Karlsruhe Institute of Technology

Detektoren

Guido Dirkes

Institut für Experimentelle Kernphysik

Überblick

- Wechselwirkung --- Teilchennachweis
- Bestimmung der Teilcheneigenschaften
  - Teilchenphysik
- HEP Detektoren
  - Spurdetektoren
  - Energiebestimmung
  - Teilchenidentifizierung

  - „Multipurpose“ (Vielzweck-) Detektoren
  - Infrastruktur

Wechselwirkungen

Eigenschaften

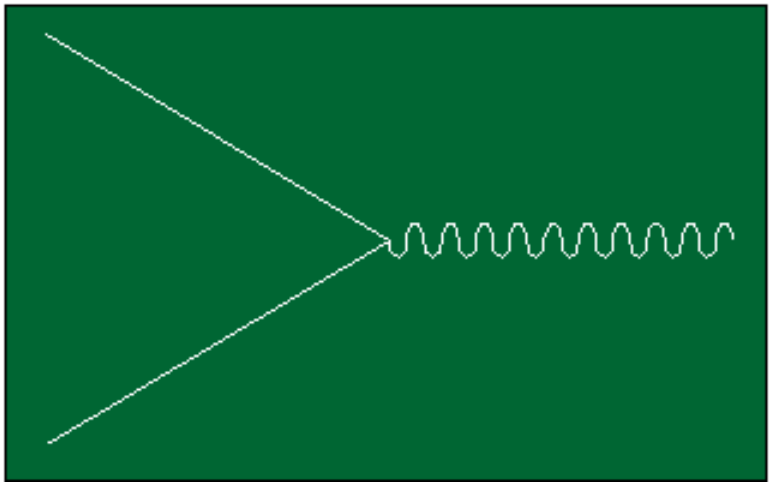
NACHWEIS

Teilchen können nicht “direkt” gesehen/gemessen werden.
Nur das Resultat einer Wechselwirkung mit dem Detektor(material) kann beobachtet werden!
Schlussendlich wird alles konvertiert in

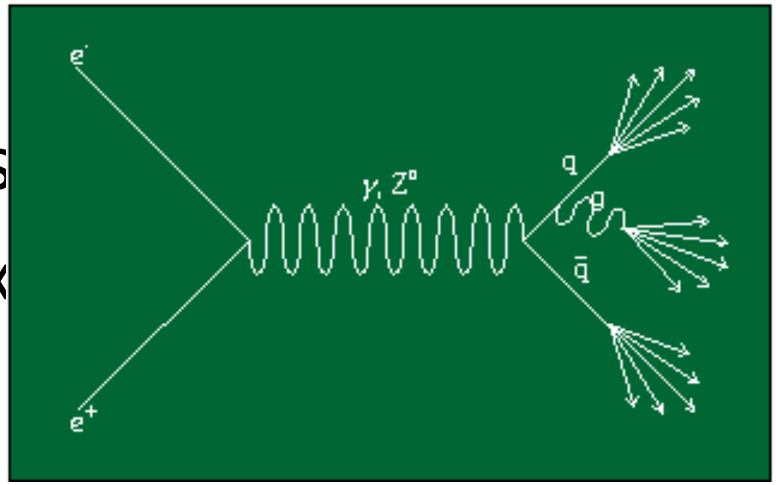
- Optische Bilder
- Strom oder Spannungssignale

Teilchen – Teilchen Interaktionen

- Streuung

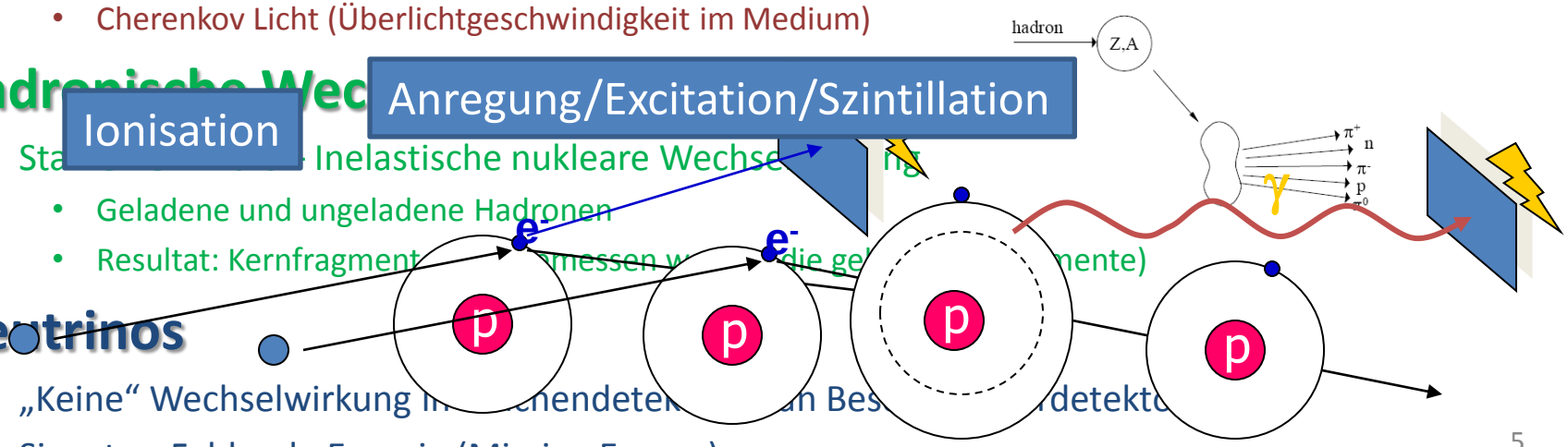


- Annihilation
- und die Produktion neuer Teilchen
- All Ereignisse ents
  - Colliding Beam Ex
  - Fixed Target Expe



Wechselwirkungen

- **Photonen**
  - Compton Streuung
  - Photo Effekt
  - Paarbildung
- **Geladene Teilchen**
  - Streuung (mit Atomen, Elektronen, etc.) unerwünscht
  - Ionisation (Herausschlagen eines Elektrons)
    - Bethe-Bloch-Formel
  - Anregung/Excitation (Elektron in höheres Niveau ➔ Rückfall ➔ Lichtabstrahlung)
    - (z.B. Szintillatorlicht)
  - Photonabstrahlung
    - Bremsstrahlung (beschleunigte Ladung strahlt Photonen ab)
    - Übergangsstrahlung (transition radiation)
    - Cherenkov Licht (Überlichtgeschwindigkeit im Medium)
- **Hadronische Wec**
  - Sta[illegible] Inelastische nukleare Wechse[illegible]ng
    - Geladene und ungeladene Hadronen
    - Resultat: Kernfragment[illegible]messen w[illegible]die ge[illegible]mente)
- **Neutrinos**
  - „Keine“ Wechselwirkung i[illegible]endetek[illegible]an Bes[illegible]detekto
  - Signatur: Fehlende Energie (Missing Energy)



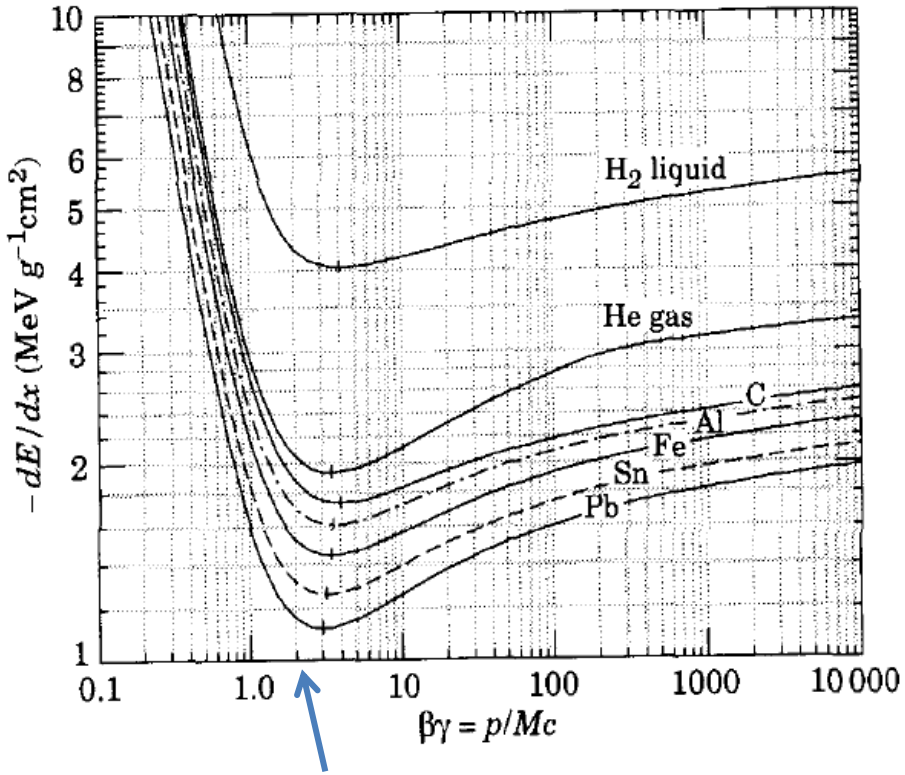
Ionisation: Bethe-Bloch-Formel

Colombwechselwirkung

Energieverlust der Teilchen pro Wegstrecke

➔ Ionisation (Ionen, Elektron-Lochpaare können nachgewiesen werden)

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{coll} = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A}\frac{z^2}{\beta^2} \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2 W_{max}}{I^2}\right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z}\right]$$



Minimal ionisierendes Teilchen MIP

z … Ladung des einfallenden Teilchens

Z, A … Ordnungszahl und Massenzahl des Targets

ρ … Targetdichte,

N_A … Avogadrozahl

I … mittleres Ionisationspotential (Materialkonstante des Targets)

W_{max} ... max. Energieübertrag in einer Einzelkollision

δ … Dichtekorrektur (Polarisationseffekt, $\delta \approx 2.\ln\gamma + K$)

C … Schalenkorrektur (wichtig für kleine Projektilgeschwindigkeiten)

β: Geschwindigkeit/c

$$\beta = \frac{v}{c}, \qquad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

$$r_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{e^2}{m_e c^2} \quad \text{… klassischer } e^- \text{– Radius}$$

Teilchen Eigenschaften

- Welche Eigenschaften hat ein Teilchen?
  - Energie
  - Impuls
  - Ladung
  - ~~Masse~~
  - Lebenszeit (life time)
  - ~~Spin~~
  - Zerfallsmoden

- Welche sind ***direkt*** messbar?

Teilchen Eigenschaften

$$\vec{p} = \left.\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix}\right\} E \qquad \begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix}$$

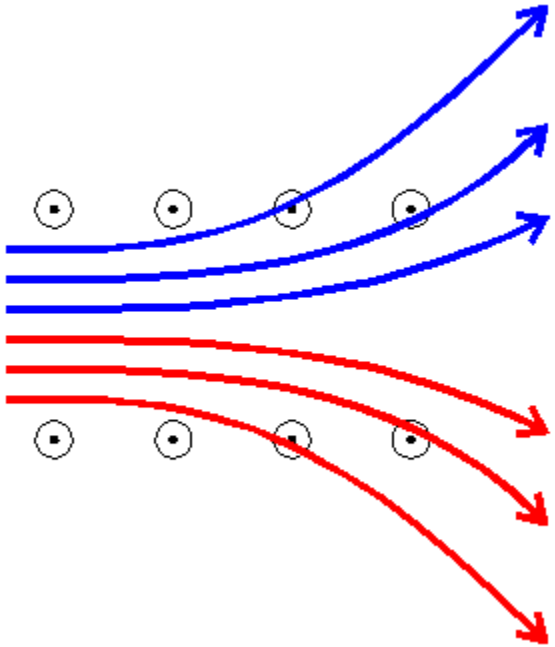
- Welche Eigenschaften können hergeleitet werden?

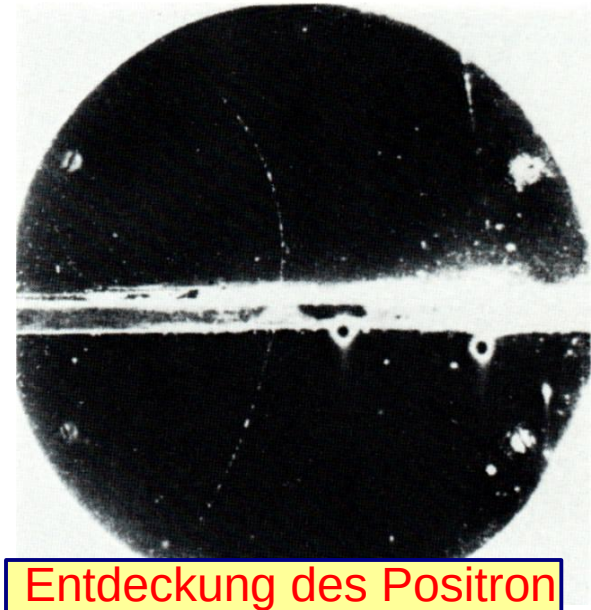
Masse: $$E^2 = m^2 \cdot c^4 + \vec{p}^{\,2} c^2 \Rightarrow m = \frac{\sqrt{E^2 - \vec{p}^{\,2} c^2}}{c^2}$$

Spin: etwas abstrakter aus der Winkelverteilung

Messen der Teilcheneigenschaften

- Ladung
  - Richtung





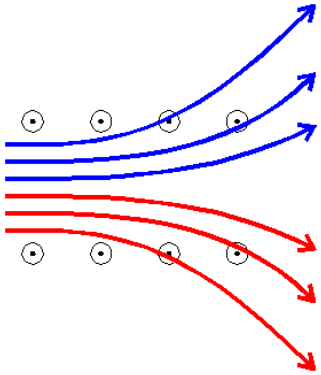
LBNL Image Library

Entdeckung des Positron
1932 Carl Anderson,
Noble Prize 1936

- Lifetime
  - Messe Strecke

Messen der Teilcheneigenschaften

- Impuls



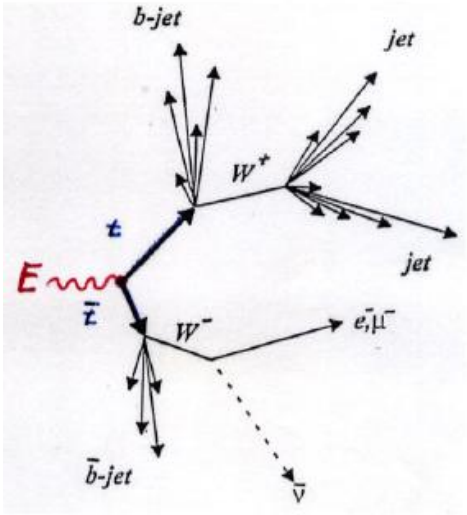
$$F = q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

$$\Rightarrow q \cdot B \cdot R = m \cdot v = \left| \vec{p} \right|$$

- Geschwindigkeit
  - Flugzeitmessung: time of flight TOF
  - RICH (siehe später)
- Energie
  - Kalorimeter

