

A: Detektoren für Teilchenstrahlung

Inhalt der Vorlesung:

- Grundlagen zur Wechselwirkung zwischen Teilchen und Materie:
 - Ionisation,
 - Vielfachstreuung,
 - Photon- und Elektron-Wechselwirkung in Materie,
 - elektromagn. und hadronische Schauer,
 - Čerenkov- und Übergangsstrahlung
- Teilchendetektoren für Orts- und Zeitmessung, Impuls- und Energiebestimmung und zur Teilchenidentifikation:
 - Szintillatoren,
 - Čerenkov- und Übergangsstrahlungsdetektoren,
 - Drahtkammern,
 - Kalorimeter,
 - Siliziumdetektoren,
 - Neutronendetektoren,
 - Detektorelektronik,
- Konzeption von Teilchendetektoren in Beispielen:
 - Collider-Detektoren (z.B. e^+e^- - Lepton-Nukleon-, p-p-, Schwerionen-Kollisionen)
 - Fixed-target-Detektoren (z.B. Lepton-Nukleon-Kollisionen, Neutrinodetektoren)

für Studenten ab dem siebten Fachsemester
(3 stündig, ohne Übungen, ohne Scheinvergabe)

Voraussetzungen: Quantenmechanik, Grundkenntnisse in Teilchenphysik

Literatur zur Vorlesung:

allgemeine Lehrbücher, z.B.:

- Kleinknecht: Detektoren für Teilchenstrahlung (Teubner),
- Grupen: Particle Detectors (Cambridge),
- Knoll: Radiation Detection and Measurement (Wiley-VCH),
- Leo: Techniques for Nuclear and Particle Physics (Springer),
- Blum, Rolandi: Particle Detection with Drift Chambers (Springer),
- Ferbel: Experimental Techniques in High Energy Physics (World Scientific),
- Sauli: Instrumentation in High Energy Physics (World Scientific)
- Particle Data Group: http://pdg.web.cern.ch/pdg/2002/contents_sports.html

A: Detektoren für Teilchenstrahlung

(Prof. Dr. O. Biebel)

geplante Themen der Vorlesung:

1. Einleitung, Motivation

- (a) Quellen: Radioaktivität, Beschleuniger, kosmische (solare, galaktische, extragalaktische) Quellen von Teilchenstrahlung
- (b) Aufgaben: Nachweis von Strahlung, Dosismessung, Orts-, Zeit-, Energie- und Impulsmessung, Teilchenidentifikation
- (c) Methoden: Teilchenphysik, Elektrodynamik, Optik, Atomphysik, Festkörper- und Halbleiterphysik, Transporttheorie, analoge und digitale Elektronik, anorganische und organische Chemie
- (d) Einsatzgebiete: Medizin, Werkstoffkunde, Geophysik, Teilchenphysik, ...

Detektoren für Teilchenstrahlung

Vielfältige Quellen von Teilchenstrahlung existieren:

● natürliche Quellen

- Radioaktivität: α -, β -, γ -Zerfälle
- kosmische Strahlung:
 - ▷ solare Herkunft z.B. Sonnenwind
 - ▷ galaktische Herkunft, z.B. Supernovae
 - ▷ extragalaktische ~, z.B. aktive Galaxienkerne

● künstliche Quellen

- Elektronenstrahlen, z.B. in Fernsehrohren
- Röntgenstrahlen
- Teilchenbeschleuniger, z.B. Elektron, Positronen, (Anti-)Protonen, schwere Ionen bis ^{238}U ,
Fragmente aus Kernspaltung, ...
- Kernreaktoren (AKWs): Anti-Neutrinos

Aber: Kein menschliches Sinnesorgan, um energiereiche Teilchenstrahlung wahrzunehmen

⇒ Detektoren für Teilchenstrahlung

Aufgaben von Teilchendetektoren

- Nachweis von Teilchenstrahlung
- Messung der Strahlung / Posismessung

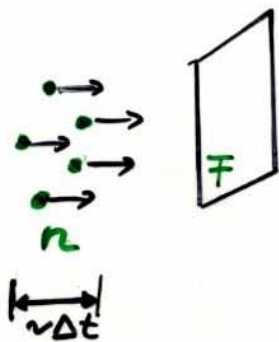
▷ z.B. Teilchenfluß F

$$F = \frac{n}{\Delta t \cdot A}$$

n : Zahl der Teilchen

Δt : Zeitintervall

A : Fläche \perp Teilchenbewegungsrichtung



▷ Aktivität, gemessen in Becquerel

$$1 \text{ Bq} \equiv 1 \text{ Zerfall/s} \quad (\text{bzw. } 1 \text{ Teilchen/s})$$

alt: 1 Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ Zerfälle/s, benannt nach Curie

▷ Zerfallskonstante λ beim radioaktiven Zerfall

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$$

(Zerfallsgesetz, $N(t)$ = Zahl der radioaktiven Kerne zum Zeitpunkt t)

$$\Rightarrow N(t) = N_0 e^{-t \cdot \lambda}$$

Aufgaben von Teilchendetektoren

▷ mittlere Lebensdauer τ , Halbwertszeit $t_{1/2}$

$$\tau := \frac{1}{\lambda} \Rightarrow N(t=\tau) = N_0 \cdot \frac{1}{e}$$

$$t_{1/2} := \tau \cdot \ln 2 \Rightarrow N(t=t_{1/2}) = N_0 \cdot \frac{1}{2}$$

▷ Energiedosis D

$$D := \frac{dW_0}{\rho \cdot dV}$$

W_0 : Energie, im Material absorbiert

ρ : Dichte des Materials

V : Volumen des Materials

mit Einheit:

$$1 \text{ Gray} \equiv 1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$\text{alt: } 1 \text{ rad} \equiv 0.01 \text{ Gy}$$

