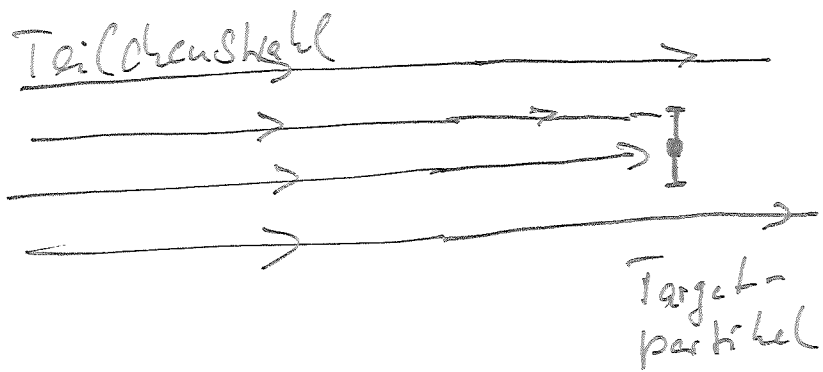


5. Wechselwirkung von Teilchen und EM Strahlung mit Materie

5.1 Wirkungsquerschnitt

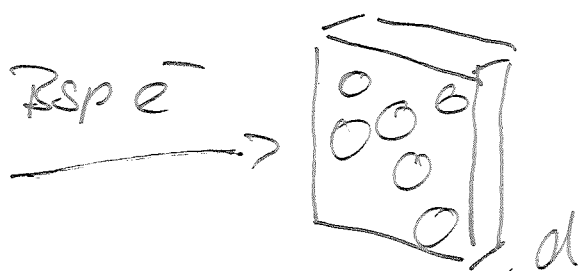


Definition:

Jedem Zielpartikel wird eine Fläche σ als gedachte "Zielscheibe" zugeordnet. Dessen Größe wurde gewählt, daß die Reaktion stattfindet, wenn einfallendes Teilchen die Scheibe trifft.

"Wirksame" Querschnittsfläche eines Zielpartikels

σ [cm^2] Einheit 1 barn = 10^{-24}cm^2
engl. I'dion "as big as a barn"



Wahrscheinlichkeit für Reaktion eines Teilchens im Target der Dichte

$$P = \frac{N_t \sigma}{A}$$

N_t : Zahl der Targetpartikel

A : Fläche

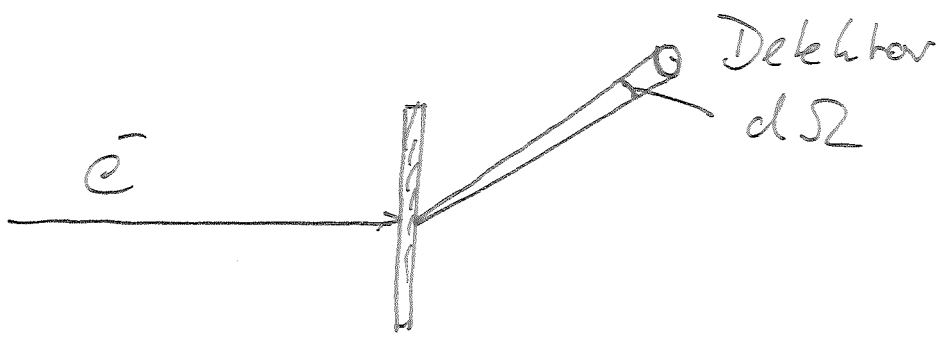
d : Dicke (Länge)

(2)

Reaktionsrate

$$R = \dot{N} \cdot P = \dot{N}_e \cdot \frac{N_t}{A} \sigma$$

$$\sigma = \frac{\text{Zahl d. Reaktionen pro Zeit} \quad \left[\frac{1}{s}\right]}{\text{Strahlteilchen pro Zeit} \times \text{Steuerelement pro Fläche} \quad \left[\frac{1}{s}\right]}$$



$$\frac{dR(\Omega)}{d\Omega} = N_e \frac{N_t}{A} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\text{Zahl d. Reaktion pro Zeit}}{\text{pro Raumwinkel} \times \text{Strahlteilchen pro Zeit} \times \text{Zentrum pro Fläche}}$$

