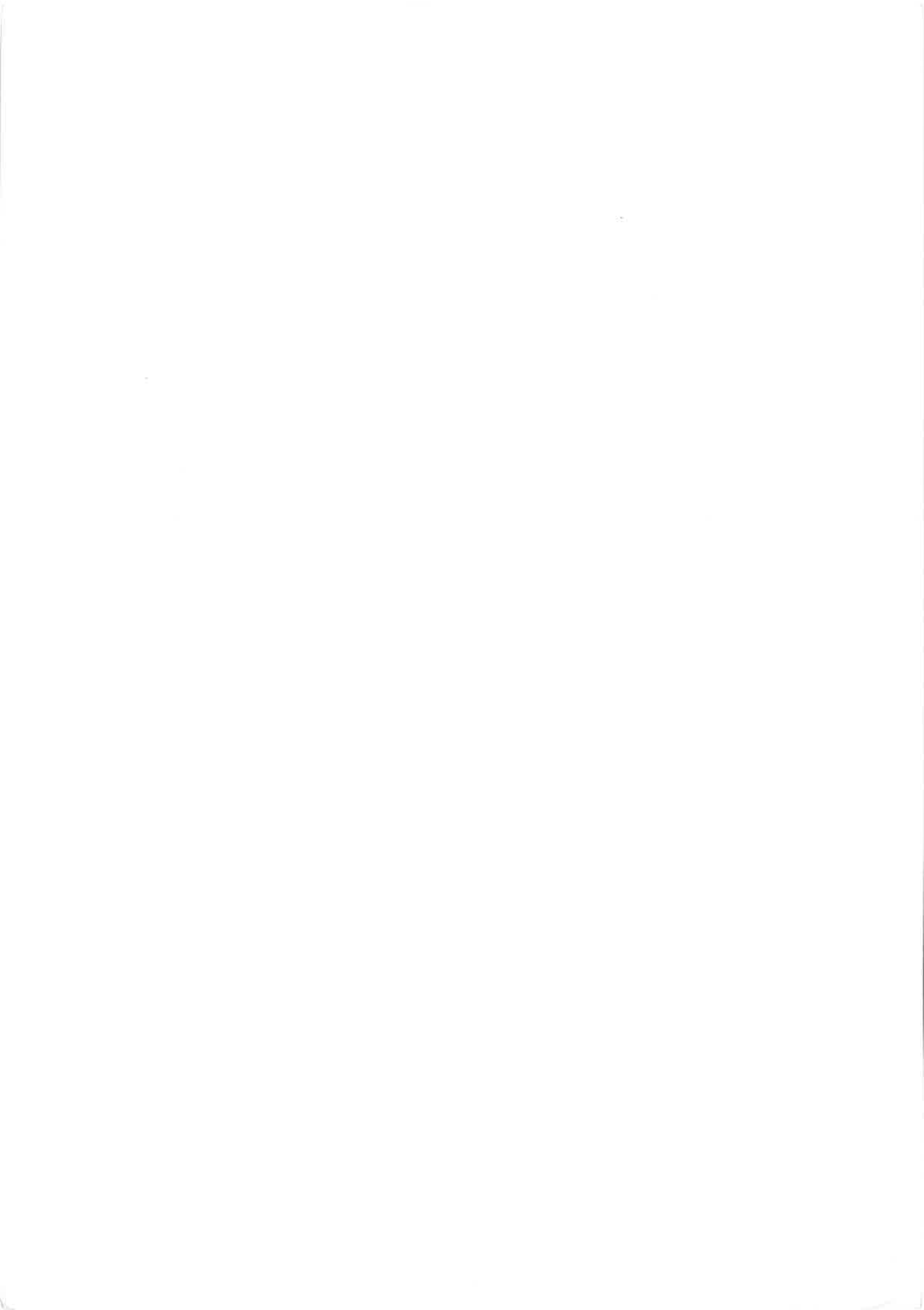


# Übung 1


vorzurechnen am: 20.4.2015

1. Wie sieht der inelastische Stoß zweier Autos aus? Bleibt die kinetische Energie erhalten? Wenn nein: In welche Energie wird die kinetische Energie umgewandelt?
2. Leiten Sie die Formeln für den elastischen Stoß ab (Vorlesung, Teil1, Folie <sup>25</sup>24)
3. Welchen Vorteil haben die Cockidge und die Lilienfeld-Röhre gegenüber den damals konventionellen Röhren? (Röntgen hat seine Untersuchungen mit einer damals konventionellen Röhre durchgeführt.)
4. Welche Energie wird nach der Bethe-Weizsäcker-Formel beim Zerfall von  $^{60}\text{Co}$  in  $^{60}\text{Ni}$  frei? Wie steht das Ergebnis im Zusammenhang mit den auf Folie 1.15 angegebenen Energien?
5. Welche kinetische Energie hat ein Elektron bzw. Proton mit jeweils einer Geschwindigkeit von 10% der Lichtgeschwindigkeit?
6. Durch welche Beobachtung konnte Rutherford 1904 die Existenz des Atomkerns (eines räumlich kleinen Teils des Atoms, in dem scheinbar die ganze Masse konzentriert ist) durch die Streuung von  $\alpha$ -Teilchen (deren Masse und Ladung bekannt war) an Goldfolien zeigen? Hinweis: Die Alternative zu dem Modell mit Atomkern war das Thomson'sche Puddingmodell, in dem positive und negative Ladungen gleichverteilt sind.
7. Welcher Zusammenhang besteht zwischen Frequenz und Wellenlänge eines Photons? Nutzen Sie dazu die relativistischen Energie-Impuls-Beziehungen!
8. Warum wurde  $^{60}\text{Co}$  für die Teletherapie benutzt und nicht  $^{207}\text{Bi}$ ?
9. Informieren Sie sich über die Verdienste, die Leiden und Lebensdaten von einigen Pionieren der Strahlentherapie: Emil Grubbe, Leopold Freund, Guido Holzknacht, Hermann Holthausen, Friedrich Dessauer, Heinrich Albers-Schönberg.



Übung 1

① inelastisch → <sup>kinetische</sup> Energie wird nicht konserviert → umgeformt in Wärme, Geräusch, Material kaputt, ...  
 $m \square \rightarrow M \square$

②  Energieerhaltungssatz  
 EES:  $\frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2} M u_M^2 + \frac{1}{2} m u_m^2$  (II)  
 Impulserhaltungssatz  
 IES:  $M v = M \cdot u_M + m u_m$   
 $\hookrightarrow u_M = \frac{M v - m u_m}{M} = v - \frac{m}{M} u_m$  (III)

(III) In (II) einsetzen:

$$\frac{1}{2} M v^2 = M \left( v^2 + \frac{m^2}{M^2} u_m^2 - 2 \frac{m}{M} v u_m \right) + \frac{1}{2} m u_m^2$$

$$0 = u_m \cdot \left( \frac{m^2}{M^2} u_m - 2 \frac{m}{M} v + u_m \cdot m \right)$$

$$0 = m u_m \left( u_m \left( \frac{1}{M} + \frac{m}{M} \right) - 2v \right) \rightarrow u_m = \frac{2v}{1 + \frac{m}{M}} = \frac{2M}{M+m} v \quad (I) \quad c_{gd}$$

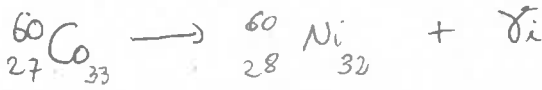
( $u_m = 0 \rightarrow$  keine Wirkung)

Aus (III):  $u_m = \frac{M v - m \cdot \frac{2M}{M+m} v}{M} = \left( 1 - \frac{2m}{M+m} \right) v = \frac{M-m}{M+m} v$



99% lost in heating  $\Delta V$  changes also X-rays (hardness)  
 Filament → you can change hardness &  $e^-$  current independently  
 Heizkathode hinter der Kathode

④



$Z > 20 \rightarrow$  empirische Bethe-Weizsäcker-Formel ganz gut, 1% Genauigkeit

$E_B({}^{60}\text{Co}) \rightarrow$  ~~Weg-Kern~~  $\rightarrow E_B({}^{60}\text{Co}) = a_v \cdot 60 - a_s \cdot 60^{2/3} - a_c \cdot (27) \cdot 26 \cdot 60^{-1/3} - a_s \frac{(33-27)^2}{4 \cdot 60} - a_p \cdot 60^{-1/2}$

$$E_B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z(Z-1)A^{-1/3} - a_s \frac{(N-Z)^2}{4A} + \begin{cases} a_p A^{-1/2} \\ 0 \\ -a_p A^{-1/2} \end{cases}$$

gg... gerade Anzahl p-n  
ug / zu  
un  
↳ beide ungerade

- $a_v = 15,67 \text{ [MeV]}$
- $a_s = 17,23$
- $a_c = 0,714$
- $a_s = 93,15$
- $a_p = 11,20$

	A	Z	N	$E_B$ (MeV)
${}^{60}\text{Co}$	60	27	33	532,68
${}^{60}\text{Ni}$	60	28	32	533,49

$\Delta E_B = -0,81 \text{ MeV}$  (frei werdende Energie)  $\neq 2,8 \text{ MeV}$  (0,7+1,2+1,3)

Ungenauigkeit der Formel:  $1\% \cdot 500 \text{ MeV} = 5 \text{ MeV} \leftarrow 2,8 \text{ MeV} < 5 \text{ MeV}$   
 ↳ global anwendbar, aber nicht für kleine Differenzen

⑤

$E_{kin} = \frac{1}{2} m_0 v^2$  (klassisch)  
 $v = 0,1$

$E_{kin,e} = 2,555 \text{ keV}$   
 $E_{kin,p} = 4,63 \text{ MeV}$

$m_e = 511 \text{ keV}$   
 $m_p = 938 \text{ MeV}$

$E_{kin} = (\gamma - 1)m$  (relativistisch)

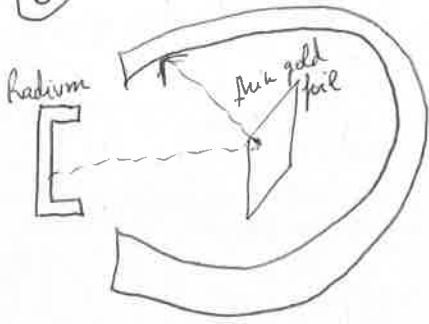
$E_{kin,e} = 2,574 \text{ keV}$   
 $E_{kin,p} = 4,73 \text{ MeV}$

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = 1,005$   
 ~~$\approx \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots$~~   
 $\approx 1 + \frac{1}{2} \beta^2$   
 $\approx 1 - \frac{1}{2}(-1) \cdot x = 1 + \frac{\beta^2}{2}$

10%  
 ⇓

Energie-Limit ab dem man relativ. rechnen muss  
 bei e- viel eher relativistisch rechnen, bei gegebener Energie

6



very few come back at large angles

Thomson Atom-model:



padding + und e<sup>-</sup> Positon

→ Rutherford (4) Ladung is concentrated in nucleus



explains large angles

elastischer Stop



m kern

$m \gg M$

$v_M = \frac{M-m}{M+m} v$

⇒ measure velocity before and afterwards to get an idea of the mass of the nucleus.

7

(1)  $E = mc^2 + p^2 c^2$

(2)  $m_0 = 0 \rightarrow$  (3)  $E = pc$

(4)  $p = \hbar k = \frac{\hbar}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\hbar}{\lambda}$

(5)  $E = \hbar \omega = \frac{\hbar}{2\pi} \cdot 2\pi \nu$

(4,5) → (3) :  $\hbar \omega = \frac{\hbar c}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu}$

8

<sup>60</sup>Co instead of <sup>207</sup>Pb  
Halbwertszeit sollte lang sein

Pb → 31 j  
Co → 5 j

Beide danach stabil

hohen Energien von Pb über metastable, → zu kurze  $\tau$   
nicht die 31 j

⑨ wir bestrahlen solange die Haut entzündet

Grubbi Chicago 1960 85 Jahre, Krebskrankungen, 90 Operationen, Schäden Gesicht nicht mehr reden/lesen Öffentlichkeit

Freund Prag 1868 19. Belgien, Jude, 75 J, erster Anwender

Holzknecht 1872-1931 55 Jahre, wir bestrahlen bis ne bestimmte Dosis erreicht wird  
Wien Holzknedit Dosimeter, Schwärzung. Schädigung Haut, Finger amputiert, Röntgenkrebs 64 Oper.

Holthosen 1886-1971 85 Jahre, Hamburg

Dessauer 1881-1963, Jude, Reichstagsabgeordneter, Exil - Biologische Wirkung der rad. Strahlung. 170 Oper.

⑩ ~~Man muss mit Quellen oder unbekanntem Forschungsgebieten~~

Albers-Schönberg 1865-1921, Hamburg. Amputiert.

Röntgen kommt nicht vor, weil er sich für die med. Anwendung nicht interessiert hat.

Was lernen wir?

- 4/6 waren Deutsche
- 4/6 hatten Schäden von der Strahlung
- 2/6 ins Exil wegen 3. Reich
- Man muss mit Quellen oder unbekanntem Forschungsgebieten aufpassen

# Übung 2

vorzurechnen am: 27.4.2015

1. Wie dick muss eine Bleischürze sein, damit einfallende Röntgenstrahlung eines Zahnröntgengerätes auf 10% geschwächt wird?
2. Erstellen Sie einen Graphen  $\frac{\tau}{\rho} = \frac{\tau}{\rho}(Z)$  für die Abhängigkeit des Photoabsorptionskoeffizienten von der Kernladungszahl für mittelschwere Kerne mit  $10 \leq Z \leq 30$  und  $E_\gamma = 30$  keV mit Hilfe einer geeigneten Datenbank. Versuchen Sie den Graphen mit einer geeigneten Funktion zu approximieren! Ist in dem Diagramm erkennbar, ob alle vorhandenen Elektronen am Photoeffekt beteiligt sein können?
3. Weisen Sie durch möglichst einfache Rechnung nach, dass eine Paarbildung bei dem sich Elektron und Positron in Richtung des einfallenden Photons weiterbewegen ohne weitere Wechselwirkung, nicht möglich ist.
4. Verifizieren Sie die in der Vorlesung angegebene Formel für die kinetische Energie (Teil2, Folie 8) des gestreuten Compton-Elektrons.
5. Man bestimme empirisch mit Hilfe der Datenbasis des NIST die Abhängigkeit des Compton-Massenschwächungskoeffizienten von der Kernladungszahl  $Z$ .
6. Bei welchen Comptonstreuwinkeln hat die Winkelverteilung und der differentielle Wirkungsquerschnitt der Streuphotonen für  $E_\gamma = 511$  keV Primärstrahlung (Positronen-Annihilationsstrahlung) ihr Maximum?
7. Verifizieren Sie die Formel für den maximalen Energieübertrag beim Comptoneffekt (Vorlesung Teil2, Folie 10).
8. Man bestimme den LET für die Cobalt- $\gamma$ -Strahlung. (Wasser)
9. Man berechne die Energie der bei Comptonstreuung unter  $90^\circ$  gestreuten Photonen für sehr hohe Photonen-Primärenergien.
10. Man vergleiche für 20 MeV Photonenstrahlung den linearen Schwächungskoeffizienten für atomare und nukleare Wechselwirkung, am Beispiel des Wassers.
11. Angenommen, es werde Strahlentherapie mit einem monoenergetischen Photonenstrahl der Energie  $E_\gamma = 15$  MeV betrieben. Es werde ferner angenommen, dass es sich um einen Parallelstrahl





mit einem transversalen Querschnitt von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  handelt. Der Strahl soll, bevor er den Patienten trifft, 1 m Luft durchlaufen. Die Dosisleistung des Strahles sei  $1 \text{ Gy/min}$ . Man schätze die Luftradioaktivität nach Applikation einer Dosis von  $2 \text{ Gy}$ , wenn man unterstellt, dass die Luft im Bestrahlungsbunker nicht ausgetauscht wird.

12. Man berechne  $t_t$  für Blei (K-Schalen-Photoeffekt) und  $t_c$  für  $90 \text{ keV}$  Röntgenstrahlung und für  $^{60}\text{Co}$  Gammastrahlung ( $E_\gamma \approx 1250 \text{ keV}$ ).



Übung 2

70-100 keV

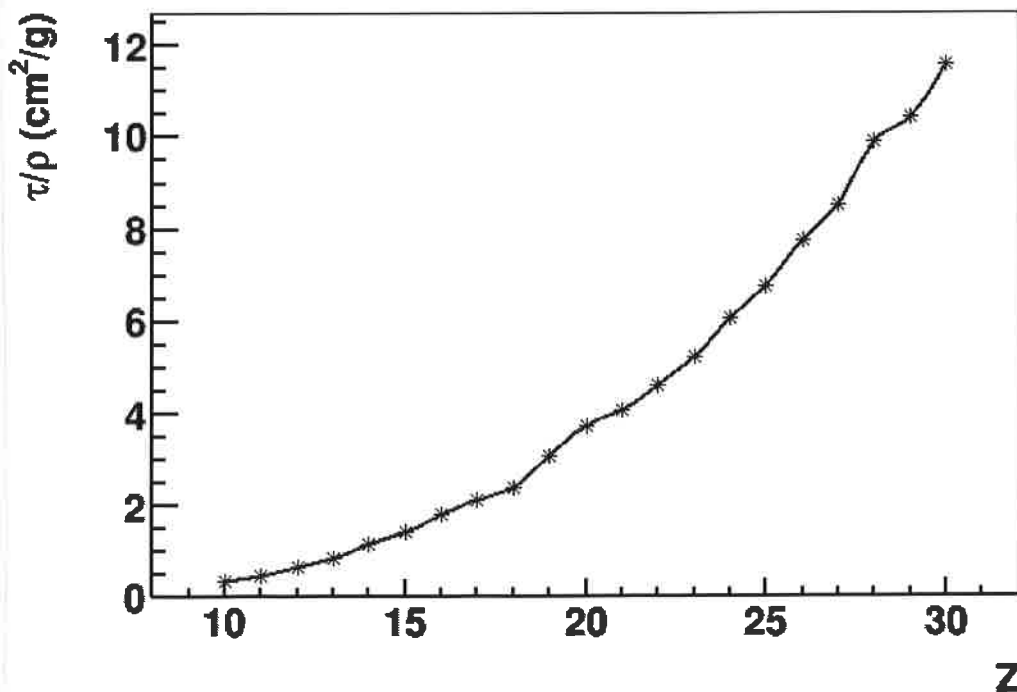
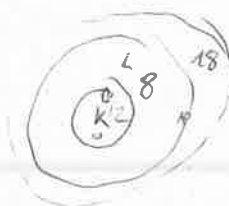
①  $E_x = 100 \text{ keV}$   
 $\rho = 10\%$


$\rho_{Pb} = 11,34 \text{ g/cm}^3$        $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{Pb, Ex} = 5,549 \text{ cm}^2/\text{g}$

$p = e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{Pb, Ex} \cdot \rho_{Pb} \cdot TVL} \leftrightarrow TVL = \frac{1}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{Pb, Ex} \cdot \rho_{Pb}} \ln\left(\frac{1}{p}\right) = 0,37 \text{ mm Pb}$

$E_x = 15 \text{ keV}$   
 $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{Ex, Pb} = 1,116 \times 10^2 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \rightarrow TVL = 0,02 \text{ mm}$   
 $E_x = 150 \text{ keV}$   
 $\frac{\mu}{\rho} = 2,014 \text{ cm}^2/\text{g} \rightarrow TVL = 1 \text{ mm}$

② Knick 20128 ;  $Z^t \rightarrow t_{\alpha}^3$



③   $p_r = p_{e^-} + p_{e^+} \quad |c|^2$   $p_r^2 = 0$

$$0 = p_{e^-}^2 + p_{e^+}^2 + 2p_{e^-} p_{e^+}$$

$$0 = 2m_e^2 + 2p_{e^-} p_{e^+} \Rightarrow 0 = m_e^2 + 2E_{e^-} E_{e^+} / (|p_{e^-}| |p_{e^+}| \cos \alpha)$$

$$p_r - p_{e^-} = p_{e^+} \quad |c|^2$$

$$p_r^2 + p_{e^-}^2 - 2p_r p_{e^-} = p_{e^+}^2$$

$$0 + m_e^2 - 2p_r p_{e^-} = m_e^2$$

$$\hookrightarrow p_r p_{e^-} = 0 \rightarrow E_r E_{e^-} - E_r |p_{e^-}| \cos \alpha_1 = 0 \quad | : E_r \quad (E_r \neq 0)$$

$E_{e^-} > 0, \text{ thus } \cos \alpha_1 > 0, \alpha_1 \leq \pi/2$

$$\hookrightarrow E_{e^-} = |p_{e^-}| \cos \alpha_1 < E_{e^-} \cos \alpha_1 \quad (m_e \neq 0)$$

$\hookrightarrow \cos \alpha_1 > 1 \rightarrow$  Widerspruch //

Drucksgleichung

Oder:

Impuls:  $p = E_r/c$       Energie:  $E = E_r$  zusammengefasst  
 $E' = 2m_0 c^2 + E_{kin}$

$$EES: E'^2 = (2m_0 c^2)^2 + (p' c)^2 = (2m_0 c^2)^2 + (p_+' + p_-' )^2 c^2 \quad (4)$$

$$(p_+' + p_-' )^2 c^2 = E'^2 - (2m_0 c^2)^2$$

$$(4) \rightarrow (6) \quad (p_+' + p_-' )^2 c^2 = E'^2 - (2m_0 c^2)^2 = \dots = \frac{1}{c^2} (4m_0^2 c^4 + E_{kin}^+ + E_{kin}^- + (E_{kin}^+ E_{kin}^- + E_{kin}^+ E_{kin}^-))$$

aus (4)  $E_{kin}^+ + E_{kin}^- = E' - 2m_0 c^2 = E_r - 2m_0 c^2 \quad [E' = E_r]$

in (7)  $p_+' + p_-' = \frac{1}{c} \sqrt{4m_0^2 c^4 (E_r - 2m_0 c^2) + (E_r - 2m_0 c^2)^2} = \frac{1}{c^2} \sqrt{4m_0^2 c^4 E_r - 8m_0^2 c^4 E_r + 4E_r^2 - 4E_r m_0^2 c^4 + 4m_0^2 c^4}$

$$= \frac{1}{c} \sqrt{E_r^2 - (4m_0 c^2)^2} = p' < p - \frac{E_r}{c}$$



$p_r = (E_r, E_r \vec{v})$  ... unitarily  
 $p_{r'} = E_{r'} (1, \vec{v})$   
 $p_e = (m_e, \vec{0})$   
 $p_{e'} = (E_{e'}, \vec{p}_{e'})$

$p_r + p_e = p_{r'} + p_{e'}$   
 $p_r - p_{r'} = p_{e'} - p_e$  | ( )<sup>2</sup>     Trick 1      $1 - p_{r'} - p_e$

$0 + 0 - 2p_r p_{r'} = 2m_e^2 - 2p_e p_{e'} \quad | : 2$

$-E_r E_{r'} + E_r E_{r'} \cos \theta = m_e^2 - m_e E_{e'}$

Trick 2  
 $E_r + m_e = E_{r'} + E_{e'}$

$-E_r E_{r'} (1 - \cos \theta) = m_e (m_e - E_{e'})$   
 $E_{e'} - E_r$

$| : (E_r E_{r'})$

$1 - \cos \theta = -m_e \left( \frac{1}{E_r} - \frac{1}{E_{r'}} \right)$

$\frac{1 - \cos \theta}{m_e} = \frac{1}{E_{r'}} - \frac{1}{E_r}$

$E_{e' \text{ kin}} = E_{e'} - m_e = E_r - E_{r'} = E_r - \left( \frac{1 - \cos \theta}{m_e} + \frac{1}{E_r} \right)^{-1}$

$= E_r - \frac{m_e E_r^2}{(1 - \cos \theta) E_r + m_e} = E_r \left( 1 - \frac{m_e}{(1 - \cos \theta) E_r + m_e} \right)$

$= E_r \left( \frac{m_e + E_r (1 - \cos \theta) - m_e}{(1 - \cos \theta) E_r + m_e} \right) = E_r \frac{\frac{E_r}{m_e} (1 - \cos \theta)}{1 + \frac{E_r}{m_e} (1 - \cos \theta)}$  ✓

Alternative

EES:  $E_0 + E_r = E_{r'} + E_{e'} \quad (1)$

IES:  $\vec{p}_r = \vec{p}_{r'} + \vec{p}_e$

$p_e^2 = p_r^2 + p_{r'}^2 - 2|p_r||p_{r'}|\cos \varphi \quad (2)$

E-I-Beziehung

$E_r = p_r/c \quad E_{r'} = p_{r'}/c \quad (3)$

$E_e^2 = E_0^2 + p_e^2 c^2$

(3) → (2)

$\frac{E_e^2 - E_0^2}{c^2} = \left( \frac{E_r}{c} \right)^2 + \left( \frac{E_{r'}}{c} \right)^2 - 2 \frac{E_r E_{r'}}{c^2} \cos \varphi$

$\vec{p}^2$   
 ↓ binom. Formel

$E_0^2 + E_r^2 + E_{r'}^2 + 2E_0 E_r - 2E_r E_{r'} - E_0^2 = E_r^2 + E_{r'}^2 - 2E_r E_{r'} \cos \varphi$

$2E_0 E_r - 2E_r E_{r'} - 2E_0 E_{r'} = -2E_r E_{r'} \cos \varphi$

wenn bleibt, unterstreichen

$$E_0(E_r - E_r') - E_r E_r' = -E_0 E_r' \cos\varphi$$

$$E_0(E_r - E_r') = E_r E_r' (1 - \cos\varphi)$$

$$E_r - E_r' = \frac{E_r E_r'}{E_0} (1 - \cos\varphi)$$

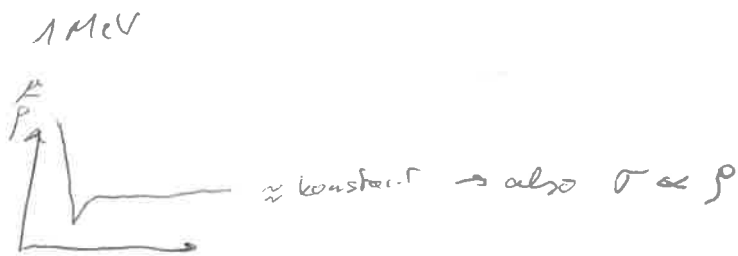
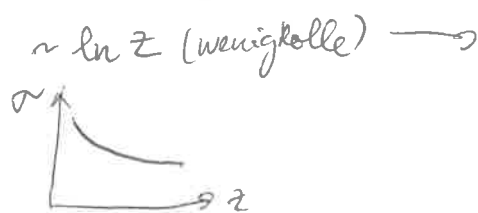
$$E_r = E_r' \left( 1 + \frac{E_r}{E_0} (1 - \cos\varphi) \right)$$

$$\hookrightarrow \bar{E}_r' = \frac{E_r}{1 + \frac{E_r}{E_0} (1 - \cos\varphi)}$$

$$E_k = E_r - \bar{E}_r' = E_r - \frac{E_r}{1 + \frac{E_r}{E_0} (1 - \cos\varphi)} = E_r \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{E_r}{E_0} (1 - \cos\varphi)} \right)$$

$$= E_r \left( \frac{1 + \frac{E_r}{E_0} (1 - \cos\varphi) - 1}{1 + \frac{E_r}{E_0} (1 - \cos\varphi)} \right) \rightarrow E_{e^-} = E_r \frac{\frac{E_r}{E_0} (1 - \cos\varphi)}{1 + \frac{E_r}{E_0} (1 - \cos\varphi)}$$

⑤ Für  $E_{ph} = 30 \text{ keV}$

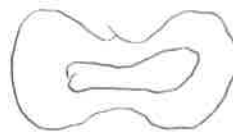


⑥ Ableiten zu aufwendig

Tabelle ablesen / My PhD thesis

$\int_{15 \text{ keV}}$  Maximum at  $\theta \approx 40^\circ$

$E_r \ll 100 \text{ keV}$   
Thomson scattering



diff Weg (ohne  $2\pi \sin\theta$ )  
mit Raumwinkel  $\rightarrow \times 2\pi \sin\theta$

⑦  $\rightarrow$  see ④

$$E_k(\varphi) = \frac{E_r^2 / me}{\frac{1}{1 - \cos\varphi} + \frac{E_r}{me}}$$

$\varphi \in [0, \pi]$   
max( $\varphi$ )?  $E_r, me$  fest

$\hookrightarrow$  Nenner am kleinsten  
 $\rightarrow 1 - \cos\varphi$  am größten  
 $\rightarrow \cos\varphi$  am kleinsten  $\rightarrow \varphi = \pi$

$$= \frac{E_r^2 / me}{\frac{1}{2} + \frac{E_r}{me}} = \frac{\bar{E}_r^2}{\frac{me + 2E_r}{2}} = \frac{2E_r^2}{me + 2E_r} = E_r \frac{2E}{1 + 2E}; \quad E = E_r / me$$

Oder:  $E_{e^-} = \frac{E_r E (1 - \cos\varphi)}{1 + E (1 - \cos\varphi)}$

$$\frac{dE_{e^-}}{d\varphi} = E_r \frac{E \sin\varphi (1 + E(1 - \cos\varphi)) - E (1 - \cos\varphi) E \sin\varphi}{(1 + E(1 - \cos\varphi))^2} = E_r \frac{E \sin\varphi}{(1 + E(1 - \cos\varphi))^2} = 0$$

$\sin\varphi = 0 \Rightarrow \varphi = 0, \pi$   
 $\hookrightarrow E_{e^-} = \frac{E_r E \cdot 2}{1 + 2E}$

8) 0,2 keV/μm

$^{60}\text{Co}$   $E_{\gamma 1} = 1173 \text{ keV}$   
 $E_{\gamma 2} = 1333 \text{ keV}$  }  $E_{\gamma} = 1253 \text{ keV}$

äquivalent zu  $100 \text{ keV } \gamma \approx 15 \text{ keV } e^- \rightarrow$  Folie 14, 16

Folie 14  $\rightarrow E_{\gamma} = 1 \text{ MeV} \Rightarrow E_{e^-} = (1 - 55\%) E_{\gamma} = 45\% E_{\gamma} \approx 600 \text{ keV}$

Wasser als Material angenommen

ESTAR:  $S(600 \text{ keV}) = 1,972 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$  (oder direkt aus Folie 16 ablesen)

LET =  $S \cdot \rho_{\text{water}} = 1,9 \text{ MeV/cm} = 0,19 \frac{\text{MeV}}{\text{mm}} = 0,2 \frac{\text{keV}}{\mu\text{m}}$

9)

$E_{\gamma}'(\theta) = \frac{1}{\frac{1}{E_{\gamma}} + \frac{1}{m_e} (1 - \cos \theta)}$   $\rightarrow \lim_{\left(\frac{E_{\gamma}}{m_e}\right) \rightarrow \infty} E_{\gamma}'(E_{\gamma}, \theta) = \lim_{\frac{E_{\gamma} \rightarrow \infty}{m_e} \frac{1}{\frac{1}{E_{\gamma}} + \frac{1}{m_e}}} \approx m_e$

$\lim_{\frac{E_{\gamma}}{m_e} \rightarrow \infty} E_{\gamma}'(E_{\gamma}, \theta) = \frac{m_e}{(1 - \cos \theta)}$  ; if  $\theta = 0$ , then  $E_{\gamma}' = E_{\gamma}$  (no scattering)

10)

$E_{\gamma} = 20 \text{ MeV}$

Wasser

$\frac{\mu}{\rho} = 1,813 \frac{e^- \text{ cm}^2}{\text{g}}$

$\frac{\mu_{\text{ext}}}{\rho} = 1,382 \frac{e^- \text{ cm}^2}{\text{g}}$

$\mu <$  atomare Wechselwirkung  
 nukleare Wechselwirkung

NIST: ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

Coherent scatt.	Incoherent scatt.	Photoabs.	Pair Prod Nud	Pair El Field
$1,407 e^{-7}$	$1,016 e^{-2}$	$6,555 e^{-8}$	$7,186 e^{-3}$	$7,878 e^{-4}$

Kernreaktionen liefern kein Beitrag  $\uparrow$   
 $\text{H} \rightarrow$  Kernreaktion  $\rightarrow$  gar keine möglich, nur ein Proton  
 $\text{O} \rightarrow$  ja, hier kann man  $\rightarrow$  fehlt in der Tabelle

keine Einfluss auf Abschirmung haben

11)  $E_\gamma = 15 \text{ MeV}$

2 Gy in Luft, nicht im Patient

$14 \text{ N } (\gamma, n) \text{ } 13 \text{ N}$

$z = 10 \text{ min}$

$\sigma = 2 \text{ mb}$

$E_{th} = 10,6 \text{ MeV}$

$V_{\text{Luft}} = 0,01 \text{ m}^3$

$\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{N_2} = 0,8 \rho_{\text{air}}$  (80% stickstoff)

$M^{14}\text{N} = 14 \text{ g/mol}$

$\frac{\mu}{\rho} = 1,81 \cdot 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$

$\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} = 1,353 \cdot 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$

$\mu$  selbst, nicht  $\mu_{\text{en}}$

$e^{-1,353 \cdot 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 1 \text{ m}} = e^{-0,0016236} = 99,86\%$

$D = 2 \text{ Gy}$

$\dot{D} = 1 \text{ Gy/min}$

$N_\gamma = 2 \text{ Gy } \rho_{\text{Luft}} V_{\text{Luft}} \cdot E_\gamma^{-1} = 9,99 \cdot 10^9$

$N_N = \frac{\rho_{\text{Luft}} \cdot 0,8 \cdot V_{\text{Luft}}}{M_N} = 0,686 \text{ mol} \leftrightarrow 4,13 \cdot 10^{23} \text{ N atoms}$

$M_N \dots 14 \text{ g/mol}$  und nicht  $28 \text{ g/mol}$ , weil Reaktion ist am Kern, nicht am  $N_2$  gebund.

