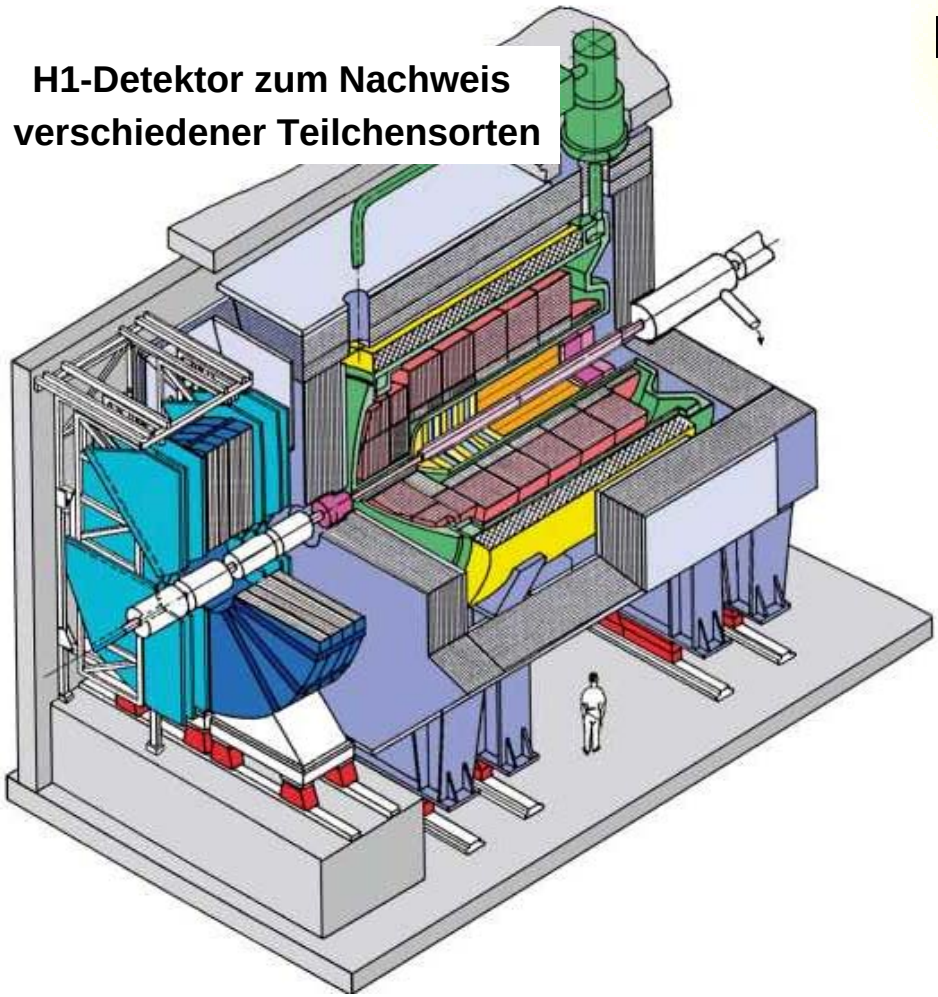
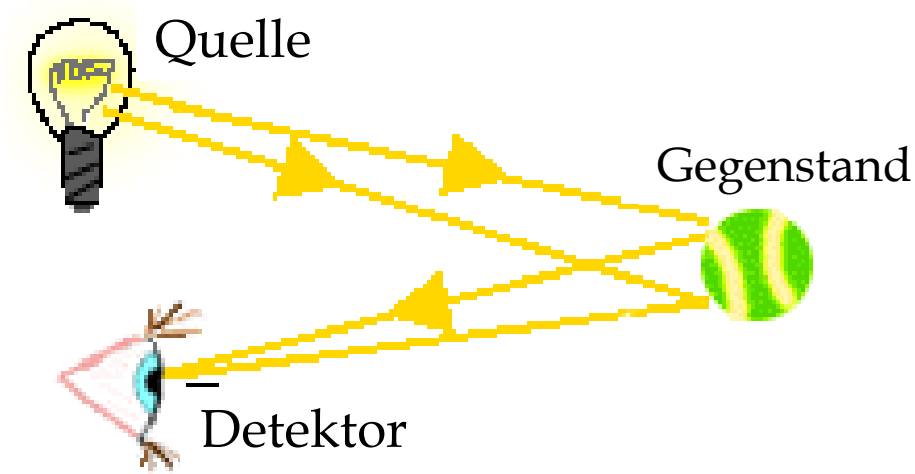
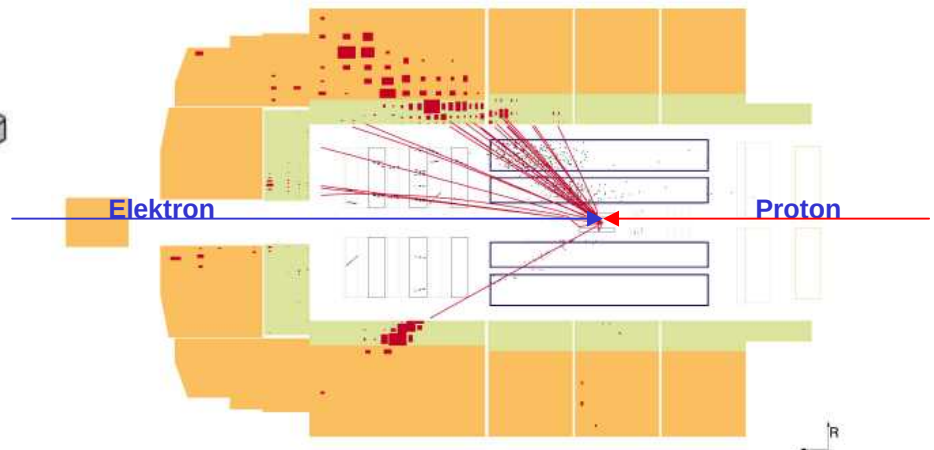
Detektoren
– die Augen der Teilchenphysiker

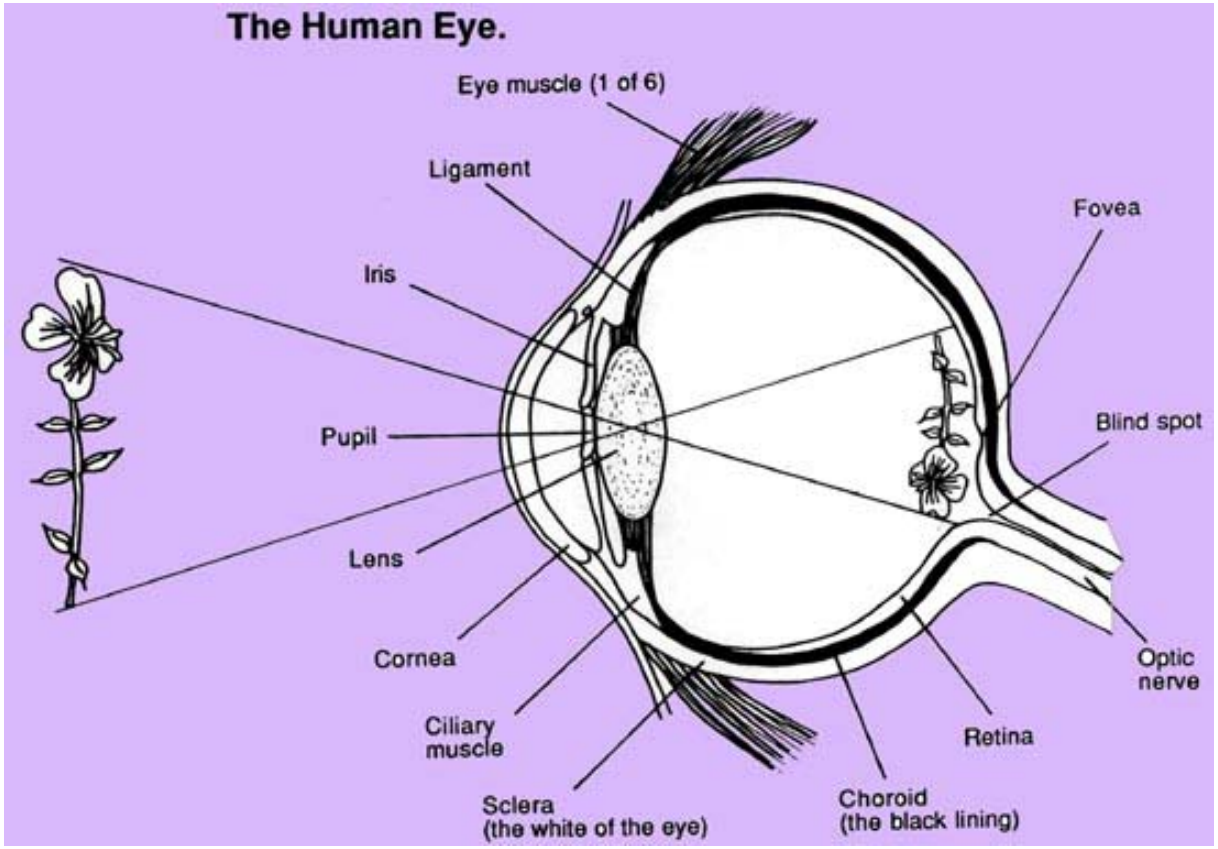
Hermann Kolanoski
Humboldt Universität zu Berlin and DESY Zeuthen

