

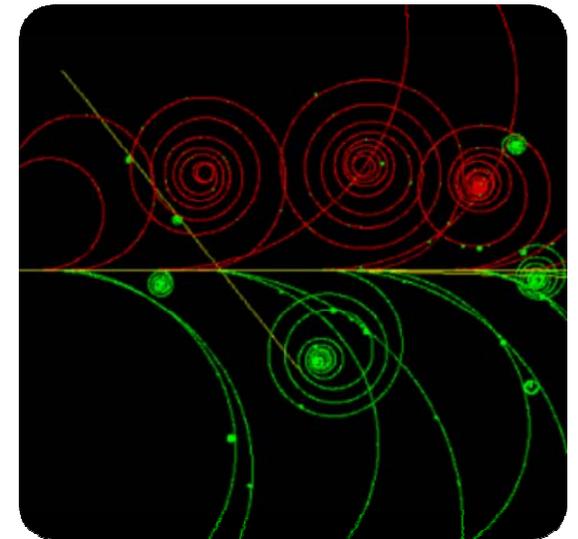
Kerne und Teilchen

Moderne Physik III

Vorlesung # 11

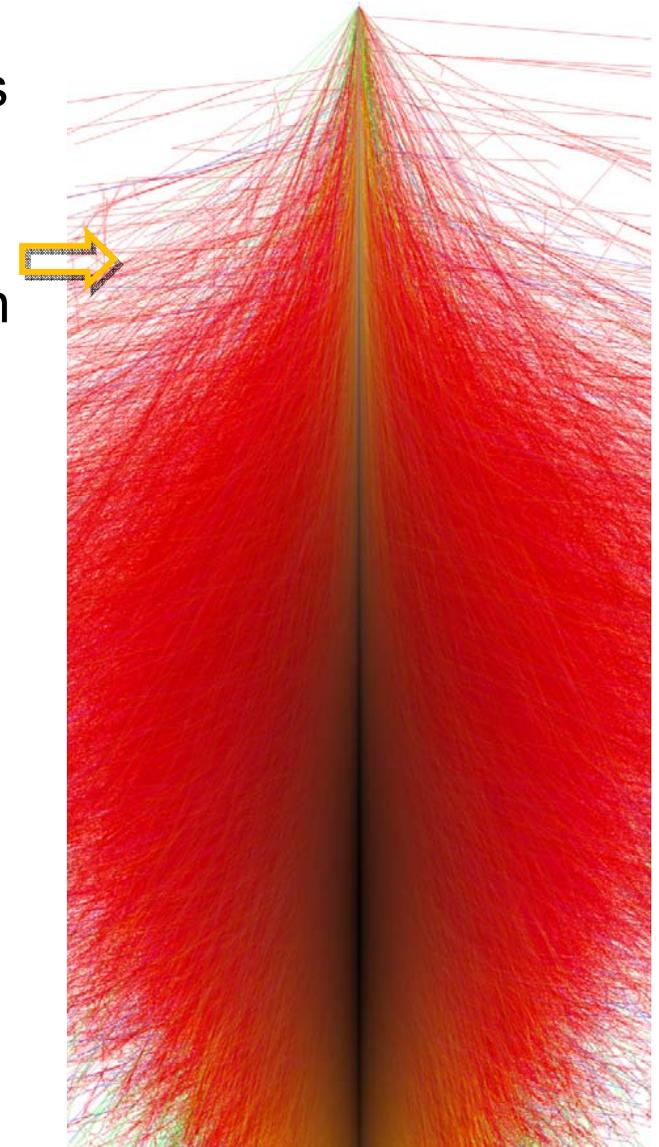
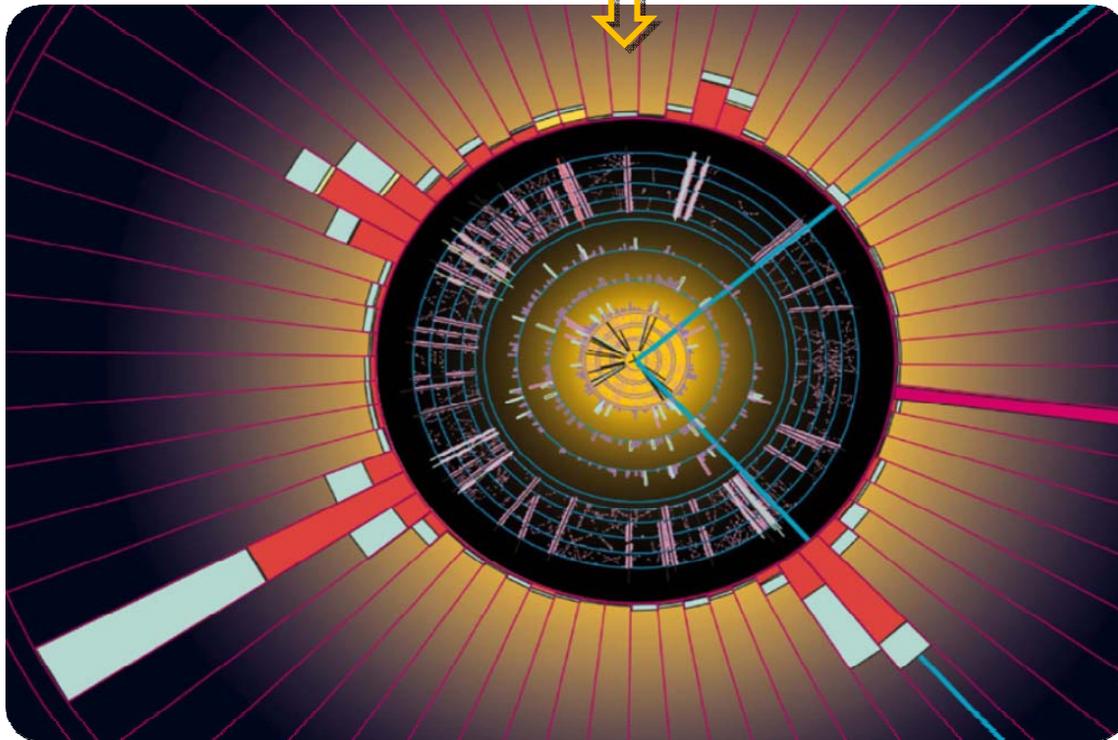
5. Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

- Bethe-Bloch: Ionisationsverluste
- radiative Prozesse leichter Teilchen
- Landau-Vavilov Verteilung

