

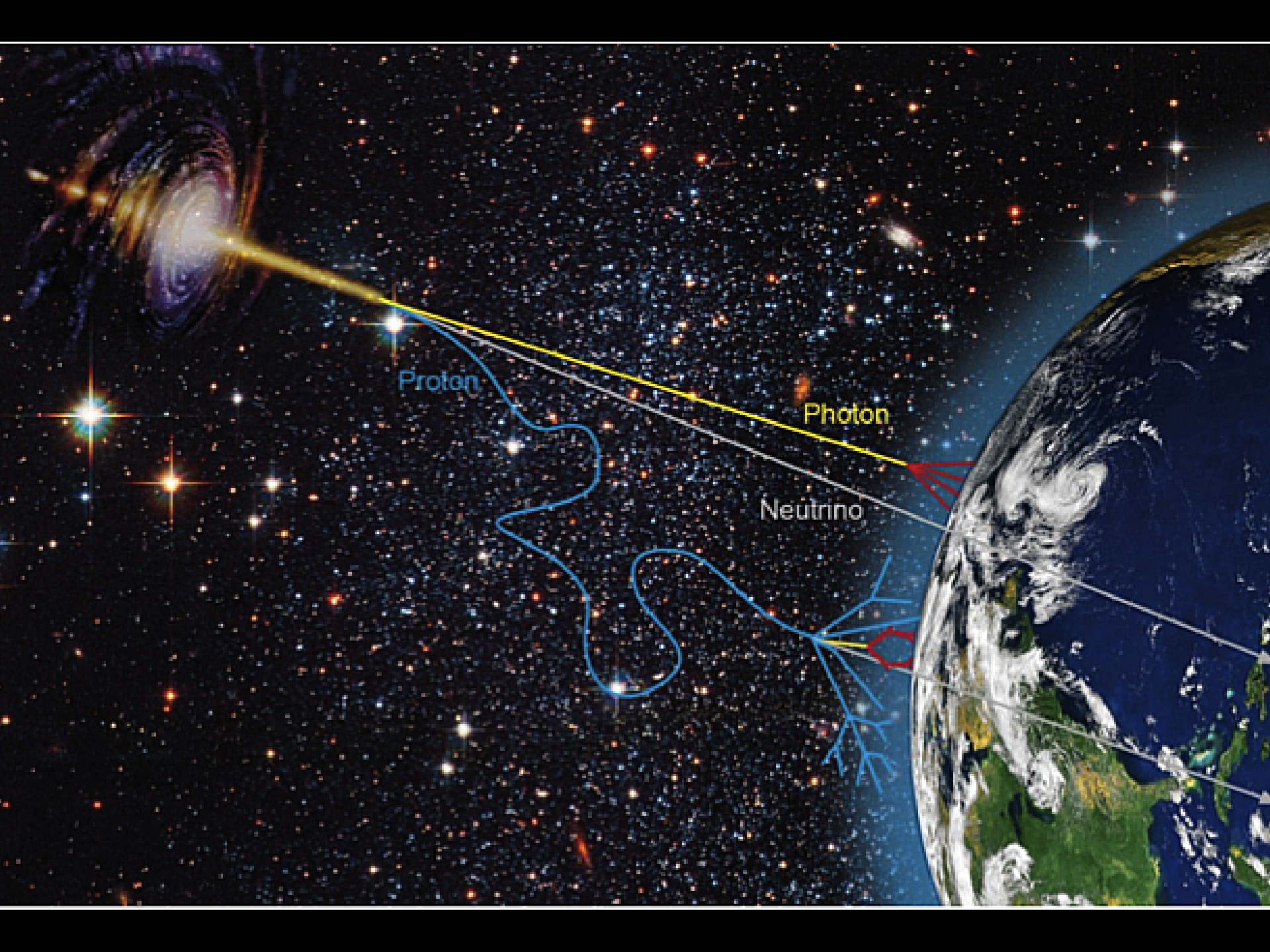
Messung kosmischer Myonen

- Fortbildung für Lehrkräfte -

Belina von Krosigk
Prof. Dr. Kai Zuber, Arnd Sörensen

27. 04. 2013



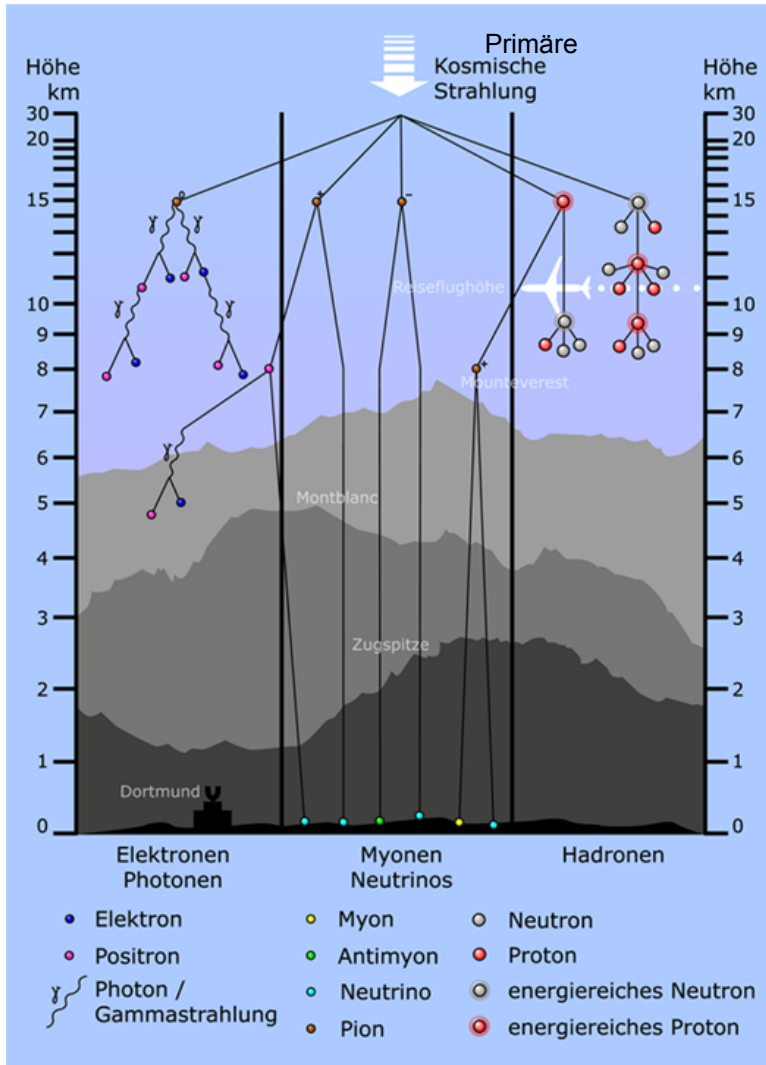


Proton

Photon

Neutrino

Kosmische Teilchenschauer

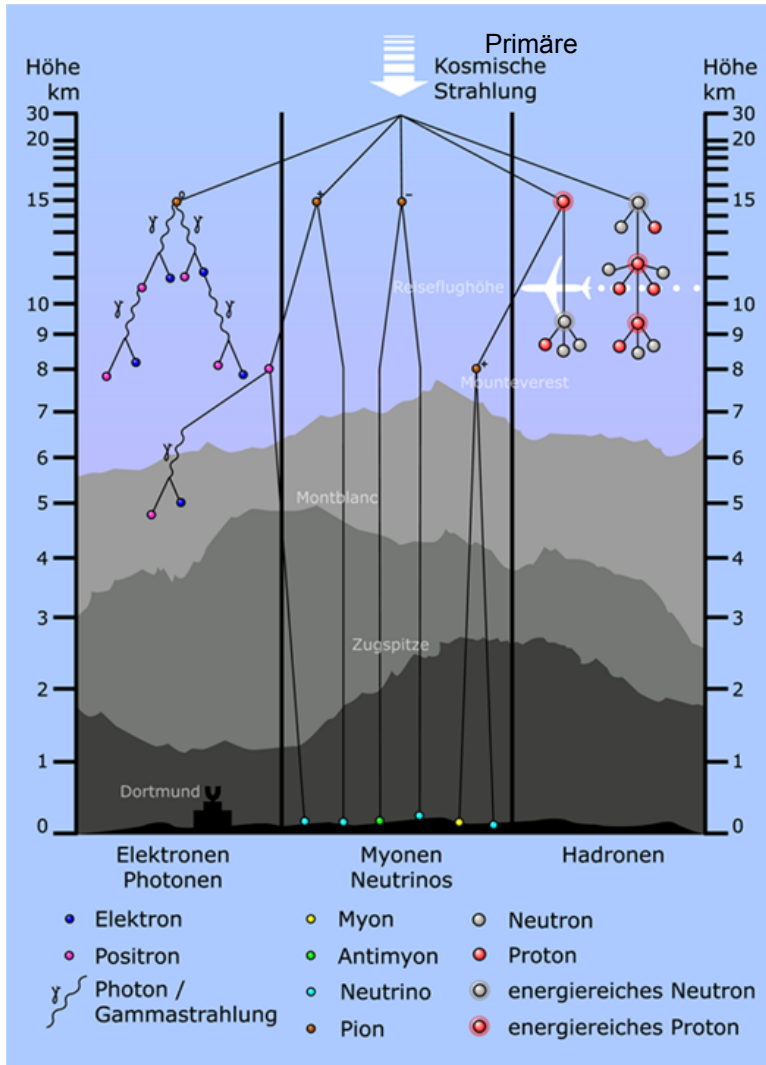


Primäre kosmische Strahlung:

- aus allen Richtungen auf Atmosphäre
- ca. 85% Protonen
- ca. 12% α -Teilchen (^4He -Kerne)
- ca. 1% schwere Atomkerne
- ca. 2% Elektronen

Quellen u.a.: <http://www.physicsmasterclasses.org/>
(DESY), <http://www.xplora.org/>

Kosmische Teilchenschauer

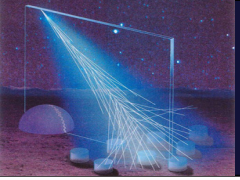


Sekundäre kosmische Strahlung:

- ausgelöst durch Stöße primärer Teilchen mit Atomen der Erdatmosphäre in ~ 15 km Höhe
- nur wenige Teilchen erreichen den Erdboden
- ca. 90% **Myonen**
außerdem: **Neutrinos**
Protonen
Neutronen

Quellen u.a.: <http://www.physicsmasterclasses.org/>
(DESY), <http://www.xplora.org/>

Das Standardmodell der Teilchen



Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

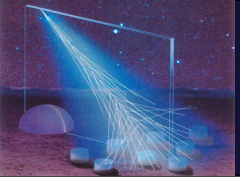
	I	II	III	
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon
	d down	s strange	b bottom	g Gluon
	$<2,2$ eV	$<0,17$ MeV	$<15,5$ MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	Z⁰ schwache Kraft
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W[±] schwache Kraft

Materieteilchen

Austauschteilchen

Myonen unterscheiden sich von **Elektronen** nur in zwei Punkten:

- sie sind ca. 200 mal schwerer
- sie können zerfallen ($\tau \approx 2,197 \mu\text{s}$)



Untersuchungsmöglichkeiten



Direkter Test der Speziellen Relativitätstheorie

Myon Lebensdauer:

$$\tau_{\mu} \approx 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Flugstrecke, klassische Rechnung:

$$l_{klass} = v \cdot t \approx c \cdot t \approx 660 \text{ m}$$

vs. ~ 15 km!

aber Fluss auf Meeresniveau:

$$\phi_{\mu} \approx 170 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

Untersuchungsmöglichkeiten

Direkter Test der Speziellen Relativitätstheorie

Myon Lebensdauer:

$$\tau_{\mu} \approx 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Flugstrecke, klassische Rechnung:

$$l_{klass} = v \cdot t \approx c \cdot t \approx 660 \text{ m} \quad \text{vs. } \sim 15 \text{ km!}$$

aber Fluss auf Meeresebene:

$$\phi_{\mu} \approx 170 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

Untersuchungsmöglichkeiten

Direkter Test der Speziellen Relativitätstheorie

Myon Lebensdauer:

$$\tau_{\mu} \approx 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Flugstrecke, klassische Rechnung:

$$l_{\text{klass}} = v \cdot t \approx c \cdot t \approx 660 \text{ m} \quad \text{vs. } \sim 15 \text{ km!}$$

aber Fluss auf Meeresebene:

$$\phi_{\mu} \approx 170 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

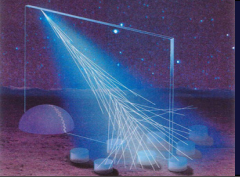
Flugstrecke, relativistische Rechnung:
(Zeitdilatation)

$$l_{\text{rel}} = v \cdot t = c \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \tau_{\mu} \approx 25 \text{ km}$$

mit:

$$E_{\mu} = 4 \text{ GeV}$$
$$m_{\mu} \approx 105,7 \text{ MeV}$$

$$\beta \cdot \gamma = \frac{p}{m_{\mu} c} = \sqrt{\left(\frac{E_{\mu}}{m_{\mu} c^2}\right)^2 - 1} \approx 38$$



Untersuchungsmöglichkeiten



Direkter Test der Speziellen Relativitätstheorie

Myon Lebensdauer:

$$\tau_{\mu} \approx 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Flugstrecke, klassische Rechnung:

$$l_{\text{klass}} = v \cdot t \approx c \cdot t \approx 660 \text{ m} \quad \text{vs. } \sim 15 \text{ km!}$$

aber Fluss auf Meeresniveau:

$$\phi_{\mu} \approx 170 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

Flugstrecke, relativistische Rechnung:
(Zeitdilatation)

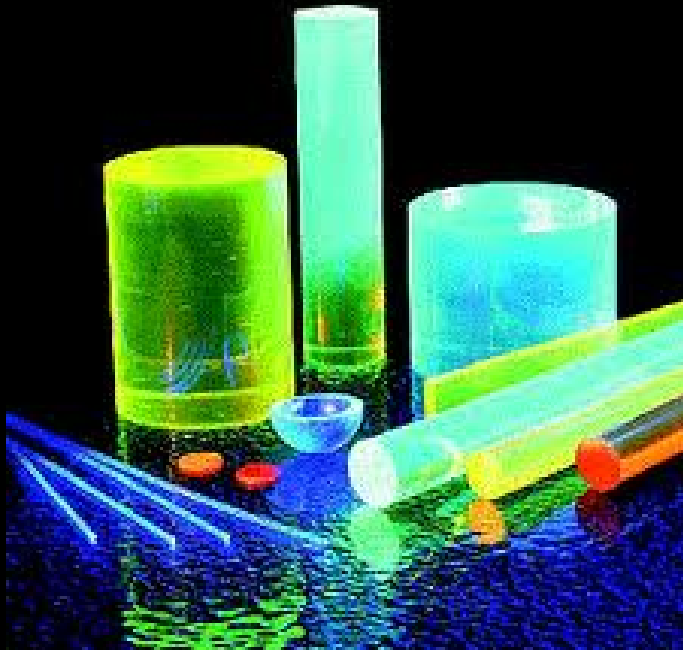
$$l_{\text{rel}} = v \cdot t = c \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \tau_{\mu} \approx 25 \text{ km}$$

mit:

$$E_{\mu} = 4 \text{ GeV}$$
$$m_{\mu} \approx 105,7 \text{ MeV}$$

$$\beta \cdot \gamma = \frac{p}{m_{\mu} c} = \sqrt{\left(\frac{E_{\mu}}{m_{\mu} c^2}\right)^2 - 1} \approx 38$$

