Teilchendetektoren in der Hochenergiephysik
- Teil 1 -

Eva Sicking (CERN)

Deutsches Lehrerprogramm am CERN

13. Juni 2017 – CERN, Genf, Schweiz

Übersicht

1. Einleitung
2. Wechselwirkung von Strahlung und Materie
3. Historische Detektoren
4. Gasdetektoren

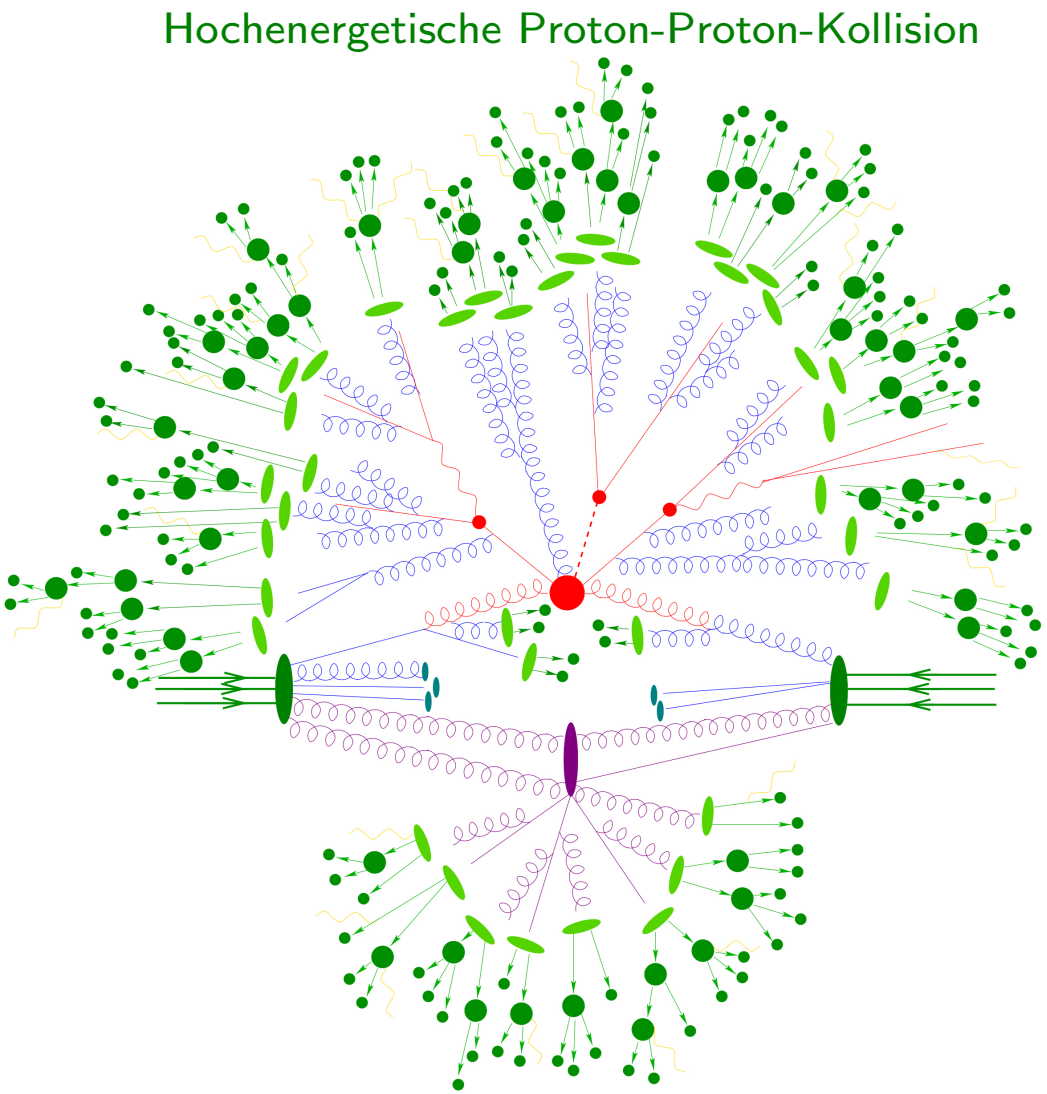
5. Halbleiterdetektoren
6. Szintillatoren
7. Kalorimeter
8. Teilchenidentifikation
9. Detektorsysteme
10. Zusammenfassung

Quellen - Teil 1

- Vorlesung von Manfred Krammer zu "Detektoren", 2009
- Vorlesung von Norber Wermes zu "Tracking and Tracking Detectors", 2016
- Vorlesung von Kristof Schmieden zu "Teilchendetektoren", Deutsches Lehrerprogramm CERN, 2016
- Vorlesung von Lucie Linssen und Fergus Wilson zu "Particle Detectors, 2015
- Vorlesung von Michael Hauschild zu "Teilchendetektoren", Deutsches Lehrerprogramm CERN, 2013
- Particle Data Group, http://pdg.lbl.gov/
- Frank Krauss, Sherpa: Model einer Proton-Proton-Kollision
- Delta-Elektronen: https://physics.stackexchange.com/
- Nebelkammer: http://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/
- BEBC: http://cds.cern.ch/record/733768
- Bild einer Blasenkammer (BEBC): https://home.cern/about/updates/2015/06/seeing-invisible-event-displays-particle-physics
- Fotoemulsion/Annihilation: http://cerncourier.com/cws/article/cern/62197
- ALICE TPC dE/dx: http://cerncourier.com/cws/article/cern/50561
- ALICE Eventdisplay: http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html
- Wikipedia
  - https://de.wikipedia.org/wiki/Elementarteilchen
  - https://de.wikipedia.org/wiki/Blasenkammer
  - https://de.wikipedia.org/wiki/Bremsstrahlung
  - https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation
  - https://de.wikipedia.org/wiki/Photoelektrischer_Effekt
  - https://de.wikipedia.org/wiki/Compton-Effekt
  - https://de.wikipedia.org/wiki/Rayleigh-Streuung
  - https://en.wikipedia.org/wiki/Bubble_chamber

Einleitung

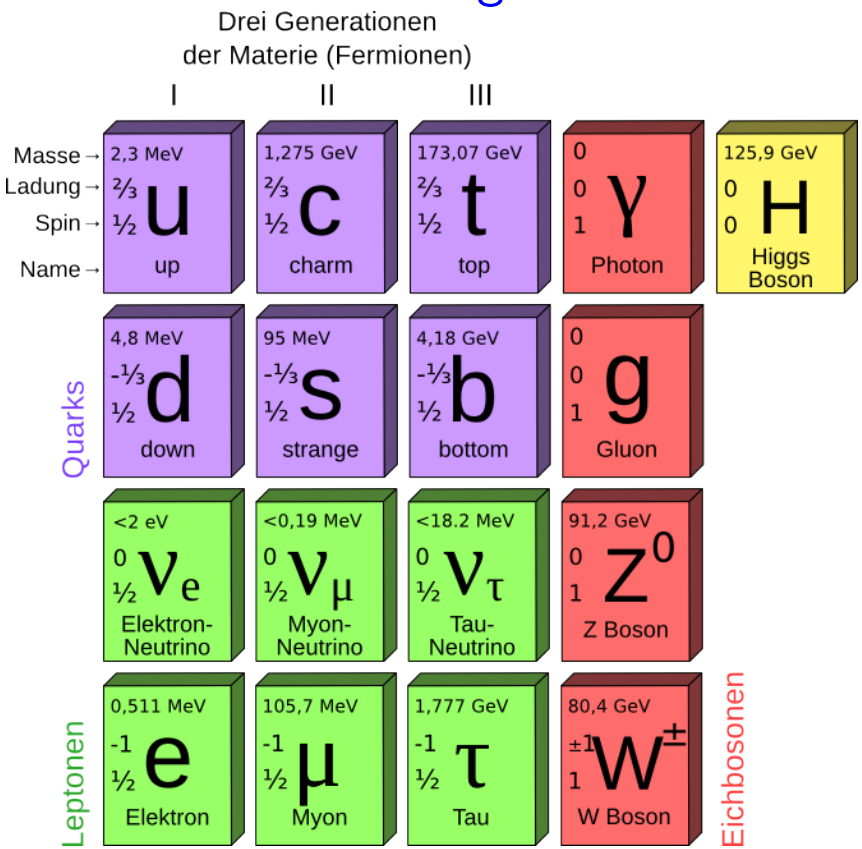
Hochenergetische Teilchenkollision



- Proton-Proton-Kollision
  - Einfliegende Protonen
  - Harte Parton-Parton-Wechselwirkung
  - Strahlung der gestreuten Partonen
  - Hadronisation
  - Weitere Parton-Parton-Interaktion

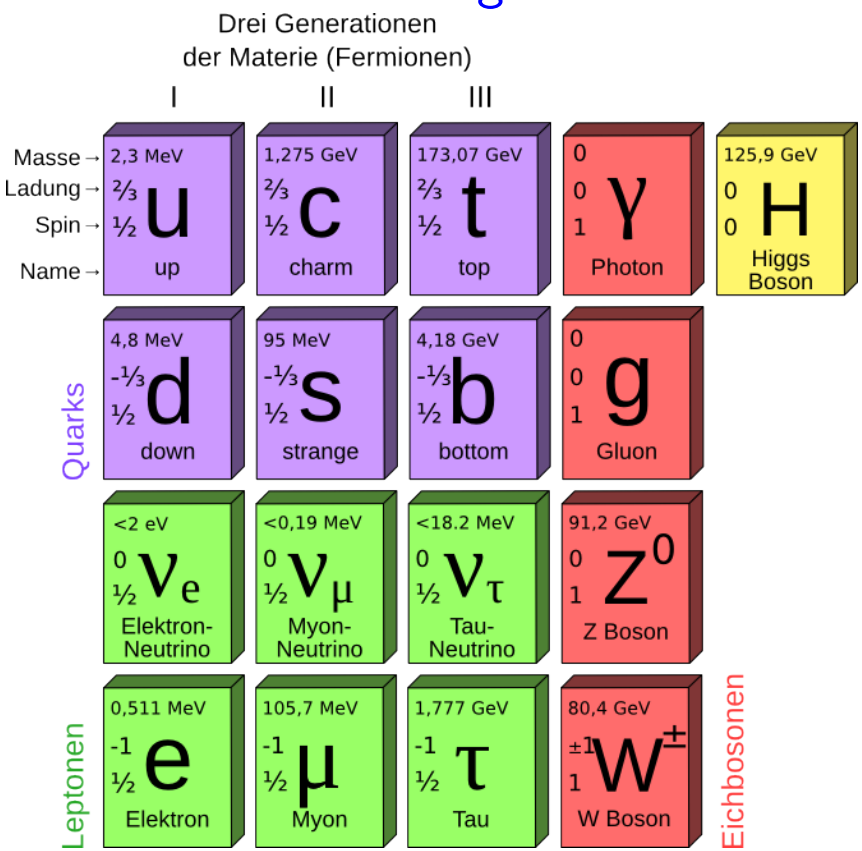
Was misst man?

Interesse an Elementarteilchen und ihren Wechselwirkungen



Was misst man?

Interesse an Elementarteilchen und ihren Wechselwirkungen



Man misst aber

Citation: C. Patrignani *et al.* (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016)

LIGHT UNFLAVORED MESONS
($S = C = B = 0$)

For $I = 1$ (π, b, ρ, a): $u\overline{d}$, $(u\overline{u}-d\overline{d})/\sqrt{2}$, d
for $I = 0$ (η, η', h, h', ω, ϕ, f, f'): $c_1(u\overline{u}+d\overline{d})$ +

Zusammensetzung

$\pi^{\pm}$ $I^G(J^P) = 1^-(0^-)$

Spin

Masse

Mass $m = 139.57018 \pm 0.00035$ MeV (S = 1.2)
Mean life $\tau = (2.6033 \pm 0.0005) \times 10^{-8}$ s (S = 1.2)
$c\tau = 7.8045$ m

Lebensdauer

orm factors [a]
54 ± 0.0017
$F_A = 0.0119 \pm 0.0001$
F_V slope parameter $a = 0.10 \pm 0.06$
$R = 0.059^{+0.009}_{-0.008}$

Formfaktoren

π^- modes are charge conjugates of the modes below.

For decay limits to particles which are not established, see the section on Searches for Axions and Other Very Light Bosons.

π^+ DECAY MODES		Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	p (MeV/c)
$\mu^+\nu_\mu$	[b]	(99.98770±0.00004) %		30
$\mu^+\nu_\mu\gamma$	[c]	(2.00 ±0.25) × 10^{-4}		30
$e^+\nu_e$	[b]	(1.230 ±0.004) × 10^{-4}		70
$e^+\nu_e\gamma$	[c]	(7.39 ±0.05) × 10^{-7}		70
$e^+\nu_e\pi^0$		(1.036 ±0.006) × 10^{-8}		4
$e^+\nu_e e^+e^-$		(3.2 ±0.5) × 10^{-9}		70
$e^+\nu_e\nu\overline{\nu}$		< 5 × 10^{-6}	90%	70
Lepton Family number (LF) or Lepton number (L) violating modes				
$\mu^+\overline{\nu}_e$	L	[d] < 1.5 × 10^{-3}	90%	30
$\mu^+\nu_e$	LF	[d] < 8.0 × 10^{-3}	90%	30
$\mu^-e^+e^+\nu$	LF	< 1.6 × 10^{-6}	90%	30

Zerfallskanäle

Zerfallswahrscheinlichkeiten

Wie misst man Teilchen?

