

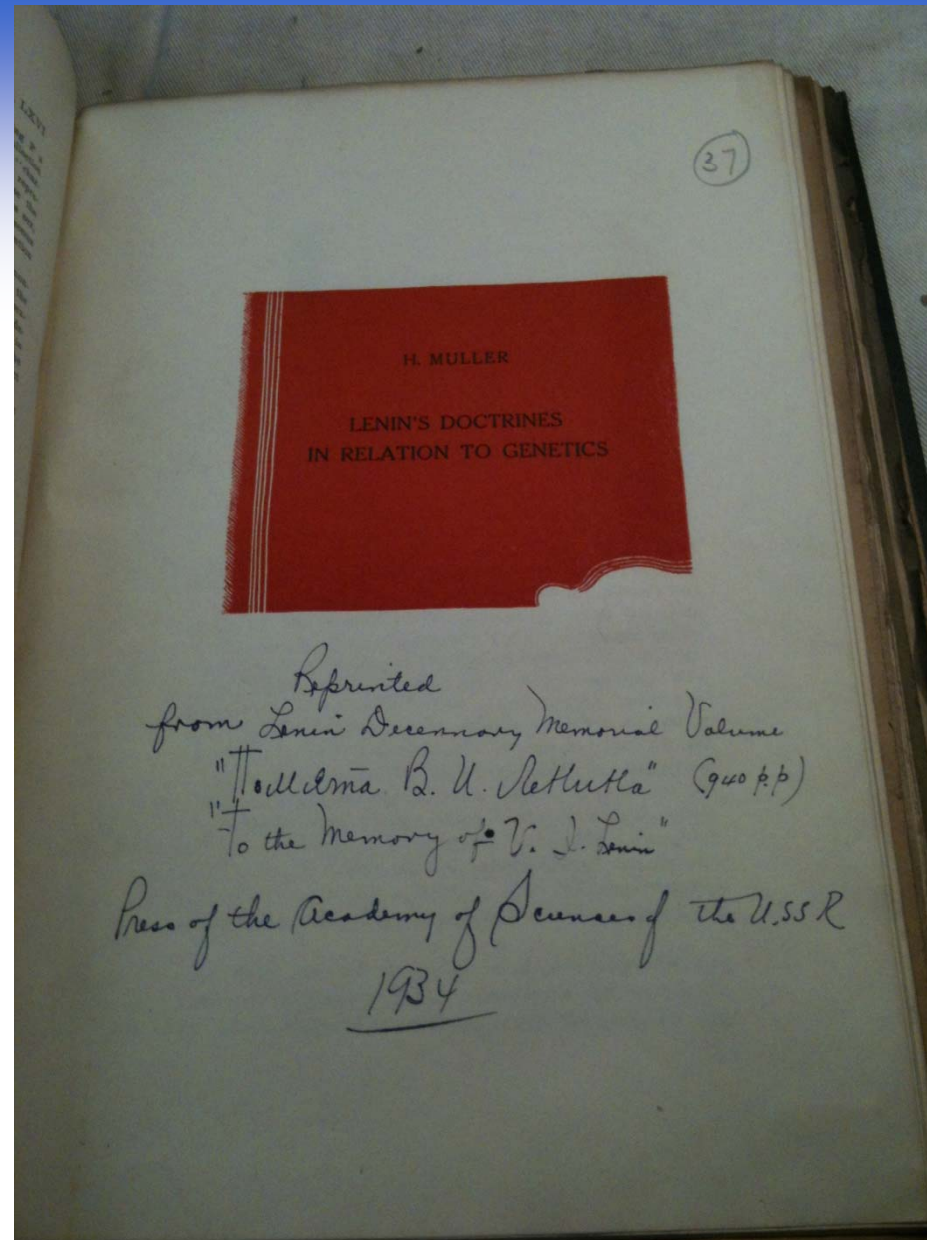
Strahlenschäden
Dosiseinheiten
Biologische Wirkung
Radon
Licht-Materie
Radiotracer
Tumorbehandlung

Strahlentherapie

Thema Ionisierende Strahlung Strahlenschäden



Extrablatt



The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1946 was awarded to Hermann J. Muller for the discovery of the production of mutations by means of X-ray irradiation

Ionisierende Strahlung

ENERGIE ►

Frequenz in Hz

10^0 10^2 10^4 10^6 10^8 10^{10} 10^{12} 10^{14} 10^{16} 10^{18} 10^{20} 10^{22} 10^{24} 10^{26}

Nieder-

Hochfrequenzen

Lang-, Mittel-, Kurz-, Ultrakurz-, Mikrowellen

Infrarotes- sichtbares- ultraviolettes Licht

Röntgenstrahlen

Gammastrahlung

sekundäre Höhenstrahlung



Stromversorgung



Radio



Handy



Wärme



Licht



Röntgen



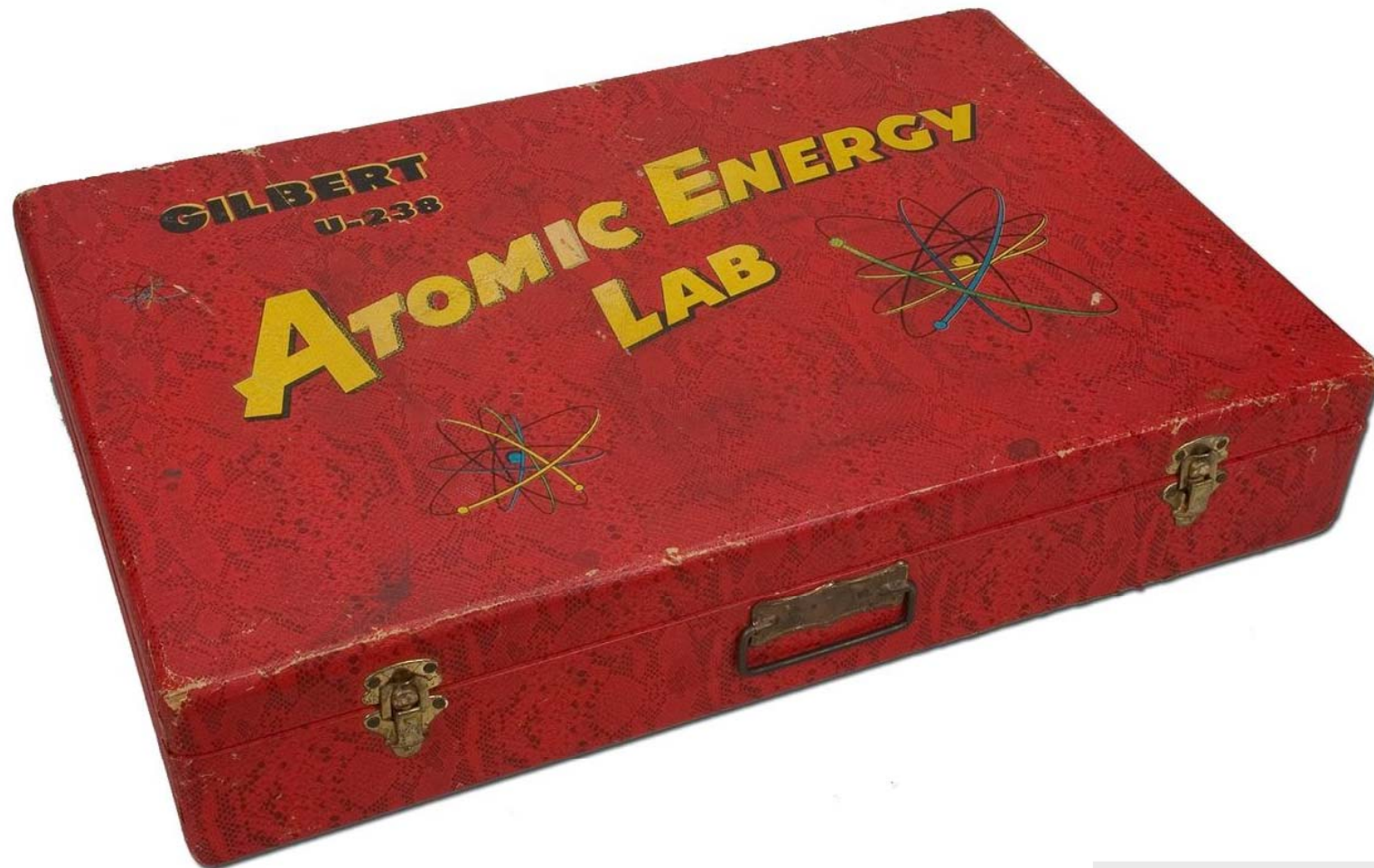
Radioaktivität

NICHT IONISIERENDE

IONISIERENDE

Extrablatt

Kuriositätenkabinett Kinderspielzeug



Kinderspielzeug um 1950



treated by radiation Radura

Food irradiation (the application of ionizing radiation to food) is a technology that improves the safety and extends the shelf life of foods by reducing or eliminating microorganisms and insects



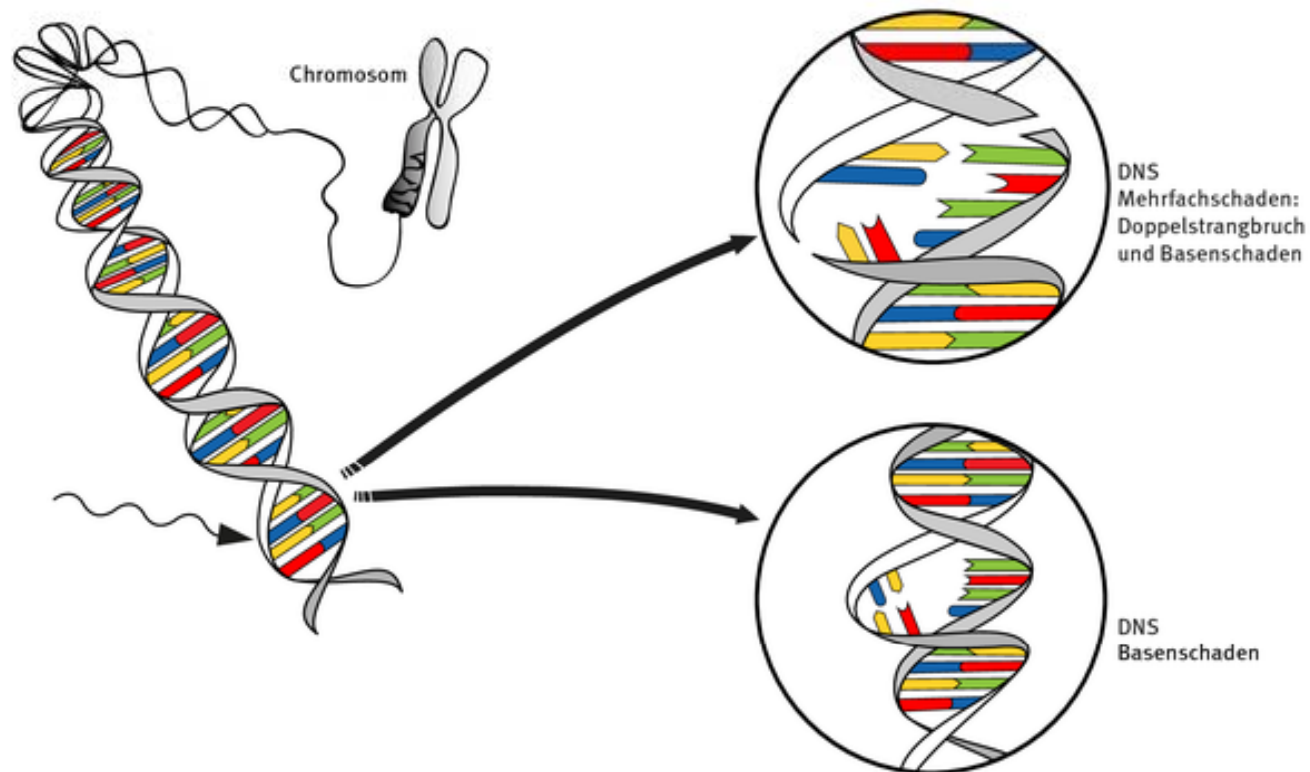
Debunking Irradiation Myths

Irradiation does not make foods radioactive, compromise nutritional quality, or noticeably change the taste, texture, or appearance of food. In fact, any changes made by irradiation are so minimal that it is not easy to tell if a food has been irradiated



Grotthuß-Draper Gesetz

Nur vom lichtempfindlichen Material absorbiertes Licht lässt photochemische Reaktionen aus



Diagnose

- nur absorbiertes Teil ionisierender Strahlung auf biologisches Objekt wird wirksam
- NICHT absorbiertes, reflektiertes Anteil hat KEINE Wirkung auf biologische Materie

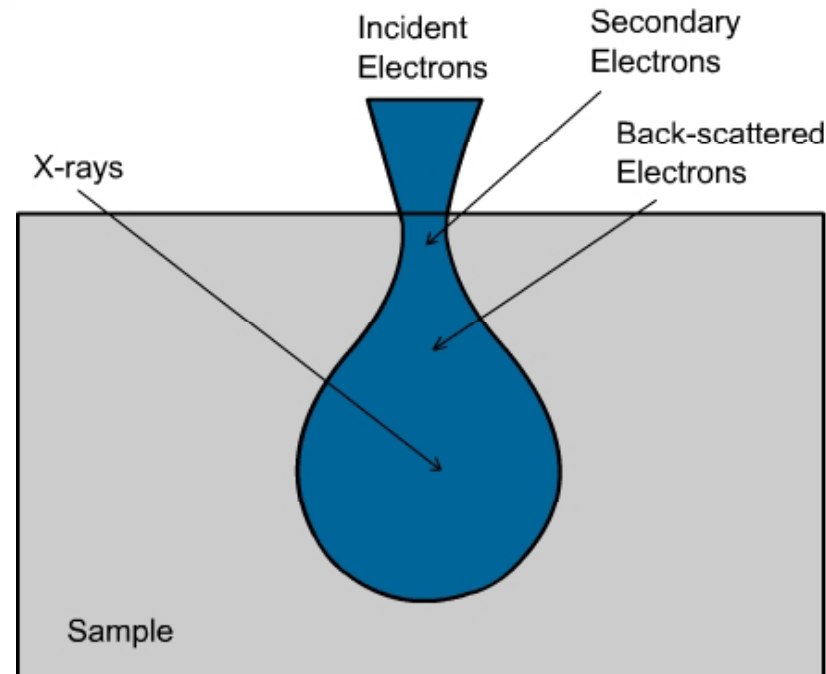


Biologische Wirkung Glockersches Grundgesetz



Richard Glocker
1890 - 1978

Für die biologische Wirkung ist **NUR** die kinetische Energie der von den Photonen erzeugten Sekundärteilchen maßgeblich



Diagnose

- Photonen verlieren bei Wechselwirkung mit Materie Energie, wie z.B. durch Compton-Effekt
- biologische Strahlenwirkung muss entsprechend angepasst werden
- insbesondere bei schweren Elementen ab Silizium ($Z > 13$) durch Elektron-Positron Paarbildung

Über das Grundgesetz der physikalischen Wirkungen von Röntgenstrahlen verschiedener Wellenlänge und seine Beziehung zum biologischen Effekt
R. Glockner Strahlentherapie 26, 147 (1925)

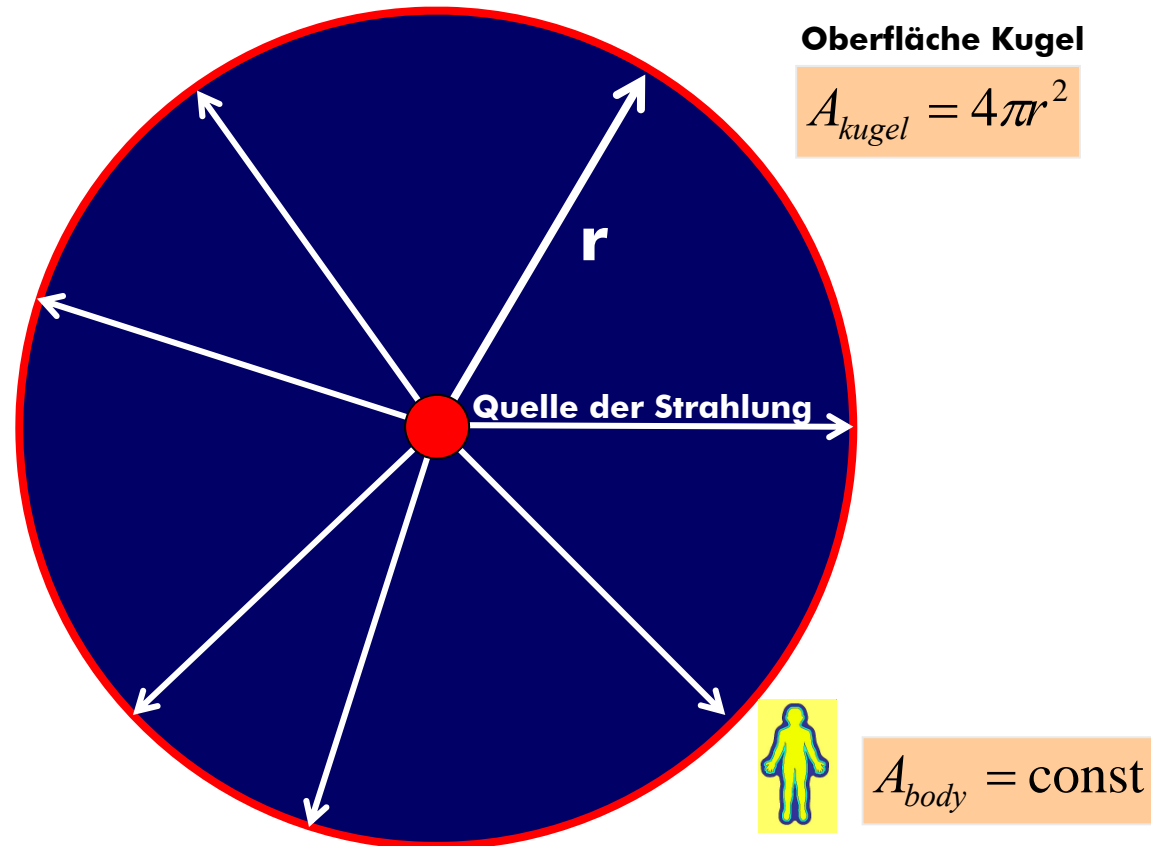


Isotrop abgestrahlte Energie

typisch für fast alle hochenergetische Strahlung

Symptome

Strahlung einer radioaktiven Quelle verteilt sich gleichmäßig im Raum



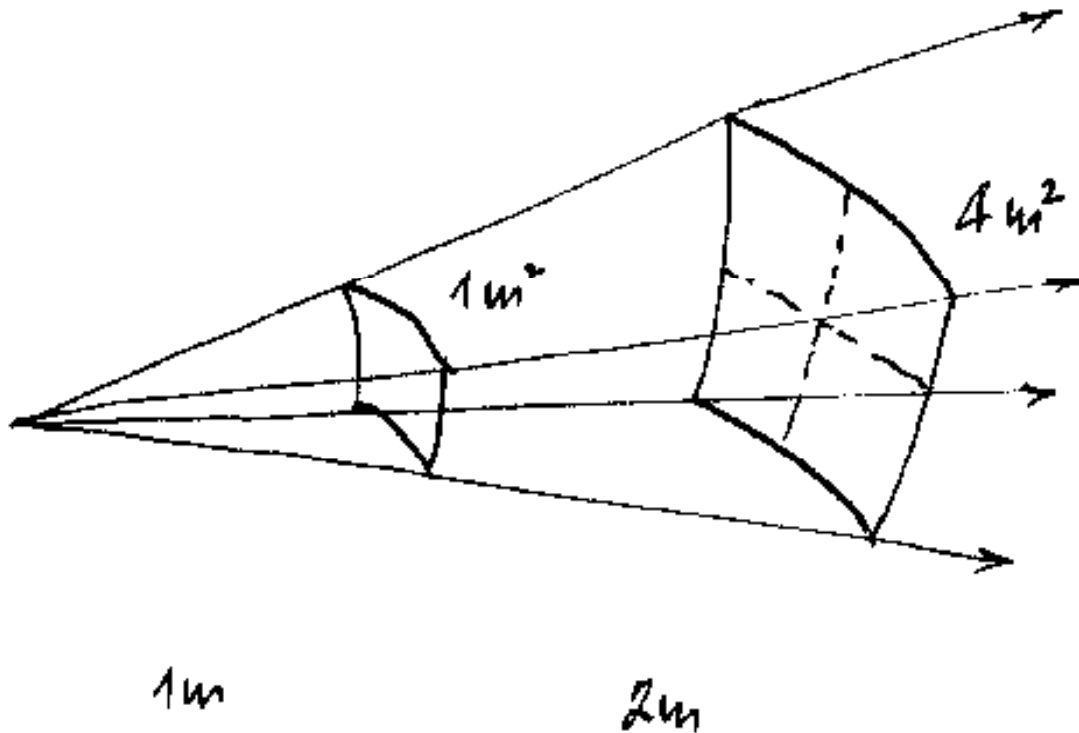
Diagnose

Strahlenbelastung eines Körpers hängt vom Abstand zur Quelle ab



Isotrope Abstrahlung

typisch für fast alle hochenergetische Strahlung



Zählrate in Abstand von Quelle

$$\frac{Z(r)}{A_{body}} = \frac{Z_{quelle}}{4\pi r^2}$$

$$Z(r) = \frac{Z_{quelle} \cdot A_{body}}{4\pi r^2}$$

$$Z(r) \sim \frac{1}{r^2}$$

Diagnose

Strahlenbelastung sinkt quadratisch mit dem Abstand zur Quelle



Physikalische Größen im Strahlenschutz

Fluenz

Symptome

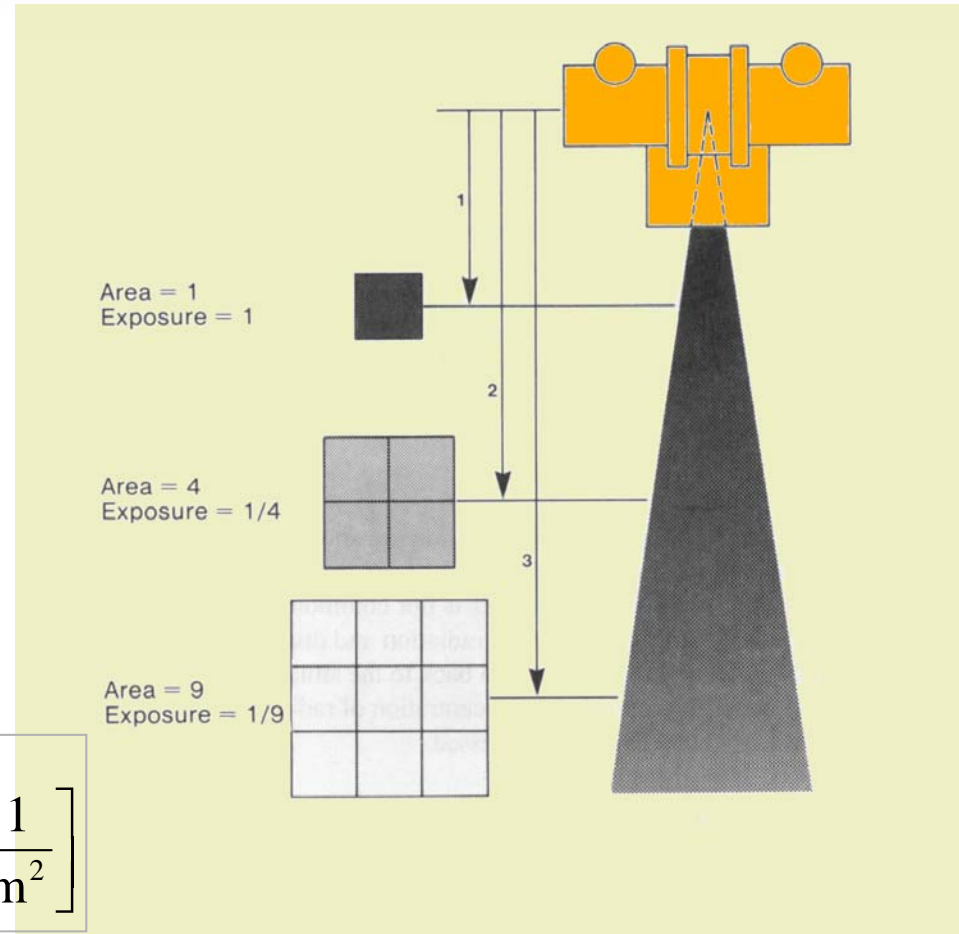
Fluenz ist physikalische Größe zur Beschreibung von Teilchenstrahlung

Fluence

$$\Phi_{rad} = \frac{N_{rad}}{A_0}$$

Dimensionsanalyse

$$[\Phi_{rad}] = \left[\frac{N_{rad}}{A_0} \right] = \left[\frac{1}{m^2} \right]$$



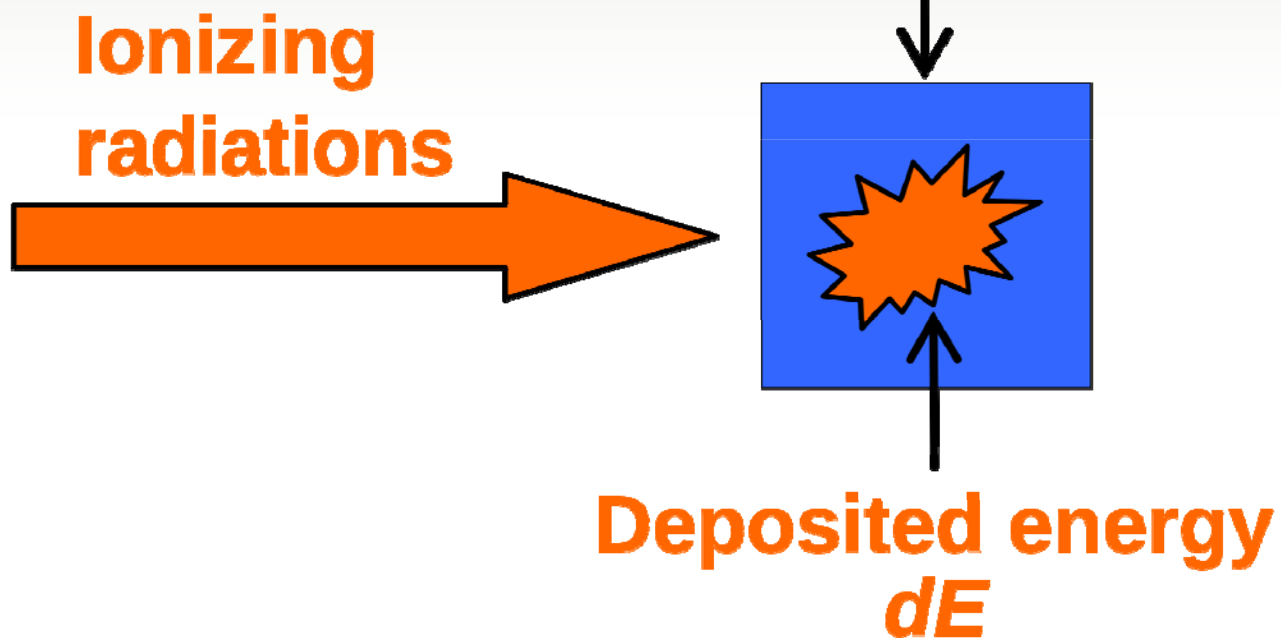
Diagnose

Fluenz bezeichnet Anzahl von Teilchen, die durch eine Fläche hindurch treten

Fluenz nimmt mit Abstand von punktförmigen Strahlungsquelle proportional zu $1/r^2$ ab

Thema Strahlentherapie
Dosiseinheiten

Element of matter
mass = dm



Charakterisierung ionisierender Strahlung

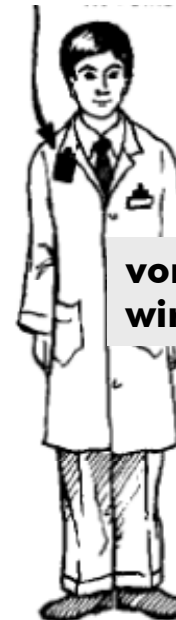
Einheiten

Bestrahlungsmenge angezeigt auf dem Dosimeter wird in Sievers angegeben (**Äquivalentdosis**)

Intensität der ionisierenden Strahlung wird in Coulomb pro Kilogramm gemessen (**Ionendosis**)



Aktivität eines radioaktiven Präparats wird in Becquerel gemessen

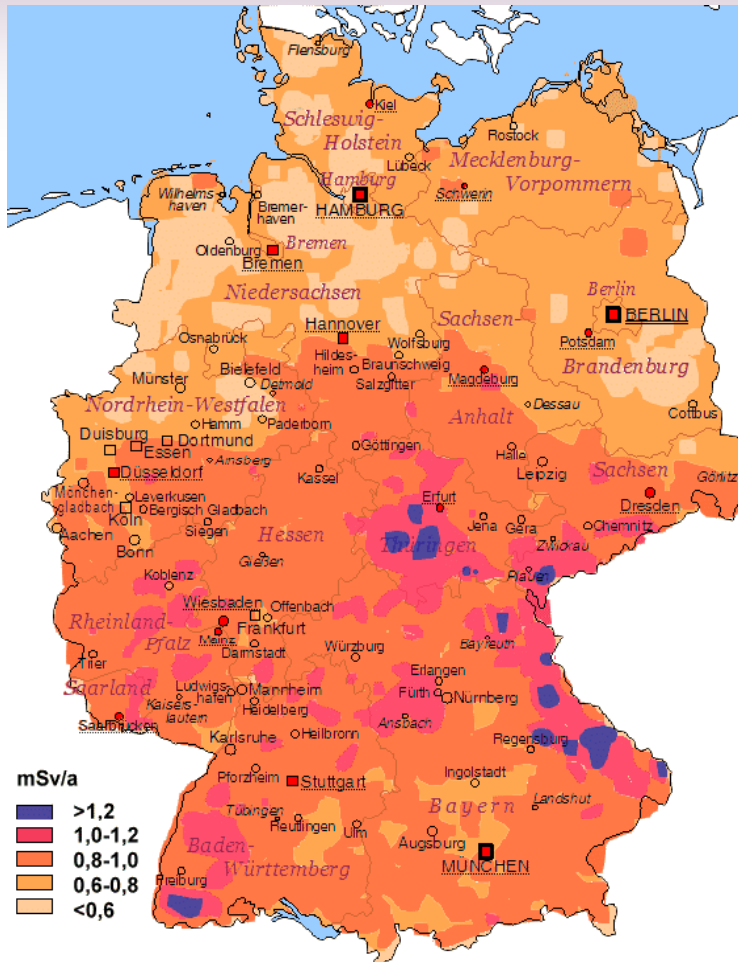


vom Körper absorbierte **Energiedosis** wird in Gray gemessen

INFOBOX

Herzklappen aus Kadavern werden vor Herzoperationen ionisierender Strahlung ausgesetzt

