

Kerne und Teilchen

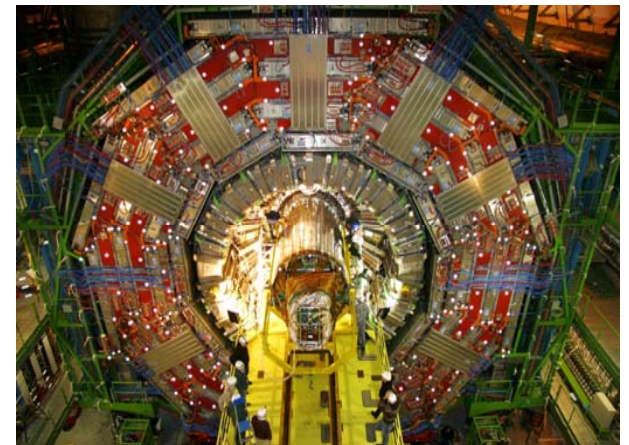
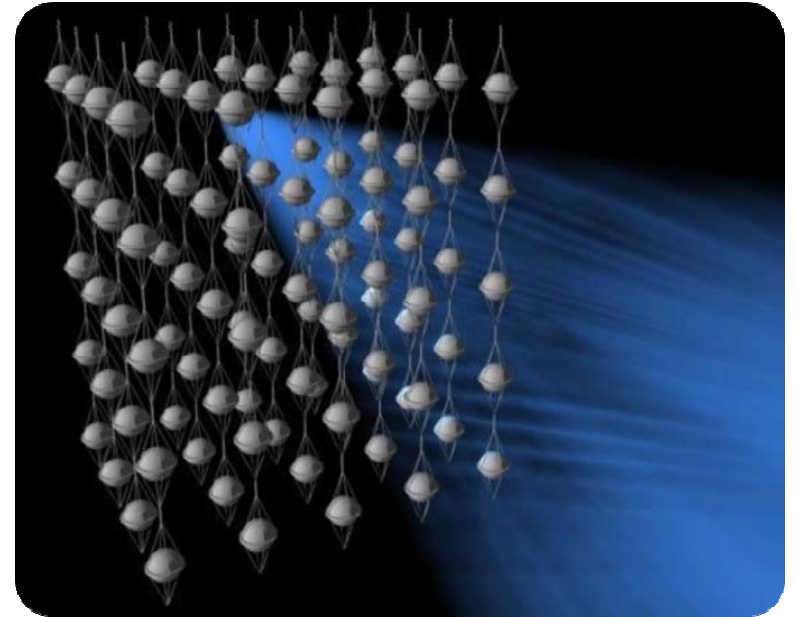
Moderne Physik III

Vorlesung # 13

6. Detektoren und Beschleuniger

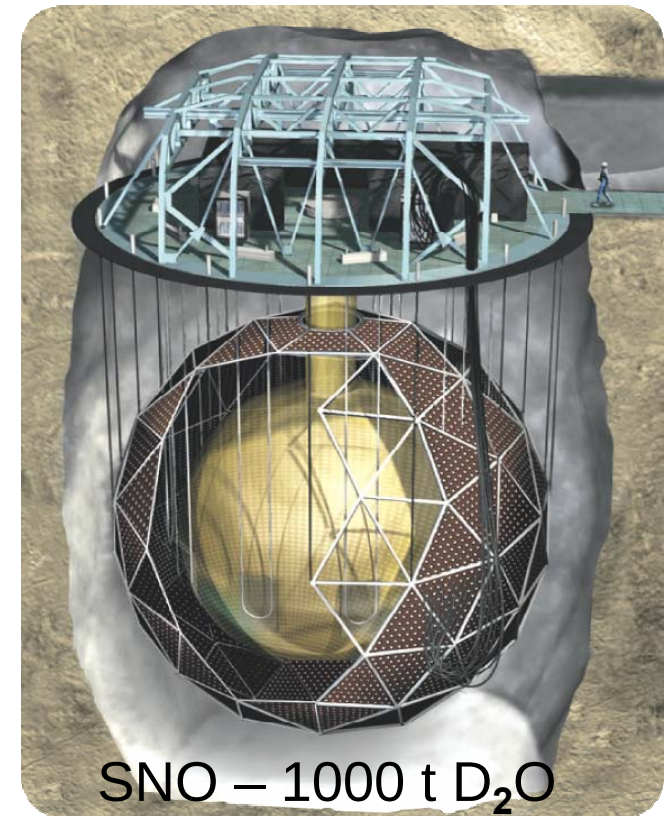
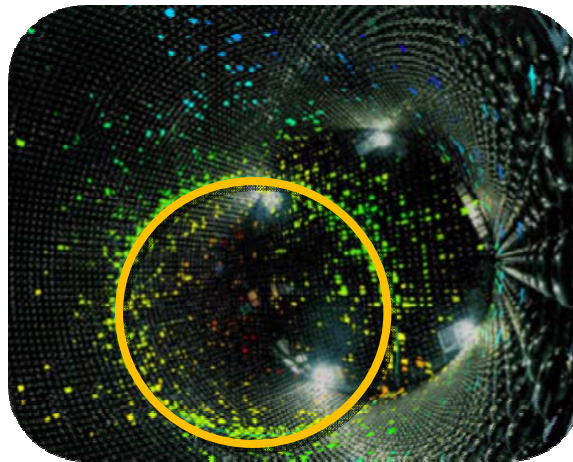
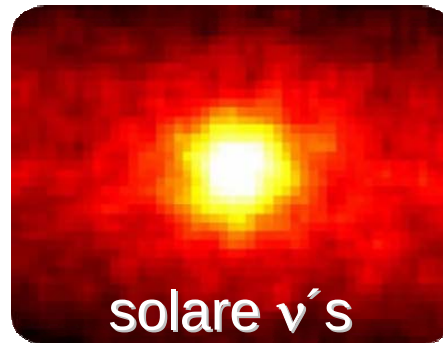
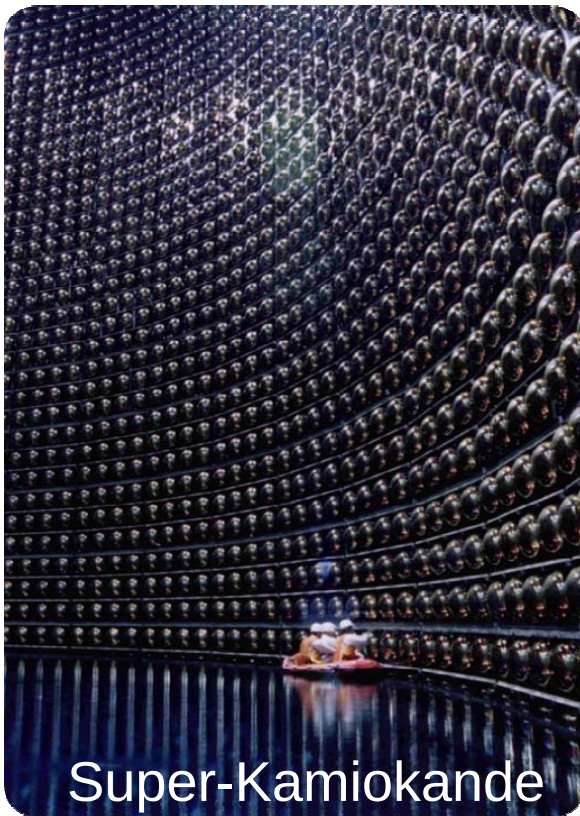
6.1 Detektoren der Teilchenphysik

