

#### **Moderne Experimentalphysik II** Teilchenphysik - Vorlesung 02

Professor Dr. Markus KLUTE (<u>markus.klute@kit.edu</u>) Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



19.12.2023

#### Recap





#### 1. Einführung

- 1.1. Organisatorisches, Lernziele, Motivation und Tips
- 1.2. Literatur
- 1.3. Standard Model der Teilchenphysik
- 1.4. Einheiten
- 1.5. Relativistische Kinematik
- 1.6. Feynman Diagramme



#### Was ist im Standardmodell?

- Die Elementarladung e ist die kleinste Einheit der Ladung?
- Die Masse der Austauschteilchen definiert die Stärke der Wechselwirkung?
- Es gibt kein Teilchen, welches an allen Wechselwirkungen des SM teilnimmt?
- Die Masse eines Teilchens lässt sich sehr gut aus der Higgs-Masse berechnen?







#### Einheiten

- Haben Längen und Zeit in natürlichen Einheiten die gleiche Einheit?
- Haben Energie und Zeit in natürlichen Einheiten die gleiche Einheit?





#### Muon Zerfall

- Ein Myon hat eine Lebensdauer von 2.2µs. In atmosphärischen Schauern werden sie mit eine mittleren Geschwindigkeit von 0.9998c ( $\chi$ =50) in einer höhe von 10km erzeugt.
- Erreichen Myonen die Erdoberfläche?





- Feynman Diagramm sind eine graphische Darstellung
  - A) von Prozessen in der Teilchenphysik,
  - B) der Trajektorien der Elementarteilchen,
  - C) Both?
  - D) None of the above?





#### Visualisierung von Prozessen & wichtiges Tool f ür Berechnungen

- konkrete Rechenregeln (Störungstheorie) für Wechselwirkungen (Impulse q, ...)
- zu einem physikalische Prozess tragen oft über mehrere Feyman-**Diagramme** bei (Interferenz der Amplituden)
- Erzeugung/Vernichtung von Teilchen an einem Vertex:
- Kopplungskonstante: e, bzw.  $\sqrt{\alpha}$
- Antiteilchen: e+ als rückwärts laufendes e- in der Zeit t







Reelle und virtuelle Teilchen

Beispiele: Positronium\*  $\Leftrightarrow$  Collider

- Energie/Impulserhaltung erfordert Erzeugung von 2 reellen Photonen
- Energie- und Impulserhaltung verbieten Produktion eines einzelnen (reellen) Photons, erlaubt Bildung eines einzelnen virtuellen Photons (andere Energie-Impuls-Relation!)







- Virtuelle Photonen als Träger des elektromagnetischen Feldes
  - Wechselwirkungen werden vermittelt durch Austausch virtueller Teilchen



- virtuelles Photon kann z.B. ein Myon-Antimyon Paar erzeugen
- e+
- virtuelle Teilchen: verantwortlich für Lamb-Shift\* (H-Atom)



- Heisenberg'sche Unschärferelation
- virtuelle Teilchen mit Masse kurze Lebensdauer - endliche Reichweite





#### Streuprozess

Kopplungsstärke\* der elektromagnetischen Wechselwirkung - Feinstrukturkonstante α

- Beispiel: Elektron-Positron Streuung vermittelt über virtuelles Photon





$$\alpha = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 \cdot hc} \approx \frac{1}{137}$$



Streuprozess

#### Virtuelles Photon verantwortlich f ür Impulstransfer q

- Prozess: erfordert  $\rightarrow$  |Wahrscheinlichkeits<u>amplitude</u>|<sup>2</sup>





- **Propagator**: Wahrscheinlichkeits<u>amplitude</u> für  $\gamma$  Propagation Vertex 1  $\rightarrow$  Vertex 2  $e^+-e^-$  Streuung (oder  $d\sigma/d\Omega$  bei Rutherford\*-Streuung) ):



#### Streuprozess

#### Frage: Welche Feynman-Diagramme stehen f ür die Vernichtung eines Elektron-Positron-Paares?







SHELDON COOPER CIP presenta GID WITH ELAGS

a Feynman díagram











## **Moderne Experimentalphysik II - Part II**





### 1. Einführung

- 1.1. Organisatorisches, Lernziele, Motivation, und Tips
- 1.2. Übersicht und Literatur
- 1.3. Standard Model der Teilchenphysik
- 1.4. Einheiten
- 1.5. Relativistische Kinematik
- 1.6. Feynman Diagramme

