

## Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

### Karlsruher Institut für Technologie Sommersemester 2020 – 5. Vorlesung (Teil 1)

### ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS





www.kit.edu



# Kurze Wiederholung

- Energieverlust schwerer geladener Teilchen: hauptsächlich lonisation Mittlerer Energieverlust durch geladene Teilchen mit 0,1  $\leq \beta \gamma \leq 1000$ :
- **Bethe-Gleichung** 
  - Reichweite: größter Energieverlust am Ende der Wegstrecke  $\rightarrow$  Bragg-Peak Dünne Absorber: dE/dx-Fluktuationen  $\rightarrow$  Landau-Verteilung Dicke Absorber: Vielfachstreuung

  - → Energieverlust und Streuwinkel ungefähr gaußverteilt
  - Anwendungen:
    - dE/dx: Teilchenidentifikation über Messung der Geschwindigkeit  $\beta$ Bragg-Peak: Tumortherapie mit Schwerionen



 $-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}X} \right\rangle \sim \beta^{-2} \ln \beta^2 \gamma^2$ 



# Kurze Wiederholung

- Spezialfall: Energieverlust von Elektronen/Positronen

  - gleich
- zur Energie des Teilchens:

$$-\left(\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}X}\right)_{\mathrm{rad}} = \frac{E}{X_0} \operatorname{mit} X_0 = \left(4\alpha \, r_{\mathrm{e}}^2 \, N_A \frac{Z^2}{A} \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right)\right)^{-1}$$

Strahlungslänge  $X_0 \sim Z^{-2}$ : charakteristische Materialkonstante  $\rightarrow$  Elektronenenergie nach  $X_0$  auf Bruchteil 1/e reduziert



## **Identische** Streupartner in Absorber: gleiche Masse, Pauli-Prinzip Dominante Effekte: E klein $\rightarrow$ lonisation, E groß $\rightarrow$ Bremsstrahlung Kritische Energie: Energieverlust durch Ionisation und Bremsstrahlung

## Energieverlust durch Bremsstrahlung in guter Näherung proportional





# Auflösung Aufgabe 8

- Was unterscheidet den Energieverlust von Elektronen in Materie von dem schwerer geladener Teilchen?
  - A. Aufgrund der geringen Masse von Elektronen ist die Bremsstrahlung für hohe Energien der dominante Effekt.
  - B. Aufgrund der geringen Masse von Elektronen ist die Bremsstrahlung für niedrige Energien der dominante Effekt.
  - C. Der Energieverlust ist für Elektronen und Positronen derselbe.
  - D. Bei der Streuung an Hüllenelektronen muss beachtet werden, dass die Streupartner identische Teilchen sind.





**Kapitel 3** 

# **Experimentelle Methoden**





# Cherenkov- und Übergangsstrahlung



### Kapitel 3.3



# **Cherenkov-Strahlung**

Geladenes Teilchen in Medium mit Brechungsindex n mit Geschwindigkeit größer als Phasengeschwindigkeit des Lichts im Medium ( $v_{ph} = c/n$ ) → charakteristische Strahlung (P. A. Cherenkov, 1934; theoretische Erklärung: I. M. Frank, I. Y. Tamm, 1937)









<u>www.no</u>





# **Cherenkov-Strahlung**

## Physikalisches Bild (klassische Elektrodynamik): **asymmetrische Polarisation** des Mediums für große $\beta = v/c$



mittleres Dipolmoment = 0  $\rightarrow$  keine Strahlung

## → kontinuierliches Photonenspektrum

Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 5. Vorlesung





mittleres Dipolmoment  $\neq 0$ → Cherenkov-Strahlung





# **Cherenkov-Strahlung**

**Spektrum** der Cherenkov-Photonen: (pro Energie  $E_{\gamma}$  und Strecke x im Medium)

$$\frac{\mathrm{d}^2 N_{\gamma}}{\mathrm{d} E_{\gamma} \,\mathrm{d} x} = \begin{cases} 0 & \beta \\ \frac{\alpha z^2}{\hbar c} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(E_{\gamma})}\right) & \beta \end{cases}$$