- Gasdetektoren
- Cerenkovdetektoren
- Szintillationsdetektoren
- Siliziumdetektoren
- Kalorimeter
- Detektorsysteme: CMS



2) Cherenkow-Detektoren

- Cherenkow-Detektoren nutzen zum Teilchennachweis den Cherenkow-Effekt
Wasser-Cherenkow-Detektoren in der Astroteilchenphysik:
Super-Kamiokande (Japan), **SNO** - **S**udbury **N**eutrino **O**bservatory (Ontario)
Messung von E_e und θ_e relativistischer Elektronen aus νe -Streuungen



3) Szintillationsdetektoren

- **Szintillationsdetektoren** konvertieren die durch ionisierende Teilchen erzeugte Anregung im Festkörper in sichtbares Licht, Nachweis durch Photomultiplier, Photodioden (falls B-Feld)

Szintillatoren lassen sich unterteilen in:

anorganische Szintillatoren

Material: **NaJ**, **CsJ**, BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) Kristalle, die mit **Aktivator-Zentren** (Farbzentren) dotiert sind

- **hohe Lichtausbeute** (bis zu 50000 Photonen/MeV)
- **lange Abklingzeiten** (250 – 1000 ns)



Material	Dichte	Lichtausbeute	τ_{Abkling}	Emission λ	X_0/ρ [cm]
NaJ (TI)	3.67 g/cm ³	40000 ph/MeV	230 ns	410 nm	2.59
CsJ (TI)	4.51 g/cm ³	52000 ph/MeV	1000 ns	550 nm	1.86
BGO	7.13 g/cm ³	8200 ph/MeV	350 ns	480 nm	1.12
PbWO ₃	8.3 g/cm ³	100 ph/MeV	10 ns	480 nm	0.89

■ Organische Szintillatoren

Material $(CH)_n$ - Ketten:

- polymerisiertes Material (**Plastikszintillator**)
PMMA (Plexiglas), Poly-Vinyltoluol, Poly-Styrol
- organische Flüssigkeit (**Mineralöl mit organischem Lösungsmittel**)

Szintillationsmechanismus:

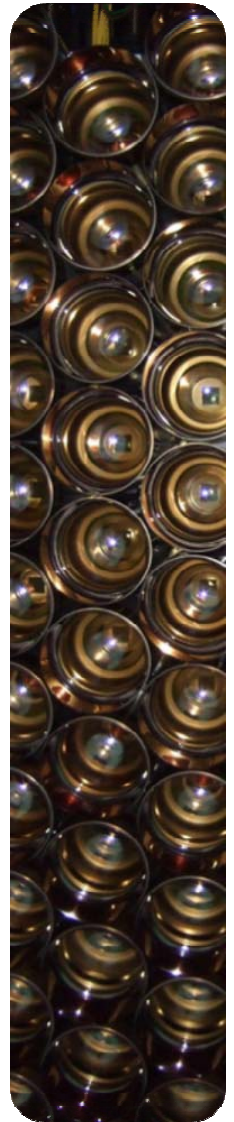
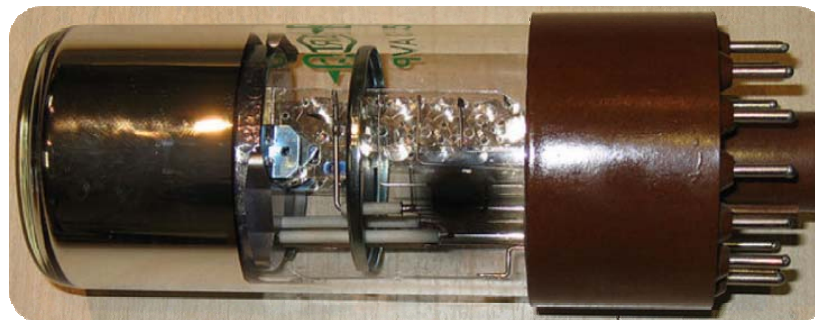
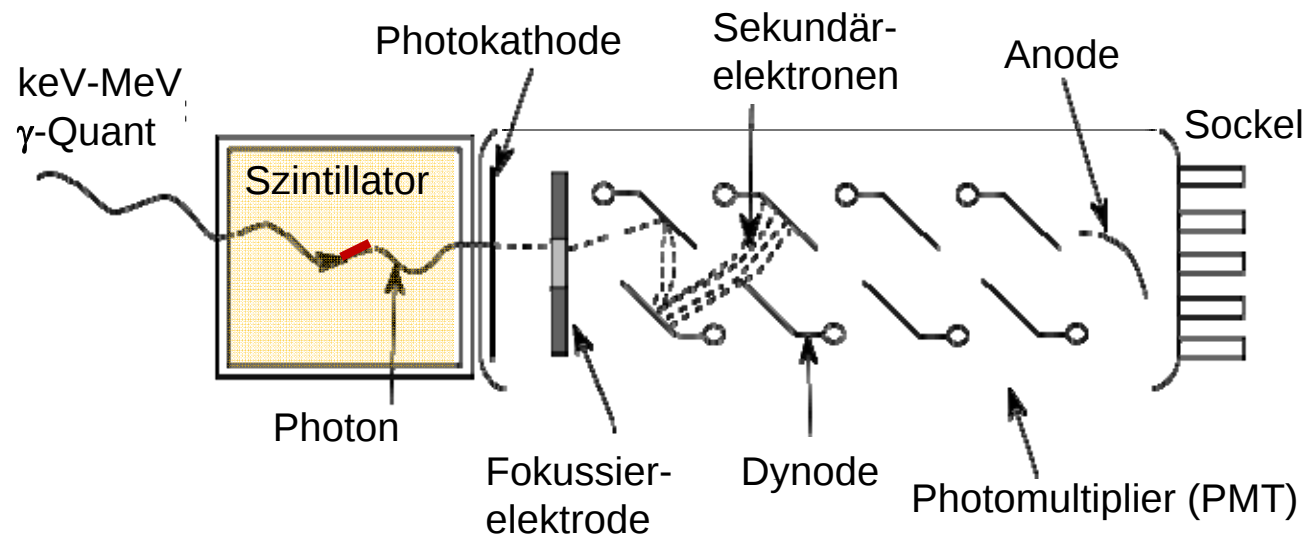
- Anregung von Molekülzuständen in *primärem Fluoreszenzstoff*, $\rightarrow$ Emission von UV-Licht
Beispiel: **Anthracen, Naphtalen**
- Umwandlung des UV-Lichts in sichtbares Licht durch *sekundären Fluoreszenzstoff (Wellenlängenschieber)*
Beispiel: POPOP, bis-MSB, PMP,...
- **kurze Abklingzeiten**: wenige ns
- kostengünstig, beliebige Formen (Fibern)



