

ECAL

Elektromagnetisches Kalorimeter

Elektronen und Photonen

HCAL

Hadronisches Kalorimeter

Hadronen:

Mesonen(z.B. Pionen)

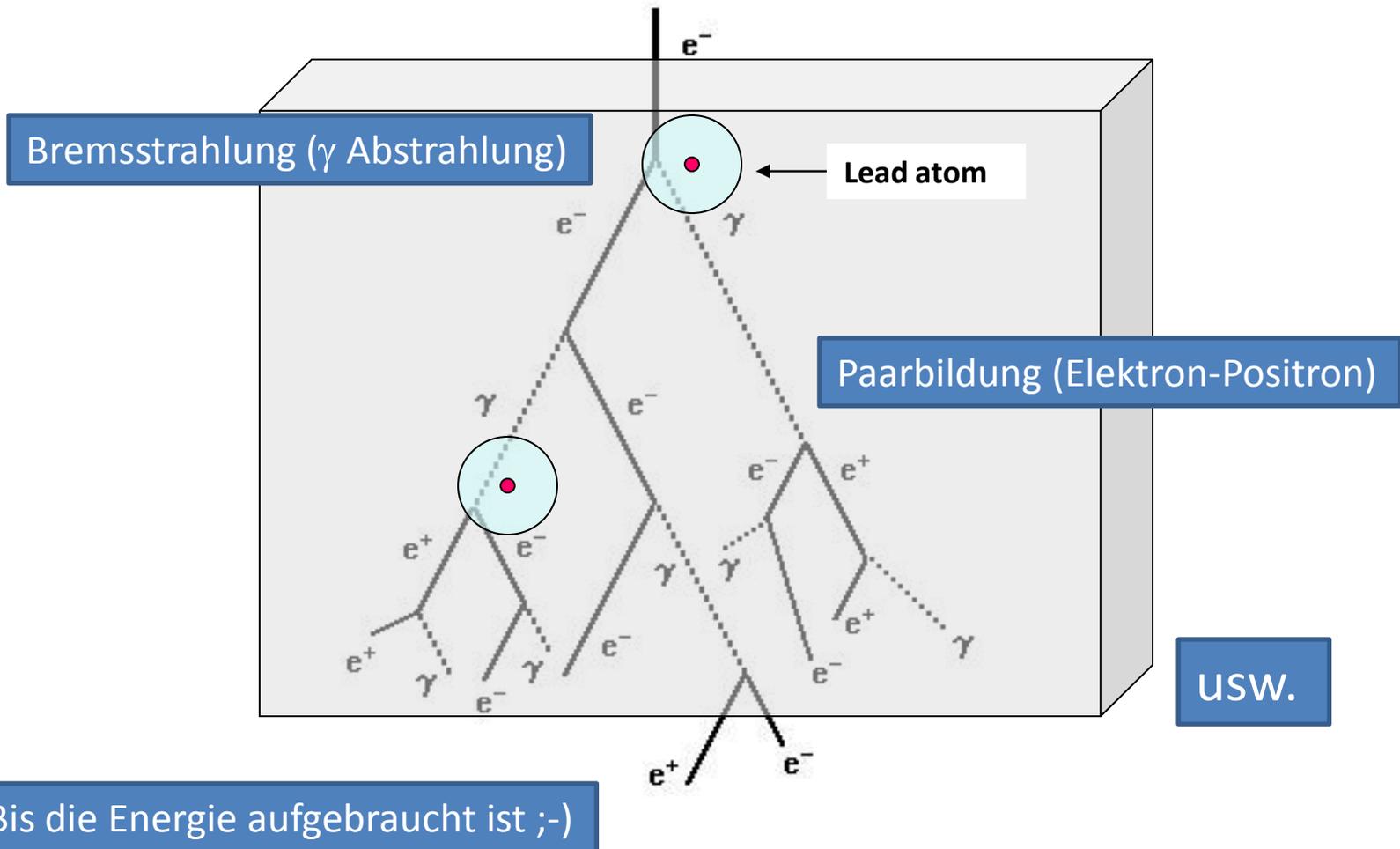
Baryonen (z.B. Protonen)

KALORIMETER (ENERGIEMESSER)

Aufgabe eines Kalorimeters

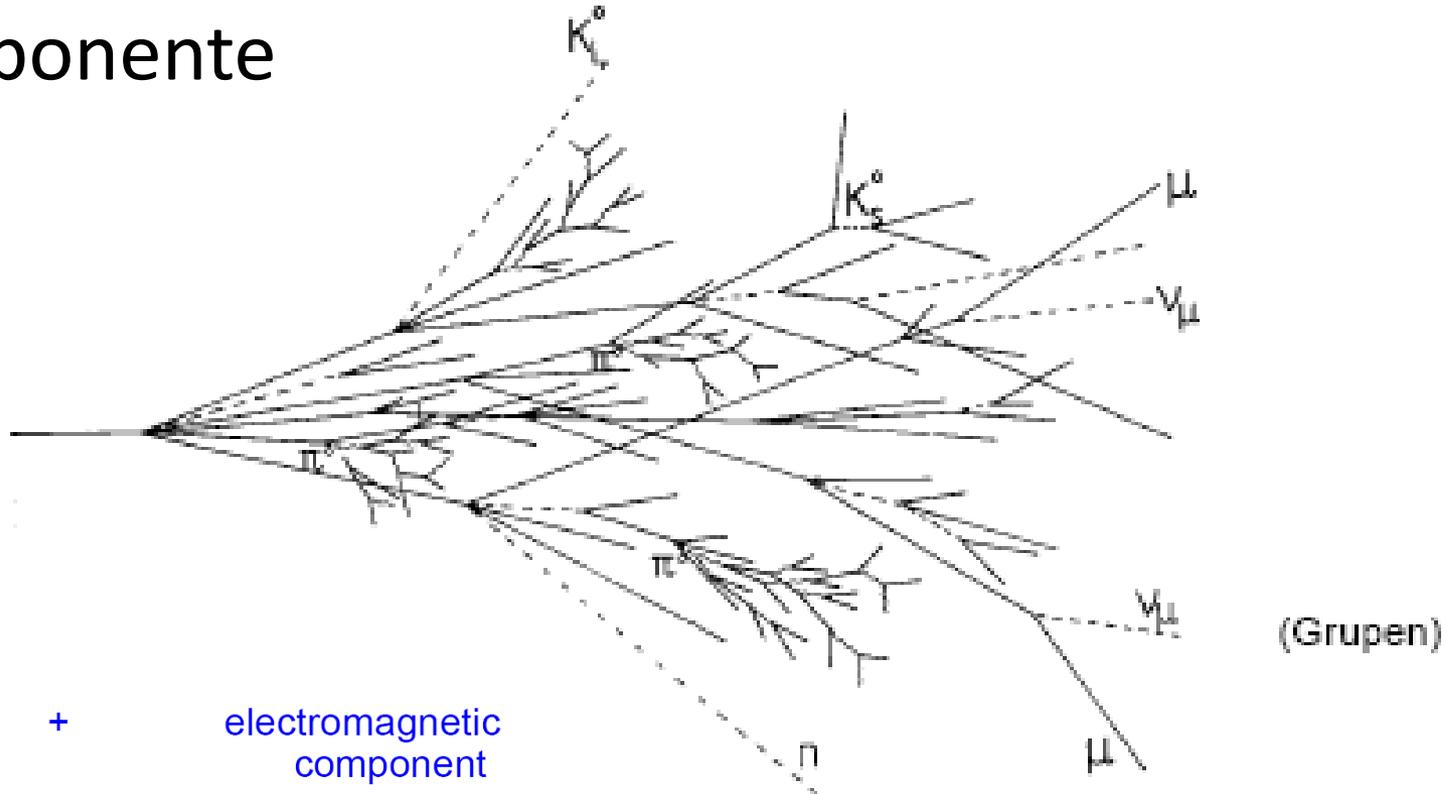
- Messung der Energie durch totale Absorption (destruktiv)
- Detektorantwort $\sim E$ für
 - Geladene Teilchen
 - Elektronen/Positronen und Hadronen
 - Neutrale Teilchen (n, γ)
- Prinzipielle Funktionsweise:
 - Elektromagnetische **Schauer**
 - Hadronische **Schauer**
- Konversion in Ionisation oder Anregung des Detektormaterials \rightarrow Strom, Spannung

Elektromagnetischer Schauer



Hadronisches Kalorimeter

- Kaskade mit elektronischer und hadronischer Komponente

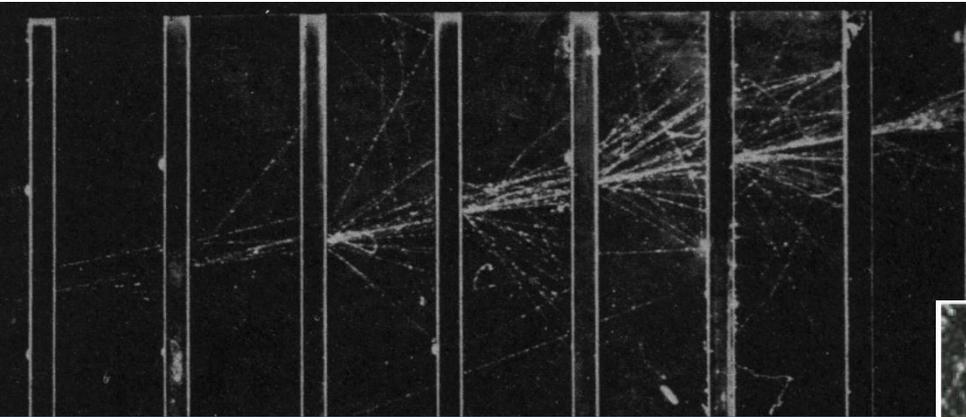


Hadronic +
 ↓
 charged pions, protons, kaons
 Breaking up of nuclei
 (binding energy),
 neutrons, neutrinos, soft γ 's
 muons → invisible energy

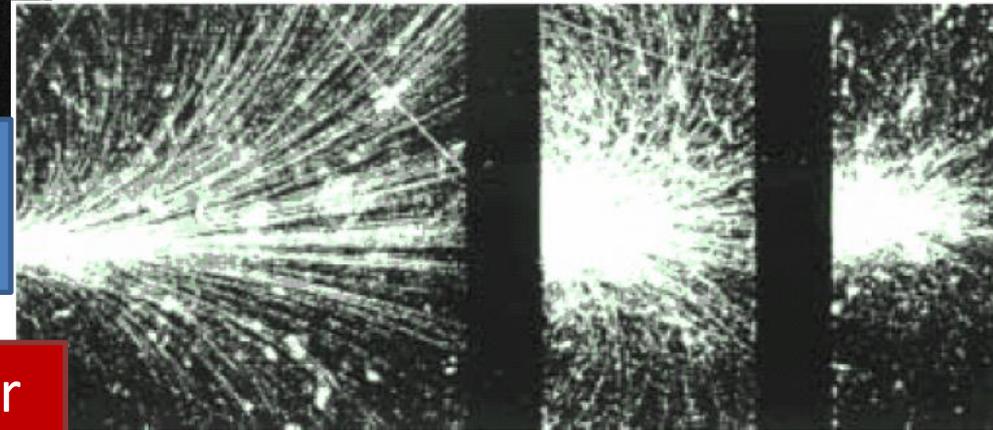
electromagnetic
 component
 ↓
 neutral pions → 2γ →
 electromagnetic cascade
 $n(\pi^0) \approx \ln E(\text{GeV}) - 4.6$
 example 100 GeV: $n(\pi^0) \approx 18$

Kalorimeter und Schauer

Wie misst man nun die Energie?



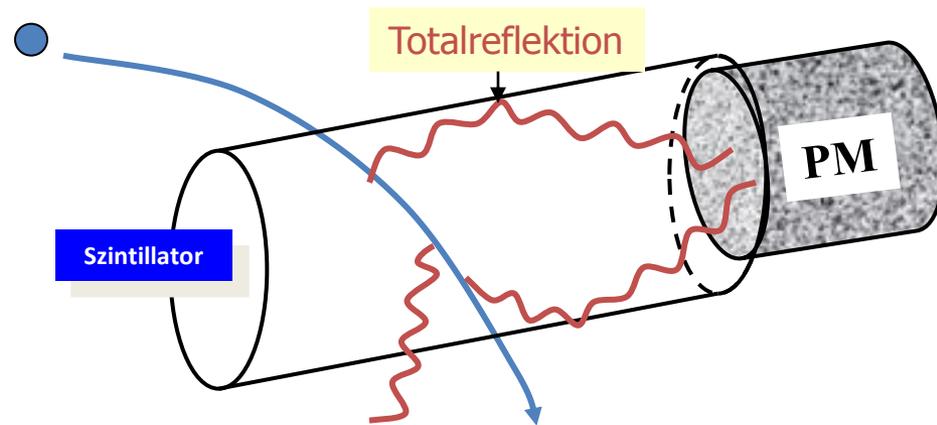
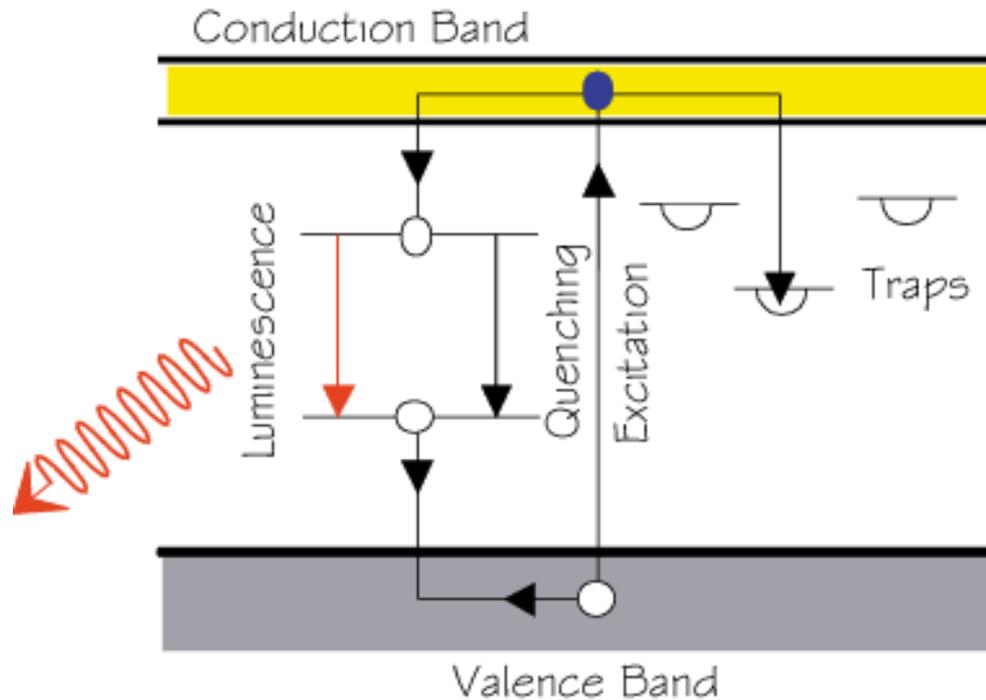
Photon-induzierter Schauer in einer Nebelkammer;
die schwarzen Bereiche sind Blei-Platten;
senkrecht zur Bildebene wirkt ein Magnetfeld



Die Energie ist nun proportional zur
Lichtmenge & Eindringtiefe
des Schauers

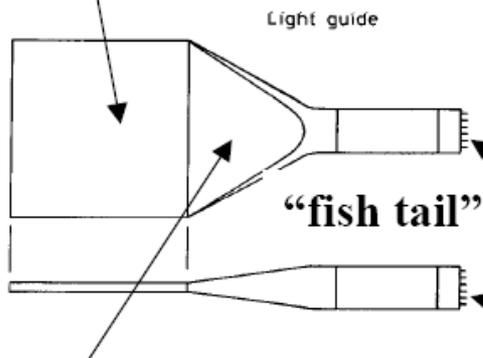
Dies ist nun mit bloßem Auge etwas mühselig ;-(
Also müssen wir die Lichtmenge und Wegstrecke **elektronisch** messen!

