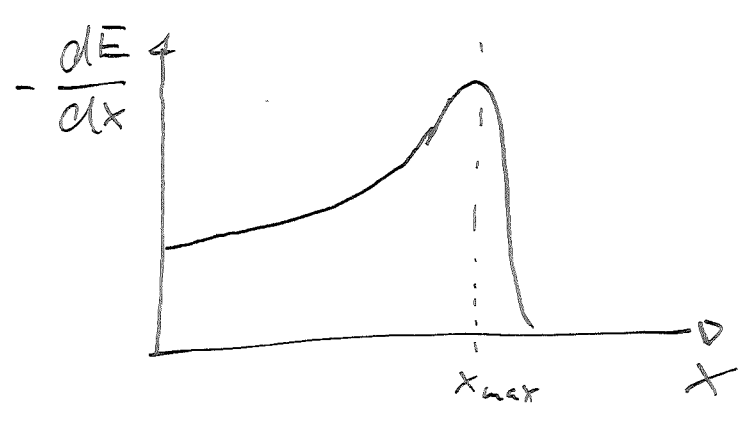


Bragg-Kurve : Energiedeposition entlang Teilchen spw



Maximale Energieverlust
 am Ende der Spw.
 Anwendung in der Strahlentherapie
 mit schweren Ionen (^{12}C)

Elektronen :

Bethe Block beschreibt e^\pm Kollisionsverlust
 allerdings 2 Annahmen nicht gültig:

- 1) $m_e \ll m_{\alpha, \text{C}, \dots} \Rightarrow$ Ablenkung
- 2) identische Teilchen \Rightarrow ununterscheidbar
 \Rightarrow max. Energieübertrag T_e

geringer Masse verlieren Elektronen zusätzliche Energie
 über Bremsstrahlung.

Klassisch: Emission EM aufgrund der Beschleunigung
 im E-Feld der Kernladung

Bei wenigen keV ist $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}}$ gering

Häufiger bei einigen 10 keV (materialabhängig)
ähnlich wie bei Kollisionsverluste.

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{tot}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{coll}}$$

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} \approx 4 \times \frac{N_A \cdot Z}{A} z^2 r_e^2 \left(\frac{E}{X_0}\right) \ln\left(\frac{183}{z^{1/3}}\right) \equiv \frac{E}{X_0}$$

Kritische Energie $E_c := \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{coll}} \quad \text{für } E = E_c$

Bsp:	Pb	$E_c = 9,51 \text{ keV}$
	Al	51,0 keV
	H ₂ O	92,0 keV

Näherung $E_c \approx \frac{800 \text{ keV}}{Z + 1,2}$

Annahme: $\frac{dE}{dx} \propto \left(\frac{v^2}{m_e c^2}\right)^2$

Bremsstrahlung für Neutron $v_n = 10^6 \text{ rad } c^2$

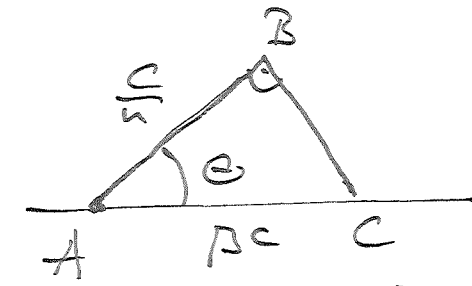
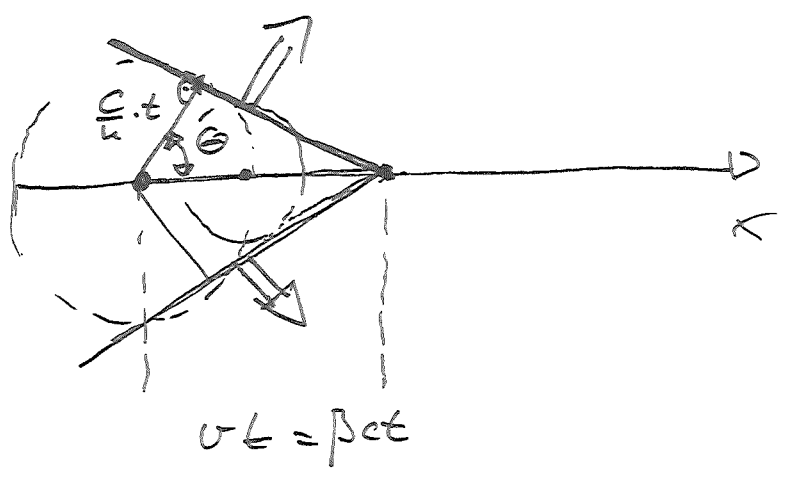
$\Rightarrow \frac{1}{40.000}$ kleiner $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}}$ für Neutron $v_n = 0,5 \text{ rad } c^2$

$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} \equiv \frac{E}{X_0} \Leftrightarrow E(x) = E_0 e^{-x/X_0}$

\Rightarrow Strahlungslänge X_0 der Dichte, bei der ein Elektron $\frac{1}{2}$ seiner Energie über Bremsstrahlung verliert.