hwp://pdg.lbl.gov

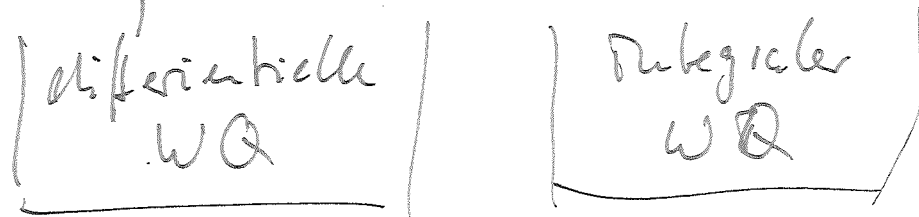
6. ATOMIC AND NUCLEAR PROPERTIES OF MATERIALS

Table 6.1 Abridged from pdg.lbl.gov/AtomicNuclearProperties by D. E. Groom (2007). See web pages for more detail about entries in this table including chemical formulae, and for several hundred other entries. Quantities in parentheses are for NTP (20°C and 1 atm), and square brackets indicate quantities evaluated at STP. Boiling points are at 1 atm. Refractive indices n are evaluated at the sodium D line blend (589.2 nm); values >1 in brackets are for $(n-1) \times 10^6$ (gases).

Material	Z	A	(Z/A)	Nucl. coll. length λ_N [g cm ⁻²]	Nucl. inter. length λ_I [g cm ⁻²]	Radi. len. X_0 [g cm ⁻²]	dE/dx_{min} [MeV]	Density [g cm ⁻³]	Melting point (K)	Boiling point (K)	Refract. index (@ Na D)
H ₂	1	1.00794(7)	0.99212	42.8	52.0	63.04	(4.103)	0.071(0.083)	13.81	20.28	1.111[32]
D ₂	1	2.014101778(8)	0.49650	51.3	71.8	125.97	(2.053)	0.169(0.168)	18.7	23.65	1.11[138]
He	2	4.002602(2)	0.49967	51.8	71.0	94.32	(1.937)	0.125(0.166)	4.220	4.220	1.02[35.0]
Li	3	6.941(2)	0.43221	52.2	71.3	82.78	1.630	0.534	453.6	1615.	
Be	4	9.012182(3)	0.44384	55.3	77.8	65.19	1.595	1.848	1560.	2714.	
C diamond	6	12.0107(8)	0.49955	59.2	85.8	42.70	1.725	3.520			2.42
C graphite	6	12.0107(8)	0.49955	59.2	85.8	42.70	1.742	2.210			
N ₂	7	14.0067(2)	0.49976	61.1	89.7	37.99	(1.892)	0.807(1.165)	63.15	77.29	1.20[298.]
O ₂	8	15.9994(3)	0.50002	61.3	90.2	34.24	(1.801)	1.141(1.332)	54.36	90.20	1.22[271.]
F ₂	9	18.998403(5)	0.47372	65.0	97.4	32.93	(1.676)	1.507(1.580)	53.53	85.03	[195.]
Ne	10	20.1797(6)	0.49555	65.7	99.0	28.93	(1.724)	1.204(0.839)	24.56	27.07	1.09[67.]
Ar	18	39.948(1)	0.48181	69.7	107.2	24.01	1.615	2.699	933.5	2792.	
Kr	36	79.904(2)	0.47951	73.8	115.7	19.28	(1.630)	1.574(2.980)	171.6	239.1	[773.]
Xe	54	131.293(6)	0.44252	110.4	191.9	6.76	(1.519)	1.396(1.662)	83.81	87.26	1.23[281.]
Rn	86	222.017(4)	0.44252	110.4	191.9	6.76	(1.519)	1.396(1.662)	83.81	87.26	1.23[281.]
U	92	238.02891(3)]	0.38651	118.6	209.0	6.00	1.081	18.950	1408.	4404.	
Air (dry, 1 atm)			0.49919	61.3	90.1	36.62	(1.815)	(1.205)		78.80	
Shielding concrete			0.50274	65.1	97.5	26.57	1.711	2.300			
Borosilicate glass (Pyrex)			0.49707	64.6	96.5	28.17	1.696	2.230			
Lead glass			0.42101	95.9	158.0	7.87	1.255	6.220			