Momentaufnahme Strahlenbelastung



Aktivität einer radioaktiven Probe
Anzahl der Zerfälle pro Sekunde

$$A_{rad} = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Dimensionsanalyse

$$[A_{rad}] = [\text{Bq}] = \left[\frac{1}{\text{s}} \right]$$

Einheit Becquerel

Änderung in Anzahl radioaktiver Kerne

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda_{decay} N(t)$$

alternativer Ausdruck für Aktivität

$$A_{rad} = \lambda_{decay} N(t)$$

Geigerzähler

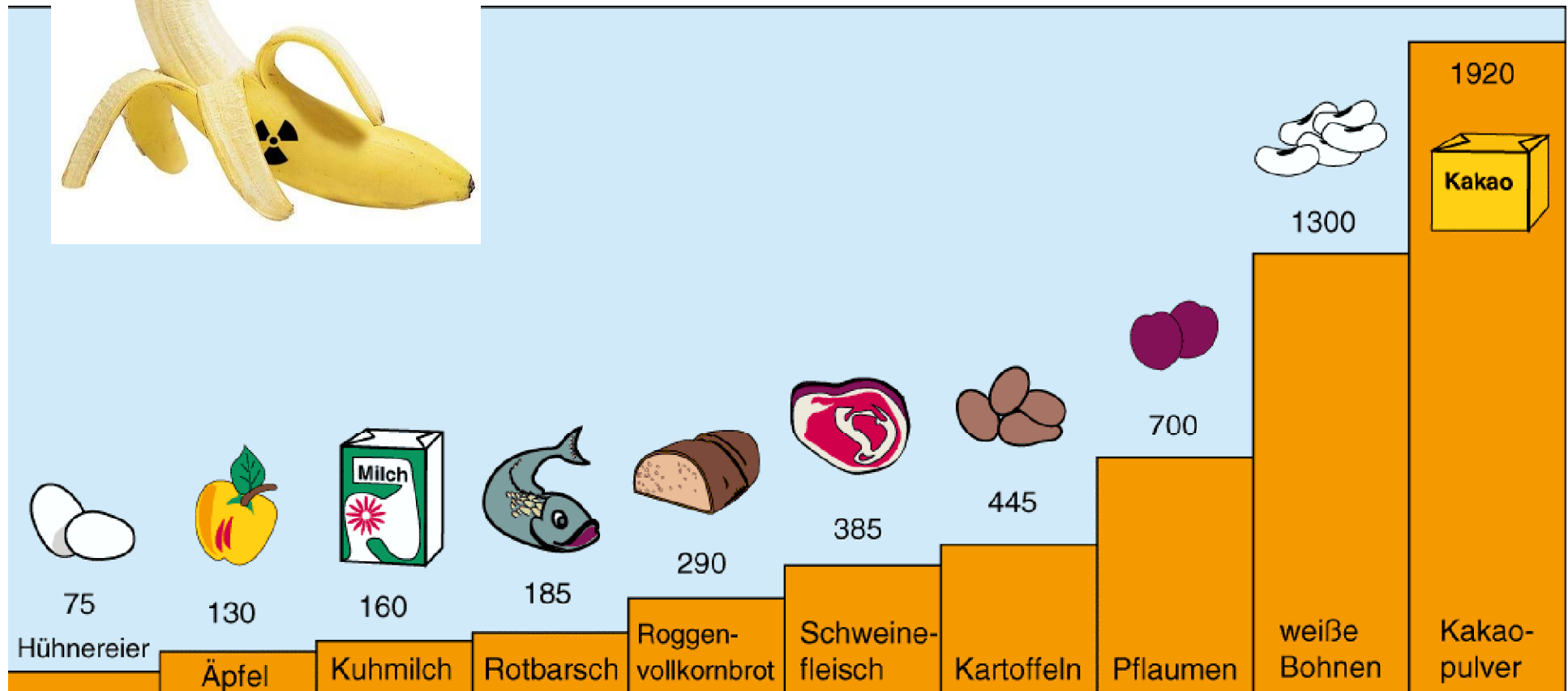


Franklin bells

Diagnose

- Aktivität im menschlichen Körper durch natürliche Quellen etwa 10 000 Bq (10^4 Bq)
- Aktivität verursacht durch medizinische Anwendungen bis 10 000 000 Bq (10^8 Bq)

relativ gesehen Aktivität im Vergleich





Kondensator

Energiedosis absorbierte Energie

$$D_E = \frac{dE_{rad}}{dm_{tissue}}$$

absorbierte Energie pro Masse

Dosisleistung

$$D_P = \frac{dP_{rad}}{dm_{tissue}}$$

absorbierte Leistung pro Masse

Dosisleistung absorbierte Leistung

Dimensionskontrolle

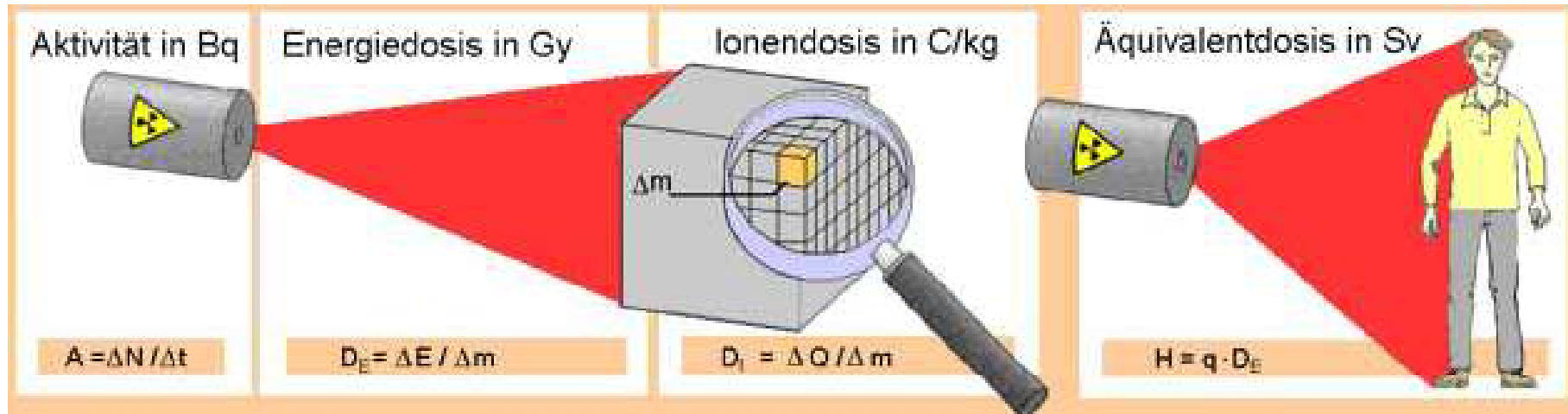
$$[D_E] = \left[\frac{dE_{rad}}{dm_{tissue}} \right] = \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] = [\text{Gy}]$$

Einheit Gray

Dimensionskontrolle

$$[D_P] = \left[\frac{dP_{rad}}{dm_{tissue}} \right] = \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right] = \left[\frac{\text{Gy}}{\text{s}} \right]$$

Gray pro Sekunde



Ionendosis Anzahl in Luft erzeugter Ionen

Ionendosis

$$D_I = \frac{dQ_e}{dm_{tissue}} = \frac{1}{\rho_{tissue}} \frac{dQ_e}{dV_{tissue}}$$

absorbierte Ionen pro Masse

Dimensionskontrolle

$$[D_I] = \left[\frac{dQ_e}{dm_{tissue}} \right] = \left[\frac{\text{C}}{\text{kg}} \right]$$

Äquivalentdosis absorbierte Energie plus biologischer Wirksamkeit

Äquivalentdosis

$$H_{tissue} = q_{bio} D_E$$

biologisch gewichtete absorbierte Energie pro Masse

Dimensionskontrolle

$$[H_{tissue}] = [q_{bio} D_E] = \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] = [\text{Sv}]$$

Einheit Sievers

Charakterisierung ionisierender Strahlung

Nicht mehr verwendete Einheiten

Aktivität

$$[A_{rad}] = [\text{Bq}] = \left[\frac{1}{\text{s}} \right]$$

nicht mehr verwendete Einheit Curie (Ci)

$$1.0 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Energiedosis

$$[D_E] = \left[\frac{dE}{dm} \right] = [\text{Gy}] = \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$$

nicht mehr verwendete Einheit Rad (rd)

$$1.0 \text{ Gy} = 100 \text{ rd}$$

radiation absorbed dose

Ionendosis

$$[D_I] = \left[\frac{dQ_e}{dm} \right] = \left[\frac{\text{C}}{\text{kg}} \right]$$

nicht mehr verwendete Einheit Röntgen (R)

$$1.0 \frac{\text{C}}{\text{kg}} = 3.88 \cdot 10^3 \text{ R}$$

Äquivalentdosis

$$[H_{tissue}] = [q_{bio} \cdot D_E] = [\text{Sv}] = \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$$

nicht mehr verwendete Einheit Rem (rem)

$$1.0 \text{ Sv} = 100.0 \text{ rem}$$

roentgen equivalent in man

Vergleich radioaktive Quelle vs CT

Symptome

- 120 kV-CT-Scanner produziert in Abstand 50 cm 25 mR pro Sekunde und mA Elektronenstrom
- dies entspricht einer Röntgenfluenz von 6.7×10^6 Photonen/ mm^2
- radioaktive Quelle mit Aktivität 3.7×10^{10} Bq hat Fluenz von nur 1.2×10^4 Photonen/ mm^2
- radioaktive Quelle müsste Aktivität von 2.1×10^{13} haben für eine vergleichbare Dosis



Umrechnung Ionendosis

$$1 \text{ R} = 0.258 \frac{\text{mC}}{\text{kg}}$$

Röntgen

$$25 \text{ mR} = 6.45 \frac{\text{mC}}{\text{kg}}$$

Diagnose

- bei typischen Elektronenströmen von 200 mA steigt Strahlen Belastung Patient um Faktor 200
- dies entspricht Aktivität einer radioaktiven Probe von 4.1×10^{15} Bq
- stark erhöhte Strahlenbelastung von CT-Scanner im Vergleich zur radioaktiven Quelle

Quelques exemples de sources d'exposition sur l'homme

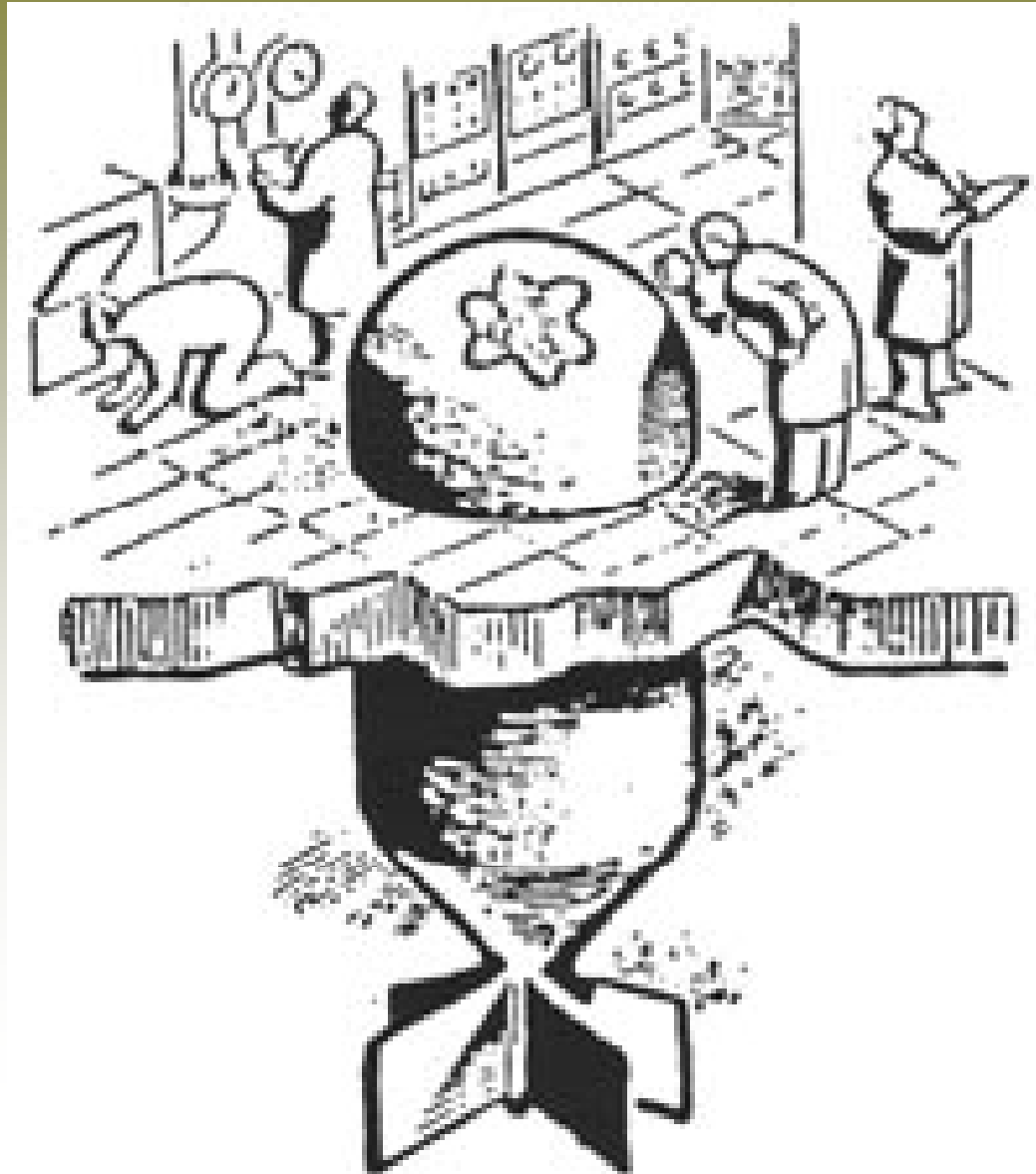


Rappel

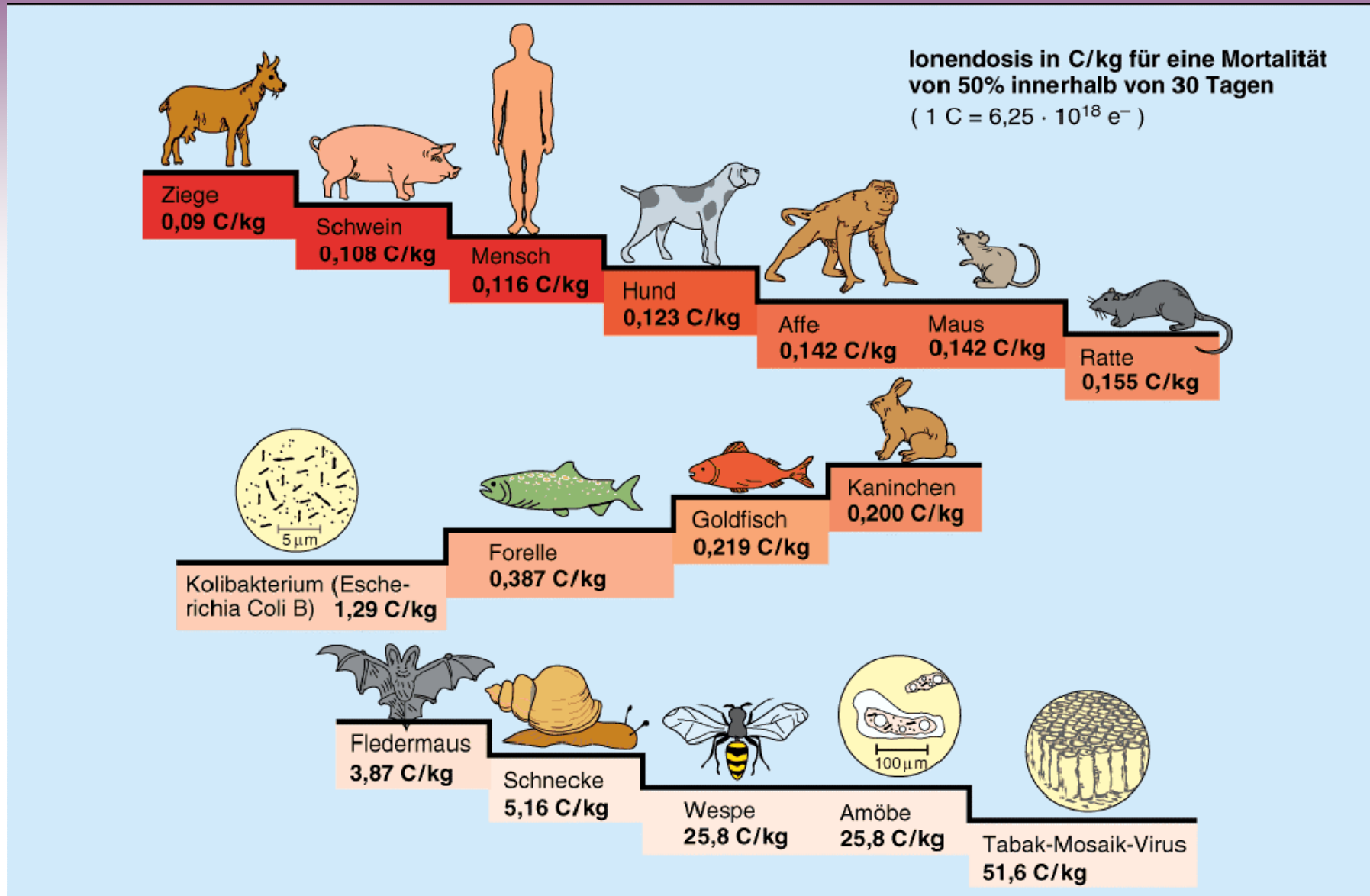
La dose efficace individuelle moyenne due à la radioactivité naturelle en France est de 2,4 millisieverts par an.

Thema Strahlentherapie

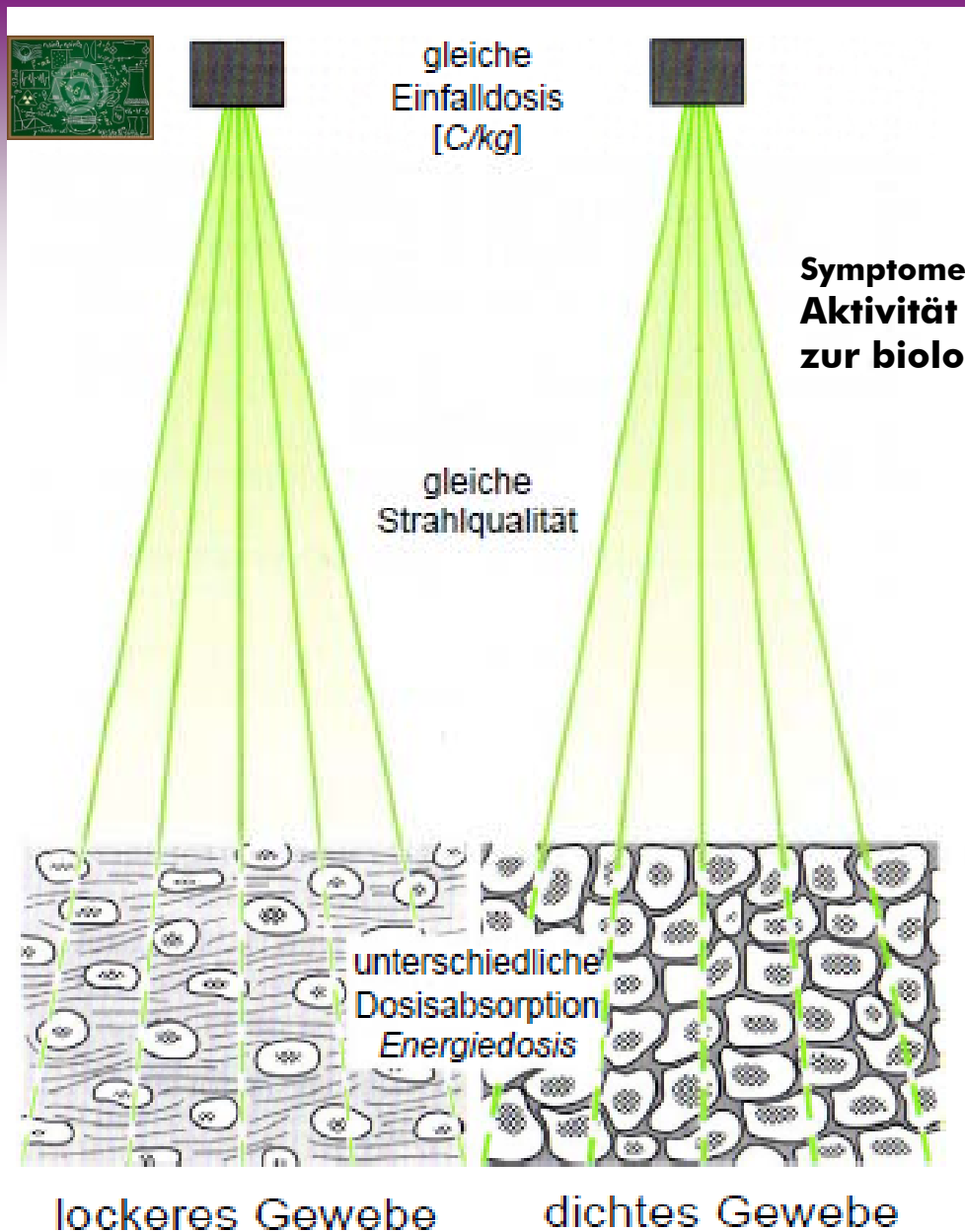
Biologische Wirkung



Ionendosis Tod durch Strahlung



Energiedosis Dichteeffekt



**Symptome
Aktivität und Ionendosis geben keine Informationen
zur biologischen Wirkung der Strahlung**

Diagnose

Energiedosis im Gewebe kann bei gleicher Ionendosis aufgrund unterschiedlicher Dichte variieren

Äquivalentdosis Strahlenbelastung



Eine Portion Wildschwein:
< 0,004 mSv



Drei Stunden Flug in 10 km Höhe:
ca. 0,01 mSv



Rauchen, 20 Zigaretten pro Tag,
im Jahr: ca. 9 mSv



Schwankung der natürlichen Strahlung
im Jahr: 1 – 10 mSv

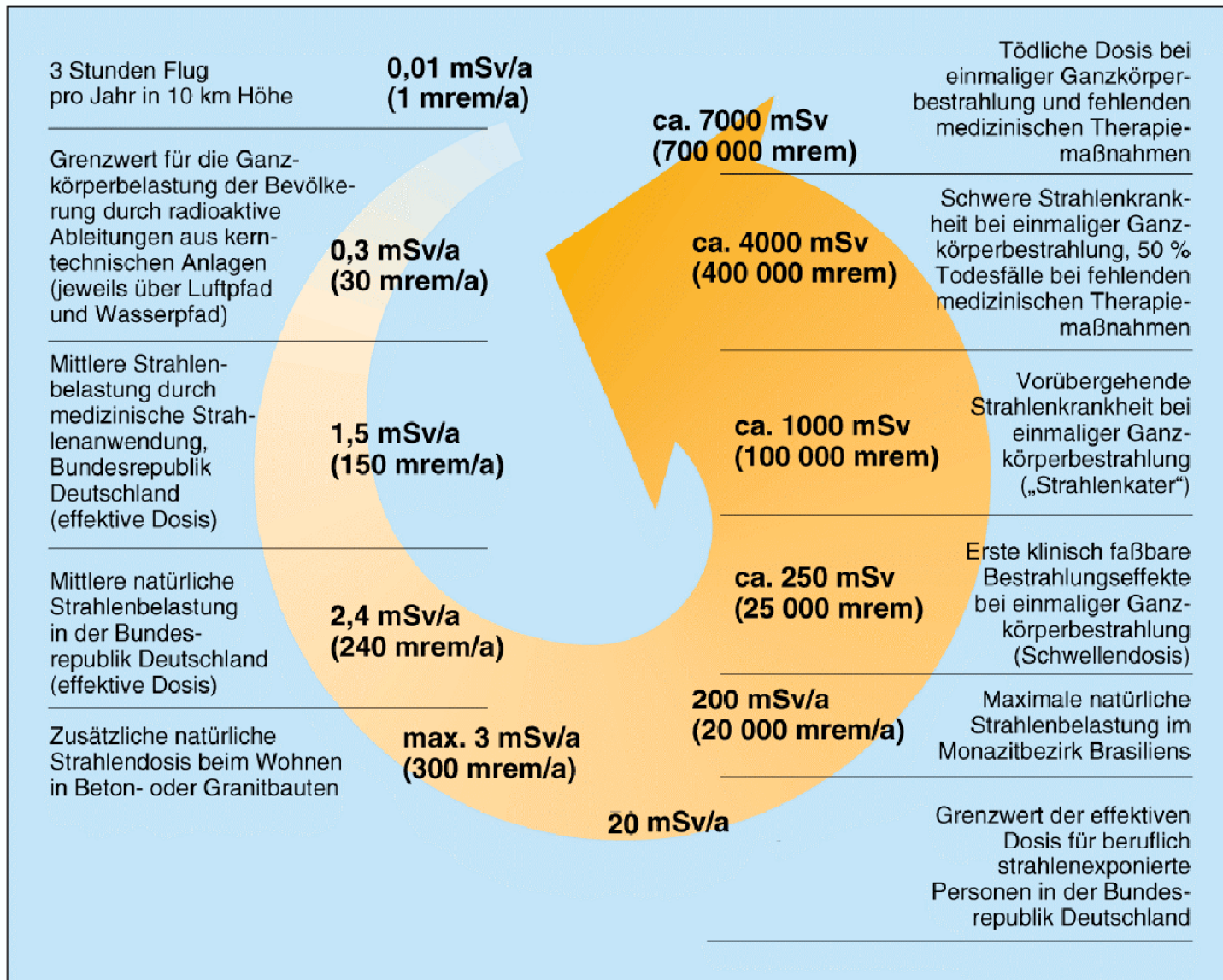


Kernkraftwerk im Jahr: < 0,01 mSv



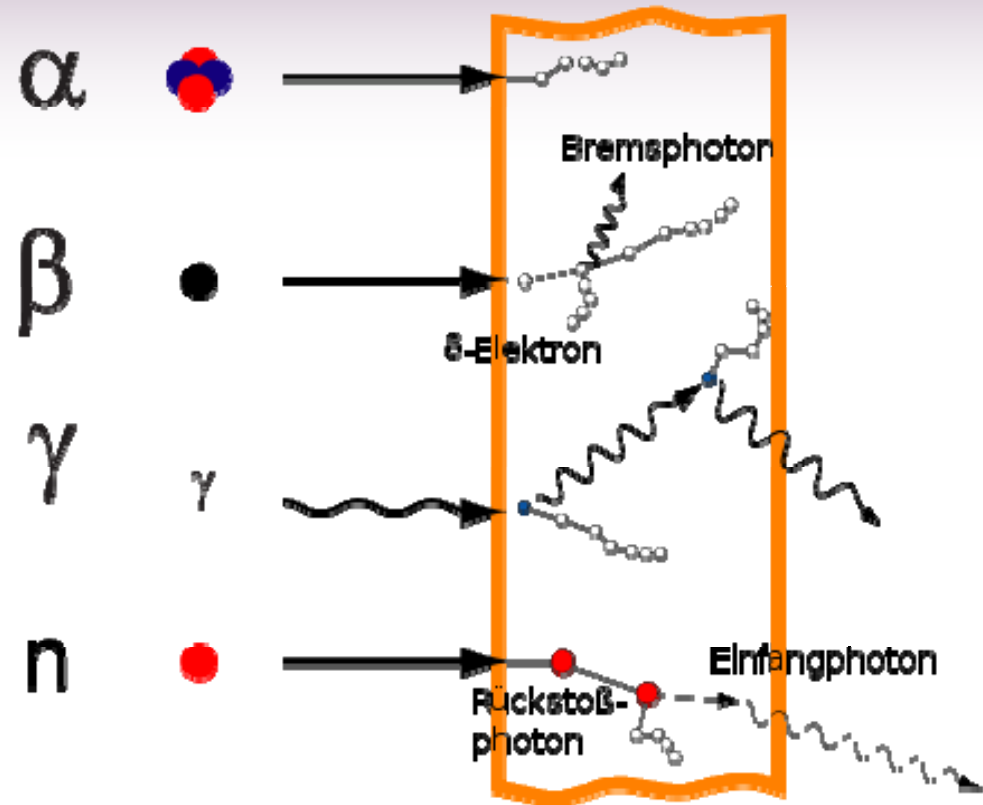
Röntgenaufnahme Lendenwirbelsäule
(2 Ebenen): 0,8 – 1,8 mSv

Strahlenbelastung





Biologische Wirkung Strahlungswichtungsfaktor



$$H_{tissue} = q_{bio} D_e$$

Äquivalentdosis = biologisch gewichtete absorbierte Energie pro Masse

Energiedosis = Strahlungs- Wichtungsfaktor

Diagnose

- Strahlungswichtungsfaktor beschreibt relative biologische Wirksamkeit einer Strahlung.
- Faktor hängt von Art und Energie der Strahlung und Gewebetyp ab
- beispielsweise hat Röntgen einen Faktor 1.0, während α -Teilchen Faktor 20



Biologische Wichtung

Äquivalentdosis
$$H_{tissue} = q_{bio} D_e$$

biologisch gewichtete absorbierte Energie pro Masse

Gewebe/Organe	Gewebe – Wichtungsfaktor
Gonaden	0.20
Knochenmark	0.12
Dickdarm	0.12
Lunge	0.12
Magen	0.12
Blase	0.05
Brust	0.05
Leber	0.05
Speiseröhre	0.05
Schilddrüse	0.05
Haut	0.01
Kochenoberfläche	0.01
andere	0.05

Äquivalentdosis Strahlungswichtungsfaktor

Art der Strahlung	Energiebereich	Strahlungs – Wichtungsfaktor
Photonen	alle Energien	1.0
Elektronen, Myonen	alle Energien	1.0
Neutronen	bis 10 keV	5.0
	10 keV bis 100 keV	10.0
	100 keV bis 2 MeV	20.0
	2 MeV bis 20 MeV	10.0
	über 20 MeV	5.0
Protonen		5.0
	über 2 Mev	20.0
α_{He}^+ , schwere Kerne		20.0

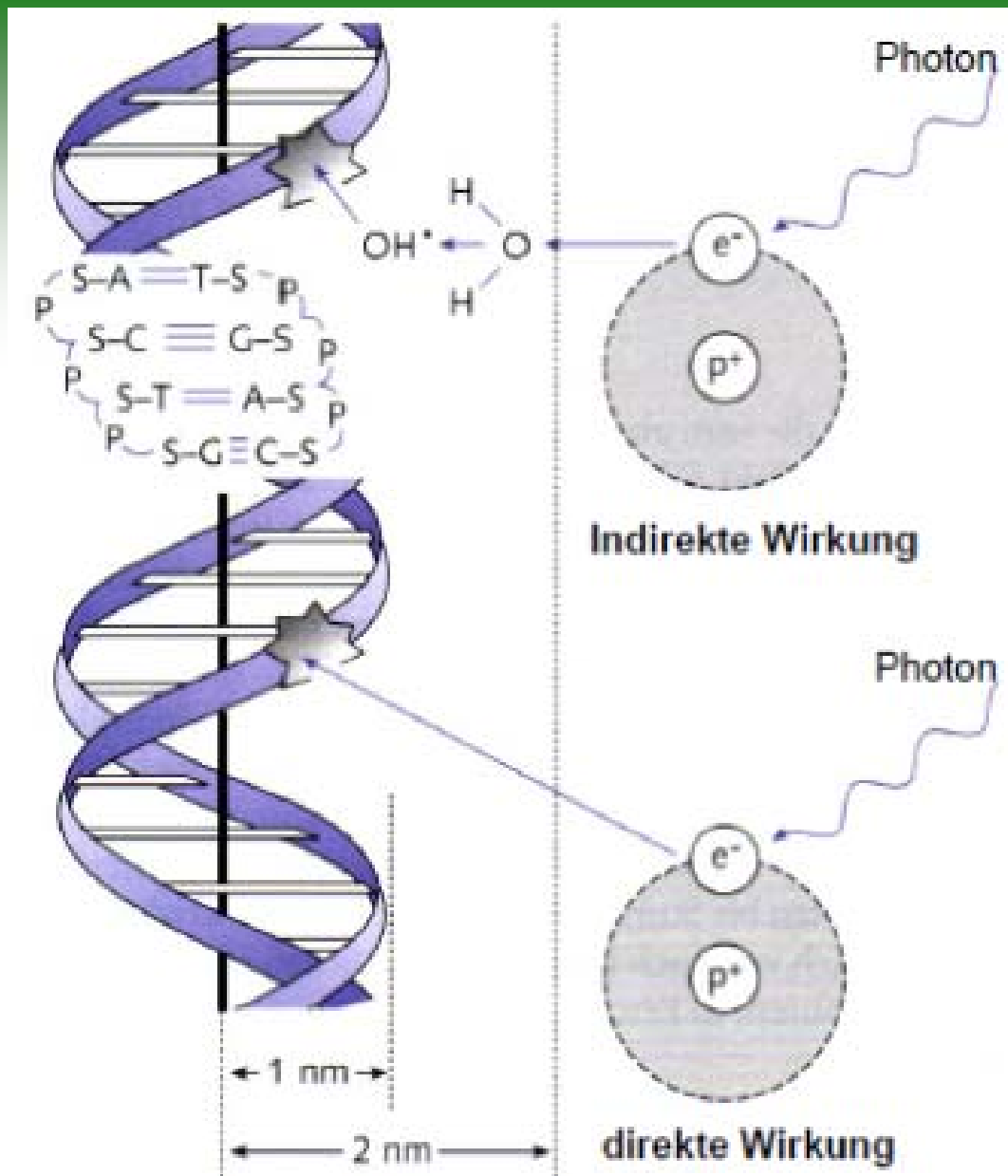
Andere Wichtungsfaktoren

Gewebe-Wichtungsfaktor

Gewebe/Organe	Gewebe – Wichtungsfaktor
Gonaden	0.20
Knochenmark	0.12
Dickdarm	0.12
Lunge	0.12
Magen	0.12
Blase	0.05
Brust	0.05
Leber	0.05
Speiseröhre	0.05
Schilddrüse	0.05
Haut	0.01
Kochenoberfläche	0.01
andere	0.05

Diagnose

Berücksichtigung, dass effektive Dosis durch unterschiedliche Empfindlichkeit der Organe gegenüber ionisierender Strahlung beeinflusst wird



Diagnose

Hauptsächlich Bildung von Wasserradikalen in Wechselwirkung mit harter Röntgenstrahlung

