

Physik für Studierende der Medizin im 1. Fachsemester

(PFMF-V); 09410100

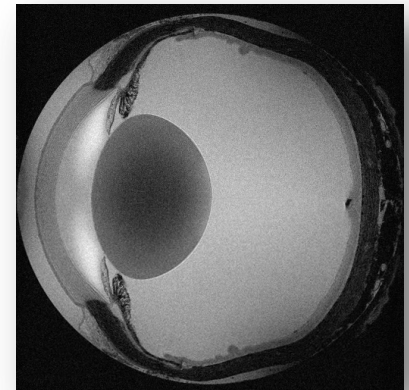
Dienstag mit Freitag 8.15-9.00

Atomphysik - Teil 3

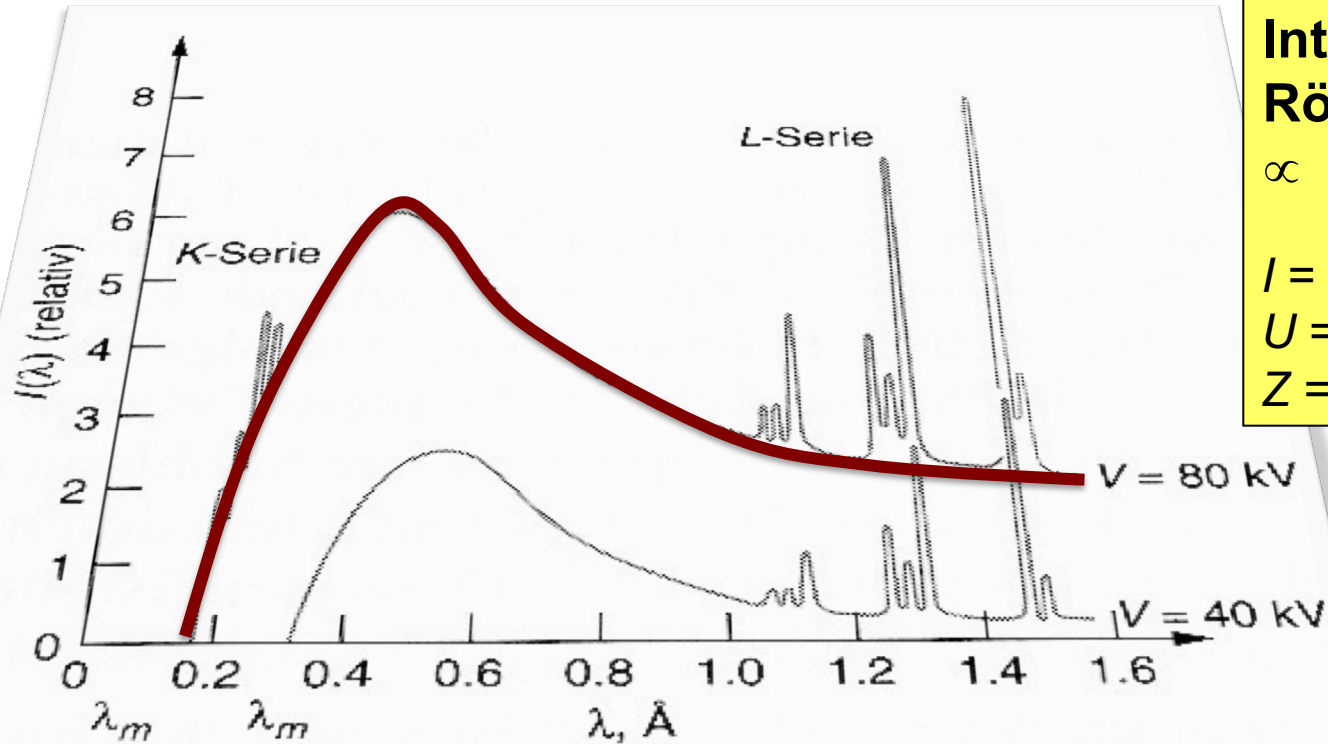
Atommodell, Atomspektren, Röntgenstrahlung
Kernphysik, Radioaktivität, Dosimetrie



Dr. Simon Moser
Lehrstuhl für Exp. Physik IV,
Universität Würzburg
simon.moser@physik.uni-wuerzburg.de



