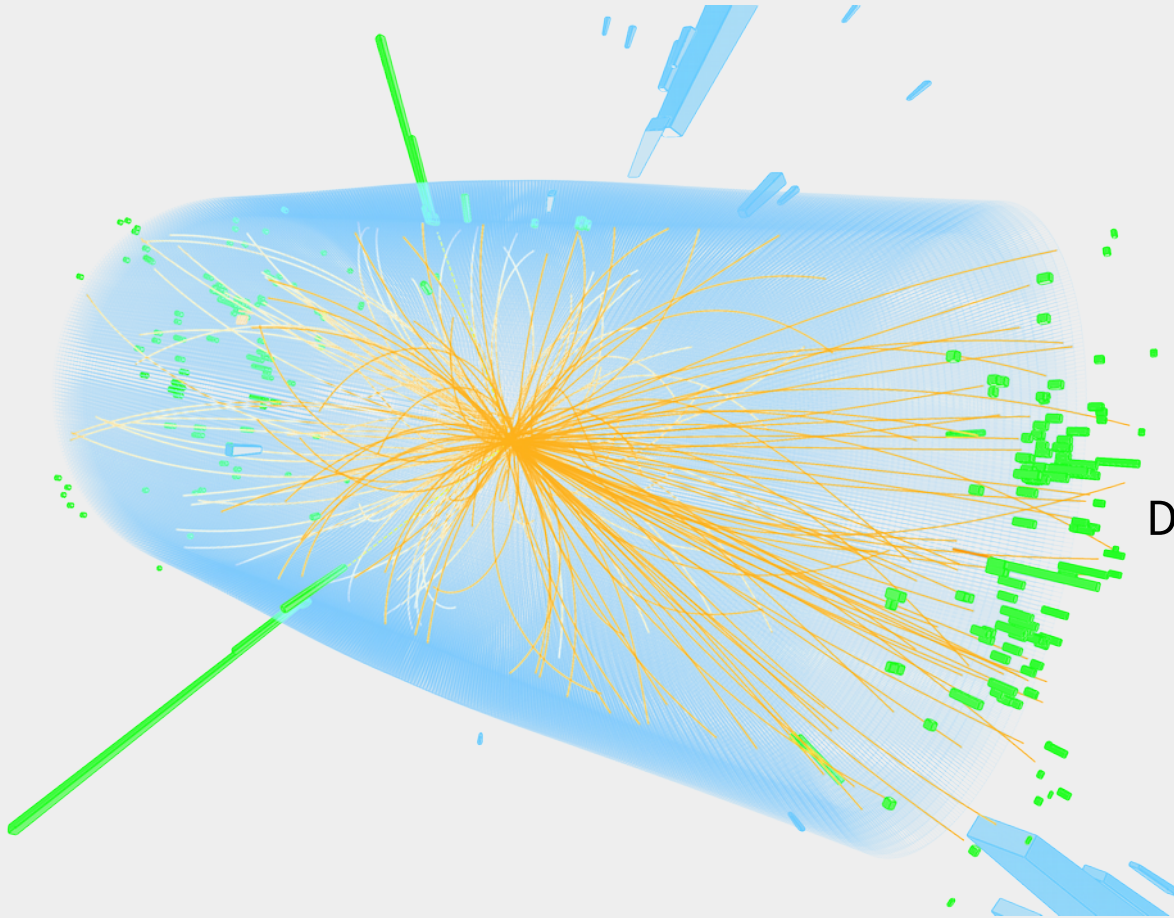


Teilchendetektoren

Teilchennachweis in der Hochenergiephysik



Simon Spannagel, CERN
Deutsches Lehrerprogramm
19. Juni 2019

Event-Display:



Inhaltsverzeichnis

- Was messen wir?
 - Stabile Teilchen
 - Vermessung von Teilcheneigenschaften
 - Detektorsysteme
- Wechselwirkung mit Materie
 - Geladene Teilchen
 - Photonen
 - Hadronische Wechselwirkung
 - Neutrinos
- Detektortypen
 - Historischer Überblick
 - Gasdetektoren
 - Halbleiterdetektoren
 - Szintillatoren
 - Kalorimeter
 - Cherenkovdetektoren
- Detektorsysteme an LHC-Experimenten

Prolog: Einheiten

- Elementarladung: $e = 1,602\ 176\ 6208 \times 10^{-19}\ \text{C}$
- Energieeinheit eV: $1\ \text{eV} = 1,602\ 176\ 6208 \times 10^{-19}\ \text{J (CV)}$
Energie eines Elektrons, durch 1V beschleunigt
- Masse eines Elektrons: $m_e = 9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg}$
 $= 511\ \text{keV} / c^2$
- Faktor c^2 wird oft nicht angegeben, Einheiten definiert mit $c = 1$ (und $\hbar = 1$):
MeV, GeV, TeV...
für Energie, Impuls, (Ruhe-) Masse
- Wissenschaftliche Schreibweise: Mantisse plus Exponent zur Basis 10: $a \times 10^b$

Was messen wir?

Bestimmung von Teilcheneigenschaften

Welche Teilchen können wir nachweisen?

- Teilchen müssen langlebig genug sein, um den Detektor zu erreichen...
 - Viele Elementarteilchen haben eine sehr kurze Lebensdauer (Higgs, W, Z...)
 - Gemessen werden Zerfallsprodukte

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

- Teilchen müssen wechselwirken!
 - Nicht jedes Teilchen nimmt an allen Kräfte teil
 - Möglichkeiten der Detektion hängen stark von Kräften ab

• Elementarteilchen: $e^\pm, \mu^\pm, \nu^e, \bar{\nu}^e, \nu^\mu, \bar{\nu}^\mu, \nu^\tau, \bar{\nu}^\tau, \gamma$

• Baryonen: $p^\pm, n, \Sigma^\pm, \Xi_0^\pm, \Xi^\pm, \Omega^\pm$

• Mesonen: $\pi^\pm, K^\pm, K_0 (K_0^S, K_0^L)$

$$\tau_n \approx 15 \text{ min}$$

$$\tau_\mu \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Messgrößen

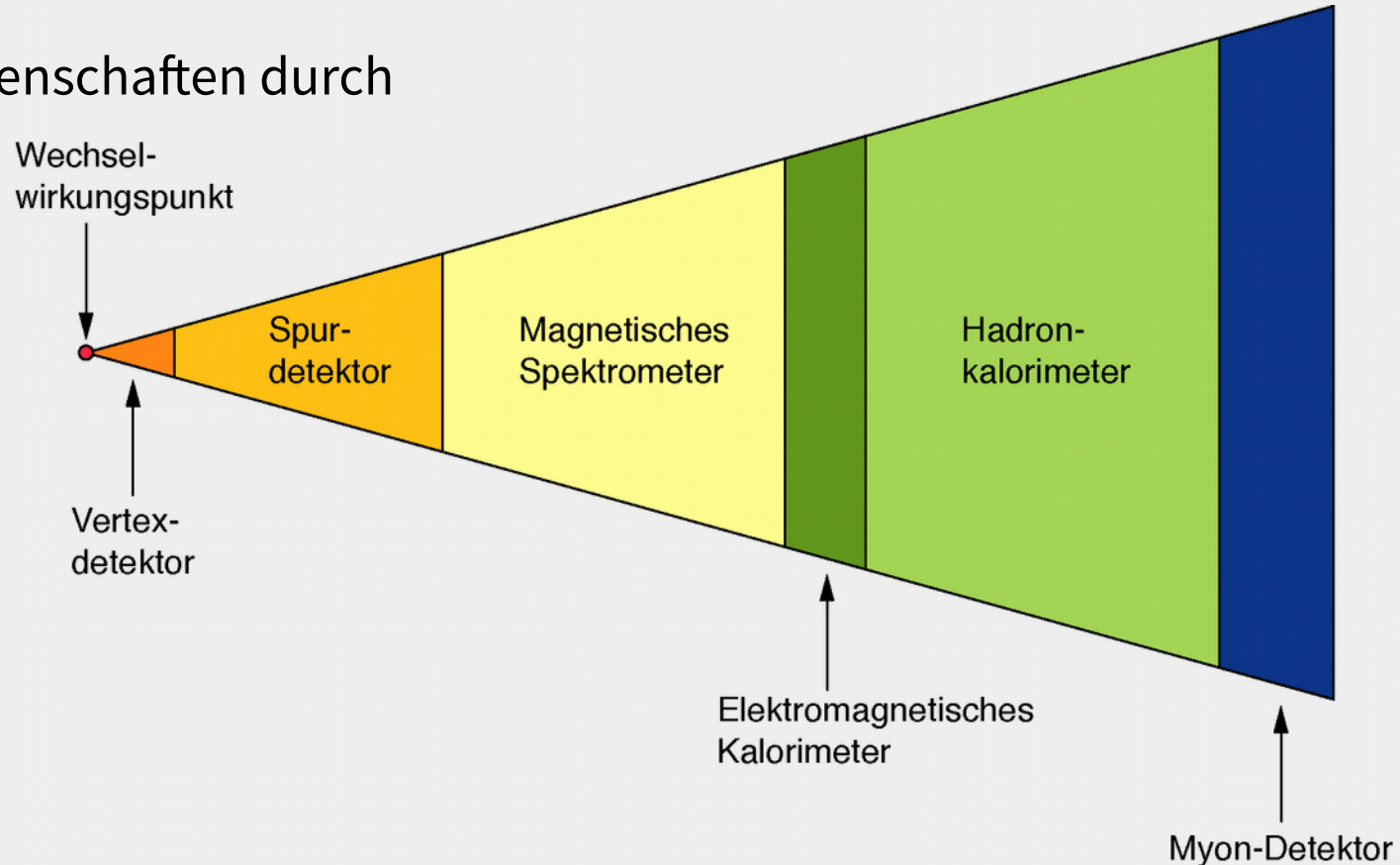
- Impuls **p** Krümmungsradius im Magnetfeld
- Geschwindigkeit **v** Flugzeitmessung, RICH, etc.
- Teilchenladung **Q** Flugbahnkrümmung im Magnetfeld
- Lebensdauer **τ** Messung der Zerfallsstrecke
- Energie **E** Absorption in Kalorimetern
- Teilchenmasse **m** Indirekte Bestimmung z.B. aus dem Impuls und Energie oder Geschwindigkeit

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \quad p = \gamma m v = \frac{m v}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}}$$



Typischer Aufbau eines Experiments

- Kombination von komplementären Nachweismethoden
- Messung einzelner Eigenschaften durch separate Detektoren
- Reihenfolge wichtig!
Manche Messungen “destruktiv“
- Aufbau vieler Experimente sehr ähnlich



Detektor-Begrifflichkeiten

- **Totzeit:**

Zeitspanne unmittelbar nach dem Nachweis eines Teilchens, während der der Detektor noch nicht wieder bereit ist, ein weiteres Teilchen nachzuweisen

- Nicht verlängerbare Totzeit: Neu eintretendes Ereignis bewirkt nichts
- Verlängerbare Totzeit: Neu eintretendes Ereignis verlängert Totzeit

- **Auflösung:**

Erzielbare Unsicherheit auf die Messgröße

- **Effizienz:**

Zahl der aufgezeichneten Ereignisse geteilt durch alle eingetretenen Ereignisse

Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Energieverlust und Wechselwirkungsprozesse

Wechselwirkung mit Materie

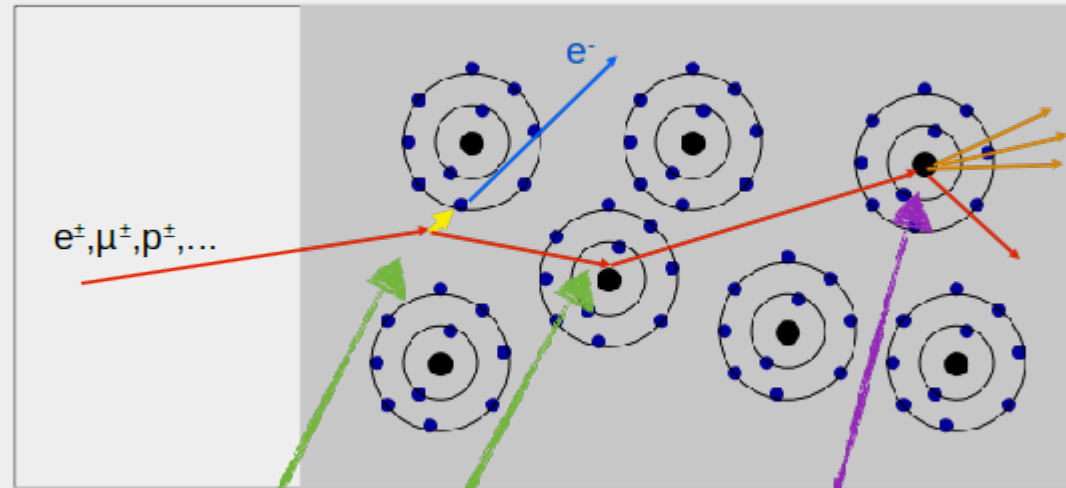
- Hochenergetische Teilchen wechselwirken über verschiedene Prozesse mit Materie, je nach
 - Teilchenart
 - Energie
 - Material
- Energieverlust des Teilchens durch Wechselwirkung
 - Übertragung der Energie an Materie oder andere Teilchen
 - In Detektoren: Energieverlust = Signal!

Geladene Teilchen

Ionisation

Elastische Streuung
Rückstoß am Atom /
Kristallgitter → Phonon

Inelastische Streuung



Elektromagnetische Wechselwirkung

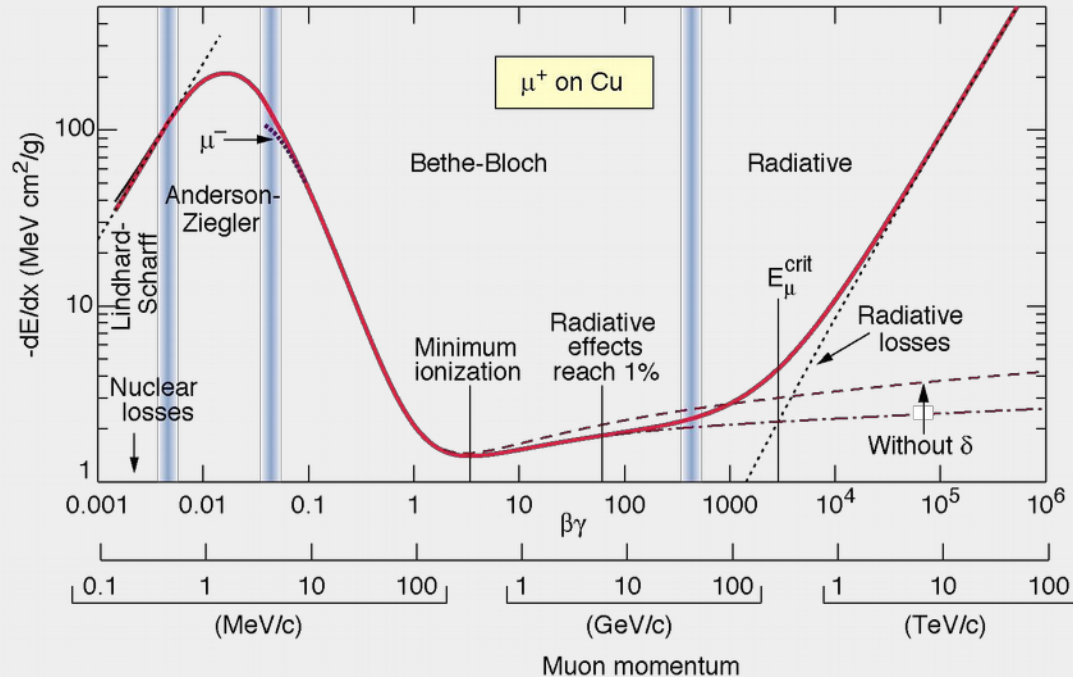
Elektromagnetische oder
Schwache oder
Starke Wechselwirkung

Mittlerer Energieverlust

- geladene Teilchen wechselwirken mit den Elektronen im Material
- Für schwere geladene Teilchen: **Bethe-Bloch-Formel**

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \approx K q^2 \frac{1}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left[\ln \left(\frac{2 m_e c^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

- Energieverlust hängt ab von
 - Projektil-Eigenschaften: Ladung, Energie
 - Target-Eigenschaften: Kernladungszahl, Ionisationsenergie, Dichte

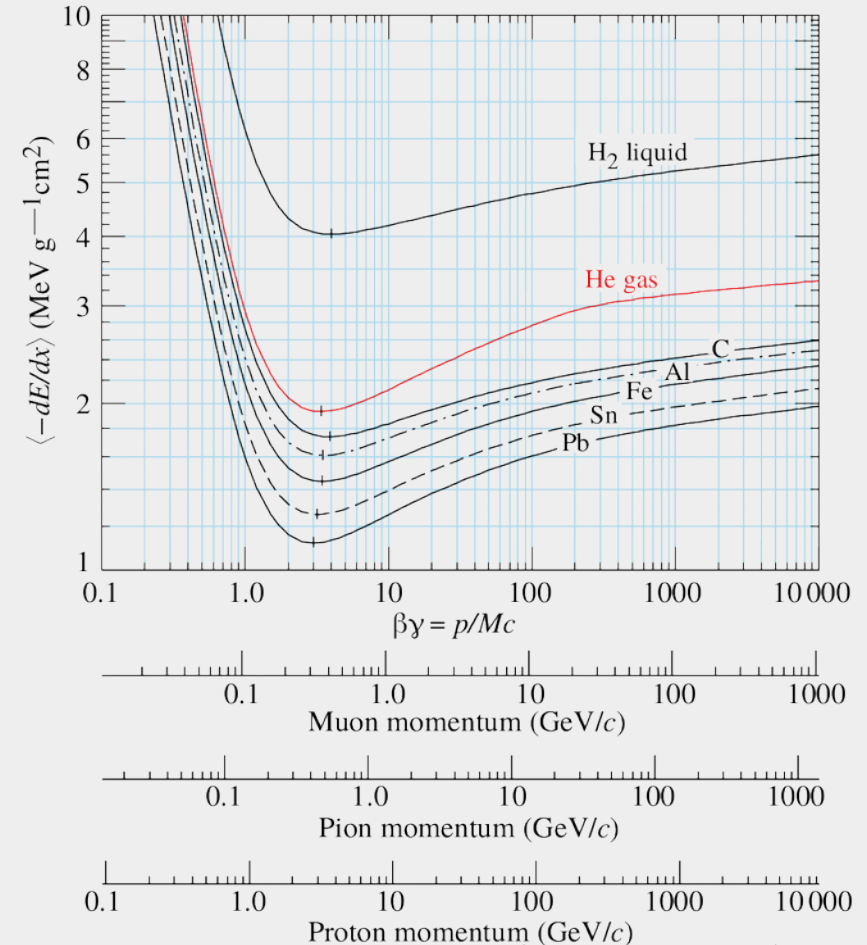


Mittlerer Energieverlust

- Verschiedene Komponenten dominieren :
 - Bei geringen Energien: $\sim 1/\beta^2$
 - Bei hohen Energien: $\sim \ln \gamma$

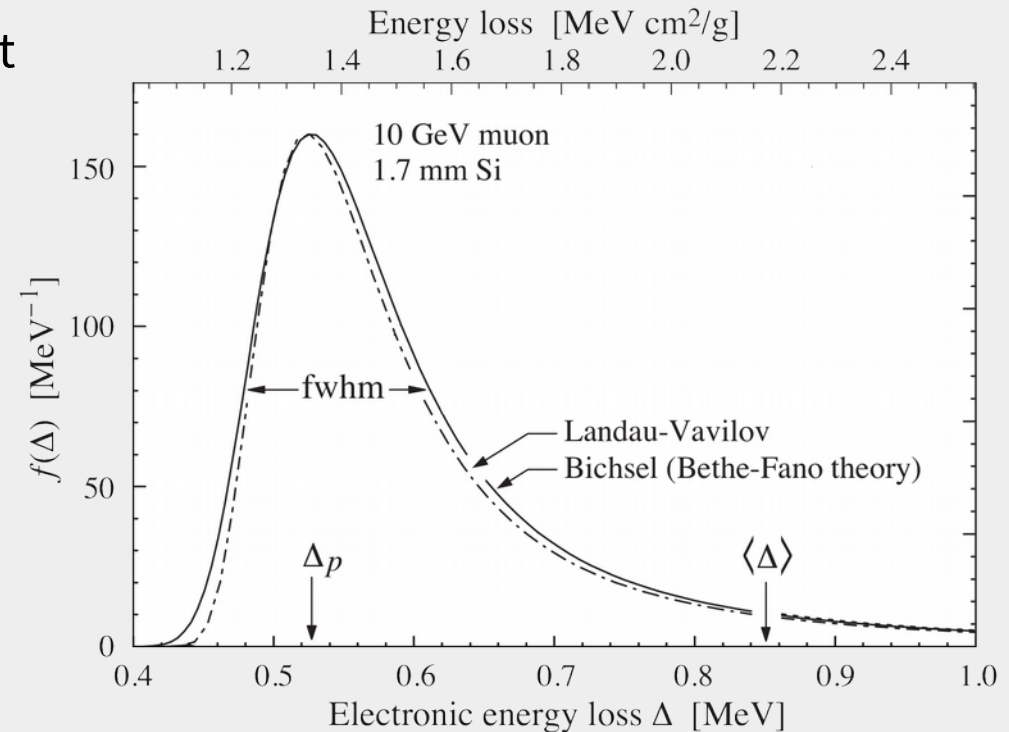
$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \approx K q^2 \frac{1}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left[\ln \left(\frac{2 m_e c^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

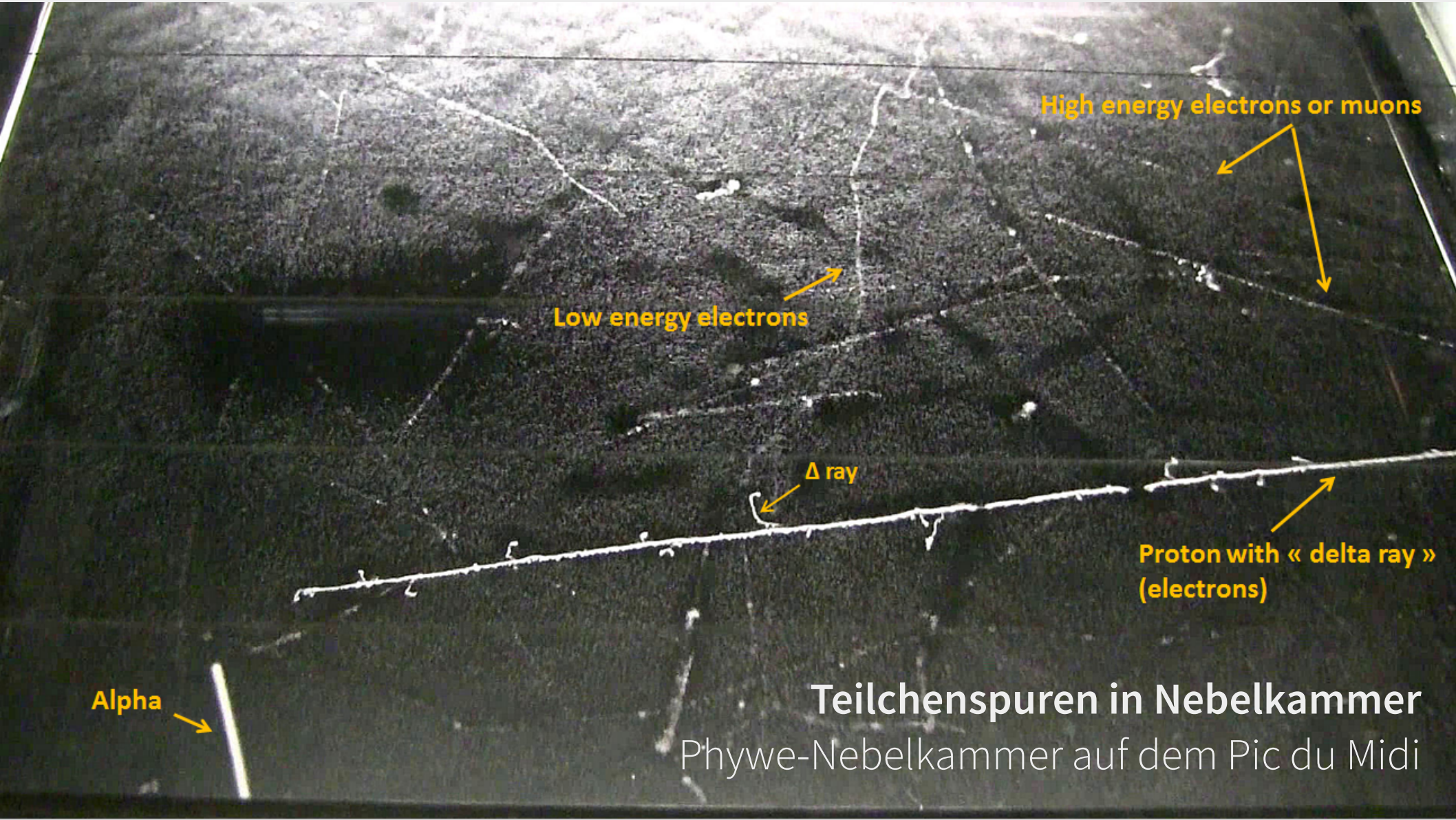
- Minimaler Energieverlust für $\sim \beta\gamma$
 - MIP: Minimum Ionizing Particle
- $[dx] = g / cm^2 = cm \times g / cm^3$



Fluktuationen im Energieverlust

- Tatsächlicher Energieverlust fluktuiert
- **Landau-Vavilov-Verteilung** mit langen Ausläufern zu hohen Energien
 - Wahrscheinlichster Wert \ll Mittelwert
- Hüllenelektronen können sehr großen Energieübertrag erfahren
 - Erzeugung von Delta-Elektronen
 - Delta-Elektronen haben genügend Energie für weitere Ionisation





High energy electrons or muons

Low energy electrons

Δ ray

Proton with « delta ray »
(electrons)