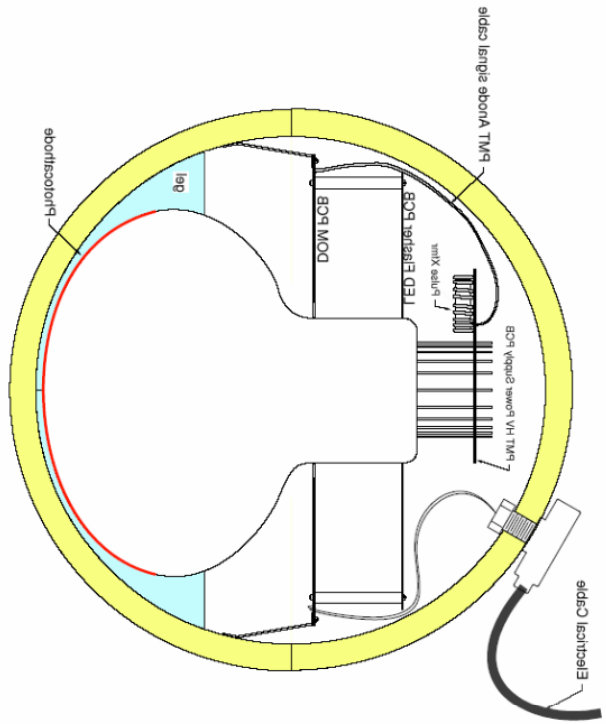






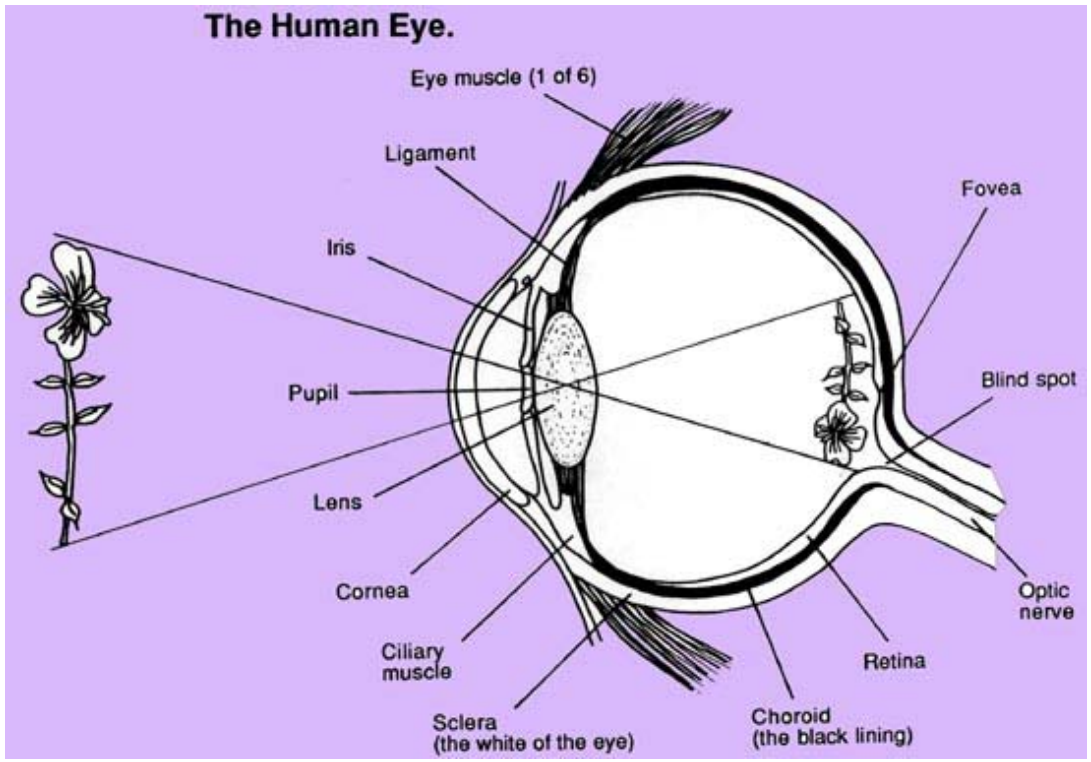
Zwei „Optische Module“

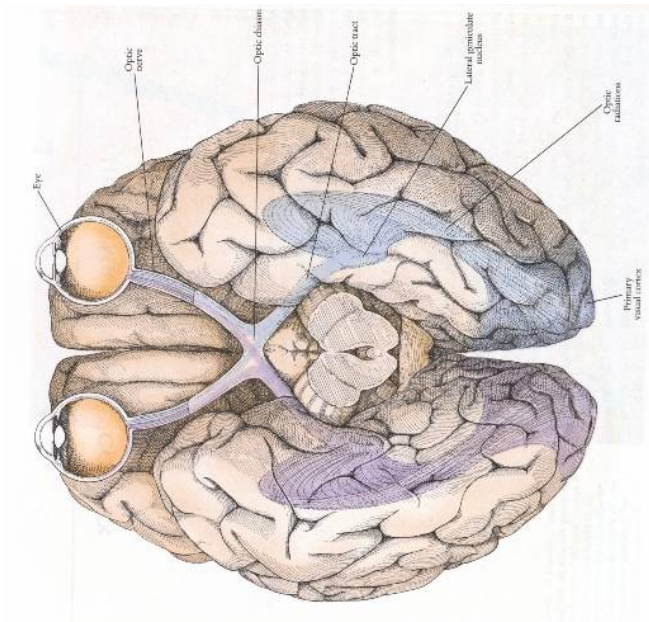




„Digital Optical Module“
von IceCube

Seh-**Apparat** verglichen mit einem Detektor

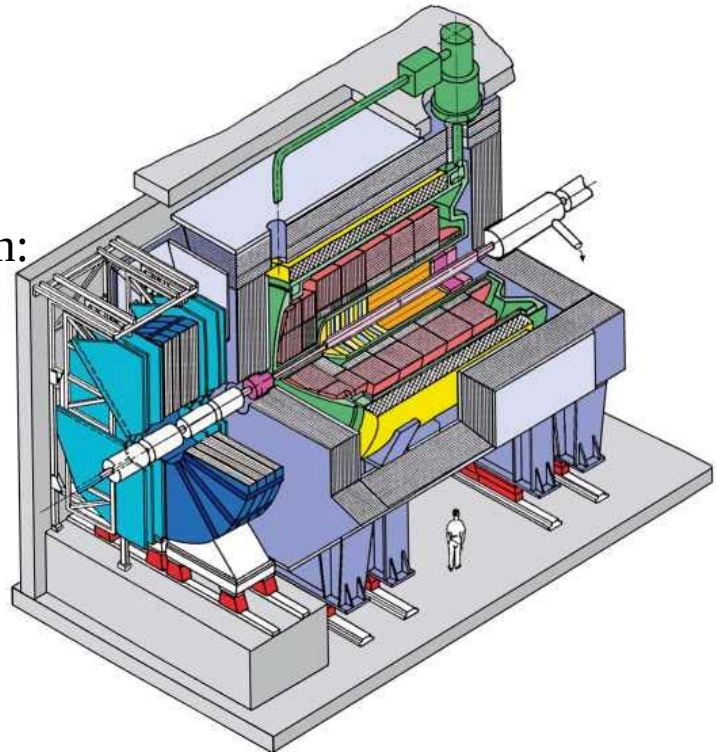




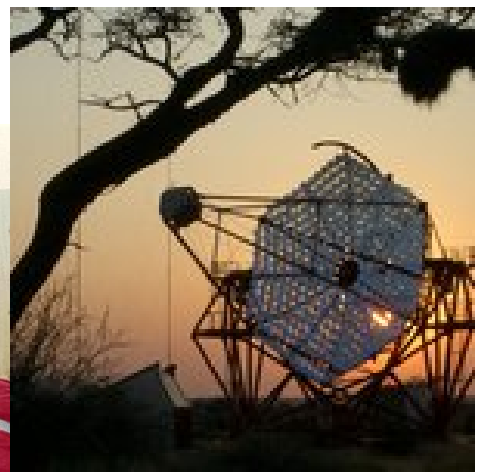
Strahlung	Fokussierung	Wechselwirkung mit Sensor	Signaltransfer	Datenverarbeitung
Licht	Linse	Netzhaut	Nerven	Gehirn
Teilchenstrahlen	Magnete	Detektor	Kabel	Computer

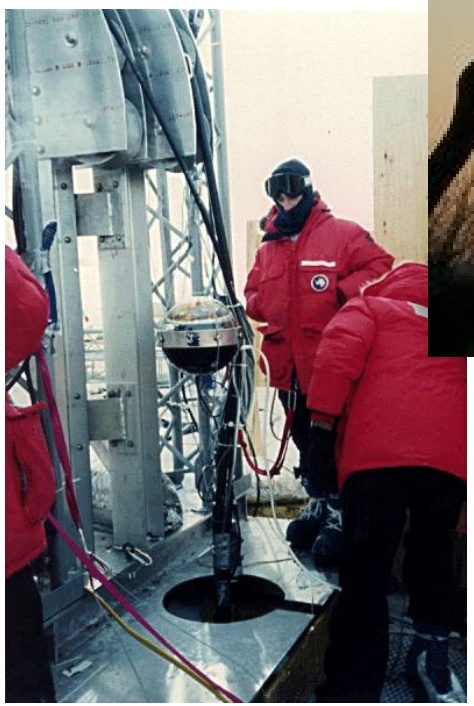
Einsatz von Teilchen- oder Strahlungsdetektoren

Experimente an Beschleunigern:



Experimente mit kosmischer Strahlung:





Nachweis von Strahlung
in Medizin, Geologie, Archeologie, …

(Teilchen-) Strahlung

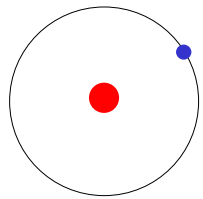
Strahlung = Teilchen: **Detektoren sehen meistens einzelne Teilchen**

Beispiele:

Geladene Teilchen:

- **Proton, Ladung +**
- **Elektron, Ladung –**

} Wasserstoffatom



- **Myonen μ^+ und μ^-** — Kosmische Strahlung

Neutrale Teilchen:

Photonen = „Licht“quant γ

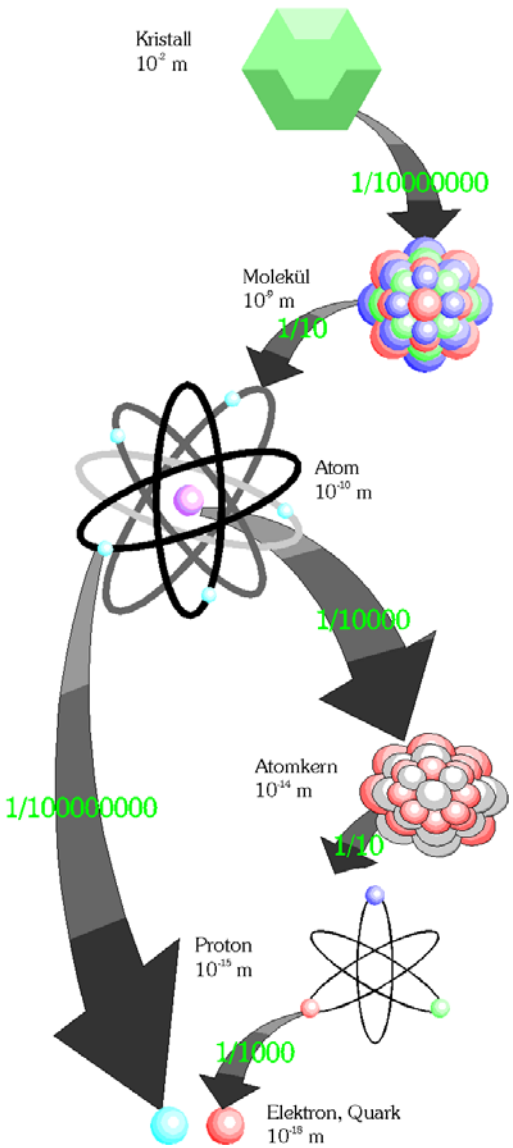
- Radiowellen
- Licht
- Röntgen-Strahlung
- γ-Strahlung

Energie

- **…**
- **…**
- **Neutrinos** — „Geisterteilchen“

Aufbau der Welt aus Teilchen

oder das **Nichts**, das durch **Kräfte** zusammenhält



Detektoren bestehen aus
Atomen, Molekülen, Kristallen.

Die **Wechselwirkung** der Teilchen
mit der Detektormaterie ist
notwendige Voraussetzung für deren Nachweis

Die kleinsten Teilchen haben
keine oder eine **sehr klein**e Ausdehnung!
Wie kann man sie **trotzdem sichtbar** machen??

Alle bekannten Teilchen
üben **Kräfte** auf ihre Umgebung aus
(die das nicht tun sind uns deshalb nicht bekannt)

Voraussetzung für den Nachweis:
Wechselwirkung der Teilchen mit Materie

Verschiedene Arten der Wechselwirkung: so: oder so:

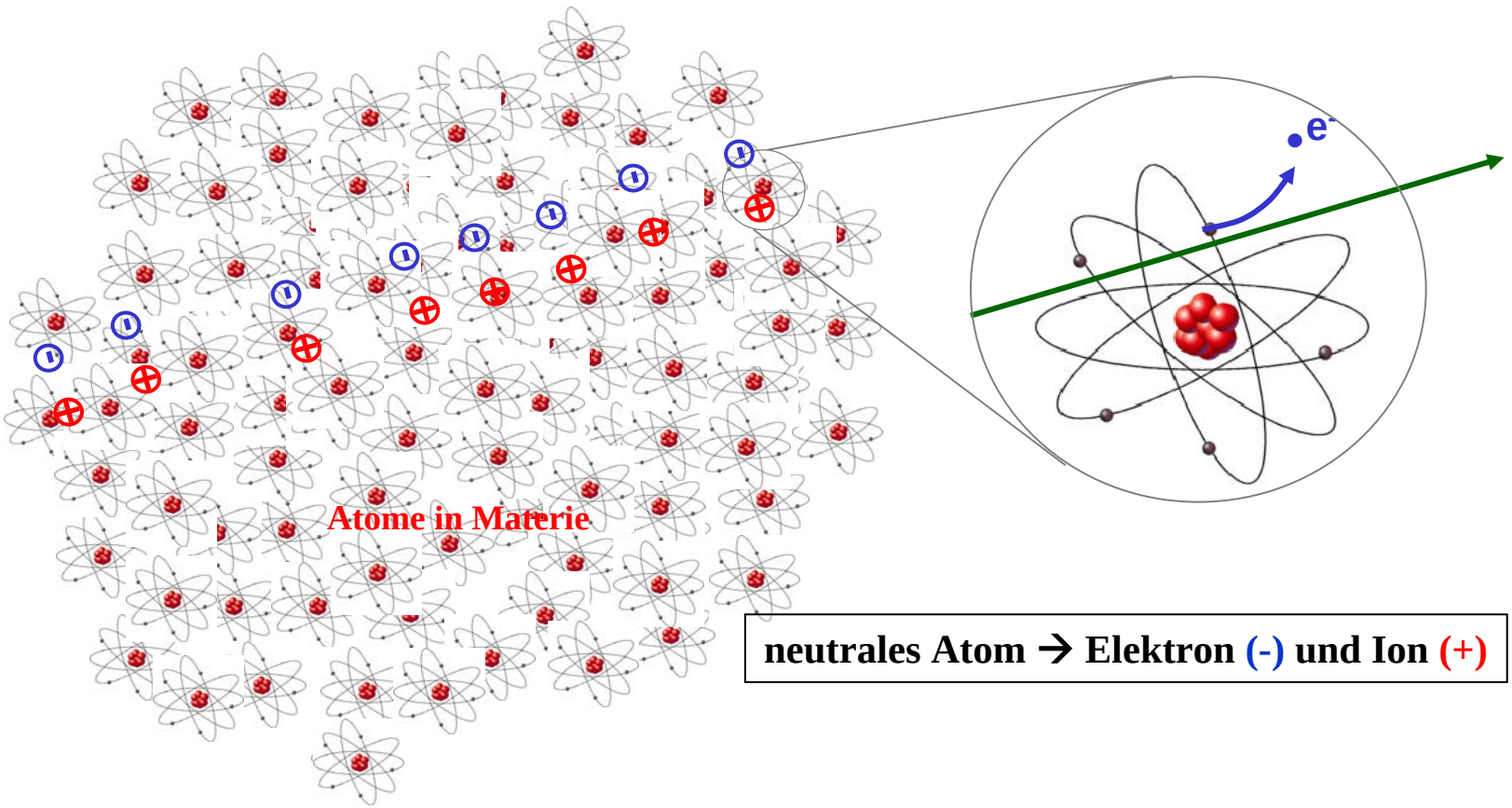
oder …

- **Schwerkraft:** gut für den Nachweis von Kometen, für Teilchen nicht sehr hilfreich
- **Elektromagnetisch:** **Ionisation,** **Cherenkov-,** Übergangsstrahlung, elektromagn. Schauer ($e^{\pm}$, γ)
- **Stark:** hadronische Schauer, Kern-WW (Neutron-Nachweis)
- **Schwach:** Neutrino-Nachweis (inverser β-Zerfall)