$^{14}\text{N} (\gamma, n) ^{13}\text{N}, \sigma(\gamma, n) \approx 2 \text{ mb}$

$\sigma_{\text{ges}} \cdot N_N = 0,826 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$

$N_{\text{N}} = \frac{\sigma_{\text{ges}}}{\Delta \omega} N_\gamma = 82500 \cdot f \cdot e^{-\mu x} \dots ^{13}\text{N}$

$t_{1/2} = 10 \text{ min}$

Aktivierungsgleichung

$A = \frac{dN}{dt} = N_0 \lambda \left( \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \right)^{-1} \left( 1 - e^{-\frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot 2 \text{ min}} \right)$

$A = 82500 f \left( \frac{10 \text{ min}}{\ln 2} \right)^{-1} \left( 1 - e^{-\frac{\ln 2}{10 \text{ min}} \cdot 2 \text{ min}} \right)$

$A = 77 \text{ kBq} \cdot f$

Oder:  $A = N_\gamma f \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$  und nicht alle absorbiert

Stickstoff und Sauerstoff  
 $(\gamma, n)$   $(\gamma, \alpha)$   
 $^{16}\text{O} (\gamma, n) ^{15}\text{O} \rightarrow$  Schwache  $15,6 \text{ MeV}$  nicht möglich  
 $^{14}\text{N} (\gamma, n) ^{13}\text{N} \rightarrow E_{th} = 10,6 \text{ MeV} < 15,6 \text{ MeV}$   
 $^{16}\text{O} (\gamma, p) ^{15}\text{N} \rightarrow$  stabil  
 $^{14}\text{N} (\gamma, p) ^{13}\text{C} \rightarrow$  stabil  
 ↓  
 einzige Reaktion

$^{13}\text{N} \rightarrow z = 10 \text{ min} \dots$   
 $\sigma = 2 \text{ mb}$   
 $E_{th} = 10,6 \text{ MeV}$   
 $\gamma$  nur weil  $\gamma$  zu viel  $\rightarrow E_{th}$   
 $(1 \text{ kg/m}^3 \cdot 1000 \text{ kg/mol})^{-1} = 70 \text{ mol/m}^3$   
 $70 \text{ mol} \cdot 0,01 \text{ m}^3 = 0,7 \text{ mol}$   
 $\rightarrow$  (Anzahl an Reaktionszentren) bestrahlte Kerne  
 $N(N) = 0,7 \text{ mol}$   
 $\sigma_{\text{ges}} (\gamma, n) = 0,7 \text{ NA} \cdot 2 \text{ mb}$   
 Nur 0,14% werden absorbiert, d.h. ich muss 1000 mehr mal Photonen schicken um 2 Gy zu erreichen.

Karsch Ergebnis  
 70 kBq



12

$t_{t, Pb, K\text{-Schalen}}$  Photoeff

$Z=82$   
 $N=126$   
 $A=208$

$t_c$

Röntgen

$\begin{cases} 90\text{keV} \\ 1250\text{keV} \end{cases}$

Internet, table  
 $E_B = 88005\text{eV} = 88\text{keV}$  K-Schale

$$t_z = 1 - \frac{E_D}{E_x} \begin{cases} 0,02 \\ 0,93 \end{cases}$$

$E_x'$ : Folie 11  $\begin{cases} 76,5\text{keV} = 85\% \cdot 90\text{keV} \\ 687,5\text{keV} = 55\% \cdot 1250\text{keV} \end{cases}$   
ablesen

$$t_z = 1 - \frac{E_x'}{E_x} = \begin{cases} 0,15 \rightarrow \text{relativ wenig Energie übertragen} \\ 0,45 \rightarrow \text{hier mehr} \end{cases}$$



# Übung 3

vorzurechnen am: 4.5.2015

1. Man erstelle für Elektronen und Positronen einen Graphen für  $(dE_K/dx)_{col}$  in Abhängigkeit von  $E_K$  mit  $100 \text{ keV} \leq E_K \leq 100 \text{ MeV}$ , für Graphit ( $\rho = 1.7 \text{ g/cm}^3$ ) wobei die Dichte- und Schalenkorrekturen in der Bethe-Bloch-Formel vernachlässigt werden sollen. Vergleichen Sie mit den tabellierten Werten von NIST.
2. Man vergleiche das Strahlungsbremsvermögen von Elektronen und Protonen gleicher kinetischer Energie.
3. Schätzen Sie ab aus dem Bremsvermögen von Elektronen ab, welcher Anteil der Strahlenergie bei einer Röntgenröhre (200 KV) mit einem Wolframtarget in Strahlung umgesetzt wird! Weiter werde angenommen, dass ein Filter nachgeschaltet ist, der alle Photonen mit weniger als 30 kV absorbiert, und alle höherenergetischen Photonen transmittiert. Welcher Anteil der Strahlungsenergie wird in dem Filter absorbiert?
4. Wie groß ist der maximale Energieübertrag eines  $^{16}\text{O}$  Ions der Energie 3.2 GeV an ein Elektron?
5. Man stelle  $Z_{eff}$  der Barkas-Korrektur für  $^{16}\text{O}$  und  $^{208}\text{Pb}$  Ionen in Abhängigkeit von  $\beta$  dar.
6. Man begründe die Beziehung  $R(\alpha, E_\alpha = 4E_p) = R(p, E_p)$  zwischen der Reichweite von Alphateilchen und Protonen.
7. Man berechne mit Hilfe der unter <http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/contents.html> verfügbaren Daten die Reichweite von  $^{12}\text{C}$ -,  $^{14}\text{N}$ -,  $^{16}\text{O}$ - und  $^{20}\text{Ne}$ -Ionen mit einer Energie von 400 AMeV in Wasser.
8. Wieviele Stöße sind in Wasserstoff, Kohlenstoff und Uran erforderlich, um Neutronen der Energie 2 MeV auf thermische Energie abzubremesen ( $E_{th}=0.0252 \text{ eV}$ )?
9. Welche kinetische Energie haben das  $\alpha$ -Teilchen und das  $^7\text{Li}$ -Ion nach der  $^{10}\text{B} (n_{th}, \alpha) ^7\text{Li}$  Reaktion? Wie groß ist die Reichweite dieser Teilchen in Wasser?
10. Man bestimme den Wirkungsquerschnitt für die elastische Streuung für Neutronen der Energie 2 MeV an Wasserstoff.
11. Wie groß ist der Sättigungswert der Rückstreu- Koeffizienten für 5 MeV Elektronen und einen Wolfram-Absorber?

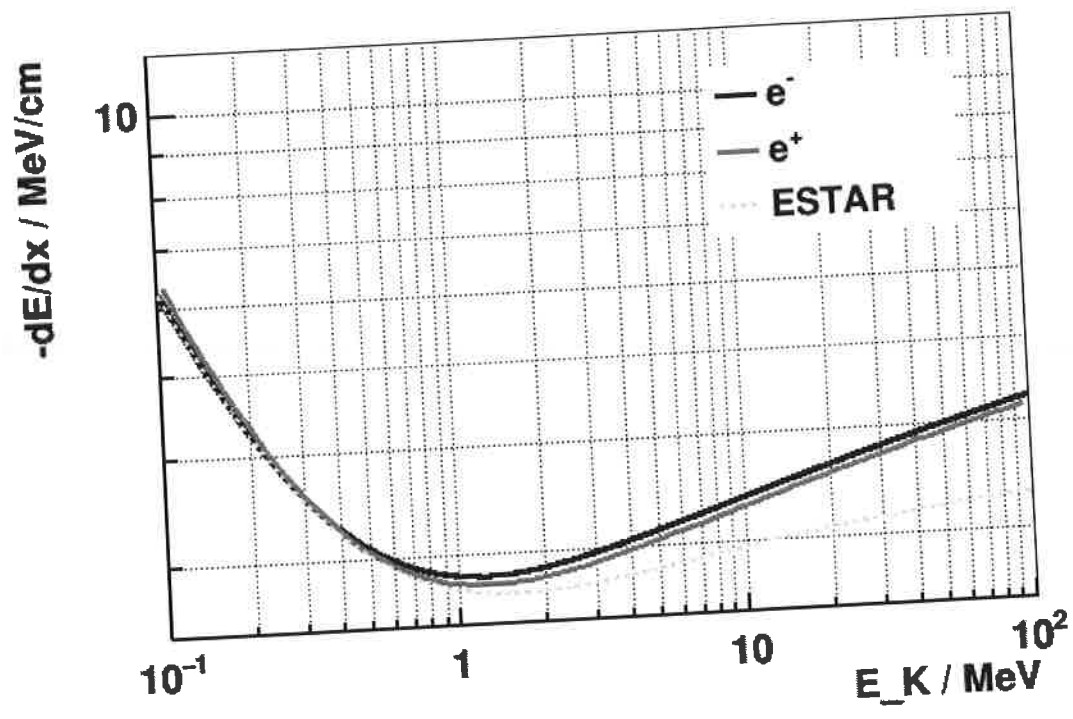


①

$$\gamma^2 = \frac{1}{1-\beta^2} \Leftrightarrow \beta^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

$$\text{mol}^{-1} \text{cm}^2 \frac{\text{MeV}}{\rho \cdot \text{mol}} \frac{\rho}{\text{cm}^3} \rightarrow \text{MeV} \frac{\rho}{\text{cm}}$$

Bei 10 MeV  $\sim$  16% Fehler



$$k = 2\pi N_A r_e^2 \cdot 0.511 \text{ MeV} \cdot \rho \cdot \frac{z}{A}$$

Bethe Bloch:

$$z = E_K / 0.511 \text{ MeV}$$

$$\gamma = 1 + z$$

$$\beta^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

$$F_{z,e^-} = 1 - \beta^2 + \frac{z^2 / \beta^2 - (z^2 + 1) \ln(z)}{(z+1)^2}$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{k}{\beta^2} \left( \ln \left( \frac{z^2 \cdot (z+2)}{2 \left( \frac{I}{0.511 \text{ MeV}} \right)^2} \right) + F_z \right)$$

$$\rho = 1.7 \text{ g/cm}^3$$

$$z = 6$$

$$A = 12 \text{ g/mol}$$

$$I = 81 \cdot 10^{-6} \text{ MeV}$$

$$r_e = 2.818 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$$

$$F_{z,e^+} = 2 \ln 2 - \frac{\beta^2}{z} \left( 23 + \frac{14}{z+2} + \frac{10}{(z+2)^2} + \frac{4}{(z+2)^3} \right)$$

②

$$-\frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} = \frac{E}{X_0} \quad X_0 - \text{Strahlungslänge}$$

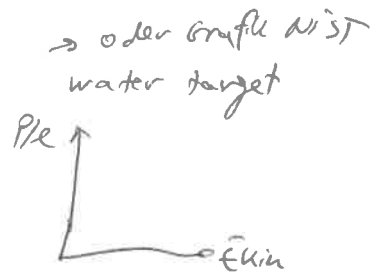
$$X_0 = \frac{A}{4 \alpha N_A Z(Z+1) r^2 z^2 \ln(183 z^{-1.3})}$$

$$S_{\text{rad}} \propto \rho \left( \frac{Ze}{m} \right)^2 z^2 E K \quad (\text{für beide } p \text{ und } e \text{ gilt das})$$

$$\frac{S_{\text{rad } e^-}}{S_{\text{rad } p}} = \left( \frac{m_p}{m_e} \right)^2 = 3,37 \times 10^6$$

Schwere Teilchen mit  $E \rightarrow$  stärke Hülle  $e^- \rightarrow$  loss  $\alpha \sim \frac{z^2}{\beta^2}$

Bremsstrahlung nur bei sehr hohen  $E$



③

$U = 200 \text{ kV}$

W

% rad

$E = 0,2 \text{ MeV}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{coll} = 1,439 \text{ e}^0 \\ \text{rad} = 5,021 \text{ e}^2 \\ \text{tot} = 1,489 \end{array} \right. \quad \frac{\text{rad}}{\text{tot}} = 3,4\%$$

(ESTAR)

$\text{CSDA range} = 8,835 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^2$

$\Delta E_{\text{rad}} = S_{\text{rad}} \cdot \text{CSDA range} = 4,436 \text{ keV} \quad E \text{ verloren durch Strahlung}$

$e^- 200 \text{ keV}$

gilt nur an der Oberfläche,  $\bar{S}$  wird kleiner, Verhältnis kleiner. müsste man mitteln.

$$\frac{\Delta E_{\text{rad}}}{E} = \frac{4,436 \text{ keV}}{200 \text{ keV}} = 2,2\%$$

Wirkungsgrad  $\eta = k Z U A$

$k = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ V}^{-1}$

$U_A = 200 \text{ keV}$

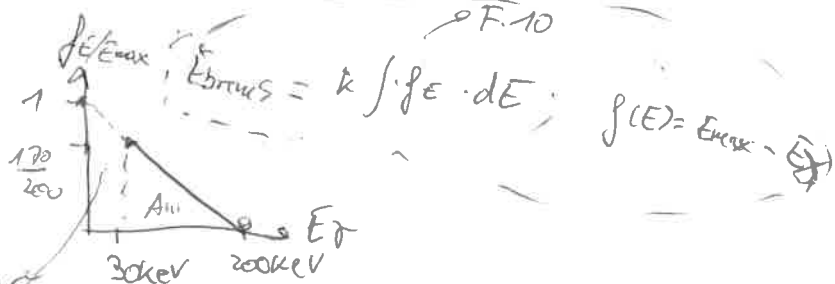
$Z = 74$

$\eta = 16,2\%$

Kramers Regel  $\left( (E - E_{\text{min}}) \right) \dots$

25% der Energie bleibt im Filter

$$\frac{A_{\text{III}}}{A} = \frac{170 \cdot \frac{170}{200}}{200} = 0,7225 = 72\%$$



④ Defke - Bloch Formel

$$T_{max} = \frac{2 m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + \frac{2 \gamma m_e}{M} + \left(\frac{m_e}{M}\right)^2}$$

Maximaler Energieübertrag Einzelstoß  $\approx 2 m_e c^2 \beta^2 \gamma^2$

$$\gamma = \frac{E}{M} + 1 = 1,215$$

$$\beta^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2} = 0,322$$

$$\beta = 0,56$$

$$E_0 = 74,9 \text{ GeV} \quad ; \quad (\gamma - 1) m$$

$$E_k = 3,2 \text{ GeV} = e \quad \checkmark$$

$$Z = 8$$

$$A = 16$$

$$M = 16 u = 16 \cdot 0,9315 \text{ GeV} = 14,9 \text{ GeV}$$

$$T_{max} = 0,486 \text{ MeV}$$

Klassische Formel im Kugel-Modell ist einfacher  $v_M = \frac{2M}{M+m} v$  ;  $T = \frac{M}{2} v_M^2$   
 $\approx \frac{2M^2}{M+m} v^2 = 1,1 C$   
 ↳ kann man hier nicht anwenden

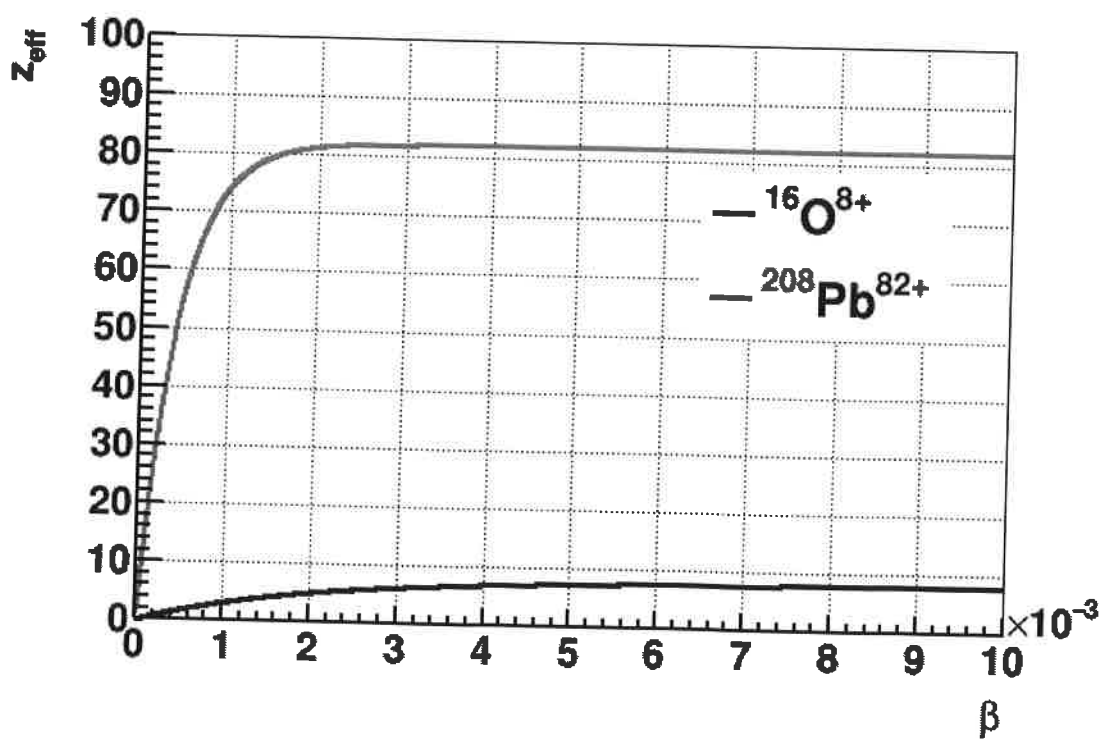


⑤

ab 3-5-cpp

Blei schneller / können wir die Korrektur eher vernachlässigen

$$Z^*(1 - \exp(-125 \cdot \beta \cdot \text{pow}(Z, 2./3.)))$$



6

$R(\alpha, E_\alpha = 4E_p) = R(p, E_p)$   $\alpha$  vs Protonen

$R = \int \frac{1}{-\frac{dE}{dx}} dE$

~~$\frac{m_\alpha}{2} \beta_\alpha^2 = 4 \frac{m_p}{2} \beta_p^2$~~

$\beta_\alpha = \beta_p$  ?

$\frac{dE}{dx}(Z, \beta) \propto \frac{Z^2}{\beta^2} \iff \frac{dE}{dx}(Z, \beta) = \frac{dE}{dx}(2Z, 2\beta)$

klassisch  $\frac{dE}{dx} \propto \frac{Z^2}{\beta^2} \propto \frac{Z^2 M^2}{E_{kin}}$

$E_\alpha \sim \frac{m_\alpha}{2} (2\beta)^2$

wegen dE nicht direkt  $\frac{Z^2}{\beta^2}$  same speed = same range  
 $\rightarrow$  ~~beide unterschiedl.~~  $\frac{(2Z)^2 4M}{(4E_{kin})^2} \rightarrow$  NOT same  $\frac{dE}{dx}$   
 sondern  $4 \left(\frac{dE}{dx}\right)_p$

oder: F.23  $R_2(E_{kin}^{(2)}) = \frac{M_2}{M_1} \frac{Z_1^2}{Z_2^2} R_1(E_{kin}^{(1)}) \cdot \frac{M_1}{M_2}$

1:  $\alpha$   
2: p

$R(p, E_p) = \frac{1}{4} \cdot \frac{2^2}{1^2} R(\alpha, 4E_p) = R(\alpha, E_\alpha = 4E_p)$   $\checkmark$   
 egd

same speed  
 $\beta_\alpha = \beta_p$   
 $\downarrow$   
 same range  
 (only for alphas)

7



$E = 400 \text{ A MeV}$

PSTAR:  $E = 400 \text{ MeV}$  protons Water  $OSDA = 8,225 \text{ e}^1 \text{ g/cm}^2 \rightarrow 82,25 \text{ cm}$

$E = 400 \text{ A MeV} \rightarrow$  gleiche Geschwindigkeit  $E_{kin} = \frac{M_2}{M_1} \cdot E = A$

$R_2(E_{kin}^{(2)}) = \frac{M_2}{M_1} \frac{Z_1^2}{Z_2^2} R_1(E_{kin}^{(1)} \frac{M_1}{M_2})$   
 1: p  
 2:  $\alpha$   
 $\underbrace{400 \text{ MeV}}_{82,25 \text{ cm} = R_1}$

$\beta_I = \beta_p$

$R_I = \frac{A_I}{Z_I^2} R_p$

$A_I = 2Z_I$  (für  $Z > 1$  oder Deuterium)  
 $\approx \frac{2}{Z_I} R_p$   
 $R_\alpha = R_p$   
 $R_d = 2 R_p$  (Deuterium)  
 $R_c = \frac{R_p}{3}$

	$E_2/\text{MeV}$	$Z_2$	$M_2/u = A$	$R_2(E_2) / \text{cm}$
$^{12}C$	4800	6	12	$12/6^2 \cdot R_1 = 27,4$
$^{14}N$	5600	7	14	$14/7^2 \cdot R_1 = 23,5$
$^{16}O$	6400	8	16	$16/8^2 \cdot R_1 = 20,56$
$^{20}Ne$	8000	10	20	$20/10^2 \cdot R_1 = 16,45$
$^4He$	1600	2	4	$4/2^2 \cdot R_1 = 82,25$

Je schwerer, desto mehr Energie brauchen wir.  $\rightarrow$  größere Beschleuniger



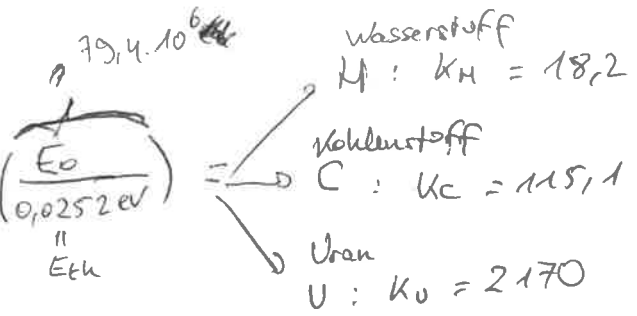
⑧  $E_0 = 2 \text{ MeV}$

$$E_n = E_0 \frac{M_k^2 + m_n^2 + 2M_k m_n \cos \delta}{(M_k + m_n)^2}$$

$$\bar{E}_n = E_0 f^{(k)}$$

$$E_n^{(k)} = E_0 \cdot e^{-L_k} = 0,0252 \text{ eV}$$

$$L \rightarrow k = -\frac{1}{L} \ln \frac{0,0252 \text{ eV}}{E_0} = \frac{1}{L} \ln \left( \frac{E_0}{0,0252 \text{ eV}} \right)$$



Je schwerer Kern, desto mehr Stöße brauchen wir  
 im elast. Modell & klassischen Ballstoßes: anfall bleibt stehen wenn  $M \gg m$  und  $M$  geht weiter. wenn  $m \gg M \hat{=} \text{Wand}$ , Ball wird reflektiert.

⑨  ${}_{5}^{10}\text{B} \left( {}_0^1\text{n}_{1,1}, {}_2^4\alpha_2 \right) {}_3^7\text{Li}$

$Q = 2,4 \text{ MeV}$

$M({}^{10}\text{B}) = 10,0129370$

$M({}^7\text{Li}) = 7,016004$

$M({}^4\text{He}) = 4,0026032497$

$M(\text{n}) = 1,0087$

$\rightarrow \Delta M = 0,003029751 \text{ u} = 2,83 \text{ MeV}$   
 (+ 0,0252 eV)

ASTAR  $\alpha (2,83 \text{ MeV}) \rightarrow \frac{1,673 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2}{1 \text{ g/cm}^2} = 16 \mu\text{m}$   $\xrightarrow{\text{Li}}$

$\text{Li?} \rightarrow E_\alpha = \frac{1}{2} M_{\text{Li}} \beta_{\text{Li}}^2 \rightarrow \beta_{\text{Li}} = \sqrt{\frac{2 E_\alpha}{M_{\text{Li}}}}$

$\tilde{p}_\alpha = \beta_{\text{Li}}$   
 $\tilde{E}_\alpha = \frac{1}{2} M_\alpha \cdot \tilde{p}_\alpha^2 = \frac{1}{2} M_\alpha \frac{2 E_\alpha}{M_{\text{Li}}}$

$\tilde{E}_\alpha = 1,62 \text{ MeV}$

ASTAR ( $\tilde{E}_\alpha$ )  $\rightarrow R = 3,8 \cdot 10^9 \cdot 9,02 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 9 \mu\text{m}$

$\text{Li} (2,83 \text{ MeV}) = \frac{7}{4} \cdot \frac{4}{9} \cdot R_\alpha (2,83 \cdot \frac{4}{7})$

$R({}^7\text{Li}) = 2,6 \mu\text{m}?$

$R({}^6\text{Li}) = 7 \mu\text{m}$

$= \frac{M_\alpha}{M_{\text{Li}}} \cdot E_\alpha$   
 $= 0,07 E_\alpha$

10

$\sigma(n \rightarrow p)$   
↓  
2,88 bar

$$\tan \varphi = \frac{\sin \delta}{\cos \delta + m_u/M_u}$$

11

$$n_{b, \text{sat}} = 2,2 \cdot \left( Z \frac{m_0 c^2}{E_0} \right)^{1,3} \quad [\%] \quad \left( d = \frac{1}{2} R \right)$$

Wolfram:  $Z = 74$

$E = 5 \text{ MeV}$

$$n_{b, \text{sat}} = 30,5 \%$$

# Übung 4

vorzurechnen am: 18.5.2015

1. In den Strahlerkopf eines 18 MV Beschleunigers wird eine Co-Quelle eingebaut. Ist damit eine Strahlentherapie möglich? (Welche technischen Details fehlen oder müssten verändert werden? Warum?)
2. Man beschreibe die Wechselwirkung von 15 MeV Photonen mit einem Polyethylenkörper. Nennen Sie alle Primärprozesse der Wechselwirkung der Photonen mit dem Target und die dadurch entstehenden Sekundärstrahlungsarten oder Sekundärprodukte. Nennen Sie weiter alle Wechselwirkungen und deren Produkte der Sekundärstrahlung mit dem Target.
3. Überlegen Sie sich die Unterschiede zwischen Steh und Wanderwellenbeschleuniger im Hinblick auf Größe, Breite des Energiespektrums der beschleunigten Elektronen, maximal erreichbare Feldstärke und Anforderungen an das Vakuum.
4. Wie sehen die elektrischen und magnetischen Feldlinien in einem zylindrischen Beschleunigungsrohr aus? Wie sollten Sie dann in einem Hohlwellenleiter aussehen, der die elektromagnetischen Wellen senkrecht in das Beschleunigungsrohr einspeist? Dabei sind folgende Regeln zu beachten: elektrische Feldlinien verlaufen immer senkrecht zu begrenzenden Metallplatten. (Übergangsbedingung), magnetische Feldlinien stehen senkrecht auf elektrischen Feldlinien, die Stärke
5. Im klinischen Linac werden Elektronen auf der Strecke von 1 m auf eine Energie von 20 MeV beschleunigt. Berechnen Sie die beschleunigende Feldstärke. Nach welcher Beschleunigungsstrecke erreichen die Elektronen  $0.9c$ ? Ist das Beschleunigungsprinzip des LINAC auch für Protonen anwendbar? Wie lang wäre ein Beschleunigungsrohr um Protonen auf 230 MeV zu beschleunigen?
6. Man bestimme den mittleren Energieverlust in 0,1mm W und 30  $\mu\text{m}$  Pb-Folien und dessen relativen Bremsstrahlungsanteil für 6 und 20 MeV Elektronen.
7. Schätzen Sie den Durchmesser eines ursprünglich nadelförmigen Elektronenstrahls von 20 MeV ab, der einen Meter Luft durchlaufen hat. Benutzen Sie den Tabellenauszug aus ICRU Report 35 mit der Näherungsformel für das mittlere Streuwinkelquadrat  $\bar{\theta}^2 = \left(\frac{T}{\rho}\right) \rho l$ .