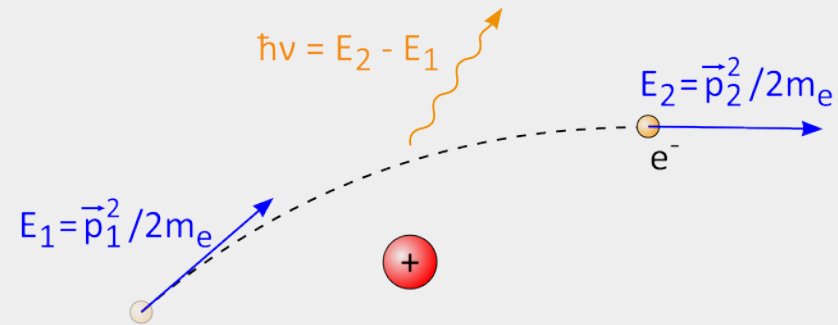
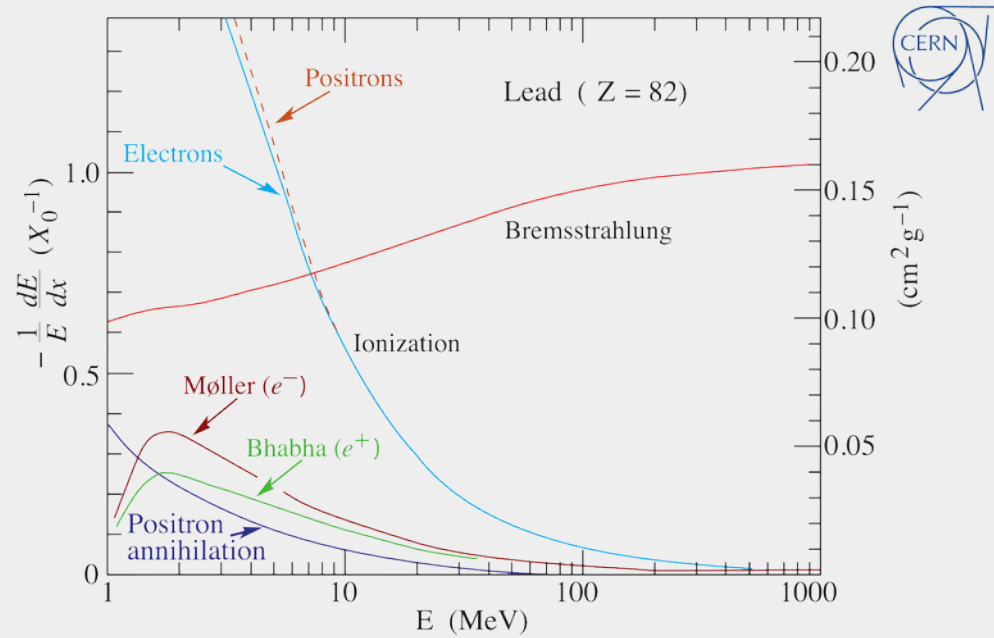
Alpha

Teilchenspuren in Nebelkammer

Phywe-Nebelkammer auf dem Pic du Midi

Sonderfall: Elektron & Positron

- Sonderfall: geringe Masse
 $m_e = 0.511 \text{ MeV} / c^2$
 $m_\mu = 106 \text{ MeV} / c^2 \approx 200 m_e$
- Bei hohen Energien: Bremsstrahlung
 - Englisch: „bremstrahlung“
 - entsteht bei Impulsänderung eines geladenen Teilchens, z.B.
 - ...im Coulomb-Feld eines Kerns
 - ...im Magnetfeld: Synchrotronstrahlung
 - Hier: Teilchen werden in Materie gebremst
 - Relevant für Elektronen: $-\frac{dE}{dx} \sim E \cdot \frac{1}{m^2}$



Cherenkov-Strahlung

- Wird emittiert, wenn Teilchengeschwindigkeit > Lichtgeschwindigkeit

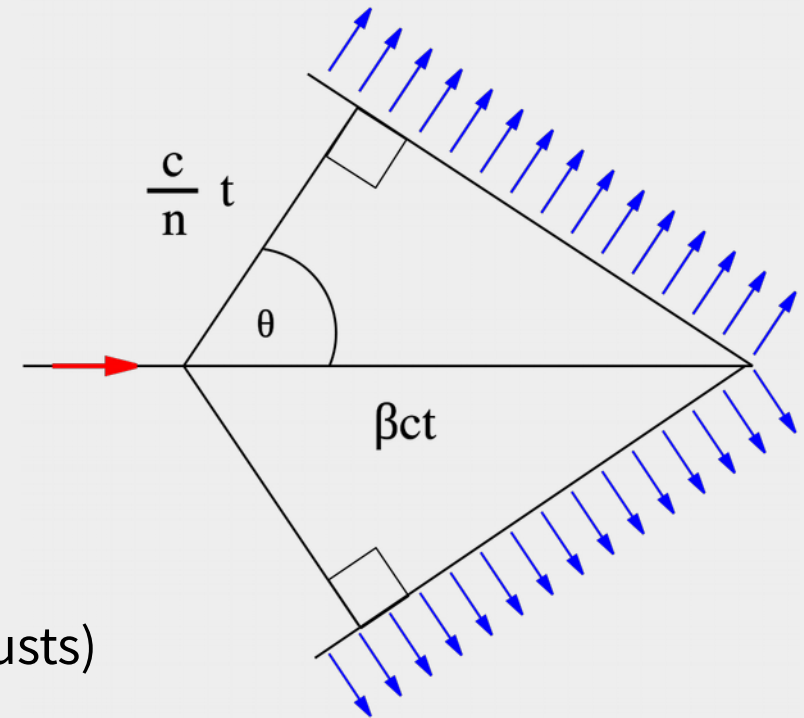
$$c_{\text{Medium}} = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{n} < v_{\text{Teilchen}} < c_{\text{Vakuum}}$$

n: Brechungsindex des Mediums

- Elektromagnetische Schockwelle mit konischer Form wird abgestrahlt unter Winkel θ :

$$\cos(\theta) = \frac{1}{\beta n}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

- Geringer Energieverlust (ca. 1% des totalen Verlusts)



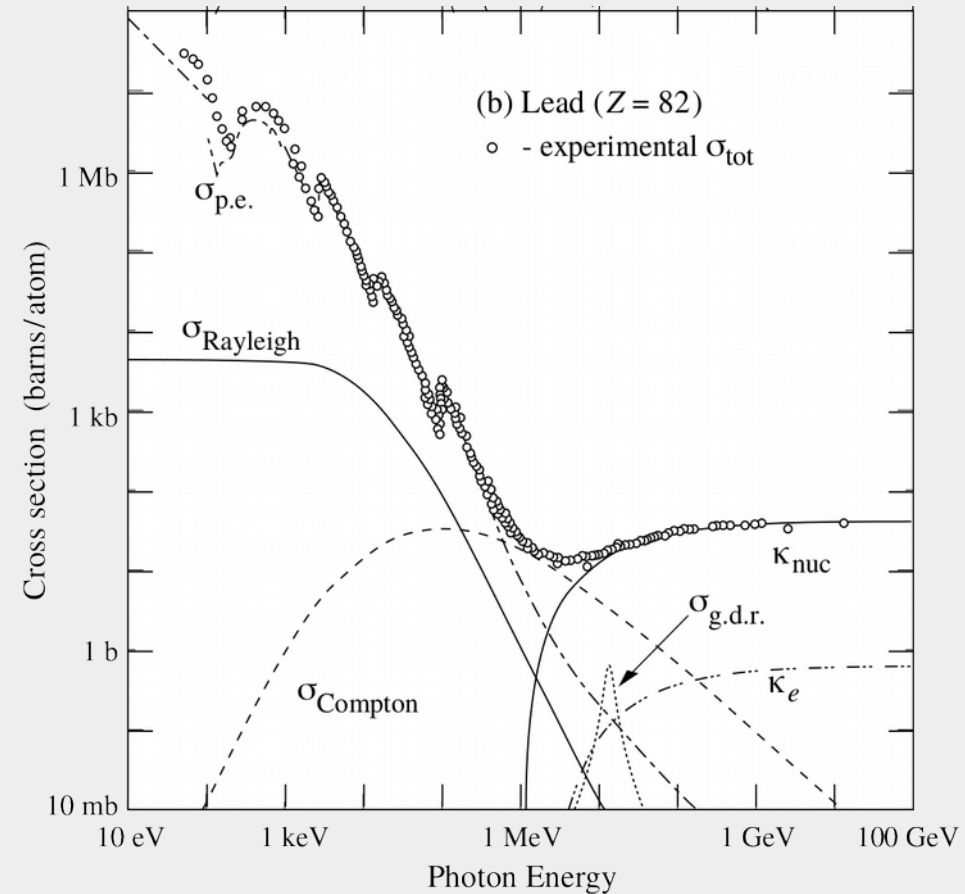
Cherenkov-Strahlung von Kernreaktor

Advanced Test Reactor, INL



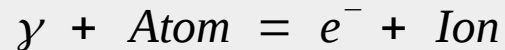
Photonen

- Elektromagnetische Wechselwirkung
- Unterschiedliche Prozesse dominant, je nach Photon-Energie:
 - Photoeffekt
 - Rayleigh-Streuung
 - Compton-Effekt
 - Paarbildung

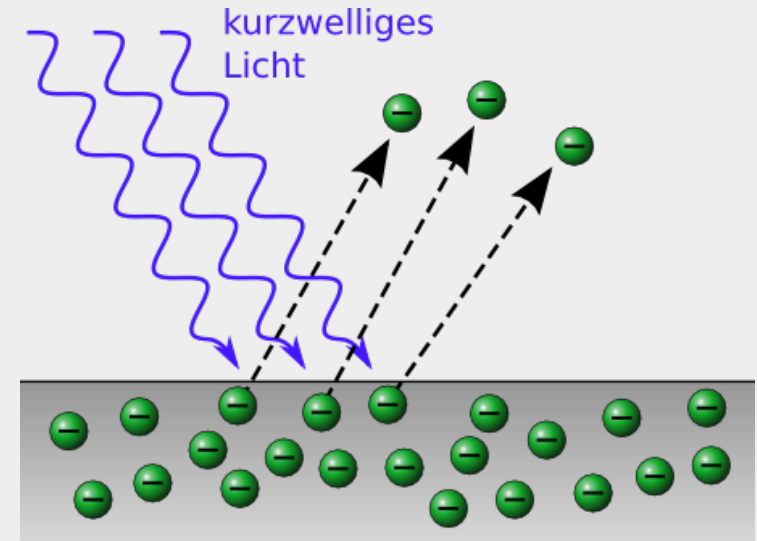


Photoelektrischer Effekt

- Theoretische Beschreibung des Photoeffekts: **Nobelpreis 1921 für Albert Einstein**
- Photon wird von Elektron der Atomhülle absorbiert
- Übertragene Energie setzt das Elektron frei

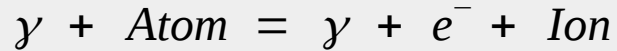


- Prozess nur im Feld des Atomkerns möglich:
 - Impulserhaltung
 - Kern fängt Rückstoß auf
- Wirkungsquerschnitt des Fotoeffekts zeigt Schalenstruktur des Atoms

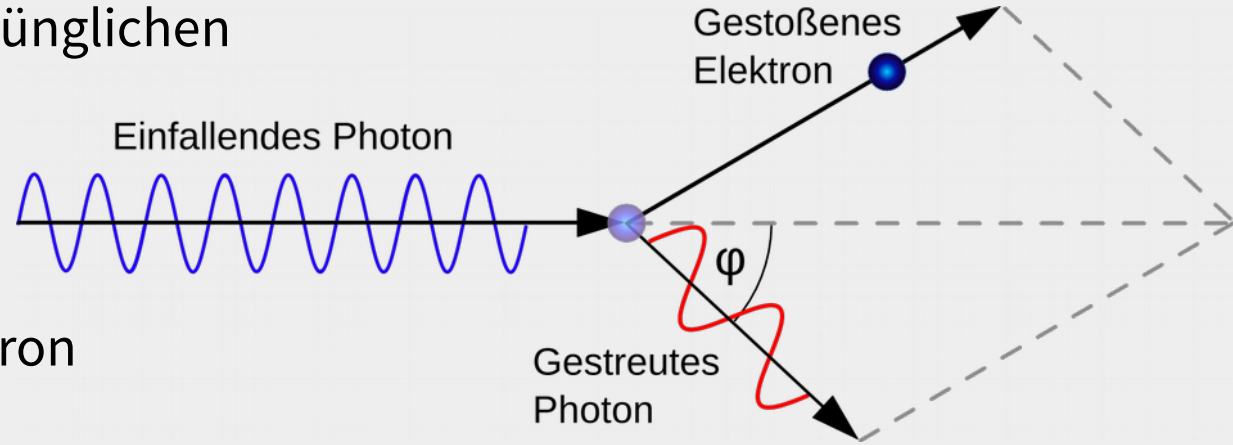


Compton-Effekt

- Beschreibt Streuung eines Photons an einem “quasi-freien” Elektron

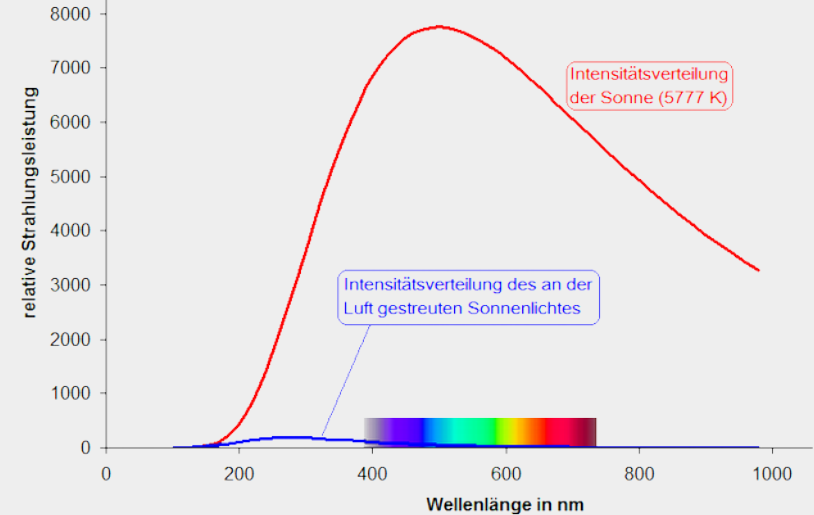


- Photon wird von seiner ursprünglichen Bahn abgelenkt
- Wellenlänge des Photons ändert sich durch Energieübertrag an das Elektron



Photonen: Thomson/Rayleigh-Streuung

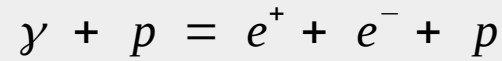
- Elastische Streuungen: kaum Energieübertrag auf Medium
- Thomson-Streuung:
Photon-Streuung an freiem Elektron
- Rayleigh-Streuung:
Photon-Streuung an gesamtem Atom
 - Streuquerschnitt $\sigma_{\text{Rayleigh}} \sim f^4$
- Grund für Blau- / Rotfärbung des Himmels in Abhängigkeit vom Zenitwinkel
 - Mittag: kurzer Weg durch Atmosphäre, kaum blaues Licht gestreut
 - Morgen-Abend: Langer Weg durch Atmosphäre, viel blaues Licht gestreut



$$\frac{\sigma_{\text{blau}}}{\sigma_{\text{rot}}} = \frac{1/\lambda_{\text{blau}}^4}{1/\lambda_{\text{rot}}^4} = \left(\frac{650 \text{ nm}}{450 \text{ nm}} \right)^4 \approx 4.4$$

Photonen: Paarbildung

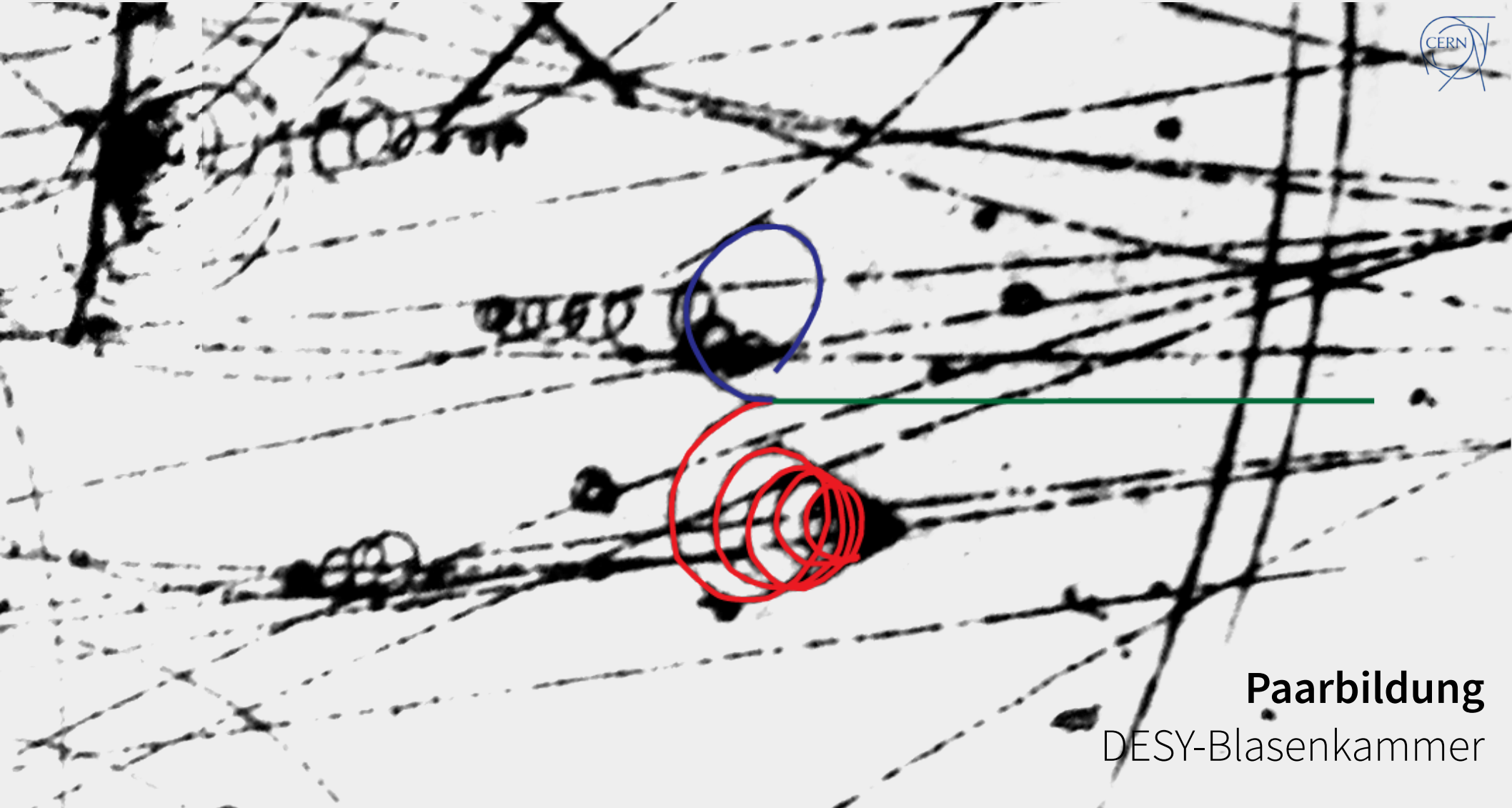
- Paarbildung ist die Produktion eines Elektron-Positron-Paares durch ein Photon
- Paarbildung im Feld eines Stoßpartners, der den Rückstoß aufnimmt (Atomkern, aber auch Hüllenelektron)



- Photon muss mindestens Ruhemasse des e^+e^- -Paares plus Rückstoßenergie aufbringen:

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 \left(1 + \frac{m_e}{M}\right)$$

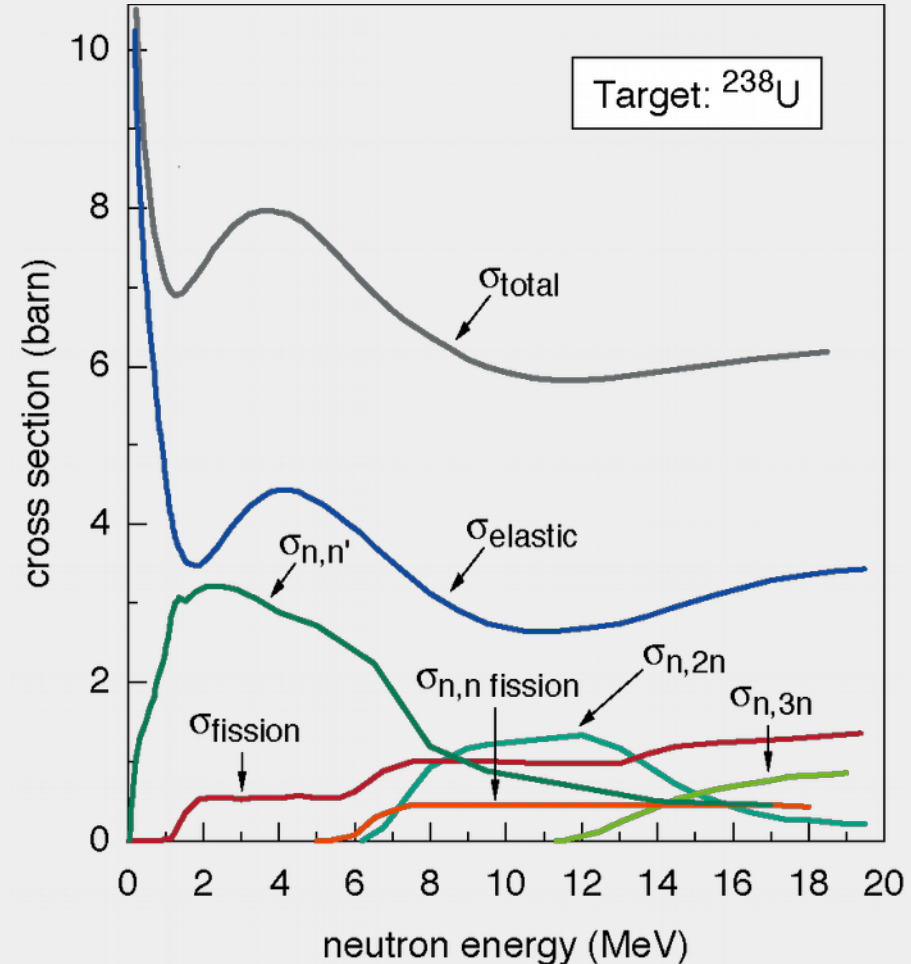
- Rückstoßenergie kann oft vernachlässigt werden, e.g. Ge-Detektor: $\frac{m_e}{M} \approx 7.6 \cdot 10^{-6}$



Paarbildung DESY-Blasenkammer

Hadronische Wechselwirkung

- Interaktionen eines Hadrons mit Atomkern
- Basiert auf der starken Wechselwirkung
 - Geringe Reichweite
 - Geringe Wahrscheinlichkeit für hadronische Reaktionen
 - Neutronen können nur stark wechselwirken: sehr durchdringend
- Viele mögliche Prozesse (energieabhängig)
 - Elastische, inelastische Streuung; Neutroneneinfang; Reaktionen mit Abstrahlung geladener Teilchen; Kernspaltung



Wechselwirkung von Neutrinos

- Neutrinos unterliegen ausschließlich der schwachen Wechselwirkung
- Mögliche Interaktionen



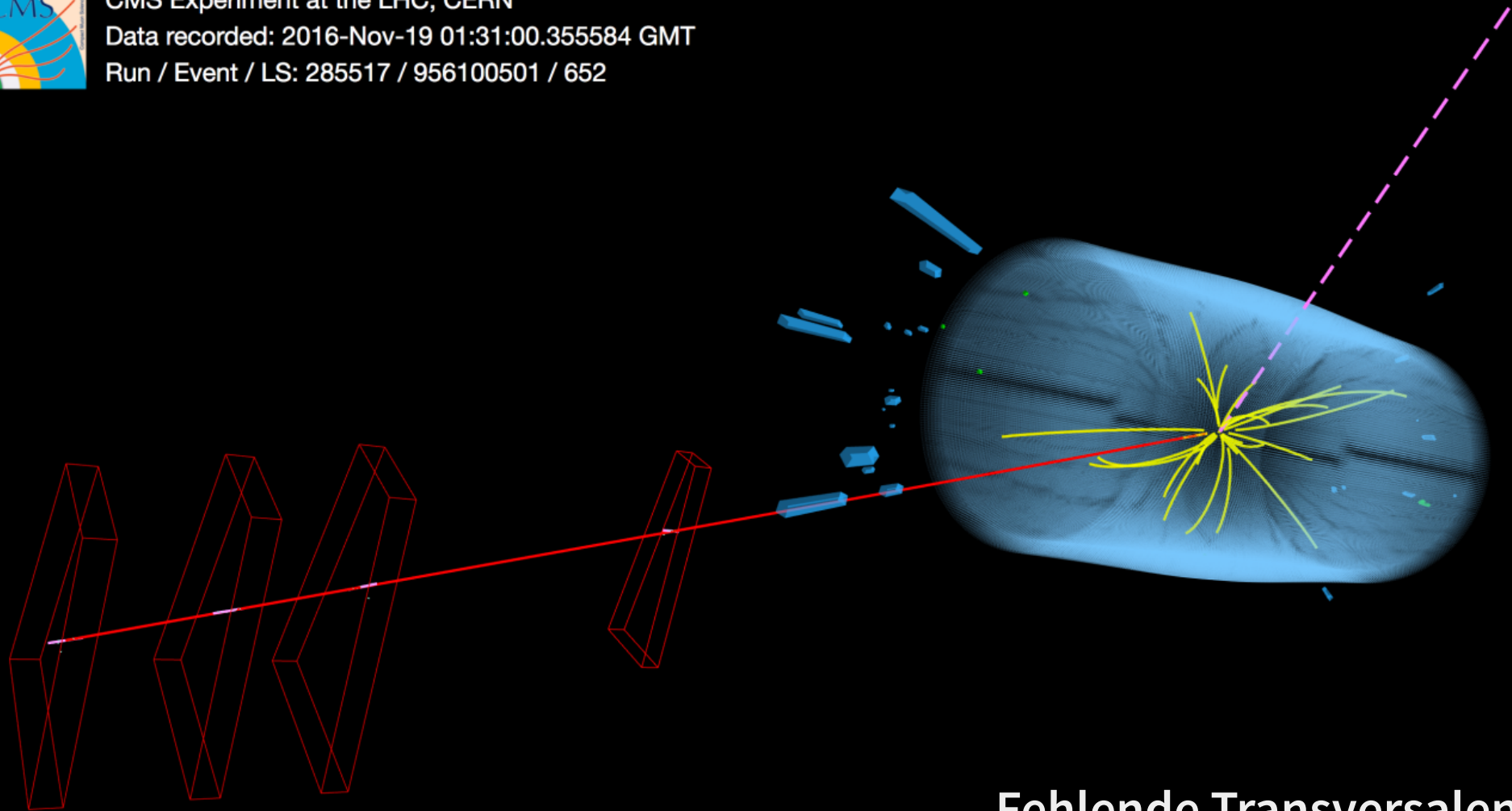
- Neutrinowechselwirkungen haben sehr geringer Wirkungsquerschnitt
- Nachweis von Neutrinos benötigt
 - sehr großen Detektor und hohe Neutrinoflüsse oder
 - hermetischen Detektor für Messung fehlender Energie



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2016-Nov-19 01:31:00.355584 GMT

Run / Event / LS: 285517 / 956100501 / 652



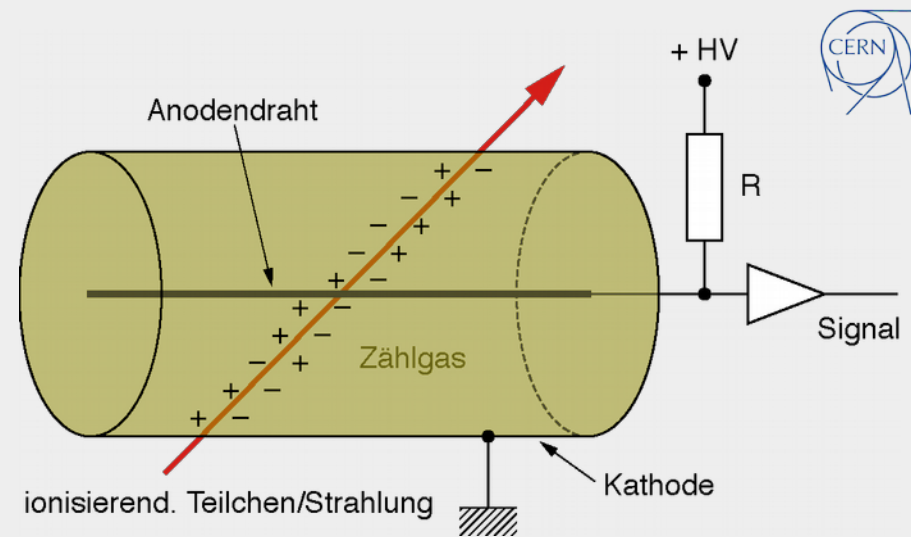
Fehlende Transversalenergie
Messing von Neutrinos

Teilchendetektoren

Historischer Überblick

Geiger-Müller-Zählrohr

- „Klick“ = Teilchendurchgang
- „Viel Klick“ = Viele Teilchen
- „Sehr viel Klick“ = Schnell weg...