Szintillator: Funktionsweise



Photomultiplier/Sekundär-Elektronenvervielfacher:
Konvertiert Licht in ein elektronisches Signal

Szintillator



Lichtleiter:

lichtdicht eingepackt, Lichttransfer via innere Totalreflexion

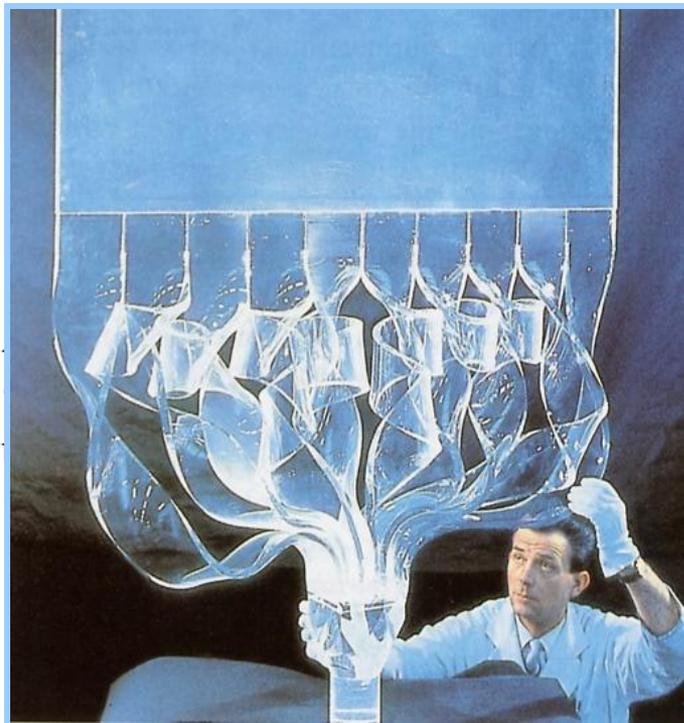
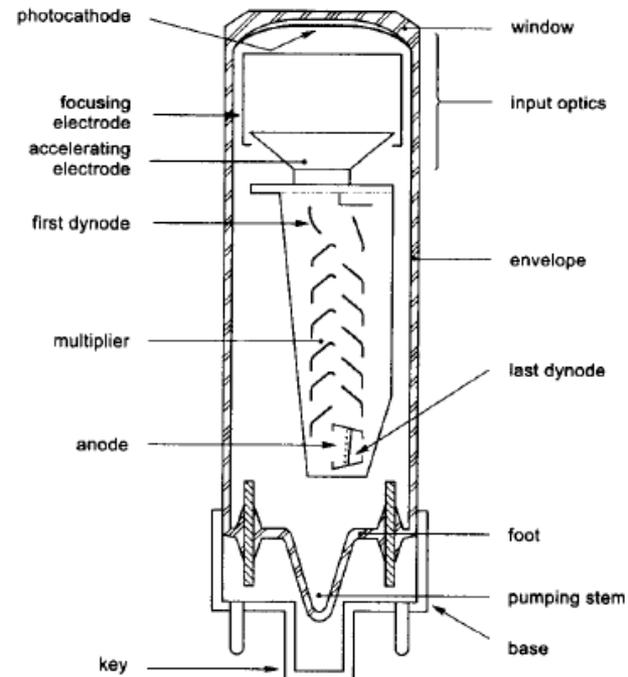


Photo-Multiplier

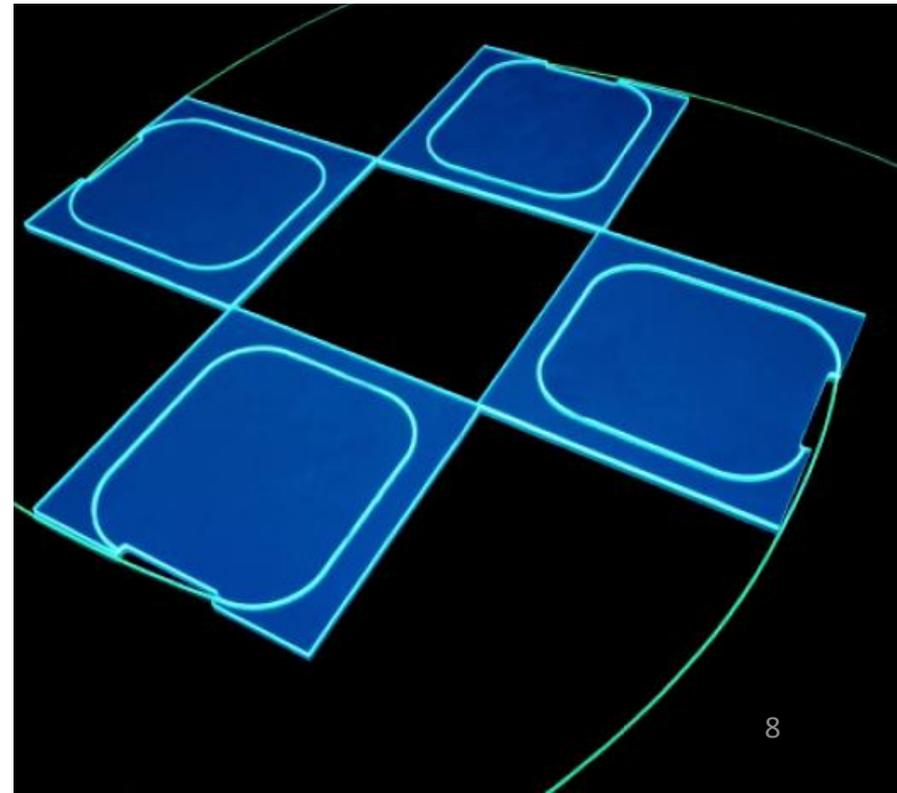
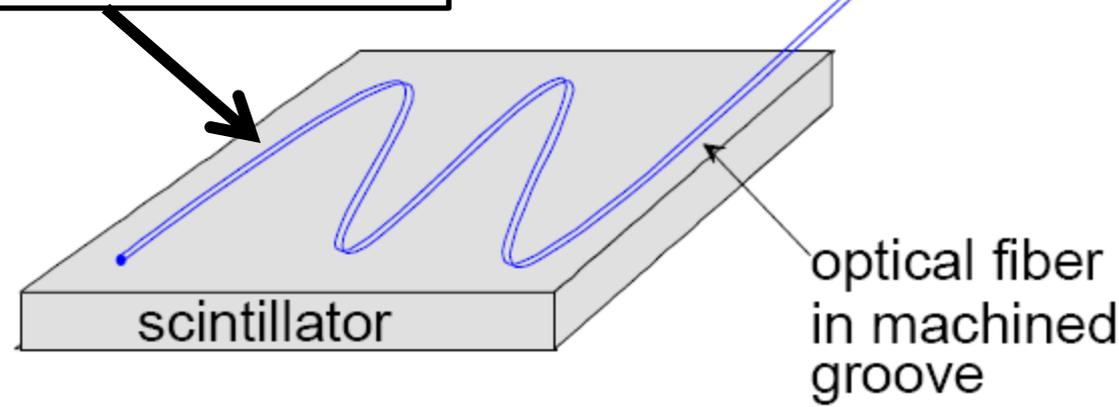


Photoeffekt an der Photokathode
↔ sichtbares Licht $\lambda > 400\text{nm}$

Teilchendurchgang → Atomanregung
→ γ Abstrahlung → Führung zur Photokathode
→ Photoeffekt → Primärelektron →
Vervielfachung via Dynoden unter Spannung

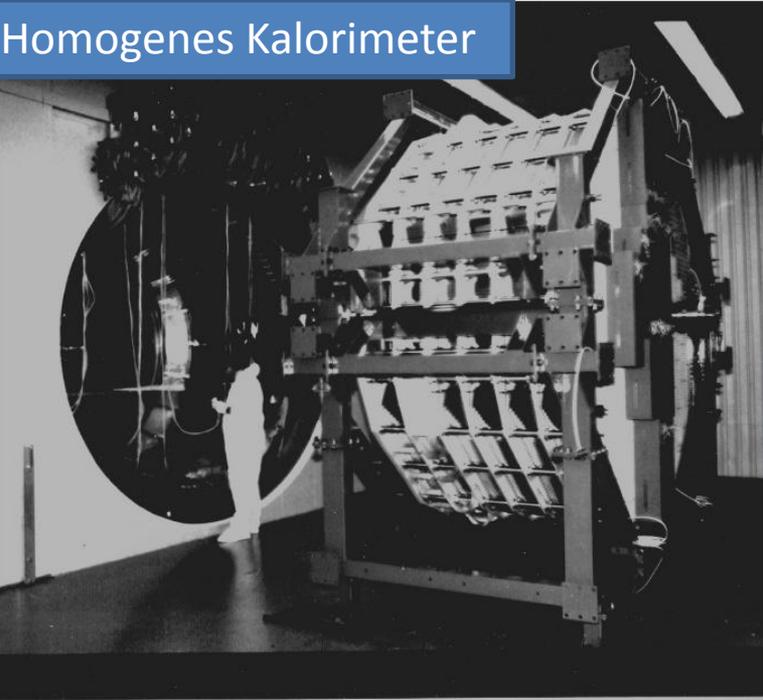
CMS Hadron Kalorimeter

Lichtleiter im Szintillator, um das Licht zum Photomultiplier zu führen.



Kalorimeter

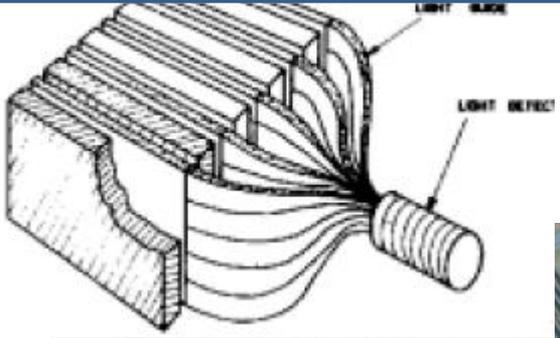
Homogenes Kalorimeter



The NA48 LKr calorimeter prior to installation in the cryostat.



Sampling Kalorimeter
Szintillator wechselt mit Absorbermaterial



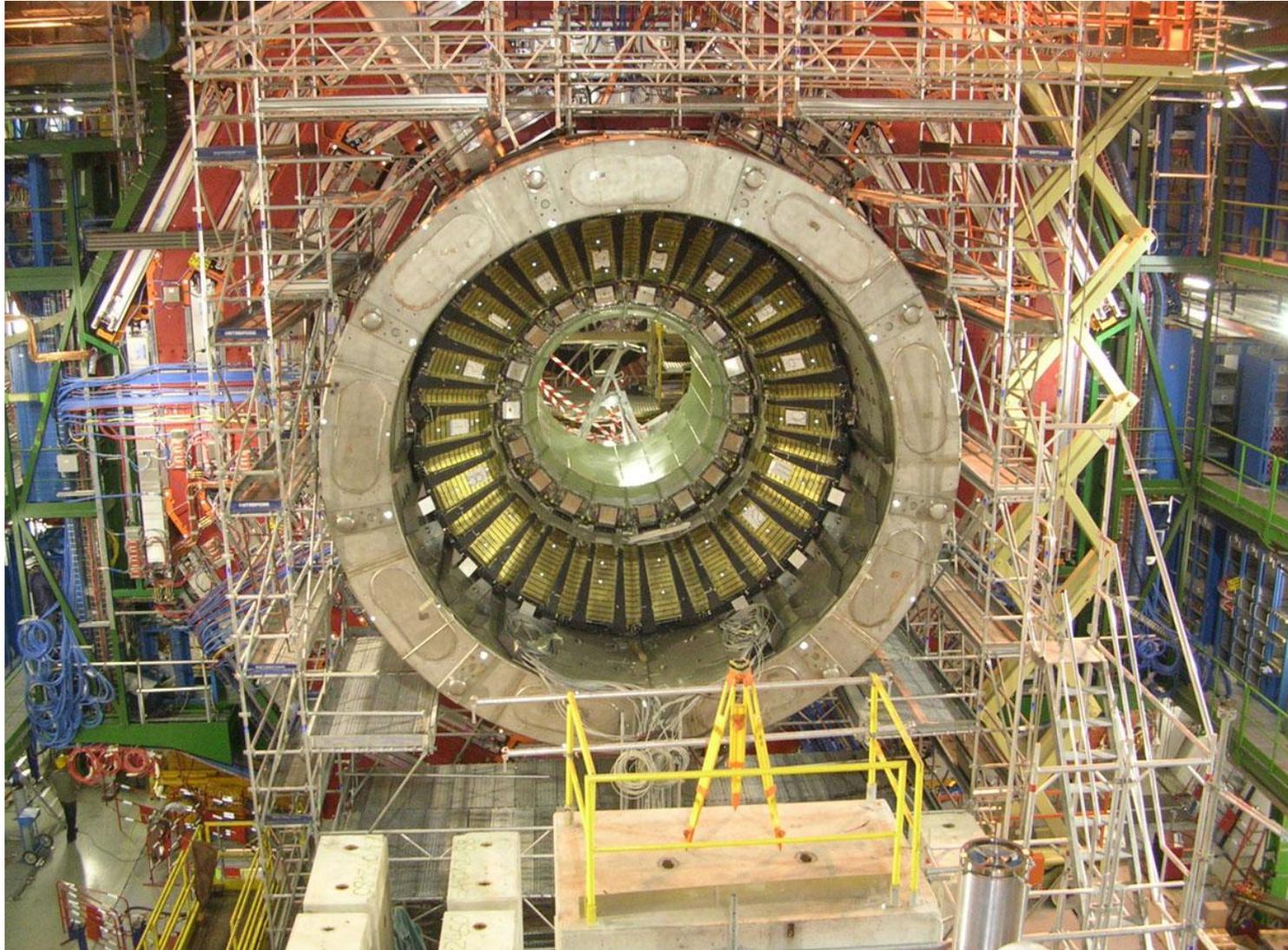
Lichtleiter & PM



Sampling Kalorimeter



CMS ECAL in der Kaverne 2007





ALEPH

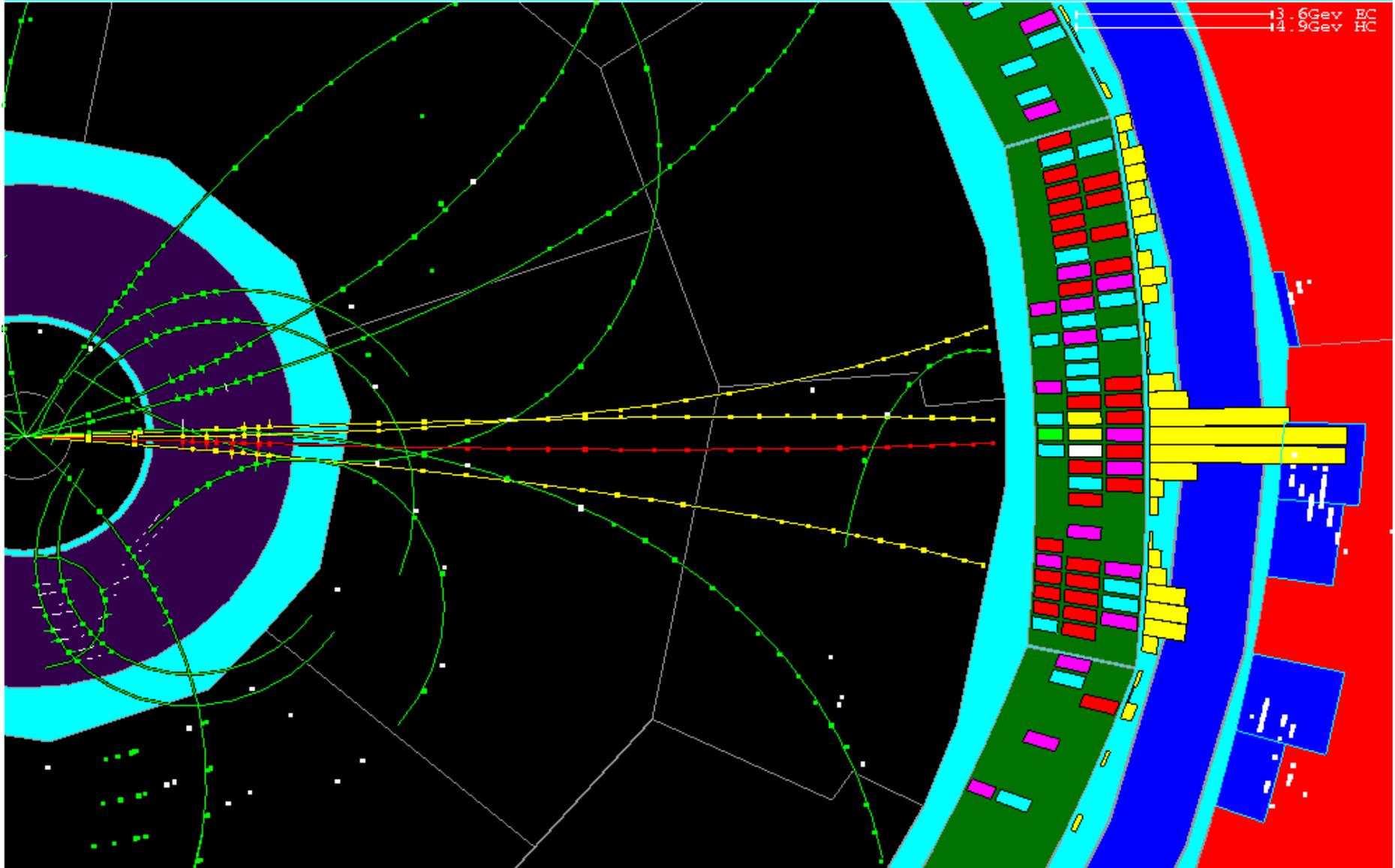
DALI_D5

ECM=91.14 Pch=55.1 Rf1=107. Ewi=37.4 Eha=16.6
Nch=17 EV1=.950 EV2=.732 EV3=.138 ThT=1.19

