



Isotope, Radioaktive Zerfälle und Strahlungen

L. Smeller

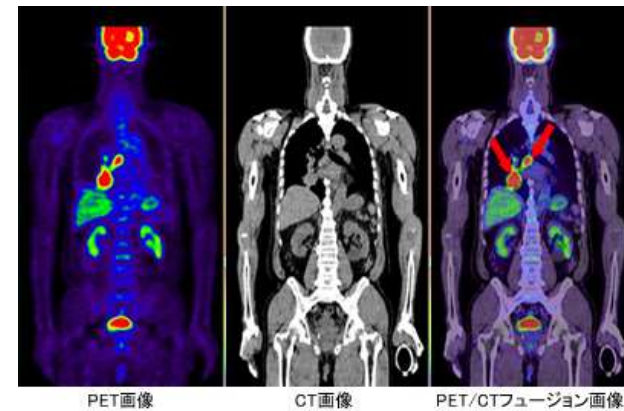
Warum ist es interessant?

Medizinische Anwendungen der radioaktiven Strahlungen:

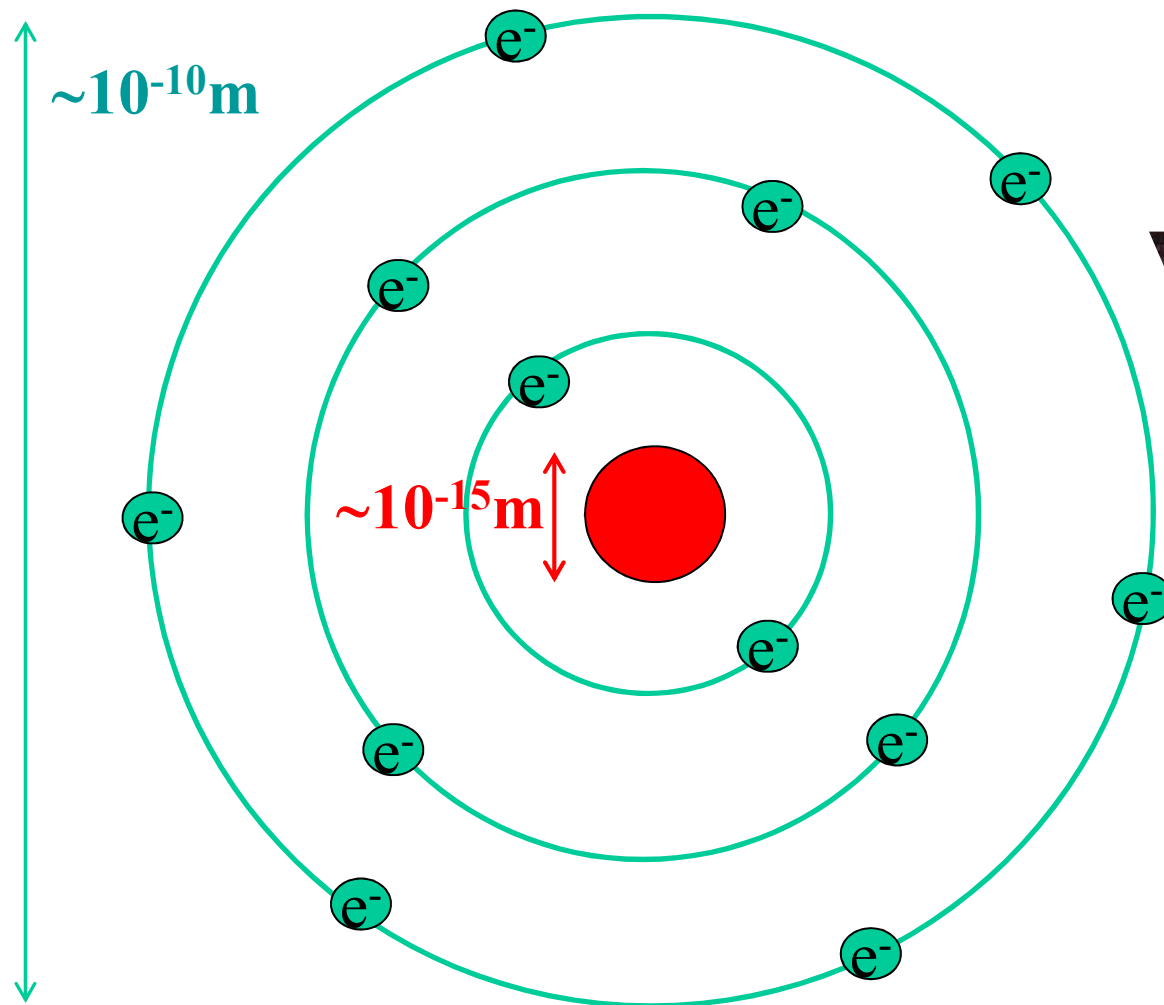
- Diagnostik
(Isotopendiagnostik)
- Therapie (Strahlentherapie)

Pharmazeutische Anwendungen:

- Pharmakokinetische
Untersuchungen



Aufbau des Atoms

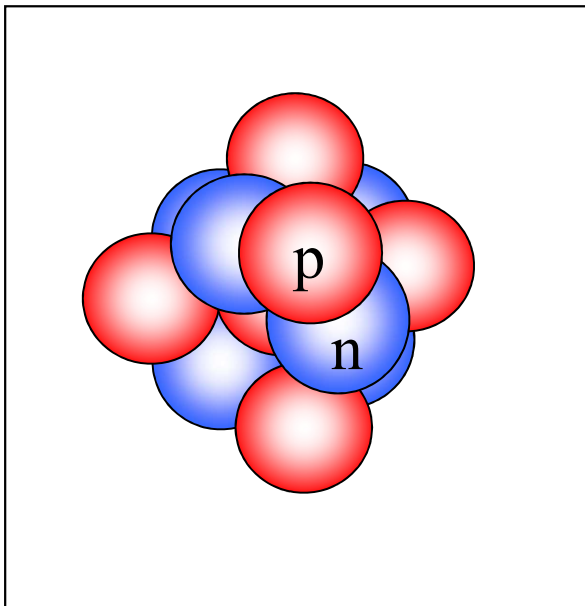


Elektronenschale
=> chemische
Eigenschaften



Atomkern:
=> **Radioaktivität**

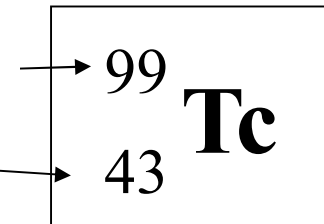
Aufbau des Atomkernes



	Ladung	Masse
Proton	+1 e	1 a.u.
Neutron	0	1 a.u.

A (Massenzahl) = Protonenzahl + Neutronenzahl

Z (Ordnungszahl) = Protonenzahl

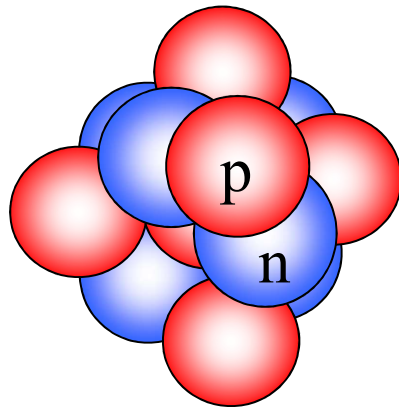


99 Nukleon: 43 Proton és 56 Neutron



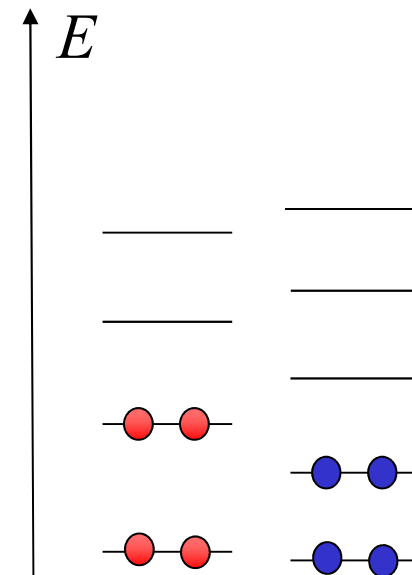
Stabilität des Atomkernes

Coulomb-Kraft → Abstoßung zw. Protonen → destabilisiert
Kernkraft → Ladungsunabhängig → stabilisiert
kurze Reichweite



Diskrete Energieniveaus

Typische Übergangsenergie-
verte: einige MeV

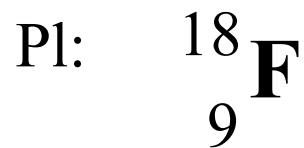


Isotope

Atomkerne mit gleicher Ordnungszahl aber unterschiedlicher Massenzahl

=> gleiche Protonenzahl unterschiedliche Neutronenzahl

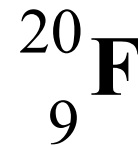
Varianten des gleichen Elementes => Chemische Eigenschaften sind identisch!



