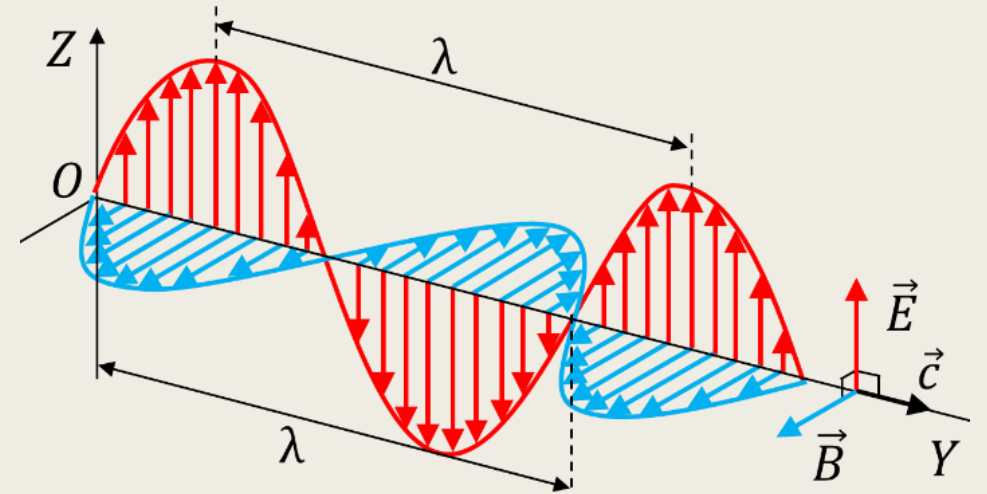


A thick black L-shaped frame surrounds the central text. The top-left corner is a horizontal bar extending to the right, then a vertical bar extending downwards. The bottom-right corner is a horizontal bar extending to the left, then a vertical bar extending upwards.

# WECHSELWIRKUNGEN VON TEILCHEN MIT MATERIE

# Inhaltsverzeichnis

- Typen von Strahlung
- Energieverlust und Wechselwirkungen geladener Teilchen mit Materie
- Photon-Wechselwirkungen
- Hadronische Wechselwirkungen
- Neutrino-Wechselwirkungen



**Abb. 1:** Schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle.<sup>[8]</sup>

# Warum sind Wechselwirkungen wichtig?

- Teilchennachweis
- Dominierende Prozesse je nach Teilchenart und Energie

## Anwendungen:

- Teilchenphysik
- Astroteilchenphysik
- Medizin

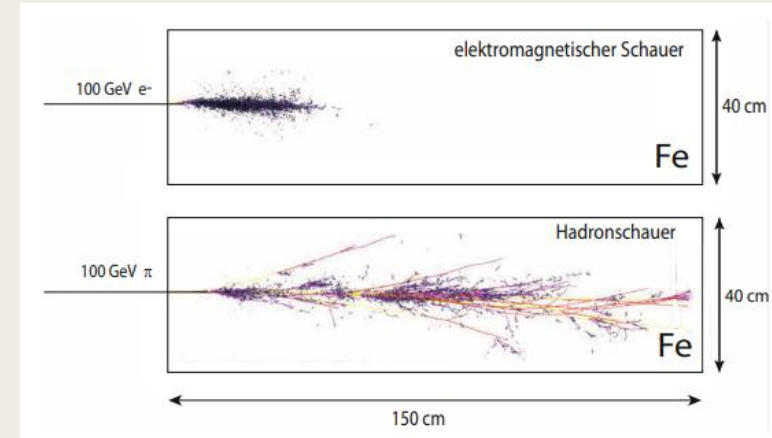


Abb. 2: Simulation von Schauern in einem Eisenblock.<sup>[6]</sup>

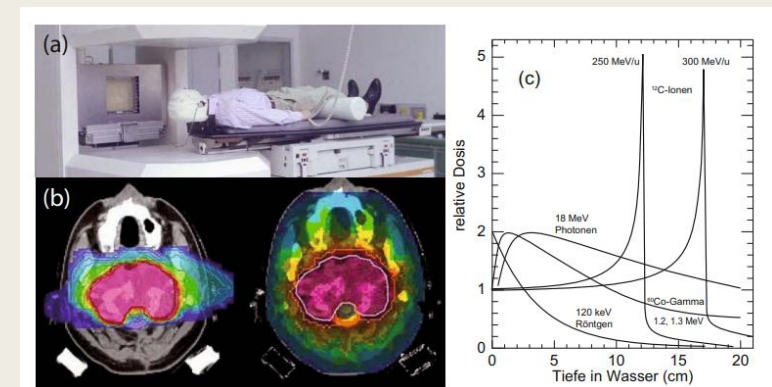


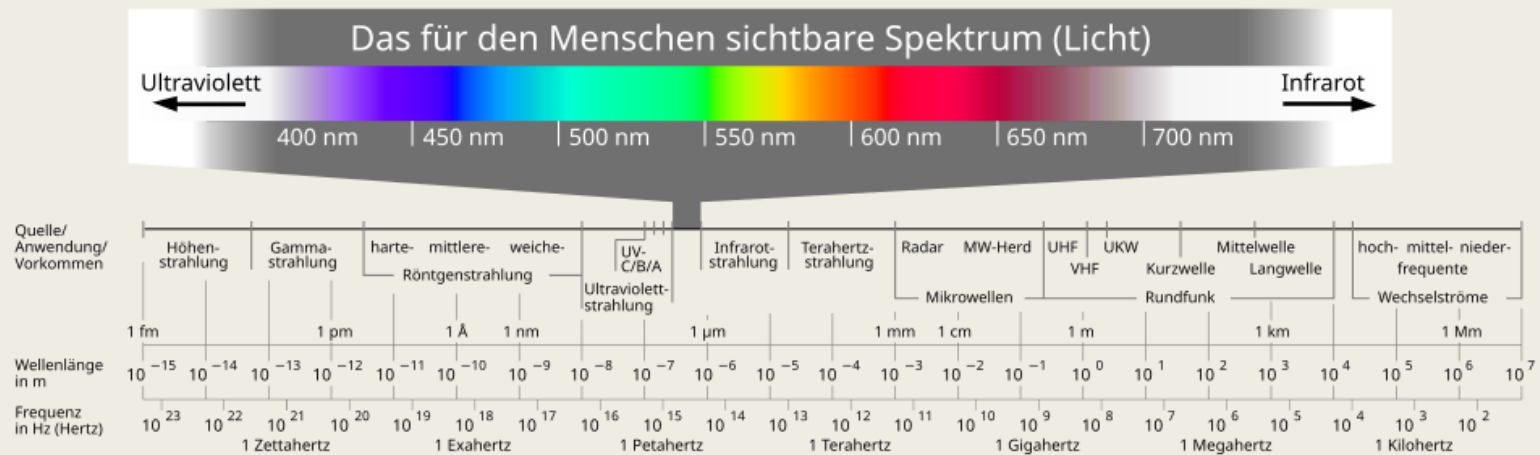
Abb. 3: Ionentherapie und Bragg-Peak.<sup>[6]</sup>