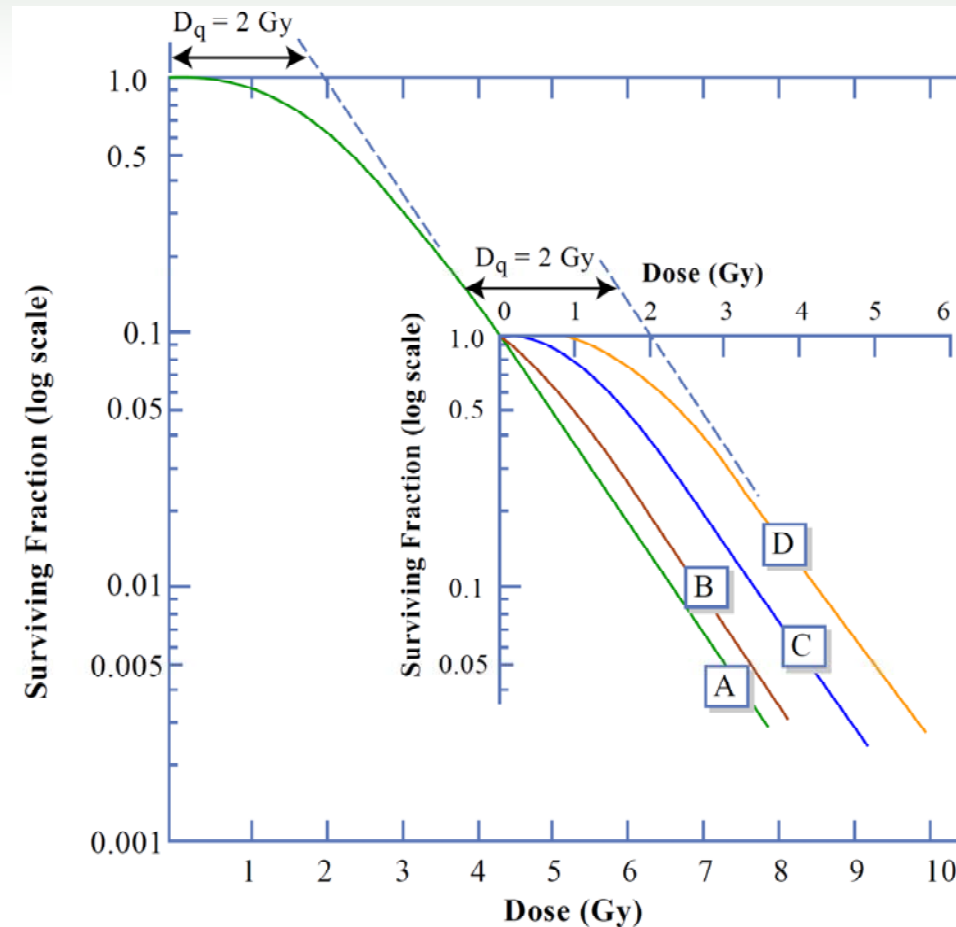
1959

Elkind-Sutton Experiment

Symptome

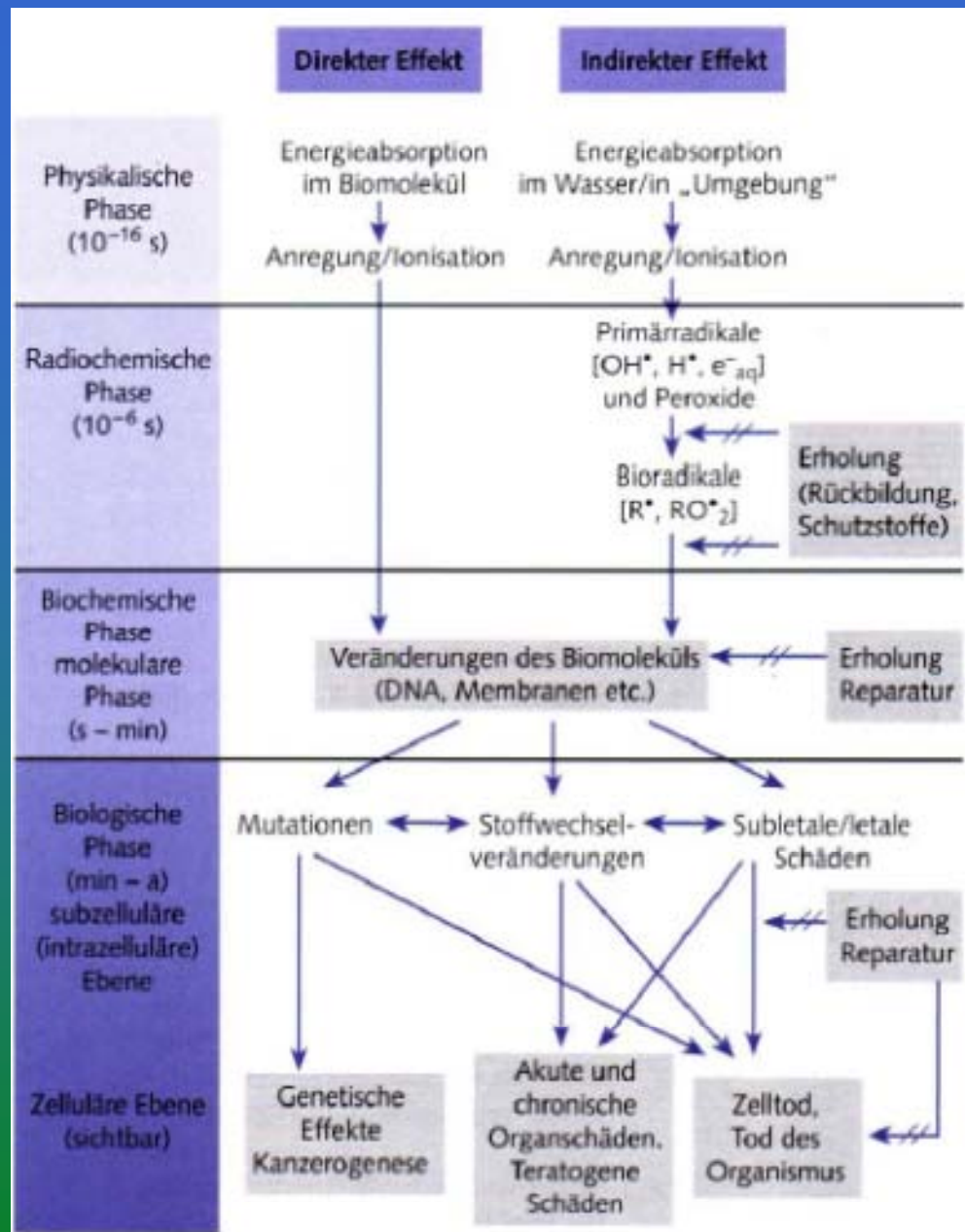
Zellen werden so mit ionisierender Strahlung behandelt, dass nur 10% der Zellen überleben

Zellkultur	Pause
A	ohne Unterbrechung
B	15 Minuten
C	2 Stunden
D	6 Stunden



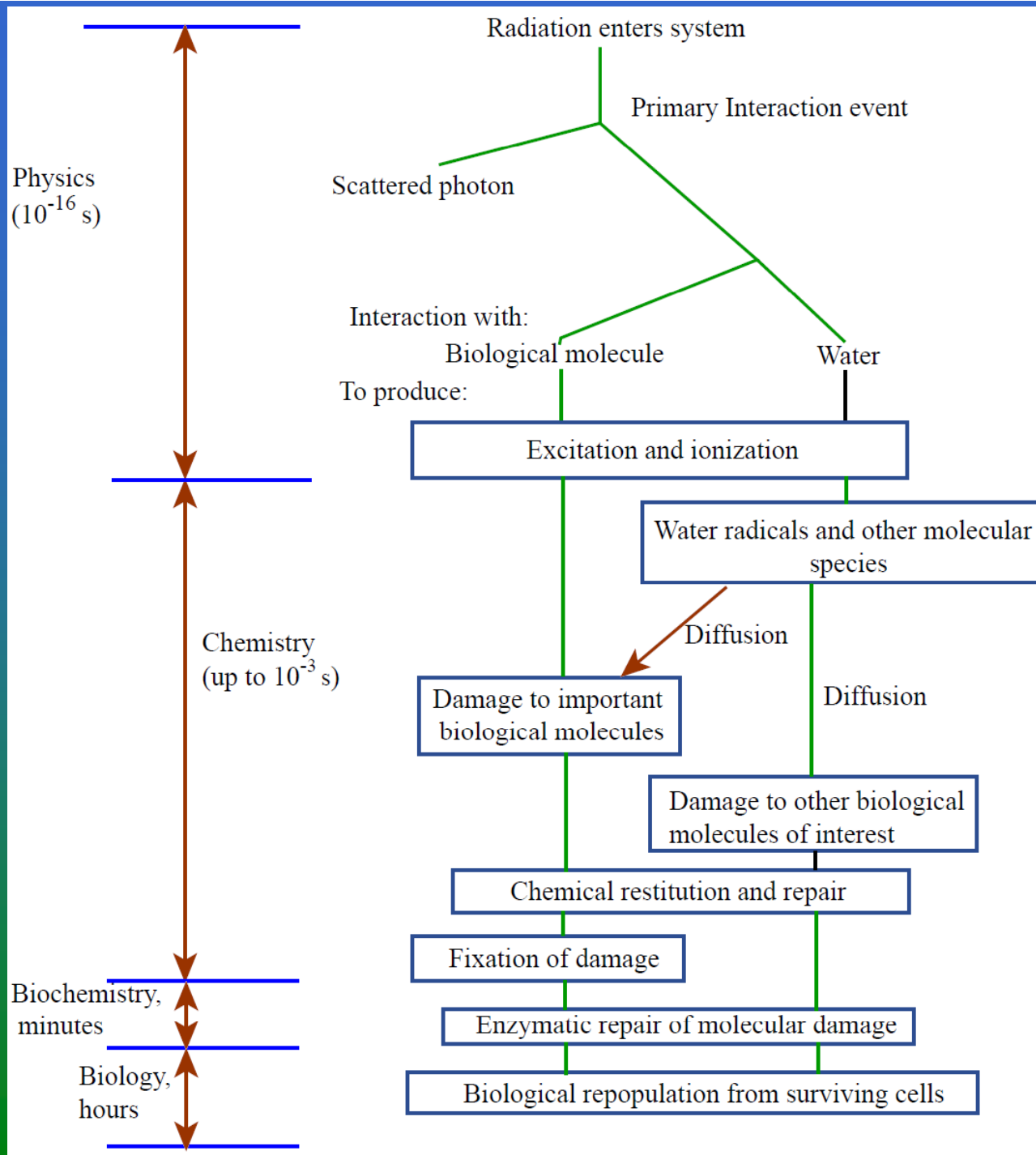
Diagnose

- unterschiedliche Zeitpunkt der weiteren Bestrahlung entscheidet über Überleben der Zellen
- Zellreparatur benötigt Zeit



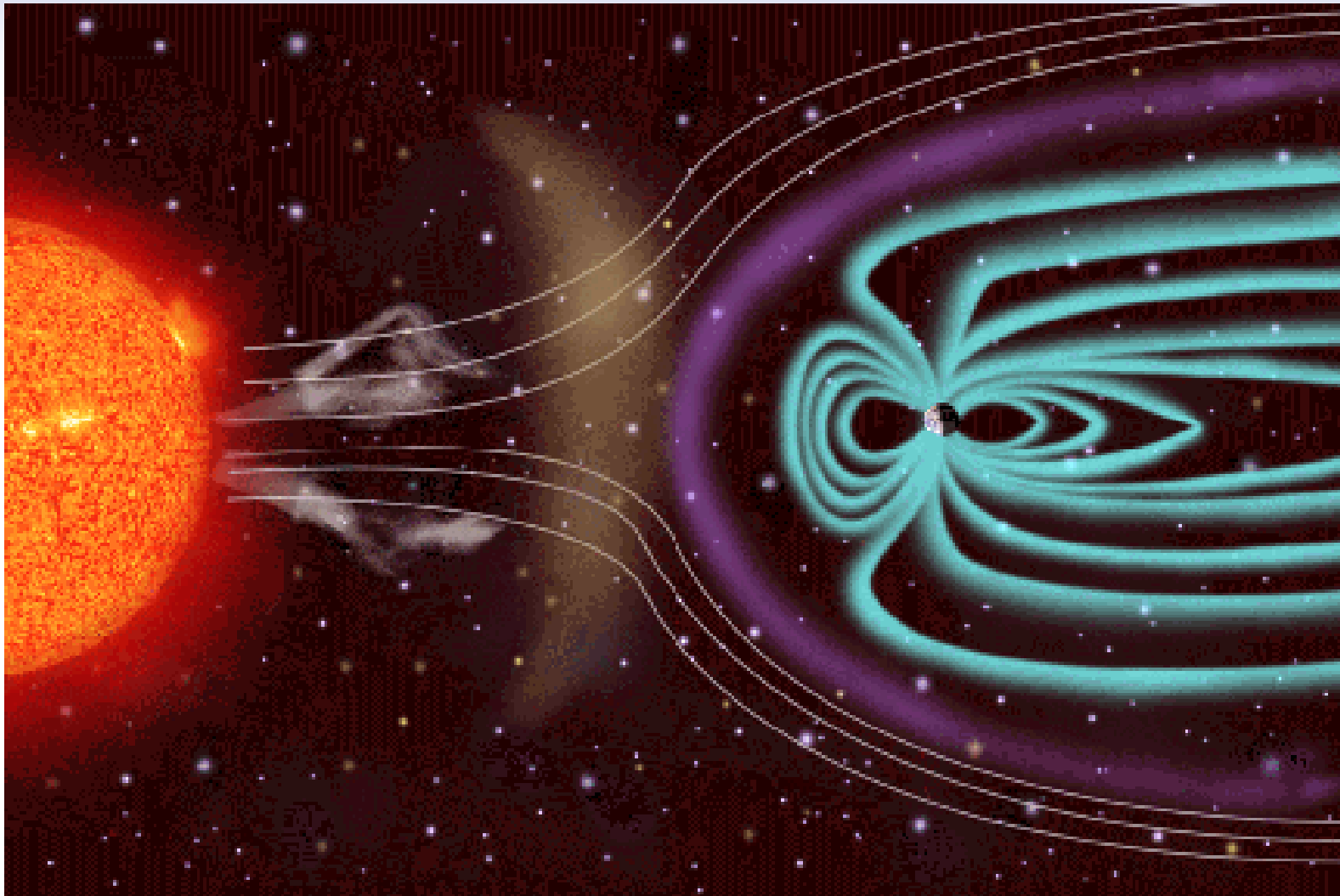
Diagnose

Vom physikalischen Ereignis zum biologischen Effekt kann Reparatur auf allen Ebenen erfolgen





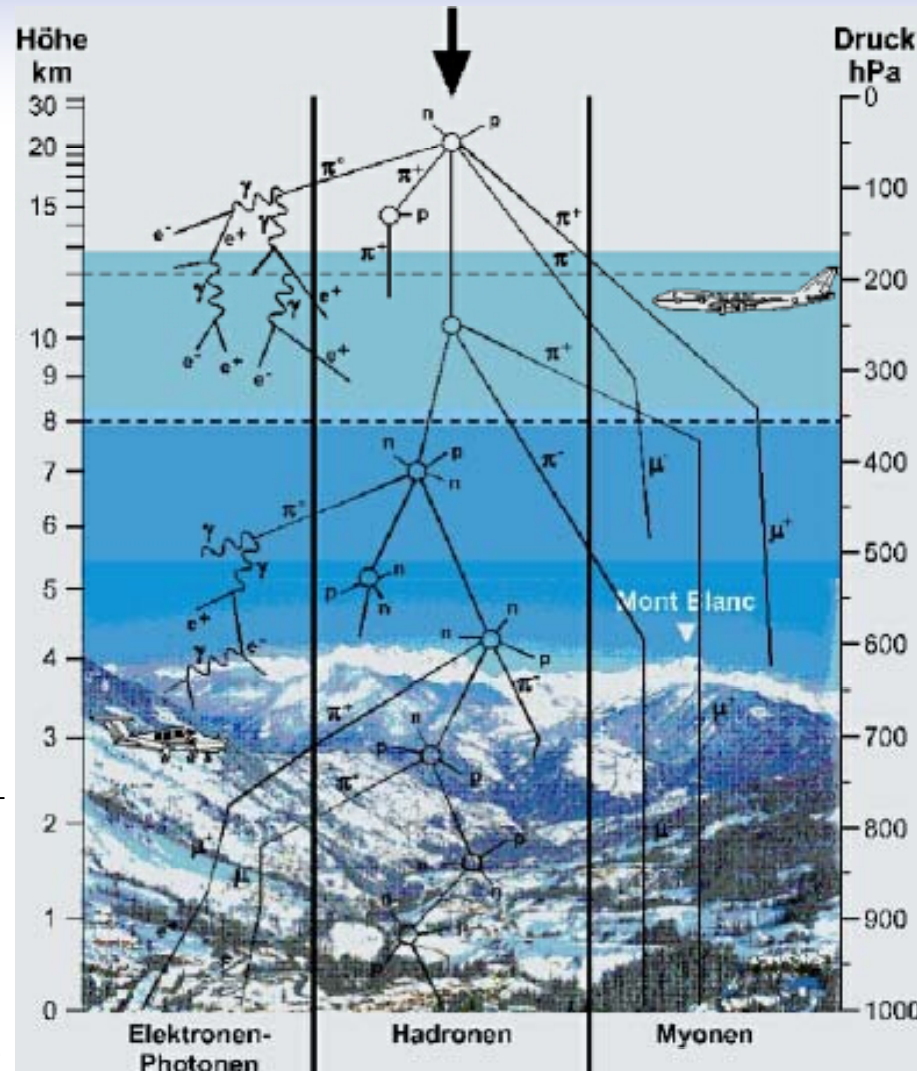
Kosmische Belastung Teilchenregen



Diagnose

Energetische Teilchen vom Magnetfeld der Erde effektiv abgeschirmt (van Allen Gürtel)

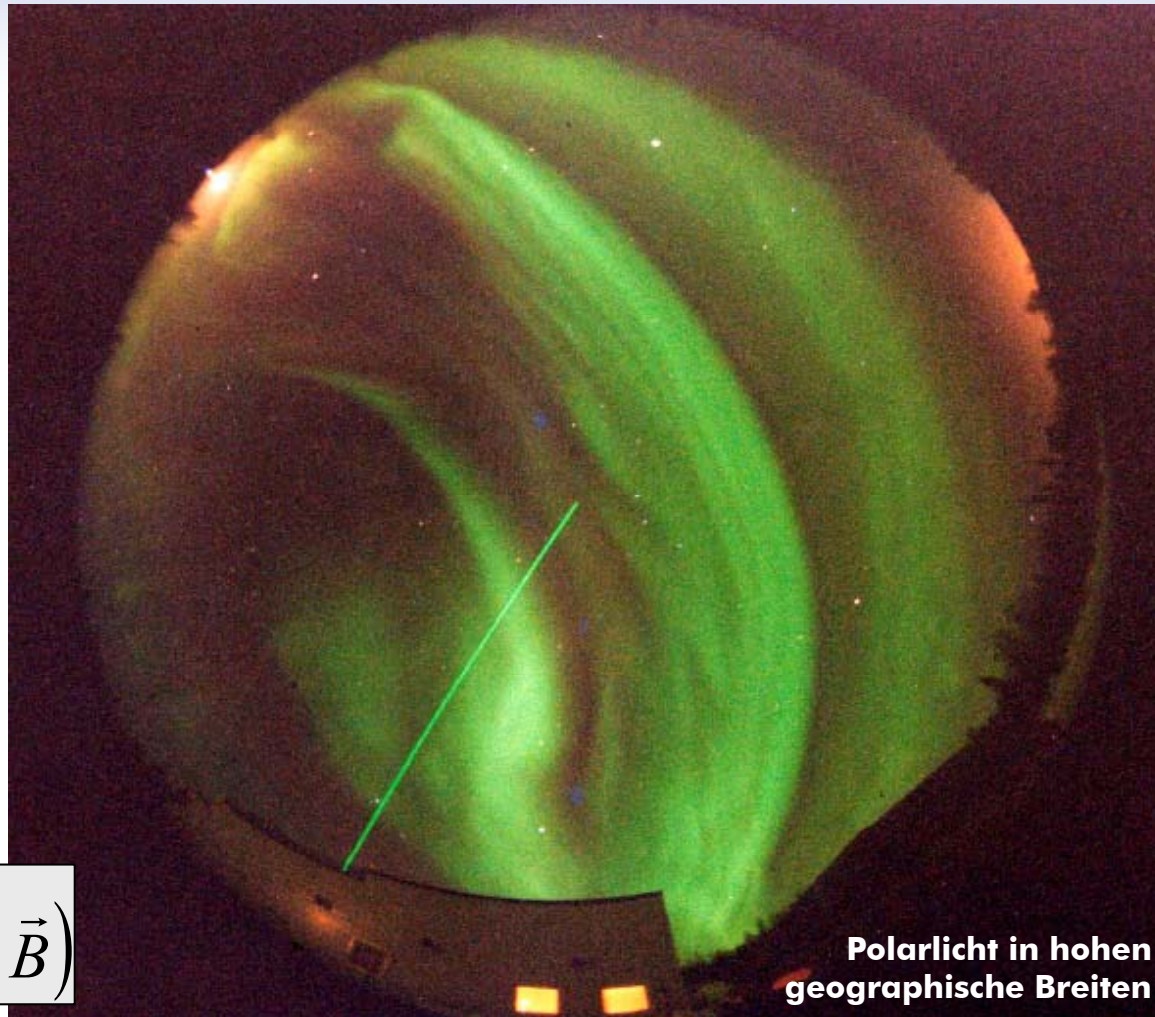
Kosmische Belastung Teilchenregen



Teilchenart	Anteil
Protonen	85 %
α - Teilchen	14 %
schwere Kerne	1.5 %
γ - Photonen	<1.0 %

Diagnose
Kosmische Schauer erzeugen Teilchenschauer in oberen Atmosphäre

Kosmische Belastung Teilchenregen



Lorentzkraft

$$\vec{F}_M = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

Polarlicht in hohen
geographische Breiten

Diagnose

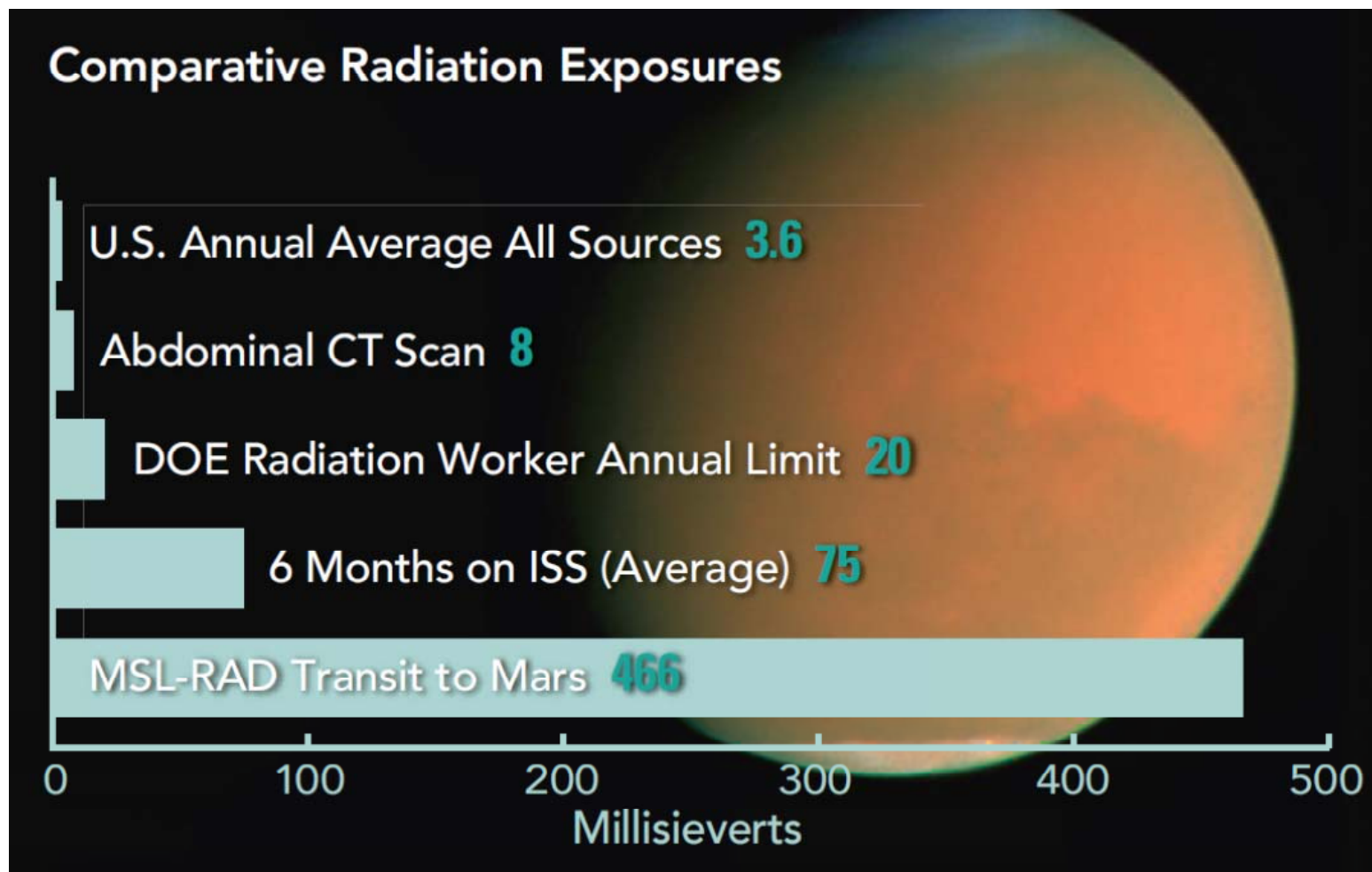
- Zyklotronbewegung im Magnetfeld führt verstärktem Eintrag an Polen
- Anregung von Luftmolekülen führt zu N₂ und O₂ Fluoreszenz (Polarlichter)

Weltraumabenteuer Menschen zum Mars

PLANETARY EXPLORATION

SCIENCE VOL 340 31 MAY 2013

Radiation Will Make Astronauts' Trip to Mars Even Riskier



Strahlenbelastung

Natürliche vorkommende Radioaktive Substanzen in der Nahrung

Produkt	Radioaktivität (K-40)
Milch	40 – 60 Bq/l
Fleisch	30 – 140 Bq/kg
Gemüse, Obst	30 – 150 Bq/kg

Strahlenbelastung durch medizinische Untersuchungen

Röntgenuntersuchung von	Dosis
Zahn	< 0,01 mSv
Brustkorb	0,02 – 0,08 mSv
Magen und Darm	6 – 18 mSv
Bauchraum (Computertomographie)	10 – 25 mSv

Strahlenbelastung

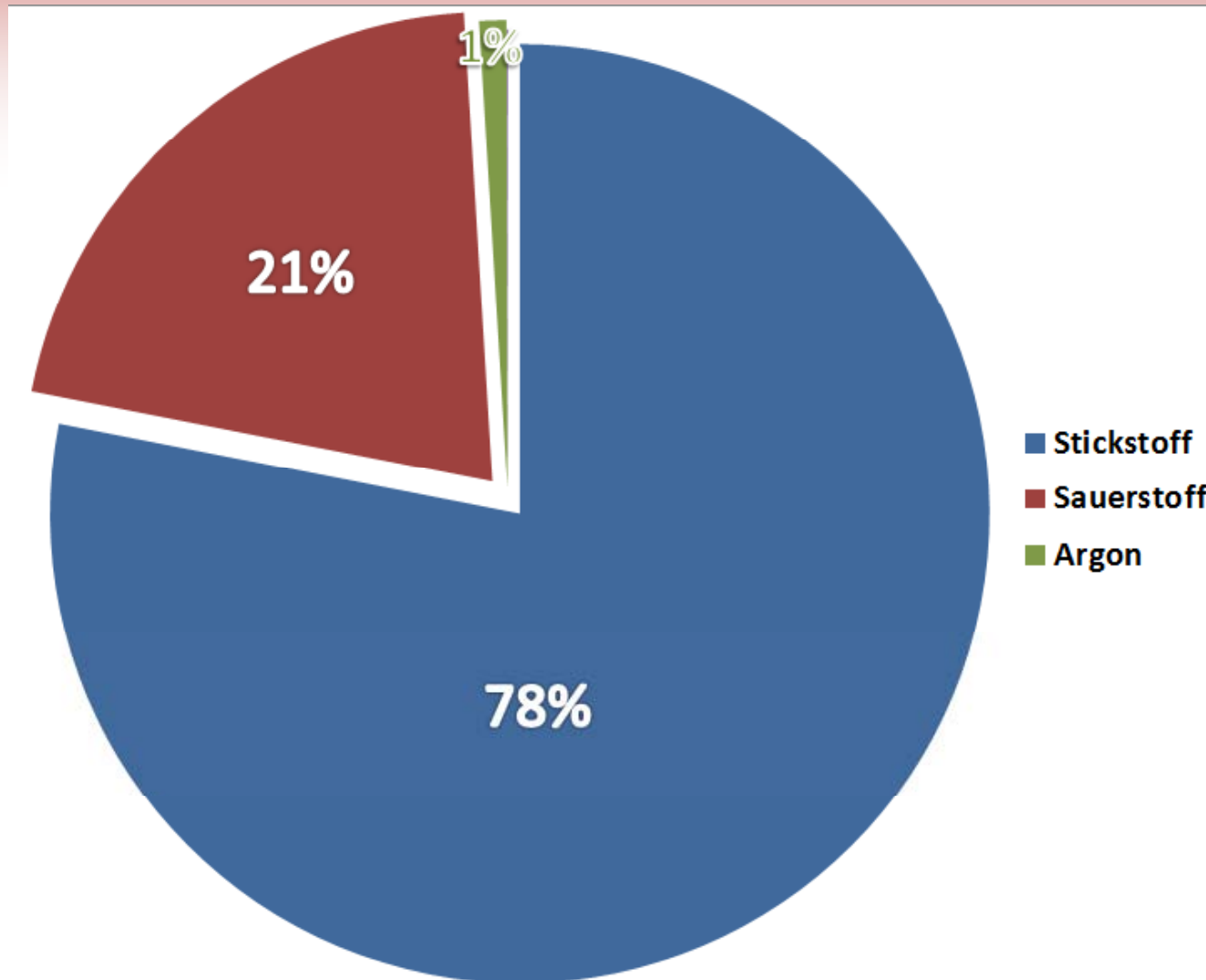
	Dosis
Schwankungsbereich der Jahresdosis durch natürliche Radioaktivität (weltweites Mittel)	1 – 10 mSv
Jahresdosis in Gegenden mit extrem hoher natürlicher Radioaktivität, z. B. Gebiete in Indien, Brasilien und im Iran	100 – 200 mSv
Schwellendosis: erste klinisch fassbare Effekte bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung (z. B. Veränderungen im Blutbild)	200 – 300 mSv
Vorübergehende Strahlenkrankheit bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung (z.B. Übelkeit, Erbrechen, Haarausfall)	750 – 1.500 mSv
Tödliche Dosis bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung und fehlender medizinischer Behandlung	6.000 – 10.000 mSv

Thema Ionisierende Strahlung
Radon





Luftanalyse



Diagnose

Bestandstandteile der Luft sind im wesentlichen Stickstoff und Sauerstoff, sowie Argon

Luftanalyse

Periodensystem der Elemente Periodic table of the elements

1												18						
1 H												13	14	15	16	17	18 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43* Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	57-71 Lanthaniden Lanthanides	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84* Po	85* At	86* Rn	
87* Fr	88* Ra	89-103 Actiniden Actinides	104* Rf	105* Db	106* Sg	107* Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uu	112 Uub							
Lanthaniden Lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61* Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
Actiniden Actinides		89* Ac	90* Th	91* Pa	92* U	93* Np	94* Pu	95* Am	96* Cm	97* Bk	98* Cf	99* Es	100* Fm	101* Md	102* No	103* Lr		

