

# Teilchendetektoren in der Hochenergiephysik - Teil 1 -

Eva Sicking (CERN)

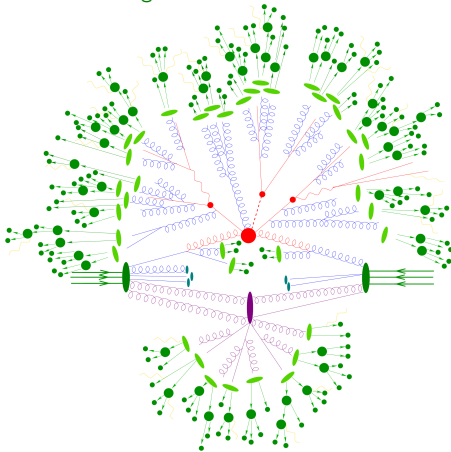
Deutsches Lehrerprogramm am CERN  
18. Oktober 2022 – CERN, Genf, Schweiz

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

- ▶ 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://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation)
  - ▶ [https://de.wikipedia.org/wiki/Photoelektrischer\\_Effekt](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](https://en.wikipedia.org/wiki/Bubble_chamber)

# Einleitung

## Hochenergetische Proton-Proton-Kollision



- ▶ 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

Drei Generationen  
der Materie (Fermionen)

	I	II	III	
Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 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	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Photon
				<b>H</b> 125,9 GeV Higgs Boson
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon
	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> Elektron-Neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> Myon-Neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> Tau-Neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z Boson
Leptonen	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 2$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> Elektron	<b>μ</b> Myon	<b>τ</b> Tau	<b>W<sup>±</sup></b> W Boson
				Eichbosonen

# Was misst man?

## Interesse an Elementarteilchen und ihren Wechselwirkungen

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III	
Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 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	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Photon
				<b>H</b> Higgs Boson
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon
	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> Elektron-Neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> Myon-Neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> Tau-Neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z Boson
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 2$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptonen	<b>e</b> Elektron	<b>μ</b> Myon	<b>τ</b> Tau	<b>W<sup>±</sup></b> W Boson

Eichbosonen

## Man misst aber

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

**LIGHT UNFLAVORED MESON**  
( $S = C = B = 0$ )

For  $I = 1$  ( $\pi, \rho, \omega$ ):  $u\bar{d}, (u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2}, d\bar{u}$   
for  $I = 0$  ( $\eta, \eta', \phi, \omega, \phi, f, f'$ ):  $c_1(u\bar{u}+d\bar{d}) + c_2(s\bar{s})$

Zusammensetzung

Spin

Masse

$\pi^\pm$

$$J^G(J^P) = 1^-(0^-)$$

Lebensdauer

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

Formfaktoren

$\pi^\pm \rightarrow \ell^\pm \nu \gamma$  form factors [5]

$F_V = 0.0254 \pm 0.0017$   
 $F_A = 0.0119 \pm 0.0001$   
 $F_V$  slope parameter  $a = 0.10 \pm 0.06$   
 $R = 0.059^{+0.009}_{-0.008}$

$\pi^\pm$  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.

$\pi^\pm$ DECAY MODES	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Confidence level	$p$ (MeV/c)
$\mu^+ \nu_\mu$	[0] (99.96770 ± 0.00004) %		30
$\mu^+ \nu_\mu \gamma$	[c] (2.00 ± 0.25) × 10 <sup>-4</sup>		30
$e^+ \nu_e$	[0] (1.230 ± 0.004) × 10 <sup>-4</sup>		70
$e^+ \nu_e \gamma$	[c] (7.39 ± 0.05) × 10 <sup>-7</sup>		70
$e^+ \nu_e \pi^0$	(1.036 ± 0.006) × 10 <sup>-8</sup>		4
$e^+ \nu_e e^+ e^-$	(3.2 ± 0.5) × 10 <sup>-9</sup>		70
$e^+ \nu_e \nu \bar{\nu}$	< 5 × 10 <sup>-6</sup>	90%	70
<b>Lepton Family number (LF) or Lepton number (L) violating modes</b>			
$\mu^+ \bar{\nu}_e$	L [d] < 1.5	× 10 <sup>-3</sup> 90%	30
$\mu^+ \nu_\mu$	LF [e] < 8.0	× 10 <sup>-3</sup> 90%	30
$\mu^- e^+ e^+ \nu$	LF [f] < 1.6	× 10 <sup>-6</sup> 90%	30