**Schwelleneffekt** 

Reale Medien:  $n = n(E_{\gamma}) \rightarrow \text{Dispersion}$ 



# Abstrahlung unter Kegel mit Öffnungswinkel $\theta_c \rightarrow$ **Cherenkov-Winkel** Huygenssches Prinzip: konstruktive Interferenz der Photonen, Schockwelle $\cos \theta_c = \frac{c/n \cdot t}{\beta ct} = \frac{1}{n\beta}$ c/n·t $\theta_c$ $\leq 1/n$ $\beta ct$ > 1/n







# **Cherenkov-Zähler**

- Schwellenzähler (engl.: threshold counter):
  - Minimale Geschwindigkeit für Cherenkov-Strahlung:  $\beta_{thr} = v_{min}/c = 1/n$ → Teilchenidentifikation über **Beobachtung** von Cherenkov-Strahlung
  - Beispiel Wasser (n = 1,33):  $\beta_{thr} = 0,75$ 
    - $\rightarrow$  Pion mit p = 1 GeV/c:  $\beta = pc/E = 0.98 \rightarrow$  Strahlung
    - $\rightarrow$  Proton mit p = 1 GeV/c:  $\beta = pc/E = 0,71 \rightarrow$  keine Strahlung
  - Herausforderung: Materialien mit passendem Brechungsindizes

- Abbildung des Cherenkov-Kegels (engl.: imaging counter): Bestimmung der **Teilchengeschwindigkeit**  $\beta$  über Messung des Cherenkov-Winkels  $\theta_c$ 
  - Mit bekanntem Impuls p und  $\beta = pc/E$ : Teilchenidentifikation über Masse







# **Cherenkov-Zähler: Beispiele**

- LHCb-Experiment (CERN):
  - Ringabbildender Cherenkov-Zähler (engl.: ring-imaging Cherenkov = RICH)
  - Unterscheidung: Protonen, Kaonen, Pionen
- Luftschauer-Nachweis:
  - Cherenkov-Licht aus kosmischen Luftschauern, z. B. durch kosmische **TeV-Gammastrahlung**
  - Gleichzeitige ("stereoskopische") Beobachtung mit mehreren Teleskopen
  - Derzeit: H.E.S.S. (Namibia), MAGIC (La Palma)  $\rightarrow$  Zukunft: CTA





















# Übergangsstrahlung

Charakteristische Strahlung beim Übergang zwischen Vakuum und Medium mit **Permittivität**  $\varepsilon_r$  mit Intensität (V. L. Ginzburg, I. M. Frank, 1945)

$$I = \alpha \, z^2 \, \gamma \frac{\hbar \omega_p}{3} \quad \text{mit} \quad \omega$$

(Klassisches) physikalisches Bild: **Dipol** zwischen Ladung und Spiegelladung



Anwendung: Übergangsstrahlungsdetektor Bestimmung Lorentzfaktor  $\gamma$ : Intensitätsmessung für viele Übergänge (dünne Folien) Mit bekanntem Impuls p ( $\beta \approx 1$ ) und  $\gamma = E/mc^2$ : Teilchenidentifikation über Masse



 $v_p^2 = \frac{n_e e^2}{\varepsilon_r \varepsilon_0 m_c}$  Plasmafrequenz



# Kurze Zusammenfassung

Cherenkovstrahlung

### Geladene Teilchen mit $\beta > c/n$ in Medium mit **Brechungsindex** *n*

Abhängig von **Geschwindigkeit**  $\beta$ 

Schwelleneffekt

Moderne Experimentalphysik III (4010061) – 5. Vorlesung





Übergangsstrahlung

Geladenen Teilchen beim Übergang zwischen Medien mit unterschiedlichen Permittivitäten

Abhängig von Lorentzfaktor  $\gamma$ 

Keine Schwelle













# Wechselwirkungen von **Photonen mit Materie**



### Kapitel 3.4



# Überblick: WW von Photonen

- Kleine Energien (< 1 MeV): photoelektrischer</p> Effekt (außerdem: Rayleigh- und Compton-Streuung)
- Mittlere Energien (1 MeV): Compton-Effekt
- Hohe Energien (>2 *m*<sub>e</sub>): e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>-**Paarbildung**
- **Absorption** von Photonen: Lambert-beersches Gesetz für Intensität