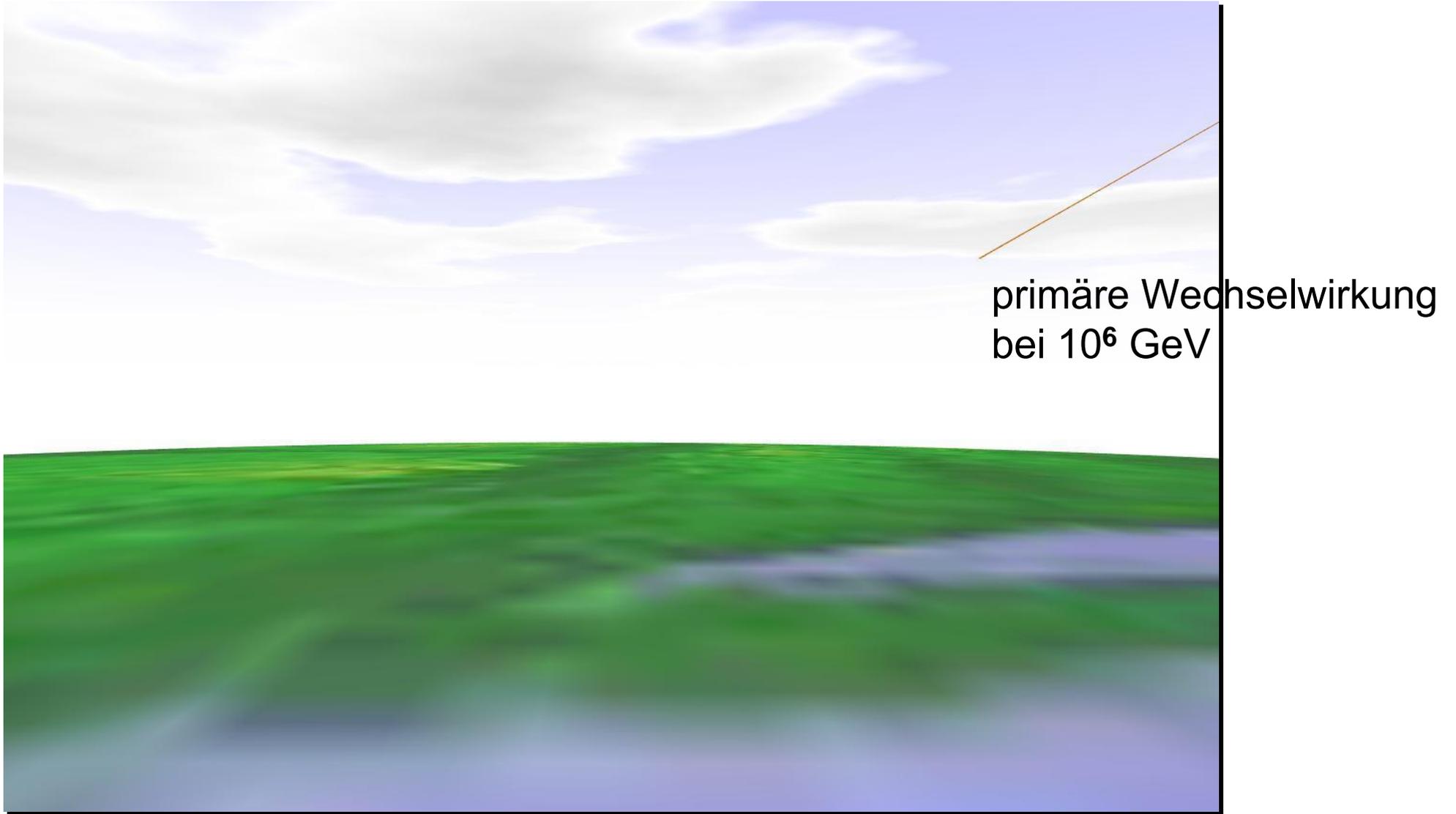


5. Wechselwirkung von Strahlung & Materie

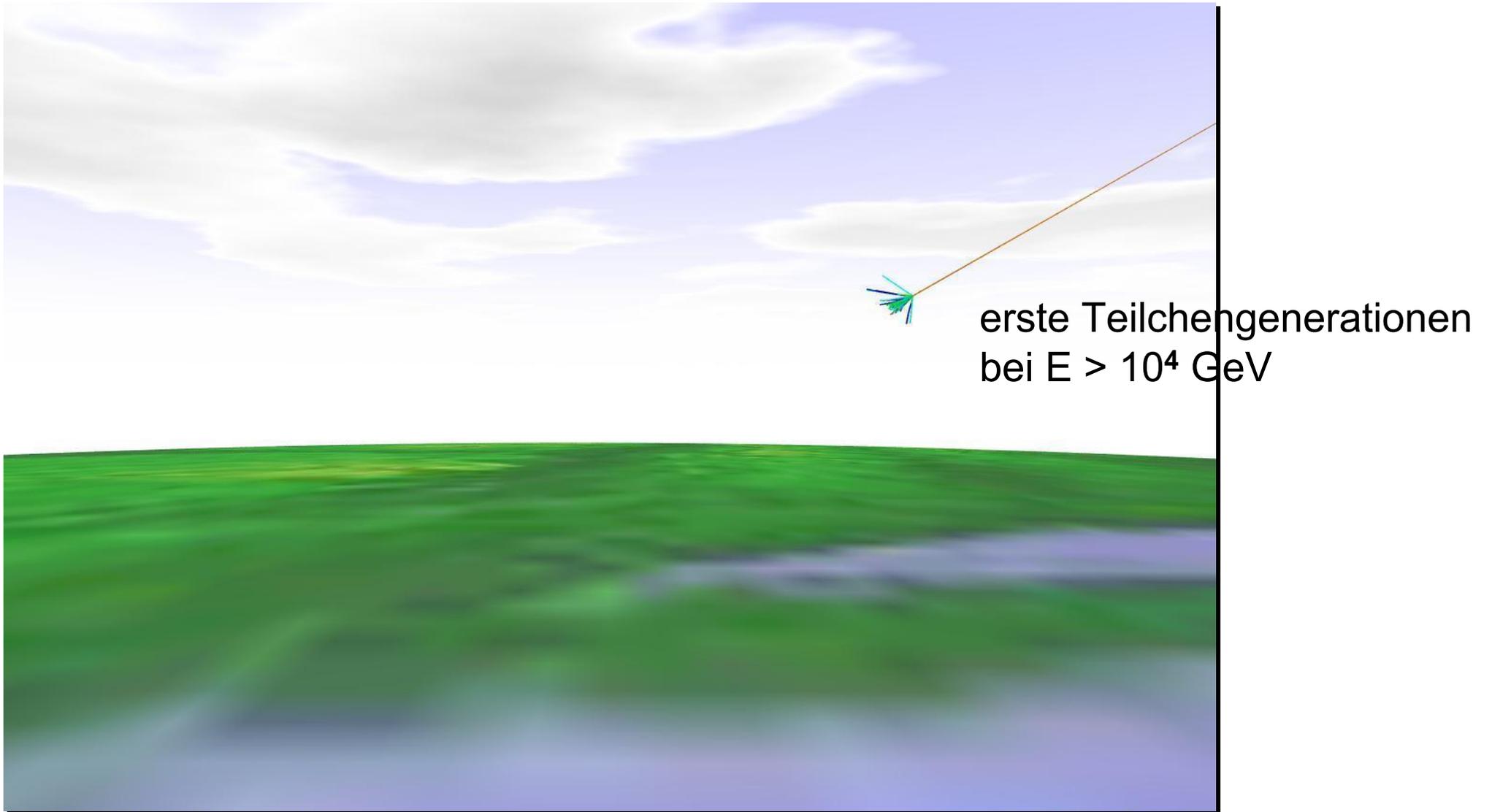
- Die **Wechselwirkung von Strahlung** (geladene & ungeladene Teilchen) **mit Materie** ist wichtig für das Verständnis & die Optimierung von modernen Detektorsystemen & Teilchen-Beschleunigern
 - ↪ detaillierte Modellierung der Prozesse erforderlich