Wdh. Spektrum der Röntgenstrahlung



Intensität der
Röntgenstrahlung
 $\propto ZIU^2$

I = Strom

U = Spannung

Z = Ordnungszahl

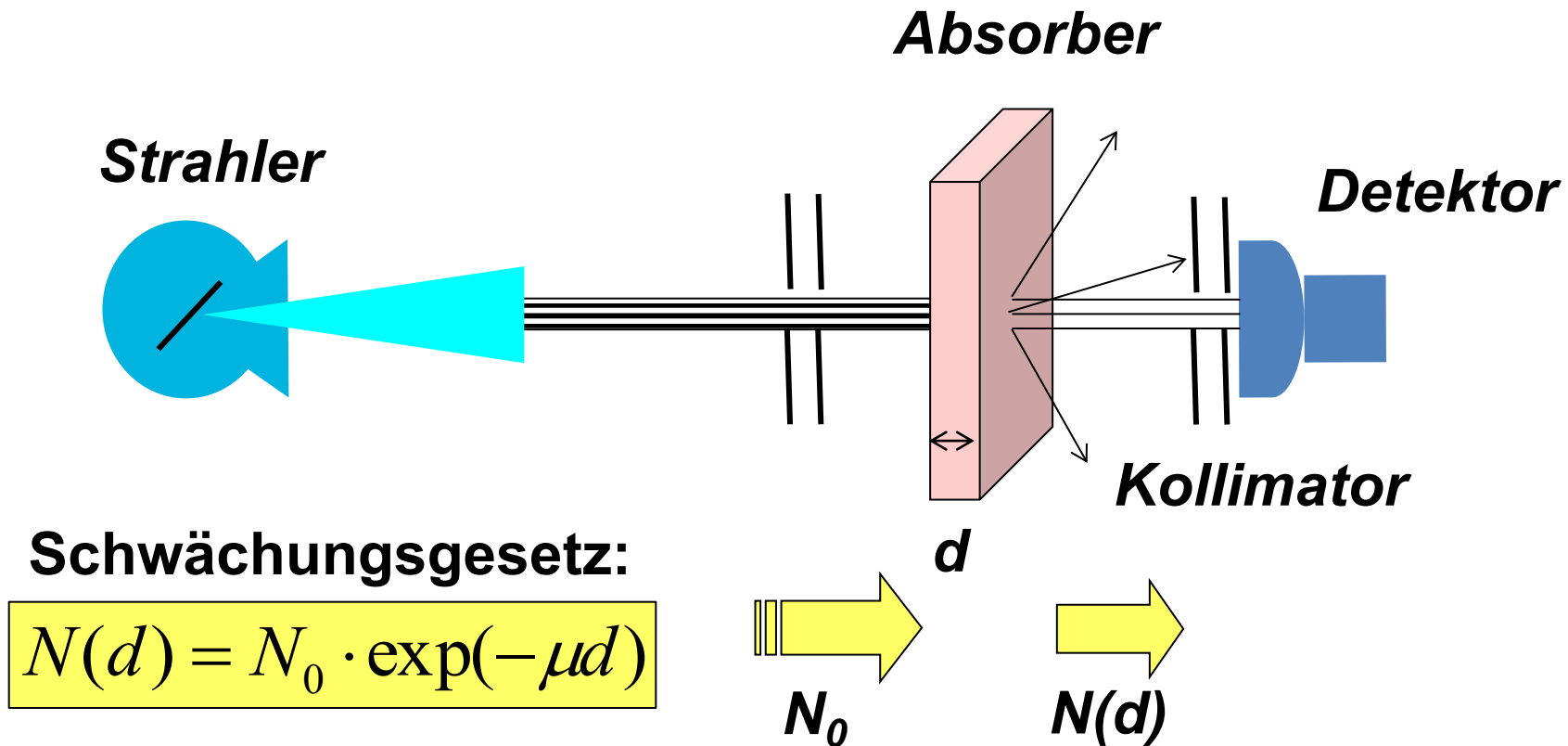
Charakteristika

- (1) Breites Spektrum „**Bremsstrahlungskontinuum**“
- (2) Spannungsabhängige **Grenzwellenlänge**
- (3) Überlagerung des Kontinuums durch Serien von **scharfen Linien**
- (4) Wellenlänge der scharfen Linien ist **unabhängig** von der Beschleunigungsspannung
- (5) Scharfe Übergänge entsprechen atomaren Niveaus (→ **Atommodelle**)

Röntgenstrahlen: Schwächung

Zentrale Frage:

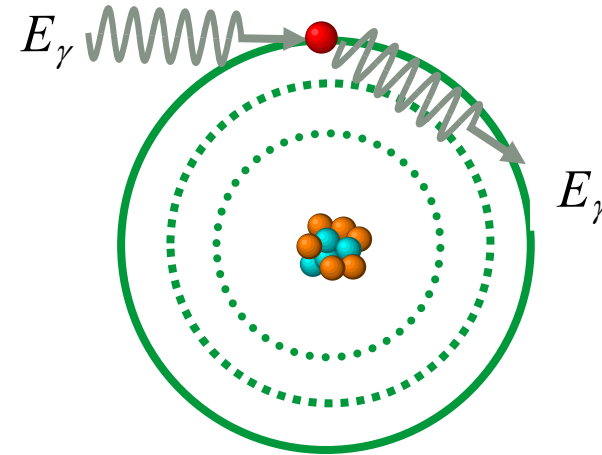
Was sind die genauen Mechanismen, die zur Abschwächung der Röntgenstrahlung in einem Gewebe/einer Probe führen?



AG: Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

a) Klassische Streuung

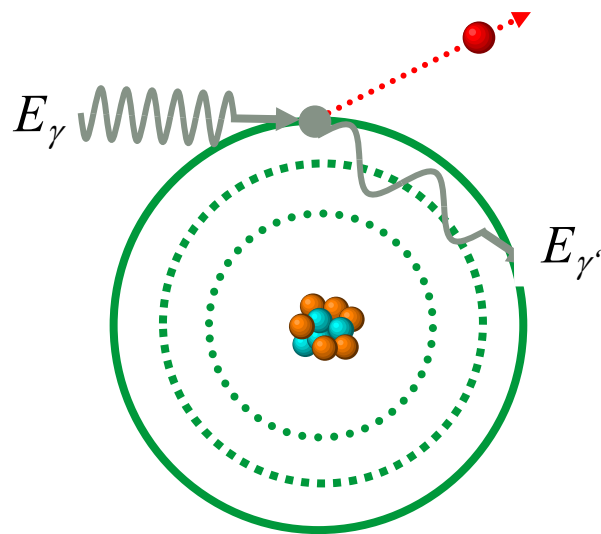
(kohärente Streuung,
Thompson Streuung)



- **Richtungsänderungen ohne Energieverlust**
- Überwiegt im langwelligen Strahlenbereich
- Atomhülle bleibt unverändert
- nur unterhalb von 20 kV von Bedeutung

AG: Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

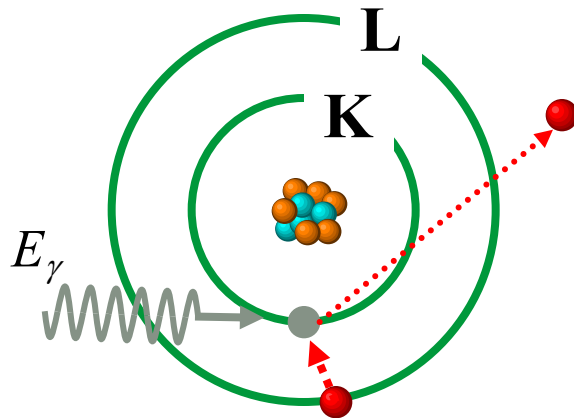
b) Comptoneffekt (inkohärente Streuung)



- **Richtungsänderungen mit Energieverlust**
- Überwiegt im kurzwelligen Strahlenbereich
- Hüllenelektron wird frei
- Comptoneffekt ist ab ca 30 kV der dominierende WW-Prozess
- Liefert den größten Beitrag zur Energiedosis in biol. Gewebe
- Liefert Weichteilkontrast in Röntgenbildern

AG: Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

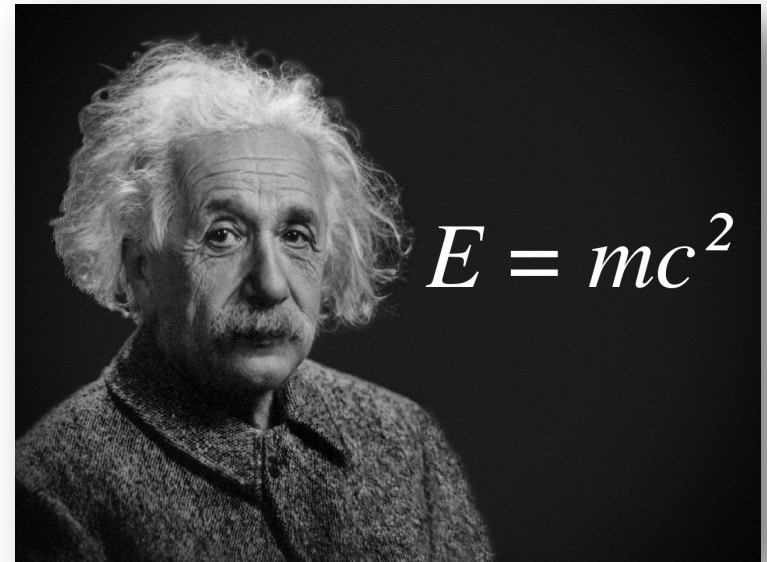
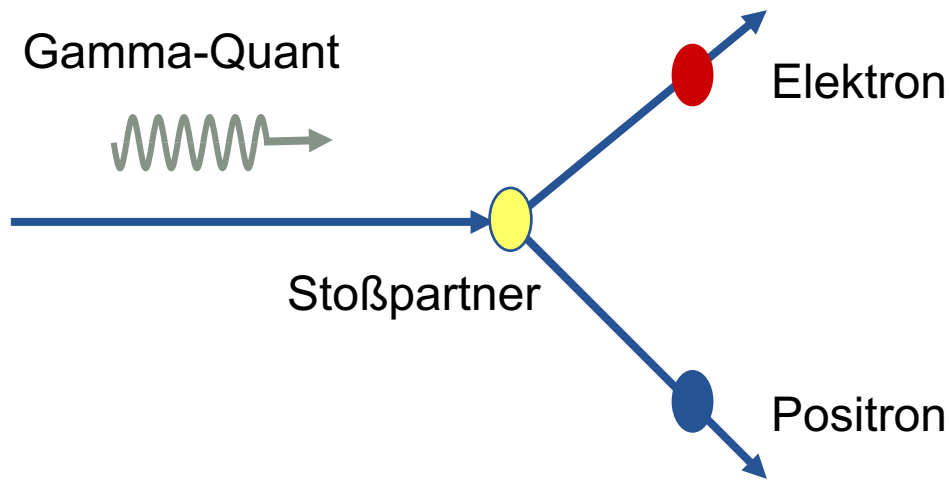
c) Photoabsorption (Photoionisation)



