

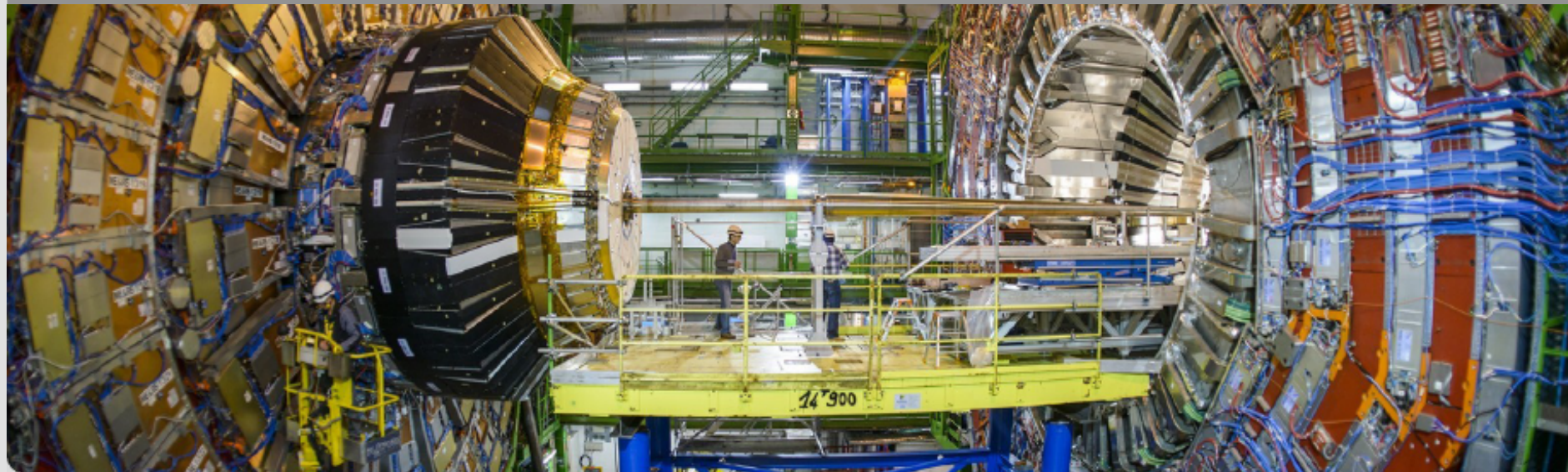
Moderne Experimentalphysik III: Teilchenphysik

Sommersemester 2018

Thomas Müller, Roger Wolf

15. Mai 2018 – VL 7

Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



2. Experimentelle Methoden

2.1 Teilchenbeschleuniger

2.2 Wechselwirkung geladener Teilchen in Materie (Ionisation)

2.2.1 Sonderfall: Abbremsung von Elektronen und Positronen in Materie

2.2.2 Cerenkov- und Übergangsstrahlung

2.3 Wechselwirkung von Photonen mit Materie

2.4 Wechselwirkung von Hadronen mit Materie

2.5 Teilchendetektoren

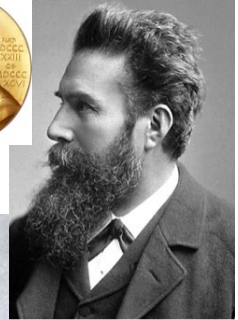
2.6 Detektorsysteme - Experimente

Für Fortgeschrittene: siehe Vorlesung F. Hartmann, Th. Müller,
„**Detektoren für Teilchen- und Astroteilchenphysik**“, WS 17/18

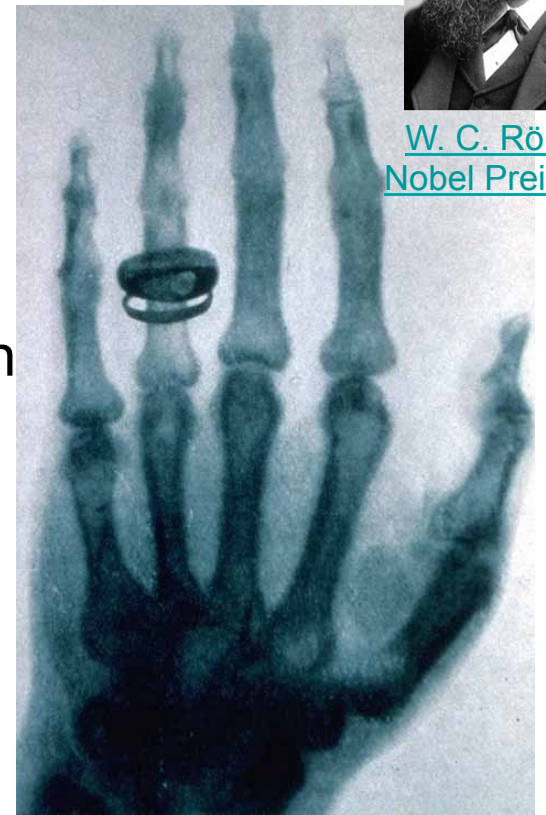
Erste Teilchennachweise

1896: Radioaktivität

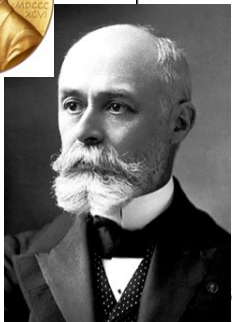
- Detektor: **Photoemulsion**
- Becquerel: Photoplatten benebelt durch Strahlung von Uran-Salzen (Beta Elektronen)
- Röntgen: Erste Abbildungen (Ph



W. C. Röntgen
Nobel Preis 1901



X-ray - Aufnahme v. Wilhelm Röntgen



H. Becquerel
Nobel Preis 1903

10 - 11 - 1896. Selbst. Dunkel. Wirkung d. Uransalze auf
Photoplatten. Gezeigt durch Becquerel. Erste
Ergebnisse am 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100.

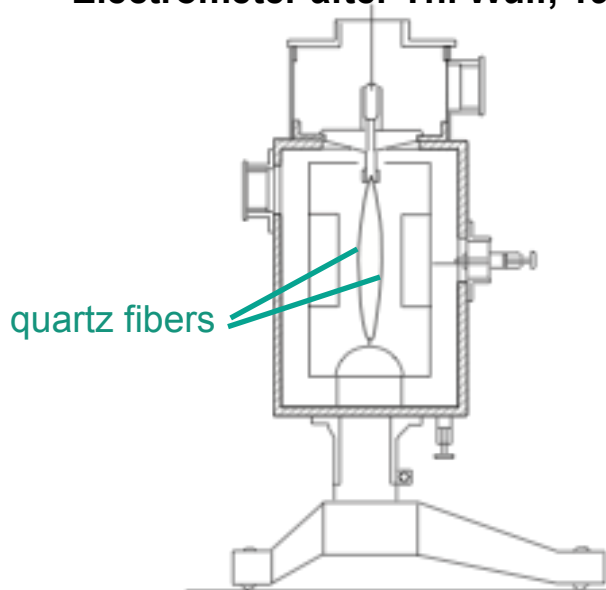


<http://www.leifiphysik.de>

1912: Entdeckung der **Kosmischen Höhenstrahlung** (Hess)

- Detektor: **Elektrometer**
- Entladung des Elektrometers nimmt mit der Höhe in der Atmosphäre zu!

Electrometer after Th. Wulf, 1909



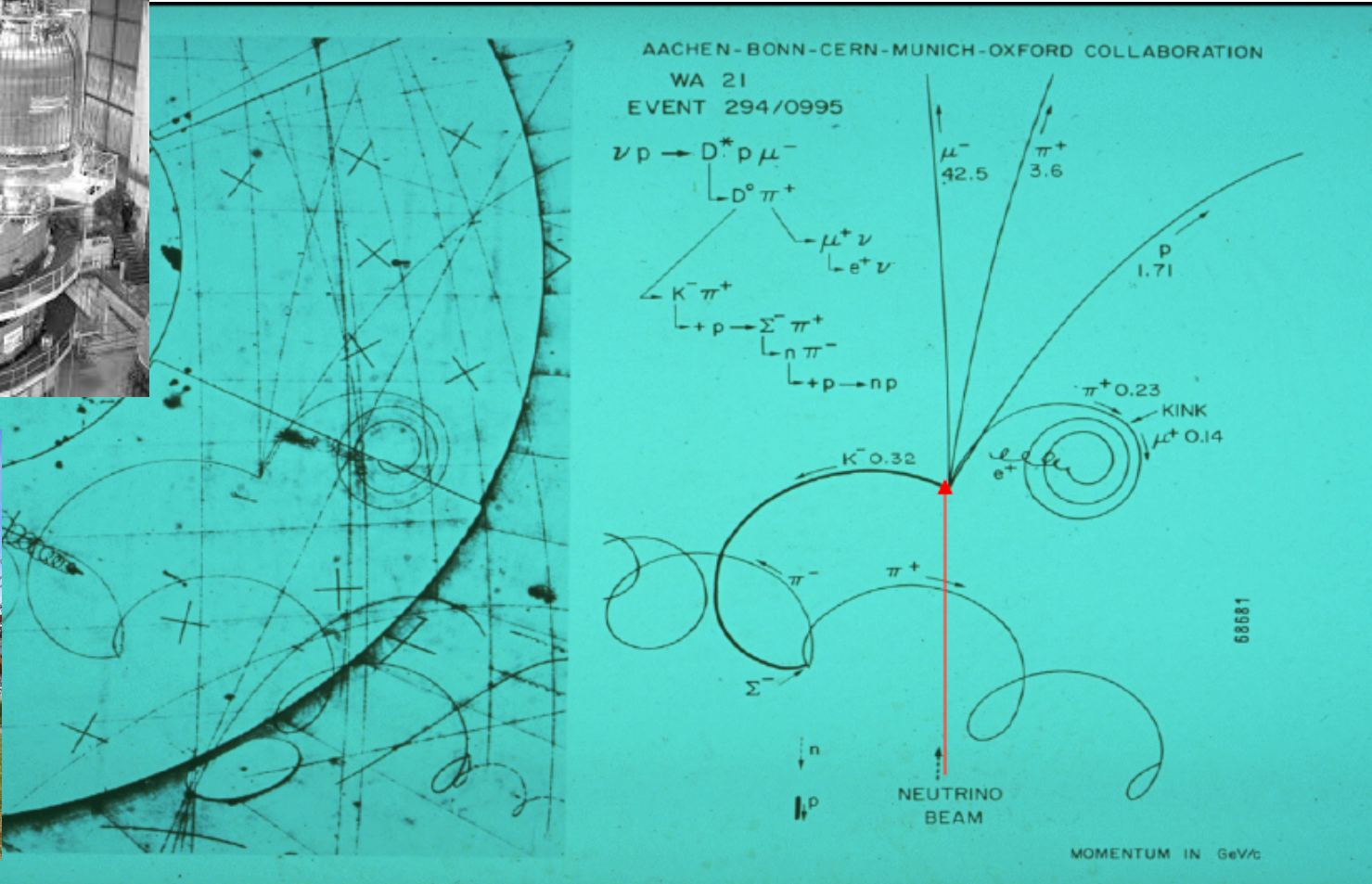
[arXiv:1212.0706 \[physics.hist-ph\]](https://arxiv.org/abs/1212.0706)



[V.F. Hess, Nobel Preis 1936](#)

Blasenkammer

Prinzip: Flüssigkeit (z.B. H₂) im Unterdruck beginnt an Verunreinigungen und Ionisationskeimen zu sieden. Diese Bläschen werden fotografiert.



Neutrinoereignis in der Big European Bubble Chamber (BEBC), CERN Photo

Moderne Teilchendetektoren

Teilchennachweis

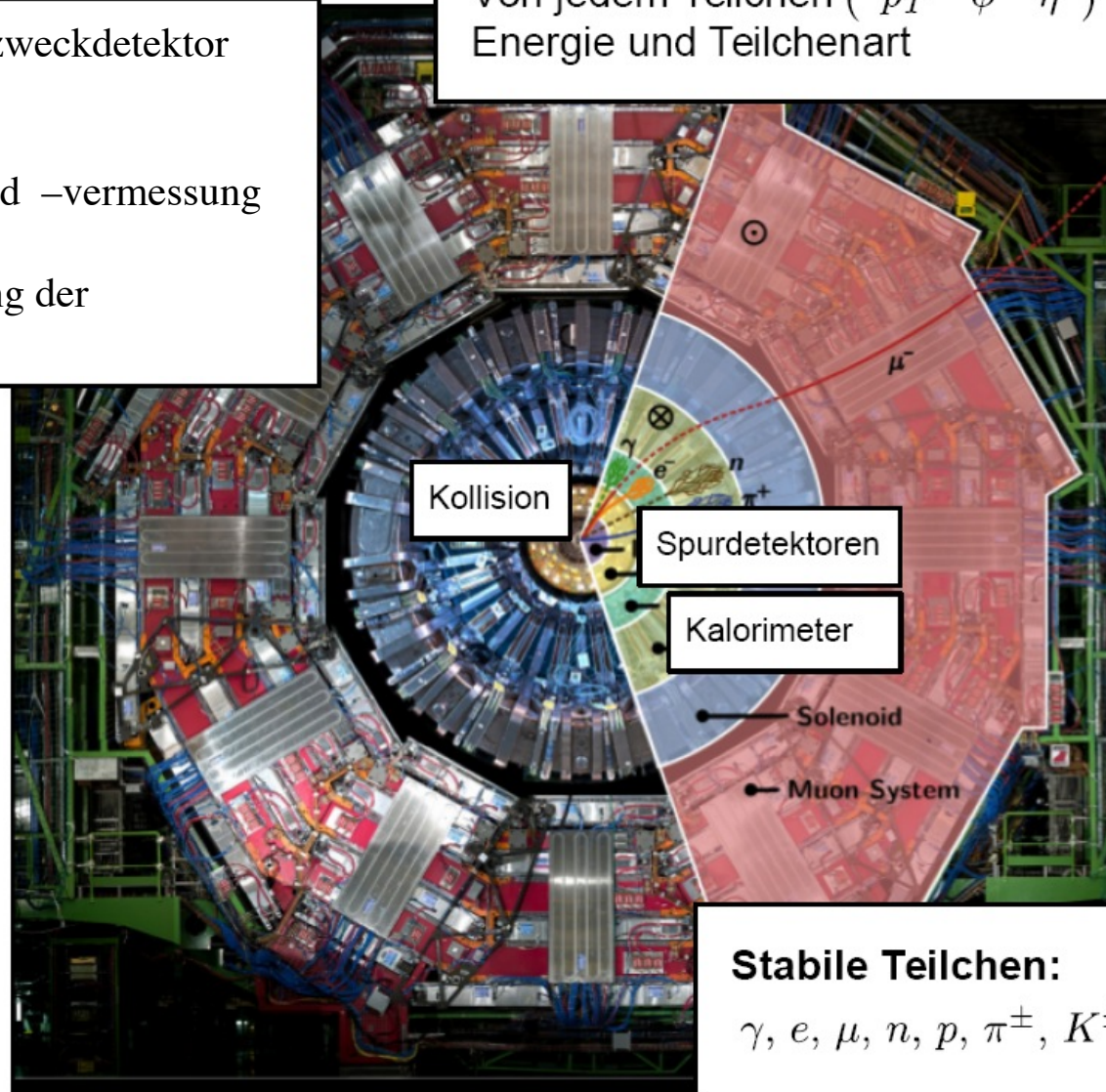
Illustration an einem Vielzweckdetektor der Teilchenphysik

Teilchenidentifizierung und -vermessung

Minimum an Beeinflussung der Teilchenbahnen

Was wir wissen wollen:

Von jedem Teilchen (p_T ϕ η)
Energie und Teilchenart



Kollision

Spurdetektoren

Kalorimeter

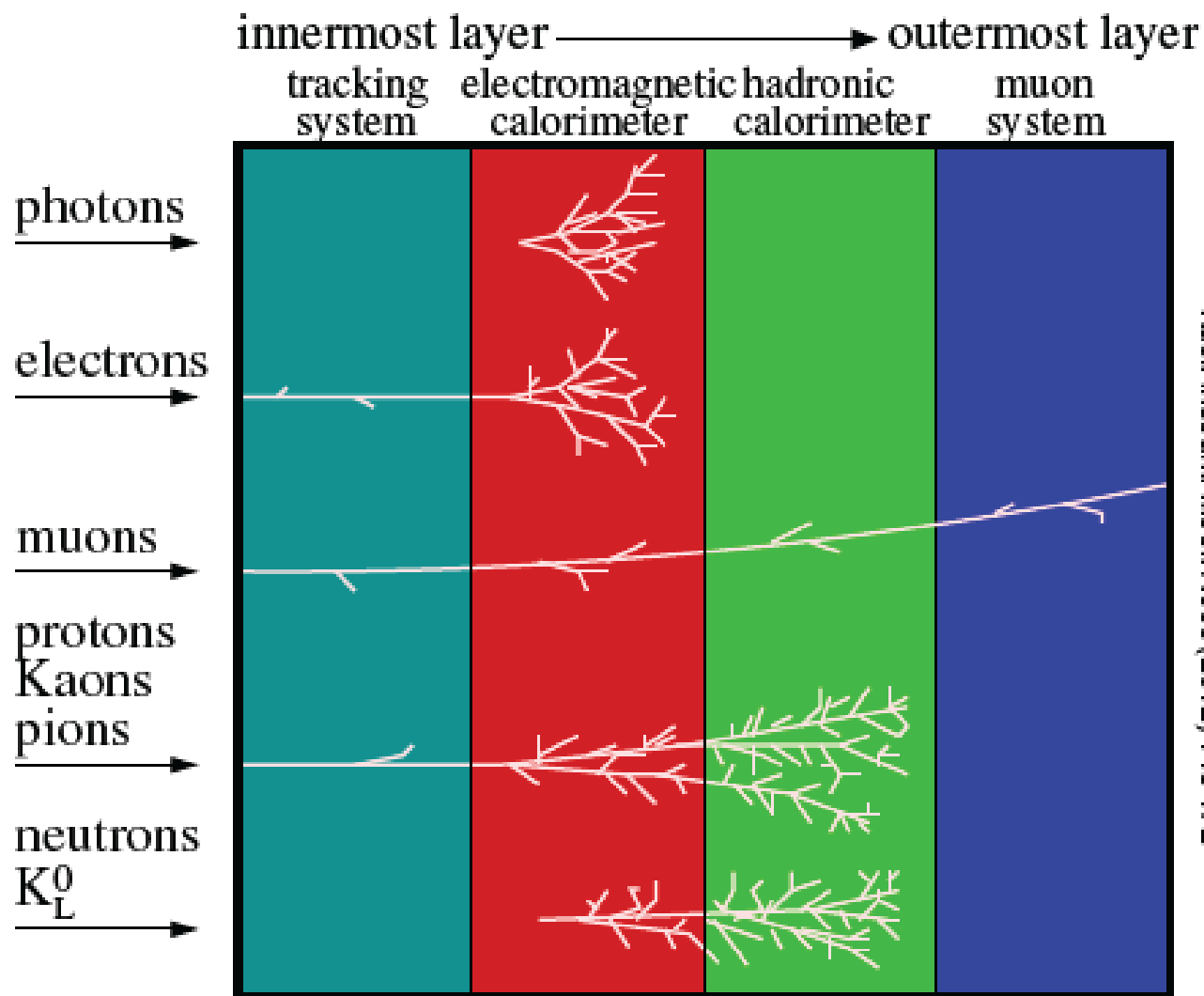
Solenoid

Muon System

Stabile Teilchen:

$\gamma, e, \mu, n, p, \pi^\pm, K^\pm$

Nachweismethoden für Teilchen



C. Lippmann – 2003

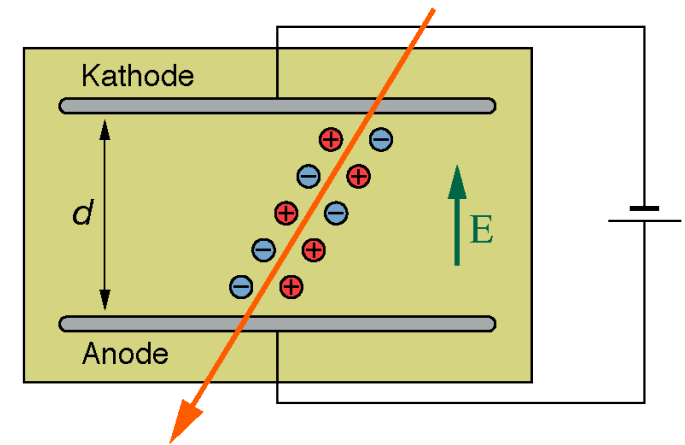
momentum,
direction, (type)

energy,
(direction, type)

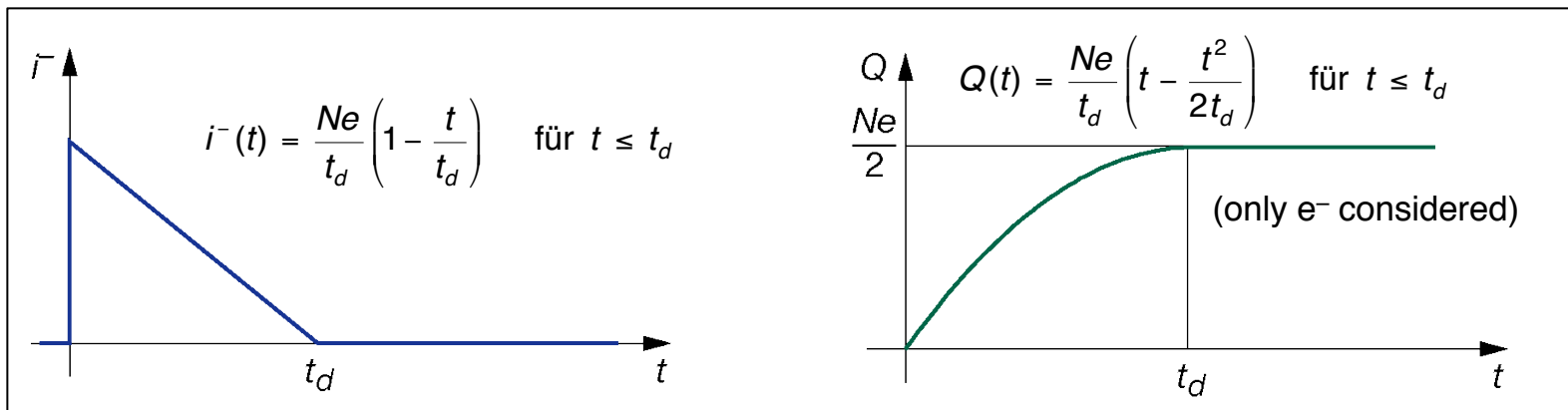
type, momentum,
direction

1. Gasgefüllte Spurdetektoren

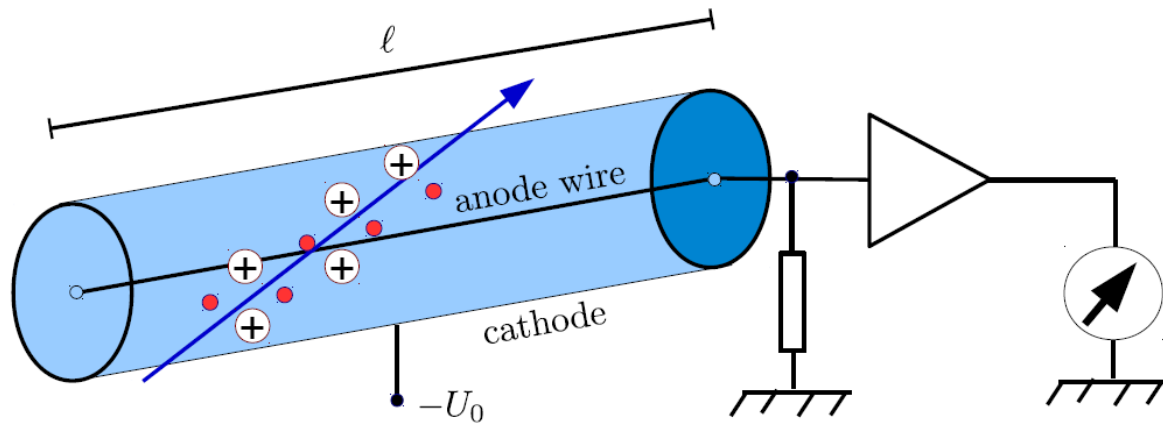
Bewegung der Ionisations-Elektronen und -Ionen in einem elektrischen Feld induziert el. Signal. Das entspricht der Zahl der ionierten Ladungen und ist sehr klein.



Zeitverlauf des Stroms und der Ladung im Kondensator durch Elektrondrift



Elektrisches Feld im Zylinderkondensator



$$E(r) = \frac{1}{r} \frac{U_0}{\ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})} \quad \Delta U^- = -\frac{Ne}{C} \frac{\ln((v_D^- \cdot \Delta t^-)/r_{\text{inner}})}{\ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})}$$

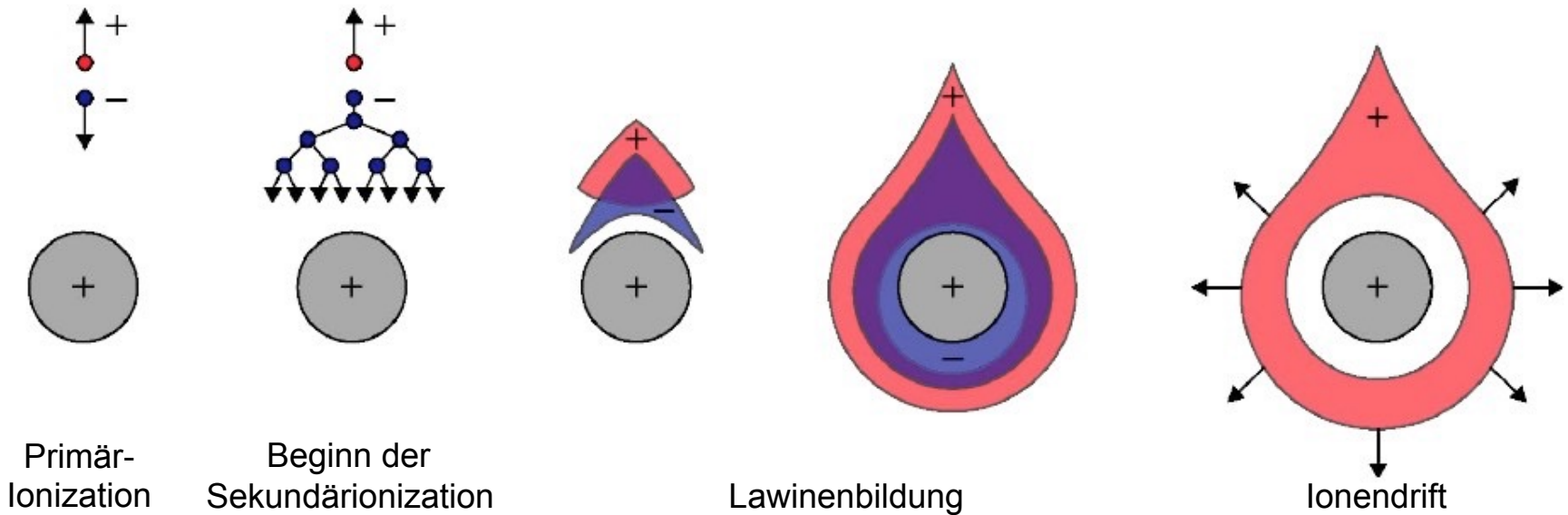
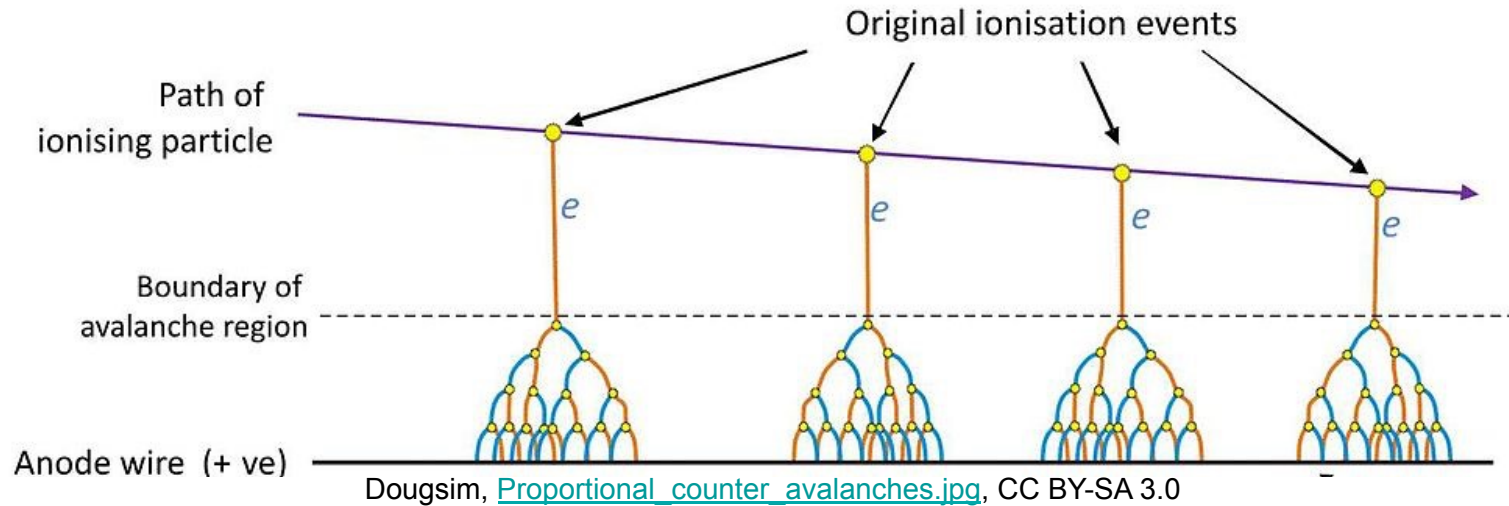
$$\Delta U^+ = -\frac{Ne}{C} \frac{\ln(r_{\text{outer}}/(v_D^+ \cdot \Delta t^+))}{\ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})}$$

$$2\pi r \ell E(r) = \int_{\partial V} \vec{E}(r) \, df = \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E}(r) \, dV = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$E(r) = \frac{Q}{2\pi \epsilon_0 r \ell} = \frac{1}{r} \frac{U_0}{\ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})}$$