Übung 4

① mehr bewegliche Sachen, um Gerät "abzuschalten" = Quelle blockieren  
 Abschirmung - abgereichertes Uran/Pb  
 Edelstahl für  $\beta$  Strahlung  $\rightarrow$  all andere Richtung  $\rightarrow$  Bremsstrahlung forward  
 Fiberoptik, Supersung Monitor-Kamera  
 W target braucht man nicht mehr Schichten/Kollim.  
 es gibt kein multi-leaf Kollimator (sind später erschienen)  
 Inhomogen  $\rightarrow$  Nadelstrahl lenken, Bremsstrahlung forward  $\leftrightarrow$  bei  $^{60}\text{Co}$  ist isotrop  
 Monitor-Kamera ist nicht notwendig, "strom" ist konstant  $\neq$  LINAC  
 ein bisschen weiter Einstellung kann nicht falsch sein

②  $\gamma: 15 \text{ MeV} \rightarrow \text{PE} = \text{C}_2\text{H}_4$   
 Primärwechselwirkung  
 • Photoeffekt  $\rightarrow$  Sekundäre  $e^-$   
 • Paarbildung  $\rightarrow$  Positronen & Elektronen  
 • Kernphotoeffekt  $\rightarrow$  für  $\gamma$  in Schwelle  $18.7 \text{ MeV}$ , für  $\alpha$  kleiner  $\sigma \rightarrow$  vernachlässigen und mit H nicht, man braucht mehrere Nukleonen  
 • (in)kohärente Streuung  $\rightarrow$  Photonen geringer  $E$ ,  $e^-$

$\rightarrow e^- / e^+ / \gamma$   
 x Stopping  $e^-$  (hard collisions),  $\delta e^-$  (Sekundärelektronen) / Soft coll = Stoßbremsung = Ionisation + Dargungsbremsung

(Part 3) x Bremsstrahlung  $\rightarrow \gamma$   
 x Streuung Kern (elastische Streuung)  $\rightarrow$  dasselbe  
 x Cerukov  
 x Kernreaktion  $\rightarrow$  aber sehr geringer  $\sigma$

$\rightarrow$  Positronen:  
 x  $\gamma$ -Quanten (Annihilation)  
 x Strahlungsbremsung  
 x Stoßbremsung

$\rightarrow \alpha$ -Teilchen  
 x Stoßbremsung  $\rightarrow \delta e^-$  (Tertiär)  
 x (Strahlungsbremsung) sehr wenig  
 x  $Q_\alpha \approx 2,8 \text{ MeV}$ ;  $Q_\alpha = 5 \text{ MeV}$   
 $\hookrightarrow$  Kerneffekte ab  $\approx 5 \text{ MeV}$  ... nicht da

③ Licht ist EM Welle



Stehwelle: → PV Anschluss

- überschläge Restluft ionisieren, mehr Anforderung, wegen höheres Feldgradient, besseres Vakuum ↔ bei Wanderw nicht so großes Gefähr
- 80% des RF-Pulses lassen sich einkoppeln, Rest wird reflektiert
- Strahl variiert stärker in Energie

Shunt Impedanz um 1/3 zu 50% niedriger als bei Wanderwelle

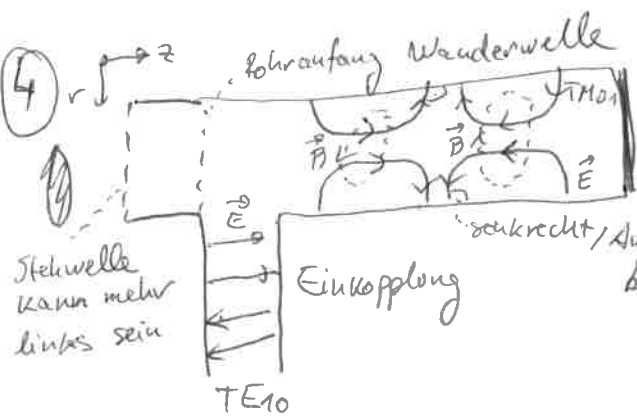
$P = R_s \cdot I^2$   
 Leistung ← Strahlstrom  
 ← Shuntimpedanz

⇒ höhere Energieeffizienz

hinlaufend von Kopplung  
 rücklaufend von Reflexion  
 + 2x Feldstärke im halben Raum

hoher Feldgradient bei gleich "starker" Einkopplung möglich  
 ↳ hin und rücklaufende Welle interferieren

4



Symmetrieachse  $\vec{B} = \vec{0}$

... Reflektor / Absorber  
 Nr. 2 umdrehen damit  $\vec{E}$  parallel und nicht antiparallel

TM<sub>01</sub>, TE<sub>10</sub> sind die leichtesten

Ausschluss Stehwelle: reflektierend  
 rechts Wanderwelle: absorbierend

⑤  $L = 1m$   $q = e$   
 $W = 20MeV$

$F = q \cdot E$

$W = q \cdot E \cdot L \rightarrow E = \frac{W}{qL} = \frac{20MV}{1m} = 20 \frac{MV}{m}$

$W(L) = q \cdot E \cdot L = (\gamma - 1) m_e c^2$   $\gamma^2 = \frac{1}{1 - \beta^2}$

nicht notw.  $\gamma = \frac{qEL}{m_e c^2} + 1 \Rightarrow 1 - \beta(L)^2 = \left( \frac{qEL}{m_e c^2} + 1 \right)^{-2}$

$\beta(L) = \sqrt{1 - \left( \frac{qEL}{m_e c^2} + 1 \right)^{-2}}$

$l(\beta) = \frac{(\gamma - 1) m_e c^2}{q \cdot E} = \frac{\left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right) m_e c^2}{q \cdot E} \xrightarrow{\beta = 0,9} = 3,3cm \ll 1m$

Für Protonen (230 MeV)  $\rightarrow \frac{230 MeV}{20 MV/m} = 11,5m \rightarrow$  Not applicable

⑥  $\overline{\Delta E}$   $0,1mm$   $W$   $Z = 74$   $\rho_W = 19,25 g/cm^3$   
 $30\mu m$   $Pb$   $Z = 82$   $\rho_{Pb} = 11,34 g/cm^3$

	coll	rad	tot	$\delta$				
6 MeV $e^-$	1,142	$6,991 \cdot 10^{-1}$	1,844	105	1,146	$6,523 \cdot 10^{-1}$	1,798	1,544
20 MeV $e^-$	1,277	2,554	3,83	2,31	1,277	2,406	3,682	2,810

[MeV cm<sup>2</sup>/g]

$\Delta E = S \cdot \rho \cdot t$	W	Pb
6 MeV	0,346 MeV	0,626 MeV
20 MeV	0,709 MeV	0,1303 MeV

W	% rad/tot	$S_{rad}$ (MeV cm <sup>2</sup> /g)	$\Delta E_{brems}$ (KeV)	% rad/tot	$S_{rad}$ (MeV cm <sup>2</sup> /g)	$\Delta E_{brems}$ (KeV)
6 MeV	36,4%	0,6523	126	38%	0,6991	62,6
20 MeV	65,3%	?	463	66,7%	2,554	130,3

⑦  $E = 20MeV, e^-$   $L = 1m$ ,  $\rho_{Wgt} = 1,225 kg/m^3 = 1,225 g/cm^3 e^{-3}$

$\overline{\theta}^2 = \left( \frac{F}{p} \right) \cdot \rho \cdot L$

$\frac{F}{p} \Big|_{20MeV} = 2,01 \cdot 10^{-2} cm^2/g \rightarrow \overline{\theta}^2 = 0,00246 \rightarrow \overline{\theta} = 0,05$

$\sin \theta = \theta / L$

$\phi = L \overline{\theta} = 0,05m = 5cm$





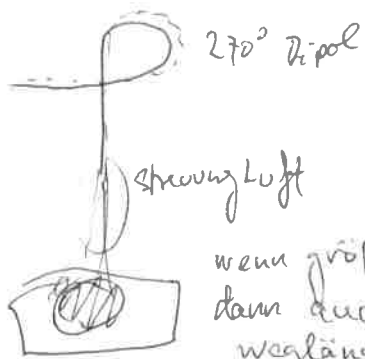
# Übung 5

vorzurechnen am: 1.6.2015

1. Geben Sie den Umrechnungsfaktor zwischen Pulsdosisleistung und mittlerer Strahlleistung allgemein und für typische Werte eines LINAC an.
2. Welche Unsicherheit in der Wegstrecke der Elektronen bewirkt, dass die zeitliche Mikrostruktur am Ausgang des Beschleunigungsrohres im Isozentrum nicht mehr aufgelöst werden kann? Wie groß wäre der Wegunterschied in einem  $270^\circ$ -Dipol mit der Flussdichte von 1 T für 20 MeV Elektronen bei einer Energieunschärfe von  $10^{-3}$ ?
3. Vergleichen Sie die Arten der Homogenisierung des therapeutischen Elektronenstrahles (Einzelstreuung, Doppelstreuung, magnetisches Scanning) bzgl. Energiebreite, Bremsstrahlungsanteils, Feldhomogenität, erreichbare Feldgrößen, Aufwand zur Strahlkontrolle, technischer Aufwand zur Erzeugung und therapeutischen Einsatz bei bewegten Zielvolumen.
4. Schätzen Sie ab, wie sich die Nominalspannung einer klinischen Photonentherapie ändert, wenn sich die relative Dosis in 10 cm Tiefe eines Wasserphantoms von 80,1% auf 82,4% der Maximaldosis ändert.
5. Ein Betatron soll die maximale Magnetische Flussdichte von 1 T erreichen. Wie groß ist der Bahnradius von Elektronen die bis zu 20 MeV beschleunigt werden? Schätzen Sie ab, in welcher Zeit das magnetische Feld (beginnend beim feldfreien Raum) aufgebaut werden muss, um die gewünschte Endenergie zu erreichen!
6. Wie müsste ein elektrisches Feld aussehen, mit dem geladene Teilchen auf eine Kreisbahn gezwungen werden? Welche elektrische Feldstärke wäre notwendig um Elektronen von 20 MeV auf einer Kreisbahn mit 20 cm Durchmesser zu halten?
7. Bei einem Spektrometer (sogenannte Thomson-Parabel) sind in einem (nicht nacheinander!) bestimmten Raum ein elektrisches und ein magnetisches Dipolfeld parallel ausgerichtet. Welches Bild eines Strahles von Teilchen gleicher Art ergibt sich auf einem ebenen Detektor hinter dem Spektrometer? Was verändert sich, wenn der Strahl Teilchen enthält, die andere Masse oder eine andere Ladung haben?
8. Schätzen Sie ab, welche Dicke ein Ausgleichkörper für 12,5 MV Photonenstrahlung aus Aluminium mindestens haben muss, um im 1 m Abstand des Wolframtargets auf einer Fläche von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  eine homogene Dosis zu erreichen.







(II) Energy spread Einfluss:

$$\frac{m\dot{v}^2}{r} = qvB$$

$$r = \frac{m\dot{v}}{qB}$$

$$s = \frac{3}{2} \pi \frac{m\dot{v}}{qB} \Rightarrow \text{Relat: } s = \frac{3}{2} \pi \frac{\gamma m_0 \dot{v}}{qB} = \frac{3}{2} \pi \frac{\gamma m_0 c \beta}{qB}$$

$$s = \frac{3}{2} \pi \gamma \sqrt{1-\beta^2} \frac{m_0 c \beta}{qB} = \frac{3}{2} \pi \frac{E_0 \sqrt{1-\beta^2} \beta}{qB c} \approx \frac{3}{2} \pi \frac{E_0}{qB c} \left( \frac{1}{\gamma} \right) \approx \frac{3}{2} \pi \frac{E_0}{qB c} \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \right)$$

(Kreis (270° Dipol))

$$s(20 \text{ MeV} + 0,05\%) = s(20,01 \text{ MeV}) \leftrightarrow \gamma = \frac{E_0}{m_0 c^2}$$

$$= 31,432 \text{ cm}$$

$$\Delta s = 0,3 \text{ mm} \ll 0,1 \text{ m}$$

$$s(20 \text{ MeV} - 0,05\%) = s(19,99 \text{ MeV}) = 31,400 \text{ cm}$$

↳ Zeitstruktur nicht <sup>überwiegend</sup> kreisförmig  
 ↳ könnte man mit einem guten Detektor erkennen

③

	Einzelstreifenfolien	Doppelstreifenfolien	Magnetisches Scanning
Energiebreite / Energieverlust	groß < 10%	mittel < 3%	klein/nicht
Bremsstrahlungsanteil	groß	sehr gut	sehr gering (Ablenkung Magnet)
Feldhomogenität	mittel	sehr gut	Restwelligkeit
erreichbare Feldgröße	klein	groß	groß
Aufwand zur Kontrolle	normal	normal	schwierig → I-Kammer wird nicht homogen bestrahlt Rekombination zu korrigieren
Techn. Aufwand zur Erzeugung	klein	klein	groß
Th. Einsatz bei bedingtem Zielvolumen	ja	ja	nein
Energieabhängigkeit	groß (Folien wechseln)	klein	klein



④  $t = 10 \text{ cm}$   
 $\frac{D}{D_{\max}} = e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot t} \rightarrow \frac{\mu}{\rho} = -\frac{\ln(D/D_{\max})}{\rho t} = 2,219 \times 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \leftrightarrow \text{für } D/D_{\max} = 13 - 80,1\%$

NIST nach diesem Wert suchen  $\rightarrow$  entspricht  $E = 10 \text{ MeV} \rightarrow U_N = 10 \text{ MV}$

bei  $\frac{D}{D_{\max}} = 82,4\% \rightarrow \frac{\mu}{\rho} = 1,936 \times 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \quad \left\{ +50\% \right.$

NIST: entspricht  $E' = 15 \text{ MeV} \rightarrow U_N' = 15 \text{ MV}$



⑤  $B = 1 \text{ T}$   
 $\rho = ?$   
 $E = 20 \text{ MeV}$   
 $\rho = \frac{p}{qB} = 68,3 \text{ mm}$ , oder mit  $B = 0,5 \text{ T} \rightarrow \rho \approx 15 \text{ cm}$   
 $\gamma^2 = \frac{1}{1-\beta^2} \rightarrow \beta = \sqrt{1-\frac{1}{\gamma^2}} \quad \gamma = \frac{E}{m}$

Detatron: aufpassen  $\rightarrow$  Randfeld (Führung)  $0,5 \text{ T}$  = mittleres Feld  $1 \text{ T}$

$F_L = F_r$   
 $q v B = \frac{m v^2}{r}$

$\rho = \frac{m v}{q B} \quad \text{(I)}$   
 $m v = p = \sqrt{2 m_0 E_{\text{kin}} + E_{\text{kin}}^2 / c^2} \quad \text{(II)}$   
 $\rho = \frac{1}{q B} \sqrt{2 m_0 E_{\text{kin}} + E_{\text{kin}}^2 / c^2}$

$E_{\text{kin}} = 20 \text{ MeV}$   
 $m_0 = 0,511 \text{ MeV}$   
 $B = 1 \text{ T}$

$B(t) = B_{\max} \cdot \frac{t}{t_{\max}}$ ,  $B_{\max} = 1 \text{ T}$  (linearer Aufbau)  
 $0 \leq t \leq t_{\max}$

magn. Fluss:  $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int B \cdot dA = B \cdot \pi r^2$  (Kreisfläche)

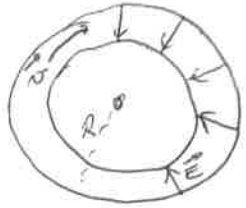
$U_{\text{ind}} = \frac{d\Phi}{dt} = \pi r^2 \frac{dB}{dt} = \pi r^2 \frac{B_{\max}}{t_{\max}}$

$E = e \int_0^{t_{\max}} U_{\text{ind}} dt = e U_{\text{ind}} t_{\max} = e \pi r^2 \frac{B_{\max}}{t_{\max}}$

$t_{\max} = \frac{e \pi r^2 B_{\max}}{E_{\text{kin}}} = 7,3 \times 10^{-10} \text{ s}$

$\rightarrow$  in der Praxis geht es nicht so schnell  $\rightarrow$  Magnetfeld  $\propto E^2$

⑥ Elektrisches Feld:



R = 10cm

$$q \cdot E = \frac{\gamma m_e v^2}{R} \rightarrow E = \frac{E_e (1 - (\frac{v}{c})^2)}{q R} \approx 200 \frac{MV}{m}$$

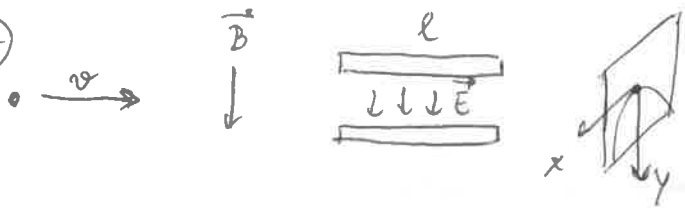
$E_e = 20 MeV$   
 $v = \sqrt{1 - (\frac{m}{E_e})^2}$

≈ 200 MV/m

Linac: 20 MV/m  
 Luftdurchschlag: 3 MV/m  
 (Vakuum besser)

↳ man nimmt nur Magnete und keine elek. Felder um e<sup>-</sup> zu beugen

⑦



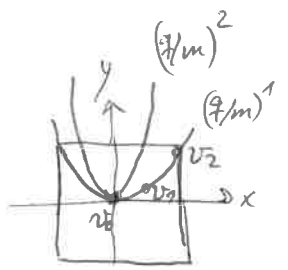
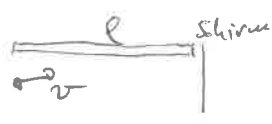
Thomson Parabel;  
 nacheinander: Wien Filter

$$m \ddot{y} = q \cdot E \rightarrow y = \frac{qE}{2m} t^2 + v_y t + y_0$$

$$m \ddot{x} = -q \dot{z} B \rightarrow x = -\frac{q v B}{2m} t^2 + ( )$$

$$m \dot{z} = -q x B \approx 0 \rightarrow \dot{z} \approx \text{konstant} \approx v$$

zeit bis zum Schirm:  $t \approx \frac{l}{v}$



Am Schirm:

$$y = \frac{q \cdot E}{2m} \frac{l^2}{v^2} = y(v)$$

$$x = \frac{q B l^2}{2 v m} = x(v)$$

$$y(x) = \frac{qE}{2m} \frac{4x^2 m^2}{q^2 B^2 l^2} = \frac{2mE}{qB^2 l^2} x^2$$

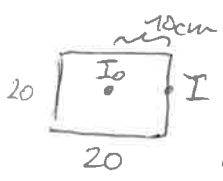
Thomson Parabel

... parametric equations

⑧

12,5 MV  
 AR → t?  
 d = 1m  
 S = 400 cm<sup>2</sup>  
 ρ<sub>Al</sub> = 2,70 g/cm<sup>3</sup>

10cm: 70% =  $\frac{I}{I_0} = e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot d}$   
 $d_{Al} = -\ln(0,7) \frac{1}{(\frac{\mu}{\rho}) \cdot \rho} = 6cm$



Flächen  
 Part 5,  
 Folie 16

$(\frac{\mu}{\rho})_{\text{XrayCoef}} = 2,236 e^{-2} \frac{cm^2}{g}$

Gerader (mit Ecken):



d'AR = 8,5 cm

# Übung 6

vorzurechnen am: 1.6.2015

- ✓ 1. Man berechne die magnetische Steifigkeit für therapeutische Elektronen (20 MeV) und Protonen (200 MeV).
2. Man berechne den Frequenzbereich der Beschleunigungsspannung für Kohlenstoffionen, wenn man annimmt, dass auf der 4. Harmonischen beschleunigt wird. HIT
3. Man berechne die maximale extrahierbare Strahlenergie für Neonionen ( $^{20}\text{Ne}^{10+}$ ), die mit dem HIT-Synchrotron beschleunigt werden.
- ✓ 4. Berechnen Sie die Länge eines Protonen-Linearbeschleunigers, dessen maximale Feldstärke gleich der der konventionellen Elektronen-LINACS ist.
- ✓ 5. Berechnen Sie die elektrische Feldstärke bzw. magnetische Flussdichte, um einen 200 MeV Protonenstrahl auf einer Kreisbahn mit 4m Durchmesser zu halten.
- ✓ 6. Welcher Bahnradius wird erreicht, wenn 20 MeV Elektronen (klassischer LINAC) mit einem magnetischen Feld von 1T (typischer Maximalwert für Dipole mit Eisenkern) abgelenkt werden.
7. Schätzen Sie den Strom ab, der notwendig ist, um im Inneren einer Spule (120 Wdg...) eine Flussdichte von 2T zu erreichen.  $I = 0,1 \text{ A}$
8. Welche Vor- und Nachteile haben Spulen mit bzw. ohne Eisenkern?
- ✓ 9. Zeigen Sie, dass eine Punkt-zu-Punkt Abbildung mit einem Quadrupolduplett möglich ist. Berechnen Sie den Zusammenhang zwischen Bild- und Gegenstandsweite in Abhängigkeit der Linsenbrechkraft und des Linsenabstandes.





Übung 6

①  $E_{e^-} = 20 \text{ MeV}$  (kinetische Energie)  $E_{kin} = (\gamma - 1) m c^2 \rightarrow \gamma m = \frac{E_{kin} + m c^2}{c^2}$   
 $E_p = 200 \text{ MeV}$   $\frac{v^2}{c^2} = \beta^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$

$$B\beta = \frac{\gamma m v}{q} = \frac{(E_{kin} + m c^2) \sqrt{1 - (1 + E_{kin}/m c^2)^{-2}}}{q c} = \begin{matrix} \vec{e^-} & 0,068 \text{ Tm} \\ \vec{p} & 2,15 \text{ Tm} \end{matrix} \left. \vphantom{\frac{(E_{kin} + m c^2) \sqrt{1 - (1 + E_{kin}/m c^2)^{-2}}}{q c}} \right\} \text{Faktor 32}$$

$\left[ \frac{\text{MeV}}{30 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \right] = [\text{Tm}]$

oder  $p = \sqrt{E^2 - m^2} = \sqrt{(E_{kin} + m c^2)^2 - m^2 c^4}$

② Hit  $Z = \frac{2\pi r}{\lambda} = \frac{u}{v} = n \frac{1}{f_{HF}} \leftarrow n = 4, \text{ Harmanstr}$



Umfang:  $63,242 \text{ m} = u$   
 $E_0 = 12,939 \text{ MeV}$   
 $E_{kin} = 50 - 430 \text{ A MeV}$   
 $A = 12$

$$L \int_{HF} = \frac{n \cdot v}{u} = \frac{n \cdot c \cdot \beta}{u} = \beta = \sqrt{1 - \left(1 + \frac{E_{kin}}{E_0}\right)^{-2}}$$

$$\int_{HF} = \begin{matrix} 50 \text{ A MeV} & \rightarrow & 5,96 \text{ MHz} \\ 430 \text{ A MeV} & \rightarrow & 13,8 \text{ MHz} \end{matrix} \left. \vphantom{\int_{HF}} \right\} \text{Bereich}$$

③  $20 \text{ Ne}^{10+}$   $T = \frac{v s}{m^2}$

$r = \frac{m_0 c}{q B} \sqrt{\gamma^2 - 1} \rightarrow \gamma^2 = \left( \frac{r q B}{m_0 c} \right)^2 + 1$  ;  $\gamma = \frac{T}{E_0} + 1$

bedingung  $\frac{\text{mV} \cdot \text{Stk} \cdot \text{m}^2}{\text{s} \cdot \text{V}}$

$B_{max} = 1,5 \text{ T}$   
 $q = 10e$   
 $\frac{m_0}{c^2} = 20 \cdot 939 \text{ MeV}/c^2$

$\rightarrow T(1,5 \text{ T}, 10e, 20 \cdot 939 \text{ MeV}/c^2, 4,4 \text{ m}) = 8,5 \text{ GeV} \hat{=} 425 \text{ A MeV}$

$\gamma^2 = \left( \frac{4,4 \times 10^{-3} \times 1,5 \times 3 \times 10^8}{20 \cdot 939 \times 10^6} \right)^2 + 1 = 2,11 \rightarrow \gamma = 1,45$

$L T = (\gamma - 1) E_0 = 8,5 \text{ GeV} = 425 \text{ A MeV}$

$r_1 = \frac{u}{2\pi} \approx 20 \text{ m}$   
 $r_2 = 4,4 \text{ m}$  (Dipol Magnete)

4

$$E = 20 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$$

$$T = 230 \text{ MeV}$$

$$L = \frac{v}{f \cdot E} = 11,5 \text{ m}$$

5

$$R = 2 \text{ m}$$

$$E_{\text{kin}} = 200 \text{ MeV}$$

$$q v B = \frac{\gamma m v^2}{R} \rightarrow B = \frac{\gamma m v}{q R}$$

$$p = \sqrt{(E_{\text{kin}} + m)^2 - m^2} / c$$

$$B = 1,07 \text{ T}$$

$$\beta^2 = 1 - \gamma^{-2}$$

$$(\gamma - 1)m = T \rightarrow \gamma = \frac{T}{m} + 1$$

$$q \cdot E = \frac{\gamma m v^2}{R} \rightarrow E = \frac{(\gamma m v^2)}{R}$$

$$E = \frac{(\gamma m v^2)}{R} = 182 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$$

$$\frac{(938 + 200) \times 10^6 \times (1 - (1 + \frac{200}{938})^{-2})}{2}$$

6

$$q v B = \frac{\gamma m v^2}{R} \rightarrow R = \frac{\gamma m v}{q B} = \frac{20 \text{ MeV}}{e \cdot 1 \text{ T} \cdot 3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 6,7 \text{ cm}$$

7

$$n = 120$$

$$B = 2 \text{ T}$$

"lange Spule"

$l = 0,1 \text{ m}$  (Angabe fehlt)

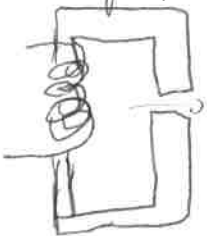
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} = \frac{V \cdot s}{\text{Am}} = \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$$

$$B = \mu_0 n I \rightarrow I = \frac{B l}{\mu_0 n} = \frac{2 \text{ T} \cdot 0,1 \text{ m}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 120} = 1,33 \text{ kA} \cdot \frac{1}{\mu\text{r}}$$

Eisenkern: Umweg von Beamline zu sein, B hindern, wo Wackie ist darf kein Strahl durch

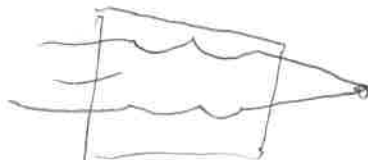
werden sehr warm, dicke Dröhte (6m x 6mm)

sehr hohe Induktivität, dauert lange Strom ändern



Helmholtz Spulen (Luft-Kern)

Strahl entlang Luftspule



Solenoid fokussieren,  $R_{\text{max}}$  bleibt erhalten  
Strahlrohr gleich

→ Randeffekte fokussieren  
braucht den nur ein, statt Quadrupoldukt  
aber weniger Fokussierkraft

⑧ ohne Eisenkerne  $\rightarrow$  schneller regeln, weniger E-Speicher, weniger Induktivität  
 (Luftspule)  $\rightarrow$  1,5 kA für 2T, kannst höhere  $B$  erreichen (keine Sättigung)  
 als 2T  $\rightarrow$  bis 100T

mit Eisenkern  $\rightarrow$  höheres  $B$  ( $\mu_r$ ) bei gleichem  $I$ , aber begrenzt:  
 alle Atome in Eisen ausgerichtet, Sättigung bei  $\approx 2$  T  
 bis 2T effektiver  
 kleinere Streufelder, Magnet fokussiert



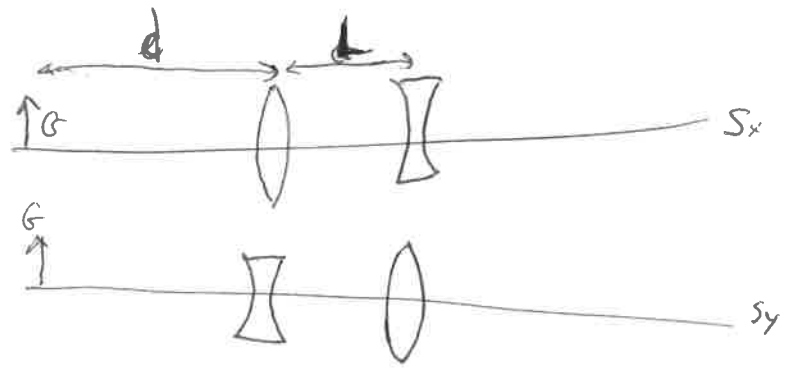
wie kriegt ich Quadrupolfeld mit Eisenkern?  
 $\rightarrow$  ~~ist~~ " " " "



abgerundete Eisenkerne

verbiegen, oder größer/wachsender Radius

⑨



$\approx$  dünne Linsen

In X: zwei Linsen  $f_{x1}, f_{x2}$  (positiv: konvergent)  
 negativ: divergent

In Y: " "  $f_{y1}, f_{y2}$  " "

} Konventionen

$g$ : Gegenstand-Position (positiv nach links)

$b$ : Bild-Position (" " rechts)

Formel: 
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

$$X1: \frac{1}{f_{x1}} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b_{x1}} \rightarrow \frac{1}{b_{x1}} = \frac{1}{f_{x1}} - \frac{1}{g} \rightarrow$$
 Bild von  $X1$  ist neuer Gegenstand für Linse 2 in Abstand  $L - b_{x1}$

$$X2: \frac{1}{f_{x2}} = \frac{1}{L - b_{x1}} + \frac{1}{b_{x2}} \rightarrow \frac{1}{b_{x2}} = \frac{1}{f_{x2}} - \frac{1}{L - b_{x1}} = \frac{1}{f_{x2}} - \frac{1}{L - \left(\frac{1}{f_{x1}} - \frac{1}{g}\right)^{-1}} \quad (I)$$

Ideen für  $\gamma_1, \gamma_2$ :

$$\frac{1}{b_{\gamma_2}} = \frac{1}{f_{\gamma_2}} - \frac{1}{L - \left(\frac{1}{f_{\gamma_1}} - \frac{1}{g}\right)^{-1}} \quad (\text{II})$$

$$g \equiv d > 0$$

$$f_{x_1} \equiv f_1 > 0$$

$$f_{x_2} = -f_2 < 0$$

$$f_{\gamma_1} = -f_1 < 0$$

$$f_{\gamma_2} = +f_2 > 0$$

Kondition Punkt-zu-Punkt Abbildung:

$$b_{x_2} = b_{\gamma_2}$$

$$\hookrightarrow \text{Also (I) = (II)}$$

$$-\frac{1}{f_2} - \frac{1}{L - \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{d}\right)^{-1}} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{L - \left(-\frac{1}{f_1} - \frac{1}{d}\right)^{-1}} \quad \left. \right\} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{L + \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{d}\right)^{-1}}$$

$$\frac{1}{L + \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{d}\right)^{-1}} - \frac{1}{L - \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{d}\right)^{-1}} = \frac{2}{f_2}$$

$$\frac{2}{f_2} = \frac{1}{L + \frac{f_1 d}{f_1 + d}} - \frac{1}{L + \frac{f_1 d}{f_1 - d}} = \frac{f_1 + d}{L(f_1 + d) + f_1 d} - \frac{f_1 - d}{L(f_1 - d) + f_1 d}$$

$$\frac{2}{f_2} = \frac{f_1 + d}{\cancel{f_1(L+d) + Ld}} - \frac{f_1 - d}{\cancel{f_1(L+d) - Ld}} = \frac{(f_1 + d)(z - Ld) - (f_1 - d)(z + Ld)}{z^2 - (Ld)^2}$$

3. b. Formel;  $z = f_1(L+d)$

$$\frac{2}{f_2} = \frac{f_1(z - Ld - z - Ld) + d(z - Ld + z + Ld)}{z^2 - (Ld)^2} = \frac{2dz - 2f_1 Ld}{z^2 - (Ld)^2} \quad | : 2$$

$$\frac{1}{f_2} = \frac{d(z - z f_1 L)}{z^2 - (Ld)^2} = \frac{d \cdot f_1 \cdot d}{f_1^2 (L+d)^2 - (Ld)^2} = \frac{f_1}{f_1^2 \left(\frac{L+d}{f_1}\right)^2 - L^2}$$

$$\hookrightarrow f_1 f_2 = \frac{f_1^2 \left(\frac{L}{d} + 1\right)^2 - L^2}{L} \rightarrow \frac{L}{d} + 1 = \sqrt{\frac{f_1 f_2 + L^2}{f_1^2}}$$

Solte:

$$d = \sqrt{\frac{f_1^2 + L^2}{f_1^2}} - 1 \quad \hookrightarrow = \frac{L f_1}{\sqrt{f_1^2 + L^2} - f_1} = \frac{1}{\sqrt{\frac{f_1^2}{L^2} + \frac{f_2}{f_1 L^2}} - \frac{1}{L}}$$

$$g = \frac{f_1 L}{\sqrt{\frac{f_1^2}{L^2} + \frac{f_2}{f_1 L^2}} - \frac{1}{L}}$$

# Übung 7

vorzurechnen am: 15.6.2015 (2.DS)

1. Welches laterale Dosisprofil wird im Wasserphantom gemessen, wenn der Elektronenstrahl mit einer hohen Divergenz auf das Target trifft?
2. Welches Bild entsteht, wenn ein Film im Isozentrum unter verschiedenen Kollimatorwinkeln mit nahezu geschlossenen x-Kollimator und maximal geöffneten y-Kollimatoren bestrahlt wird und weiter die Drehachse i) genau auf das Isozentrum gerichtet ist oder ii) um  $0,6^\circ$  verkippt ist. Ändert sich etwas, wenn die x-Kollimatoren geöffnet und die y-Kollimatoren fast geschlossen sind? Kann man am Bild erkennen, in welcher Richtung die Verkipfung liegt?
3. Welche Prozesse erzeugen sekundäre Elektronen im empfindlichen Volumen einer Transmissionskammer, wenn mit 6 MV Bremsstrahlung gearbeitet wird? Schätzen Sie ab, welcher Anteil der Elektronen durch welchen Prozess freigesetzt wird! Wieviele Elektronen sind es insgesamt, wenn die Kammer eine planparallele Kammer mit 2 mm Plattenabstand, der Strahl einen Durchmesser von 7,5 mm hat und in der Kammer 1 Gy appliziert werden? Wie ändert sich der Wert für eine zylindrische Kammer gleichen empfindlichen Volumens?
4. Die Transmissionskammern in einem Bestrahlungskopf können abhängig von der Öffnung <sup>e</sup> der Kollimatoren eine unterschiedliche Stromstärke bei sonst gleichen Strahleinstellungen anzeigen. Warum? Schätzen sie die Abweichung für vollständig offene und vollständig geschlossene Kollimatoren ab, wenn sich zwischen Kollimator und Transmissionskammer kein weiterer Absorber befindet.
5. Schätzen Sie den Verstärkungsfaktor einer 1 mm Kupferplatte vor 10 mm Szintillator als EPID ab?   
 *CS I*  
*Energie*
6. Überlegen Sie sich die Variante zu einer möglichst homogenen Bestrahlung einer rechteckigen Fläche in einem Wasserphantom. Das Phantom habe Abmessungen von  $20 \times 60 \times 80 \text{ cm}^3$ . Die zu bestrahlende Fläche liege 4 cm unter der Oberfläche und ist 4 cm breit/hoch (in Richtung der 20 cm Phantomkante) über die gesamte Länge des Phantoms (80 cm). Im ersten Versuch sollen nur Felder bis  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  benutzt und nur die Kollimatoren bewegt werden. In welchen Bereichen können Über- bzw. Unterdosierungen auftreten? In einem zweiten Versuch (falls der erster Versuch zu unbefriedigenden Ergebnissen führt) kann auch eine Gantryrotation oder andere der üblichen Freiheitsgrade verwendet werden. Welche zusätzlichen Schwierigkeiten treten hier auf? Können Sie behoben werden?
7. An einem Linearbeschleuniger wird für ein <sup>20x20</sup>  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  Feld in einem Wasserphantom die unten stehende symmetrische Lateralverteilung gemessen. Schätzen Sie die Outputfaktoren für die Feldgrößen  $0,5 \times 0,5$ ,  $1,0 \times 1,0$ ,  $2,0 \times 2,0$ ,  $5,0 \times 5,0 \text{ cm}^2$  ab.

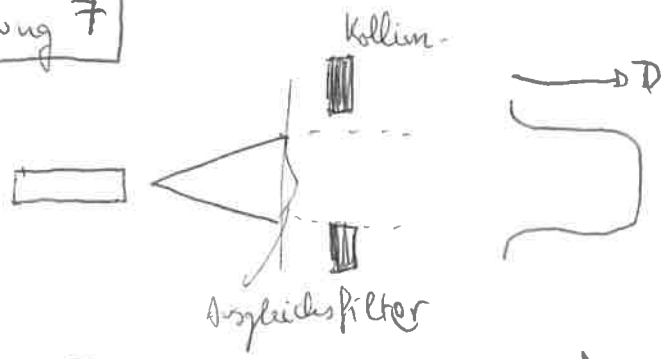
Ort/cm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12
Relative Dosis/%	98	98	99	100	101	102	103	102	100	95	82	70	50	30	18	5	0

- ✕ 8. Bei zwei verschiedenen Bestrahlungsplanungen werden innerhalb einer Ebene unten angegebene Dosen in jedem Voxel berechnet. Zeichnen Sie die DVH für Tumor- (die vier umrandeten Kästchen in der Mitte) und Normalgewebe (alle anderen Kästchen). Welches der Pläne wäre klinisch zu bevorzugen? Sind weitere Zusatzinformationen zur Bewertung sinnvoll?

0	2	2	0
0	3,5	3	0
0	4	3,5	0
0	2	2	0
0	1	1	0
1	4	3	1
1	4	3	1
0	1	1	0

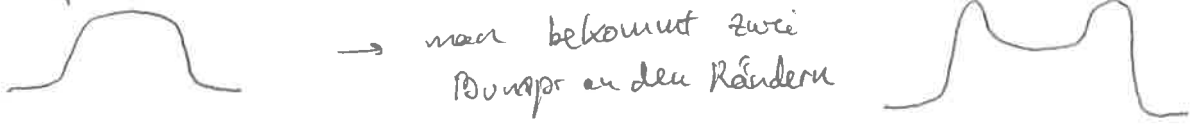
Übung 7

①

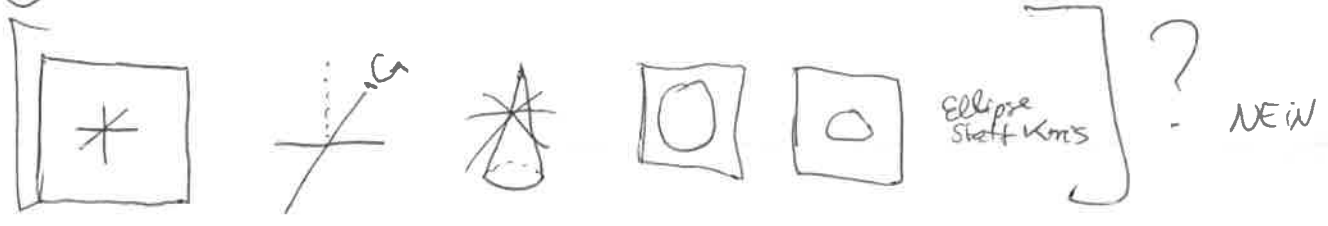


strahl: Teilchenphysik: von links nach rechts  
Medizinphysik: von oben nach unten

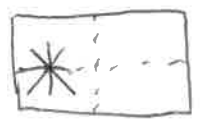
höhere Divergenz: Ränder verschwimmen, mehr Streuung im Material



②



Kollimator Ankerung verkippt, Halterung 0,6% gekippt, trotzdem horizontal gedreht. ~~Strahl~~ kommt raus, aber nicht im Isozentrum



man muss nicht nur Stern zeichnen sondern auch Isozentrum

③

6 MV Bremsstrahlung

$\cong 6 \text{ MeV } e^- \rightarrow \gamma \gamma$



$\rho_{\text{air}} = 1,3 \text{ kg/m}^3$

Sekundäre  $e^-$ ?

4 MeV: $\mu(\text{XCOM}) \text{ cm}^2/\text{g}$ (Air)	
$P_{4,589e-7}$	$\approx 0\%$
$2,897e-2$	93%
$1,978e-3$	6%

Total  $3,1e-2$



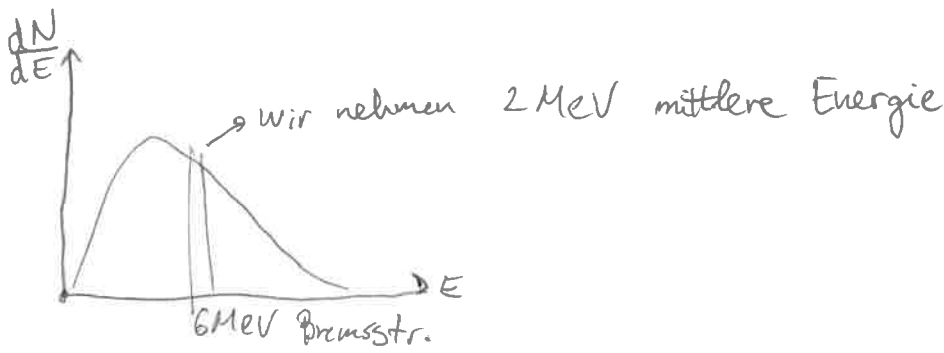
zu berücksichtigen

- $\gamma \rightarrow$  Photoabsorption
- $\rightarrow$  Compton
- $\rightarrow$  Paarbildung

Alle Prozesse erzeugen freie Ladung. Innerer Photoeffekt erzeugt nur, aber das passiert nur bei kleineren Energien.

• Compton erzeugt ein  $e^-$  und ein Ion. Sekundäre Streuung ist  $\frac{Z^2}{A}$  Wahrscheinlichkeit quadriert.  $P(B) = P(A) \cdot P(A)$ , sonst Monte Carlo

• Paarbildung:  $e^-$  und  $e^+$ ,  $e^+$  annihiliert mit anderer  $e^-$  eines Atoms. Also am Ende ist es ein  $e^-$  und ein Ion. Wir vernachlässigen Zusatzionisation bei der Abbremsung.



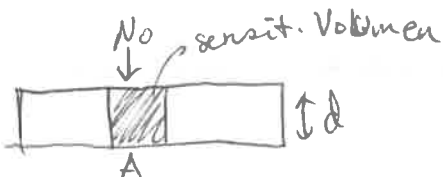
PE  $1e^- + 1ion$   
 CS  $1e^- + 1ion$   
 PB  $e^- et$

→ Ladung  $Q = (N_0 - N)e$   
 die die Primärstrahlung absetzt

$$Q = (N_0 - N_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot t}) e \quad ; \quad D = N_w \cdot Q \cdot K$$

$$N_w = \frac{D}{QK} = \frac{N_0 (1 - e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot d}) \cdot E_0}{\rho A d \cdot N_0 (1 - e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot d}) \cdot Q} \quad \rightarrow \text{Abschwächung im Wasser}$$

... niedrigste Ladung



$$D = \frac{E}{m} = \frac{(N_0 - N) \cdot \overline{E_T}}{\rho A d}$$

average  $E_T$

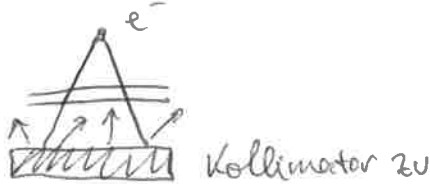
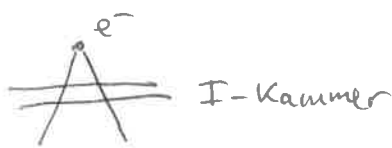
$$N_w = 10^{12} \frac{Gy}{C}$$

Roos Kammer  $d = 2mm$   
 $d \cdot A = 0,35cm^2$

Datublatt:  $8,5 \cdot 10^7 \frac{Gy}{C}$

↘ wir bekommen weniger Ladung als in Realität  
 (50eV Szii)  
 um

④ Es sind  $e^-$ . Geschlossener Kollimator: Rückstreuung.



Wie viele  $e^-$  zurück?  
 Welche Energie?

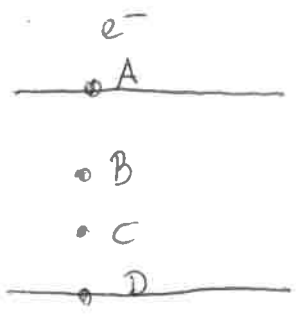
In Realität beliebt man das mit einer Absorberfolie dazwischen.

Folie 15:  $d \approx \frac{1}{2} R$ ,  $\eta$  Sättigung Elektronen Rückstreuung und Transmission. Kollimator: schwereres Element, 10 MeV  $\eta = 15\%$  zurückgestreut, oder Formel nehmen.

Aber  $E$  der rückgestreuten niedriger? → Rückstreuung kann nicht  $e^- - e^-$  (erster bleibt stehen oder 90°) ||

↳ nur Stoß am Kern viel schwerer, Energie wird NICHT verloren.





Wo wird rückgestreut? Überall

Wenn Rückstreuung bei:

- A: selbe Energie
- B: zuerst und später Materie durchdringen, verliert E im Weg

Rückstreuung taucht nur auf bis zur Hälfte der Reichweite = Tiefe. Sonst kommen die nicht zurück.

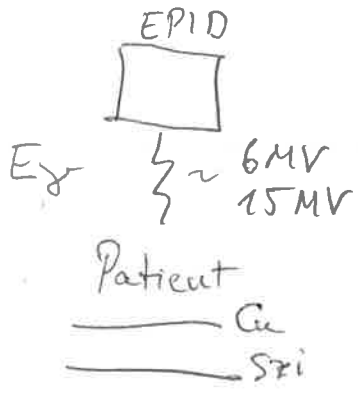
Energie kleiner  $\rightarrow$   $n$  kleiner

12% ; 1,2% ; 5% ?

5

1mm Cu  
10mm Szi  $\rightarrow$  CsI

Abschwächung



Kupferplatte:  $\left\langle \begin{matrix} CS \\ PE \end{matrix} \right.$

Szintillator  $(X-Y)\%$  deponiert. Besten Falls, alles was in Cu (dünn) wechselwirkt wird dann in Szi deponiert, maximal  $(100-Y)\%$   
Wir ignorieren E-Spektrum

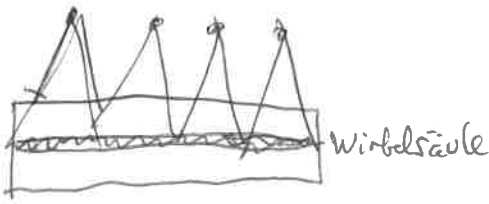
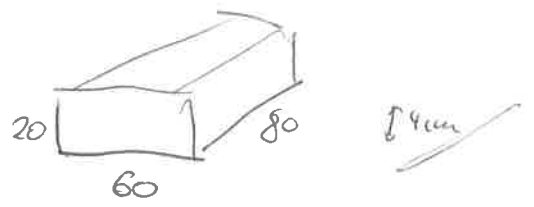
$\frac{100-Y}{X-Y} \Rightarrow$  Verstärkungsfaktor. Ist eine Abschätzung.

$\frac{I}{I_0} = e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot d}$  für Cu, Szi. Szintillator weiß  
Film AgCl Kassetten gelb

Wachstum: X-Auflösung wird verschmirt wegen der Shower an der Verstärkerfolie.

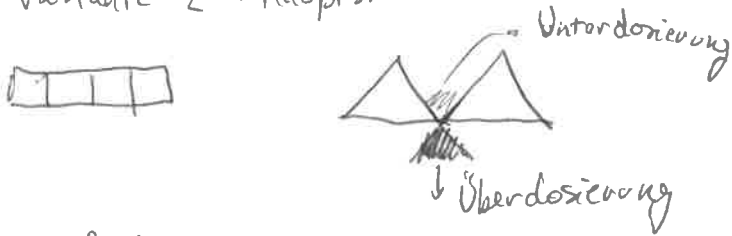
Röntgenbild Diagnostik  $\rightarrow$  es gab auch Verstärkerfolien, nämlich Szintillatoren X-ray-visible  
Film besser with visible light

⑥  $V = 20 \times 60 \times 80 \text{ cm}^3$   
 $f = 4 \text{ cm}$   
 $A = 20 \times 20 \text{ cm}^2$   
 4 Felder 20cm

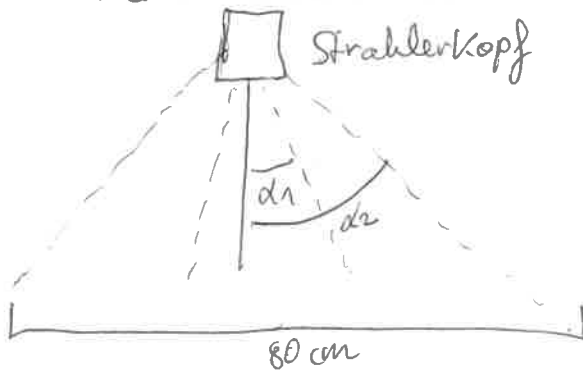


→ Überlapp Problem  
 Über/Unterdosierung

Variante 2: Hauptstrahlachse drehen; Spiegel ...



Strahlachse ändern



100 cm Abstand



$$\tan \alpha = \frac{10 \text{ cm}}{100 \text{ cm}}$$

$$\rightarrow \alpha_1 = 5,7^\circ$$

$$\alpha_2 = 3\alpha_1 = 17,1^\circ$$

Da Strahlerkopf im Isozentrum rotiert, muss man Tisch verschieben um das obere zu schaffen

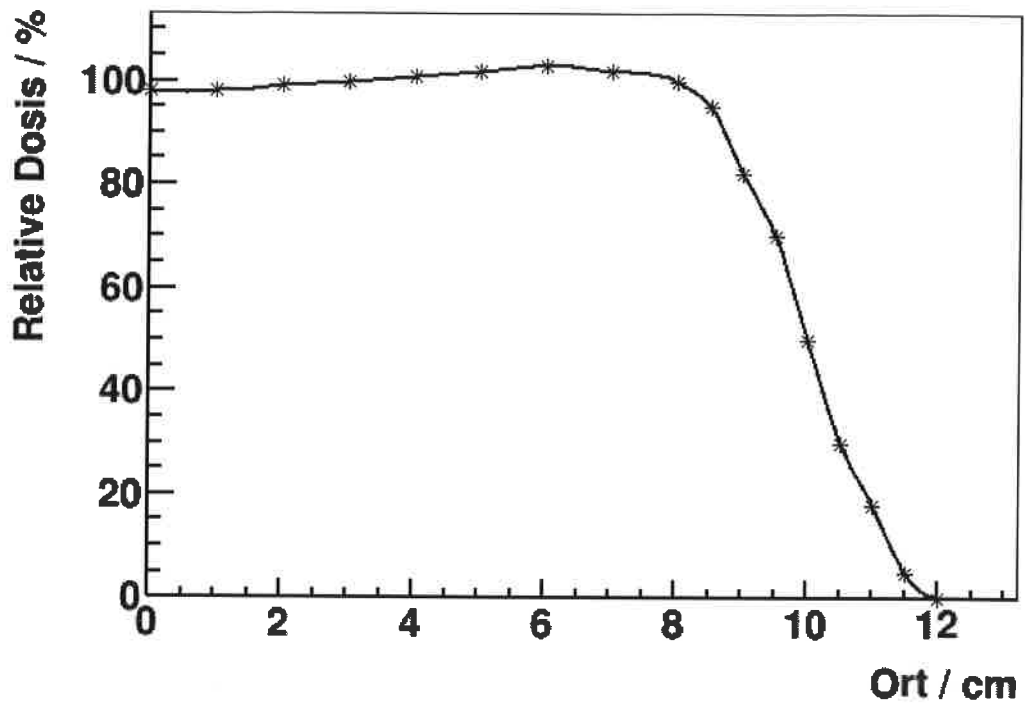


Fraktionieren, 3x selbe dann verschieben

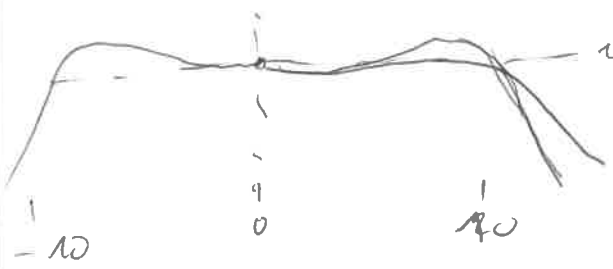
Problem: Dosisverteilung nicht homogen weil schräg Einfallswinkel

↳ keine hinzufügen um auszugleichen

(7)



20x20 cm<sup>2</sup> Feld ↑ hier nur von Mitte zu Ecke



100% (symmetrisch)  
Referenz auf 100% beziehen

0,5 cm → 98/100



100 MV = 1 Gy



Koll auf



Koll zu

→ nicht nur geschnitten sondern weniger Höhe  
~ 0,7

Outputfaktor:

wahre / kalibrierte Dosis

Streuung an Rändern  
↳ flache Kanten



Man erreicht nicht die 100%, 2x Verlust links-rechts, Überlapp  
Wieviel sinkt das?

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1/0 & 0 \\ \approx 1/0,78 & 1 & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0,15 & 0,18 \end{matrix}$$

$\hookrightarrow OF = 1$  (Outputfaktor)

Wir zeichnen nur eine Hälfte, 0 = Mitte

Ideal 20x20  
 Real Originalproj. fallend flache  
 aus Tabelle, schreiben

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1/0 & 0 \\ & & & & 0,82 & 0,5 & 0,18 \\ & & & & \hookrightarrow OF = 1 \end{matrix}$$

Ideal 10x80  
 Real

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1/0 & 0 \\ 1 & 0,82 & 0,5 & 0,18 \\ \vdots & \text{Kante} & & \end{matrix} \rightarrow OF = 1$$

4x4

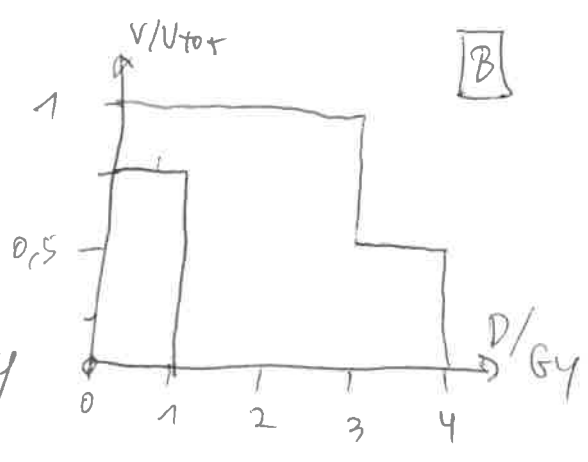
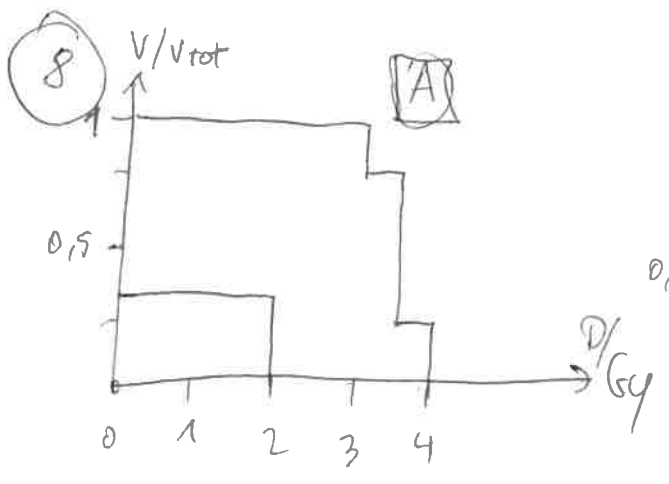
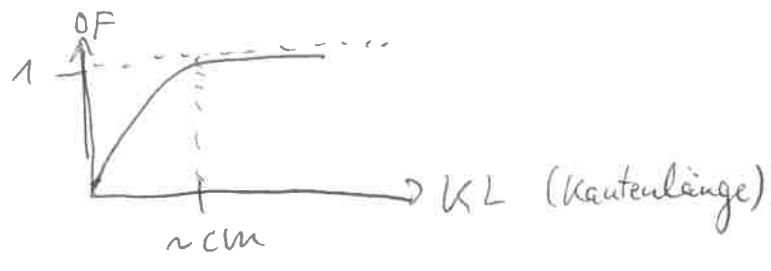
$$\begin{matrix} 1 & 1/0 & 0 \\ (0,82)^4 & 0,5 & 0,18 \end{matrix}$$

$\hookrightarrow$  4 Kanten rechteckigen Feld  $\rightarrow 0,82$  noch konfiguriert, 2x Verlust 12x2  
 $0,64 = 1 - 2(1 - 0,82)$   
 quadr. Feld: aber kommen noch zwei Kanten  $\rightarrow$  aber sehr klein oder negativ, stattdessen besser als Produkt  $\leftarrow$   $\leftarrow$  geht nicht so

$OF = (0,82)^4 = 0,45$

$OF = (0,7)^4 = 0,24$

1x1



B ist besser, weniger deterministische Effekte, Dosemel kleiner

# Übung 8

vorzurechnen am: 22+27.6.2015

- †
- ✓ 1. Welche Strahlungskomponente aus dem Zerfall der in Folie 3 VL 9 aufgeführten Radionuklide wird in der Nuklearmedizin genutzt?
- ✗ 2. Das Cyclone 18/9 beschleunigt Protonen auf 18 MeV auf der 2. Harmonischen, Deuteronen auf 9 MeV auf der 4. Harmonischen. Der Winkel der Dees ist  $30^\circ$ . Wieviele Umläufe benötigen die Protonen bzw. die Deuteronen bis zum Erreichen der Endenergie?
- ✗ 3. Warum sind Spaltfragmente neutronenreich?
- ✗ 4. Man berechne die spezifische Sättigungsaktivität bei der Produktion von  $^{60}\text{Co}$  im Reaktor mit einer thermischen Neutronenflussdichte von  $10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2 \text{ s})$  und einem Wirkungsquerschnitt der  $^{59}\text{Co} (n_{\text{th}}, \gamma) ^{60}\text{Co}$  Reaktion von 37,2 b. (Querschnittsdaten nach <http://atom.kaeri.re.kr/ton/nuc7.html>)  
ex for
- n
5. Warum verwendet man als Moderator  $\text{D}_2\text{O}$  und nicht  $\text{H}_2\text{O}$ ? Berechnen Sie den Verlust an thermischen Neutronen durch Einfang, wenn diese eine Strecke von 1 m jeweils in  $\text{D}_2\text{O}$  und in  $\text{H}_2\text{O}$  zurück legen.
6. Man zeichne die Zerfallsschemata der in Folie 28 stehender Tabelle aufgeführten Generatorsysteme auf.
- ✗ 7. Wie dick ist eine Pb Abschirmung auszulegen, um die primäre Strahlungskomponente des Nuklids  $^{99}\text{Mo}$  auf 1% zu reduzieren.
- ✗ 8. Welche Aktivität an  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (in Einheiten der Ausgangsaktivität an  $^{99}\text{Mo} = A_0$ ) wurde für das in Folie 30 stehenden Beispiel bei der 2. Eluation nach 30 Stunden erzielt? Wie hoch wäre die Aktivität, wenn nach 30 h die erste Eluation stattgefunden hätte?

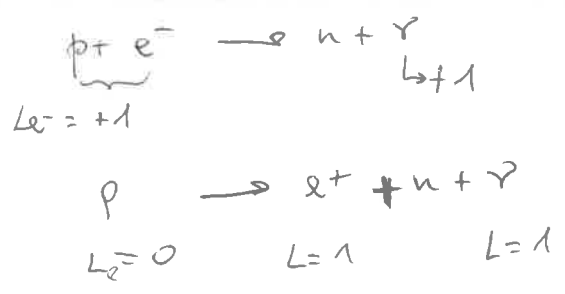


Übung 8

① PET:  $\beta^+$  Zerfall  $^{11}\text{C}$   $^{13}\text{N}$   $^{15}\text{O}$   $^{18}\text{F}$  Annihilationsquanten  
 $e^+ \leftrightarrow e^- \rightarrow 2 \times 511 \text{ KeV}$

SPECT:  $\gamma$ -Abregung  $^{67}\text{Co} \rightarrow 93,9 \text{ KeV}$   
 $^{111}\text{In} \rightarrow 171,8 \text{ KeV}$   
 $^{123}\text{I} \rightarrow 159 \text{ KeV}$   
 $^{201}\text{Tl} \rightarrow 165 \text{ KeV}$

Elektroneneinfang  $L_0 \gamma, \text{Neutrino}$   $L_{e^-} = 1$   $L_{e^+} = -1$



②

18/9  $E = 18 \text{ MeV}$   $E = 9 \text{ MeV}$   
 2. Harmonischen 4. Harmonische  
 p d  
 $\alpha \text{ OEE} = 30^\circ$

F. 15:  $\gamma_{\text{RF}} = 41,8 \text{ MHz}$   
 $U_p = 32 \text{ kV}$

$N_{\text{gap}} = 4$   
 Harmonische  $k_p = \begin{cases} 2 & (\text{protons}) \\ 4 & (\text{deuterons}) \end{cases}$

2 dies aber Übergang ist zwischen  $U_{\text{max}}$  und  $U=0$   
 passiert 2x pro Halbkreis, von - auf 0, von 0  
 auf +  $\Rightarrow$  4 Mal pro Kreis

$\Delta E = N_{\text{gap}} \cdot q \cdot U_p \sin\left(\frac{1}{2} k d\right)$

$N_{\text{Umlauf}} = \frac{E_{\text{tot}}}{\Delta E}$

$N_{\text{Umlauf}}(p) = \frac{18 \text{ MeV}}{4 \cdot 32 \text{ keV} \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 30^\circ\right)} = \frac{18 \text{ MeV}}{4 \cdot 32 \text{ keV} \cdot \frac{1}{2}} = 281$   
 $N_{\text{Umlauf}}(d) = \frac{9 \text{ MeV}}{4 \cdot 32 \text{ keV} \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 30^\circ\right)} = \frac{9 \text{ MeV}}{4 \cdot 32 \text{ keV} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}} = 81$

③ F.18, Bethe-Weizsäcker

großes  $Z \rightarrow$  viele  $n$  notwendig  $n \rightarrow p$

kleines  $Z \rightarrow n = p$  ist ok

bei der Spaltung gehen wir von 1 groß auf 2 kleine Kerne  
↳ da sind  $n$  übrig

$$E_B = Q_0 A - Q_0 A^{2/3} - Q_c Z(Z-1)A^{-1/3} - Q_s \frac{(N-Z)^2}{4A} \begin{cases} + a_p A^{-1/2} & p\text{-Kerne} \\ 0 & n, p\text{-Kerne} \\ - a_n A^{-1/2} & n\text{-Kerne} \end{cases}$$

niedriges  $Z: N \approx Z \rightarrow$  damit 3. Term verschwindet, 4. Term vernachlässigt  
↳ 10 auf

$$A = Z + N$$

großes  $Z: N > Z \quad || A = Z + 4$

↳ 3. und 4. Term (-) Vorzeichen:  $A$  größer machen

aber im 4. wird  $N$  auch größer wenn man  $A$   $n$  macht.

↳ Man muss Gleichgewicht finden  $\frac{(N-Z)}{A}$

im 3 nur  $\frac{Z}{A}$

$Z$  fest,  $N(A)$  ausdrücken  $\rightarrow$  optimal  $N$  ausrechnen

$$\frac{d}{dA} (\dots) = 0 \quad \rightarrow \text{für } Z=5 \rightarrow A=10,5$$

④ spezifische Sättigungsaktivität

$$\Phi_{\text{Akt}} = 10^{13} \frac{n}{\text{cm}^2 \text{ s}} = \frac{d^2 N}{dt dA}$$



$$S = N_A \cdot \phi \cdot \sigma =$$

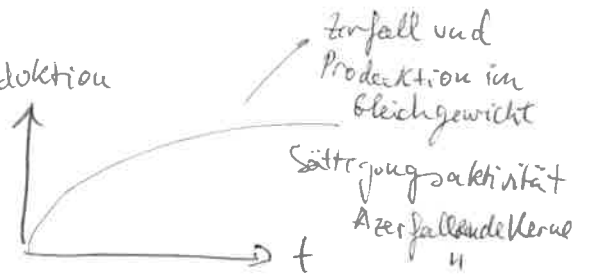
↑  
Trefferfläche pro Kern

$$= 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{cm}^2 \text{ s}} \cdot 37,2 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$= 2,24 \cdot 10^{14} \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad \left. \vphantom{2,24 \cdot 10^{14}} \right\} M = 60$$

$$A_{\text{Sätt, spez}} = \sigma \phi \frac{N_A}{M} = 3,7 \cdot 10^{12} \text{ Bq/g}$$

$^{60}\text{Co}$  Produktion



$$37,2 \cdot 10^{14} \text{ Kern}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{N_A}{M} \rightarrow \text{Anzahl Kerne/g}$$

$$\frac{N_A}{M} \cdot \sigma \rightarrow \text{Gesamtfläche pro Gramm}$$

$$\frac{N_A}{M} \sigma \phi \rightarrow \text{Reaktionen pro Gramm}$$

↑  
Fluss pro Fläche



⑤ D<sub>2</sub>O Moderator statt H<sub>2</sub>O

$\Delta n \approx 1 \text{ m}$

$\sigma_{D20} = 550 \mu\text{b}$

$\sigma_{H20} = 332 \text{ mb}$

Will man mehr n später benutzen (Gleichgewicht)?

$N(x) = N_0 \cdot e^{-\Sigma x}$

$\Sigma = n \sigma$

$n = \rho \cdot \frac{N_A}{M} f$

$\Sigma = \sigma \rho \frac{N_A}{M} f$

$\Delta N = N(x) - N_0 = N_0 (1 - e^{-\Sigma x})$

	D <sub>2</sub> O <small>schweres Wasser</small>	H <sub>2</sub> O
$\rho / \text{g/cm}^3$	1,11	1
$M / \text{g/mol}$	20,03	18,02
$f$	2	2
$\sigma$	550 $\mu\text{b}$	332 mb
$\Sigma / 1/\text{km}$	$3,67 \cdot 10^{-5}$	$2,22 \cdot 10^{-2}$
$\frac{\Delta N}{N_0}$	0,36%	89%

man will <sup>als Power</sup> Neutronen später benutzen

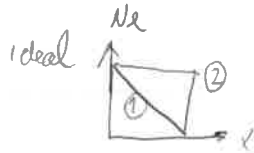
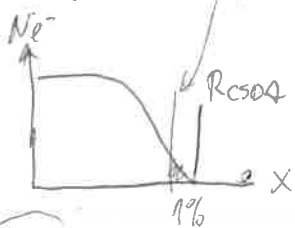
⑥ → see next page

⑦ Pb  $\rho_{Pb} = 11,34 \text{ g/cm}^3$   
F. 33

$\beta^- = E_{\beta, \text{max}} = 1,2 \text{ MeV} = (1357,2 - 142) \text{ keV}$   
 $\sim 89\%$  - 142 keV  
 366 keV  
 750 keV

$R_{\text{CSOA}} = \frac{1,004 \text{ g/cm}^2}{11,42 \text{ g/cm}^3} = 0,88 \text{ mm}$

1% → ein bisschen verdünnen  
 ↳ mehr Silber bei  $\sigma$ -Abschirmung



⑧  $^{99}\text{Mo} \rightarrow \text{A}_0$

$^{99\text{m}}\text{Tc}$

$\lambda_{\text{Mo}} = \frac{\ln(2)}{66 \text{ h}}$

$\lambda_{\text{Tc}} = \frac{\ln(2)}{6 \text{ h}}$

$A_{\text{MI}} = A_0 e^{-\lambda_{\text{M}} \cdot 24 \text{ h}} = 0,777 A_0$

$A_{\text{Tc}} = \frac{\lambda_{\text{T}}}{\lambda_{\text{T}} - \lambda_{\text{M}}} A_{\text{MI}} (e^{-\lambda_{\text{M}} \cdot 6 \text{ h}} - e^{-\lambda_{\text{T}} \cdot 6 \text{ h}}) = 0,37 A_0$  (2. entleert)

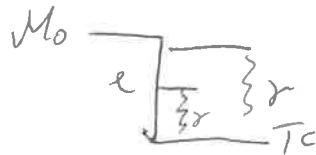
30 Stunden  $A_{\text{T}} = \frac{\lambda_{\text{T}}}{\lambda_{\text{T}} - \lambda_{\text{M}}} A_0 (e^{-\lambda_{\text{M}} \cdot 30 \text{ h}} - e^{-\lambda_{\text{T}} \cdot 30 \text{ h}}) = 0,71 A_0$   
 nichts entleert

(man kriegt mehr ohne zu entleeren aber später)

$A(^{99}\text{Mo}) = A_0 \cdot e^{-\lambda_{\text{Mo}} t}$

$A(^{99\text{m}}\text{Tc}) = \frac{\lambda_{\text{Tc}}}{\lambda_{\text{Tc}} - \lambda_{\text{Mo}}} A(^{99}\text{Mo}) (e^{-\lambda_{\text{Mo}} t} - e^{-\lambda_{\text{Tc}} t})$

$\tilde{t}$  time to last detection  
 $A(^{99}\text{Mo}) = A_0 \cdot e^{-\lambda_{\text{Mo}} \tilde{t}}$



$dE = -S \rho dx$

$S = 1,73 \text{ MeV cm}^2 / \text{g}$

$\Delta E \approx 1,2 \text{ MeV} = S \cdot \rho \cdot x$

$\hookrightarrow t = 0,9 \text{ mm}$

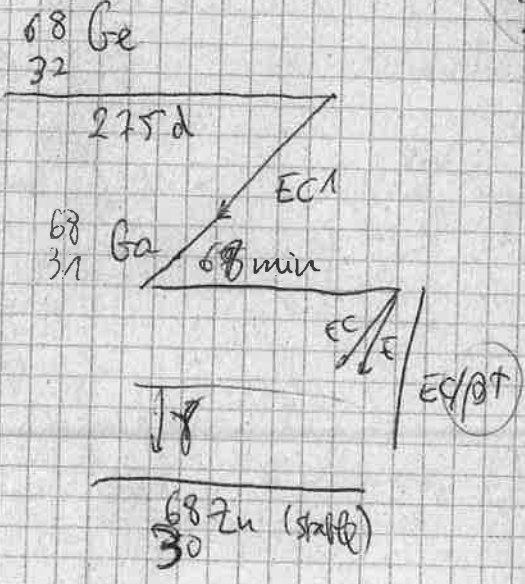
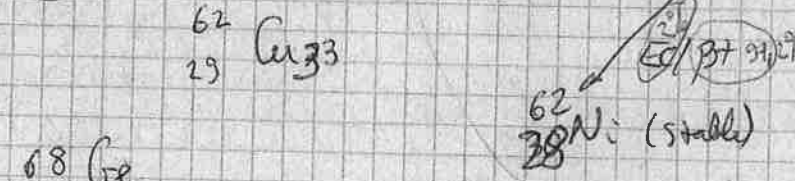
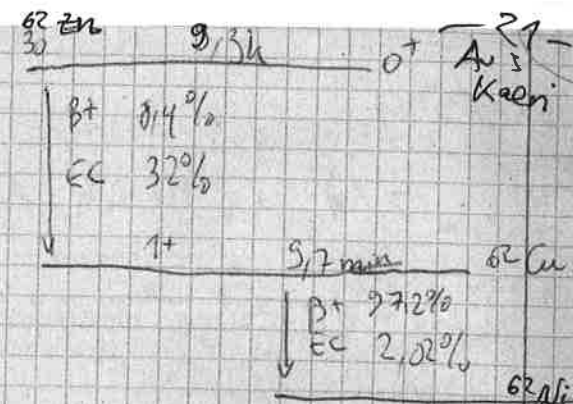
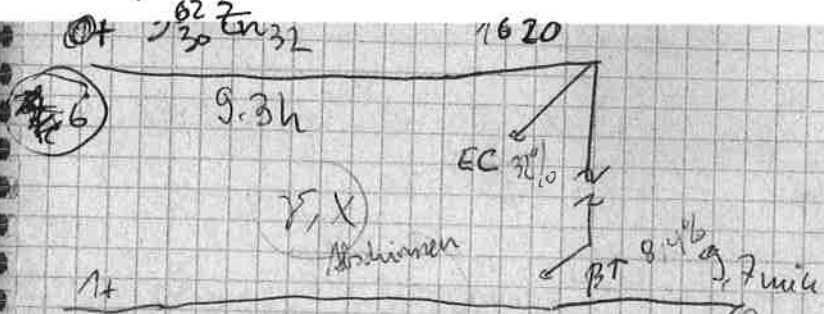
XRAY COEF

$p = 1\% = e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot t}$

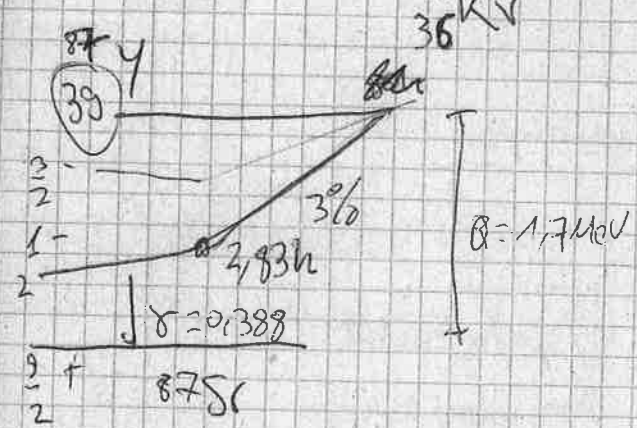
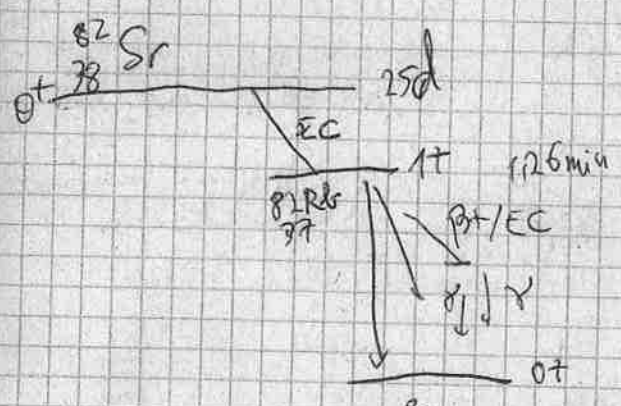
$\hookrightarrow t = \frac{-\ln(0,01)}{\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho} = 4,6 \text{ cm}$

① gibt es nicht,  $e^-$  werden nicht eingefangen  
 Also gibt's ②, aber stochastisch verschmiedet  
 das. bei ideal ② geht das mit einem  
 1% nicht, von 100% auf 0% ganz schnell

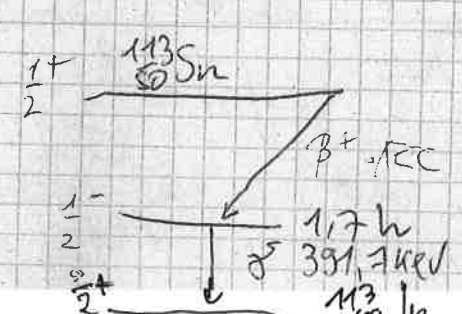
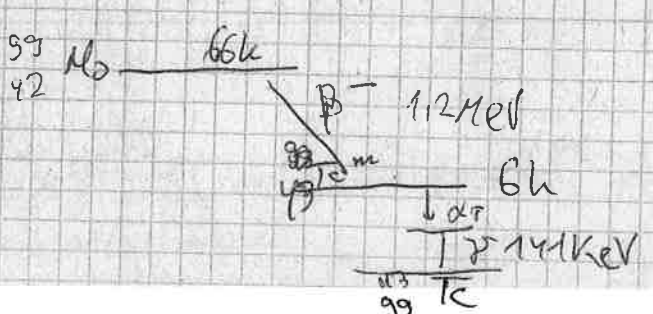
M: Mutter  $\lambda_{\text{M}} = 0,0105118 \text{ h}^{-1}$   
 T: Tochter  $\lambda_{\text{T}} = 0,11533 \text{ h}^{-1}$



Energy levels  
spezifizieren



$Q = 1,7\text{MeV}$





# Übung 9

(mit Hilfe) vorzurechnen am: 6.7.2015

1. Unter der Annahme einer Fluoreszenzzeitkonstanten von 230 ns berechne man für NaI(Tl) die Zeit, welche bis zur Emission von 99 % der gesamten Lichtausbeute vergeht.
2. Man berechne  $Z_{\text{eff}}$  für CdWO<sub>4</sub>, LuAP und LaBr<sub>3</sub>
3. Man berechne für eine vorgegebene Verstärkung  $G$  die Zahl der Dynoden bei der die Betriebsspannung minimal ist.
4. Berechnen Sie die theoretisch maximale Nachweiseffektivität eines Siliziumdetektors mit einer 1 mm dicken Verarmungsschicht, wenn Sie annehmen, dass ein Photonenstrahl mit der Quantenenergie von 140 keV senkrecht auf diese Schicht fällt.
5. Berechnen Sie die genaue Lage der Comptonkante für eine Photonenenergie von 1460 keV.
6. Berechnen Sie die (theoretische) Energieauflösung einer Argon-gefüllten Proportional-kammer für die von <sup>99m</sup>Tc emittierten Photonen.
7. Eine Firma stellt Detektoren her, mit denen die radioaktiven Materialien einer unbekanntem Quelle bestimmt werden können. Dazu wird das emittierte  $\gamma$ -Spektrum der Quelle aufgezeichnet wird und durch Vergleich mit den Datenbanken die entsprechenden Elemente angegeben. Würden Sie vermuten, dass der Detektor ein Halbleiter- oder Szintillationsdetektor ist? Warum?
8. Berechnen Sie die Ganzkörperaktivität eines medizinisch unauffälligen Menschen aufgrund des <sup>40</sup>K im Körper (Masse 90 kg)!



$$\textcircled{3} \quad U_b = \frac{n}{k} G^{1/n}$$

$$\frac{dU_b}{dn} = \frac{1}{k} G^{1/n} + \frac{n}{k} \cancel{G^{1/n}} \frac{d}{dn} G^{1/n} = \frac{1}{k} G^{1/n} + \frac{n}{k} \ln(G) G^{1/n} \left(-\frac{1}{n^2}\right)$$

$$z = 1/n$$

$$dz = -\frac{1}{n^2} dn$$

$$\frac{d}{dn} G^z = \frac{dG^z}{dz} \cdot \frac{dz}{dn} = \ln(G) G^z \cdot \left(-\frac{1}{n^2}\right)$$

$$\frac{dU_b}{dn} = \frac{1}{k} G^{1/n} - \frac{\ln(G)}{nk} G^{1/n} = \frac{G^{1/n}}{k} \left( \frac{1}{n} - \frac{\ln G}{n} \right) = 0$$

$$\hookrightarrow \text{für } \boxed{n = \ln G}$$

2. Ableitung formell  
oder vorzeichen Diskussion



$$\textcircled{4} \quad \text{Si}$$

$$\Delta z = 1 \text{ mm}$$

$$E_x = 140 \text{ keV}$$

$$\# 106 \rightarrow \rho_n \approx 20000 \text{ } \Omega \text{ cm}$$

$$U \approx 100 \text{ V}$$

$$\frac{1}{\rho} \stackrel{\text{material, x-ray coef}}{\approx} 1,448 e^{-1} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \rightarrow \rho_{\text{Si}} = 2,32 \text{ g/cm}^3$$

$$1 - \frac{I}{I_0} = 1 - e^{-\mu \rho \Delta z} = 3\%$$

$\hookrightarrow$  Das ist das Problem, dass man nur 3% verliert



①  $\tau = 230 \text{ ns}$   
NaI(Tl)

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \rightarrow \ln \frac{I}{I_0} = -\frac{t}{\tau} \rightarrow t_{99} = -\tau \ln(0,99)$$

$$= 1,06 \mu\text{s}$$

oder mit der Integralen machen,  
kommt aber selbe raus  $\int_0^{t_{99}} I dt = 99\% \int_0^{\infty} I dt$



② F.53 exp Funktion: Höhe = Integral

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3]{\sum_i W_i Z_i^3}$$

$x \approx 3,5$

$$W_i = \frac{m_i Z_i}{\sum_j m_j Z_j}$$

$m_i$  = Anzahl der Atome des Elements I

Element	Z
Cd	48
W	74
O	8
Lu	71
Al	13
La	57
Br	35
Bi	83
Ge	32
S	14

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3]{\frac{m_i Z_i^{x+1}}{\sum_j m_j Z_j^x}}$$

•  $\text{CdWO}_4$  (cwo)

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3,5]{\frac{1 \cdot 48^{4,5} + 1 \cdot 74^{4,5} + 4 \cdot 8^{4,5}}{48 + 74 + 4 \cdot 8}} = 62,35 //$$

Lithium Aluminium Peroxid

•  $\text{LuAP} = \text{LuAlO}_3$

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3,5]{\frac{71^{x+1} + 13^{x+1} + 3 \cdot 8^{x+1}}{71 + 13 + 3 \cdot 8}} = 63 //$$

•  $\text{LaBr}_3$

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3,5]{\frac{57^{4,5} + 3 \cdot 35^{4,5}}{57 + 3 \cdot 35}} = 46 //$$

$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$

89

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3,5]{\frac{4 \cdot 83^{4,5} + 3 \cdot 32^{4,5} + 12 \cdot 8^{4,5}}{4 \cdot 83 + 3 \cdot 32 + 12 \cdot 8}} = 73 //$$

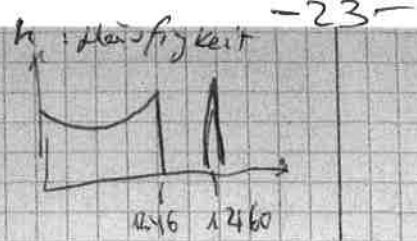
$\text{Lu}_2\text{SiO}_5$

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[3,5]{\frac{2 \cdot 71^{4,5} + 14^{4,5} + 5 \cdot 8^{4,5}}{2 \cdot 71 + 14 + 5 \cdot 8}} = 65 //$$



5)  $E_x = 1460 \text{ keV}$

$$T_e'(TT)_{\text{max}} = \frac{E_x}{\Delta + \frac{m_e}{2E_x}} = \frac{1248 \text{ keV}}{1242,6} //$$



6) Ar Proportionalkammer  $F_{149,149}$   
 $w/eV = 26$   
 $F = 0.2$   
 $^{99m}\text{Tc}$   $E_x = 140 \text{ keV}$

$$\frac{\Delta E}{E} = R = 2.35 \sqrt{\frac{F w}{E_x}} = 2.35 \sqrt{\frac{0.2 \cdot 26 \text{ eV}}{140 \text{ keV}}} = 1.43\% //$$

7) Halbleiter  $\rightarrow$  bessere E-auflösung beschränkte Dicke  
 $Sz_i \rightarrow$  besseres Signal-Rausch-Verhältnis; günstiger; mehr Nachweiseffizienz, keine Kühlung  
 kann man größer bauen  
 In der Praxis  $Sz_i$  normalerweise

8)  $m = 90 \text{ kg} \rightarrow 0.3\% \text{ K}^{\text{wiki}}$  Aktiv K  
 $0.125\%$

$^{40}\text{K} \rightarrow 0.0117\%$   $\rightarrow 30,346 \text{ Bq/kg}^{\text{wiki}}$   
 Isotopenanteil  
 $(0.117 \text{ mSv/Jahr})^{\text{wiki}}$

$$\frac{1}{2} N_{0K} = 1,251 \times 10^5 \text{ years}$$

$$\frac{1}{2} = \frac{\ln 2}{\lambda_{0K}} \rightarrow \lambda_{0K} = \frac{\ln 2}{\frac{1}{2} N_{0K}}$$

$$M_{0K} = 90 \text{ kg} \cdot 0.3\% \cdot 0.0117\% = 32 \text{ mg}$$

$$N_{0K} = N_A \frac{m}{M} = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot \frac{32 \text{ mg}}{40 \text{ g/mol}} = 4.8 \cdot 10^{20} \text{ atoms}$$

$$A_{0K} = \lambda_{0K} \cdot N_{0K} = 11.4 \text{ kBq} \approx 8 \text{ kBq} //$$



# Übung 10

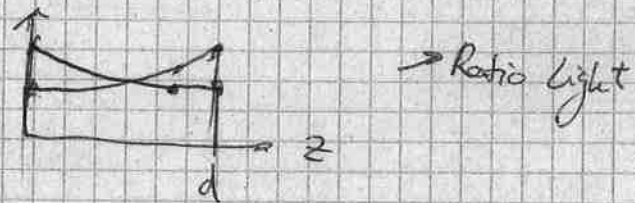
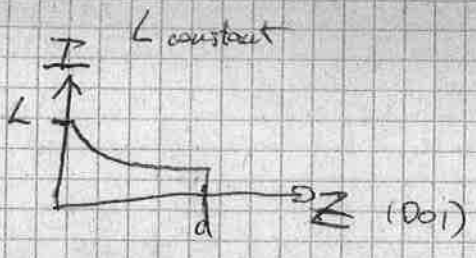
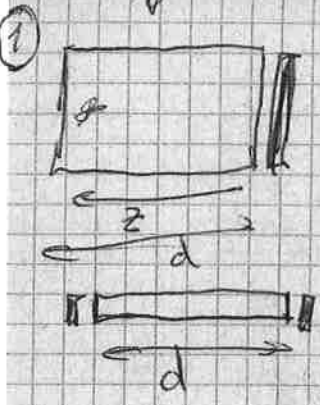
vorzurechnen am: 20.7.2015

- ✖ 1. In einem großen Szintillator wird das von der Strahlung erzeugte Licht eigentlich auf dem Weg bis zum Austrittsfenster exponentiell geschwächt. Gibt es eine Möglichkeit für einen dünnen, langen Szintillator, der zweiseitig ausgelesen wird, die durch die Strahlung erzeugte Lichtmenge ortsunabhängig zu bestimmen?
- ✖ 2. Wie groß ist das einer digitalen Einheit entsprechende Spannungsintervall für einen 12 bit ADC für eine maximale Eingangsspannung (analog) von 10 V?
- ✖ 3. Leiten Sie eine Beziehung zwischen der maximalen Konversionszeit und der Oszillatorfrequenz eines Wilkinson ADC bei einem gegebenen dynamischen Bereich des ADC her.
- ✖ 4. Für einen punktförmigen Positronenstrahler der Aktivität 100 MBq zwischen zwei (der Einfachheit halber unendlich ausgedehnten) Strahlungsdetektoren einer Sensitivität von 100 % berechne man das Trues-to-Randoms-Ratio, wenn die Konizidenzzeitauflösung 10 ns beträgt.
- ✖ 5. Man berechne die linearen Schwächungskoeffizienten von Photonenstrahlung im Energiebereich  $80 \leq E_g \leq 511$  keV in Wasser, NaI und Blei.
- ✖ 6. Welche Comptonstreuwinkel werden durch ein Energiefenster  $130 \text{ keV} \leq E_\gamma \leq 150 \text{ keV}$  für die  $\gamma$ -Strahlung aus  $^{99m}\text{Tc}$  (140,5 keV) bei der Anger-Kamera unterdrückt?
- ✖ 7. Man berechne den Verkleinerungsfaktor für einen divergenten Kollimator der Dicke 5 cm,  $f = 45$  cm und für eine Quellverteilung 15 cm vor dem Kollimator. Für einen Kristalldurchmesser von 30 cm berechne man das Gesichtsfeld.
- 8. Man verifiziere die Näherungsbeziehung für die Geometrie einer Anger-Kamera. Unter welcher Voraussetzung gilt diese?
- 9. Man berechne die Septendicken für Nieder-, Mittel- und Hochenergie-Kollimatoren aus Blei, wobei deren Lochdurchmesser 2.5 mm und deren Dicke 2.5 cm betragen soll.
- 10. Man berechne das Kollimator-Auflösungsvermögen für den Niederenergie-Kollimator aus der vorhergehenden Aufgabe für Abstände zwischen Quelle und Kollimator von 0 bzw. 10 cm.
- 11. Man berechne die Kollimatoreffektivität für den Nieder-Energie-Kollimator aus Aufgabe 3 unter der Annahme sechseckiger Löcher in hexagonaler Packung.



Übung 10

11.7.15



$\mu = \frac{1}{\lambda}$

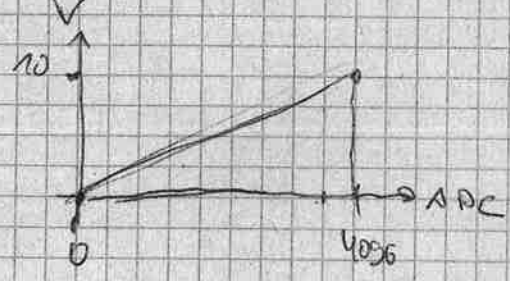
$I_1 = L_0 \cdot e^{-\mu z}$   
 $I_2 = L_0 \cdot e^{-\mu(d-z)}$   
 $\rightarrow I_1 \cdot I_2 = L_0^2 \cdot e^{-\mu d}$

$L_0 = \sqrt{I_1 I_2 e^{\mu d}}$   
 $\propto \sqrt{I_1 I_2}$   
 $z = \ln\left(\frac{I_1}{L_0}\right) \cdot \frac{1}{\mu}$

$z = \frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{I_2 e^{\mu d}}{I_1}\right)$

Oder mit TOF

12 bit  $\rightarrow 2^{12} - 1 \rightarrow 4095$



$\frac{10V}{4096/ch} = 2.44 \text{ mV/channel}$

3)  $\tau(f_{max})$

Messtechnik in der Kernphysik Georg Borer

$n = \text{Bitzahl}$

to: Ausstieg

lyn. Bereich jedes Puls  $\rightarrow$  1 Kanal

kleinere Pulse  $\rightarrow$  weniger Zeit an

$\frac{1}{f} = T_{Pulse}$  max. Kanalarbeit

$\rightarrow 2^n \text{ Kanäle} \cdot T_{Pulse} = T_{Gesamt}$

Kondensator

Zeit an

|||||





Nuclei Pulsabstand =  $N_{\text{pulse}} \cdot \frac{1}{f} = T$



$\frac{\max N_p}{f} \rightarrow T_{\max}$

Bsp  $\frac{2^{12}}{1 \text{ GHz}} = 4 \mu\text{s} = T_{\max}$

↓  
Konversionszeit



④  $A = 100 \text{ MBq} \rightarrow \text{~~1000~~ MBq}$

$2\tau = 10 \mu\text{s}$

4π Detectors

$\epsilon = 100\%$

$\frac{nt}{nr} = \frac{1}{A \cdot 2\tau} = \frac{1}{100 \cdot 10^6 \frac{1}{s} \cdot 10 \cdot 10^{-9} s} = 1$

Zeit zum nächsten Event  $\rightarrow$  Poisson:  $P(t, t+10 \mu\text{s}) = 0$   
 $= e^{-\lambda \cdot 10 \mu\text{s}} (\lambda \cdot 10 \mu\text{s})^0$

$P(0; 10 \mu\text{s}) = e^{-\lambda \cdot 10 \mu\text{s}} = e^{-100 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} \cdot 10 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = e^{-1} = 0,368$

$P_{\text{rand}}^{(10 \mu\text{s})} = 1 - P(0; 10 \mu\text{s}) = 63\%$

Constant rate approach:  
 Every  $\Delta t = \frac{1}{100 \text{ MBq}} = \frac{1 \mu\text{s}}{100} = 10 \mu\text{s}$   
 $\hookrightarrow p=1$

For 32 integration;  $\lambda = \frac{1}{10 \mu\text{s}}$   
 $P_{\text{rand}} = 1 - e^{-\frac{1}{10 \mu\text{s}} \cdot 32}$

⑤  $80 \leq E_g \leq 511 \text{ keV}$

See Andreas! attenuation

↓  
See extra page - 27 -

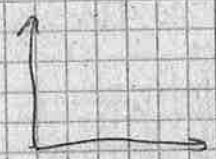
(6)

130 - 150 keV

$$\frac{1 - \cos\theta}{m_e} = \frac{1}{E_0'} - \frac{1}{E_0}$$

<sup>99</sup>Tc (140,5 keV)

$$E_{\text{Kante}} = \frac{E_0}{1 + \frac{m_e}{2E_0}} = \frac{140,5}{1 + \frac{511}{2 \cdot 140,5}} = 91 \text{ keV}$$

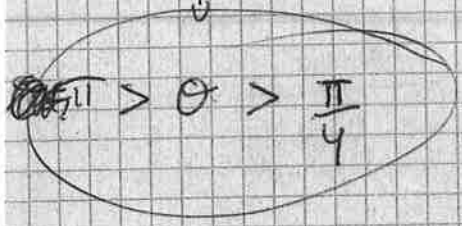


$E_{0, \text{min}} = 91 \text{ keV}$

gleiches  $E_0' \leq 130 \text{ keV}$

$$\cos\left(1 - m_e \left(\frac{1}{E_0'} - \frac{1}{E_0}\right)\right) \approx 45^\circ$$

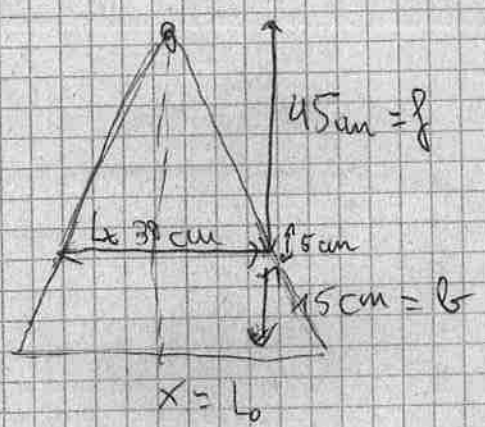
$\uparrow$  130       $\uparrow$  140,5



(7)  $\frac{l_1}{l_0} = \frac{f-t}{f+b} \Rightarrow \frac{40}{60} = \frac{2}{3}$

$f = 45 \text{ cm}; t = 5 \text{ cm}; b = 15 \text{ cm}$

$\varnothing = 30 \text{ cm}$

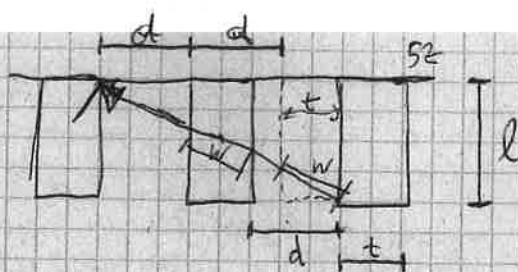


$$\frac{30}{45} = \frac{x}{45+15} \rightarrow x = \frac{60}{45} \cdot 30 \text{ cm} = \frac{4}{3} \cdot 30 = 40 \text{ cm}$$

$$l_0 = \frac{3}{2} \cdot l_1 = \frac{3}{2} \cdot 30 \text{ cm} = 45 \text{ cm}$$



$$\textcircled{9} \quad t \approx \frac{2dw}{l-w}$$



$$\frac{t}{w} \approx \frac{2d}{l-w}$$

$$\frac{t}{w} = \frac{2d}{\sqrt{l^2 + (2d+t)^2} - w}$$

$$2d+t \ll l$$

$$= \frac{2d}{l \sqrt{1 + \left(\frac{2d+t}{l}\right)^2} - w}$$

Reihenentwicklung, nach 1. Term abbrechen

$$= \frac{2d}{l \left(1 + \frac{1}{2} \frac{2d+t}{l} - t\right) - w} = \frac{2d}{l-w} = \frac{t}{w} \rightarrow t = \frac{2dw}{l-w}$$

$d = 2.5 \text{ mm}$  (Längendurchmesser)  
 $l = 2.5 \text{ cm}$  (Dicke)  
 $t \rightarrow \frac{6d}{\mu(l - 3/\mu)}$

$$= \frac{6 \cdot 2.5 \text{ mm}}{\mu \cdot 2.5 \text{ cm} - 3}$$

$\mu \rightarrow \text{NiST}$

$$\rho_{\text{Pb}} = 11.342 \text{ g/cm}^3$$

$E_\gamma$

$$\leq 150 \text{ keV}$$

$$\leq 400 \text{ keV}$$

$$\leq 511 \text{ keV}$$

$\mu/\rho \quad \left| \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right|$

$$2.015$$

$$0.2323$$

$$0.1562$$

$\mu$

$$22.85413$$

$$2.63475$$

$$1.77462$$

$t/\text{cm}$

$$0.277$$

$$4.1019$$

$$10.4965$$



10

F. 160

$$R_{coll} = \frac{d(l_{eff} + b)}{l_{eff}} = d \left( 1 + \frac{b}{l - \frac{z}{\mu}} \right)$$

We set  $d = 2,5 \text{ mm}$ ,  $l = 2,5 \text{ cm}$ ;  $\mu = 22,7 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \text{see } \textcircled{9}$   
 $b = 0 \text{ cm}$   
 $z = 10 \text{ cm}$   
 $l_{eff} = l - \frac{z}{\mu} = 2,412 \text{ cm}$

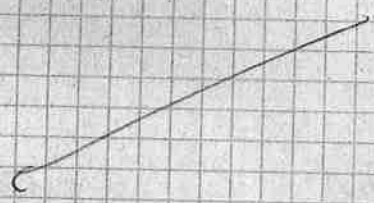
$b/\text{cm}$	0	10
$R_{coll}/\text{mm}$	2,5	12,9

11

F. 160

$$g = k^2 \left( \frac{d}{l - \frac{z}{\mu}} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{z}{d}} \right)^2$$