Das Prinzip am Beispiel eines TOP Quarks

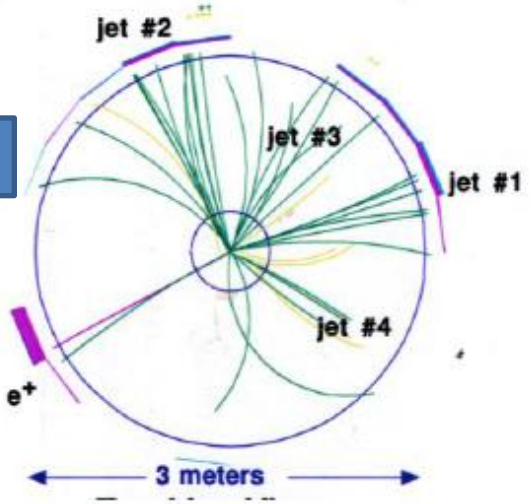
Theorie



NACHWEIS ANHAND DER ZERFALLSPRODUKTE

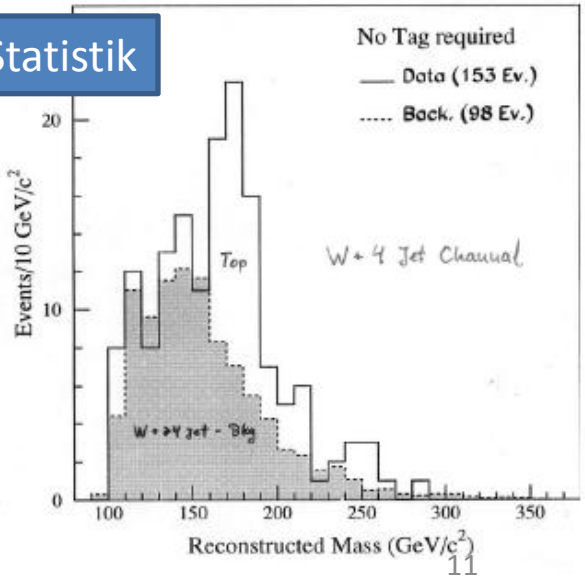
Realer Detektor CDF in Chicago

Ereignis



TOP-ANTITOP-EREIGNIS

Statistik

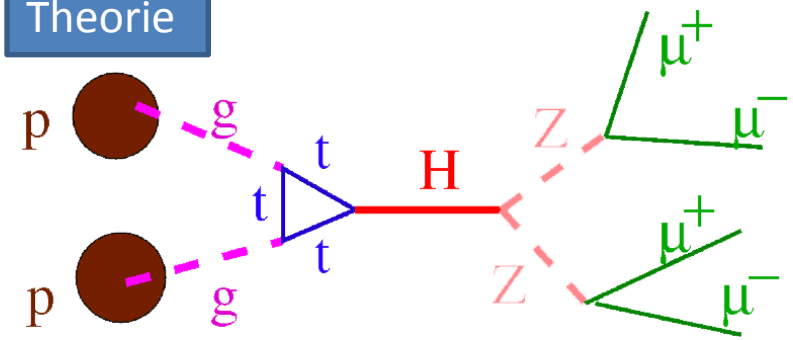


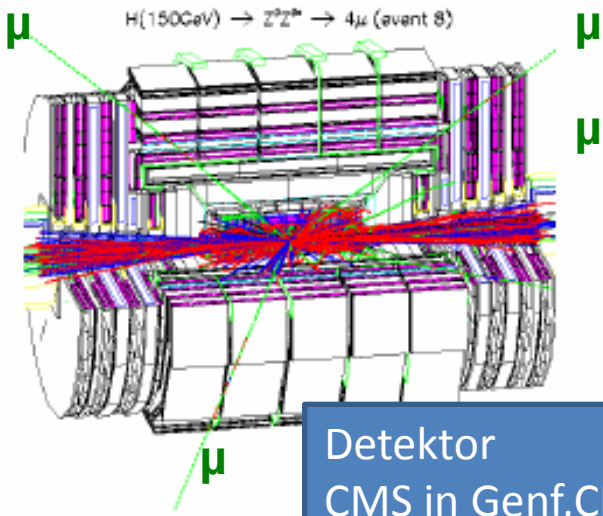
TOP-QUARK-SIGNAL

Higgs Boson, ein Beispiel

pp → H → ZZ → 4μ

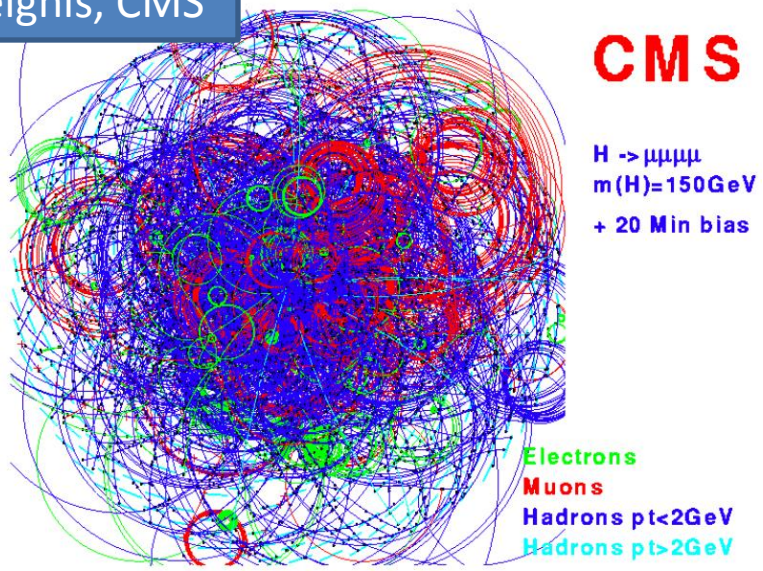
Theorie

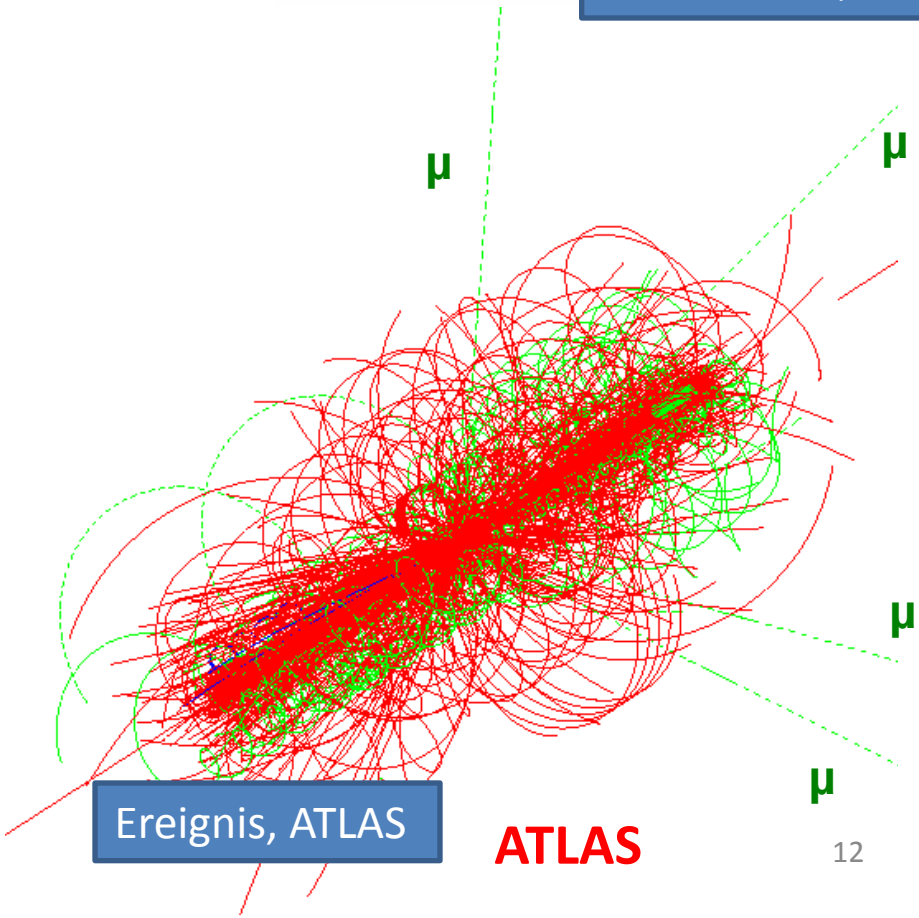




Detektor
CMS in Genf,CERN

Ereignis, CMS



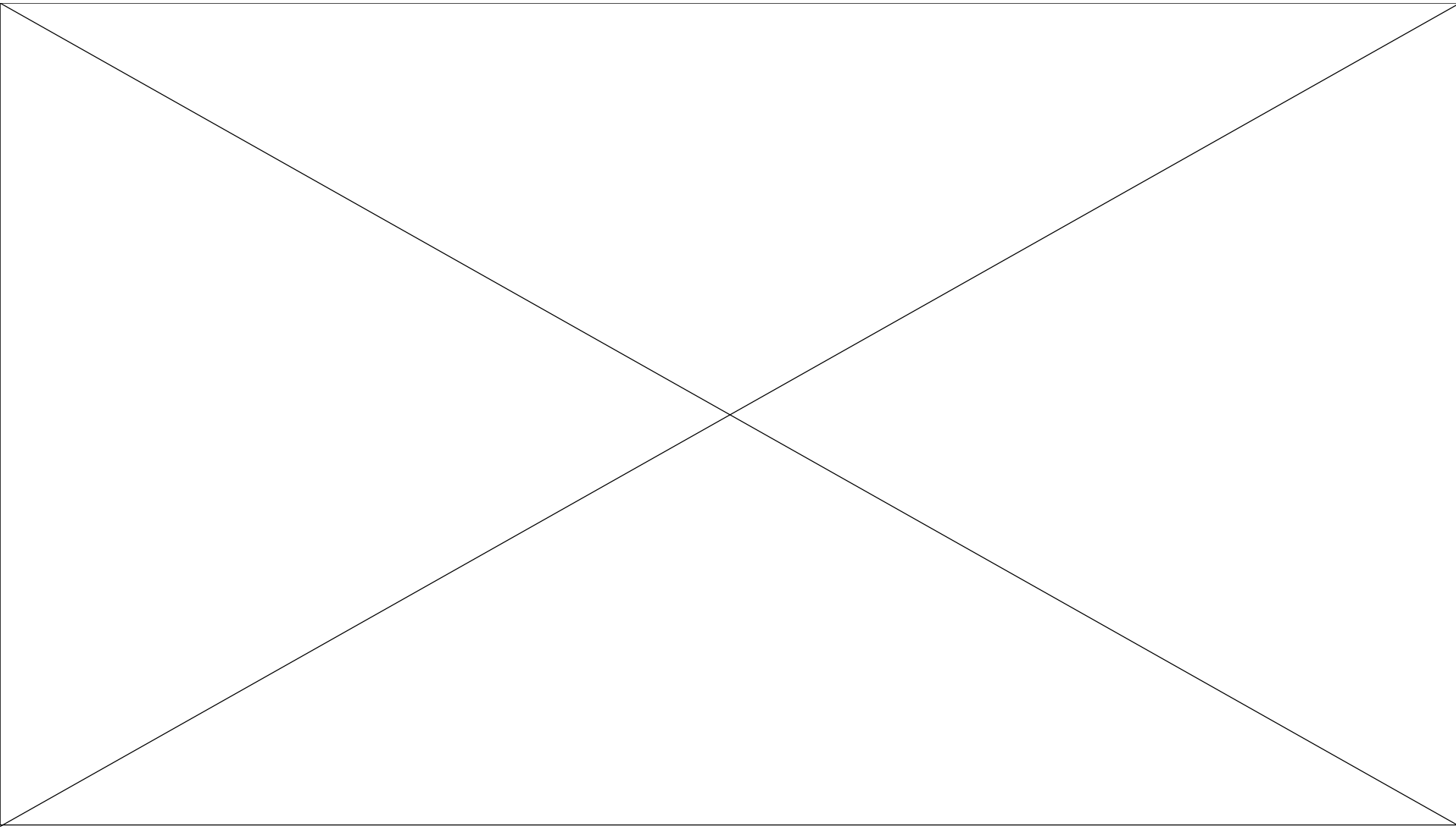


Ereignis, ATLAS

Schnitt durch den CMS Detektor

Teilchen Wechselwirkung und Rekonstruktion

Jedem Teilchen “SEINEN” Detektor



Spurdetektoren (Spur: Impuls, Ladung, Zerfall)

Kalorimeter (Energie)

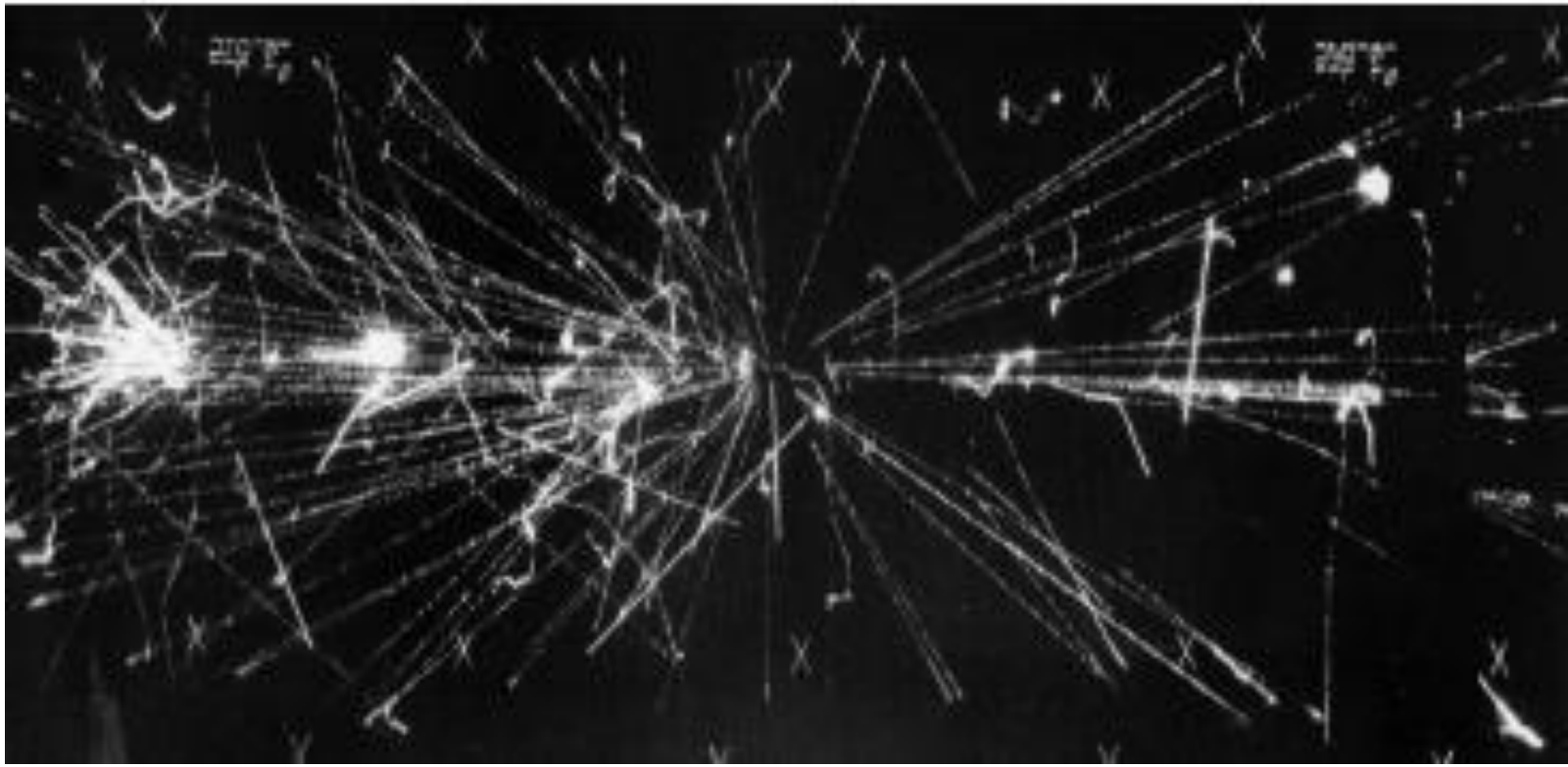
- ECAL: Elektromagnetisches Kalorimeter
- HCAL: Hadron Kalorimeter

Teilchenidentifikation

Myonkammer (Spur, Myonnachweis)

Vielzweckdetektor
(Multipurposedetektor: alles zusammen)

DETEKTORARTEN



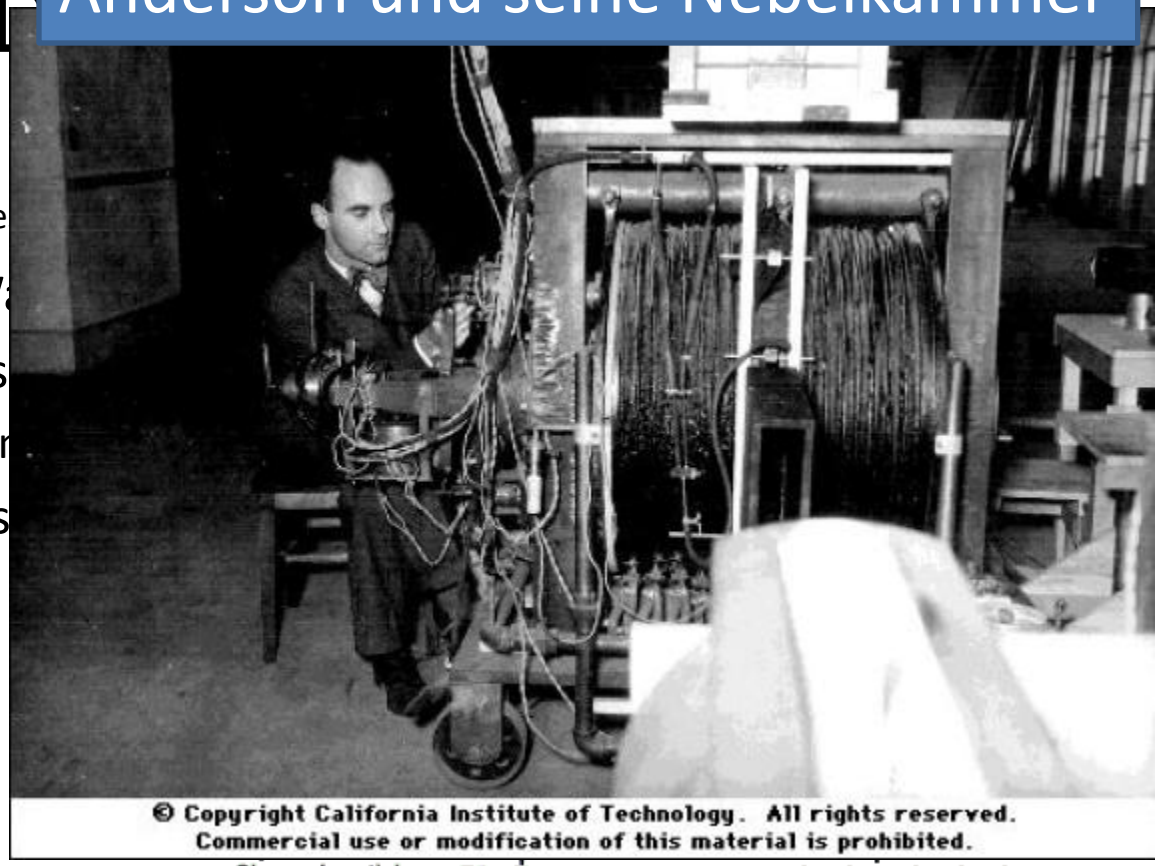
- Nebel-, (Funken-), Blasenkammer

HISTORISCHE SPURDETEKTOREN

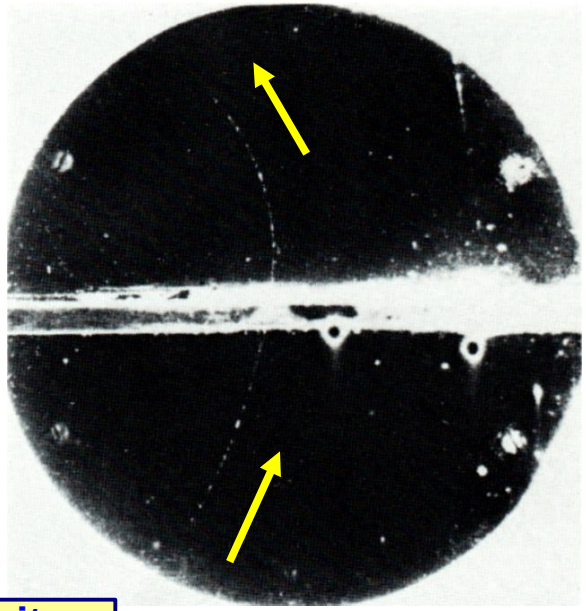
“Historischer” D

- Nebelkammer (1911 by Charle
  - Kammer mit saturiertem W
  - Geladene Teilchen hinterlas
    - Wasser kondensiert an der
  - Sichtbare Spur kleiner Wass
  - Photographie

