

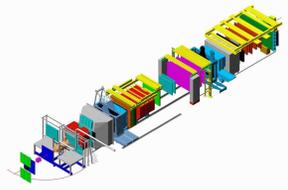
Likelihood-Methoden zur Teilchenidentifikation im CEDAR – Abschlussbericht

Tobias Weisrock

Institut für Kernphysik
Johannes Gutenberg-Universität Mainz

COMPASS Mainz Meeting 6. Juni 2011

Motivation

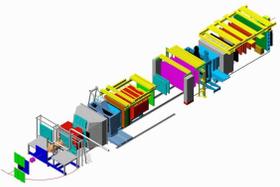


❖ Motivation

Klassifizierung der
Treffermuster

Identifizierung des
wahrscheinlichsten
Teilchens

Teilchenidentifikation über Multiplizitäten berücksichtigt
Strahldivergenz nicht



Motivation

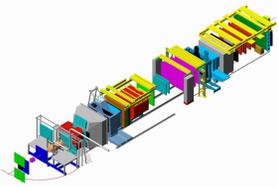
❖ Motivation

Klassifizierung der
Treffermuster

Identifizierung des
wahrscheinlichsten
Teilchens

Teilchenidentifikation über Multiplizitäten berücksichtigt
Strahldivergenz nicht

→ Finde Methode, die Strahldivergenz in Identifikation
integriert



Motivation

❖ Motivation

Klassifizierung der
Treffermuster

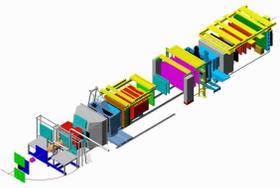
Identifizierung des
wahrscheinlichsten
Teilchens

Teilchenidentifikation über Multiplizitäten berücksichtigt
Strahldivergenz nicht

→ Finde Methode, die Strahldivergenz in Identifikation
integriert

Wir benötigen dazu:

1. Klassifizierung der Treffermuster in Abhängigkeit der
Strahldivergenz
2. Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens für
gegebenes Treffermuster



Inhalt

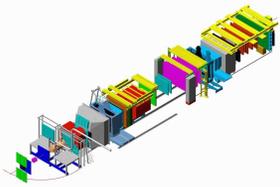
❖ Motivation

Klassifizierung der
Treffermuster

Identifizierung des
wahrscheinlichsten
Teilchens

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens



❖ Motivation

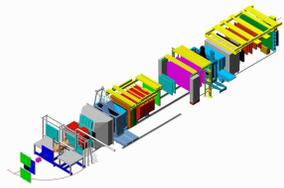
Klassifizierung der Treffermuster

- ❖ Strahldivergenz I
- ❖ Strahldivergenz II
- ❖ Strahldivergenz III
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier I
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier II
- ❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten I
- ❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten II

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

Klassifizierung der Treffermuster in Abhängigkeit der Strahldivergenz

Strahldivergenz I



❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

❖ Strahldivergenz I

❖ Strahldivergenz II

❖ Strahldivergenz III

❖ Gruppierung der Photomultiplier I

❖ Gruppierung der Photomultiplier II

❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten I

❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten II

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

- Differenz der Strahlposition vor und hinter dem CEDAR:

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

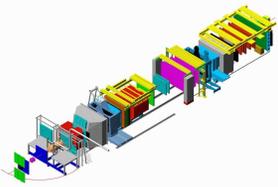
$$\Delta y = y_2 - y_1$$

$$\Delta z = z_2 - z_1$$

- Winkel in x und y :

$$dx = \arctan\left(\frac{\Delta x}{\Delta z}\right) \approx \frac{\Delta x}{\Delta z}$$

$$dy = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta z}\right) \approx \frac{\Delta y}{\Delta z}$$



Strahldivergenz II

❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

❖ Strahldivergenz I

❖ **Strahldivergenz II**

❖ Strahldivergenz III

❖ Gruppierung der Photomultiplier I

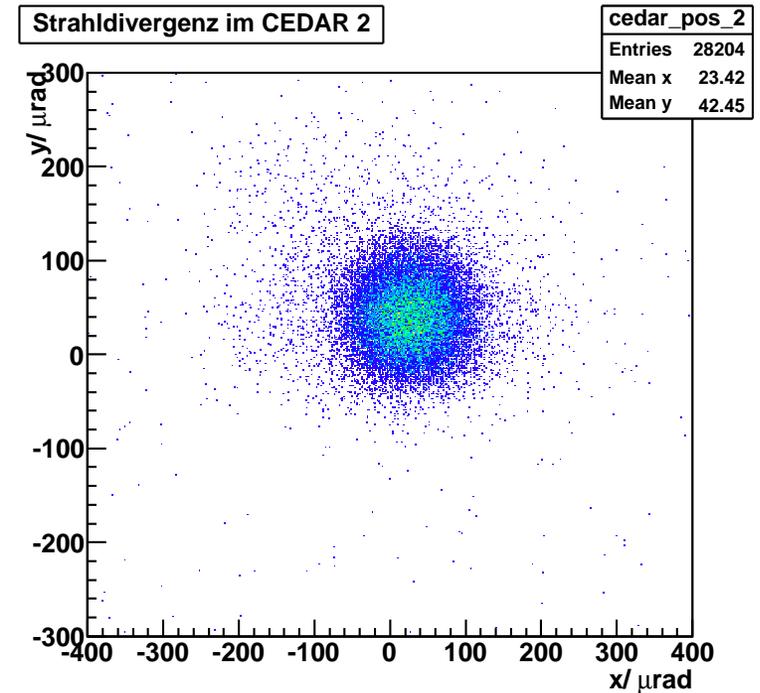
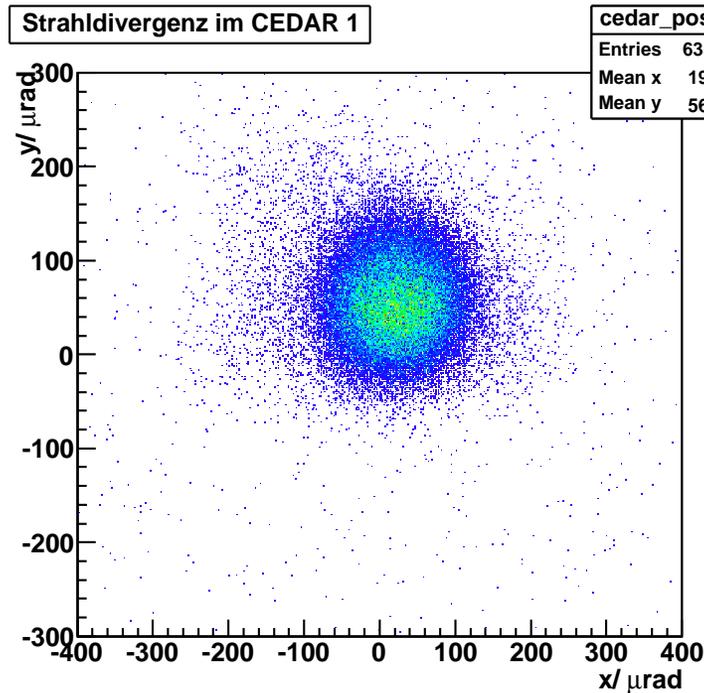
❖ Gruppierung der Photomultiplier II

❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten I

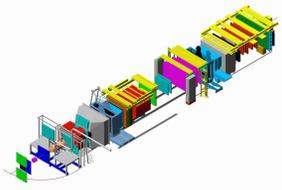
❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten II

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

Koordinatensystem muss um die Nullpunktlage der Strahldivergenz korrigiert werden:



Strahldivergenz III



❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

❖ Strahldivergenz I

❖ Strahldivergenz II

❖ Strahldivergenz III

❖ Gruppierung der Photomultiplier I

❖ Gruppierung der Photomultiplier II

❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten I

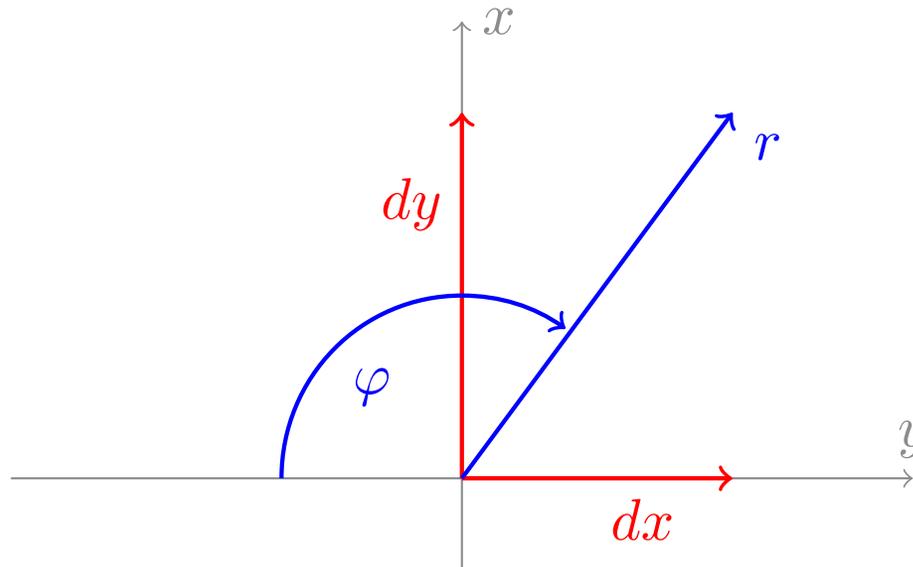
❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten II

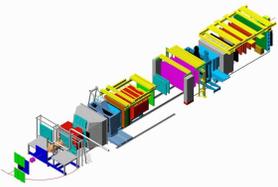
Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

- Führe Polarkoordinaten in dx und dy ein:

$$r = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \frac{1}{\Delta z} \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

$$\varphi = \begin{cases} \arctan \frac{dx}{dy} + \frac{\pi}{2} & \text{für } y \geq 0 \\ \arctan \frac{dx}{dy} + \frac{3\pi}{2} & \text{für } y < 0 \end{cases}$$

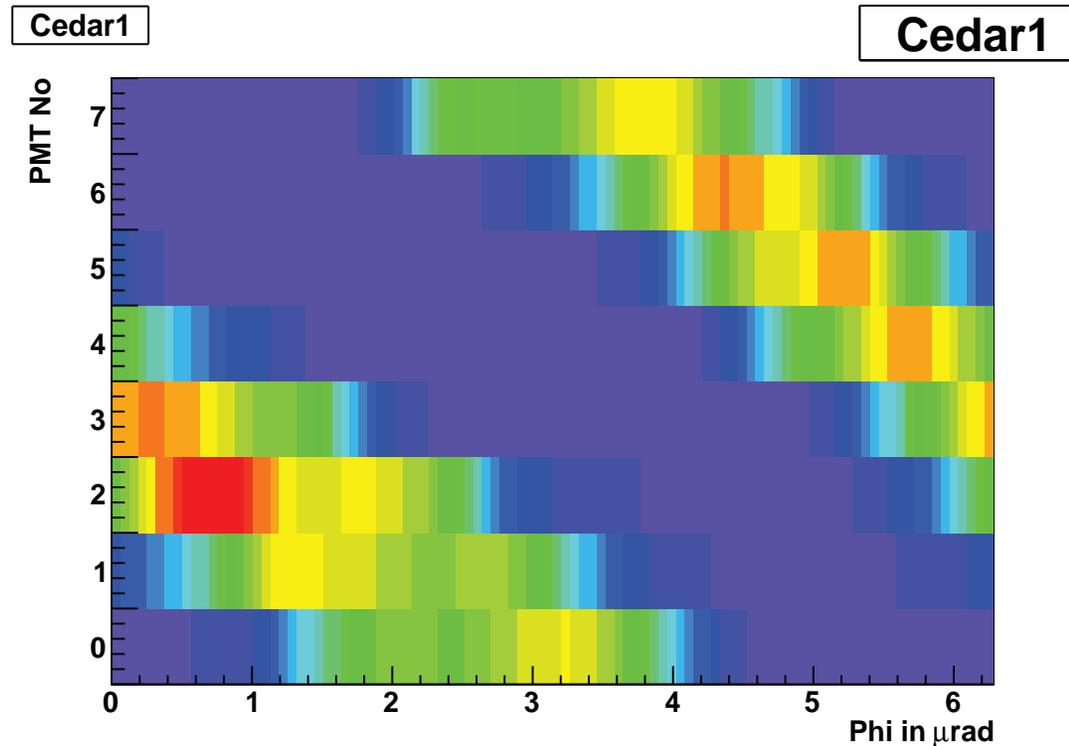




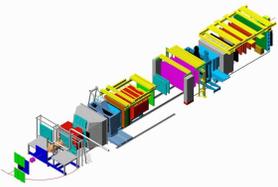
Gruppierung der Photomultiplier I

Lage der Photomultiplier in φ wird bestimmt über Ereignisse, die weniger als 3 Treffer in den PMTs haben, jedoch immer einen Treffer in einem bestimmten PMT:

- ❖ Motivation
- Klassifizierung der Treffermuster
- ❖ Strahldivergenz I
- ❖ Strahldivergenz II
- ❖ Strahldivergenz III
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier I**
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier II
- ❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten I
- ❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten II
- Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens



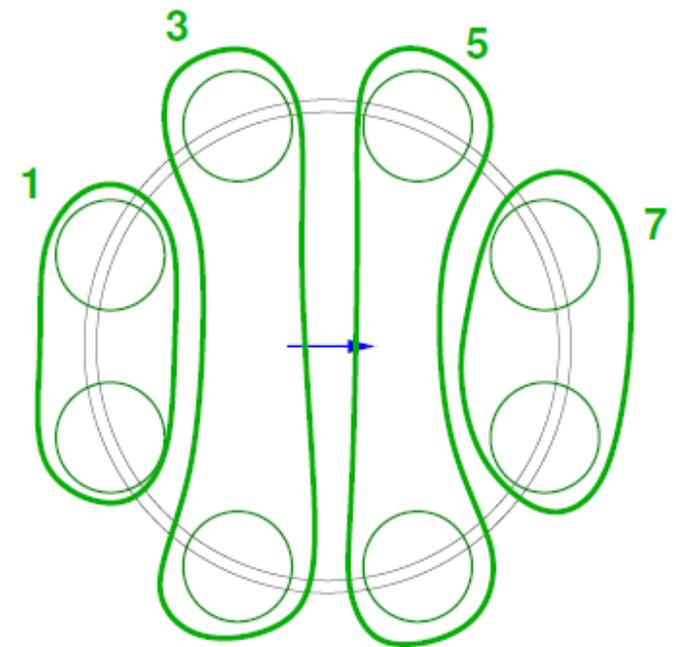
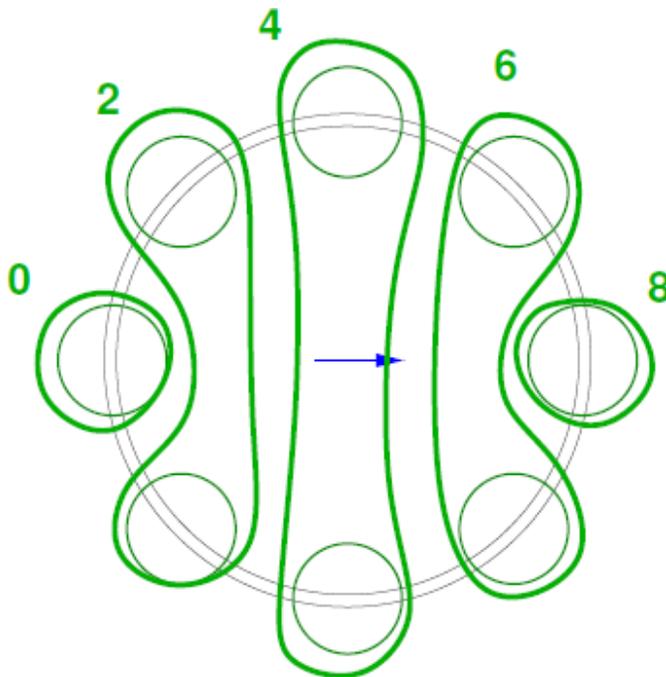
Gerade wird angefittet um eine Zuweisung $\varphi \mapsto \text{PMT}$ zu finden.



Gruppierung der Photomultiplier II

Je nach Winkel φ der Strahldivergenz gibt es zwei verschiedene Gruppierungen der Photomultiplier:

- „trifft“ Photomultiplier \rightarrow Gruppierung 0 (links)
- „verfehlt“ Photomultiplier \rightarrow Gruppierung 1 (rechts)



❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

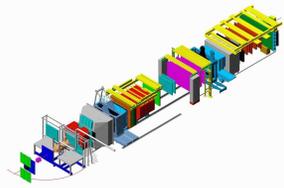
- ❖ Strahldivergenz I
- ❖ Strahldivergenz II
- ❖ Strahldivergenz III
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier I

❖ Gruppierung der Photomultiplier II

- ❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten I
- ❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten II

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten für Treffermuster I



❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

- ❖ Strahldivergenz I
- ❖ Strahldivergenz II
- ❖ Strahldivergenz III
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier I
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier II

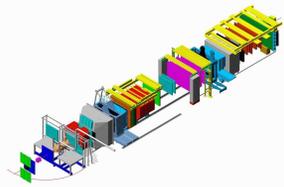
❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten I

❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten II

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

- Zahl der Treffer in den einzelnen PMT-Gruppen ($g = 0 \dots 8$) wird ermittelt ($h_g = 0, 1, 2$ Treffer) und in Abhängigkeit von r aufgetragen
- Verteilungen werden binweise auf gesamte Ereignisse normiert

Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten für Treffermuster I



❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

- ❖ Strahldivergenz I
- ❖ Strahldivergenz II
- ❖ Strahldivergenz III
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier I
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier II

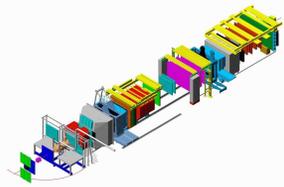
❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten I

- ❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten II

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

- Zahl der Treffer in den einzelnen PMT-Gruppen ($g = 0 \dots 8$) wird ermittelt ($h_g = 0, 1, 2$ Treffer) und in Abhängigkeit von r aufgetragen
- Verteilungen werden binweise auf gesamte Ereignisse normiert
- getrennt für Pionen und Kaonen jeweils für beide CEDARs ($c = 1, 2$)

Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten für Treffermuster I



❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

- ❖ Strahldivergenz I
- ❖ Strahldivergenz II
- ❖ Strahldivergenz III
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier I
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier II