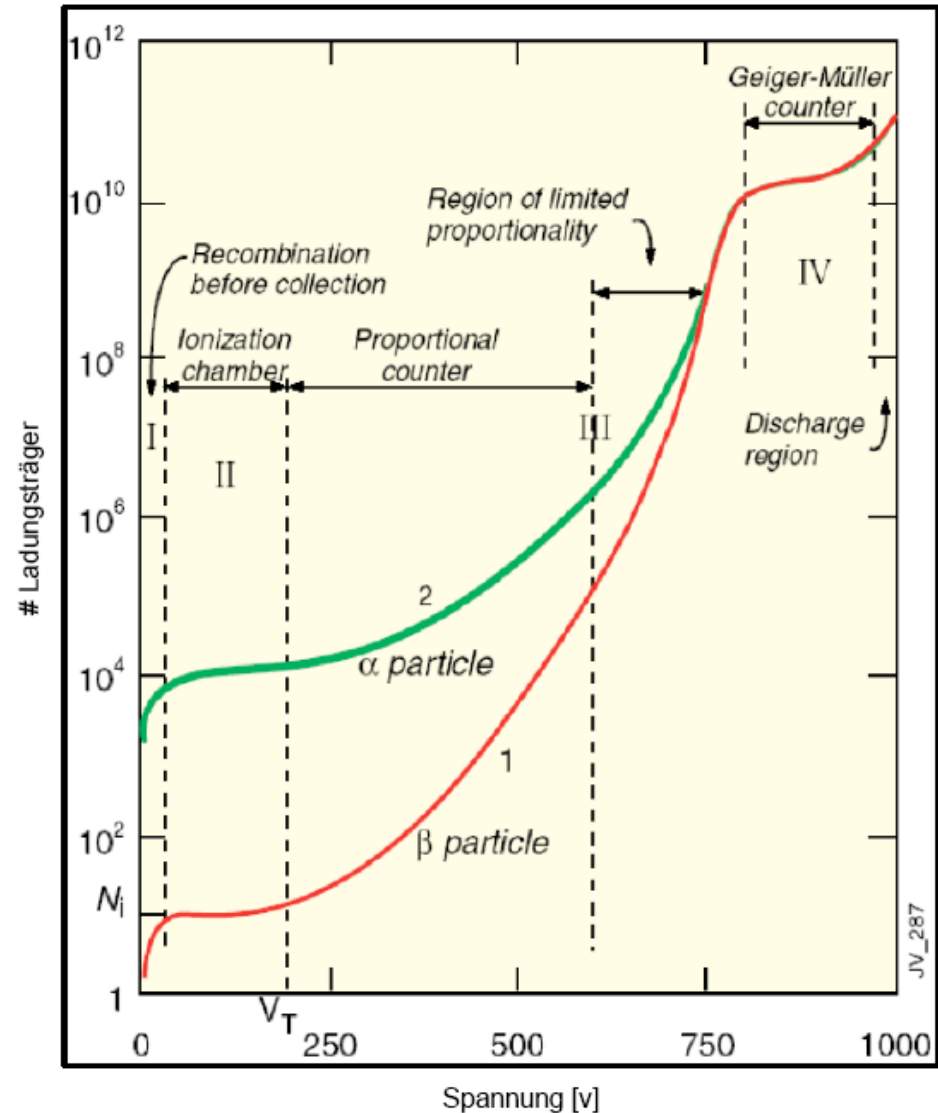
$$U_0 = \int_{r_{\text{inner}}}^{r_{\text{outer}}} E(r) \, dr = \frac{Q}{\pi \epsilon_0 \ell} \ln(r_{\text{outer}}/r_{\text{inner}})$$

Ladungsverstärkung durch zylinderförmige Elektroden



Betriebsmoden

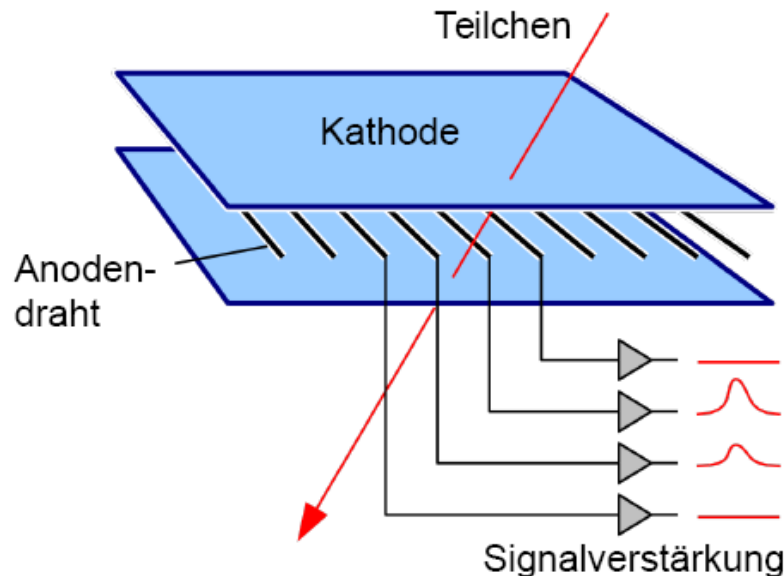
- **Proportionalkammer:**
 - Betrieb in Proportionalzählbereich
 - Anzahl der Elektron-Ionen Paare proportional zu Primärionisation
- **Geiger-Müller-Zählrohr** (1908 Geiger, 1928 Müller):
 - Betrieb im Plateaubereich
 - Anzahl der Elektron-Ionen Paare unabhängig von Primärionisation



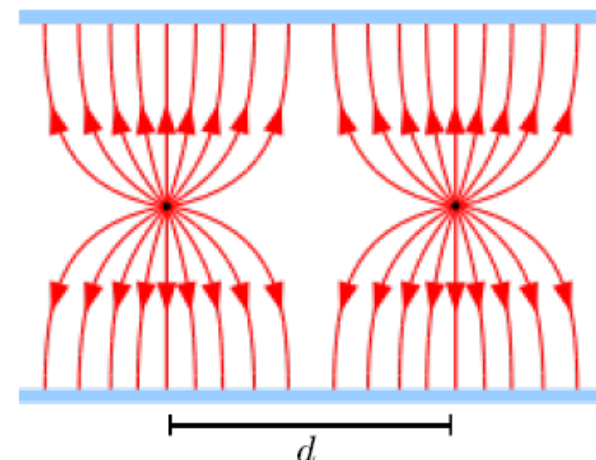
Vieldraht-Proportionalkammer (G. Charpak 1968)



- Großflächige planare Anordnung, **viele parallele Anodendrähte** (typisch: Durchmesser $\mathcal{O}(100 \mu\text{m})$, Abstand $\mathcal{O}(\text{mm})$, Betrieb im Proportionalbereich)
- Ortsinformation: 1d durch Signal an angesprochenen Drähten
- Segmentierte Kathodenebene (z.B. Streifen senkrecht zu Anodendrähten) → Information in zweiter Dimension durch Ladungsinfluenz



Elektrisches Feld einer MWPC
(=multi-wire proportional chamber):



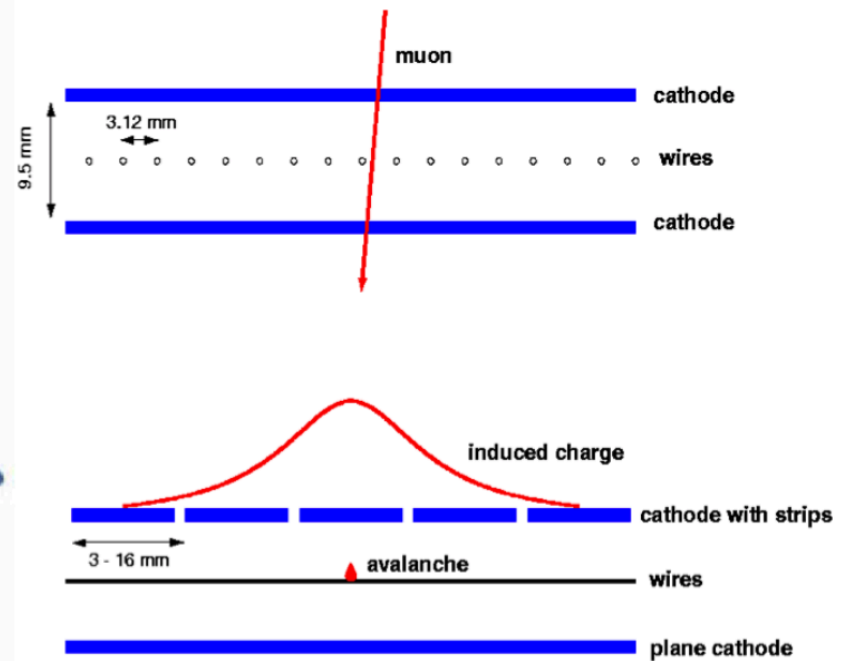
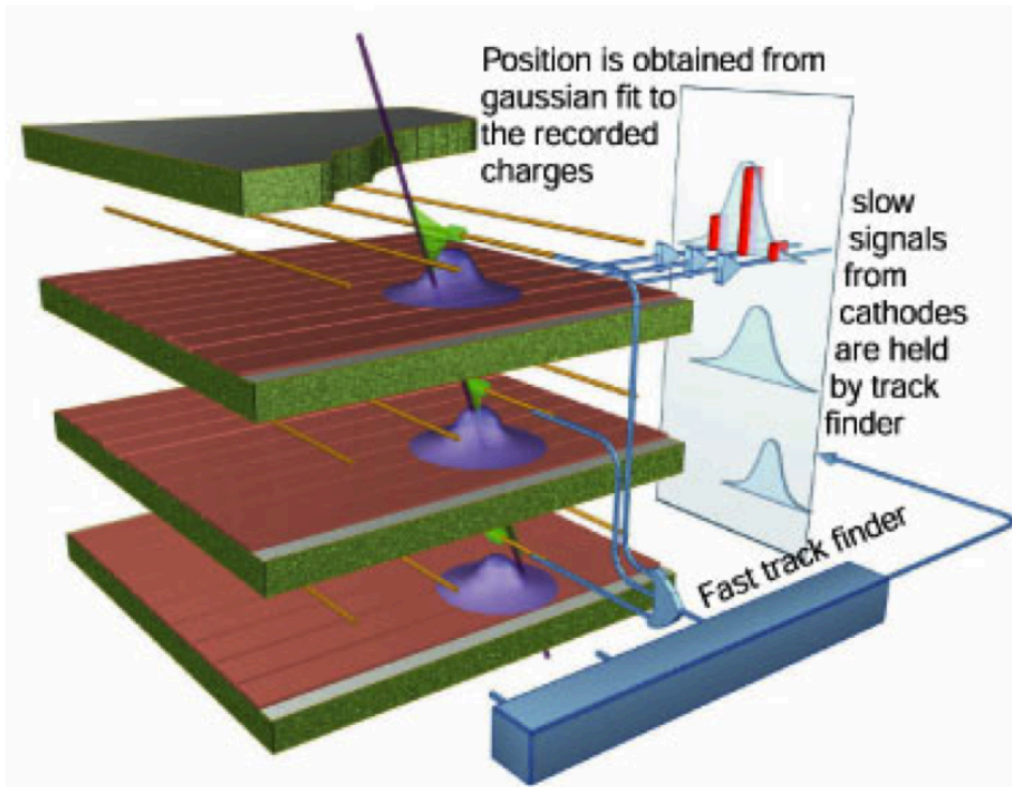
Ortsauflösung zwischen den Anodendrähten: $\sigma_d = d/\sqrt{12}$



Charpak

Sauli

Kathodenstreifenkammern



540 Kammern

CMS
10° und 20° CSC
Kammern (2nd Station)

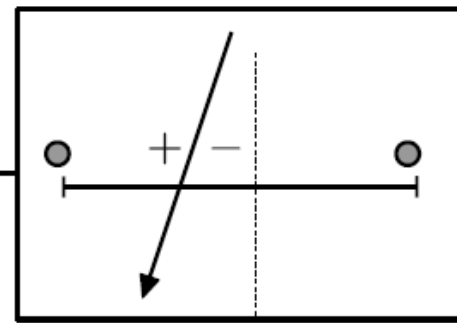


Driftkammer (Walenta, Heinze, Schürlein, 1971)

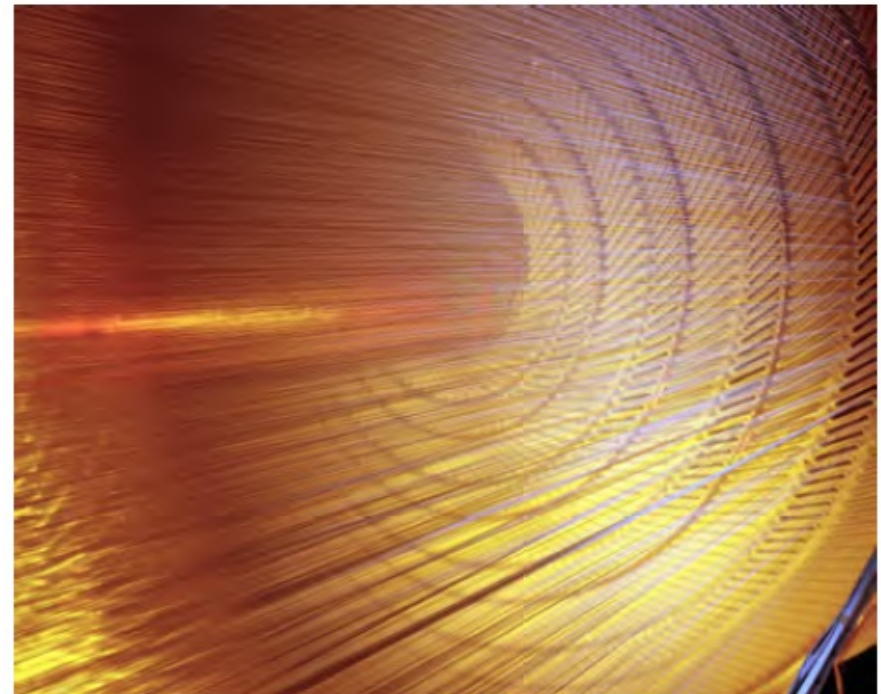
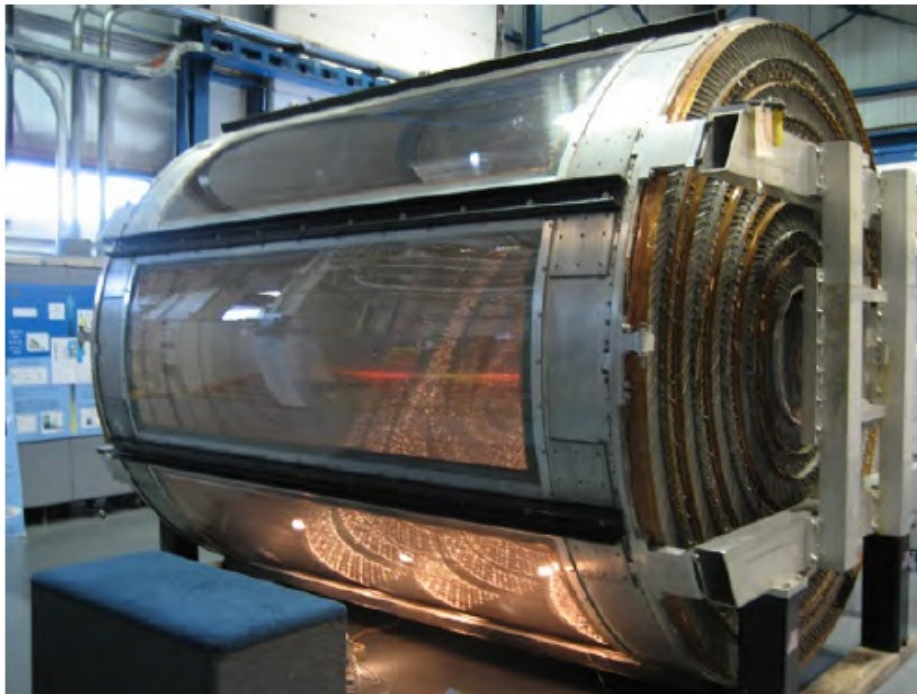
- Ortsauflösung der MWPC limitiert durch Drahtabstand
- Verbesserung durch Verwendung von **Driftzeitinformation**

$$x' = x_0 + \frac{e}{2m_2} \vec{E}(\vec{r}) \Delta t$$

$\Delta t = t' - t_0$: Driftzeit Elektronen
zu Anodendraht

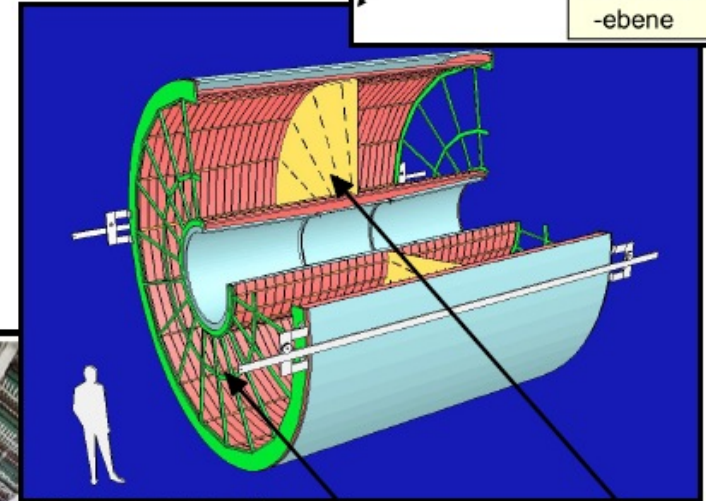
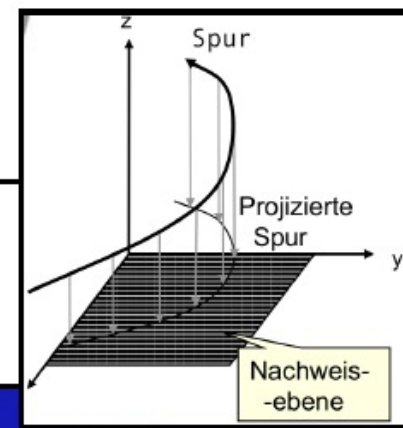


