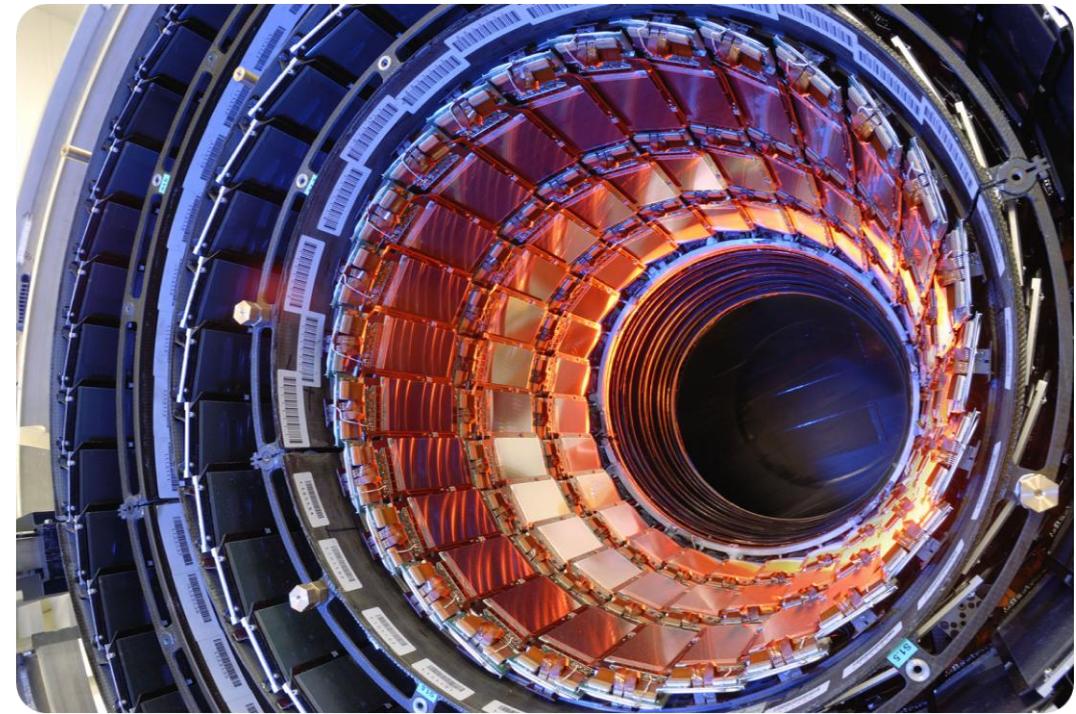


Kerne und Teilchen

Physik VI

Vorlesung # 17 15.6.2010



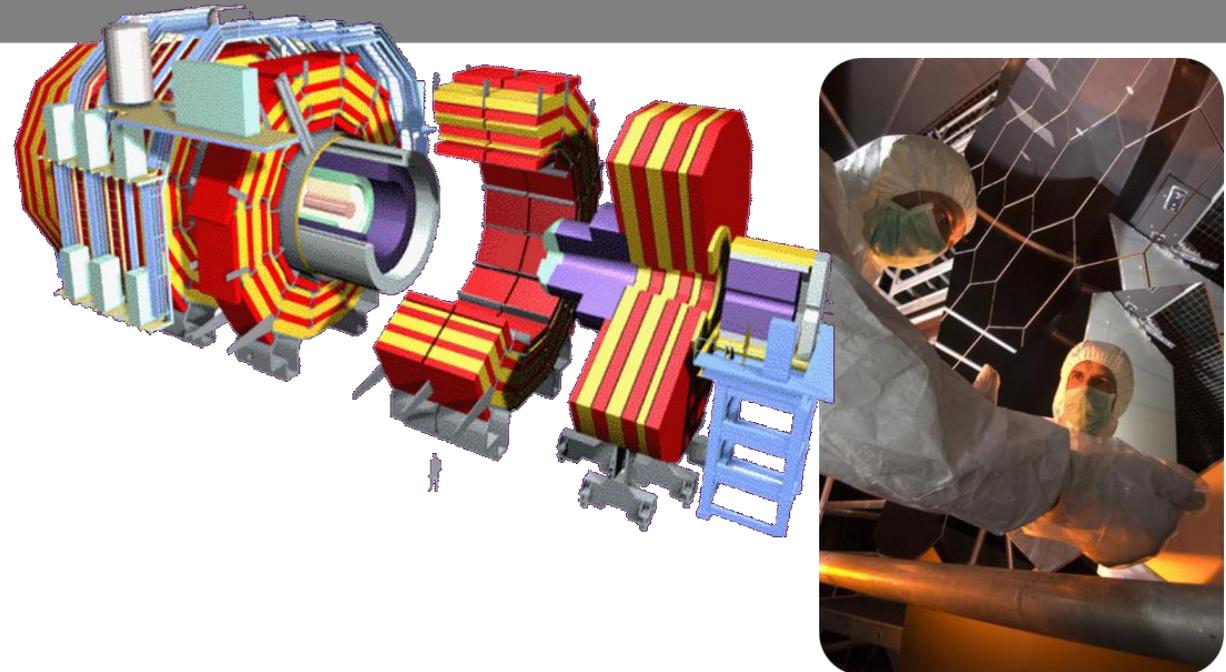
Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

Beschleuniger und Detektoren

- TPCs, Szintillatoren
- Cherenkow-Detektoren
- moderne Teilchendetektoren

Quarkmodell der Hadronen

- Teilchen mit Strangeness
- der achtfache Weg



Schauer, Beschleuniger



- Entwicklung von **elektromagnetischen Schauern** wird bestimmt durch die Strahlungslänge X_0 :

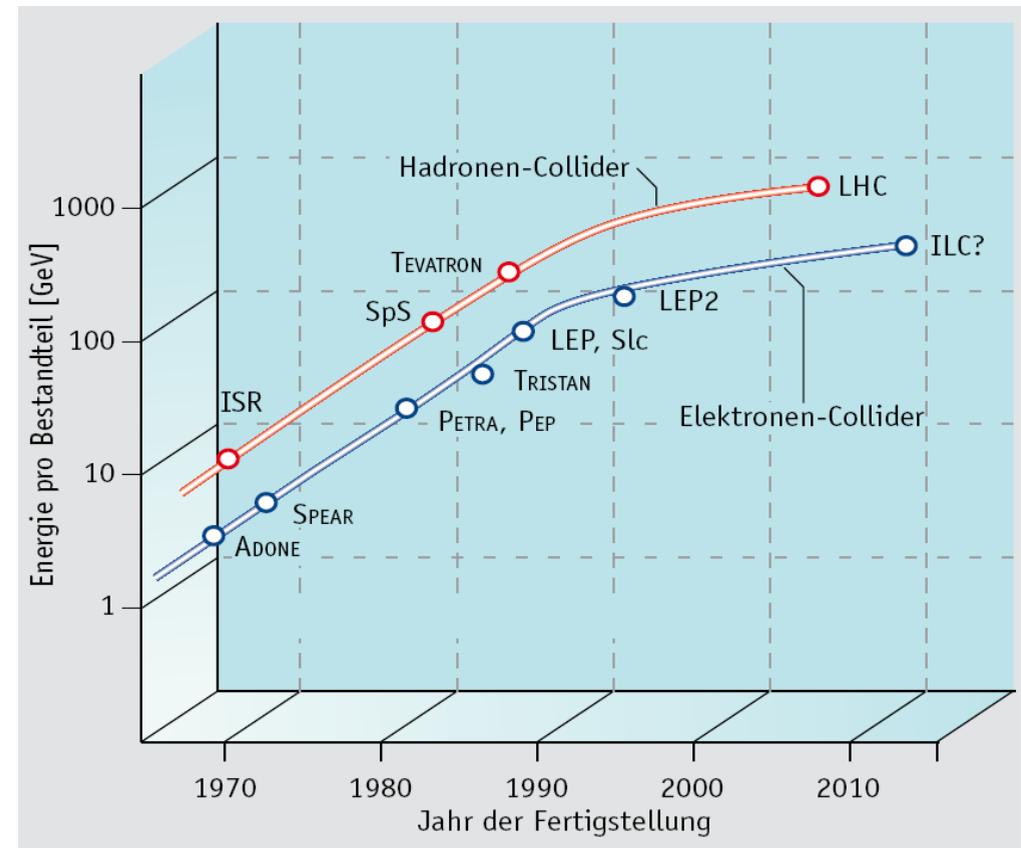
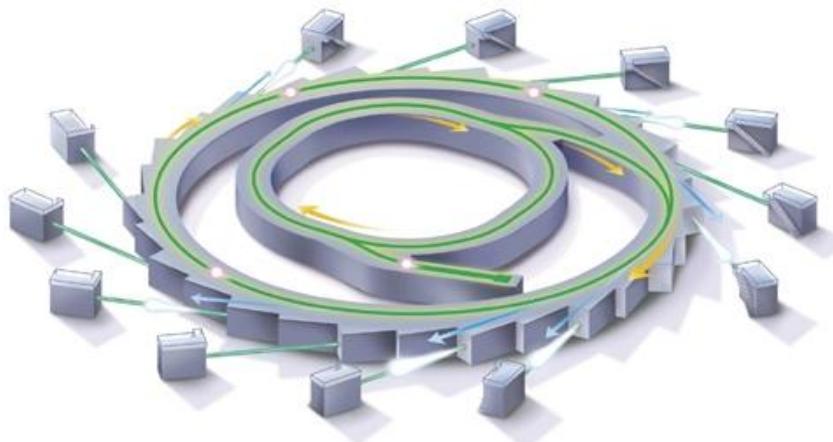
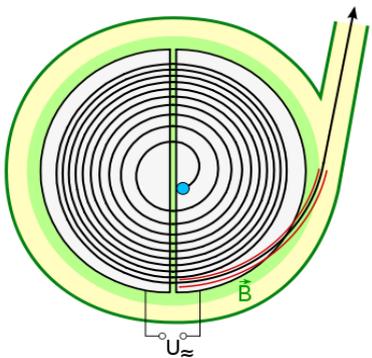
Photonen:
Paarbildung

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

Elektronen:
Bremsstrahlung

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

- Zyklotron**: Beschleunigung mit fester Frequenz $\omega = (q/m) \cdot B$
- Synchrotron**: festes r , B variabel
Dipole, Quadrupole, Kavitäten



Beschleuniger, Detektoren



- **Teilchenbeschleunigung** über Stufen: Cockcroft-Walton \Rightarrow Linac \Rightarrow Booster-Synchrotron \Rightarrow großes Synchrotron \Rightarrow Speicherring
Tevatron (p-p̄): $E_{\text{CMS}} = 1.96 \text{ TeV}$, **LHC** (p-p): $E_{\text{CMS}} = 7 \text{ TeV}$

