

Kerne und Teilchen

Physik VI

Vorlesung # 14 1.6.2010

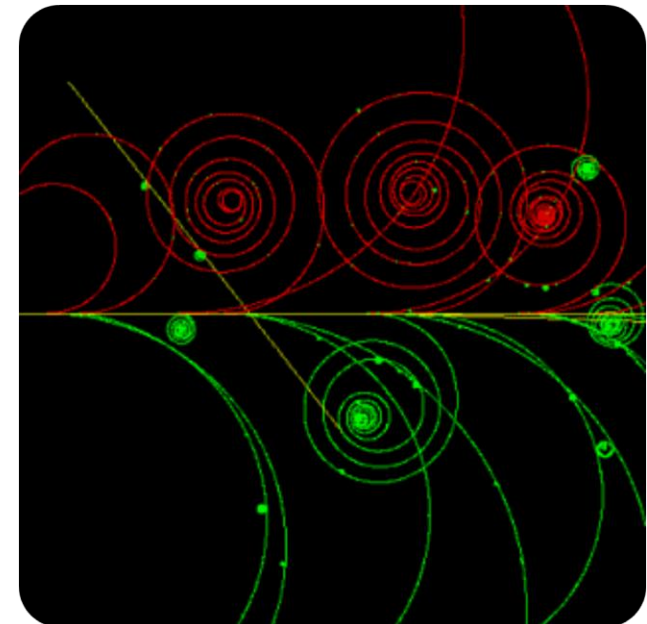
Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

Elementarteilchen-Phänomenologie

- Vektorbosonen $W^\pm$, Z^0 : Eigenschaften

Beschleuniger und Detektoren

- Wechselwirkung von Strahlung & Materie
- Bethe-Bloch: Ionisationsverluste
- radiative Prozesse leichter Teilchen
- Landau-Vavilov Verteilung

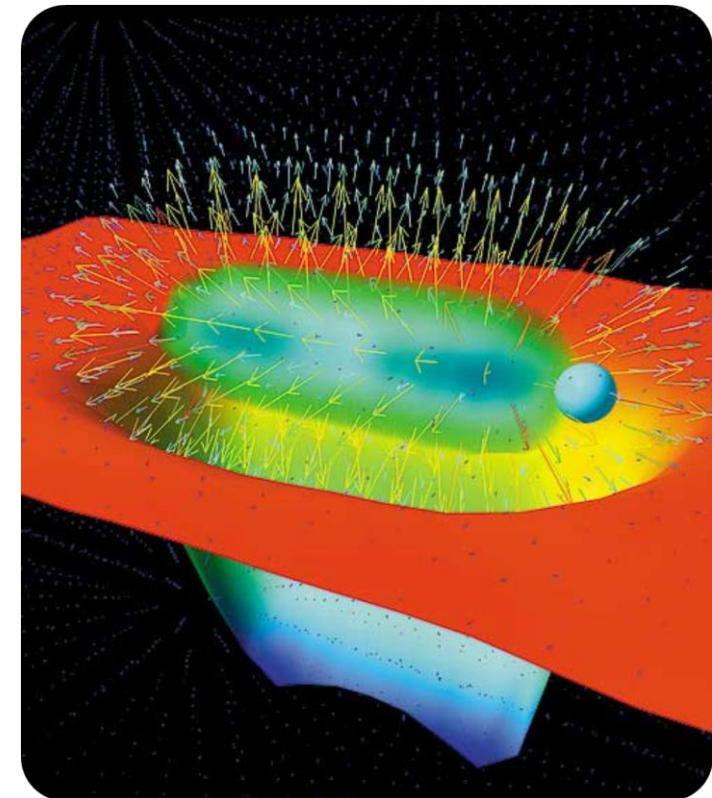
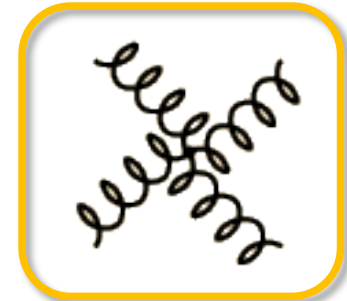
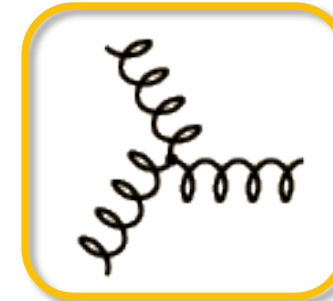
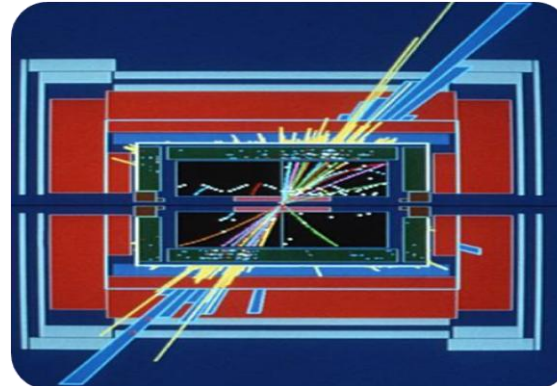
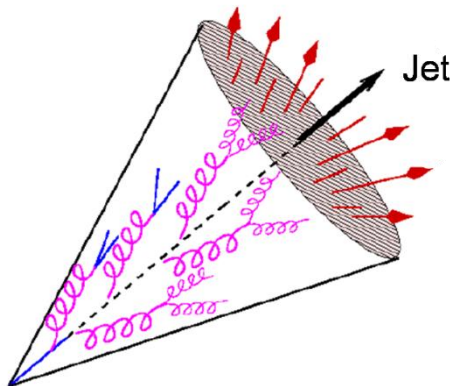
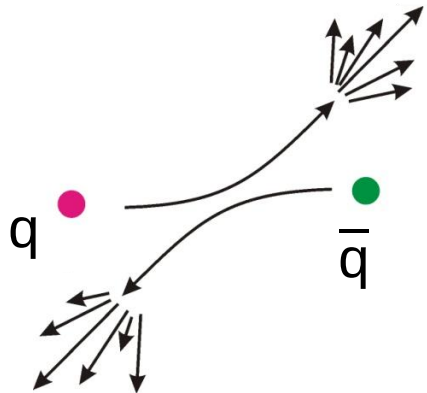


Selbstwechselwirkung von Gluonen



- Gluonen als farb-geladene Eichbosonen der $SU(3)_{\text{color}}$ Symmetrie unterliegen einer Selbstwechselwirkung:

- Existenz der hypothetischen **Gluonenbälle**?
- bei einer räumlichen Trennung eines qq-Paares erzeugen die Gluonen enge Farb-Flussschläuche
 - ⇒ **Quark-Confinement** in Baryonen & Mesonen
 - ⇒ **Asymptotische Freiheit** bei sehr kleinen qq-Abständen: Quarks als quasi-freie Teilchen (Partonen) bei der eN Streuung
 - ⇒ **Hadronisation** eines getrennten qq-Paares: Ausbildung einer **Jet-Struktur** im Detektor



QCD – Vakuumpolarisation, Vektorbosonen

■ QCD-Vakuumpolarisation

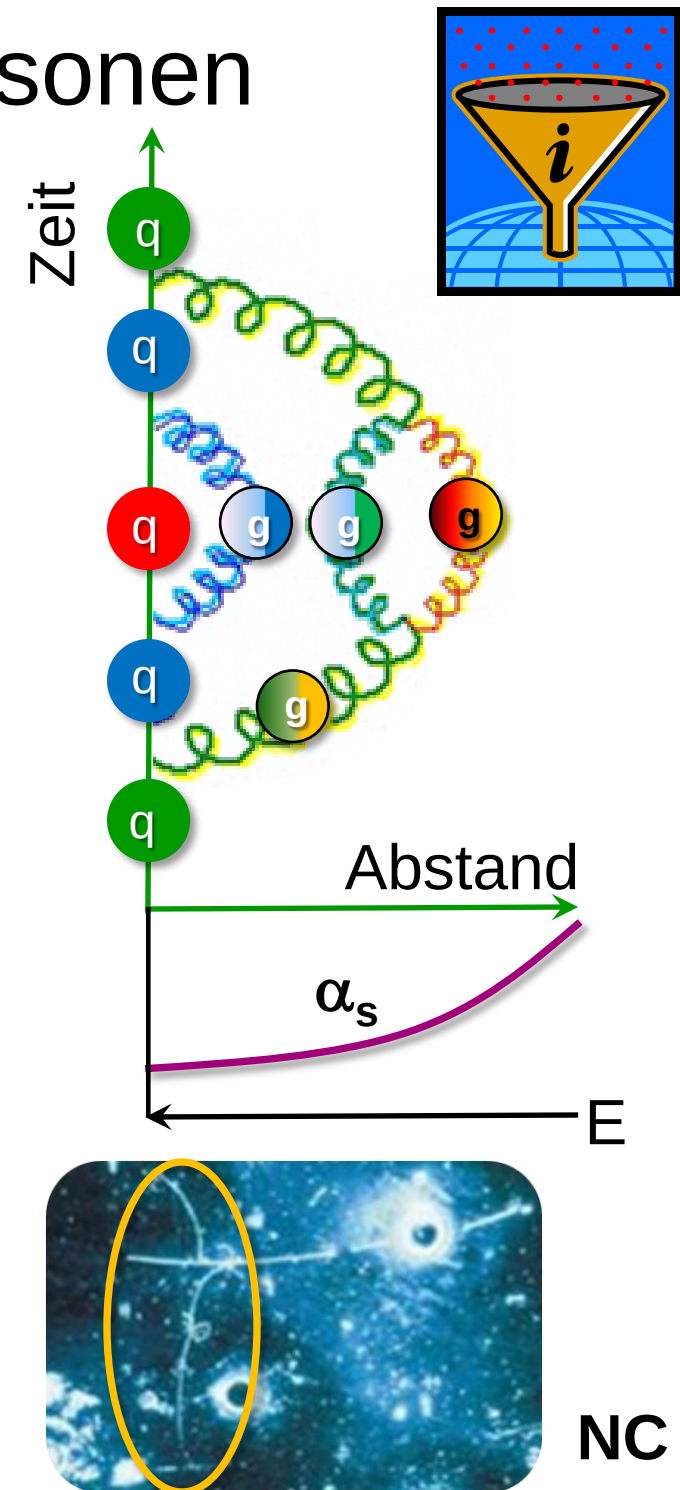
- die „nackte“ Quark-Farbladung wird modifiziert:
- **Abschirmung** durch virtuellen Quark-Antiquark Paare (Analogie zur QED-Vakuumpolarisation)
 - **Anti-Abschirmung** durch Gluonen-Emission
↳ Verschmierung der Farbladung auf Volumen

laufende starke Kopplungskonstante' α_s :

- α_s wird kleiner bei höherer Energie / größerem Q^2 / kleineren Abständen (↳ asymptotische Freiheit)
- α_s wird größer bei fallender Energie / kleinerem Q^2 / größeren Abständen (↳ Confinement)

■ Elektroschwache Wechselwirkung

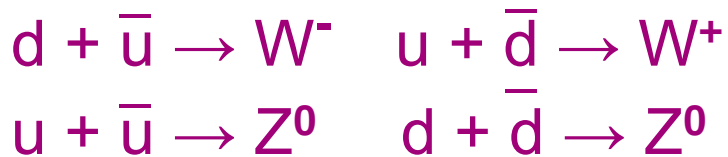
WSG-Modell: Vereinheitlichung von schwacher & elektromagnet. Wechselwirkung mit Vorhersage:
schwacher neutraler Strom (Z^0 mit $M = 91.2 \text{ GeV}$)



Vektorbosonen am CERN

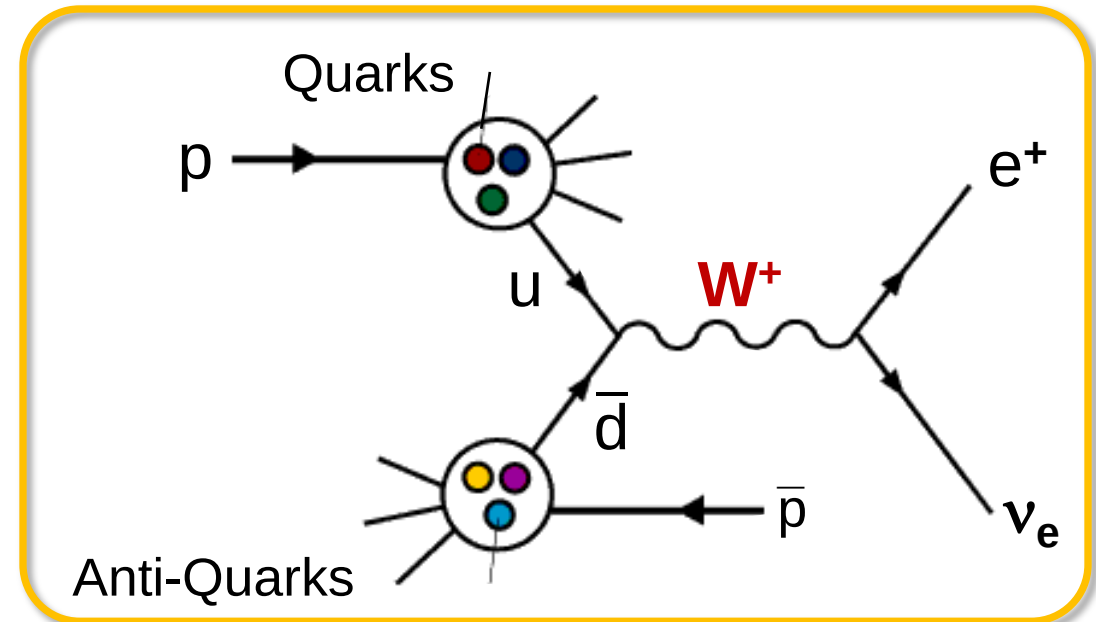
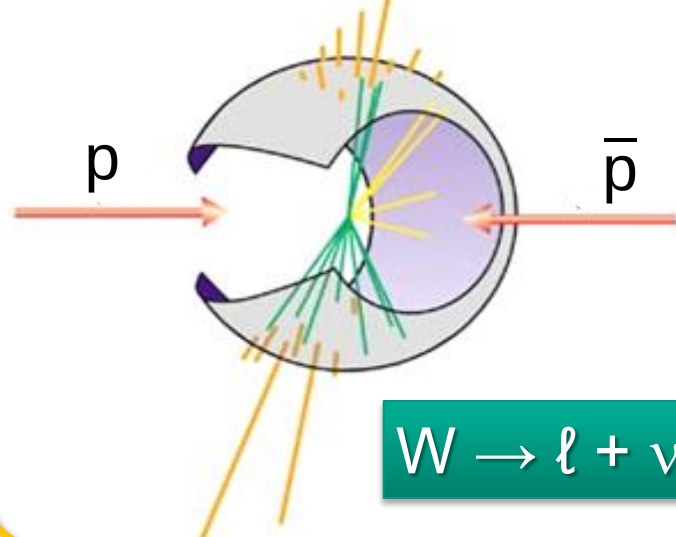
- die **intermediären Vektorbosonen W^+ , W^- & Z^0** des GSW-Modells wurden in Proton-Antiproton Kollisionen bei Energien $E = 400 \text{ GeV}$ nachgewiesen,