← am häufigsten für Detektoren genutzt

← Wichtig für Zeuthen: AMANDA/IceCube

Ionisation: Erzeugung elektrischer Ladungen in Material

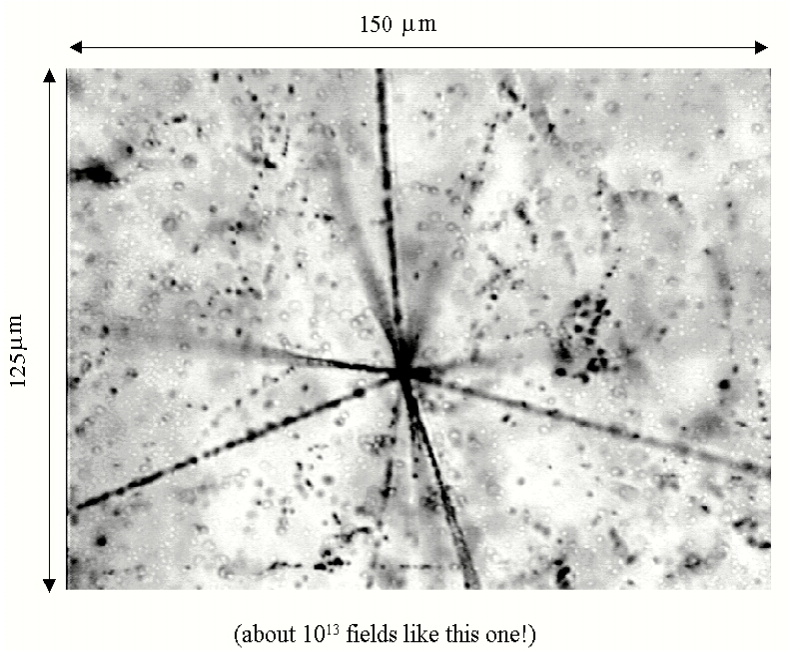


neutrales Atom → Elektron (-) und Ion (+)

Beispiel: ein Teilchen erzeugt etwa 100 Ionen pro 1 cm in Argon ← Driftkammern
und etwa 25000 Ionen pro 300 μm in Silizium ← Si-Detektoren

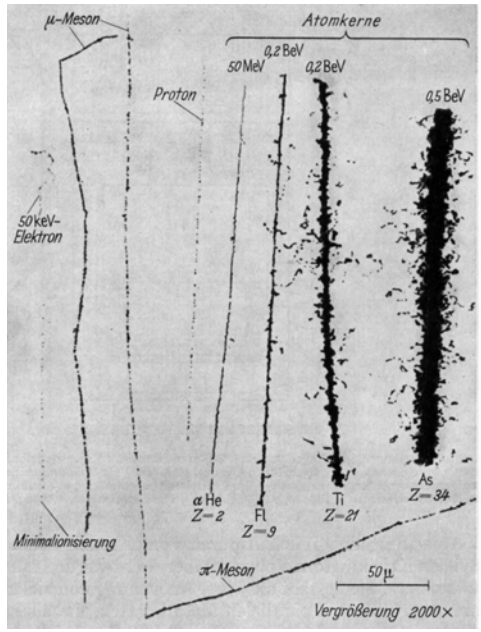
Ionisationsspuren sichtbar machen: Photoemulsion

Schwärzung einer Photoemulsion



Ortsgenauigkeit ~1 µm

(der ungeschlagene Rekord)

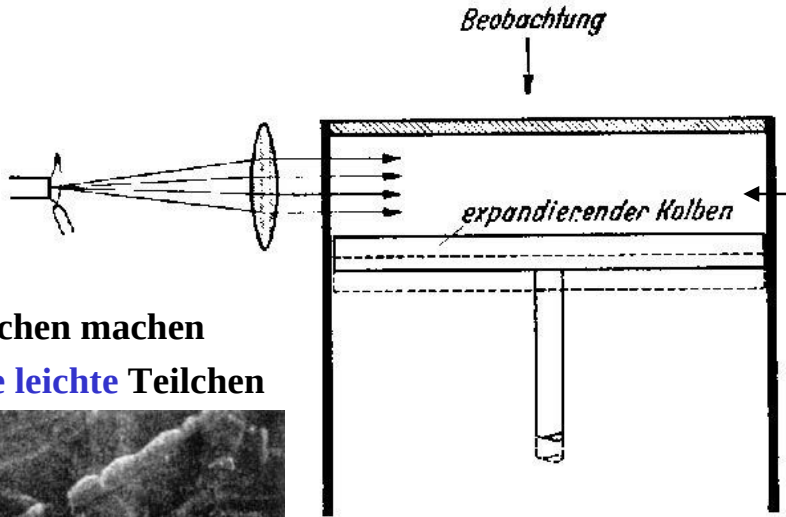


Langsame schwere Teilchen machen mehr Ionisation als schnelle leichte Teilchen

Mikroskopische Vermessung der Spuren

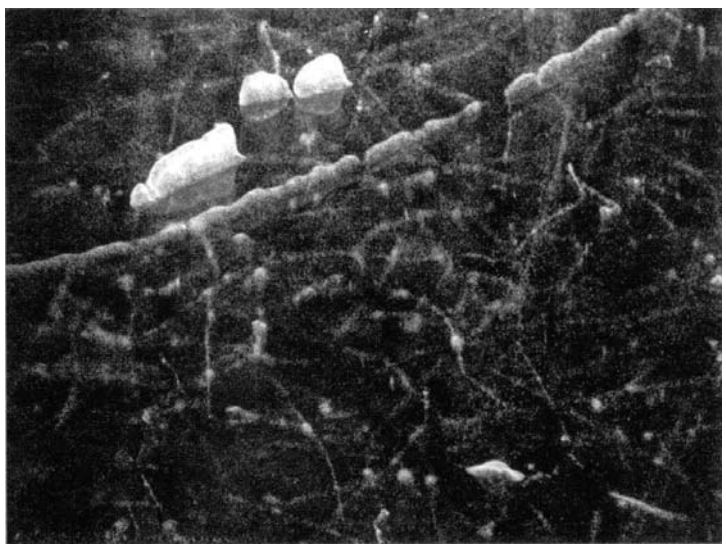
Ionisationsspuren sichtbar machen:
Nebelkammer

Ionen als Kondensations- oder Verdampfungskeime: Nebel- und Blasenkammer:



dampfgesättigt

Langsame schwere Teilchen machen mehr Ionisation als schnelle leichte Teilchen

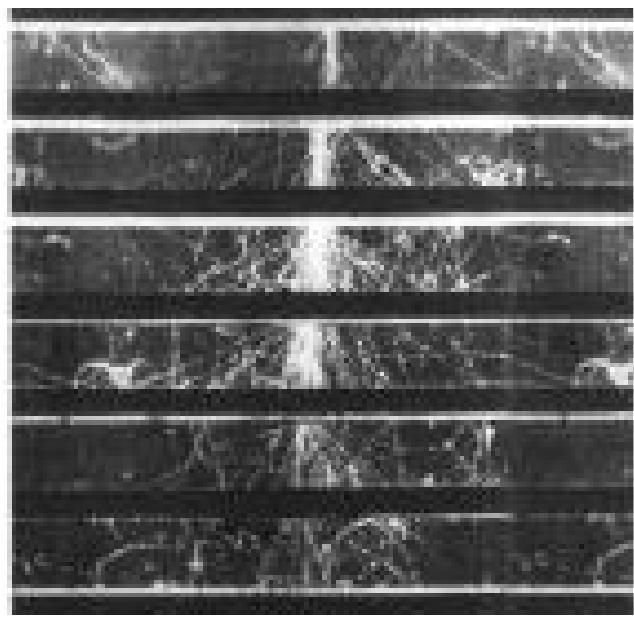


Zeuthener Nebelkammer

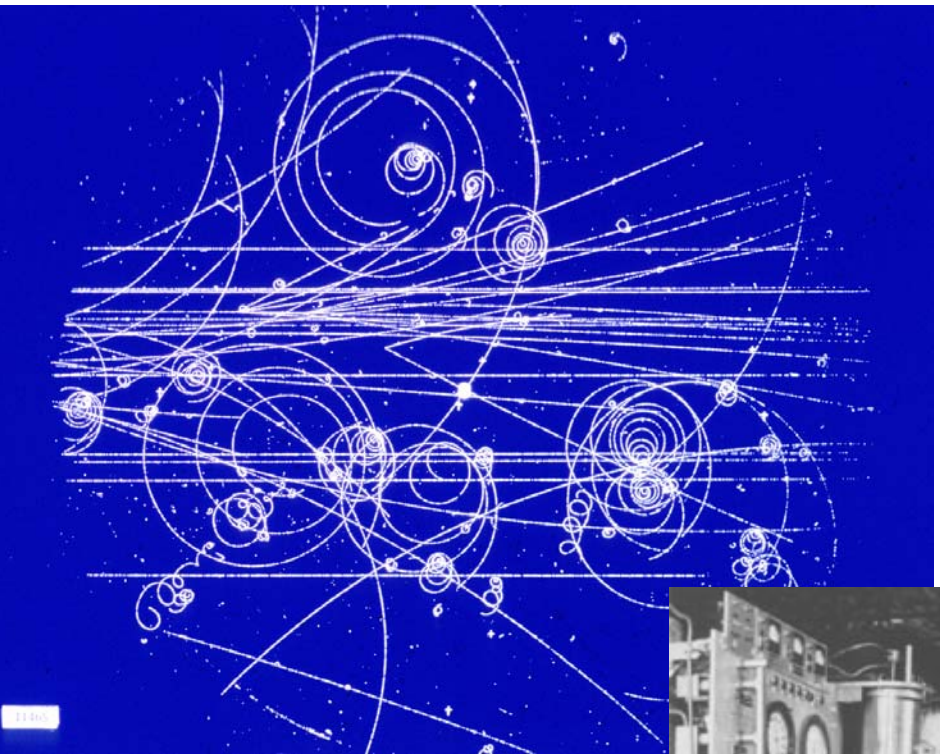
Schauerdetektoren oder Kalorimeter zur Energiemessung

destruktiv!!