Standard rock			0.50000	66.8	101.3	26.54	1.688	2.650			
Methane (CH ₄)			0.62534	54.0	73.8	46.47	(2.417)	(0.667)	90.68	111.7	[444.]
Ethane (C ₂ H ₆)			0.59861	55.0	75.9	45.66	(2.304)	(1.263)	90.36	184.5	
Propane (C ₃ H ₈)			0.58962	55.3	76.7	45.37	(2.262)	0.463(1.865)	85.52	231.0	
Butane (C ₄ H ₁₀)			0.59497	55.5	77.1	45.23	(2.278)	(2.489)	134.9	272.6	
Octane (C ₈ H ₁₈)			0.57778	55.8	77.8	45.00	2.123	0.703	214.4	398.8	
Paraffin (CH ₂ (CH ₂) _{n-2} CH ₃)			0.57275	56.0	78.3	44.85	2.088	0.930			
Nylon (type 6, 6/6)			0.54790	57.5	81.6	41.92	1.973	1.18			
Polycarbonate (Lexan)			0.52697	58.3	83.6	41.50	1.886	1.20			
Polyethylene ((CH ₂ CH ₂) _n)			0.57034	56.1	78.5	44.77	2.079	0.89			
Polyethylene terephthalate (Aylan)			0.52037	58.9	84.9	39.95	1.848	1.40			
Polyimide film (Kapton)			0.51264	59.2	85.5	40.58	1.820	1.42			
Polyethylene methacrylate (acrylic)			0.53937	58.1	82.8	40.55	1.929	1.19			1.49
Polystyrene (C ₈ H ₈ CHCH ₂) _n			0.53998	56.1	78.5	41.77	2.041	0.90			
Polytetrafluoroethylene (Teflon)			0.53768	57.5	81.7	43.79	1.936	1.06			1.59
Polyvinylchloride			0.47992	63.5	94.4	34.84	1.671	2.20			
Polyvinylidene fluoride			0.54141	57.3	81.3	43.90	1.956	1.03			1.58
Aluminum oxide (sapphire)			0.49038	65.5	98.4	27.94	1.647	3.970	2327.	3273.	1.77
Barium fluoride (BaF ₂)			0.42207	90.8	149.0	9.91	1.303	4.893	1641.	2533.	1.47
Bismuth germanate (BiGeO ₃)			0.42065	96.2	159.1	7.97	1.251	7.130	1317.		2.15
Carbon dioxide gas (CO ₂)			0.49989	60.7	88.9	36.20	1.819	(1.842)			[449.]
Solid carbon dioxide (dry ice)			0.49989	60.7	88.9	36.20	1.787	1.563			
Cesium iodide (CsI)			0.41569	100.6	171.5	8.39	1.243	4.510	894.2	1553.	1.79
Lithium fluoride (LiF)			0.46262	61.0	88.7	39.26	1.614	2.635	1121.	1946.	1.39
Lithium hydride (LiH)			0.50321	50.8	68.1	79.62	1.897	0.820	965.		
Lead tungstate (PbWO ₄)			0.41315	100.6	168.3	7.39	1.229	8.300	1403.		2.20
Silicon dioxide (SiO ₂ , fused quartz)			0.49930	65.2	97.8	27.05	1.699	2.200	1986.	3223.	1.46
Sodium chloride (NaCl)			0.55509	71.2	110.1	21.91	1.847	2.170	1075.	1738.	1.54
Sodium iodide (NaI)			0.42697	93.1	154.6	9.49	1.305	3.667	933.2	1577.	1.77
Water (H ₂ O)			0.55509	58.5	83.3	36.08	1.992	1.000(0.756)	273.1	373.1	1.33
Silica aerogel			0.50093	65.0	97.3	27.25	1.740	0.200	(0.03 H ₂ O, 0.97 SiO ₂)		

