

# Detektoren zur Teilchenidentifikation

Melanie Heil, EKP  
GK workshop Dezember 2012

# *Overview*

- **Wechselwirkung von Teilchen mit Materie**
- **Detektortypen**
- **Detektorsysteme**

# Overview

## → Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Photonen

leichte Teilchen ( $e^{+/-}$ )

geladenen Teilchen

Hadronen und Ionen

# Wechselwirkungen mit Materie

## ■ Photonen

### ■ Photoeffekt:

$$\sigma \propto Z^5 E_\gamma^{-3.5}$$

Photon wird absorbiert

bei kleinen Energien ( $< 1$  MeV)

### ■ Comptoneffekt:

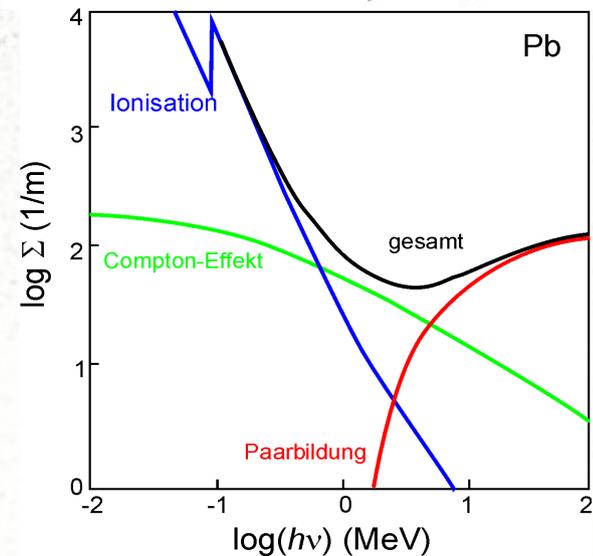
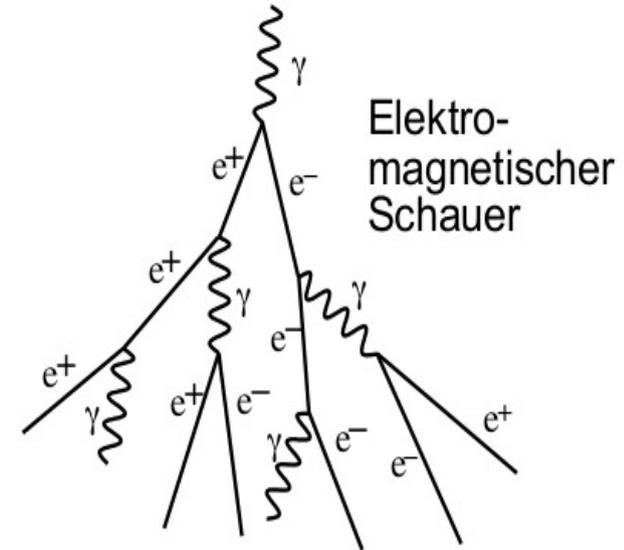
Energieänderung

bei mittleren Energien ( $\approx 1$  MeV)

### ■ Paarbildung

$\gamma$  absorbiert

bei Energien  $> 2m_e c^2$



# Wechselwirkungen mit Materie

## ■ Leichte geladene Teilchen

### ■ wie Photonen

### ■ Bremsstrahlung:

entsteht, wenn geladene Teilchen beschleunigt werden, z.B. bei der Passage eines Magnetfeldes

→ reduziert die gemessene Energie im Primärschauer

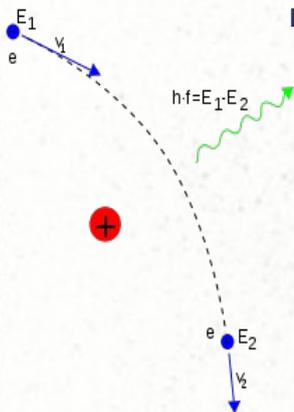
→ kann zusätzliche Schauer im Ecal erzeugen

### ■ Knock-off Elektronen

herausgeschlagen von Elektronen aus dem Material

→ zusätzliche Signale im Detektor nahe der Teilchenspur

→ verschlechtert die Ortsauflösung



# *Wechselwirkungen mit Materie*

- **Geladene Teilchen**

  - **elektromagnetische Wechselwirkungen**

  - **Ionisation und Anregung**

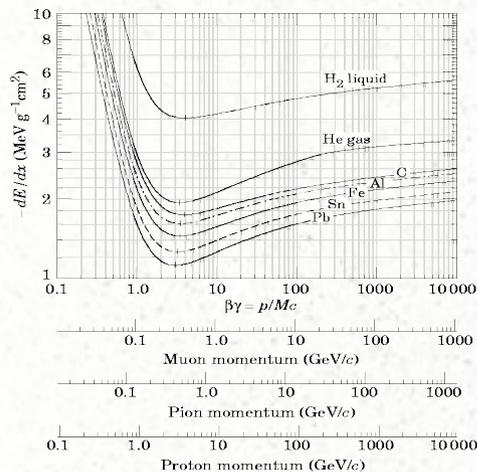
  - **Cherenkov-Strahlung**

  - **Übergangsstrahlung**

# Wechselwirkungen mit Materie

## ■ Ionisation und Anregung

Energieverlust nach Bethe-Bloch:

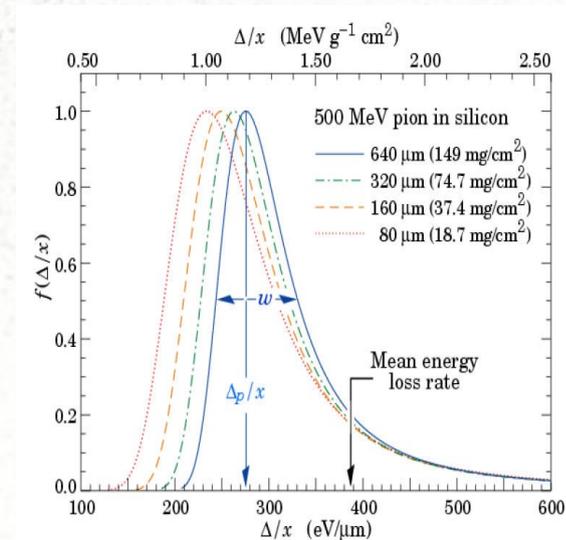


$$\frac{-dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2}{m_e c^2 \beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1-\beta^2)}\right) - \beta^2\right]$$

Energieverlust fluktuiert statistisch:

→ Landau Verteilung

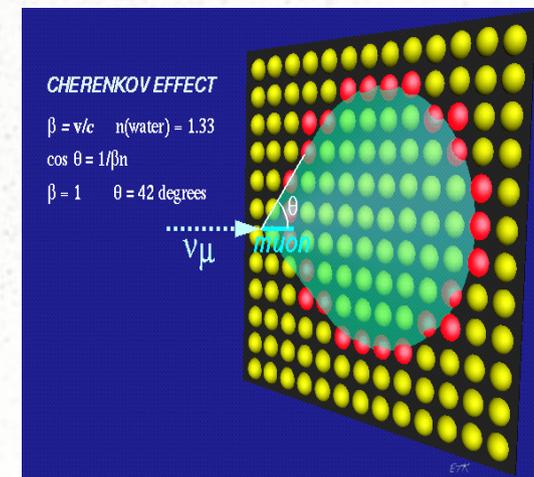
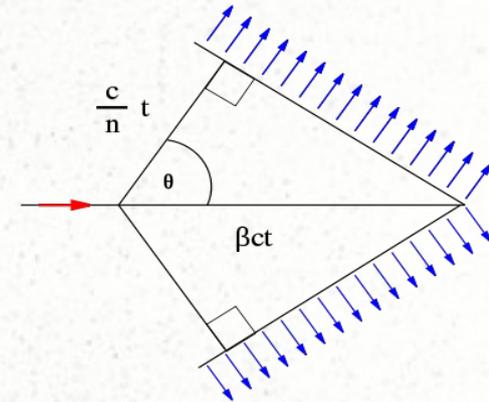
$$P(x) = \frac{1}{\pi} \int \exp[-t \ln t - xt] \sin(\pi t) dt$$



# Wechselwirkungen mit Materie

## ■ Cherenkov-Strahlung:

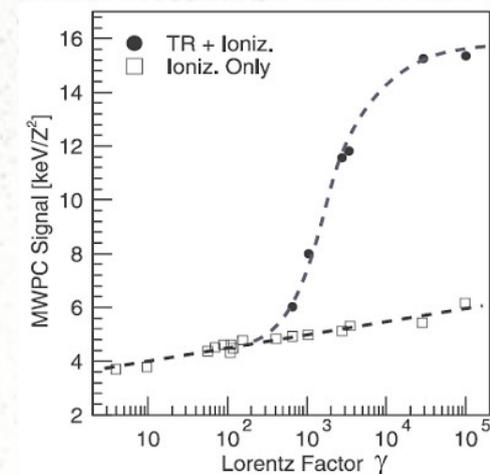
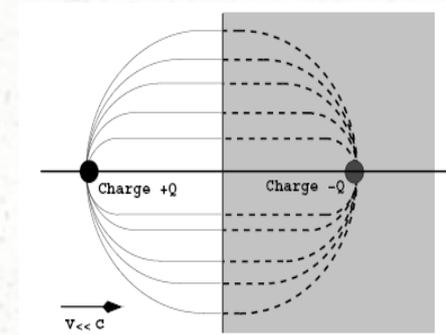
- Entsteht, wenn geladene Teilchen in nicht-leitender Materie höhere Geschwindigkeit haben als Licht in diesem Medium
- Die Moleküle des Materials werden angeregt und gehen durch Emission von konstruktiv interferierender Strahlung in den Grundzustand zurück
- Öffnungswinkel des Lichtkegels:  
 $\cos(\theta) = 1/n\beta$
- Intensität der Strahlung abhaengig von der Ladung der Teilchen
- In periodischen Medien auch für niedrigere Geschwindigkeiten erreichbar (Smith-Purcell Effekt)



# Wechselwirkungen mit Materie

## ■ Übergangsstrahlung

- entsteht, wenn ein geladenes Teilchen den Übergang zwischen zwei Medien mit unterschiedlicher Dielektrizitätskonstanten passiert
- Entsteht durch Veränderung des Dipol zwischen Teilchen und Spiegelladung
- Emittierte Strahlung liegt typischerweise im Bereich von 5-15 keV
- Maximum der Emission unter  $\theta=1/\gamma$   
→ in Vorwärtsrichtung fuer hochenergetische Teilchen
- Für Intensität gilt: 
$$I = \frac{\gamma q^2 (\omega_1 - \omega_2)}{3c}$$



# Wechselwirkungen mit Materie

- **Hadronen und Kerne**

→ **starke Wechselwirkung**

- Hadronische Schauer:

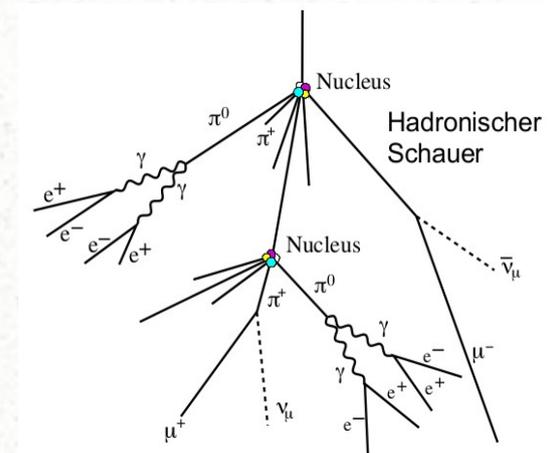
90% Pionen, davon 1/3  $\Pi^0$

$\Pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  : elektromagnetischer Subschauer

- Kernreaktionen:

1/3 der Energie geht in Bindungsenergie für Nukleonen

→ Signal für Hadronen kleiner als für Elektronen gleicher Energie



# Overview

## → Detektortypen

Spurkammern

Kalorimeter

Flugzeitdetektoren

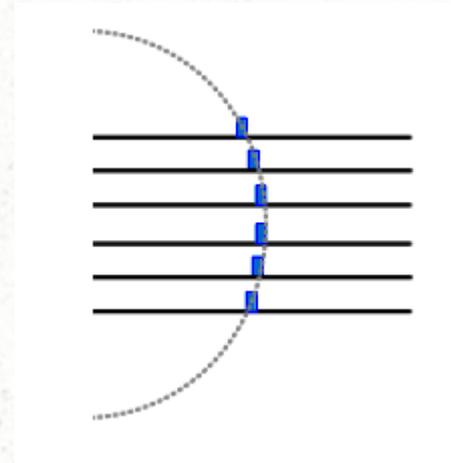
Cherenkov-Detektoren

Übergangsstrahlungsdetektoren

# Detektoren

Spurkammern:

- Driftkammern
- Halbleiterdetektoren



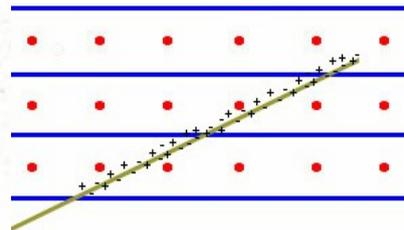
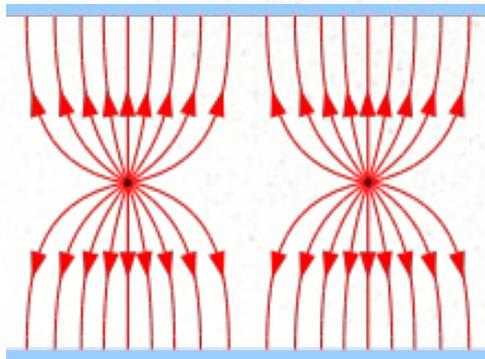
Messen Punkte entlang des Teilchendurchgangs in einem Magnetfeld

- Rekonstruktion der Bahkrümmung  $r$
- Bestimmung der Rigidität  $R=p/Q=Br$
- Ladungsvorzeichen aus Lorentzkraft:  $\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B})$

# Detektoren

## Driftkammern:

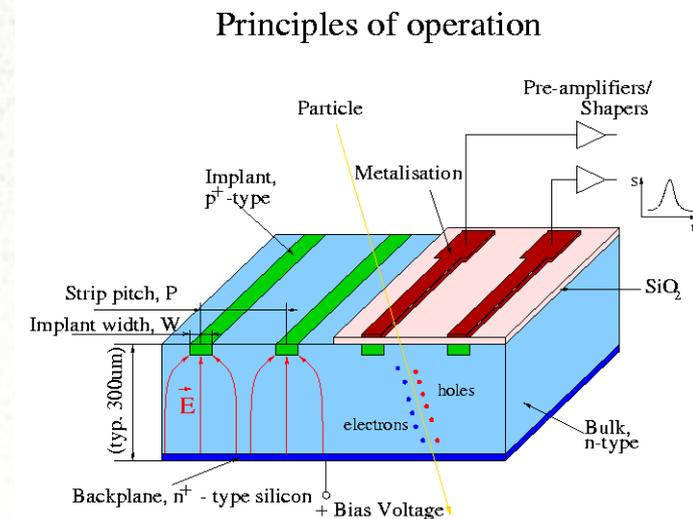
- Gasgefüllte Kammern/Röhrchen mit Draht → Hochspannung zwischen Draht und “Wand”
- Geladene Teilchen ionisieren das Gas, Elektronen und Ionen werden zu entsprechender Elektrode beschleunigt und dort als Spannungsabfall nachgewiesen
- + wenig Material → weniger WW, kostengünstig
- - Ortsauflösung ( $> 200 \mu\text{m}$ )



# Detektoren

## Halbleiterdetektoren:

- Dotierte Halbleiterdioden (Si, Ge, GaAs, ...) werden bei voller Depletionsspannung betrieben
- Geladene Teilchen erzeugen Elektron-Loch-Paare die zu entgegengesetzten Spannungspolen driften und dort ein Signal erzeugen
- Bauarten:
  - Pixel:
    - + sehr hohe 2-D Ortsauflösung → Sekundärvertices
    - sehr viele Auslesekanäle (= Elektronik) nötig
  - Streifen:
    - für grossflächige Spurmessung zur Impulsbestimmung
- Genaue Ortsbestimmung durch Schwerpunktmethode  
→ Ortsauflösung  $O(5 \mu\text{m})$



# Detektoren

## Kalorimeter:

- Elektromagnetische Kalorimeter
- Hadronische Kalorimeter

Messen bzw. rekonstruieren die Energie des jeweiligen Teilchen.

- Auflösungsparametrisierung:

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} + b + \frac{c}{E}$$

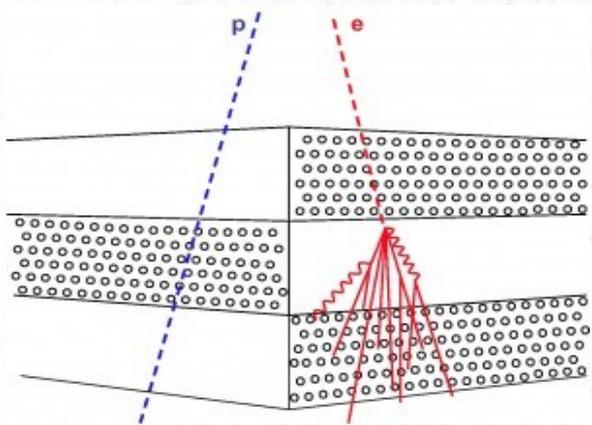
Stochastischer  
Term: Schauer-  
Fluktuationen

“Auslecken”  
von Energie,  
Kalibration

Elektronik-  
Rauschen

# Detektoren

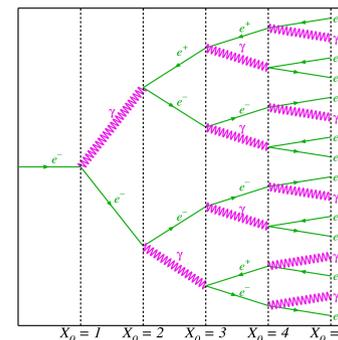
## Elektromagnetische Kalorimeter:



- Homogen: nur ein Material, das mit den Teilchen wechselwirkt und gleichzeitig die Energie misst
- Sampling: abwechselnd Szintillationsmaterial, welches die deponierte Energie misst und Absorber (z.B. Blei)

### Wichtige Größen:

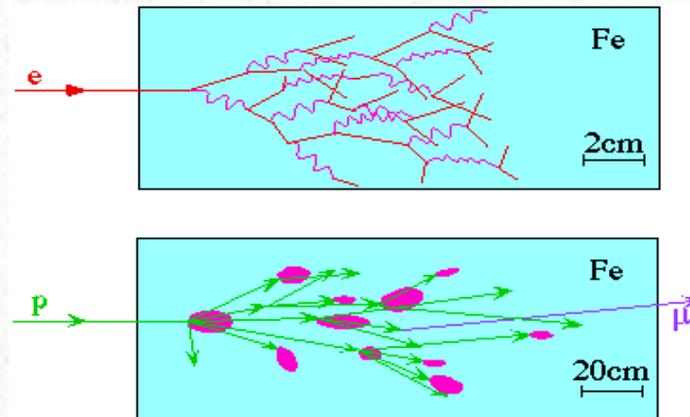
- Hohe Energieauflösung
- Große Anzahl an Strahlungslängen
- Gute Winkelauflösung (Schauerachse, vor allem für Photonen)



# Detektoren

## Hadronisches Kalorimeter:

Eigenschaften:

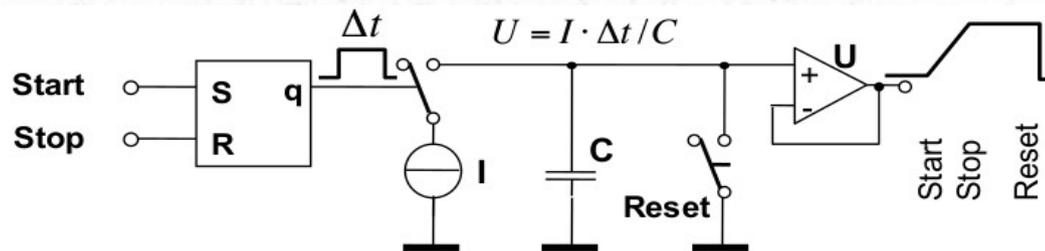


- Große Anzahl an Interaktionslängen ( $\sim 10 \times$  Strahlungslänge)  $\rightarrow$  sehr groß  $\rightarrow$  meist Sampling-Kalorimeter
- Hadronische Schauer fluktuieren statisch stärker  $\rightarrow$ 
  - Schlechtere Energieauflösung
  - Schlechtere Winkelauflösung
- Für  $4\pi$  Detektoren: Ortsauflösung und Energieauflösung wichtig für Definition von fehlender transversaler Energie  $\rightarrow$  Neutrinos

# Detektoren

## Flugzeitdetektoren:

- Besteht aus 2 räumlich separierten Komponenten aus z.B. Szintillator
- Präzise Time-to-digital-Converter messen die Flugzeit der geladenen Teilchen von einem zum anderen Teil → Geschwindigkeitsmessung
- Erreichte Genauigkeit 150 ps →  $\beta < 0.98$



# Detektoren

## Cherenkov-Detektoren:

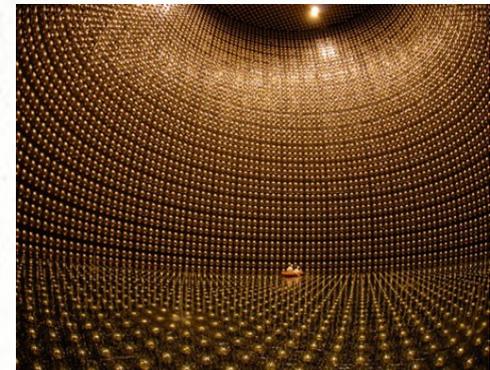
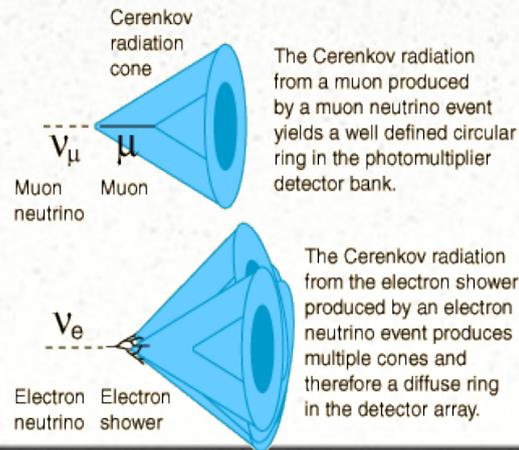
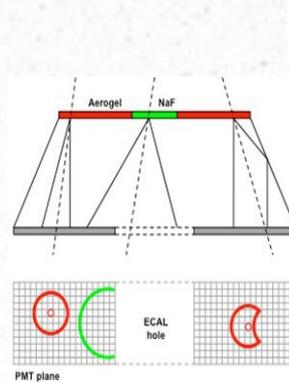
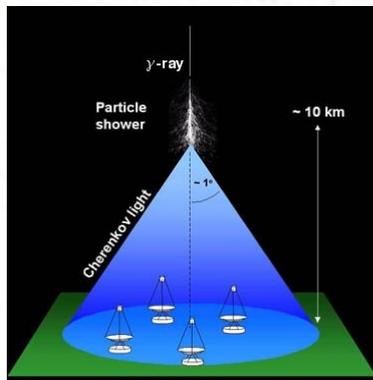
- Schwellendetektoren

Teilchen muss eine Geschwindigkeitsschwelle überschreiten um Strahlung zu erzeugen

- Ring Imaging Cherenkov

Geladene Teilchen erzeugen einen Lichtkegel, die Photonen werden detektiert und durch den Öffnungswinkel des Kreises wird  $\beta$  bestimmt

Sehr wichtig für die Neutrinoophysik → Neutrinooszillationen  
und Astroteilchenphysik → Detektorarrays



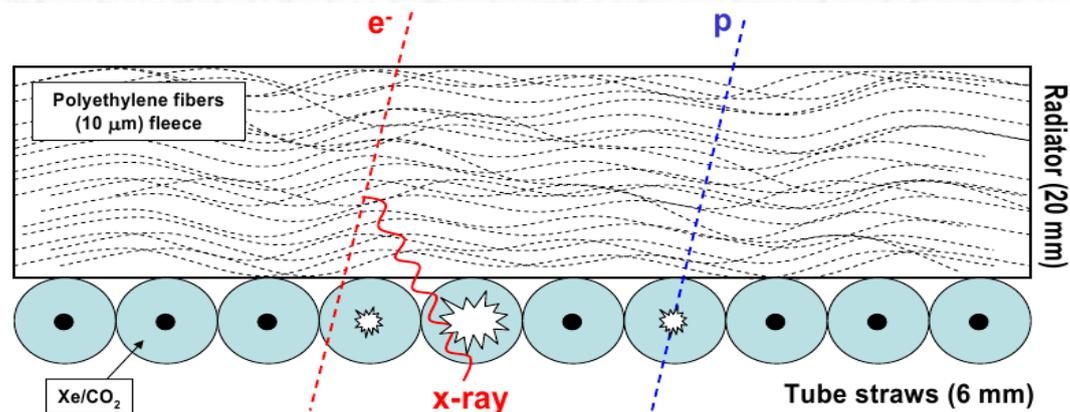
# Detektoren

## Übergangsstrahlungsdetektoren:

- Um die Wahrscheinlichkeit der Emission von Übergangstrahlung zu erhöhen wird Radiatorfleece verwendet
  - $P(\text{Emission pro Übergang}) \sim 0.5\alpha$
  - pro Detektorlage:  $P(\text{Emission+Absorption}) \sim 0.5$
- Proportionalkammern gefüllt mit Xe/CO<sub>2</sub> Gemisch:

Xe: gute Absorption von X-Strahlen (80%-90%)

CO<sub>2</sub>: "löscht" Ladungslawine (10%-20%)