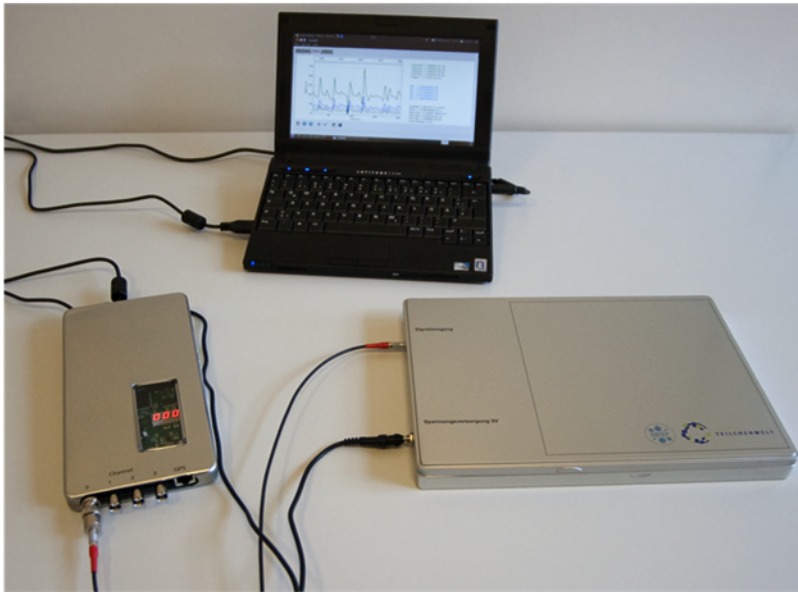
Teilchendetektion mittels Szintillations- und Cherenkov Licht



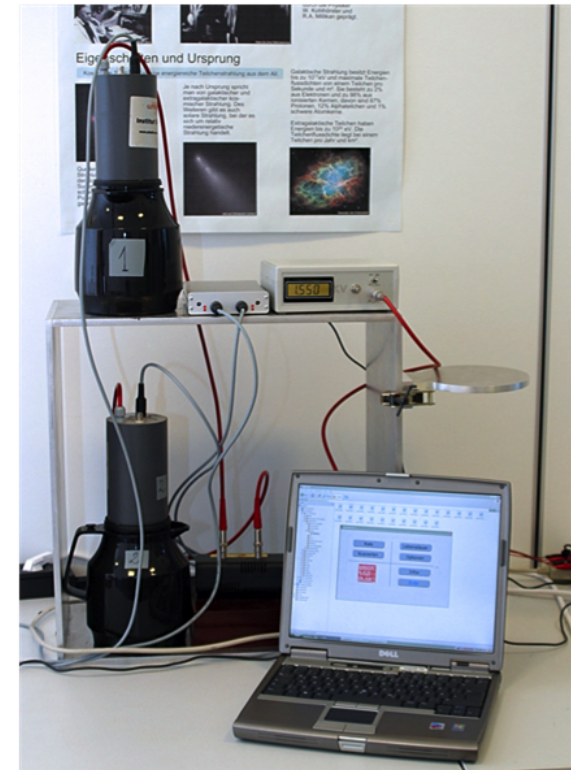
Licht ins Dunkle bringen

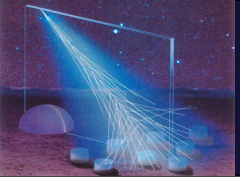
Schülerexperimente zur Ratenmessung kosmischer Teilchen

Szintillationszähler-
Experiment



Kamiokanden-
Experiment





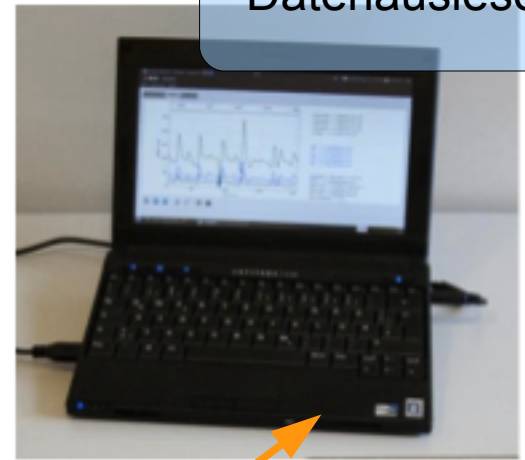
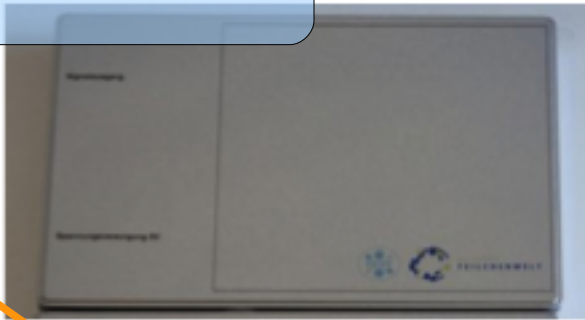
Licht ins Dunkle bringen



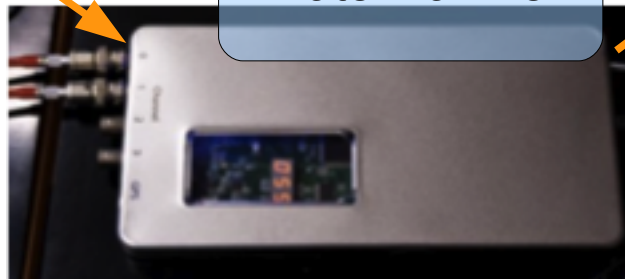
Grundlegendes Messprinzip



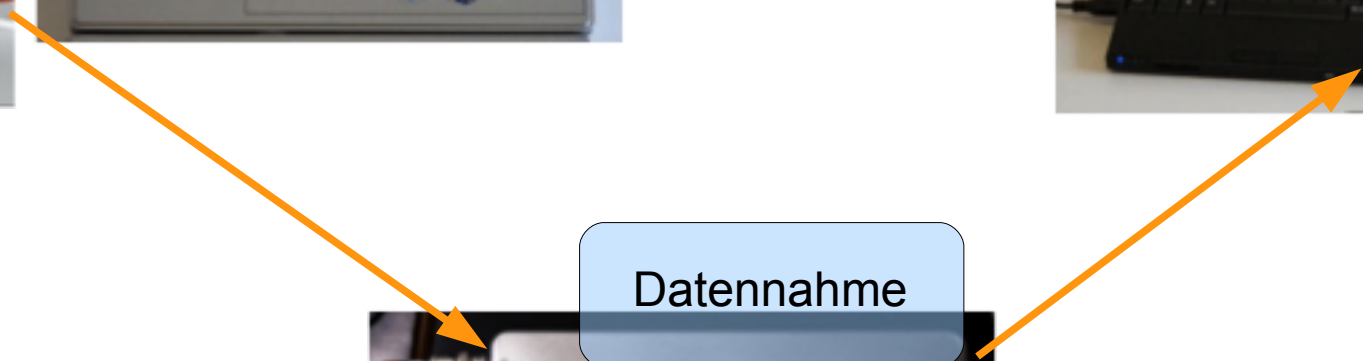
Detektor



Datenauslese



Datennahme



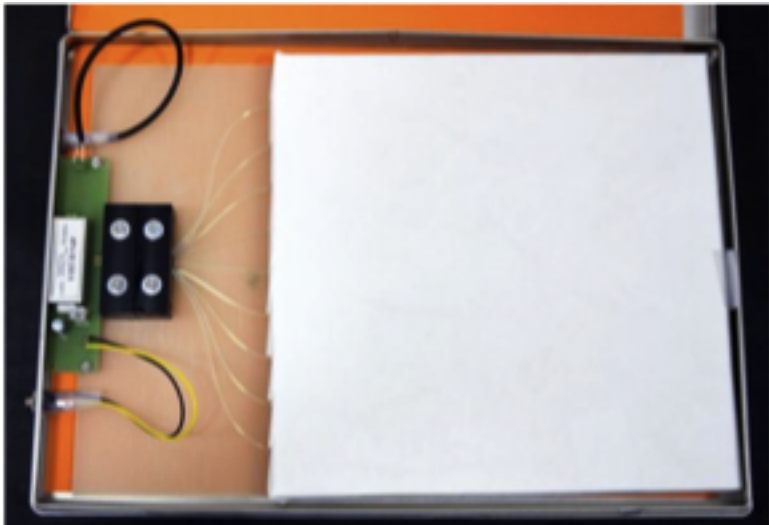
Licht ins Dunkle bringen

Das Szintillationszähler-Experiment

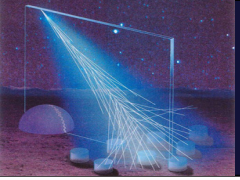


Der Detektor

- aktives Medium: **Plastikszintillator**
- Lichtleiter
- Photomultiplier (PM)
- Hochspannungsversorgung (HV)



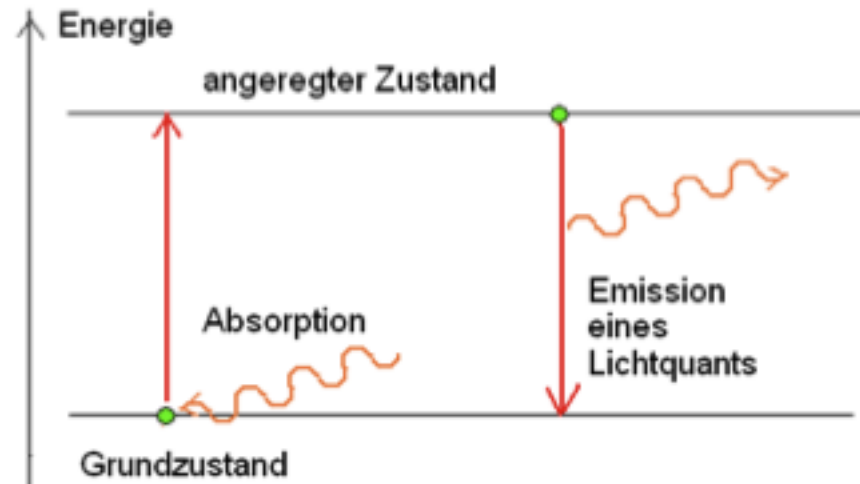
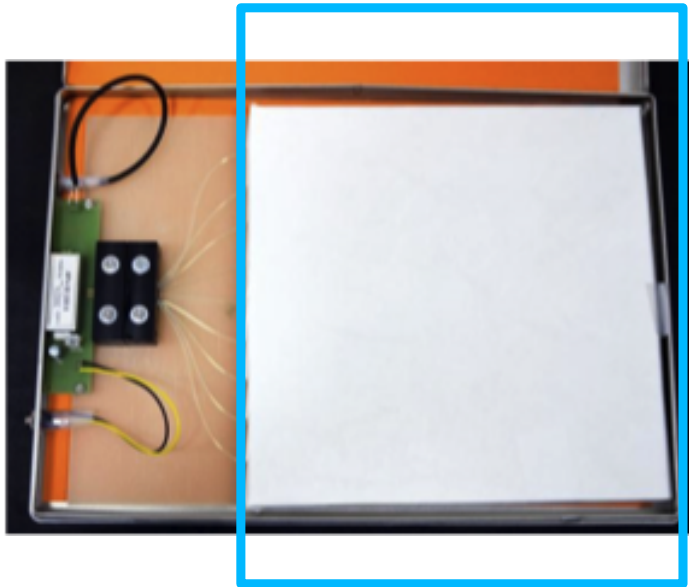




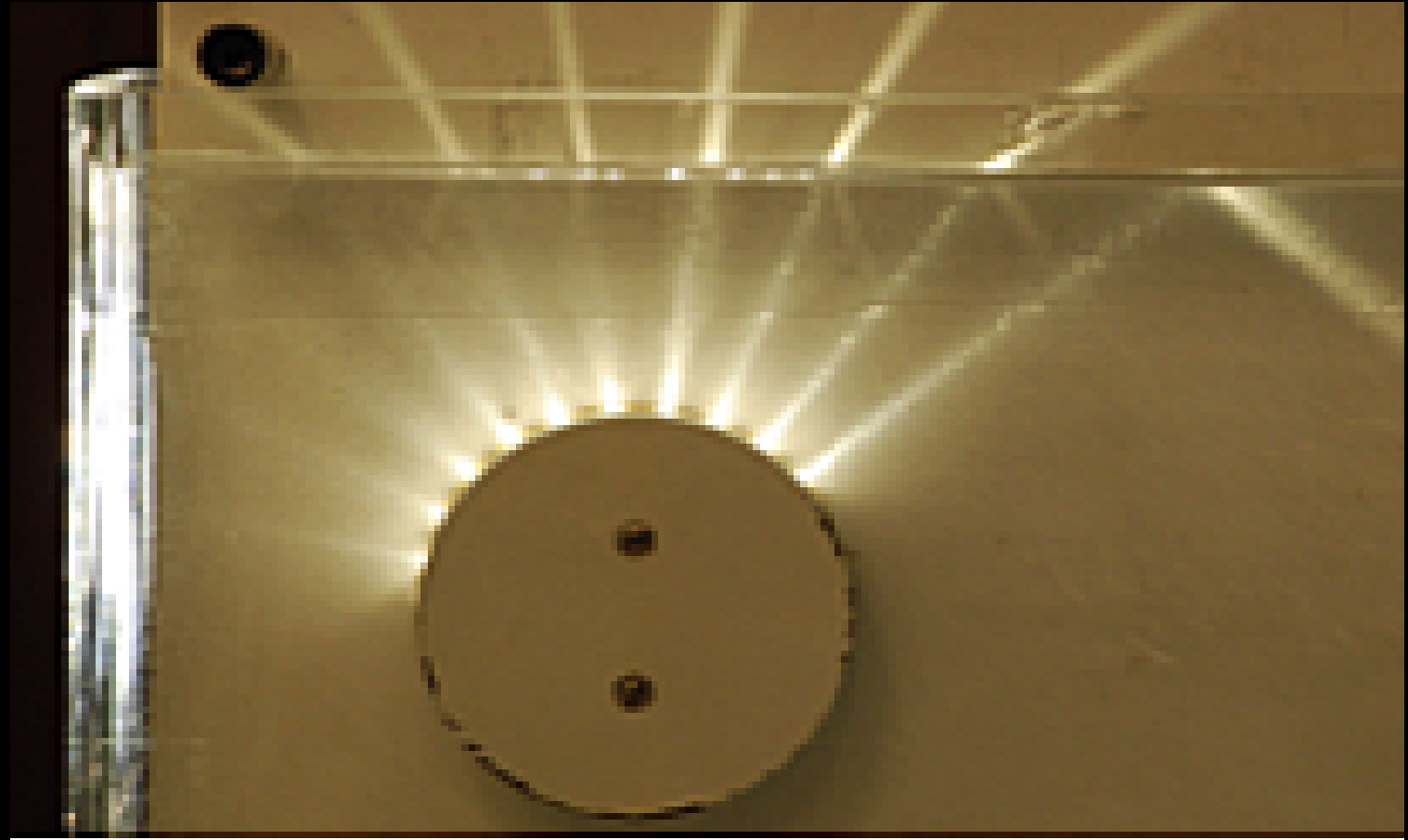
Licht ins Dunkle bringen

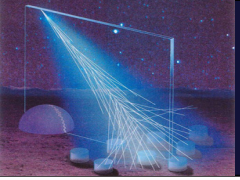


Funktionsweise des Szintillators



- geladene Teilchen und Photonen mit genügend Energie regen beim Durchgang durch's Szintillationsmaterial Atome an
- beim Übergang des Elektrons zurück in den Grundzustand wird Licht emittiert
- das emittierte Licht liegt meist im UV Bereich