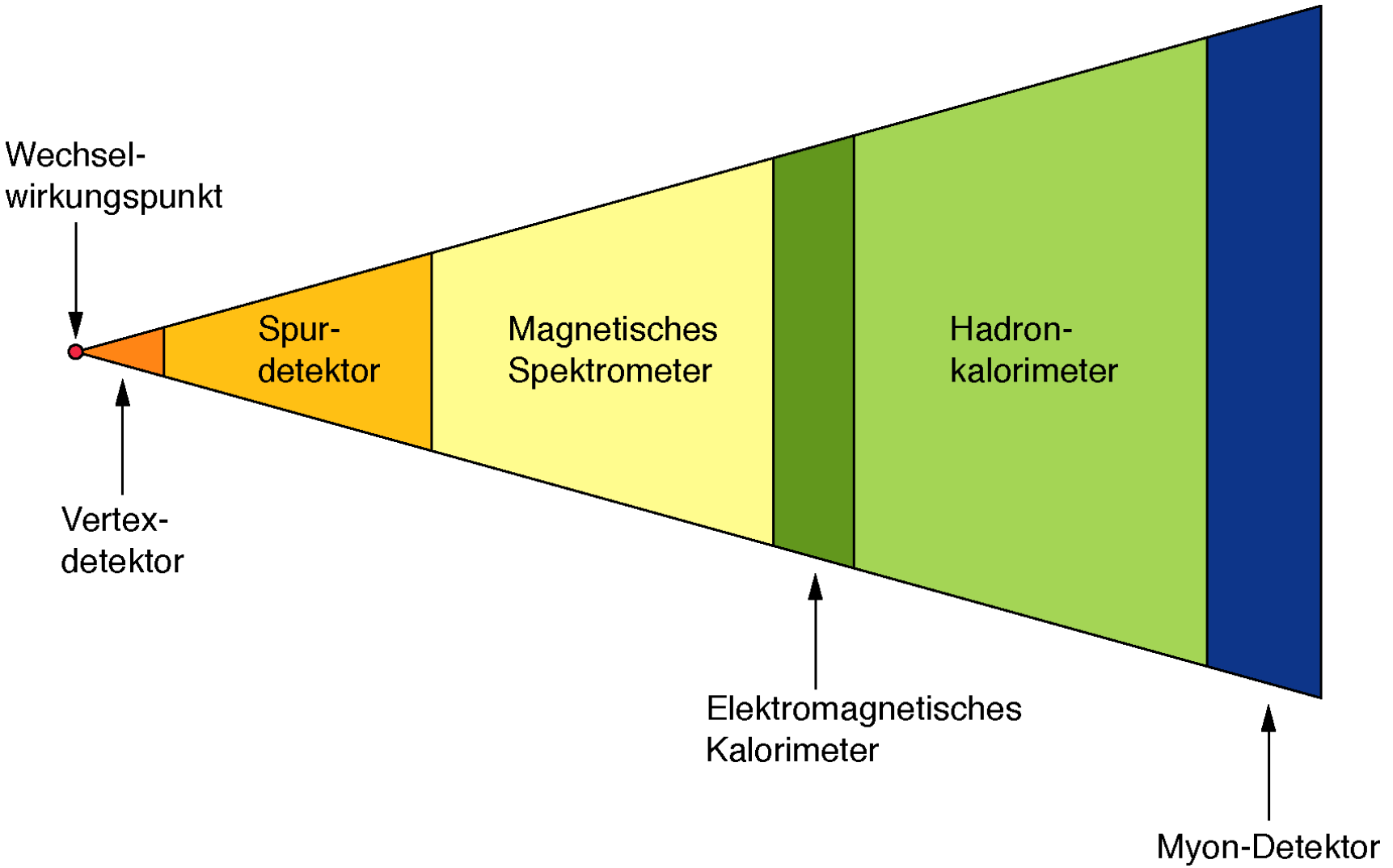
- Eine Messung erfolgt durch eine Wechselwirkung des zu messenden Teilchens mit dem Detektormaterial
- Zwei Effekte
  1. Erzeugung eines kleinen, messbaren Signals (z.B. durch Ionisation, Anregung - Szintillation, Wärme, ...)
  2. Veränderung der Teilcheneigenschaften (Energieverlust, Änderung der Flugbahn durch Streuung, Absorption)

- Vier Wechselwirkungen sind bekannt
  1. Elektromagnetische Kraft
  2. Schwache Kraft
  3. Starke Kraft
  4. Gravitation
- Nicht alle Teilchen unterliegen allen Wechselwirkungen
- Verschiedene Nachweismethoden für unterschiedliche Energiebereiche
- Es gibt keinen Detektor, der alle Erfordernisse erfüllt

→ Man benötigt mehrere Detektortechnologien und -konzepte

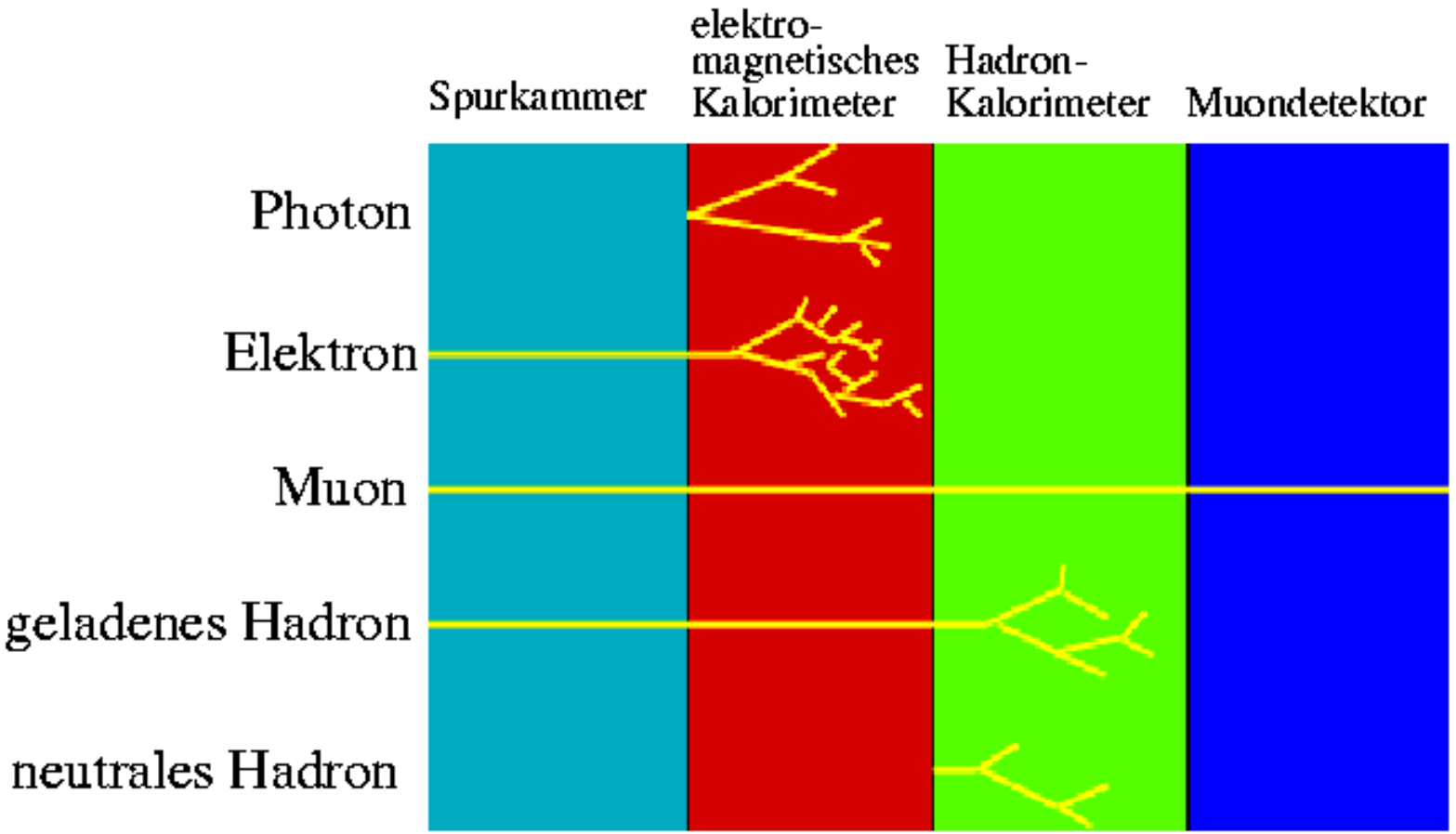
Prinzip eines Teilchendetektors

- Kombiniere komplimentäre Nachweismethoden um alle Teilchen zu messen



Detektierung und Unterscheidung von Teilchen

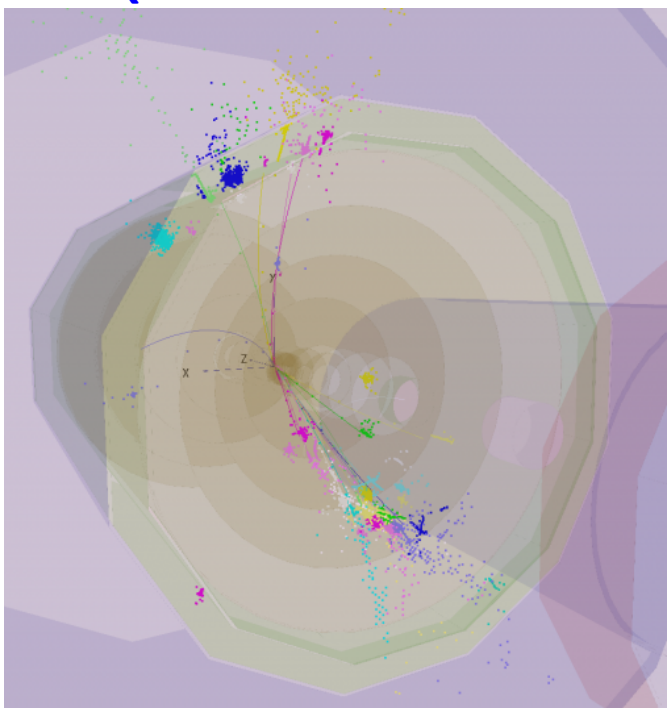
- Teilchen unterscheiden sich in der Art, in der sie mit Material interagieren
- Das kann man ausnutzen, um die Teilchen zu identifizieren



Kann man alle Teilchen messen?

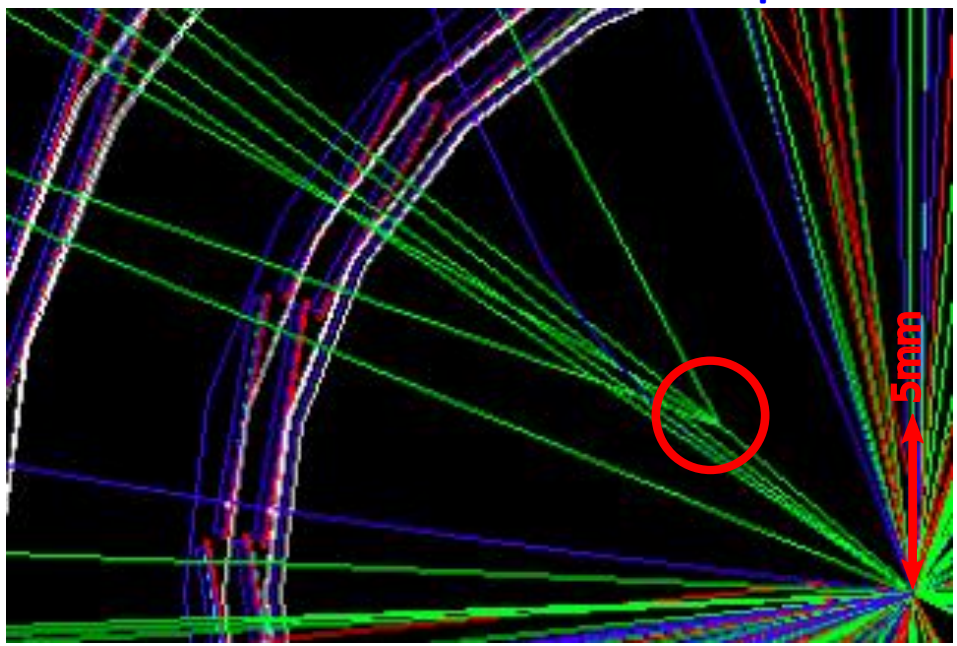
- Viele Elementarteilchen haben sehr kurze Lebensdauern
  - z.B. W, Z, Higgs und viele mehr
- Man sieht nur ihre Zerfallsprodukte

Quarks: Hadronisation



- Quarks hadronisieren in Jets von Teilchen

Sekundärvertex bei r=5 mm: b-quark



- Identifikation von Hadronen, die b-Quarks enthalten über Rekonstruktion von Sekundärvertex (langlebig)

Beispiele: Bestimmung von Teilcheneigenschaften

- Impuls p: über Ermittlung des Krümmungsradius im Magnetfeld
- Geschwindigkeit v: durch Flugzeitmessung, RICH, etc.
- (Vorzeichen der) Teilchenladung Q: aus Flugbahnkrümmung innerhalb eines Magnetfeldes
- Lebensdauer τ: aus Messung der Zerfallsstrecke
- Energie E: durch vollständige Absorption in Kalorimetern

- Teilchenmasse m: z.B. indirekte Bestimmung aus dem Impuls p und der Energie E oder der Geschwindigkeit v

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Wechselwirkung von Strahlung und Materie

Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

- Hochenergetische Teilchen wechselwirken mit Materie auf verschiedenste Arten
  - Ionisation der Detektoratome
  - Anregung der Detektoratome
  - Bremsstrahlung (relevant für $e^{\pm}$)
  - Cherenkov-Strahlung
  - Übergangsstrahlung
  - Photoeffekt
  - Compton-Effekt
  - Paarproduktion
  - Hadronische Wechselwirkung
  - ...
- Sie verlieren durch die Wechselwirkung Energie $\rightarrow$ Messung
- Je nach Teilchenart und -energie dominieren bestimmte Prozesse bzw. können manche Prozesse nicht auftreten

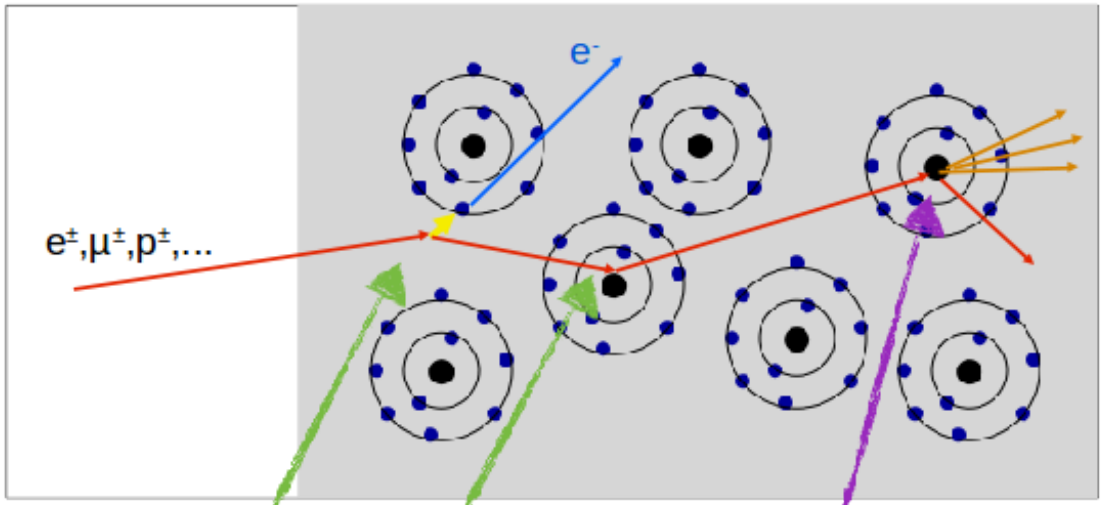
Geladene Teilchen: Allgemein

Leptonen: EM, schwache Wechselwirkung
Hadronen: EM, schwache, starke Wechselwirkung

