

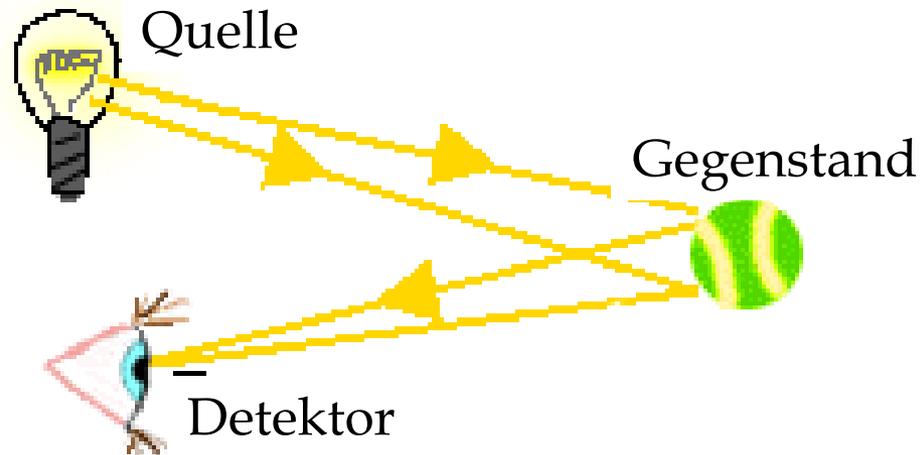
# Das Unsichtbare sichtbar machen



**Ullrich Schwanke**  
Humboldt-Universität zu Berlin



# Detektoren – die Augen der Teilchenphysiker



- Teilchen sind zu klein, um sie mit bloßen Auge zu sehen
- Teilchen müssen wechselwirken, um nachweisbar zu sein.

# Voraussetzung für den Nachweis: Wechselwirkung der Teilchen mit Materie

Verschiedene Arten der Wechselwirkung:

- **Schwerkraft:** gut für den Nachweis von Kometen,  
für Teilchen nicht sehr hilfreich
- **Elektromagnetisch:** Ionisation, Szintillationslicht  
Photoeffekt  
elektromagnetische Schauer ( $e^\pm$ ,  $\gamma$ )  
Aussendung von Tscherenkow-Licht
- **Stark:** Kern-WW (Neutron-Nachweis),  
hadronische Schauer
- **Schwach:** Neutrino-Nachweis (inverser  $\beta$ -Zerfall)

# Tscherenkow-Strahlung

Teilchen kann in einem Medium mit Brechungsindex  $n$  **schneller** sein **als Licht**:

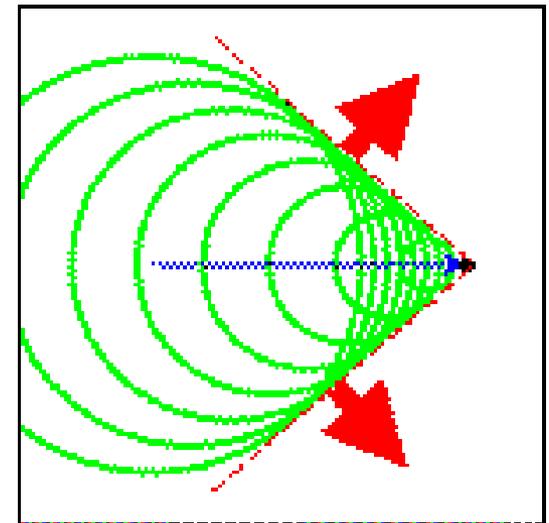
$$c_{\text{medium}} = c_{\text{vakuum}} / n$$

- Wasser:  $n = 1,33$
- Eis:  $n = 1,3$
- Diamant:  $n = 2,4$
- Gase:  $n \approx 1 + 0,001..$

⇒ Effekt wie bei Schall: „Schallmauer“ (Machscher Kegel)



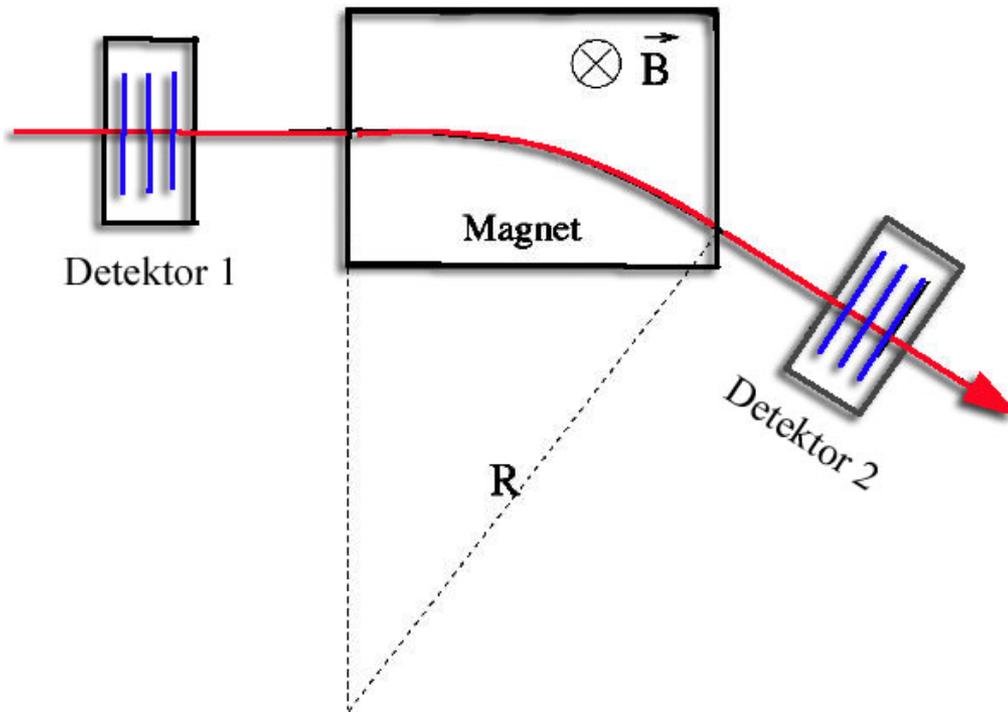
Cherenkov-Kegel





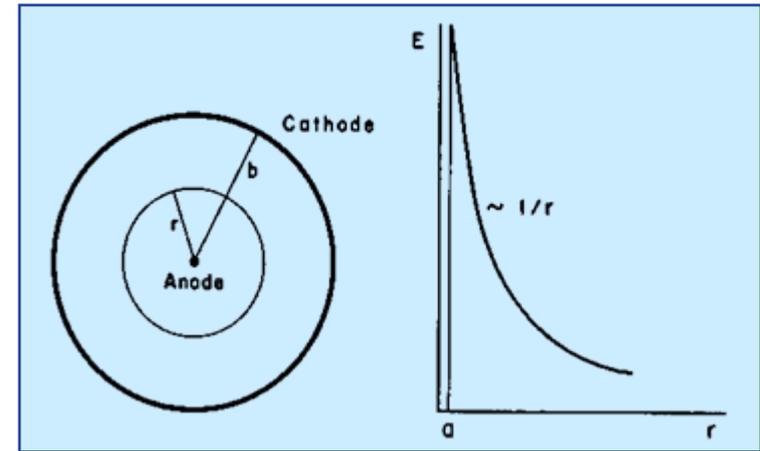
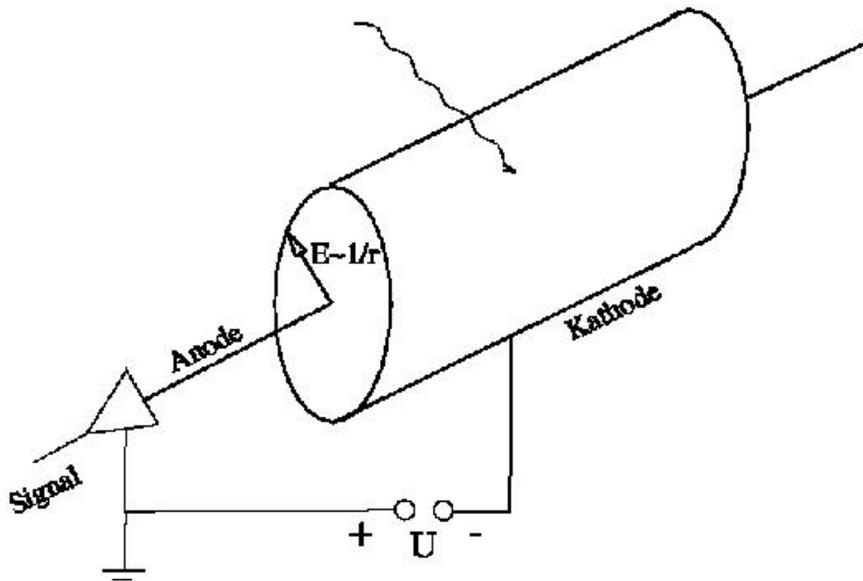
# Impulsmessung: Prinzip

Impuls = Masse  $\times$  Geschwindigkeit

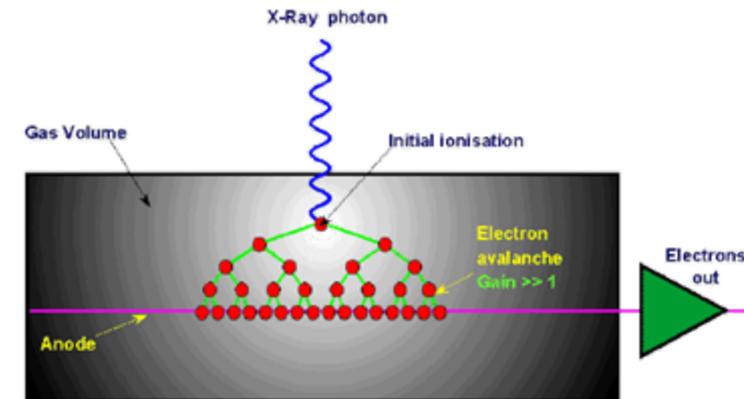


- Stärke der Krümmung  $\rightarrow$  Impuls
- Richtung der Krümmung  $\rightarrow$  Ladung
- Rückführung der Impulsmessung auf eine Ortsmessung
- Häufig ganze Detektoren im Magnetfeld

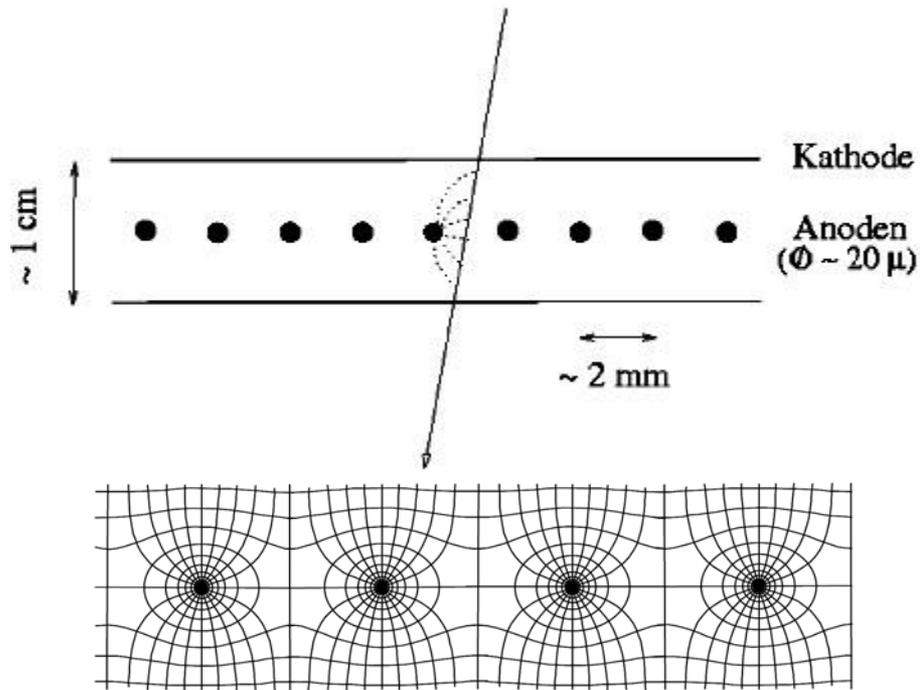
# Ortsmessung: z.B. Geiger-Müller-Zähler



- Ionisationsladungen driften zum Anodendraht → elektrisches Signal durch Gasverstärkung
- Elektronische Auslese