instabil
(radioaktiv)



stabil

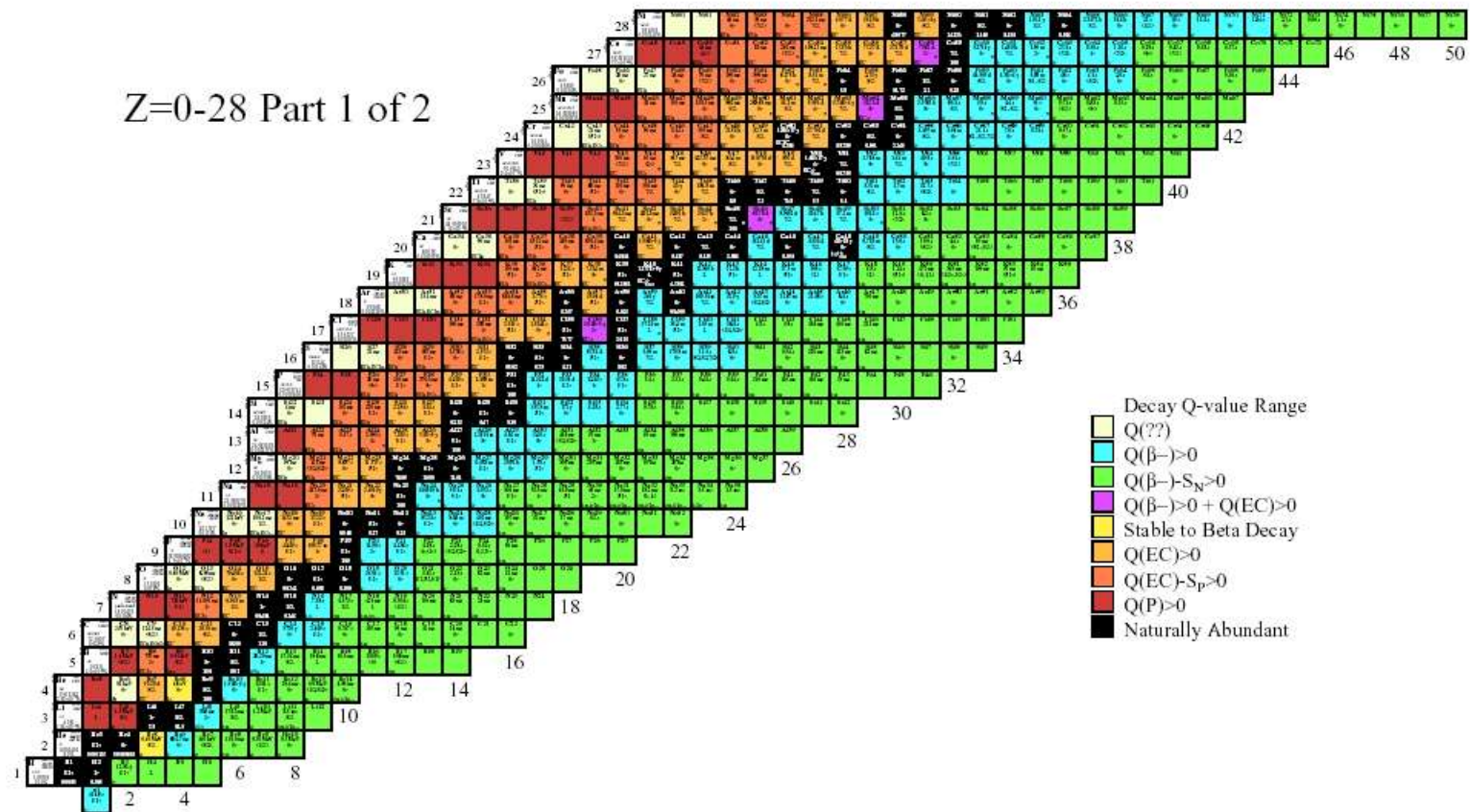


instabil
(radioaktiv)

Isotop <-> radioaktives Isotop

Isotoptabelle

Table of Isotopes (1998)



[illegible]

Zerfälle und radioaktive Strahlungen

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

β -Zerfall: β^- β^- Teilchen = Elektron
 β^+ β^+ Teilchen = Positron

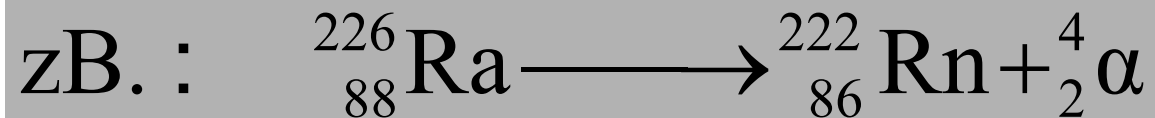
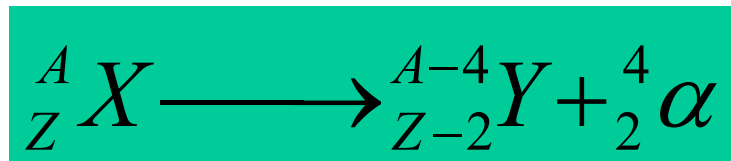
K-Einfang charakteristische
 Röntgenstrahlung

Isomere Kernumwandlung γ -Strahlung

α - Zerfall

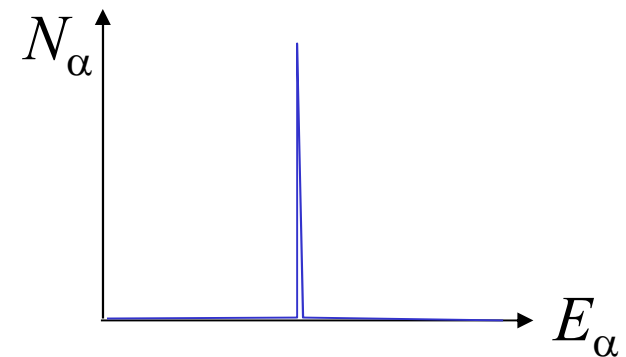
Hierbei treten ${}^4\text{He}$ Atomkerne aus dem Atomkern aus. Damit erhöht sich die Stabilität des Kernes

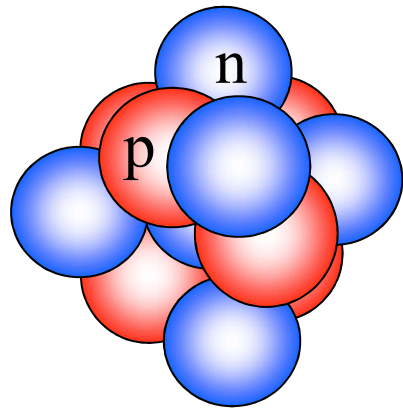
Massenzahl $\downarrow 4$ Ordnungszahl $\downarrow 2$



Energiespektrum: Linienspektrum

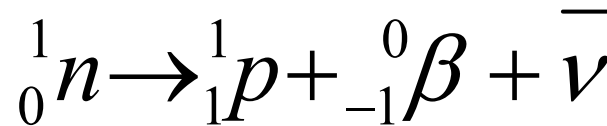
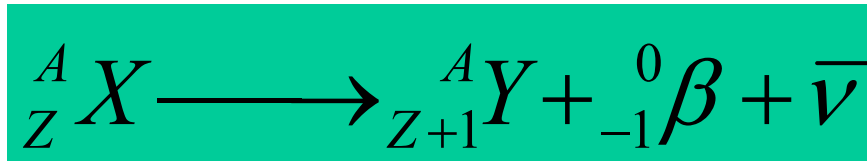
$E_\alpha \sim \text{MeV}$





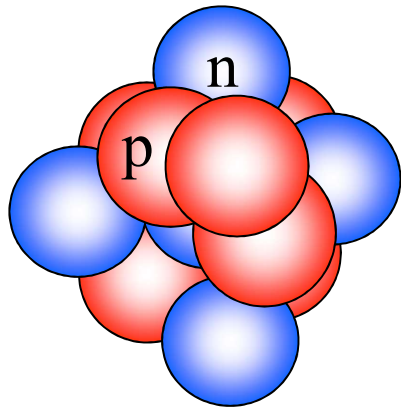
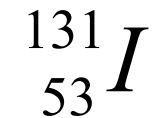
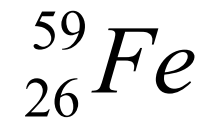
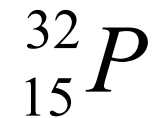
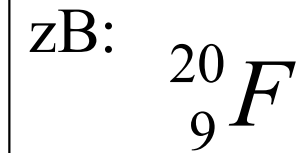
Neutronenüberschuss

β^- - Zerfall

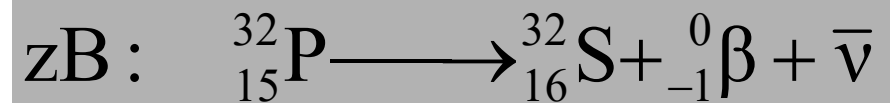


bleibt im Atomkern

treten aus

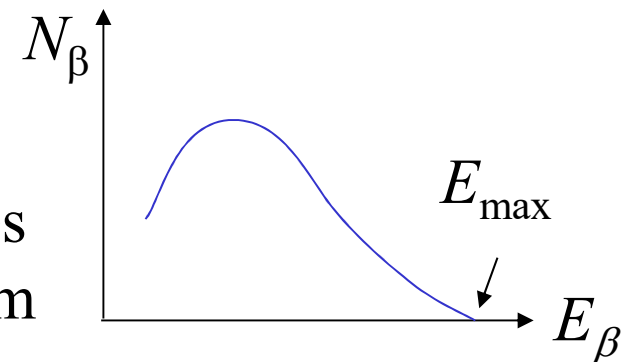


$$\beta^- = {}^0_{-1} \beta = e^-$$

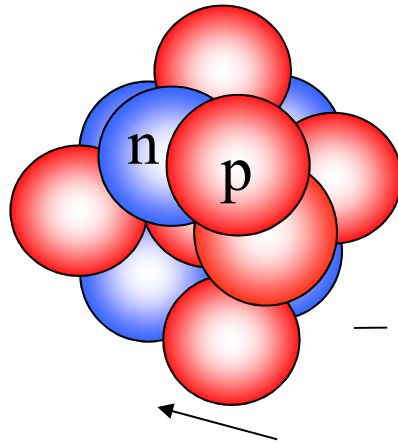


β^- -Strahlung

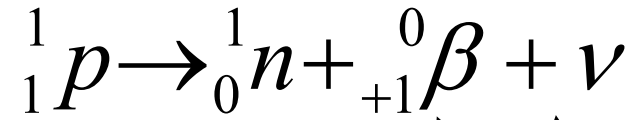
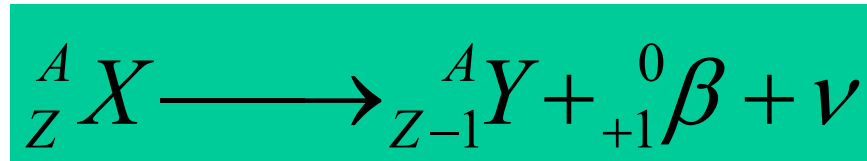
Kontinuierliches
Energiespektrum