Anderson und seine Nebelkammer


© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

Charged particle Free ions Condensation droplets



LBNL Image Library

Stahlplatte

Magnetfeld

Positron

Entdeckung des Positrons
(1932 Carl Anderson, Noble Prize 1936)

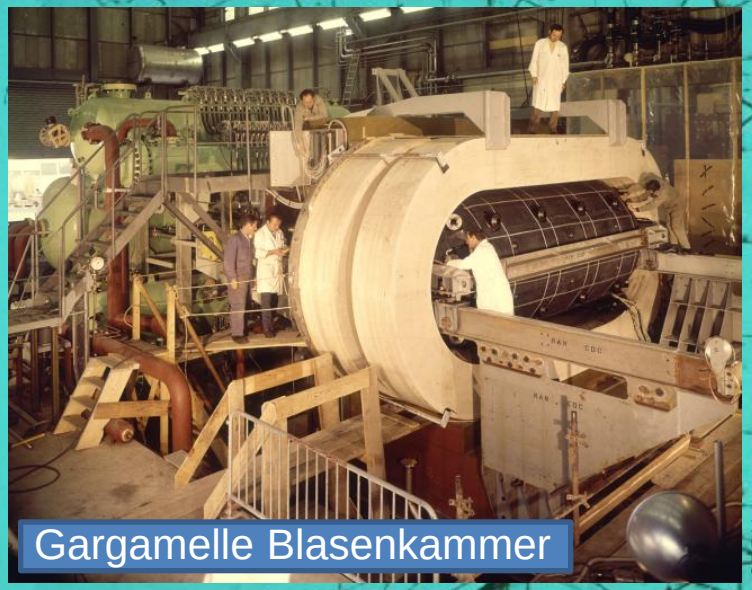
“Historischer” Detektor: Blasenkammer

Siehe Nebelkammer:

Wasser im Siedeverzug (anstatt Wasserdampf)

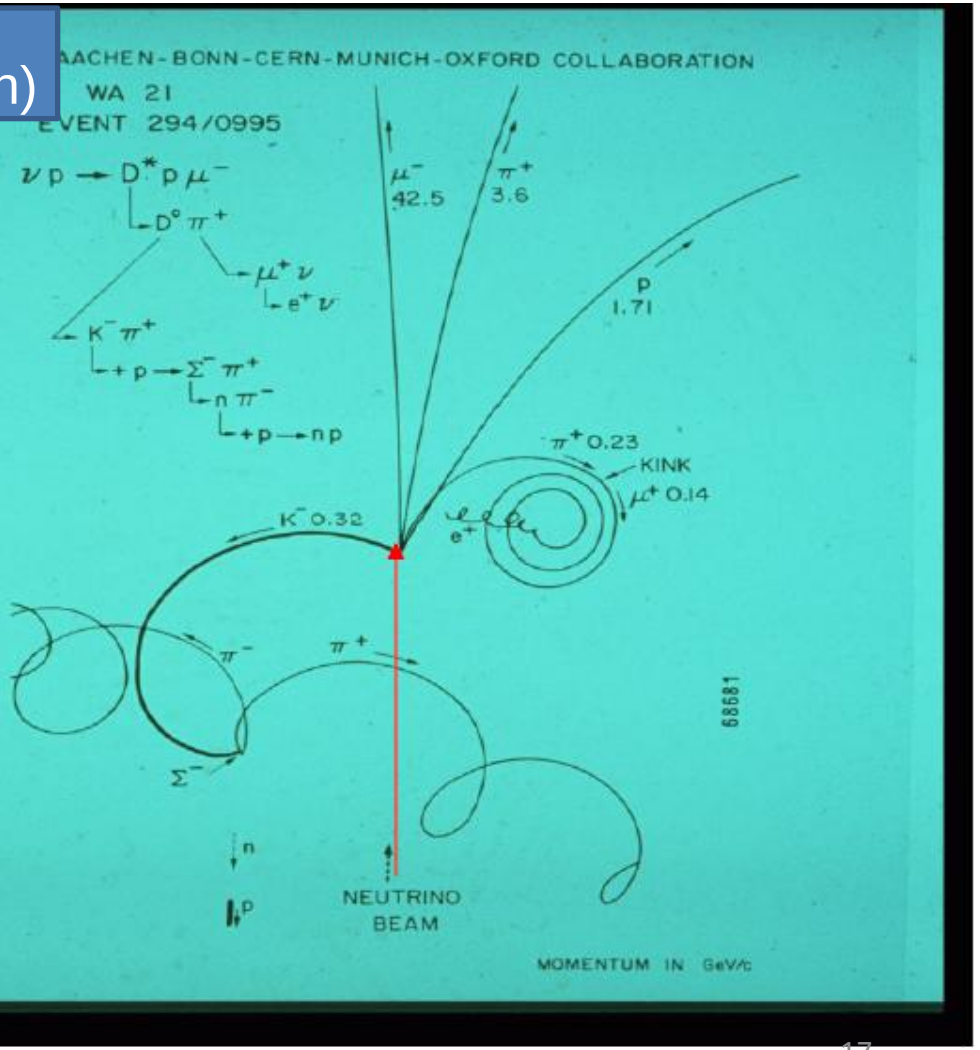
Geladenes Teilchen ➔ erzeugt Ionen ➔ Kondensation ➔ Spur ➔ Photographie

Entdeckung des “Neutralen Stroms”
(1973 von der Gargamelle Kollaboration)



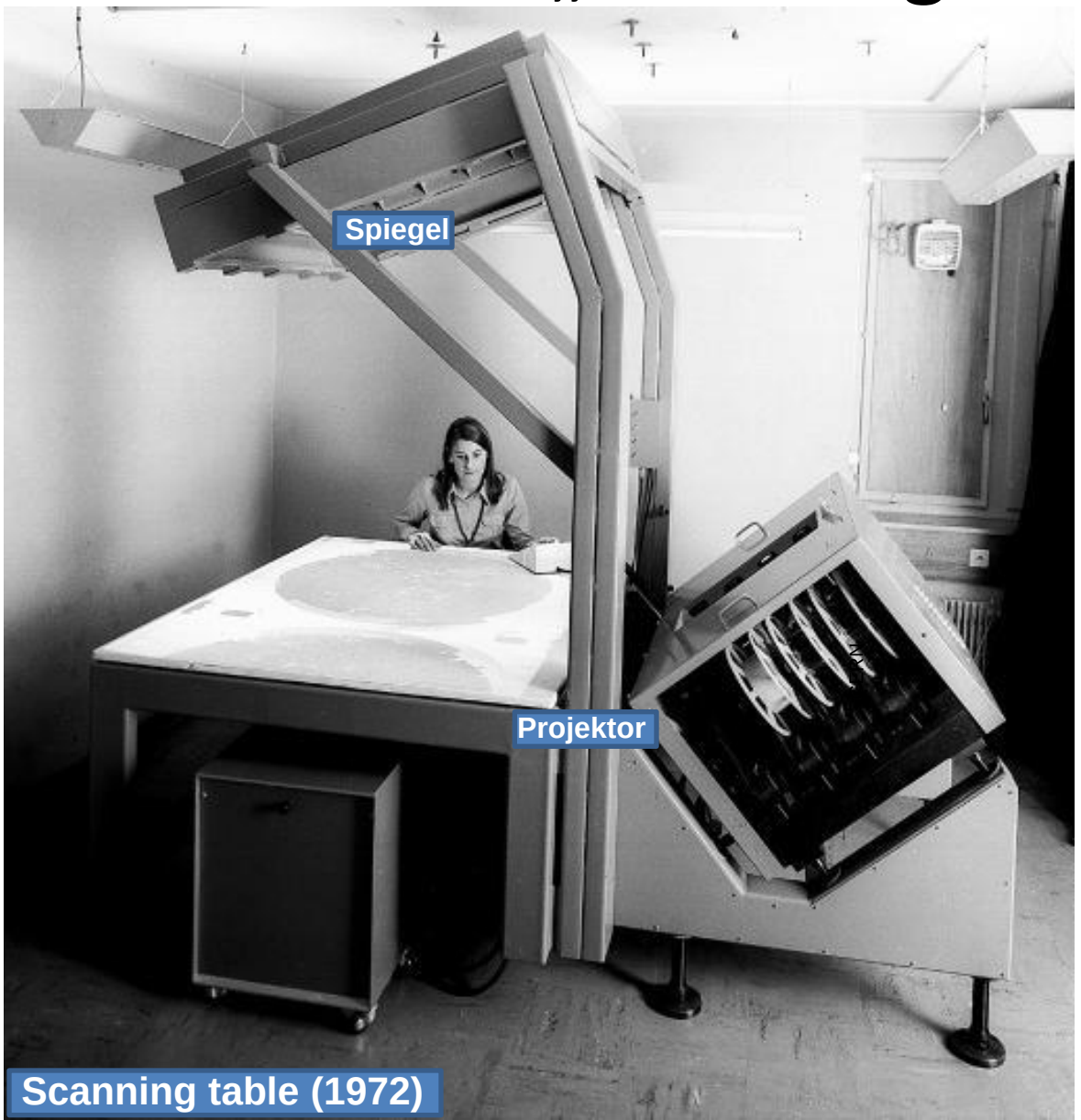
Gargamelle Blasenkammer

CERN



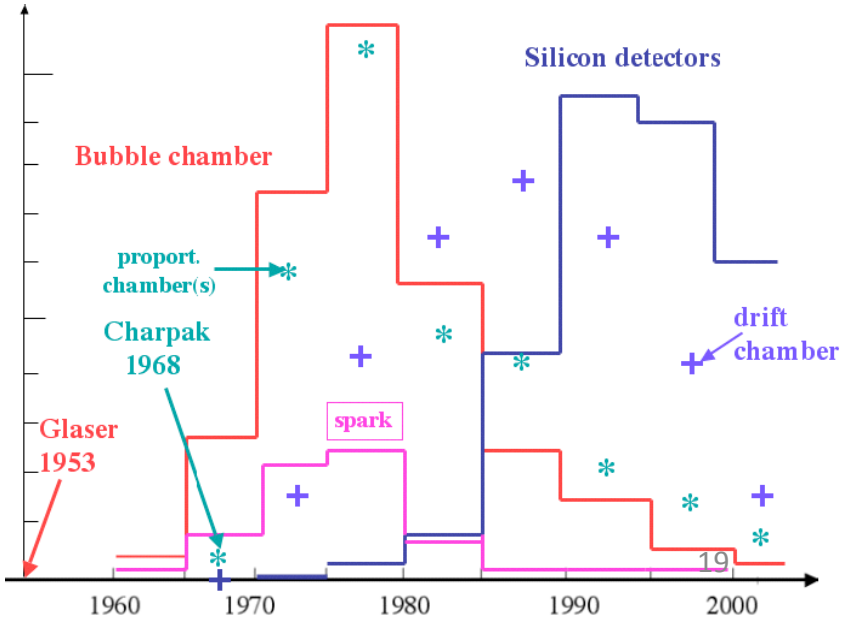
Ein Neutrino-Ereignis in der Big European Bubble Chamber (BEBC) , CERN Photo

Die Soziale Komponente
Das Zeitalter der „Scanning Girls“



Detektoren, geschichtlich

- Nebelkammern dominierten bis in die 50er
  - Aktuell sehr populär in Ausstellungen ☺
- Blasenkammern hatten ihren Höhepunkt 1960-1985
  - Letzte große Blasenkammer: Big European Bubble Chamber; zu besichtigen im CERN Mikrocosmos
- Draht- und Driftkammer dominierten seit den 80er
  - Noch heute im Einsatz
- Seit den frühen 90er sind Halbleiterdetektoren im Einsatz
  - Zu Beginn: kleine Vertexdetektoren
  - Heute ~200 m^2 Siliziumspurendetektor in



Historische Detektoren

- Nebelkammer (Cloud Chamber)
- Blasenkammer (Bubble Chamber)
- Funkenkammer

Gasdetektoren

Festkörper- (Halbleiter-) Detektoren

(Szintillator-Spurendetektor)

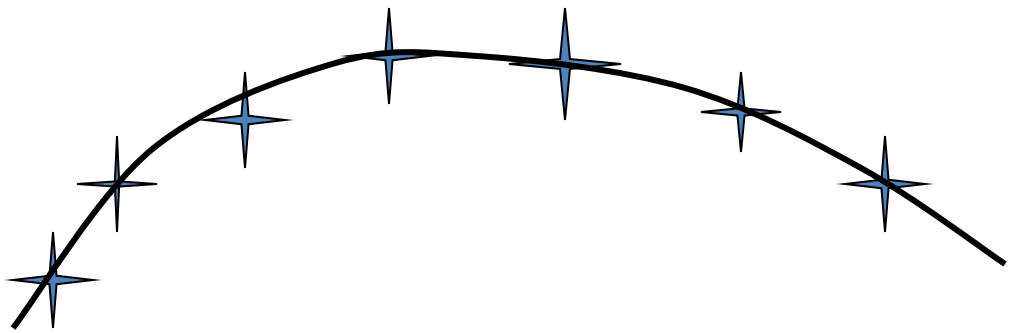
SPURENDETEKTOREN HEUTE ELEKTRONISCHE DATENNAME

Detektieren nur geladene Teilchen

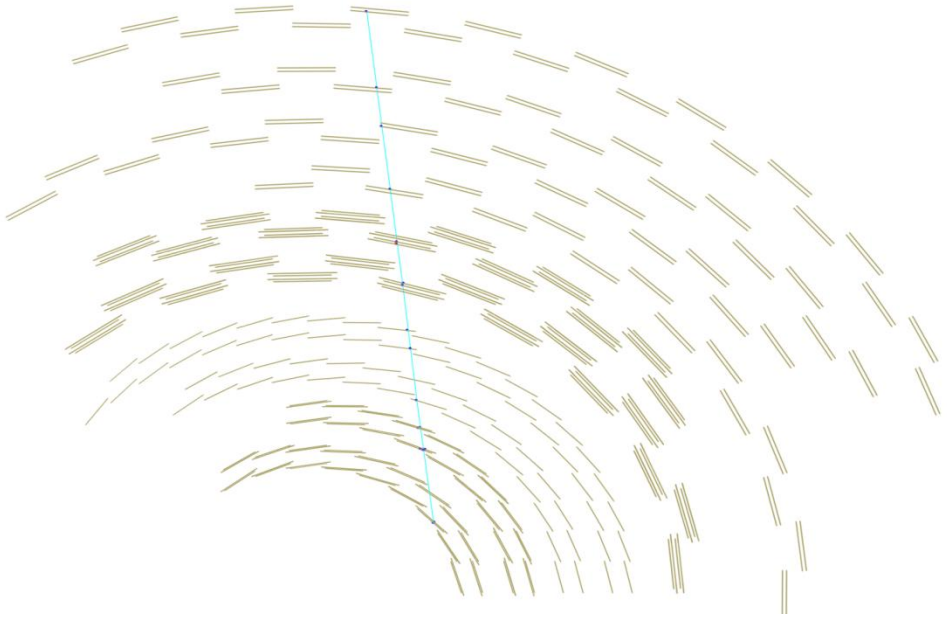
Funktion von Spurendetektoren

- Vermessung der Teilchenspur
- Ermittle
  - Ladung
  - Impuls

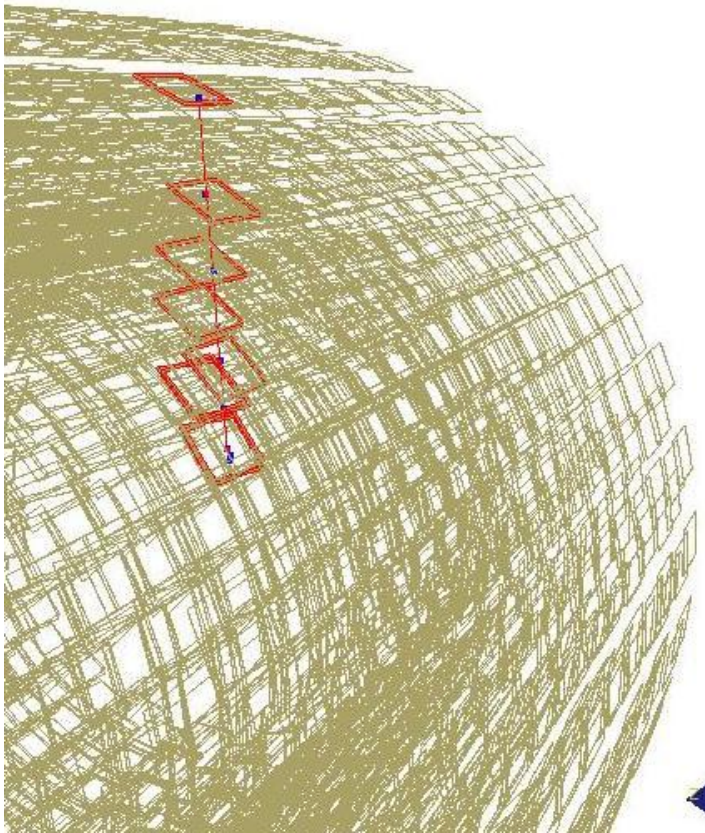
  in Verbindung mit einem Magnetfeld
- Spuren werden aus Raumpunkten rekonstruiert



