



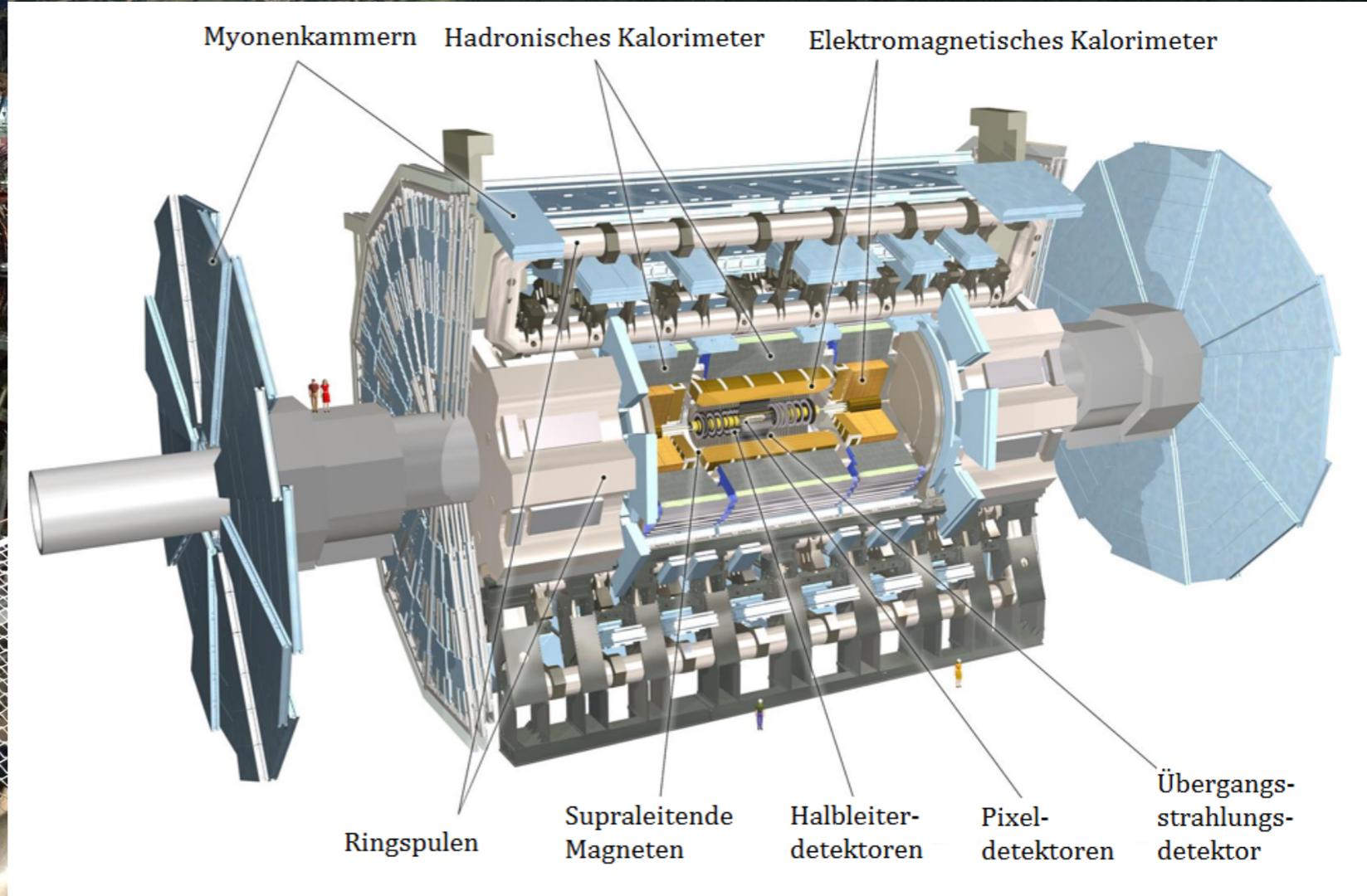
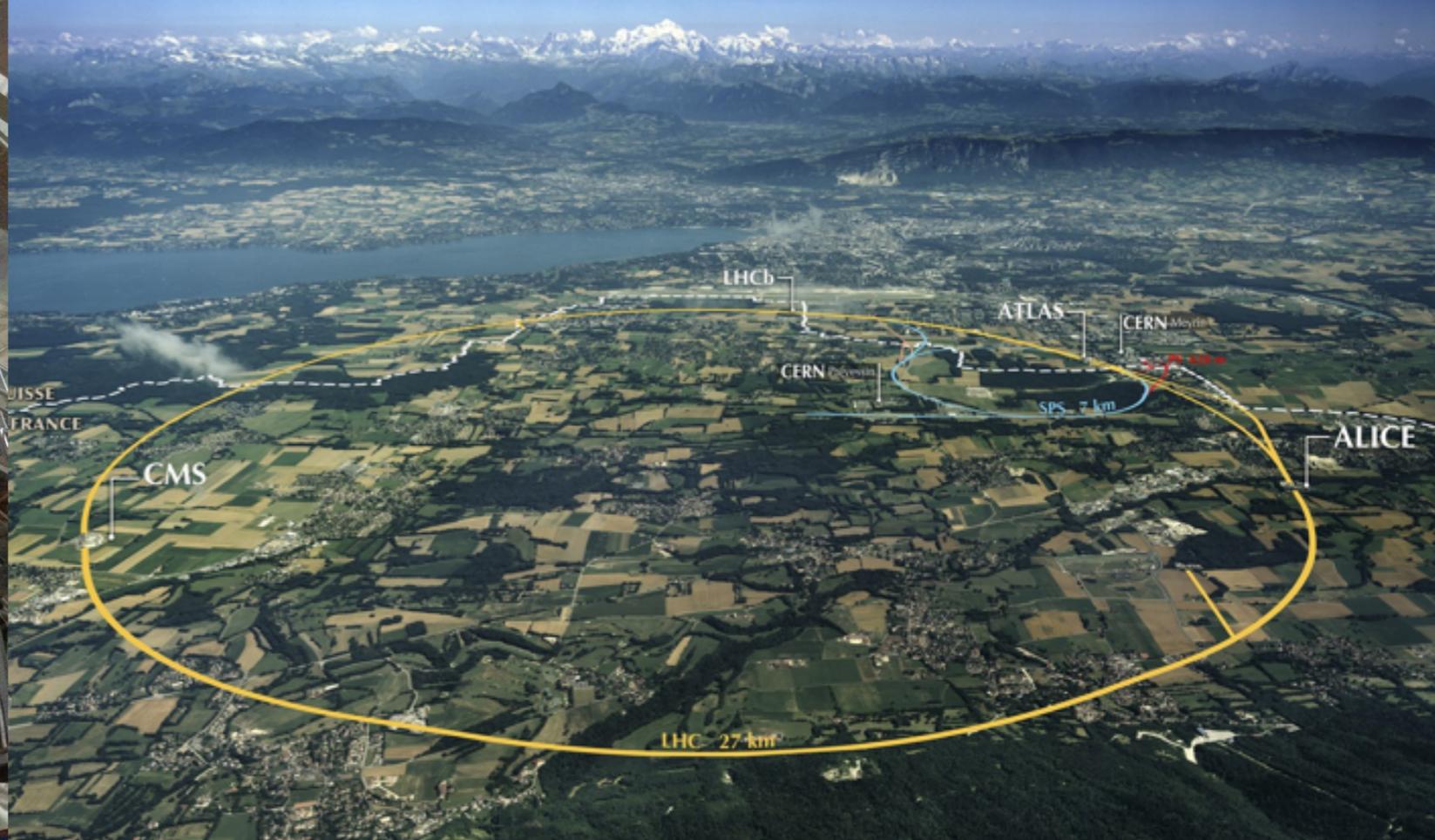
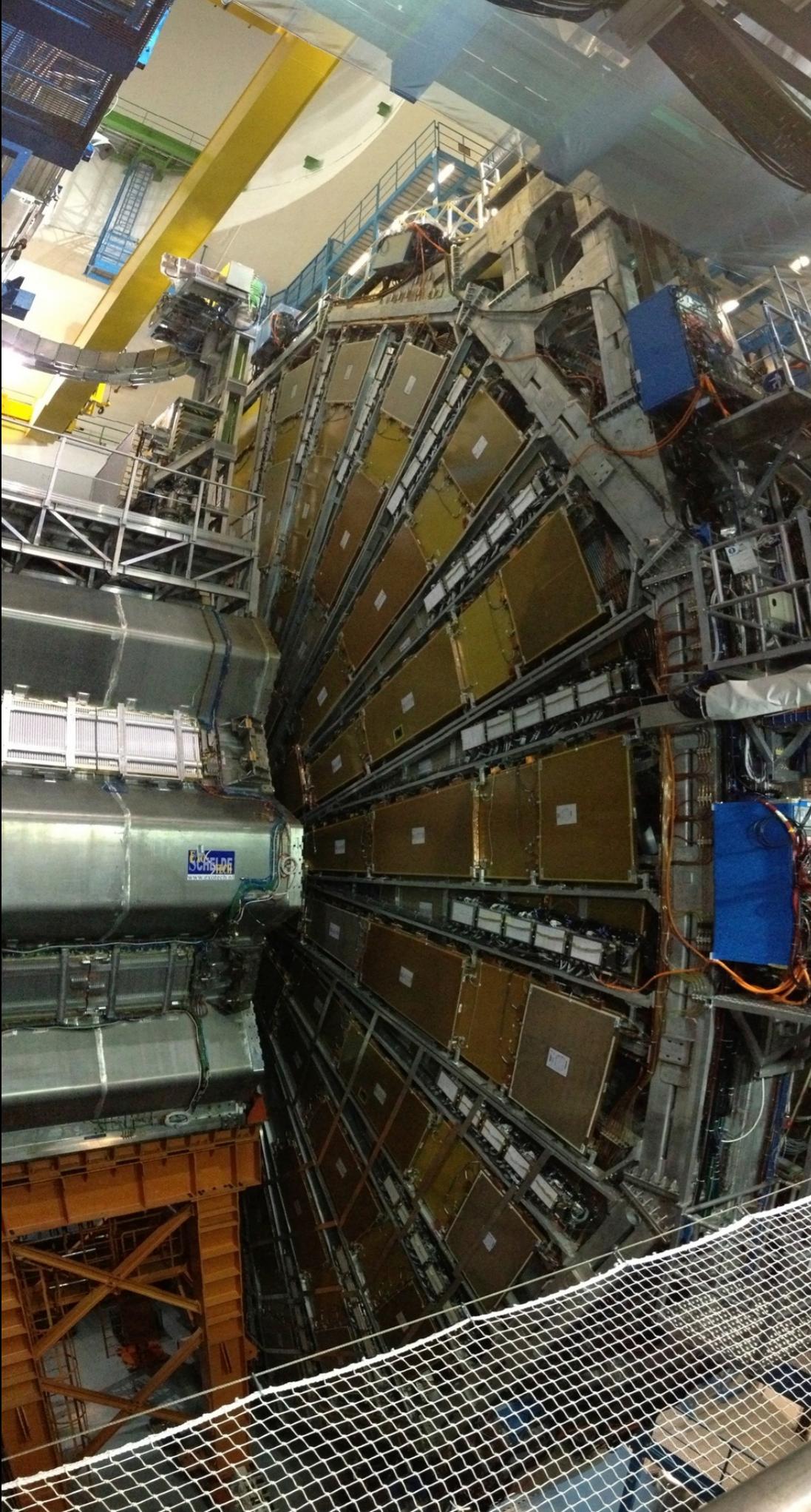
# Teilchendetektoren

European Organisation for Nuclear Research  
NTW summer school, August 2017

*„Magic is not happening at CERN, magic is explained at CERN“ - Tom Hanks*

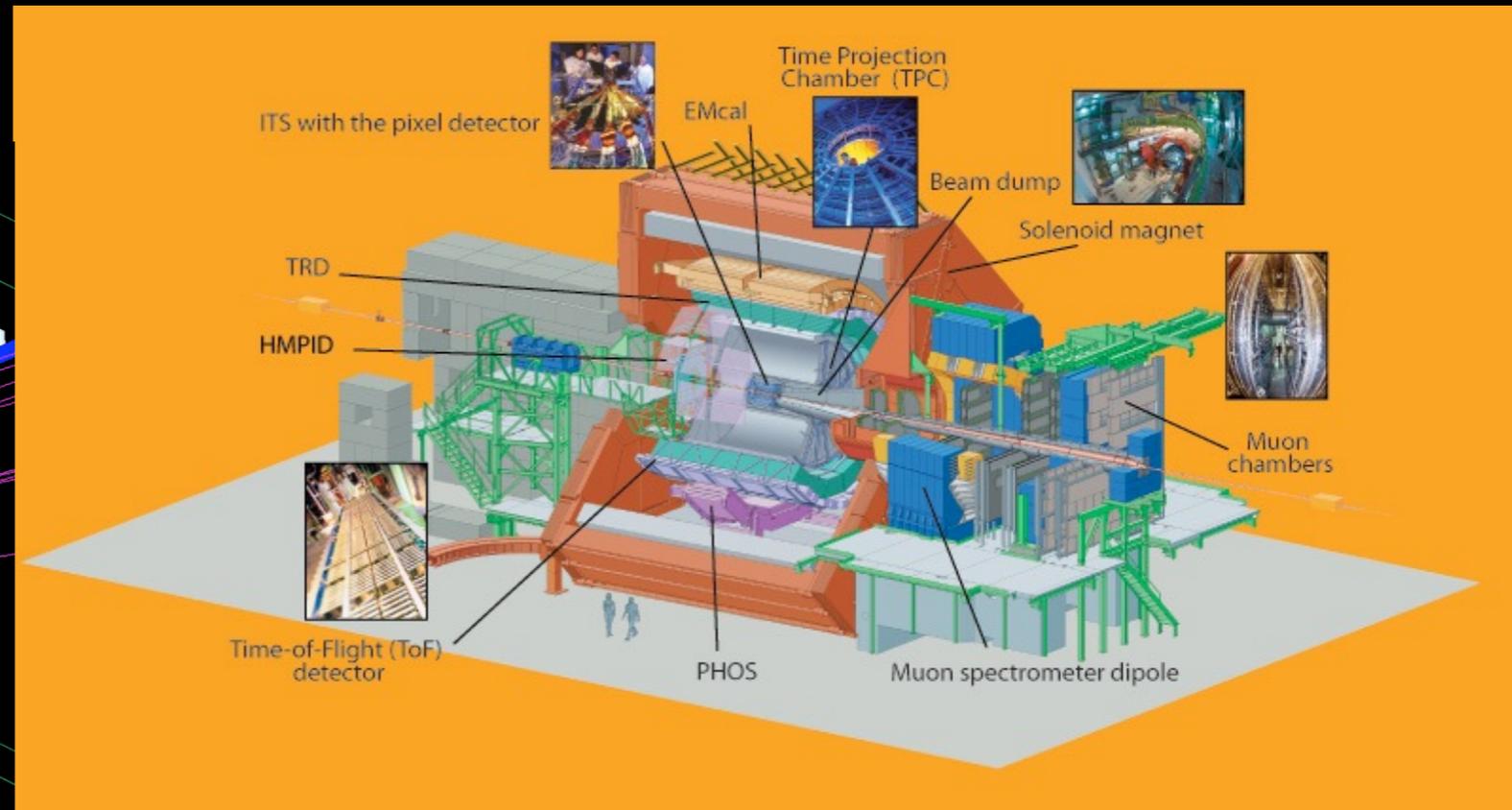
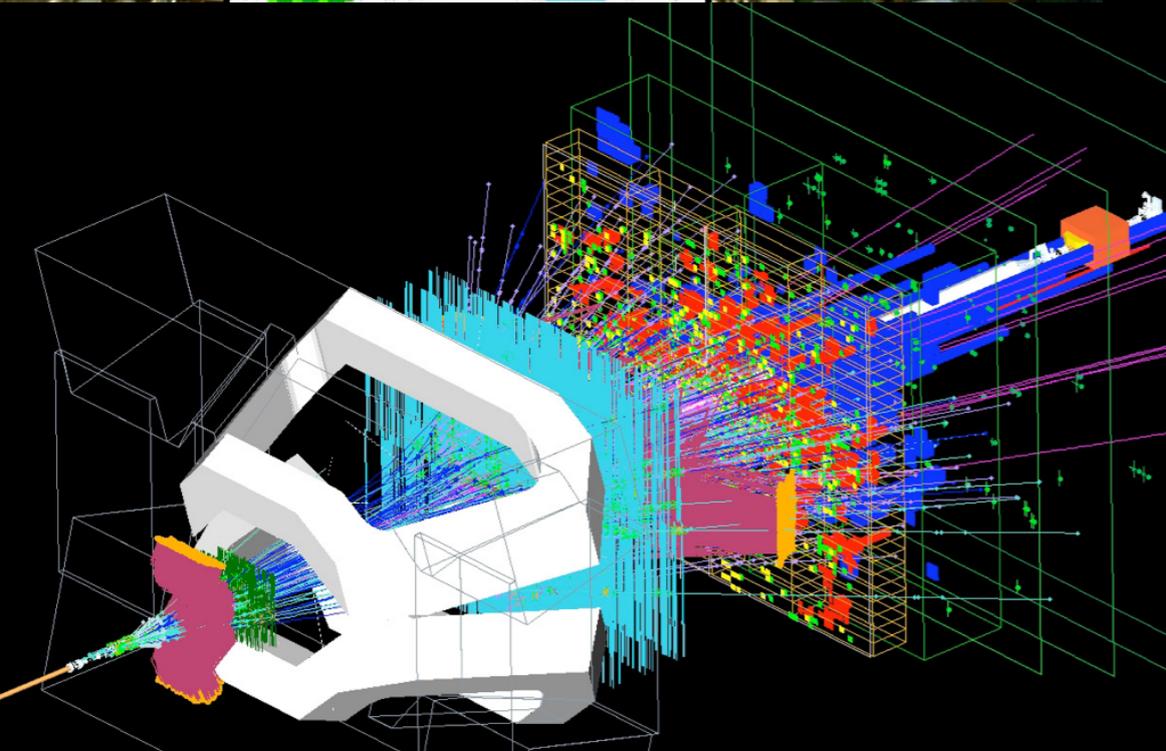
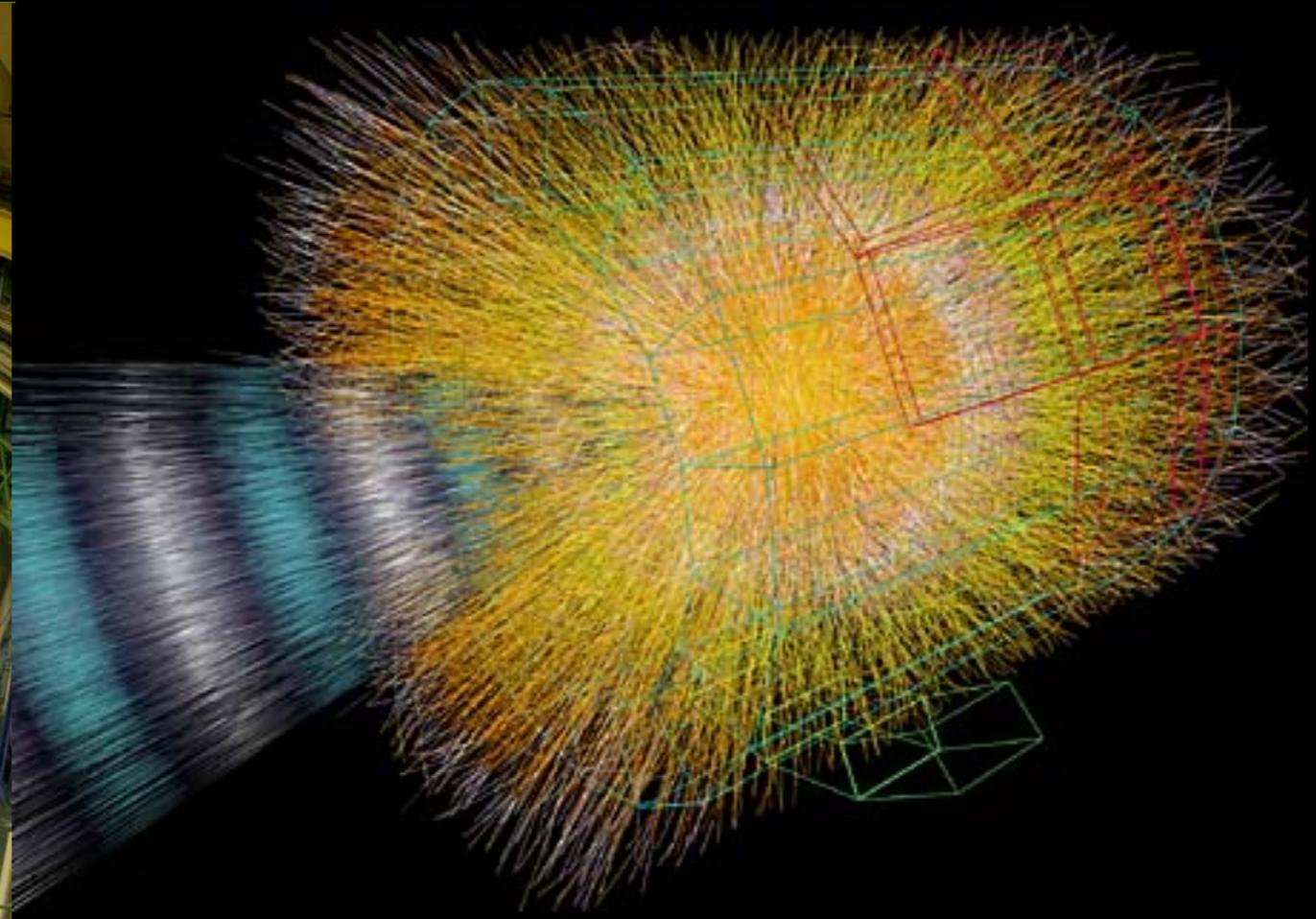
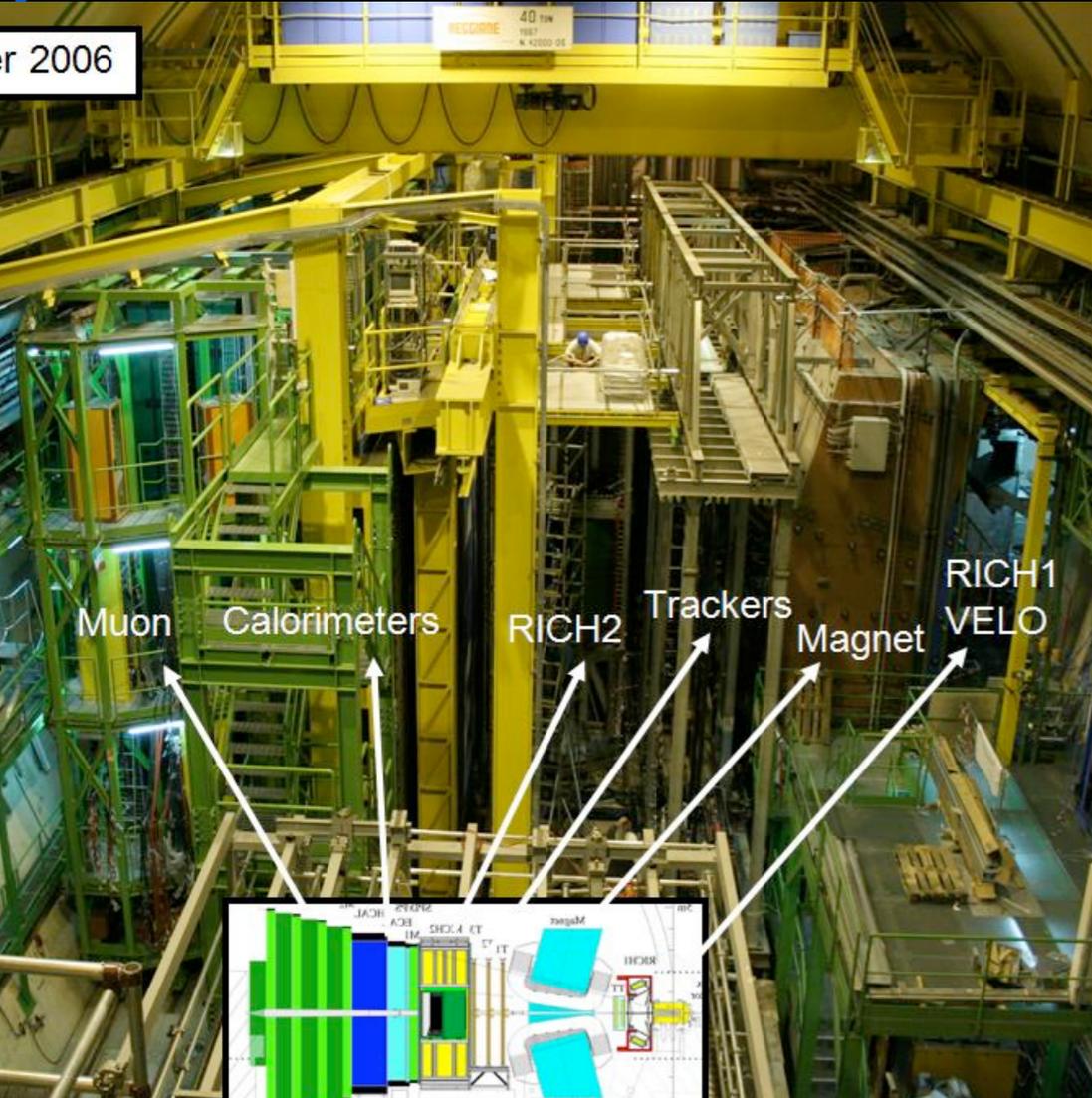


**Kristof Schmieden**  
EP Department  
[kristof.schmieden@cern.ch](mailto:kristof.schmieden@cern.ch)

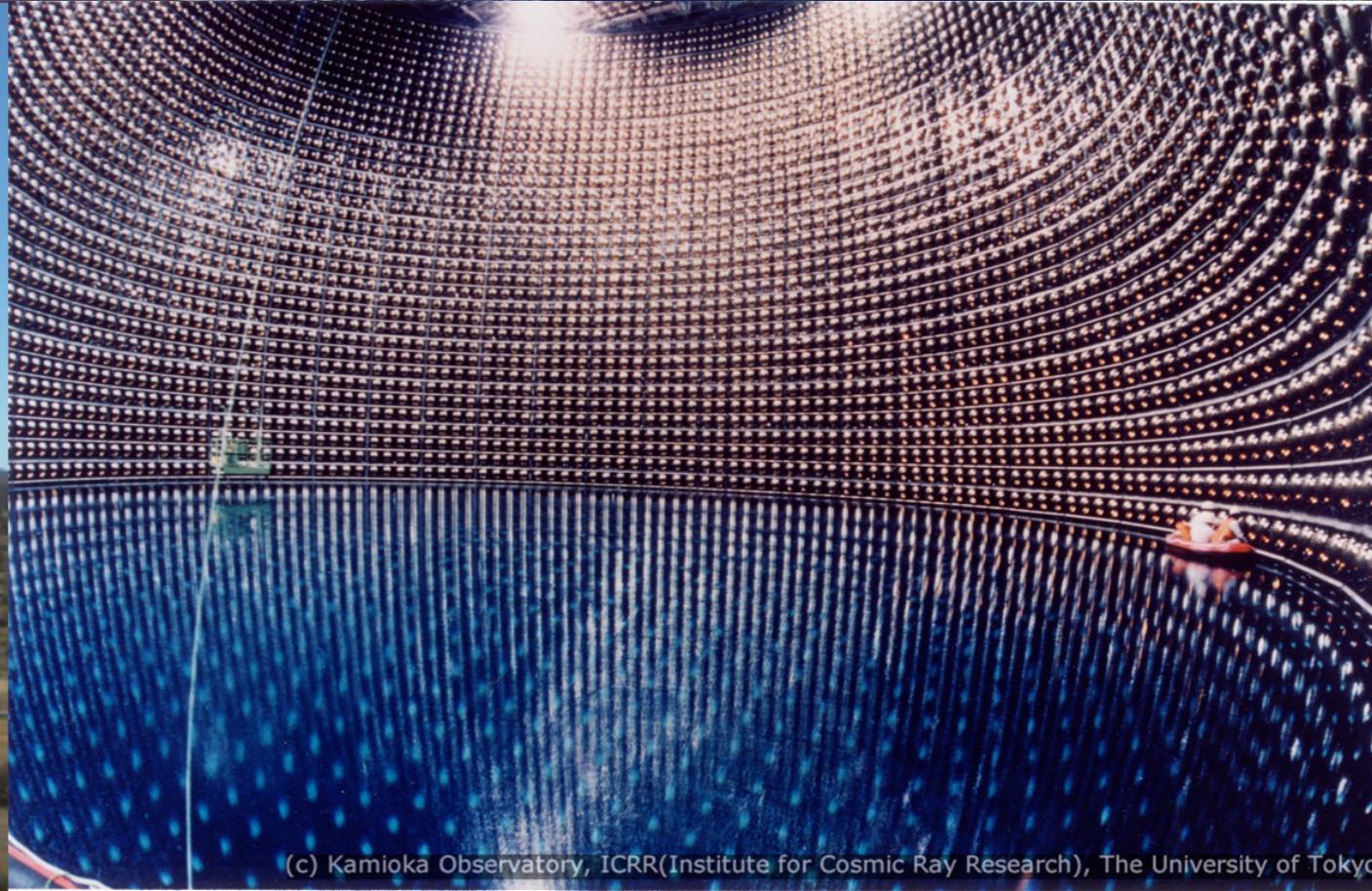
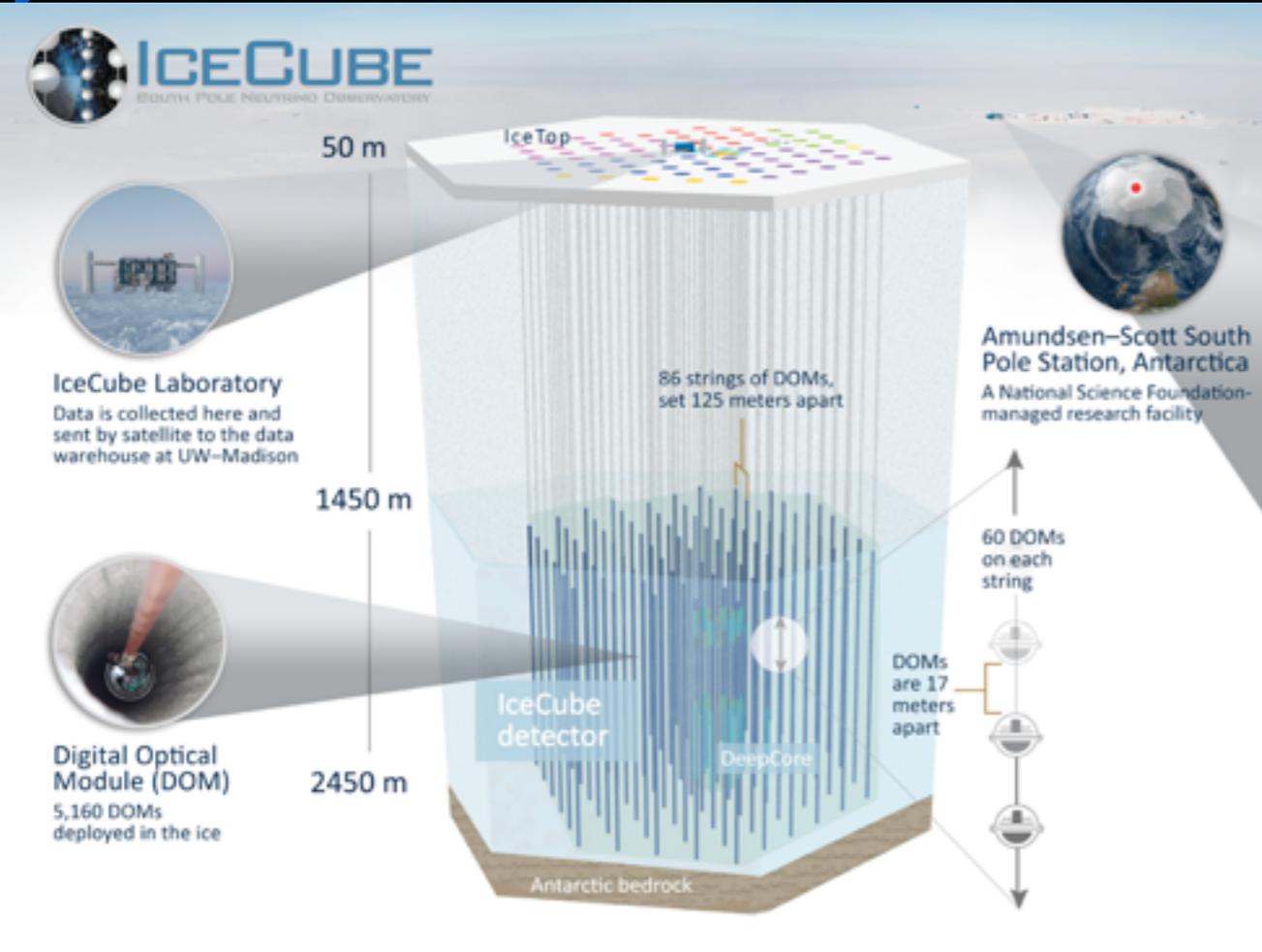


# Impressionen von großen Geräten

er 2006



# Impressionen von großen Geräten



Was wollen wir über die Teilchen wissen?

- **Impuls  $p$ :**
  - Krümmungsradius im Magnetfeld
- **Geschwindigkeit  $v$ :**
  - Flugzeitmessung, RICH, ...
- **Energie  $E$ :**
  - Vollständige Absorption -> Kalorimeter
- **Lebensdauer  $t$ :**
  - Messung der Zerfallsstrecke
- **Teilchenmasse:**
  - Indirekte Bestimmung aus Impuls und Energie

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# Welche Teilchen können vermessen werden?

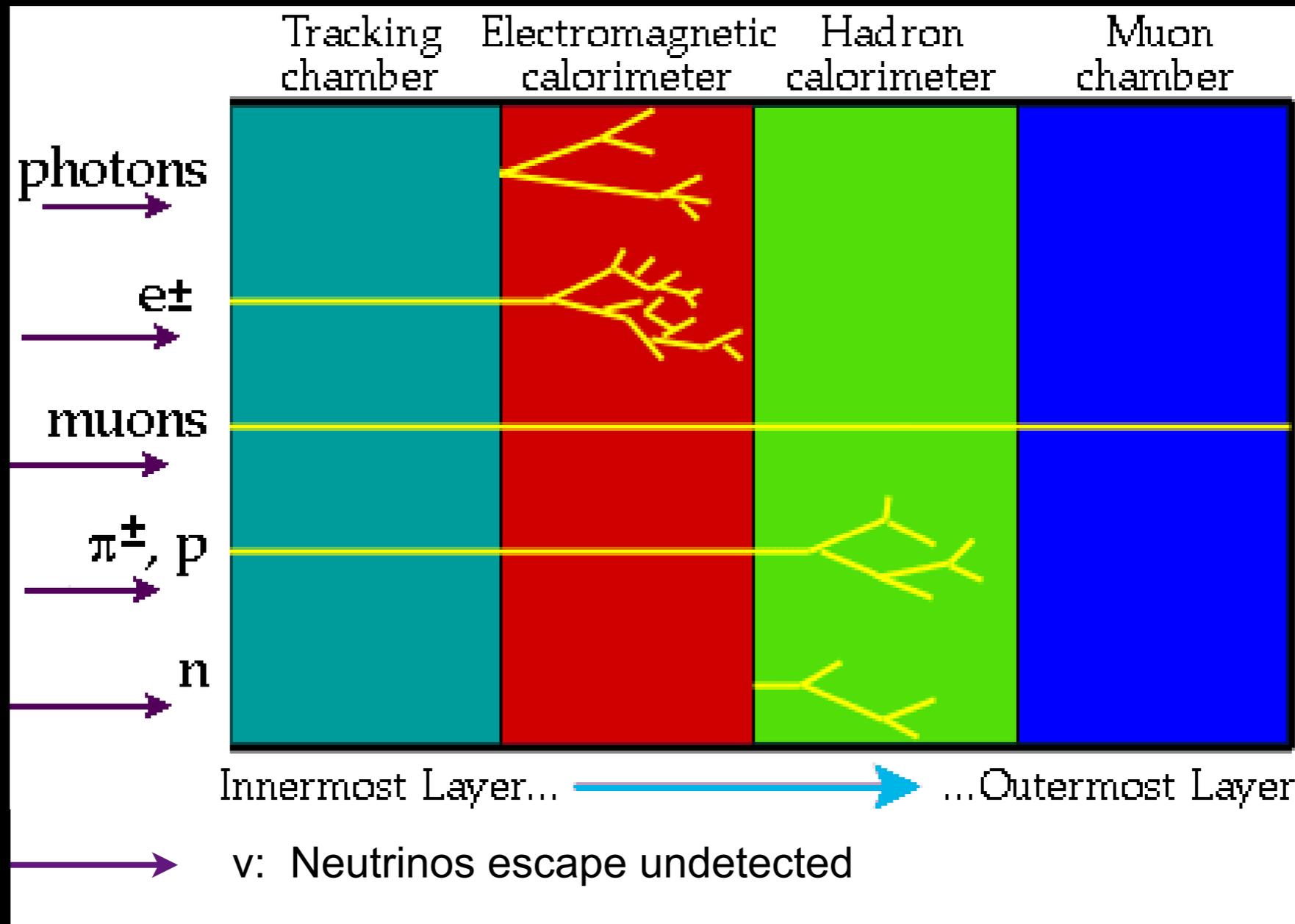


- Stabil - Lebensdauer  $>$  Flugzeit durch Detektor (cm - m)
  - Photonen
  - Elektron / Muon
  - Proton / Neutron / Hadronen (Pion / Kaon)
  - Neutrinos
- „Langlebig“  $>$  Zerfallsvertex messbar ( $\mu\text{m}$  - mm)
  - Tauon
  - B-Hadronen

# Der Universelle Teilchendetektor der Hochenergiephysik

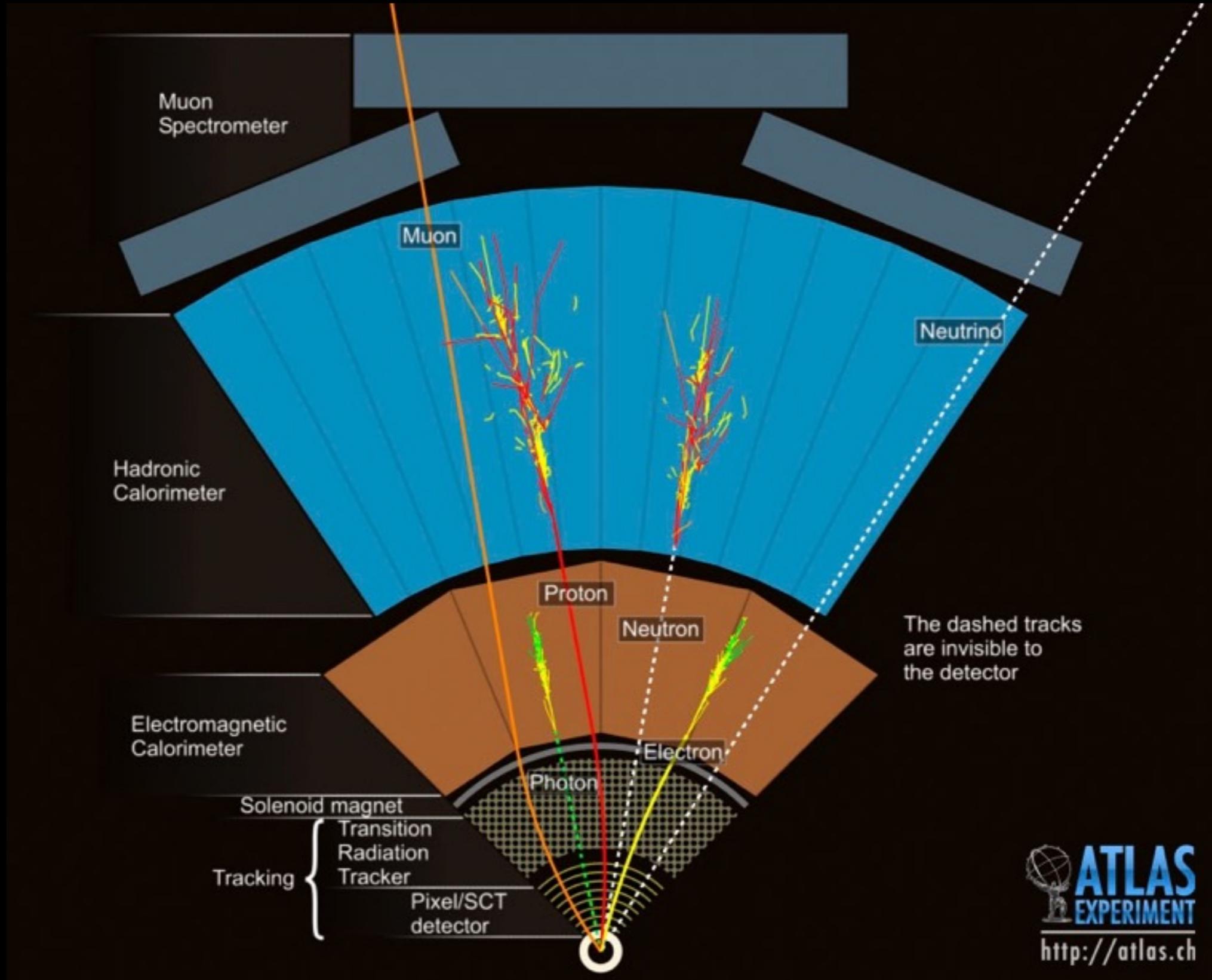
# Universeller Teilchendetektor

- Ziel: Messung von Energie und Impuls aller Teilchen



„Fixed-Targed“ Experimente  
(COMPASS)

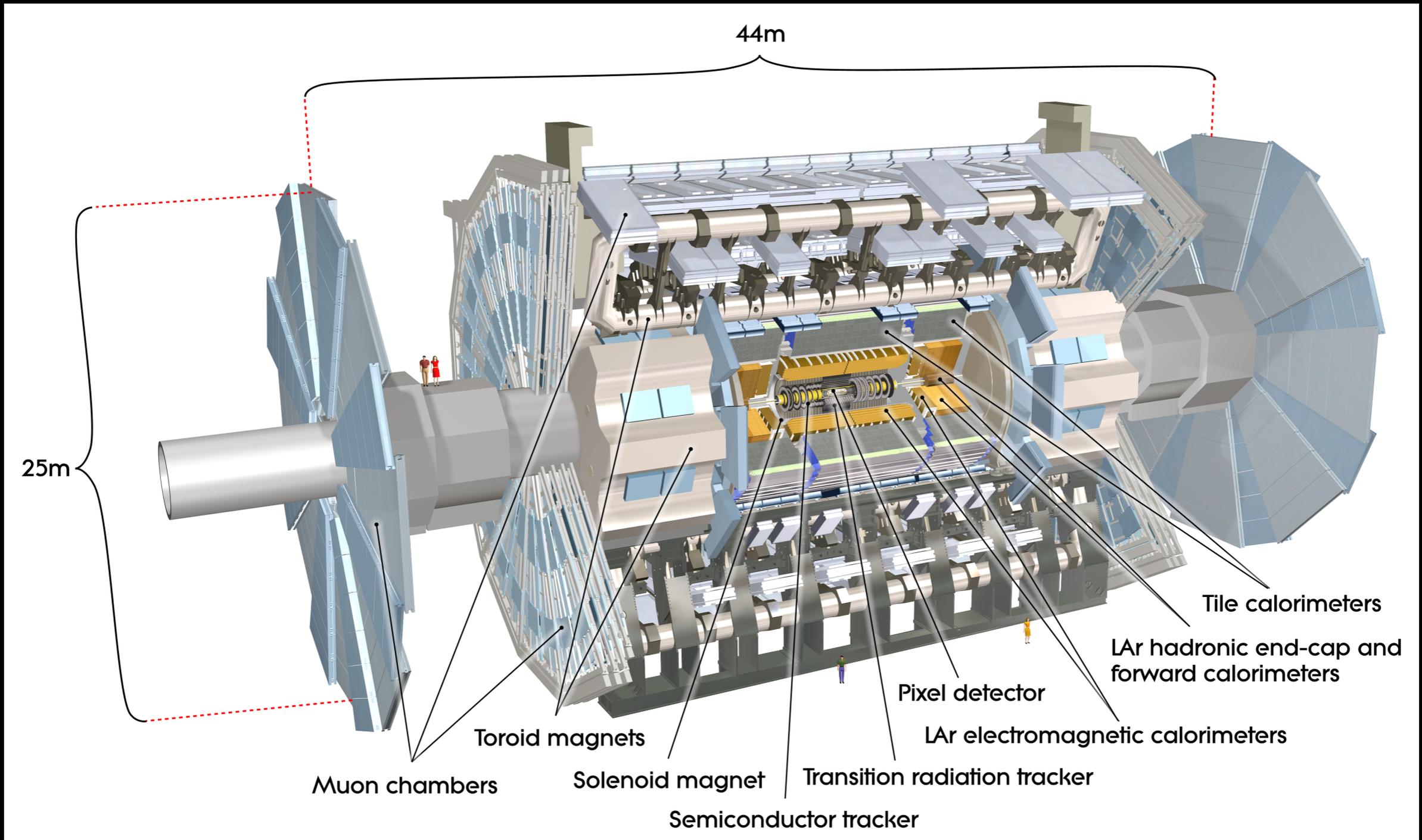
# Universeller Teilchendetektor - ATLAS / CMS



# Universeller Teilchendetektor - ATLAS

Gewicht: 7000 t  
Auslesekanäle: ~ 100 M  
Magnetfeld: 2T solenoid + toroid field

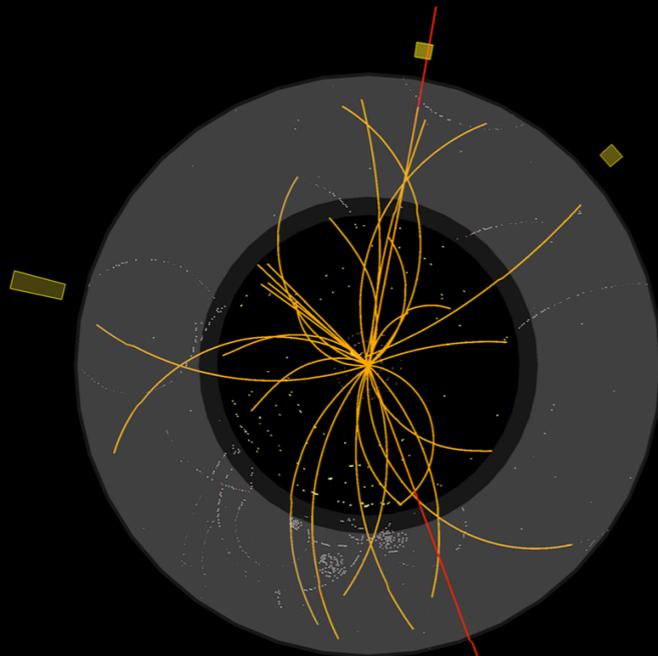
Datenrate:  
1.6 MB / sec  
1k Ereignisse / sec  
=> **1.6 GB / sec**



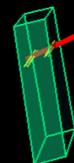
$$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



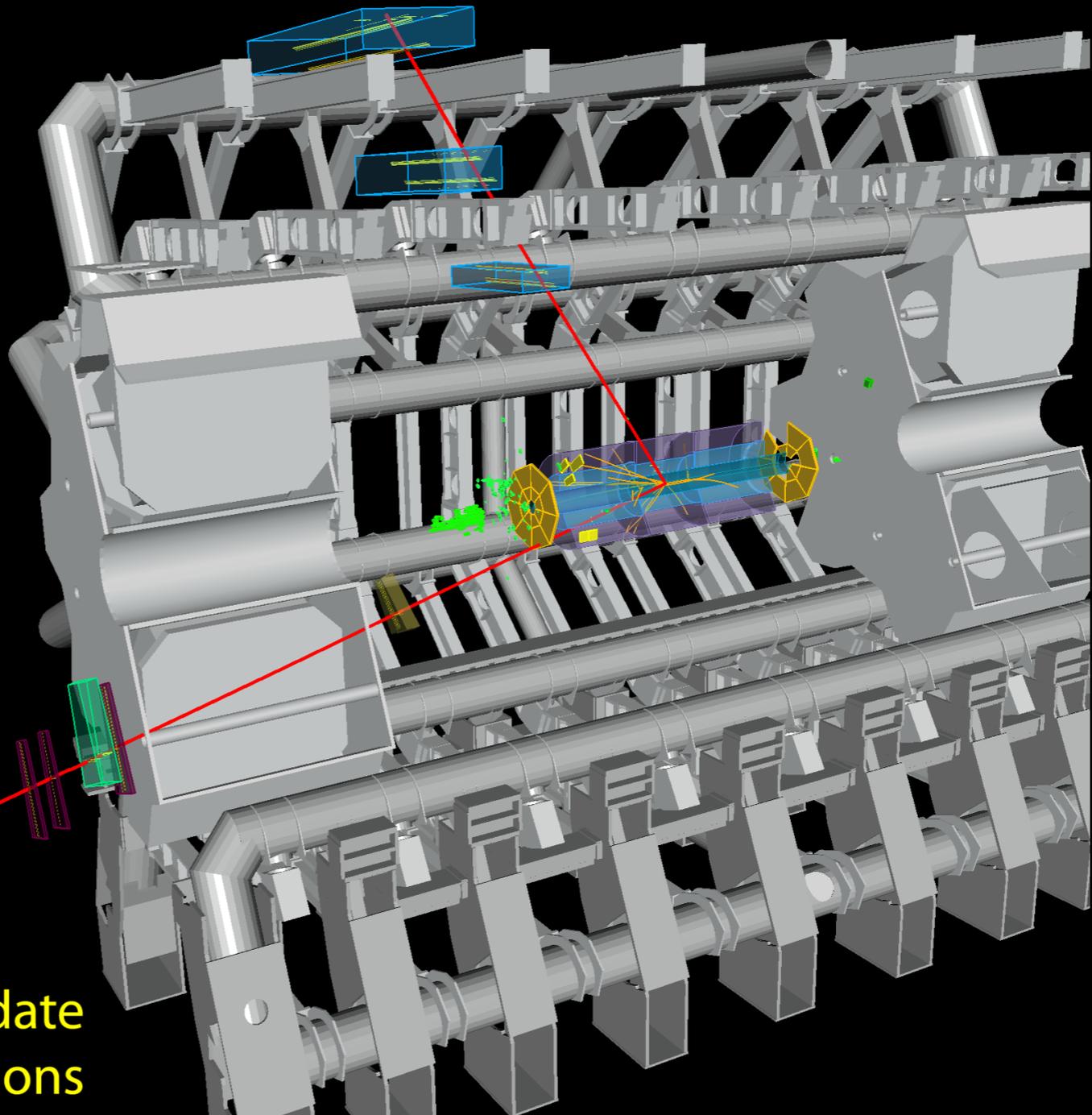
Run: 154822, Event: 14321500  
Date: 2010-05-10 02:07:22 CEST



$p_T(\mu^-) = 27 \text{ GeV}$   $\eta(\mu^-) = 0.7$   
 $p_T(\mu^+) = 45 \text{ GeV}$   $\eta(\mu^+) = 2.2$   
 $M_{\mu\mu} = 87 \text{ GeV}$



**Z $\rightarrow\mu\mu$  candidate  
in 7 TeV collisions**



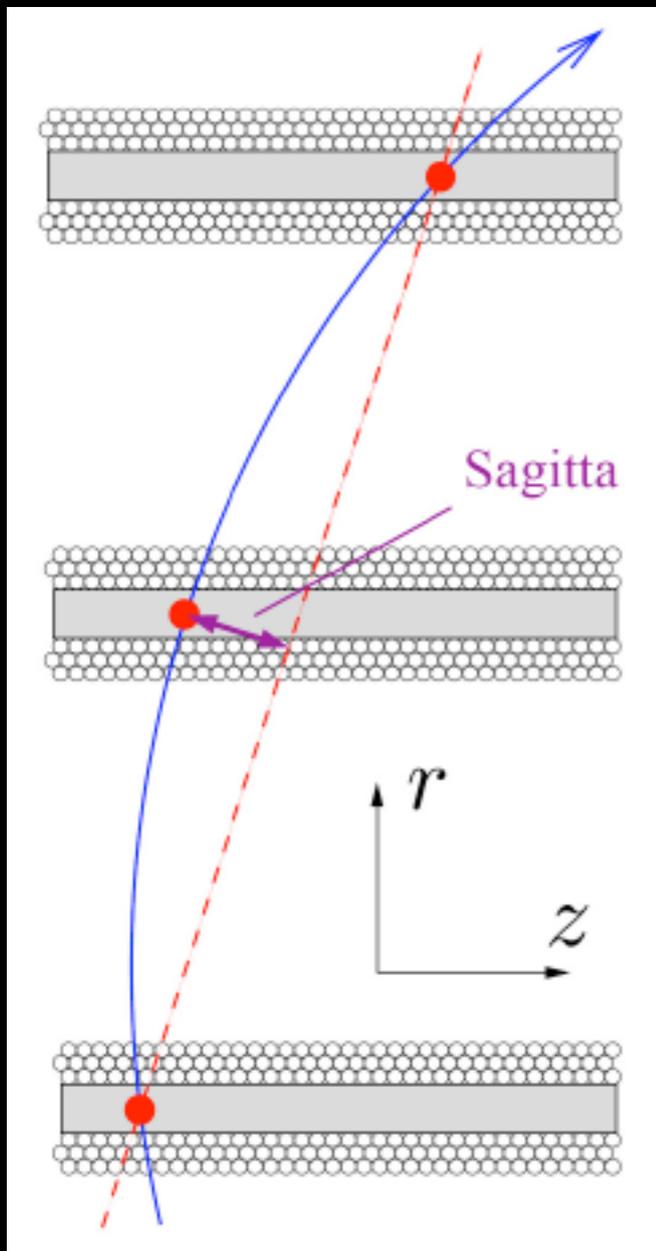
# Spurdetektionssysteme Impulsmessung

# Messgrößen von Interesse - Impuls

- **Impuls**  $p = m v = \gamma m_0 v$

Lorentzkraft:  $F_L = Q \cdot [v \times B]$   
 Zentripedalkraft:  $F_Z = m \cdot v^2 / r$

$$F_L = F_Z \Rightarrow p/r = Q \cdot B \Rightarrow \mathbf{p} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{r}$$

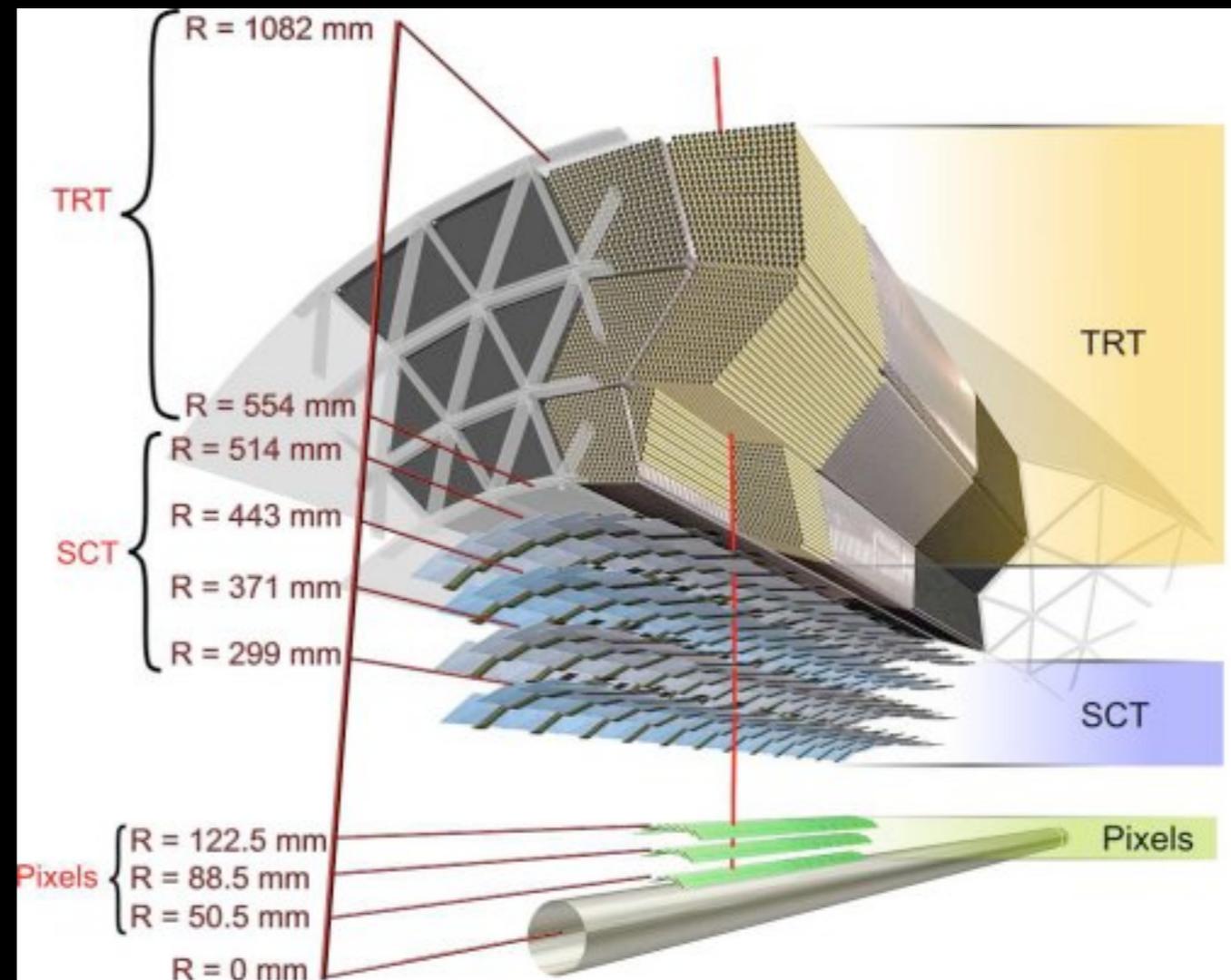
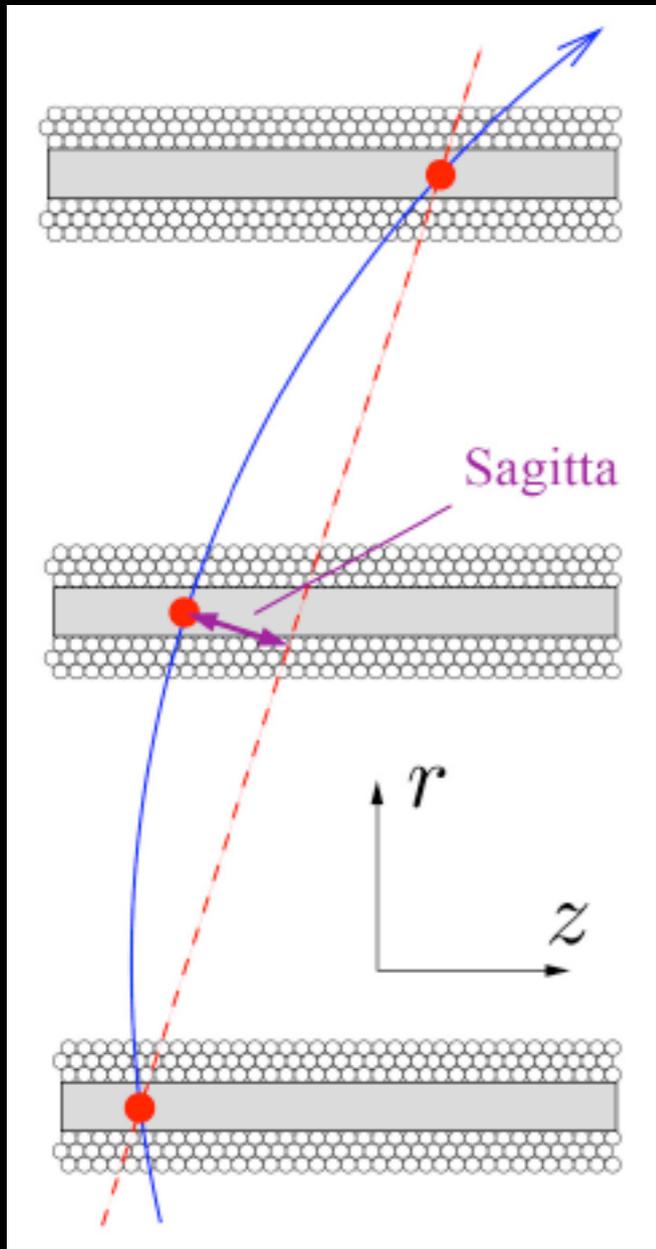


- **Impuls**  $p = m v = \gamma m_0 v$

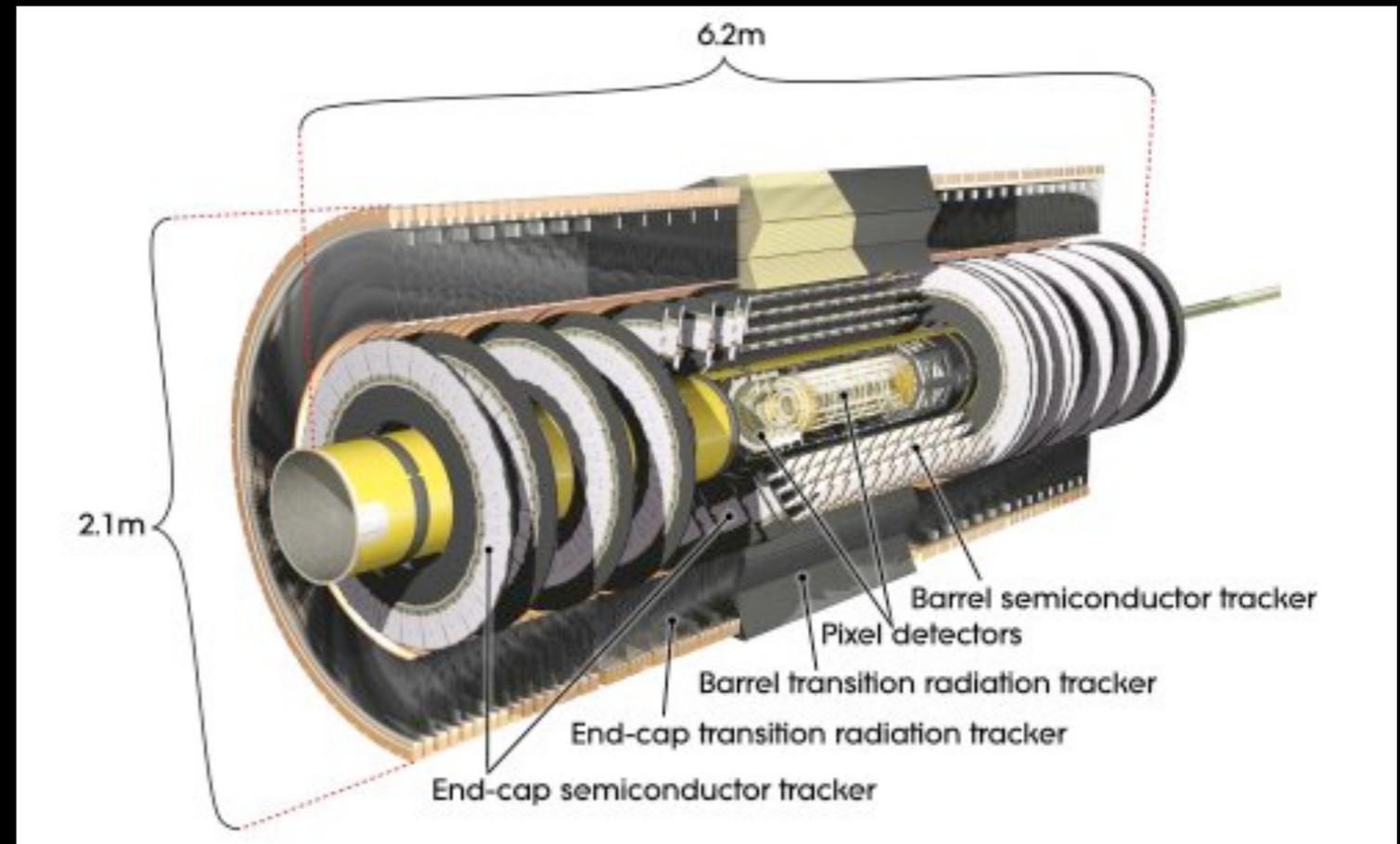
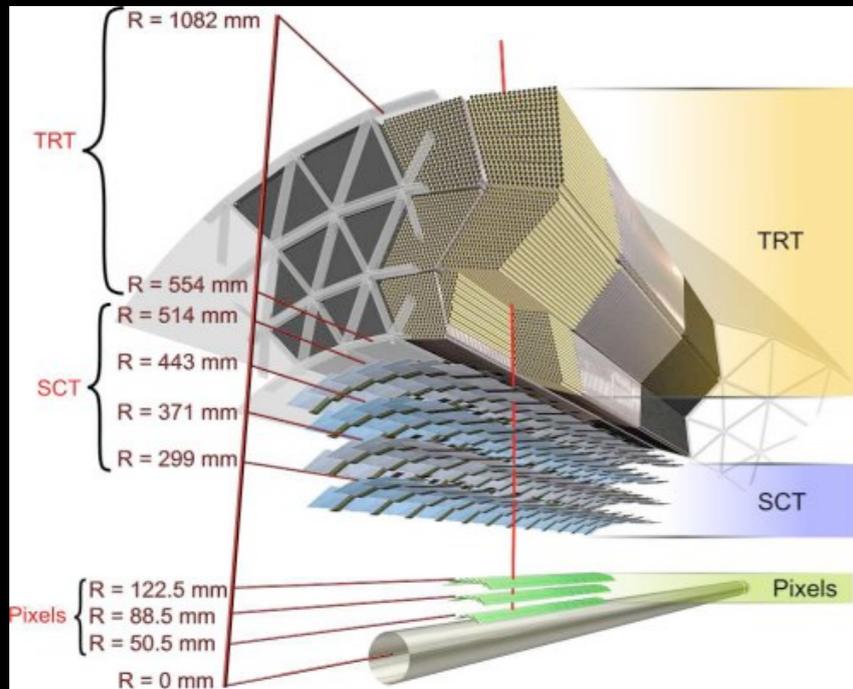
Lorentzkraft:  $F_L = Q \cdot [v \times B]$   
 Zentripedalkraft:  $F_Z = m \cdot v^2 / r$

$$F_L = F_Z \Rightarrow p/r = Q \cdot B \Rightarrow \mathbf{p} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{r}$$

$$\mathbf{B} = 2\mathbf{T}$$



- **Impuls**  $p = m v = \gamma m_0 v$

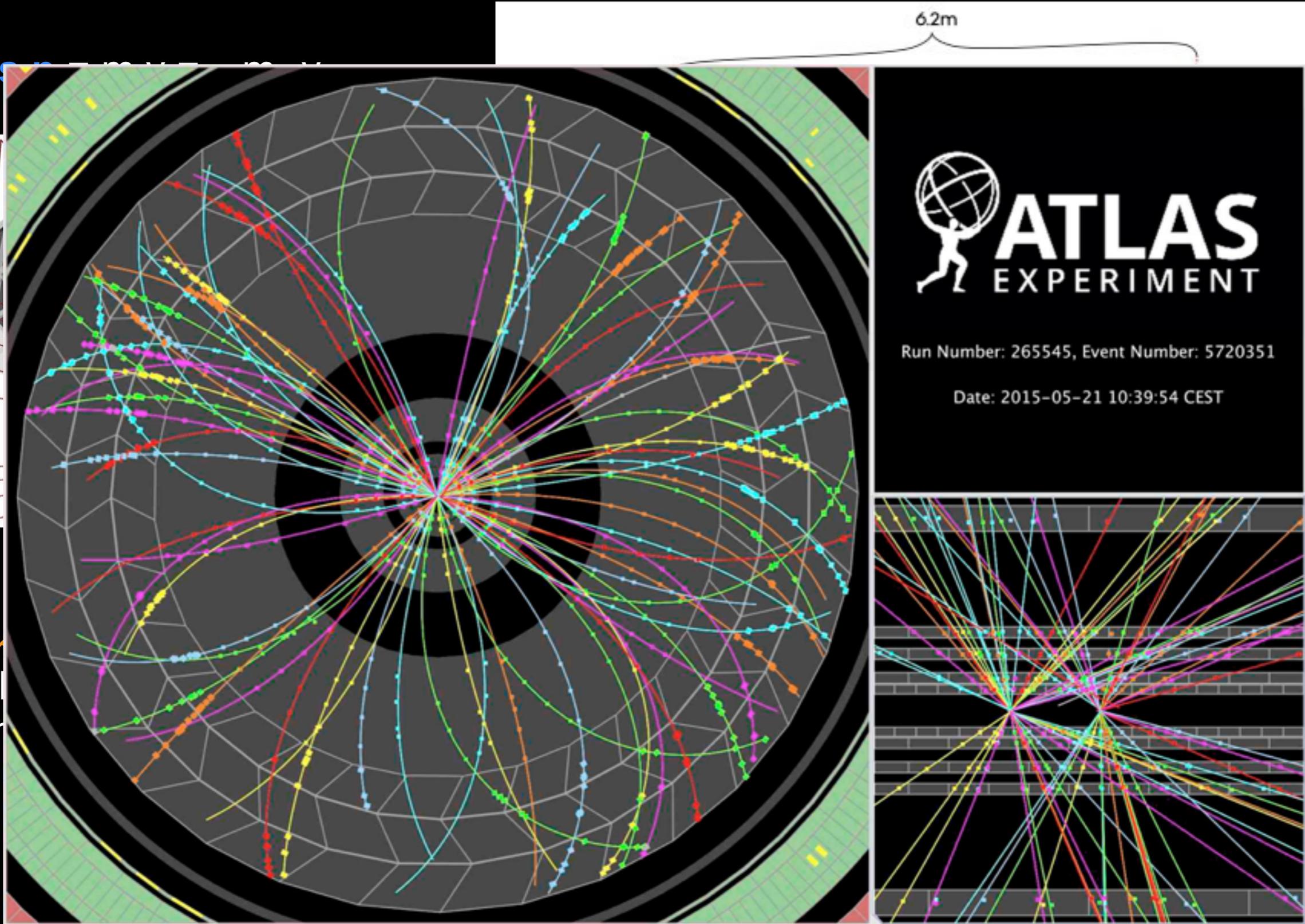


## Komplikationen:

- Inhomogenes Magnetfeld
- Energieverlust der Teilchen im Detektormaterial
- Numerischer Fit der Teilchenspur durch Detektor

# Messgrößen von Interesse - Impuls

- Impuls

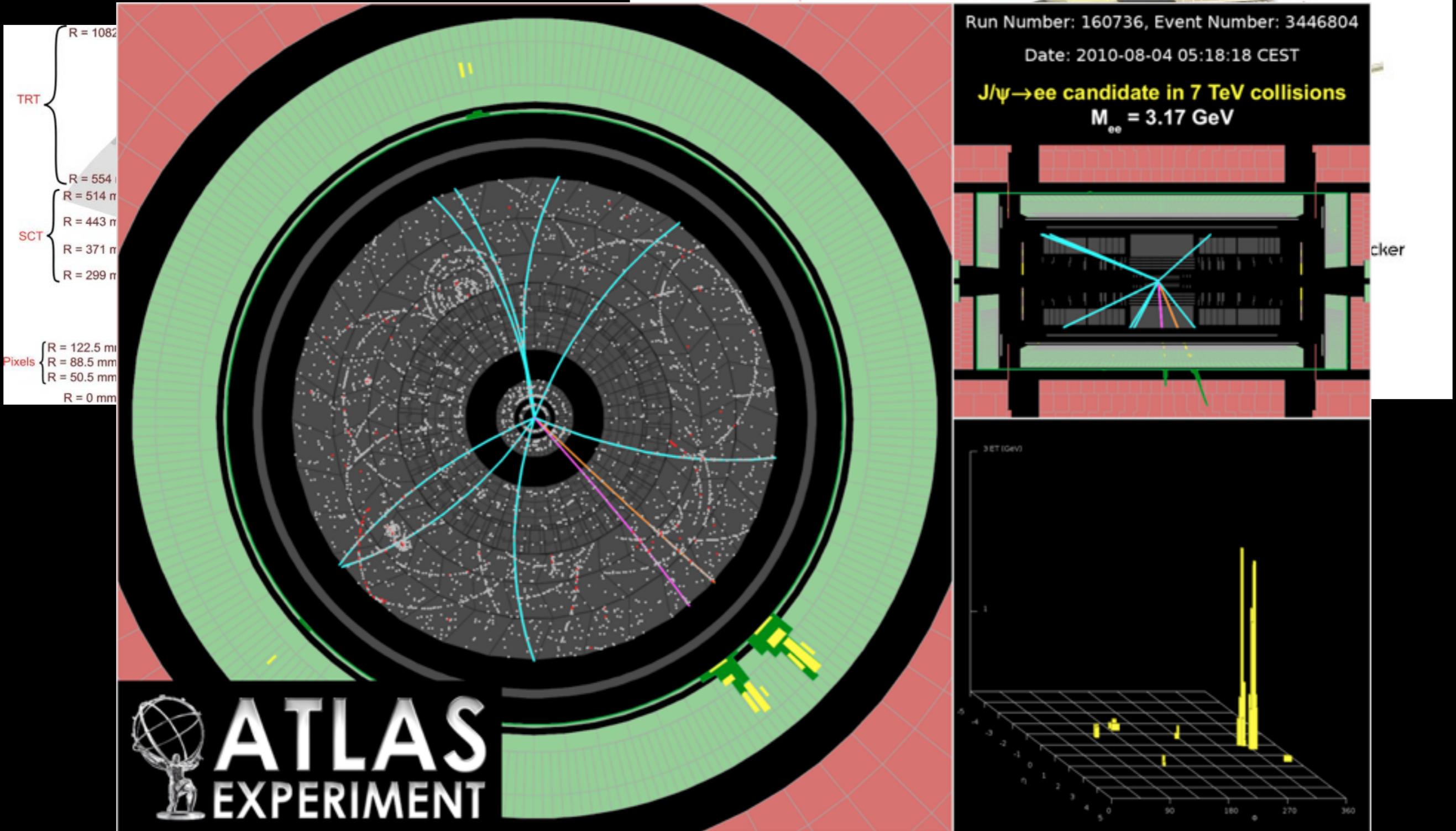


## Komplik

- Inf
- Er

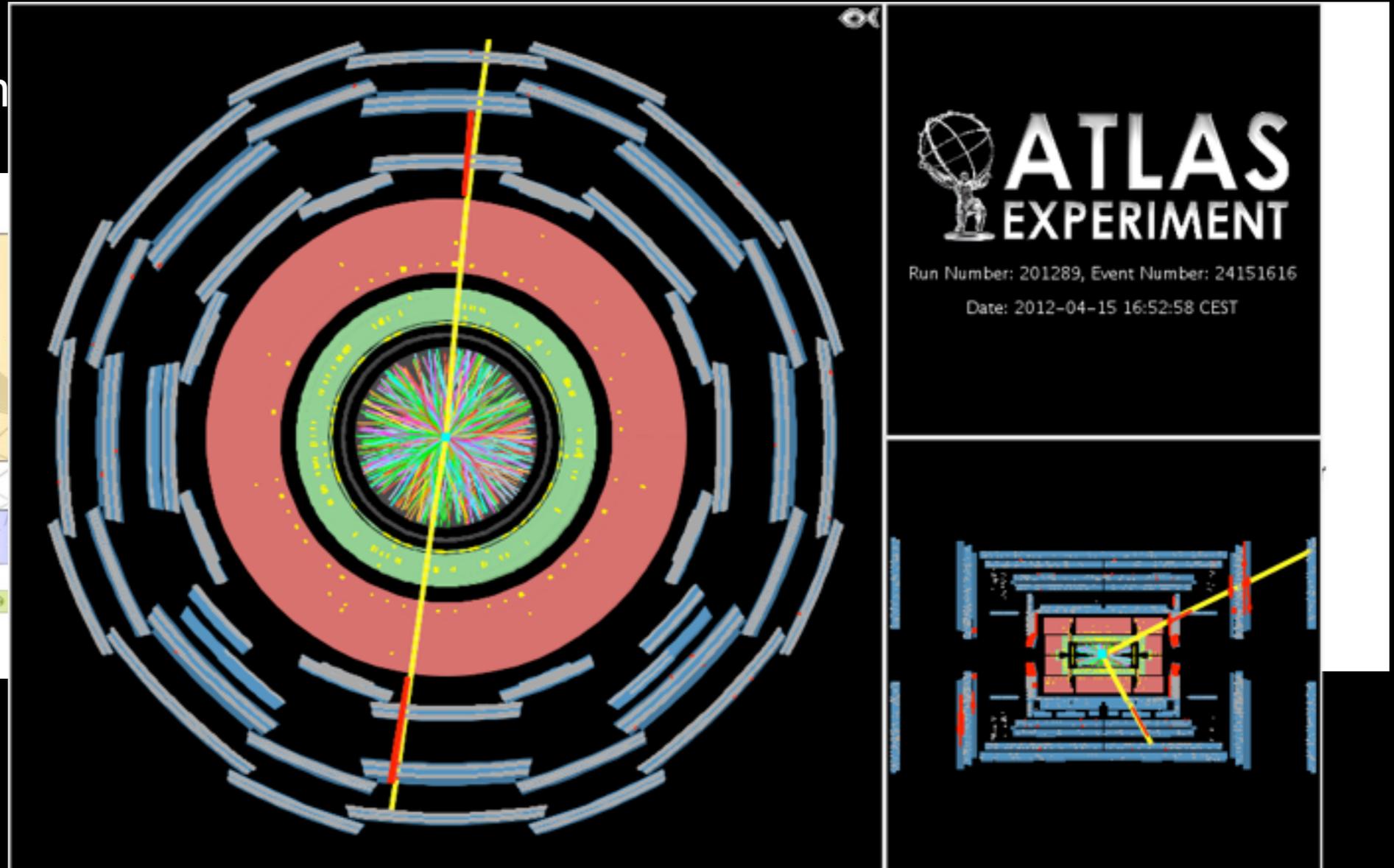
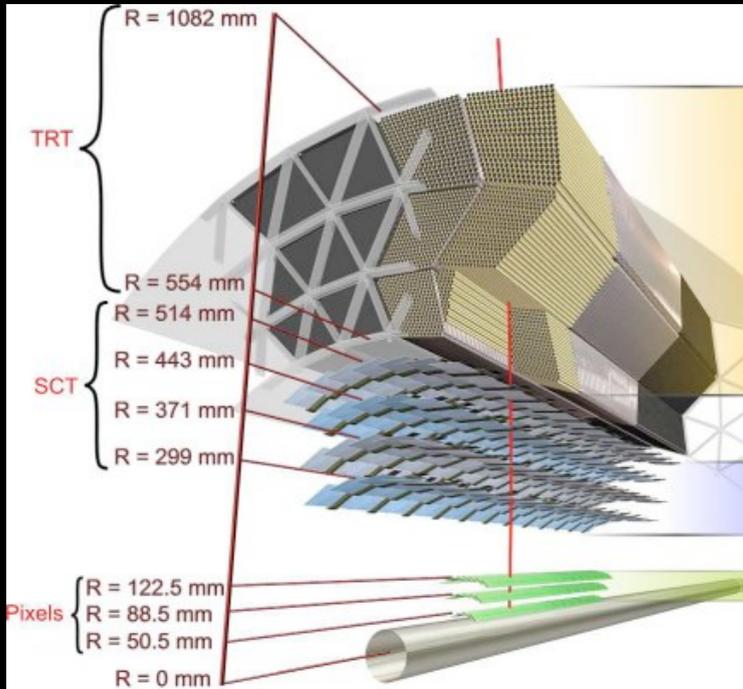
# Messgrößen von Interesse - Impuls

- **Impuls**  $p = m v = \gamma m_0 v$

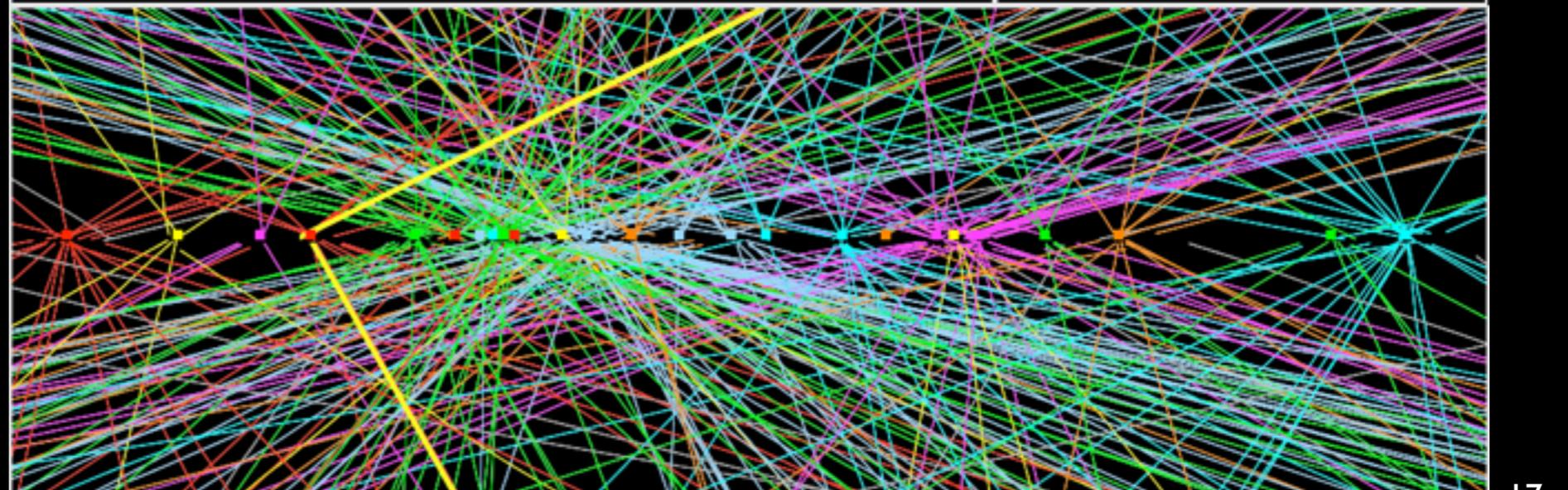


# Messgrößen von Interesse - Impuls

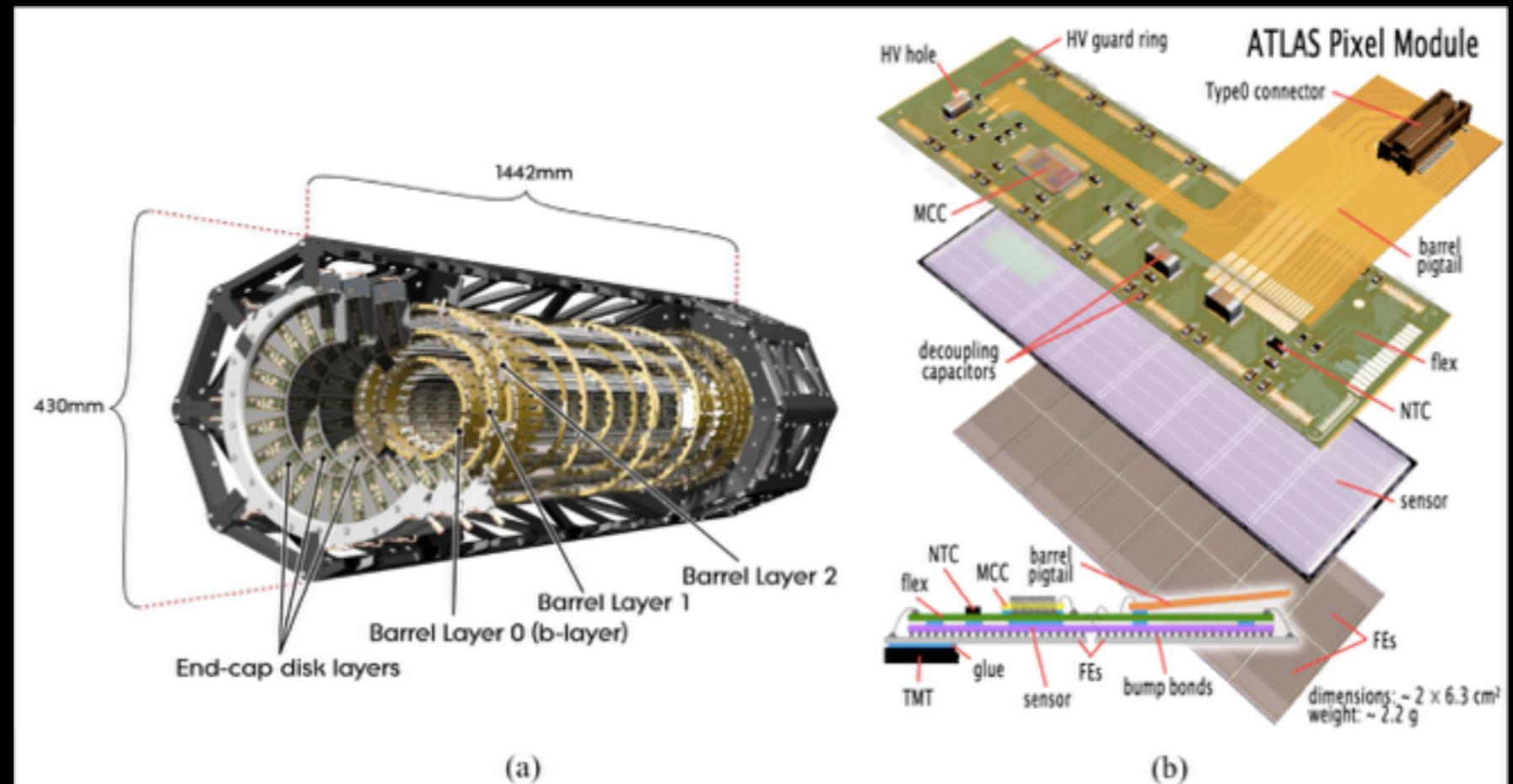
- **Impuls**  $p = m v = \gamma m$



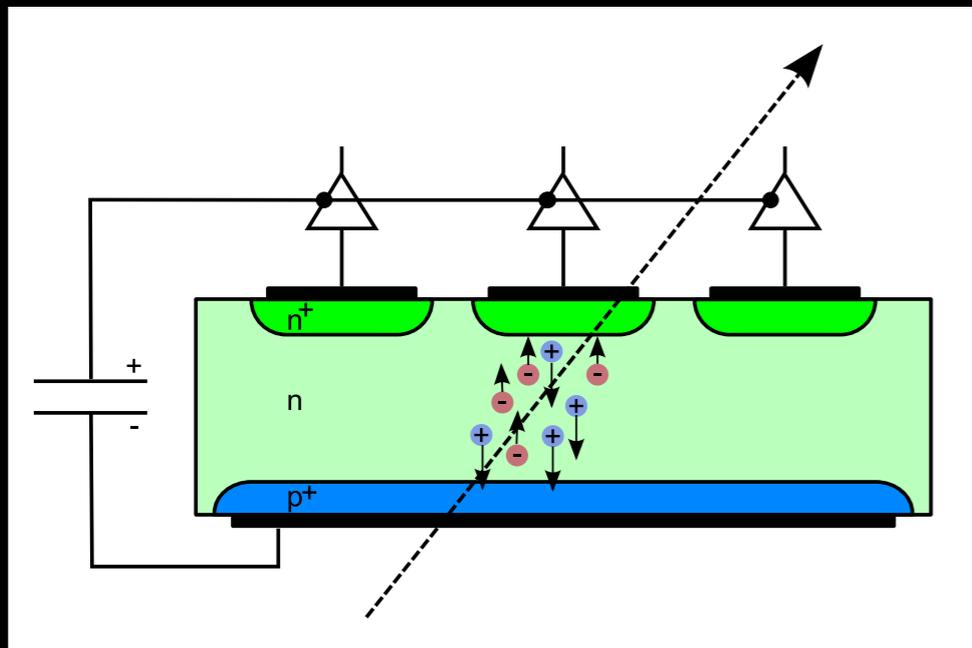
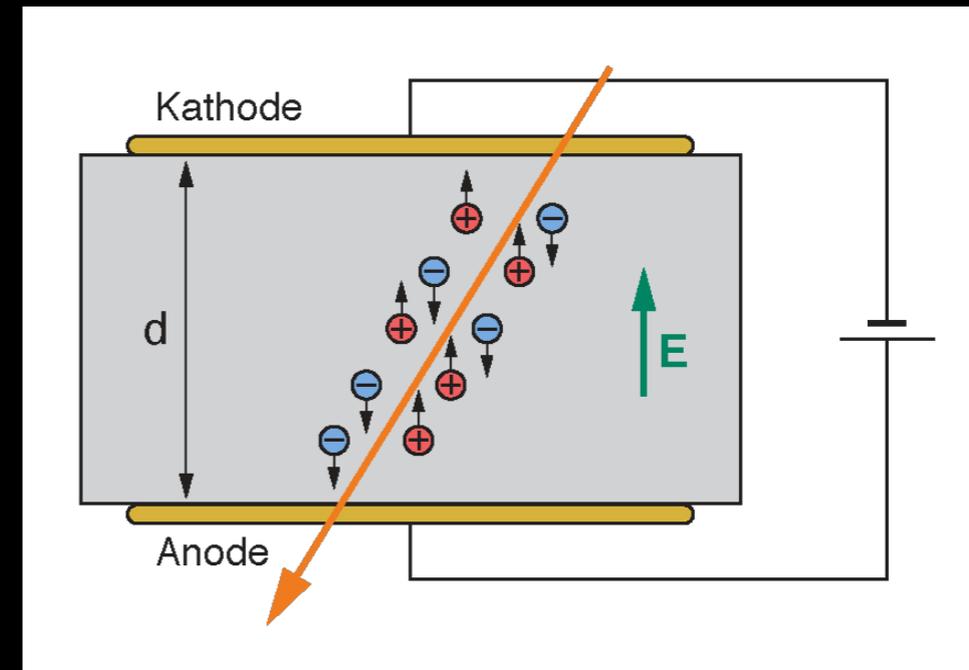
25 Pileup Vertices