Es gilt $\int_{\Omega} \frac{dR}{d\Omega} d\Omega = R$

$\int_{\Omega} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \sigma$



5.2 Grundlegende Prozesse

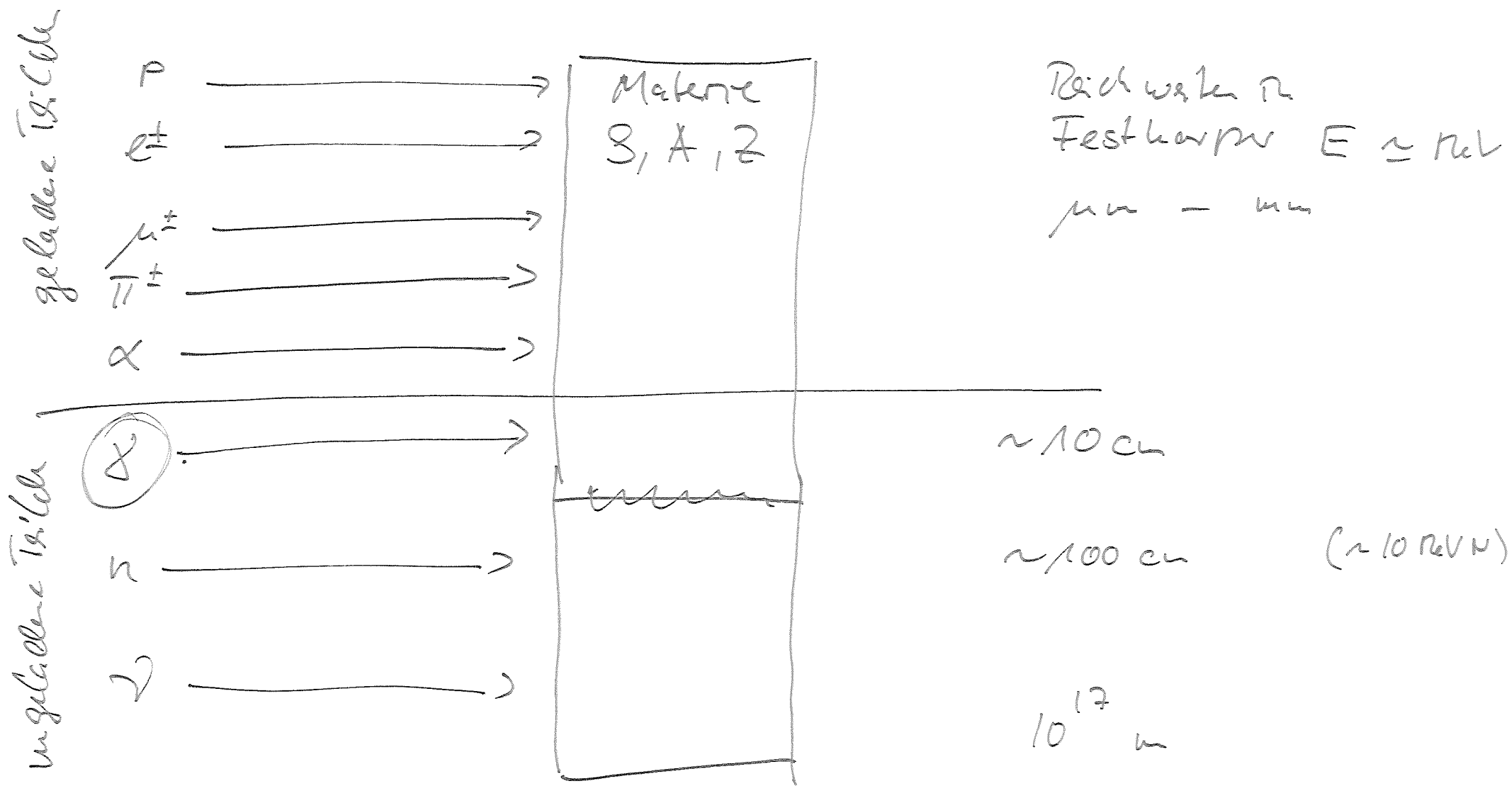
Materie: Gas, Flüssigkeit, FK

Charakterisiert durch

- 1: Dichte: ρ
- 2: Massenzahl: A
- 3: Ordnungszahl: Z
- 4: ...

Einfachere Teilchen "spüren" die Bausteine d. Materie
Elektronen und Nucleonen

=> WW zw. Teilchen und Materie sind meist EM und starker Natur (aber auch schw. WW ν 's)



5.3 WW EM Strahlung mit Materie

EM Strahlung wird je nach Entstehungsart unterschiedlich bezeichnet:

- Emission aus äußeren Elektronenschalen \Rightarrow Licht
- " " " übrige " \Rightarrow Röntgenstrahlung
- " " " Kern \Rightarrow γ -Strahlung
- " " bei Abbremsung v. geladen Teilchen \Rightarrow Bremsstrahlung
- " " bei Beschleunigung in Magnetfeldern \Rightarrow Synchrotron
- ...

