



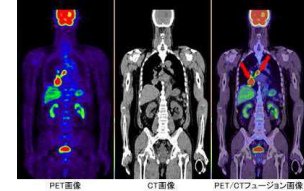
Biophysik für Pharmazeuten I

2019/20

## Warum ist es interessant?

Medizinische Anwendungen der radioaktiven Strahlungen:

- Diagnostik (Isotopendiagnostik)
- Therapie (Strahlentherapie)

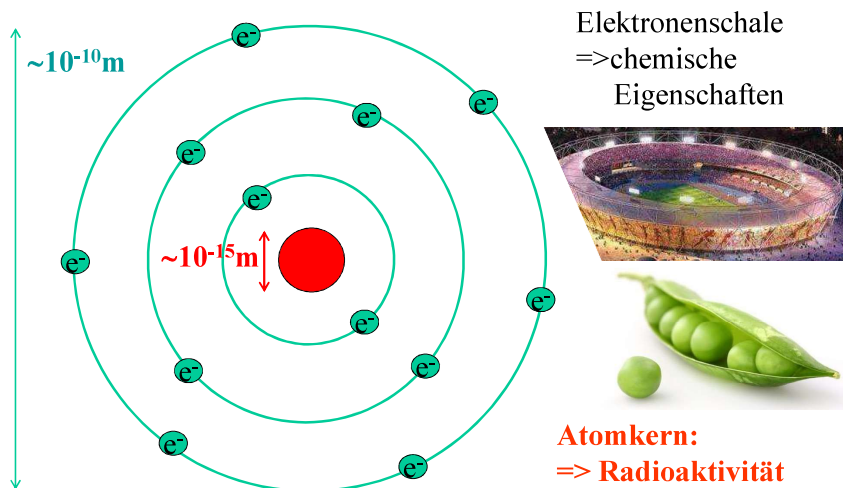


Pharmazeutische Anwendungen:

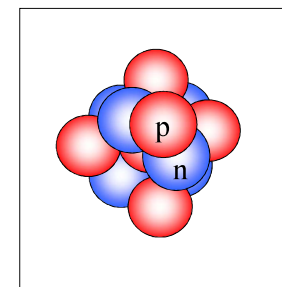
- Pharmakokinetische Untersuchungen



## Aufbau des Atoms



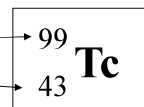
## Aufbau des Atomkernes




	Ladung	Masse
<b>Proton</b>	<b>+1 e</b>	<b>1 a.u.</b>
<b>Neutron</b>	<b>0</b>	<b>1 a.u.</b>

A (Massenzahl) = Protonenzahl + Neutronenzahl

Z (Ordnungszahl) = Protonenzahl

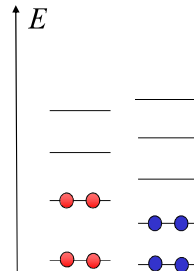


99 Nukleon: 43 Proton és 56 Neutron



A diagram of a nucleus consisting of 3 protons (p) and 3 neutrons (n). The protons are represented by red spheres and the neutrons by blue spheres. They are clustered together in a roughly spherical arrangement.