▷ Äquivalent-Dosis D_q

$$D_q := q \cdot D$$

q : empirischer Gewichtungsfaktor für biologische Wirkung der Strahlung, z.B.

mit Einheit:

$$1 \text{ Sievert} \equiv 1 \text{ Sv} = q \cdot 1 \text{ Gy}$$

$$\text{alt: } 1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv} = q \cdot 1 \text{ rad}$$

(rem: roentgen equivalent man)

$$\left[\begin{array}{l} q=1 \text{ für } \gamma \\ 10 \text{ für } \alpha, \text{ Proton} \\ 20 \text{ für Kernfragmente} \\ 2 \dots 10 \text{ für Neutronen} \\ \text{je nach Energie} \end{array} \right]$$

Aufgaben für Teilchendetektoren

▷ Ionendosis D_I

$$D_I := \frac{dQ}{\rho_L dV}$$

Q : freigesetzte Ladung in Luft

ρ_L : Dichte der Luft

V : Volumen

mit Einheit

$$1 \text{ Röntgen} = 1R = 2.58 \cdot 10^{-4} \frac{C}{kg \text{Luft}}$$

$$\Rightarrow \frac{1R}{e} \hat{=} 1.61 \cdot 10^{15} \text{ Ionen/kgLuft}$$

mit der mittleren effektiven Energie zur Erzeugung eines Elektron-Ion-Paares von $\langle W_i \rangle = 33.7 eV$ folgt:

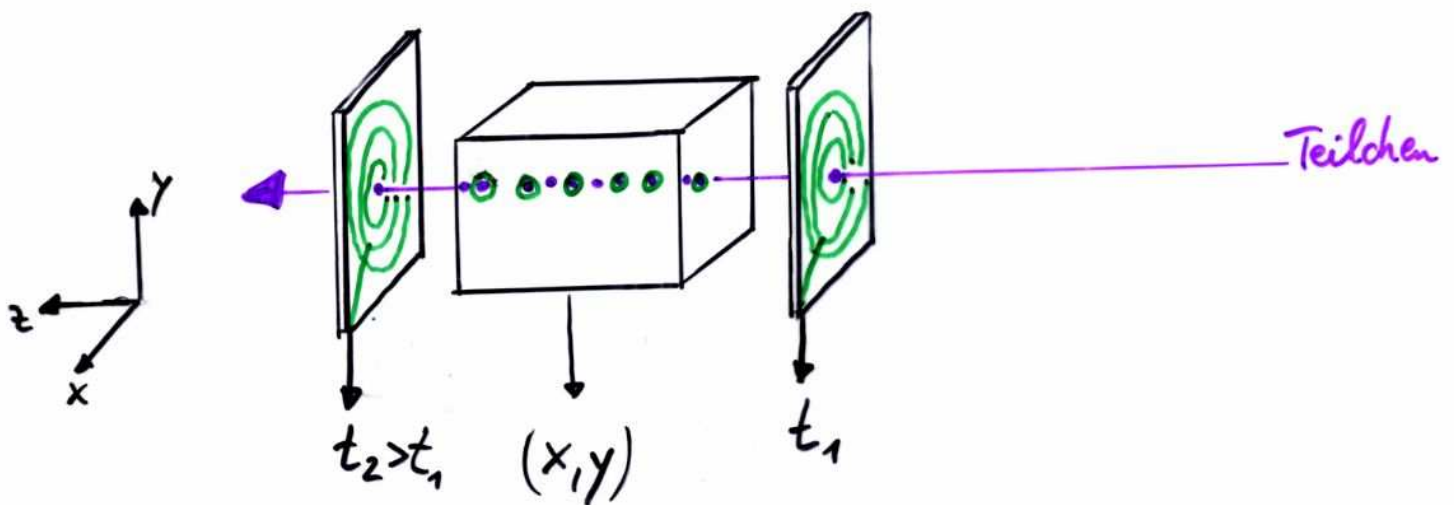
$$D = \frac{dW_i}{\rho_L dV} = \frac{\langle W_i \rangle}{e} \frac{dQ}{\rho_L dV}$$