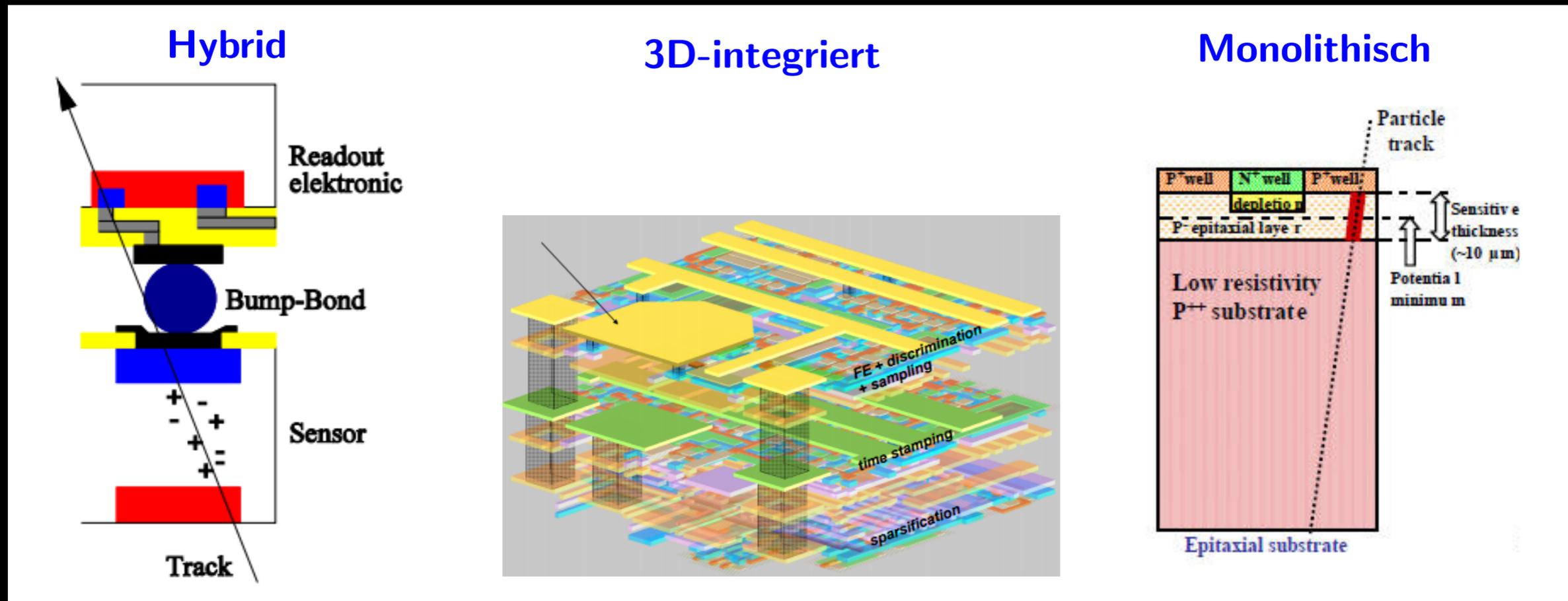
- Beispiel: **ATLAS Pixeldetektor**
  - **80M Pixel = 80M Auslesekanäle**
    - 160M einstellbare Parameter
    - Triggerrate: 100kHz
  - 2 phasen Kühlsystem (CF<sub>6</sub>) bei -10C
  - Services: LV, HV, Daten für 1700 Module



- Diode in Sperrrichtung
- Ladungserzeugung & Drift
  - Analog zu Gas-Ionisationskammern
- Festkörper  $\rightarrow$  hohe Dichte
  - Hoher Energieverlust auf kurzer Strecke



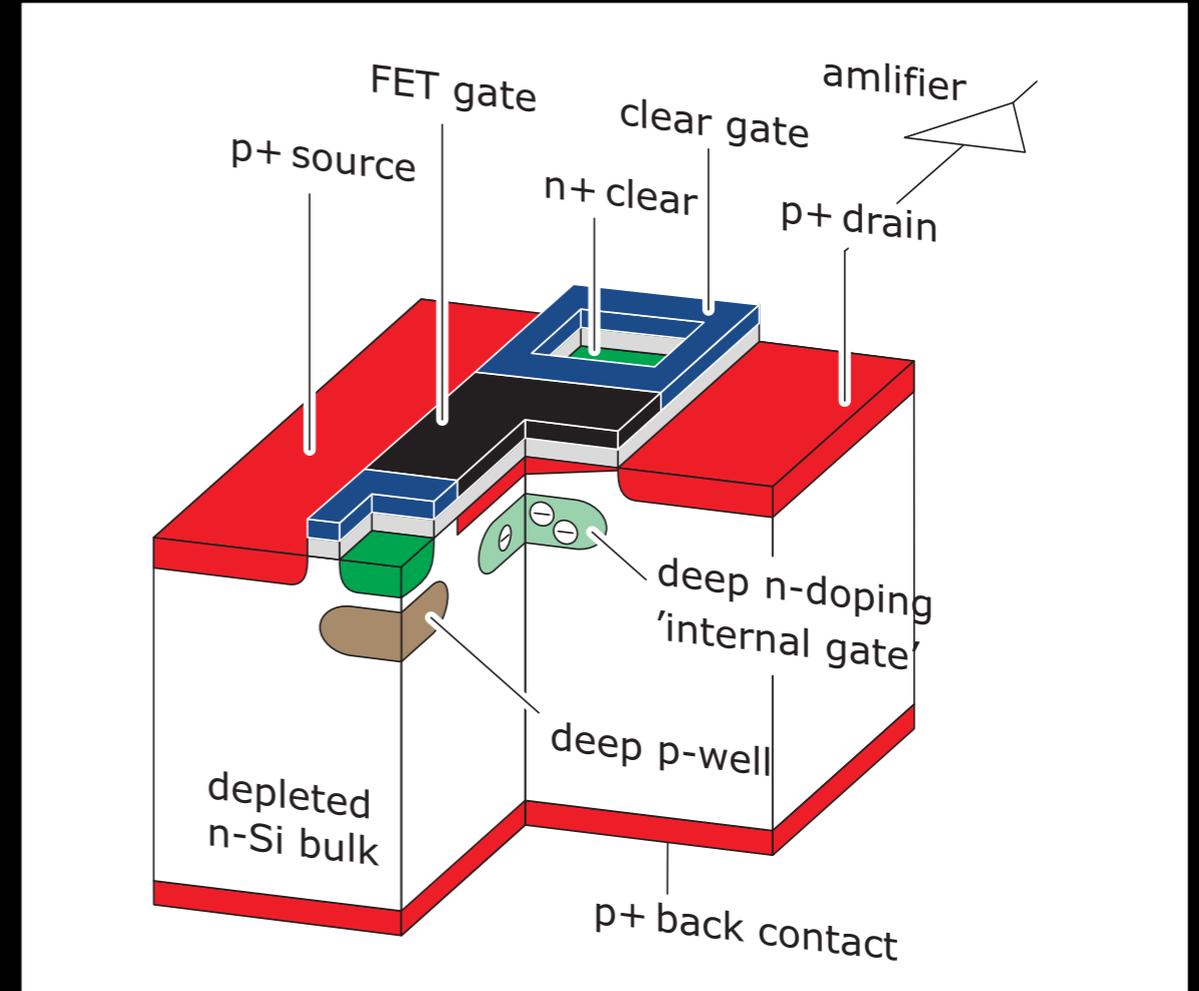
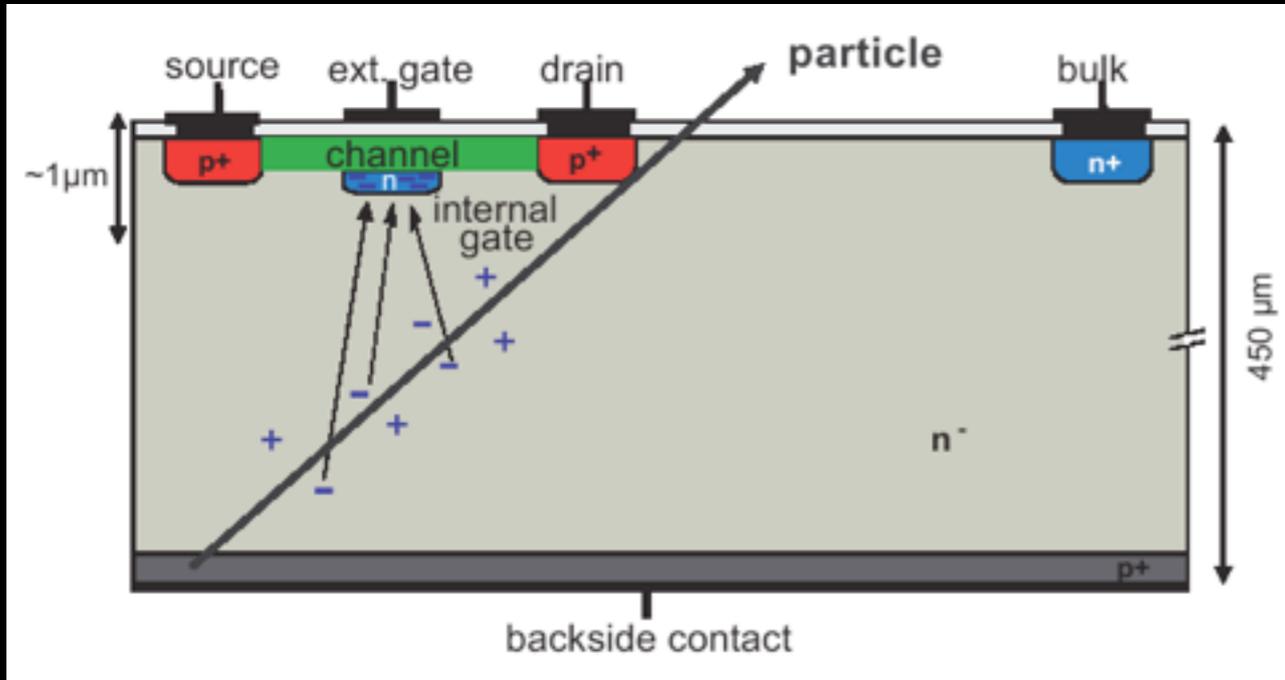
- Anordnung in **Streifen**:
  - Länge  $\sim$ cm
  - Abstand  $\sim 20\mu\text{m}$
- Anordnung in **Pixel**:
  - In Atlas:  $50\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$



- Sehr aktives Forschungsgebiet!
  - Verschiedene Konzepte
  - Neue Materialien

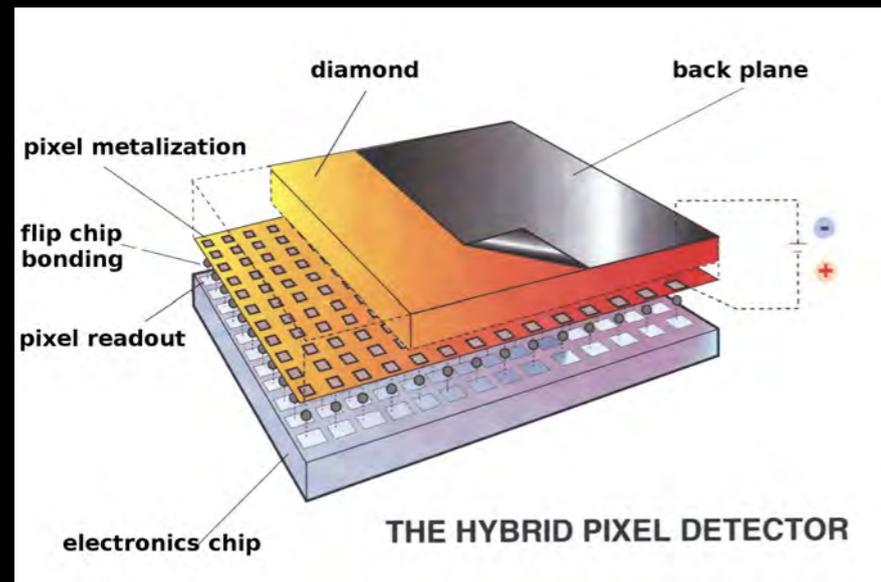
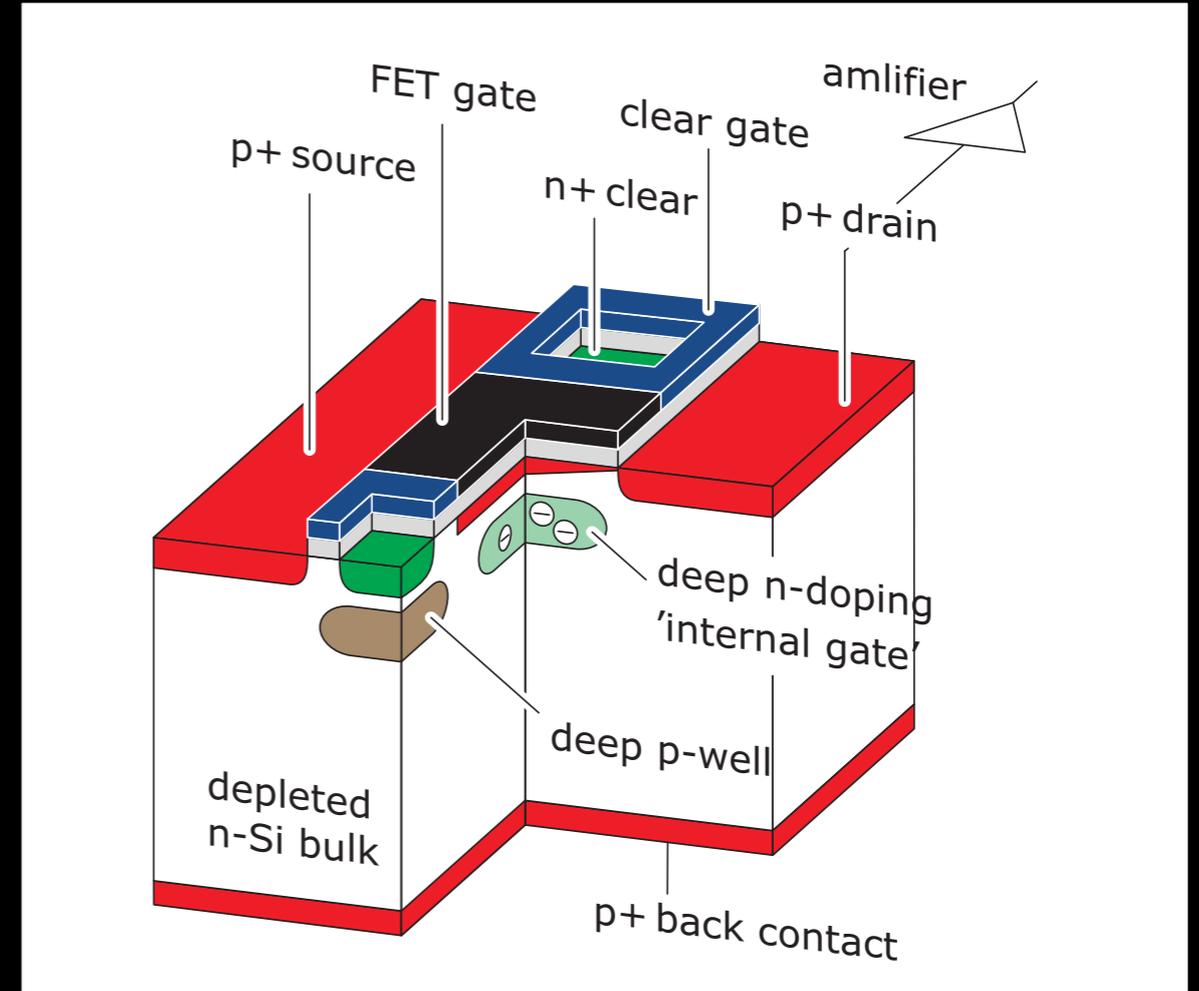
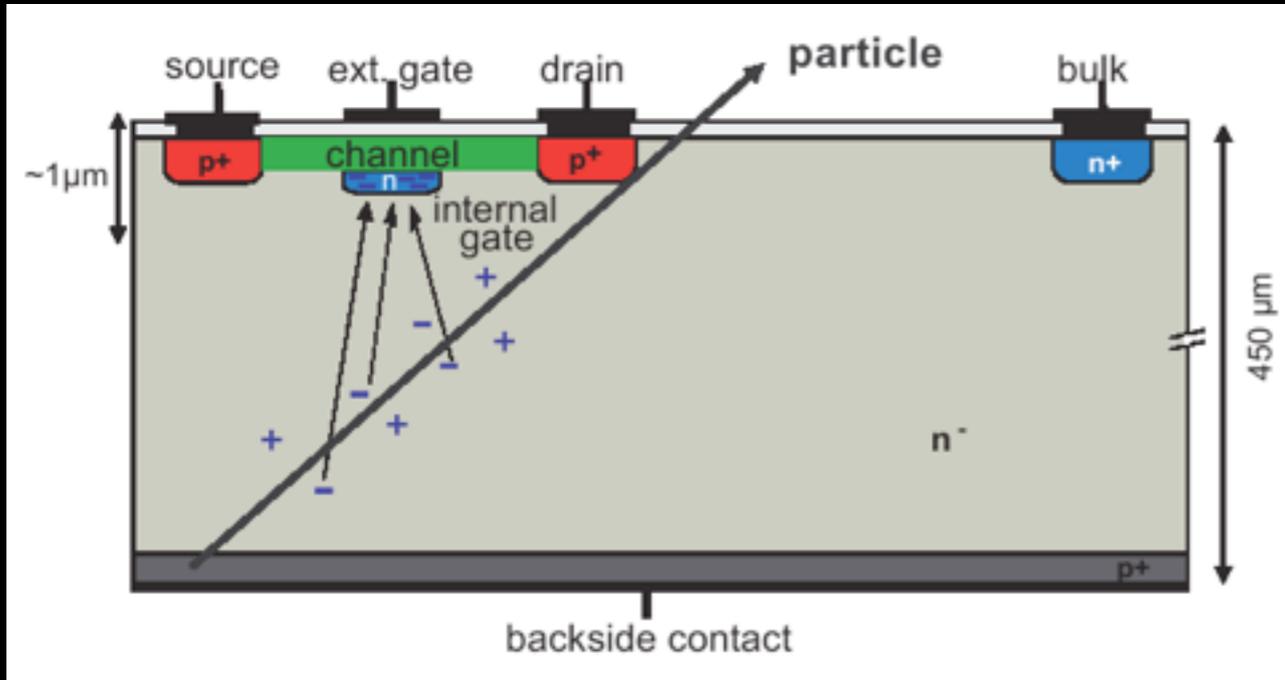
# Halbleiter Detektoren, quo vadis?

- Monolithisch:
  - Interne Verstärkung:
    - Kleineres Rauschen



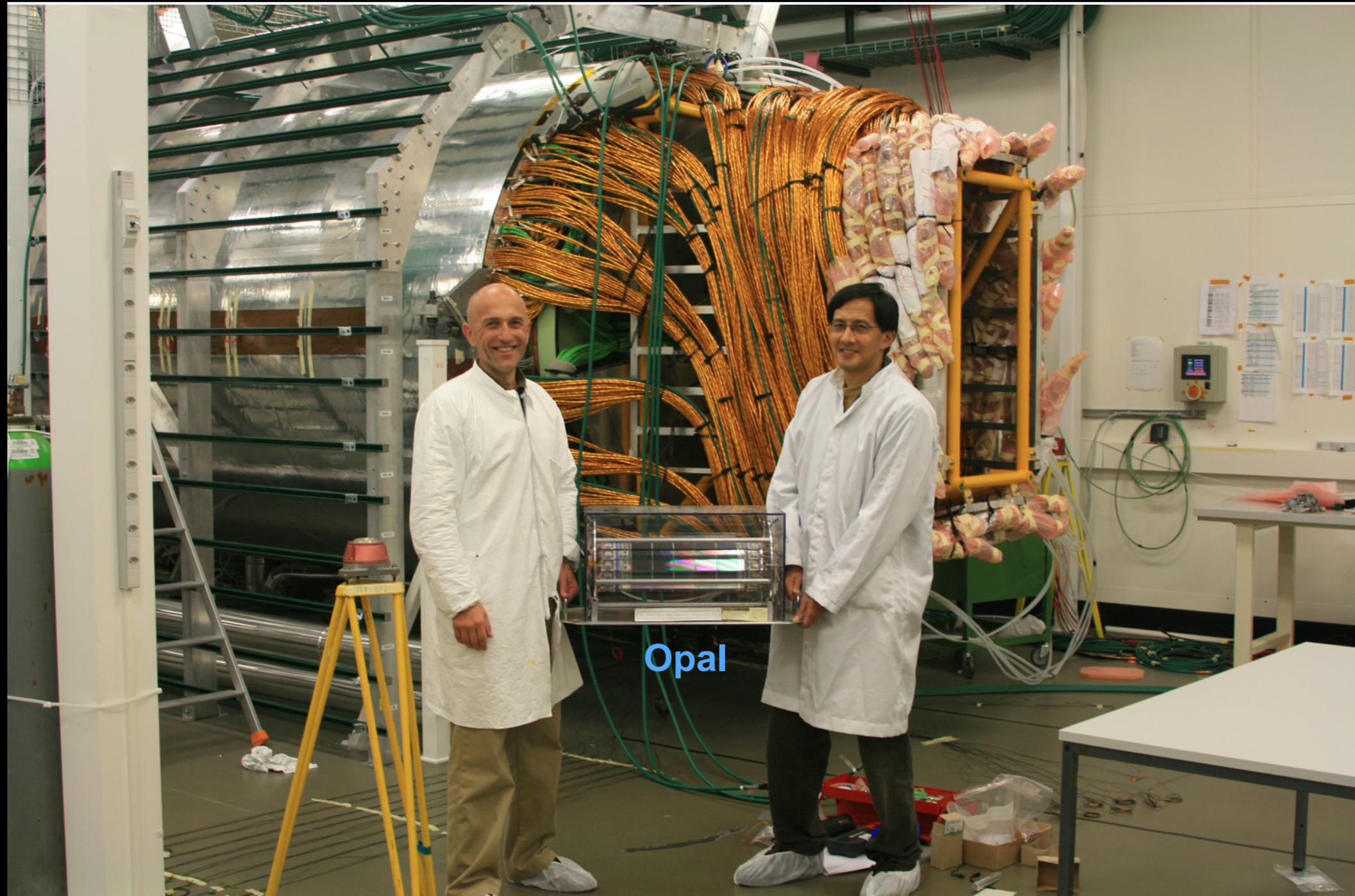
# Halbleiter Detektoren, quo vadis?

- Monolithisch:
  - Interne Verstärkung:
    - **Kleineres Rauschen**



- **Diamant (Isolator) als aktives Medium ( Ionisationskammer )**
  - extrem Strahlenhart
  - praktisch keine freien Ladungsträger
    - kein Leckstrom
  - gute Ladungssammlungseigenschaften

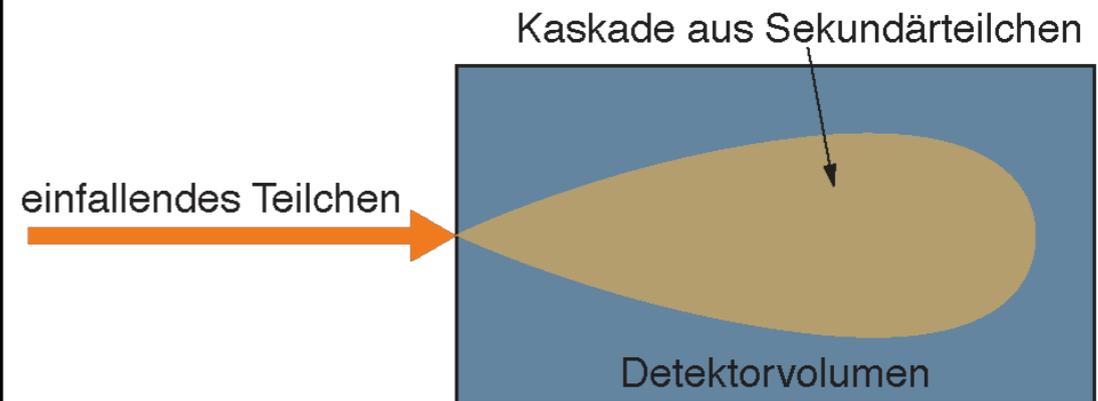
CMS



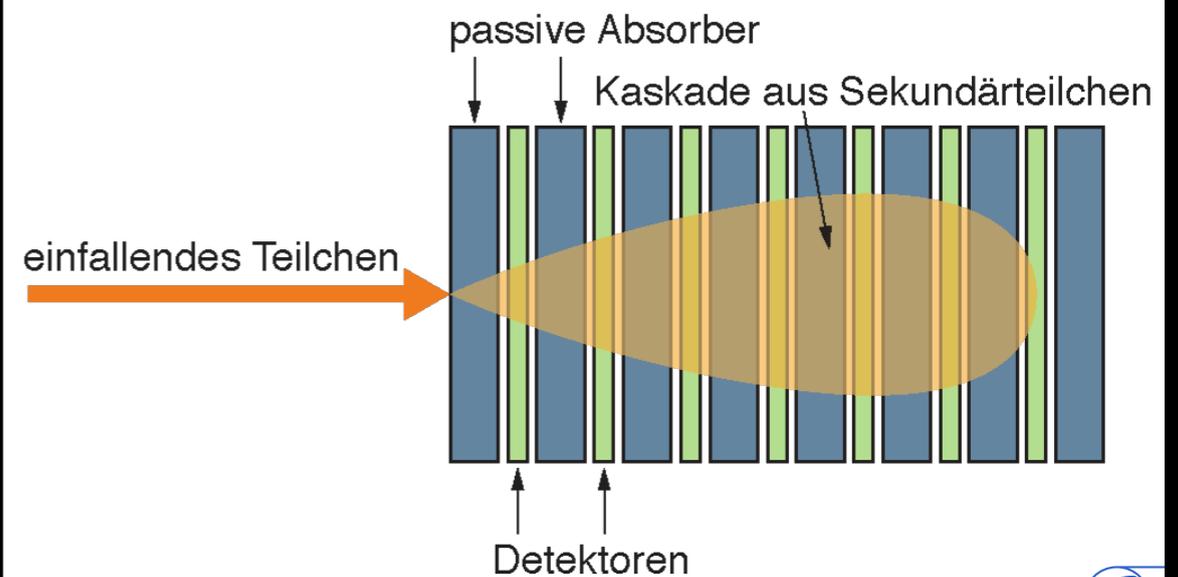
# Kalorimeter - Energiemessung

- Energiemessung der Teilchen
- Vollständige absorption:
  - Hohe Dichte
- Energie deponiert in Form von
  - Wärme
  - Ionisation
  - Licht
    - Anregung
    - Szintillation

## Homogenes Kalorimeter



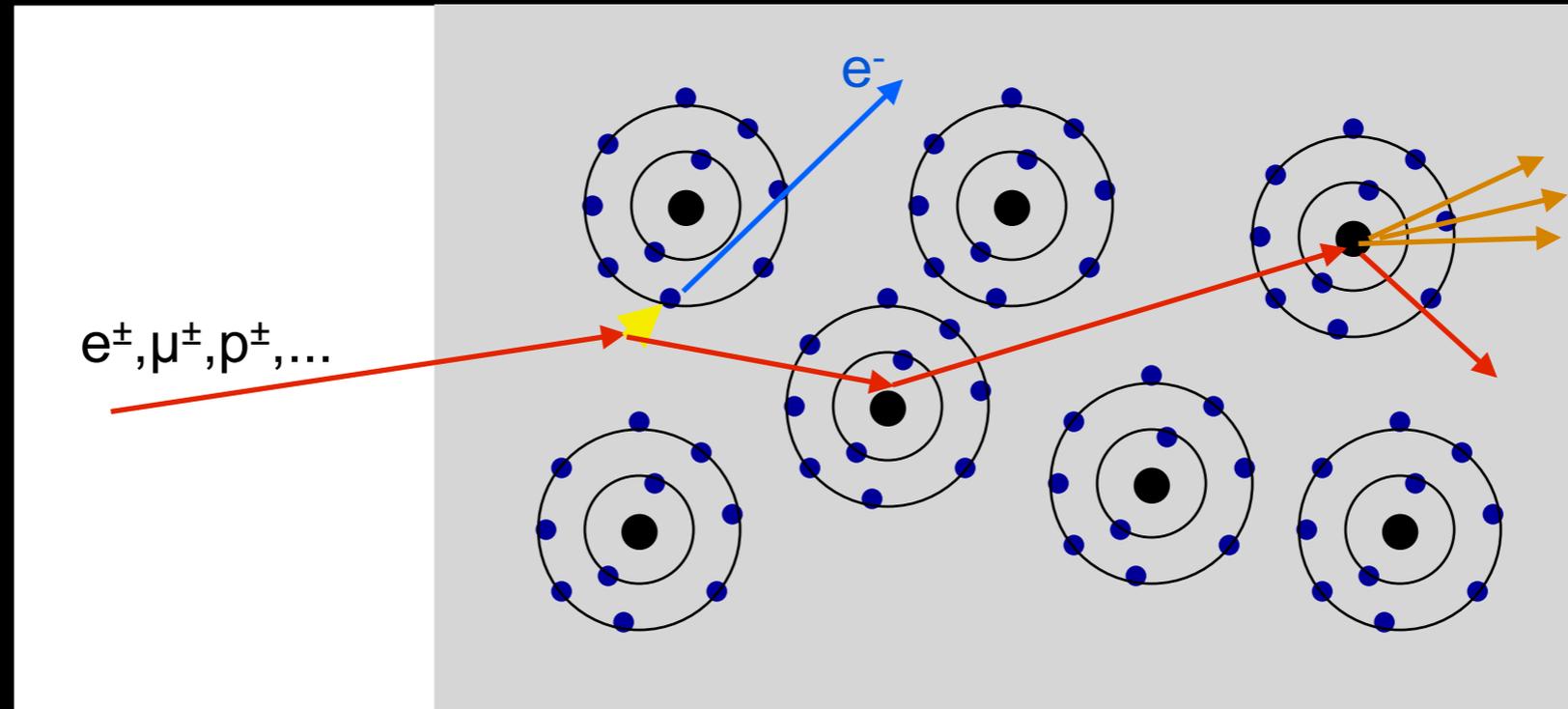
## Sampling-Kalorimeter



# Interaktion von geladenen Teilchen mit Materie

**Leptonen:** EM, schwache Wechselwirkung

**Hadronen:** EM, schwache, starke Wechselwirkung



# Interaktion von geladenen Teilchen mit Materie

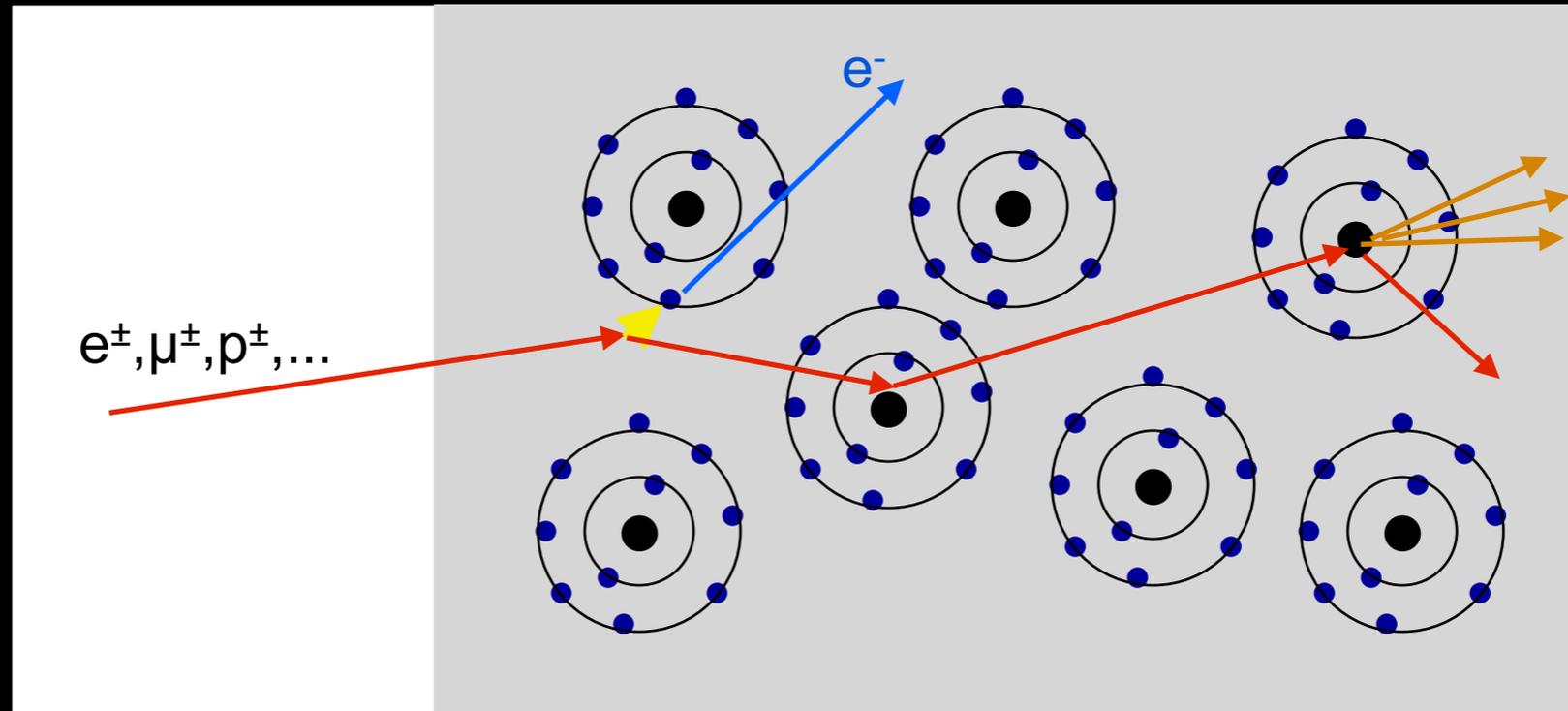
**Leptonen:** EM, schwache Wechselwirkung

**Hadronen:** EM, schwache, starke Wechselwirkung

**Ionisation**

**Elastische Streuung**  
Rückstoß am Atom /  
Kristallgitter → Phononen

**Inelastische Streuung**



# Interaktion von geladenen Teilchen mit Materie

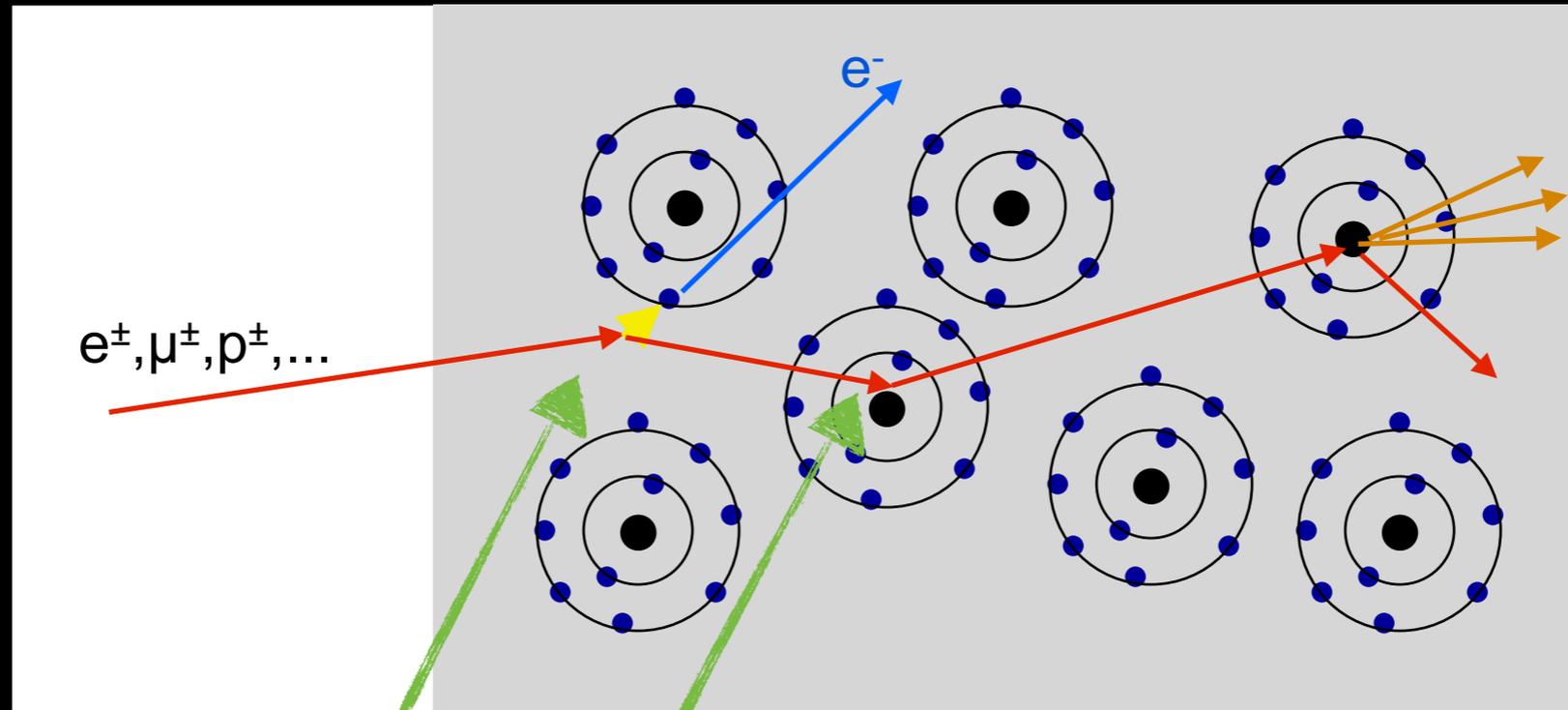
**Leptonen:** EM, schwache Wechselwirkung

**Hadronen:** EM, schwache, starke Wechselwirkung

**Ionisation**

**Elastische Streuung**  
Rückstoß am Atom /  
Kristallgitter → Phononen

**Inelastische Streuung**



**Elektromagnetische Wechselwirkung**

# Interaktion von geladenen Teilchen mit Materie

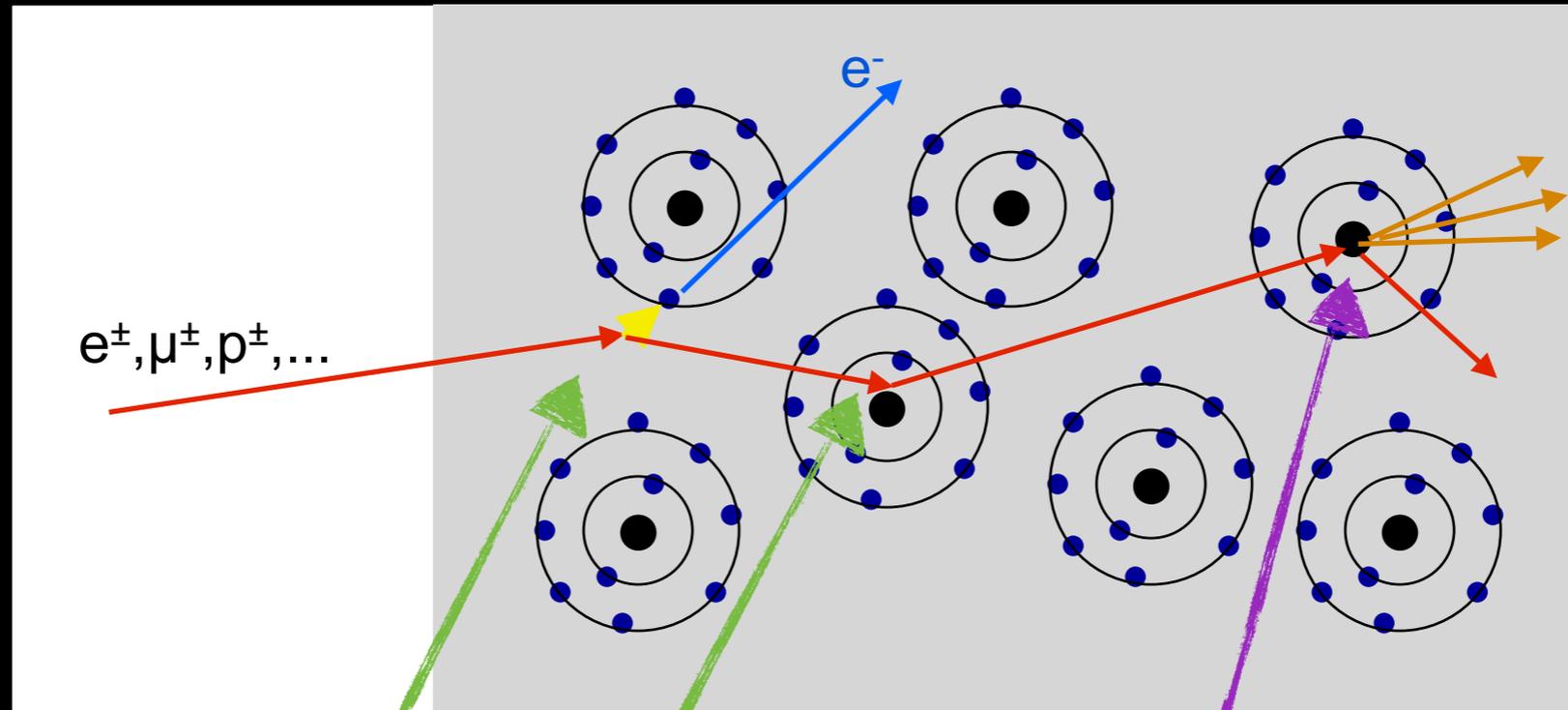
**Leptonen:** EM, schwache Wechselwirkung

**Hadronen:** EM, schwache, starke Wechselwirkung

**Ionisation**

**Elastische Streuung**  
Rückstoß am Atom /  
Kristallgitter → Phononen

**Inelastische Streuung**



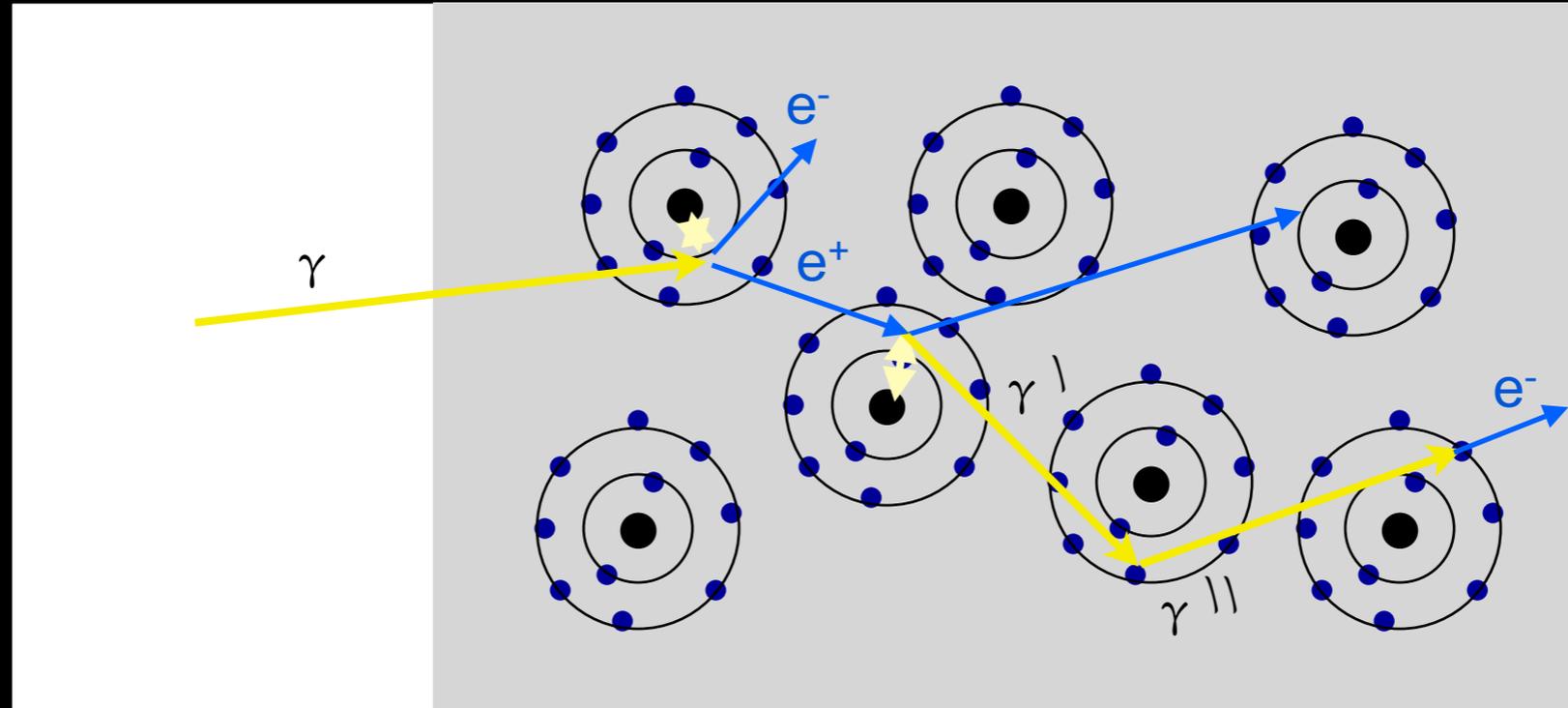
Elektromagnetische Wechselwirkung

Elektromagnetische oder  
Schwache oder  
Starke Wechselwirkung

# Interaktion von Photonen mit Materie

**Leptonen:** EM, schwache Wechselwirkung

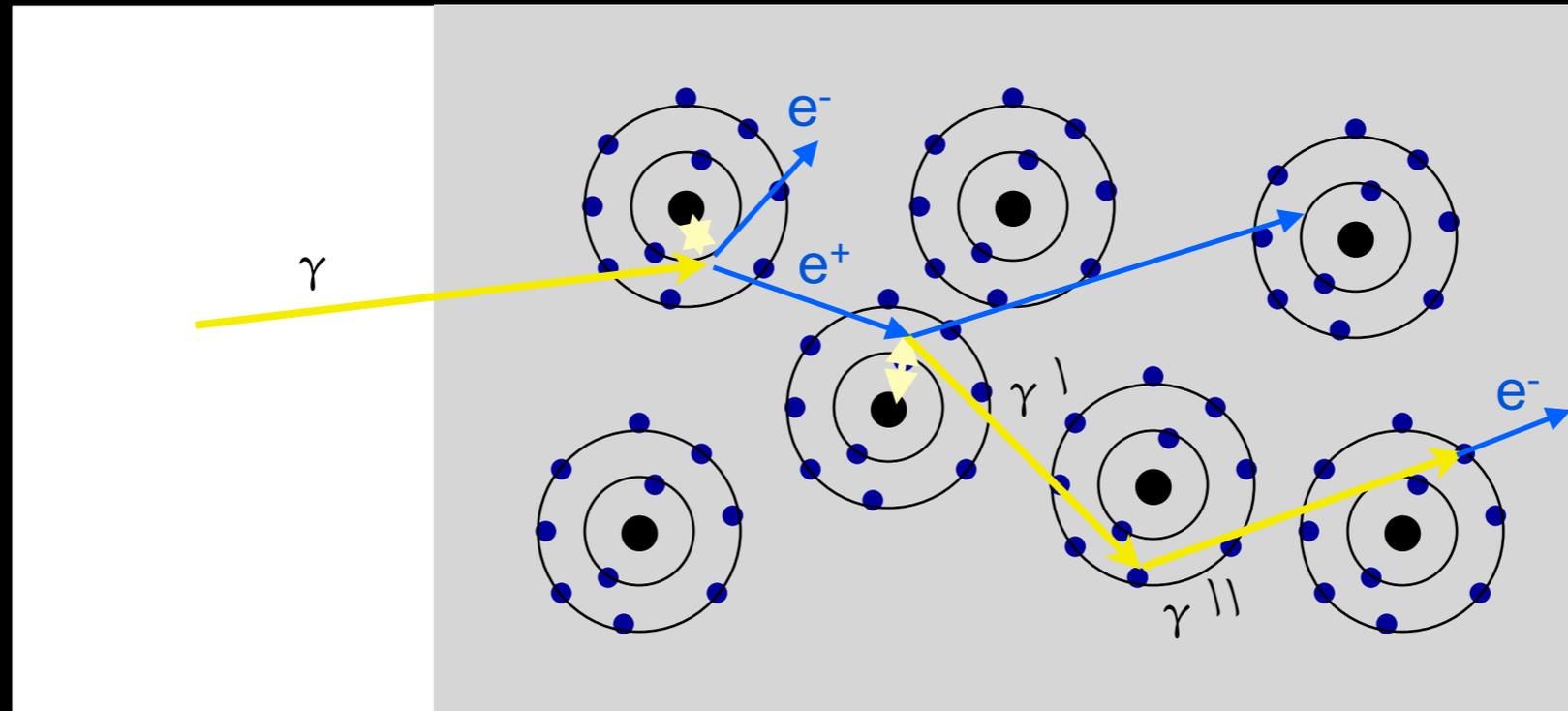
**Hadronen:** EM, schwache, starke Wechselwirkung



