

Strahlung und Materie

①

1. Durchgang von Strahlung durch Materie

Je nach der Art der „Strahlung“ spielen verschiedene Wechselwirkungen die Hauptrolle:

- * Strahlung = elektrisch geladenes Teilchen oder Photon
↳ elektromagnetische WW

Meistens WW zwischen dem Teilchen und den Elektronen der Atomhülle der Materie. Dabei können die Elektronen als freie Teilchen betrachtet werden:

- in Kernphysik ist $E_{\text{Strahlung}} \sim 1 \text{ MeV}$ viel größer als die Bindungsenergie $\sim 10 \text{ eV} - 1 \text{ keV}$ der Elektronen
- die (de Broglie) Wellenlänge der Strahlung ist viel kleiner als der Durchmesser der Atome

- * Strahlung = ungeladenes Teilchen außer Photon oder Neutrino
↳ starke WW

- * Strahlung = Neutrino ↳ schwache WW
(wird hiernach nicht weiter diskutiert).

Allgemein wird die Strahlung in der Materie abgebremst (und gestoppt): die Strahlung verliert (kinetische) Energie, die der Materie übertragen wird.

„Dosimetrie“: Messung der von einem Stoff absorbierten Strahlungsenergie, meistens mit Angaben zu deren biologischen Wirksamkeit (s. Abschn. 2).

Strahlungsmessgeräte:

- „Detektor“, um Strahlung nachzuweisen
- „Spektrometer“: für eine genauere Charakterisierung.

1.1 Durchgang eines geladenen Teilchens durch Materie

Geladenes Teilchen $\rightarrow$ Masse $m \neq 0$

Teilchen-Materie Prozesse:

* Stöße mit den Elektronen der Atomhülle

$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Anregung der Atome} \\ \text{Ionisation der Atome} \end{array} \right\}$ "Ionisationsverluste"

$\hookrightarrow$ führt zu "sekundärem" Elektron mit beträchtlicher kinetischer Energie

- Wenn $m \gg m_e$ ("schweres" Teilchen): die Flugrichtung des Teilchens ändert sich fast nicht

- Wenn Teilchen = Elektron: beträchtliche Richtungsänderungen

* Streuung im Coulomb-Feld der Kerne

$\leadsto$ meist vernachlässigbar, elastisch.

* Im Coulomb-Feld der Hüllenelektronen bzw. der Kerne ändert sich die Geschwindigkeit des Teilchens.

$\rightarrow$ Es emittiert Bremsstrahlung: "Strahlungsverluste"

Teilchen mit der gleichen el. Ladung unterliegen der gleichen WW: die Abbremsung hängt von der Masse m ab und wächst mit abnehmender Masse

$\leadsto$ nur beträchtlich für Elektronen.

1.1.a Ionisationsverlust schwerer Teilchen

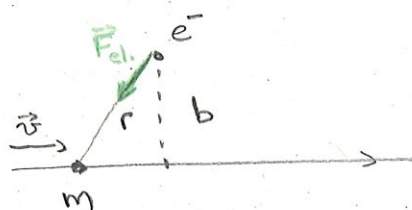
Teilchen: Masse $m \gg m_e$, Ladung ze

stoß an ein Elektron (e^- , beschrieben als freie Teilchen).

Flugrichtung des schweren Teilchens fast ungeändert:

$$\vec{v}_{\text{nach}} \approx \vec{v}_{\text{vor}} \approx \vec{v}$$

(hier $ze > 0$)



Coulomb-Kraft des Teilchens auf das Elektron:

$$F_x = \frac{-ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\Delta x}{r}, \quad F_y = \frac{-ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\Delta y}{r} \quad \text{mit } \Delta x = x_e - x_{\text{Teilchen}} \text{ und } \Delta y = y_e - y_{\text{Teilchen}}$$

Das Teilchen fliegt von $x = -\infty$ bis $x = +\infty$ entlang der x -Achse ($y=0$) und überträgt dem Elektron ($x=0, y=b$) den Impuls

$$P_x = \int_{-\infty}^{\infty} F_x dt = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-ze^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{-x}{(x^2+b^2)^{3/2}} \frac{dx}{v} = 0$$

$$P_y = \int_{-\infty}^{\infty} F_y dt = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-ze^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{b}{(x^2+b^2)^{3/2}} \frac{dx}{v} = \frac{-2ze^2}{4\pi\epsilon_0 v b}$$

(Bem.: versteckte Annahme (toy model!): die Position des Elektrons hat sich nicht geändert...)