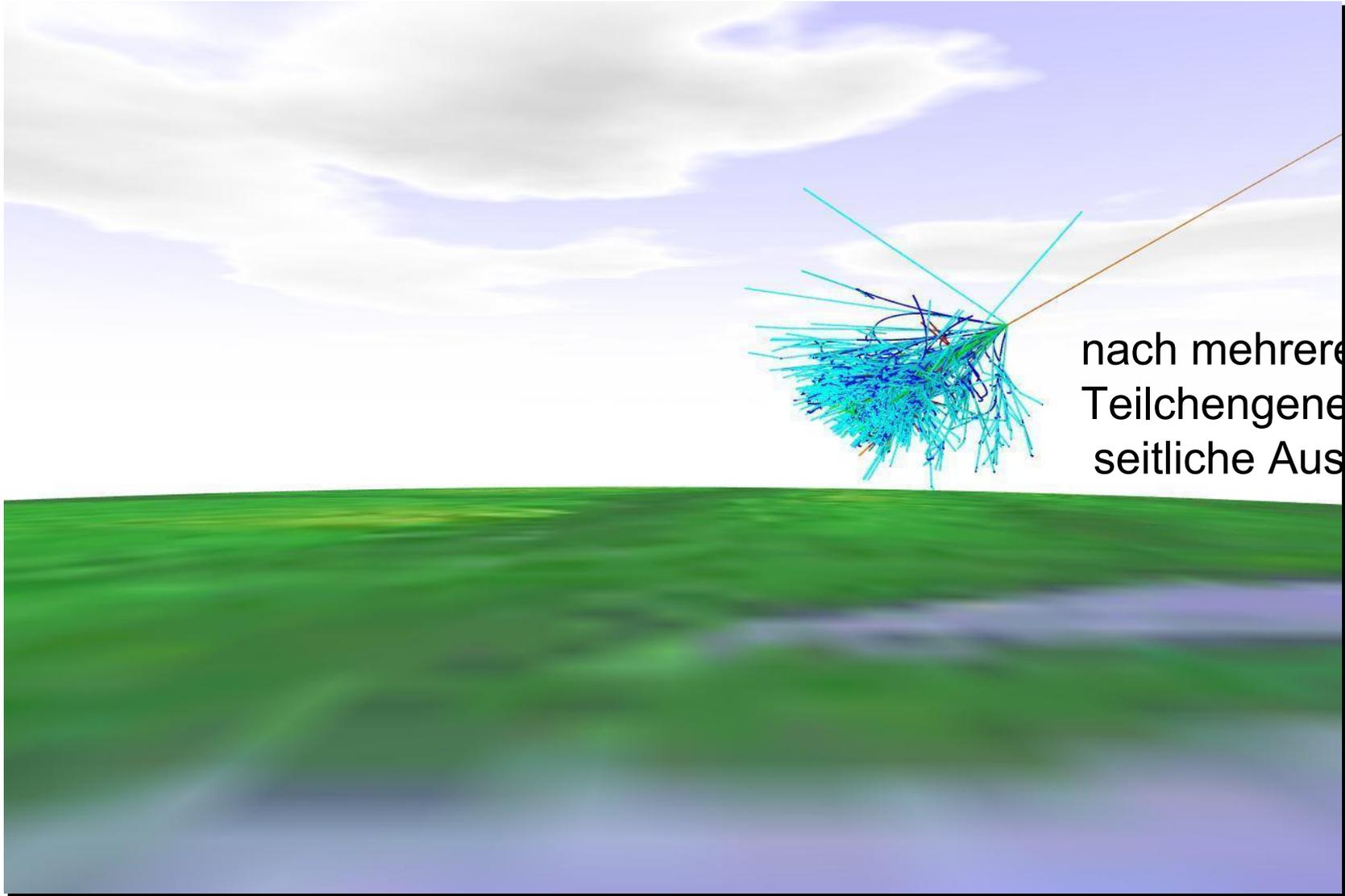
Schema eines Luftschauers



Schema eines Luftschauers

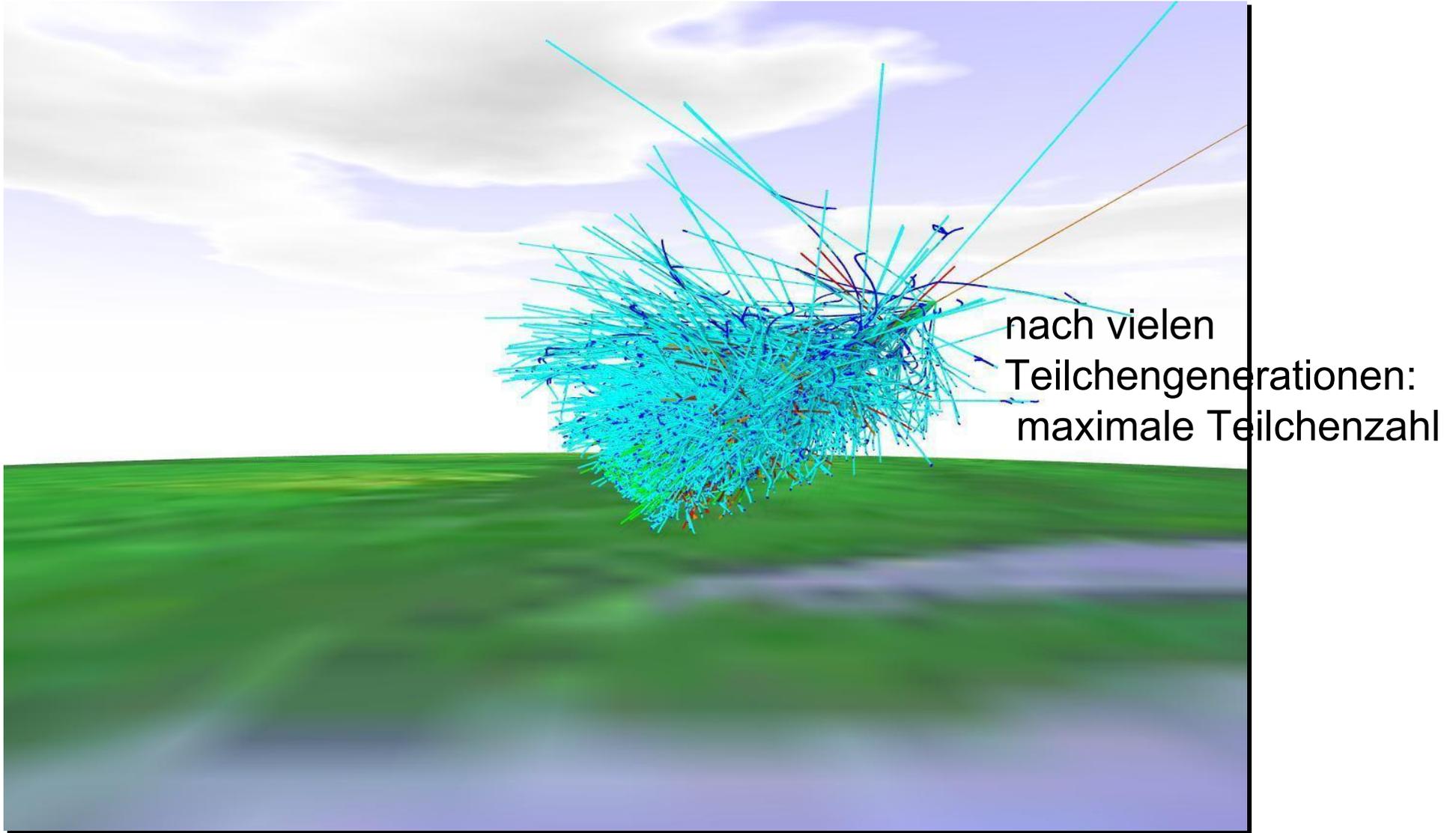


Schema eines Luftschauers

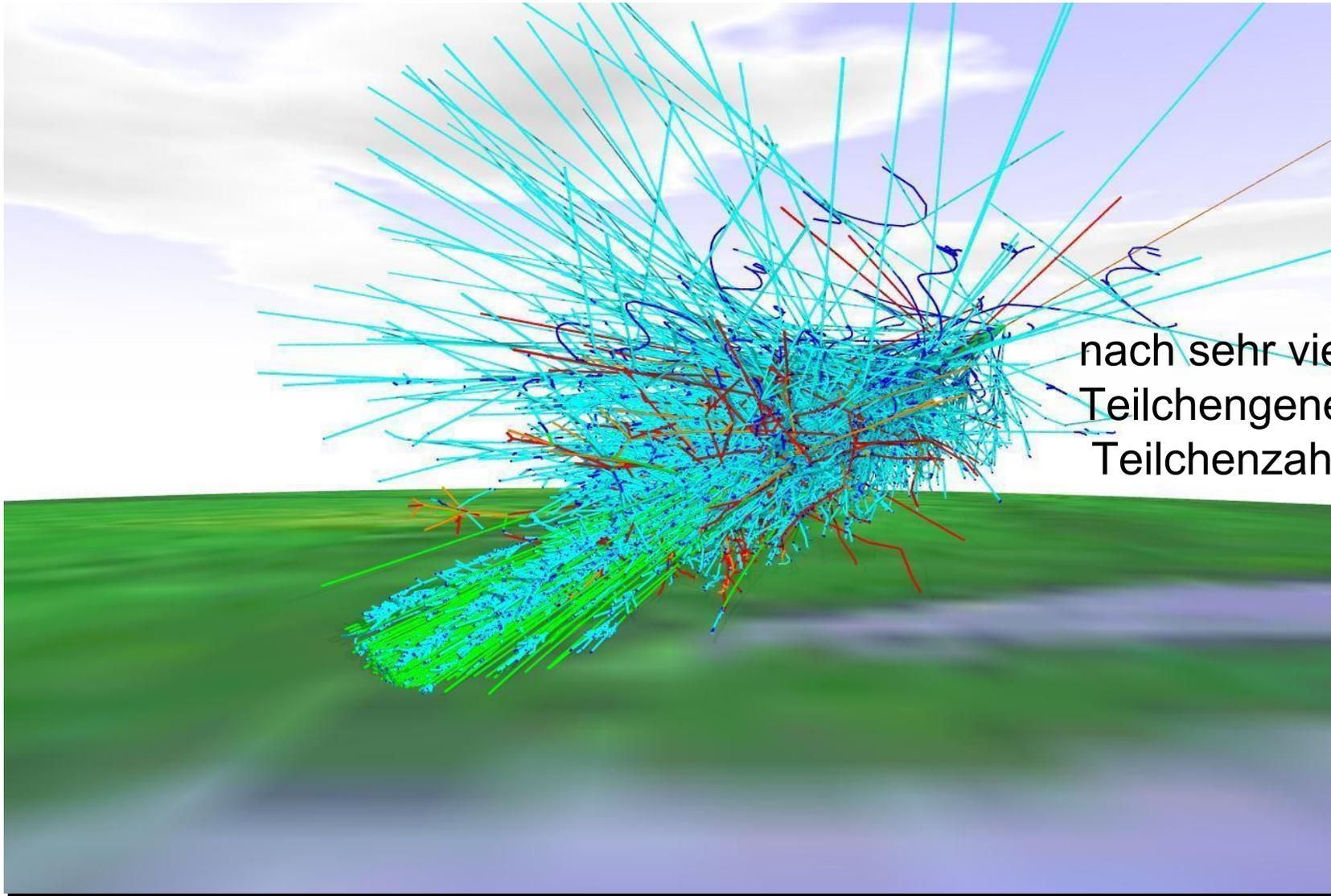


nach mehreren
Teilchengenerationen:
seitliche Ausbreitung

Schema eines Luftschauers

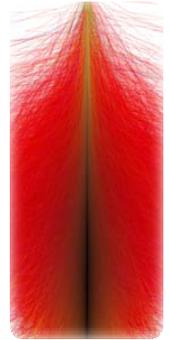


Schema eines Luftschauers



nach sehr vielen
Teilchengenerationen:
Teilchenzahl nimmt ab

Wechselwirkung von Strahlung & Materie



Verschiedene Wechselwirkungseffekte dominieren je nach
Teilchenart, Energiebereich & Nachweismedium

Teilchenart

Geladene Teilchen (z = 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: μ^\pm , π^\pm , ρ^\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, Zyklotrons
- GeV:** Teilchen aus Synchrotrons
- TeV:** Teilchen an Hochenergiebeschleunigern LHC, Tevatron, TeV- γ 's
- >TeV:** Teilchen aus kosm. Beschleunigern: Quasare, SNR

