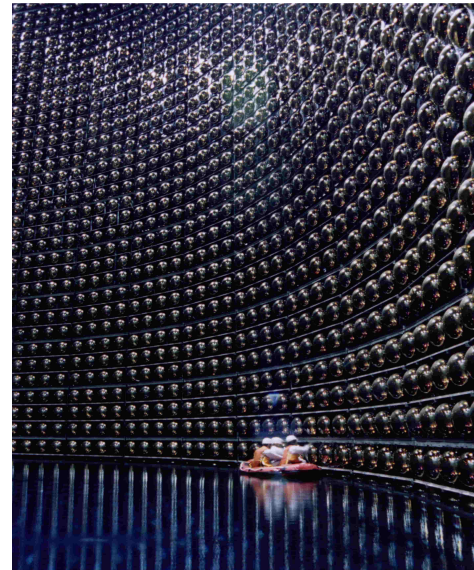
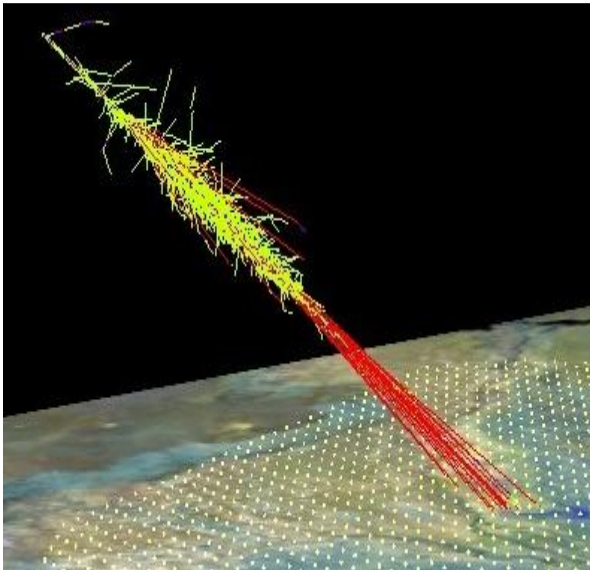


Die Kamiokanne

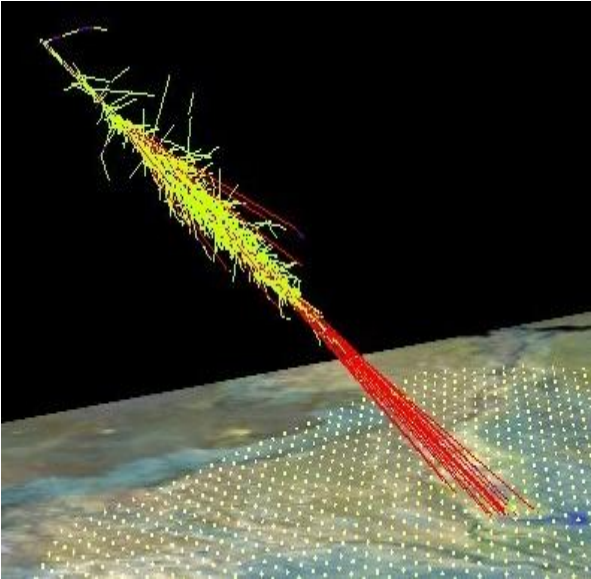
Messung kosmischer Höhenstrahlung im Schulunterricht

Frank Fiedler
Universität Mainz
7. 7. 2009



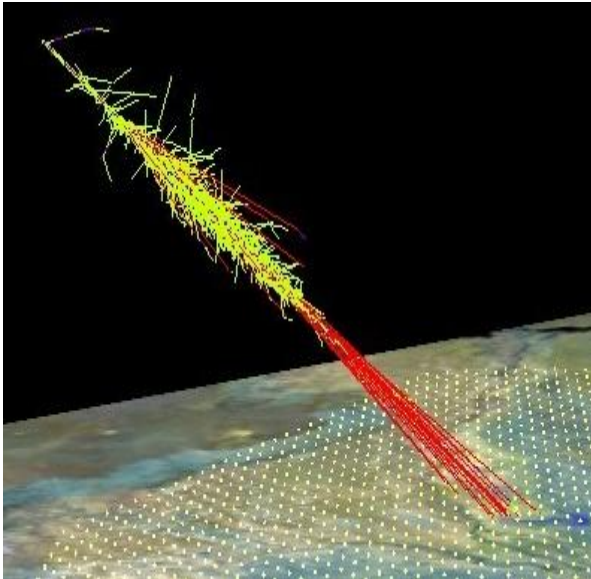
Übersicht

- **kosmische Strahlung** auf der Erde

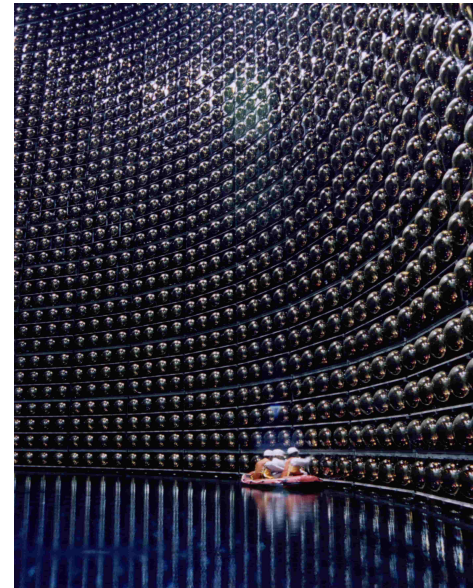


Übersicht

- **kosmische Strahlung** auf der Erde

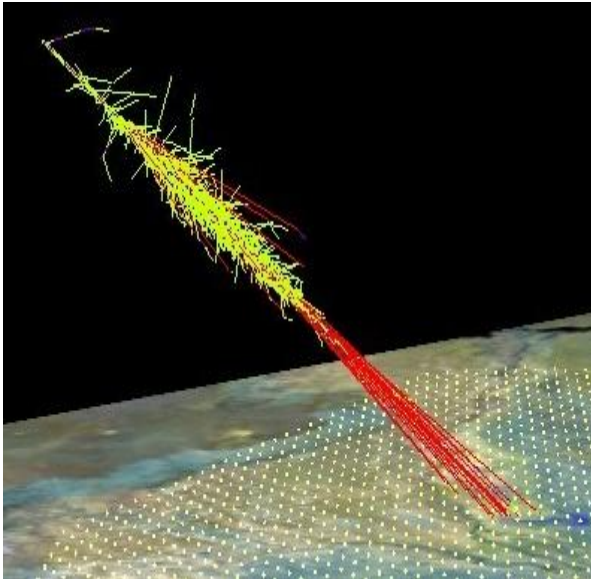


- Cherenkov-Detektoren und
- **Kamiokande**: das “große” Vorbild

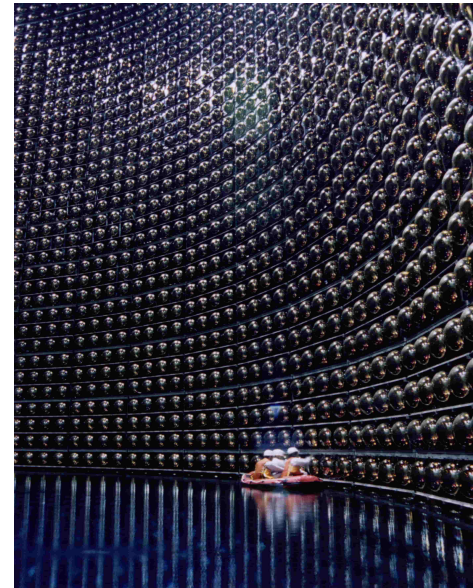


Übersicht

- **kosmische Strahlung** auf der Erde



- Cherenkov-Detektoren und
- **Kamiokande**: das “große” Vorbild

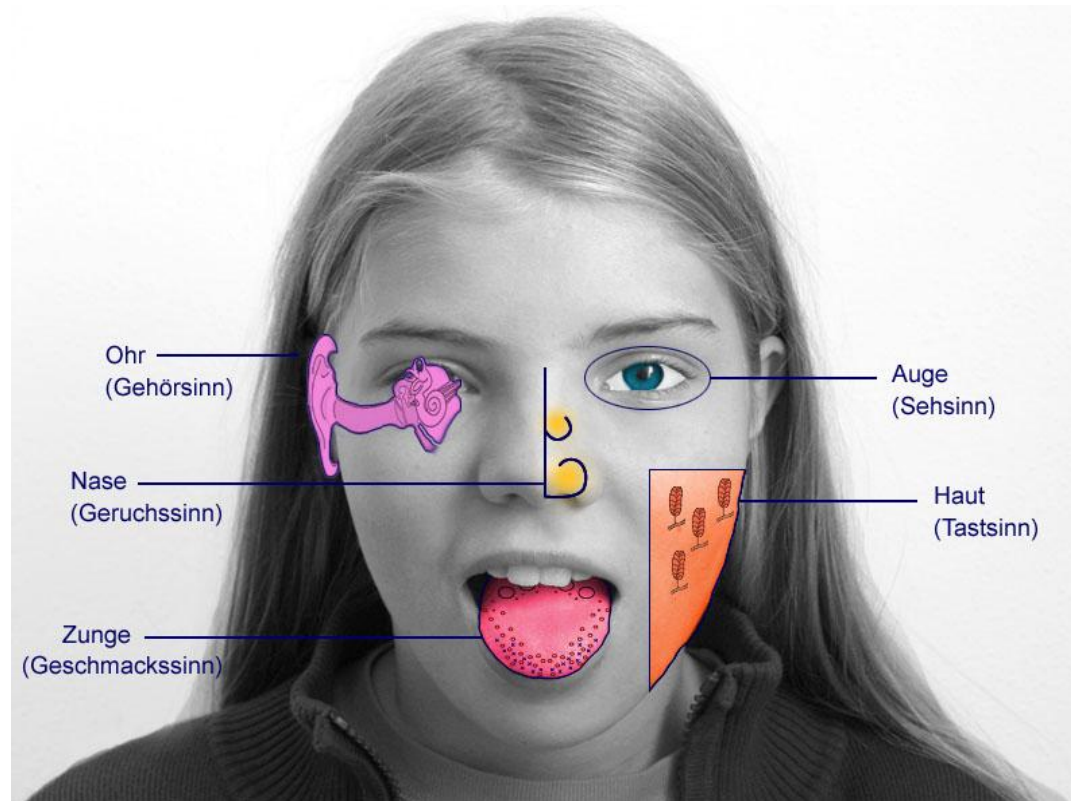


- **die “Kamiokanne”**: Funktionsweise
Inbetriebnahme und Messungen
Auswertung der Daten