Typische Übergangsenergie-  
werte: einige MeV

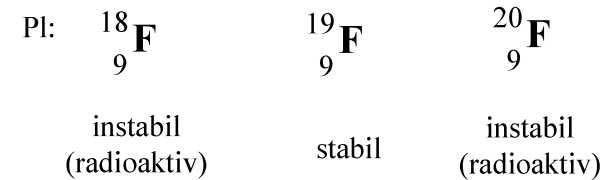


Z=0-28 Part 1 of 2

Decay Q-value Range

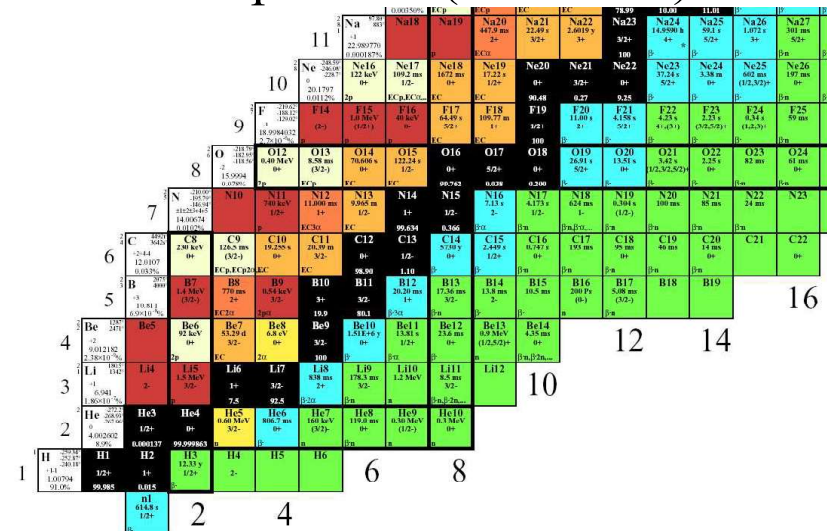
- $Q(\alpha) > 0$
- $Q(\beta^-) = 0$
- $Q(\beta^-) > 0$  &  $Q(EC) = 0$
- Stable to Beta Decay
- $Q(EC) > 0$
- $Q(EC) > S_{np} = 0$
- Naturally Abundant

Atomkerne mit gleicher Ordnungszahl aber unterschiedlicher Massenzahl  
=> gleiche Protonenzahl unterschiedliche Neutronenzahl  
Varianten des gleichen Elementes => Chemische Eigenschaften sind identisch!



Isotop  $\leftrightarrow$  radioaktives Isotop

## Isotoptabelle (Abschnitt)



# Zerfälle und radioaktive Strahlungen

$\alpha$  - Zerfall       $\alpha$  - Teilchen =  ${}^4_2\text{He}$  Atomkern

$\beta^-$  - Zerfall:  $\beta^-$        $\beta^-$  Teilchen = Elektron  
 $\beta^+$        $\beta^+$  Teilchen = Positron

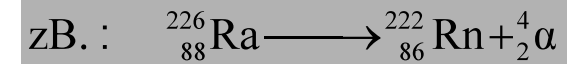
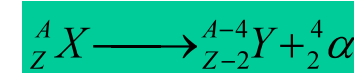
K-Einfang      charakteristische Röntgenstrahlung

Isomere Kernumwandlung       $\gamma$ -Strahlung

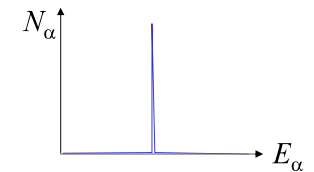
## $\alpha$ - Zerfall

Hierbei treten  ${}^4\text{He}$  Atomkerne aus dem Atomkern aus. Damit erhöht sich die Stabilität des Kernes

Massenzahl  $\downarrow 4$       Ordnungszahl  $\downarrow 2$



Energiespektrum: Linienspektrum  
 $E_\alpha \sim \text{MeV}$



**$\beta^-$  - Zerfall**

Neutronenüberschuss

$${}^A_Z X \longrightarrow {}^{A}_{Z+1} Y + {}^0_{-1} \beta + \bar{\nu}$$

${}^1_0 n \longrightarrow {}^1_1 p + {}^0_{-1} \beta + \bar{\nu}$

bleibt im Atomkern      treten aus

zB.:  ${}^{20}_9\text{F}$   
 ${}^{32}_{15}\text{P}$   
 ${}^{59}_{26}\text{Fe}$   
 ${}^{131}_{53}\text{I}$

$\beta^-$ -Strahlung

Kontinuierliches Energiespektrum

$\beta^- = {}^0_{-1} \beta = e^-$

$N_\beta$

$E_{\max}$

$E_\beta$

**$\beta^+$  - Zerfall**

Protonenüberschuss

$${}^A_Z X \longrightarrow {}^{A}_{Z-1} Y + {}^0_{+1} \beta + \nu$$

${}^1_1 p \longrightarrow {}^1_0 n + {}^0_{+1} \beta + \nu$

bleibt im Atomkern      treten aus

pl:  ${}^{11}_6\text{C}$   
 ${}^{15}_8\text{O}$   
 ${}^{18}_9\text{F}$   
 ${}^{52}_{26}\text{Fe}$