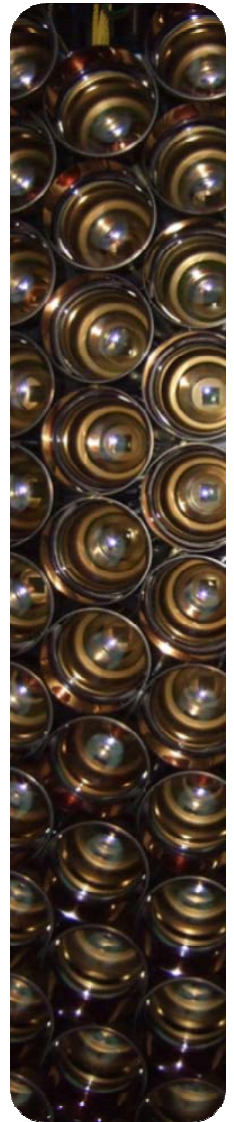
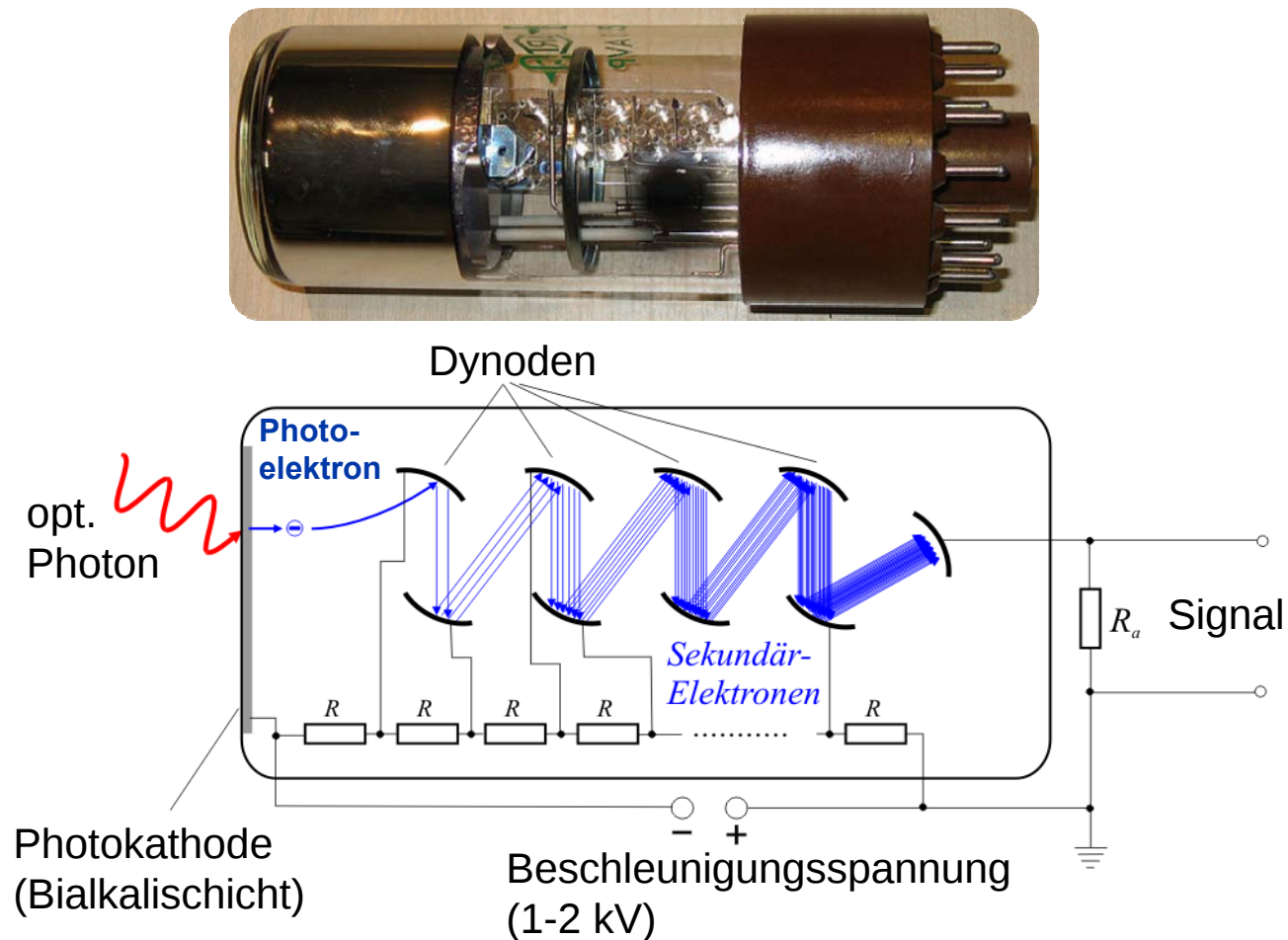
Photomultiplier (PMT)

Früher: Sekundärelektronenvervielfacher

- Nachweis von Szintillationslicht durch dünne **Bialkali-Photokathode** (~25% Effizienz bei $\lambda = 400 \text{ nm}$)



- Elektronenvervielfachung in der **Dynodenkette** (BeO, Mg-O-Cs), Verstärkung bis $\sim 10^8$, Signal-Laufzeit im PMT $\tau \sim 40$ ns



4) Siliziumdetektoren

- Nur bei $T=0^\circ\text{K}$ ist das Leitungsband wirklich vollständig leer.

- Verteilung gemäss der Fermi-Dirac Statistik

- Bei Zimmertemperatur befinden sich

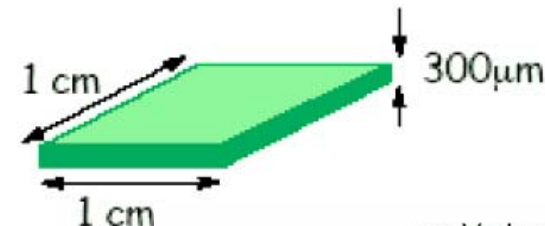
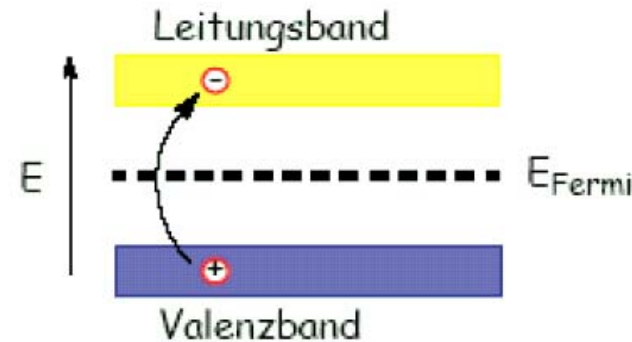
$$n_i = \sqrt{n_V n_C} \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{Gap}}}{2kT}\right) = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ also}$$

etwa ein Anteil von 10^{-12} im Leitungsband
(Silizium $\approx 5 \times 10^{22} \text{ Atome/cm}^3$)

