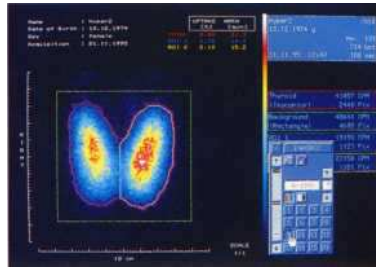
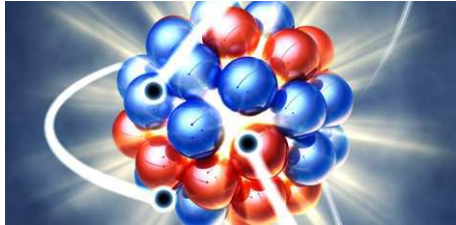


Radioaktivität und Kernstrahlungen



Ausschliesslich für den Unterrichtsgebrauch

1

Der Atomkern und seine Bestandteile

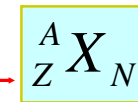
Aufbau: Protonen (p)
Neutronen (n) } Nukleon



Nukleon	Symbol-schreibweise	Ruhemasse	Ruheenergie	Ladung
Proton	1_1p	$1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $1,007276 \text{ u}$	$938,28 \text{ MeV}$	$+1e$ $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Neutron	1_0n	$1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $1,008665 \text{ u}$ ($1 \text{ u} = 1,660540 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)	$939,57 \text{ MeV}$	0

Massenzahl: $A = Z + N$

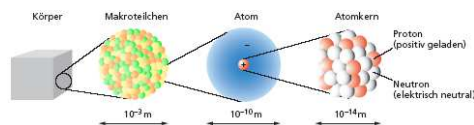
Ordnungszahl
(Kernladungszahl)



Neutronenzahl

2

Das Tröpfchenmodell



Kernradius: $r = r_0 \cdot A^{1/3}$ $r_0 = 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$

Kraft	Wirkt auf	Reichweite	Relative Stärke	Beispiel
elektromagnetische Kraft	elektrisch geladene Teilchen	nimmt mit r^{-2} ab	10^{-2}	Zusammenhalt des Atoms
starke Kraft	Nukleonen (Quarks)	10^{-15} m	1	Zusammenhalt des Atomkerns
schwache Kraft	alle Teilchen	10^{-17} m	10^{-13}	Beta-Zerfall
Gravitationskraft	alle Teilchen	nimmt mit r^{-2} ab	10^{-40}	Zusammenhalt des Planetensystems

${}^{137}_{55}\text{Cs}$ 55 Protonen, 82 Neutronen

Ein durch Massenzahl und Kernladungszahl eindeutig charakterisierter Atomkern wird als **Nuklid** bezeichnet.

Isotope: Kerne mit gleicher Protonenzahl aber mit unterschiedlicher Neutronenzahl (z.B. ${}^{11}\text{C}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{C}$)

Isomere: Kerne mit gleicher Massen- und Protonenzahl aber verschiedenem Anregungszustand (z.B. ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$, ${}^{99}\text{Tc}$)

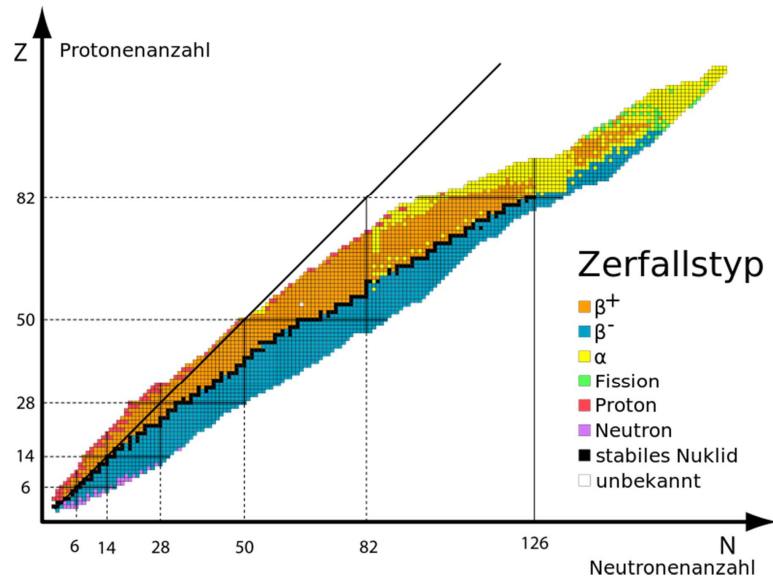
Bemerkung:

$$m_K < Z \cdot m_P + N \cdot m_N$$

Massendefekt (Δm) \Rightarrow Bindungsenergie des Kerns ($E = \Delta m \cdot c^2$)