~~Handwritten scribble~~



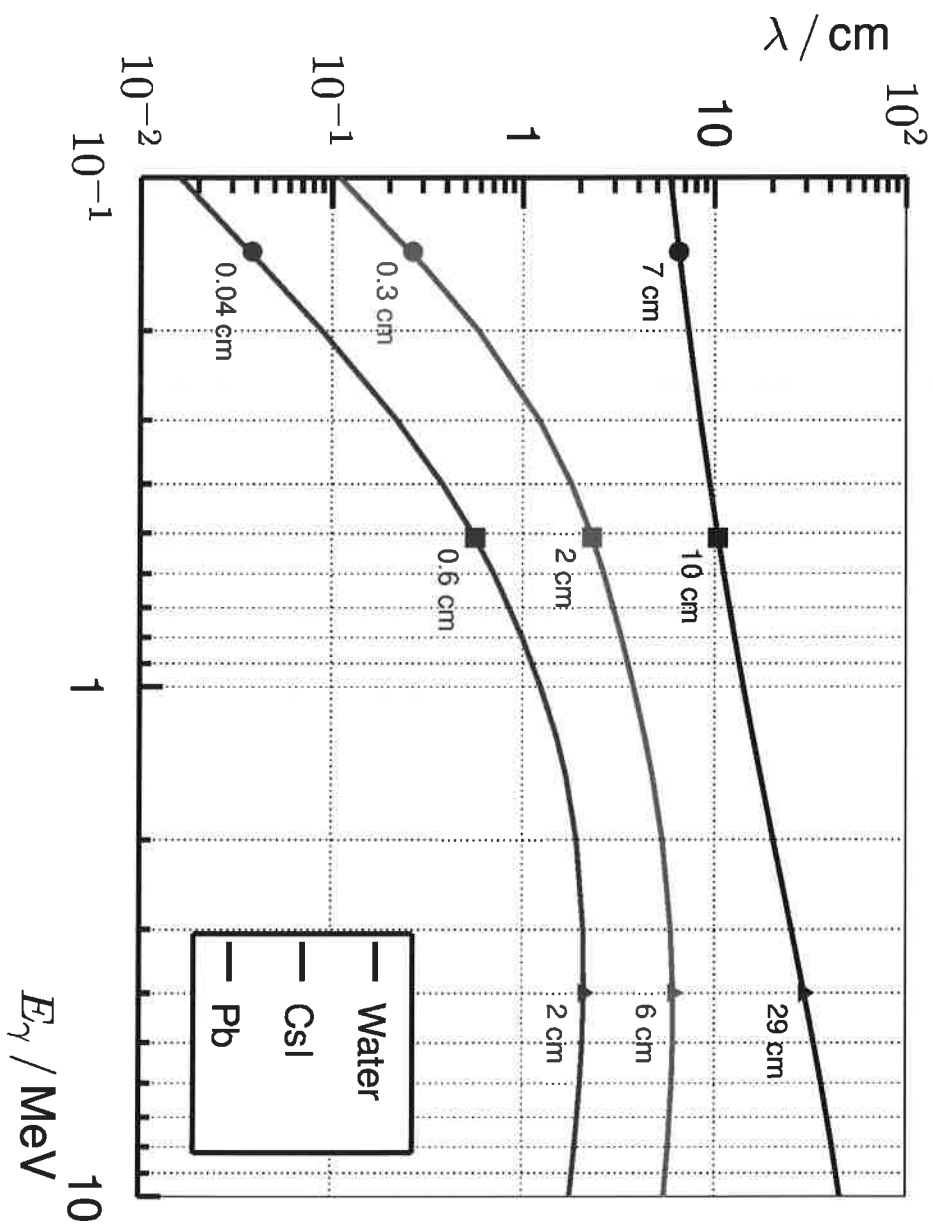
$$g \approx 5,88 \cdot 10^{-4}$$

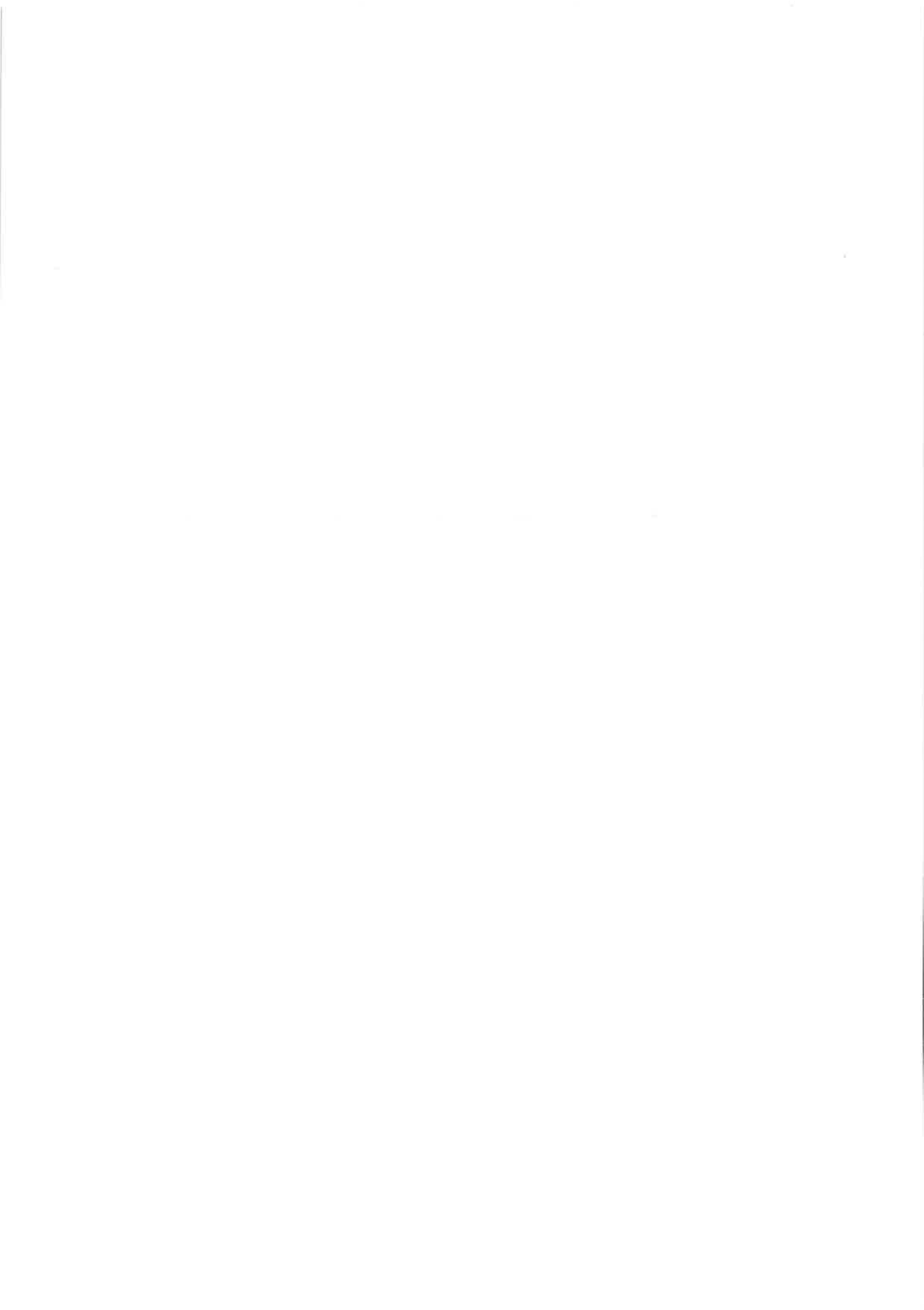
- $k = 0,26$
- $d = 2,5 \text{ mm}$
- $l_{eff} = 2,412 \text{ cm}$  (see 10)
- $z = 0,277 \text{ mm}$  (see 9)





50-5  $\tau$





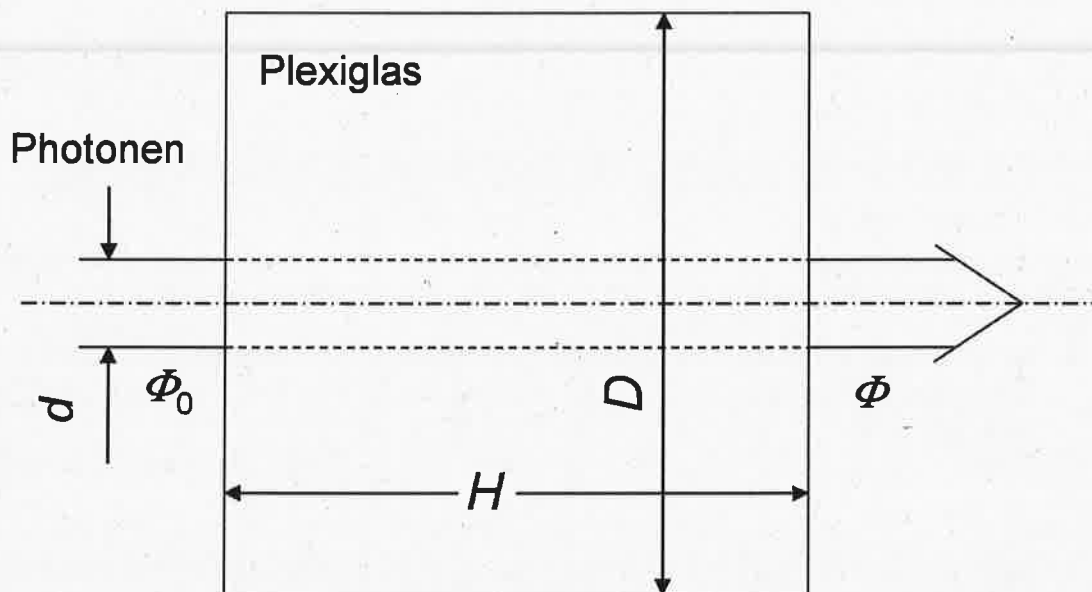
**Klausur: Physik und Technologie der Strahlentherapie**  
**Sommersemester 2008**

**Vorbemerkung:**

Der Gang der Rechnung muss erkennbar sein. Verwendete Formeln sowie Zwischenergebnisse sind anzugeben.

**Problemstellung:**

Ein zylindrischer Körper (Durchmesser:  $D = 10$  cm, Höhe:  $H = 10$  cm) aus Plexiglas (stöchiometrische Zusammensetzung  $C_5O_2H_8$ , Dichte  $\rho = 1.18$  g cm<sup>-3</sup>) werde mit einem kollimierten, monoenergetischen Photonenstrahl der Energie  $E_\gamma = 20$  MeV mit kreisförmigem Querschnitt (Strahldurchmesser  $d = 1$  cm) bestrahlt (siehe Skizze).



Der einfallende Photonenfluss sei  $\Phi_0 = 10^{10}$  s<sup>-1</sup>.

### Aufgaben:

1. Man beschreibe umfassend den Prozess der Energiedeposition im Plexiglaskörper bei der Bestrahlung mit 20 MeV Photonen. Geben Sie die ablaufenden primären und sekundären Wechselwirkungsprozesse und deren physikalische Folgen an. Man gehe dabei wie folgt vor:
  - a) Man nenne alle Primärprozesse der Wechselwirkung der Photonen mit dem Target und die dadurch entstehenden Sekundärstrahlungsarten oder Sekundärprodukte.
  - b) Man nenne für alle Arten von Sekundärstrahlung aus a) die Wechselwirkungsprozesse mit dem Target und die daraus resultierenden Tertiärstrahlungsarten oder -produkte.
  - c) Man nenne für alle Sekundärprodukte aus a) die von ihnen emittierten Strahlungskomponenten.

### Hinweis zur Bewertung:

- Für jeden richtig genannten Fakt wird  $\frac{1}{2}$  Punkt vergeben.
- Jede falsche Antwort zieht den Abzug von  $\frac{1}{2}$  Punkt nach sich.

25 Punkte  
+ max. 6 Zusatzpunkte

2. Man berechne die Schwächung des primären Photonenflusses  $s = \Phi/\Phi_0$  durch den Plexiglaskörper.

5 Punkte

3. Man berechne die Dosis, die durch 20 MeV Photonen im bestrahlten Gebiet während einer Bestrahlung von 2 min Dauer in einer Tiefe von 8 cm im Plexiglaskörper deponiert wird.

12 Punkte

4. Man berechne die durch 20 MeV Photonen erzeugte  $\beta^+$ -Aktivität des Plexiglaskörpers am Ende einer Bestrahlung von 2 min.

Hilfestellung:

Aktivierungsgleichung

$$A(t) = P (1 - e^{-\lambda t})$$

$A$  – Aktivität

$T$  – Zeit

$P$  – Produktionsrate des Radionuklids

$\lambda$  – Zerfallskonstante des Radionuklids

18 Punkte

### Bewertung

- 58 – 60 Punkte: 1  
49 – 57 Punkte: 2  
40 – 48 Punkte: 3  
31 – 39 Punkte: 4  
 $\leq 30$  Punkte: 5

$$(H) A(t) = P(1 - e^{-\lambda t})$$

$$A(2 \text{ min}) = P(1 - e^{-\lambda \cdot 2 \text{ min}})$$

P?

2

$$\sigma^{11C} = 0,7 \text{ mb} \quad 20,38 \text{ min}$$

$$\sigma^{15O} = 0,6 \text{ mb} \quad 2,03 \text{ min}$$

$$n_C: \Sigma = \frac{N_A}{M} \rho \sigma = \frac{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{11 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 1,188 \text{ g/cm}^3 \cdot 0,7 \times 10^{-3} \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$= 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$$

$$H = 10 \text{ cm}$$

$$r = 0,5 \text{ cm} \quad \rightarrow A = \pi r^2$$

$$E_\gamma = 20 \text{ MeV}$$

$$\Phi_0 = 10^{10} \text{ s}^{-1} \approx \text{cte (Trefe)}$$

$$\phi = \frac{10^{10} \text{ s}^{-1}}{\pi (0,5 \text{ cm})^2} = 1,27 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{cm}^2}$$

~~$$N_{11C} = \Sigma \cdot A = 4,5 \cdot 10^{-4}$$~~

$$N_{11C} = \frac{N_A}{M} \cdot \rho \cdot V = \frac{N_A}{M} \rho \cdot \pi r^2 h = 5,07 \cdot 10^{23}$$

~~$$e^{-\Sigma H} = 0,99995$$~~

~~$$1 - e^{-\Sigma H} = 4,5 \cdot 10^{-4}$$~~

~~$$N_{\text{act}} = \Phi_0 \cdot 4,5 \cdot 10^{-4} = 4,52 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} = P_1 \text{ richtig}$$~~

$$S_{\text{ges}} = N_{11C} \cdot \sigma = 3,55 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$\phi \cdot S_{\text{ges}} = \frac{2,1273 \times 10^6 \text{ s}^{-1}}{4,52} = \frac{\Phi_0}{\pi r^2} \cdot \sigma \cdot \frac{N_A}{M} \rho \cdot \pi r^2 h = \Sigma \cdot h$$





# Wolfram

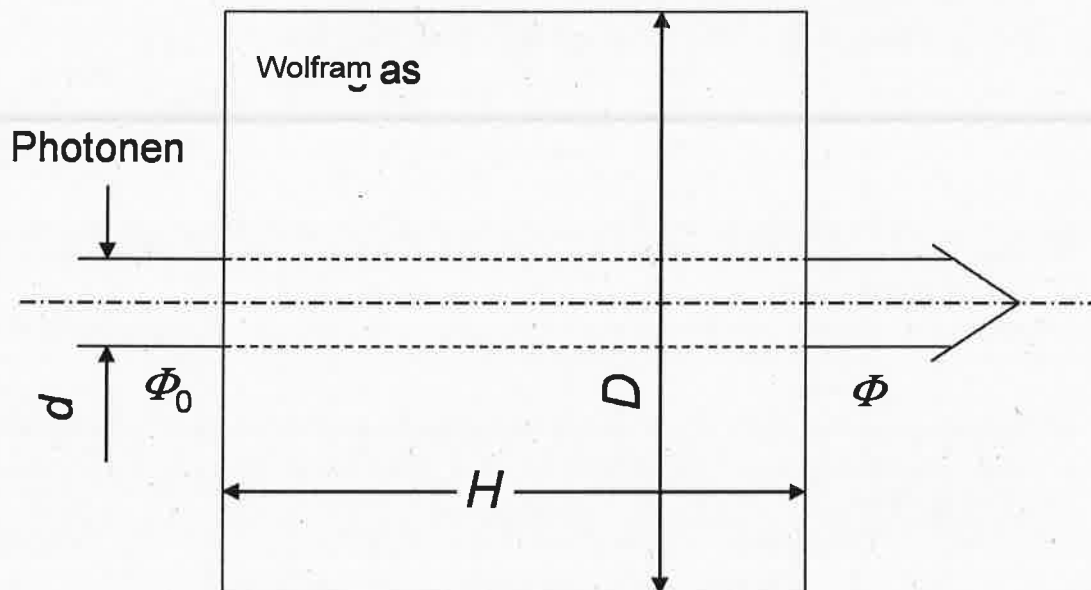
## Klausur: Physik und Technologie der Strahlentherapie Sommersemester 2009

### **Vorbemerkung:**

Der Gang der Rechnung muss erkennbar sein. Verwendete Formeln sowie Zwischenergebnisse sind anzugeben.

### **Problemstellung:**

Als Strahlverschluss für einen kollimierten monoenergetischen Photonenstrahl der Energie  $E_\gamma = 10 \text{ MeV}$  mit kreisförmigem Querschnitt (Strahldurchmesser  $d = 1 \text{ cm}$ ) soll ein zylindrischer Körper (Durchmesser:  $D = 10 \text{ cm}$ , Höhe:  $H = 10 \text{ cm}$ ) aus Wolfram (Dichte  $\rho = 19.3 \text{ g cm}^{-3}$ , molare Masse  $M = 183,84 \text{ g/mol}$ ) verwendet werden (siehe Skizze).



Einfallende Photonenfluss sei  $\Phi_0 = 10^{10} \text{ s}^{-1}$ .

### Aufgaben:

1. Man beschreibe umfassend den Prozess der Energiedeposition im Wolframkörper bei der Bestrahlung mit 10 MeV Photonen. Geben Sie die ablaufenden primären und sekundären Wechselwirkungsprozesse und deren physikalische Folgen an. Man gehe dabei wie folgt vor:
  - a) Man nenne alle Primärprozesse der Wechselwirkung der Photonen mit dem Target und die dadurch entstehenden Sekundärstrahlungsarten oder Sekundärprodukte.
  - b) Man nenne für alle Arten von Sekundärstrahlung aus a) die Wechselwirkungsprozesse mit dem Target und die daraus resultierenden Tertiärstrahlungsarten oder -produkte.
  - c) Man nenne für alle Sekundärprodukte aus a) die von ihnen emittierten Strahlungskomponenten.

#### Hinweis zur Bewertung:

- Für jeden richtig genannten Fakt wird  $\frac{1}{2}$  Punkt vergeben.
- Jede falsche Antwort zieht den Abzug von  $\frac{1}{2}$  Punkt nach sich.

25 Punkte  
+ max. 6 Zusatzpunkte

2. Man berechne die Schwächung des primären Photonenflusses  $s = \Phi/\Phi_0$  durch den Wolframkörper.

5 Punkte

3. Man berechne die Dosis, die durch 10 MeV Photonen im bestrahlten Gebiet während einer Bestrahlung von 2 min Dauer in einer Tiefe von 9.9 cm im Wolframkörper deponiert wird.

12 Punkte

4. Man berechne die durch 10 MeV Photonen erzeugte  $\beta$ -Aktivität des Wolframkörpers am Ende einer Bestrahlung von 2 min.

Hilfestellung:

Aktivierungsgleichung

$$A(t) = P(1 - e^{-\lambda t})$$

$A$  – Aktivität

$T$  – Zeit

$P$  – Produktionsrate des Radionuklids

$\lambda$  – Zerfallskonstante des Radionuklids

18 Punkte

### Bewertung

- 58 – 60 Punkte: 1  
49 – 57 Punkte: 2  
40 – 48 Punkte: 3  
31 – 39 Punkte: 4  
 $\leq 30$  Punkte: 5

## Zusammenstellung von Tabellenwerten

1. Massenschwächungskoeffizienten für 10 MeV Photonenstrahlung in Wolfram:

$$\text{Photoeffekt: } \frac{\tau}{\rho} = 3.75 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{g}$$

$$\text{Inkohärente Streuung: } \frac{\sigma}{\rho} = 1.24 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$$

$$\text{Paarbildung: } \frac{\kappa}{\rho} = 3.47 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$$

2. Massenenergieabsorptionskoeffizient für 10 MeV Photonenstrahlung in Wolfram:

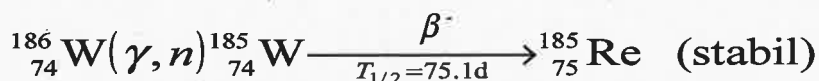
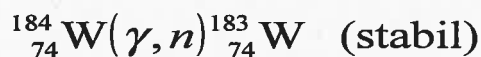
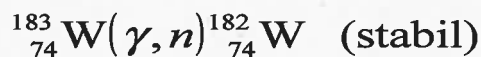
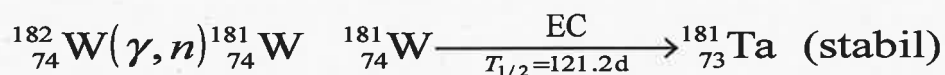
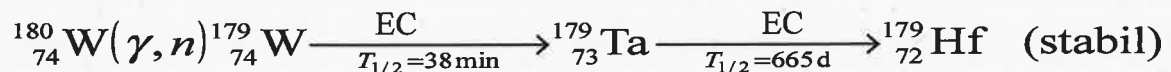
$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = 3.072 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$$

3. Wirkungsquerschnitte des Kernphotoeffektes für 10 MeV Photonen:

$${}^{182}_{74}\text{W}(\gamma, n){}^{181}_{74}\text{W} : \sigma = 85.3 \text{ mb}$$

$${}^{186}_{74}\text{W}(\gamma, n){}^{185}_{74}\text{W} : \sigma = 88.8 \text{ mb}$$

4. Aktivierung von Wolfram:



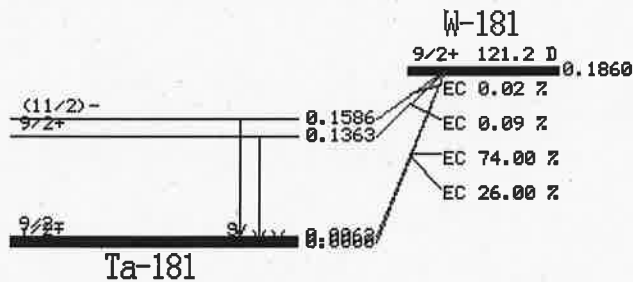
5. Auszug aus der Karlsruher Nuklidkarte:

Os 182 22,1 h ε γ 510; 180; 263; 56... m	Os 183 9,9 h   13,0 h ε γ 102; 106; 183; 114; 188; γ (171); e <sup>-</sup>	Os 184 0,02 α 3000	Os 185 94 d ε γ 646; 875; 880; 717...	Os 186 1,58 2,0 · 10 <sup>15</sup> a α 2,76 α - 80	Os 187 1,6 α 200	Os 188 13,3 α - 5	Os 189 6 h   16,1 ε γ (31) e <sup>-</sup> α 0,00026 + 40
Re 181 20 h ε γ 366; 361; 639...	Re 182 13 h   94 h ε γ 68; 1121; 1221; 139; 100...	Re 183 71 d ε γ 182; 46; 292; 209; 110; 99... g	Re 184 169 d   38,0 d ε γ 105; 253; 217; 921...	Re 185 37,40 ε γ 903; 792; 111; 896 α - 9000	Re 186 2 · 10 <sup>5</sup> a   89,25 h ε γ 58; 40; 99...	Re 187 62,60 5 · 10 <sup>10</sup> a ε γ 111... 137...	Re 188 18,6 m   15,96 h ε γ 64; 106... e <sup>-</sup> β <sup>-</sup> 2,1... γ 155; 633
W 180 0,13 α - 4	W 181 121,2 d ε γ (6...) e <sup>-</sup>	W 182 26,3 α 20	W 183 5,3 s   14,3 ε γ 108; 99; 53; 46...	W 184 30,67 α 0,002 + 2,0	W 185 1,67 m   75,1 d ε γ 66; 132; 174...	W 186 28,6 α 36	W 187 23,72 h β <sup>-</sup> 0,6; 1,3... γ 686; 480; 72... α 70
Ta 179 665 d ε no γ g	Ta 180 0,012 > 10 <sup>15</sup> a   6,15 h ε β <sup>-</sup> 0,7 γ 93; 104 g	Ta 181 99,988 α 0,012 + 20	Ta 182 16 m   114,43 d ε β <sup>-</sup> 0,5; 1,7... γ 172; 147; 185 ... α 8200	Ta 183 5,0 d β <sup>-</sup> 0,6; 0,8... γ 246; 354; 108; 161... g; m	Ta 184 8,7 h β <sup>-</sup> 1,2; 1,6... γ 414; 253; 921...	Ta 185 49 m β <sup>-</sup> 1,8... γ 178; 174... g	Ta 186 10,5 m β <sup>-</sup> 2,2; 2,6... γ 198; 215; 511; 738; 615...
Hf 178 31 a   4,0 s   27,30 ε γ 426; 574; 326; 495; 213; 217...	Hf 179 25 d   18,7 s   13,63 ε γ 454; 363; 123; 146... γ 214 α 0,42 + 46	Hf 180 5,5 h   35,10 ε γ 332; 443; 215; 57... β <sup>-</sup> ...; m α 13	Hf 181 42,39 d β <sup>-</sup> 0,4... γ 482; 133; 346... α 30	Hf 182 61,5 m   9 · 10 <sup>6</sup> a ε β <sup>-</sup> 0,6; 1,6... γ 344; 224; γ 943; 800...; g; m; g	Hf 183 64 m β <sup>-</sup> 0,2 γ 270; 156... α 459...	Hf 184 48 s   4,12 h ε γ 368; 243; 482... β <sup>-</sup> 1,1... γ 139; 345; 181...	Hf 185 3,5 m β <sup>-</sup> γ 165
Lu 177 160,1 d   6,71 d β <sup>-</sup> 0,2 γ 414; 319; 122 m;	Lu 178 22,7 m   28,4 m β <sup>-</sup> 2,0... γ 90; 1341; 1310; 1289...; g	Lu 179 4,6 h β <sup>-</sup> 1,4... γ 214... g	Lu 180 5,7 m β <sup>-</sup> 1,5; 2,7... γ 408; 1199; 1107; 215... g	Lu 181 3,5 m β <sup>-</sup> γ 652; 206; 575...	Lu 182 2,0 m β <sup>-</sup> γ 721; 818; 98; 808...; g	Lu 183 58 s β <sup>-</sup> γ 1125; 1057; 168; 249...	Lu 184 ~ 20 s β <sup>-</sup> γ 107; 243

6. Zerfall von radioaktiven Wolfram Isotopen (Auszug aus der Nuklidkarte):

**181W EC DECAY**

Parent state: G.S.  
 Half life: 121.2 D(2)  
 Q(gs): 186(7) keV  
 Branch ratio: 1.0



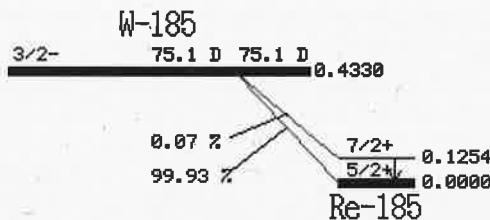
EC: total intensity = 100.1

**Gamma ray:**

Energy(keV)	Intensity(rel)
6.24( 2)	1.03( 3)
136.28( 2)	0.0311(10)
152.32( 2)	0.0083( 3)

**185W B- DECAY**

Parent state: G.S.  
 Half life: 75.1 D(3)  
 Q(gs): 433.0(9) keV  
 Branch ratio: 1.0

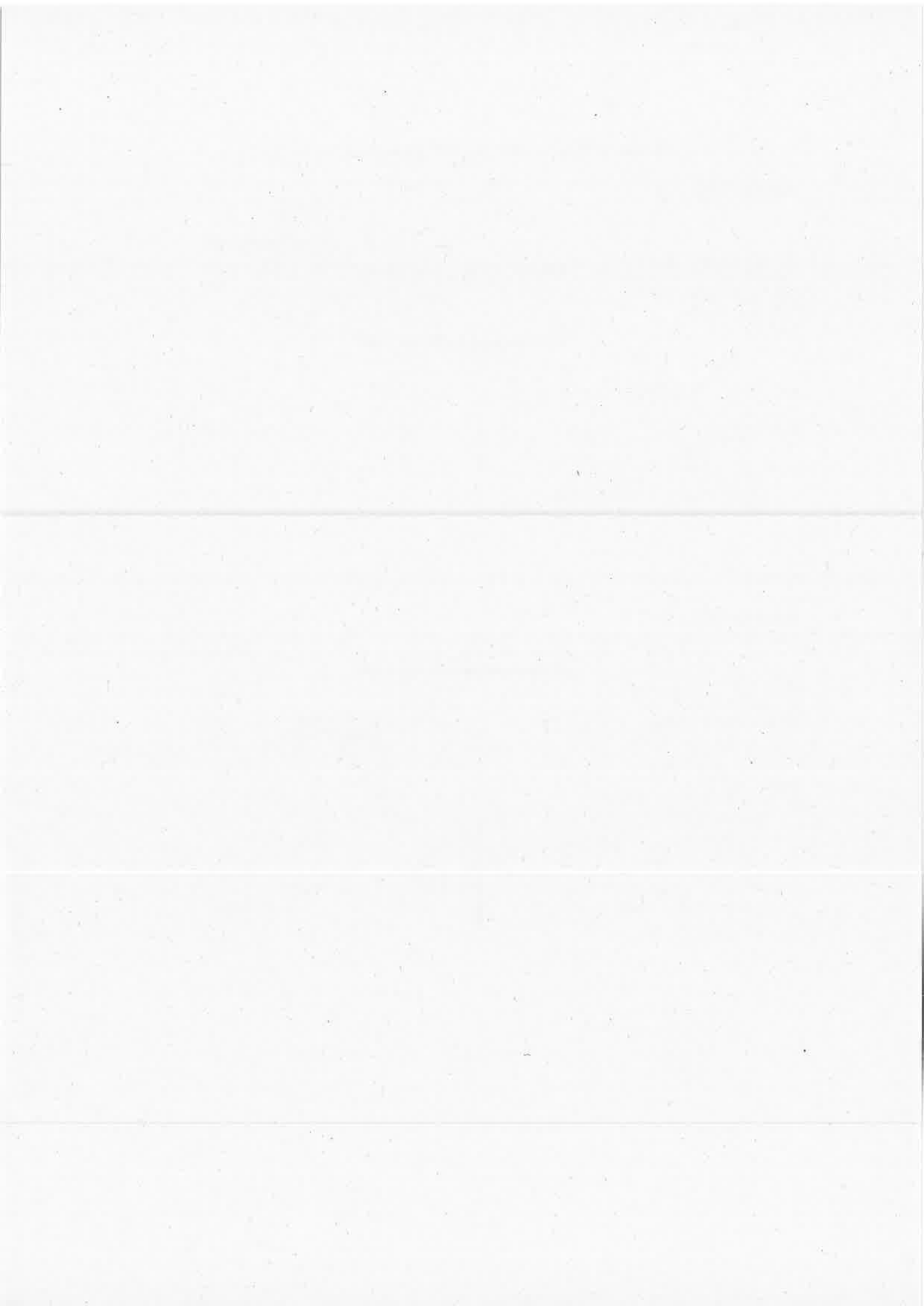


**Beta ray:**

Max.E(keV)	Avg.E(keV)	Intensity(rel)	Spin
432.6(10)	126.9( 3)	99.928( 3)	3/2-
307.6( -)	97.1( 3)	0.072( 3)	5/2+
			7/2+

Gamma ray: for absolute intensity multiply by 0.000192(7)

Energy(keV)	Intensity(rel)
125.358( 3)	100



**Klausur: Physik und Technologie der Strahlentherapie**  
**Sommersemester 2010**

**Vorbemerkung:**

Der Gang der Rechnung muss erkennbar sein. Verwendete Formeln sowie Zwischenergebnisse sind anzugeben. Bei Interpolationen genügt die lineare. Für die Angabe der Ergebnisse genügen 3 Stellen.

Bearbeitungszeit: 120 min

Ein kubisches Wasserphantom (Dichte:  $\rho = 1.0 \text{ g cm}^{-3}$ ) von 30 cm Kantenlänge werde mit einem Protonenstrahl ( $^1\text{H}^+$ ) mit der Energie 200 MeV und mit einem Heliumstrahl ( $^4\text{He}^{2+}$ ) mit der Energie 800 MeV bestrahlt. Die Strahlen haben einen Querschnitt von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Der Strahlstrom sei jeweils 1 nA. Die Wand des Wasserphantoms werde bei den folgenden Betrachtungen außer Acht gelassen.

**Aufgabe 1:** Man gebe die Reichweite beider Strahlen im Wasserphantom an.

5 Punkte

$$\begin{array}{l} p(200 \text{ MeV}) \\ \alpha(800 \text{ MeV}) \end{array} \rightarrow \text{Wasser} \quad I = 1 \text{ nA}$$

$$R_p = 25,93 \text{ cm}$$

$$R_\alpha(800 \text{ MeV}) = \frac{4}{2^2} \cdot R_p(200 \text{ MeV}) = \cancel{R_p} = 25,93 \text{ cm}$$

$$A = 10 \times 10 \text{ cm}^2$$

**Aufgabe 2:** Man berechne für beide Strahlenarten die über das gesamte bestrahlte Volumen gemittelte Dosisleistung (in Gy/min).

9 Punkte



**Aufgabe 3:** Man beschreibe umfassend den Prozess der Energiedeposition im Wasserphantom bei der Bestrahlung mit 200 MeV Protonen. Geben Sie die ablaufenden primären und sekundären Wechselwirkungsprozesse und deren physikalische Folgen an. Man gehe dabei wie folgt vor:

- a) Man nenne alle Primärprozesse der Wechselwirkung der Protonen mit dem Target und die dadurch entstehenden Sekundärstrahlungsarten oder Sekundärprodukte.
- b) Man nenne für alle Arten von Sekundärstrahlung aus a) die Wechselwirkungsprozesse mit dem Target und die daraus resultierenden Tertiärstrahlungsarten oder -produkte.
- c) Man nenne für alle Sekundärprodukte aus a) die von ihnen emittierten Strahlungskomponenten.

Hinweis zur Bewertung:

- Für jeden richtig genannten Fakt wird 1/4 Punkt vergeben.
- Jede falsche Antwort zieht den Abzug von 1/4 Punkt nach sich.

18 Punkte  
max. 5 Zusatzpunkte







**Aufgabe 4:** Man berechne die magnetische Steifigkeit der  ${}^4\text{He}$ -Strahlen. Die Masse des  ${}^4\text{He}$ -Ions beträgt 4,003 amu ( $1 \text{ amu} = 931.48 \text{ MeV}/c^2$ ).

5 Punkte

**Aufgabe 5:** Man berechne die Reichweite (in Einheiten der Reichweite des Primärprojektils) von Protonen, welche in peripheren Stößen (kein Impulsübertrag zwischen den Stoßpartnern) von  $^3\text{He}$ - und  $^4\text{He}$ -Ionen mit Targetkernen aus den Projektilen entstehen. Welches der beiden Heliumisotope ist nach diesem Ergebnis besser für die Strahlentherapie geeignet? Begründen Sie dies.