Ionisation

Elastische Streuung
Rückstoß am Atom / Kristallgitter → Phonen

Inelastische Streuung

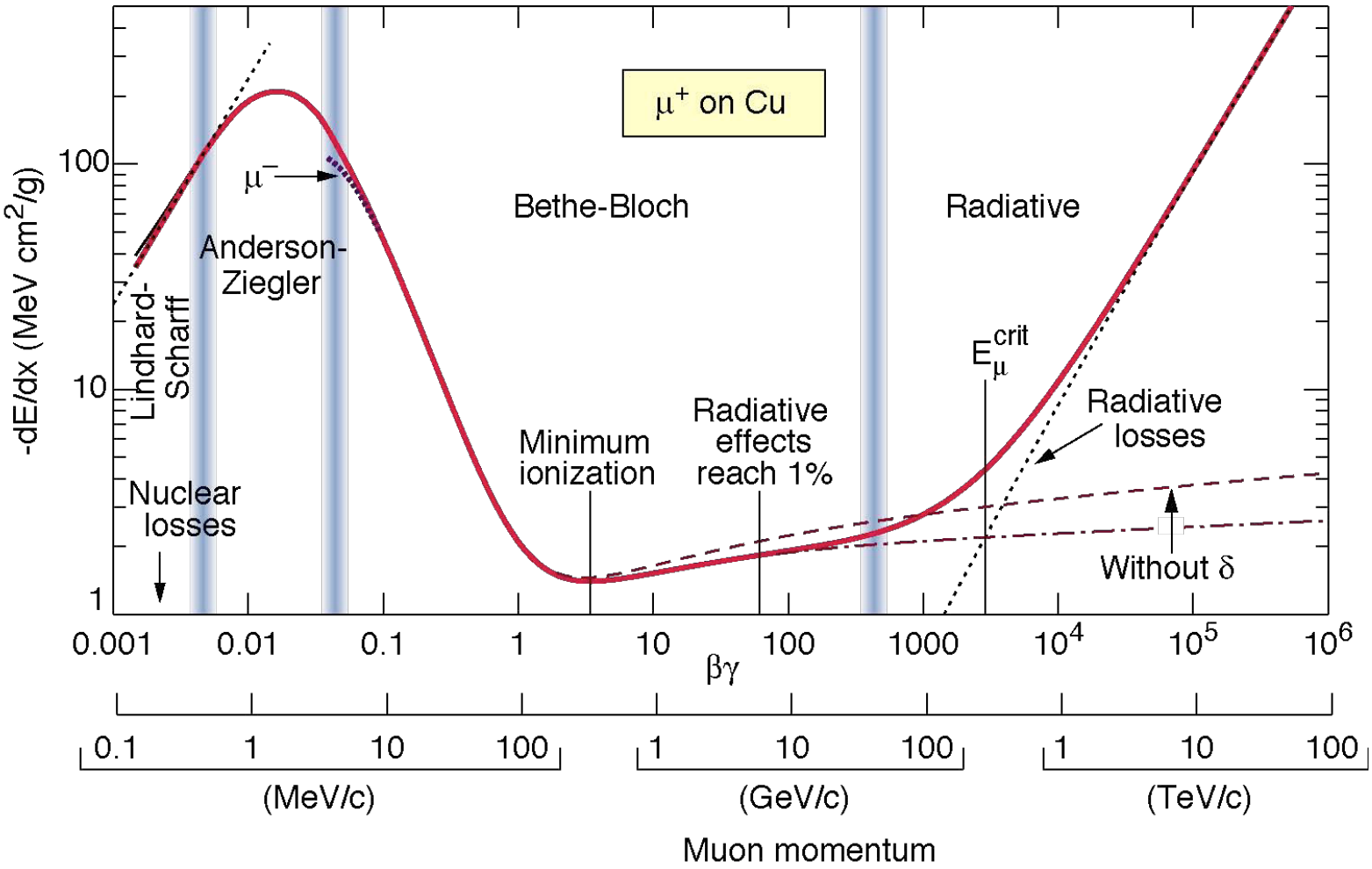


Elektromagnetische Wechselwirkung

Elektromagnetische oder Schwache oder Starke Wechselwirkung

Quelle: Kristof Schmieden

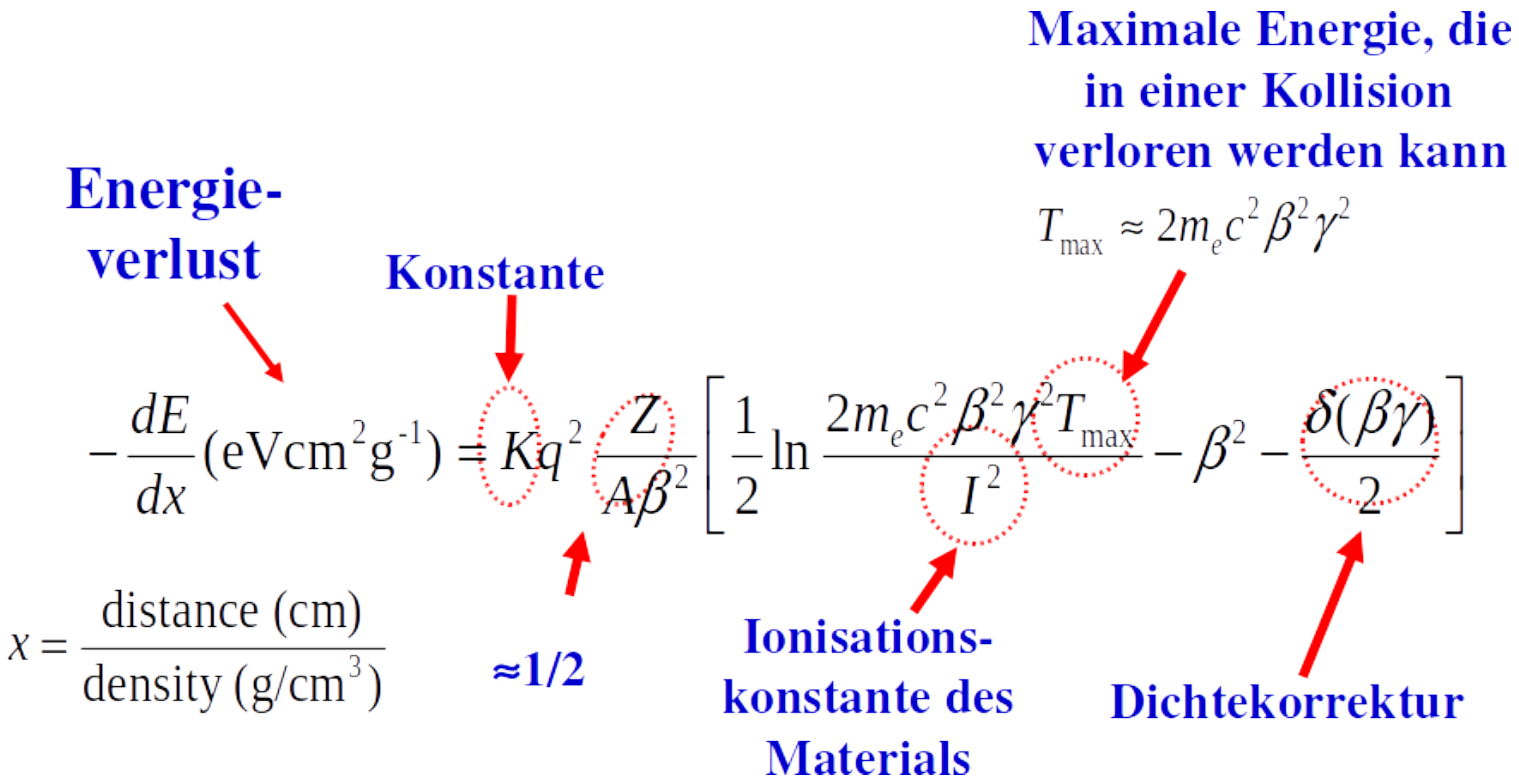
Geladene Teilchen: Energieverlust vs. Energie



- Je nach Projektilenergie sind verschiedene Prozesse von Bedeutung
- Ionisation, Anregung, Bremsstrahlung, ...

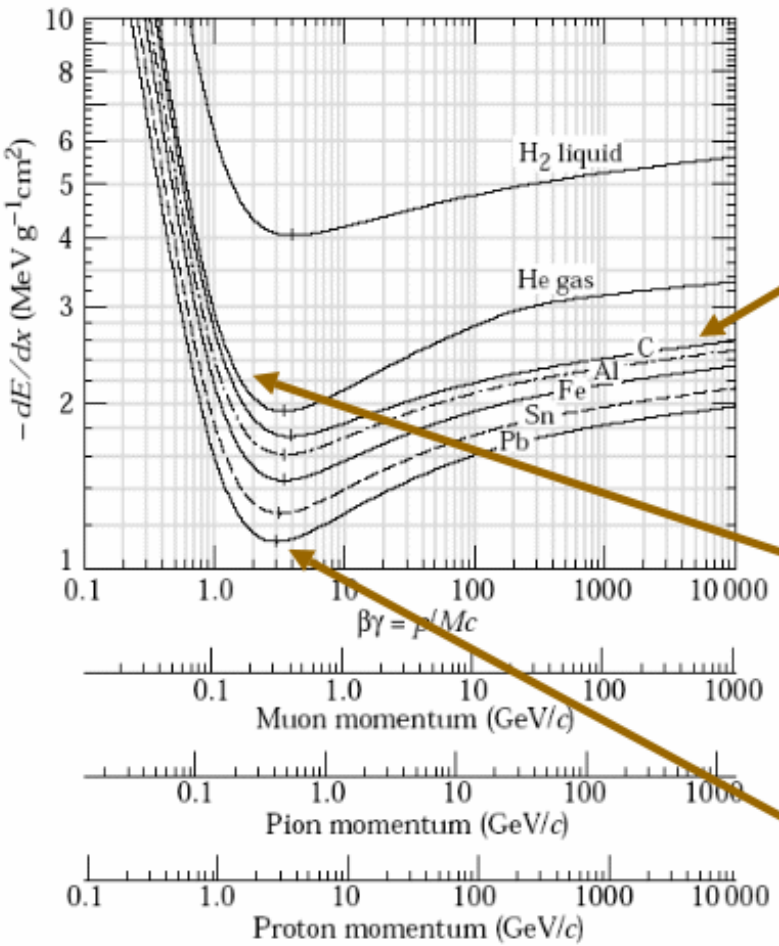
Geladene Teilchen: Bethe-Bloch-Formel

- (Schwere) geladene Teilchen wechselwirken mit den Elektronen im Material
- Energieverlust zwischen 6 MeV and 6 GeV berechenbar über Bethe-Bloch-Formel



- Energieverlust ist hauptsächlich eine Funktion von $\beta = \frac{v}{c}$

Geladene Teilchen: verschiedene Targetmaterialien



Bei hoher Energie
~ ln γ

$$-\frac{dE}{dx} \approx Kq^2 \frac{Z}{A\beta^2}\left[\ln\frac{2m_e c^2\beta^2\gamma^2}{I^2} - \beta^2\right]$$

Bei geringer Energie
~ 1/β²

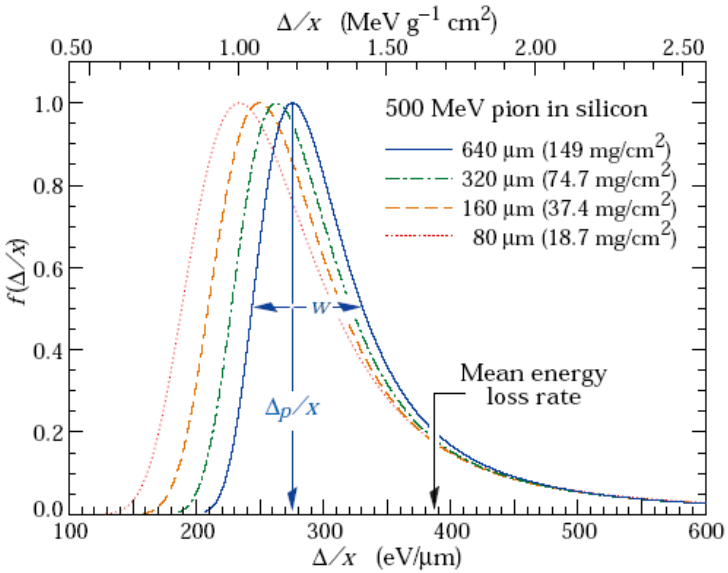
Minimum
bei γ≈3

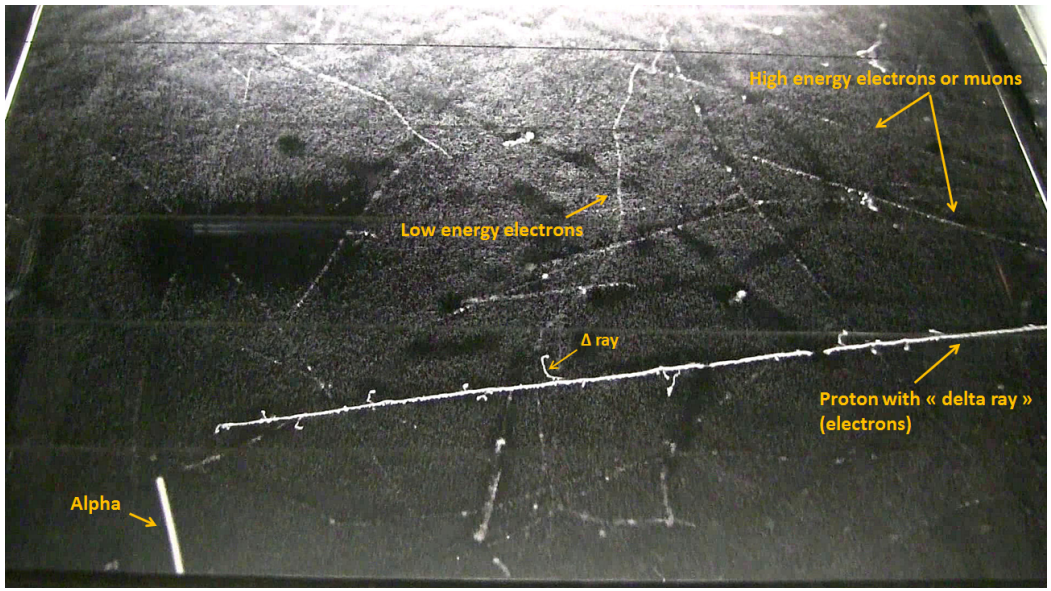
Distanz-Einheit (x):