Erzeugung durch:



W-Boson
Produktion
& Zerfall

Lepton



- der **Nachweis der reellen Bosonen** erfolgt über Zerfallsprozesse in hochenergetische Leptonen:

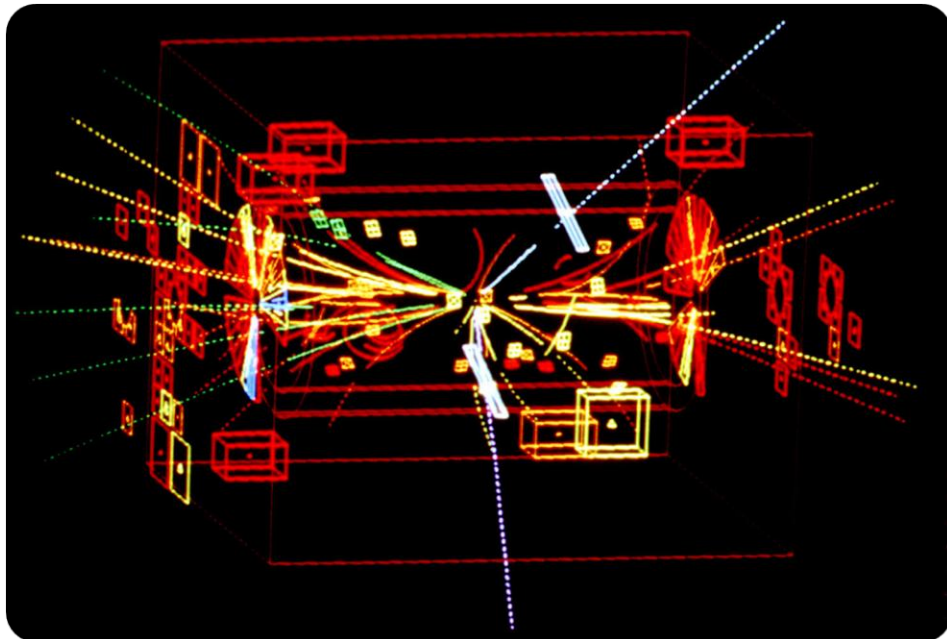


1 HE-Lepton & fehlender Transversalimpuls (ν)



Nachweis von $W^\pm$ & Z^0 am CERN

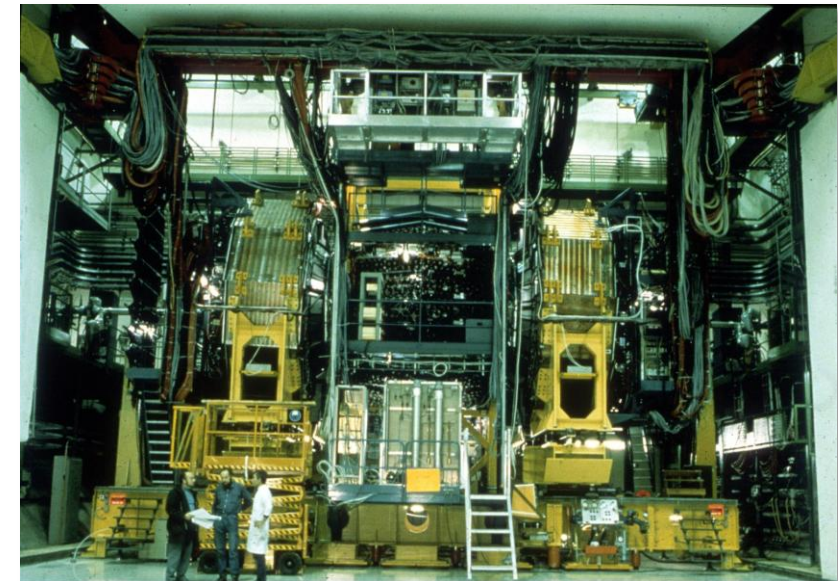
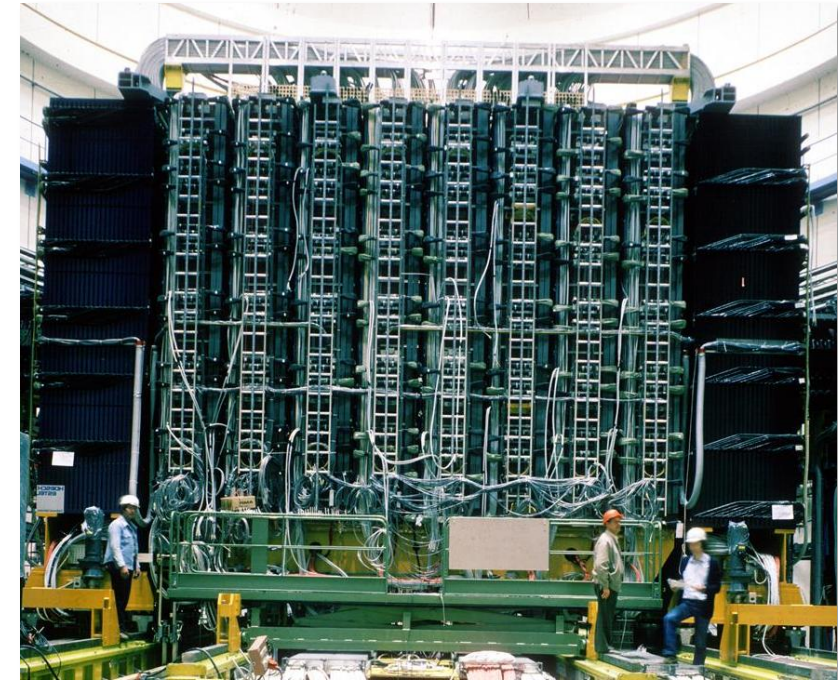
- 1983: der experimentelle Nachweis der intermediären Vektorbosonen erfolgte am **CERN SPS Beschleuniger** in den Experimenten UA1 und UA2
- UA1, April 1983: erster beobachteter **Z^0 Zerfall** in ein hochenergetisches Leptonenpaar (e^+, e^-) jedes Lepton hat $E \sim 45$ GeV



Nobel
1984



Carlo Rubbia,
S. van der Meer



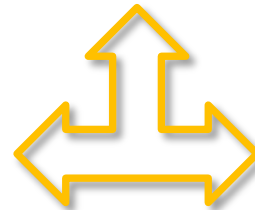
Zerfälle von $W^\pm$ & Z^0

- 1989-2000: nach Inbetriebnahme des **LEP** (**L**arge **E**lectron-**P**ositron Collider) werden am CERN die $W^\pm$ und Z^0 Zerfallsmoden detailliert untersucht:

- **$W^\pm$ Zerfallsmoden**

$$\begin{aligned} W^\pm &\rightarrow e^\pm + (\bar{\nu}_e) : && (10.9 \pm 0.4) \% \\ &\mu^\pm + (\bar{\nu}_\mu) : && (10.2 \pm 0.5) \% \\ &\tau^\pm + (\bar{\nu}_\tau) : && (11.3 \pm 0.8) \% \\ &\text{Hadronen} : && \sim 68\% \end{aligned}$$

je 1/9 Leptonpaar,
6/9 = 2/3 in Hadronen



- das W-Boson koppelt an alle (linkshändigen) Fermionen mit gleicher Stärke an, z.B. für W^- :
 - 3 Lepton-Doublets (ν_e, e^-) , (ν_μ, μ^-) , ...
 - aber nur 2 Quark-Doublets, da das top-Quark zu schwer: $(\bar{u}, d)$, $(\bar{c}, s)$

1 : 1 : 1 : 3 : 3



- **Z^0 Zerfallsmoden**

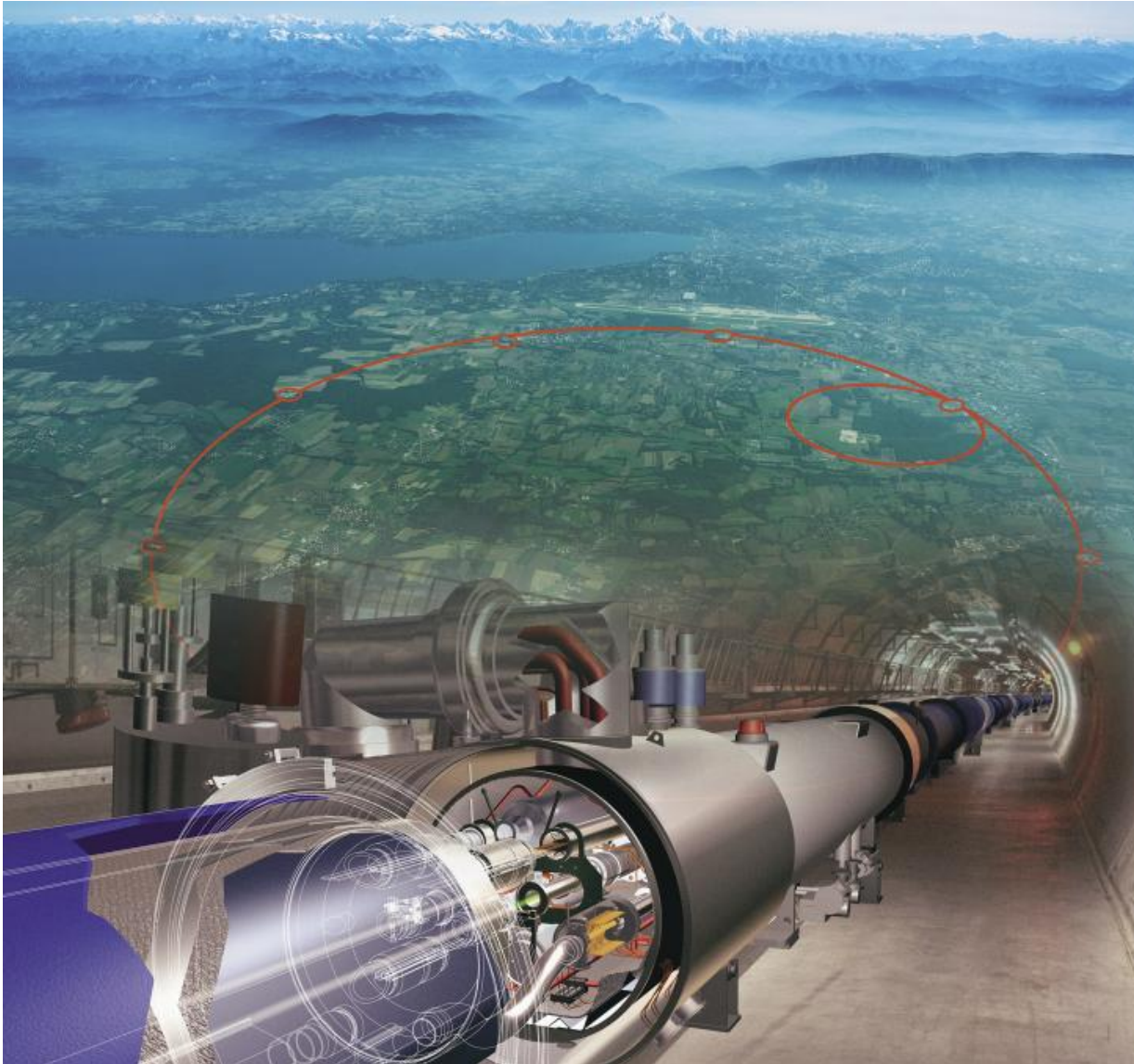
6 leptonische Kanäle: $(\nu_e, \bar{\nu}_e)$, $(\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu)$, $(\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau)$, (e^+, e^-) , (μ^+, μ^-) , (τ^+, τ^-)

5 hadronische Kanäle: $(u, \bar{u})$, $(d, \bar{d})$, $(s, \bar{s})$, $(c, \bar{c})$, $(b, \bar{b})$ (zusammen $\sim 70\%$)