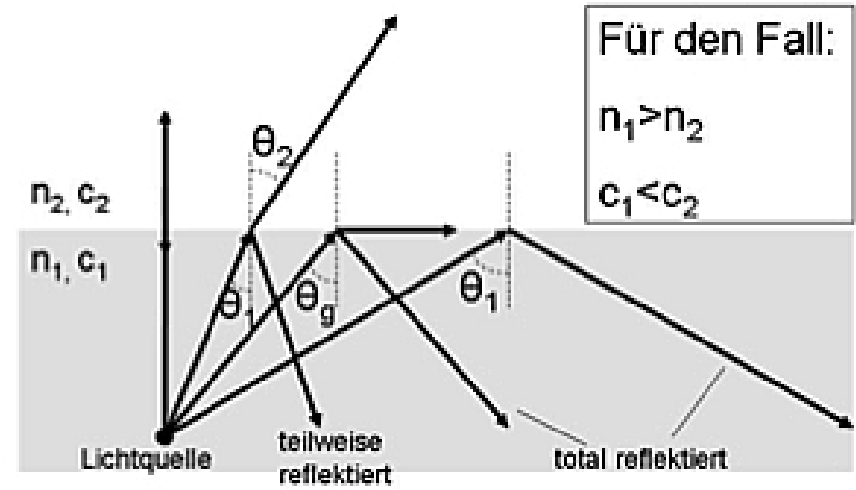
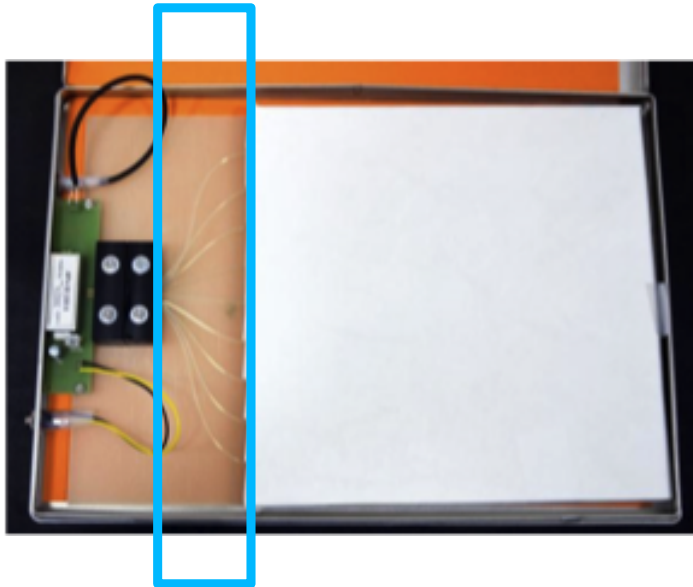




Licht ins Dunkle bringen

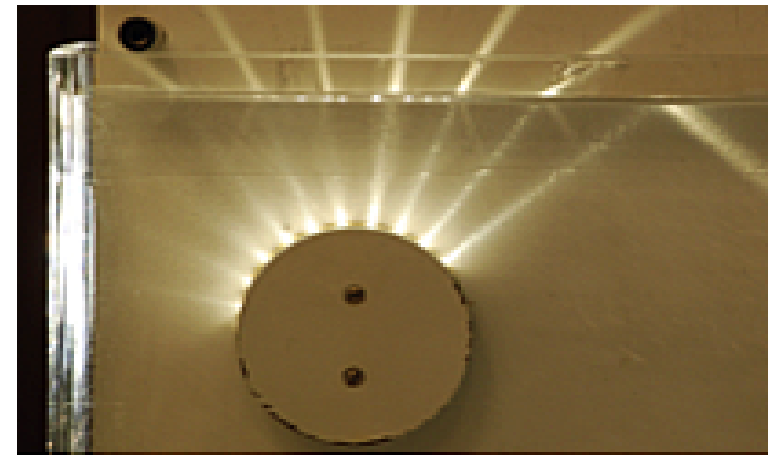


Nutzung des Effekts der Totalreflektion für den Lichtleiter

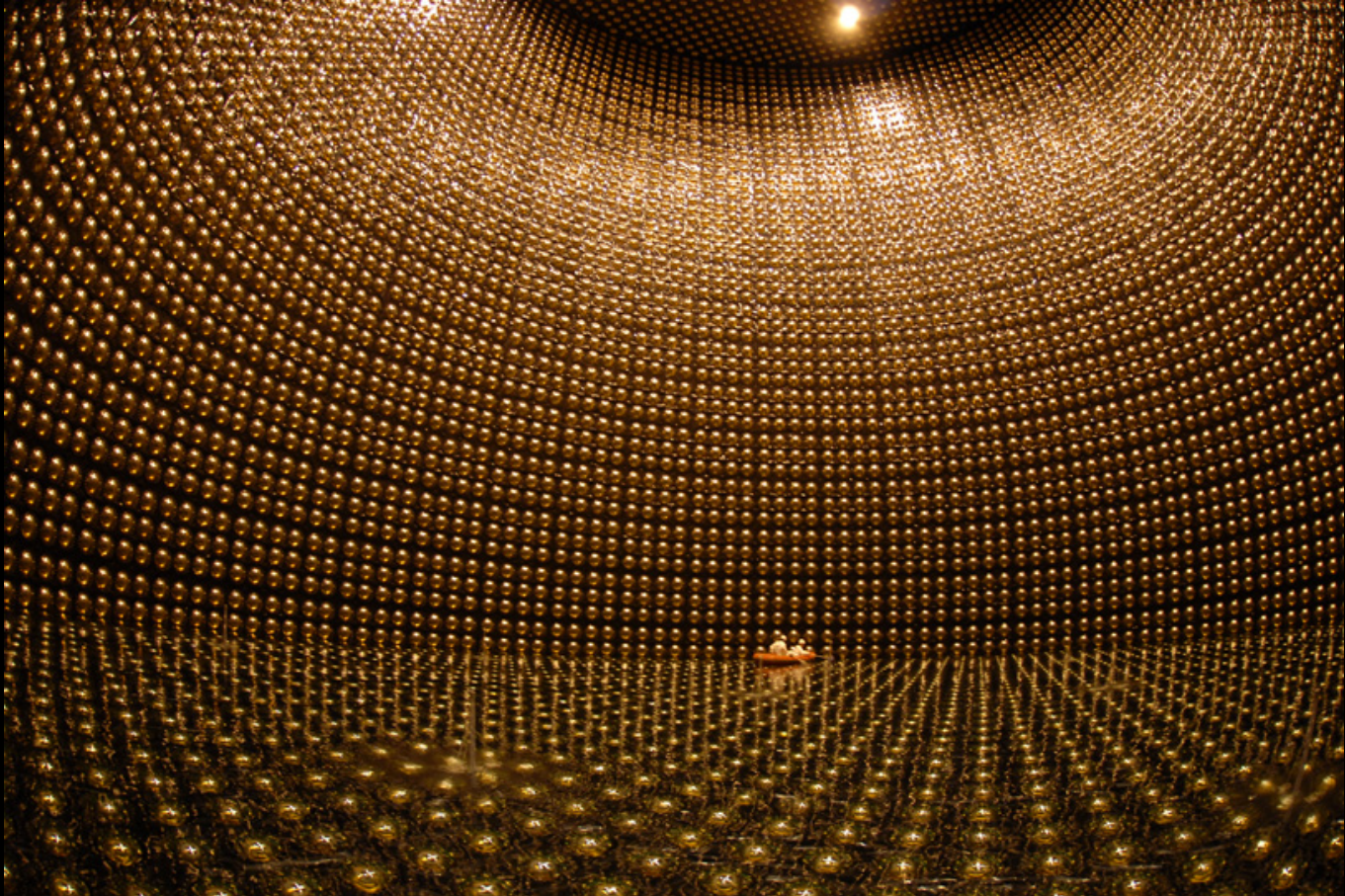


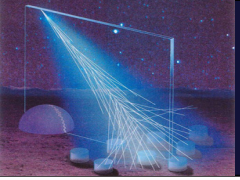
Grenzwinkel θ_g der Totalreflektion:

$$\sin \theta_g = \frac{n_2}{n_1}$$





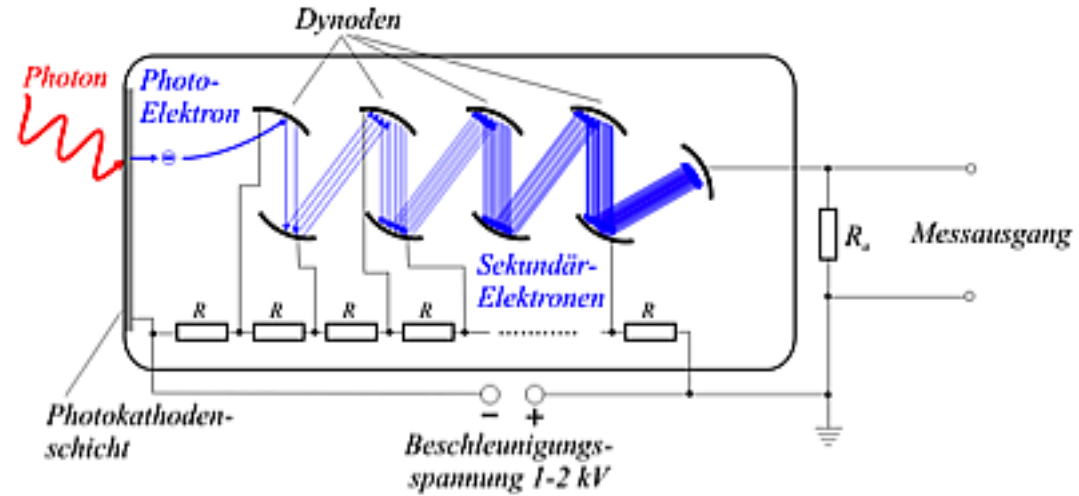
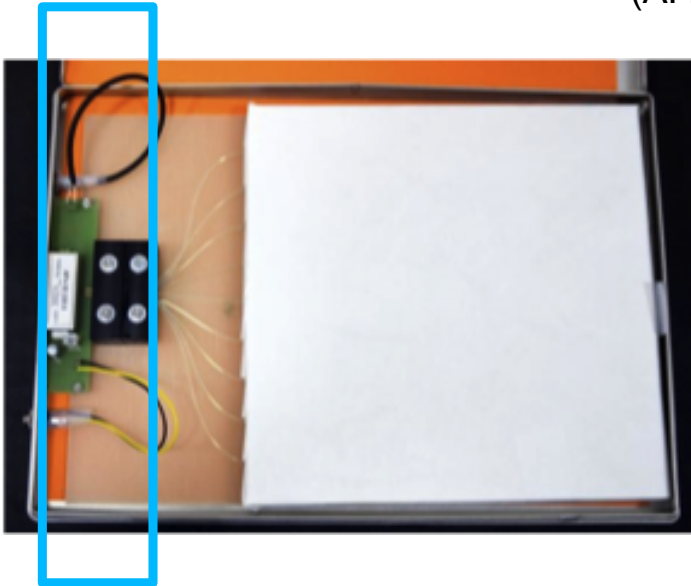




Licht ins Dunkle bringen

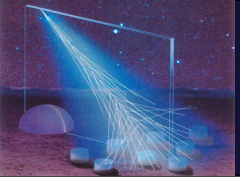


Nutzung des Photoeffekts für den Photomultiplier (A. Einstein, Nobelpreis 1921)