CDF Driftkammer



Zeitprojektionskammer (D. Nygren, 1974)

- Drift der Ladungsträger in homogenem E-Feld (und hier auch B-Feld), segmentierte Auslese in Endkappen als Anoden (z.B. MWPC)
- Rekonstruktion der Spur in 3d:
 - x, y : aus Projektion auf Anode
 - z : aus Driftzeit der Ladungsträger zu den Endkappen

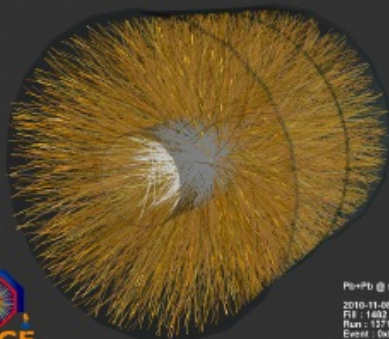


Kathodenplatte auf Hochspannung

Segmentierte Auslese auf Anodenseite



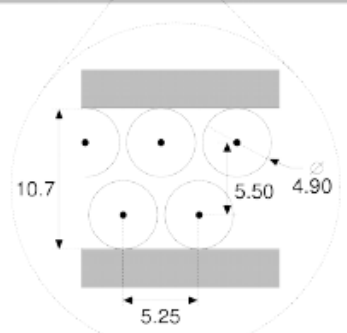
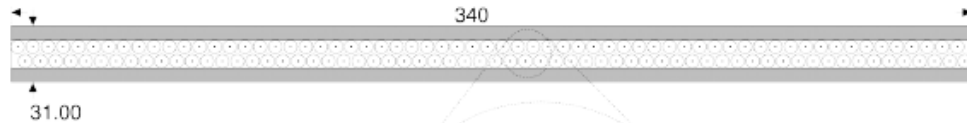
Time Projection Chamber (TPC) des ALICE Experiments



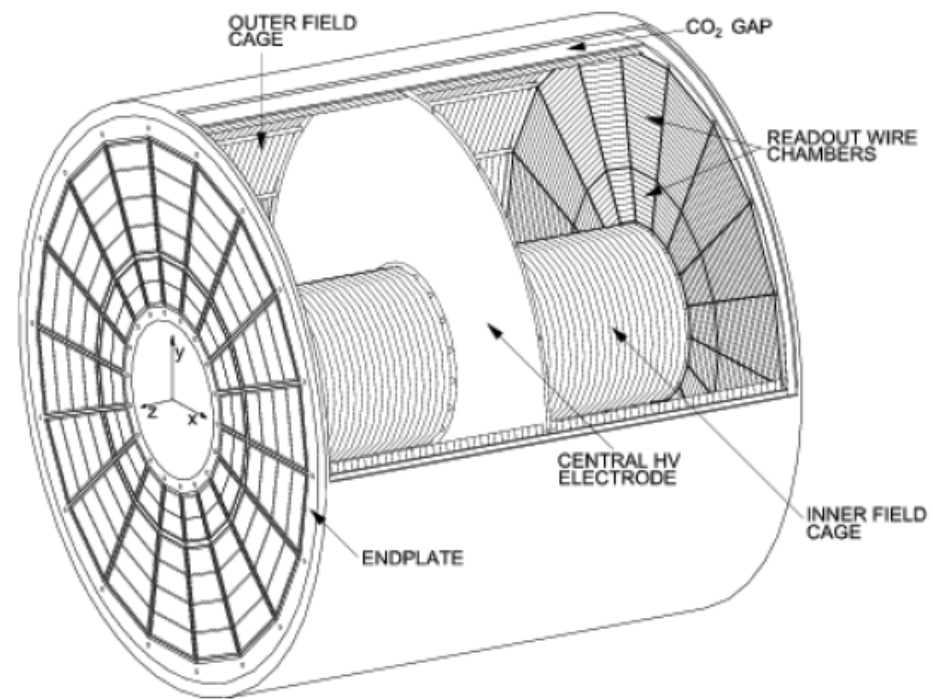
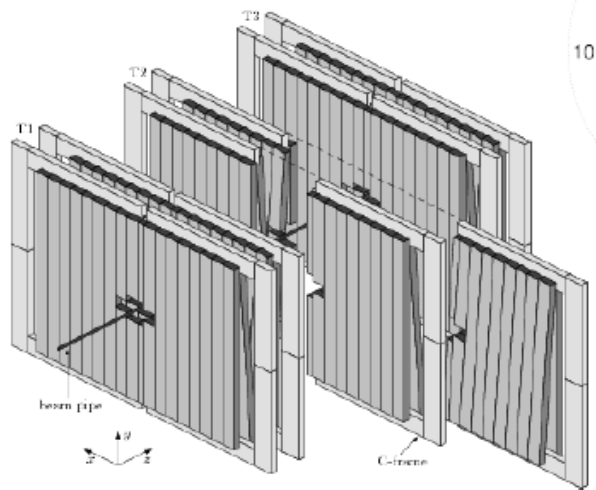
Pln/Pb @ sqrt(s) = 2.76 ATeV
2010-11-08 11:30:46
Flt : 1492
Run : 137124
Event : 0x0000000000000000

Gasdetektoren am LHC

Straw tube detectors for OTR of LHCb.

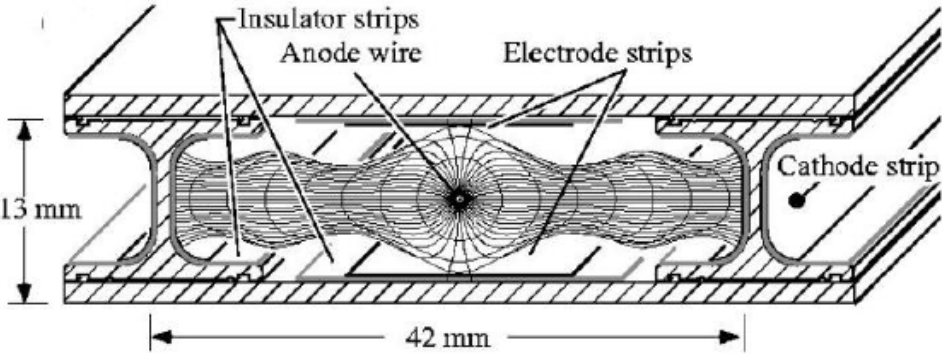


Distances in mm.



Time projection chamber as in use at ALICE:

Drift chamber for muon system of CMS.



Gasgefüllte Spurdetektoren: Pro & Con

Vorteile:

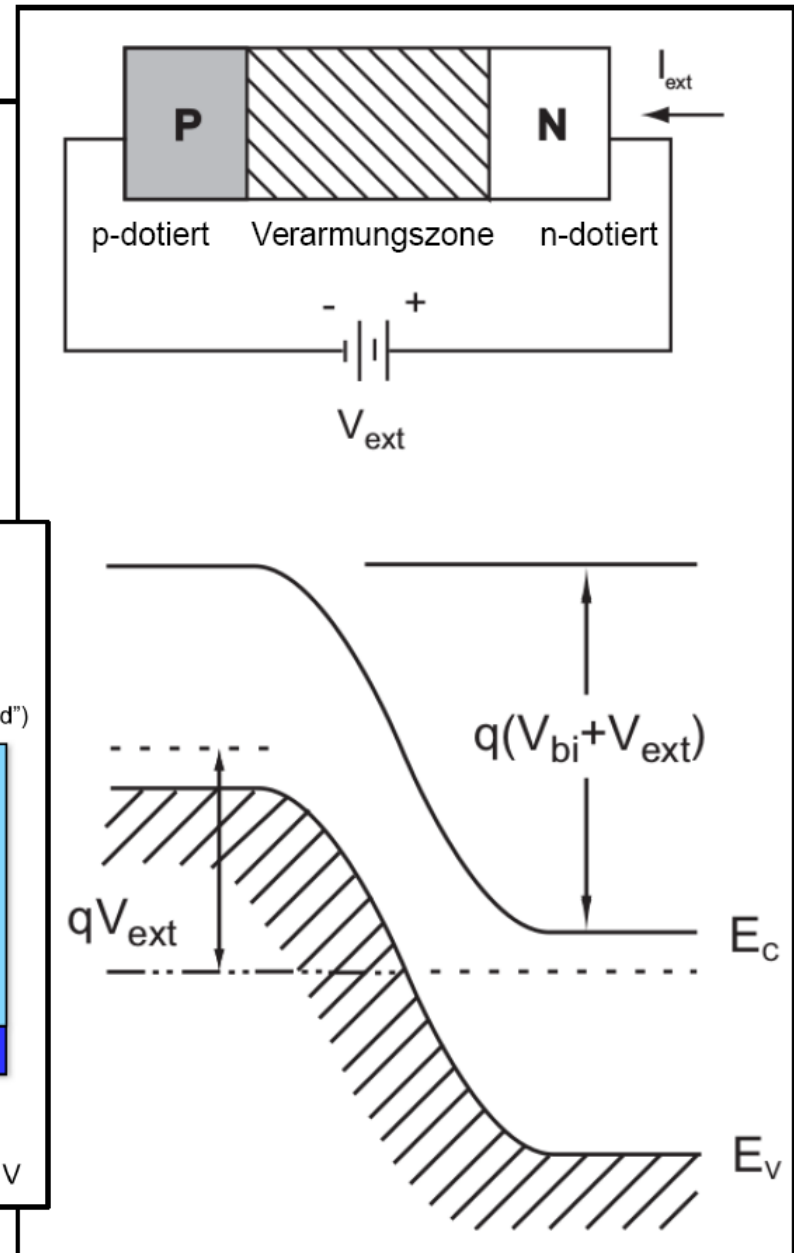
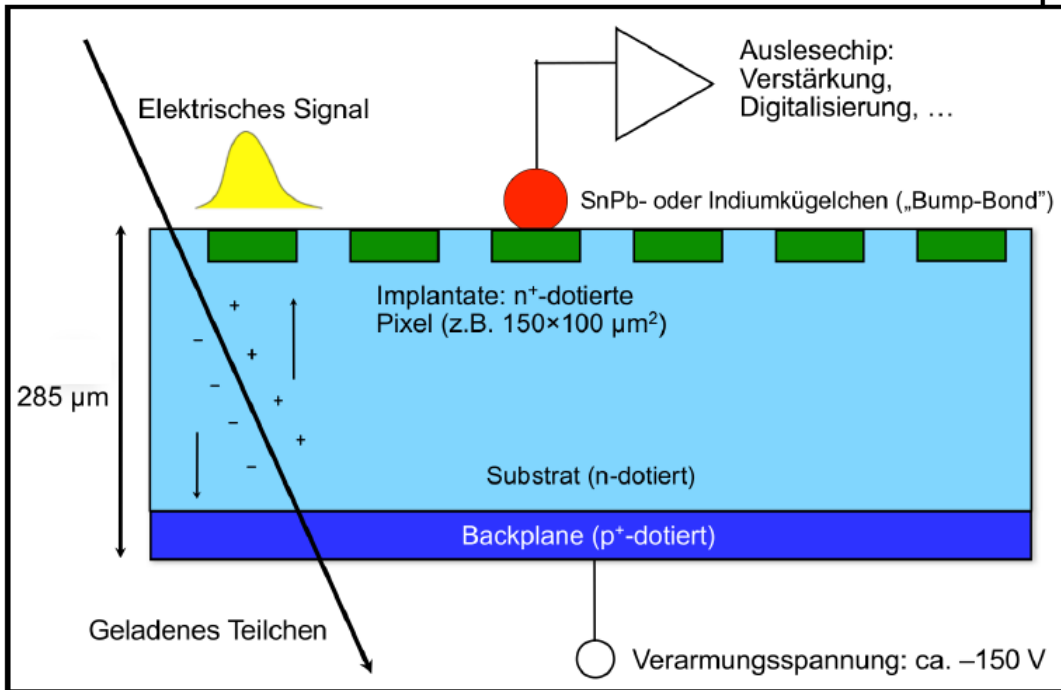
- Wenig Material ($X_0 \rightarrow$ anschließende Energiemessung, Vielfachstreuung)
- Kostengünstig und i.a. verhältnismäßig einfach herzustellen
- Elegant, z.B. 3d-Information für TPC

Probleme:

- Gasdichte des Detektors
- Überschläge (Schäden auf Anodenstruktur)
- Alterung unter radioaktiver Bestrahlung (\rightarrow sorgfältige Auswahl der Gase)
- Bei Drahtkammern: was passiert, wenn ein Draht reißt?

2. Siliziumdetektoren

- Detektionsprinzip: Halbleiterdiode in **Sperrrichtung** → starkes Feld zur Ladungstrennung
- Ortsmessung (z.B. bei LHC): 1d – Streifen, 2d – Pixel (Dimensionierung und Auslese)

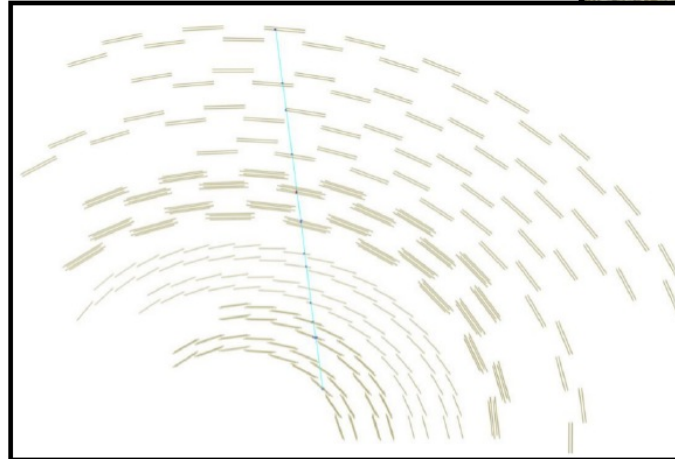
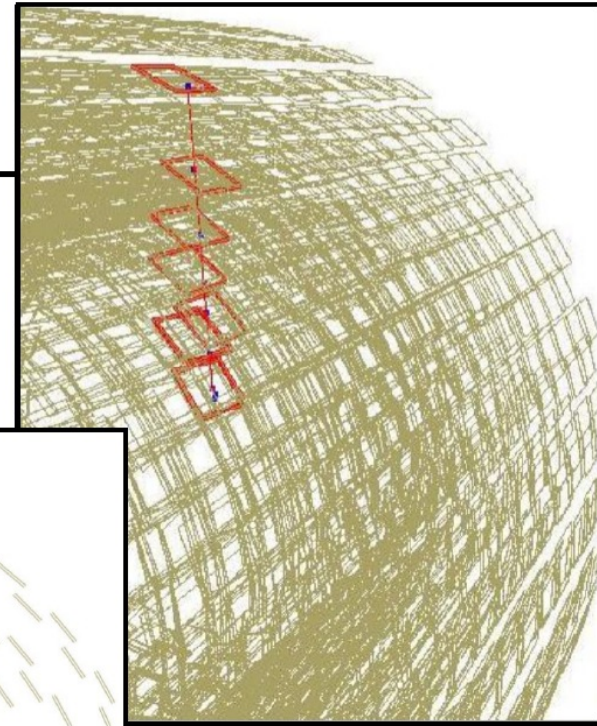


