

Moderne Physik: Elementarteilchenphysik, Astroteilchenphysik, Kosmologie

Ulrich Husemann

Humboldt-Universität zu Berlin

Sommersemester 2008

Präsenzübung

- Welche der folgenden Zerfälle sind nicht erlaubt und warum? Welche Wechselwirkung vermittelt die erlaubten Zerfälle?

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \quad \times \text{ (Leptonenzahlerhaltung)}$$

$$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e \quad \checkmark \text{ (schwach)}$$

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \quad \checkmark \text{ (schwach)}$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad \checkmark \text{ (elektromagnetisch)}$$

$$\gamma \rightarrow e^+ e^- \quad \times \text{ (Impulserhaltung)}$$

$$e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma \quad \checkmark \text{ (elektromagnetisch)}$$

Präsenübung

- Welche der folgenden Zerfälle sind nicht erlaubt und warum? Welche Wechselwirkung vermittelt die erlaubten Zerfälle?

$$p \rightarrow \pi^+ \pi^0 \quad \times \text{ (Baryonenzahlerhaltung)}$$

$$\pi^- \rightarrow K^0 e^- \bar{\nu}_e \quad \times \text{ (Energieerhaltung)}$$

$$K^- \rightarrow \pi^0 e^- \bar{\nu}_e \quad \checkmark \text{ (schwach)}$$

$$t \rightarrow W^+ b \quad \checkmark \text{ (schwach)}$$

$$t \rightarrow Z c \quad \times \text{ (keine Flavor- ohne Ladungsänderung)}$$

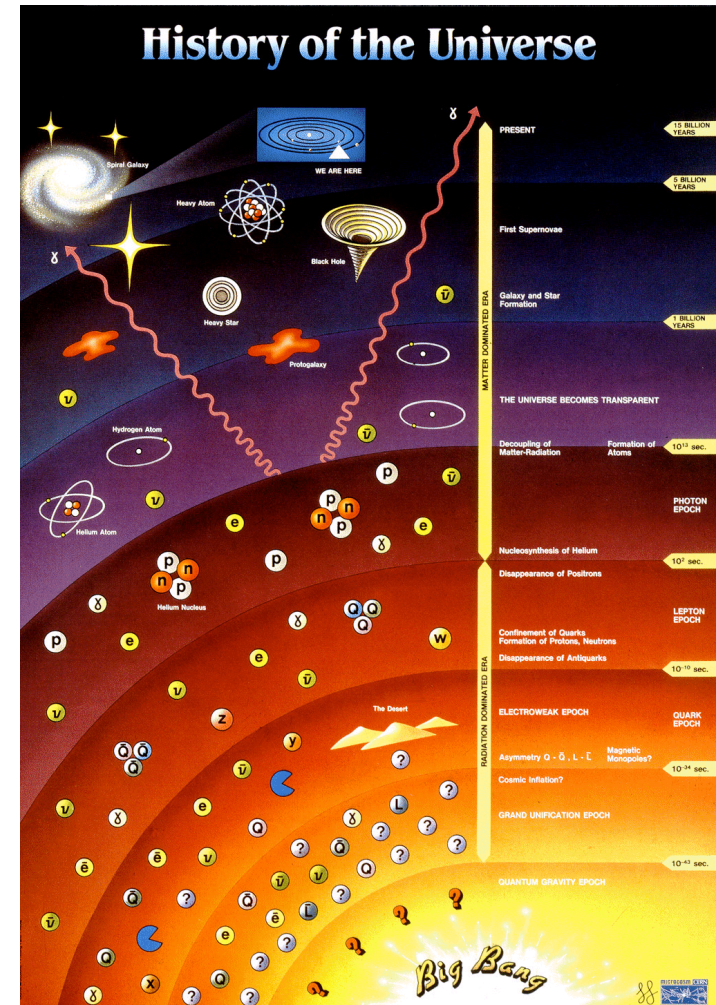
$$\Delta^{+++} \rightarrow p \pi^+ \quad \checkmark \text{ (stark)}$$

Kapitel 8.3

Entwicklung des frühen Universums

Geschichte des Universums

- Fortschreitende Zeit: Energie/ Temperatur nehmen ab
($E = k_B T \rightarrow T[\text{K}] \approx 11605 \cdot E[\text{eV}]$):
- Wichtige Epochen:
 - $t < 10^{-43}$ s: Urknall
 - $t < 10^{-34}$ s: Kosmische Inflation
 - $t < 1$ s: Baryogenese
 - $t \approx 3$ min: Nukleosynthese
 - $t \approx 380.000$ Jahre: Entkopplung Materie-Strahlung
 - $t \approx 10^9$ Jahre: Erste Sterne und Galaxien



[CERN]

