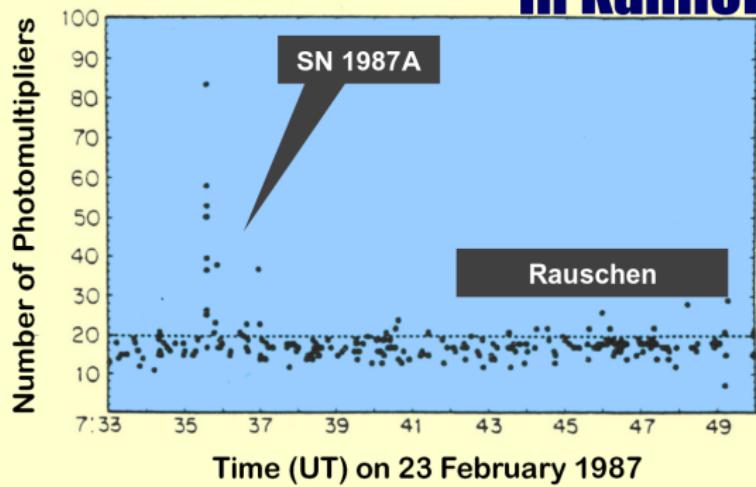


Expendng remnant emitting X-rays,  
visible light, and radio waves.  
The collapsed stellar remnant may be  
observable as a pulsar.

Star brightens by  $\sim 10^8$  times

# Supernova Signal

## Neutrino-Signal von SN- 1987A in Kamiokande

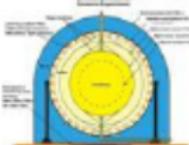


# Supernova detectors in the world

(running and near future experiments)

Super-K

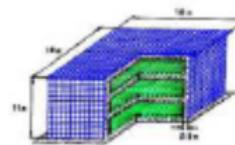
Borexino



LVD



Baksan

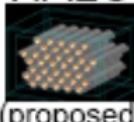


SNO+

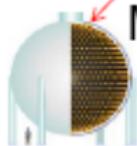


(beginning construction)

HALO



(proposed)



Mini-BOONE



NOvA

(construction started)



KamLAND



(in construction)