# Typen von Strahlungen

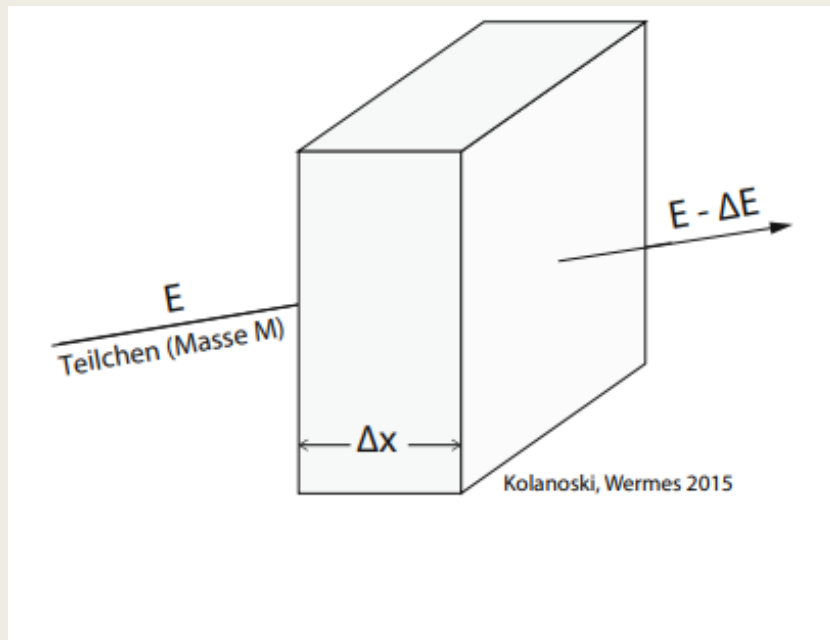
## Teilchenstrahlung

Strahlung	$\alpha$ -Strahlung	$\beta$ -Strahlung	Protonenstrahlung	Neutronenstrahlung	Neutrinos
Eigenschaften	Heliumkerne, stark ionisierend, geringe Reichweite	Elektronen/Positronen, mittel ionisierend, mittlere Reichweite	geladene Teilchen, stark ionisierend	ungeladene Teilchen, hohe Durchdringung	sehr hohe Durchdringung

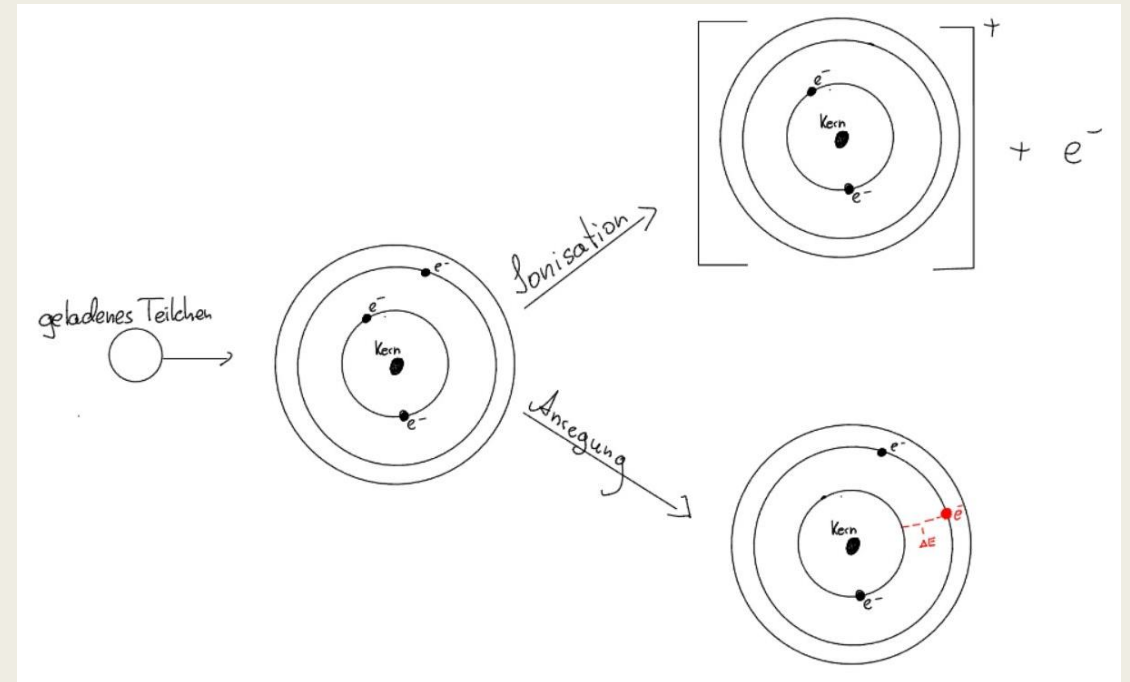
## Elektromagnetische Strahlung <sup>[4]</sup>



# Energieverlust geladener Teilchen durch Ionisation und Anregung von Atomen



**Abb. 4:** Energieverlust eines Teilchens bei Durchgang durch Materie. [6]



**Abb. 5:** Schematische Darstellung von Ionisation und Anregung durch geladene Teilchen.

# Mittlerer Energieverlust pro Weglänge

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = n \int_{Tmin}^{Tmax} T \frac{d\sigma_A}{dT} (M, \beta, T) dT$$

Gl.1: Mittlerer Energieverlust pro Weglänge

- $T$  - übertragene Energie auf ein Elektron
- $\frac{d\sigma_A}{dT}$  - differentieller Wirkungsquerschnitt  
(Wahrscheinlichkeit für die Übertragung der Energie  $T$ )
- $n$  - Elektronendichte des Material
- $M$  - Masse des einfallenden Teilchens
- $\beta = \mathbf{v}/c$  - Geschwindigkeit des Teilchens relativ zur Lichtgeschwindigkeit

# Verlauf des Energieverlusts nach der Bethe-Bloch-Formel

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K \frac{Z}{A} \rho \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} - \frac{C(\beta\gamma, I)}{Z} \right]$$

Für kleine Energien:

$$\frac{dE}{dx} \sim \frac{1}{\beta^2}$$

Minimal ionizing particles (MIPs)

$$\beta\gamma \approx 3 - 3.5$$

Für hohe Energien:

$$\frac{dE}{dx} \sim \log \gamma$$

Dichteeffekt reduziert den Anstieg

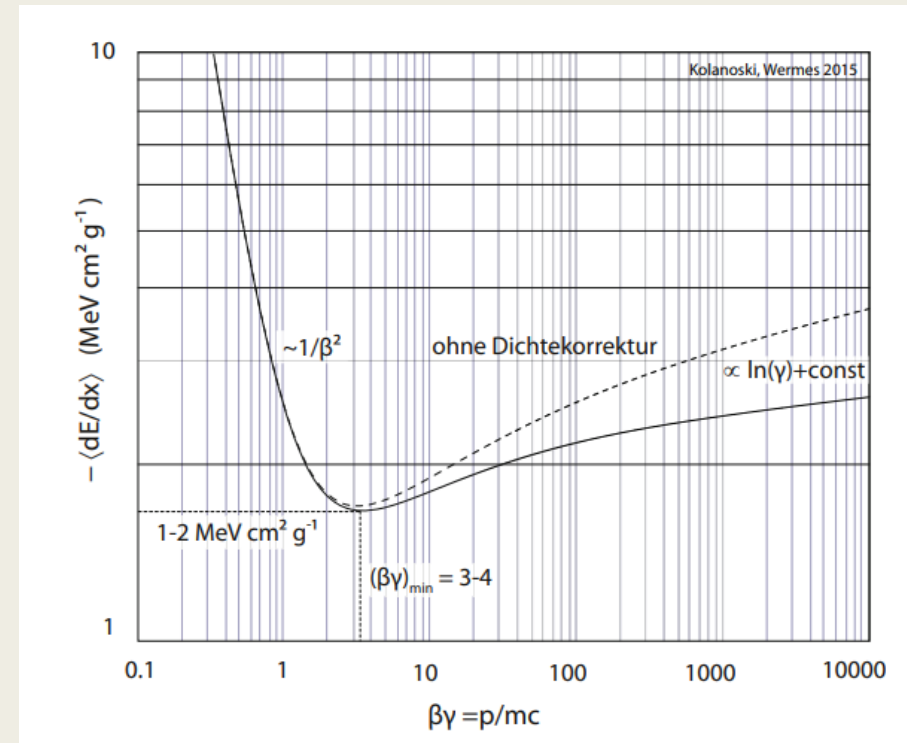


Abb . 6: Verlauf des Energieverlusts geladener Teilchen nach der Bethe-Bloch-Formel. [6]