 $I(X) = I_0 \exp[-\mu X]$ 

 $\mu$ : Absorptionskoeffizient  $\rightarrow$  proportional zu Wirkungsquerschnitt des Absorptionsprozesses  $(1/\mu = \text{mittlere freie Weglänge})$ 



### (b) Lead (Z = 82) • - experimental $\sigma_{tot}$ 1 Mb **Totaler** s/atom) **Wirkung**squerschnitt für Photonen in Blei $\sigma_{Rayleigh}$ 1 kb Cross section К<sub>пис</sub> g.d.r. 1 b $\bar{\mathbf{K}}_{e}$ $\sigma_{Compton}$ 10 mb10 eV 1 keV 1 MeV 1 GeV Photon Energy

pdg.lbl.gov







## Lambert-beersches Gesetz





~ mittlere freie Weglange 1/2







# **Photoelektrischer Effekt**

- Charakteristische Absorptionskanten: Schwellen für Photoionisation an Energieniveaus der Atome
- Emission eines **Photoelektrons** mit  $E_{kin} = hv E_b$ (*E<sub>b</sub>*: Bindungsenergie)
- **Z<sup>5</sup>:** wichtig für **große Kernladungszahlen Z**



Photoelektrischer Effekt: Absorption von Photonen in Elektronenhülle Wirkungsquerschnitt (mit  $\varepsilon = E_{\gamma}/m_ec^2$  "reduzierte Photonenenergie"):  $\sigma_{\mathsf{PE}} = \frac{8\pi}{3} r_{\mathsf{e}}^2 \mathbf{Z}^5 \alpha^4 \frac{1}{\varepsilon^{\delta}} \operatorname{mit} \delta = \begin{cases} 3,5 & \text{falls } \varepsilon \ll 1\\ 1 & \text{falls } \varepsilon \gg 1 \end{cases}$ 







# **Compton-Effekt**

- Inelastische Streuung eines Photons an quasi-freien Hüllenelektronen (A. H. Compton 1922):
  - Energieverlust abhängig von Streuwinkel  $\theta$

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \varepsilon (1 - \cos \theta)}$$

Elektronen: kontinuierliches Energiespektrum mit Compton-Kante für Rückstreuung (und Photopeak)

Wirkungsquerschnitt ~ $E_{\gamma}^{-1}$ (exakte Berechnung: Klein-Nishina-Formel)





# **Elektron-Positron-Paarbildung**

- Umwandlung eines Photons in ein e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>-Paar:
  - **Schwelleneffekt** durch Umwandlung der Photonenenergie in Masse des e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>-Paars  $\rightarrow$  nur möglich für  $\varepsilon = E_{\gamma}/m_ec^2 \ge 2$
  - Impulserhaltung: nur in Coulombfeld eines Atomkerns (oder eines Hüllenelektrons) möglich

### Paarbildung: totaler Wirkungsquerschnitt für $\varepsilon \gg 1$

- Absorptionskoeffizient bei Paarbildung:
- Totaler Wirkungsquerschnitt für Paarbildung:  $\sigma_P = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left| \frac{7}{9} \ln \left( \frac{183}{Z^{1/3}} \right) \frac{1}{54} \right|$

### Sommersemester 2020

# Exakte Berechnung: QED (Bethe, Heitler, Proc. Roy. Soc. Lond. A146 (1934) 83)

 $\mu_{P} = \sigma_{P} \frac{N_{A}}{\Lambda}$ 





www.zw-jena.de







# Strahlungslänge

$$X_{0} = \left(4\alpha r_{e}^{2} N_{A} \frac{Z^{2}}{A} \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right)\right)^{-1} \rightarrow \sigma_{P} = 4\alpha r_{e}^{2} Z^{2} \left[\frac{7}{9} \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) - \frac{1}{54}\right] \approx \frac{7}{9} Z^{2} \left[\frac{1}{9} \ln\left(\frac{1}{2} \frac{1}{3}\right) - \frac{1}{54}\right] = \frac{1}{2} Z^{2} \left[\frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{2} \frac{1}{3}\right) - \frac{1}{54}\right] = \frac{1}{2} Z^{2} \left[\frac{1}{3} \ln\left(\frac{1}{3} \frac{1}{3}\right) - \frac{1}{2} \left[\frac{1}{3} \ln\left(\frac{1}{3} \frac{1}{3}\right) - \frac{1}{54}\right] = \frac{1}{2} Z^{2} \left[\frac{1}{3} \ln\left(\frac{1}{3} \frac{1}{3}\right) - \frac{1}{54}\right] =$$