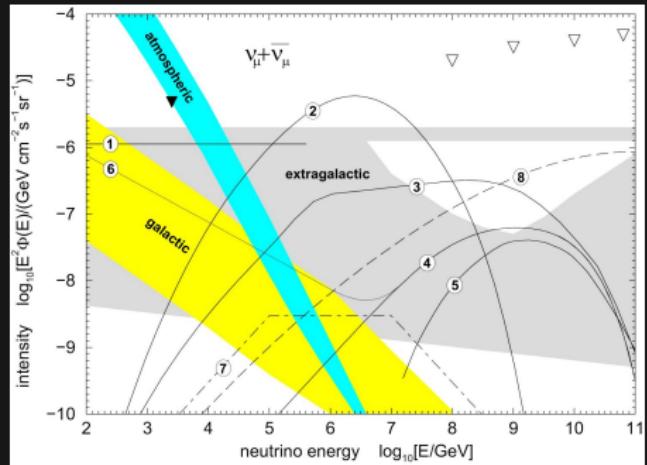


IceCube



Icarus 600

# Erwartete Neutrino Flüsse

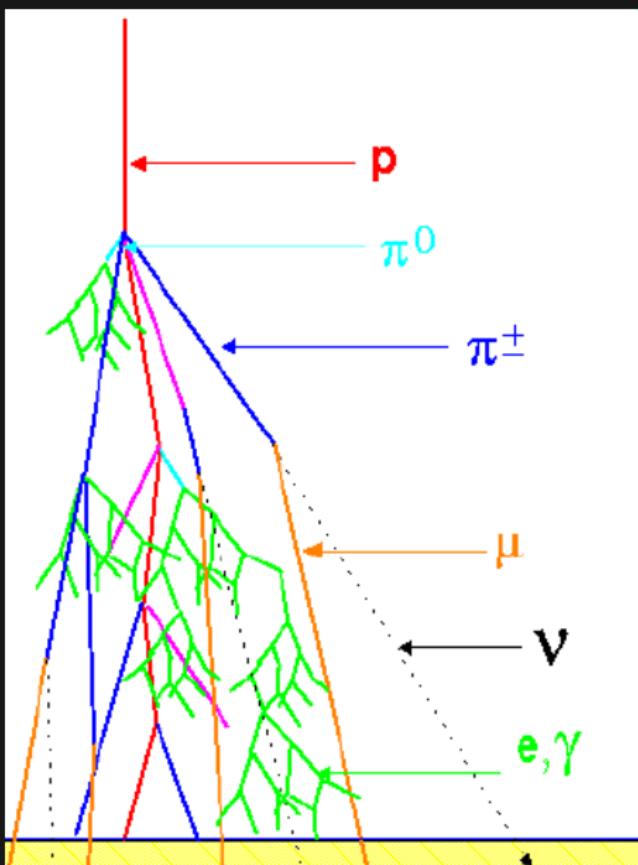


Mannheim, Learned

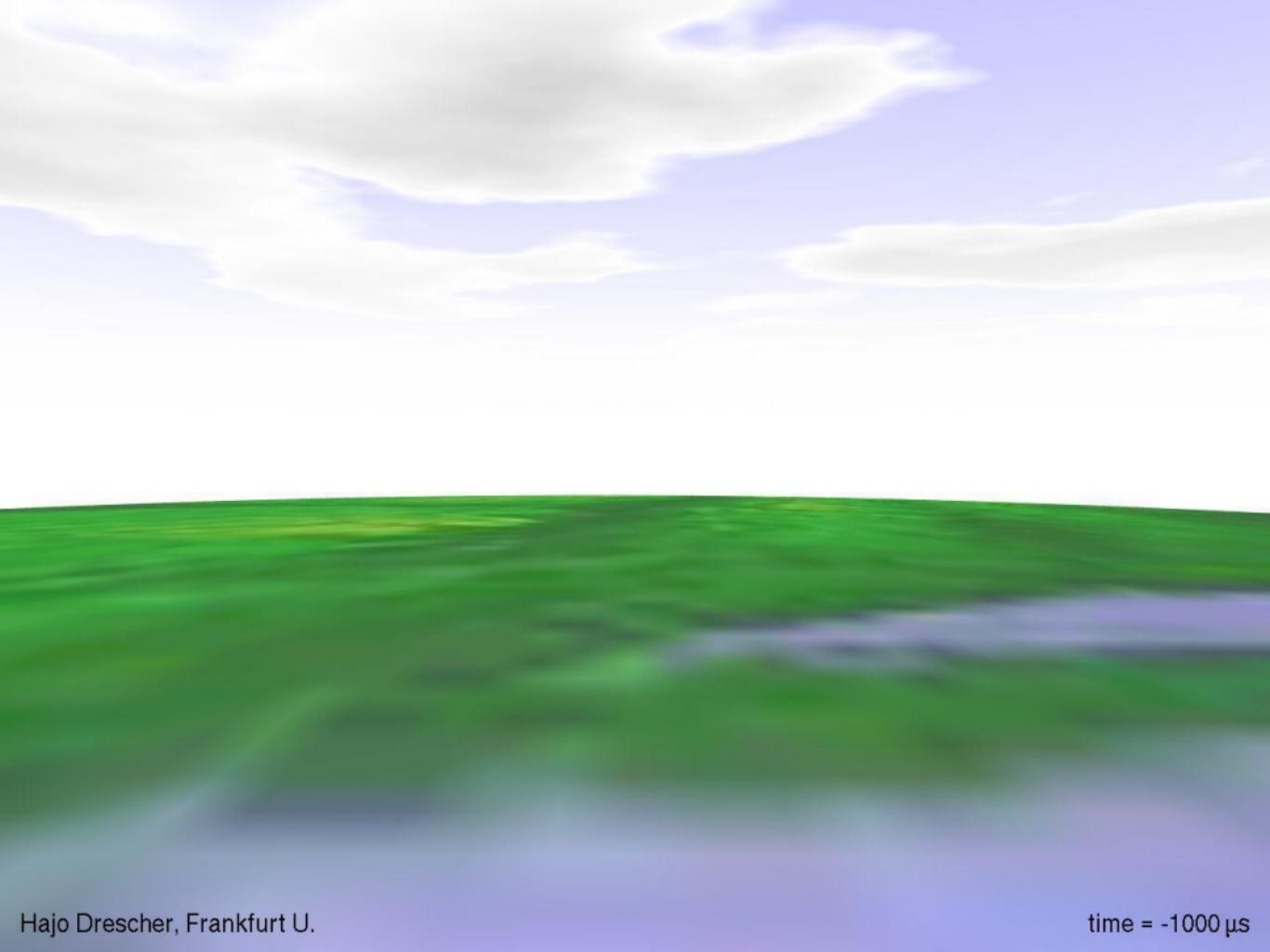
- ▶ Garantierte Flüsse:
  - ▶ solar
  - ▶ atmosphärisch
  - ▶ aus Wechselwirkung der kosmischen Strahlung
- ▶ mögliche Flüsse:
  - ▶ Bottom-Up Modelle (beschleunigt, z. B. in AGN oder GRBs)
  - ▶ Top-Down Modelle (Produkt aus Zerfall hochenergetischer Teilchen)

# Atmosphärische Neutrinos

- ▶ viele Neutrinos werden in Luftschauren erzeugt, z. B. beim Zerfall geladener Pionen in Muonen und deren weiteren Zerfall in Elektronen.
- ▶ erzeugt hohen Neutrino Fluss bei niedrigen bis mittelhohen Energien
- ▶ Luftschauer ausgelöst durch ultrahoch-energetische Atomkerne, der kosmischen Strahlung.