## **Moderne Experimentalphysik II - Part II**



#### 14 Teilchenphysik



#### 2. Experimentelle Methoden

- 2.1. Energieverlust geladener Teilchen
- 2.2. Energieverlust von Elektronen
- 2.3. Cherenkov- und Übergangsstrahung
- 2.4. Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
- 2.5. Hadronische Wechselwirkungen
- 2.6. Nachweistechniken
- 2.7. Detektorsysteme in der Teilchenphysik
- 2.8. Teilchenbeschleuniger



## **Nachweis von Teilchen in Detektoren**

- Teilchenidentifikation (e,  $\mu$ ,  $\gamma$ , p, n,  $\pi$ , ...)
  - Masse, Ladung
- Teilchenimpuls (Größe, Richtung, …)
  - Spur in B-Feld
- Teilchenenergie
  - Nachweis von Energiedepositionen

Komplexe Detectorsysteme







## Wechselwirkung von Teilchen

- Vielfältige Prozesse: starke, schwache, elektromagnetische Wechselwirkung
  - Reaktion sind abhängig von der Teilchenart: Ladung Q, Masse M, Hadron/Lepton, Lebensdauer, ...
  - Nachweisprozesse sind energieabhängig
  - Wahl des Nachweismediums
  - Detaillierte Modellierung möglich, typischerweise über MC-Methoden (GEANT4, ...) **GEANT4**





Schauerprozess







## Wechselwirkung von Teilchen

### **Spezifische Eigenschaften des Nachweismediums**

- Dichte p
- Aggregatzustand & Temperatur (gasförmig, flüssig, fest, plasma)
- Kernladung Z, Masse A,
- Ionisationsenergie, Bindungsenergie Elektronen, Gitter,...
- Strahlungslänge X<sub>0</sub>
- hadronische Wechselwirkungslänge  $\Lambda$ ,...
- angelegtes Potenzial/Feld: E-Feld, B-Feld
- elektrische Leitfähigkeit (supraleitend, Halbleiter,...)







## **Teilchenreaktionen in großen Detektorsystemen** Teilchensignaturen in verschiedenen Detektorsystemen









## Wechselwirkung von Teilchen – (sub-) eV Skala

#### sichtbares Licht



#### therm. Neutronen



(sub) eV-

Skala





#### Sekundärelektronen



## Wechselwirkung von Teilchen – keV... EeV Skala

Hochenergetische Teilchenstrahlung

- keV-Skala: Röntgenstrahlung, ß-Strahlung, Elektronkanone,...
- MeV-Skala:  $\alpha$ -Strahlung, Gammastrahlung, Sonneneutrinos, Zyklotron\*
- GeV-Skala: Synchrotron\*, Sekundärteilchen in Luftschauer
- TeV-Skala: LHC\*, kosmische Strahlung (p, γ,...) aus Galaxis (SNae,...)
- PeV-Skala und höher: kosmische Strahlung (p, γ,...) AGNs, GRBs,...



\* typische Teilchenenergie aus Beschleunigung Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

## **Moderne Experimentalphysik II - Part II**





- 2. Experimentelle Methoden
  - 2.1. Energieverlust geladener Teilchen
  - 2.2. Energieverlust von Elektronen
  - 2.3. Cherenkov- und Übergangsstrahung
  - 2.4. Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
  - 2.5. Hadronische Wechselwirkungen
  - 2.6. Nachweistechniken
  - 2.7. Detektorsysteme in der Teilchenphysik
  - 2.8. Teilchenbeschleuniger



## **Energieverlust von geladenen Teilchen**

Ionisation von Materie ist von grundlegender Bedeutung f
ür Nachweis

- inelastische Streuprozesse mit den Hüllenelektronen im Atom, hoher Querschnitt  $\sigma_{\text{inelast.}} \sim 10^{-17} - 10^{-16} \text{ cm}^2$ **Anregung** (gebundene Elektronen) & **Ionisation** (freie Elektronen, Ionen)
- maximaler Energieübertrag T<sub>max</sub> an ruhendes Elektron mit Masse me (für schwere Teilchen):

$$T_{\rm max} = 2m_e \cdot \beta^2 \cdot \gamma^2$$



```
Μ
```



Primärteilchen mit Masse m Lorentzparameter: ß, γ





## **Energieverlust von geladenen Teilchen**

Ionisation von Materie ist von grundlegender Bedeutung f
ür Nachweis

- Ionisationsprozesse dominieren bei schweren Teilchen ( $\mu$ , p, Ionen,...)
- in hinreichend dicken Absorbern wird ein Großteil der Teilchen-Primärenergie in ein **lonisationssignal** umgewandelt
- spezifischer Energieverlust dE/dx (pro Wegstrecke)
- Drift der Ladungsträger zu Elektroden (Platten, Drähte) via E-Feld, oder Ladungen als Kondensationskerne für Gasbläschen









## **Ionisationsenergien von freien Atomen\***

- hohe Werte für Edelgase: He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn: 10 eV...25 eV





#### Größe wichtig für alle lonisationsdetektoren (Vieldrahtkammer, …)

\* vgl. Mod. I Estitute by Sexperimental Particle Physics (ETP)

### **Bethe – Gleichung\***

#### Grundlegende Beschreibung des <u>mittleren</u> Energieverlusts eines Teilchens



 $= 0,307 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^{2}$ 

Konstanten: Elektronradius r<sub>e</sub> Elektronmasse m<sub>e</sub> Avogadro  $N_0 = N_A$ 

**Target**: Kernladung Z Kernmasse A Polarisation  $\delta$ 

\* früher: Bethe-Bloch Gleichung



$$\frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

**Projektil:** Ladung z 



Hans Bethe

mittleres Ionisationspotenzial I (für große Z gilt:  $I \sim Z \cdot 12 eV$ )



	σ
Ĩ	Ο
	Ð
	0
	$\mathbf{\mathbf{X}}$
÷.	_
	>
(	3



### **Bethe – Gleichung**

#### dE/dx ist eine mittlere Größe, in dünnen Targets große Fluktuationen

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \cdot r_e^2 \cdot N_0 \cdot m_e c^2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1-\beta^2)}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2}\right]$$

- Energieverlust nicht abhängig von Teilchenmasse M
- dE/dx nur abhängig von der **Teilchengeschwindigkeit ß**, typischerweise dargestellt als Funktion des Impulses p, wobei gilt:  $p = I \cdot \gamma \cdot M \cdot c$
- Anwendungsbereich für dE/dx: Teilchengeschwindigkeit ß > Geschwindigkeit der Hüllenelektronen der Targetatome (v ~ Z  $\cdot \alpha$ )





## Target: Massenbelegung & Bremsvermögen

- Targeteigenschaft: Massenbelegung X
  - Beschreibung mit Massenbelegung  $X = \rho \cdot x$  in (g/cm<sup>2</sup>) mit der stoff-spezifischen Dichte p in (g/cm<sup>3</sup>)
- Targeteigenschaft: Bremsvermögen dE/dX\*
  - mit der differenziellen Relation  $dX = \rho \cdot dx$  ergibt sich für das **Bremsvermögen** dE/dX in (MeV g<sup>-1</sup> cm<sup>2</sup>):

$$\frac{dE}{dX} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx}$$

- dE/dX für alle Medien (außer H) nahezu identisch, da Term Z/A ~ const. \*entspricht dem "Energieverlust" aus Teilchensicht







#### Eigenschaften des Targets: Z/A, I, $\delta$ , Projektils: ß, z

$$-\frac{dE}{dX} = 4\pi \cdot r_e^2 \cdot N_0 \cdot m_e c^2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1-\beta^2)}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

### $= 0,307 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^{2}$ (Energieverlust pro Massenbelegung)

#### **Ionisation der Elektronenhülle:**

- $m_e = 0.511 MeV$
- $r_{\rho}$ : klass. Elektronenradius mit  $r_{\rho} = 2,818 fm$ *m*<sub>e</sub>: Elektronmasse.  $N_0 = 6,022 \times 10^{23}$  $N_0$ : Avogadrozahl



#### Zahlenwert



### **Eigenschaften des Targets: Z/A, I, \delta, Projektils:** B, z

$$-\frac{dE}{dX} = 4\pi \cdot r_e^2 \cdot N_0 \cdot m_e c^2 \cdot \frac{Z}{A}$$

## **Target**: Kernladung Z Kernmasse A typisch: (Z/A) ~ 0,5 kleine Korrektur durch Polarisation $\delta$





Projektil Ladung z 

mittleres Ionisationspotenzial I (für große Z gilt:  $I \sim Z \cdot 12 eV$ )







#### • Anwendungsbereich der Bethe-Formel: 0,1 < ß $\cdot \gamma$ < 1000

$$-\frac{dE}{dX} = 4\pi \cdot r_e^2 \cdot N_0 \cdot m_e c^2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1-\beta^2)}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2}\right]$$

kleines ß: Term 1/ ß<sup>2</sup> dominant für dE/dx lange Stoßzeit in der Nähe der Atomhülle!