Cherenkov Strahlung: Emission von EM Strahlung wenn sich Teilchen mit Geschwindigkeit größer als die des Lichtes in dem Medium ist. Lichtgeschwind. in Medium $v_c = v = \frac{c}{n}$

$v_{\text{particle}} > \frac{c}{n} \Rightarrow$ „Elektromagnetische Schockwelle“ n Brechungsindex des Mediums



$$\cos \theta = \frac{AB}{AC} = \frac{1}{n\beta} \approx \frac{1}{n}$$

Wellenfront hat konische Form (Cherenkov-Kegel) mit Öffnung Θ_c wobei $\cos \Theta_c = \frac{1}{\beta n(\omega)}$

N.B. Energieverlust ist klein im vgl. Kollisionsverluste.

$$-\frac{dE}{dx} \approx 10^{-3} \text{ neV cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Effekt wird z. Nachweis von Strahlung in Detektoren verwendet!

Wechselwirkung von Neutronen mit Materie

Ladung des Neutrons $Q_n = 0 \Rightarrow$ keine Coulomb WW mit Elektronen u. Kernen

WW über starke WW mit Kernen

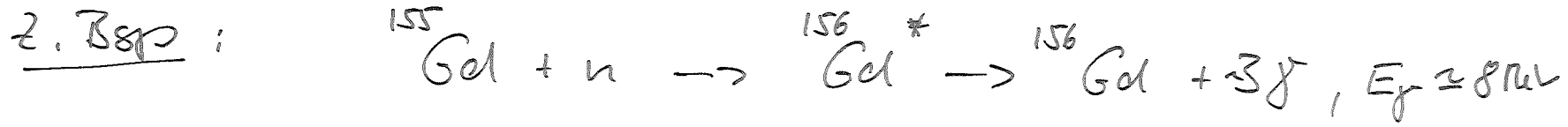
WW ist stark energieabhängig. $\Delta t = \frac{\Delta x}{v} \Rightarrow \sigma \propto \frac{1}{v}$

Größenordnung $\sigma \approx 10^{-24} \text{ cm}^2$ (1 barn),
"Radius" $\approx 10^{-12} \text{ cm}$ (\Rightarrow starke WW ist kurzreichweitig)

Art der WW von Neutronen mit Kernen:

- 1) elastische Streuung an Kernen $A(n, n)A$
 \Rightarrow wesentlicher Mechanismus des Energieverlustes für MeV Neutronen
- 2) inelastische Streuung: $A(n, n')A^*$, $A(n, 2n')B, \dots$
 A^* : angeregter Zustand von A
Energien \gtrsim MeV um Anregung zu generieren
- 3) (radiative) Neutroneneinfang: $n + (Z, A) \rightarrow (Z, A+1) + \gamma$

Anwendung
in dotierten
Szintillatoren



4) andere Kernreaktionen: $(n, p), (n, \alpha), (n, d), \dots$



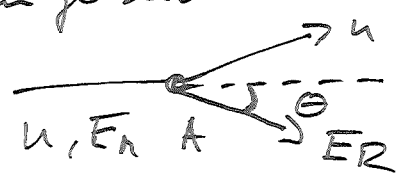
(Anwendung in ^3He -Proportionalzählr.

5) Spaltung: (n, f) verbt bei Kernische Energie

6) hochenergetische hadronische Schauerproduktion
 $E \gtrsim 100 \text{ MeV}$

Moderation (Abbremsung) von Neutronen

Schnelle Neutronen über 1) + 2) ins Kernische Gleichgewicht mit der umgebenden Atomen.



$$E_R = \frac{2A}{(1+A)^2} (1 - \cos \theta^*) E_n$$

θ^* : Streuwinkel in CMS

früher $D[\text{rad}] \rightarrow H[\text{rem}]$

$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ / $1 \text{ rem} = 10 \mu\text{Sv}$

natürliche Strahlung : $2 - 3 \text{ mSv/yr}$
davon $0,3 \text{ mSv/yr}$ Kosm. Strahlung
 $0,3 \text{ mSv/yr}$ terrestr. "
 $0,8 - 1,6 \text{ mSv/yr}$ Radon

gesamt : 1 mSv/yr

occupational : 100 mSv/5yr dabei $\sim 50 \text{ mSv/20 Jahre}$

Langstrecke flug : $\sim 120 \mu\text{Sv}$

Röntgenaufnahme : $200 \mu\text{Sv}$

Einheit: $\frac{\text{Joule}}{\text{kg}} =: 1 \text{ Gray (1G)}$

Faktor: rad $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$

Äquivalent Dosis (H)

Höhere Energiekonzentrationen (pro cm³) => höhere biologische Belastung

z. Bsp α , β belastete ^4He und e^- (mit gleicher Energie)

mit Q: Qualitätsfaktor

dE/dx [keV/ μm]	Q	
$\leq 3,5$	1	(Normierung) schnelle β
7,0	2	
23	5	
53	10	
175	<u>20</u>	x mit Enthalpe

$H := Q \cdot D$

$D [\text{Gy}] \rightarrow H [\text{Sv}]$
Sievert

$$E_{R,max} = \frac{4k}{(1+k)^2} E_n$$

$$E_{R,max} \stackrel{A=1}{=} E_n \quad \text{für } H$$

Neutronen thermalisieren effizient leichte

Absorbiermaterialien: H, H_2O, D_2O, C, \dots

Strahlung und Dosis

Gammaexposition: "Feld" von erzeugte Ladungen in einer γ -Punktquelle in Luft:

$$1 \text{ Röntgen} := 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (\text{in Luft bei STP})$$

Absorbierende Dosis D:

Belastung \propto absorbierte Energie

$$\text{Dosis} := \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{Einkermass}}$$

$$D := \frac{dE}{dm}$$