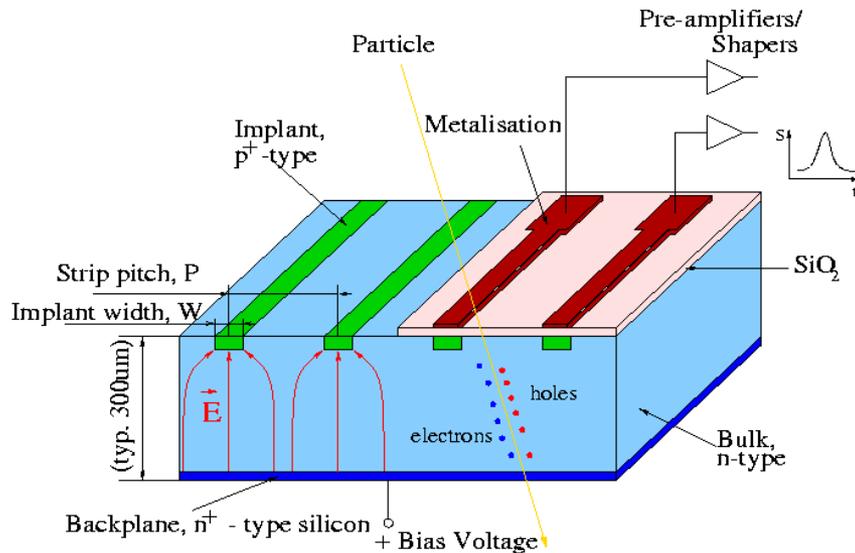
# Ortsbestimmung: Spurkammern



- Oft mehrlagig
- Messung von Flugrichtung und Zerfallsstrecke



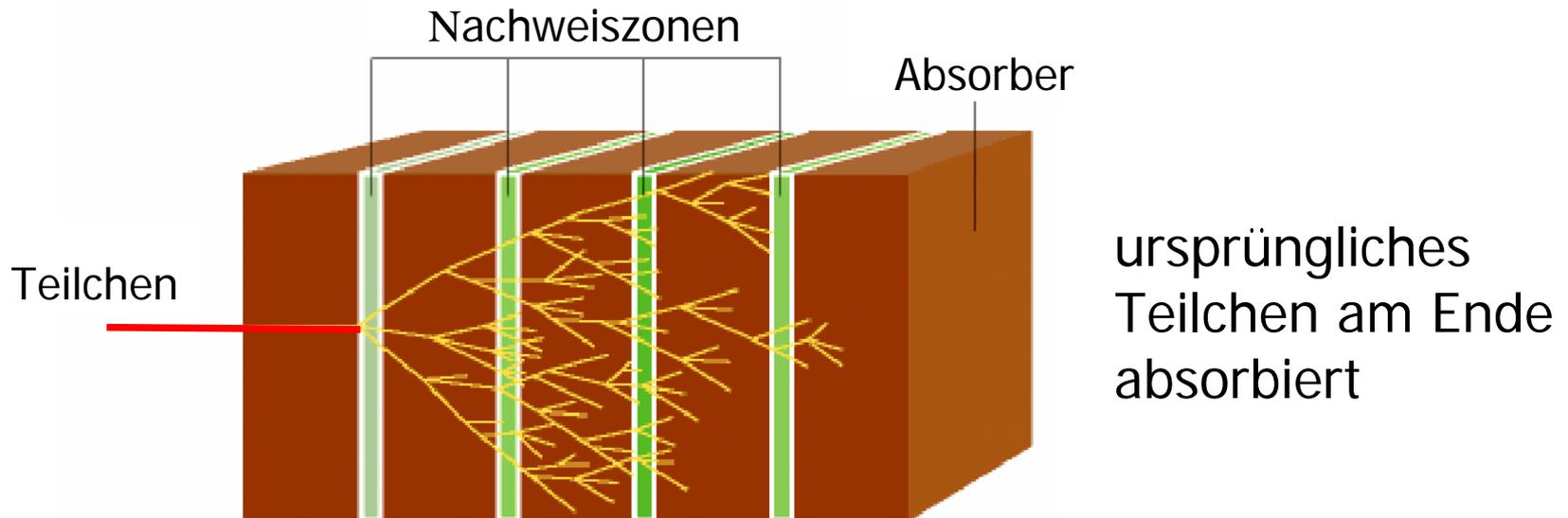
# Ortsbestimmung: Siliziumdetektoren



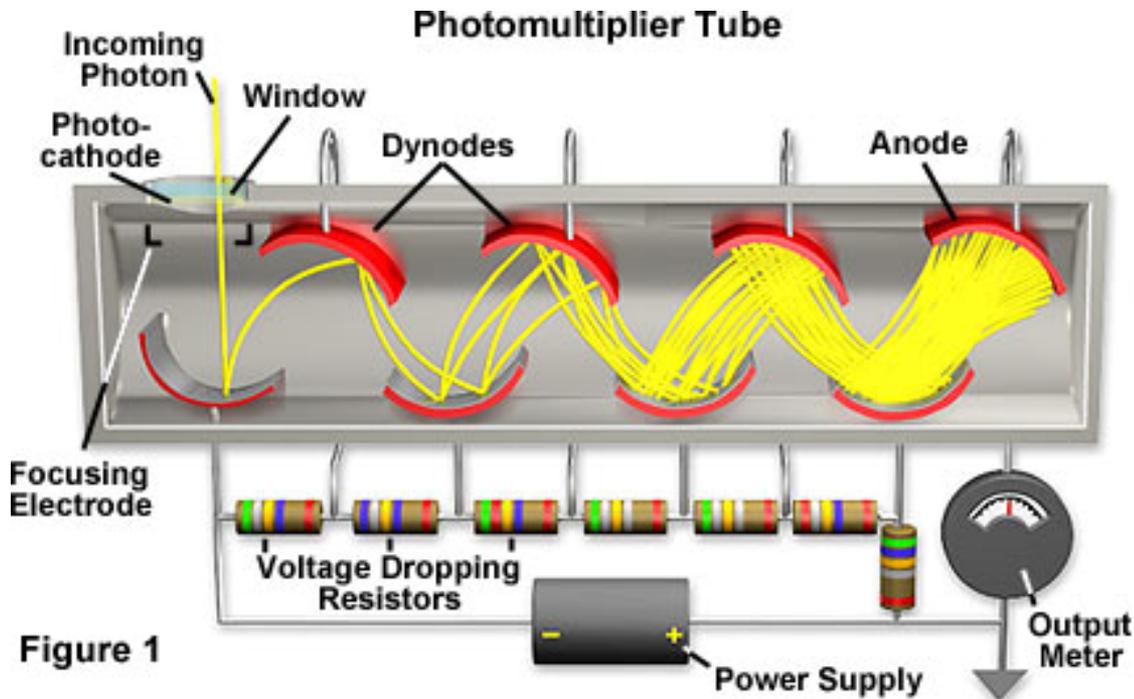
- Funktionsweise ähnlich zu einer in Sperrrichtung geschalteten Diode
- Ionisierende Teilchen erzeugen Elektron-Loch-Paare in Halbleiter, die über Elektronen abgesaugt werden
- Bessere Auflösung (Genauigkeit) als Drahtkammern (Streifenbreite  $\sim 20 \mu\text{m}$ )
- Oft in der Nähe des Wechselwirkungspunktes angebracht

# Energiemessung: Prinzip

- Teilchen geben in Materie ihre Energie durch Produktion neuer Teilchen ab → Schauer
- Anzahl der Teilchen im Schauer ist proportional zur Energie
- Messung von Szintillationslicht in den Nachweiszonen



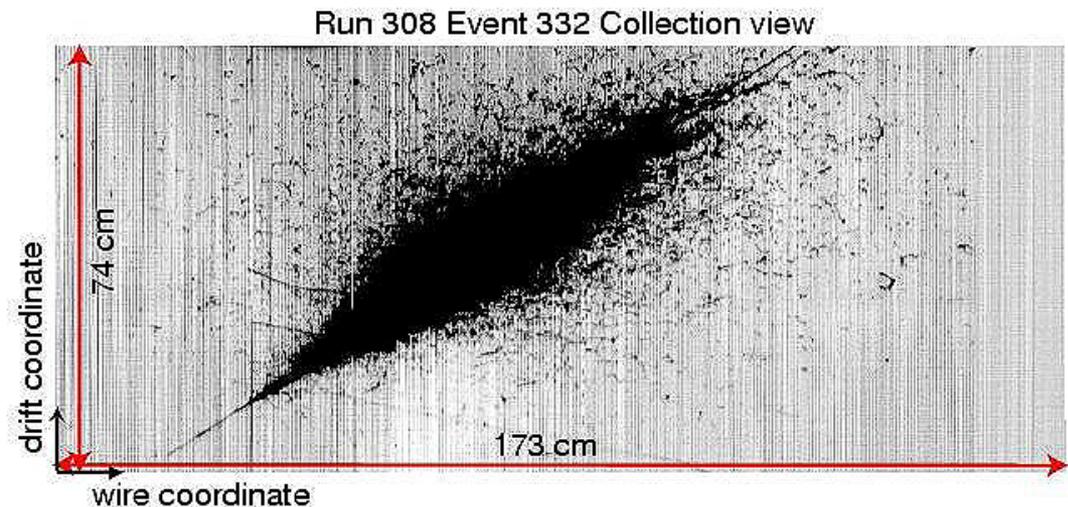
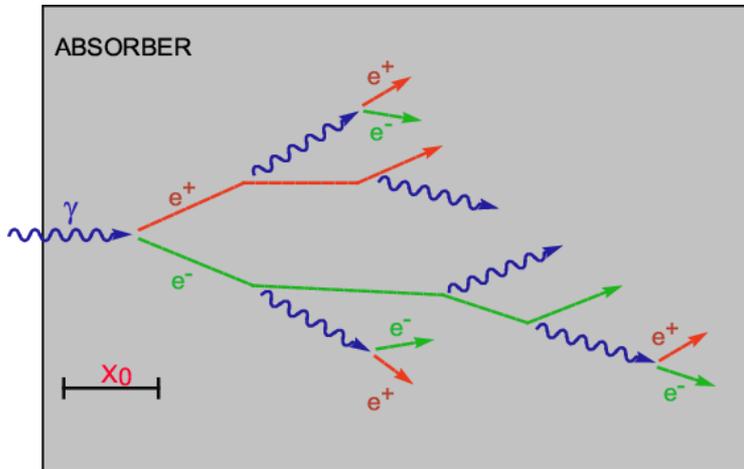
# Photovervielfacher-Röhren



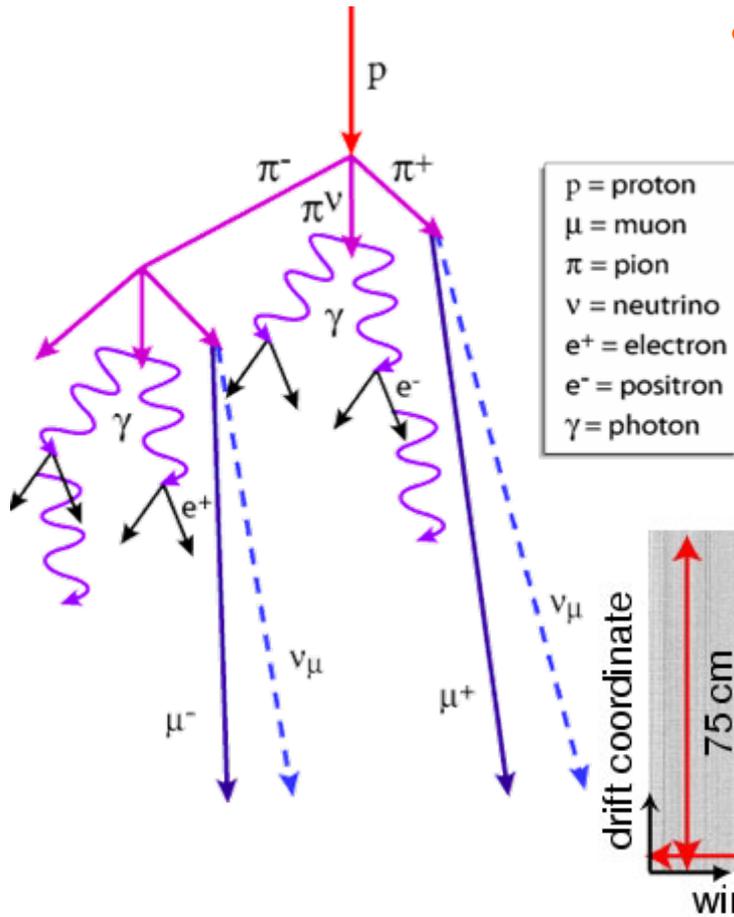
- Auch PMT ("photo multiplier tube") genannt
- Umwandlung von Licht in Spannungspuls
- Nachweis von Szintillations- und Tscherenkow-Licht

# Messung der Energie: Kalorimeter (1/3)

- elektromagnetisches Kalorimeter
  - Elektronen/Positronen und Photonen verursachen in Materie Schauer aus Photonen und Elektron-Positron-Paaren
  - kurze, kompakte Schauer



