

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:

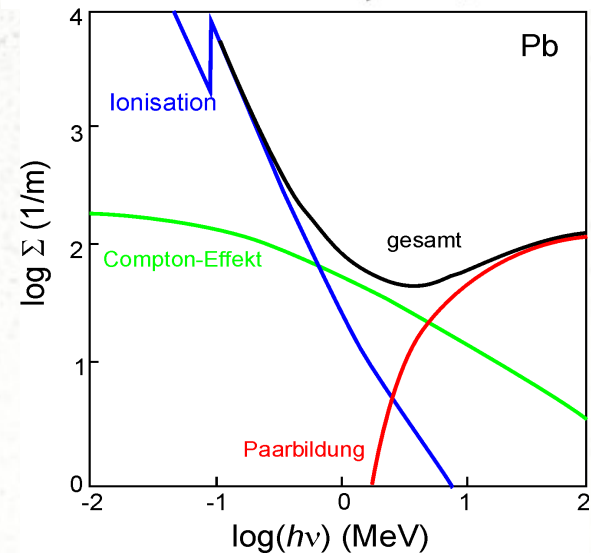
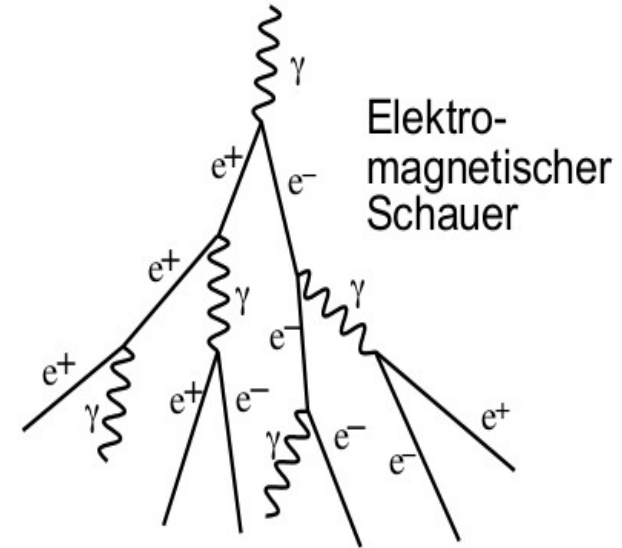
Energieänderung

bei mittleren Energien (≈ 1 MeV)

■ Paarbildung

γ 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

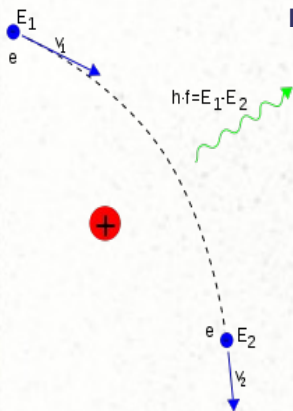
→ kann zusätzliche Schauer im Ecal erzeugen

■ 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**

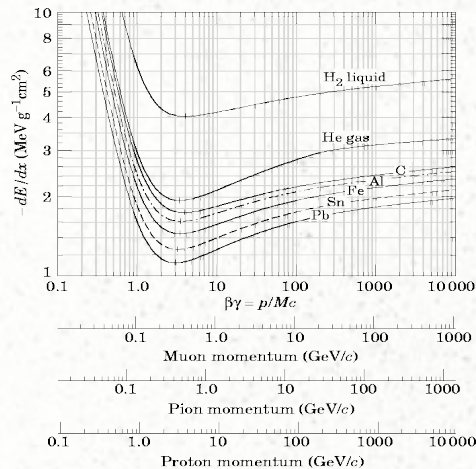
- **Cherenkov-Strahlung**

- **Übergangsstrahlung**

Wechselwirkungen mit Materie

■ Ionisation und Anregung

Energieverlust nach Bethe-Bloch:

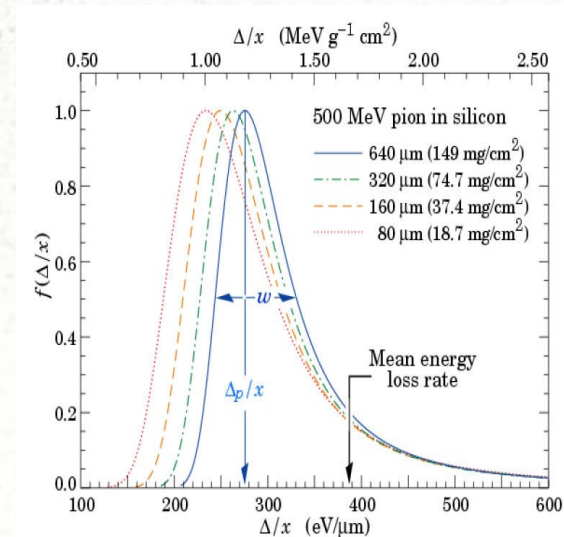


$$\frac{-dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2}{m_e c^2 \beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1-\beta^2)}\right) - \beta^2\right]$$

Energieverlust fluktuiert statistisch:

→ Landau Verteilung

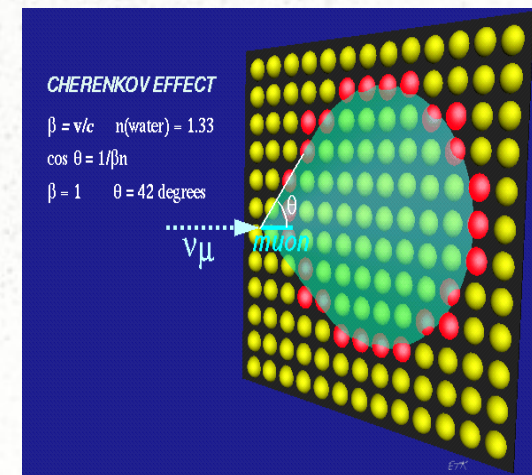
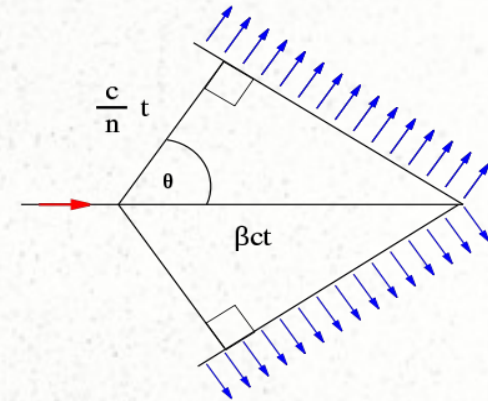
$$P(x) = \frac{1}{\pi} \int \exp[-t \ln t - xt] \sin(\pi t) dt$$