	Absorption	Inelastische Streuung	elast. Streuung
Elektronen	Photoeffekt	Compton-Streuung	Thomson- Rayleigh
Kerne	Kernphotoeffekt	Kernresonanz Streuung	(H)
Elektr.	Paarzeugung	—	Kernpotential Delbrück
Mesonenfelder	Resonanz		

Klassische Elektronenradius

Ruhe Masse des Elektron ($m_e c^2$) = (el. stat.) Selbstenergie
El. stat. Energie einer Kugel mit Ladung e und Radius r_e

$$E = \frac{3}{5} \frac{e^2}{r_e}$$

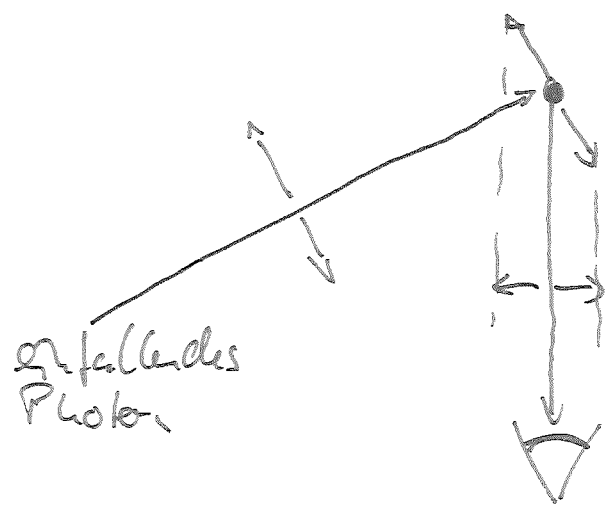
$$\Rightarrow \frac{3}{5} \frac{e^2}{r_e} = m_e c^2 \quad (\Rightarrow) \quad r_e = \frac{3}{5} \frac{e^2}{m_e c^2} = 2,82 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$$

↑
klass. Elektronradius

a) Thomson Streuung

elastische Streuung elektromagn. Strahlung an (quasi) freien geladenen Teilchen beschrieben mittels klassischer EM ($E_\gamma \ll m_e c^2$)

Elastisch: die Energie der gestreuten Strahlung (Photonen) ist identisch mit der einfallenden Strahlung



Streuendes Elektron
EΠ-Dipolstrahlung

σ_{Th} ist unabhängig von Photon-Energie

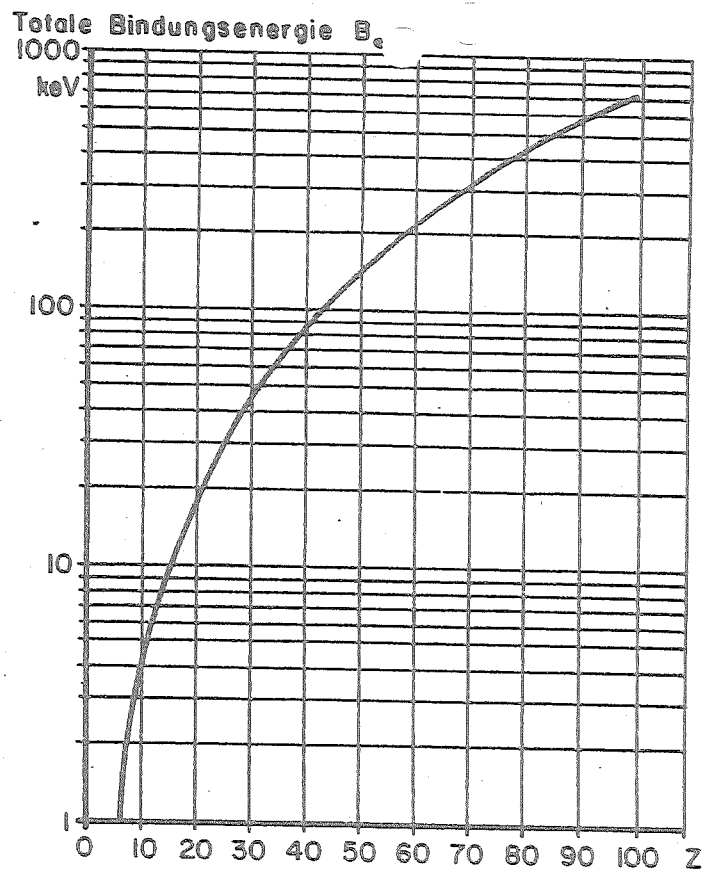
$$\sigma_{Th} = \frac{8\pi}{3} r_e^2 \sim 0,67 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$\underline{\underline{0,67 \text{ barn}}}$$

b) Photoeffekt : Atomelektron können Energie eines

Photons vollständig absorbieren. Elektron werden entweder auf gebundenen Zustand höherer Energie gehoben, oder falls Energie $E_\gamma > B_E$ (Bindungsenergie) ein Elektron mit kinetischer Energie $T_e = E_\gamma - B_E$ emittiert.