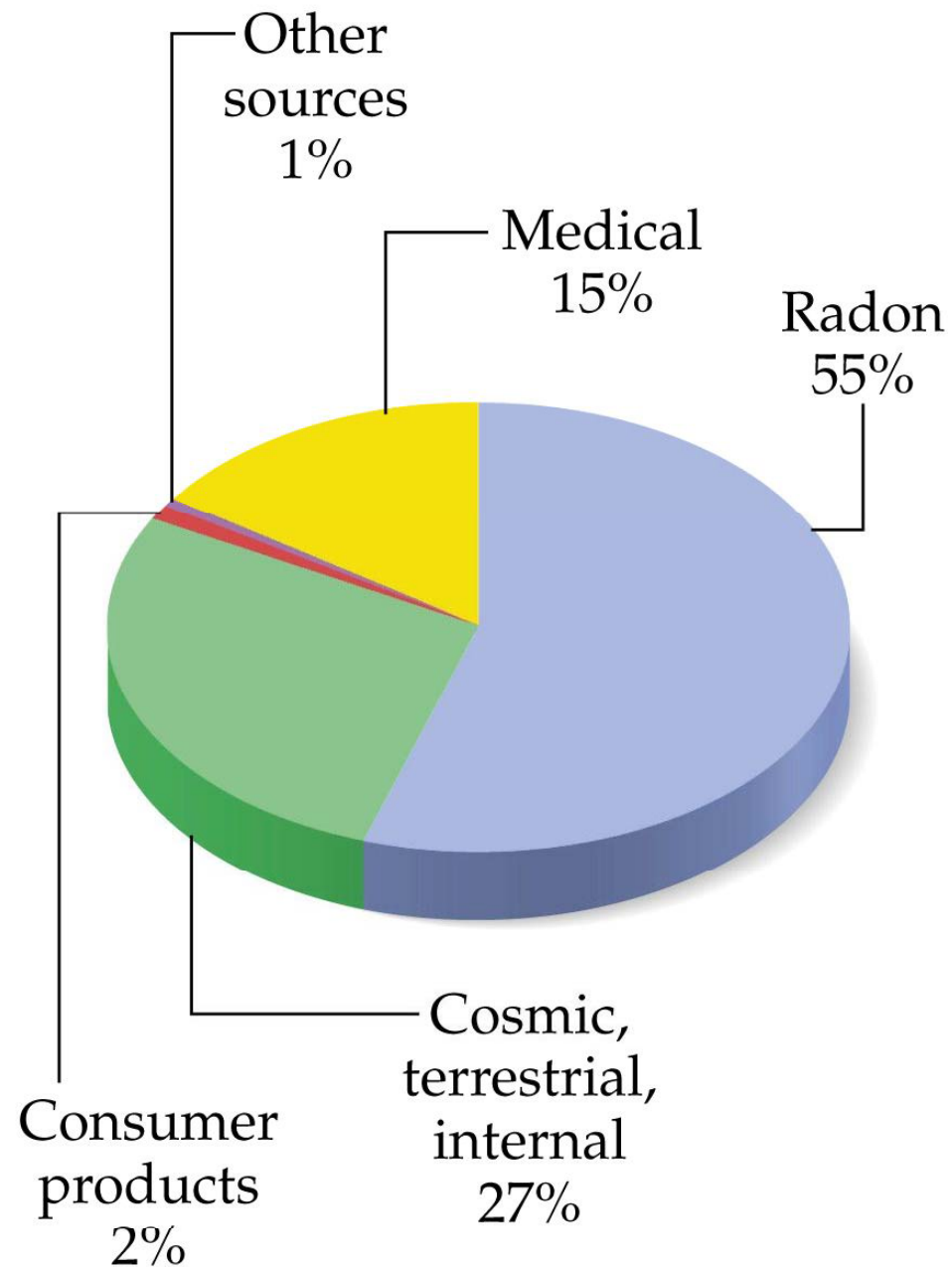
■ Metalle · Metals
■ Nichtmetalle · Nonmetals
■ Übergangsmetalle · Transition metals
■ Elemente der f-Reihe · Elements of the f-series

stabilstes Isotop · Most stable isotope

Luftbestandteile

Radon

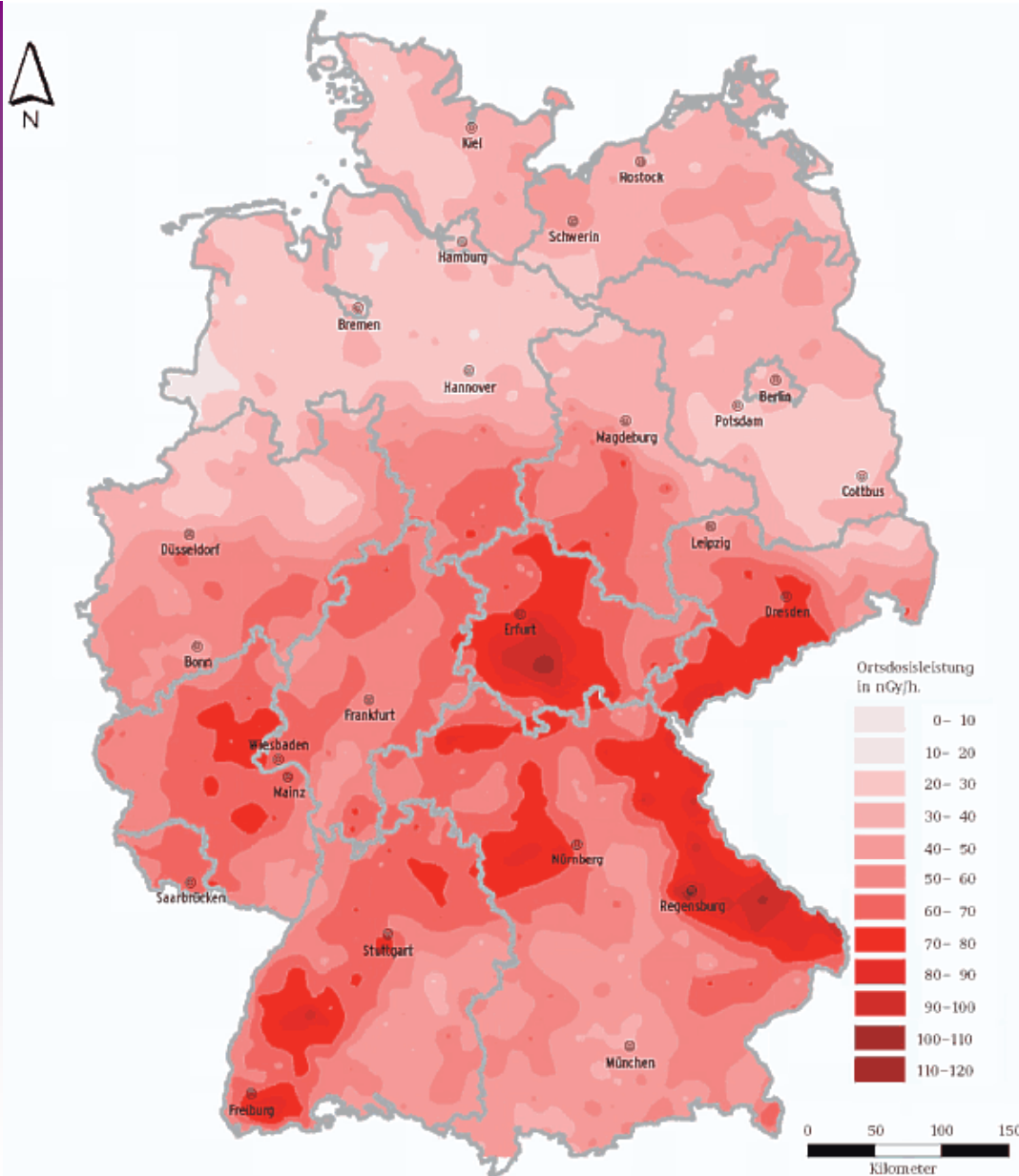
Diagnose
Hauptbestandteile der Luft sind leichte Elemente



Diagnose

Radon hat höchsten Anteil an Strahlenbelastung auf der Erde

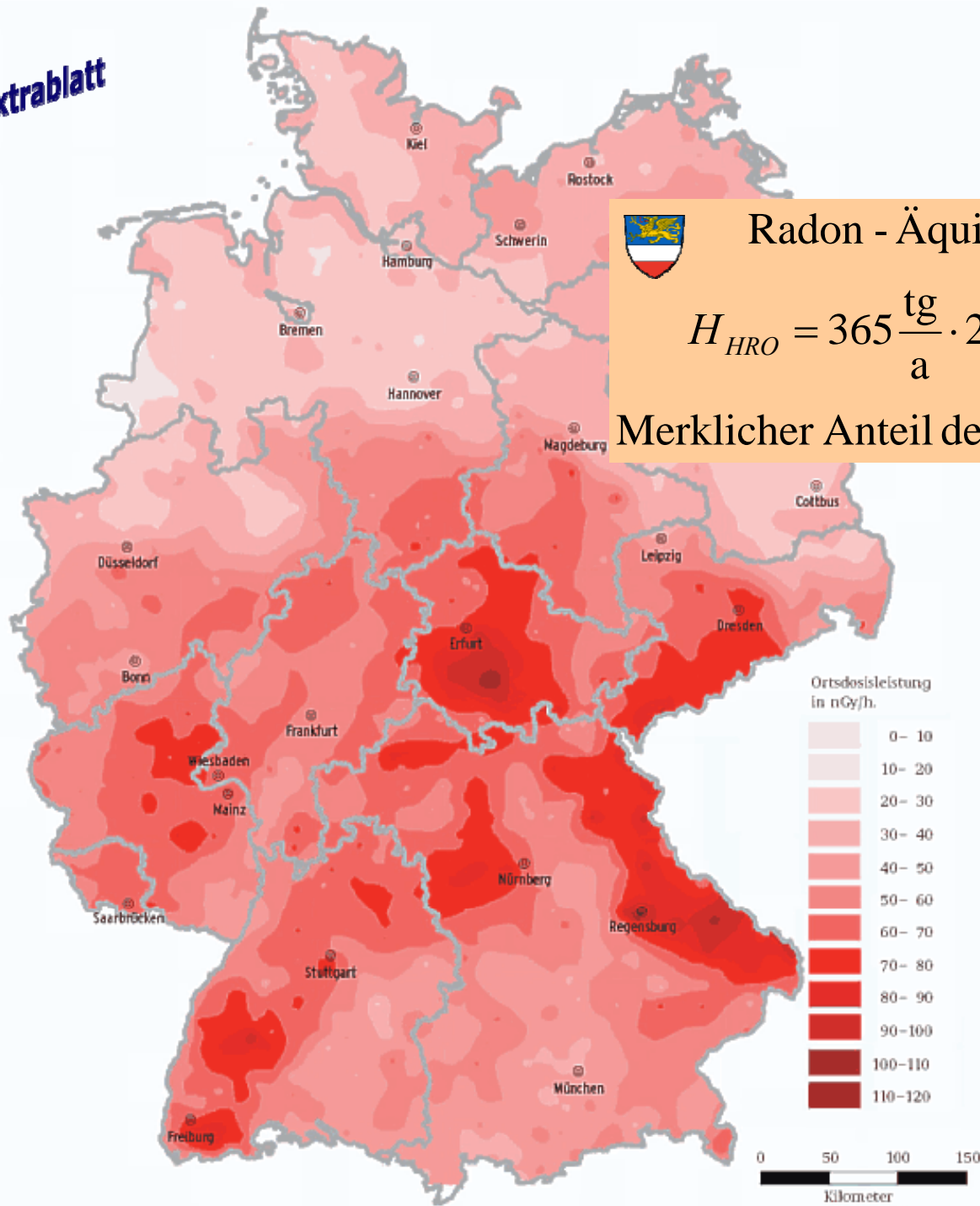
Strahlenbelastung Radon



Diagnose

- Radon entsteht aus dem radioaktiven Zerfall von Radium
- Element Radon kommt insbesondere in Gebieten mit Uranvorkommen vor

radioaktive Belastung Radon



Radon - Äquivalentdosis für Rostock

$$H_{HRO} = 365 \frac{\text{tg}}{\text{a}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{tg}} \cdot \frac{30 \cdot 10^{-9} \text{Sv}}{\text{h}} = 0.3 \text{ mSv}$$

Merklicher Anteil der natürlichen Strahlenbelastung

Dosisleistung vor Ort

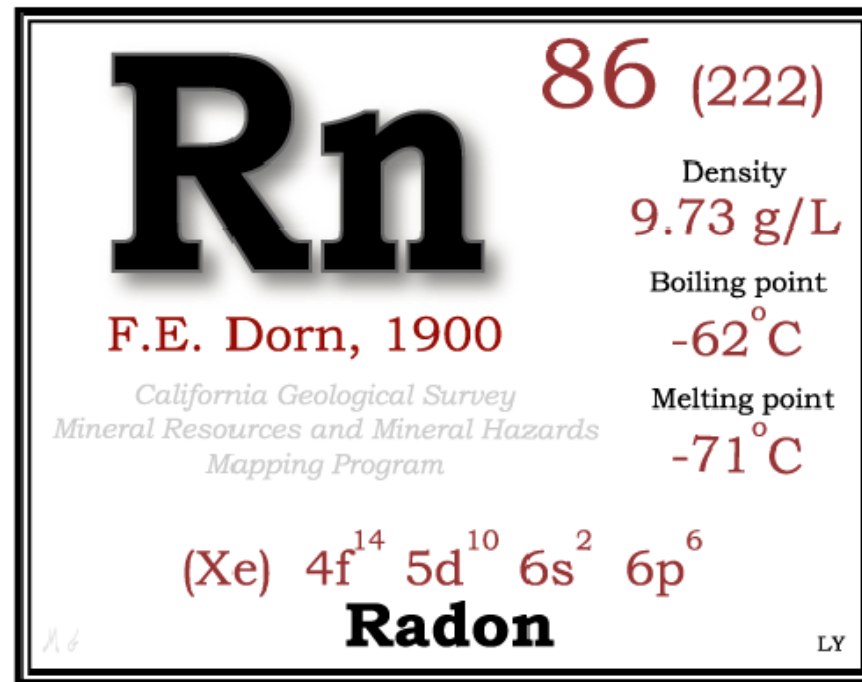
$$\left[\frac{\text{nGy}}{\text{h}} \right] = \left[\frac{10^{-9} \text{J}}{\text{kg} \cdot \text{h}} \right] \approx \left[\frac{10^{-9} \text{Sv}}{\text{h}} \right]$$



Problemfall Radon

Symptome

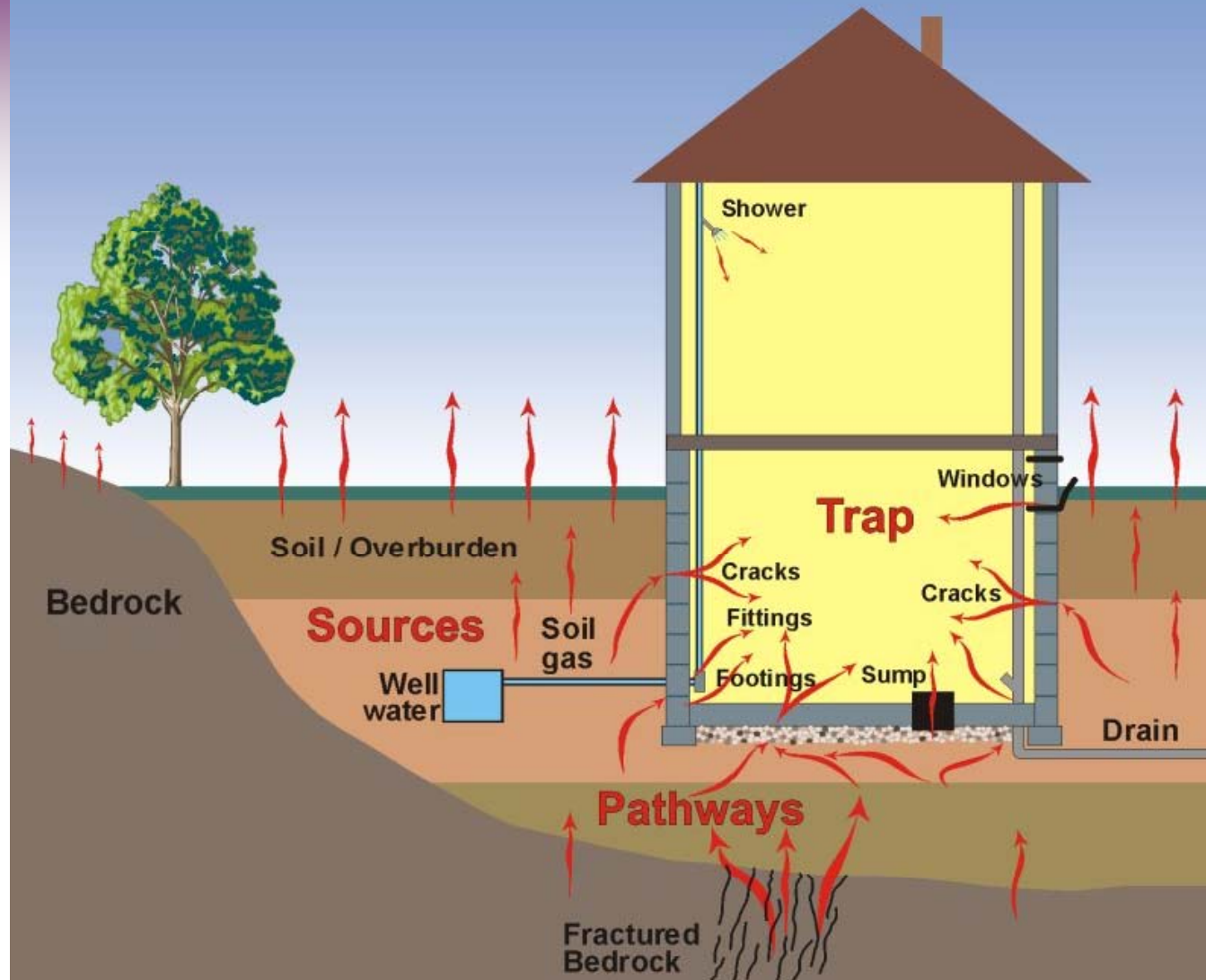
- von Friedrich Ernst Dorn 1900 entdeckt
- ursprünglicher Name Radium-Emanation (*aus Radium Herausgehendes*)
- 1908 chemisch isoliert durch Ramsay und Whytlaw-Gray
- Emission von Licht führt zu Namen Niton (lateinisch *nitens leuchtend*)
- seit 1923 heißt das Element Radon



Diagnose

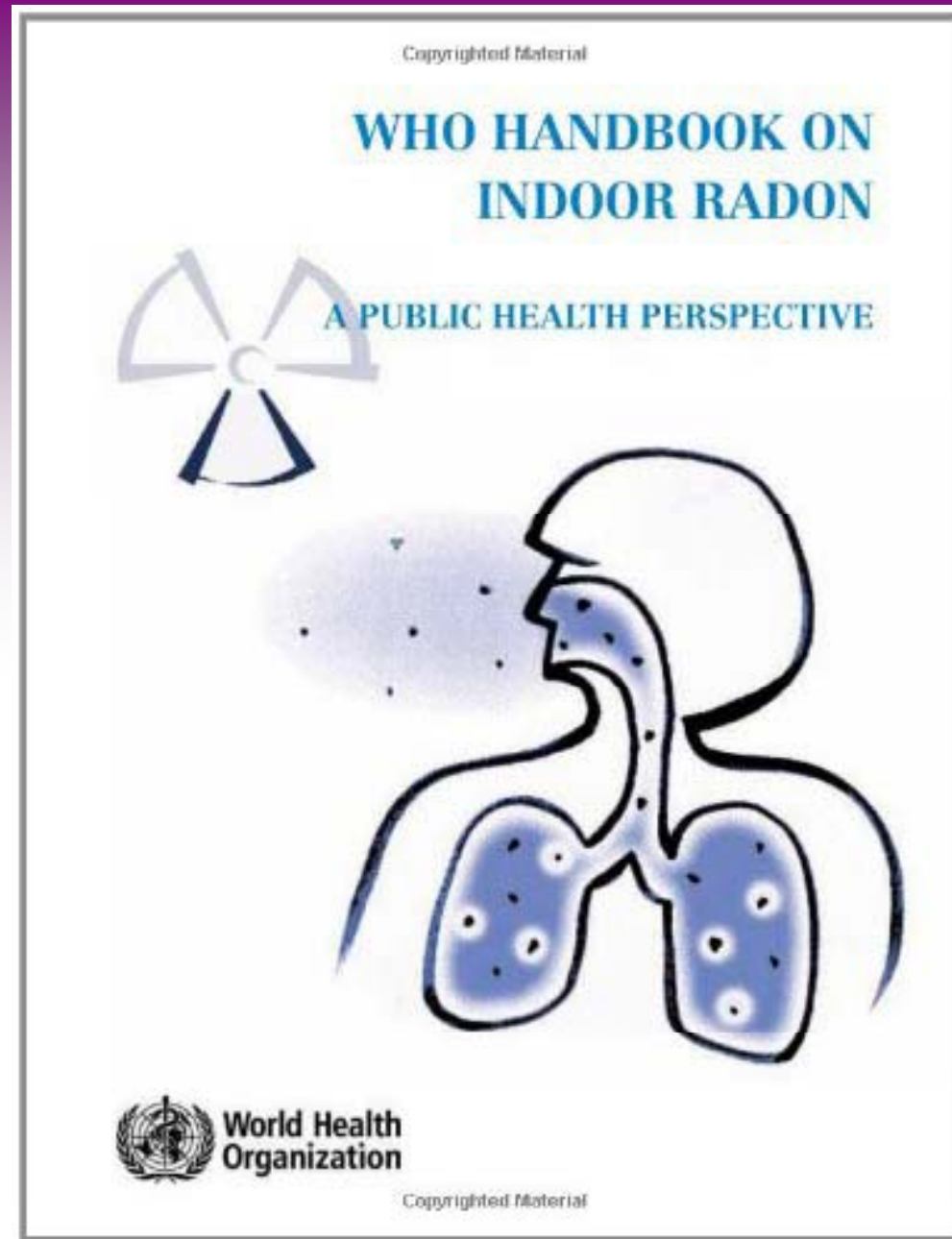
- Radon ist Element der 8. Hauptgruppe und als Edelgas gasförmig
- Radon ist das schwerstes Edelgas und chemisch nicht reaktiv
- Radon allerdings **INSTABIL** und zerfällt mit Halbwertszeit von 3.8 Tagen

Radon Movement



Diagnose

- Radon dringt aus dem Erdreich in tief gelegene Räume ein
- Rn-222 wird eingeatmet und verbleibt als schweres Gasatom in Lunge (Schwerkraft)
- radioaktiver Zerfall führt zu Strahlenbelastung insbesondere der Lunge



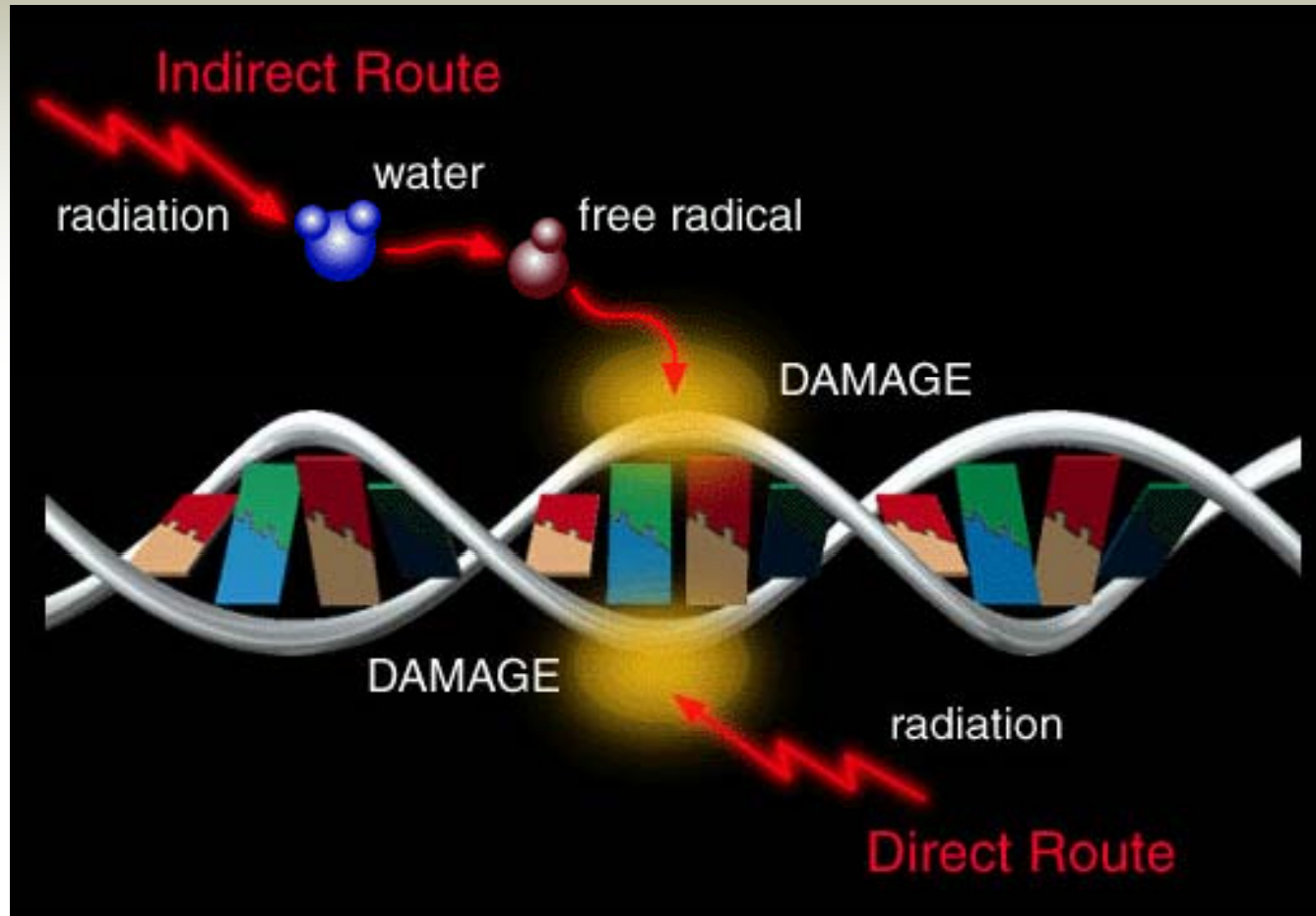
Einatmung SF₆

Diagnose

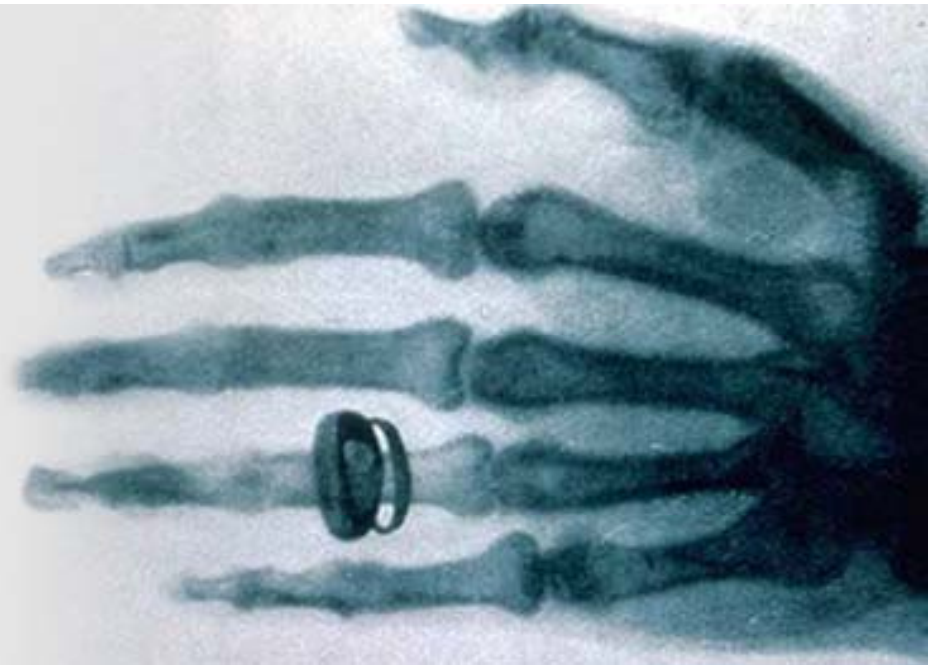
Rodan wahrscheinlich ursächlich verantwortlich für 10% aller Fälle von Lungenkrebs

Thema Strahlentherapie

Licht-Materie



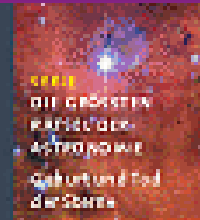
Radioaktivität und Röntgenstrahlung als Krebsrisiko



Extrablatt

Spektrum

DER WISSENSCHAFT



1. AUGUST 2013

Spektrum
8/13

REISWANDERUNGEN

Minibender offenbaren
Überschungen

NEUROWISSENSCHAFT

Wie Luft im
Gehirn entsteht

ARCHÄOLOGIE

Die Goldkönige
von Hawaii

Neue Strategien gegen Krebs

Physiker wollen
die Tumorthherapie
revolutionieren



DAUERHAFT VERFÜGBAR IN DER SCIENTIFIC AMERICAN

www.spektrum.de

Heft 8/ 2013

Strahlentherapie 61

Wechselwirkungsszenarien Strahlung trifft Materie

Röntgenstrahlung

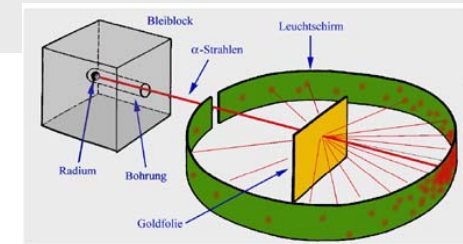
- elektromagnetische Strahlung (Licht)
- Entstehung in Elektronenhülle des Atoms
- typische Energien im Bereich von 10 keV

Radioaktivität und
Röntgenstrahlung
als Krebsrisiko



α -Strahlung

- Helium-Kerne entstanden bei Kernumwandlung
- typische kinetische Energien im Bereich von MeV



β -Strahlung

- Elektronen oder Positronen entstehen bei Kernumwandlung,
- typische Energien im Bereich von MeV



γ -Strahlung

- elektro-magnetische Strahlung (Licht) durch Übergänge im Atomkern
- typische Energien im Bereich von MeV