Rekonstruktion der Spuren



CMS Spurdetektor aktuell im Test



Ionisationszähler (Geiger-Müller-Zähler)

Proportionalkammer

Vieldrahtproportionalkammer

Driftkammer

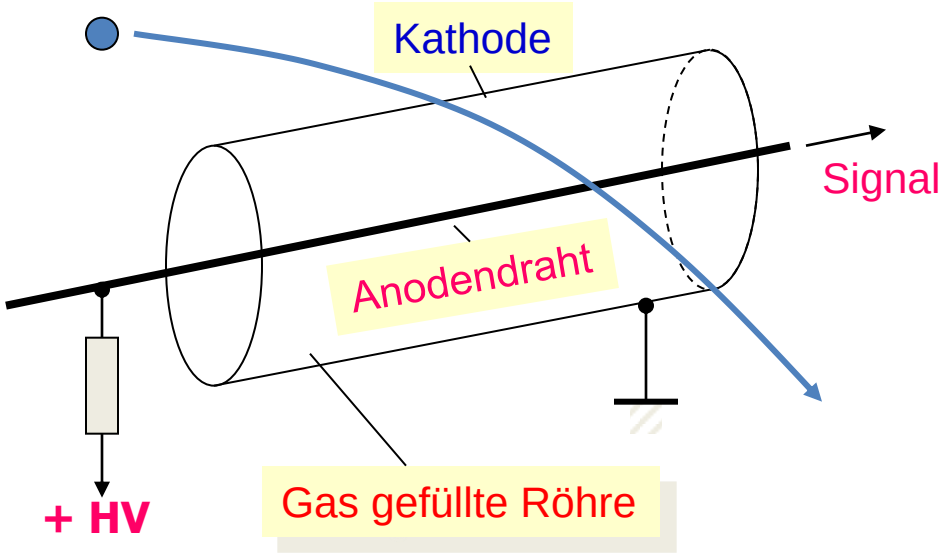
Zeitprojektionskammer

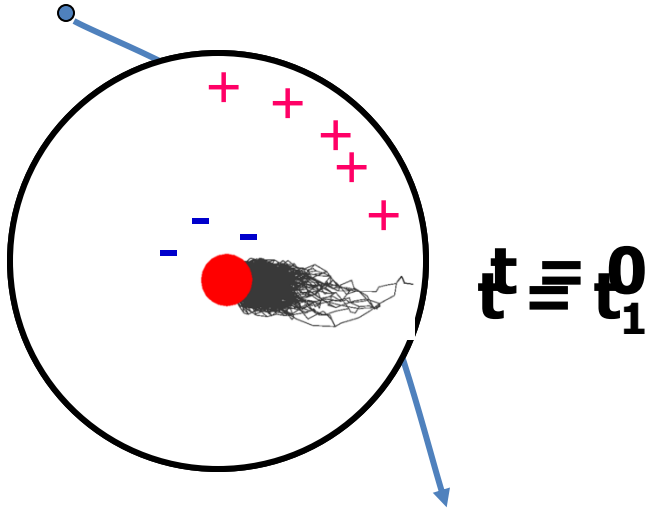
Mikro-Streifen-Gasdetektoren

Resistive Plate Chambers

SPURENDETEKTOREN GAS

Ionisationszähler

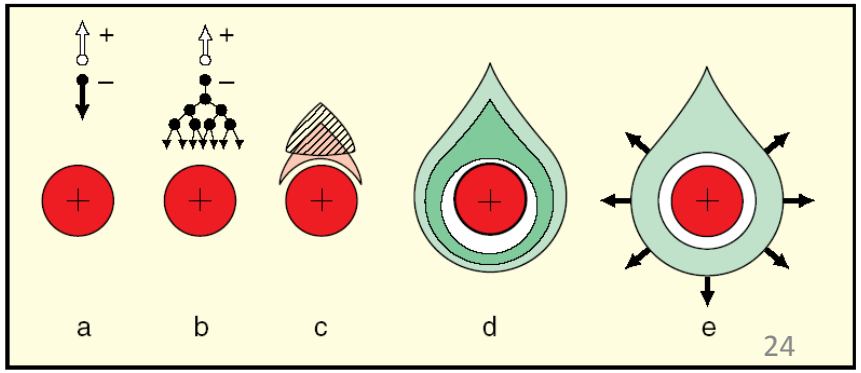




- Lawinenbildung nahe der Anode
- Signal proportional zur deponierten Energie

Signalentwicklung

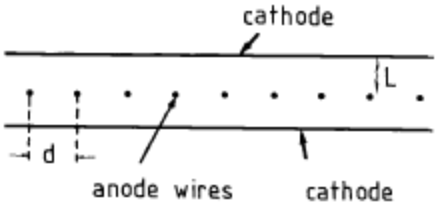
F.Sauli, CERN 77-09

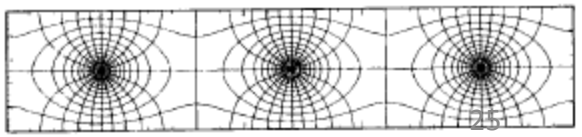


JV_289

Entwicklung der Gasdetektoren

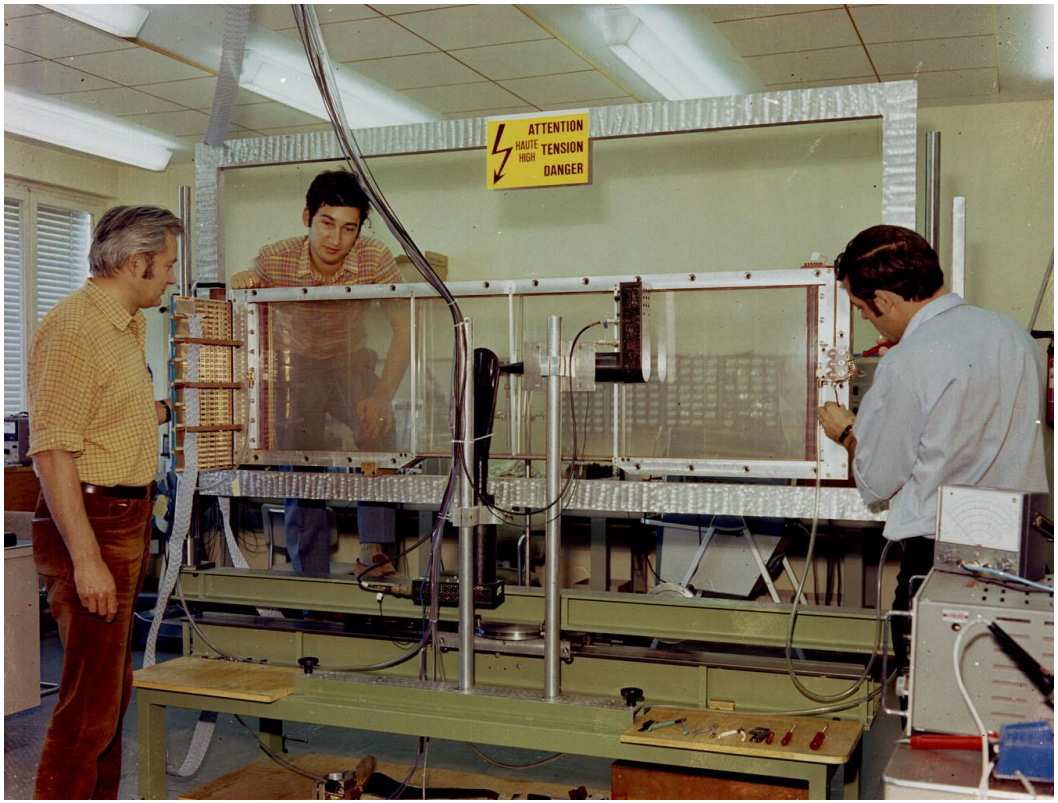
- **Geiger-Zähler**: Binäre Antwort
  - Anzahl Teilchen
  - Jedes Teilchen gleiche Ladung
- **Proportionalzähler**:
  - Primärionisation ➔ Sekundärionisation (Lawine)
- **Vieldrahtproportionalkammer**
  - Viele Proportionaldrähte in einer Kammer
    - Anodendrähte wechseln mit Kathoden ab
  - Ortsauflösung (Spurenerkennung)
  - Nobelpreis: G. Charpak, 1992





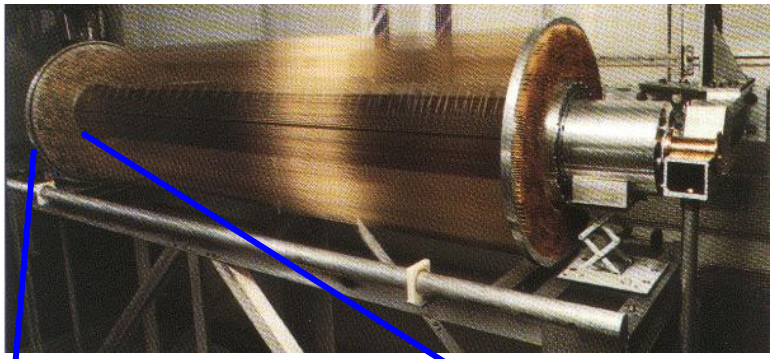
field lines and equipotentials around anode wires

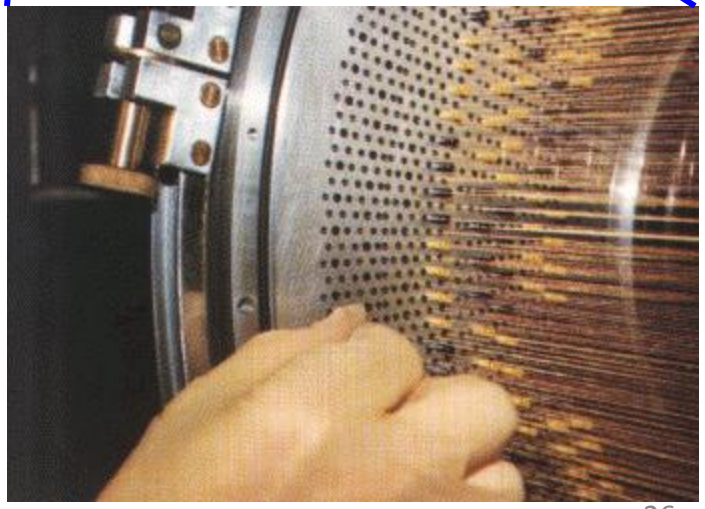
MWPC



ITC (ALEPH)