# Overview

## → Detektorsysteme

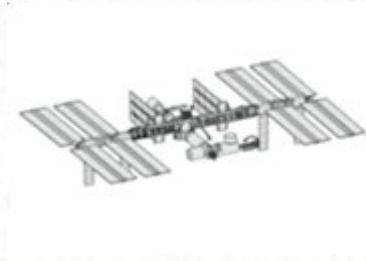
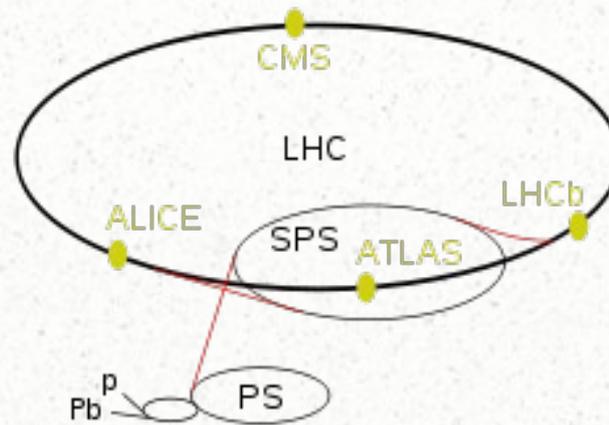
CMS

ATLAS

LHCb

ALICE

AMS



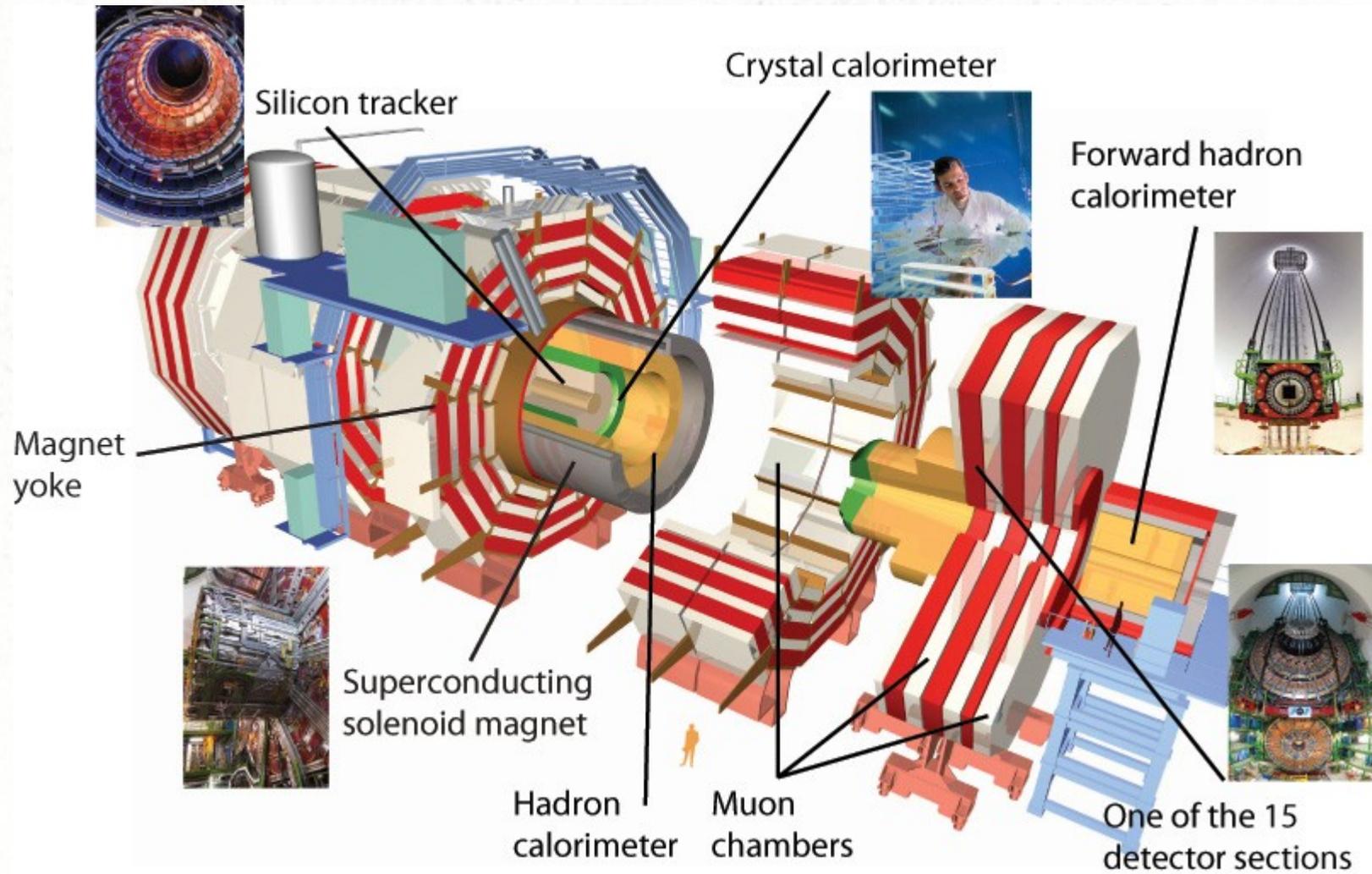
# Detektorsysteme

## Compact Muon Solenoid:

- Tracker
    - Pixelsensoren
    - Streifensensoren
  - Kalorimeter:
    - Homogenes Kristall-ECal
    - Szintillator/Messing HCal
  - Myonkammer
- Multi purpose detector