# Anwendungen in Teilchendetektoren

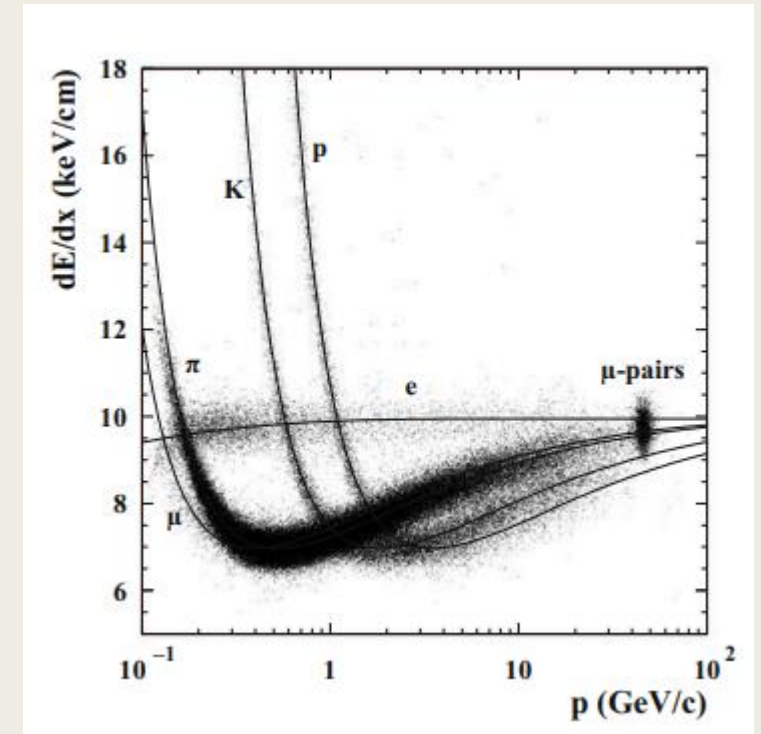
## Teilchenidentifikation mit $dE/dx$

- verschiedene Teilchen besitzen charakteristische  $dE/dx$ -Kurven
- Identifikation über Energieverlust und Impuls

## *Fluktuationen:*

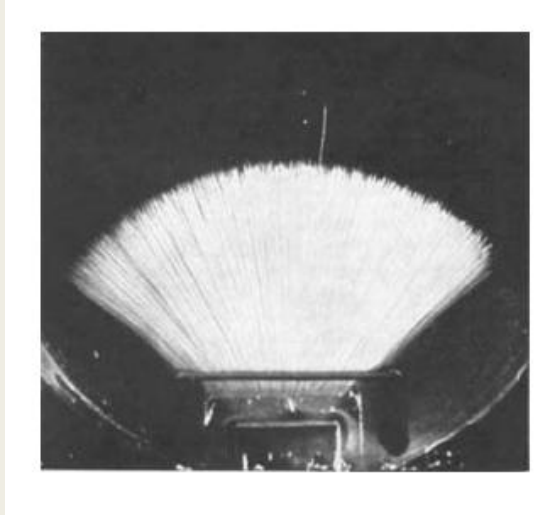
Der Energieverlust ist ein statistischer Prozess

- Anzahl der Ionisationen
- Energieübertrag pro Stoß

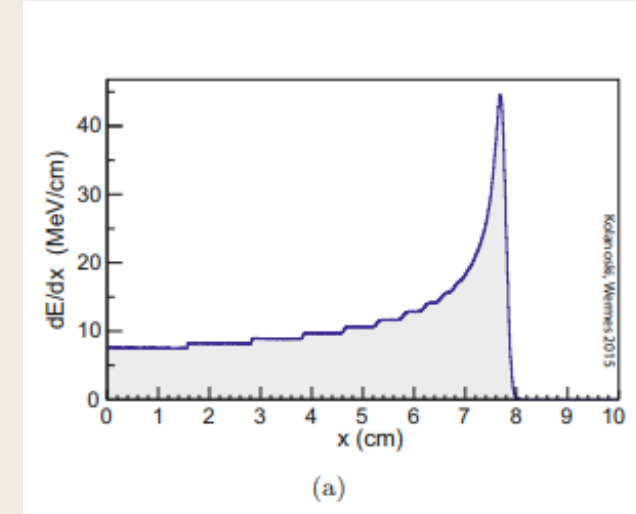


**Abb. 7:** Charakteristische  $dE/dx$ -Kurven verschiedener geladener Teilchen als Funktion des Impulses. <sup>[6]</sup>

# Reichweite & Bragg-Peak



**Abb. 8:** Spuren von  $\alpha$ -Teilchen mit ähnlicher Reichweite. <sup>[6]</sup>



**Abb. 9:** Bragg-Peak eines Protons in Wasser. <sup>[6]</sup>

- Energieverlust durch Ionisation
- Reichweite = Strecke bis zum Stillstand
- Ähnliche Anfangsenergie  $\rightarrow$  ähnliche Reichweite
- $dE/dx$  steigt beim Abbremsen
- Maximum kurz vor dem Stillstand = Bragg-Peak
- Hohe lokale Energiedeposition am Ende der Bahn

# Anwendung: Ionentherapie in der Tumorbehandlung

- Bragg-Peak gezielt im Tumor
- Hohe Dosis im Tumorgewebe
- Schonung gesunden Gewebes
- Präzise Tiefenkontrolle
- Einsatz in der Ionentherapie

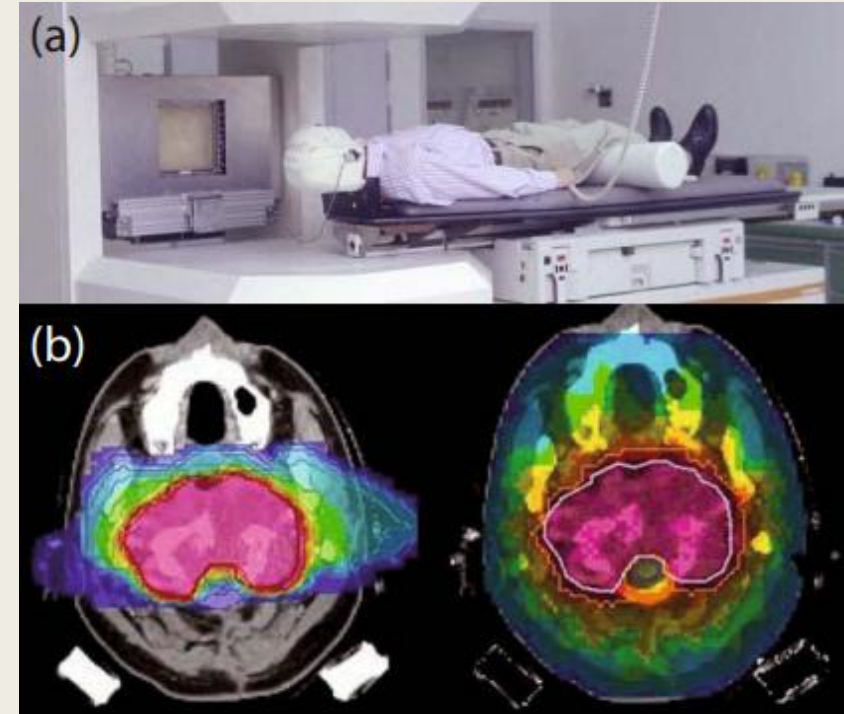
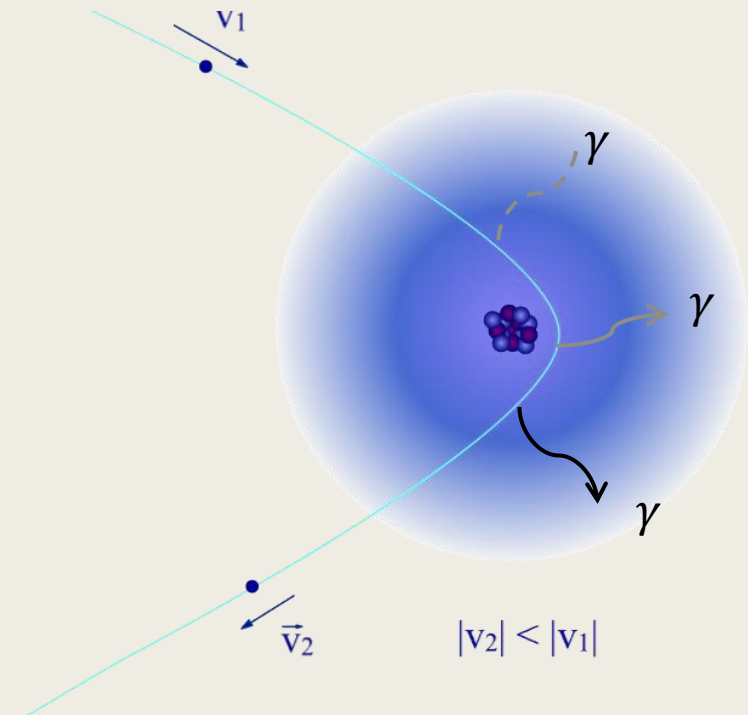