Wechselwirkungen mit Materie

■ Cherenkov-Strahlung:

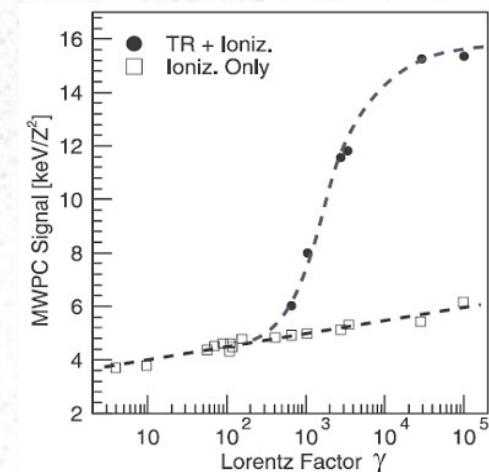
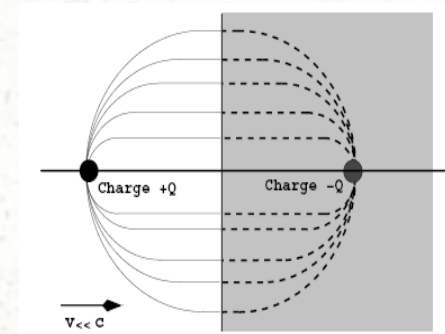
- Entsteht, wenn geladene Teilchen in nicht-leitender Materie höhere Geschwindigkeit haben als Licht in diesem Medium
- Die Moleküle des Materials werden angeregt und gehen durch Emission von konstruktiv interferierender Strahlung in den Grundzustand zurück
- Öffnungswinkel des Lichtkegels:
 $\cos(\theta) = 1/n\beta$
- 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:

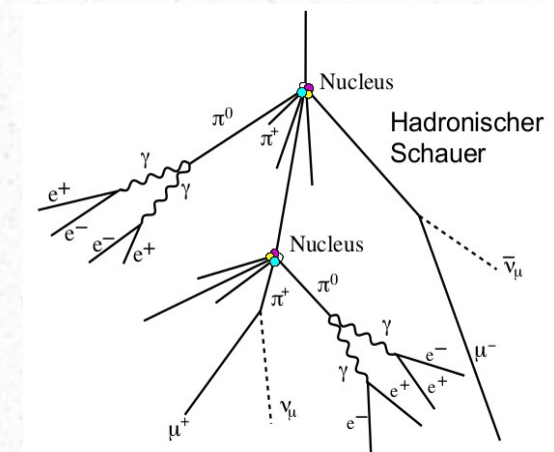
90% Pionen, davon 1/3 Π^0

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

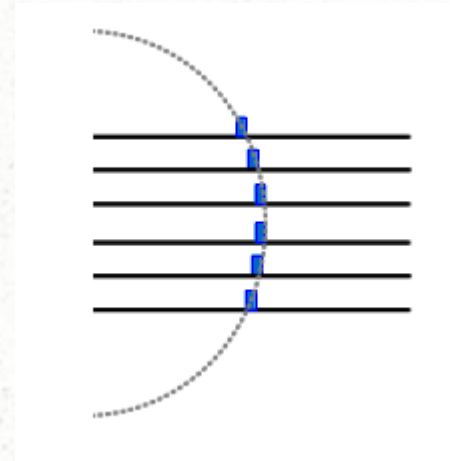
Cherenkov-Detektoren

Übergangsstrahlungsdetektoren

Detektoren

Spurkammern:

- Driftkammern
- Halbleiterdetektoren



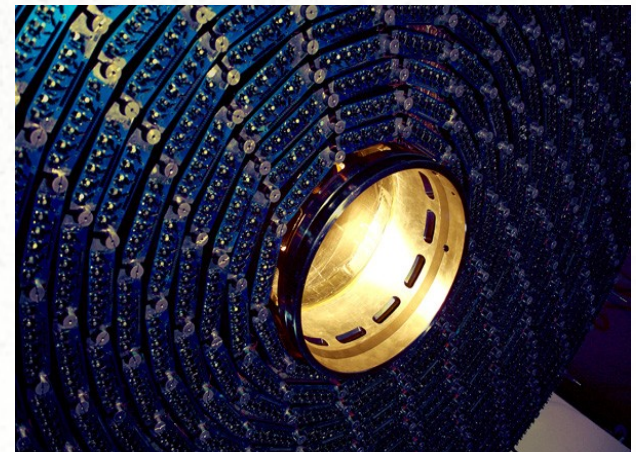
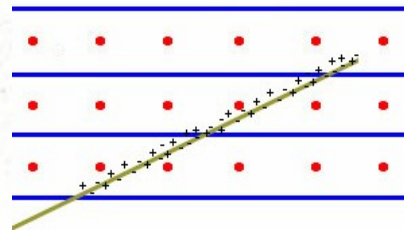
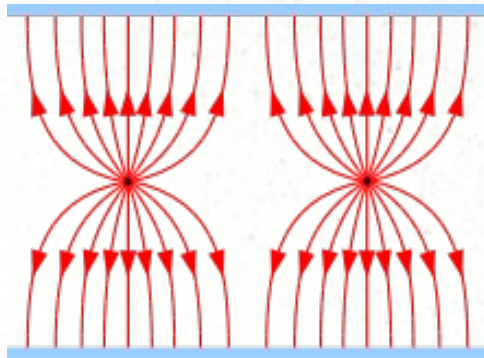
Messen Punkte entlang des Teilchendurchgangs in einem Magnetfeld