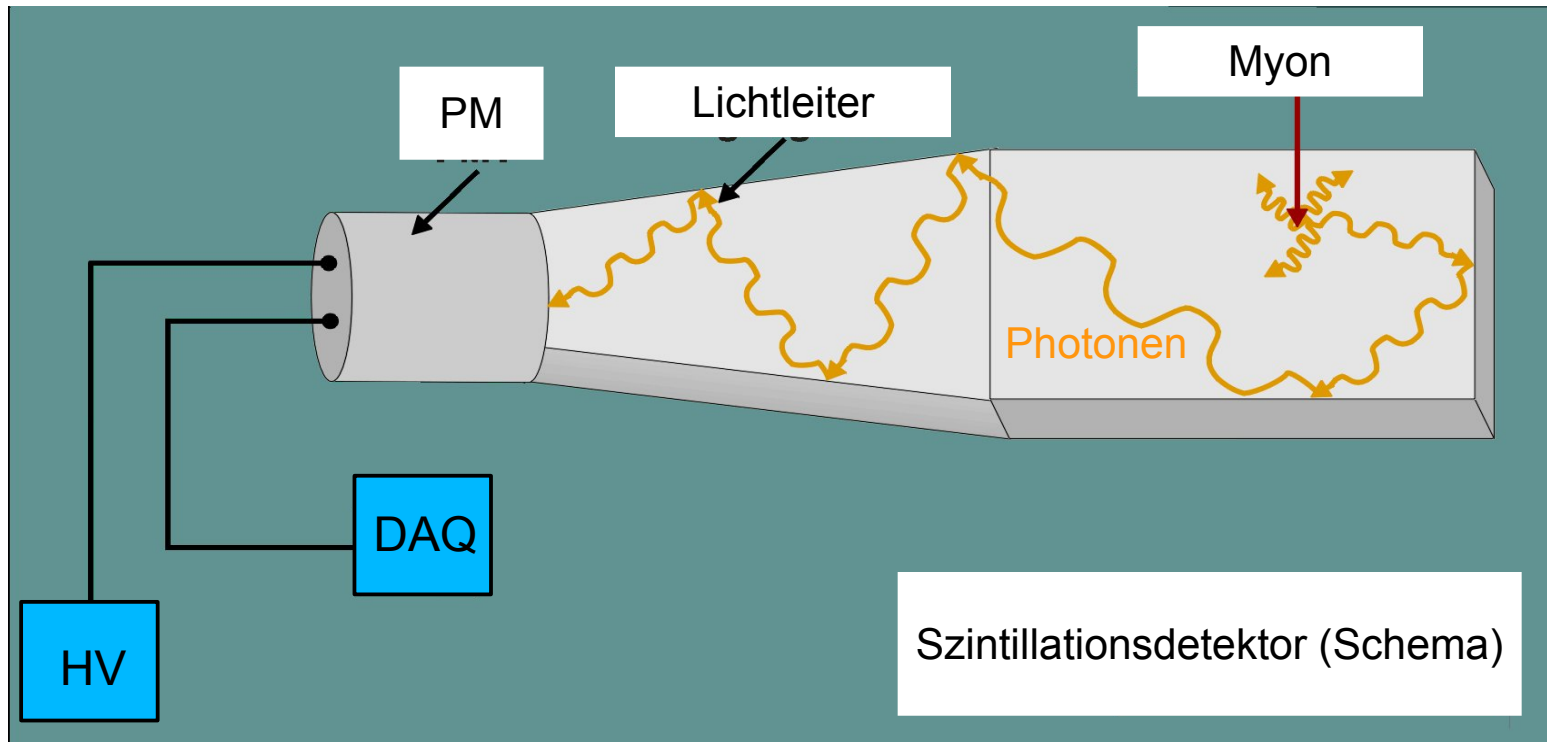


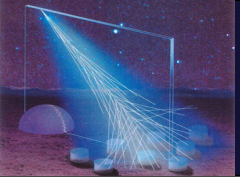
Elektronlawine wird erzeugt, mit

$$N_{e, Anode} \sim N_{e, prim} \cdot N_{e, sek}^D$$



Licht ins Dunkle bringen





Licht ins Dunkle bringen



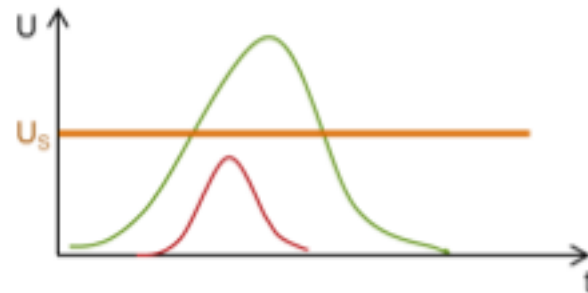
Das Szintillationszähler-Experiment

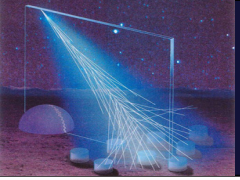


Die DAQ-Karte

- verarbeitet das elektronische Signal
- verknüpft das Signal mit Zeitdaten & GPS-Koordinaten

Über die Einstellung des **Thresholds** lassen sich Ereignisse zu niedriger Energie (Untergrund) rausfiltern:





Licht ins Dunkle bringen



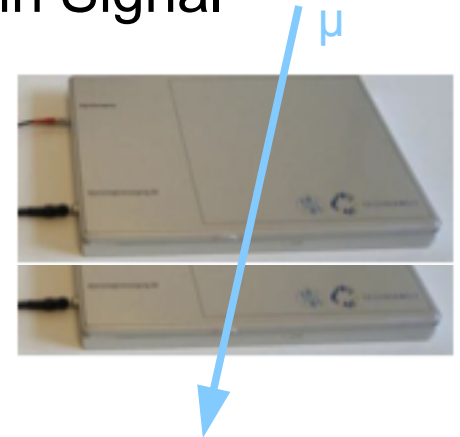
Das Szintillationszähler-Experiment

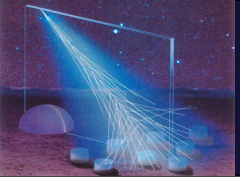


Die DAQ-Karte



- **Triggerbedingung:** innerhalb von 200ns muss in beiden Platten ein Signal registriert werden
- durch Einstellen einer Triggerbedingung kann eine Richtungsmessung durchgeführt werden



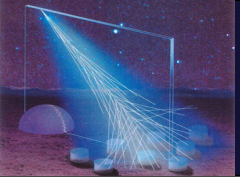


Das Szintillationszähler-Experiment



Die Datenauslese

- mit Hilfe des Rechners können die Einstellungen für die DAQ vorgenommen werden
- nach der Messung können die Daten bearbeitet werden



Licht ins Dunkle bringen



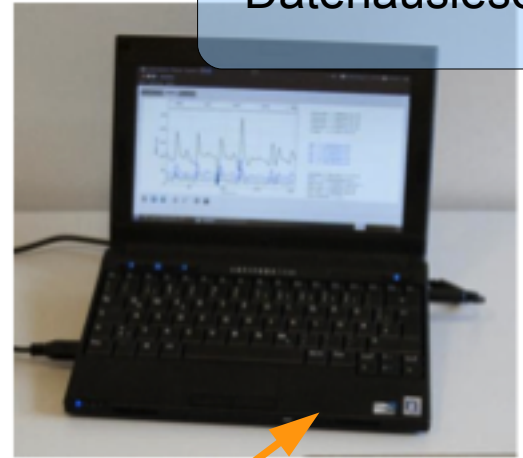
Grundlegendes Messprinzip



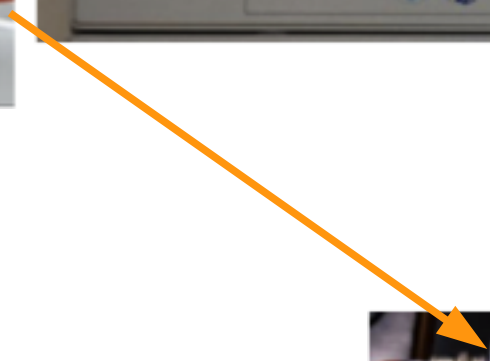
Detektor



Datennahme



Datenauslese



Licht ins Dunkle bringen

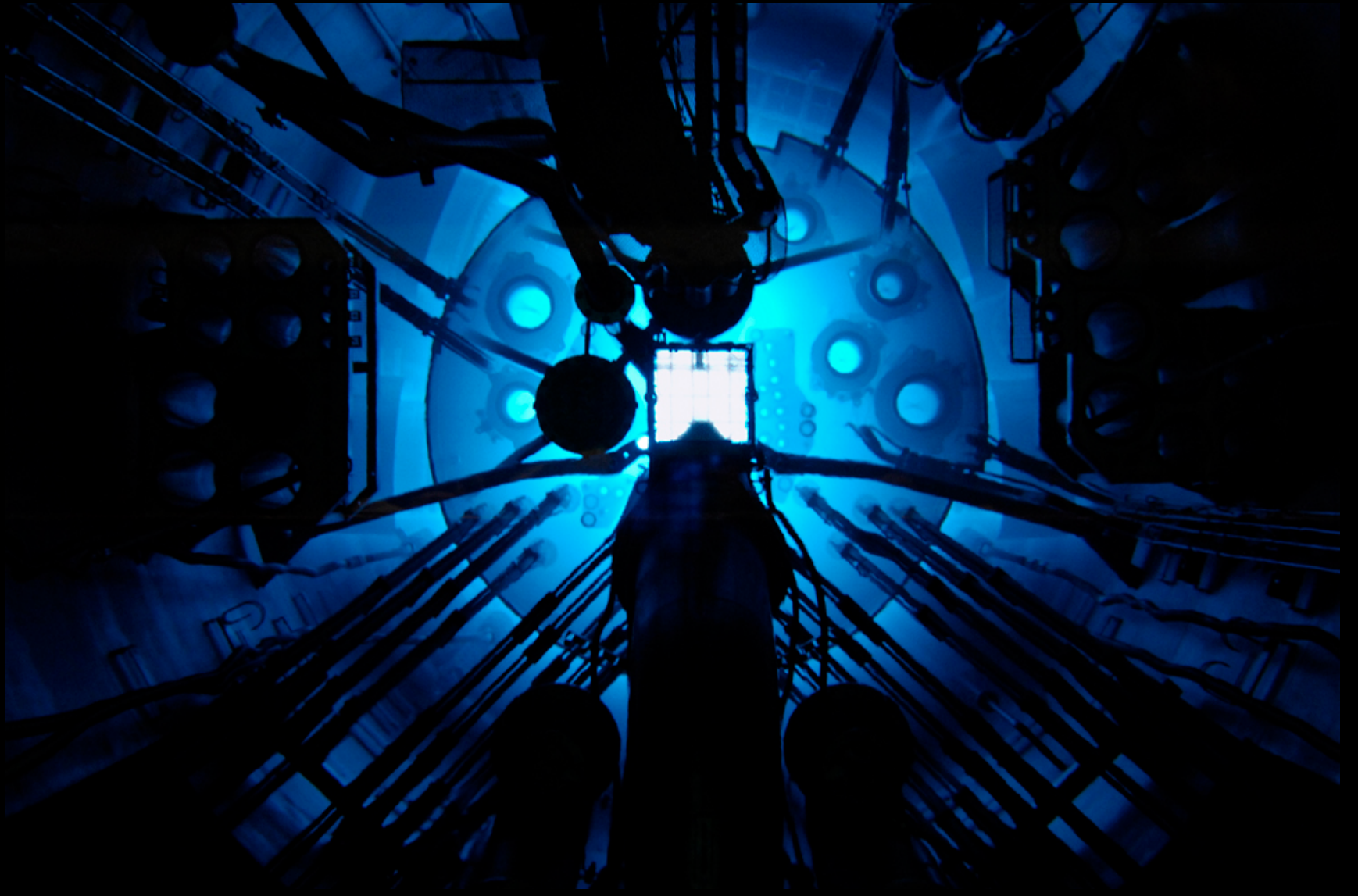


Das Kamiokannen-Experiment

Der Detektor

- aktives Medium: **Wasser**
- Thermoskanne
- Photomultiplier (PM)

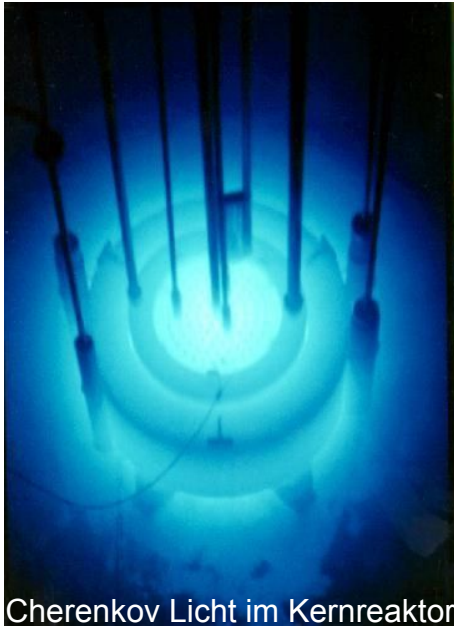




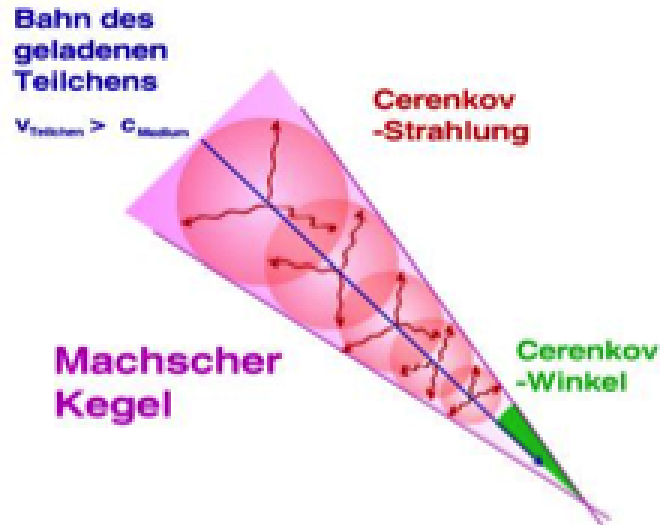
Licht ins Dunkle bringen



Der Cherenkov-Effekt (P. Cherenkov, Nobelpreis 1958)

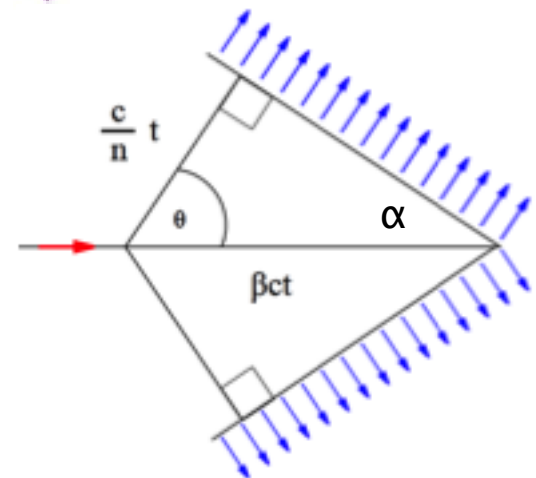


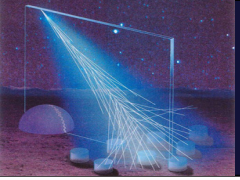
Cherenkov Licht im Kernreaktor



$$\sin(\alpha) = \frac{c}{v} = \frac{c_0}{v \cdot n}$$

- **Cherenkov-Licht** entsteht, wenn sich ein geladenes Teilchen in Medium schneller bewegt, als Licht im Medium ($v > c_0/n$)
- das Licht breitet sich **kegelförmig** mit Öffnungswinkel α aus
- Medien: **Wasser, Gase, Eis**