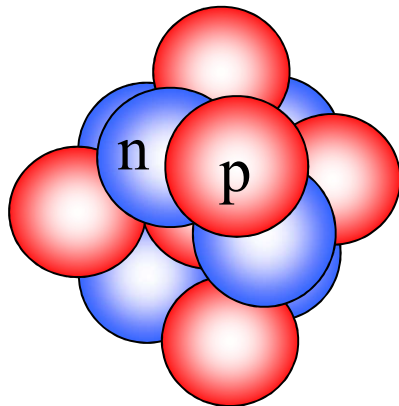
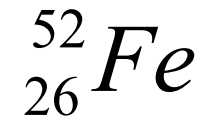
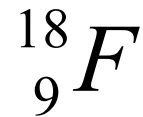
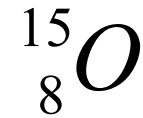
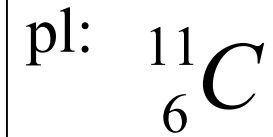
β^+ - Zerfall



Protonenüberschuss

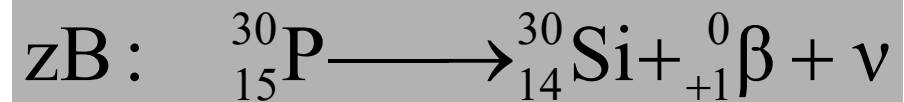


bleibt im Atomkern treten aus



β^+ Strahlung

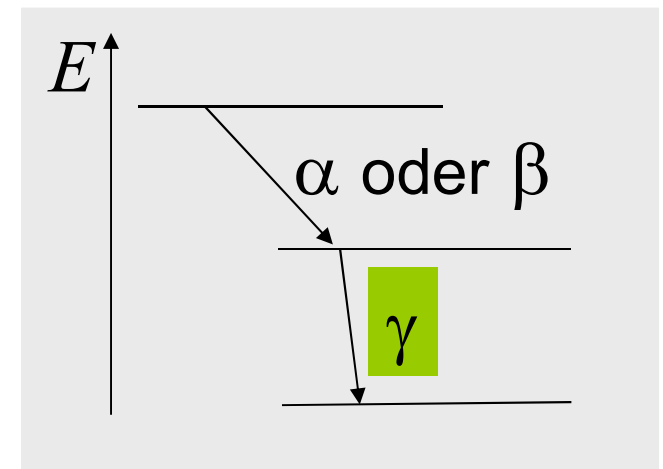
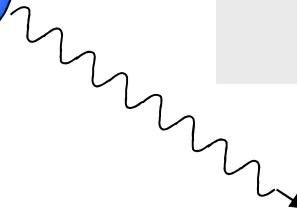
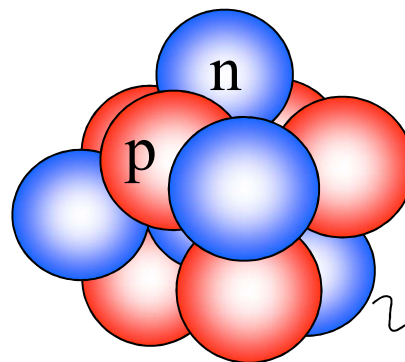
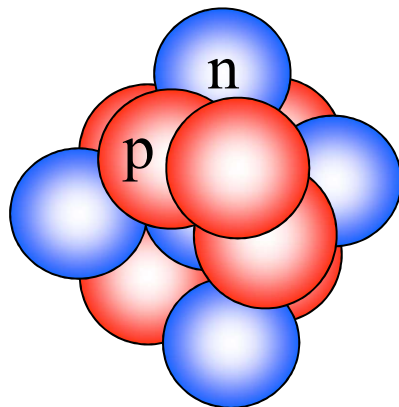
Kontinuierliches
Energiespektrum



Promte γ -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 γ -Strahlung ausgestrahlt.



Protonenzahl u. Neutronenzahl sind unverändert!

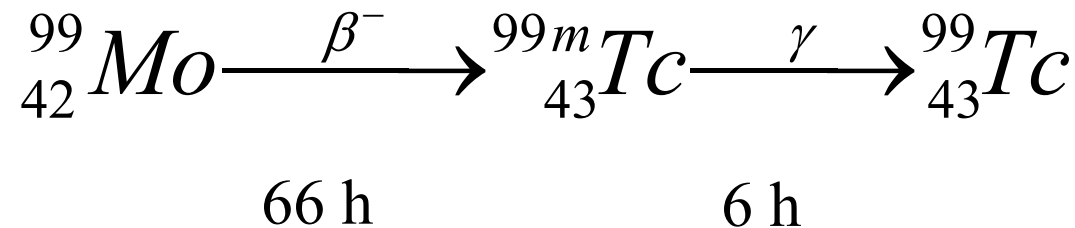
Isomere Kernumwandlung

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

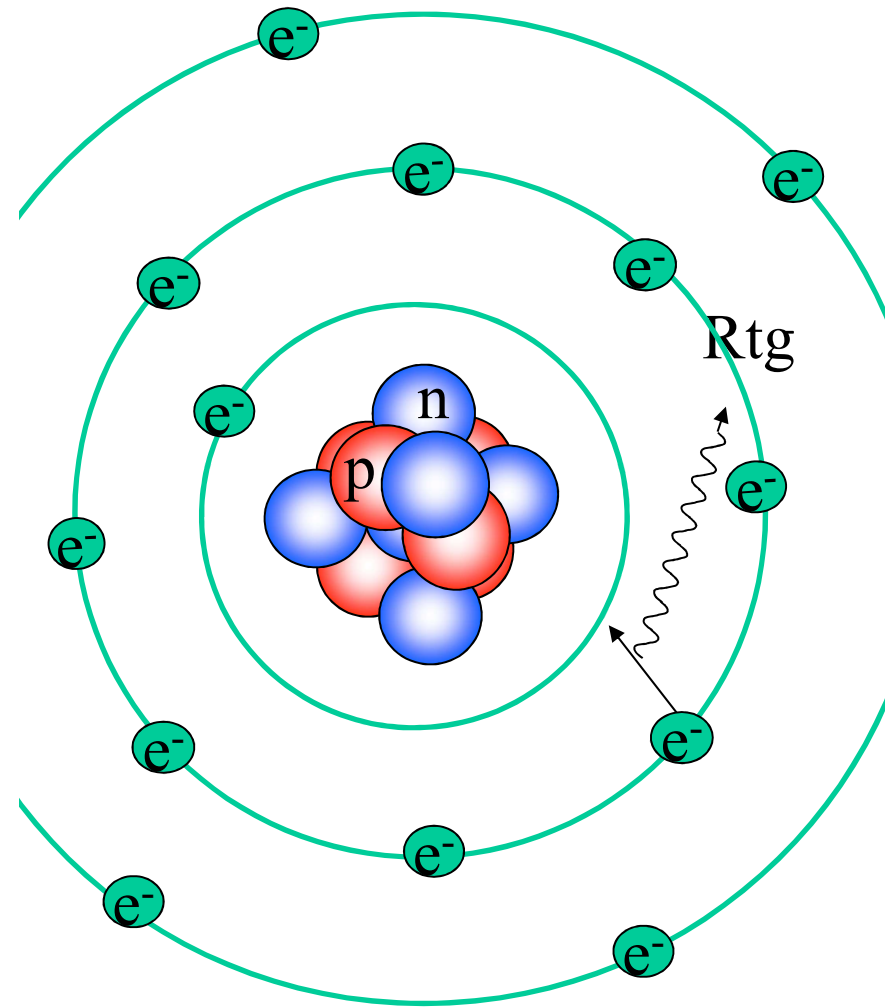
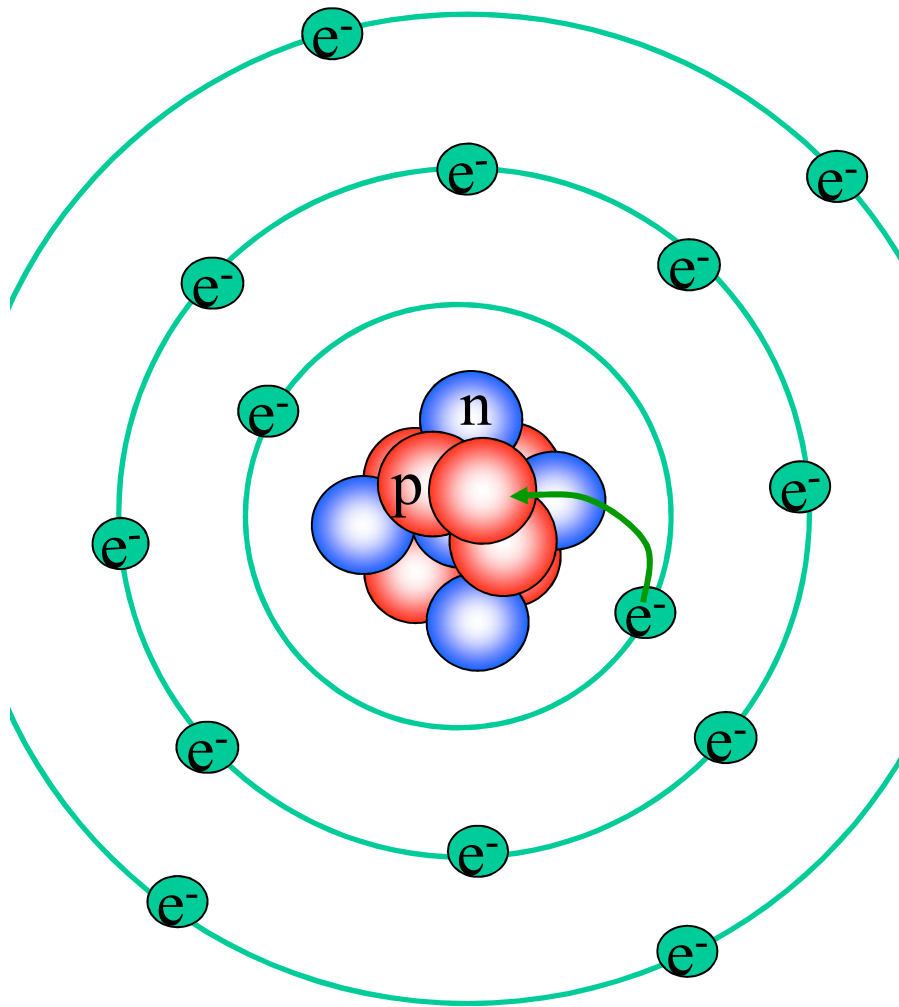
Die zwei Prozesse (α -oder β -Zerfall, γ -Strahlungsemission) können separiert werden.