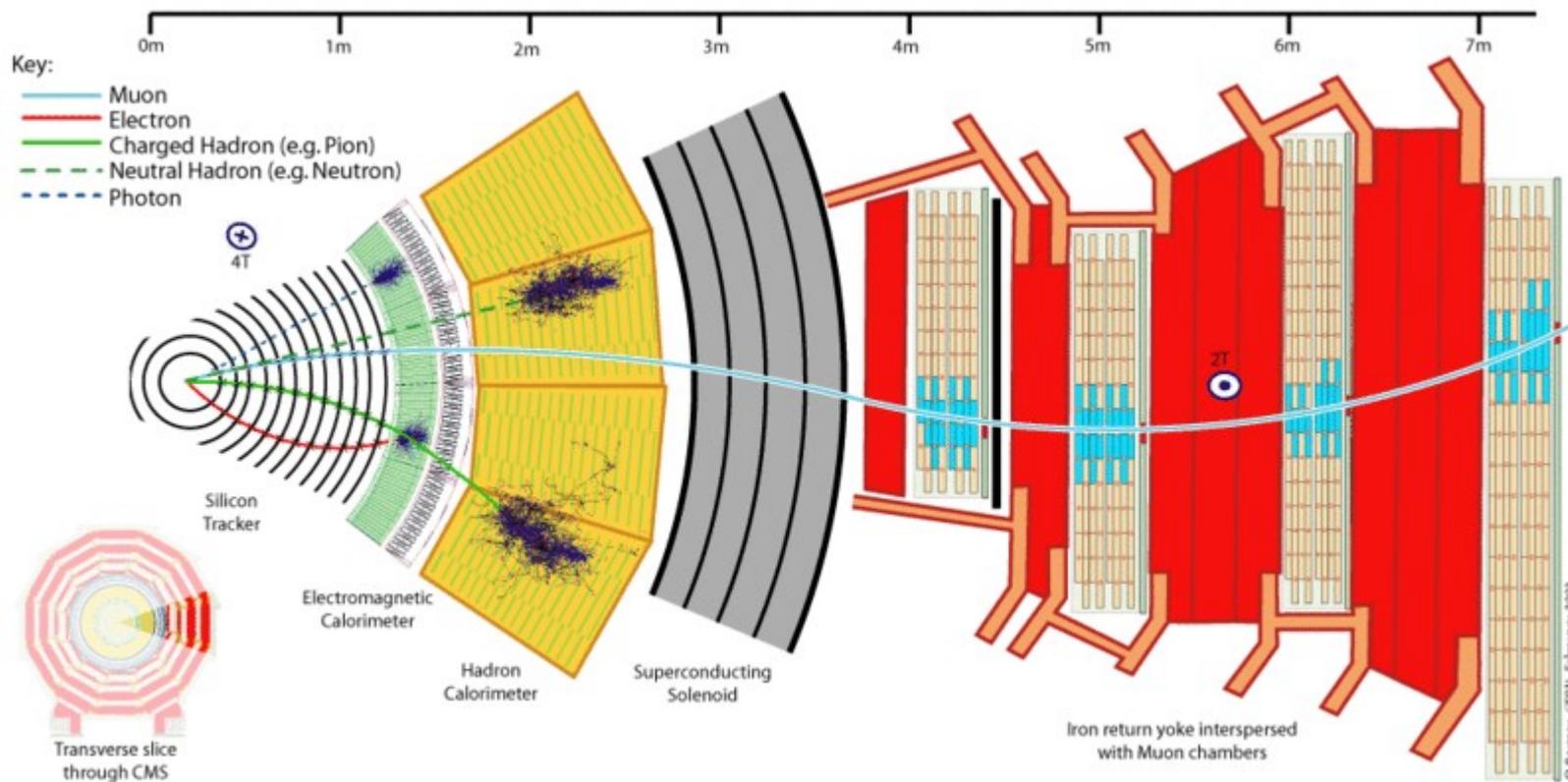


# Detektorsysteme



# Detektorsysteme

CMS:



# *Detektorsysteme*

## ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus):

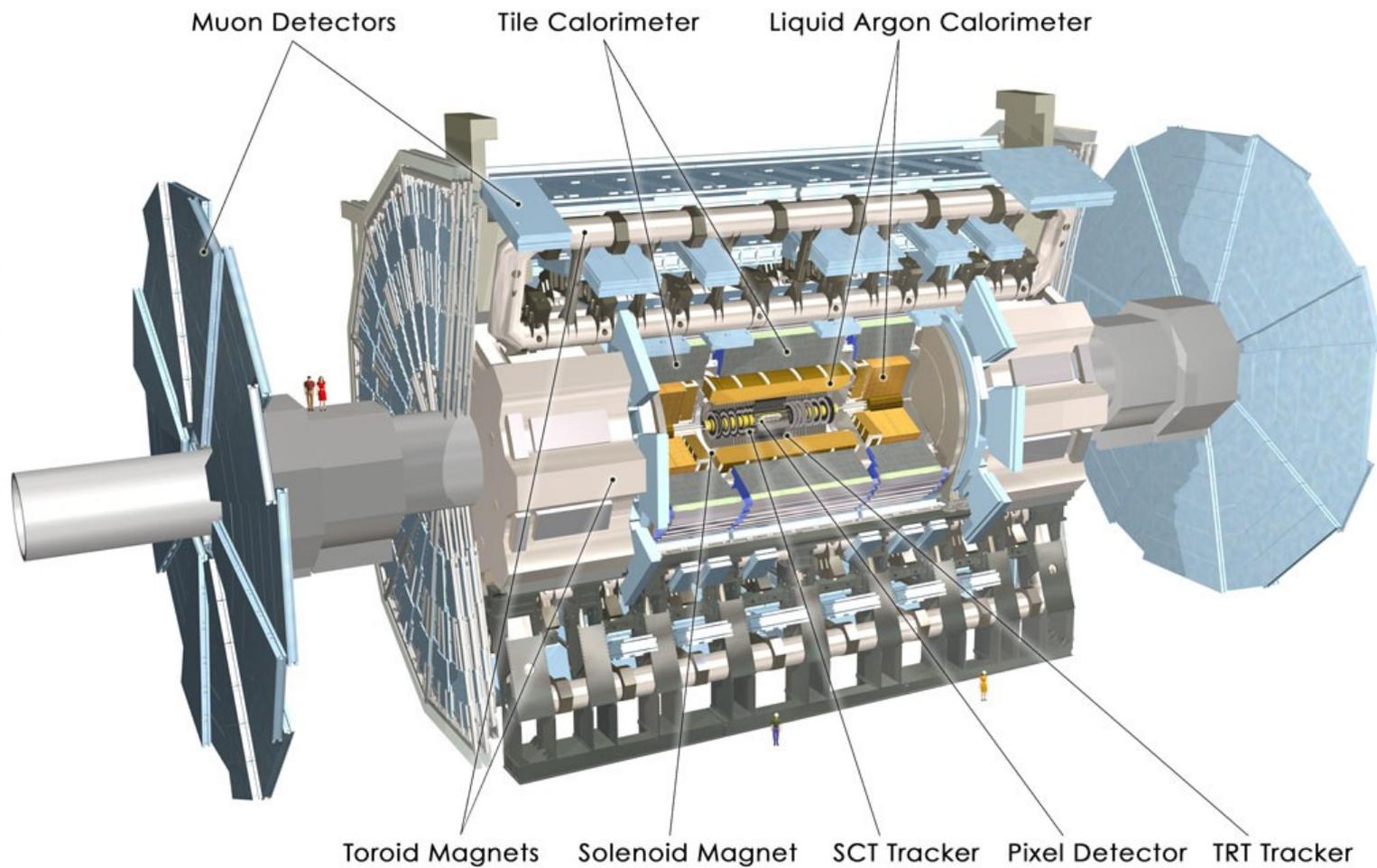
- Tracking system
  - Pixel Detektor
  - Halbleiterdetektor
  - Übergangsstrahlungsdetektor
- Kalorimeter
  - Flüssigargon/Blei Sampling-ECAL
  - Szintillator/Messing HCAL
- Myonspektrometer