Z^0 koppelt auch an elektr. Ladung, daher 3.35% pro (ℓ^+, ℓ^-) & 6.7% pro $(\nu, \bar{\nu})$

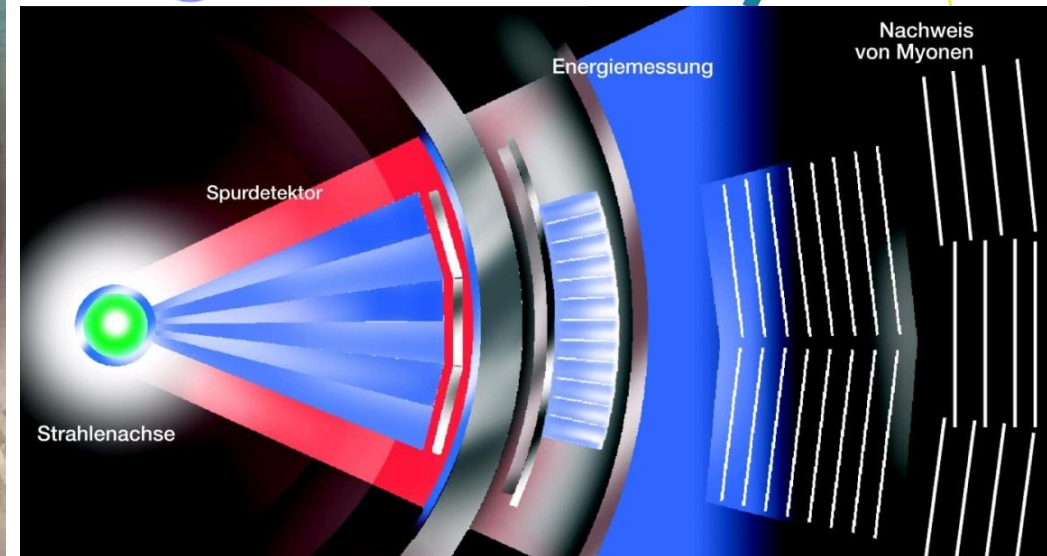
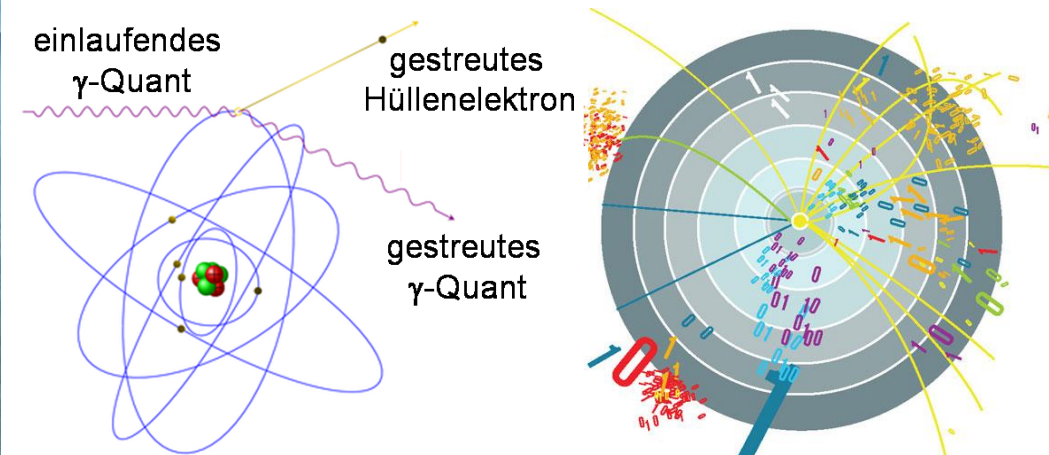
6. Beschleuniger und Detektoren

6.1 Wechselwirkung von Strahlung mit Materie



6.2 Beschleunigertypen

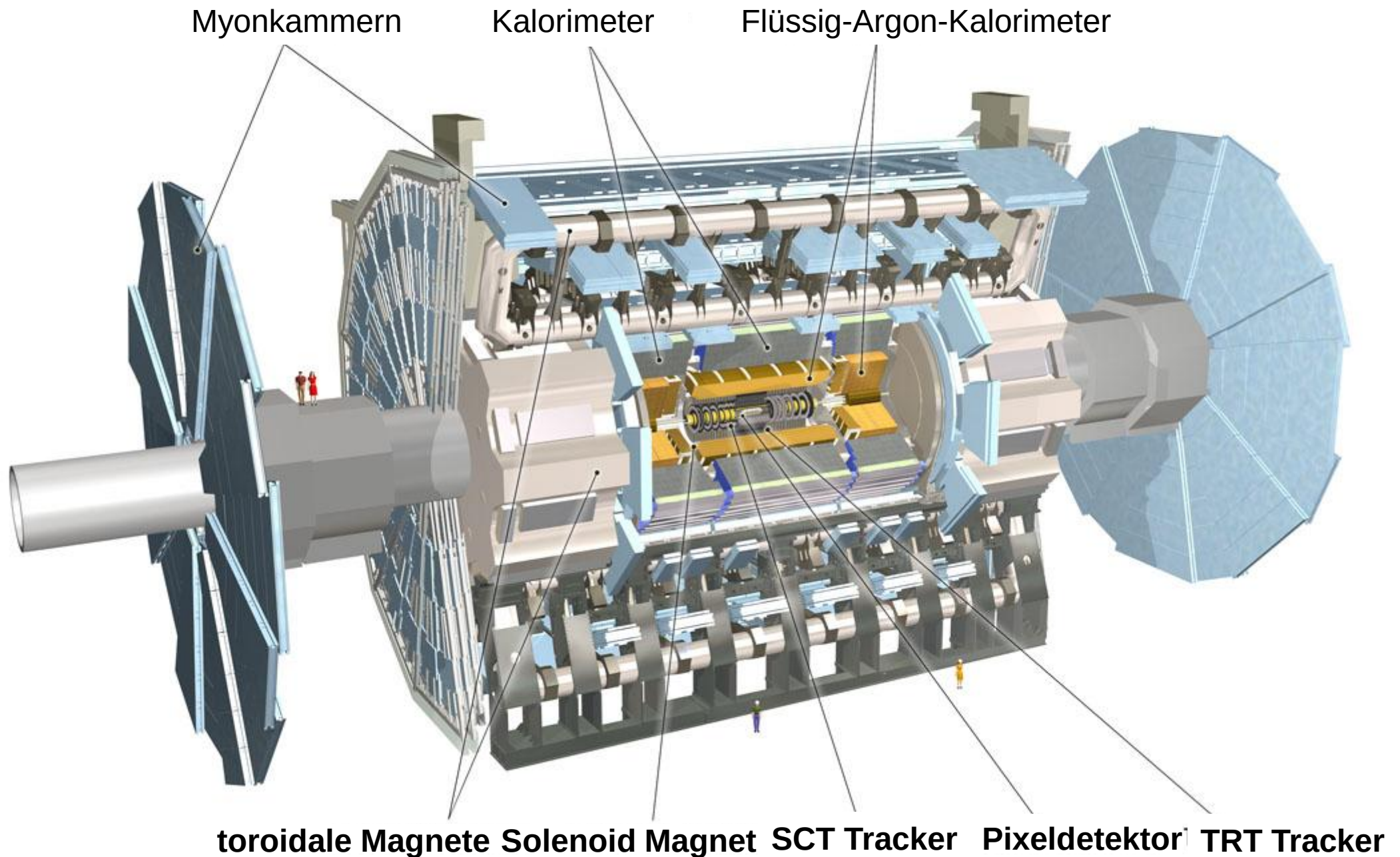
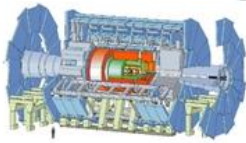
6.3 Moderne Teilchendetektoren