 $\rightarrow$  gleichzeitig Massenbelegung, für die gilt: Elektronen-Energie auf 1/e reduziert X<sub>0</sub> entspricht 7/9 der mittleren freien Weglänge von Photonen  $\rightarrow$  Intensität der Photonen auf Bruchteil  $e^{-7/9} \approx 0,46$  abgefallen



### Vergleich von Absorptionskoeffizient für Photonen mit Strahlungs**länge X**<sub>0</sub> aus Energieverlust von Elektronen durch Bremsstrahlung

 $X_0$ : charakteristisch sowohl für Bremsstrahlung als auch für Paarbildung







# **Elektromagnetischer Schauer**

- Elektronen und Photonen bei hohen Energien ( $E \gg E_c$ )
  - Primäres Elektron: Photonen durch Bremsstrahlung Primäres Photon: Elektron-Positron-Paar durch Paarbildung
- Konsequenz: hochenergetische Photonen und Elektronen induzieren Kaskade aus Paarbildung und Bremsstrahlung → elektromagnetischer Schauer
  - Aussterben des Schauers: mittlere e<sup>±</sup>-Energie unterhalb kritischer Energie *E*<sub>c</sub>
  - Charakteristische Länge: Strahlungslänge X<sub>0</sub>
  - Laterale Ausdehnung: 90% der Energie innerhalb von
    - **Molière-Radius**  $R_M$  (95% in 2  $R_M$ ), Faustformel:  $R_M = \frac{1}{2}$



40-GeV-Elektron auf Bleiglas



21 MeV

 $E_c$ 

X<sub>0</sub>





# Heitler-Modell

Einfaches Modell elektromagnetischer Schauer (Heitler 1954):

- Prozesse: Paarbildung  $\gamma \rightarrow e^+e^-$  und Bremsstrahlung  $e^\pm \rightarrow e^\pm \gamma$  (Verdopplung:  $1 \rightarrow 2$ ) Typische Länge (in Einheiten der Massenbelegung) für beide Prozesse:  $X = X_0 \ln 2$ Energie teilt sich gleichmäßig auf alle N Teilchen auf, für jedes Teilchen:  $E = E_0/N$ Abbruch der Kaskade bei kritischer Energie:  $E_e = E_c$

- Nach *n* Generationen:
  - Länge des Schauers:
  - **Zahl der Schauerteilchen:**  $N = 2^n = \exp\left[\frac{X_n}{X_0}\right]$
- **Schauermaximum** bei Erreichen von *E*<sub>c</sub>:
  - Maximale Anzahl von Teilchen:  $N_{\text{max}} = \frac{E_0}{F_a}$
  - Zahl der Generationen:







# Aufgabe 9

- Was charakterisiert die Wechselwirkung von hochenergetischen Photonen mit Materie?
  - A. Nach einer Strahlungslänge ist die Photonenintensität auf e<sup>-7/9</sup> abgefallen. B. Nach einer Strahlungslänge ist die Photonenenergie auf e<sup>-7/9</sup> abgefallen. C. Ein einzelnes Photon kann durch Vielfachstreuung Energie verlieren. D. Ein einzelnes Photon verliert primär durch Compton-Streuung Energie. E. Ein einzelnes Photon wird entweder durch eine Wechselwirkung absorbiert oder passiert die Materie ungehindert.
- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS: https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold 1080516&client id=produktiv







# Kurze Zusammenfassung

- Dominante Prozesse für Wechselwirkung von **Photonen** in Materie Niedrige Energien ( $E_{\gamma}$  < 1 MeV): photoelektrischer Effekt  $\rightarrow$  Absorption Mittlere Energien ( $E_{\gamma} \approx 1$  MeV): **Compton-Effekt**  $\rightarrow$  Energieverlust • Hohe Energien ( $E_{\gamma} > 1$  MeV): **Paarbildung**  $\rightarrow$  Absorption

- **Strahlungslänge X**<sub>0</sub>: charakteristisch für Bremsstrahlung (Energie auf 1/e abgefallen) und für Paarbildung (7/9 der mittleren freien Weglänge)
- **Elektromagnetische Schauer**: hochenergetische e<sup>±</sup> und  $\gamma$  bilden Kaskade aus Bremsstrahlung und Paarbildung (Heitler-Modell)
- Anwendung: elektromagnetisches Kalorimeter  $\rightarrow$  destruktive Energiebestimmung für e<sup>±</sup> und  $\gamma$  über Schauereigenschaften ( $\rightarrow$  später)







## Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

### Karlsruher Institut für Technologie Sommersemester 2020 – 5. Vorlesung (Teil 2)

### ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS





www.kit.edu



# Auflösung Aufgabe 9

- Was charakterisiert die Wechselwirkung von hochenergetischen Photonen mit Materie?
  - A. Nach einer Strahlungslänge ist die Photonenintensität auf e<sup>-7/9</sup> abgefallen.
  - B. Nach einer Strahlungslänge ist die Photonenenergie auf e<sup>-7/9</sup> abgefallen.
  - C. Ein einzelnes Photon kann durch Vielfachstreuung Energie verlieren.
  - D. Ein einzelnes Photon verliert primär durch Compton-Streuung Energie.
  - E. Ein einzelnes Photon wird entweder durch eine Wechselwirkung absorbiert oder passiert die Materie ungehindert.







# Hadronische Wechselwirkungen



Kapitel 3.5



# Hadronische WW und Luftschauer

- Wechselwirkungen von Hadronen in Materie:
  - Alle Hadronen: Prozesse der starken Wechselwirkung  $\rightarrow$  hadronische (und elektromagnetische) **Schauer**
  - **Geladene** Hadronen: zusätzlich elektromagnetische Wechselwirkung

 $\mu^+$ 









# Hadronische WW-Länge

- **länge**  $\lambda$  (auch: nukleare Absorptionslänge)
  - Intensitätsverlauf (Absorption):

$$I(X) = I_0 \exp\left[-\frac{X}{\lambda}\right] \text{ mit } \lambda = \left(\sigma_{\text{ine}}\right)$$

( $\sigma_{inel}$ : inelastischer Wirkungsquerschnitt für Kernreaktionen)

- Werte für *λ*: tabelliert
- Charakteristisch: λ deutlich größer als X<sub>0</sub>, starke **Fluktuationen** um mittleres  $\lambda$



# Charakteristische Längenskala: hadronische Wechselwirkungs-

nel  $\frac{N_A}{A}$ 

Material	<mark>λ (g/cm²)</mark>	λlg (cm)	<i>Х₀/ϱ</i> (с
H <sub>2</sub> (gasf.)	52,0	6,209·10 <sup>5</sup>	7,527.
Wasser	83,3	83,3	36
Argon (fl.)	119,7	85,77	14
Eisen	132,1	16,77	1,
Blei	199,6	17,59	0,5





# Kurze Zusammenfassung

- Hadronischer Schauer: kompliziertes Zusammenspiel vieler Prozesse
  - Produktion sekundärer Hadronen (überwiegend Pionen)
  - Zerfälle von geladenen Pionen und Myonen
  - Zusätzlich: Kernanregung und -abregung, Kernspaltung, intra- und internukleare Kaskaden ("Spallation")
  - Zerfall neutrale Pionen:  $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma \rightarrow elektromagnetische Subkaskade$
- Charakteristische Skala f
  ür Ausdehnung hadronischer Schauer: hadronische Wechselwirkungslänge  $\lambda$
- Anwendungen:
  - Luftschauerexperimente: Erdatmosphäre als hadronisches Kalorimeter
  - Hadronisches Kalorimeter: destruktive Energiebestimmung f
    ür Hadronen





# Detektionstechniken



### Kapitel 3.6



# Übersicht

- Klassifizierung von Teilchendetektoren z. B. nach
  - **Messgrößen**, z. B. Ort, Impuls, Energie, Teilchenart
  - **Detektionstechniken**, z. B. Ionisation von Gasen und Halbleitern, Szintillationslicht, Cherenkov- und Übergangsstrahlung, Phasenübergänge
- Kombination von Detektoren zu Detektorsystemen, angepasst an physikalisches Problem und experimentelle Umgebung, z. B.:
  - Experimente mit Teilchenstrahlen aus Beschleunigern: LHC, KEKb, ...
  - Experimente ohne Beschleuniger: kosmische Strahlung, direkte Suche nach dunkler Materie, ...



## Weitere Grundlagen: Spezialvorlesung Detektoren (Wintersemester)





# Gasgefüllte Detektoren

- Gasgefüllte Detektoren:
  - Kammer mit Zählgas (z. B. Argon), Elektroden mit Hochspannung
  - Primärionisation des Zählgases  $\rightarrow$  **Drift** von Elektronen (wichtiger Beitrag: Sekundärelektronen) und Ionen zu Elektroden
  - Betrieb als **lonisationskammer**:
    - Bauform: parallele Platten
    - Sammlung und Verstärkung der direkt erzeugten Ladungen
    - Anwendung: Detektion von Gammastrahlung mit hohen Zählraten



### Visualisation of ion chamber operation Anode Incident radiation particle Electric field Cathode -----Kev onisation even

Dougsim, lon chamber operation, CC BY-SA 3.0



# Gasverstärkung

- Betrieb gasgefüllter Detektoren bei höheren Spannungen:
  - Typische Bauform: zylindrische Kammer mit Anodendraht  $\rightarrow$  elektrisches Feld *E(r)* ~ 1/*r* (*r*: Abstand zu Drahtmittelpunkt)
  - Hohes elektrisches Feld nahe am Anodendraht: Gasverstärkung (typisch: Faktor 10<sup>5</sup>) durch **Townsend-Lawine**
  - Ausbreitung von UV-Photonen aus angeregten Ionen in Kammer: weitere Ionisation

Absorption der UV-Photonen durch Löschgas (engl.: quench gas), **z**. **B**. **CO**<sub>2</sub>









# Gasgefüllte Detektoren: Betriebsmodi

- **Ionisationskammer** (→ vorige Folie)
- **Proportionalkammer**:
  - Betrieb im **Proportionalbereich**
  - Anzahl der Elektron-Ion-Paare proportional zu Primärionisation
- **Geiger-Müller-Zählrohr** (H. Geiger 1908, W. Müller 1928):
  - Betrieb im Plateaubereich (auch: Geiger-Bereich)
  - Anzahl der Elektron-Ion-Paare unabhängig von Primärionisation





DooFi, Kennlin aehlrohr gemeinfrei



# Vieldraht-Proportionalkammer

- Aufgabe: Messung der Ortskoordinaten eines Teilchendurchgangs
- Vieldraht-Proportionalkammer: (G. Charpak 1968, engl.: multi-wire proportional chamber, MWPC)
  - Großflächige planare Anordnung vieler paralleler Anodendrähte mit Durchmesser O(100 µm) und Abstand O(mm), Betrieb im Proportionalbereich
  - **Ortsinformation** (eindimensional): elektrisches Signal an angesprochenen Drähten



Schmid, <u>Wire\_chamber\_E\_field.svg</u>, <u>CC BY-SA 3.0</u>



### Anodendraht



# Weitere Entwicklungen

## **Driftkammer:**

(Heinze, Walenta, Schürlein, 1971) verbesserte Ortsauflösung durch Messung der Driftzeit der Elektronen

Zeitprojektionskammer: (Nygren, 1974, engl: time projection chamber) **3D-Information durch Projektion der** Teilchenspur auf Endplatten und Messung der Driftzeit in homogenem elektrischen Feld

















# Halbleiterdetektoren

- **Prinzip: Halbleiter-Ionisationskammer** 
  - $\rightarrow$  Halbleiterdiode (pn-Übergang) in Sperrrichtung
  - Drift + Diffusion + Rekombination von Ladungsträgern O → Verarmungszone frei von Ladungsträgern
  - Betrieb als Detektor: umgekehrte Bias-Spannung (Minuspol an p-Halbleiter): vergrößerte Verarmungszone
  - Teilchendurchgang: Elektron-Loch-Paare
- Anwendungen:
  - Ortsmessung (z. B. LHC): Siliziumdetektoren, Segmentierung in 1D (Streifen) oder 2D (Pixel)
  - **Energiemessung** (z. B. Gammaspektroskopie): Detektoren aus hochreinem Germanium











# **Szintillationsdetektoren**



nach W.R. Leo, <u>Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments</u>, Springer 1994

- Teilchen in (sichtbares) Licht in Szintillatormaterial





# Prinzip: Umwandlung von Anregungen im Festkörper durch ionisierende → Nachweis in lichtempfindlichen Detektoren (Photodetektoren)

Anwendungen: Zählung von Teilchendurchgängen, Energiemessung







# Szintillatormaterialien

- Anorganische Szintillatoren: dotierte Kristalle mit Farbzentren (z. B. Zustände in Bandlücke)
  - Beispiele: Nal(TI), Csl(Na), PbWO<sub>4</sub> (Bleiwolframat)
  - Hohe Lichtausbeute, aber oft lange **Abklingzeiten**  $O(\mu s)$  und teuer (Kristallzüchtung)
- **Organische** Szintillatoren: Anregung von Molekülzuständen in Aromaten
  - **Formen: Kristalle, Flüssigkeiten,** Plastikszintillator
  - Kurze Abklingzeiten O(ns), günstig, aber oft geringe Lichtausbeute















## Photodetektoren

- **Photoelektronenvervielfacher** (engl.: photomultiplier tube, PMT)



Jkrieger, Photomultiplier\_schema\_de.png, gemeinfrei



# Photokathode, z. B. Bialkali (Sb-K-Cs): Elektronen über Photoeffekt Verstärkung um Faktor O(10<sup>6</sup>) in O(50 ns) über **Dynoden** (viele Bauformen)





## Photodetektoren





## Halbleiter-Photodetektoren, z. B. Silizium-Photomultiplier (SiPM)

Avalanche-Photodiode (APD): Absorption von Photonen in Halbleiter und Verstärkung der Elektronen durch Stoßionisation (Faktor 100–1000)

**SiPM** = Matrix von APDs im **Geiger**-Modus  $\rightarrow$  Signal ~ Zahl Photonen

Silizium-Photomultiplier





# Aufgabe 10

- Welche der folgenden Aussagen über Detektionstechniken sind korrekt? A. Der Ort eines Teilchendurchgangs kann mit gasgefüllten oder Halbleiterdetektoren bestimmt werden.

  - B. Mit einem Halbleiterdetektor kann man die Energie eines Teilchens bestimmen. C. Die Lichterzeugung in organischen und anorganischen Szintillatoren beruht auf denselben physikalischen Prozessen.

  - D. Szintillatoren erzeugen bei Teilchendurchgang sichtbares Licht, das mit einem Photodetektor nachgewiesen werden kann.
  - E. Zum Betrieb eines PMTs zum Photonennachweis benötigt man eine Betriebsspannung von > 1 kV.
- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS:



# https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold 1080516&client id=produktiv

# Kurze Zusammenfassung

- Gasgefüllte Detektoren:
  - Strahlenschutz (Ionisationsmessung), Ortsmessung (Driftkammer, TPC)
  - Primärionisation in Zählgas, Ladungsverstärkung durch Townsend-Lawine
- **Halbleiter**detektoren:
  - Ortsmessung (Spurdetektor) oder Energiemessung (Spektroskopie)
  - Ionisation: Elektron-Loch-Paare in Verarmungszone am pn-Übergang
  - Szintillationsdetektoren:
    - Ionisation: Anregungen im Szintillatormaterial  $\rightarrow$  (sichtbares) Licht Nachweis mit Photodetektor, z. B. PMT, SiPM

    - Schneller Teilchenzähler und Energiemessung (Kalorimeter)







## Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

### Karlsruher Institut für Technologie Sommersemester 2020 – 5. Vorlesung (Teil 2)

### ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS





www.kit.edu