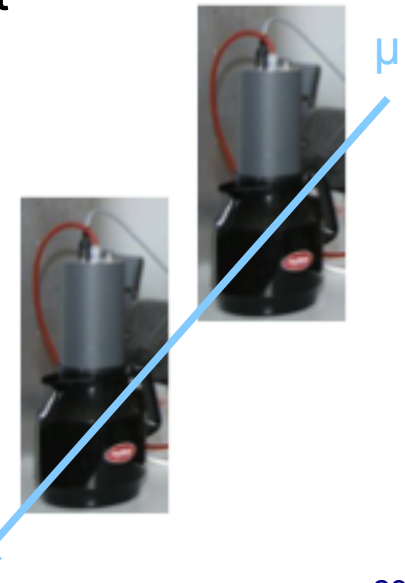
Licht ins Dunkle bringen

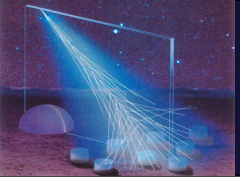


Das Kamiokannen-Experiment



- der PMT wandelt das schwache optische Signal in ein elektronisches Signal um und verstärkt es
- der Threshold kann zur Untergrund-Unterdrückung eingestellt werden
- eine Koinzidenzanalyse ist offline möglich
- über ein Oszilloskop können die Pulse direkt beobachtet werden



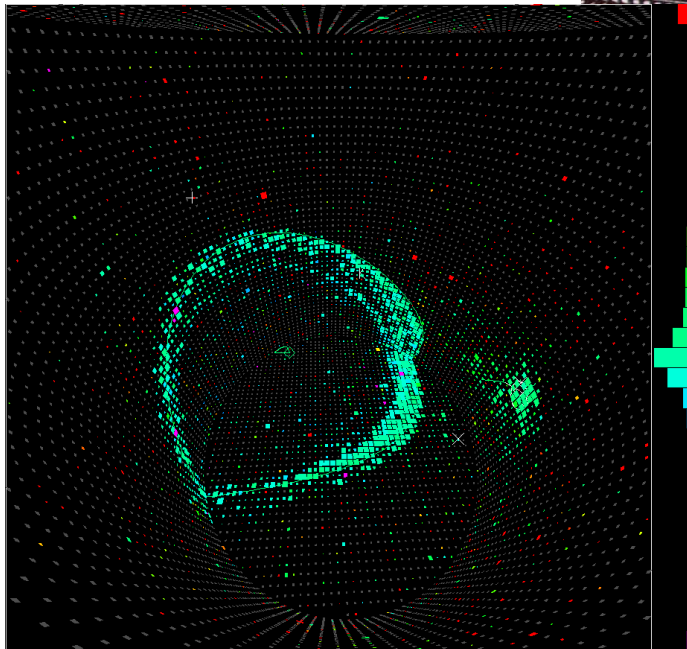
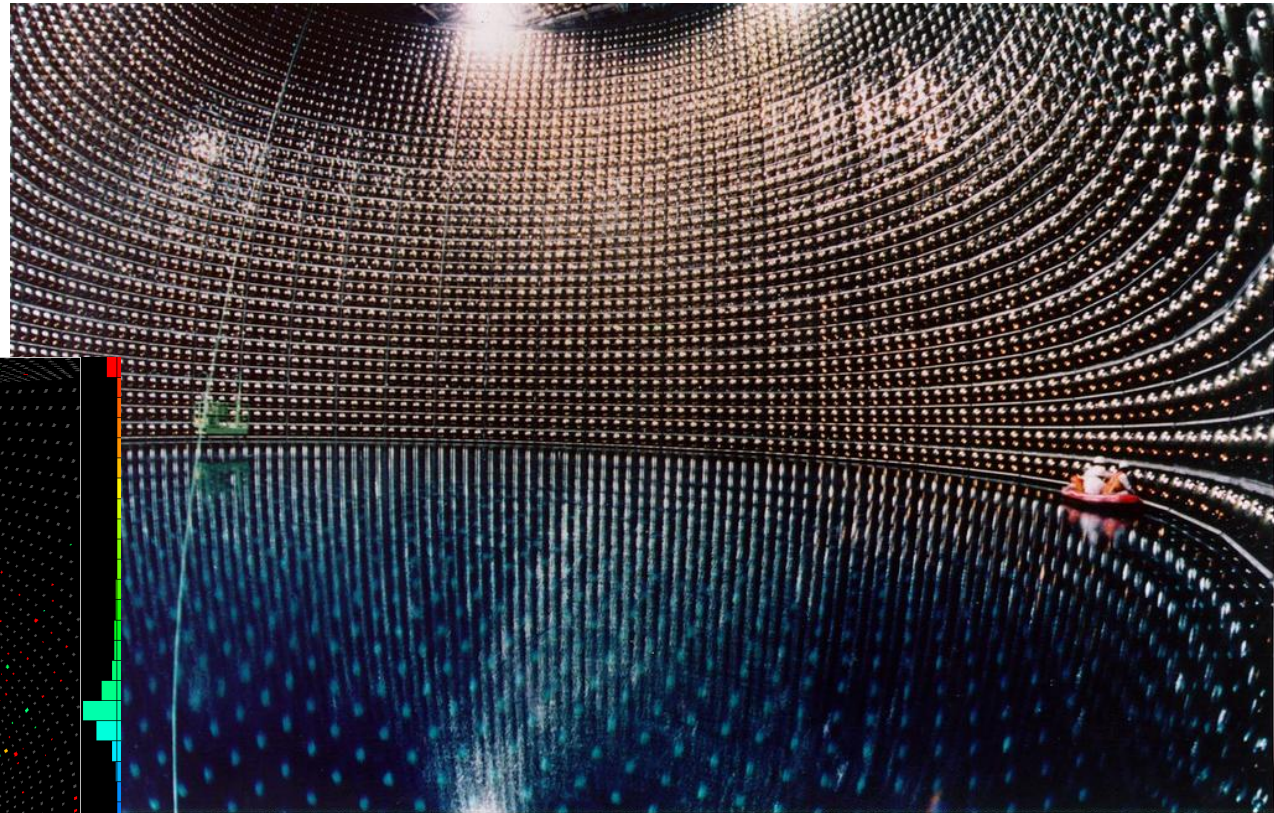


Licht ins Dunkle bringen

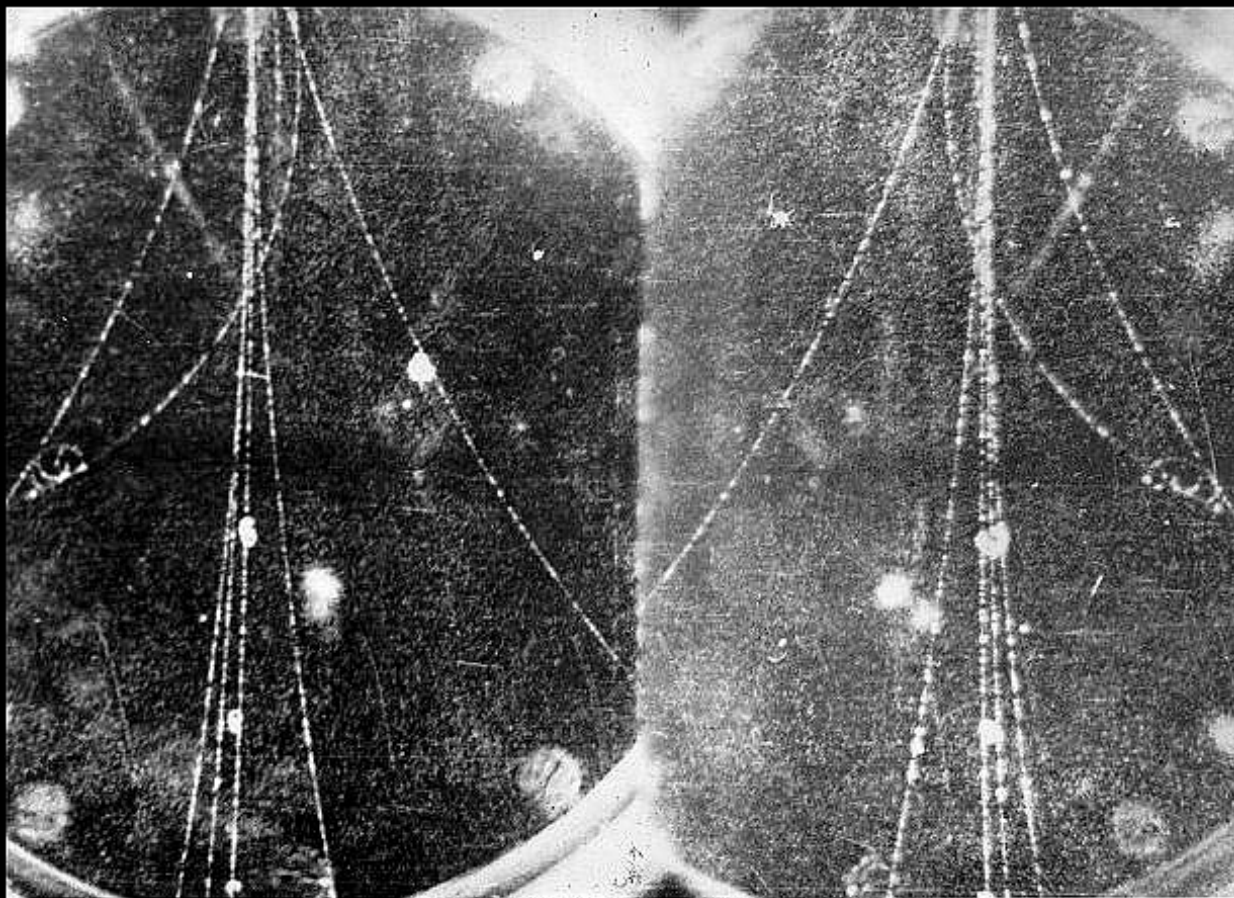


Wassertank des Neutrino-Experiments Super-Kamiokande

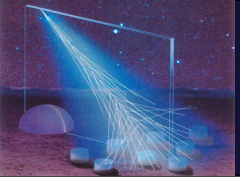
- 50 000 t Wasser
- > 11 000 PMTs
(je \varnothing 51cm)



← Aufnahme eines Cherenkov Rings



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

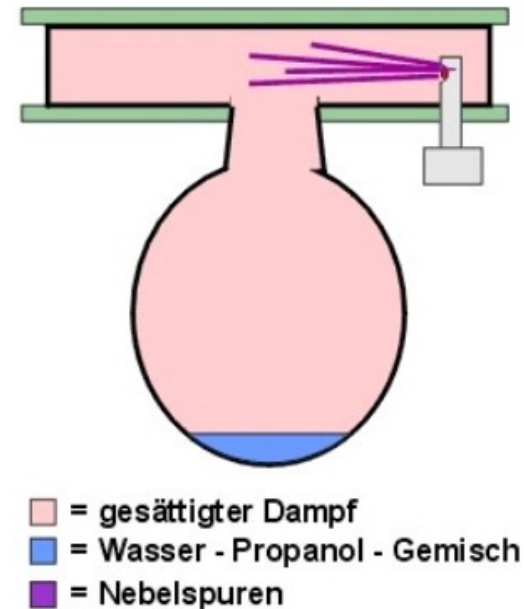
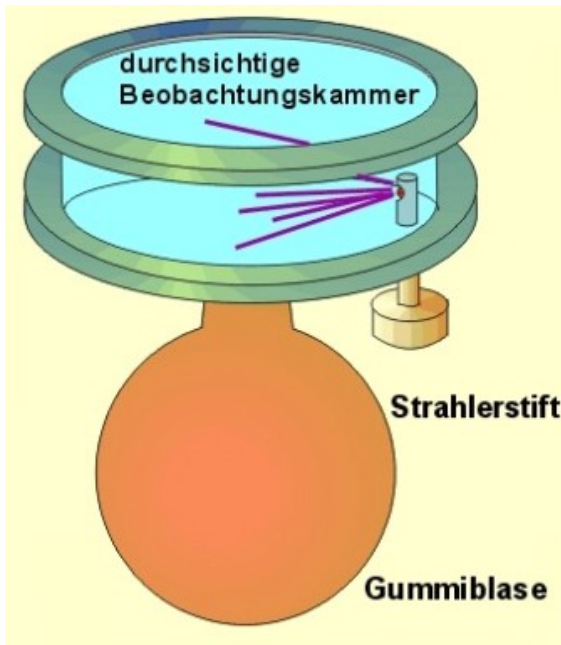


Nachweis Ionisierender Strahlung



1911:

Entwicklung der **Nebelkammer** durch **C. T. R. Wilson**.



- Die Kammer ist gefüllt mit übersättigtem Dampf.
- Ein ionisierendes Teilchen erzeugt beim Durchgang Tröpfchenspur.

Den Teilchen auf der Spur



- > Experimentierset mit Material zum Bau von 10 Nebelkammern
- > nicht enthalten sind Verbrauchsmaterialien (Isopropanol, Trockeneis) und Schutzausrüstung (Schutzbrillen, Handschuhe)
- > Teilchenspuren sichtbar machen



- ① 10 durchsichtige Plexiglasboxen
 - ② 10 schwarz eloxierte Metallplatten mit Rille
 - ③ 10 Holzkisten mit Styroporauskleidung
 - ④ 100 Neodym-Magnete (8 mm x 3 mm)*
 - ⑤ 10 Stück Filz*
 - ⑥ 10 LED Taschenlampen (mit Batterien)*
- * in Holzkiste

Eine Mappe mit:

- ▶ 10 laminierten Anleitungen
- ▶ Hinweisen und Kopiervorlagen

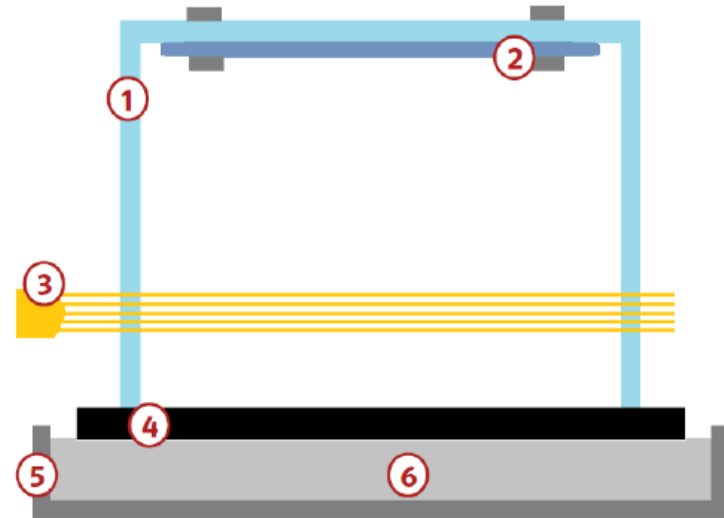
chwer

Den Teilchen auf der Spur

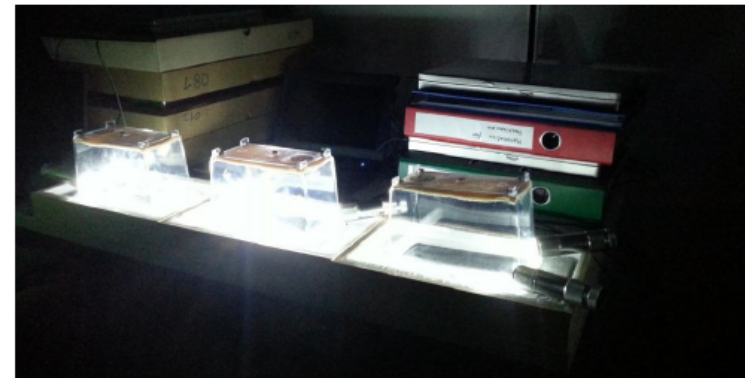
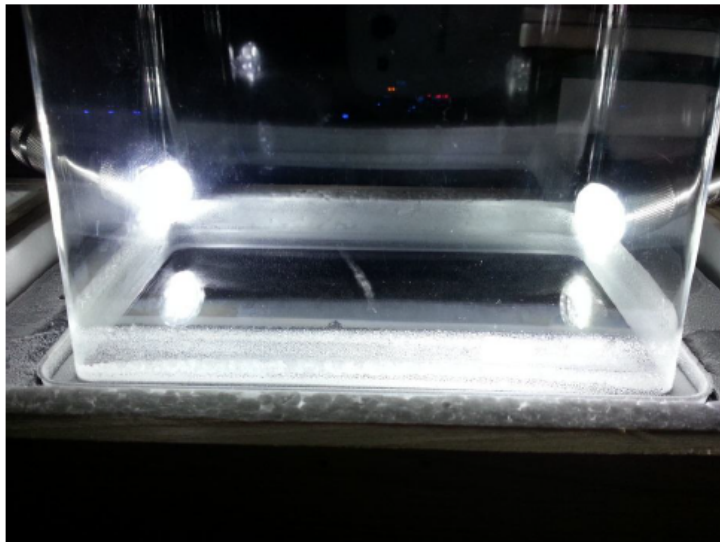


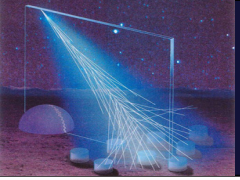
- 1 Durchsichtige Kunststoff- oder Glasbox
- 2 Filz und Magnete zum Befestigen
- 3 Taschenlampe
- 4 Schwarze Metallplatte
- 5 Styroporkiste
- 6 Trockeneis

Außerdem benötigst du reinen Alkohol (100% Isopropanol), Knetmasse, Schutzhandschuhe und eine Schutzbrille.



© Netzwerk Teilchenwelt

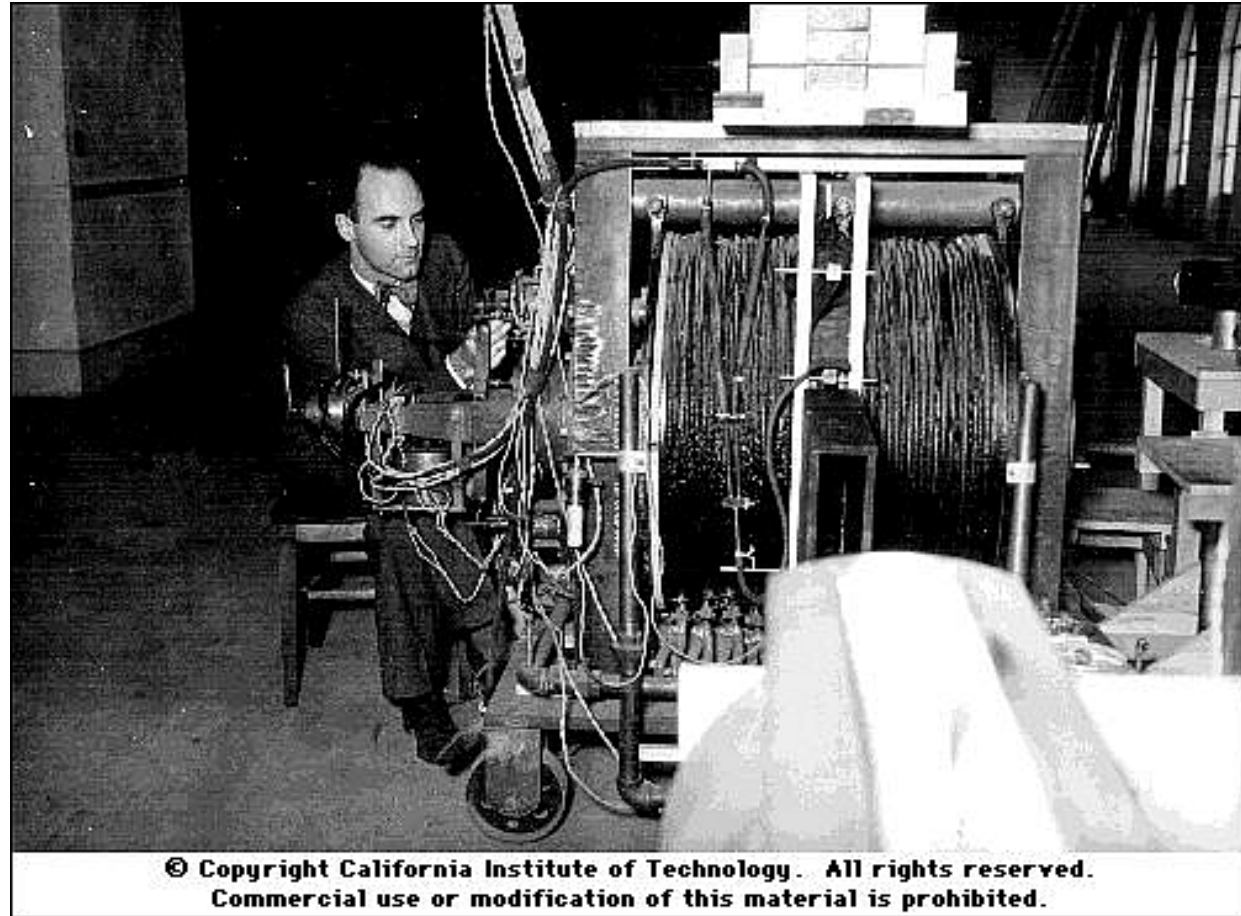




Teilchen-Detektoren

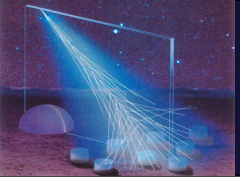


C.D. Anderson bei der Arbeit an seiner Nebelkammer:

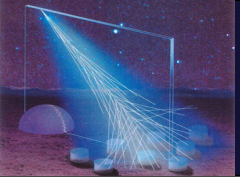


M. Gell-Mann,
E.P. Rosenbaum:

"The muon was the unwelcome baby on the doorstep, signifying the end of days of innocence"



Untersuchungsmöglichkeiten und Aufgaben für Schüler



Untersuchungsmöglichkeiten



Warum messen wir überhaupt Myonen auf der Erde?

- die sekundäre kosmische Strahlung wird in der Atmosphäre in **> 10 km Höhe** erzeugt
- ca. 90% der kosmischen Teilchen auf Meeressniveau sind **Myonen**
- sie erreichen die Erdoberfläche mit einer mittleren Energie von ca. **4 GeV**

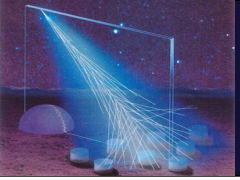
Myon-Fluss auf Meeressniveau:

$$\phi_{\mu} \approx 170 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

Myon Lebensdauer:

$$\tau_{\mu} \approx 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

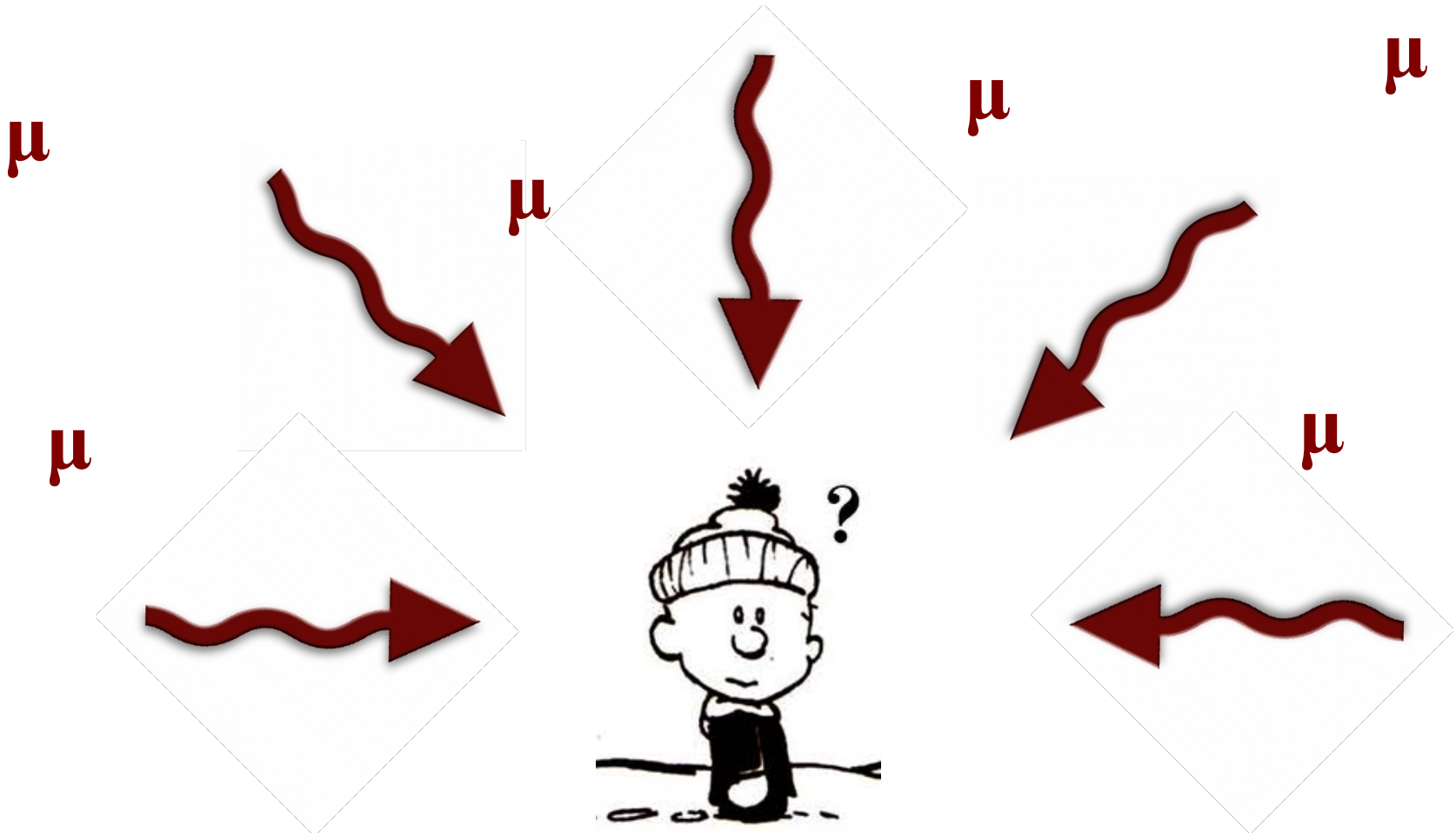
$$l_{klass} = v \cdot t \approx c \cdot t \approx 660 \text{ m}$$



Untersuchungsmöglichkeiten



Und kommen Myonen auch von der Seite?

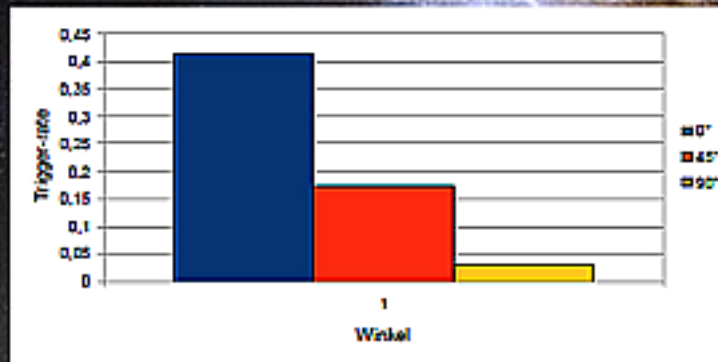




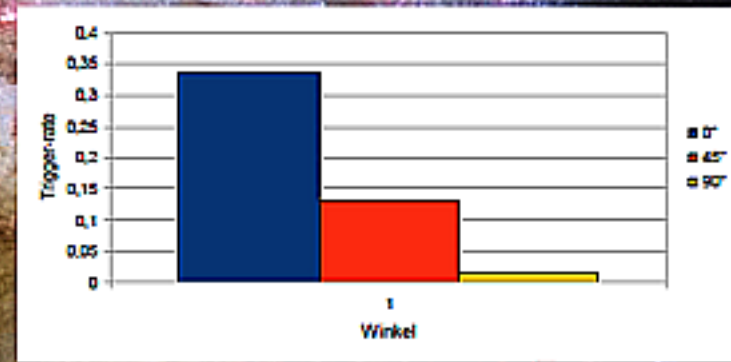
Winkelabhängigkeit

Ergebnis Schülerarbeit

2. Etage



Dachterasse



- geladene Pionen zerfallen zu Myonen
- Lebensdauer Myonen: $2,2 \mu\text{s}$
- schrägem Einfallswinkel ↻
Strecke für einige zu lang ↻
Zerfall vor Erreichen der Erdoberfläche

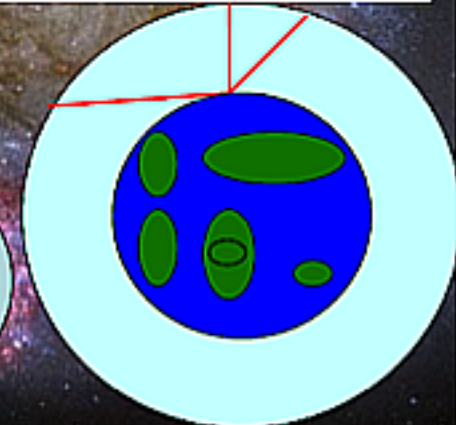
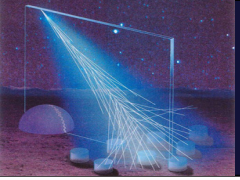