- Gesamtenergie wird auf Hüllenelektron übertragen
- Bremsstrahlenerzeugung
- Einfallendes Photon wird absorbiert und aus einer inneren Schale (K, L) wird ein Photoelektron frei !!!
- Photonenenergie muss größer als die Bindungsenergie des gestoßenen Elektrons sein !!!!

AG: Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

d) Paarbildung

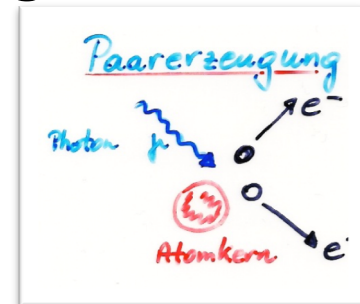


- Wenn die Energie eines Gammaquants größer ist als die Ruheenergie eines Elektronen-Positronen-Paares, kann sich aus diesem Quant ein solches Paar bilden (bei Vorhandensein eines weiteren Teilchens)
- Die Mindestenergie eines Quants für einen solchen Vorgang beträgt $E_{\min} = 2 \times 0.511 \text{ MeV}$

Photonenwechselwirkung: Paarerzeugung

1) Ein Photon kann Materie erzeugen: Paarerzeugung

- Erzeugung eines Elektron-Positron-Paares
- Photon verschwindet während dieses Prozesses
- Erinnerung: $E = m c^2$
- **Achtung 1:** Ladungserhaltung notwendig!
- **Achtung 2:** Paarerzeugung kommt im Vakuum nicht vor!
(wegen Impulserhaltung!)



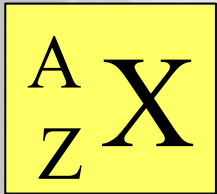
2) Umkehrprozess = Paarvernichtung = Annihilation

Wenn ein Elektron mit einem Positron zusammenstößt, dann vernichten sich die beiden Teilchen gegenseitig & ihre Energie/Masse erscheint in Form von EM-Energie!



Positronen Emissions Tomographie: PET

Es gibt radioaktive Atomkerne, die **Positronen** (= Antiteilchen des Elektrons) emittieren



X = Bezeichnung des Elements

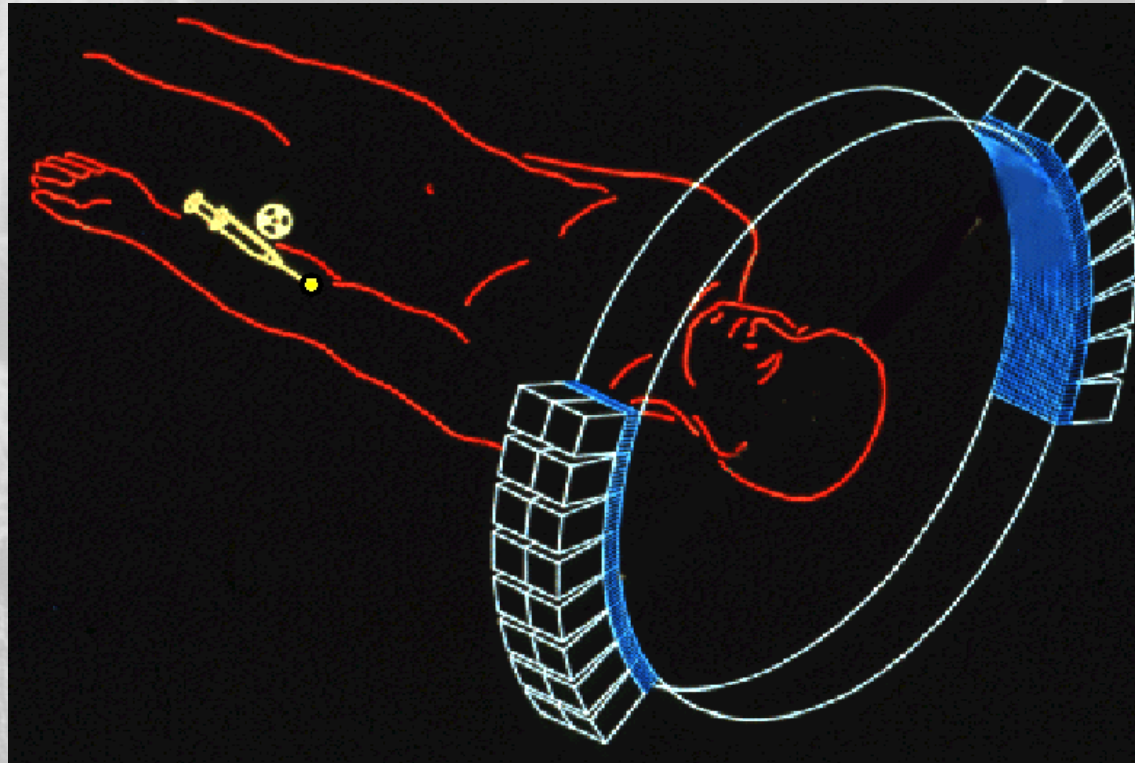
A = Massenzahl = Anzahl aller Protonen & Neutronen im Kern

Z = Ordnungszahl = Zahl der Protonen

Beispiel Kohlenstoff:



Isotop (emittiert Positronen):