$\beta^+$  Strahlung

Kontinuierliches Energiespektrum

$N_\beta$

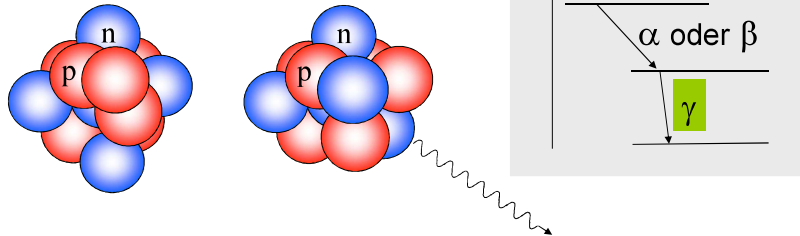
$E_{\max}$

$E_\beta$

# Promte $\gamma$ -Strahlung

Nach dem Zerfall kann die Anordnung der Nukleonen **energetisch ungünstig** sein

Umordnen der Nukleonen: ein niedrigeres Energieniveau wird erreicht, (z.B. weniger coulombsche Abstoßung) => die überflüssige Energie wird in Form von  $\gamma$ -Strahlung ausgestrahlt.



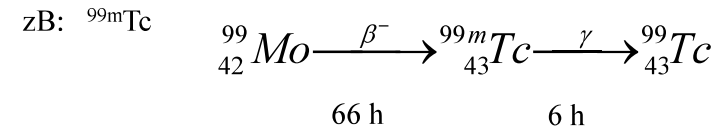
Protonenzahl u. Neutronenzahl sind unverändert!

# Isomere Kernumwandlung

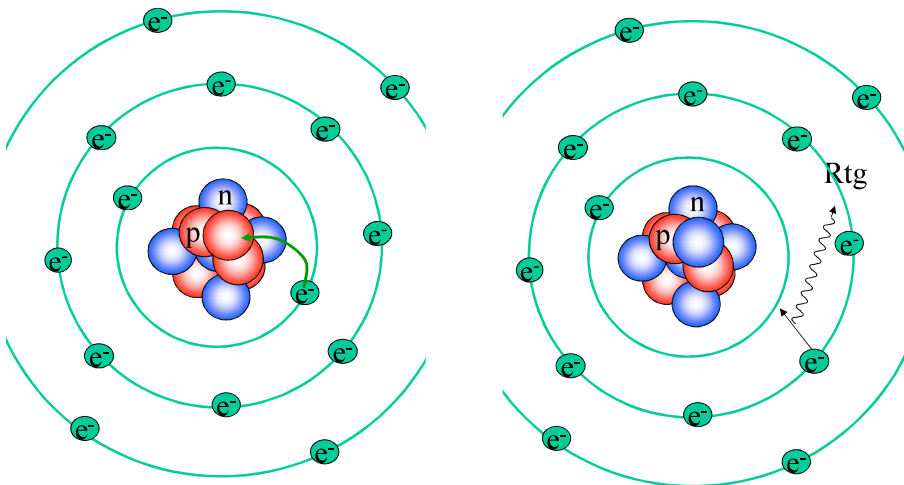
Wenn die Umordnen nicht einfach vor sich gehen kann, entsteht  $\gamma$ -Strahlung nicht sofort, sondern erst nach einer gut messbaren Zeit.

Die zwei Prozesse ( $\alpha$ -oder  $\beta$ -Zerfall,  $\gamma$ -Strahlungsemission) können separiert werden.

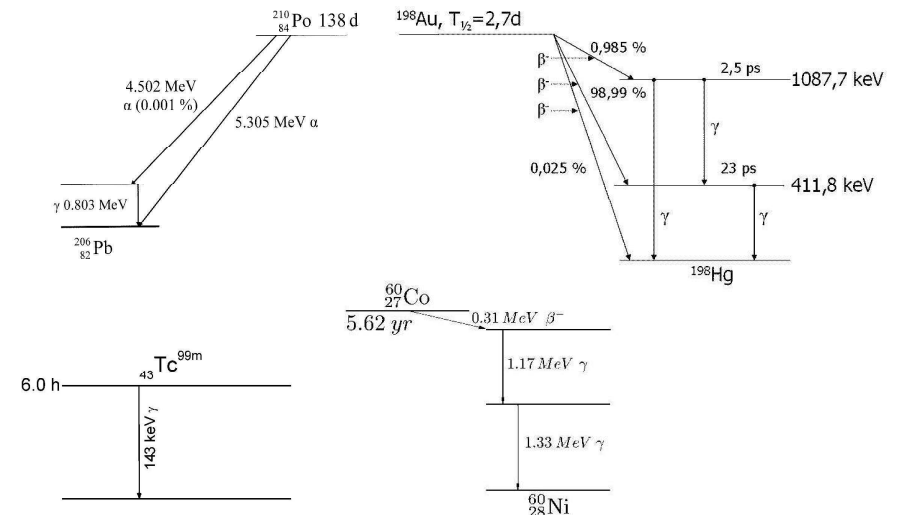
**Man kann ein reines  $\gamma$ -strahlen Isotop herstellen!**  
=> **Isotopendiagnostik**