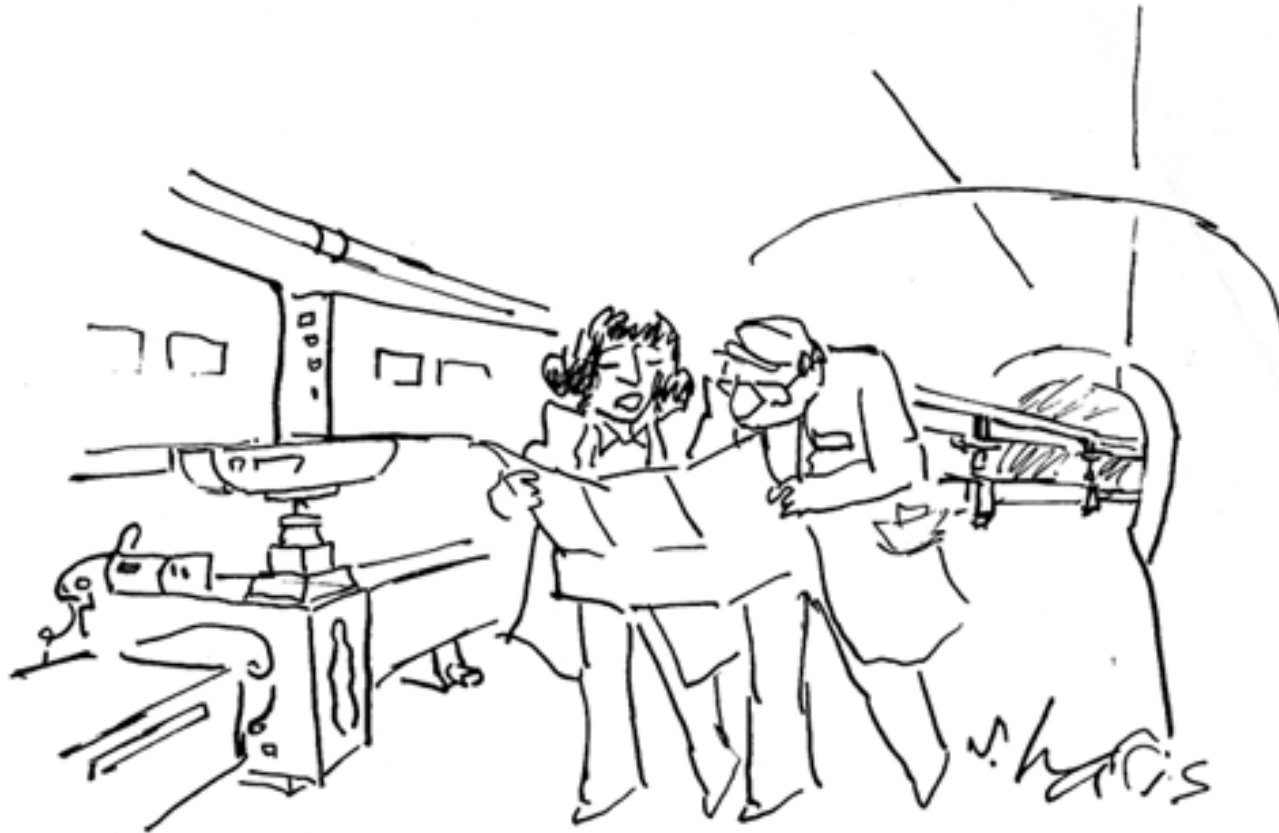
ATLAS am LHC



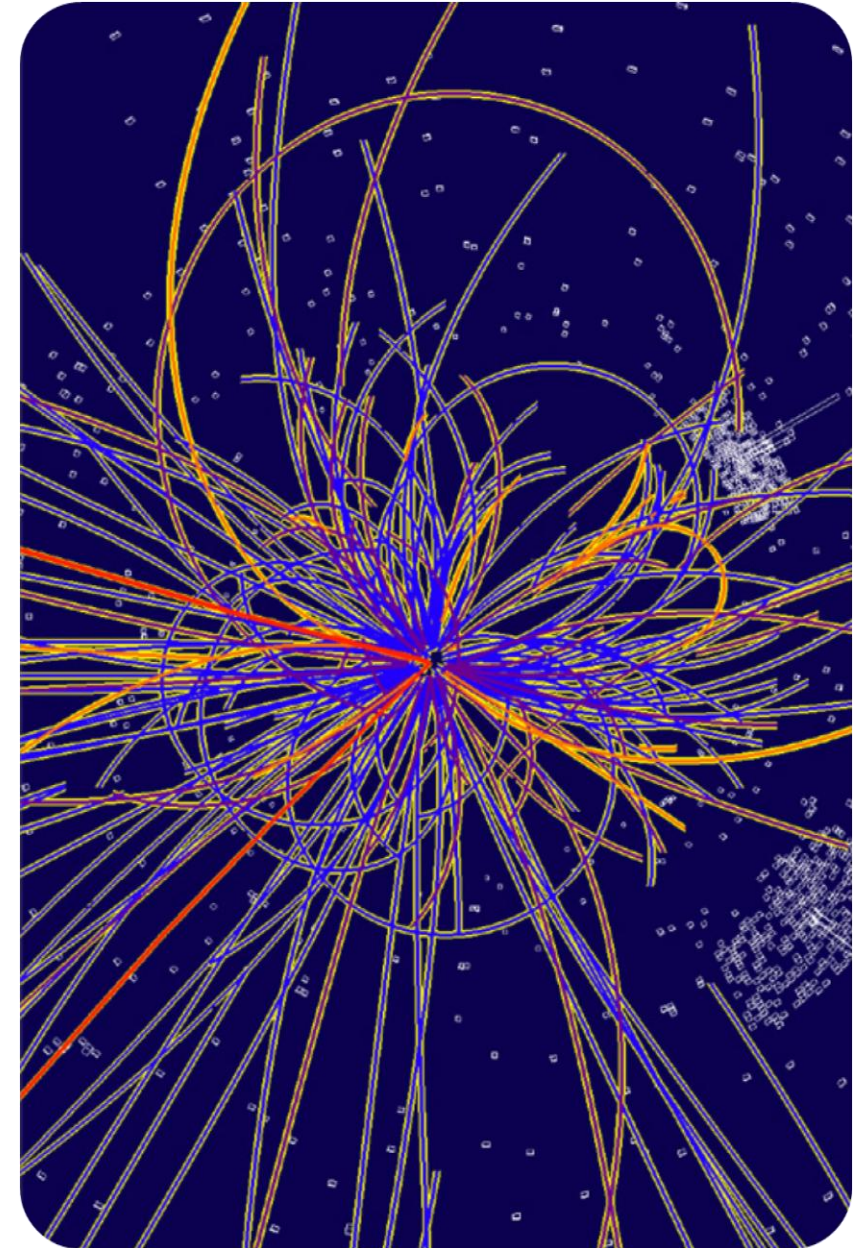
the **ATLAS Experiment**



Teilcheneigenschaften

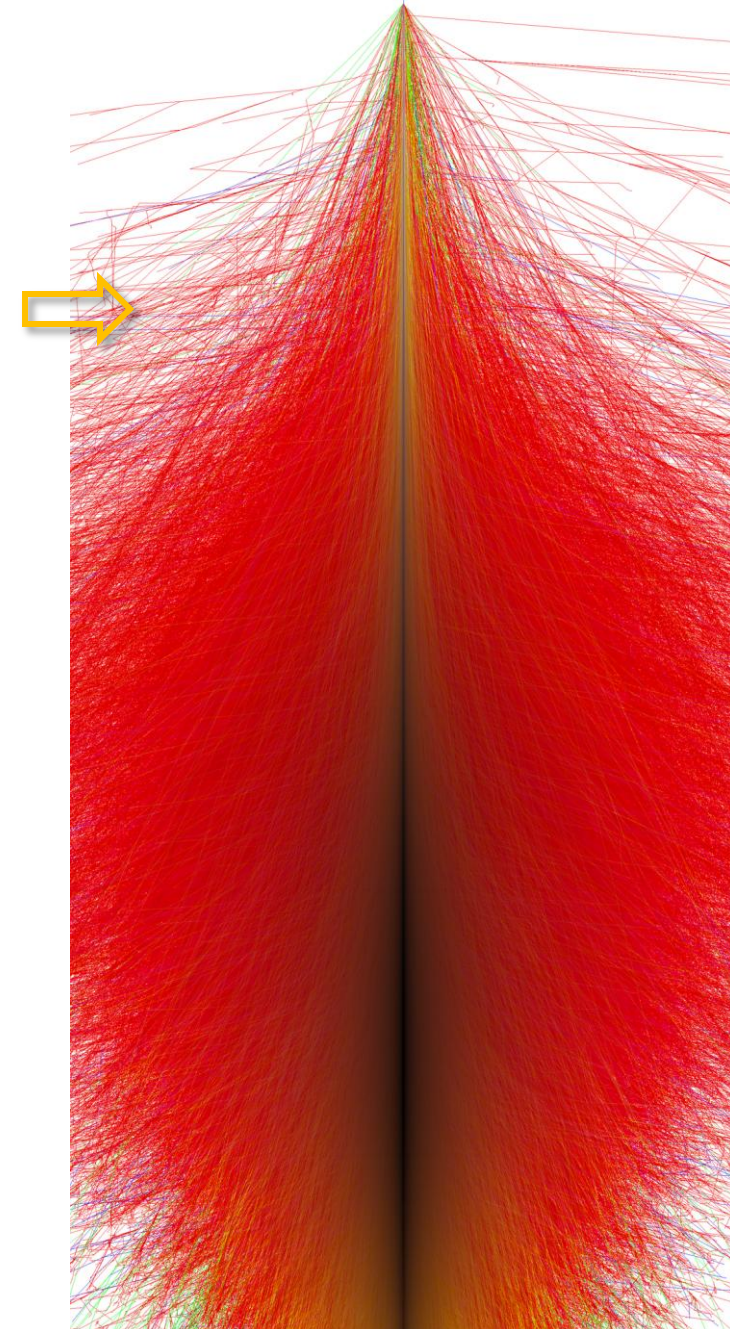
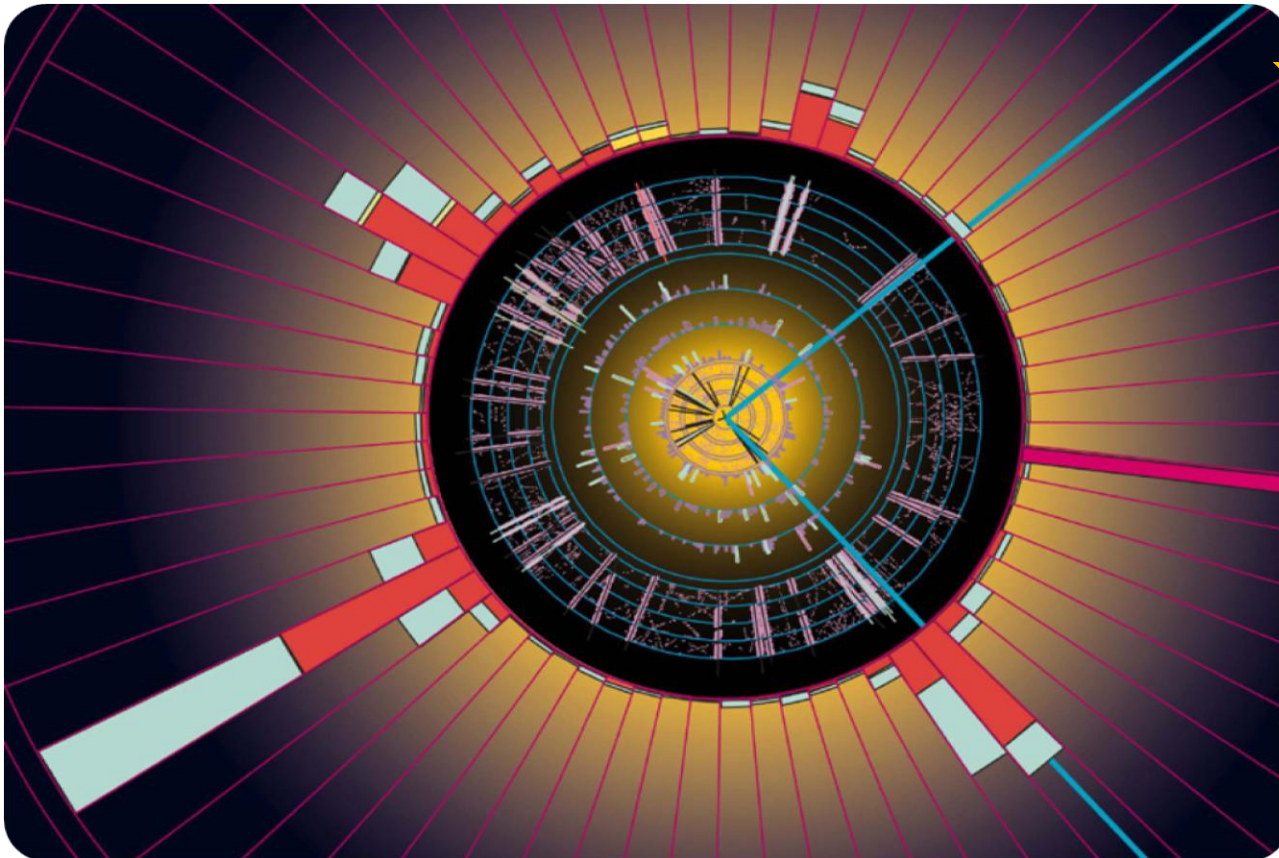


"WE'VE PROVEN, WITHOUT A DOUBT, THAT THIS PARTICLE HAS A NEGATIVE CHARGE. UNFORTUNATELY AN ACCELERATOR IN SWITZERLAND HAS PROVEN, WITHOUT A DOUBT, THAT IT HAS A POSITIVE CHARGE."

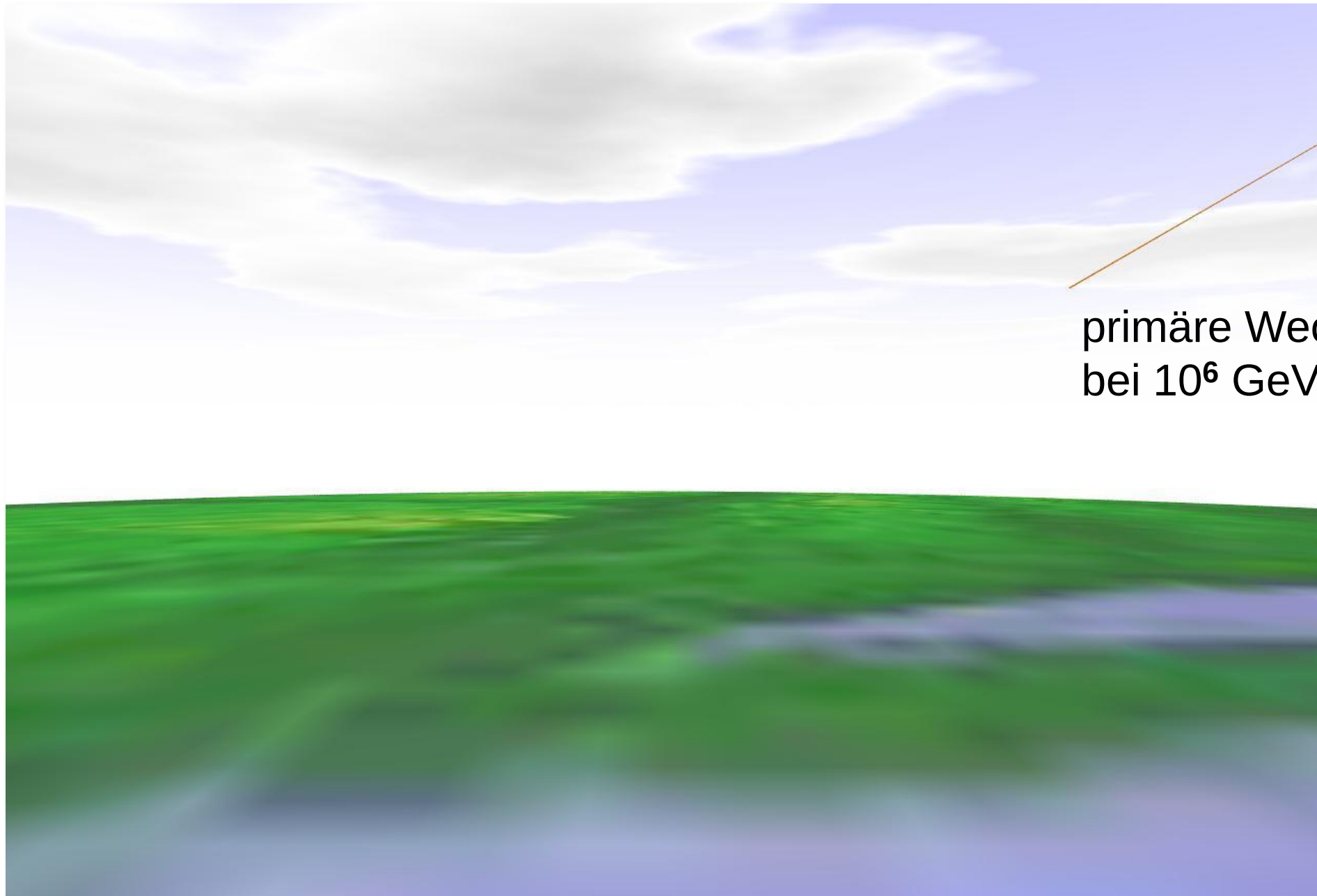


6.1 Wechselwirkung von Strahlung & Materie

- die **Wechselwirkung von Strahlung** (geladene & ungeladene Teilchen) **mit Materie** ist wichtig für das Verständnis & die Optimierung von modernen Detektorsystemen & Teilchen-Beschleunigern
↳ detaillierte Modellierung der Prozesse erforderlich