Abb.10: Anwendung der Protonentherapie. [6]

# Bremsstrahlung

- Bethe-Bloch gilt nur eingeschränkt für Elektronen
- Bremsstrahlung durch Ablenkung im Coulomb-Feld
- Emission von  $\gamma$ -Photonen
- Strahlungsverlust steigt mit der Teilchenenergie
- Besonders wichtig für Elektronen und Positronen

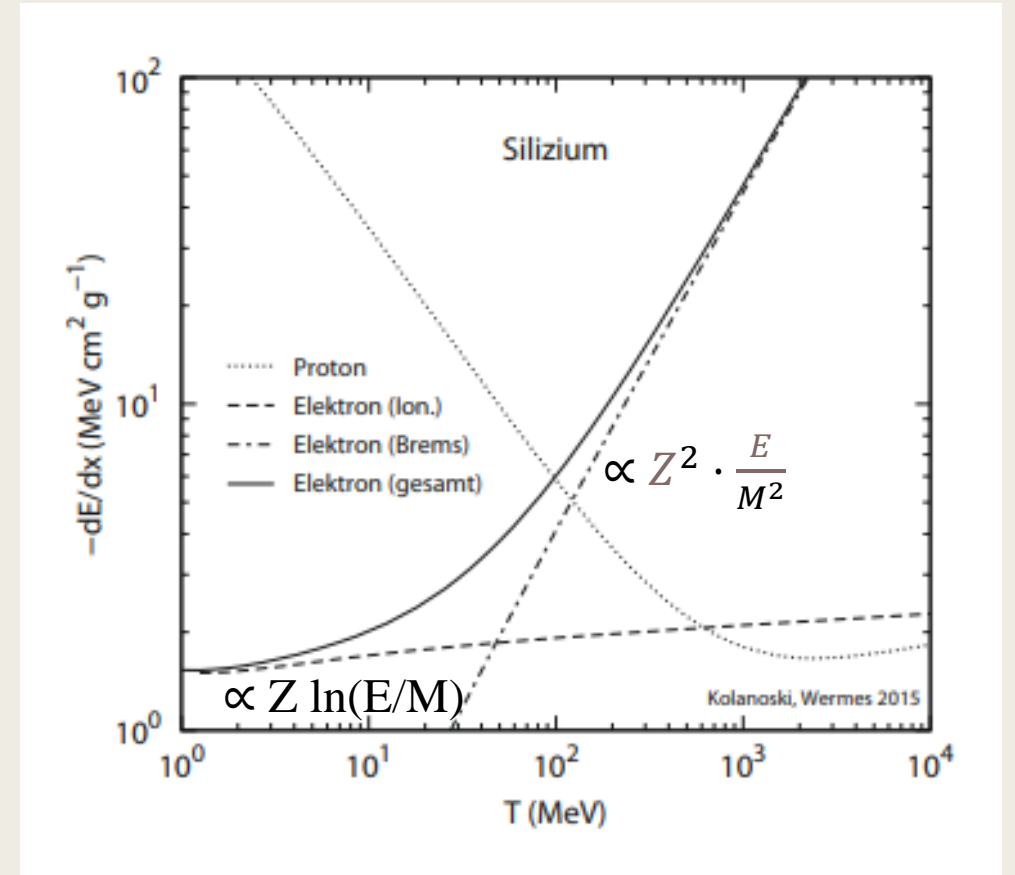
$$\frac{dW}{dt} \sim \frac{E}{m^2}$$



**Abb. 11:** Bremsstrahlung bei der Wechselwirkung eines geladenen Teilchens mit dem Coulomb-Feld eines Kernes. Rutherford-Streuung.<sup>[2]</sup>

# Kritische Energie

- Ionisation dominiert bei kleinen Energien
- Bremsstrahlung dominiert bei hohen Energien
- Kritische Energie: beide Beiträge gleich groß
- Für Protonen bleibt Bremsstrahlung vernachlässigbar