Innerer Spurdetektor von CMS

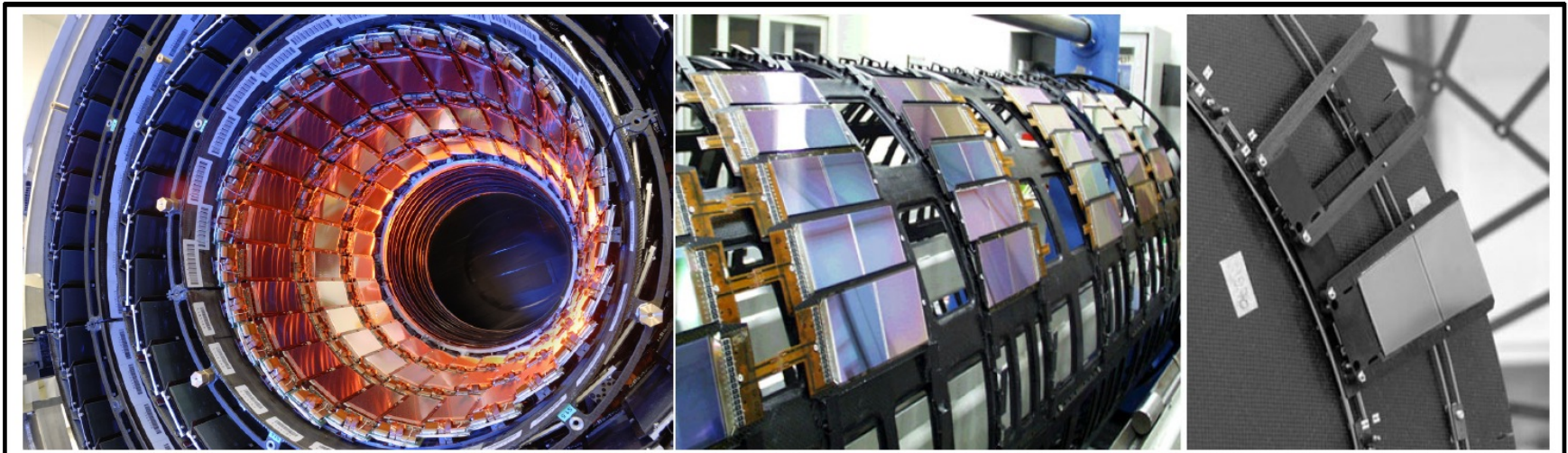
- 200 m² Siliziumdetektoren (größter Siliziumdetektor der Welt)
- Impulsaufösung für 10 GeV Spur (in 3.8 T supraleitenden Magnetfeld):

$$\Delta p/p = 0.5\%$$

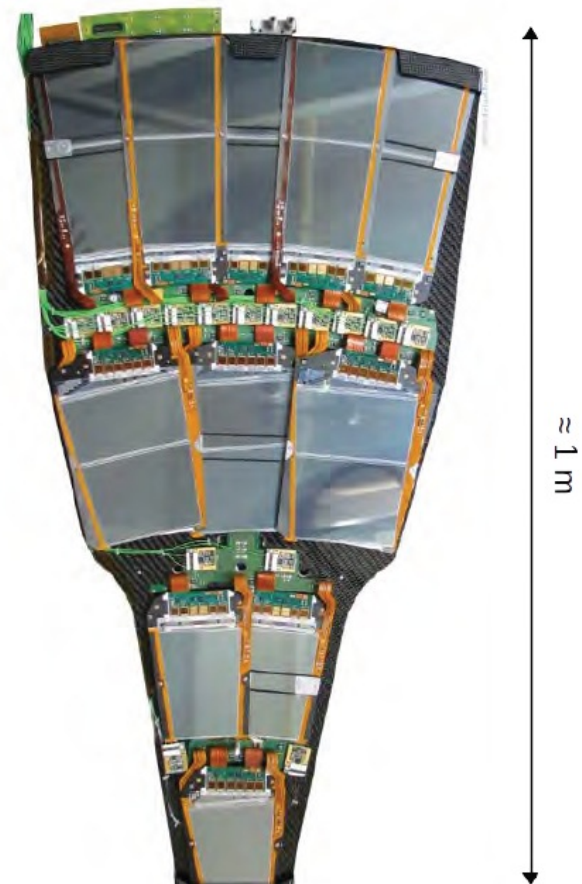
(s. Übungsblatt 3)



Impressionen des CMS Spurdetektors



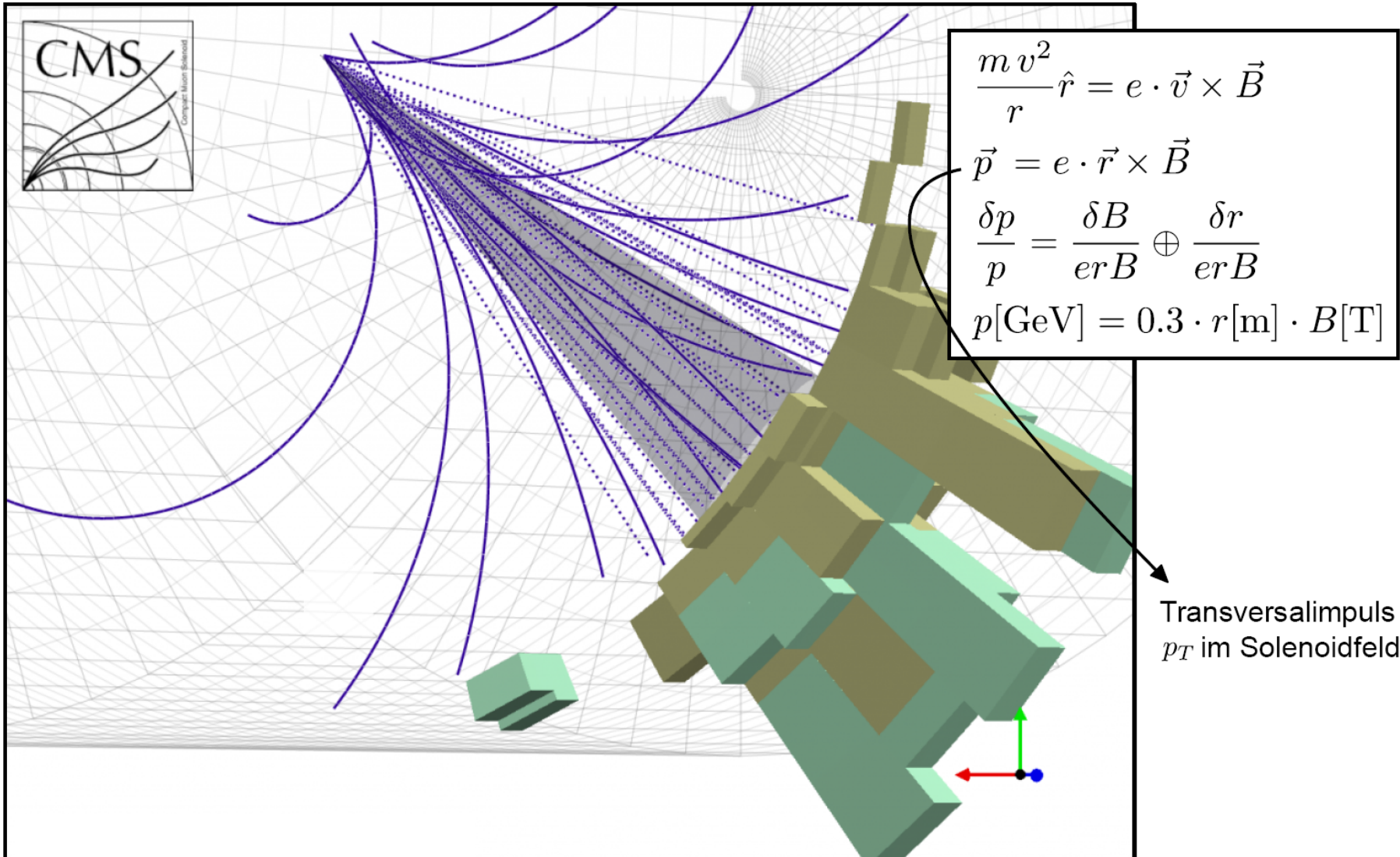
Bau der Siliziumdetektoren für CMS im ETP



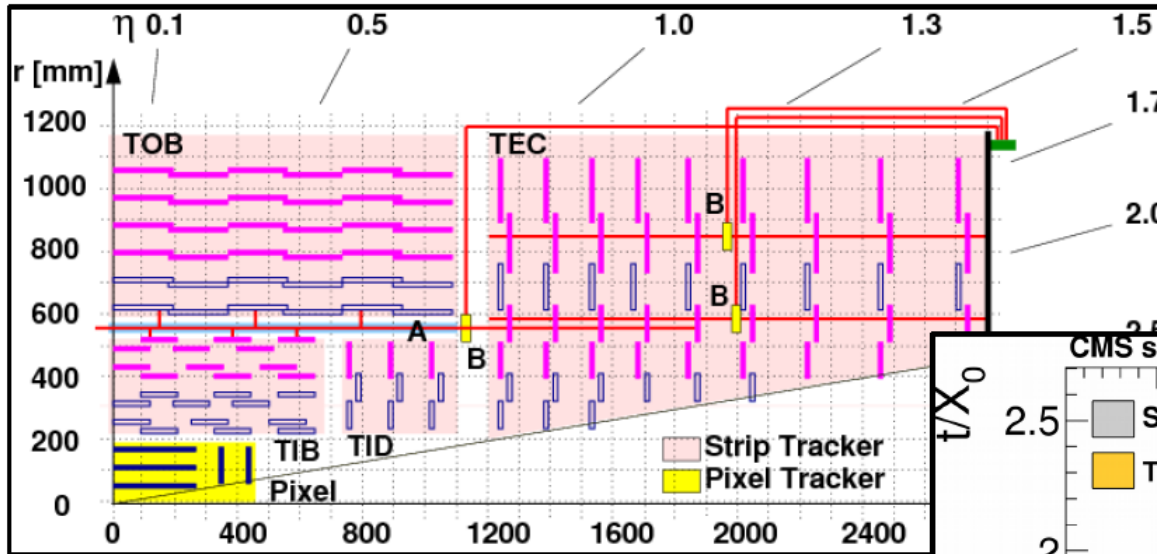
JINST 5 (2010) P06007

Impulsbestimmung aus der rekonstruierten Spur

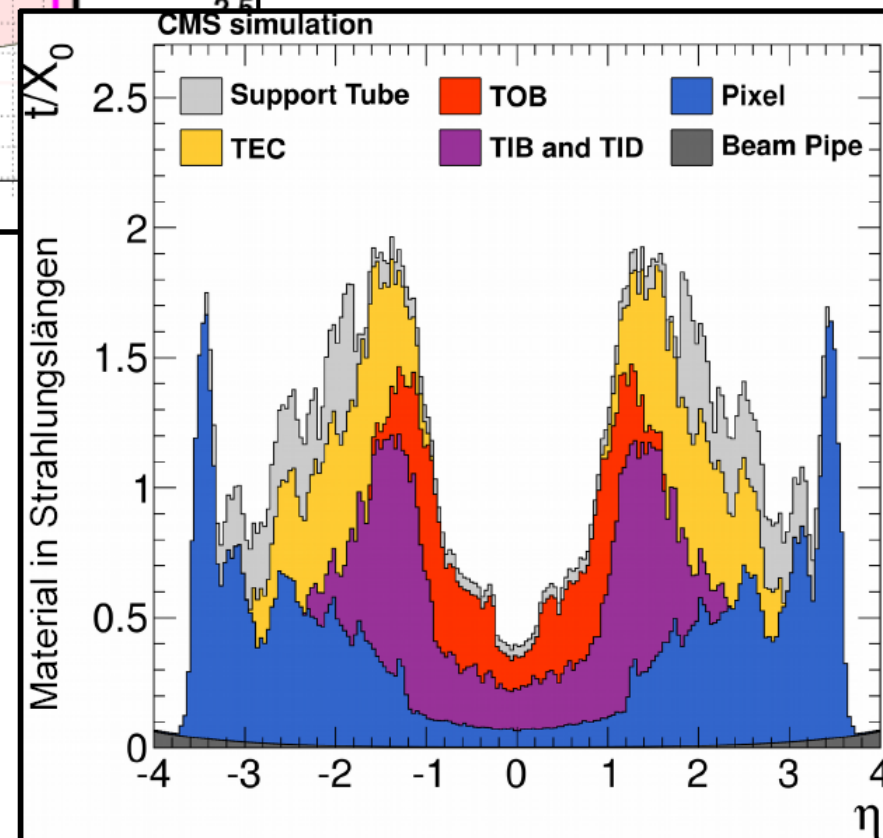
- Spurdetektoren in Magnetfeldern erlauben Impulsbestimmung: üblicherweise Solenoid-, manchmal auch Toroidfelder



Frage der Beeinflussung – neu gestellt



- Beampipe im Wechselwirkungspunkt aus Beryllium, wenige hundert μm dick.
- Support Material: Kühlleitungen, Hochspannung, Ausleseelektronik, ...

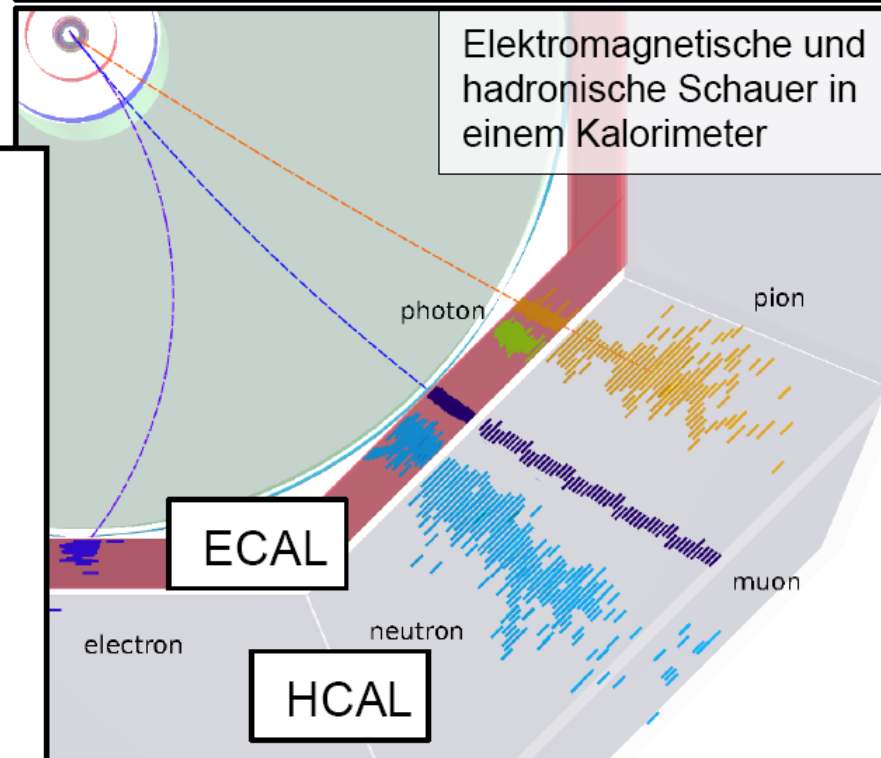
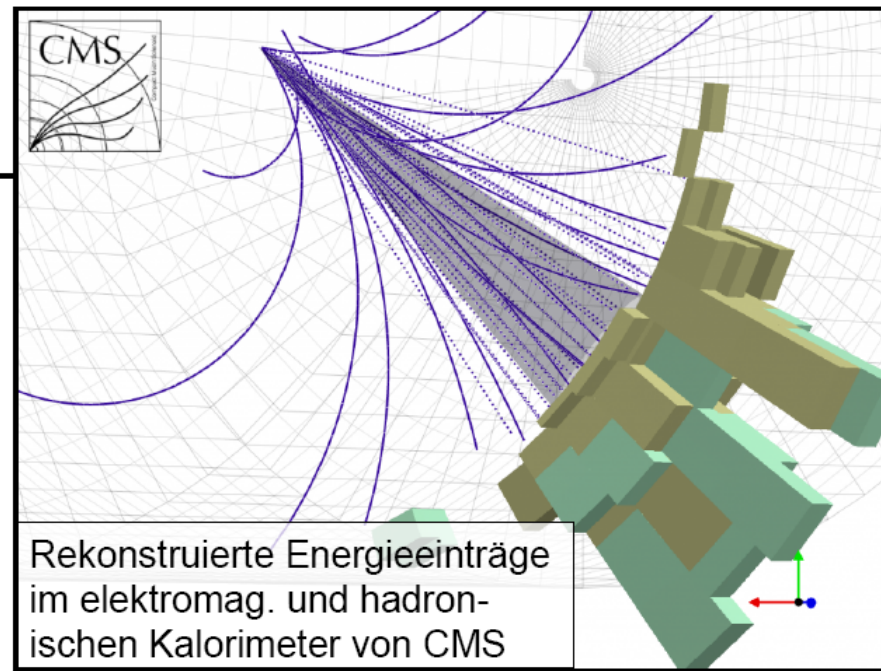