Elektronenschauer in einer Nebelkammer

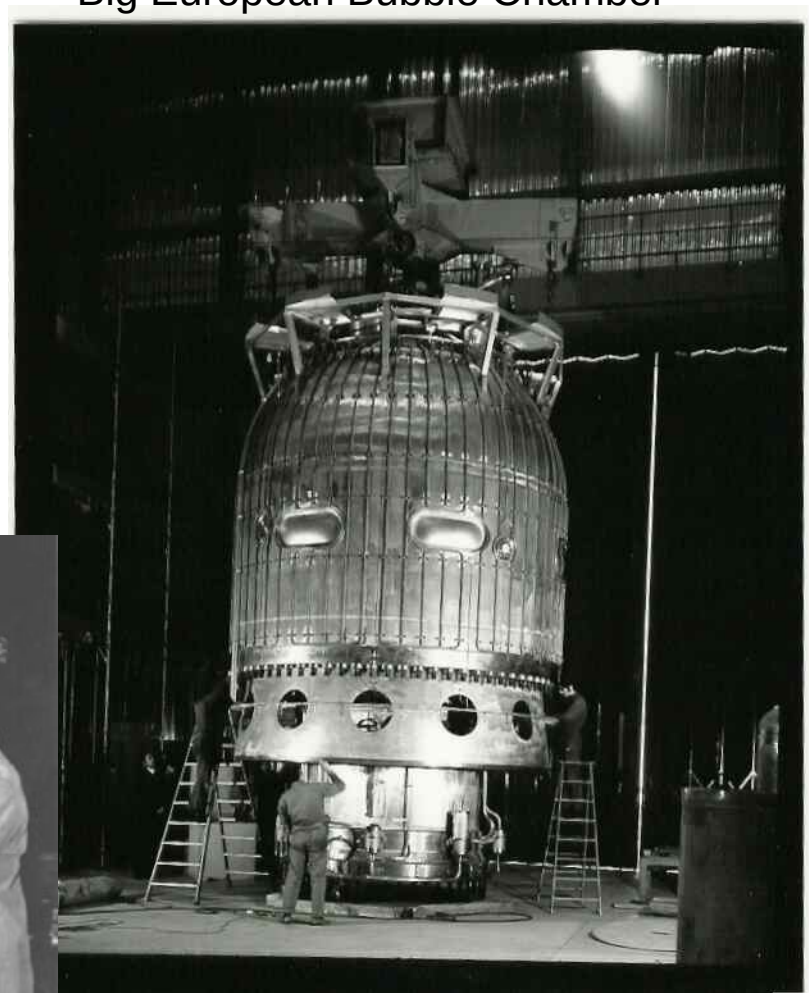


Ionisationsspuren sichtbar machen:
Blasenkammer



Spuren durch Magnetfeld gekrümmt

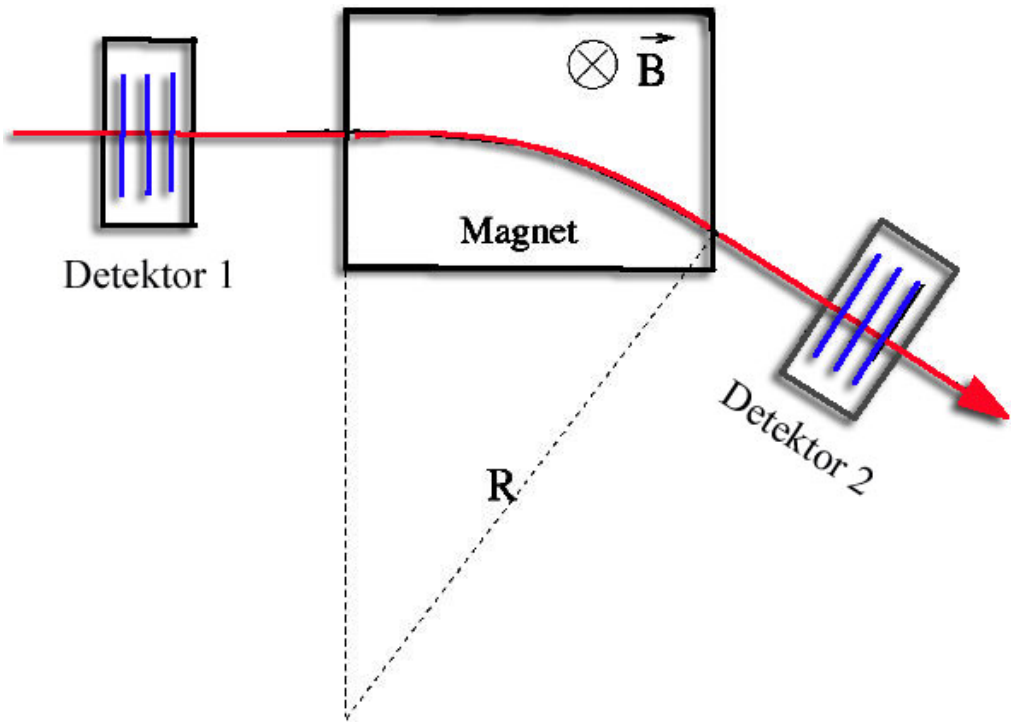
Big European Bubble Chamber



D.A.Glaser, Nobelpreis 1960

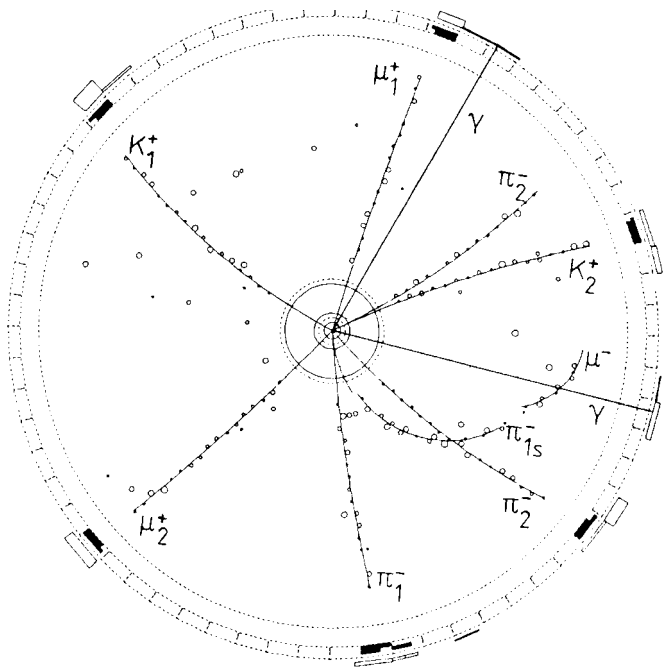
Intermezzo: Impulsmessung

Impuls = Masse × Geschwindigkeit

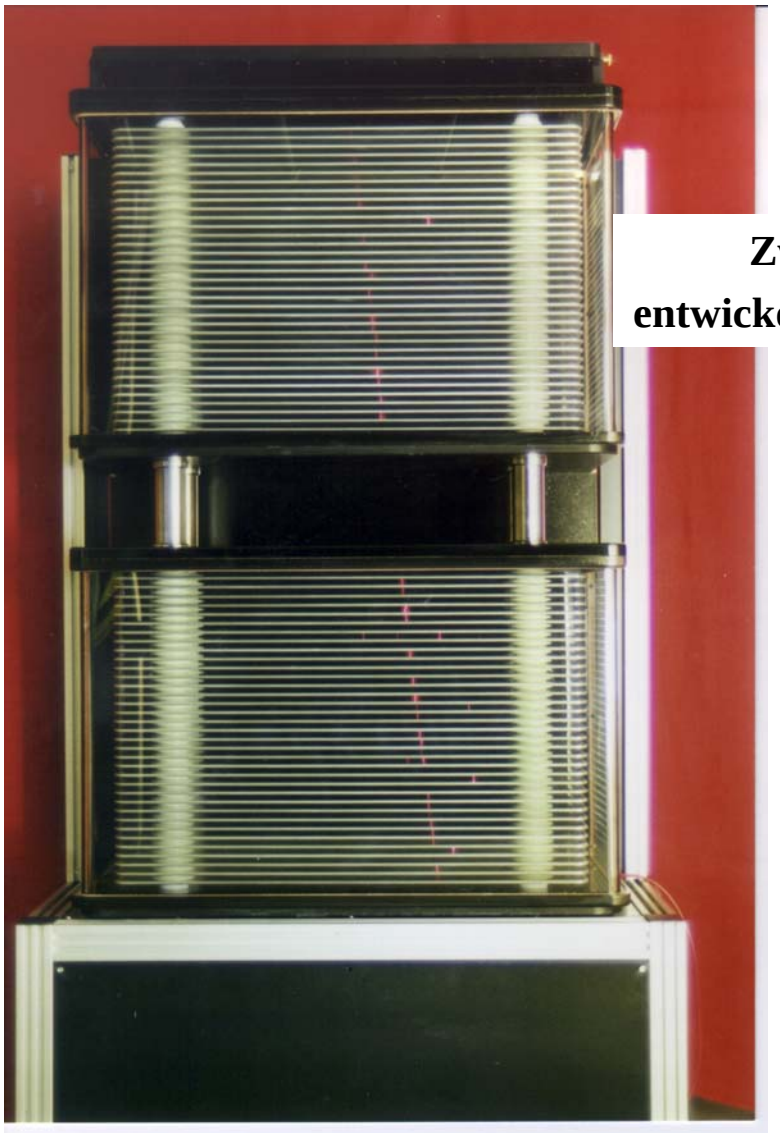


$$R[\mathrm{m}] = \frac{p_T[\mathrm{GeV}]}{0.3 \cdot B[\mathrm{T}]}$$

Häufig auch Detektoren im Magnetfeld



Ionisationsspuren sichtbar machen:
Funkenkammer



Zwischen 2 Platten mit Hochspannung
entwickelt sich ein Blitz entlang dem Ionisationsweg

Probleme für moderne Detektoren:

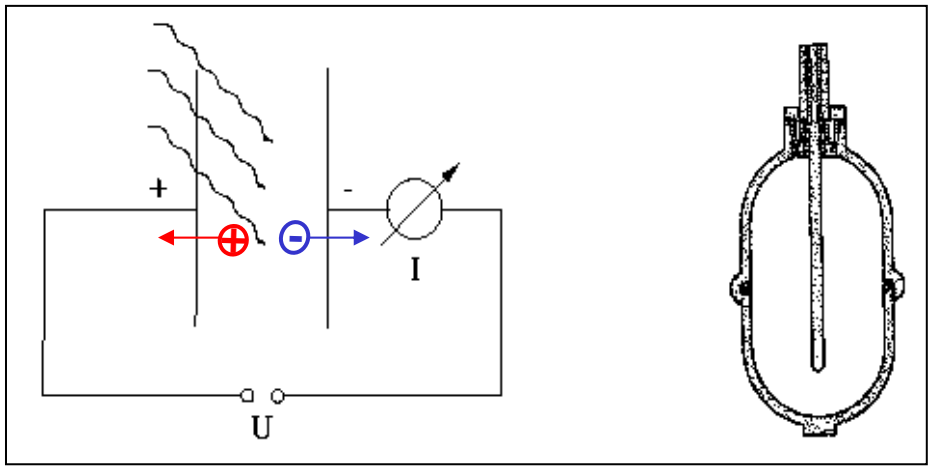
- **zu langsam**
- **braucht Trigger (**= schneller Auslöser, der Hochspannung auf die Platten legt)
- **Funke macht elektromagnetischen „Dreck“**
- **schwierig elektronisch auszulesen**

↓

Gilt auch für Emulsionen, Nebel- und Blasenkammern

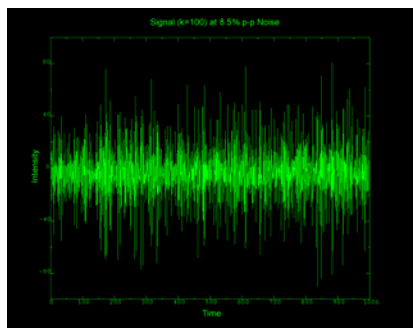
Elektronischer Nachweis von Ionisation: Ionisationskammer

Ladungssammlung ohne Verstärkung



Ionisation in einem Gasvolumen

I ~ Strahlendosis im Ionisationsvolumen pro Zeit

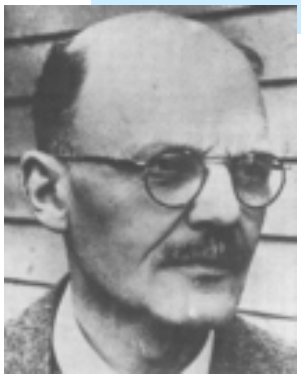


Unmöglich, so eine einzelne Ionisation nachzuweisen:

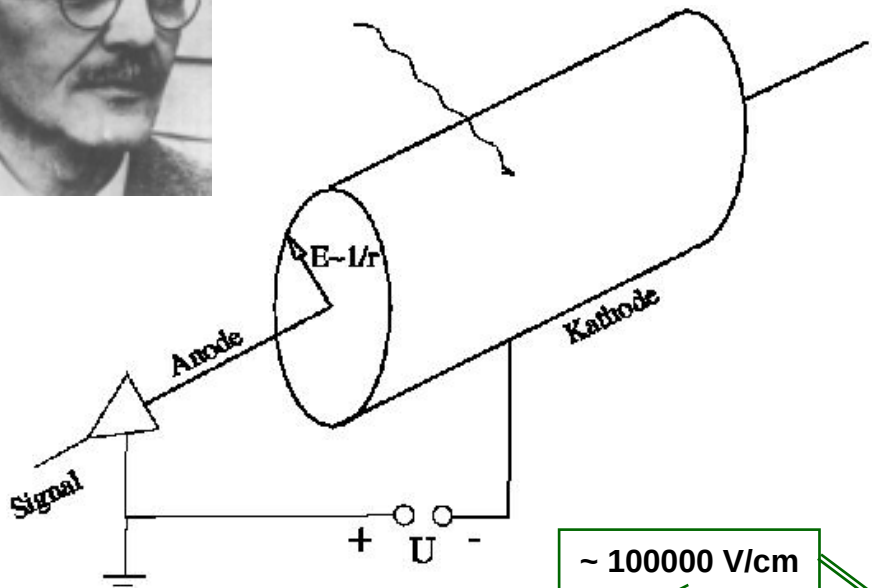
- **Elektronladung (= - Ionladung) = 10^{-19} Coulomb** (für 1 Nanoampere 10000 Ion./Sek.)
- **unserer Elektroniker brauchen mindestens 10^{-15} Coulomb (Femto-Coulomb)**