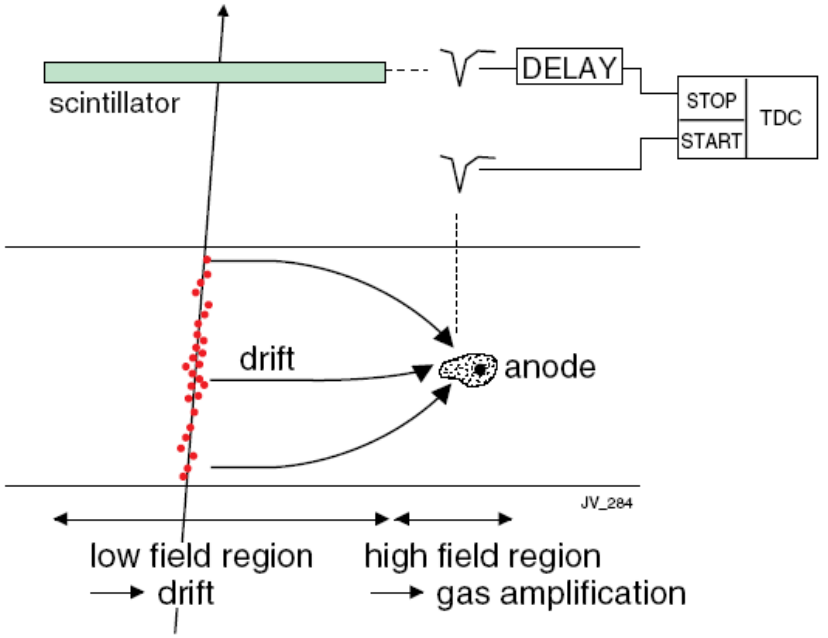
Inner Tracking Chamber



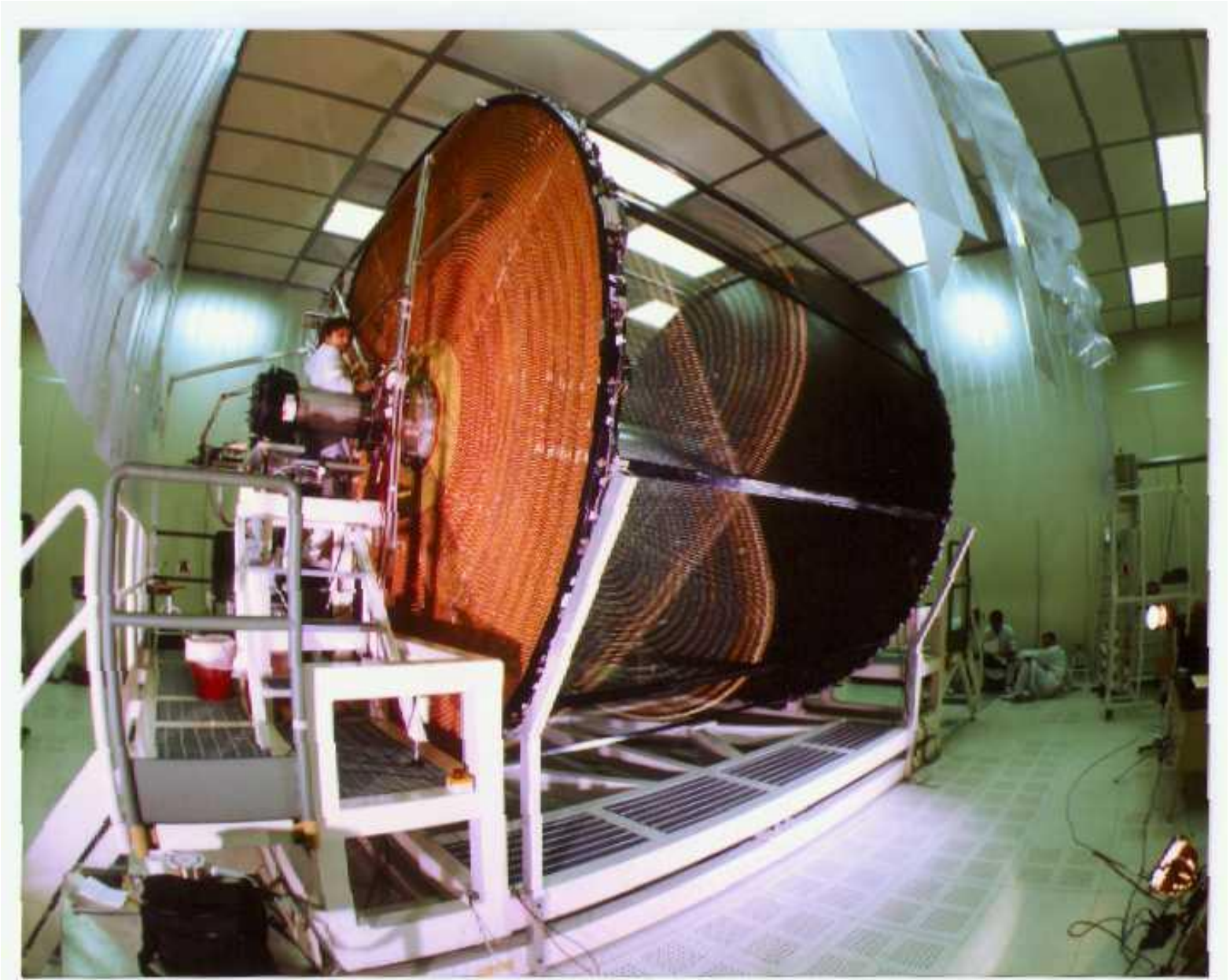


Driftkammer

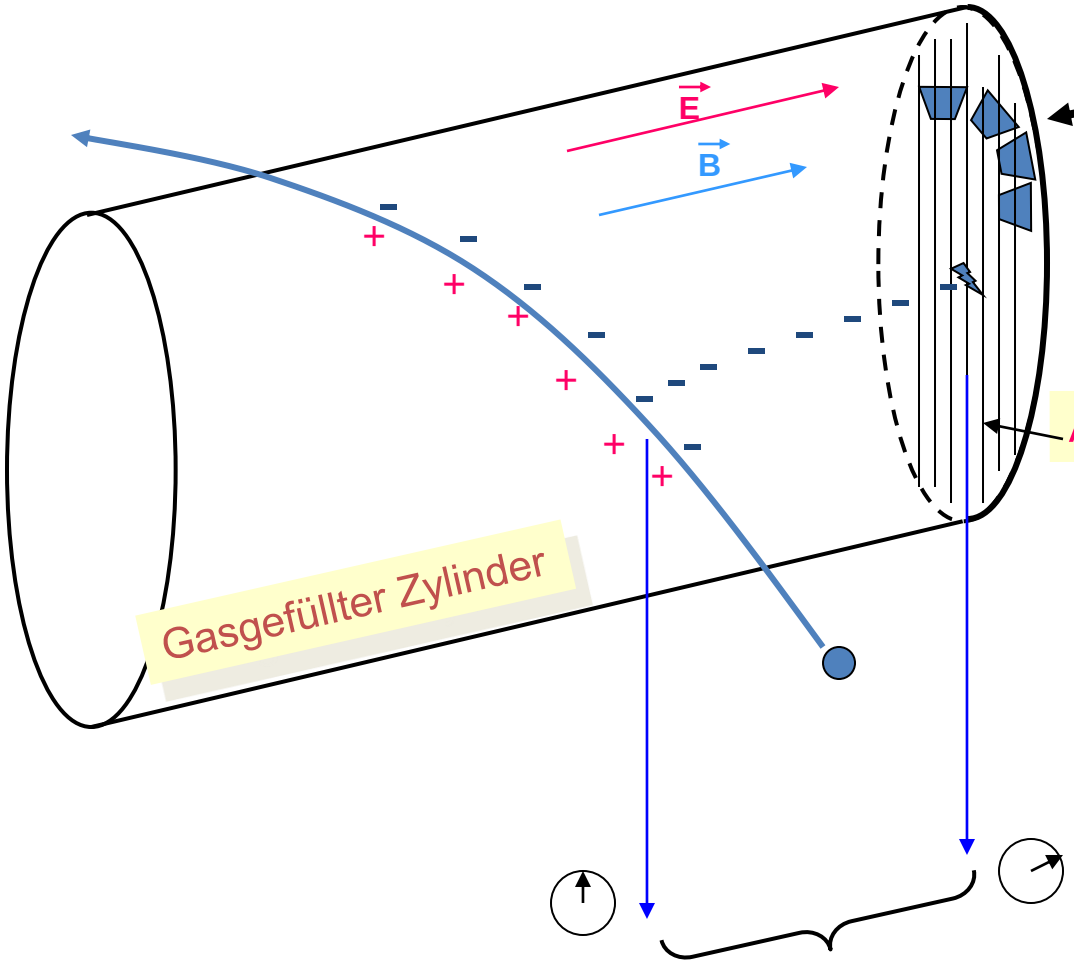
- Standard Drahtkammern sind begrenzt in der Auflösung durch den minimalen Drahtabstand
- Driftkammern weiten den Abstand und berücksichtigen die Driftzeit
  - Natürlich muss die Zeit des Teilchendurchgangs bekannt sein



Kloe Driftkammer in Frascati



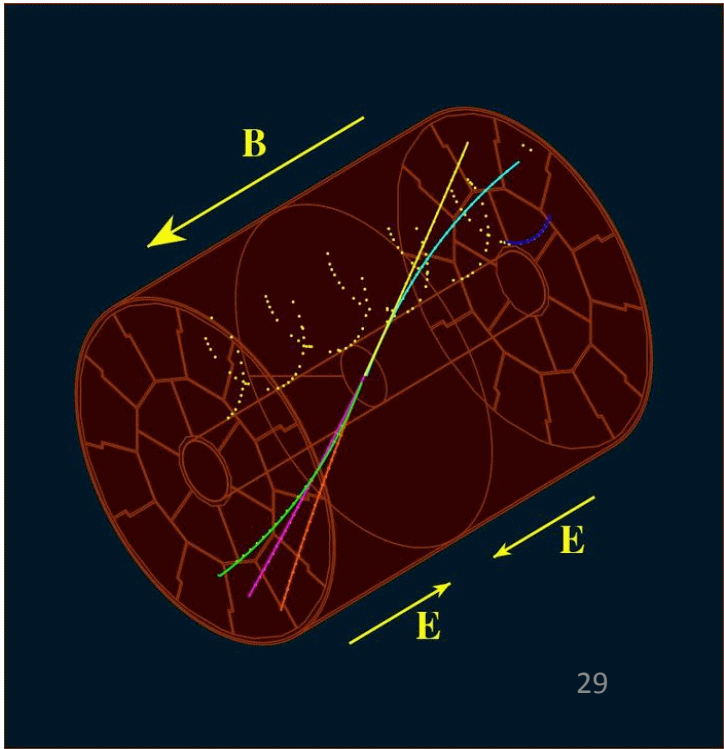
Zeitprojektionskammer (TPC)



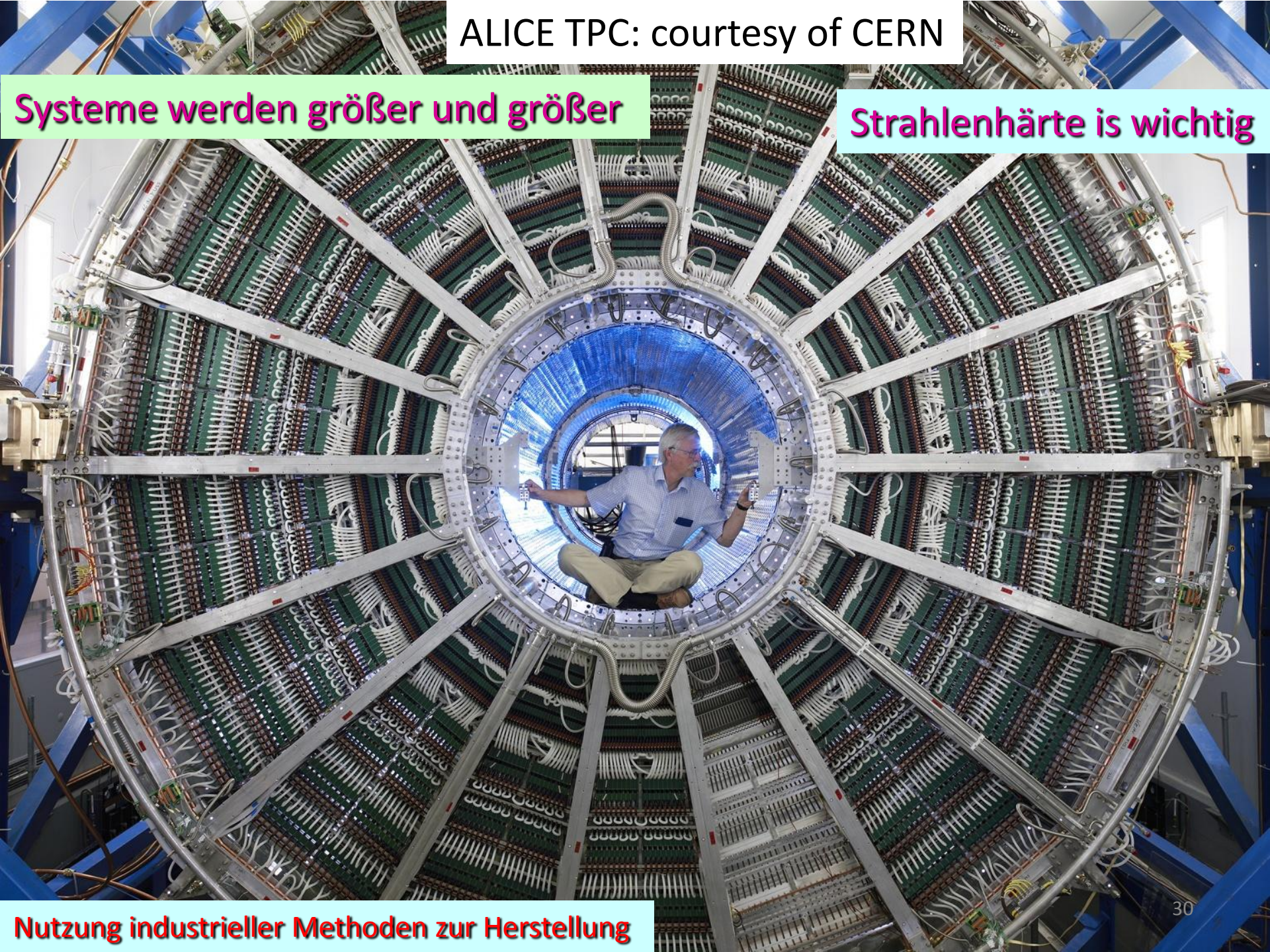
Draht-kammer
misst r,ϕ

Anodendrähte

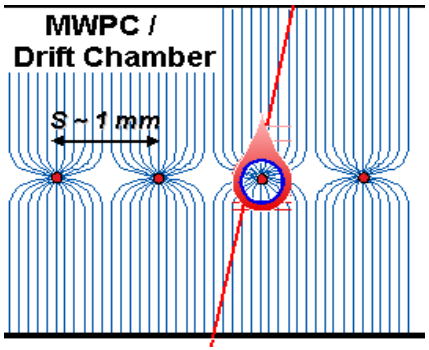
$z = v_{drift}\ t$

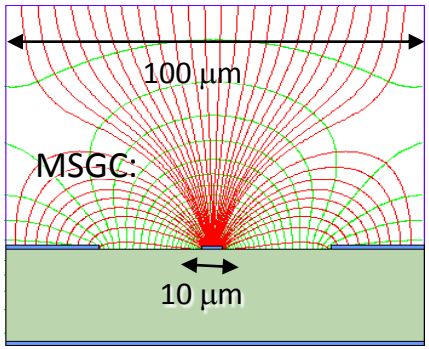


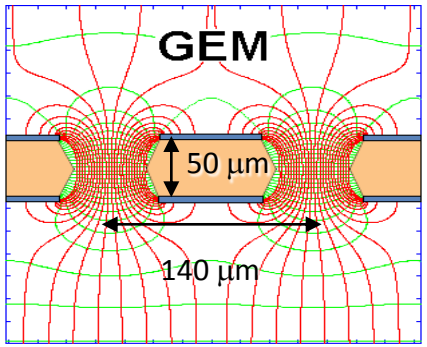
Maximierung der Driftzeit
Nicht für große Raten geeignet
Perfekt für (1) Elektron-Positron Kolider
und (2) Schwerionen Kolider

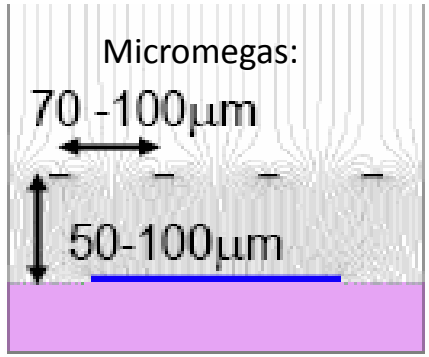

ALICE TPC: courtesy of CERN
Systeme werden größer und größer
Strahlenhärte is wichtig
Nutzung industrieller Methoden zur Herstellung

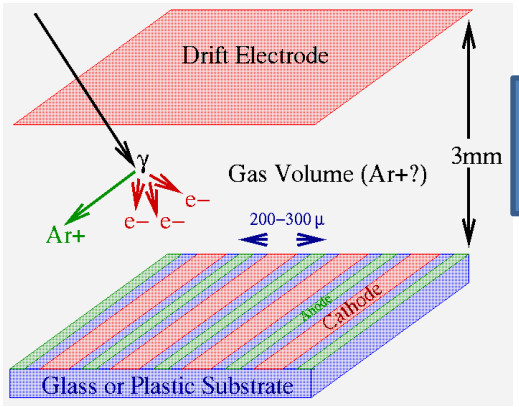
Gasdetektoren ohne Drähte







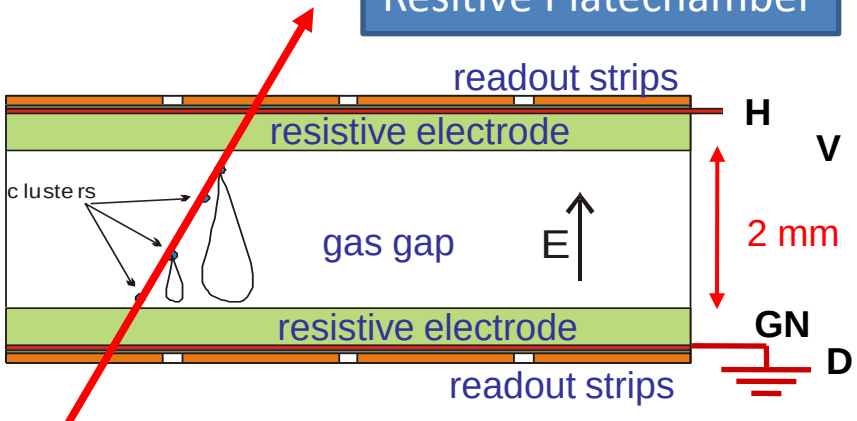


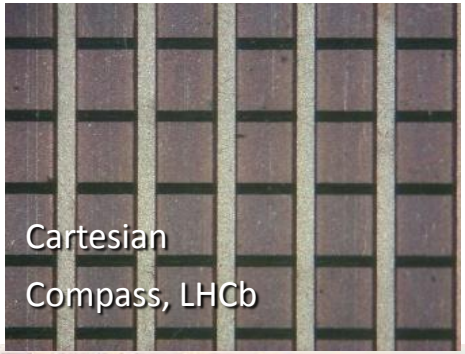


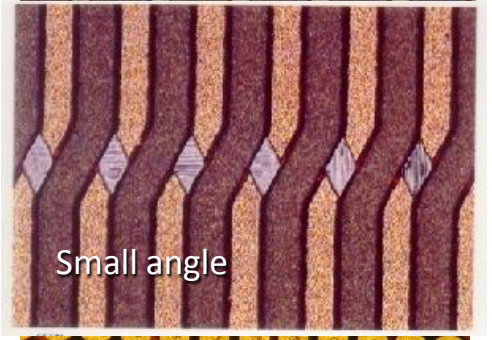
Mikrostreifen-Gaskammer

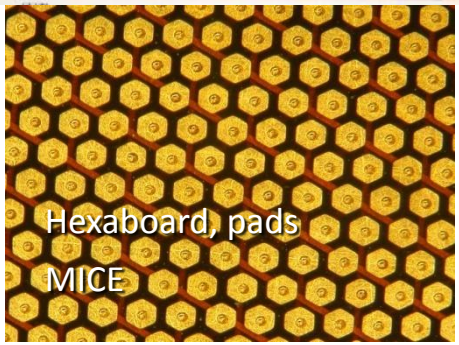
- Strukturierte Ebenen statt Drähte
- Dünne Kammern; HOCHspannung
- Spezielle Feldkonfigurationen zur Gasverstärkung

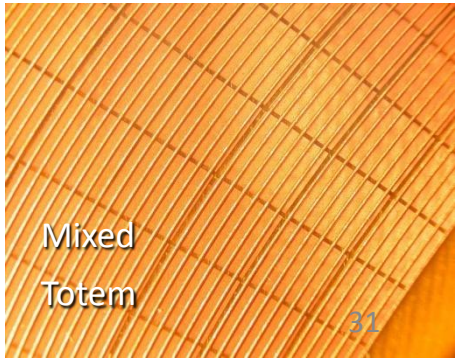
Resitive Platechamber







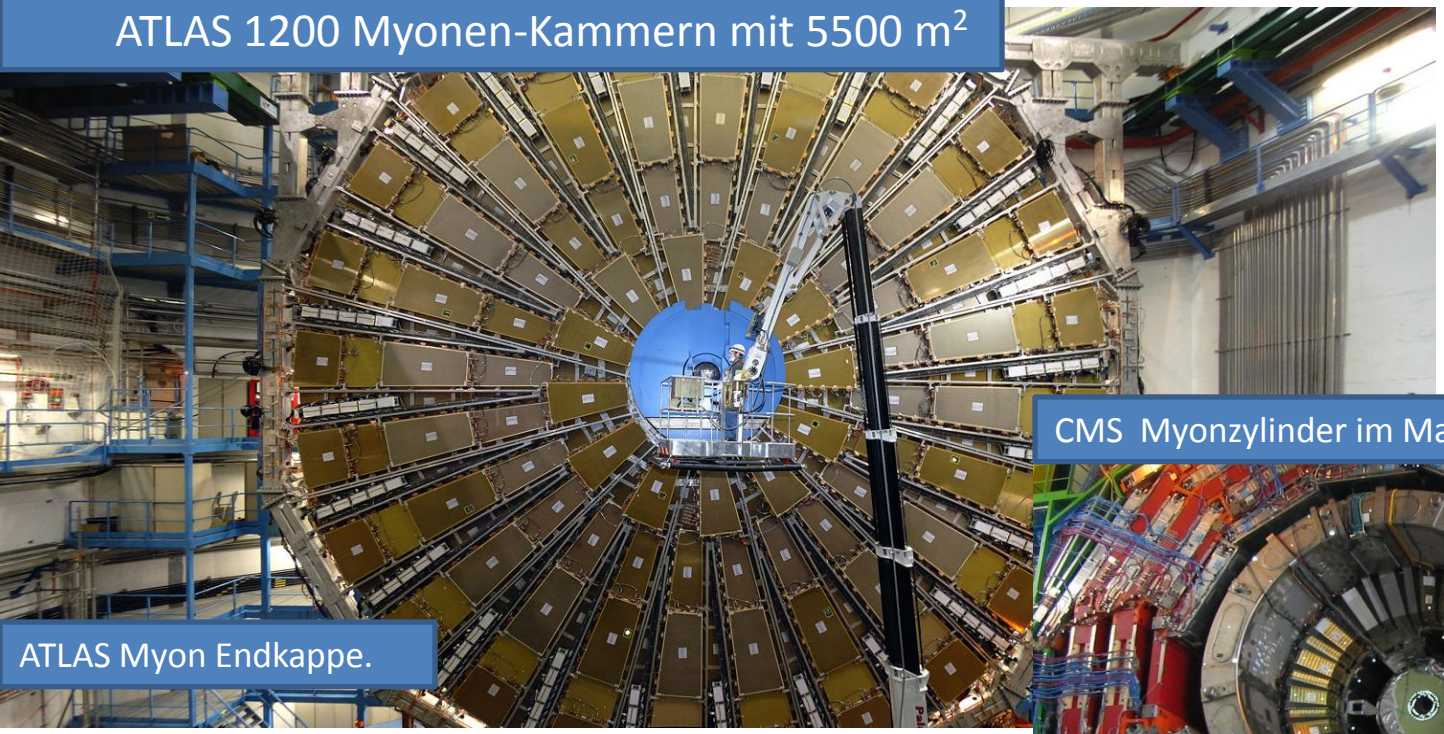




Myonen-”detektoren”

Myonen passieren sowohl die Kalorimeter, als auch das Magnetjoch
➔ alles außerhalb sind Myonen (abgesehen von Neutrinos)
➔ Gasdetektoren messen nun die Myonenspur im Magnetfeld

ATLAS 1200 Myonen-Kammern mit 5500 m^2



ATLAS Myon Endkappe.