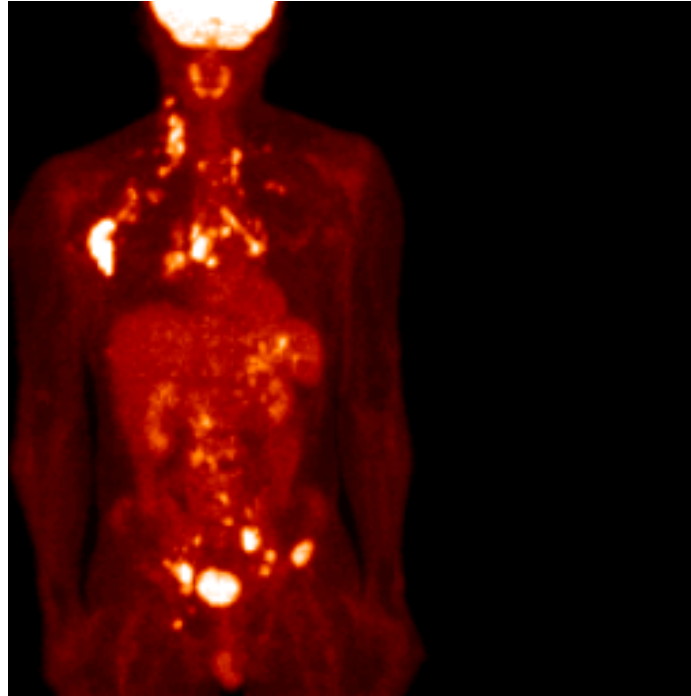


Prinzip eines PET-Scanners

Positronen Emissions Tomographie: PET

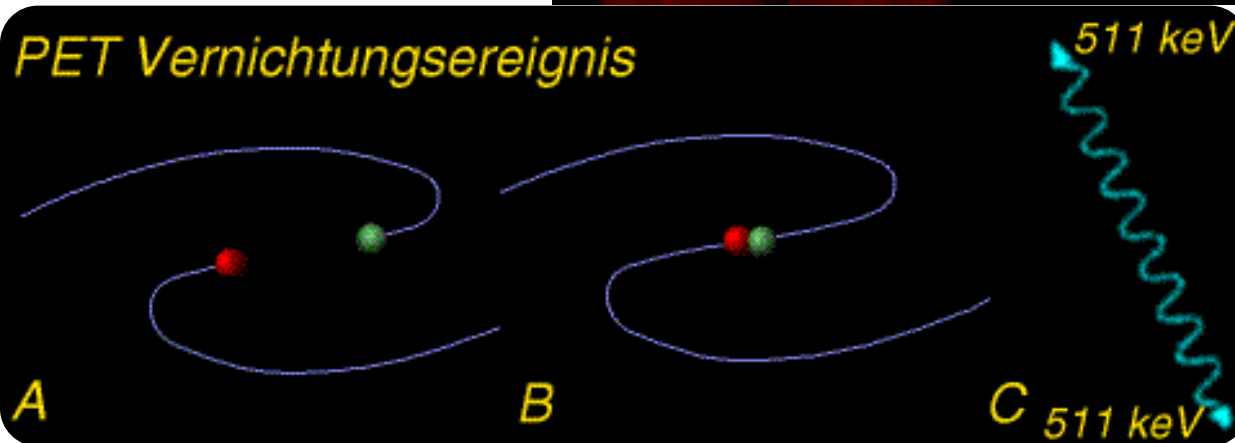


Positronen Emissions Tomographie: PET



Erhaltungssätze:

- Energieerhaltung
- Impulserhaltung



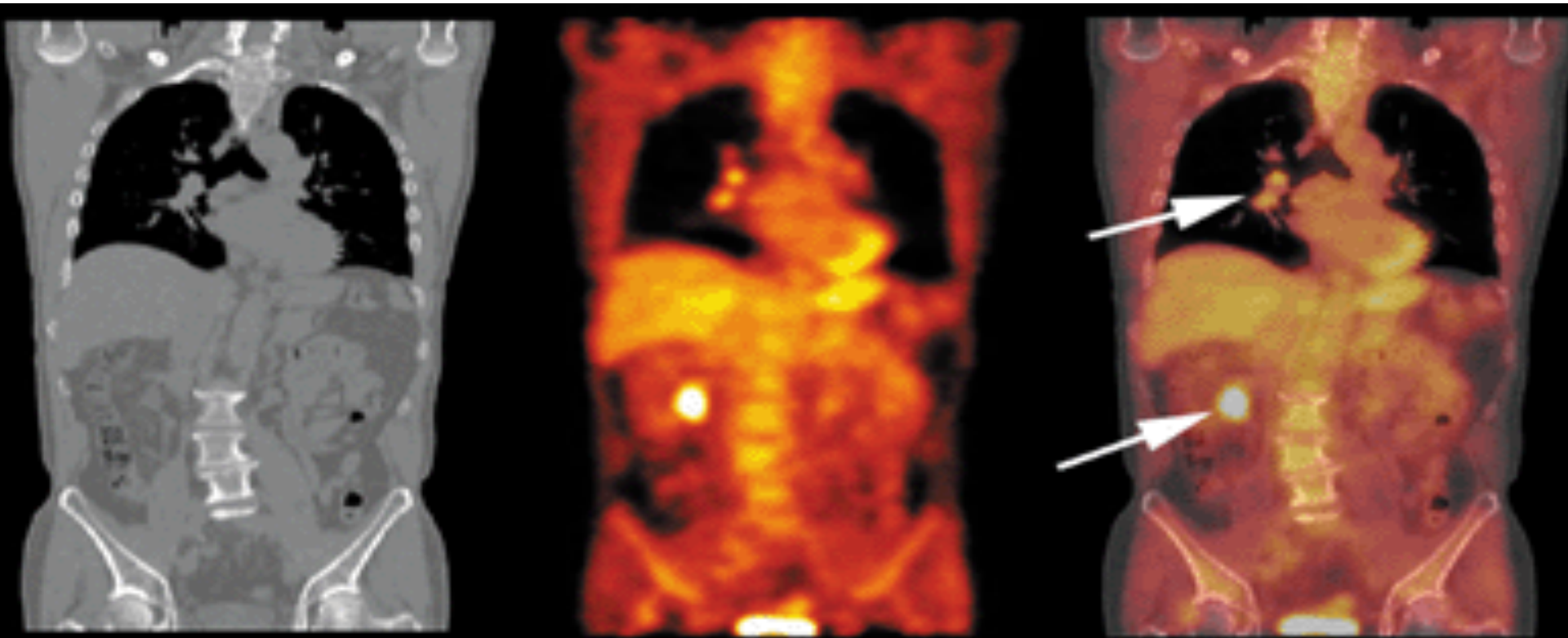
Positronen Emissions Tomographie: PET

Integrated PET-CT zur Tumor-Bildgebung

CT: Anatomie

PET: Metabolische Aktivität

Image Fusion



Wdh.: Röntgenstrahlen: Schwächung

Schwächungsgesetz:

$$N(d) = N_0 \cdot \exp(-\mu d)$$

$$T(d) = \frac{N(d)}{N_0} = \exp(-\mu d)$$

$N(d)$	= Anzahl der registrierten Quanten
N_0	= Anzahl der einfallenden Quanten
d	= Dicke des Absorbers
μ	= Schwächungskoeffizient [1/m]
T	= Transmission