# Interaktion von Photonen mit Materie

**Leptonen:** EM, schwache Wechselwirkung

**Hadronen:** EM, schwache, starke Wechselwirkung



Elektromagnetische Wechselwirkung

# Interaktion von Photonen mit Materie

**Leptonen:** EM, schwache Wechselwirkung

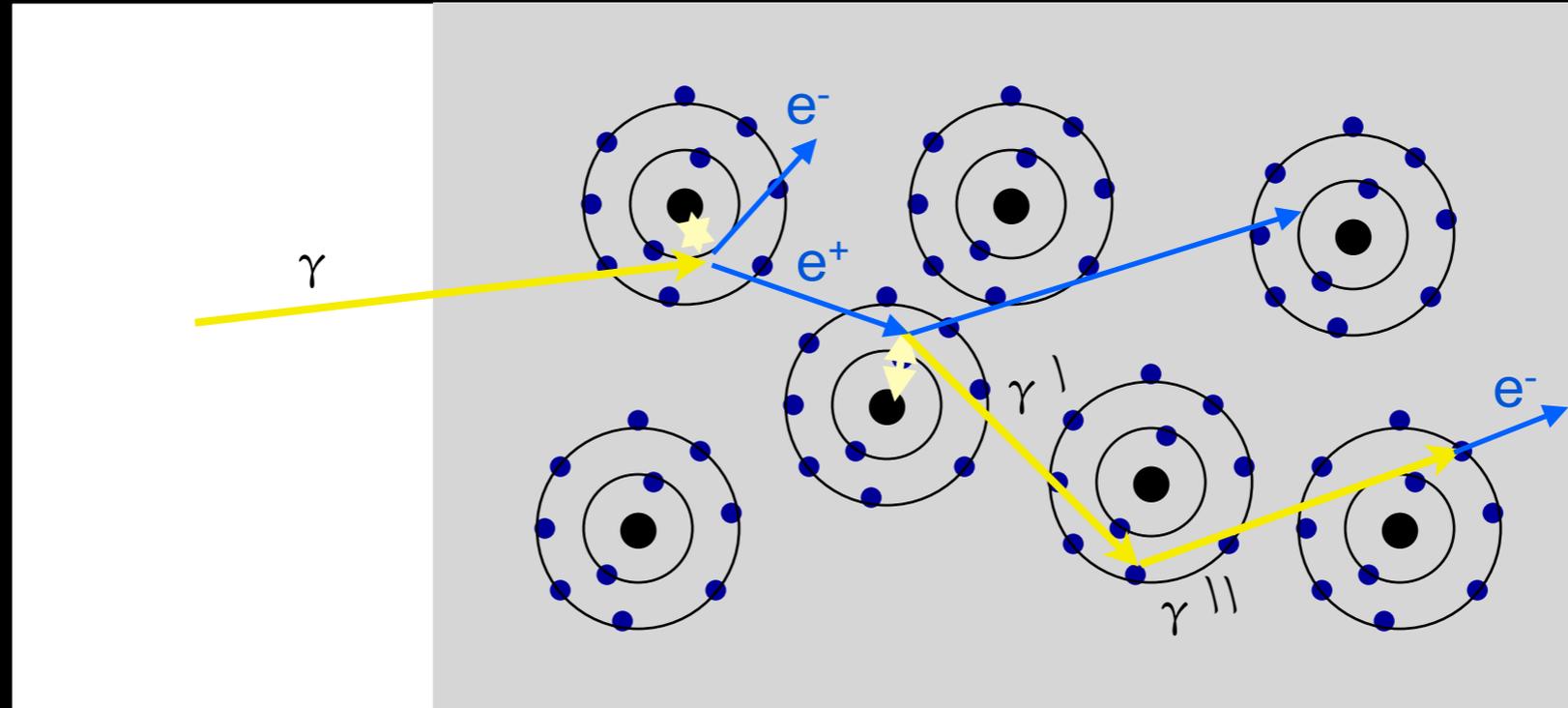
**Hadronen:** EM, schwache, starke Wechselwirkung

Paarbildung

Bremsstrahlung

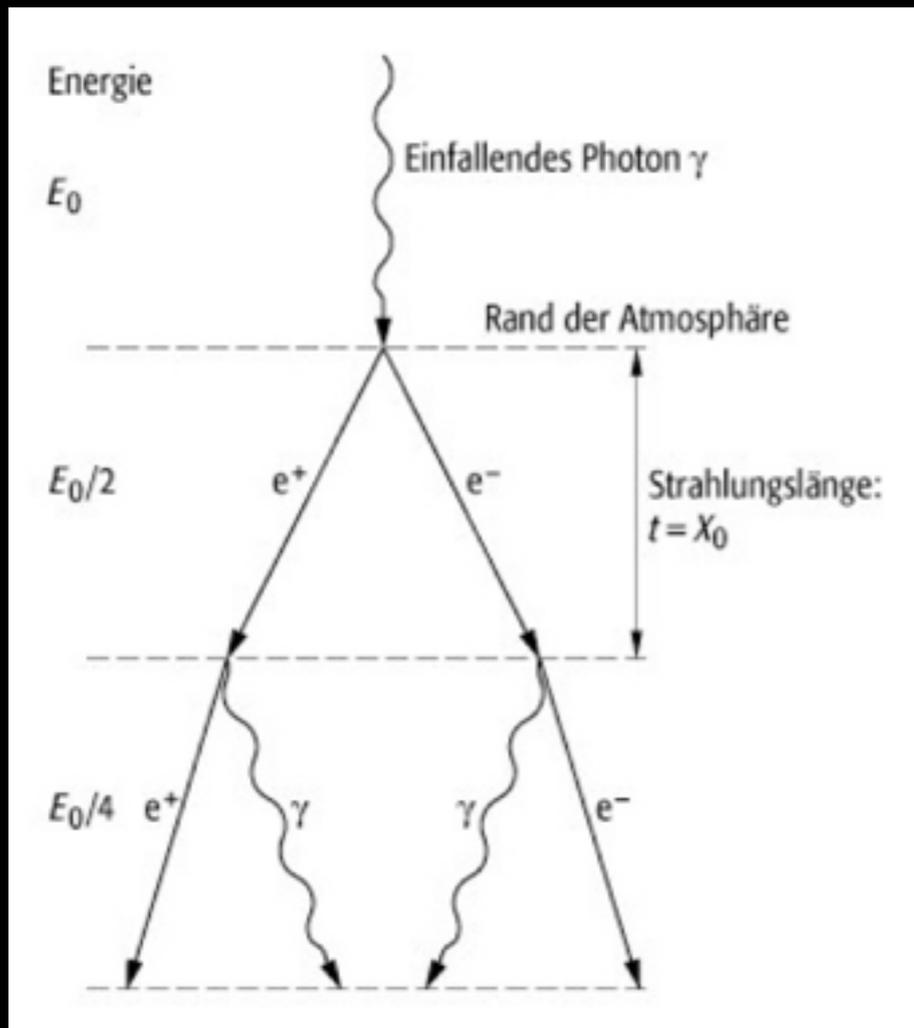
Compton  
Streuung

Ionisation



Elektromagnetische Wechselwirkung

- Stoppen der Teilchen im **Kalorimeter**
  - **Licht** oder **Ladungssignal** proportional zur Energie E
- Elektromagnetisches Kalorimeter: e/ $\gamma$
- **Oberhalb  $E_k$** : Energieverlust durch Paarbildung und Bremsstrahlung



Anzahl der Teilchen nach  $t$  Strahlungslängen:  
 $N(t) = 2^t$

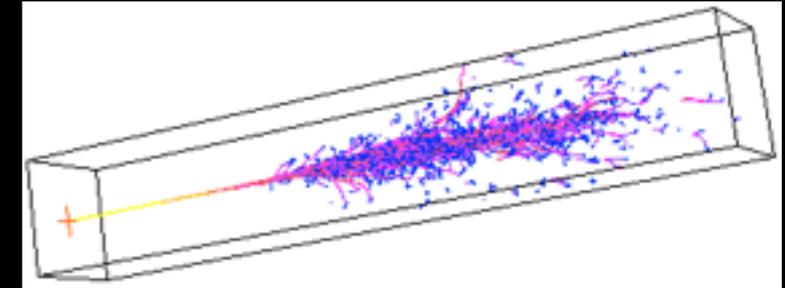
Mittlere Energie der Teilchen:  
 $E(t) = E_0/2^t$

Schauermaximum bei  $E(t) = E_k$ :  
 $t_{\max} = \ln(E_0) * \ln(2) / \ln(E_k)$

**=> Kalorimeterlänge wächst mit  $\ln(E_0)$**

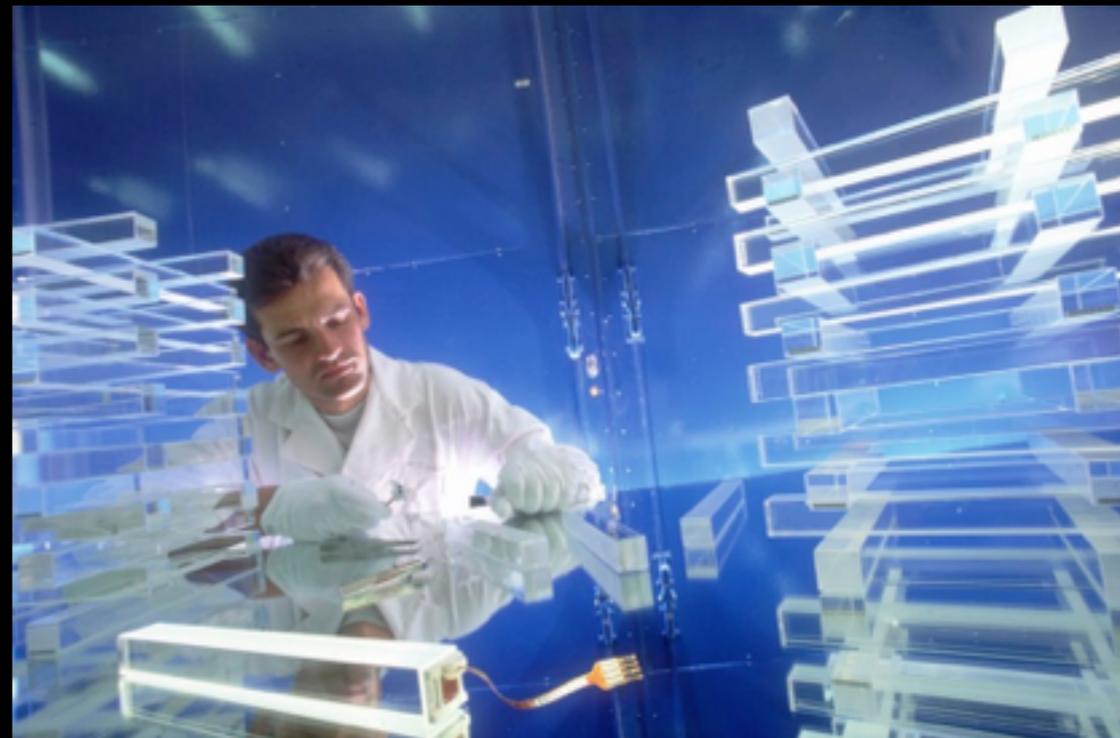
- Stoppen der Teilchen im **Kalorimeter**
  - **Licht** oder **Ladungssignal** proportional zur Energie  $E$
- Elektromagnetisches Kalorimeter:  $e/\gamma$
- Typische Materialien:
  - NaI ( $X_0 = 2,6\text{cm} \rightarrow 57\text{cm} @ 22 X_0$ )
    - Relativ langsam 230ns / 150ms (!!)
  - $\text{PbWO}_4$  ( $X_0 = 0,9\text{cm} \rightarrow 20\text{cm} @ 22 X_0$ )
    - Schnell: 2-20ns

- Stoppen der Teilchen im **Kalorimeter**
  - **Licht** oder **Ladungssignal** proportional zur Energie  $E$
- Elektromagnetisches Kalorimeter:  $e/\gamma$
- Typische Materialien:
  - NaI ( $X_0 = 2,6\text{cm} \rightarrow 57\text{cm} @ 22 X_0$ )
    - Relativ langsam 230ns / 150ms (!!)
  - PbWO<sub>4</sub> ( $X_0 = 0,9\text{cm} \rightarrow 20\text{cm} @ 22 X_0$ )
    - Schnell: 2-20ns



## Homogenes Kalorimeter:

- Beste Energieauflösung
- Teuer
- PMT auslese  
problematisch im B Feld
- keine longitudinale  
Segmentierung!

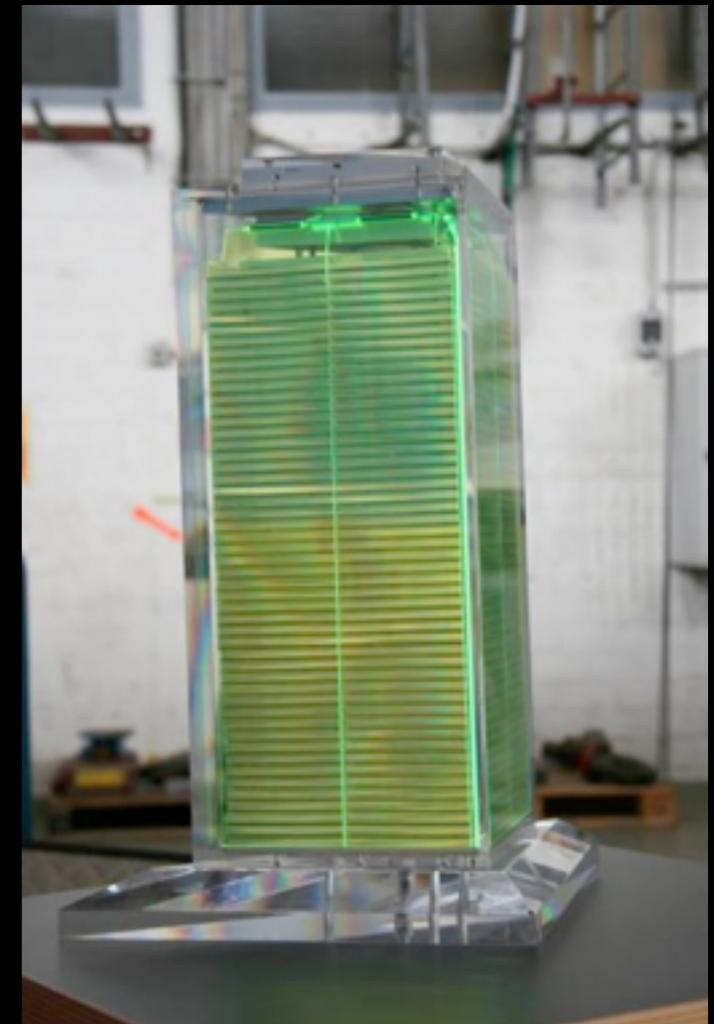
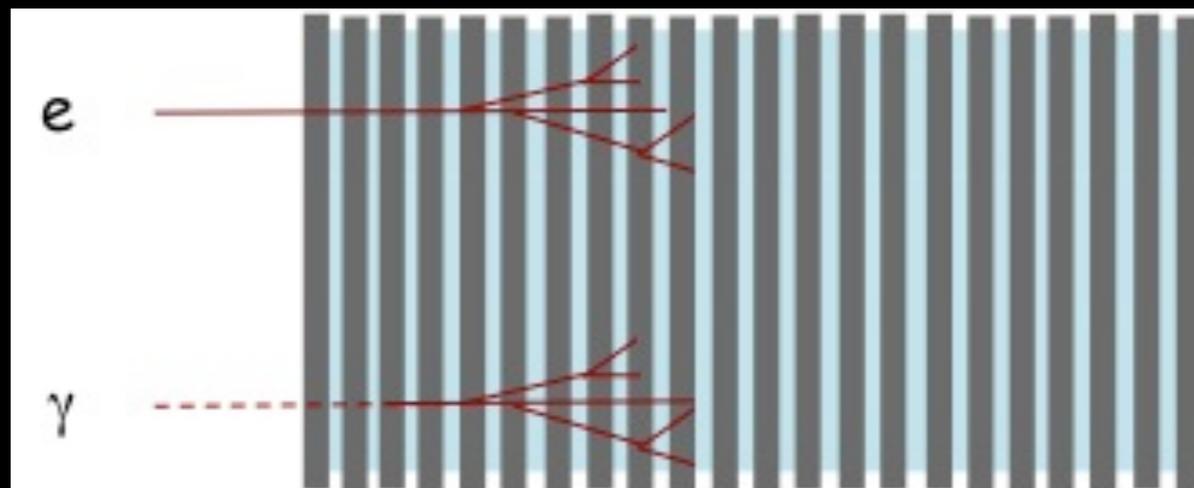


- Stoppen der Teilchen im **Kalorimeter**
  - **Licht** oder **Ladungssignal** proportional zur Energie  $E$
- Elektromagnetisches Kalorimeter:  $e/\gamma$
- Alternativ:
  - **Absorber & Aktives Medium abwechseln**
    - Absorber  
Stahl / Blei / Wolfram / Uran (großes  $Z$ )
  - Aktives Material:  
Szintillator: Organisch  
Ionisation: Flüssiges Argon

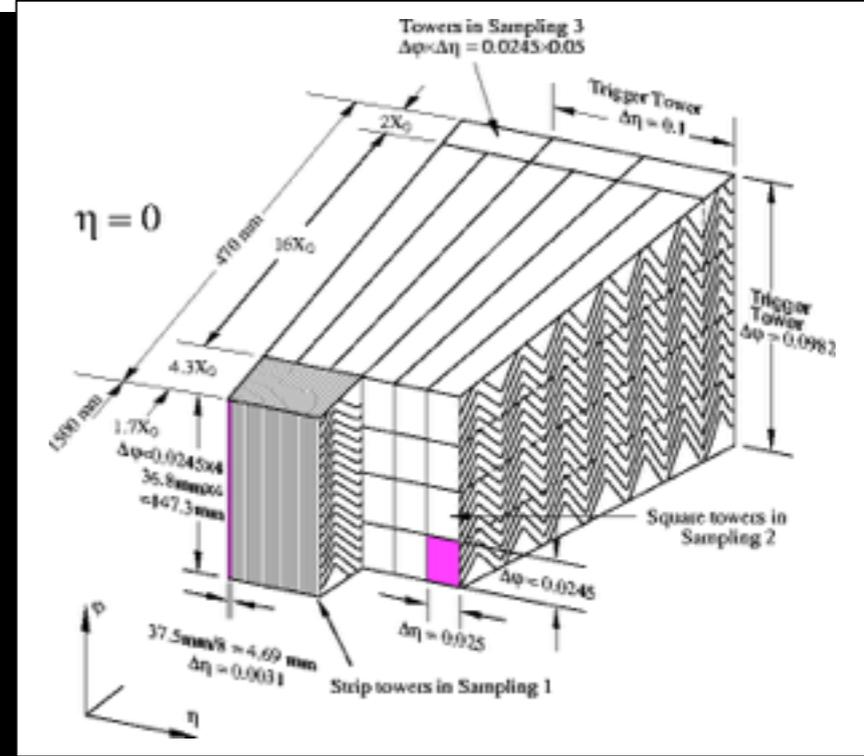
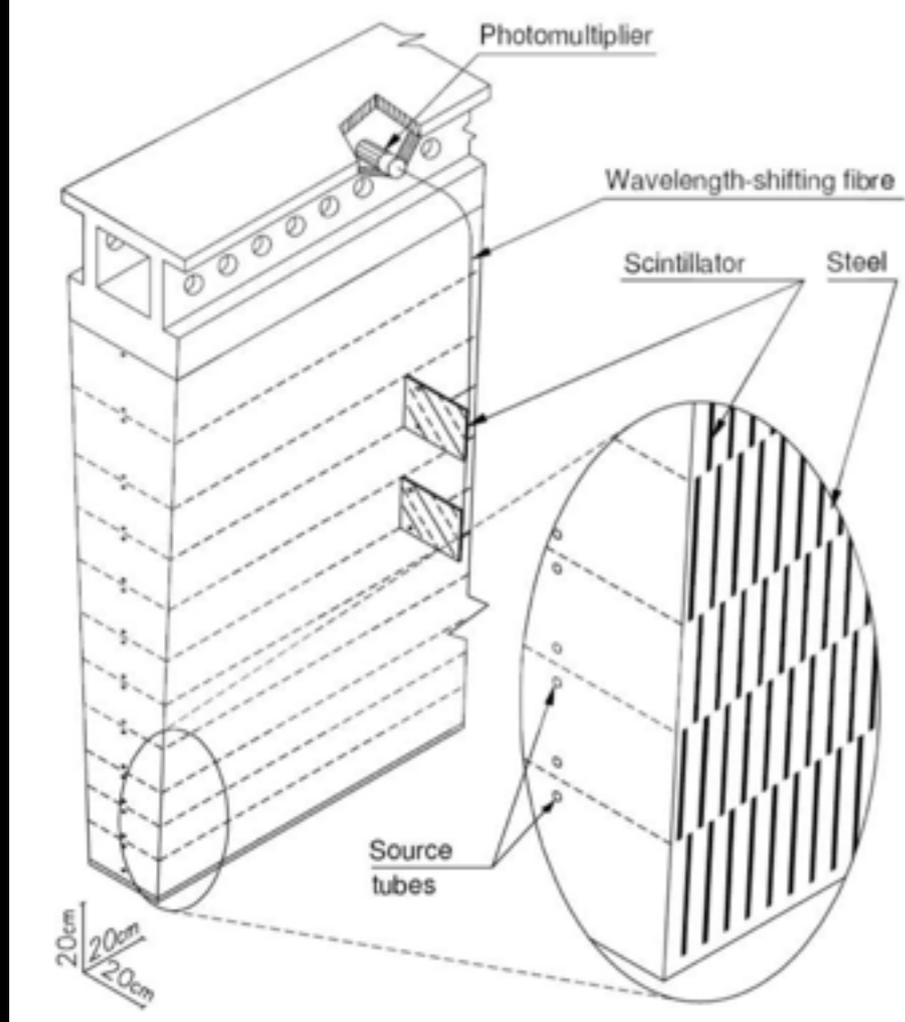
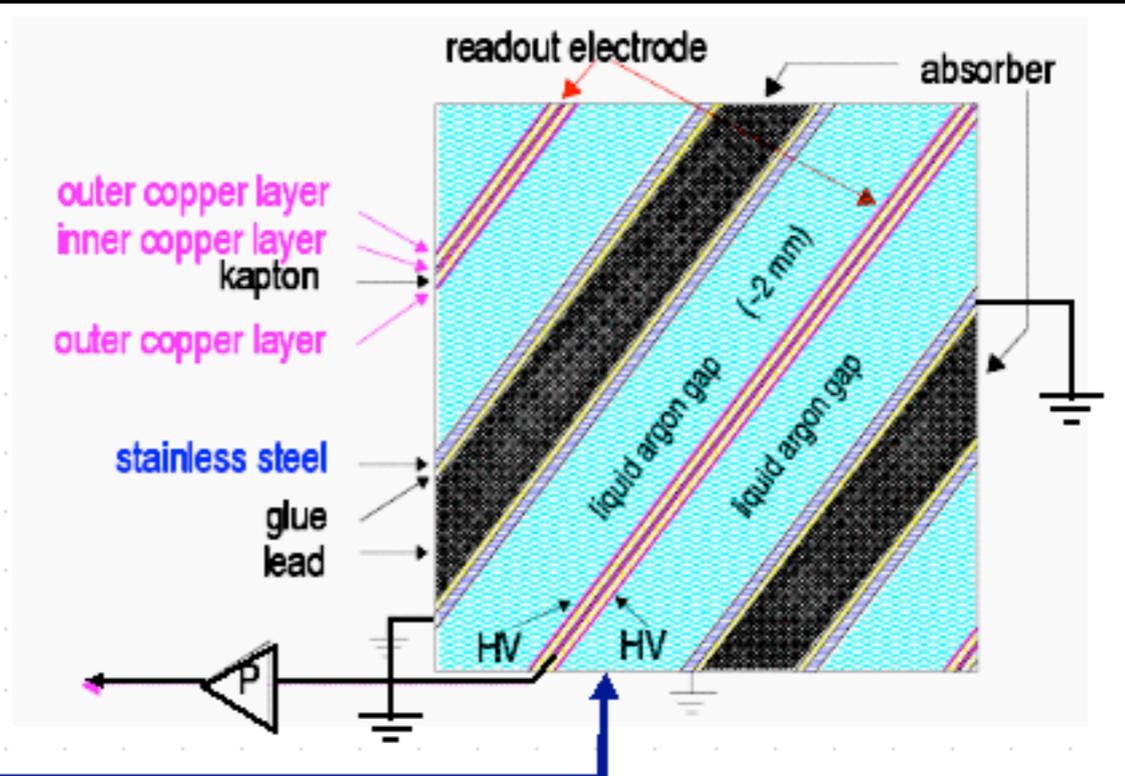
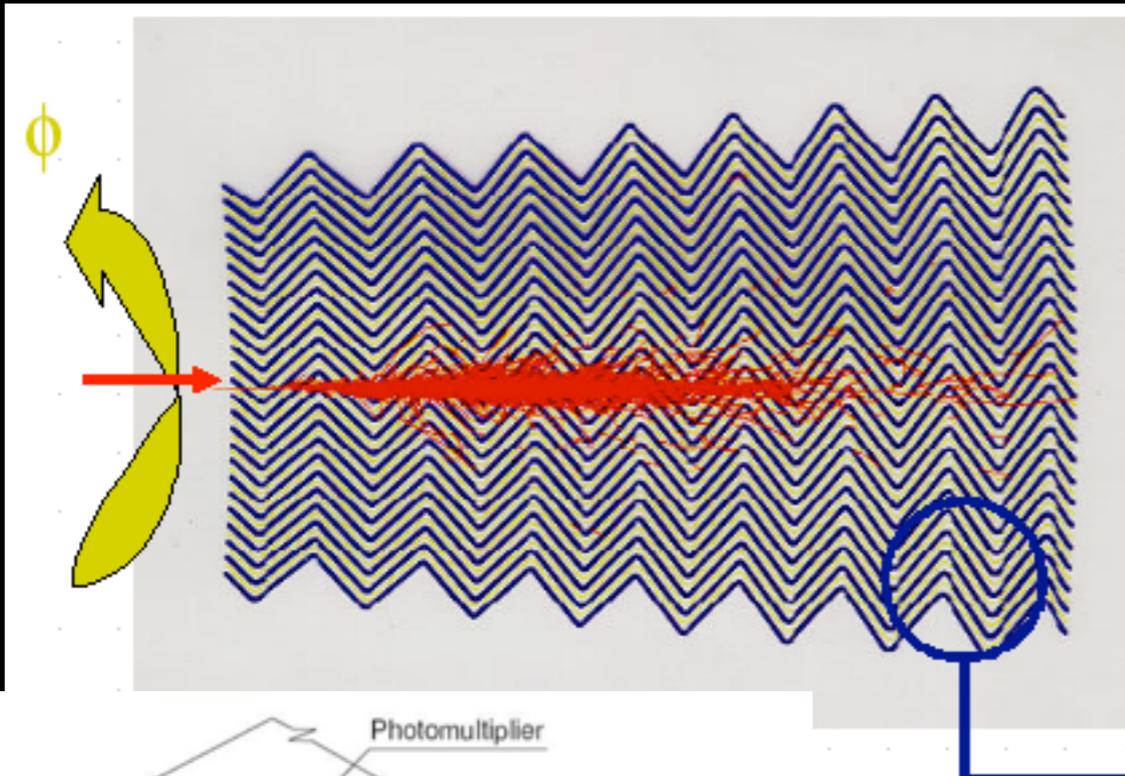
- Stoppen der Teilchen im **Kalorimeter**
  - **Licht** oder **Ladungssignal** proportional zur Energie  $E$
- Elektromagnetisches Kalorimeter:  $e/\gamma$
- Alternativ:
  - **Absorber & Aktives Medium abwechseln**
    - Absorber  
Stahl / Blei / Wolfram / Uran (großes  $Z$ )
  - Aktives Material:  
Szintillator: Organisch  
Ionisation: Flüssiges Argon

## Sampling Kalorimeter:

- Kompakt
- Hohe 2D Segmentierung
- Günstiger
- **Schlechtere Energieauflösung**



# Kalorimeter



- Auflösung = relativer Fehler auf Energiemessung:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

stochastisch

„noise“  
• elektronisches Rauschen  
• Radioaktivität  
• „pile up“

konstant  
• Kalibrierungsfehler  
• Inhomogenität  
• Nichtlinearität

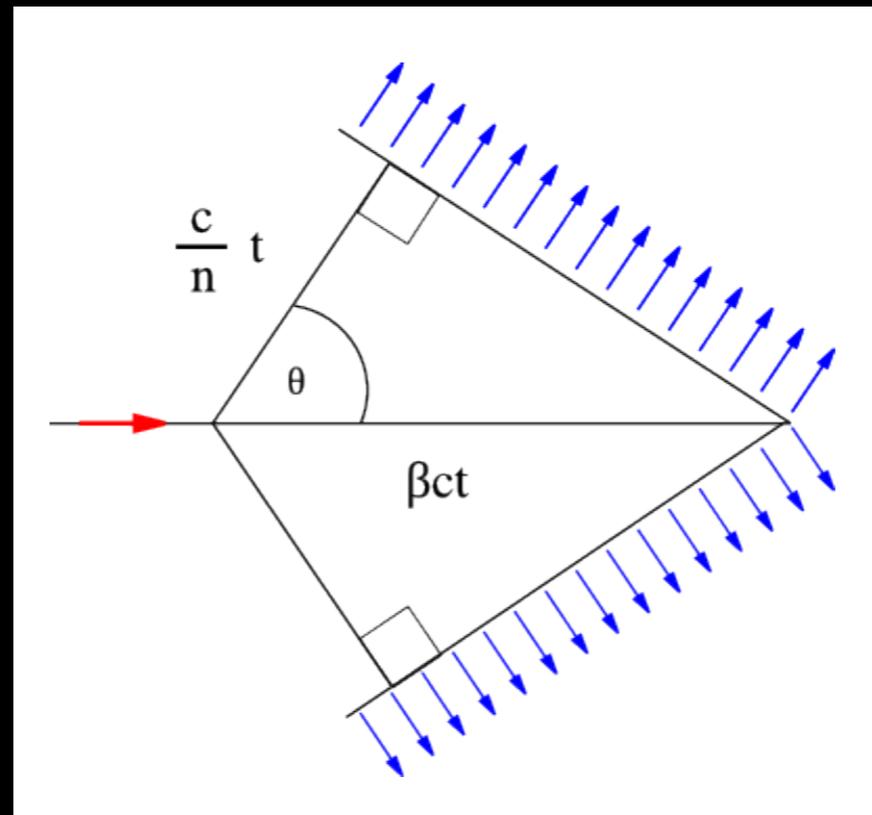
ATLAS Hadronic Cal.:  $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{52\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{1.6}{E} \oplus 3\%$

ATLAS EM Cal.:  $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{0.17}{E} \oplus 0.7\%$

# Nachweis von Neutrinos

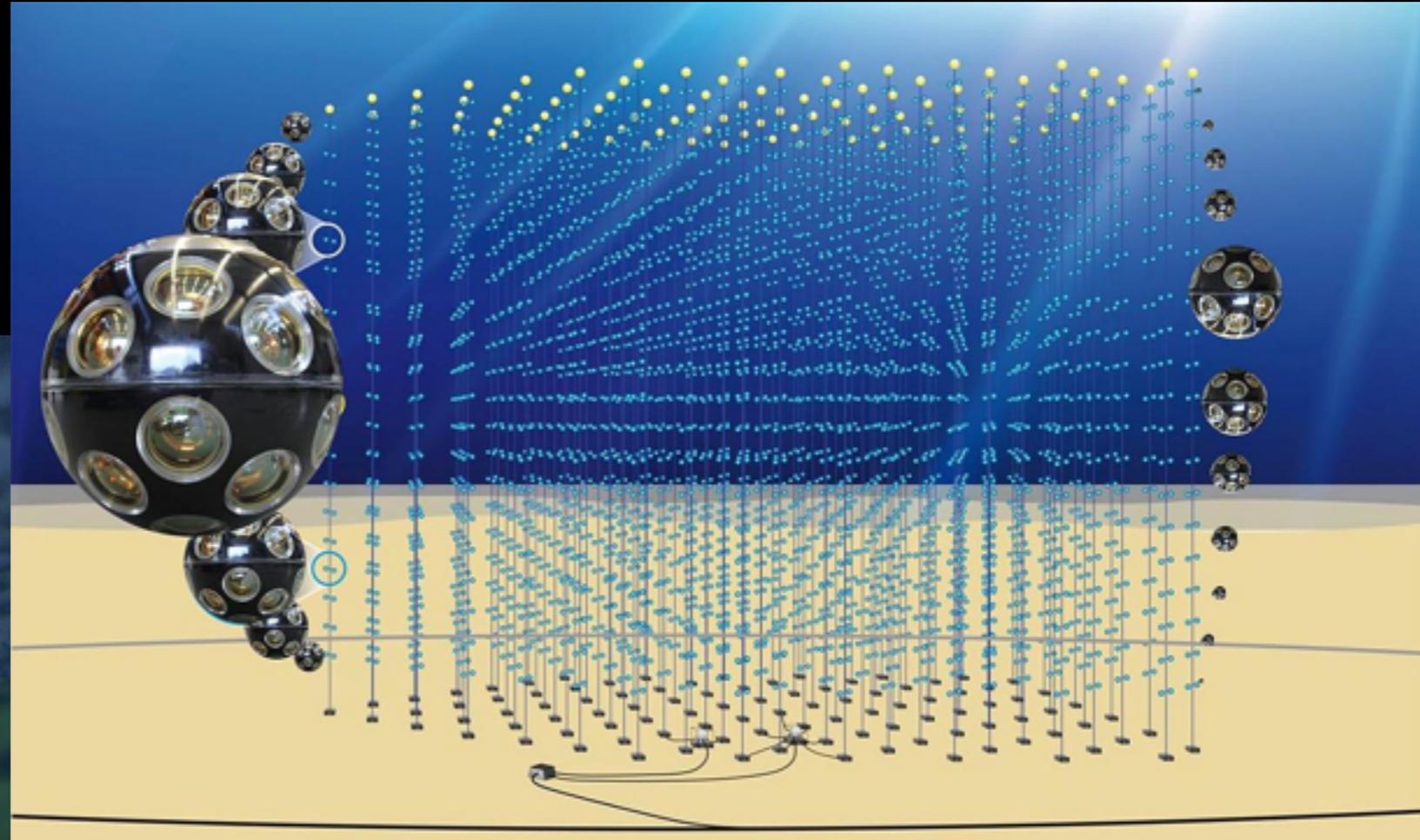
# Neutrinos - Cherenkov-Licht in Wasser

- Reaktion: Neutrino - Elektron Streuung
  - Schnelles Elektron erzeugt Cherenkov-Licht
  - Öffnungswinkel abhängig von Geschwindigkeit  $\cos(\theta) = c/v$



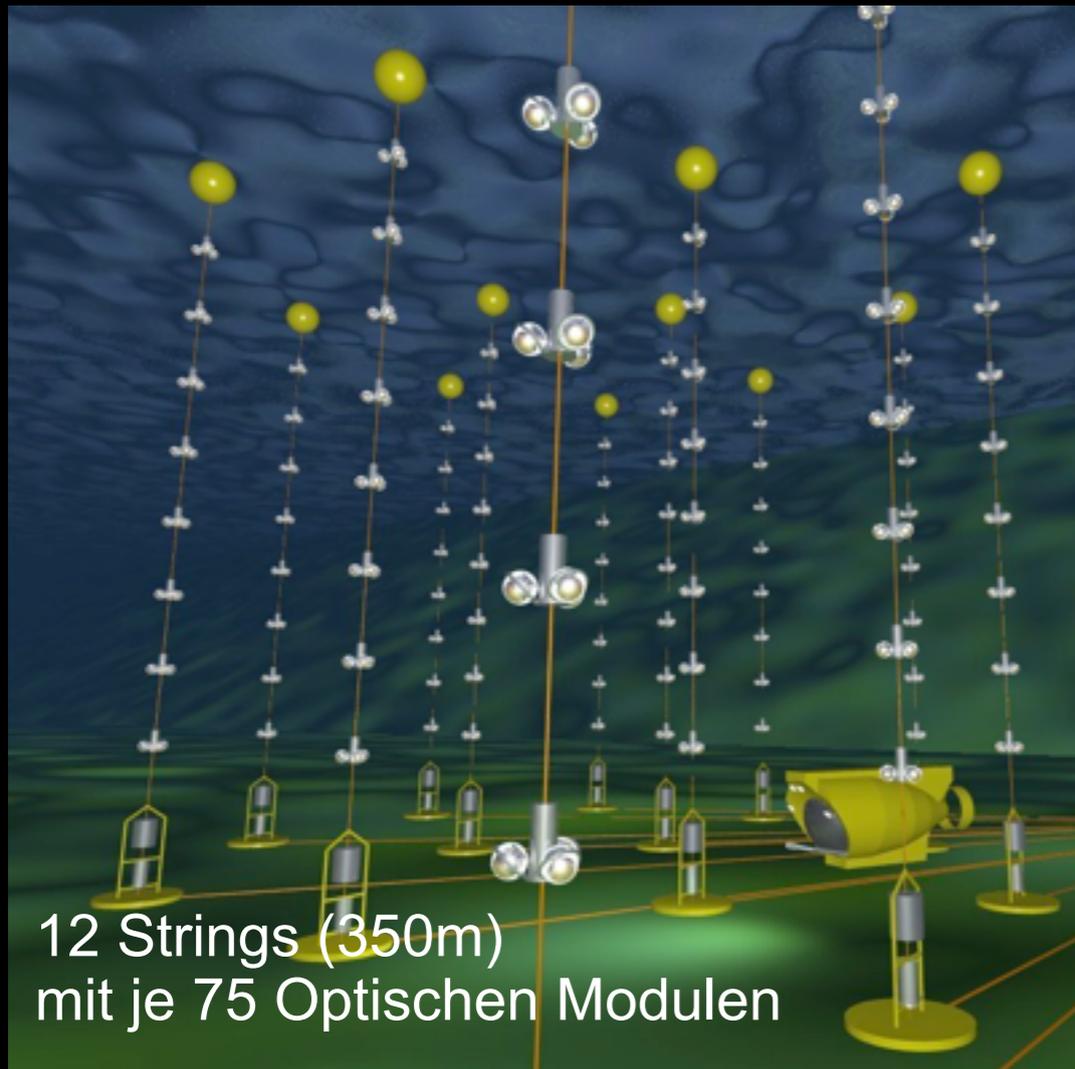
# Neutrinos - Antares / km3Net

km3Net (im Bau):  
600 Strings (650m) mit je 18 Optischen Modulen



- Neutrino Teleskop im Mittelmeer
  - 3.4 km Tiefe

Antares (2008)

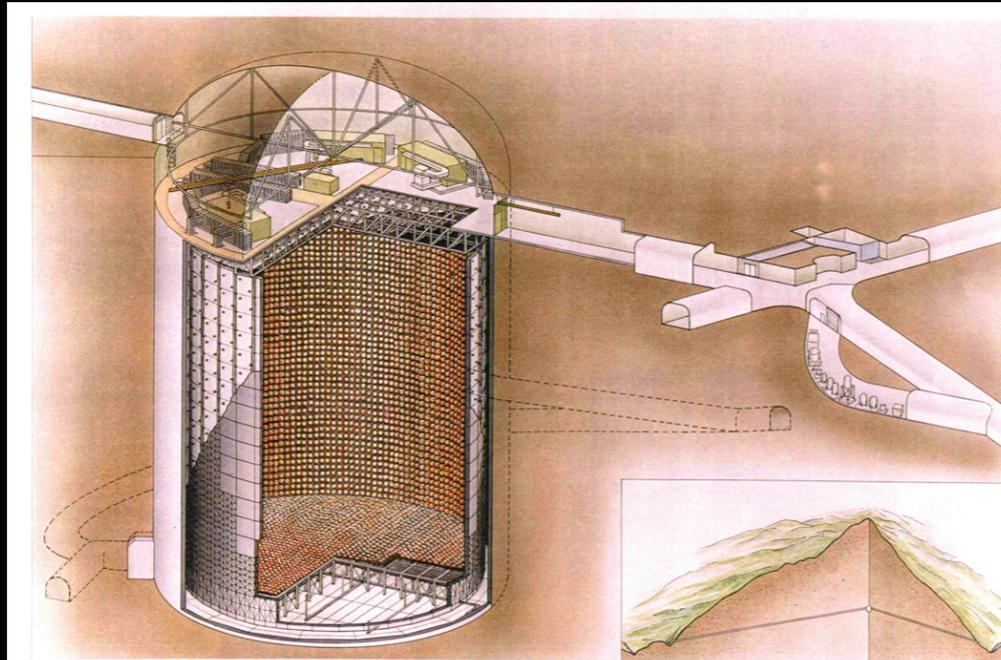


12 Strings (350m)  
mit je 75 Optischen Modulen

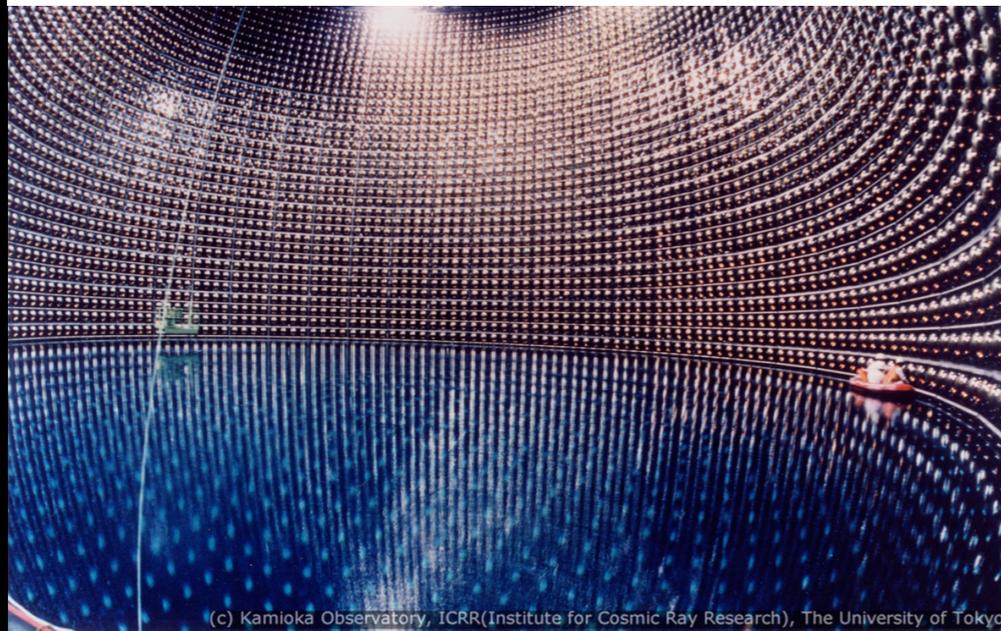


Insgesamt:  
200k PMTs

- Super-Kamiokande



SUPERKAMIOKANDE (c) Kamioka Observatory, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo



(c) Kamioka Observatory, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo

## Super-Kamiokande (Super-K )

Ort: Mozumi-Mine (Hida's Kamioka Area) - 1000m unterirdisch

Höhe: 41.4m

Durchmesser: 39.3m

Fassungsvolumen: 50.000 t

11146 photo multipliers (Sekundärelektronenvervielfacher)