5 Punkte

Überlegungen zum Abschirmcontainer einer Cobalt ( $^{60}\text{Co}$ )-Bestrahlungseinrichtung:

Die Quelle dieser Bestrahlungseinrichtung soll näherungsweise punktförmig sein. Ihre Aktivität sei  $A = 200 \text{ TBq}$ . Sie befinde sich im Mittelpunkt eines kugelförmigen Containers aus Wolfram (Dichte:  $\rho = 19.3 \text{ g cm}^{-3}$ ). Die Dosisleistungskonstante für die Luftkerma ( $K$ ) ist:

$$\Gamma = K \frac{r^2}{A} = 0,307 \text{ mGy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{GBq} \quad (r - \text{Abstand zur Quelle}).$$

Alle im Folgenden nötigen Betrachtungen zur Dosis und Äquivalentdosis sollen näherungsweise für die Messsituation „Frei Luft“ durchgeführt werden.

**Aufgabe 6:** Man berechne die Dosisleistung (in Gy/min) der nicht abgeschirmten Quelle im Abstand von 1 m.

2 Punkte

**Aufgabe 7:** Man berechne den Durchmesser des Abschirmcontainers, damit der Bestrahlungsbunker bei abgeschirmter Quelle als Kontrollbereich ( $\dot{H} < 20 \text{ mSv/a}$ ) ausgewiesen werden kann, wenn man einen Abstand der im Bunker tätigen Personen von der Quelle von 1,5 m und eine jährliche Aufenthaltsdauer von 1000 Stunden annimmt.

12 Punkte



**Aufgabe 8:** Welcher Durchmesser des Abschirmcontainers ist erforderlich, damit auch beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie B 1000 Stunden im Jahr im Bunker arbeiten dürfen.

4 Punkte

**Bewertung**

58 – 60 Punkte: 1  
49 – 57 Punkte: 2  
40 – 48 Punkte: 3  
31 – 39 Punkte: 4  
≤ 30 Punkte: 5



### Range Table for Protons, WATER, LIQUID

Kinetic Energy MeV	Projected Range g/cm2	Kinetic Energy MeV	Projected Range g/cm2
1.000E-02	2.545E-05	4.000E+00	2.451E-02
1.250E-02	3.037E-05	4.500E+00	3.007E-02
1.500E-02	3.499E-05	5.000E+00	3.613E-02
1.750E-02	3.938E-05	5.500E+00	4.268E-02
2.000E-02	4.356E-05	6.000E+00	4.972E-02
2.250E-02	4.757E-05	6.500E+00	5.724E-02
2.500E-02	5.144E-05	7.000E+00	6.522E-02
2.750E-02	5.519E-05	7.500E+00	7.368E-02
3.000E-02	5.883E-05	8.000E+00	8.259E-02
3.500E-02	6.585E-05	8.500E+00	9.196E-02
4.000E-02	7.259E-05	9.000E+00	1.018E-01
4.500E-02	7.911E-05	9.500E+00	1.120E-01
5.000E-02	8.547E-05	1.000E+01	1.228E-01
5.500E-02	9.169E-05	1.250E+01	1.828E-01
6.000E-02	9.782E-05	1.500E+01	2.535E-01
6.500E-02	1.039E-04	1.750E+01	3.344E-01
7.000E-02	1.099E-04	2.000E+01	4.252E-01
7.500E-02	1.159E-04	2.500E+01	6.359E-01
8.000E-02	1.218E-04	2.750E+01	7.553E-01
8.500E-02	1.278E-04	3.000E+01	8.839E-01
9.000E-02	1.338E-04	3.500E+01	1.168E+00
9.500E-02	1.398E-04	4.000E+01	1.486E+00
1.000E-01	1.458E-04	4.500E+01	1.839E+00
1.250E-01	1.767E-04	5.000E+01	2.224E+00
1.500E-01	2.094E-04	5.500E+01	2.641E+00
1.750E-01	2.440E-04	6.000E+01	3.089E+00
2.000E-01	2.806E-04	6.500E+01	3.567E+00
2.250E-01	3.191E-04	7.000E+01	4.075E+00
2.500E-01	3.596E-04	7.500E+01	4.611E+00
2.750E-01	4.019E-04	8.000E+01	5.176E+00
3.000E-01	4.462E-04	8.500E+01	5.769E+00
3.500E-01	5.404E-04	9.000E+01	6.389E+00
4.000E-01	6.422E-04	9.500E+01	7.035E+00
4.500E-01	7.515E-04	1.000E+02	7.707E+00
5.000E-01	8.683E-04	1.250E+02	1.144E+01
5.500E-01	9.926E-04	1.500E+02	1.576E+01
6.000E-01	1.124E-03	1.750E+02	2.060E+01
6.500E-01	1.263E-03	2.000E+02	2.593E+01
7.000E-01	1.410E-03	2.250E+02	3.171E+01
7.500E-01	1.563E-03	2.500E+02	3.790E+01
8.000E-01	1.724E-03	2.750E+02	4.447E+01
8.500E-01	1.891E-03	3.000E+02	5.139E+01
9.000E-01	2.066E-03	3.500E+02	6.621E+01
9.500E-01	2.247E-03	4.000E+02	8.217E+01
1.000E+00	2.435E-03	4.500E+02	9.912E+01
1.250E+00	3.472E-03	5.000E+02	1.169E+02
1.500E+00	4.669E-03	5.500E+02	1.355E+02
1.750E+00	6.020E-03	6.000E+02	1.547E+02
2.000E+00	7.519E-03	6.500E+02	1.746E+02
2.250E+00	9.164E-03	7.000E+02	1.949E+02
2.500E+00	1.095E-02	7.500E+02	2.158E+02
2.750E+00	1.288E-02	8.000E+02	2.370E+02
3.000E+00	1.494E-02	8.500E+02	2.586E+02
3.500E+00	1.946E-02	9.000E+02	2.805E+02

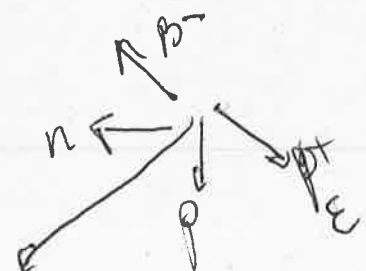
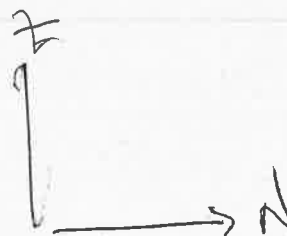
**Auszug aus der Karlsruher Nuklidkarte**

		F 18,998403	F 15	F 16	F 17 64,8 s	F 18 109,7 m	F 19 100	F 20 11,0 s
9		$\alpha$ 0,0096	$\beta$	$\beta$	$\beta^+$ 1,7 no $\gamma$	$\beta^+$ 0,6 no $\gamma$	$\alpha$ 0,0095	$\beta^+$ 5,4... $\gamma$ 1634
	O 12	O 13 8,58 ms	O 14 70,59 s	O 15 2,03 m	O 16 99,762	O 17 0,038	O 18 0,200	O 19 27,1 s
	2p	$\beta^+$ 16,7... $\beta$ 1,44; 5,44... $\gamma$ 4439; 3800...	$\beta^+$ 1,6; 4,1... $\gamma$ 2313	$\beta^+$ 1,7 no $\gamma$	$\alpha$ 0,00019	$\alpha$ 0,24	$\alpha$ 0,00916	$\beta^+$ 3,3; 4,7... $\gamma$ 197; 1357
	N 11	N 12 11,0 ms	N 13 9,96 m	N 14 99,634	N 15 0,366	N 16 5,3 ps 7,13 s	N 17 4,17 s	N 18 0,63 s
	p	$\beta^+$ 16,4... $\gamma$ 4436	$\beta^+$ 1,2 no $\gamma$	$\alpha$ 0,080 $\gamma$ 1,8	$\alpha$ 0,00064	$\beta^+$ 3,2; 8,7... 10,4 1,185 7116 $\beta$ 3,76	$\beta^+$ 3,2; 8,7... $\beta$ 1,7; 0,28... $\gamma$ 871; 2184 $\beta$ 1,25; 1,41	$\beta^+$ 0,8; 11,5... $\gamma$ 992; 822; 888; 3473 $\beta$ 5,0; 7,0 $\beta$ 1,3; 2,4
	C 9 126,5 ms	C 10 19,3 s	C 11 20,38 m	C 12 98,90	C 13 1,10	C 14 5730 a	C 15 2,45 s	C 16 0,747 s
	$\beta^+$ 15,5... $\beta$ 8,24; 10,92... $\beta$ 1	$\beta^+$ 1,0... $\gamma$ 715; 1022	$\beta^+$ 1,0 no $\gamma$	$\alpha$ 0,0035	$\alpha$ 0,0014	$\beta^+$ 0,2 no $\gamma$	$\beta^+$ 4,5; 8,6... $\beta$ 0,79; 1,72 $\gamma$ 5298	$\beta^+$ 4,7; 7,0... $\beta$ 0,79; 1,72
	B 8 770 ms	B 9	B 10 19,9	B 11 80,1	B 12 20,20 ms	B 13 17,33 ms	B 14 13,8 ms	B 15 10,4 ms
	$\beta^+$ 14,1... $\beta$ 1,6; 5,3	p	$\alpha$ 0,5 $\gamma$ 3840	$\alpha$ 0,005	$\beta^+$ 15,4... $\gamma$ 4439 $\beta$ 0,2	$\beta^+$ 13,4... $\gamma$ 3664 $\beta$ 3,6; 2,4	$\beta^+$ 14,0... $\gamma$ 6090; 8738 $\beta$ 1	$\beta^+$ 10,4... $\beta$ 1,77; 3,26
	Be 7 53,29 d	Be 8	Be 9 100	Be 10 1,6 · 10 <sup>6</sup> a	Be 11 13,8 s	Be 12 23,6 ms		Be 14 4,35 ms
	$\alpha$ 476 $\alpha$ 39000	2 $\alpha$	$\alpha$ 0,008	$\beta^+$ 0,6 no $\gamma$	$\beta^+$ 11,5... $\gamma$ 2126; 6791 $\beta$ 0,77...	$\beta^+$ 11,7... $\beta$ 1		$\beta^+$ 4,35... $\beta$ 0,0; 3,02 3,23; 4,25 $\gamma$ 5320; 3660*
	Li 6 7,5	Li 7 92,5	Li 8 840,3 ms	Li 9 178,3 ms	Li 10	Li 11 8,5 ms		10
	$\alpha$ 0,039 $\alpha$ 940	$\alpha$ 0,045	$\beta^+$ 12,5 $\beta$ 1,6	$\beta^+$ 13,6... $\beta$ 0,7... $\beta$ 1	n	$\beta^+$ 18,5; 20,4 3368; 320 $\beta$ 1; 2; 3; 4 $\beta$ 1; 2		

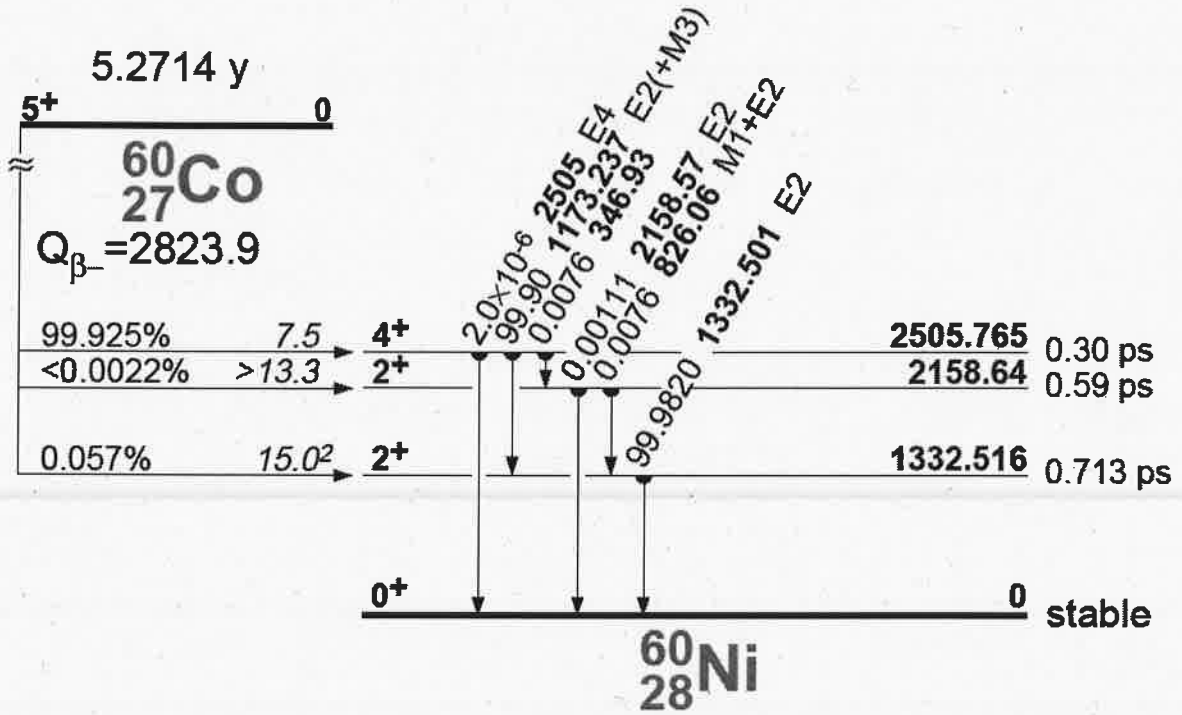
**Massenschwächungskoeffizienten für Wolfram**

Photon Energy MeV	Scattering			Pair Production		Total Attenuation	
	Coherent	Incoherent	Photoelectric Absorption	In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
	cm <sup>2</sup> /g	cm <sup>2</sup> /g	cm <sup>2</sup> /g	cm <sup>2</sup> /g	cm <sup>2</sup> /g	cm <sup>2</sup> /g	cm <sup>2</sup> /g
1.173E+00	1.81E-03	4.70E-02	9.35E-03	1.20E-04	0.00E+00	5.83E-02	5.65E-02
1.250E+00	1.60E-03	4.56E-02	8.28E-03	3.23E-04	0.00E+00	5.58E-02	5.42E-02
1.332E+00	1.41E-03	4.41E-02	7.34E-03	6.41E-04	0.00E+00	5.35E-02	5.21E-02

Maraja  $\beta^+$   
 Azul  $\beta^-$   
 Amanillo  $\alpha$   
 Verde Fission  
 Rojo Proton  
 Morado Neutron  
 Negro Stable



Das Zerfallsschema von  $^{60}\text{Co}$





**Klausur: Physik und Technologie der Strahlentherapie**  
**Sommersemester 2011**

**Vorbemerkung:**

Der Gang der Rechnung muss erkennbar sein. Verwendete Formeln sowie Zwischenergebnisse sind anzugeben. Bei Interpolationen genügt die lineare. Für die Angabe der Ergebnisse genügen 3 Stellen.

Bearbeitungszeit: 120 min

Ein kubisches Wasserphantom (Dichte:  $\rho = 1,0 \text{ g cm}^{-3}$ ) von 20 cm Kantenlänge werde mit einem auf einen Querschnitt von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  aufgeweiteten, parallelen Elektronenstrahl mit der Energie 12 MeV bestrahlt. Die Wand des Wasserphantoms werde bei den folgenden Betrachtungen außer Acht gelassen. Für alle Reichweiteangaben benutze man die „continuous-slowing-down Approximation“ (CSDA).

**Aufgabe 1:** Man beschreibe umfassend den Prozess der Energiedeposition im Wasserphantom bei der Bestrahlung mit 12 MeV Elektronen. Man gebe die ablaufenden primären und sekundären Wechselwirkungsprozesse und deren physikalische Folgen an. Man gehe dabei wie folgt vor:

- a) Man nenne alle Primärprozesse der Wechselwirkung der Elektronen mit dem Target und die dadurch entstehenden Sekundärstrahlungsarten und Sekundärprodukte.
- b) Man nenne für alle Arten von Sekundärstrahlung aus a) die Wechselwirkungsprozesse mit dem Target und die daraus resultierenden Tertiärstrahlungsarten und -produkte.
- c) Man nenne für alle Sekundärprodukte aus a) die von ihnen emittierten Strahlungskomponenten.

**Hinweis zur Bewertung:**

- Für jeden richtig genannten Fakt wird  $\frac{1}{2}$  Punkt vergeben.
- Jede falsche Antwort zieht den Abzug von  $\frac{1}{2}$  Punkt nach sich.

14 Punkte





**Aufgabe 2:** Man gebe die Reichweite der Elektronenstrahlen im Wasserphantom an.

$$\rho = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$a = 20 \text{ cm}$$

$$S = 10 \times 10 \text{ cm}^2$$

$$E = 12 \text{ MeV}$$

WATER

Tabelle  $\rightarrow$   ~~$6.4 \times 10^4 \text{ MeV} \cdot \text{g/cm}^2 / 1 \text{ g/cm}^3$~~  =  ~~$6.4 \text{ cm}$~~  //

2 Punkte

**Aufgabe 3:** Man berechne den mittleren Elektronenstrom, der erforderlich ist, um im bestrahlten Volumen eine mittlere Dosisleistung von 10 Gy/min zu erzielen.

5 Punkte

$$V_{\text{bestrahlt}} = 7,2 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3 = 720 \text{ cm}^3$$

$$E_{\text{dosis}} = 12 \text{ MeV} \quad (\text{assuming no leaks}) \quad \text{pro } e^-$$

$$\hookrightarrow \frac{12 \text{ MeV}}{1 e^-} = \frac{12 \text{ MJ}}{C}$$

$$\eta = \frac{\frac{12 \text{ MJ}}{C}}{\rho \cdot V} = \frac{12 \text{ MJ/C}}{720 \text{ g}}$$

$$\dot{D} = \eta \cdot I_e$$

$$\hookrightarrow I_e = \frac{10 \text{ Gy/min} \cdot 720 \text{ g}}{12 \text{ MJ/C}} = 600 \frac{\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{g}^{10^{-3}}}{\text{kg} \cdot \text{min} \cdot \text{MJ}}$$

$$= \frac{10}{60} \times 10^{-3} \times 10^{-6} \frac{\text{C}}{\text{s}} = 10 \text{ nA} //$$

**Aufgabe 4:** Der Elektronenstrahl werde mittels eines medizinischen Elektronen-Linearbeschleuniger erzeugt. Die Frequenz der beschleunigenden Hochspannung sei 3 GHz. Die effektive Pulsdauer eines Mikropulses sei 33 ps, die Makropuls-Wiederholfrequenz sei 200 Hz, die Makropulsdauer sei 5  $\mu$ s. Man berechne die erforderliche Zahl von Elektronen in einem Mikropuls, wenn man im bestrahlten Volumen eine mittlere Dosisleistung von 10 Gy/min erzielen möchte.

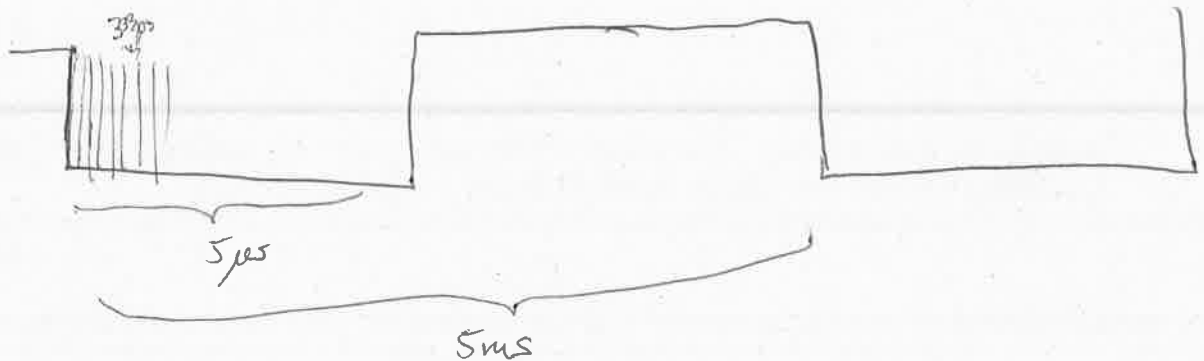
$$f = 3 \text{ GHz} \rightarrow \Delta t = 33 \text{ ps}$$

$$\tau = 33 \text{ ps}$$

5 Punkte

$$T = 5 \mu\text{s}$$

$$f' = 200 \text{ Hz} \rightarrow \frac{1}{f'} = 5 \text{ ms}$$



Es gibt 200 Makropulse pro Sekunde  
 In jedem Makropuls gibt es 15000 Mikropulse.  
 $T \cdot f = \frac{5 \mu\text{s}}{33 \text{ ps}}$   
 Pro Sekunde gibt es dann  $3 \times 10^6$  Mikropulse

Der Mittelstrom (Aufg. 3) ist  $10 \text{ nA} \Leftrightarrow 6,24 \times 10^{10} \frac{e^-}{s}$   
 ↳ verteilt auf die  $3 \times 10^6$  Pulse, ergibt  
 20807 e<sup>-</sup> pro Mikropuls

Auf eine Zeit von 33 ps ist das inst. current of 0,1 mA

**Aufgabe 5:** Man berechne die Strahlungslänge in cm für Elektronen mit einer Energie von 12 MeV in Wasser.

A

4 Punkte

$$X_0 = \frac{1}{4 \alpha N_A Z (Z+1) r_e^2 z^2 \ln(183 Z^{-1/3})}$$

$$\alpha = \frac{1}{137}$$

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$r_e = 2,818 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$$

$$z = 1$$

$$Z = 1$$

$$\bar{A} / \text{H}_2\text{O}$$

$$\bar{Z} = 7,42$$

$$Z_{\text{eff}} = 7,42 = \sqrt[2,94]{0,2 \times 1^{2,94} + 0,8 \times 8^{2,94}}$$

$$A = 18 \text{ g/mol}$$

$$X_0 = \frac{18 \text{ g/mol}}{4 \cdot \frac{1}{137} \cdot 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot 7,42 \cdot 8,42 \cdot (2,818 \times 10^{-13} \text{ cm})^2 \cdot 1^2 \cdot \ln(183 \cdot 7,42^{-1/3})}$$

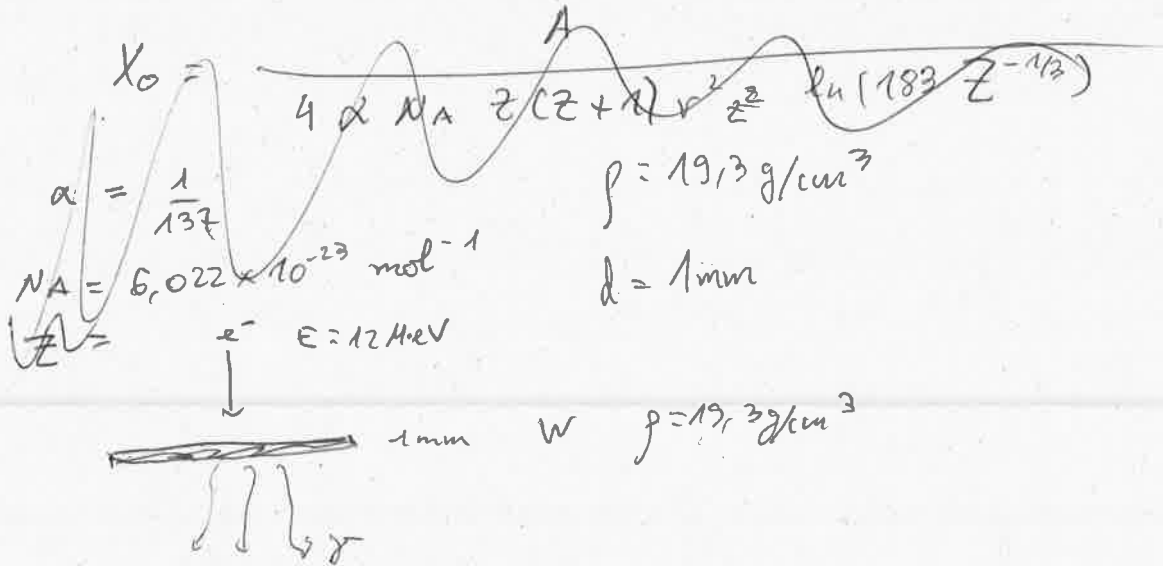
$$= 46 \text{ g/cm}^2$$

$$\tilde{X}_0 = X_0 / \rho = 46 \text{ g/cm}^2 / 1 \text{ g/cm}^3 = 46 \text{ cm}$$



**Aufgabe 6:** In den Elektronenstrahl (vor seiner Aufweitung) werde ein Wolfram-Radiator (Dichte  $\rho = 19,3 \text{ g/cm}^3$ ) der Dicke 1 mm eingeführt. Man berechne näherungsweise die mittlere Leistung des entstehenden Photonenstrahles. Die Abhängigkeit des Strahlungsbremsvermögens von der Elektronenenergie approximiere man dabei als eine lineare Funktion.

12 Punkte



$$E_{\text{brems}} = Z E_{\text{einstr}}^2$$

$$I_{e^-} = 10 \text{ A}$$

$$e^{-\frac{h\nu}{p} \cdot x} \rightarrow \text{Anzahl } \cdot I_{e^-}$$

$$\left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}}$$

Kramer



**Aufgabe 7:** Welche mittlere Energie haben die Elektronen nach Durchlaufen des Wolfram-Radiators. Durch welche technische Maßnahme wird bei medizinischen Elektronen-Linearbeschleunigern verhindert, dass diese Elektronen im Photonenbetrieb den Patienten treffen. Man gebe eine Begründung für die Wahl dieser technischen Maßnahme.

4 Punkte

**Aufgabe 8:** Der in Rede stehende Elektronenstrahl mit einer Energie von 12 MeV werde mit einem Betatron erzeugt. Der Durchmesser des ringförmigen Beschleunigungsrohres betrage 50 cm. Man gebe die Maximalwerte der magnetischen Flussdichte für das magnetische Führungs- und das Beschleunigungsfeld an.

4 Punkte

$$R = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$$

$$E = 12 \text{ MeV}$$

$$\frac{mv^2}{R} = qvB_F \rightarrow B_F = \frac{\gamma m v^2}{qR} = \frac{12 \text{ MeV}}{e \cdot R} = 0,16 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \text{ T}$$

$$B_B = 2B_F = 0,32 \text{ T}$$

**Bewertung**

48 – 50 Punkte: 1

41 – 47 Punkte: 2

33 – 40 Punkte: 3

26 – 32 Punkte: 4

≤ 25 Punkte: 5



## ESTAR: Stopping Powers and Range Tables for Electrons

WATER, LIQUID

Kinetic Radiation Energy Yield MeV	Collision Stp. Pow. MeV cm <sup>2</sup> /g	Radiative Stp. Pow. MeV cm <sup>2</sup> /g	Total Stp. Pow. MeV cm <sup>2</sup> /g	CSDA Range g/cm <sup>2</sup>
1.000E-02	2.256E+01	3.898E-03	2.256E+01	2.515E-04
9.408E-05				
1.250E-02	1.897E+01	3.927E-03	1.898E+01	3.728E-04
1.133E-04				
1.500E-02	1.647E+01	3.944E-03	1.647E+01	5.147E-04
1.316E-04				
1.750E-02	1.461E+01	3.955E-03	1.461E+01	6.762E-04
1.493E-04				
2.000E-02	1.317E+01	3.963E-03	1.318E+01	8.566E-04
1.663E-04				
2.500E-02	1.109E+01	3.974E-03	1.110E+01	1.272E-03
1.990E-04				
3.000E-02	9.653E+00	3.984E-03	9.657E+00	1.756E-03
2.301E-04				
3.500E-02	8.592E+00	3.994E-03	8.596E+00	2.306E-03
2.599E-04				
4.000E-02	7.777E+00	4.005E-03	7.781E+00	2.919E-03
2.886E-04				
4.500E-02	7.130E+00	4.018E-03	7.134E+00	3.591E-03
3.165E-04				
5.000E-02	6.603E+00	4.031E-03	6.607E+00	4.320E-03
3.435E-04				
5.500E-02	6.166E+00	4.046E-03	6.170E+00	5.103E-03
3.698E-04				
6.000E-02	5.797E+00	4.062E-03	5.801E+00	5.940E-03
3.955E-04				
7.000E-02	5.207E+00	4.098E-03	5.211E+00	7.762E-03
4.453E-04				
8.000E-02	4.757E+00	4.138E-03	4.761E+00	9.773E-03
4.931E-04				
9.000E-02	4.402E+00	4.181E-03	4.407E+00	1.196E-02
5.393E-04				
1.000E-01	4.115E+00	4.228E-03	4.119E+00	1.431E-02
5.842E-04				
1.250E-01	3.591E+00	4.355E-03	3.596E+00	2.083E-02
6.912E-04				
1.500E-01	3.238E+00	4.494E-03	3.242E+00	2.817E-02
7.926E-04				
1.750E-01	2.984E+00	4.643E-03	2.988E+00	3.622E-02
8.894E-04				
2.000E-01	2.793E+00	4.801E-03	2.798E+00	4.488E-02
9.826E-04				
2.500E-01	2.528E+00	5.141E-03	2.533E+00	6.372E-02
1.161E-03				
3.000E-01	2.355E+00	5.514E-03	2.360E+00	8.421E-02
1.331E-03				
3.500E-01	2.235E+00	5.914E-03	2.241E+00	1.060E-01
1.496E-03				
4.000E-01	2.148E+00	6.339E-03	2.154E+00	1.288E-01
1.658E-03				

4.500E-01	2.083E+00	6.787E-03	2.090E+00	1.523E-01
1.818E-03				
5.000E-01	2.034E+00	7.257E-03	2.041E+00	1.766E-01
1.976E-03				
5.500E-01	1.995E+00	7.747E-03	2.003E+00	2.013E-01
2.134E-03				
6.000E-01	1.963E+00	8.254E-03	1.972E+00	2.265E-01
2.292E-03				
7.000E-01	1.917E+00	9.313E-03	1.926E+00	2.778E-01
2.608E-03				
8.000E-01	1.886E+00	1.042E-02	1.896E+00	3.302E-01
2.928E-03				
9.000E-01	1.864E+00	1.159E-02	1.876E+00	3.832E-01
3.251E-03				
1.000E+00	1.849E+00	1.280E-02	1.862E+00	4.367E-01
3.579E-03				
1.250E+00	1.829E+00	1.600E-02	1.845E+00	5.717E-01
4.416E-03				
1.500E+00	1.822E+00	1.942E-02	1.841E+00	7.075E-01
5.281E-03				
1.750E+00	1.821E+00	2.303E-02	1.844E+00	8.432E-01
6.171E-03				
2.000E+00	1.824E+00	2.678E-02	1.850E+00	9.785E-01
7.085E-03				
2.500E+00	1.834E+00	3.468E-02	1.868E+00	1.247E+00
8.969E-03				
3.000E+00	1.846E+00	4.299E-02	1.889E+00	1.514E+00
1.092E-02				
3.500E+00	1.858E+00	5.164E-02	1.910E+00	1.777E+00
1.291E-02				
4.000E+00	1.870E+00	6.058E-02	1.931E+00	2.037E+00
1.495E-02				
4.500E+00	1.882E+00	6.976E-02	1.951E+00	2.295E+00
1.702E-02				
5.000E+00	1.892E+00	7.917E-02	1.971E+00	2.550E+00
1.911E-02				
5.500E+00	1.902E+00	8.876E-02	1.991E+00	2.802E+00
2.123E-02				
6.000E+00	1.911E+00	9.854E-02	2.010E+00	3.052E+00
2.336E-02				
7.000E+00	1.928E+00	1.185E-01	2.047E+00	3.545E+00
2.766E-02				
8.000E+00	1.943E+00	1.391E-01	2.082E+00	4.030E+00
3.200E-02				
9.000E+00	1.956E+00	1.601E-01	2.116E+00	4.506E+00
3.636E-02				
1.000E+01	1.968E+00	1.814E-01	2.149E+00	4.975E+00
4.072E-02				
1.250E+01	1.993E+00	2.362E-01	2.230E+00	6.117E+00
5.163E-02				
1.500E+01	2.014E+00	2.926E-01	2.306E+00	7.219E+00
6.243E-02				
1.750E+01	2.031E+00	3.501E-01	2.381E+00	8.286E+00
7.309E-02				
2.000E+01	2.046E+00	4.086E-01	2.454E+00	9.320E+00
8.355E-02				
2.500E+01	2.070E+00	5.277E-01	2.598E+00	1.130E+01
1.039E-01				