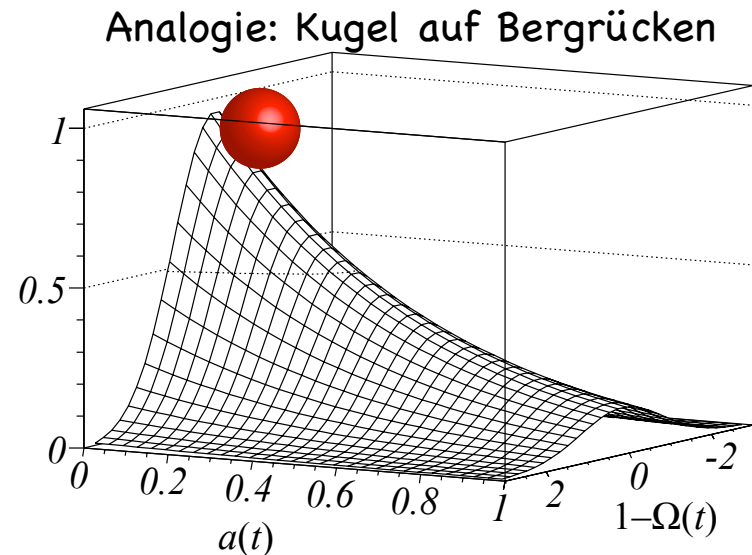
Big-Bang-Kosmologie: Probleme

- Horizont-Problem:

- Kontinuierliche Expansion: Bereiche des Universums mit Winkelabständen $> 1^\circ$ bei Urknall nicht kausal verbunden (Informationsaustausch mit endlicher Lichtgeschwindigkeit)
- Aber (COBE, WMAP): CMB isotrop bis auf $O(10^{-5})$

- Flachheits-Problem:

- Messung Energiedichte heute:
 $\Omega_0 = \rho/\rho_{\text{krit}} = 1,0052 \pm 0,0064$
- Expansion: labiles Gleichgewicht bei $\Omega_0 = 1 \rightarrow$ heutiger Wert nur, wenn $\Omega(10^{-43} \text{ s}) - 1 < 10^{-60}$!



Kosmische Inflation

- Kosmische Inflation (A. Guth, 1980):
 - 10^{-34} s nach Urknall: kosmologische Konstante dominiert Energiedichte im Universum
 - Universum expandiert für kurze Zeit exponentiell:
$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{\Lambda}{3} \Rightarrow \dot{a} = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}} a \Rightarrow a(t) = C \cdot \exp\left[\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} \cdot t\right]$$
 - Ursache: Vakuumenergie von neuem Quantenfeld („Inflaton“)?
- Inflation Lösung für beide Probleme:
 - Horizont: Expansion vergrößert kausal zusammenhängende Gebiete → gesamtes sichtbares Universum vor Inflation kausal verbunden
 - Flachheit: Expansion „glättet“ jede Raumkrümmung

Λ CDM-Kosmologie

- Heutiges Standardmodell der Kosmologie: „ Λ CDM“
 - Flaches Universum
 - Inflation
 - Kosmologische Konstante Λ
 - Kalte dunkle Materie (cold dark matter, CDM)
- Kompatibel mit allen Beobachtungen, aber offene Fragen:
 - Kandidaten für dunkle Materie (WIMPs? → Entdeckung am LHC?)
 - Ursache der kosmologischen Konstante?
 - Ursache der Inflation?

Kapitel 8.4

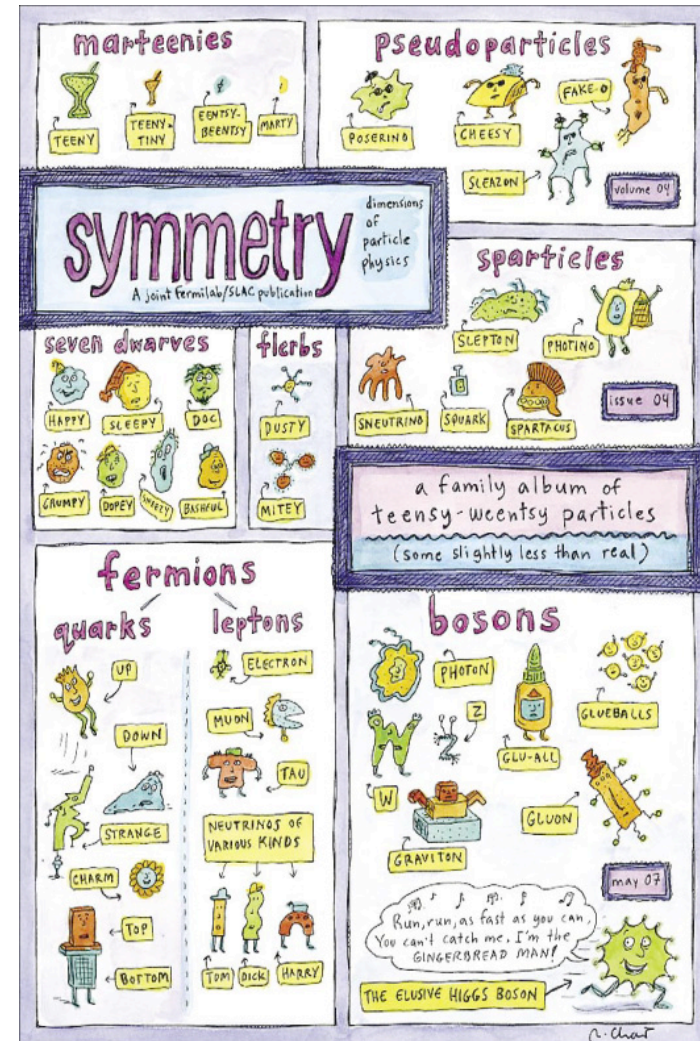
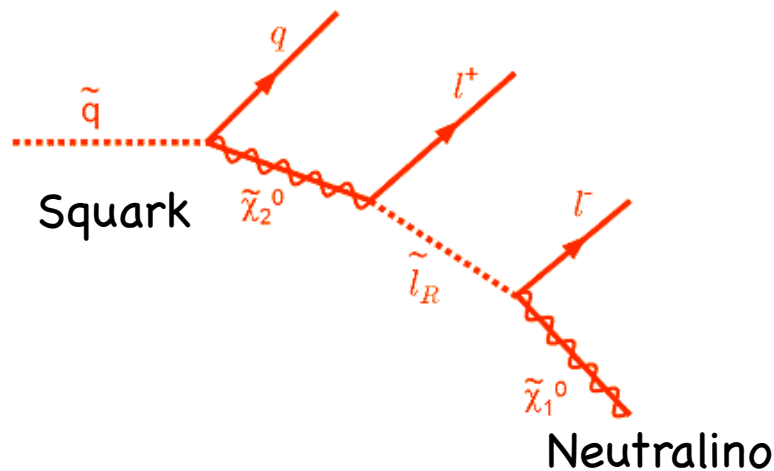
Experimente zu Dunkler Materie