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

Detektoren

Driftkammern:

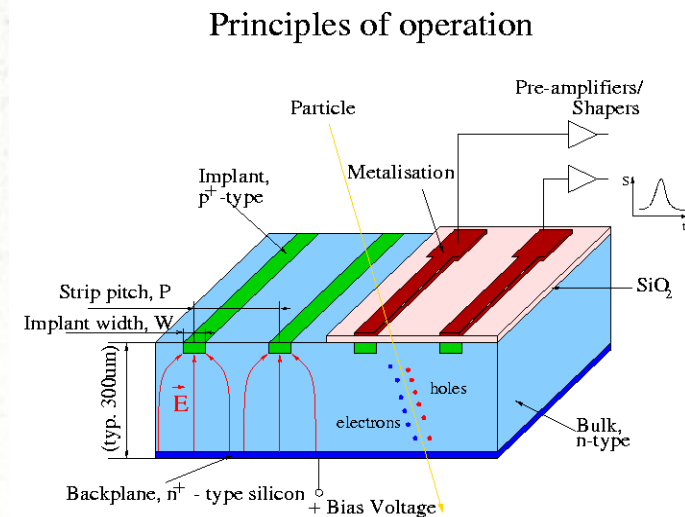
- Gasgefüllte Kammern/Röhrchen mit Draht → Hochspannung zwischen Draht und “Wand”
- Geladene Teilchen ionisieren das Gas, Elektronen und Ionen werden zu entsprechender Elektrode beschleunigt und dort als Spannungsabfall nachgewiesen
- + wenig Material → weniger WW, kostengünstig
- - Ortsauflösung ($>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



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:

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

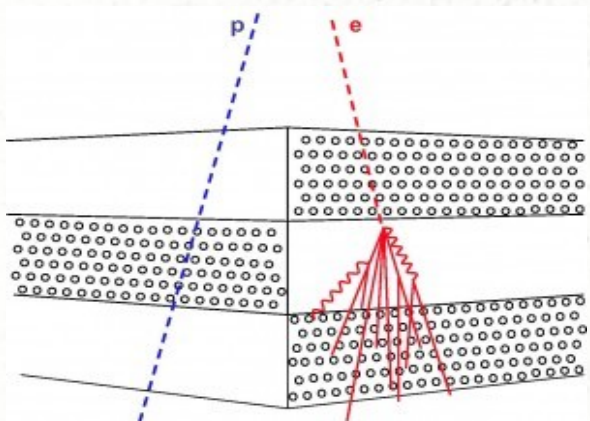
Stochastischer
Term: Schauer-
Fluktuationen

“Auslecken”
von Energie,
Kalibration

Elektronik-
Rauschen

Detektoren

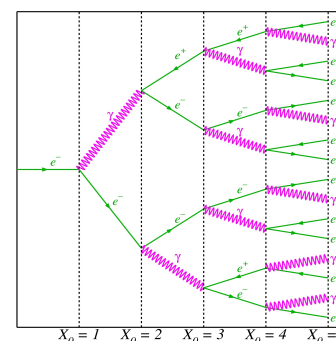
Elektromagnetische Kalorimeter:



- 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:

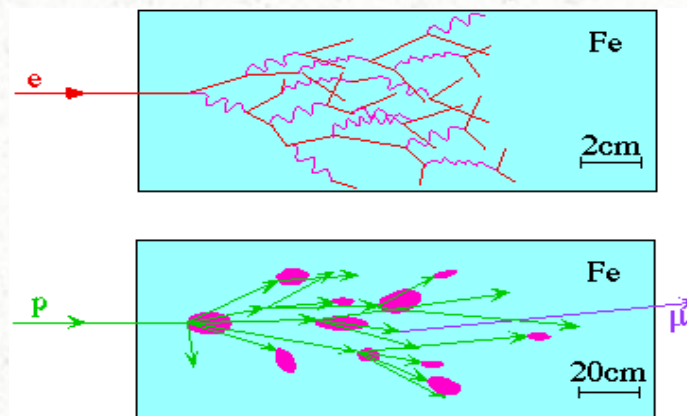
- Hohe Energieauflösung
- Große Anzahl an Strahlungslängen
- Gute Winkelauflösung (Schauerachse, vor allem für Photonen)



Detektoren

Hadronisches Kalorimeter:

Eigenschaften:

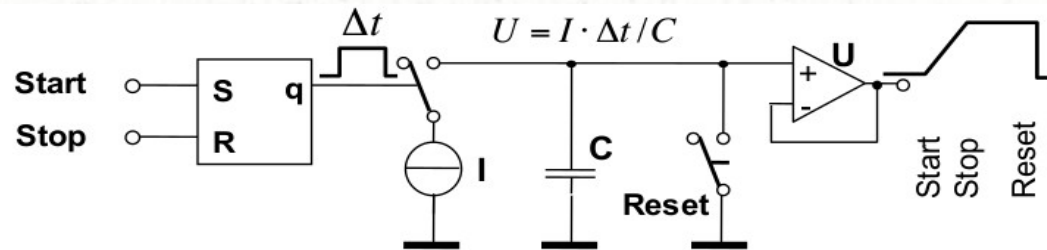


- Große Anzahl an Interaktionslängen ($\sim 10 \times$ Strahlungslänge) \rightarrow sehr groß \rightarrow meist Sampling-Kalorimeter
- Hadronische Schauer fluktuieren statisch stärker \rightarrow
 - Schlechtere Energieauflösung
 - Schlechtere Winkelauflösung
- Für 4π Detektoren: Ortsauflösung und Energieauflösung 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:

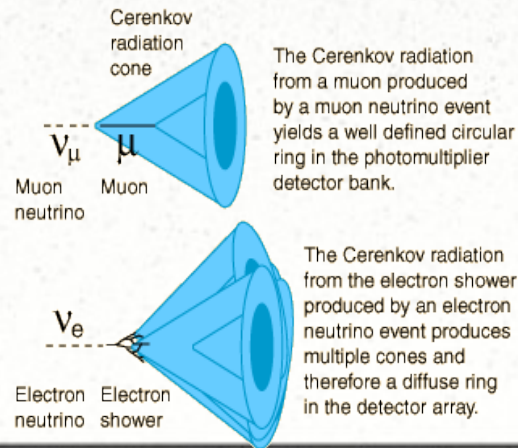
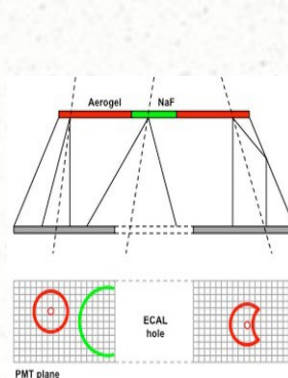
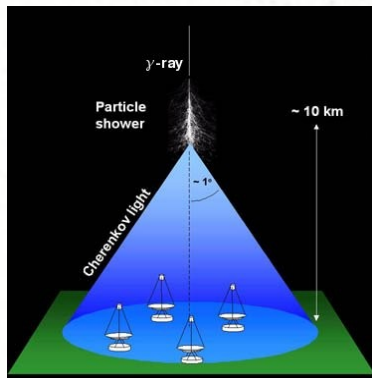
- Schwellendetektoren

Teilchen muss eine Geschwindigkeitsschwelle überschreiten um Strahlung zu erzeugen

- Ring Imaging Cherenkov

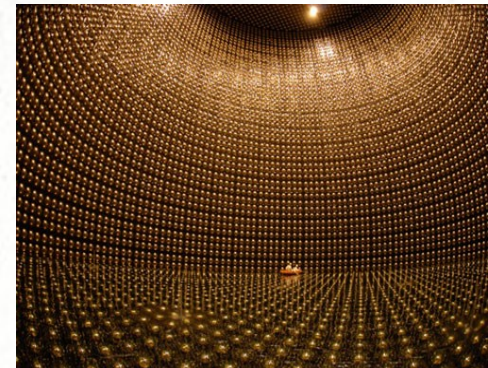
Geladene Teilchen erzeugen einen Lichtkegel, die Photonen werden detektiert und durch den Öffnungswinkel des Kreises wird β bestimmt

Sehr wichtig für die Neutrinoophysik → Neutrinooszillationen
und Astroteilchenphysik → Detektorarrays



The Cerenkov radiation from a muon produced by a muon neutrino event yields a well defined circular ring in the photomultiplier detector bank.

The Cerenkov radiation from the electron shower produced by an electron neutrino event produces multiple cones and therefore a diffuse ring in the detector array.



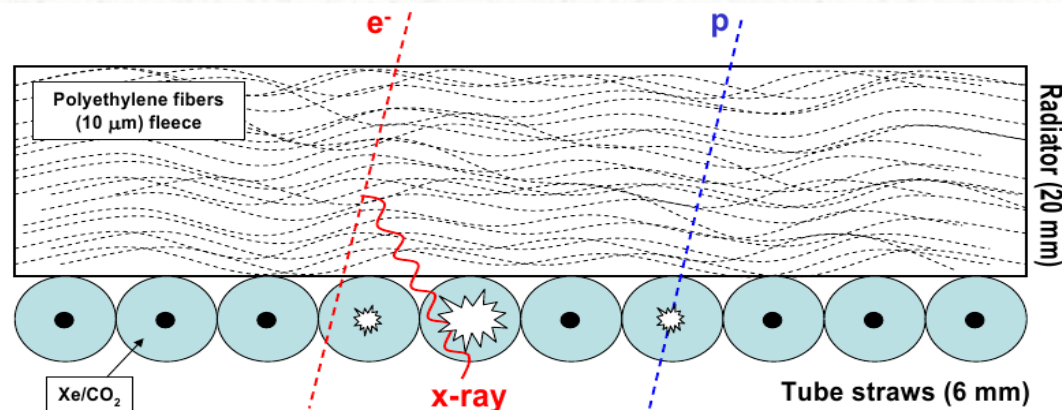
Detektoren

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/CO₂ Gemisch:

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

CO₂: "löscht" Ladungslawine (10%-20%)



Overview

→ Detektorsysteme

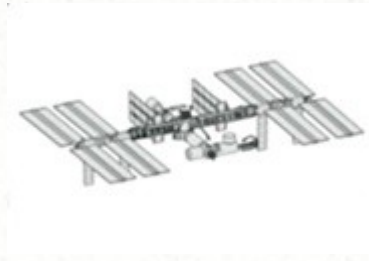
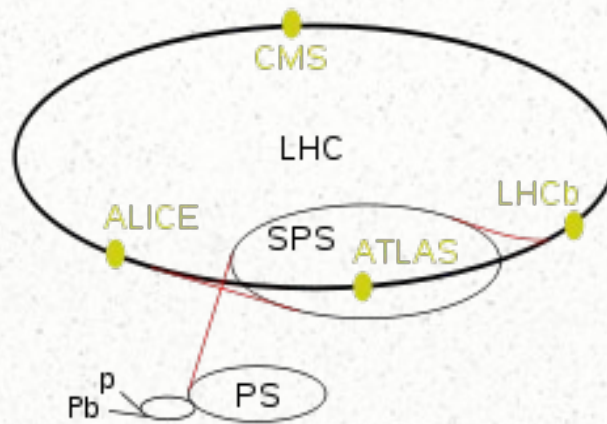
CMS