3. Kalorimeter

- Schließt sich i.a. an Spurdetektor an
- **Energiemessung** aller erzeugten (und nachweisbaren) Teilchen:
 - Energieverlust durch Ionisation
 - Sammlung von Szintillationslicht
 - Elektromagnetische und hadronische Schauer

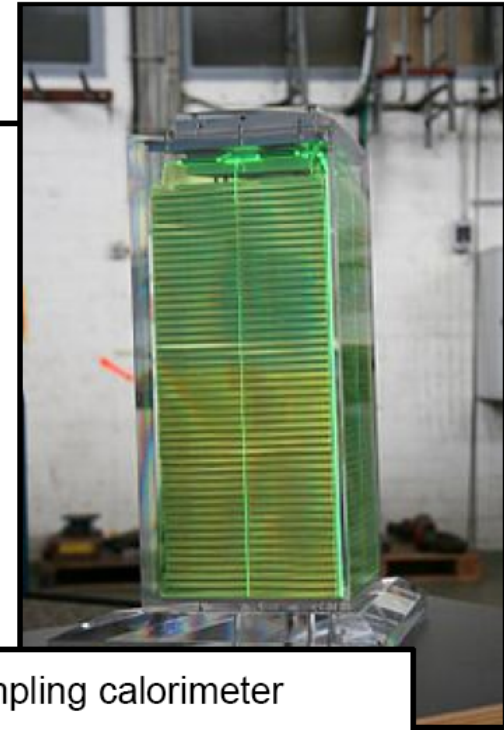
Wichtigste Eigenschaften:

- Hohe Energieauflösung
- Dick genug, um das Teilchen vollständig im aktiven Material zu stoppen
- Linearität ($2 \cdot 10 \text{ GeV} = 20 \text{ GeV}$)
- Kompensation (\rightarrow Energiemessung gleich für Hadronen und Elektronen)

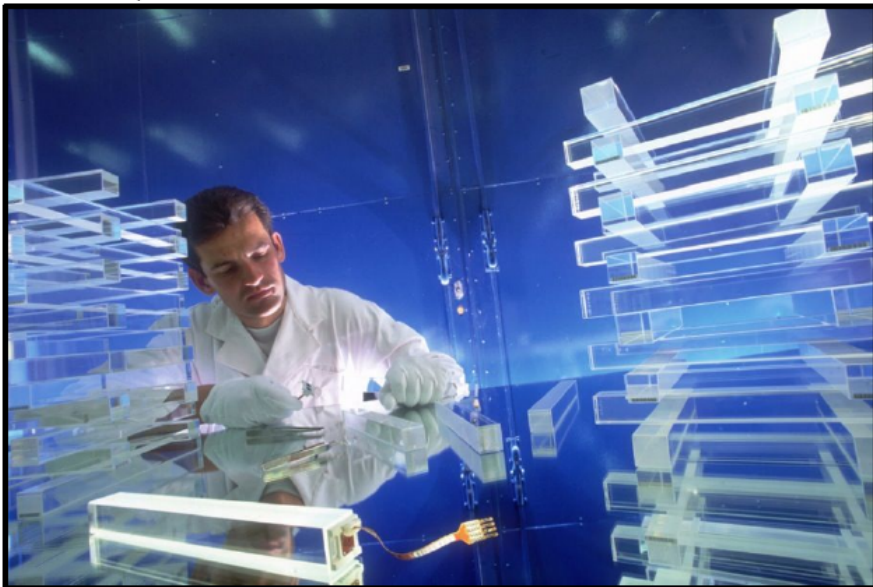


Kalorimetertypen

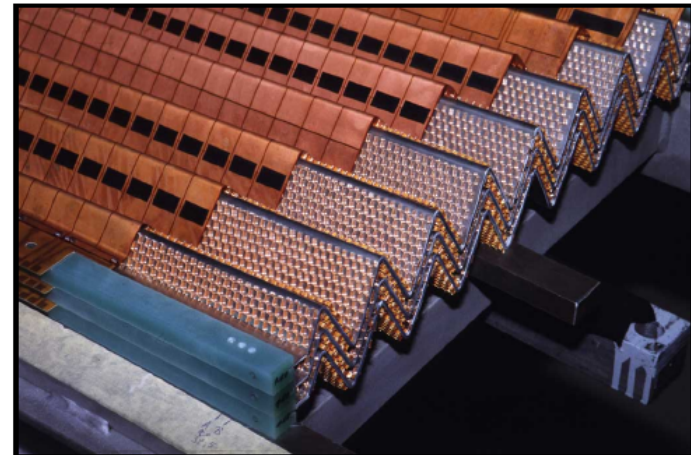
- Bessere Energieauflösung:
homogene Kalorimeter (z.B. aus Einkristallen möglichst schwerer Szintillatoren, hohe Kernladungszahl, wie z.B. bei Bleiglas, Haushaltsbeispiel NaCl)
- Bessere stopping power:
sampling calorimeter (mit dichten Absorberplatten hinterlegt)



PbWO₄ Einkristalle für CMS ECAL



ATLAS Pb-LAr sampling calorimeter
($\approx 100 e^-$'s per cm)



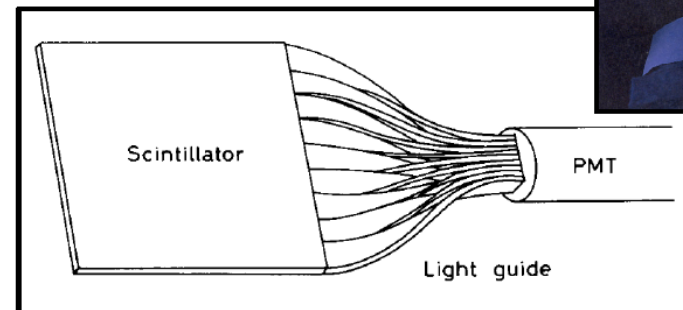
Energiemessung durch Ionisation

Kalorimeterauslese im Fall von Szintillatoren

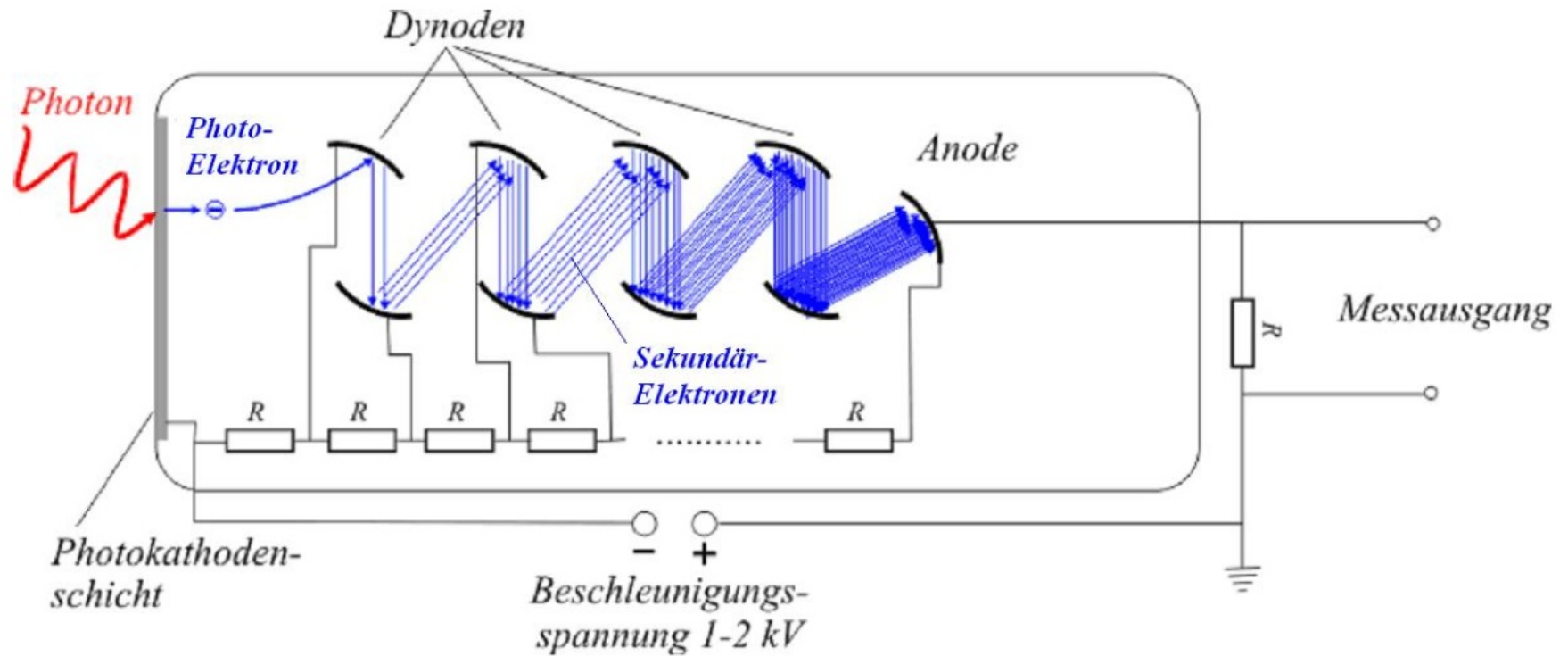
- Nutzte Anregungszustände die durch Atomgitter propagieren können und nach (möglichst kurzer) Abklingzeit Licht emittieren (→ Farbzentren)
- Typische anorganische Szintillatoren:

	ρ [g/cm ³]	λ_{max} [nm]	decay time [μ s]	N_γ /MeV
NaI	3.7	303	0.06	$8 \cdot 10^4$
CsI	4.5	565	1	$1.1 \cdot 10^4$
PbWO ₄	8.3	420	0.006	$2 \cdot 10^2$

- Weiterleitung des emittierten Lichtes durch Lichtleiter an Photomultiplier (PM)
- PM: 20% Quanteneffizienz, Signalverstärkung $\mathcal{O}(10^8)$

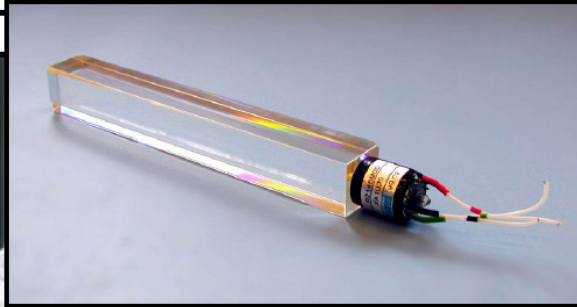


Funktion eines Photomultipliers

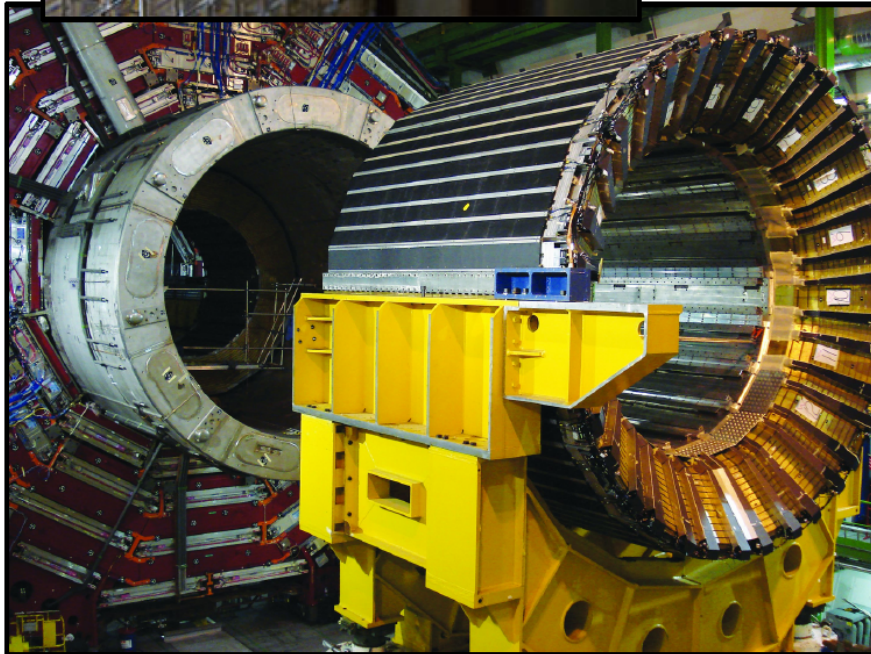
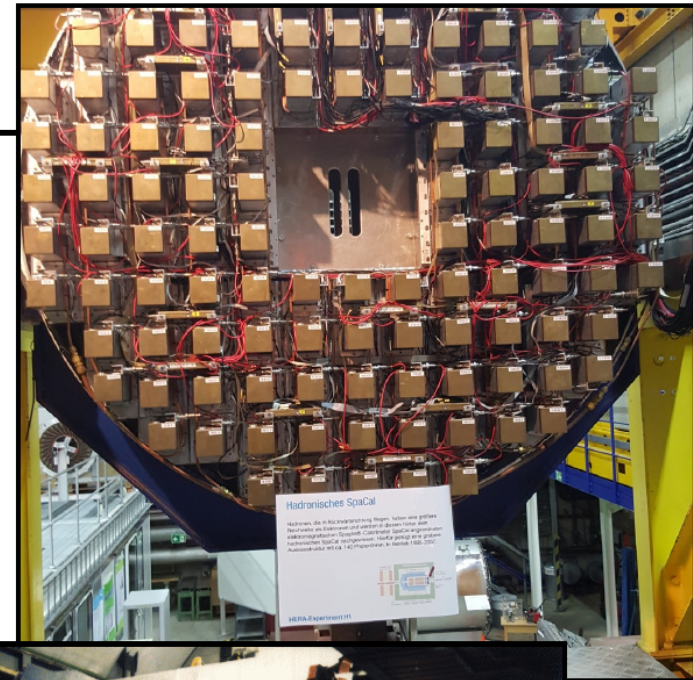