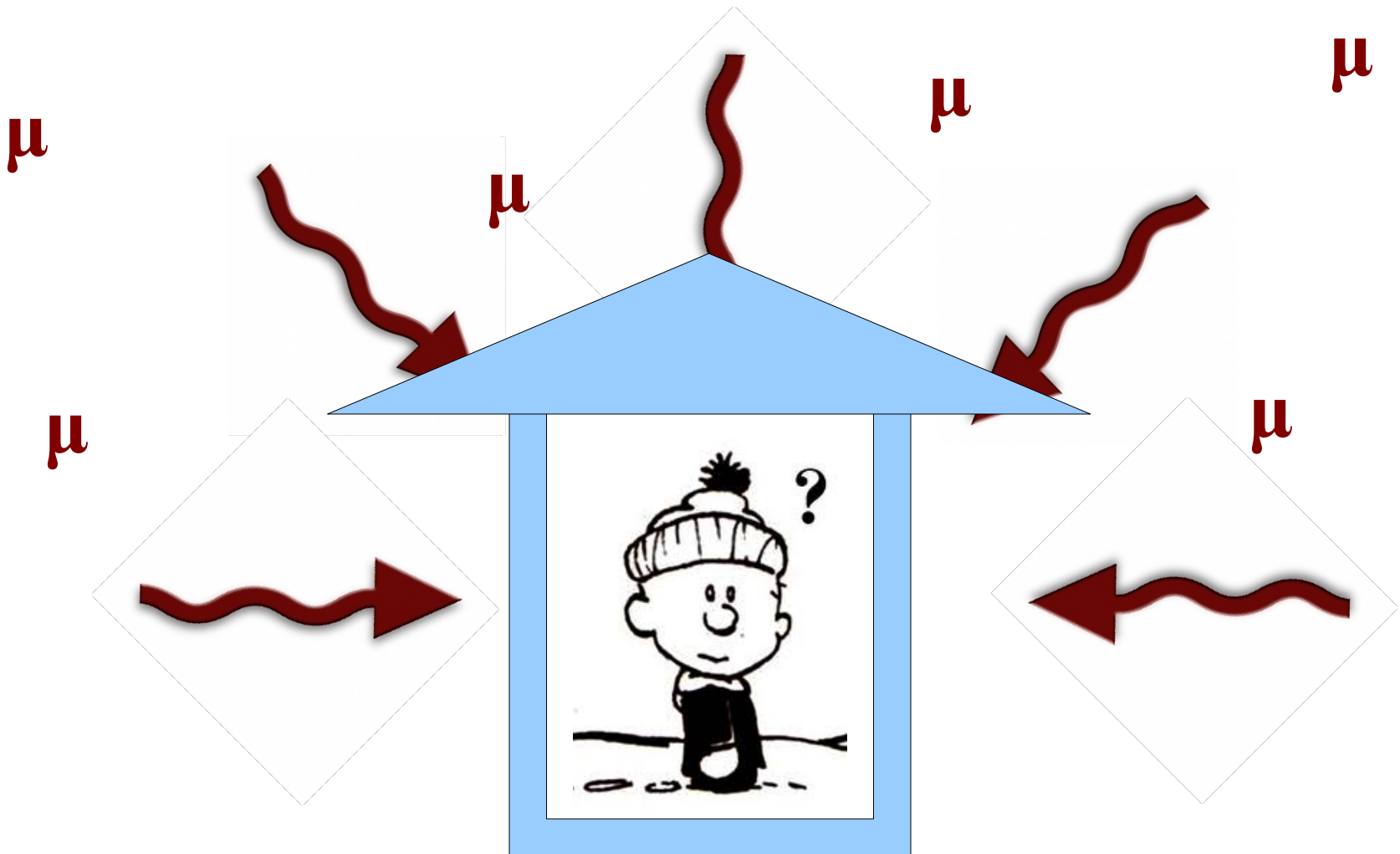
Abb.14: Flugbahn der Myonen in der Atmosphäre



Untersuchungsmöglichkeiten



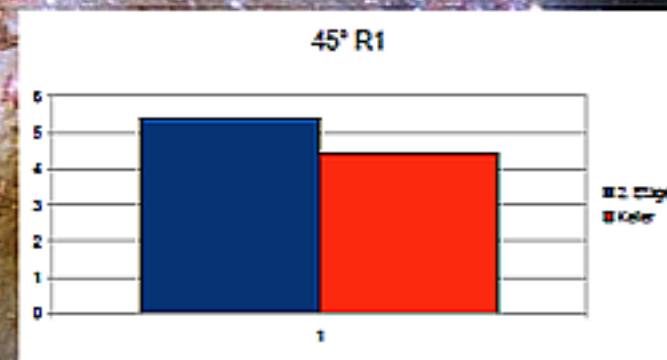
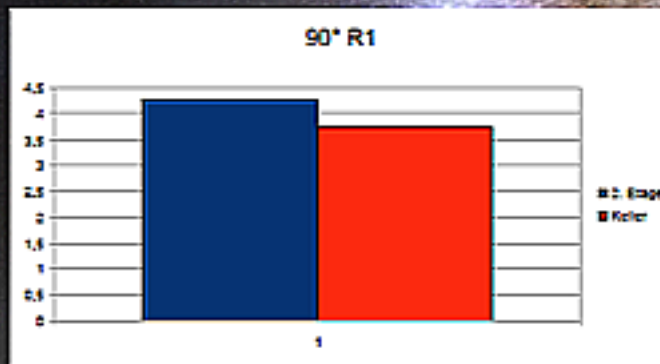
Können Myonen durch Beton gestoppt werden?



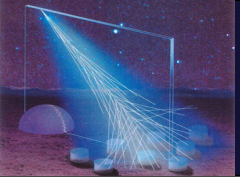


Einfluss vom umgebenden Material

Ergebnis Schülerarbeit



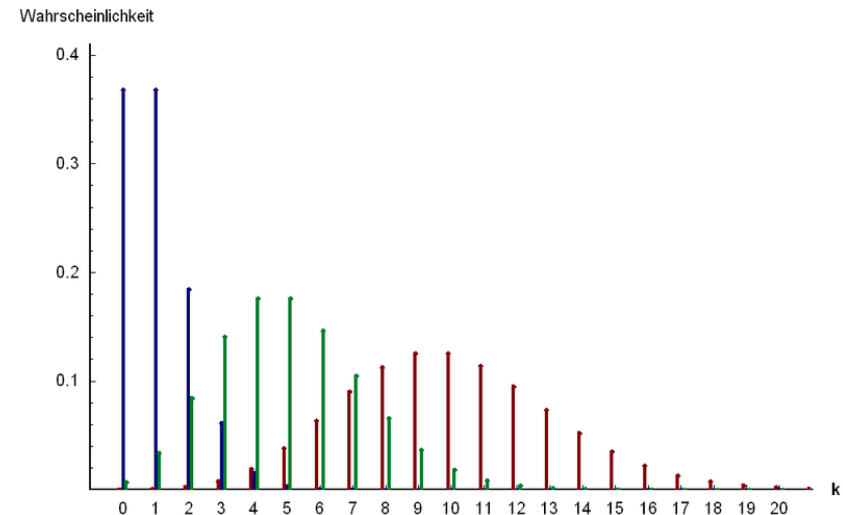
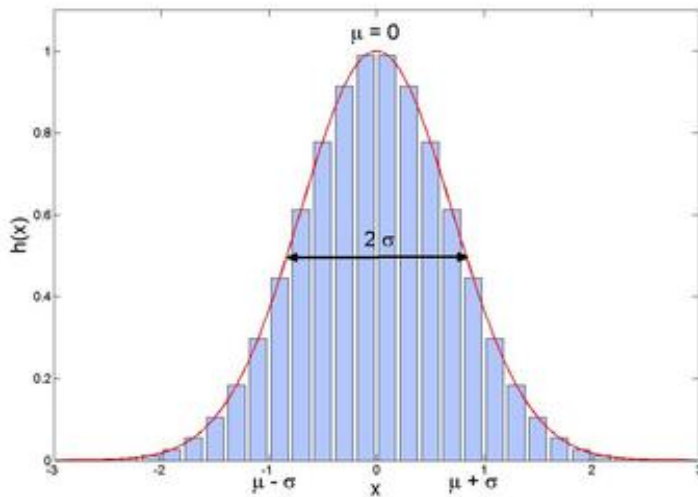
- Die Teilchen werden im Keller durch die Wände, Böden etc. abgeschirmt. Dadurch ist die Rate geringer als in der 2. Etage.



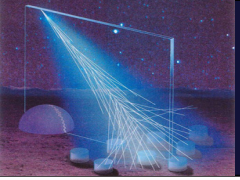
Untersuchungsmöglichkeiten



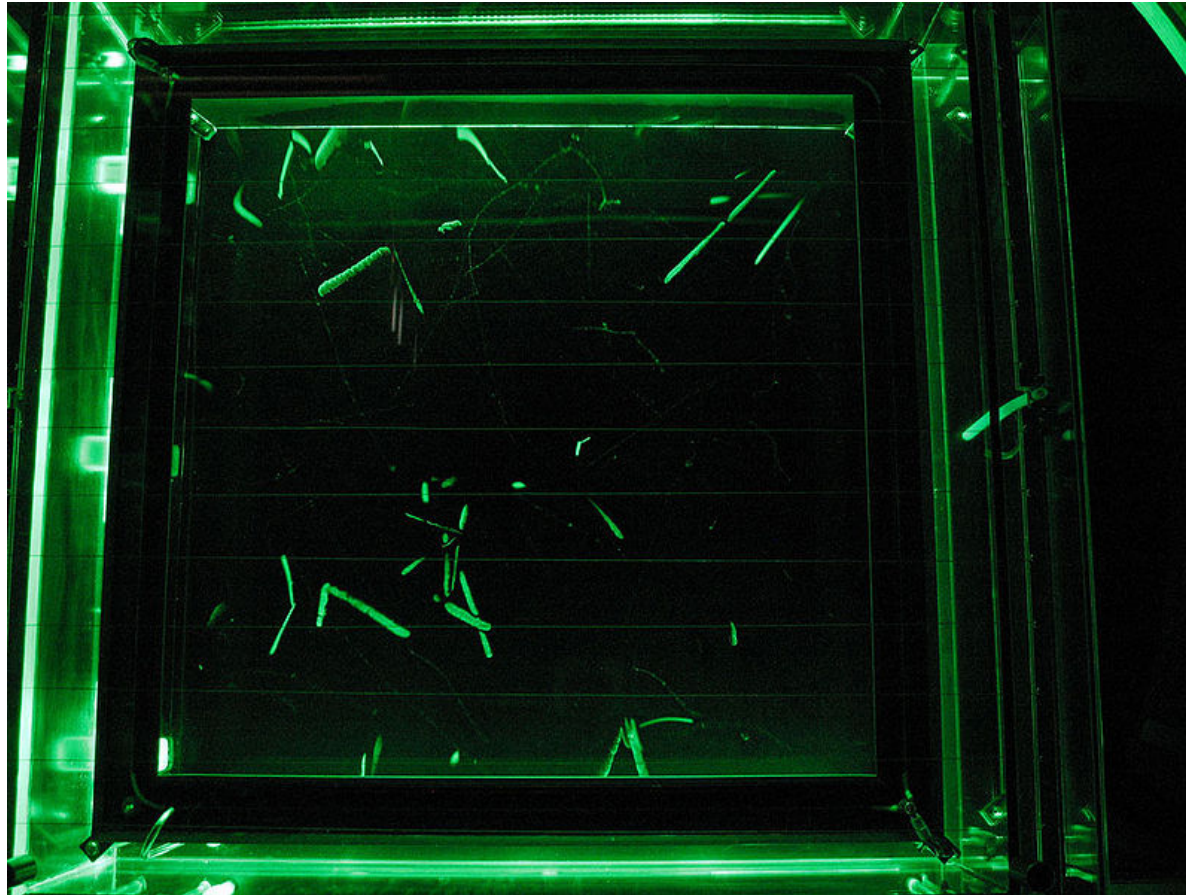
Untersuchung	Auswertung
Ratenmessung in Abhängigkeit von der Messzeit	<ul style="list-style-type: none">· Schwankung Rate mit Messzeit· mittlere Rate und Standardabweichung· Verteilung der Messwerte: Gauss-Verteilung oder Poisson-Verteilung· relativer Fehler einer Messung und nötige Messzeit



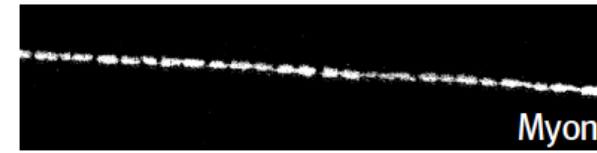
Untersuchungsmöglichkeiten



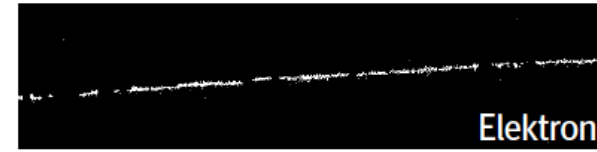
Welche Teilchen verursachen welche Spuren?