ATLAS

LHCb

ALICE

AMS



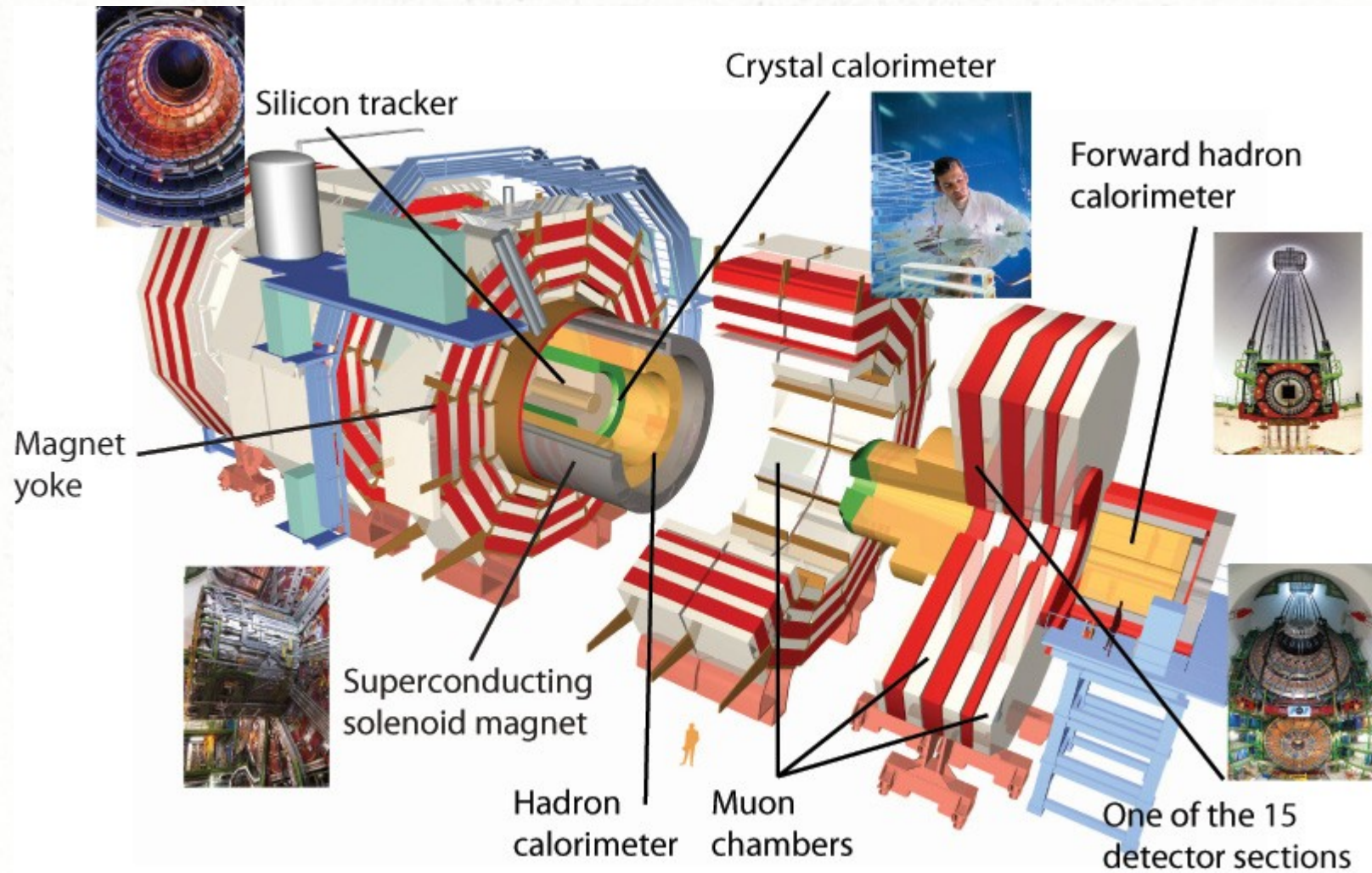
Detektorsysteme

Compact Muon Solenoid:

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

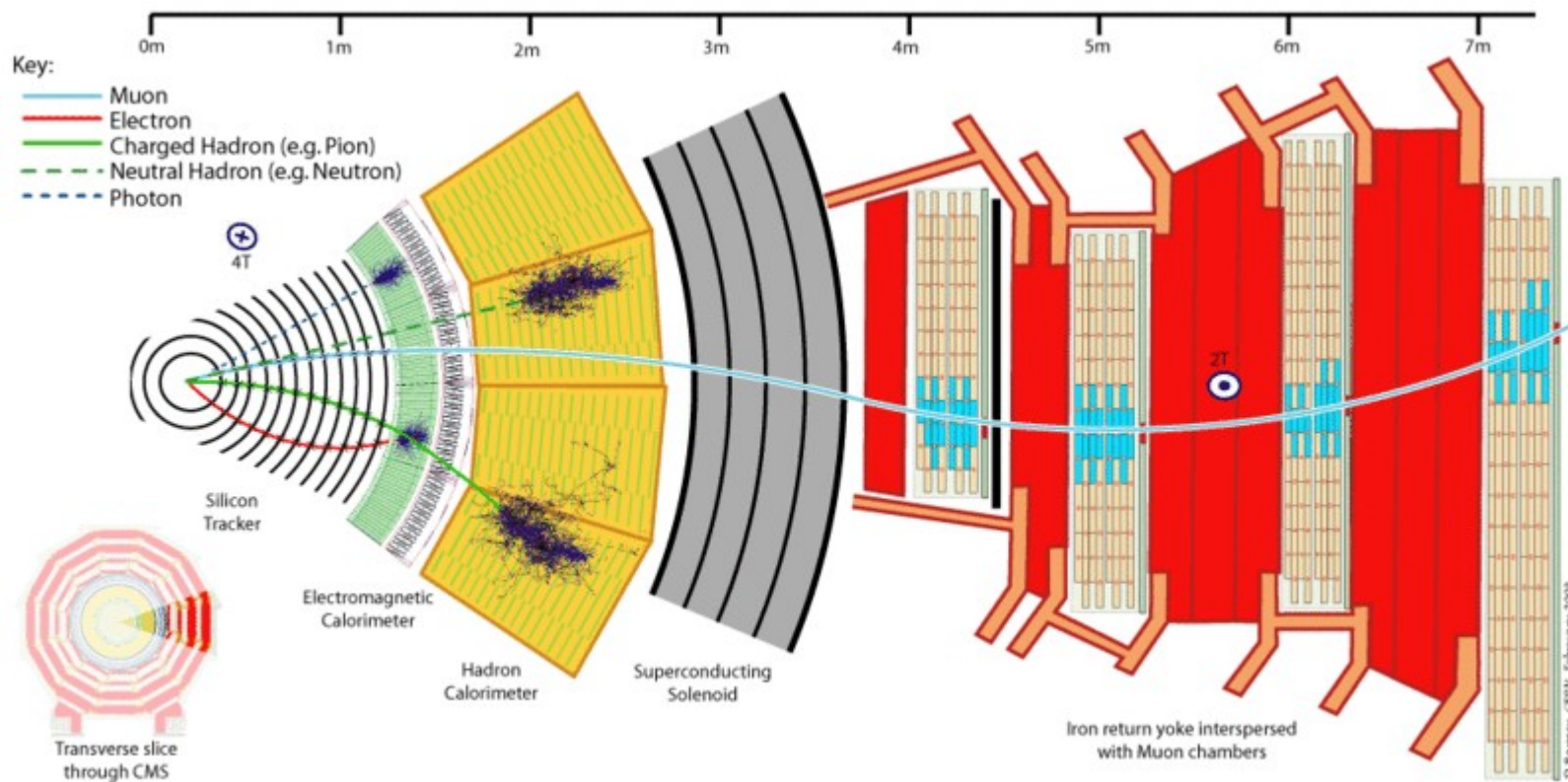


Detektorsysteme



Detektorsysteme

CMS:



Detektorsysteme

ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus):

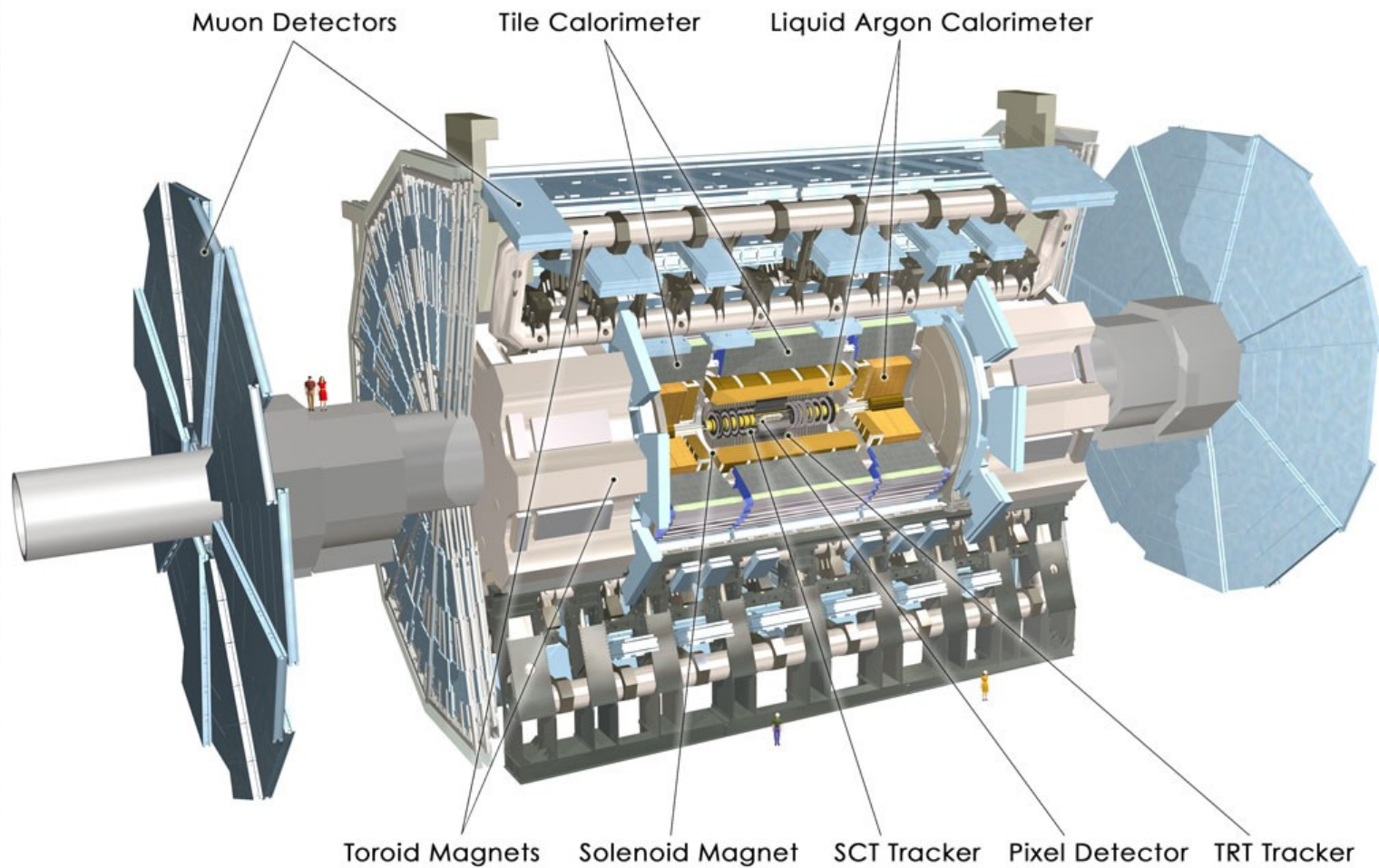
- Tracking system
 - Pixel Detektor
 - Halbleiterdetektor
 - Übergangsstrahlungsdetektor
- Kalorimeter
 - Flüssigargon/Blei Sampling-ECAL
 - Szintillator/Messing HCAL
- Myonspektrometer

→



Detektorsysteme

ATLAS:



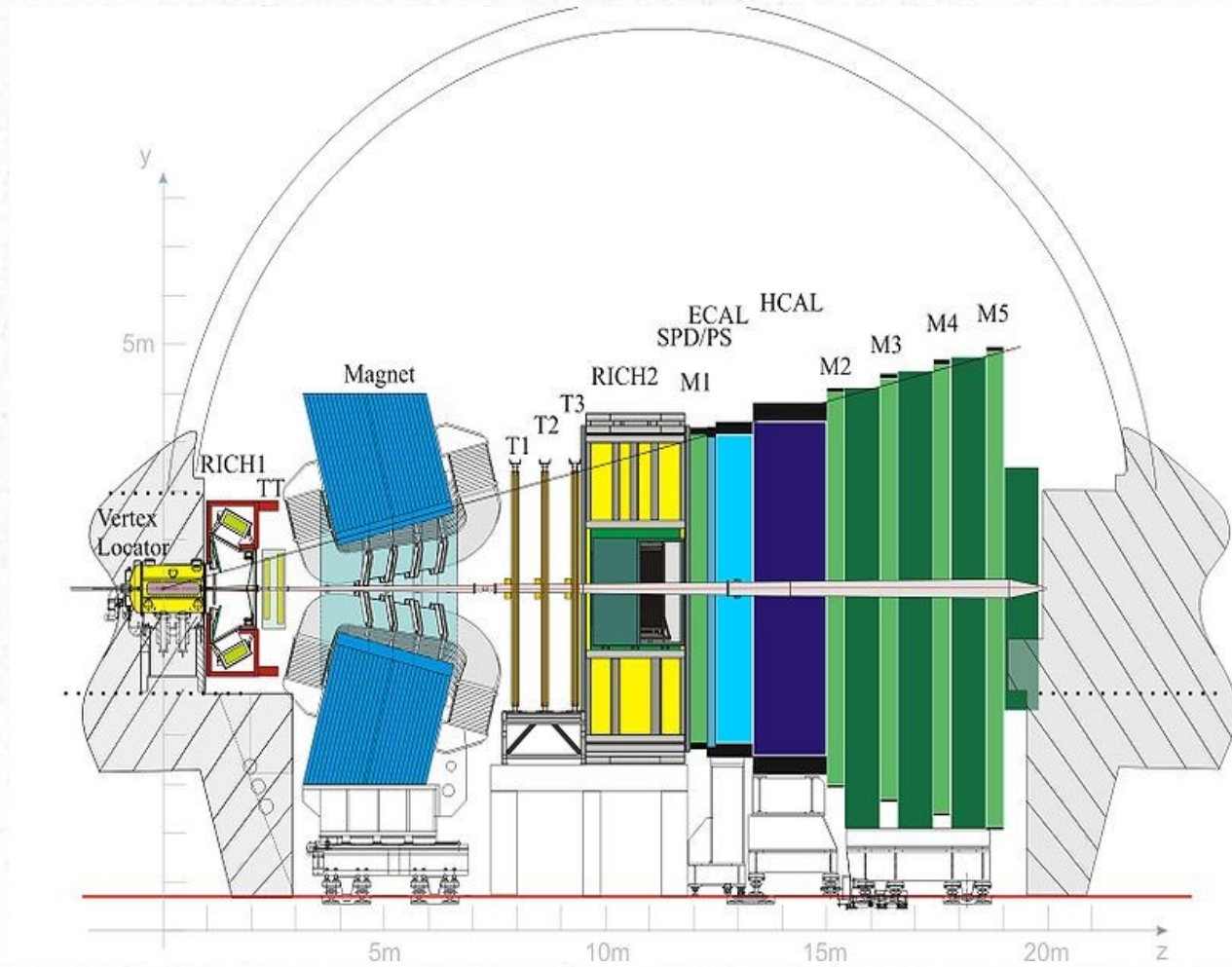
Detektorsysteme

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



Detektorsysteme

- LHCb



Detektorsysteme

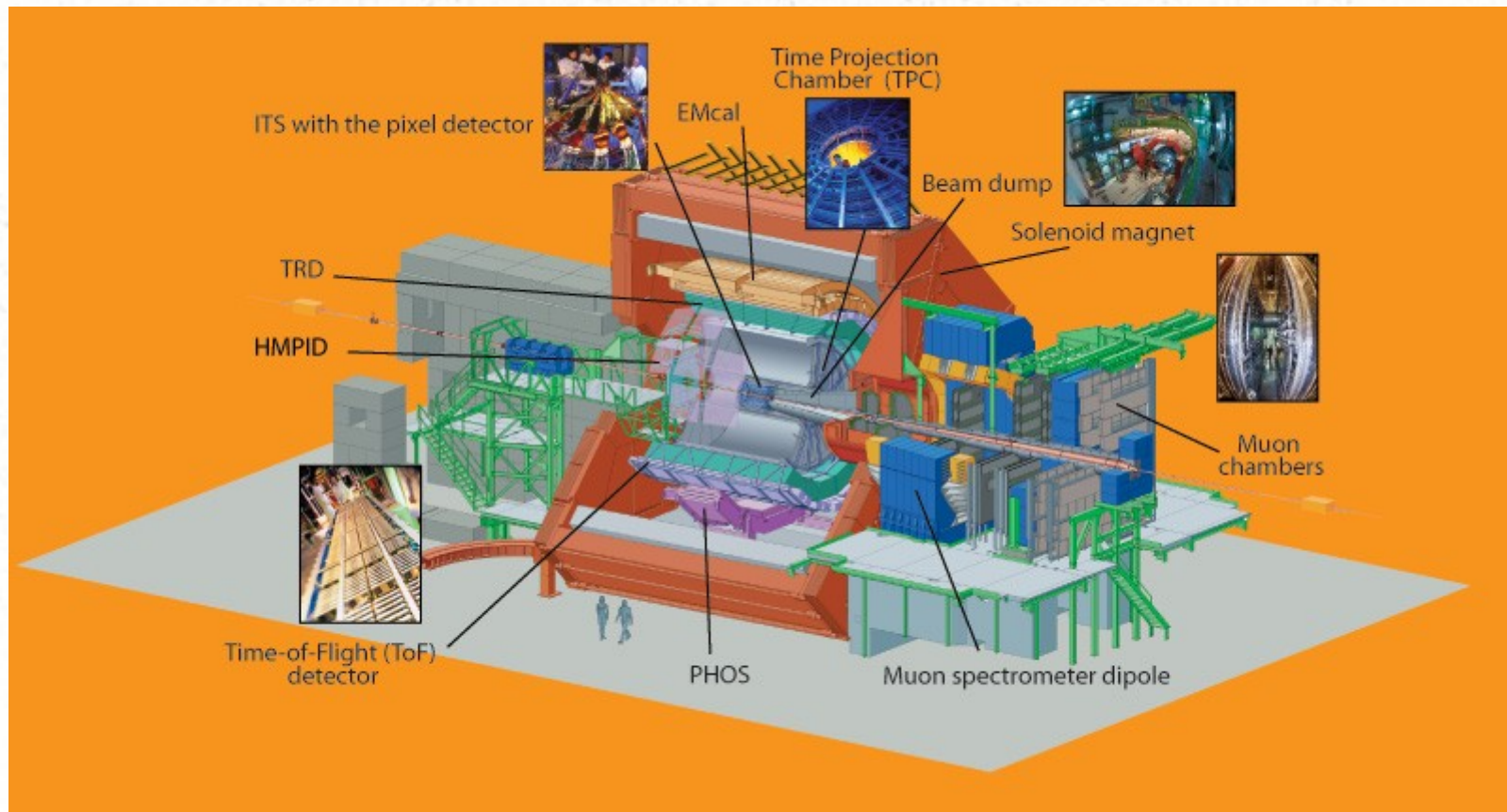
- ALICE: A Large Ion Collider Experiment
 - Zero Degree Calorimeters
 - Forward Multiplicity Detector
 - Inner Tracking System:
 - Silicon Pixel Detector
 - Time Projection Chamber
 - Transition Radiation Detector
 - Time-of-Flight
 - HMPID (RICH's)
 - Dimuon Spektrometer
 - Photon Spektrometer

