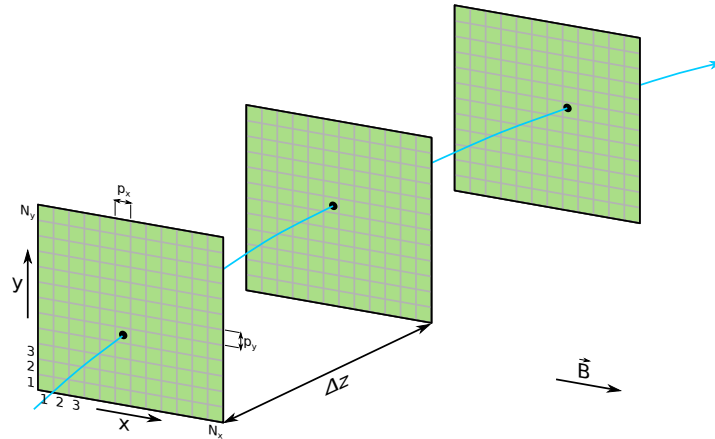


# Aufgabenblatt 8 – Experimentalphysik IV – SS18

Diskussion in den Übungen: Do./Fr., 14./15. Juni

## 8.1 Impulsmessung mit einem Pixeldetektor (1 Punkt)

Ein Pixeldetektor ist ein Halbleiterdetektor, der pixelartig segmentiert ist. Die nachstehende Abbildung zeigt schematisch einen Pixeldetektor, bestehend aus drei Lagen:



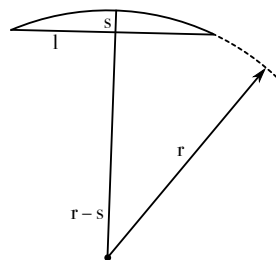
Der Abstand zwischen zwei Lagen möge jeweils  $\Delta z = 10 \text{ cm}$  betragen und die Zellengröße der einzelnen Pixel sei  $p_x = p_y = 200 \mu\text{m}$ . Der Detektor befinde sich in einem Magnetfeld von  $1 \text{ T}$ , das in positive  $x$ -Richtung zeigt. Die Messsignale fallen als lokale Koordinaten pro Ebene an. Eine gemessene Teilchenspur habe Treffer in den folgenden Koordinaten ergeben:

| Lage | $x$ | $y$ |
|------|-----|-----|
| 1    | 14  | 12  |
| 2    | 14  | 15  |
| 3    | 14  | 12  |

Die Punkte können durch einen Kreisabschnitt verbunden werden.

- Welches Vorzeichen hat die Ladung des auf der gemessenen Spur geflogenen Teilchens? Nehmen Sie an, dass das Teilchen genau eine Elementarladung trägt.
- Ermitteln Sie den Krümmungsradius der Teilchenbahn unter der Annahme, dass die einzelnen Pixel exakt in der Mitte der Zellen getroffen worden seien. Verwenden Sie dazu die sogenannte Sagitta-Methode, für die gemäß untenstehender Abbildung gilt:

$$r^2 = l^2 + (r - s)^2 \Rightarrow r = \frac{l^2 + s^2}{2s} = \frac{s}{2} + \frac{l^2}{2s}$$



- c) Welches ist der höchste messbare Impuls mit diesem Aufbau? Dazu überlegen Sie sich, was geschieht, wenn Sie im Gedankenexperiment Teilchen mit immer höheren Impulsen durch den Detektor fliegen lassen. Oberhalb eines Grenzwertes kann eine schwach gekrümmte Spur nicht mehr von einer Geraden unterschieden werden.

### Musterlösung:

- a) Der Krümmungsradius aus den Werten ist ähnlich zu der Skizze. Die Lorentzkraft wirkt offenbar nach unten, also in  $-y$ -Richtung. Beachte dass die  $z$ -Richtung für ein rechtshändiges Koordinatensystem entgegen der Richtung der Spurpropagation ist. Die Lorentzkraft ist in unserem Fall also

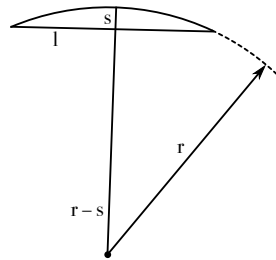
$$F_y = q \cdot v_z \cdot B_x$$

In einer simplen Vorzeichenbetrachtung erhalten wir dann

$$(-1) = q \cdot (-1) \cdot (+1)$$

folglich muss  $q = +1$  sein.