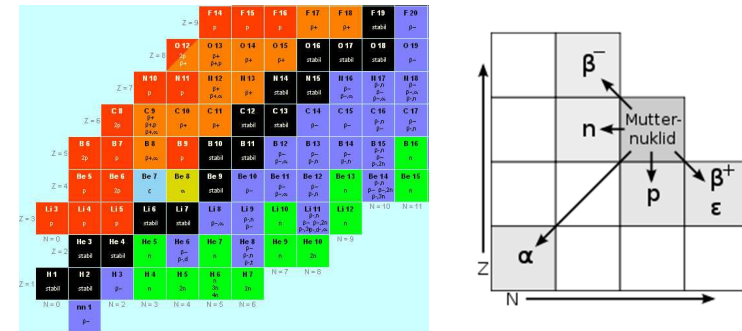
4

Die Nuklidkarte



5

Ausschnitt der Nuklidkarte



6

Kernumwandlung und Radioaktivität

Henri Becquerel - 1896

Ehepaar Marie und Pierre Curie 1898 - Radium, Polonium

=> Nobel Preis in Physik 1903

Kernumwandlung (Kernreaktion):

die Umwandlung von Atomkernen in andere Kerne.

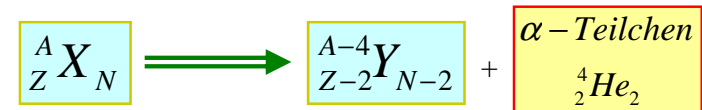
- Bei einer Kernumwandlung wird Strahlung abgegeben.
- > **radioaktive Strahlung** oder **Kernstrahlung**

Radioaktivität:

die Atomkerne verändern sich unter Abgabe von Strahlung.

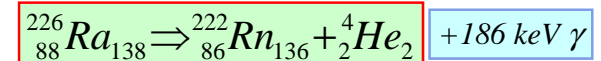
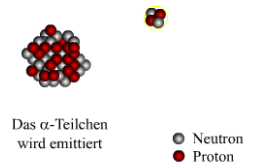
7

α -Zerfall



Charakterisierung:

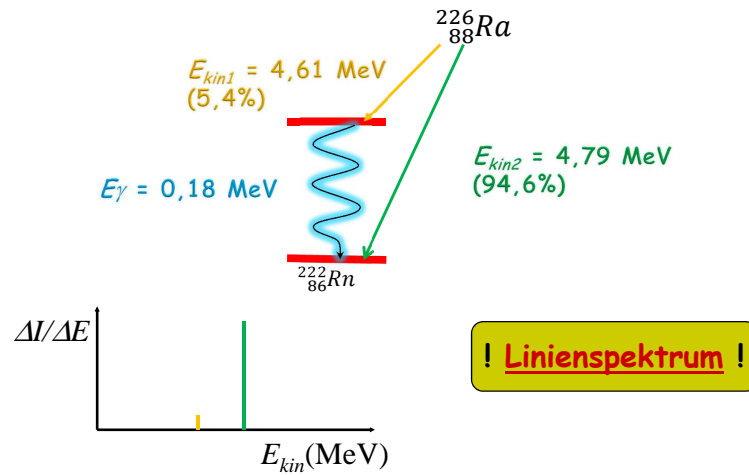
- relative Atommasse: $A \approx 4$
- elektrische Ladung: $q = +2e$
- kinetische Energie: einige MeV
- Teilchengeschwindigkeit: $\approx 1/10 \cdot c_0$