- Fixed-Target-Experimente & Collider-Experimente

Luminosität L: verbindet Wirkungsquerschnitt σ mit Rate R

$$R = \frac{dN}{dt} = \sigma \cdot L$$

L in $[\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}]$, integrierte Luminosität $\int L dt$ in $[\text{cm}^{-2}]$
LHC-Design: $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, in 1 a: $\int L dt = 100 \text{ fb}^{-1}$

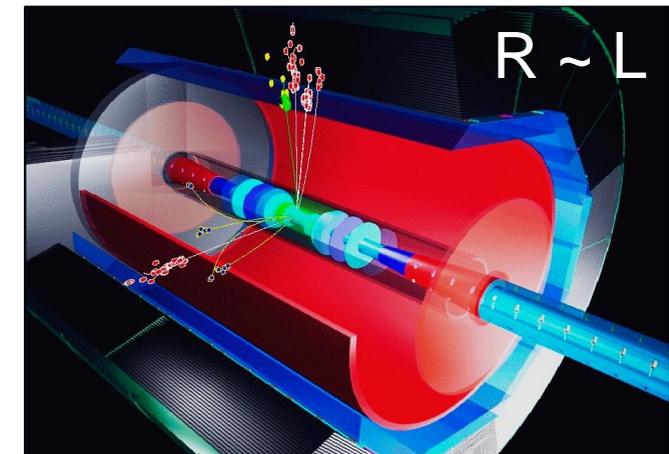
- **Vieldrahtproportionalkammern (MWPC)**

Prinzip:

- dünne parallele Anodendrähte zur Ladungs-Multiplikation um $\sim 10^5$ in Ar-CO₂ Zählgas

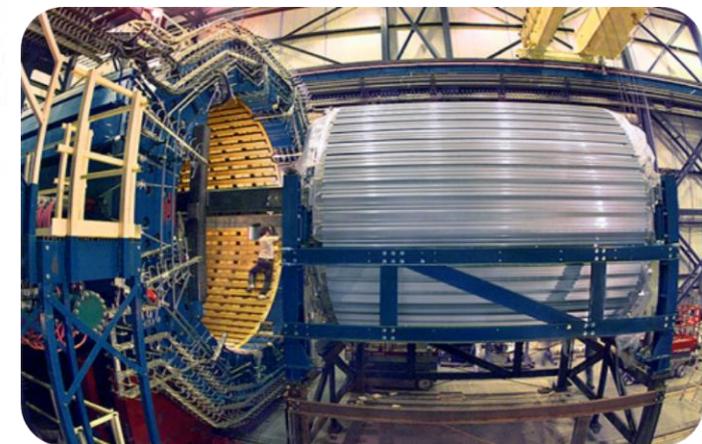
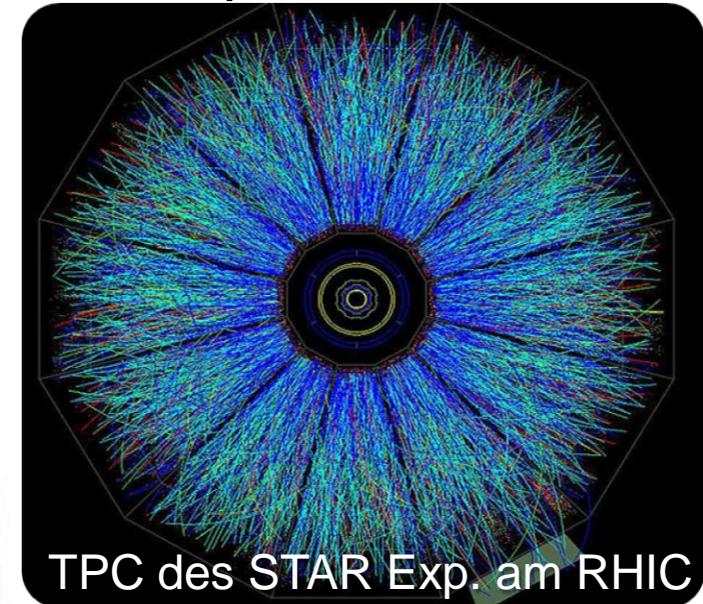
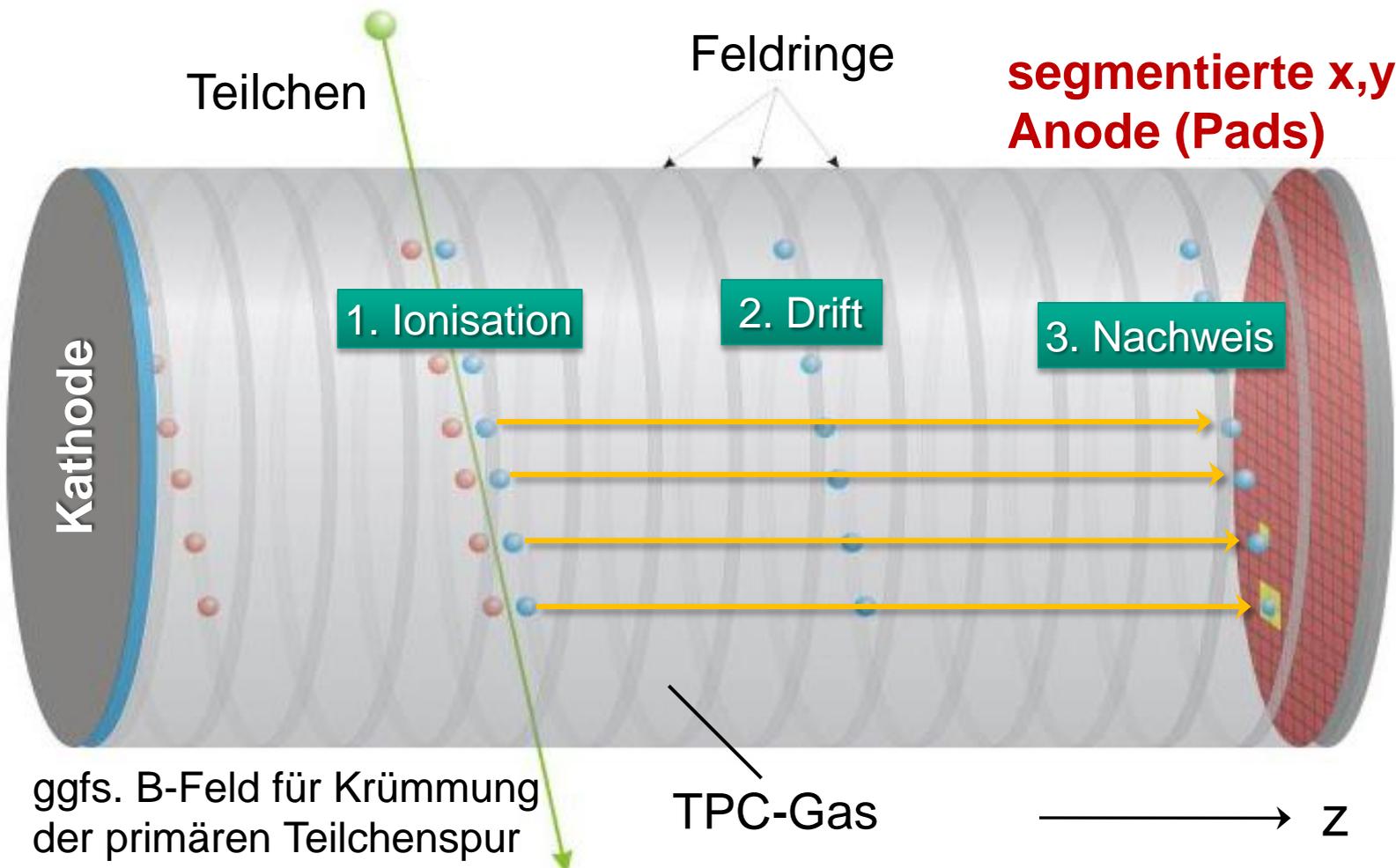
Aufgabe:

- Ortsbestimmung mit $\sigma_x \sim 600 \mu\text{m}$



Time Projection Chamber: 3-dim. Spuren

- **Spurendriftkammern** (TPCs) basieren auf der **Drift der Ladungsträger** mit konstanter Driftgeschwindigkeit v_D in einem homogenen E-Feld ($E = -dV/dz$)
 - **typische Parameter**: $E \sim 1$ kV/cm, $v_D \sim 1 - 4$ cm/ μ s, $\Delta z \sim 200$ μ m
 - **3D**: z aus Driftzeit, (x,y) aus segmentierter Anode



- **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

Szintillatoren

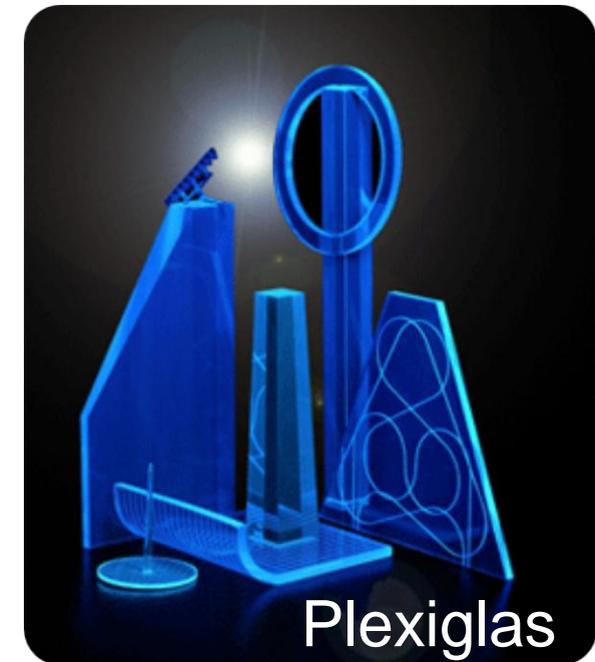
■ organische Szintillatoren

Material $(CH)_n$ - Ketten:

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

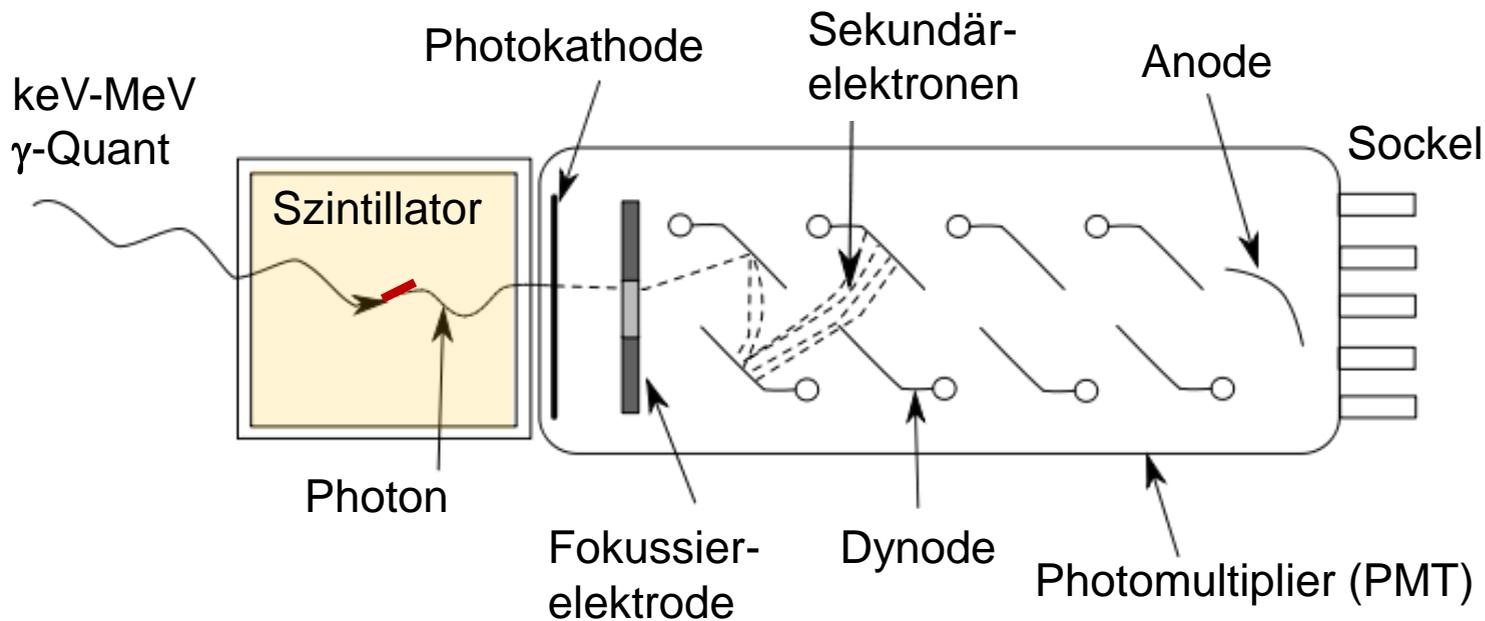
Szintillationsmechanismus:

- Anregung von Molekülzuständen in *primärem Fluoreszenzstoff*, ↪ 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 (Fibres)



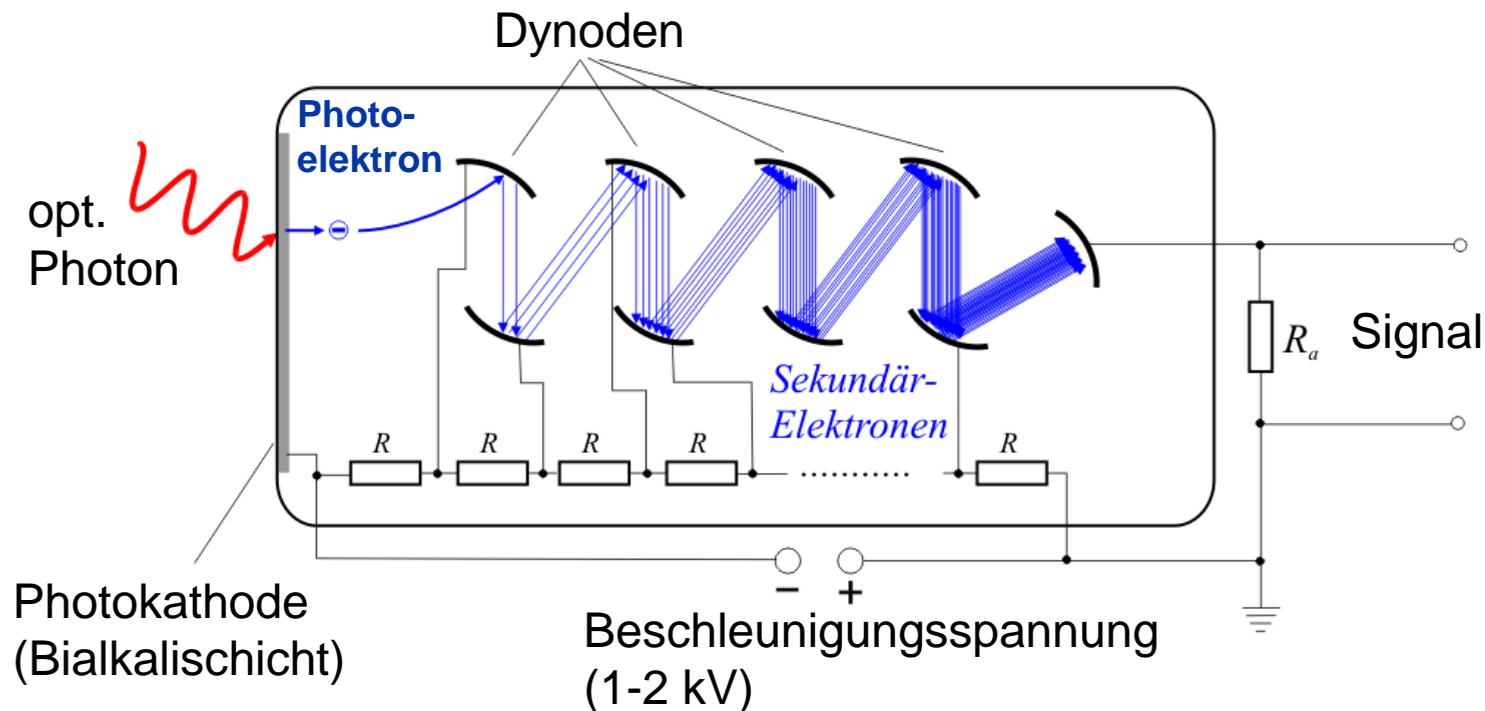
Photomultiplier (PMT)

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



Photomultiplier (PMT)

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



■ 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 Plastik-Szintillators
- **Flüssig-Argon Kalorimeter** (Szintillationslicht im UV, Wellenlängenschieber)
- **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



Hadronische 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) & einer Flüssigionskammer / MWPC

■ hadronische Wechselwirkungslänge Λ mittlere Länge für inelastische Streuung

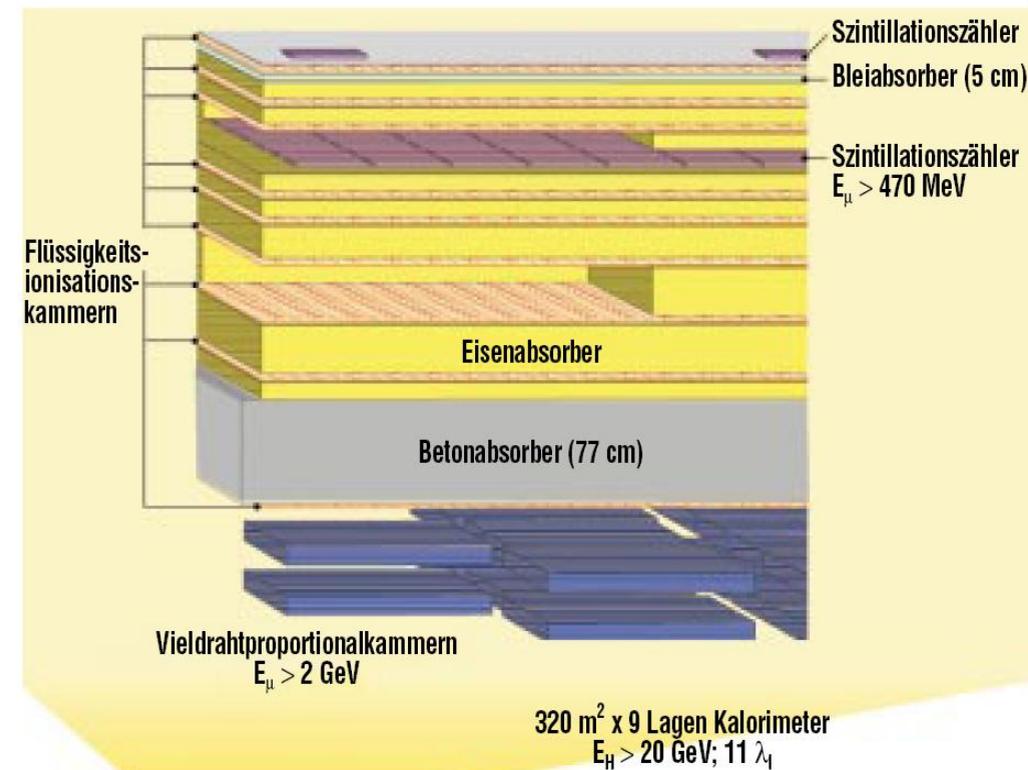
$$\Lambda = \frac{1}{\sigma \cdot n} \quad \text{in [g cm}^{-2}\text{] bzw. [cm]}$$

σ : Kern-Wirkungsquerschnitt

n : Anzahl der Streuzentren

- Λ ist wesentlich größer als X_0

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



KASCADE Hadron-Kalorimeter

Cherenkow-Detektoren

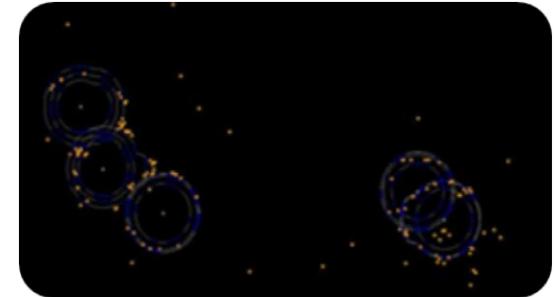
- Cherenkow-Detektoren nutzen zum Teilchennachweis den Cherenkow-Effekt

Ring Imaging Cherenkow (RICH)-Detektoren:

Ziel: Messung der Teilchengeschwindigkeit β

Design: Teilchen emittiert UV-Photonen in einem **Radiator**

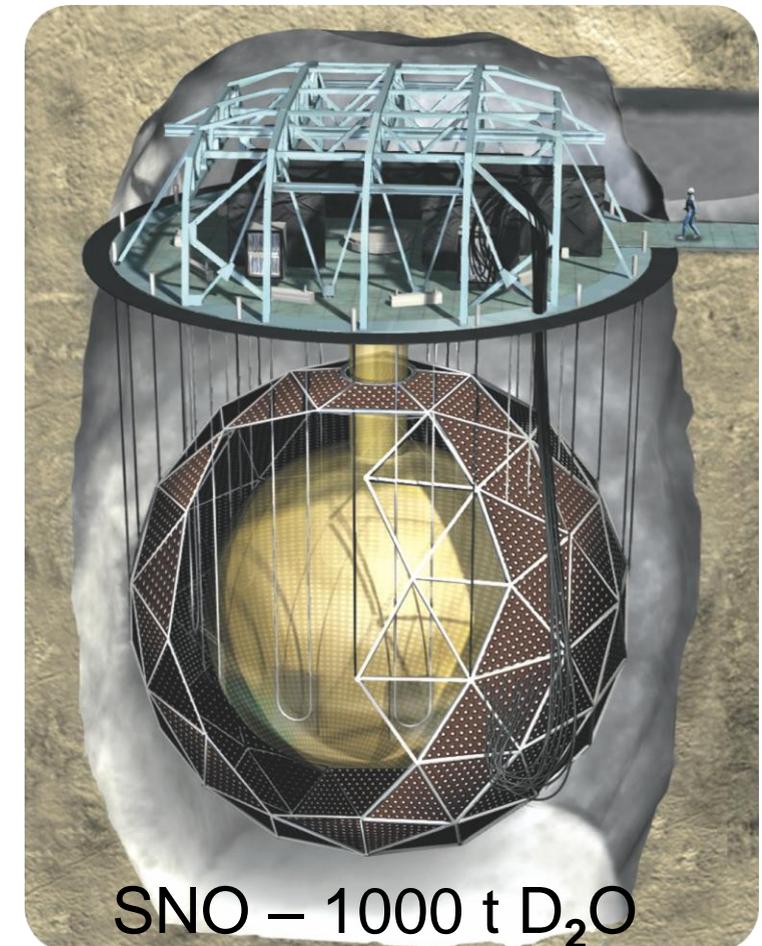
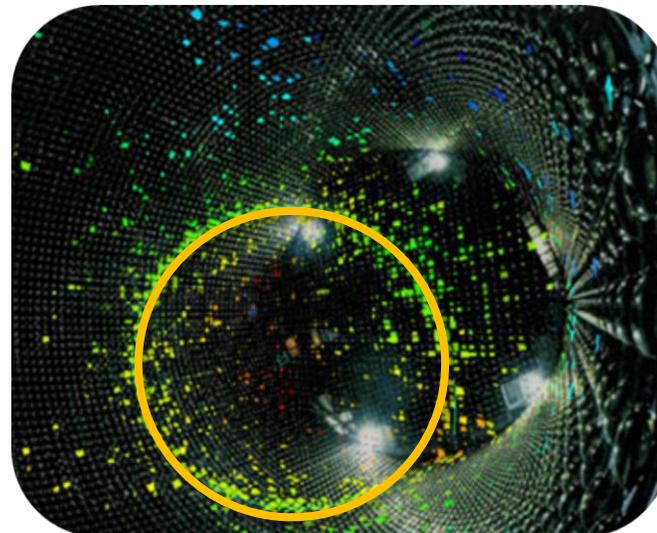
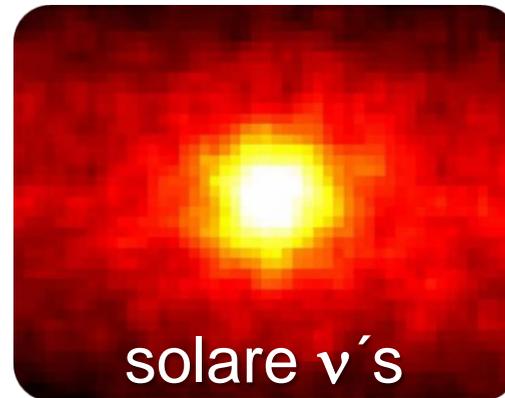
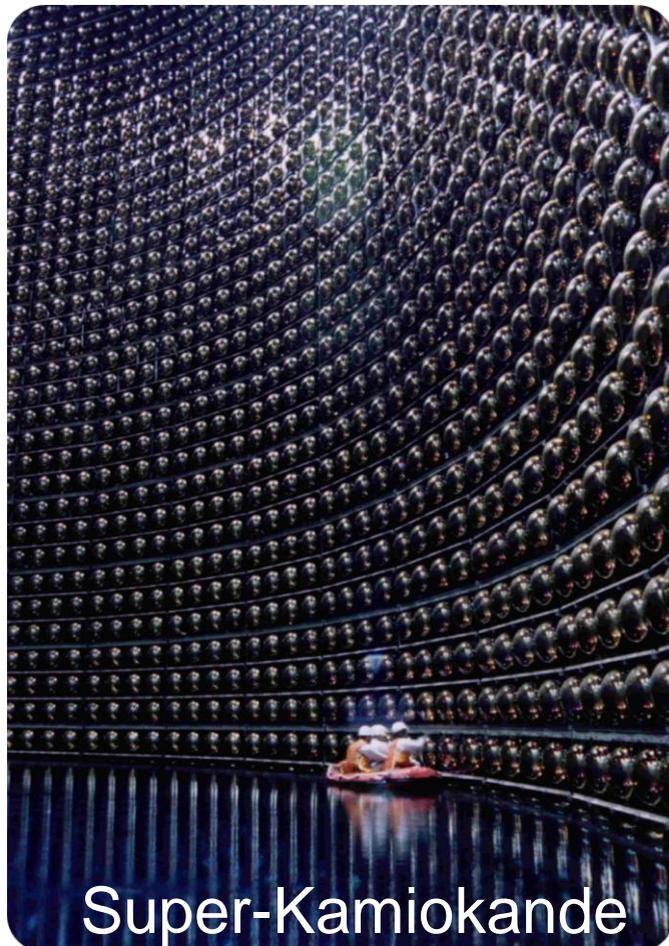
- **NaF** mit $n = 1.336$,
- **Aerogel** mit $n = 1 + 0.21 \cdot \rho$
($\rho = 0.003-0.55 \text{ g/cm}^3$)
- Spiegelsysteme leiten Licht auf Photondetektoren



Aerogel: Rayleigh-Streuung

Cherenkow-Detektoren

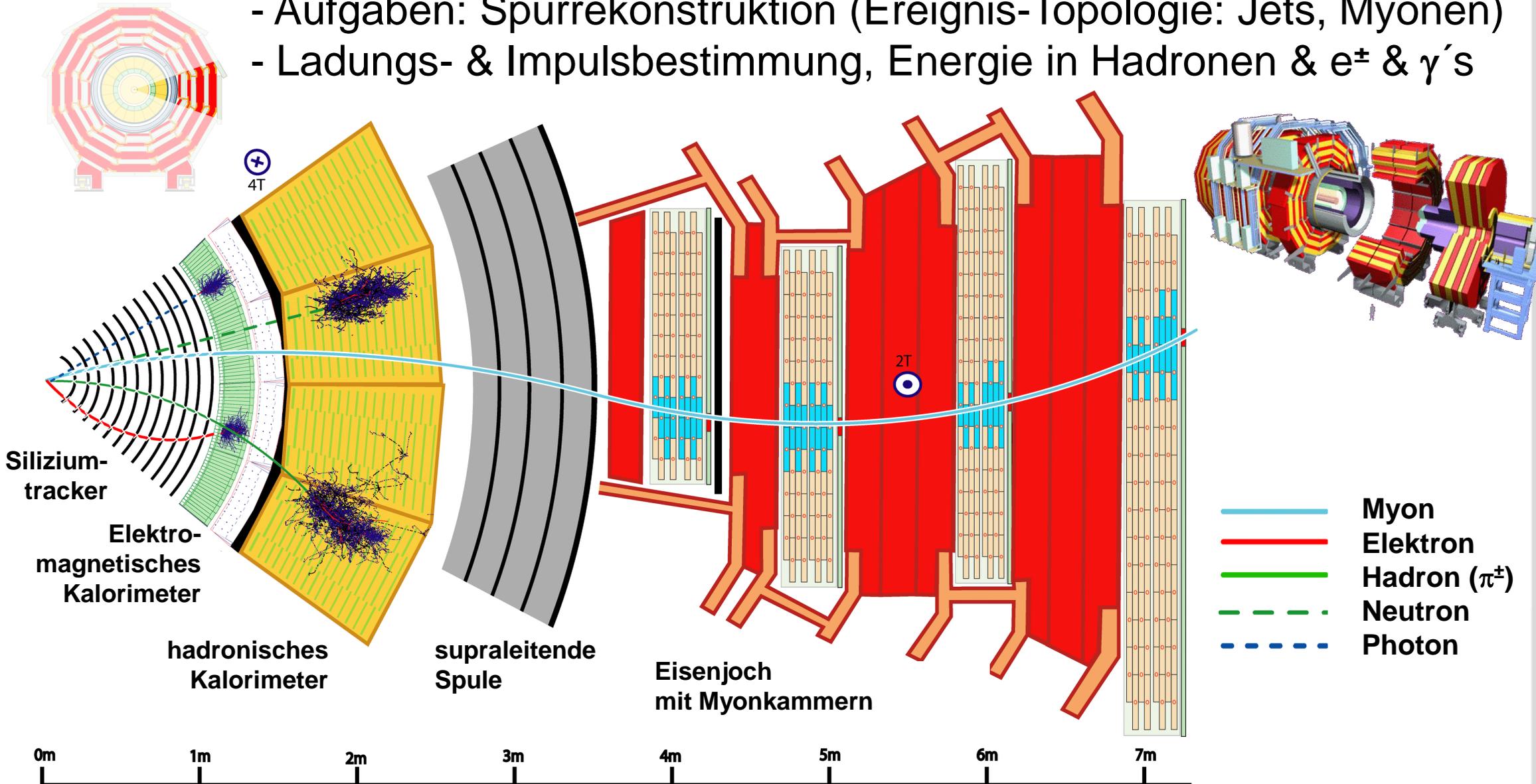
- Cherenkow-Detektoren nutzen zum Teilchennachweis den Cherenkow-Effekt
- Wasser-Cherenkow-Detektoren in der Astroteilchenphysik:
Super-Kamiokande (Japan), **SNO** - **Sudbury Neutrino Observatory** (Ontario)
Messung von E_e und θ_e relativistischer Elektronen aus νe -Streuungen



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

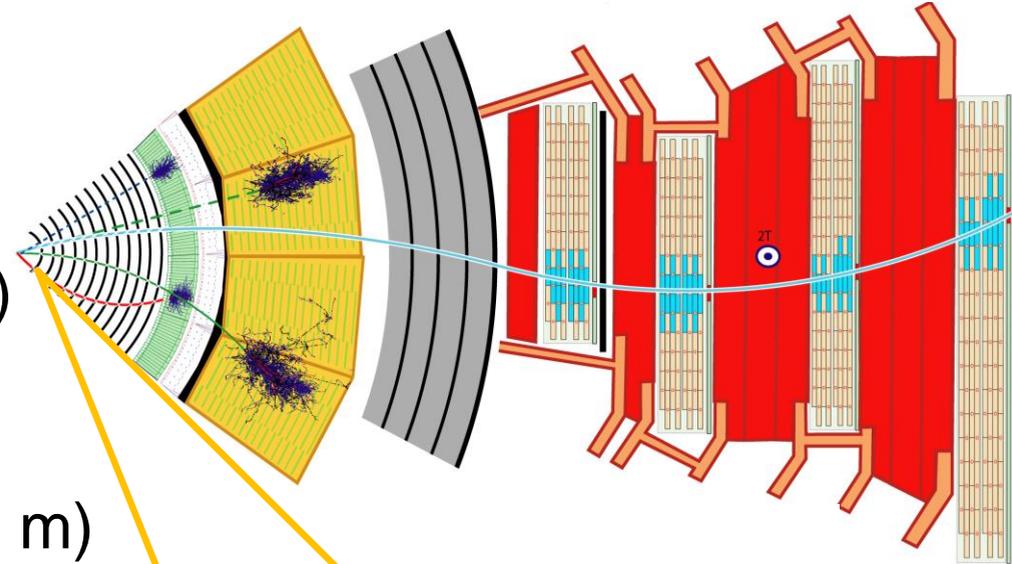
■ innerer Siliziumtracker:

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
($10^{13}\text{-}10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$)



■ elektromagnetisches Kalorimeter:

Aufgabe:

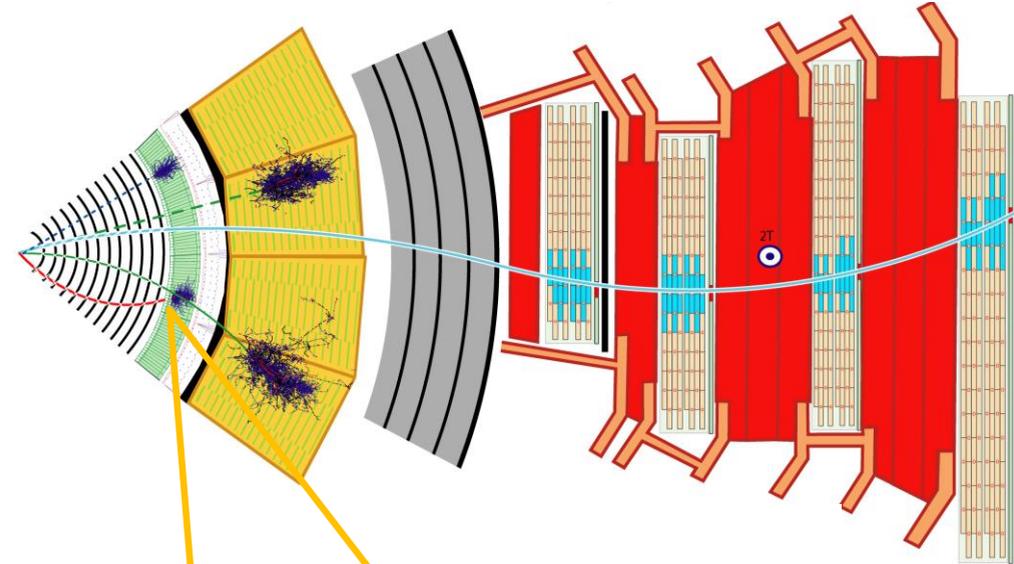
Bestimmung der elektromagnetischen Energie eines Ereignisses

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

- 61200 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:

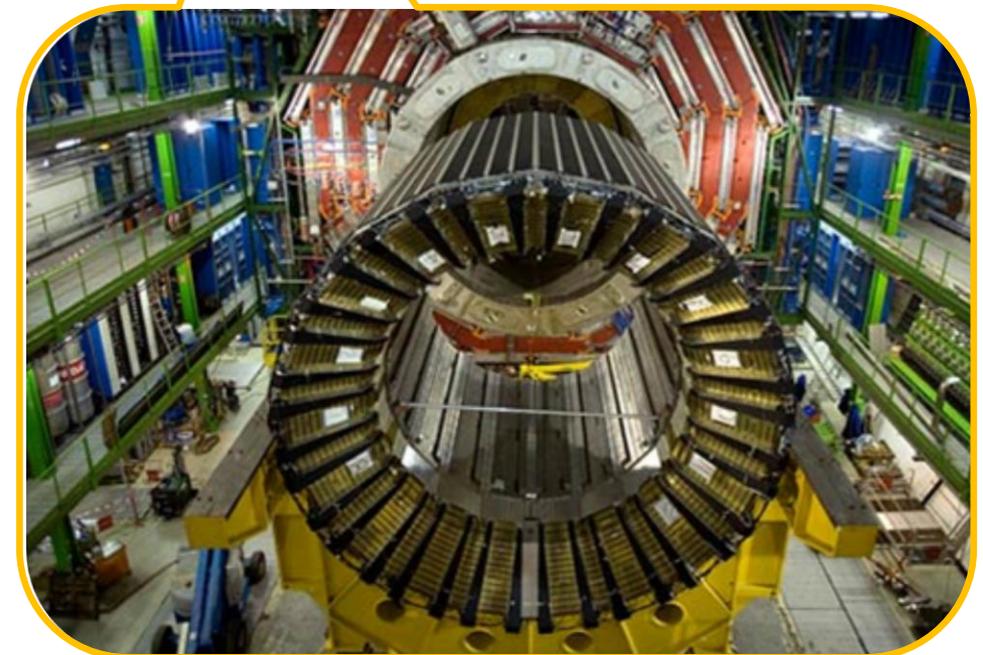
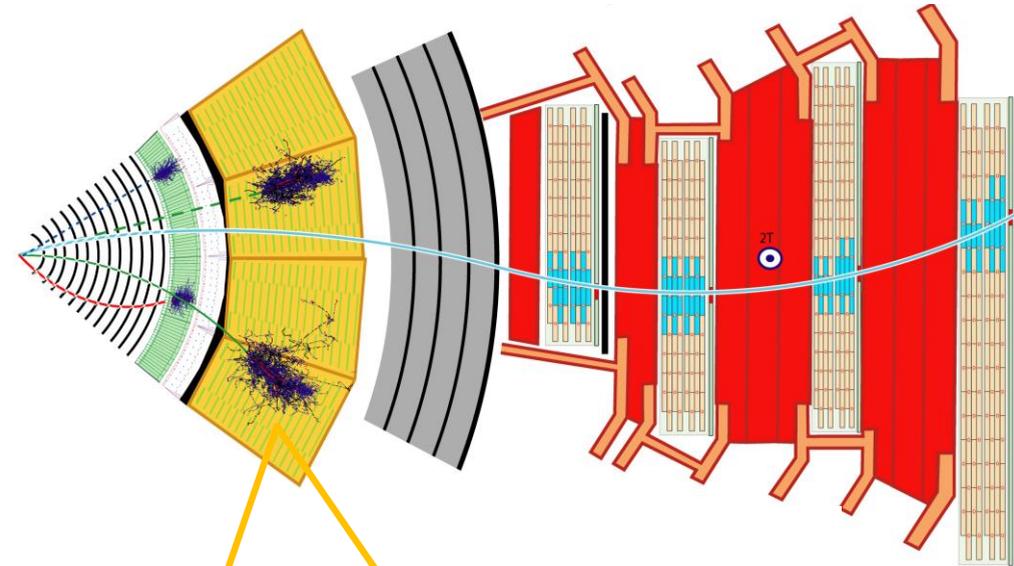
Bestimmung der hadronischen Energie eines Ereignisses

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

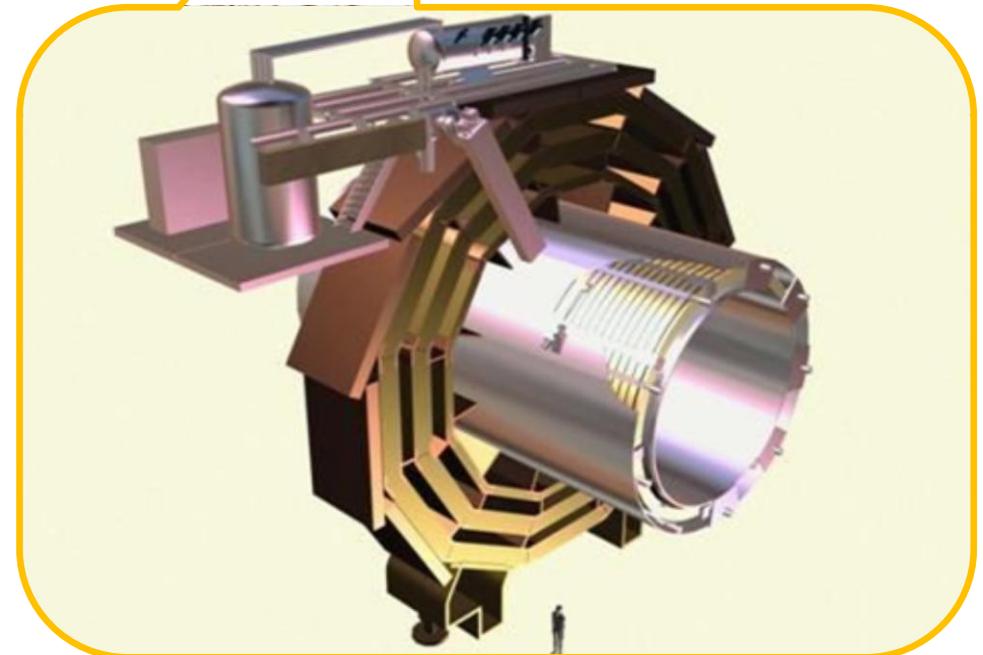
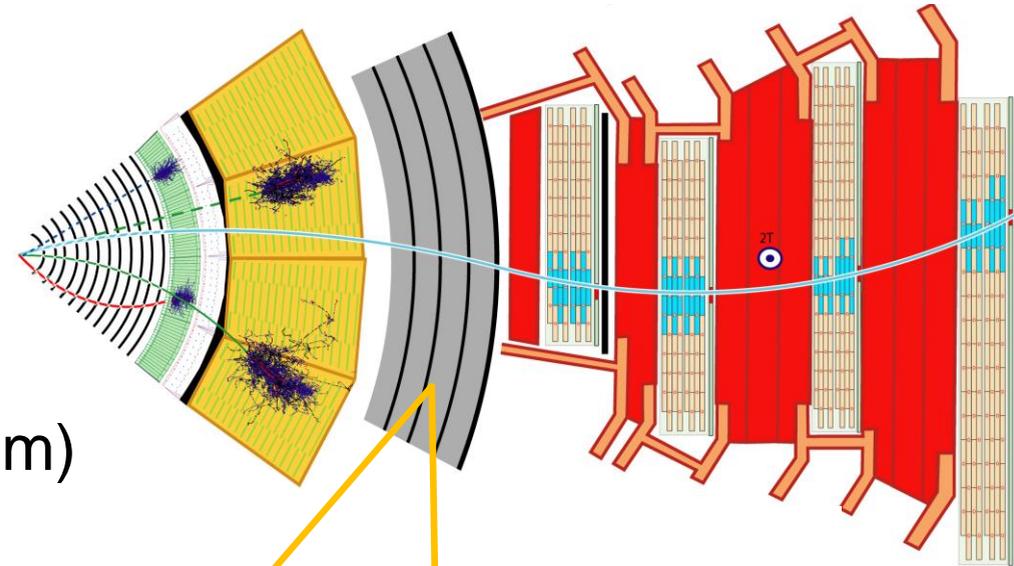
Design:

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 $\Rightarrow B \cdot L^2 = 36$ Tm²
- außen: $B = 2$ T $\Rightarrow B \cdot L^2 = 5$ Tm²
- Kombination: s-förmige μ -Spuren in CMS



CMS – Myonkammern & Eisenjoch

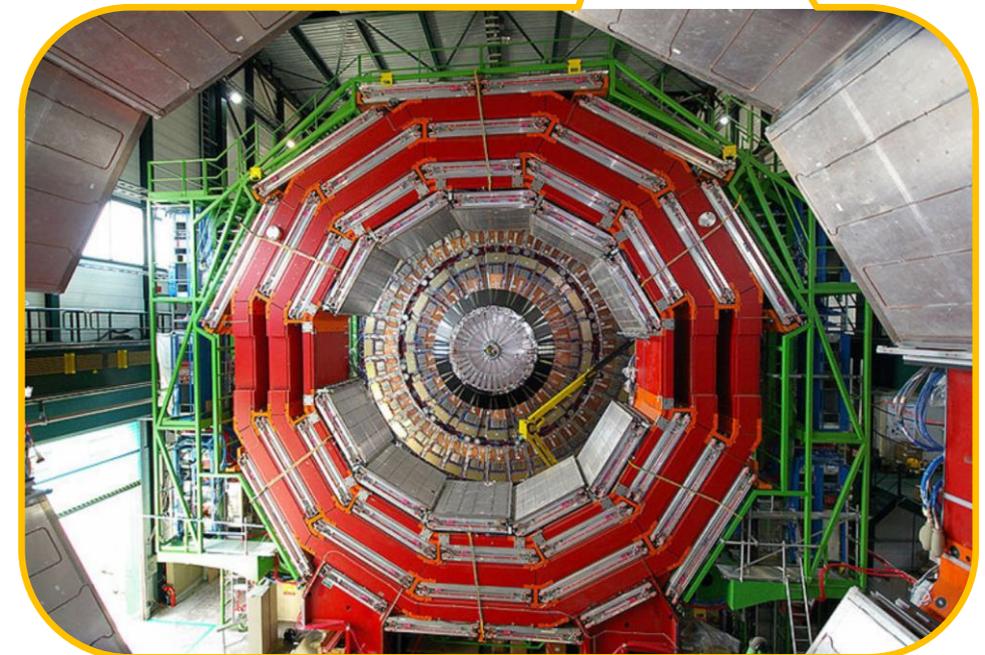
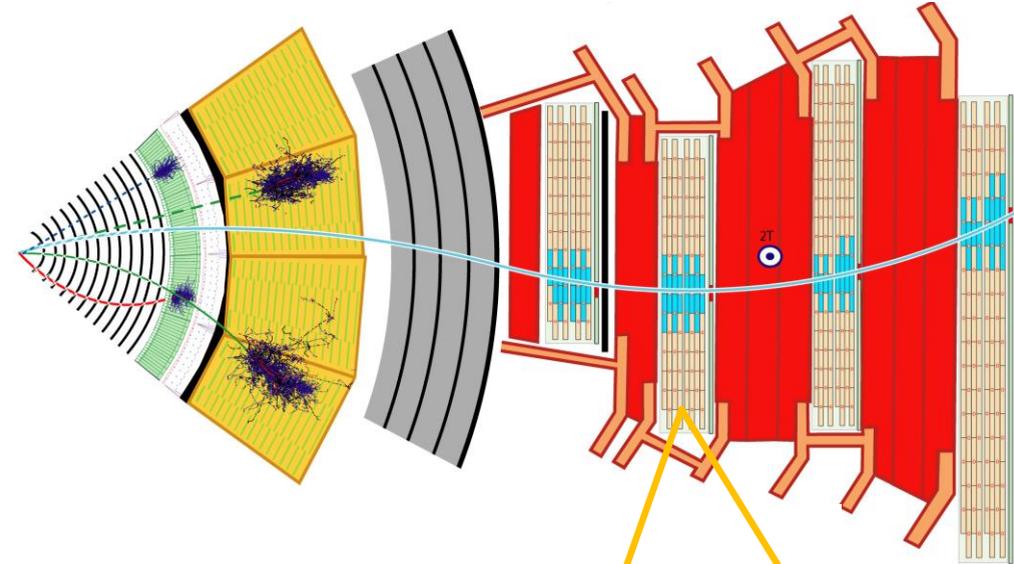
■ Myonkammern & Eisenjoch:

Aufgabe: Identifikation von Myonen und Bestimmung ihres Impulses

Design:

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

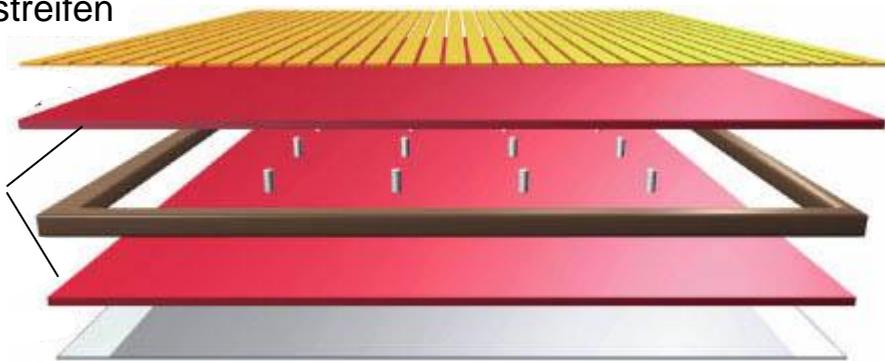
- 250 Driftröhren
- 540 Kathodenstreifenkammern
- 610 RPCs (Resistive Plate Chambers)



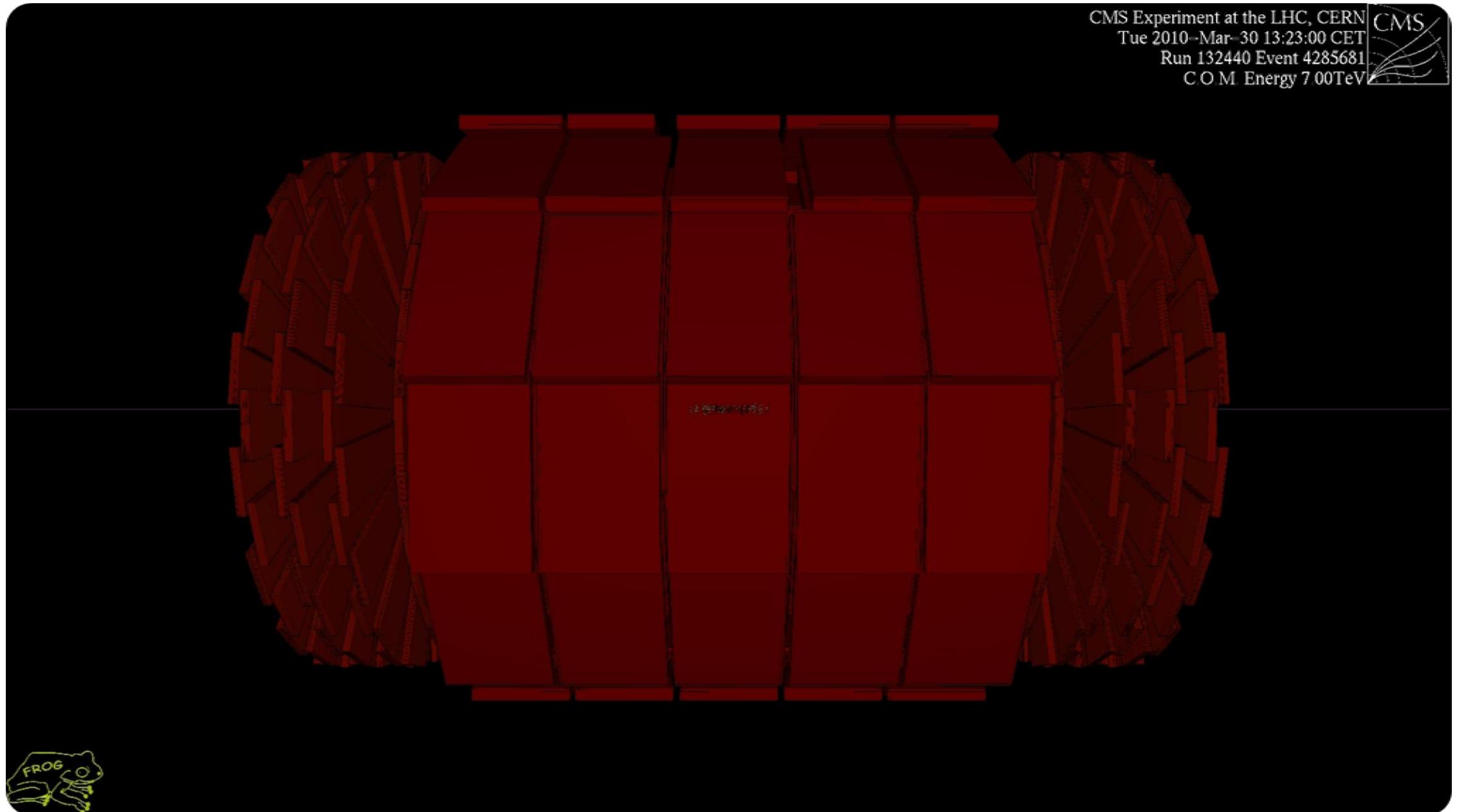
Nachweisstreifen

Resistive
Platten

HV
Alu-Folie

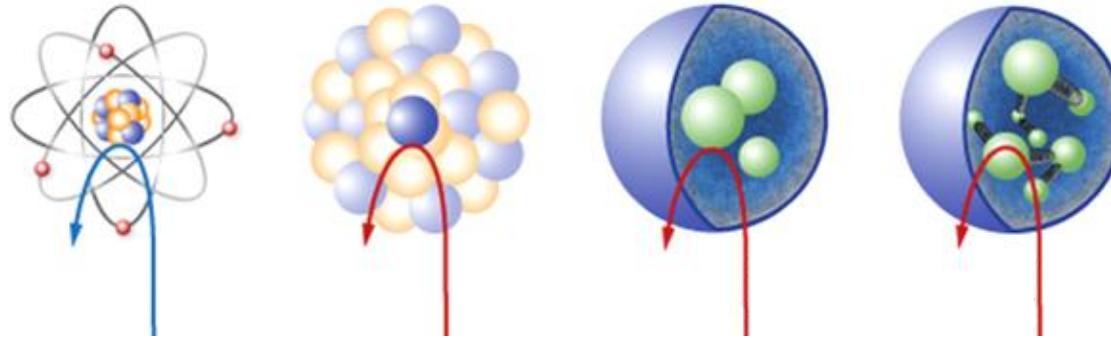


CMS – pp Ereignis bei $E_{\text{CMS}} = 7 \text{ TeV}$



7. Quarkmodell der Hadronen

- Untersuchung immer kleinerer Strukturen: Atom – Kern – Quarks



- Struktur der Mesonen (**Quarkonia**) und Baryonen Multipletts (vgl. Kap. 5.2)
- bisher: leichte Quarks u, d, s - jetzt: auch schwere Quarks c, b, t