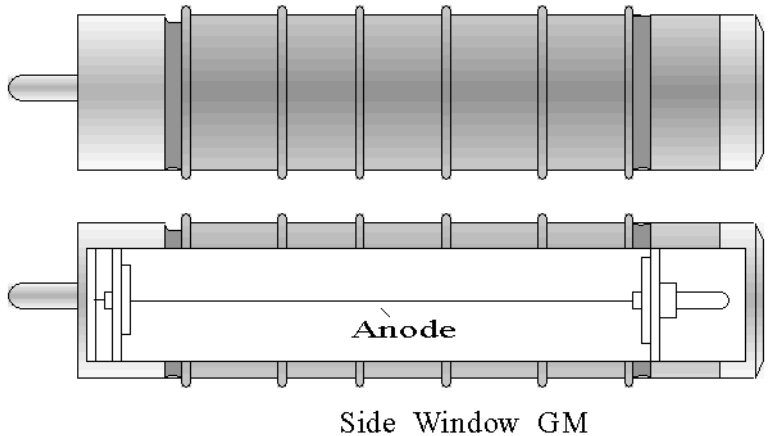
⇒ **wenn wir einzelne Ionisationen sehen wollen,**
brauchen wir eine min. 10000-fache Verstärkung, die das Rauschen nicht mitverstärkt

Das Prinzip der „Gasverstärkung“ Geiger-Müller-Zählrohr

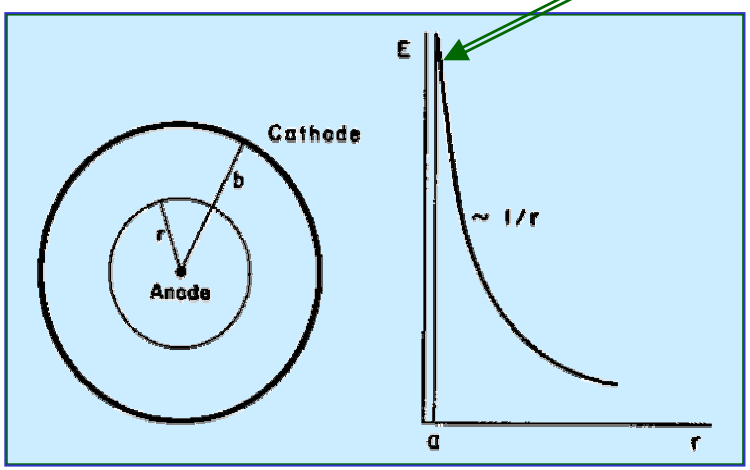


Geiger, Hans, (1882-1945)

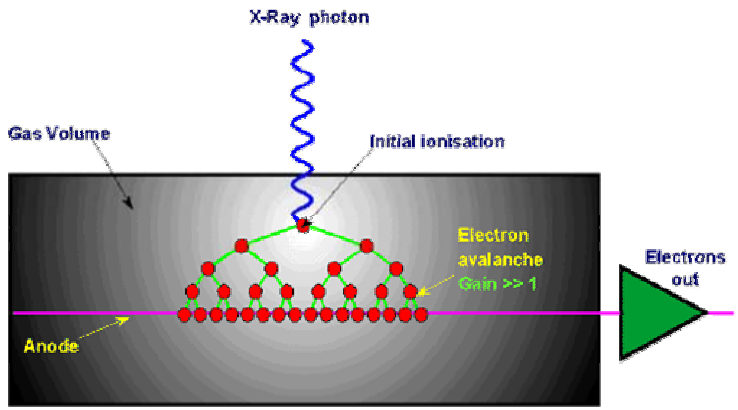




~ 100000 V/cm

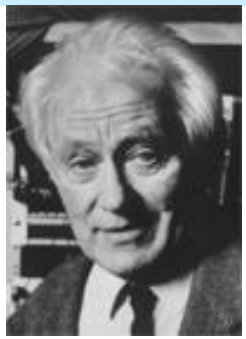


~ Ladungs-lawine am Draht

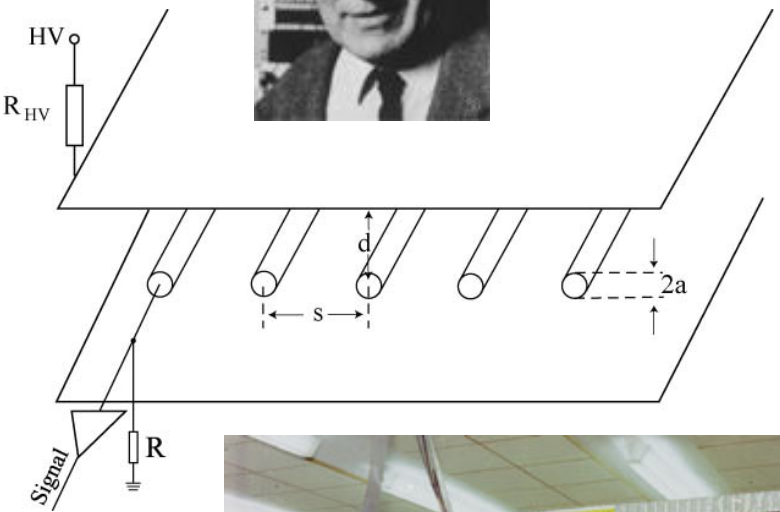


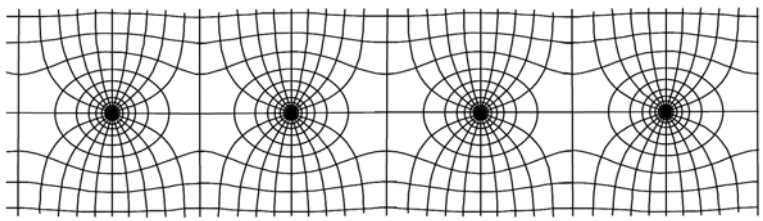
Elektronische Auslese!

Ortsbestimmung: Vieldrahtproportionalkammer (MWPC)



G.Charpak, Nobelpreis 1992

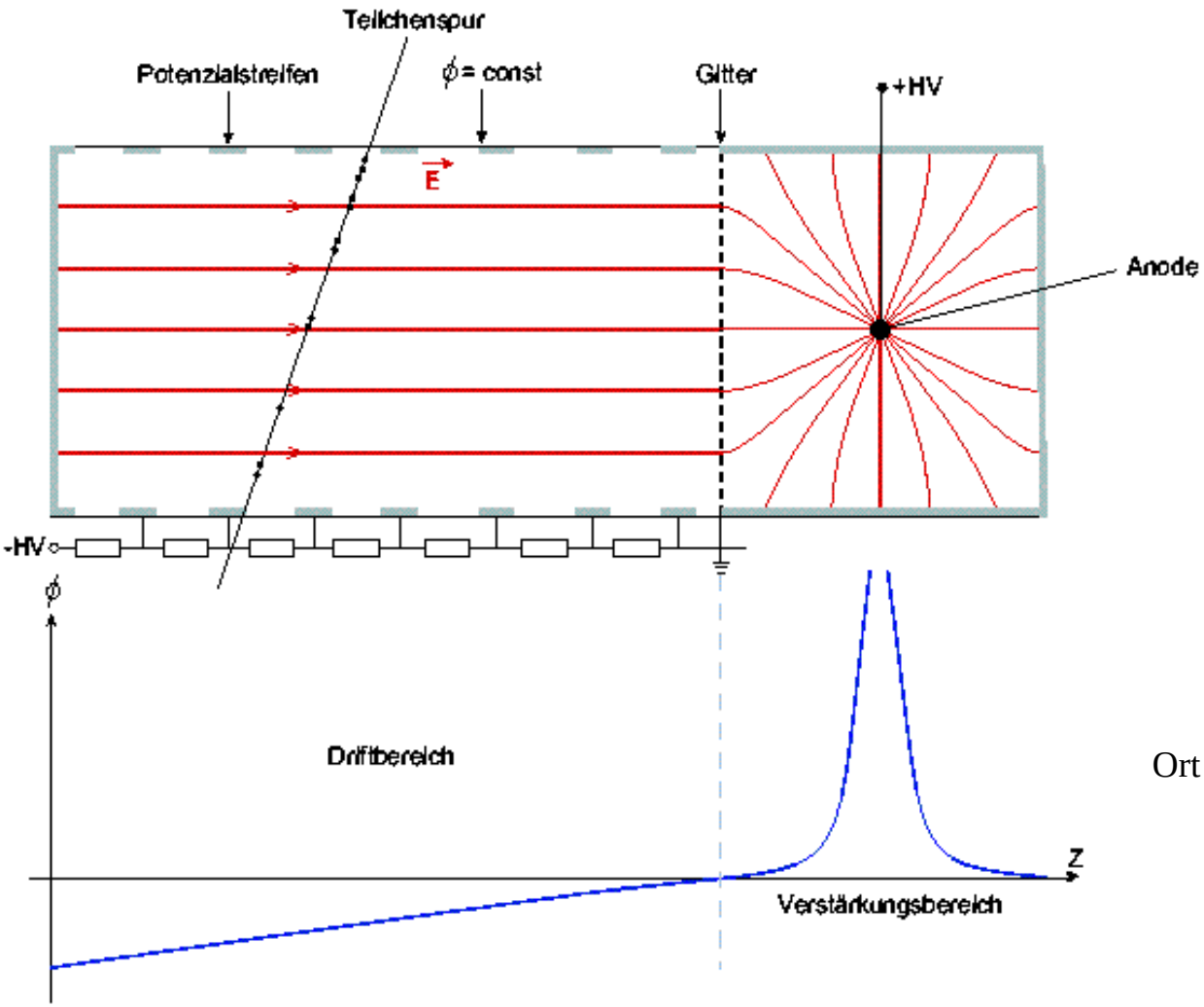




Elektronische Auslese!
Grosse Kanalzahlen möglich
durch integrierte Schaltungen

Noch bessere Ortsbestimmung: Driftkammern

(Walenta and Heintze 1971)



$$r(t) = w_{drift} \cdot t_{drift}$$

Ort = Driftgeschwindigkeit × Driftzeit

Etwa 100-200 μm genau

DC Zelltypen

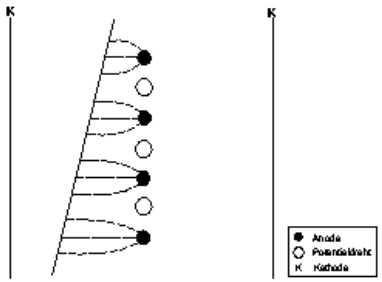
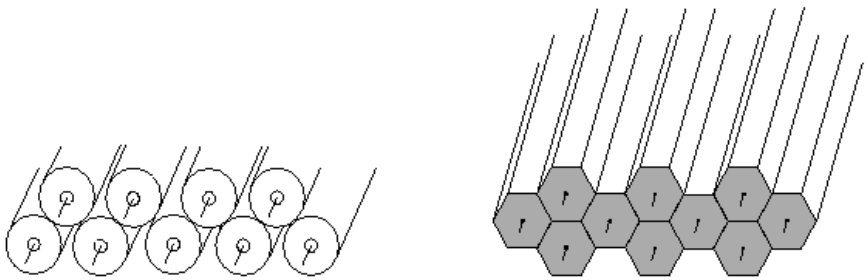


Abbildung 3.34: Driftzelle einer "Jet-Kammer": Die Anoden sind in der Mittelebene zwischen den Kathodenebenen angeordnet. Zur besseren Trennung der Driftwege sind zwischen die Anoden zusätzlich "Potenzialdrähte" gespannt.

Beispiel: HERA-B Outer Tracker



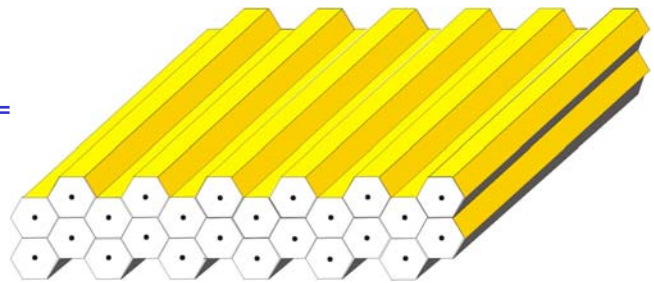


Abbildung 3.35: Querschnitt von runden ("straw") und sechseckigen ("honeycomb") Driftrohren.

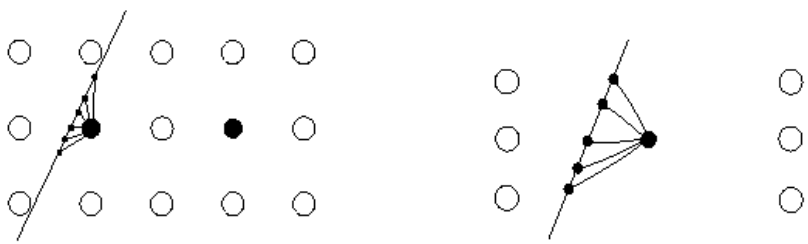
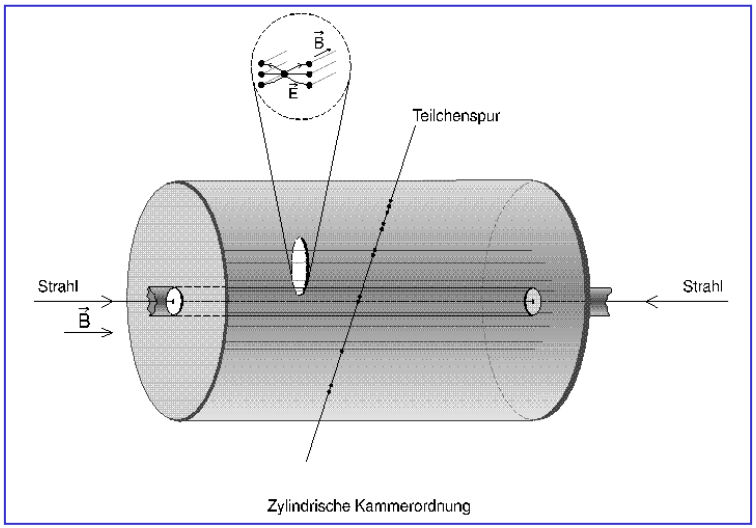
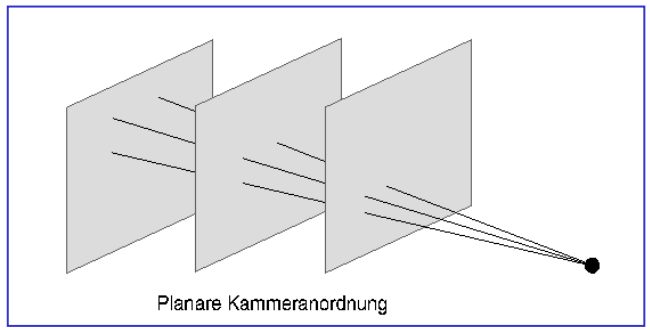


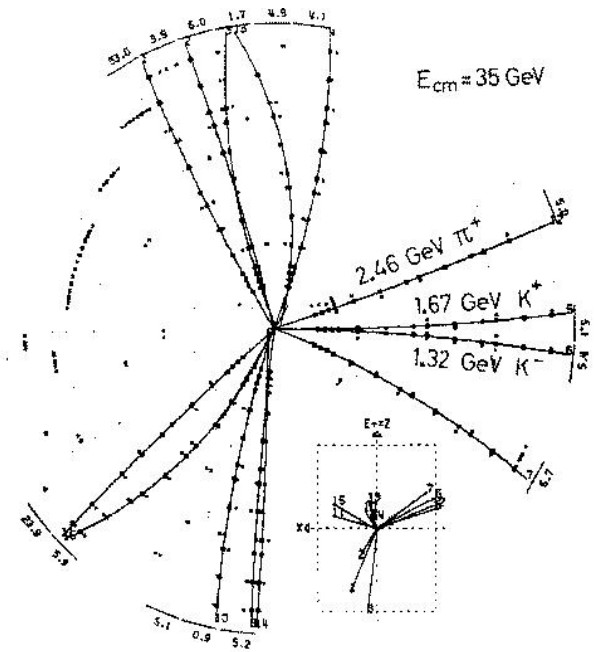
Abbildung 3.36: Zwei Beispiele für Zellen, die aus Anoden- und Kathodendrähten gebildet werden.

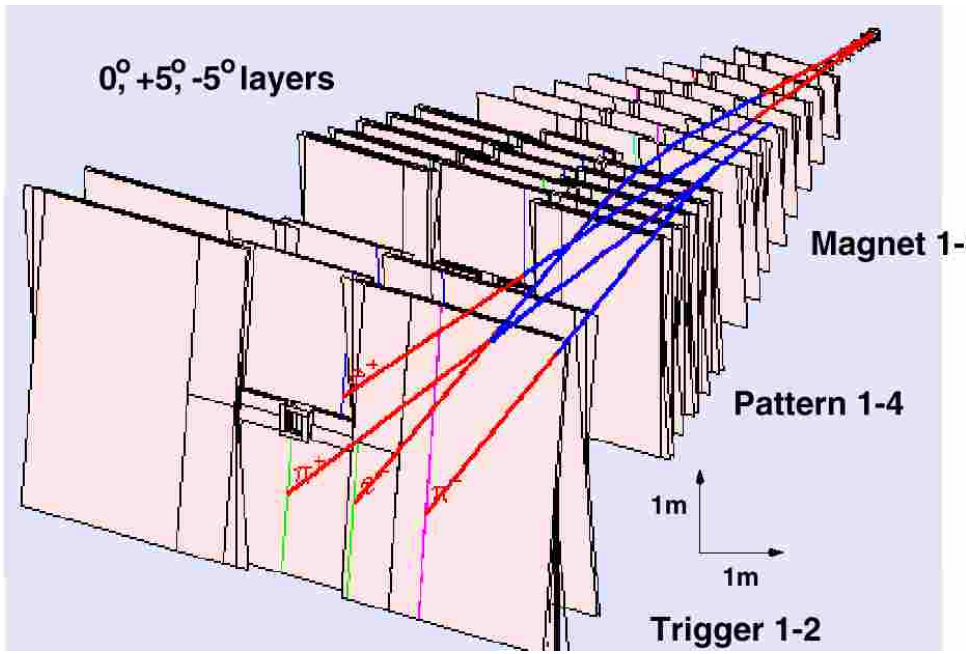
Driftkammern (TASSO, HERA-B)



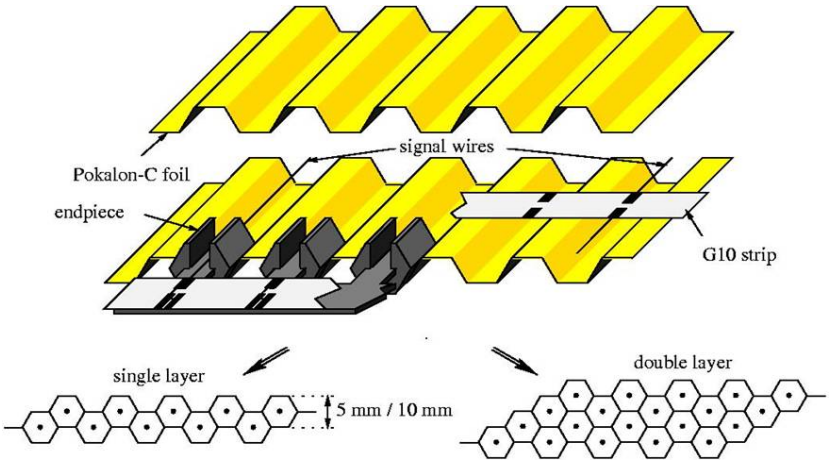
Zylindrische Kammerordnung


Planare Kammeranordnung





HERA-B Outer Tracker: Honigwaben-Struktur



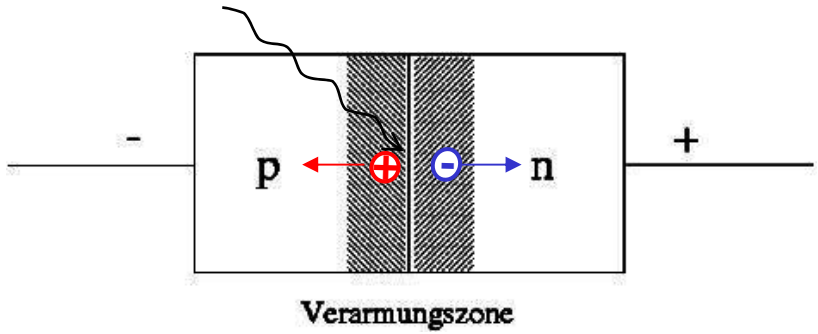
Halbleiterdetektor

Statt Gasverstärkung mehr Ionen von Teilchen in dichterem Medium erzeugt

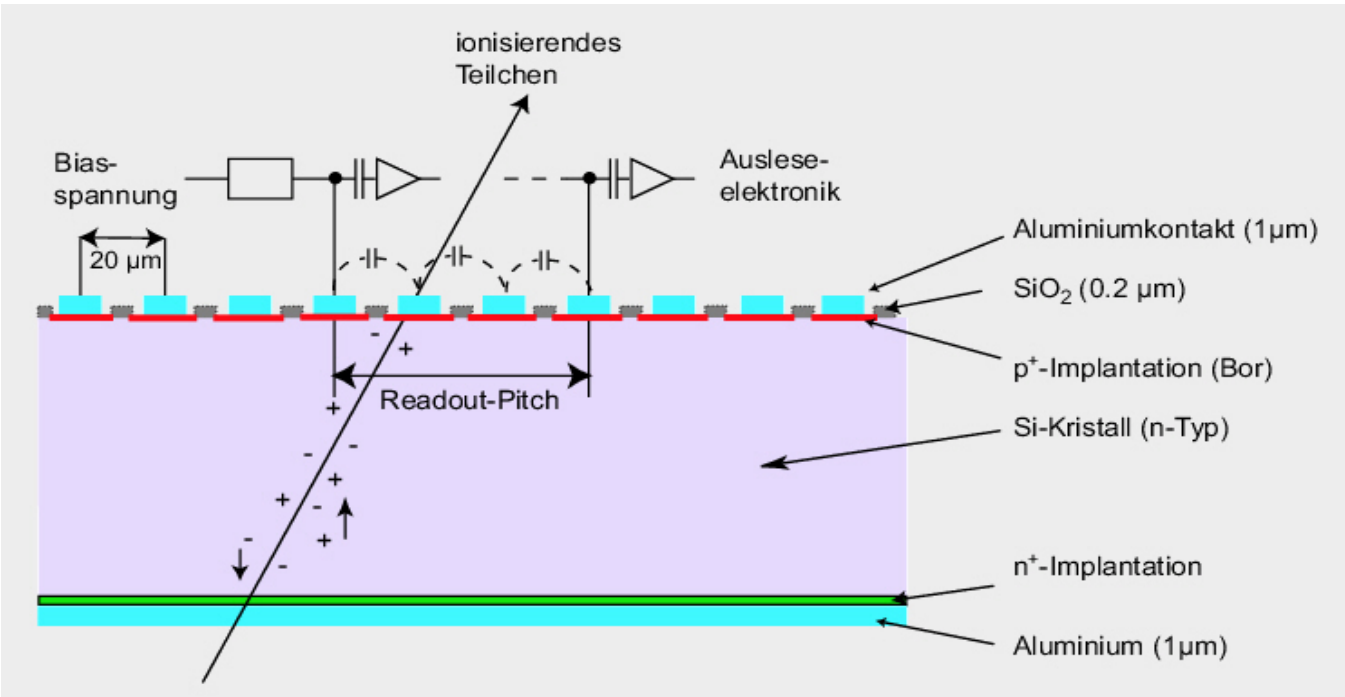
Prototyp des Halbleiter Detektors: **Diode**