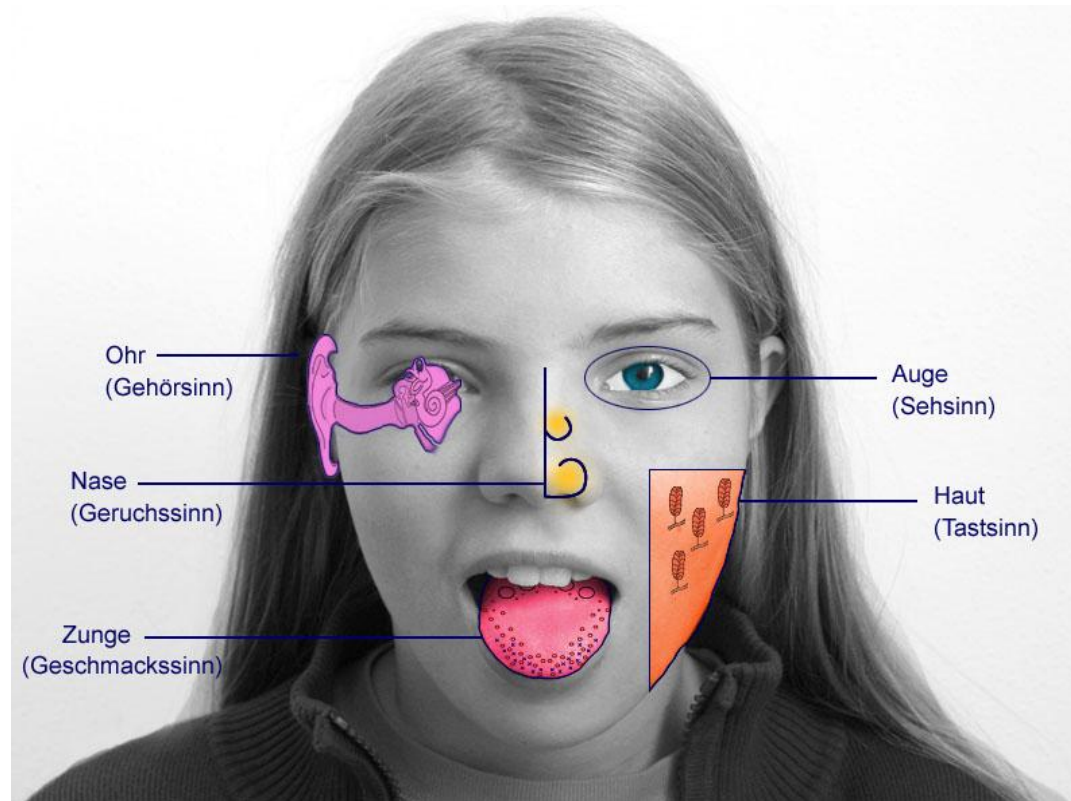
Fünf Sinne

- alles Überlebenswichtige wahrnehmen => fünf Sinne



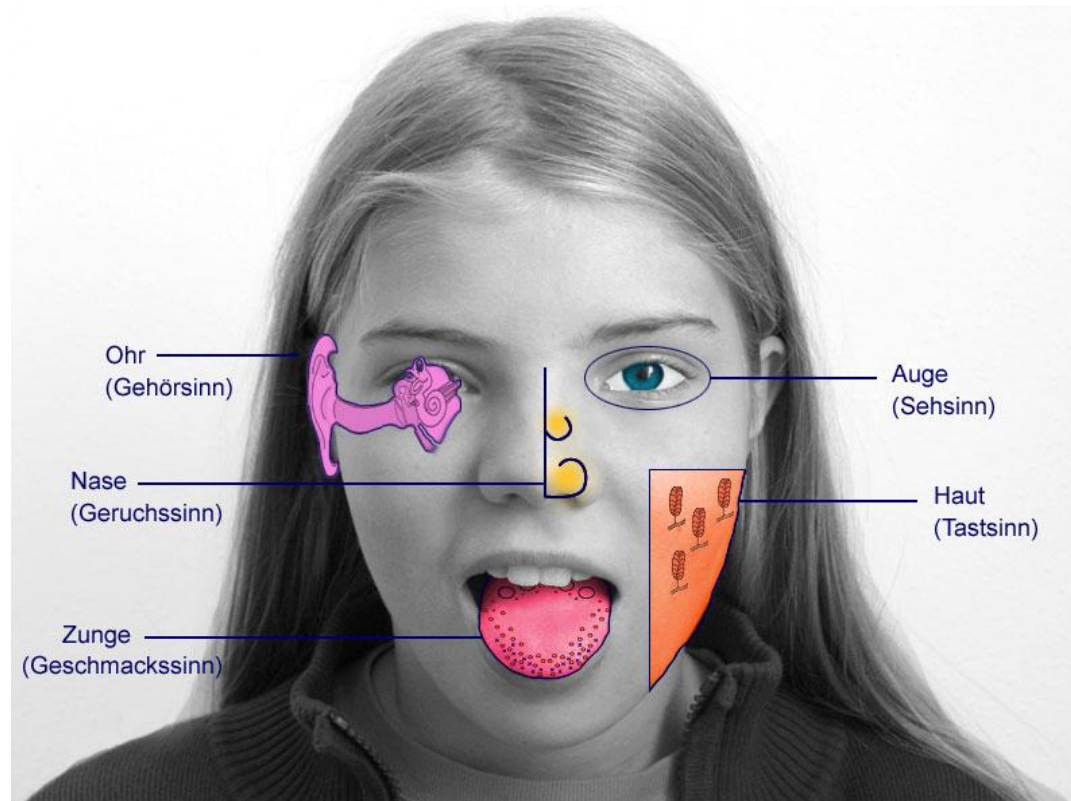
Fünf Sinne

- alles Überlebenswichtige wahrnehmen => fünf Sinne
- Elementarteilchen... fühlen? schmecken? riechen? hören? sehen?
- Elementarteilchen sind offensichtlich nicht überlebenswichtig



Fünf Sinne

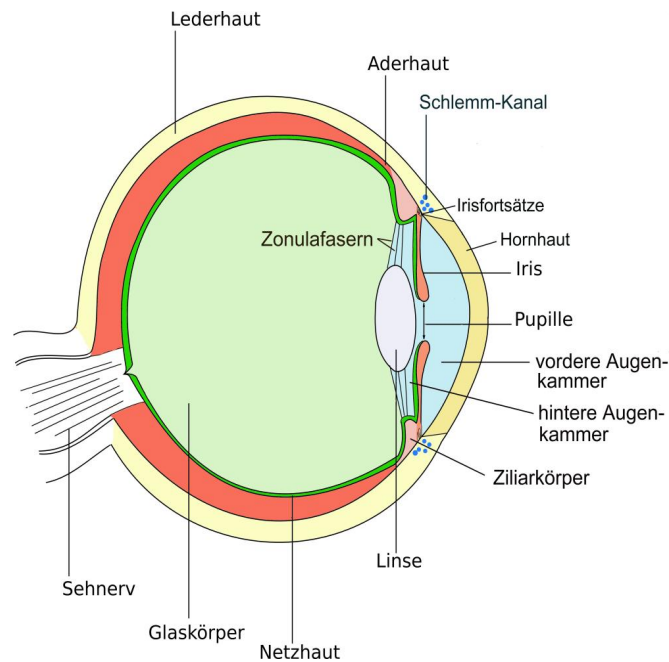
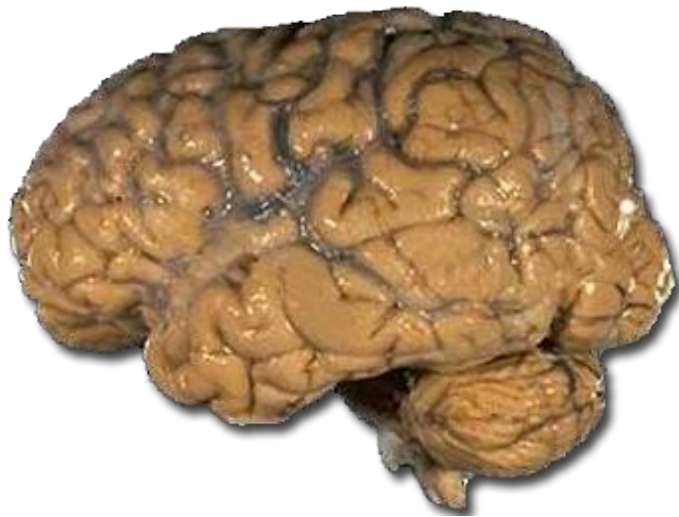
- alles Überlebenswichtige wahrnehmen => fünf Sinne
- Elementarteilchen... fühlen? schmecken? riechen? hören? sehen?
- Elementarteilchen sind offensichtlich nicht überlebenswichtig
- aber: Elementarteilchenphysik ist einer der fundamentalsten und spannendsten Bereiche der modernen Physik



Sechster Sinn

Erschaffung eines Sinneseindrucks “Teilchen aus der Höhenstrahlung”

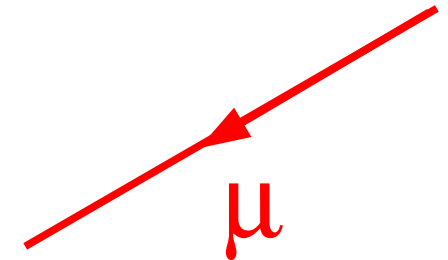
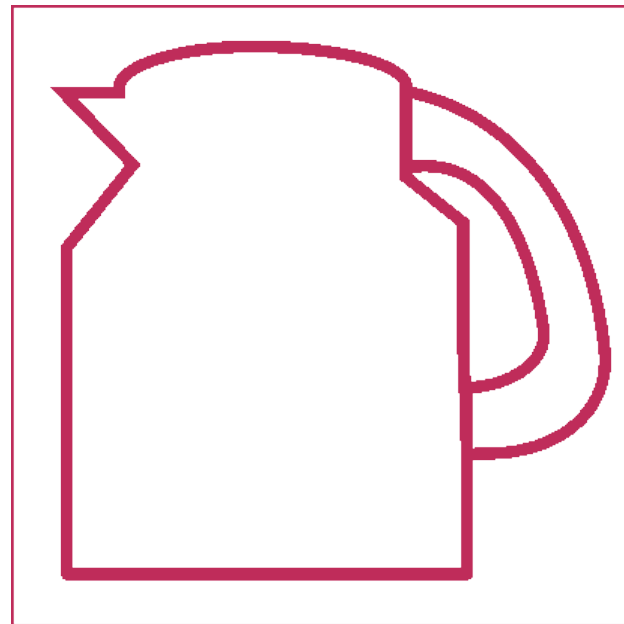
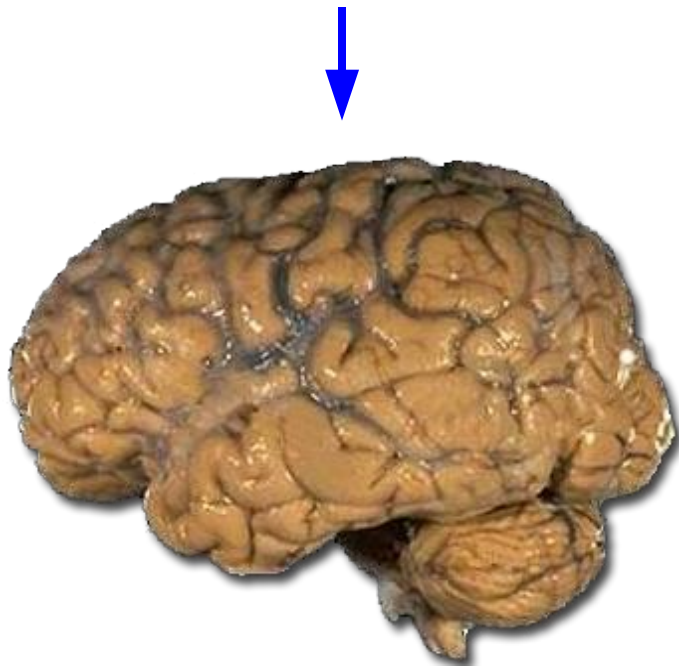
- **Was** wollen wir wahrnehmen?
- **Wie** funktioniert die Wahrnehmung?
- **Interpretation** der Wahrnehmung



Sechster Sinn

Erschaffung eines Sinneseindrucks “Teilchen aus der Höhenstrahlung”

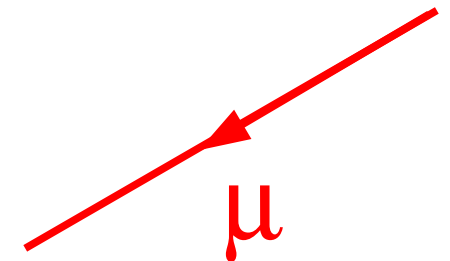
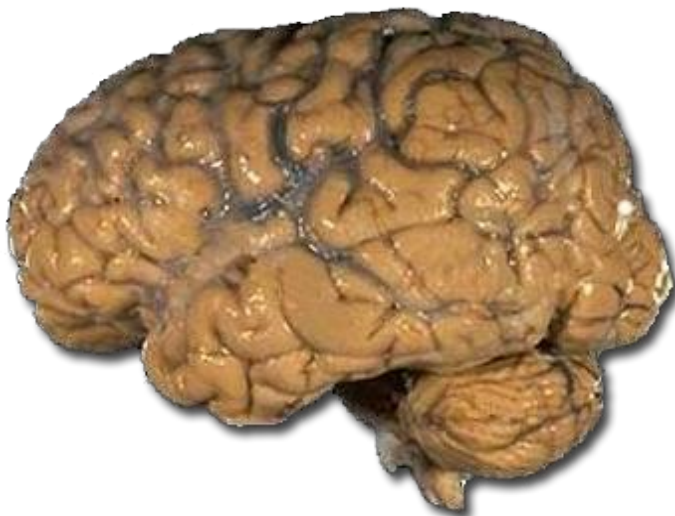
- **Was** wollen wir wahrnehmen?
- **Wie** funktioniert die Wahrnehmung?
- **Interpretation** der Wahrnehmung



Sechster Sinn

Erschaffung eines Sinneseindrucks "Teilchen aus der Höhenstrahlung"

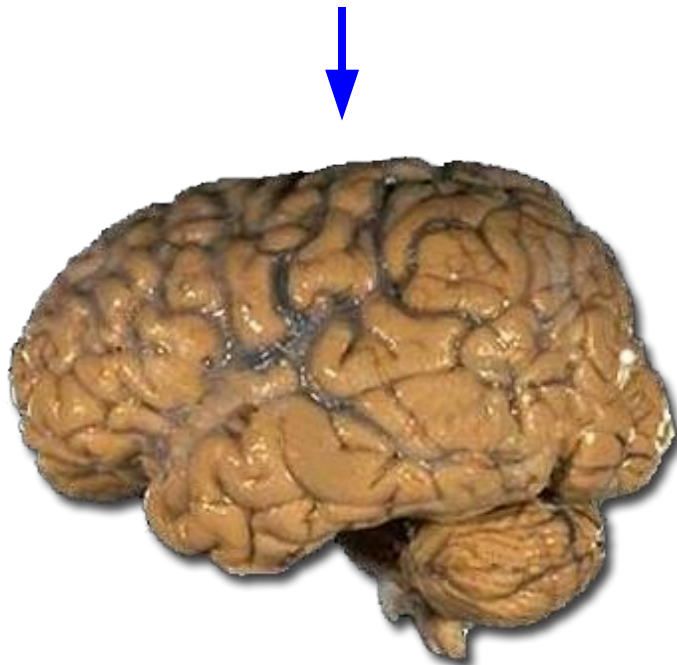
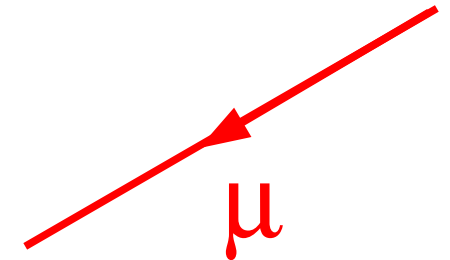
- **Was** wollen wir wahrnehmen?
- **Wie** funktioniert die Wahrnehmung?
- **Interpretation** der Wahrnehmung



Sechster Sinn

Erschaffung eines Sinneseindrucks “Teilchen aus der Höhenstrahlung”

- **Was** wollen wir wahrnehmen?
- **Wie** funktioniert die Wahrnehmung?
- **Interpretation** der Wahrnehmung



