

German Teachers Programme October 2016

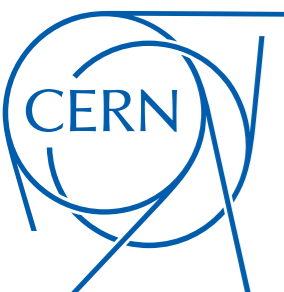
Teilchendetektoren

oder: Wie schaut man in den Mikrokosmos?

Jennifer Mertens

CERN - Technology Department

jennifer.mertens@cern.ch



Vorwort

- ▶ Viel ist übernommen aus vorherigen Vorlesungen von Kristof Schmieden und Daniel Münstermann
- ▶ Lektüre, die ich sehr empfehlenswert finde:
Teilchendetektoren - Grundlagen und Anwendungen von H. Kolanoski und N. Wermes
- ▶ Ich habe versucht alle Bilder zu referenzieren
- ▶ Falls es Fragen oder Hinweise gibt, dann immer raus damit! Hier oder später auch per Mail.

Worum geht es die nächsten 90 Minuten?

- ▶ Welche Teilchen können wir überhaupt messen?
- ▶ Wechselwirkung von Teilchen mit Materie
- ▶ Was können wir messen und wie hilft uns das beim Nachweis von Teilchen? -> Detektionsprinzipien
- ▶ Welche Detektortypen gibt es?
- ▶ Das ganz große Ganze: Detektorsysteme

Prolog: Einheiten

- ▶ Elementarladung: $e = 1,602\ 176\ 6208 \cdot 10^{-19}$ C
- ▶ Energieeinheit eV: $1\ \text{eV} = 1,602\ 176\ 6208 \cdot 10^{-19}$ J (CV)
- ▶ Masse eines Elektrons: $9.1 \cdot 10^{-31}$ kg
- ▶ Ruheenergie ($E_0 = m \cdot c^2$) Elektron: $8.2 \cdot 10^{-14}$ J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$) = 511 keV
- ▶ Oft 511 keV als Angabe für die Masse des Elektrons, obwohl es natürlich genauer $511\ \text{keV}/c^2$ heißen sollte.
- ▶ Häufig verwendet: MeV, GeV, TeV
wobei $c = 1$ (und $\hbar = 1$) gesetzt wird

Prolog: Teilchen zerfallen

Fast alle bekannten Teilchen zerfallen

$$n \text{ (939 MeV)} \rightarrow p^+ \text{ (938 MeV)} + e^- \text{ (0,5 MeV)} \quad \tau = 15 \text{ min}$$

$$\mu^- \text{ (106 MeV)} \rightarrow e^- \text{ (0,5 MeV)} + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \tau = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Mittlere Flugstrecke bis Zerfall hängt von der Geschwindigkeit ab:

$$d = v \cdot \tau \quad \text{bzw. relativistisch in unserem Fall: } d = c \cdot \tau \cdot \gamma$$

$$\text{mit } \gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

Prolog: Der Teilchenzoo (Teil 1)

Leptonen: e^\pm (0.511), μ^\pm (105.7), τ^\pm (1777) (alle Massen in MeV!)

Neutrinos (Masse klein, aber > 0): $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$

Quarks: u (2.3), d (4.8), s (95), c (1275), b (4180), t (173070)

Bosonen: γ ($< 10^{-24}$), g (0), W^\pm (80385), Z^0 (91187), H^0 (125900)

Baryonen:

p^\pm (938.3), n (939.6), $N(1440)$, $N(1520)$, $N(1535)$, $N(1650)$, $N(1675)$, $N(1680)$, $N(1700)$, $N(1710)$, $N(1720)$, $N(1875)$, $N(1900)$, $N(2190)$, $N(2220)$, $N(2250)$, $N(2600)$, $\Delta(1232)$, $\Delta(1600)$, $\Delta(1620)$, $\Delta(1700)$, $\Delta(1905)$, $\Delta(1910)$, $\Delta(1920)$, $\Delta(1930)$, $\Delta(1950)$, $\Delta(2420)$, $\Lambda(1116)$, $\Lambda(1405)$, $\Lambda(1520)$, $\Lambda(1600)$, $\Lambda(1670)$, $\Lambda(1690)$, $\Lambda(1800)$, $\Lambda(1810)$, $\Lambda(1820)$, $\Lambda(1830)$, $\Lambda(1890)$, $\Lambda(2100)$, $\Lambda(2110)$, $\Lambda(2350)$, Σ^+ (1189), Σ^0 (1193), Σ^- (1197), $\Sigma(1385)$, $\Sigma(1660)$, $\Sigma(1670)$, $\Sigma(1750)$, $\Sigma(1775)$, $\Sigma(1915)$, $\Sigma(1940)$, $\Sigma(2030)$, $\Sigma(2250)$, Ξ^0 (1315), Ξ^- (1322), $\Xi(1530)$, $\Xi(1690)$, $\Xi(1820)$, $\Xi(1950)$, $\Xi(2030)$, Ω^- (1672), $\Omega(2250)^-$, $\Lambda+c$ (2286), $\Lambda_c(2295)$, $\Lambda_c(2295)^+$, $\Lambda_c(2625)^+$, $\Lambda_c(2880)^+$, $\Lambda_c(2940)^+$, $\Sigma_c(2455)$, $\Sigma_c(2520)$, $\Sigma_c(2800)$, $\Xi+c$ (2468), Ξ^0c (2471), $\Xi'+c$ (2576), Ξ'^0c (2578), $\Xi_c(2645)$, $\Xi_c(2790)$, $\Xi_c(2815)$, $\Xi_c(2980)$, $\Xi_c(3080)$, Ω^0c (2695), Ω_c (2770) 0 , Λ^0b (5619), $\Lambda_b(5912)^0$, $\Lambda_b(5920)^0$, Σ_b (5811), Σ^*b (5832), Ξ^0b (5788), Ξ^-b (5791), $\Xi_b(5945)^0$, Ω^-b (6071)

Prolog: Der Teilchenzoo (Teil 1)

Mesonen:

π^\pm (139.6), π^0 (135.0), η (547.9), σ (400-550), ρ (770), ω (782.7), η' (957.8), f_0 (990), a_0 (980), ϕ (1019), h_1 (1170), b_1 (1229), a_1 (1230), f_2 (1275), f_1 (1282), η (1295), π (1300), a_2 (1318), f_0 (1370), π_1 (1400), η (1409), f_1 (1426), ω (1400-1450), a_0 (1474), ρ (1465), η (1476), f_0 (1505), f'_2 (1525), π_1 (1662), η_2 (1617), ω (1670), ω_3 (1667), π_2 (1672), ϕ (1680), ρ_3 (1689), ρ (1720), f_0 (1720), π (1812), ϕ_3 (1854), π_2 (1895), f_2 (1944), f_2 (2011), a_4 (1996), f_4 (2018), ϕ (2175), f_2 (2297), f_2 (2339)

K^\pm (493.7), K^0 (497.6), K^0_S , K^0_L , K^* (891.7), K_1 (1272), K_1 (1403), K^* (1414), K^{*0} (1425), K^{*2} (1426), K^* (1717), K_2 (1773), K^{*3} (1776), K_2 (1816), K^{*4} (2045)
 D^\pm (1870), D^0 (1865), $D^*(2007)^0$, $D^*(2010)^\pm$, $D^{*0}(2318)^0$, $D_1(2420)^0$, $D^{*2}(2463)^0$, $D^{*2}(2464)^\pm$, D^\pm_s (1969), $D^{*s\pm}$ (2112), $D^{*s0}(2317)^\pm$, $Ds_1(2460)^\pm$, $Ds_1(2535)^\pm$, D^{*s2} (2572), $D^{*s1}(2709)^\pm$

B^\pm (5279), B^0 (5280), B^* (5325), $B_1(5724)^0$, $B^{*2}(5743)^0$, B^0_s (5367), B^{*s} (5415), $Bs_1(5829)^0$, $B^{*s2}(5840)^0$, B^\pm_c (6275), $\eta_c(1S)$ (2984), $J/\psi(1S)$ (3097), $\chi_{c0}(1P)$ (3415), $\chi_{c1}(1P)$ (3511), $h_c(1P)$ (3525), $\chi_{c2}(1P)$ (3556), $\eta_c(2S)$ (3639), $\psi(2S)$ (3686), ψ (3373), X (3872), $\chi_{c0}(2P)$ (3918), $\chi_{c2}(2P)$ (3927), ψ (4039), ψ (4153), X (4250), X (4361), ψ (4421), X (4664), $Y(1S)$ (9460), $\chi_{b0}(1P)$ (9859), $\chi_{b1}(1P)$ (9893), $h_b(1P)$ (9899), $\chi_{b2}(1P)$ (9912), $Y(2S)$ (10023), $Y(1D)$ (10174), $\chi_{b0}(2P)$ (10233), $\chi_{b1}(2P)$ (10255), $\chi_{b2}(2P)$ (10269), $Y(3S)$ (10355), $\chi_b(3P)$ (10534), $Y(4S)$ (10579), Y (10876), Y (11019)

Welche Teilchen können wir nachweisen?

Nur die, die lange genug leben, um unseren Detektor zu erreichen, also namentlich:

$e^\pm, \mu^\pm, \nu_e, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\mu, \nu_\tau, \nu_\tau, \gamma$

$\pi^\pm, K^\pm, K^0 (K^0_S, K^0_L)$

p^\pm, n

$\Sigma^+, \Sigma^-, \Xi^0, \Xi^-, \Omega^-$

$$c \cdot \tau > 500 \mu\text{m}$$

für $\gamma = 20$:

Reichweiten zwischen
13km (μ) und 0,5 m (K^0_S)

(∞ für p & γ)

Typischer γ Faktor:

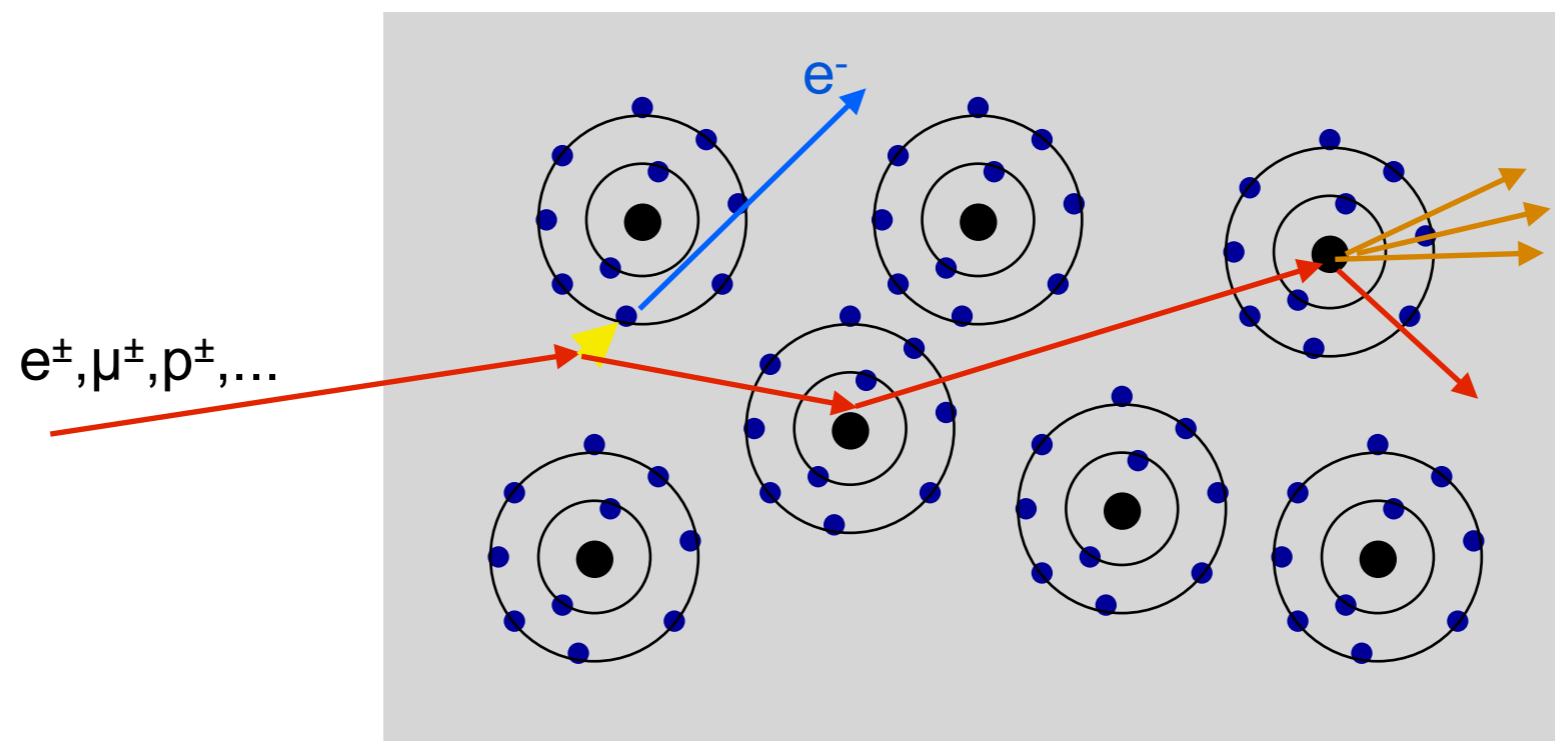
10 - 1 000

Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Leptonen: elektromagnetisch und schwach

Hadronen: elektromagnetisch, schwach und stark

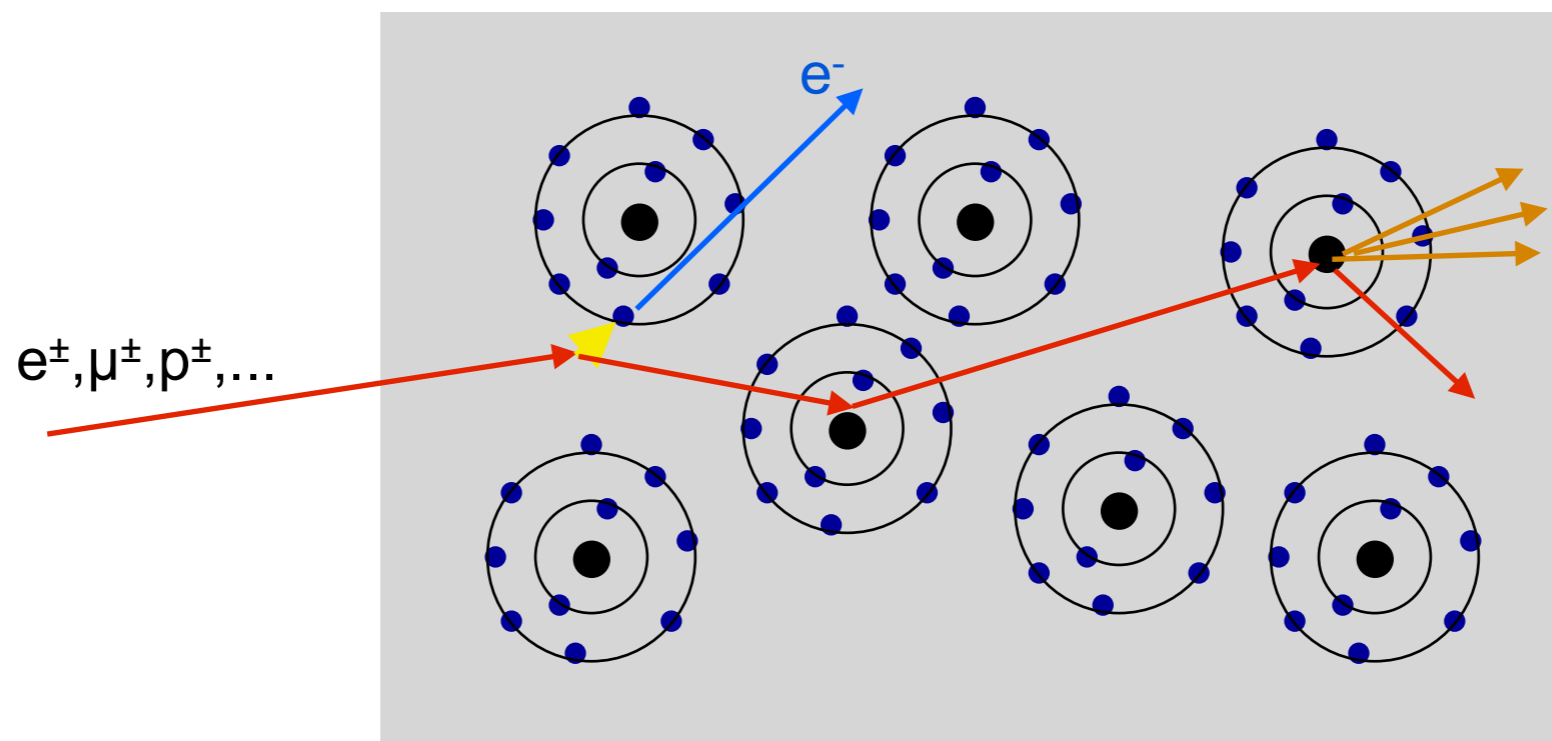


Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Leptonen: elektromagnetisch und schwach

Hadronen: elektromagnetisch, schwach und stark

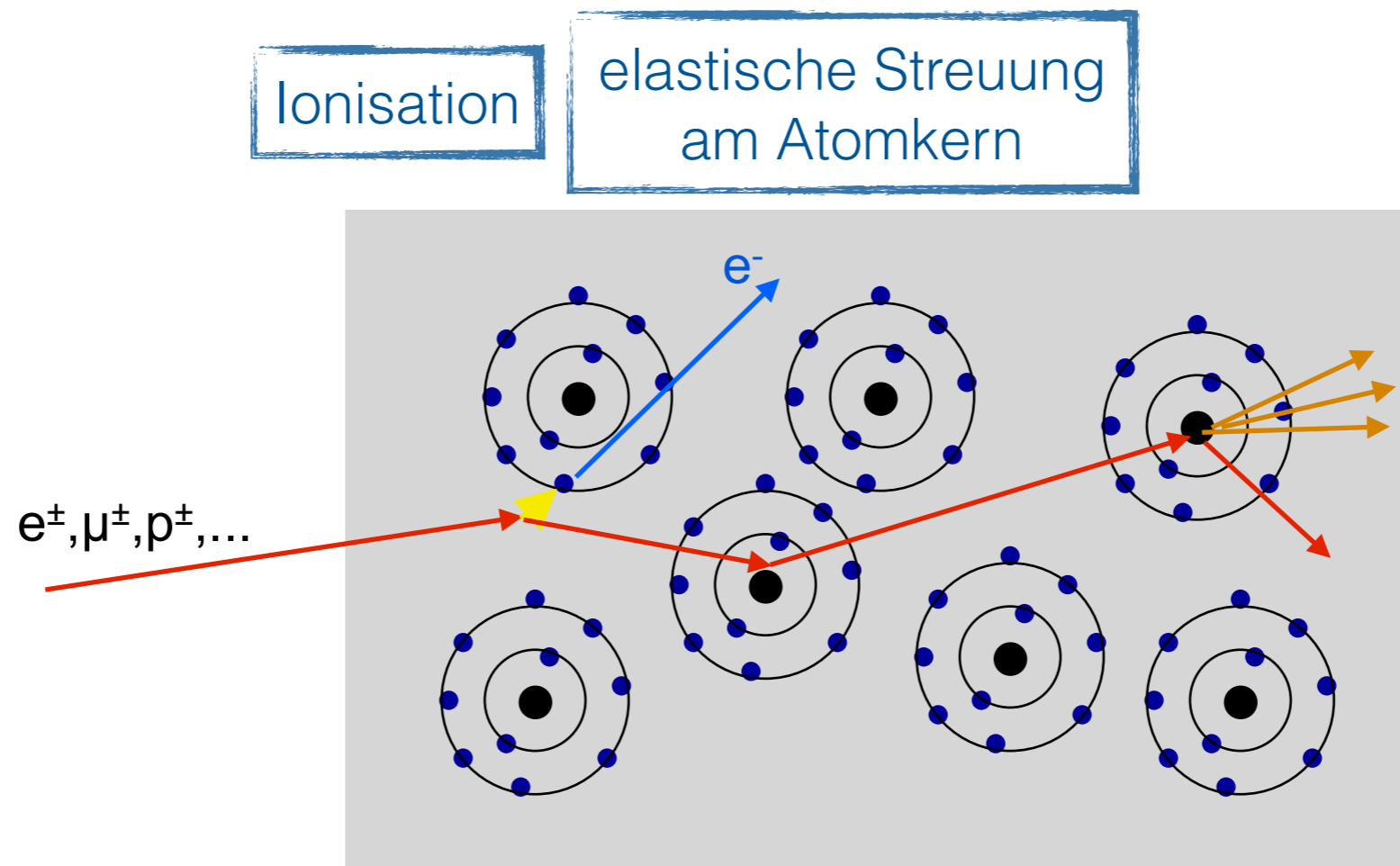
Ionisation



Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Leptonen: elektromagnetisch und schwach

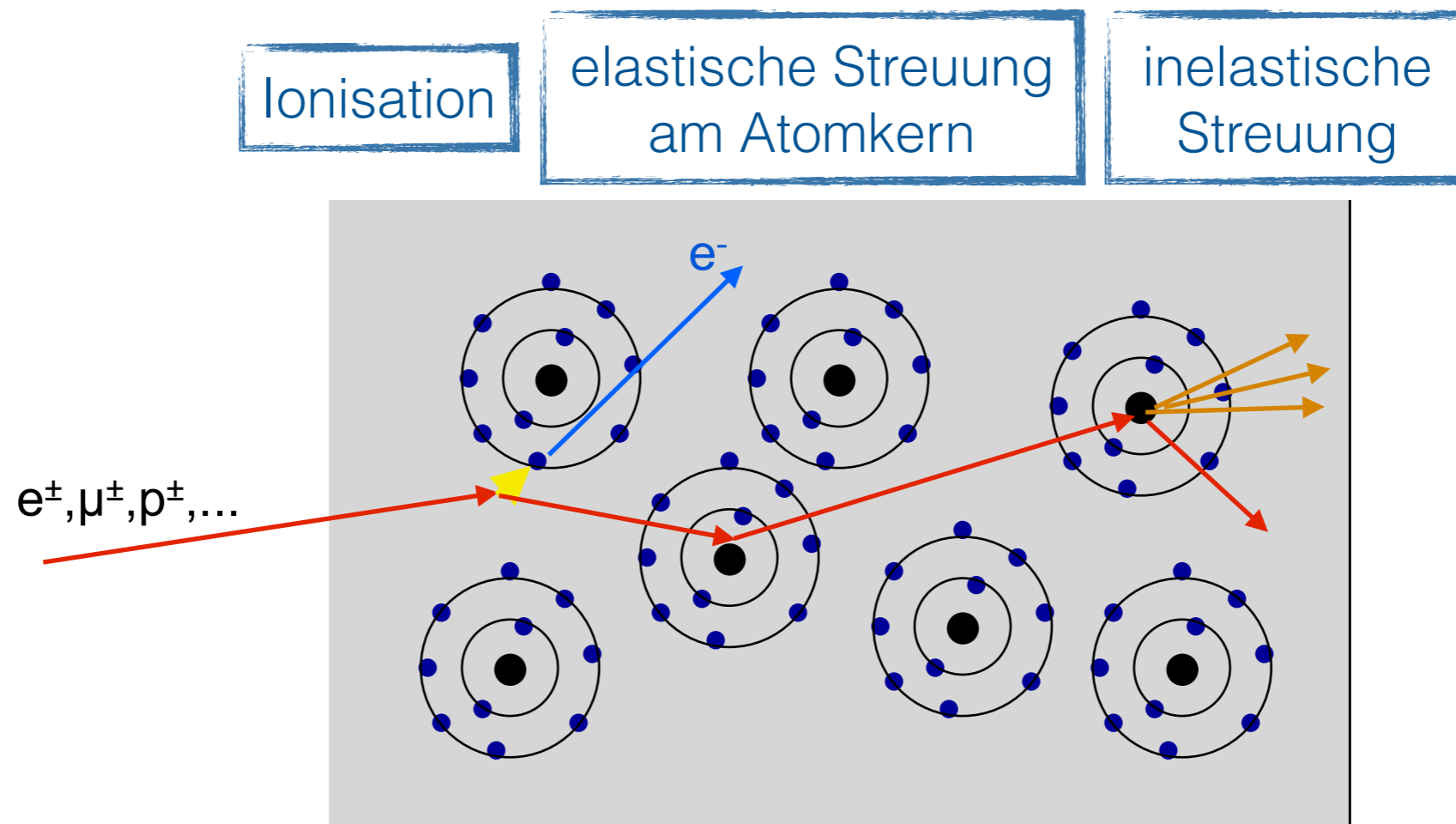
Hadronen: elektromagnetisch, schwach und stark



Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Leptonen: elektromagnetisch und schwach

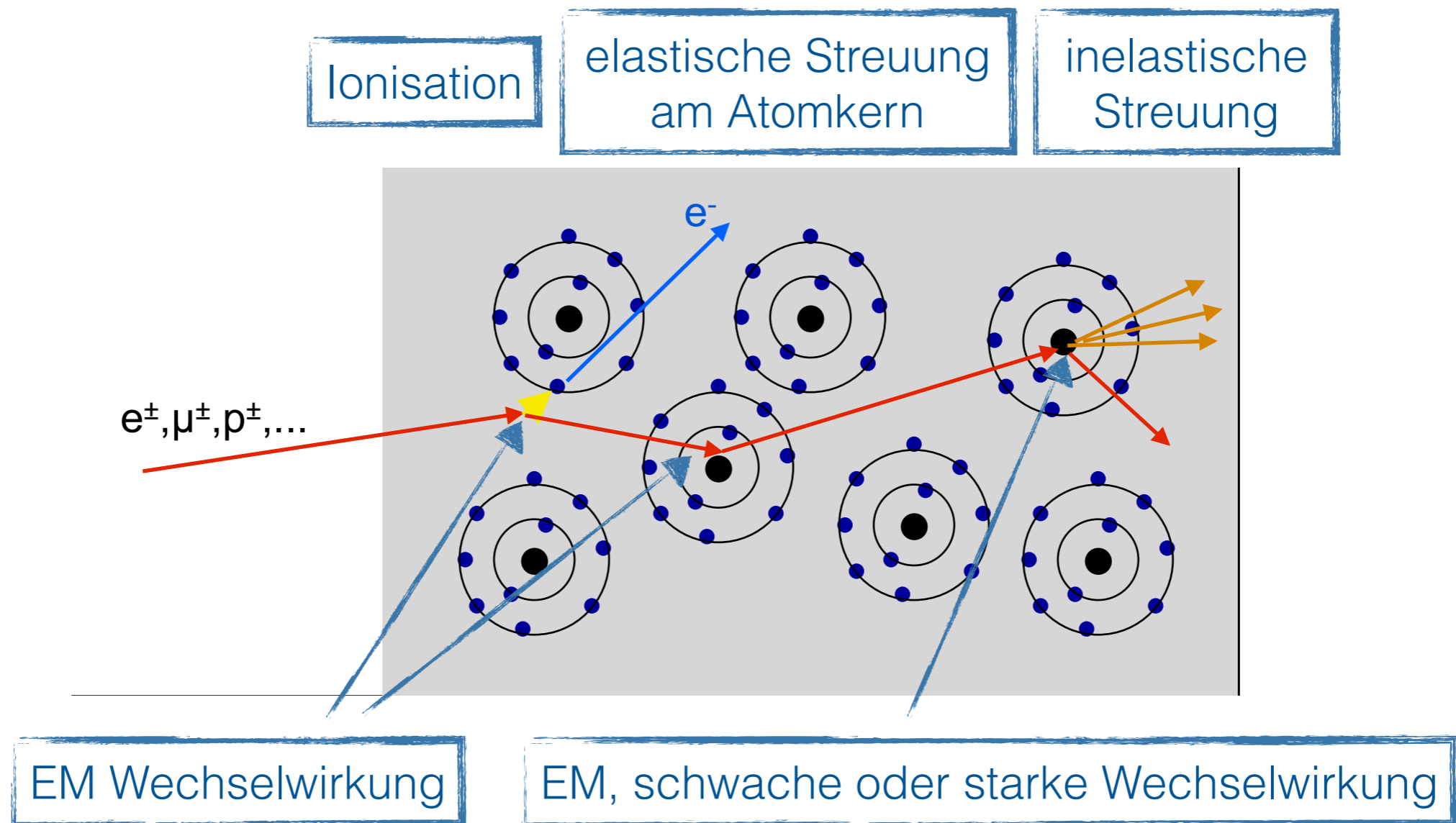
Hadronen: elektromagnetisch, schwach und stark



Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Leptonen: elektromagnetisch und schwach

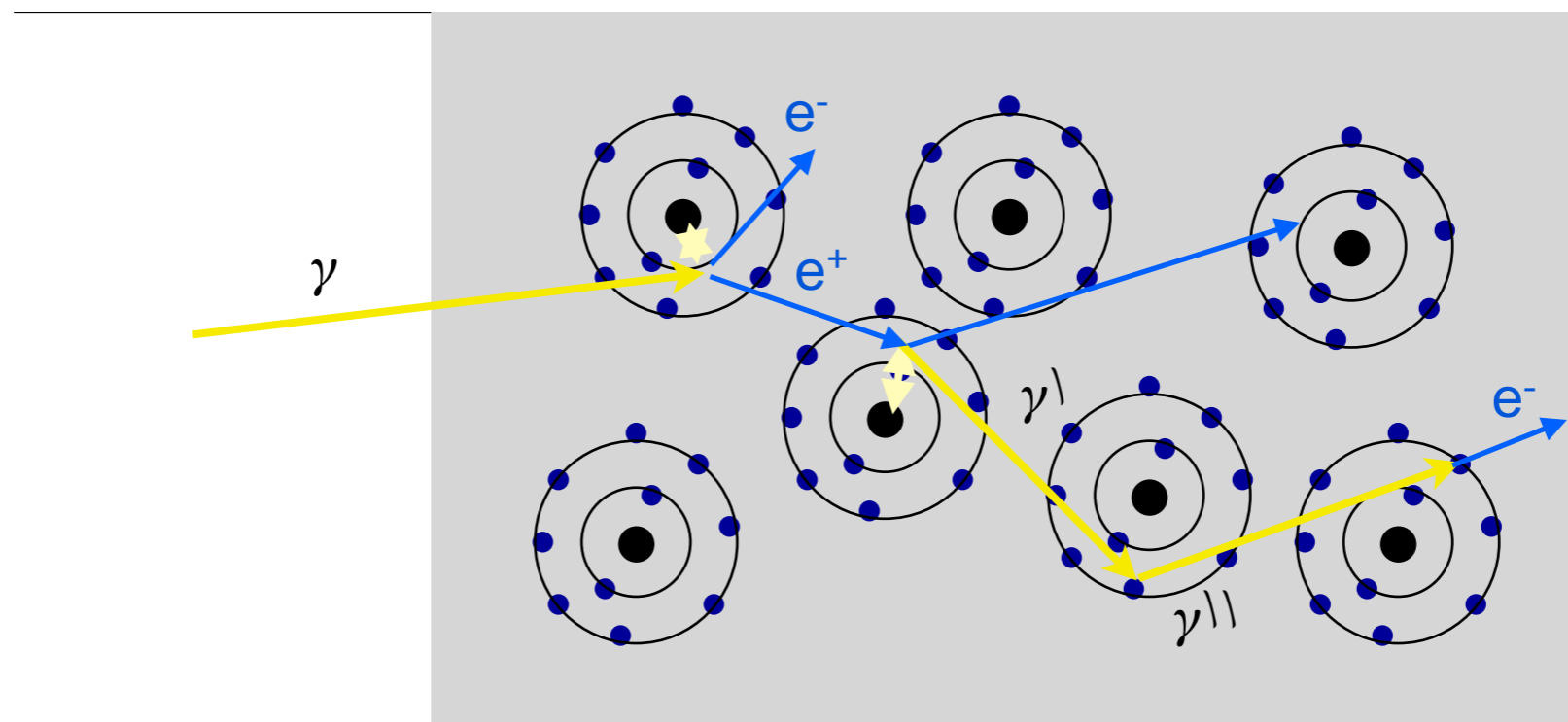
Hadronen: elektromagnetisch, schwach und stark



Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Leptonen: elektromagnetisch und schwach

Hadronen: elektromagnetisch, schwach und stark



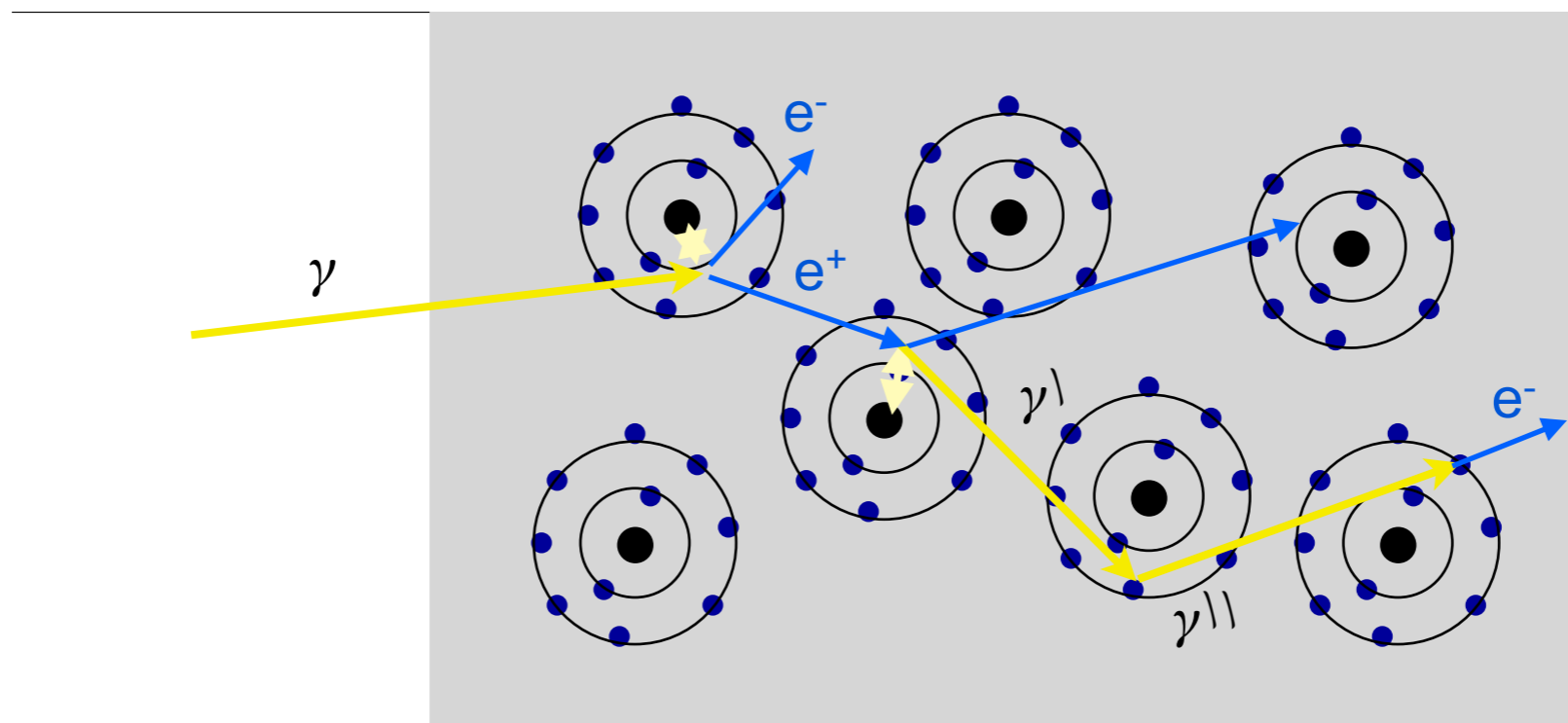
EM Wechselwirkung

Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Leptonen: elektromagnetisch und schwach

Hadronen: elektromagnetisch, schwach und stark

Paarbildung

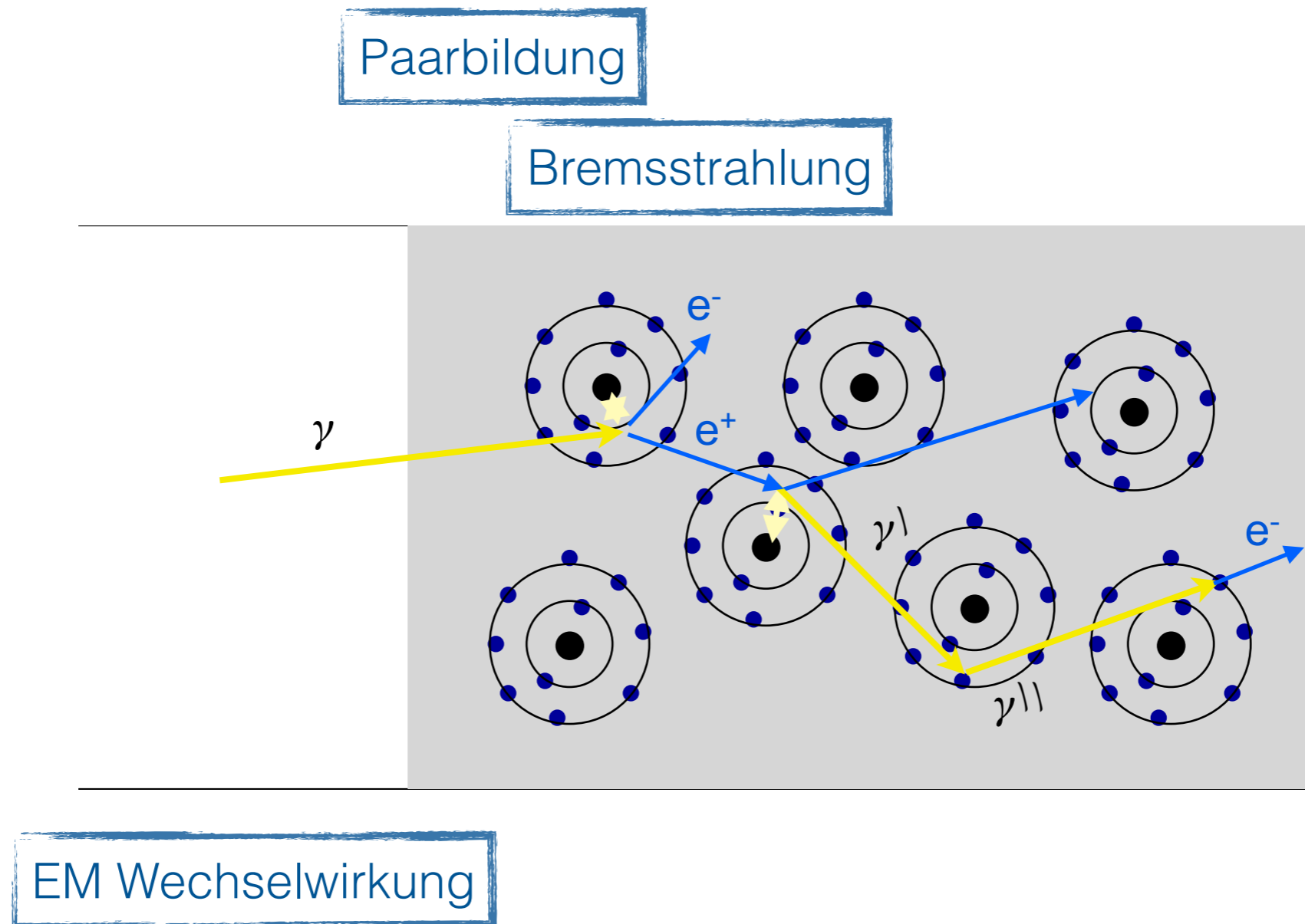


EM Wechselwirkung

Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Leptonen: elektromagnetisch und schwach

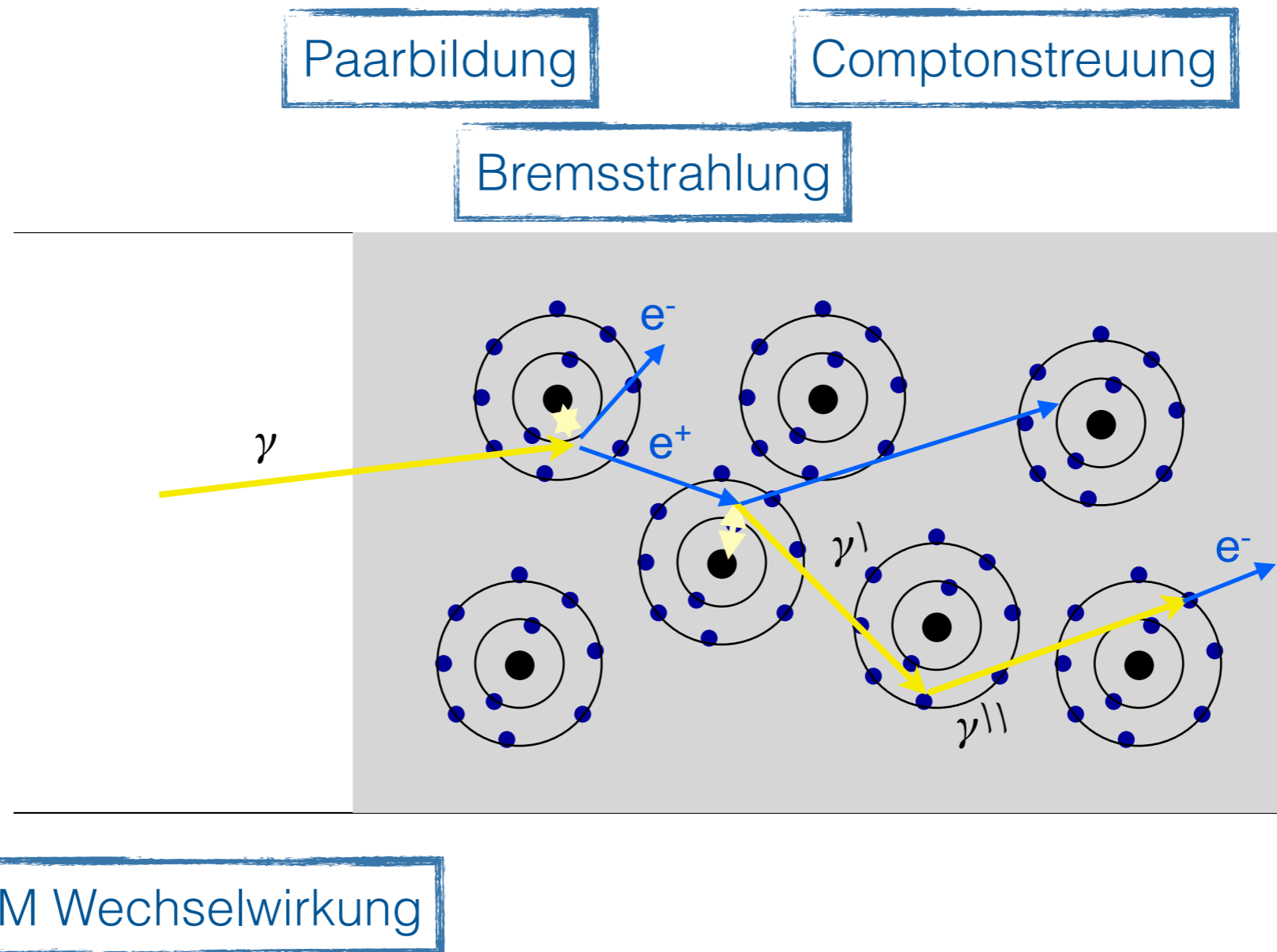
Hadronen: elektromagnetisch, schwach und stark



Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Leptonen: elektromagnetisch und schwach

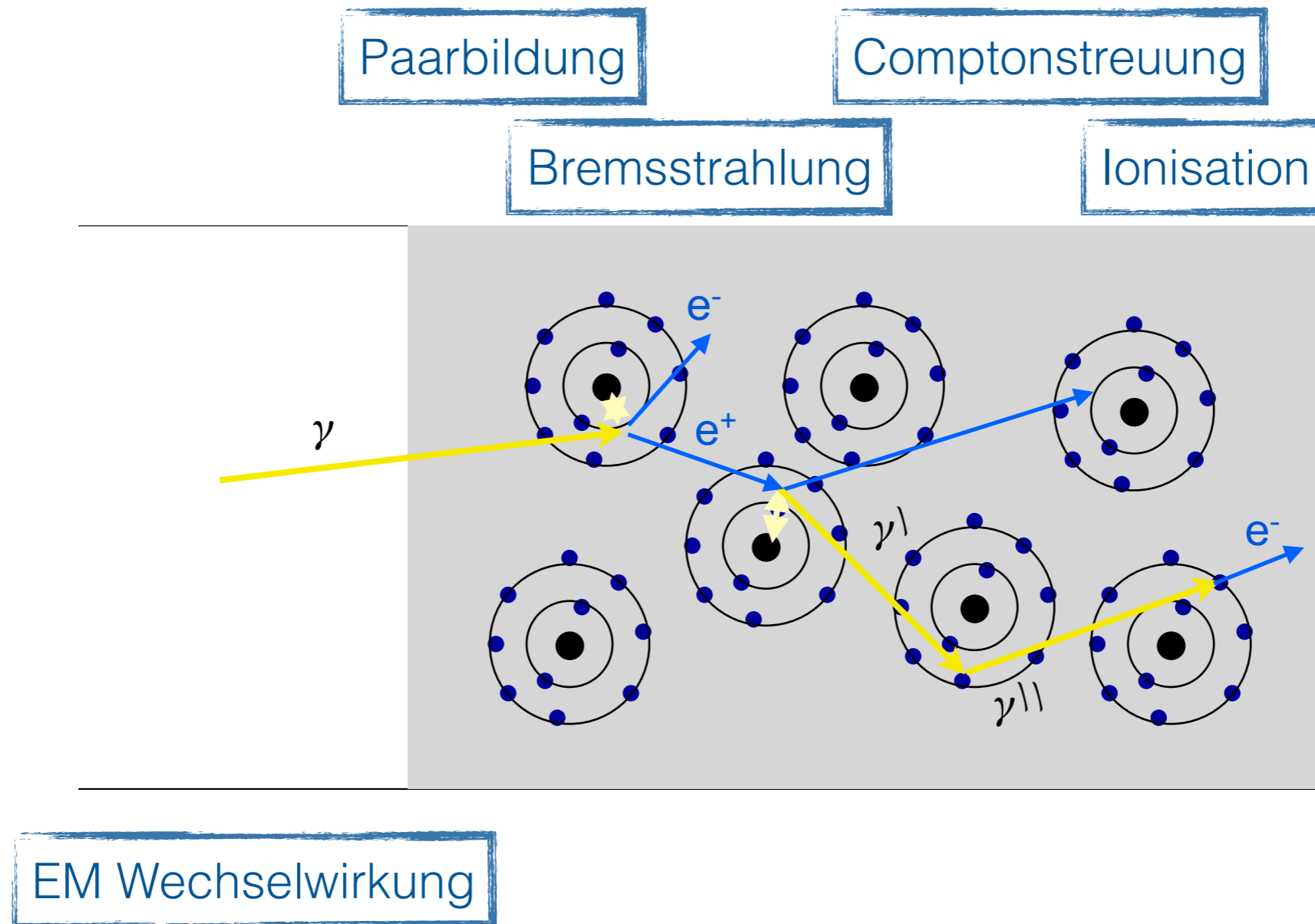
Hadronen: elektromagnetisch, schwach und stark



Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

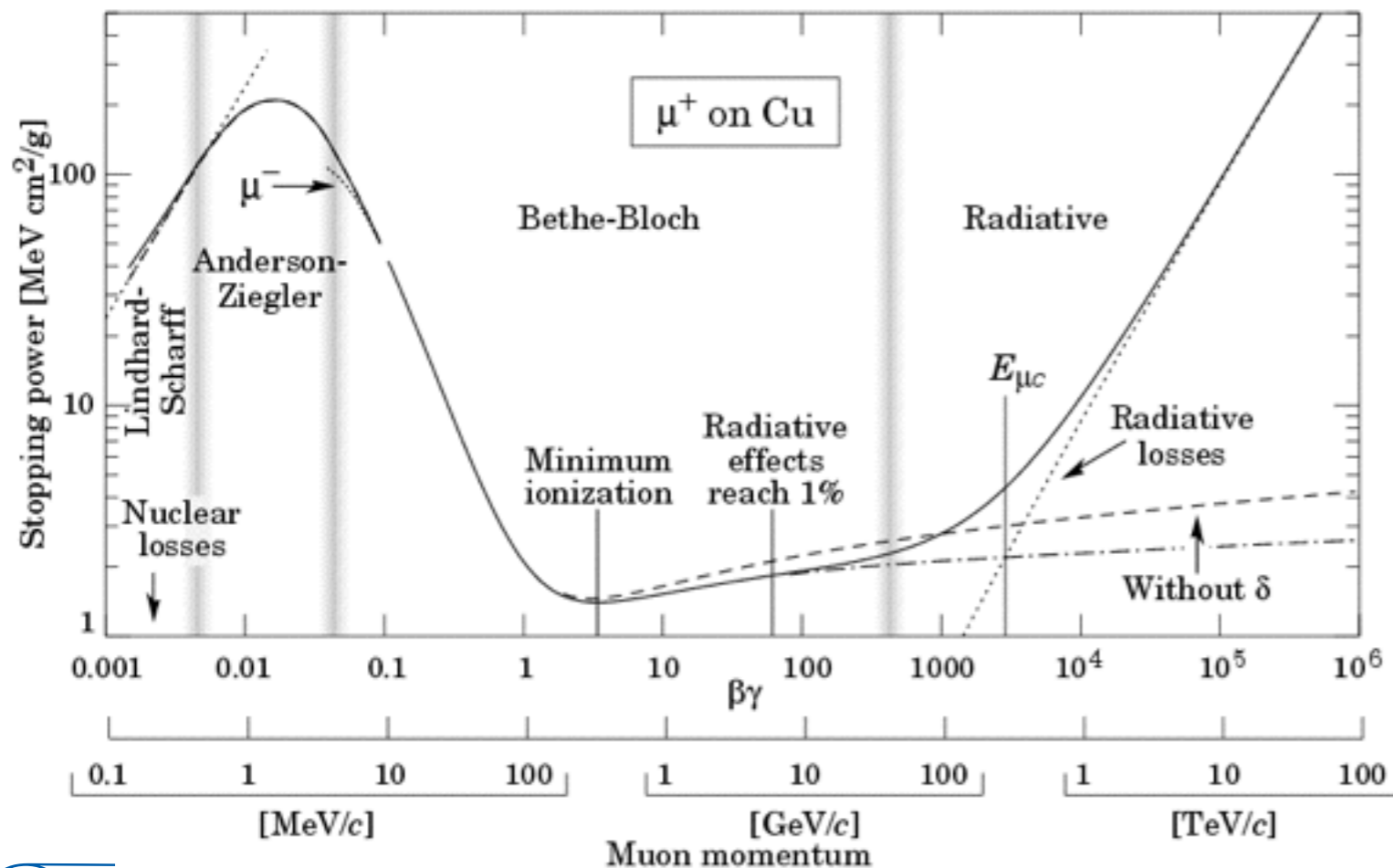
Leptonen: elektromagnetisch und schwach

Hadronen: elektromagnetisch, schwach und stark



Wechselwirkung geladener Teilchen

- ▶ Durch die Bethe-Bloch- Formel beschrieben
 - Ausnahme: Elektronen (kleine Ruhemasse)
- ▶ Merke: Große Ionisationsverluste bei niedrigen Energien
 - Minimum bei $\approx 0.3 \text{ GeV}$ => MIP



$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2}{m_e c^2 \beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

wobei

$$\beta = v/c$$

v = momentane Geschwindigkeit des Teilchens

c = Lichtgeschwindigkeit

E = Energie des Teilchens

x = Weglänge

z = Ladungszahl des Teilchens ($z \cdot e$ = Ladung des Teilchens)

ϵ_0 = Elektrische Feldkonstante

e = Elementarladung

n = Elektronendichte des Materials

m_e = Ruhemasse des Elektrons

I = mittleres Anregungspotential des Materials (s.u.)

Detektionsprinzipien

bzw. was davon können wir eigentlich messen?

Zu welchen Messgrößen haben wir Zugang?