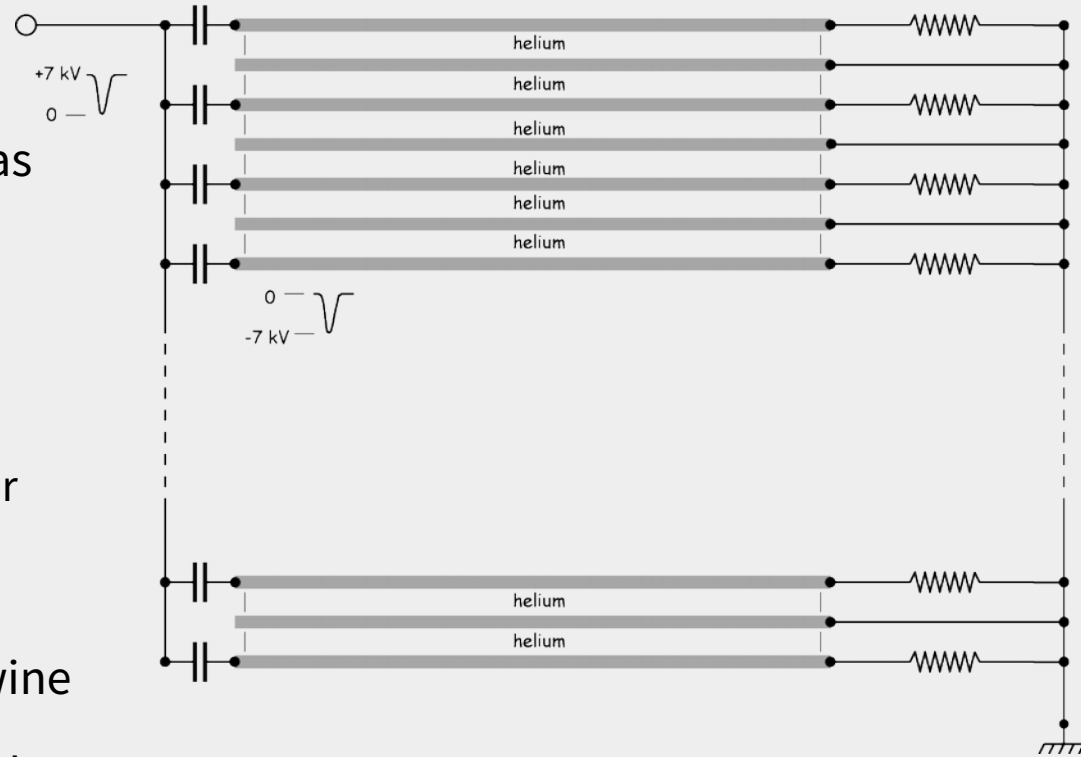


- Detektor gefüllt mit Edelgas
 - Geladene Teilchen ionisieren Edelgas-Atome
 - Hohe Spannung zwischen Elektroden verstärkt Signal
- Signal: Strompuls an Lautsprecher: Klick



Funkenkammer

- „Viele Geigerzähler“
- Durchsichtige Kammer, gefüllt mit Edelgas und vielen parallelen Platten
 - Spannung (\sim kV) zwischen Platten
 - Teilchen ionisieren Edelgasatome
 - Kleine Funken entlang der Teilchenspur
- Analyse durch Fotos oder Mikrofone
- Relativ große Totzeit: Abklingzeit der Lawine
- Eingesetzt während der 1930er-1960er Jahre
- **Funkenkammer in Aktion: CERN Globe**

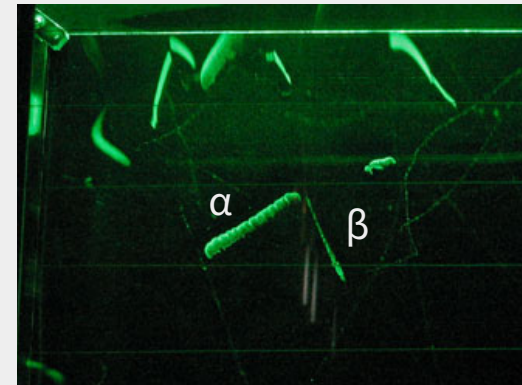
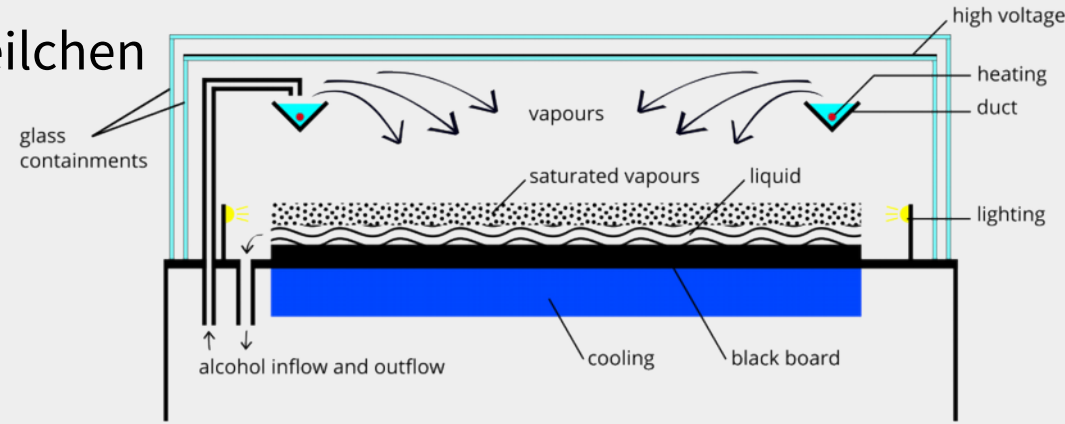




Funkenkammer
CERN Globe Exhibition

Nebelkammer

- Optischer Nachweis von geladenen Teilchen
 - Durchsichtige Kammer mit übersättigtem Luft-Alkohol-Gemisch
 - Energiereiches, geladenes Teilchen erzeugt durch Stoßionisation Ionen
 - Ionen agieren als Kondensationskeime, Tröpfchenbildung im Gasgemisch
- Art der Spuren lassen sich (manchmal) Teilchen zuordnen
- **Nobelpreis 1927 für Charles Thomson Rees Wilson**
- **Heute, 14:00: Nebelkammer Workshop**

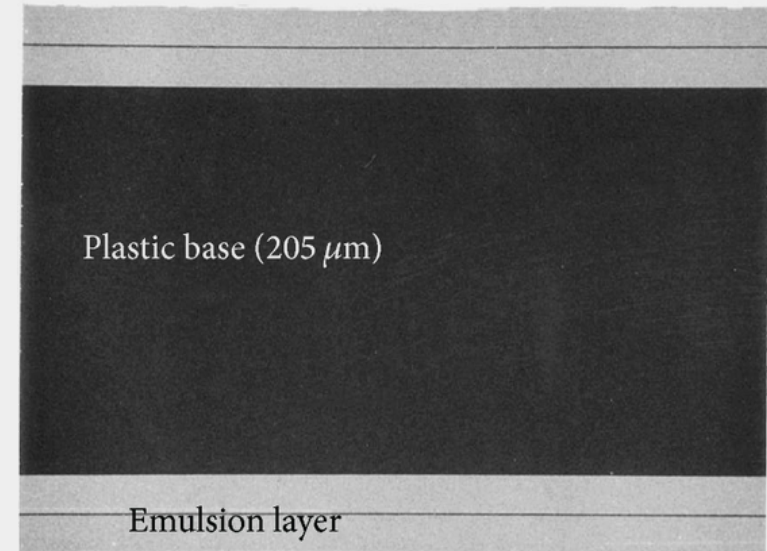




Detailaufnahme von Tröpfchen
Nebelkammer mit Isopropylalkohol

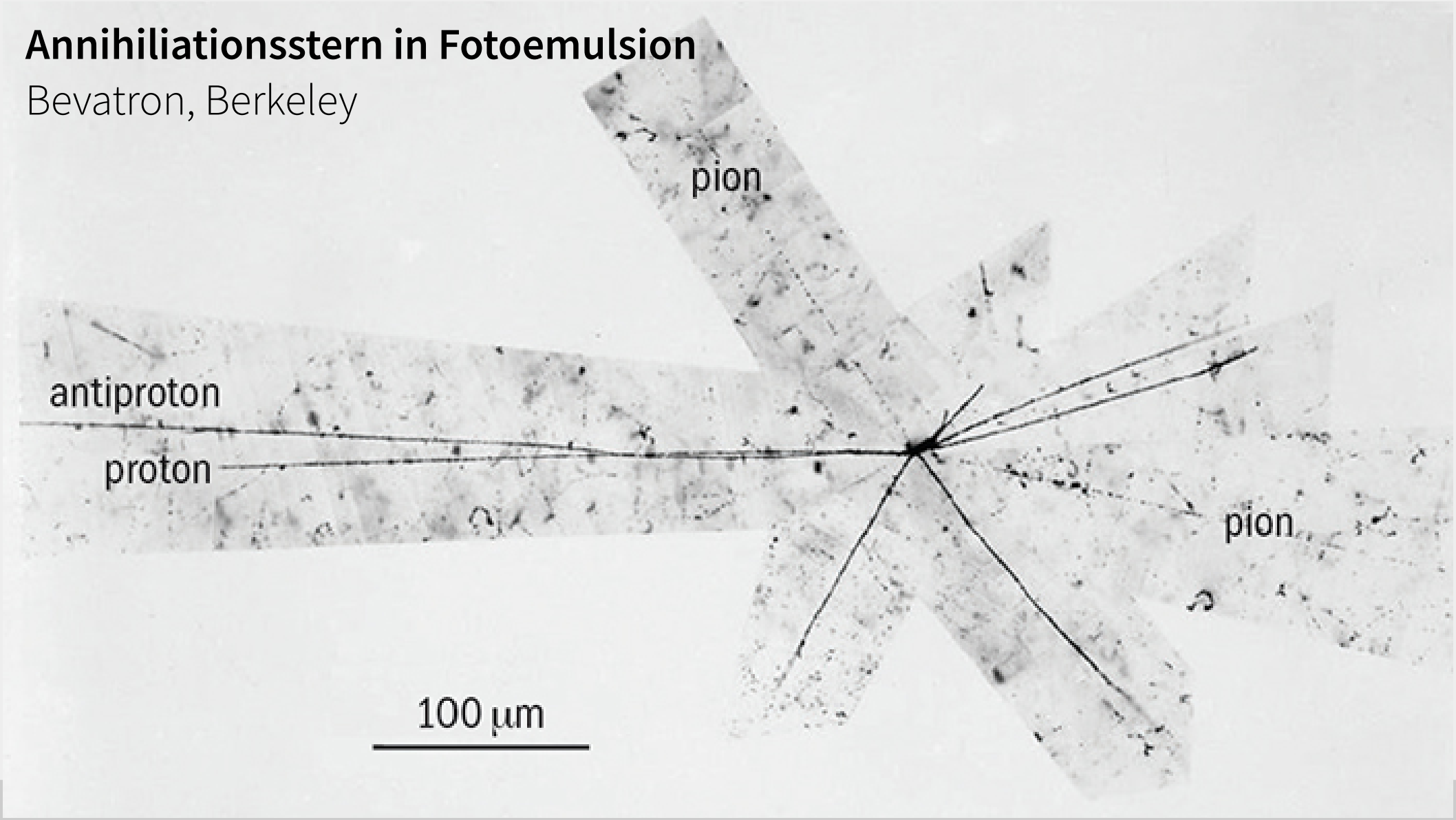
Photoemulsion

- Fotoplatte mit dicker empfindlicher Schicht und sehr gleichmäßiger Korngröße
 - Ionisierende Strahlung hinterlässt Spuren
 - Entwicklung der Platte
 - Spuren der Teilchen (geschwärzt durch Silber) sichtbar mit Mikroskop
- **Nobelpreis 1950 für Cecil Powell**
- OPERA Experiment in Gran Sasso
 - Photoemulsions-Platten zur Teilchenrekonstruktion
 - AgBr-Emulsion, Kooperation mit Fuji Film: 9 Millionen Filme, je ca. 10 x 12 cm

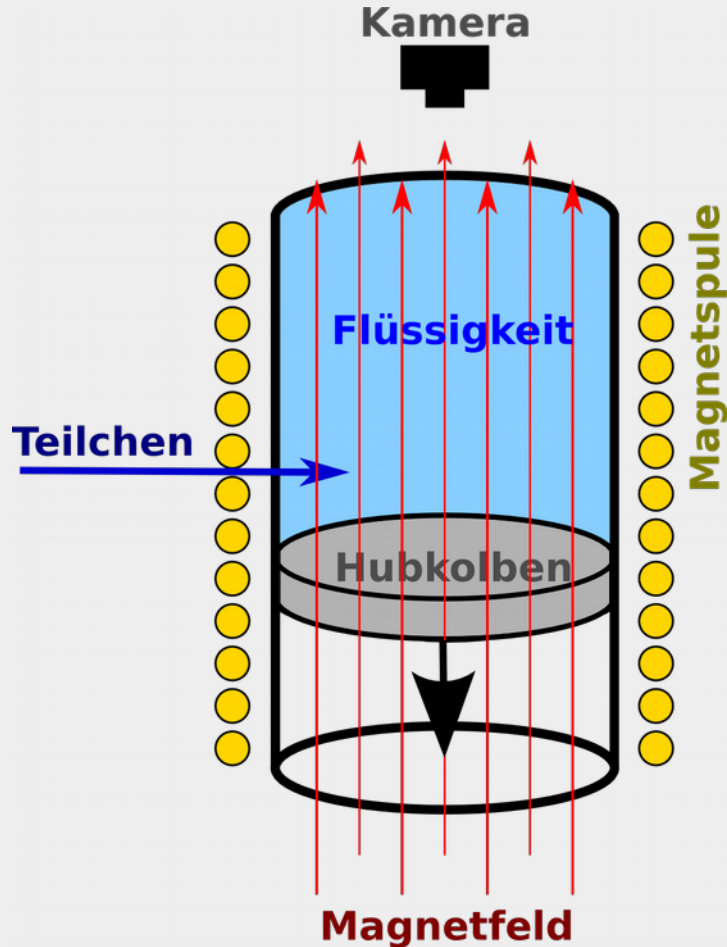


Annihilationsstern in Fotoemulsion

Bevatron, Berkeley



Blasenkammer



- Optisch durchsichtige Kammer gefüllt z.B. mit flüssigem Wasserstoff
 - Temperatur der Flüssigkeit nahe des Siedepunktes
 - Verringerung des Kammerdrucks mit Kolben
 - Temperatur der Flüssigkeit liegt nun oberhalb des Siedepunktes
 - Geladene Teilchen erzeugen Ionen entlang Spur
 - Ionen dienen als Keime für Gasblasen
- Analyse von Fotos der Spuren
- **Nobelpreis 1960 für Donald A. Glaser**

Blasenkammern @ CERN



- Wichtigster Teilchendetektor-Typ in den 1970er
- Teilchenquelle: Proton-Synchrotron
- Gargamelle – 1970–1978
 - 4.8 m x 1.88 m, 12 000 l
 - Erstmaliger Nachweis des Z-Bosons
- BEBC – 1971–1984
 - Big European Bubble Chamber
 - 3.5 T Magnetfeld von supraleitenden Spulen
 - Entdeckung des D-Mesons
- Zu besichtigen hinter „Microcosm“

Blasenkammer-Aufnahme

Big European Bubble Chamber @ CERN



Problematik früher Teilchendetektoren

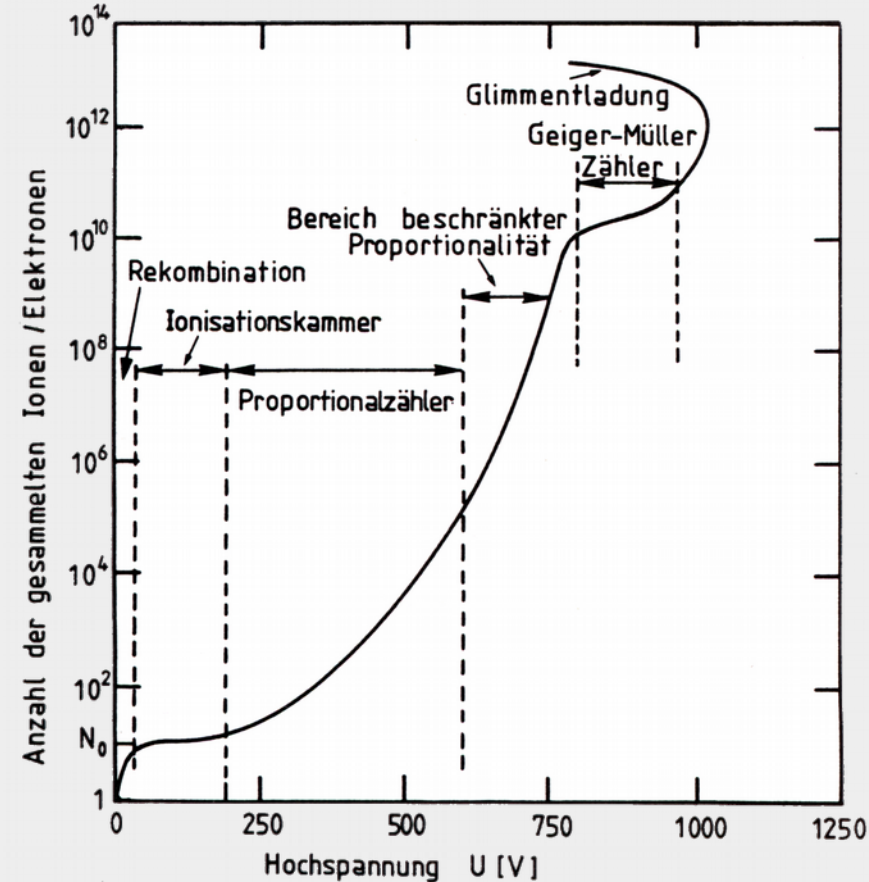
- Viele basierend auf fotografischen Aufnahmen
 - Datenauswertung aufwendig und nur von Hand möglich
 - Limitierung der Datenmenge
- Lange Detektor-Totzeiten
 - Keine weitere Messung möglich, bis Gas-Lawine abgeklungen/Bläschen verschwunden sind
 - Nur geringe Teilchenraten möglich
- Nur wenig Information in Messung
 - Aussage über Teilchenort (& -Impuls), aber keine Energie/Zeit-Messung

Gasdetektoren

Primär- & Sekundärionisation von Gasatomen

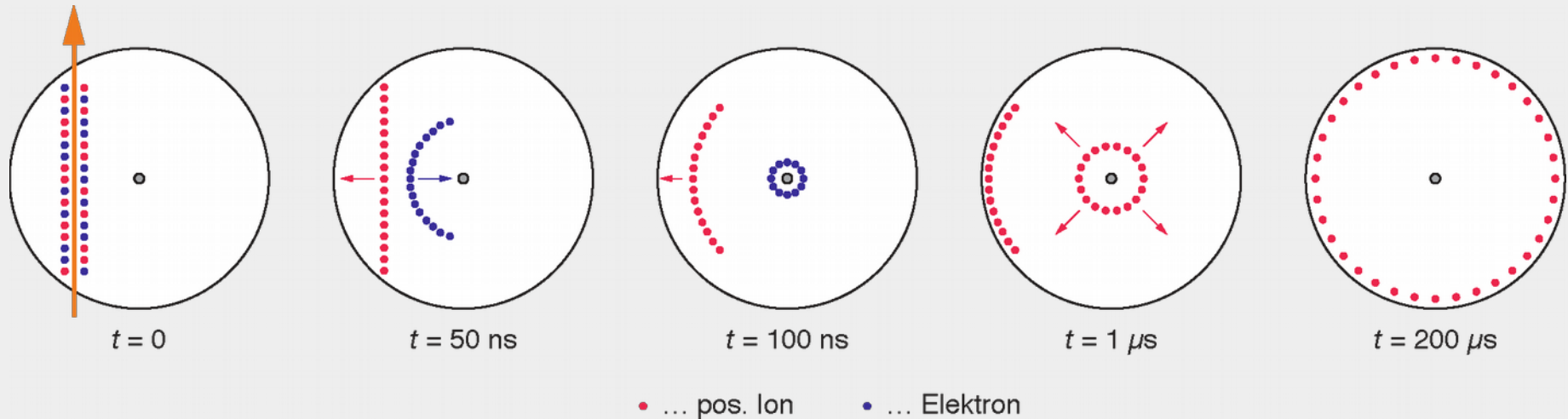
Gasdetektoren: Funktionsprinzip

- **Primärsignal:** geladenes Teilchen erzeugt durch Ionisation Elektron-Ion-Paare
 - Edelgase: relativ geringe Ionisationsenergie
 - Mittlere Energie zur Erzeugung eines Paares ~ 30 eV
 - Anzahl proportional zu deponierter Energie
- **Verstärkung:** verschiedene Arbeitsbereiche je nach angelegte Spannung
 - Mittlere Spannungen: proportionale Verstärkung
 - Hohen Spannungen: Lawinenbildung durch Sekundärionisationen

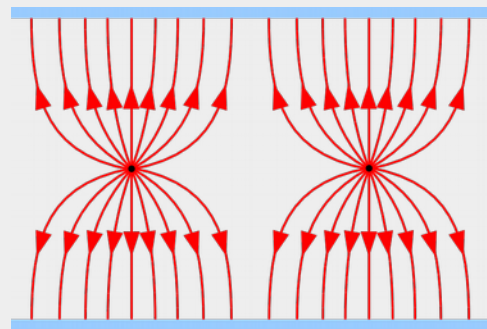
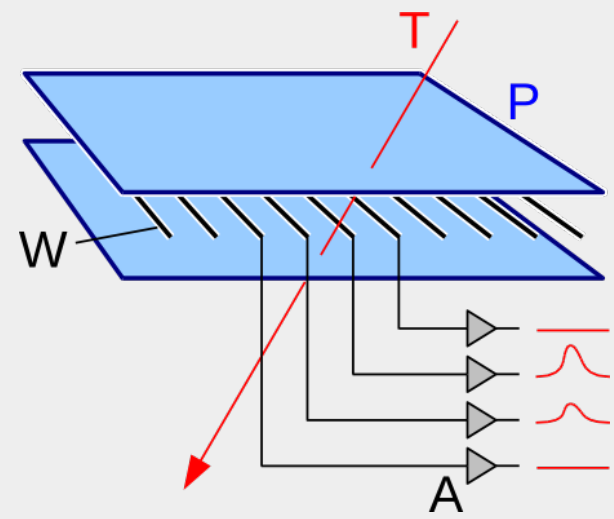


Proportional-Zählrohr

- Sehr ähnlich zum Geigerzähler: Anode in Form von dünnem Draht
- Hohes Feld in Drahtnähe führt zu Elektronenvervielfachung / Signalverstärkung
- Wahl der Spannung: Proportionalbereich
 - Ausgangssignal proportional zu ursprünglicher Zahl von Ionisationen



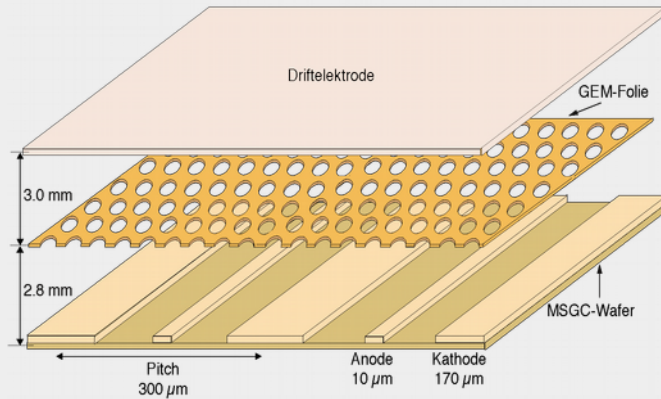
Vieldraht-Proportionalkammern



- Englisch: Multi Wire Proportional Chamber, MWPC
- Wie ebene Lage von vielen Proportionalzählrohren ohne trennende Zwischenwände
- Drähte im Abstand von wenigen Millimetern
 - Gute Ortsauflösung eines durchquerenden Teilchens
 - Große Flächen möglich
 - Elektronische Auslese
- Hohe Raten möglich: 1000 Teilchen/s
zum Vergleich, Blaskammer: 1-2 Teilchen/s
- **Nobelpreis 1992 für Georges Charpak**

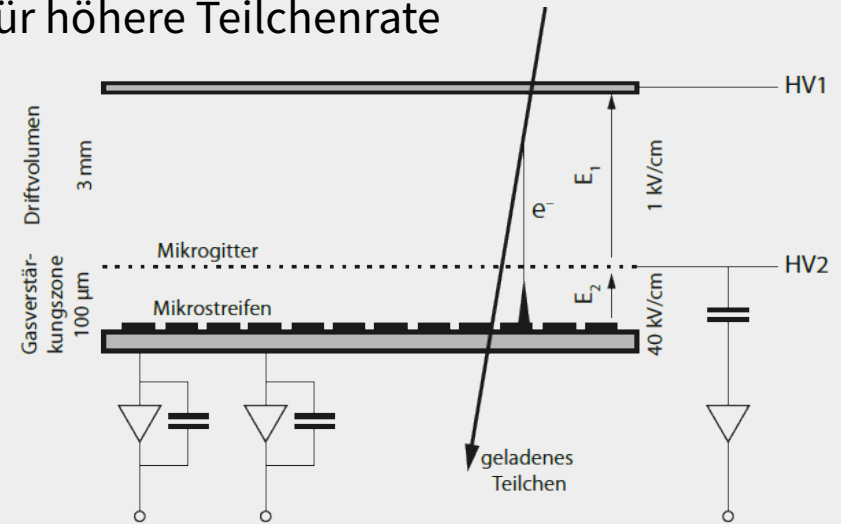
Micropattern-Gas-Detektoren

- Ersetzen der fragilen Drähte durch Mikrostrukturen
- Potentiell bessere Ortsauflösung und anwendbar für höhere Teilchenrate



Gas-Elektronenverstärker (GEM)

- Perforierte, metallisierte Kapton-Folie, Hochspannung zwischen Elektroden
- Starkes Dipol-Feld in Perforationslöchern: Gasverstärkung

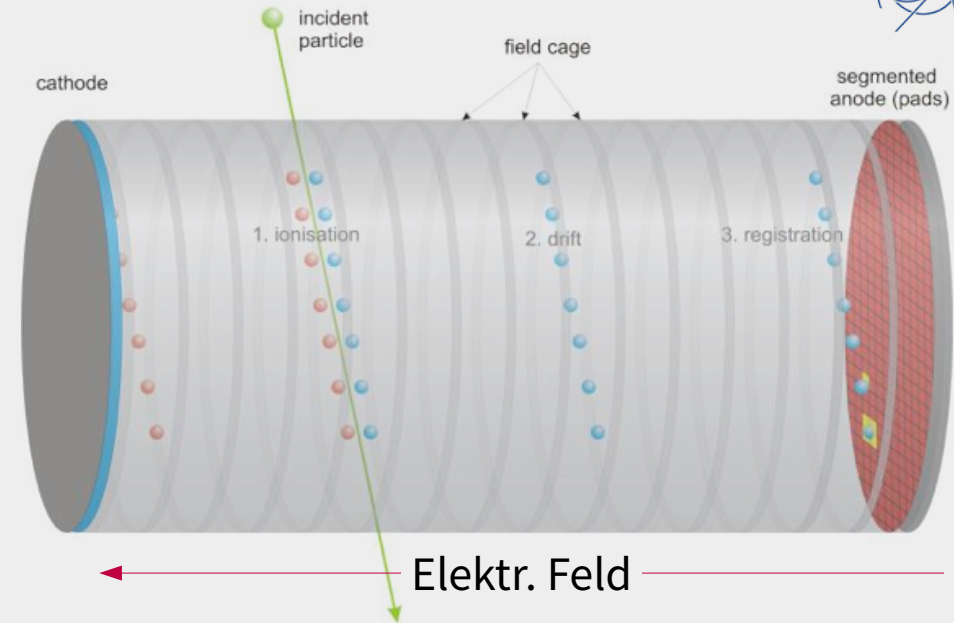


Micro-Mesh Gas Detectors (Micromegas)

- Metallisches Mikrogitter
- Elektron-Lawinenentwicklung in Nähe des Gitters: Gasverstärkung

Zeitprojektionskammern (TPC)

- Großes Gasetektor-System
- Ionisation entlang der Teilchenspur
 - Elektronen und Ionen driften im E-Feld
 - Segmentierte Anode: 2D-Information
 - Messung der Driftzeit: 3D-Information
- Auslese an Anodenseite z.B. über Vieldraht-Proportionalkammer, GEMs, ...





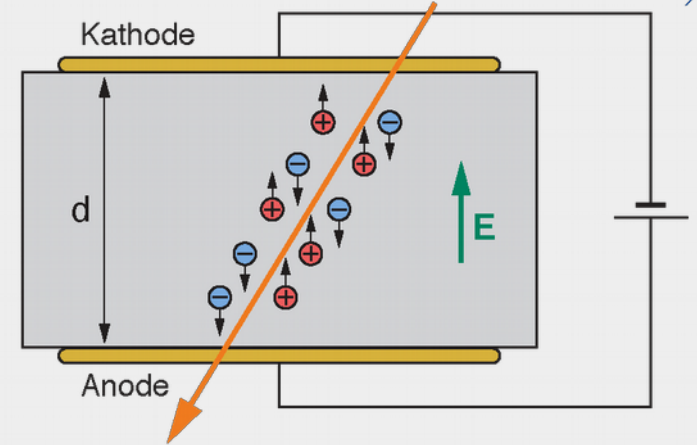
Zeitprojektionskammer
ALICE Experiment @ LHC

Halbleiterdetektoren

Über die Bandlücke ins Leitungsband

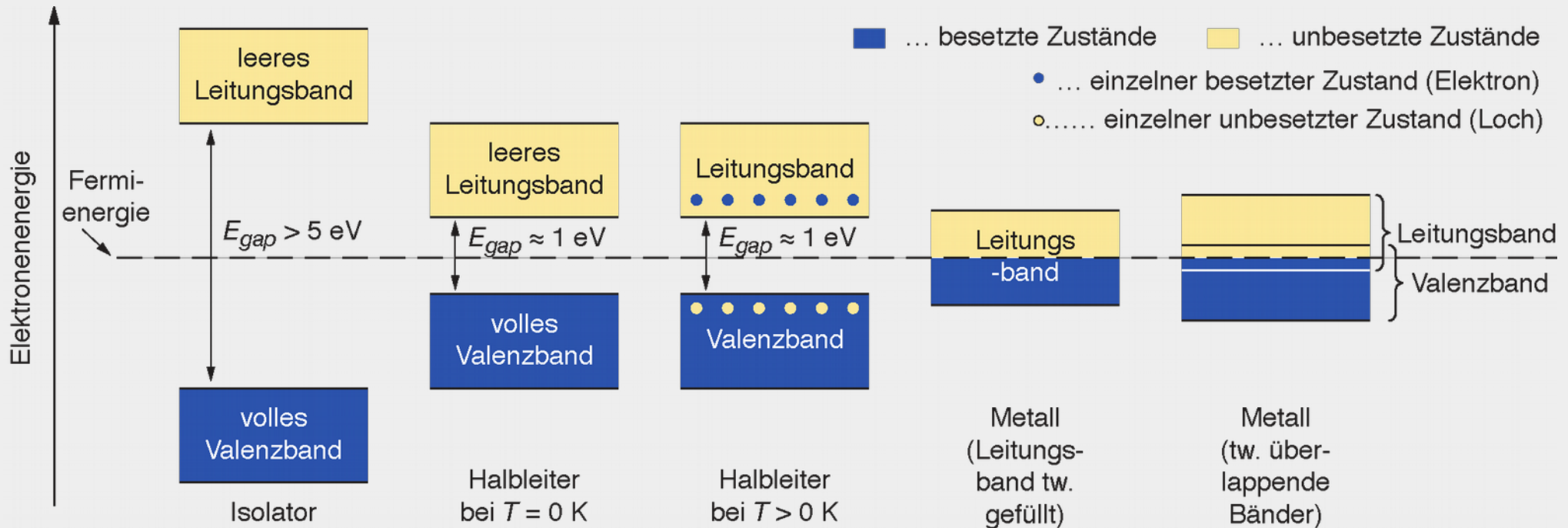
Detektionsprinzip

- Festkörperdetektor
 - Viele höhere Dichte als Gas-Detektoren
 - Hoher Energieverlust auf relativ kurzer Strecke
- Funktionsprinzip analog zu Gasdetektoren
 - „Ionisation“ zur Erzeugung von freien Ladungsträgern
 - Drift durch elektrisches Feld
 - Detektion als elektrisches Signal an Elektroden
- Halbleiter:
 - Silizium, Diamant, Germanium, GaAs, CdTe, ...



Bändermodell: Isolator – Halbleiter – Leiter

- Im Kristallgitter verschimmen diskrete Energieniveaus zu Energiebändern
- Position des Valenz- und Leitungsbandes entscheidet über Leitungseigenschaft:

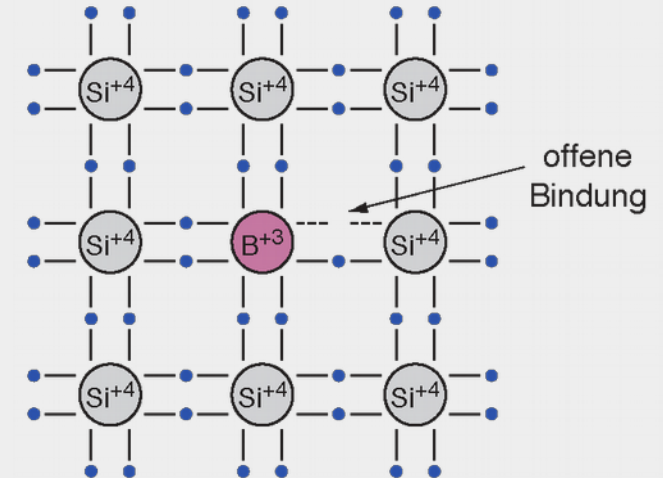
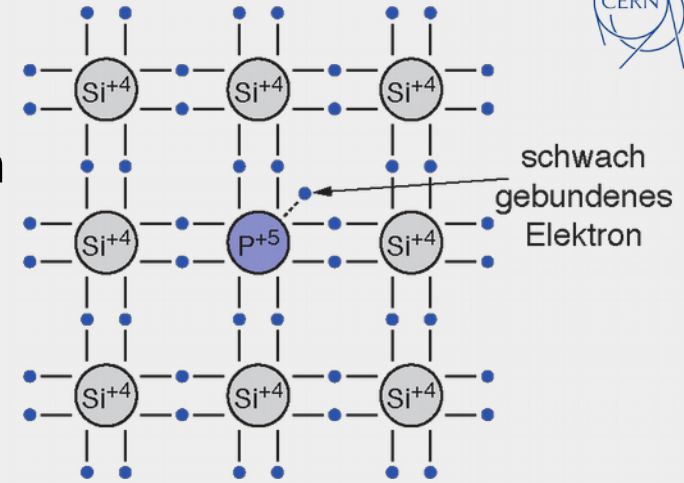


Wahl des Halbleiters

- Halbleiterdetektoren in der Hochenergiephysik: fast ausschließlich **Silizium**
 - Industriell verfügbar über IT-Branche (Verfügbarkeit, Weiterentwicklung)
 - Bandlücke groß genug $E_G = 1.12 \text{ eV}$ für Betrieb bei Raumtemperatur
 - Mittlere Energie zur Elektron-Loch-Erzeugung: **$E = 3.64 \text{ eV}$** (Gasdetektor: x 10)
- Germanium: $E_G = 0.74 \text{ eV}$
 - Bei Raumtemperatur zu viele freie Ladungsträger, benötigt Kühlung
 - Bessere Energieauflösung, wird oft in Spektrometern eingesetzt
- Diamant: $E_G = 5.4 \text{ eV}$, wird manchmal für besondere Strahlenhärte eingesetzt
- GaAs, CdTe, CYT... : Hauptsächlich eingesetzt in Röntgenspektroskopie

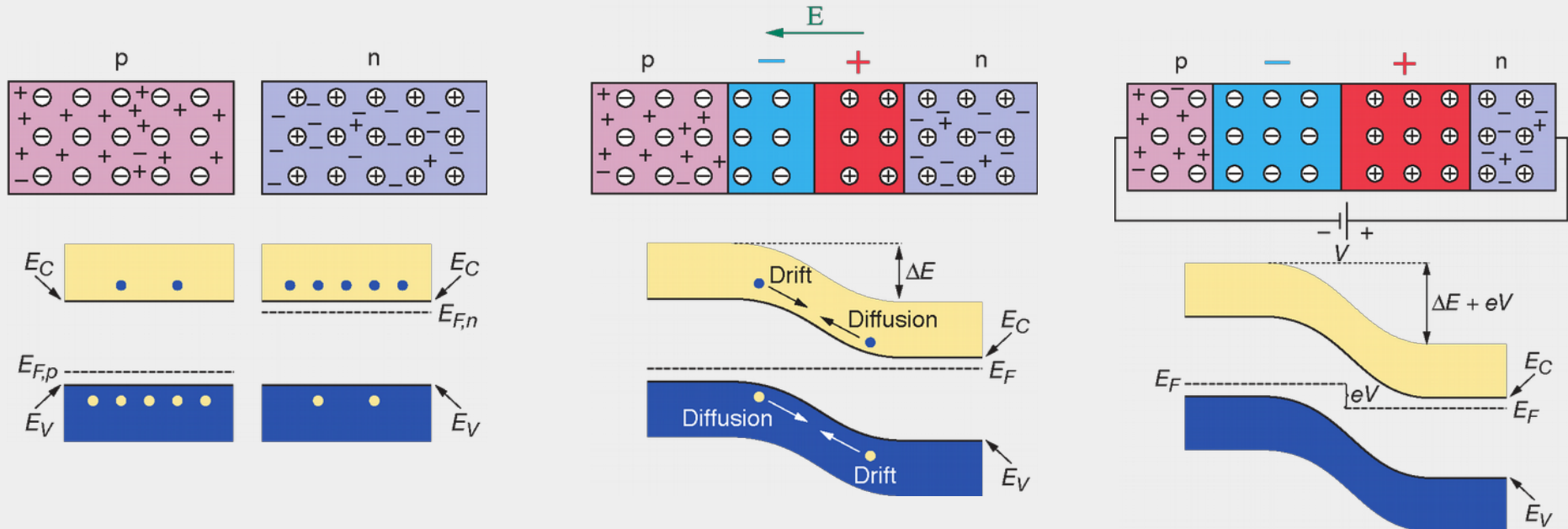
Dotierung von Halbleitern

- Anpassung der Materialeigenschaften durch Dotieren (Englisch: Doping)
- Silizium: IV. Gruppe, kristallin, bei $T = 0\text{ K}$ keine freien Ladungsträger
- Ersetzen einiger Siliziumatome durch z.B.
 - V. Gruppe: Phosphor
 - III. Gruppe: Bor
- Zusätzliche Energieniveaus in der Bandlücke
- Zusätzliche Elektronen (n -Typ) bzw. Löcher (Defektelektronen, p -Typ)



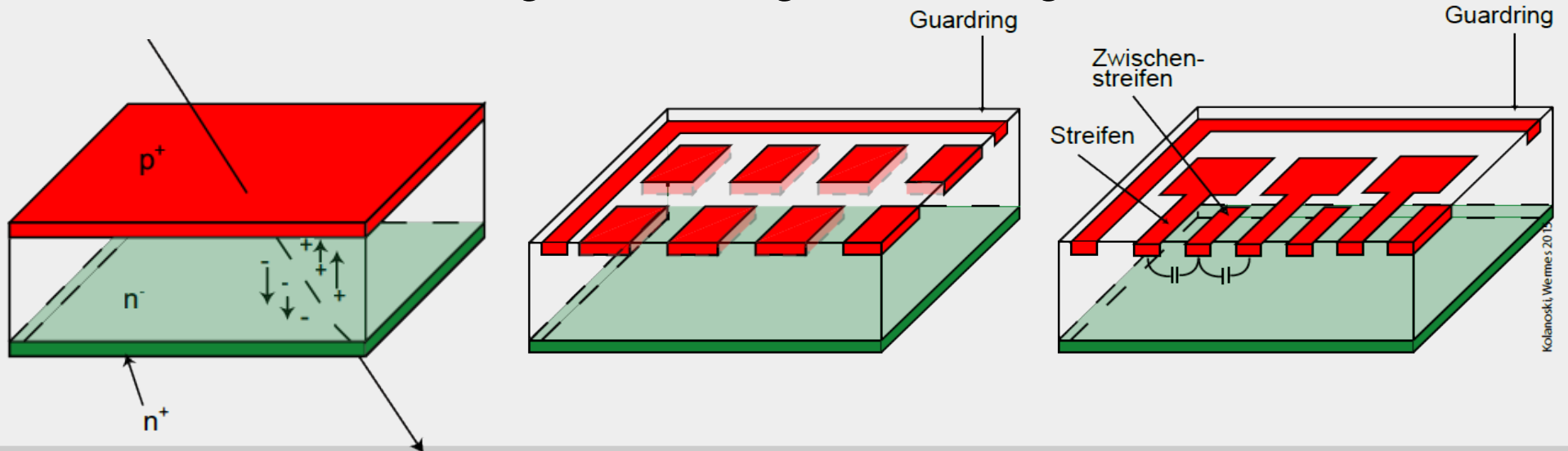
Der pn -Übergang

- Freie Ladungsträger: Intrinsisches Silizium $O(10^9) \leftrightarrow$ Signal $O(10^4)$
- Kombination von p - und n -dotiertem Silizium: Rekombination, Verarmungszone
 - Ladungsungleichgewicht erzeugt elektrisches Feld in Verarmungszone
 - Vergrößerung der Verarmungszone durch externer Spannung in Sperrrichtung: Depletion



Segmentierung der Elektroden

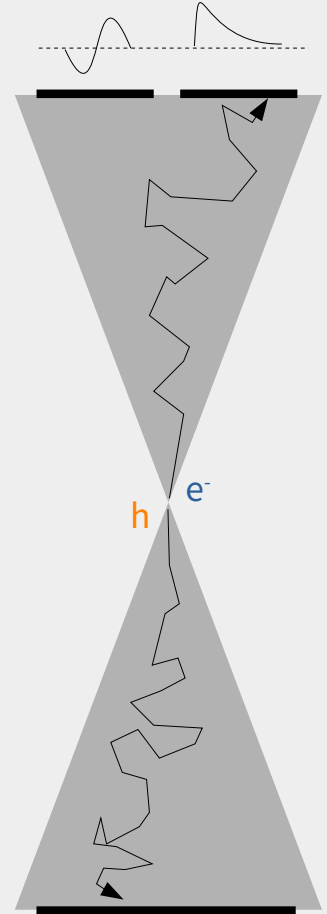
- Ionisierendes Teilchen regt beim Durchgang e- aus Valenzband ins Leitungsband: Erzeugung von e/h-Paaren
- e/h-Paare driften im elektrischen Feld zu den Elektroden, induzieren Signal
- Segmentierung der Elektrode: sehr hohe Ortsauflösungen
Kleine Strukturen von wenigen 10 μm möglich; Erfahrung aus Elektronikindustrie



Signalbildung in Silizium-Detektoren

- Induzierter Strom durch Bewegung der Ladungsträger
 - Diffusion
 - Temperatur-bedingte, zufällige Bewegung, nicht gerichtet
 - Langsame Bewegung
 - Drift
 - Gerichtete Bewegung durch elektrisches Feld
 - Nur in depletierten Bereichen
 - Schnelle Bewegung
- Gesamtbewegung: Überlagerung
- Beste Ortsauflösung:
Interpolation des Signals zwischen zwei Elektroden:

$$x = \frac{\sum_i Q_i x_i}{\sum_i Q_i}$$



Streifendetektoren

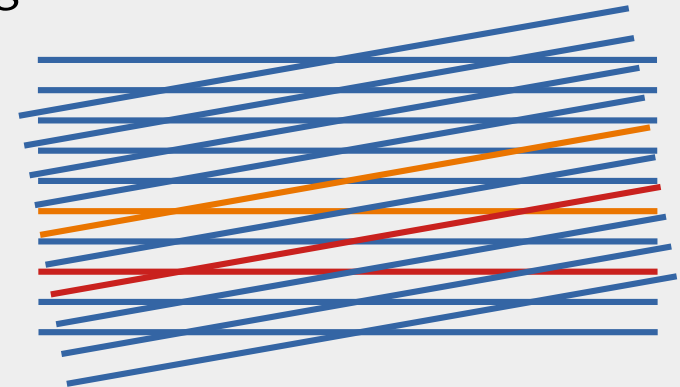
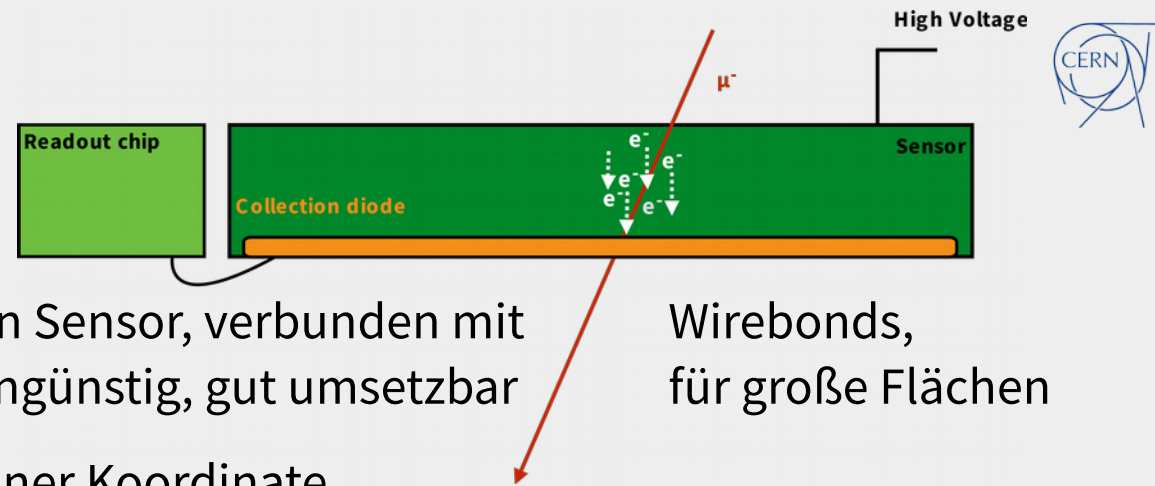
- Streifen als Ausleseelektroden

- Vorteil: Ausleseelektronik neben Sensor, verbunden mit Relativ einfach zu bauen, kostengünstig, gut umsetzbar
- Nachteil: Ortsmessung nur in einer Koordinate

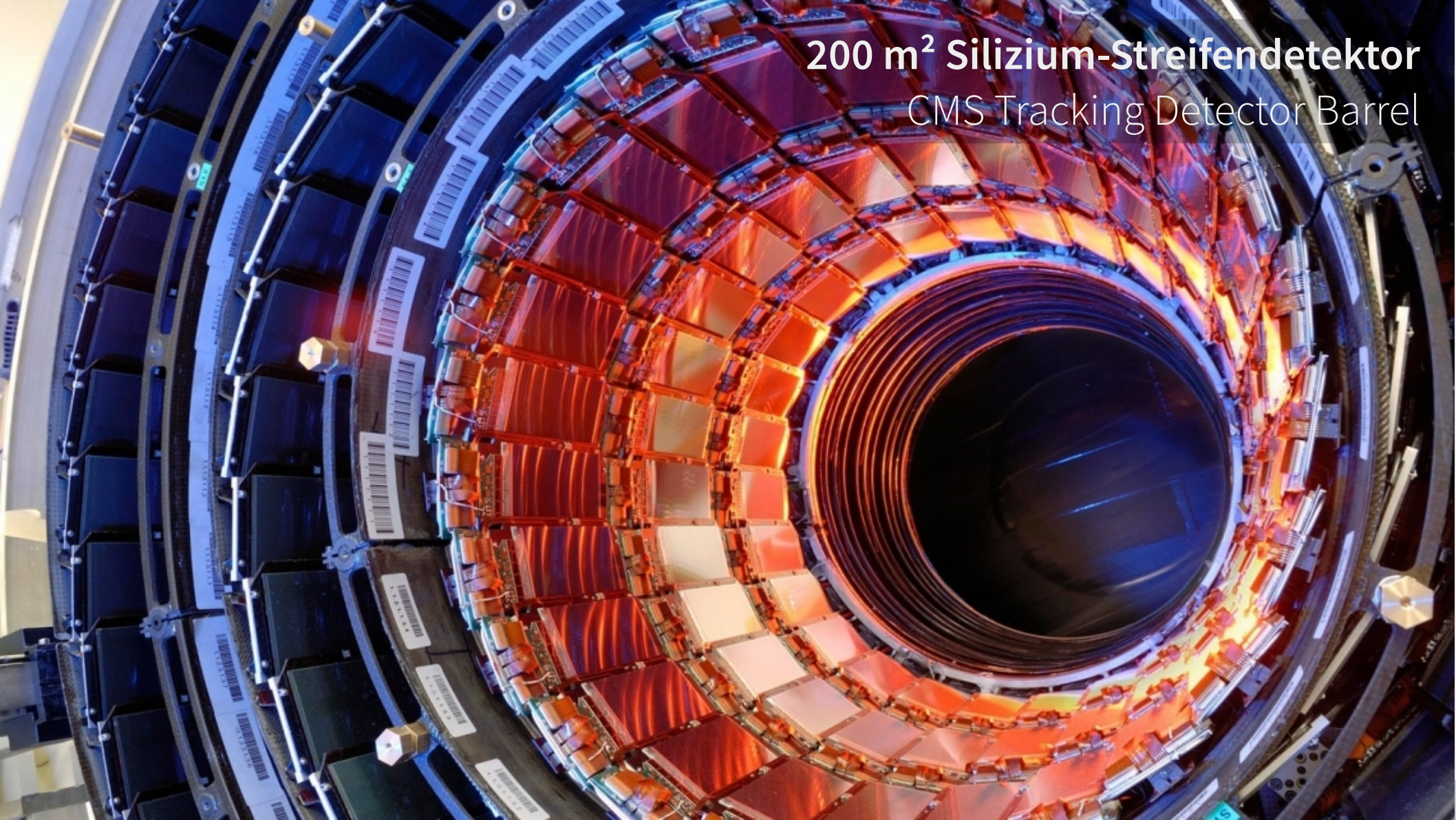
- 2D Messung über Stereo-Winkel

- Zwei Detektormodule übereinander, leicht rotiert gegeneinander
- Ratenlimitierung durch Mehrdeutigkeiten

- Verwendet für große Flächen:
Große Radii vom Interaktionspunkt,
großer Hebelarm für Impulsmessung



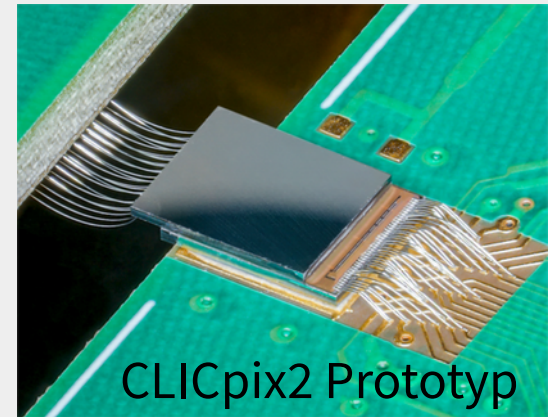
200 m² Silizium-Streifendetektor
CMS Tracking Detector Barrel



Silizium-Pixeldetektoren

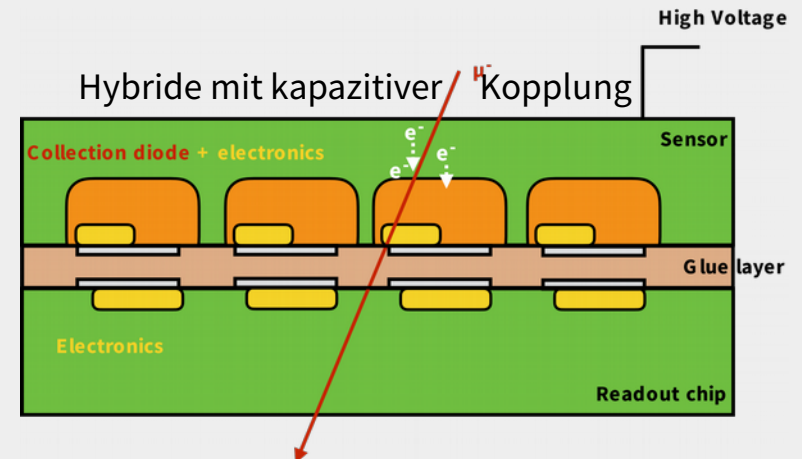
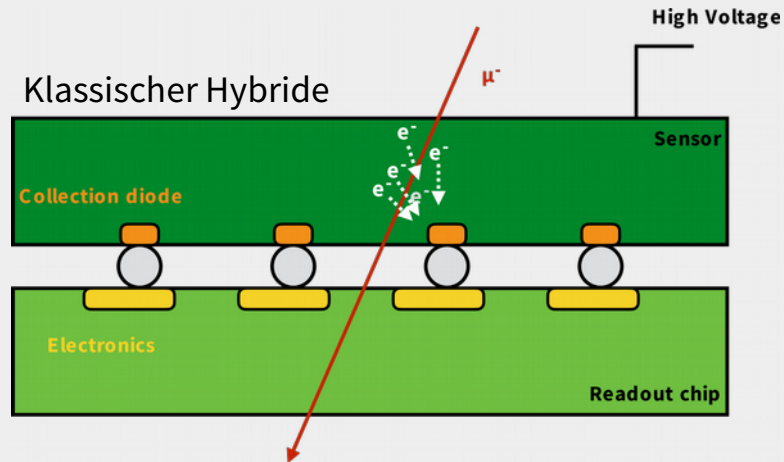