$$\Rightarrow D = \frac{33.7 eV}{e} \cdot 1R \approx 8.7 \text{ mGy}$$

Aufgaben von Teilchendetektoren

• Ortsmessung, Zeitmessung

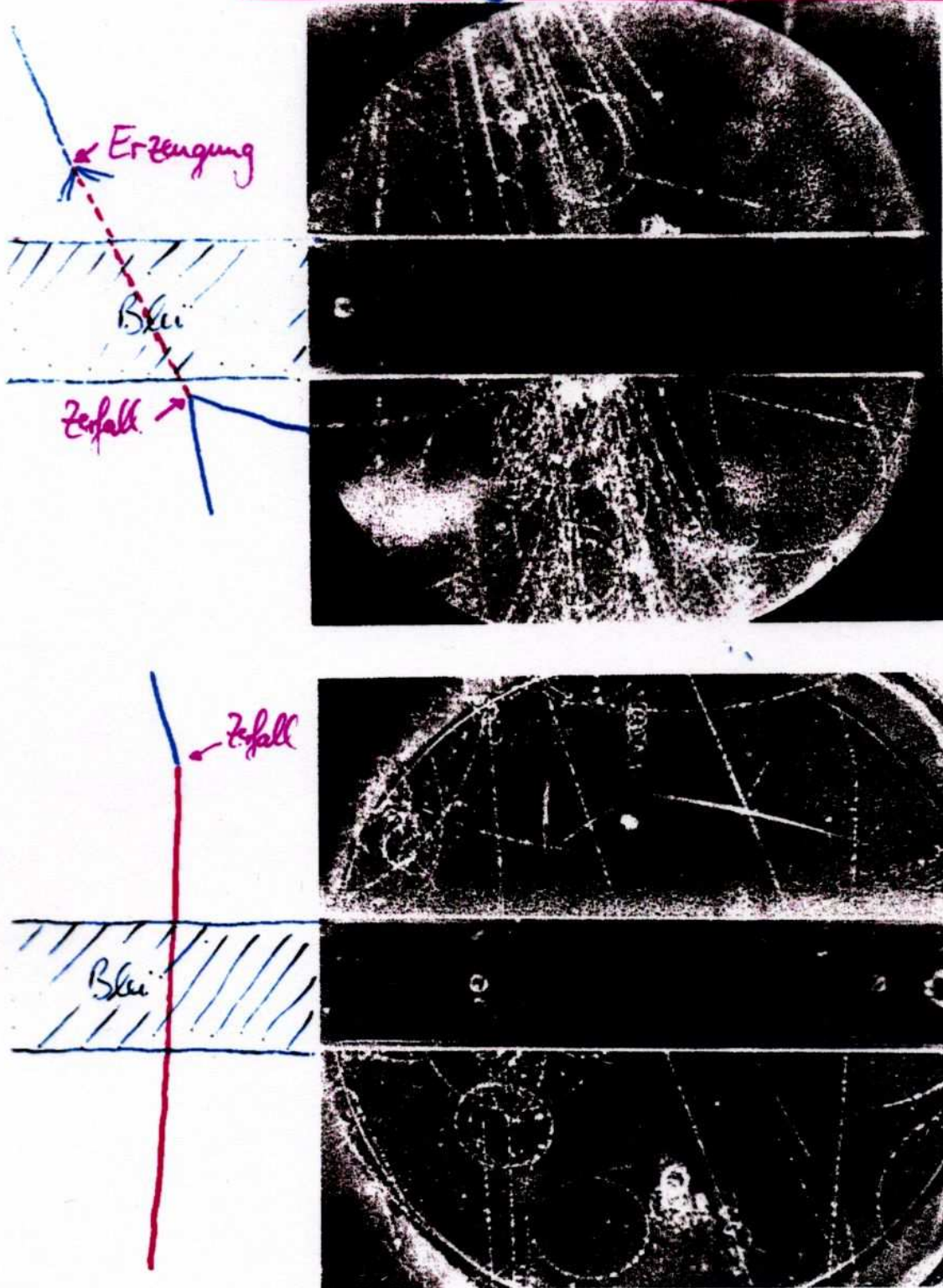
z.B. um die Richtung von Teilchenstrahlung festzustellen



Viele Anwendungsbeispiele existieren:

- Suche nach der Quelle von Teilchenstrahlung (Prospektierung von Uranlagerstätten, etc.)
- auf-/abwärtslaufende Myonen aus Neutrino-Reaktionen / Höhenstrahlung
- Zuordnung von Teilchenstrahlung zu astrophysikalischen Quellen

Entdeckung seltsamer Teilchen



Teilchenstrahl:
 oben → unten?
 oder
 unten → oben?
 → Flugzeit=
 messung!

Fig. 1.5 First observations of V-events in a cloud chamber, by Rochester and Butler (1947). The upper picture is of a "neutral V-event", consisting of a wide-angle fork occurring in the gas a few millimeters below the horizontal plate. Subsequent analysis suggests that it was due to the decay $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. The lower picture is of a "charged V-event", seen as a fork near the right-hand top corner of the picture. The secondary traverses the 3-cm lead plate without interaction. The measured momenta are in fact consistent with the decay scheme $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$, or what is now called the $K_{\mu 2}$ decay mode of the charged kaon. (Courtesy Pergamon Press.)

Aufgaben von Teilchendetektoren

• Impuls- und Energiemessung

Impulsmessung

durch Ablenkung geladener Teilchen in Magnetfeldern:

$$p = e \cdot B \cdot R$$

für praktische Anwendung:

$$p [\text{GeV}/c] = 0.3 \cdot z \cdot B [\text{T}] \cdot R [\text{m}];$$

p : Impuls

e : elektr. Ladung

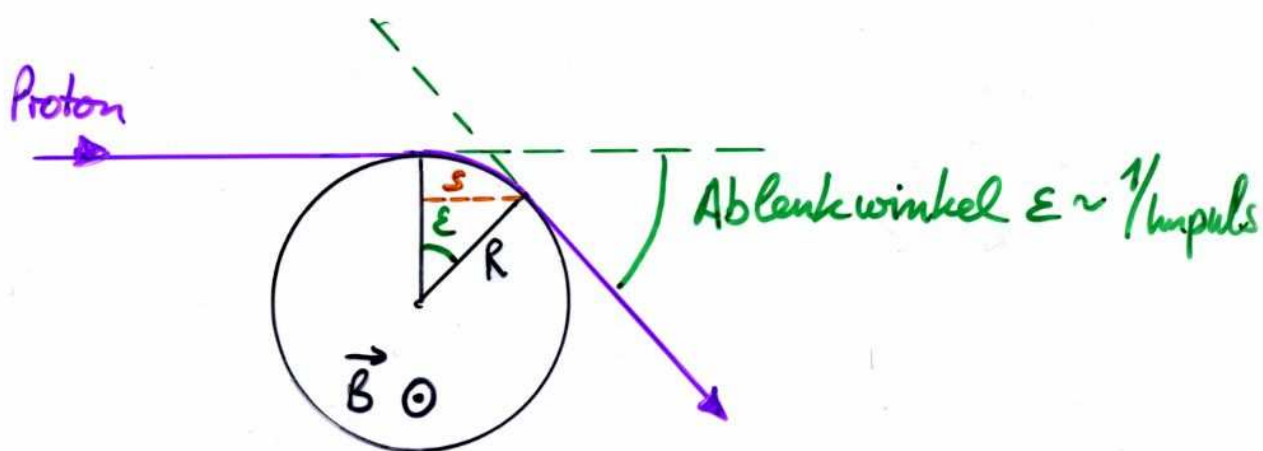
B : magnet. Induktion

R : Krümmungsradius

z : elektr. Ladung in Einheiten von e

z.B. $p = 100 \text{ GeV}/c$, $B = 1 \text{ T}$, $z = +1 \Rightarrow R = 333 \text{ m}!$