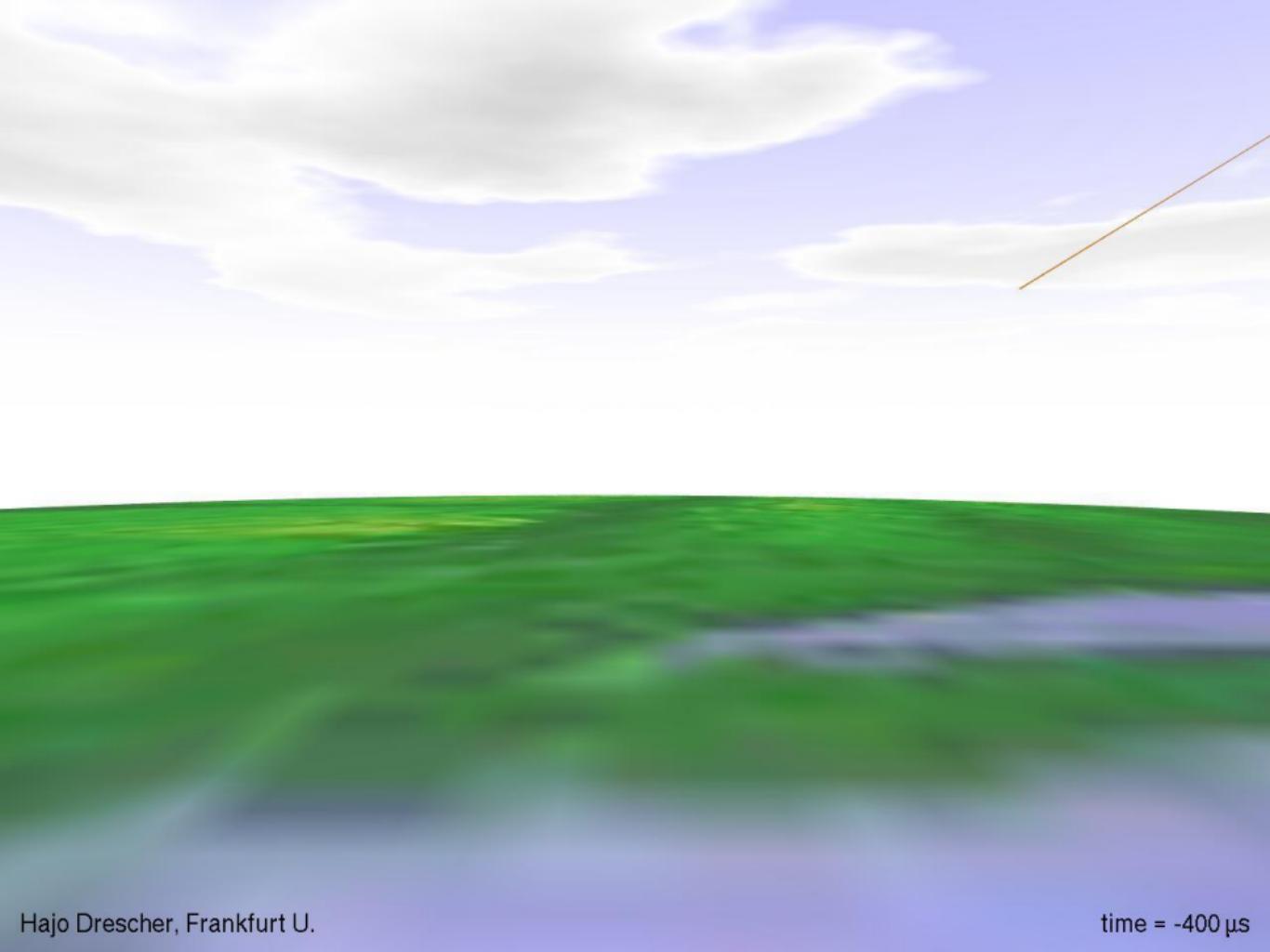


# Kosmische Strahlung



Hajo Drescher, Frankfurt U.