WIMPs und Supersymmetrie

- WIMPs: schwere ungeladene Teilchen, stabil
- WIMP-Kandidaten z.B. in Theorie der Supersymmetrie
 - Supersymmetrie = Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen (die letzte verbleibende Symmetrie)
 - Partnerteilchen zu jedem Standardmodellteilchen
 - Fermionen (Spin 1/2) → Spin-0-Partner („Squarks“ und „Sleptonen“)
 - Eichbosonen (Spin 1) → Spin-1/2-Partner („Gauginos“)
 - Leichtestes supersymmetrisches Teilchen stabil → WIMP-Kandidat: neutrales Gaugino („Neutralino“)

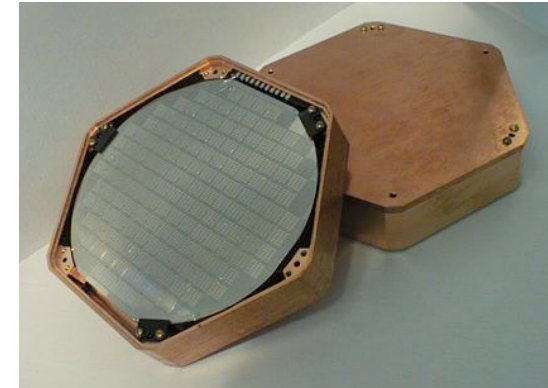
DM-Suche an Beschleunigern

- Signatur am LHC:
fehlende transversale Energie (ähnlich Neutrino)
- Z.B. Kaskadenzerfall in Squark-Produktion
 $pp \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}$

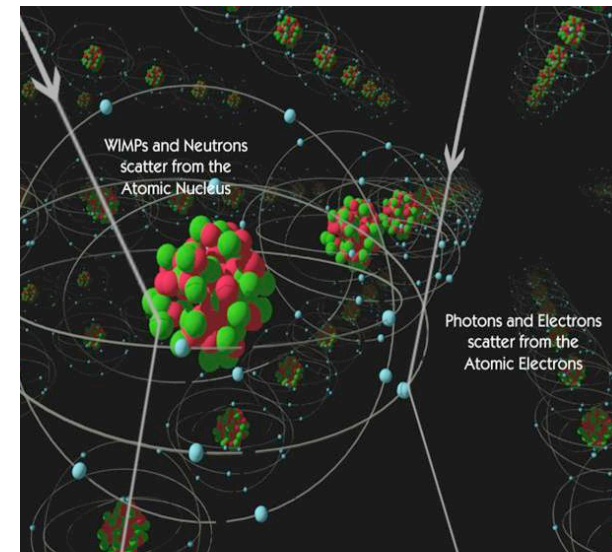


DM-Suche ohne Beschleuniger

- Idee: WIMP-Wechselwirkung mit Atomkern und Elektron \rightarrow Ionisation und Wärme durch Rückstoß
- Beispiel CDMS-II (cold dark matter search):
 - Detektor in Soudan-Mine (Minnesota) \rightarrow Abschirmung kosmische Strahlung
 - Ionisation und Rückstoß in Germanium- und Siliziumblocks bei 10 mK (gegen thermische Bewegung)
 - Bisher keine Hinweise auf WIMPs



CDMS-Detektormodul



[<http://cdms.berkeley.edu/>]