- in diesem Volumen befinden sich also ca.
 4.5×10^8 freie Ladungsträger im Vergleich
zu nur 3.2×10^4 Elektron-Loch Paaren für MIP

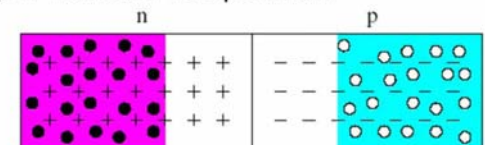
⇒ um dieses Signal nachweisen zu können muss
die Anzahl der freien Ladungsträger drastisch
reduziert werden. Möglichkeiten:

- Kühlen
- pn-Übergang in Sperrrichtung

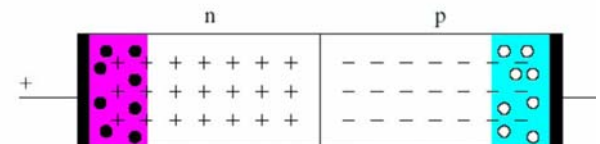


ohne angelegte
Spannung

p-n-Verbund vorspannen:



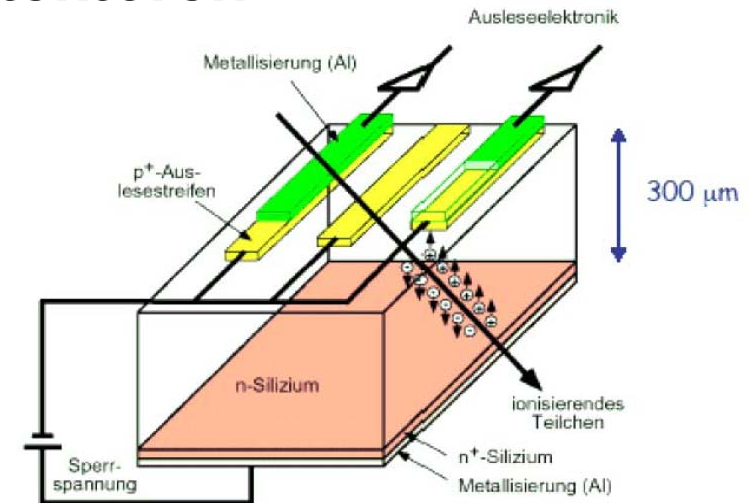
mit angelegter
Spannung



Ausgezeichnete Zusammenfassung:

<http://www.hephy.oeaw.ac.at/p3w/halbleiter/VOSkriptum/VO-4-Halbleiterdetektoren.pdf>

Siliziumstreifendetektoren

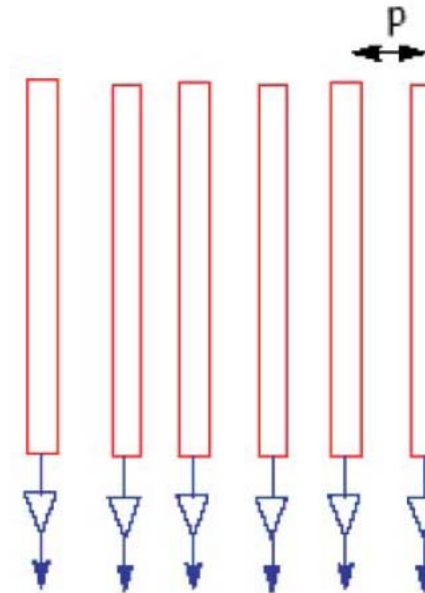


Digitale Auslese:

- Auflösung gegeben durch: $\sigma_x = \frac{p}{\sqrt{12}}$

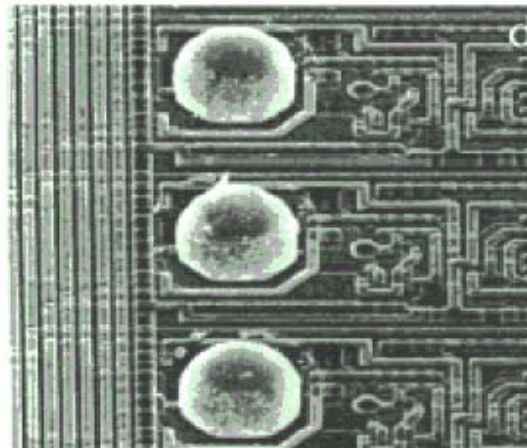
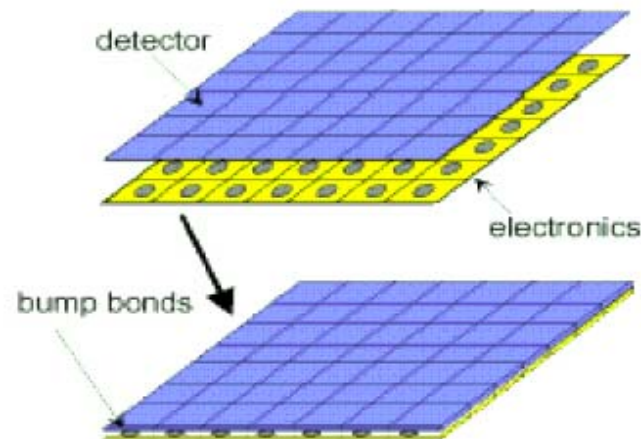
Analoge Auslese:

- verbesserte Auflösung $\sigma_x \ll p$ möglich durch Ladungsteilung und Schwerpunktbildung
- Auflösung wird begrenzt durch transversale Diffusion der Ladungsträger
- typische Werte für Silizium $\sigma_x = 5 - 10 \mu\text{m}$
- typischer Pitch: $p = 25 - 150 \mu\text{m}$

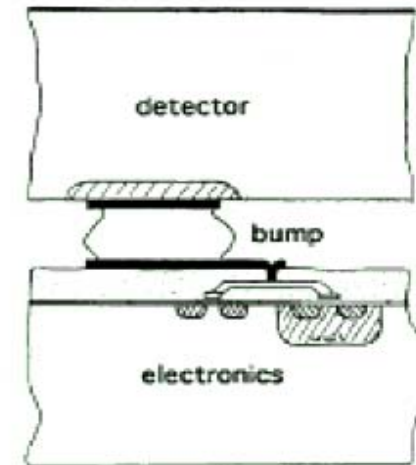


Siliziumpixeldetektoren

- Segmentierung in beiden Richtungen → Matrix
- Ausleseelektronik mit gleicher Geometrie
- Verbindung durch sog. "Bump Bonding"
- Verwendung von weichem Material Indium, Gold
- Komplexe Auslesearchitektur
- *Echte 2D Hits* ⇒
- Einsatz in LHC Experimenten