NB: Impulsmessung durch Ablenkung im Magnetfeld
braucht Ortsmessung der Teilchentrajektorie



$$\Rightarrow p = 0.3 \cdot \frac{B \cdot s}{\sin \epsilon} \sim \frac{1}{\sin \epsilon} \approx \frac{1}{\epsilon} \quad \text{für kleine Ablenk-} \\ \text{winkel!}$$

Aufgaben von Teilchendetektoren

▷ Energiemessung

entspricht einer Messung der Energiedosis D
für ein einzelnes Teilchen

→ kalorimetrische Energiemessung
, d.h. Totalabsorption der Energie des Teilchens

● Teilchenidentifikation

durch

- Impuls & Energie: $m^2 c^2 = (E/c)^2 - p^2$

- Flugzeitmessung & Impuls: $\Delta t = \frac{\Delta L}{v} = \frac{\Delta L}{\beta \cdot c} \rightarrow \beta$
 $(\beta := \frac{v}{c}, \gamma := \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}})^*$ $p = \beta \gamma m \rightarrow m$

- Energieverlust & Impuls: Bethe-Bloch-Formel
(folgt später)

benötigt Orts-, Zeit-, Energie-, Impuls-, ... -Messung!

[* weitere nützliche Relationen:

$$\beta \gamma = \frac{p}{mc} \quad ; \quad \beta = \frac{pc}{E} \quad ; \quad \gamma = \frac{E}{mc^2}$$

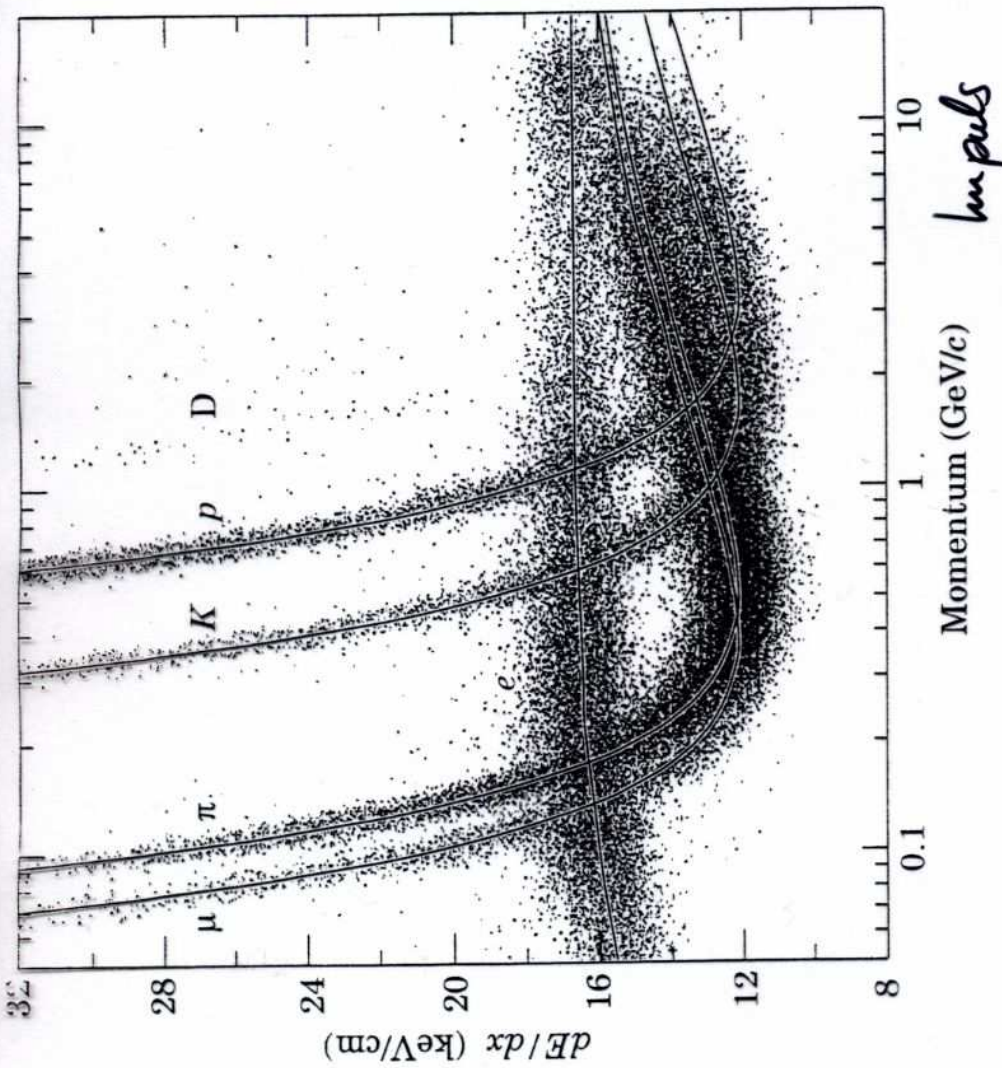


Figure 27.5: PEP4/9-TPC dE/dx measurements (185 samples @8.5 atm Ar-CH₄ 80-20%) in multihadron events. The electrons reach a Fermi plateau value of 1.4 times minimum. Muons from pion decays are separated from pions at low momentum; π/K are separated over all momenta except in the cross-over region. (Low-momentum protons and deuterons originate from hadron-nucleus collisions in inner materials such as the beam pipe.)