CMS Myonzylinder im Magnetjoch.

Myonendetektoren

Streifenzähler

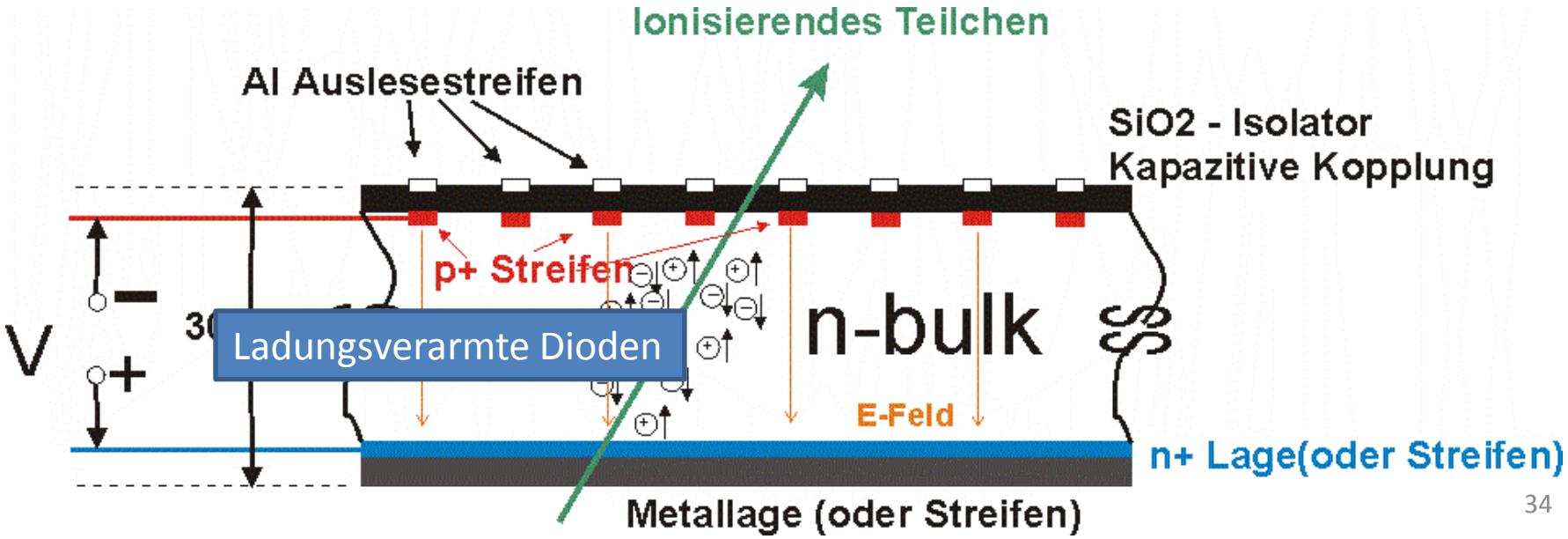
Pixel

(Silizium-Drift-Sensor; DepFET, CCD, CMOS)

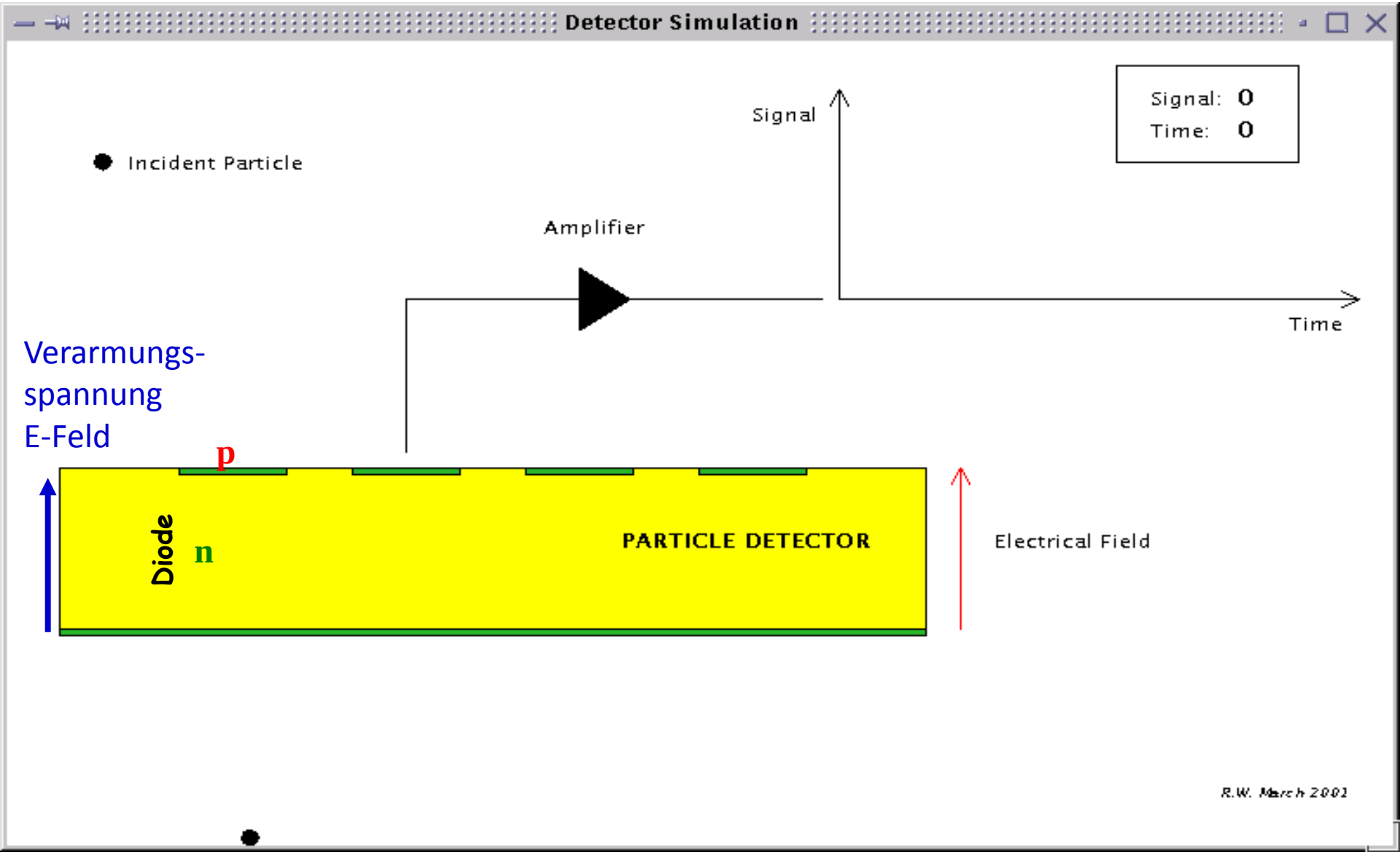
HALBLEITERDETEKTOREN - SILIZIUM

Halbleiterdetektoren (Silizium)

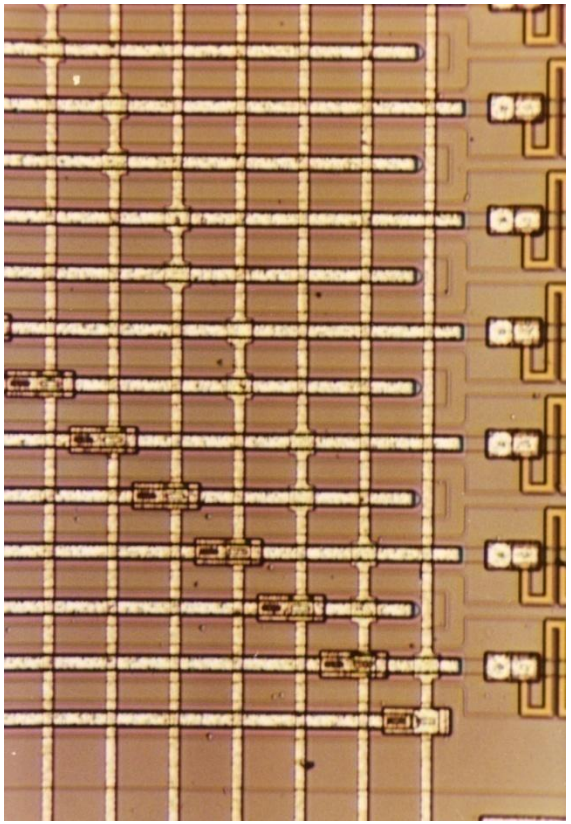
- Funktionsweise: Siehe Gasdetektoren ;-)
  - Ionisation im Festkörper, statt im Gas
  - **Keine** Ladungsverstärkung!
    - Ca. 10^{12} freie Ladungsträger gegenüber 10^{8} erzeugte Ladungsträger (bei Zimmertemperatur) ☹ ➔ **Ladungsverarmung nötig**
  - Segmentierung / Strukturierung von Dioden, welche in Sperrichtung betrieben werden!

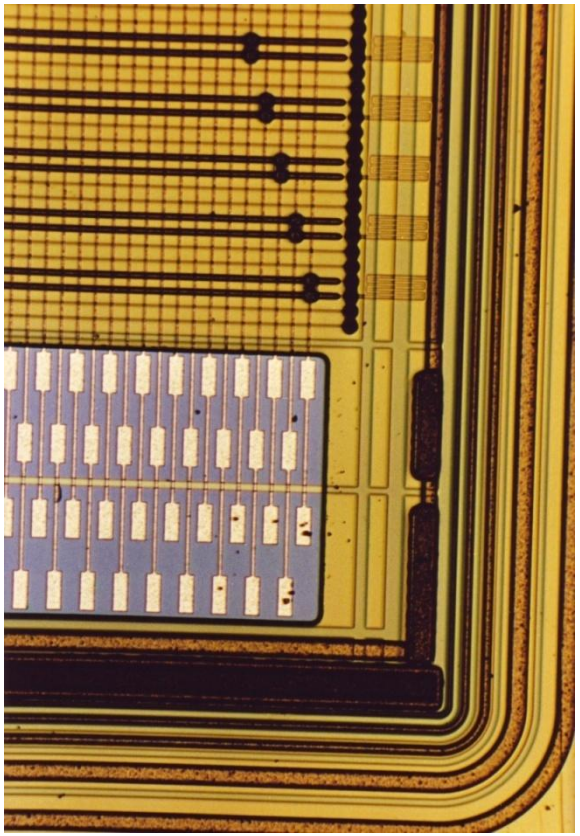


Funktionsweise



Siliziumstreifendetektor von oben und Ihre Eigenschaften





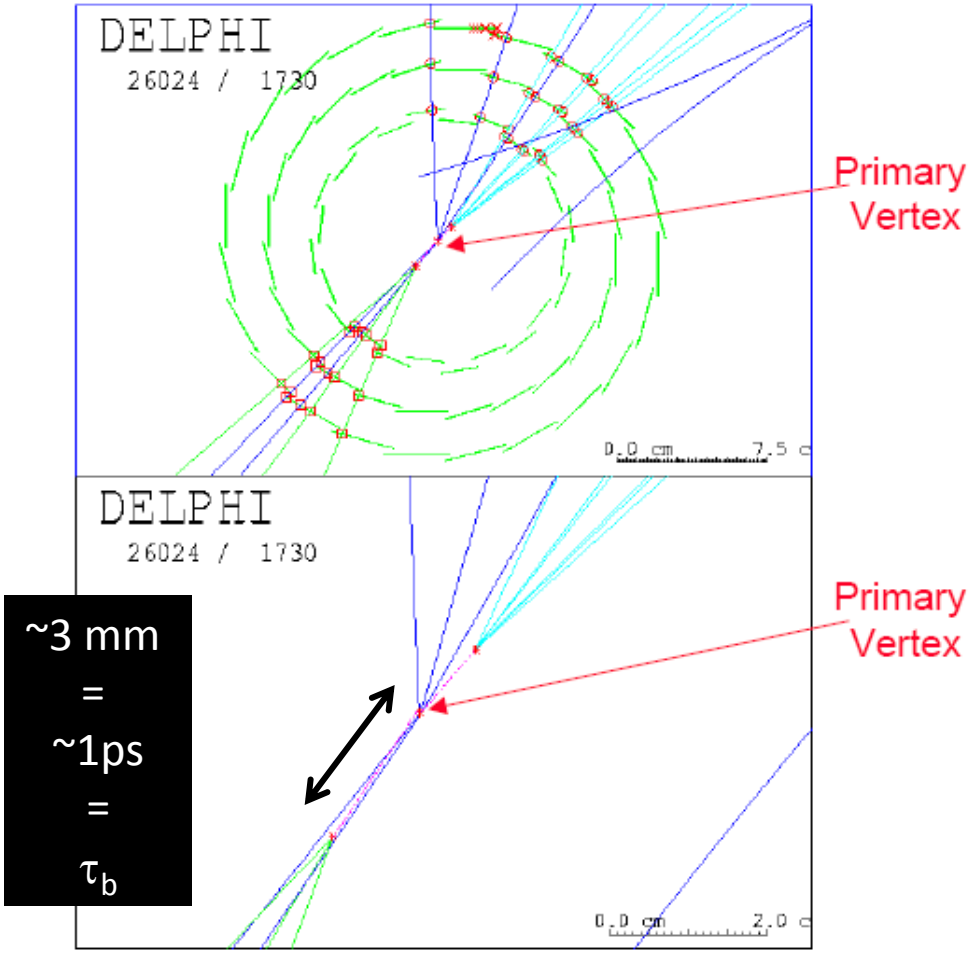
- Sehr kleine Streifenabstände möglich 20-200µm
- Sehr gute Auflösung ~3-5µm
- Sehr schnell

Braucht man so eine hohe Auflösung?