**Abb.12:** Energieverlust durch Ionisation und Bremsstrahlung in Silizium.  $E_k = 47.86 \text{ MeV}$  [6]

# Energieverlust hochenergetischer Myonen

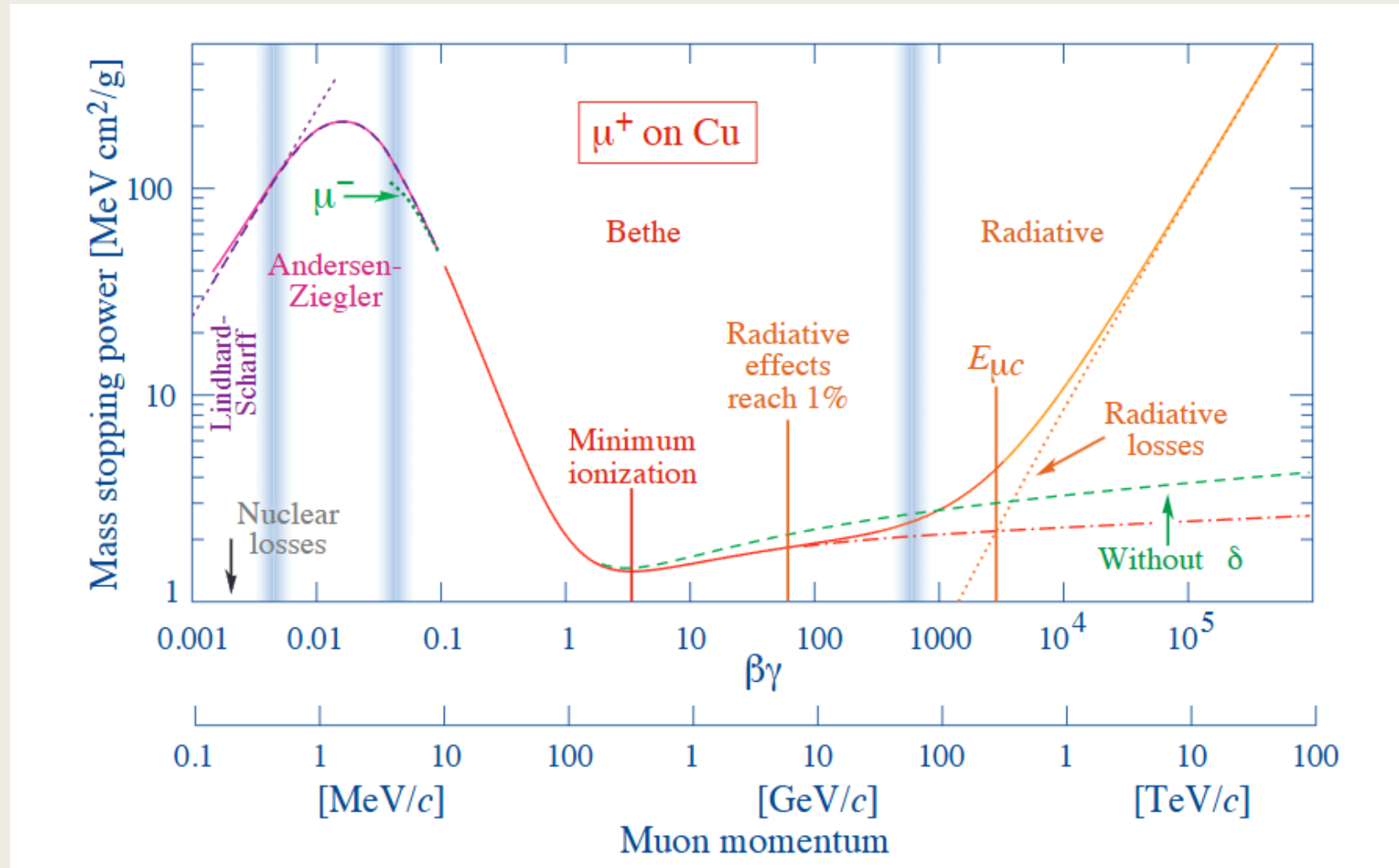
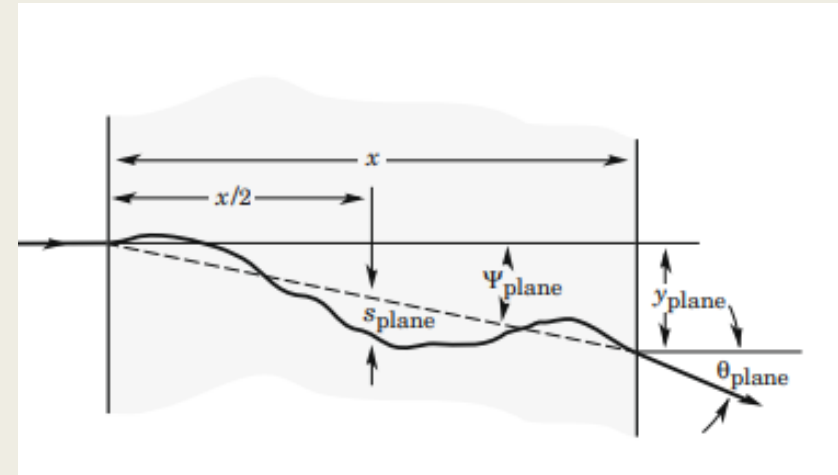


Abb. 13: Energieverlust für positive Myonen in Kupfer. [7]

# Coulomb-Vielfachstreuung geladener Teilchen

- Viele kleine Ablenkungen im Coulomb-Feld der Kerne
- Statistische Verteilung der Streuwinkel
- Stärkere Streuung bei kleinen Impulsen und dicken Materialien
- Begrenzt die Spurauflösung von Detektoren



**Abb. 14:** Skizze der Coulomb-Vielfachstreuung eines geladenen Teilchens in Materie. <sup>[6]</sup>

*Highland-Formel:*

$$\theta_0 = \frac{13,6 \frac{\text{Mev}}{c}}{p\beta} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} (1 + 0,038 \ln(\frac{x}{x_0}))$$

# Cherenkov-Strahlung

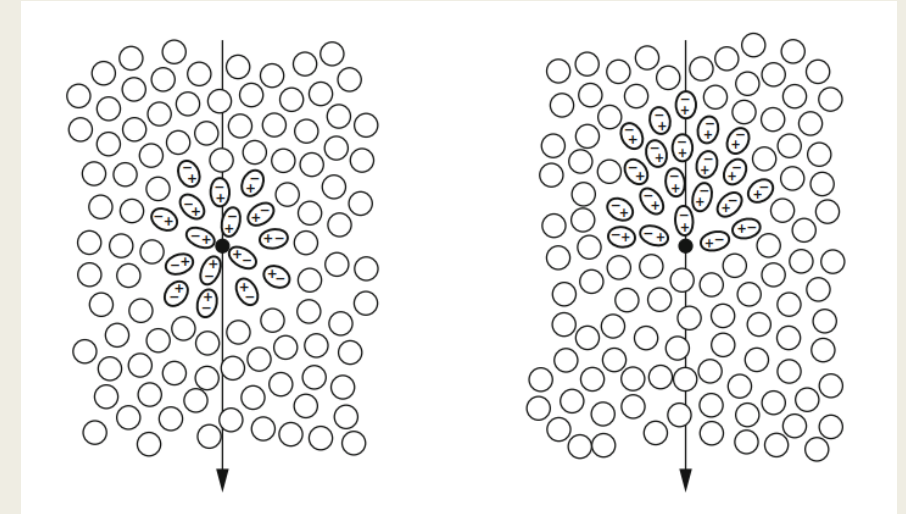
**Bedingung:**

$$V > \frac{c_0}{n}$$

- optisch transparentes Medium
- Polarisation des Mediums
- konstruktive Interferenz

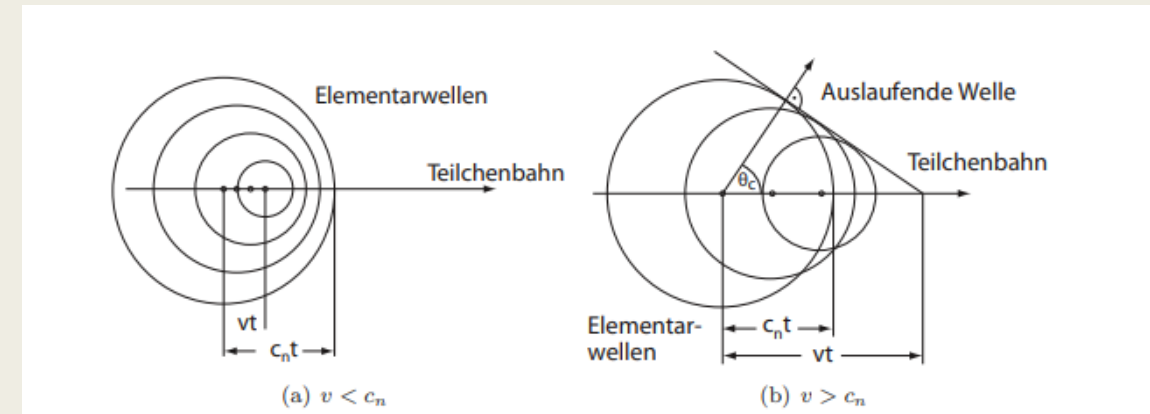
**Cherenkov-Winkel**

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n}$$



**Abb. 15:** Cherenkov-Effekt:

(a) symmetrische Polarisation → keine Strahlung  
 (b) asymmetrische Polarisation → Cherenkov-Strahlung.<sup>[6]</sup>