Energie=
Verlust

Impuls

Methoden beim Teilchennachweis

bei:

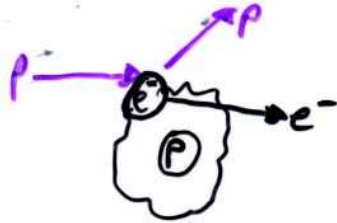
▷ Wechselwirkung in Materie



wird gebraucht:

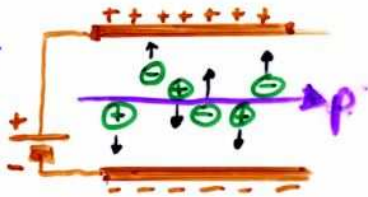
Teilchenphysik, Wirkungsquerschnitte

▷ Details der Streureaktion



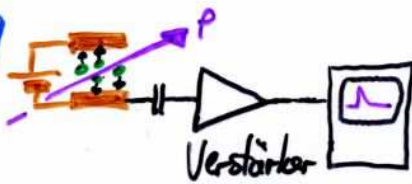
Atomphysik, Festkörper-Halbleiterphysik

▷ Messung der Ionisation



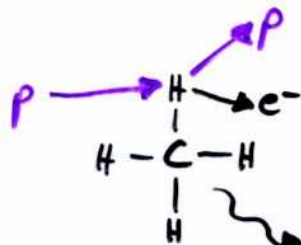
Elektrodynamik, Transporttheorie, Optik

▷ Verarbeitung des Signals



Elektronik (analog & digital)

▷ Absorbermaterial



anorganische & organische Chemie

CH₄⁺ macht evtl. chem. Reaktionen...

⇒ Detektoren für Teilchenstrahlung involvieren viele Aspekte der Physik und auch darüberhinaus (Chemie, Elektronik,...)

Einsatzgebiete für Teilchendetektoren

sehr vielfältig, z.B.

- **Medizin**

Röntgenbild, Positronen-Emissions-Tomographie PET, Computertomographie CT, Strahlentherapie

- **Werkstoffkunde**

zerstörungsfreie Materialprüfung, Röntgen-Absorptions-Spektroskopie \rightarrow Materialzusammensetzung

- **Geophysik**

Prospektion von Lagerstätten (Uran, Öl, ...)

- **Archäologie**

^{14}C -Radiokarbon-Methode (u.a.) zur Altersbestimmung

- **Klimatologie**

^{18}O zur Messung der biologischen Aktivität (hängt von Temperatur ab) vor 100 000en von Jahren (Eisbohrkerne)

...

- **Teilchenphysik**

Teilchendetektoren in der Teilchenphysik

Konzeption von Experimenten zur Teilchenphysik:

▷ im Allgemeinen mehrere unterschiedliche Detektorprinzipien in einem Experiment vereint

▷ Kompromiss zwischen verschiedenen Anforderungen, z.B.

- Impulsmessung → $\left[\begin{array}{l} \text{starke Magnetfelder (große Spurkrümmung)} \\ \text{vs.} \\ \text{lange Teilchentrajektorien (Messung der} \end{array} \right.$ ^{genaue} Krümmung

- Ortsmessung → $\left[\begin{array}{l} \text{hohe Messgenauigkeit @ kleiner Raumbereich} \\ \text{vs.} \\ \text{geringe Messgenauigkeit @ großer Raumbereich} \end{array} \right.$

- ...

▷ u.U. stärkere Spezialisierung der Detektoren auf wenige typische/charakteristische Messgrößen

Detektoren in der Teilchenphysik

zwei Beispiele (später mehr!)

● **OPAL** am e^+e^- -Kollider LEP

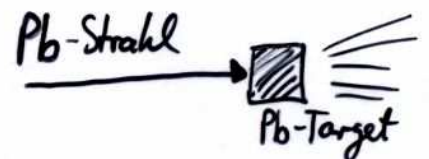
- Omni Purpose Apparatus at LEP

- Vielzweck-Detektor:

- präzise Vermessung von Teilchentrajektorien
- Impuls- und Energiemessung
- Teilchenidentifikation