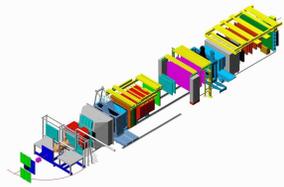
❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten I

- ❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten II

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

- Zahl der Treffer in den einzelnen PMT-Gruppen ($g = 0 \dots 8$) wird ermittelt ($h_g = 0, 1, 2$ Treffer) und in Abhängigkeit von r aufgetragen
 - Verteilungen werden binweise auf gesamte Ereignisse normiert
 - getrennt für Pionen und Kaonen jeweils für beide CEDARs ($c = 1, 2$)
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die zwei Hypothesen Pion und Kaon

Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten für Treffermuster I



❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

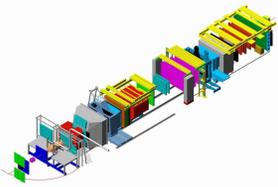
- ❖ Strahldivergenz I
- ❖ Strahldivergenz II
- ❖ Strahldivergenz III
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier I
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier II

❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten I

- ❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten II

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

- Zahl der Treffer in den einzelnen PMT-Gruppen ($g = 0 \dots 8$) wird ermittelt ($h_g = 0, 1, 2$ Treffer) und in Abhängigkeit von r aufgetragen
- Verteilungen werden binweise auf gesamte Ereignisse normiert
- getrennt für Pionen und Kaonen jeweils für beide CEDARs ($c = 1, 2$)
- Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die zwei Hypothesen Pion und Kaon
- Verteilungen werden angefitet, um Zuweisung $r \mapsto P^{\pi, K}(r; c, g, h_g)$ zu erhalten



Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten für Treffermuster II

Fitfunktion: Polynom 8. Grades

$$P^{\pi,K}(r; c, g, h_g) = \sum_{n=0}^8 a_n^{\pi,K}(c, g, h_g) \cdot r_c^n$$

❖ Motivation

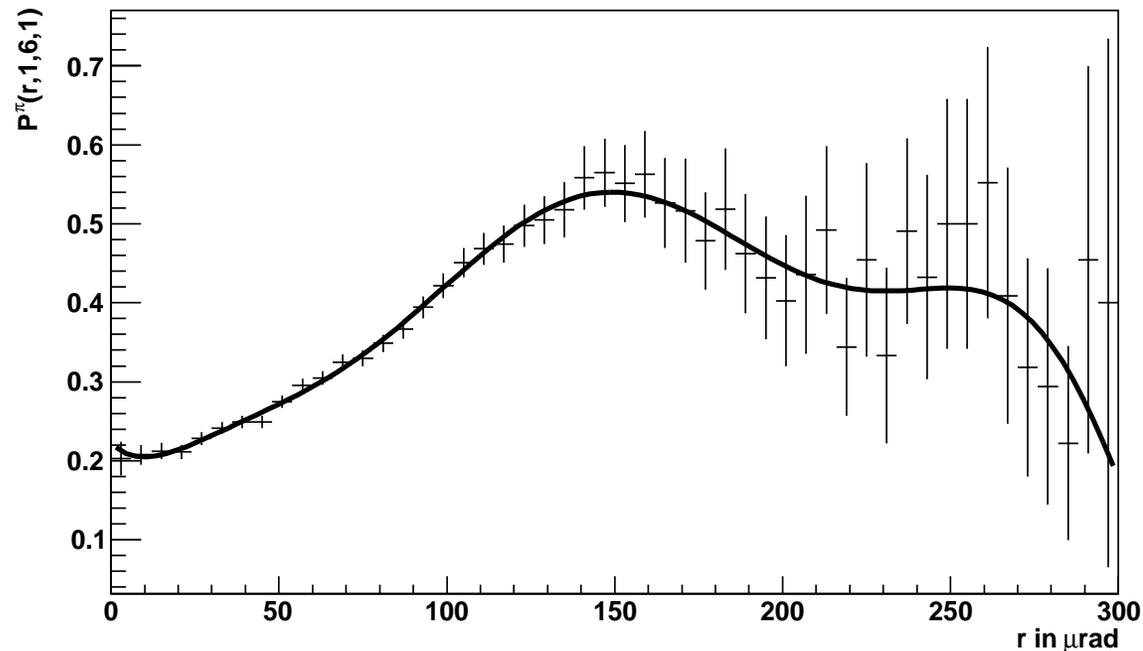
Klassifizierung der Treffermuster

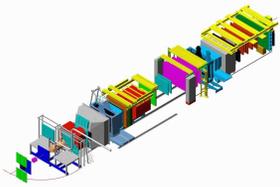
- ❖ Strahldivergenz I
- ❖ Strahldivergenz II
- ❖ Strahldivergenz III
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier I
- ❖ Gruppierung der Photomultiplier II
- ❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten I

❖ Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten II

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

$P^{\pi}(r,1,6,1) = \text{CEDAR 1, Group 6, 1 Hit for Pions}$





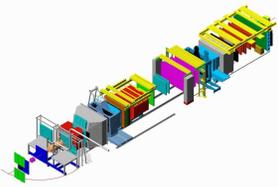
❖ Motivation

Klassifizierung der
Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

- ❖ Vorgehensweise
- ❖ Berechnung der Likelihood
- ❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample
- ❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample
- ❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese
- ❖ Anwendung auf Strahl I
- ❖ Anwendung auf Strahl II

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens für gegebenes Treffermuster



Vorgehensweise

Um ein beliebiges einlaufendes Teilchen zu identifizieren, geht man in mehreren Schritten vor:

❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ **Vorgehensweise**

❖ Berechnung der Likelihood

❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample

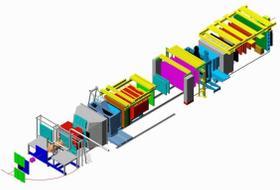
❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample

❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Anwendung auf Strahl I

❖ Anwendung auf Strahl II

Vorgehensweise



❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

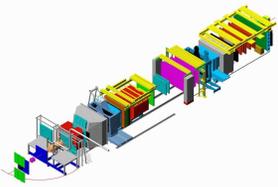
Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ Vorgehensweise

- ❖ Berechnung der Likelihood
- ❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample
- ❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample
- ❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese
- ❖ Anwendung auf Strahl I
- ❖ Anwendung auf Strahl II