→



# Detektorsysteme

ATLAS:



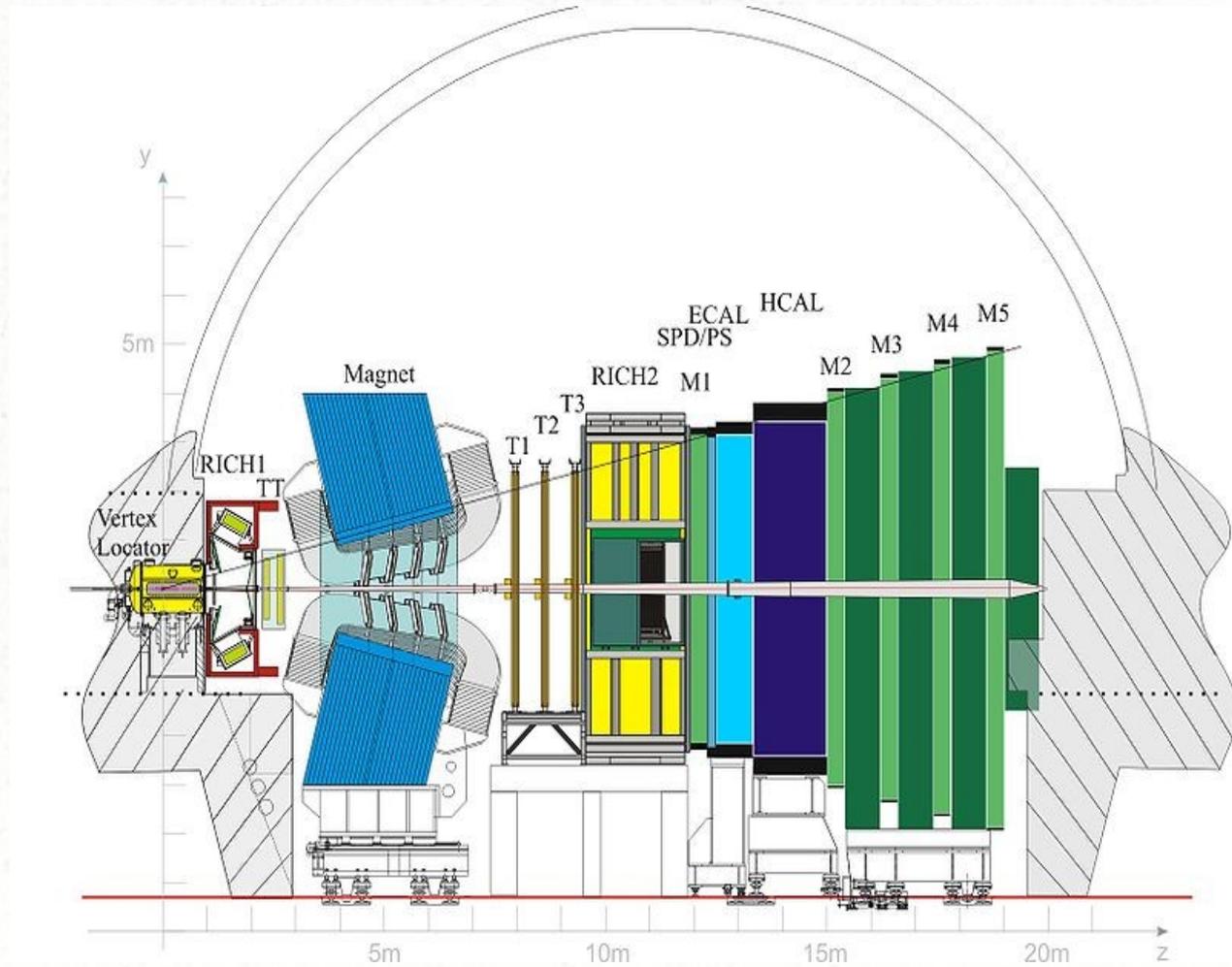
# *Detektorsysteme*

- LHCb: Large Hadron Collider beauty
  - VErtext LOcator
  - RICH
  - Silicon Tracker
  - Kalorimeter system:
    - Elektomagnetsiches Sampling Kalorimeter
    - Hadronisches Sampling Kalorimeter
  - Myon Kammern