Identifikation eines
b-Quark Ereignisses

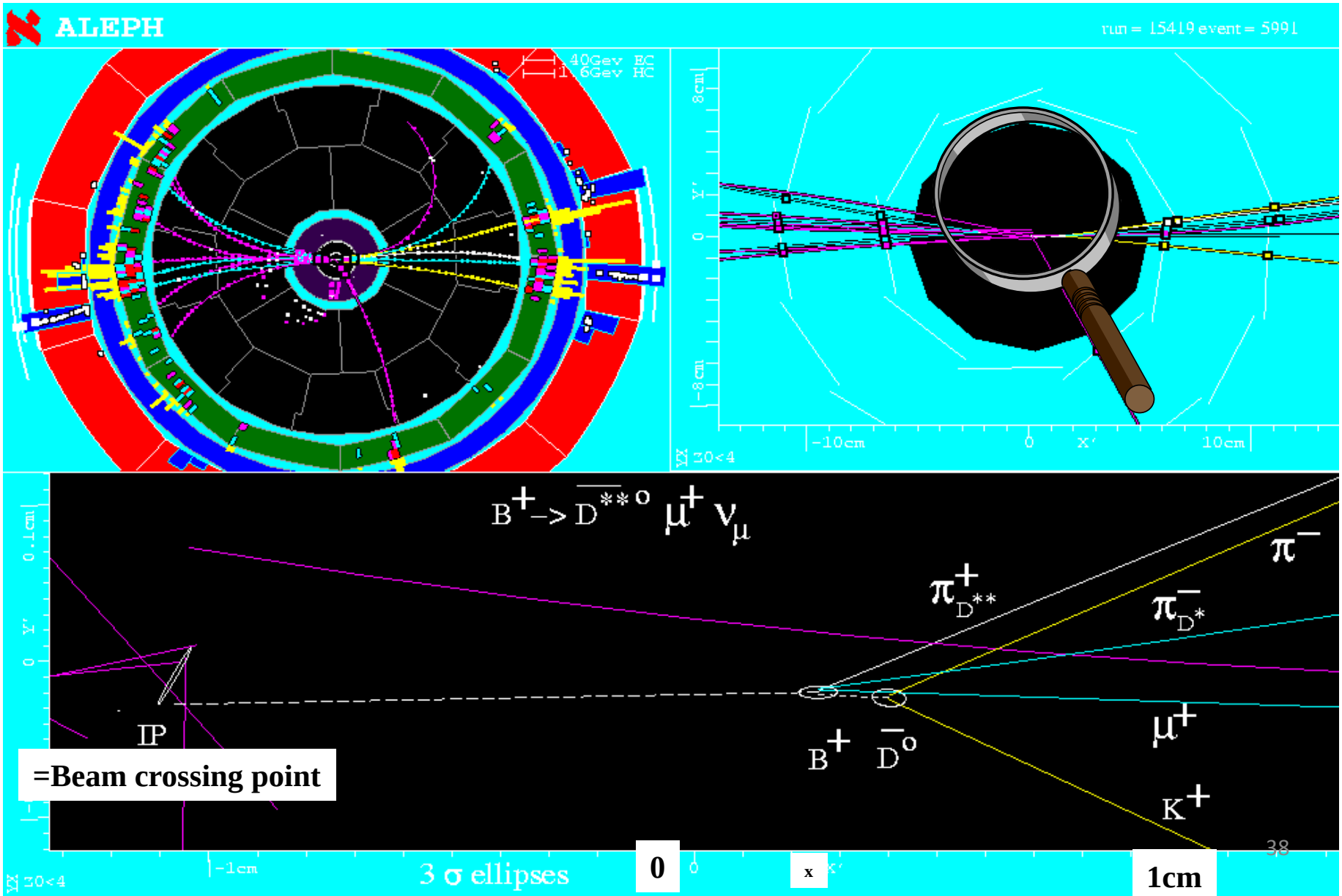
Reconstructed B-mesons in the DELPHI micro vertex detector

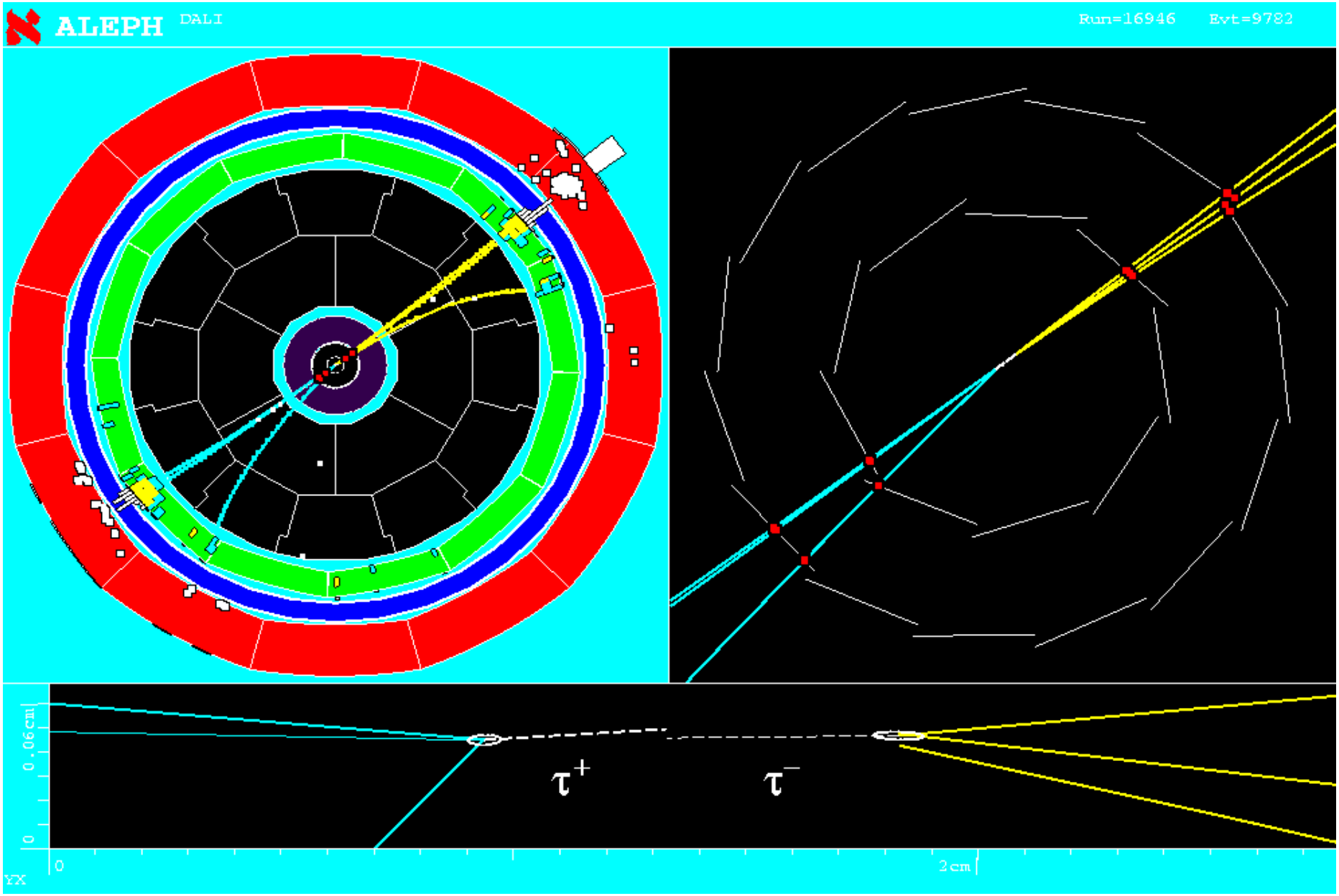
$\tau_B \approx 1.6$ ps $l = c\tau\gamma \approx 500\ \mu m \cdot \gamma$



~3 mm
=
~1ps
=
τ_b

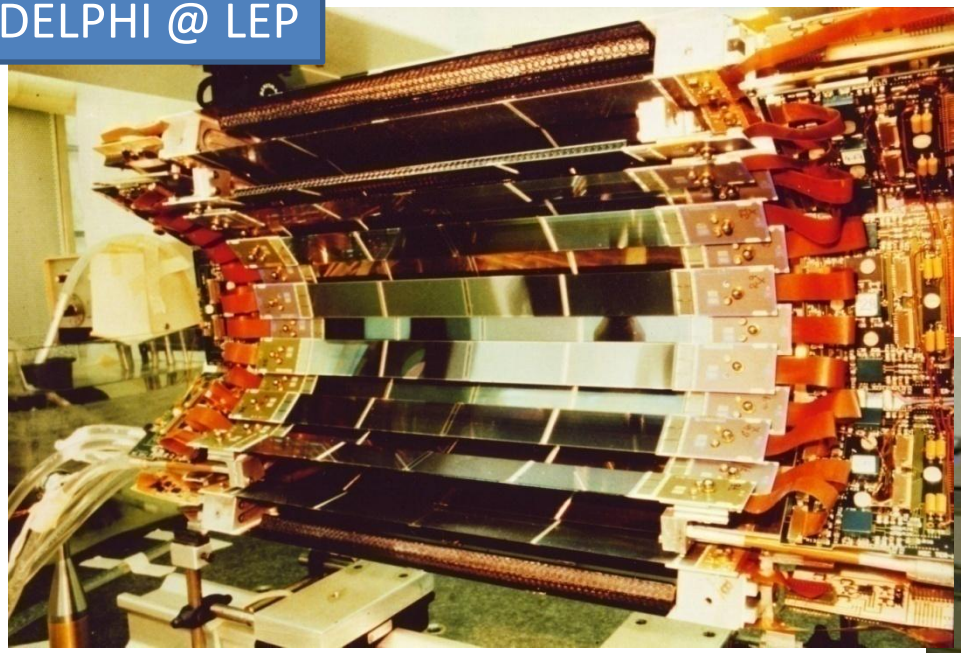
Increase in precision

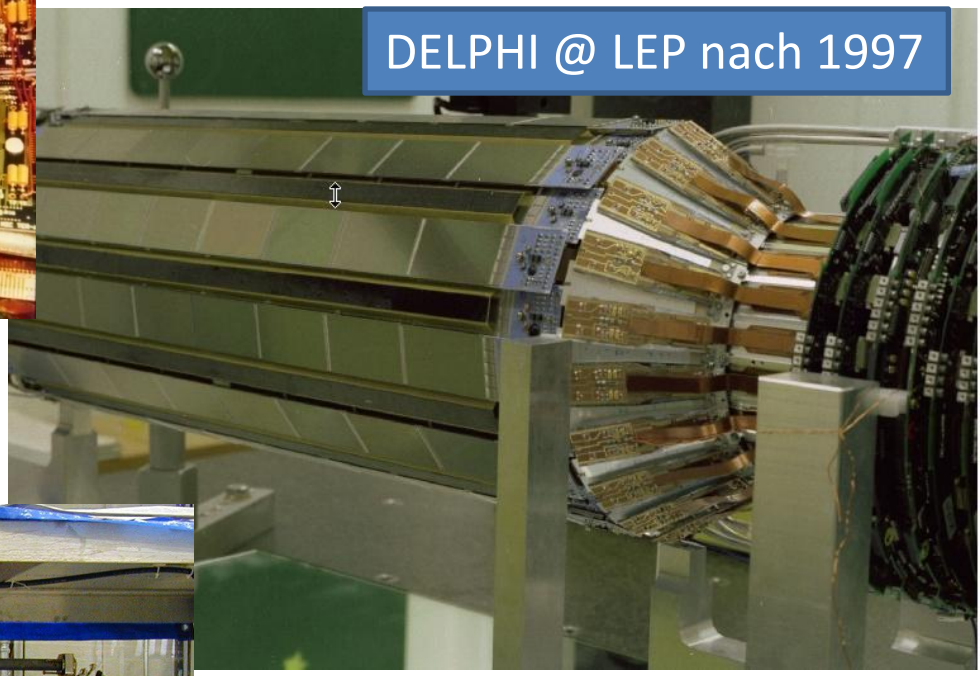




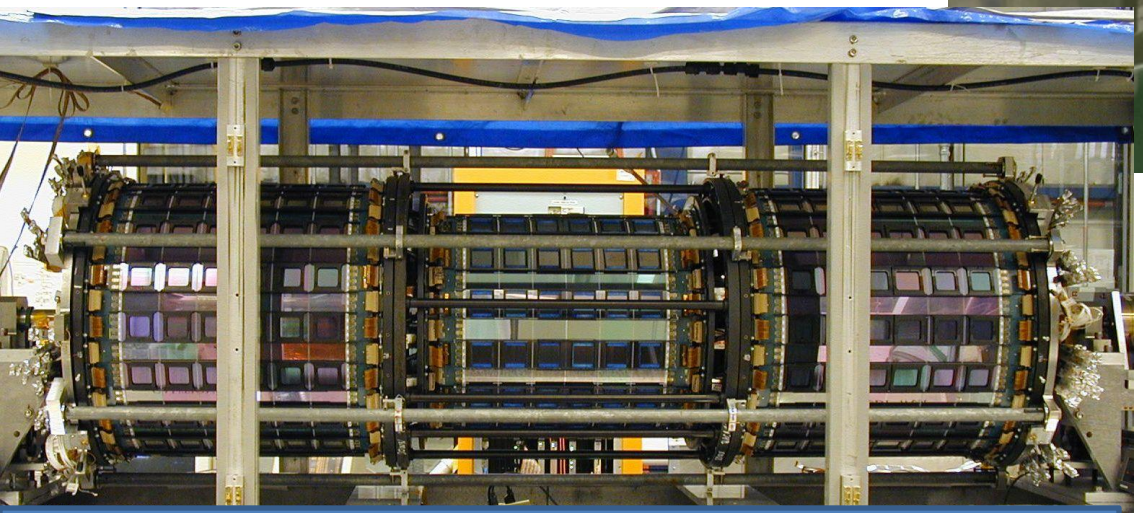
Mean Lifetime of tau τ=290 x 10^{-15} sec !! --> $c\tau$ = 87 μm !?

DELPHI @ LEP



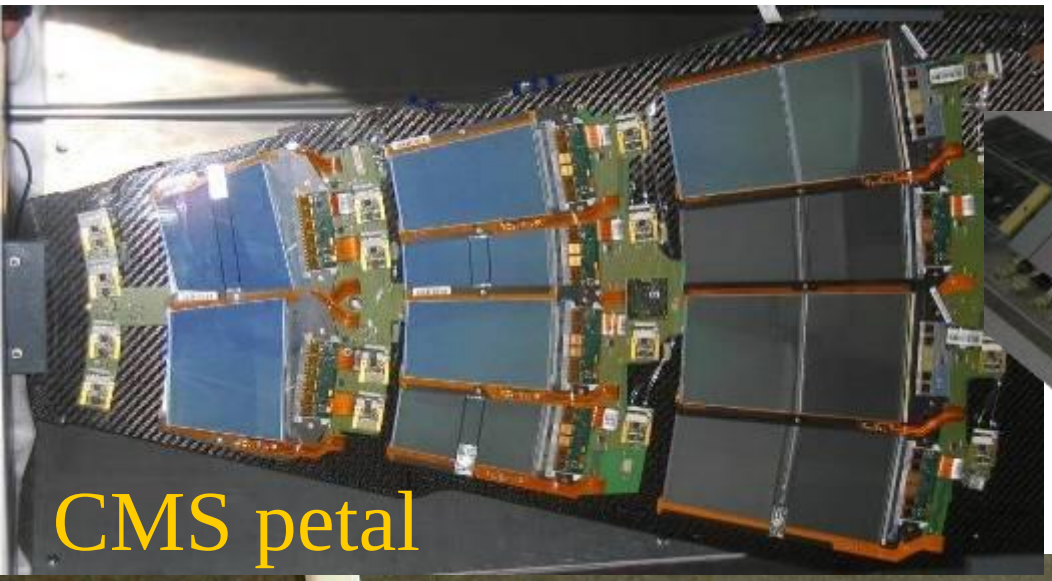


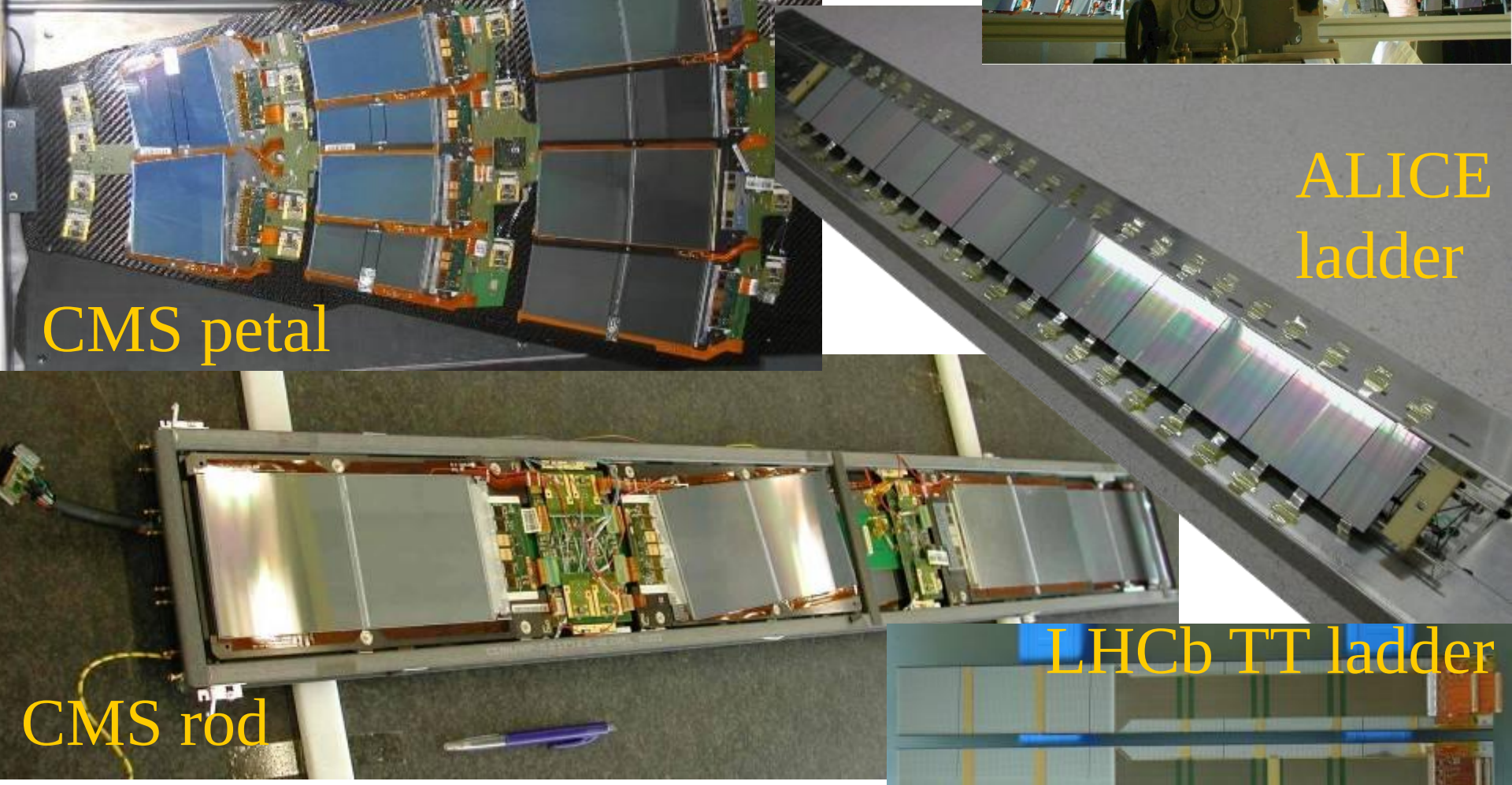
DELPHI @ LEP nach 1997



CDF @ Fermilab in Chicago (nimmt aktuell Daten)