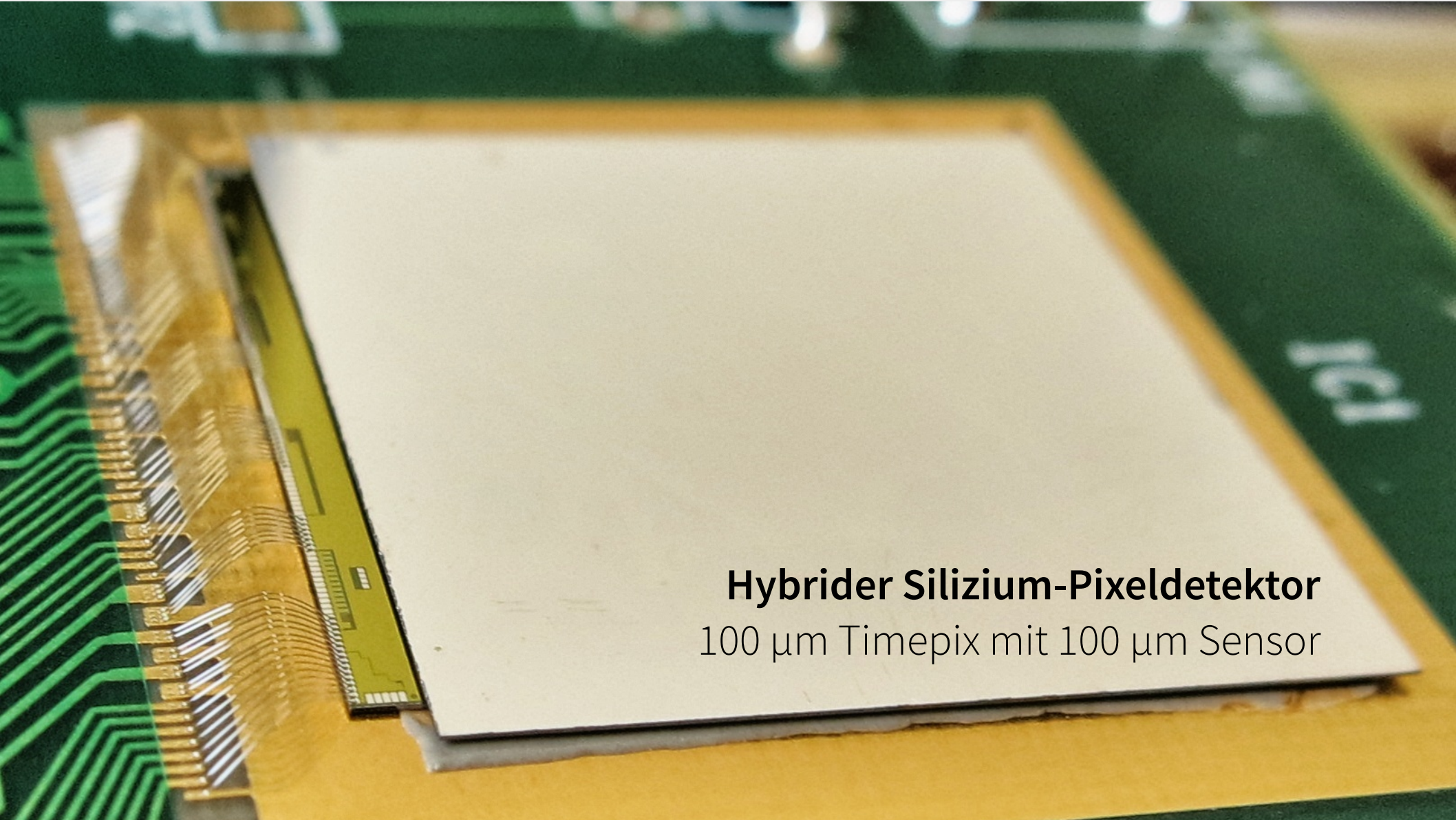
- Segmentierung in zwei Dimensionen
 - Vorteil: Direkt 2D Ortsmessung, kein Stereo-Winkel
 - Nachteile: Verbindung zur Ausleseelektronik, sehr viel mehr Kanäle
- Verschiedene Technologien, Auslesekonzepte, Sensor-Aufbauten
 - Genauer Aufbau eines Sensors sehr komplex (Metallisierung, Passivierung...)
 - Detektoren konzipiert und optimiert für jeweiligen Einsatzzweck (Experiment)
- Pixelgrößen von wenigen $10\ \mu\text{m}$ → gute Ortsauflösung
- Sensordicken von wenigen $100\ \mu\text{m}$ → Wenig Vielfachstreuung bei Durchgang



Pixeldetektor-Technologie: Hybride

- Trennung von Ausleseelektronik und Sensor in zwei Silizium-Chips
 - Verbindung über kleine Metallkugeln (Bump Bonds) oder Klebelage
 - Sensor-Doping wie gewünscht, hohe Spannung zum Depletieren möglich
 - Auslese-Chip kann volles Potential kommerzieller Prozesse ausschöpfen
- Kleine Pixelgrößen mit viel Funktionalität möglich – aber sehr teuer zu produzieren

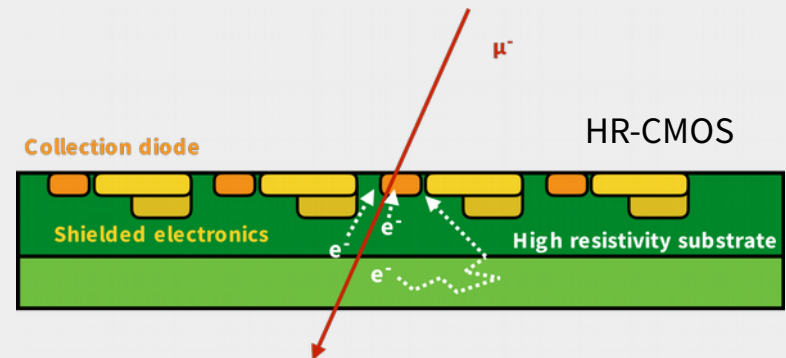
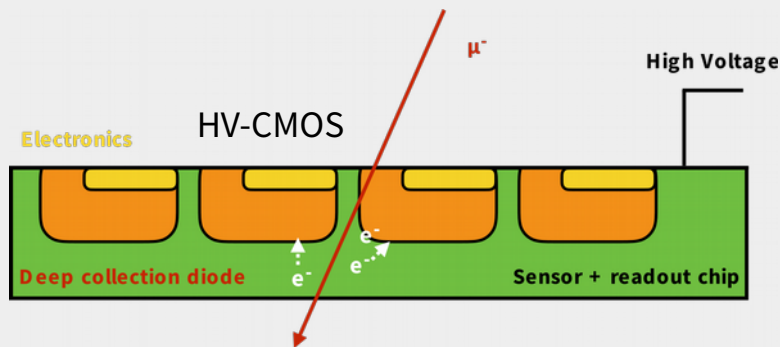




Hybrider Silizium-Pixeldetektor
100 μm Timepix mit 100 μm Sensor

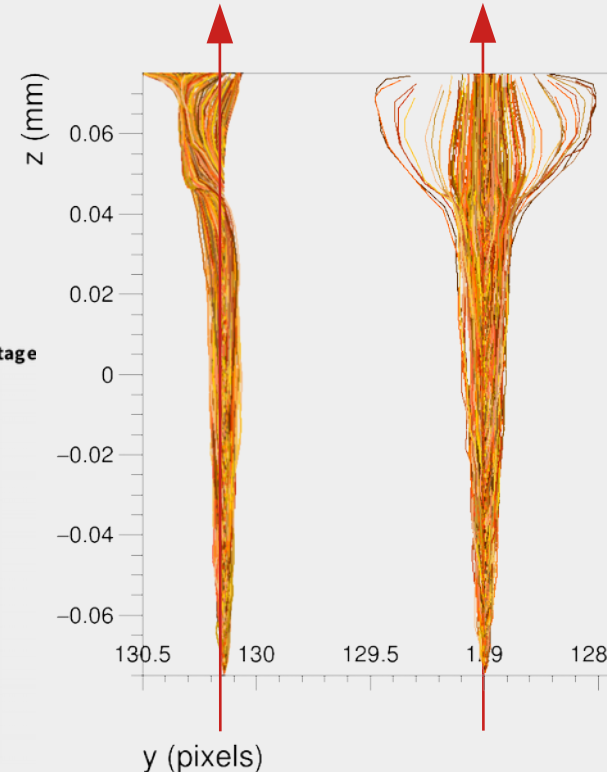
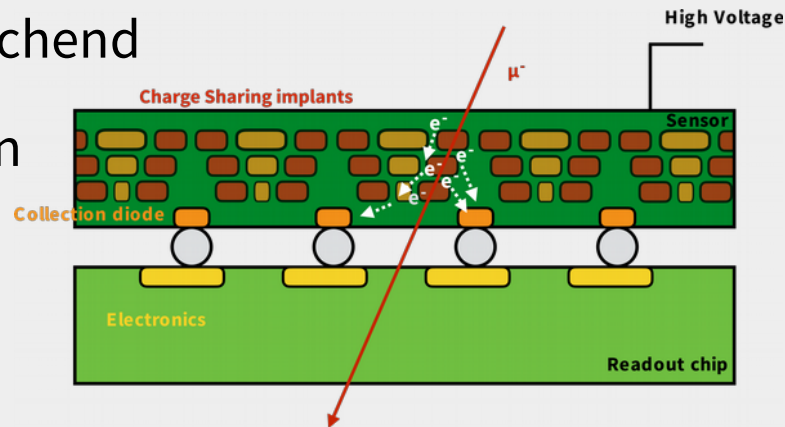
Pixeldetektor-Technologie: Monolithische Sensoren

- Ziel: minimales Material bei größtmöglicher Präzision
- Entfernung des Auslesechips, Implementierung der Elektronik im Sensor
 - Günstiger, da kein Bump Bonding, weniger Material
 - Problem: CMOS-Elektronik verträgt nur ca 3 V Spannung, keine Depletion
- Verschiedene Technologien, um „Sensor“ und „Elektronik“ zu isolieren



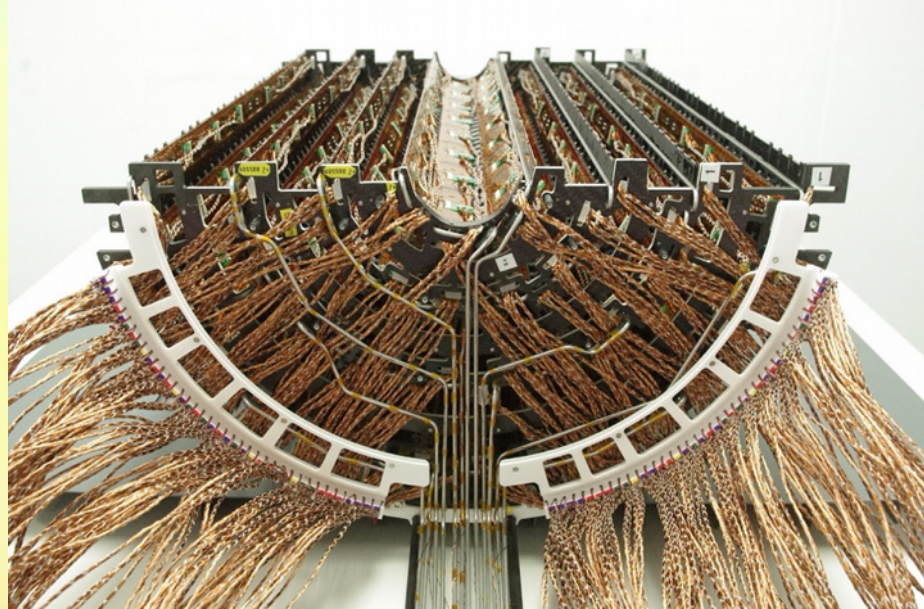
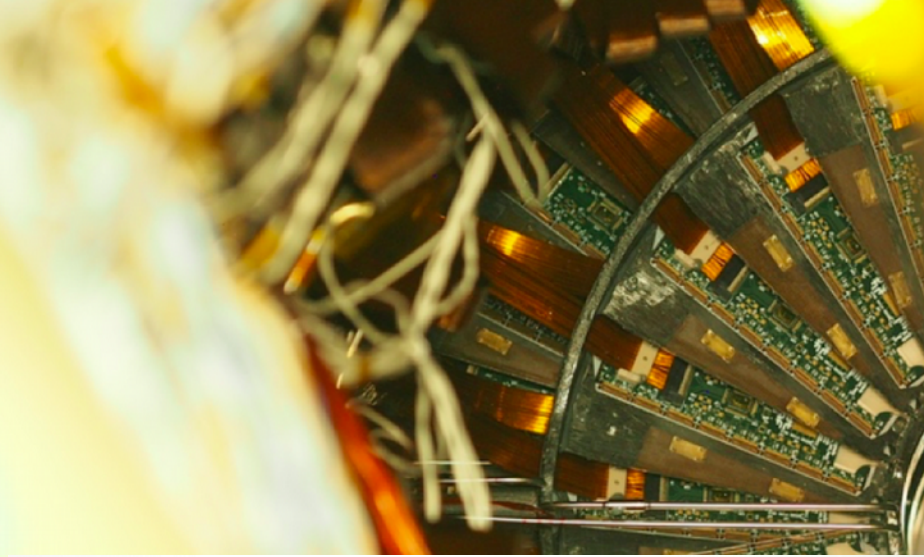
Pixeldetektor-Technologien: Neue Konzepte

- Problem: bei sehr dünnen Sensoren kaum mehr Ladungsteilung zwischen Pixeln
- Künstliches Verstärken der Ladungsteilung durch zusätzliches Dotieren
 - Implantate erzeugen laterale Feldkomponenten
 - Ladung wird auf mehrere benachbarte Pixel verteilt
 - “Enhanced Lateral Drift Detectors”
- Simulationen vielversprechend
- Validierung an Prototypen steht noch aus





Installation des neuen Pixeldetektors
CMS-Experiment @ LHC



Endkappe und Zylinderhälfte
CMS Phase I Pixeldetektor

Spur-Rekonstruktion & Impulsmessung

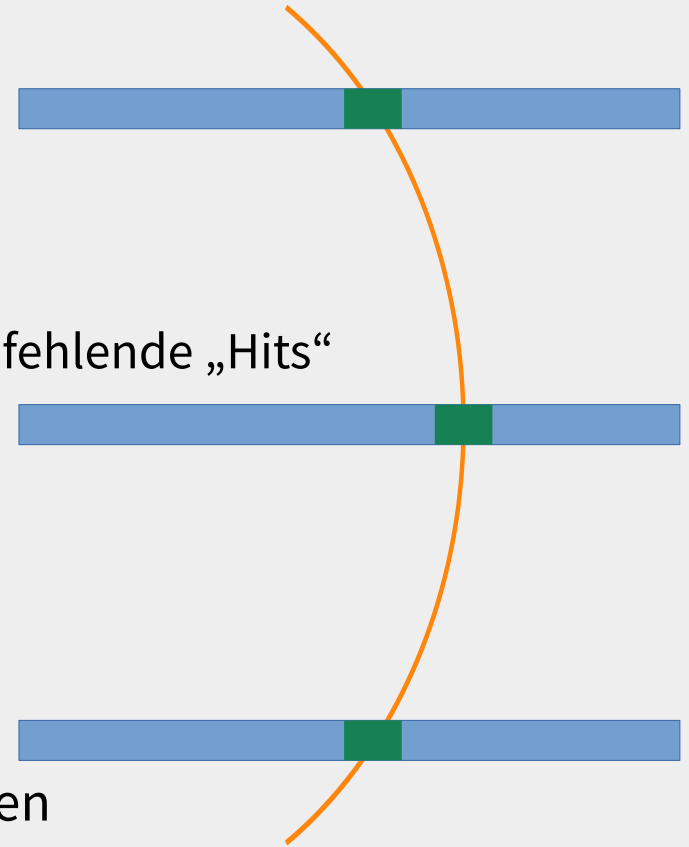
- Rekonstruktion von Teilchen-Trajektorien:
 - Homogenes B-Feld: Helix, Zylinderkoordinaten
 - Getrennte Mustererkennung für y und $r\varphi$
 - Schwierigkeit: sehr viele Spuren, Mehrdeutigkeiten, fehlende „Hits“

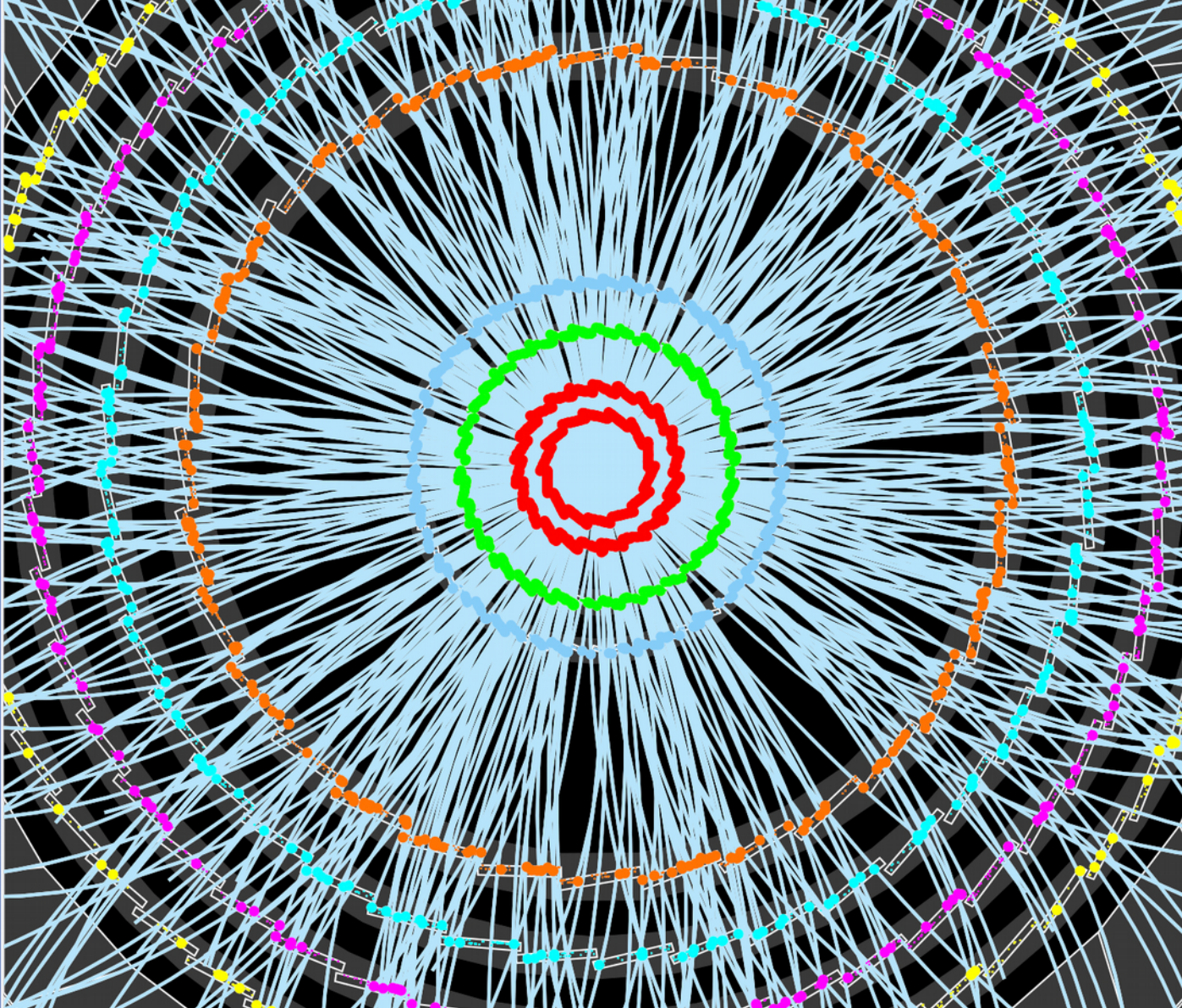
- Impulsmessung: Bahnkrümmung im Magnetfeld, Lorentzkraft:

$$F_L = Q \cdot [\vec{v} \times \vec{B}] \quad F_Z = m v^2 / r$$

$$p = Q \cdot B \cdot r$$

- Gute Auflösung mit starkem B-Feld und großen Radien



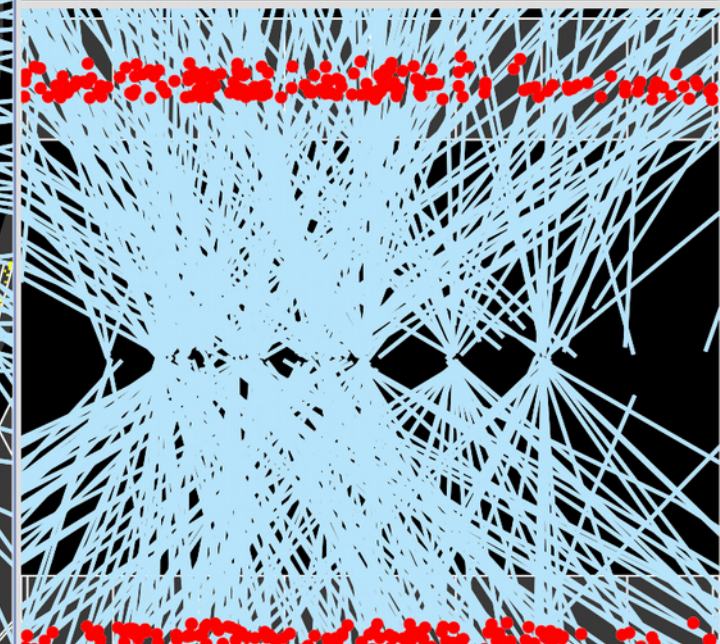


ATLAS

EXPERIMENT

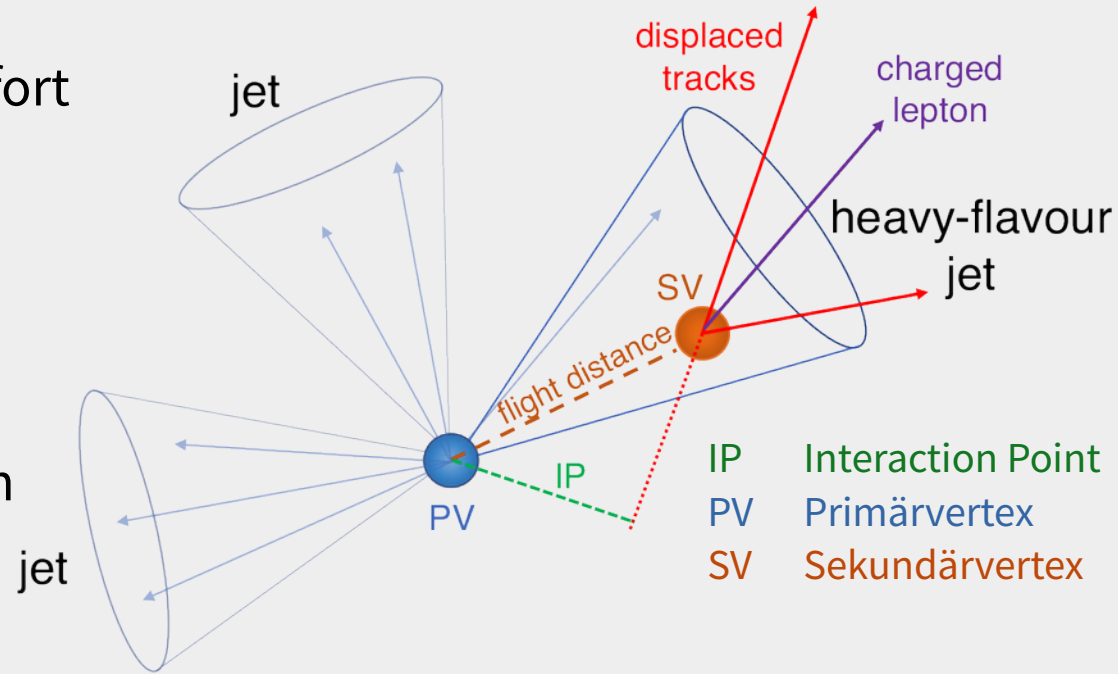
Run Number: 266904, Event Number: 25884805

Date: 2015-06-03 13:41:54 CEST



Sekundärvertex-Rekonstruktion

- Manche Teilchen zerfallen nicht sofort
 - Produktion in Kollision (PV)
 - Flug während Lebensdauer
 - Zerfall an Sekundärvertex
- Wichtige Messung zur Identifikation
- Benötigt präzise Ortsauflösung nah des Kollisionpunkts
- Wichtig z.B. für b-Quark-Bestimmung (Zerfall von Top Quarks),
Lebenszeit von b-Mesonen $\tau \approx 10^{-12}$ s \rightarrow $d/\gamma \approx 0.1$ mm

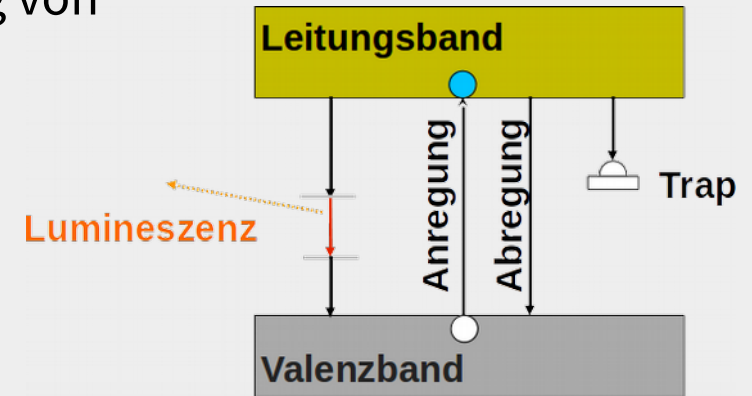


Szintillatoren

Anregung und Lumineszenz

Funktionsprinzip

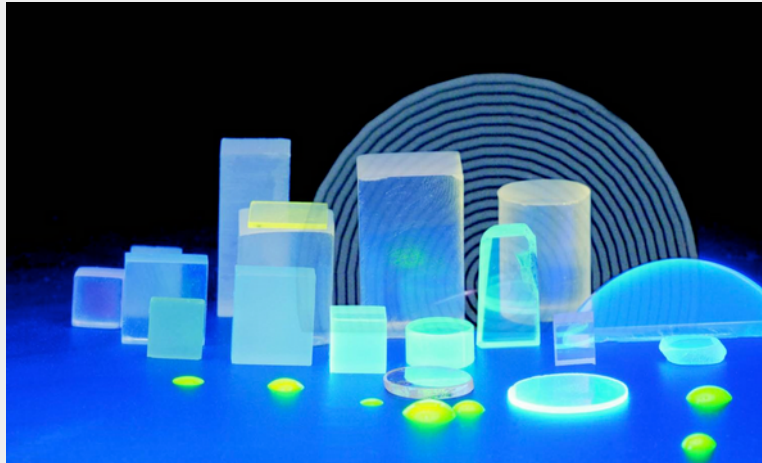
- Szintillation: Emission von Photonen nach Anregung von Atomen oder Molekülen durch Teilchen
- Sehr komplexer Vorgang
 - Viele Zwischenniveaus
 - Strahlende und nicht strahlende Übergänge
 - Anregung von anderen Elektronen durch emittiertes Photon
- Umwandlung eines Bruchteils der Anregungsenergie in Licht
- Auslese z.B. mit **Photomultiplier-Tubes** oder **Silizium-Photomultipliern**



Materialien

Anorganische Kristalle

- NaI, PbWO₄, BaF₂, ...
- Relativ langsam: 10-1000 ns Abklingzeit
- Hohe Dichte
- Wellenlänge: 300-500 nm

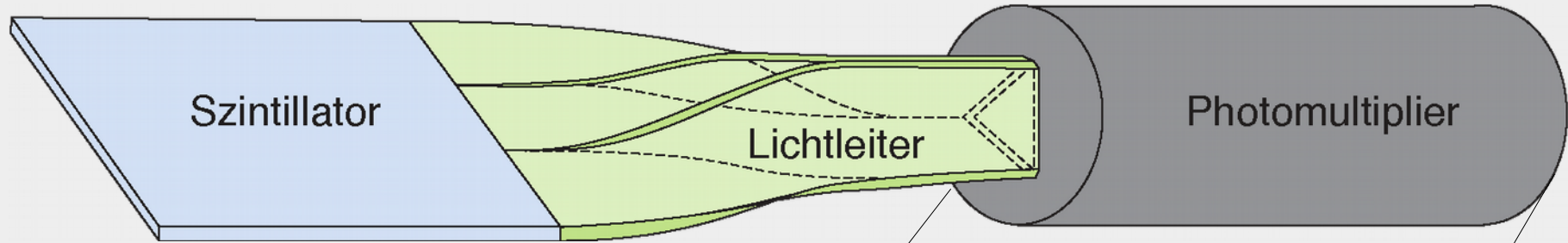


Plastik-Szintillatoren (organisch)

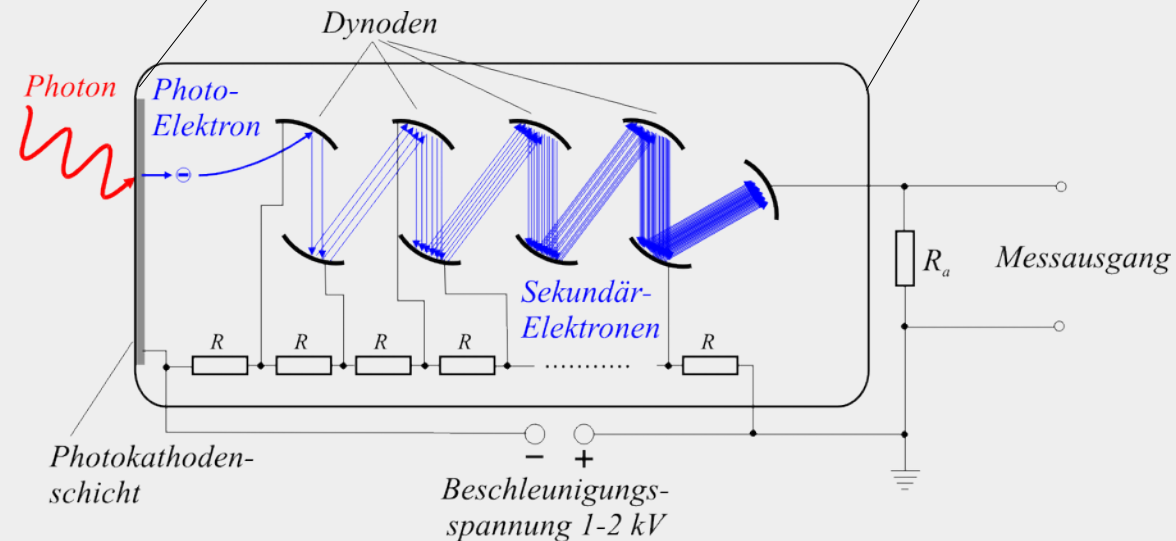
- Große Auswahl an Materialien
- Schnell: 1-10 ns Abklingzeit
- Geringe Dichte, einfache Verarbeitung
- Wellenlänge: 300-400 nm



Szintillator mit PMT-Auslese

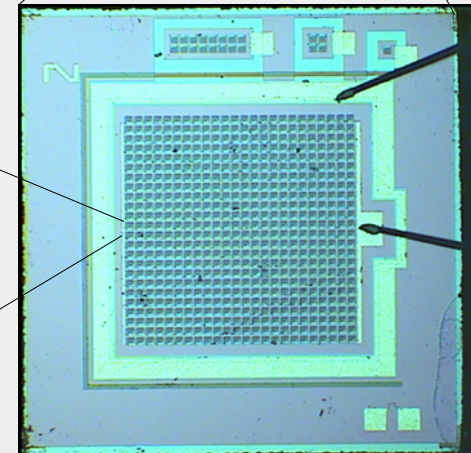
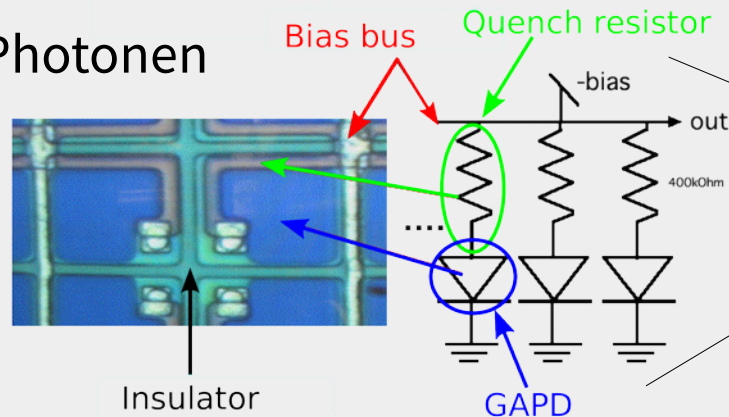
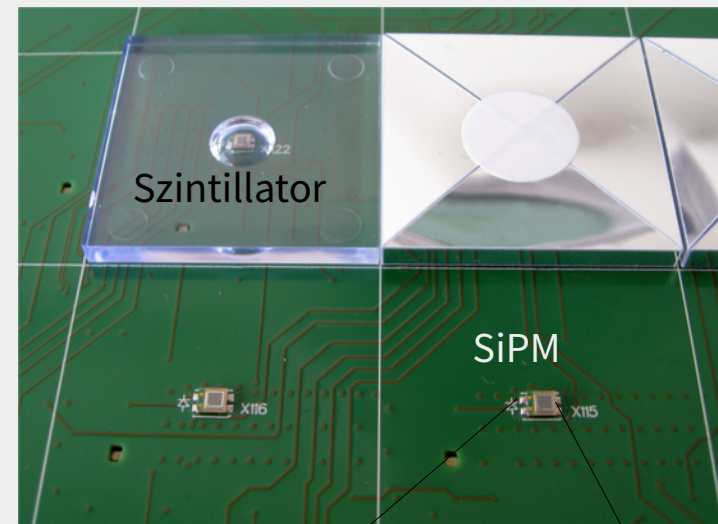


- Leicht zu bauen, viel verwendet
- Referenzmessung, Trigger, ...
- Für HEP-Experiment unpraktisch:
 - Relativ groß
 - Funktioniert nicht in Magnetfeldern



Szintillator mit SiPM-Auslese

- SiPM: Silicon Photo-Multiplier
- Matrix von Photodioden im Geiger-Modus
- Einzelnes Photon \rightarrow Photoelektrischen Effekt:
Lawine von Elektronen ($10^5 - 10^7 e^-$)
- Lawine wird mit Quench-Widerständen abgebrochen
- Nachweis von einzelnen Photonen

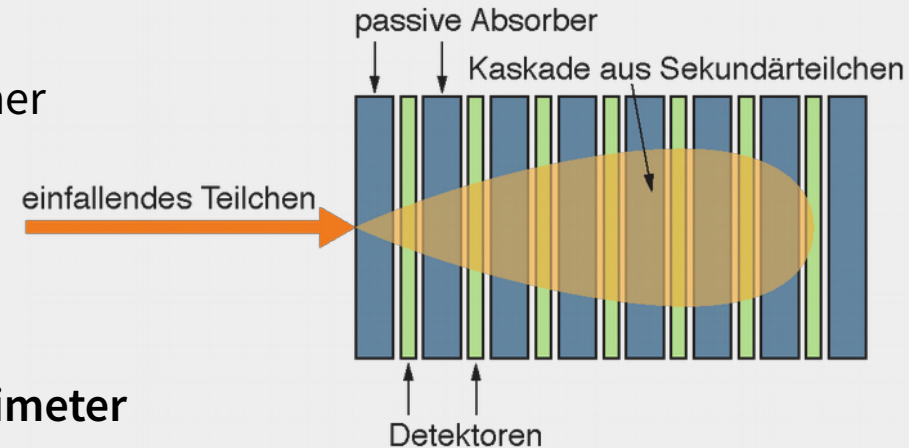
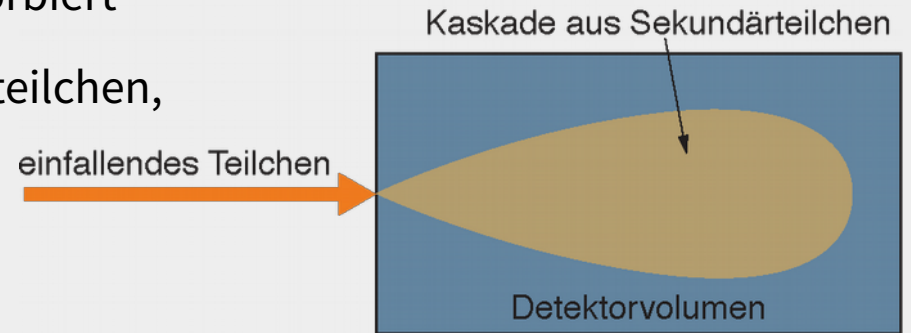


Kalorimeter

Schauer, Absorption, Messung

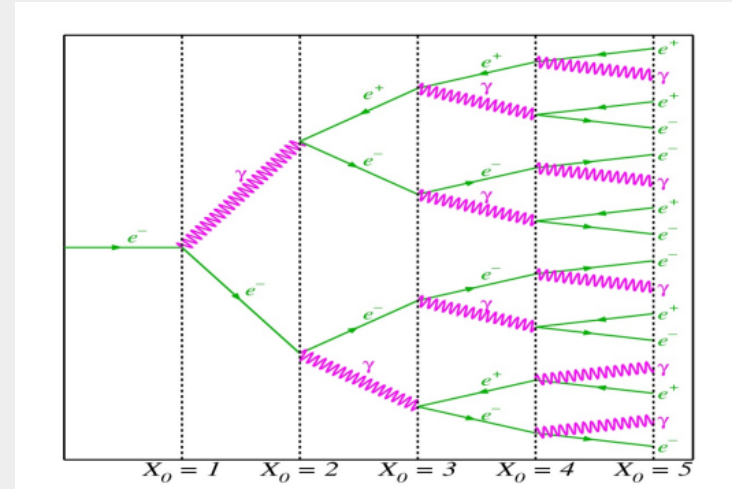
Kalorimeter-Konzepte

- Dichter Detektor, der das Teilchen vollständig absorbiert
- Das Teilchen erzeugt einen Schauer von Sekundärteilchen, die ihre Energie im Detektor deponieren
 - Wärme, Ionisation, Atomare Anregung
 - Bremsstrahlung
 - Cherenkov-Licht, Szintillations-Licht
- Die Form des Schauers hängt vom Teilchen und seiner Energie ab
- Ideales Kalorimeter:
Signal \propto deponierte Energie \propto Teilchenenergie
- Man unterscheidet **homogene** und **Sampling-Kalorimeter**



Elektromagnetische Schauer

- Kaskade aus Photonen & Elektron-Positron-Paaren
 - e^\pm emittiert γ via Bremsstrahlung
 - γ erzeugt ein e^+e^- -Paar
 - Rasch anwachsende Zahl von e^+ , e^- , γ bis E_c
- Strahlungslänge X_0 :
Strecke, in der Projektilenergie durch Strahlungsverluste um $1/e$ (63%) kleiner wird
- Relativ kompakter Schauer durch großen Wirkungsquerschnitt der Wechselwirkung

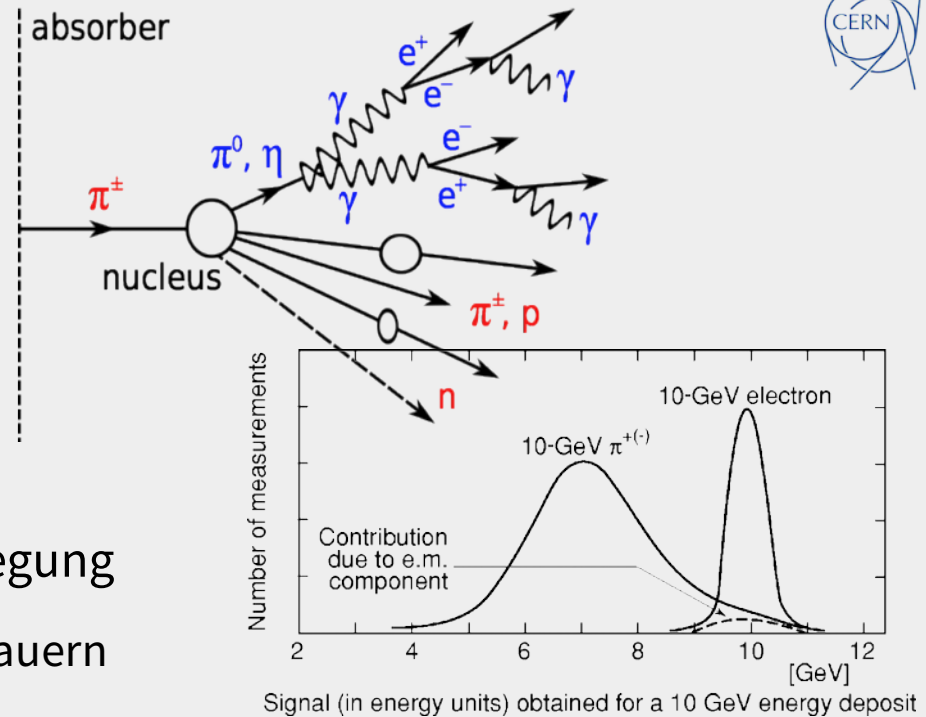


x	0	X_0	$2X_0$	$3X_0$	$4X_0$	
N	1	2	4	8	16	0
$\langle E \rangle$	E_0	$E_0/2$	$E_0/4$	$E_0/8$	$E_0/16$	$< E_c$

Material	Strahlungslänge X_0 (cm)
Luft	30000
Stahl	1.76
Blei	0.56
Uran	0.33

Hadronischer Schauer

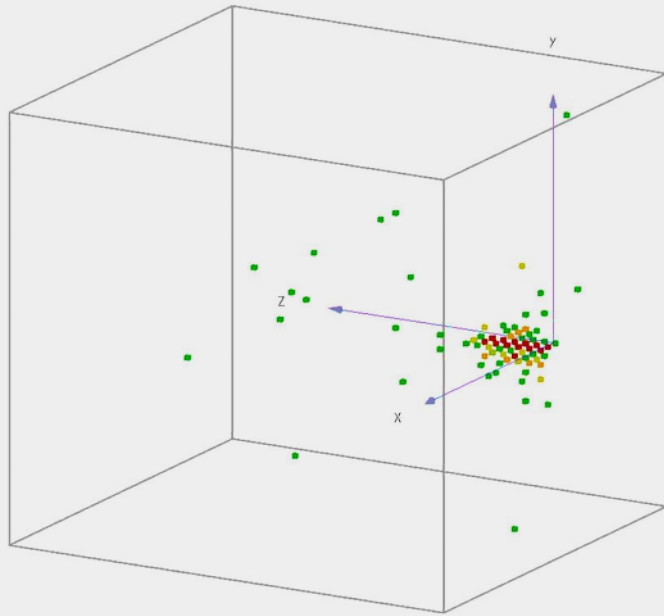
- Hadron wechselwirkt über die starke Kraft mit Detektormaterial
 - Erzeugung von Mesonen und Baryonen, Spallation, Kernanregung, Kernspaltung
- Erzeugung von immer mehr Teilchen, Energieverlust durch durch Ionisation und Anregung
 - Ausbildung von elektromagnetischen Teil-Schauern
 - „Unsichtbare Energie“: Verlust durch Bindungsenergien
 - Späte Komponenten durch Neutronen
- Starke Interaktion: kleineren Wirkungsquerschnitt, höhere Eindringtiefe von Hadronschauern



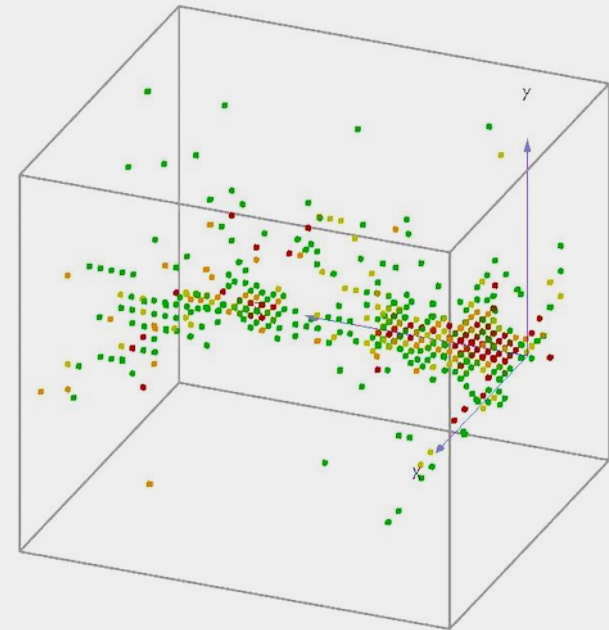
Material	Absorptionslänge λ_a (cm)
Luft	75000
Stahl	16.8
Blei	17.6
Uran	11.0

Schauertiefe - Vergleich

15 GeV Positron - EM-Schauer



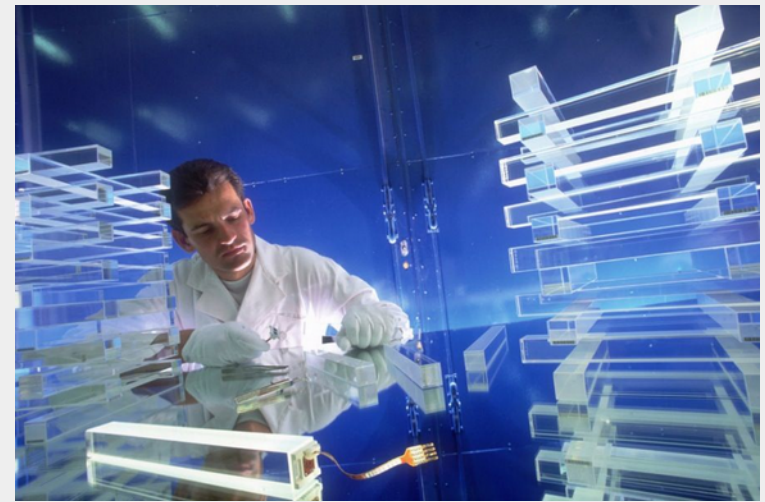
80 GeV Pion - Hadronischer Schauer



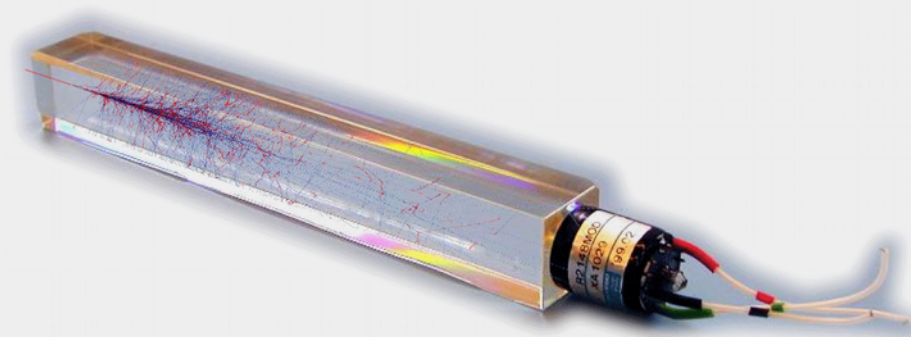
CALICE W-AHCAL

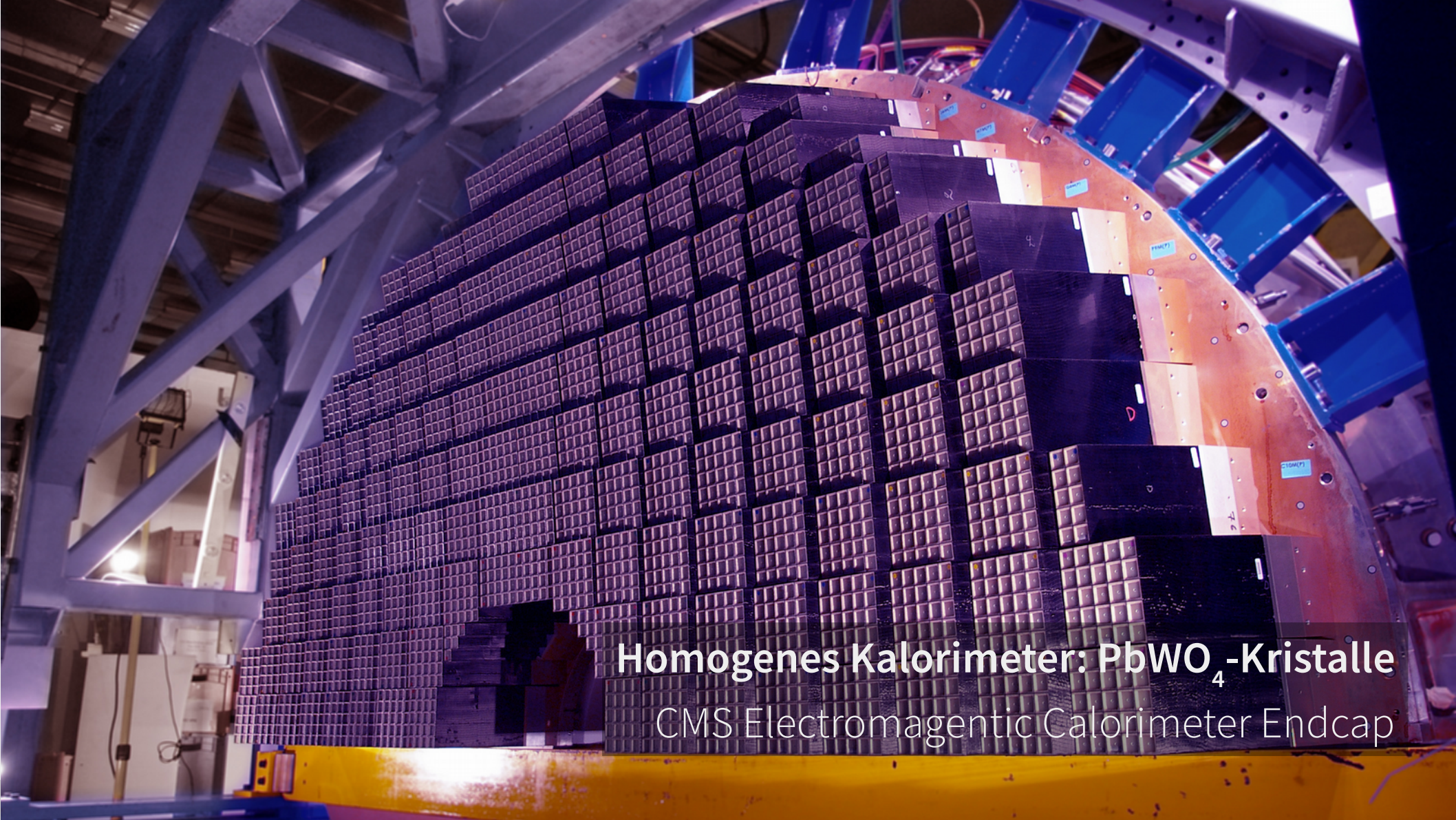
Homogene Kalorimeter

- Detektormaterial ist sowohl Absorber als auch das aktive Material
 - Kristalle
 - Bleiglas, PbWO_4
 - Flüssige Edelgase (z.B. Argon)
- Solche Materialien werden fast ausschließlich für elektromagnetische Kalorimeter verwendet
- Vorteil: Sehr gute Energieauflösung, gesamte Schauer wird gemessen
- Nachteil: Kosten, begrenzte Informationen zur Ausdehnung und Substruktur des Schauers



CMS EM-Kalorimeter:
 PbWO_4 -Kristalle (95% Blei)





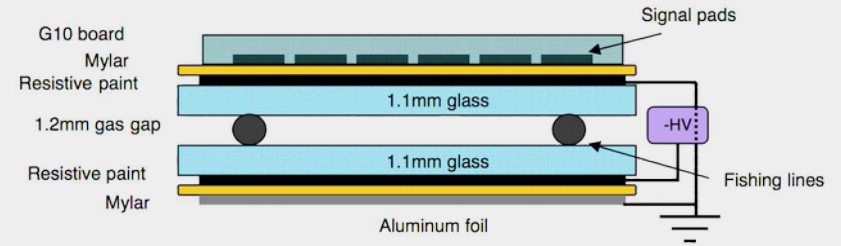
Homogenes Kalorimeter: PbWO_4 -Kristalle
CMS Electromagnetic Calorimeter Endcap

Sampling-Kalorimeter

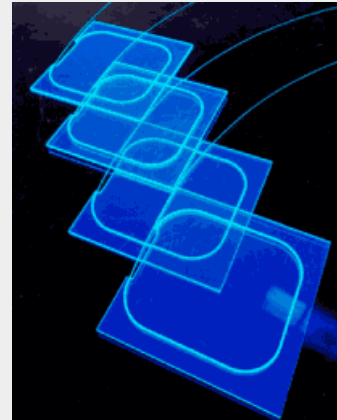
- Absorber-Material rein passiv, nur Schichten von aktivem Material:
 - Szintillatoren
 - Silizium-Sensoren
 - Flüssiges Edelgas
 - Gas-Detektoren
- Vorteil: geringere Kosten, mehr Information über Schauerform
- Nachteil: Nur ein Teil des Schauers wird gesampelt, schlechtere Energieauflösung