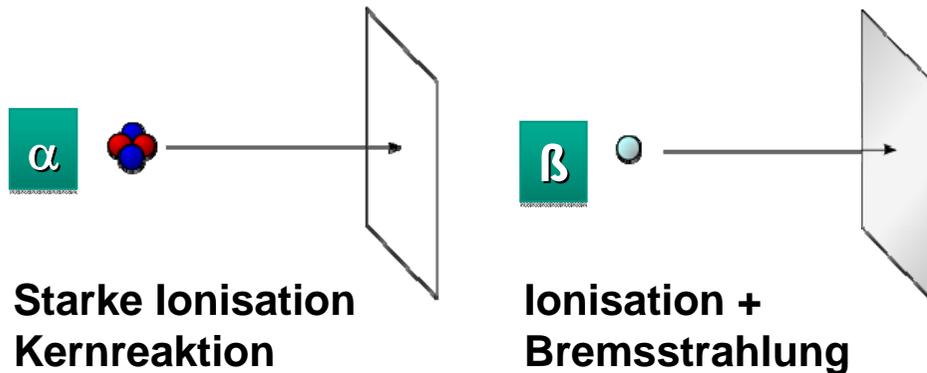
Nachweismedium

Eigenschaften des Mediums:

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

geladene & neutrale Teilchen

Geladene Teilchen

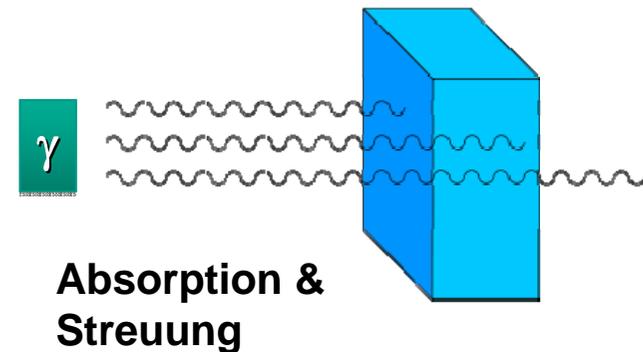


Prozesse

Ionisation: dominanter Prozess
Absorption: selten (nur bei Kernreaktion)
Streuung: Moliere-Theorie
Kaskade: meist nur bei Elektronen

Wohldefinierte Reichweite

Photonen

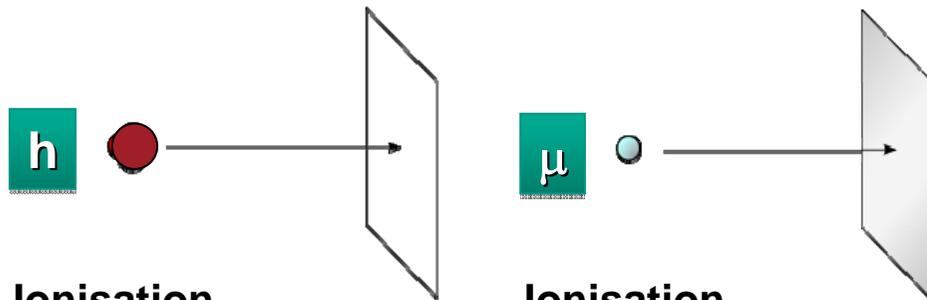


Prozesse

Absorption: Photoeffekt
Streuung: Comptoneffekt
Kaskade: Paarerzeugung

Exponentielle Abschwächung
Keine definierte Reichweite

Geladene Teilchen



Ionisation
Hadron. Reaktion

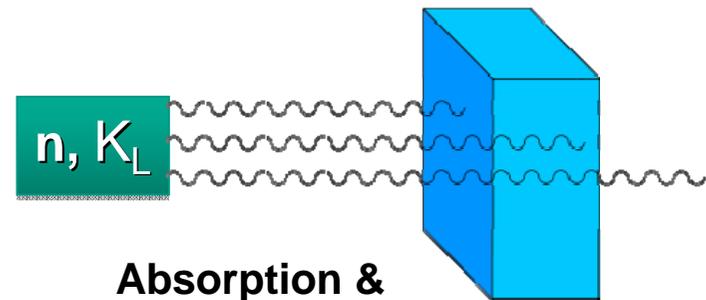
Ionisation

Prozesse

Ionisation: dominanter Prozess
Absorption: Kernwechselwirkung
Streuung: Moliere-Theorie
Kaskade: hadronische Schauer

Wohldefinierte Reichweite

Neutronen, K_L



Absorption &
Streuung

Prozesse

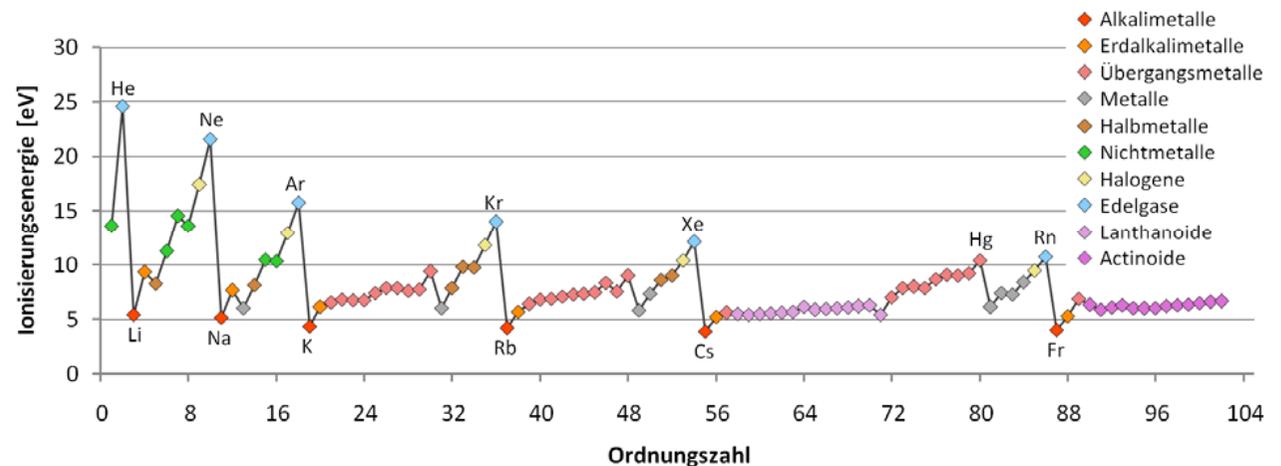
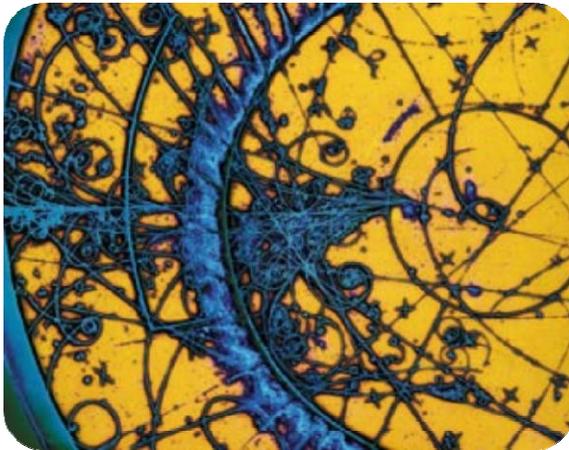
Absorption: Kernwechselwirkung
Schauer: Erzeugung von
Sekundärhadronen

Exponentielle Abschwächung
Keine definierte Reichweite

Wechselwirkung von geladenen Teilchen

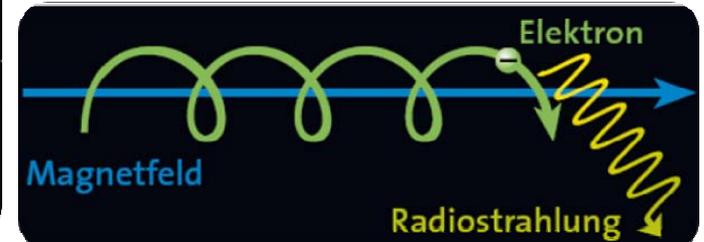
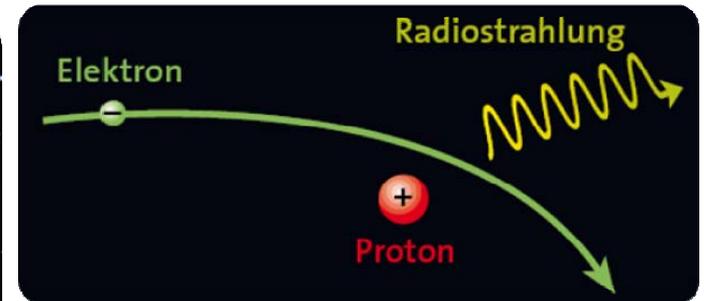
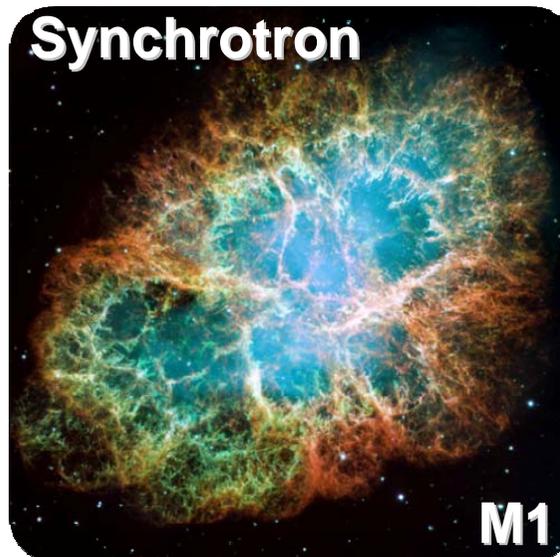
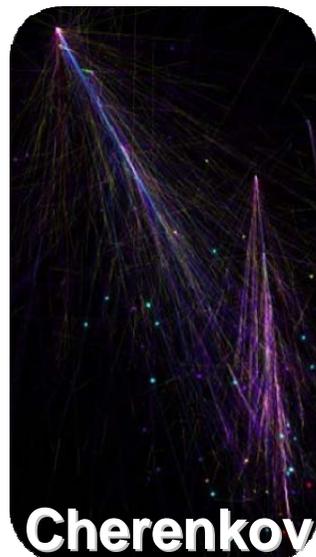
■ Ionisationsprozesse