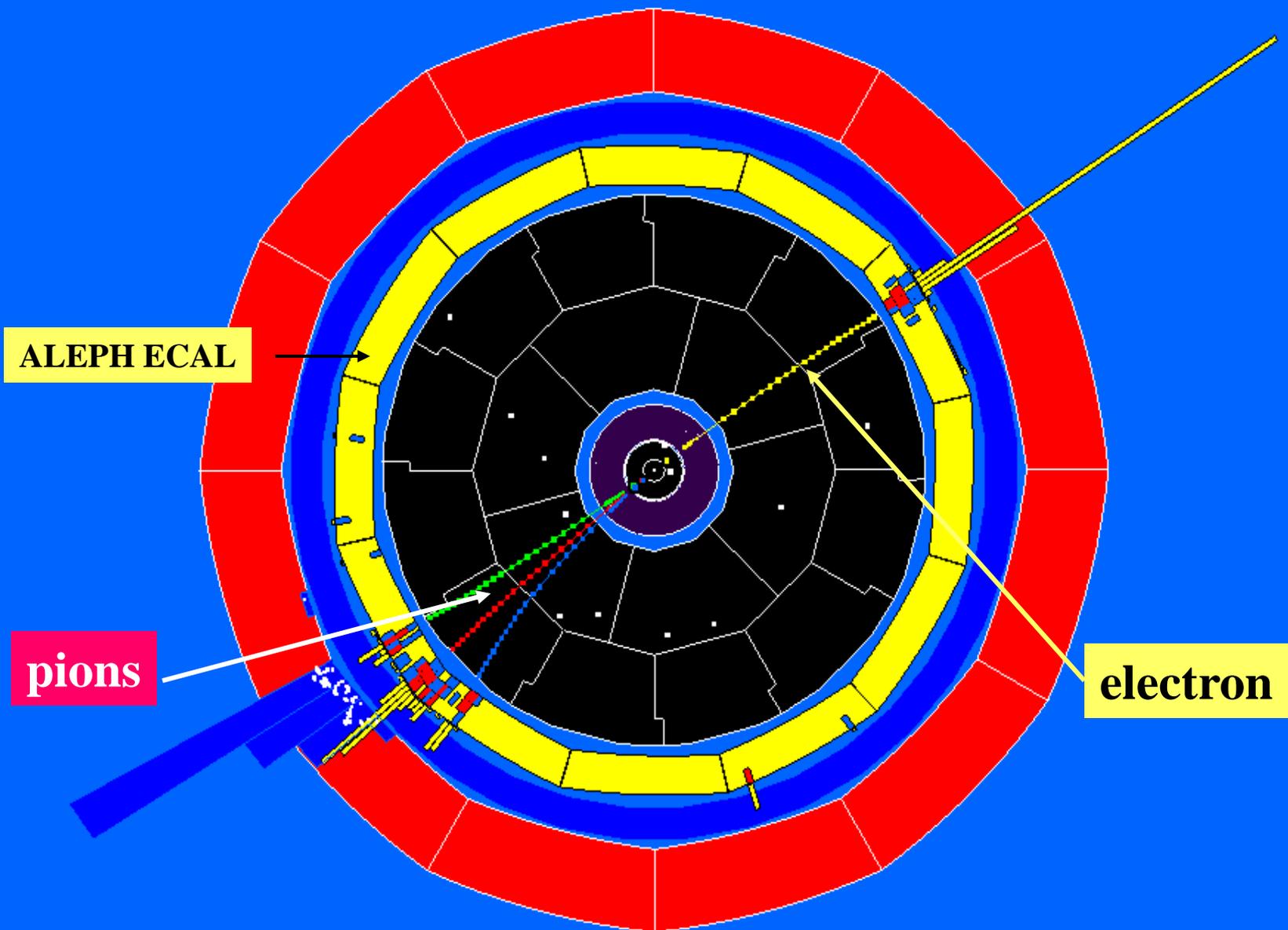
LAMB_EXC 94-07-18 12:39 Run=27381

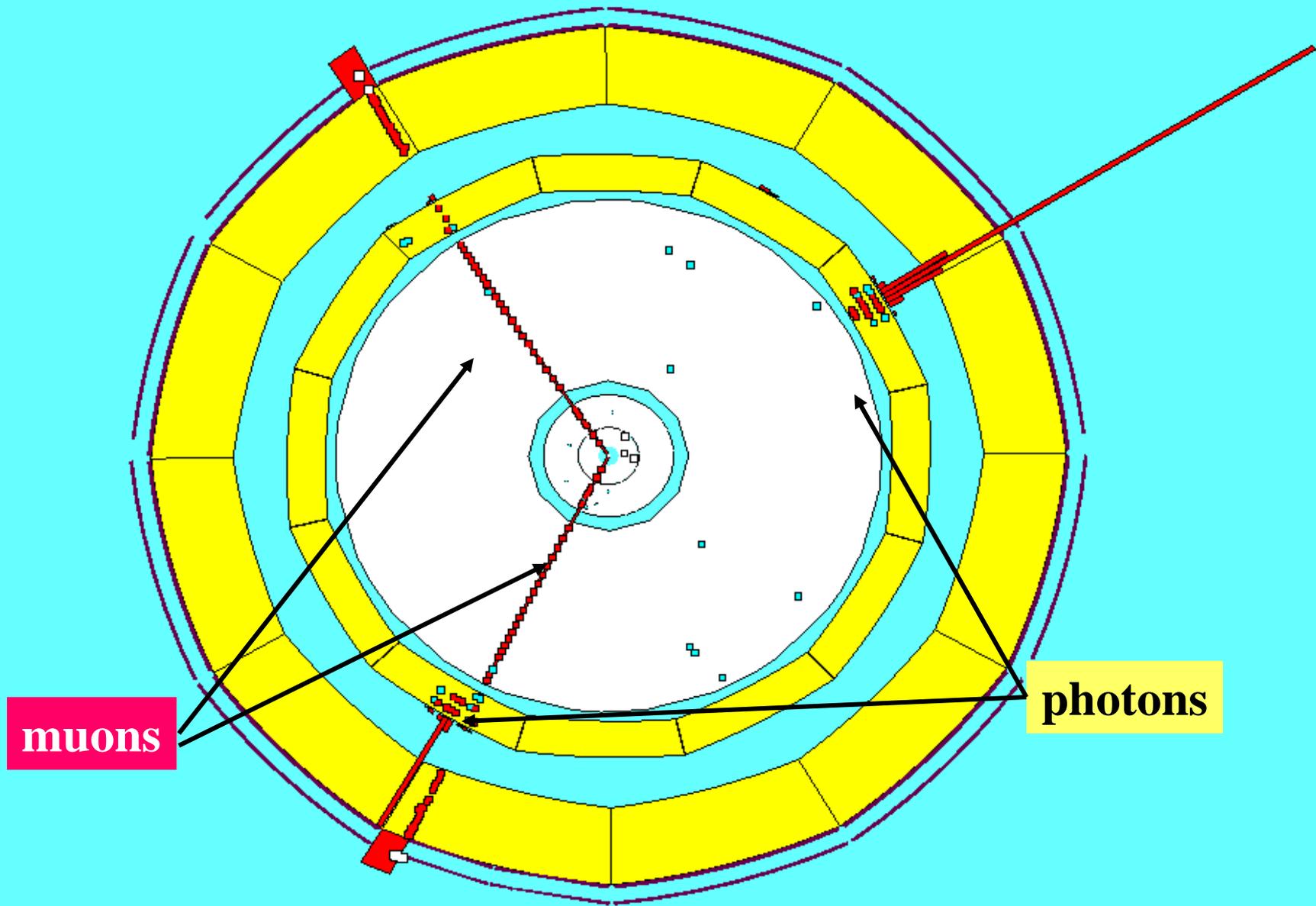
Evt=864

Detb= E1FFFF



13: 6Gev EC
14: 9Gev HC





TOF (Time Of Flight / Flugzeitmesser)

RICH (Ring Image Cherenkov Counter)

Überlichtgeschwindigkeit! Geht das?

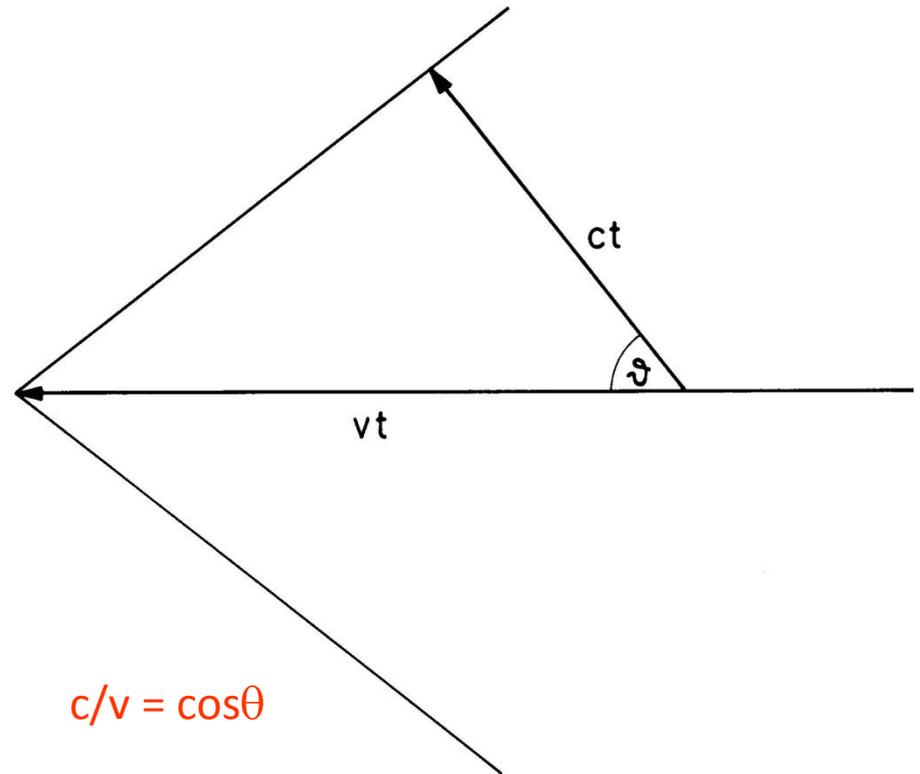
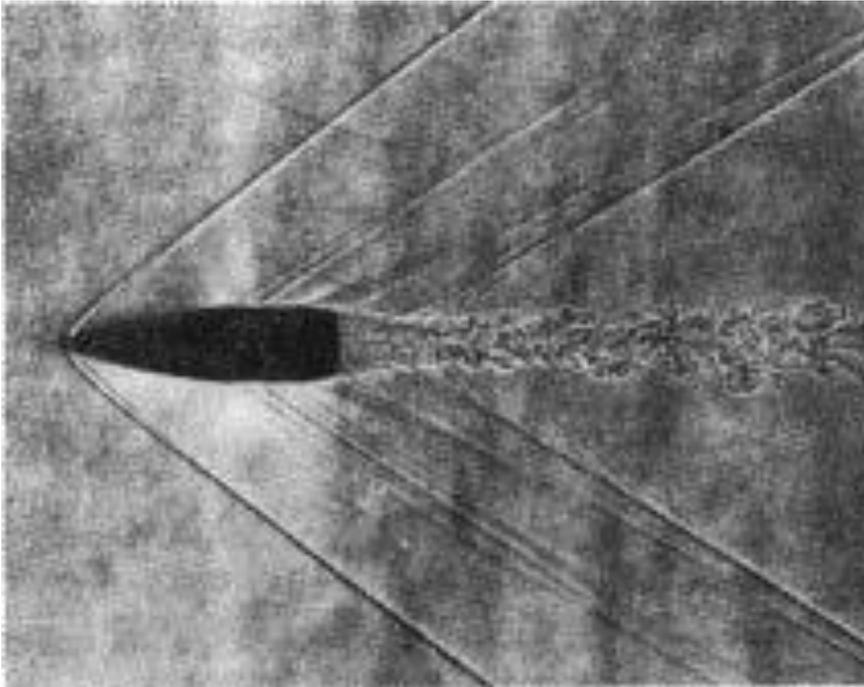
dE/dx (Energieverlustmessung pro Strecke)

PARTICLE ID

TEILCHENIDENTIFIZIERUNG

Exkurs: Geschwindigkeit durch Vermessung einer Schockwelle!

Geschwindigkeit des Geschosses?



Siehe Bild:

Winkel 52° , $v = c/\cos\theta = 340\text{m/s} / \cos 52^\circ = 552\text{m/s}$

Siehe auch Mach'scher Kegel beim Überschallflugzeug

Cherenkov Strahlung

Bestimmung der Teilchengeschwindigkeit

1. Grundlegend: Durchgang eines geladenen Teilchens →
Atomanregung → Photonenabstrahlung

2. Teilchengeschwindigkeit größer als die
„Lichtgeschwindigkeit im Medium“

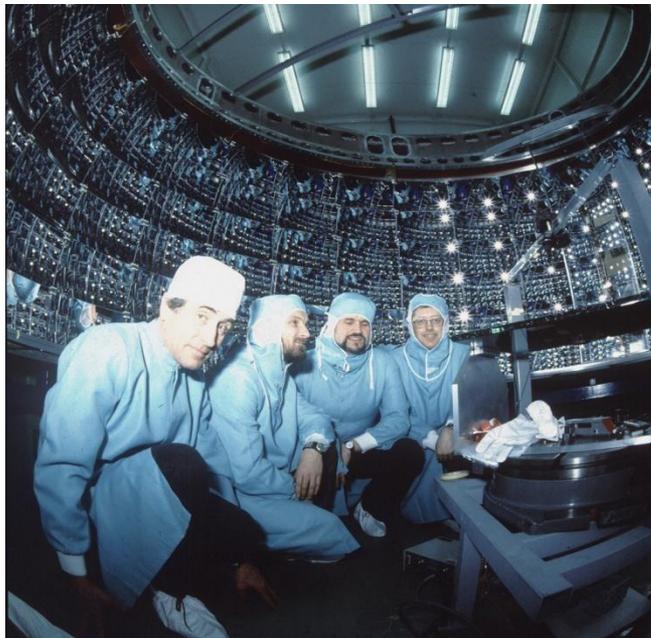
$$c_{\text{Medium}} = \frac{1}{n} c_{\text{Vakuum}}$$

3. Schockwelle → v

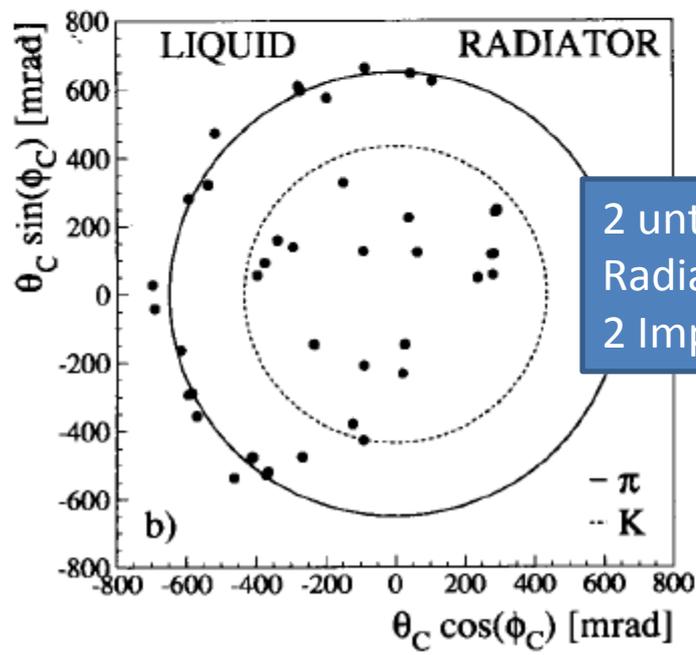
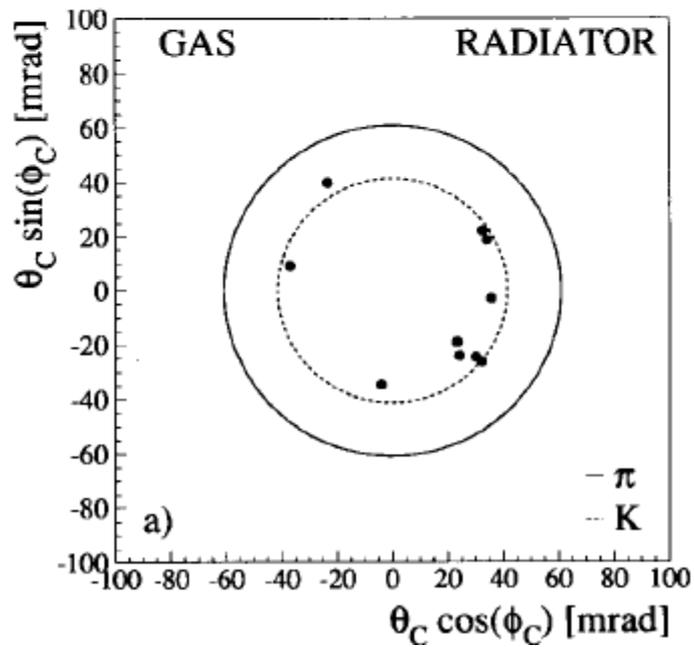
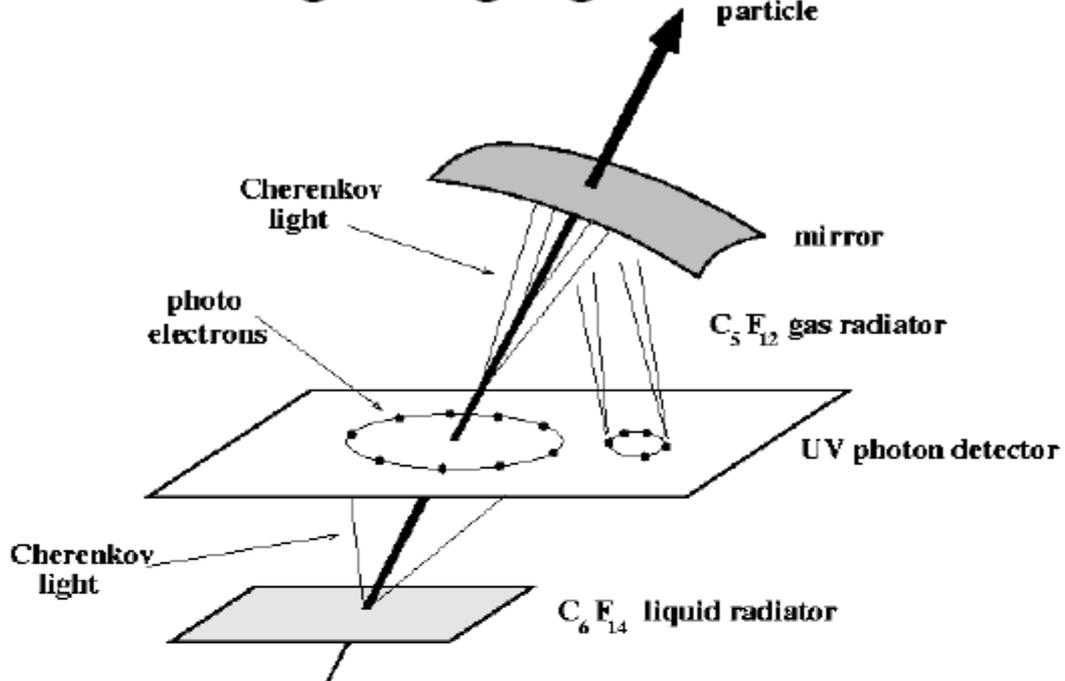
$$v = \frac{c_{\text{Medium}}}{\cos \alpha} = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{n} \frac{1}{\cos \alpha}$$