# K-Einfang



# Beispiele



# Aktivität

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| \quad \left( = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| \right)$$

N = Anzahl der Zerfallsfähigen Atomkerne  
t = Zeit

$\Delta N$  die Anzahl der während  $\Delta t$  Zeit zerfallenen Atomkerne

Einheit: Becquerel Bq

1 Bq = 1 Zerfall/sec

Bq, kBq, MBq, GBq, TBq

# Zerfallsgesetz

$\Delta N \sim N$  N Anzahl der zerfallsfähigen Kerne

$\lambda$ : Zerfallskonstante

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

Zerfallswahrscheinlichkeit[1/s]

$1/\lambda = \tau$  Zeit! durchschnittlicher Lebensdauer

Differentialgleichung

Lösung:

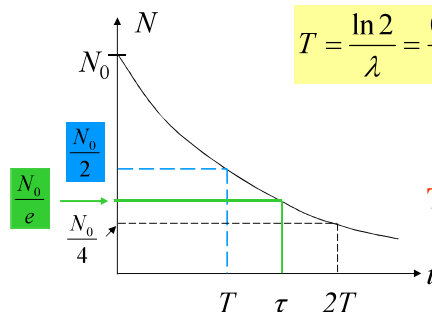
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Exponentialfunktion!

$N_0$  Anzahl der zerfallsfähigen Kerne am Anfang ( $t=0$ )

# Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$$



$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

$\lambda$  Zerfallskonstante  
 $T$  Halbwertszeit

Theoretisch erreicht es nie 0 !

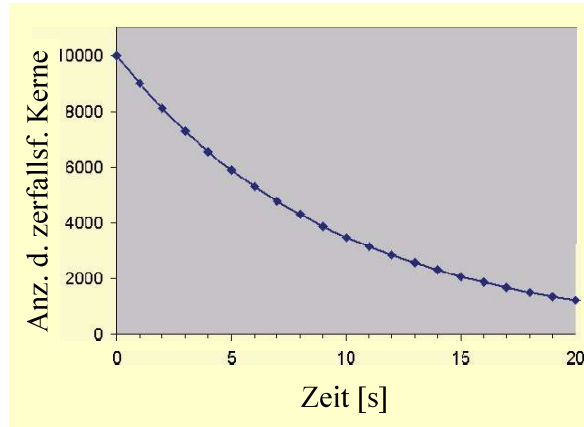
# Beispiel

- Sei  $N_0=10000$   $\lambda=0,1$  1/s
- nach 1 sec: 9000 (10000x0,1=1000 sind zerfallen)
- nach 2 sec: 8100 (9000x0,1=900 sind zerfallen)
- nach 3 sec: 7290 (8100x0,1=810 sind zerfallen)
- nach 4 sec: 6561 (7290x0,1=729 sind zerfallen)
- ....



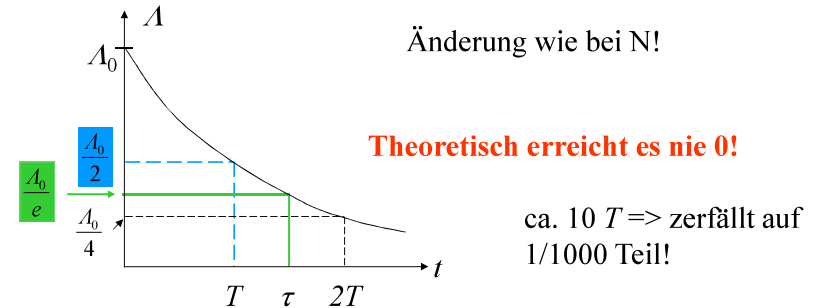
## Beispiel

- Sei  $N_0=10000$   $\lambda=0,1 \text{ 1/s}$
- 1 sec 9000
- 2 sec 8100
- 3 sec 7290
- 4 sec 6561
- ....