Kapitel 9

Astroteilchenphysik

Überblick

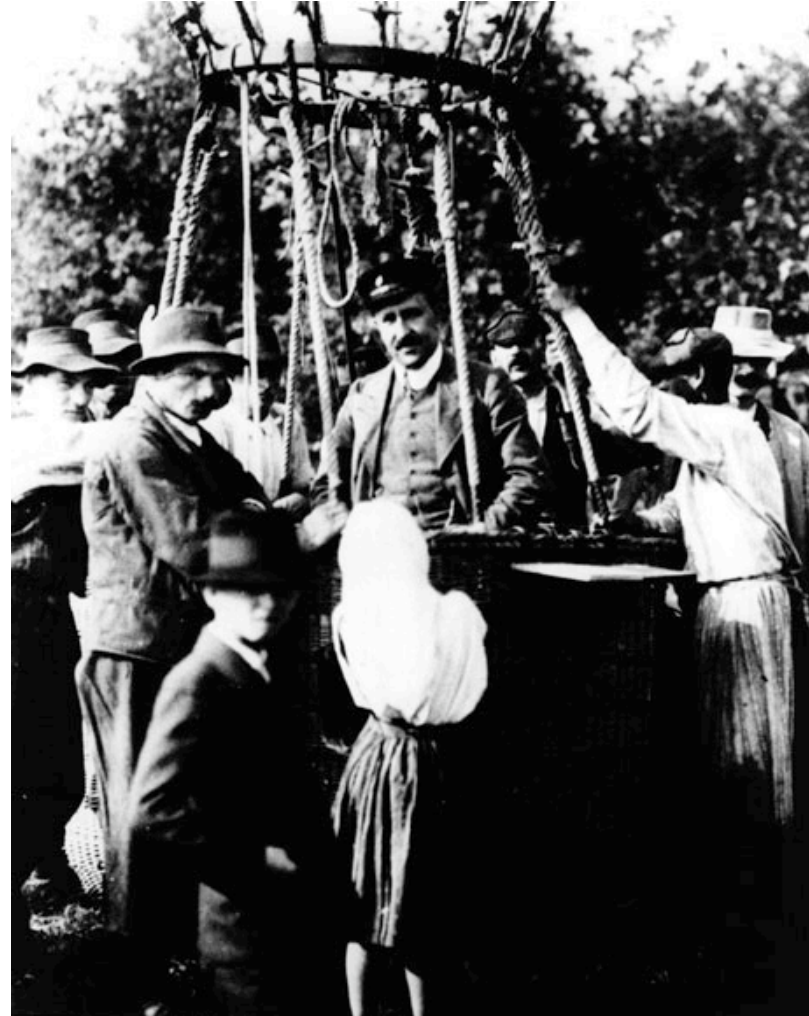
- Untersuchung von teilchenphysikalischen Vorgängen im Universum
 - Quellen kosmischer Strahlung und Beschleunigungsmechanismen
 - Transport und Ablenkung durch interstellares Medium
- Detektoren mit Methoden aus der Teilchenphysik
 - Luftschauerarrays
 - Gammastrahlenteleskope
 - Neutrino-teleskope

Kapitel 9.1

Energiespektrum der kosmischen Strahlung

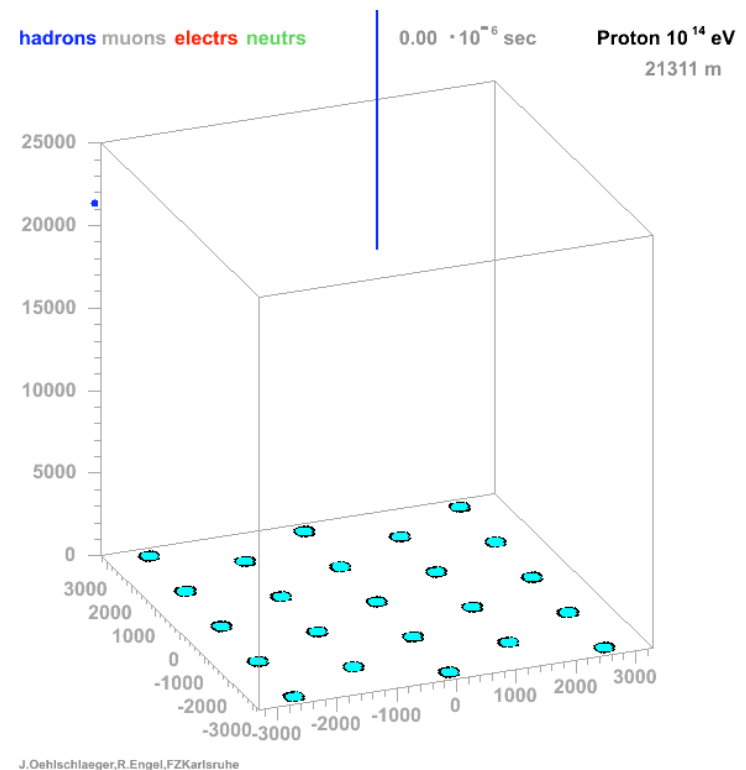
Kosmische Strahlung

- Entdeckung (V. Hess, 1912):
 - Ballon in bis zu 5 km Höhe
 - Resultat: Gasionisation nimmt mit Höhe zu → „Höhenstrahlung“
- Ca. 1/3 der natürlichen Strahlenbelastung am Erdboden
- Quellen: Sonne, weitere intra- und extragalaktische Quellen



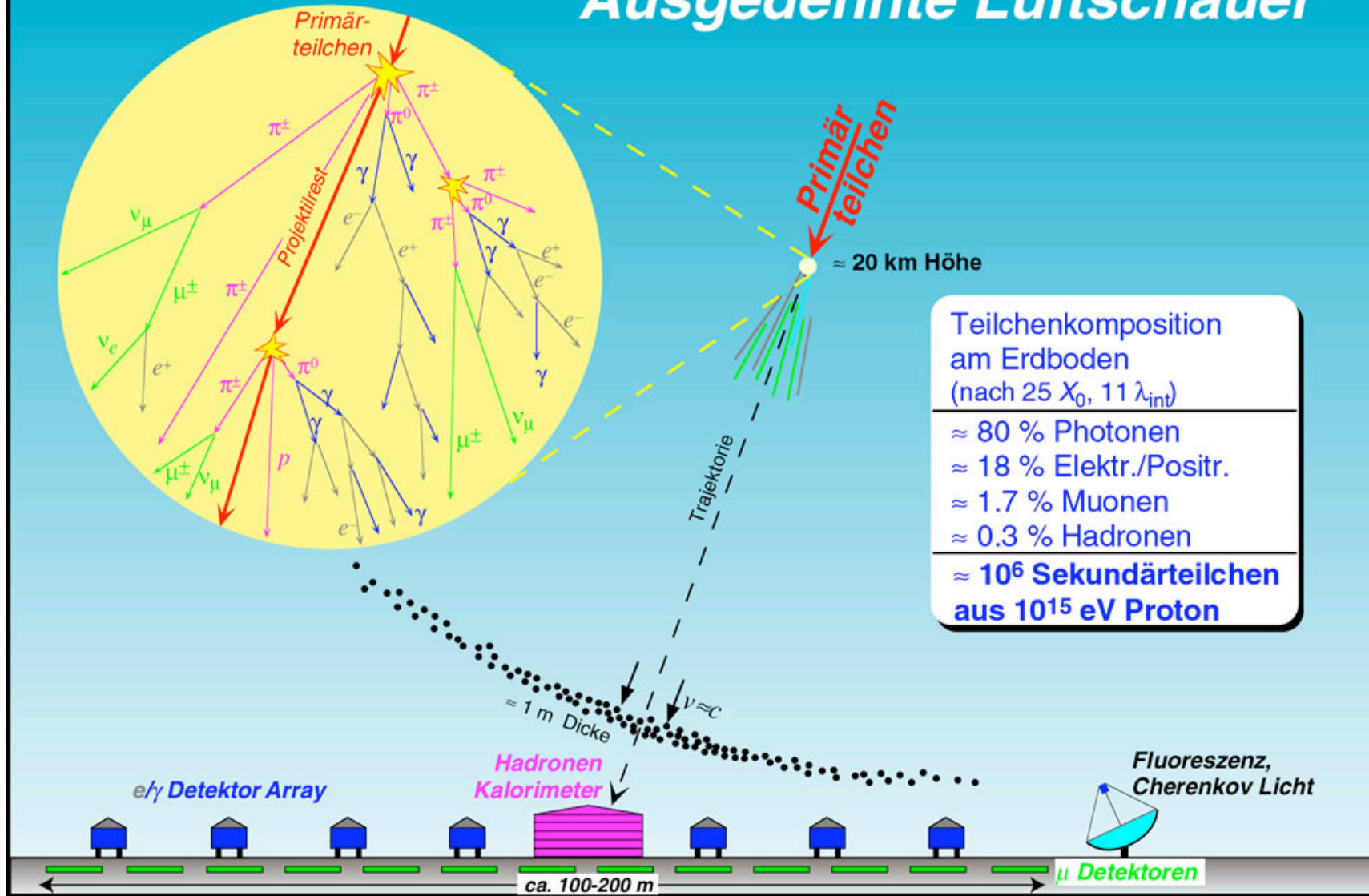
Energie geladener Teilchen

- Direkte Messung ($< 10^5$ GeV):
Ballons, Satelliten, ISS
 - Absorption in Atmosphäre → große Höhen (> 30 km)
 - Teilchenphysikdetektoren:
Silizium, Kalorimeter, Cherenkov
- Indirekte Messung ($\geq 10^5$ GeV): Luftschauerarrays
 - WW mit Atmosphäre:
ausgedehnte Luftschauer
 - Großflächige Arrays →
Sampling des Luftschauers



[www.auger.de]