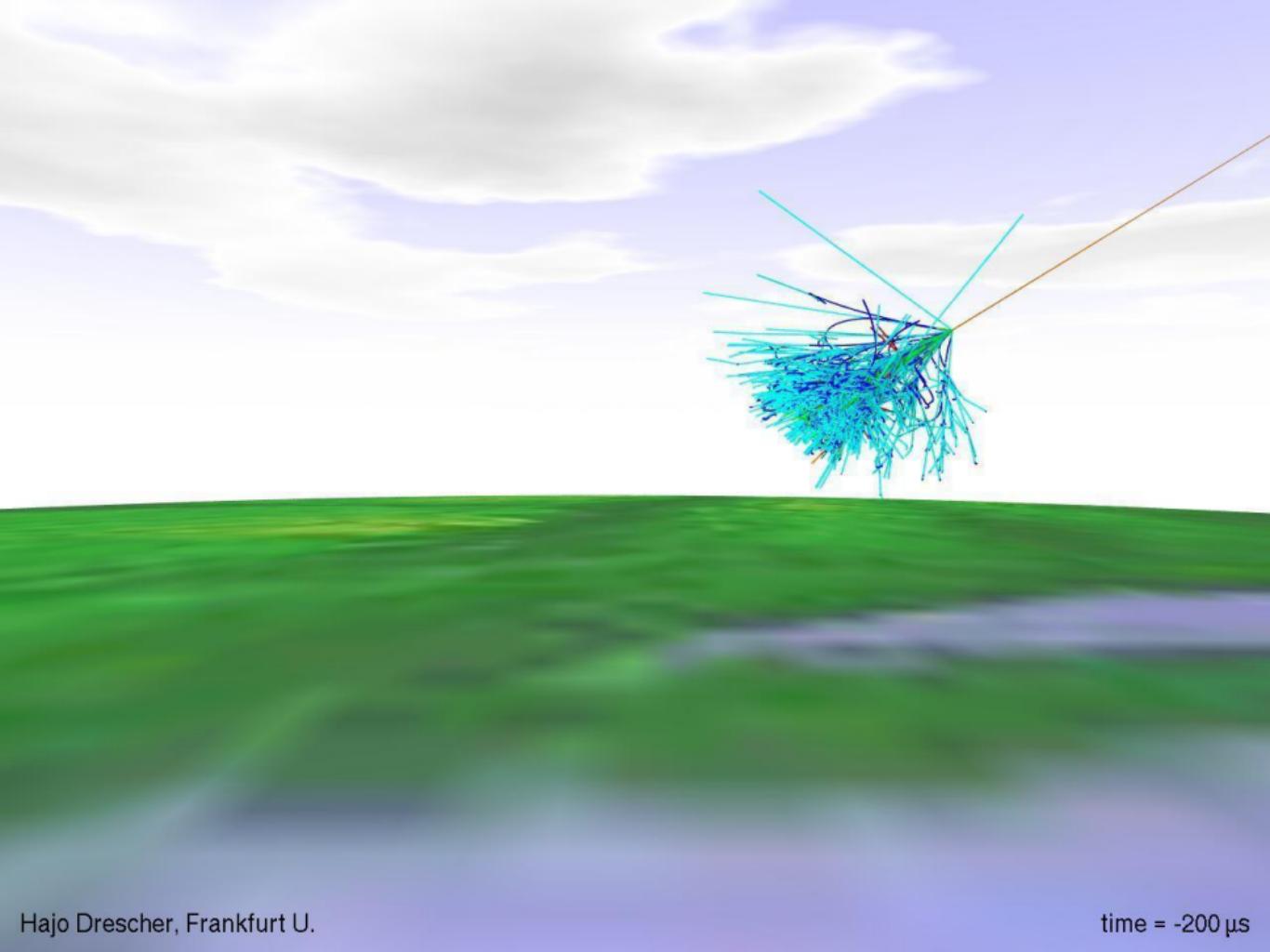
time = -1000  $\mu$ s

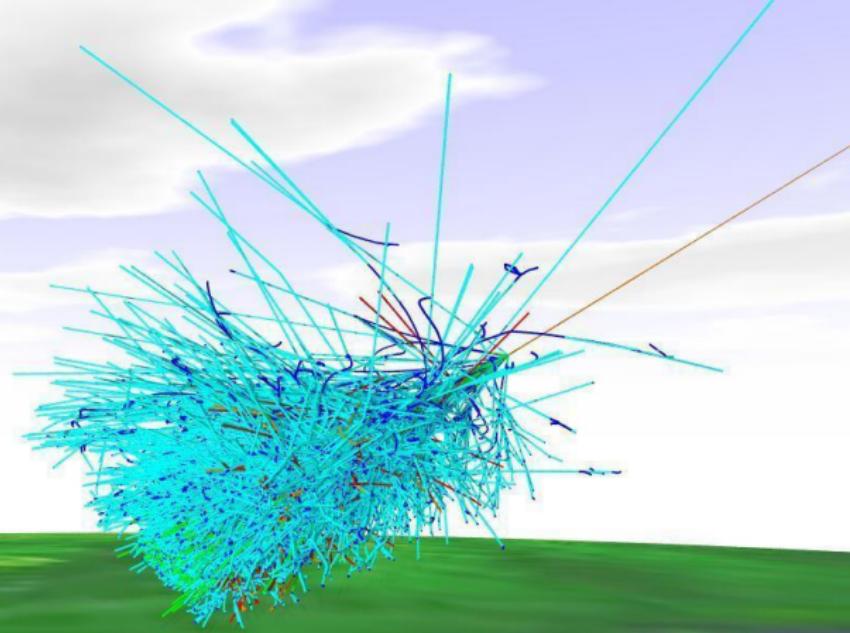


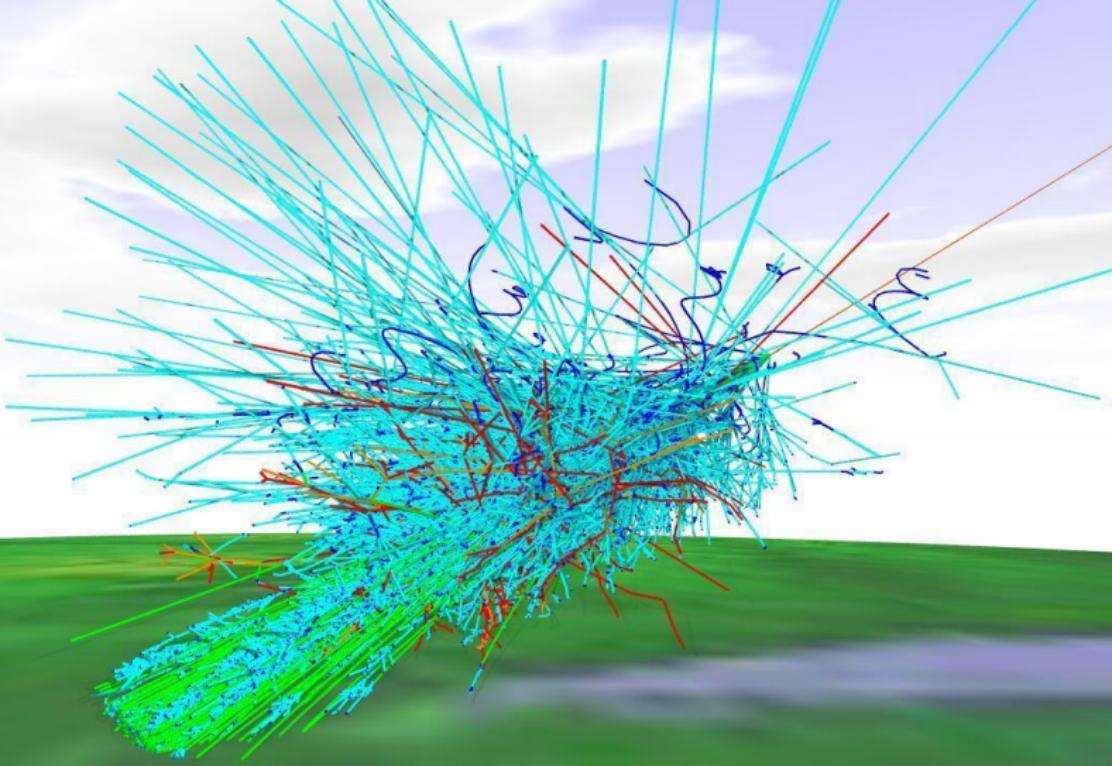
Hajo Drescher, Frankfurt U.

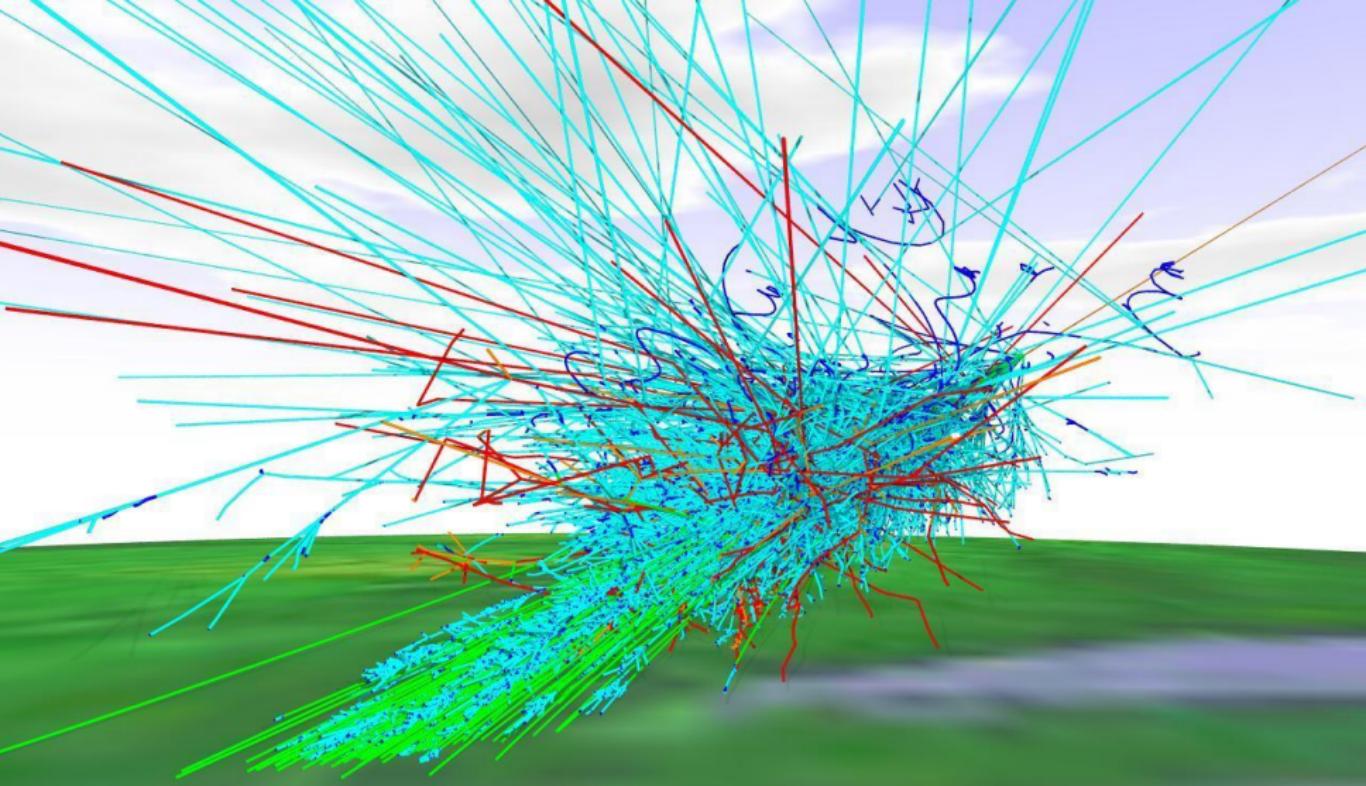
time = -400  $\mu$ s



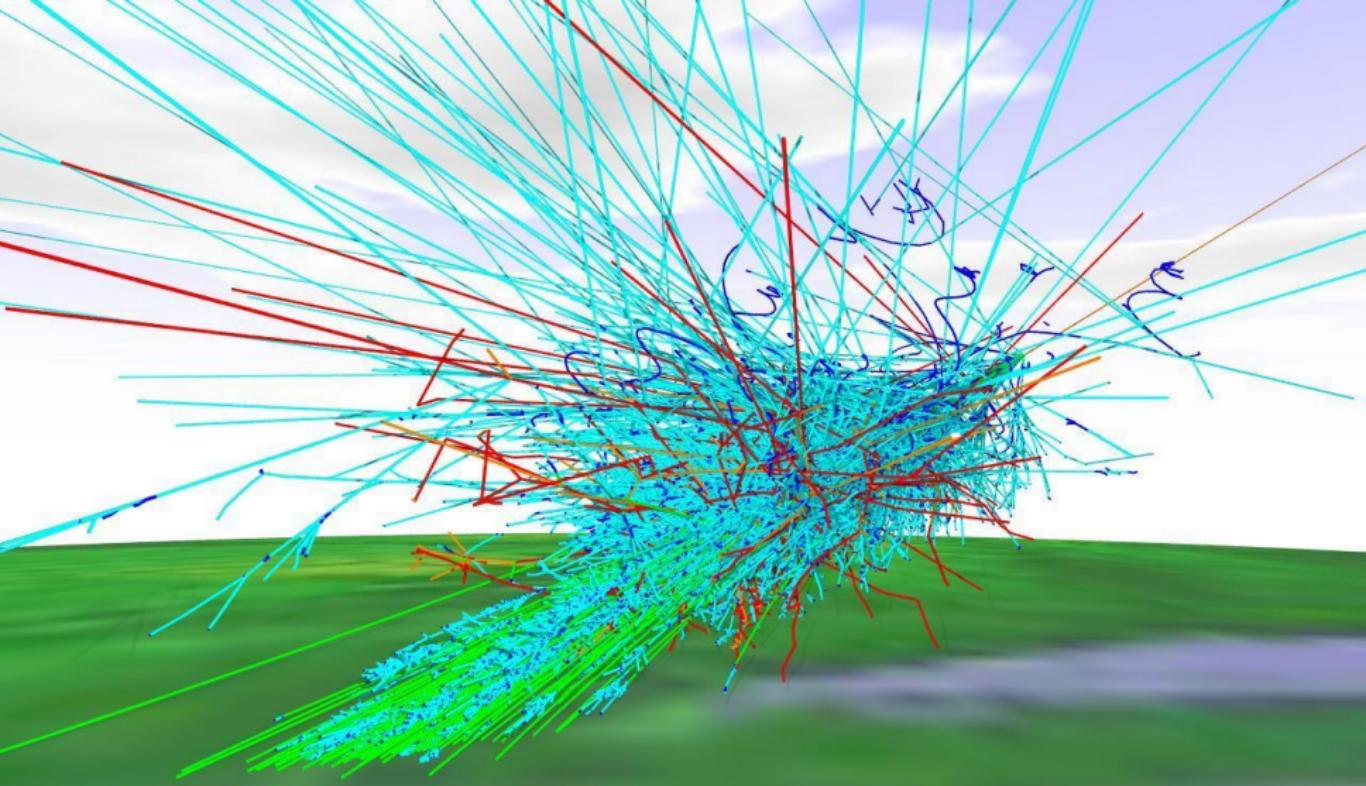




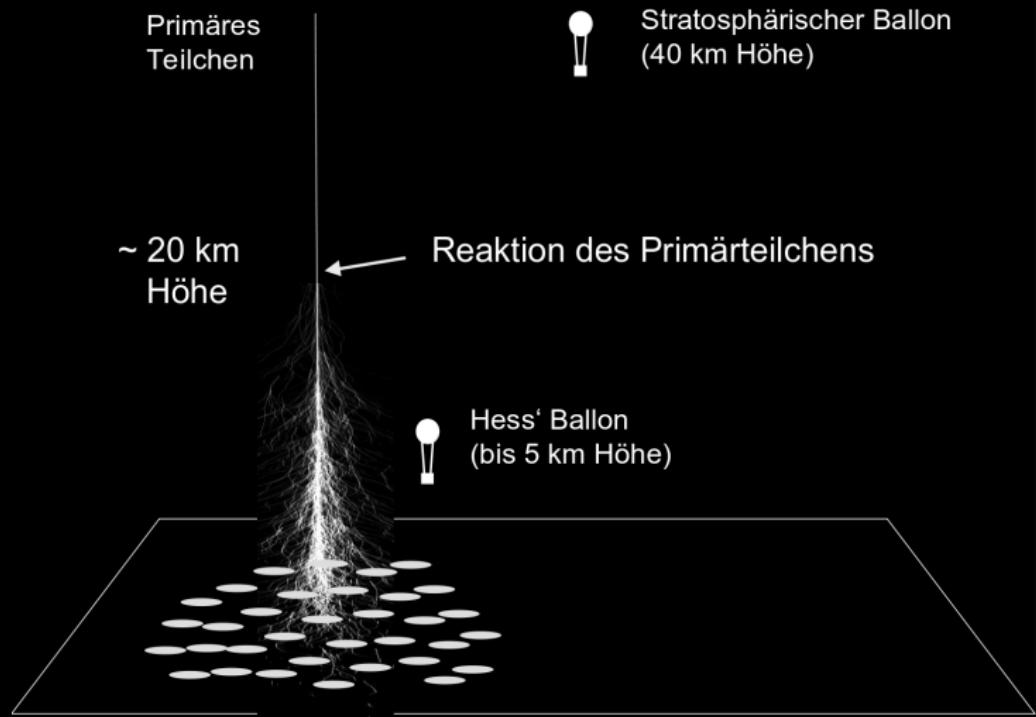




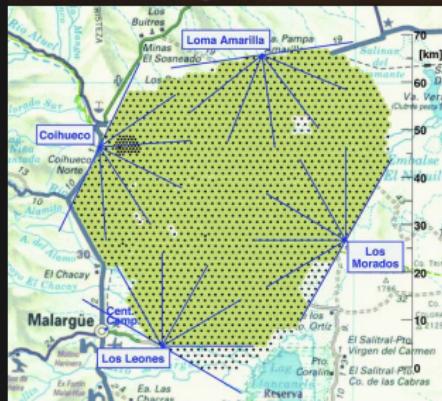
Hajo Drescher, Frankfurt U.



Hajo Drescher, Frankfurt U.