## Zeitliche Änderung der Aktivität

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 2^{-\frac{t}{T}}$$



## Einige Beispiele für Halbwertszeit

$^{232}\text{Th}$	$1,4 \cdot 10^{10} \text{ J}$	$^{60}\text{Co}$	5,3 J
$^{238}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9 \text{ J}$	$^{59}\text{Fe}$	1,5 M
$^{40}\text{K}$	$1,3 \cdot 10^9 \text{ J}$	$^{56}\text{Cr}$	1 M (28 T)
$^{14}\text{C}$	5736 J	$^{131}\text{I}$	8 T
$^{137}\text{Cs}$	30 J	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 h
$^3\text{H}$	12,3 J	$^{18}\text{F}$	110 min
		$^{11}\text{C}$	20 min
		$^{15}\text{O}$	2 min
		$^{222}\text{Th}$	2,8 ms

Nicht auswendig lernen!

## Teilchenenergie

Gemessen in Elektronenvolt (eV).

$\text{eV} = \text{Ladung eines Elektrons} \times 1 \text{ Volt} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Typische Teilchenenergiewerte (die bei Kernumwandlungen freigesetzte Energie) bewegen sich in **MeV** Größenordnungen.

$\alpha$  und  $\beta$ :  $E = E_{\text{kin}}$   
je höher ist die Teilchenenergie desto größer Reichweite

# Absorption von radioaktiven Strahlungen

$\alpha$   
 $\beta^+$   
 $\beta^-$

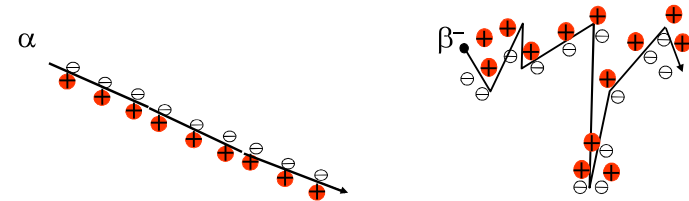
haben elektrische Ladung

$\gamma$   
Rtg

ungeladene Teilchen (elektromagnetische Strahlung)

# Schwächung der geladenen Teilchen

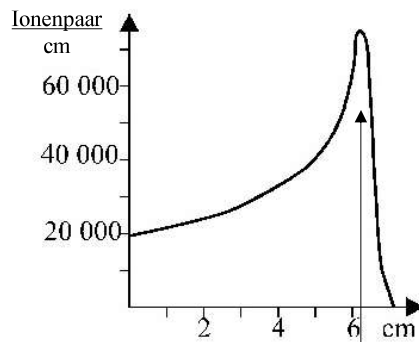
Ionisieren: ihre Energie wird auf einem bestimmten Weg verbraucht  
**Reichweite**



Lineare Energieübertragung (**LET**, Linear Energy Transfer)

LET = (lineare Ionendichte) · (zur Ionisation notwendige Energie)

Lineare Ionendichte für ein  $\alpha$ -Teilchen in Luft



Bragg Spitze

# Reichweite

$\alpha$ -Teilchen

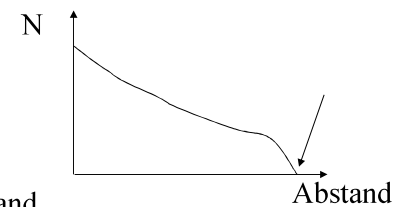
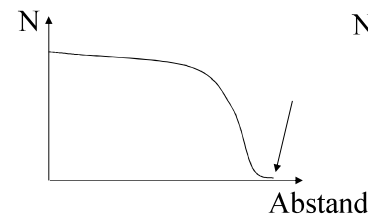
$\beta^-$ -Teilchen

in Luft **einige cm**

in Luft **m**

in Gewebe **0,01-0,1 mm**

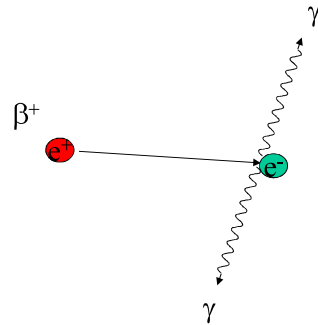
in Gewebe **cm**





## $\beta^+$ -Strahlung

Annihilation



Medizinische Anwendung: Positron Emissionstomographie (PET)