# Detektorsysteme

- LHCb



# Detektorsysteme

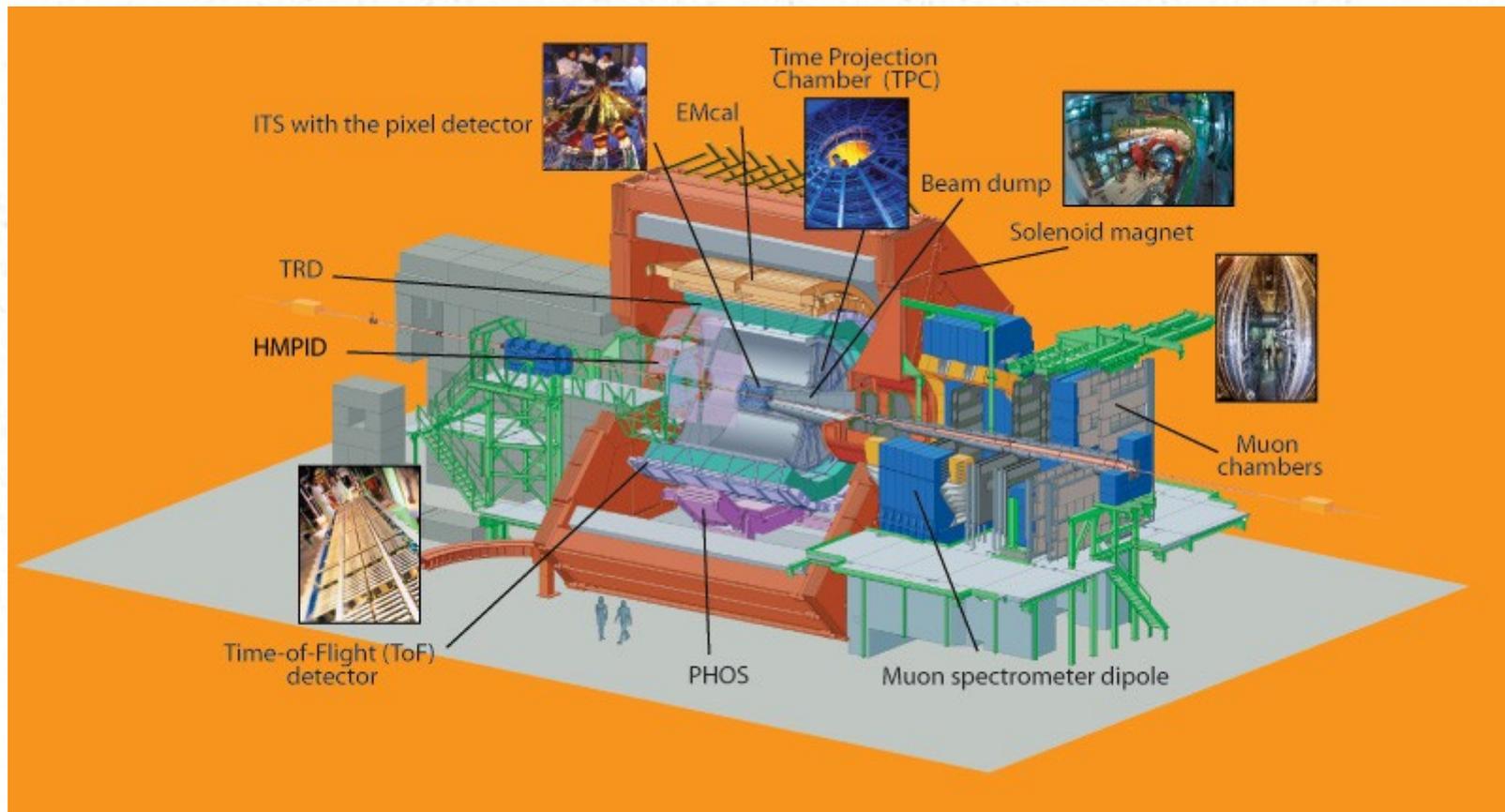
- ALICE: A Large Ion Collider Experiment
  - Zero Degree Calorimeters
  - Forward Multiplicity Detector
  - Inner Tracking System:
    - Silicon Pixel Detector
    - Time Projection Chamber
    - Transition Radiation Detector
  - Time-of-Flight
  - HMPID (RICH's)
  - Dimuon Spektrometer
  - Photon Spektrometer

→ Matter Physics



# Detektorsysteme

- ALICE



# Detektorsysteme

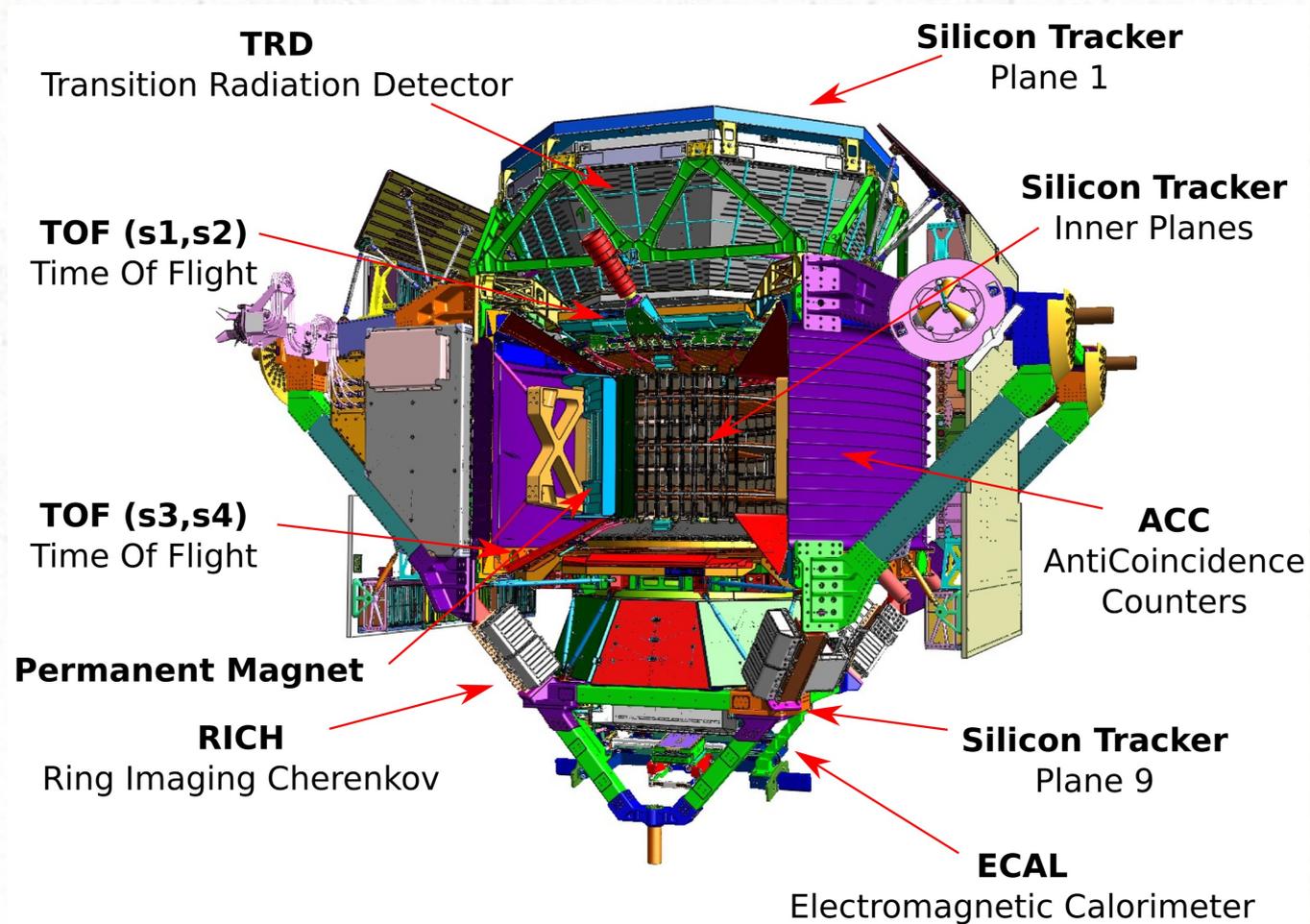
Alpha Magnetic Spectrometer:

- Übergangstrahlungsdetektor
- Flugzeitdetektor
- Tracker
- Ring Imaging Cherenkov-Detektor
- Elektomagnetisches Kalorimeter



# Detektorsysteme

AMS:



# Detektorsysteme

AMS: Teilchenidentifikation

0.3 TeV	$e^-$	$e^+$	P	$\bar{He}$	$\gamma$
TRD					
TOF					
Tracker					
RICH					
Calorimeter					

*The End...*