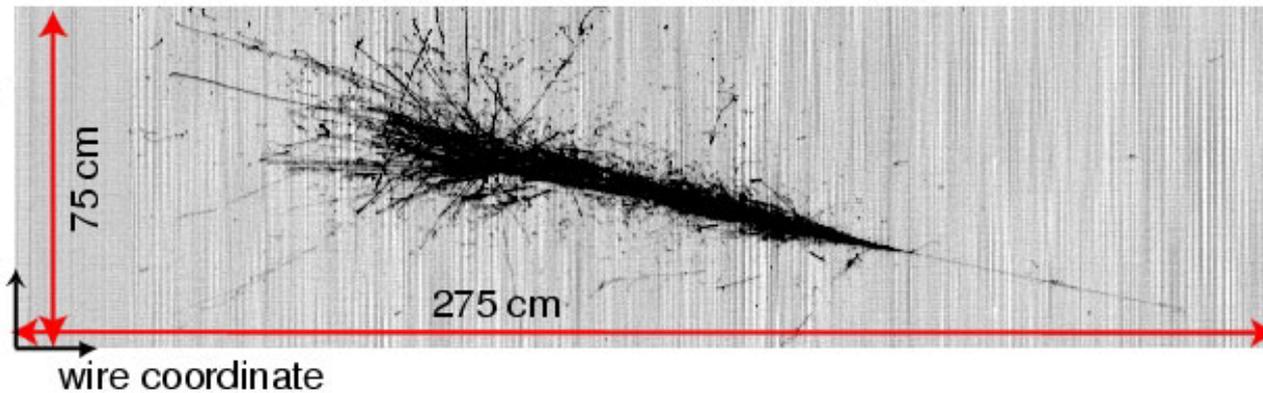
# Messung der Energie: Kalorimeter (2/3)



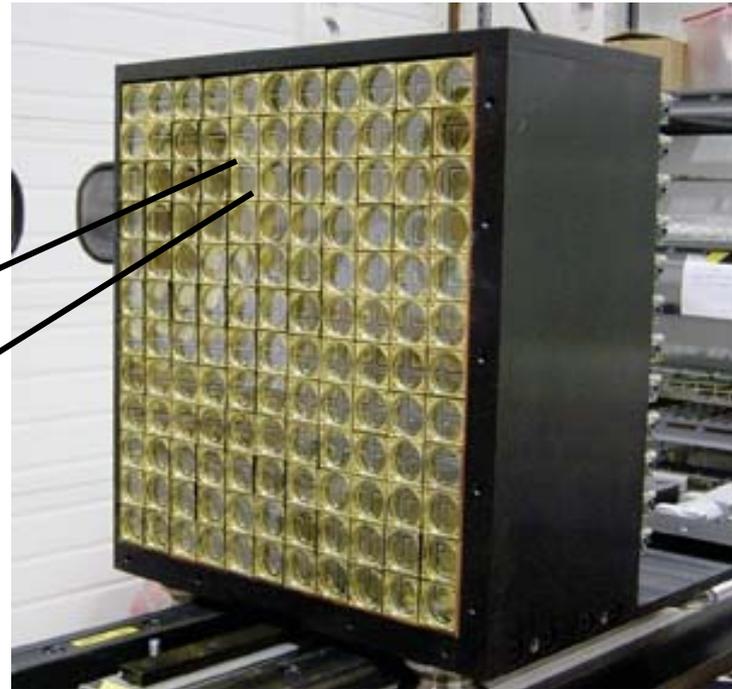
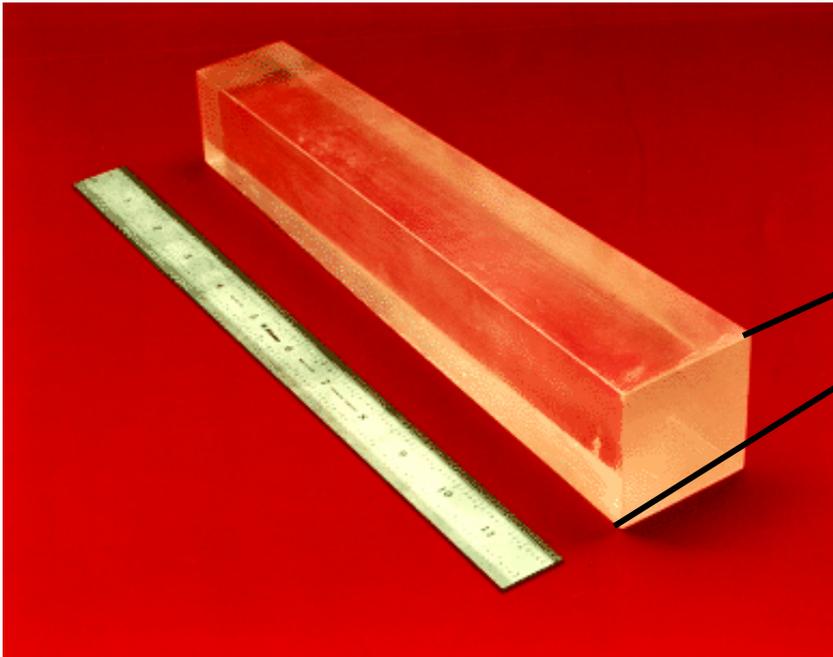
- hadronisches Kalorimeter

- Hadronen (z.B. Protonen, Pionen, Neutronen) verursachen in Materie Schauer aus weiteren Hadronen
- tiefe, ausgedehnte Schauer

Run 308 Event 7 Collection view



# Kalorimeter (3/3)



1 m

- Kalorimeter-Materialien: Kristalle, Blei, ...
- Ortsauflösung:  $\sim 5$  cm

# „Besondere“ Teilchen



Myon (1/10 Protonmasse)



Neutrinos (fast masselos)



Tau (~2 Protonmassen)

- Schwerere Ausgabe des Elektrons
  - wenig Wechselwirkung mit Materie
  - durchdringen fast alles
  - hinterlassen nur wenig Energie
- 
- elektrisch neutral, schwache Wechselwirkung mit Materie
  - entkommen unerkannt und machen sich durch „verschwundene“ Energie bemerkbar
- 
- Schwerere Ausgabe des Myons
  - Viele Zerfallskanäle, Zerfallskaskaden
  - Neutrinos, leichtere Leptonen und Hadronen entstehen

# Tau-Zerfälle

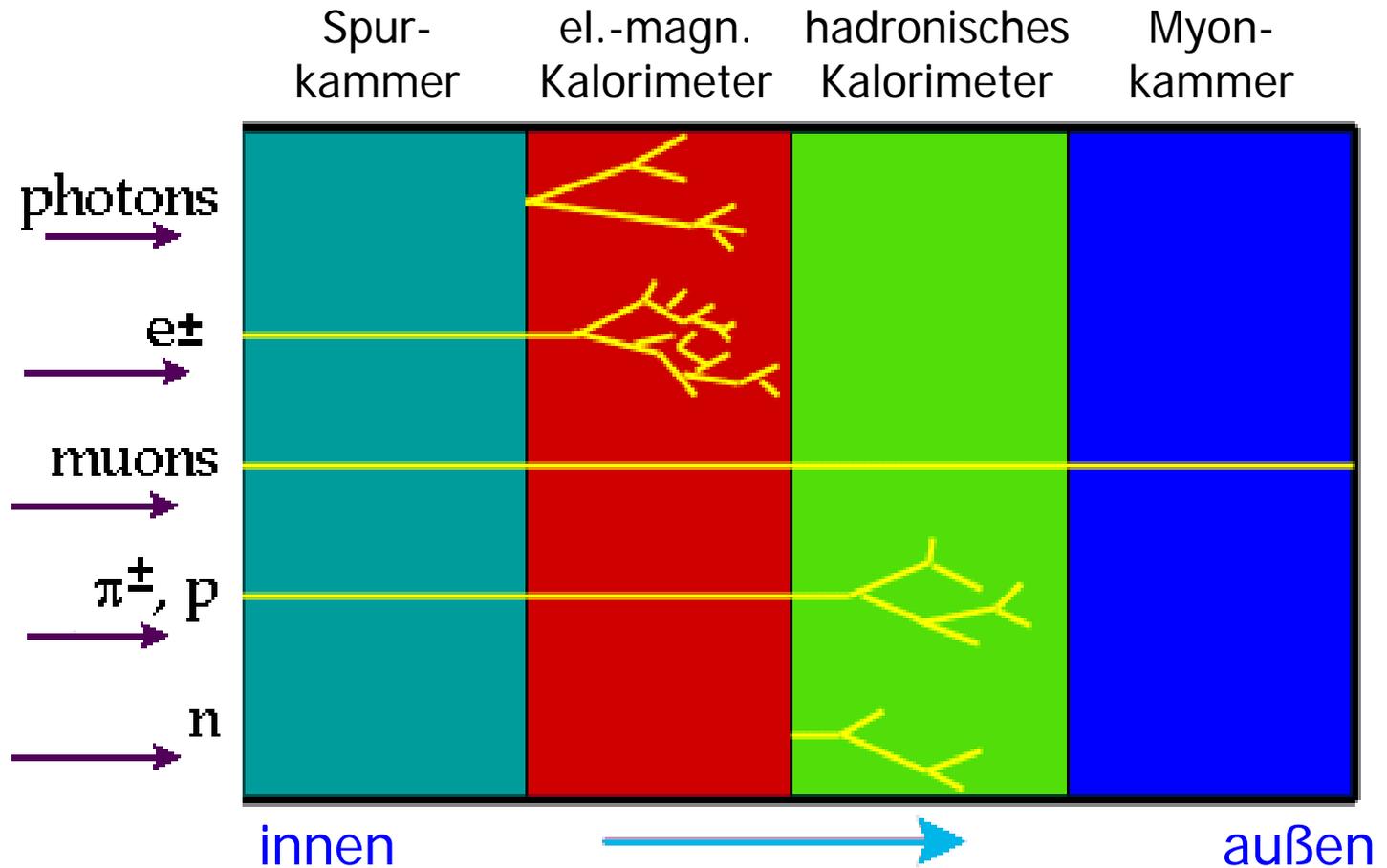


- Hadronen und Leptonen unter den Zerfallsprodukten – mit entsprechenden Schauern
- Neutrinos verraten sich durch "fehlende" Energie
- Schwierig!

**Tabelle:** Die Zerfallsmodi des Tau-Leptons mit den größten Verzweigungsverhältnissen am Beispiel des  $\tau^-$ -Zerfalls.

Zerfallsmodus	Verzweigungsverhältnis	
$\pi^- \pi^0 \nu_\tau$	24.0% $\pm$ 0.6%	1-prong
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	17.9% $\pm$ 0.3%	1-prong
$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	17.6% $\pm$ 0.3%	1-prong
$\pi^- \nu_\tau$	11.6% $\pm$ 0.4%	1-prong
$\pi^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$	5.6% $\pm$ 0.7%	3-prong
$\pi^- \pi^- \pi^+ \pi^0 \nu_\tau$	4.4% $\pm$ 1.6%	3-prong
$\pi^- \pi^0 \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$	3.0% $\pm$ 2.7%	1-prong