**ESTAR: Stopping Powers and Range Tables for Electrons**

TUNGSTEN

Kinetic Radiation Energy Yield MeV	Collision Stp. Pow. MeV cm2/g	Radiative Stp. Pow. MeV cm2/g	Total Stp. Pow. MeV cm2/g	CSDA Range g/cm2
1.000E-02	8.974E+00	1.977E-02	8.993E+00	7.490E-04
1.076E-03				
1.250E-02	7.806E+00	2.165E-02	7.828E+00	1.048E-03
1.357E-03				
1.500E-02	6.945E+00	2.320E-02	6.968E+00	1.387E-03
1.639E-03				
1.750E-02	6.281E+00	2.450E-02	6.306E+00	1.765E-03
1.920E-03				
2.000E-02	5.753E+00	2.563E-02	5.779E+00	2.179E-03
2.200E-03				
2.500E-02	4.961E+00	2.752E-02	4.989E+00	3.114E-03
2.756E-03				
3.000E-02	4.394E+00	2.908E-02	4.423E+00	4.181E-03
3.305E-03				
3.500E-02	3.966E+00	3.042E-02	3.996E+00	5.372E-03
3.846E-03				
4.000E-02	3.631E+00	3.160E-02	3.662E+00	6.681E-03
4.381E-03				
4.500E-02	3.360E+00	3.267E-02	3.393E+00	8.101E-03
4.908E-03				
5.000E-02	3.137E+00	3.364E-02	3.171E+00	9.627E-03
5.430E-03				
5.500E-02	2.950E+00	3.454E-02	2.985E+00	1.125E-02
5.944E-03				
6.000E-02	2.791E+00	3.539E-02	2.826E+00	1.298E-02
6.453E-03				
7.000E-02	2.533E+00	3.694E-02	2.570E+00	1.669E-02
7.453E-03				
8.000E-02	2.334E+00	3.834E-02	2.373E+00	2.075E-02
8.430E-03				
9.000E-02	2.176E+00	3.964E-02	2.216E+00	2.511E-02
9.385E-03				
1.000E-01	2.047E+00	4.084E-02	2.088E+00	2.977E-02
1.032E-02				
1.250E-01	1.808E+00	4.355E-02	1.852E+00	4.253E-02
1.257E-02				
1.500E-01	1.646E+00	4.595E-02	1.692E+00	5.668E-02
1.470E-02				
1.750E-01	1.528E+00	4.814E-02	1.576E+00	7.202E-02
1.673E-02				
2.000E-01	1.439E+00	5.021E-02	1.489E+00	8.835E-02
1.865E-02				
2.500E-01	1.315E+00	5.414E-02	1.370E+00	1.235E-01
2.226E-02				
3.000E-01	1.234E+00	5.797E-02	1.292E+00	1.611E-01
2.558E-02				
3.500E-01	1.178E+00	6.179E-02	1.240E+00	2.007E-01
2.870E-02				
4.000E-01	1.138E+00	6.565E-02	1.203E+00	2.416E-01
3.164E-02				
4.500E-01	1.108E+00	6.956E-02	1.177E+00	2.836E-01
3.443E-02				
5.000E-01	1.085E+00	7.353E-02	1.159E+00	3.265E-01
3.712E-02				

5.500E-01	1.068E+00	7.755E-02	1.146E+00	3.699E-01
3.971E-02				
6.000E-01	1.055E+00	8.162E-02	1.136E+00	4.137E-01
4.221E-02				
7.000E-01	1.036E+00	8.993E-02	1.126E+00	5.022E-01
4.702E-02				
8.000E-01	1.025E+00	9.841E-02	1.124E+00	5.911E-01
5.161E-02				
9.000E-01	1.019E+00	1.071E-01	1.126E+00	6.800E-01
5.602E-02				
1.000E+00	1.016E+00	1.159E-01	1.132E+00	7.686E-01
6.030E-02				
1.250E+00	1.016E+00	1.387E-01	1.154E+00	9.875E-01
7.051E-02				
1.500E+00	1.021E+00	1.624E-01	1.183E+00	1.201E+00
8.022E-02				
1.750E+00	1.029E+00	1.868E-01	1.215E+00	1.410E+00
8.955E-02				
2.000E+00	1.037E+00	2.117E-01	1.249E+00	1.613E+00
9.856E-02				
2.500E+00	1.055E+00	2.630E-01	1.318E+00	2.003E+00
1.158E-01				
3.000E+00	1.072E+00	3.158E-01	1.388E+00	2.372E+00
1.321E-01				
3.500E+00	1.087E+00	3.698E-01	1.457E+00	2.724E+00
1.476E-01				
4.000E+00	1.101E+00	4.248E-01	1.526E+00	3.059E+00
1.625E-01				
4.500E+00	1.114E+00	4.806E-01	1.595E+00	3.380E+00
1.766E-01				
5.000E+00	1.126E+00	5.372E-01	1.663E+00	3.687E+00
1.902E-01				
5.500E+00	1.136E+00	5.945E-01	1.731E+00	3.981E+00
2.032E-01				
6.000E+00	1.146E+00	6.523E-01	1.798E+00	4.265E+00
2.157E-01				
7.000E+00	1.163E+00	7.697E-01	1.933E+00	4.801E+00
2.393E-01				
8.000E+00	1.178E+00	8.890E-01	2.067E+00	5.301E+00
2.612E-01				
9.000E+00	1.191E+00	1.010E+00	2.201E+00	5.770E+00
2.816E-01				
1.000E+01	1.203E+00	1.132E+00	2.335E+00	6.211E+00
3.006E-01				
1.250E+01	1.227E+00	1.443E+00	2.670E+00	7.212E+00
3.432E-01				
1.500E+01	1.247E+00	1.759E+00	3.006E+00	8.094E+00
3.800E-01				
1.750E+01	1.263E+00	2.081E+00	3.343E+00	8.882E+00
4.120E-01				
2.000E+01	1.277E+00	2.406E+00	3.682E+00	9.594E+00
4.403E-01				
2.500E+01	1.299E+00	3.065E+00	4.364E+00	1.084E+01
4.881E-01				

**Klausur: Physik und Technologie der Strahlentherapie**  
**Sommersemester 2012**

**Vorbemerkung:**

Der Gang der Rechnung muss erkennbar sein. Verwendete Formeln sowie Zwischenergebnisse sind anzugeben. Bei Interpolationen genügt die lineare. Für die Angabe der Ergebnisse genügen 3 Stellen.

Bearbeitungszeit: 120 min

An der Heidelberger Ionentherapie-Anlage (HIT) werden Krebspatienten mit  $^{12}\text{C}$ -Ionenstrahlen mit einer kinetischen Energie von 80 – 430 A MeV behandelt. Für Dosimetriezwecke werde ein würfelförmiges Phantom (Abmessungen:  $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$ ) aus Grafit, Dichte:  $\rho = 1,70 \text{ g/cm}^3$  benutzt. Das Phantom werde mit einem lateral aufgeweiteten Strahl von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  bestrahlt. Der Strahl möge senkrecht und zentriert auf eine Fläche des Phantoms treffen.

**Aufgabe 1:** Man beschreibe umfassend den Prozess der Wechselwirkung der  $^{12}\text{C}$ -Ionen mit dem Phantom bei der Bestrahlung. Man gebe alle ablaufenden primären und sekundären Wechselwirkungsprozesse und deren physikalische Folgen an. Man gehe dabei wie folgt vor:

- a) Man nenne alle Primärprozesse der Wechselwirkung der  $^{12}\text{C}$ -Ionen mit dem Target und die dadurch entstehenden Sekundärstrahlungsarten und Sekundärprodukte.
- b) Man nenne für alle Arten von Sekundärstrahlung aus a) die Wechselwirkungsprozesse mit dem Target und die daraus resultierenden Tertiärstrahlungsarten und -produkte.
- c) Man nenne für alle Sekundärprodukte aus a) die von ihnen emittierten Strahlungskomponenten.

Hinweis zur Bewertung:

- Für jeden richtig genannten Fakt wird  $\frac{1}{2}$  Punkt vergeben.
- Jede falsche Antwort zieht den Abzug von  $\frac{1}{2}$  Punkt nach sich.

17 Punkte

a)  $^{12}\text{C}$  ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$ )  
80-430 A MeV  
Grafit  $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$   
 $\rho_{\text{Grafit}} = 1,70 \text{ g/cm}^3$

Primär

- x Stoßbremsung mit Hüllene $^-$  (hard collisions)  $\rightarrow \delta^- e^-$ , Ionen
- x Strahlungsbremsung (wenig)  $\rightarrow$  Photonen
- x Elastische / inelastische Atomstöße (soft collisions)
- x Elastische Streuung an den Atomkernen
- x Kernreaktionen  $\rightarrow$  aktivierte Kerne, Neutronen, Protonen,  $\alpha$ ,  $\gamma$
- x Cerenkov Effekt  $\rightarrow$  Lichtquanten  $\rightarrow$  Projekttilfragmentierung

x  $\text{H}_2\text{O}$

b)

$e^-$

- x Stopbremsung  $e^-$  (hard coll)  $\rightarrow$  weitere Tertiäre  $e^-$
- x Bremsstrahlung (viel)  $\rightarrow$  Photonen
- x Elast. Streuung Kern
- x Gerenken  $\rightarrow$  Photonen
- x Kernreaktionen (sehr geringe  $\sigma$ )

$\gamma$

- x Photoeffekt  $\rightarrow$  Tertiäre  $e^-$  (und low), X-ray
- x Paarbildung  $\rightarrow$  Positronen und  $e^-$  (und low) Schwelle 1,022 MeV
- x Kernphotoeffekt (hohe E Schwelle)
- x (in)kohärente Streuung  $\rightarrow$  Photonen geringerer Energie,  $e^-$   
Compton Thomson (low E)

$P_{id}$  x wie a): Stopbremsung (f  $e^-$  Tertiär), wenige Strahlungsbremsung  
 Kerneffekte ab  $\sim 5$  MeV

angeregte Kerne

- x  $\beta^+$  Emission,  $\nu_e$ ,  $n$
- x  $\gamma$

$n$

- x Elastische Neutronenstreuung  $\rightarrow$  = ~~...~~ Energieverlustfaktoren
- x Unelastische "  $\rightarrow$   $n'$  ... (Thermalisierung)
- x Neutroneneinfang mit Emission geladener Teilchen ( $n, p$ ), ( $n, d$ ), ( $n, \alpha$ )
- x " " " von Photonen ( $n, \gamma$ )... Hydrogenium, 2 MeV  
 $^1_0n + ^1_1H \rightarrow ^2_1H + \gamma$   
 $^{10}_0B (n, \alpha) ^7_3Li$
- (x keine Kernspaltung, keine Kerne)

c) Alle außer  $e^+$ ,  $\nu$  wurden schon benannt

$e^+$

- x ~~...~~ Stopbremsung
- x 511 keV Annihilationsquanten
- x Strahlungsbremsung ~~...~~

$\nu$

- x vernachlässigbar







**Aufgabe 2:** Die in Heidelberg zur Ablenkung des  $^{12}\text{C}^{6+}$ -Ionenstrahls benutzten Dipolmagnete sind für eine maximale magnetische Flussdichte von 1,5 T ausgelegt. Welcher Biegeradius folgt daraus für die höchste Strahlenergie von 430 A MeV?

Hilfe:  $1 \text{ amu} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$

6 Punkte

$$B = 1,5 \text{ T}$$

$$E_{\text{kin}} = 430 \text{ A MeV} = (\gamma - 1) M c^2 \quad |q| = 6e$$

$$M = A \cdot 1 \text{ amu} \quad A = 12$$

$$\downarrow$$

$$\gamma = 1 + \frac{430 \text{ A MeV}}{A \cdot 931,5 \text{ MeV}} = 1,4616$$

$$r = \frac{\gamma m v}{q B} = \frac{\gamma \sqrt{E_{\text{kin}} + M^2 c^4}}{q B} = \frac{1,4616 \times 12 \times 931 \frac{\text{MeV}}{c^2} \times \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \cdot c}{6e \cdot 1,5 \text{ T}}$$

$$= 1,53 \text{ m} //$$

$$= \frac{B \cdot A \cdot 930 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}}{6 \cdot \frac{3}{2} \cdot 3e^2} = \frac{2 \cdot 930}{3 \cdot 100} \sqrt{\frac{5}{9}} \approx$$

$$= \frac{2}{3} \cdot 1,1 \cdot 2,2 \approx 1,6$$

**Aufgabe 3:** Man berechne die mittlere Ionenstromstärke in nA, die erforderlich ist, um im bestrahlten Volumen bei einer Strahlenergie von 200 A MeV eine mittlere Dosisleistung von 10 Gy/min zu erzielen.

12 Punkte

$$E_{kin} = 200 \text{ A MeV}$$

$$\downarrow$$

$$10 \text{ Gy/min}$$

Range C ?

$$E_{kc} \approx \frac{1}{2} m_p \cdot A \cdot v_c^2 \rightarrow \frac{1}{2} m_p v_c^2 = 200 \text{ MeV}$$

$v_c = v_p \rightarrow$  Teilchen gleicher Geschwindigkeit, Stablenungsgerichte

$$R_c(200 \text{ A MeV}) = \frac{M_c}{M_p} \cdot \frac{Z_p^2}{Z_c^2} R_p(200 \text{ MeV})$$

Tabelle:  $R_p(200 \text{ MeV, Graphite}) = 29 \text{ g/cm}^2 / 1,7 \text{ g/cm}^3 = 17,1 \text{ cm}$

$$R_c = \frac{12}{36} R_p = 5,7 \text{ cm}$$

Bestrahltes Volumen:  $V = 10 \times 10 \text{ cm}^2 \times 5,7 \text{ cm} = 569 \text{ cm}^3$

Nehmen an keine "escape energy", vollständige E depos

Pro Ion: 2400 MeV (6 Ladungen)

$$\rightarrow \frac{2400 \text{ MeV}}{6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \rightarrow \dot{E}_{depos} = I_{ion} \cdot \frac{2400 \text{ MeV}}{6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}}$$

$$\dot{D} = \frac{10 \text{ Gy}}{\text{min}} = \frac{\dot{E}_{depos}}{\rho \cdot V}$$

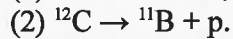
$$\rightarrow I_{ion} = \frac{\rho \cdot V \cdot \dot{D} \cdot 6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{2400 \text{ MeV}}$$

$$= \frac{1,7 \text{ g/cm}^3 \cdot 570 \text{ cm}^3 \cdot 10 \text{ Gy/min} \cdot 6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{2400 \times 10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}}$$

$$= 2,4225 \times 10^{-5} \frac{\text{g Gy C}}{\text{F min}} = 2,42 \times 10^{-5} \times \frac{1}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{\text{C}} = 0,4 \text{ nA}$$



Mögliche Reaktionskanäle der Projektil-Fragmentierung des Kohlenstoff-Ionenstrahls sind



Die entstehenden Projektilfragmente ( $^{11}\text{C}$ ,  $^{11}\text{B}$ ), die Protonen und die Neutronen haben nach der Reaktion die gleiche Geschwindigkeit und Richtung wie die Projektile ( $^{12}\text{C}$ ) vor der Reaktion. Es wird angenommen, dass die kinetische Energie der  $^{12}\text{C}$ -Ionen wieder 200 AMeV beträgt, ferner wird angenommen, dass die Reaktionen unmittelbar nach Eintritt des Strahles in das Target stattfinden, so dass man für die Tiefe, in der die Reaktion stattfindet, näherungsweise 0 und somit für die kinetische Energie der bei der Kernreaktion (1) entstehenden Protonen und Neutronen näherungsweise 200 MeV annehmen kann.

**Aufgabe 4:** Berechnen Sie die Anzahl der Stöße, die ein Neutron im Grafittarget ausführen müsste, um im Mittel auf thermische Energie abgebremst zu werden.

5 Punkte

$$E_n^0 = 200 \text{ MeV}$$

$$E_p^0 = 200 \text{ MeV}$$

$$E_n^{(k)} = E_n^0 \cdot e^{-L \cdot k}$$

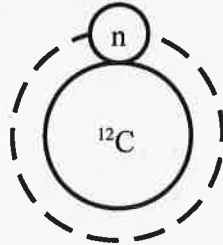
$$E_n^{(k)} = 25 \text{ meV}$$

$$L (\text{Kohlenstoff}) = 0,158$$

$$k = -\frac{1}{L} \ln \left( \frac{E_n^{(k)}}{E_n^0} \right) = + \frac{1}{0,158} \ln \left( \frac{200 \text{ MeV}}{25 \text{ meV}} \right) = 144,3 //$$

**Aufgabe 5:** Ist ein Abbremsen dieser Neutronen auf thermische Energien im vorliegenden Target realistisch? Begründen Sie Ihre Aussage quantitativ indem Sie den geometrischen Wirkungsquerschnitt aus der Trefferfläche (gestrichelter Kreis in der unten stehenden Abbildung) und daraus die mittlere freie Weglänge des Neutrons zwischen zwei Kollisionen mit  $^{12}\text{C}$ -Kernen des Grafits berechnen.

Hilfe zur Berechnung des geometrischen Wirkungsquerschnittes als Trefferfläche (das Neutron bewegt sich in die Papierebene hinein, der  $^{12}\text{C}$ -Kern ruht).

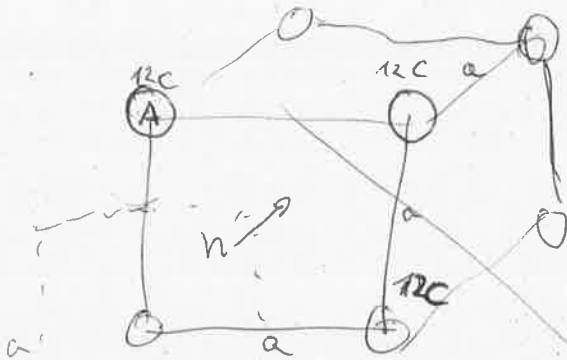


Der Radius eines Kernes beträgt  $1,3 \cdot A^{1/3}$  fm ( $A$  – Massenzahl).

8 Punkte

$$R = 1,3 \cdot 12^{1/3} \text{ fm} = 3 \text{ fm}$$

$$A = \pi R^2 = 27,8 \text{ fm}^2 = \sigma = 0,278 \text{ barn} \quad \begin{matrix} 10^{-24} \text{ cm}^2 = 100 \text{ fm}^2 \\ N_C \propto V \end{matrix}$$



$$12 \text{ g/mol} =$$

$$\eta = \frac{1,17 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{12 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,14 \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3}$$

$$a \quad V_2 = a^3 \rightarrow 1 \text{ atom}$$

$a$ : Mittlerer Abstand zwischen ~~Atomen~~ Nachbar-Atome

$$\eta = \frac{0,14 \text{ mol} \cdot 6,022 \times 10^{23} \text{ at/mol}}{\text{cm}^3} = 8,5 \text{ at/cm}^3$$

$$a = (V_{\text{at}})^{1/3} = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ cm} = 0,23 \cdot 10^6 \text{ fm}$$

$V_{\text{at}} = \frac{1}{\eta} = 1,17 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$

$$\frac{27,8 \text{ fm}^2}{(0,23 \cdot 10^6 \text{ fm})^2}$$

$$\Sigma = n \sigma = \frac{\rho N_A}{M} \cdot f \sigma$$

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma} = \frac{M}{\rho N_A \sigma} = \frac{12 \text{ g/mol}}{1,17 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 6,022 \times 10^{23} \cdot 0,278 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2} = 9$$

$\rightarrow$  Abstand zwischen Stoßern  $\rightarrow$  Nicht im Target gestoppt



**Aufgabe 6:** Können die Protonen nach Reaktion (2) das Target in Strahlrichtung verlassen?  
Begründen Sie Ihre Aussage quantitativ.

2 Punkte

$$R_p(200 \text{ MeV}) = 17,1 \text{ cm}$$

$$17,1 \text{ cm} < 20 \text{ cm}$$

Nein, sie werden vorher gestoppt.

**Bewertung**

48 – 50 Punkte: 1

41 – 47 Punkte: 2

33 – 40 Punkte: 3

26 – 32 Punkte: 4

≤ 25 Punkte: 5

**PSTAR: Stopping Powers and Range Tables for Protons**

CARBON (Graphite, density 1.7 g/cm<sup>3</sup>)

Kinetic Energy MeV	Electron. Stp. Pow. MeV cm <sup>2</sup> /g	Nuclear Stp. Pow. MeV cm <sup>2</sup> /g	Total Stp. Pow. MeV cm <sup>2</sup> /g	CSDA Range g/cm <sup>2</sup>	Projected Range g/cm <sup>2</sup>
1.000E+01	4.082E+01	1.932E-02	4.084E+01	1.377E-01	1.374E-01
1.250E+01	3.411E+01	1.567E-02	3.413E+01	2.050E-01	2.046E-01
1.500E+01	2.944E+01	1.320E-02	2.945E+01	2.841E-01	2.836E-01
1.750E+01	2.598E+01	1.141E-02	2.599E+01	3.746E-01	3.740E-01
2.000E+01	2.331E+01	1.006E-02	2.332E+01	4.764E-01	4.756E-01
2.500E+01	1.945E+01	8.149E-03	1.946E+01	7.122E-01	7.111E-01
2.750E+01	1.800E+01	7.446E-03	1.801E+01	8.459E-01	8.446E-01
3.000E+01	1.678E+01	6.858E-03	1.678E+01	9.898E-01	9.883E-01
3.500E+01	1.481E+01	5.926E-03	1.482E+01	1.308E+00	1.306E+00
4.000E+01	1.331E+01	5.221E-03	1.331E+01	1.664E+00	1.662E+00
4.500E+01	1.211E+01	4.669E-03	1.211E+01	2.058E+00	2.056E+00
5.000E+01	1.113E+01	4.225E-03	1.114E+01	2.489E+00	2.486E+00
5.500E+01	1.032E+01	3.859E-03	1.033E+01	2.956E+00	2.952E+00
6.000E+01	9.642E+00	3.553E-03	9.645E+00	3.457E+00	3.453E+00
6.500E+01	9.056E+00	3.293E-03	9.060E+00	3.992E+00	3.987E+00
7.000E+01	8.549E+00	3.069E-03	8.553E+00	4.561E+00	4.555E+00
7.500E+01	8.106E+00	2.874E-03	8.109E+00	5.161E+00	5.155E+00
8.000E+01	7.714E+00	2.703E-03	7.717E+00	5.794E+00	5.786E+00
8.500E+01	7.366E+00	2.551E-03	7.368E+00	6.457E+00	6.449E+00
9.000E+01	7.054E+00	2.416E-03	7.056E+00	7.151E+00	7.142E+00
9.500E+01	6.773E+00	2.295E-03	6.775E+00	7.874E+00	7.864E+00
1.000E+02	6.518E+00	2.186E-03	6.520E+00	8.627E+00	8.616E+00
1.250E+02	5.536E+00	1.768E-03	5.538E+00	1.281E+01	1.279E+01
1.500E+02	4.867E+00	1.486E-03	4.868E+00	1.764E+01	1.762E+01
1.750E+02	4.381E+00	1.283E-03	4.382E+00	2.306E+01	2.303E+01
2.000E+02	4.013E+00	1.130E-03	4.014E+00	2.903E+01	2.900E+01
2.250E+02	3.723E+00	1.010E-03	3.724E+00	3.550E+01	3.547E+01
2.500E+02	3.491E+00	9.141E-04	3.492E+00	4.244E+01	4.240E+01
2.750E+02	3.299E+00	8.349E-04	3.300E+00	4.981E+01	4.976E+01
3.000E+02	3.140E+00	7.686E-04	3.140E+00	5.758E+01	5.753E+01
3.500E+02	2.888E+00	6.638E-04	2.889E+00	7.422E+01	7.414E+01
4.000E+02	2.699E+00	5.847E-04	2.700E+00	9.214E+01	9.206E+01
4.500E+02	2.553E+00	5.228E-04	2.554E+00	1.112E+02	1.111E+02
5.000E+02	2.437E+00	4.730E-04	2.438E+00	1.313E+02	1.311E+02
5.500E+02	2.343E+00	4.321E-04	2.344E+00	1.522E+02	1.521E+02
6.000E+02	2.266E+00	3.979E-04	2.266E+00	1.739E+02	1.737E+02
6.500E+02	2.201E+00	3.688E-04	2.202E+00	1.963E+02	1.961E+02
7.000E+02	2.147E+00	3.438E-04	2.147E+00	2.193E+02	2.191E+02
7.500E+02	2.100E+00	3.220E-04	2.101E+00	2.428E+02	2.426E+02
8.000E+02	2.060E+00	3.029E-04	2.061E+00	2.669E+02	2.667E+02
8.500E+02	2.026E+00	2.860E-04	2.026E+00	2.913E+02	2.911E+02
9.000E+02	1.996E+00	2.710E-04	1.996E+00	3.162E+02	3.160E+02
9.500E+02	1.969E+00	2.575E-04	1.969E+00	3.414E+02	3.412E+02
1.000E+03	1.946E+00	2.453E-04	1.946E+00	3.670E+02	3.667E+02
1.500E+03	1.816E+00	1.672E-04	1.816E+00	6.345E+02	6.341E+02
2.000E+03	1.771E+00	1.275E-04	1.772E+00	9.138E+02	9.133E+02
2.500E+03	1.757E+00	1.034E-04	1.757E+00	1.197E+03	1.197E+03
3.000E+03	1.755E+00	8.710E-05	1.755E+00	1.482E+03	1.482E+03
4.000E+03	1.768E+00	6.650E-05	1.768E+00	2.050E+03	2.050E+03
5.000E+03	1.787E+00	5.395E-05	1.787E+00	2.613E+03	2.612E+03
6.000E+03	1.808E+00	4.548E-05	1.808E+00	3.169E+03	3.168E+03
7.000E+03	1.828E+00	3.937E-05	1.828E+00	3.719E+03	3.718E+03
8.000E+03	1.847E+00	3.474E-05	1.847E+00	4.264E+03	4.263E+03
9.000E+03	1.864E+00	3.112E-05	1.864E+00	4.803E+03	4.801E+03



1.000E+04 1.881E+00 2.820E-05 1.881E+00 5.337E+03 5.335E+03  
 Auszug aus der Karlsruher Nuklidkarte

3	<b>Li</b> 6,941 <small><math>\sigma = 0,0071</math></small>		<b>Li 5</b>	<b>Li 6</b> 7,5 <small><math>\sigma = 0,022</math> <math>m = 0,04</math></small>	<b>Li 7</b> 92,5 <small><math>\sigma = 0,046</math></small>	<b>Li 8</b> 840,3 ms <small><math>\sigma = 12,2</math> <math>\beta = 1,8</math></small>	<b>Li 9</b> 178,3 ms <small><math>\sigma = 12,8</math> <math>\beta = 0,7</math> <math>\beta = 0,8</math></small>	<b>Li 10</b>	<b>Li 11</b> 8,6 ms <small><math>\sigma = 16,5</math> <math>\beta = 0,4</math> <math>\beta = 0,9</math> <math>\beta = 0,9</math> <math>\beta = 0,9</math></small>									
2	<b>He</b> 4,002602 <small><math>\sigma &lt; 0,05</math></small>	<b>He 3</b> 0,000137 <small><math>\sigma = 0,00055</math> <math>m = 0,000</math></small>	<b>He 4</b> 99,999863	<b>He 5</b>	<b>He 6</b> 806,7 ms <small><math>\sigma = 3,5</math> <math>\beta = 0</math></small>	<b>He 7</b>	<b>He 8</b> 119 ms <small><math>\sigma = 9,7</math> <math>\beta = 0,1</math> <math>\beta = 0,1</math></small>	<b>He 9</b>										
1	<b>H</b> 1,00794 <small><math>\sigma = 0,032</math></small>	<b>H 1</b> 99,985 <small><math>\sigma = 0,032</math></small>	<b>H 2</b> 0,015 <small><math>\sigma = 0,00055</math></small>	<b>H 3</b> 12,323 a <small><math>\sigma = 0,02</math></small>		<b>4</b>		<b>6</b>		<b>8</b>		<b>14</b>	<b>Si</b> 28,0855 <small><math>\sigma = 0,17</math></small>					
			<b>n 1</b> 10,25 m <small><math>\sigma = 0,8</math></small>	<b>2</b>								<b>13</b>	<b>Al</b> 26,981539 <small><math>\sigma = 0,230</math></small>					
										<b>12</b>	<b>Mg</b> 24,3050 <small><math>\sigma = 0,063</math></small>							
										<b>11</b>	<b>Na</b> 22,989768 <small><math>\sigma = 0,525</math></small>							
										<b>10</b>	<b>Ne</b> 20,1797 <small><math>\sigma = 0,04</math></small>	<b>Ne 16</b>	<b>Ne 17</b> 109,2 ms <small><math>\sigma = 0,2</math> <math>\beta = 0,2</math> <math>\beta = 0,2</math> <math>\beta = 0,2</math></small>					
										<b>9</b>	<b>F</b> 18,998403 <small><math>\sigma = 0,0065</math></small>	<b>F 15</b>	<b>F 16</b>					
										<b>8</b>	<b>O</b> 15,9994 <small><math>\sigma = 0,00028</math></small>	<b>O 12</b>	<b>O 13</b> 8,58 ms <small><math>\sigma = 16,2</math> <math>\beta = 1,4</math> <math>\beta = 0,4</math> <math>\beta = 0,4</math></small>	<b>O 14</b> 70,59 s <small><math>\sigma = 1,8</math> <math>\beta = 4,1</math> <math>\beta = 2,0</math></small>	<b>O 15</b> 2,03 m <small><math>\sigma = 1,7</math> <math>\beta = 1</math></small>			
										<b>7</b>	<b>N</b> 14,00674 <small><math>\sigma = 1,8</math></small>	<b>N 11</b>	<b>N 12</b> 11,0 ms <small><math>\sigma = 16,4</math> <math>\beta = 0,2</math></small>	<b>N 13</b> 9,96 m <small><math>\sigma = 1,2</math> <math>\beta = 1</math></small>	<b>N 14</b> 99,634 <small><math>\sigma = 0,060</math> <math>m = 1,6</math></small>			
										<b>6</b>	<b>C</b> 12,011 <small><math>\sigma = 0,0035</math></small>	<b>C 8</b>	<b>C 9</b> 126,5 ms <small><math>\sigma = 15,6</math> <math>\beta = 3,24</math> <math>\beta = 10,82</math> <math>\beta = 0</math></small>	<b>C 10</b> 19,3 s <small><math>\sigma = 1,6</math> <math>\beta = 2,06</math> <math>\beta = 3,02</math></small>	<b>C 11</b> 20,38 m <small><math>\sigma = 1,0</math> <math>\beta = 1</math></small>	<b>C 12</b> 98,93 <small><math>\sigma = 0,009</math></small>	<b>C 13</b> 1,10 <small><math>\sigma = 0,0014</math></small>	
										<b>5</b>	<b>B</b> 10,811 <small><math>\sigma = 760</math></small>	<b>B 7</b>	<b>B 8</b> 770 ms <small><math>\sigma = 14,1</math> <math>\beta = 1,2</math> <math>\beta = 0,3</math></small>	<b>B 9</b>	<b>B 10</b> 19,9 <small><math>\sigma = 0,5</math> <math>m = 2640</math></small>	<b>B 11</b> 80,1 <small><math>\sigma = 0,003</math></small>	<b>B 12</b> 20,20 ms <small><math>\sigma = 13,4</math> <math>\beta = 4,0</math> <math>\beta = 0,2</math></small>	
										<b>4</b>	<b>Be</b> 9,012182 <small><math>\sigma = 0,008</math></small>	<b>Be 6</b>	<b>Be 7</b> 53,29 d <small><math>\sigma = 4,7</math> <math>m = 38900</math></small>	<b>Be 8</b>	<b>Be 9</b> 100 <small><math>\sigma = 0,008</math></small>	<b>Be 10</b> 1,6 · 10 <sup>6</sup> a <small><math>\sigma = 0,6</math> <math>\beta = 1</math></small>	<b>Be 11</b> 13,8 s <small><math>\sigma = 11,3</math> <math>\beta = 2,0</math> <math>\beta = 0,9</math> <math>\beta = 0,7</math></small>	
										<b>3</b>	<b>Li</b> 6,941 <small><math>\sigma = 0,0071</math></small>		<b>Li 5</b>	<b>Li 6</b> 7,5 <small><math>\sigma = 0,021</math> <math>m = 0,04</math></small>	<b>Li 7</b> 92,5 <small><math>\sigma = 0,046</math></small>	<b>Li 8</b> 840,3 ms <small><math>\sigma = 12,2</math> <math>\beta = 1,8</math></small>	<b>Li 9</b> 178,3 ms <small><math>\sigma = 12,8</math> <math>\beta = 0,7</math> <math>\beta = 0,8</math></small>	<b>Li 10</b>

30 138f 168f 188f 162f 14f 6