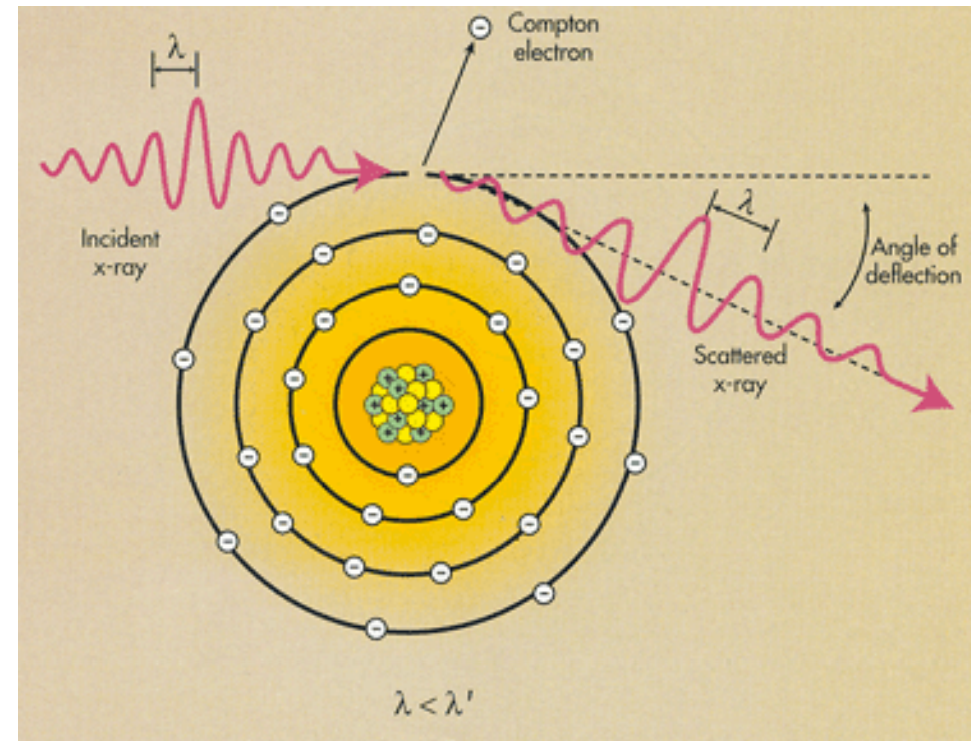
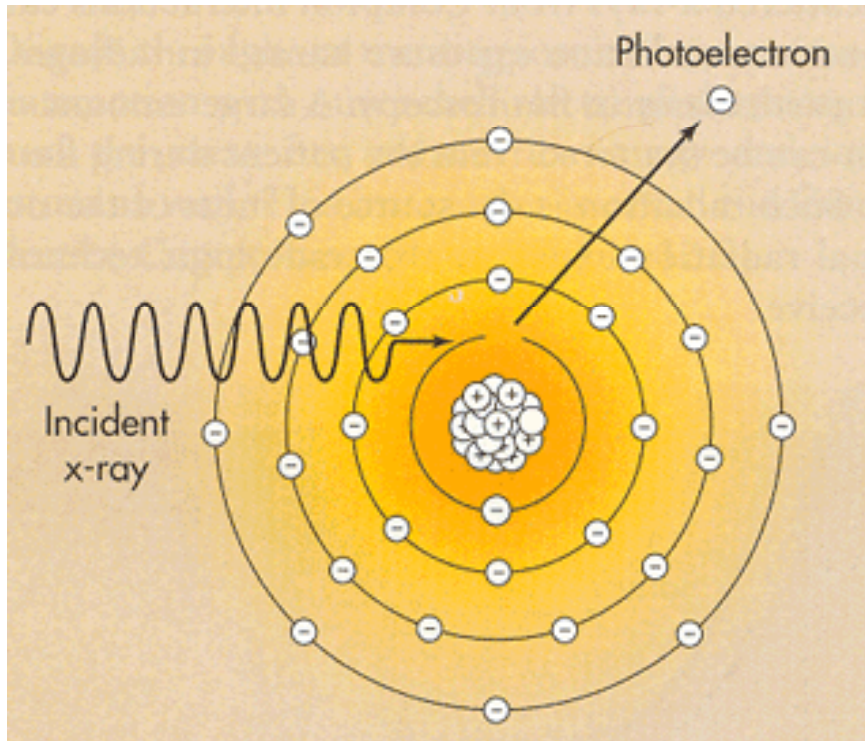


$$1 \text{ MeV} = 1000 \text{ keV} = 1000000 \text{ eV}$$



Wechselwirkungsszenarien γ -Licht trifft Materie

Photoeffekt

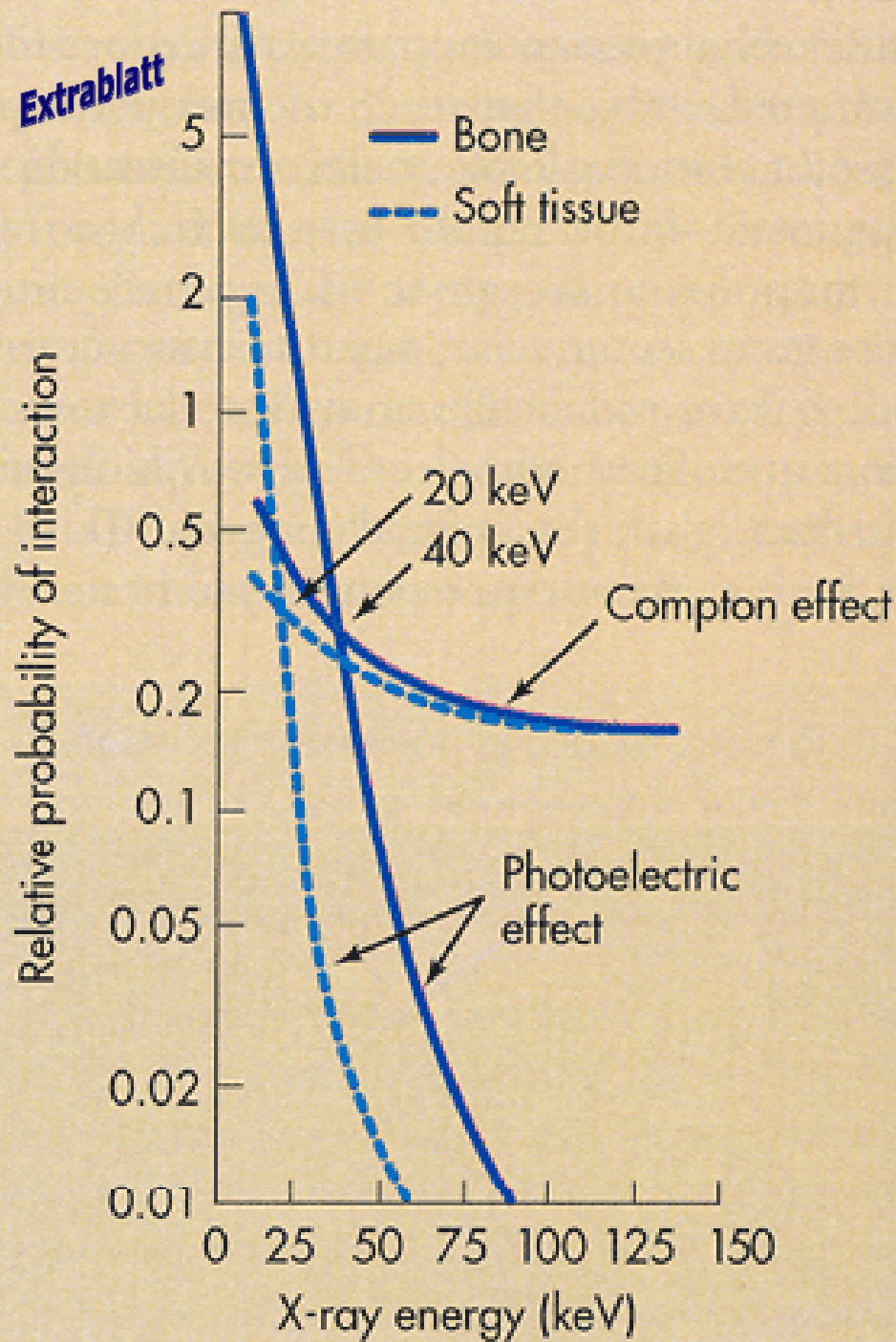


Comptoneffekt

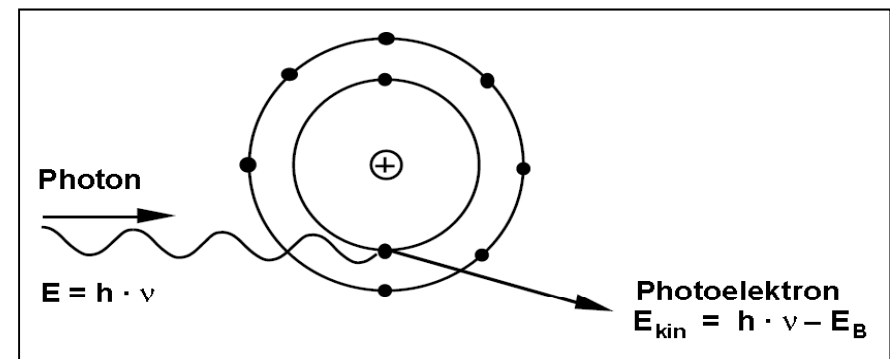
Diagnose

Wechselwirkungen von γ -Strahlung mit Materie NUR mit Teilchencharakter des Lichts erklärbar

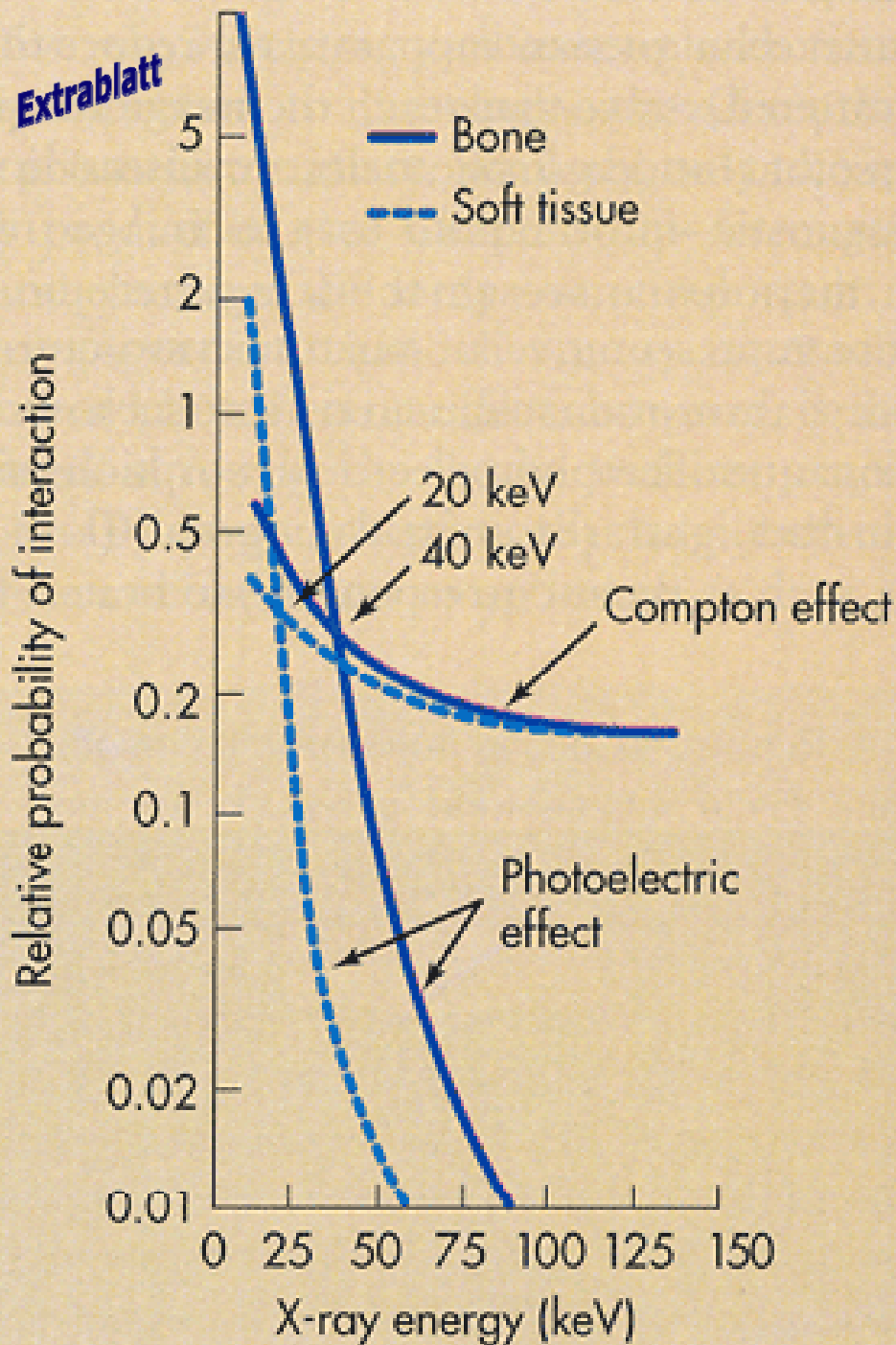
Extrablatt



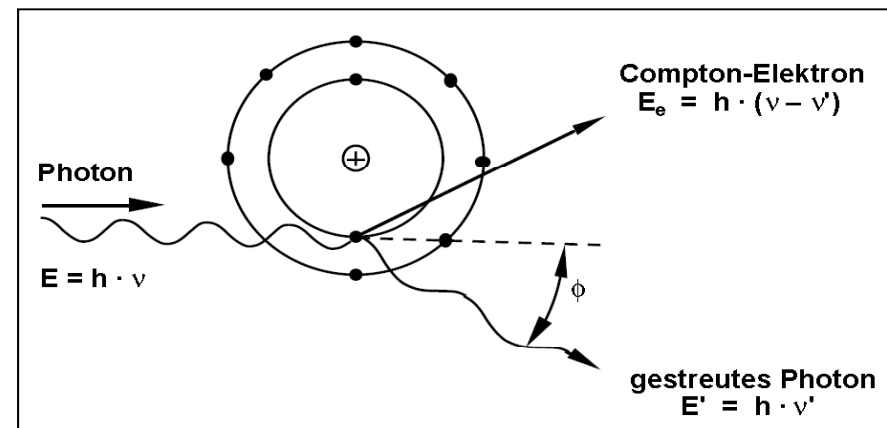
Wechselwirkung 1 Photoeffekt



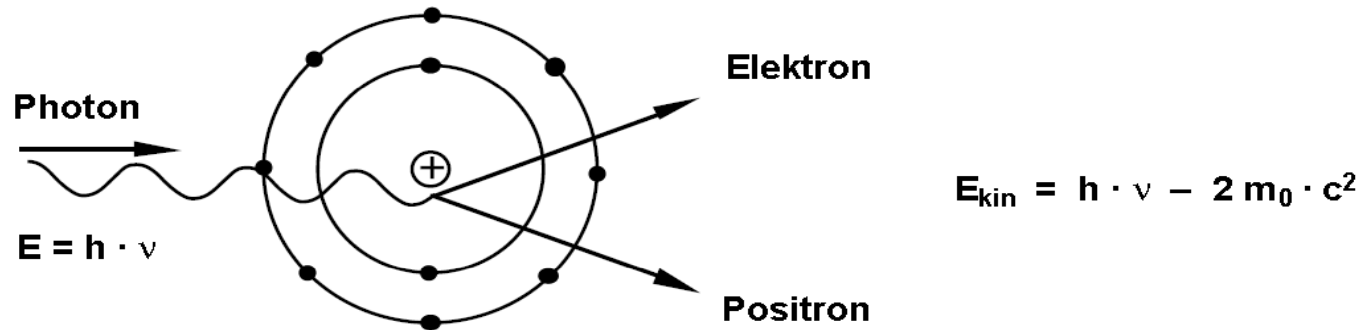
Extrablatt



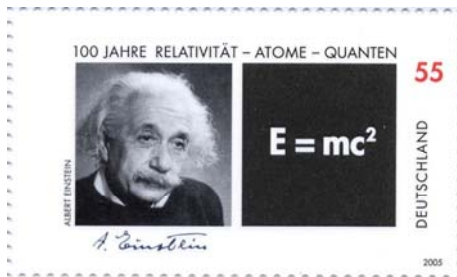
Wechselwirkung 2 Comptoneffekt



Wechselwirkung 3 Paarbildung



Zerfall ^{22}Na



ENERGIEERHALTUNG

Ruheenergie Positron	+	Ruheenergie Elektron	=	$2 \cdot 511 \text{ keV}$
-------------------------	---	-------------------------	---	---------------------------

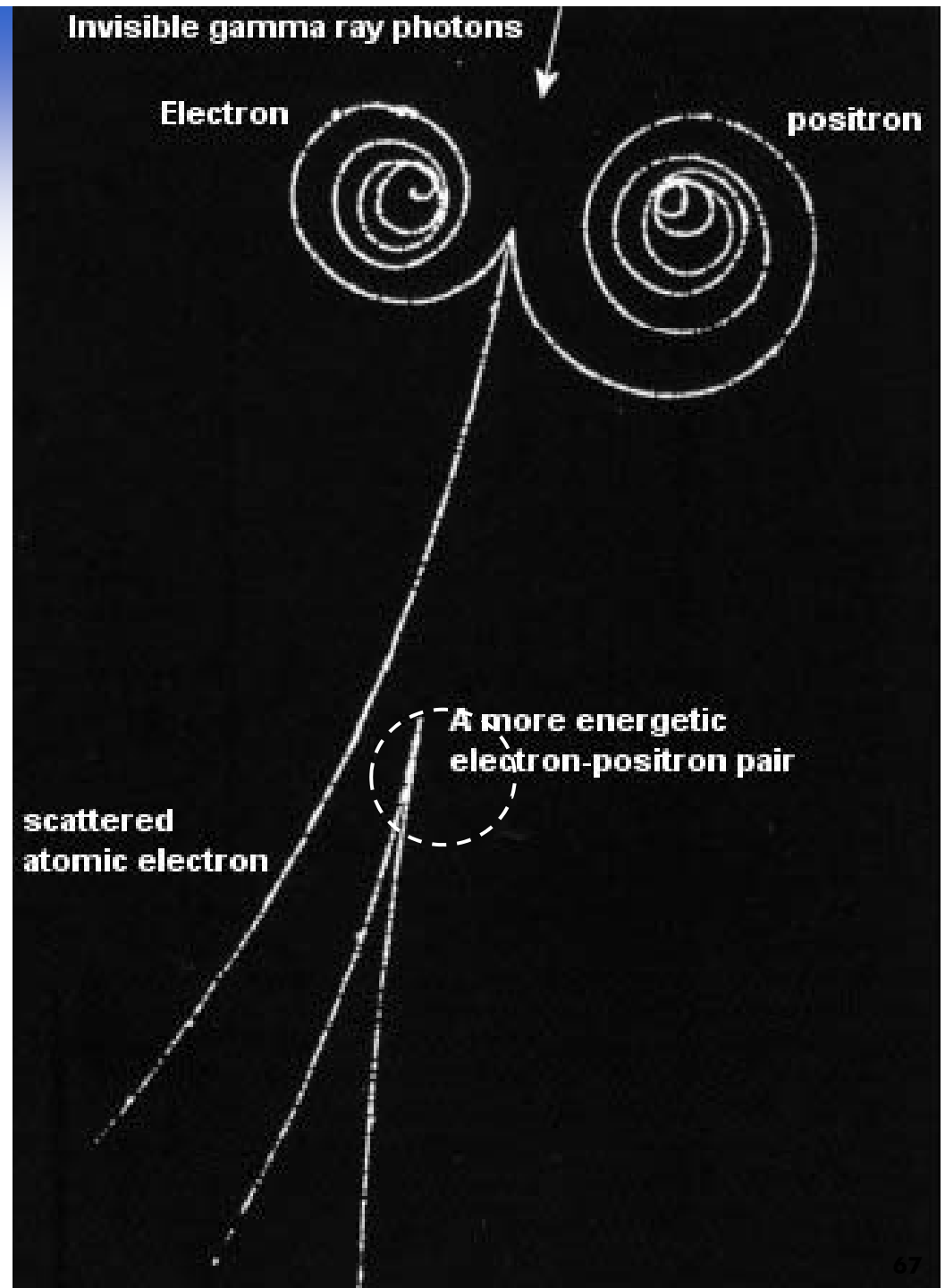
$$h \nu_{\gamma} = m_{e^+} c^2 + m_{e^-} c^2 = 2 \cdot 511 \text{ keV}$$

minimale Photonenergie

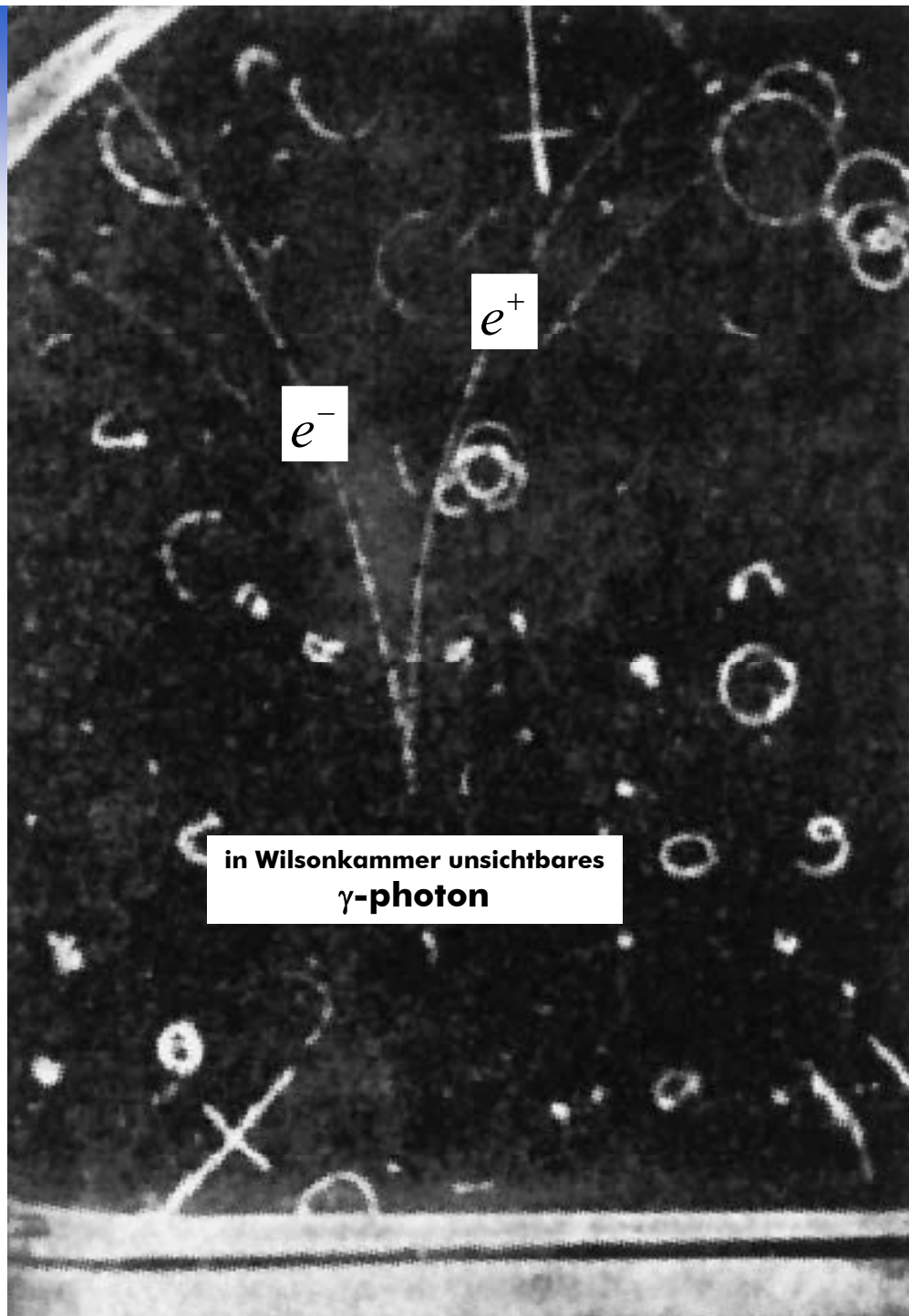
Diagnose

- bei höchsten γ -Energien entstehen aus elektromagnetischer Strahlung Teilchen
- das Prozess überhaupt stattfindet, liegt an Einsteins Äquivalenz von Masse und Energie
- Photon muss für Paarbildung (e^+ , e^-) mindestens Energie von $2 \times 511 \text{ keV}$ haben

Licht trifft Materie
Paarbildung



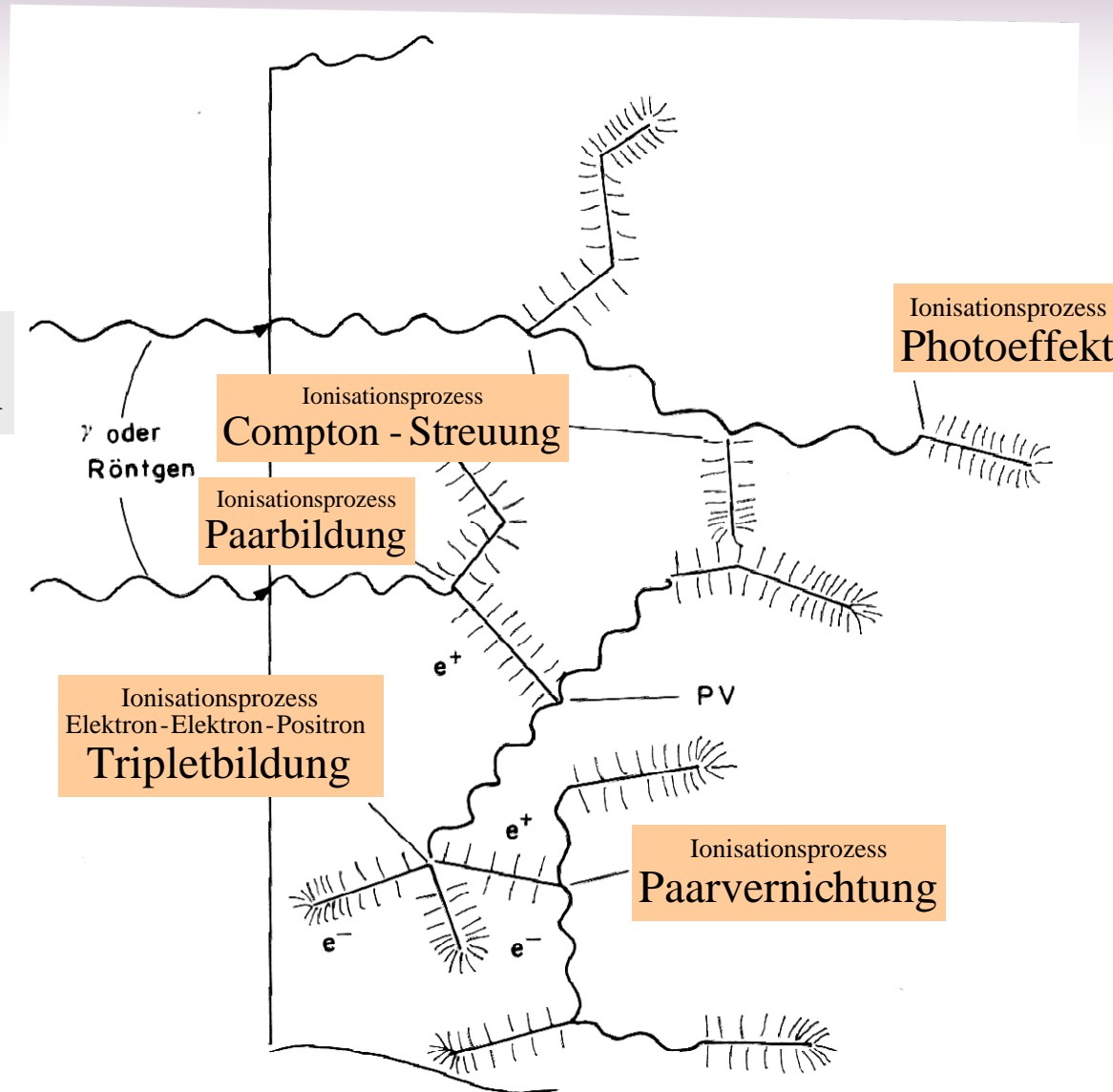
Paarbildung beobachtet in Nebelkammer



Zusammenfassung Ionisationsprozesse

hochenergetische
xray - Photonen

hochenergetische
 γ - Photonen



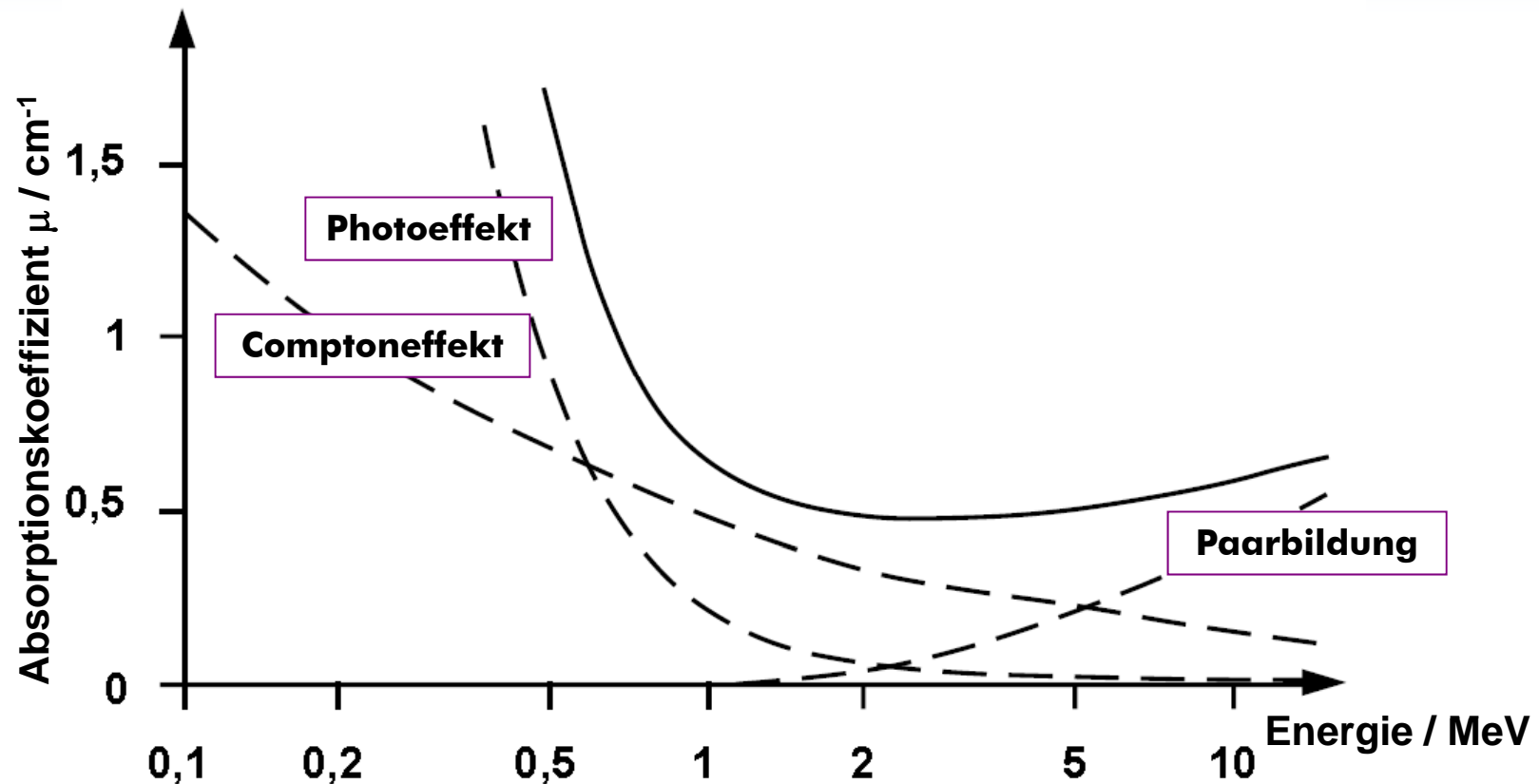


Licht trifft Materie

Querschnitte

Symptome

Totaler Absorptionsquerschnitt ist Summe aller Einzelprozesse



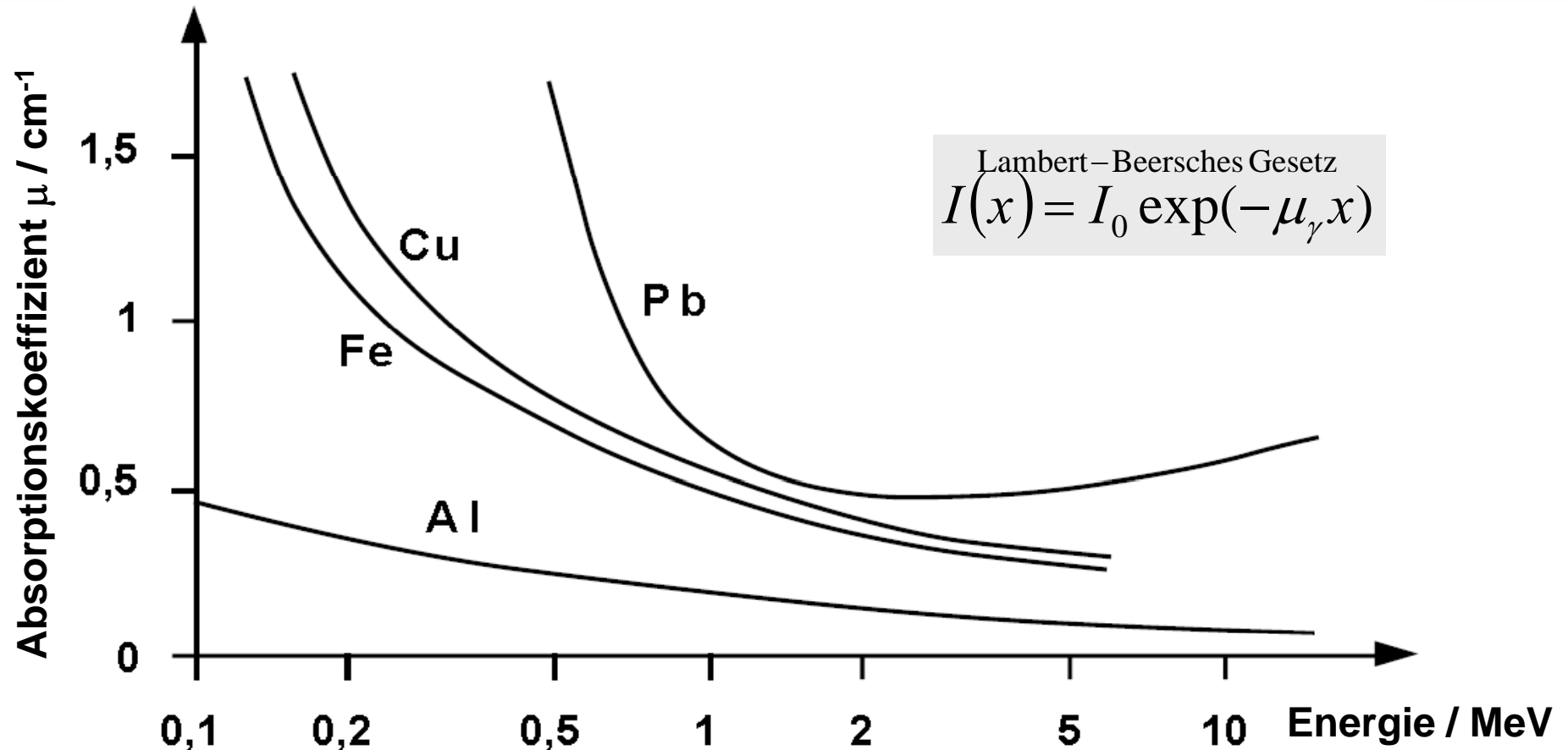
Diagnose

- im Bereich der γ -Strahlung gibt es nur drei unterschiedliche Wechselwirkungsprozesse
- Photoeffekt dominiert für niedrige γ -Energien
- Comptoneffekt dominiert im Bereich mittlerer γ -Energie
- Paarbildung dominiert im Bereich hoher γ -Energien