Um ein beliebiges einlaufendes Teilchen zu identifizieren, geht man in mehreren Schritten vor:

1. Bestimmung der Strahldivergenz $r = \tilde{r}$ und des Winkels $\varphi = \tilde{\varphi}$ für beide CEDARs



Vorgehensweise

❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ Vorgehensweise

❖ Berechnung der Likelihood

❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample

❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample

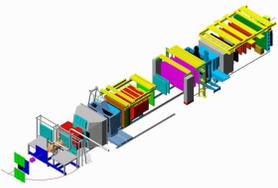
❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Anwendung auf Strahl I

❖ Anwendung auf Strahl II

Um ein beliebiges einlaufendes Teilchen zu identifizieren, geht man in mehreren Schritten vor:

1. Bestimmung der Strahldivergenz $r = \tilde{r}$ und des Winkels $\varphi = \tilde{\varphi}$ für beide CEDARs
2. Festlegung der Gruppierungen der Photomultiplier gemäß $\tilde{\varphi}$



Vorgehensweise

❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ Vorgehensweise

❖ Berechnung der Likelihood

❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample

❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample

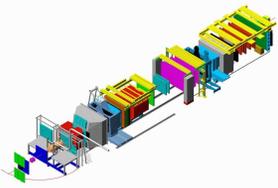
❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Anwendung auf Strahl I

❖ Anwendung auf Strahl II

Um ein beliebiges einlaufendes Teilchen zu identifizieren, geht man in mehreren Schritten vor:

1. Bestimmung der Strahldivergenz $r = \tilde{r}$ und des Winkels $\varphi = \tilde{\varphi}$ für beide CEDARs
2. Festlegung der Gruppierungen der Photomultiplier gemäß $\tilde{\varphi}$
3. Ermittlung der Anzahl der Treffer $h_g = \tilde{h}_g$ in den einzelnen Gruppen



Vorgehensweise

❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ Vorgehensweise

❖ Berechnung der Likelihood

❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample

❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample

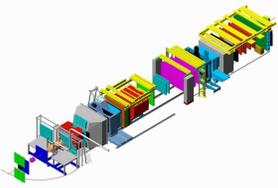
❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Anwendung auf Strahl I

❖ Anwendung auf Strahl II

Um ein beliebiges einlaufendes Teilchen zu identifizieren, geht man in mehreren Schritten vor:

1. Bestimmung der Strahldivergenz $r = \tilde{r}$ und des Winkels $\varphi = \tilde{\varphi}$ für beide CEDARs
2. Festlegung der Gruppierungen der Photomultiplier gemäß $\tilde{\varphi}$
3. Ermittlung der Anzahl der Treffer $h_g = \tilde{h}_g$ in den einzelnen Gruppen
4. Berechnung der Likelihoods aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen



Vorgehensweise

❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ Vorgehensweise

❖ Berechnung der Likelihood

❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample

❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample

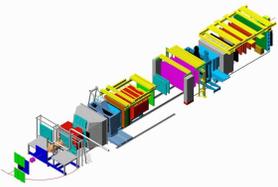
❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Anwendung auf Strahl I

❖ Anwendung auf Strahl II

Um ein beliebiges einlaufendes Teilchen zu identifizieren, geht man in mehreren Schritten vor:

1. Bestimmung der Strahldivergenz $r = \tilde{r}$ und des Winkels $\varphi = \tilde{\varphi}$ für beide CEDARs
2. Festlegung der Gruppierungen der Photomultiplier gemäß $\tilde{\varphi}$
3. Ermittlung der Anzahl der Treffer $h_g = \tilde{h}_g$ in den einzelnen Gruppen
4. Berechnung der Likelihoods aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen
5. Vergleich der ermittelten Likelihoods und Entscheidung



Berechnung der Likelihood

❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ Vorgehensweise

❖ Berechnung der Likelihood

❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample

❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample

❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Anwendung auf Strahl I

❖ Anwendung auf Strahl II

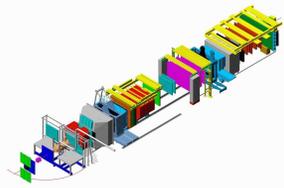
- Multipliziere Wahrscheinlichkeiten für ermitteltes Treffermuster

⇔ Addiere Logarithmen der Wahrscheinlichkeiten

$$\log L^{\pi,K}(c) = \sum_g \log \left(P^{\pi,K}(\tilde{r}; c, g, \tilde{h}_g) \right)$$