→ kinetische Energie des Elektrons nach dem Stoß (= Energie verloren durch das schwere Teilchen):

$$E_{\text{kin}, e^-} = \frac{\vec{p}^2}{2m_e} = \frac{z^2 e^4}{8\pi^2 \epsilon_0^2 m_e v^2 b^2} \quad (1)$$

Materie: besteht aus Atomen mit Massenzahl Z und Teilchenzahldichte n

→ Teilchenzahldichte der e^- : Zn

Längs einer Wegstrecke dl existieren $2\pi b db dl Zn$ Elektronen mit einem Stoßparameter zwischen b und $b+db$: diese führen zu einem Energieverlust (des Teilchens)

$$\frac{dE}{dl db} = - \frac{z^2 e^4 2\pi b Zn}{8\pi^2 \epsilon_0^2 m_e v^2 b^2} = - \frac{z^2 Z e^4 n}{4\pi \epsilon_0^2 m_e v^2 b}$$

$$\rightarrow \frac{dE}{dl} = \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \frac{dE}{dl db} db = - \frac{z^2 Z e^4 n}{4\pi \epsilon_0^2 m_e v^2} \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \quad (2)$$

Grenzen des Integrals:

(4)

- $b_{\max}$: der Stoßparameter kann nicht zu groß werden, sonst reicht die Wechselwirkungsenergie nicht mehr aus, um die Hüllenelektronen anzuregen

$$\rightarrow b_{\max} \propto \frac{1}{E_{\text{ionis}}^{1/2}} \quad \text{wobei } E_{\text{ionis}} \sim 10Z \text{ eV}$$

(durchschnittliche Ionisationsenergie)

- $b_{\min}$: gegeben durch den maximalen Impuls (bzw. die maximale Energie $E_{\max}$), den das schwere übertragen kann

$$\rightarrow b_{\min} \propto \frac{1}{E_{\max}^{1/2}}$$

Setze in Gl. (2) ein:

$$\frac{dE}{dl} = - \frac{z^2 Z e^4 n}{8 \pi \epsilon_0^2 m_e v^2} \ln \frac{E_{\max}}{E_{\text{ionis}}} \quad (3)$$

In einer relativistischen quantentheoretischen Berechnung leitet man die Bethe-Bloch-Formel her:

$$\frac{dE}{dl} = - \frac{z^2 Z e^4 n}{4 \pi \epsilon_0^2 m_e v^2} \left[\ln \frac{E_{\max}}{E_{\text{ionis}}} - \frac{v^2}{c^2} - C \right] \quad (4)$$

mit $E_{\max} \approx \frac{2 m_e v^2}{1 - v^2/c^2}$

unwesentliche Konstante
(Dichte der Materie)

Der Energieverlust (pro Einheitswegstrecke) (3) bzw. (4)

- ist proportional zu z^2
- hängt von v ab, nicht von der Masse des Teilchens.

Für eine feste Energie $\mathcal{E}$ des Teilchens gilt $\frac{1}{v^2} \propto \frac{m}{\mathcal{E}}$,
so dass schwerere Teilchen mehr Energie verlieren.

Sei ρ die Massendichte der Materie: $\rho \approx n A m_N$

Der spezifische Ionisationsverlust wird als $S \equiv -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl}$ definiert.

Wenn man die (geringe) Abhängigkeit des Logs vernachlässigt

$$S \propto \frac{Z}{A}, \quad \text{annähernd stoffunabhängig}$$

(bis auf ^1H)

Reichweite:

$$R \equiv \int_{E_{\text{tot}}}^0 \frac{dE}{-eS} = \int_{E_{\text{tot}}}^0 \frac{dE}{dE} dE$$

(5)

(Die Definition ist äquivalent zu $E_{\text{tot}} = \int_0^R \frac{dE}{dE} dE$, wobei E_{tot} die ursprüngliche gesamte kinetische Energie des schweren Teilchens ist)

und für α -Teilchen:

- in der Luft: 3 cm ($E_{\text{tot}} \sim 4 \text{ MeV}$) - 8,5 cm ($E = 8 \text{ MeV}$)

- im Wasser: $3,6 \cdot 10^{-2}$ - $8,6 \cdot 10^{-2}$ mm

(Aber: schwere Teilchen ionisieren die Materie viel: in der Luft erzeugt ein α -Teilchen mit Energie $E \sim 2,88 \cdot 10^4 E_0 (\text{MeV})$ Ionen).

Längs der Wegstrecke nimmt die Energie des schweren Teilchens ab $\rightarrow$ sein spezifischer Ionisationsverlust ($\propto \frac{1}{v^2}$) nimmt zu $\rightarrow$ Bragg-Kurve, mit dem Bragg-Peak am Ende des Wegs, wo der Hauptteil der Energie deponiert wird.