Proton

Anti-Proton

Neutron

Lambda

Baryonen

Pion π^+

Kaon K^0

Pion π^0

Charmonium J/Ψ

Mesonen/Quarkonia

7.1 Struktur des Teilchenzoos

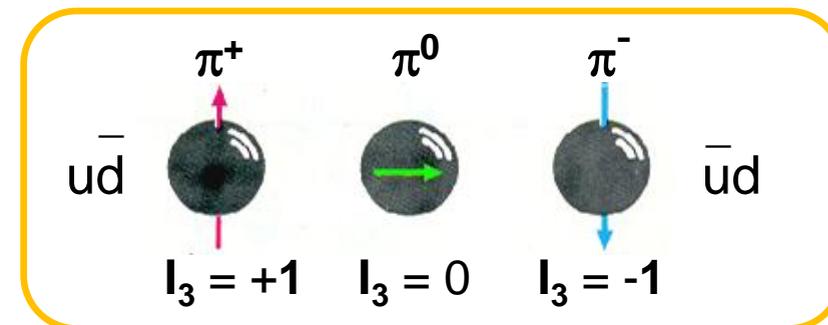
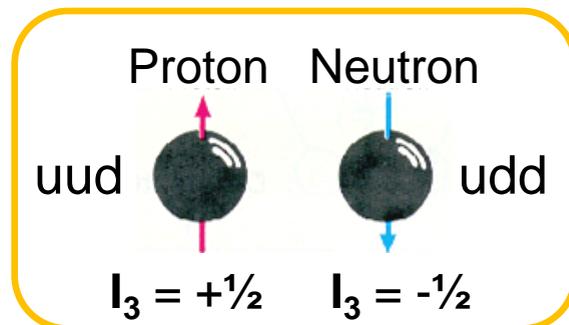
■ Mesonen und Baryonen:

für die Einordnung von Hadronen sind Symmetrien wichtig:

- **diskrete Symmetrie-Transformationen C, P, T** (s. Kap. 8.2)
- **kontinuierliche inneren Symmetrien:**

Ladung Q : Ladungserhaltung, Symmetrietransformation $\Psi' = \Psi \cdot e^{i\alpha \cdot Q}$
 α = reeller Phasenfaktor, unitäre Transformation U(1)-Gruppe
exakt erhaltene globale Symmetrie

Isospin I : eingeführt von Heisenberg (1932) – Spiegelkerne, $m(p) \approx m(n)$
starke Wechselwirkung ist ladungsunabhängig $\hookrightarrow [H, I] = 0$
- Nukleon (p,n) Isospin-Dublett, Pion (π^+ , π^0 , π^-) Isospin-Triplett
erstes Beispiel einer **Flavoursymmetrie der Quarks**
(u,d)-Quark-Isospin-Dublett mit Isospin $I_3 = +\frac{1}{2}$ (u), $-\frac{1}{2}$ (d)



- alle anderen Quarks (s,c,b,t) sind Isospin-Singulets mit den Quark-Dubletts (u,d) und (\bar{u},\bar{d}) erhält man:

- Mesonen ($q\bar{q}$): Singulets mit $I = 0$ (ω)
Tripletts mit $I = 1$ (π, ρ)
- Baryonen (qqq): Dubletts mit $I = \frac{1}{2}$ (p,n)
Quadrupletts mit $I = \frac{3}{2}$ ($\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$)

- Vertauschungsrelationen für Drehoperatoren, Eigenwerte & Eigenzustände:

$$[I_1, I_2] = i \cdot I_3 \quad \vec{I}^2 |I, I_3\rangle = I \cdot (I + 1) |I, I_3\rangle \quad \tilde{I}_3 |I, I_3\rangle = I_3 |I, I_3\rangle$$

- **Isospininvarianz & -verletzung:**

- starke Wechselwirkung:

invariant unter **Rotationen im Isospinraum**, Erhaltung von I und I_3

- elektromagnetische Ww. : Erhaltung von I, Verletzung von I_3

- schwache Wechselwirkung : Verletzung von I und I_3

Flavour-Symmetrie

- mit weiteren schweren Quarkflavours s, c, \dots ergibt sich eine **Erweiterung der Isospinsymmetrie** auf eine **Flavoursymmetrie**

SU(3)-Gruppe:

(u,d,s) Quarks mit additiven Quantenzahlen

- **Isospin I_3**
- **Hyperladung Y** ($Y = B + S$):

↳ Baryonenoktett

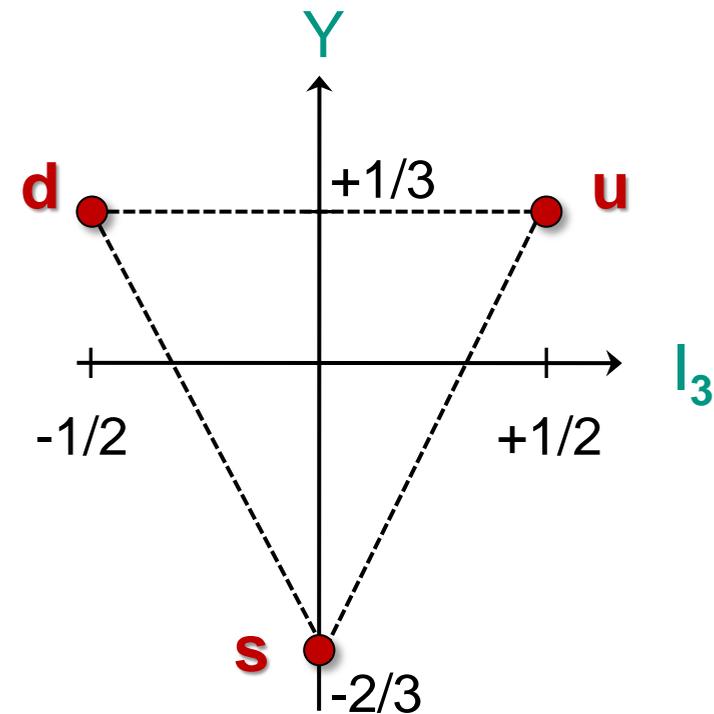
↳ Baryonendekuplett

↳ Mesonenoktette ($J = 0, 1$)

SU(4)-Gruppe:

(u,d,s,c) Quarks mit

- Isospin I_3
- Hyperladung Y , Charm C
- ↳ hadronische 20-pletts & 16-pletts



SU(3): fundamentale Darstellung
und Zuordnung der Quarks

Strangeness – historischer Rückblick

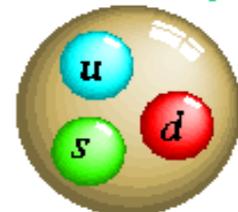
- **seltsame Teilchen:** K^0 (neutrales Kaon), Λ (Lambda-Hyperon)
unterschiedliche Erzeugungs-/Zerfalls-Reaktionen:



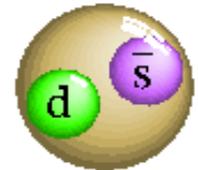
starke Wechsel-
Wirkung: $\sigma \sim 1\text{mb}$
paarweise Erzeugung



schwache Wechsel-
Wirkung: $\tau \sim 100\text{ps}$
einzelner Zerfall von K^0, Λ



Lambda



Kaon

Strangeness-Erhaltung $\Delta S = 0$

Strangeness-Verletzung $|\Delta S| = 1$

Einführung der additiven Quantenzahl: **Strangeness S**

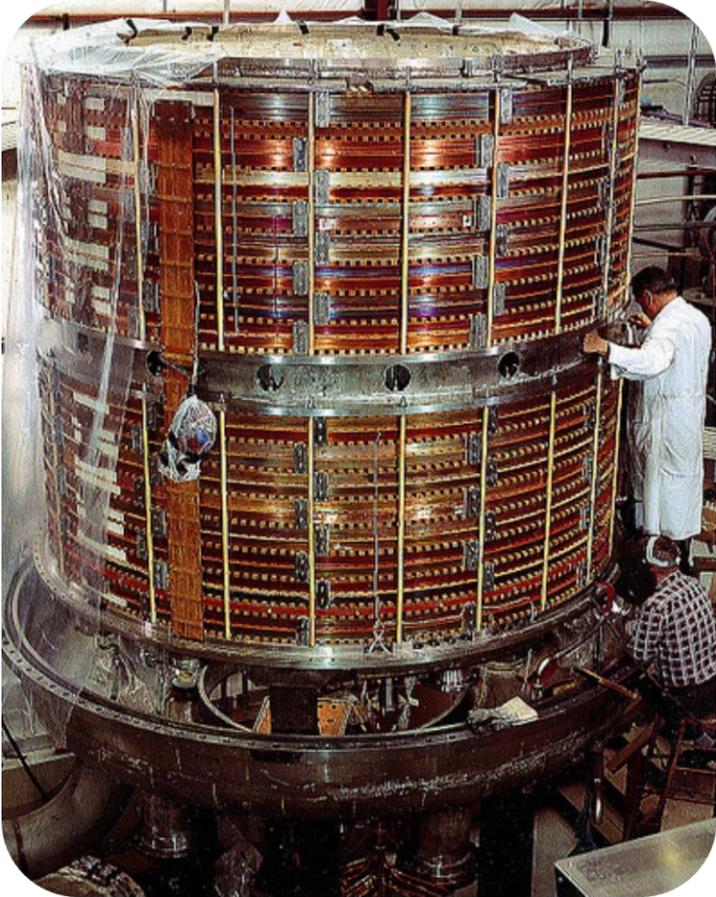
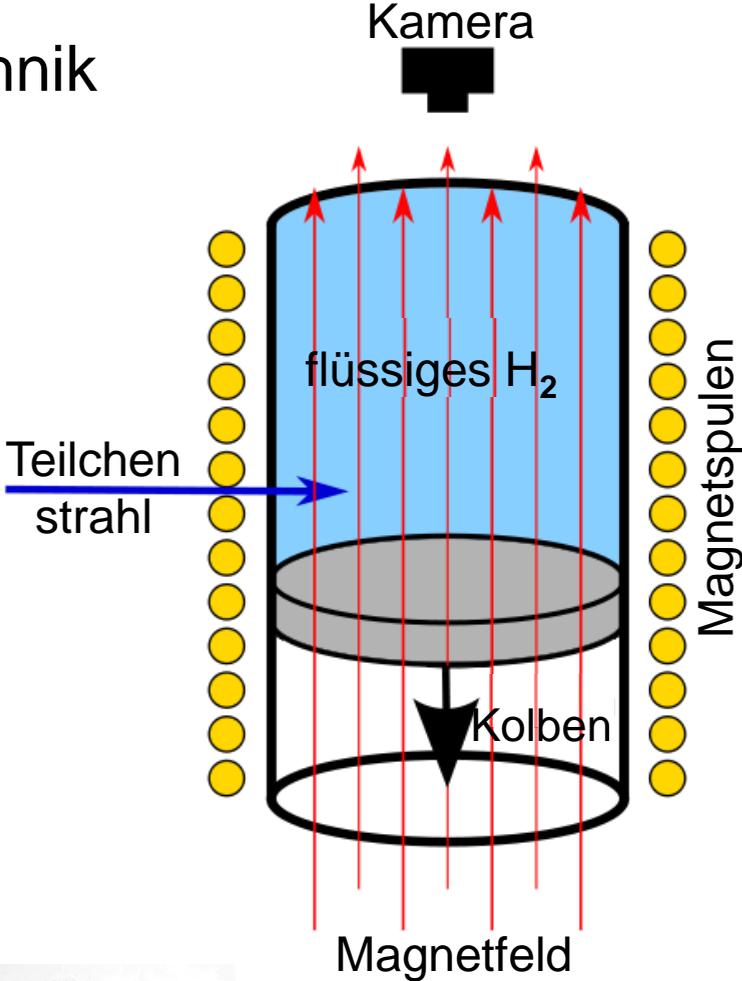
Definition: $S(K^0) = +1$ $S(\Lambda) = -1$