- b) Dazu muss der Krümmungsradius berechnet werden, was am einfachsten mit der Formel für die Sagitta geht:



$$r^2 = l^2 + (r - s)^2 \Rightarrow r = \frac{l^2 + s^2}{2s} = \frac{s}{2} + \frac{l^2}{2s}$$

Der letzte Ausdruck zeigt auch, dass wenn  $l \gg s$  der letzte Term eine gute Näherung ist:

$$r \approx \frac{l^2}{2s}$$

Die Messpunkte sind so gewählt, dass der erste und der letzte Punkt die gleiche  $y$ -Koordinate haben. In  $x$  sind sie alle gleich, weshalb die Sache einfach ist. Sagitta ist im Beispiel 3 Pixel lang ( $15 - 12 = 3$ ), d.h.  $3 \cdot 200 \mu\text{m} = 0.6 \text{ mm}$  und  $l = 100 \text{ mm}$ . Somit ergibt sich als Krümmungsradius der Spur:

$$r = \frac{100^2 + 0.6^2}{2 \cdot 0.6} \text{ mm} \approx 8.3 \text{ m}$$

Mit der folgenden Faustformel erhält man dann den Impuls ( $B$  in Tesla,  $R$  in Meter):

$$P = 0.3 \cdot B \cdot R = 0.3 \cdot 1 \text{ T} \cdot 8.3 \text{ m} = 2.5 \text{ GeV}$$

- c) In einer einfachen Abschätzung ist der grösste Impuls, der noch gemessen werden kann, durch eine Sagitta von einem Pixelpitch ( $= 0.2 \text{ mm}$ ) gegeben. Das ergibt dann

$$r = \frac{100^2 + 0.2^2}{2 \cdot 0.2} = 25 \text{ m} \Rightarrow P = 0.3 \cdot B \cdot R = 0.3 \cdot 1 \text{ T} \cdot 25 \text{ m} = 7.5 \text{ GeV}$$

Da das näherungsweise linear ist, ist als Antwort 3 Mal grösser als in der vorherigen Aufgabe auch korrekt.

---

## 8.2 Kalorimetrie (1 Punkt)

Die Energie geladener und auch nicht-geladener Teilchen kann mit Hilfe zweier Typen von Kalorimetern gemessen werden. Im sog. elektromagnetischen Kalorimeter (ECAL) erzeugen einfallende Photonen und Elektronen einen elektromagnetischen Schauer. Im zweiten Typ deponieren die Teilchen ihre Energie über einen hadronischen Schauer; solch einen Detektor nennt man entsprechend hadronisches Kalorimeter (HCAL).

- a) Wie unterscheiden sich elektromagnetische von hadronischen Schauern?
- b) Sei  $E_c$  die Energie, bei der Bremsstrahlung und Ionisation gleich stark zum Energieverlust von Elektronen beitragen. Ein einfaches Modell für einen elektromagnetischen Schauer macht folgende Annahmen:
  - (i) Jedes Elektron und Positron mit  $E > E_c$  legt eine Strahlungslänge  $X_0$  zurück und gibt die Hälfte seiner Energie an ein Bremsstrahlungsphoton ab.
  - (ii) Jedes Photon mit  $E_\gamma > E_c$  legt  $X_0$  zurück und erzeugt dann ein  $e^+e^-$  Paar, wobei seine Energie gleichmäßig aufgeteilt wird.
  - (iii) Elektronen (Positronen) mit  $E < E_c$  werden gestoppt und verlieren ihre Energie durch Stöße. Dadurch werden u.a. Szintillationsphotonen erzeugt, die im Detektor nachgewiesen werden.
  - (iv) Für  $E > E_c$  wird Ionisation vernachlässigt.

Wie hängt die maximale Eindringtiefe des Schauers ins Kalorimeter von der Energie der einfallenden Elektronen ab?

- c) Nun treffen Elektronen der Energie  $E$  auf das Kalorimeter. Wie hängt die Energieauflösung  $\Delta E/E$  von der Energie der einfallenden Elektronen ab? Nehmen Sie an, dass die Anzahl der detektierten Szintillationsphotonen proportional zur einfallenden Elektronenenergie ist.

Hinweis: Betrachten Sie statistische Fluktuationen in der Anzahl der detektierten Szintillationsphotonen.