**Abb. 16:** Cherenkov-Strahlung unter dem Winkel  $\theta_c$ .<sup>[6]</sup>

# Übergangsstrahlung

## Entstehung

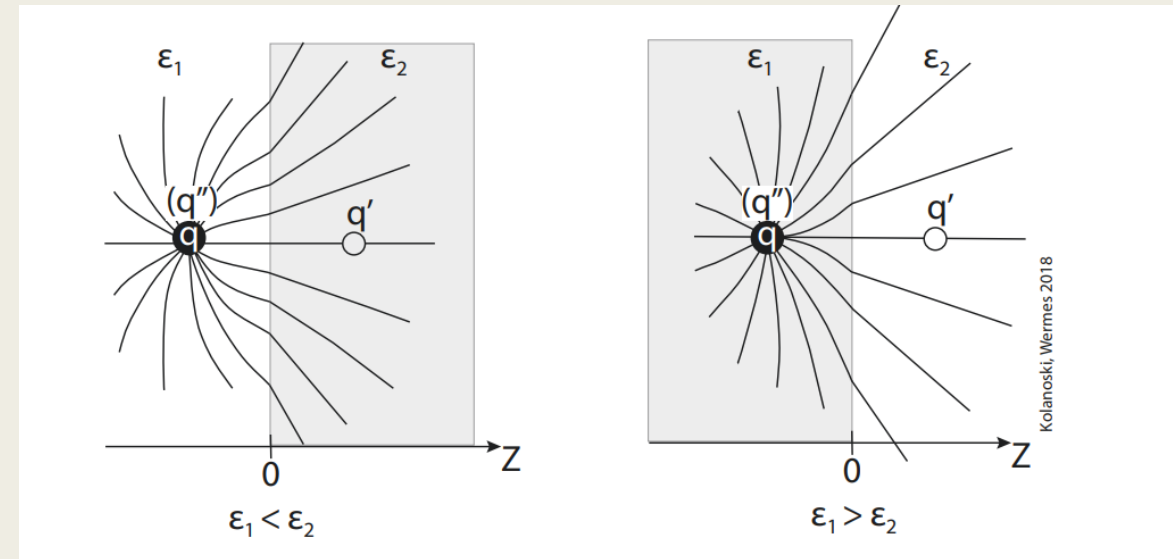
- Übergang zwischen zwei Medien
- elektromagnetische Felder passen sich an
- Emission von Strahlung

## Wichtig für

- hochrelativistische Teilchen ( $\gamma \gg 1$ )
- Intensität steigt mit  $\gamma$

## Anwendungen

- Teilchenidentifikation
- Übergangsstrahlungsdetektoren
- Unterscheidung von Elektronen und Hadronen



**Abb. 17:** Anpassung der elektromagnetischen Feldkonfiguration beim Übergang zwischen zwei Medien. <sup>[6]</sup>

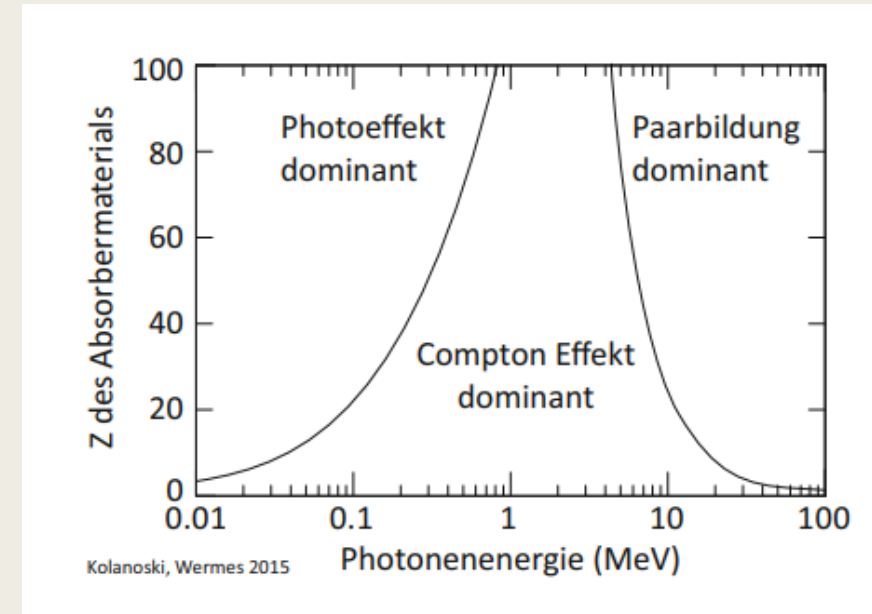
# Wechselwirkungen von Photonen mit Materie

## Wichtige Prozesse:

- Photoeffekt
- Compton-Effekt
- Paarbildung

## Abhängigkeit von:

- Photonenergie  $E_\gamma$
- Kernladungszahl  $Z$



**Abb.18:** Dominanzbereiche verschiedener Wechselwirkungsprozesse von Photonen mit Materie in Abhängigkeit von der Photonenergie  $E_\gamma$  und der Kernladungszahl  $Z$ . <sup>[6]</sup>

# Photoeffekt:

- Vollständige Absorption eines Photons
- Emission eines gebundenen Elektrons

## Kinetische Energie des Elektrons:

$$T = E_{\gamma} - E_{\beta}$$

## Grenzfrequenz:

$$\nu_{\text{grenz}} = \frac{W}{h}$$

## Anwendungen:

- Elementanalyse und Röntgenspektroskopie

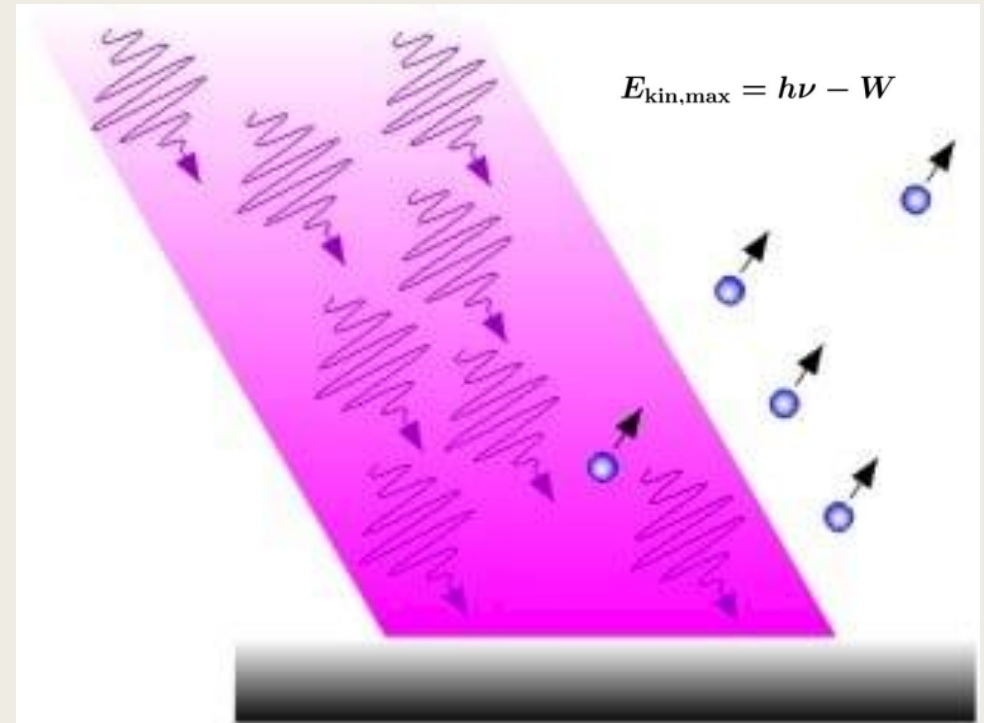


Abb. 19: Schematische Darstellung des Photoeffekts.<sup>[3]</sup>

# Compton-Effekt

## Experiment

- Streuung von Röntgenstrahlung an Elektronen
- Messung unter verschiedenen Streuwinkeln

## Experimentelle Beobachtung

- erster Peak: keine (geringe) Energieübertragung
- zweiter Peak: Energieverlust des Photons bei Streuung

## Physikalische Bedeutung

- Energie- und Richtungsänderung von Photon und Elektron
- Wellenlängenverschiebung abhängig vom Streuwinkel

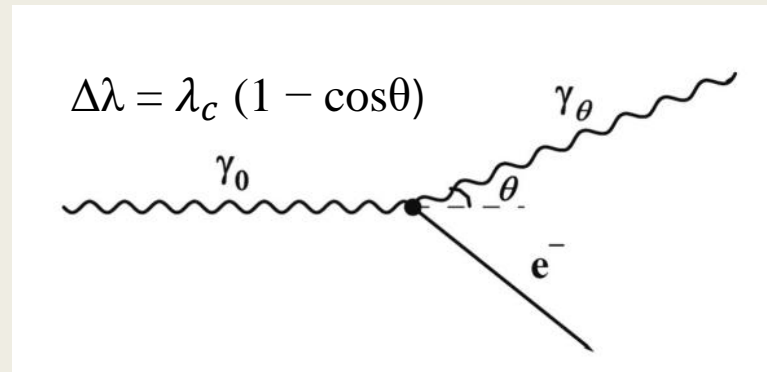


Abb.20: Schematische Darstellung des Compton-Effekts.