z.B. Silizium, Germanium, GaAs, …

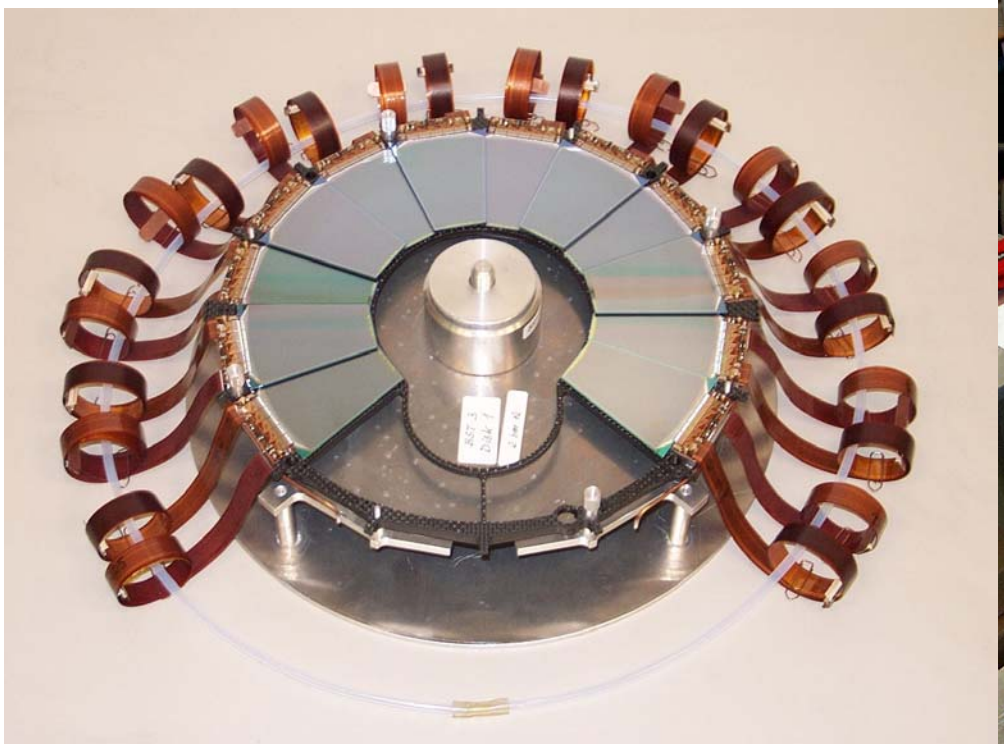
25000 Ionen pro 300 μm in Silizium



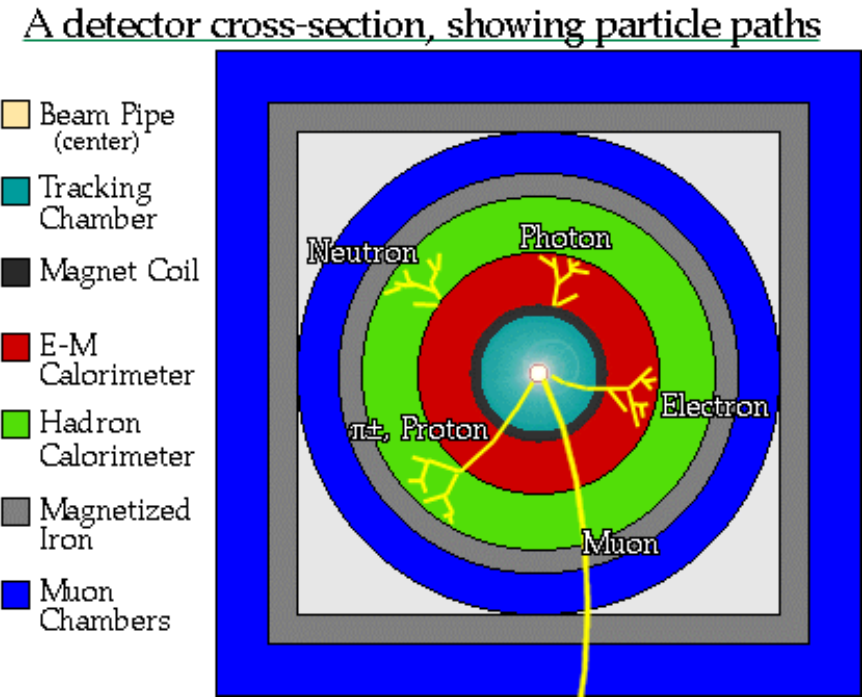
Silizium-Streifendetektor:



Vorwärts- und Rückwärts- Si-Detektoren bei H1

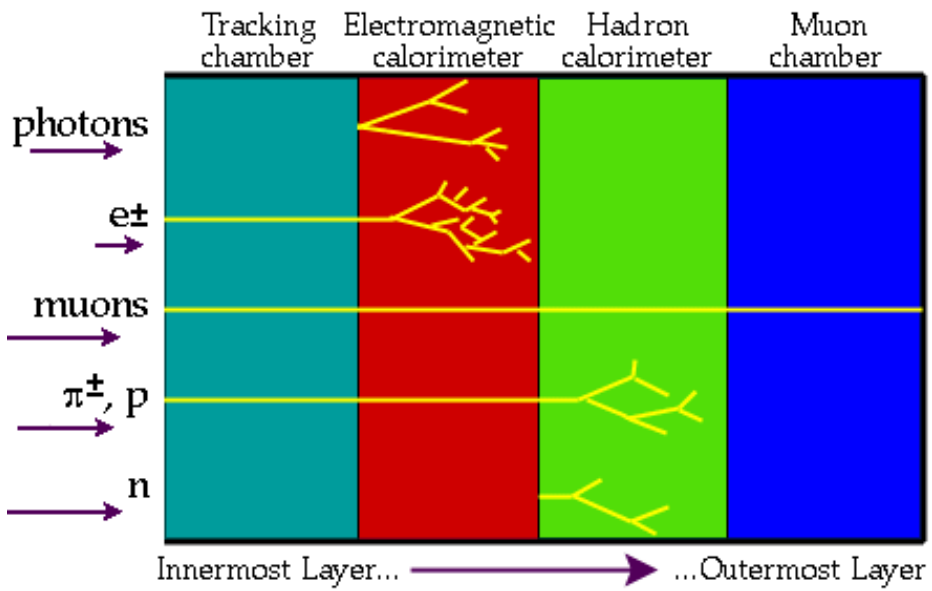


Typischer Detektor an einem Speicherring

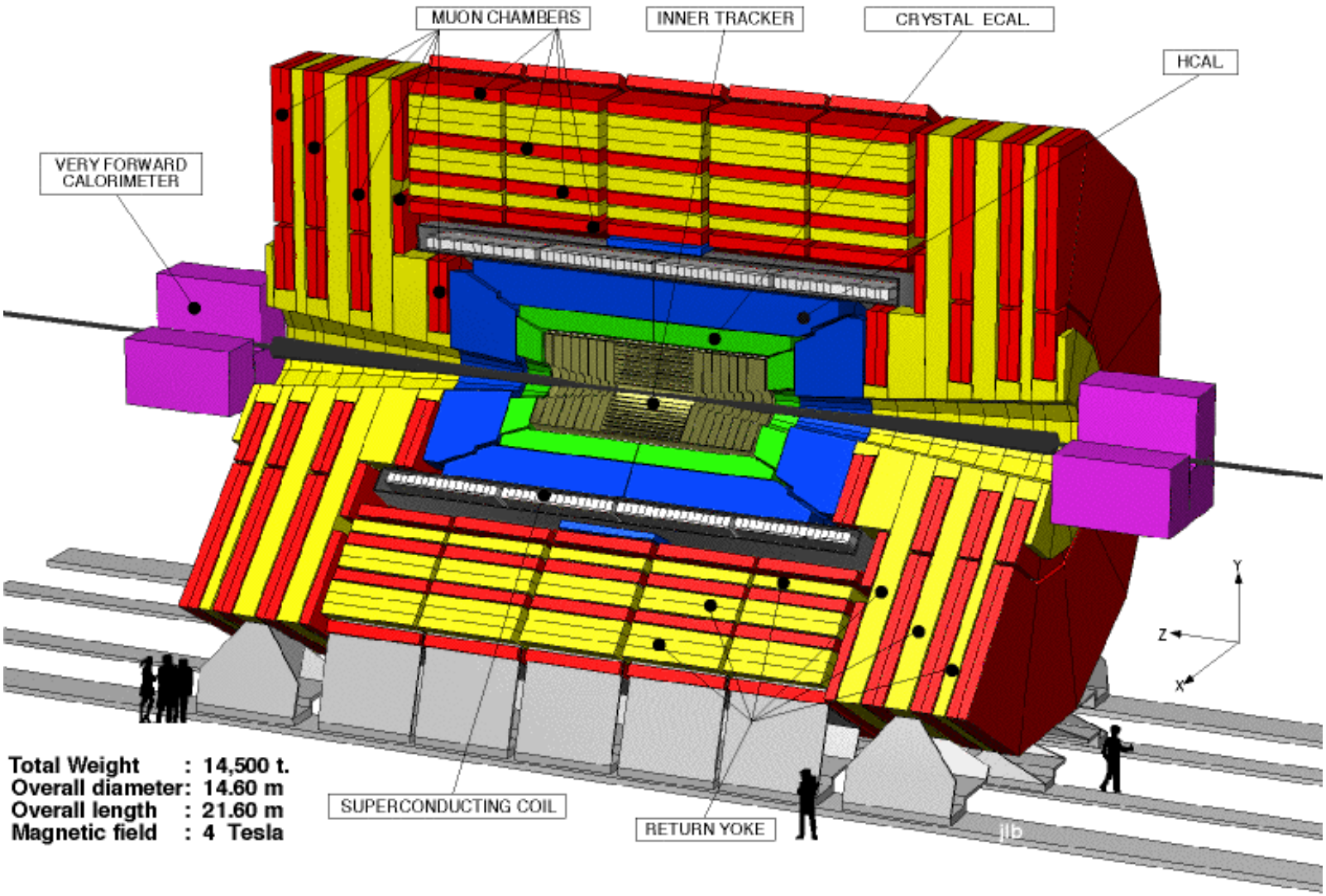


Detektoraufgaben

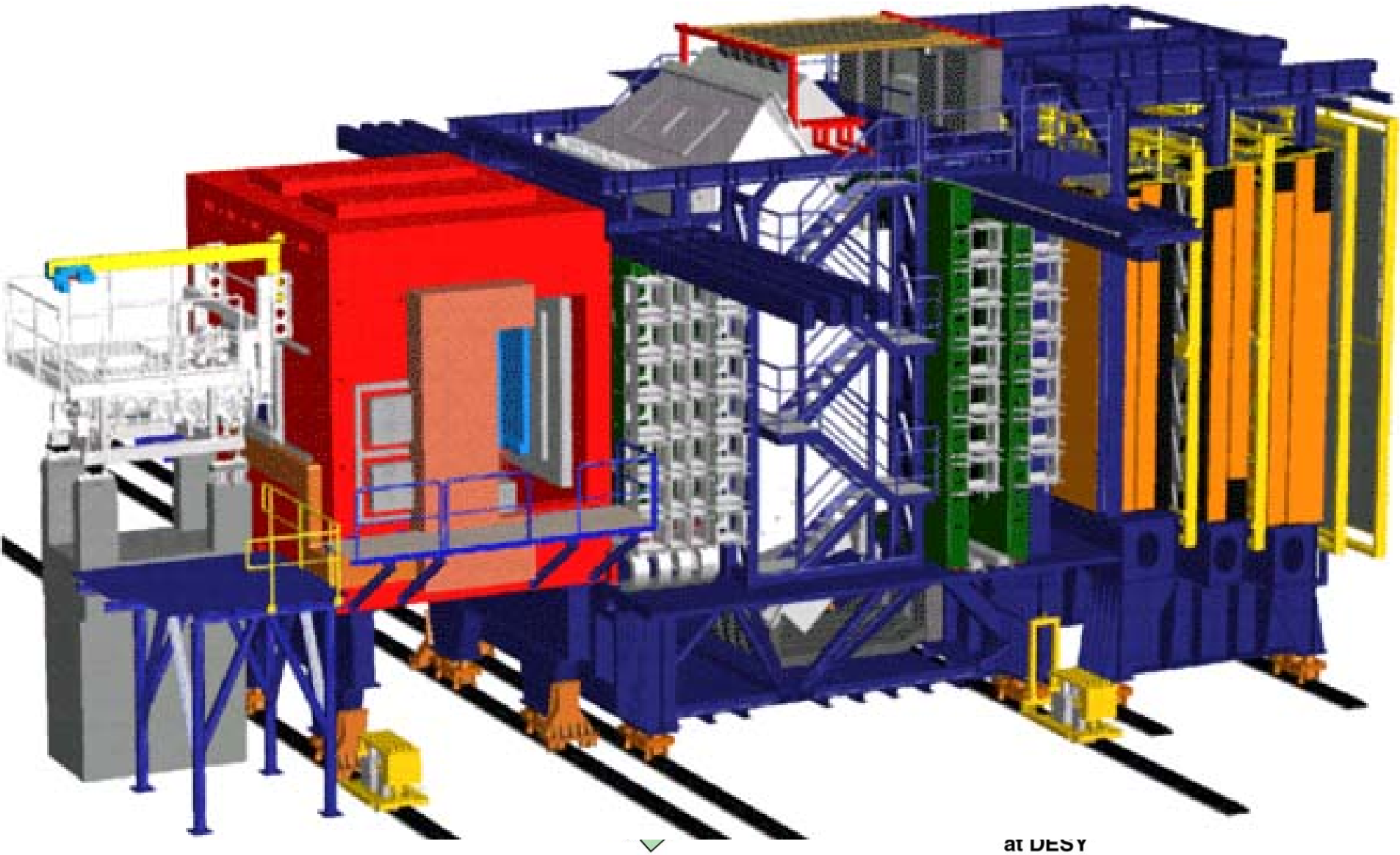
- **Nachweis, evt. auch Strahlungsfluss**
- **Kinematik der Teilchen messen (Energie, Richtung, …)**
- **Teilchen identifizieren (z.B. Masse bestimmen)**



CMS-Detektor am LHC



HERA-B-Detektor (fixed target)



