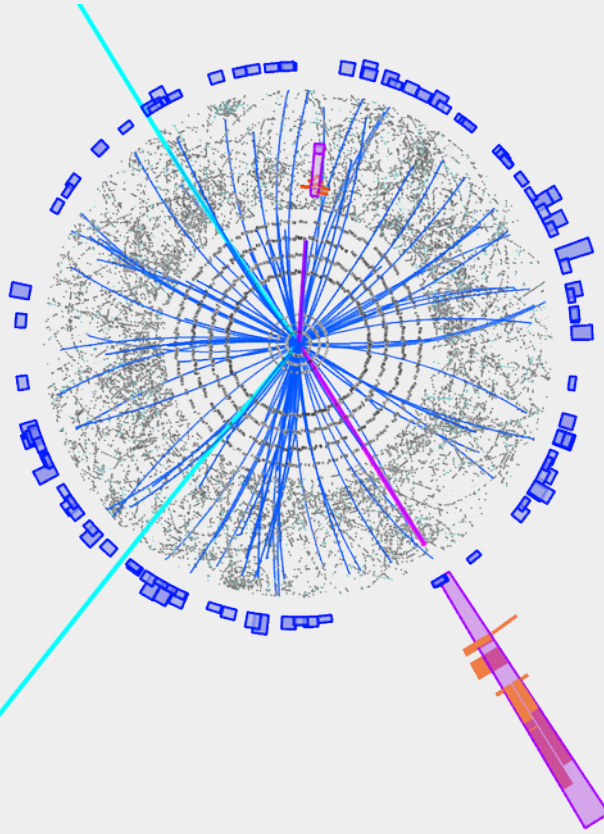


Teilchendetektoren I

Teilchennachweis in der Hochenergiephysik



Simon Spannagel, CERN
Deutsches Lehrerprogramm
16. April 2019

Inhaltsverzeichnis

- Was messen wir?
 - Stabile Teilchen
 - Vermessung von Teilcheneigenschaften
 - Detektorsysteme
- Wechselwirkung mit Materie
 - Geladene Teilchen
 - Photonen
 - Hadronische Wechselwirkung
 - Neutrinos
- Detektortypen
 - Historischer Überblick
 - Gasdetektoren
 - Halbleiterdetektoren
 - Szintillatoren
 - Kalorimeter
 - Cherenkovdetektoren
- Detektorsysteme an LHC-Experimenten

Prolog: Einheiten

- Elementarladung: $e = 1,602\ 176\ 6208 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Energieeinheit eV: $1 \text{ eV} = 1,602\ 176\ 6208 \times 10^{-19} \text{ J (CV)}$
Energie eines Elektrons, durch 1V beschleunigt
- Masse eines Elektrons: $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
 $= 511 \text{ keV} / c^2$
- Faktor c^2 wird oft nicht angegeben, Einheiten definiert mit $c = 1$ (und $\hbar = 1$):
MeV, GeV, TeV...
für Energie, Impuls, (Ruhe-) Masse
- Wissenschaftliche Schreibweise: Mantisse plus Exponent zur Basis 10: $a \times 10^b$

Was messen wir?

Bestimmung von Teilcheneigenschaften

Welche Teilchen können wir nachweisen?

- Teilchen müssen langlebig genug sein, um den Detektor zu erreichen...
 - Viele Elementarteilchen haben eine sehr kurze Lebensdauer (Higgs, W, Z...)
 - Gemessen werden Zerfallsprodukte

$$d = c \tau \gamma, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

- Teilchen müssen wechselwirken!
 - Nicht jedes Teilchen nimmt an allen Kräfte teil
 - Möglichkeiten der Detektion hängen stark von Kräften ab

• Elementarteilchen: $e^\pm, \mu^\pm, \nu^e, \bar{\nu}^e, \nu^\mu, \bar{\nu}^\mu, \nu^\tau, \bar{\nu}^\tau, \gamma$

• Baryonen: $p^\pm, n, \Sigma^\pm, \Xi_0^\pm, \Xi^\pm, \Omega^\pm$

• Mesonen: $\pi^\pm, K^\pm, K_0 (K_0^S, K_0^L)$

$$\tau_n \approx 15 \text{ min}$$

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

Messgrößen

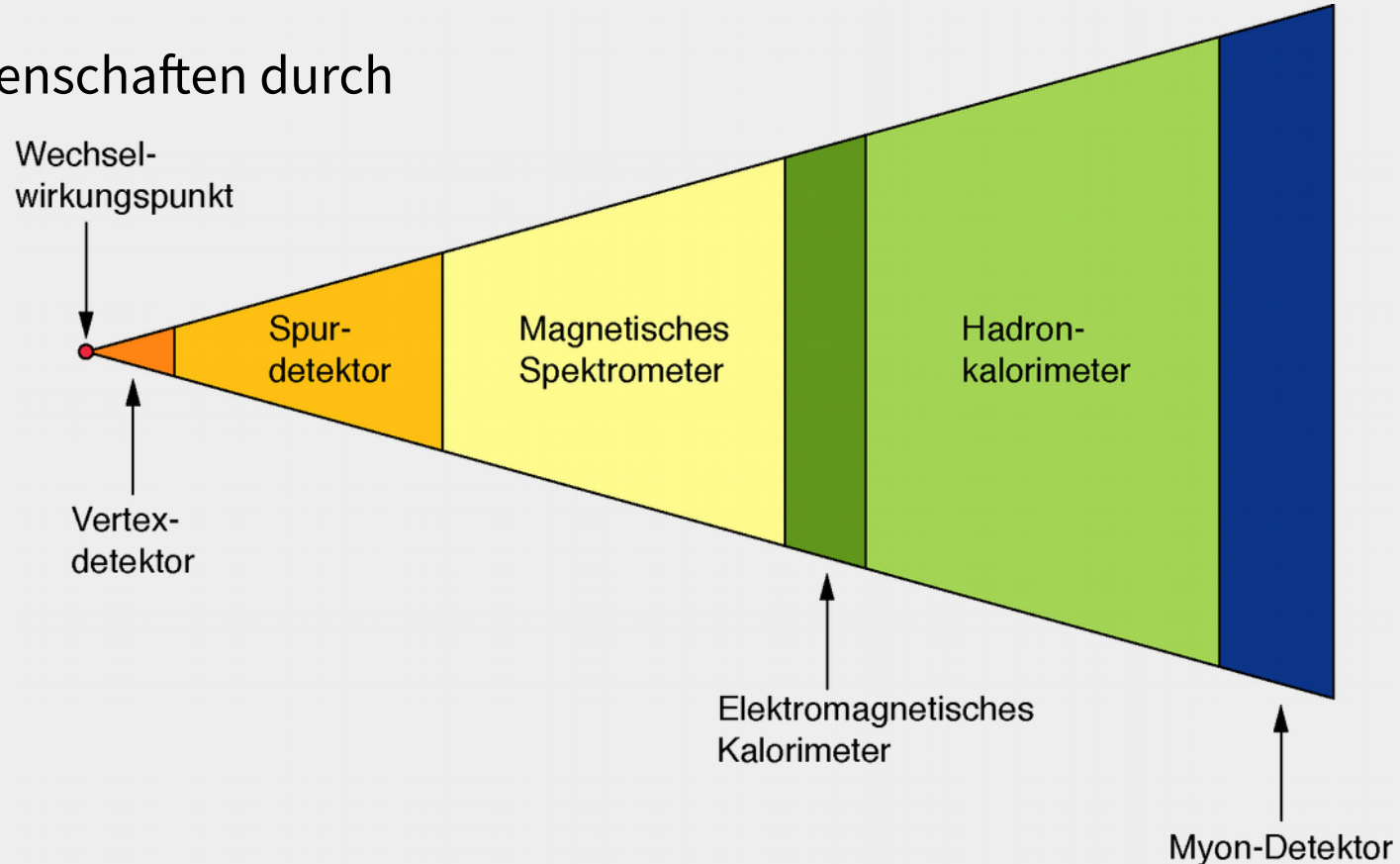
- Impuls **p** Krümmungsradius im Magnetfeld
- Geschwindigkeit **v** Flugzeitmessung, RICH, etc.
- Teilchenladung **Q** Flugbahnkrümmung im Magnetfeld
- Lebensdauer **τ** Messung der Zerfallsstrecke
- Energie **E** Absorption in Kalorimetern
- Teilchenmasse **m** Indirekte Bestimmung z.B. aus dem Impuls und Energie oder Geschwindigkeit

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \quad p = \gamma m v = \frac{m v}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}}$$



Typischer Aufbau eines Experiments

- Kombination von komplementären Nachweismethoden
- Messung einzelner Eigenschaften durch separate Detektoren
- Reihenfolge wichtig!
Manche Messungen “destruktiv“
- Aufbau vieler Experimente sehr ähnlich



Detektor-Begrifflichkeiten

- **Totzeit:**

Zeitspanne unmittelbar nach dem Nachweis eines Teilchens, während der der Detektor noch nicht wieder bereit ist, ein weiteres Teilchen nachzuweisen

- Nicht verlängerbare Totzeit: Neu eintretendes Ereignis bewirkt nichts
- Verlängerbare Totzeit: Neu eintretendes Ereignis verlängert Totzeit

- **Auflösung:**

Erzielbare Unsicherheit auf die Messgröße

- **Effizienz:**

Zahl der aufgezeichneten Ereignisse geteilt durch alle eingetretenen Ereignisse

Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Energieverlust und Wechselwirkungsprozesse

Wechselwirkung mit Materie

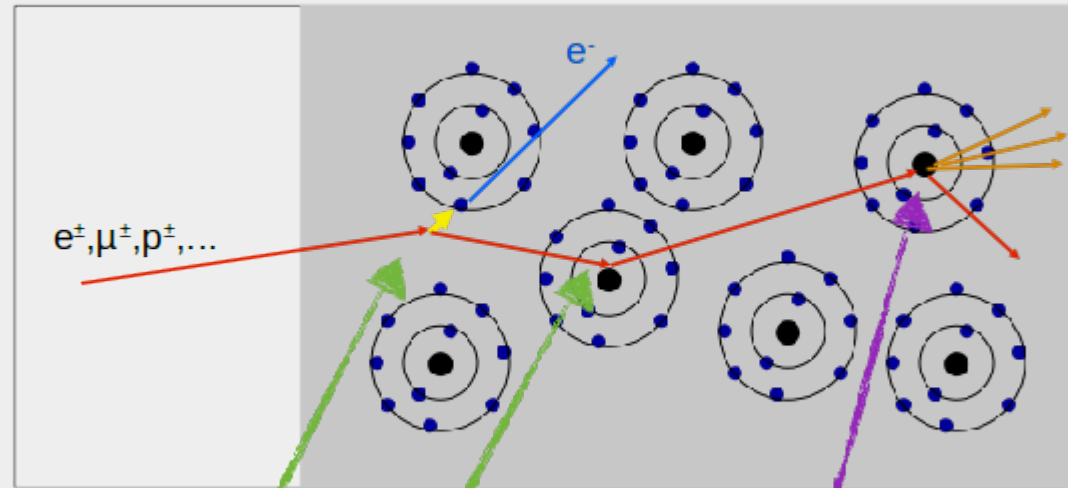
- Hochenergetische Teilchen wechselwirken über verschiedene Prozesse mit Materie, je nach
 - Teilchenart
 - Energie
 - Material
- Energieverlust des Teilchens durch Wechselwirkung
 - Übertragung der Energie an Materie oder andere Teilchen
 - In Detektoren: Energieverlust = Signal!