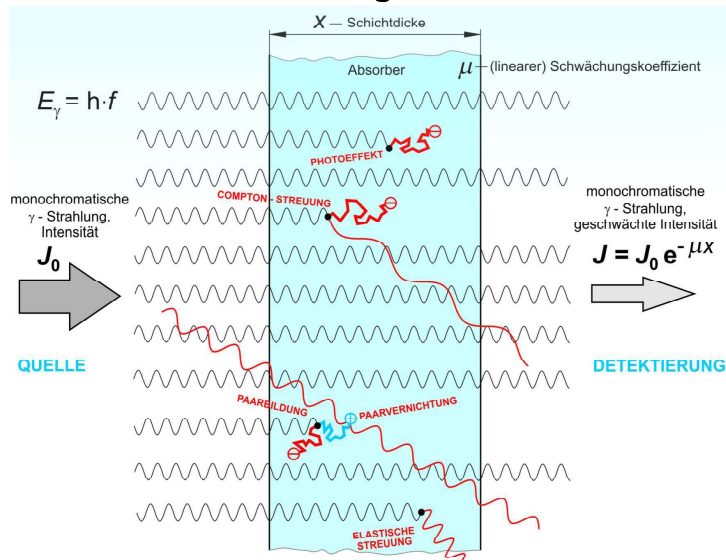
Einsteinsche Formel:

$$E=mc^2$$

Energie - Masse Äquivalenz !

~~Umwandlung~~

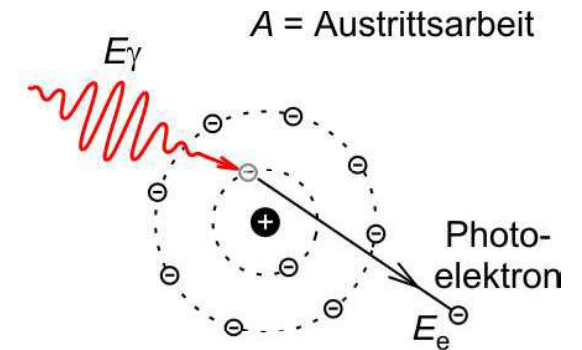
## Wechselwirkung der Röntgen- und Gamma-Strahlung mit der Materie



31

## Photoelektrischer Effekt

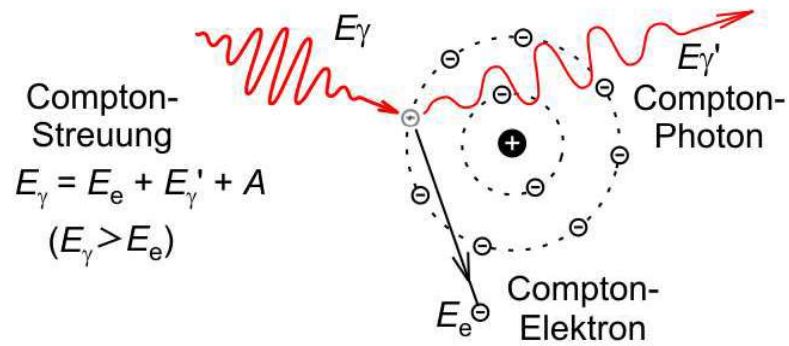
Photoeffekt  
 $E_\gamma \approx E_e$   
 (wenn  $E_\gamma \gg A$ )