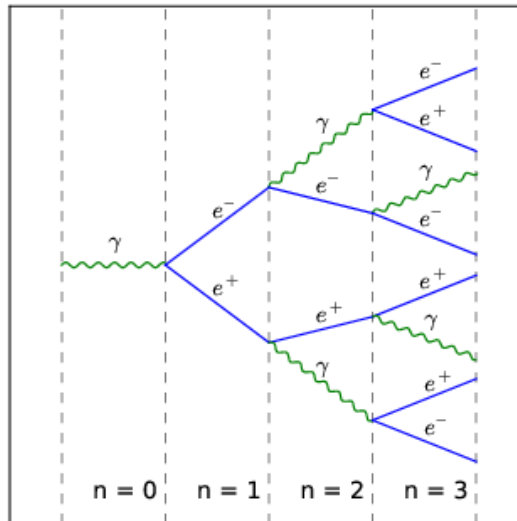
---

### Musterlösung:

- a) In einem elektromagnetischen Schauer verlieren geladene Teilchen, aber auch Photonen, ihre Energie über Paarerzeugung und Bremsstrahlung. Im Fall des hadronischen Kalorimeters findet der Energieverlust hauptsächlich über inelastische Stöße mit den Kernen des Absorbermaterials statt. Daher hängt die Wechselwirkungslänge mehr von der Massenzahl der Kerne als von der Strahlungslänge des Detektors ab. Aus diesem Grund sind hadronische Kalorimeter meistens deutlich grösser und schwerer als ECALs.
- b) Nach  $x = t \cdot X_0$  enthält der Schauer  $2^t$  Teilchen; in etwa zu gleichen Teilen Elektronen, Photonen und Positronen, die im Mittel eine Energie von

$$E(t) = E_0/2^t$$

haben.



Der Schauer bricht ab wenn  $E(t = t_{max}) = E_c$  erreicht ist. Damit bekommt man für  $t_{max}$

$$E_c = E(t_{max}) = \frac{E_0}{2^{t_{max}}}$$

$$2^{t_{max}} = \frac{E_0}{E_c}$$

$$t_{max} = \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2}$$

Die maximale Eindringtiefe hängt nur logarithmisch von der Anfangsenergie ab.

Die Anzahl der Teilchen im Schauer zu diesem Zeitpunkt sind

$$N_{max} = \exp(t_{max} \ln 2) = E_0/E_c$$

- c) Die Energieauflösung elektromagnetischer Kalorimeter hängt im Wesentlichen von den statistischen Fluktuationen in der Anzahl der erzeugten (und detektierten) Photonen ab.

$$E = \alpha N_\gamma$$

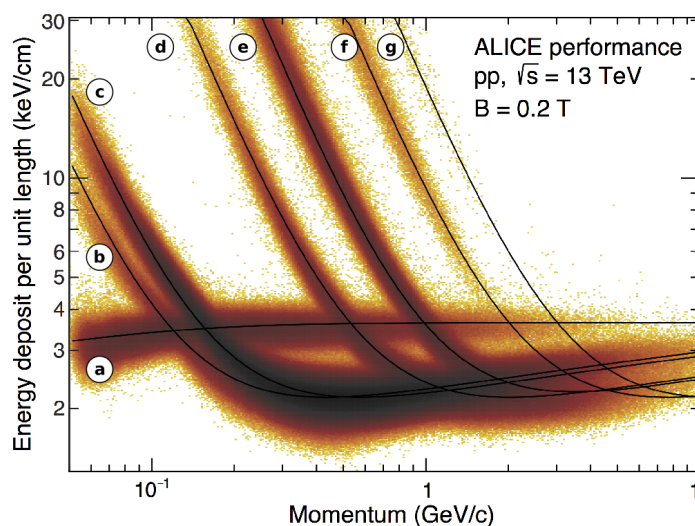
$$\Delta(E) = \alpha \sqrt{N_\gamma}$$

$$\Delta E/E = \frac{\sqrt{N_\gamma}}{N_\gamma}$$

$$\Delta E/E \propto \frac{1}{\sqrt{N_\gamma}}$$

### 8.3 Teilchenidentifikation in einer TPC (1 Punkt)

Eine Zeitprojektionskammer (Time Projection Chamber, TPC) ist ein Gasdetektor, bei dem die Teilchen das Gas ionisieren und die freigesetzten Elektronen über weite Strecken zu einer Auslesekeammer driften. Die Driftzeit ist dabei ein Maß für den Abstand der ursprünglichen Teilchenspur von der Ausleseelektronik (Zeitprojektion). Neben der Driftzeit wird auch die Ladung, die eine Maß für den Energieverlust der Teilchen ist, gemessen. Das Diagramm zeigt Messungen des Energieverlusts von geladenen Teilchen im Gasvolumen der TPC des ALICE Experiments am LHC.