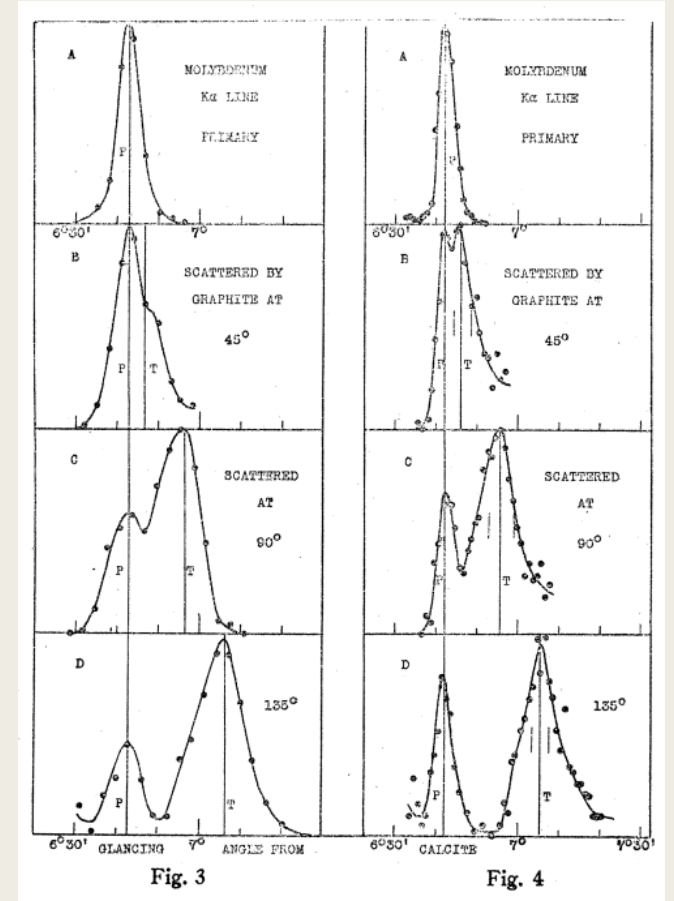


Abb. 21: Experimentelle Beobachtung der Wellenlängenverschiebung bei verschiedenen Streuwinkeln. [1]

# Paarbildung

- Photon  $\rightarrow$  Elektron-Positron-Paar
- Umwandlung im Coulomb-Feld eines Kerns
- Energie- und Impulserhaltung erfordern einen Rückstoßkern

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 \approx 1.022 \text{ MeV}$$