# Detektoren

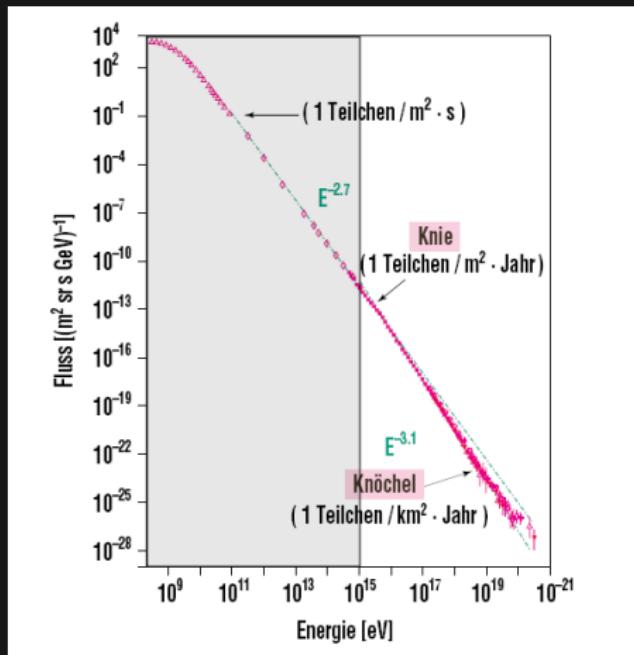


Pierre Auger Observatory



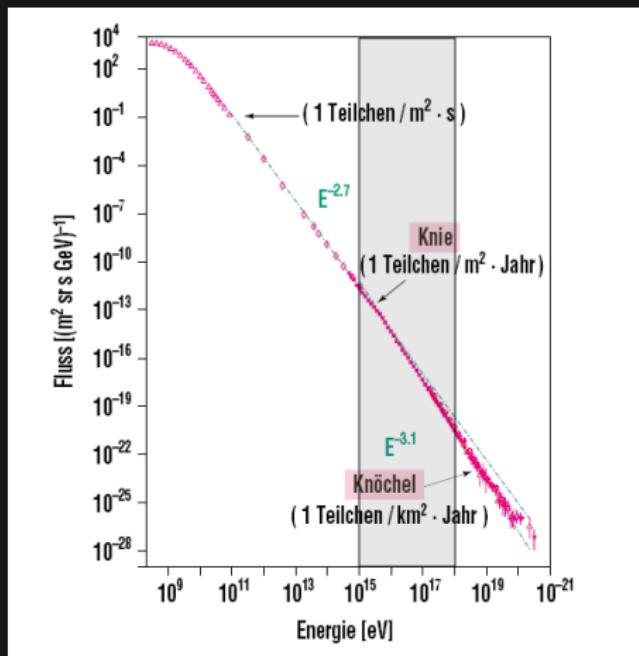
Square Kilometre Array

# Kosmische Strahlung bis $10^{15}$ eV



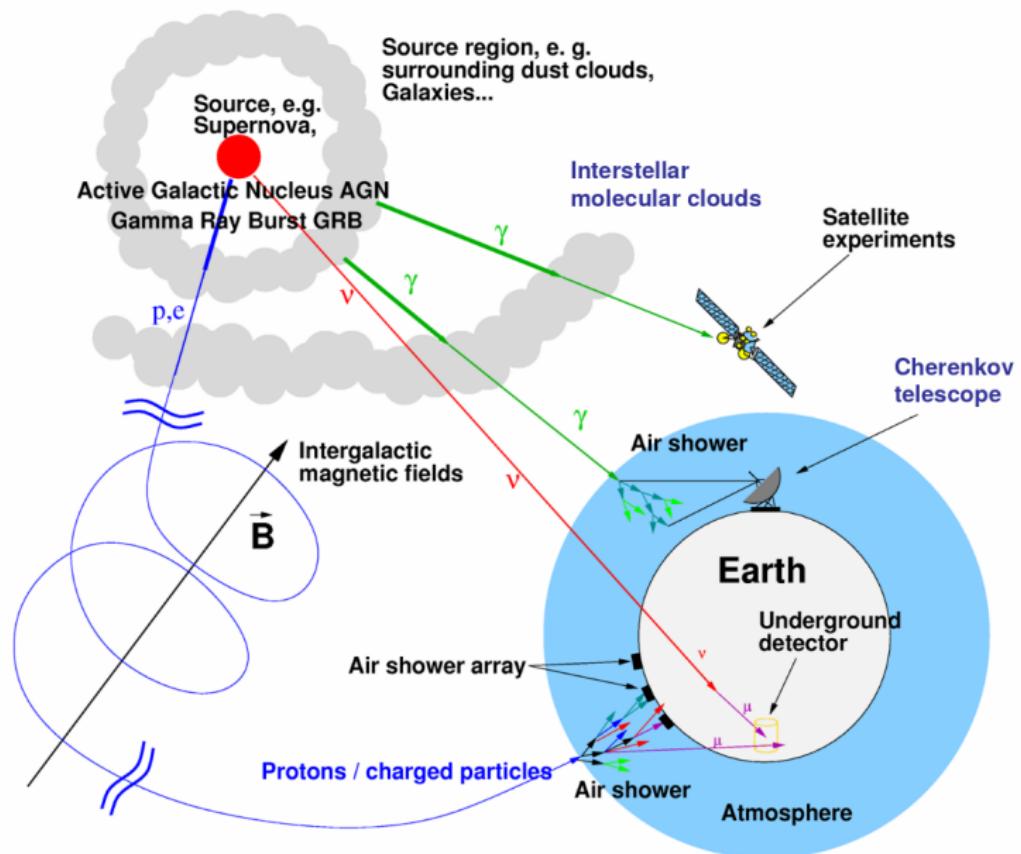
- bis zum Knie stammt die kosmische Strahlung aus den Überresten von Supernovae.