Suche nach Protonenzerfall

Studie solarer und atmosphärischer Neutrinos

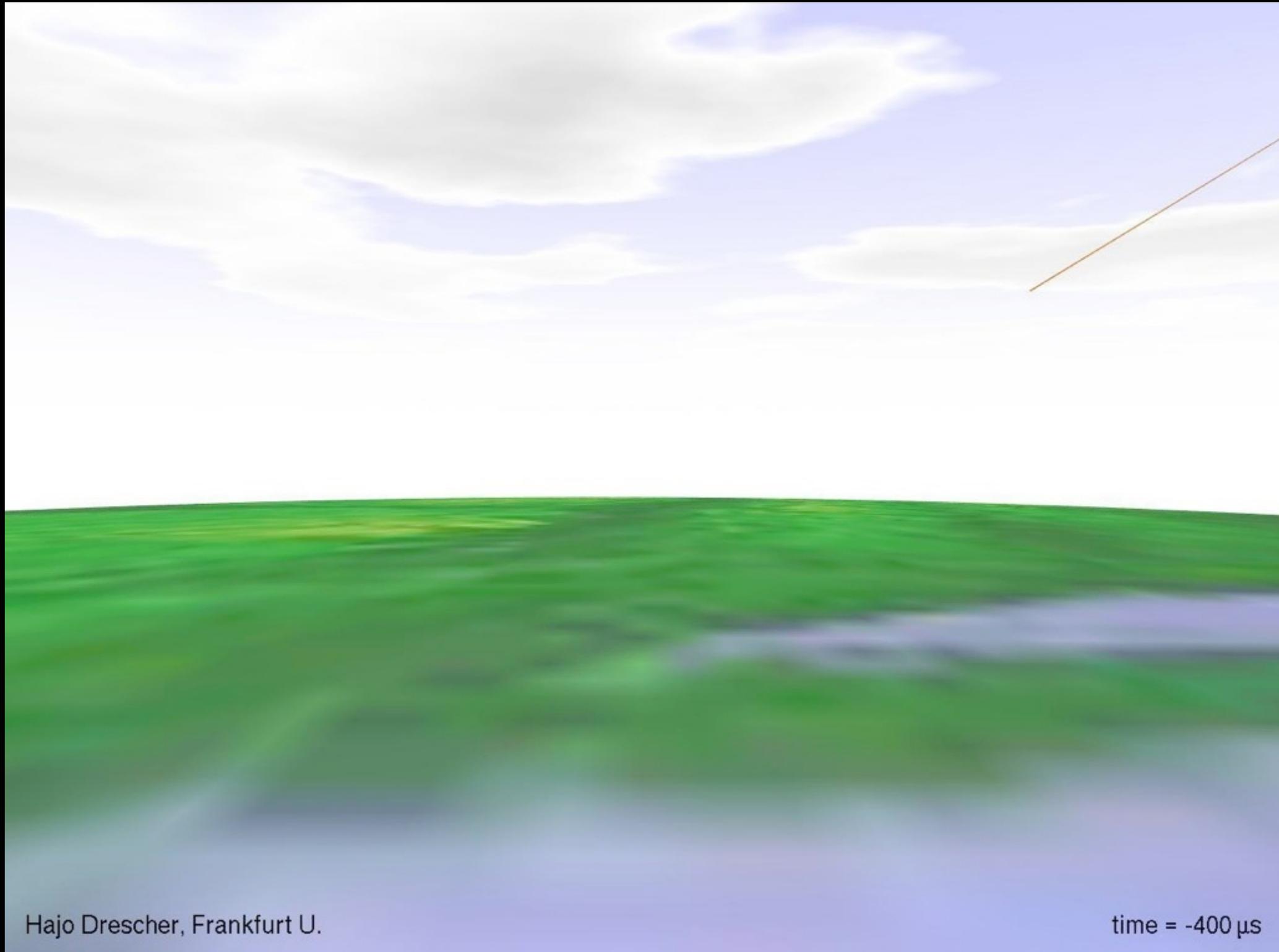
Suche nach Supernovae in Milchstraße

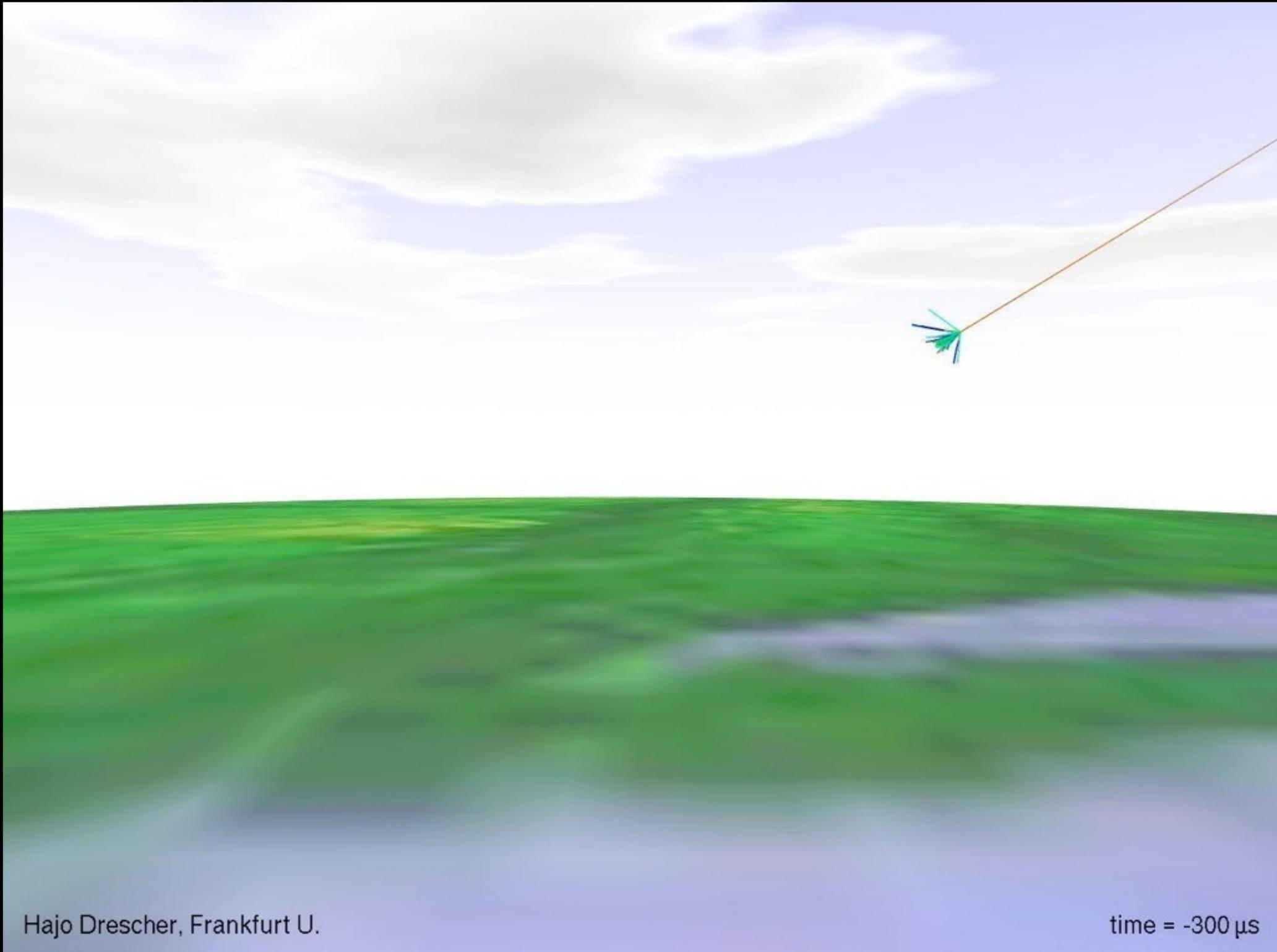
- Cherenkov (Wasser)
- **Chemische Veränderung**

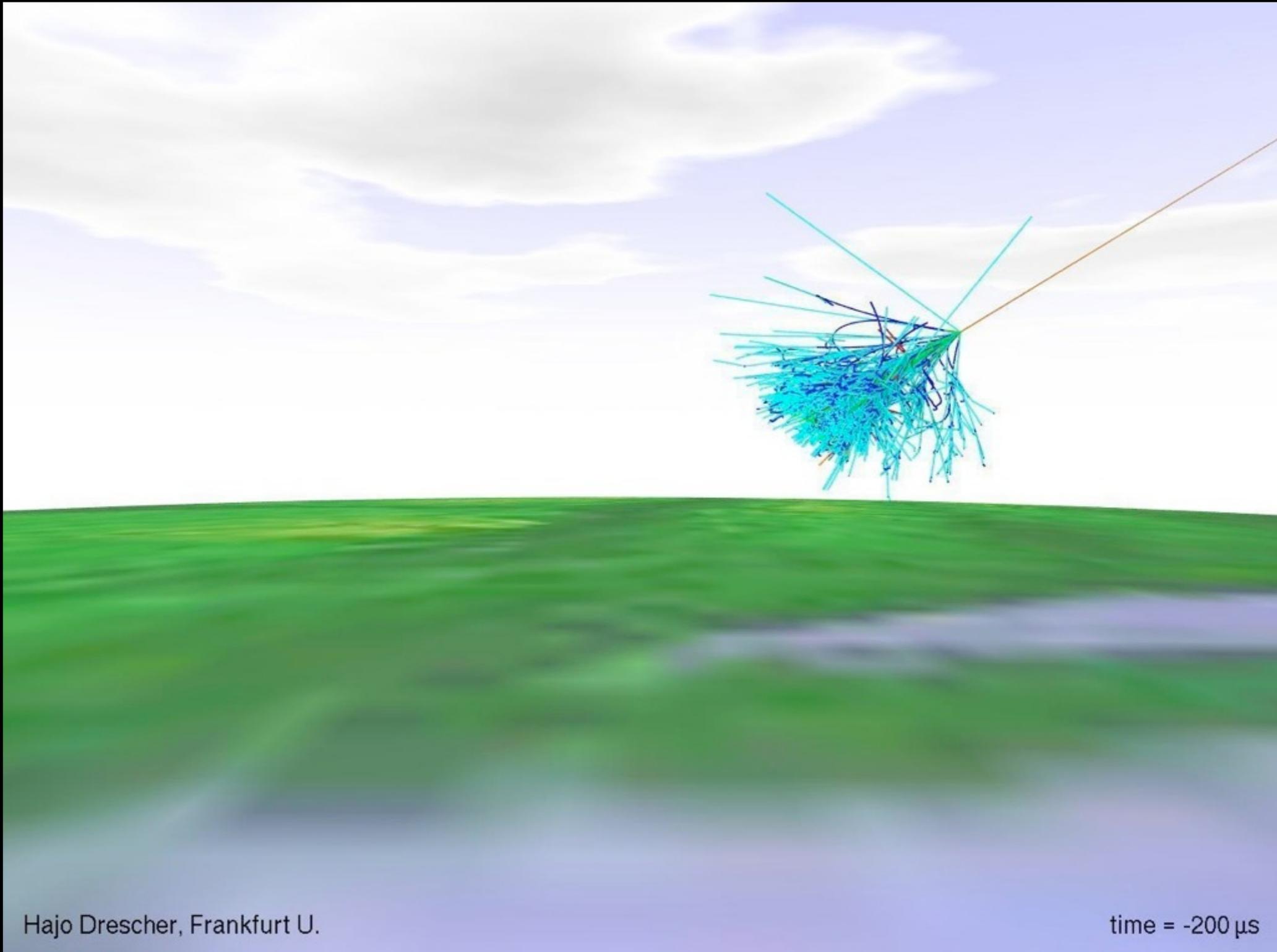


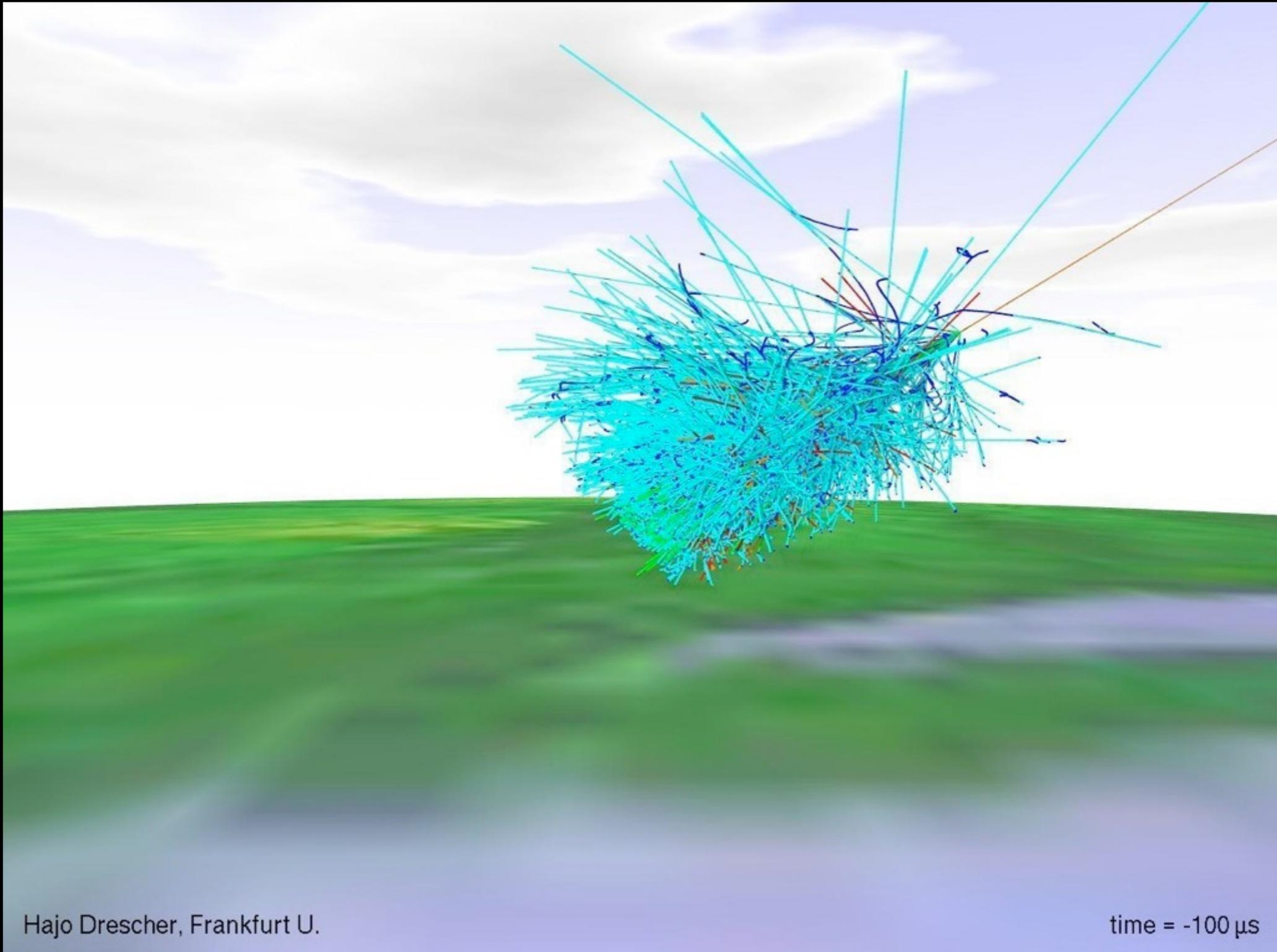
- Homestake experiment: 615t Tetrachlorethylen: 0,5 Neutrinos pro Tag
- Ar aus Detektor Volumen extrahiert und „Atome gezählt“

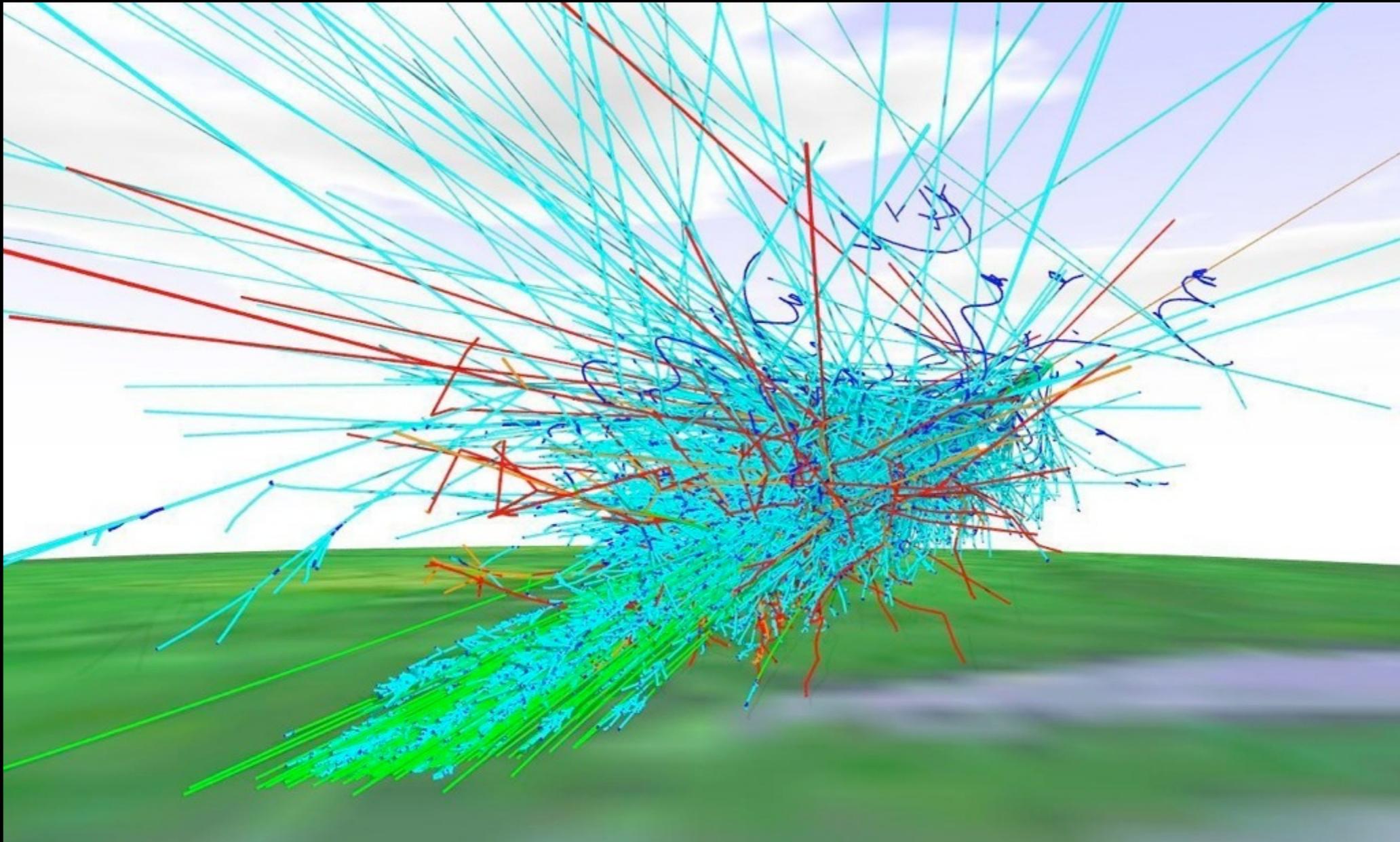
# Gamma-Teleskope Kosmische Höhenstrahlung





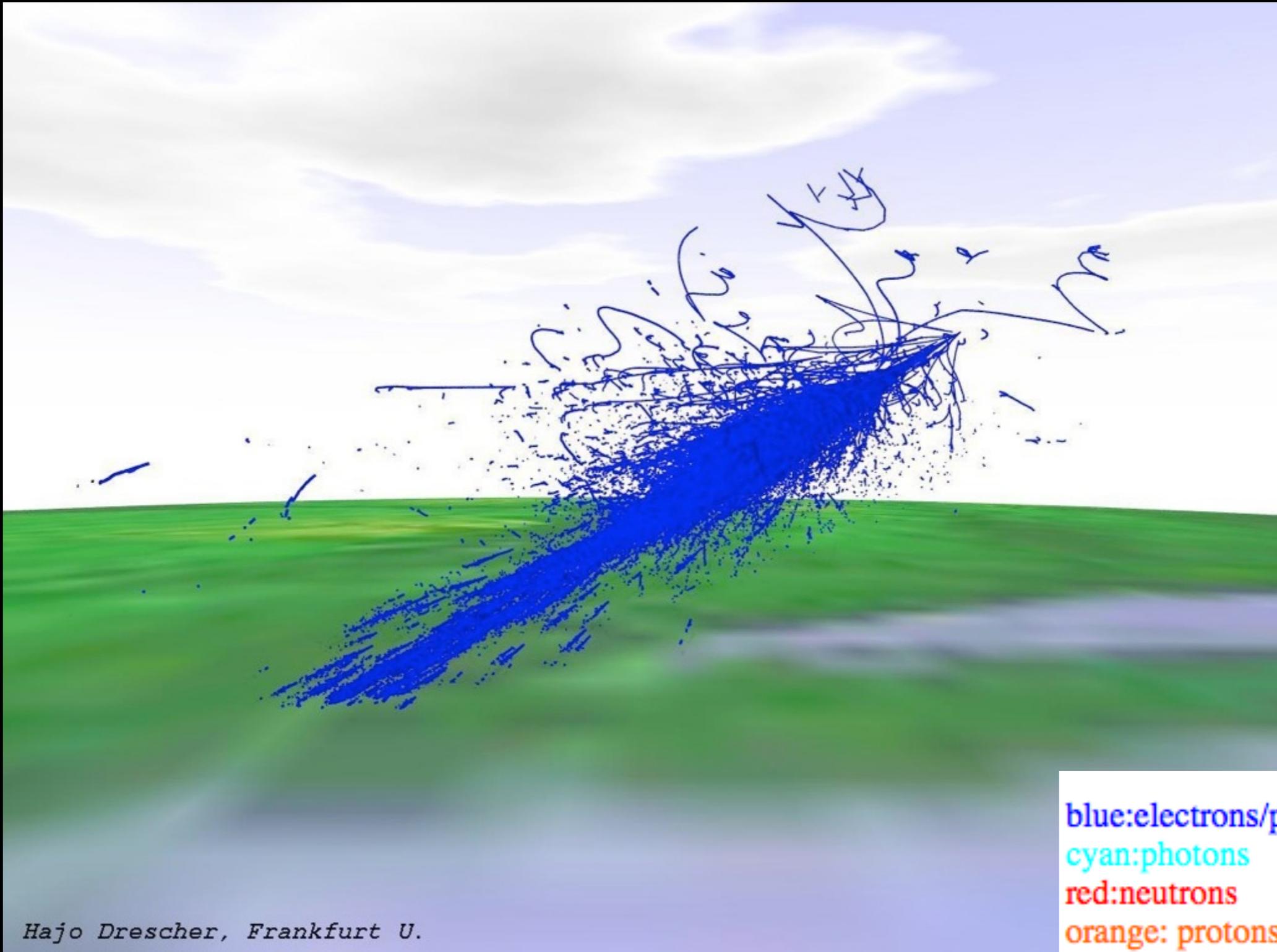




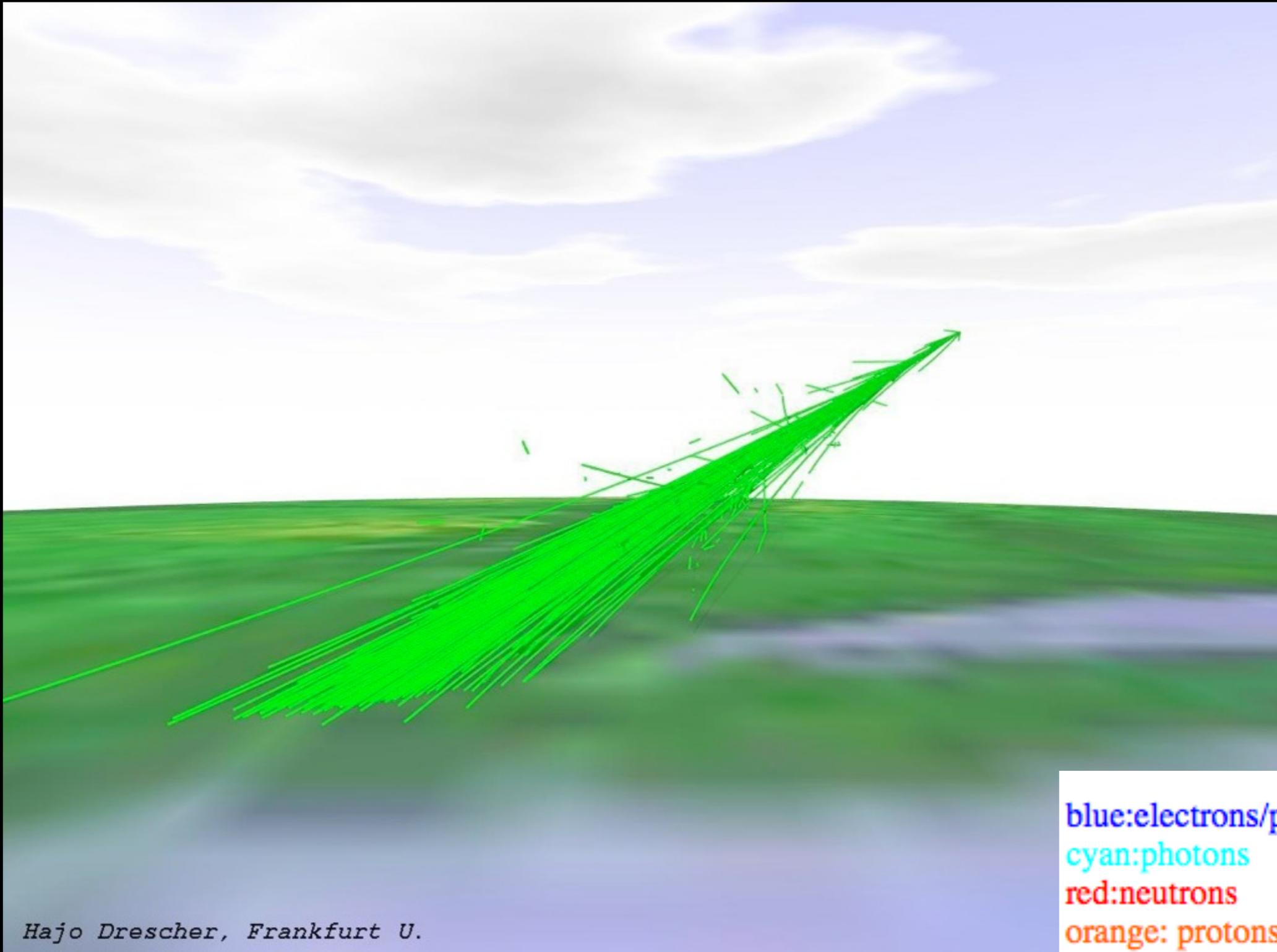


*Hajo Drescher, Frankfurt U.*

blue:electrons/positrons  
cyan:photons  
red:neutrons  
orange: protons  
gray: mesons  
green:muons



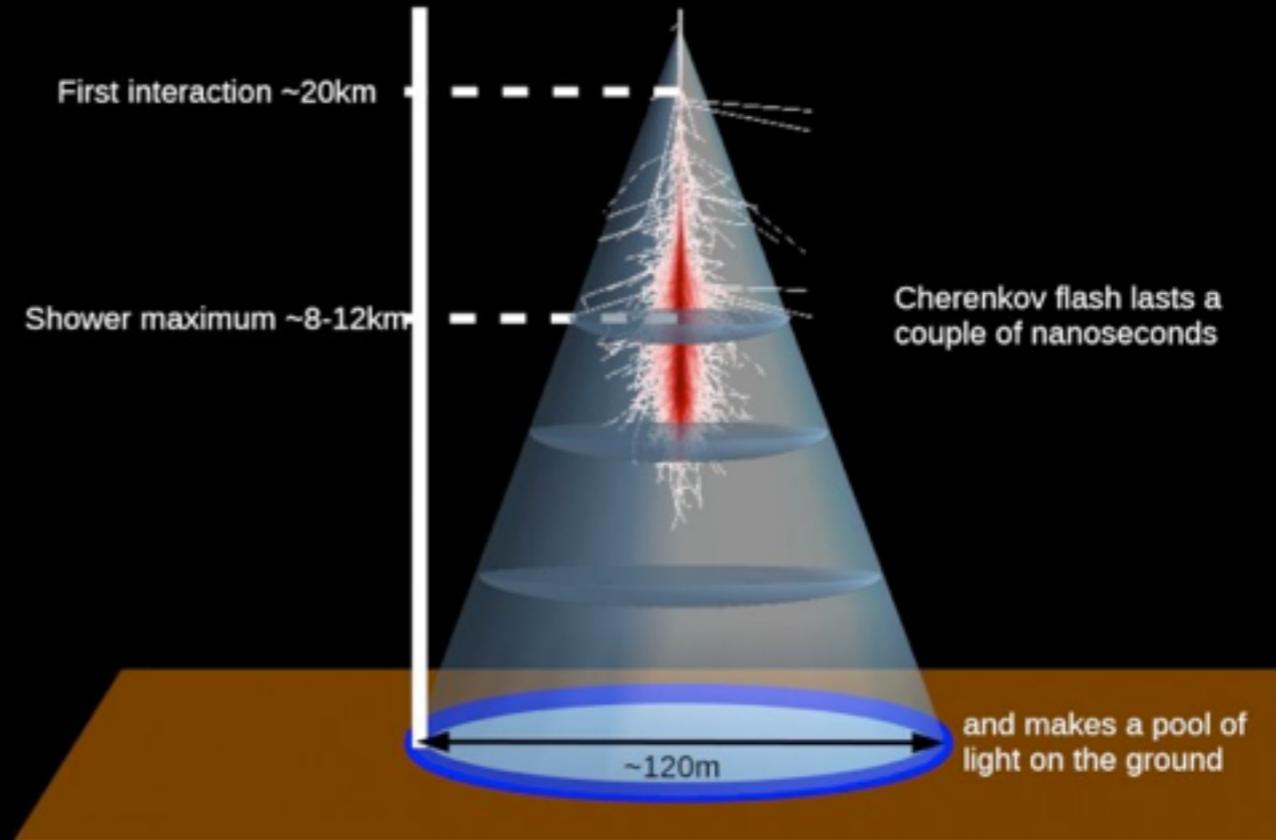
blue:electrons/positrons  
cyan:photons  
red:neutrons  
orange: protons  
gray: mesons  
green:muons



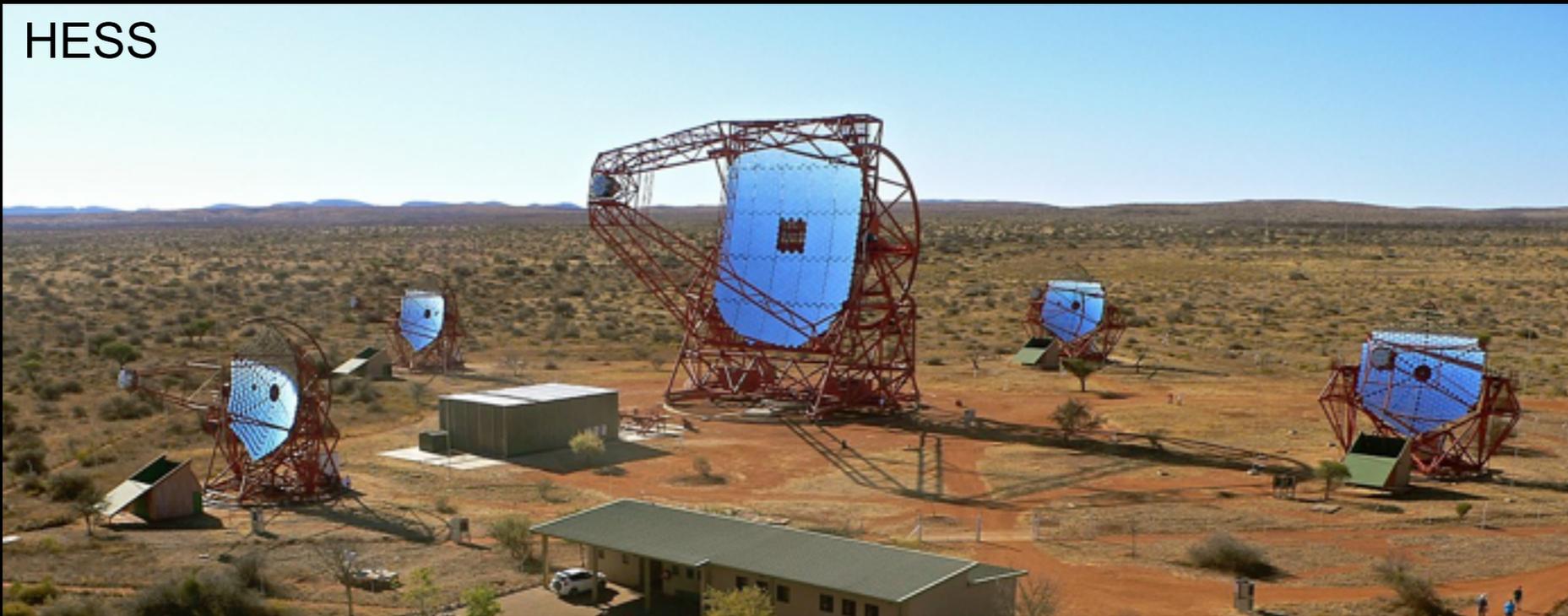
blue:electrons/positrons  
cyan:photons  
red:neutrons  
orange: protons  
gray: mesons  
green:muons

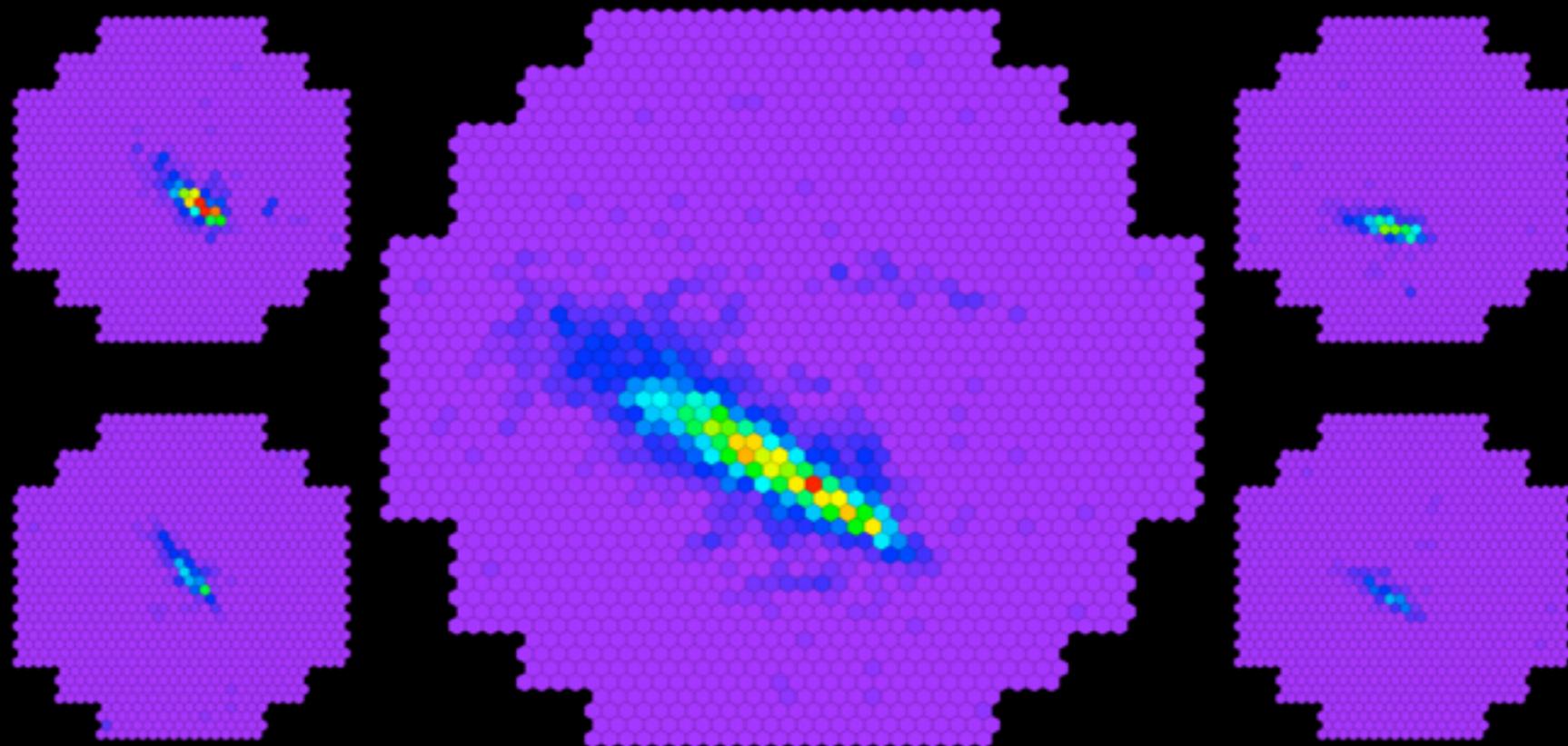
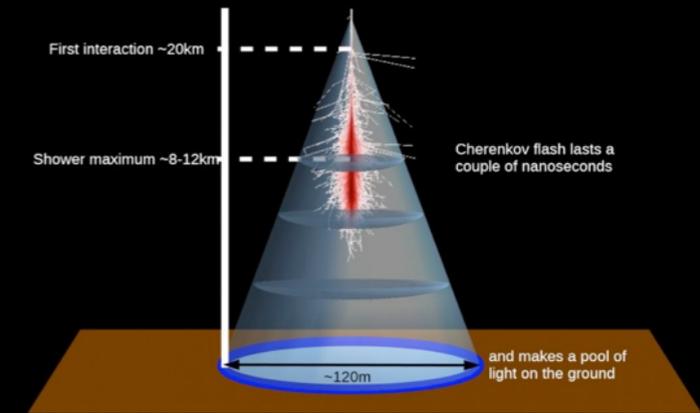
## Cherenkov Teleskope

Magic 1&2



HESS



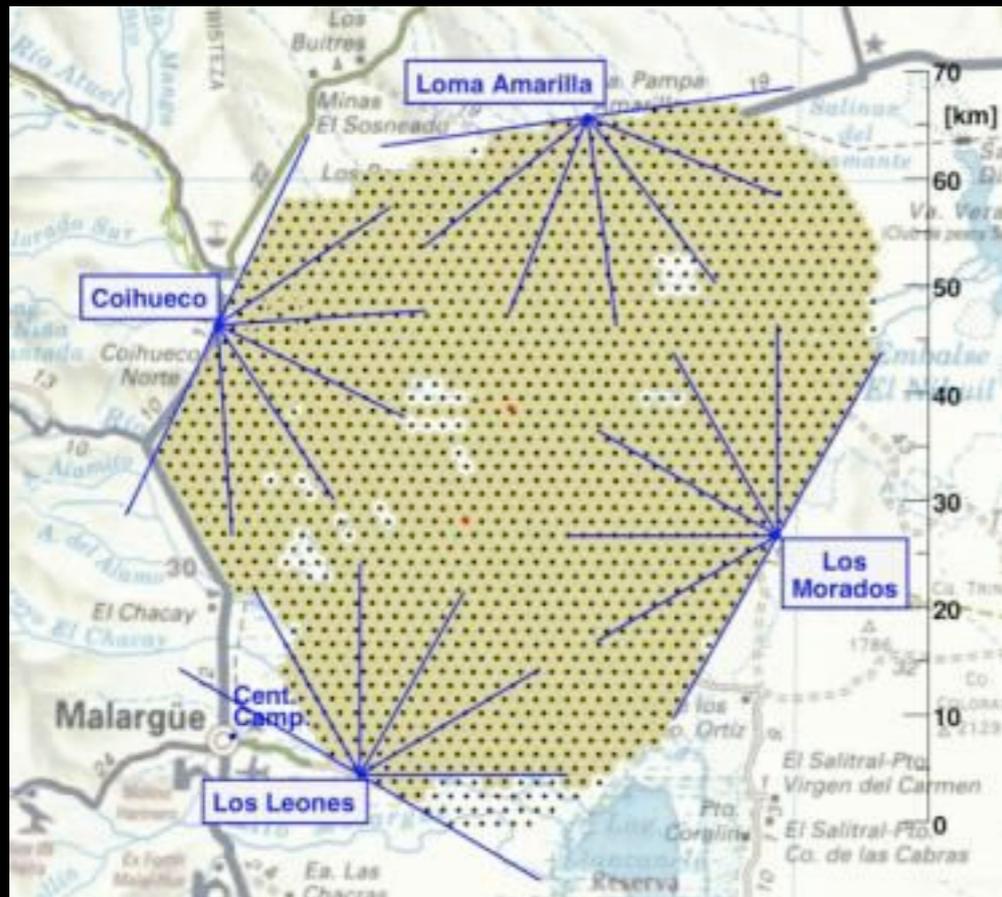
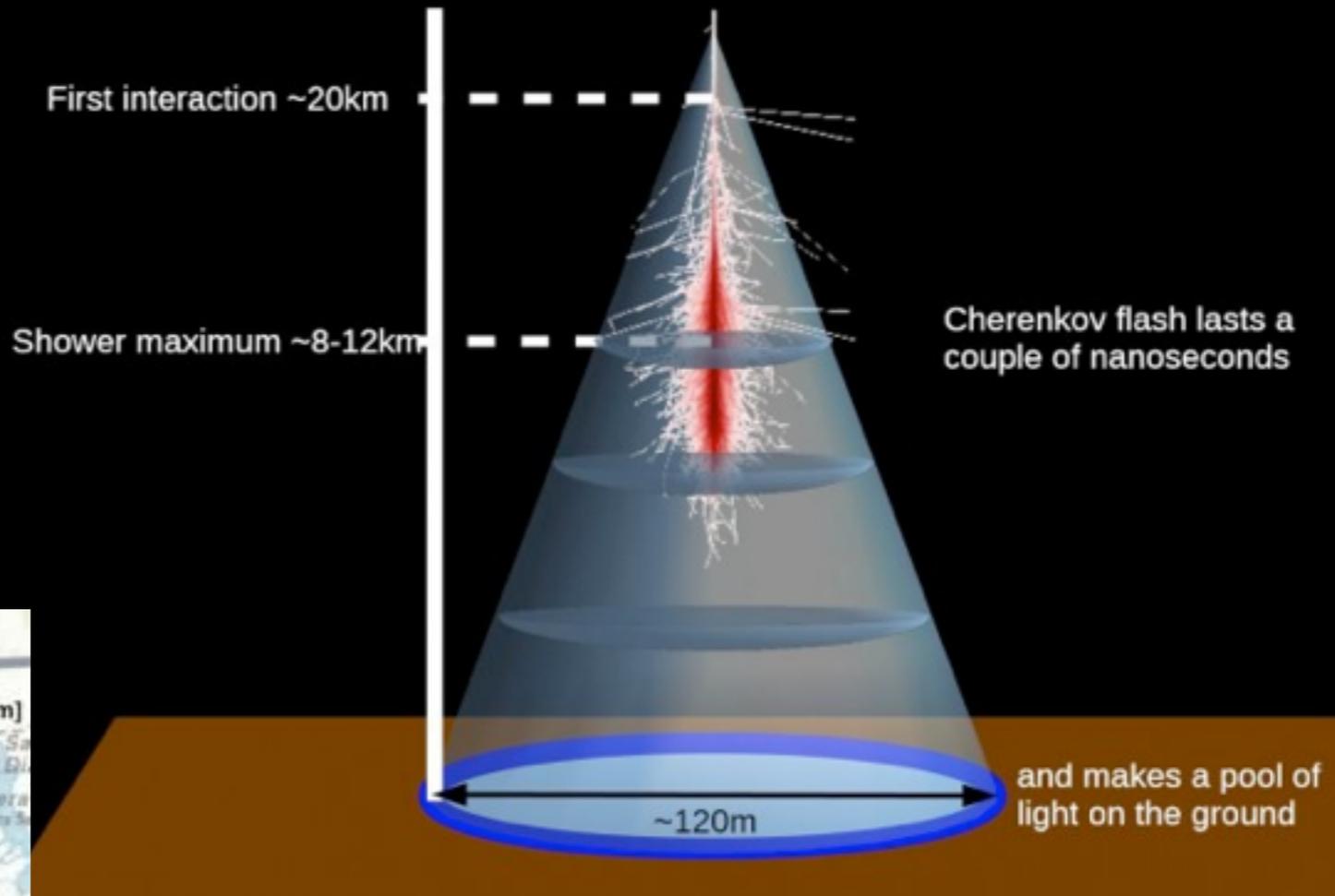


# Luftschauer - Pierre Auger

1650 Muon Detektoren  
Wasser Cherenkov

4 Cherenkov Teleskope

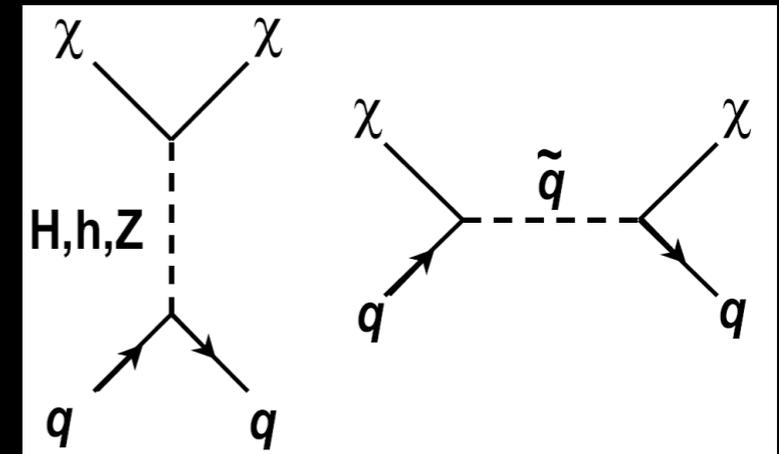
> 3000 km<sup>2</sup> Abdeckung



# Detektoren für Dunkle Materie

# Detektoren für Dunkle Materie

- Interaktion ausschließlich per schwacher Wechselwirkung
  - **Sehr seltene Ereignisse**
    - Brauche sehr gute Abschirmung
- Sehr kleiner Impulsübertrag: **~10 keV**
  - Stoß mit Kern:
    - **Phononen (Gitterschwingungen)**
    - Anregung (Szintillation)
  - Stoß mit Elektron
    - Ionisation