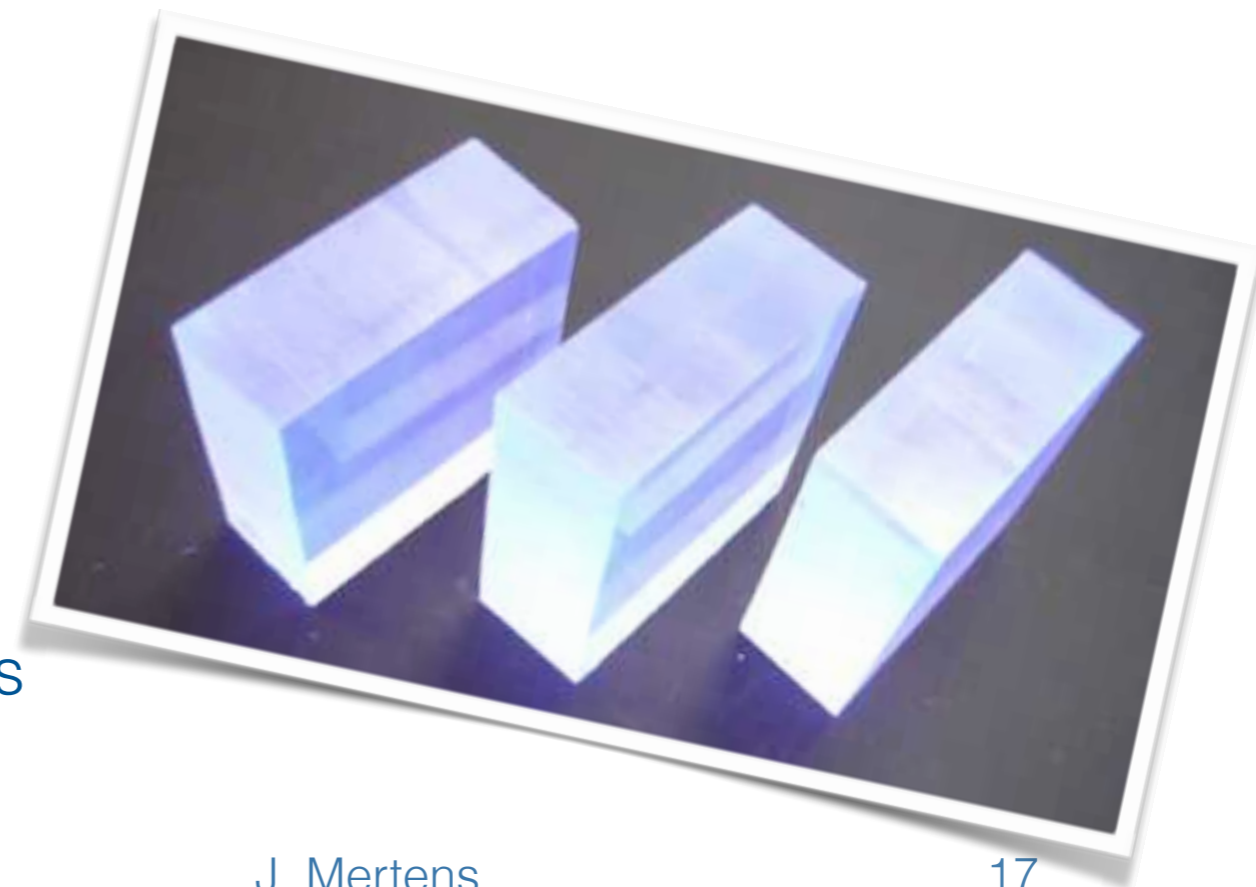
- ▶ **Strom** (z.B. über die Ladezeit eines Kondensators)
- ▶ **Spannung**
(z.B. über Analog zu Digital Konvertern (ADCs))
- ▶ **Temperatur** (z.B. über Materialausdehnung bzw ADCs)
- ▶ **Ladung** (z.B. über Spannung eines Kondensators)
- ▶ **Zeit** (z.B. über das Zählen von clock cycles)
- ▶ **Ort** (wenn man weiß, wo welcher Detektor steht)

Nachweis von Teilchen

- ▶ **Direkter Nachweis:** Teilchen “pflügt” durchs Medium und ionisiert es. Dann:
 - ▶ Rekombination ggf. unter Emission von Licht (Szintillation)
 - ▶ Anlegen einer Spannung verhindert Rekombination und gesammelte Ladung kann gemessen werden (vom Zählrohr bis zum Halbleiterdetektor)
- ▶ **Indirekter Nachweis:**
 - ▶ Photonen (Gammas, Röntgenstrahlung): Umwandlung in Elektronen durch Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung
 - ▶ Neutronen: Nachweis üblicherweise durch Einfang im Atomkern => Emission von geladenen Teilchen
 - ▶ Neutrinos: Streuung oder Einfang erzeugen wieder geladene Teilchen

Szintillatoren

- ▶ Im Detail komplex, aber allen Szintillatoren ist gemein, dass sie einen (sehr kleinen) Teil der deponierten Energie als Lichtquanten wieder abstrahlen
 - ▶ **Anorganische Kristalle:** Z.B. NaI, CsI, BGO, PbWO₄. Eher langsam, hohe Lichtausbeute. Teilweise recht strahlenhart.
 - ▶ **Organisch:** Als Kristall, aber auch als Plastik oder flüssig. Schnell, geringere Lichtausbeute. Eher nicht strahlenhart. In vielen Formen erhältlich, teilweise recht preiswert.
 - ▶ **Edelgase (!)** szintillieren auch, dies wird tatsächlich genutzt...
 - ▶ Eher exotisch: Szintillierende **Gläser**, z.B. Li/B-Silikate für Neutronennachweis

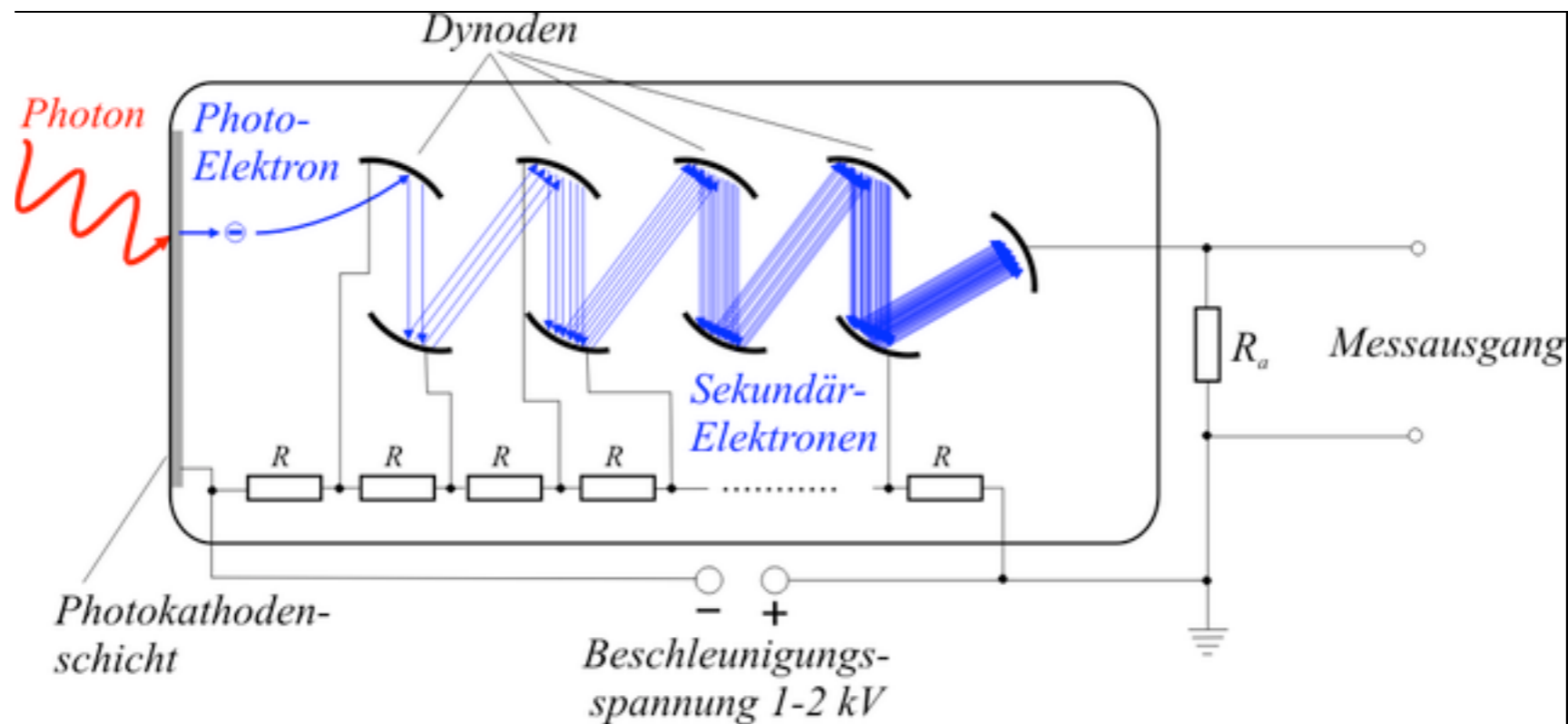


Wie messen wir Photonen/Licht?



<http://www.vikdhillon.staff.shef.ac.uk/teaching/phy217/instruments/pmt.jpg>

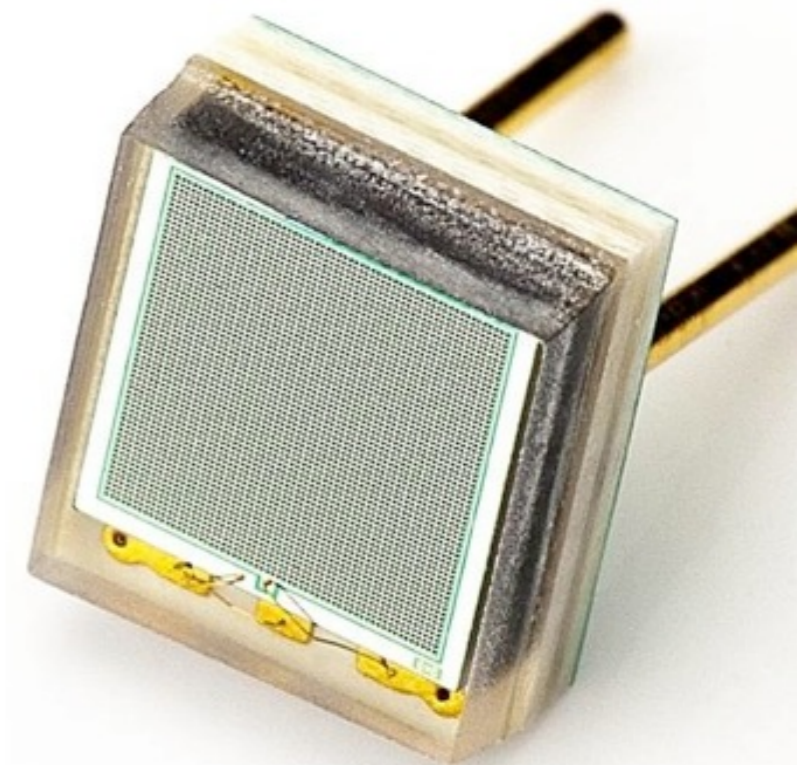
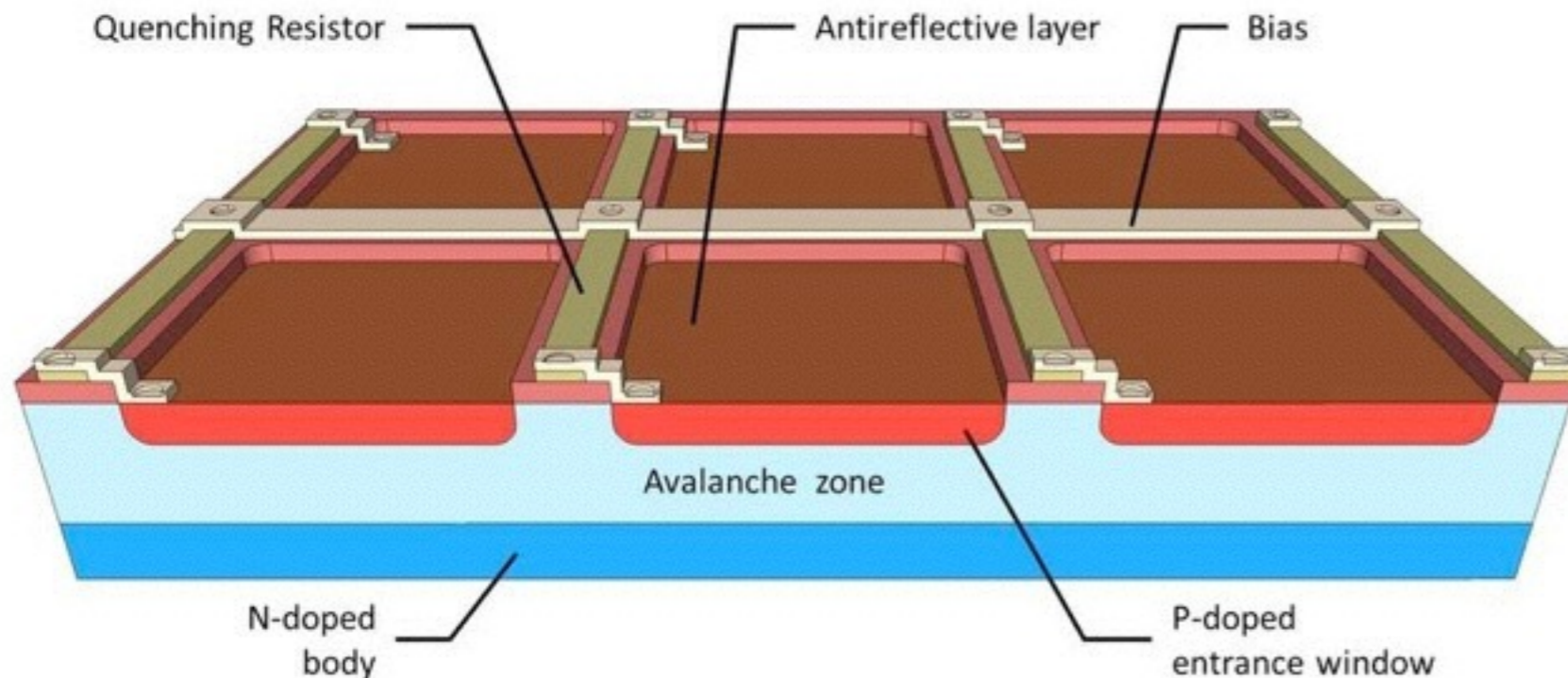
- ▶ Das hängt stark vom Energiebereich ab:
- ▶ **Sichtbar - UV:** über PMTs (photo multiplier tubes) Sekundärelektronenvervielfacher... Licht -> Strom



Vorteile: Gute Effizienzen, große Flächen. **Nachteile:** "Handarbeit", teuer, groß.

Wie messen wir wenig Licht?

- ▶ Sichtbar - UV in modern: Silizium-Photomultiplier (SiPMs, MPPCs)
 - ▶ Erzeugen die Elektronenvervielfachung durch den kontrollierten Lawinendurchbruch einer Silizium-Diode
 - ▶ **Vorteile:** Industriell gefertigt, kompakt, niedrige Spannungen, hohe Granularität durch (sehr) viele Kanäle möglich
 - ▶ **Nachteile:** Teilweise hohe Dunkelrate, geringere Effizienz



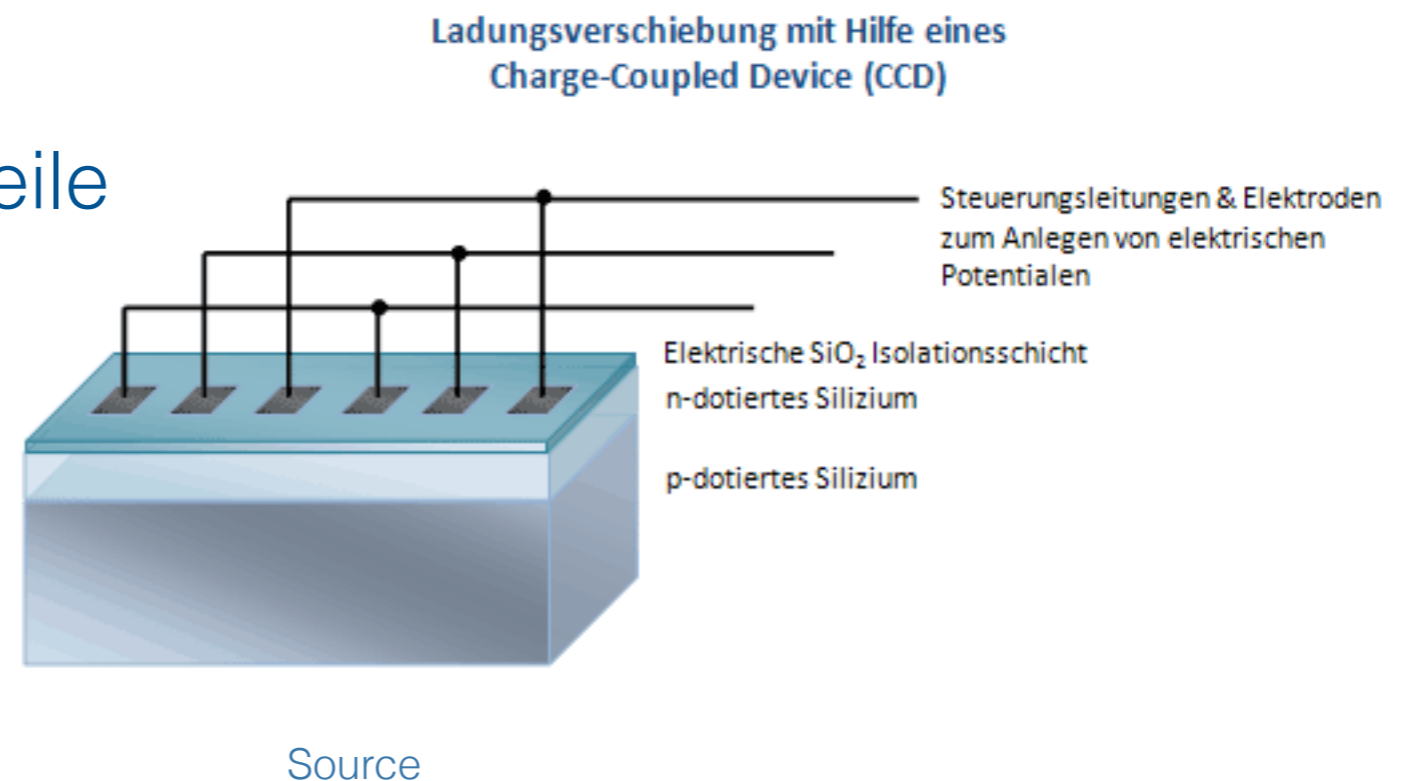
Exkurs: CCDs (Physik Nobelpreis 2009)

- ▶ **Photodiode:**
Dünne p dotierte Schicht (wenige μm), Licht dringt bis zum p-n Übergang vor. Dann passiert innerer Photoeffekt.
- ▶ Strom- (Ladungs-) Signal proportional zur Lichtintensität
- ▶ Im Array angeordnet:
 - ▶ Auslese nur in letzter Zeile
Transport der Ladung entlang der Spalten
 - ▶ **Charged coupled device (CCD)**

Source

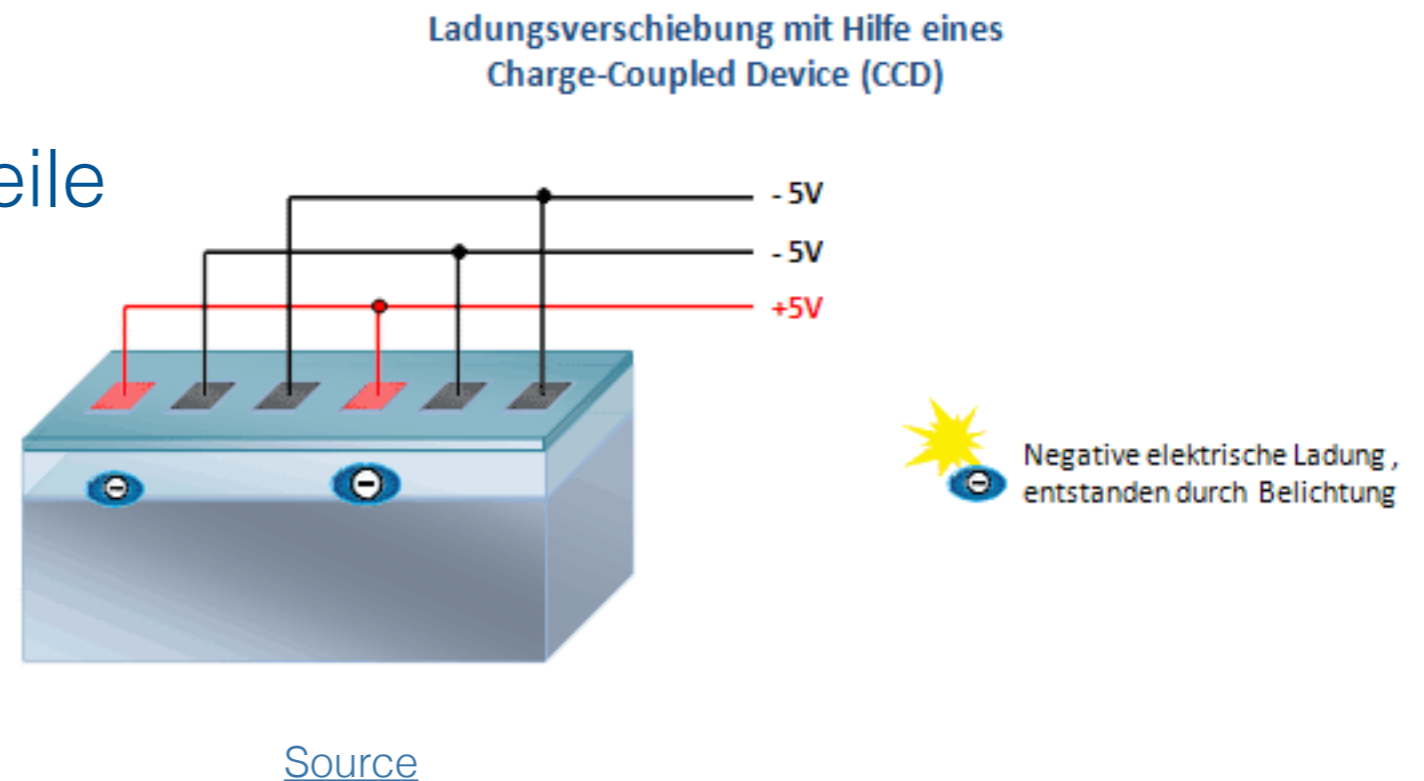
Exkurs: CCDs (Physik Nobelpreis 2009)

- ▶ **Photodiode:**
Dünne p dotierte Schicht (wenige μm), Licht dringt bis zum p-n Übergang vor. Dann passiert innerer Photoeffekt.
- ▶ Strom- (Ladungs-) Signal proportional zur Lichtintensität
- ▶ Im Array angeordnet:
 - ▶ Auslese nur in letzter Zeile
Transport der Ladung entlang der Spalten
 - ▶ **Charged coupled device (CCD)**



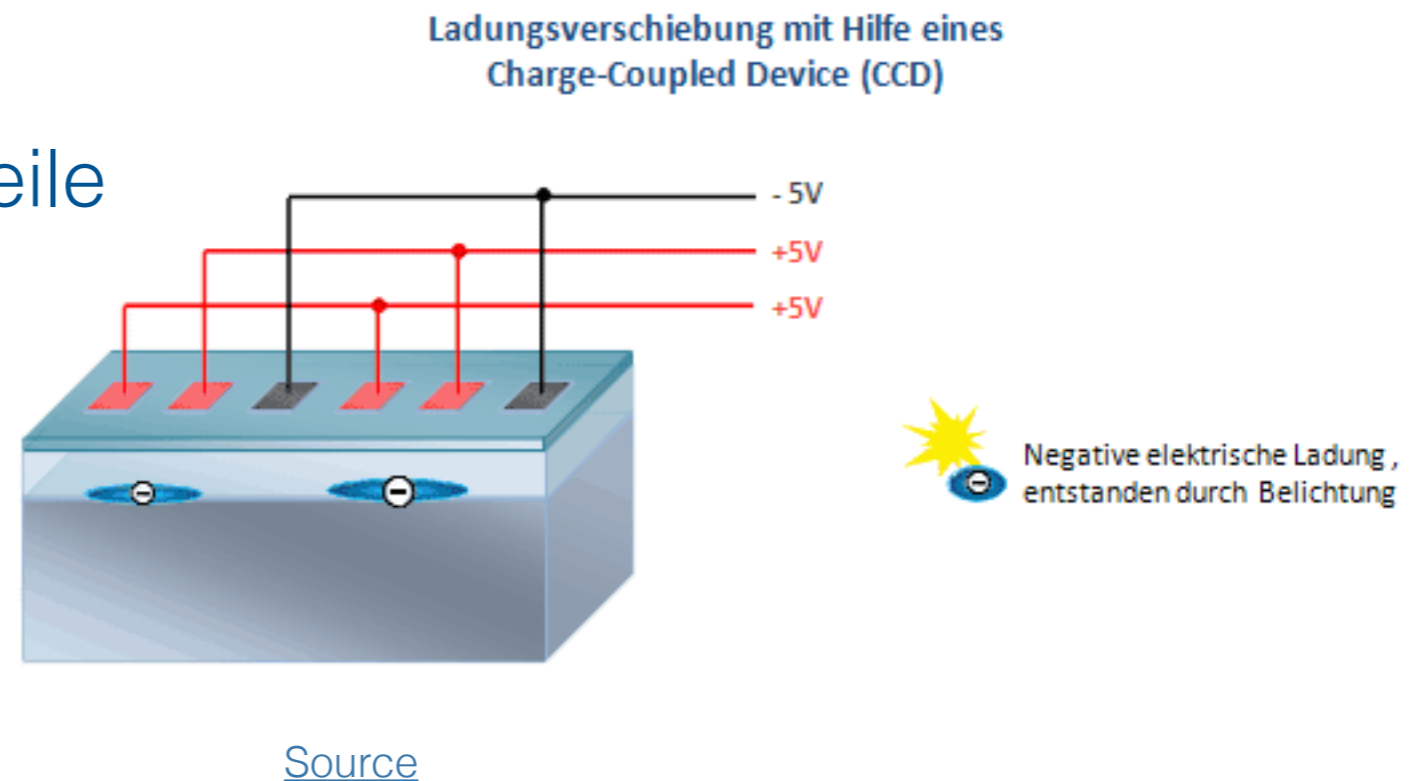
Exkurs: CCDs (Physik Nobelpreis 2009)

- ▶ **Photodiode:**
Dünne p dotierte Schicht (wenige μm), Licht dringt bis zum p-n Übergang vor. Dann passiert innerer Photoeffekt.
- ▶ Strom- (Ladungs-) Signal proportional zur Lichtintensität
- ▶ Im Array angeordnet:
 - ▶ Auslese nur in letzter Zeile
Transport der Ladung entlang der Spalten
 - ▶ Charged coupled device (CCD)