Man kann ein reines γ -strahlen Isotop herstellen!
=> Isotopendiagnostik

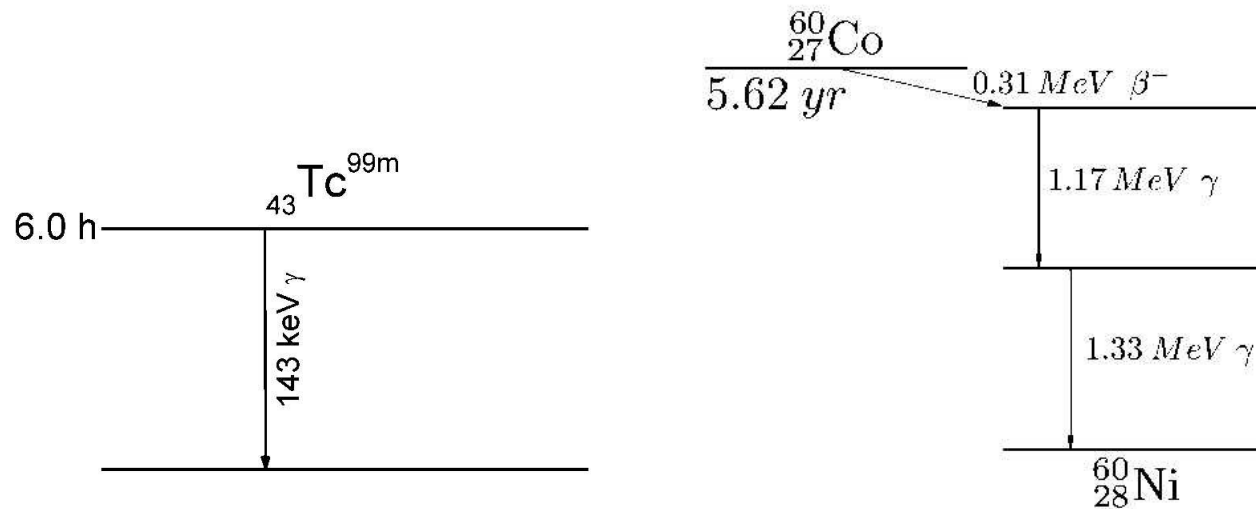
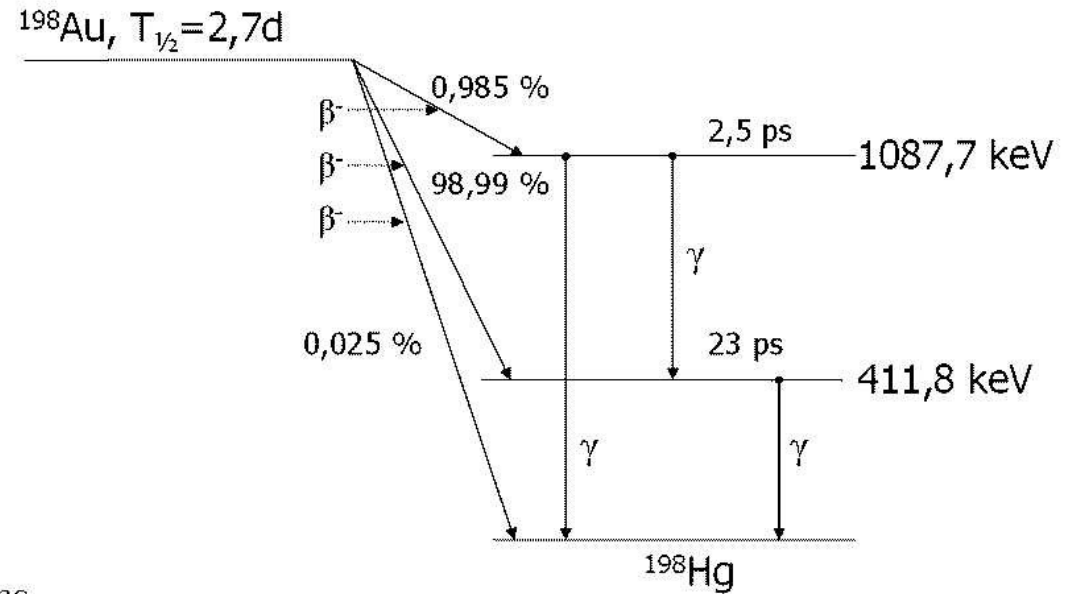
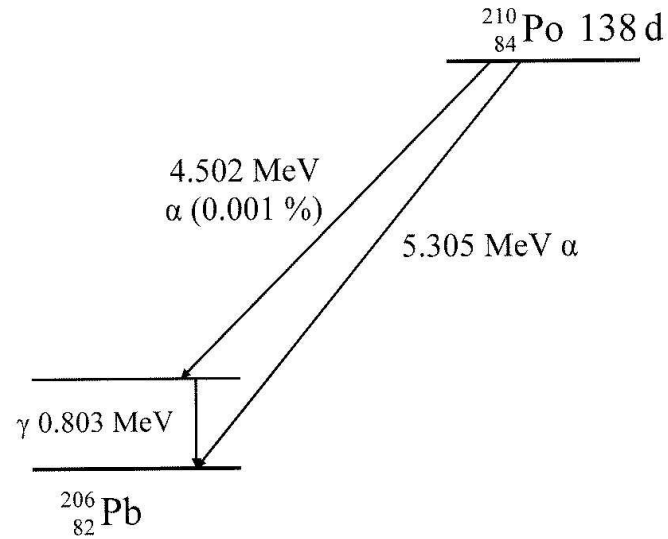
zB: ^{99m}Tc



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

ΔN die Anzahl der während Δt Zeit zerfallenen Atomkerne

Einheit: Becquerel Bq

1 Bq = 1 Zerfall/sec

Bq, kBq, MBq, GBq, TBq, PBq

Zerfallsgesetz

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

$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$ λ : Zerfallskonstante
Zerfallswahrscheinlichkeit[1/s]
 $1/\lambda = \tau$ Zeit! durchschnittlicher Lebensdauer

Differentialgleichung

Lösung:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Exponentialfunktion!}$$

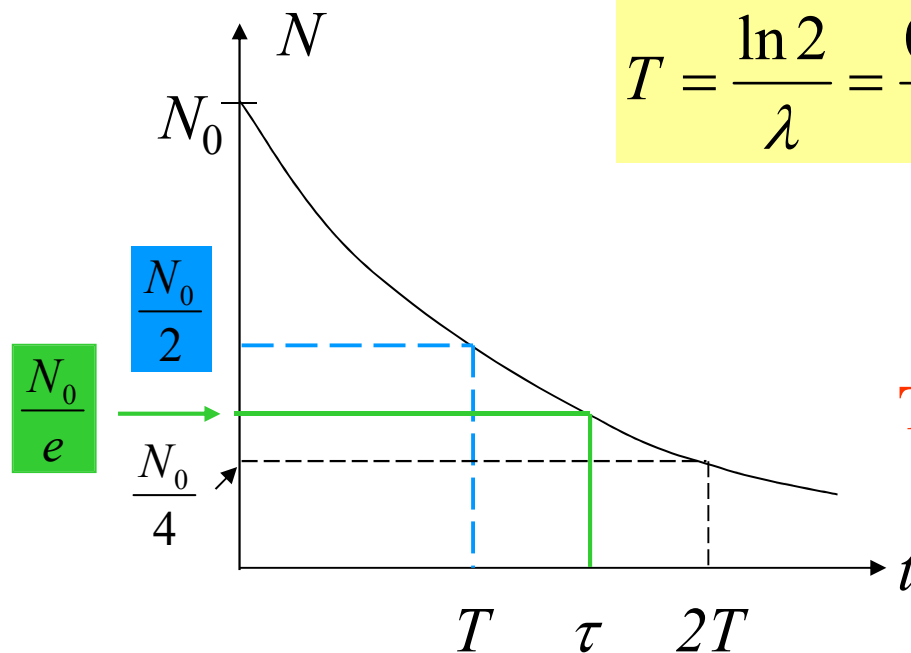
N_0 Anzahl der zerfallsfähigen Kerne am Anfang ($t=0$)

Zerfallsgesetz

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

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

λ Zerfallskonstante
 T Halbwertszeit



Theoretisch erreicht es nie 0 !