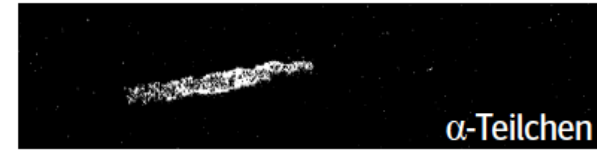
DESY Nebelkammer



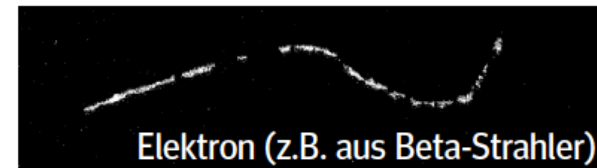
Myon



Elektron



α -Teilchen



Elektron (z.B. aus Beta-Strahler)

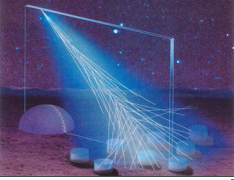


Photoelektronen



e^-
Myon-Zerfall

© Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



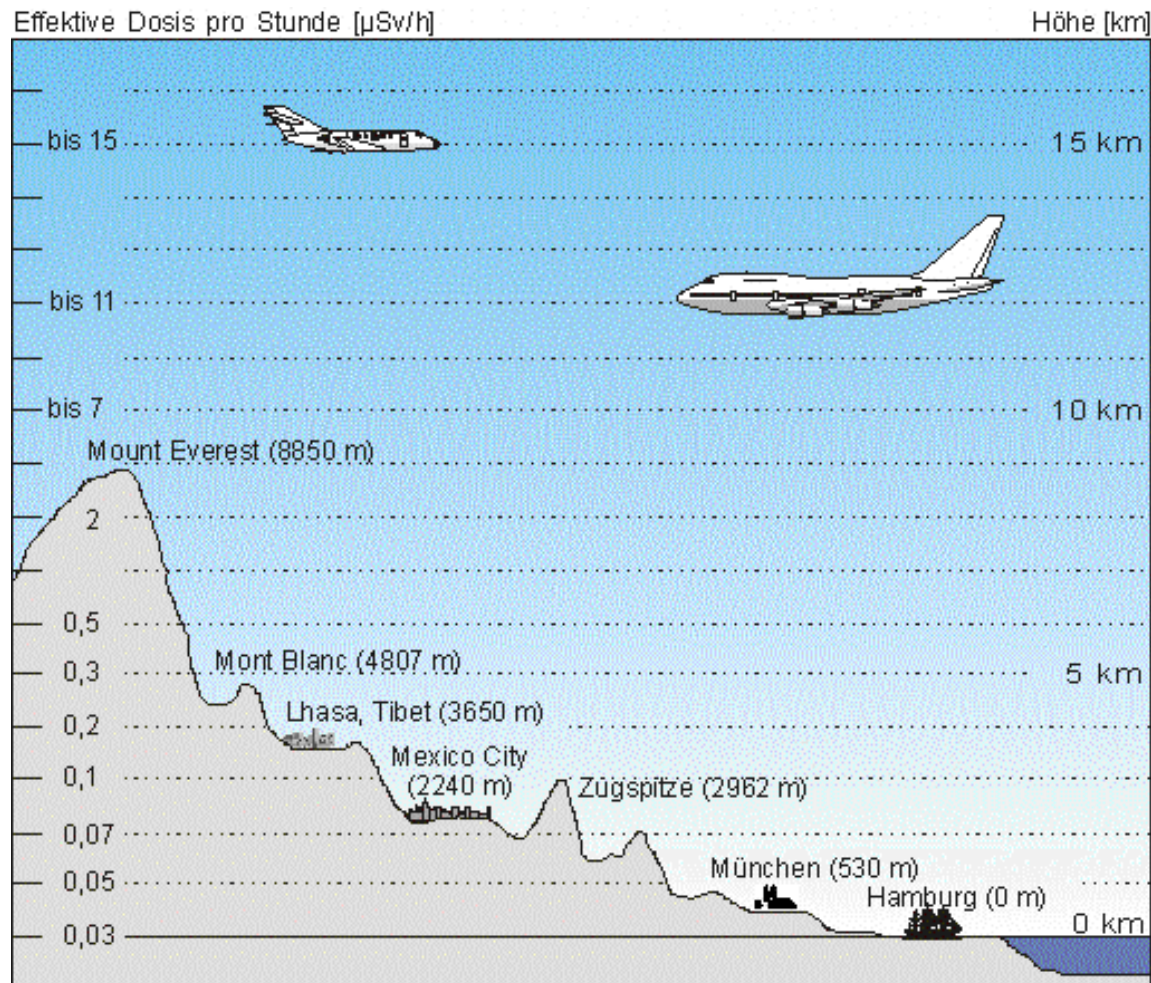
Recherche Möglichkeiten



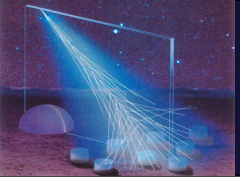
Wie gefährlich ist die kosmische Strahlung?



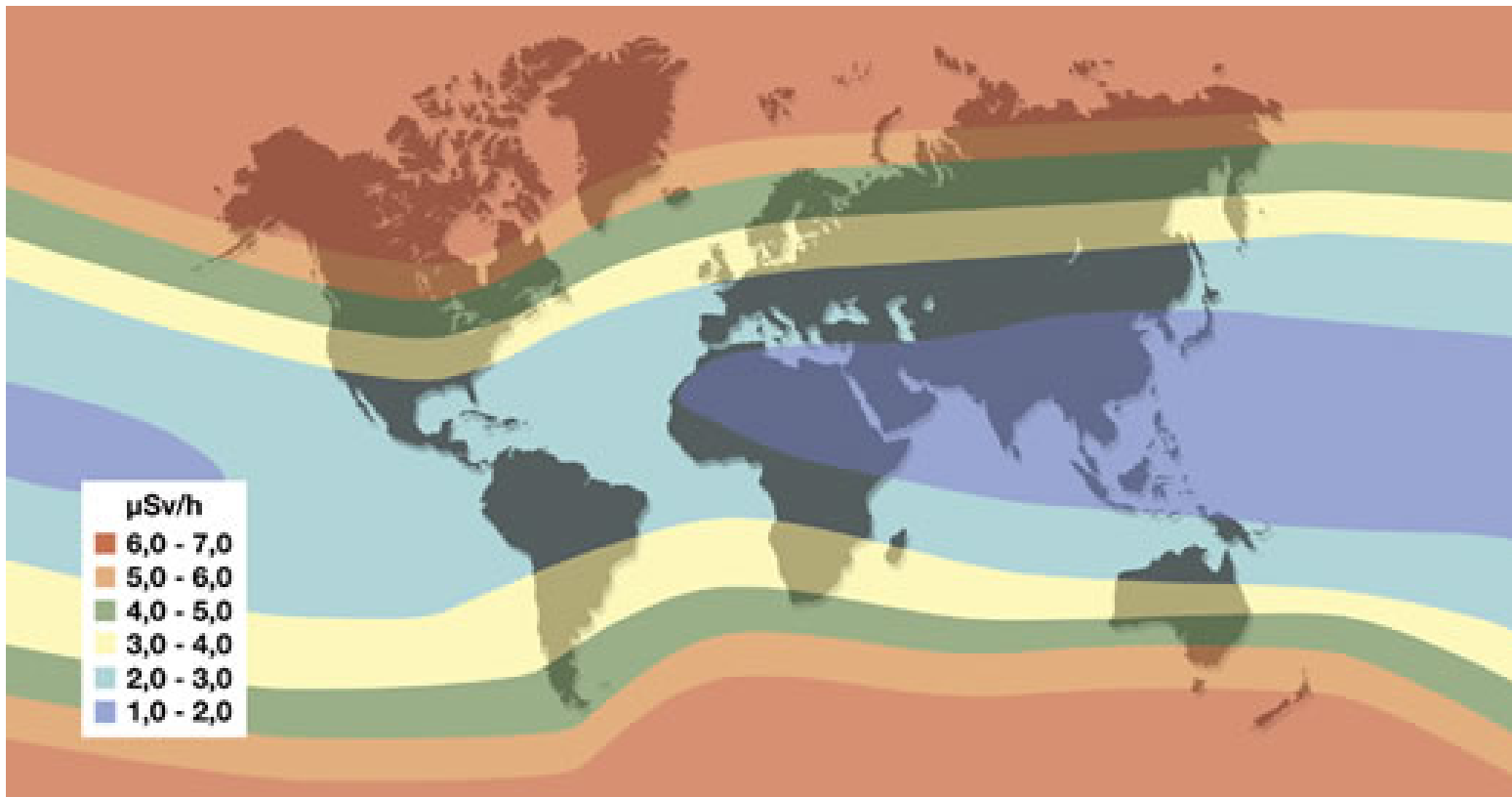
Höhere Strahlenbelastung in größeren Höhen



Quelle: <http://www.bfs.de>



Geringere Strahlenbelastung in Äquatornähe

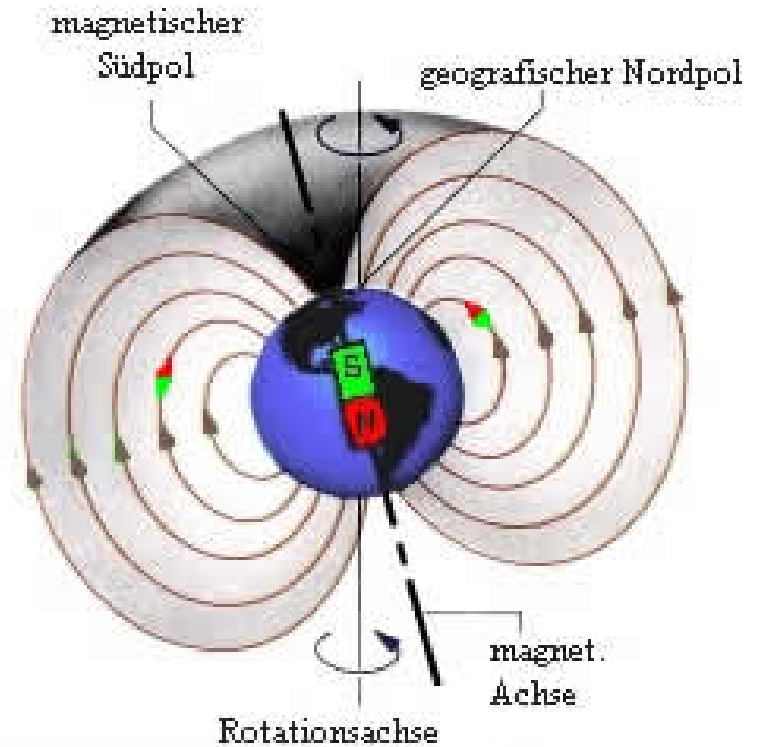
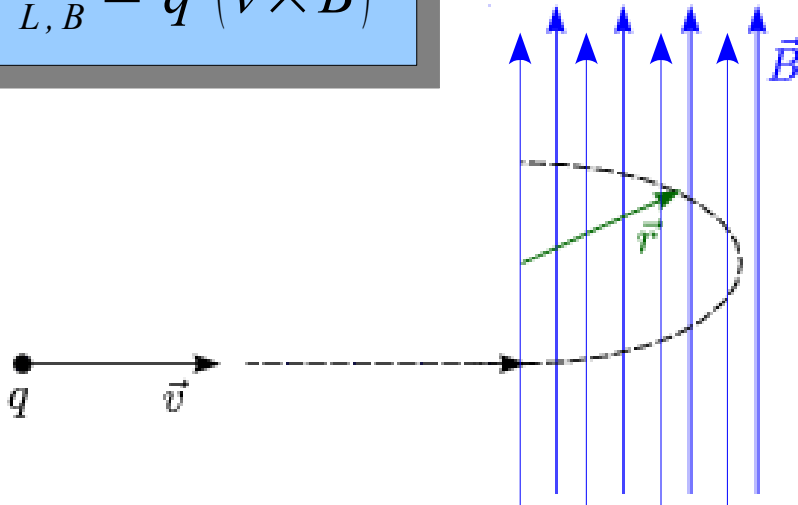


Quelle: <http://www.wissensnetz.org>



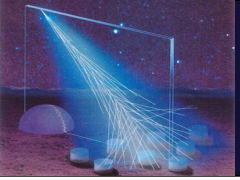
Das Magnetfeld der Erde als Regenschirm

$$\vec{F}_{L,B} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

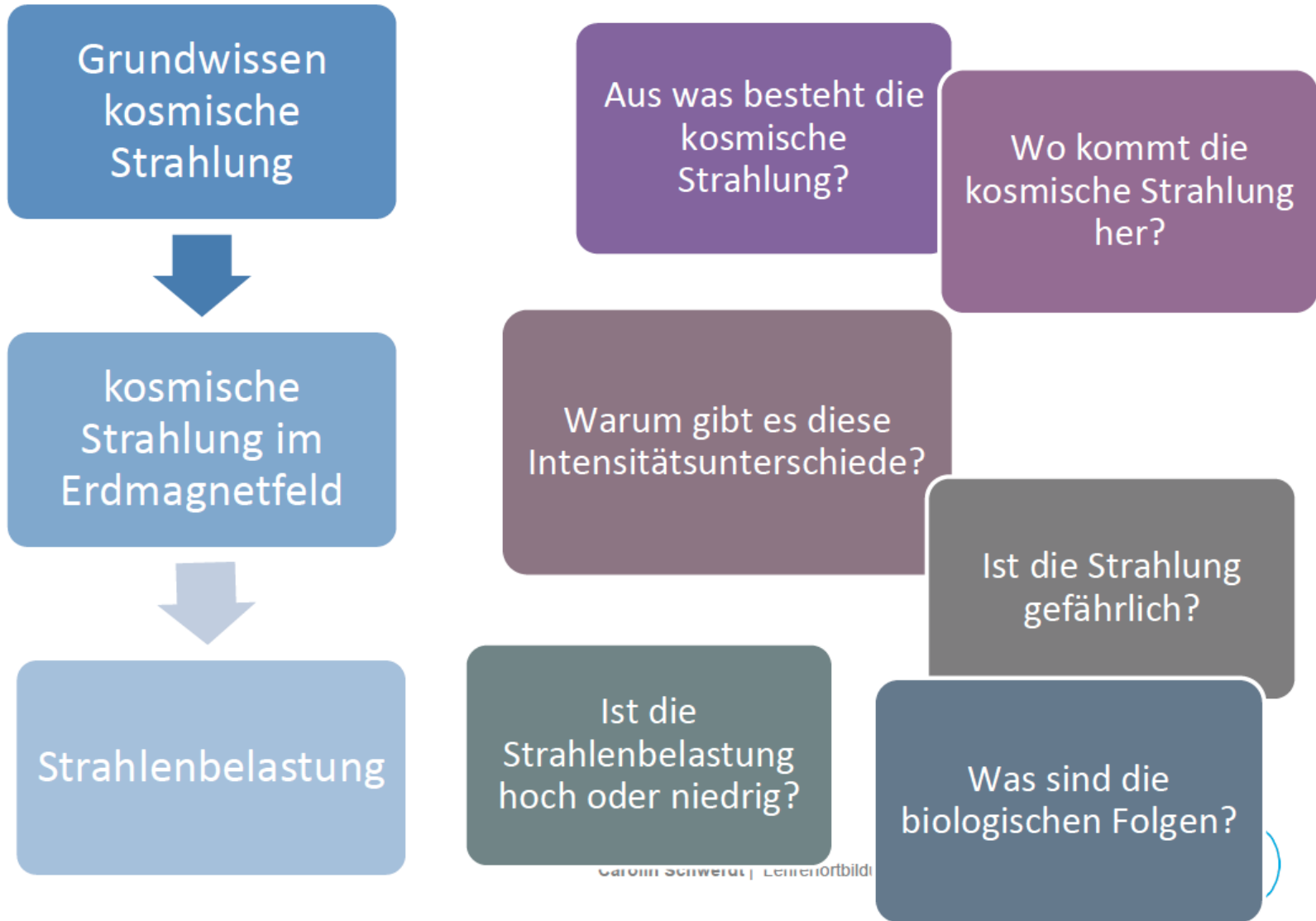


Quelle: <http://www.polarlichtinfo.de>

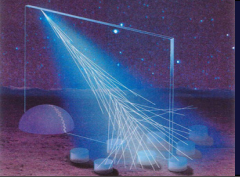
Die Abschirmung durch das Erdmagnetfeld ist am Effektivsten, wenn die Feldlinien parallel zur Erdoberfläche sind → Äquatornähe



Recherche Möglichkeiten



Carolin Schwerdt | Lehrerbildung



www.teilchenwelt.de

www.forum.teilchenwelt.de

http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische_teilchen

<http://astro.desy.de/>

www.cern.ch/icd2013