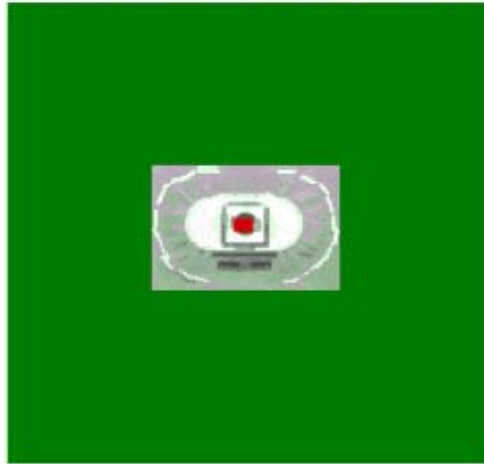
Flip-Chip Technique



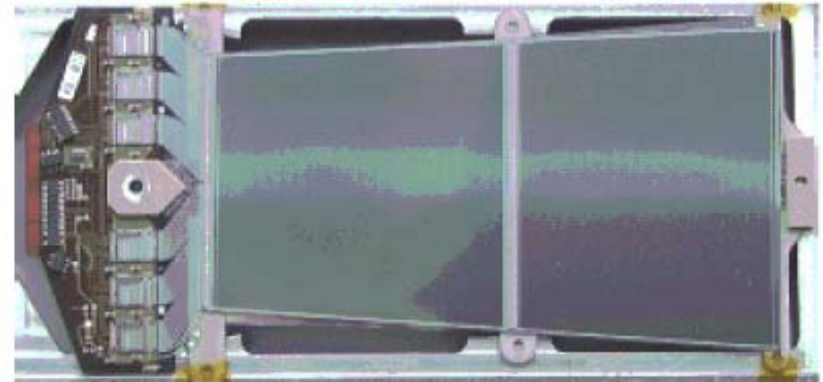
Historisches: 1981 (Na11, CERN)

2004, CMS

9 cm² Sensor mit 10000cm² Elektronik



160 cm² Sensor mit 20cm² Elektronik

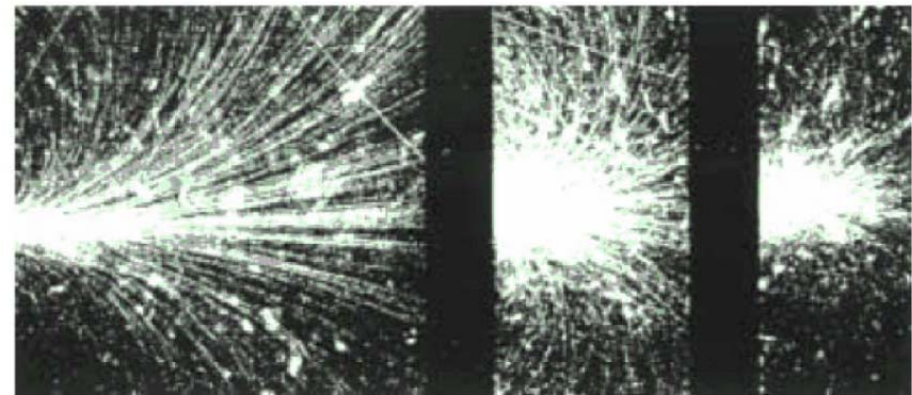
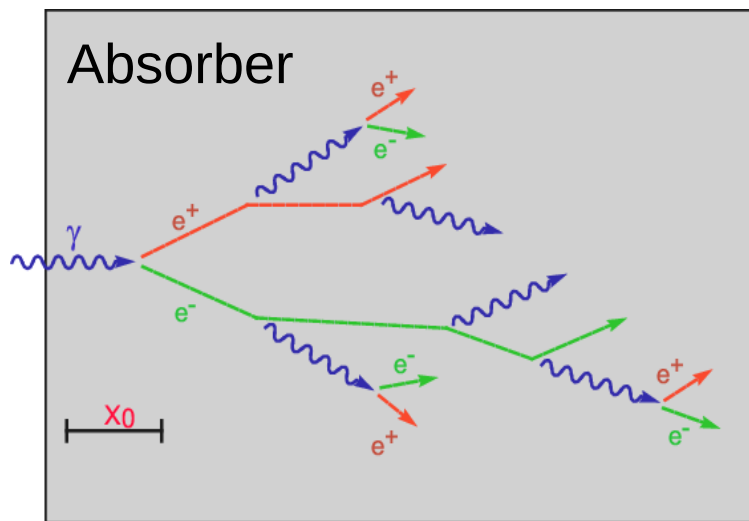
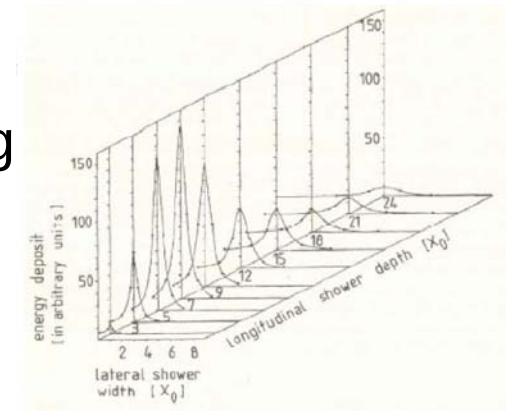


- mit VLSI-Chips^{*} können Silizium-Detektoren in Collider-Experimente eingebaut werden
seit Ende der 80er Jahre haben (fast) alle Collider-Experimente einen Silizium-Vertex-Detektor (zuerst in MARKII)
- zusätzlich erforderlich sind miniaturisierte „Leiterplatten“: Elektronik-Hybride
- kleinste Baugruppe: ein ‚Detektor-Modul‘
 - erhält Betriebsspannung und Steuer-Signale
 - liefert analoge oder digitale Daten auf typ. einer seriellen Leitung (Kupfer oder Glasfaser)

^{*}Very Large Scale Integration

5) Elektromagnetische und hadronische Kalorimeter

- A** Hochenergetische Elektronen oder Photonen initiieren einen **elektromagnetische Schauer** (nach $\sim 1 X_0$)
- primäres hochenergetisches Elektron: Bremsstrahlung
 - primäres hochenergetisches Photon: $e^+ e^-$ Paarbildung
 - **Kaskadenprozess: Paarbildung $\leftrightarrow$ Bremsstrahlung**
↳ Erzeugung zahlreicher niederenergetischer e^+ , e^- , γ



Photon-induzierter Schauer in einer Nebelkammer.

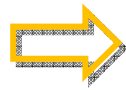
- Die schwarzen Bereiche sind Blei-Platten.
- Senkrecht zur Bildebene wirkt ein Magnetfeld.

- Bei Kaskadenprozessen spielt die **Strahlungslänge X_0** eine zentrale Rolle:

Photonen

bei hohen Energien gilt $\sigma_{\text{tot}} \approx \sigma_{\text{paar}}$, damit:

$$\mu = \frac{7}{9} \cdot \frac{1}{X_0}$$



$$I(X_0) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot X_0} = I_0 \cdot e^{-7/9} = 0.46$$

nach **Absorberdicke X_0 ist γ -Intensität auf $\sim 1/2$ abgefallen**,
 $P(e^-e^+)$ für Paarbildung beträgt $\sim 1/2$ ($P = 1 - e^{-7/9}$)

$$\lambda_{\text{paar}} = \frac{9}{7} \cdot X_0$$

mittlere freie Weglänge λ_{paar} eines γ 's
in Einheiten von X_0 (d.h. nach Λ_{paar} noch $1/e$)

Elektronen

$$E(x) = E_0 \cdot e^{-\frac{x}{X_0}}$$

nach einer Absorberdicke $x = 1 X_0$ ist die Energie von hoch-relativistischen Elektronen auf $1/e$ abgefallen

■ Elektromagnetische Kalorimeter (ECAL):

Messung der Energie von Elektronen, Positronen & Gammas durch Nachweis des von ihnen initiierten Schauers

Design:

- **Sampling-Kalorimeter** (Sandwich-Zähler) mit abwechselnden Lagen eines schweren Absorbers (Blei) & eines Ionisationsmediums (z.B. Szintillator, Flüssig-Argon Ionisationskammer)
- **Bleiglaszähler** (Cherenkow-Licht)

Auslegung eines ECAL:

um den Schauer nach seinem Maximum beim exponentiellen Abklingen vollständig im ECAL einzugrenzen, sind Massen-Belegungen $X \sim 20 \cdot X_0$ erforderlich
Beispiel: 2 mm Pb-Folien, 5 mm Szintillator
↳ 40 cm Kalorimeterlänge

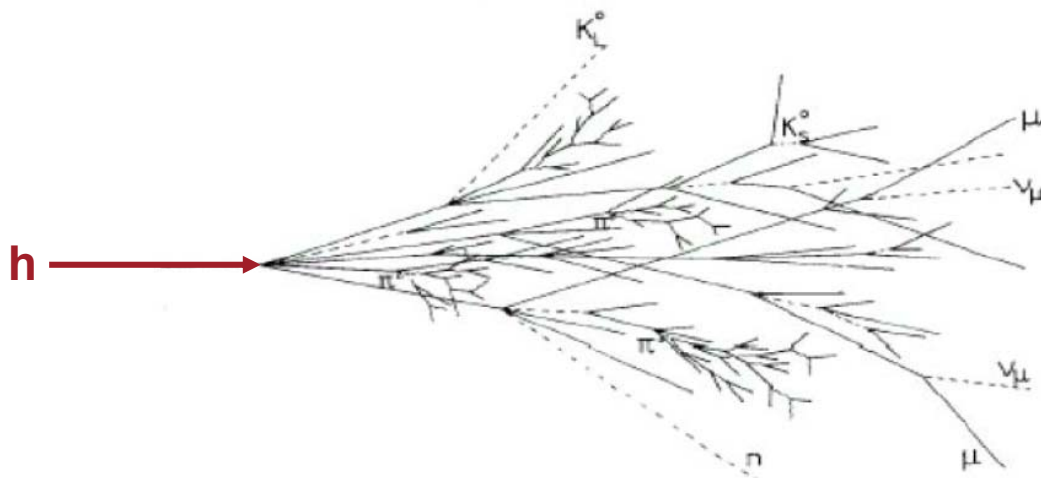


B Hadronische Schauer:

Einfache Vorstellung:

Hadron + Kern $\rightarrow$

$$\left. \begin{array}{l} \pi^+, \pi^-, \pi^0 \\ + \sim 10\% K^+ K^-, K_S^0, K_L^0 \\ + \sim 5\% p, n \\ + \text{Kernfragmente} \end{array} \right\} \sigma \propto \pi R_K^2 A^{2/3} \approx 35 \text{ mb} \cdot A^{0.7}$$



Die geladenen Teilchen der Wechselwirkung und die konvertierten Photonen der π^0 -Zerfälle können als Ionisationssignal nachgewiesen werden.

■ Hadronische Wechselwirkungslänge Λ :

mittlere Länge für inelastische Streuung

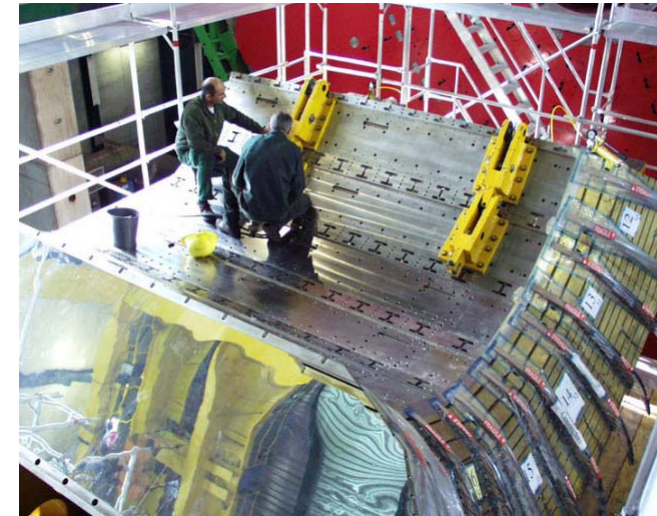
$$\Lambda = \frac{1}{\sigma \cdot n} \quad \text{in [g cm}^{-2}\text{] bzw. [cm]}$$

σ : Kern-Wirkungsquerschnitt

n : Anzahl der Streuzentren

- Λ ist wesentlich größer als X_0

- Blei: $\Lambda = 18$ cm, $X_0 = 0.89$ cm



CMS Hadron-Kalorimeter

■ Hadronische Kalorimeter (HCAL):

Messung der Energie von Hadronen (Baryonen, Mesonen) durch Nachweis des durch inelastische Kernstreuungen initiierten **hadronischen Schauers**