Bindungsenergie der Hüllelektronen ist abhängig von Z und von der Schale n in welcher es sich befindet.



Näherungswerte:

K-Elektronen;

$$B_e = R_y (Z-1)^2$$

L-Elektronen;

$$B_e = \frac{R_y}{4} (Z-5)^2$$

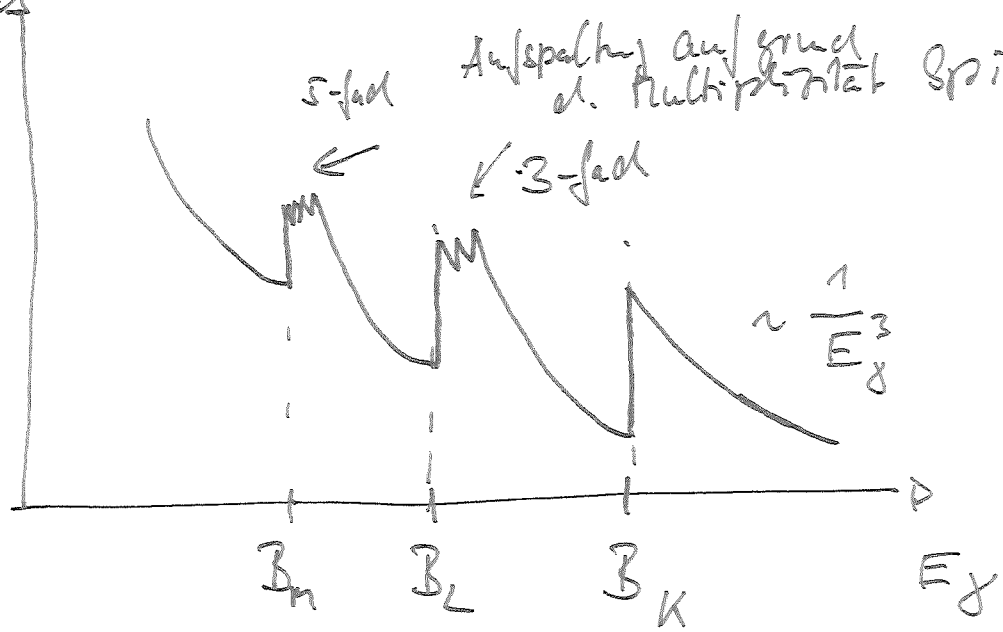
M-Elektronen;

$$B_e = \frac{R_y}{9} (Z-13)^2$$

mit $R_y = 13.6 \text{ eV}$
(Rydbergenergie)

Quelle:
Mannick

Absorption
(a.u.)



freies Elektron kann wg. Impuls und Energieerhaltung Photonenenergie nicht vollständig aufnehmen. Ist bei Atomelektronen möglich, da restlicher Stoßimpuls als Rückstoß aufnimmt