Geladene Teilchen

Ionisation

Elastische Streuung
Rückstoß am Atom /
Kristallgitter → Phononen

Inelastische Streuung



Elektromagnetische Wechselwirkung

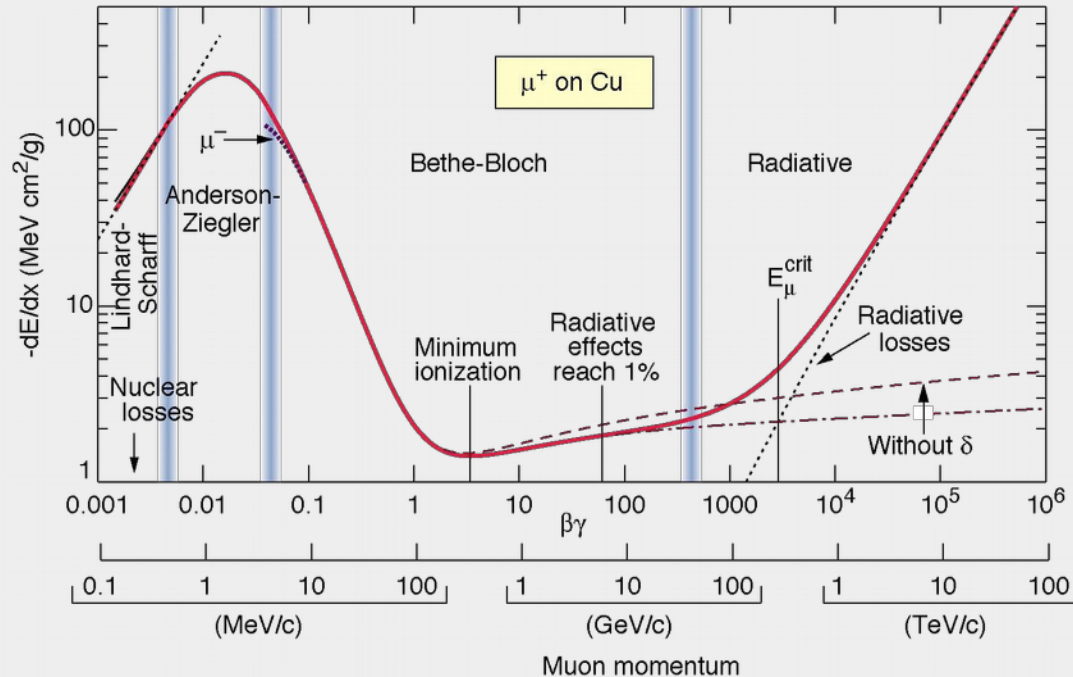
Elektromagnetische oder
Schwache oder
Starke Wechselwirkung

Mittlerer Energieverlust

- geladene Teilchen wechselwirken mit den Elektronen im Material
- Für schwere geladene Teilchen: **Bethe-Bloch-Formel**

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \approx K q^2 \frac{1}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left[\ln \left(\frac{2 m_e c^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

- Energieverlust hängt ab von
 - Projektil-Eigenschaften: Ladung, Energie
 - Target-Eigenschaften: Kernladungszahl, Ionisationsenergie, Dichte

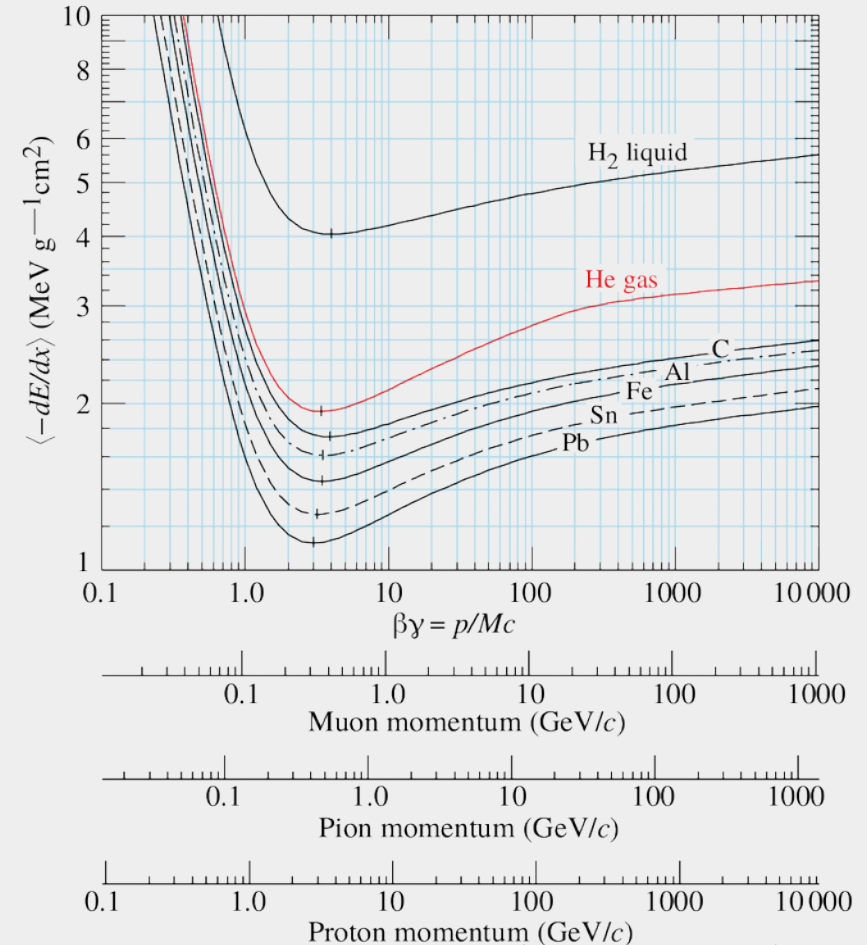


Mittlerer Energieverlust

- Verschiedene Komponenten dominieren :
 - Bei geringen Energien: $\sim 1/\beta^2$
 - Bei hohen Energien: $\sim \ln \gamma$

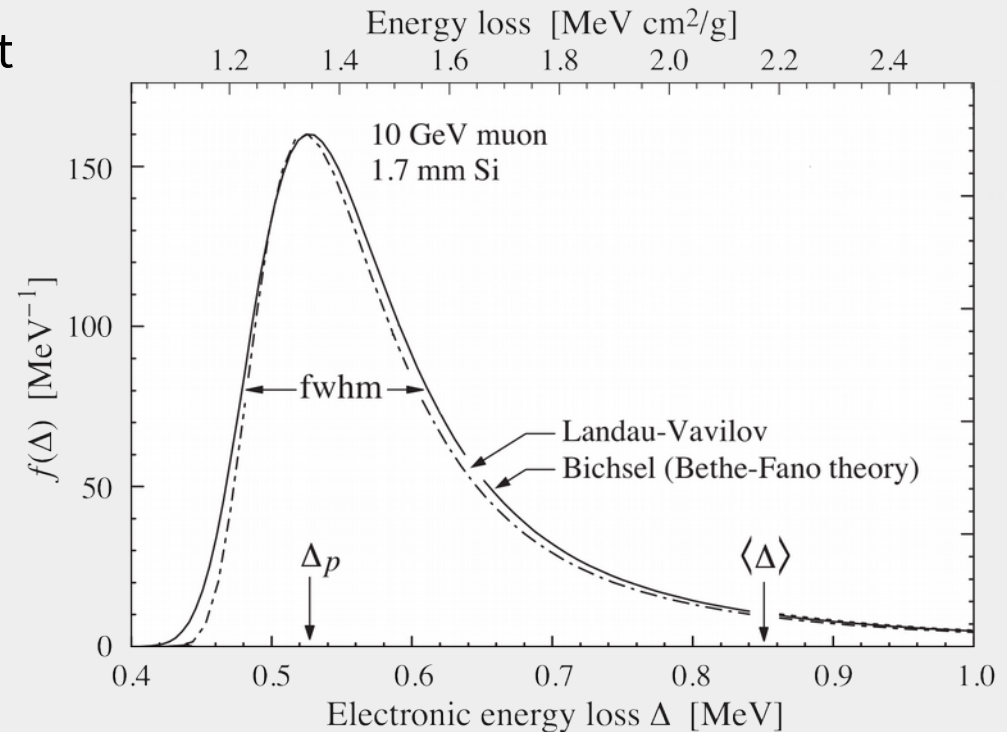
$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \approx K q^2 \frac{1}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left[\ln \left(\frac{2 m_e c^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

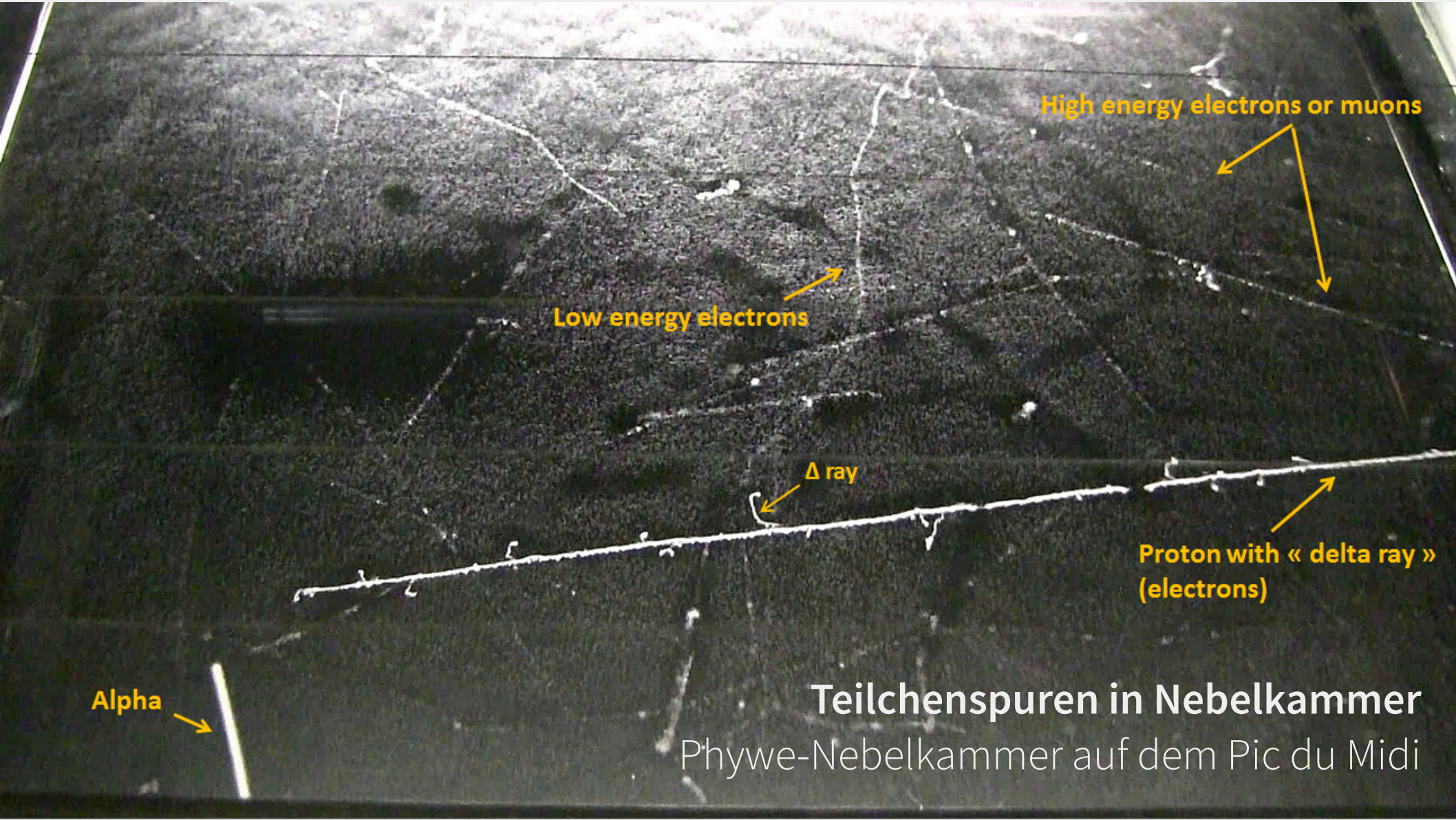
- Minimaler Energieverlust für $\sim \beta\gamma$
 - MIP: Minimum Ionizing Particle
- $[dx] = g / cm^2 = cm \times g / cm^3$