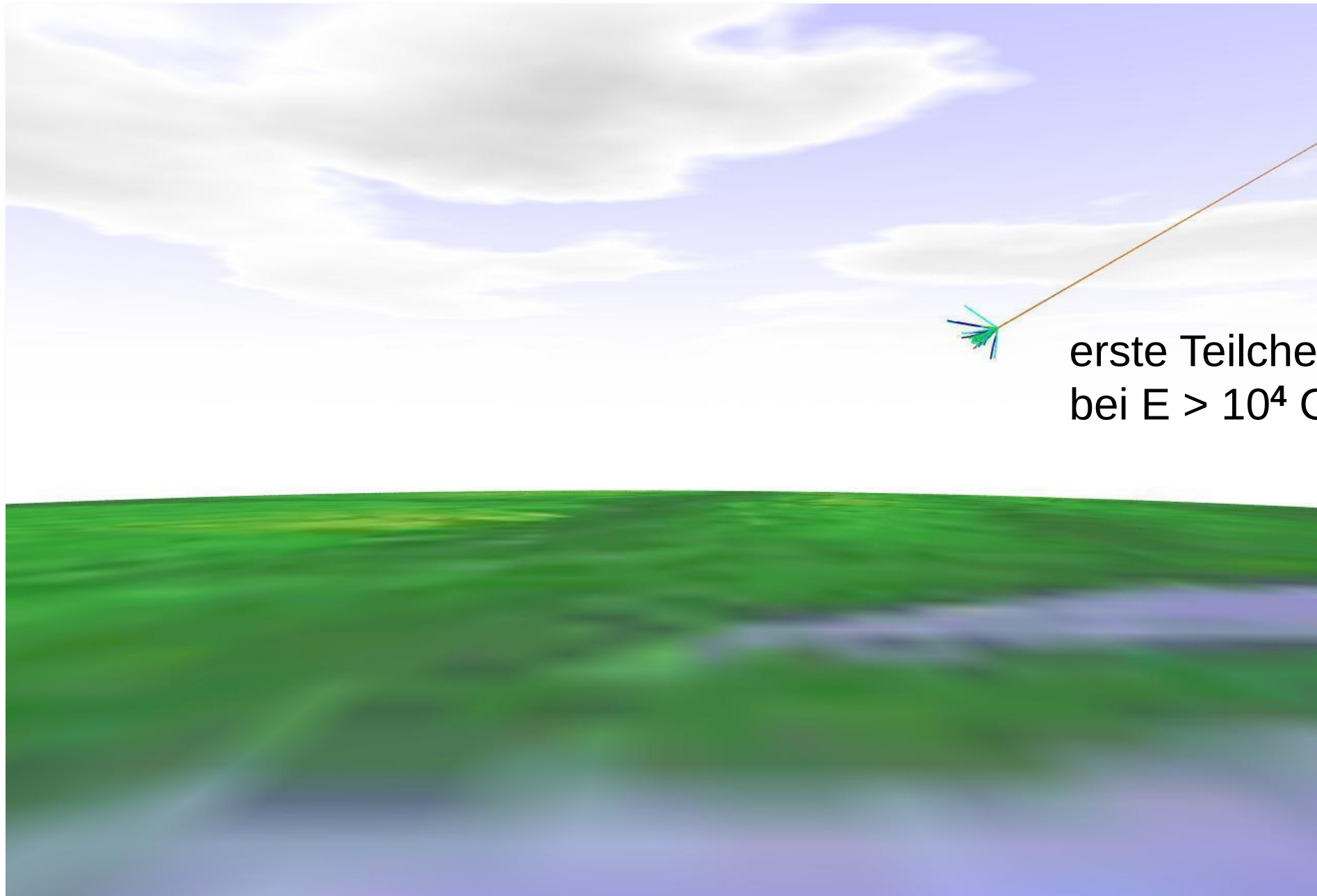


Schema eines Luftschauers



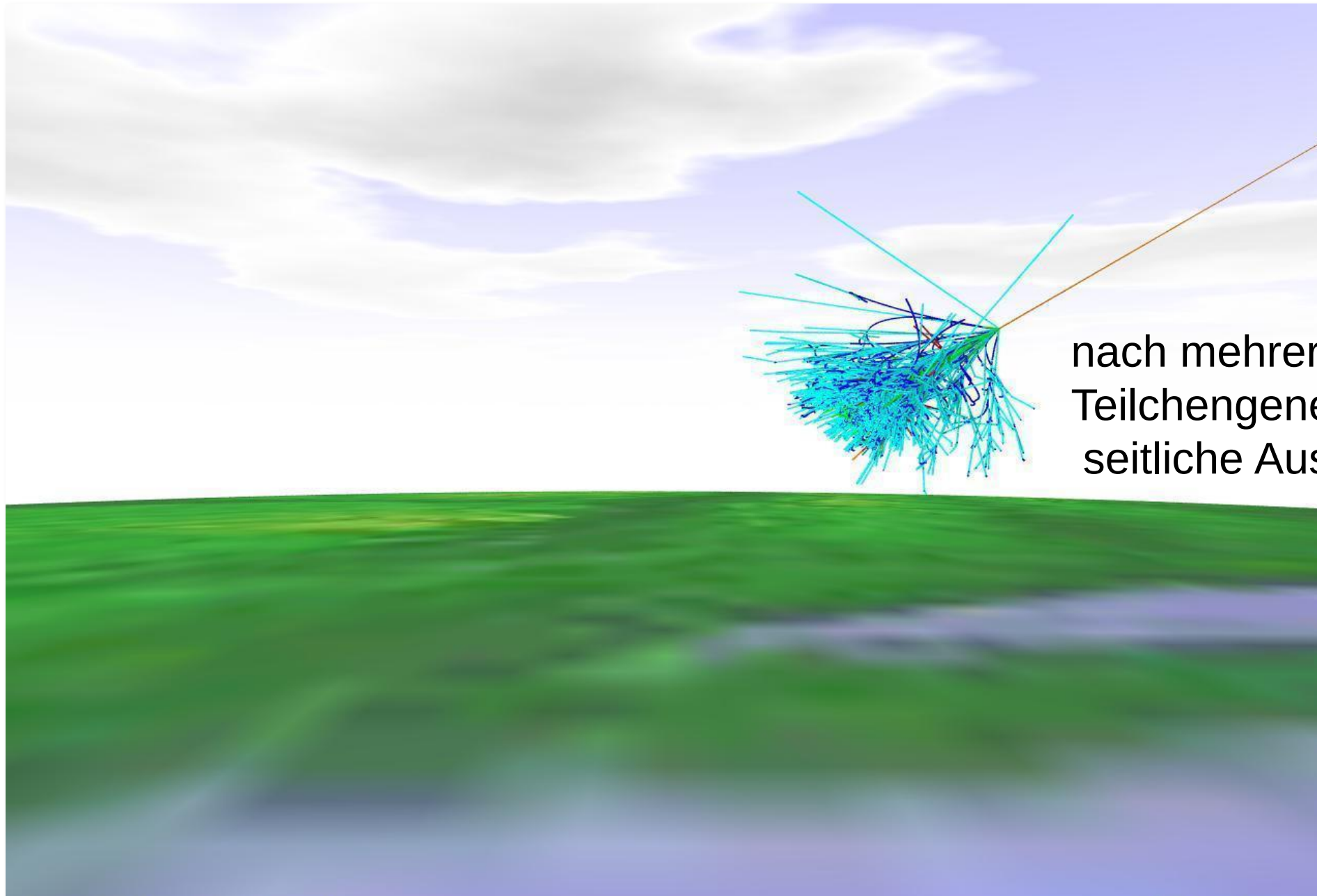
primäre Wechselwirkung
bei 10^6 GeV

Schema eines Luftschauers



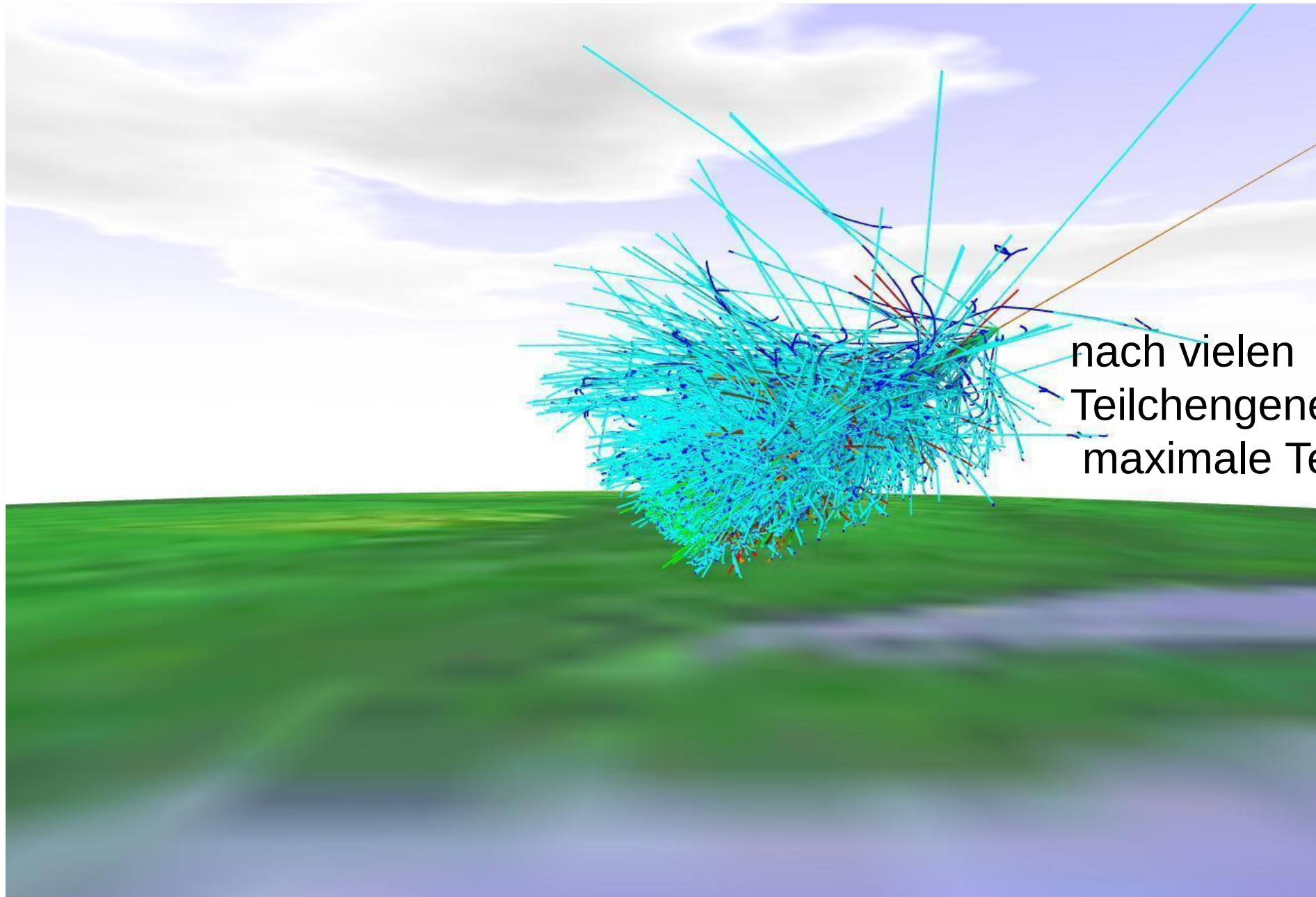
erste Teilchengenerationen
bei $E > 10^4$ GeV

Schema eines Luftschauers



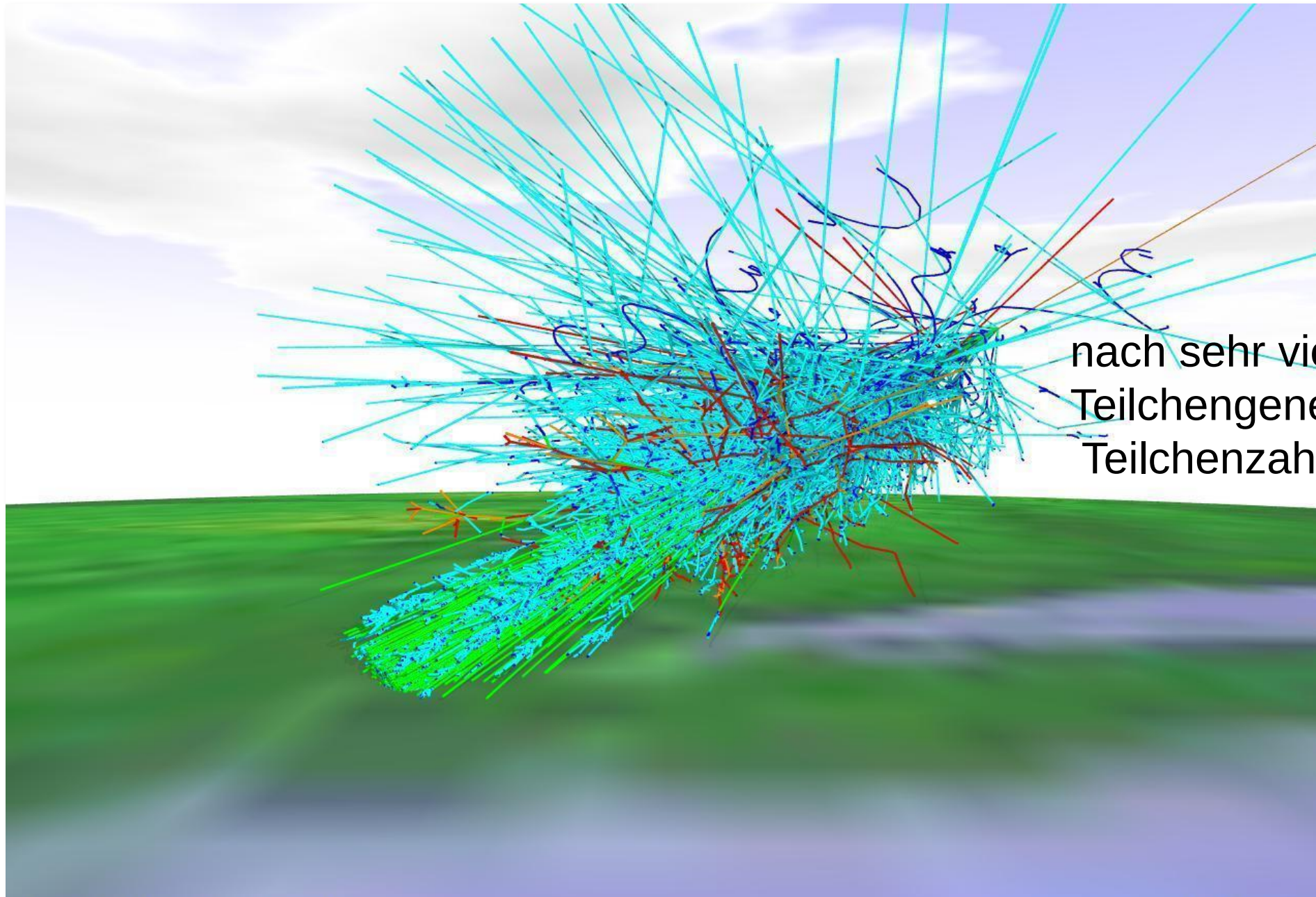
nach mehreren
Teilchengenerationen:
seitliche Ausbreitung

Schema eines Luftschauers



nach vielen
Teilchengenerationen:
maximale Teilchenzahl

Schema eines Luftschauers



nach sehr vielen
Teilchengenerationen:
Teilchenzahl nimmt ab

Wechselwirkung von Strahlung & Materie



- verschiedene Wechselwirkungseffekte dominieren je nach **Teilchenart, Energiebereich & Nachweismedium**

Teilchenart

geladene Teilchen ($z = \text{Ladung des Projektils}$)

α , e^+ , μ^- , ^{92+}U -Ion, Ω^{--} , p , π^- , ... (elektromagnet. Wechselwirkung dominant)

Beispiele: Ionisation, atomare Anregung, Cherenkov-Strahlung, ...