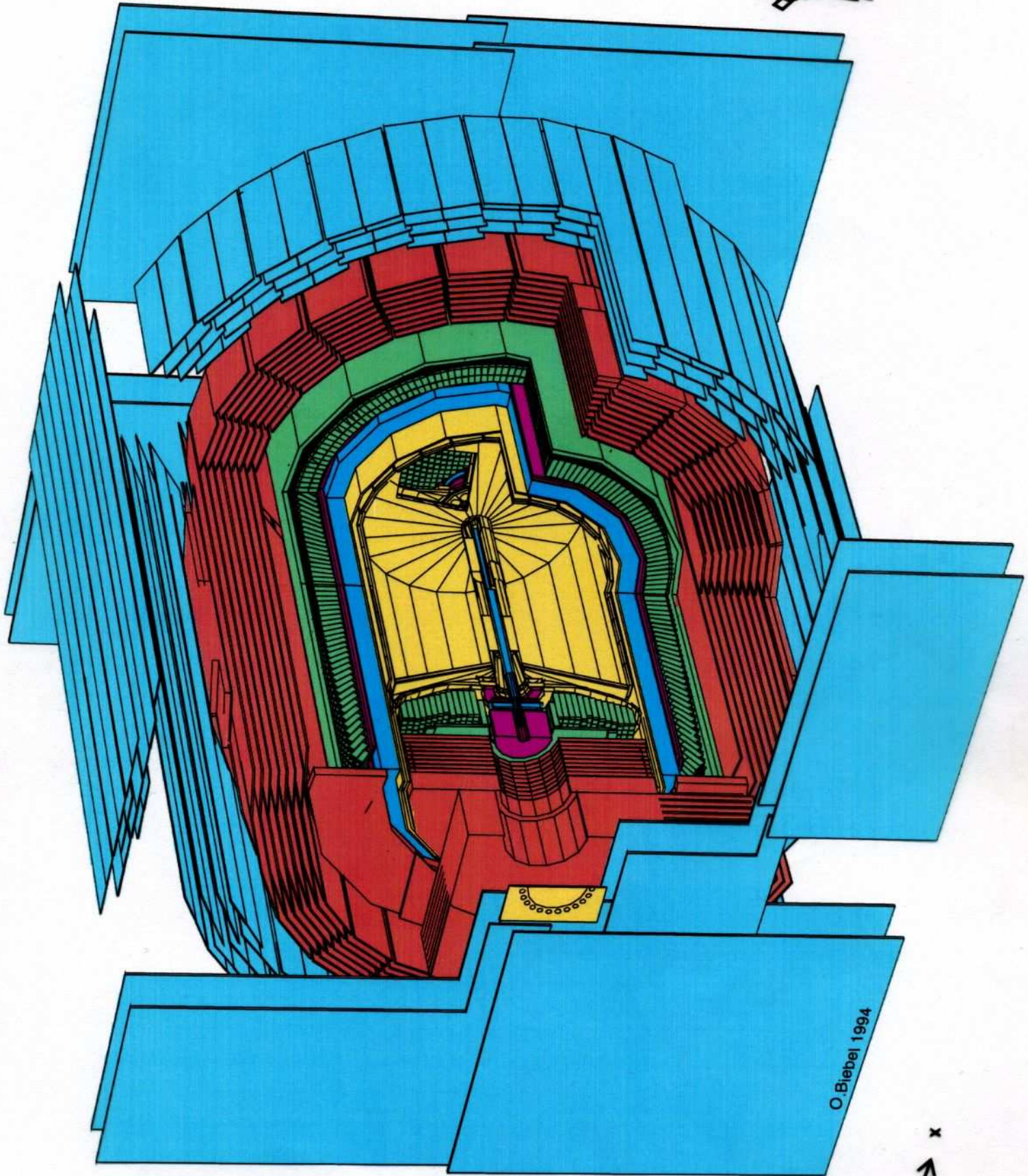
● **NA49** am SPS für Schwerionen-Kollisionen

- "fixed target" - Experiment

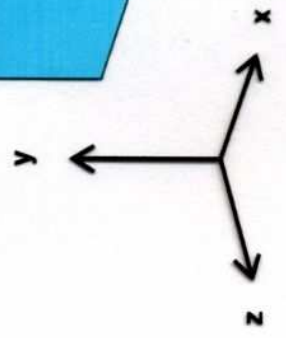


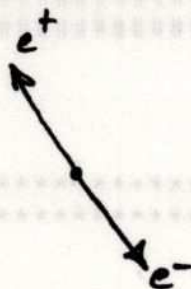
- Fokussierung auf Vermessung geladener Teilchen