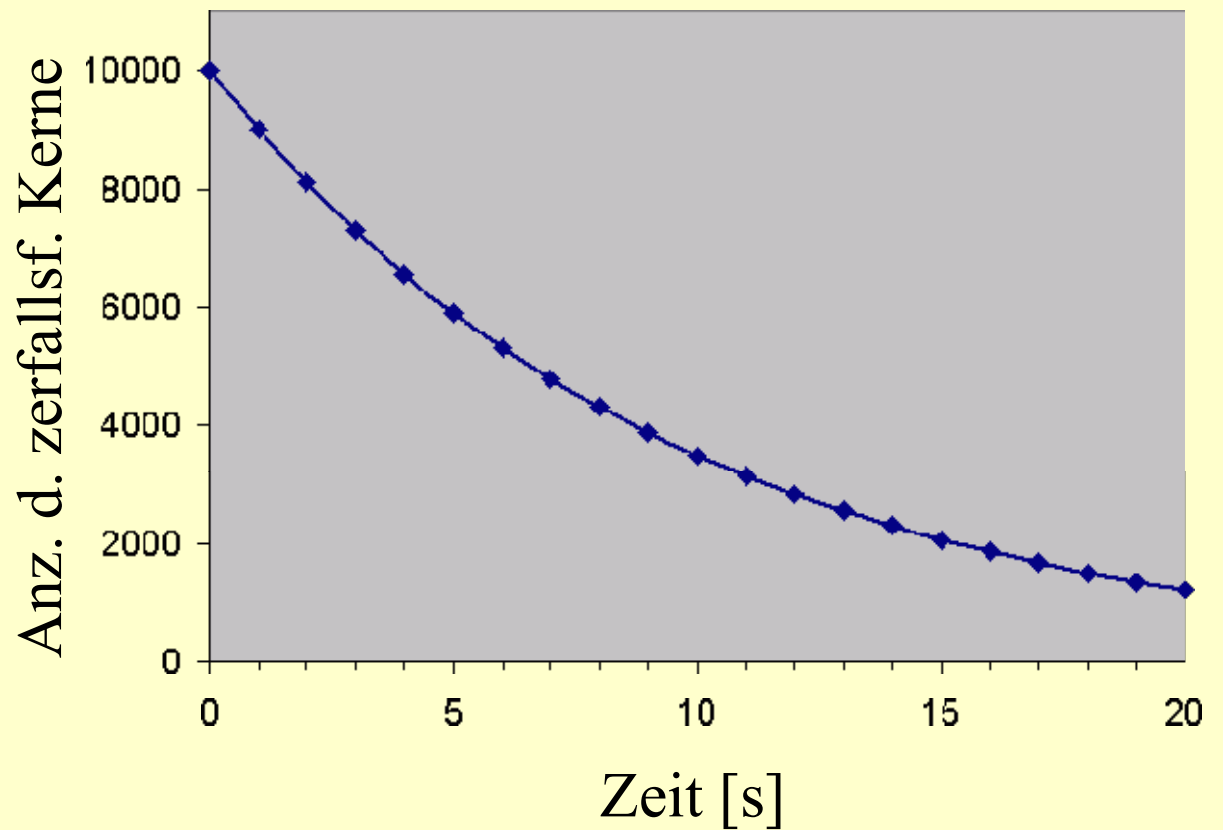
Beispiel

- Sei $N_0=10000$ $\lambda=0,1 \text{ } ^1/\text{s}$
- 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

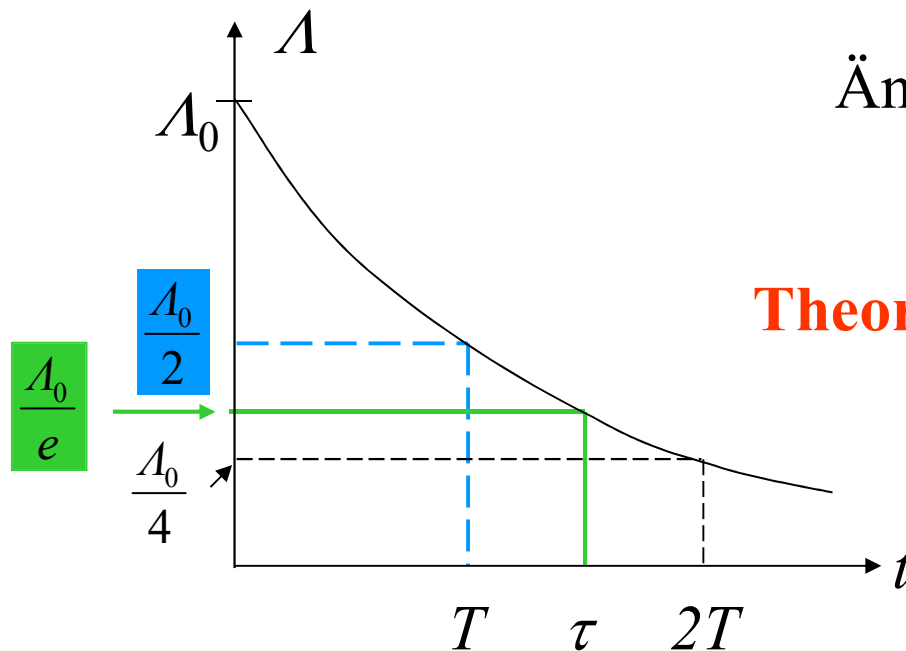
- Sei $N_0=10000$ $\lambda=0,1 \text{ } ^1/\text{s}$
- 1 sec 9000
- 2 sec 8100
- 3 sec 7290
- 4 sec 6561
-



Zeitliche Änderung der Aktivität

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

Änderung wie bei N!



Theoretisch erreicht es nie 0!

ca. $10 T \Rightarrow$ zerfällt auf
1/1000 Teil!

Einige Beispiele für Halbwertszeit

^{232}Th	$1,4 \cdot 10^{10} \text{ J}$
-------------------	-------------------------------

^{238}U	$4,5 \cdot 10^9 \text{ J}$
------------------	----------------------------

^{40}K	$1,3 \cdot 10^9 \text{ J}$
-----------------	----------------------------

^{14}C	5736 J
-----------------	------------------

^{137}Cs	30 J
-------------------	----------------

^3H	$12,3 \text{ J}$
--------------	------------------

^{60}Co	$5,3 \text{ J}$
------------------	-----------------

^{59}Fe	$1,5 \text{ M}$
------------------	-----------------

^{56}Cr	1 M (28 T)
------------------	----------------------

^{131}I	8 T
------------------	---------------

$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 h
--------------------------	---------------

^{18}F	110 min
-----------------	-------------------

^{11}C	20 min
-----------------	------------------

^{15}O	2 min
-----------------	-----------------

^{222}Th	$2,8 \text{ ms}$
-------------------	------------------

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.

$$\alpha \text{ und } \beta: E = E_{\text{kin}}$$

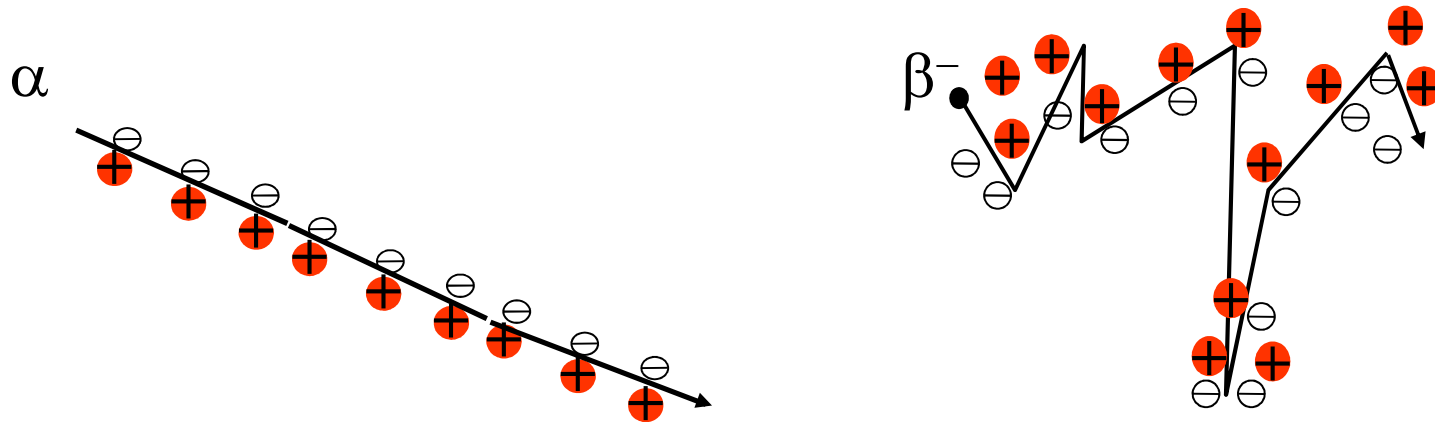
je höher ist die Teilchenenergie desto größer Reichweite

Absorption von radioaktiven Strahlungen

α	}	haben elektrische Ladung
β^+		
β^-		
γ	}	ungeladene Teilchen (elektromagnetische Strahlung)
Rtg		
ν		

Schwächung der geladenen Teilchen

Ionisieren: ihre Energie wird auf einem bestimmten Weg verbraucht
Reichweite

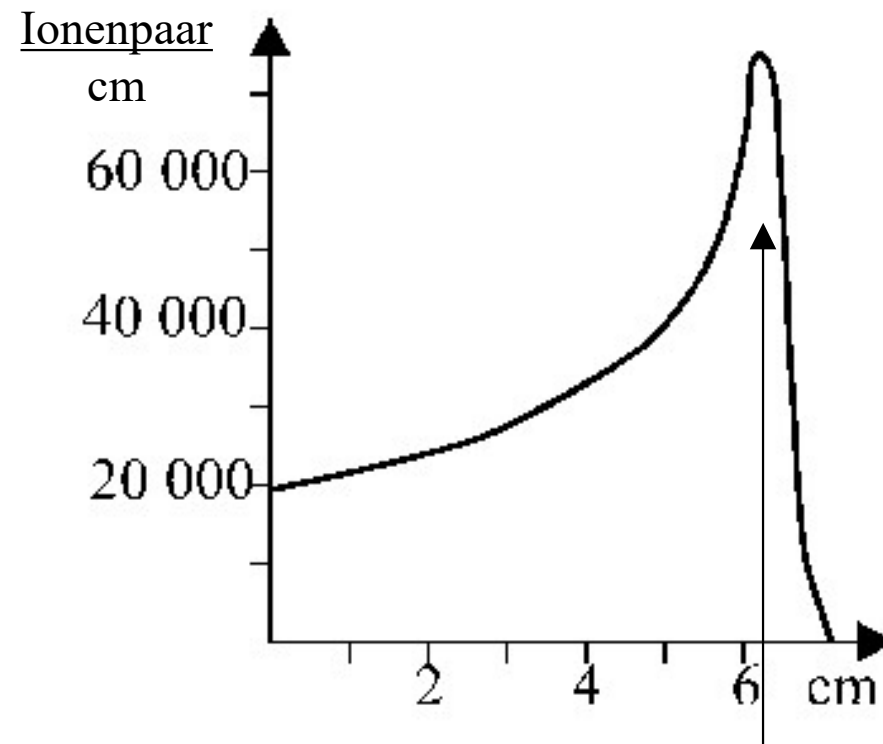


Lineare Energieübertragung (**LET**, Linear Energy Transfer)

$$\text{LET} = (\text{lineare Ionendichte}) \cdot (\text{zur Ionisation notwendige Energie})$$

Lineare Ionendichte für
ein α -Teilchen in Luft

Bragg Spitze



Reichweite

α -Teilchen

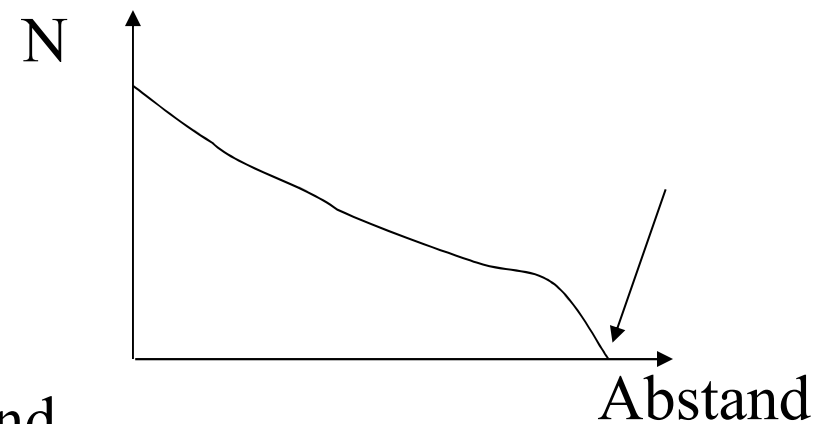
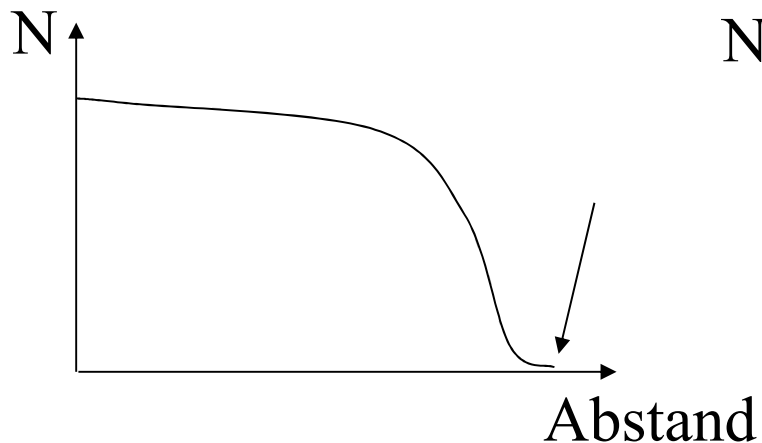
β^- -Teilchen

in Luft **einige cm**

in Luft **m**

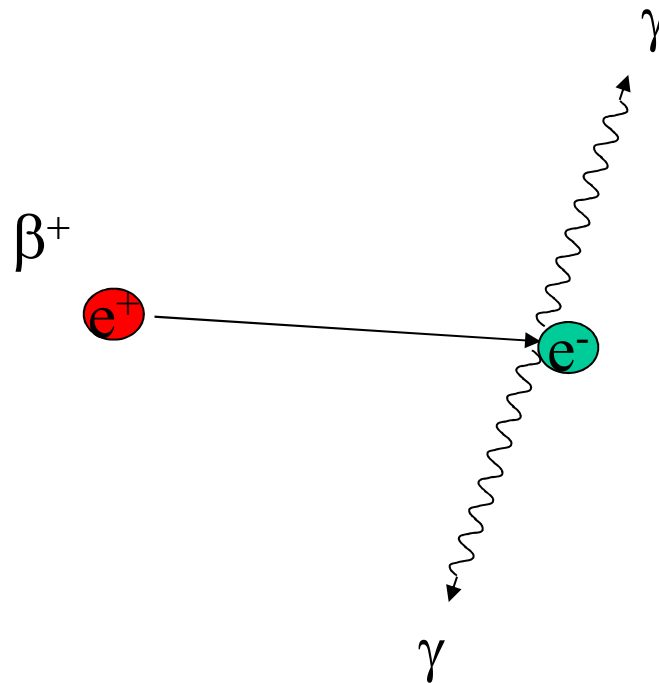
in Gewebe **0,01-0,1 mm**

in Gewebe **cm**



β^+ -Strahlung

Annihilation



Medizinische Anwendung: Positron Emissionstomographie (PET)

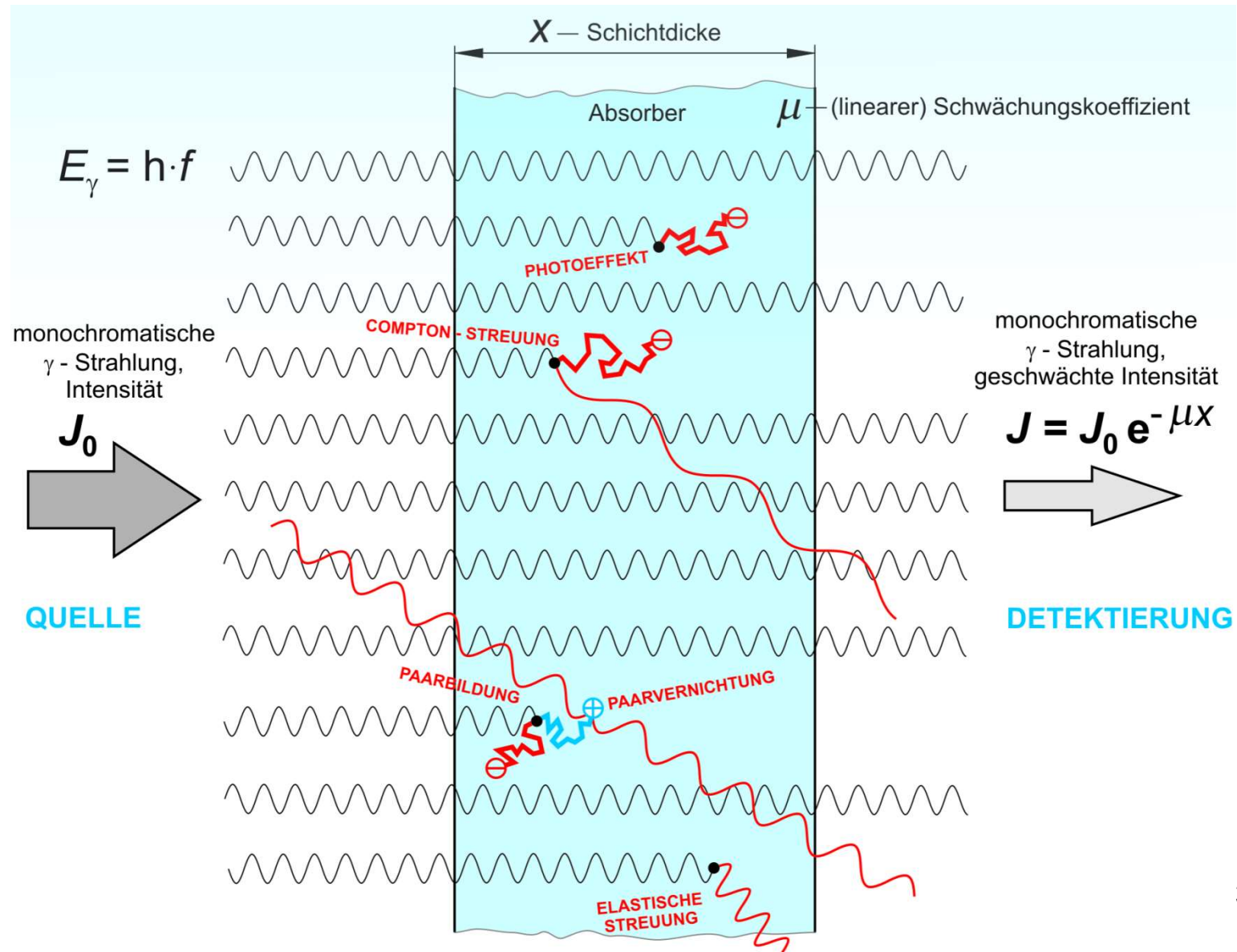
Einsteinsche Formel:

$$E=mc^2$$

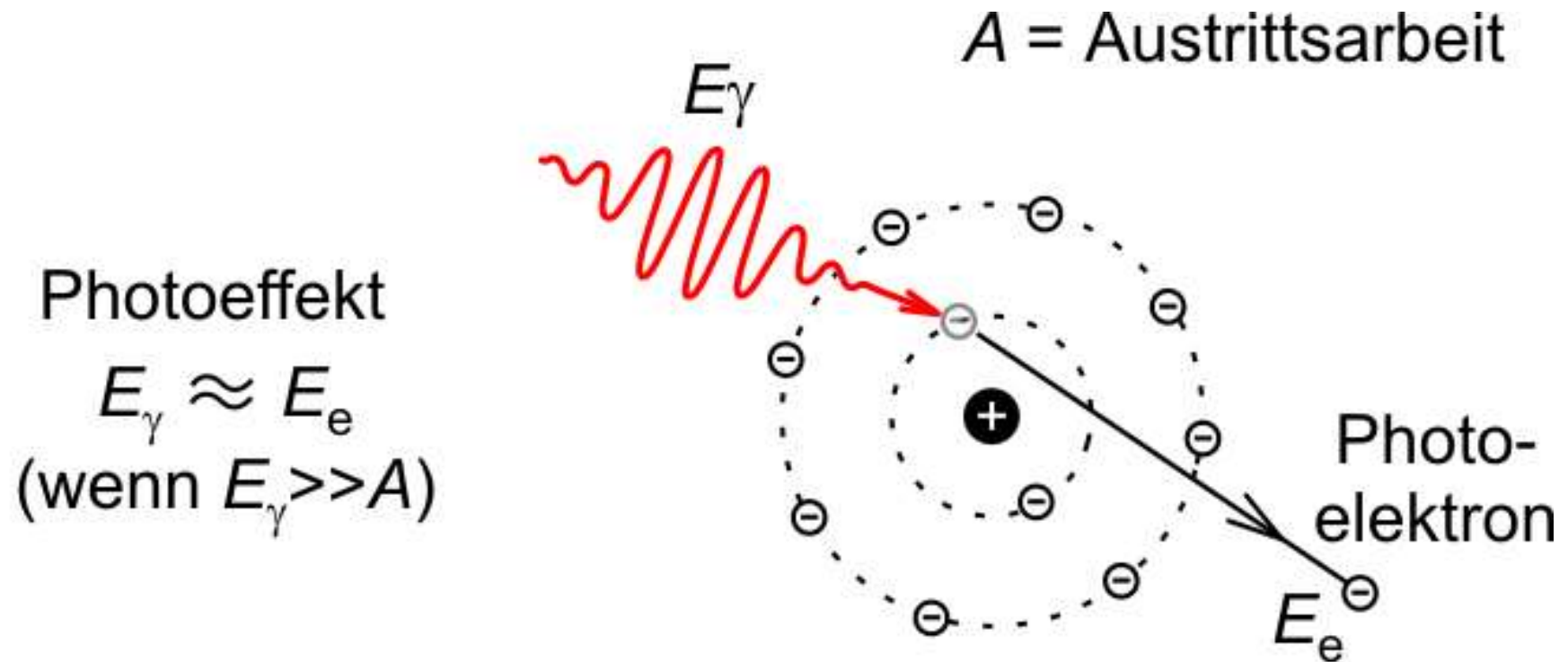
Energie - Masse Equivalenz !

~~Umwandlung~~

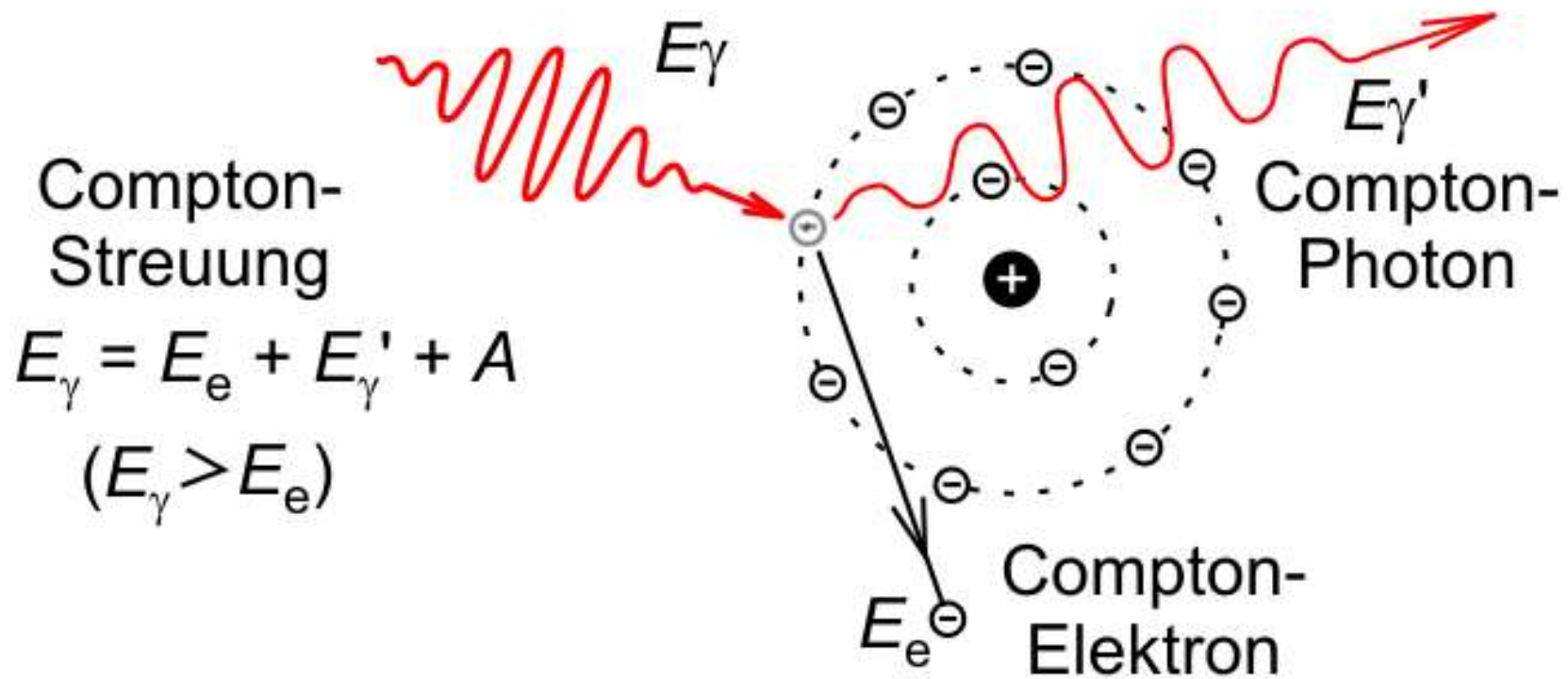
Wechselwirkung der Röntgen- und Gamma-Strahlung mit der Materie



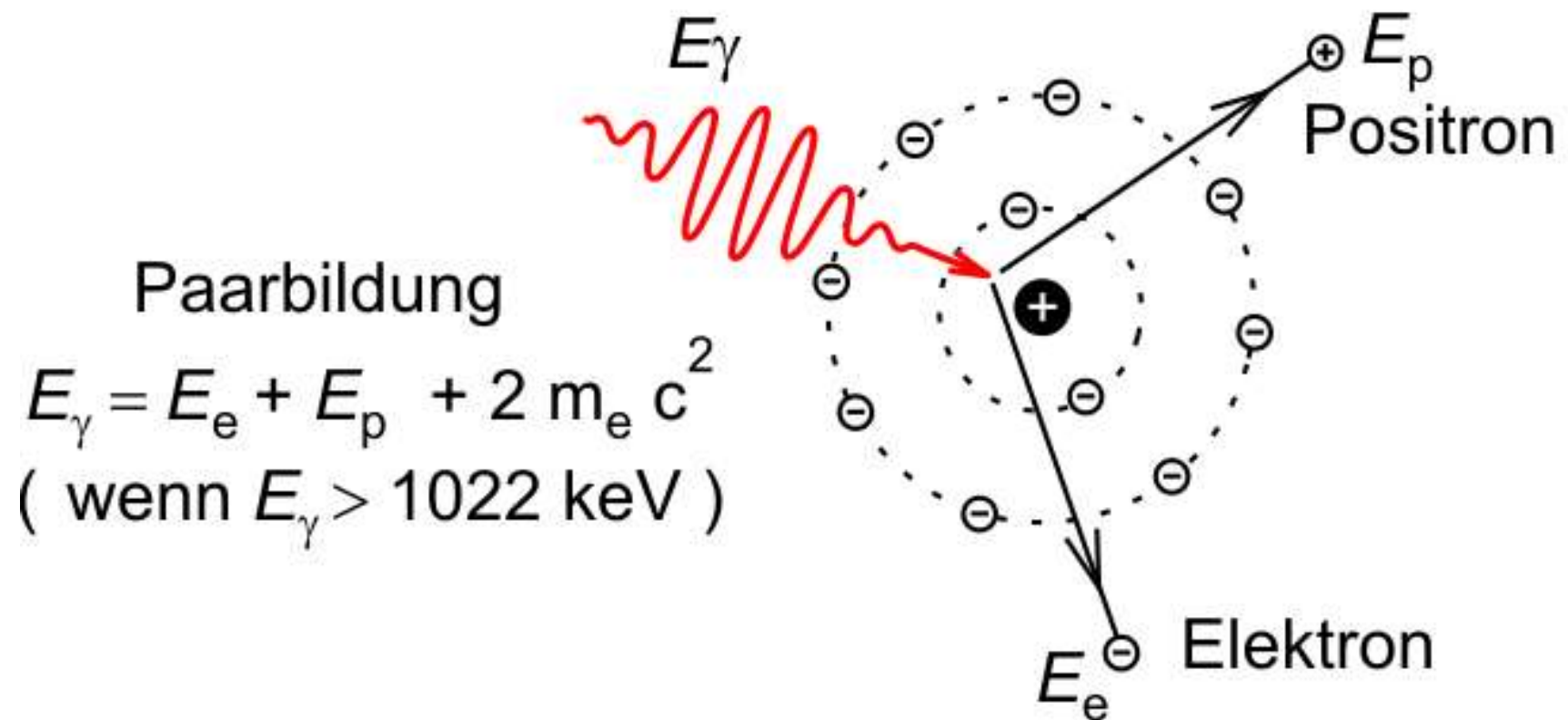
Photoelektrischer Effekt



Compton Effekt

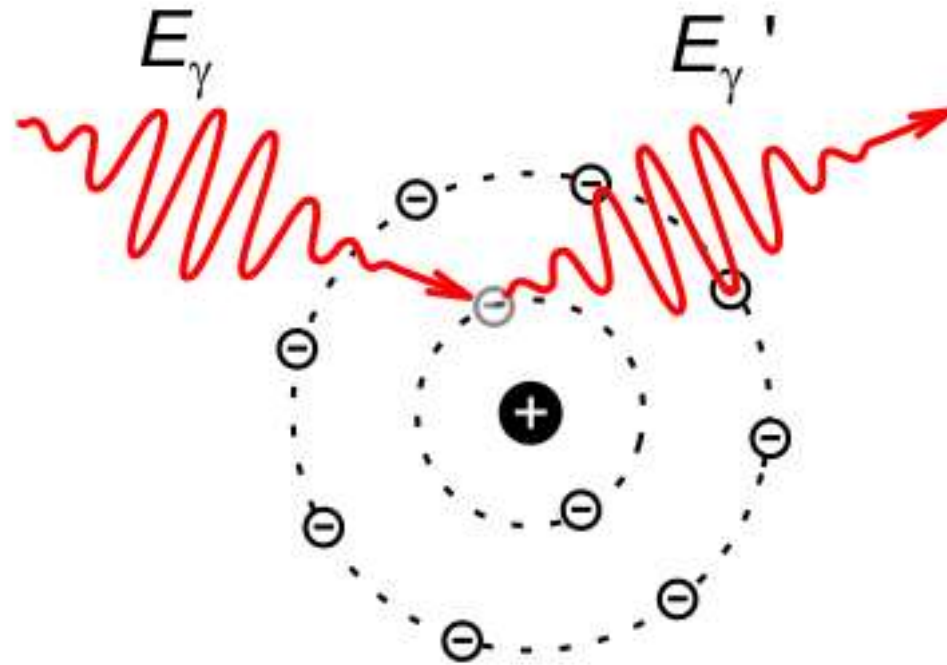


Paarbildung

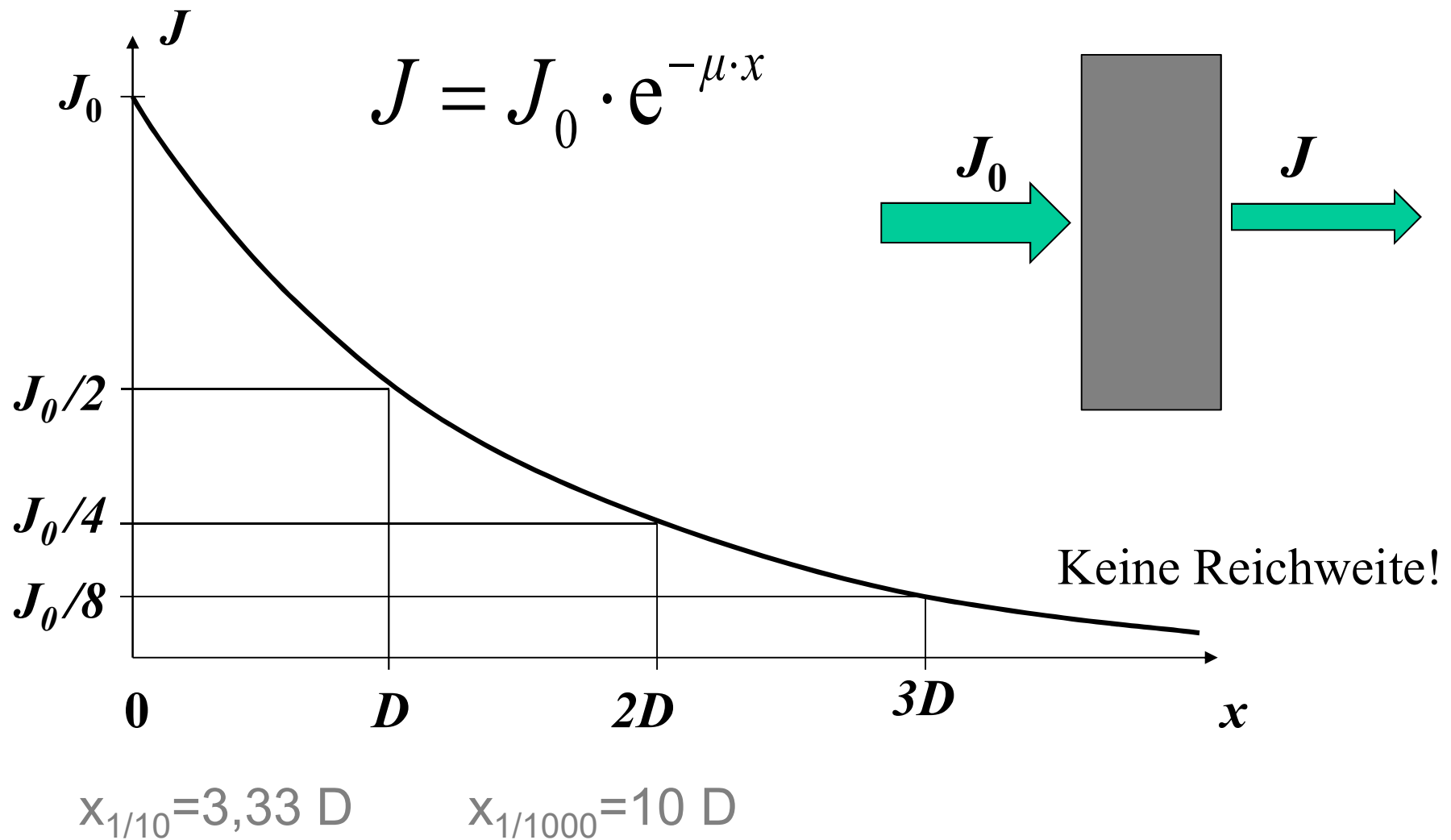


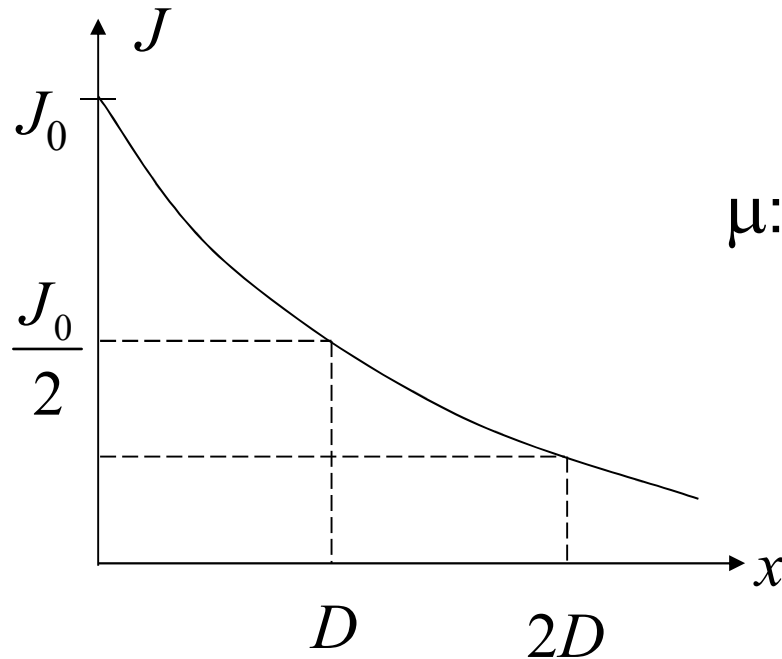
Elastische Streuung

$$E_{\gamma} = E_{\gamma}'$$



Schwächung der γ - und Röntgenstrahlung





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

μ : (linearer) Schwächungskoeffizient

Maßeinheit: 1/m, 1/cm

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

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

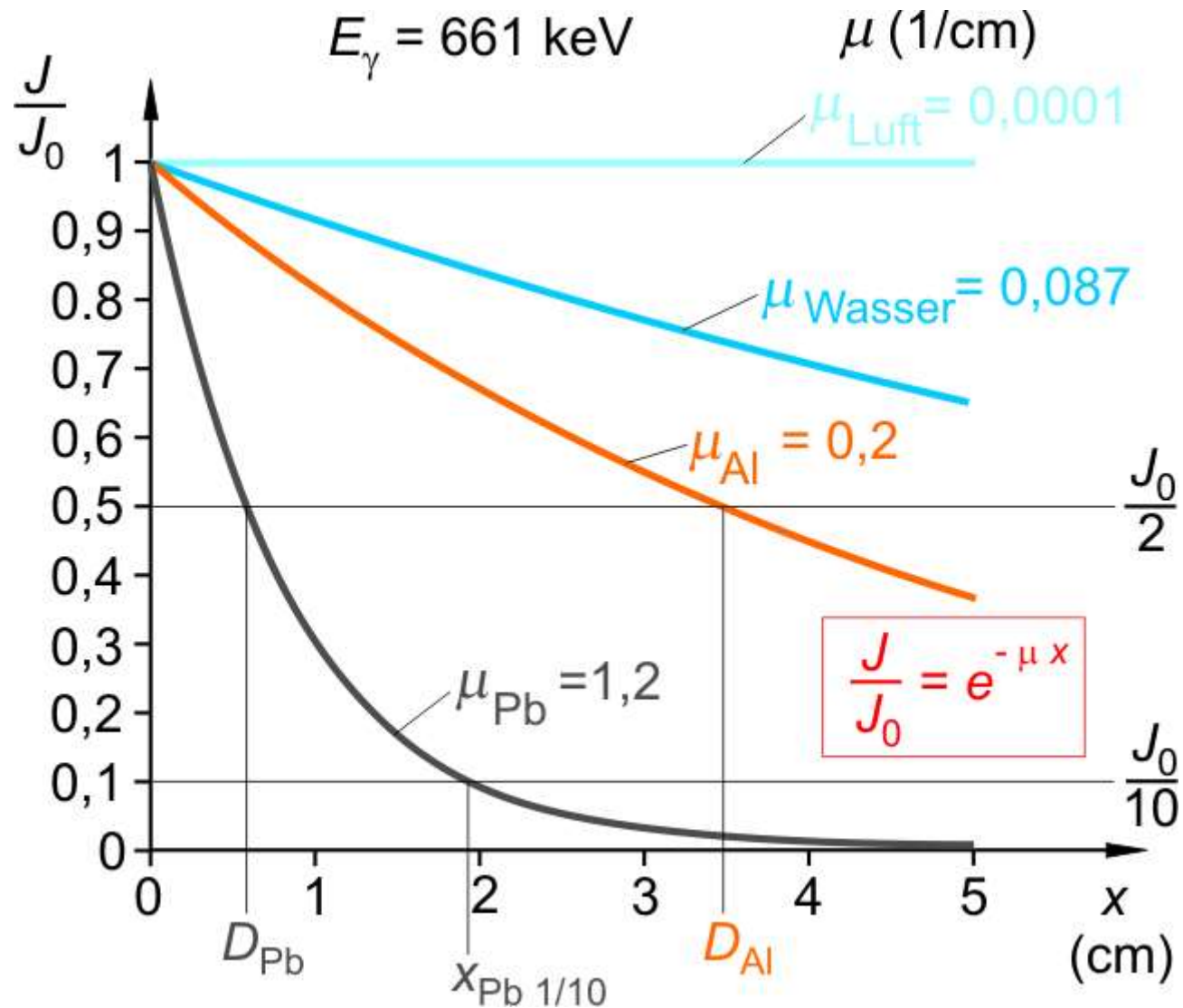
$$\mu(\text{Stoffart, Dichte, Energie der Strahlung}) = \mu(\text{Stoffart}, \rho, E_{\text{foton}}) \sim \rho$$

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

Massenschwächungskoeffizient

Maßeinheit: cm^2/g

Schwächung der γ - und Röntgenstrahlung



Massenschwächungs-
koeffizient:

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

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

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