# Detektoren für Dunkle Materie

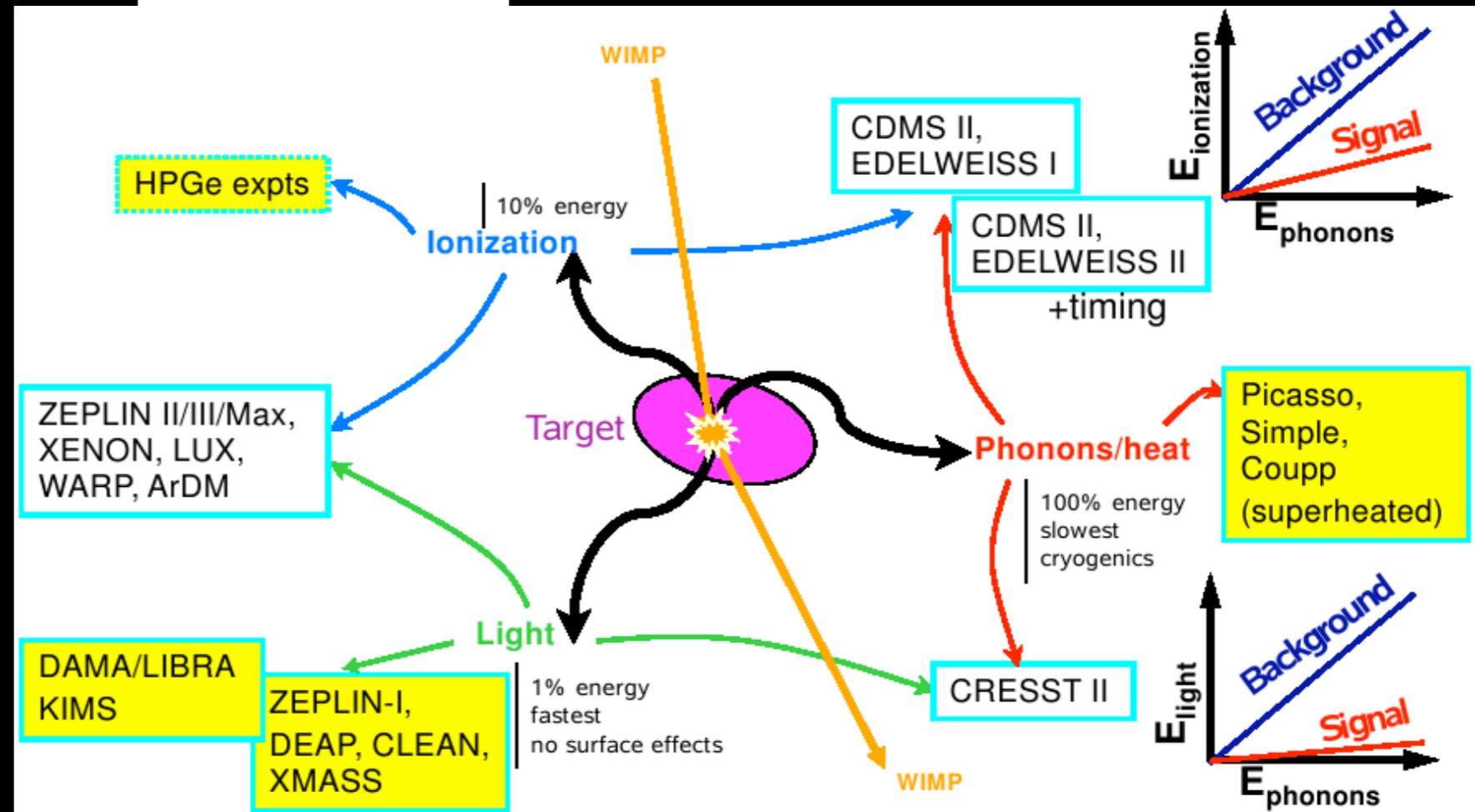
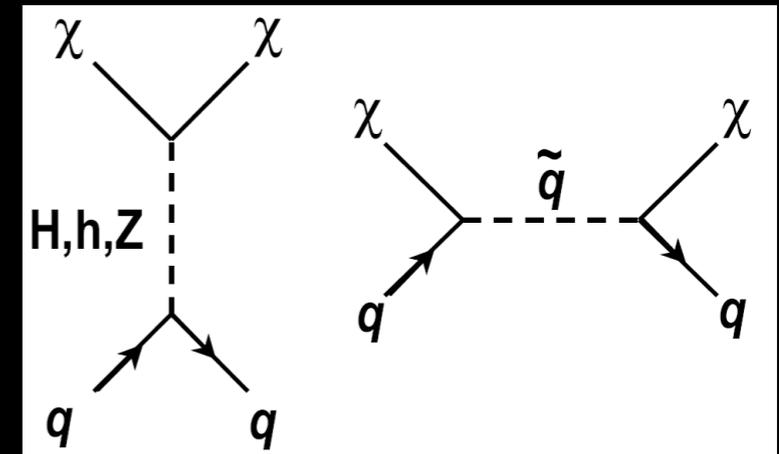
- Interaktion ausschließlich per schwacher Wechselwirkung

- **Sehr seltene Ereignisse**
  - Brauche sehr gute Abschirmung

- Sehr kleiner Impulsübertrag: **~10 keV**

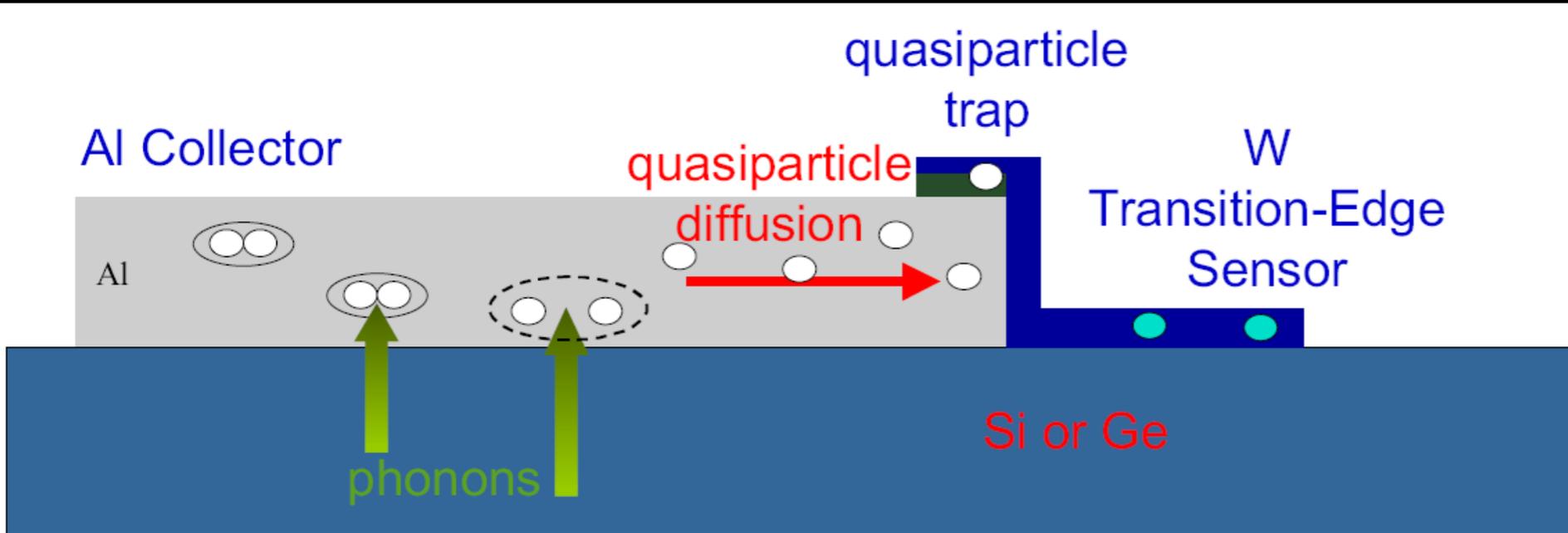
- Stoß mit Kern:
  - **Phononen (Gitterschwingungen)**
  - Anregung (Szintillation)

- Stoß mit Elektron
  - Ionisation

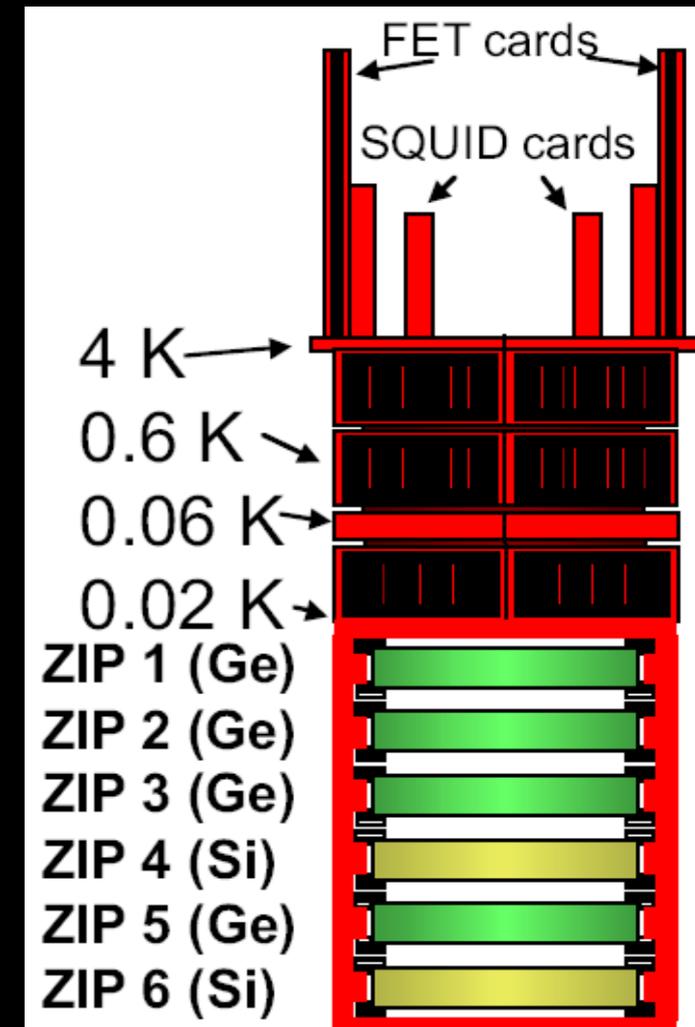


# Detektoren für Dunkle Materie - Phononen

- **CDMS**: Messung der Temperaturerhöhung durch Phononen

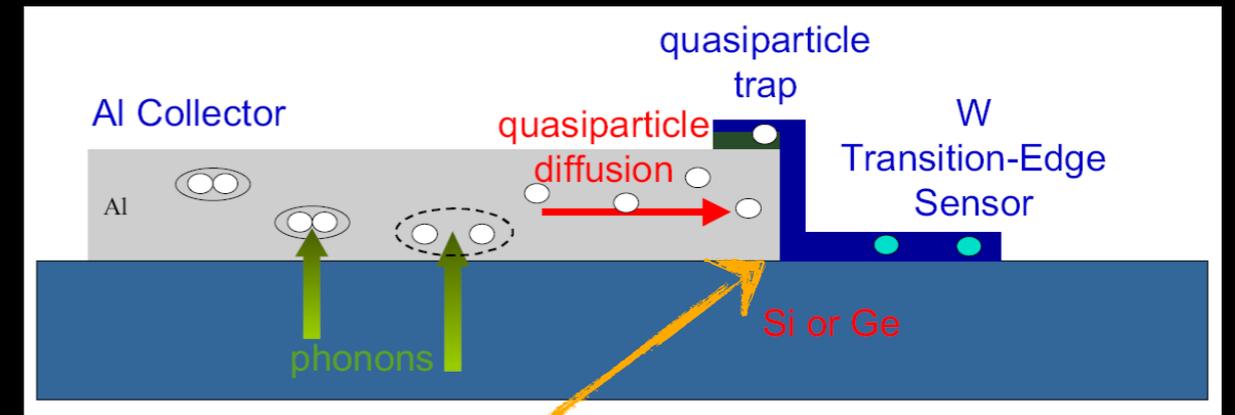


- Übertragung der Phononenergie auf Al-Schicht (60 $\mu$ m)
  - Energiesammlung
- Übertragung der Energie auf Wolframfaden (1 $\mu$ m)
  - Erwärmung
  - große Widerstandsänderung

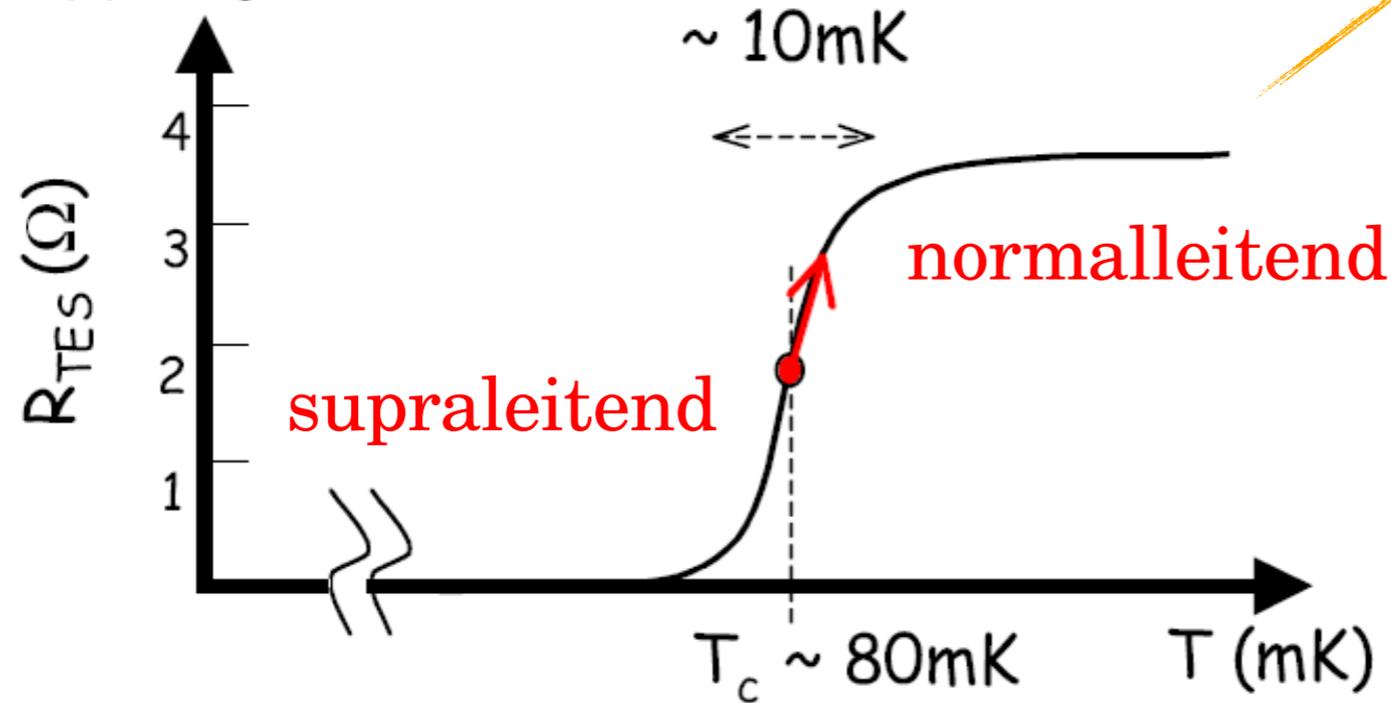


# Detektoren für Dunkle Materie - Phononen

- **CDMS**: Messung der Temperaturerhöhung durch Phononen



- Temperaturstabilisierung durch elektro-thermische Rückkopplung



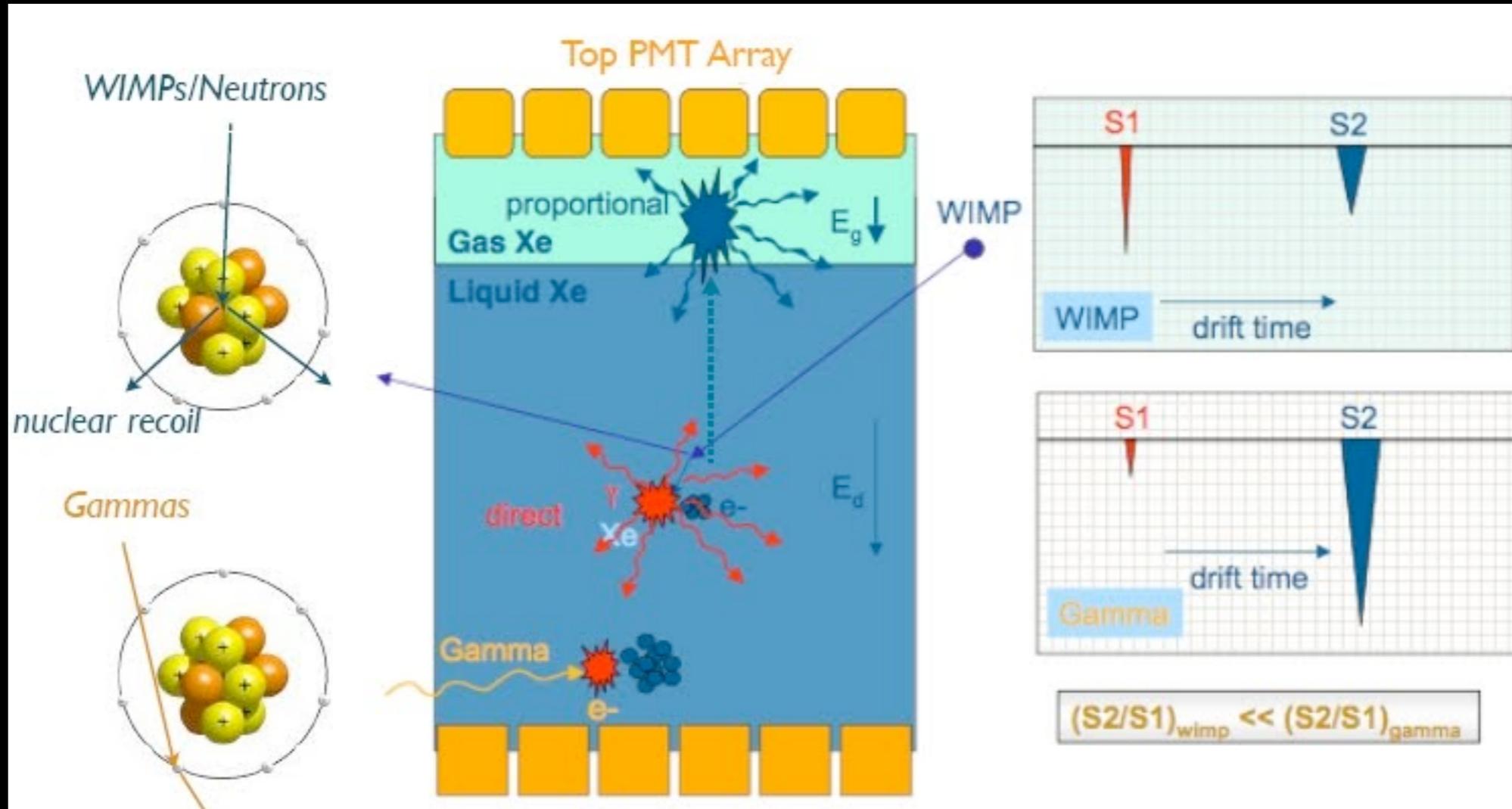
Selbststabilisierendes System!

- Verlustleistung:  $P = U \cdot I = U^2 / R$ ,  $U = \text{konstant!}$
- $T(\text{Substrat}) \ll T_c$

# Detektoren für Dunkle Materie - Szintillation

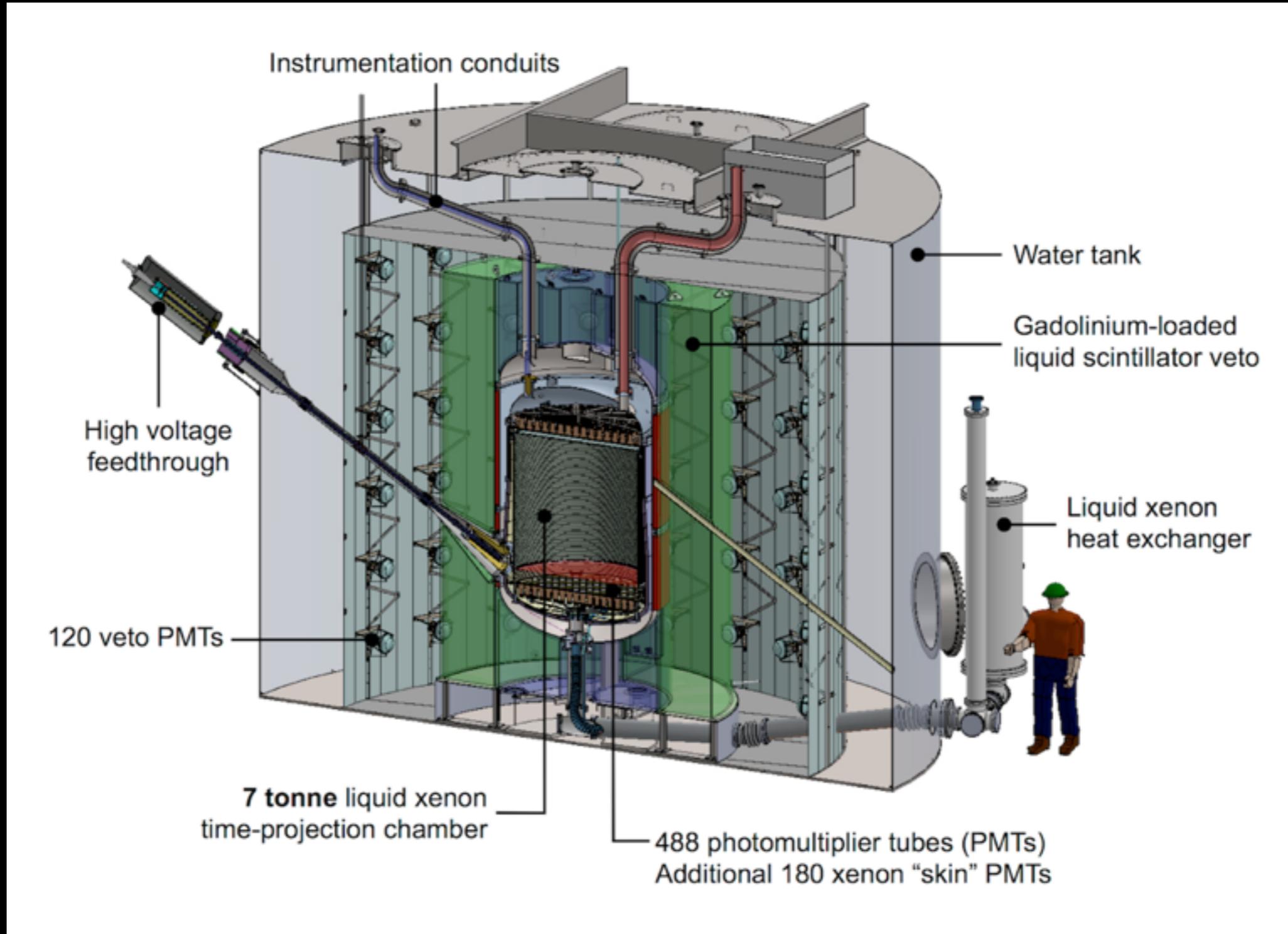
- **XENON**: 2 Phasen system: Szintillation / Ionisation

TPC!



- **XENON**: 2 Phasen system: Szintillation / Ionisation

## Aufwändige Abschirmung



# Zusammenfassung

- Viele verschiedene Teilchendetektoren
- Oft mit vielen Technischen und Physikalischen Kniffen
  - Universal HEP Detektor
  - Neutrinos
  - Höchstenergetische Ereignisse in der Atmosphäre

**und es gibt noch viele mehr .....**

# Triggersysteme

## Problem: Datenmenge

- ~1,6 MB pro Ereignis
  - Kollisionen mit 40MHz => **64 TB/s**
- Maximale Speicherrate: 1kHz => 1,6 GB/s

- **Ausgeklügeltes Triggersystem:**

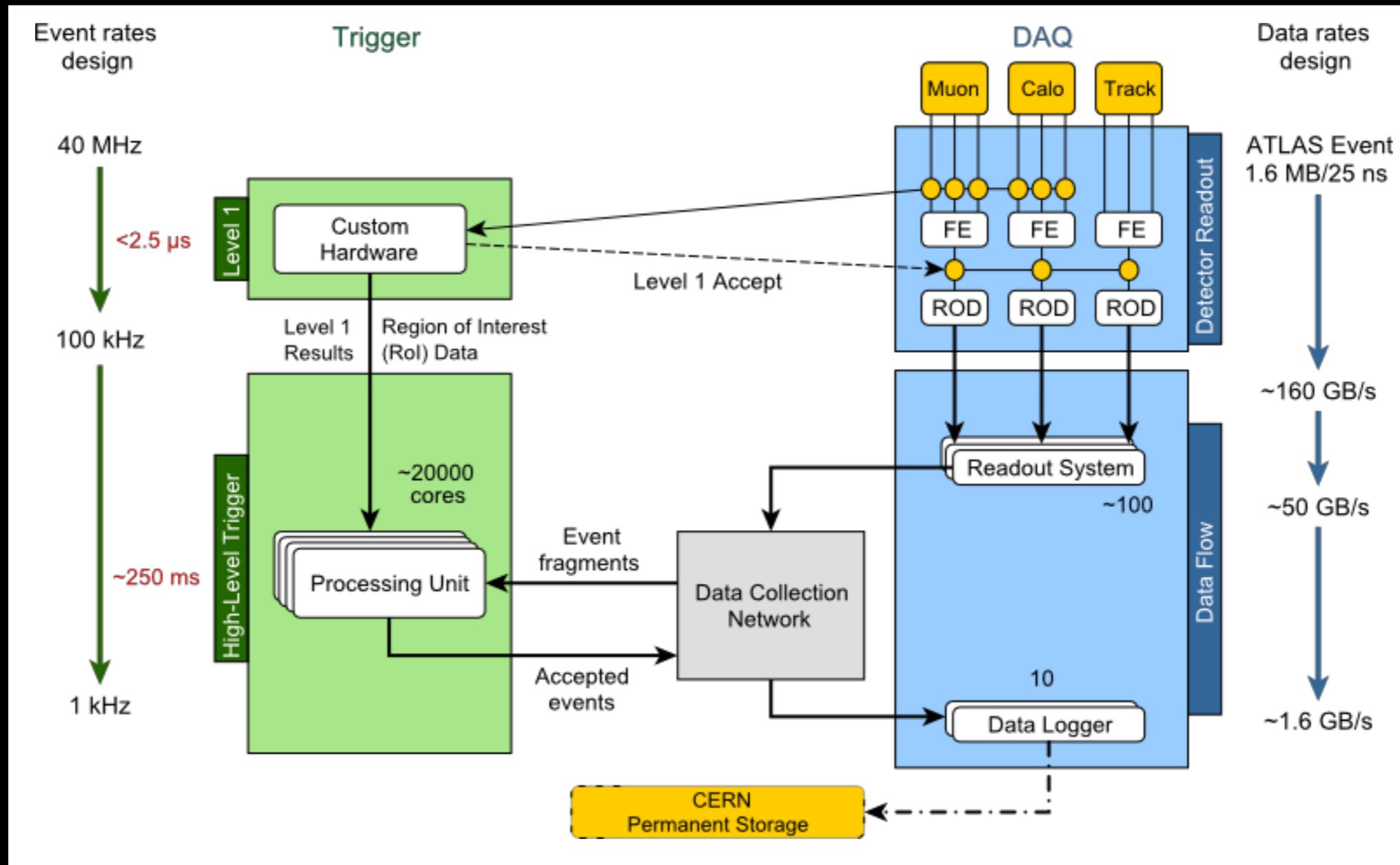
- L1 FPGA basiert: 40MHz -> 100kHz (**160 GB/s**)  
Muon Info + Calo Info + Topo. Verknüpfung  
512 ,Items‘
- HLT: PC basier: 100kHz -> 1kHz  
Volle Information  
Event Rekonstruktion  
(fast) beliebige Algorithmen möglich

# Universal Detektor für HEP - Triggersystem



## Problem: Datenmenge

- ~1,6 MB pro Ereignis
  - Kollisionen mit 40MHz => **64 TB/s**
- Maximale Speicherrate: 1kHz => 1,6 GB/s



- more inputs: 512 trigger inputs
- more computing resources
- dedicated monitoring FPGA

- additional monitoring counters
  - 256 per bunch counters vs. 12!

front inputs have lower latency, used by topological processor

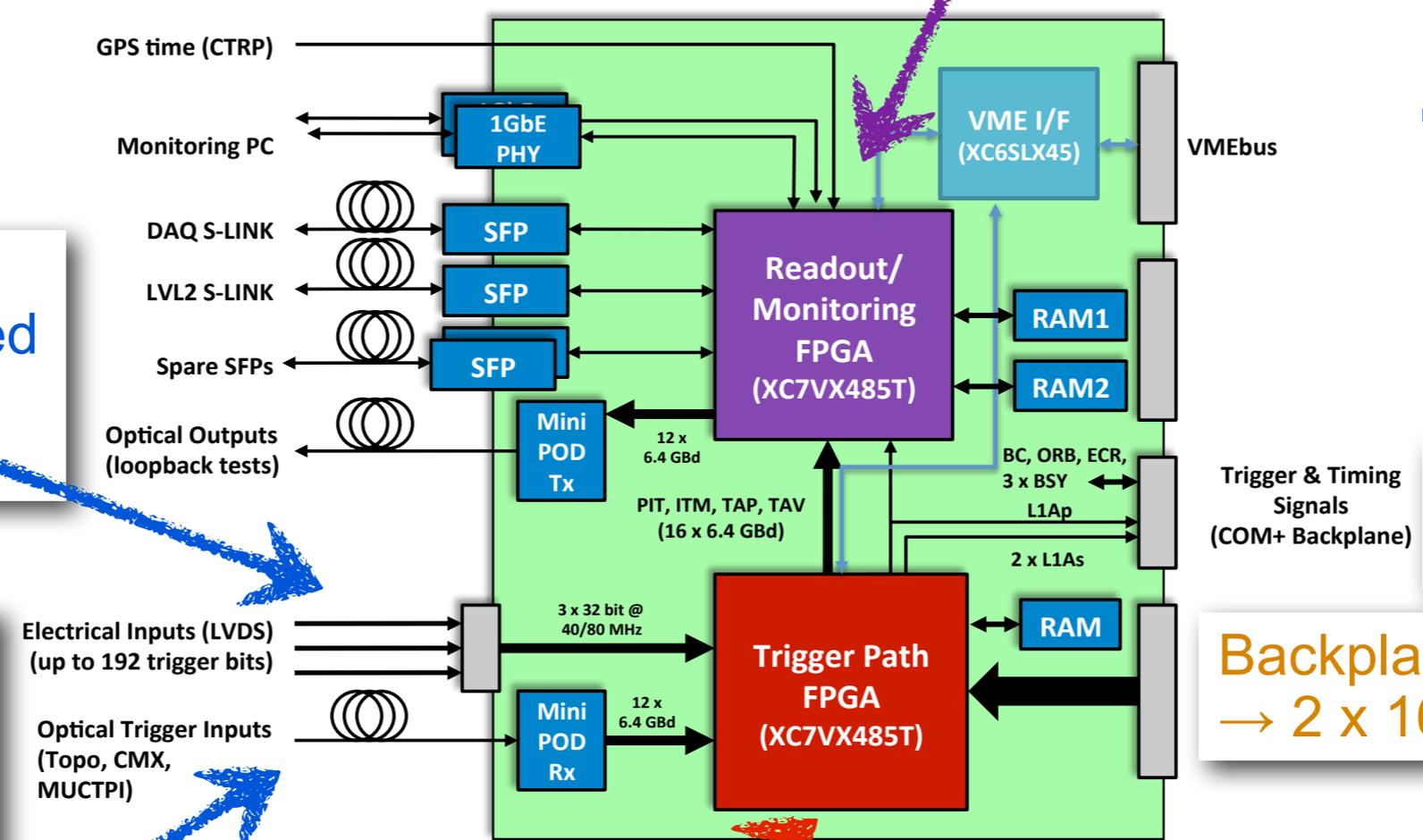
3 x 32 = 96 front panel inputs, @ DDR (80 MHz) ⇒ 192 inputs

hardware support for optical inputs (needed for Run 3)

- Firmware:**
- 512 trigger items (vs. 256)
  - 16 bunch group masks (vs. 8)
  - additional random trigger generators
  - random prescaling

support for up to 3 logical partitions

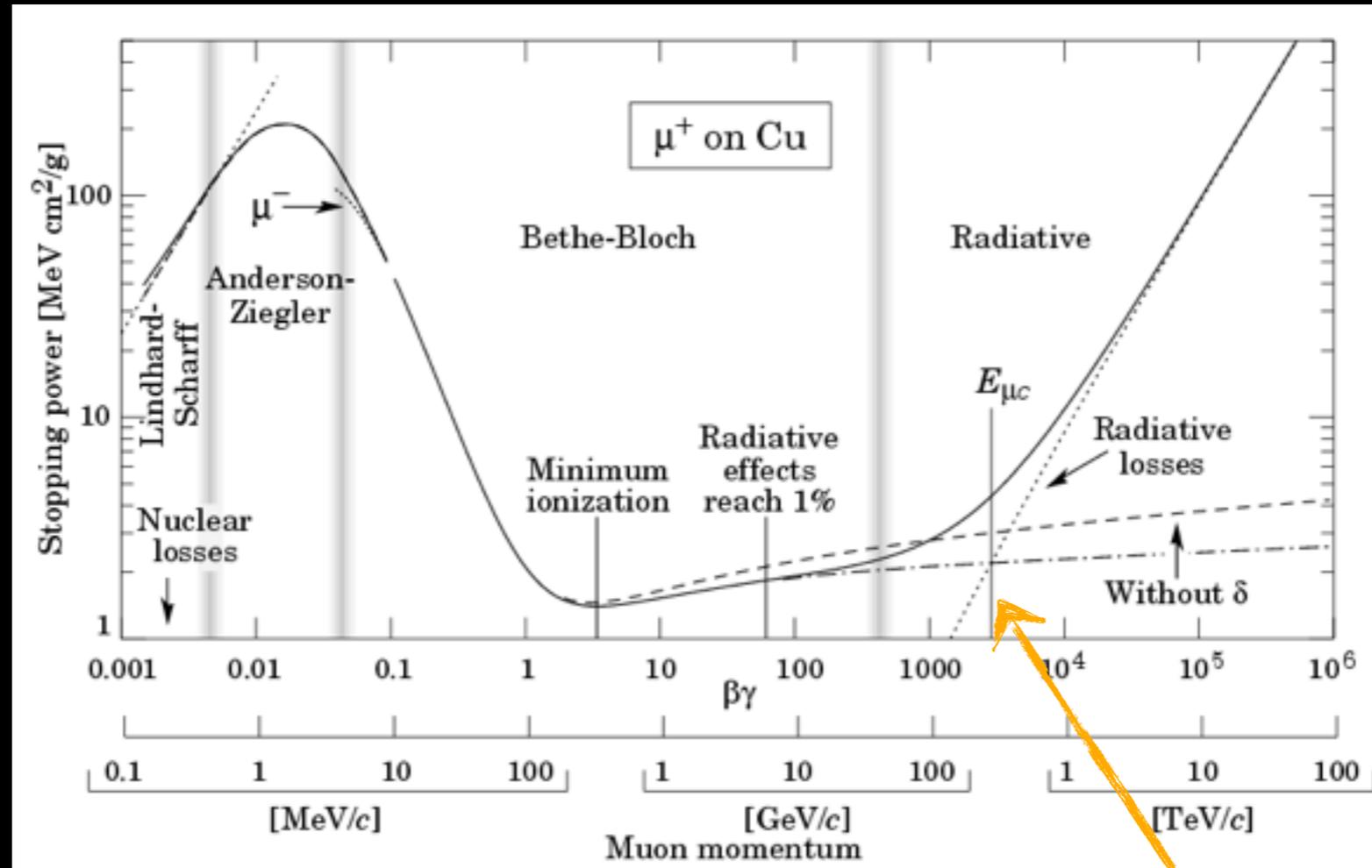
Backplane bus @ DDR → 2 x 160 = 320 inputs



# Backup

# Energieverlust in Materie - geladene Teilchen

- Energieverlust abhängig von:
  - Teilchenart ( $m$ ), Teilchenimpuls ( $p$ ) & Absorbermaterial ( $Z$ )



[1]

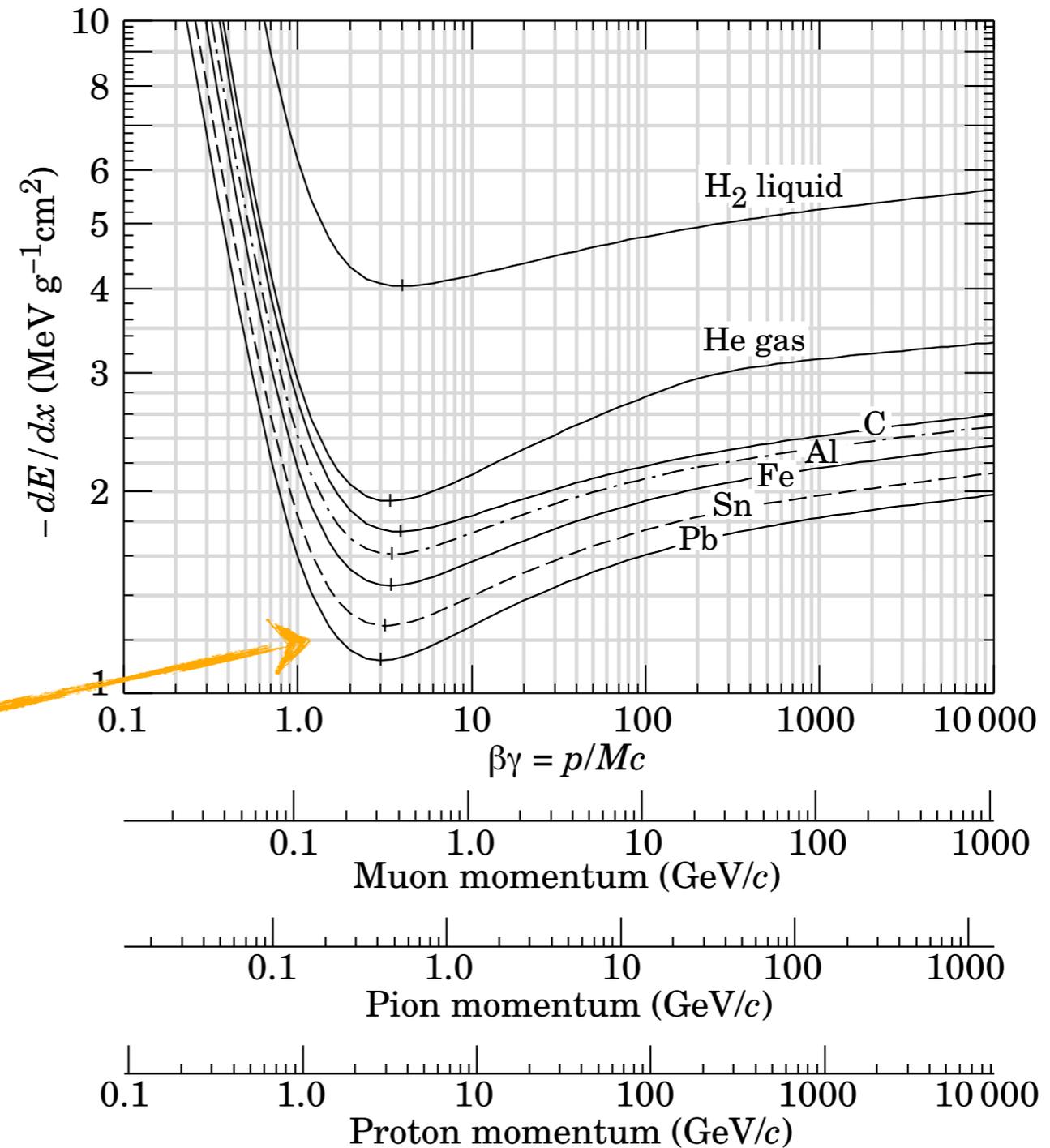
- Total
- - - - Ionisation
- ..... Bremsstrahlung

kritische Energie

# Energieverlust in Materie - geladene Teilchen

- Energieverlust in unterschiedlichen Materialien:

[1]



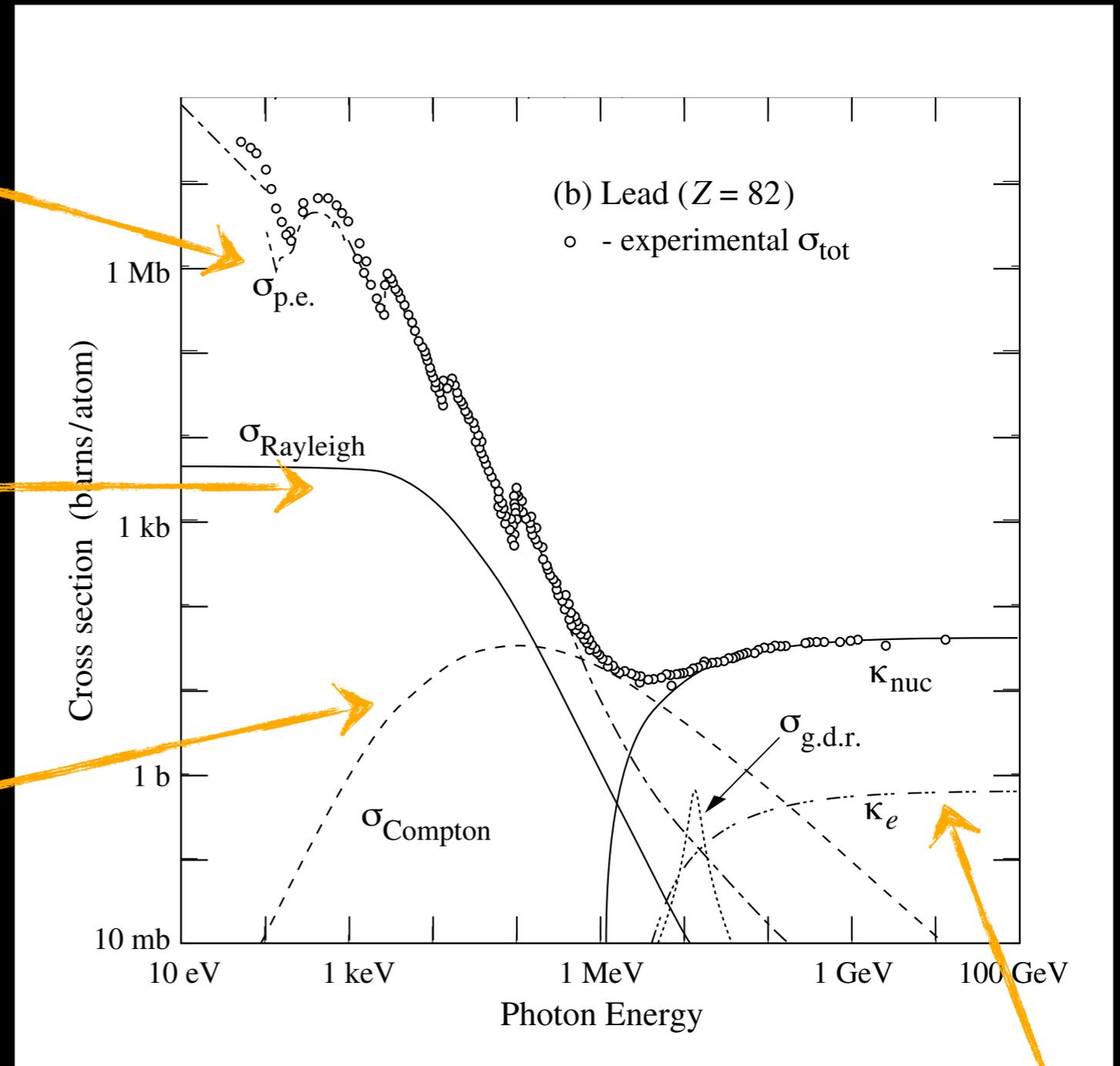
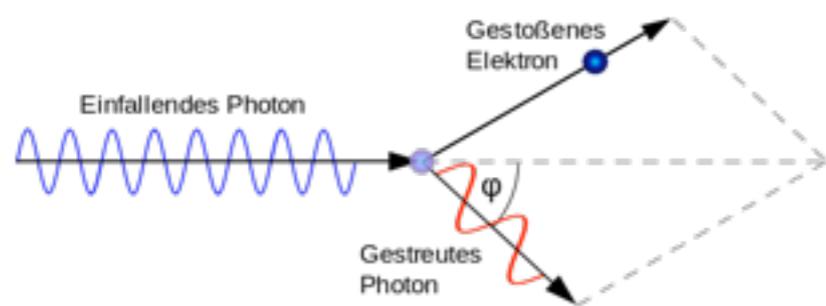
Minimalionisierendes  
Teilchen

# Energieverlust in Materie - Photonen

Photoeffekt

??