- **leichte Teilchen**: e^- , e^+ , ...
- **schwere Teilchen**: $\mu^\pm$, $\pi^\pm$, $\rho^\pm$, p , (c, b-Quarks), Schwerionen (^{92+}U), ...

ungeladene Teilchen ($z = 0$)

γ , n , ν , π^0 , ρ^0 , neutrale Atome, ...

Beispiele: Comptoneffekt, Photoeffekt, Streuung an Elektronen/Kernen

- **nur schwache Wechselwirkung**: Neutrinos
- **starke/elektromagnetische Wechselwirkung**: neutrale Pionen, ρ^0
- **nur elektromagnetische Wechselwirkung**: γ

- verschiedene Wechselwirkungseffekte dominieren je nach **Teilchenart, Energiebereich & Nachweismedium**

Energiebereich

- eV:** thermische Neutronen, Licht, Sekundär-Elektronen aus Ionisation
- keV:** Elektronen aus dem β -Zerfall, Röntgenstrahlung
- MeV:** Alpha-Teilchen, γ -Strahlung von Kernen, Zyklotrone
- GeV:** Teilchen aus Synchrotronen
- TeV:** Teilchen an Hochenergiebeschleunigern LHC, Tevatron, TeV- γ 's
- >TeV:** Teilchen aus kosm. Beschleunigern: μ -Quasare, SMBH, SNR

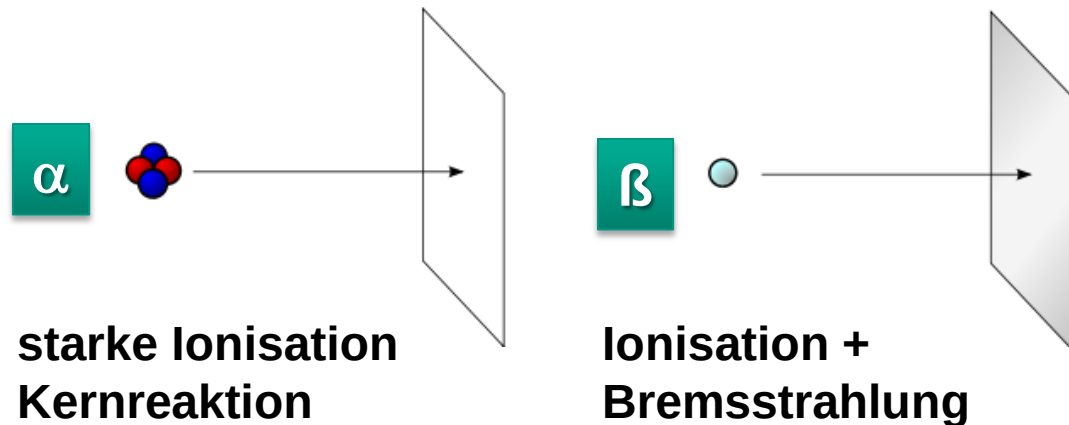
Nachweismedium

Eigenschaften des Mediums:

- Kernladung, Dichte, Temperatur (Phase: kondensiert, gasförmig)
- Magnetfeld, elektrisches Potenzial, supraleitend, normal/halbleitend

geladene & neutrale Teilchen

geladene Teilchen

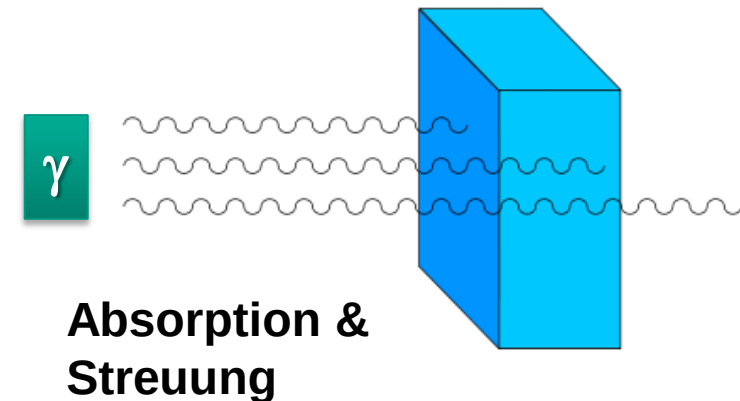


Prozesse

Ionisation: dominanter Prozess
Absorption: selten (nur bei Kernreaktion)
Streuung: Molieretheorie (kleines $d\theta$)
Kaskade: meist nur bei Elektronen

definierte Reichweite

neutrale Teilchen



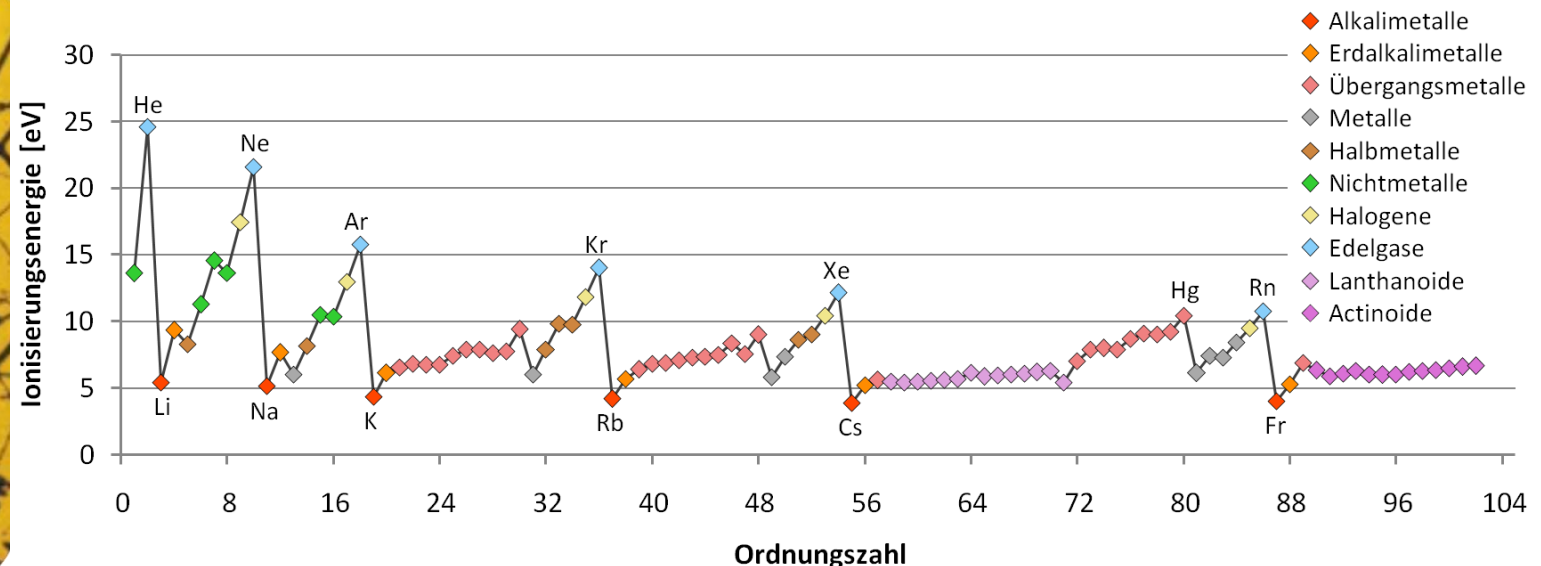
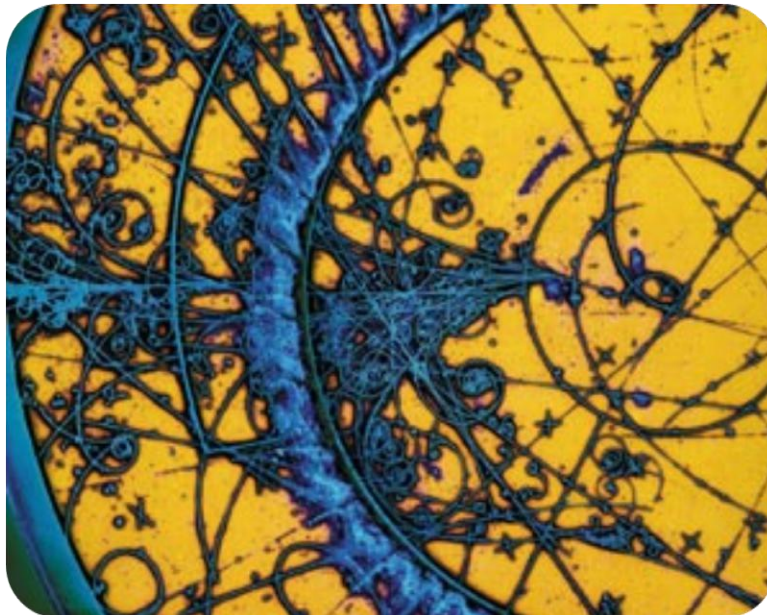
Prozesse

Absorption: Photoeffekt
Streuung: Comptoneffekt
Kaskade: Paarerzeugung

exponentielle Abschwächung
keine definierte Reichweite

■ Ionisationsprozesse

- **Prozess:** inelastische Teilchenstöße mit den Hüllenelektronen
- **Resultat:** Ionisation & Anregung der Atomhülle (Ionisationspotenzial)
- **Teilchenart:** dominiert bei allen schweren Teilchen (Myonen, Protonen, ...)
⇒ spezifischer Energieverlust dE/dx eines Teilchens
- **Nachweis:** Drift der Ladungsträger (Elektronen & Ionen) zu Elektroden, Drähten, Erzeugung von Gasbläschen, ...
- **Physik:** Spurrekonstruktion, Reichweite, Ereignistopologie

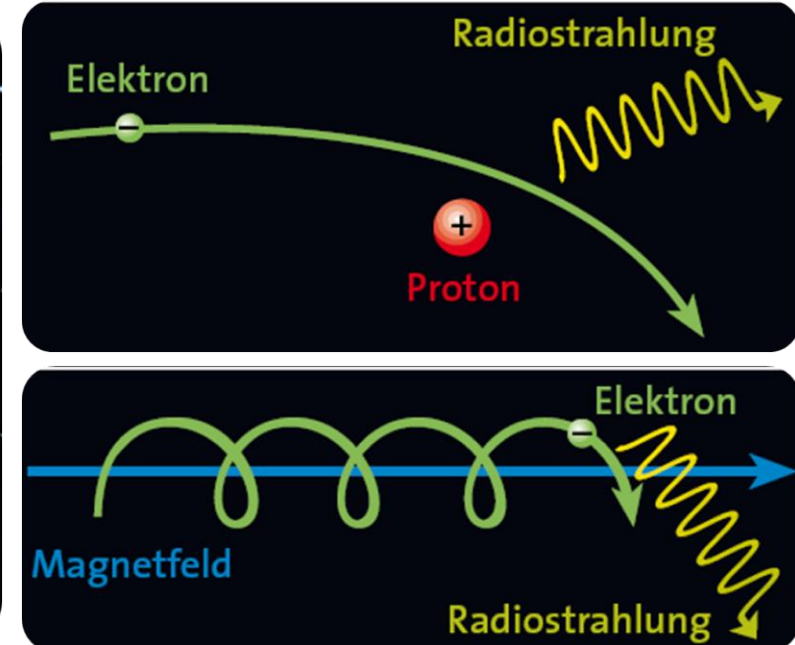
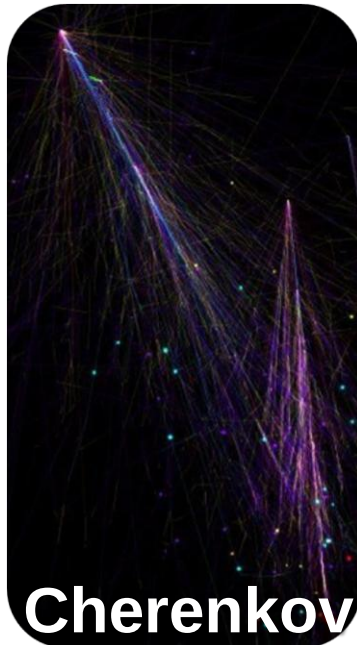