Cherenkov-Strahlung

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

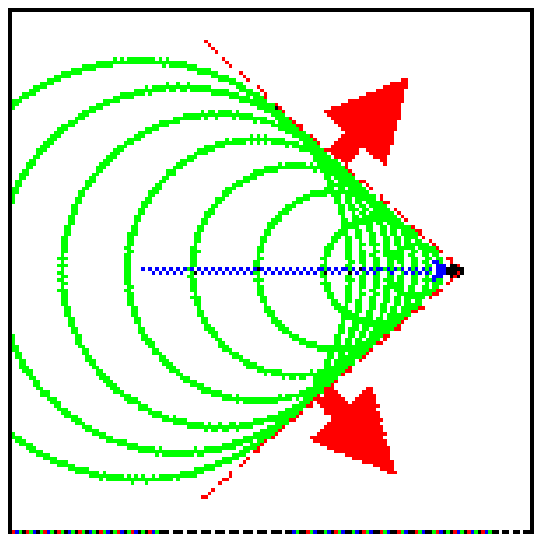
$$c_{medium} = c_{vakuum} / n$$

- **Wasser:** ***n = 1,33***
- **Eis:** ***n = 1,3***
- **Diamant:** ***n = 2,4***
- **Gase:** ***n ≈ 1 + 0,001..***

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

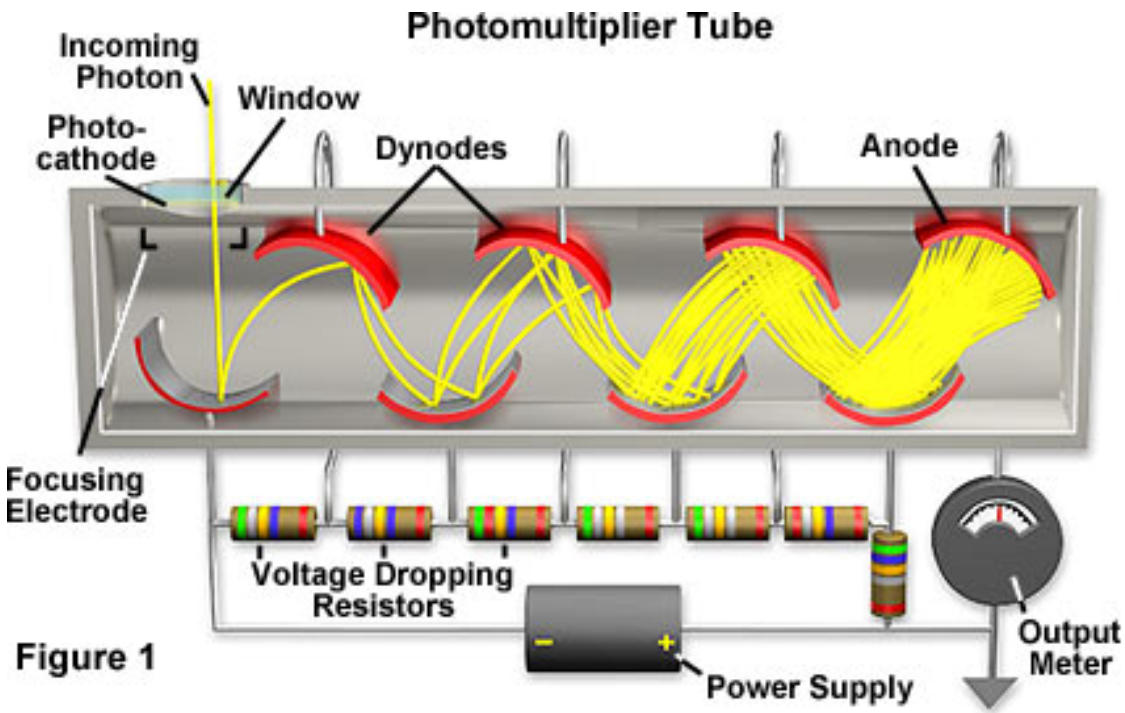
.\..\..\ALBERT\mach.exe

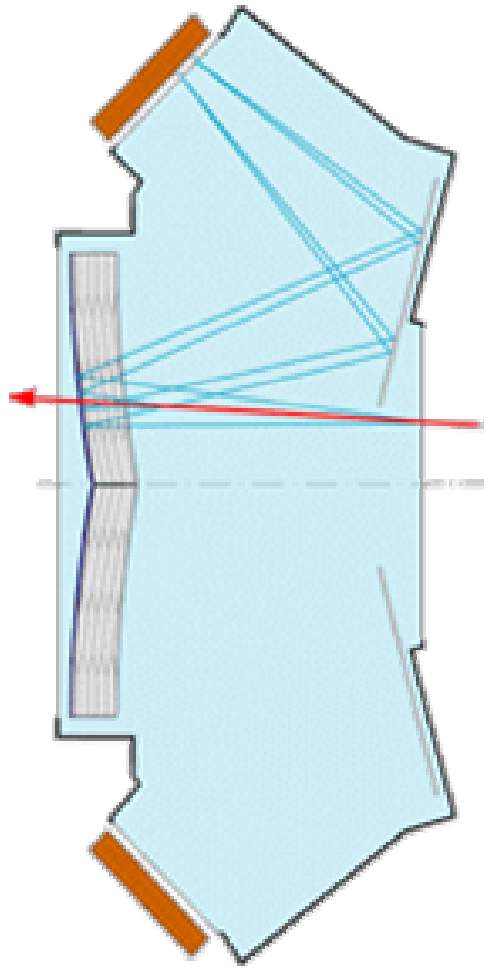
Cherenkov-Kegel



Cherenkov-Detektoren

Nachweis von Licht: **Photovervielfacher-Röhren**

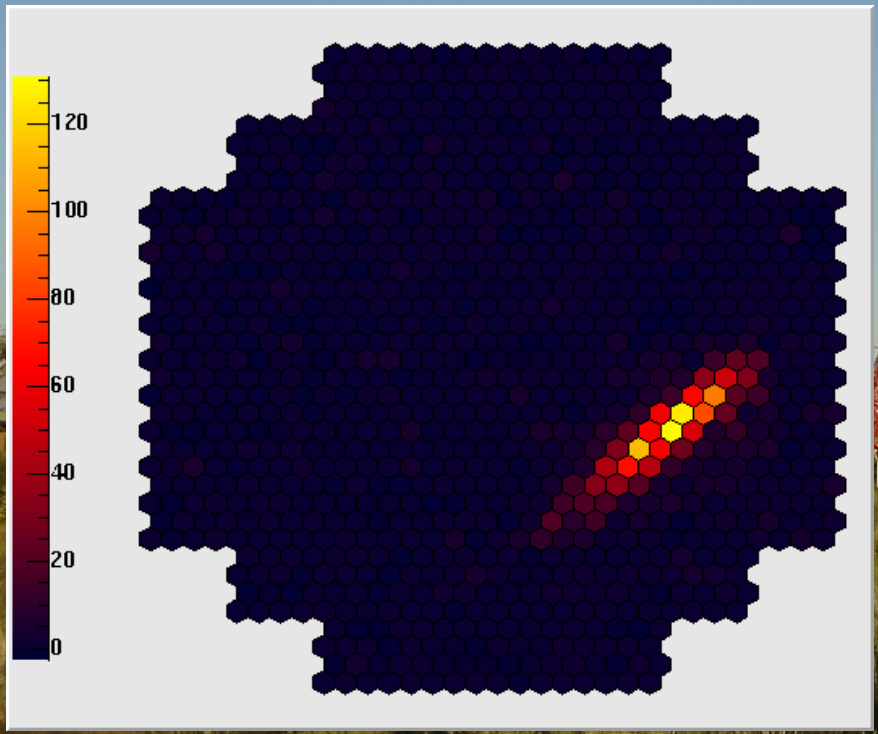




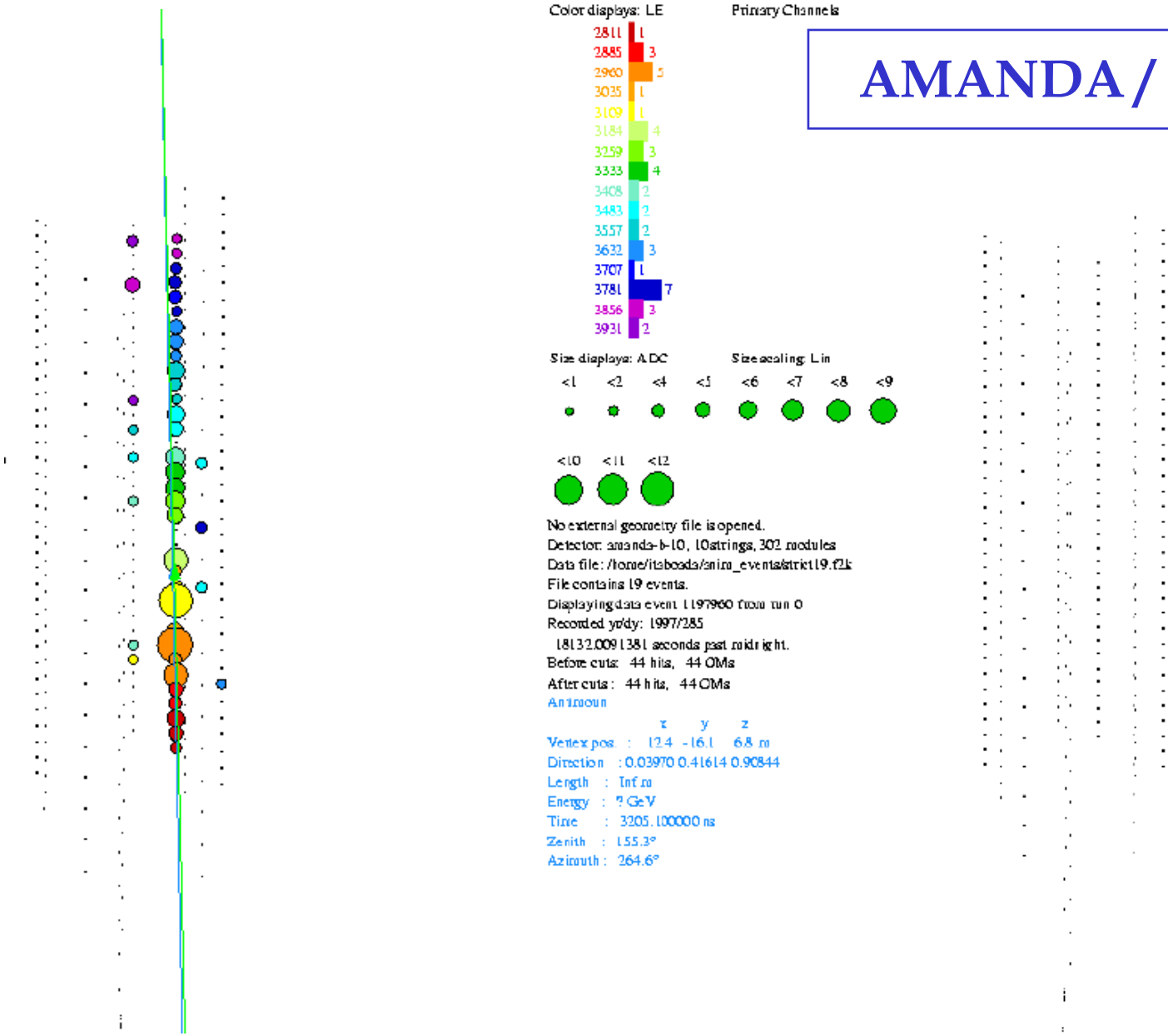
HERA-B RICH

(= ring imaging Cherenkov detector)

Kamera in Aktion



AMANDA / IceCube



$\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X \Rightarrow$ Cherenkov-Strahlung im Eis

Sehen und Hören: Nutze alle Sinne

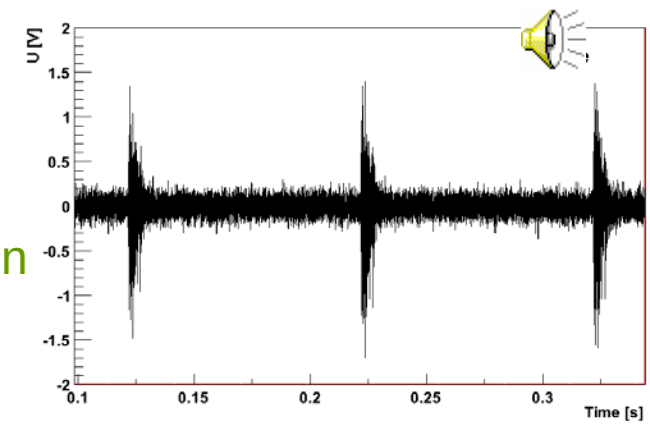
Teilchen hören ?!!

Akustische Sensoren für den IceCube Detektor

Thermoakustisches Modell:

- ⇨ Ultrahochenergetische Kaskade
  - ⇨ Lokale Erwärmung
    - ⇨ Expansion
      - ⇨ Schallwelle

Akkustische Sensoren



180 MeV Protonen
TSL, Uppsala

Das war‘s