- **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, Erzeugung von Elektron-Lochpaaren, Erzeugung von Gasbläschen, ...
- **Physik:** Spurrekonstruktion, Reichweite, Ereignistopologie

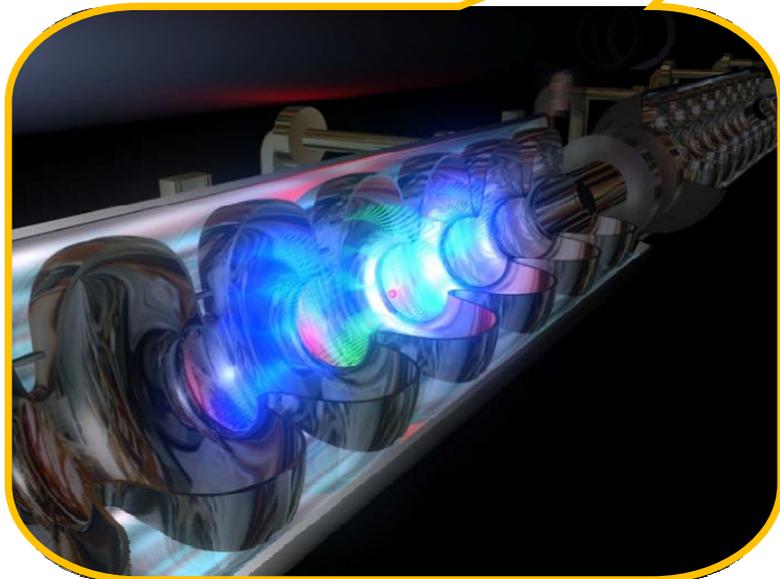


■ Strahlungsverluste

- **Prozess:** Wechselwirkung mit elektromagnet. Feldern, Medium
- **Resultat** Emission von elektromagnetischer Strahlung ($\mu\text{eV} - \text{GeV}$)
 - ⇒ Brems-, Synchrotron-, Cherenkov- & Übergangs- Strahlung
- **Teilchenart:** dominant bei leichten Teilchen
- **Nachweis:** abhängig von λ : Radio-, optischer, Röntgen-, Gamma-Bereich
- **Physik:** Energiespektrum der e^+/e^- , Magnetfelder



- **Anwendung der Strahlungsverluste: Synchrotronstrahlungsquellen**
 - Beschleuniger zum Erzeugen von Synchrotronstrahlung



Elektronenquelle
und Beschleuniger

Magnetstruktur

Elektronenfalle

Lichtbündel

Experiment

Ionisationsverluste

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

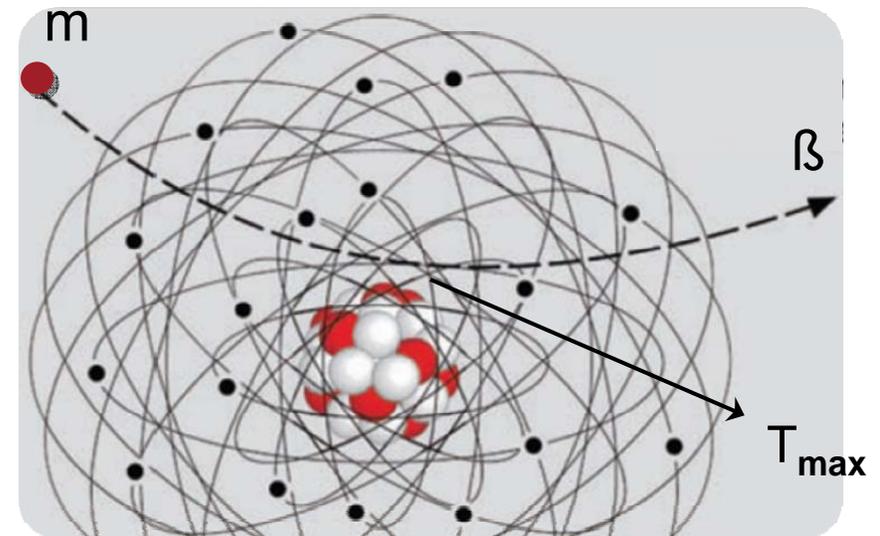
$$T_{\text{max}} = \frac{2m_e \cdot \beta^2 \cdot \gamma^2 \cdot m^2}{m^2 + m_e^2 + 2\gamma \cdot m \cdot m_e}$$



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

für alle schweren
Primärteilchen

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



Ionisationsverluste: Bethe-Bloch

■ Bethe-Bloch Gleichung

Mittlerer Energieverlust dE/dx von geladenen (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

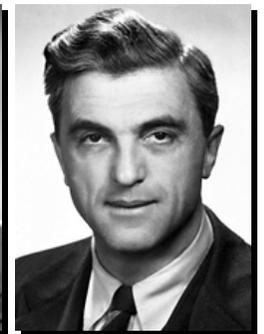
■ **Targetparameter:** Kernladung Z , Kernmasse A ,
effektives Ionisations-Potenzial I