Wechselwirkung von geladenen Teilchen



■ Strahlungsverluste

- **physikalischer Prozess:** Wechselwirkung mit elektromagnet. Feldern, Medium
- **Resultat:** Emission von elektromagnetischer Strahlung (μeV – GeV)
 - ⇒ Brems-, Synchrotron-, Cherenkov- & Übergangs- Strahlung
- **Teilchenart:** dominiert bei leichten Teilchen (e^+ & e^- bei hohen Energien)
- **Nachweis:** abhängig von λ : Radio-, optischer, Röntgen-, Gamma-Bereich
- **Physik:** Energiespektrum der e^+/e^- , Magnetfelder



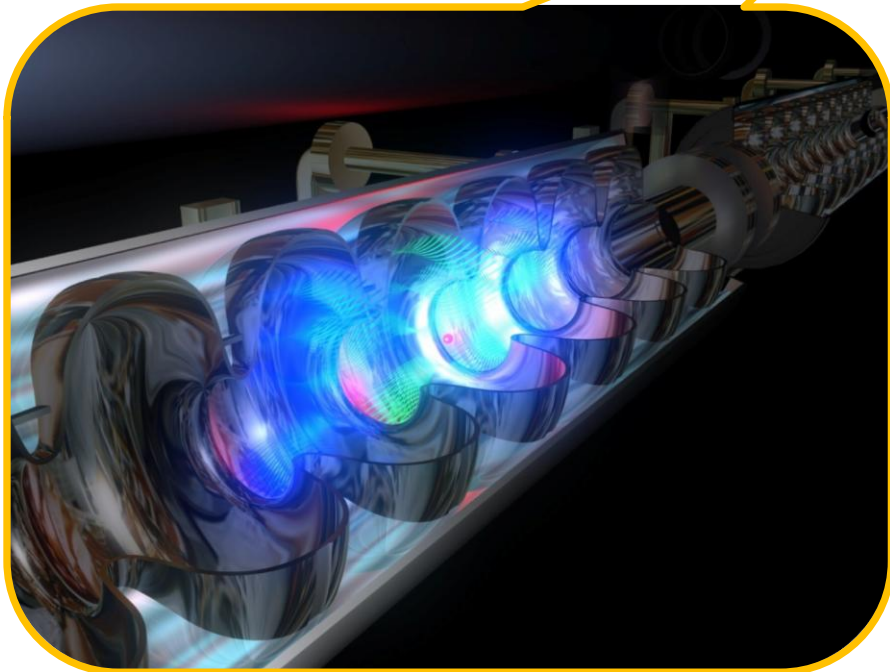
Wechselwirkung von geladenen Teilchen

■ **Strahlungsverluste: Synchrotronstrahlungsquellen**

- Beschleuniger zum Erzeugen von Synchrotronstrahlung



ANKA



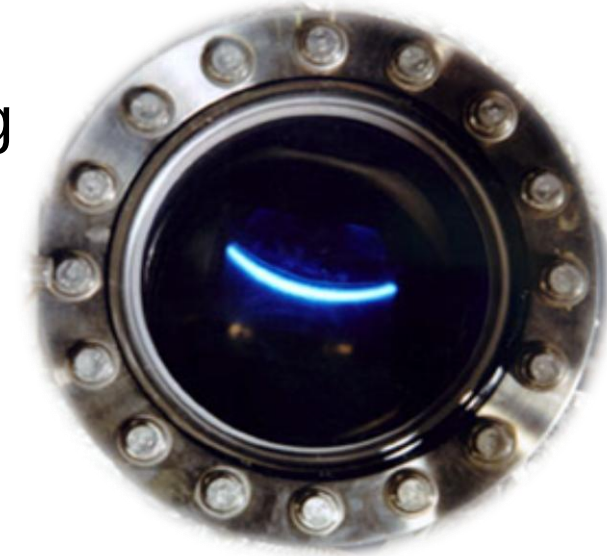
Elektronenquelle
und Beschleuniger

Magnetstruktur

Elektronenfalle

Lichtbündel

Experiment



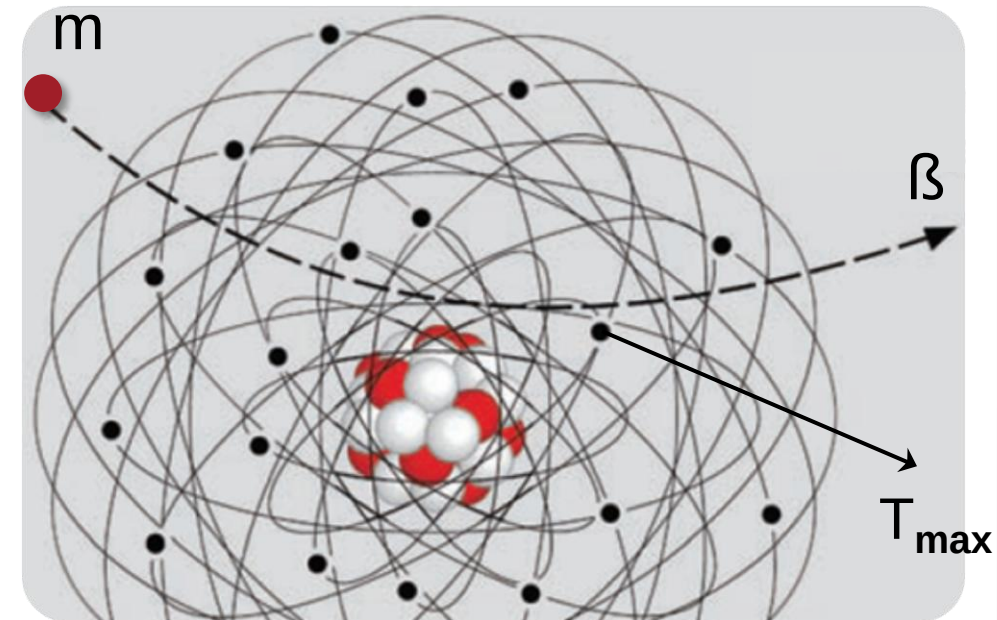
- geladene Teilchen ionisieren ein Nachweismedium durch **inelastische Stöße** mit den Hüllenelektronen (vorwiegend Einfachionisation, z.B. Ar^+)
hoher Streuquerschnitt: $\sigma_{\text{inelast.}} \sim 10^{-17} - 10^{-16} \text{ cm}^2 \rightarrow$ zahlreiche Stöße
- **maximaler Energieübertrag** T_{max} an ruhendes Elektron mit m_e durch ein einlaufendes Teilchen mit Ruhemasse m und Geschwindigkeit β :

$$T_{\text{max}} = \frac{2m_e \cdot \beta^2 \cdot \gamma^2 \cdot m^2}{m^2 + m_e^2 + 2\gamma \cdot m \cdot m_e}$$



$$T_{\text{max}} = 2m_e \cdot \beta^2 \cdot \gamma^2 \quad \text{für alle schweren Primärteilchen}$$

- in hinreichend dicken Absorbern wird ein Großteil der Teilchen-Primärenergie in ein Ionisationssignal umgewandelt



■ Bethe-Bloch Gleichung

mittlerer Energieverlust dE/dx von geladenen ($q = z$) Teilchen mit $\beta = v/c$

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \cdot r_e^2 \cdot N_0 \cdot m_e c^2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

$= 0.307 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$



Target:
Kernladung **Z**
Atomgewicht **A**



I = effektives Ionisationspotenzial
des Target-Atoms, experimentell
beobachtet: $I \sim Z \cdot 12 \text{ eV}$ (große Z)

δ : Polarisation
des Mediums

■ **Targetparameter:** Kernladung **Z**, Kernmasse **A**,
effektives Ionisations-Potenzial **I**

Teilchenparameter: Geschwindigkeit **β** , Ladung **z**

Konstanten: klass. Elektronenradius **r_e**
Elektronmasse **m_e** , Avogadrozahl **N_0**



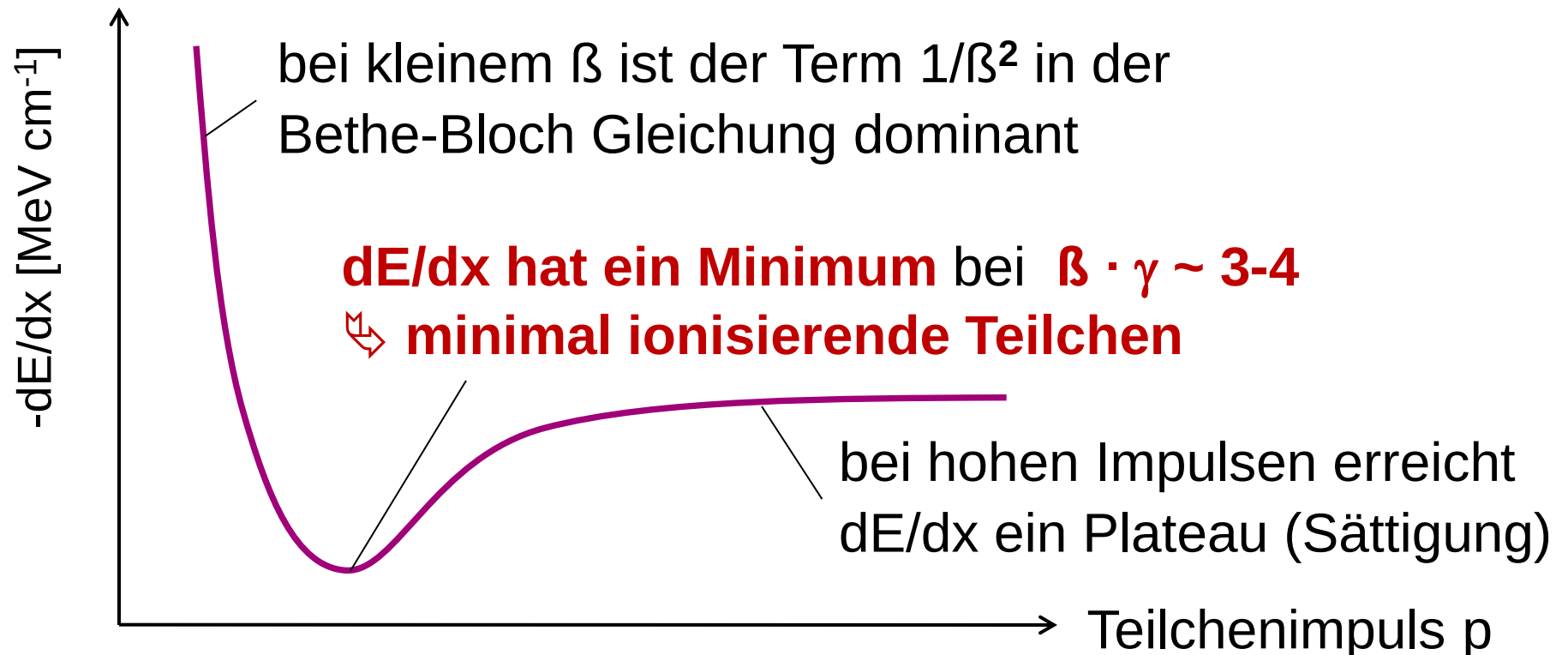
Hans Bethe



Felix Bloch

- **Anwendungsbereich von Bethe-Bloch:** Teilchengeschwindigkeit $\beta >$ Geschwindigkeit der Hüllenelektronen der Targetatome ($v \sim Z \cdot \alpha$)

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \cdot r_e^2 \cdot N_0 \cdot m_e c^2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$



Ionisationsverluste: Bethe-Bloch Kurve

- **der Energieverlust eines Teilchens ist unabhängig von seiner Masse!**

dE/dx nur abhängig von der Teilchengeschwindigkeit β , typischerweise wird dE/dx aber als Funktion des Impulses p dargestellt, wobei gilt:

$$p = \beta \cdot \gamma \cdot M \cdot c$$

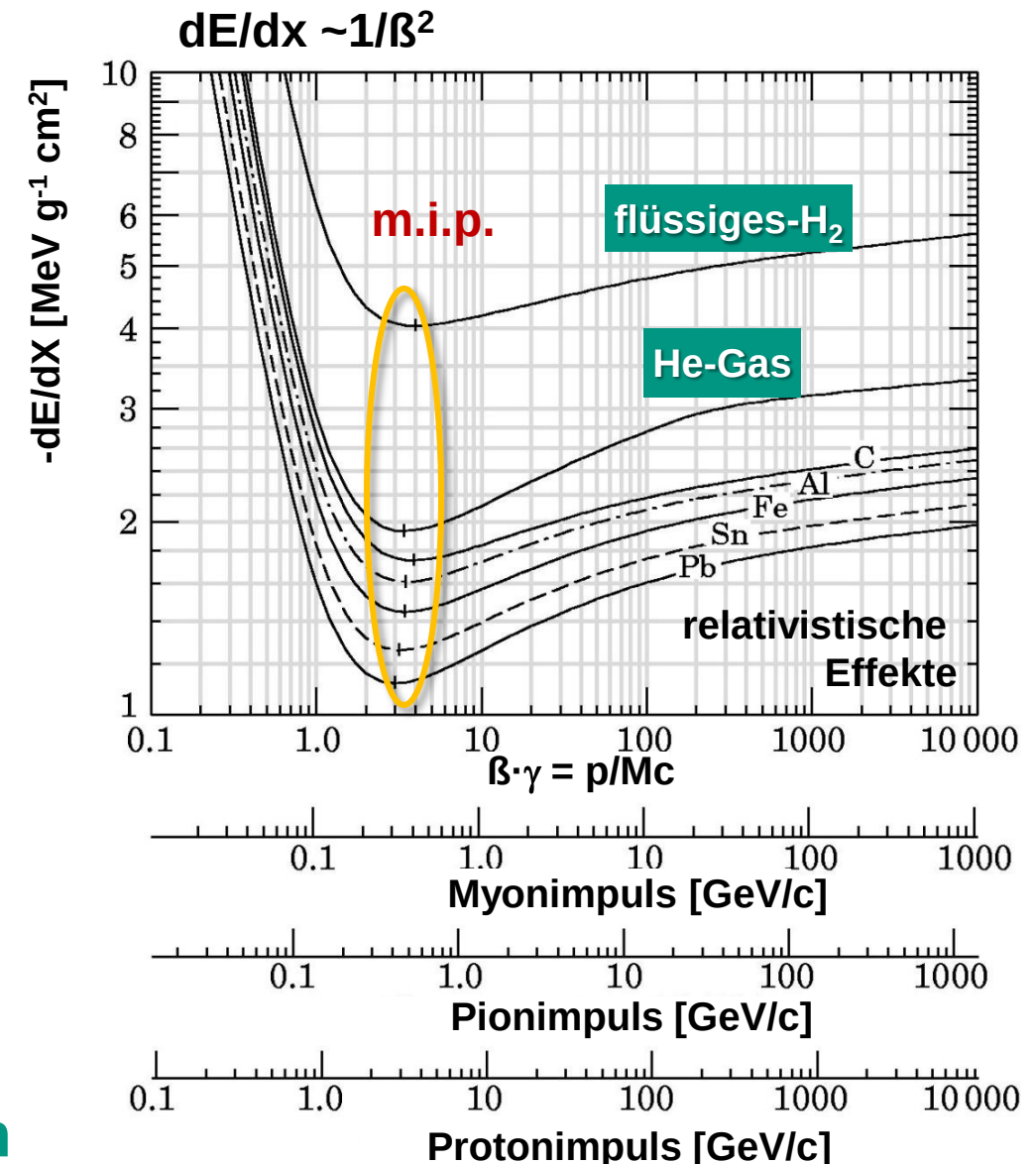
- im Bereich minimaler Ionisation gilt für **m.i.p. = minimum ionizing particles**