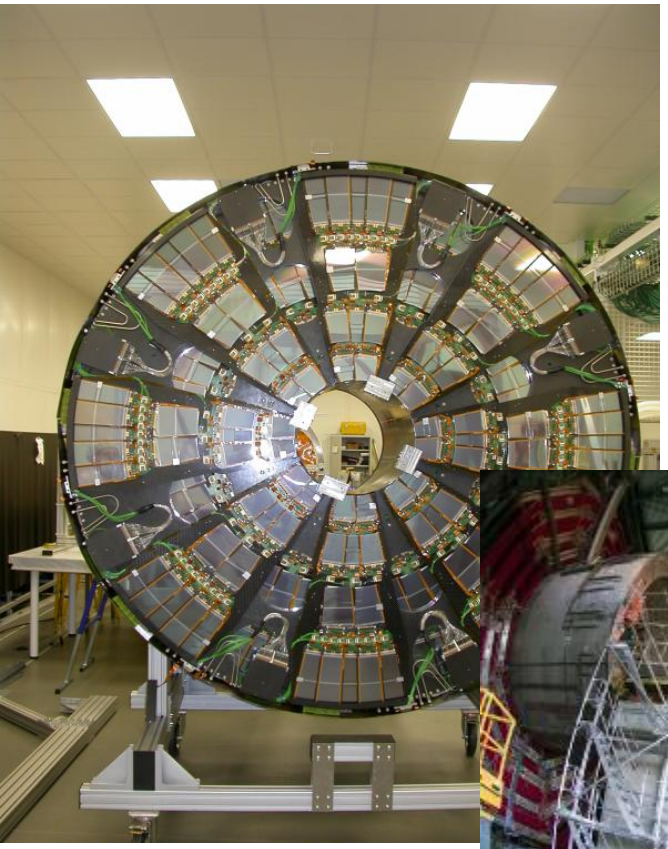
Blütenblätter & Stäbe & Leitern & Halbschalen: Wer baut denn so was?

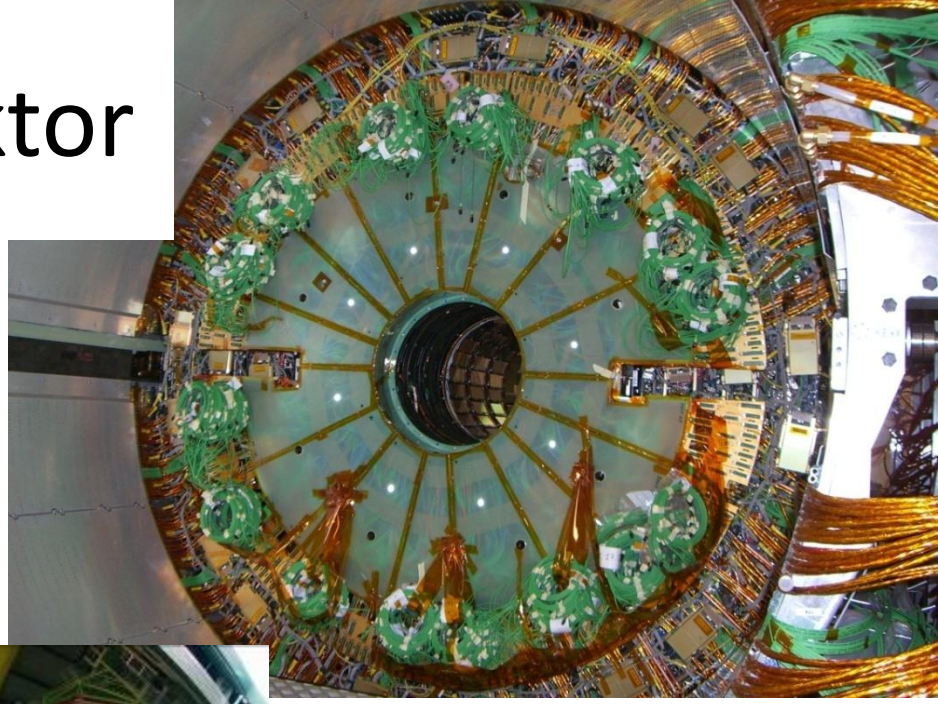


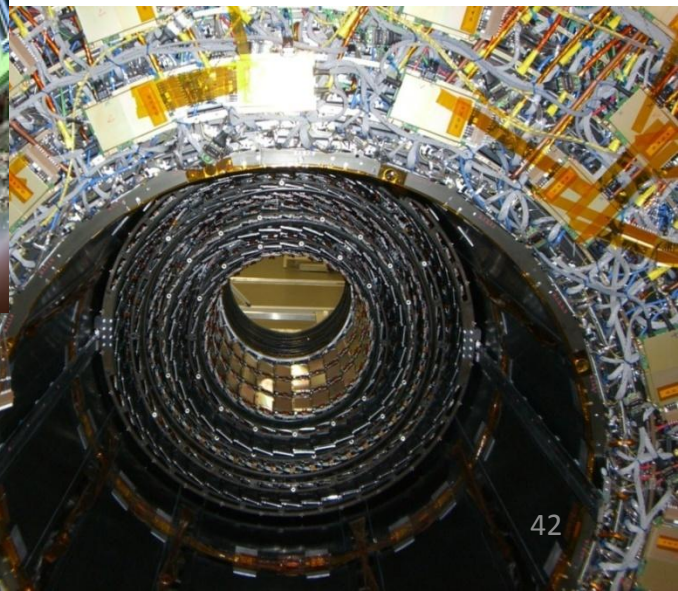


Bis zu 14 Sensoren pro Leiter(4 Sensoren pro Hybrid)

Der CMS Spurendetektor

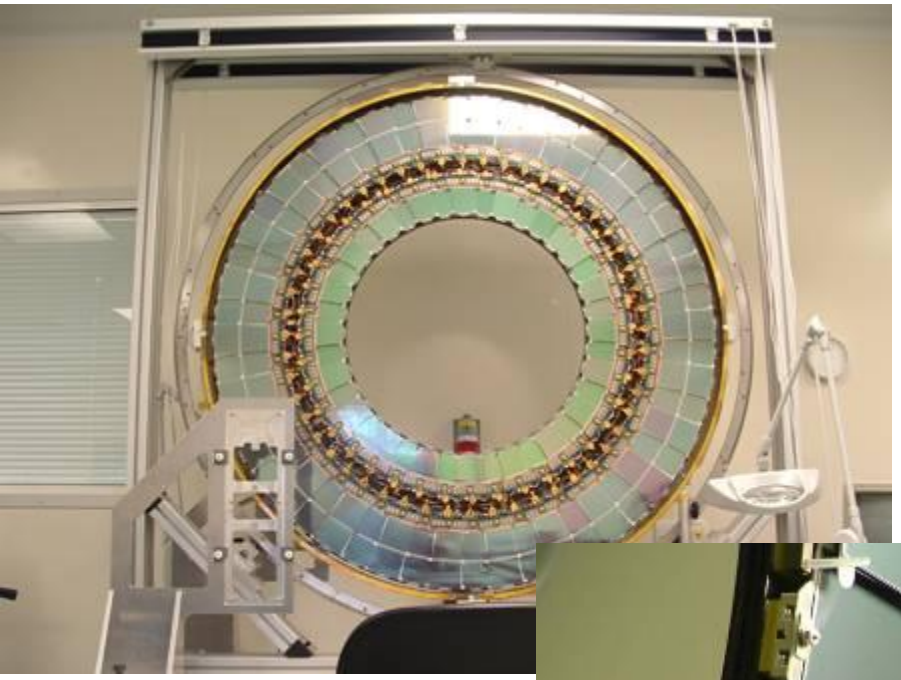


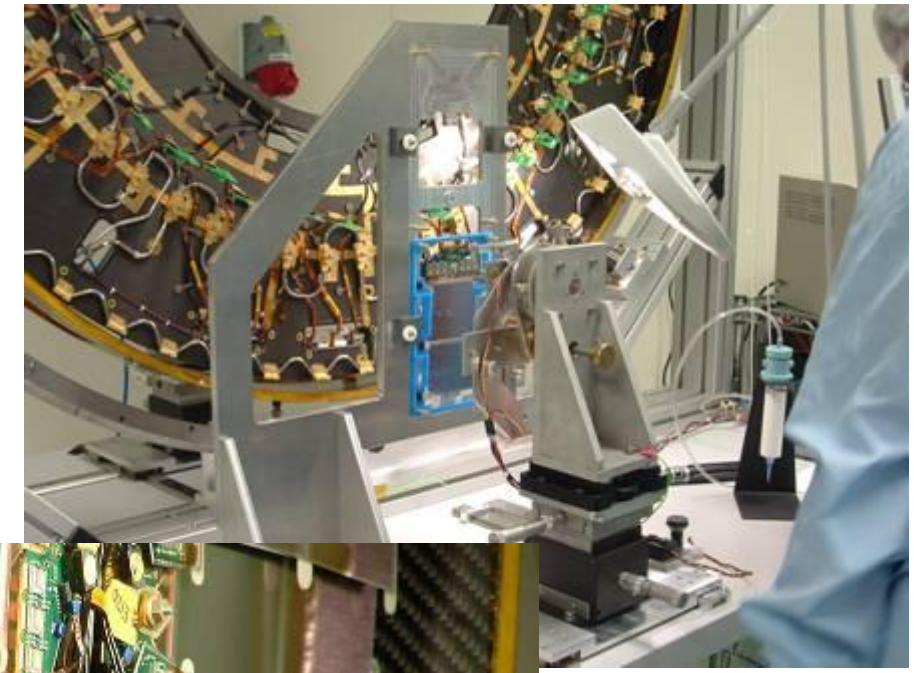


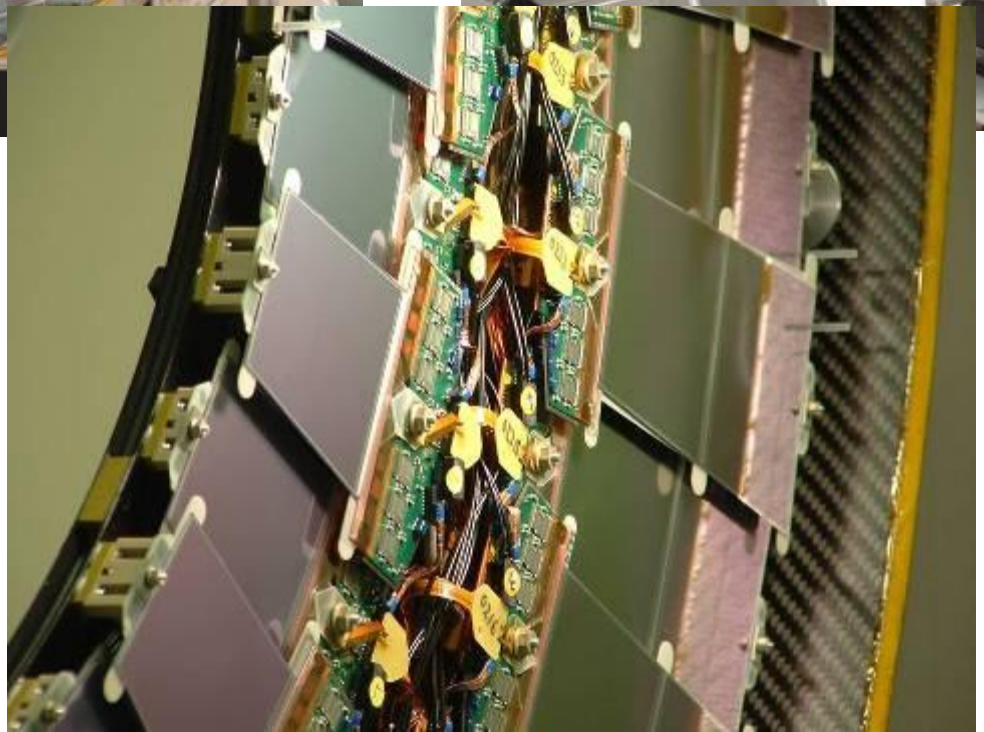


206 m² Fläche
25.000 Siliziumsensoren
10Mio Streifen ≡ Elektronische Kanäle
75.376 Auslesechips
26.000.000 Bonds
37.000 Analog optische Links
3.000 km optische Fibern

ATLAS Endkappe





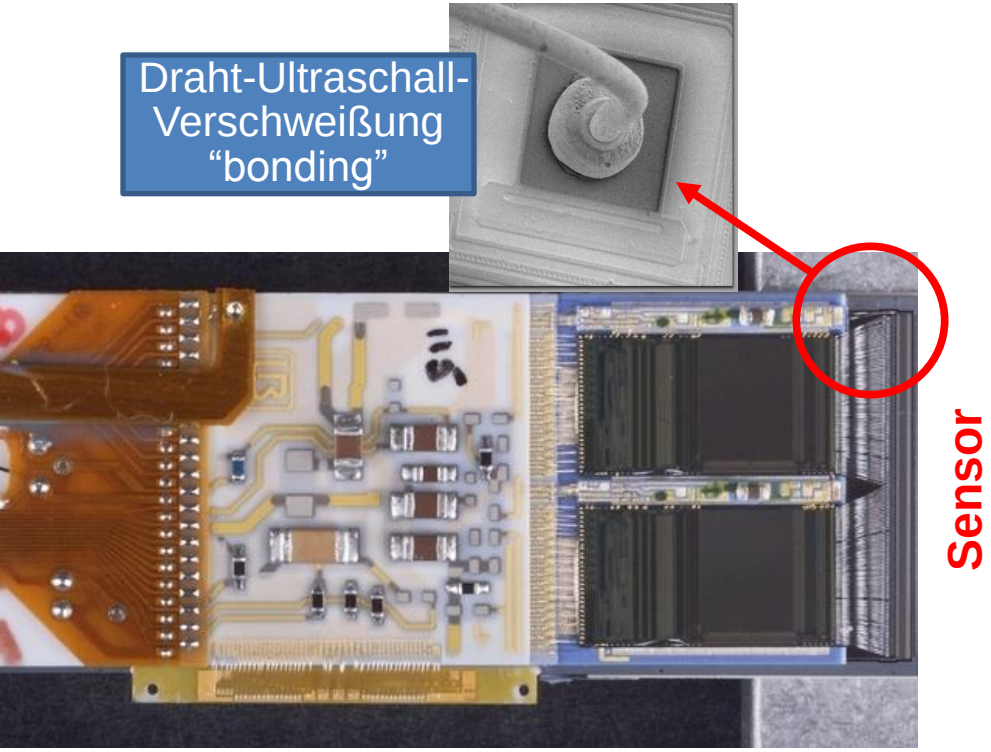


ATLAS Barrel 3

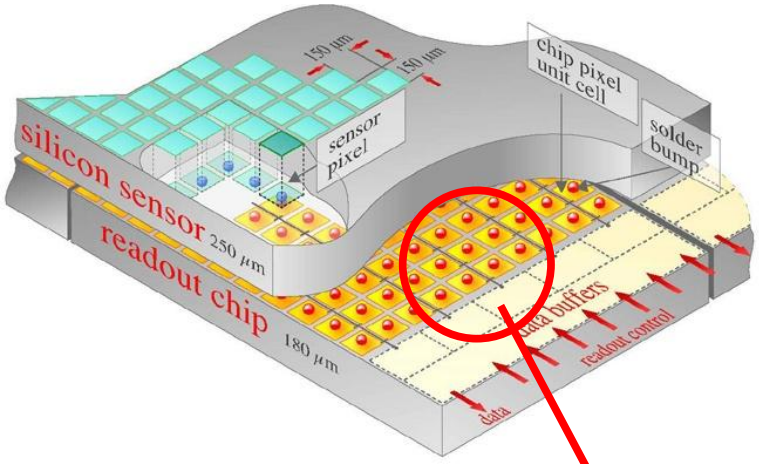
Silizium-Pixel-Sensoren

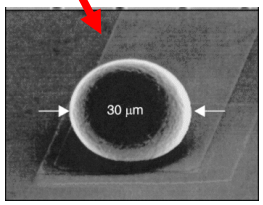
- Funktionsprinzip: siehe Siliziumstreifensensoren
- Segmentierung: Pixel(-dioden) statt Streifen(-dioden)
  - Elektronik aufgesetzt, um alle Pixel zu erreichen

Draht-Ultraschall-Verschweißung “bonding”



Streifen: Nur eine Koordinate,
Pixel sind 2D Detektoren



“bump” bonding

Kanäle: ~10^8 - 10^9