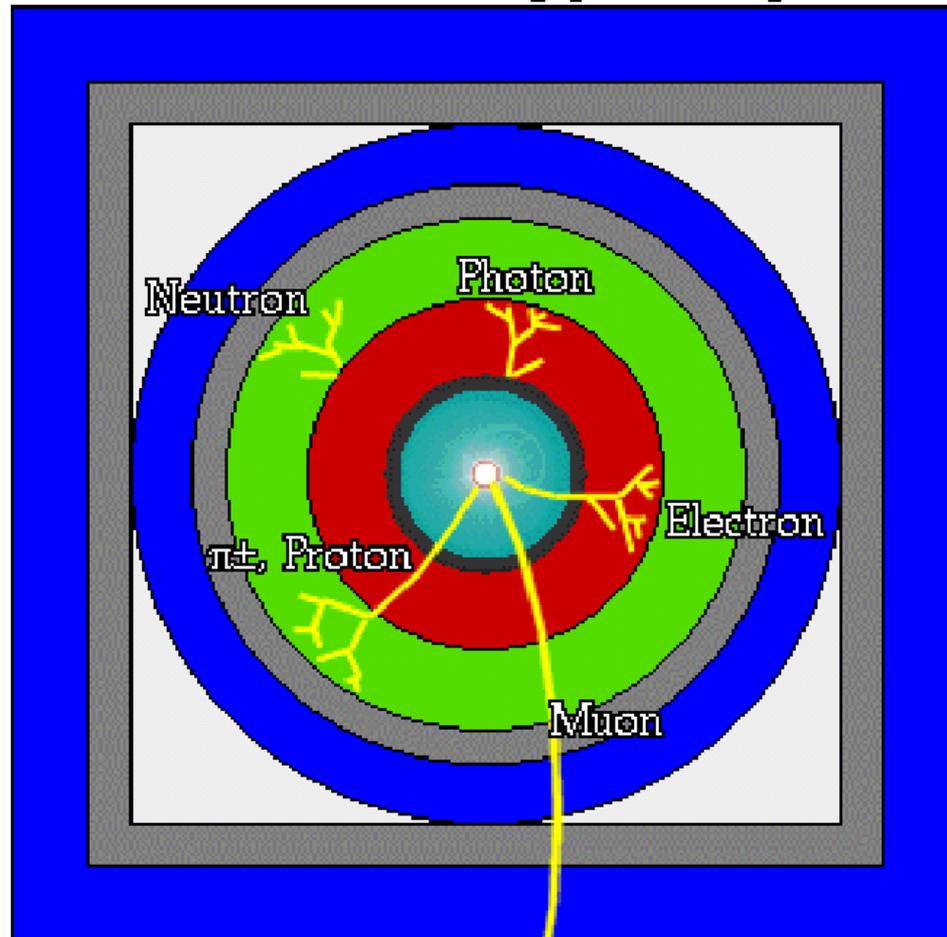
# Unterscheidung der Teilchensorten



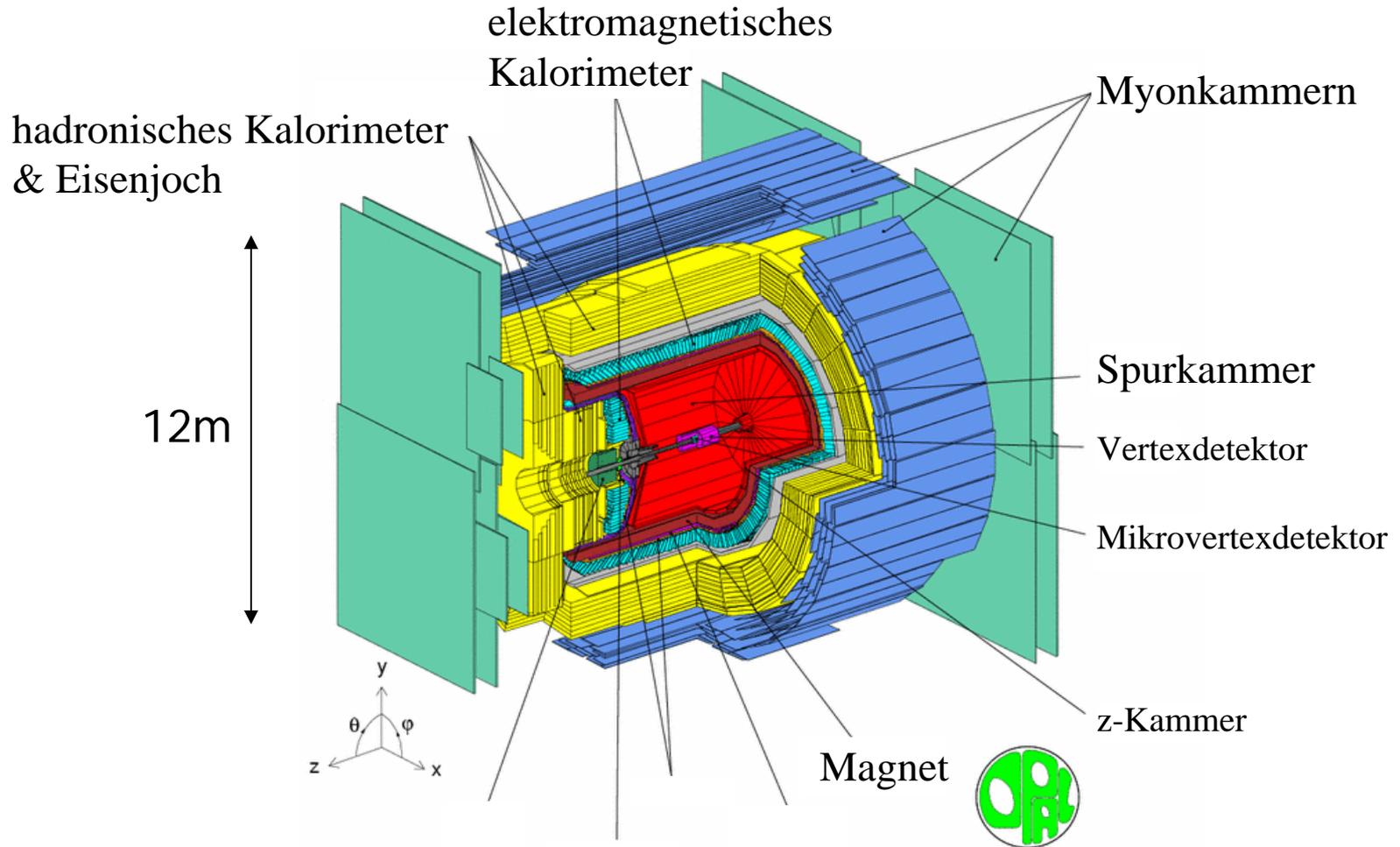
# Schematischer Aufbau eines Detektors

Zwiebelschalenartiger Aufbau aus verschiedenen Komponenten

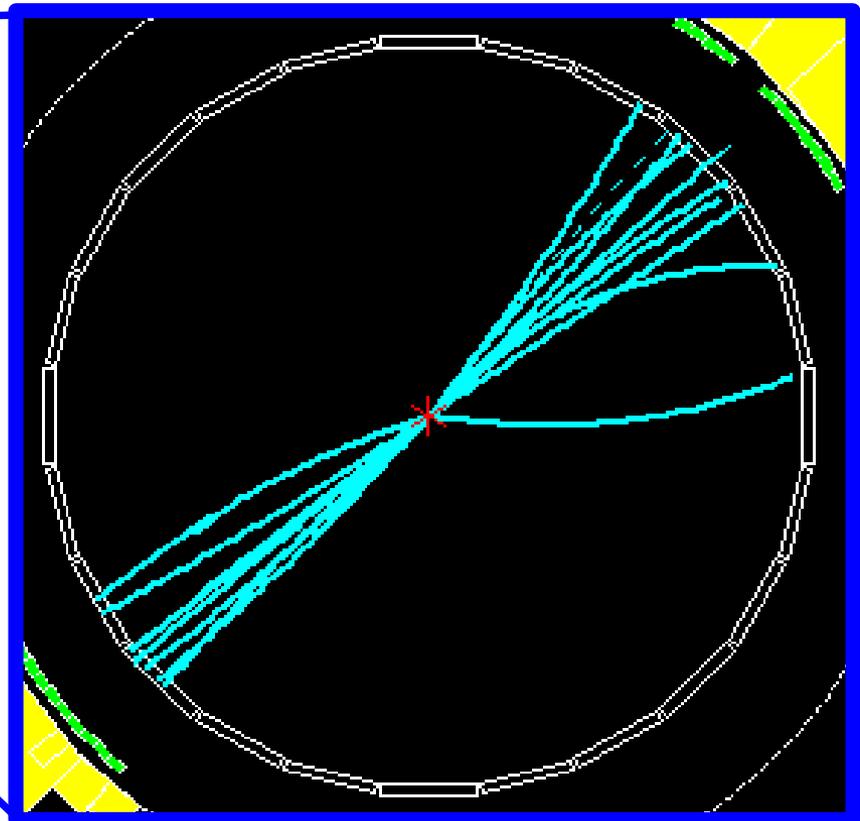
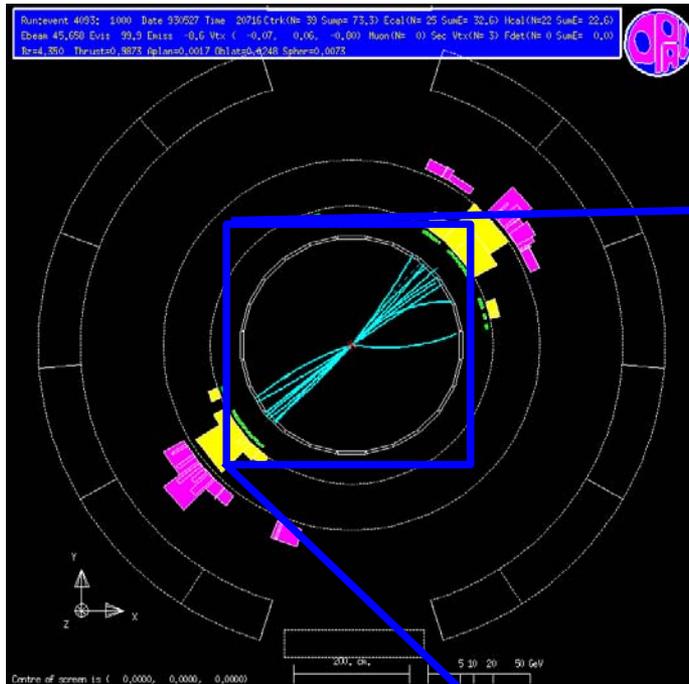
-  Strahlrohr
-  Spur-  
kammer
-  Magnet
-  el.-magn.  
Kalorimeter
-  hadron.  
Kalorimeter
-  Eisenjoch
-  Myon-  
kammer



# Der OPAL-Detektor



# Ein Ereignis im OPAL-Detektor



# PC-Übung

- Viel Spass beim Klassifizieren der Z-Zerfälle bei der PC-Übung!
  - Bitte Eingang zur Bibliothek im Erwin-Schrödinger-Zentrum benutzen
  - Sachen müssen an der Garderobe abgegeben werden