→ Matter Physics



Detektorsysteme

- ALICE



Detektorsysteme

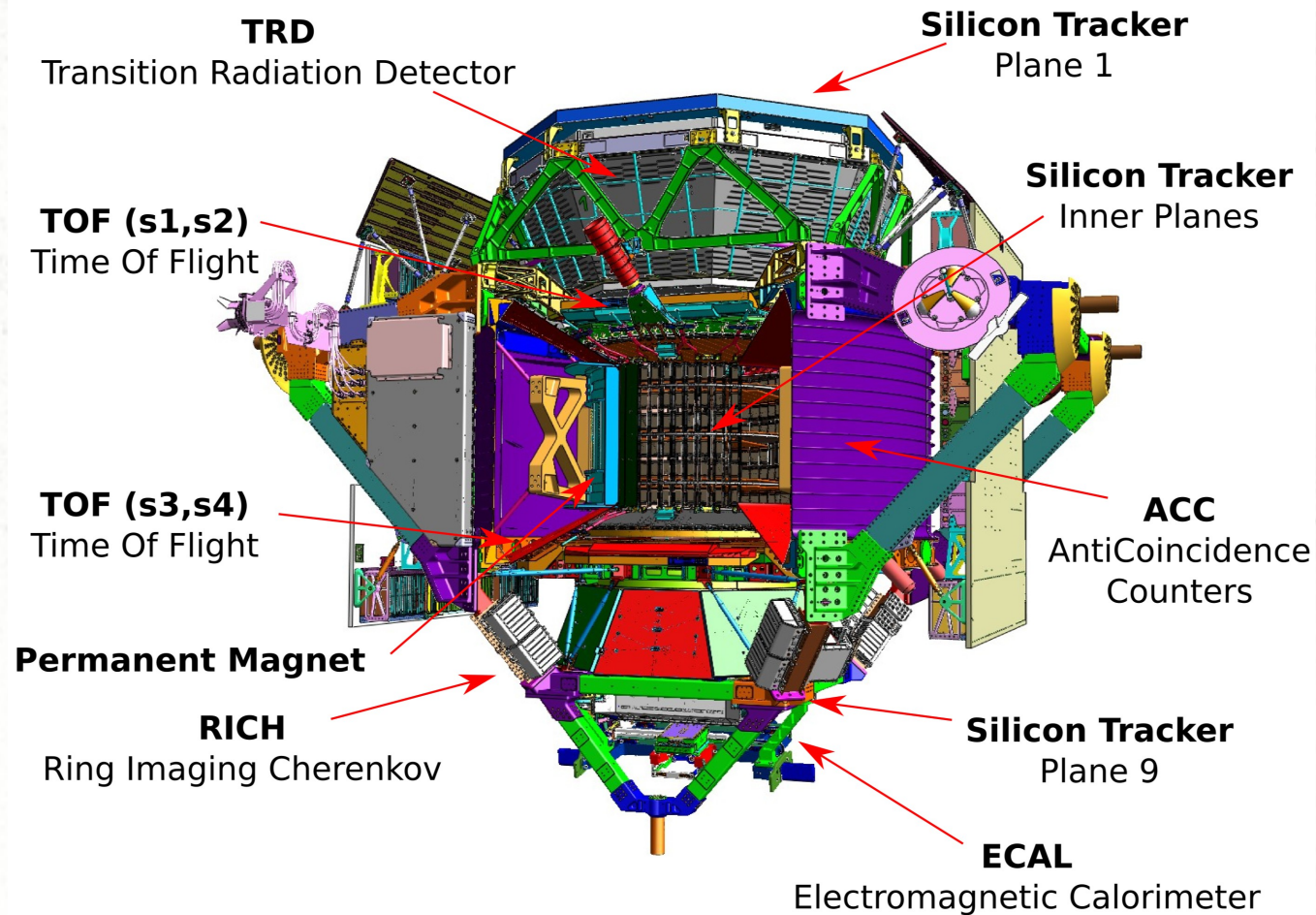
Alpha Magnetic Spectrometer:

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



Detektorsysteme

AMS:



Detektorsysteme

AMS: Teilchenidentifikation

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

The End...