#### dE/dX zeigt Minimum bei $\beta \cdot \gamma \sim 3 - 4$ Symptotic management in the second se

bei hohen Impulsen erreicht dE/dx ein Plateau (Sättigung)

Teilchenimpuls p





#### • Anwendungsbereich der Bethe-Formel: 0,1 < ß $\cdot \gamma$ < 1000

$$-\frac{dE}{dX} = 4\pi \cdot r_e^2 \cdot N_0 \cdot m_e c^2 \cdot \frac{Z}{A}$$

- elektrisches Feld eines relativistischen Ladungs-**Trägers** "klappt nach oben" ("Längenkontraktion")  $\rightarrow$  <u>größere</u> lonisationsverluste als bei einem kugelsymmetrischen Feld "relativistic rise"





![](_page_30_Picture_7.jpeg)

physics.stackexcha

![](_page_30_Picture_9.jpeg)

## Spezialfall m.i.p.s\*

- Bereich minimaler lonisation
- wichtiger Bereich in Energieverlustkurve
- bei einer Targetdichte  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ :

![](_page_31_Figure_4.jpeg)

Wassertank

![](_page_31_Picture_6.jpeg)

![](_page_31_Figure_7.jpeg)

32 Teilchenphysik

\*m.i.p. = minimum ionizing particle

0.1

![](_page_31_Picture_10.jpeg)

![](_page_31_Figure_11.jpeg)

![](_page_31_Picture_13.jpeg)

![](_page_31_Picture_14.jpeg)

## Myonen in großen Detektorsystemen

![](_page_32_Figure_2.jpeg)

![](_page_32_Picture_4.jpeg)

![](_page_32_Picture_6.jpeg)

![](_page_32_Picture_7.jpeg)

# KatzenpauseTick, Trick und Track

![](_page_33_Picture_1.jpeg)

![](_page_33_Picture_3.jpeg)

![](_page_33_Picture_5.jpeg)

## **Energieverlust geladener Teilchen**

- ab?
- aber gleicher Ladungszahl Z ist größer, kleiner, oder gleich?

![](_page_34_Picture_3.jpeg)

![](_page_34_Picture_5.jpeg)

![](_page_34_Picture_6.jpeg)

Hängt der Energieverlust durch lonisation von der Masse der Projektils

Der Energieverlust an einem Target mit grösserer Neutronenzahl N

![](_page_34_Picture_10.jpeg)

![](_page_34_Picture_11.jpeg)

![](_page_35_Picture_0.jpeg)

## EINSCHUB: MYON-ABSCHIRMUNG IN UNTERGRUND-EXPERIMENTEN

![](_page_35_Picture_3.jpeg)

![](_page_35_Picture_4.jpeg)

![](_page_35_Picture_6.jpeg)

## Untergrundlabore für seltene Prozesse

 Suche nach seltenen Prozessen: Untergrundlabore zur Abschirmung vor kosmischen Myonen (m.i.p.s)

![](_page_36_Figure_2.jpeg)

![](_page_36_Picture_4.jpeg)

Ш

<u>с</u>

Tiefe

![](_page_36_Picture_5.jpeg)

#### Standardfels $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$

#### kosmische Myonen auf Meereshöhe (dE/dX in Gestein)

![](_page_36_Picture_9.jpeg)

## Untergrundlabore für seltene Prozesse

- Suche nach seltenen Prozessen: Untergrundlabore zur Abschirmung vor kosmischen Myonen (m.i.p.s)
  - Myonen aus der Höhenstrahlung sind stark durchdringend (<E>~4 GeV)
  - Experimente zur Suche nach Dunkler Materie nur in tiefen Untergrundlaboren
  - Labore in Tiefen von 1000 7000 m.w.e. (meters water equivalent mit  $\rho(H_2O) = 1 \text{ g/cm}^3$ ): Minen, dedizierte Untergrundlabore

![](_page_37_Picture_6.jpeg)

m.w.e.

C

Tiefe

~ 50 Myonen cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup>

Myonen

L

Tiefe

10-4 Myonen m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

> ti-functional lab module rd generation dark matter)

Institute of Experimental Particle

![](_page_37_Picture_14.jpeg)

![](_page_37_Picture_15.jpeg)

## **Untergrundlabore: LNGS**

- Suche nach seltenen Prozessen: Dunkle Materie,...
- größtes Untergrundlabor weltweit mit Fläche  $A = 17.300 \text{ m}^2$
- unterteilt in 3 große Experimentierhallen Myonrate: 3 · 10-4 m<sup>2</sup>/s

![](_page_38_Picture_4.jpeg)

Laboratori Nazionali del Gran Sasso

![](_page_38_Picture_6.jpeg)

![](_page_38_Picture_10.jpeg)

![](_page_38_Picture_11.jpeg)

![](_page_38_Picture_12.jpeg)

![](_page_38_Picture_13.jpeg)

![](_page_38_Picture_14.jpeg)

## **Untergrundlabore: LNGS**

#### Seit 2020: XENONnT Experiment im LNGS - Halle B

![](_page_39_Picture_2.jpeg)

#### \*Master-Vorlesung im WS: ATP-I Dunkle Materie

![](_page_39_Picture_5.jpeg)

![](_page_39_Picture_8.jpeg)

## **Teilchenidentifikation via dE/dx**

- dE/dx vs. p für verschiedene Teilchenarten
- Trennung von Teilchenspezies (Ruhemasse!) in Teilchenphysik oft über dE/dx

![](_page_40_Figure_3.jpeg)

![](_page_40_Picture_5.jpeg)

![](_page_40_Picture_6.jpeg)

![](_page_40_Figure_8.jpeg)

![](_page_40_Figure_9.jpeg)

![](_page_40_Figure_10.jpeg)

## **Teilchenidentifikation via dE/dx**

- Energieverlust dE/dx : ein wichtiges Mittel zur Teilchenidentifikation (Particle Identification - PID)
- dE/dx entspricht einer Messung von ß
- relativistischer Impuls p:

$$p = \beta \cdot \gamma \cdot M \cdot c = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cdot M \cdot c$$

- Messe dE/dx und <u>unabhängig</u> davon relativistischer Impuls p: **Teilchenmasse M (damit: PID)**  $\Box$ 

![](_page_41_Picture_7.jpeg)

![](_page_41_Figure_9.jpeg)

![](_page_41_Picture_11.jpeg)

![](_page_41_Picture_12.jpeg)

## Energieverlust geladener Teilchen: Überblick

![](_page_42_Figure_1.jpeg)

43 Teilchenphysik

![](_page_42_Picture_3.jpeg)

## **Energieverlust dE/dx: Fluktuationen**

- - inelastische Streuungen an Hüllenelektronen sind statistische Prozesse: zentrale Stöße (großes  $\Delta E$ ) sind sehr viel seltener als periphere Stöße (kleines  $\Delta E$ )

![](_page_43_Picture_3.jpeg)

Lev Landau (Nobelpreis 1962, Suprafluide)

Q: wikipedia

![](_page_43_Picture_7.jpeg)

![](_page_43_Picture_8.jpeg)

![](_page_43_Picture_10.jpeg)

## Energieverlustverteilung: "Landau-Kurve"

- Landau Vavilov Verteilung gilt in dünnen Absorbern
  - "Landau"-Verteilung: asymmetrische Verteilung
  - Stoß-Parameter, Erzeugung von "δ-Elektronen"

![](_page_44_Picture_4.jpeg)

![](_page_44_Picture_5.jpeg)

Q: wikipedia

![](_page_44_Picture_8.jpeg)

![](_page_44_Picture_11.jpeg)

![](_page_44_Picture_12.jpeg)

## Häufige Anwendung der "Landau-Kurve"

- Landau Vavilov Verteilung: experimentelles Spektrum
  - "Landau"-Verteilung: ideal zur Energiekalibration von Detektoren über Maximum der "Landau-Kurve"
  - typisch: Myonen als m.i.p. aus der kosmischen Höhenstrahlung (stets verfügbar <sup>(2)</sup>)

![](_page_45_Picture_4.jpeg)

![](_page_45_Picture_6.jpeg)

![](_page_45_Figure_8.jpeg)

### **Reichweite & Bragg-Peak**

#### • mittlere Reichweite $\overline{R}$ eines Teilchens

- Integration über inverses Bremsvermögen

Stopenergie  

$$\overline{R} = \int_{E_0}^0 \left(\frac{dE}{dX}\right)^{-1} \cdot dE$$
Startenergie

- Beispiel: 100 MeV/c Pionen in Pb  $R / \rho \sim 0.8 \text{ cm}$ 

#### - Bragg-Peak: dE/dx erreicht am Ende des Weges ein scharfes Maximum

![](_page_46_Picture_7.jpeg)

![](_page_46_Figure_8.jpeg)

![](_page_46_Picture_10.jpeg)

### **Reichweite & Bragg-Peak**

#### • mittlere Reichweite $\overline{R}$ eines Teilchens

- Integration über inverses Bremsvermögen

Stopenergie  

$$\overline{R} = \int_{E_0}^0 \left(\frac{dE}{dX}\right)^{-1} \cdot dE$$
Startenergie

- Beispiel: 100 MeV/c Pionen in Pb  $\bar{R}$  /  $\rho$  ~ 0,8 cm

#### - Bragg-Peak: dE/dx erreicht am Ende des Weges ein scharfes Maximum

![](_page_47_Picture_7.jpeg)

#### $E(\alpha) = 7,69 \text{ MeV}$ $t_{\frac{1}{2}}$ (214Po) = 164,3 µs

![](_page_47_Picture_10.jpeg)

#### $\alpha$ -Spuren (<sup>214</sup>Po)

![](_page_47_Picture_13.jpeg)

![](_page_47_Figure_14.jpeg)

![](_page_47_Picture_15.jpeg)

## **Bragg-Peak: Anwendung**

#### Therapie mit Protonen bzw. schweren lonen: 3D-Fokussierung von Strahlen

![](_page_48_Figure_2.jpeg)

![](_page_48_Picture_4.jpeg)

![](_page_48_Picture_5.jpeg)

## Linearer Energietransfer – LET

#### LET: ein Begriff aus der Dosimetrie (Radiobiologie, Medizinphysik, Chips)

- Energie bzw. Ladung, die ein Ionisierendes Teilchen pro "Einheitslänge" (hier: µm) im Material deponiert, oft in [keV/µm, pC/µm]
- in der Physik: Energieverlust  $[MeV \cdot cm^2/g]$  bzw. [MeV/cm]
- LET von schweren lonen **Ionen in Silizium als Funktion** ihrer Reichweite (Dotieren)

![](_page_49_Picture_6.jpeg)

![](_page_49_Figure_7.jpeg)

![](_page_49_Picture_9.jpeg)

![](_page_49_Picture_10.jpeg)

## **Reichweiten-Streuung & Vielfachstreuung**

#### Vielfachstreuprozesse

- Statistische Natur der Streuungen: ⇒ Reichweite unterliegt Fluktuationen

- begrenzt Auflösung für: Impuls p (Krümmungsradius) Ursprungskoordinaten r<sub>0</sub> (Vertex) Energie E (Integration von dE/dx entlang Spur)

- Gegenmaßnahmen:

a) Verwendung von Materialien mit kleinem Z (Beryllium Z = 4) b) minimiertes Material in Haltestrukturen

![](_page_50_Picture_7.jpeg)

![](_page_50_Figure_8.jpeg)

![](_page_50_Picture_10.jpeg)

### Vielfachstreuung: dicke Absorber

#### Energieverlust in dicken Absorbern

- Summation über Vielfachstreuung in dickem Absorber ergibt mit zentralem Grenzwertsatz der Statistik bzw. Summation über viele Auslenkwinkel eine gaußförmige Energie-Verlustverteilung mit Breite  $\sigma$
- mittlerer Auslenkwinkel:

![](_page_51_Picture_4.jpeg)

 $\sigma_{\text{Streu}}$  [rad] ~  $p^{-1} \cdot \sqrt{L}$ 

![](_page_51_Picture_7.jpeg)

![](_page_51_Figure_10.jpeg)

Impuls p

![](_page_51_Picture_14.jpeg)

![](_page_51_Picture_15.jpeg)

![](_page_51_Picture_16.jpeg)

## Katzenpause Cats & Dogs

![](_page_52_Picture_1.jpeg)

![](_page_52_Picture_3.jpeg)

![](_page_52_Picture_5.jpeg)

## **Moderne Experimentalphysik II - Part II**

![](_page_53_Figure_1.jpeg)

![](_page_53_Picture_3.jpeg)

- 2. Experimentelle Methoden
  - 2.1. Energieverlust geladener Teilchen
  - 2.2. Energieverlust von Elektronen
  - 2.3. Cherenkov- und Übergangsstrahung
  - 2.4. Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
  - 2.5. Hadronische Wechselwirkungen
  - 2.6. Nachweistechniken
  - 2.7. Detektorsysteme in der Teilchenphysik
  - 2.8. Teilchenbeschleuniger

![](_page_53_Picture_14.jpeg)

### **Energieverlust von Elektronen**

#### Energieverlustprozesse von Elektronen & Positronen

- Ionisation : kleine Modifikation für e- bei Bethe-Formel, da bei den Stößen ununterscheidbare Teilchen (Hüllenelektron, stoßendes Elektron)
- Bremsstrahlung : radiativer Prozess von leichten Teilchen durch Ablenkung des e- bzw. e+ im Coulombfeld des Kerns (Abbremsung)

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{e^-,e^+} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{ionis.} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{brems}$$

Ionisations-Energieverluste

![](_page_54_Picture_7.jpeg)

rluste radiative Energieverluste

![](_page_54_Picture_10.jpeg)

### **Energieverlust von Elektronen**

 $(X_0^{-1})$ 

 $\frac{dE}{dx}$ 

E|

1.0

0.5

0

- Energieverlustprozesse
- Møller Streuprozess: **Elektron-Elektron** Stoß
- Bhabha Streuprozess: **Elektron-Positron** Stoß
- normierter Energieverlust pro Strahlungslänge X<sub>0</sub> in einem Pb-Absorber mit  $X_0(Pb) = 6,37 \text{ g cm}^2$

![](_page_55_Picture_6.jpeg)

![](_page_55_Figure_7.jpeg)

![](_page_55_Figure_9.jpeg)

![](_page_55_Figure_10.jpeg)

![](_page_55_Figure_11.jpeg)

![](_page_55_Picture_12.jpeg)

![](_page_55_Picture_13.jpeg)

![](_page_55_Picture_14.jpeg)

## **Elektronen: kritische Energie E**<sub>C</sub>

#### Definition: bei E = E<sub>c</sub>

sind Energieverluste durch Ionisation & Bremsstrahlung identisch:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{brems}$$

- empirische Formel für Z-Abhängigkeit von E<sub>c</sub>:

$$E_c = \frac{610 MeV}{Z + 1.24}$$

 $(X_0^{-1})$ 

 $\frac{dE}{dx}$ 

E|

1.0

0.5

0

![](_page_56_Picture_8.jpeg)

![](_page_56_Figure_9.jpeg)

![](_page_56_Figure_11.jpeg)

![](_page_56_Figure_12.jpeg)

![](_page_56_Figure_13.jpeg)

![](_page_56_Picture_14.jpeg)

![](_page_56_Picture_15.jpeg)

![](_page_56_Picture_16.jpeg)

## Bremsstrahlung & Strahlungslänge X<sub>0</sub>

radiative Bremsstrahlungs-Energieverluste dominieren bei hohen Energien

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{brems} = \frac{4 \cdot \alpha^3 \cdot N_0}{m^2} \cdot \frac{Z^2}{A} \cdot \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) \cdot E = \frac{1}{X_0} \cdot E$$
$$= 1 / \text{Strahlungslänge } X_0$$

- Energieverluste nehmen linear zu mit Energie E
- nur wichtig für leichte geladene Teilchen wie Elektronen (~ m-4)

 $m = m_e = Elektronmasse$ N<sub>0</sub>: Avogadrozahl  $\alpha$ : Feinstrukturkonstante

![](_page_57_Picture_7.jpeg)

![](_page_57_Picture_10.jpeg)

![](_page_57_Figure_14.jpeg)

![](_page_57_Picture_16.jpeg)

## **Radiative Effekte an Beschleunigern**

#### radiative Energieverluste von Elektronen sehr groß bei Hochenergie-Ring-Beschleunigern

![](_page_58_Picture_2.jpeg)

- wichtig bei leichten, geladenen Teilchen, insbesondere bei Elektronen (~ m-4): bei TeV-Energien: ⇔ nur e- Linearcollider

![](_page_58_Picture_5.jpeg)

#### **Proton-Collider**: fast keine relevanten Verluste durch Bremsstrahlung, da große Masse M(p) = 1 GeV

![](_page_58_Picture_9.jpeg)

![](_page_58_Figure_11.jpeg)

![](_page_58_Picture_12.jpeg)

## Bremsstrahlung: Anwendung über X-Rays\*

![](_page_59_Figure_2.jpeg)

\*vgl. Mod. Ex. Phys. I

![](_page_59_Picture_5.jpeg)

#### Kontinuierliches Bremsstrahlungsspektrum & charakteristische Röntgen-Strahlung (diskrete Peaks) aus Auffüllen einer Vakanz in der Elektronenhülle

## Bremsstrahlung: Anwendung bei KATRIN

Analyse von Röntgenspektren mit hochauflösenden Siliziumdrift-Detektoren (SDDs) aus Elektron-Wechselwirkungen in einer dünnen Gold-Edelstahl Schicht (KATRIN Rear Wall)

![](_page_60_Figure_2.jpeg)

![](_page_60_Picture_4.jpeg)

![](_page_60_Picture_6.jpeg)

![](_page_60_Picture_8.jpeg)

## Strahlungslänge X<sub>0</sub>

- wichtige material-spezifische Größe für Elektron-Wechselwirkungen
  - wird i.a. in [g/cm<sup>2</sup>] angegeben (Massenbelegung)
  - mit der Absorber-Dichte ρ ergibt sich X<sub>0</sub> / ρ in [cm]
  - Beschreibung von elektromagnetischen Schauern:

X<sub>0</sub> gibt an, nach welcher Strecke die Energie eines relativistischen e- auf 1/e abgefallen ist (bzw. wie groß die **freie Weglänge**  $\Lambda$  eines hochenergetischen  $\gamma$ 's ist)

$$E(X) = E_0 \cdot e^{-\frac{X}{X_0}}$$

![](_page_61_Picture_8.jpeg)

#### E: Elektronen-Energie

![](_page_61_Figure_14.jpeg)

Q:simulationworld.com

![](_page_61_Picture_17.jpeg)

![](_page_61_Picture_18.jpeg)

## Strahlungslänge X<sub>0</sub> - materialspezifisch

- wichtige material-spezifische Größe für Elektron-Wechselwirkungen
  - nimmt ab mit Kernladung Z ( $X_0 \sim 1/Z^2$ )
  - kurzes  $X_0$  in Materialien mit hoher Kernladungszahl wie z.B. Blei (Z = 82) Blei als kompaktes Kalorimeter-Material bzw. Abschirmung  $\Box$

Material	Ζ	X <sub>0</sub> [g/cm <sup>2</sup> ]	krit. Energie E <sub>c</sub>
H <sub>2</sub>	1	63	340 MeV
Ar	18	18,9	35 MeV
Xe	54	8,5	14,5 MeV
Fe	26	13,8	24 MeV
Pb	82	6,37	6,9 MeV
NaJ (TI)	11 / 53	9,5	12,5 MeV

![](_page_62_Picture_6.jpeg)

![](_page_62_Picture_8.jpeg)

## Elektronen in großen Detektorsystemen

#### Elektronen schauern auf im elektromagnetischen Kalorimeter $\odot$ 4 T Myon (~GeV) **Elektron** Hadron Neutron **2T** Photon $\odot$ Tracker elektromagnet. **Calorimeter** Hadronsupraleitender Kalorimeter Solenoid Myonkammern **CMS** mit Eisenjoch **3**m\_ 4m 5m 6m 2m

![](_page_63_Picture_2.jpeg)

![](_page_63_Picture_4.jpeg)

![](_page_63_Picture_5.jpeg)

![](_page_63_Figure_7.jpeg)

![](_page_63_Picture_8.jpeg)

![](_page_63_Picture_9.jpeg)

## **Energieverlust geladener Teilchen**

- - Elektron
  - Myon
  - Tau

![](_page_64_Picture_5.jpeg)

![](_page_64_Picture_7.jpeg)

#### Bei Energie von einem GeV hat das ... den größten Energieverlust?

## **Moderne Experimentalphysik II - Part II**

![](_page_65_Figure_1.jpeg)

![](_page_65_Picture_3.jpeg)

- 2. Experimentelle Methoden
  - 2.1. Energieverlust geladener Teilchen
  - 2.2. Energieverlust von Elektronen
  - 2.3. Cherenkov- und Übergangsstrahung
  - 2.4. Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
  - 2.5. Hadronische Wechselwirkungen
  - 2.6. Nachweistechniken
  - 2.7. Detektorsysteme in der Teilchenphysik
  - 2.8. Teilchenbeschleuniger

![](_page_65_Picture_14.jpeg)