- Messung von Teilchentrajektorien
- Impulsmessung



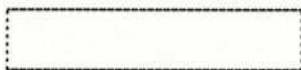
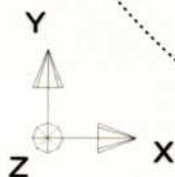
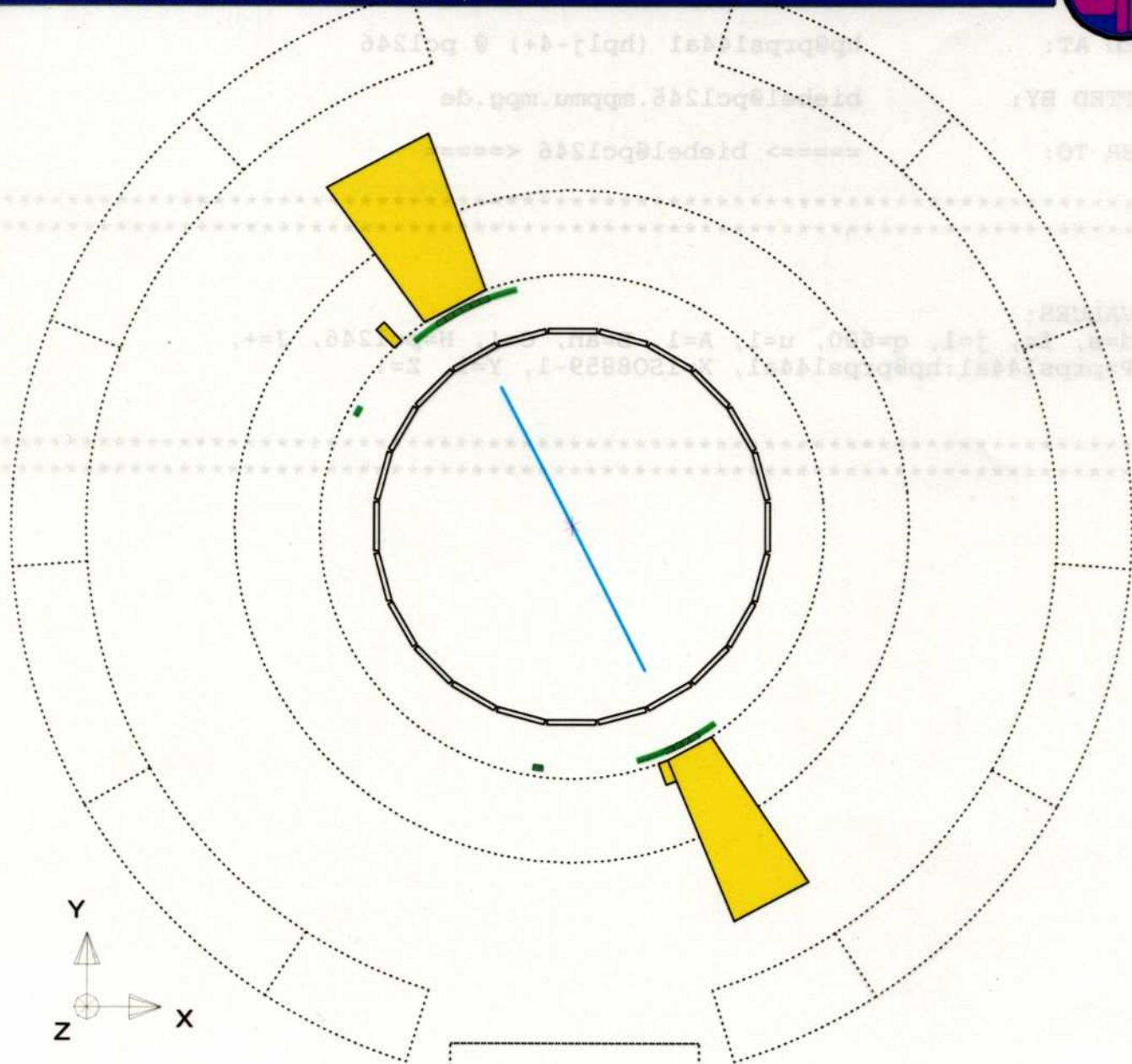
O. Biebel 1994





mit jeweils $p \approx 46 \text{ GeV}/c$

Run: event 4093: 1150 Date 930527 Time 20751 Ctrk(N= 2 Sump= 92.4) Ecal(N= 9 SumE= 90.5) Hcal(N= 0 SumE= 0.0)
 Ebeam 45.658 Evis 94.4 Emiss -3.1 Vtx (-0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 1 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9979 Aplan=0.0000 Oblat=0.0039 Spher=0.0001



5 10 20 50 GeV

Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

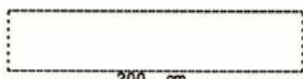
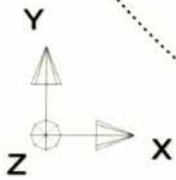
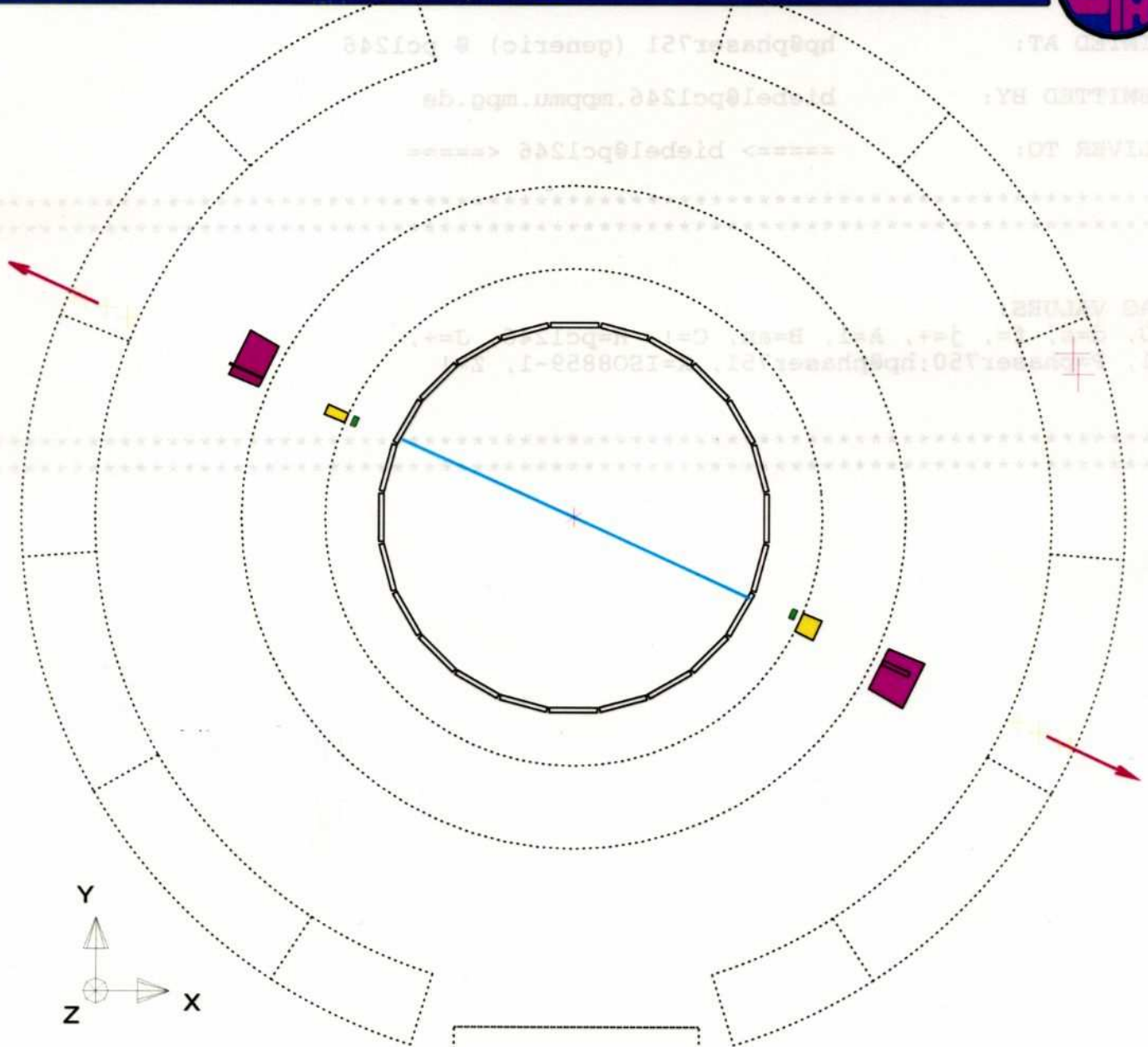
Myon-Detektor =
signal