- Summe läuft über gerade (Gruppierung 0) oder ungerade (Gruppierung 1) g

Vergleich der Likelihoods – Kaonsample



❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ Vorgehensweise

❖ Berechnung der Likelihood

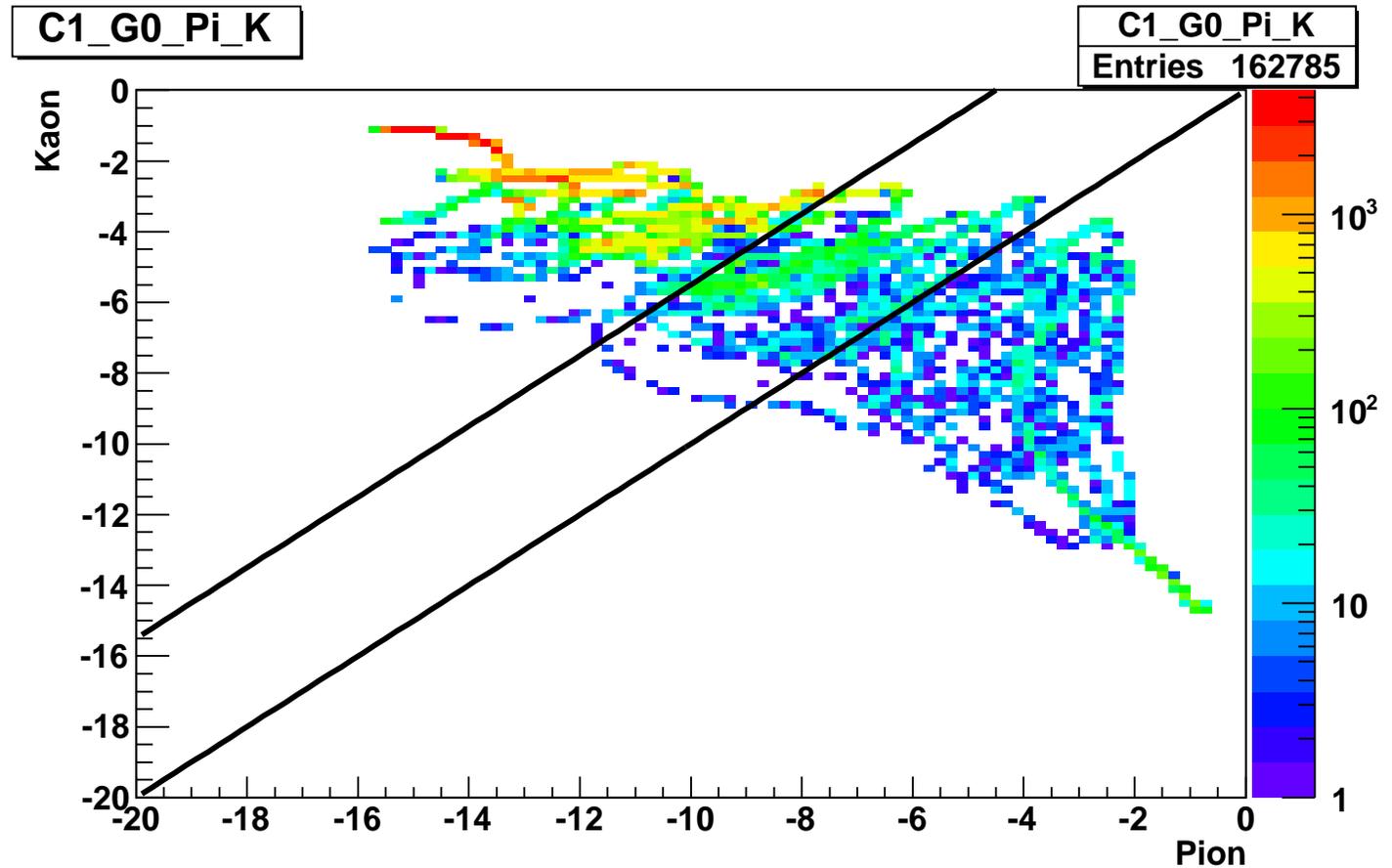
❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample

❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample

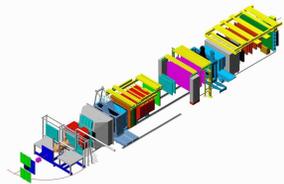
❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Anwendung auf Strahl I

❖ Anwendung auf Strahl II



Vergleich der Likelihoods – Pionsample



❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ Vorgehensweise

❖ Berechnung der Likelihood

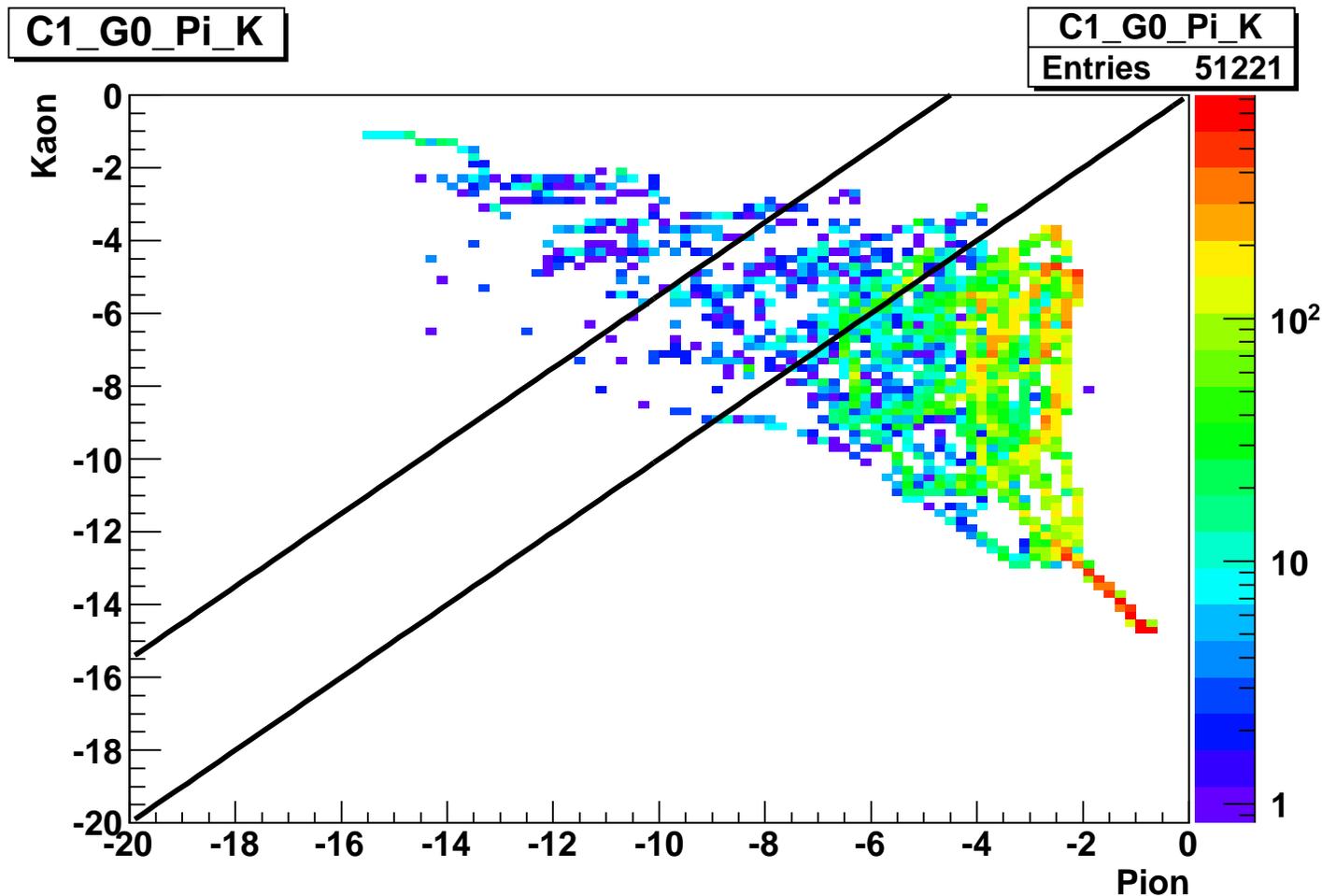
❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample

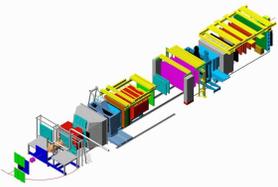
❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample

❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Anwendung auf Strahl I

❖ Anwendung auf Strahl II





Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ Vorgehensweise

❖ Berechnung der Likelihood

❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample

❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample

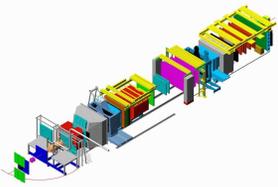
❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Anwendung auf Strahl I

❖ Anwendung auf Strahl II

Die Hypothesen werden anhand des Vergleichs der $\log L$ -Werte angenommen oder abgelehnt:

- $\log L^\pi(c) > \log L^K(c) \quad \mapsto$ Entscheidung „Pion“
- $\log L^K(c) > \log L^\pi(c) + 4,5 \quad \mapsto$ Entscheidung „Kaon“
- sonst keine Entscheidung „?“



Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ Vorgehensweise

❖ Berechnung der Likelihood

❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample

❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample

❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Anwendung auf Strahl I

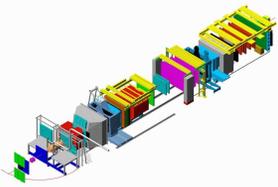
❖ Anwendung auf Strahl II

Die Hypothesen werden anhand des Vergleichs der $\log L$ -Werte angenommen oder abgelehnt:

- $\log L^\pi(c) > \log L^K(c) \quad \mapsto$ Entscheidung „Pion“
- $\log L^K(c) > \log L^\pi(c) + 4,5 \quad \mapsto$ Entscheidung „Kaon“
- sonst keine Entscheidung „?“

Die Entscheidungen der beiden CEDARs werden dann abschließend kombiniert:

$\&$	$?$	π	K
$?$	$?$	π	$?$
π	π	π	$?$
K	$?$	$?$	K



Anwendung auf Strahl I

❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ Vorgehensweise

❖ Berechnung der Likelihood

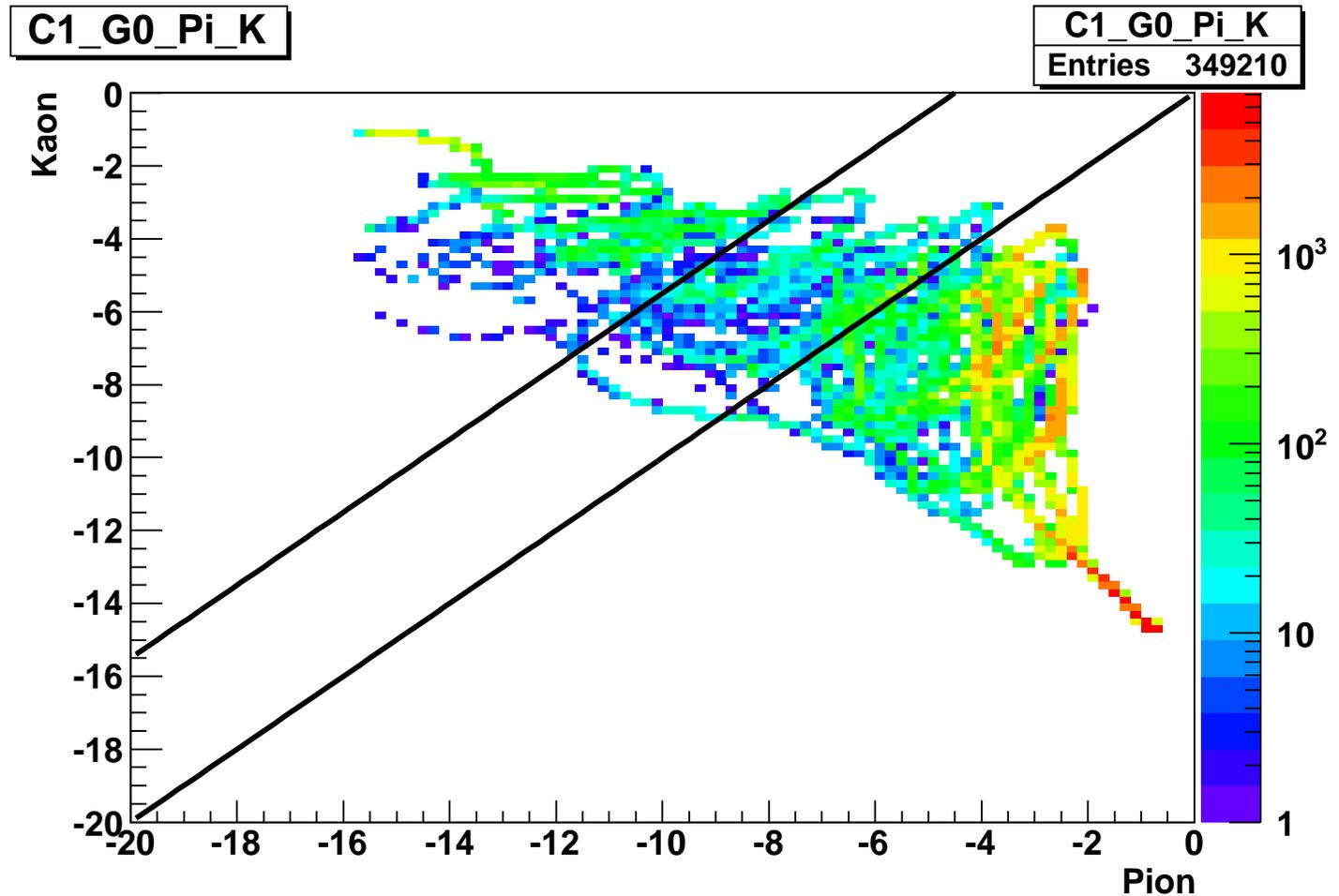
❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample

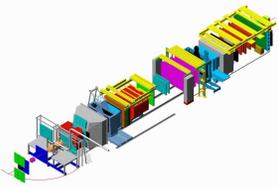
❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample

❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Anwendung auf Strahl I

❖ Anwendung auf Strahl II





Anwendung auf Strahl II

❖ Motivation

Klassifizierung der Treffermuster

Identifizierung des wahrscheinlichsten Teilchens

❖ Vorgehensweise

❖ Berechnung der Likelihood

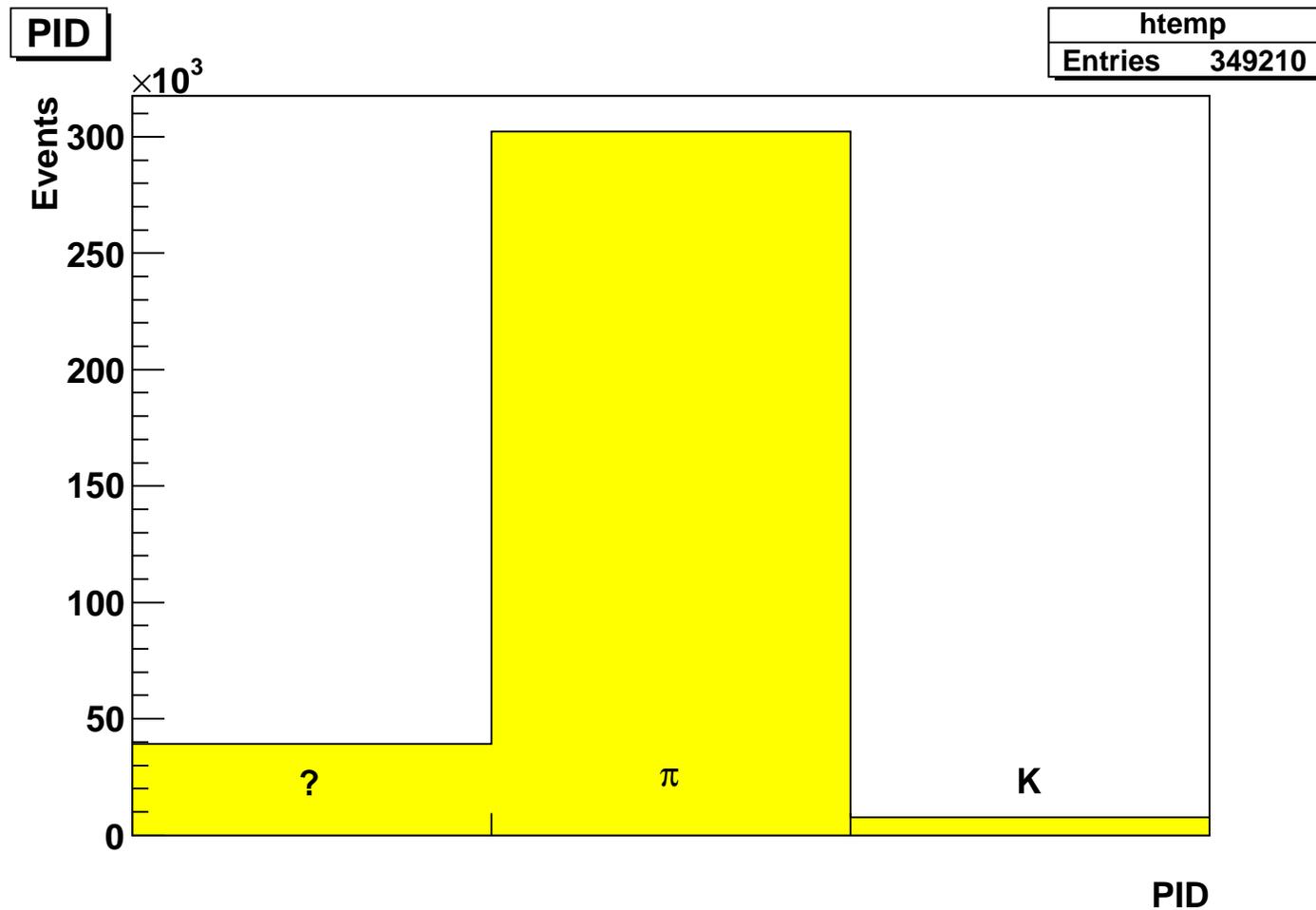
❖ Vergleich der Likelihoods – Kaonsample

❖ Vergleich der Likelihoods – Pionsample

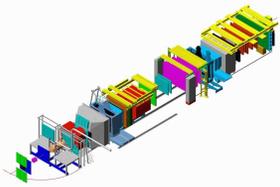
❖ Entscheidung für bestimmte Hypothese

❖ Anwendung auf Strahl I

❖ Anwendung auf Strahl II



Ergebnis: 2,21% Kaonen, 86,6% Pionen, 11,2% ohne PID



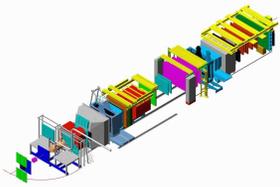
❖ Motivation

Klassifizierung der
Treffermuster

Identifizierung des
wahrscheinlichsten
Teilchens

**Methode Likelihood_new ist im CEDAR-Helper
zum Testen verfügbar**

Viel Spaß damit!!

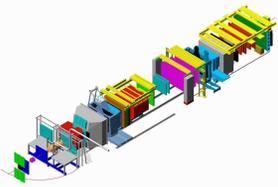


❖ Motivation

Klassifizierung der
Treffermuster

Identifizierung des
wahrscheinlichsten
Teilchens

Backup



Kaonsample

❖ Motivation

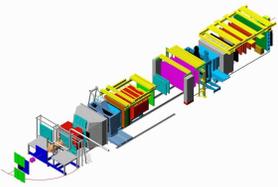
Klassifizierung der
Treffermuster

Identifizierung des
wahrscheinlichsten
Teilchens

Freie Kaonzerfälle $K^- \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+$ in W33, W35, W37 aus 2008

- Kaontrigger
- Primärvertex außerhalb des Targets
- 3 auslaufende Teilchen (- - +)
- $E(3\pi) = 190 \pm 4 \text{ GeV}$
- $m(3\pi) = m_K \pm 50 \text{ MeV}$

Insgesamt 156671 Ereignisse



Pionsample

❖ Motivation

Klassifizierung der
Treffermuster

Identifizierung des
wahrscheinlichsten
Teilchens

Ereignisse mit drei auslaufenden Teilchen unter kleinen Winkeln mit ähnlichen Impulsen

- $\theta < 0,2 \text{ rad}$
- $\Delta p_{ij} < 10 \text{ GeV}$

Insgesamt 51221 Ereignisse