➤ **g cm^{-2}**

Geladene Teilchen: Landau-Verteilung / Delta-Elektronen

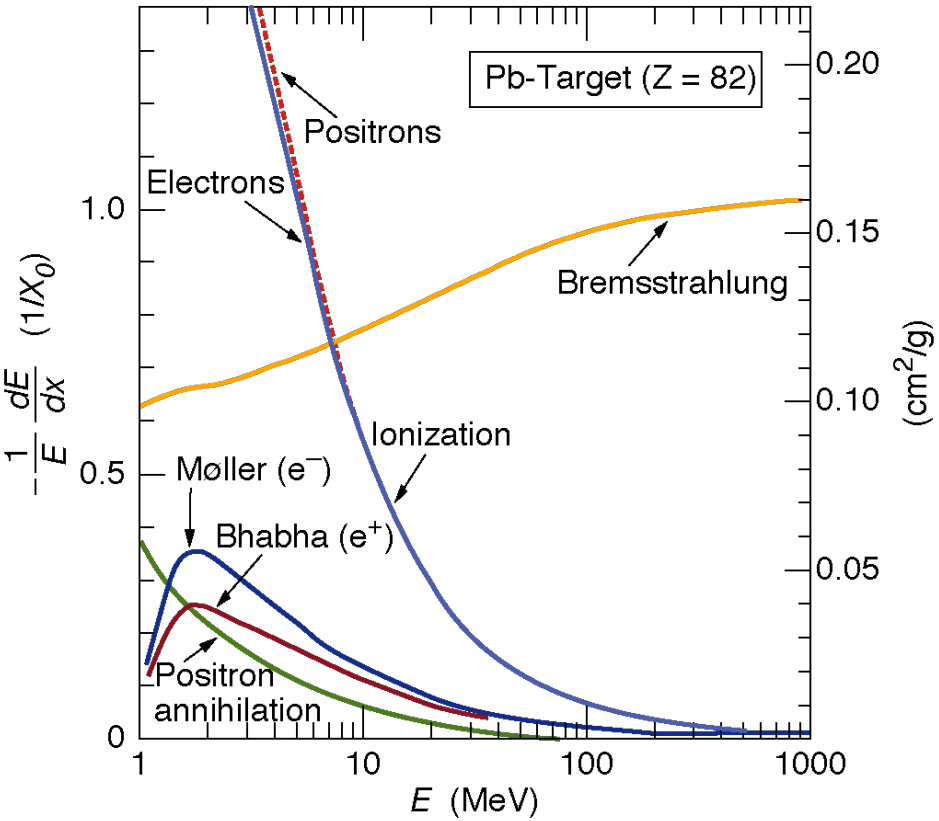
- Bethe-Bloch-Formel: Mittlerer Energieverlust pro zurückgelegter Wegstrecke
- Tatsächlicher Energieverlust fluktuiert um diesen Mittelwert





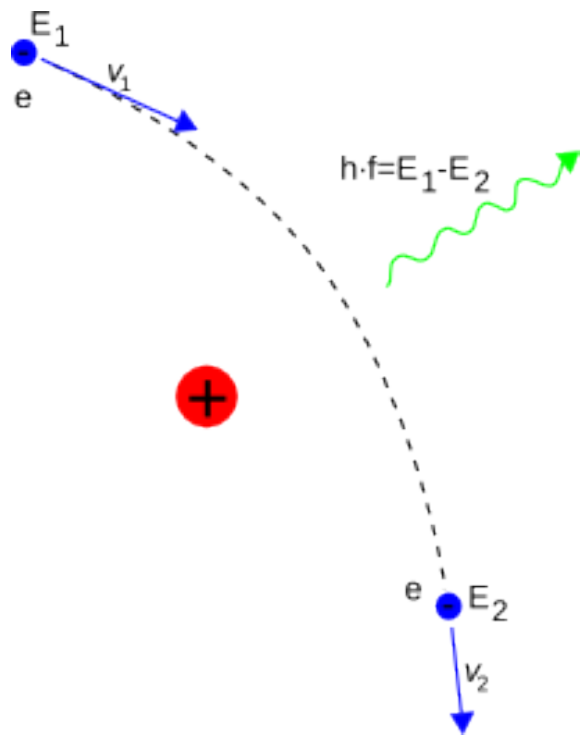
- Folgt einer Landauverteilung mit Ausläufer zu großen Energien
- Hüllenelektron können sehr hohen Energieübertrag erfahren → Delta-Elektronen
- Delta-Elektronen haben genügend große Energien, um weitere Ionisation anderer Atome zu verursachen

Geladene Teilchen: Sonderfall $e^{\pm}$ als Projektil



- $e^{\pm}$ haben eine Sonderstellung durch ihre geringe Masse
  - $m_e = 0.511\,\mathrm{MeV}/c^2$
  - $m_\mu = 106\,\mathrm{MeV}/c^2$
- Für hohe Elektron-Energien ($> 1\,\mathrm{GeV}$) ist Bremsstrahlung der dominierende Prozess
- Bremsstrahlung nahezu energieunabhängig für hohe Energien

Geladene Teilchen: Bremsstrahlung



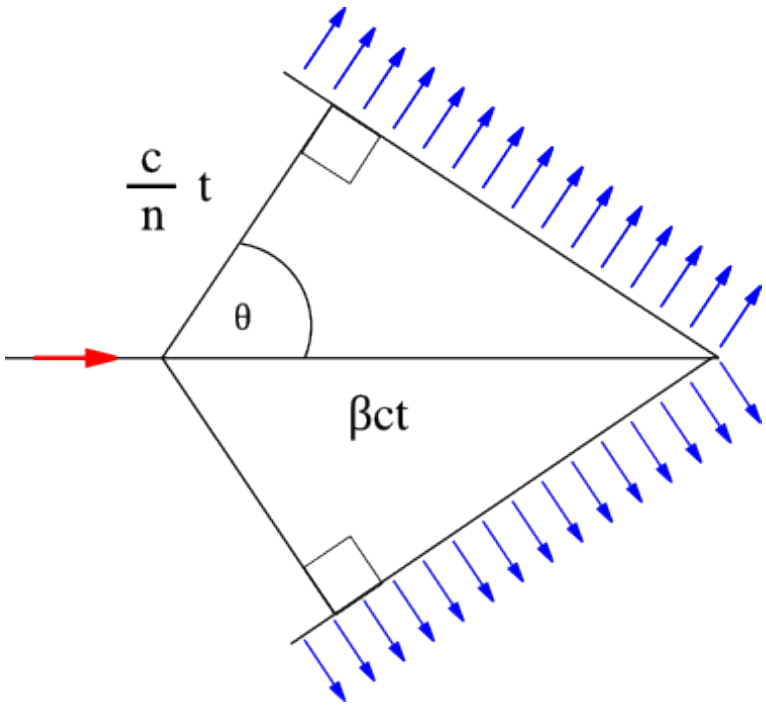
$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z(Z+1)}{A} z^2 \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{mc^2}\right)^2 E \cdot \ln 183 Z^{-1/3}$$

- Bremsstrahlung entsteht bei Impulsänderung eines geladenen Teilchens, z.B. im Coulomb-Feld eines Atomkerns
- Von Bremsstrahlung im engeren Sinne spricht man, wenn Teilchen in Materie gebremst werden

$$-\frac{dE}{dx} \sim E \quad \text{und} \quad -\frac{dE}{dx} \sim \frac{1}{m^2}$$

- Besonders relevant für Elektronen mit geringer Masse ($m_e = 511\,\mathrm{keV}/c^2$)
- Energieverlust über Bremsstrahlung ist 40 000 stärker bei $e^{\pm}$ als bei $\mu^{\pm}$ ($m_\mu \approx 200 m_e$)

Geladene Teilchen: Cherenkov-Strahlung



- Cherenkov-Strahlung wird emittiert, wenn die Geschwindigkeit v eines Teilchens größer ist als die Lichtgeschwindigkeit in dem durchquerten Material

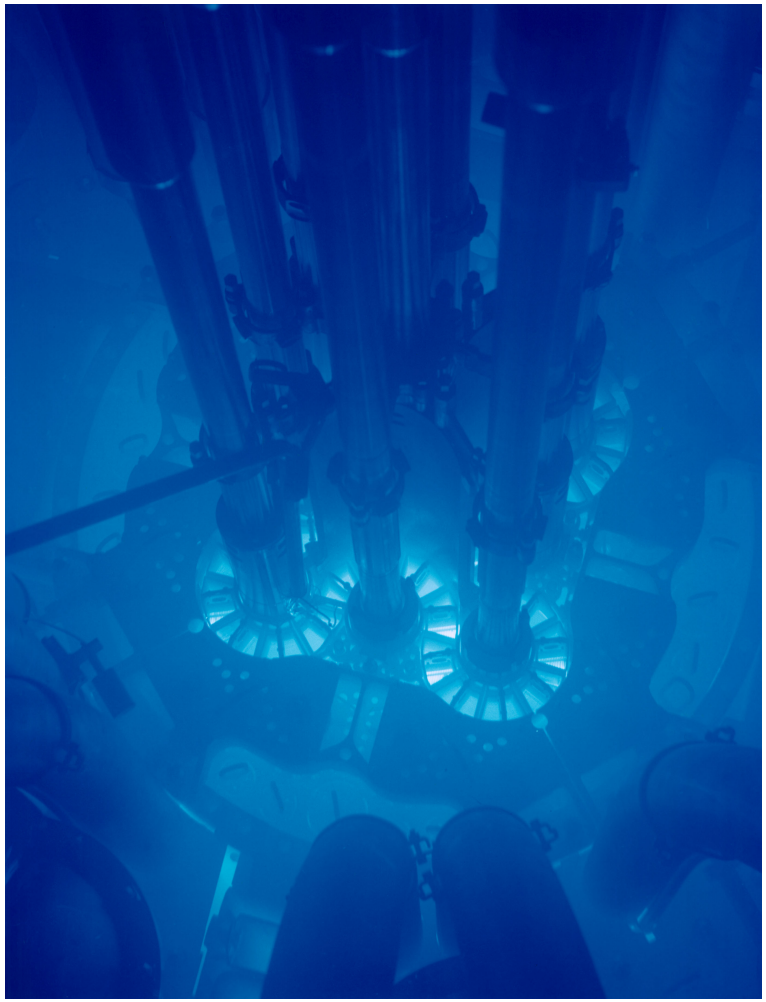
$$v > \frac{c}{n} \quad \text{mit } n = \text{Brechungsindex}$$

- Elektromagnetische Schockwelle konischer Form wird abgestrahlt unter Winkel θ_c

$$\cos\theta_c = \frac{1}{\beta n} \quad \text{mit} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

- Beitrag zum Gesamtenergieverlust gering ($\sim 1\%$)

Geladene Teilchen: Cherenkov-Strahlung



- Cherenkov-Strahlung wird emittiert, wenn die Geschwindigkeit v eines Teilchens größer ist als die Lichtgeschwindigkeit in dem durchquerten Material

$$v > \frac{c}{n} \quad \text{mit } n = \text{Brechungsindex}$$

- Elektromagnetische Schockwelle konischer Form wird abgestrahlt unter Winkel θ_c

$$\cos\theta_c = \frac{1}{\beta n} \quad \text{mit} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

- Beitrag zum Gesamtenergieverlust gering ($\sim 1\%$)

Geladene Teilchen: Übergangsstrahlung

- Änderung elektromagnetischer Felder $\rightarrow$ Emission elektromagnetischer Strahlung
- Bei bewegten geladenen Teilchen
  - Geschwindigkeitsänderung **oder**
  - Änderung der dielektrischen Umgebung $\rightarrow$ Übergang in anderes Medium

- Übergangsstrahlung:
  - Übergangsstrahlung tritt auf, wenn ein geladenes, hochrelativistisches Teilchen die Grenzfläche zwischen zwei Materialien mit unterschiedlicher Dielektrizitätskonstante ϵ durchquert
  - Das elektrische Feld der bewegten Ladung ändert seine räumliche Ausdehnung an der Grenzfläche abrupt
  - Plötzliche Umverteilung der Ladungen an der Grenzfläche und Änderung des elektrischen Feldes verursacht Emission von Photonen (Röngtenstrahlung)

Photonen: Allgemein

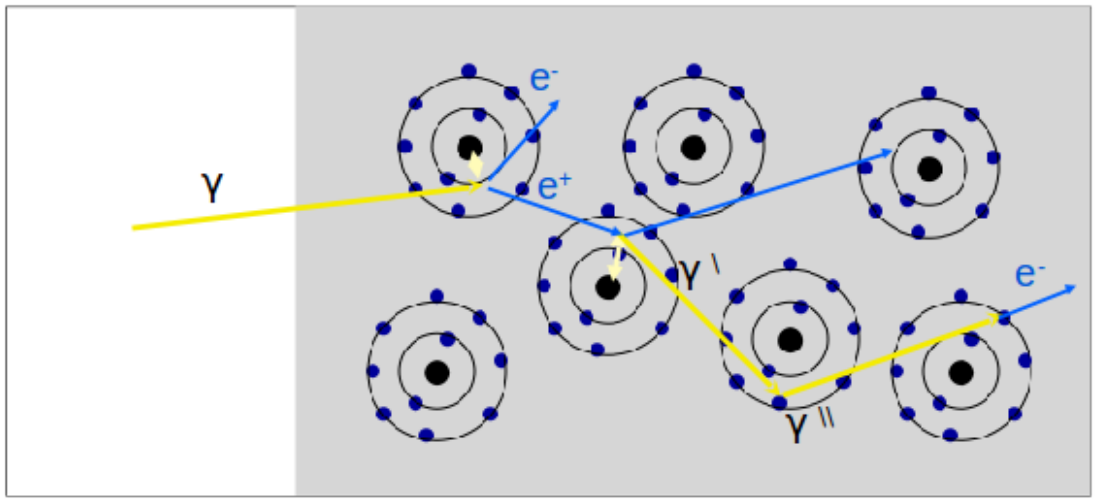
Photonen: Elektromagnetische Wechselwirkung