Halbwertsdicke

$$d_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

e-tel-Dicke

$$d_{\frac{1}{e}} = \frac{1}{\mu}$$

Halbwertsdicke bzw. e-tel-Dicke ist die Schichtdicke d , bei der die Transmission auf die Hälfte bzw. ein e-tel gefallen ist

e = 2.71

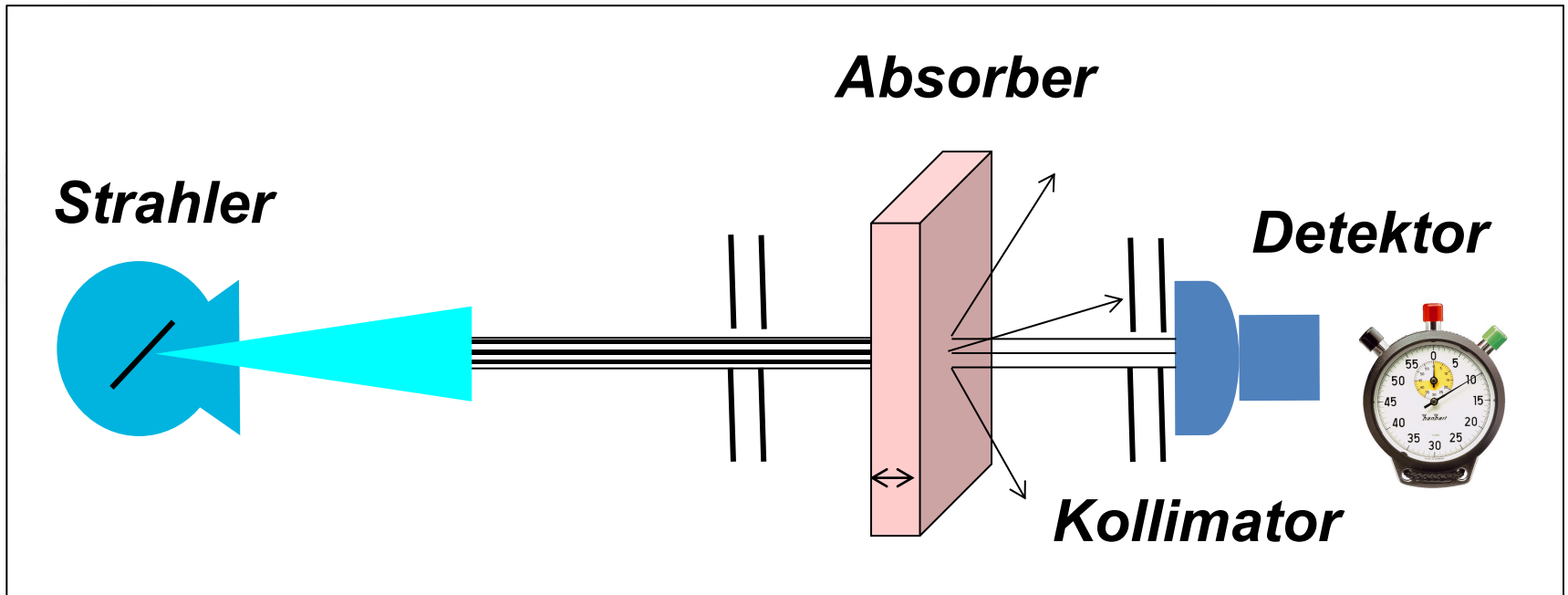
AG: Schwächungsgesetz

Messungen an Aluminium

Messreihe:

$d[m]$	$N(d)$	$N(d) [1/min]$	$\ln(N(d))$
0,005	236	60,2	60,2
0,01	224	56,2	56,2
0,02	181	41,9	41,9
0,025	191	45,2	45,2
0,03	151	31,9	31,9
0,035	183	42,5	42,5

Absorptionsgesetz - Aluminium



AG: Der Atomkern

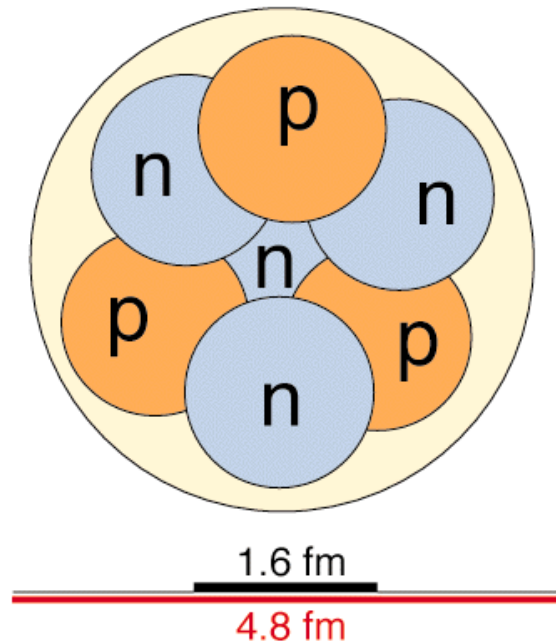
Aufbau des Atomkerns

- Gesamte positive Ladung & Masse des Atoms ist im Atomkern konzentriert
- Atomkern besteht aus Protonen & Neutronen (Nukleonen)
- Dichte der Kernmaterie: 180 000 Tonnen/mm³
- Zwischen den Nukleonen wirken kurzreichweitige Kernkräfte, die den Kern zusammenhalten (Gluonen)

Kernradius:

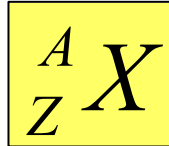
$$r_{Kern} = r_0 \cdot A^{\frac{1}{3}}$$
$$r_0 = 1.21 \text{ fm}$$

A = Massenzahl



AG: Der Atomkern

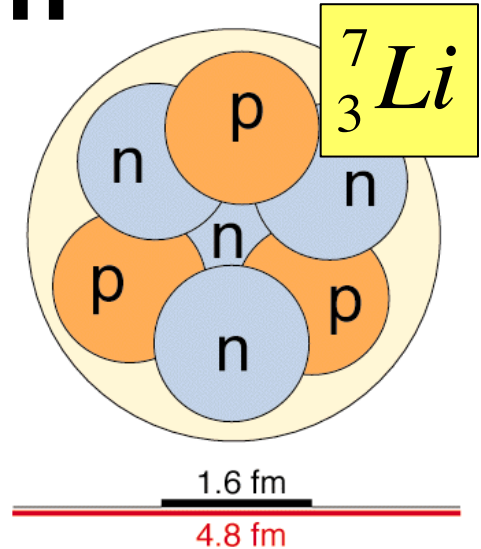
Nuklid X (Atomkern)



Z = Anzahl der Protonen/**Ordnungszahl** des Atoms
im Periodensystem

N = Anzahl der Neutronen

A = **Z+N** = Nukleonenzahl (**Massenzahl**)