- PM: 20% Quanteneffizienz,
Signalverstärkung $\mathcal{O}(10^8)$

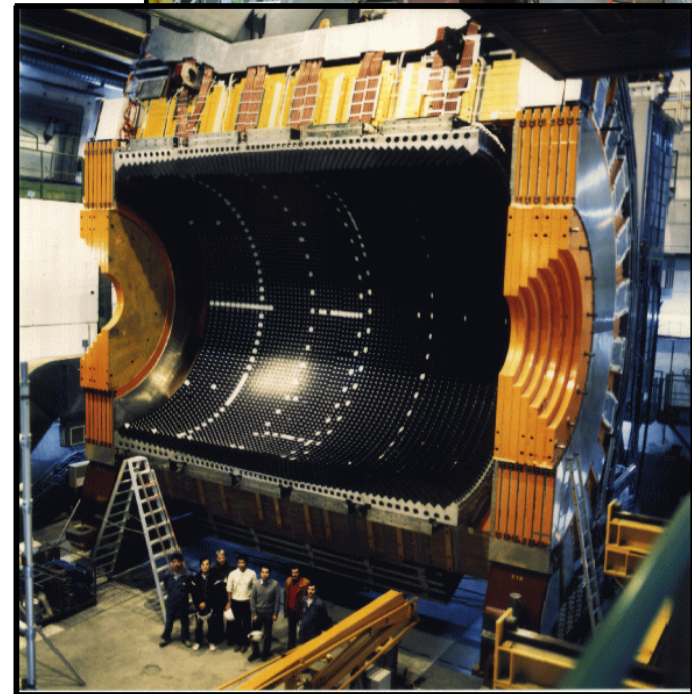
Beispiele von Kalorimetern



Bleiwolframat Einkristalle des CMS ECAL



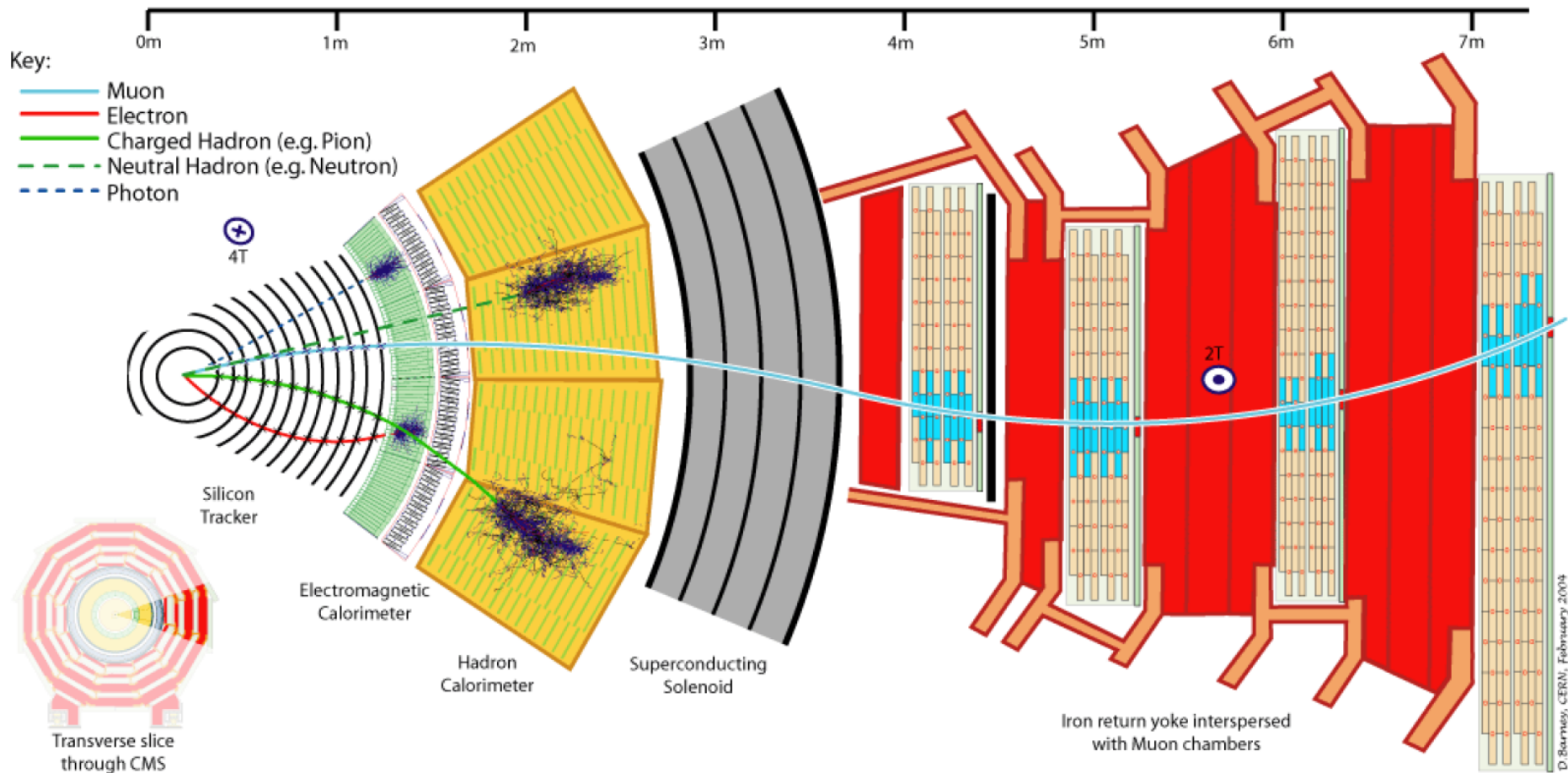
CMS HCAL brass-scintillator sampling calorimeter



ECAL von OPAL aus Pb-Glas Einkristallen

Teilchennachweis bei CMS

- Putting things together...

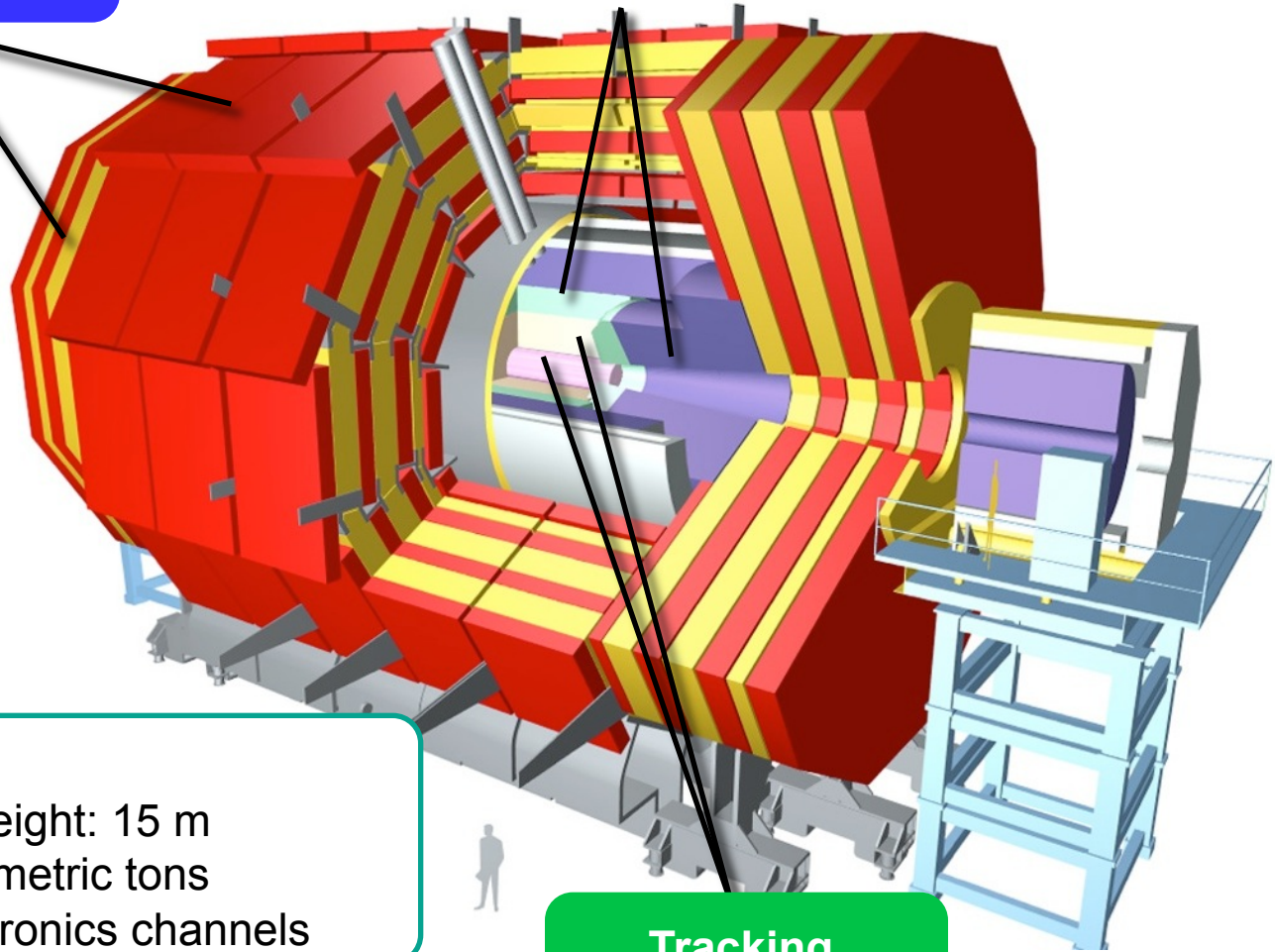


- Schlüsselanforderungen:** optimale Impuls- und Energiebestimmung, möglichst alle erzeugten Teilchen in aktivem Detektormaterial stoppen

Kapitel 2.6 Aktuelle Detektorsysteme - Experimente

Myon Detektor

Kalorimeter

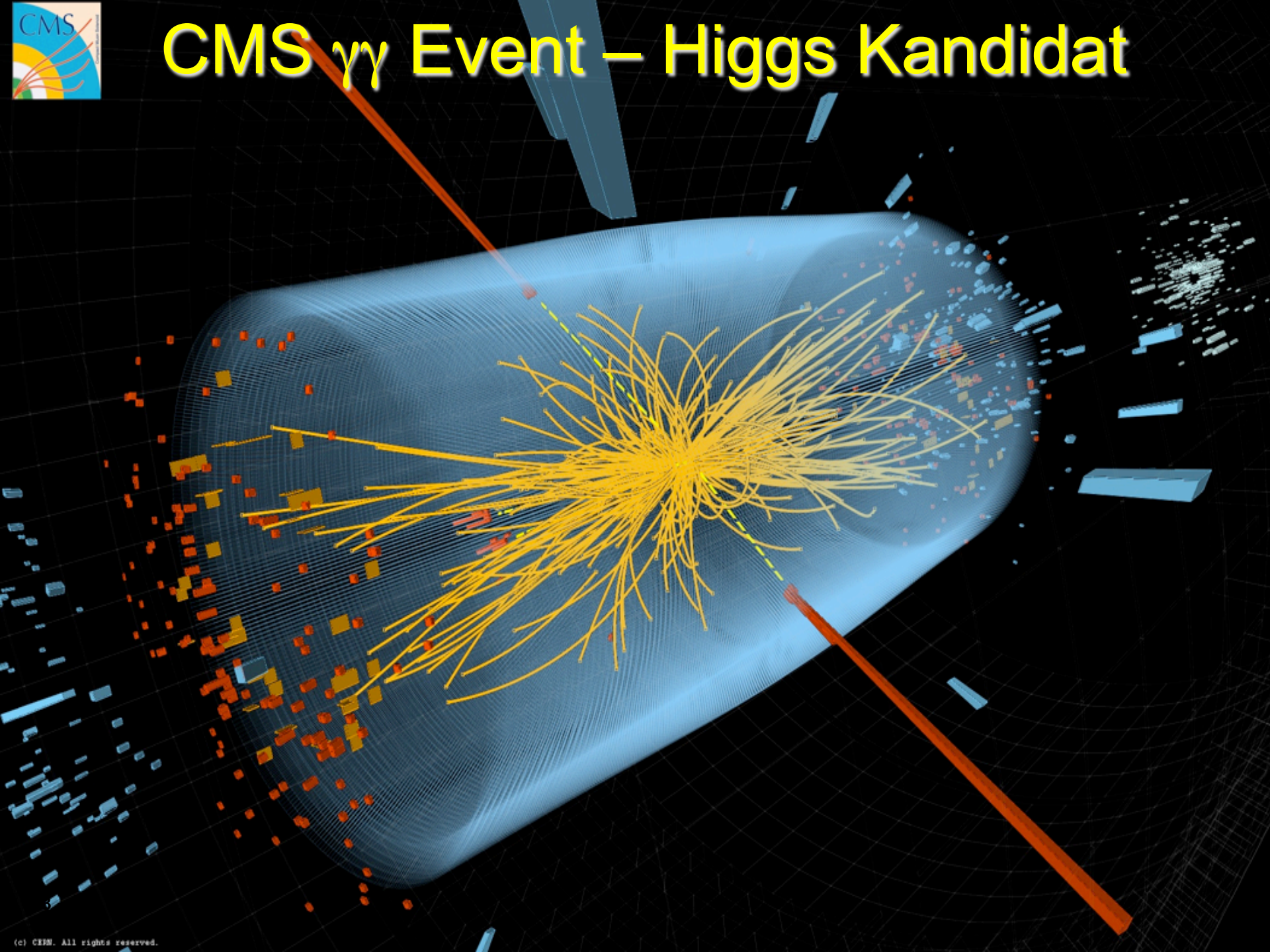


CMS facts:
⚡ Length: 21 m, height: 15 m
⚡ Weight: 14.000 metric tons
⚡ 100 million electronics channels

Tracking



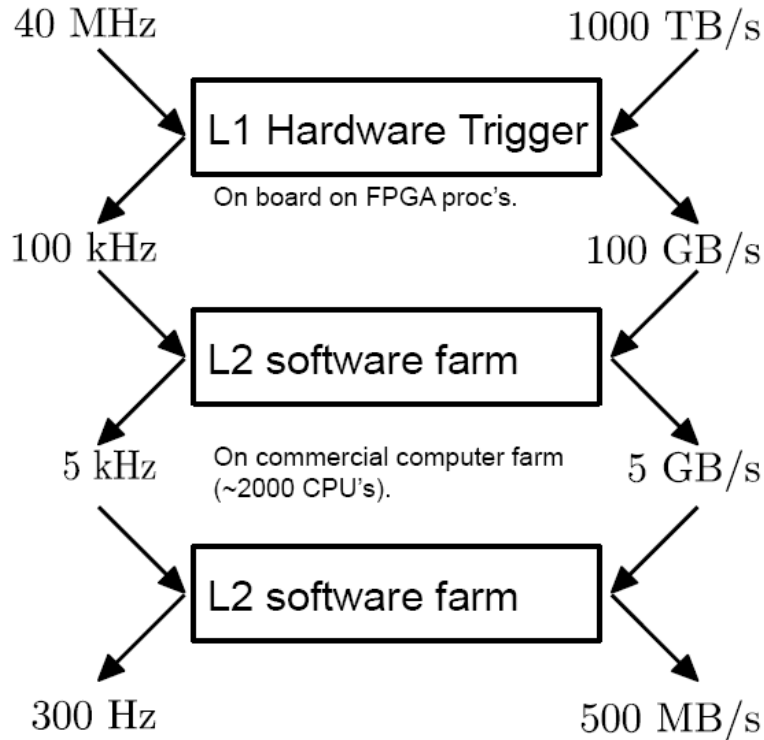
CMS $\gamma\gamma$ Event – Higgs Kandidat



Deadtime free readout

- Achieve deadtime free readout by sophisticated data acquisition.

Layered trigger system:



HLT paths with too high rate can be *prescaled* ($prescale=2 \rightarrow$ only any second event recorded).

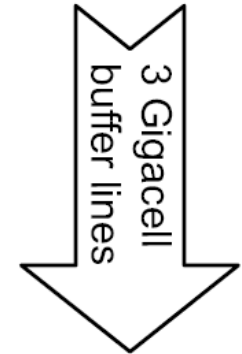
Requirements (e.g. CMS):

- ~100 million detector cells.
 - 40 MHz event rate.
 - 10 – 12 bits/cell.
- \rightarrow ~1000 TByte/s raw data (most of this data is not of interest).

- App. high p_T electron.
- App. high p_T muon
- Decisions within $\mathcal{O}(ns)$.
- Regional readout of tracker and CALO e.g. to check isolation.
- Decisions within $\mathcal{O}(\mu s)$.
- Nearly full event reconstruction.
- Decisions within $\mathcal{O}(ms)$.