# Kosmische Strahlung bis $10^{18}$ eV

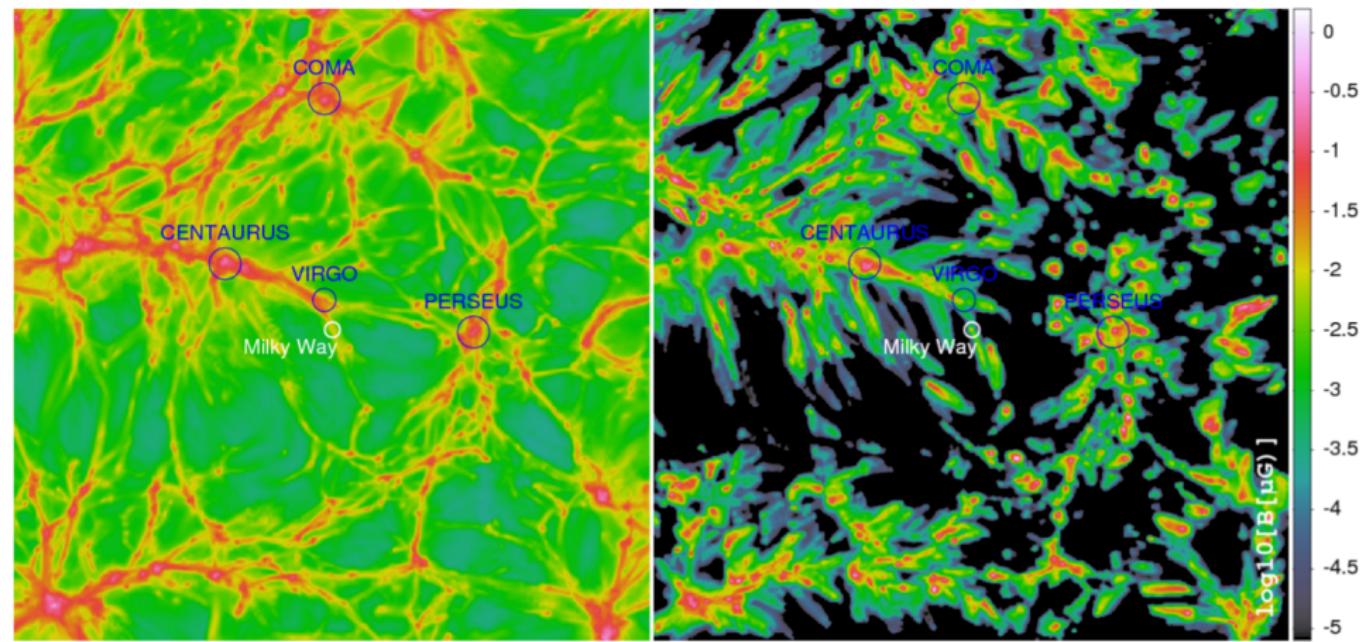


- ▶ zwischen Knie und Knöchel werden die Teilchen beschleunigt von z. B. Binärsystemen oder Neutronensternen.
- ▶ Über das Knie hinaus entstammt die kosmische Strahlung von ausserhalb unserer Galaxies, da der gyromagnetische Radius die Größe unserer Galaxis übersteigt.

# Neutrinos as Cosmic Messengers

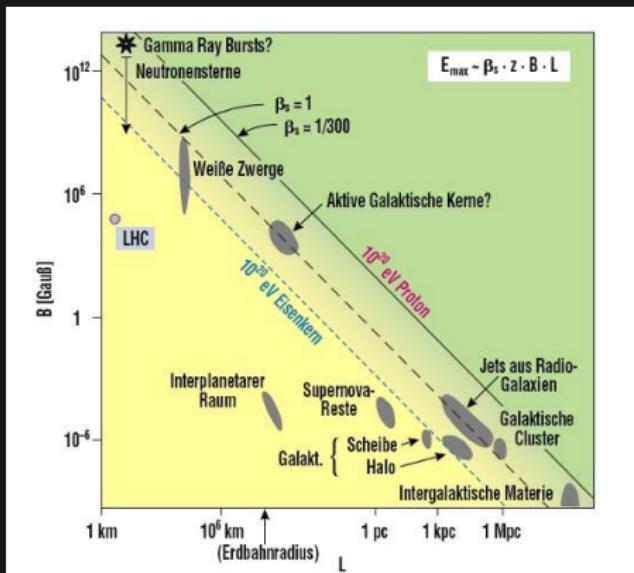


# Kosmische Magnetfelder



# Woher stammt kosmische Strahlung höchster Energien?

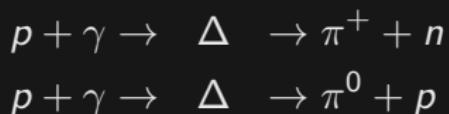
- ▶ Bottom-Up Modell:  
Teilchen werden beim  
durchqueren von  
Schockwellen  
beschleunigt (Fermi-  
Beschleunigung)
- ▶ Hillas 1984:  
“Größe der Quelle  
muss ausreichen um  
Teilchen weiter zu  
beschleunigen”
- ▶ Hillas-Diagramm zeigt  
mögliche Quellen