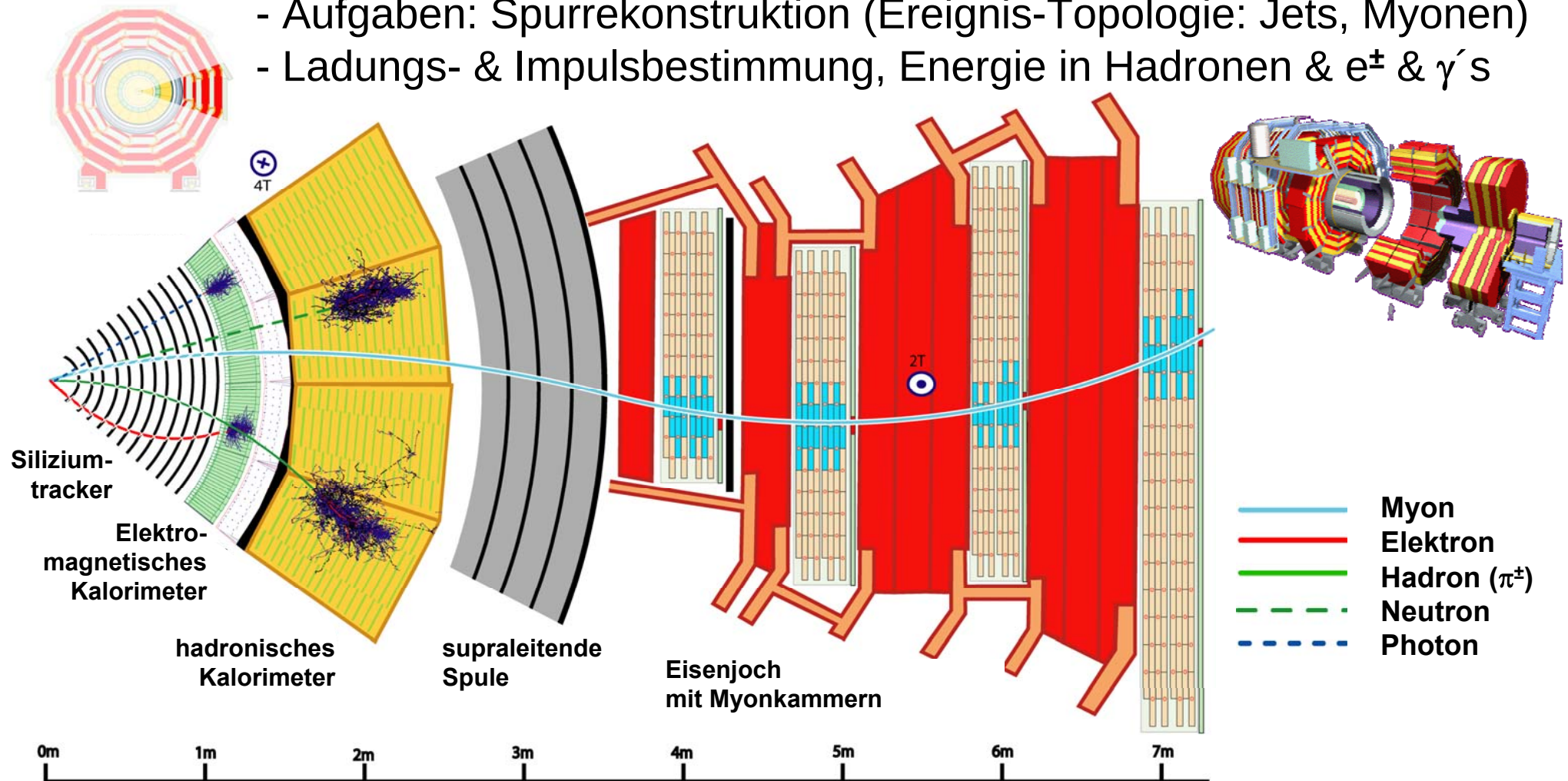
Design:

- Sampling-Kalorimeter (Sandwich-Zähler) mit abwechselnden Lagen eines schweren Absorbers (Blei, Eisen) & Ionisationsmedium

6) Detektorsysteme: CMS – Compact Muon Solenoid

■ typischer **Aufbau eines Collider-Experiments** am Beispiel von CMS

- Aufgaben: Spurrekonstruktion (Ereignis-Topologie: Jets, Myonen)
- Ladungs- & Impulsbestimmung, Energie in Hadronen & $e^\pm$ & γ 's



CMS – Siliziumtracker

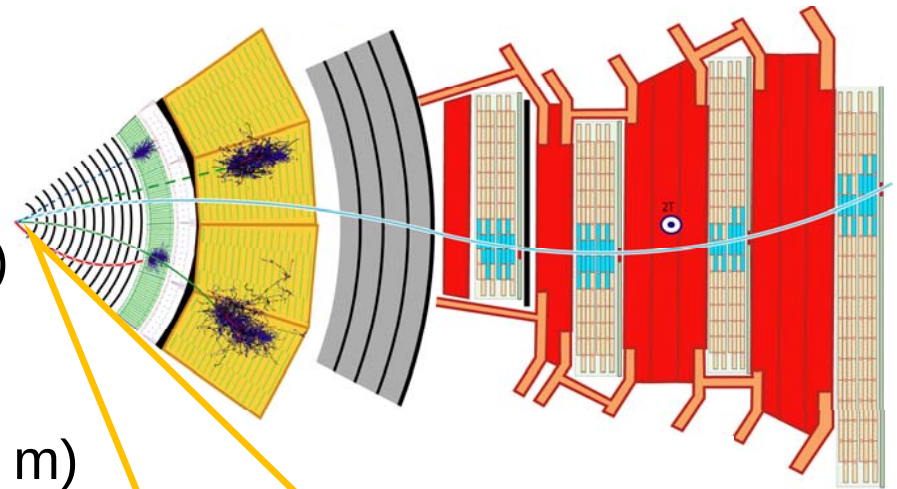
■ innerer Siliziumtracker:

Aufgabe:

Rekonstruktion der Spuren nahe am primären Eventvertex (Auflösung $\sim 10 \mu\text{m}$)

Design:

- Fläche = 206 m^2 (weltgrößter Tracker)
- 13 Lagen an Si-Halbleiterzählern ($r < 1.1 \text{ m}$)
- **Lage 1-3:** Si-Pixel ($150 \times 100 \mu\text{m}^2$)
- **Lage 4-7:** Si-Mikrosteifen (microstrips) ($10 \text{ cm} \times 100 \mu\text{m}^2$)
- **Lage 8-13:** Si-Mikrostreifen ($25 \text{ cm} \times 180 \mu\text{m}^2$)
- 10 Mio. Auslesekanäle
- 26 Mio. Bondverbindungen
- Betrieb bei -10°C
- Strahlenbelastung: $\sim 500 \text{ kGy}$ in 10 a (10^{13} - $10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$)



CMS – ECAL

■ Elektromagnetisches Kalorimeter:

Aufgabe:

Bestimmung der elektromagnetischen Energie eines Ereignisses

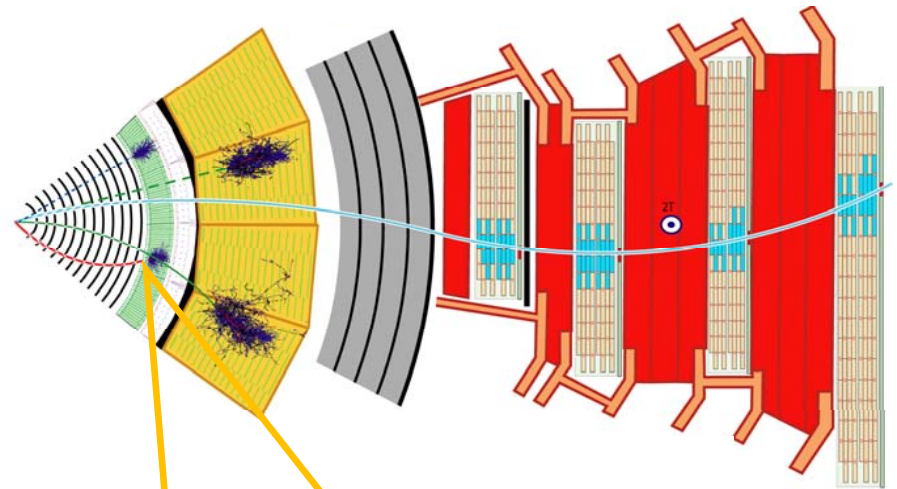
Teilchen-Identifikation: e^- , e^+ , γ , π^0