Teilchenparameter: Geschwindigkeit β , Ladung z

Konstanten: klass. Elektronenradius r_e
Elektronmasse m_e , Avogadrozahl N_0



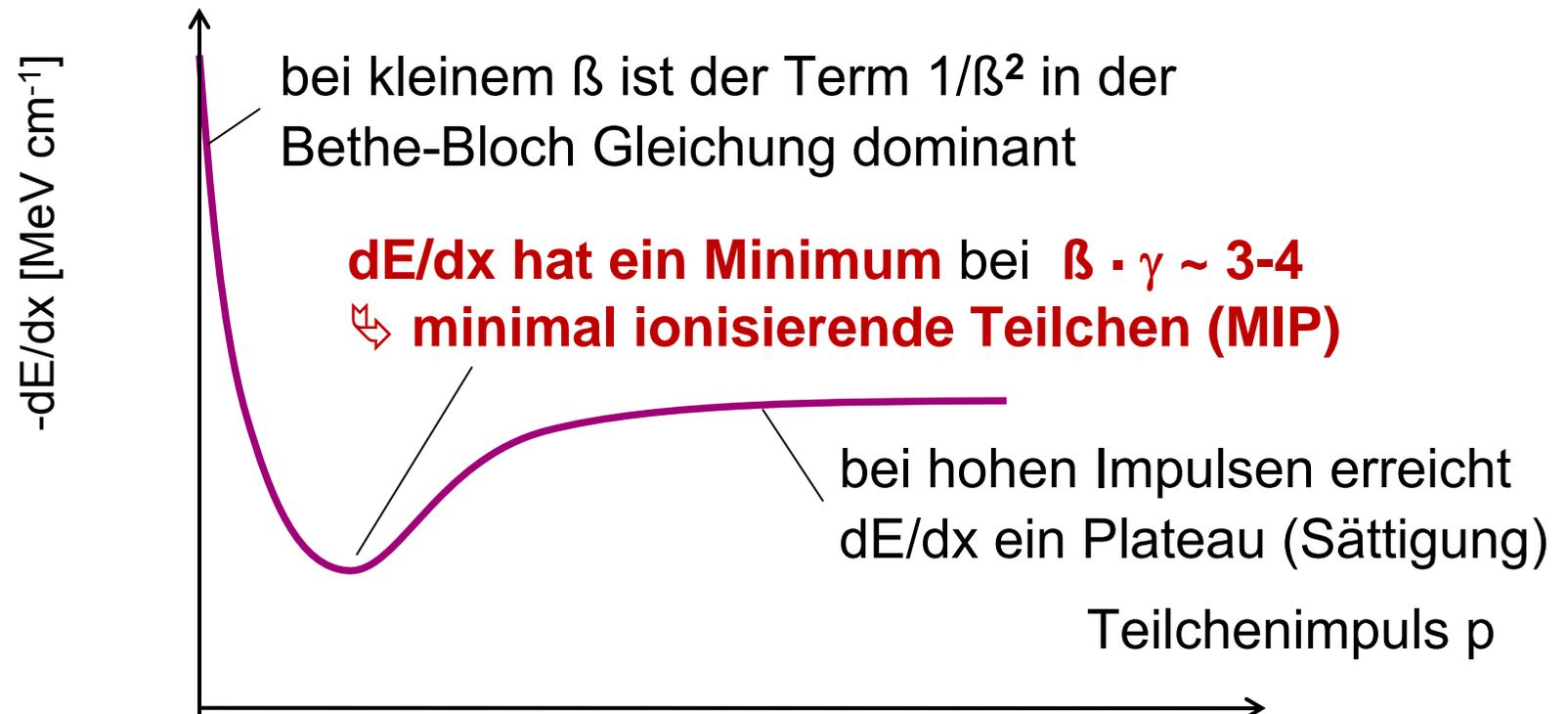
Hans Bethe



Felix Bloch

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

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



- 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

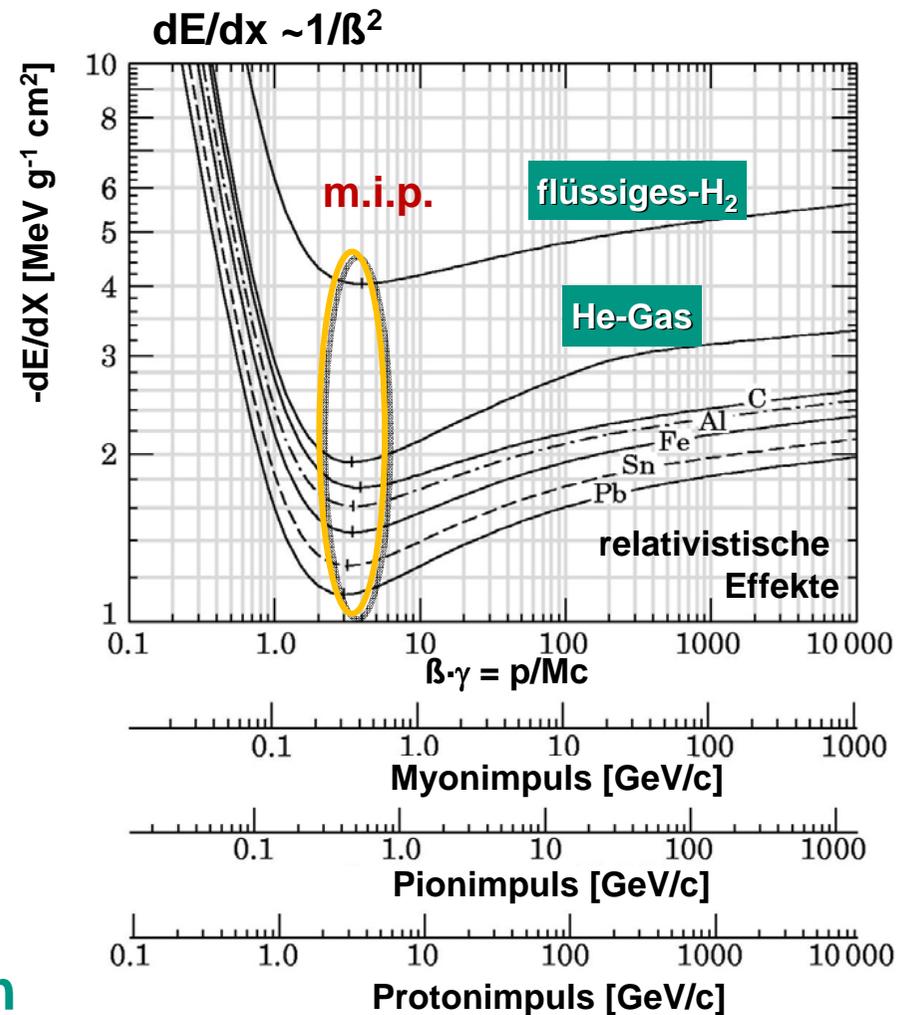
MIP:

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

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

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

Wichtiges Beispiel: kosmische Myonen



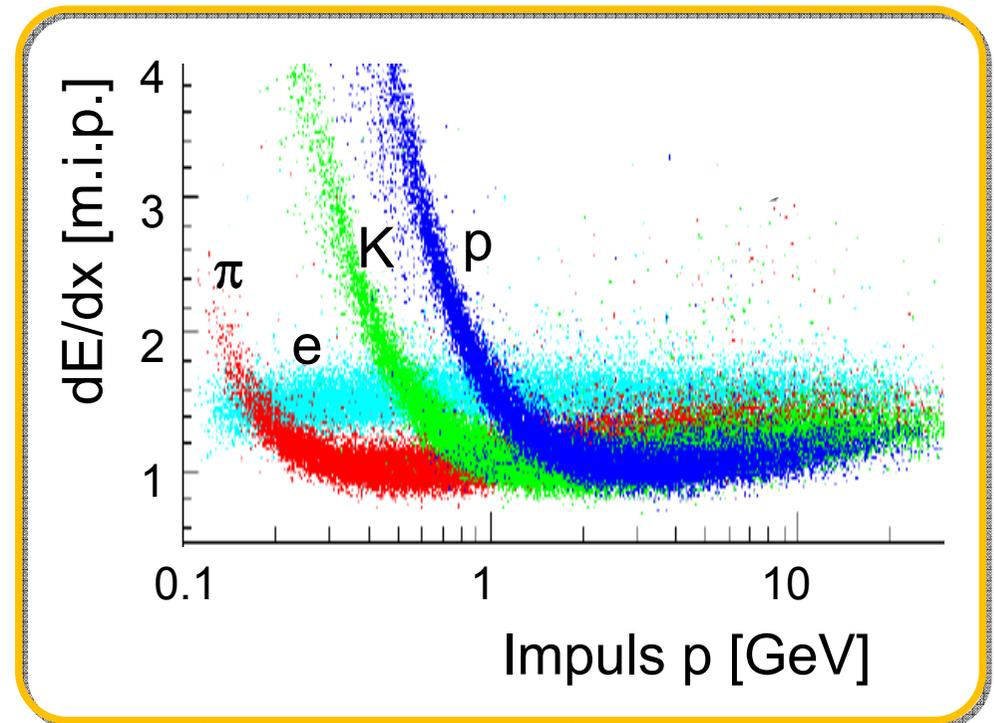
Teilchenidentifikation

- 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

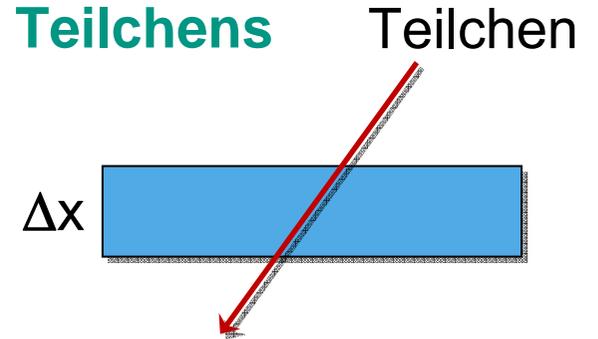
- Der Energieverlust dE/dx eines Teilchens ist immer statistischen Fluktuationen unterworfen



Energieverlustverteilung: Landaukurve

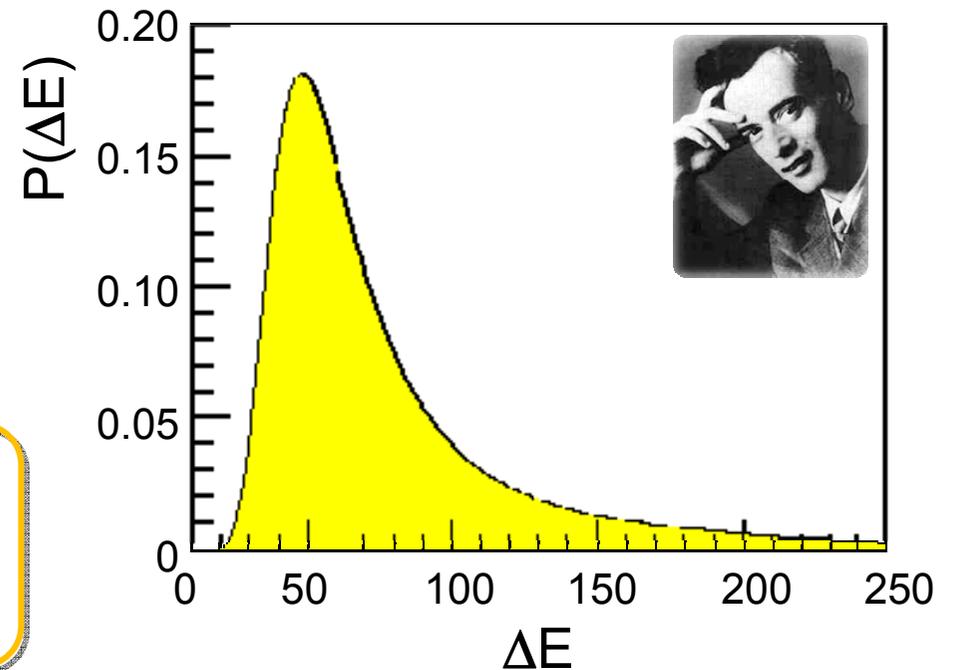
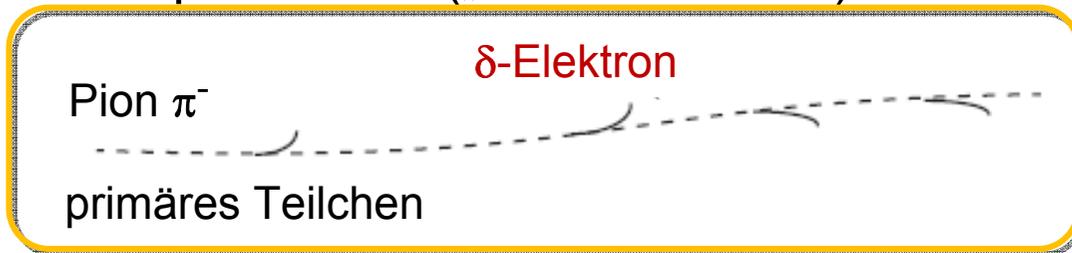
■ **Bethe-Bloch Formel:**