Compton Effekt



Paarbildung  
(Kern / Elektron)

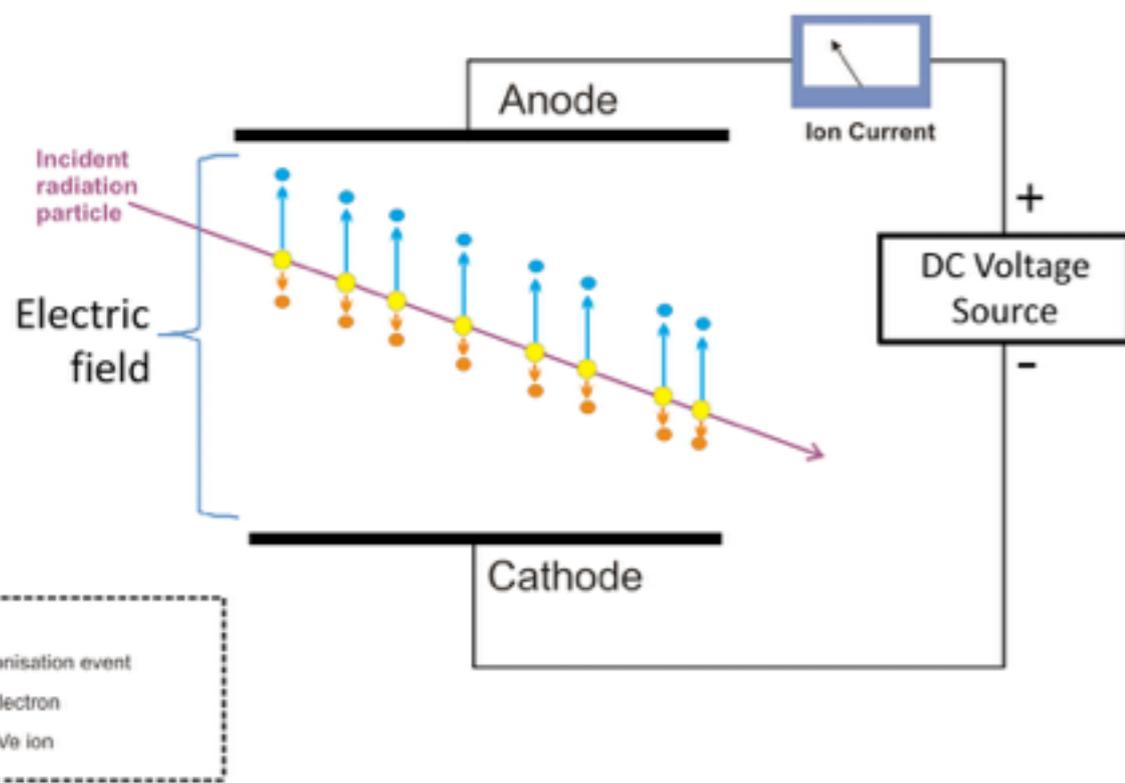
[2]

# Apropos Ionisationskammer - Gasdetektoren

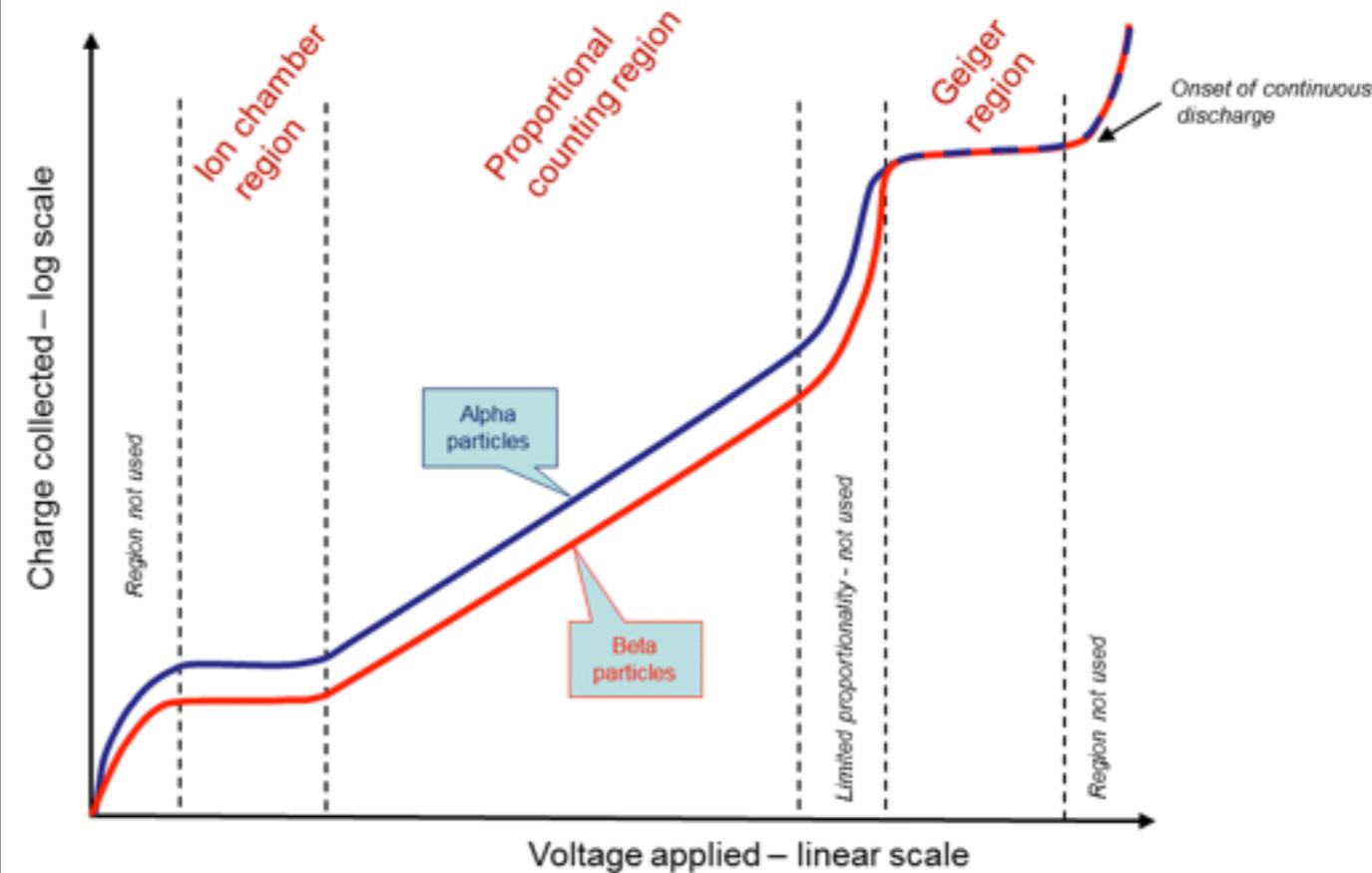
# Apropos Ionisationskammer - Gasdetektoren

- Ladungsseparation durch ionisation
  - Ladung drifted in angelegtem E Feld zu Elektroden
  - Verstärkung bei großem E-Feld durch Stoßionisation
    - Sekundärionisation
- Elektronenlawine (Durchbruch) → Entladung

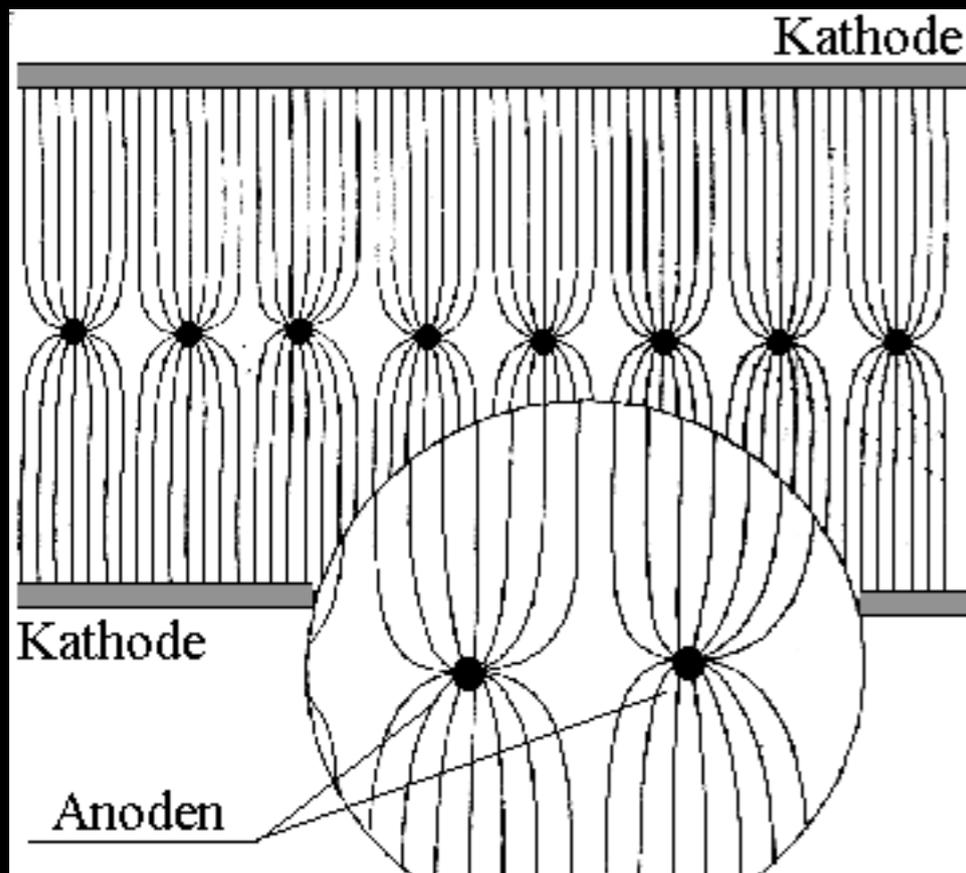
Visualisation of ion chamber operation



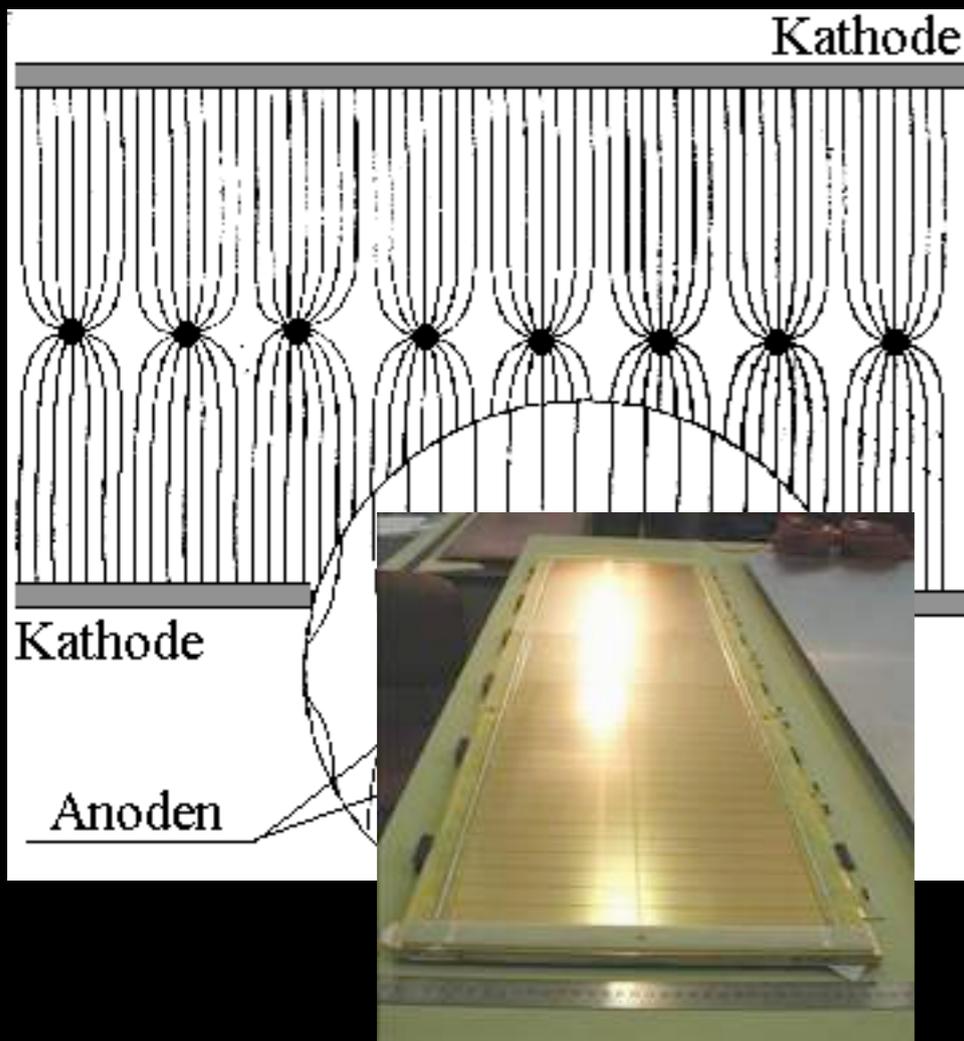
Variation of ion pair charge with applied voltage



- Multiwire proportional chamber - Drahtkammer
  - Anoden in Form von dünnen Drähten
    - hohes Feld in Drahtnähe → Elektronenvervielfachung (Signalverstärkung)
- Viele Drähte im Abstand von  $\sim$ mm
  - **gute Ortsauflösung** eines durchquerenden Teilchens
  - große Flächen

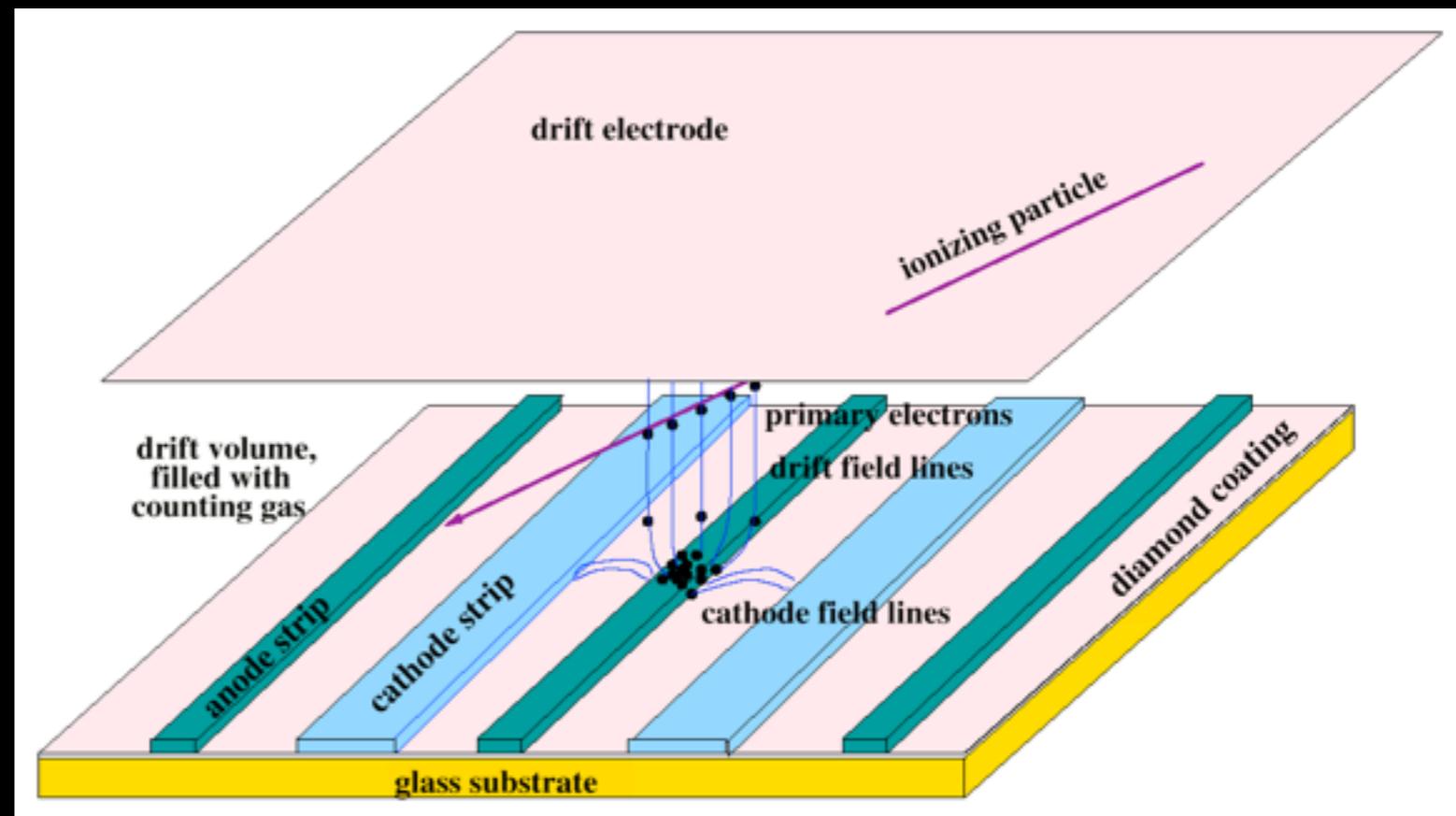
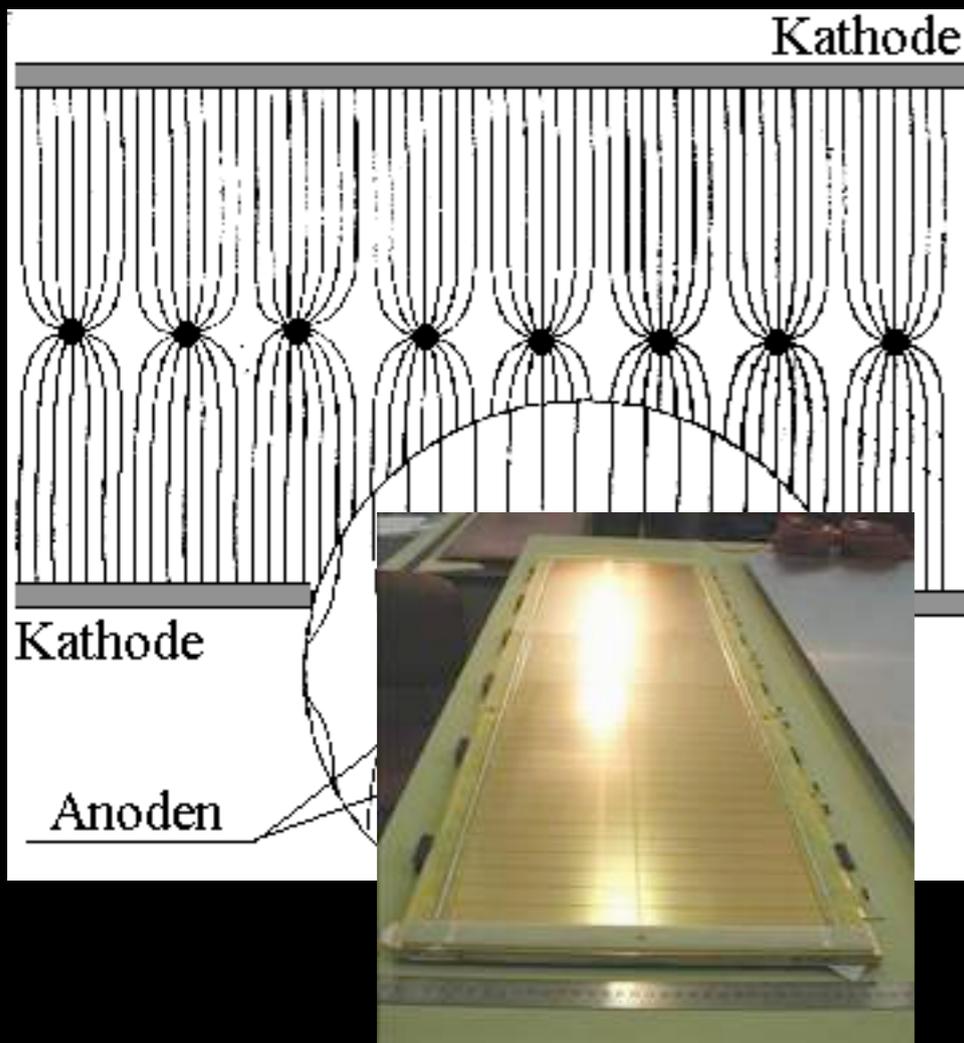


- Multiwire proportional chamber - Drahtkammer
  - Anoden in Form von dünnen Drähten
    - hohes Feld in Drahtnähe → Elektronenvervielfachung (Signalverstärkung)
  - Viele Drähte im Abstand von  $\sim$ mm
    - **gute Ortsauflösung** eines durchquerenden Teilchens
    - große Flächen



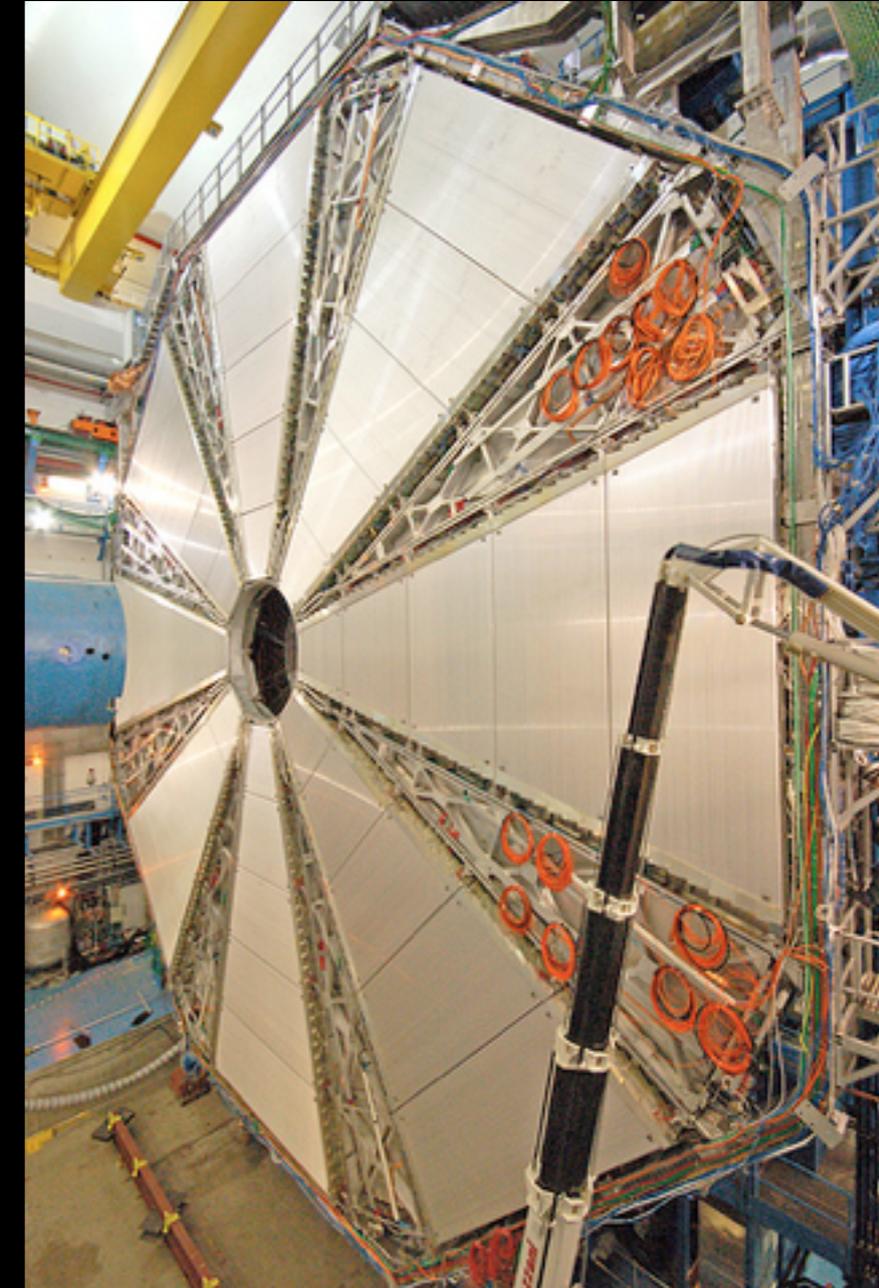
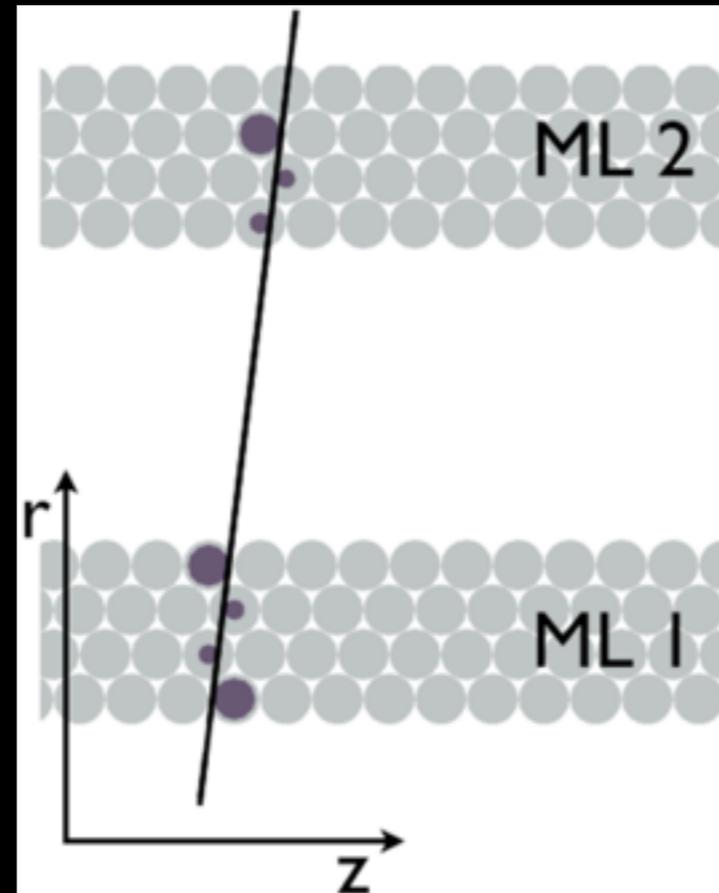
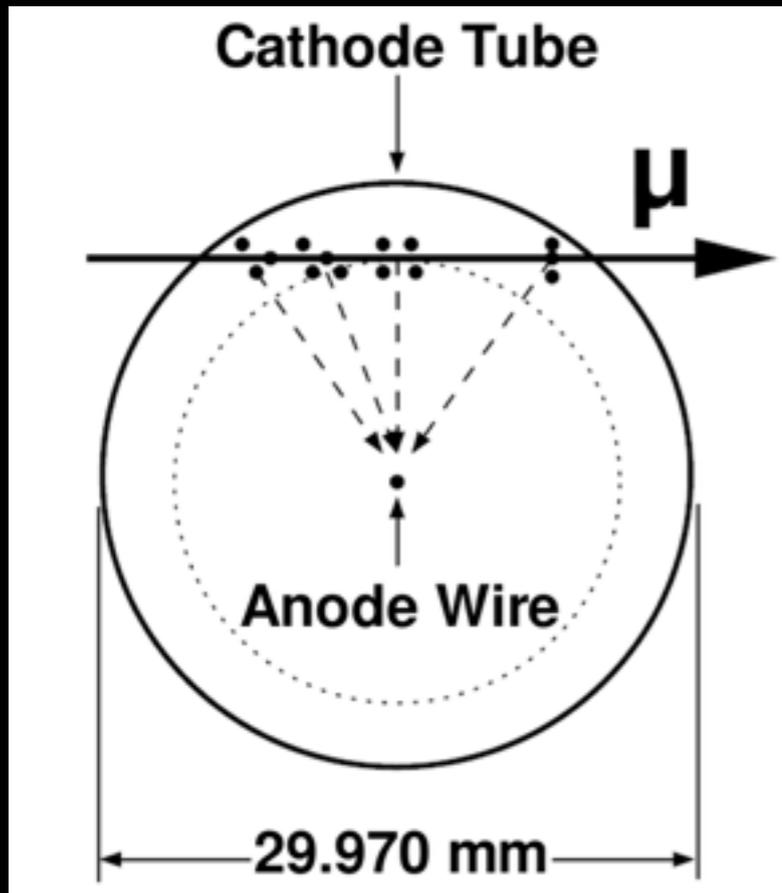
- Multiwire proportional chamber - Drahtkammer
  - Anoden in Form von dünnen Drähten
    - hohes Feld in Drahtnähe → Elektronenvervielfachung (Signalverstärkung)
- Viele Drähte im Abstand von ~mm
  - **gute Ortsauflösung** eines durchquerenden Teilchens
  - große Flächen

- Weiterentwicklung:
  - **Cathod strip chamber**



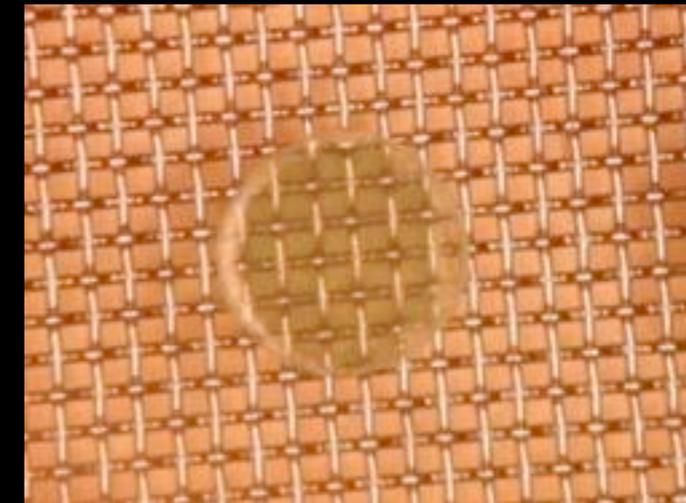
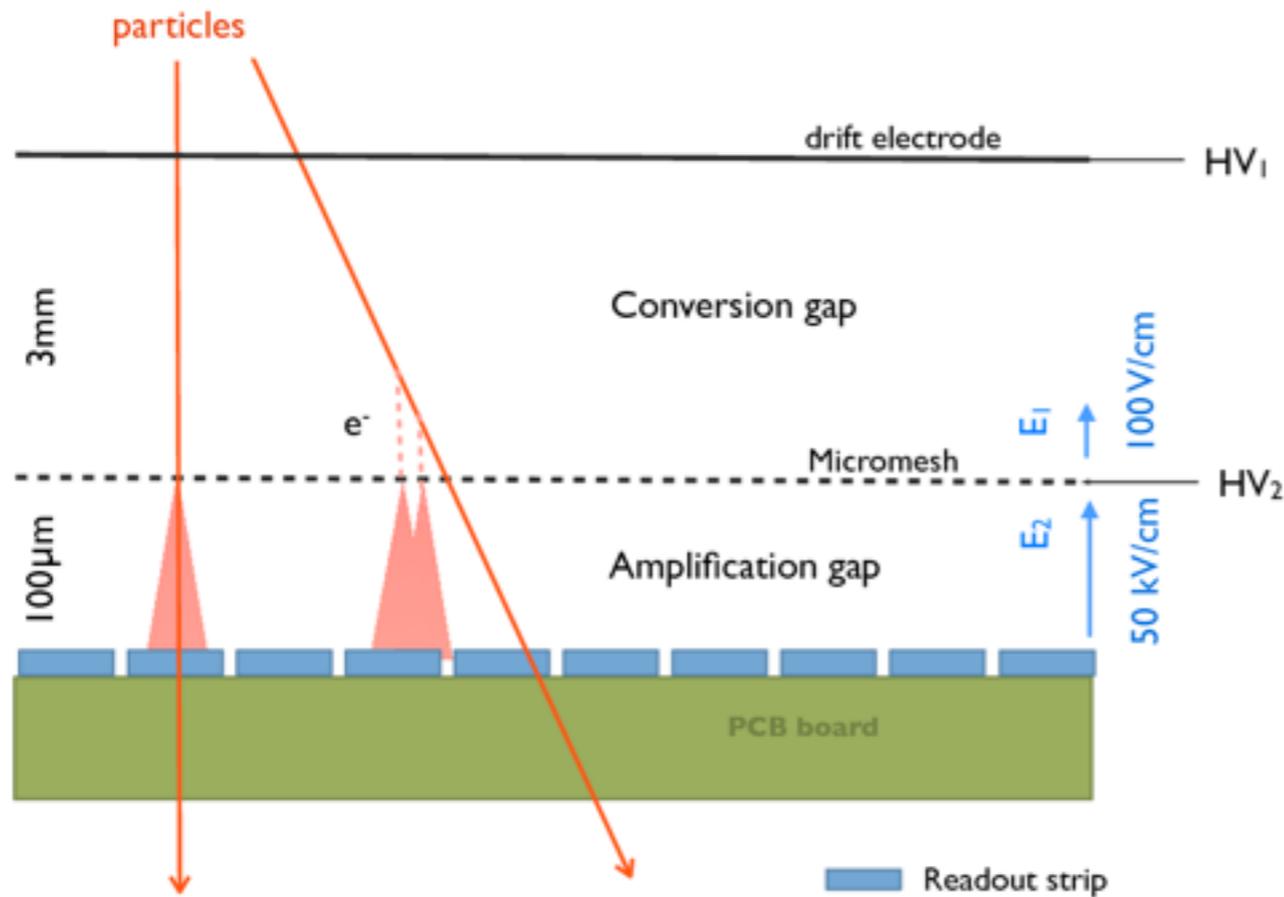
# Gasdetektoren - Drift tubes

- Problem der MWPC: reisende Drähte (z.B. durch Funken)
  - Kammer evtl. unbenutzbar durch Kurzschluss!
- Lösung: **Drift tubes**
  - Jeder Draht umhüllt
  - Messe **Driftzeit** zur Verbesserung der Ortsauflöbung

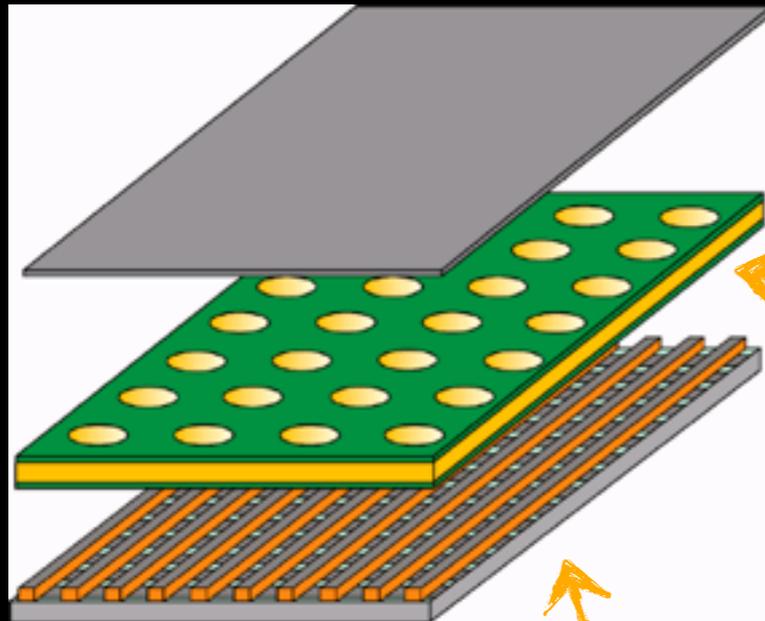


# Gasdetektoren - Micromegas

- Bessere Ortsauflösung & höhere Teilchenrate?
  - größere Granularität → kleineres Ladungssammlungsvolumen pro Kanal

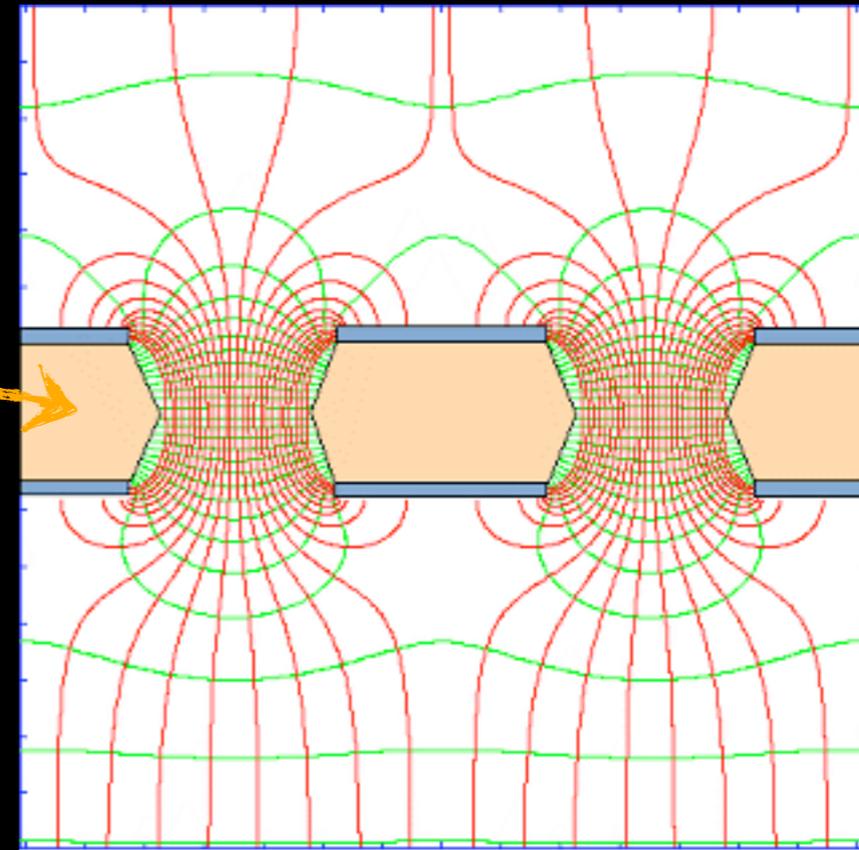


- Bessere Ortsauflösung & höhere Teilchenrate?
  - größere Granularität → kleineres Ladungssammlungsvolumen pro Kanal

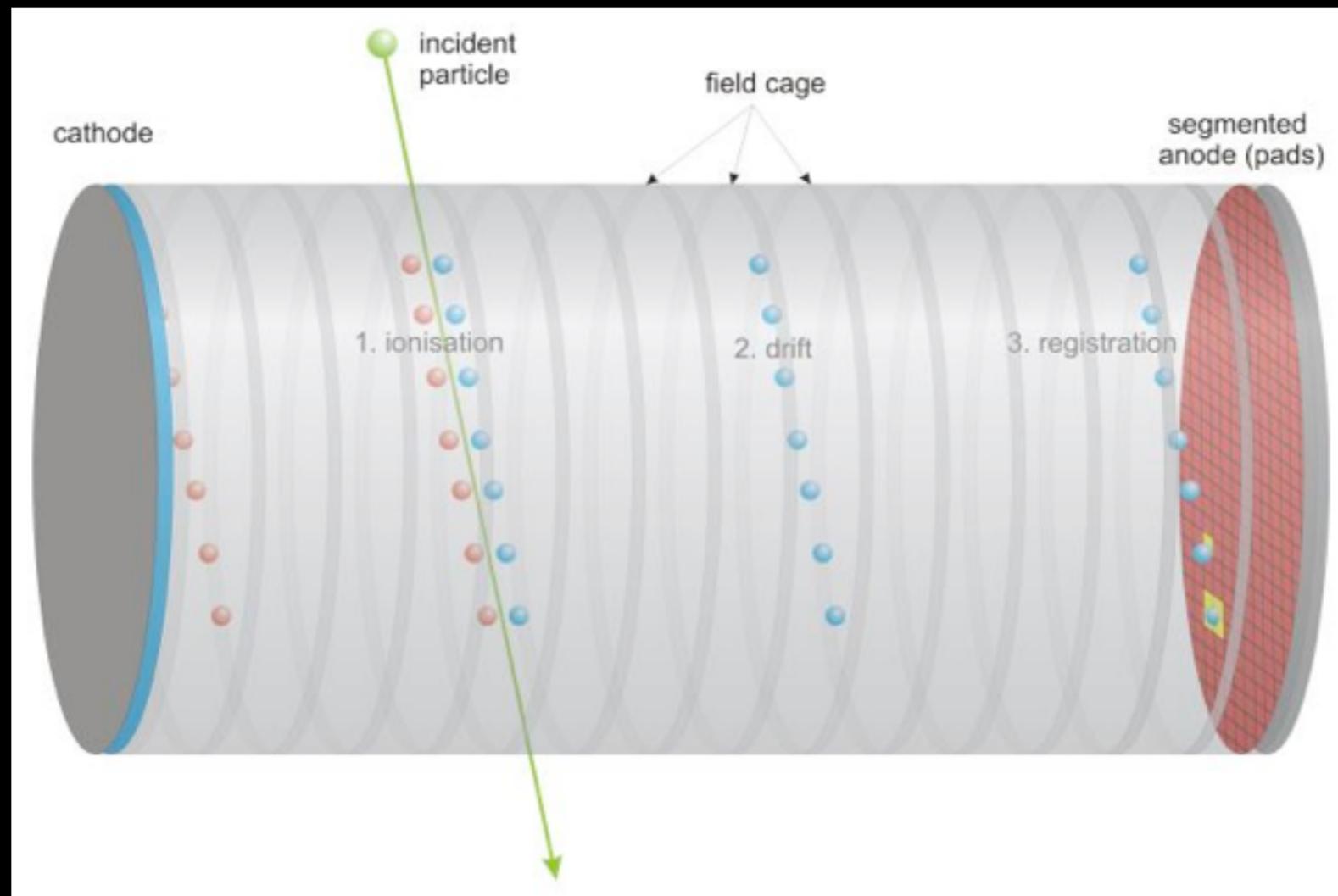


Auslese

Verstärkung



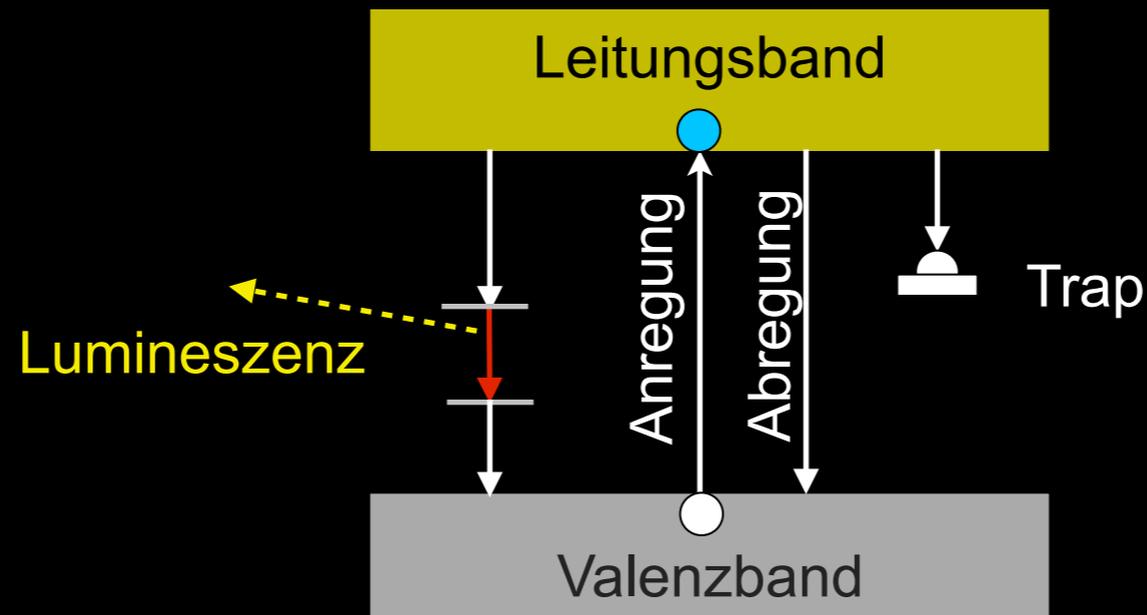
- Time projection chamber
  - 3D Ortsauflösung bei sehr geringem Detektor Material
  - sehr große Volumina möglich
- 2D Projektion einer Teilchenspur; 3te Dimension aus Zeitinformation



E-Feld

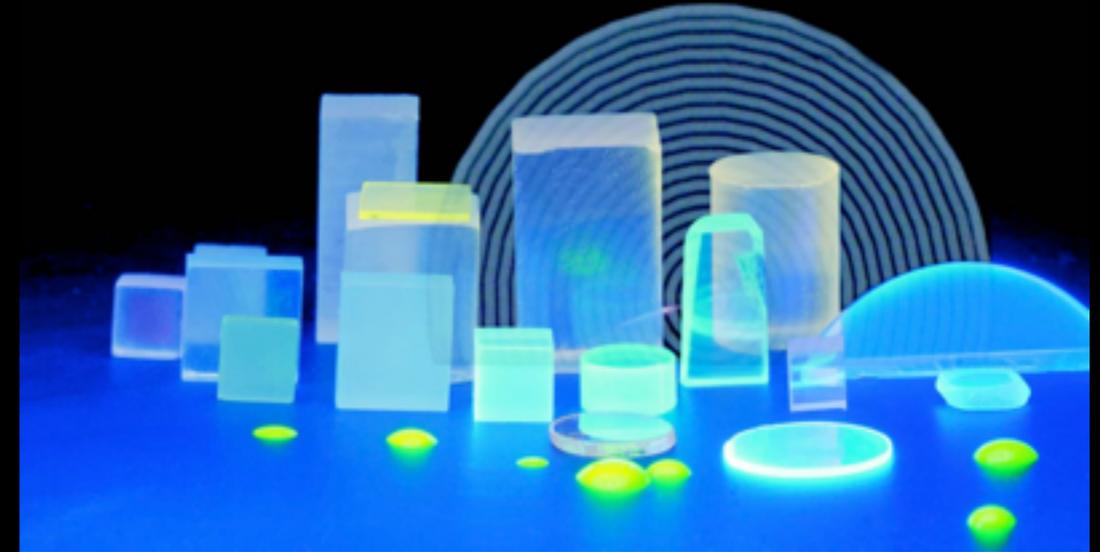
# Szintillation

- Umwandlung von Anregungsenergie in Licht



- **Im Detail sehr komplexer Vorgang**
  - Viele Zwischenniveaus
  - Strahlende und nicht strahlende Übergänge
  - Anregung von anderen Elektronen durch emittiertes Photon
    - Geschickte Wahl der Zustände und möglichen Übergänge
    - ...
- **Materialien:**
  - Anorganische Kristalle / Flüssigkeiten / Edelgase
  - Organische Kunststoffe / Flüssigkeiten