4. Abbildung des Kegels auf einen Kreis im bestimmten
Abstand → α → v

DELPHI (LEP/CERN):



Ring Imaging Cherenkov

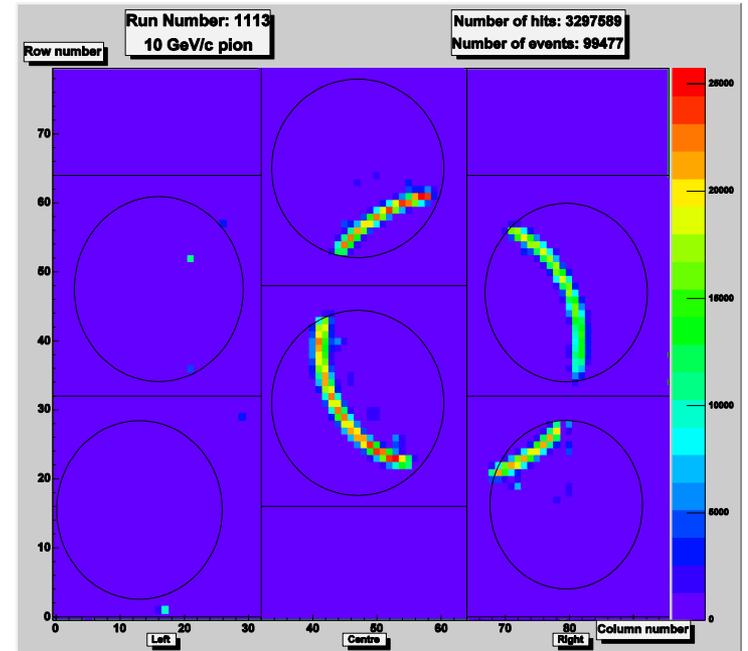
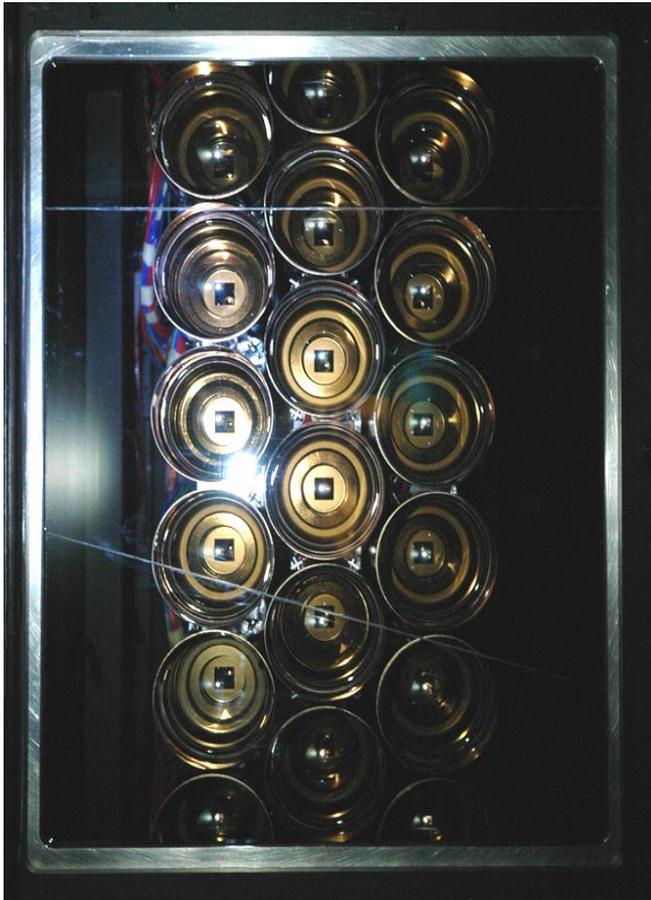


2 unterschiedliche Radiatoren = 2 Impulsbereiche

LHC ALICE RICH Installation



LHCb RICH System test

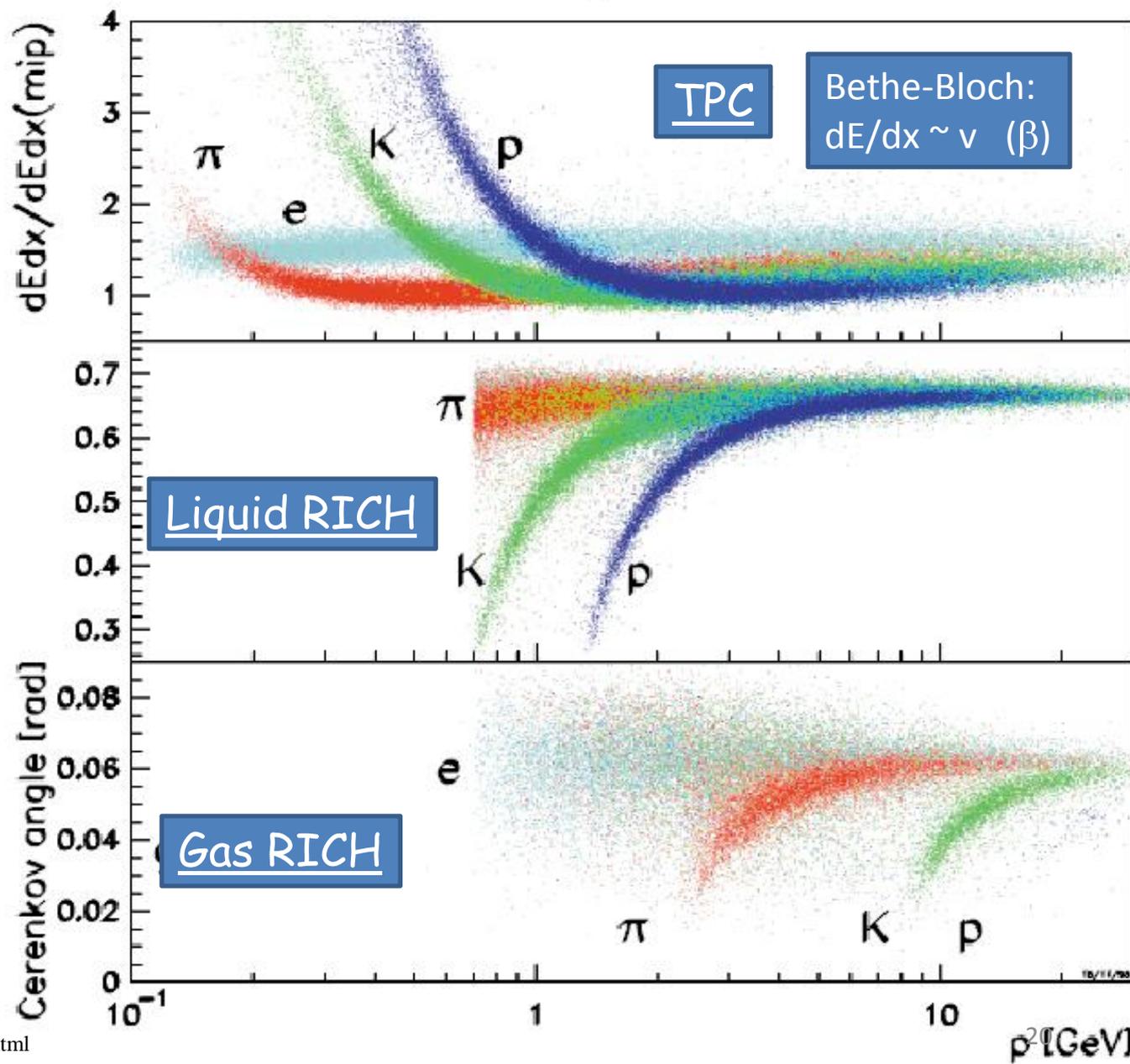


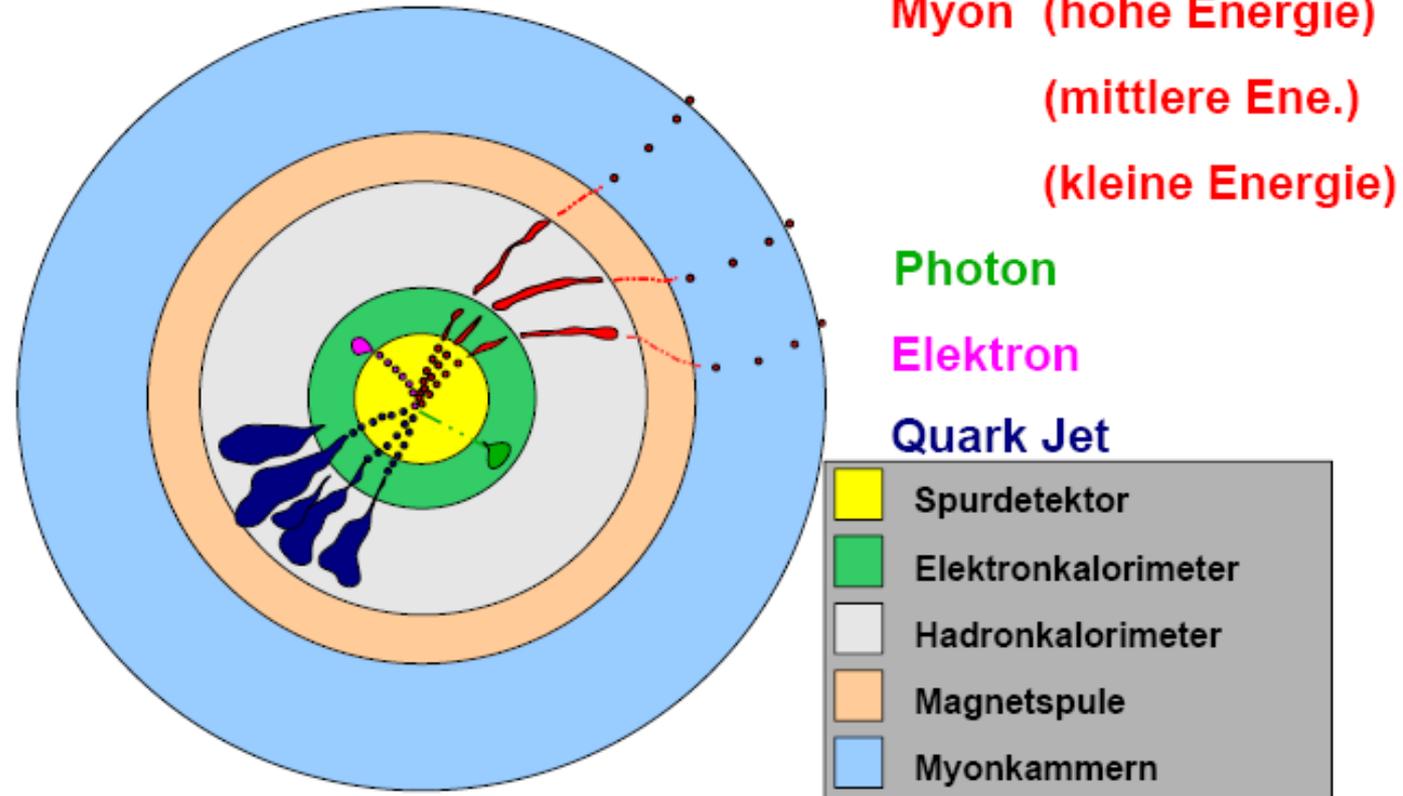
DELPHI

Teilchen

Identifikation

DELPHI particle ID





Wiederholung: Ort und Aufgabe der einzelnen Detektoren

Vielzweckdetektoren – Multipurpose

Exkurs: Der Perfekte Detektor

- Sollte **alle** Wechselwirkungen und alle Teilchen mit 100% Effizienz rekonstruieren **ohne** ihre Eigenschaften zu ändern

- Mit unbegrenzter Auflösung und für alle Energien, Impuls, Teilchen gleich
- Er muss den gesamten Raumbereich von 4π lückenlos abdecken
- Alle Teilchen sollten direkt identifizierbar sein
- Einfacher Zugang zur Wartung
- Strahlenhart

- Dann wären wir in der Lage alle Wechselwirkung **direkt mit den theoretischen Vorhersage zu vergleichen**

- **Warum geht das nicht?**

- Effizienz:

- Nicht alle Teilchen werden nachgewiesen
- Löcher, Spalten erlauben Teilchen den Detektor undetektiert zu verlassen
- Rauschen: Kanäle sprechen statistisch auch ohne Wechselwirkung an

- Wechselwirkung

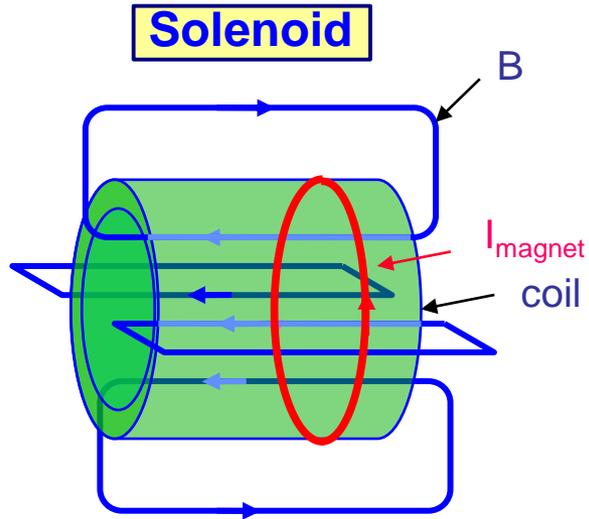
- Jede Wechselwirkung ändert die Teilcheneigenschaft (siehe Kalorimeter):
- Eigentlich sollten alle Kabel, Kühlleitungen, Trägerstrukturen masselos sein, damit keine ungewollte Streuung passiert

- Zugang

- Großdetektoren sind wie Satellitenexperimente
 - Bestrahlt, sehr kompakt und kompliziert; Wartung ist faktisch nicht möglich (oder nur sehr schwer)

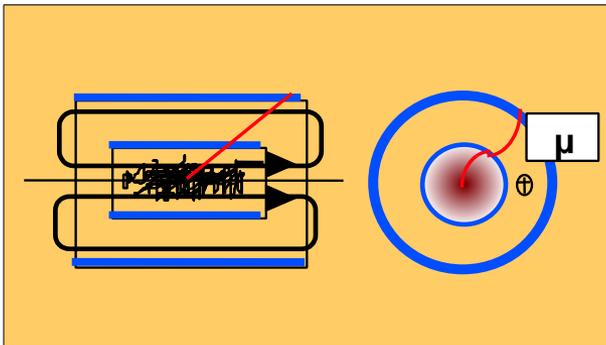


Magnet Konfigurationen der LHC Experiments

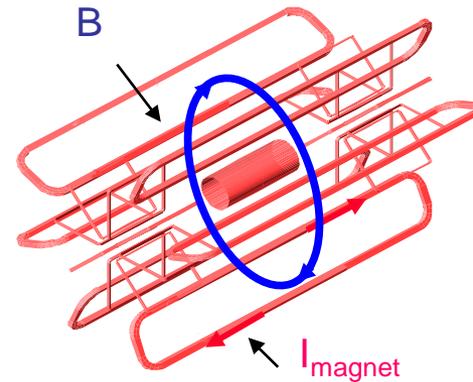


- + Starkes homogenes Feld in der Spule
- Großes Eisen-Rückführjoch notwendig
- Größe Limitiert (Kosten)
- Spulendicke (Strahlungslänge)