I																		VIII							
1,01 H 1																	4,00 He 2								
6,94 Li 3	9,01 Be 4															10,81 B 5	12,01 C 6	14,01 N 7	16,00 O 8	19,00 F 9	20,18 Ne 10				
22,99 Na 11	24,31 Mg 12	III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a			I a	II a	26,98 Al 13	28,09 Si 14	30,97 P 15	32,06 S 16	35,45 Cl 17	39,95 Ar 18								
39,10 K 19	40,08 Ca 20	44,96 Sc 21	47,87 Ti 22	50,94 V 23	52,00 Cr 24	54,94 Mn 25	55,85 Fe 26	58,93 Co 27	58,69 Ni 28	63,55 Cu 29	65,39 Zn 30	69,72 Ga 31	72,61 Ge 32	74,92 As 33	78,96 Se 34	79,90 Br 35	83,8 Kr 36								

Atommasse in u (molare Masse)

Elementsymbol

Ordnungszahl

- Wasserstoff
- radioaktiv
- Erdalkalimetalle
- Metalle
- Halbmetalle
- Edelgase
- Nichtmetalle
- Alkalimetalle

AG: Der Atomkern

Legend for element categories:

- Wasserstoff (Hydrogen)
- radioaktiv (radioactive)
- Erdalkalimetalle (alkaline earth metals)
- Metalle (metals)
- Halbmetalle (metalloids)
- Edelgase (noble gases)
- Nichtmetalle (non-metals)
- Alkalimetalle (alkali metals)

Callout for Aluminum (Al):

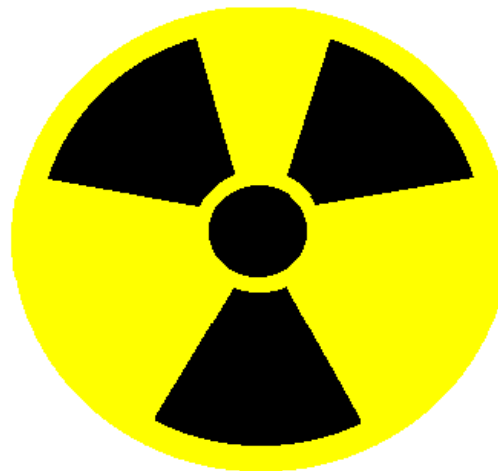
- Atommasse in u (molare Masse): 26,98
- Elementsymbol: Al
- Ordnungszahl: 13

I																					VIII
1,01 H 1	II												20,18 He 2								
6,94 Li 3	9,01 Be 4											10,81 B 5	12,01 C 6	14,01 N 7	16,00 O 8	19,00 F 9	20,18 Ne 10				
22,99 Na 11	24,31 Mg 12	III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a		I a	II a	26,98 Al 13	28,09 Si 14	30,97 P 15	32,06 S 16	35,45 Cl 17	39,95 Ar 18					
39,10 K	40,08 Ca	44,96 Sc	47,87 Ti	50,94 V	52,00 Cr	54,94 Mn	55,85 Fe	58,93 Co	58,69 Ni	63,55 Cu	65,39 Zn	69,72 Ga	72,61 Ge	74,92 As	78,96 Se	79,90 Br	83,8 Kr				
I																					VIII
1,01 H 1	II												20,18 He 2								
6,94 Li 3	9,01 Be 4											10,81 B 5	12,01 C 6	14,01 N 7	16,00 O 8	19,00 F 9	20,18 Ne 10				
22,99 Na 11	24,31 Mg 12	III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a		I a	II a	26,98 Al 13	28,09 Si 14	30,97 P 15	32,06 S 16	35,45 Cl 17	39,95 Ar 18					
39,10 K 19	40,08 Ca 20	44,96 Sc 21	47,87 Ti 22	50,94 V 23	52,00 Cr 24	54,94 Mn 25	55,85 Fe 26	58,93 Co 27	58,69 Ni 28	63,55 Cu 29	65,39 Zn 30	69,72 Ga 31	72,61 Ge 32	74,92 As 33	78,96 Se 34	79,90 Br 35	83,8 Kr 36				

AG: Natürliche Radioaktivität

- **Radioaktive Stoffe** senden ohne äußeren Einfluss eine (Teilchen-)Strahlung aus & wandeln sich in stabilere Nuklide um
- Strahlung führt Energie mit sich und ionisiert Moleküle
- Für diese Strahlung hat der Mensch keine Sinnesorgane !
- Alle Atomkerne die eine höhere Nukleonenzahl als 210 haben sind instabil und zerfallen

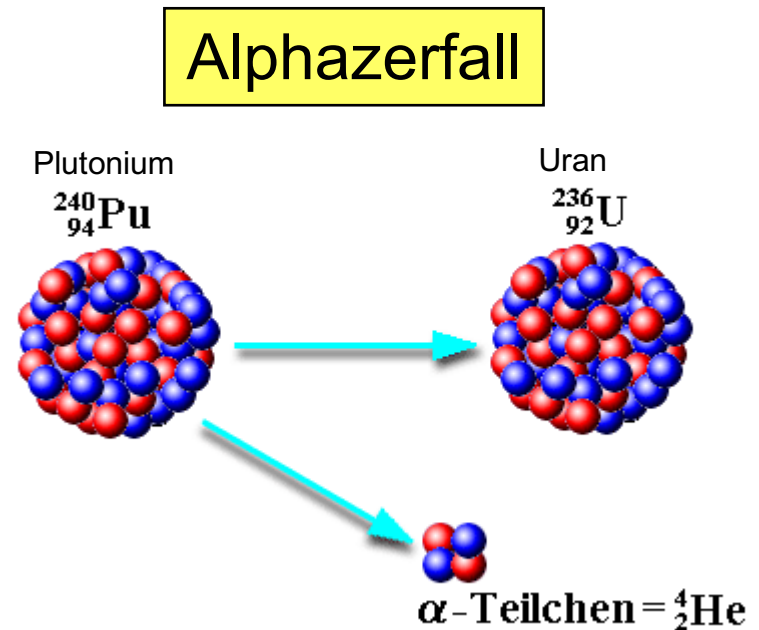
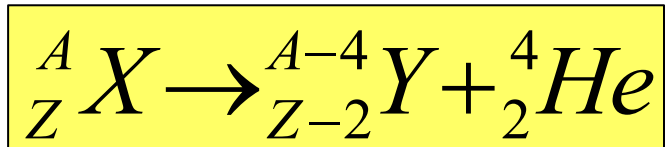
Das internationale Zeichen für
radioaktive Strahlung



AG: Der Atomkern

Alphastrahlung

- α -Strahlung besteht aus zweifach positiv geladenen Heliumkernen
- Geschwindigkeit der Teilchen: 10^7 m/s