Zerfallskanäle

Zerfallswahrscheinlichkeiten

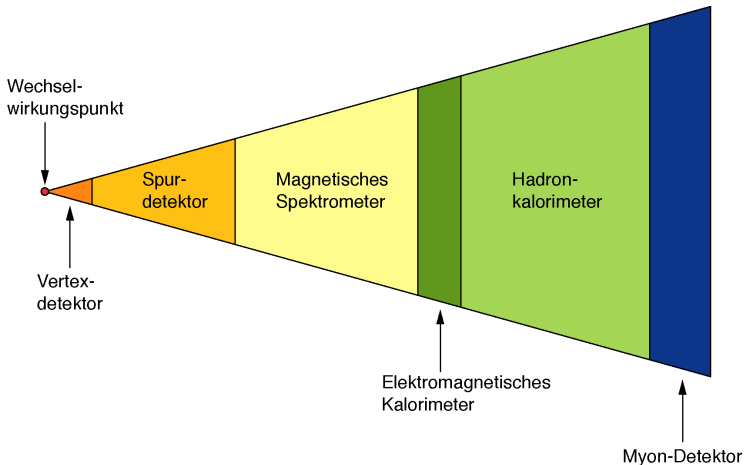
- ▶ Eine Messung erfolgt durch eine Wechselwirkung des zu messenden Teilchens mit dem Detektormaterial
- ▶ Zwei Effekte
  1. Erzeugung eines kleinen, messbaren Signals (z.B. durch Ionisation, Anregung - Szintillation, Wärme, ...)
  2. Veränderung der Teilcheneigenschaften (Energieverlust, Änderung der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



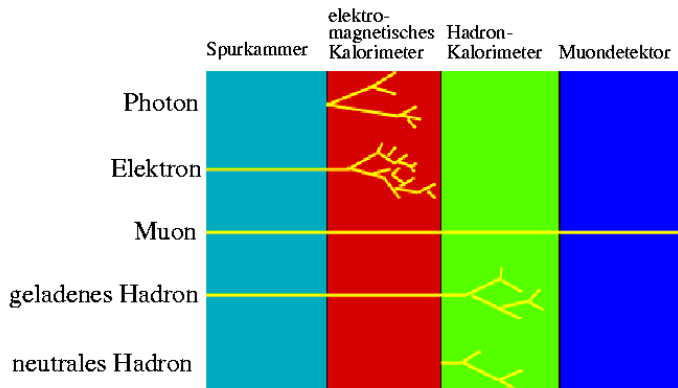
# Prinzip eines Teilchendetektors



- ▶ Kombiniere komplementäre Nachweismethoden, um alle Teilchen nachzuweisen

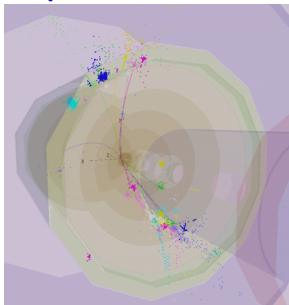


- ▶ Teilchen unterscheiden sich in der Art, in der sie mit Material interagieren
- ▶ Das kann man ausnutzen, um die Teilchen zu identifizieren



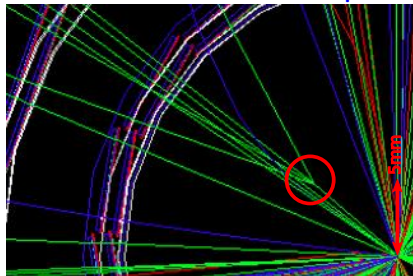
- ▶ Viele Elementarteilchen haben eine sehr kurze Lebensdauer
  - ▶ z.B. W, Z, Higgs und viele mehr
- ▶ Man sieht nur ihre Zerfallsprodukte

## Quarks: Hadronisation



- ▶ Quarks hadronisieren in Jets von Teilchen

## Sekundärvertex bei $r=5\text{ mm}$ : b-quark



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

## Beispiele:

- ▶ **Impuls  $p$** : über Ermittlung des Krümmungsradius im Magnetfeld
- ▶ **Geschwindigkeit  $v$** : durch Flugzeitmessung, RICH, etc.
- ▶ (Vorzeichen der) **Teilchenladung  $Q$** : aus Flugbahnkrümmung innerhalb eines Magnetfeldes
- ▶ **Lebensdauer  $\tau$** : 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  $v$

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

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

# Wechselwirkung von Strahlung und Materie

- ▶ Hochenergetische Teilchen wechselwirken mit Materie auf verschiedene 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 → Messung
- ▶ Je nach Teilchenart und -energie dominieren bestimmte Prozesse bzw. können manche Prozesse nicht auftreten

# Geladene Teilchen: Allgemein

**Leptonen:** EM, schwache Wechselwirkung

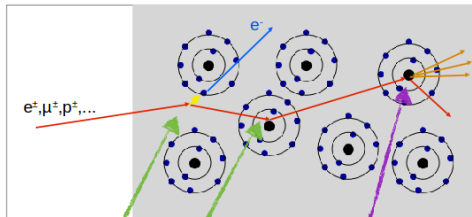
**Hadronen:** EM, schwache, starke Wechselwirkung

**Ionisation**

**Elastische Streuung**

Rückstoß am Atom /  
Kristallgitter → Phonon

**Inelastische Streuung**



$e^{\pm}, \mu^{\pm}, p^{\pm}, \dots$

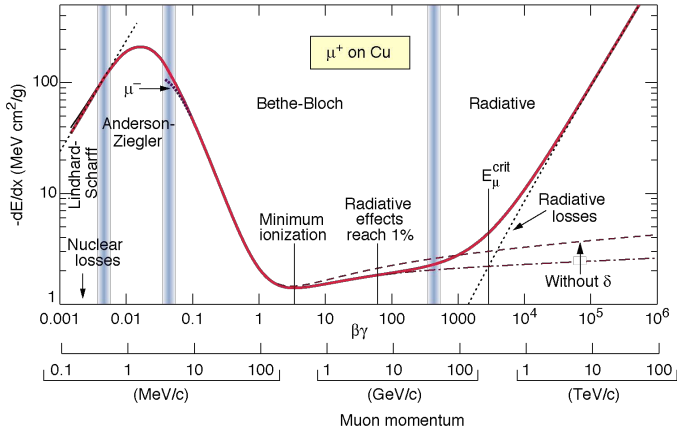
$e^{-}$

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**

**Konstante**

**Maximale Energie, die in einer Kollision verloren werden kann**

$$-\frac{dE}{dx} \text{ (eVcm}^2\text{g}^{-1}\text{)} = Kq^2 \frac{Z}{A\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

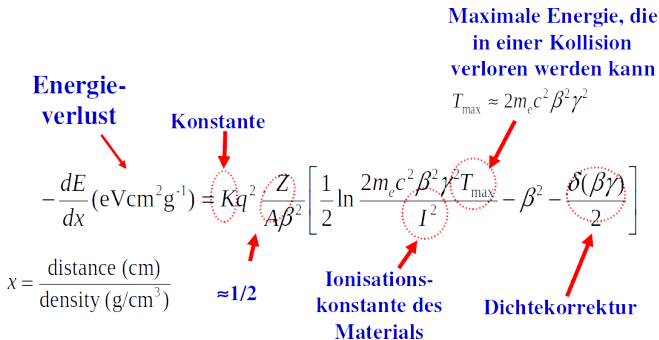
$x = \frac{\text{distance (cm)}}{\text{density (g/cm}^3\text{)}}$

$\approx 1/2$

**Ionisationskonstante des Materials**

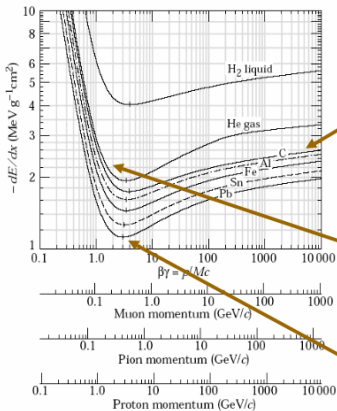
**Dichtekorrektur**

$T_{\max} \approx 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2$



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

# Geladene Teilchen: verschiedene Targets



Bei hoher Energie  
 $\sim \ln \gamma$

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

Bei geringer Energie  
 $\sim 1/\beta^2$

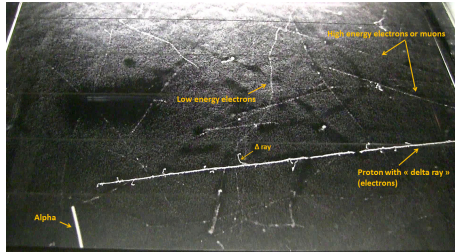
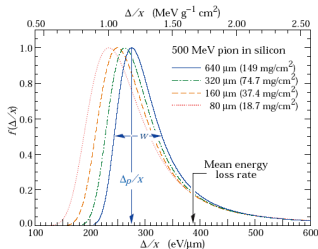
Minimum  
 bei  $\gamma \approx 3$

Distanz-Einheit (x):

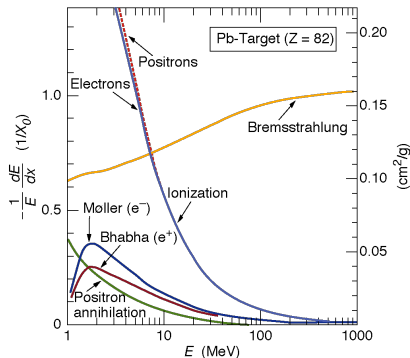
$\blacktriangleright \text{g cm}^{-2}$

# Geladene Teilchen: Landau-Verteilung / Delta-Elektronen

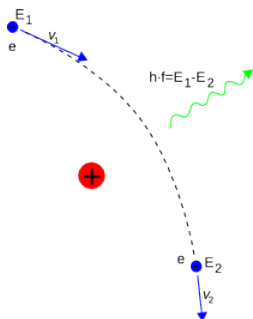
- ▶ Bethe-Bloch-Formel: Mittlerer Energieverlust pro zurückgelegter Wegstrecke
- ▶ Tatsächlicher Energieverlust fluktuiert um diesen Mittelwert



- ▶ 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



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

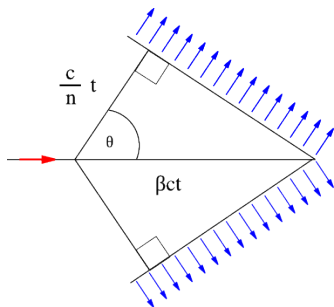


$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z(Z+1)}{A} z^2 \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 E \cdot \ln 183Z^{-1/3}$$

- ▶ 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 ( $m_e = 511 \text{ keV}/c^2$ )
- ▶ Energieverlust über Bremsstrahlung ist 40 000 stärker bei  $e^\pm$  als bei  $\mu^\pm$  ( $m_\mu \approx 200m_e$ )



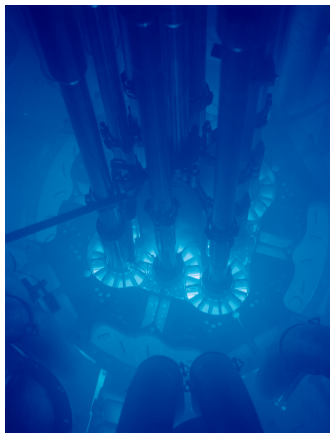
- ▶ Cherenkov-Strahlung wird emittiert, wenn die Geschwindigkeit  $v$  eines Teilchens größer ist als die Lichtgeschwindigkeit in dem durchquerten Material

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

- ▶ Elektromagnetische Schockwelle konischer Form wird abgestrahlt unter Winkel  $\theta_c$

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

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



- ▶ 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  $\theta_c$

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

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

- ▶ Änderung elektromagnetischer Felder → Emission elektromagnetischer Strahlung
- ▶ Bei bewegten geladenen Teilchen
  - ▶ Geschwindigkeitsänderung **oder**
  - ▶ Änderung der dielektrischen Umgebung → Übergang in anderes Medium
- ▶ **Übergangsstrahlung:**
  - ▶ Übergangsstrahlung tritt auf, wenn ein **geladenes, hochrelativistisches Teilchen** die **Grenzfläche zwischen zwei Materialien mit unterschiedlicher Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$**  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 (Röntgenstrahlung)



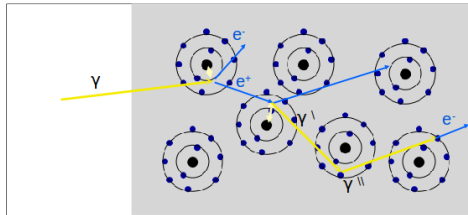
**Photonen:** Elektromagnetische Wechselwirkung

Paarbildung

Bremsstrahlung

Compton  
Streuung

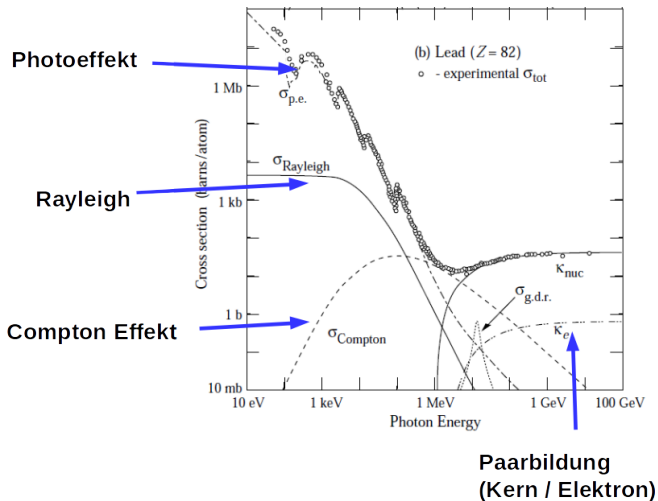
Ionisation

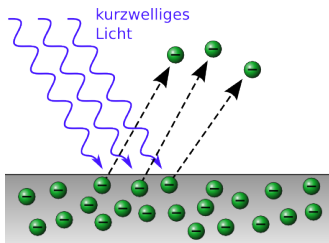


Elektromagnetische Wechselwirkung

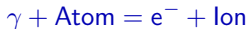
Quelle: Kristof Schmieden

# Photonen: Wirkungsquerschnitte

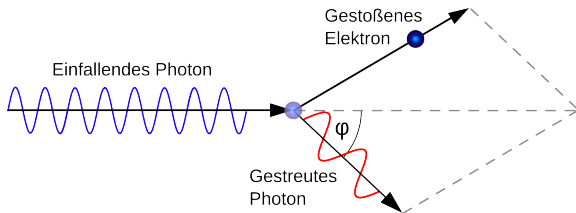




- ▶ Das Photon wird von einem Elektron der Atomhülle absorbiert. Durch die übertragene Energie wird das Elektron freigesetzt:



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

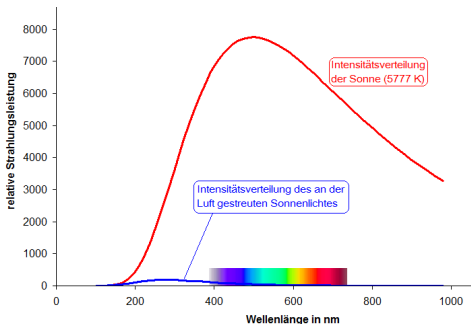


- ▶ Der Compton-Effekt beschreibt die Streuung eines Photons an einem “quasi -freien” Elektron

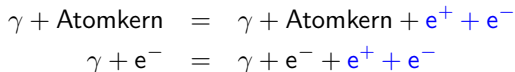
$$\gamma + \text{Atom} = \gamma + e^{-} + \text{Ion}$$

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

- ▶ 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  $\sigma_{\text{Rayleigh}}$  ist proportional zur vierten Potenz der Frequenz  $f$



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

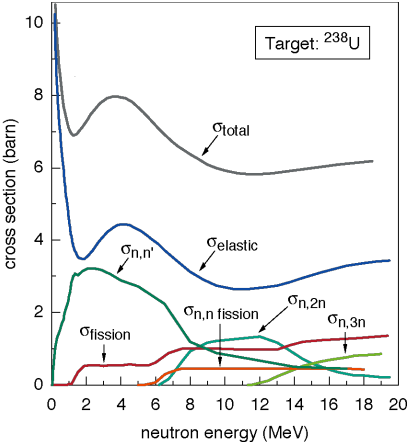


- ▶ Photon muss mindestens die **Ruhemasse des  $e^+ e^-$ -Paares** und die **Rückstoßenergie** aufbringen

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

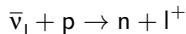
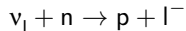
- ▶ Hadronische Wechselwirkung: Interaktionen eines Hadrons mit einem Atomkern, die auf der **starken Wechselwirkung** basieren
  - ▶ Geringe Reichweite der starken Kraft
  - Sehr geringe Wahrscheinlichkeit für hadronische Reaktionen
  - **Neutronen** können nur stark wechselwirken → sehr durchdringend
- ▶ Mögliche Prozesse (energieabhängig)
  - ▶ Elastische Streuung
  - ▶ Inelastische Streuung
  - ▶ Neutroneneinfang
  - ▶ Reaktionen mit Abstrahlung geladener Teilchen
  - ▶ Kernspaltung

# Hadronische Wechselwirkung



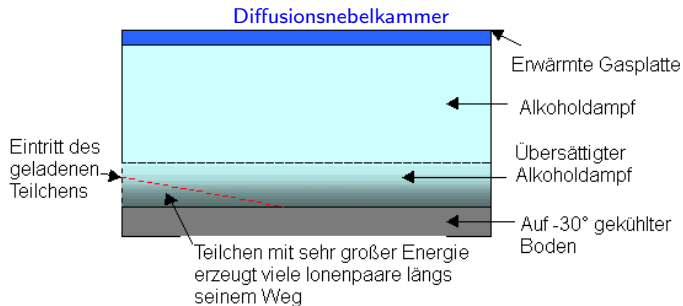


- ▶ Neutrinos unterliegen nur der **schwachen Wechselwirkung**
- ▶ Mögliche Interaktionen



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

# Historische Teilchendetektoren



- ▶ 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)

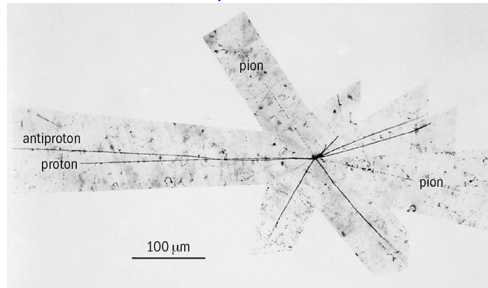
Diffusionsnebelkammer



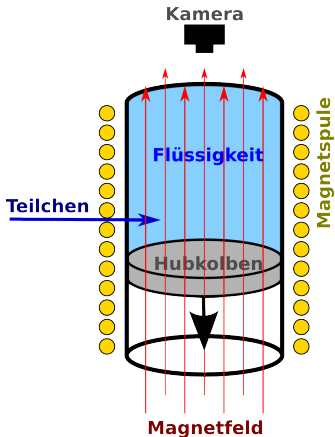
- ▶ Optisch durchsichtige Kammer gefüllt mit übersättigtem Luft-Alkohol-Gemisch
- ▶ Energiereiches, geladenes Teilchen erzeugt durch Stoßionisation Ionen
- ▶ Ionen agieren als Kondensationskeime für die Bildung von Tröpfchen
- ▶ Physik-Nobelpreis für Charles Thomson Rees Wilson in 1927 (Expansionsnebelkammer)

- ▶ 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

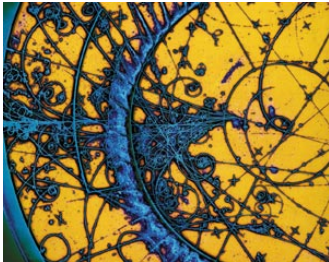
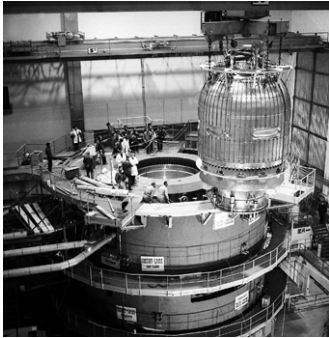
## Proton-Antiproton-Annihilation



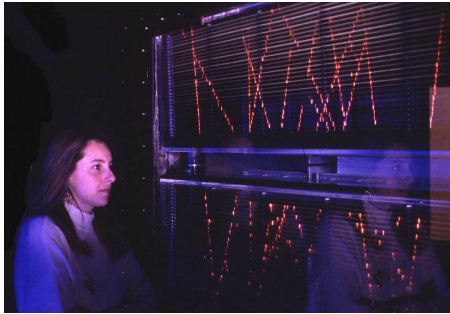
- ▶ Marietta Blau und Herta Wambacher entdeckten 1937 Kernzertrümmerungssterne
- ▶ Cecil Frank Powell et al. entdeckten 1947 das Pion (Nobelpreis)



- ▶ Optisch durchsichtige Kammer gefüllt mit flüssigem Wasserstoff o.ä.
- ▶ Temperatur der Flüssigkeit nahe des Siedepunktes
- ▶ Über Druckstempel wird Druck innerhalb der Kammer stark verringert → Temperatur der Flüssigkeit liegt nun oberhalb des Siedepunktes
- ▶ Ionisierende 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**



- ▶ Optisch durchsichtige Kammer gefüllt mit flüssigem Wasserstoff o.ä.
- ▶ Temperatur der Flüssigkeit nahe des Siedepunktes
- ▶ Über Druckstempel wird Druck innerhalb der Kammer stark verringert → Temperatur der Flüssigkeit liegt nun oberhalb des Siedepunktes
- ▶ Ionisierende 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**



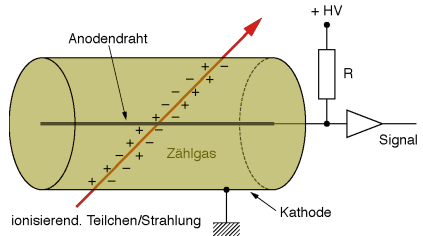
- ▶ Optisch durchsichtige Kammer gefüllt mit Edelgas und vielen parallelen Platten
- ▶ Elektrische Spannung von mehreren kV zwischen parallelen Platten
- ▶ Spannung nicht hoch genug, dass es Überschläge gibt
- ▶ Ionisiert ein hochenergetisches Teilchen die Edelgasatome, entstehen entlang der Teilchenspur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



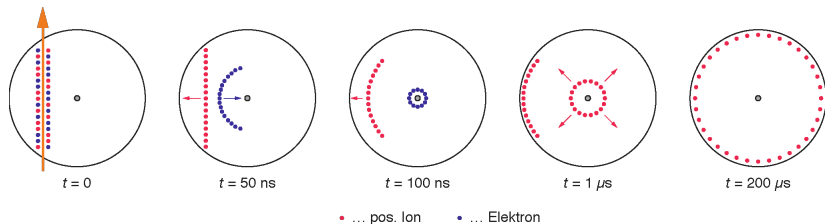
# Gasdetektoren

# Gasdetektor: Funktionsprinzip

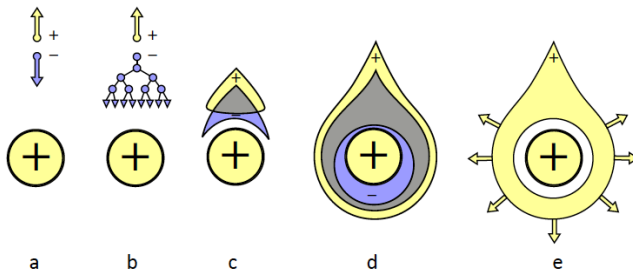
- ▶ Gas gutes Medium um geladene Teilchen durch Ionisation nachzuweisen
- ▶ Geladenes Teilchen erzeugt durch Ionisation Elektron-Ion-Paare
- ▶ Anzahl der Paare proportional zu deponierten Energie
- ▶ Messung:
  - ▶ Anlegen externer Spannung
  - ▶ Elektronen driften zur Anode, Ionen driften zur Kathode
  - ▶ Durch die Bewegung der Elektronen und Ionen im elektrischen Feld wird an der Anode und der Kathode ein Signal induziert



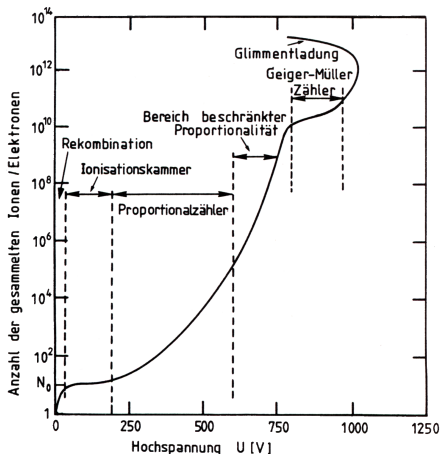
- ▶ Detektormedium z.B. Edelgas
- ▶ Mittlere Energie zur Erzeugung eines Elektron-Ion-Paares  $\sim 30 \text{ eV}$
- ▶ Elektronen haben eine 1000 mal höhere Mobilität als Ionen  $\rightarrow$  höhere Driftgeschwindigkeiten
- ▶ Driftgeschwindigkeit energieabhängig



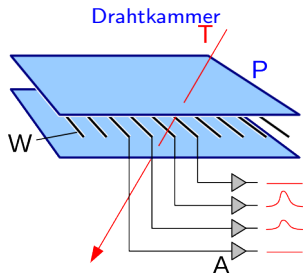
- ▶ Anode in Form von dünnem Draht
- ▶ Hohes Feld in Drahtnähe  $\rightarrow$  Elektronenvervielfachung (Signalverstärkung)



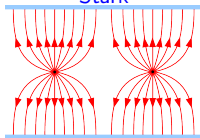
- ▶ **Elektronen** aus einer Primäriionisation driften zum Anodendraht
  - ▶ Sie gelangen dort in Bereiche hoher lokaler Feldstärke
  - ▶ Sobald die elektr. Feldstärke  $E_{\text{krit}}$  übersteigt, kommt es zur Sekundäriionisation
- Ladungsträgerlawine
- ▶ Elektronen driften schnell auf den Anodendraht zu und werden dort abgeleitet
  - ▶ Ionen entfernen sich langsam vom Anodendraht Richtung Kathode



- ▶ 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



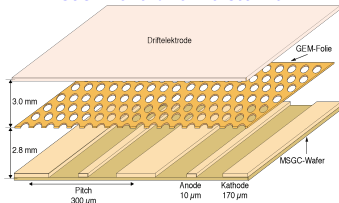
Elektrische Feldlinien: Dicht =  
Stark



- ▶ Vieldraht-Proportionalkammer (Englisch: Multi Wire Proportional Chamber (MWPC)) entwickelt in 1968
- ▶ Wie ebene Lage von vielen Proportionalzählrohren ohne trennende Zwischenwände
- ▶ Drähte im Abstand von  $\sim$ 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

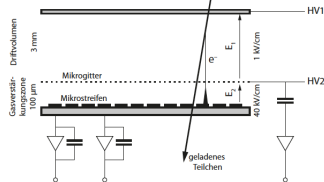
- ▶ Drähte können reißen, z.B. bei Funken → Kammer eventuell unbenutzbar
- ▶ **Alternative: Micropattern-Gas-Detektoren**
  - ▶ Potentiell bessere Ortsauflösung und anwendbar für höhere Teilchenrate

## Gas-Elektronenverstärker



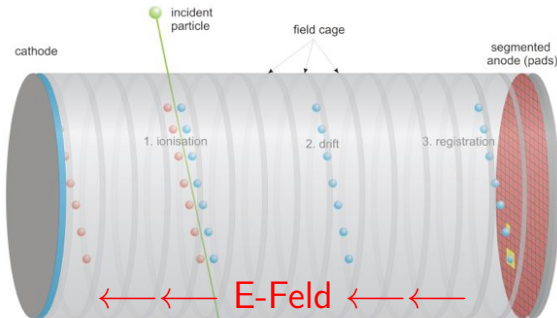
- ▶ ~ 50  $\mu\text{m}$  dicke Kapton-Folie, beide Seiten metallisiert, perforiert
- ▶ Hochspannung zw. den beiden Seiten
- ▶ Starkes Dipolfeld in jedem Loch → Gasverstärkung

## Micromegas



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

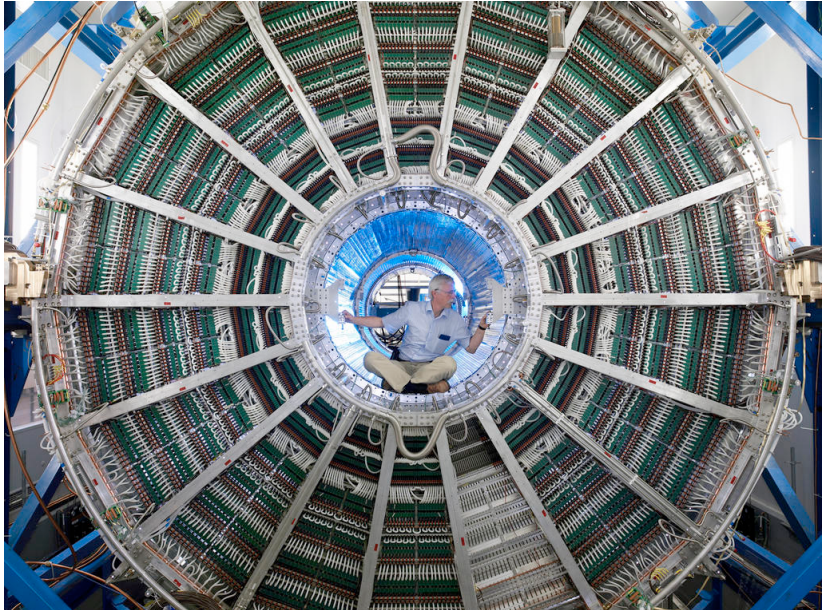
# Zeitprojektions- oder Spurendriftkammer (TPC)



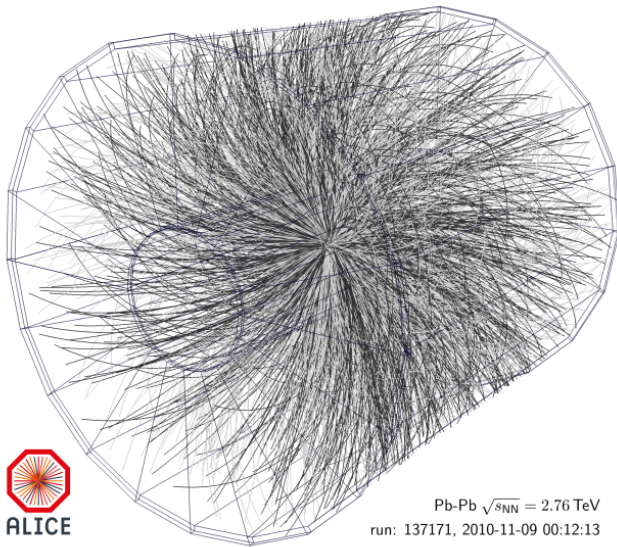
- ▶ Ionisation entlang der Teilchenspur
- ▶ Elektronen und Ionen driften im E-Feld
- ▶ Segmentierte Anode: 2D-Information
- ▶ 3. Dimension aus Driftzeit
- ▶ Auslese an Anodenseite z.B. über Vieldraht-Proportionalkammer, GEMs, ...



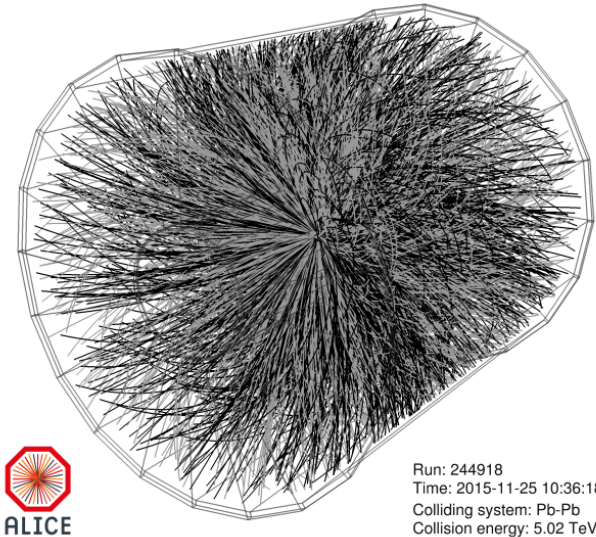
# Beispiel: TPC des ALICE-Experimentes



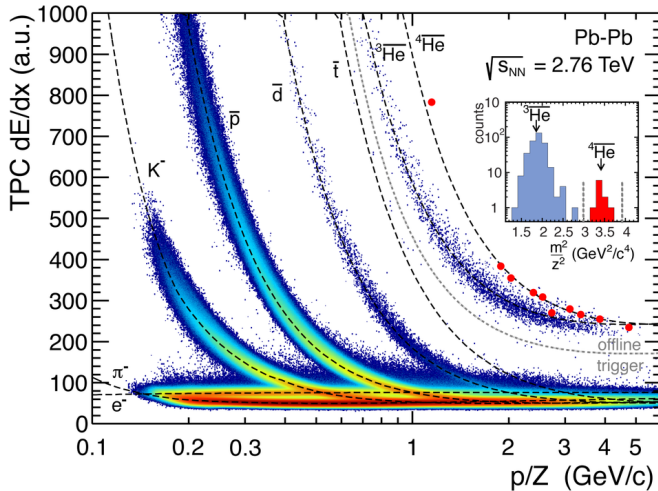
# Beispiel: TPC des ALICE-Experimentes



# Beispiel: TPC des ALICE-Experimentes



# Beispiel: Teilchenidentifikation in ALICE TPC



## 1. Teilchendetektion

- ▶ Ziel: Alle Teilcheneigenschaften mit hoher Genauigkeit und Effizienz messen
- ▶ Messung erfolgt durch Wechselwirkung des zu messenden Teilchens mit dem Detektormaterial
- ▶ Es gibt kein einzelnes Detektorkonzept, das alle Teilchenarten nachweisen kann
- ▶ Man benötigt mehrere Detektortechnologien und -konzepte

## 2. Wechselwirkung von Strahlung und Materie

- ▶ Ionisation und Anregung der Detektoratome, Bremsstrahlung, Cherenkov-Strahlung, Übergangsstrahlung, Photoeffekt, Compton-Effekt, Paarproduktion, Hadronische Wechselwirkung, fehlende Energie, ...

## 3. Historische Detektoren

- ▶ Nebelkammer, Fotoemulsion, Blasenkammer, Funkenkammer

## 4. Gasdetektoren

- ▶ Funktionsprinzip
- ▶ Proportionalzählrohr
- ▶ Vieldraht-Proportionalkammer
- ▶ Micropattern-Gas-Detektoren
- ▶ Spurendriftkammer



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