- 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)



■ **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**“)



Mittlere Reichweite

■ Reichweite:

die **mittlere Reichweite \bar{R}** eines Teilchens [in g cm⁻²] in einem Medium (Absorber, Detektor) ergibt sich durch Integration der Bethe-Bloch Gleichung:

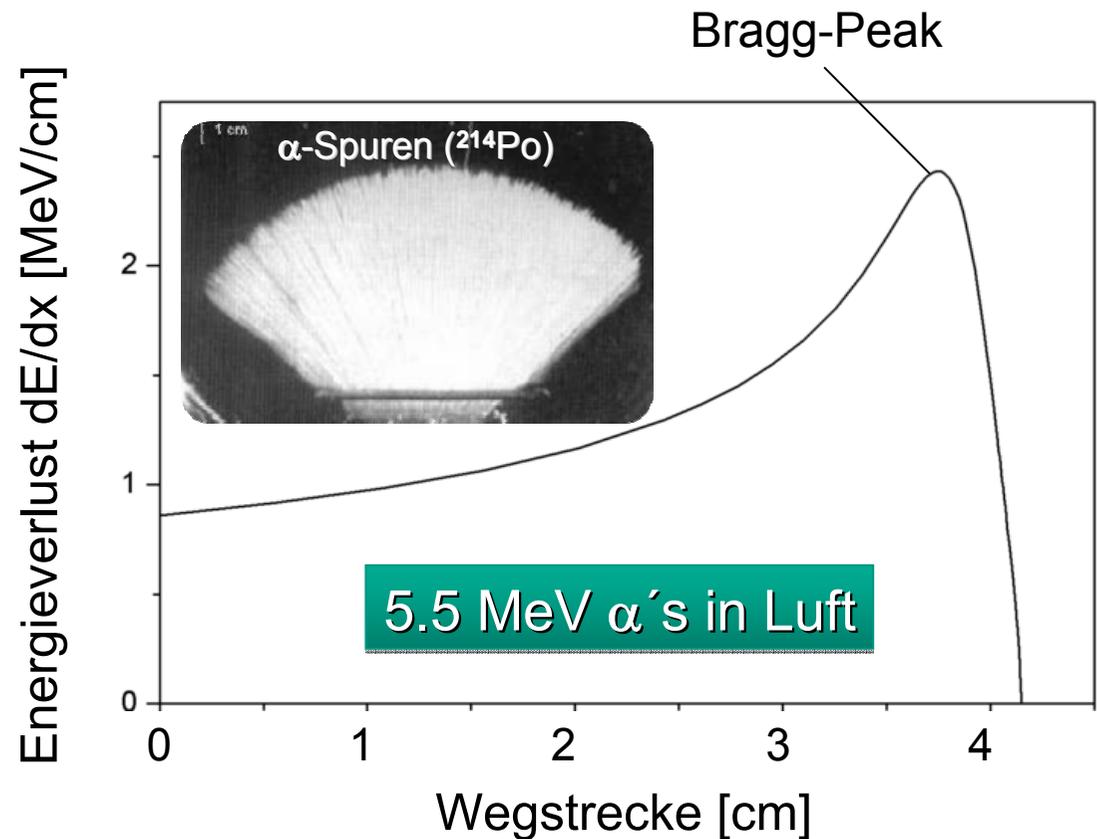
$$\bar{R} = \int_{E_0}^0 \left(\frac{dE}{dX} \right)^{-1} \cdot dE$$

Beispiele:

- \bar{R} 100 MeV/c Pionen in Pb:
 $\bar{R}/\rho \sim 0.8$ cm
- \bar{R} 5.5 MeV Alphas in Luft:
 $\bar{R}/\rho \sim 4.2$ cm

■ Bragg-Peak:

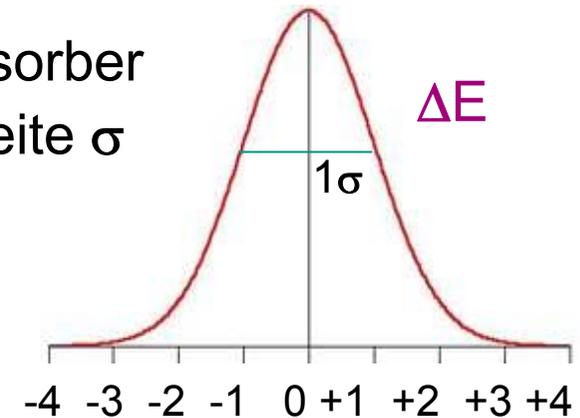
dE/dx erreicht am Ende des Weges ein Maximum (wichtig in Strahlentherapie)



Dicke Absorber & Vielfachstreuung

- **Energieverlust in einem dicken Absorber:**

Summation über Vielfachstreuung in einem dicken Absorber ergibt **gaußförmige Energieverlustverteilung** mit Breite σ

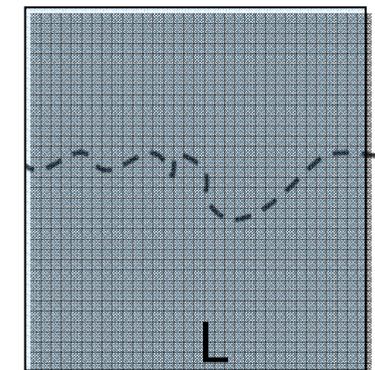


$$\frac{\sigma}{\langle \Delta E \rangle} \propto \frac{\sqrt{\Delta x}}{\Delta x} \propto \frac{1}{\sqrt{\Delta x}}$$

- Die Vielfachstreuung eines Teilchens in einem dicken Absorber führt nach Summation über viele Auslenkwinkel zu **gaußförmiger Winkelverteilung** - mittlerer Auslenkwinkel $\sigma_{\text{Streu}} [\text{rad}] \sim p^{-1} \cdot \sqrt{L}$

$$\sqrt{\langle \theta_{\text{Streu}}^2 \rangle} = \frac{19.2}{\beta \cdot p [MeV / c]} \cdot z \cdot \sqrt{\frac{L}{X_0}}$$

Benutzung des Mittelwerts des quadratischen Streuwinkels

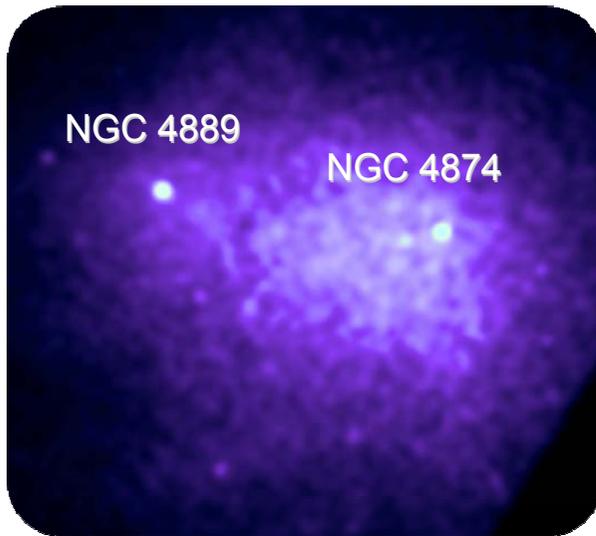


X_0 = **Strahlungslänge** (stoffspezifische Größe)