CMS, ALICE, LEP Detektoren

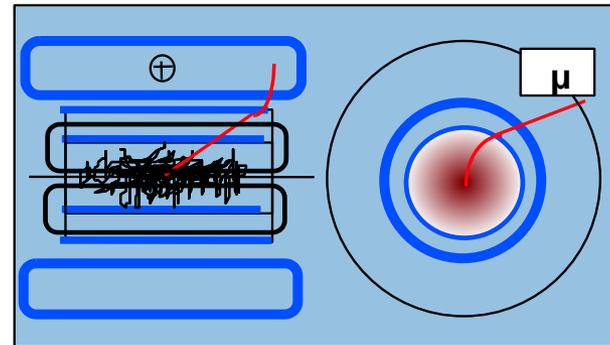


(air-core) Toroid

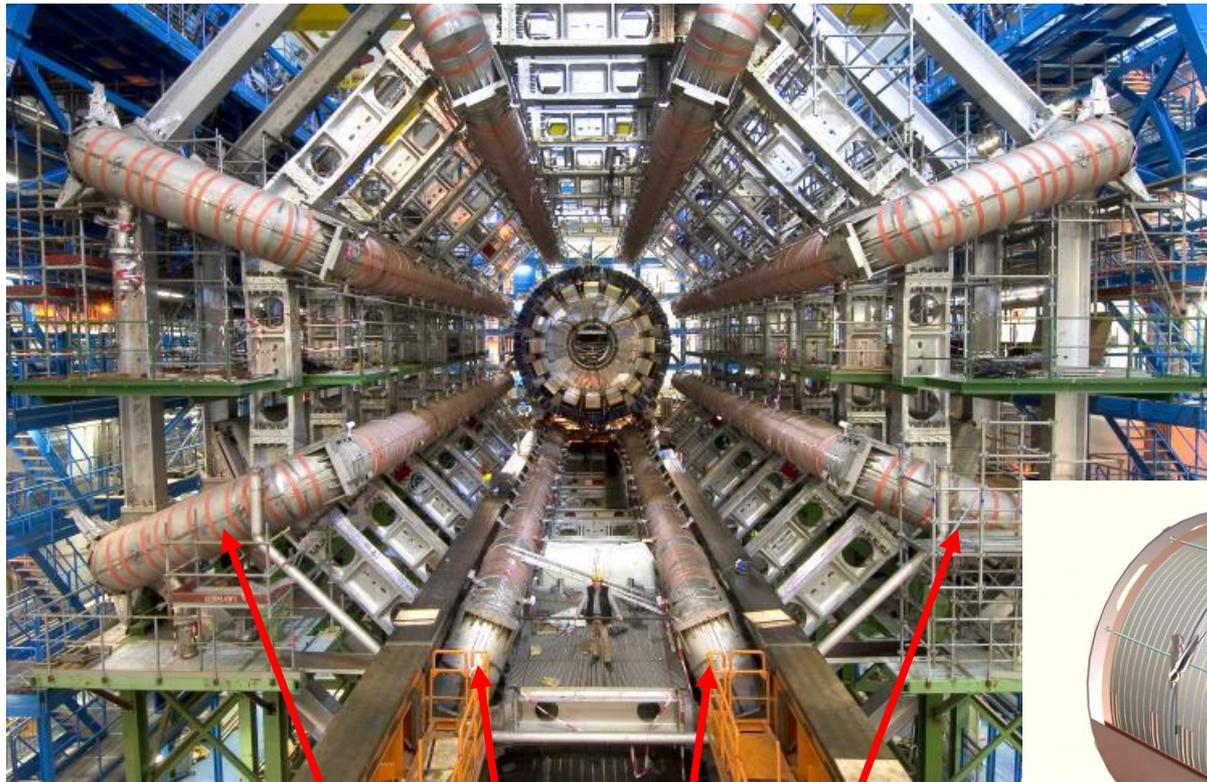


- + großes Volumen
- + „Luftkern“, kein Eisen, wenig Material
- Zusätzlicher Solenoid im Innern nötig
- inhomogenes Feld
- Komplexe Struktur

ATLAS



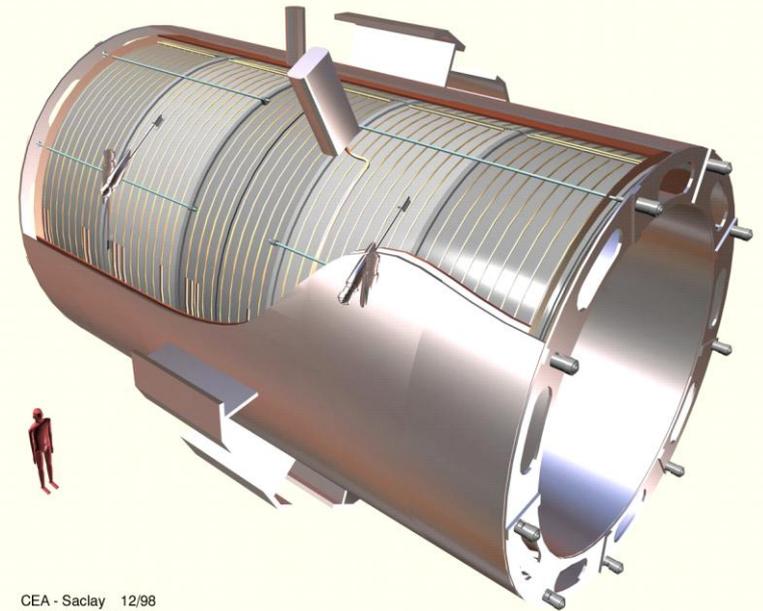
ATLAS und CMS Spulen



ATLAS Toroid Spulen

Herbst 2005

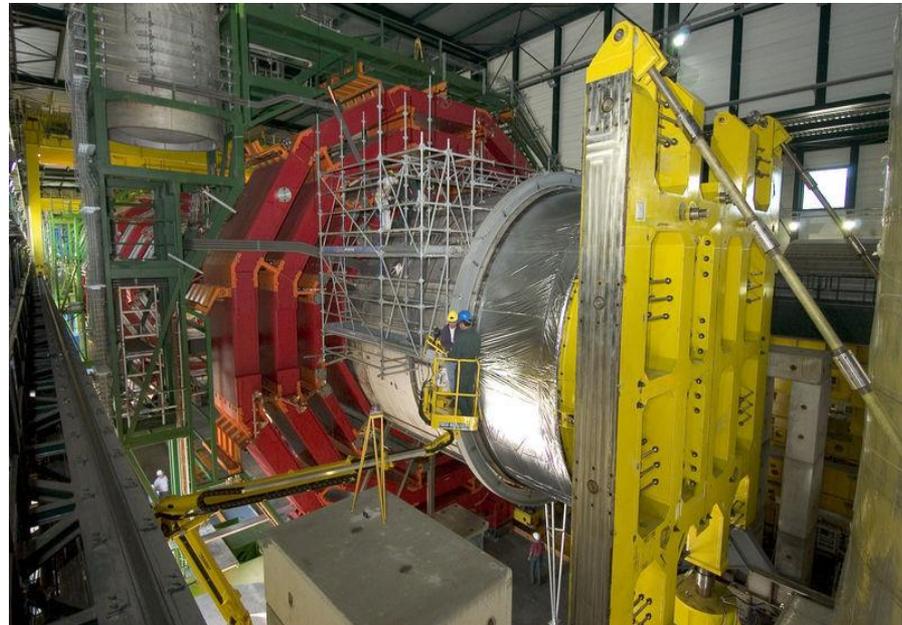
**CMS Solenoid
(5 Segmente)**



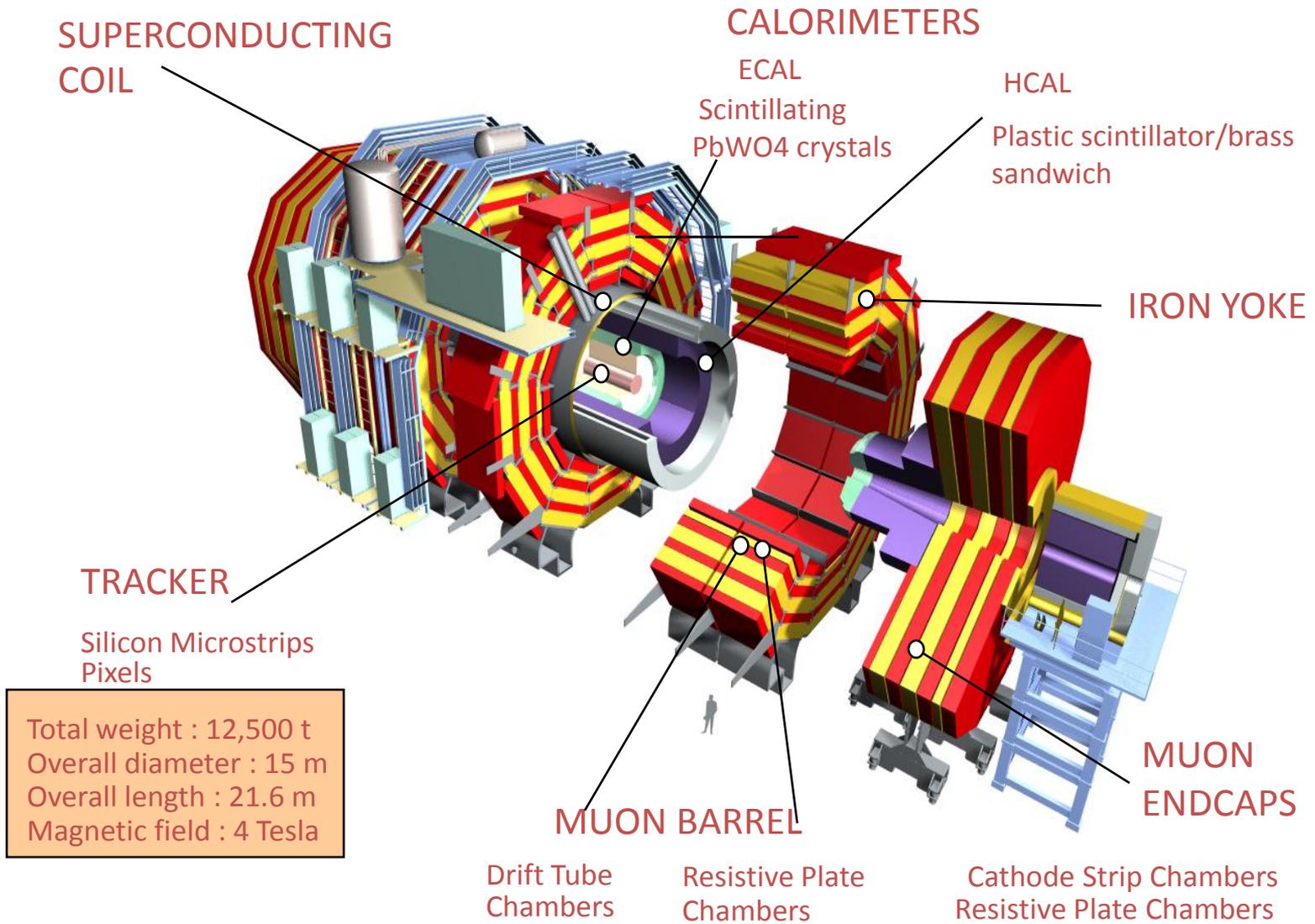
CEA - Saclay 12/98
DSM DAPNIA STCM
K 0000 004

CMS Solenoide

Coil Assembly in Surface Hall (Aug05)



Exploded View of CMS

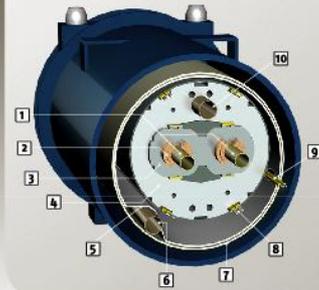


Total weight : 12,500 t
Overall diameter : 15 m
Overall length : 21.6 m
Magnetic field : 4 Tesla

So funktioniert der Large Hadron Collider

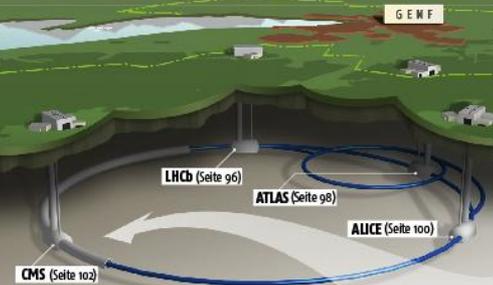
Nahe Genf entsteht die leistungsstärkste Beschleunigeranlage der Welt: der Large Hadron Collider (LHC). In einem zwischen 50 und 175 Meter tiefen Tunnel ist ein 27 Kilometer langes Ringsystem untergebracht, in das von einem kleineren Ring vorbebeschleunigte Teilchen eingeschleust werden. Kernstück des LHC sind „Strahlrohre“, die durch vier, in gewaltigen Kavernen installierte Detektoren führen. Deren Funktionsprinzip wird rechts am Beispiel des CMS erläutert

- 1 Strahlrohr
- 2 Supraleitender Magnet
- 3 Stahlmanschette
- 4 Eisenjoch (-271°C)
- 5 Kälteschild
- 6 Heliumleitung (-223°C)
- 7 Superisolierung
- 8 Stromzufuhr für Dipolspulen
- 9 Stromleitung für andere Magnete
- 10 Wärmetauscher-Rohr



1. Ringe

Die beiden Beschleuniger sind insgesamt aus 1252 blauen, jeweils 35 Tonnen schweren Dipolmagneten zusammengesetzt. Sie umschließen die luftleeren Strahlrohre, durch welche Protonen (Kerne des Wasserstoffs) rasen, und zwingen diese auf eine Kreisbahn. Die Protonen kreisen gegenläufig und treffen an vier Punkten aufeinander: dem Standort der Detektoren, welche die Spuren der bei der Kollision neu entstehenden Partikel aufzeichnen



2. Dipolmagnete

Spulen aus supraleitenden Niob-Titan-Drähten, in denen ein Strom von etwa 12 000 Ampere verlustfrei zirkuliert, erzeugen ein zwei-poliges Magnetfeld: Sie funktionieren als Dipolmagnete. Das Feld ist etwa 160 000-mal so stark wie jenes der Erde. Die Supraleitung funktioniert nur bei minus 271 Grad Celsius. Der gesamte Ring wird daher mit 100 Tonnen flüssigen Heliums tiefgekühlt

Kollisionspunkt

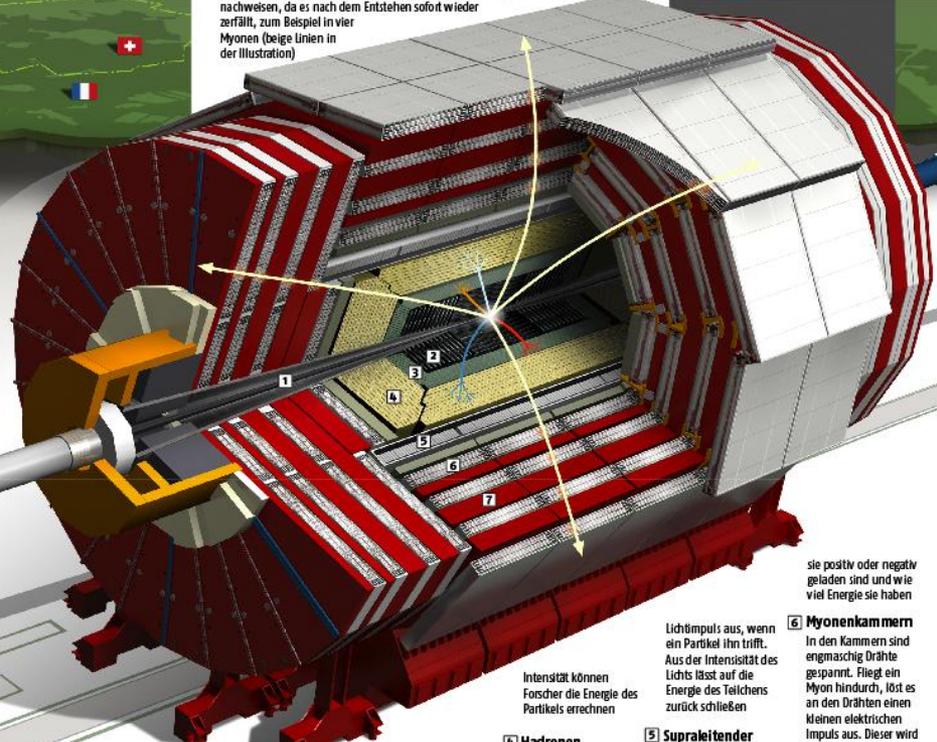


Vor dem Detektor vereinigen sich die beiden Strahlrohre zu einem Rohr. Exakt im Zentrum des CMS kollidieren die Partikel

3. Compact Muon Solenoid (CMS)

Um einen Kollisionspunkt der Teilchen herum haben Wissenschaftler und Ingenieure den riesigen Detektor errichtet: 15 Meter hoch, 22 Meter lang und mit 12 500 Tonnen das schwerste der vier Nachweigeräte im Ring. Wie auch die anderen Detektoren ist der CMS aus mehreren Lagen von Sensoren aufgebaut, die nach unterschiedlichen Prinzipien arbeiten. Stößen im Zentrum der komplexen Maschine aus entgegengesetzten Richtungen herankommende Protonen zusammen, bilden sich in einem Feuerball tausende Partikel, die nach außen davon fliehen. Die Bahnen elektrisch geladener Teilchen werden in einem starken Magnetfeld – je nach deren Ladungsart und Energie – unterschiedlich gekrümmt, und die Partikel damit voneinander trennt. Auf ihrem Flugweg gelangen die Splitter zu den diversen Sensoren. Manche Teilchen werden in bestimmten Messgeräten gebremst, andere wie die Myonen schaffen es, die gesamte Experimentieranlage zu durchdringen. Die Kunst der Physiker besteht nun darin, aus dem Gewirr der Teilchenspuren die herauszufiltern, hinter denen sich Neues verbirgt, etwa das gesuchte Higgs-Partikel. Dieses lässt sich allerdings nur indirekt nachweisen, da es nach dem Entstehen sofort wieder zerfällt, zum Beispiel in vier Myonen (beige Linien in der Illustration)

- Myon
- geladenes Hadron
- neutrales Hadron
- Elektron
- Photon



1. Strahlrohr

Im Innern des Detektors sind die Teilchen, die sonst in zwei Röhren in entgegengesetzter Richtung, in einer Röhre zusammengeführt

2. Silizium-Tracker

Wenn ein Teilchen einen der 25 000 Siliziumstreifen in dieser Schicht durchfliegt, löst es einen winzigen elektrischen Impuls aus. So kann seine Flugbahn nachvollzogen werden

3. Elektromagnetisches Kalorimeter

Gerät ein Elektron oder ein Photon in einen der etwa 80 000 Kristalle aus Bleiwolframat, werden sie gestoppt und es entsteht ein winziger Lichtblitz. Aus dessen

4. Hadronen Kalorimeter

In diesem Messgerät wechseln sich Schichten von Stahl bzw. Messing und Kunststoffen ab. Das massive Metall bremsst heran rasende Hadronen ab, der Kunststoff sendet einen

5. Supraleitender Magnet

Durch den Magneten fließen 20 000 Ampere und erzeugen ein Magnetfeld, vom 180 000-fachen des Erdmagnetfelds. Die Magnetkräfte lenken elektrisch geladene Teilchen unterschiedlich stark ab – je nachdem ob

sie positiv oder negativ geladen sind und wie viel Energie sie haben

6. Myonenkammern

In den Kammern sind engmaschig Drähte gespannt. Fliegt ein Myon hindurch, löst es an den Drähten einen kleinen elektrischen Impuls aus. Dieser wird gemessen, und die Physiker können daraus die Flugbahn des Teilchens rekonstruieren

7. Eisenjoch

Die mächtigen Ringe und Scheiben aus Eisen verstärken und formen das Magnetfeld

Intensität können Forscher die Energie des Teilchens zurück schließen

Lichtimpuls aus, wenn ein Partikel ihn trifft. Aus der Intensität des Lichts lässt sich die Energie des Teilchens zurück schließen

CMS: INVESTIGATING THE DEEPEST QUESTIONS IN THE UNIVERSE

1 AT THE BORDER BETWEEN FRANCE AND SWITZERLAND, THE EUROPEAN CENTER FOR NUCLEAR RESEARCH: CERN.



2 100M UNDERGROUND VAST CATHEDRAL-SIZED CAVERNS HOUSE FOUR GIANT PARTICLE DETECTORS FOR THE WORLD'S BIGGEST SCIENTIFIC TOOL: A MASSIVE PARTICLE ACCELERATOR, 27 KM AROUND, THE LHC: LARGE HADRON COLLIDER.