Fluktuationen im Energieverlust

- Tatsächlicher Energieverlust fluktuiert um Mittelwert
- **Landau-Vavilov-Verteilung** mit langen Ausläufern zu hohen Energien
 - Wahrscheinlichster Wert \ll Mittelwert
- Hüllenelektronen können sehr großen Energieübertrag erfahren
 - Erzeugung von Delta-Elektronen
 - Delta-Elektronen haben genügend Energie für weitere Ionisation





High energy electrons or muons

Low energy electrons

Δ ray

Proton with « delta ray »
(electrons)

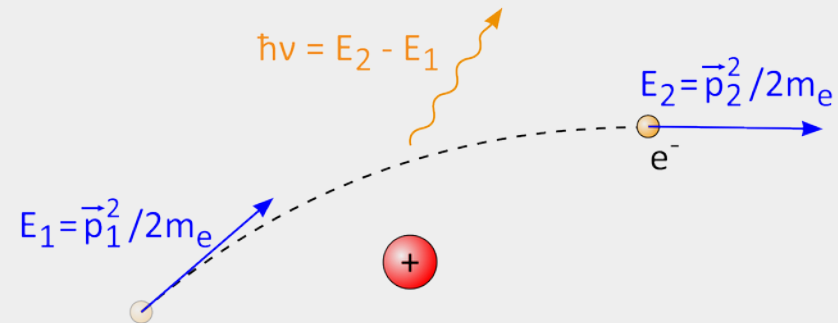
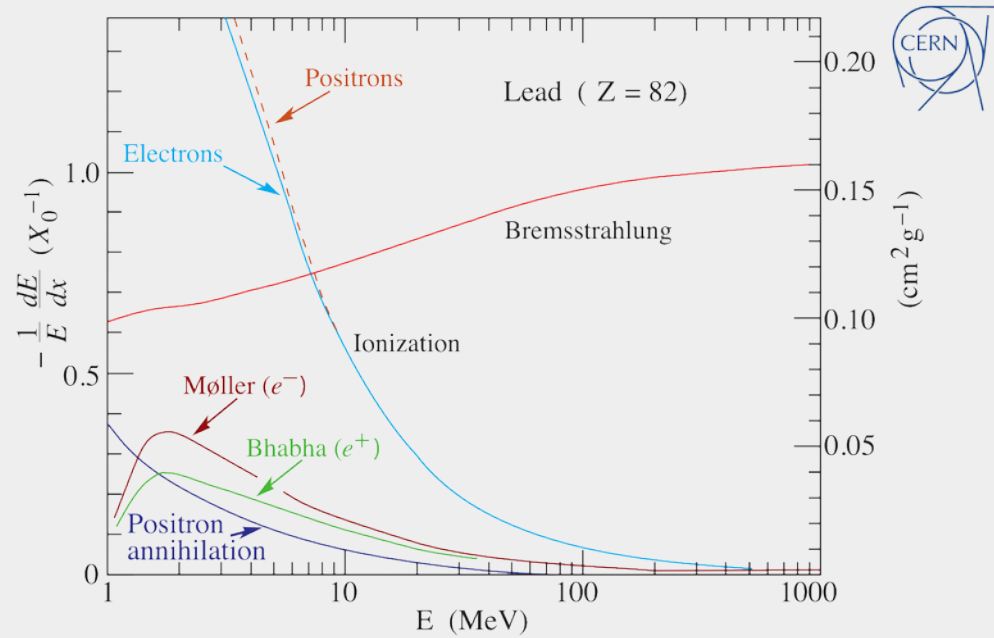
Alpha

Teilchenspuren in Nebelkammer

Phywe-Nebelkammer auf dem Pic du Midi

Sonderfall: Elektron & Positron

- Sonderfall: geringe Masse
 $m_e = 0.511 \text{ MeV} / c^2$
 $m_\mu = 106 \text{ MeV} / c^2 \approx 200 m_e$
- Bei hohen Energien: Bremsstrahlung
 - Englisch: „bremstrahlung“
 - entsteht bei Impulsänderung eines geladenen Teilchens, z.B.
 - ...im Coulomb-Feld eines Kerns
 - ...im Magnetfeld: Synchrotronstrahlung
 - Hier: Teilchen werden in Materie gebremst
 - Relevant für Elektronen: $-\frac{dE}{dx} \sim E \cdot \frac{1}{m^2}$



Cherenkov-Strahlung

- Wird emittiert, wenn Teilchengeschwindigkeit > Lichtgeschwindigkeit

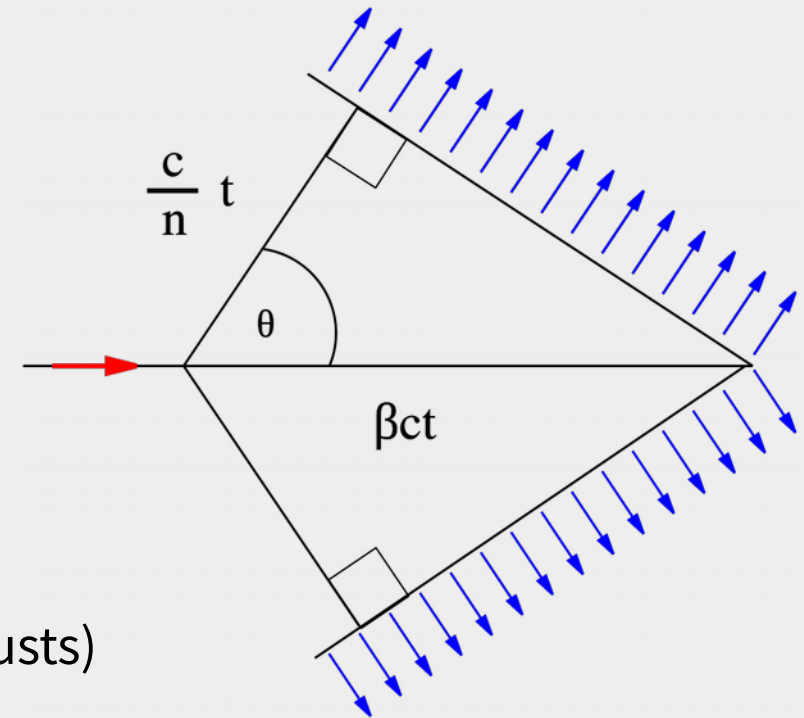
$$c_{\text{Medium}} = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{n} < v_{\text{Teilchen}} < c_{\text{Vakuum}}$$

n : Brechungsindex des Mediums

- Elektromagnetische Schockwelle mit konischer Form wird abgestrahlt unter Winkel θ :

$$\cos(\theta) = \frac{1}{\beta n}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

- Geringer Energieverlust (ca. 1% des totalen Verlusts)



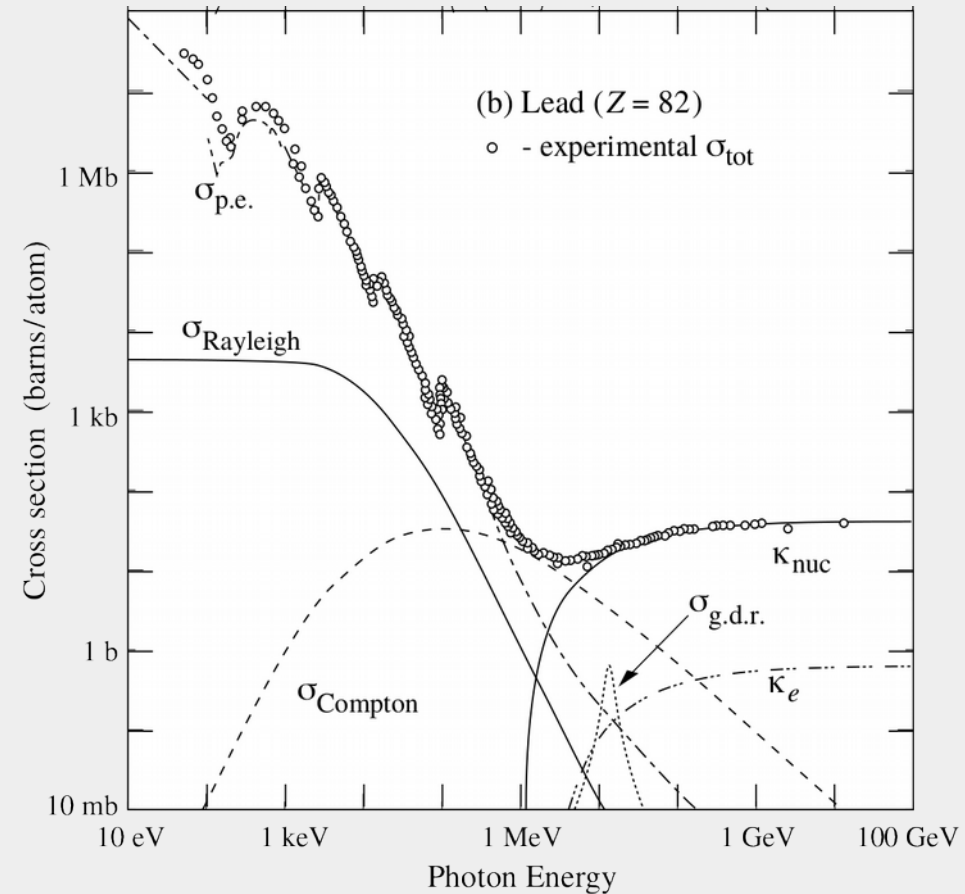
Cherenkov-Strahlung von Kernreaktor

Advanced Test Reactor, INL



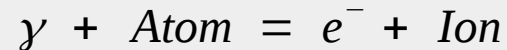
Photonen

- Elektromagnetische Wechselwirkung
- Unterschiedliche Prozesse dominant, je nach Photon-Energie:
 - Photoeffekt
 - Rayleigh-Streuung
 - Compton-Effekt
 - Paarbildung

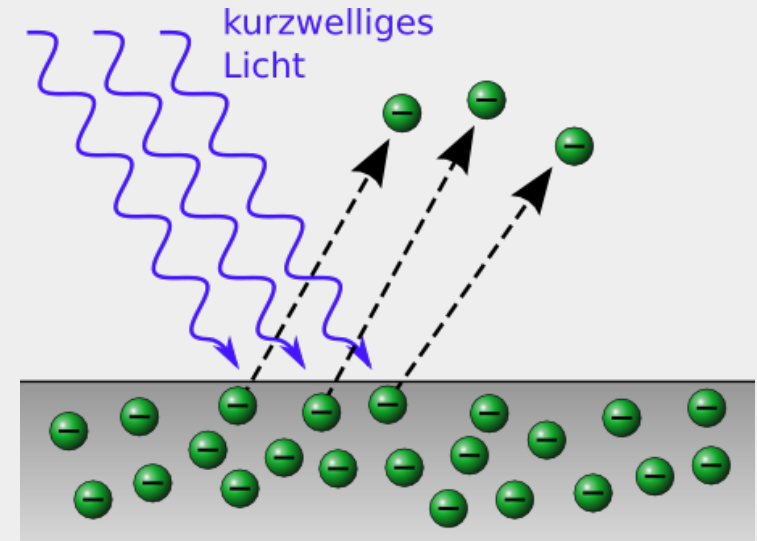


Photoelektrischer Effekt

- Theoretische Beschreibung des Photoeffekts: **Nobelpreis 1921 für Albert Einstein**
- Photon wird von Elektron der Atomhülle absorbiert
- Übertragene Energie setzt das Elektron frei

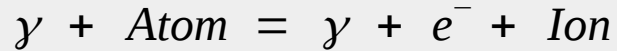


- Prozess nur im Feld des Atomkerns möglich:
 - Impulserhaltung
 - Kern fängt Rückstoß auf
- Wirkungsquerschnitt des Fotoeffekts zeigt Schalenstruktur des Atoms

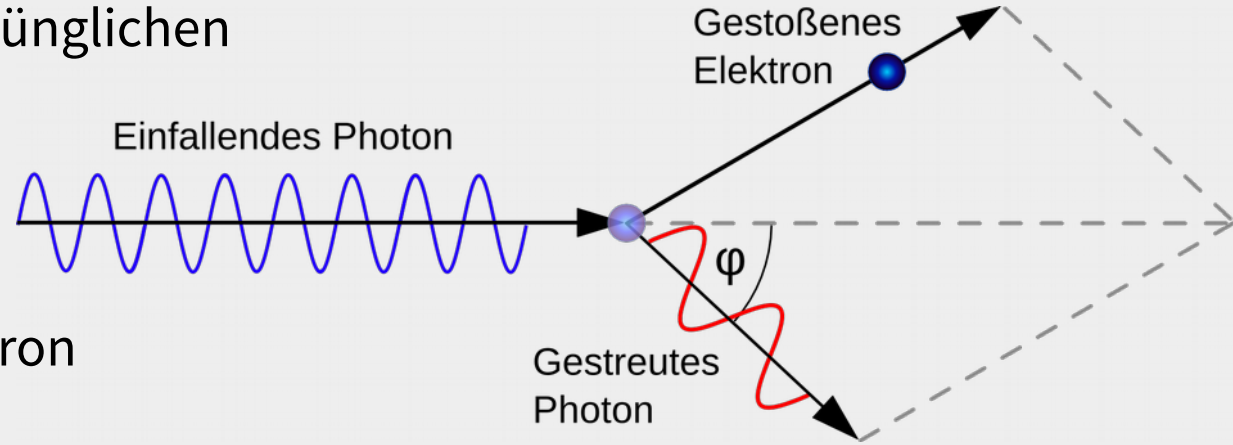


Compton-Effekt

- Beschreibt Streuung eines Photons an einem “quasi-freien” Elektron



- Photon wird von seiner ursprünglichen Bahn abgelenkt
- Wellenlänge des Photons ändert sich durch Energieübertrag an das Elektron



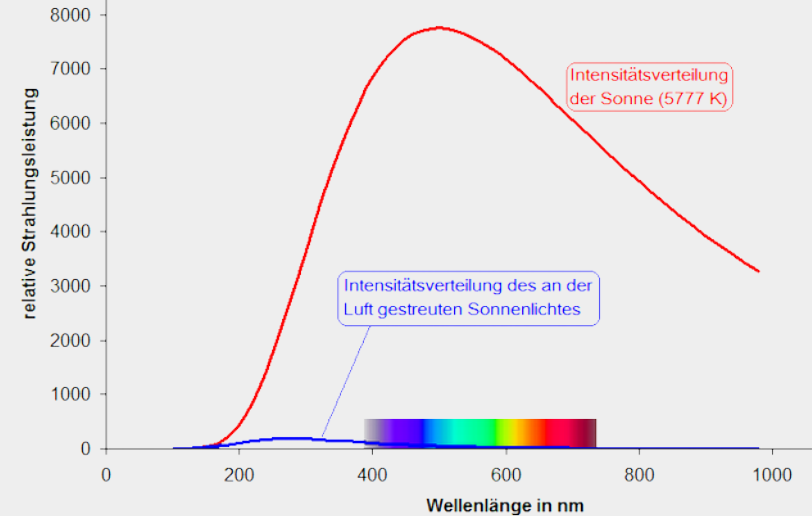
Photonen: Thomson/Rayleigh-Streuung

- Elastische Streuungen: kaum Energieübertrag auf Medium
- Thomson-Streuung:
Photon-Streuung an freiem Elektron
- Rayleigh-Streuung:
Photon-Streuung an gesamtem Atom

- Streuquerschnitt $\sigma_{\text{Rayleigh}} \sim f^4$

- Grund für Blau- / Rotfärbung des Himmels
in Abhängigkeit vom Zenitwinkel

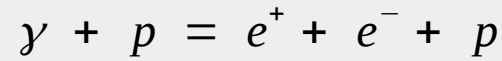
- Mittag: kurzer Weg durch Atmosphäre, kaum blaues Licht gestreut
- Morgen-Abend: Langer Weg durch Atmosphäre, viel blaues Licht gestreut



$$\frac{\sigma_{\text{blau}}}{\sigma_{\text{rot}}} = \frac{1/\lambda_{\text{blau}}^4}{1/\lambda_{\text{rot}}^4} = \left(\frac{650 \text{ nm}}{450 \text{ nm}} \right)^4 \approx 4.4$$

Photonen: Paarbildung

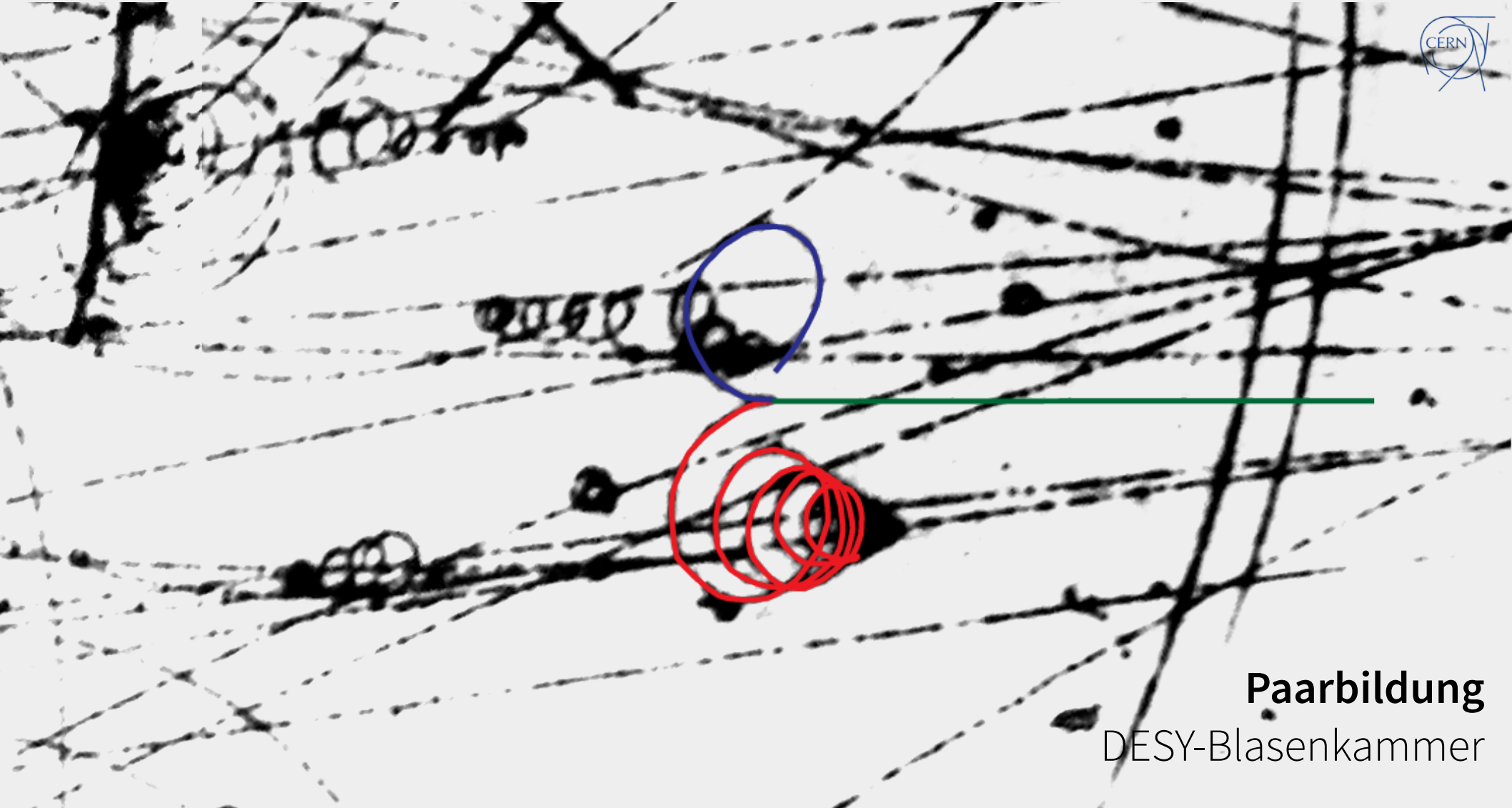
- Paarbildung ist die Produktion eines Elektron-Positron-Paares durch ein Photon
- Paarbildung im Feld eines Stoßpartners, der den Rückstoß aufnimmt (Atomkern, aber auch Hüllenelektron)



- Photon muss mindestens Ruhemasse des e^+e^- -Paares plus Rückstoßenergie aufbringen:

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 \left(1 + \frac{m_e}{M}\right)$$

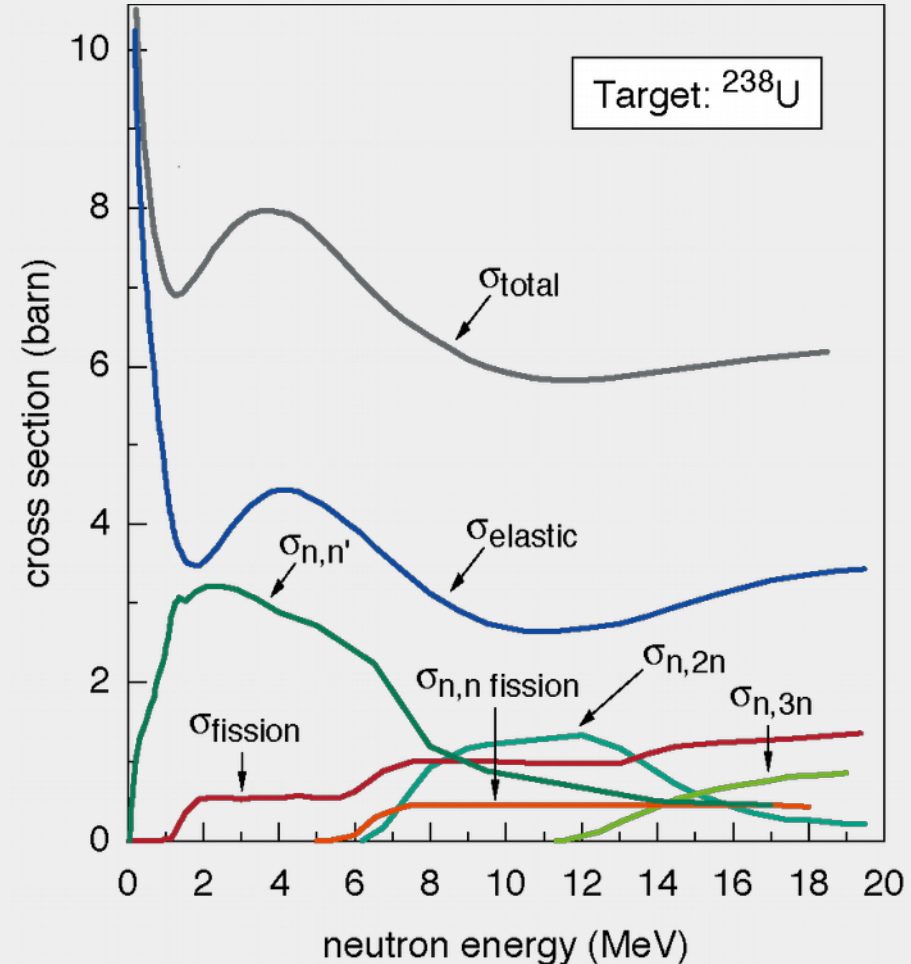
- Rückstoßenergie kann oft vernachlässigt werden, e.g. Ge-Detektor: $\frac{m_e}{M} \approx 7.6 \cdot 10^{-6}$



Paarbildung DESY-Blasen-kammer

Hadronische Wechselwirkung

- Interaktionen eines Hadrons mit Atomkern
- Basiert auf der starken Wechselwirkung
 - Geringe Reichweite
 - Geringe Wahrscheinlichkeit für hadronische Reaktionen
 - Neutronen können nur stark wechselwirken: sehr durchdringend
- Viele mögliche Prozesse (energieabhängig)
 - Elastische, inelastische Streuung; Neutroneneinfang; Reaktionen mit Abstrahlung geladener Teilchen; Kernspaltung



Wechselwirkung von Neutrinos

- Neutrinos unterliegen ausschließlich der schwachen Wechselwirkung
- Mögliche Interaktionen



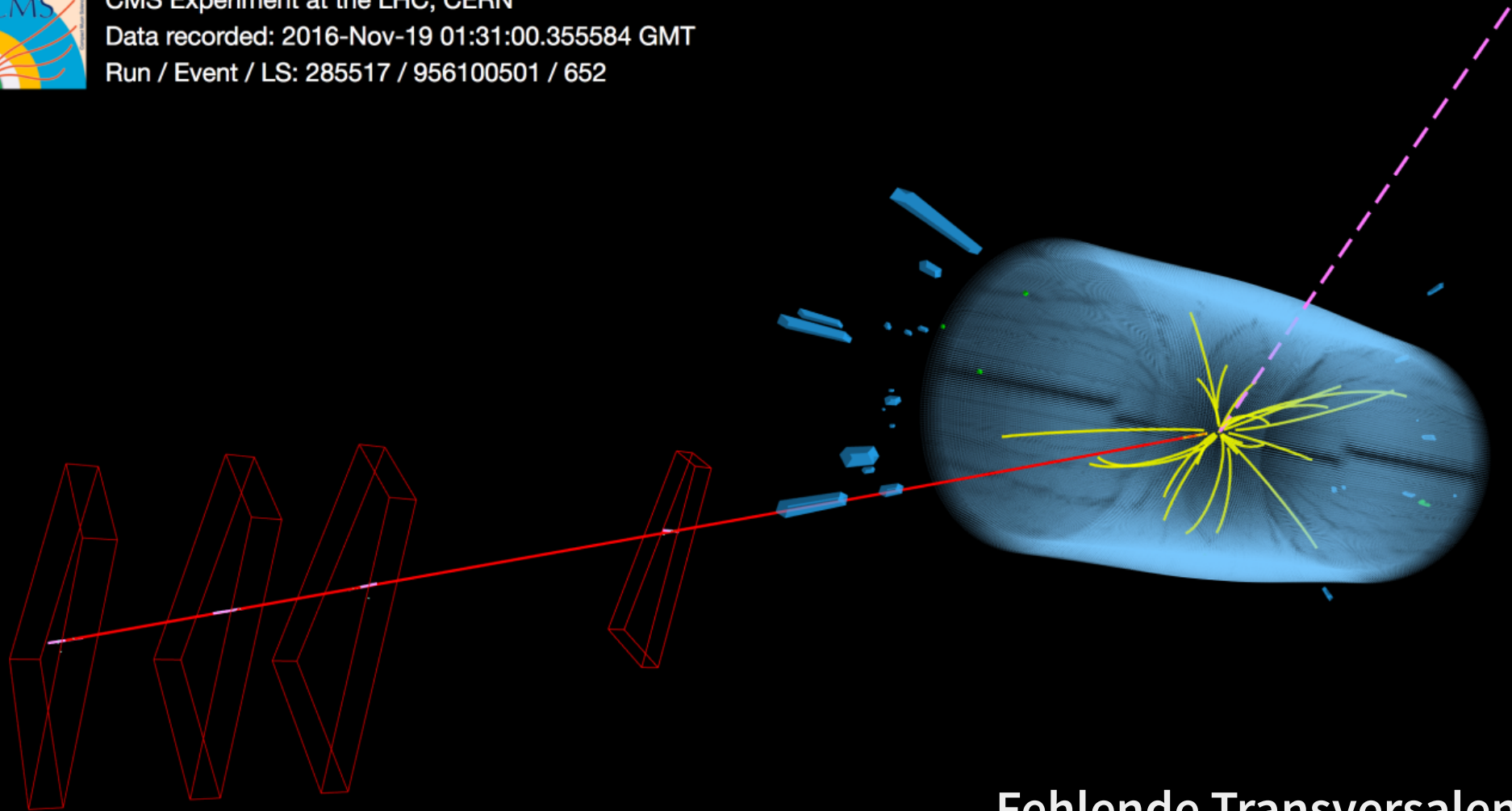
- Neutrinowechselwirkungen haben sehr geringer Wirkungsquerschnitt
- Nachweis von Neutrinos benötigt
 - sehr großen Detektor und hohe Neutrinoflüsse oder
 - hermetischen Detektor für Messung fehlender Energie



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2016-Nov-19 01:31:00.355584 GMT

Run / Event / LS: 285517 / 956100501 / 652



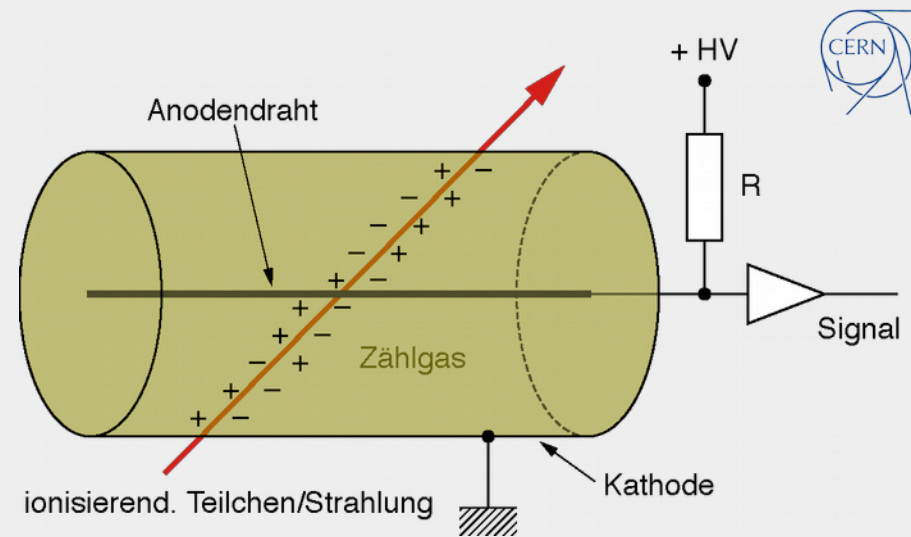
Fehlende Transversalenergie
Messung von Neutrinos

Teilchendetektoren

Historischer Überblick

Geiger-Müller-Zählrohr

- „Klick“ = Teilchendurchgang
- „Viel Klick“ = Viele Teilchen
- „Sehr viel Klick“ = Schnell weg...

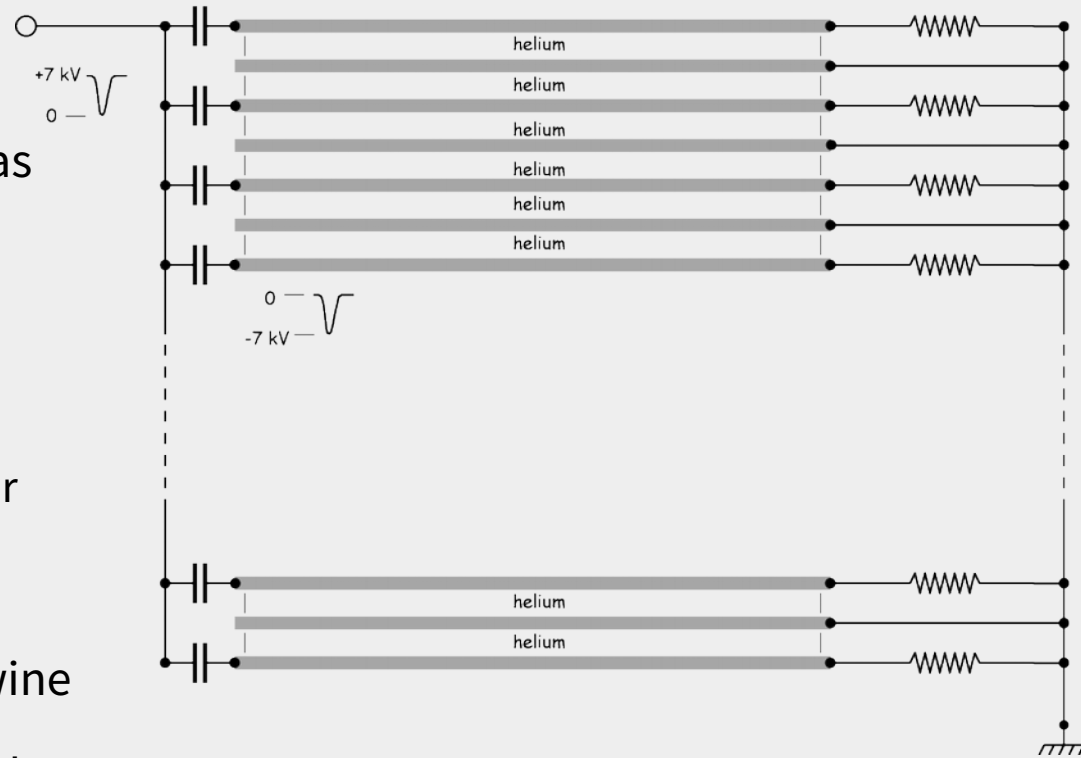


- Detektor gefüllt mit Edelgas
 - Geladene Teilchen ionisieren Edelgas-Atome
 - Hohe Spannung zwischen Elektroden verstärkt Signal
- Signal: Strompuls an Lautsprecher: Klick



Funkenkammer

- „Viele Geigerzähler“
- Durchsichtige Kammer, gefüllt mit Edelgas und vielen parallelen Platten
 - Spannung (\sim kV) zwischen Platten
 - Teilchen ionisieren Edelgasatome
 - Kleine Funken entlang der Teilchenspur
- Analyse durch Fotos oder Mikrofone
- Relativ große Totzeit: Abklingzeit der Lawine
- Eingesetzt während der 1930er-1960er Jahre
- **Funkenkammer in Aktion: CERN Globe**

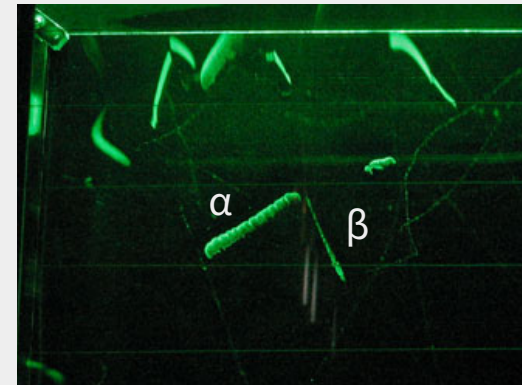
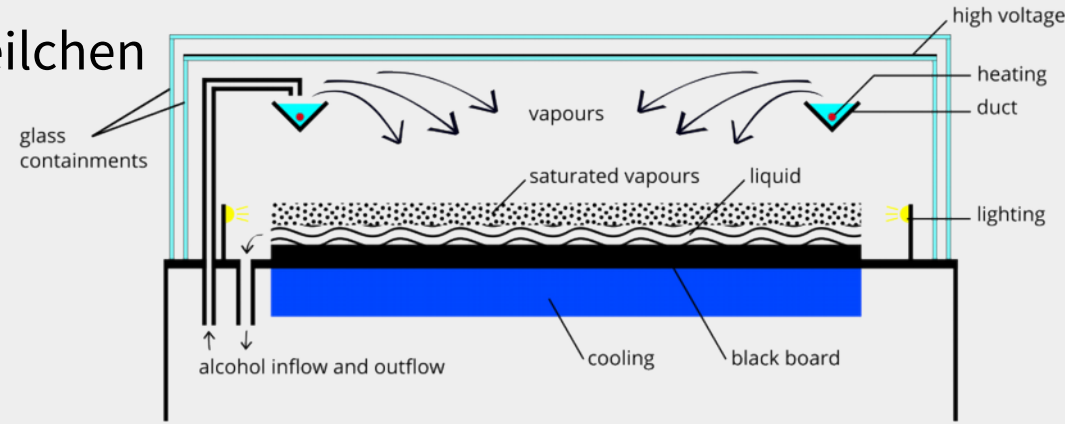




Funkenkammer
CERN Globe Exhibition

Nebelkammer

- Optischer Nachweis von geladenen Teilchen
 - Durchsichtige Kammer mit übersättigtem Luft-Alkohol-Gemisch
 - Energiereiches, geladenes Teilchen erzeugt durch Stoßionisation Ionen
 - Ionen agieren als Kondensationskeime, Tröpfchenbildung im Gasgemisch
- Art der Spuren lassen sich (manchmal) Teilchen zuordnen
- Nobelpreis 1927 für Charles Thomson Rees Wilson
- Heute, 14:00: Nebelkammer Workshop





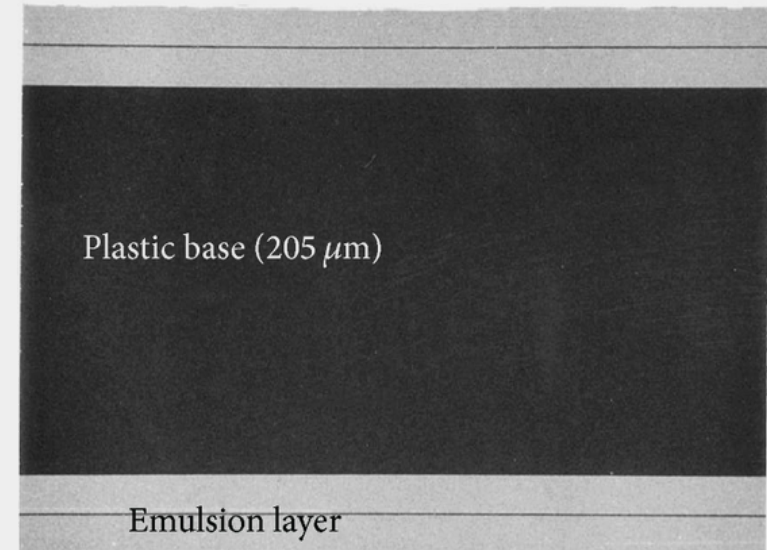
Nebelkammer-Aufnahme
Künstlerische Interpretation



Detailaufnahme von Tröpfchen
Nebelkammer mit Isopropylalkohol

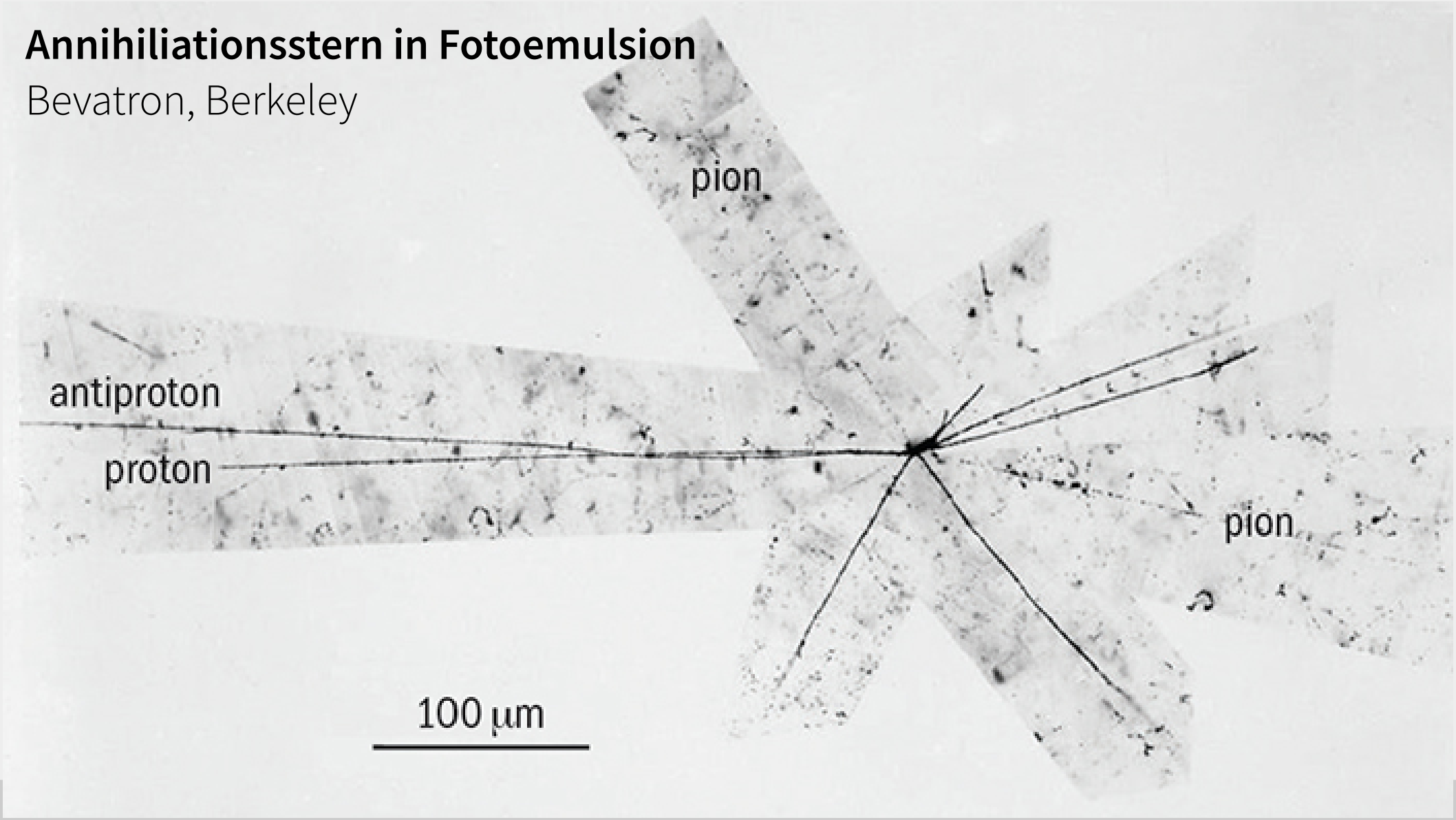
Photoemulsion

- Fotoplatte mit dicker empfindlicher Schicht und sehr gleichmäßiger Korngröße
 - Ionisierende Strahlung hinterlässt Spuren
 - Entwicklung der Platte
 - Spuren der Teilchen (geschwärzt durch Silber) sichtbar mit Mikroskop
- **Nobelpreis 1950 für Cecil Powell**
- OPERA Experiment in Gran Sasso
 - Photoemulsions-Platten zur Teilchenrekonstruktion
 - AgBr-Emulsion, Kooperation mit Fuji Film: 9 Millionen Filme, je ca. 10 x 12 cm

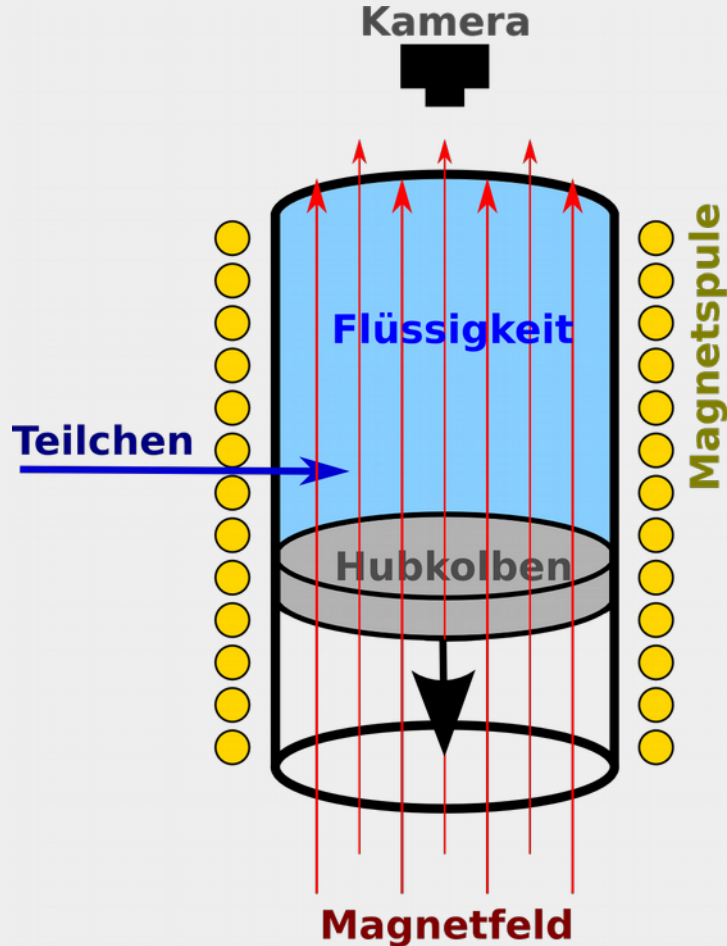


Annihilationsstern in Fotoemulsion

Bevatron, Berkeley



Blasenkammer



- Optisch durchsichtige Kammer gefüllt z.B. mit flüssigem Wasserstoff
 - Temperatur der Flüssigkeit nahe des Siedepunktes
 - Verringerung des Kammerdrucks mit Kolben
 - Temperatur der Flüssigkeit liegt nun oberhalb des Siedepunktes
 - Geladene Teilchen erzeugen Ionen entlang Spur
 - Ionen dienen als Keime für Gasblasen
- Analyse von Fotos der Spuren
- **Nobelpreis 1960 für Donald A. Glaser**

Blasenkammern @ CERN



- Wichtigster Teilchendetektor-Typ in den 1970er
- Teilchenquelle: Proton-Synchrotron
- Gargamelle – 1970–1978
 - 4.8 m x 1.88 m, 12 000 l
 - Erstmaliger Nachweis des Z-Bosons
- BEBC – 1971–1984
 - Big European Bubble Chamber
 - 3.5 T Magnetfeld von supraleitenden Spulen
 - Entdeckung des D-Mesons
- Zu besichtigen hinter „Microcosm“

Blasenkammer-Aufnahme

Big European Bubble Chamber @ CERN



Problematik früher Teilchendetektoren

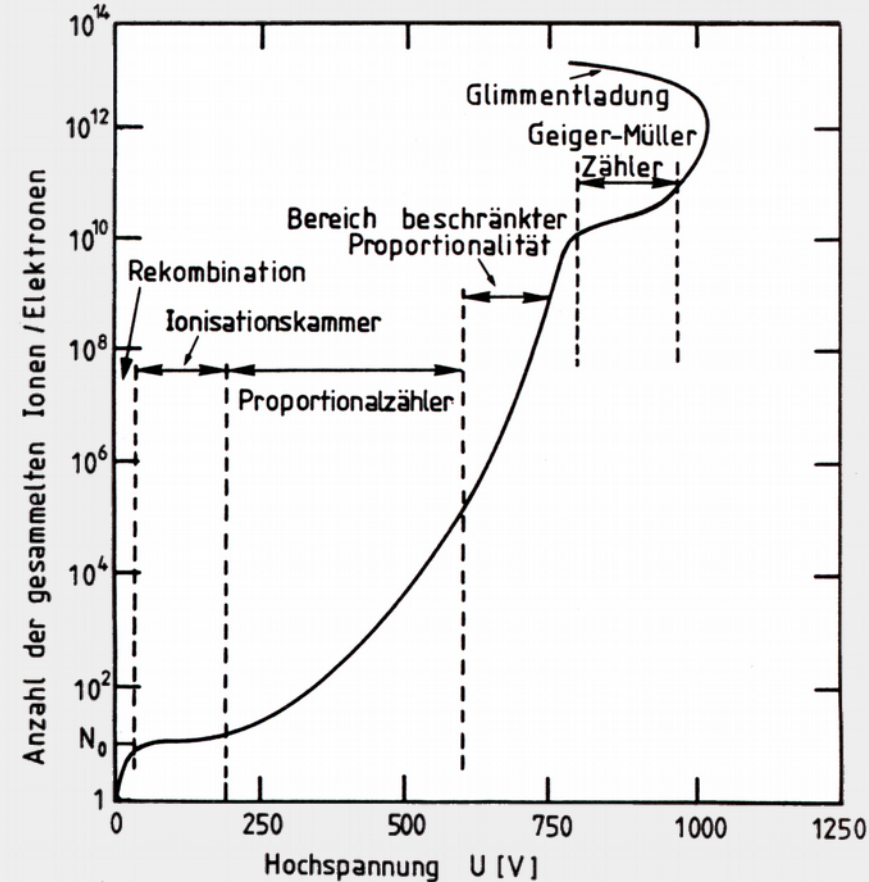
- Viele basierend auf fotografischen Aufnahmen
 - Datenauswertung aufwendig und nur von Hand möglich
 - Limitierung der Datenmenge
- Lange Detektor-Totzeiten
 - Keine weitere Messung möglich, bis Gas-Lawine abgeklungen/Bläschen verschwunden sind
 - Nur geringe Teilchenraten möglich
- Nur wenig Information in Messung
 - Aussage über Teilchenort (& -Impuls), aber keine Energie/Zeit-Messung

Gasdetektoren

Primär- & Sekundärionisation von Gasatomen

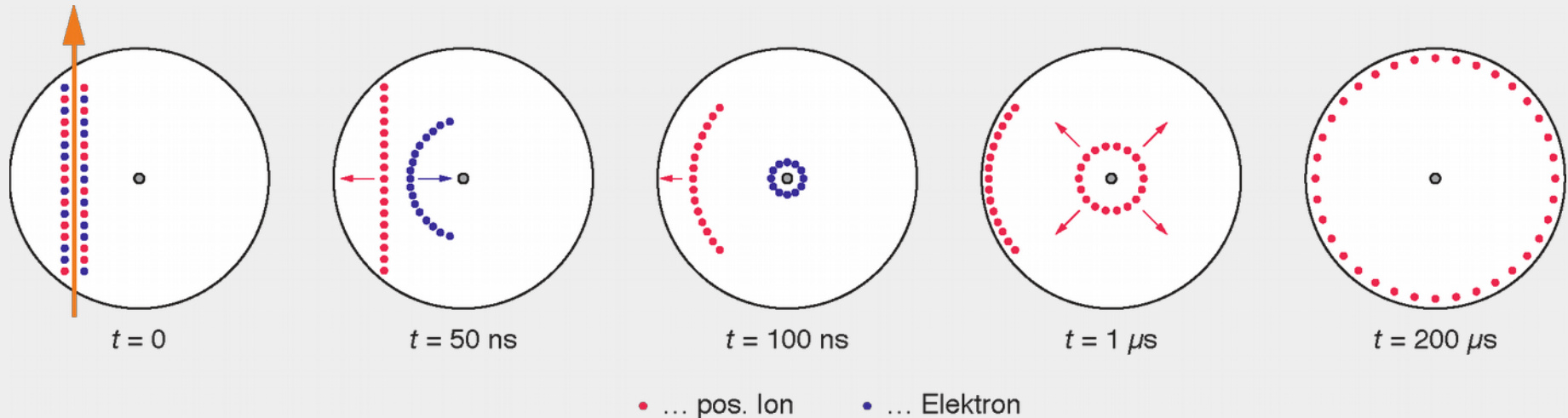
Gasdetektoren: Funktionsprinzip

- **Primärsignal:** geladenes Teilchen erzeugt durch Ionisation Elektron-Ion-Paare
 - Edelgase: relativ geringe Ionisationsenergie
 - Mittlere Energie zur Erzeugung eines Paares ~ 30 eV
 - Anzahl proportional zu deponierter Energie
- **Verstärkung:** verschiedene Arbeitsbereiche je nach angelegte Spannung
 - Mittlere Spannungen: proportionale Verstärkung
 - Hohen Spannungen: Lawinenbildung durch Sekundärionisationen

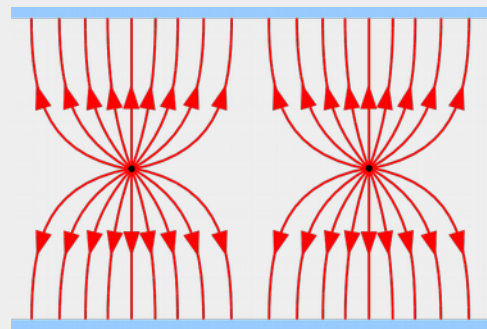
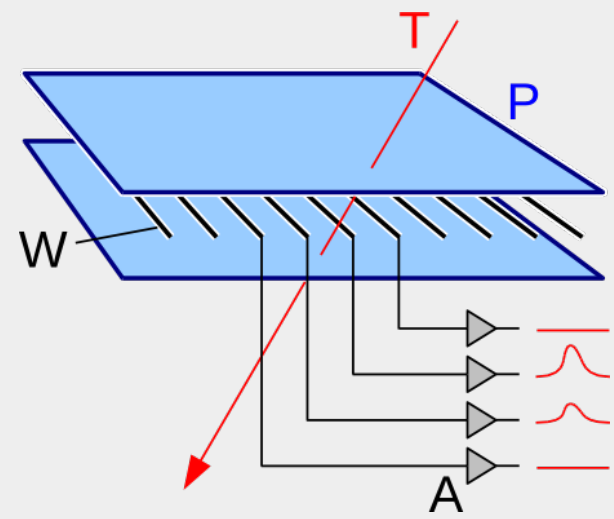


Proportional-Zählrohr

- Sehr ähnlich zum Geigerzähler: Anode in Form von dünnem Draht
- Hohes Feld in Drahtnähe führt zu Elektronenvervielfachung / Signalverstärkung
- Wahl der Spannung: Proportionalbereich
 - Ausgangssignal proportional zu ursprünglicher Zahl von Ionisationen



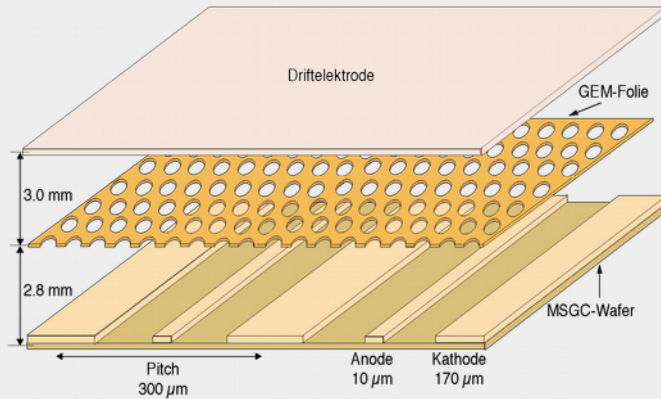
Vieldraht-Proportionalkammern



- Englisch: Multi Wire Proportional Chamber, MWPC
- Wie ebene Lage von vielen Proportionalzählrohren ohne trennende Zwischenwände
- Drähte im Abstand von wenigen Millimetern
 - Gute Ortsauflösung eines durchquerenden Teilchens
 - Große Flächen möglich
 - Elektronische Auslese
- Hohe Raten möglich: 1000 Teilchen/s
zum Vergleich, Blaskammer: 1-2 Teilchen/s
- **Nobelpreis 1992 für Georges Charpak**

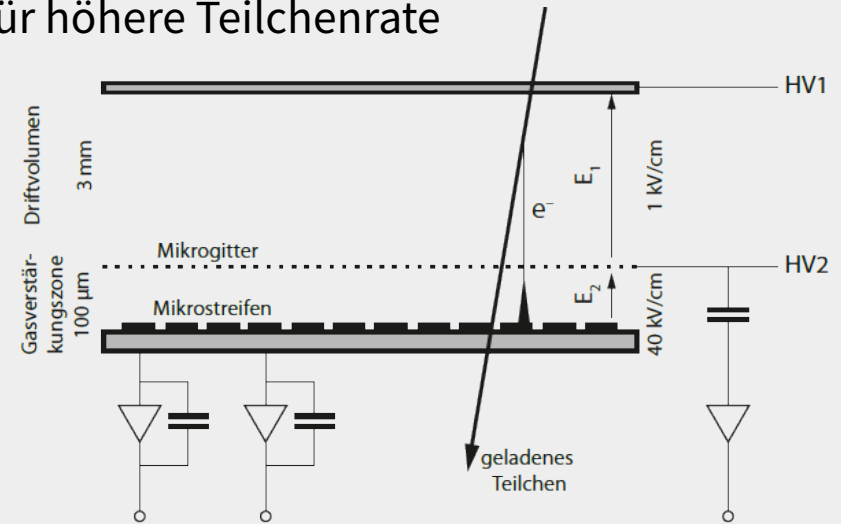
Micropattern-Gas-Detektoren

- Ersetzen der fragilen Drähte durch Mikrostrukturen
- Potentiell bessere Ortsauflösung und anwendbar für höhere Teilchenrate



Gas-Elektronenverstärker (GEM)

- Perforierte, metallisierte Kapton-Folie, Hochspannung zwischen Elektroden
- Starkes Dipol-Feld in Perforationslöchern: Gasverstärkung

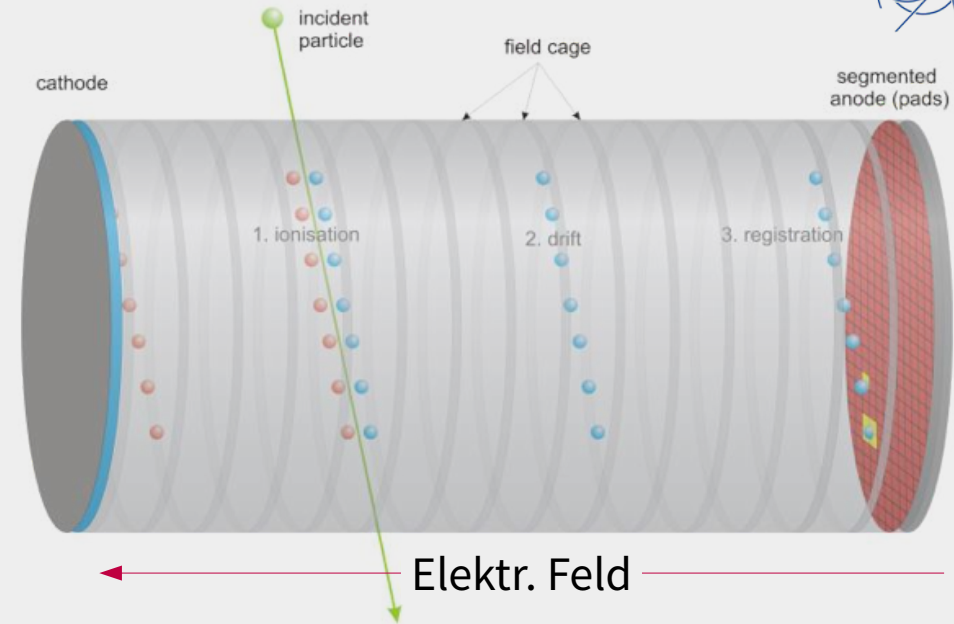


Micro-Mesh Gas Detectors (Micromegas)

- Metallisches Mikrogitter
- Elektron-Lawinenentwicklung in Nähe des Gitters: Gasverstärkung

Zeitprojektionskammern (TPC)

- Großes Gasedetektor-System
- Ionisation entlang der Teilchenspur
 - Elektronen und Ionen driften im E-Feld
 - Segmentierte Anode: 2D-Information
 - Messung der Driftzeit: 3D-Information
- Auslese an Anodenseite z.B. über Vieldraht-Proportionalkammer, GEMs, ...





Zeitprojektionskammer
ALICE Experiment @ LHC

Zusammenfassung

- Teilchendetektion
 - Messung erfolgt durch Wechselwirkung des zu messenden Teilchens mit Detektormaterial
 - Es gibt kein einzelnes Detektorkonzept, das alle Teilchenarten / -Eigenschaften nachweisen kann
 - Man benötigt mehrere Detektortechnologien und -konzepte
- Wechselwirkung von Strahlung und Materie
 - Ionisation und Anregung der Detektoratome, Bremsstrahlung, Cherenkov-Strahlung
 - Photoeffekt, Compton-Effekt, Paarproduktion,
 - Hadronische Wechselwirkung, fehlende Energie, ...
- Historische Detektoren
 - Nebelkammer, Fotoemulsion, Blaskammer, Funkenkammer
- Gasetektoren
 - Funktionsprinzip
 - Proportionalzählrohr, Vieldraht-Proportionalkammer
 - Micropattern-Gas-Detektoren
 - Spurendriftkammer

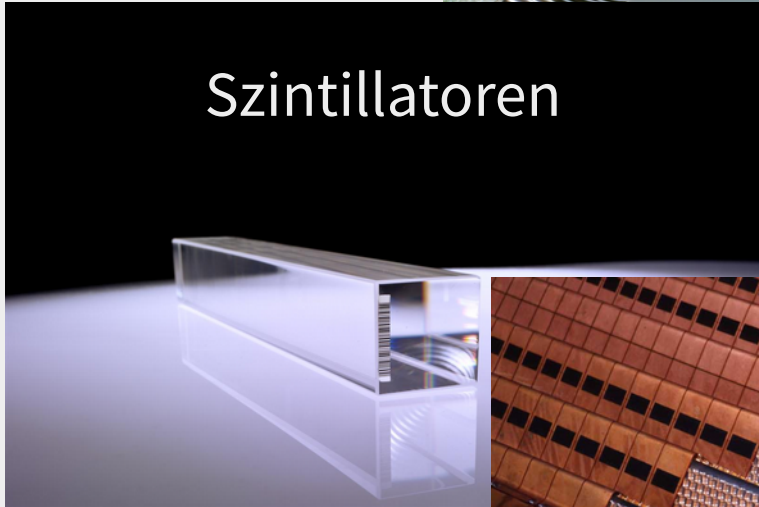
Ressourcen / Quellen

- Vorangegangene Vorlesungen im CERN Lehrerprogramm:
Eva Sicking, Kristof Schmieden
- Websites:
 - Particle Data Group – Passage of particles through matter
<http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-passage-particles-matter.pdf>
 - Deutsche / englische Wikipedia – Beschreibungen, Formeln, Diagramme, Photos
 - CERN CDS Server – Photos alter Experimente
<https://cds.cern.ch>
 - Websites der LHC-Experimente – Event Displays, Photos
[ALICE](#), [ATLAS](#), [CMS](#), [LHCb](#)
- Literatur:
 - Povh, Rith: Teilchen und Kerne, Springer – Beschreibung der Materie: Teilchen, Kerne, Wirkungsquerschnitte
 - Kolanoski, Wermes: Teilchendetektoren, Grundlagen und Anwendungen, Springer – Überblick zu Detektoren

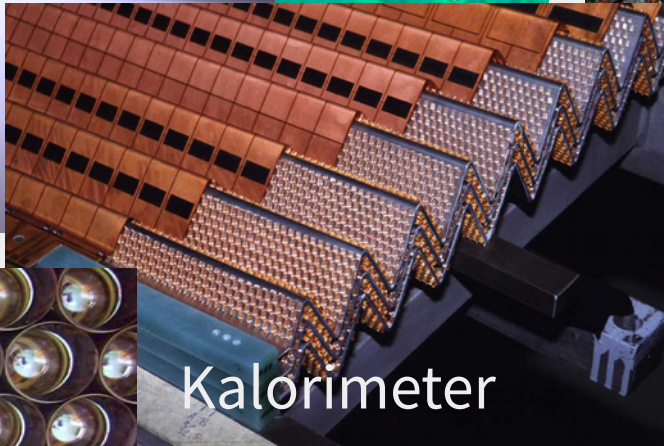
Ausblick

Halbleiterdetektoren

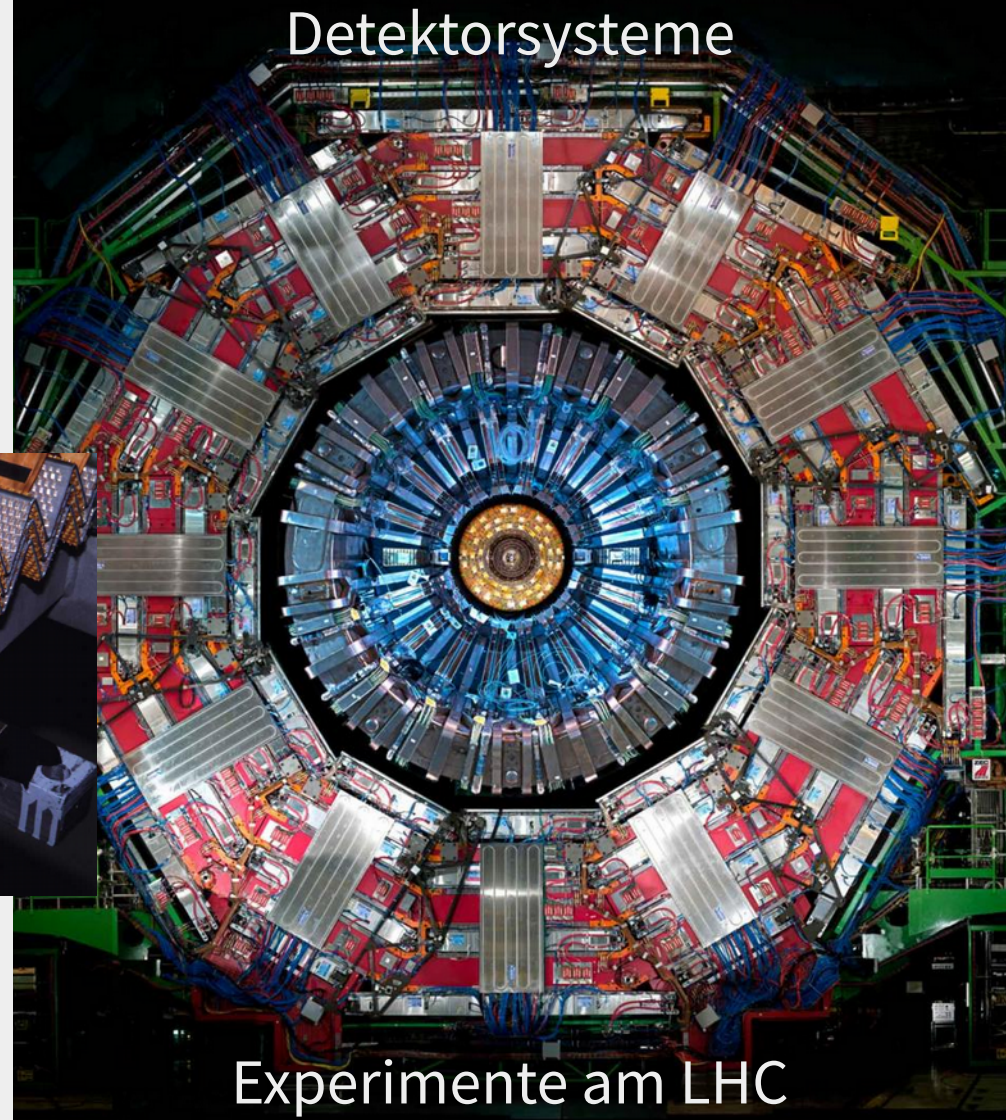
Szintillatoren



Cherenkov-Detektoren



Kalorimeter



Detektorsysteme

Experimente am LHC