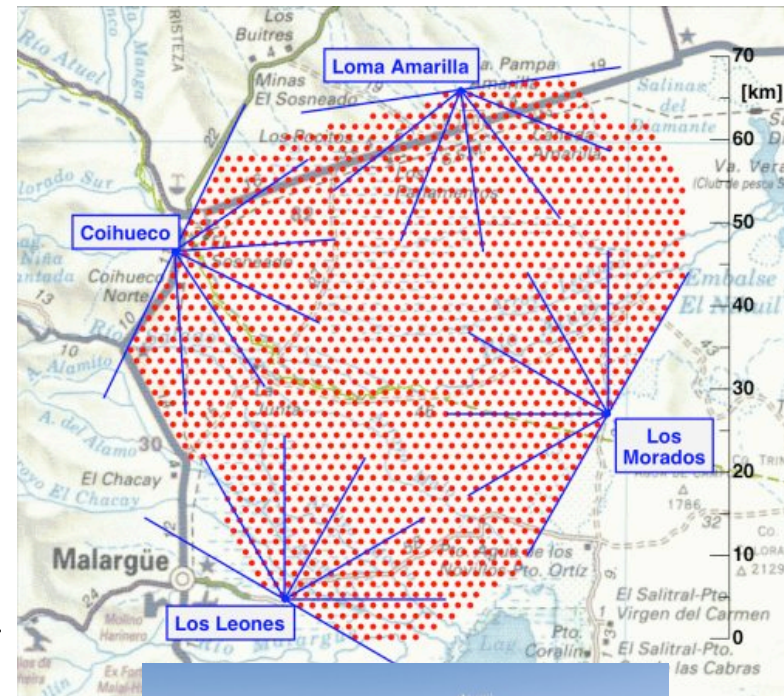
Ausgedehnte Luftschauer



[www.astroteilchenphysik.de]

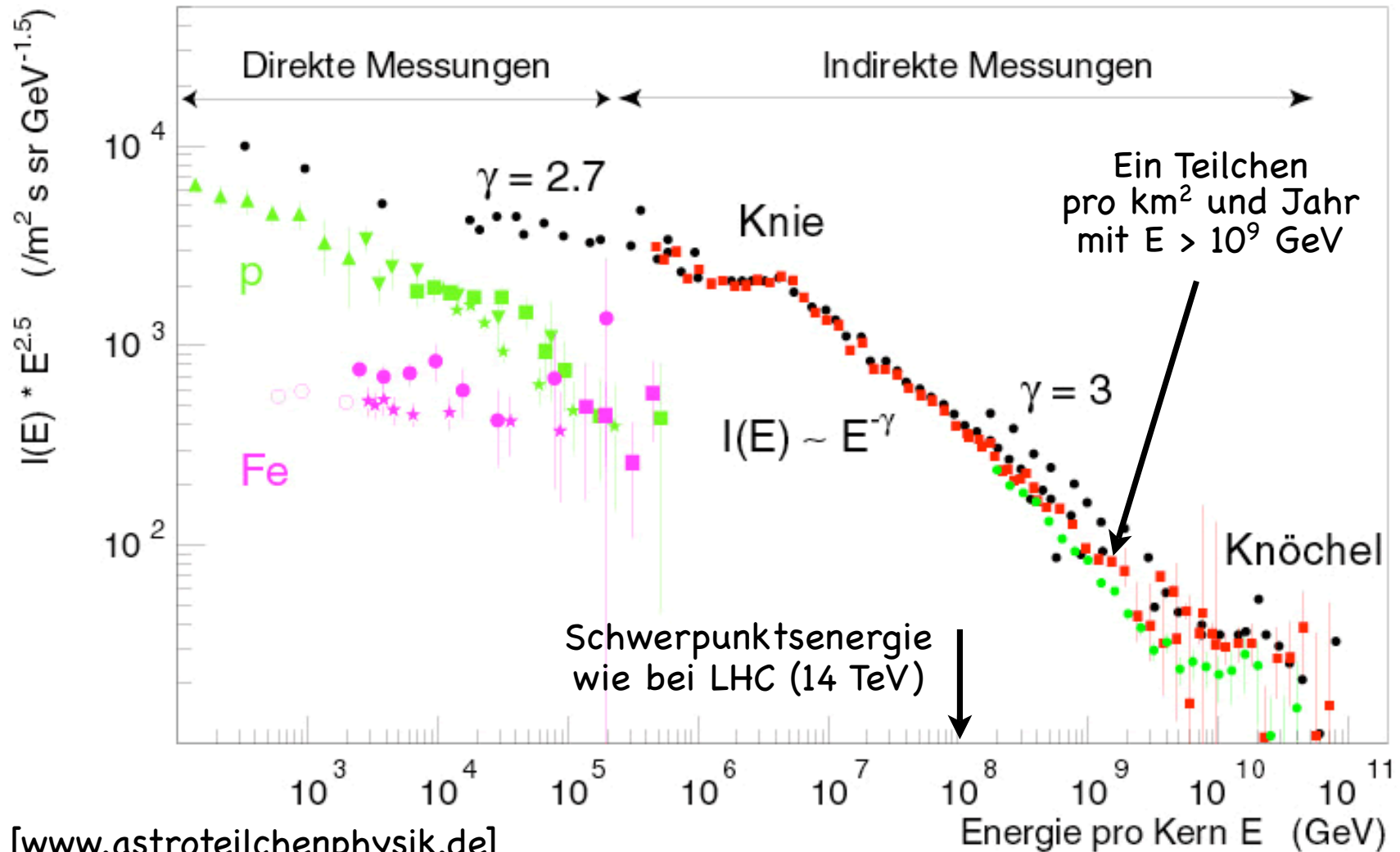
Pierre-Auger-Observatorium

- Standort: Malargüe (Argentinien)
- Hybriddetektor:
 - 1600 Wasser-Cherenkov-Detektoren (1,5 km Abstand) → 3000 km² (> Saarland)
 - 4 Detektoren für Fluoreszenzlicht aus Luftschauder
- Messungen von Richtung, Energie und chemischer Zusammensetzung (Fe oder H)?