Resistive place chambers ($1 \times 1 \text{ cm}^2$)



CMS Szintillator-Kachel



CALICE

Szintillator-Kachel ($3 \times 3 \text{ cm}^2$), SiPMs



Samplingkalorimeter mit Eisen/Plastiksintillatoren

ATLAS Tile Calorimeter Endkappe



Energiemessung

- Ideales, räumlich unbegrenztes, homogenes Kalorimeter:
Energieauflösung σ_E/E begrenzt durch statistische Fluktuationen der Schauerteilchenzahl N

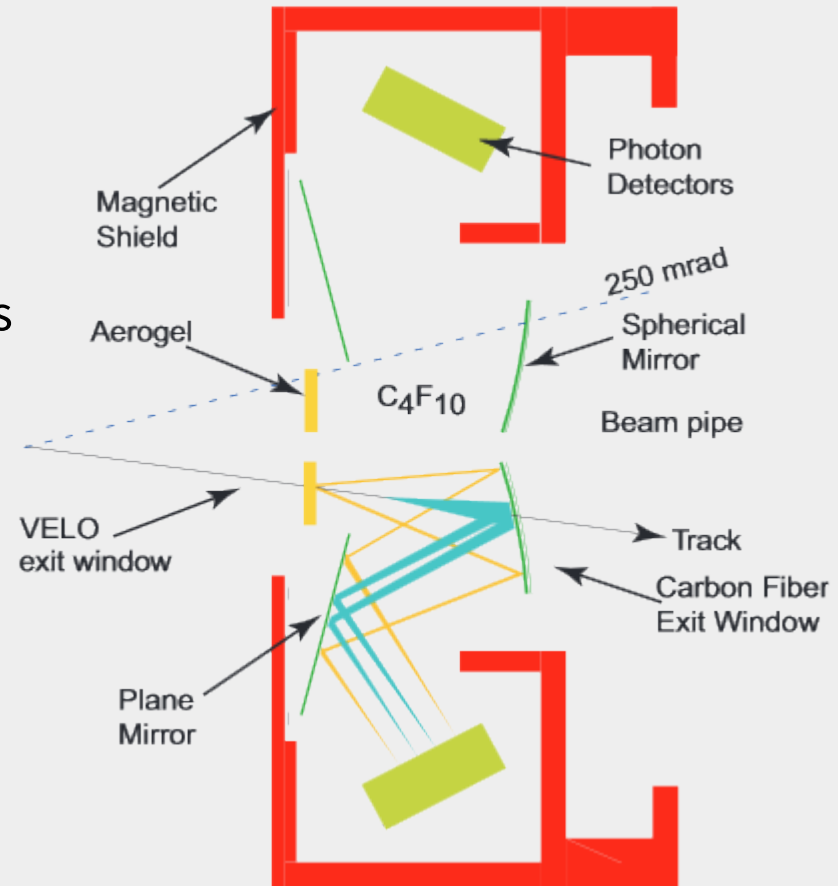
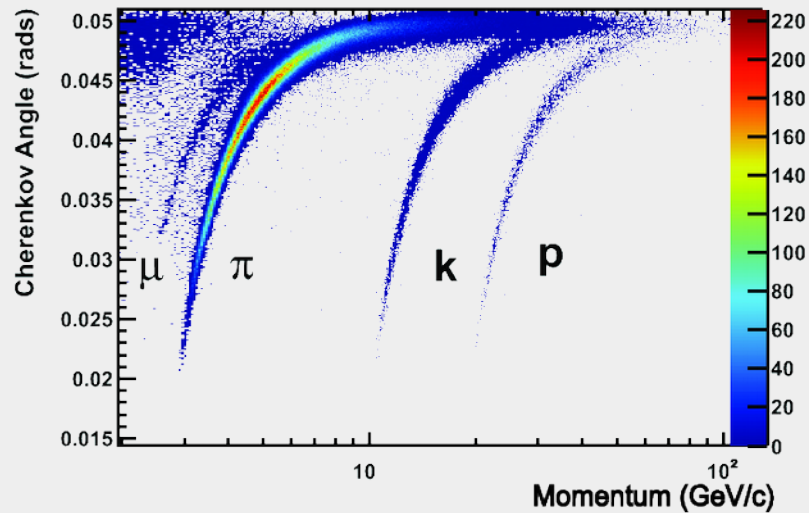
$$\frac{\sigma_E}{E} \propto \frac{\sigma_N}{N} \approx \frac{\sqrt{(N)}}{N} = \frac{1}{\sqrt{(N)}} + \text{Rauschen} + \text{const.}$$

- Maximal erzeugbare Anzahl an detektierbaren Teilchen: $N_{max} = E/E_C$
 - Siliziumdetektoren: $E_C \approx 3.6 \text{ eV}$
 - Gasdetektoren: $E_C \approx 30 \text{ eV}$
 - Plastikszintillatoren: $E_C \approx 100 \text{ eV}$
- Weitere Probleme der Energiemessung:
 - Ineffizienzen bei Photonenmessung, Leakage, Fluktuationen im Schauer: Sampling, Landau
 - Ungleichförmigkeiten, Kalibrationsfehler

Cherenkov-Detektoren

Messprinzip eines RICH-Detektors

- Ring Imaging Cherenkov Detektoren
 - Material zur Erzeugung von Cherenkov-Licht
 - (Meistens) Spiegelsystem
 - Photodetektoren zur Messung des Ring-Radius





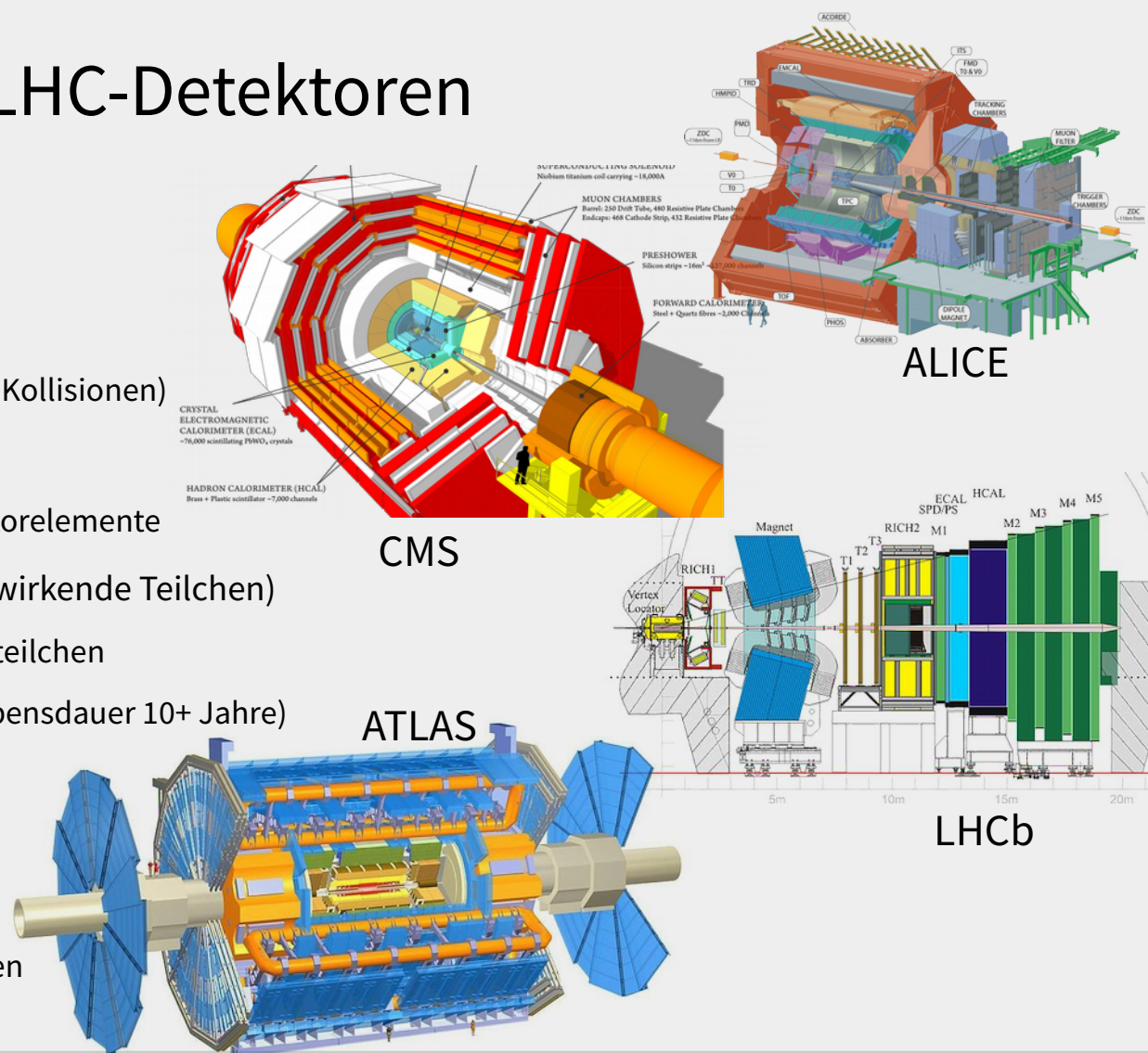
Hybrid Photodetectors
LHCb RICH Detector

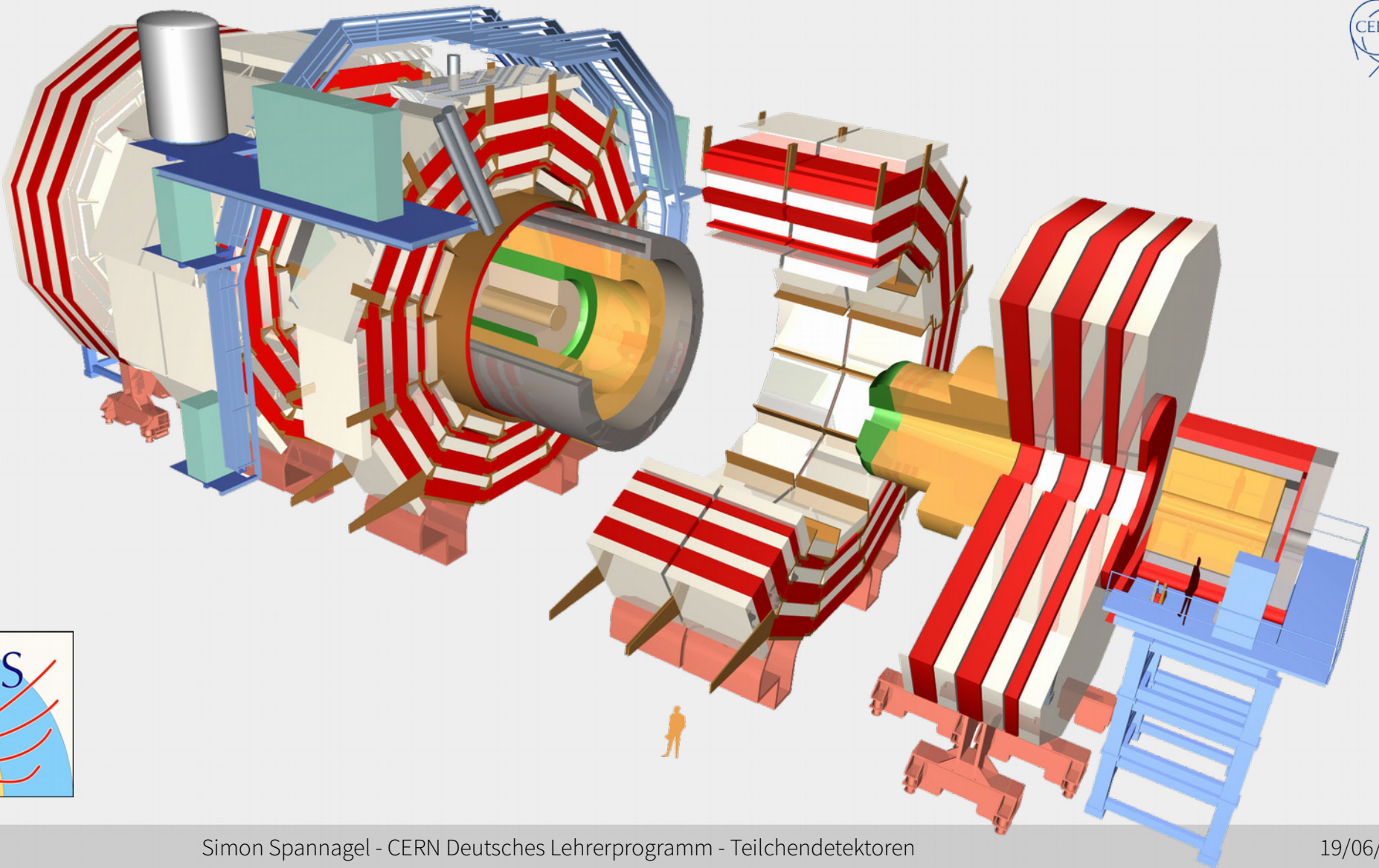
Detektorsysteme

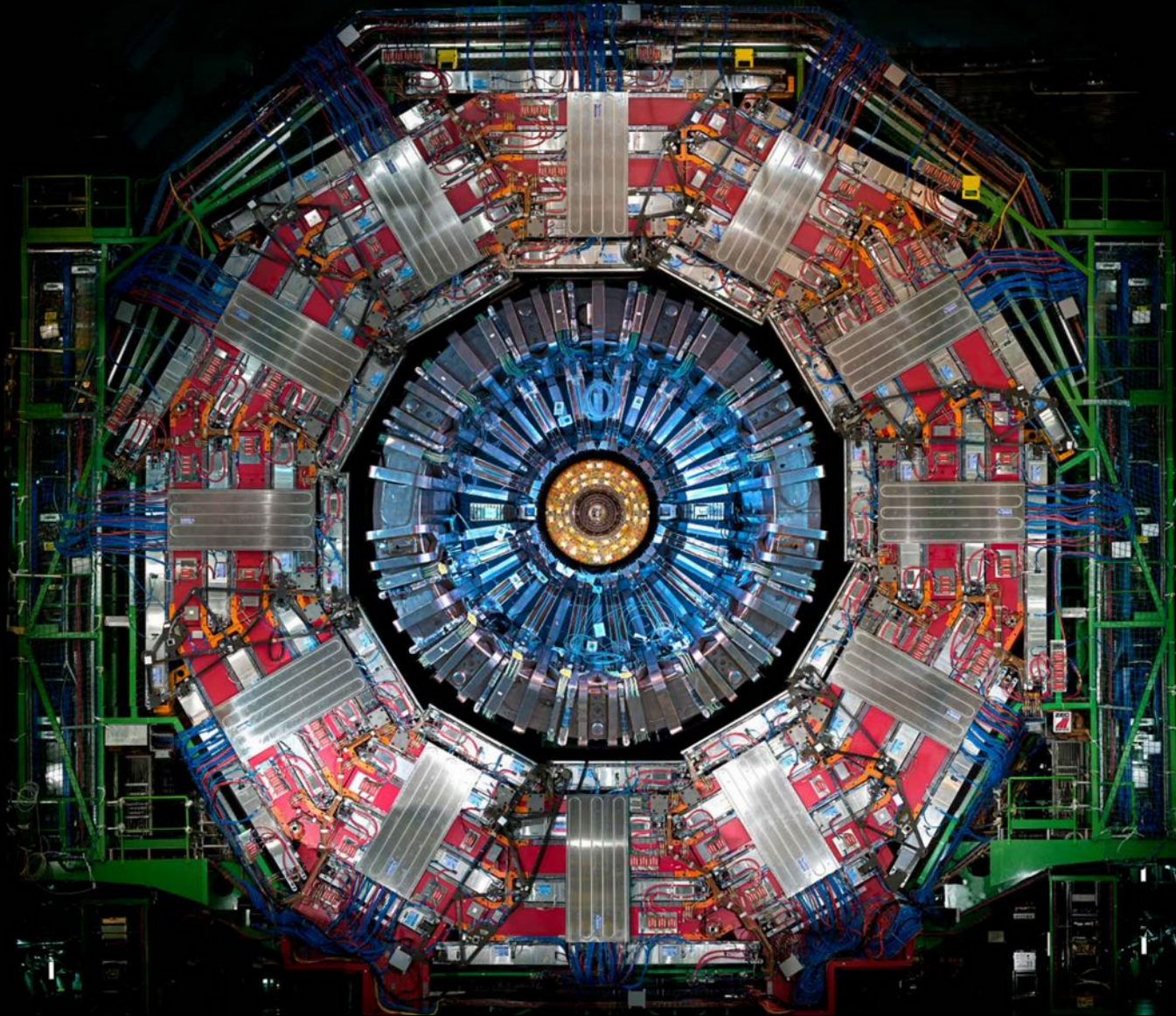
Experimente am LHC und zukünftigen Beschleunigern

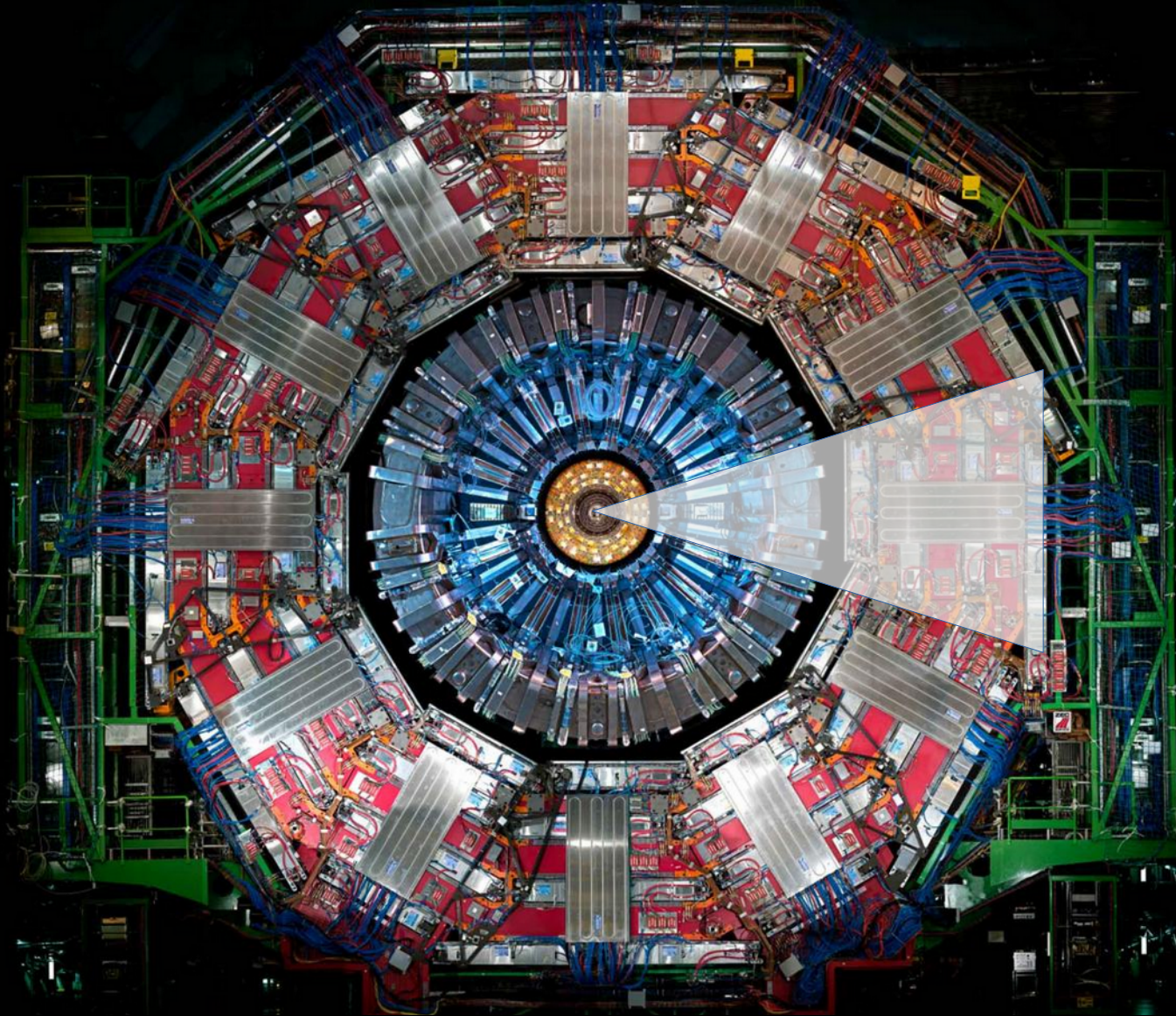
Herausforderungen für LHC-Detektoren

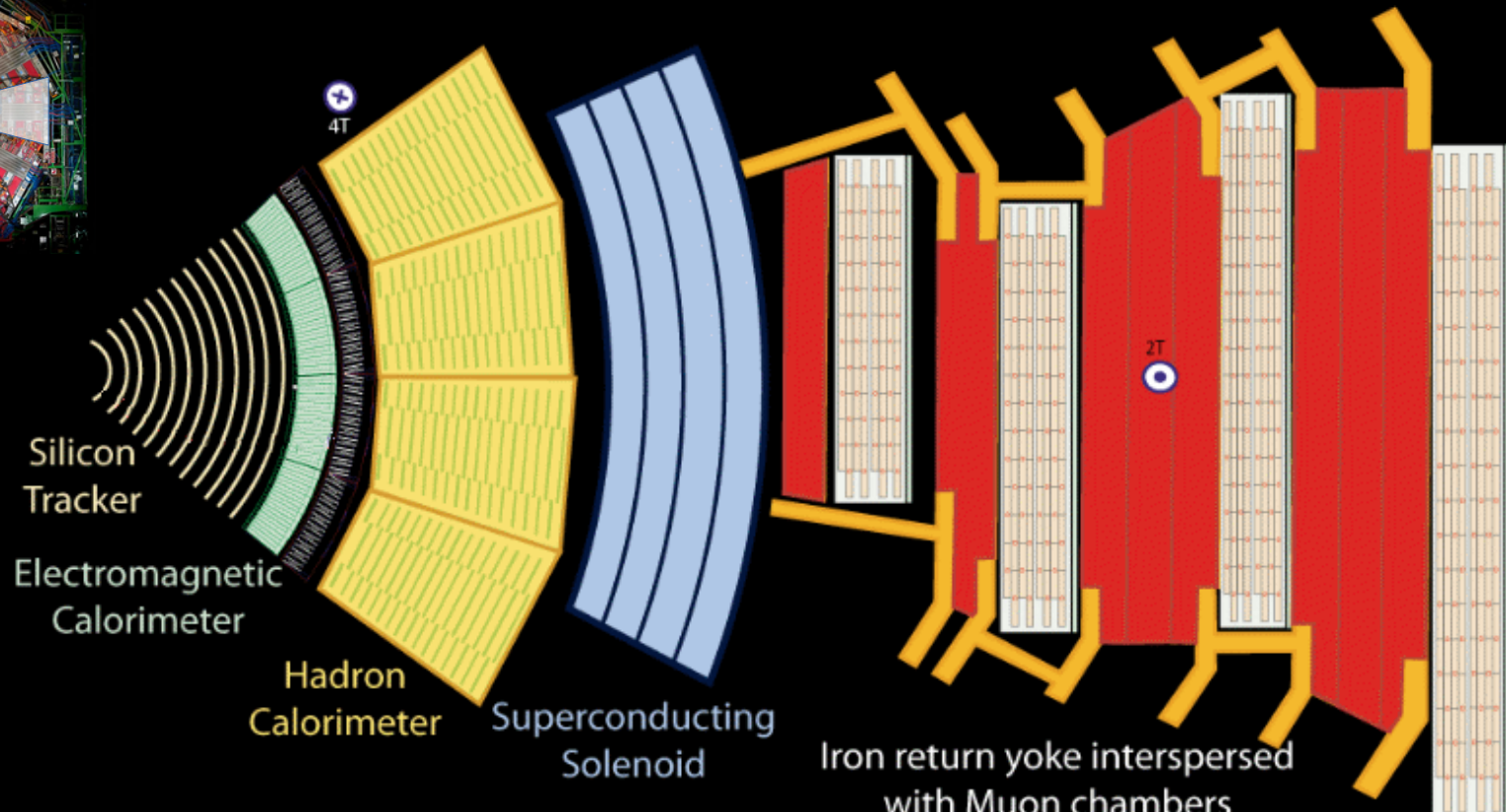
- **Kollisionen bei höchsten Energien**
 - Gute Impulsauflösung bis hin zur TeV-Skala
- **Hohe Luminosität** (große Kollisionsrate)
 - Schnelle Detektoren (nur 25 ns zwischen den Kollisionen)
- **Große Teilchendichte**
 - Hohe Granularität, ausreichend kleine Detektorelemente
- **Hohes Strahlungsniveau** (viele stark wechselwirkende Teilchen)
 - Strahlung hauptsächlich durch die Kollisionsteilchen
 - Strahlenharte Detektoren und Elektronik (Lebensdauer 10+ Jahre)
- **Große Kollaborationen**
 - O(3000) Physikers jeweils in ATLAS und CMS
 - Kommunikation, soziologische Aspekte
 - Viele Meetings, Telefon- und Videokonferenzen