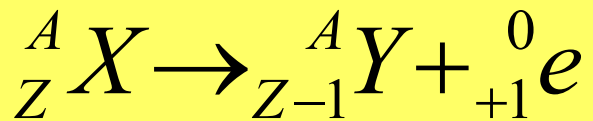
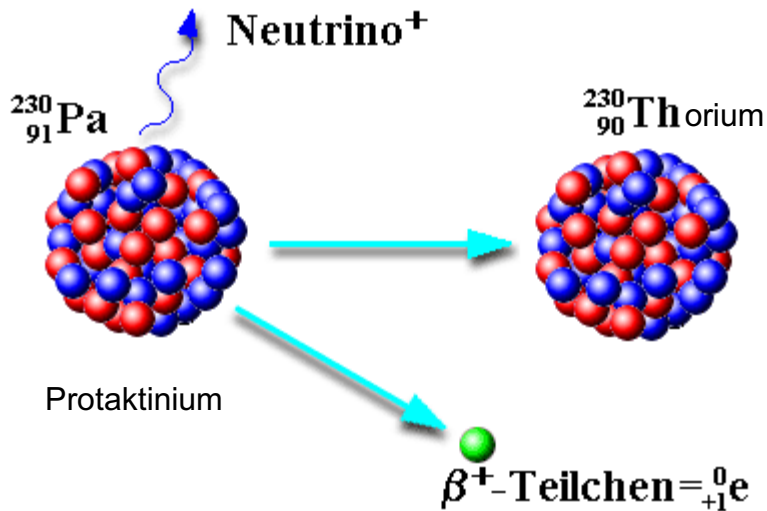


AG: Der Atomkern

Betastrahlung

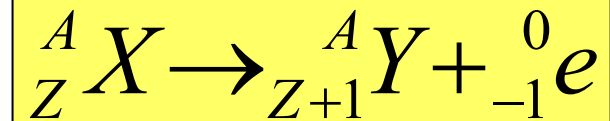
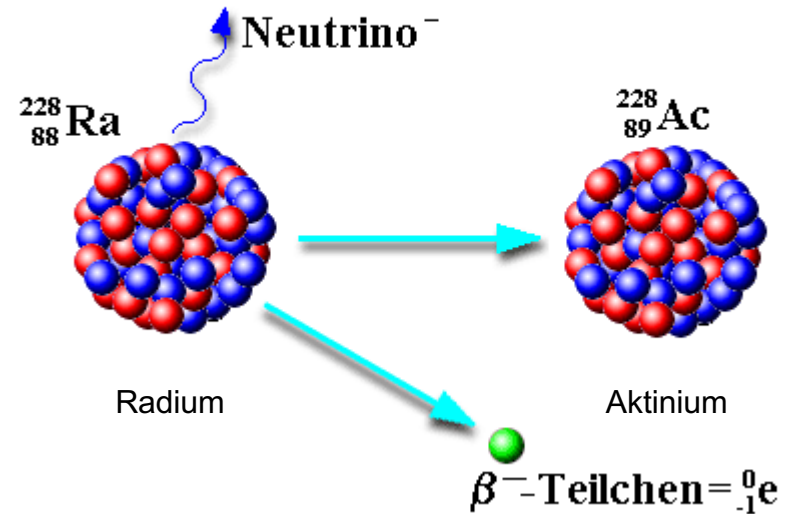
- β -Strahlung besteht aus Elektronen (e^-) oder Positronen (e^+)

Beta-plus-Zerfall



Zerfall eines Protons in Neutron und Positron

Beta-minus-Zerfall



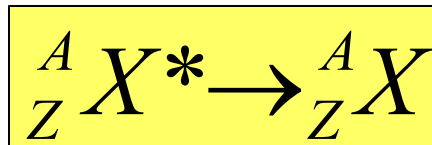
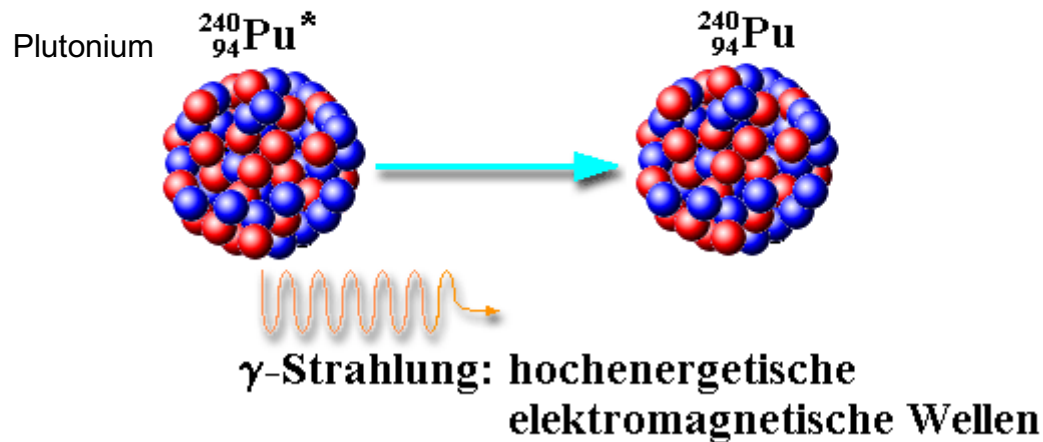
Zerfall eines Neutrons in Proton & Elektron

AG: Der Atomkern

Gammastrahlung

- Gammastrahlung ist energiereiche Photonenstrahlung
- Kern geht von angeregten Zustand in Grundzustand über

Gammazerfall



AG: Reichweite radioaktiver Strahlung

Alpha-Strahlung (α)

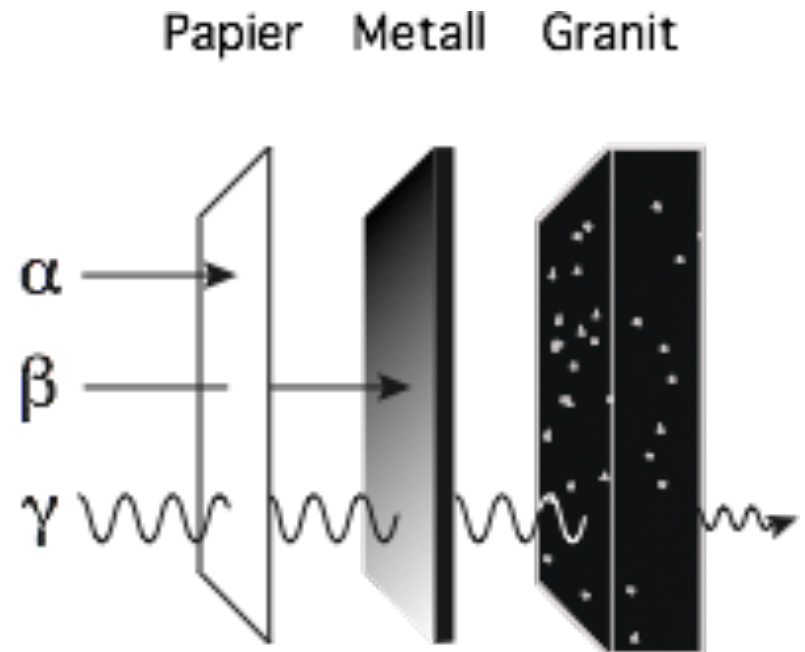
- Wenige cm in Luft
- Abschirmung durch Blatt Papier, Kleidung
- Bei Verschlucken maximale Ionisierung (sehr gefährlich!)