3 THE PROTONS IN THE LHC ARE ACCELERATED TO 99.9998% OF THE SPEED OF LIGHT IN TWO BEAM LINES, MOVING IN OPPOSITE DIRECTIONS.

4 THOUSANDS OF POWERFUL SUPERCONDUCTING MAGNETS STEER THE PROTON BEAMS AROUND THE HUGE RING AND THEN FOCUS THEM TO LESS THAN THE WIDTH OF A HUMAN HAIR... READY TO CRASH AGAINST EACH OTHER. THESE SUPERCONDUCTING MAGNETS RUN AT -271°C: EVEN COLDER THAN OUTER SPACE. THE LHC IS THE BIGGEST CRYOGENIC SYSTEM EVER MADE.

THESE ANCESTRAL PARTICLES SURVIVE FOR ONLY THE TINIEST FRACTION OF A SECOND BEFORE THEY DISINTEGRATE INTO CASCADES OF MORE FAMILIAR PARTICLES. SCIENTISTS NEED ULTRAFAST, ULTRAPRECISE DETECTORS, AND STATE-OF-THE-ART CUSTOM MADE ELECTRONICS TO SEE THE CASCADE...THEY NEED CMS: THE COMPACT MUON SOLENOID.

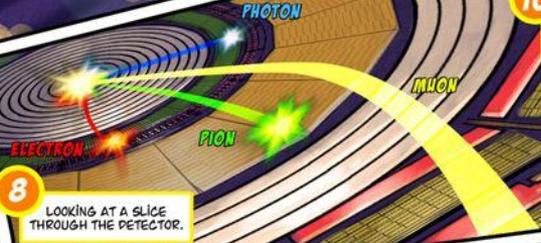
5 THE COLLISION GENERATES SO MUCH ENERGY THAT PARTICLES EXIST SINCE THE BIG BANG (14 BILLION YEARS AGO), LIKE THE HIGGS PARTICLE, REAPPEAR BRIEFLY.

9 CMS HAS BEEN ASSEMBLED IN LAYERS FROM MILLIONS OF PARTS WITH WATCH-MAKING PRECISION. EACH LAYER OF DETECTORS HAS A SPECIAL JOB TO DO: TO IDENTIFY AND MEASURE AS MANY PARTICLES AS POSSIBLE.



7 CMS IS LIKE A 12,500 TONNE DIGITAL CAMERA WITH 100 MILLION PIXELS THAT TAKES A 3D PICTURE OF THE LHC COLLISIONS 40 MILLION TIMES PER SECOND!

10 A TOTAL OF 1 TERABYTE OF DATA IS GENERATED IN CMS EVERY SECOND, EQUIVALENT IN VOLUME TO STORING THE NAMES AND ADDRESSES OF EVERY LIVING HUMAN BEING.



8 LOOKING AT A SLICE THROUGH THE DETECTOR.

11 TO CRUNCH AND SWALLOW ALL THIS INFORMATION IS JUST NOT POSSIBLE. POWERFUL ELECTRONICS FILTERS THE DATA SIGNALS SO THAT, EVERY SECOND, ONLY THE RESULTS FROM THE 100 MOST INTERESTING COLLISIONS ARE STORED.

12 A HUGE COMPUTING NETWORK, THE GRID, SENDS THE CMS DATA OUT ALL OVER THE WORLD...

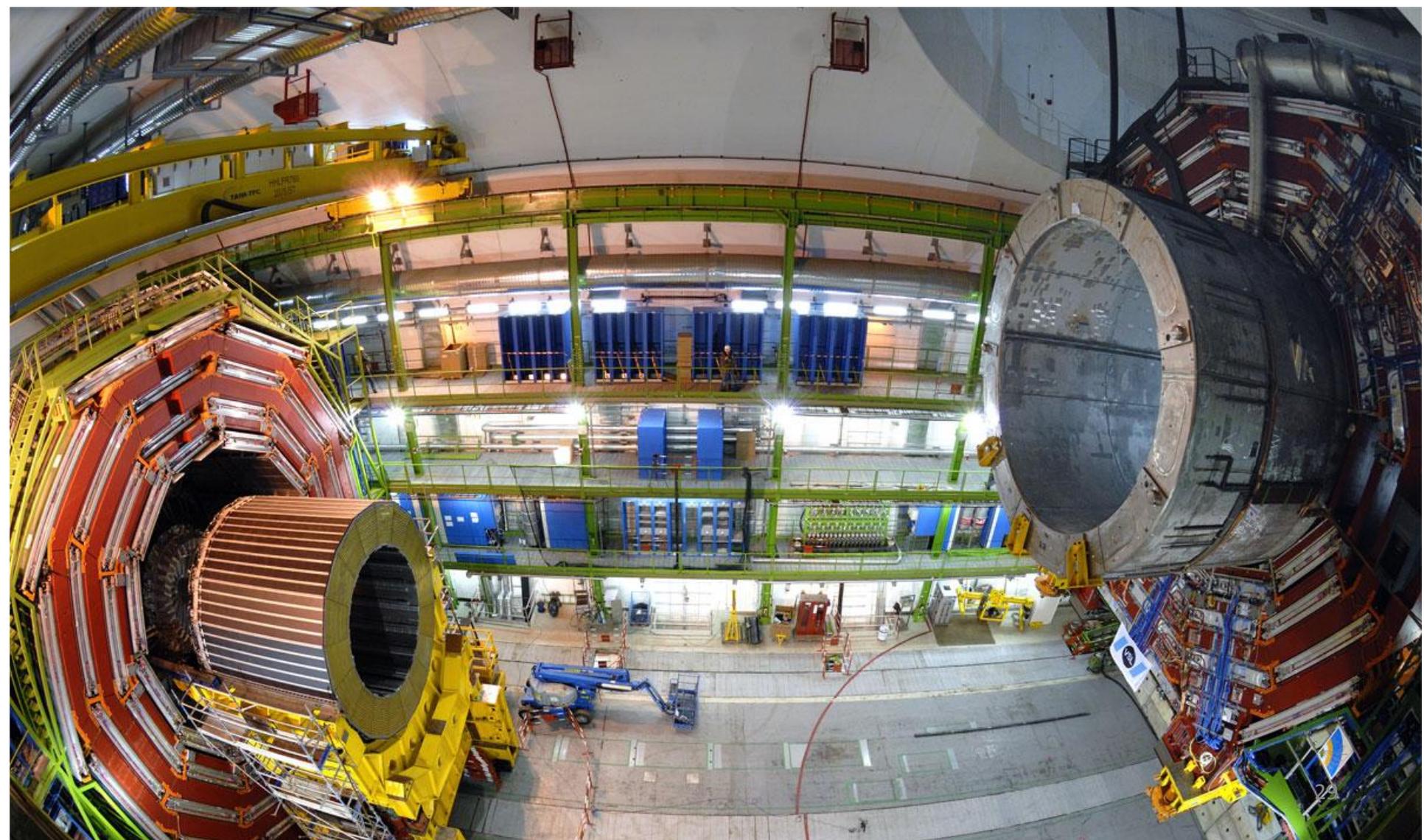


13 A PHYSICS STUDENT SAT AT THEIR PC ANYWHERE IN THE WORLD CAN HARNESS THE POWER OF THOUSANDS OF PCs OVER THE GRID...

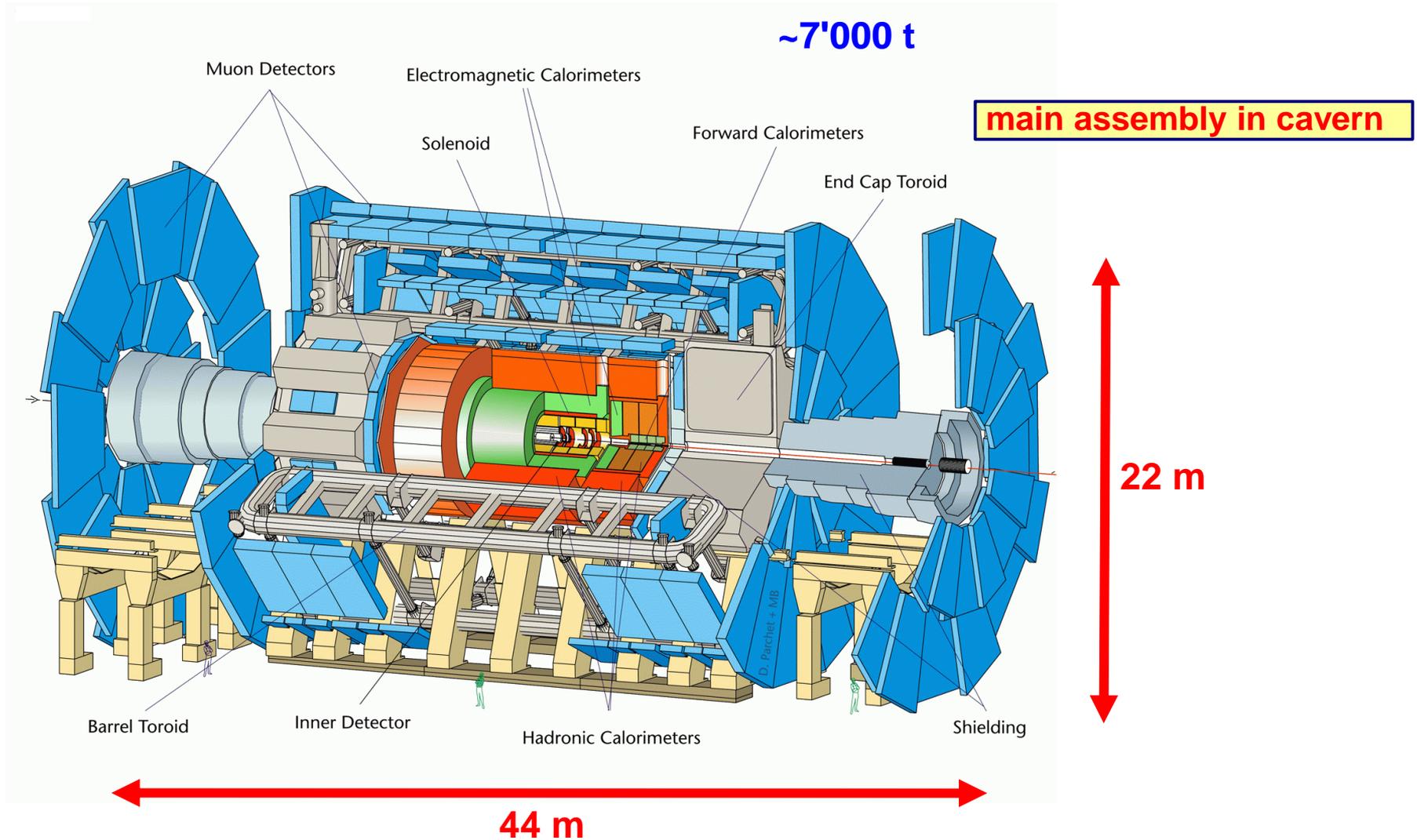


14 TO SEARCH FOR RARE COLLISIONS AND NEW PHYSICS...

Der Mittelteil des CMS Detektors auf der Reise in die Kaverne



ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)



Reichen Beschleuniger und Detektoren?

Was brauchen wir noch?

- Infrastruktur
 - Elektronik, Elektronik, Elektronik
 - Kabel, Kabel, Kabel (Logistik)
 - E.g. PC, Kühlung, Gas, Werkstätten, ...
 - E.g. schnelle ADCs, Controller Spannungsversorgung, Kabel, ...
- Trägerstrukturen
- Kontrollsoftware
- Auslesesoftware und Speicherung
- Analysesoftware der gespeicherten Daten
- Monte Carlo (Simulation)
- Jede Menge Menschen!!!!!!
- ...

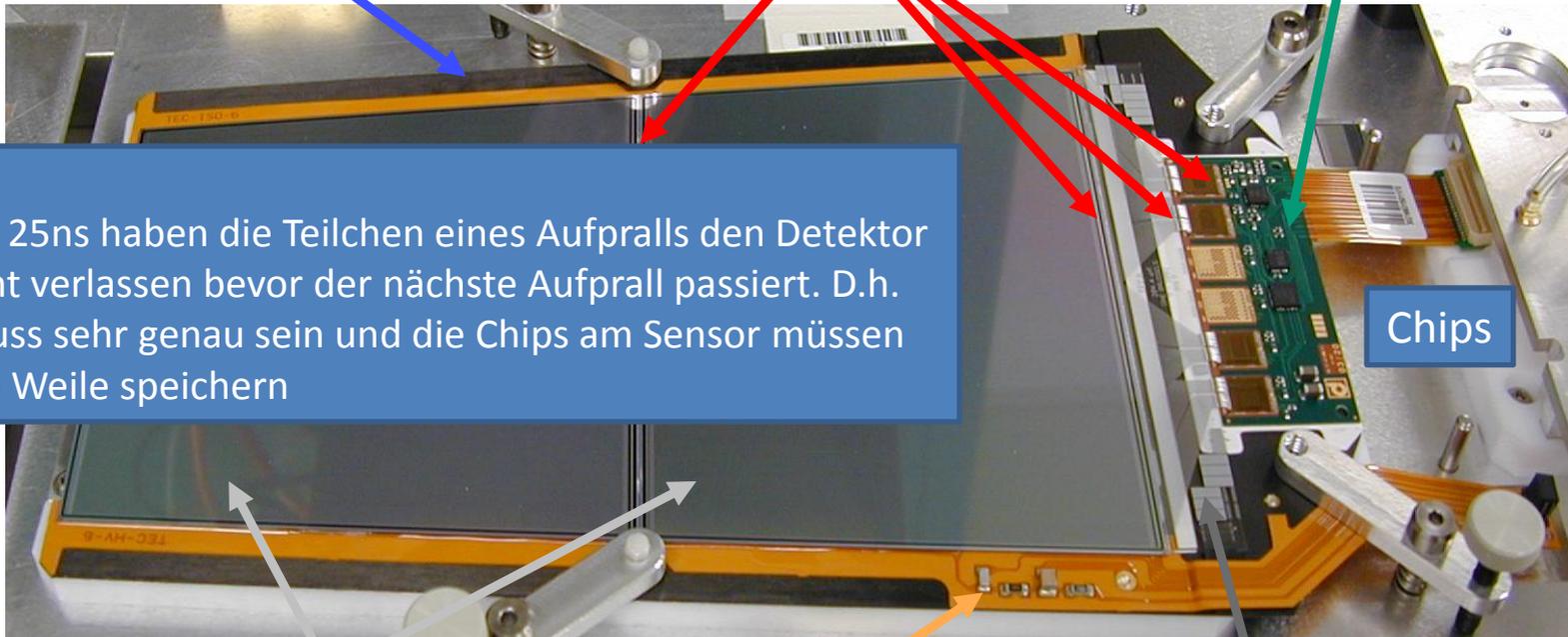
Chips & Module (Im Prinzip eine eigene Vorlesung)

- Nicht zu vergessen ist, dass meistens die komplette Elektronik eine Eigenentwicklung ist!
 - Chips und Treiberkarten werden speziell auf die Experimente zugeschnitten
 - **Zeit**konstanten, Strahlungsumgebung, Magnetfeld muss berücksichtigt werden
 - Kapazitäten, Ströme, Spannungen, ...