# Von Berlin nach Genf, Afrika und zum Südpol - Teilchenphysik in Berlin/Brandenburg



Martin zur Nedden  
Ullrich Schwanke  
Humboldt-Universität zu Berlin





DESY Hamburg

CERN, Genf

HU Berlin /  
DESY Zeuthen

# Reiseplan

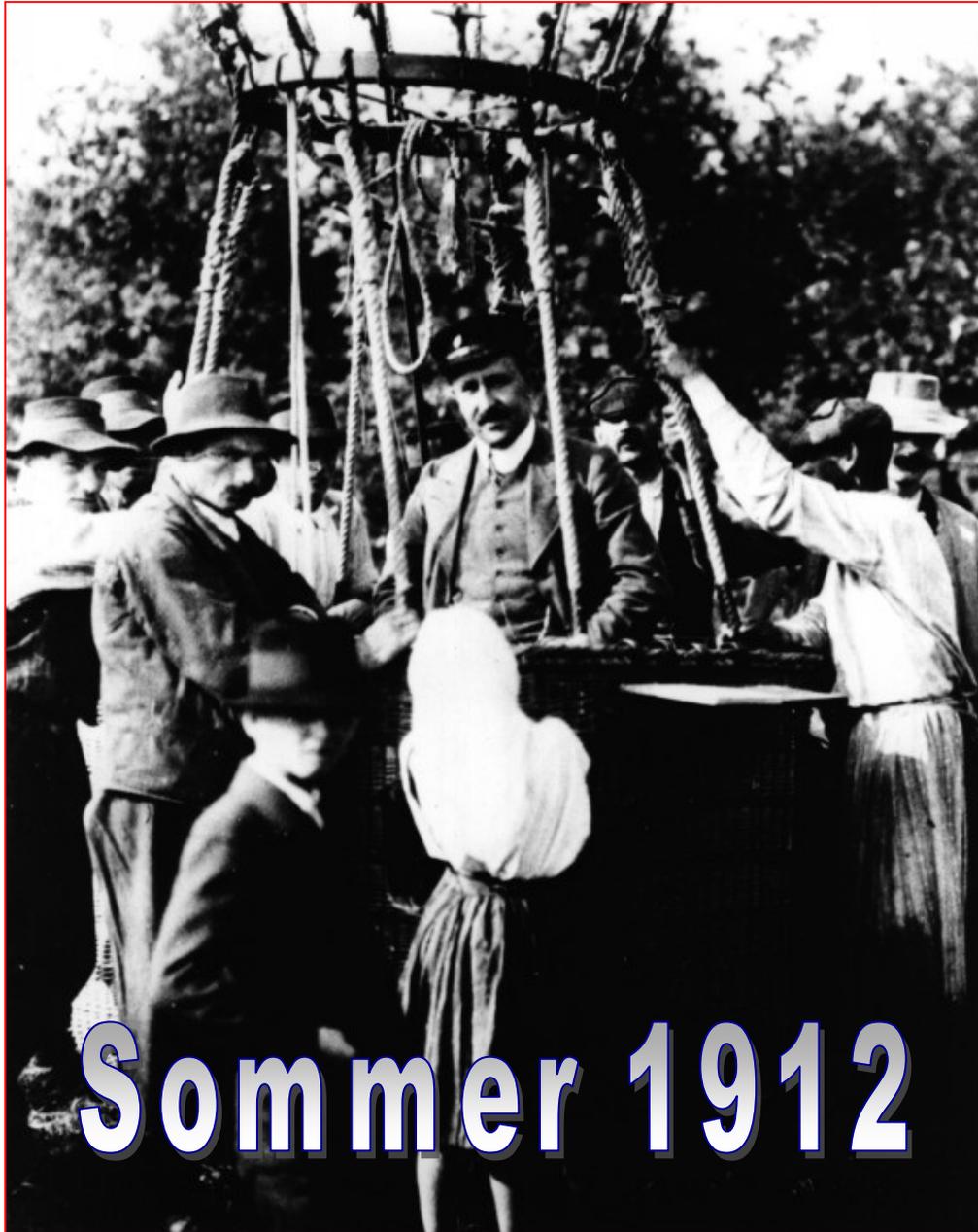
Namibia

Südpol

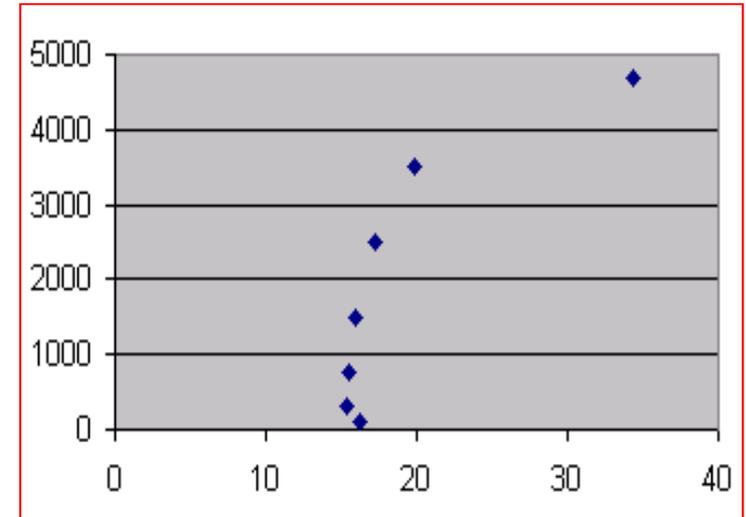
# Übersicht

- Motivation: Die Suche nach den Quellen der Kosmischen Strahlung
- Gammastrahlungs-Astronomie mit dem H.E.S.S.-Experiment
- Neutrino-Astronomie mit dem AMANDA/IceCube-Experiment





Höhe (m)



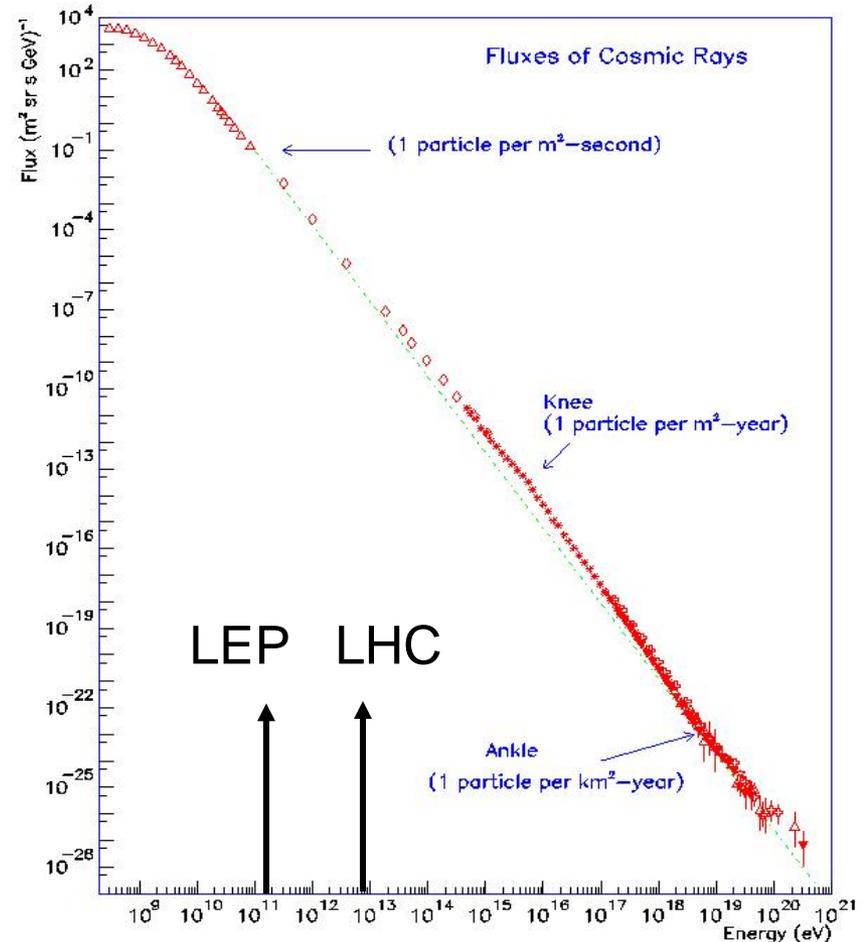
Ionisation

**Viktor Hess**

Nobelpreis 1936

# Kosmische Strahlung

- Nicht-thermisches Spektrum (Potenzgesetz  $E^{-\Gamma}$ )
- Beachtliche Leistung:  $10^{34}$  Watt ( $\sim 10^9$  Sonnen) in der Milchstraße
- Zusammensetzung recht gut bekannt: vorwiegend Protonen, aber auch Kerne
- **Quellen unbekannt**

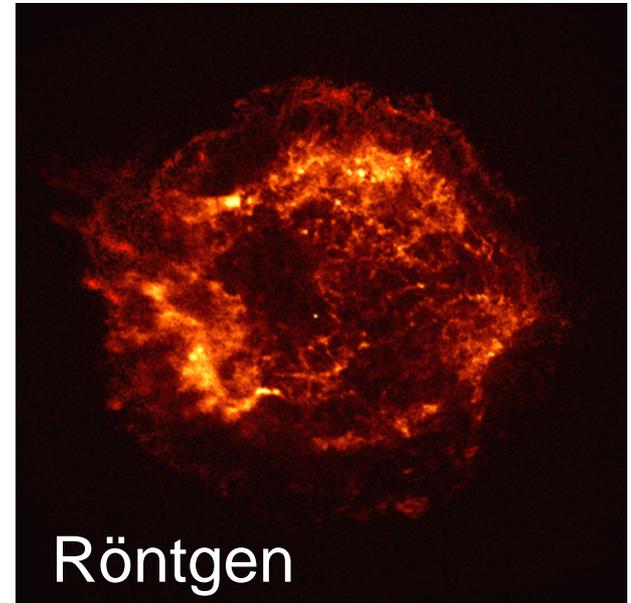


# Sind Supernovarestes die Quellen?

- Ausreichende Energiefreisetzung

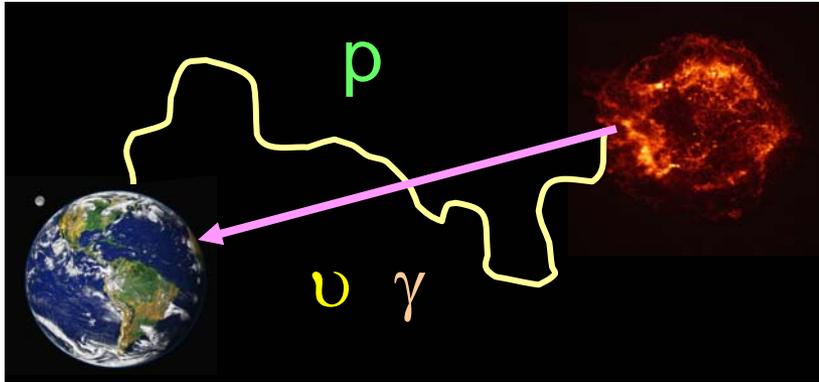
$$(dE/dt)_{SN} = 10 \cdot (dE/dt)_{CR}$$

- Elementzusammensetzung passt
- Diffusiver Schockbeschleunigungs-Mechanismus



Kassiopeia A Supernova,  
 $d = 2.8 \text{ kpc}$

# Lokalisierung der Quellen?



## Protonen und Kerne

- Isotrope Verteilung durch Ablenkung in Magnetfeldern

## Neutrinos

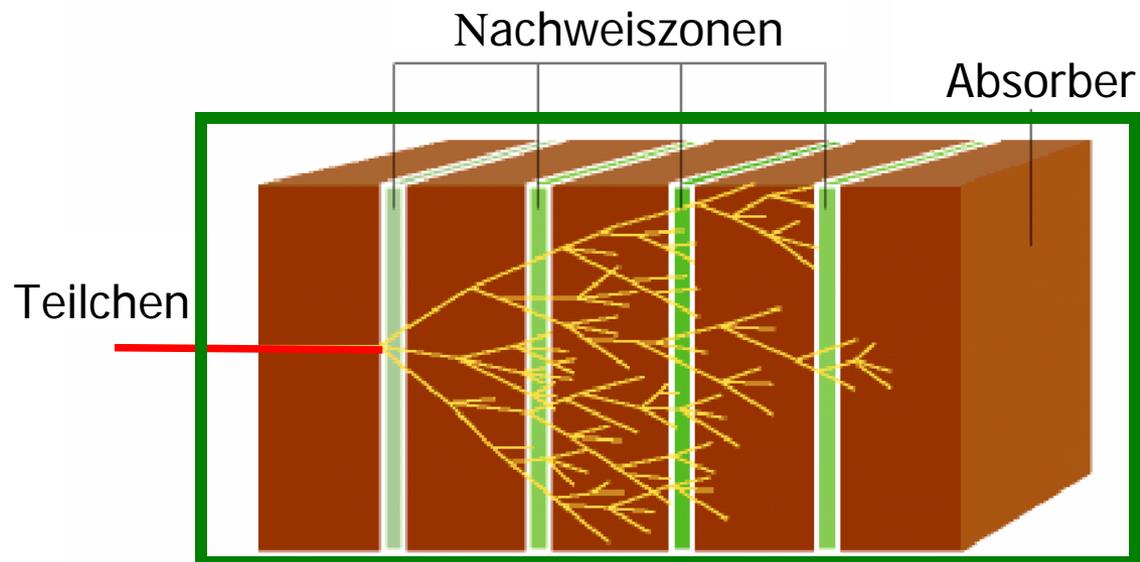
- *Die* Signatur zum Nachweis hadronischer Wechselwirkungen
- Praktisch keine Absorption in der Quelle oder bei der Ausbreitung

## Gammastrahlung

- Entsteht in hadron. und elektromagnet. Wechselwirkungen
- Relativ einfacher Nachweis