H. Blümer, Karlsruhe

# Greisen-Zatsepin-Kuzmin cutoff

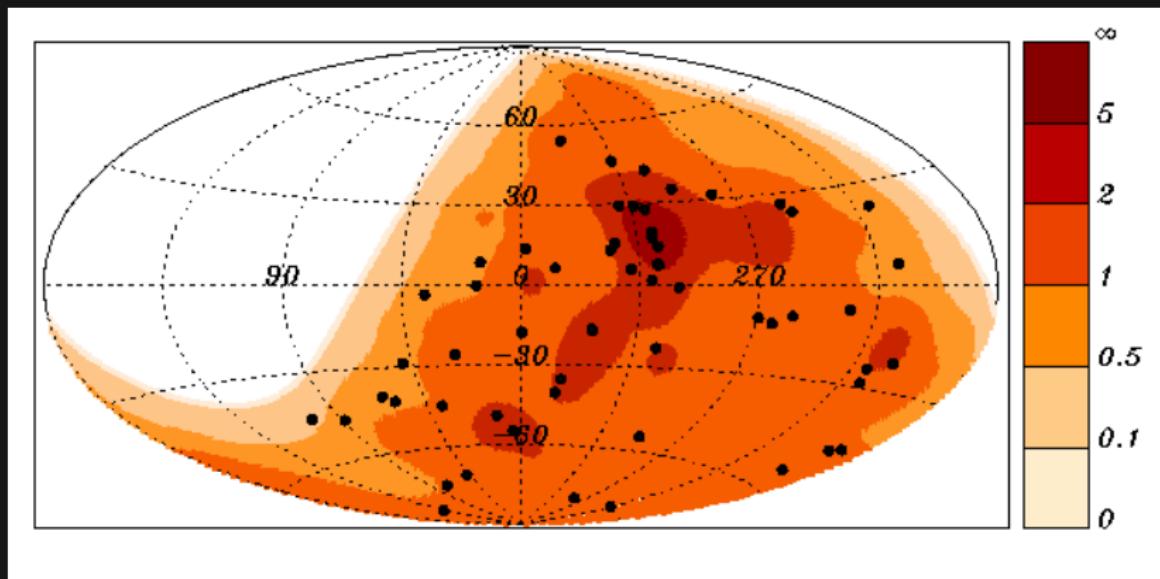
- ▶ Protonen mit Energien über 50 EeV können mit der kosmischen Hintergrundstrahlung interagieren, wobei Pionen entstehen.



- ▶ eingeschränkte Reichweite oberhalb dieser Energie ( $\sim 10$  Mpc für Proton mit 100 EeV).
- ▶ Quellen müssen sich in unserem Supercluster befinden.

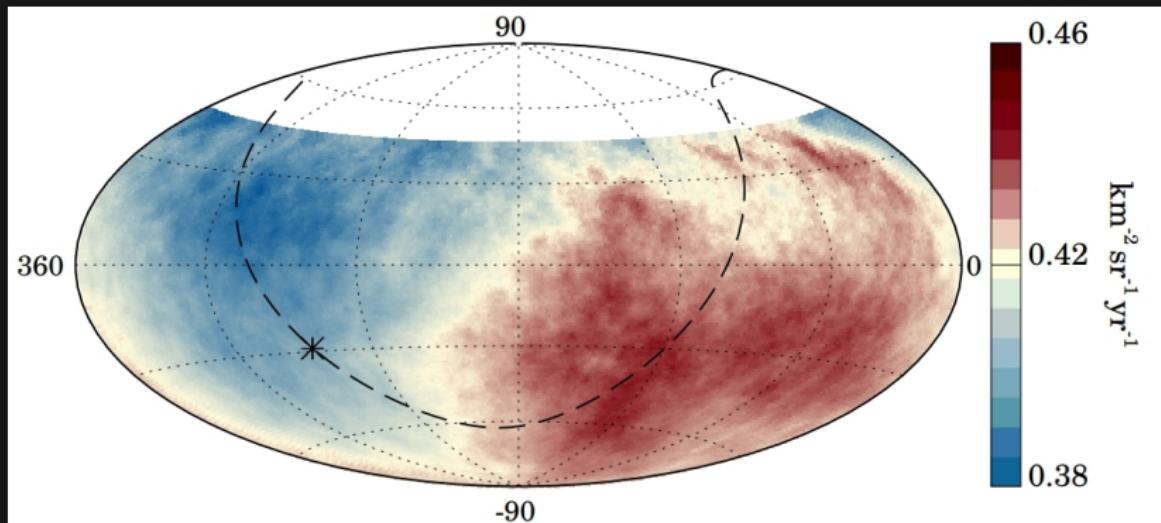
# Beobachtungen

Himmelskarte der 58 energiereichsten Ereignisse von Auger,  
im Verleich zur Dichteveilung aktiver Galaxien



Pierre Auger Collaboration 2009

# Beobachtungen



Pierre Auger Collaboration 2017

- ▶ kürzliche Messung eines Signifikanten dipolaren Signals.  
Amplitude: 5% , Signifikanz:  $5\sigma$
- ▶ korelliert nicht mit Orientierung der Milchstraße  
 $\Rightarrow$  bestätigt extragalaktische Herkunft.
- ▶ Radio Galaxien womöglich hauptsächliche Quelle

# Zusammenfassung

# Die großen Fragen der (Teilchen-) Astronomie

- ▶ Was ist es, das wir sehen?
- ▶ Woher kommt es?
- ▶ Was passiert auf dem Weg hierher?
- ▶ Was lernen wir daraus über unser Universum?

# Die großen Fragen der (Teilchen-) Astronomie

- ▶ Was ist es, das wir sehen?  
Zusammensetzung kosmischer Strahlung?
- ▶ Woher kommt es?  
Was ist die Quelle dieser kosmischen Strahlung?
- ▶ Was passiert auf dem Weg hierher?  
Wie verändern sich die Teilchen auf dem Weg?
- ▶ Was lernen wir daraus über unser Universum?  
Wie ist das kosmische Magnetfeld beschaffen?

# Quellen

- F. Halzen: Lectures on High-Energy Neutrino Astronomy
- C. Spiering: High Energy Neutrino Astronomy: The Experimental Road
- F. Halzen: High-Energy Neutrino Astronomy: The Cosmic Ray Connection
- E. Waxman, J. Bahcall: High Energy neutrinos from astrophysical sources: An upper bound
- T. K. Gaisser, R. Engel, E. Resconi: Cosmic Rays and Particle Physics
- T. Stanev: High Energy Cosmic Rays
- R. Schlickeiser: Cosmic Ray Astrophysics
- und viele weitere Referenzen die großteils auf  
<http://www.arxiv.org/> zu finden sind