Schwellenenergie der Paarbildung

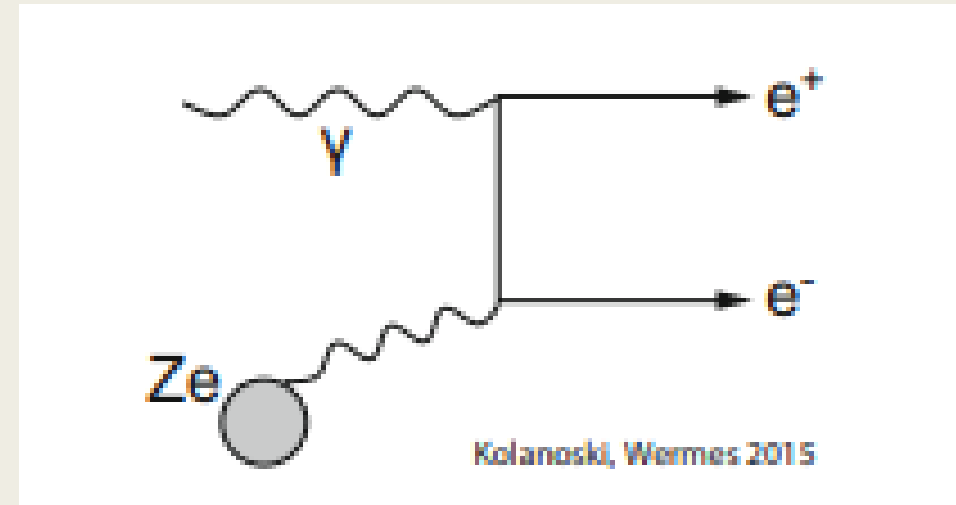


Abb. 22: Diagramme für die Paarbildung. <sup>[6]</sup>

# Wechselwirkung von Hadronen mit Materie

## Eigenschaften

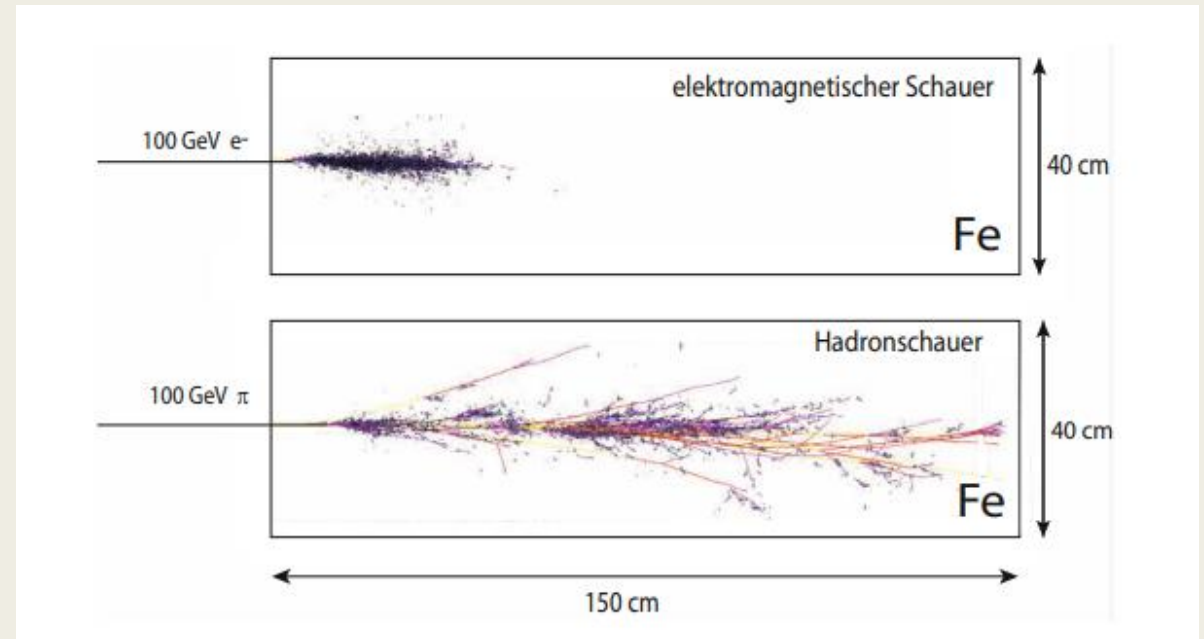
- starke Wechselwirkung dominant

## Beispiele

- elastische Streuung
- inelastische Streuung
- Sekundärteilchen-Erzeugung

## Hohe Energien

- Bildung hadronischer Schauer



**Abb. 23:** Vergleich eines elektromagnetischen und hadronischen Schauers bei 100 GeV in Eisen. <sup>[6]</sup>

# Wechselwirkungen von Neutrinos

## Eigenschaften:

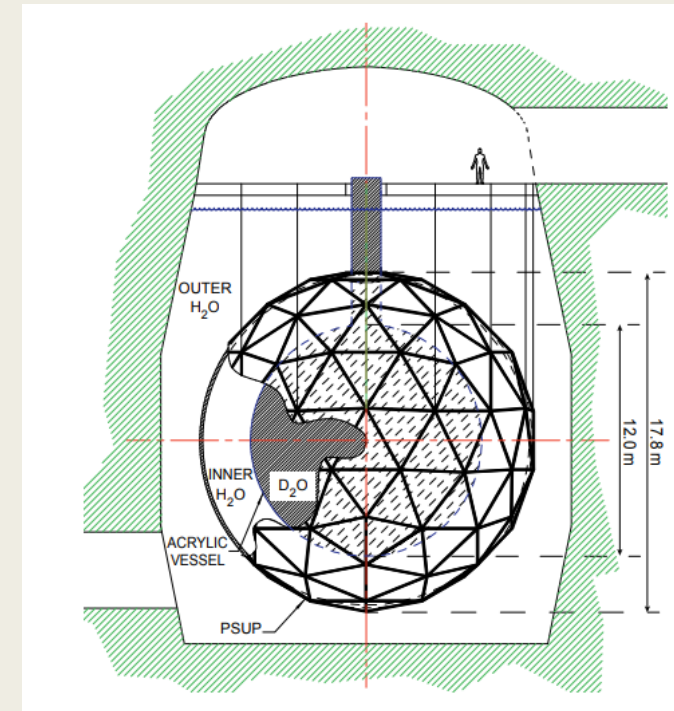
- nur schwache Wechselwirkung
- sehr kleiner Wirkungsquerschnitt
- Neutrinos durchdringen Materie fast ungehindert

## Nachweis:

- direkter Nachweis sehr schwierig
- große Neutrinodetektoren notwendig

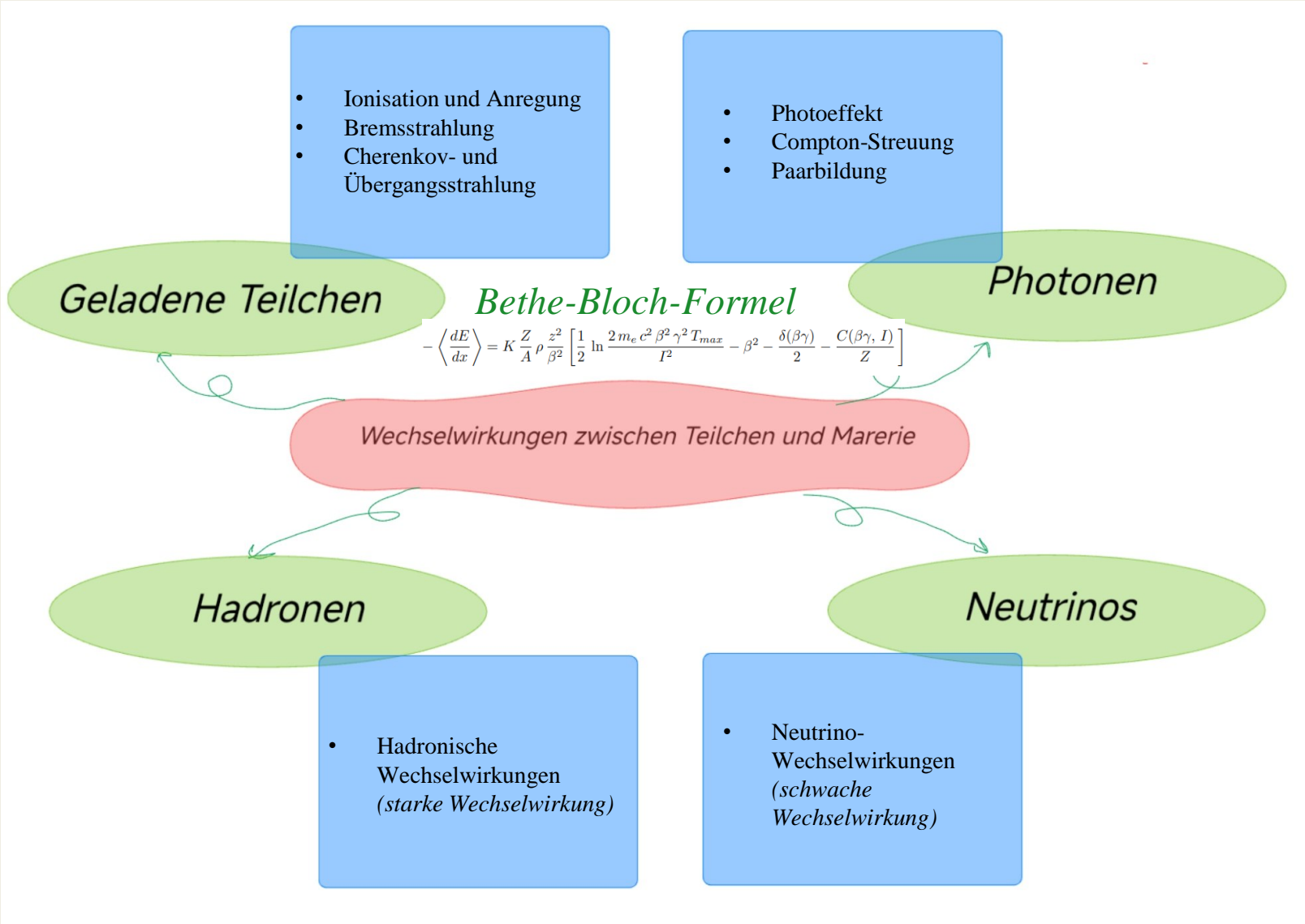
## Anwendungen:

- Teilchenphysik
- Neutrino-Astronomie



**Abb. 24:** Aufbau des Sudbury Neutrino Observatory (SNO) zur Detektion von Neutrinos. <sup>[6]</sup>

# Zusammenfassung



# Literaturverzeichnis:

1. Compton, A. H. (1923). *The spectrum of scattered X-rays*. Physical Review, 22(5), 409–413. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.22.409>
2. LEIFIphysik (o. D.): *Bremsstrahlung*. Verfügbar unter: <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/roentgenstrahlung/grundwissen/bremsstrahlung> (Zugriff: 18.06.2026).
3. LEIFIphysik (o. D.): *Einsteins Theorie des Lichts*. Verfügbar unter: <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/grundwissen/einsteins-theorie-des-lichts> (Zugriff: 25.05.2026).
4. Wikipedia (o. D.): *Elektromagnetisches Spektrum*. Verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches\\_Spektrum](https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum) (Zugriff: 18.06.2026).
5. Demtröder, Wolfgang: *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. 3. Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer, 2005 80 82 ст
6. Kolanoski, H.; Vermes, N.: *Teilchendetektoren. Grundlagen und Anwendungen*. Springer, Berlin Heidelberg, 2015, S. 28–89.
7. Particle Data Group. (2023). *Passage of particles through matter*. In *Review of Particle Physics*. Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://pdg.lbl.gov/2023/web/viewer.html?file=../reviews/rpp2023-rev-passage-particles-matter.pdf>
8. VSEOSVITA: *Elektromagnetische Wellen. Eigenschaften elektromagnetischer Wellen. Hertz's Experimente*. Verfügbar unter: <https://vseosvita.ua/test/elektromahnitni-khvyli-vlastyvosti-elektromahnitnykh-khvyli-doslidy-herts-2546391.html> (Zugriff am 16.06.2026).