Detector granularity available for trigger readout.

Each decision buys the system more time to take a closer look.



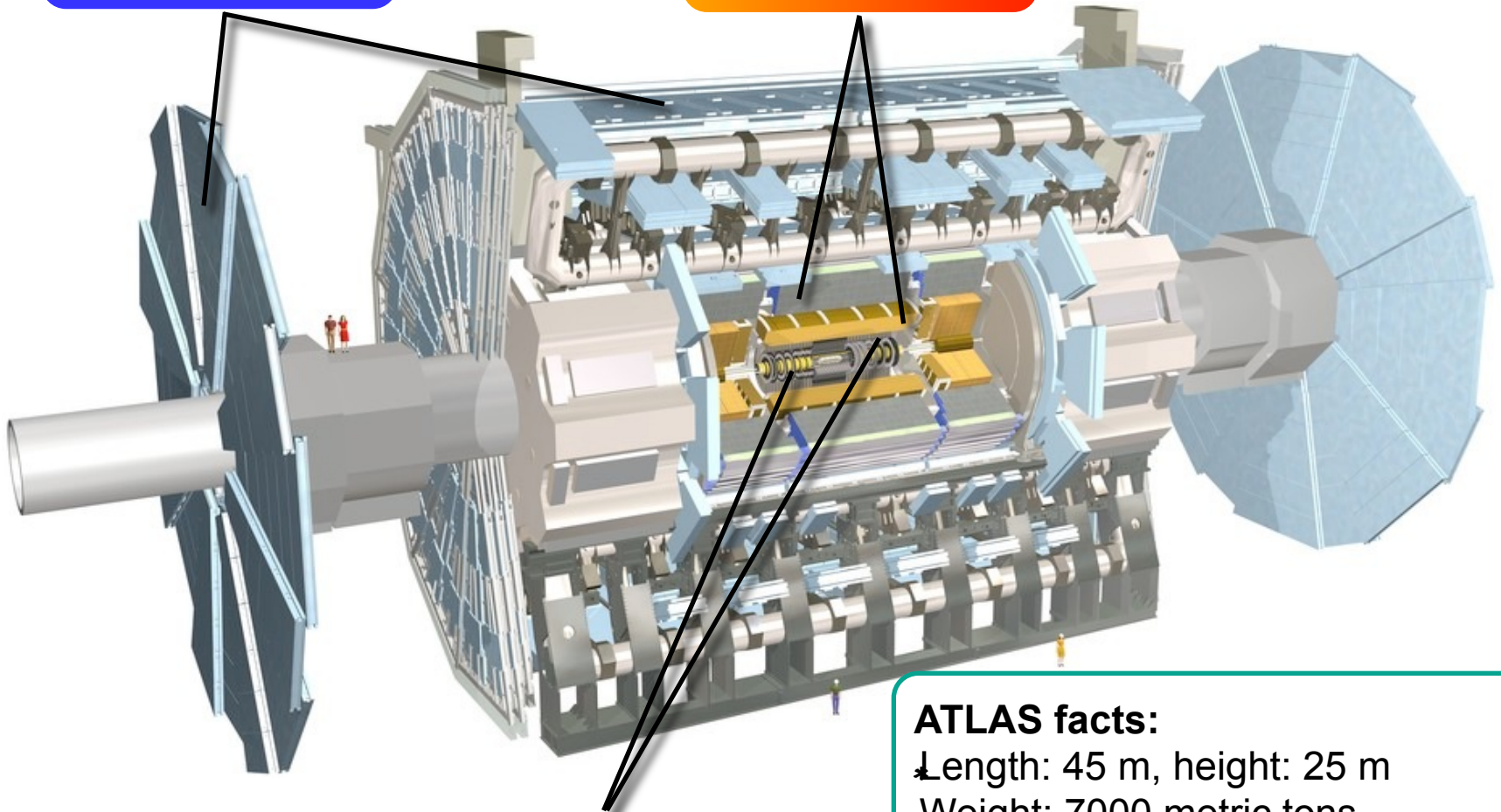
Keep all detector information till trigger decision is reached.

- $\mathcal{O}(10)$ L1-keep decisions.
- $\mathcal{O}(100)$ HLT trigger bits.

ATLAS

Myon Detektor

Kalorimeter



Tracking

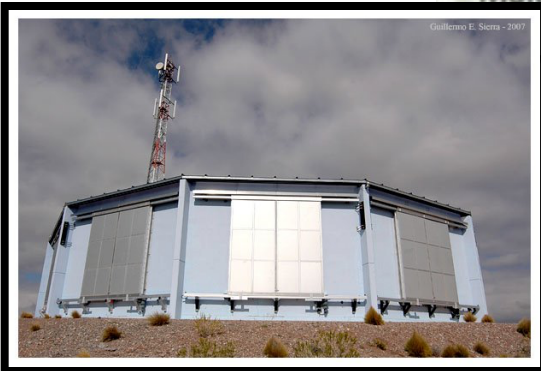
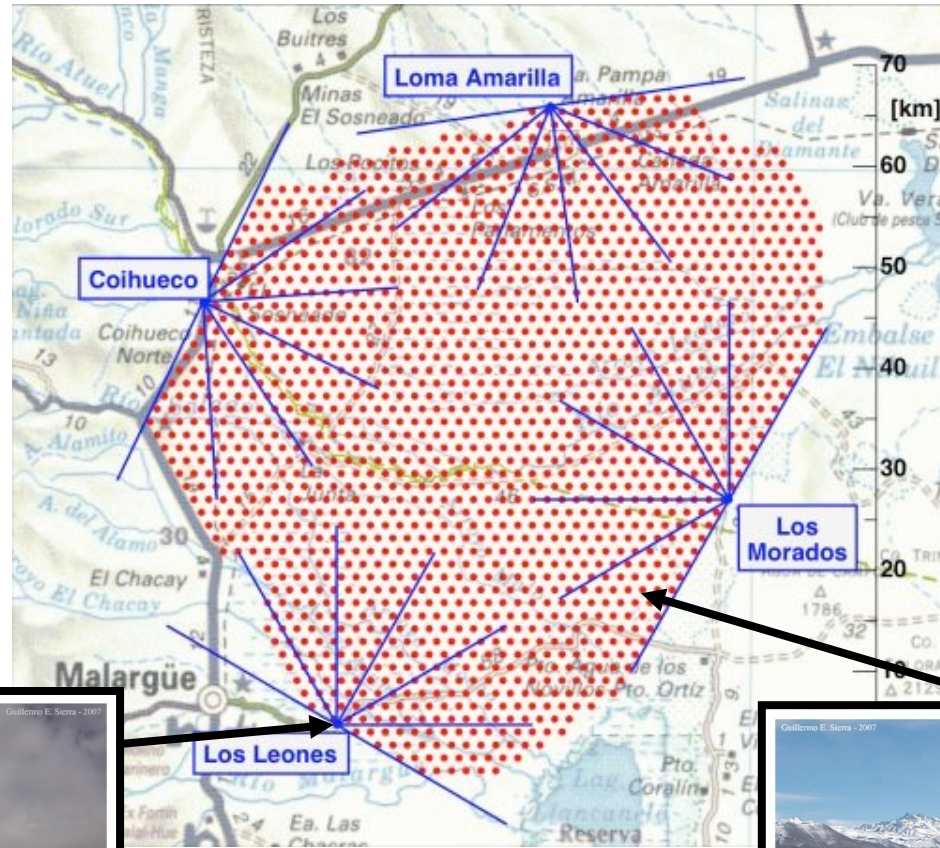
ATLAS facts:

*Length: 45 m, height: 25 m

*Weight: 7000 metric tons

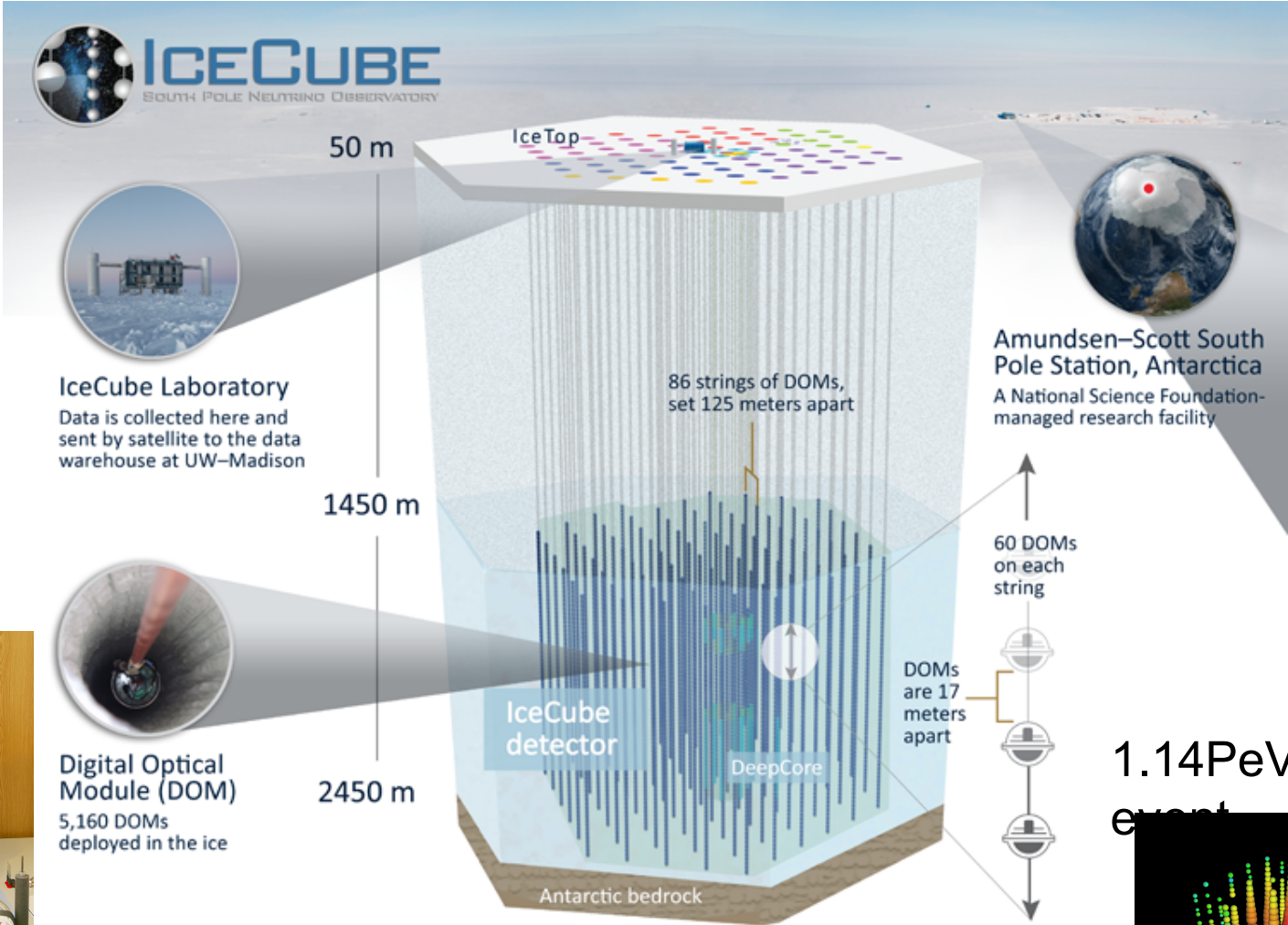
*100 million electronics channels

AUGER



<https://www.auger.org>

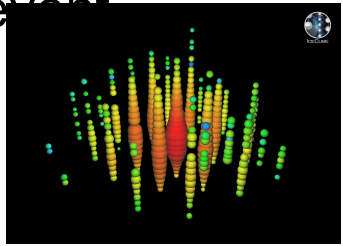
Ice Cube



<http://icecube.wisc.edu/science/icecube/detector/>

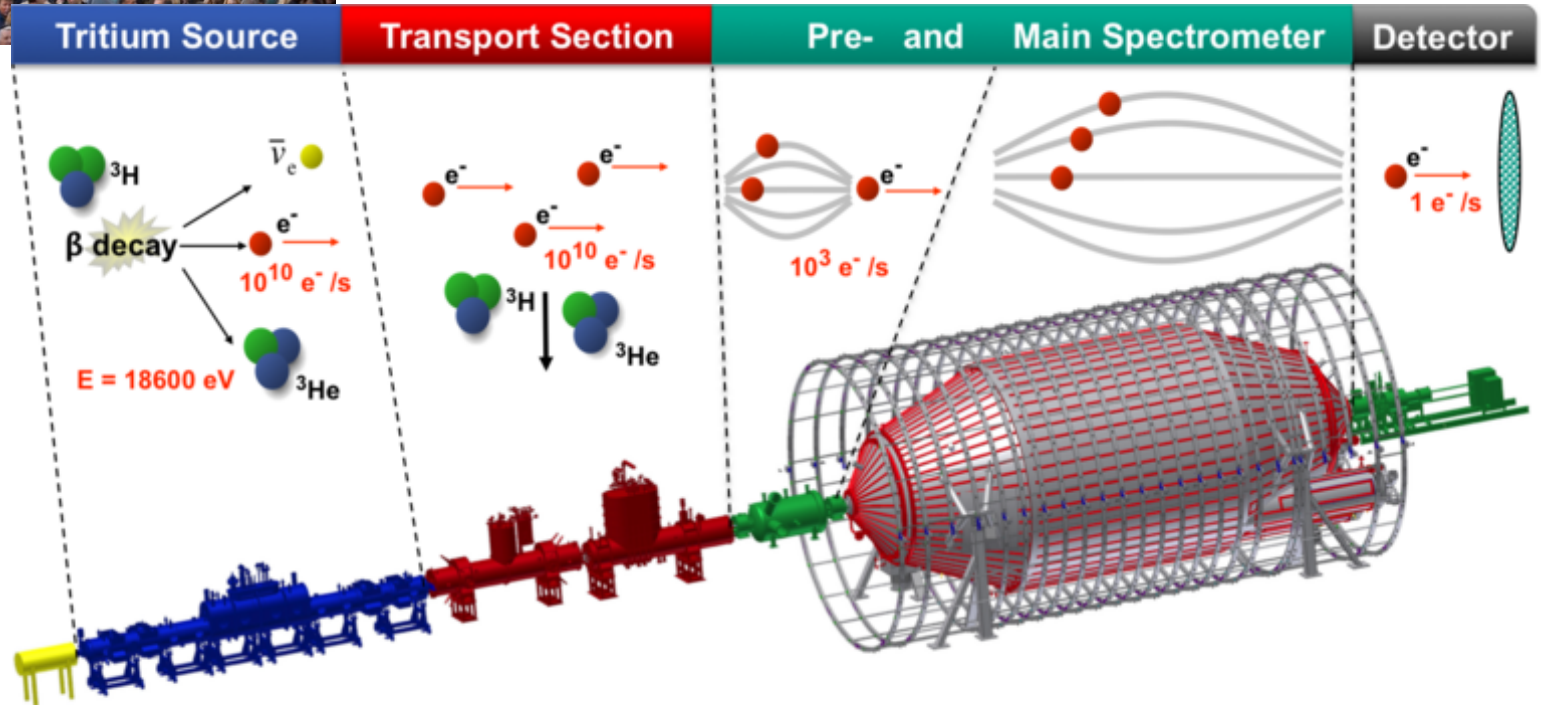


1.14PeV neutrino event



<https://www.youtube.com/watch?v=3PZgfpHULHw>

KATRIN



Tritium decays, releasing an electron and an anti-electron-neutrino. While the neutrino escapes undetected, the electron starts its journey to the detector.

Electrons are guided towards the spectrometer by magnetic fields. Tritium has to be pumped out to provide tritium free spectrometers.

The electron energy is analyzed by applying an electrostatic retarding potential. Electrons are only transmitted if their kinetic energy is sufficiently high.

At the end of their journey, the electrons are counted at the detector. Their rate varies with the spectrometer potential and hence gives an integrated β -spectrum.

XENON100