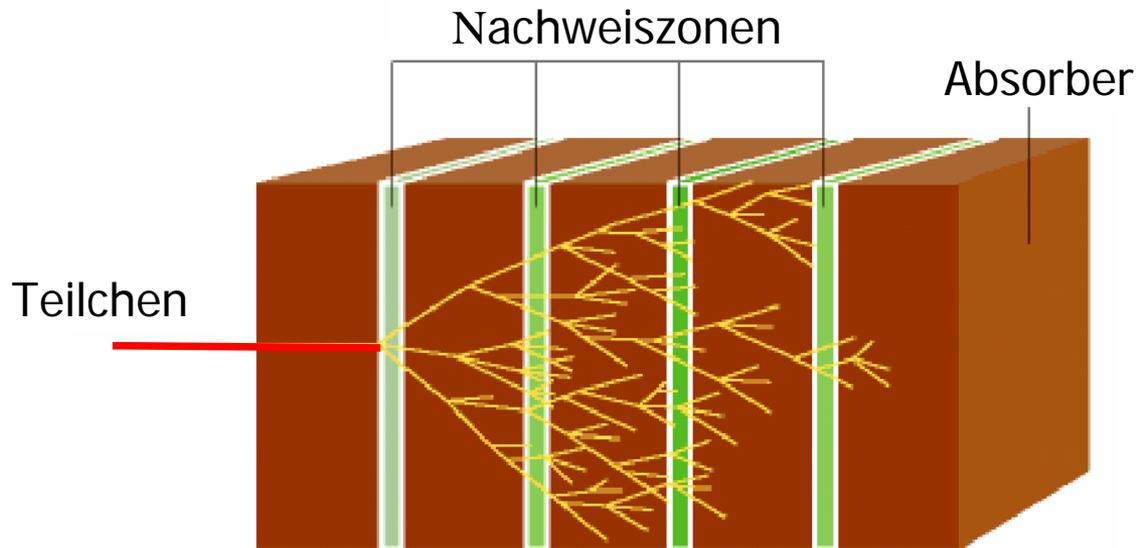
# Die abbildende Tscherenkow-Technik

- Nachweis von Gammastrahlung
- Erdatmosphäre wird als Kalorimeter benutzt

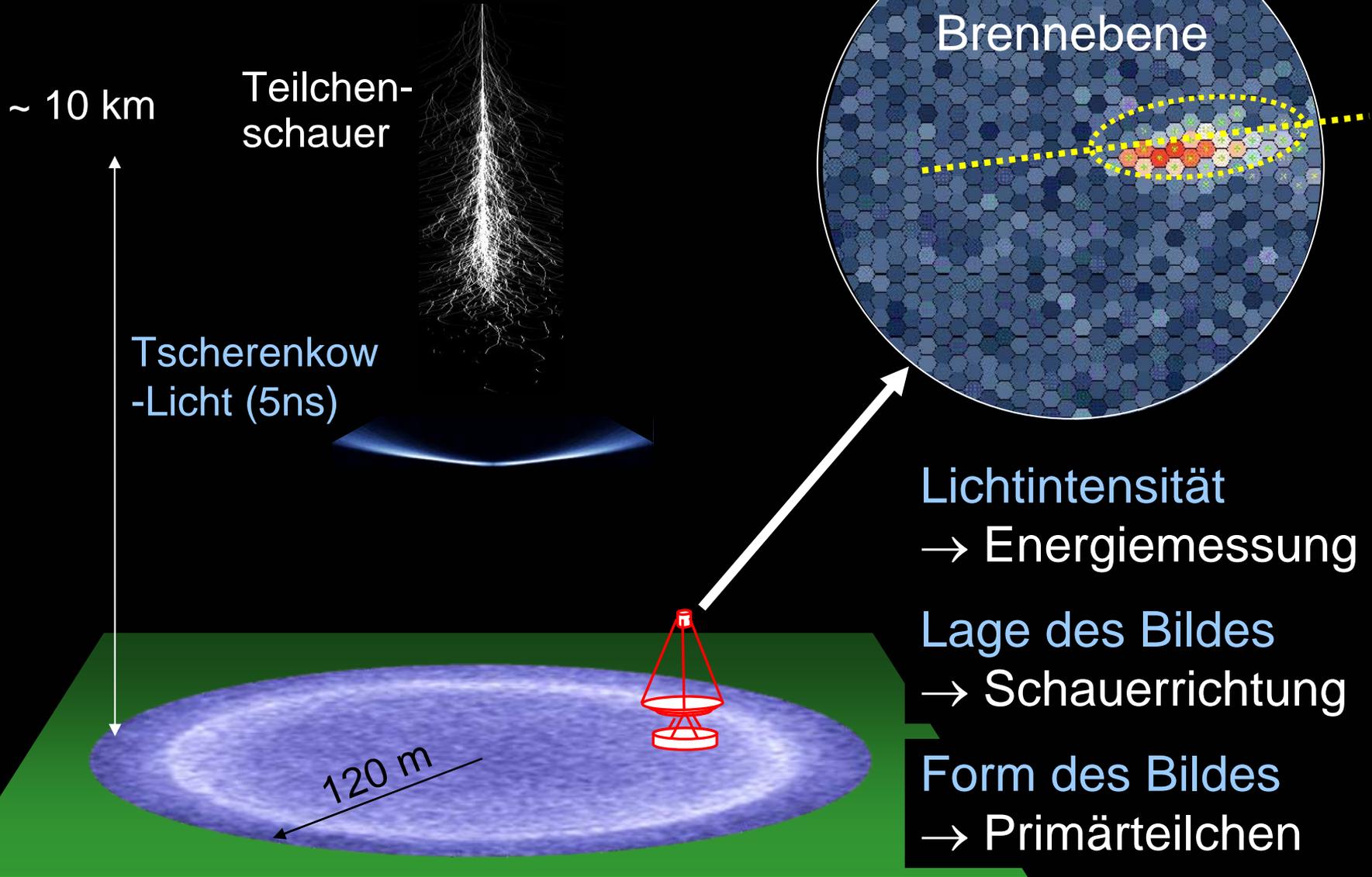


# Die abbildende Tscherenkow-Technik

- Nachweis von Gammastrahlung
- Erdatmosphäre wird als Kalorimeter benutzt



# Schauerdetektion



# High Energy Stereoscopic System

**MPI für Kernphysik, Heidelberg**

**Humboldt-Universität zu Berlin**

**Ruhr-Universität Bochum**

**Universität Hamburg**

**Universität Kiel**

**Ecole Polytechnique, Palaiseau**

**College de France, Paris**

**Universite Paris VI-VII**

**LEA Saclay**

**CESR Toulouse**

**GAM Montpellier**

**LAOG Grenoble**

**Paris Observatory**

**Durham University**

**Dublin Inst. for Advanced Studies**

**Charles University Prag**

**Yerewan Physics Institute**

**North-West University, Potchefstroom**

**University of Namibia, Windhoek**

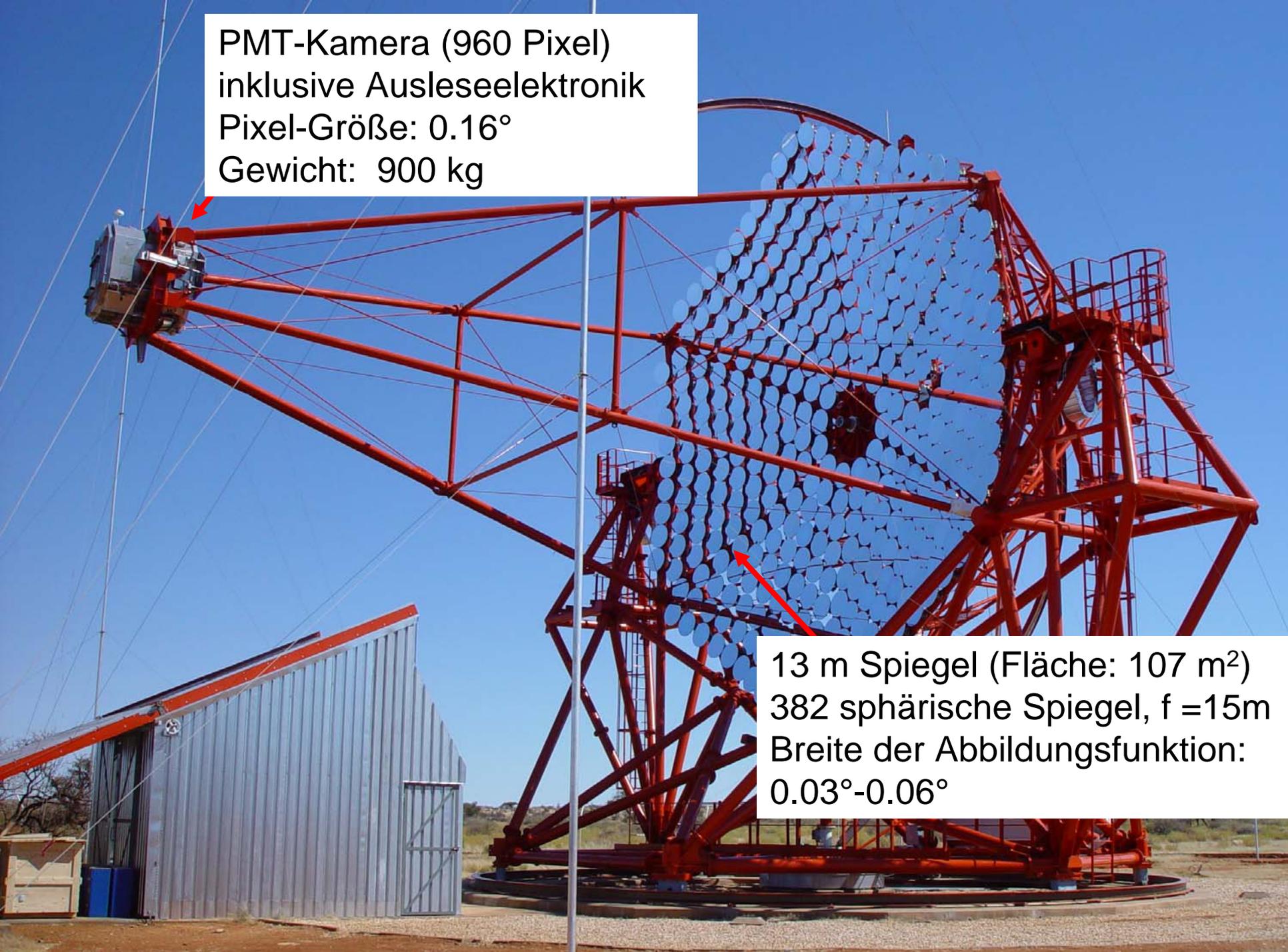


# Warum Namibia?

- Klarer Himmel
  - 1000 h pro Jahr
- Galaktisches Zentrum kulminiert im Zenit
- Mildes Klima
- Einfacher Zugang

Farm Göllschau,  
Khomas Hochland,  
100 km von Windhoek

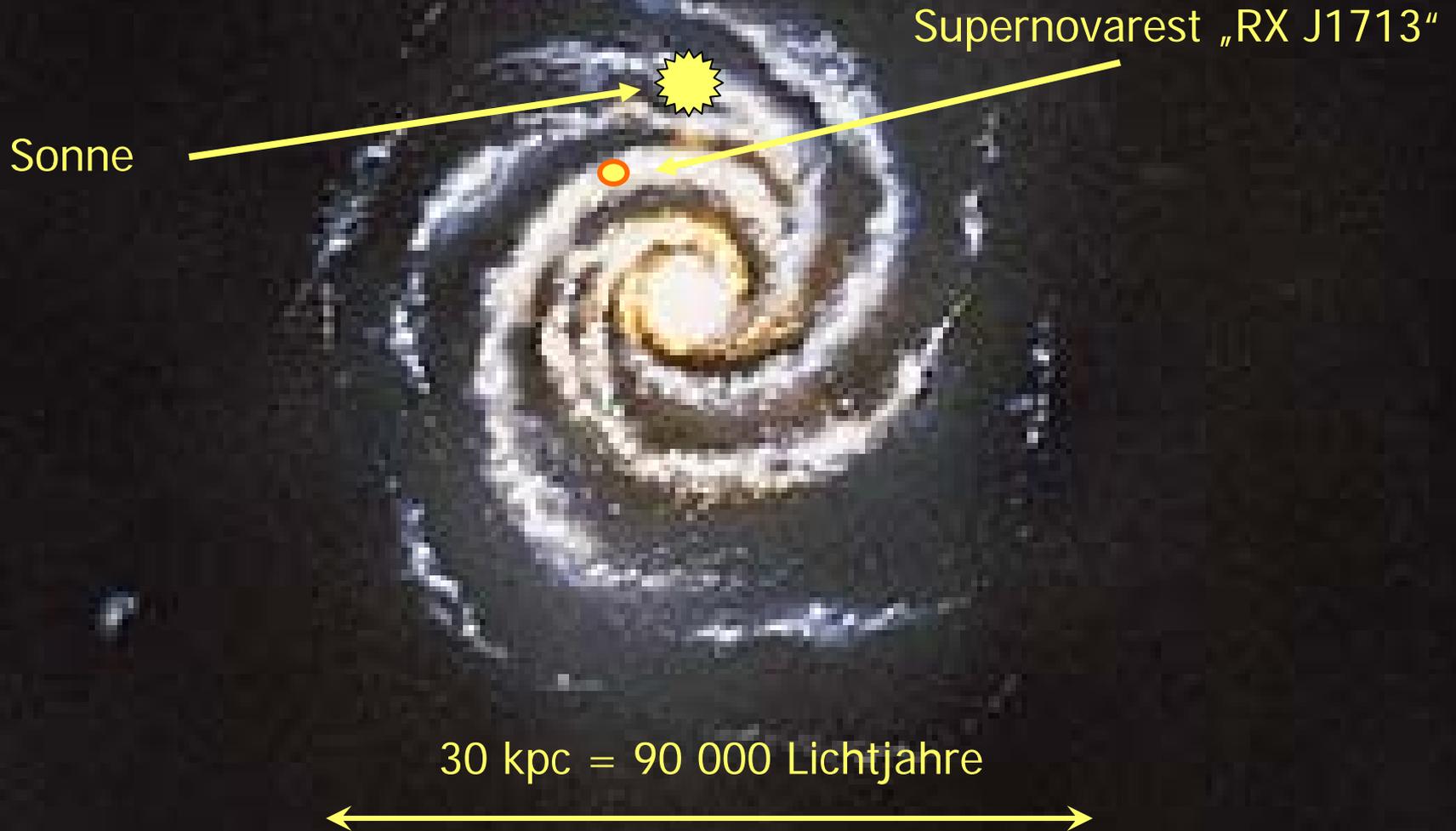




PMT-Kamera (960 Pixel)  
inklusive Ausleseelektronik  
Pixel-Größe:  $0.16^\circ$   
Gewicht: 900 kg