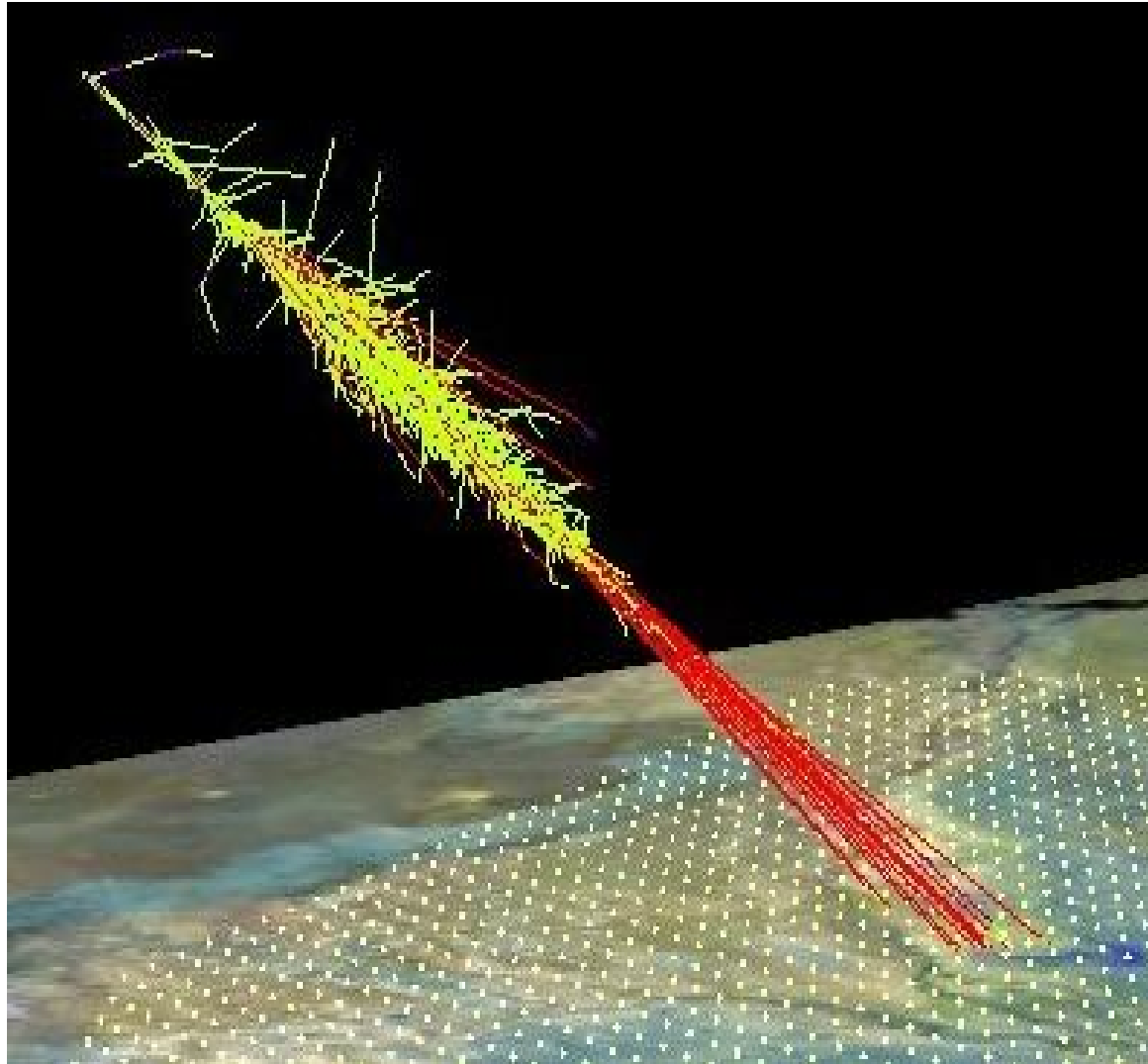
Ziele

für Lehrer:

- Bereitstellung eines “fertigen” Experimentes zur Höhenstrahlung für Schulen
- geringe Kosten, mit Schulmitteln aufzubauen
- möglichst einfache Bedienbarkeit

für Schüler:

- möglichst einfach nachzuvollziehender Aufbau
- Verdeutlichung des Konzepts “Teilchenstrahlung”



Kosmische Strahlung auf der Erde

Primärstrahlung

Primärstrahlung (aus dem All eintreffende Strahlung):

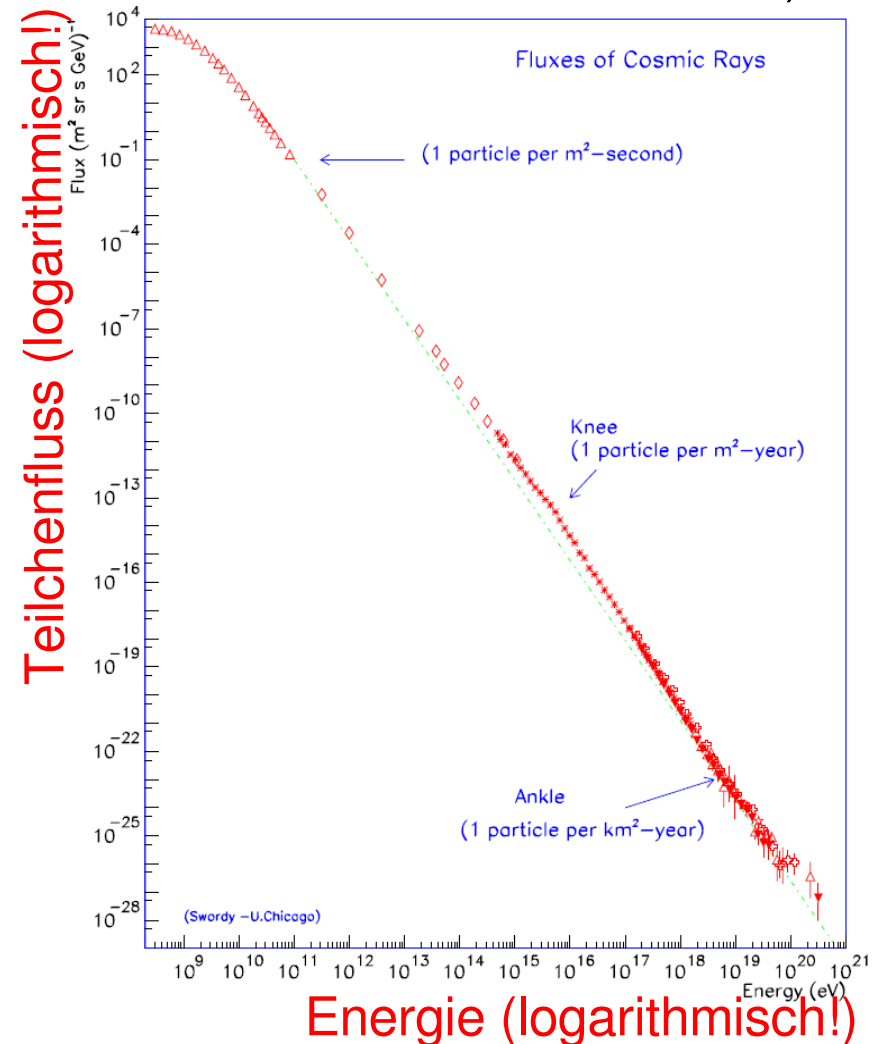
- nur stabile Teilchen
- geladene Teilchen:
 - 98% Kerne: 87% Protonen
 - 12% Heliumkerne
 - 1% schwerere Kerne
 - 2% Elektronen
- ungeladene Teilchen:
 - Photonen
 - Neutrinos

Primärstrahlung

Primärstrahlung (aus dem All eintreffende Strahlung):

- nur stabile Teilchen
- geladene Teilchen:
 - 98% Kerne: 87% Protonen
 - 12% Heliumkerne
 - 1% schwerere Kerne
- 2% Elektronen
- ungeladene Teilchen:
 - Photonen
 - Neutrinos

Energiespektrum:
(qualitativ vergleichbar für die verschiedenen Teilchensorten)



Sekundärstrahlung

Auftreffen z. B. energetischer Kerne auf die Atmosphäre:

=> **Teilchenschauer**

Beispiel:

- Wechselwirkungslänge von Protonen in Luft ($E_p = 10^{15}$ eV):
 $\lambda = 800 \text{ kg/m}^2$

- gesamte Luftsäule:
1 bar = $10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2$, also $\sim 10^4 \text{ kg/m}^2$

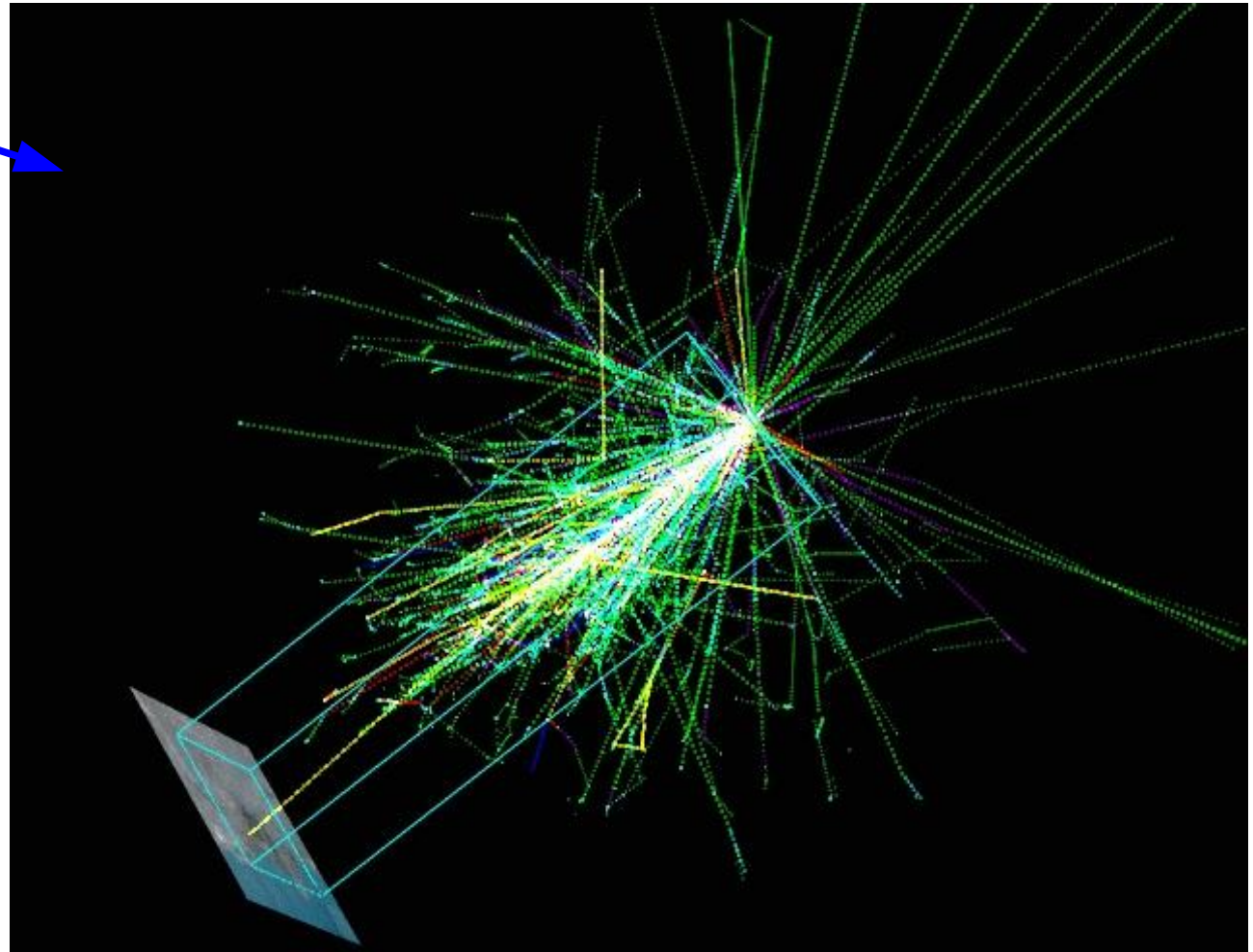
=> Atmosphäre entspricht 12.5 Wechselwirkungslängen
(deutlich mehr für schwerere Kerne)

Sekundärstrahlung

Auftreffen z. B. energetischer Kerne auf die Atmosphäre:

=> Teilchenschauer

Eisenkern, 200 GeV



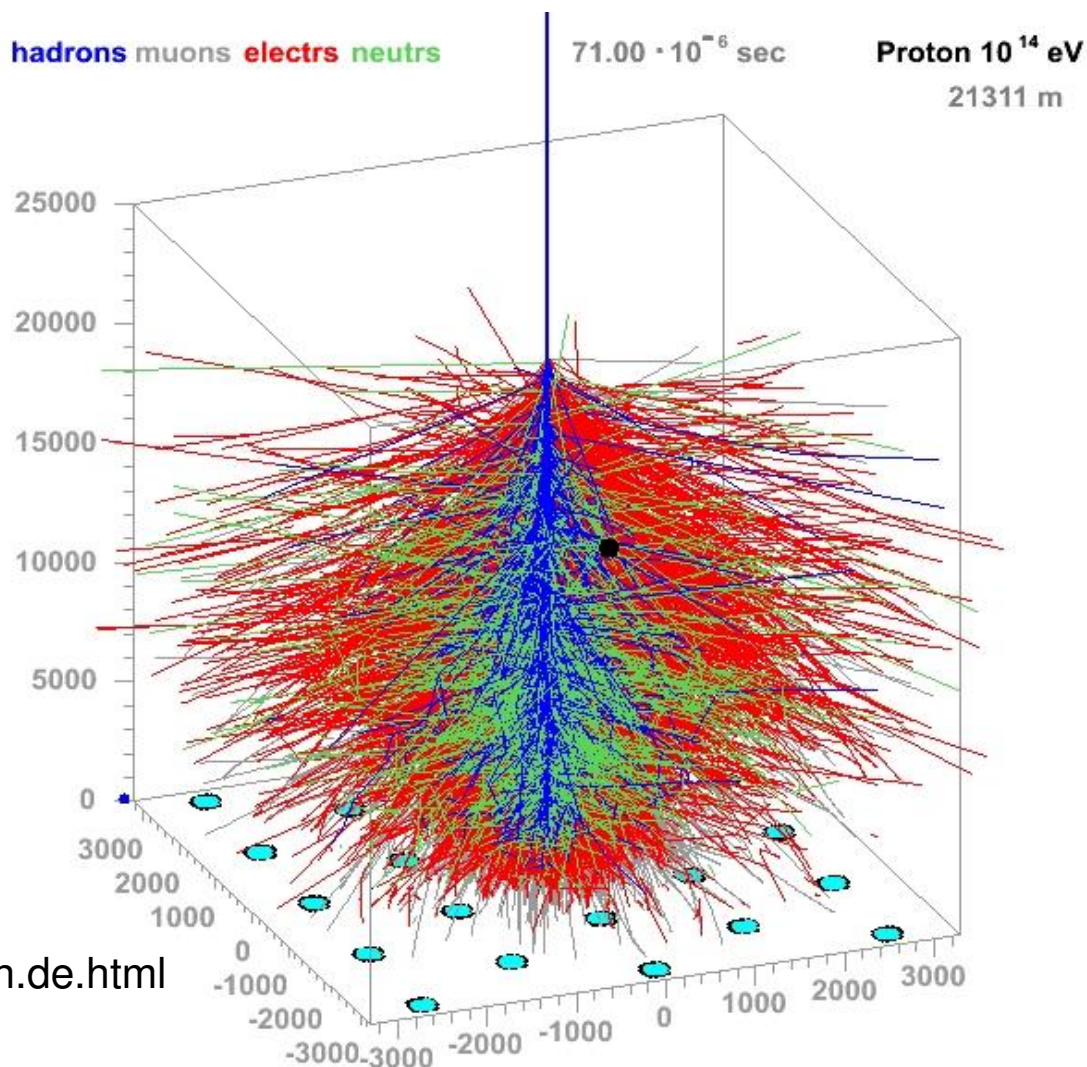
<http://astro.uchicago.edu/cosmus/projects/aires/>

Verlauf eines Luftschauers

Luftschauer eines Protons mit $E = 10^{14}$ eV

Sekundärteilchen:

- Hadronen
- Myonen
- Elektronen



<http://www.auger.de/public/animationen.de.html>

J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlsruhe

Verlauf eines Luftschauers

- **erster Schritt: Reaktion der eintreffenden Primärstrahlung**

energetischer **Kern** trifft auf die obere Atmosphäre

starke Wechselwirkung in ca. 10 – 30 km Höhe => hauptsächlich **Pionen**

- **zweiter Schritt: Zerfall der Pionen**

$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ Lebensdauer: $\tau(\pi^0) = 8.4 \cdot 10^{-17} \text{ s}$ => Zerfall

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ Lebensdauer: $\tau(\pi^+) = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ => Zerfall

Wechselwirkungslänge vergleichbar mit Protonen
=> oder Wechselwirkung

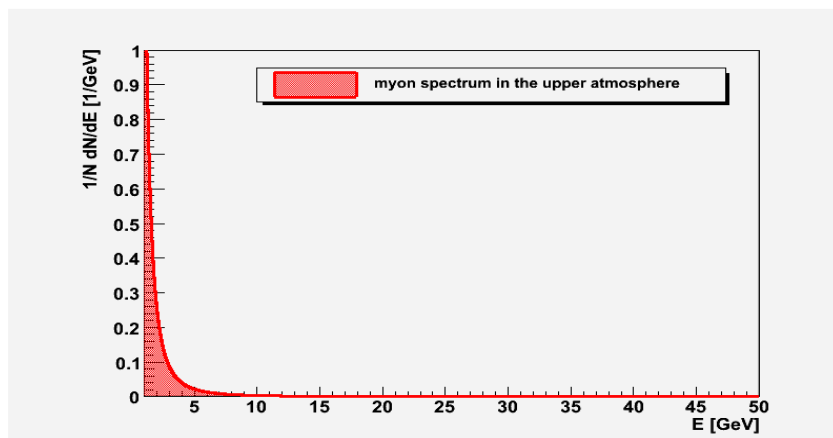
- **dritter Schritt:**

Photonen: => Schauer (Paarbildung + Bremsstrahlung)

$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu_\mu$ Lebensdauer: $\tau(\mu^+) = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ => Zerfall?

keine hadronischen Wechselwirkungen
wenig Energieverlust (schwerer als Elektronen)

Das Myonenspektrum



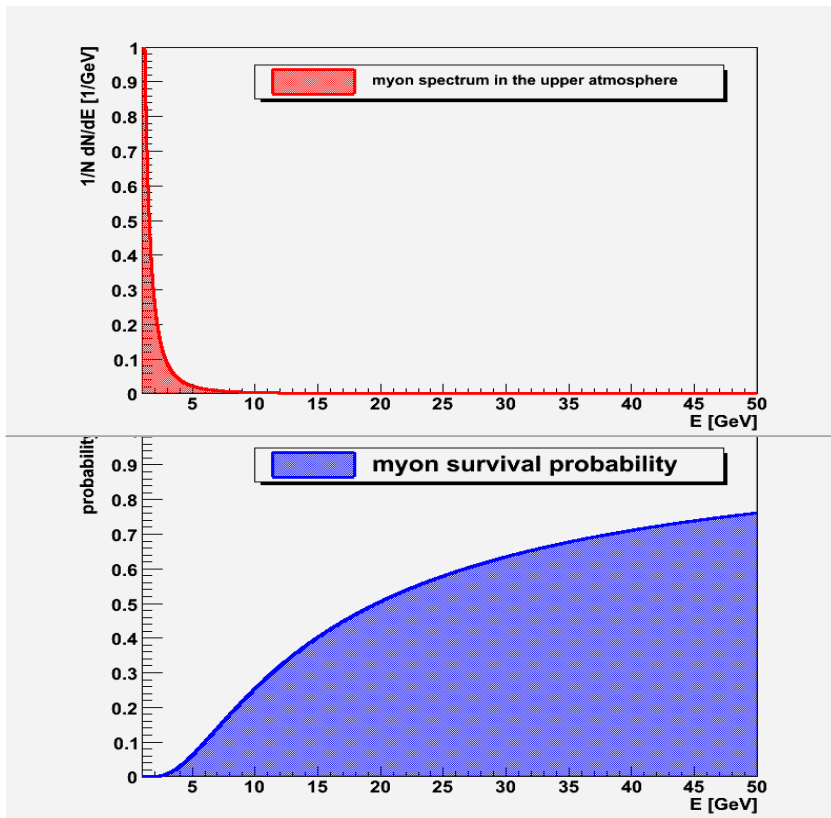
Energie E_μ (GeV)

Qualitative Erklärung:

- Spektrum der Myonen bei Produktion in 9 km Höhe:

$$1/n \, dn/dE \sim E^{-3.7}$$

Das Myonenspektrum



Energie E_μ (GeV)

Qualitative Erklärung:

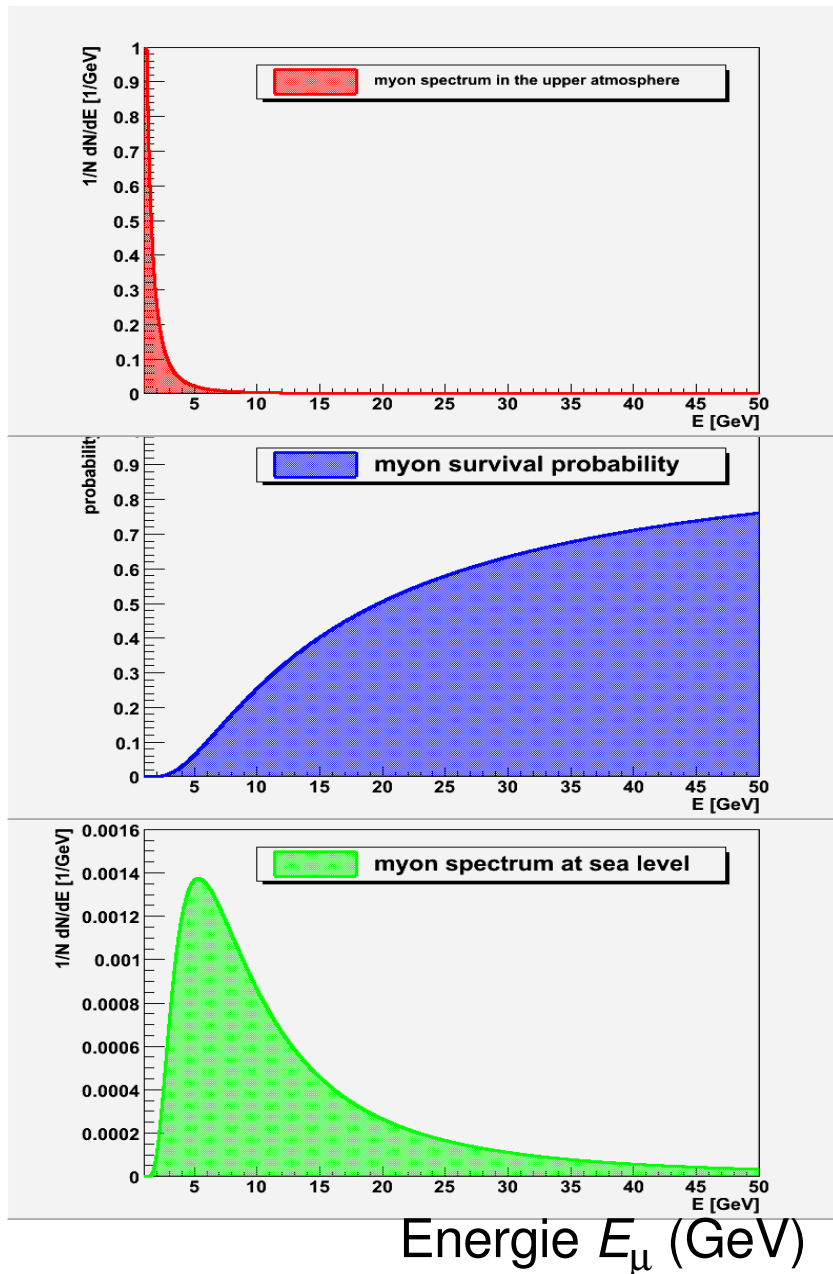
- **Spektrum der Myonen bei Produktion** in 9 km Höhe:

$$1/n \, dn/dE \sim E^{-3.7}$$

- Zeit von 9 km bis NN: $t = \frac{1}{\gamma} \frac{h}{v} = \frac{h}{\sqrt{\gamma^2 - 1} c}$
- **Wahrscheinlichkeit, nicht zu zerfallen:**

$$P = e^{-t/\tau} \quad \text{hängt von Myonenenergie ab}$$

Das Myonenspektrum



Qualitative Erklärung:

- **Spektrum der Myonen bei Produktion** in 9 km Höhe:

$$1/n \, dn/dE \sim E^{-3.7}$$

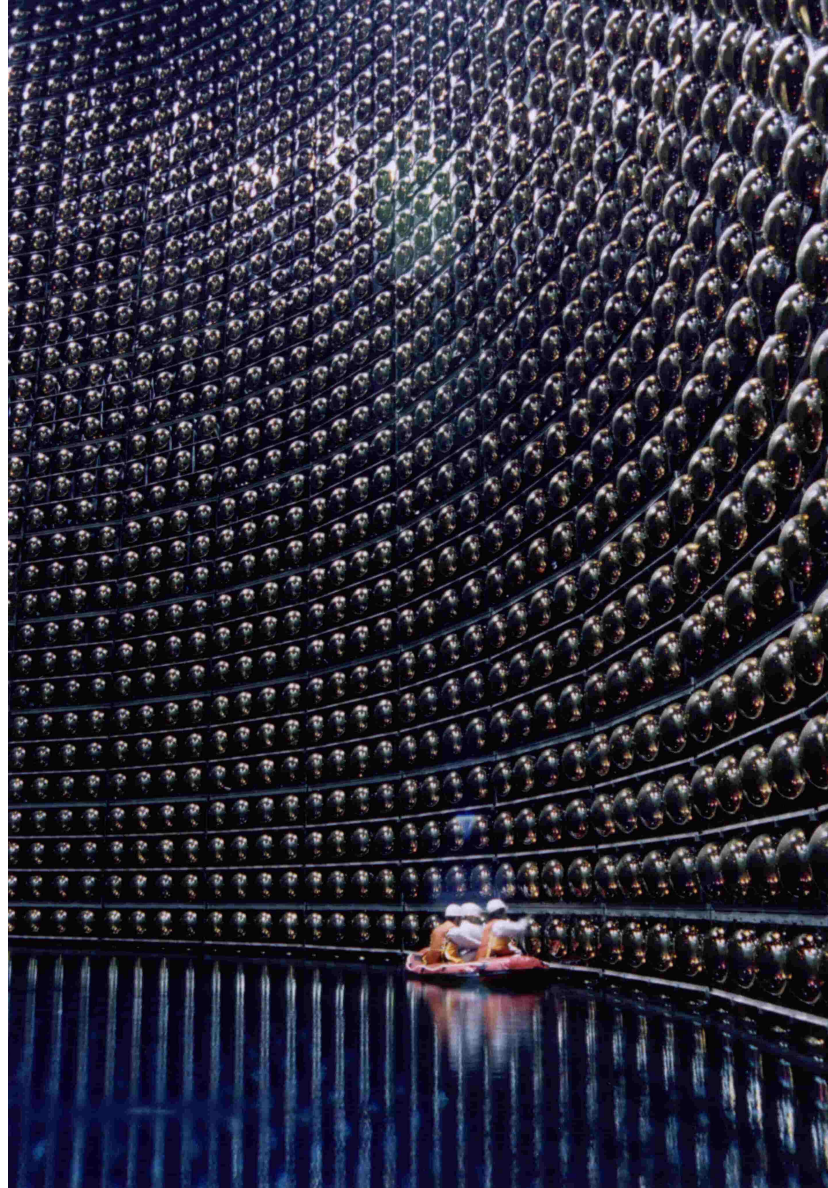
- Zeit von 9 km bis NN: $t = \frac{1}{\gamma} \frac{h}{v} = \frac{h}{\sqrt{\gamma^2 - 1} c}$

- **Wahrscheinlichkeit, nicht zu zerfallen:**

$$P = e^{-t/\tau} \quad \text{hängt von Myonenenergie ab}$$

- **Spektrum der Myonen bei NN:**

$$1/n \, dn/dE \sim E^{-3.7} \cdot e^{-t(E)/\tau}$$

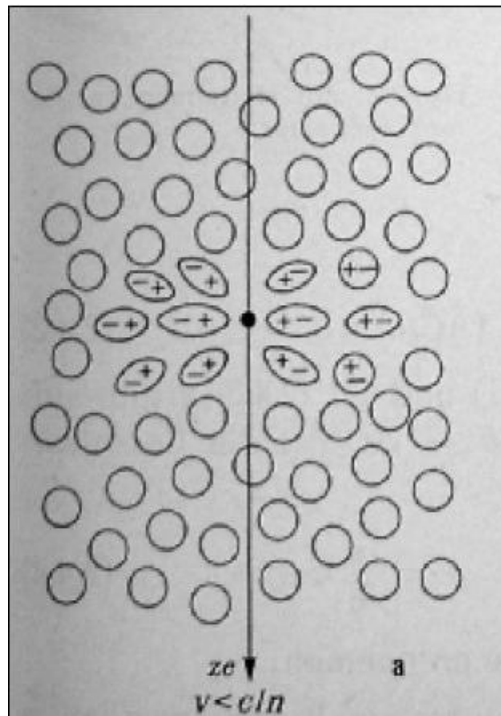


Cherenkov-Detektoren und Kamiokande

Cherenkov-Strahlung

Physikalischer Hintergrund:

- geladenes Teilchen im Medium: Polarisierung umliegender Atome/Moleküle
- $v < c/n$: destruktive Interferenz der elektromagnetischen Wellen
- $v > c/n$: konstruktive Interferenz in charakteristischem Winkel ϕ zur Flugrichtung

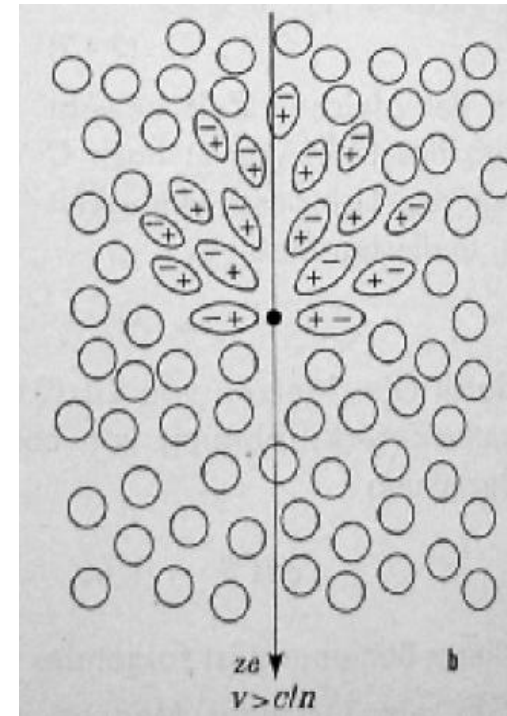


Pavel Alekseyevich
Cherenkov

1904-1990



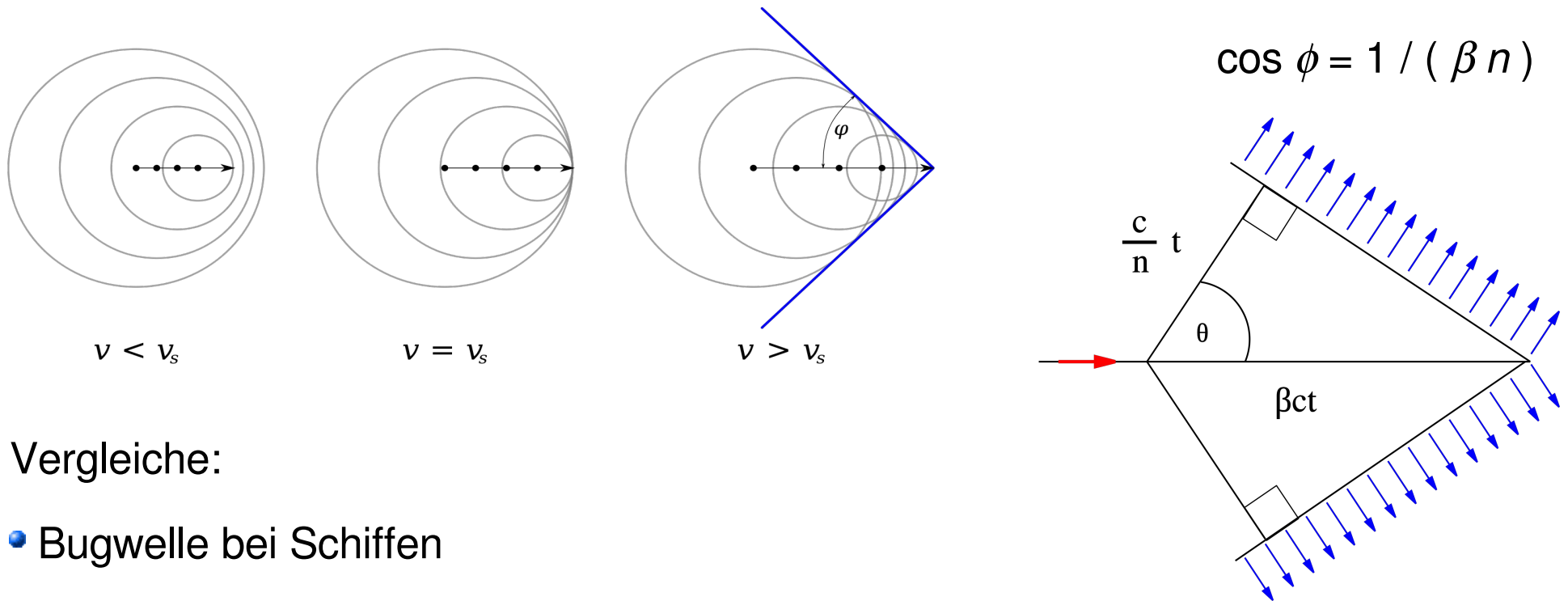
Wikipedia



Cherenkov-Strahlung

Physikalischer Hintergrund:

- geladenes Teilchen im Medium: Polarisation umliegender Atome/Moleküle
- $v < c/n$: destruktive Interferenz der elektromagnetischen Wellen
- $v > c/n$: konstruktive Interferenz in charakteristischem Winkel ϕ zur Flugrichtung



Vergleiche:

- Bugwelle bei Schiffen
- Machscher Kegel bei Schallwellen

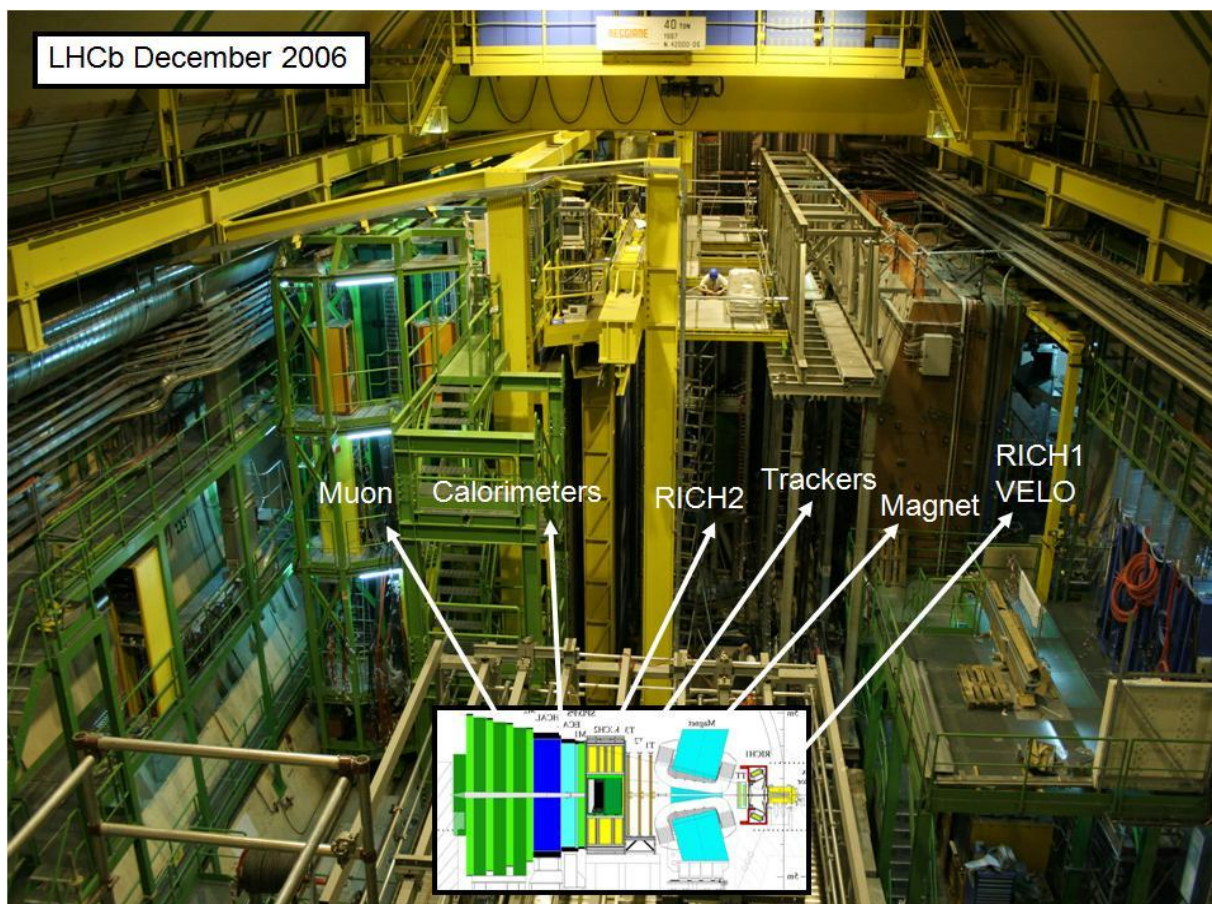
Das LHCb-Experiment

Einsatz zur Identifikation geladener Teilchen in Experimenten:

- Impulsmessung: Ablenkung im Magnetfeld $p = q B r$
- Geschwindigkeitsmessung: Winkel ϕ der Cherenkov-Photonen

Beispiel:

LHCb-Experiment am CERN



RICH1 am LHCb

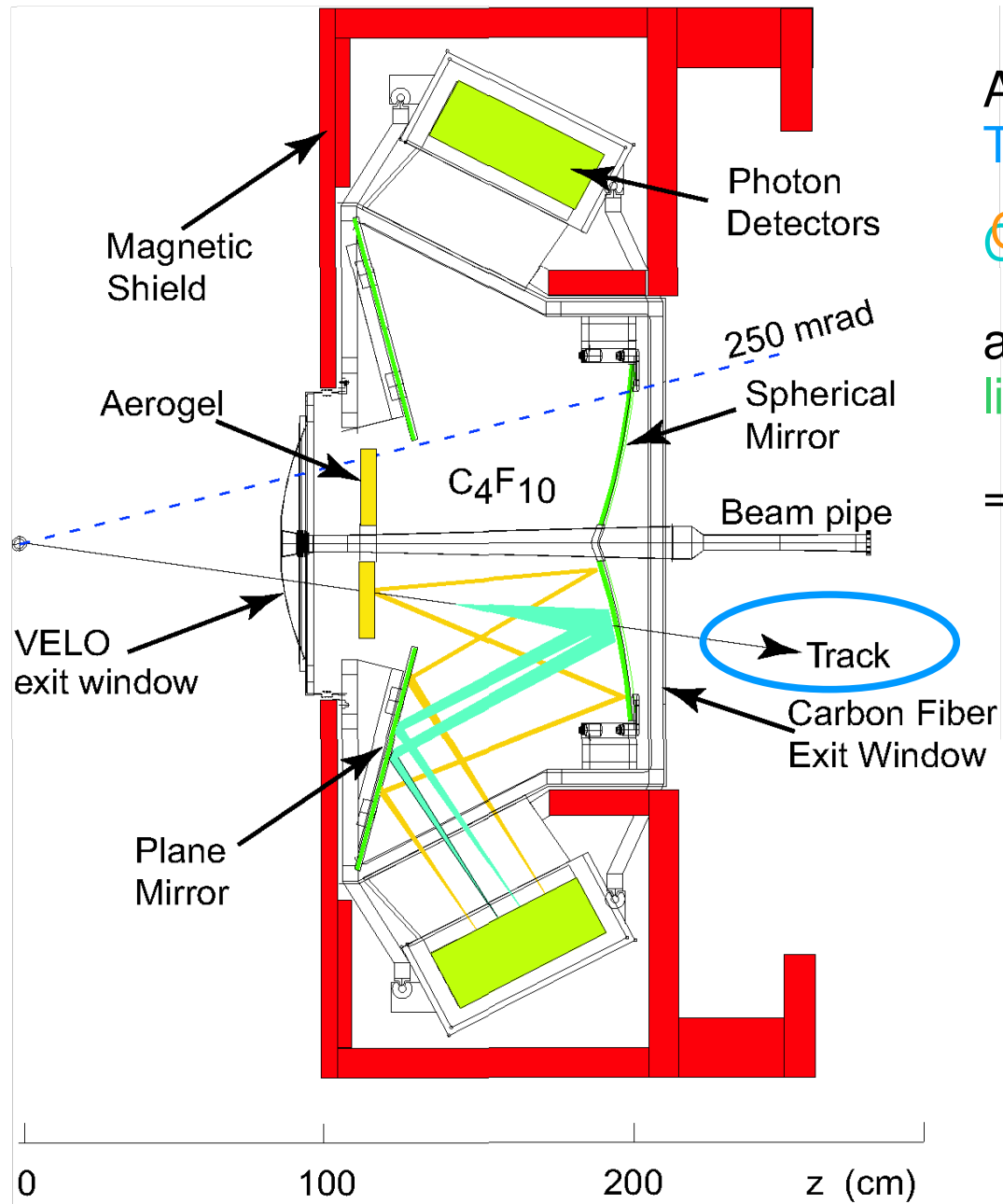


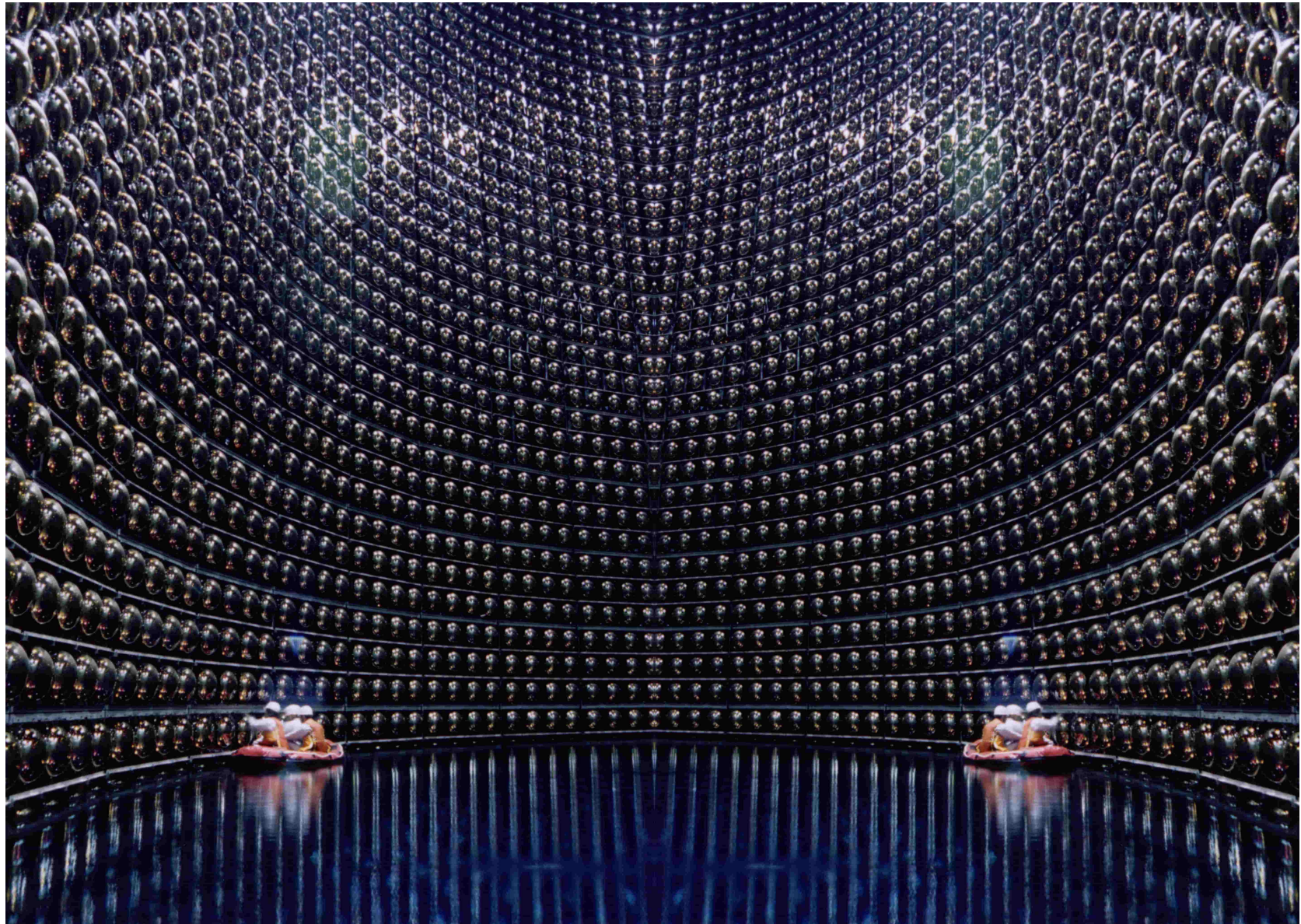
Abbildung des von einem
Teilchen ausgesandten

Cherenkov-Lichts

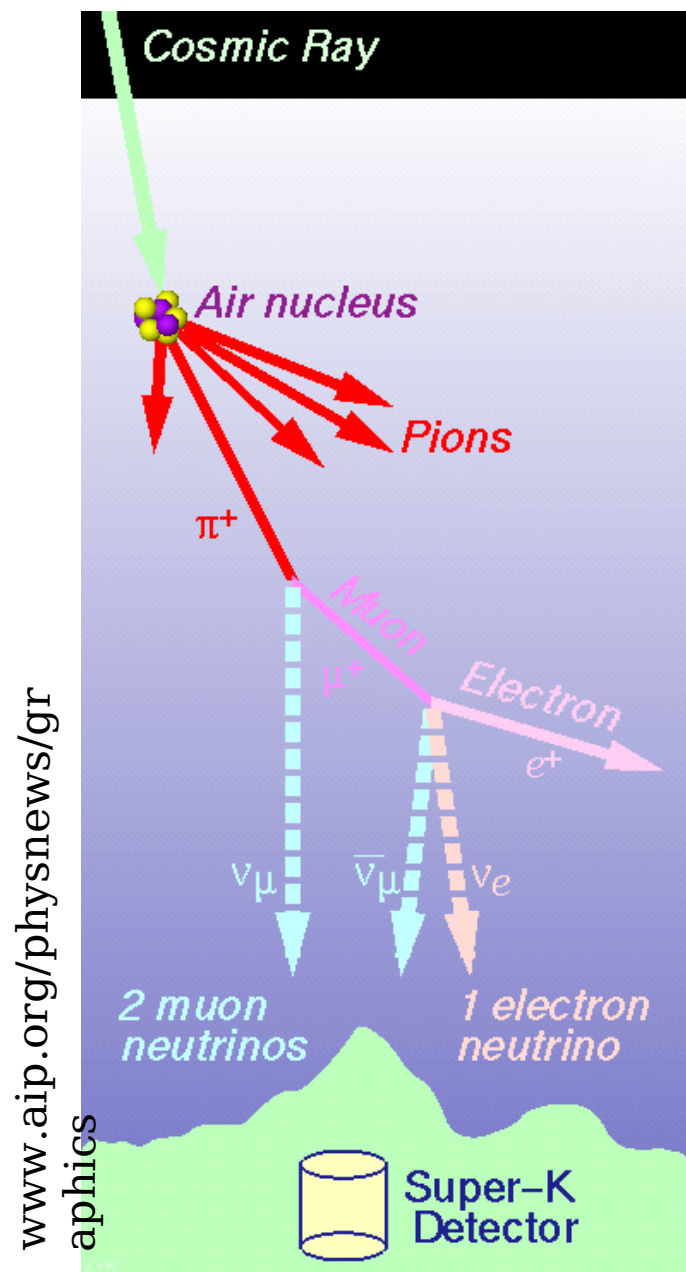
auf ortsauflösende
lichtempfindliche Detektoren

=> Ring Imaging Cherenkov
Detector

(Super-)Kamiokande



(Super-)Kamiokande



Daten:

- 50000 t hochreines Wasser
- 11200 Photomultiplier
- 1000 m unter der Erde [Kamioka-Mine, Japan]

Messungen:

- Myonen, Elektronen aus Reaktionen mit Neutrinos (Luftschauer, Sonne)

Ergebnisse:

- untere Grenze auf Proton-Lebensdauer
- Neutrino-Oszillationen
- Supernova SN 1987A
- ...

(Super-)Kamiokande

simulierte Reaktion: Myon-Produktion

Neutrino + Proton (Wasser) \rightarrow Myon + Neutron

$E_{\mu} = 1032 \text{ MeV}$

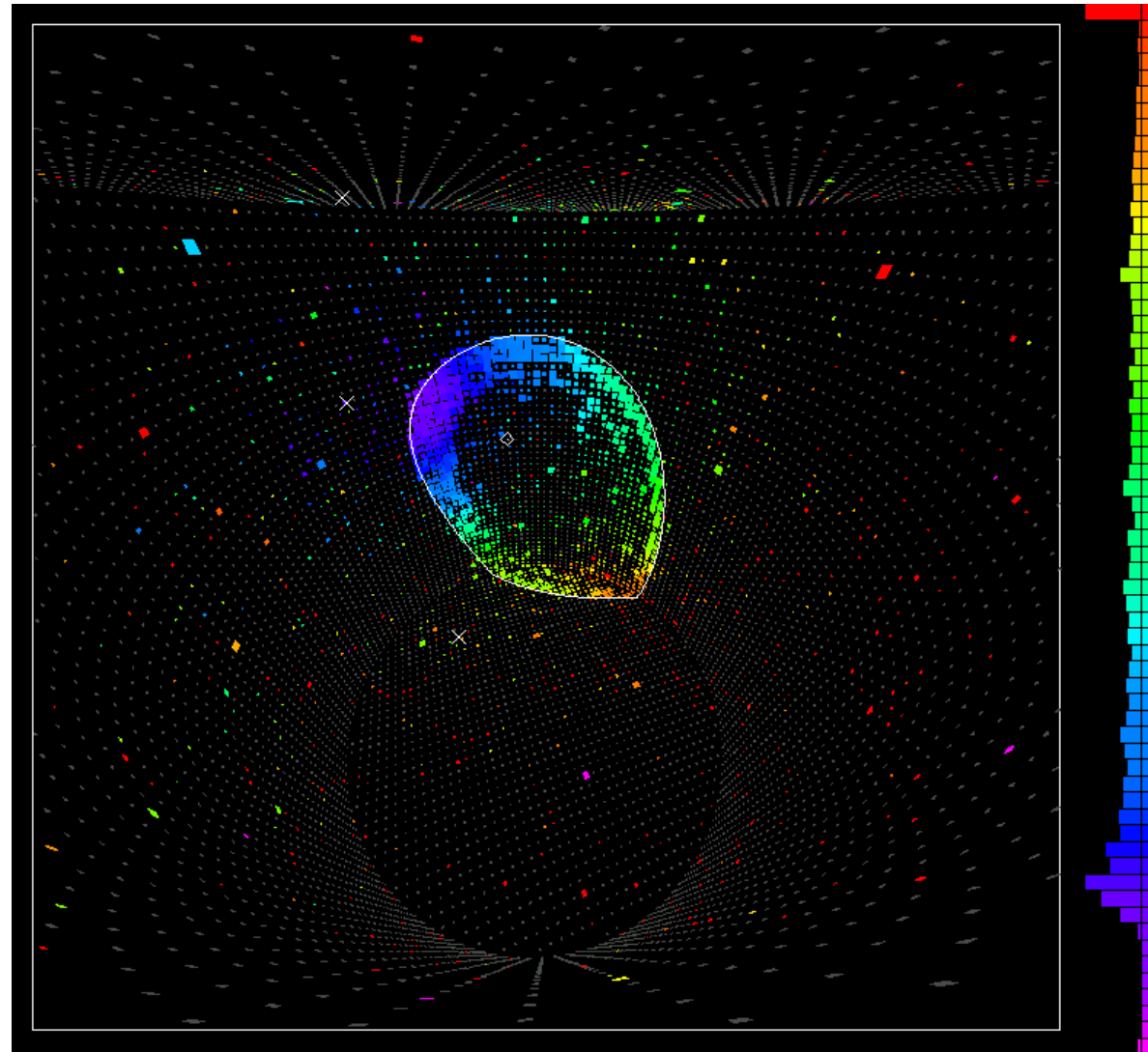
Farbskala:

violett \rightarrow rot

bedeutet

frühe \rightarrow späte

Photonen



(Super-)Kamiokande

simulierte Reaktionen: Myon-Produktion und -Zerfall

Myon-Neutrino + Proton (Wasser) \rightarrow Myon + Neutron

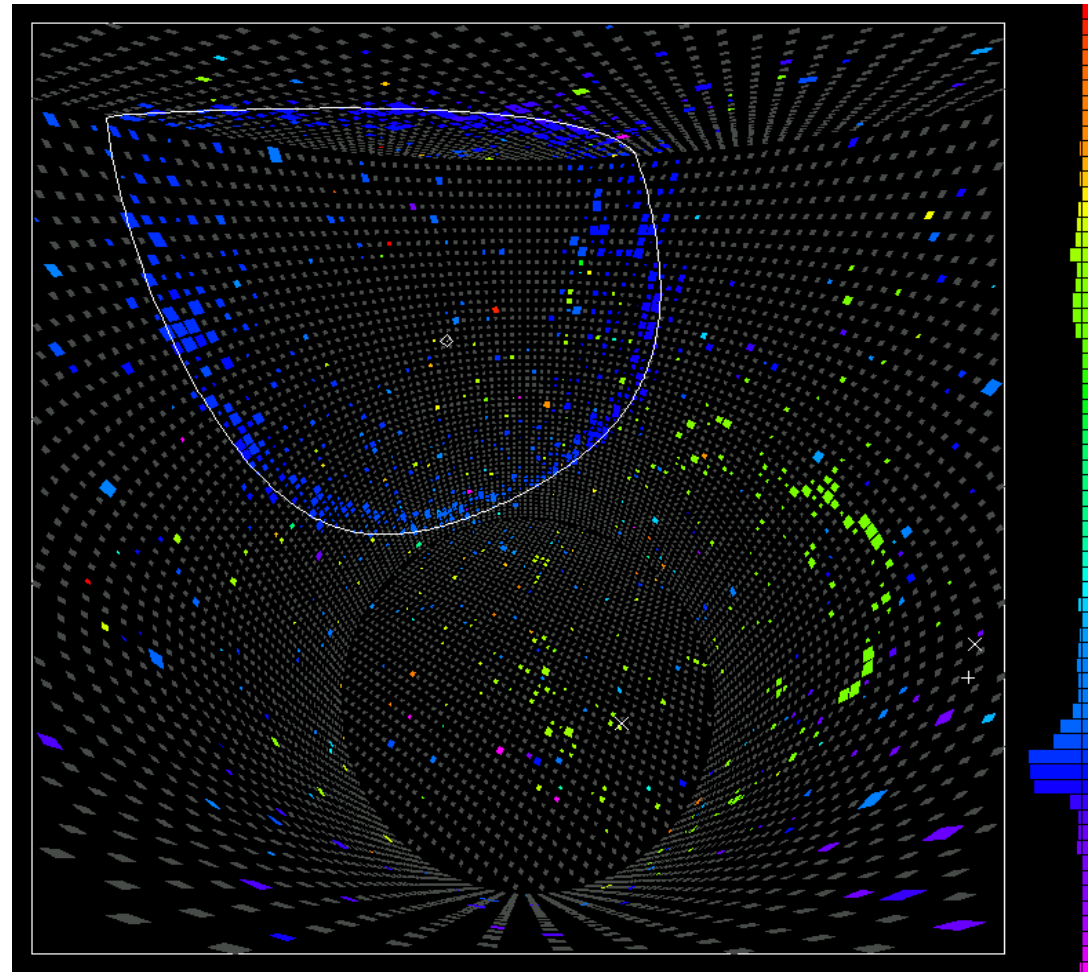
Myon \rightarrow Elektron + Myon-Neutrino + Elektron-Antineutrino

$$E_{\mu} = 394 \text{ MeV}$$

$$E_e = 52 \text{ MeV}$$

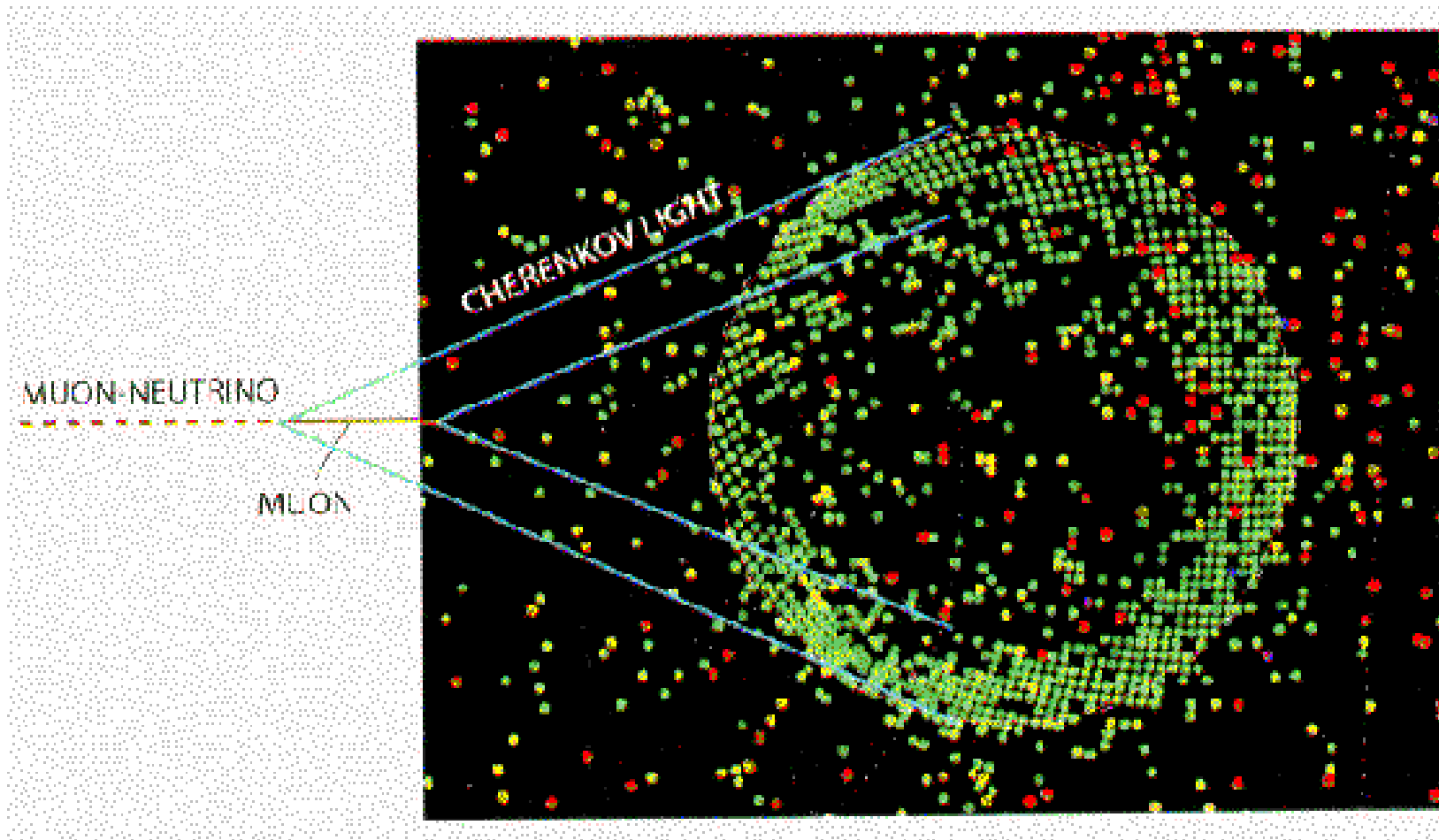
Farbskala:

violett \rightarrow rot bedeutet
frühe \rightarrow späte Photonen



Ringe im RICH

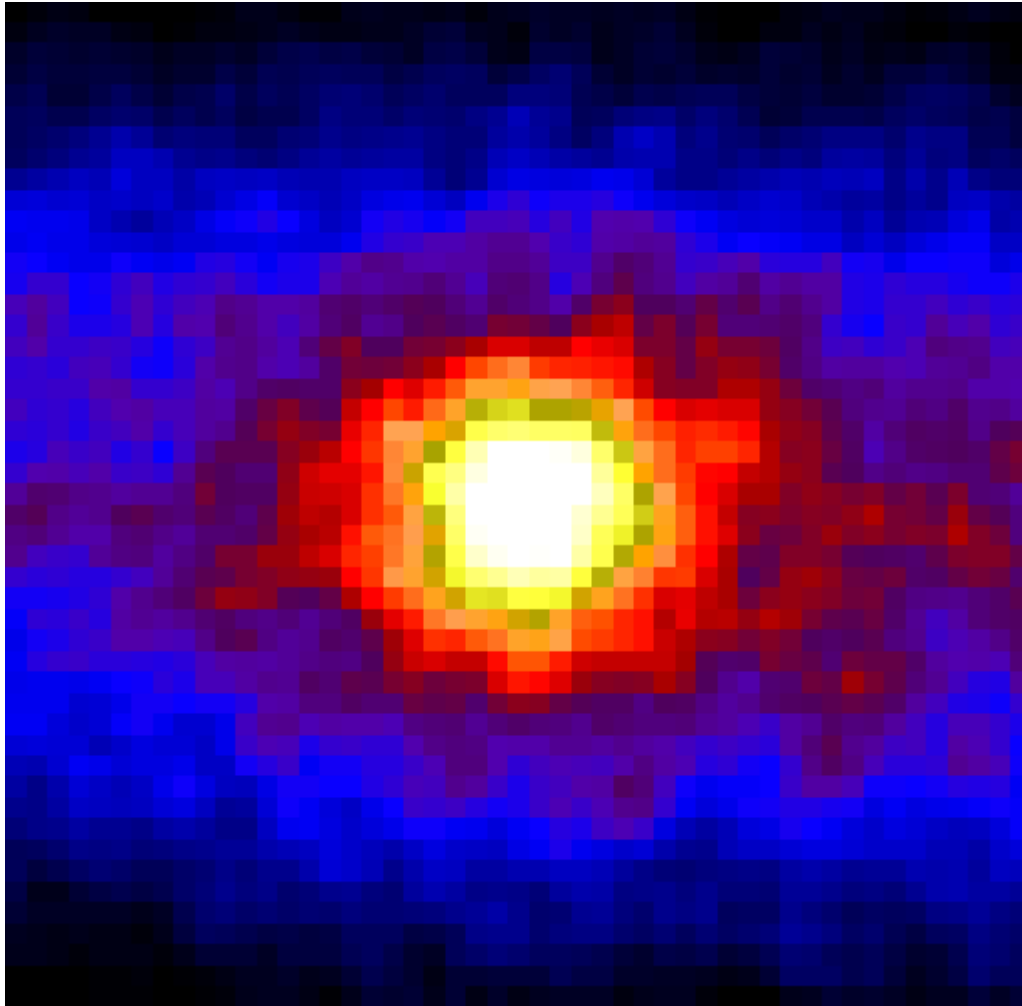
Entstehung der Ringe im Super-Kamiokande-Detektor:



<http://atropos.as.arizona.edu/aiz/teaching/a204/lecture11.html>

Die Sonne

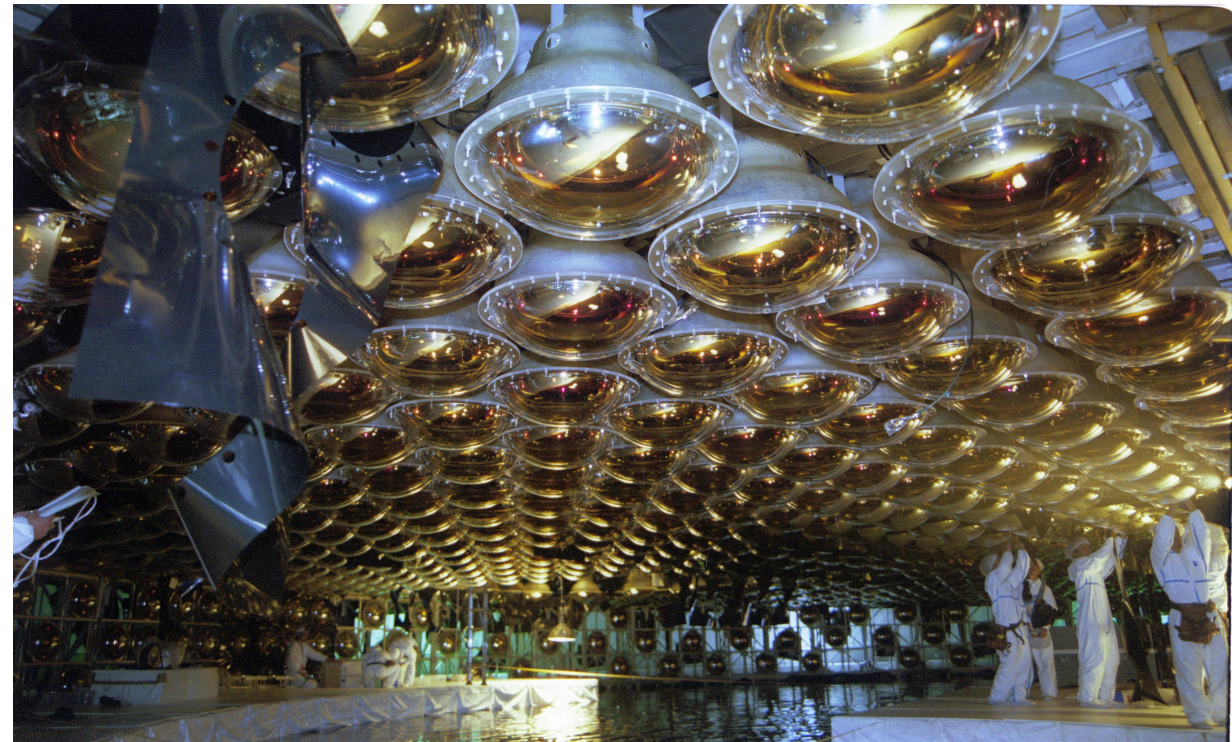
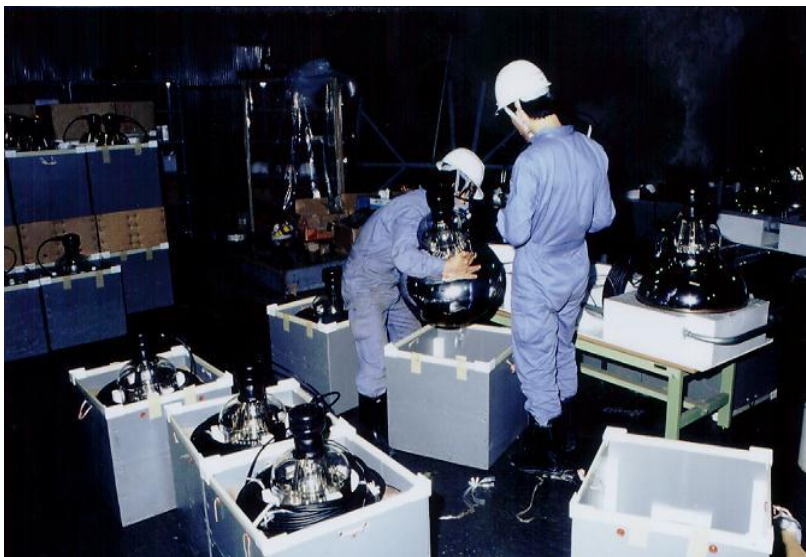
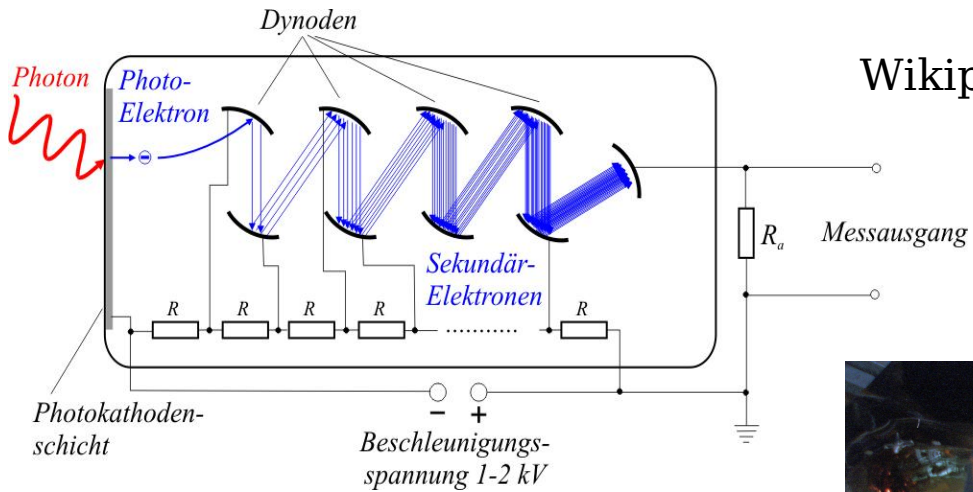
Neutrino-Bild der Sonne:



<http://hep.fuw.edu.ps/u/danka/superk.html>

Photomultiplier

- Lichtintensität ungefähr die einer Kerze auf dem Mond, beobachtet auf der Erde





Die “Kamiokanne”

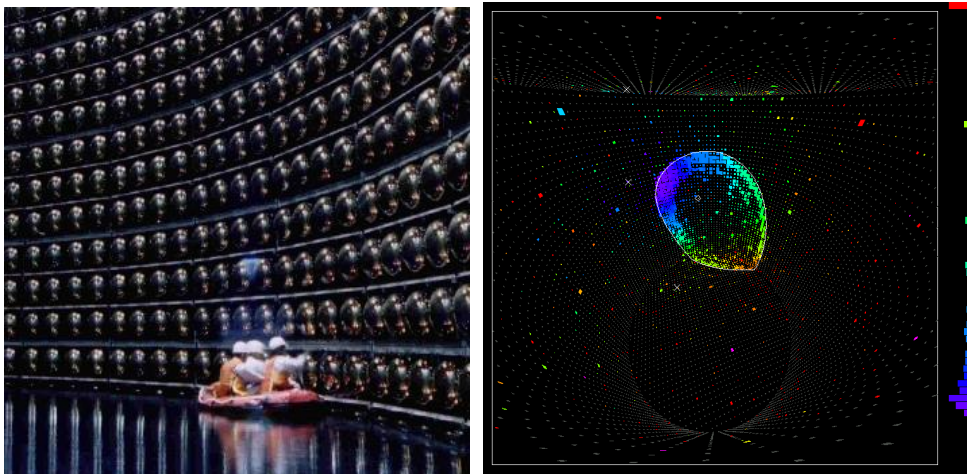
(Schul-)Kamiokanne

Super-Kamiokande:

50000 t Wasser
11200 PMs
1000 km unter Tage

Messung von Neutrinos
aus der Höhenstrahlung

Auflösung von Ringen



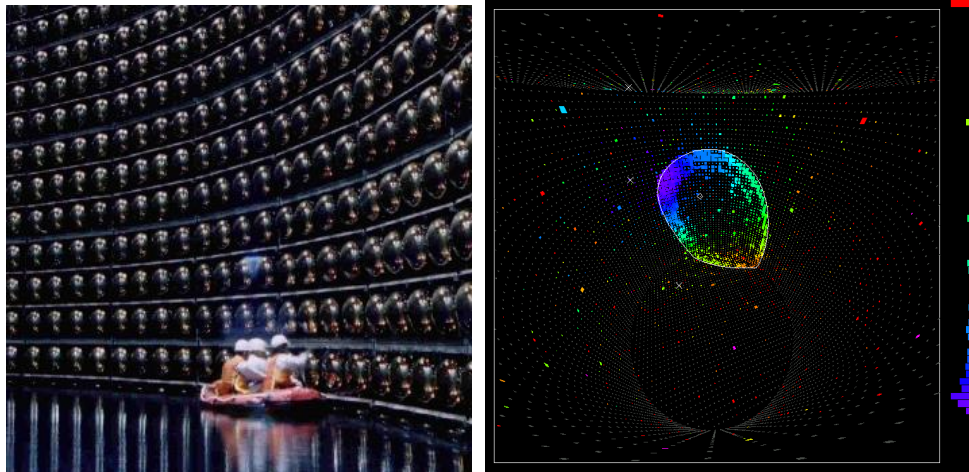
(Schul-)Kamiokanne

Super-Kamiokande:

50000 t Wasser
11200 PMs
1000 km unter Tage

Messung von Neutrinos
aus der Höhenstrahlung

Auflösung von Ringen

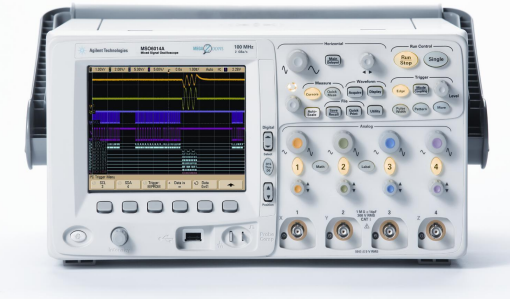


Schul-Kamiokanne:

0.00 t Wasser
1 PMs
unter 1 m Beton

Messung von Myonen aus
der Höhenstrahlung

Messung einzelner Pulse



Wikipedia

(Schul-)Kamiokanne

Schul-Kamiokanne mit und ohne Wasser:

- **Mindestenergie** von Myonen:

$$\cos \phi = \frac{1}{\beta n} < 1 \Rightarrow \beta > \frac{1}{n} \Leftrightarrow \gamma > \frac{1}{\sqrt{1-1/n^2}}$$

Wasser: $E_\mu > 1.5 m_\mu c^2 = 0.16 \text{ GeV}$

Luft: $E_\mu > 41 m_\mu c^2 = 4.4 \text{ GeV}$

(Schul-)Kamiokanne

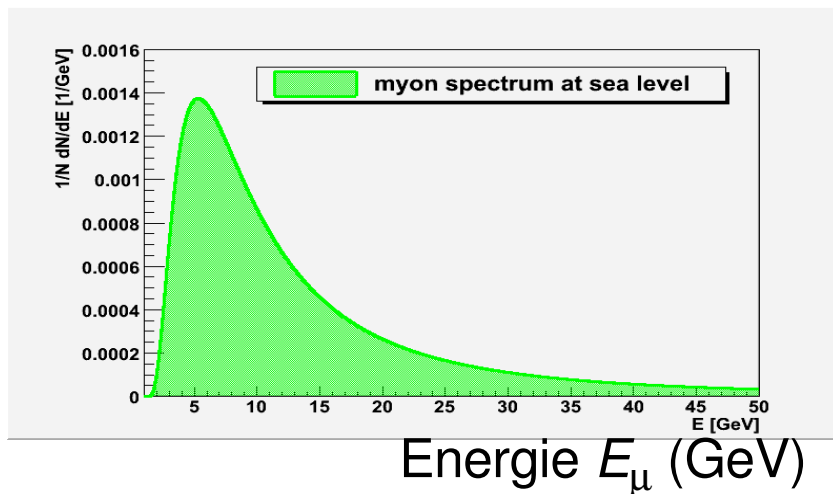
Schul-Kamiokanne mit und ohne Wasser:

- **Mindestenergie** von Myonen:

$$\cos \phi = \frac{1}{\beta n} < 1 \Rightarrow \beta > \frac{1}{n} \Leftrightarrow \gamma > \frac{1}{\sqrt{1-1/n^2}}$$

Wasser: $E_\mu > 1.5 m_\mu c^2 = 0.16 \text{ GeV}$

Luft: $E_\mu > 41 m_\mu c^2 = 4.4 \text{ GeV}$



- Energie der meisten Myonen würde auch mit Luft in der Kanne reichen
- **Intensität** des Cherenkov-Lichts:
größer, je weiter oberhalb der Schwelle

Messungen mit der Kamiokanne

Ratenmessung:

- Statistische Natur der Höhenstrahlung
 - + wenig Zeitaufwand (funktioniert “online”)
 - + kein Auswerteprogramm nötig
 - wenig spektakulär
- Durchdringungsvermögen von Myonen (Vergleich der Raten an verschiedenen Orten, z. B. verschiedenen Stockwerken)
 - + Vergleich mit Standardversuch bei α -, β -, γ -Strahlung
 - + Begründung für Untergrund-Experimente (Kamiokande)
 - Vergleichbarkeit schwer sicherzustellen (HV-Einstellung!)

Messungen mit der Kamiokanne

Ratenmessung:

- Statistische Natur der Höhenstrahlung
- Durchdringungsvermögen von Myonen (Vergleich der Raten an verschiedenen Orten, z. B. verschiedenen Stockwerken)

Koinzidenzmessung mit zwei Kannen:

- Richtungsinformation
 - + mehr als nur ein simples Zählexperiment
 - kleine Raumwinkelakzeptanz => **lange** Messzeiten
 - Langzeitstabilität des HV-Geräts?
 - "blockiert" das HV-Gerät

Messungen mit der Kamiokanne

Ratenmessung:

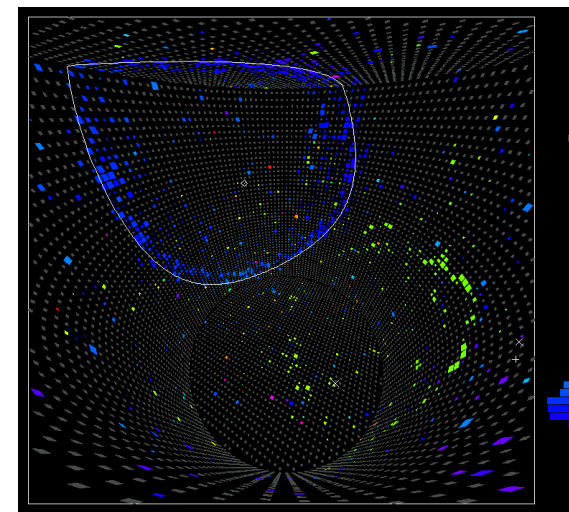
- Statistische Natur der Höhenstrahlung
- Durchdringungsvermögen von Myonen (Vergleich der Raten an verschiedenen Orten, z. B. verschiedenen Stockwerken)

Koinzidenzmessung mit zwei Kannen:

- Richtungsinformation

Koinzidenzmessung mit einer Kanne:

- Lebensdauer von Myonen
 - manche Myonen werden in der Kanne gestoppt
 - Zerfall $\mu \rightarrow e \nu \bar{\nu}$
- => Impuls 1 : Cherenkovlicht des Myons
=> Impuls 2 : Cherenkovlicht des Elektrons / Positrons und/oder Annihilation des Positrons



Messungen mit der Kamiokanne

Ratenmessung:

- Statistische Natur der Höhenstrahlung
- Durchdringungsvermögen von Myonen (Vergleich der Raten an verschiedenen Orten, z. B. verschiedenen Stockwerken)

Koinzidenzmessung mit zwei Kannen:

- Richtungsinformation

Koinzidenzmessung mit einer Kanne:

- Lebensdauer von Myonen
 - + Prinzip des radioaktiven Zerfallsgesetzes
 - + “spannend”
 - **lange** Messzeiten
 - nur mit Auswerteprogramm
 - Auswertung schwierig (Untergrund beim atomaren Einfang von μ^- , Rauschen)

Infos

Informationen:

- www.physik.uni-mainz.de/lehramt/kanne

Status:

- diese erste Version der Mainzer Kanne ist an Schulen im Einsatz

Kannenset = 2 Kannen mit Photomultipliern
 1 HV-Anschlussbox
 1 Digital-Auslesemodul

an der Schule benötigt: HV-Gerät, ca. 1.5-1.6 kV
 ggf. Windows-Computer mit Parallel-Port

- derzeit keine Module zur digitalen Signalauslese mehr “lieferbar”
- überarbeitete Module (USB-Anschluss, up-to-date-Elektronikbauteile) serienreif
- wir warten auf die (zugesagte) Finanzierung vom BMBF
- “Herstellung und Vertrieb” der neuen Kannen von mehreren Instituten (DESY, Dresden, Göttingen, Karlsruhe, Mainz, Wuppertal) im Netzwerk Teilchenphysik