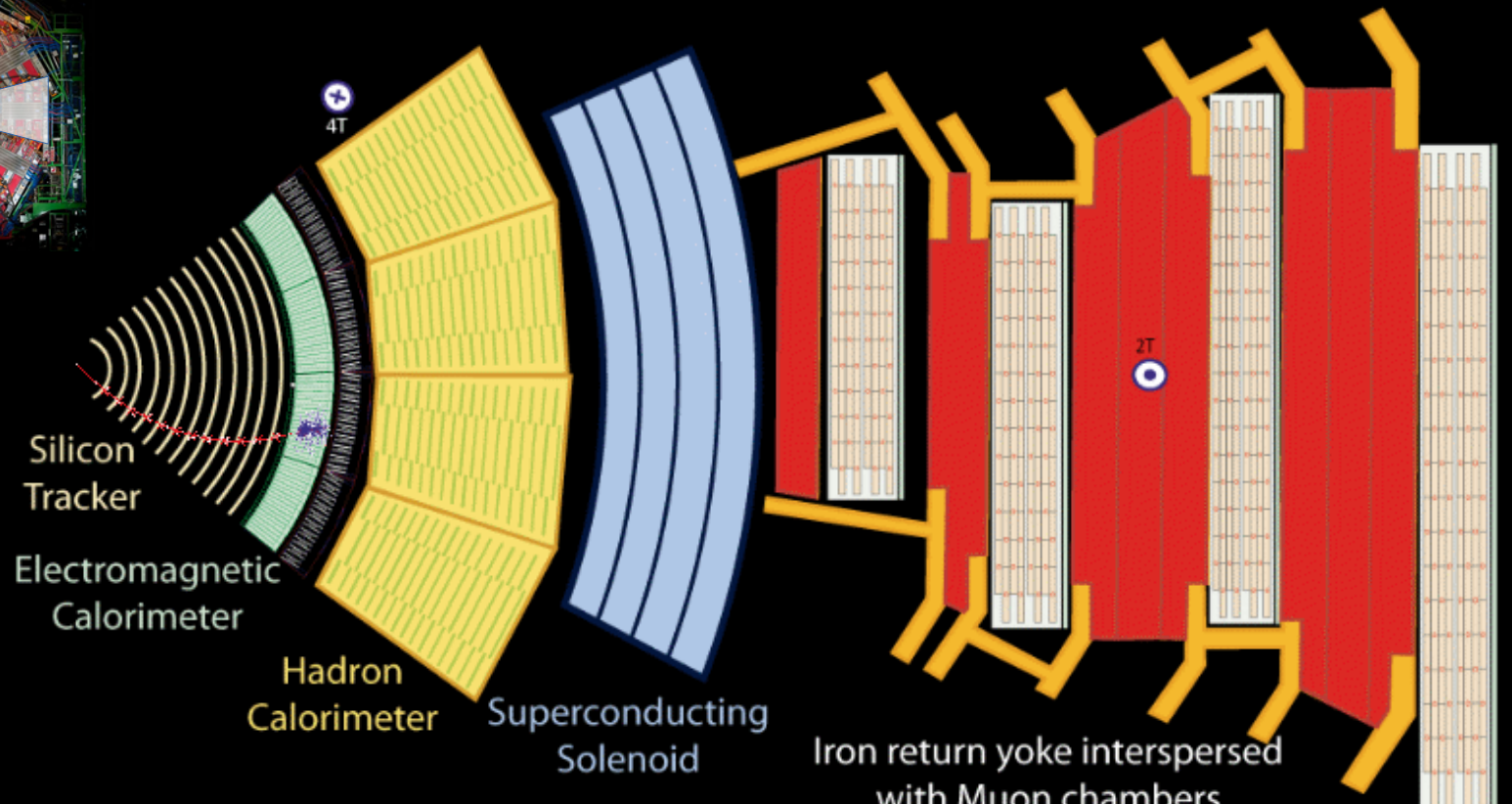
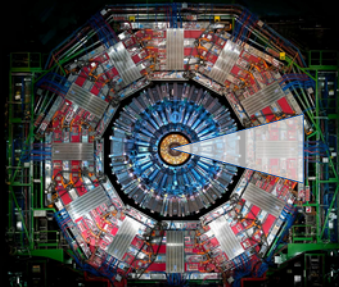




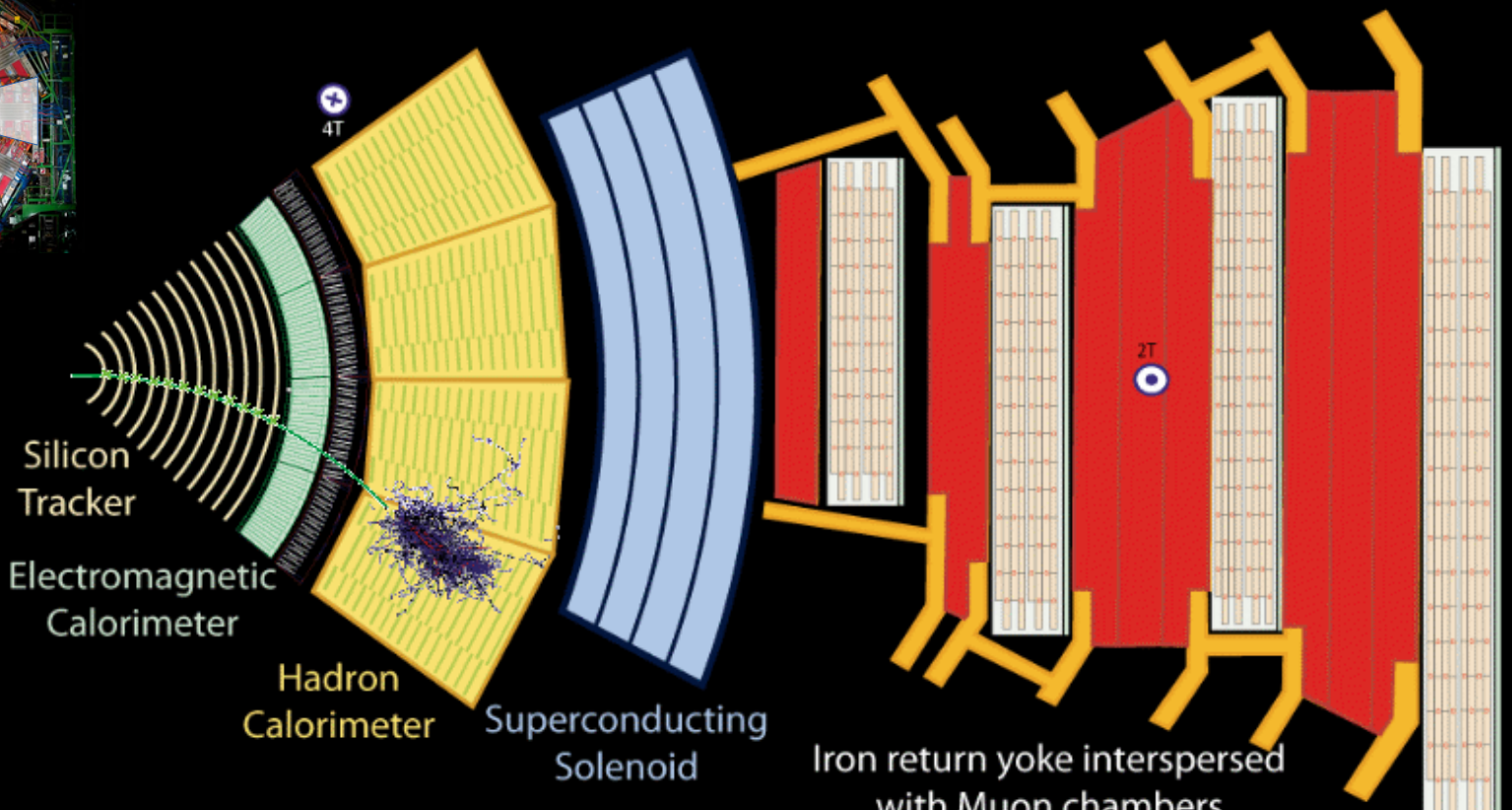
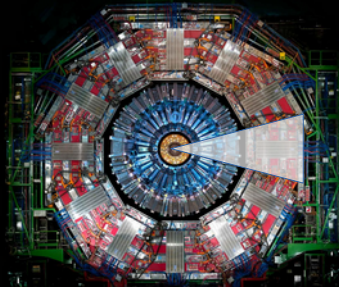




- Key:
- Muon
 - Electron
 - Charged Hadron (e.g. Pion)
 - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
 - Photon



- Key:
- Muon
 - Electron
 - Charged Hadron (e.g. Pion)
 - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
 - Photon



Key:

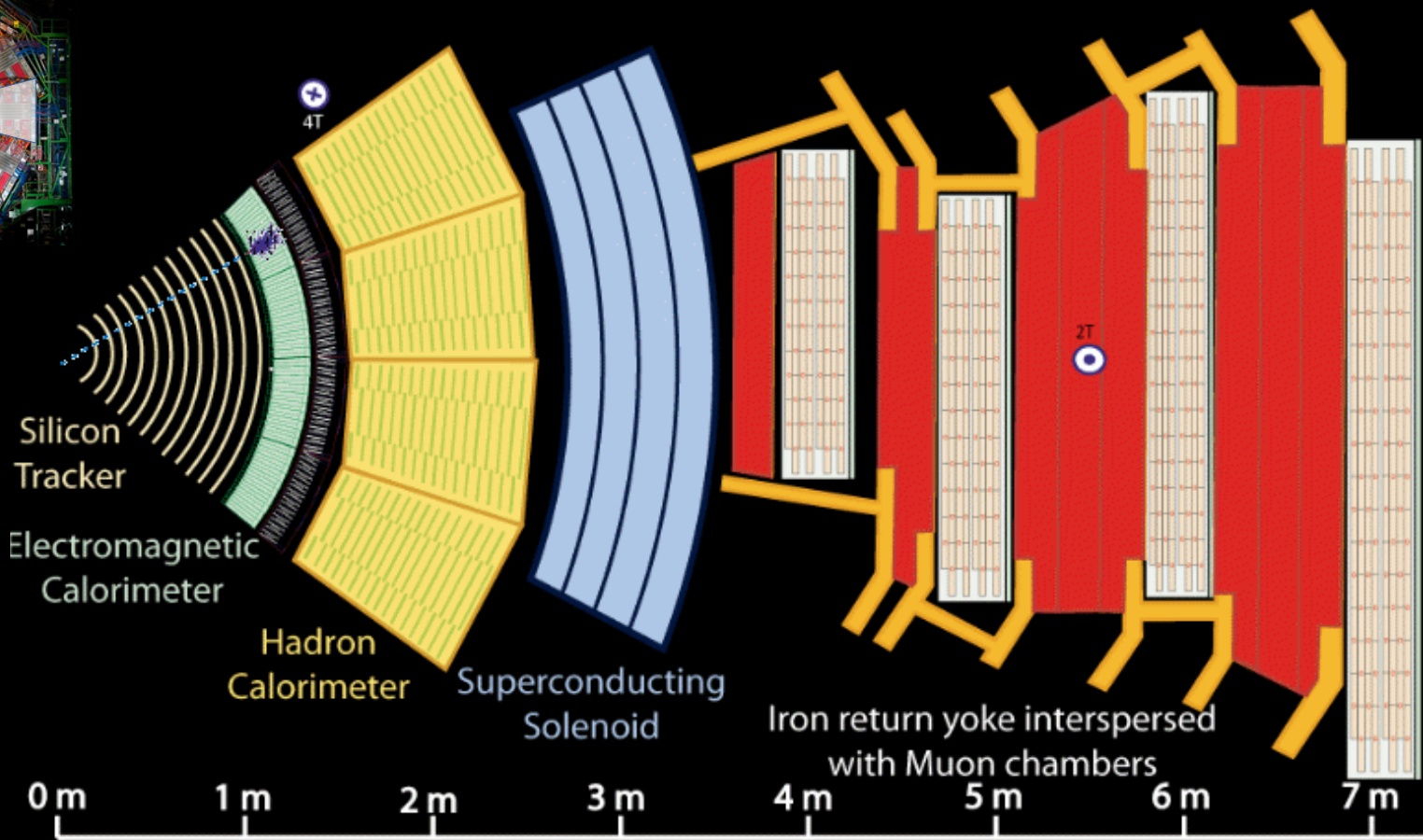
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

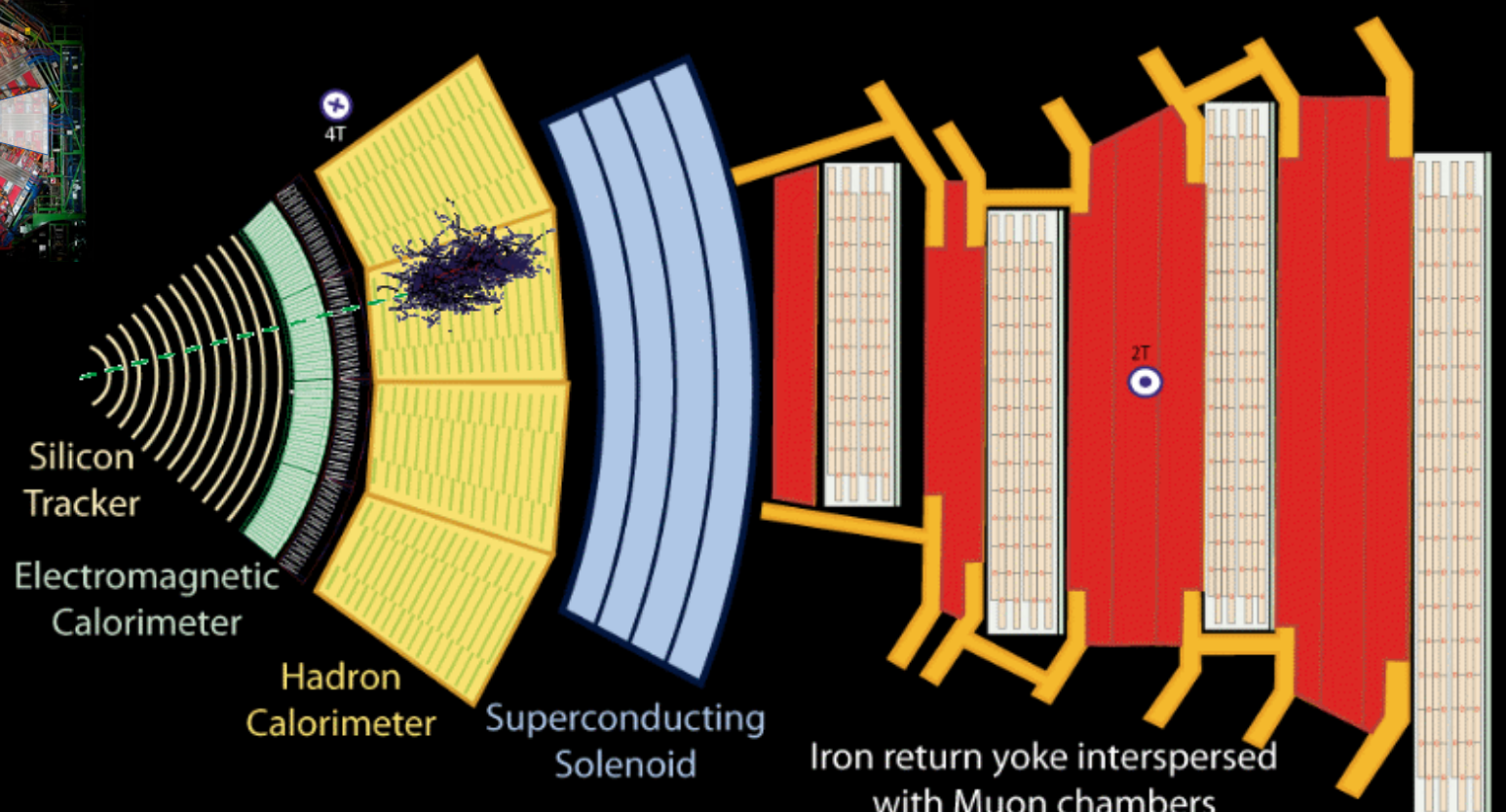
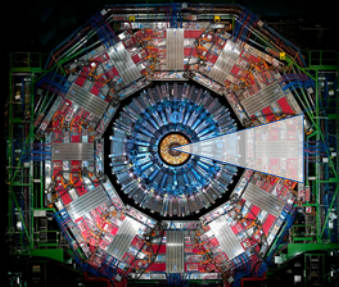
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon

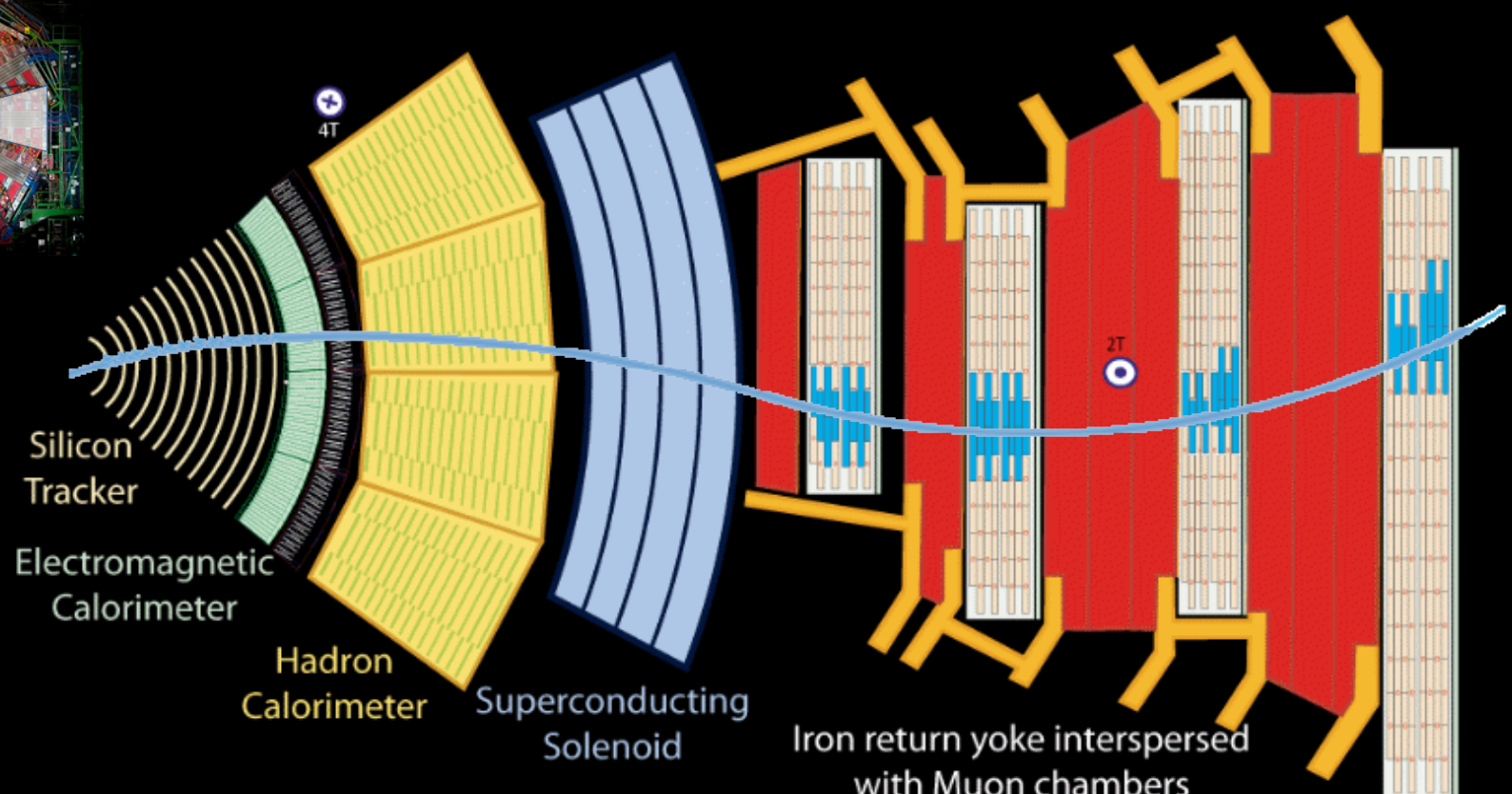


Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- Photon



- Key:
- Muon
 - Electron
 - Charged Hadron (e.g. Pion)
 - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
 - Photon

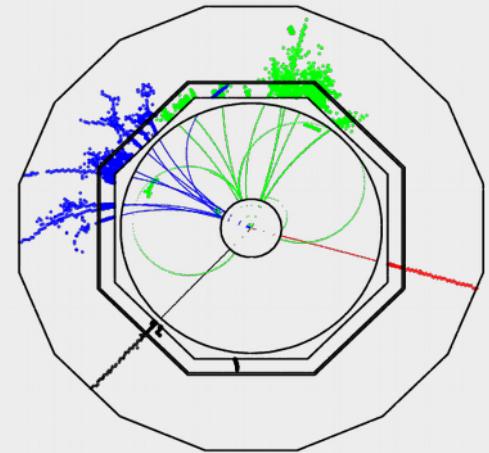
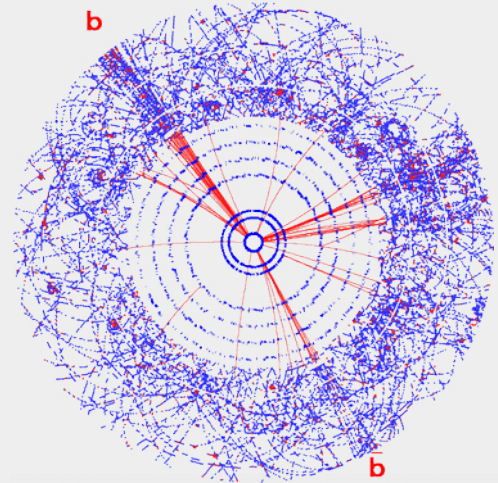


- Key:
- Muon
 - Electron
 - Charged Hadron (e.g. Pion)
 - - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
 - - - Photon



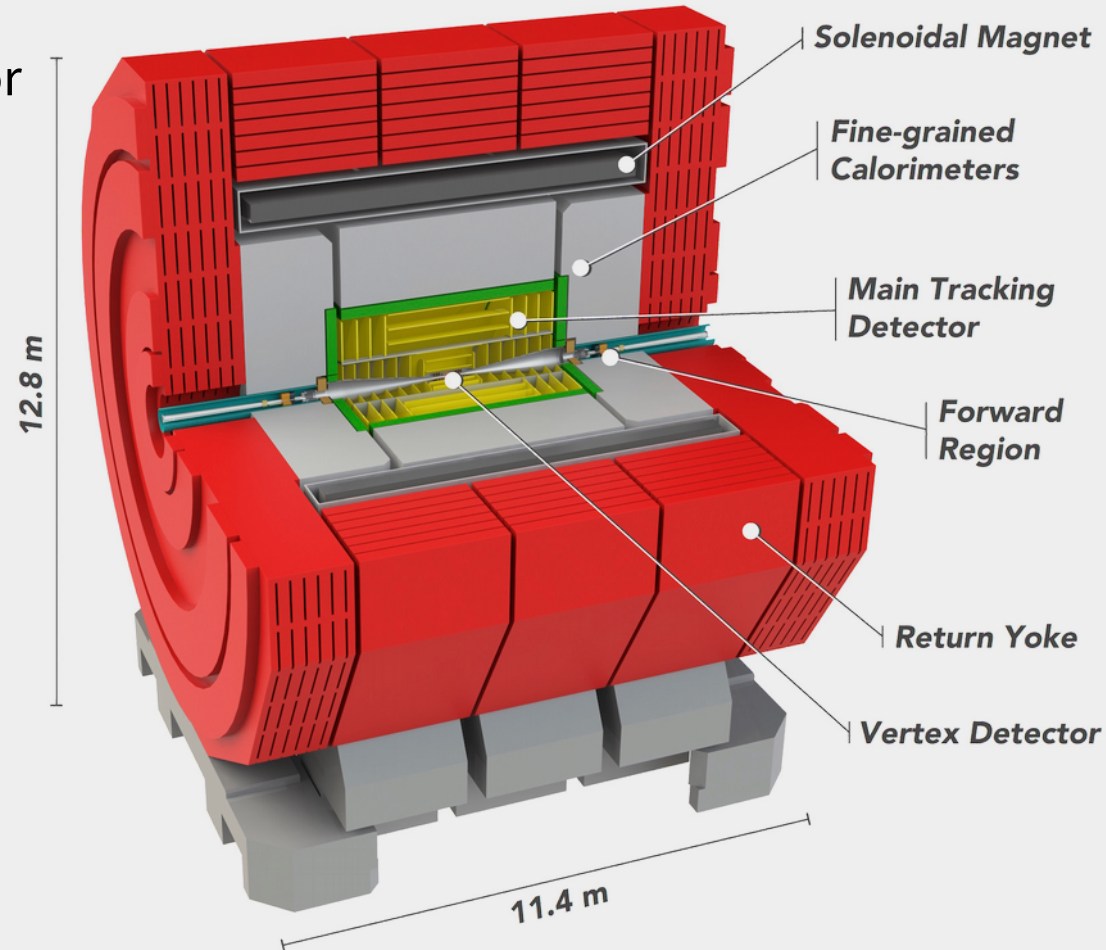
Anforderungen an Detektoren an e+e- Beschleunigern

- Einige Projekte/Konzepte für e+e- Beschleuniger:
CLIC, ILC, FCC-ee, CEPC
- Experimentelle Bedingungen und Anforderungen unterscheiden sich von LHC
- Weniger Strahlung
 - Detektoren müssen weniger strahlenhart sein
- Hochpräzisionsmessung:
 - Vertex- und Spurendetektoren mit sehr wenig Material
 - Hochgranulare Kalorimeter



Beispiel: CLICdet – Experiment an CLIC

- Silizium-Vertex- und Tracking-Detektor
R = 1.5 m
- Hocho granulare Kalorimeter
 - ECAL: $22 X_0 + 1 \lambda_I$
40 Lagen Si-Sensoren, W-Absorber
 - HCAL: $7.5 \lambda_I$
60 Lagen Plastiksintillator/SiPM,
Stahl-Absorber
- 4 T supraleitender Solenoid
- Rückführjoch, instrumentiert mit Myon-Detectoren



Zusammenfassung I

- Teilchendetektion
 - Messung erfolgt durch Wechselwirkung des zu messenden Teilchens mit Detektormaterial
 - Es gibt kein einzelnes Detektorkonzept, das alle Teilchenarten / -Eigenschaften nachweisen kann
 - Man benötigt mehrere Detektortechnologien und -konzepte
- Wechselwirkung von Strahlung und Materie
 - Ionisation und Anregung der Detektoratome, Bremsstrahlung, Cherenkov-Strahlung
 - Photoeffekt, Compton-Effekt, Paarproduktion,
 - Hadronische Wechselwirkung, fehlende Energie, ...
- Historische Detektoren
 - Nebelkammer, Fotoemulsion, Blasenkammer, Funkenkammer
- Gasetektoren
 - Funktionsprinzip
 - Proportionalzählrohr, Vieldraht-Proportionalkammer
 - Micropattern-Gas-Detektoren
 - Spurendriftkammer

Zusammenfassung II

- Halbleiterdetektoren
 - Nutzung der kleinen Bandlücke von Halbleitern zur Erzeugung freier Ladungsträger
 - Sehr hohe Ortsauflösung, verwendet in Vertex- und Spurdetektoren
- Szintillatoren
 - Anregung von Lumineszenz
 - Verschiedene Materialien (organisch, anorganisch) mit unterschiedlichen Eigenschaften
 - Auslese wahlweise mit Photomultipliern oder SiPMs
- Kalorimeter
 - Dichte Detektoren zum Stoppen von Teilchen
 - Im Idealfall: Signal \sim deponierte Energie \sim Teilchenenergie
 - Homogene und Sampling-Kalorimeter
- Detektorsysteme
 - Zusammenspiel vieler Detektortechnologien
 - Anforderungen verschieden für Detektoren an Hadron- und Lepton-Beschleunigern

Ressourcen / Quellen

- Vorangegangene Vorlesungen im CERN Lehrerprogramm:
Eva Sicking, Kristof Schmieden
- Websites:
 - Particle Data Group – Passage of particles through matter
<http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-passage-particles-matter.pdf>
 - Deutsche / englische Wikipedia – Beschreibungen, Formeln, Diagramme, Photos
 - CERN CDS Server – Photos alter Experimente
<https://cds.cern.ch>
 - Websites der LHC-Experimente – Event Displays, Photos
[ALICE](#), [ATLAS](#), [CMS](#), [LHCb](#)
- Literatur:
 - Povh, Rith: Teilchen und Kerne, Springer – Beschreibung der Materie: Teilchen, Kerne, Wirkungsquerschnitte
 - Kolanoski, Wermes: Teilchendetektoren, Grundlagen und Anwendungen, Springer – Überblick zu Detektoren