$$dE/dX \sim 2 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$$

d.h. bei einer Targetdichte $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$

$$dE/dx \sim 2 \text{ MeV/cm}$$

wichtiges Beispiel: kosmische Myonen



■ Massenbelegung X

bei der Diskussion von Energieverlustprozessen wird statt der Schichtdicke x des Materials [cm] oft auch die **Massenbelegung $X = \rho \cdot x$** in **[g/cm²]** mit der stoff-spezifischen Dichte ρ in [g/cm³] benutzt

■ Bremsvermögen dE/dX

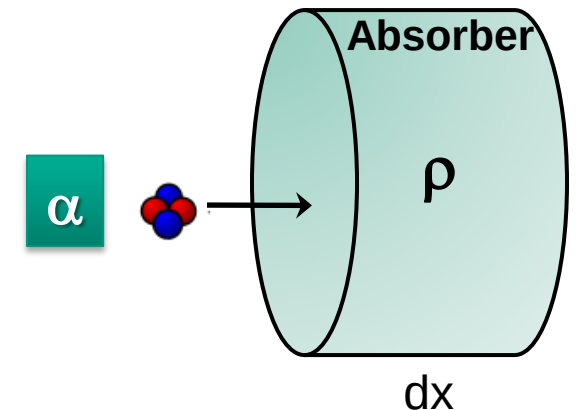
mit der differentiellen Relation **$dX = \rho \cdot dx$** ergibt sich für das **Bremsvermögen dE/dX** in **[MeV g⁻¹ cm²]**:

$$\boxed{\frac{dE}{dX} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx}}$$

Bremsvermögen dE/dX in [MeV g⁻¹ cm²]
Energieverlust dE/dx in [MeV cm⁻¹]

Bremsvermögen dE/dX ist für alle Medien (außer H) nahezu identisch, da in BB-Gl. der Term $Z/A \sim \text{const.}$

- der **Ionisationsverlust dE/dx** von Teilchen kann auch zur **Abschirmung** benutzt werden (Bsp: γ -Strahlen)

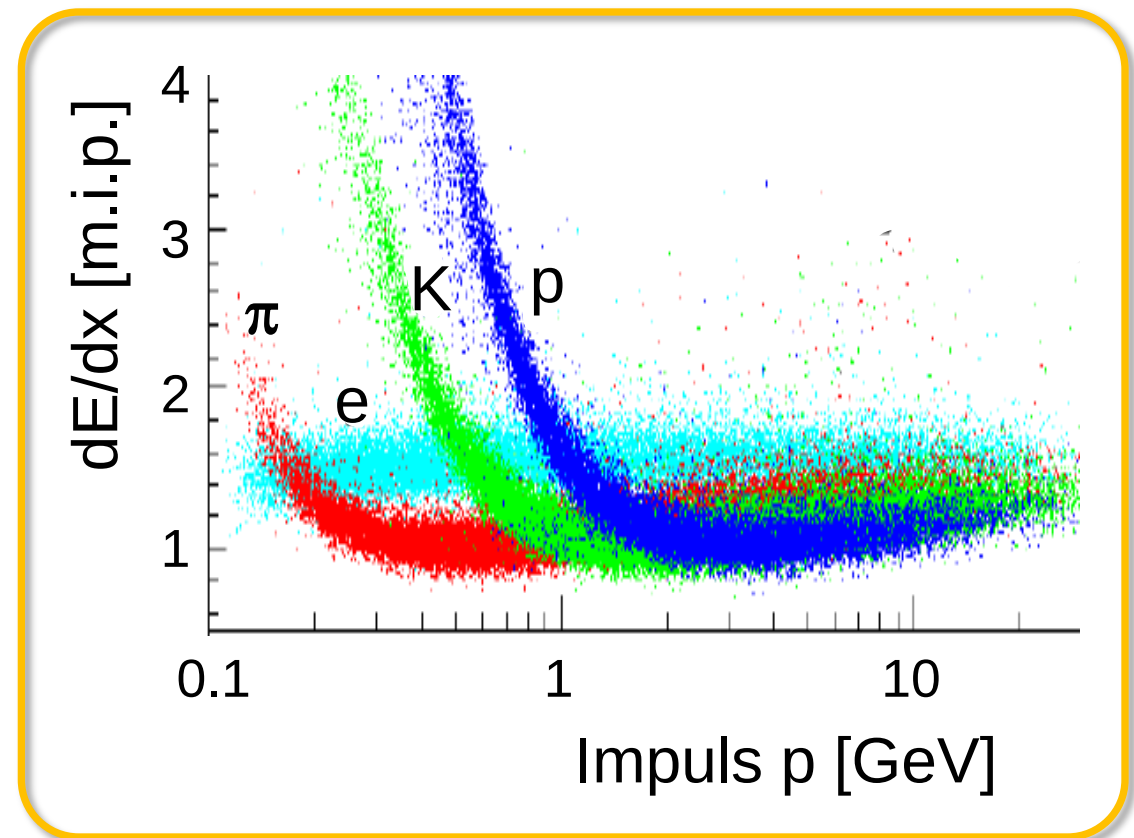


- der Energieverlust dE/dx ist ein wichtiges Mittel zur **Teilchenidentifikation** (**Particle Identification PID**), wenn mehrere Teilchenarten vorliegen:
 - dE/dx entspricht mit Bethe-Bloch implizit einer Messung des Parameters β
 - mit der Definition des relativistischen Impulses p

$$p = \beta \cdot \gamma \cdot M \cdot c = \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot M \cdot c$$

ergibt sich nach einer von dE/dx unabhängigen Messung des **Impulses p** die **Teilchenmasse M** und damit die Identifikation des untersuchten Teilchens

- der Energieverlust dE/dx eines Teilchens ist immer statistischen Fluktuationen unterworfen (PID!)

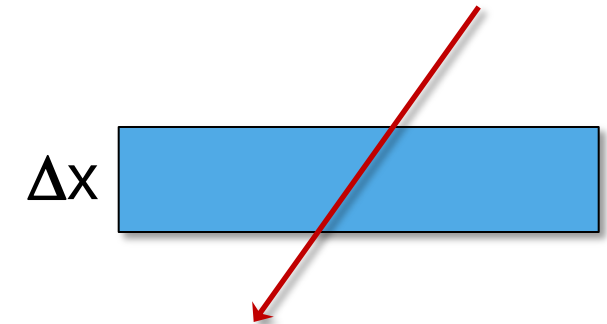


Energieverlustverteilung: Landaukurve

■ Bethe-Bloch Formel:

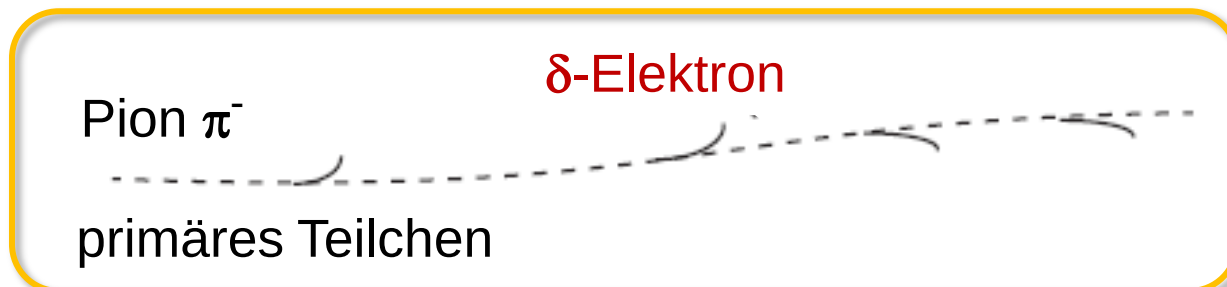
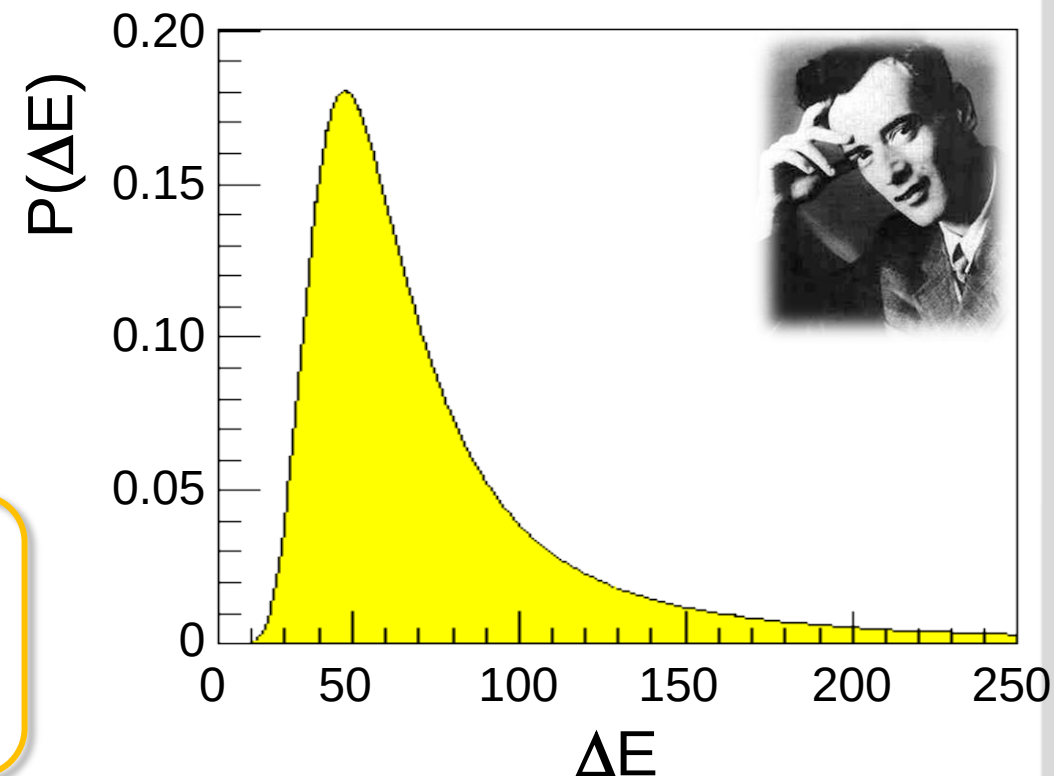
- beschreibt den **mittleren Energieverlust $\langle E \rangle$ eines Teilchens**
- inelastische Streuungen an Hüllenelektronen sind statistische Prozesse: zentrale Stöße (großes ΔE) sind seltener als periphere Stöße (kleines ΔE)

Teilchen



■ Landau-Vavilov Verteilung:

- beschreibt **Energieverlustverteilung für einen dünnen Absorber**
- **asymmetrische Verteilung** mit einem Ausläufer hin zu hohen dE/dx Werten
- Asymmetrie durch Stöße mit kleinem Stoßparameter („ **δ -Elektronen**“)



■ Landau-Vavilov Verteilung:

- eine analytische Näherung der Landau-Vavilov-Verteilung ergibt sich durch die **Moyal-Funktion** $X(\lambda)$

$$X(\lambda) = a \cdot e^{-\frac{1}{2}(\lambda - e^{-\lambda})}$$

a = Höhe
b = Breite

Energieparameter $\lambda = (\Delta E - \Delta E_{mp}) / b$
 ΔE_{mp} = wahrscheinlichster
Energieverlust

- **Standardabweichung** σ der
Energieverlustverteilung
(falls $13.3 \cdot \beta^4 \cdot \gamma^2 \ll \Delta x$):

$$\sigma [MeV] \approx \gamma \cdot \sqrt{0.07 \cdot \Delta x [g \cdot cm^{-2}]}$$