Spezialfall: Energieverlust von Elektronen

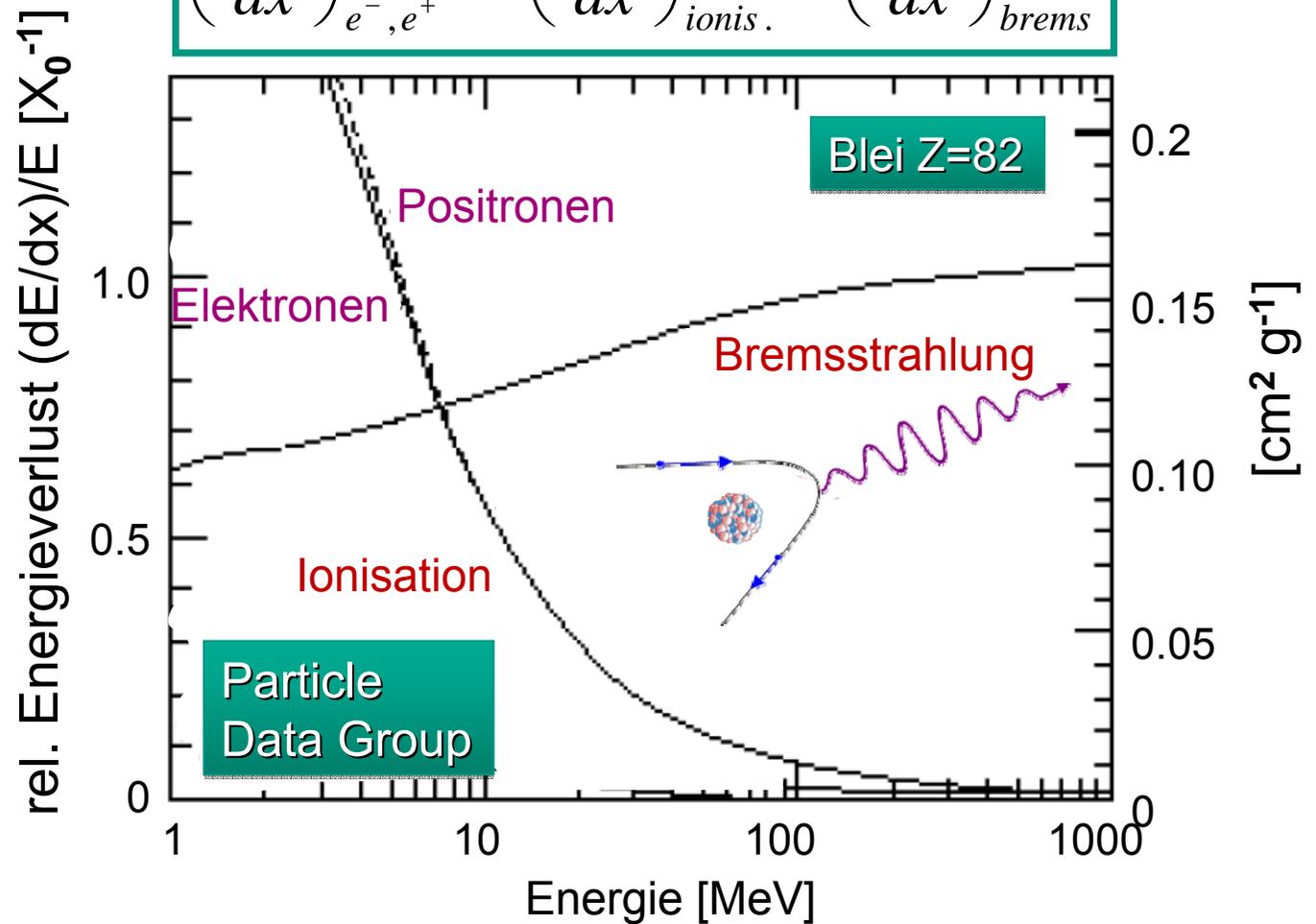
- Energieverlustprozesse von Elektronen & Positronen:

- Ionisation
- Bremsstrahlung



Bremsstrahlung & X-rays:
Coma-Galaxiencluster
im Röntgenlicht (Chandra)

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{e^-,e^+} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ionis.}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{brems}}$$



■ **Ionisationsverluste** von Elektronen & Positronen:

- die identische Massen von Target (m_e) & Projektil (m_e) erfordern eine leichte Modifikation der Bethe-Bloch-Gleichung

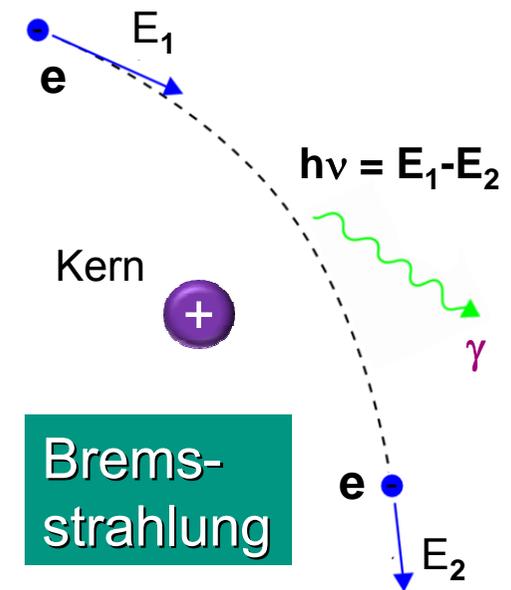
■ **Bremsstrahlung:**

- radiative Energieverluste dominieren bei sehr hohen Energien:

$$\left(\frac{dE}{dX} \right)_{brems} = \frac{4 \cdot \alpha^3 \cdot N_0 \cdot Z^2}{m^2 \cdot A} \cdot \ln \left(\frac{183}{Z^{1/3}} \right) \cdot E = \frac{1}{X_0} \cdot E$$

N_0 : Avogadrozahl

= 1 / Strahlungslänge X_0



Bremsstrahlungsverluste

- **nehmen linear mit der Energie E des Teilchens zu**
- **sind nur wichtig für leichte Teilchen ($e^- e^+$), da**

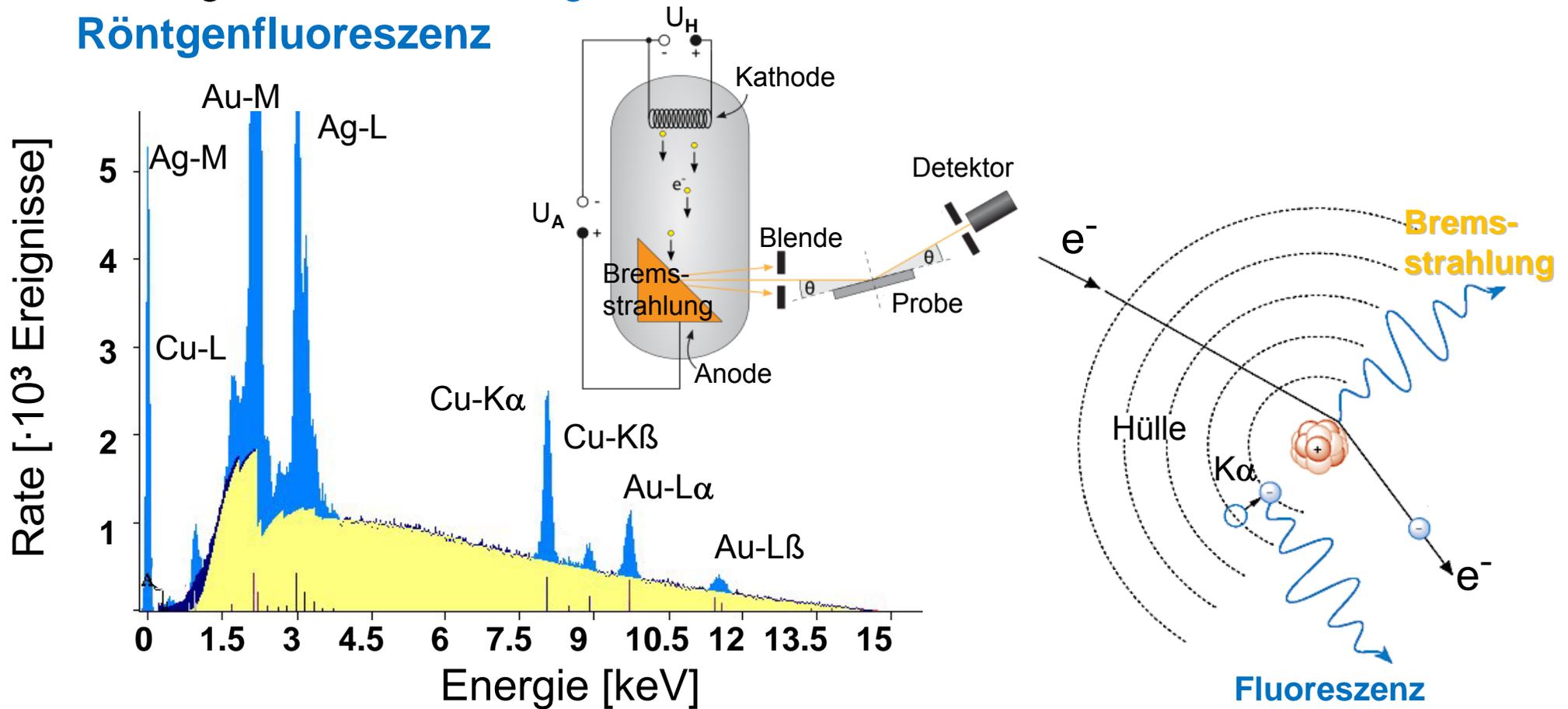
$\sigma_{Brems} \sim 1/m^2$

Bsp: Myon-Elektron Verhältnis $dE/dx \sim (m_e/m_\mu)^2 \approx 2.2 \cdot 10^{-5}$

■ Bremsstrahlungsspektren:

- kontinuierliches Spektrum bis zur maximalen Elektronenenergie E_0
- überlagert von **monoenergetischen Linien**:

Röntgenfluoreszenz



Energieverlustprozesse geladener Teilchen

- Gesamtübersicht über Energieverluste: von sub-MeV bis multi-TeV Energien