mit jeweils $p = 46 \text{ GeV}/c$

μ^+

μ^-

Run: event 4093. 4556 .Date 930527 Time 22439 Ctrk(N= 2 Sump= 86.8) Ecal(N= 5 SumE= 1.6) Hcal(N= 4 SumE= 4.0)
Ebeam 45.658 Evis 90.8 Emiss 0.6 Vtx (-0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9999 Aplan=0.0000 Oblat=0.0110 Spher=0.0003



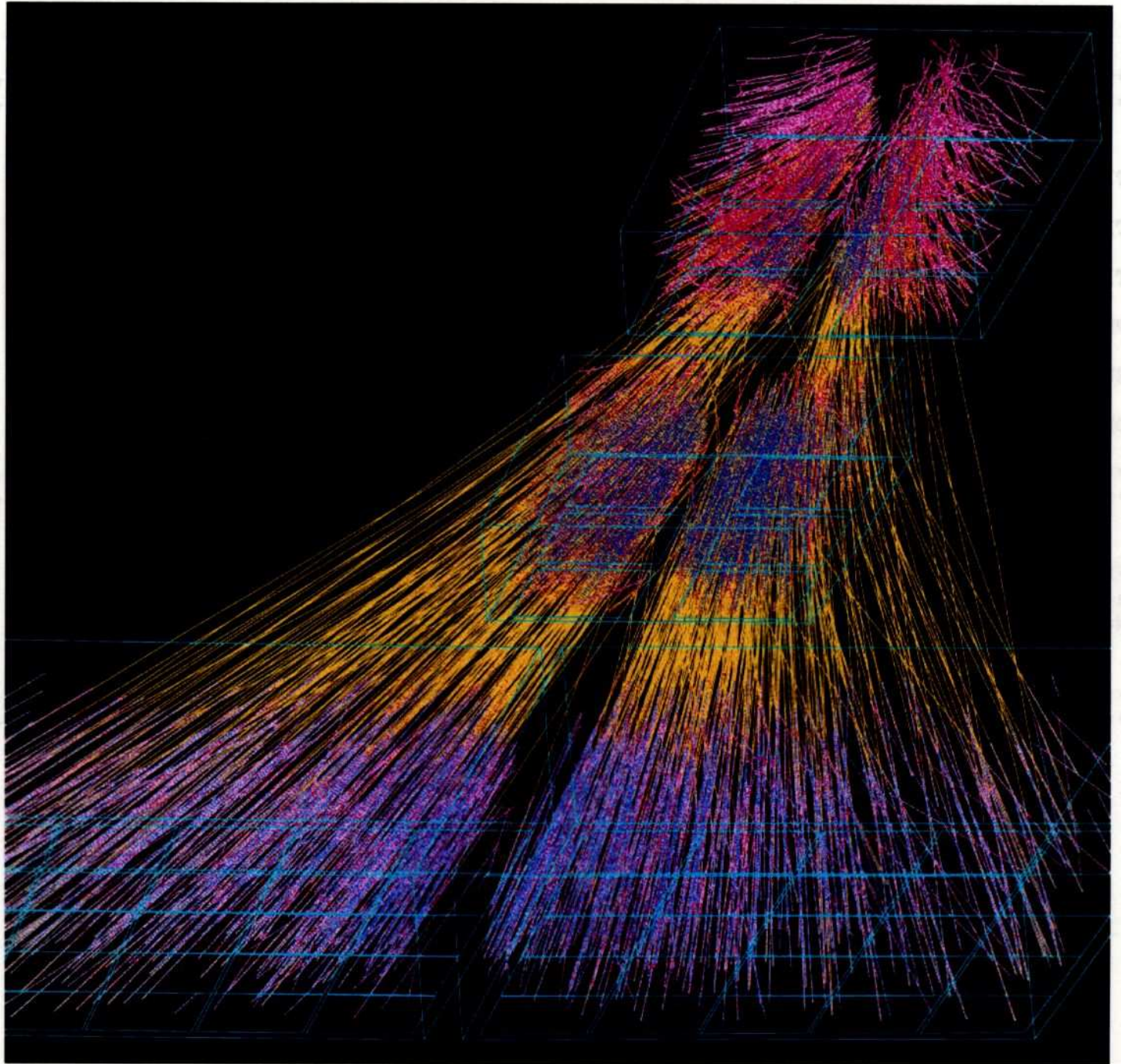
5 10 20 50 GeV

Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

NA49



TPC : Spurdetektoren , TOF = time of flight : Flugzeitmesser



Ortsmesspunkte in TPCs und rekonstruierte Teilchentrajektorien