=> die am festesten gebundene Elektronen WW am stärksten

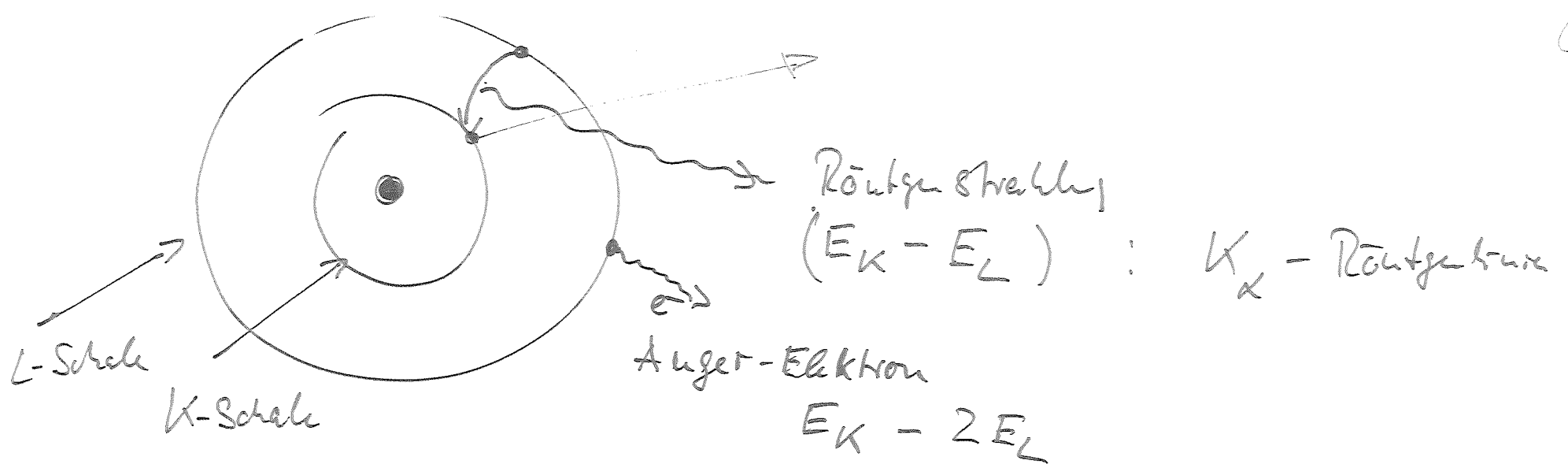
Theoret. Berechnung des WW in QED (Dirac-Gleichung eines gebundenen Elektrons (+ Abschätzung d. Kernladung))

(Hilbert, Quantum Theory of Radiation):

$$\sigma = \underbrace{\sigma_{Th}}_{\text{Thomson}} \cdot 4\sqrt{2} \cdot \alpha^4 \cdot \underbrace{Z^5}_{\text{atomic number}} \cdot \underbrace{E_\gamma^{-7/2}}_{\text{photon energy}}$$

$\sigma_{Th} = \frac{8}{3} \pi r_e^2$, α Feinstrukturkonstante $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$
 $E_\gamma = E_\gamma / m_e c^2$

(K-Elektronen) hinreichend weit von K-Kern entfernt

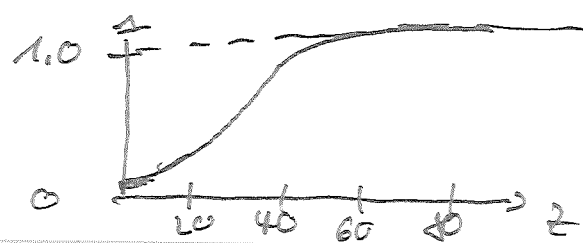


Nach Photoionisation ist z. Bsp Elektron aus K-Schale herausgeschlagen und befindet sich im angeregten Zustand

→ Emission Röntgenstrahlung

→ " Auger-Elektronen

Anzahl der emittierten Photonen N_γ pro Lücke in der K-Schale wird als K-fluorescence yield genannt.



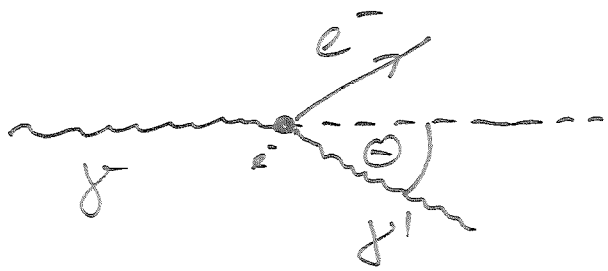
⇒ bei leichten Kernen Auger-Elektronen
 bei schweren " Röntgenemission

c)

Compton - Streuung

(10)

Compton-Effekt beschreibt inelastische
Streuung eines Photons an einem freien Elektron
"frei": $E_\gamma \gg \beta_e$



mit Energie- und Impulserhaltung

$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \Theta)}$$

$$T_e = E_\gamma - E_{\gamma'} \Rightarrow T_{e, \max} = E_\gamma - E_{\gamma'}(\Theta = \pi) = \frac{2E_\gamma^2}{2E_\gamma + m_e c^2}$$

Übungsaufgabe