Totaler Wirkungsquerschnitt Bleiabschirmung

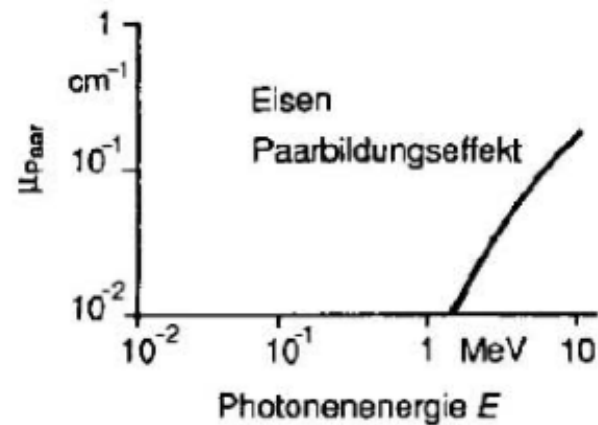
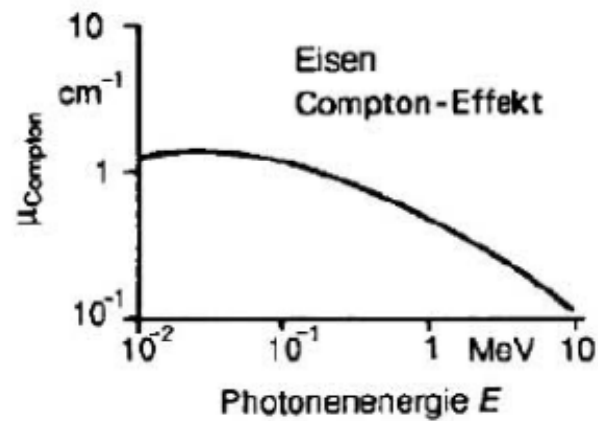
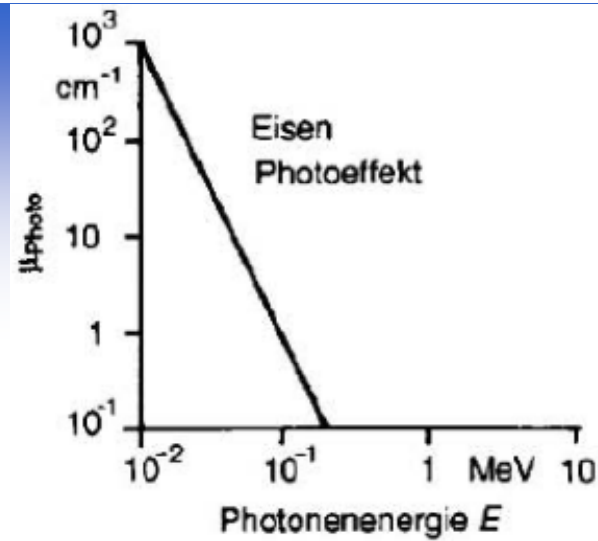
Symptome

Energieabsorption pro Wegstrecke in Material nimmt mit der Photonenenergie ab



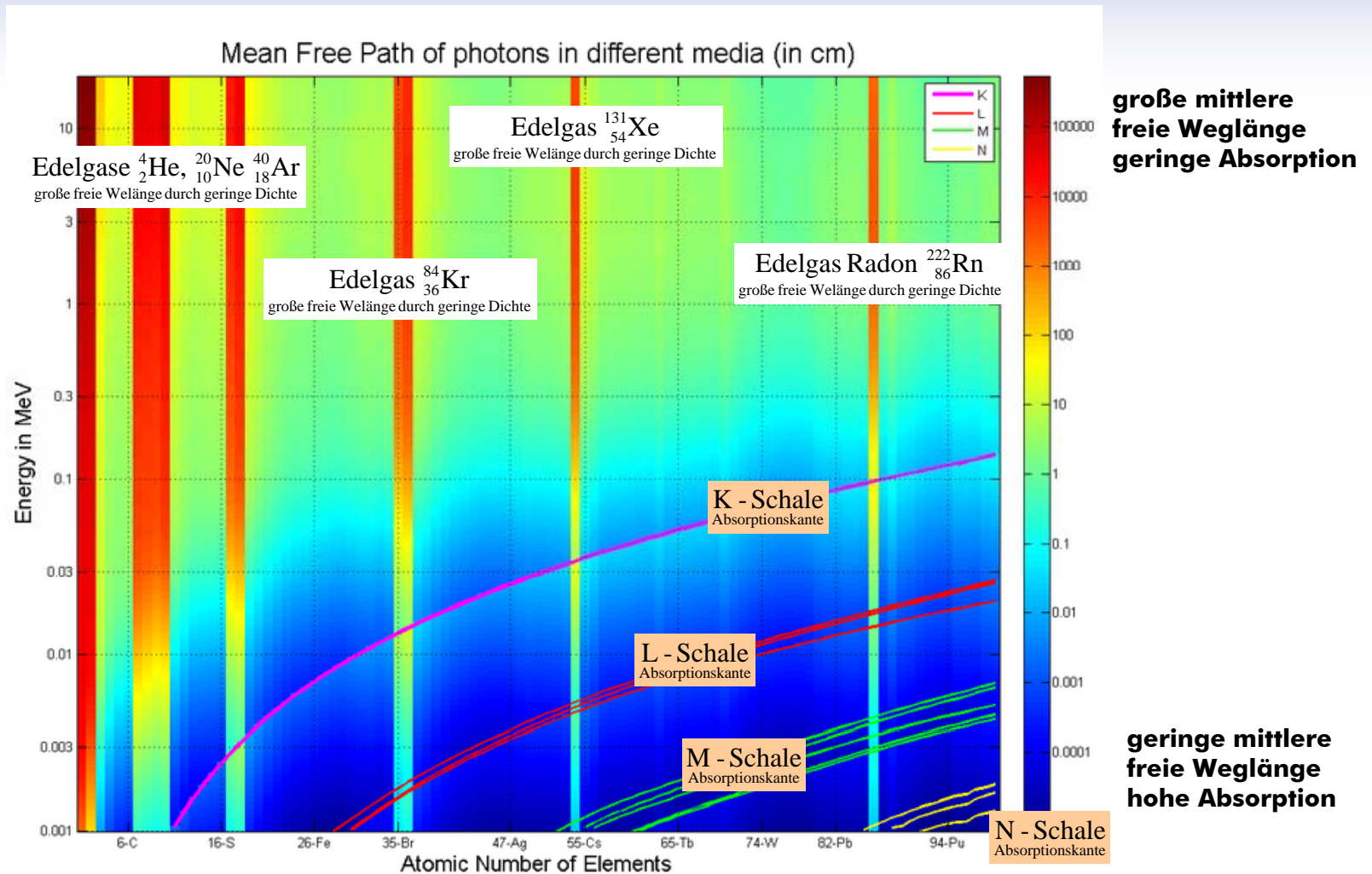
Diagnose

- Absorption von energiereicher Strahlung hängt vom Element ab
- schwere Kerne wie Blei absorbieren hochenergetische Strahlung effektiver



Licht-Materie Wechselwirkung

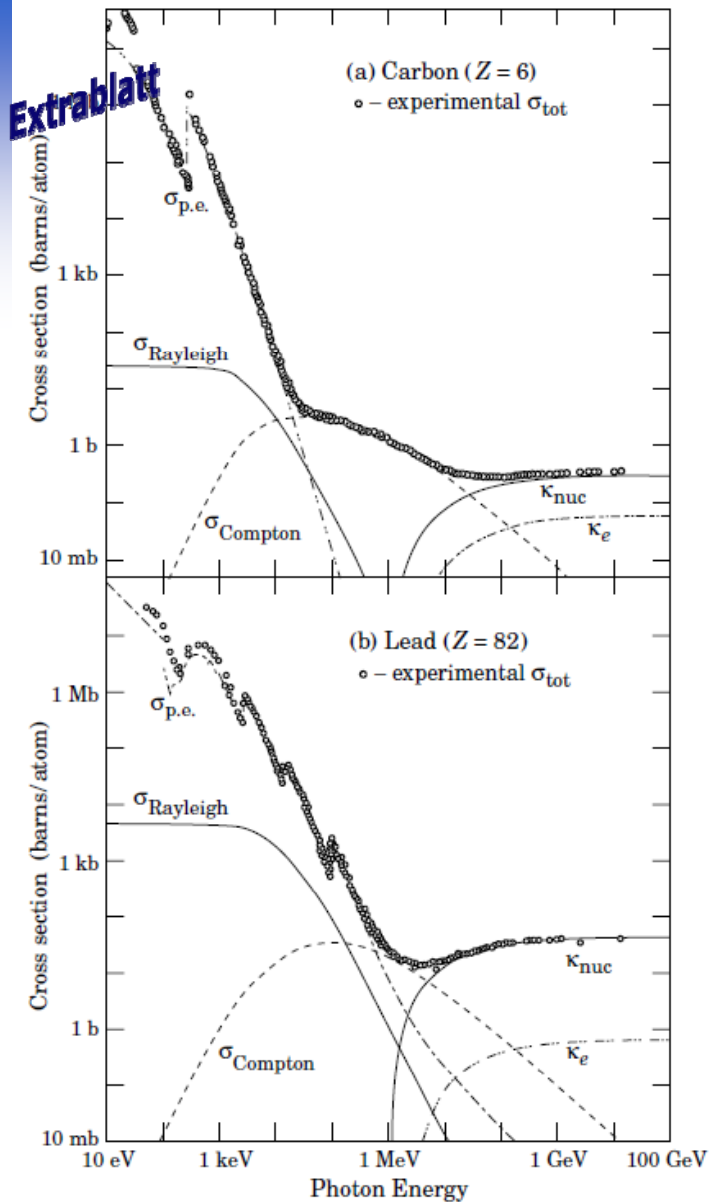
Mittlere freie Weglänge



Diagnose

- mittlere freie Weglänge für Photonen in Gewebe steigt mit der Photonenenergie
- höherenergetische Photonen werden vom Körper schwächer absorbiert

Totaler Wirkungsquerschnitt

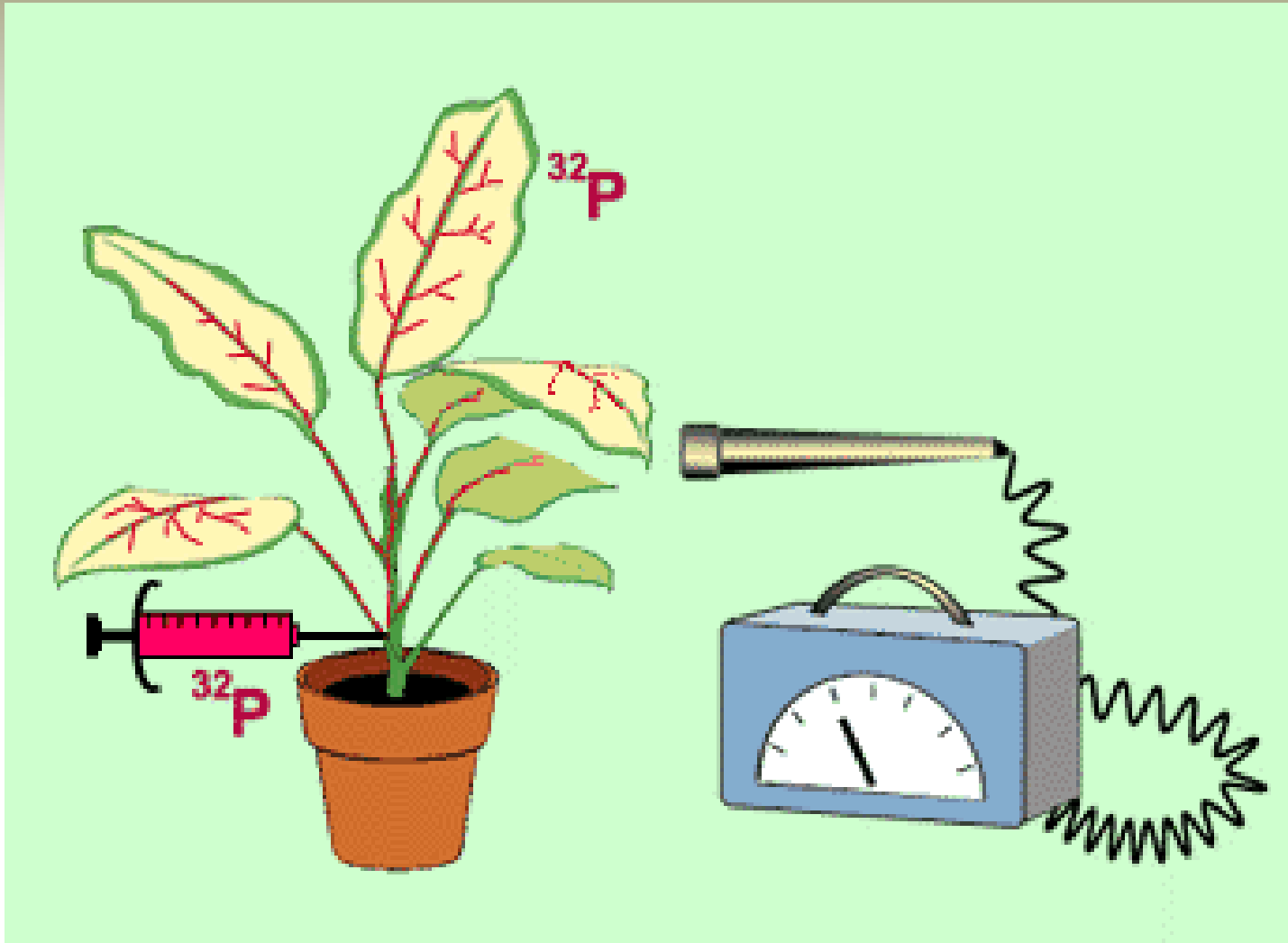


Diagnose

- oft kommt es nicht darauf an, welcher Mechanismus für Absorption verantwortlich ist
- der totale Querschnitt gibt an, bei welcher Photonenenergie die Elemente besonders stark absorbieren

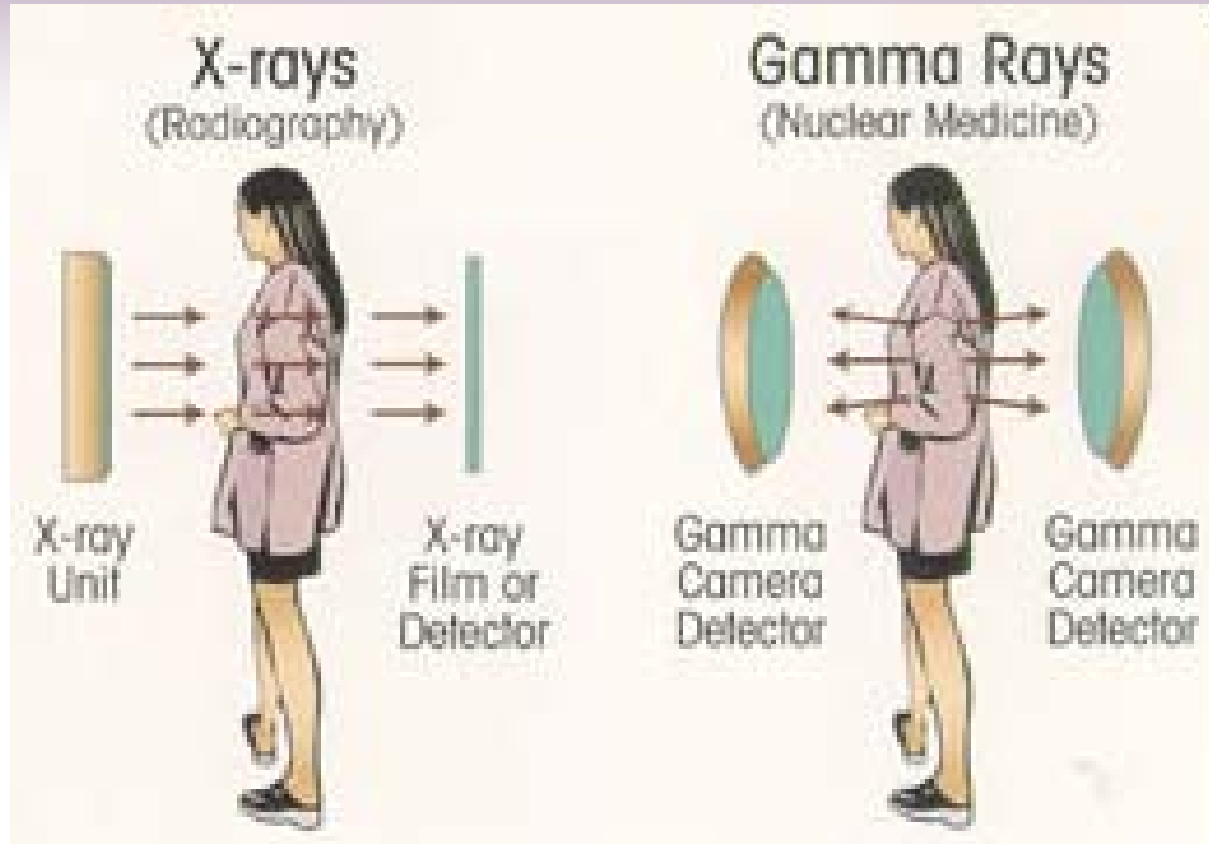
Thema Bildgebende Verfahren

Radioaktive Tracer



Radioisotope

Innen statt aussen



Strahlungsquelle

outside

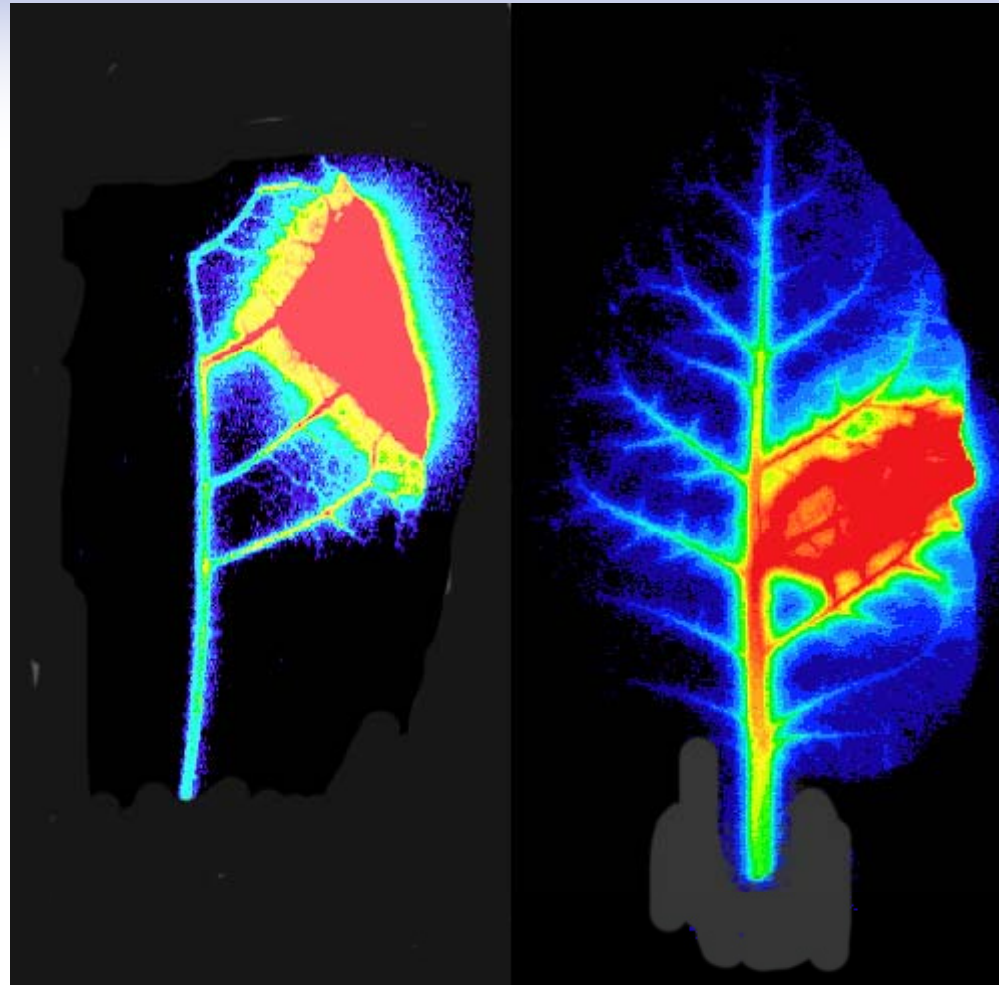
Strahlungsquelle

inside

Diagnose

Strahlungsquelle direkt vor Ort kann die Strahlenbelastung erheblich reduzieren

Radioindikatoren



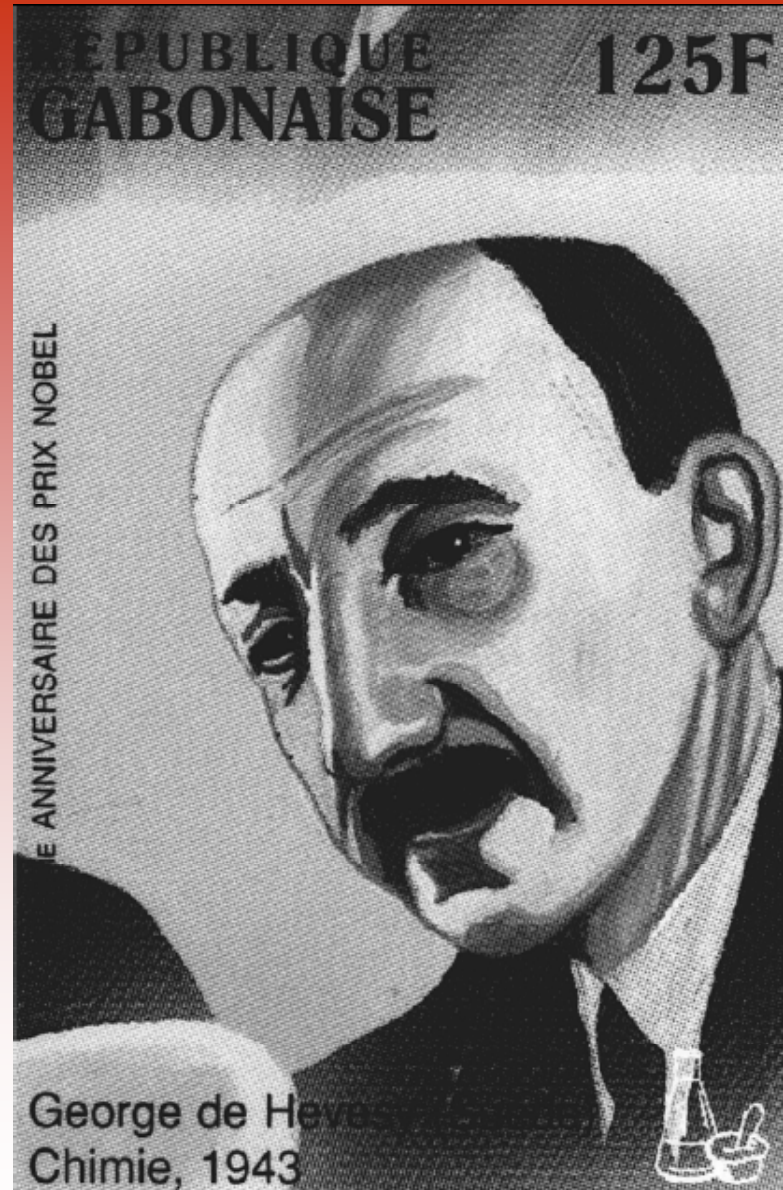
Diagnose

Erste Untersuchungen zur Aufnahme von radioaktivem Blei-222 durch die Ackerbohne

The Absorption and Translocation of Lead by Plants -A Contribution to the Application of the Method of Radioactive Indicators in the Investigation of the Change of Substance in Plants

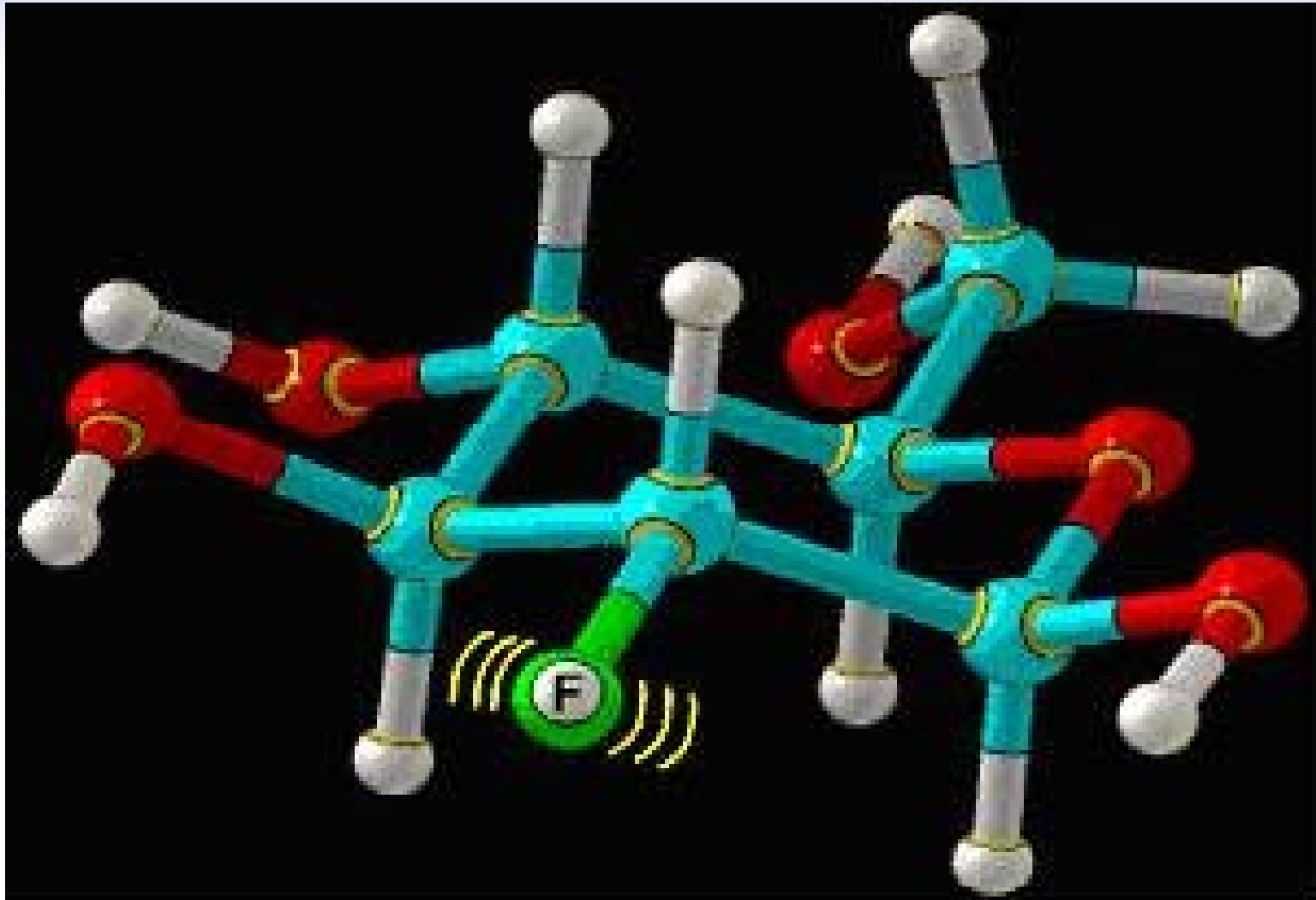
George Hevesy, *Biochem J.* 17, 439-445 (1923)

Extrablatt



The Nobel Prize in Chemistry 1943 was awarded to George de Hevesy for his work on the use of isotopes as tracers in the study of chemical processes

Herstellung Radiosynthese



Diagnose

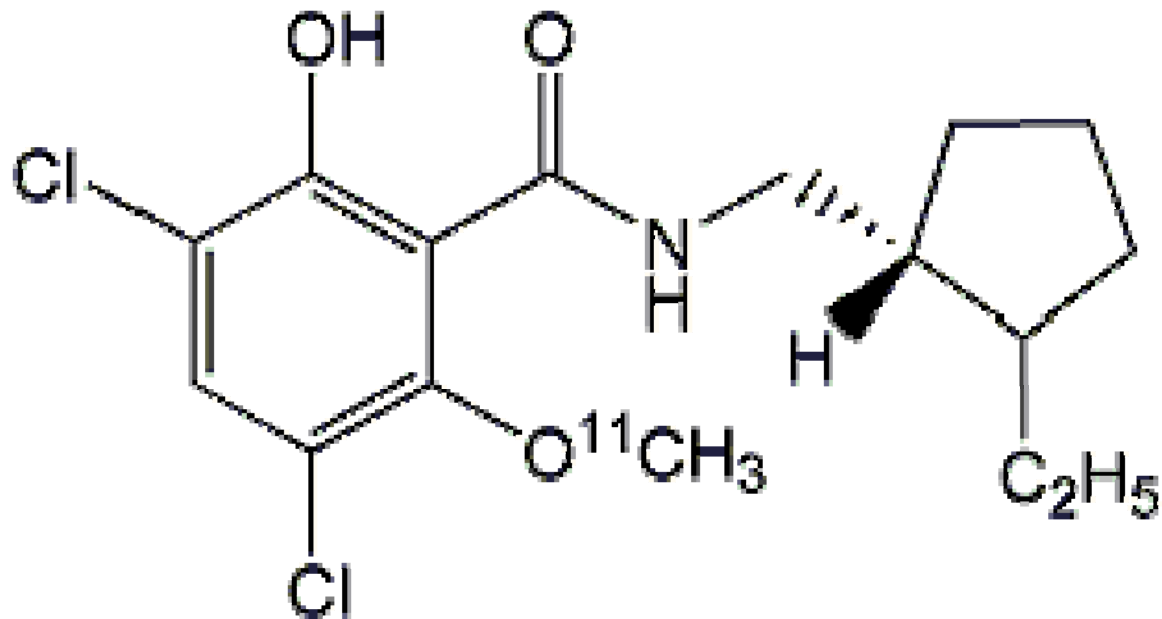
Molekül in Pharmazeutikum wird durch radioaktives, chemisch gleiches Element ersetzt

George de Hevesy

Radiotracer-Methode

Symptome

- *tracer* ist chemischer Komplex zur Diagnostik biochemischer Reaktionen
- Austausch von Atomen des Moleküls durch Radionuklide
- minimale Dosis verursacht keine pharmakologischen Effekte



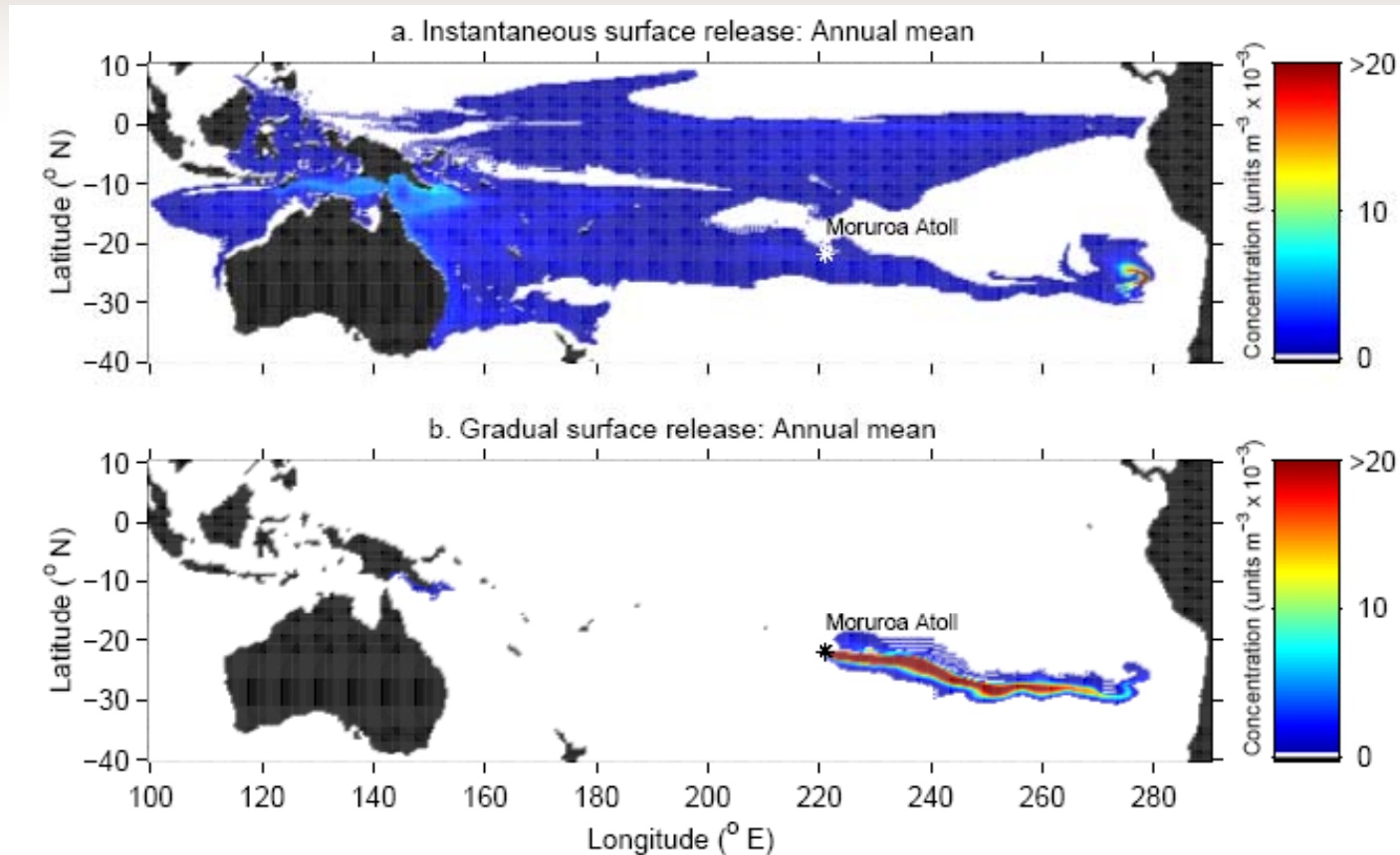
Diagnose

- Aktivität von 370 Bq aus ¹¹C sind ausreichend für Untersuchungen am Gehirn
- entsprechende Masse sind 100 pg (10⁻¹²g) des Moleküls ¹¹C-Raclopride

Umweltphysik

environmental tracers

Auswirkung eines Atombombentests auf dem Mouroua Atoll



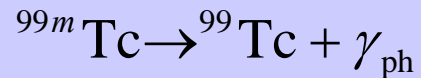
Diagnose

- As-73 wird verwendet, um Kontamination und Transportpfade von Arsen nachzuvollziehen
- Na-22, Sr-87 helfen in Modellierung geochemischer and hydrologischer Modellierungen
- Al-26 Verständnis der Folgen von saurem Regen
- Si-32 Verfolgung ozeanischer Strömungen zum Verständnis Klimawandels und Folgeeffekten

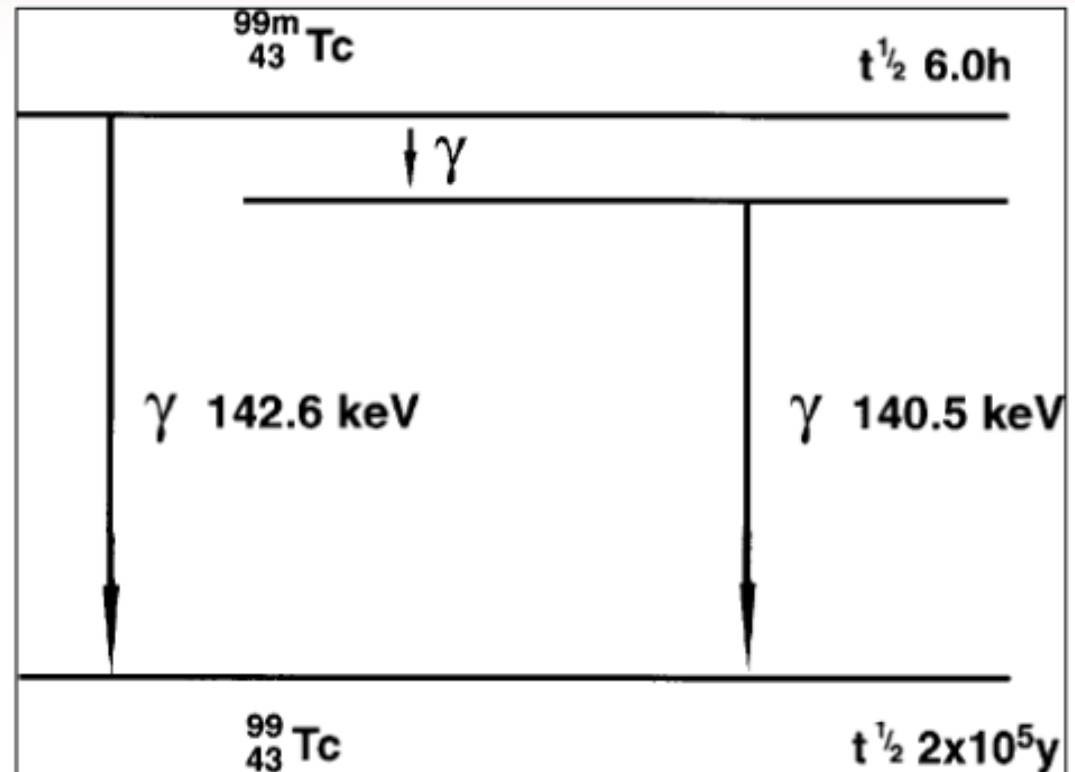
Technetium-99m

Symptome

- Molybden-99 entsteht durch Kernspaltung in Reaktoren
- Technetium entsteht als Zerfallsprodukt aus Mo-99



best suited for medical imaging via tracers



Diagnose

- geringe Strahlenbelastung, denn ${}^{99m}\text{Tc}$ relaxiert NUR über Emission γ -Photonen
- ${}^{99m}\text{Tc}$ hat GERINGE Halbwertszeit von 6 Stunden
- ${}^{99m}\text{Tc}$ γ -Emission ideal für Detektion durch Röntgenkameras
- insgesamt sind dies medizinisch interessante Eigenschaften

Medikament versetzt mit radioaktivem Isotop

Radiopharmazeutikum

Diagnose

- Einsatz Abbildung von Stoffwechselfvorgängen
- Tumorbehandlung durch β^+ - Emitter, da Positron geringe Reichweite in Gewebe hat
- β^+ -Emitter für Positronen-Emissions-Tomographie
- γ -Strahlungsemitter für beispielsweise Diagnostik



γ - Emitter	Isotop	E_γ	$T_{1/2}$	Einsatzgebiet
	Jod - 123	159 keV	1.3 h	Schilddrüse
	Jod - 131	364 keV	8.04 d	Schilddrüse
	Thallium - 201	135 keV	73 h	Niere
	Technetium - 99m	140 keV	6.0 h	... am häufigsten verwendet
e^+ - Emitter	Fluor - 18	202 keV	110 min	
	Sauerstoff - 15	696 keV	2 min	Sauerstoff Metabolismus



Eimerphysik

Symptome

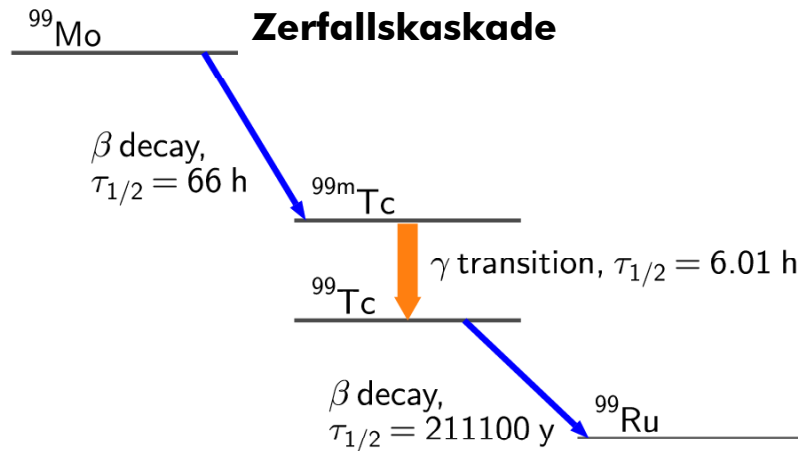
Eimer mit Loch wird kontinuierlich mit Wasser gefüllt



Diagnose

- bei höherer Auffüllrate erhöht sich auch die Ausflussrate (Schweredruck des Wassers)
- Wasserspiegel erreicht nach bestimmter Zeit ein konstantes Niveau

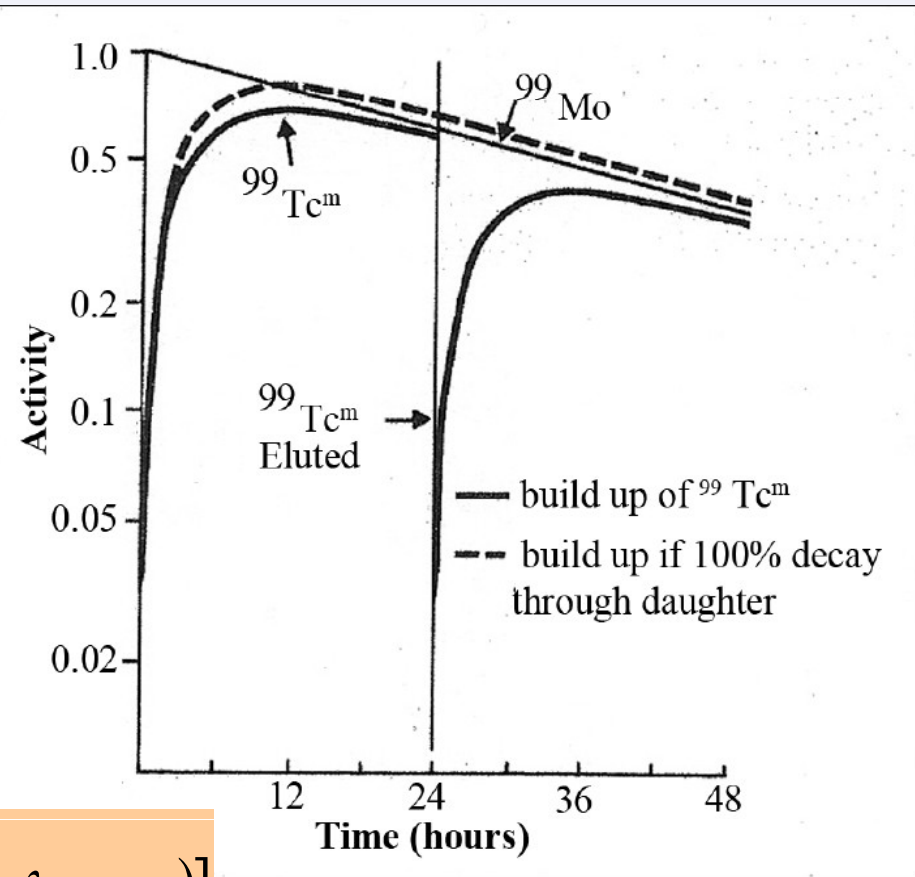
Loch im Eimer Mo99-Tc-99m Generator



Zerfallsraten

$$\lambda_{\text{decay}}^{\text{Mo-99}} = 0.0105 \text{ h}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{decay}}^{\text{Tc-99m}} = 0.1155 \text{ h}^{-1}$$



Entwicklung der Aktivität von Tc-99m

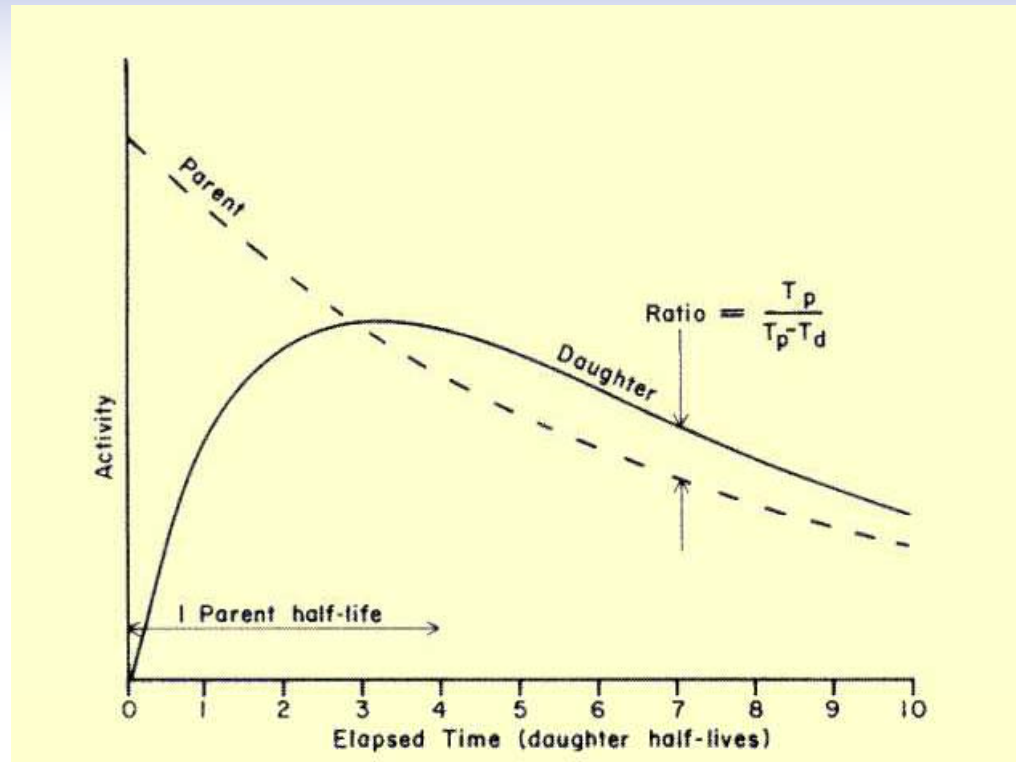
$$A_{\text{Tc-99m}}(t) = A_0^{\text{Mo-99}} \left[\exp(-\lambda_{\text{Mo-99}} t) - \exp(-\lambda_{\text{Tc-99m}} t) \right]$$

Diagnose

- Erzeugung von $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ist eng verknüpft mit radioaktivem Zerfall von ^{99}Mo
- etwa 87% radioaktiver ^{99}Mo Atome zerfällt in $^{99\text{m}}\text{Tc}$
- maximale Aktivität von $^{99\text{m}}\text{Tc}$ nach etwa vier TC-99m Halbwertszeiten



Transientes Gleichgewicht



Radioaktiver Element (p) zerfällt weiter in Tochterkern (d)

$$\frac{dN_d}{dt} = \lambda_p N_p - \lambda_d N_d$$

Aktivität des Tochterkerns

$$A_d(t) = \lambda_d N_d = \frac{\lambda_d A_p(t=0)}{\lambda_d - \lambda_p} (\exp(-\lambda_p t) - \exp(-\lambda_d t))$$

Diagnose

Aktivität des Tochterkerns nimmt zu als Folge des Zerfalls des Ausgangskerns



Transientes Gleichgewicht

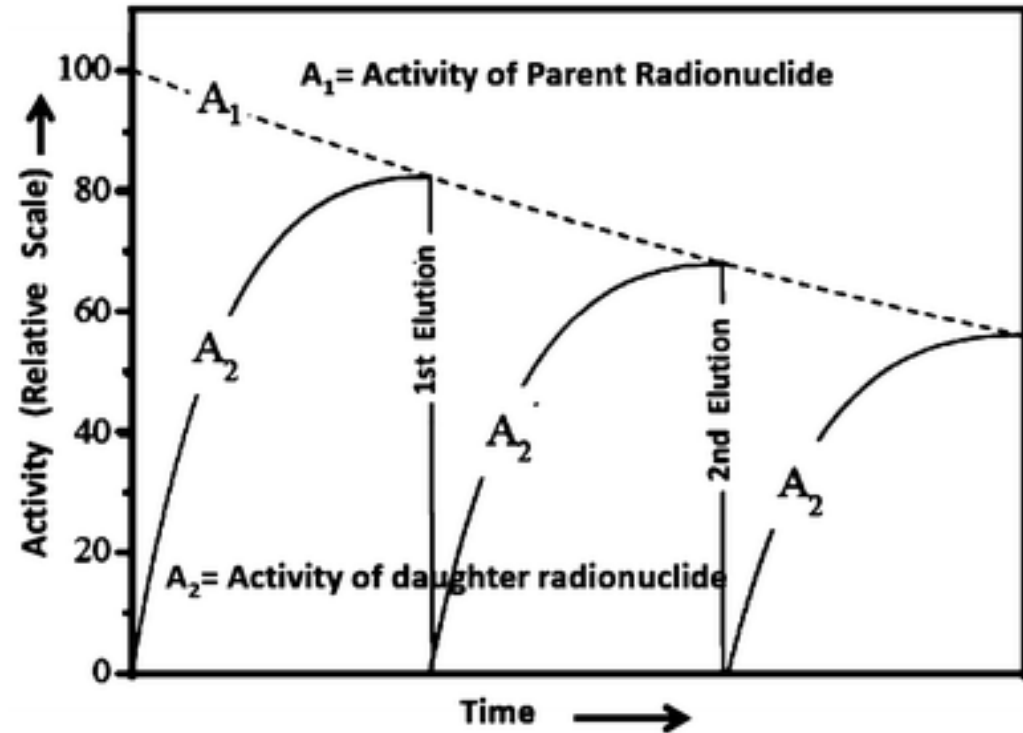
Symptome

Wenn Halbwertszeit Tochterkerns deutlich geringer (20 bis 50) als Halbwertszeit Ausgangskern

wenn gilt, dass $\lambda_d > \lambda_p$ oder $t_{1/2}^d < t_{1/2}^p$
 $\Rightarrow \exp(-\lambda_d t)$ vernachlässigbar

Transientes Gleichgewicht

$$A_d(t) = \frac{\lambda_d A_p(t=0)}{\lambda_d - \lambda_p} \exp(-\lambda_p t)$$
$$A_d(t) = \frac{\lambda_d A_p(t)}{\lambda_d - \lambda_p} = \frac{t_{1/2}^d A_p(t)}{t_{1/2}^p - t_{1/2}^d}$$



Diagnose

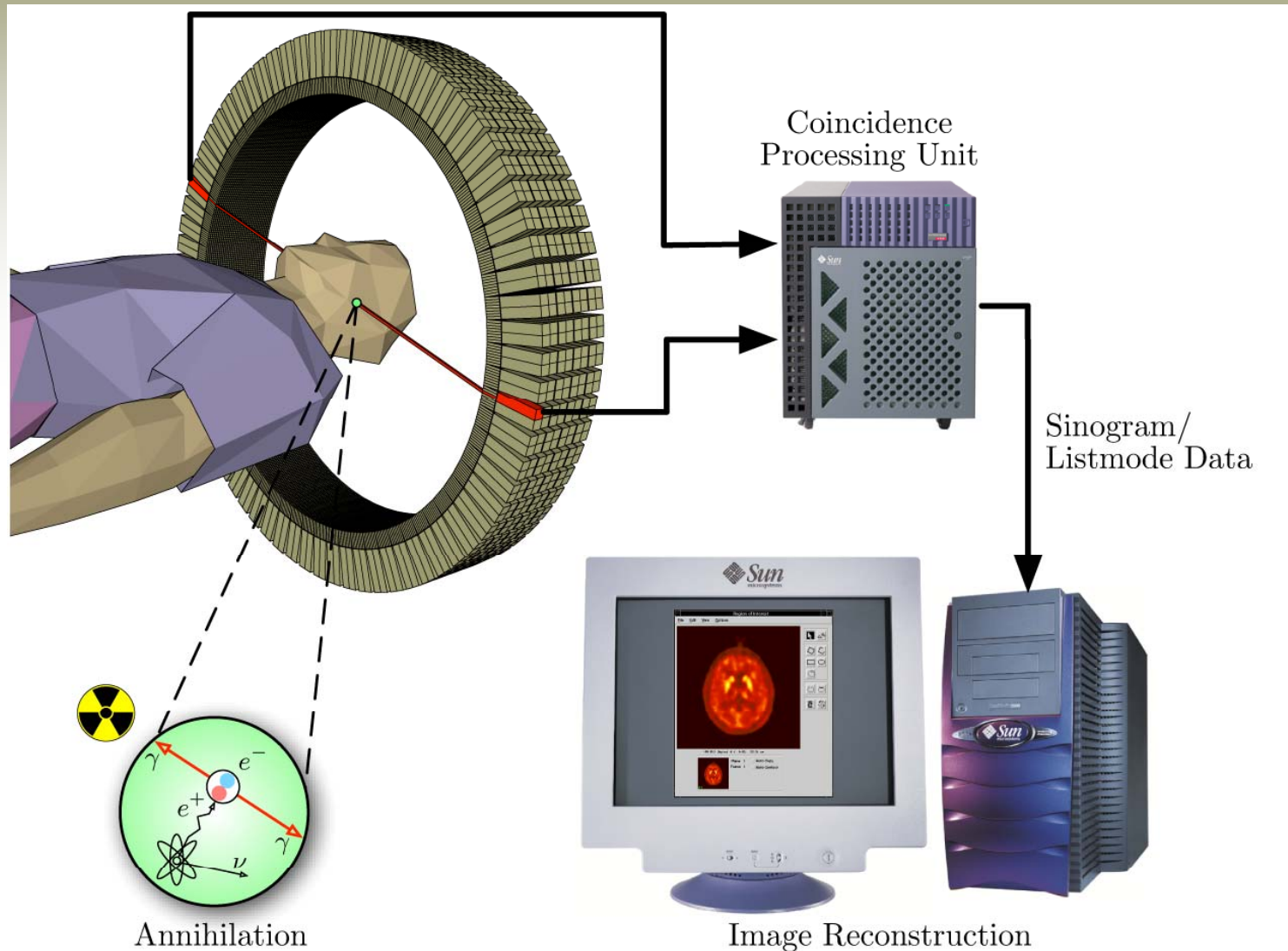
- Anteil Tochterkern erreicht zu bestimmtem Zeitpunkt maximalen Wert
- Aktivität des Tochterkerns ist zu diesem Zeitpunkt höher als Aktivität Ausgangskern

Industrial radionuclide generators: a potential step towards accelerating radiotracer investigations in industry

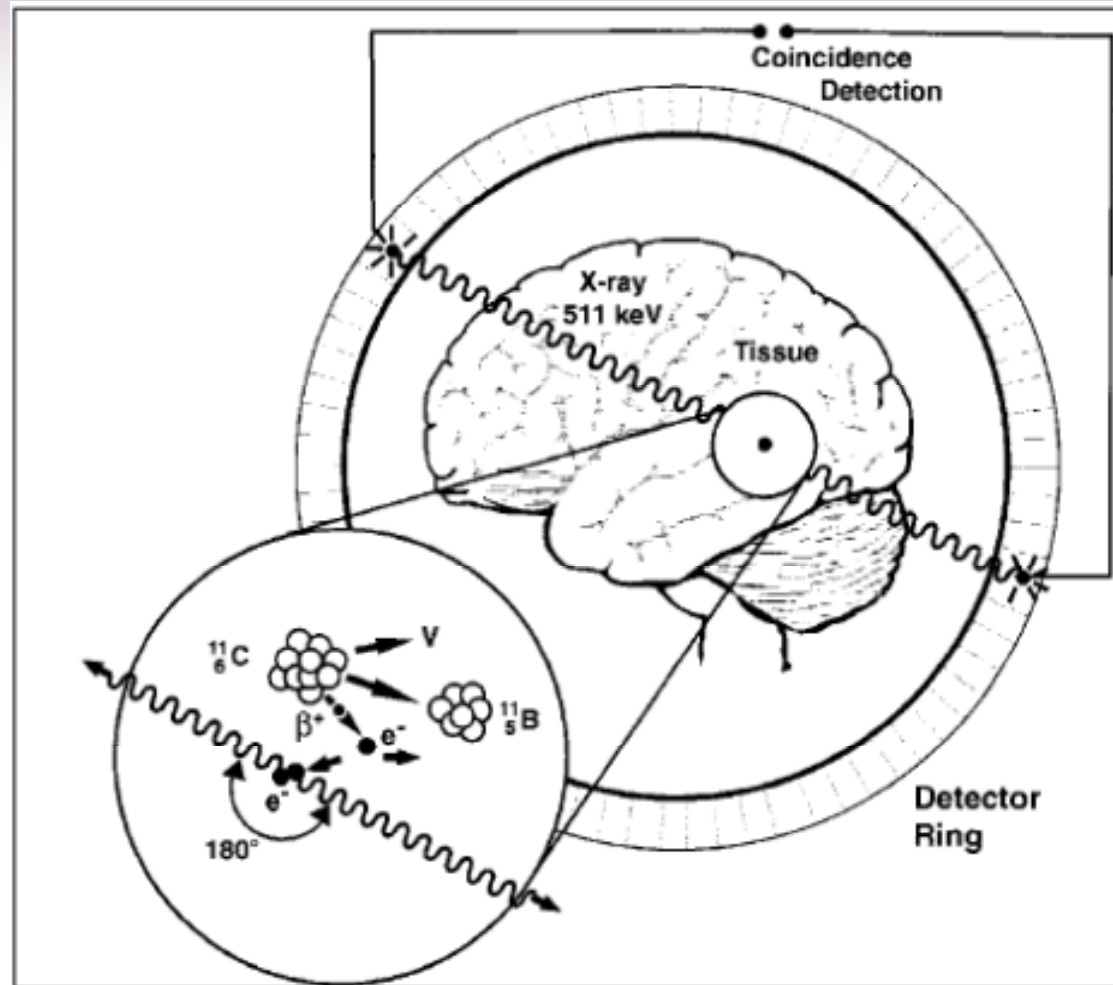
Dash et al. RSC Adv. 3, 14890 (2013)

Thema Bildgebende Verfahren

Positron-Emission-Tomographie



Koinzidenz $\beta^+\beta^-$ – Annihilierung



**Diagnose
Paarvernichtung durch Stoß Positron-Elektron erzeugt auf Koinzidenzsignal in Detektorring**



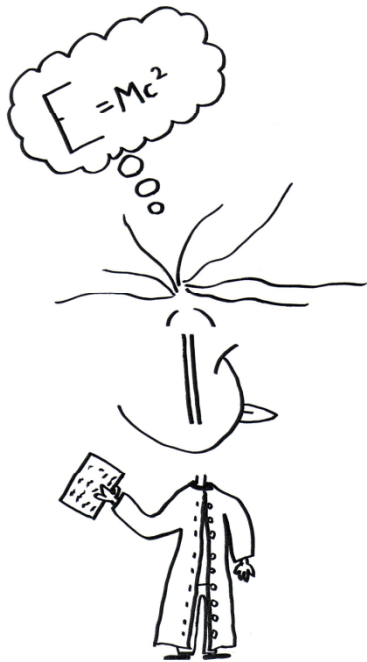
Elektron trifft Positron Paarvernichtung

Symptome

- bei Elektron-Positron Paarvernichtung entstehen zwei hochenergetische γ -Photonen
- mittlere freie Weglänge Positron ist äußerst gering
- Erhaltungssätze nutzen, um medizinisch-relevante Informationen zu extrahieren

mittlere freie Weglänge Positron in Gewebe

$$\lambda_{mfp} \approx \text{mm}$$



$\beta^+ \beta^-$ – Paarvernichtung

Ladungserhaltung

$$e^+ + e^- = 2\gamma_{2e}$$

Energieerhaltung

$$E_{elektron} = m_e c^2 = 510 \text{ keV}$$

180°

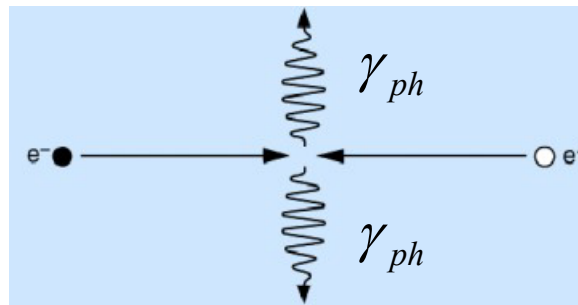
$$\gamma_e \longleftrightarrow \gamma_e$$

Impulserhaltung

Ladungserhaltung

Energieerhaltung

Impulserhaltung

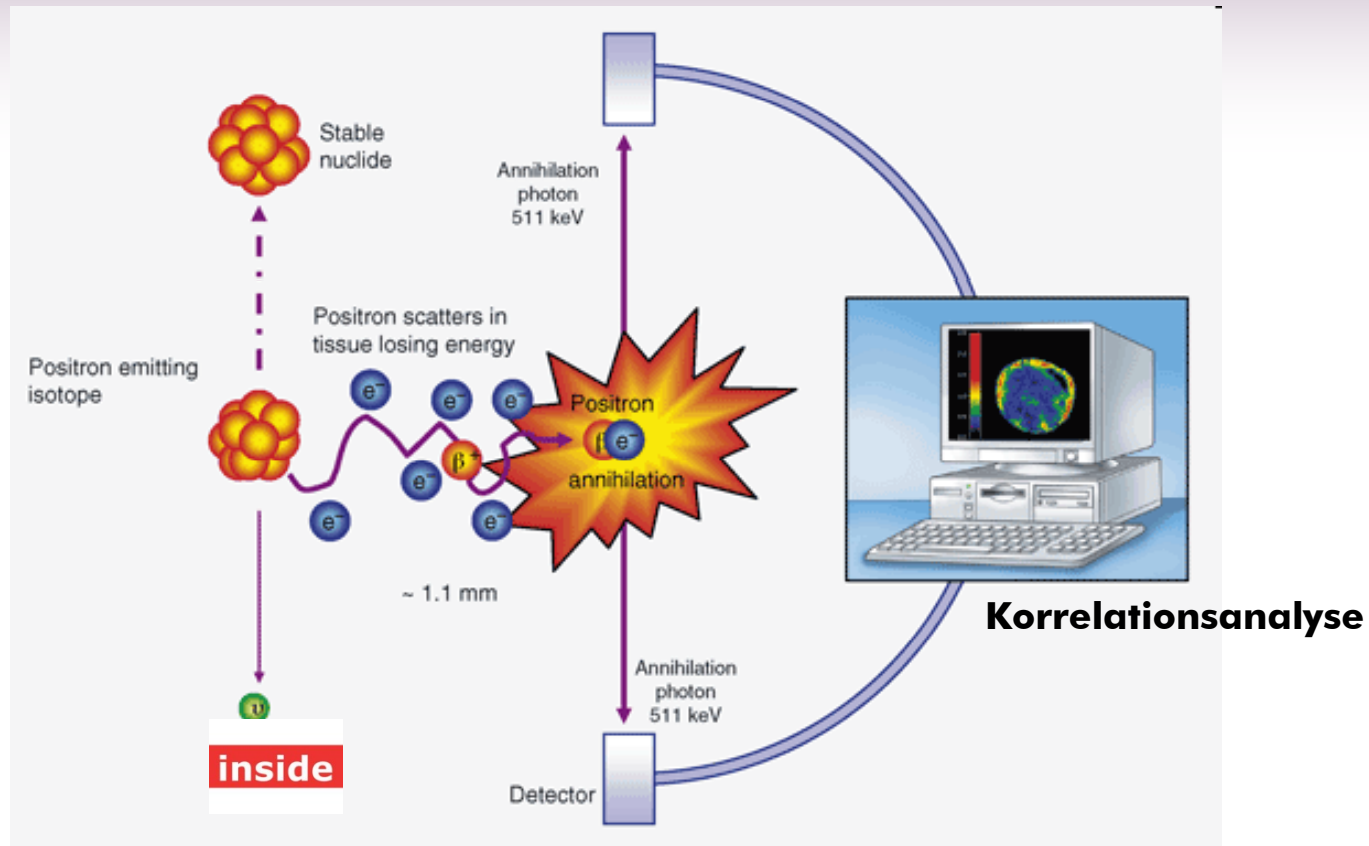


RESOLUTION

Diagnose

Effektive Weglänge Gewebe etwa 1.0 mm erlaubt Zugang zu Ortsinformation mit mm-Auflösung