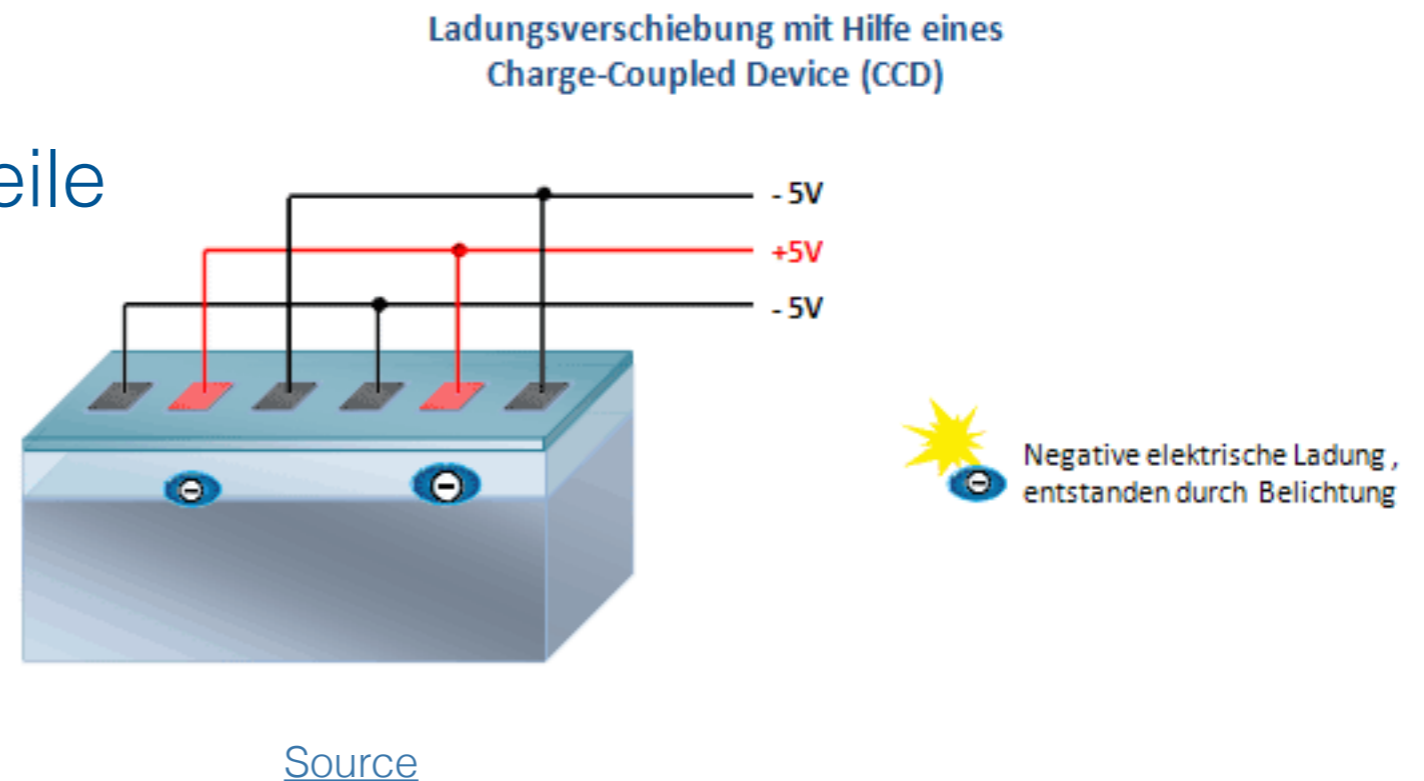
Exkurs: CCDs (Physik Nobelpreis 2009)

- ▶ **Photodiode:**
Dünne p dotierte Schicht (wenige μm), Licht dringt bis zum p-n Übergang vor. Dann passiert innerer Photoeffekt.
- ▶ Strom- (Ladungs-) Signal proportional zur Lichtintensität
- ▶ Im Array angeordnet:
 - ▶ Auslese nur in letzter Zeile
Transport der Ladung entlang der Spalten
 - ▶ Charged coupled device (CCD)



Exkurs: CCDs (Physik Nobelpreis 2009)

- ▶ **Photodiode:**
Dünne p dotierte Schicht (wenige μm), Licht dringt bis zum p-n Übergang vor. Dann passiert innerer Photoeffekt.
- ▶ Strom- (Ladungs-) Signal proportional zur Lichtintensität
- ▶ Im Array angeordnet:
 - ▶ Auslese nur in letzter Zeile
Transport der Ladung entlang der Spalten
 - ▶ **Charged coupled device (CCD)**

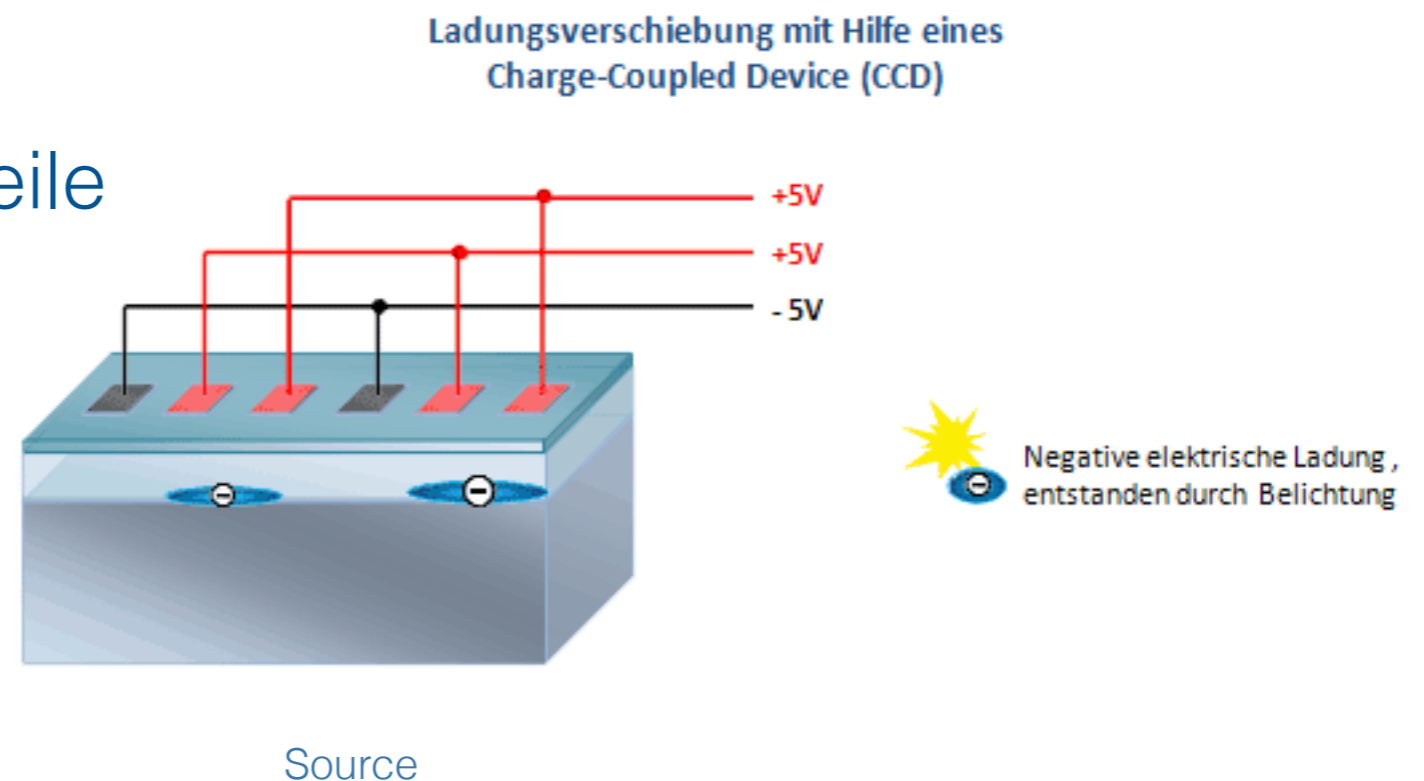


Exkurs: CCDs (Physik Nobelpreis 2009)

- ▶ **Photodiode:**
Dünne p dotierte Schicht (wenige μm), Licht dringt bis zum p-n Übergang vor. Dann passiert innerer Photoeffekt.
- ▶ Strom- (Ladungs-) Signal proportional zur Lichtintensität
- ▶ Im Array angeordnet:

- ▶ Auslese nur in letzter Zeile
Transport der Ladung entlang der Spalten

- ▶ **Charged coupled device (CCD)**

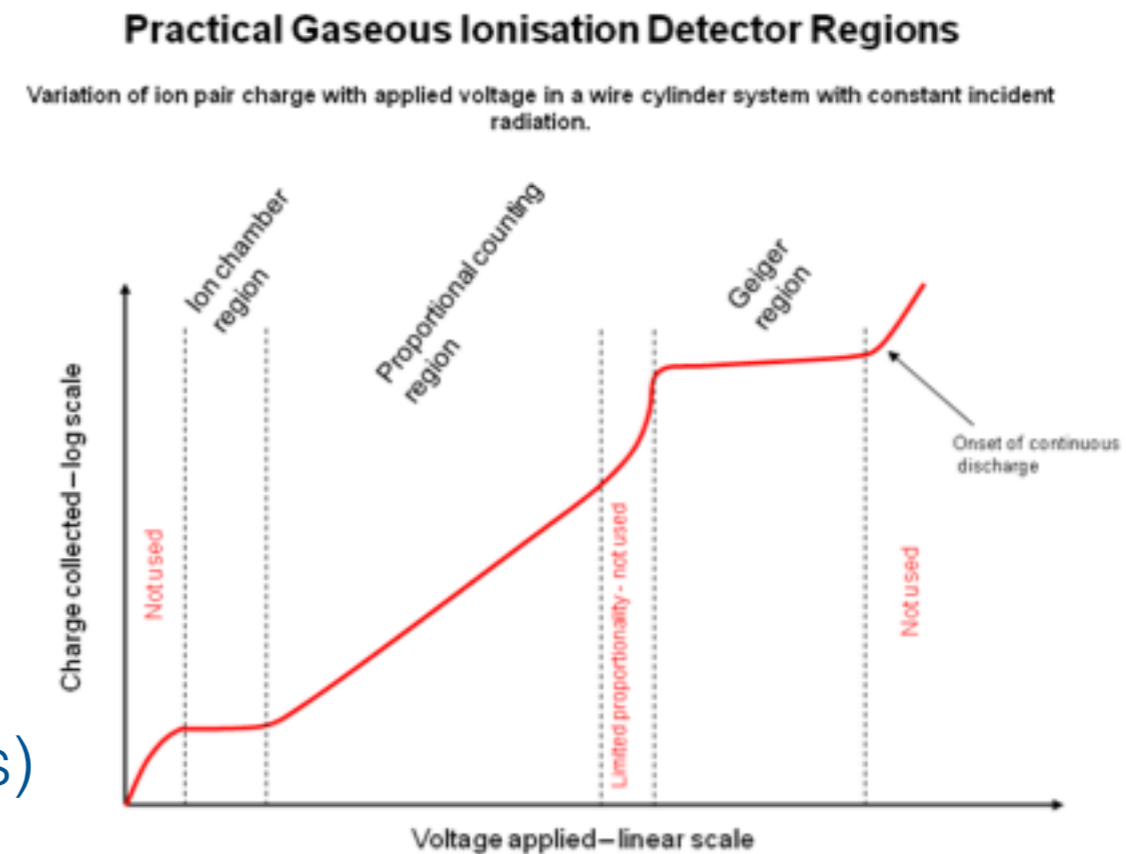


Jetzt aber mal zur Hochenergie!

- ▶ Grundlegendes Prinzip: Ladung wird durch Anlegen eines Feldes zu Elektroden gedriftet und dort mittels geeigneter Elektronik nachgewiesen
 - ▶ gut bei großen Ladungsmengen, aber einzelne Elektronen? ➔ Verstärkung

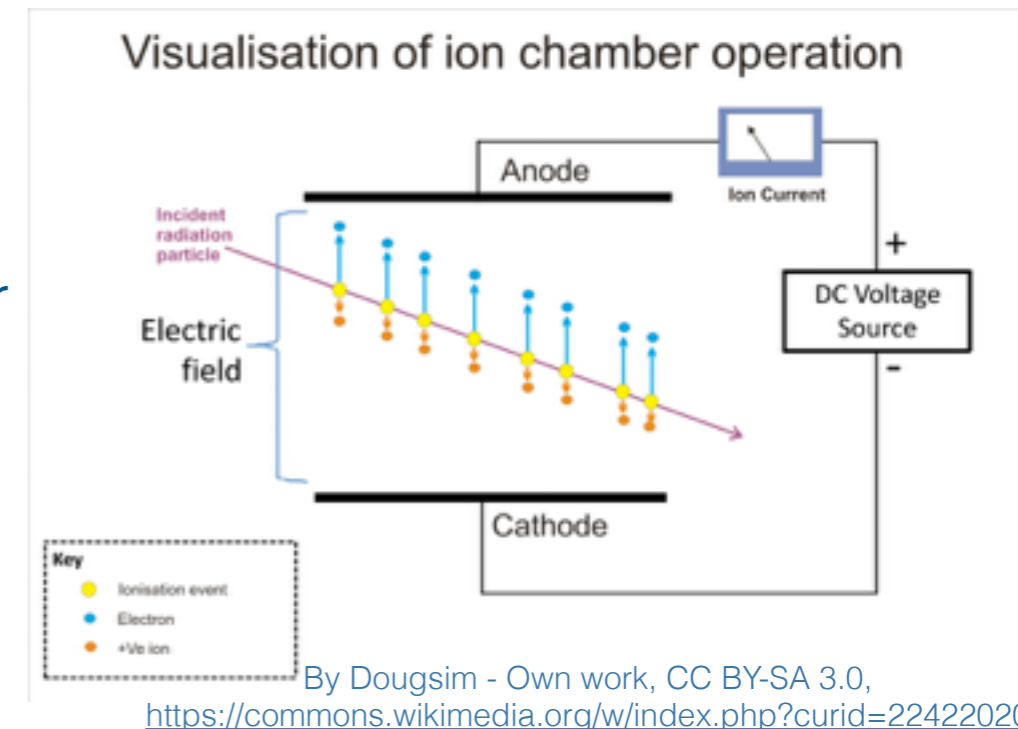
▶ Betriebsmodi:

- ▶ Ionisationskammer (einfaches Sammeln)
- ▶ Proportionalzählrohr (Gasverstärkung)
 - ▶ proportionale Verstärkung, Erhaltung der primären Ladungsinformation!
- ▶ Geiger-Müller-Zählrohr (vollständiges “Zünden” des Gasvolumens)
 - ▶ Verlust der Ladungsinformation, sehr großes Signal



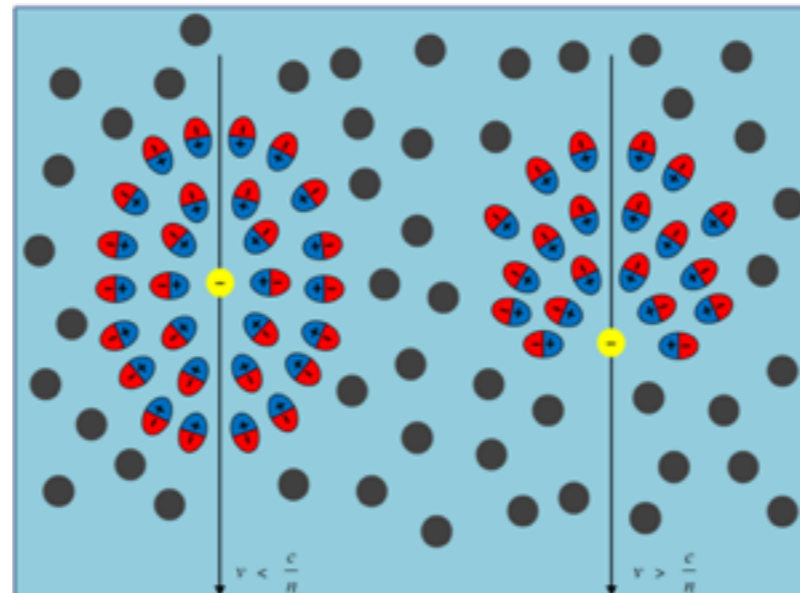
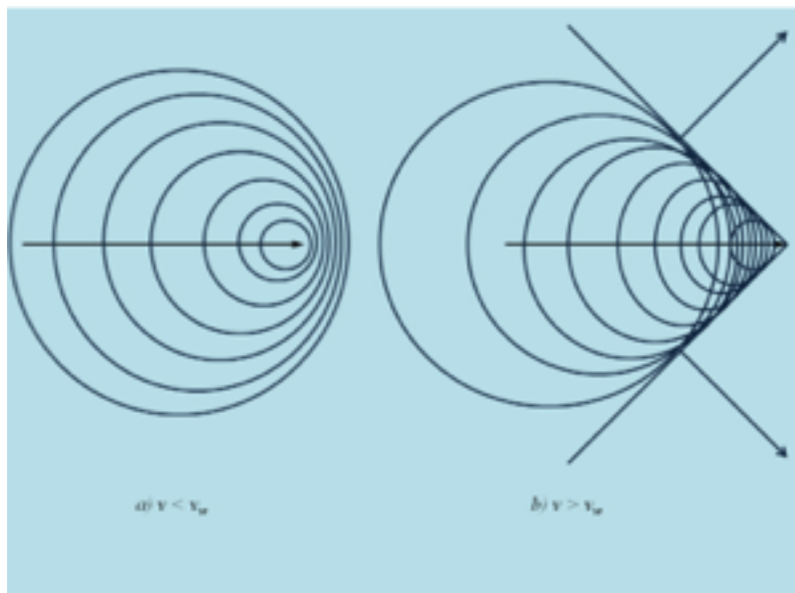
Wo kann man driften?

- ▶ Ursprünglich: **Gase**, teilweise Erhöhung der Dichte durch Überdruck
- ▶ **Flüssigkeiten**:
 - ▶ Deutlich höhere Dichte, aber höchste Reinheit nötig! Verstärkung schwierig: Ionenkammer oder 2-Phasen-Systeme mit Gasverstärkung
 - ▶ Häufig tiefkalte Edelgase (Argon, Xenon), aber auch Flüssigszintillatoren
- ▶ **Festkörper**
 - ▶ Kristalline **Isolatoren** als Festkörperionisationskammer sehr geeignet: Diamant (!), Cd(Zn)Te
 - ▶ Alternativ: **Halbleiter** wie Silizium und Germanium. Betrieb als Diode in Sperrichtung notwendig, um das Rauschen durch den Leckstrom zu begrenzen



Strahlungsdetektoren - die Exoten I

- ▶ Wir sind beinahe fertig mit den Vorarbeiten, aber zwei Effekte fehlen noch, die zur Teilchenidentifikation benutzt werden:
- ▶ **Cherenkov-Strahlung:** Wird emittiert, wenn sich ein geladenes Teilchen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegt
 - ▶ Einstein?!? Kein Problem, in Medien (z.B. Wasser) ist Lichtgeschwindigkeit $< c$
 - ▶ Effekt ist massenabhängig -> Teilchenseparation
 - ▶ Lichtdetektion wieder mit (Si)PMs



Strahlungsdetektoren - die Exoten II

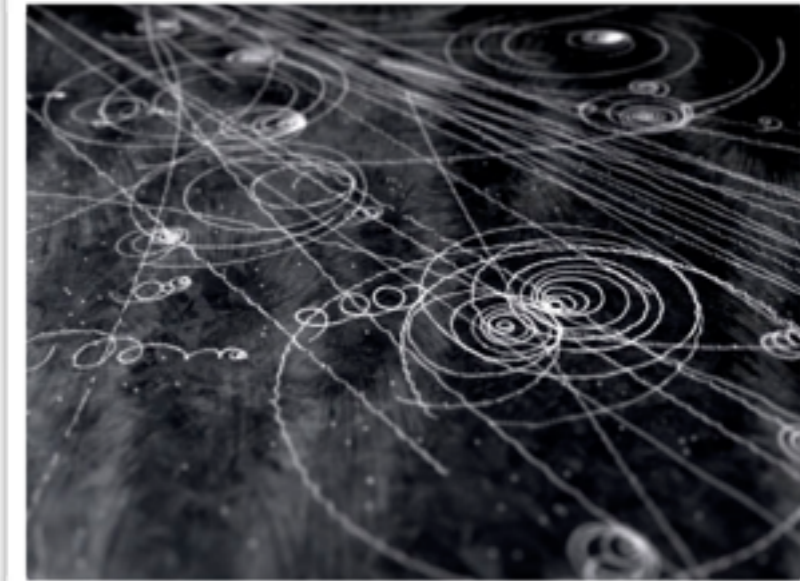
- ▶ **Cherenkov-Strahlung:** Wird emittiert, wenn sich ein geladenes Teilchen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegt
- ▶ **Übergangsstrahlung:** Wird emittiert, wenn ein (relativistisches) Teilchen durch einen Übergang im Brechungsindex zwischen zwei Materialien tritt
 - ▶ Verschiedene Erklärungsansätze, z.B. elektrisches Feld des Teilchens ist in den beiden Medien unterschiedlich, muss aber kontinuierlich übergehen -> Abstrahlung von Photonen
 - ▶ Energie im Bereich von keV (Röntgen)
 - ▶ Emittierte Intensität ist proportional zum Lorentzfaktor, daher bei bekannter Teilchenenergie Schluss auf die Teilchenmasse möglich

Welche Detektortypen gibt es?

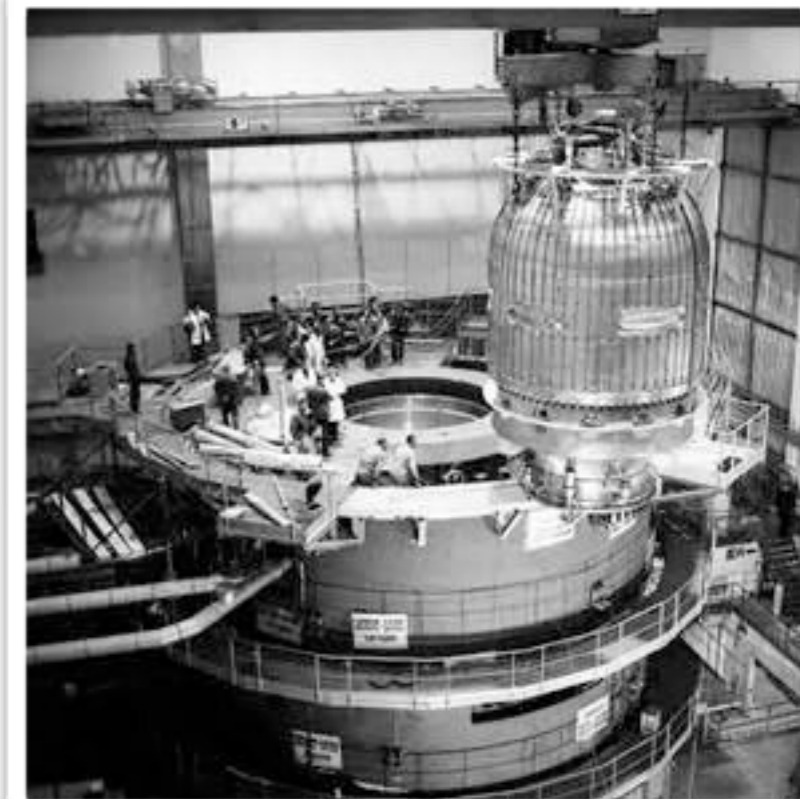
Viel zu viele für einen Talk... Also hier nur ein Auszug

Historisch: Nicht-elektronische Detektoren

- ▶ **Nebelkammer:** Teilchenbahn sichtbar durch Kondensationskeime entlang erzeugter Ionen in wasserdampfgesättigtem Gas
- ▶ **Blasenkammer:** Ionisationsspur sichtbar durch überhitzte Flüssigkeit (Target = Detektor)
- ▶ **Fotoemulsion:** ionisierende Teilchen hinterlassen Schätzung nach Entwicklung. Bis heute die beste Ortsauflösung, die man bekommen kann



Source



Source

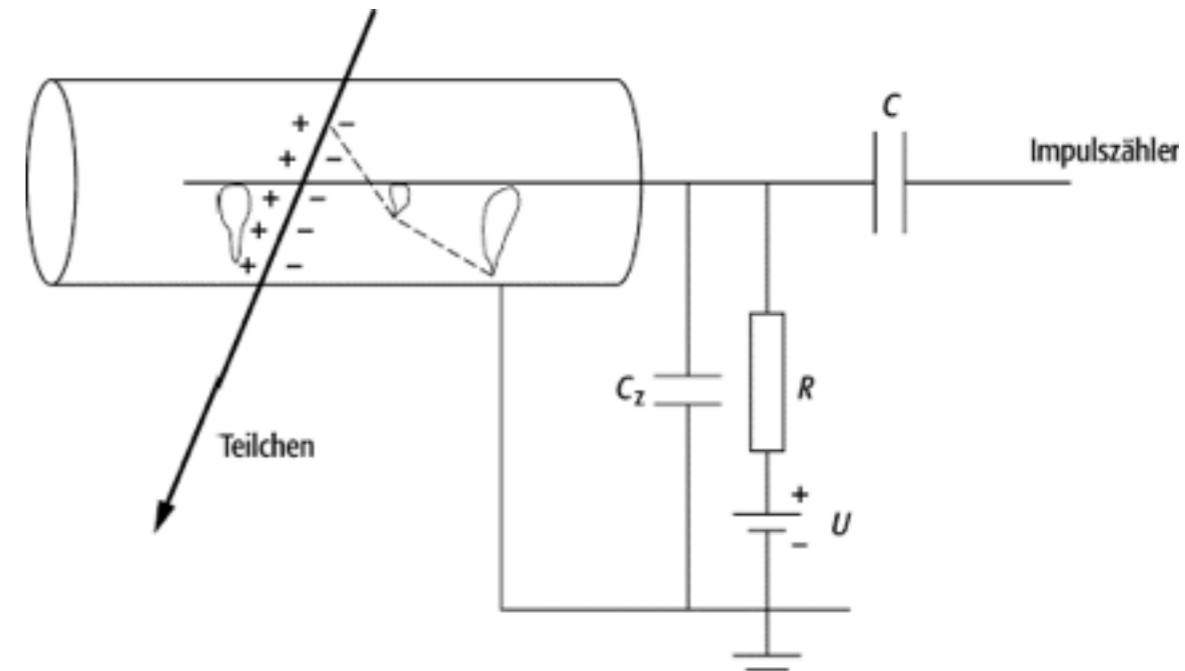
Historisch: Geigerzähler und Funkenkammer

▶ Geiger-Müller-Zählrohr:

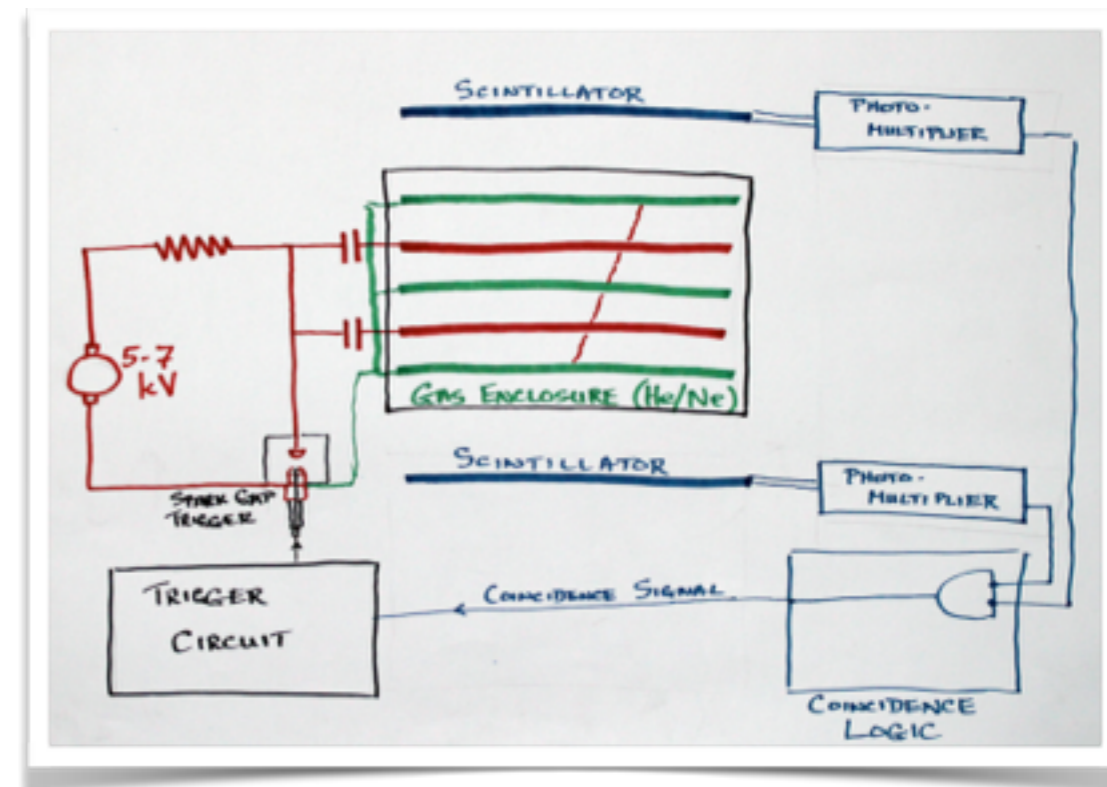
- ▶ Vorteile: großes Signal, einfach
- ▶ Nachteile: keine Information über deponierte Energie, große Totzeit

▶ Funkenkammern:

- ▶ ungefähr zeitgleich mit Blaskammer
- ▶ kann mit Hilfe externer Zähler getriggert werden
- ▶ Auswertung über Fotografie oder über Aufnahme der Ankunftszeiten in Mikrofonen
- ▶ Aber auch hier große Totzeit



Source

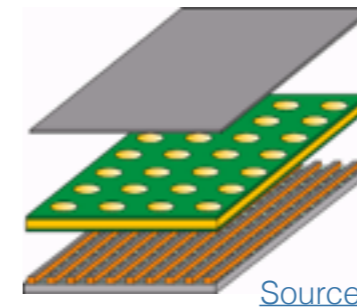
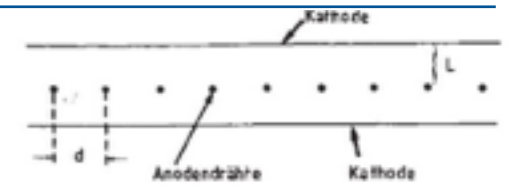


Source

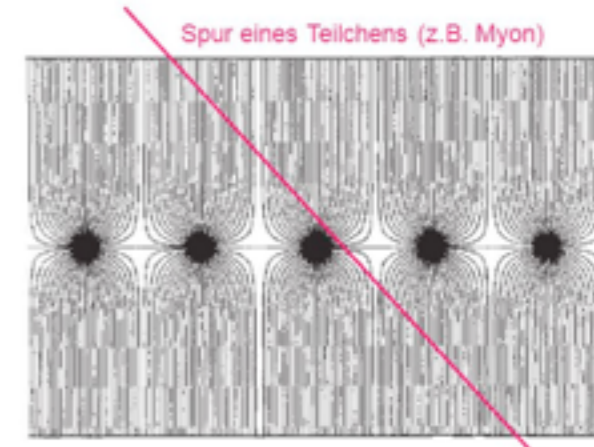
Heute verwendete Detektoren - Gas

- ▶ Driftkammern (z.B. in UA1): 170k field, 6.1k sense wires
- ▶ MWPCs (multi wire projection chambers) Nobelpreis 1992
 - ▶ Weiterentwicklungen: Microstrip Gas Detektoren GEMs (gas electron multiplier) und MICROME GAS (micro-mesh gaseous structure)
- ▶ TPCs (z.B. in ALICE)
- ▶ RPCs (resistive plate chambers)

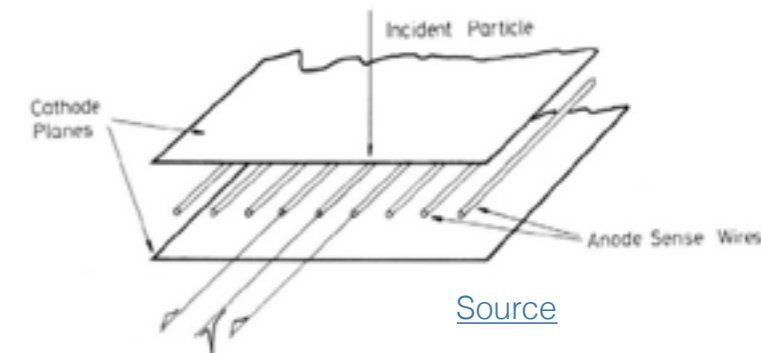
Multi-Wire-Proportional-Chambers (MWPC)



Source

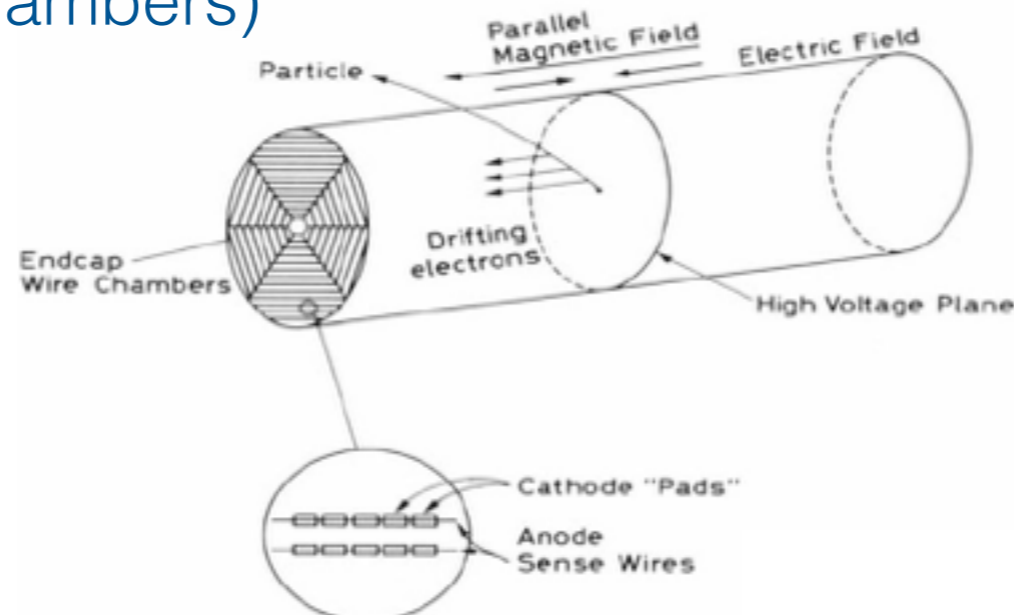


Spur eines Teilchens (z.B. Myon)

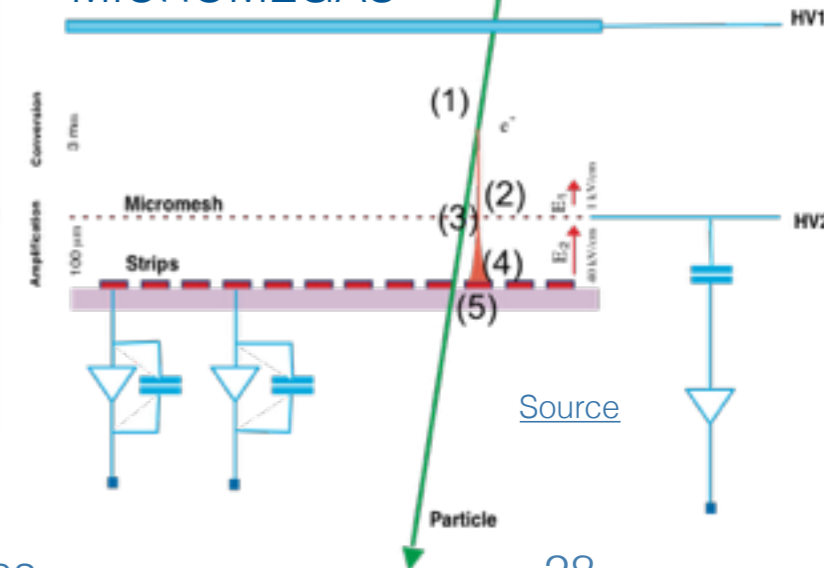


Source

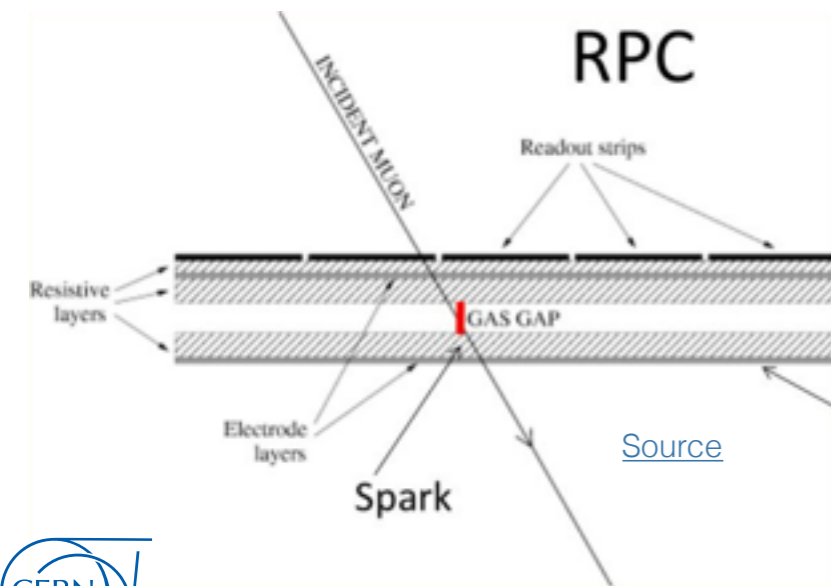
Time Projection Chambers (TPCs)



MICROME GAS



Source

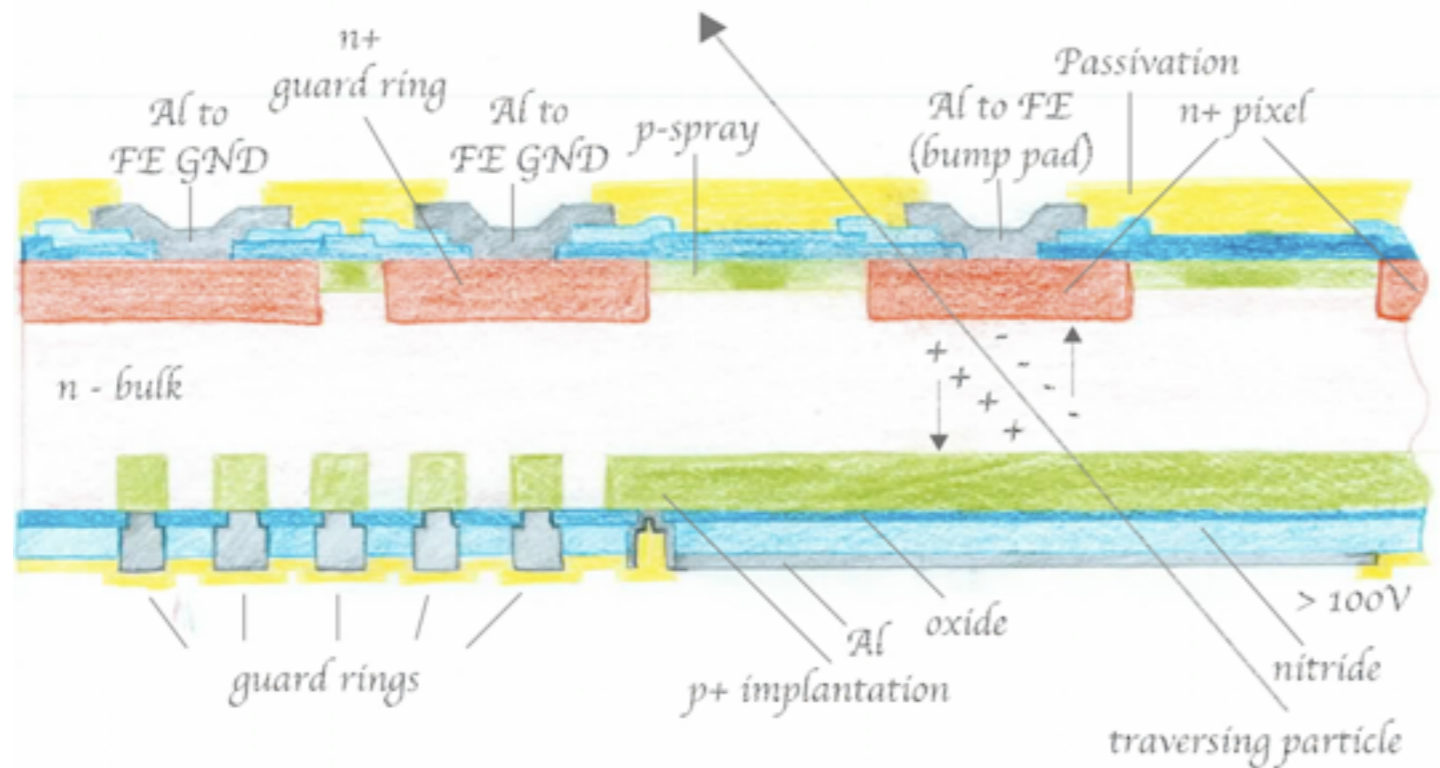


Source

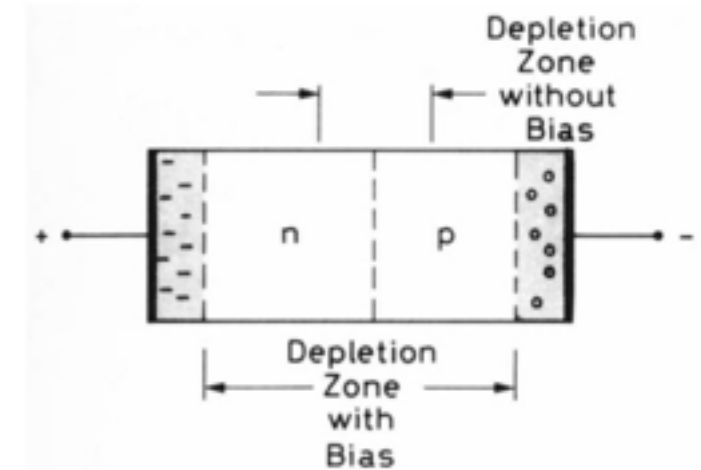


Heute verwendete Detektoren - Festkörper

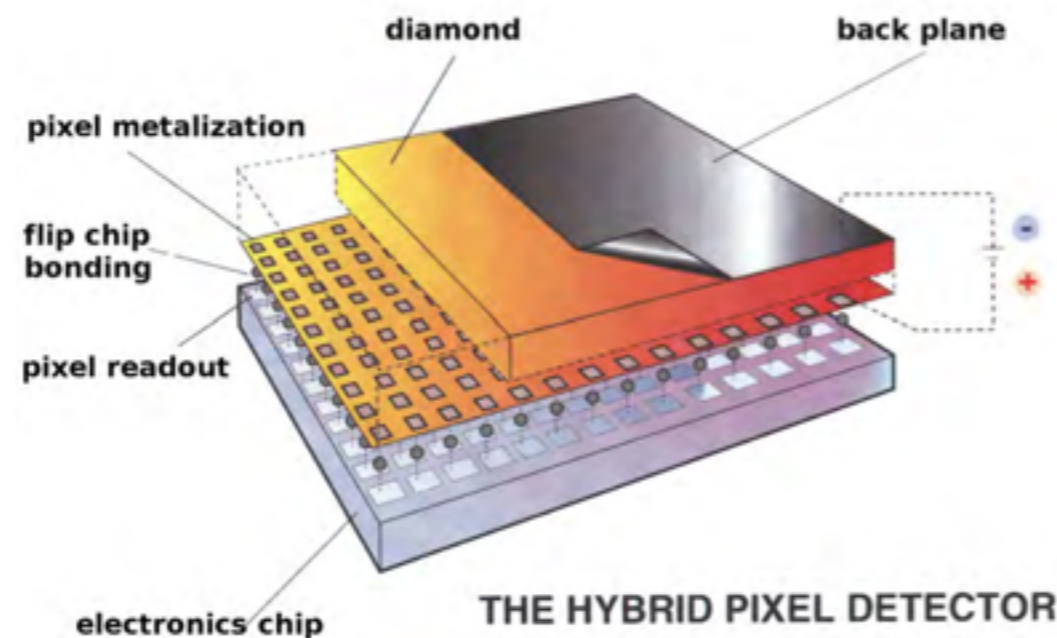
- ▶ Halbleiter: z.B. Silizium Streifen und Pixel



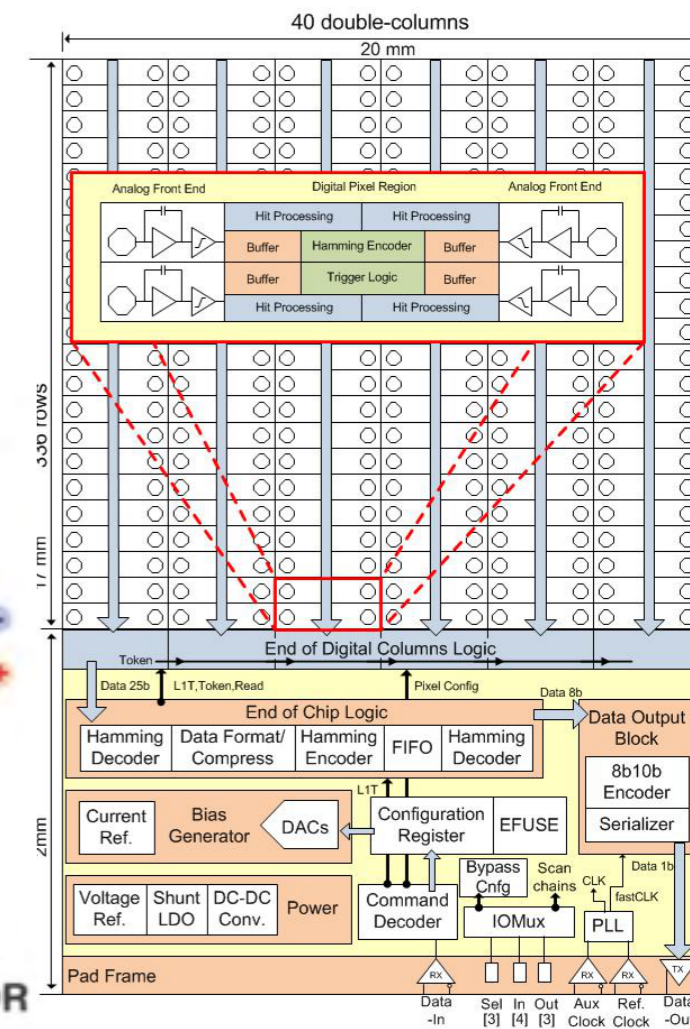
Vergrößerung der Verarmungszone durch Gegenspannung



- ▶ Isolatoren: z.B. Diamant
- ▶ Typischer Weise hybride Bauform

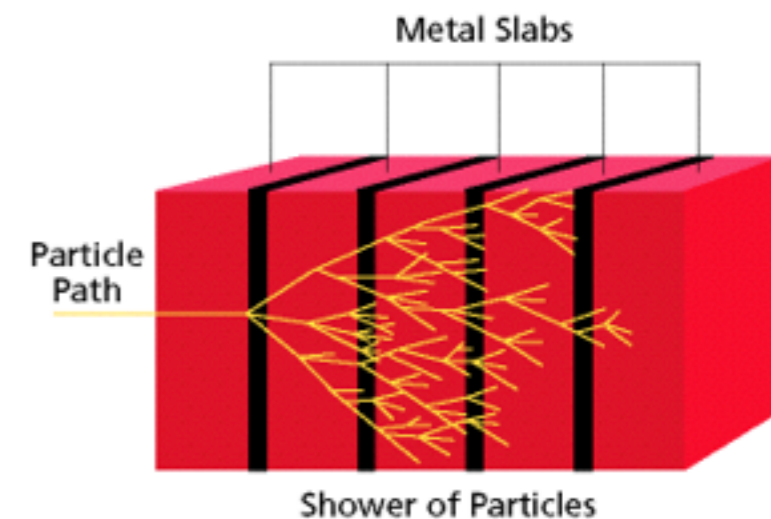
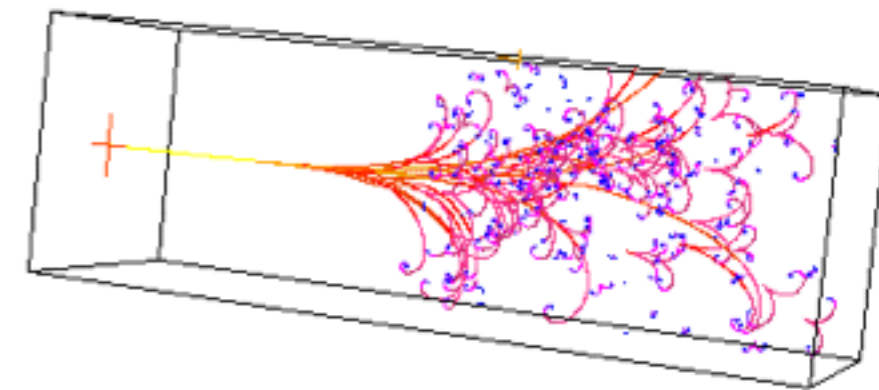


THE HYBRID PIXEL DETECTOR



Heute verwendete Detektoren - Kalorimeter

- ▶ Echte Kalorimetrie: Messung der Erwärmung
 - ▶ Meist unmöglich, wird aber in einigen Experimenten tatsächlich genutzt (CUORE)
- ▶ **Homogene Kalorimeter:** Schauer stoppt komplett in aktivem Volumen
 - ▶ z.B. CMS PbWO₄ ECAL, Neutrino-Szintillator- Experimente wie Borexino
 - ▶ Prinzipiell gute Energieauflösung (komplette Energie wird “gesehen”), aber wenig/keine Tiefenauflösung
- ▶ **Sandwich-Kalorimeter:** Wechsel von passivem Absorber und aktiven Lagen
 - ▶ z.B. ATLAS LAr ECAL, sämtliche hadronischen Kalorimeter
 - ▶ Meist Szintillator in Verbindung mit einem dichten Absorber (Eisen, Blei, Wolfram, Uran (!))



Detektorsysteme

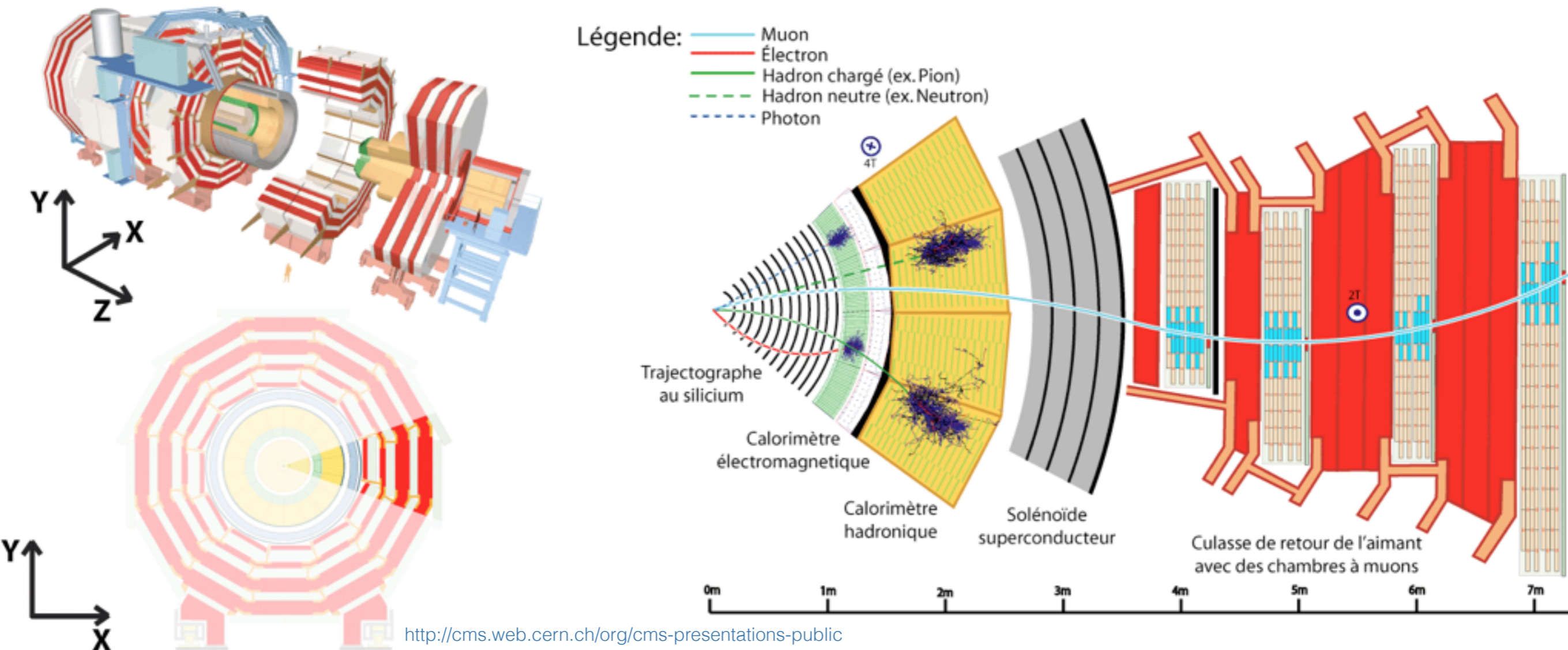
Und jetzt alle zusammen...

Was wissen wir bisher?

- ▶ Welche Teilchen fliegen weit genug?
- ▶ Wie wechselwirken diese mit Materie?
- ▶ Welche Detektoren kann ich aus der Materie bauen?
- ▶ Das meiste geht durch Spurdetektoren durch
- ▶ Zur Energiemessung müssen wir die Teilchen stoppen
- ▶ Myonen fliegen durch so ziemlich alles durch

Der universelle Detektor - z.B. CMS

- ▶ Ziel: Miss möglichst viele Eigenschaften möglichst aller Teilchen, die weit genug fliegen...

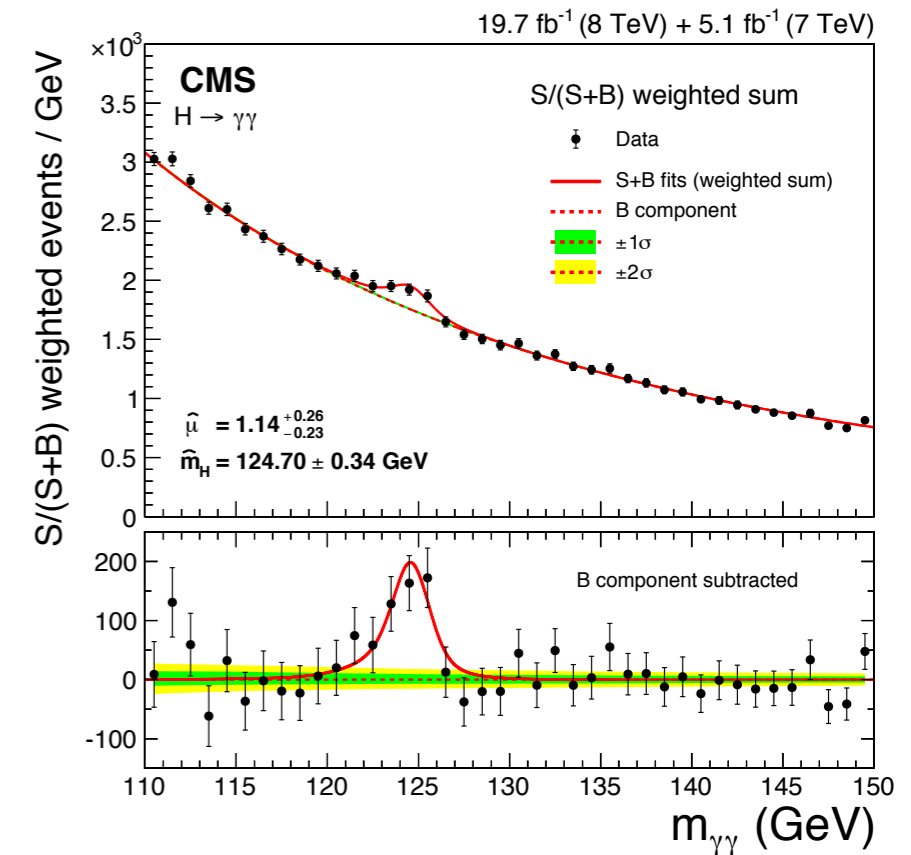


Wozu haben wir Zugang?

- ▶ **Impuls** aus Krümmungsradius beim Durchgang durch Spurdetektor
- ▶ **Ladung** aus Krümmungsrichtung beim Durchgang durch Spurdetektor auf Grund des Solenoidmagnetfeldes
- ▶ **Energie** aus Schauergeometrie im Kalorimeter
- ▶ **Teilchensorte** aus typischer Kombination einzelner Subdetektoren
- ▶ (invariante) **Masse** aus Energieerhaltung
- ▶ **Häufigkeiten** eines Events (cross sections) durch Zählen

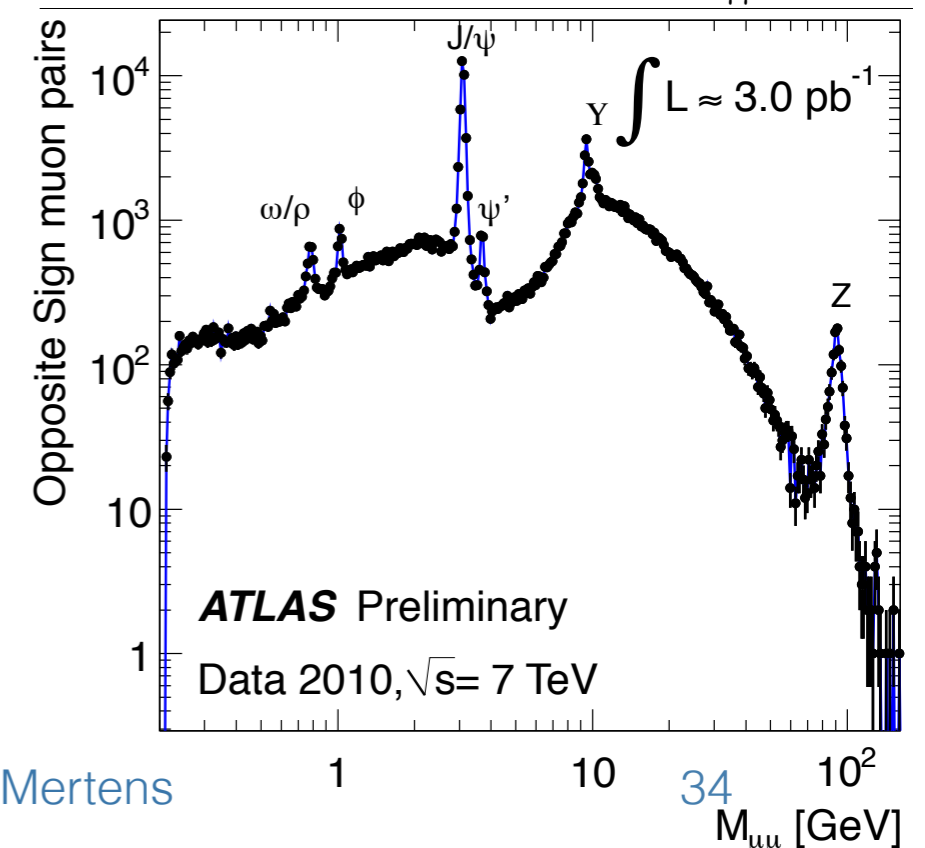
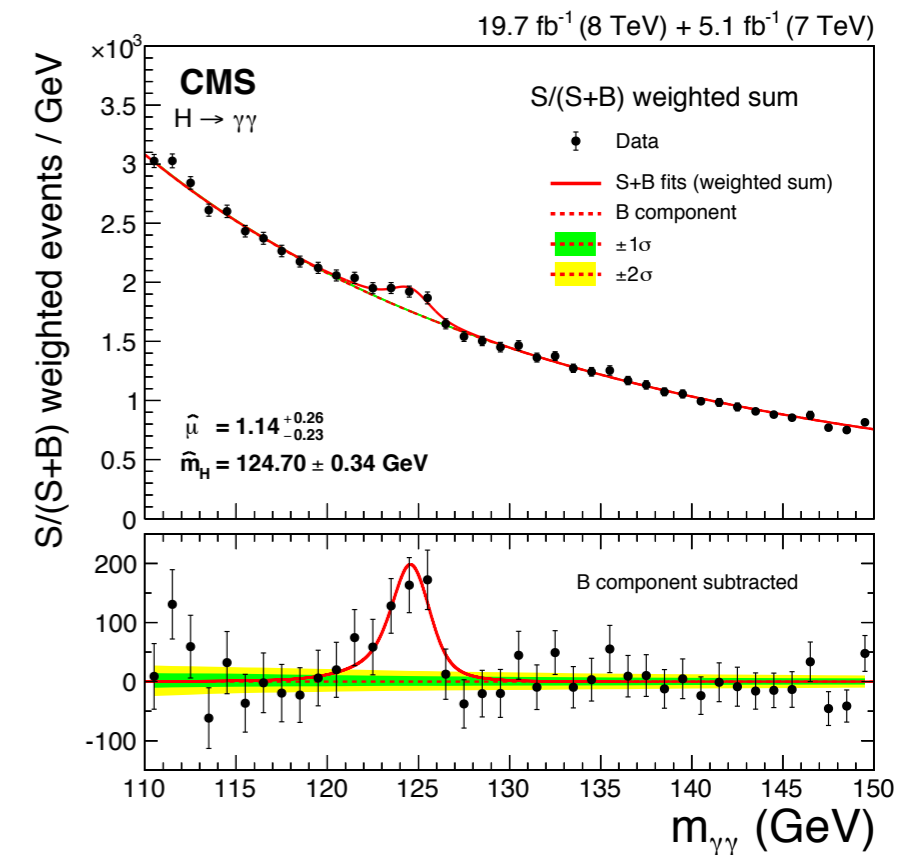
Wozu haben wir Zugang?

- ▶ **Impuls** aus Krümmungsradius beim Durchgang durch Spurdetektor
- ▶ **Ladung** aus Krümmungsrichtung beim Durchgang durch Spurdetektor auf Grund des Solenoidmagnetfeldes
- ▶ **Energie** aus Schauergeometrie im Kalorimeter
- ▶ **Teilchensorte** aus typischer Kombination einzelner Subdetektoren
- ▶ (invariante) **Masse** aus Energieerhaltung
- ▶ **Häufigkeiten** eines Events (cross sections) durch Zählen



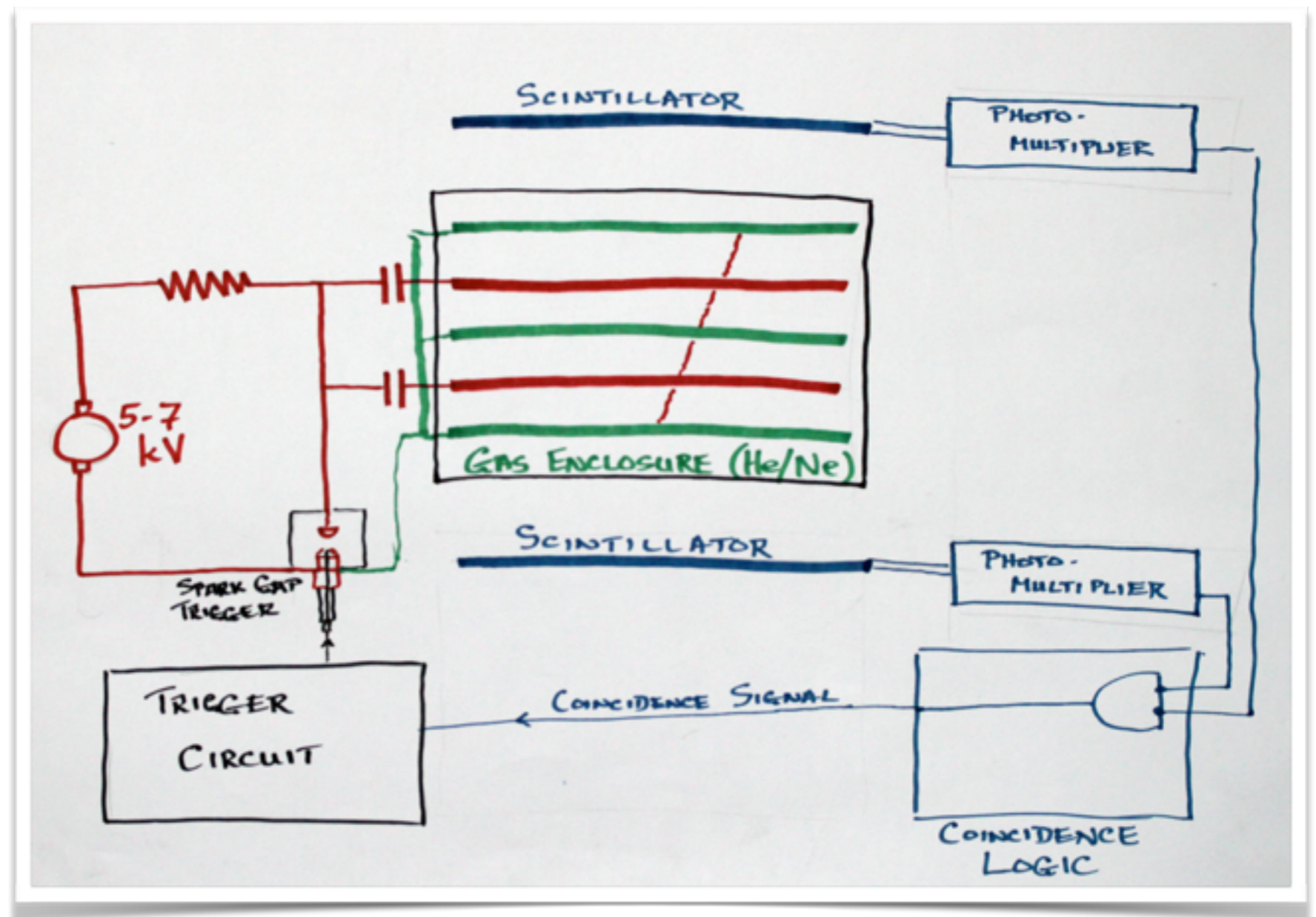
Wozu haben wir Zugang?

- ▶ **Impuls** aus Krümmungsradius beim Durchgang durch Spurdetektor
- ▶ **Ladung** aus Krümmungsrichtung beim Durchgang durch Spurdetektor auf Grund des Solenoidmagnetfeldes
- ▶ **Energie** aus Schauergeometrie im Kalorimeter
- ▶ **Teilchensorte** aus typischer Kombination einzelner Subdetektoren
- ▶ (invariante) **Masse** aus Energieerhaltung
- ▶ **Häufigkeiten** eines Events (cross sections) durch Zählen



Entscheiden, was interessant ist -> Trigger

- ▶ Manche Dinge passieren eher selten, sodass man nur auslösen möchte, wenn wirklich was passiert
- ▶ Zum Beispiel kosmische Myonen:
Fluss $\sim 100/\text{m}^2/\text{s}$



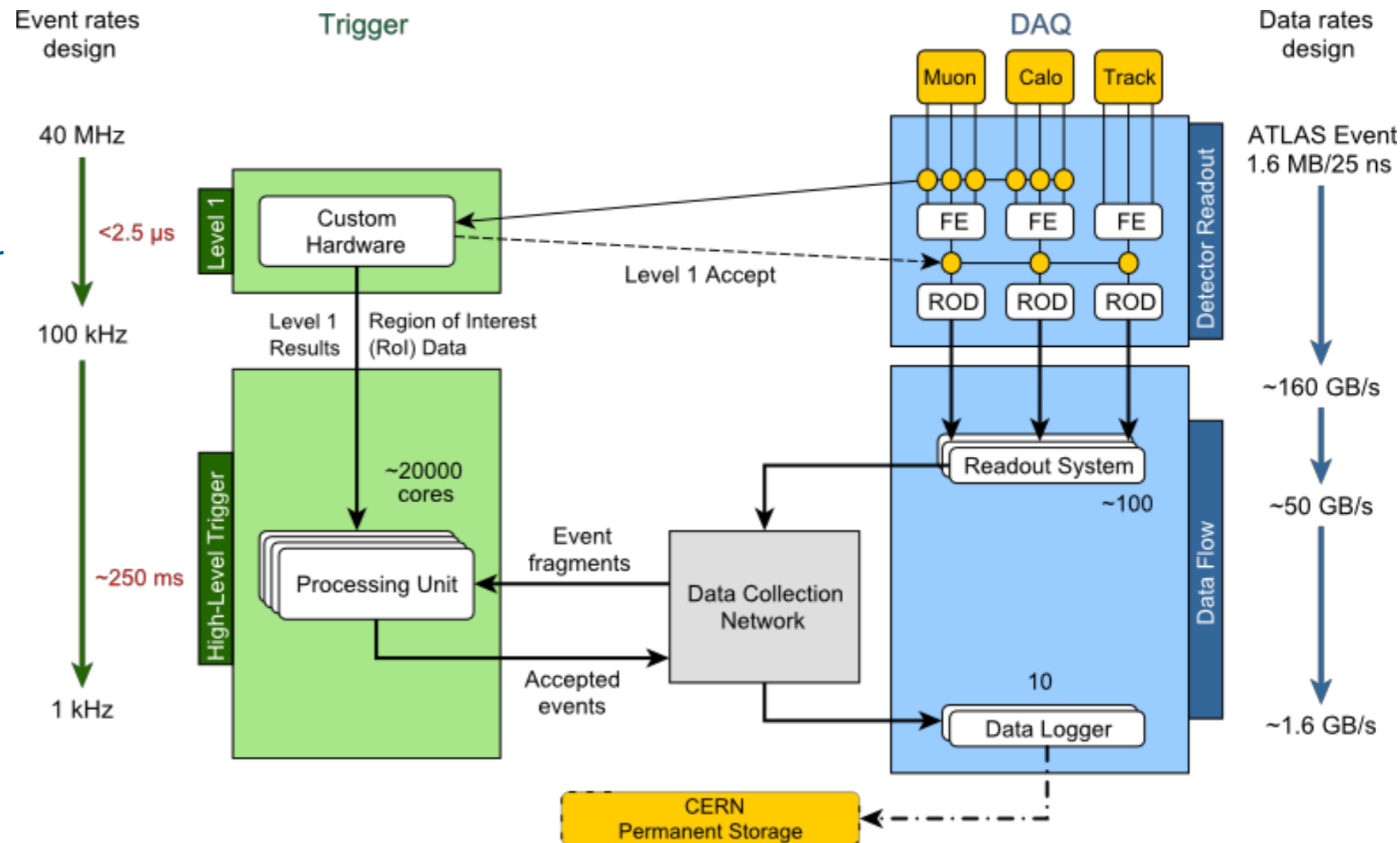
Entscheiden, was interessant ist -> Trigger

- ▶ Und manchmal passiert so viel, dass man heraus filtern möchte, wo man interessante Physik vermutet
- ▶ In ATLAS eher so 40 Millionen Kollisionen pro Sekunde mit ~50 interagierenden Protonen pro Kollision -> O(TB) an Daten pro Sekunde

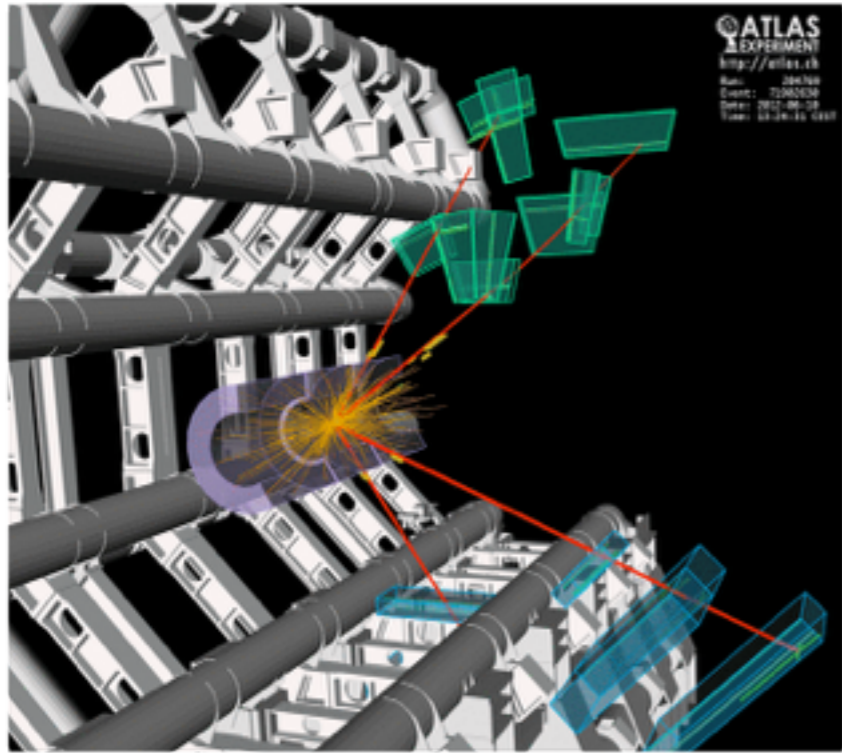
- ▶ Level 1: reduziert auf 100k Events aus Kalorimeter- und Myoninformation
2,5us Hardwaretrigger

- ▶ Level 2: Softwaretrigger, der feiner selektiert

- ▶ Level 3: Eventbuilder, der Hits zu Events verbindet und selektiert



Und was macht man mit den Daten?

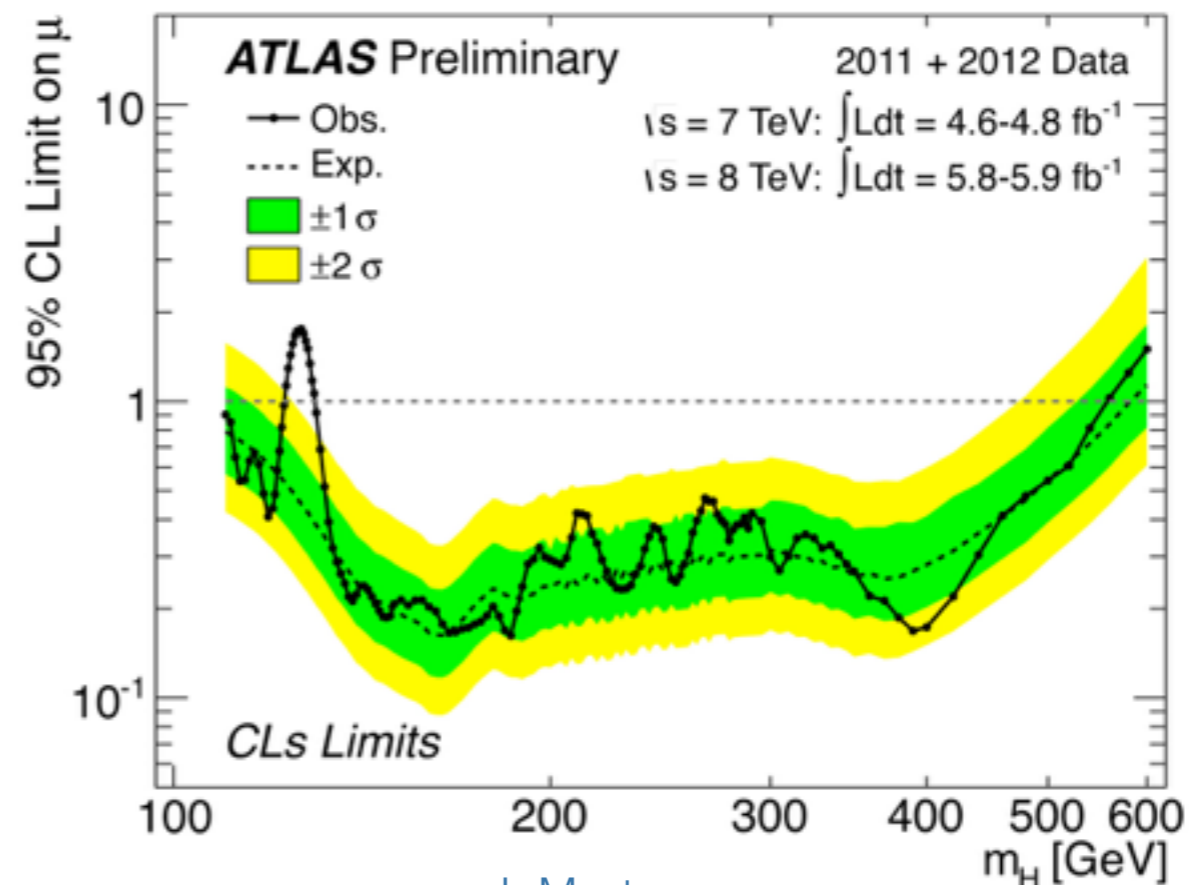


<https://www.nikhef.nl/typo3temp/pics/507688ece4.png>

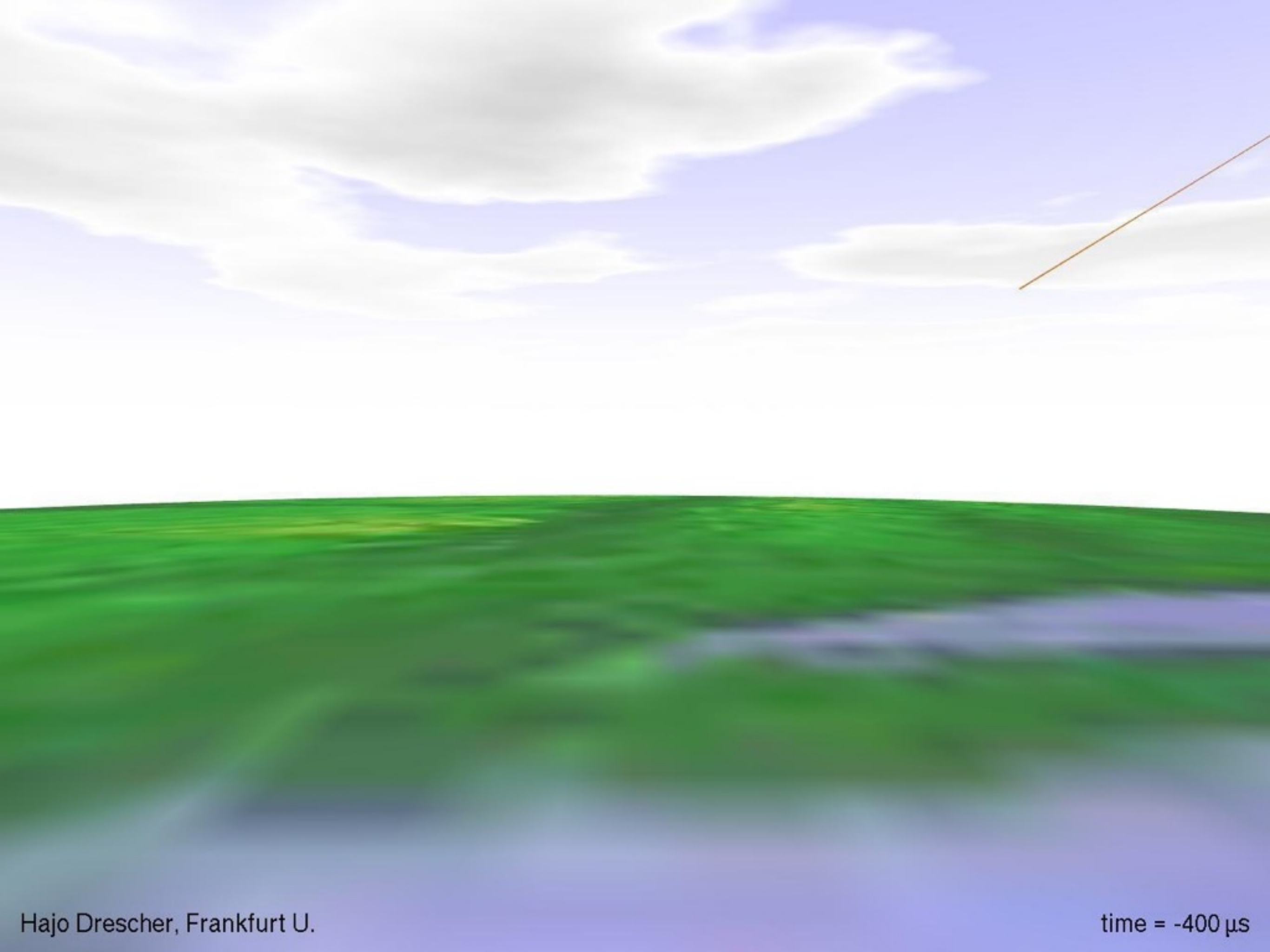


Source

- ▶ Master Classes!
 - ▶ Analyse von Event-Displays in der Schule
- ▶ Oder im etwas größeren Stile:
 - ▶ Analyse von Spuren in dedizierten Frameworks im Computing Grid
 - ▶ Und mit etwas Glück findet man sogar etwas



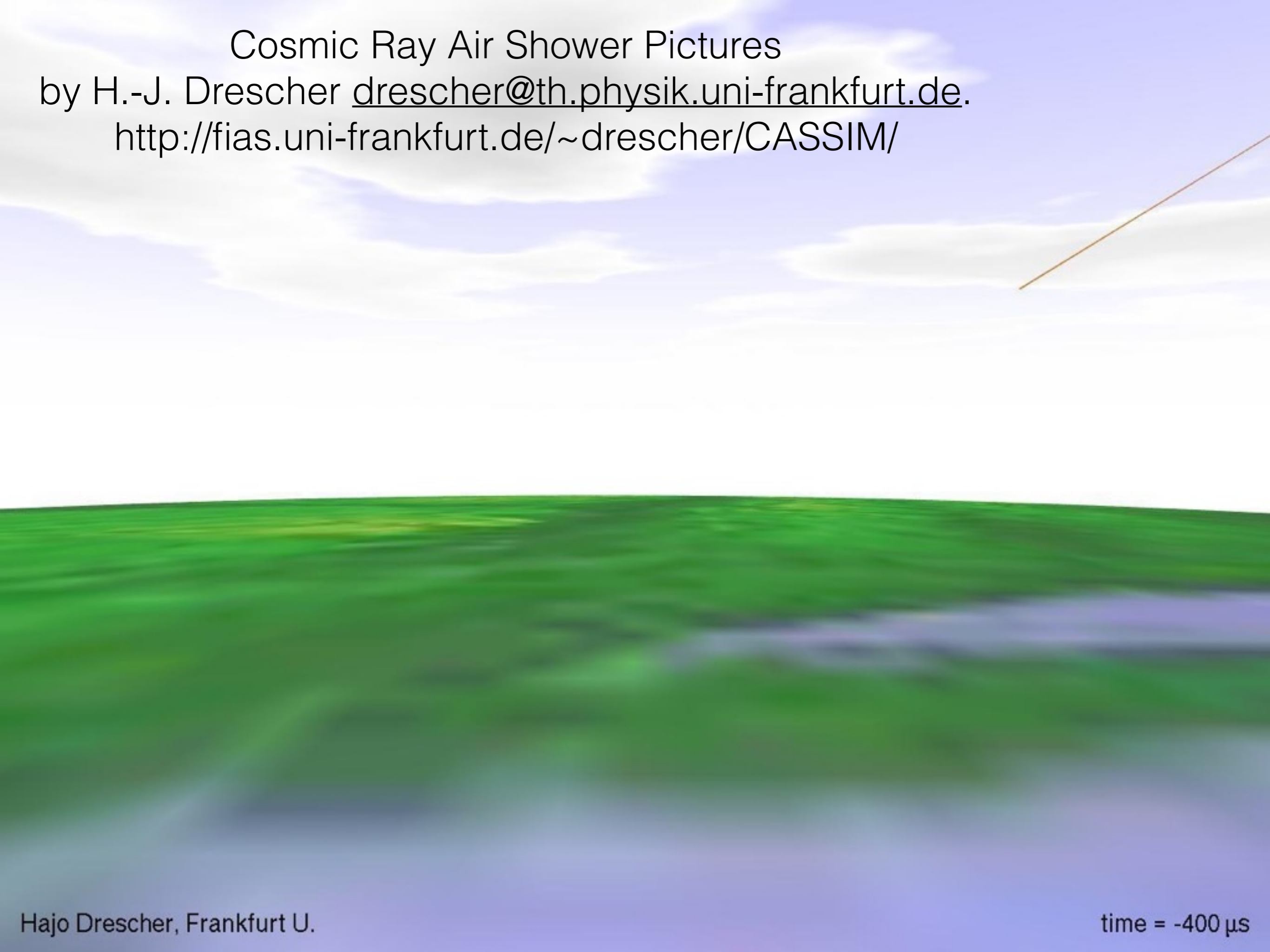
Luftschauer



Cosmic Ray Air Shower Pictures

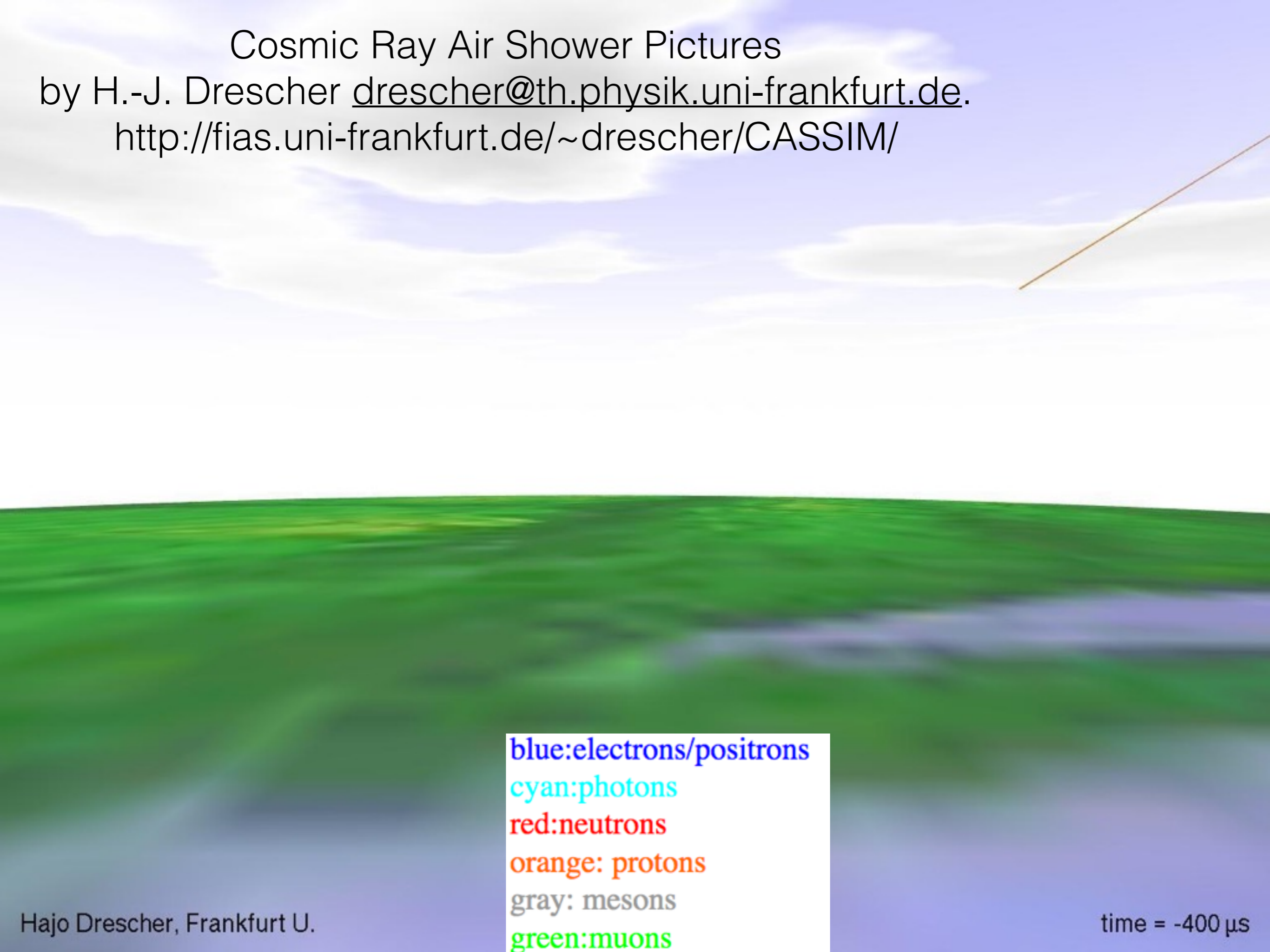
by H.-J. Drescher drescher@th.physik.uni-frankfurt.de.

<http://fias.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/>



Cosmic Ray Air Shower Pictures

by H.-J. Drescher drescher@th.physik.uni-frankfurt.de.
<http://fias.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/>



blue:electrons/positrons

cyan:photons

red:neutrons

orange: protons

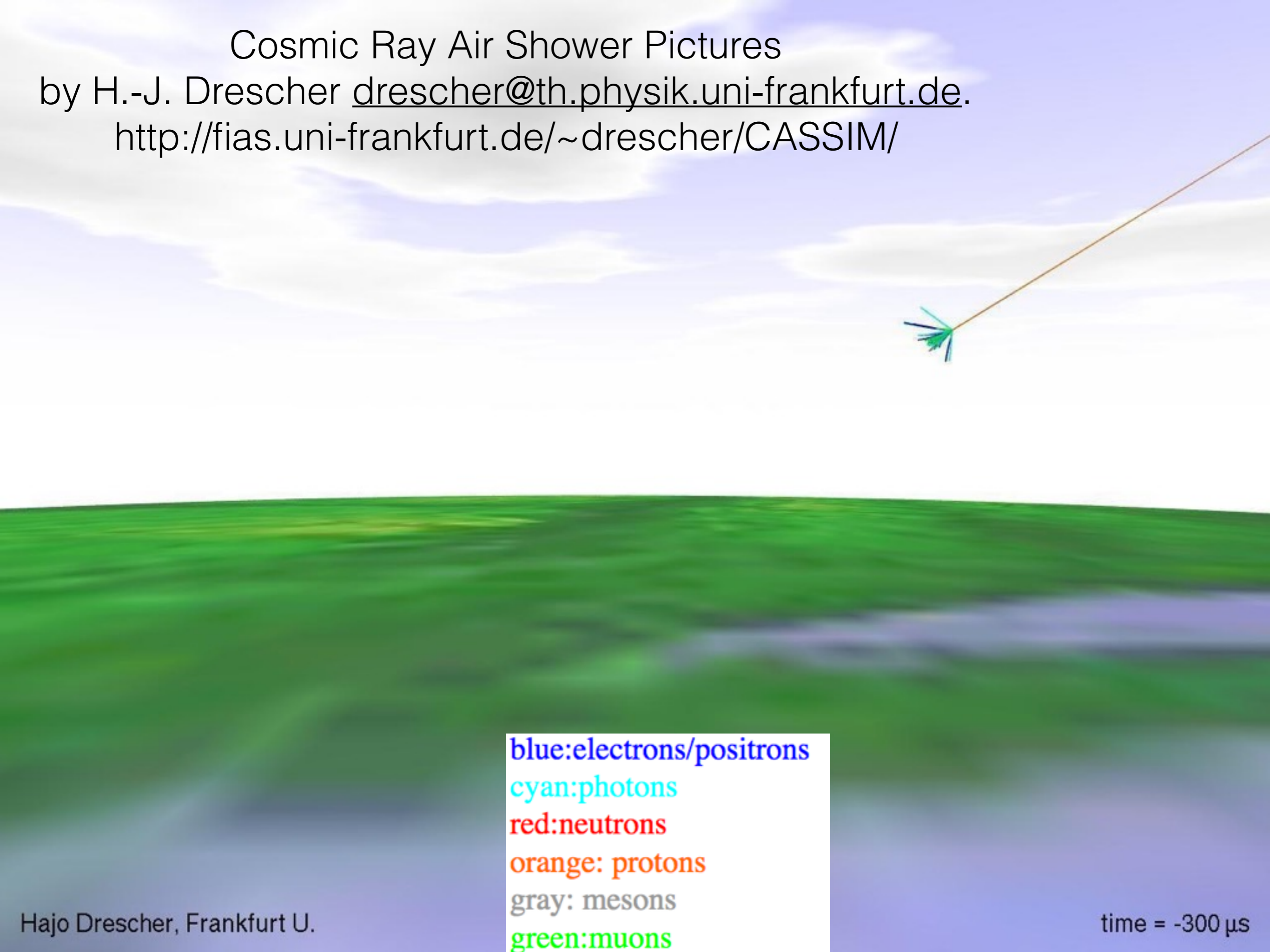
gray: mesons

green:muons

time = -400 μ s

Cosmic Ray Air Shower Pictures

by H.-J. Drescher drescher@th.physik.uni-frankfurt.de.
<http://fias.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/>



blue:electrons/positrons

cyan:photons

red:neutrons

orange: protons

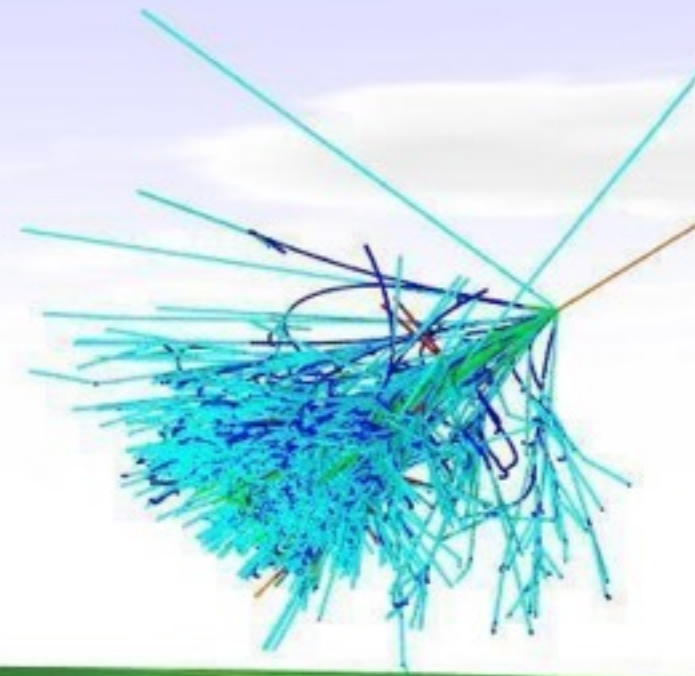
gray: mesons

green:muons

time = -300 μ s

Cosmic Ray Air Shower Pictures

by H.-J. Drescher drescher@th.physik.uni-frankfurt.de.
<http://fias.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/>

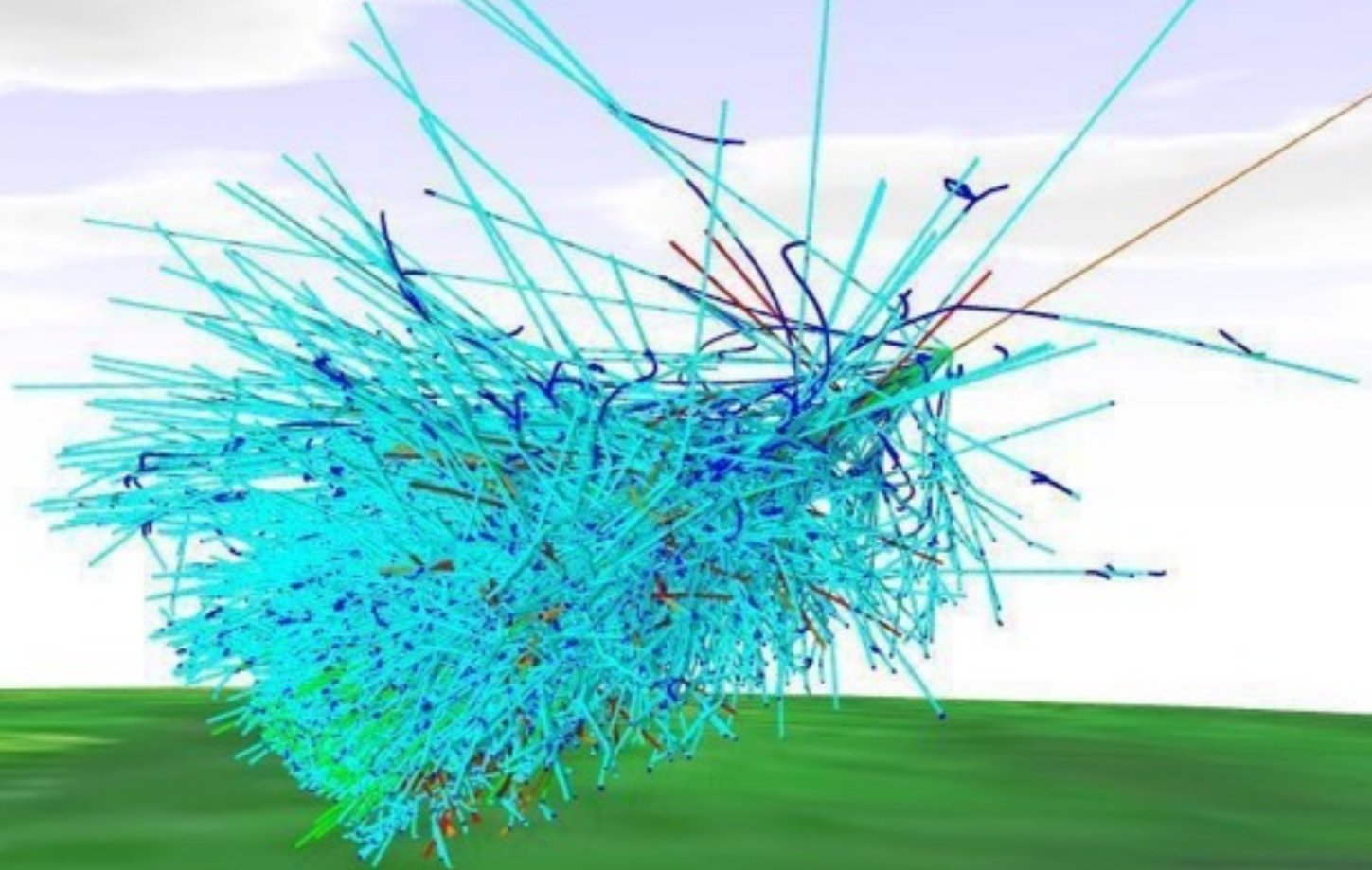


blue:electrons/positrons
cyan:photons
red:neutrons
orange: protons
gray: mesons
green:muons

time = -200 μ s

Cosmic Ray Air Shower Pictures

by H.-J. Drescher drescher@th.physik.uni-frankfurt.de.
<http://fias.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/>



blue:electrons/positrons

cyan:photons

red:neutrons

orange: protons

gray: mesons

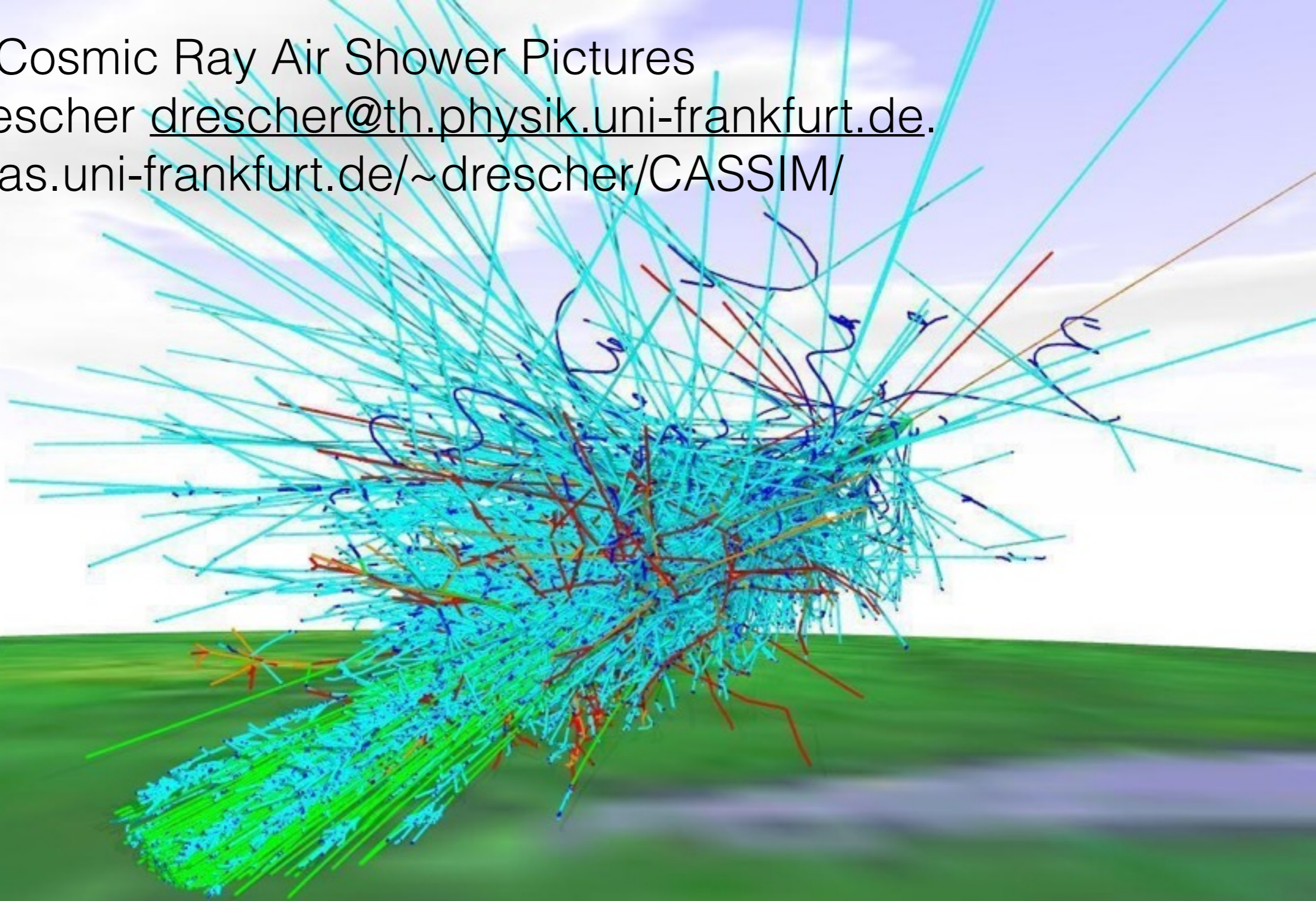
green:muons

time = -100 μ s

Cosmic Ray Air Shower Pictures

by H.-J. Drescher drescher@th.physik.uni-frankfurt.de.

<http://fias.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/>



blue:electrons/positrons

cyan:photons

red:neutrons

orange: protons

gray: mesons

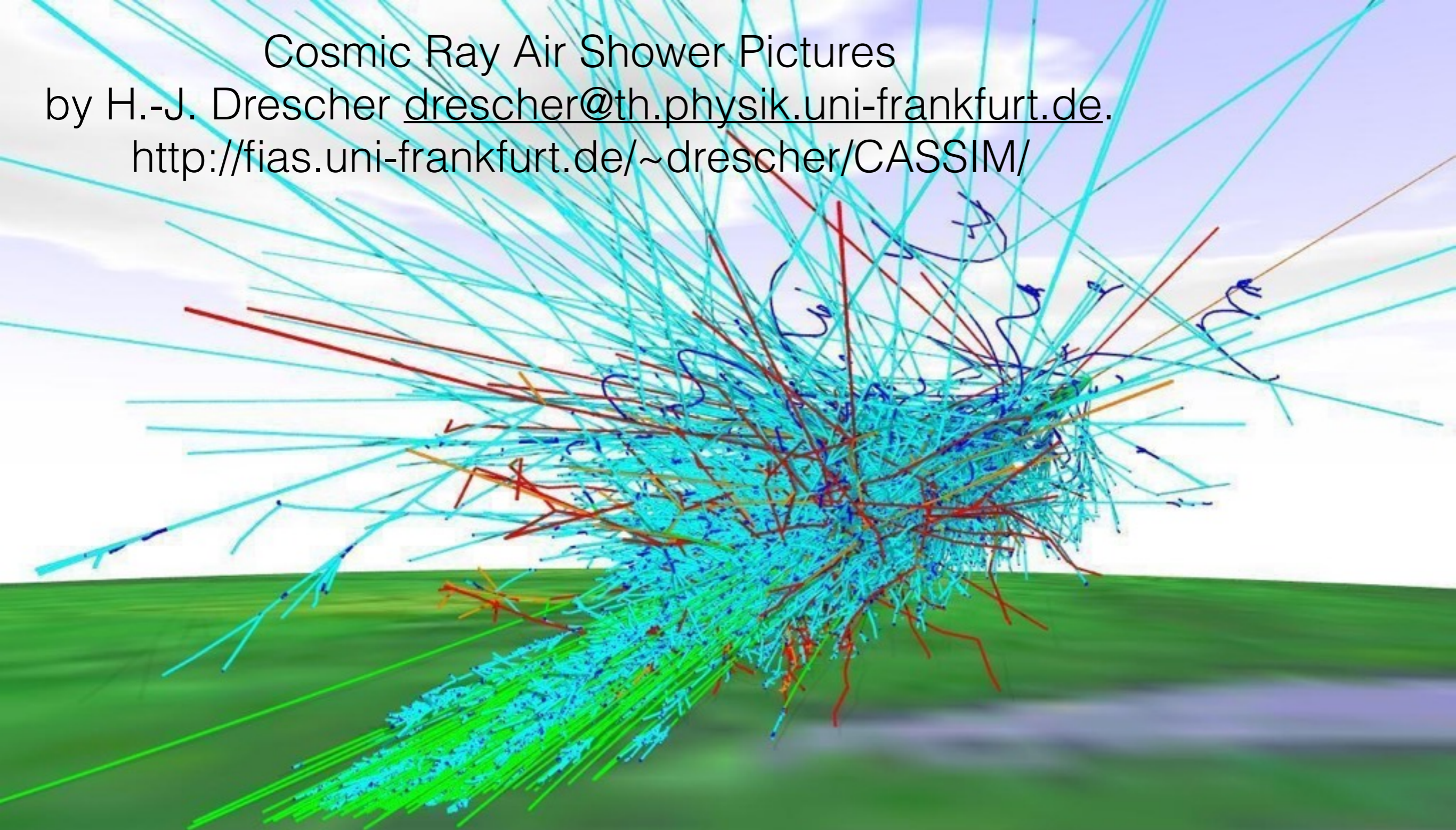
green:muons

time = 0 μ s

Cosmic Ray Air Shower Pictures

by H.-J. Drescher drescher@th.physik.uni-frankfurt.de.