[www.auger.de]

Energiespektrum



[www.astroteilchenphysik.de]

Energiespektrum

- Unterhalb von $E = 10$ GeV: Ablenkung durch Sonnenwind und Erdmagnetfeld
- Oberhalb von 10 GeV: Intensität (= Teilchen pro Energie, Fläche, Raumwinkel und Zeit) folgt Potenzgesetz

$$I(E) = \frac{d^4N}{dE dA d\Omega dt} \sim E^{-\gamma}$$

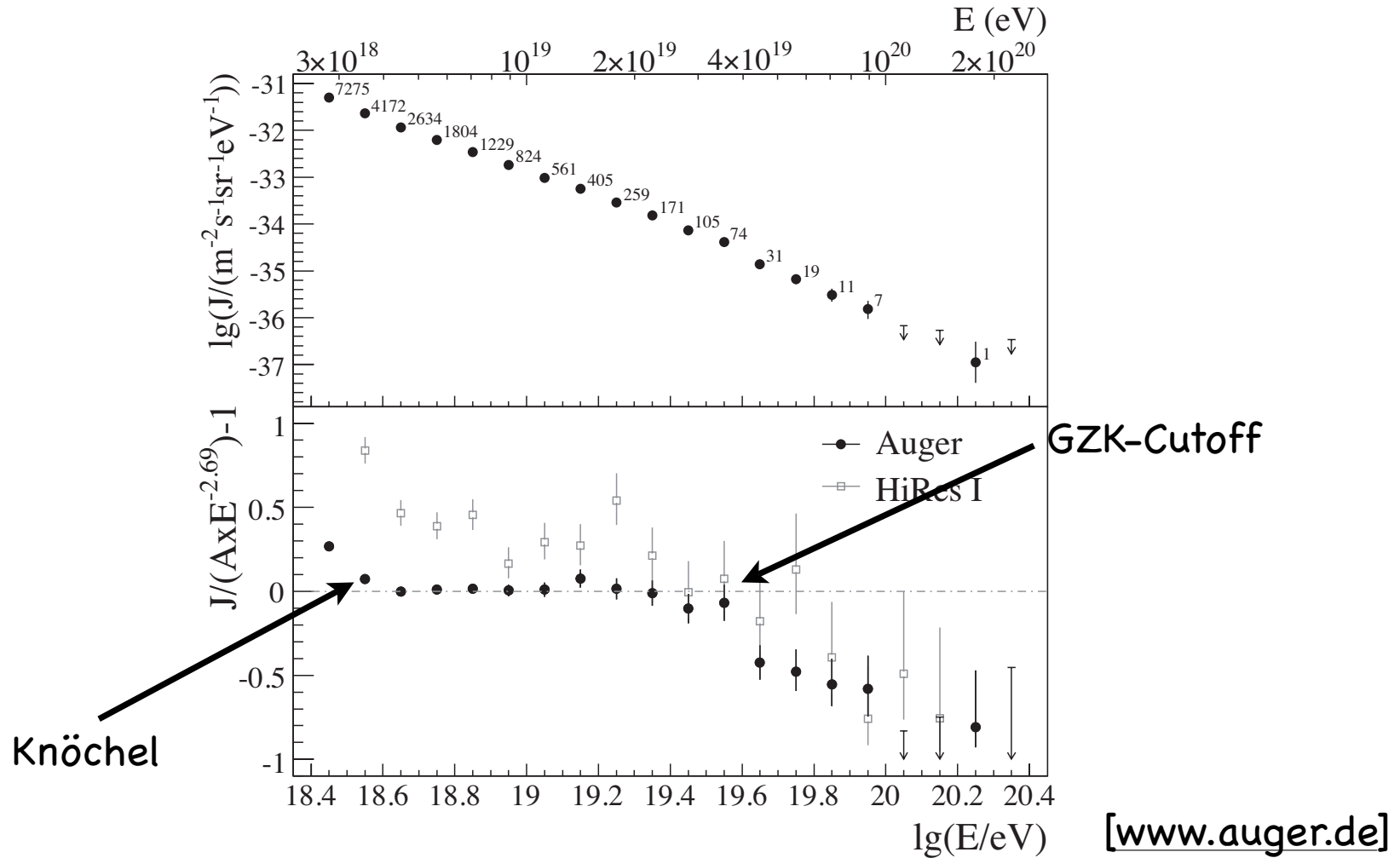
→ Quellen nicht thermisch (Planck'sches Strahlungsgesetz: exponentielle Intensitätsabnahme)

- $< 10^7$ GeV: $\gamma = 2.7$
- $\geq 10^7$ GeV: $\gamma = 3.0$ → „Knie“ im Energiespektrum
- $\geq 4 \cdot 10^9$ GeV: $\gamma < 3.0$ → „Knöchel“ im Energiespektrum
- $\geq 5 \cdot 10^{10}$ GeV: „GZK-Cutoff“

Energiespektrum

- Knie und Knöchel:
 - Ursache: keine eindeutige Lehrmeinung
 - Erklärungsversuche: Teilchen entkommen aus galaktischen Magnetfelder, Änderung des Beschleunigungsmechanismus
- GZK-Cutoff (Greisen, Zatsepin, Kuz'min): ca. $5 \cdot 10^{19}$ GeV
 - Protonen aus kosmischer Strahlung reagieren mit CMB-Photonen → resonante Produktion von Pionen
$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p\pi^0 \quad p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n\pi^+$$
 - Teilchen mit höheren Energien müssen von Quelle mit Abstand < 75 Mpc stammen, um nicht absorbiert zu werden
 - Experimentell bestätigt (HiRes Fly's Eye 2007, Auger 2008)

GZK-Cutoff

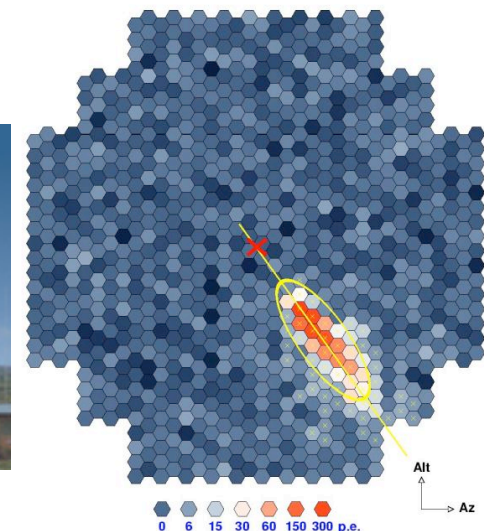


Hochenergetische Photonen

- Ziel: Suche nach Punktquellen (γ nicht abgelenkt)
- Kosmische Photonen mit $E > 100 \text{ GeV}$ \rightarrow Luftschauer mit Cherenkov-Kegel um Schauerachse
- Beispiel: H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System)
 - 4 Spiegelteleskope in Hochebene nahe Gamsberg, Namibia
 - Nachweis des Cherenkov-Lichts



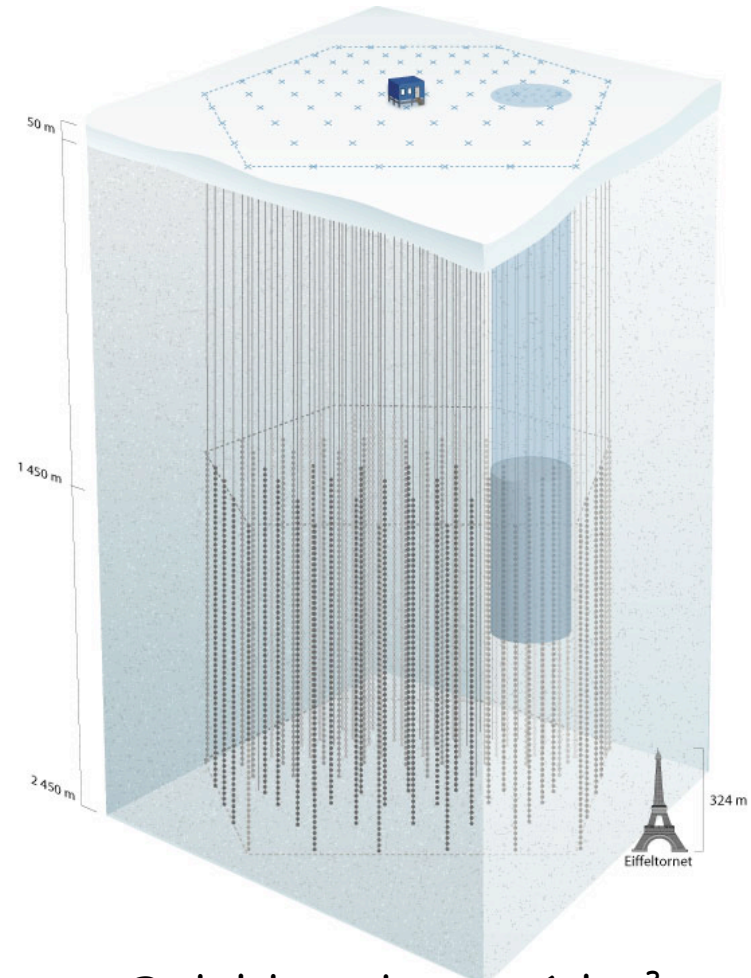
[<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.html>]



Primary: vertical gamma-ray of 1.0 TeV energy in 101 m distance

Neutrino-Astronomie

- Suche nach Punktquellen kosmischer Neutrinos
- Reaktion $\nu_{\mu} + \text{Kern} \rightarrow \mu + X$
 - Cherenkov-Licht des μ mit Photomultiplier nachweisen
- Detektoren mit guten optischen Eigenschaften (= durchsichtig)
 - Wasser: Baikalsee, Antares (Mittelmeer),
 - Eis: AMANDA, IceCube (Südpol)



Detektorvolumen: 1 km³
[icecube.wisc.edu]