Rahmen aus Kohlefaser

Mikroverschweißungen

Front-end Hybrid



Ein Beispiel:

Bei Ereignissen alle 25ns haben die Teilchen eines Aufpralls den Detektor (mit $v=c$) noch nicht verlassen bevor der nächste Aufprall passiert. D.h. Der Zeitstempel muss sehr genau sein und die Chips am Sensor müssen Informationen eine Weile speichern

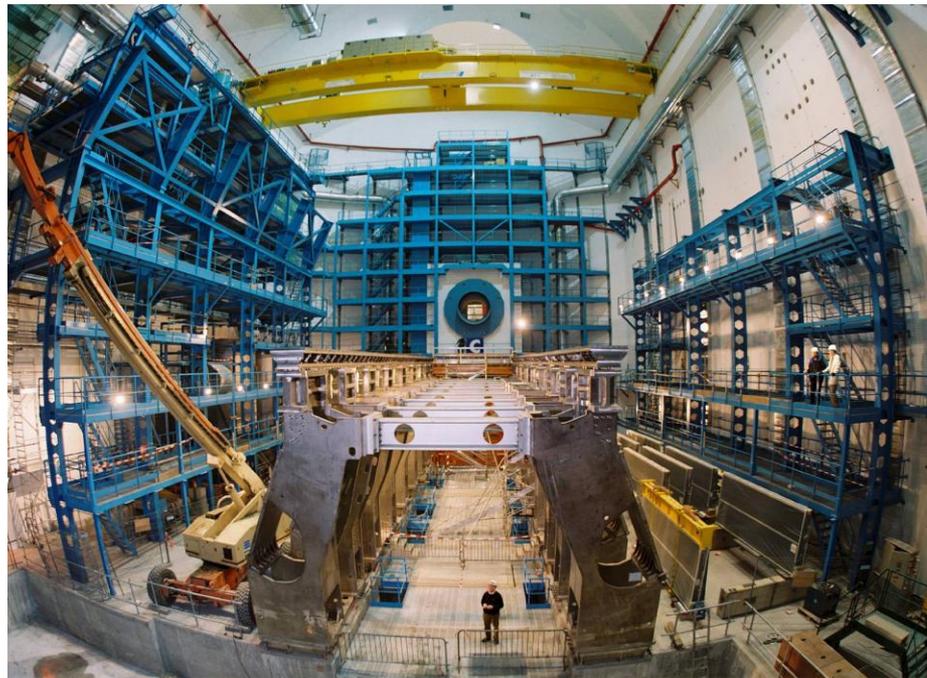
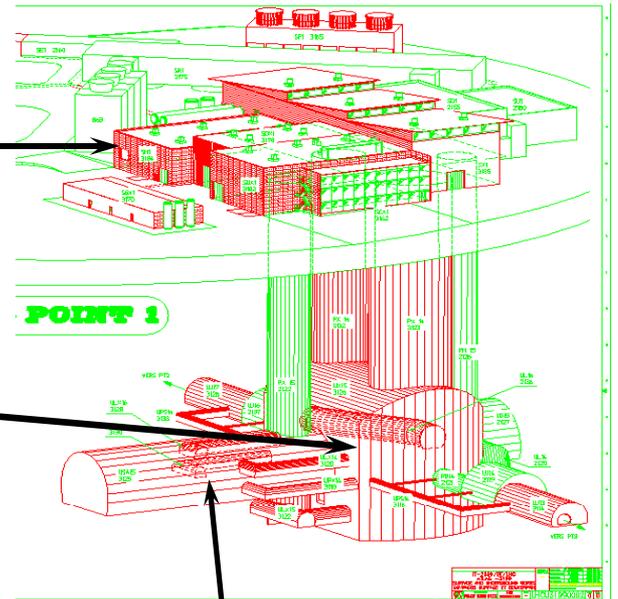
Sensoren

Kapton Schaltkreis

Pitch adapter³²(glass)

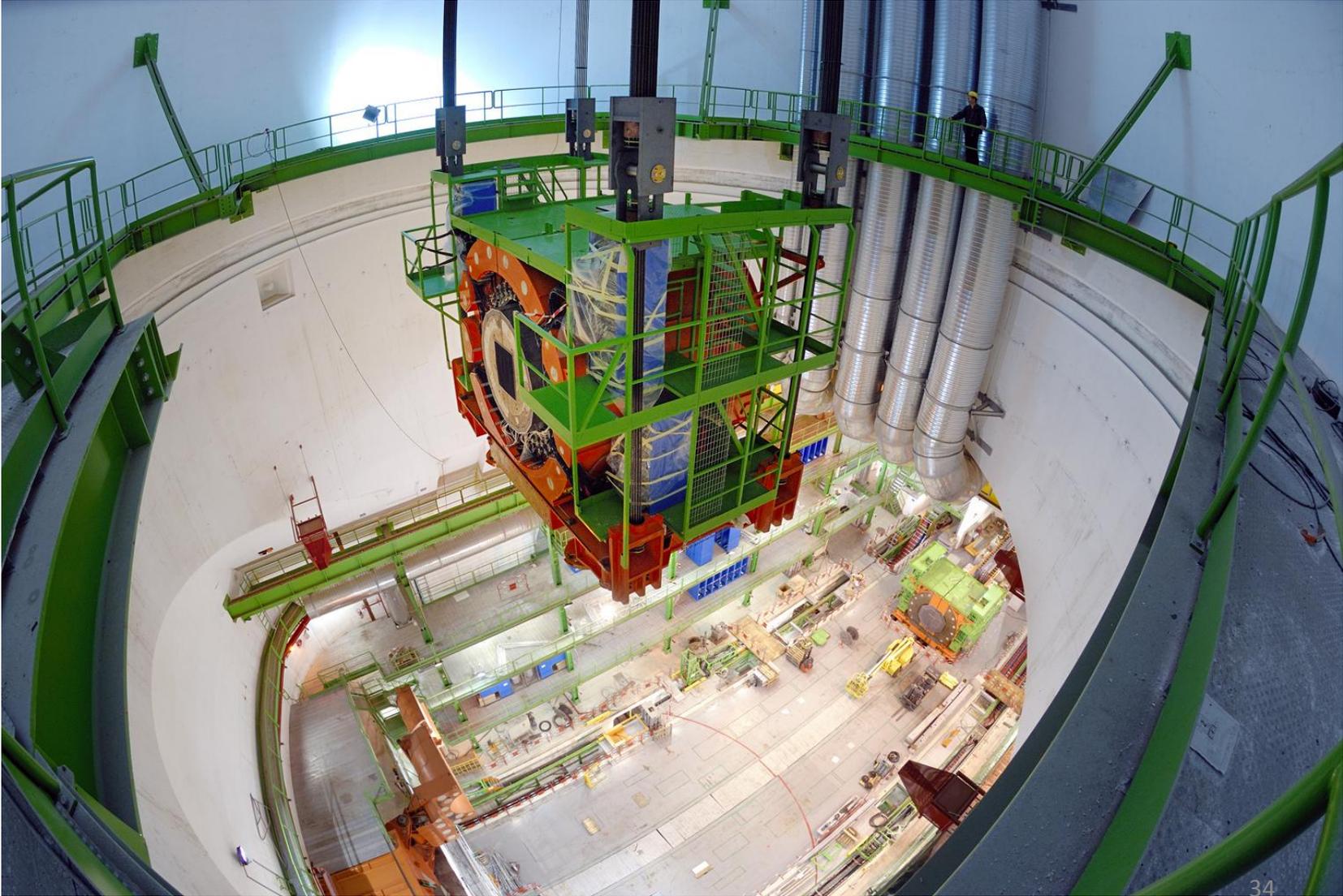
ATLAS: Infrastruktur & Installation

Cryogenic plant fertig und abgenommen

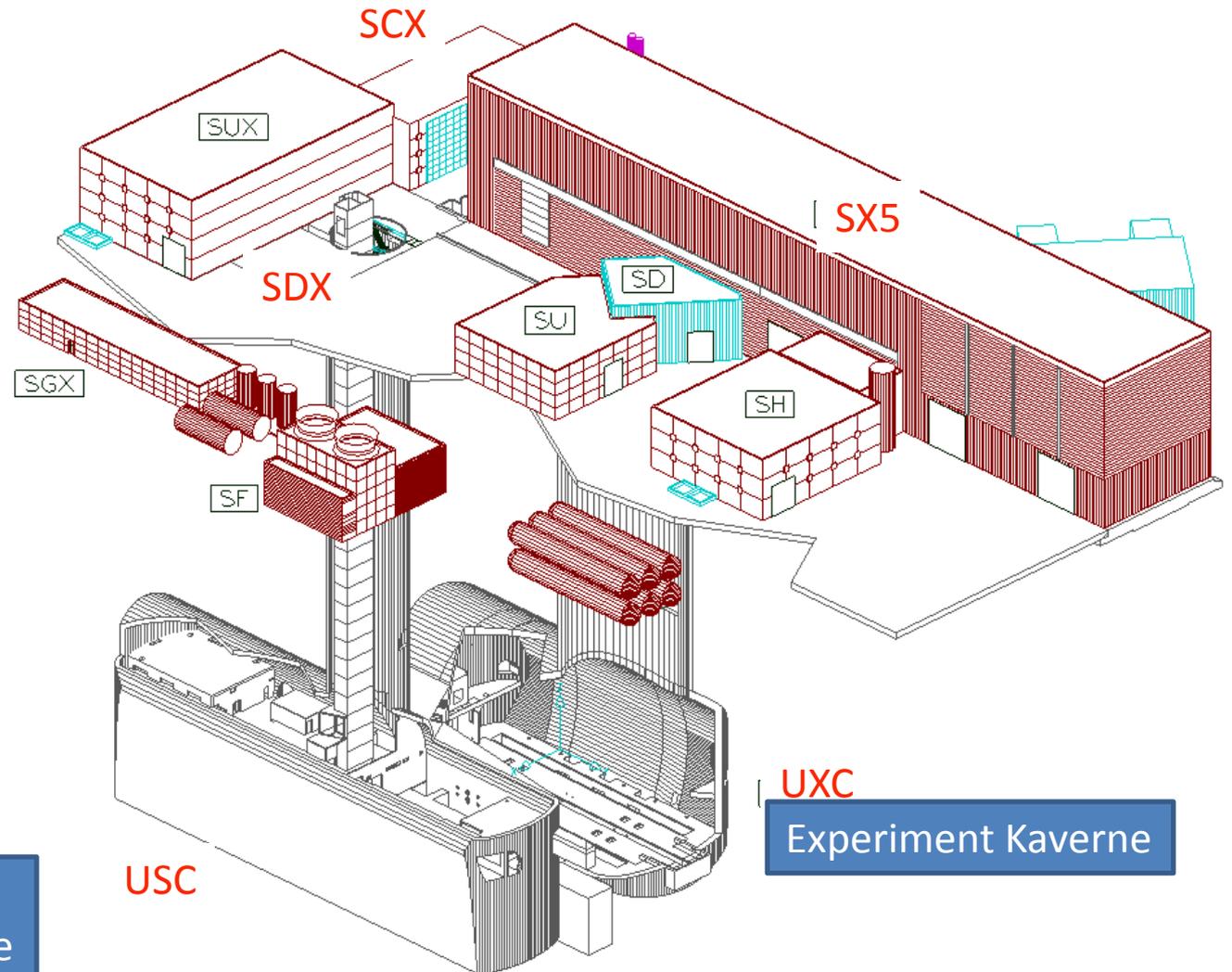


Kaverne und Basisinfrastruktur schon seit 2003

Das Endkappen Kalorimeter auf dem Weg nach unten



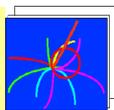
CMS: Kaverne und Gebäude



Infrastruktur:
z.B. PCs, Auslesemodule
4 stöckig

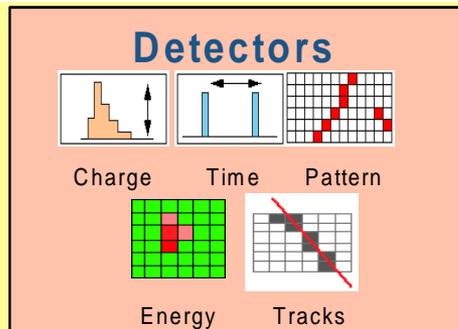
CMS Trigger and DAQ

Alle 25 ns



40 MHz
COLLISION RATE

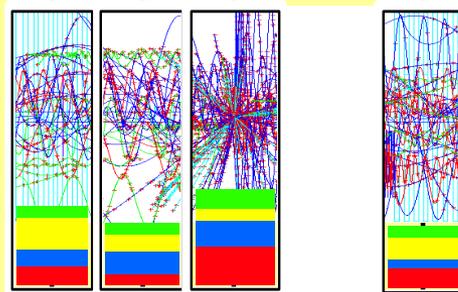
100 kHz
LEVEL-1 TRIGGER



16 Million channels
3 Gigacell buffers

DAQ akzeptiert
Level-1 Rate of 100kHz

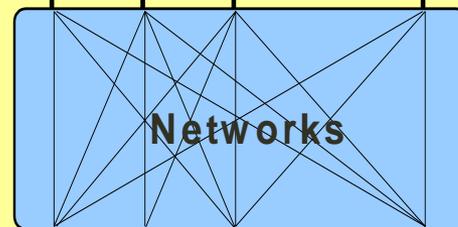
1 Terabit/s
(50000 DATA CHANNELS)



1 Megabyte EVENT DATA

200 Gigabyte BUFFERS
500 Readout memories

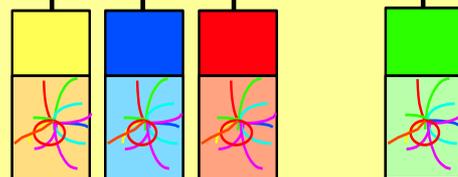
500 Gigabit/s



EVENT BUILDER. A large switching network (512+512 ports) with a total throughput of approximately 500 Gbit/s forms the interconnection between the sources (Readout Dual Port Memory) and the destinations (switch to Farm Interface). The Event Manager collects the status and request of event filters and distributes event building commands (read/clear) to RDPMs

HLT (High Level Trigger)
entworfen für ca. 100Hz
- Unterdrückung Faktor 1000
~2000 CPUs

Gigabit/s SERVICE LAN



5 TeraIPS

EVENT FILTER. It consists of a set of high performance commercial processors organized into many farms convenient for on-line and off-line applications. The farm architecture is such that a single CPU processes one event

Petabyte ARCHIVE

Trigger & DAQ

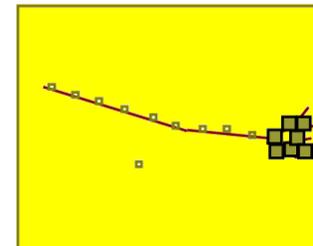
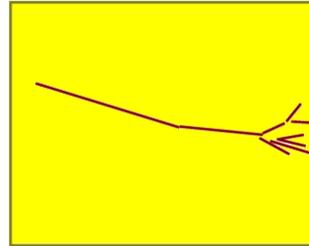
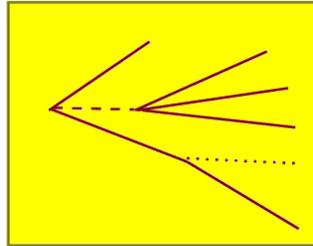
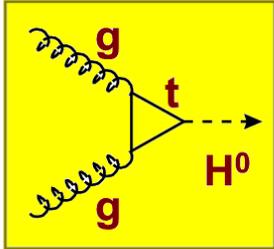
Große Anstrengungen wurden in den letzten Jahren unternommen um die Datennahme zu validieren. Mit Hilfe von Prototypen und Emulatoren.



1:8 Datannahmesystem an P5 des CMS Experimentes



Von Physik zu Rohdaten



2037	2446	1733	1699
4003	3611	952	1328
2132	1870	2093	3271
4732	1102	2491	3216
2421	1211	2319	2133
3451	1942	1121	3429
3742	1288	2343	7142

Basic physics

**Fragmentation,
Decay**

**Interaction with
detector material**
Multiple scattering,
interactions

**Detector
response**
Noise, pile-up,
cross-talk,
inefficiency,
ambiguity,
resolution,
response
function,
alignment

Raw data
Read-out
addresses,
ADC, TDC
values,
Bit patterns

- Rohdatenrate in ATLAS/CMS beträgt ca. 400MB/s
 - Z.B. Nummer eines Detektors, dessen ADC (Analog to Digital) eine Signalwert X

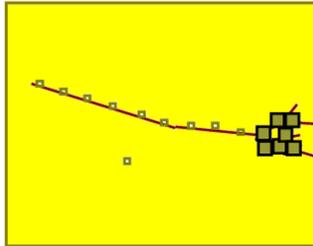
Von Rohdaten zur Physik



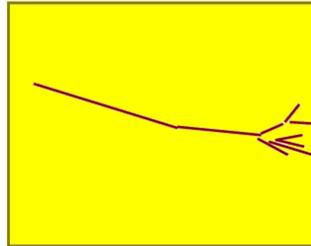
```
2037 2446 1733 1699
4003 3611 952 1328
2132 1870 2093 3271
4732 1102 2491 3216
2421 1211 2319 2133
3451 1942 1121 3429
3742 1288 2343 7142
```

Raw data

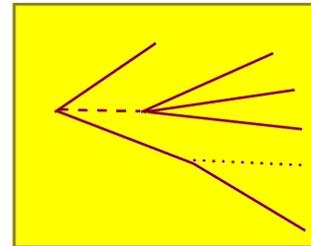
Convert to
physics
quantities



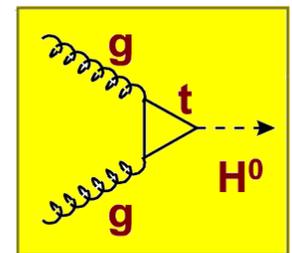
**Detector
response**
apply
calibration,
alignment



**Interaction with
detector material**
Pattern,
recognition,
Particle
identification



**Fragmentation
Decay**
Physics
analysis



Basic physics

Results

Reconstruction

Analysis

Simulation (Monte-Carlo)

- Auch der Weg von den Rohdaten zur Physik muss verstanden sein!
 - Rekonstruktion+ Analyse der Ereignisse