<http://fias.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/>



blue:electrons/positrons

cyan:photons

red:neutrons

orange: protons

gray: mesons

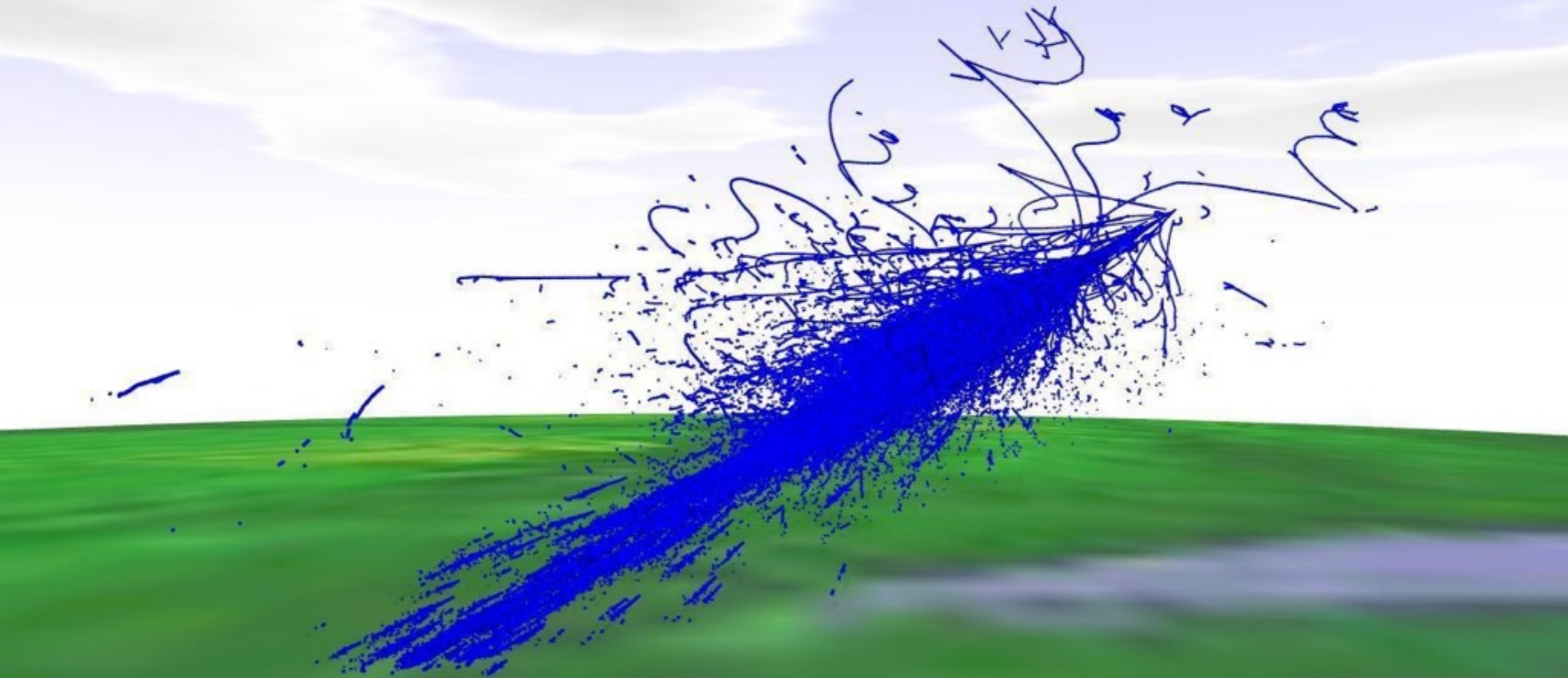
green:muons

time = 100 μ s

Cosmic Ray Air Shower Pictures

by H.-J. Drescher drescher@th.physik.uni-frankfurt.de.

<http://fias.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/>



blue:electrons/positrons

cyan:photons

red:neutrons

orange: protons

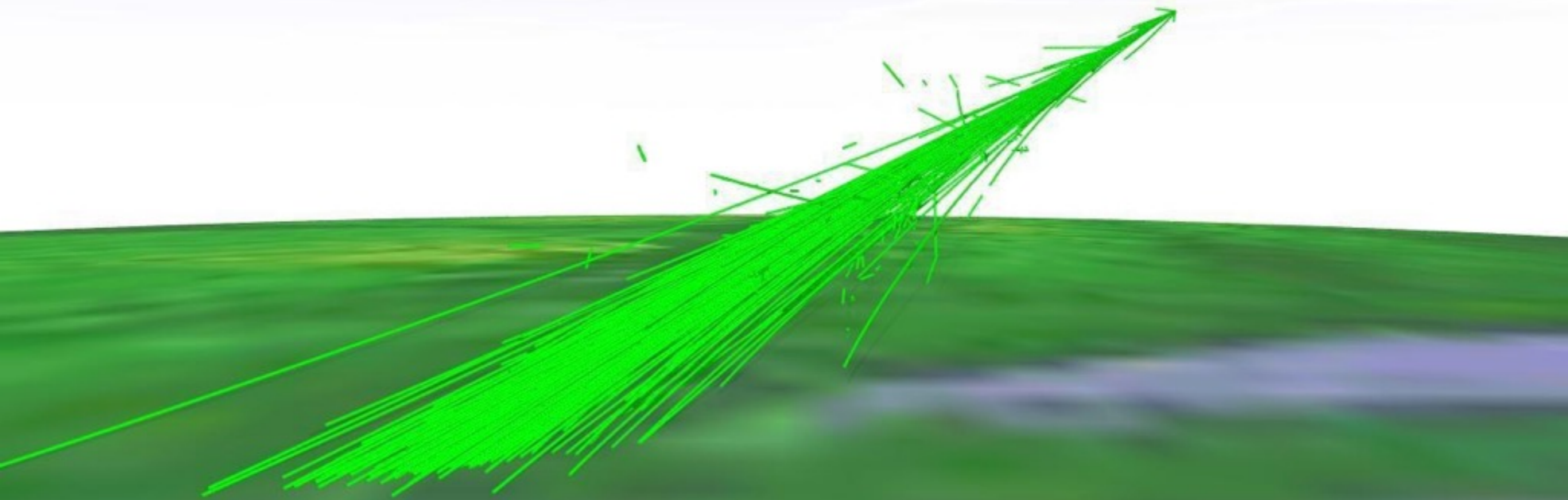
gray: mesons

green:muons

Cosmic Ray Air Shower Pictures

by H.-J. Drescher drescher@th.physik.uni-frankfurt.de.

<http://fias.uni-frankfurt.de/~drescher/CASSIM/>



blue:electrons/positrons

cyan:photons

red:neutrons

orange: protons

gray: mesons

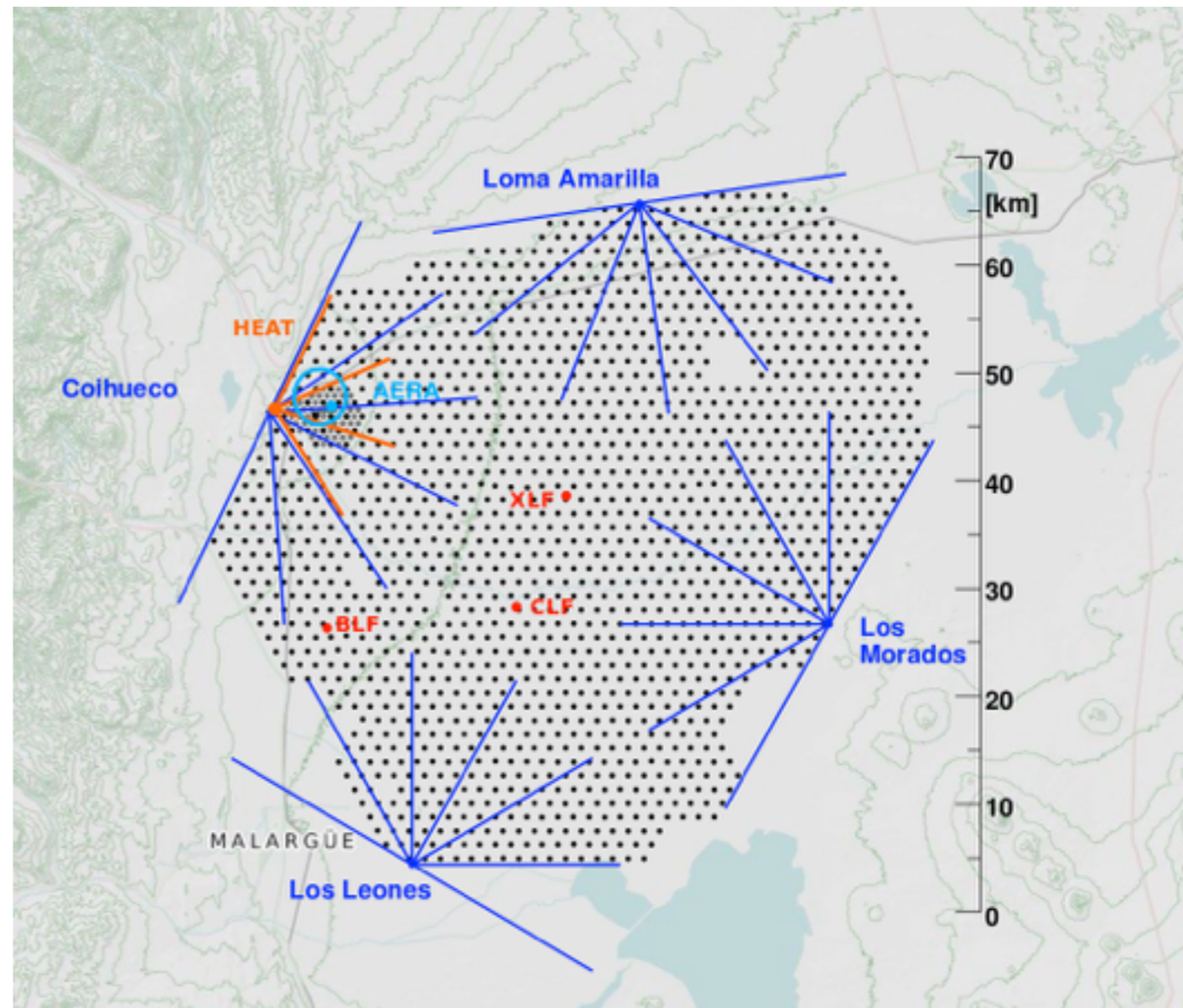
green:muons

Luftschauer messen

- z.B. im Energiebereich von 10^{17} eV bis 10^{20} eV mit 1200 Cherenkov & 26 Fluoreszenz Detektoren im Pierre Auger Observatory in Argentinien auf 3000 km² Fläche

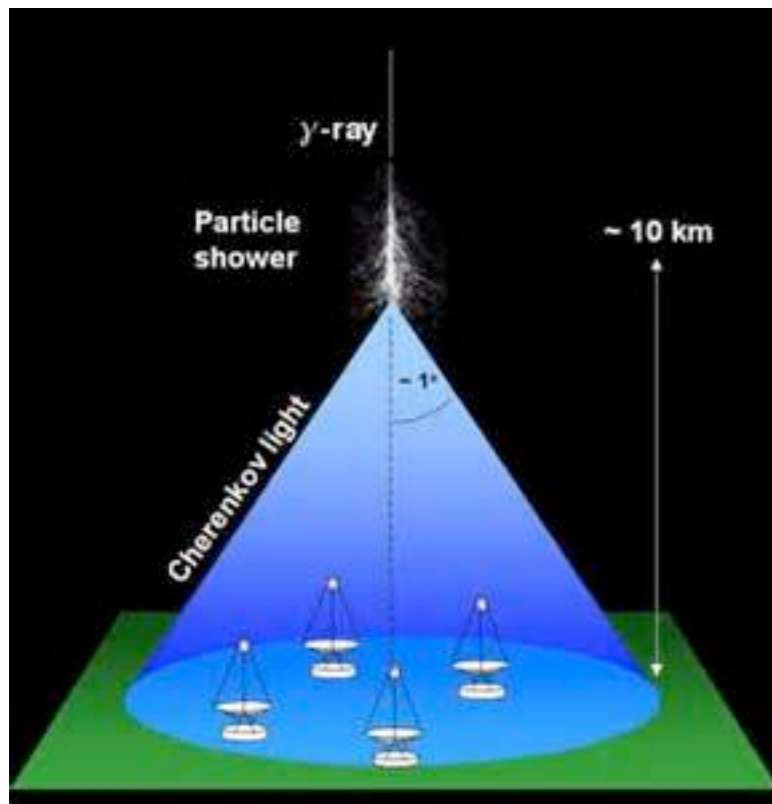


<http://www.fnal.gov/pub/today/images/images09/DSC01129PierreAugerObservatory.jpg>



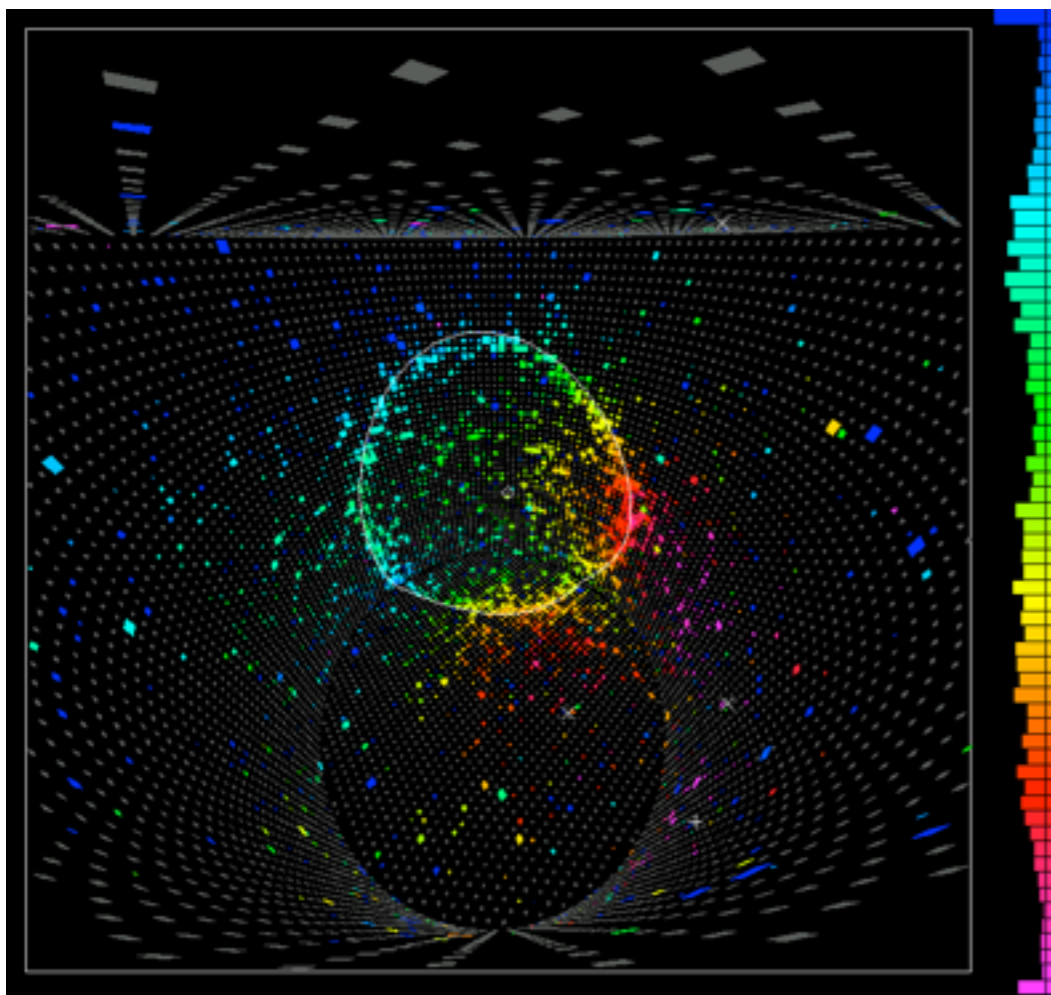
Luftschauer messen

- ▶ oder mit MAGIC Teleskopen auf La Palma auf der Suche nach kosmischer Gammastrahlung im Bereich zwischen 30 GeV und 30 TeV (dunkle Materie, schwarze Löcher, Neutronensterne)

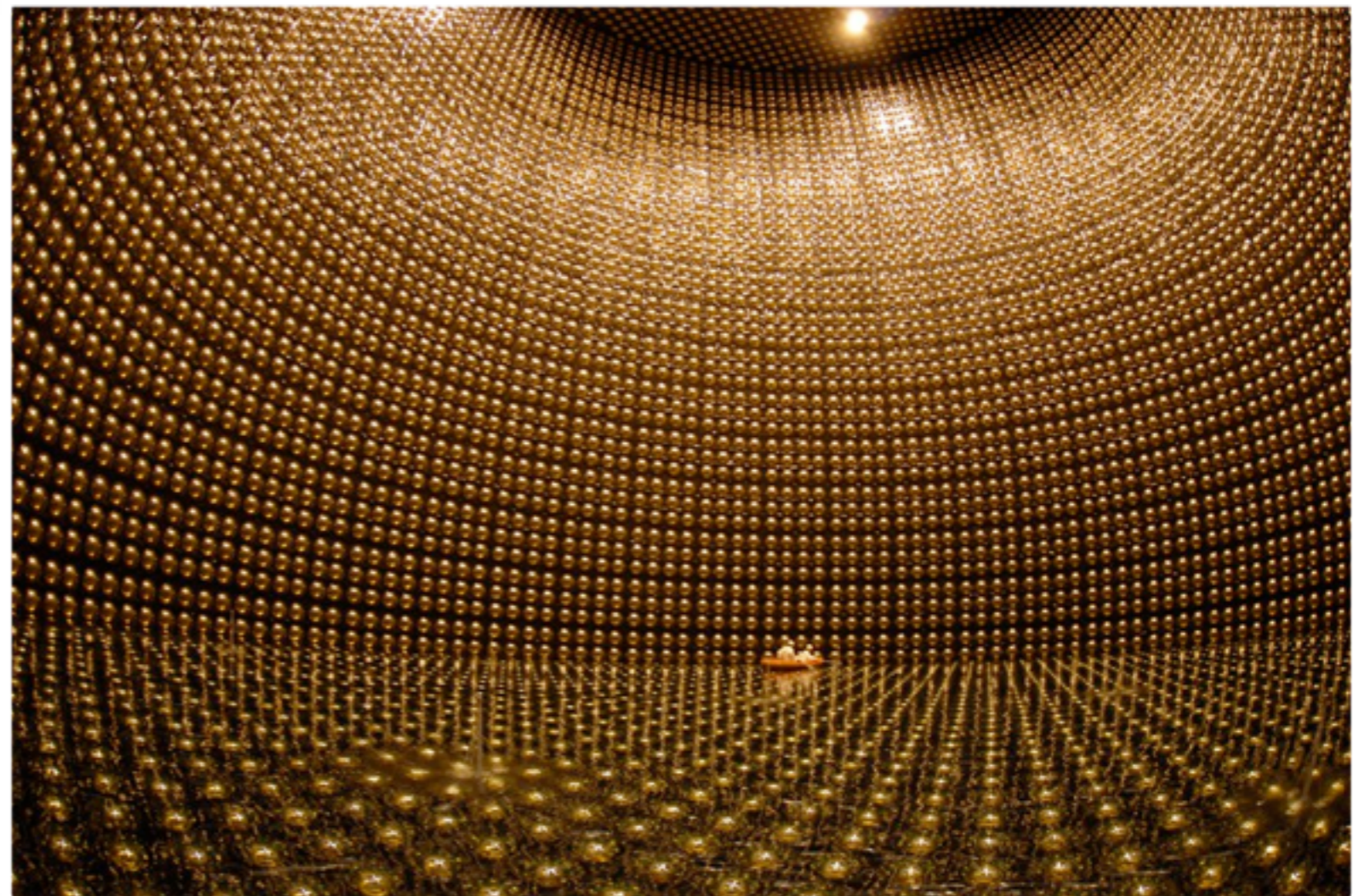


Luftschauer messen -> Neutrinos

- z.B. in SuperKamiokande erzeugen hochenergetische Neutrinos je nach Flavour Elektronen oder Myonen durch Umwandlung von Protonen bzw. Neutronen in 50kt Wassertank mit > 11k PMTs:



Source

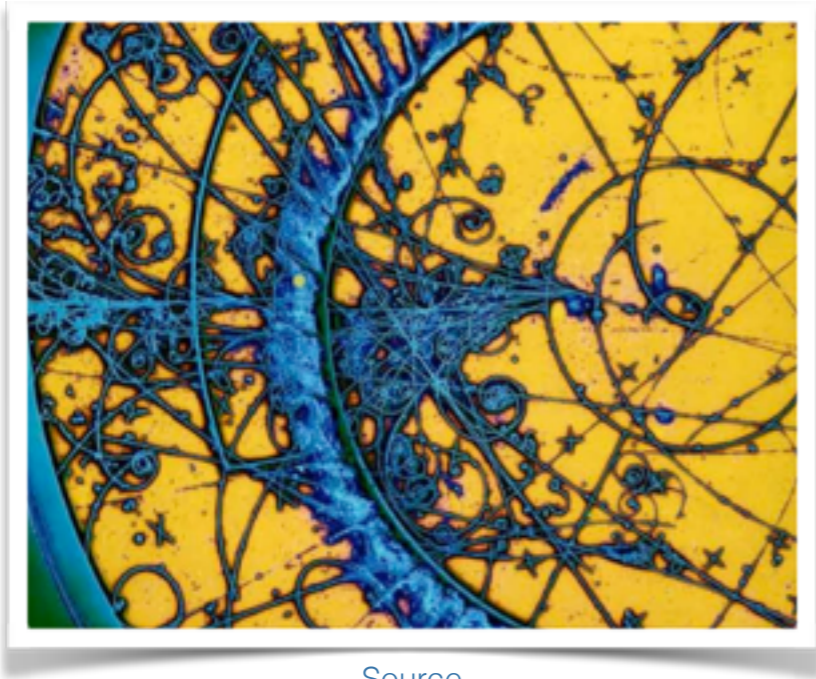


<http://i0.wp.com/www.universetoday.com/wp-content/uploads/2008/05/neutrino.jpg>

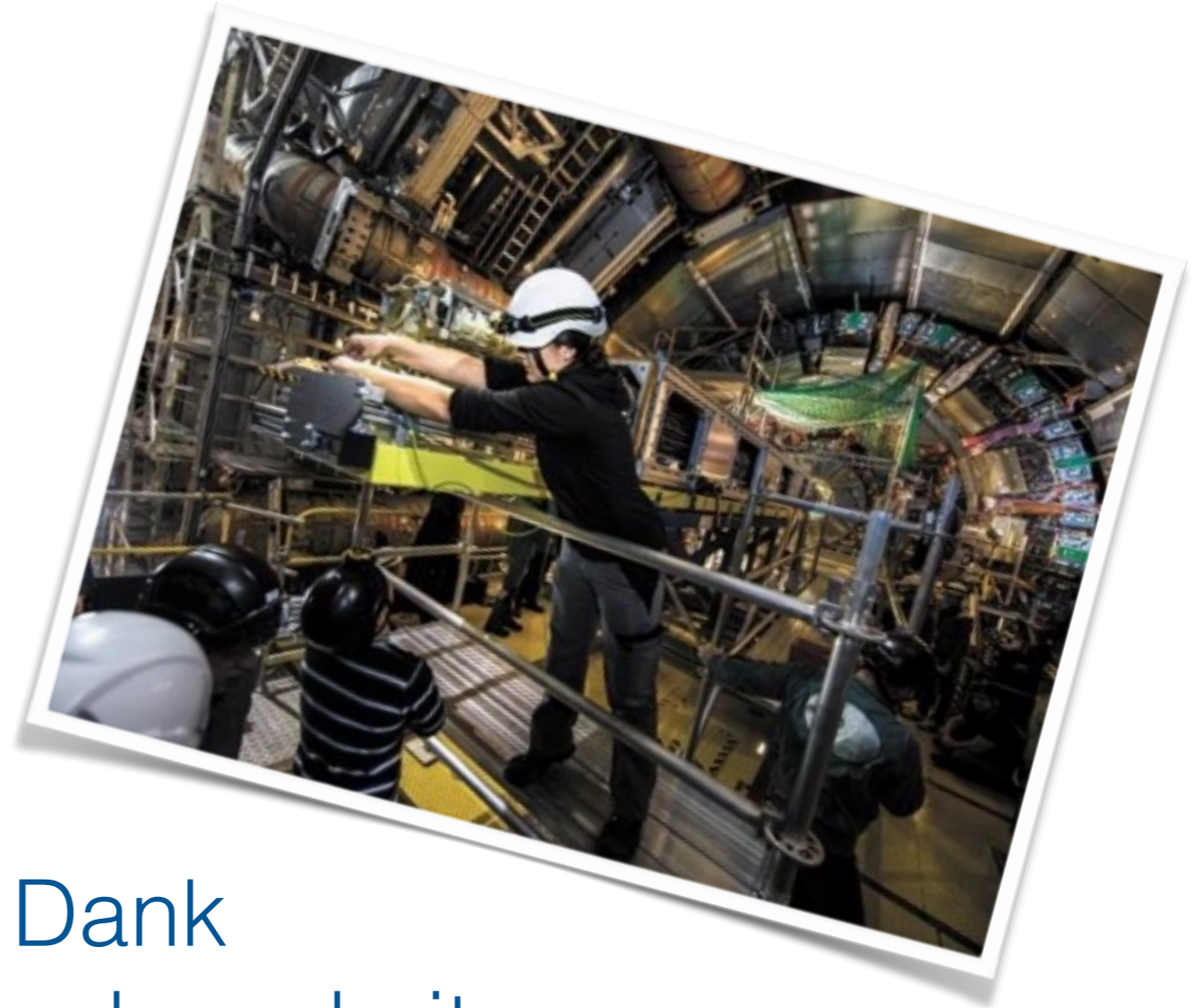
Zusammenfassung

- ▶ Detektorphysik ist eine eigene Disziplin und hat sehr häufig den Erkenntnisgewinn in anderen Feldern (Teilchenphysik, Kernphysik, aber auch im Bereich der Röntgenstreuung) erst möglich gemacht.
- ▶ Obwohl es bereits sehr viele spezialisierte Detektoren gibt, läuft die Forschung auf Hochtouren:
 - ▶ HL-LHC wird die Okkupanzen und Strahlenschäden um einen Faktor 5 nach oben treiben
 - ▶ ILC/CLIC benötigen ein unglaublich gutes Kalorimeter und einen quasi masselosen Spurdetektor
- ▶ In der Neutrino-Physik arbeitet man an Detektoren, deren Masse in Kilotonnen (Szintillator, LAr) oder gar Megatonnen (Wasser-Cherenkov) gemessen wird

Neue technische Entwicklungen im Detektorbereich werden sicherlich auch wieder neue Durchbrüche in der Teilchenphysik und anderen Disziplinen (z.B. Medizinphysik) ermöglichen.



[Source](#)



Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit

Gibt es Fragen?