Design:

kompaktes Kalorimeter innerhalb des Solenoiden (von $r = 1.1 \text{ m} \dots 1.77 \text{ m}$)

mit hoher Dichte $\rho = 8.3 \text{ g/cm}^3$

- 76000 PbWO_4 **Blei-Wolframat Kristalle**
- kurze Strahlungslänge $X_0 = 0.89 \text{ cm}$
- kurze Szintillator-Abklingzeit $\tau = 10 \text{ ns}$
- Auslese: (Avalanche-) Photodioden



CMS – hadronisches Kalorimeter

■ hadronisches Kalorimeter:

Aufgabe:

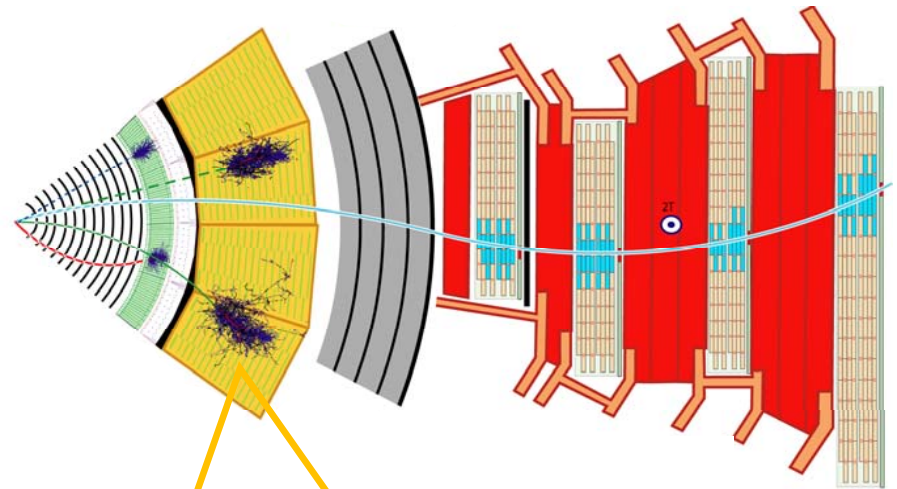
Bestimmung der hadronischen Energie eines Ereignisses

Design:

kompaktes Kalorimeter innerhalb des Solenoiden (von $r = 1.77 \text{ m} \dots 2.95 \text{ m}$)

Sampling Kalorimeter

- alternierende Lagen eines passiven Absorbers und eines aktiven Szintillators
- **aktiver Detektor:**
Plastikszintillator mit Faser-Auslese
- **passives Material:**
Messing (Cu/Zi) / Eisen (Fe)



CMS – supraleitender Solenoid

■ Supraleitender Solenoid:

Aufgabe:

Erzeugung eines axialen B-Felds mit 4 T

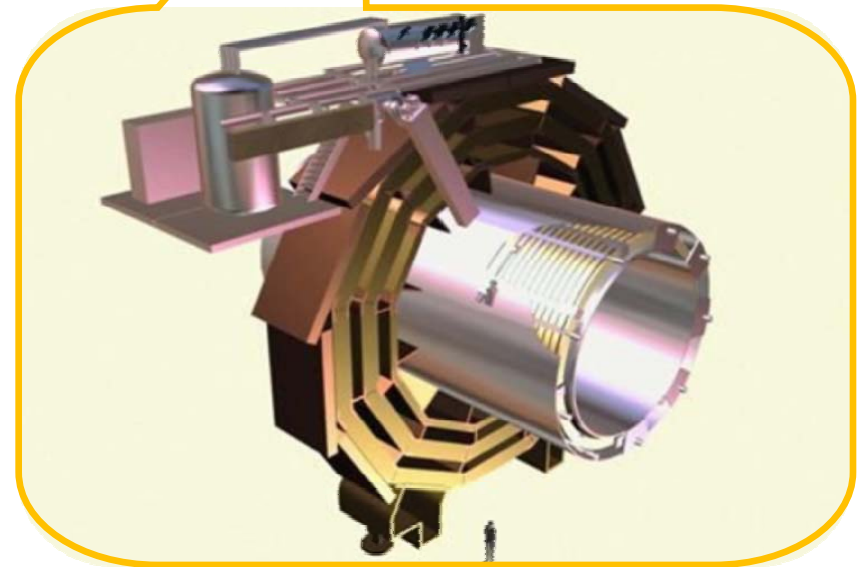
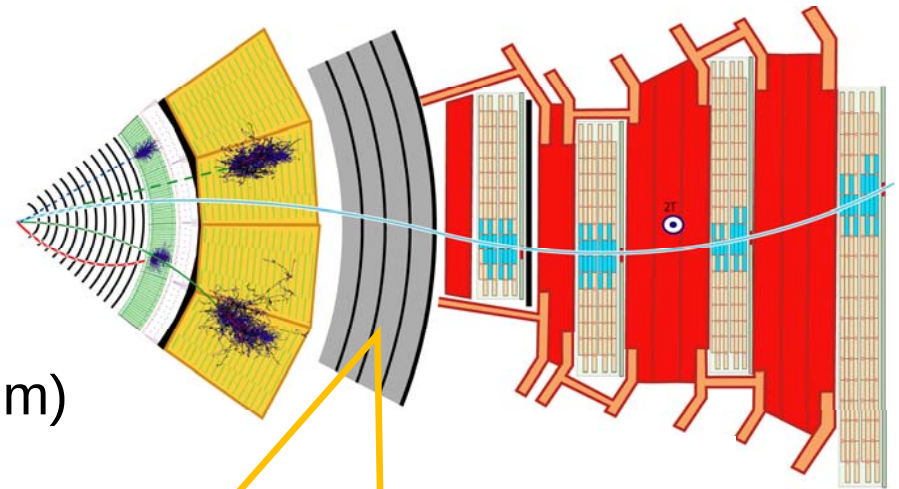
Design:

Solenoid umschließt den Si-Tracker & die beiden Kalorimeter ($\varnothing = 6$ m, $L = 12.5$ m)

- weltweit größter Solenoid
- $B = 4$ T bei Strom $I = 20.000$ A
- gespeicherte magnet. Energie 2.66 GJ
- 220 t Kaltmasse

■ Impulsauflösung $\Delta p/p$

- $\Delta p/p < 10\%$ für 1 TeV Myonen
- Auflösung $\Delta p/p \sim 1/(B \cdot L^2)$
- innen: 3 m in $B = 4$ T $\Rightarrow B \cdot L^2 = 36 \text{ Tm}^2$
- außen: $B = 2$ T $\Rightarrow B \cdot L^2 = 5 \text{ Tm}^2$
- Kombination: s-förmige μ -Spuren in CMS



CMS – Myonkammern & Eisenjoch

■ Myonkammern & Eisenjoch:

Aufgabe: Identifikation von Myonen und Bestimmung ihres Impulses

Design:

1400 Myonkammern im Rückflussjoch des Solenoiden ($B = 2 \text{ T}$)

- 250 Driftröhren
- 540 Kathodenstreifenkammern
- 610 RPCs (Resistive Plate Chambers)

Nachweisstreifen

Resistive
Platten

HV
Alu-Folie