8

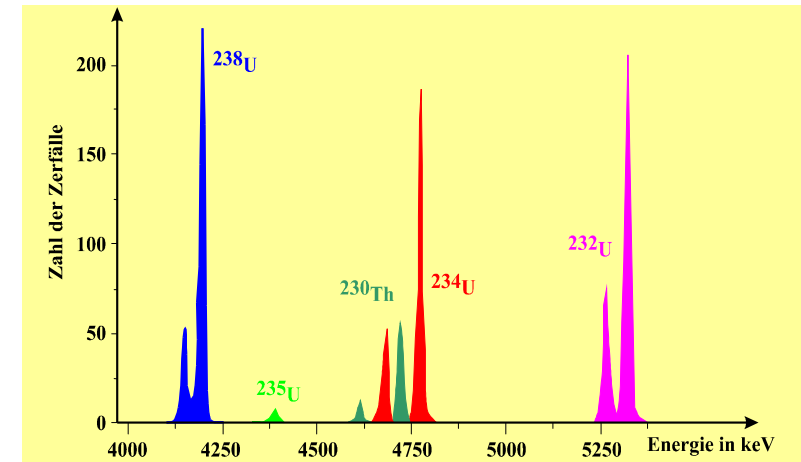
Natürliche Zerfallsreihen:

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



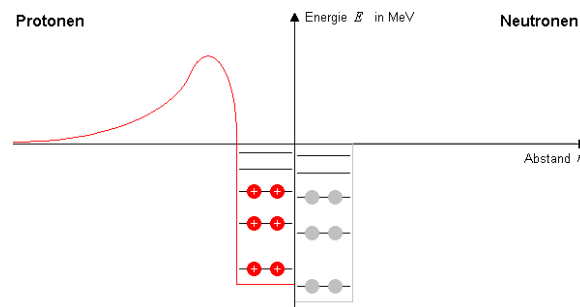
9

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



Besitzt auch der Atomkern eine Schalenstruktur? 10

Das Potentialtopfmodell des Atomkerns



**Die Energieniveaus sind gequantelt;
getrennt für Protonen und Neutronen**

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

11

Wechselwirkung der α - Strahlung mit der Materie



Ionisationsvermögen hoch
(fast) geradlinige Bahn \rightarrow

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

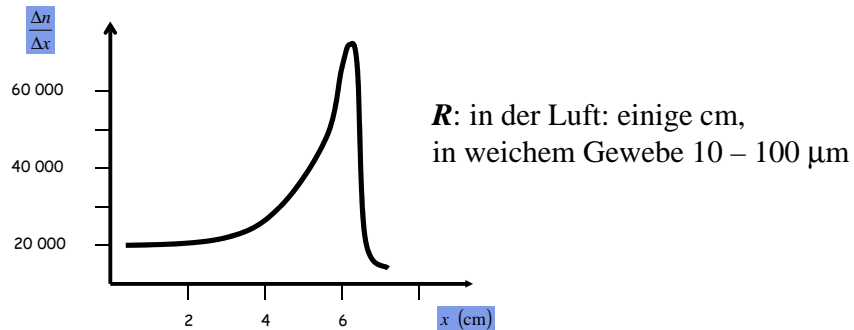
2. lineare Energieübertragung (LET) / Bremsvermögen (s):

$$s = \frac{\Delta E}{\Delta x}$$

$$s = \frac{n \cdot E_{\text{Ionenpaar}}}{\Delta x}$$

$E_{\text{Ionenpaar}}$ – zur Erzeugung eines Ionenpaares notwendige Energie 12

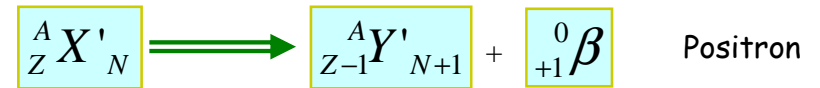
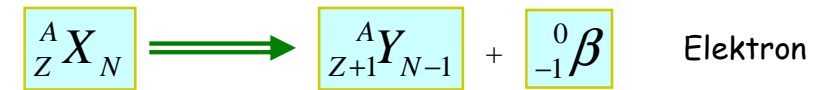
Wechselwirkung der α - Strahlung mit der Materie



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

13

β - Zerfall

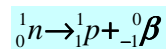
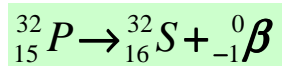


Bezeichnungen: ${}^0_{-1} \beta, \beta^-, \beta, e$ Elektron
 ${}^0_{+1} \beta, \beta^+$ Positron

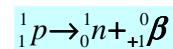
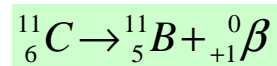
14

Bei Atomkernen mit

Neutronenüberschuß



Protonenüberschuß



Charakterisierung:

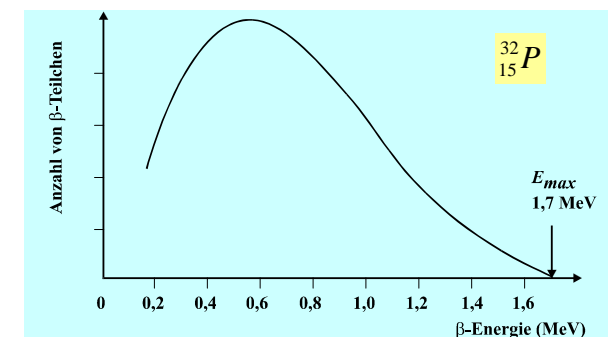
- Masse: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- elektrische Ladung: $q = \pm e$
- kinetische Energie: einige MeV
- Teilchengeschwindigkeit: bis zu $0,99 \cdot c_0$

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

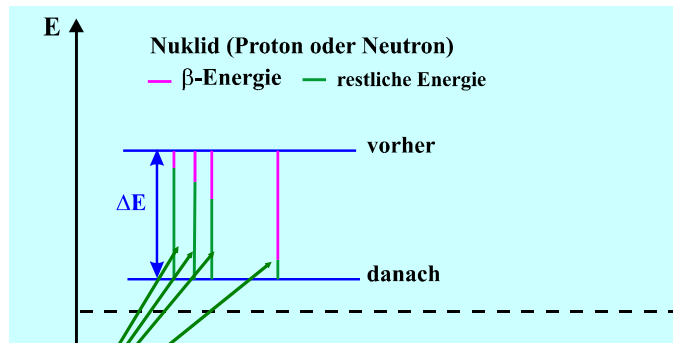
15

Das Spektrum der β -Strahlung

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

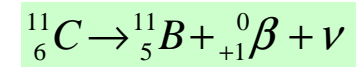
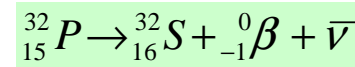
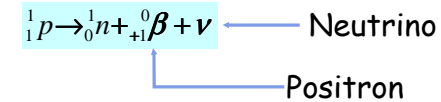
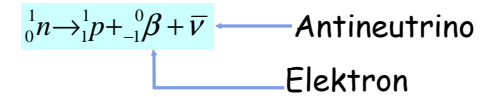


16



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

17

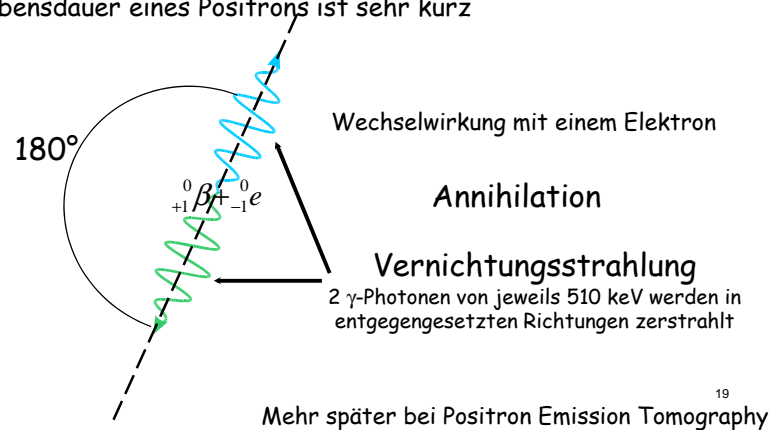


Erhaltungsgesetze: Energie, Ladung, Impuls, ...

18

Bemerkungen:

- Positronenstrahlung tritt bei künstlichen radioaktiven Isotopen auf (bei den kosmogenen Radionuklide auch)
- Die Lebensdauer eines Positrons ist sehr kurz



19

Reichweite der β - Strahlung



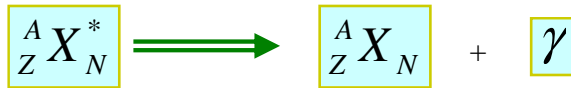
mehrere Kollisionen – zick-zack-förmige Bahn

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

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

20

γ -Strahlung



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

21

γ -Strahlung

Charakterisierung:

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

22

Das Spektrum der γ -Strahlung

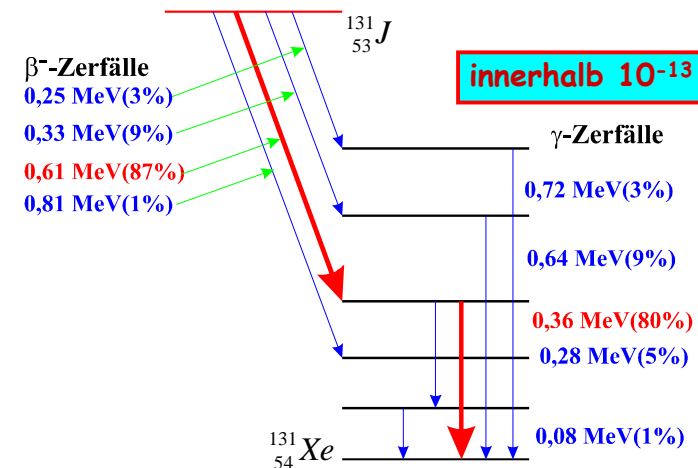
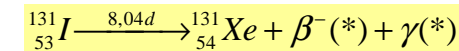
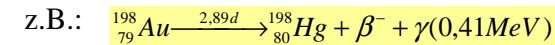
- Linienspektrum
- charakteristisch für Isotop

$$\begin{aligned} {}^{51}\text{Cr}: E_\gamma &= 0,32 \text{ MeV} \\ {}^{137}\text{Cs}: E_\gamma &= 0,661 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (\text{Praktikum: } \gamma\text{-Energie})$$

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

23

Prompte γ -Strahlung



24

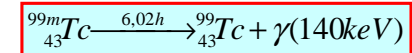
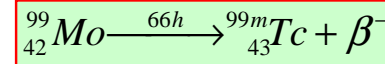
Prompte γ -Strahlung

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.

25

Isomerer Übergang



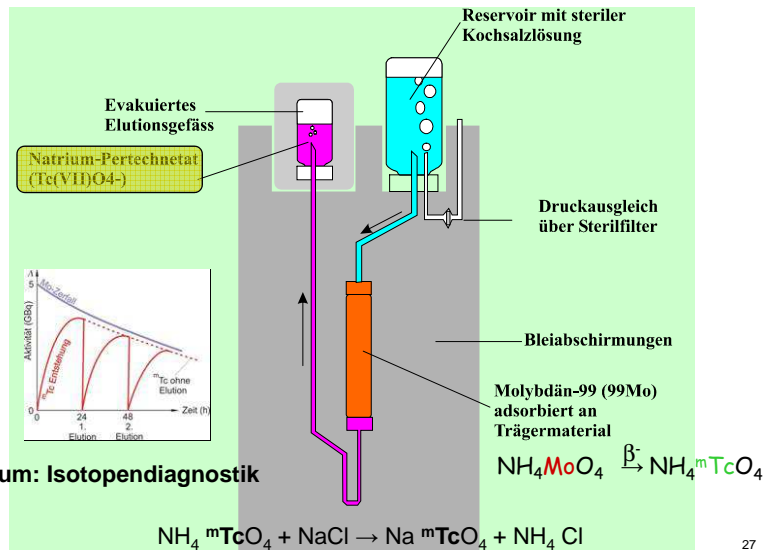
Der Kern bleibt nach der Teilchenemission für eine relativ lange Zeit (länger als 10^{-10} s) in angeregtem Zustand.

metastabiler Zustand

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

→ Technetium Generator

Technetium Generator



27

➤ ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ -99 ist das meistbenützte Isotop für unterschiedliche Radiopharmaka

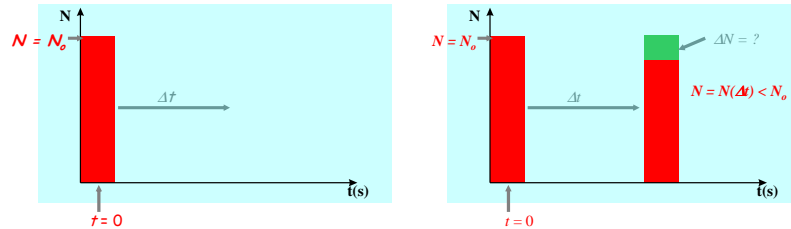
- a.) Na-Pertechnetat-Lösung (Generator-Eluat) für Darstellung der Schilddrüse und der Speicheldrüsen;
- b.) HSA-Makroaggregate für Lungenperfusions-Szintigraphie;
- c.) Iminoessigsäure-Derivate für Cholescintigraphie, Bestimmung der hepatobiliären Funktion;

28

Beschreibung des Zerfallsprozesses

Radioaktiver Zerfall ist ein zufälliger Vorgang.

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



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

29

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

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

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

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

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

$$[\lambda] = 1/s$$

30

dN : zerfallene radioaktive Kerne im Zeitintervall dt

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

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

infinitesimale Form:

$$dN(t) \sim -N(t) \cdot dt$$

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

$$[\lambda] = 1/s$$

31

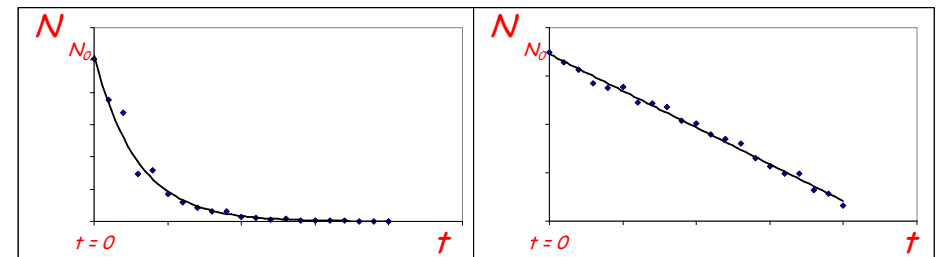
Zerfallsgesetz

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

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

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

λ - Zerfallskonstante



lineare Darstellung

halblogarithmische Darstellung

32

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.

33

λ – Zerfallskonstante

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \text{mittlere Lebensdauer}$$

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

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

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

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

34

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.

35

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

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

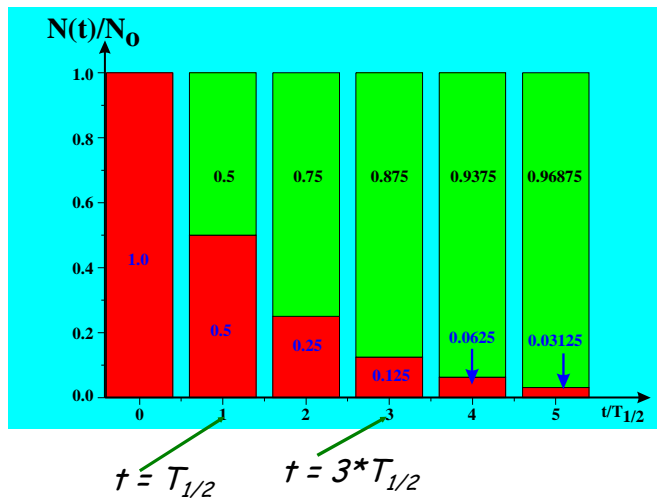
$$\Rightarrow 2 = e^{\lambda \cdot T_{1/2}}$$

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

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

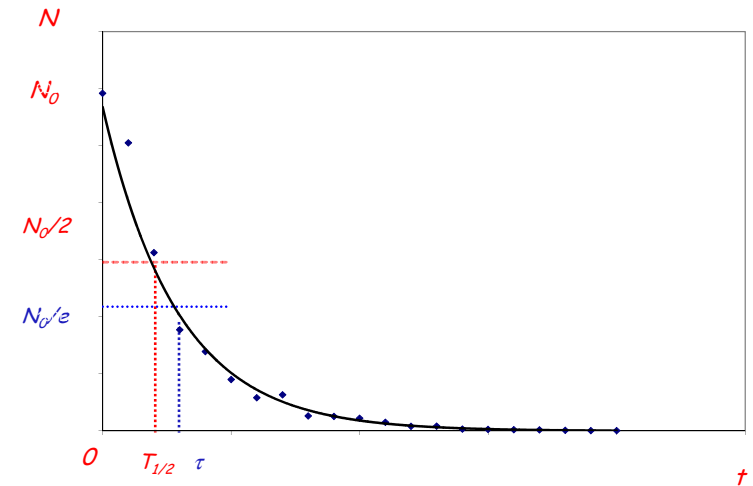
$$N(t) = N_o e^{-\lambda t} \quad \longleftrightarrow \quad \frac{N(t)}{N_o} = 2^{-t/T_{1/2}}$$

36



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

37



38

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

Aktivität eines Präparates

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

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\Lambda(t) = \lambda \cdot N(t) \quad \Lambda_0 = \lambda \cdot N_0$$

$$\Lambda(t) = \Lambda_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Bezeichnungen: Λ , A

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

39

Bemerkung:

1. spezifische Aktivität
- auf die Masseneinheit bezogene Aktivität

Einheit: Bq/g

2. Aktivitätskonzentration
- auf die Volumeneinheit bezogene Aktivität

Einheit: Bq/ml

40

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

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!!!

41

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

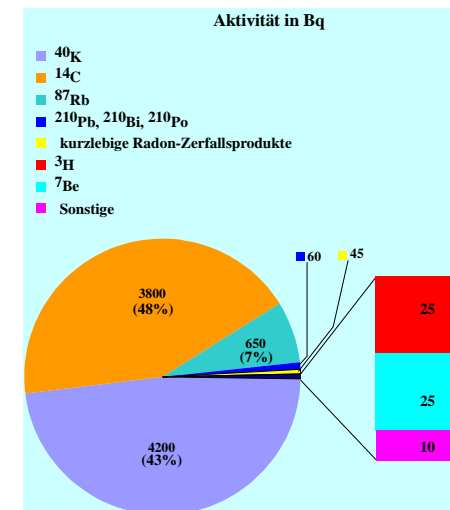
Verwendung: D: Diagnostik, T: Therapie

42

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

43

Radioaktive Isotope im menschlichen Körper



auf 70 kg bezogend
Gesamtaktivität ~ 9000 Bq

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.

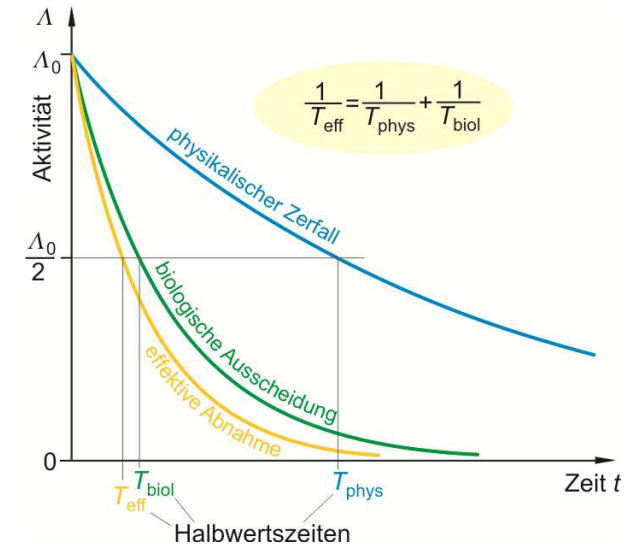
$$\lambda_{eff} \cdot \Delta t = \lambda_{phys} \cdot \Delta t + \lambda_{biol} \cdot \Delta t$$

$$\lambda_{eff} = \lambda_{phys} + \lambda_{biol} \quad \longrightarrow \quad \frac{\ln 2}{T_{eff}} = \frac{\ln 2}{T_{phys}} + \frac{\ln 2}{T_{biol}} \quad \longrightarrow$$

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

45

Biologische und effektive Halbwertszeit



46