Paarbildung

Bremsstrahlung

Compton Streuung

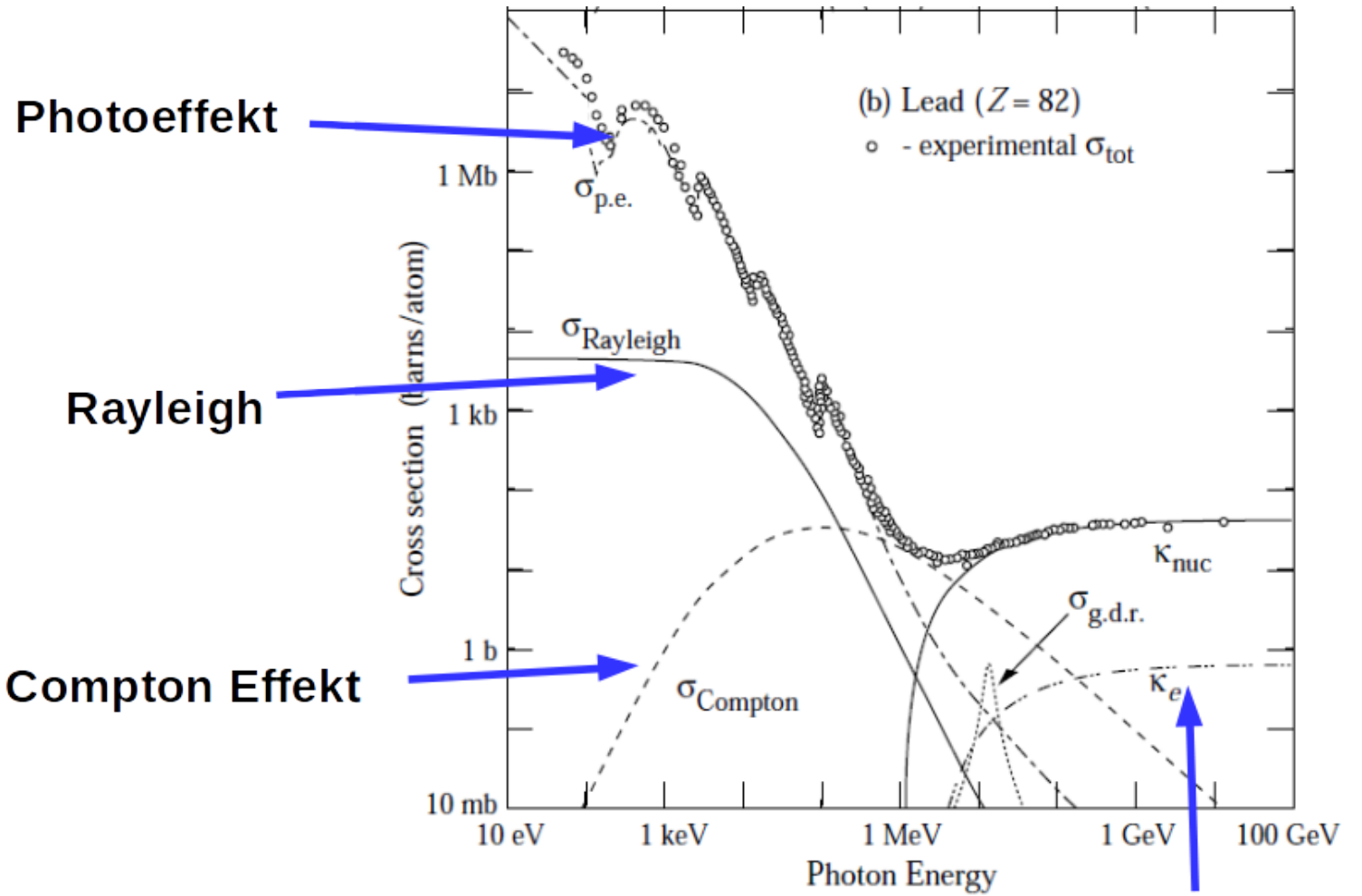
Ionisation



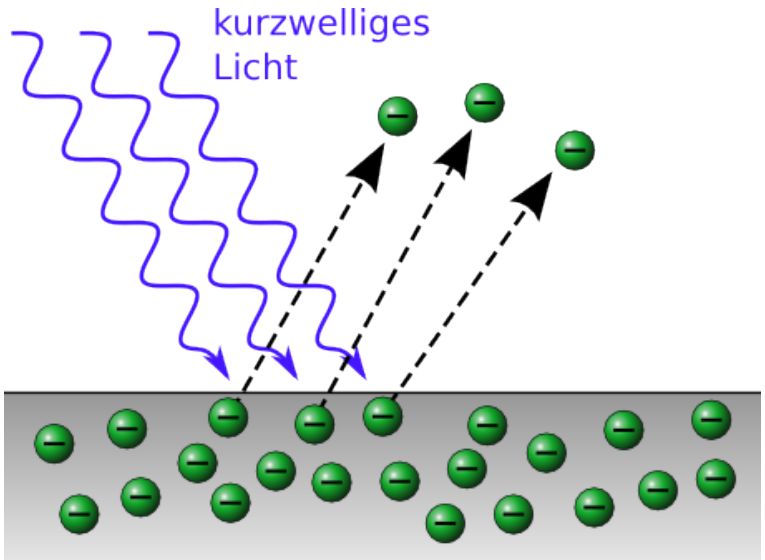
Elektromagnetische Wechselwirkung

Quelle: Kristof Schmieden

Photonen: Wirkungsquerschnitte



Photonen: Fotoelektrischer Effekt

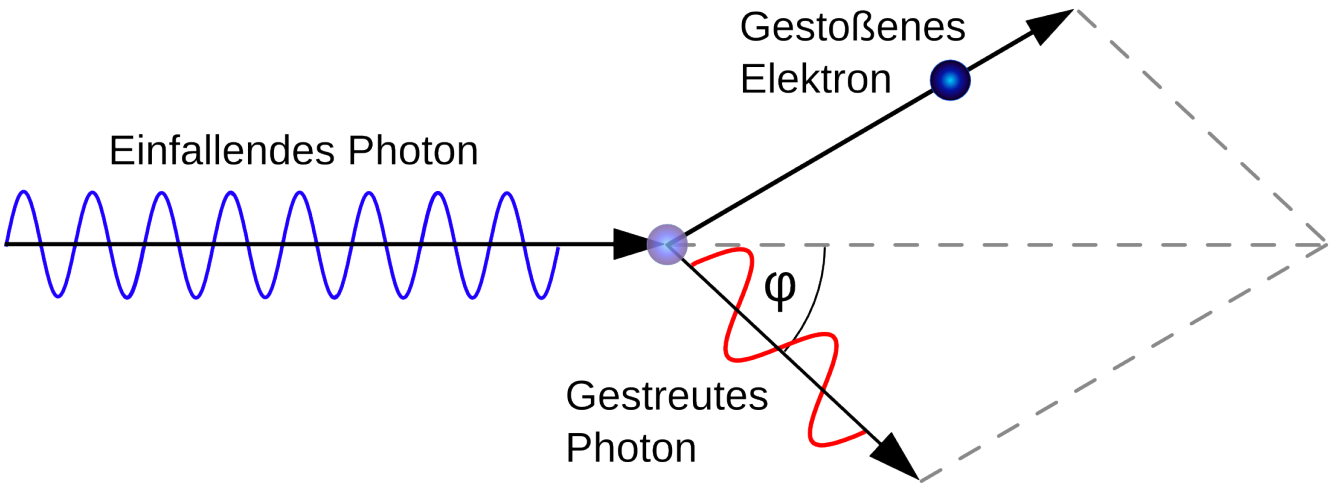


- Das Photon wird von einem Elektron der Atomhülle absorbiert. Durch die übertragene Energie wird das Elektron freigesetzt:

$$\gamma + \text{Atom} = e^- + \text{Ion}$$

- Impulserhaltung $\rightarrow$ Prozess nur im Feld eines Atomkerns möglich, der den Rückstoß auffängt
- Wirkungsquerschnitt des Fotoeffekts zeigt Schalenstruktur der Atome

Photonen: Compton-Effekt



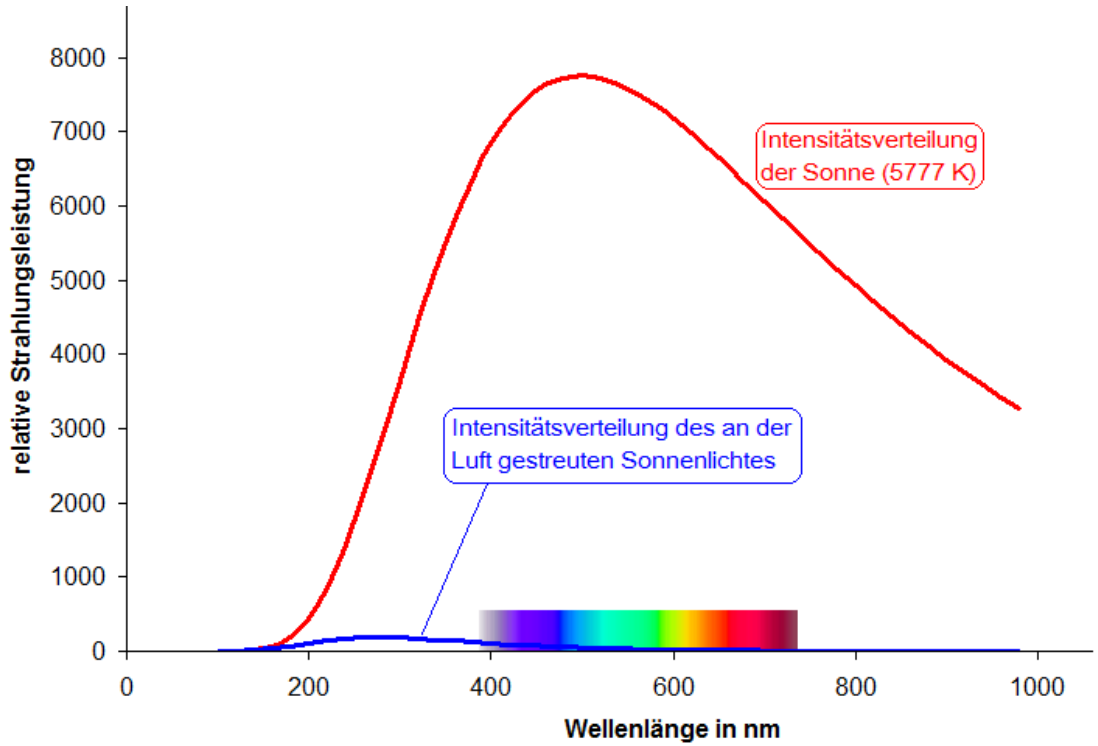
- Der Compton-Effekt beschreibt die Streuung eines Photons an einem "quasi -freien" Elektron

$$\gamma + \text{Atom} = \gamma + e^- + \text{Ion}$$

- Das Photon wird von seiner ursprünglichen Bahn abgelenkt
- Durch den Energieübertrag an das Elektron verändert sich die Wellenlänge des Photons

Photonen: Thomson und Rayleigh-Streuung

- Elastische Streuungen: kein Energieübertrag auf das Medium
- Thomson-Streuung: Streuung von Photonen an freien Elektronen
- Rayleigh-Streuung: Streuung von Photonen an einem gesamten Atom
- Der Streuquerschnitt σ_{Rayleigh} ist proportional zur vierten Potenz der Frequenz f



Photonen: Paarbildung

- Paarerzeugung ist die Produktion eines Elektron-Positron-Paares durch ein Photon
- Paarerzeugung im Feld eines Stoßpartners, der den Rückstoß aufnimmt (Kern, Elektron)

$$\begin{aligned} \gamma + \text{Atomkern} &= \gamma + \text{Atomkern} + e^+ + e^- \\ \gamma + e^- &= \gamma + e^- + e^+ + e^- \end{aligned}$$

- Photon muss mindestens die Ruhemasse des e^+ e^--Paares und die Rückstoßenergie aufbringen

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 + 2\frac{m_e^2}{m_{\text{Stoßpartner}^2}}c^2$$

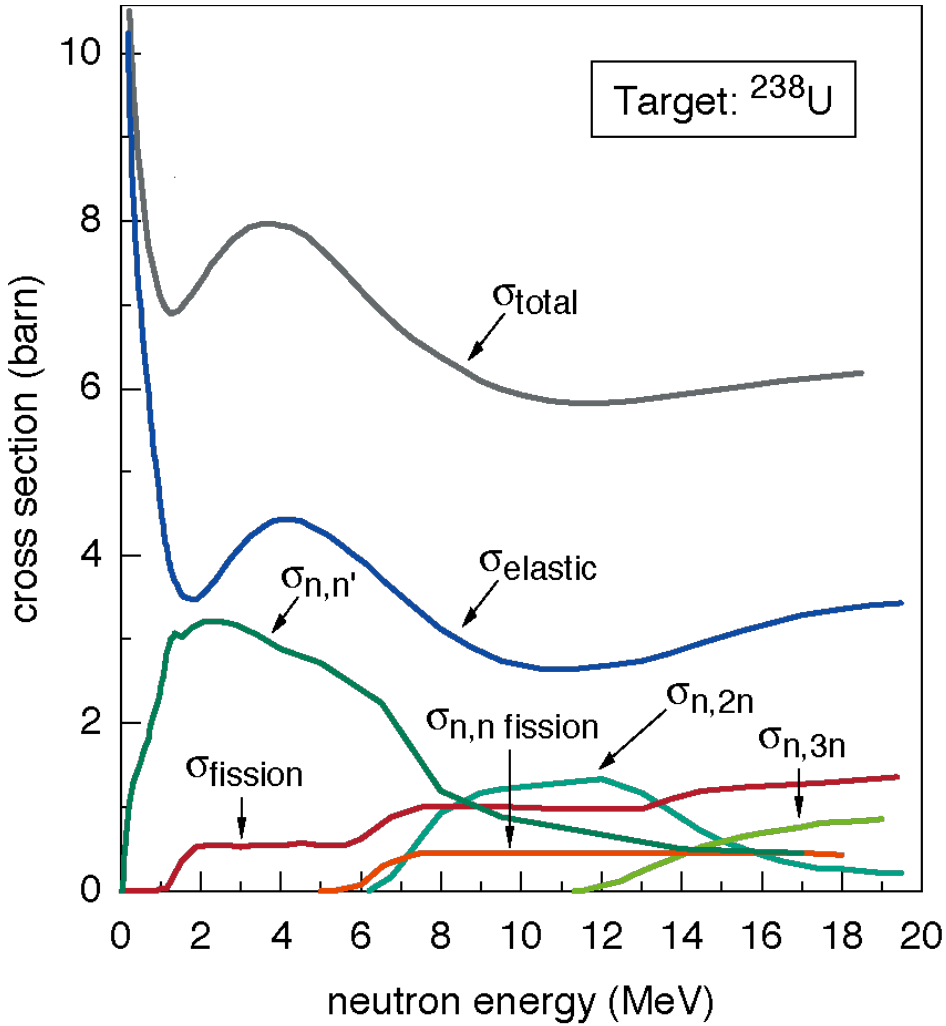
Hadronische Wechselwirkung

- Hadronische Wechselwirkung: Interaktionen eines Hadrons mit einem Atomkern, die auf der starken Wechselwirkung basieren
  - Geringe Reichweite der starken Kraft

  $\rightarrow$ Sehr geringe Wahrscheinlichkeit für hadronische Reaktionen

  $\rightarrow$ Neutronen können nur stark wechselwirken $\rightarrow$ sehr durchdringend
- Mögliche Prozesse (energieabhängig)
  - Elastische Streuung
  - Inelastische Streuung
  - Neutroneneinfang
  - Reaktionen mit Abstrahlung geladener Teilchen
  - Kernspaltung