Die vom Teilchen im Gas pro Wegstrecke deponierte Energie  $dE/dx$  ist gegen den Impuls aufgetragen (beachten Sie die doppelt-logarithmische Darstellung des Diagramms). Es sind mehrere Klassen von Teilchen erkennbar.

- (i) Ordnen Sie die mit (a) bis (g) bezeichneten Klassen den folgenden Teilchenarten zu: Myonen, Protonen, Kaonen, Deuteronen (Atomkerne des Deuteriums, bestehend aus einem Proton und einem Neutron), Pionen, Elektronen, Tritium-Kerne (bestehend aus einem Proton und zwei Neutronen). Begründen Sie Ihre Zuordnung.
- (ii) Die Steigungen der Kurven b) bis g) im jeweils steilsten Abschnitt sind auffällig ähnlich. Schätzen Sie den Wert der Steigung ab. Woher kommt dieser Wert? Diskutieren Sie.

#### Musterlösung:

Das Minimum der Bethe-Bloch-Kurve ist bei (s. Vorlesung IV.1.)

$$\beta\gamma \approx 3.5.$$

. Minimum ionising particle:

$$\beta\gamma \approx 3.5$$

Aber

$$\beta\gamma = \frac{p}{E} \frac{E}{m} = \frac{p}{m}$$

Daher verschiebt sich das Minimum des Energieverlusts als Funktion von  $p$  für Teilchen mit höherer Masse hin zu höheren Impulsen. Daher:

- a) Elektronen
- b) Myonen
- c) Pionen
- d) Kaonen
- e) Protonen
- f) Deuteron
- g) Tritium

Für die Frage der Steigung ist nochmals die doppelt-logarithmische Skala zu beachten (im Aufgabentext erwähnt). Sie kommt daher dass in der Bloch-Formel  $dE/dx \propto 1/\beta^2$  ist.

## 8.4 Erhaltungsgrößen (1 Punkt)

- a) Welche der folgenden Größen ist in der starken Wechselwirkung erhalten? Welche ist in der elektromagnetischen und welche ist in der schwachen Wechselwirkung erhalten?

• Leptonenzahl      • Baryonenzahl      • Strangeness (Seltsamkeit)      • Isospin

- b) Welche der folgenden Reaktionen ist erlaubt, und über welche Wechselwirkung kann sie ablaufen? Begründen Sie ihre Antwort! Wenn mehrere Wechselwirkungen beitragen, welche ist dominant? Zeichnen Sie das Feynman-Diagramm dieses dominanten Reaktionskanals.

Hinweis: Der Isospin der Teilchen kann in den Listen der Particle Data Group

[http://pdg.lbl.gov/2017/listings/contents\\_listings.html](http://pdg.lbl.gov/2017/listings/contents_listings.html)

gefunden werden.

- |                                                     |                                                          |                                            |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1) $\Sigma^0 \rightarrow p + n + \pi^-$             | 3) $e^+ + \bar{\nu}_e \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$ | 5) $\pi^+ + n \rightarrow \Sigma^0 + K^+$  |
| 2) $\tau^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \pi^0$ | 4) $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + \pi^+ + n$             | 6) $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + p + K^0$ |

### Musterlösung:

- a) Leptonzahl und Baryonzahl sind in allen drei Wechselwirkungen erhalten. Strangeness und dritte Komponente Isospin sind nur in der starken Wechselwirkung erhalten. Strangeness und dritte Komponente Isospin sind in der schwachen Wechselwirkung verletzt.

Der Isospin  $I$  ist in elektromagnetischen Übergängen verletzt: Die dritte Komponente  $I_3$  (beschreibt Ladungserhaltung) ist zwar in elektromagnetischen Übergängen erhalten, trotzdem ist der Isospin keine gute Symmetrie der elektromagnetischen Wechselwirkung, z.B. der Zerfall  $\Sigma^0(I = 1) \rightarrow \Lambda^0(I = 0) + \gamma$  verletzt die Isospinsymmetrie.

- b)
- 1) alle WW verboten, Baryonenzahlverletzung
  - 2) alle WW verboten, Leptonzahlverletzung
  - 3) alle WW verboten, Leptonzahlverletzung
  - 4) starke, schwache und elektromagn. WW erlaubt, starke dominiert
  - 5) alle WW erlaubt, starke WW dominiert
  - 6) verboten: Strangenessverletzung