\bar{s} -Quark = +1 s-Quark = -1

Wechselwirkungen: stark/elektromagnetisch: $\Delta S = 0$, schwach: $\Delta S = 0, \pm 1$

Strangeness

■ Blasenkammer-Technik



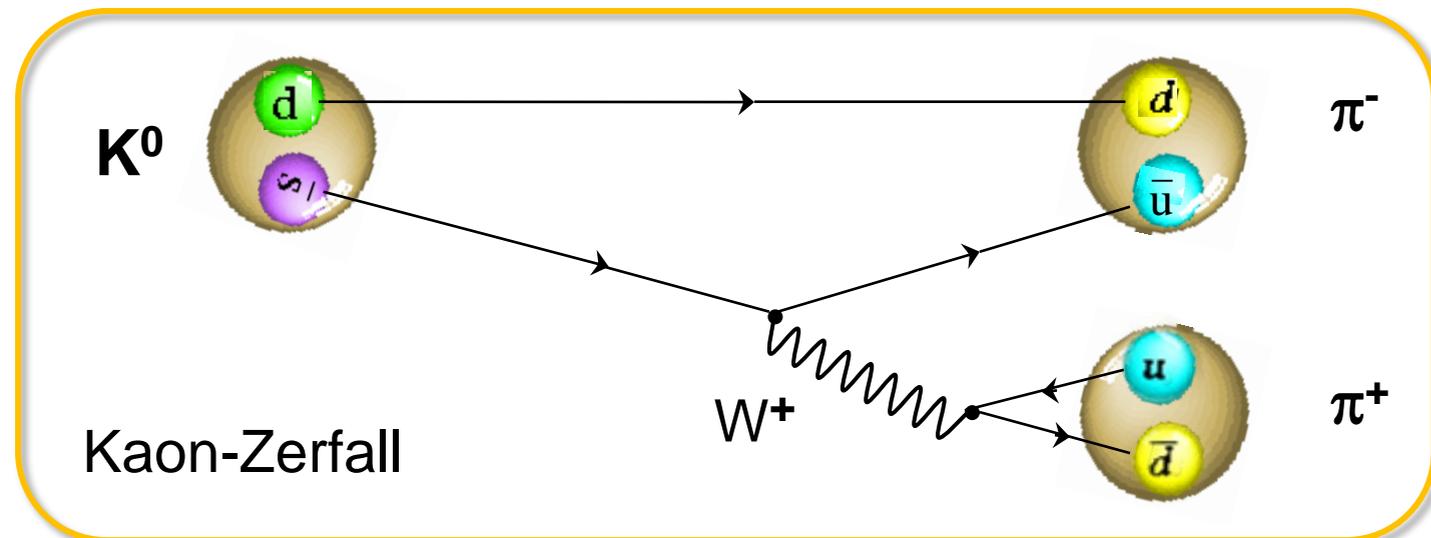
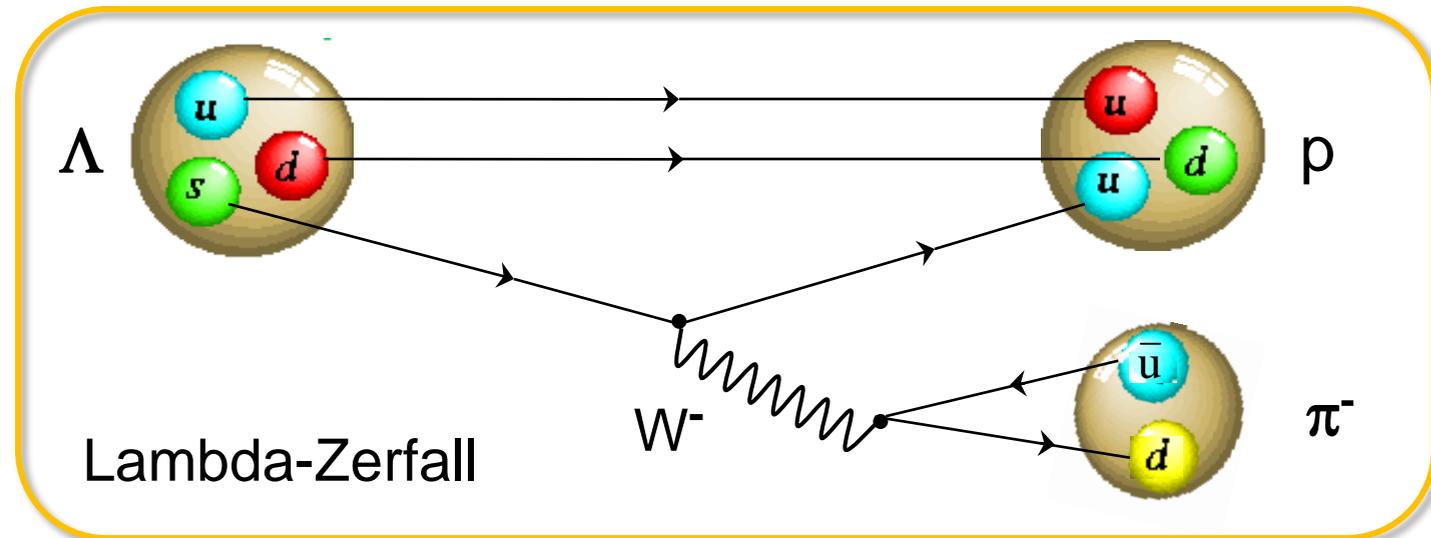
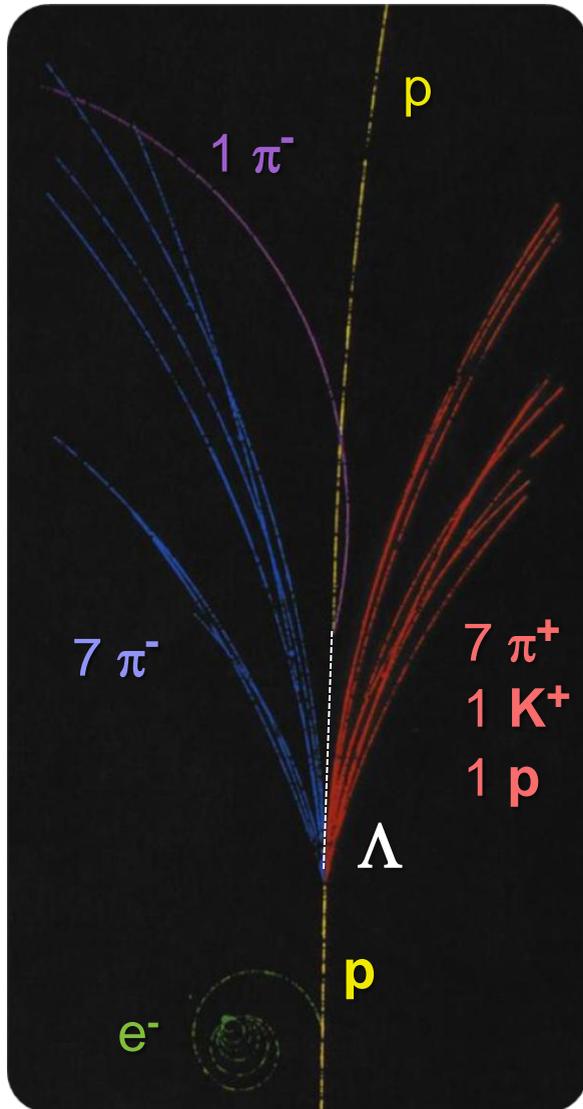
Donald Glaser *1926
Nobelpreis 1960



*"for the invention of the
bubble chamber"*

Strangeness

- assoziierte Strangeness-Produktion von Λ und K^+
(Aufnahme an 80-inch Blasenkammer am BNL, eingefärbte Spuren)



Gell-Mann Nishijima Formel

- **Gell-Mann / Nishijima Formel** für Hadronen & für Quarks beschreibt Relation zwischen Ladung Q , Baryonenzahl B und Strangeness S :

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}(B + S)$$

B = Baryonenzahl

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}Y$$

Y = Hyperladung = $B+S$

- Verallgemeinerung der Formel für alle 6 Quarkflavours

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}(B + S + C + B' + T)$$

$$S = -(n_s - n_{\bar{s}}) \quad C = +(n_c - n_{\bar{c}})$$

$$B' = -(n_b - n_{\bar{b}}) \quad T = +(n_t - n_{\bar{t}})$$

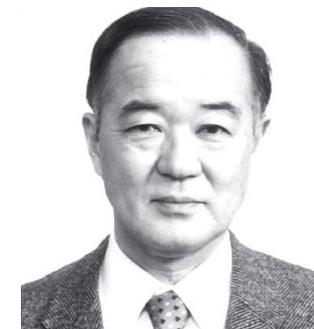
S : strangeness C : charm B' : bottom T : top



Murray Gell-Mann
(*1929)



Nobelpreis
1969



Kazuhiko Nishijima
(1926-2009)