Positron-Emissions-Tomographie Lokalisation des Zerfallsortes



Diagnose

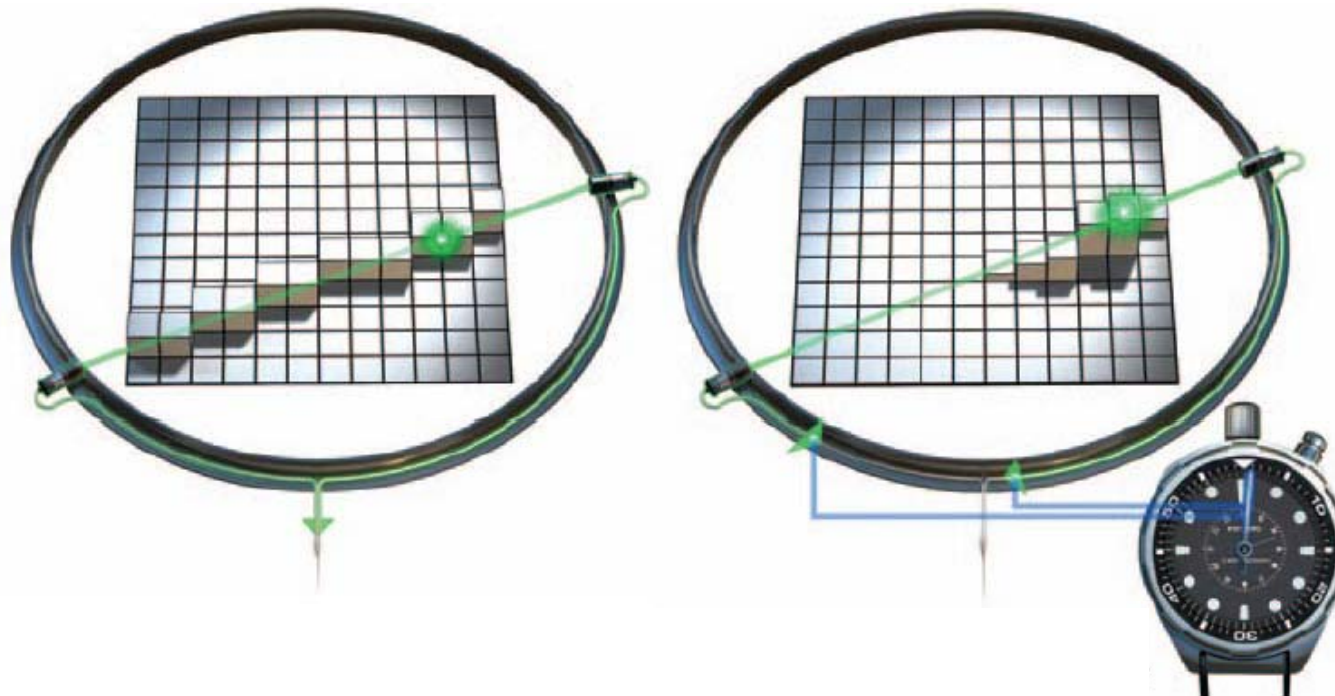
- Nachweis Entstehungsort durch Messung Ankunftszeit der beiden Photonen
- Energiegehalt der Photonen ist jeweils 511 keV (Einstein Äquivalenzprinzip)
- Photonen müssen im Winkel von 180° abgestrahlt worden sein (Impulserhaltung)
- Ankunftszeiten aufgrund Lichtgeschwindigkeit kaum unterschiedlich
- Korrelationsanalyse liefert genauen Ort des Zerfalls im Körper

PET

Koinzidenztechnik

Symptom

- konventionelles PET nutzt nicht Zeitauflösung der Detektoren
- nur Auftrefforte der Photonen wird registriert
- Ereignis erfolgte entlang der Strahlenachse der beiden γ -Photonen
- genaue Lokalisierung wird dadurch verhindert



Diagnose

- genauere Lokalisierung, wenn Zeitabstand Ankunftszeiten beider γ -Photonen aufgezeichnet
- Ort wird entlang der Emissionsachse bestimmt
- Unterdrückung unkorrelierter Ereignisse durch verbesserte Identifizierung Produkte

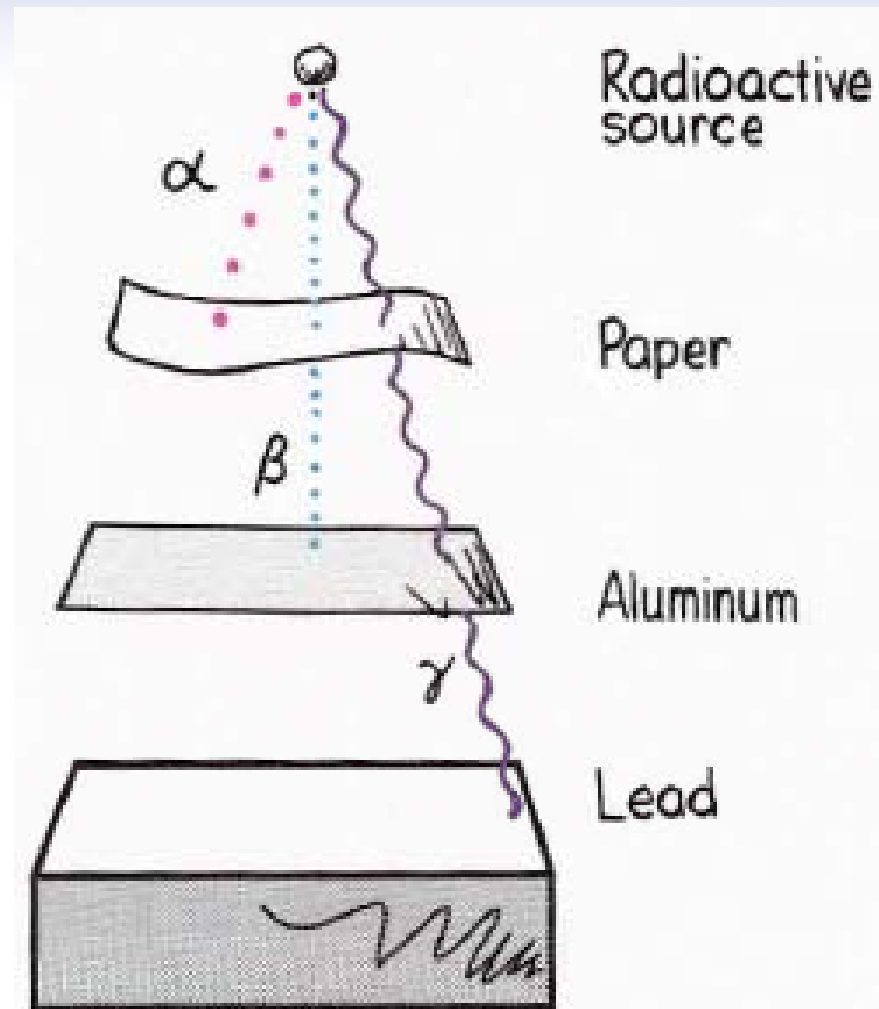
Thema Strahlentherapie Tumorthherapie





Ionisierende Strahlung

Reichweite



Diagnose

Im Gegensatz zu α - und β -Strahlung kann γ -Strahlung nie vollständig abgeschirmt, sondern immer nur (beliebig stark) abgeschwächt werden.

Energieverlust in Materie

Bethe-Bloch Gleichung

Energieverlust beim Stoß schwerer geladener Teilchen ($m > m_e$) pro Wegstrecke in Materie

Teilchen stößt mehrfach
mit Elektronen und Kernen

$$-\frac{dE}{dx} = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2$$

$$\frac{4\pi \cdot z^2}{m_e c^2 \beta_{SRT}^2}$$

Energieverlust in einzelmem Stoß
integriert über alle Abstände

$$\frac{n_{avo} Z \rho_e}{A}$$

Dichte Elektronen

$$\left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \eta^2}{I_P} \right) - \ln(1 - \beta_{SRT}^2) - \beta_{SRT}^2 \right]$$

Korrektur für großes β_{SRT}

Diagnose

- Gleichung beschreibt mittleren Energieverlust durch Ionisation/ Anregung von Hüllenelektronen
- Bethe-Bloch Gleichung gilt für alle Teilchen außer für Elektronen und Positronen

$$\beta_{SRT} \quad \text{Eigenschaft des Teilchens} \quad v/c$$

z Ladung des Teilchens

Eigenschaft des Materials

n_{avo} Avogadrozahl

Z Kernladungszahl

A Masse des Elements

m_e Ruhemasse des Elektrons

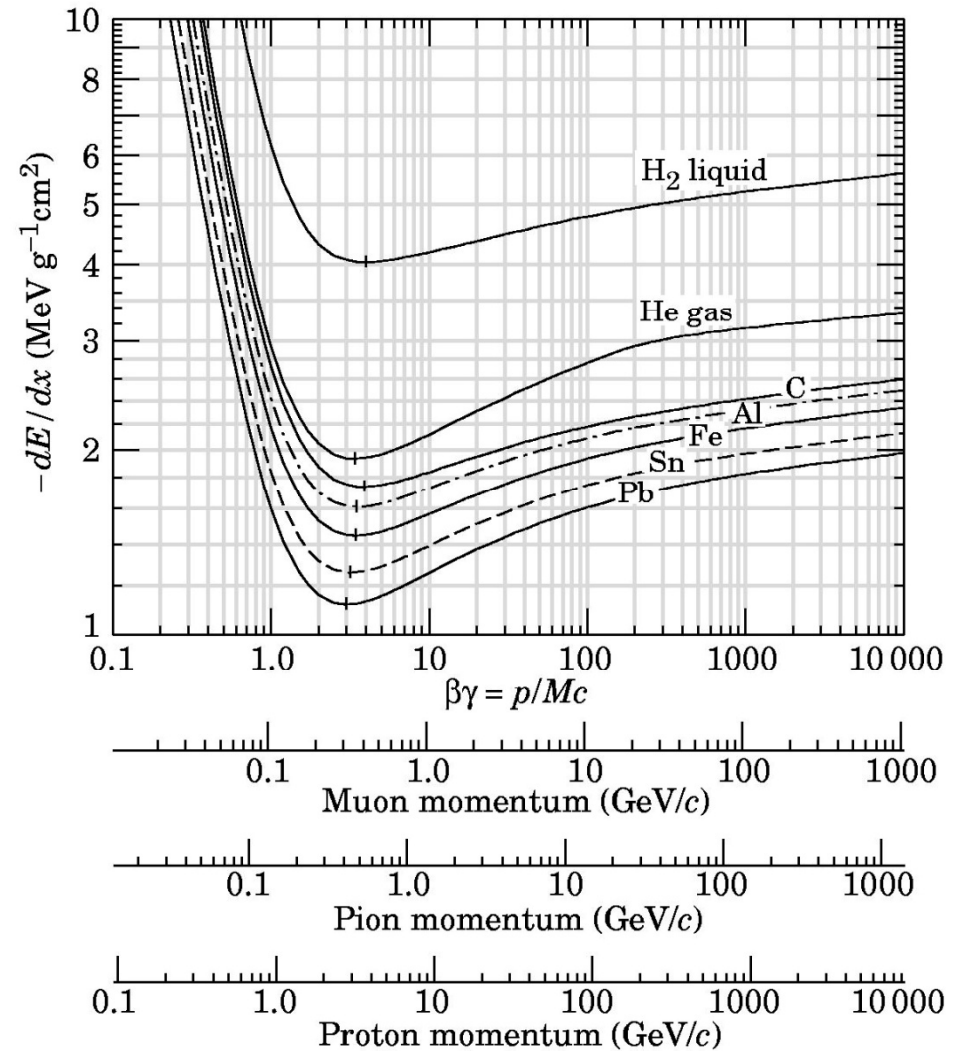
I_P mittleres Ionisationspotenzial des Materials

ρ_e Elektronendichte der Materie

Energieverlust in Materie

Bethe-Bloch

Extrablatt



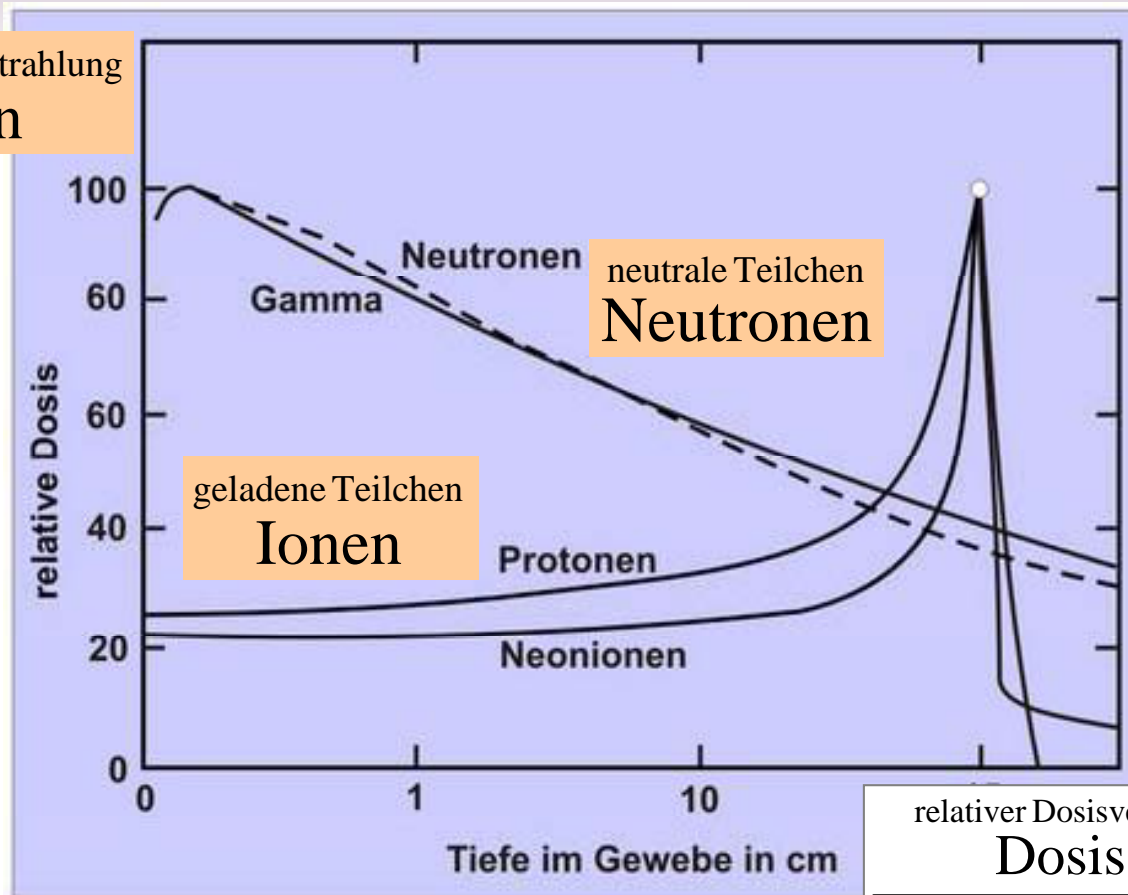
Diagnose

- hängt nur von **Geschwindigkeit und Ladung des Teilchens ab**
- **Energieverlust steigt mit Dichte der Materie**
- **komplexes Verhalten mit Minimum in Energieverlust**
- **nach Energieverlustminimum steigt Funktion langsam wieder an**
- **für hohe Energien dominiert Bremsstrahlung**
- **für niedrige Energien überwiegt Anregung/ Ionisation der Hüllenelektronen**

jeder Jeck ist anders

Relativer Dosisverlauf

elektromagnetische Strahlung
Photonen



relativer Dosisverlauf
Dosis
maximale Dosis

Diagnose

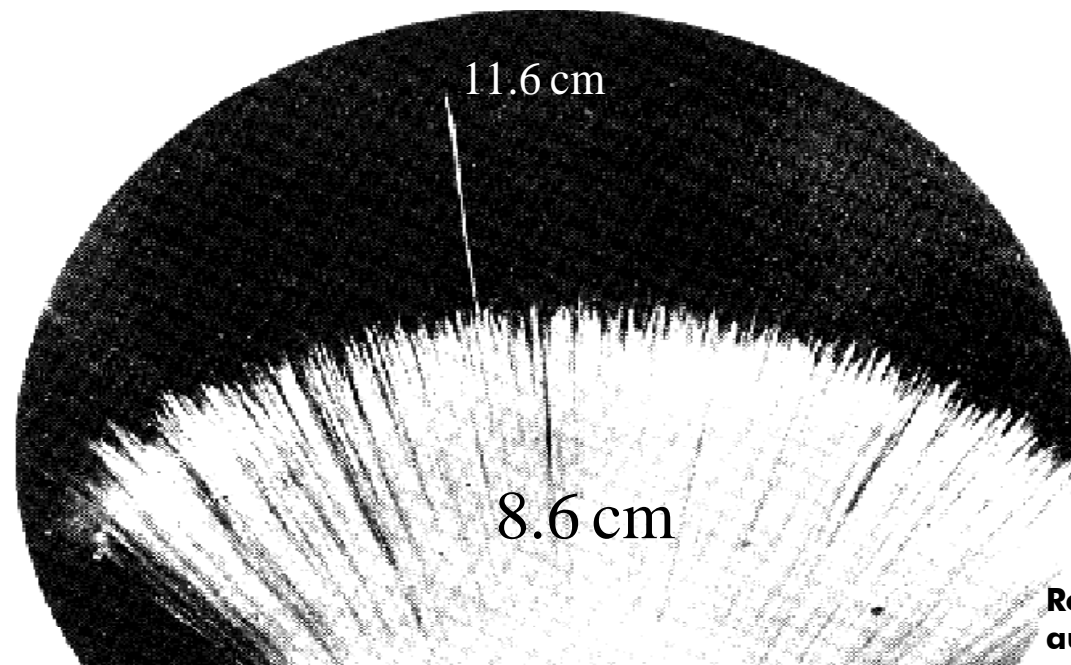
- je nach Strahlungstyp ändert sich das Absorptionsverhalten in Materie
- Hauptteil der Energie der Strahlung wird in unterschiedlichen Tiefe des Gewebes deponiert

Teilchen trifft Materie

α -Strahlung

Symptome

- inelastische Stöße mit Elektronen der Atomhülle
- Anregung und Ionisation von Hüllenelektronen
- Ablenkung geladener Teilchen im Coulombfeld des Kerns führt zu Bremsstrahlung
- inelastische Stöße mit Atomkern führt zu elektronischer Anregung (γ -Fluoreszenz)



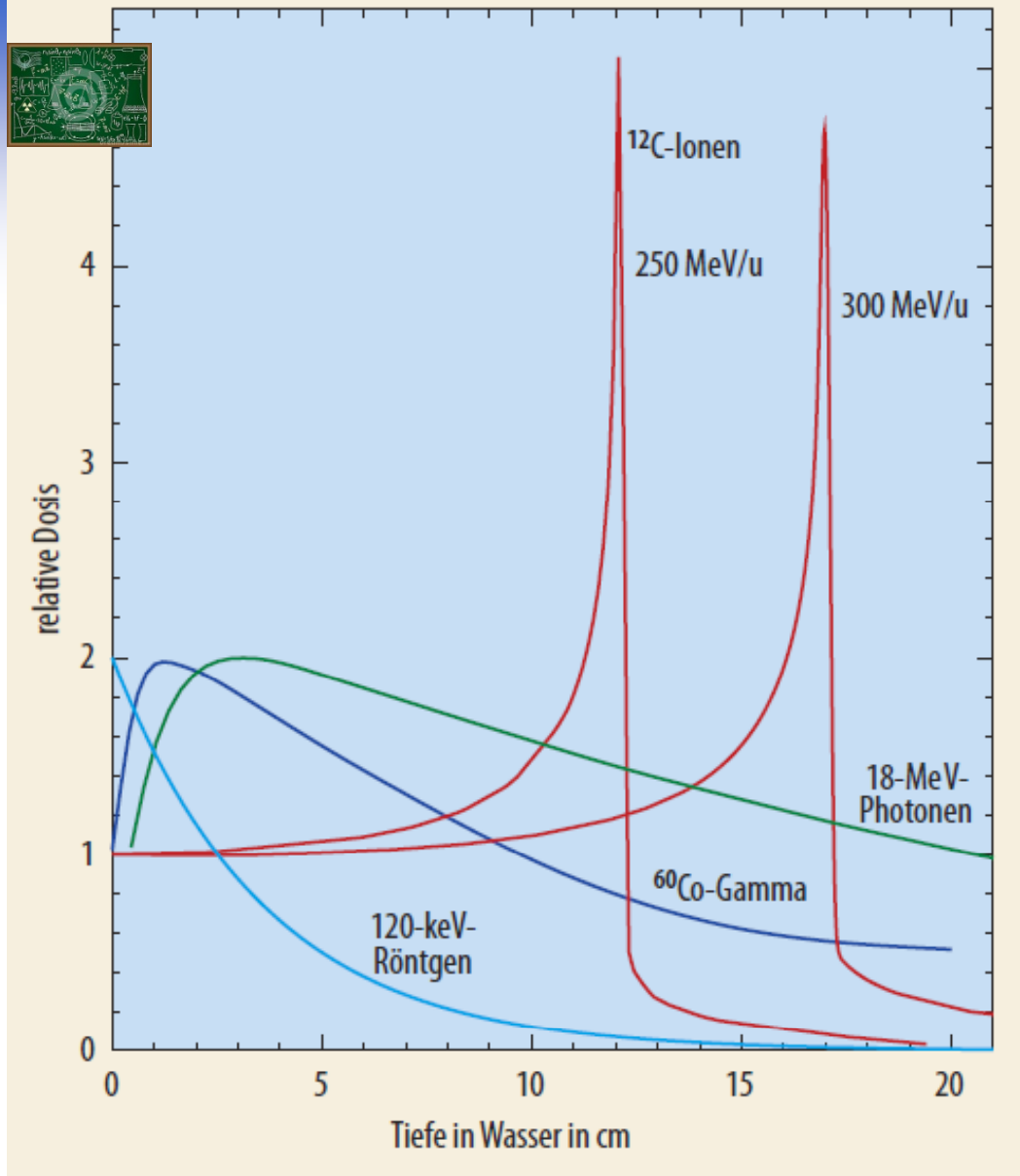
Reichweite von α -Teilchen
aus ^{212}Po in Luft 8.6 cm

Po – 212 Quelle

Diagnose

- Eindringtiefe von α -Teilchen in Materie ist extrem scharf begrenzt
- α -Teilchen DERSELBEN Energie haben DIESELBE Reichweite
- nur wenige α -Teilchen (hier ein einziges) erreicht tiefere Schichten des Gewebes

Tiefenschärfe

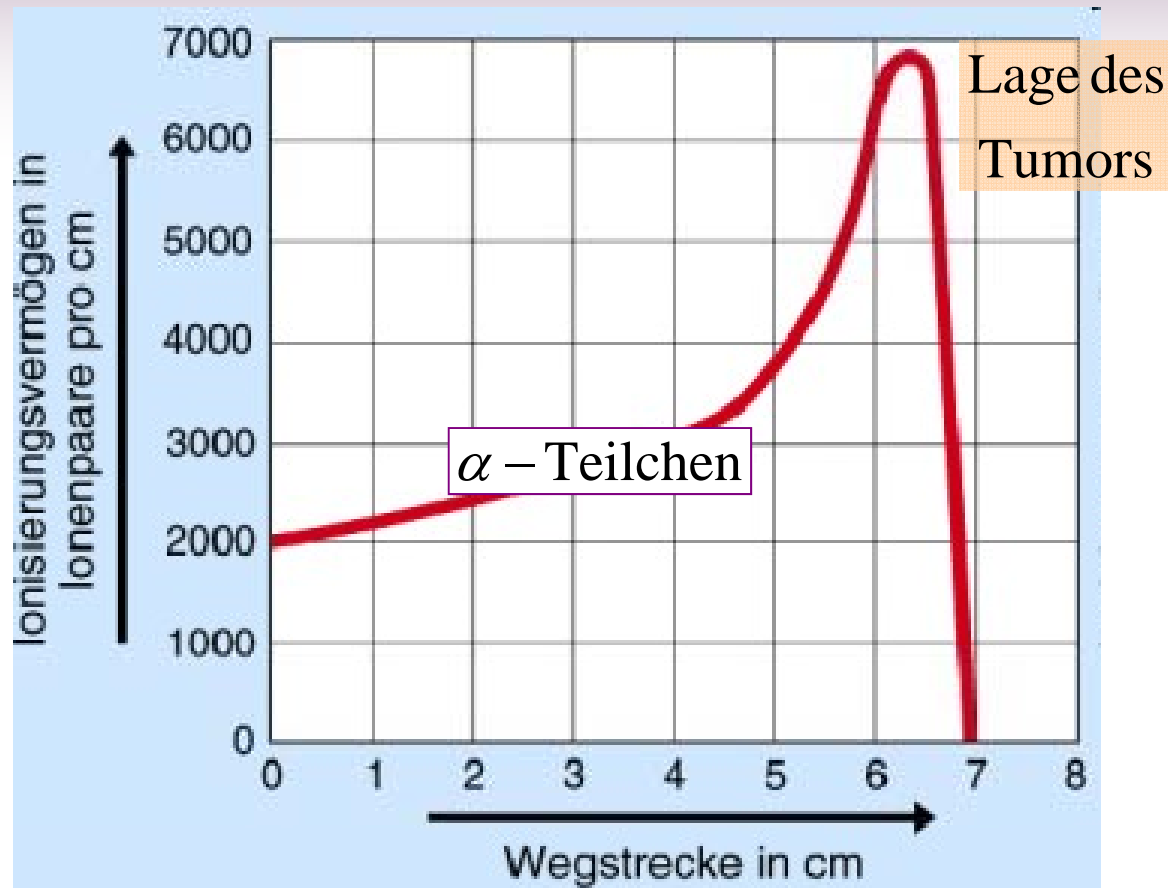


Diagnose

- Teilchen verlieren den Hauptteil ihrer Energie in eng begrenztem Tiefenbereich
- mit kinetischer Energie kann Eindringtiefe der Ionen genau und variabel eingestellt werden

Teilchen trifft Materie

Chirurgisches Messer

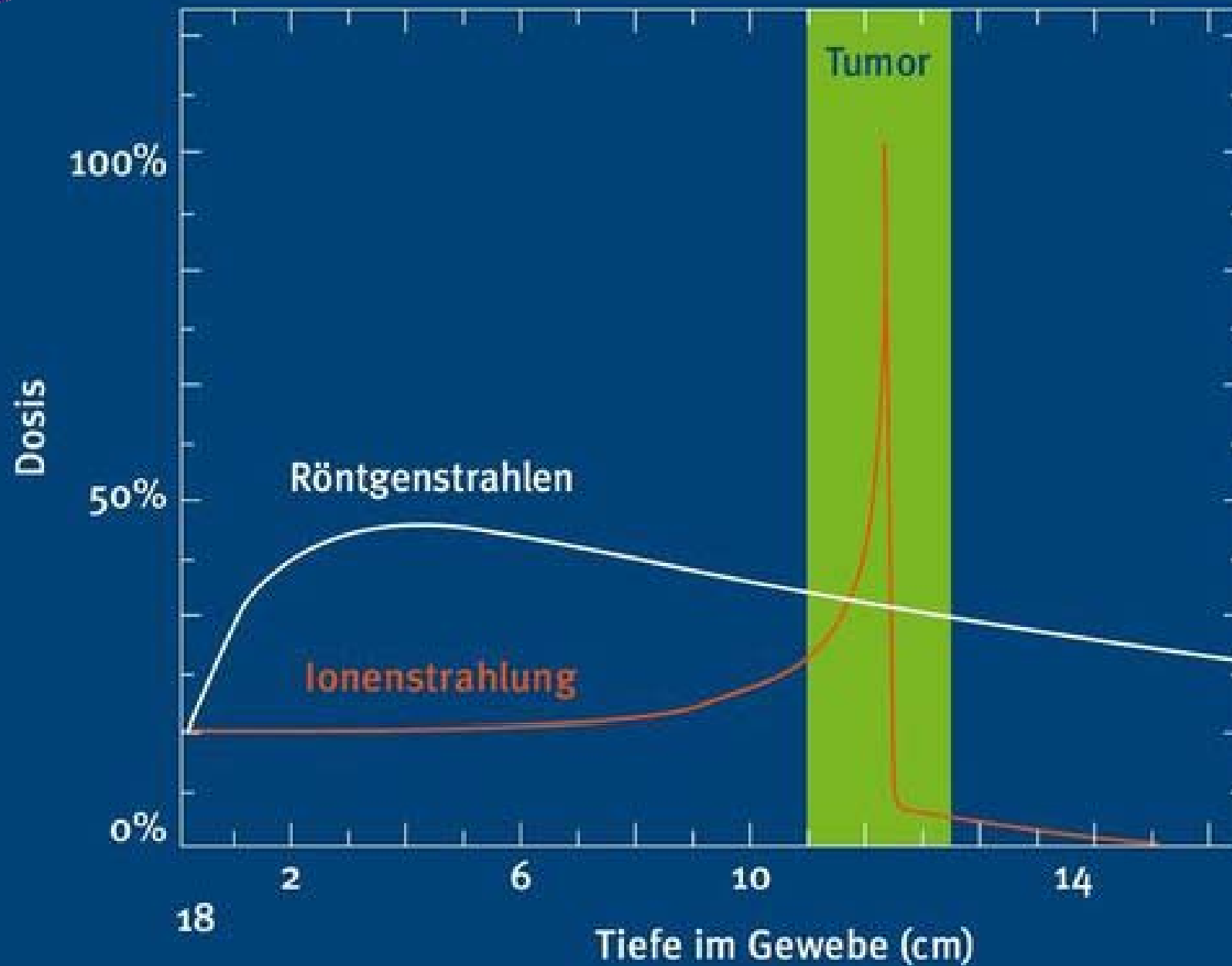


Diagnose

- **tiefliegende Tumore können gezielt behandelt werden**
- **umliegendes und insbesondere oberflächennahes Gewebe wird nur gering belastet**
- **erste Behandlung von Patienten 1954 in Berkeley (USA)**
- **erster Ionenbeschleuniger für medizinische Anwendung 1990 (Loma Linda University)**

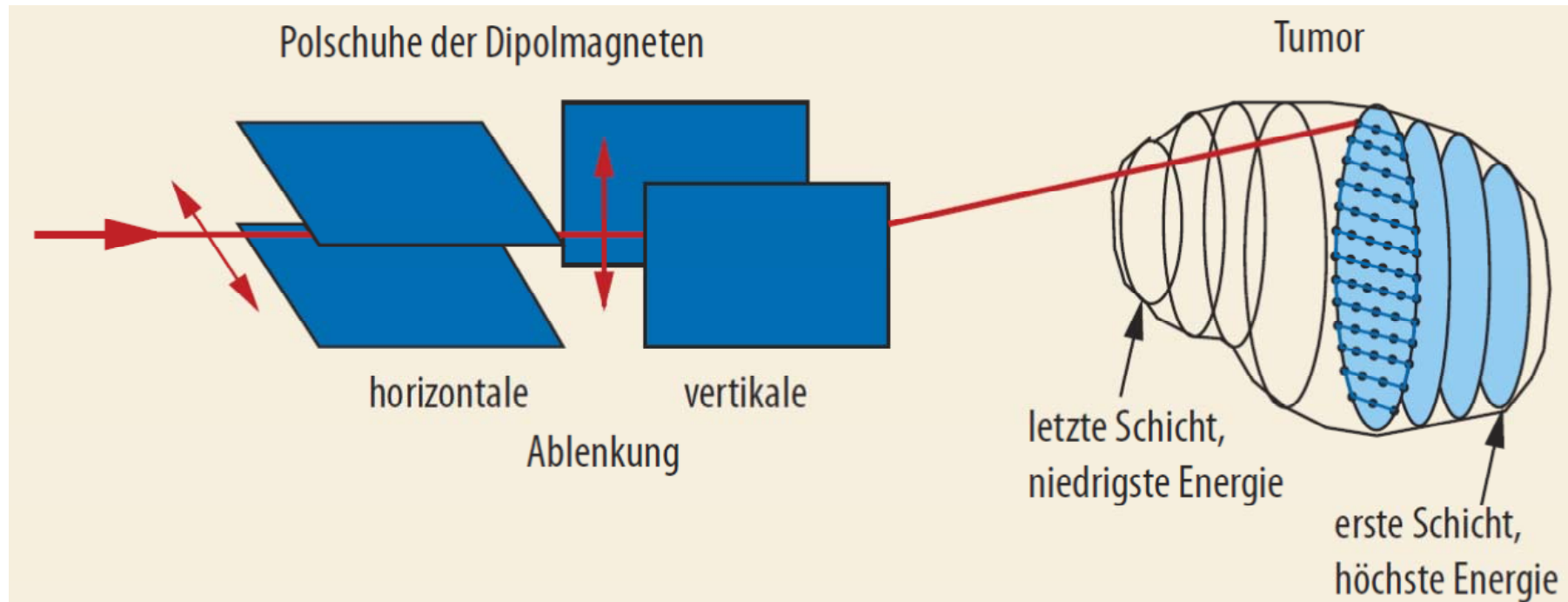
Dosisverlauf für Röntgen- und Ionenstrahlung in biologischem Gewebe

Extrablatt



Ionenbehandlung von Tumoren

Raster-Scan Verfahren



Diagnose

- schnelle geschaltete Magnete führen mm-feinen Ionenstrahl
- Ionen rastern Tumorgebiet horizontal und vertikal ab
- durch Variation kinetischer Energie können Schichten behandelt werden

Ionenbehandlung von Tumoren

Erfolgsraten

Indikation	Kriterium	Behandlungsergebnisse mit		
		Photonen	Ionen (NIRS)	Ionen (GSI)
(fortgeschrittene) Nasopharynx-Karzinome	5y-S	45 – 50 %	63 %	
Chordome	LCR	30 – 50 %	65 %	74 %
Chondrosarcome	LCR	33 %	88 %	87 %
Glioblastome	AST	12 Monate	16 Monate	
Aderhaut-Melanome	5y-S	95 %	96 %, Erhalt des Augenlichts	
Nasennebenhöhle-tumoren	LCR	21 %	63 %	
Bauchspeicheldrüsen-Karzinome	AST	6,5 Monate	7,8 Monate	
Lebertumoren	5y-S	23 %	100 %	
Speicheldrüsen-tumoren	LCR	24 – 28 %	61 %	
Weichteil-Karzinome	5y-S	31 – 75 %	52 – 83 %	67 %

AST	mittlere Überlebenszeit Patient
5y - S	5 - Jahre - Überleben Patient
LCR	lokale Tumorkontrolle
NIRS	National Institute of Radiological Science
GSI	Zentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt