



BIOPHYSIK

3. Vorlesung

Radioaktivität und Kernstrahlung

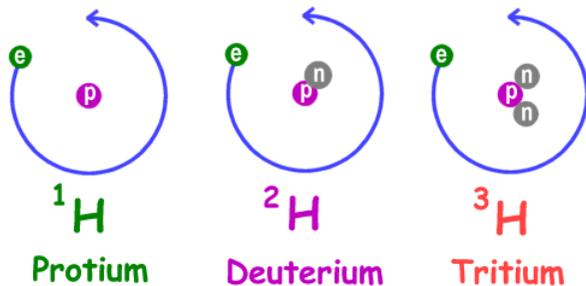
Beschreibung des Zerfallsprozesses

Isotopendiagnostik, Nuklearmedizin

Röntgenstrahlung, Diagnostik, Tomographie

Ein Beispiel für Isotop, Wasserstoff

Three Isotopes of Hydrogen



Atomkern

Aufbau: Protonen (p)
Neutronen (n)

$$m_p \cong 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$
$$q_p = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_n \cong 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$
$$q_n = 0$$



Isotope: Kerne mit gleicher Protonenzahl aber mit unterschiedlicher Neutronenzahl

Radioaktiver Zerfall

Henri Bequerel - 1896

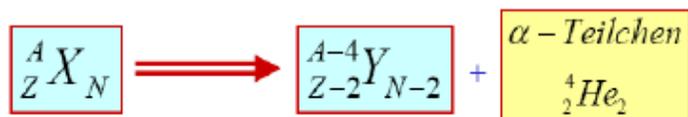
Ehepaar Marie und Pierre Curie - Radium, Polonium

Radioaktivität: die spontane Umwandlung von instabilen Atomkernen.

Der instabile Atomkern kann spontan einen tieferen, mehr stabilen Energiezustand erreichen. Bei der Umwandlung von Atomkernen wird ionisierende Strahlung ausgesendet.

Ein Atomkern ist instabil, wenn der Kern einen hohen Protonen-/Neutronenüberschuß besitzt.

α - Zerfall



Charakterisierung:

- relative Atommasse: $A \approx 4$
- elektrische Ladung: $q = +2e$
- kinetische Energie: einige MeV
- Teilchengeschwindigkeit: $\approx 1/10 \cdot c_0$

Natürliche Zerfallsreihen:

${}^{232}\text{Th}$ (Thoriumreihe), ${}^{237}\text{Np}$ (Neptuniumreihe), ${}^{238}\text{U}$ (Uranium-Radium-Reihe) und ${}^{235}\text{U}$ (Uranium-Aktinium-Reihe)

4

Wechselwirkung der α - Strahlung mit der Materie

Ionisationsvermögen hoch

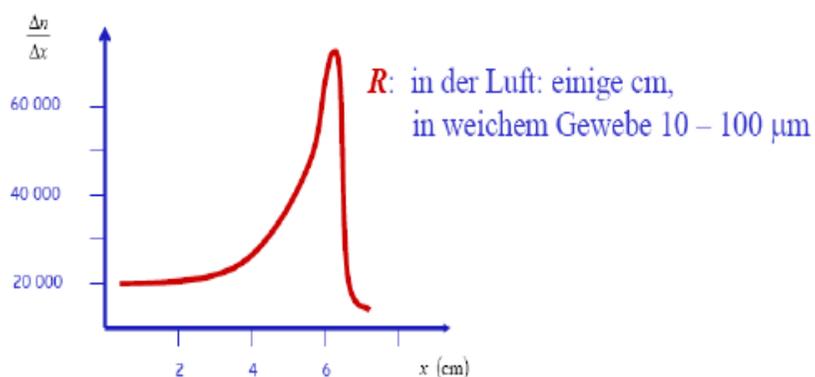
(fast) geradlinige Bahn →



1. lineare Ionendichte: $\frac{\Delta n}{\Delta x}$

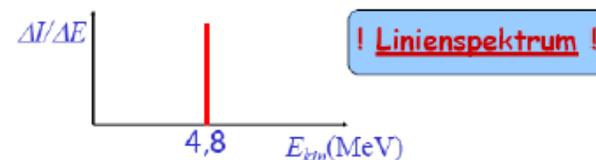
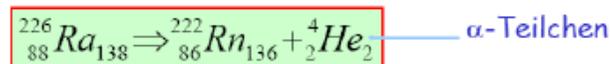
0

Wechselwirkung der α - Strahlung mit der Materie



2. **Reichweite (R)**: die Distanz, die ein Teilchen in einem Medium zurückgelegt hat, während seine Anfangsenergie auf den thermischen Wert abgesunken ist.

z.B.: in Uranium-Radium-Reihe

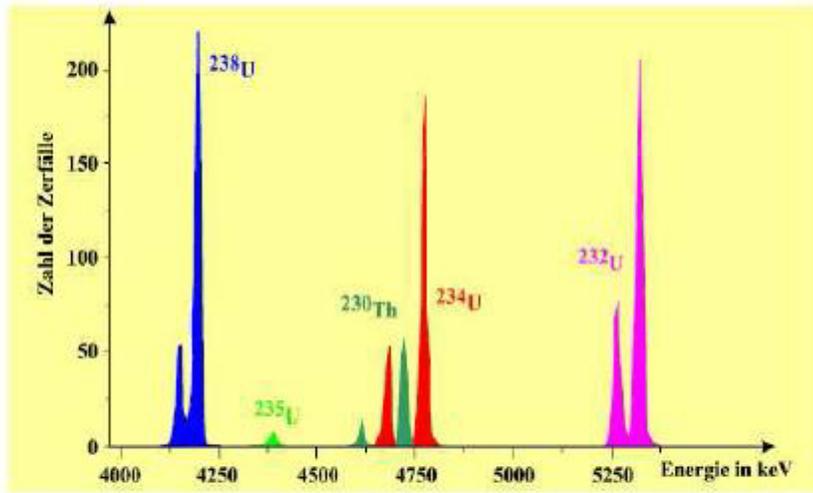


Die kinetische Energie eines α-Teilchens hängt vom zerfallenden Kern ab.

(1 eV = ? Joule beträgt → Seminar!!)

6

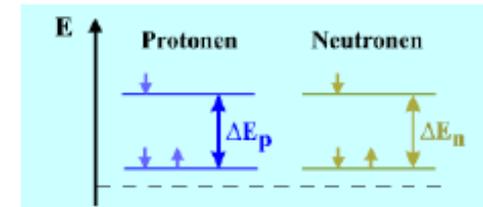
8



Besitzt auch der Atomkern eine Schalenstruktur?

y

Das Schalenmodell des Atomkerns



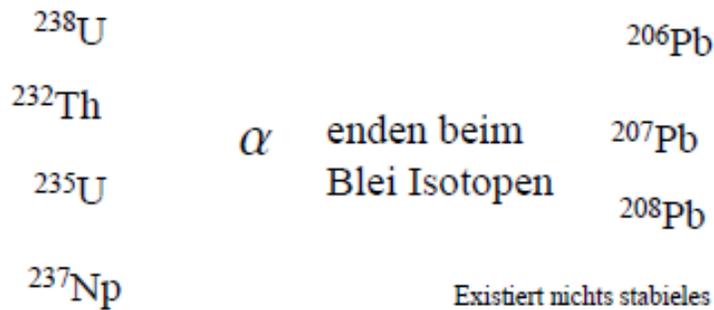
Die Energieniveaus sind gequantelt; getrennt für Protonen und Neutronen

Erklärt das beobachtete Linienspektrum des α -Zerfalls und auch der γ -Strahlung.

10

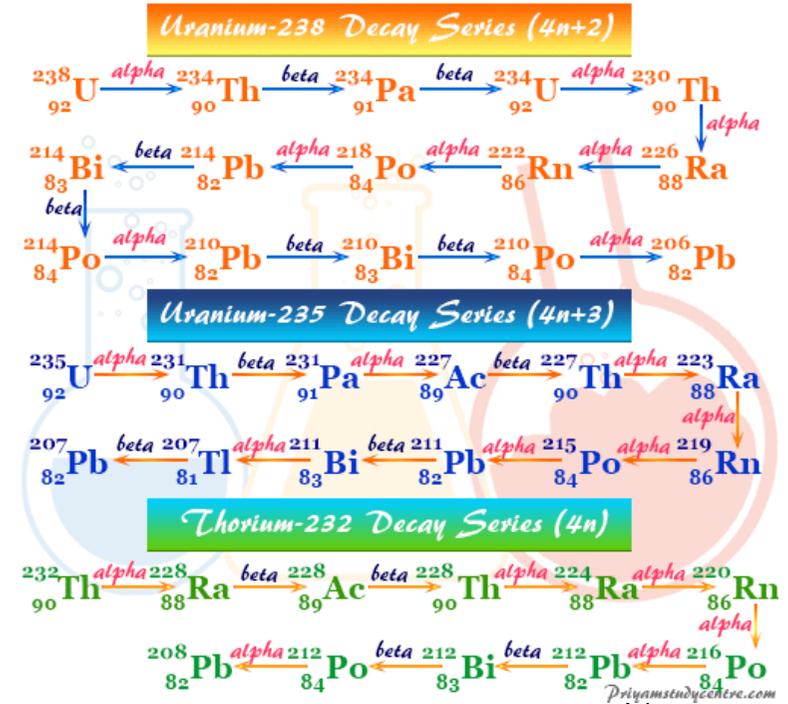
Ergänzungsmaterial

α Zerfallsreihen



11

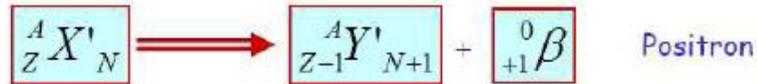
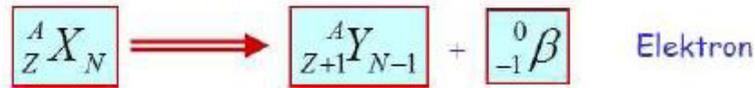
Ergänzungsmaterial



12

β - Zerfall

Geschichte: Soddy 1913

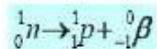
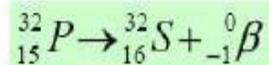


Bezeichnungen: ${}_{-1}^0 \beta, \beta^-, \beta, e$ Elektron
 ${}_{+1}^0 \beta, \beta^+$ Positron

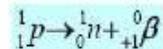
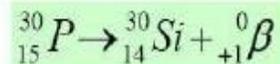
13

Bei Atomkernen mit

Neutronenüberschuß



Protonenüberschuß



Charakterisierung:

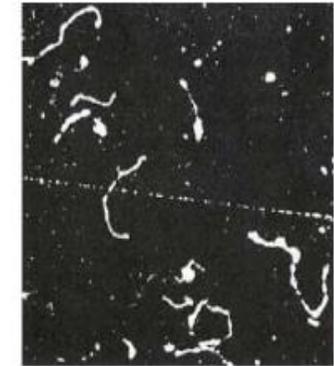
- Masse: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- elektrische Ladung: $q = \pm e$
- kinetische Energie: einige MeV
- Teilchengeschwindigkeit: bis zu $0,99 \cdot c_0$

Obwohl Mutter- und Tochterkern wohldefinierte Energie besitzen, ergibt sich für das Elektron keine feste kinetische Energie.

11

Wechselwirkung der β - Strahlung mit der Materie

mehrere Kollisionen
 - zick-zack-förmige Bahn



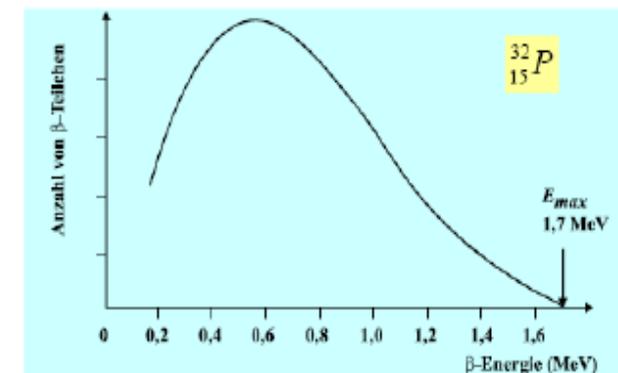
Ionisationsvermögen ~ 1 000x kleiner als bei den α - Teilchen

Reichweite: in der Luft: 10 cm - einige Meter,
 in weichem Gewebe einige mm

14

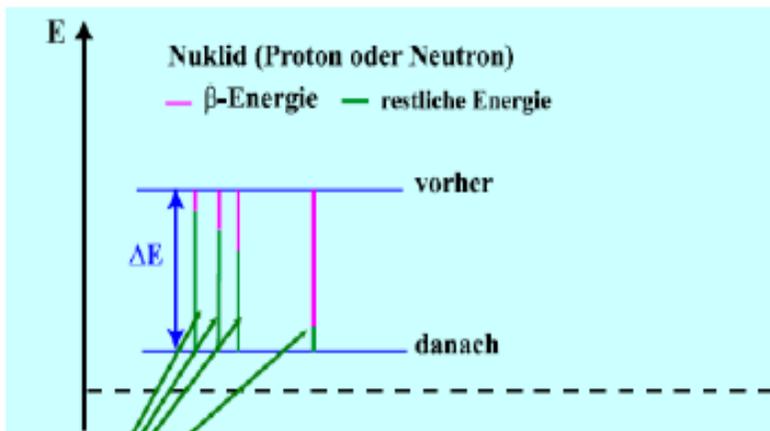
Das Spektrum der β - Strahlung

- Erwartet: Linienspektrum
- Beobachtet: kontinuierliches Spektrum, mit maximaler Energie !!

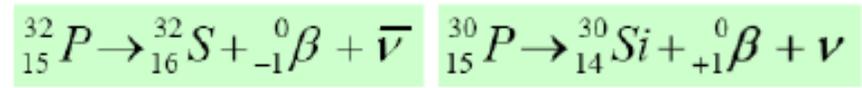
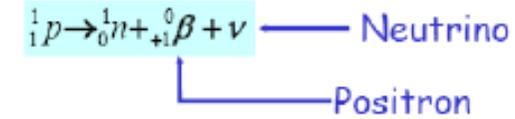
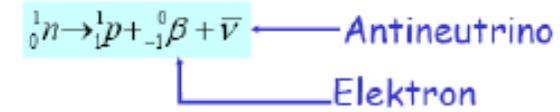


12

16

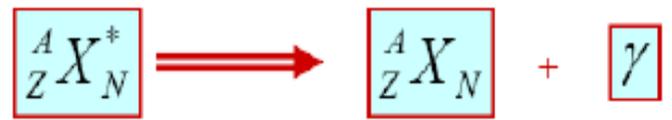


Die Energiedifferenz, ΔE ist zwischen β -Teilchen und einem neutralen Teilchen, dem *Neutrino*. aufgeteilt - Pauli 1930.

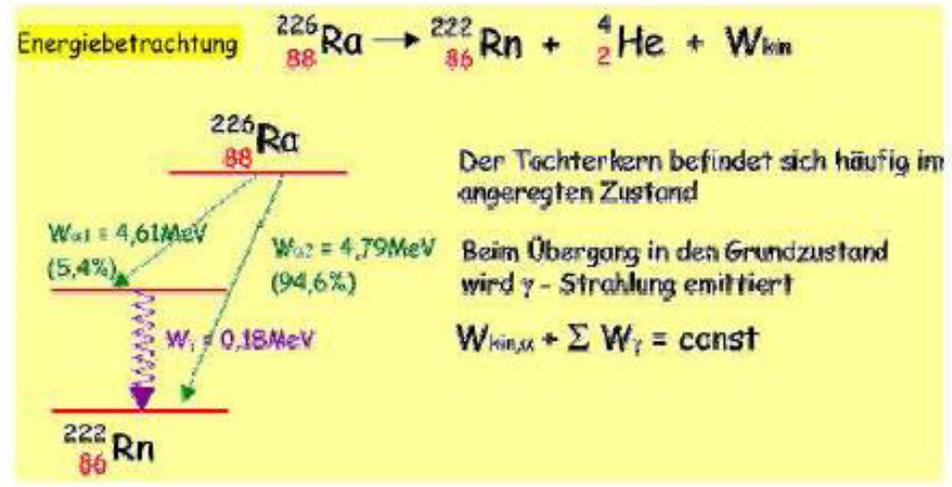


Erhaltungsgesetze: Energie, Ladung, Impuls,

γ -Strahlung



Eine Emission von γ -Photonen(Quanten) bedeutet keine Veränderung der Massen- oder Ordnungszahl. Sie stellt jedoch eine Energieänderung des Kerns dar.



γ -Strahlung

Charakterisierung:

- elektromagnetische Welle bzw. Photon → Dualismus
- mit einer Ruhemaße von 0
- keine elektrische Ladung
- Photonenenergie: MeV
- Geschwindigkeit: c_0 (Vakuumlichtgeschwindigkeit)

Das Spektrum der γ -Strahlung

- Linienspektrum
- charakteristisch für Isotop

$$^{51}\text{Cr}: W_\gamma = 0,32 \text{ MeV}$$

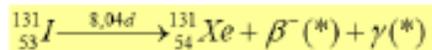
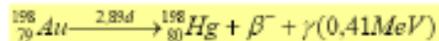
$$^{137}\text{Cs}: W_\gamma = 0,661 \text{ MeV}$$

Identifizierung der Atomkerne anhand der γ -Strahlung
⇒ **Isotopendiagnostik**

22

Prompte γ -Strahlung

z.B.:



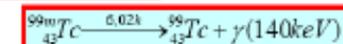
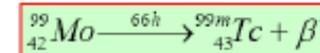
innerhalb 10^{-13} bis 10^{-18} s !

Begleiteffekt von α und β -Strahlung

Der angeregte Kern gibt seine Energieüberschuß innerhalb einer sehr kurzen Zeit in einem oder in mehreren Schritten durch Emission von γ -Strahlung ab.

23

Isomerer Übergang



Der Kern bleibt nach der Teilchenemission für eine relativ lange Zeit (länger als 10^{-10} s) in angeregtem Zustand.

metastabiler Zustand

Isomer des Kerns $^{99}_{43}\text{Tc}$

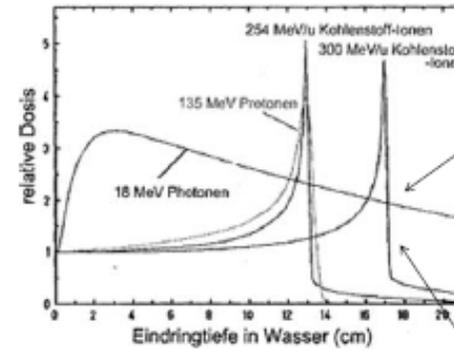
→ Technetium Generator

24

- ^{99m}Tc ist das meistbenutzte Isotop für unterschiedliche Radiopharmaka
 - a.) Na-Pertechnetat-Lösung (Generator-Eluat) für Darstellung der Schilddrüse und der Speicheldrüsen;
 - b.) HSA-Makroaggregate für Lungenperfusionsszintigraphie;
 - c.) Iminoessigsäure-Derivate für Choleszintigraphie, Bestimmung der hepatobiliären Funktion; ...

25

Die Hauptunterscheid zwischen die Strahlungsarten



Exponentielle Absorption von Gamma/Röntgenstrahlung

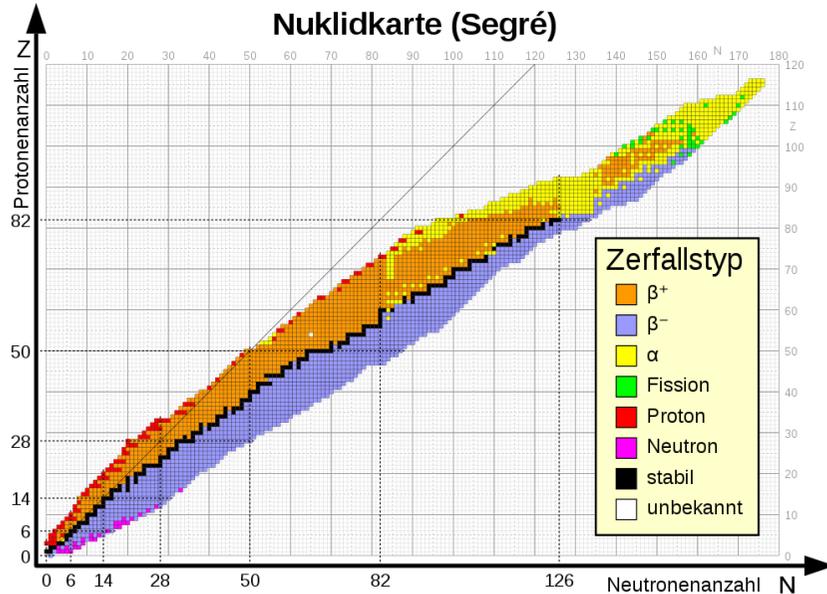
Bremsvermögen, Braggkurve und Reichweite

26

Nuklidkarte

Ergänzungsmaterial

Es sind etwa 3300 Nuklide um die 3000 sind künstlich

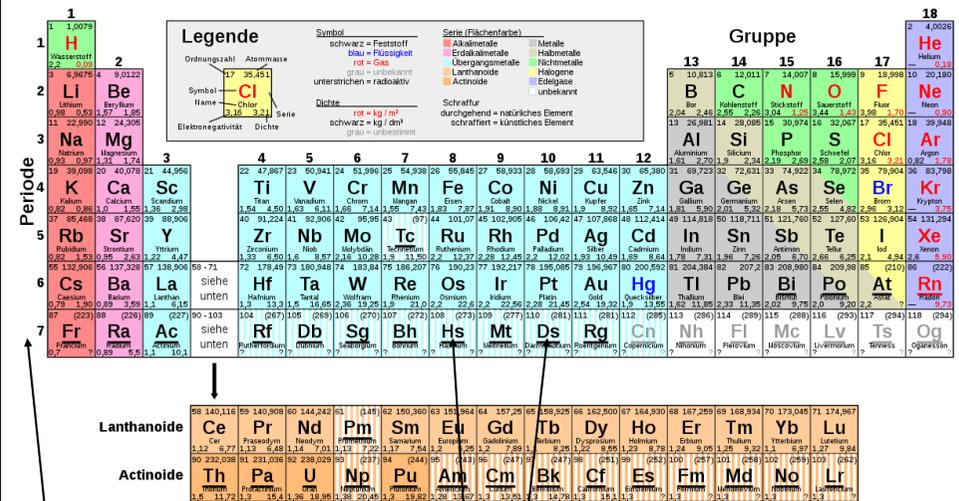


<https://de.wikipedia.org/wiki/Nuklidkarte>
https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Isotope

27

Periodensystem

Ergänzungsmaterial



„die ganze 7er-eihe ist voll ☺“

Darmstadtium nach GSI Darmstadt benannt
 Hassium nach Hessen benannt ☺

28

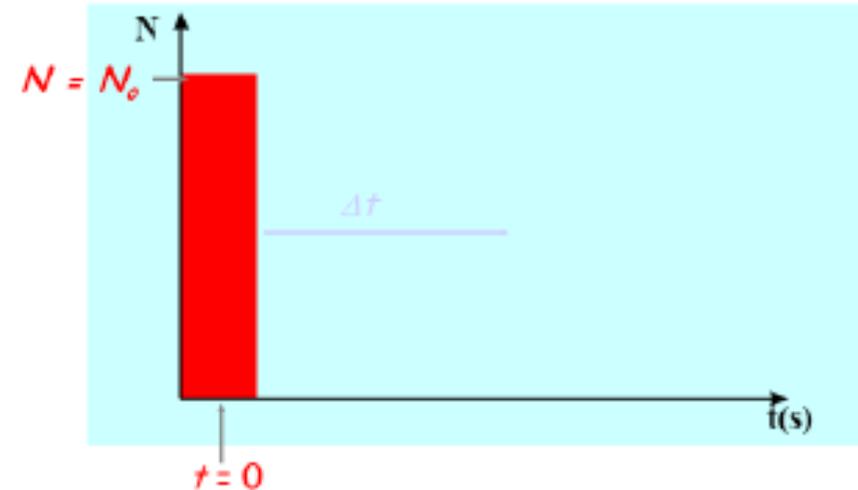
Beschreibung des Zerfallsprozesses

Radioaktiver Zerfall ist ein zufälliger Vorgang.
Die einzelnen Umwandlungen in einem Radionuklid-Präparat erfolgen zeitlich und räumlich völlig ungeordnet.

Es lassen sich lediglich *statistische Aussagen* über diesen Vorgang für eine große Anzahl von Kernen machen.

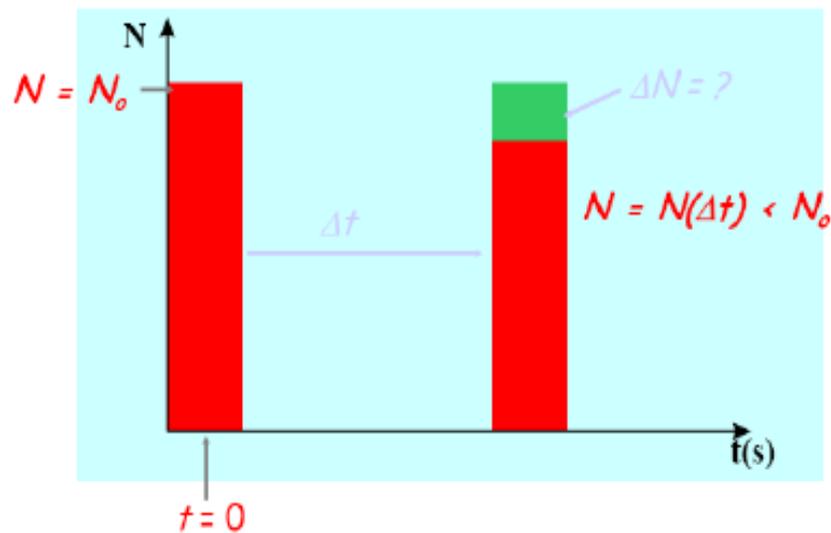
29

Beschreibung des Zerfallsprozesses



N_0 : Anzahl der radioaktiven Kerne zur Zeit $t = 0$

30



31

$\Delta N(t)$: zerfallene radioaktive Kerne im Zeitintervall Δt

$N(t)$: radioaktive Atomkerne zur Zeit t

(-) Vorzeichen: die Zahl der Zerfälle mit der Zeit abnimmt.

$$\Delta N(t) \sim -N(t) \cdot \Delta t$$

$$\frac{\Delta N(t)}{N(t)} = -\lambda \cdot \Delta t \quad \lambda - \text{Zerfallskonstante}$$

$[\lambda] = 1/s$

32

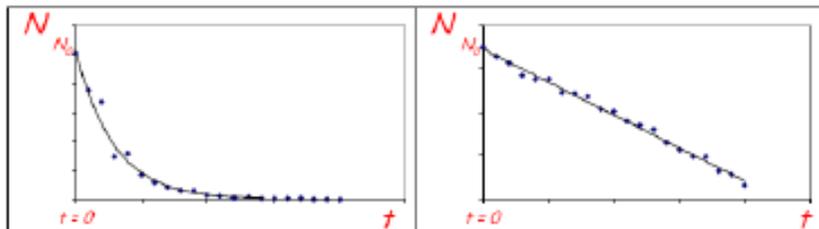
Zerfallsgesetz

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

N_0 - die Anzahl der instabilen Kerne zur Zeit $t = 0$

e - Eulersche Zahl: $e = 2,718281828$

λ - Zerfallskonstante



lineare Darstellung

halblogarithmische Darstellung

33

Deutung der Zerfallskonstante:

$$\frac{\Delta N(t)}{N(t)} = -\lambda \cdot \Delta t$$

Anteil der zerfallenen Kerne im Zeitintervall Δt

$\lambda \cdot \Delta t$ ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein Kern während Δt zerfällt.

34

λ - Zerfallskonstante

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

mittlere Lebensdauer

Wie viele instabile Kerne sind nach $t = \tau$ langer Zeit im Präparat vorhanden?

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

$$\frac{N(\tau)}{N_0} = e^{-\lambda \cdot \frac{1}{\lambda}} \Rightarrow \frac{N(\tau)}{N_0} = e^{-1}$$

τ gibt an, nach welcher Zeit die Anzahl der instabilen Kerne auf den e-ten (37%) Teil ihres Anfangswertes gesunken ist.

12

35

Nach welcher Zeit hat sich die Hälfte der zum Zeitpunkt $t = 0$ vorhandenen instabilen Kerne umgewandelt?

Halbwertszeit: $T_{1/2}$

Die Halbwertszeit ($T_{1/2}$) ist diejenige Zeit, in der die Anzahl der vorhandenen instabile Atomkerne jeweils auf die Hälfte abnimmt.

36

Nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Verwendung
Tc-99m	6h	IÜ(100)	D
J-131	8,05d	β^-	T/D
Co-57	270d	EE	D
Cr-51	27,7d	EE	D
Xe-133	5,3d	β^-	D
Kr-81m	13s	IÜ	D
P-32	14,3d	β^-	T
C-11	20,4m	β^+	D
O-15	122s	β^+	D
Cs-137	30a	β^-	

Zerfallsart: EE: Elektroneneinfang, β^- : Beta-Zerfall, β^+ : Beta-Plus-Zerfall, IÜ: isomerer Übergang

Verwendung: D: Diagnostik, T: Therapie

37

einige natürliche Radionuklide			
Nuklid	Symbol	Halbwertszeit	Natürliche Aktivität
Uran 235	^{235}U	$7.04 \times 10^8 \text{ J}$	0.72% des vorkommenden Urans
Uran 238	^{238}U	$4.47 \times 10^9 \text{ J}$	99.2745% des vorkommenden Urans; 0.5 to 4.7 ppm Gesamturan in den allgemeinen Gesteinstypen
Thorium 232	^{232}Th	$1.41 \times 10^{10} \text{ J}$	1.6 to 20 ppm in den allgemeinen Gesteinstypen
Radium 226	^{226}Ra	$1.60 \times 10^3 \text{ J}$	16 Bq/kg in Lehm und 48 Bq/kg in Eruptivgestein
Radon 222	^{222}Rn	3.82 Tage	Edelgas; jährliche Luftkonzentration in USA von 0.6 Bq/m ³ to 28 Bq/m ³
Kalium 40	^{40}K	$1.28 \times 10^9 \text{ J}$	Boden - 0.037-1.1 Bq/g

38

Ergänzungsmaterial

Von 118 existierenden Elementen die folgendem 37 haben keinen stabilen Isotopen

Technécium	Neptunium	Dubnium
Prométium	Plutonium	Siborgium
Bizmut	Americium	Borium
Polónium	Kürium	Hassium
Asztácium	Berkélium	Meitnerium
Radon	Kalifornium	Darmstadtium
Francium	Einsteinium	Röntgenium
Radium	Fermium	Kopernícium
Aktinium	Mendelévium	Nihonium
Thorium	Nobélium	Flerovium
Protaktinium	Laurencium	Moskovium
Uran	Radzerfordium	Livermorium
		Oganesszon

39

$$N(t = T_{1/2}) = N_o \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \quad N(t = T_{1/2}) = \frac{N_o}{2}$$

$$\frac{N_o}{2} = N_o \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \quad \frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$$

$$\Rightarrow 2 = e^{\lambda \cdot T_{1/2}}$$

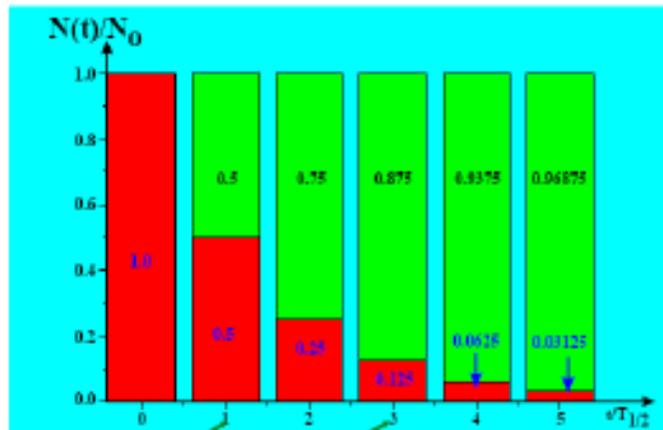
$$\ln 2 = \ln(e^{\lambda \cdot T_{1/2}}) \Rightarrow \ln 2 = \lambda \cdot T_{1/2}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$$N(t) = N_o e^{-\lambda t} \quad \leftrightarrow \quad N(t) = N_o \cdot 2^{-t/T_{1/2}}$$

16

40



1000 Kerne $\xrightarrow{t = T_{1/2}}$ 500 Kerne

41

Wieviel Kerne zerfallen pro Sekunde: $\Delta N/\Delta t = ?$

Aktivität eines Präparates

$$A(t) = -\frac{\Delta N(t)}{\Delta t} \Rightarrow A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$$

$$\begin{aligned} -\frac{dN(t)}{dt} &= \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} \\ A(t) &= \lambda \cdot N(t) \quad A_0 = \lambda \cdot N_0 \\ A(t) &= A_0 \cdot e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

Bezeichnungen: A, λ

$[A] = \text{Zerfall/Sekunde} = \text{Bq (Becquerel)}$

42

Bemerkung:

1. spezifische Aktivität
- auf die Masseneinheit bezogene Aktivität

Einheit: Bq/g

2. Aktivitätskonzentration
- auf die Volumeneinheit bezogene Aktivität

Einheit: Bq/ml

43

$$A = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N$$

Konsequenzen:

- 1.) wenn anfangs dieselbe Kernmenge (N_0) vorhanden ist, kürzere Halbwertszeit erhöht die Aktivität: mehr Kerne zerfallen pro Zeiteinheit.
- 2.) um eine gewünschte Aktivität zu erreichen, ist eine kleinere Anfangsmenge aus einem Isotop kürzerer Halbwertszeit nötig.

kleinere Strahlenbelastung bei Isotopendiagnostik!!!

44

Biologische und effektive Halbwertszeit

λ_{phys} - physikalische Zerfallskonstante

λ_{biol} - biologische Zerfallskonstante

Sei $\lambda_{eff} \cdot \Delta t$ die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Kern während Δt zerfällt oder ausgeschieden wird

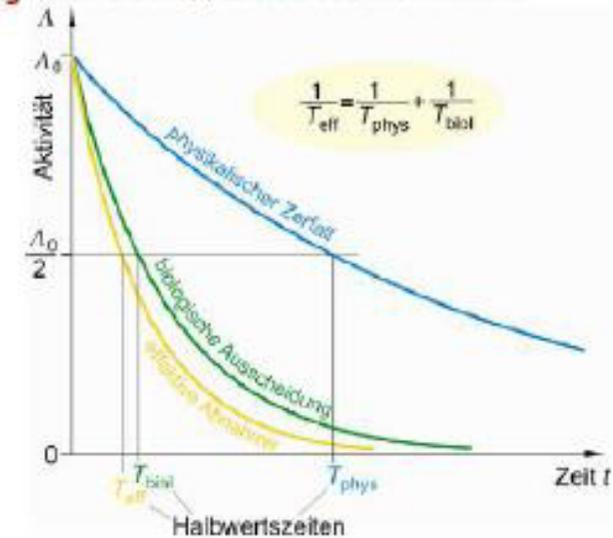
$$\frac{\Delta N_{eff}}{N} = \frac{\Delta N_{phys}}{N} + \frac{\Delta N_{biol}}{N} \longrightarrow \lambda_{eff} = \lambda_{phys} + \lambda_{biol} \longrightarrow$$

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{phys}} + \frac{1}{T_{biol}}$$

1

45

Biologische und effektive Halbwertszeit



46

Nuklearmedizin



Als **Nuklearmedizin** bezeichnet man die Anwendung von offenen radioaktiven Stoffen in medizinischer Diagnostik, Therapie und Wissenschaft.

1

47

Nuklearmedizin

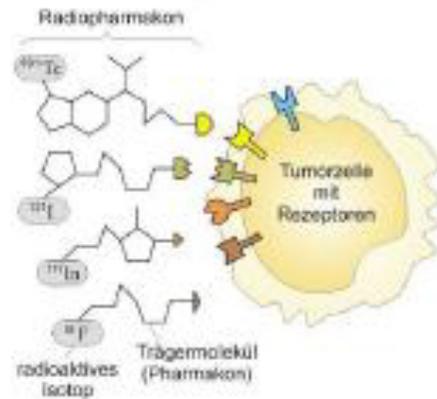


Radiopharmaka

Radiopharmaka sind pharmakologisch wirksame Substanzen, die mit einer geringen Menge eines kurzlebigen radioaktiven Nuklids (radioaktives Isotop) markiert sind. Sie folgen im Körper dem durch das Pharmakon vorgegebenen Weg (Tracer-Prinzip) und erlauben durch das strahlende Label eine Verfolgung von außen (bei Gamma-strahlenden Nukliden) oder eine gezielte therapeutische Wirkung am Zielort (bei Beta- oder Alpha-strahlendem Isotop).

48

Radiopharmaka



Das strahlende Isotop wird an ein Pharmakon gebunden, das sich dann an die Zielzelle bindet.

49

Beispiele für Anwendung von Radiopharmaka

- ^{133}Xe – Untersuchung der Lungenventilation
- ^{123}I – Schilddrüsenszintigraphie (Natriumjodid), Tumorszintigraphie (markiertes Meta-iodo-benzylguanidin, MIBG)
- ^{131}I – Schilddrüsenszintigraphie (Natriumjodid)
- $^{99\text{m}}\text{Tc}$ – Herzmuskelperfusion (markiertes Methoxy-isobutyl-isonitril, MIBI), Hirnperfusion, Entzündungsprozesse (markiertes Hexamethylen-propylamin-oxim, HMPAO)

50

George de Hevesy (geboren *György Hevesy*)

(* 1. August 1885 in Budapest;
† 5. Juli 1966 in Freiburg im Breisgau),
war ein ungarischer Chemiker.



Hevesy studierte Chemie, Mathematik und Physik in Budapest, Berlin und Freiburg. Anschließend arbeitete er unter anderem bei Ernest Rutherford und Friedrich Adolf Paneth. In Kopenhagen entdeckte 1922 er gemeinsam mit Dirk Coster 1922 das Element Hafnium. Er ist einer der **Begründer der Radiochemie und Erfinder der Tracermethode**, mit der chemische Elemente durch die Beimischung ihrer radioaktiven Isotope analytisch gekennzeichnet werden. Er hat auch die Neutronenaktivierungsanalyse als analytisches Verfahren eingeführt. Von 1926 bis 1934 war er Professor an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Nach der Machtübernahme durch die Nationalsozialisten floh er nach Kopenhagen und 1943 weiter nach Stockholm. Im gleichen Jahr wurde ihm der **Nobelpreis für Chemie** verliehen. Bis 1961 arbeitete er in Stockholm und wandte sich physiologischen und klinischen Fragestellungen auf dem Gebiet der Radiobiologie zu.

51

Nuklearmedizin

1. In vitro Laboruntersuchungen
2. Volumenbestimmung von Körperräumen
3. Bestimmung der Isotopenverteilung
4. Tomographische Verfahren

52

Nuklearmedizin

1. *In vitro* Laboruntersuchungen

RIA: Radioimmunoassay

R. Yalow - 1977, Nobelpreis für Medizin und Physiologie

Anwendung von radioaktiv markierten Substanzen/Liganden
radioaktiv markiertes Antigen

RIA-Test: Der Test basiert auf einer Kompetitionsreaktion zwischen dem radioaktiv markierten und dem unmarkierten Antigen um den Antikörper

• sehr genaue Bestimmung der Konzentration von z.B. Hormonen, Enzymen, Tumorantigenen, Infektionsantigenen, Arzneimitteln und DNA

• heute: statt Radioaktivität, sind Fluoreszenzmethoden oft benützt.

keine Strahlenbelastung

7

53

Nuklearmedizin

3. *Bestimmung der Isotopenverteilung*

• Feststellung der Form, Größe, metabolischen Aktivität von Organen

• zweidimensionale Projektion der Anreicherung der Isotope in einzelnen Organen, Zellräumen, Kompartiments

Zeitliche Verlauf der Aktivität auch

55

Nuklearmedizin

2. *Volumenbestimmung von Körperräumen*

- das Gesamtvolumen des Wassers
- das Blutplasmavolumen
- die Menge der austauschbaren Natriumionen

- die mittlere Lebensdauer der Erythrozyten
- die Kinetik der Eisen- und Kalziumaufnahme

54

Nuklearmedizin

4. *Tomographische Verfahren*

• räumliche, dreidimensionale Verteilung der Radioisotope

- SPECT (single photon emission computed tomography)
- PET (positron emission tomography)

56

Physikalische Aspekte bei der Auswahl von in vivo applizierten Isotopen

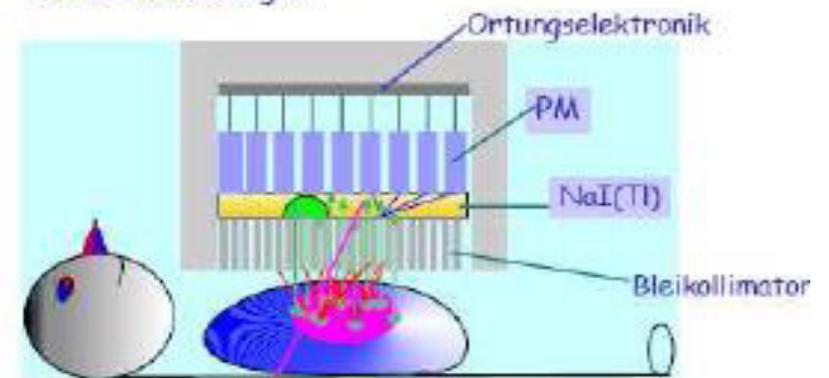
2. Die Halbwertszeit

$$\Delta = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N$$

Bei gleichgroßer Aktivität ist eine geringere Menge des Isotops mit kürzerer Halbwertszeit erforderlich

57

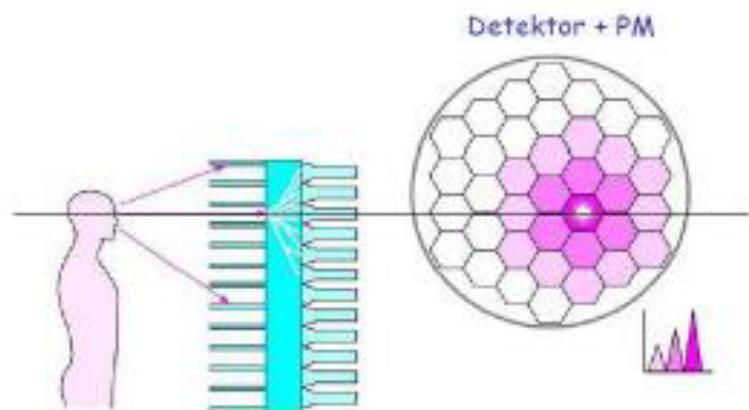
räumliche Auflösung — Bleikollimator
nur Strahlen parallel mit der Kollimatorachse
können durchdringen



Szintillation in unterschiedlicher Weite von PM
→ Intensitätsunterschied → Ortsbestimmung

15

58



Von den Photonen aus dem radioaktiven Zerfall erreichen nur die den Kristall, die parallel zu den Kollimatorspalten vor dem Szintillationskristall verlaufen, die von den γ -Photonen generierten Lichtblitze werden von Photoelektronenvervielfachern am Kristall detektiert.

Aufsicht des Szintillationskristalls und der gekoppelten sechseckigen Photomultiplienvervielfacher

17

59

Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)



– das nuklearmedizinische Analogon zur Röntgen-Computer-Tomographie (CT)

- Dabei werden aus dem Patienten emittierte Einzelphotonen (Gammaquanten) gemessen.
- Die Untersuchung findet unter verschiedenen Winkeln statt— Ein bis zu drei Gammakamera rotieren um die zu untersuchende Region.
- Schnittbilder werden durch das Verfahren der gefilterten Rückprojektion rekonstruiert.
- Erzeugt werden dabei überlagerungsfreie Bilder und dreidimensionale Darstellungen der Aktivitätsverteilung.

20

60

Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)



mehrere Detektoren ermöglichen eine kürzere Aufnahmezeit, bessere Auflösung

Gammakameras

- Sequenzszintigraphie
- Funktionsszintigraphie

21

61

Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)



1. Myocard-SPECT zur Untersuchung der Vitalität des Herzmuskelgewebes. Das verwendete Radiopharmakon ist meist Tc-99m MIBI.
2. Knochen-SPECT zur Lokalisation von Regionen mit verändertem Knochenstoffwechsel in der Skelettszintigraphie
3. Hirnfunktions-SPECT (FP-CIT und IBZM-SPECT) zur Diagnostik und Differenzierung von Parkinsonsyndromen und gegenüber weiteren degenerativen Hirnerkrankungen
4. Octreotid-SPECT im Rahmen der Somatostatinrezeptorzintigraphie bei neuroendokrinen Tumoren
5. MIBG-SPECT bei adrenergen Tumoren z. B. des Nebennierenmarkes, sog. Phäochromozytom

Deutscher Krebsforschungsausschuss, Heidelberg
Nuklearmedizinische Klinik und Poliklinik der TU München
Institut für Nuklearmedizin der Universitätsklinikum Essen

22

62

PET: Positronen Emissions Tomographie



Bild einer typischen Positronen-Emissions-Tomographie-Einrichtung

63

Radioisotope für PET

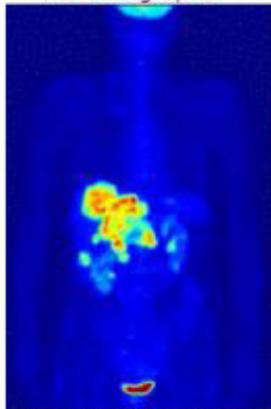
Isotop	Markermolekül	Was wird nachgewiesen	Klinische Bedeutung
^{18}F	Desoxyglukose	Glukosestoffwechsel	Stoffwechselveränderungen, Tumoren
^{18}F	^{18}F -Ion	Knochenstoffwechsel	Veränderungen des Knochenstoffs
^{11}C	Aminosäuren	Aminosäurestoffwechsel	Stoffwechselveränderungen, Tumoren
^{11}C	Roclopride	Dopamin-(D ₂) Rezeptor	Parkinson-Krankheiten
^{15}O	^{15}O -markierte Gase	Oxygenstoffwechsel	Messung des Oxygenstoffwechsels
^{15}O	Butanol	Blutzirkulation, Blutvolumen	Messung des Oxygenstoffwechsels
^{15}O	Wasser	Blutzirkulation, Blutvolumen	z. B. Untersuchung eines Stroke-betroffenen Gebietes
^{13}N	Ammoniak	Blutzirkulation	Messung der Herzmuskelvitalität

24

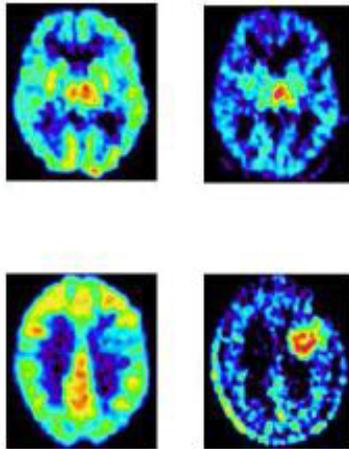
64

Hirntumor: PET Aufnahmen mit den Radiopharmaka ^{18}F -FDG und ^{11}C -Methionin (Aufnahme aus dem PET-Zentrum der DEOC, mit Genehmigung von Prof. Lajos Trón)

PE-Tomographie



^{18}F -FDG-Ganzkörperaufnahme



69

PE-Tomographie

Vorteil: Informationen über die Funktion, die Stoffwechselprozesse der lebenden Organismen → funktionelle bildgebende Verfahren

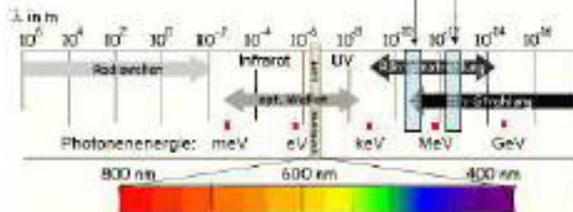
Nachteil: die Auflösung in der transaxiale Ebene 5 mm
in axialer Richtung 6 mm
die Morphologie des Körpers lässt sich nur grob beurteilen

Beseitigt mit den **Bildfusionsverfahren**
Superposition der MRT- oder CT-Aufnahme mit der PET-Aufnahme → **morphologische und funktionelle Bildgebung**

70

Charakterisierung der Röntgenstrahlung

- elektromagnetische Strahlung
- Photonenergie:
 - Diagnostik: 30-200 keV
 - Therapie: 5-20 MeV
- Wellenlänge: ~ pm



71

- Wirkungen:
 - Ionisation (Ionisierende Strahlung)
 - Lumineszenz (Fluoroskopie, Bildverstärker)
 - chemische (z.B. Photo)
 - biologische (Strahlenschädigung)
- Entstehung: in der Elektronenhülle
- Typen
 - Bremsstrahlung
 - charakteristische Strahlung

72

Historie

- 1895 Wilhelm Conrad Röntgen
X-Strahlung (X-ray)
- 1896 erste
medizinische
Anwendung
- 1901 Nobel Preis
(erste Nobel Preis in Physik)
- ... heute: 3D Röntgen-CT



73

Entstehung der Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung entsteht wenn
hocheNERGETISCHE (beschleunigte)
geladene Teilchen ihre Energie abgeben.

Elektronen E_{kin}

Röntgenröhre (Diagnostik)
Teilchenbeschleuniger (Therapie)

Geräte zur Erzeugung der
Röntgenstrahlung

Röntgenröhre



Teilchenbeschleuniger

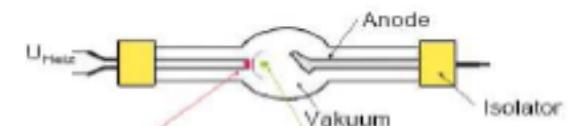


74



75

Die Röntgenröhre



Heizkathode: Heizung (T Erhöhung) \Rightarrow Erhöhte
thermische Energie \Rightarrow Elektronen treten aus der
Kathode aus.

1. (Glühelctrischer Effekt)

Anodenspannung (U) (typisch 30-200 kV):
beschleunigt die Elektronen

- 2.

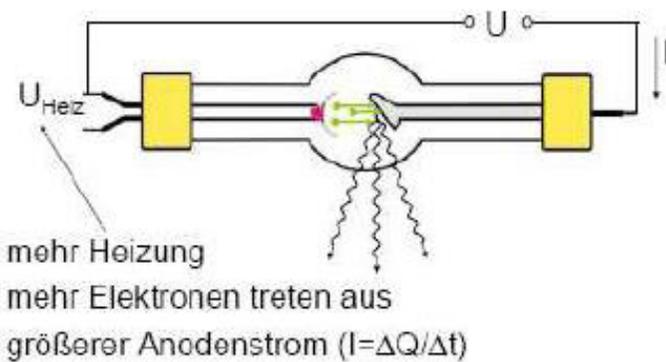
$$U \cdot e = E_{kin}$$

Elementarladung $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ kinetische Energie
des beschleunigten Elektrons

3. Röntgenstrahlung entsteht wenn die beschleunigten
Elektronen auf die Anode prallen.
1. Abbremsung (Bremsstrahlung)
2. Elektronenausstoß+Elektronenübergang
(Charakteristische Str.)

76

Regulierung der Anodenstromstärke



77

Wirkungsgrad der Röntgenröhre

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{nützliche Leistung}}{\text{investierte Leistung}}$$

$$\eta = \frac{cU^2 IZ}{UI} = cUZ$$

Anodenmaterial mit hoher Ordnungszahl !

Praktisch: Wolfram (Z=74)

typisches η : 1% **99% Wärme!**

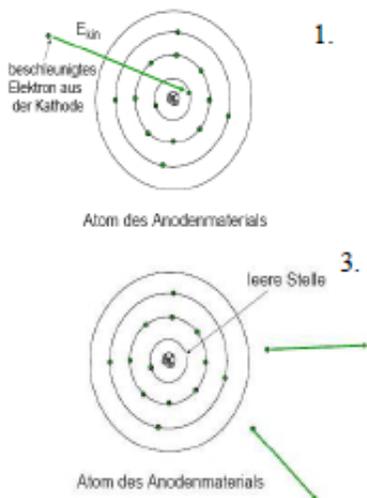


Z_{blei} = 82 !

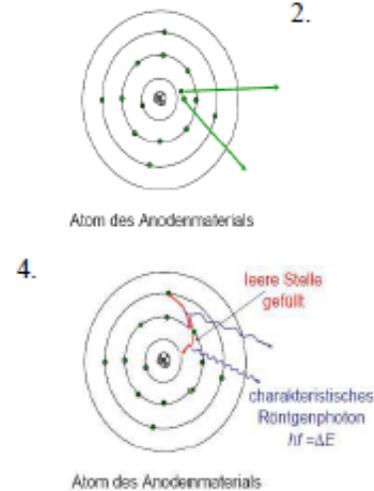
Aber: T_{Schm,W} ≈ 3400 °C T_{Schm,Pb} ≈ 330 °C

78

Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung

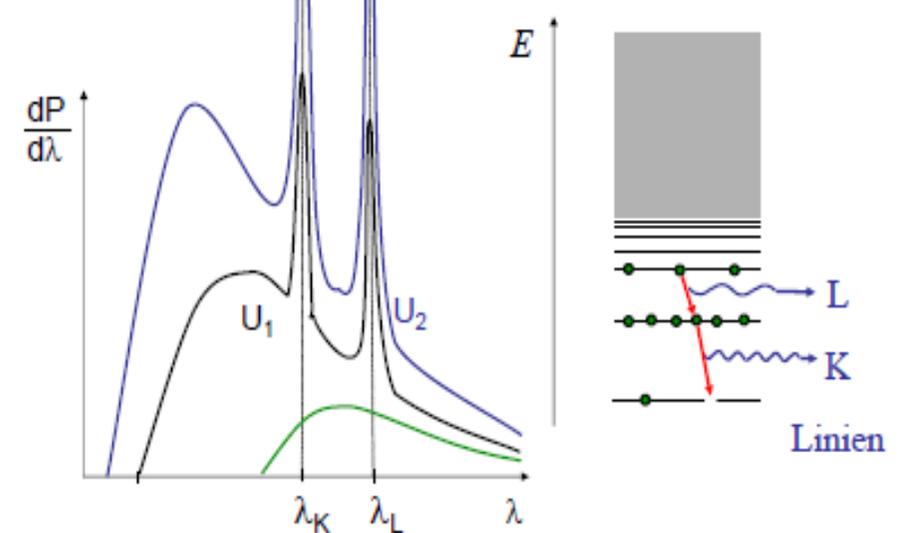


Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung



79

Spektrum der charakteristischen Röntgenstrahlung



80

Röntgendiagnostische Verfahren

Summationsbild

- Statische Aufnahme (Filmaufnahme)
- Gleichzeitiges Bild (Fluoroskopie)

Tomographisches Bild CT

Spezialitäten: Anwendung von Kontrastmitteln, Digitalisierung, Subtraktion

Röntgenbildentstehung

Grundprinzip der Röntgenbildentstehung:
Unterschiedliche Strahlungsabsorption der verschiedenen Gewebe.



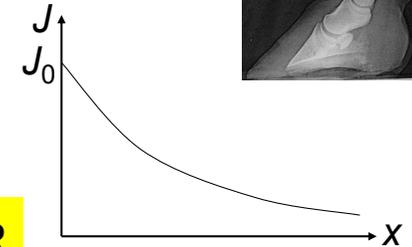
Absorptionsgesetz:

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

$$\mu(\text{Stoff}, \rho, \lambda) = \mu_m(\text{Stoff}, \lambda) \cdot \rho$$

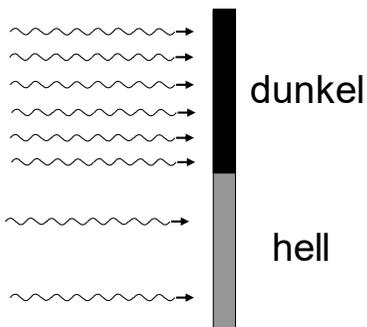
Z

Massenschwächungskoeffizient

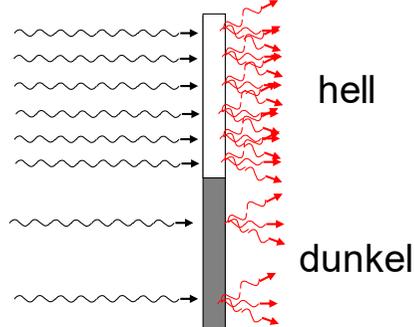


Detektion der Röntgenstrahlung

Photographisch



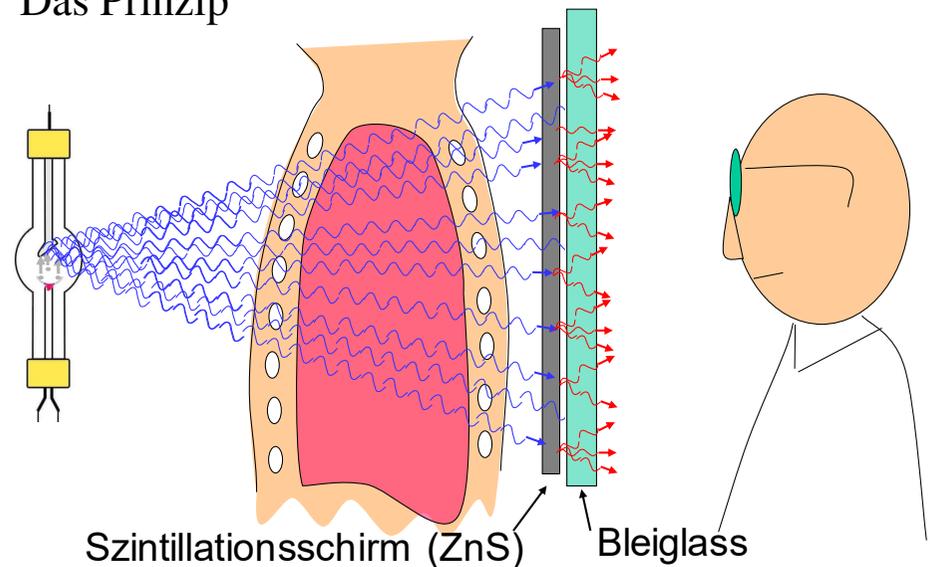
Szintillation
(Fluoroskopie)

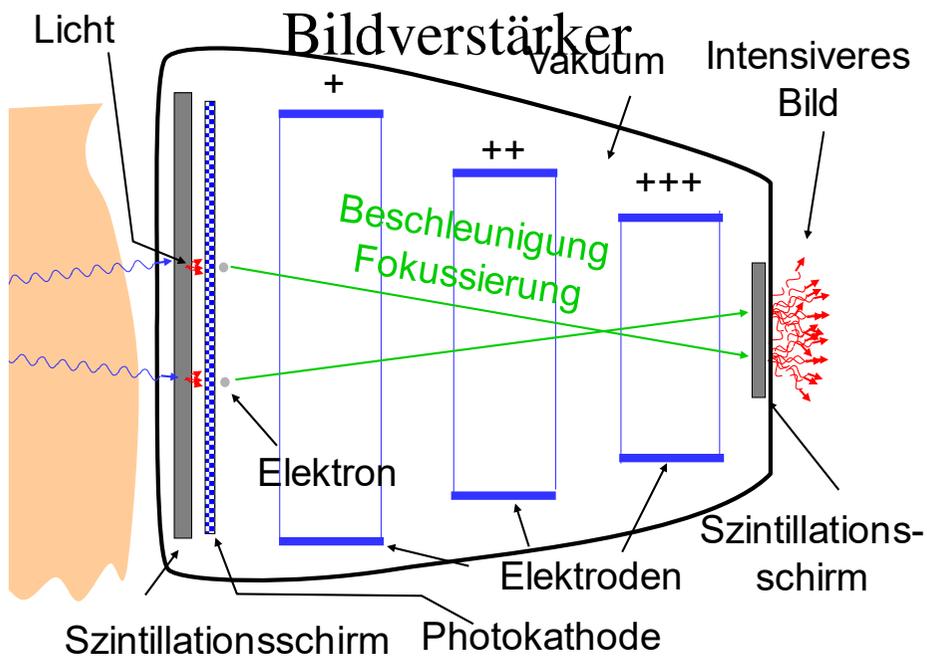


Weitere spezielle Detektiermöglichkeiten:
s. nächste Woche

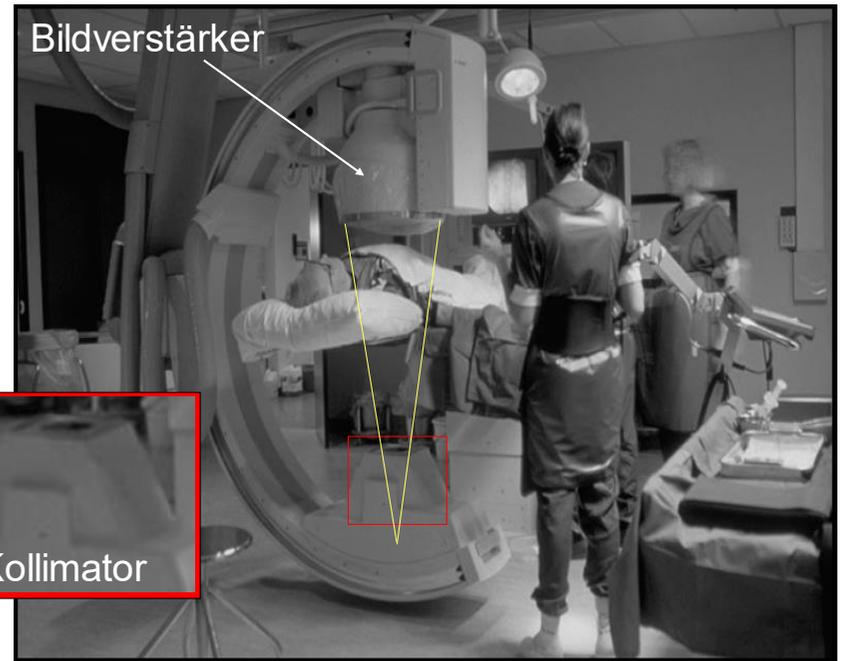
Konventionelle Fluoroskopie

Das Prinzip





85



86



CT

- Computed tomography (Computer-Tomographie)
- tomos=Schicht (griechisch)
- Τομος
- => Tomographie =Schichtaufnahme
- Auf der Körperachse senkrecht stehende Schicht ($\pm 30^\circ$)



Historie der Tomographie

Godfrey N. Hounsfield und Allan M. Cormack

- 1972 Prototyp
- 1974 erste klinische Anwendung
- 1976 ganzkörper-CT
- 1979 Nobel Preis
- 1990 spiral CT
- 1992- multislice
- 2006: 64 Schichten



87

Zusammenfassung

- Radioaktivität und Kernstrahlung
- Beschreibung des Zerfallsprozesses
- Isotopendiagnostik, Nuklearmedizin
- Röntgenstrahlung, Diagnostik, Tomographie

88



*Vielen Dank für ihre
Aufmerksamkeit!*

Fragen, Bemerkungen, Kommentare?...