32

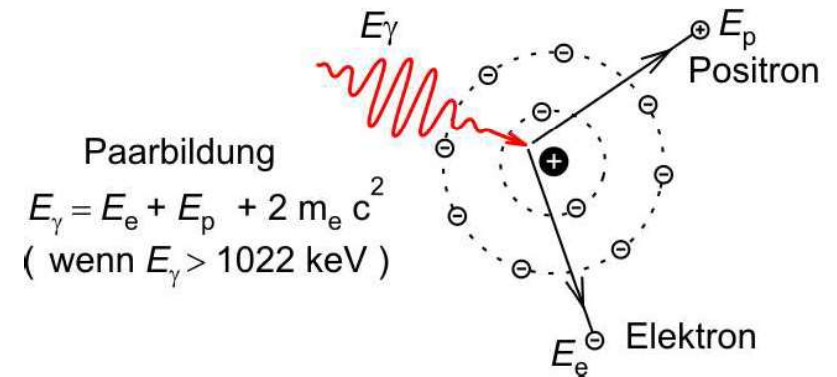


## Compton Effekt



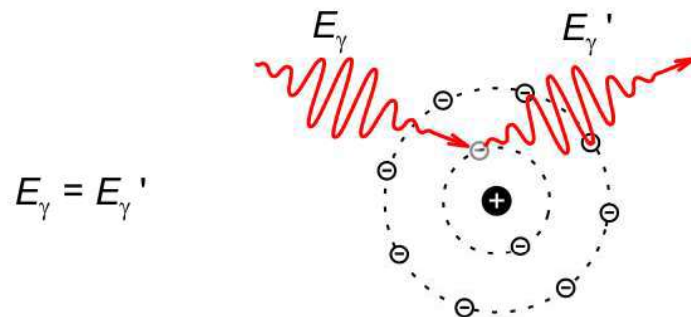
33

## Paarbildung



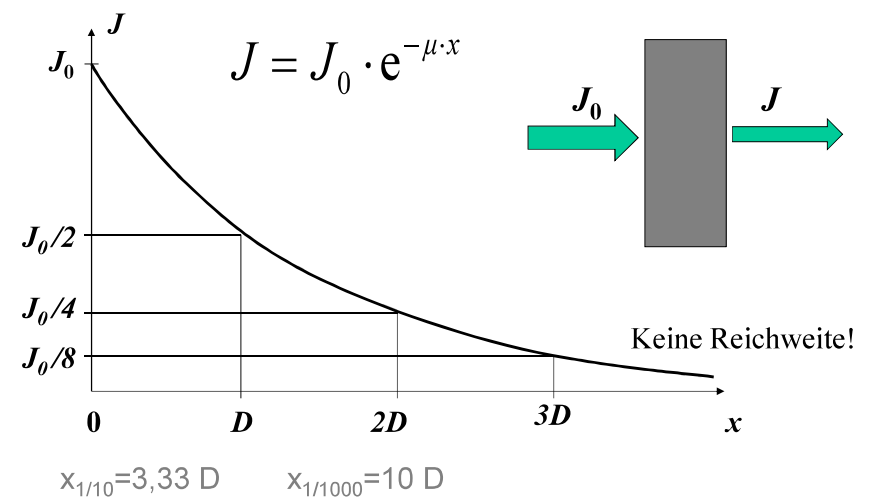
34

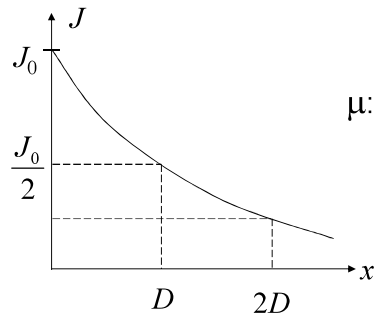
## Elastische Streuung



35

## Schwächung der $\gamma$ - und Röntgenstrahlung





$$J = J_0 e^{-\mu x}$$

$\mu$ : (linearer) Schwächungskoeffizient

Maßeinheit: 1/m, 1/cm

$$\delta = \frac{1}{\mu} \text{ „Eindringtiefe“}$$

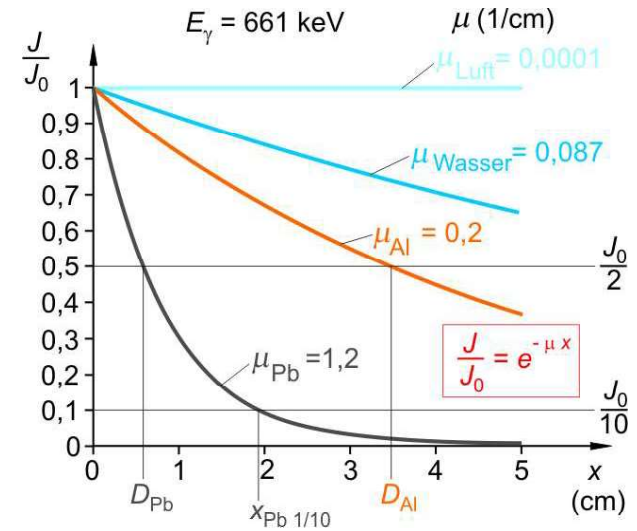
Die Intensität sinkt auf den e-ten Teil des Anfangswertes ( $\approx 37\%$ )

$\mu(\text{Stoffart, Dichte, Energie der Strahlung}) = \mu(\text{Stoffart, } \rho, E_{\text{foton}}) \sim \rho$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Massenschwächungskoeffizient}$$

Maßeinheit:  $\text{cm}^2/\text{g}$

## Schwächung der $\gamma$ - und Röntgenstrahlung



38

Massenschwächungs-  
koeffizient:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m + \kappa_m$$

$$\tau_m = c \lambda^3 Z^3$$