Ausblick

**DIE SUCHE NACH DEN FUNDAMENTALEN BAUSTEINEN DER NATUR
IST PHILOSOPHISCHES ANLIEGEN SEIT MENSCHENGEDENKEN**

**WIE WIR DIE FRÜHEREN KULTUREN BEURTEILEN, WERDEN
AUCH WIR SPÄTER AN UNSEREN ERKENNTNISSEN
GEMESSEN WERDEN**

**UNSERE FORSCHUNG IST VERKNÜPFT
MIT DER AUSBILDUNG UND DER SUCHE
NACH ANWENDUNGEN IM
TÄGLICHEN LEBEN**

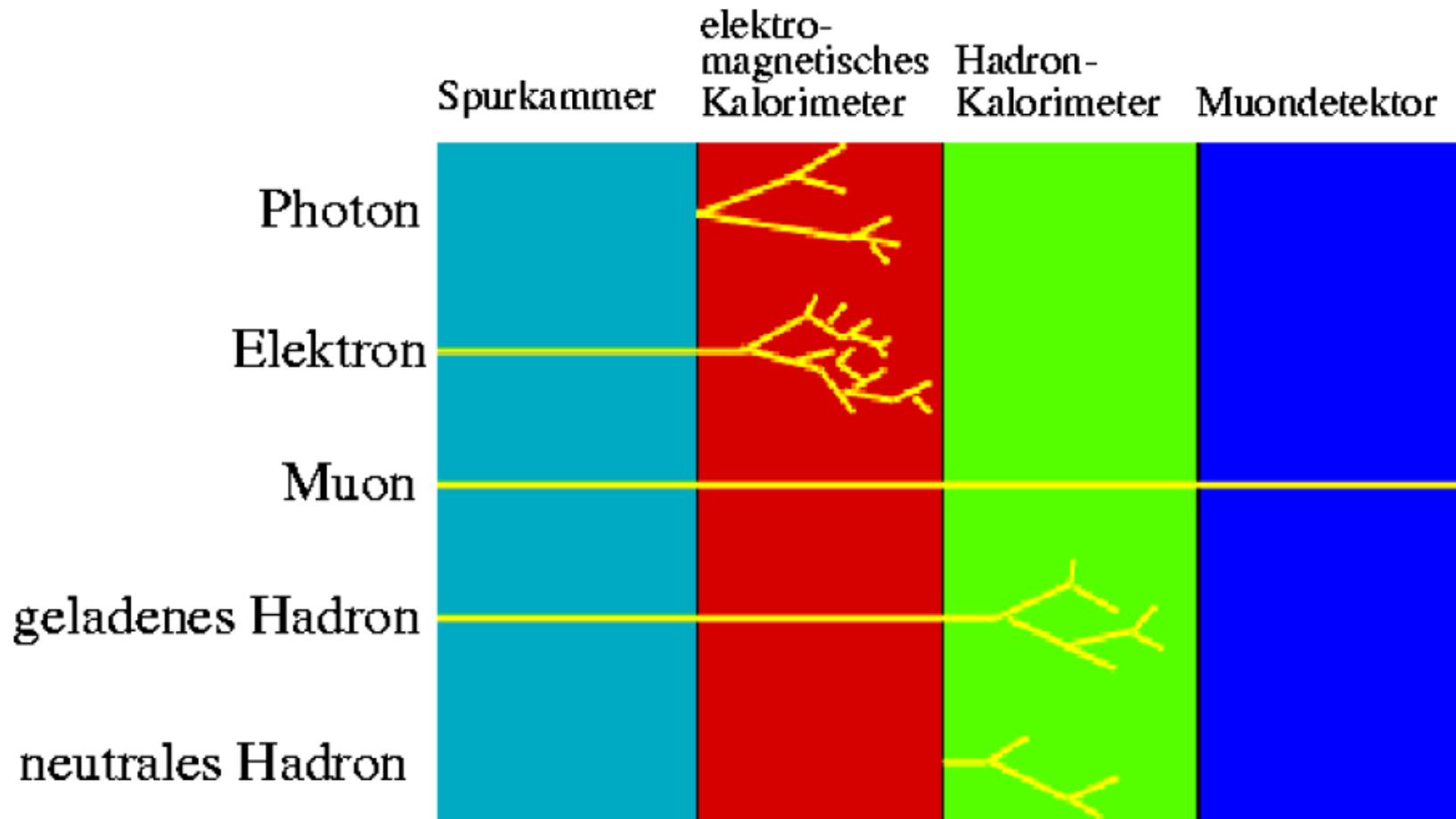


Acknowledgements

- Christian Joram Particle Detectors; Lectures for Postgraduates Students and Summer Students, CERN 1998, 2003, 2005
- Sascha Schmeling High Schools Teachers Program CERN 2003-2006
- Michael Hausschild Detectors; Doktoranden Herbstschule Maria Laach
- Thomas Müller: Teilchenphysik Vorlesung Uni Karlsruhe
- Freunde & Bekannte & Collaborators
- M. Titov (VCI 2007) : New Developments and Future Perspectives of Gaseous Detectors
- Peter Križan (VCI 2007) Detectors for Particle Identification

Backup

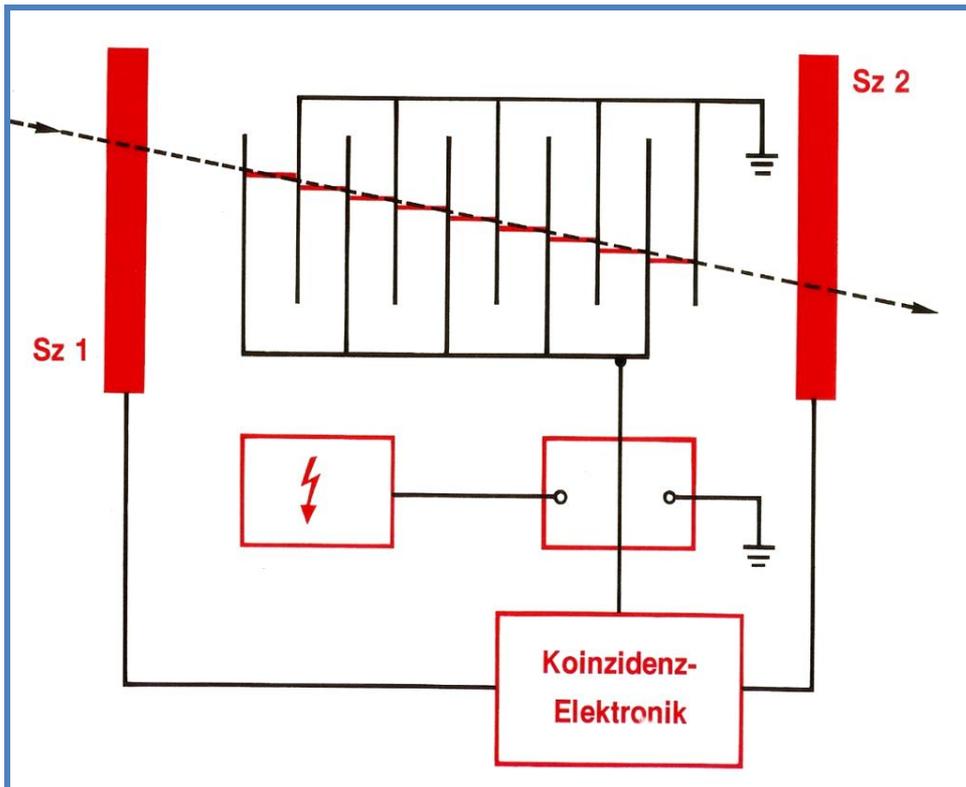
Zusammenfassung



prinzipieller Aufbau eines Detektorsystems

Funkenkammer:

- Elektronischer Detektor
- Teilchen erzeugen „**Ionisationsbrücke**“



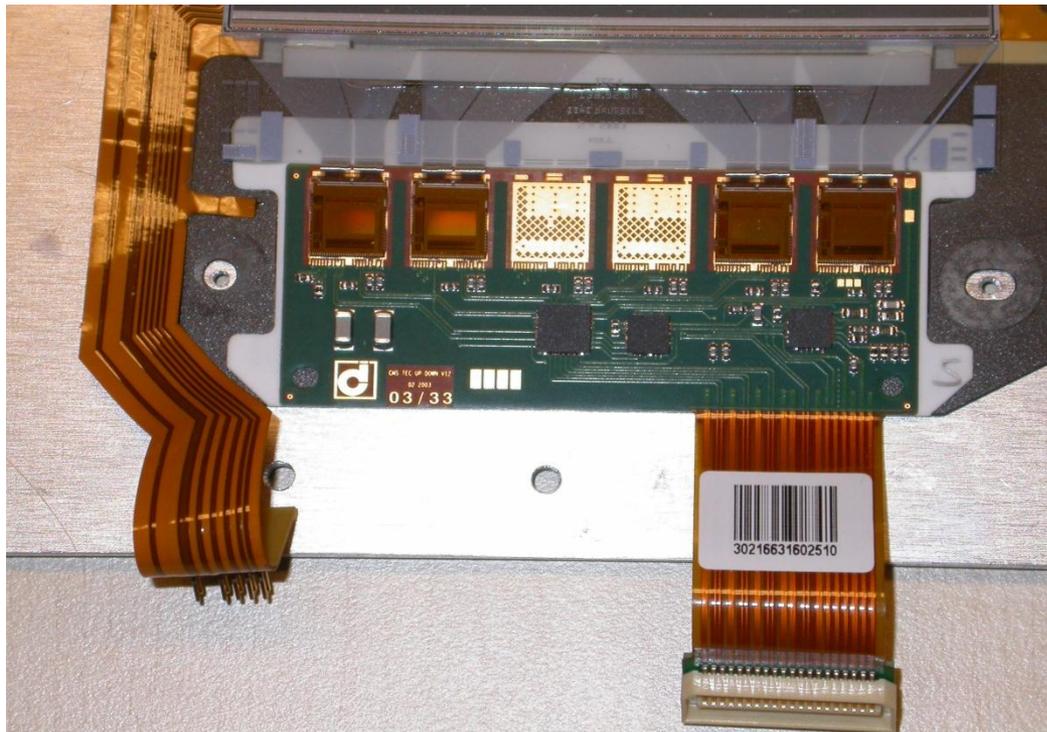
- Position dieser Durchschläge optisch oder durch **elektronische Methoden** ermittelt
- Versagen bei zu vielen gleichzeitig ankommenden Teilchen

Final front end hybrids

4-layer Kapton substrate (flex) laminated onto ceramic

4 or 6 APV25 readout chips

- radiation hard commercial 0.25 μ m CMOS technology
- 128 strips per APV, multiplexed to one analog output
- per channel: pre-amplifier, CR-RC shaper, 4.8 ns pipeline



Detector Control Unit (DCU)

- 12-bit ADC
- 8 channels:
 - hybrid and sensor temperatures
 - leakage current
 - low voltages

2:1 multiplexer

- 2 APVs multiplexed to one readout channel

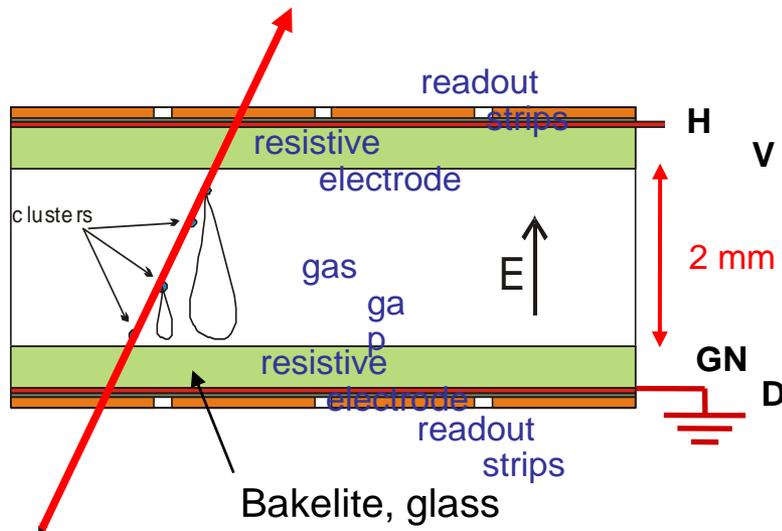
PLL chip

- decodes clock & trigger signals

Analog & optical readout!

Resistive Plate Chambers (RPC)

- There are also gaseous detectors without wires
 - two resistive plates ($\sim 10^9 \Omega\text{cm}$) with a small gas gap (2 mm) and large high voltage (12 kV) on outside electrodes
 - strong E-field: operation in “streamer mode”
 - gas avalanche already starting in gas gap (no wires involved)
 - developing of “streamers” (blob with lots of charge, almost like a spark)
 - signal on external read-out strips via influence (segmented for position resolution)
 - streamer/discharge is “self-quenching”: stops when near-by resistive electrodes are locally discharged (E-field breaks down)



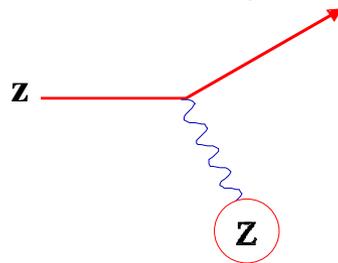
Advantages: simple device,
good to cover large areas,
VERY fast!!!

→ used as trigger devices
in LHC experiments,
time resolution $\sim 50 - 100$ ps

Disadvantages: Choice of resistive material
+ surface quality crucial,
affects “dark” trigger rate

Elastic Scattering

- Most basic interaction of a charged particle in matter
 - elastic scattering with a nucleus
Rutherford (Coulomb) scattering



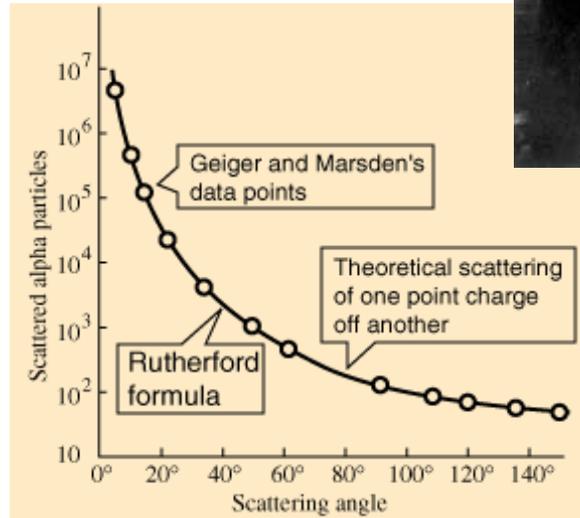
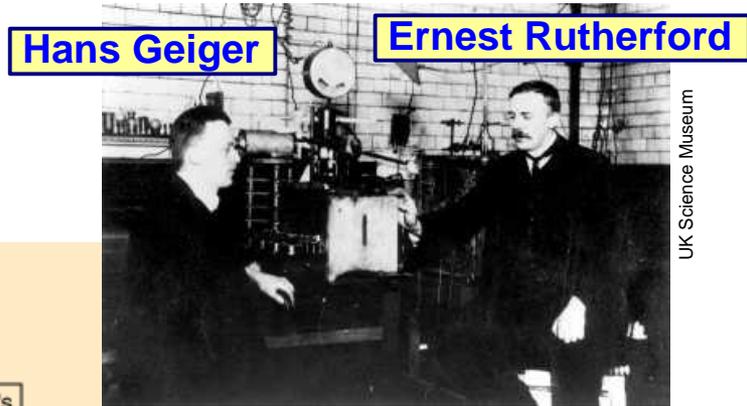
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = 4 z Z r_e^2 \left[\frac{m_e c}{p} \right]^2 \frac{1}{\sin^4 \theta / 2}$$

- Approximations

- non-relativistic
- no spins

- Scattering angle and energy transfer to nucleus usually small

- No (significant) energy loss of the incoming particle
- Just change of particle direction

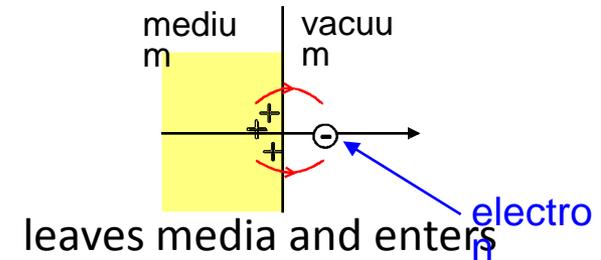


Transition Radiation

- Predicted by Ginzburg and Franck in 1946
 - emission of photons when a charged particle traverses through the boundary of two media with different refractive index

- (very) simple picture

- charged particle is polarizing medium
- polarized medium is left behind when particle
- unpolarized vacuum



- formation of an electrical dipole with $W \propto \beta^2$ (transition) radiation

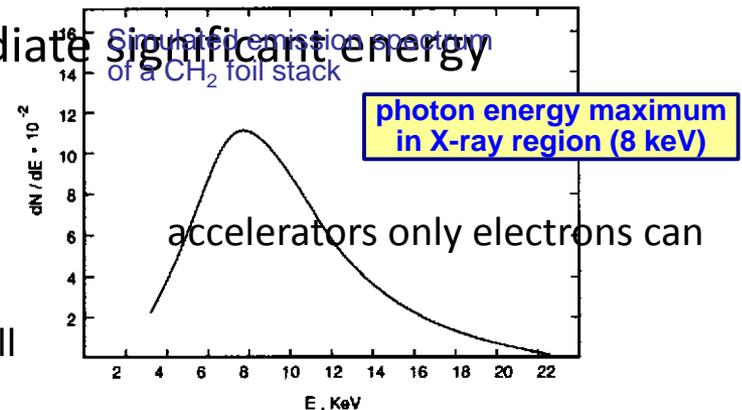
- Radiated energy per boundary

- only very high energetic particles can radiate significant energy

- need about $\gamma > 1000$
 - in our present energy range reachable

$$N_{\text{photons radiate}} \propto \beta_{EM}^2 \approx \frac{1}{137}$$

→ need many boundaries (foils, foam) to get a few photons



Calorimeter types

Homogeneous calorimeters:

- ⇒ Detector = absorber
- ⇒ good energy resolution
- ⇒ limited spatial resolution (particularly in longitudinal direction)
- ⇒ only used for electromagnetic calorimetry

Sampling calorimeters:

- ⇒ Detectors and absorber separated → only part of the energy is sampled.
- ⇒ limited energy resolution
- ⇒ good spatial resolution
- ⇒ used both for electromagnetic and hadron calorimetry