Hadronische Wechselwirkung



Wechselwirkung von Neutrinos

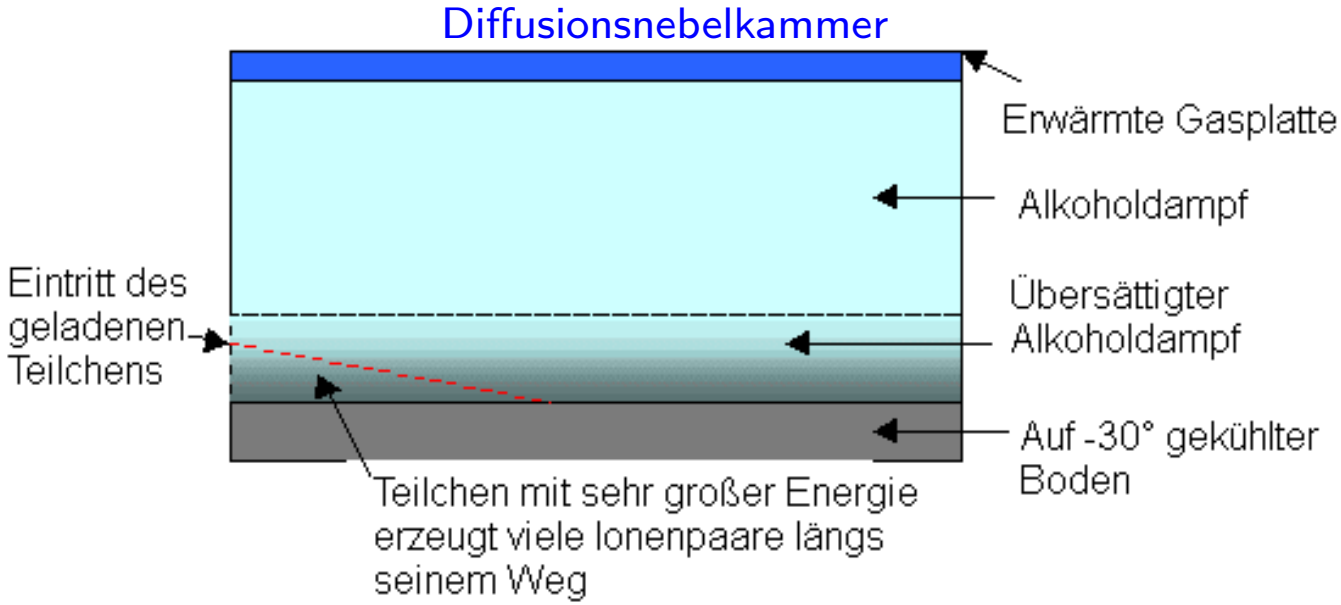
- Neutrinos unterliegen nur der schwachen Wechselwirkung
- Mögliche Interaktionenen

$$\nu_l + n \rightarrow p + l^-$$
$$\bar{\nu}_l + p \rightarrow n + l^+$$

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

Historische Teilchendetektoren

Nebelkammer



- Optisch durchsichtige Kammer gefüllt mit übersättigtem Luft-Alkohol-Gemisch
- Energiereiches, geladenes Teilchen erzeugt durch Stoßionisation Ionen
- Ionen agieren als Kondensationskeime für die Bildung von Tröpfchen

- Physik-Nobelpreis für Charles Thomson Rees Wilson in 1927 (Expansionsnebelkammer)

Nebelkammer

Diffusionsnebelkammer

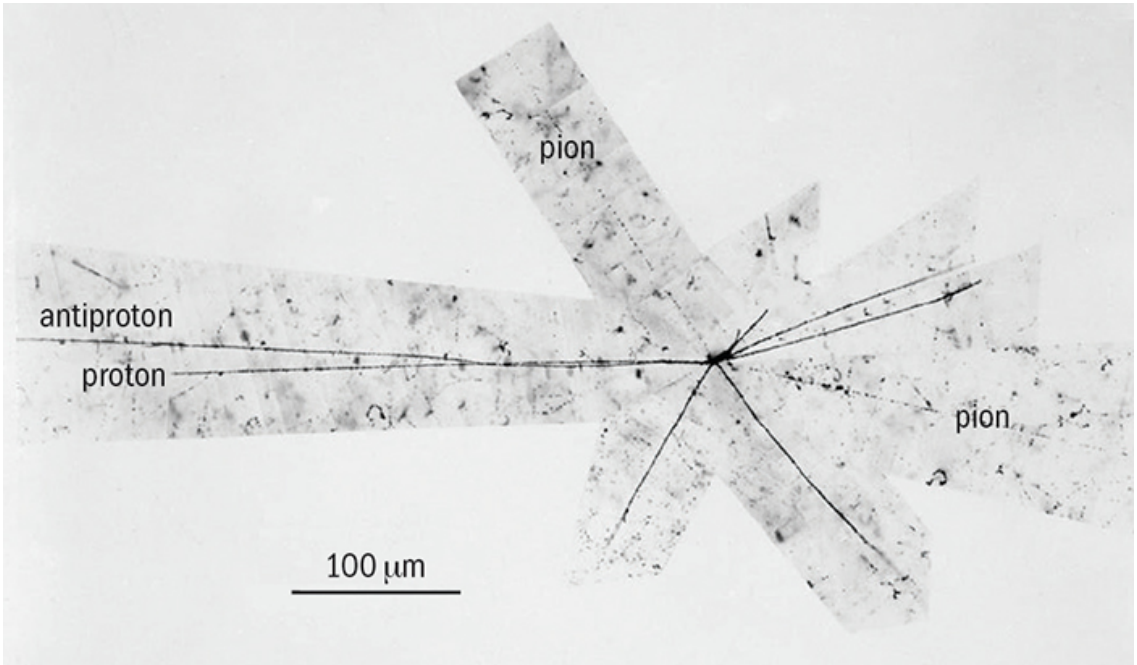
- Optisch durchsichtige Kammer gefüllt mit übersättigtem Luft-Alkohol-Gemisch
- Energiereiches, geladenes Teilchen erzeugt durch Stoßionisation Ionen
- Ionen agieren als Kondensationskeime für die Bildung von Tröpfchen

- Physik-Nobelpreis für Charles Thomson Rees Wilson in 1927 (Expansionsnebelkammer)

Fotoemulsion

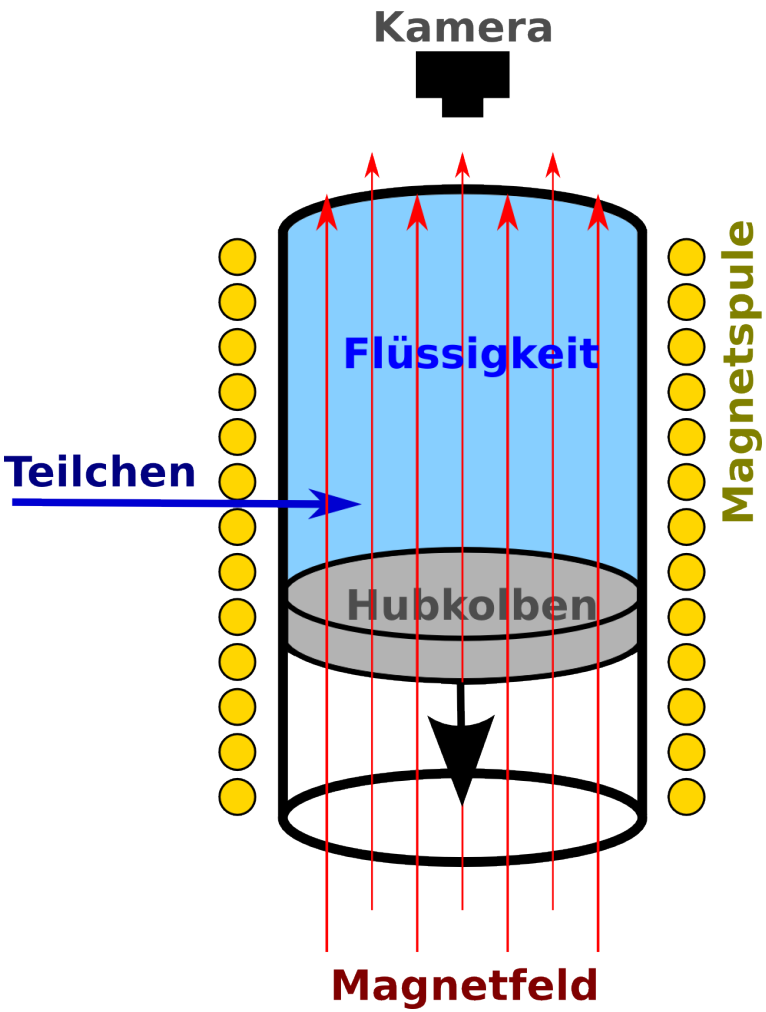
- Fotoplatte mit dicker empfindlicher Schicht und sehr gleichmäßiger Korngröße
- Ionisierende Strahlung hinterlässt Spuren
- Entwicklung der Platte
- Spuren der Teilchen (geschwärzt durch Silber) messbar mit Mikroskop

Proton-Antiproton-Annihilation



- Marietta Blau und Herta Wambacher entdeckten 1937 Kernzertrümmerungssterne
- Cecil Frank Powell et al. entdeckten 1947 das Pion (Nobelpreis)

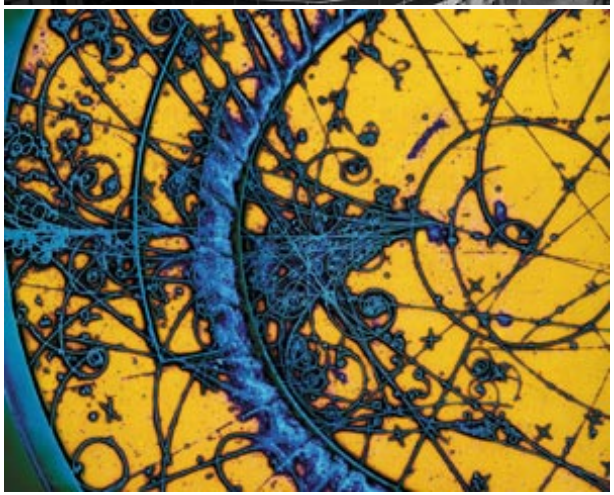
Blasenkammer



- Optisch durchsichtige Kammer gefüllt mit flüssigem Wasserstoff o.ä.
- Temperatur der Flüssigkeit nahe des Siedepunktes
- Über Druckstempel wird Druck innerhalb der Kammer stark verringert $\rightarrow$ Temperatur der Flüssigkeit liegt nun oberhalb des Siedepunktes
- Ionisierede Strahlung erzeugt Wasserstoffionen
- Ionen dienen als Keime für Gasblasen
- Analyse von Fotos der Spuren

- Physik-Nobelpreis in 1960 für Donald A. Glaser
- 1960er: wichtigster Teilchendetektor
- Am CERN
  - 1970–1978 Gargamelle
  - 1971–1984 BEBC

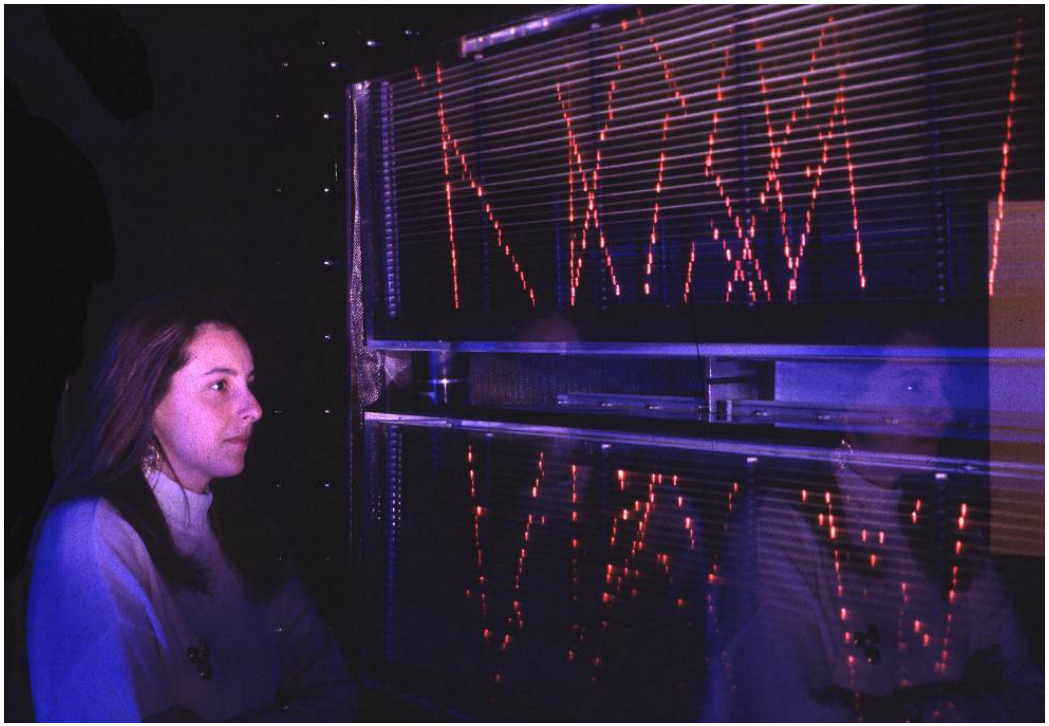
Blasenkammer



- Optisch durchsichtige Kammer gefüllt mit flüssigem Wasserstoff o.ä.
- Temperatur der Flüssigkeit nahe des Siedepunktes
- Über Druckstempel wird Druck innerhalb der Kammer stark verringert $\rightarrow$ Temperatur der Flüssigkeit liegt nun oberhalb des Siedepunktes
- Ionisierede Strahlung erzeugt Wasserstoffionen
- Ionen dienen als Keime für Gasblasen
- Analyse von Fotos der Spuren

- Physik-Nobelpreis in 1960 für Donald A. Glaser
- 1960er: wichtigster Teilchendetektor
- Am CERN
  - 1970–1978 Gargamelle
  - 1971–1984 BEBC

Funkenkammer

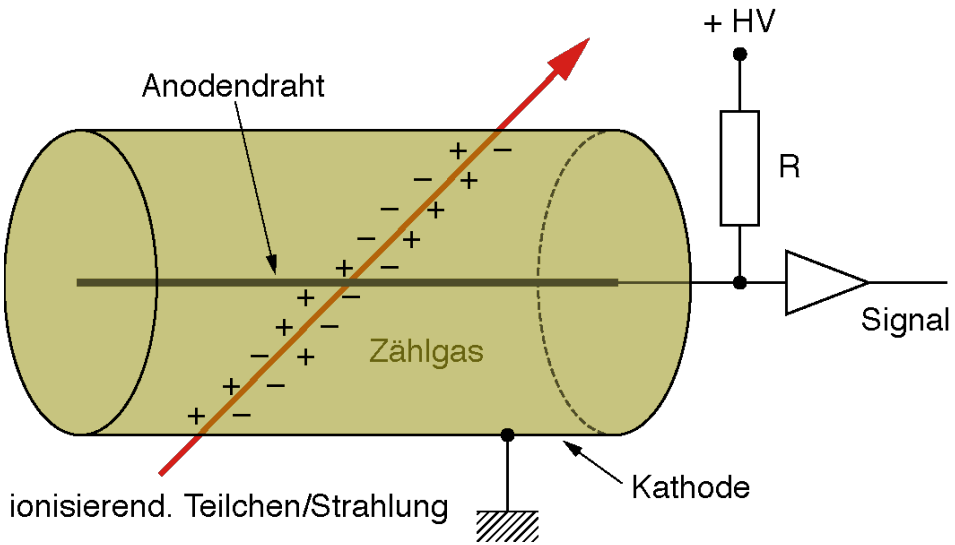


- Optisch durchsichtige Kammer gefüllt mit Edelgas und vielen parallelen Platten
- Elektrische Spannung von mehreren kV zwischen parallelen Platten
- Spannung nicht hoch genug, dass es Überschläge gibt
- Ionisiert ein hochenergetisches Teilchen die Edelgasatome, entstehen entlang der Teilchenspur kleine Funken/Blitze
- Analyse durch Fotos, große Totzeit
- 1930er-1960er Jahre

Gasdetektoren

Gasdetektor: Funktionsprinzip

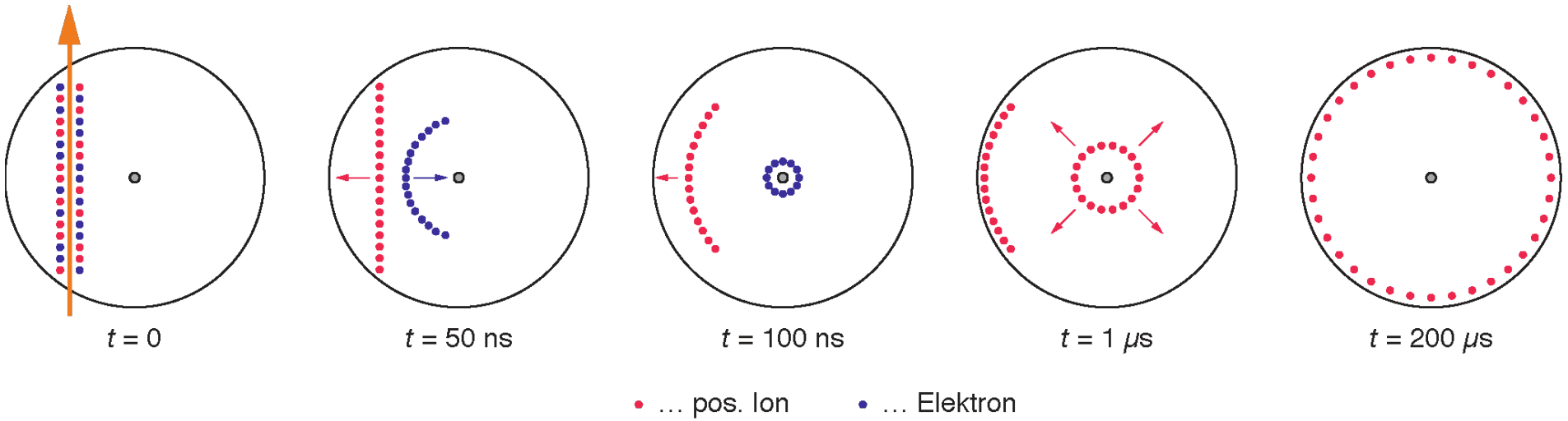
- Gas gutes Medium um geladene Teilchen durch Ionisation nachzuweisen
- Geladenes Teilchen erzeugt durch Ionisation Elektron-Ion-Paare
- Anzahl der Paare proportional zu deponierten Energie



- Messung:
  - Anlegen externer Spannung
  - Elektronen driften zur Anode, Ionen driften zur Kathode
  - Durch die Bewegung der Elektronen und Ionen im elektrischen Feld wird an der Anode und der Kathode ein Signal induziert

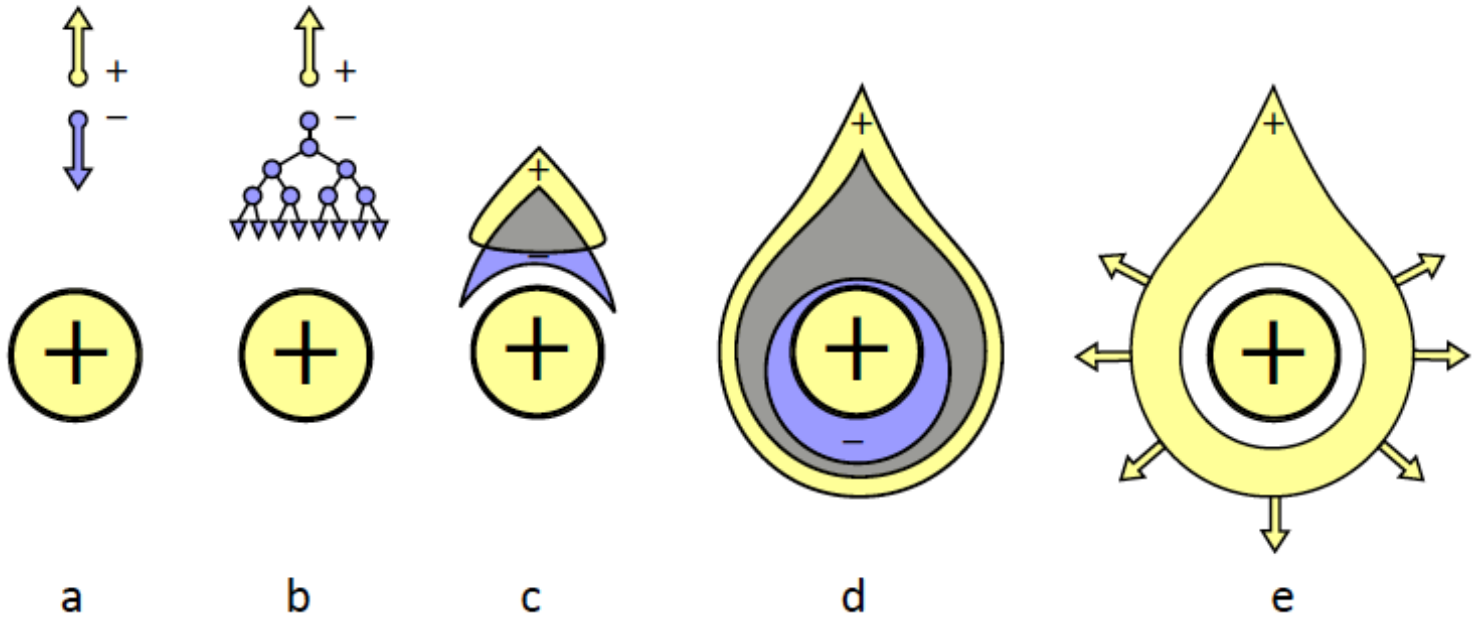
- Detektormedium z.B. Edelgas
- Mittlere Energie zur Erzeugung eines Elektron-Ion-Paares $\sim 30\,\text{eV}$
- Elektronen haben eine 1000 mal höhere Mobilität als Ionen $\rightarrow$ höhere Driftgeschwindigkeiten
- Driftgeschwindigkeit energieabhängig

Proportionalzählrohr



- Anode in Form von dünnem Draht
- Hohes Feld in Drahtnähe → Elektronenvervielfachung (Signalverstärkung)

Gasverstärkung: Proportionalzähler

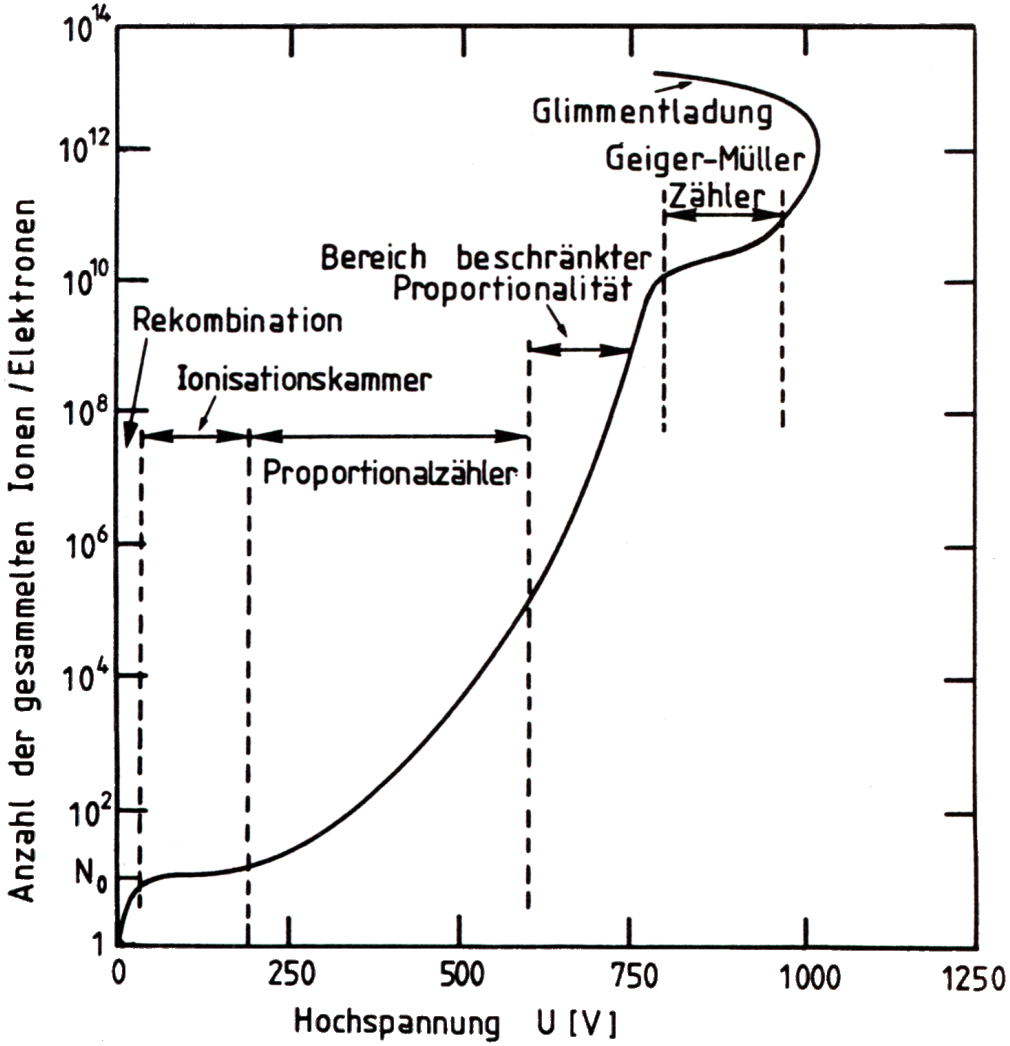


- Elektronen aus einer Primärionisation driften zum Anodendraht
- Sie gelangen dort in Bereiche hoher lokaler Feldstärke
- Sobald die elektr. Feldstärke E_{krit} übersteigt, kommt es zur Sekundärionisation

$\rightarrow$ Ladungsträgerlawine

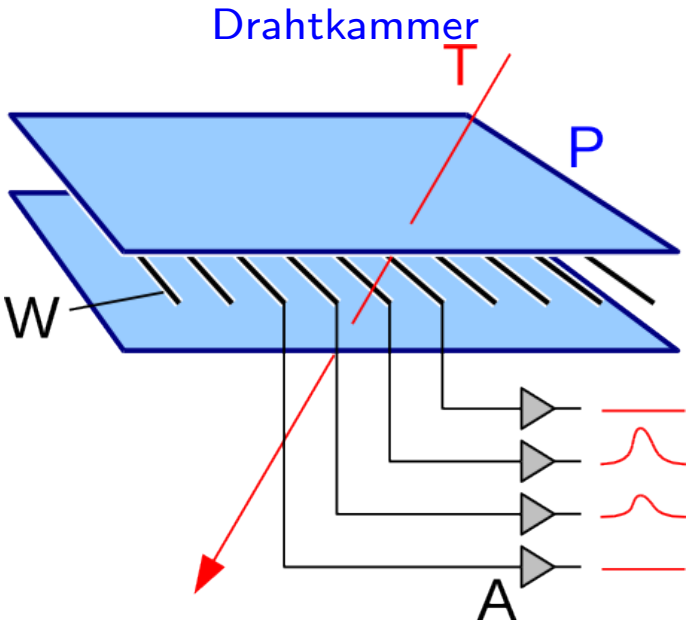
- Elektronen driften schnell auf den Anodendraht zu und werden dort abgeleitet
- Ionen entfernen sich langsam vom Anodendraht Richtung Kathode

Arbeitsbereiche vom Gas-Detektor

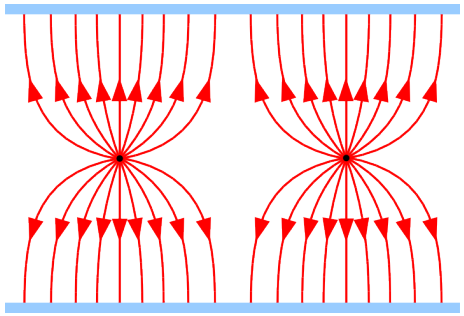


- Je nach Geometrie, Gas und verwendeter Spannung gibt es verschiedene "Arbeitsbereiche" von Gas-Detektoren
- Bei hohen Spannungen können die Elektronen so stark beschleunigt werden, dass sie selber das Gas ionisieren können
- Das führt zu Elektronenlawinen und somit zu einer großen Verstärkung des Signals

Vieldraht-Proportionalkammer



Elektrische Feldlinien: Dicht = Stark

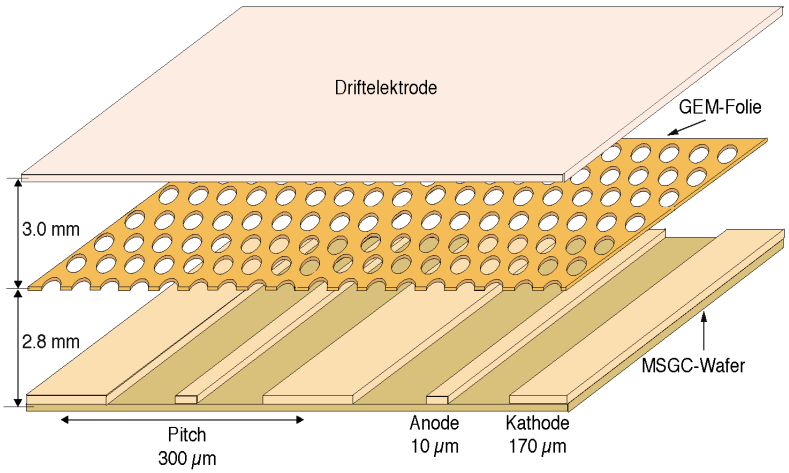


- Vieldraht-Proportionalkammer (Englisch: Multi Wire Proportional Chamber (MWPC)) entwickelt in 1968
- Wie ebene Lage von vielen Proportionalzählrohren ohne trennende Zwischenwände
- Drähte im Abstand von ∼mm
  - Gute Ortsauflösung eines durchquerenden Teilchens
  - Große Flächen
  - Elektronische Auslese
  - Hohe Raten: 1000 Teilchen/s (Blasenkammer: 1-2 Teilchen/s)
- Nobelpreis für Georges Charpak in 1992

Micropattern-Gas-Detektoren

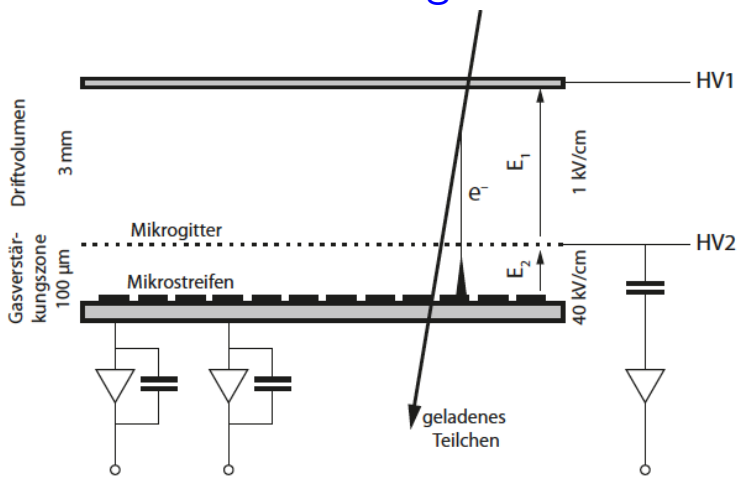
- Drähte können reissen, z.B. bei Funken → Kammer eventuell unbenutzbar
- Alternative: Micropattern-Gas-Detektoren
  - Potentiell bessere Ortsauflösung und anwendbar für höhere Teilchenrate

Gas-Elektronenverstärker



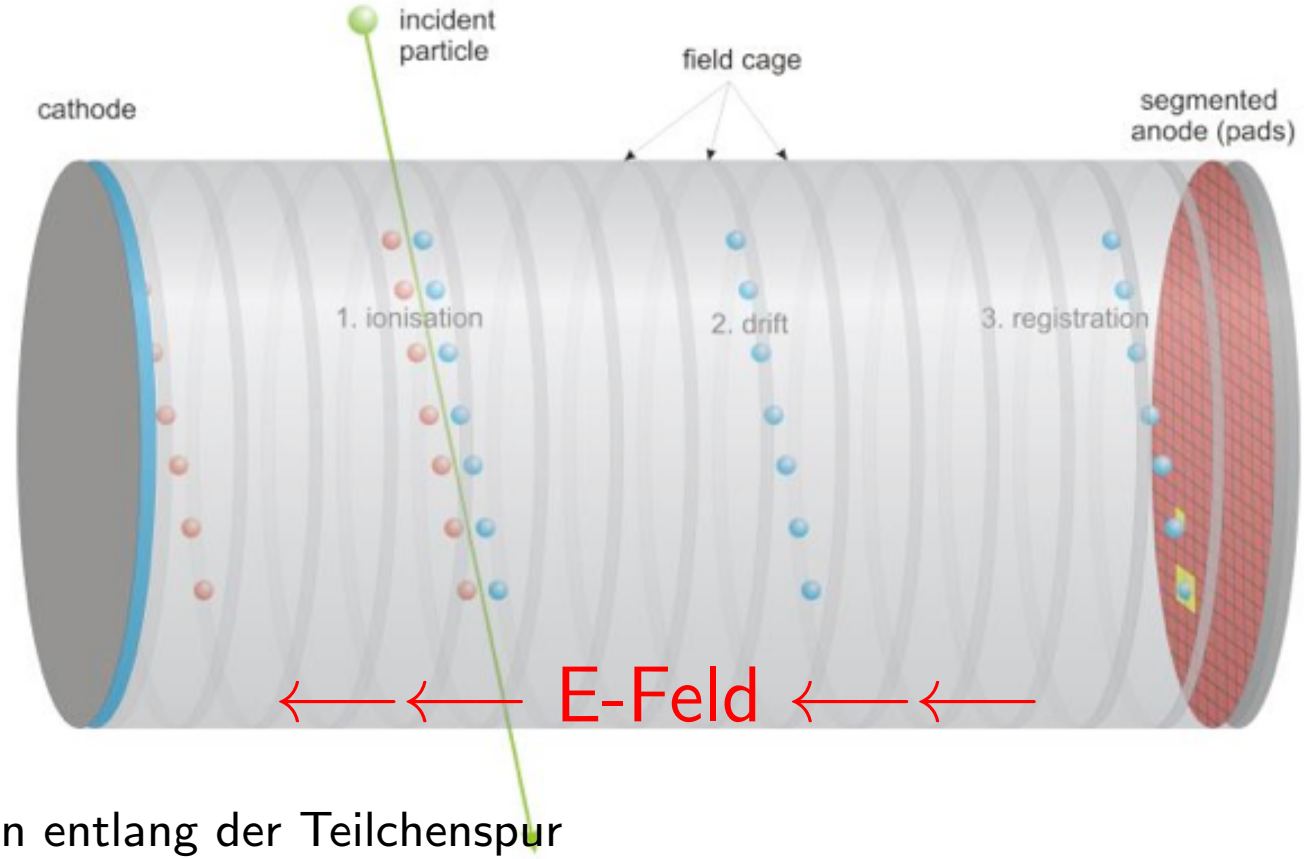
- $\sim 50\,\mu$m dicke Kapton-Folie, beide Seiten metallisiert, perforiert
- Hochspannung zw. den beiden Seiten
- Starkes Dipolfeld in jedem Loch
  → Gasverstärkung

Micromegas



- Metallisches Mikrogitter
- e^--Lawinenentwicklung in Nähe des Gitters
  → Gasverstärkung

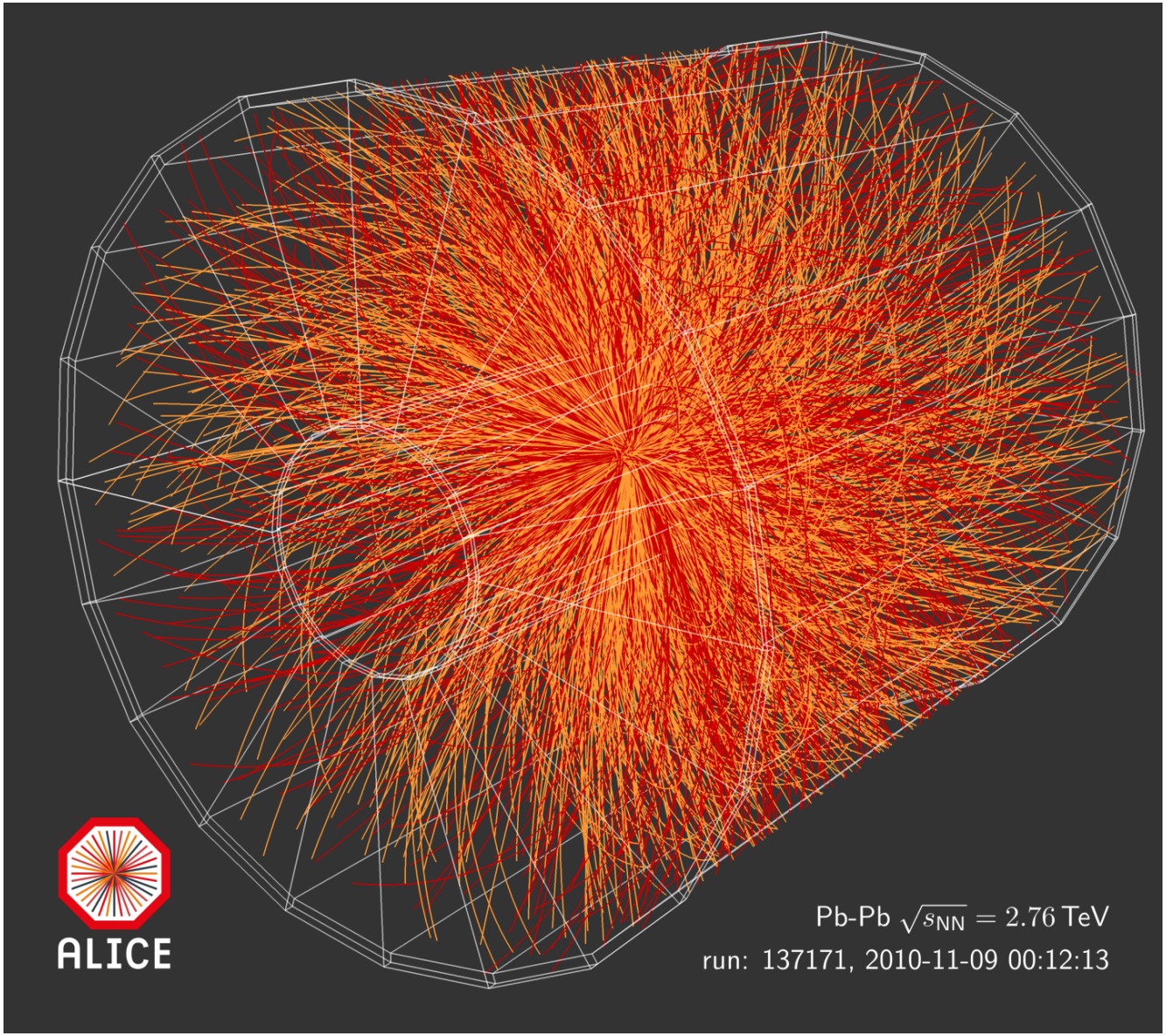
Zeitprojektionskammer (TPC) / Spurendriftkammer



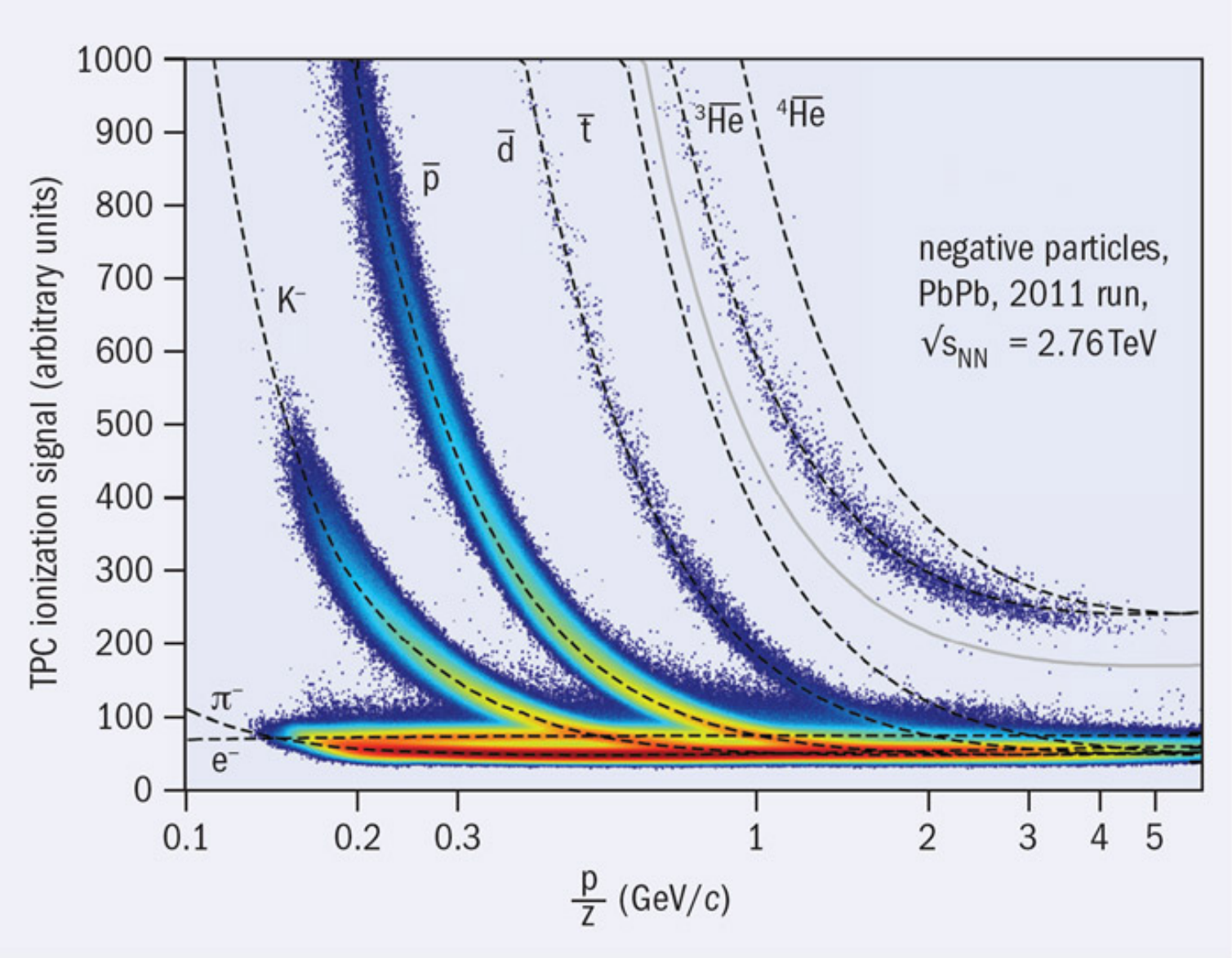
- Ionisation entlang der Teilchenspur
- Elektronen und Ionen driften im E-Feld
- Segmentierte Anode: 2D-Information
- 3. Dimension aus Driftzeit
- Auslese an Anodenseite z.B. über Vieldraht-Proportionalkammer, GEMs, ...

Beispiel: TPC des ALICE-Experimentes

Beispiel: TPC des ALICE-Experimentes



Beispiel: Teilchenidentifikation in der ALICE TPC



Ausblick: Teil 2

5. Halbleiterdetektoren
6. Szintillatoren
7. Kalorimeter
8. Teilchenidentifikation
9. Detektorsysteme
10. Zusammenfassung