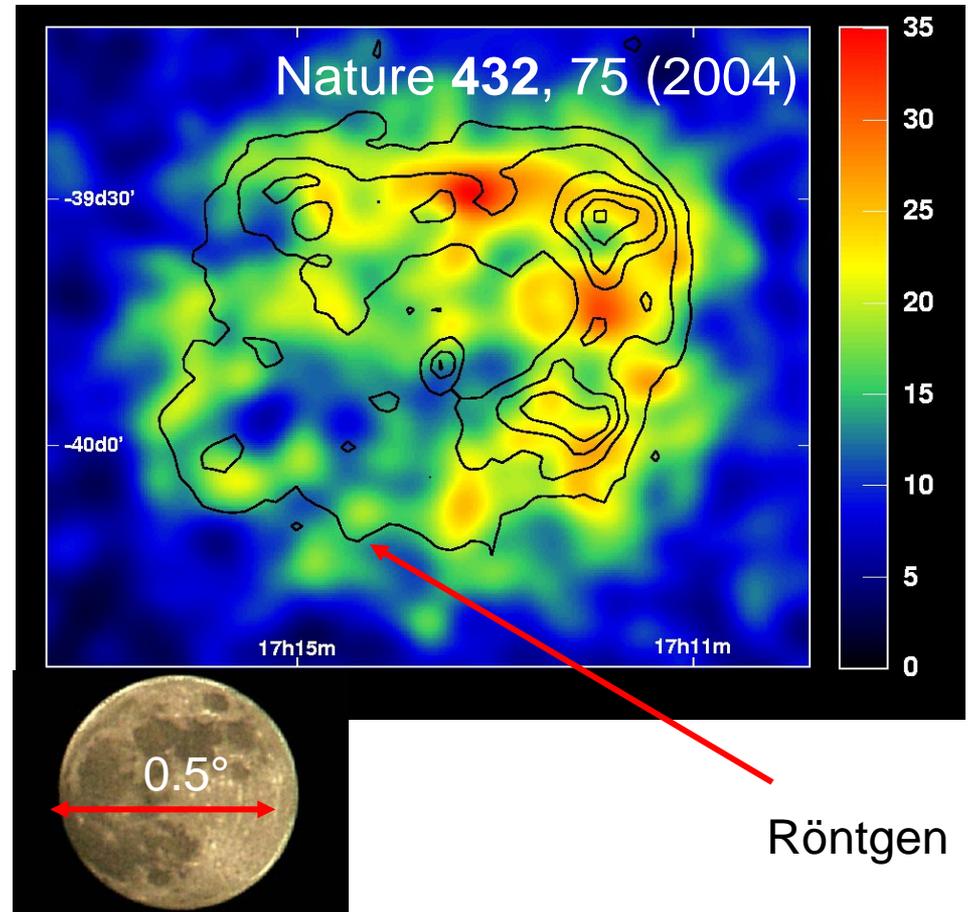
13 m Spiegel (Fläche:  $107 \text{ m}^2$ )  
382 sphärische Spiegel,  $f = 15 \text{ m}$   
Breite der Abbildungsfunktion:  
 $0.03^\circ - 0.06^\circ$

# Die Milchstraße



# Erstes Bild von „RX J1713“

- .... in TeV-  
Gammastrahlung
- $E_{\text{Schwelle}} = 1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$
- Erstmals Gamma-Quelle über Morphologie identifiziert
- Wir sind noch nicht 100% sicher, dass die Gammastrahlung von Protonen und nicht von Elektronen stammt
- Nachweis von Neutrinos wäre gut....

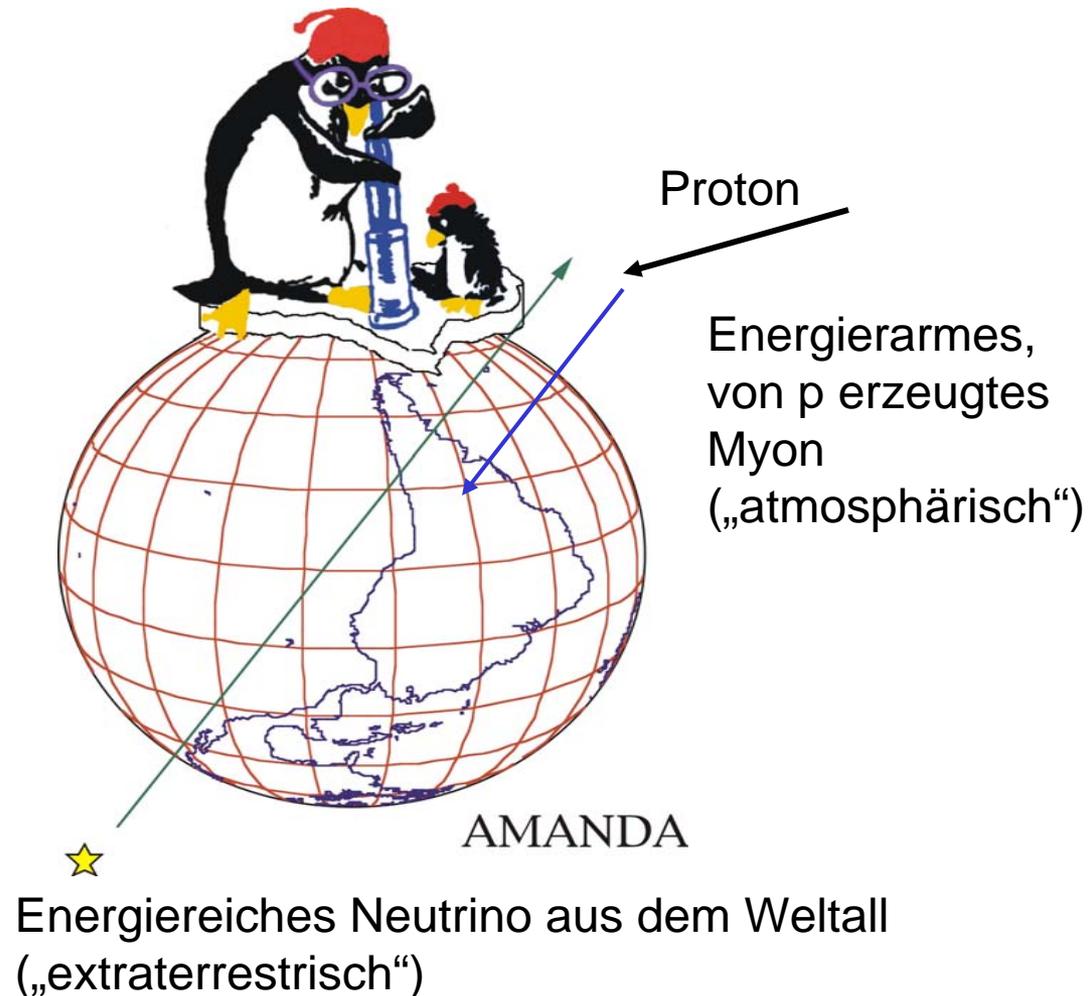


Radius des H.E.S.S. Gesichtsfeldes ( $2.5^\circ$ )

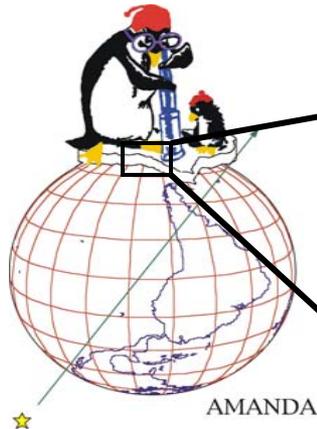


# Neutrino-Astronomie

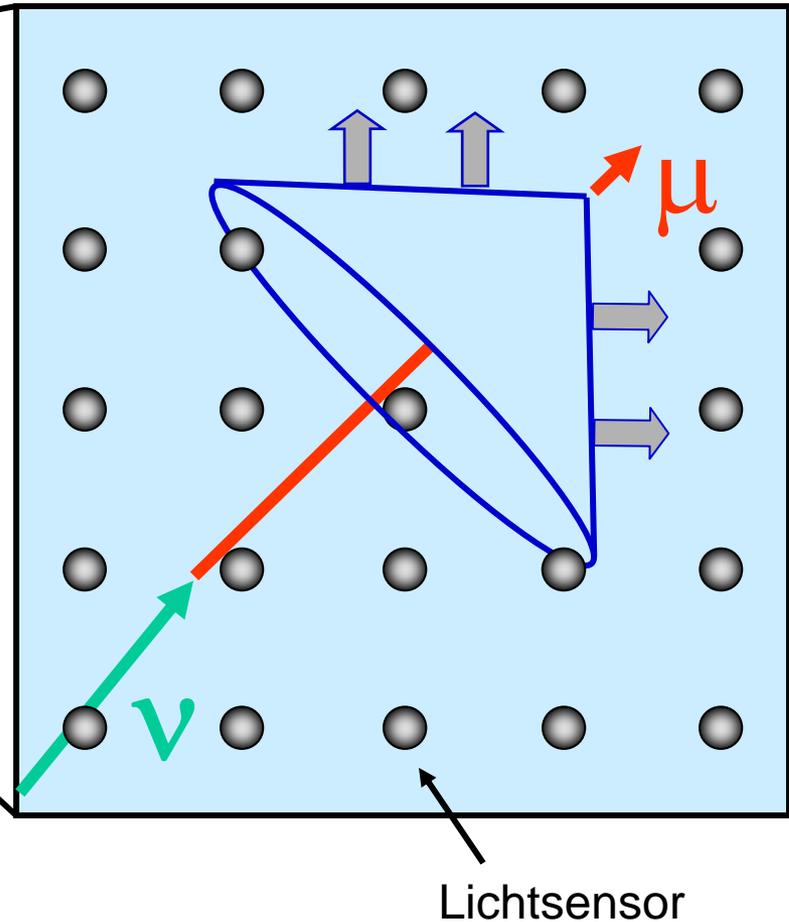
- Benutze Wasser oder Eis als Wechselwirkungsmedium
- Erde als Absorber von atmosphärischen Myonen
- Zurückweisung der von oben kommenden Myonen
- Schwache Wechselwirkung der Neutrinos → Großes Detektorvolumen ( $\sim 0.1 \text{ km}^3$ ) benötigt



# Nachweis in Wasser oder Eis



- Beobachte Umwandlung von Neutrinos in z.B. Myonen
- Nachweis: Tscherenkow-Licht



# Am Südpol

Ski-Loipe

AMANDA

Station

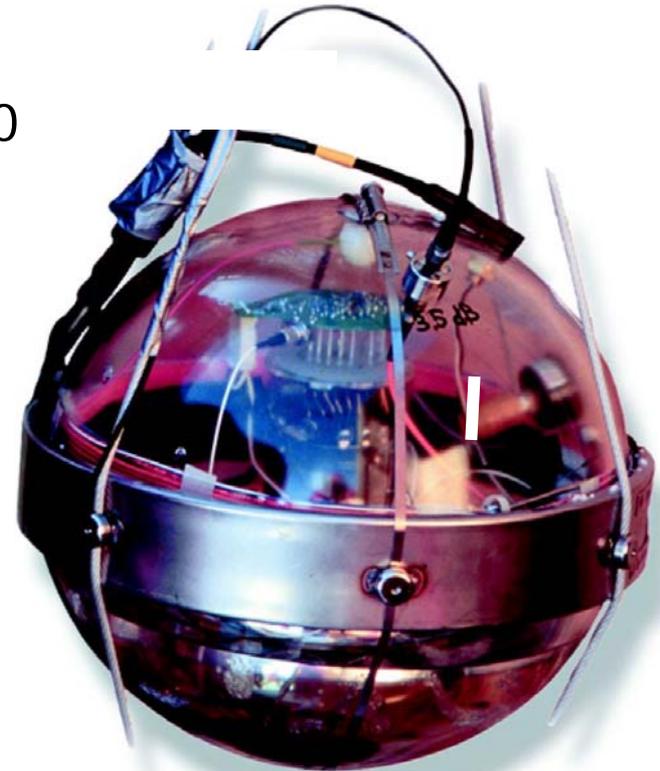
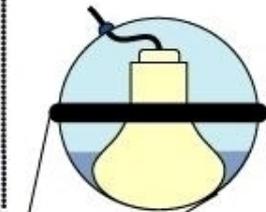
1.5-2.0 km Tiefe



# Der AMANDA Detektor

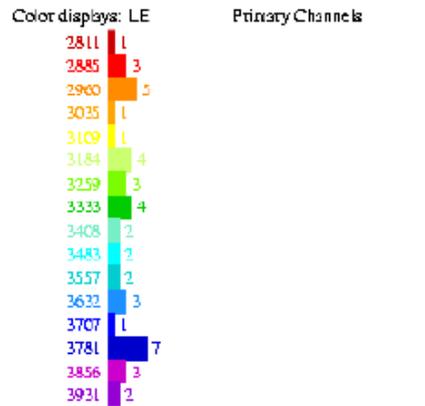
- 677 Optische Module an 19 Strängen
- Installation 1996-2000

Depth





# Ein Myon-Ereignis im AMANDA Detektor



No external geometry file is opened.  
 Detector: amanda-b-10, 10strings, 302 modules  
 Data file: /home/itsboada/anim\_events/str19.fzk  
 File contains 19 events.  
 Displaying data event 1197960 from run 0  
 Recorded y/ty: 1997/285  
 18132.0091381 seconds past midnight.  
 Before cuts: 44 hits, 44 OMs  
 After cuts: 44 hits, 44 OMs  
 An11moun

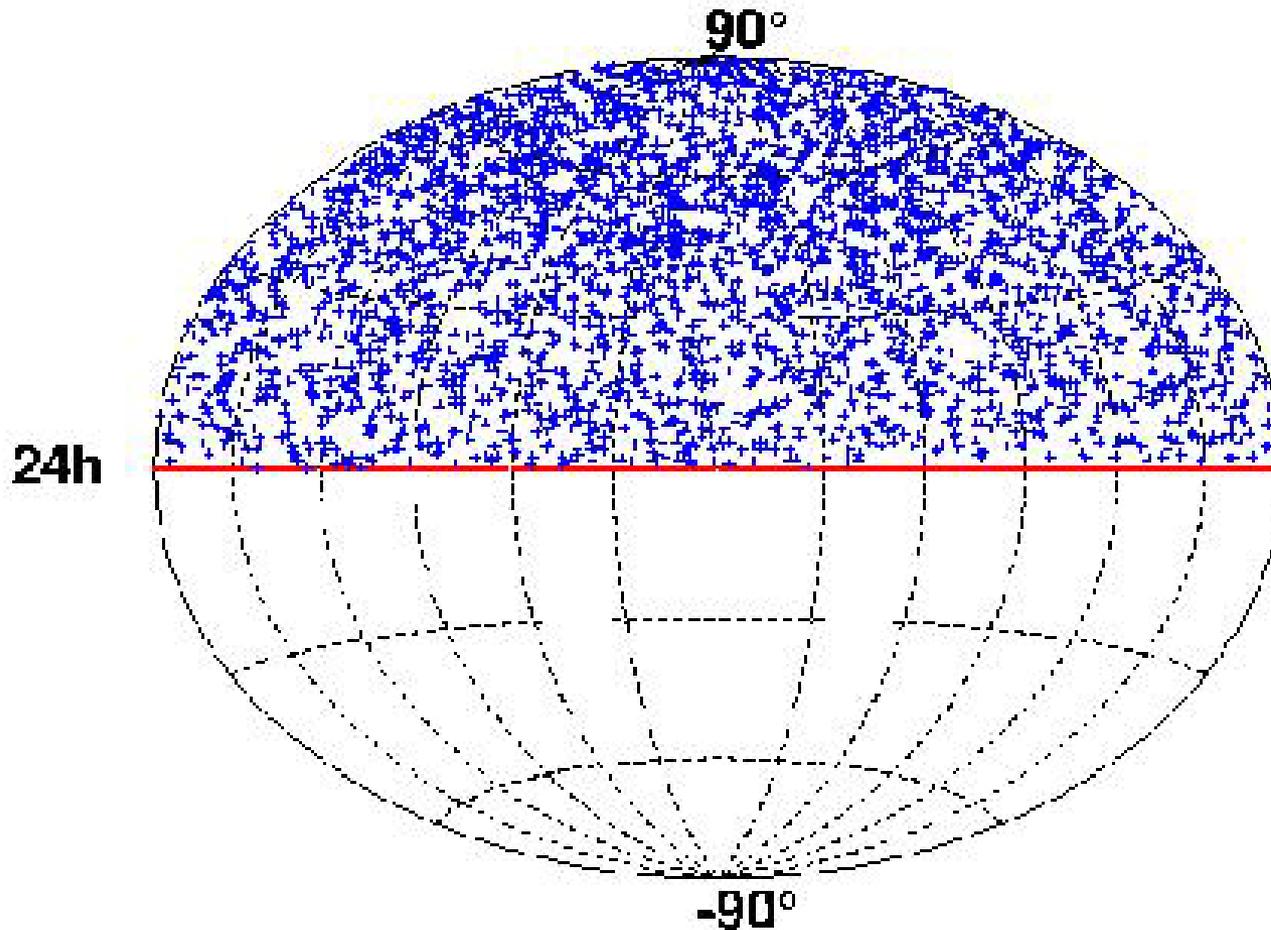
	x	y	z
Vertex pos :	12.4	-16.1	6.8 m
Direction :	0.03970	0.41614	0.90844
Length :	Inf m		
Energy :	? GeV		
Time :	3205.100000 ns		
Zenith :	155.3°		
Azimuth :	264.6°		



- Reaktion:  $\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + X$
- Display:
  - Durchmesser  $\sim$  Signalstärke
  - Farbe entspricht zeitlicher Abfolge
- Ein Myon (und damit Neutrino) von unten!!



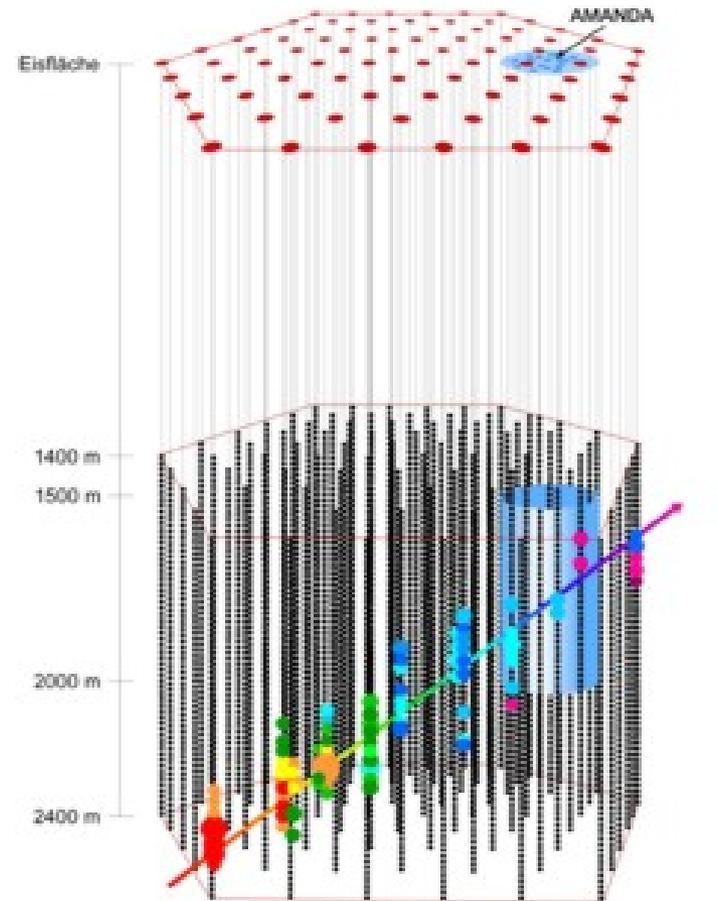
# Nachgewiesene Neutrinos



- Mehr als 3300 nachgewiesene Neutrino-Ereignisse nach einigen Jahren der Datennahme
- Nachweistechnik funktioniert
- Aber: Fast alle Neutrinos sind terrestrischen Ursprungs
- Brauchen größeren Detektor ( $\sim 1 \text{ km}^3$ )

# Die Zukunft: IceCube

- Faktor 10 größeres Detektorvolumen ( $\sim 1 \text{ km}^3$ )
- 80 Stränge, 4800 PMTs
- Installation 2005-2010
- Physik:
  - Suche nach extraterrestrischen Neutrinos von Quellen in der Milchstrasse
  - Dunkle Materie
  - Andere Galaxien als Neutrino-Quellen

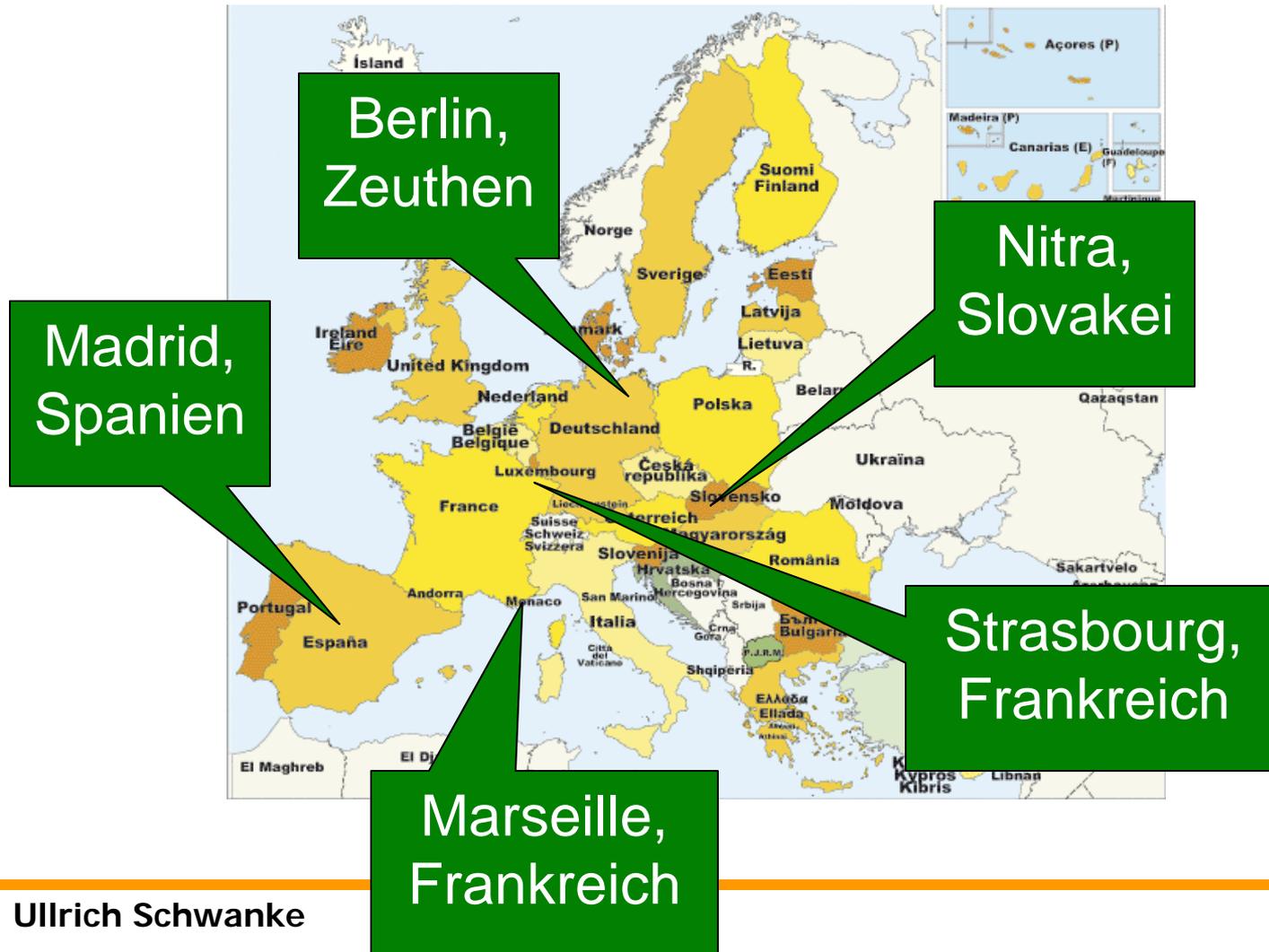


Computer-Simulation

# Zusammenfassung

- Methoden des Teilchennachweises aus der Teilchenphysik werden in der Astroteilchenphysik eingesetzt
- Teilchenphysik liefert Erkenntnisse auf kleinen (elementare Bausteine) UND großen Skalen (Universum)
- Gammastrahlungs- und Neutrino-Astronomie sind spannende Forschungsgebiete

# Videokonferenz (1/2)



# Videokonferenz (2/2)

- Vier weitere Standorte, die an der Videokonferenz teilnehmen
- Überblick der Videokonferenz:
  - Austausch der Ergebnisse
  - Besprechung
  - Quiz
- Suchen zwei Freiwillige, die unsere Ergebnisse (auf Englisch) übermitteln
- Stellen Sie Fragen, wenn Sie wollen!

# Dank

- An Adelheid Sommer, Ulrike Behrens - für die grossartige Organisation
- Martin zur Nedden ... Für die gute Zusammenarbeit ;-)