Beta-Strahlung (β)

- Bis 1 m in Luft
- Abschirmung durch Aluminiumblech

Gamma-Strahlung (γ)

- Sehr weit in Luft
- Abschirmung durch Blei (mehrere cm)



AG: Reichweite radioaktiver Strahlung

Reichweite verschiedener Strahlungstypen

Energie/ MeV	R/cm in Luft			R/mm in Wasser oder Weichgewebe		
	Beta-	Beta+	Alpha	Beta-	Beta+	Alpha
0,1	12	0,13	0,12	0,14	0,0016	0,0014
0,2	33	0,25	0,18	0,40	0,0030	0,0022
0,5	140	0,80	0,32	1,7	0,0098	0,0039
1,0	330	2,3	0,50	4,0	0,028	0,0061
2,0	790	7,0	1,0	9,5	0,086	0,012
5,0	2100	33	3,2	25	0,4	0,039
10	4150	120	9,5	50	1,47	0,12
20	8300	400	32	100	4,9	0,39
50		2000	160	250	24	1,9
100		6500	550	400	78	6,6

Reichweite von Alpha- und Beta-Strahlen in Luft und Wasser

AG: Radioaktiver Zerfall

Zerfallsgesetz:

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$



$N(t)$	= Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne
N_0	= Ursprüngliche Anzahl der Kerne
t	= Zeit
λ	= Zerfallskonstante [1/s]

Halbwertszeit

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

e-tel-Zeit

$$t_{\frac{1}{e}} = \frac{1}{\lambda}$$

Halbwertszeit bzw. **e-tel-Zeit** ist die Zeit t , bei der die Anzahl der Kerne, die ursprünglich vorhanden waren, auf die Hälfte bzw. ein e-tel gefallen ist

AG: Radioaktiver Zerfall

Aktivität A

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \cdot N(t) = A_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

= Anzahl radioaktiver Zerfälle pro Zeiteinheit

Einheiten:

1 *Becquerel* [Bq] = 1 Zerfall/s

1 *Curie* [Ci] = $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq



* C-14-Methode

AG: Radioaktiver Zerfall

Aktivität: Anzahl zerfallender Kerne pro Zeit

$$A = -dN/dt$$

$$A = \lambda \cdot N$$

N: Anzahl Kerne

λ : Zerfallskonstante

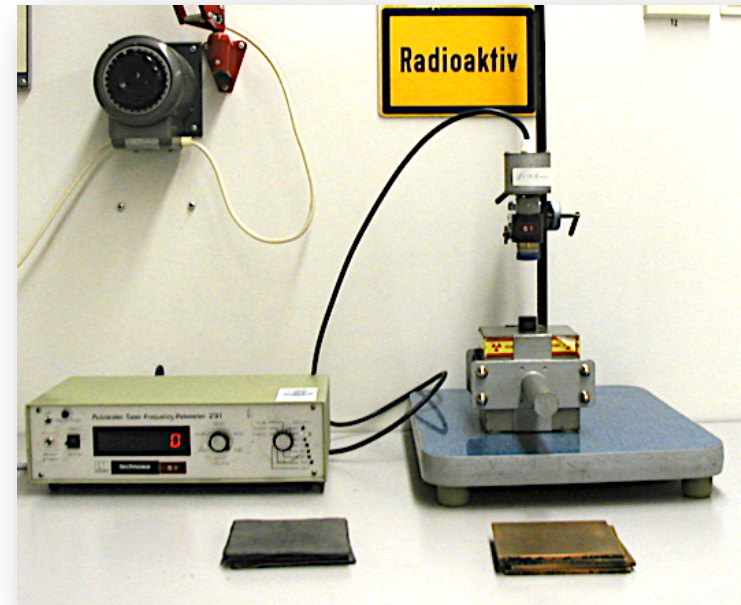
$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$



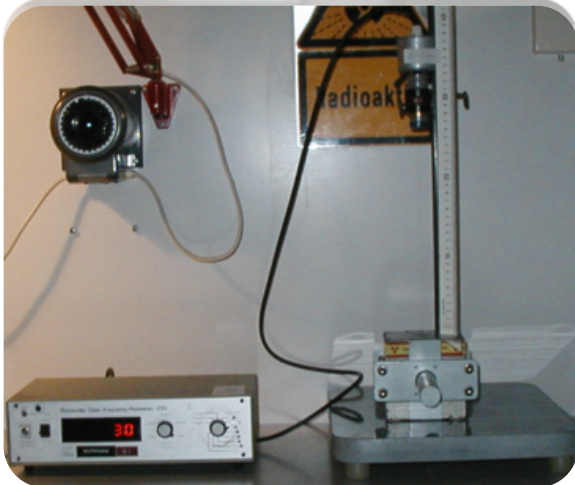
Halbwertszeit: $t_{1/2} = 30,2$ Jahre

$$A_0 = 3.70 \text{ MBq (20.6.1966)}$$

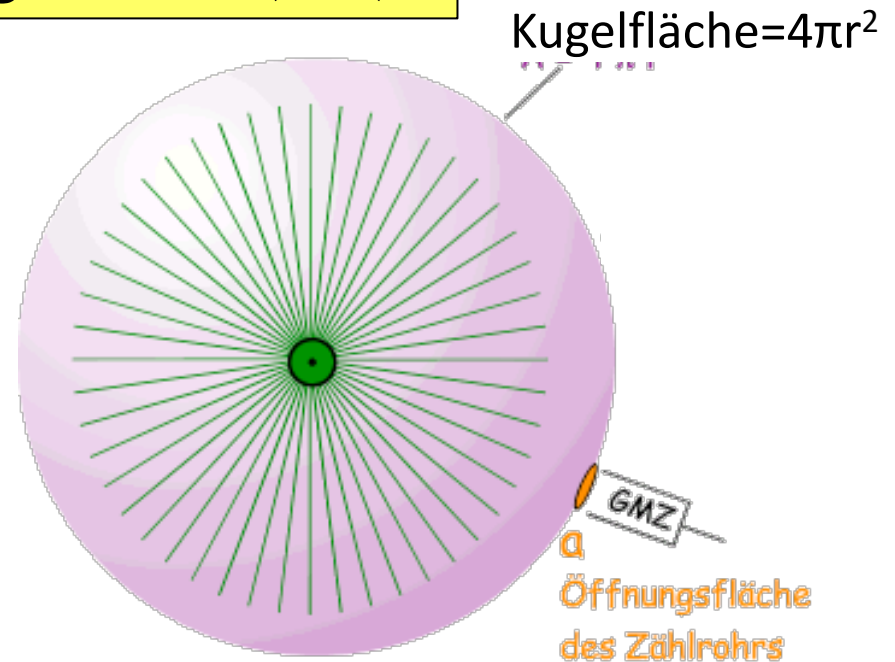


AG: Radioaktiver Zerfall

Abstandsquadrat-Gesetz: Verhältnis der gemessenen Aktivitäten



$$\frac{A_{gem2}}{A_{gem1}} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2$$



AG: Radioaktiver Zerfall

Messung der Aktivität eines Präparats mit einem Zählrohr

$$A_{\text{Real}} = A_{\text{gemessen}} \left(\frac{4\pi r^2}{F_Z} \right)$$

A_{Real} = Echte Aktivität der Probe

A_{gemessen} = Aktivität im Abstand „ r “

F_Z = Fläche des Zählrohrs