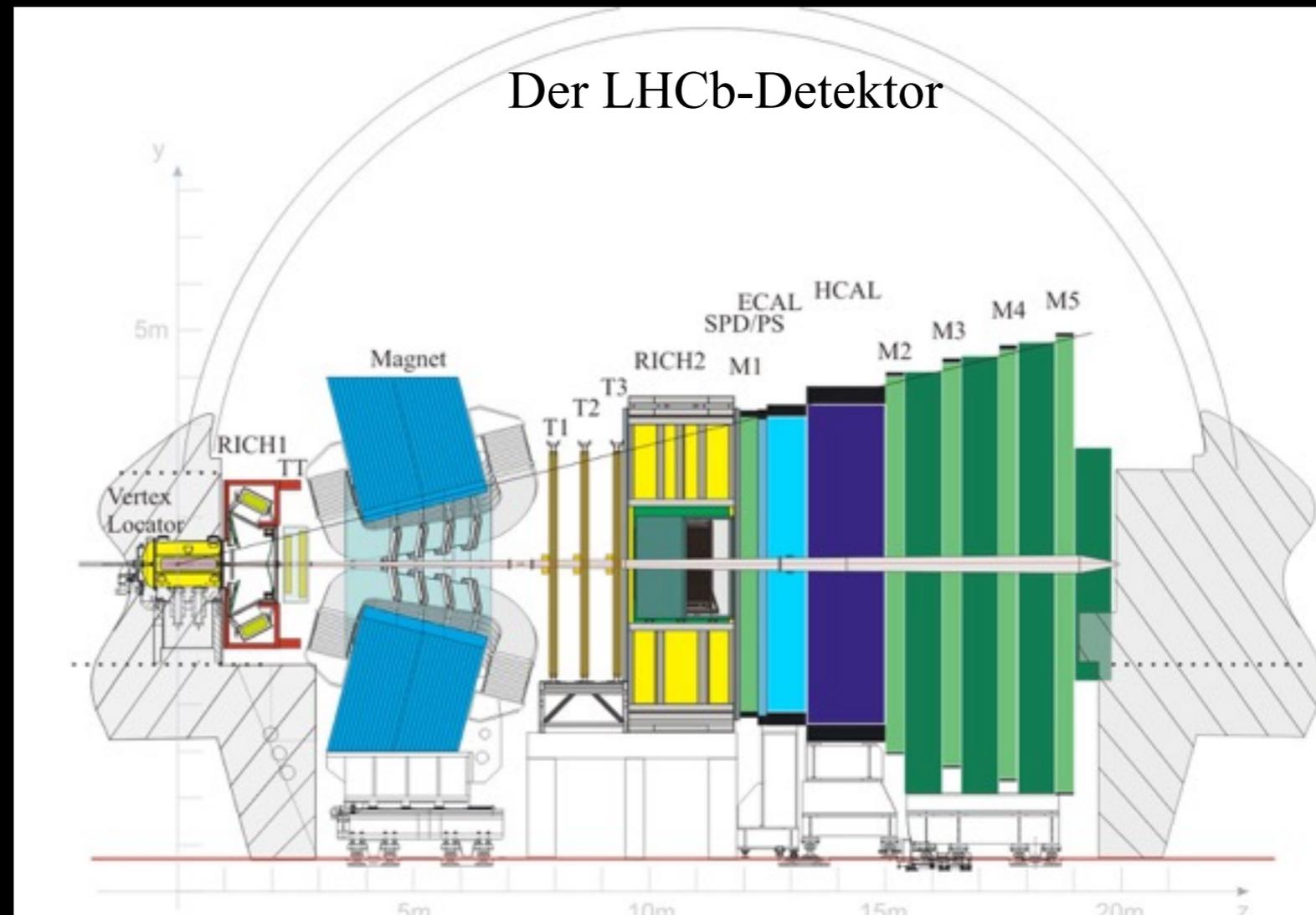
- Umwandlung von Anregungsenergie in Licht
  - Nur Bruchteil umgewandelt!
  - Auslese typisch mit PMT
- **Anorganische Kristalle:**
  - NaI, PbWO<sub>4</sub>, BaF, ...
  - Relativ langsam: 10-1000 ns Abklingzeit
  - Hohe Dichte
  - Wellenlänge: 300-500nm
  - z.T. hygroskopisch

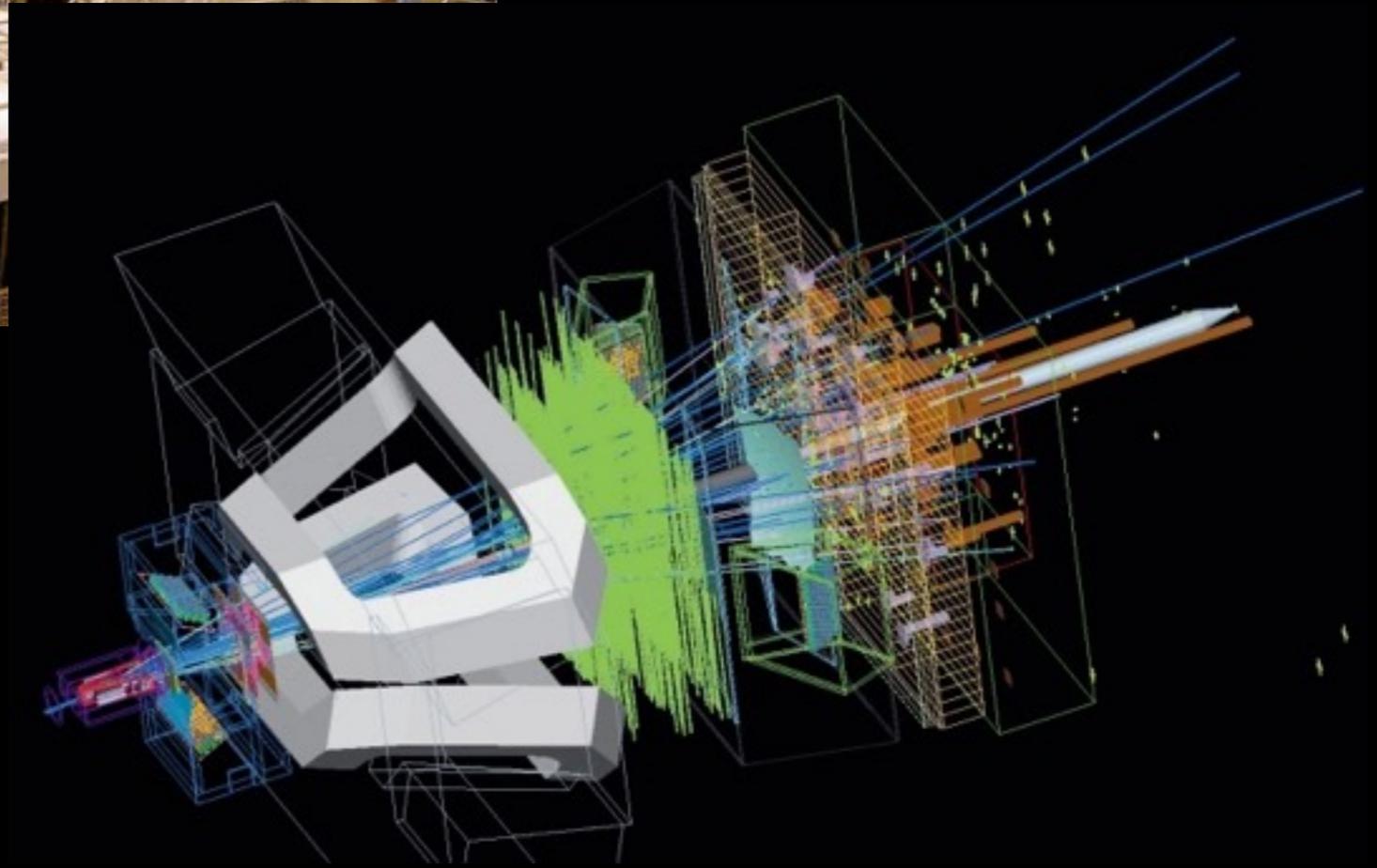
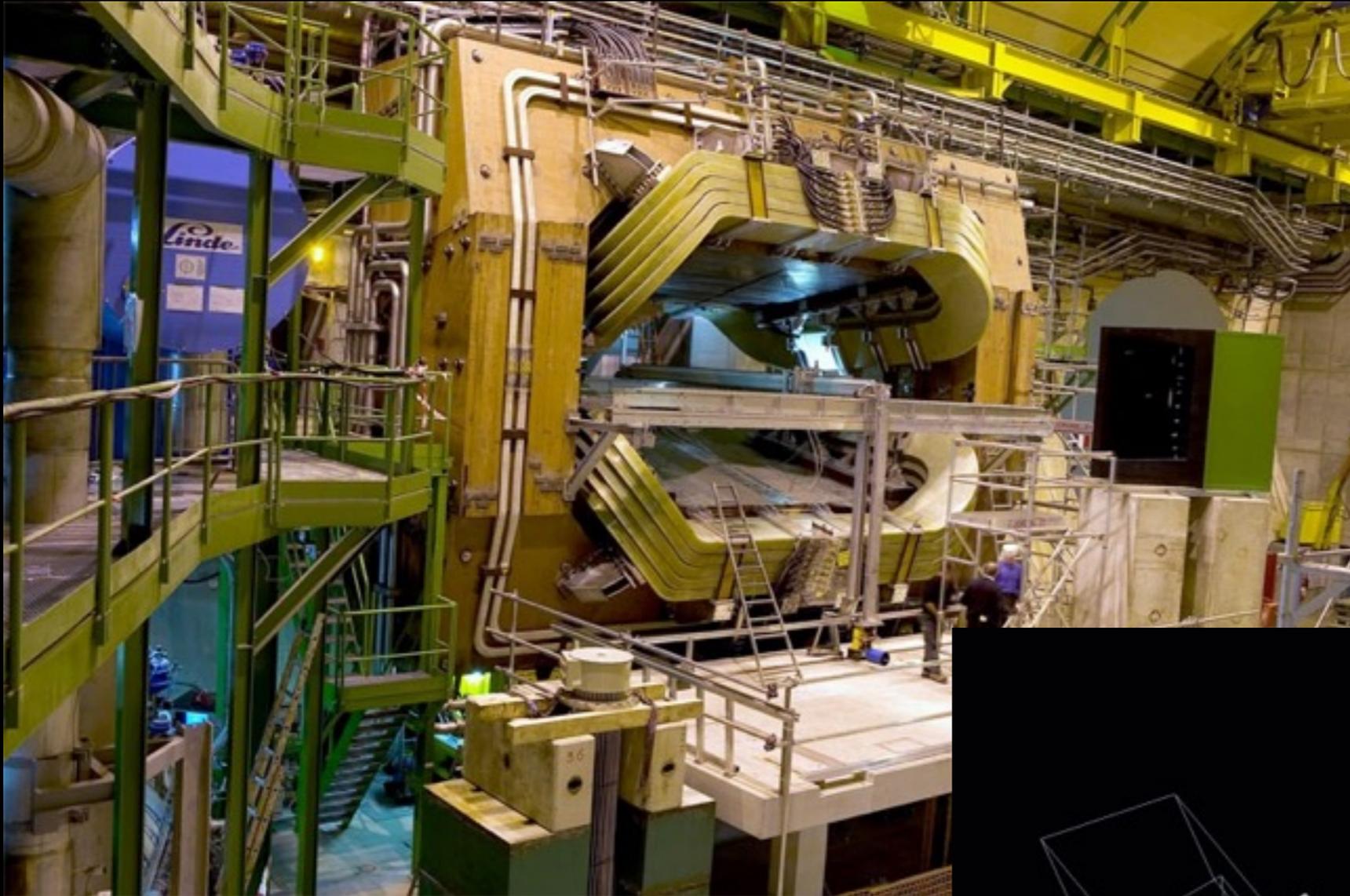


- **„Plastikszintillator“ (organisch):**
  - Reichhaltige Auswahl
  - Schnell: 1-10 ns Abklingzeit
  - Geringe Dichte
  - Wellenlänge: 300-400nm
  - Einfach zu bearbeiten, beliebige Formen

- Optimiert für spezielle Teilchen:
  - B-Mesonen
  - leichte Teilchen (5 GeV)
  - Zerfallsteilchen bewegen sich in Vorwärtsrichtung
  - ➔ Nur ein Spektrometerarm gebaut
- Untersucht die Unterschiede zwischen Materie & Antimaterie ( CP - Verletzung )

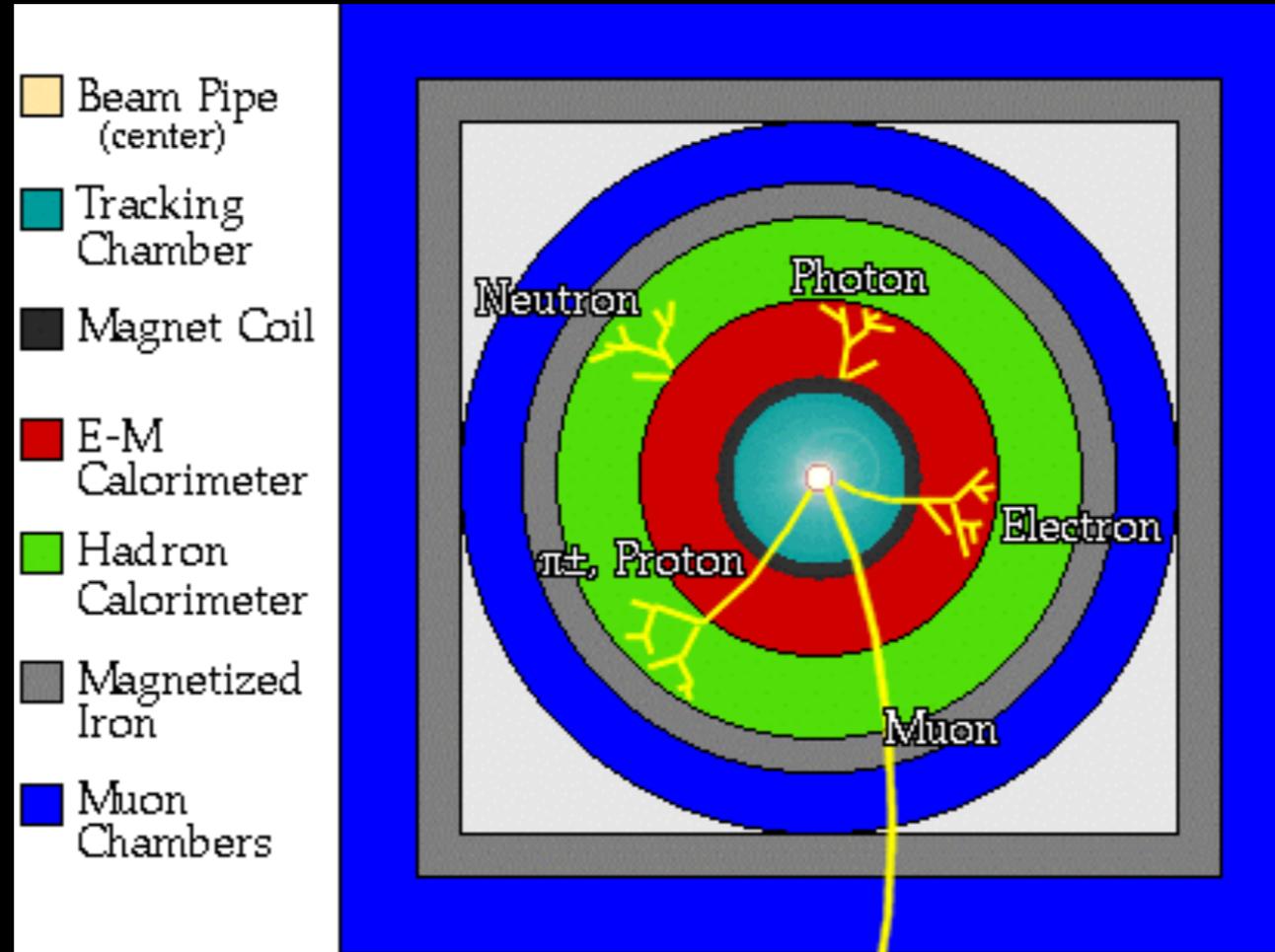
- Zerfallslänge von B - Mesonen  $\sim 0.5$  mm
  - Sehr gute Vertexauflösung erforderlich (10  $\mu$ m)
  - Si Streifendetektor, nur 7mm vom Strahl entfernt!





# Universeller Teilchendetektor

- Ziel: Messung von Energie und Impuls aller Teilchen



Zwei universelle Detektoren: Atlas & CMS  
größte Experimente am LHC

- **Impuls**  $\mathbf{p} = m \mathbf{v} = \gamma m_0 \mathbf{v}$

Lorentzkraft:  $F_L = Q \cdot [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$

Zentripetalkraft:  $F_Z = m \cdot v^2 / r$

$$F_L = F_Z \Rightarrow p/r = Q \cdot B \Rightarrow \mathbf{p} = Q \cdot \mathbf{B} \cdot r$$

**Impulsauflösung Innerdetektor:  $B = 2T$**

=> Limitiert durch  $\Delta B, \Delta R$

dX: Messgenauigkeit der Position eines Hits  
PIX:  $10\mu\text{m}$ ; SCT:  $17\mu\text{m}$ ; TRT:  $\sim 0,1\text{-}1\text{mm}$

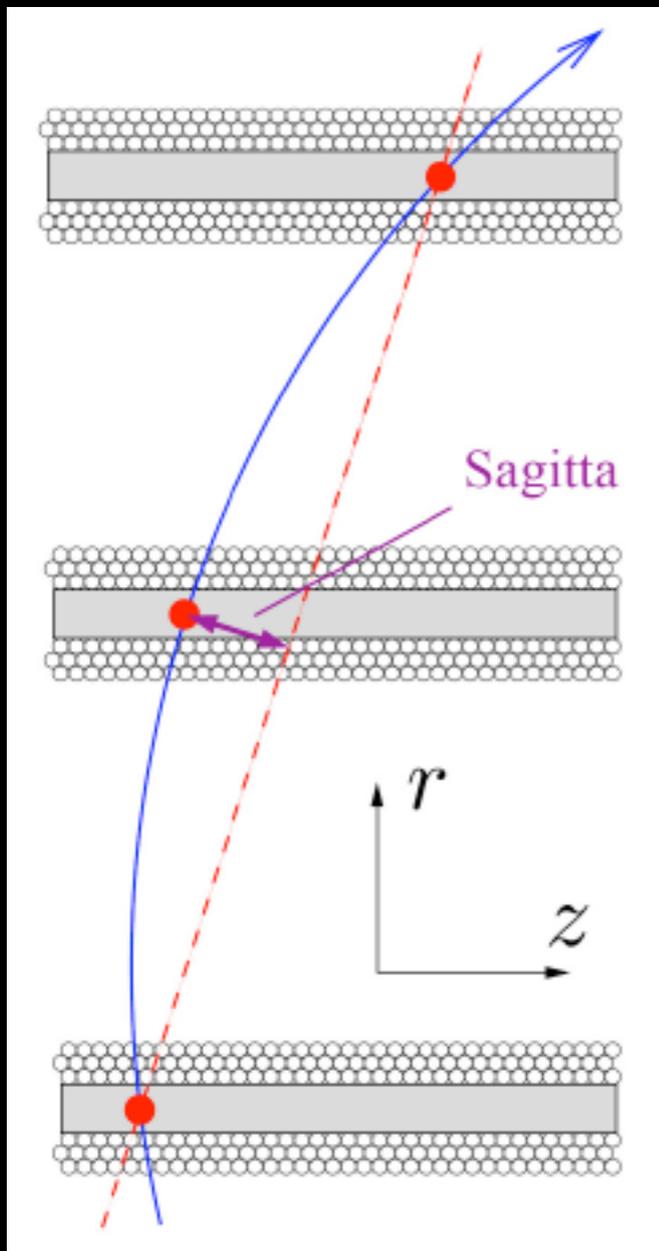
$$\Rightarrow \Delta p_T / p_T = \mathbf{1.5\% @ 5 GeV}$$

$$\Rightarrow \Delta p_T / p_T = \Delta r / r$$

**rel. Fehler wächst linear mit Impuls!**

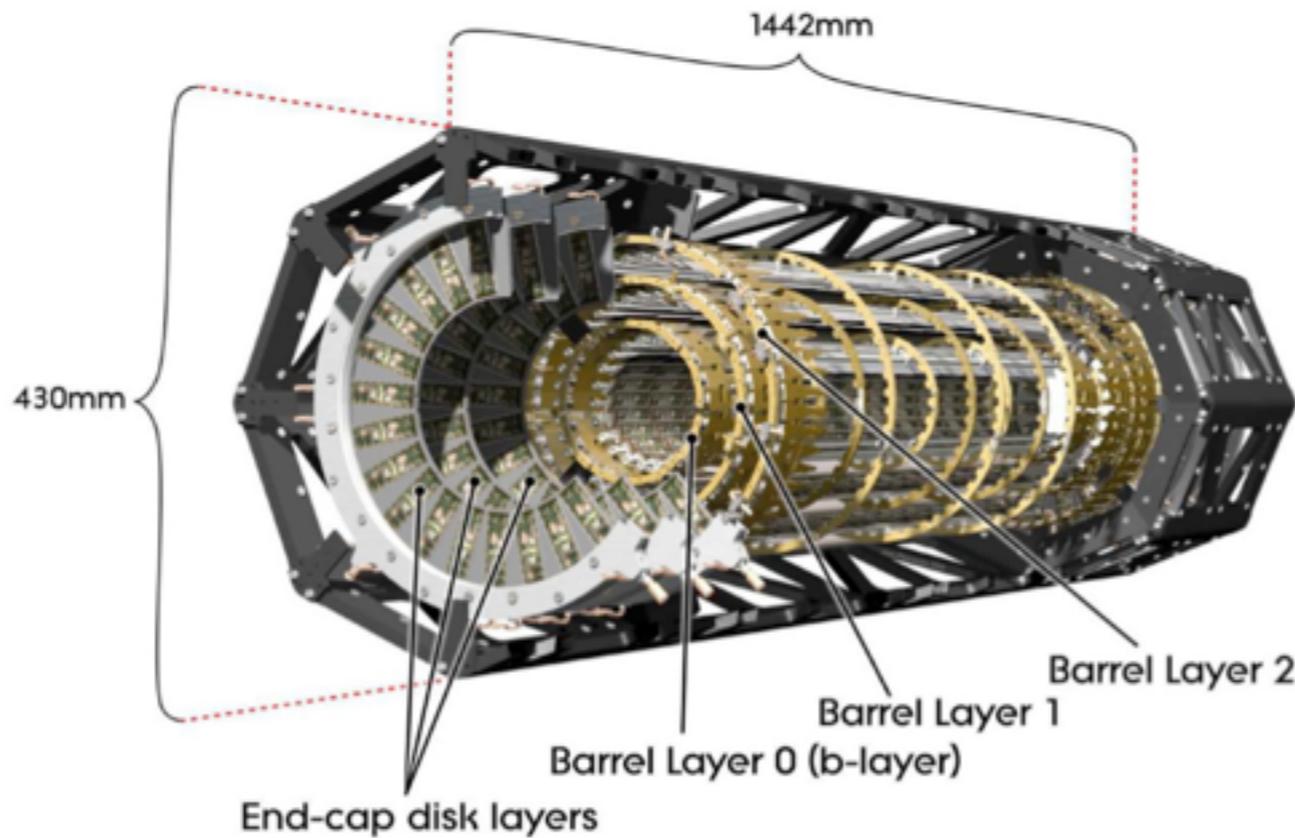
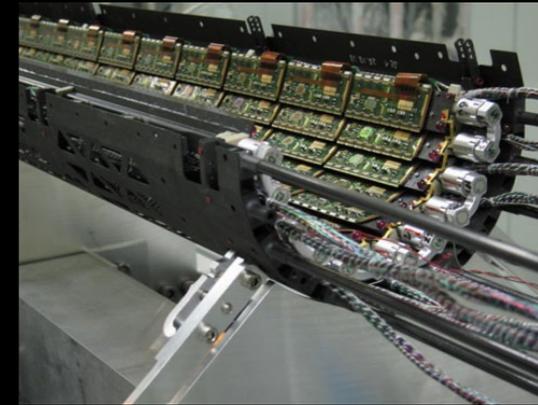
=> bei niedrigem Impuls limitiert durch Mehrfachstreuung

**Vertex Auflösung: besser als  $30\mu\text{m}$**

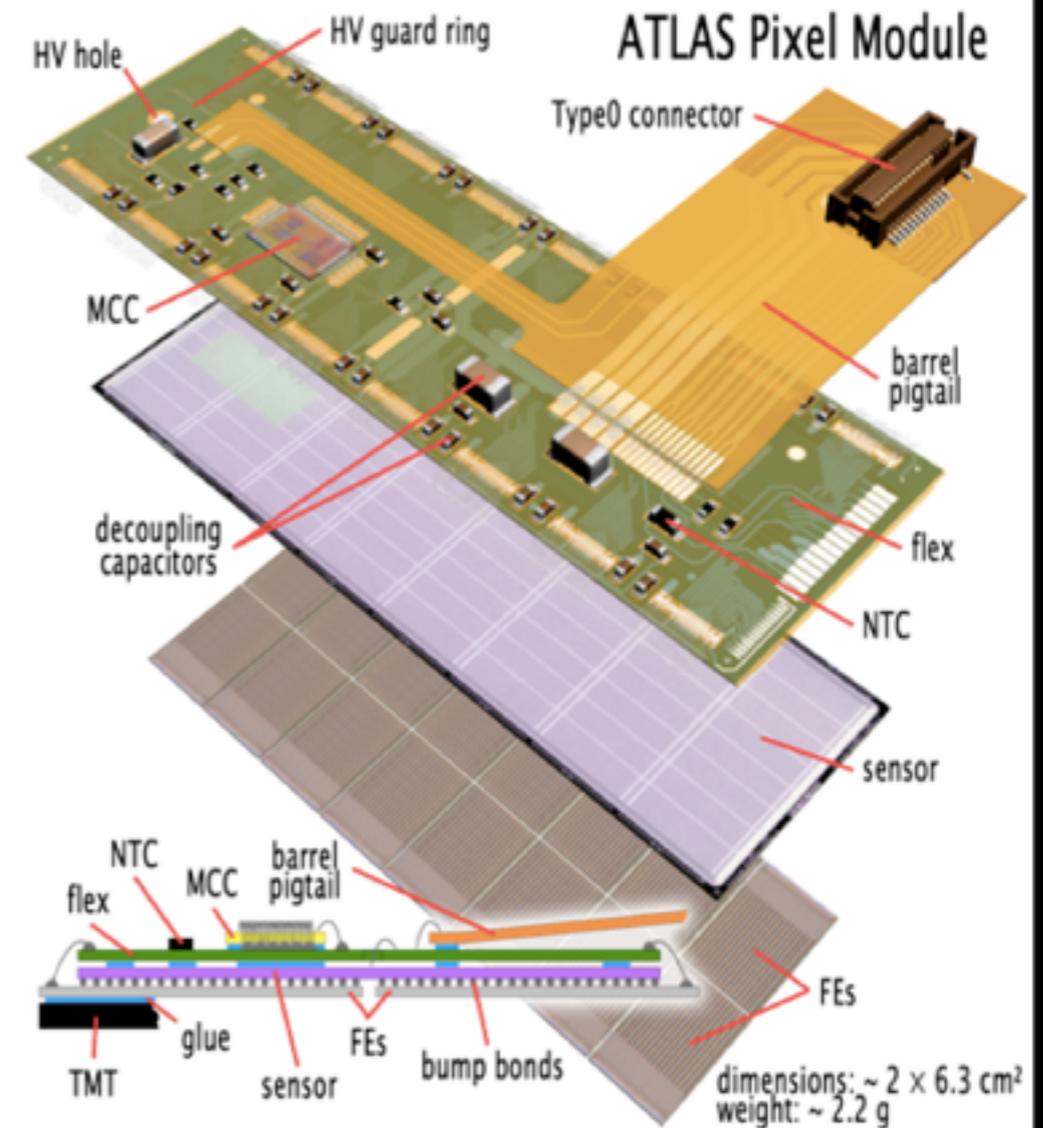


# Messgrößen von Interesse - Impuls

- Beispiel: **ATLAS Pixeldetektor**



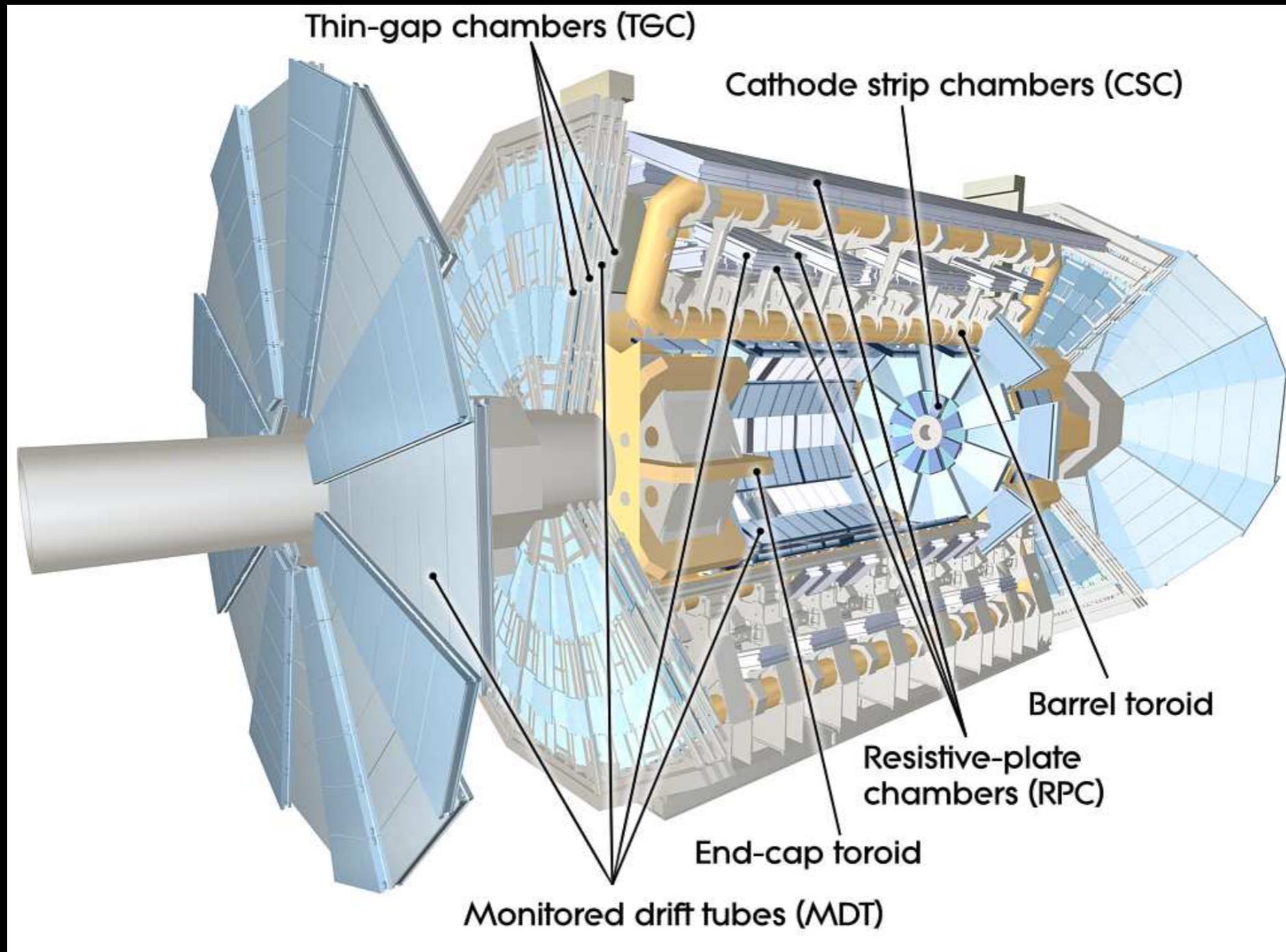
(a)



(b)

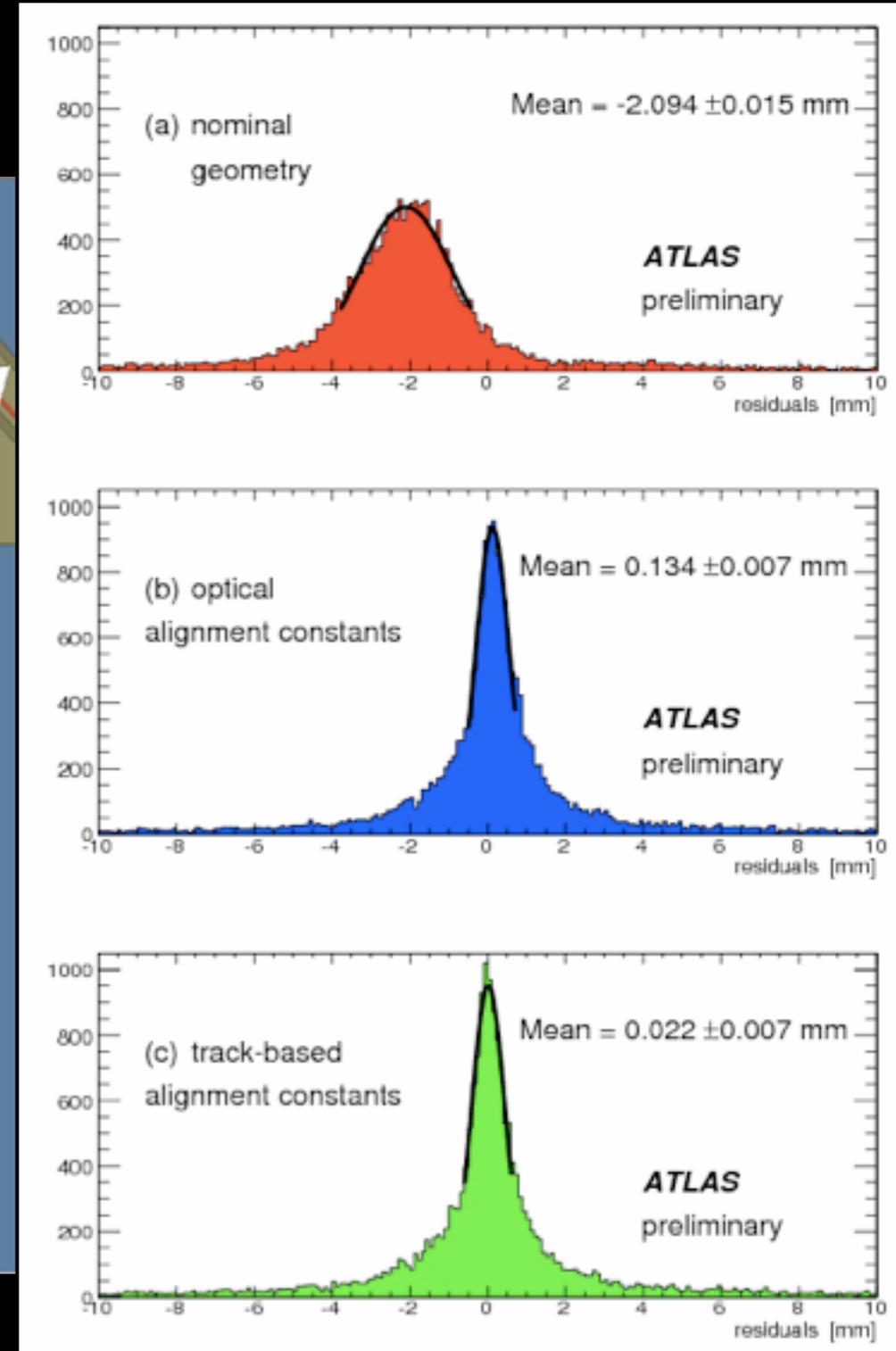
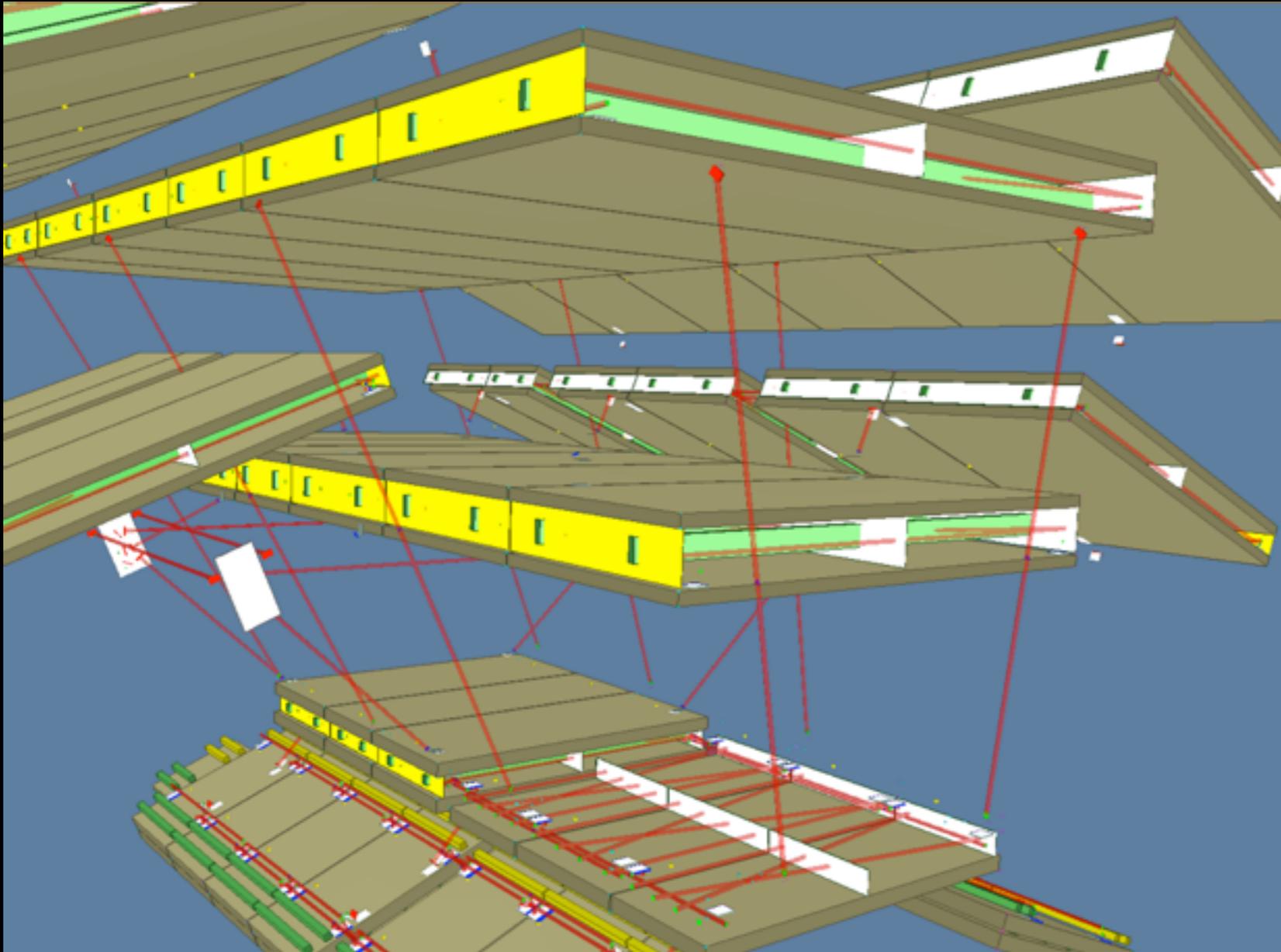
# Messgrößen von Interesse - Impuls

- ATLAS Muonspektrometer
- Einzelne Kammern: bis zu  $5 \times 7 \text{ m}^2$
- $B = 0,5 - 1 \text{ T}$



## Impulsauflösung Muonsystem: **Alignment**

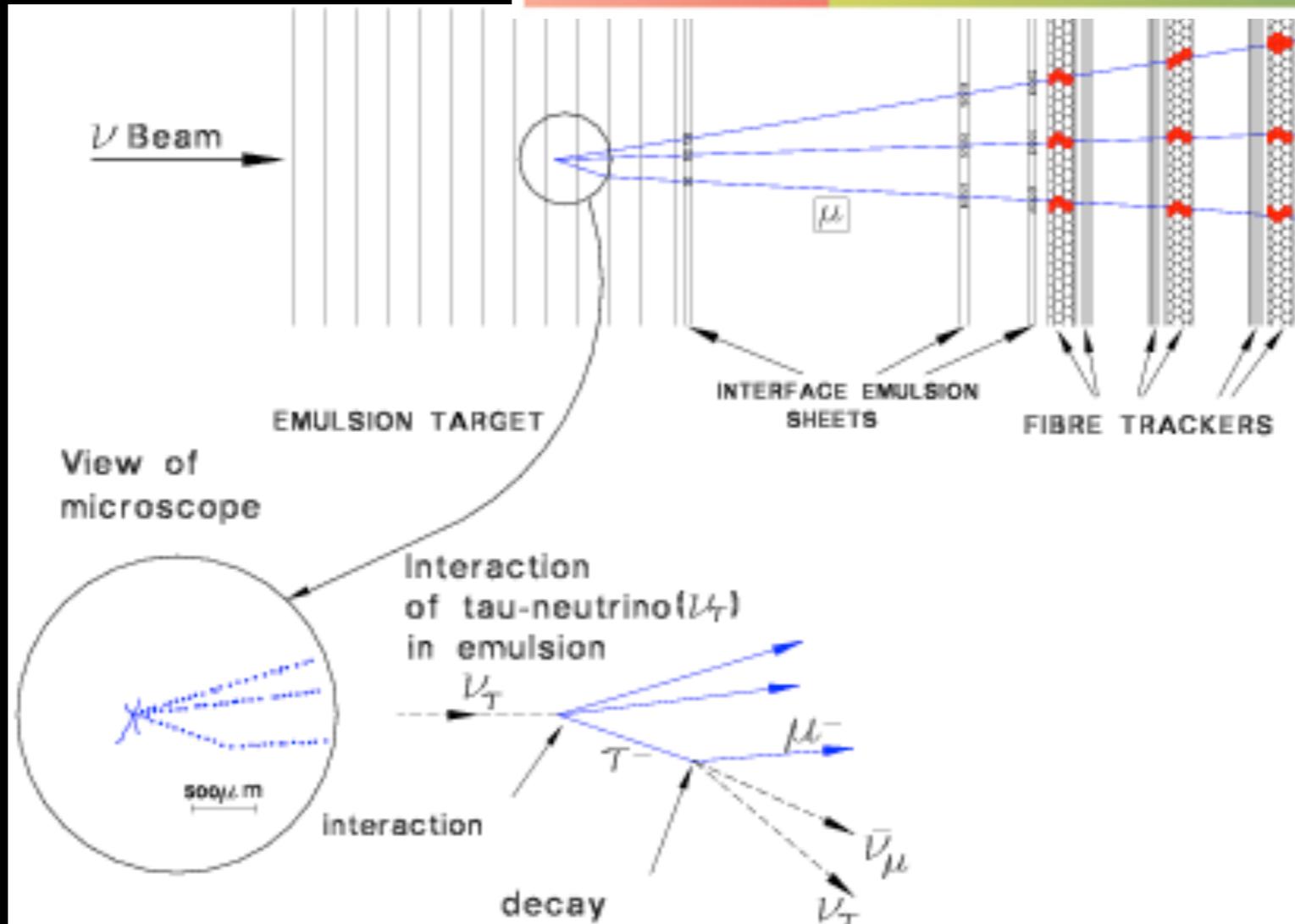
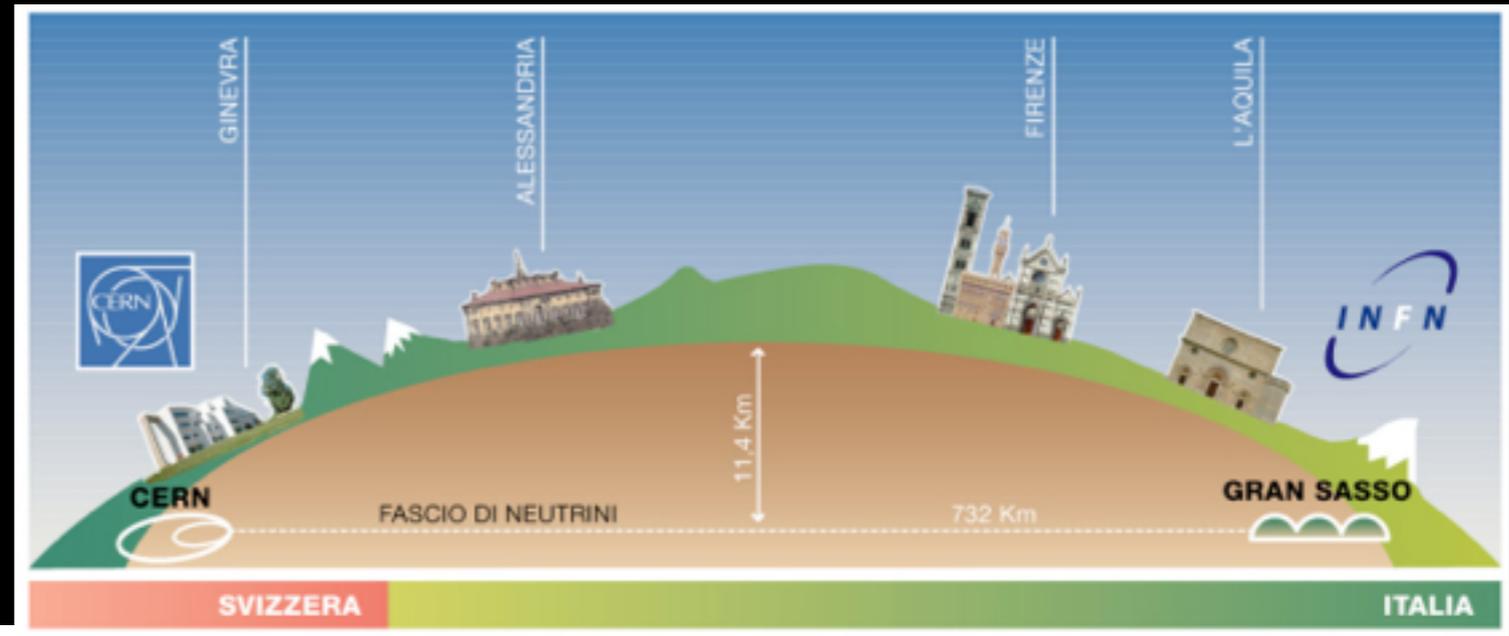
optisches Netzwerk zur Positionskontrolle



# Neutrinos

- Cherenkov (Wasser)
- Chemische Veränderung
- **Film**

## Opera Experiment:



- Cherenkov (Wasser)
- Chemische Veränderung
- **Film**

## Opera Experiment:

