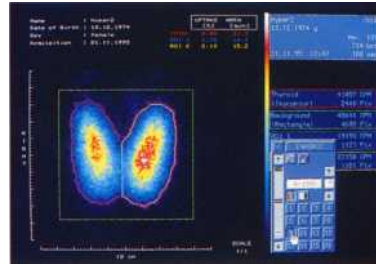


Radioaktivität und Kernstrahlungen



Ausschliesslich für den Unterrichtsgebrauch

1

Atomkern

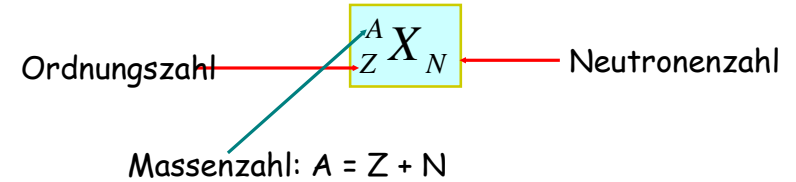
Aufbau: Protonen (p)
Neutronen (n)

$$m_p \cong 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$q_p = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

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

$$q_n = 0$$



Isotope: Kerne mit gleicher Protonenzahl aber mit unterschiedlicher Neutronenzahl

Isomere: Kerne mit gleicher Massen- und Protonenzahl aber verschiedenem Anregungszustand

2

Radioaktiver Zerfall

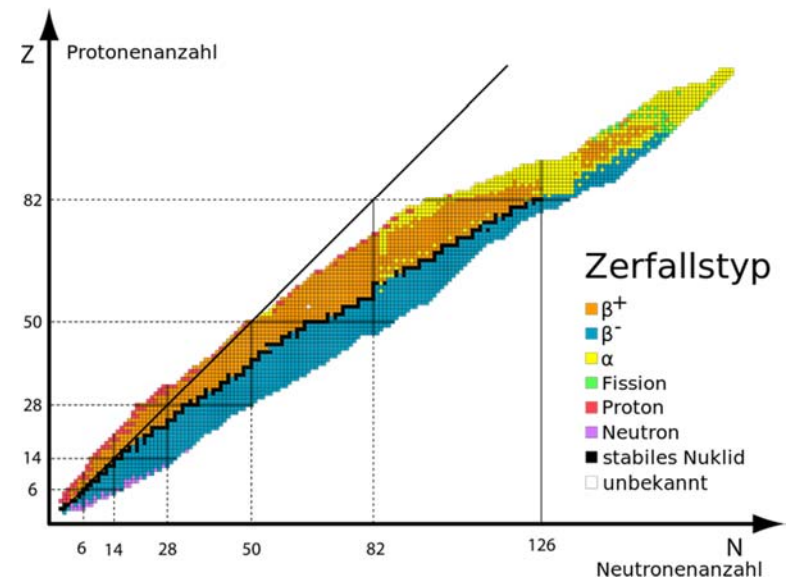
Henri Becquerel - 1896
Rutherford, Soddy, Villard
Ehepaar Marie und Pierre Curie - Radium, Polonium

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.

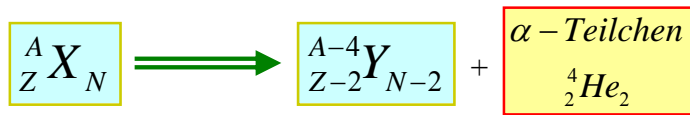
Ein Atomkern ist instabil, wenn der Kern einen hohen Protonen-/Neutronenüberschuß besitzt.

3



4

α - Zerfall



Charakterisierung:

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

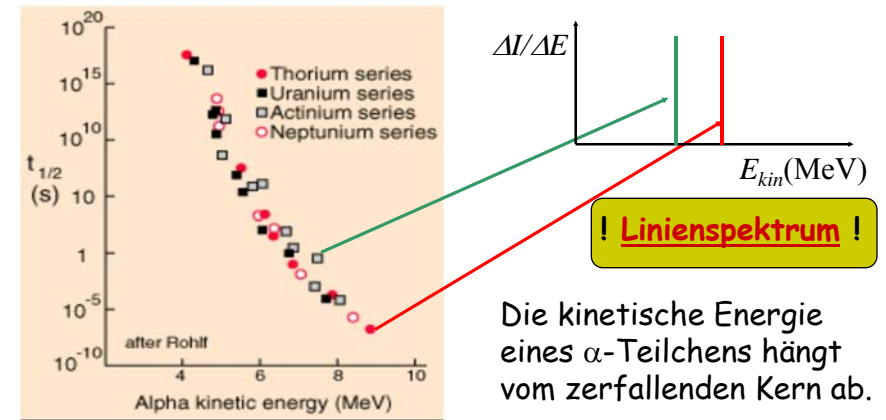
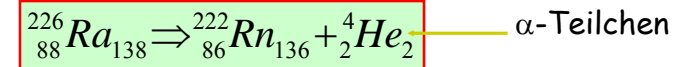
Natürliche Zerfallsreihen:

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

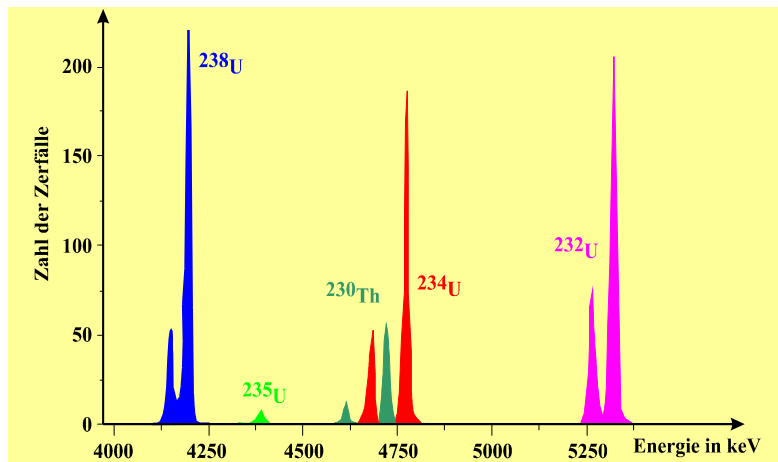
5

z.B.: in Uranium-Radium-Reihe

+186 keV γ



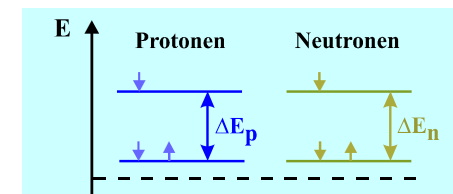
6



Besitzt auch der Atomkern eine Schalenstruktur?

7

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.

8

Wechselwirkung der α - Strahlung mit der Materie



Ionisationsvermögen hoch

(fast) geradlinige Bahn →

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

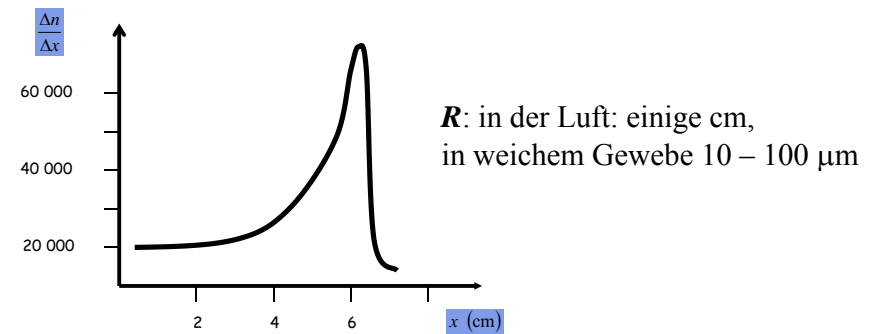
2. lineare Energieübertragung (LET) / Bremsvermögen (s):

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

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

$E_{\text{Ionenpaar}}$ – zur Erzeugung eines Ionenpaares notwendige Energie ⁹

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.

10

β - Zerfall

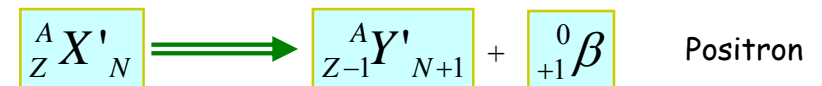
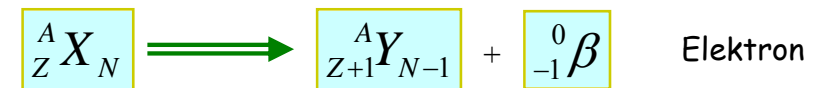
Geschichte: Soddy 1913



11

β - Zerfall

Geschichte: Soddy 1913



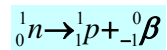
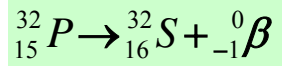
Bezeichnungen: ${}^0_{-1} \beta, \beta^-, \beta, e$ Elektron

${}^0_{+1} \beta, \beta^+$ Positron

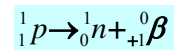
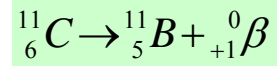
12

Bei Atomkernen mit

Neutronenüberschuß



Protonenüberschuß



Charakterisierung:

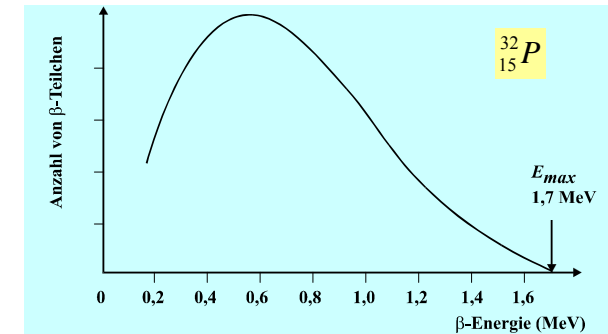
- Masse: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- elektrische Ladung: $q = \pm e$
- kinetische Energie: einige MeV
- Teilchengeschwindigkeit: bis zu $0,99 \cdot c_0$

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

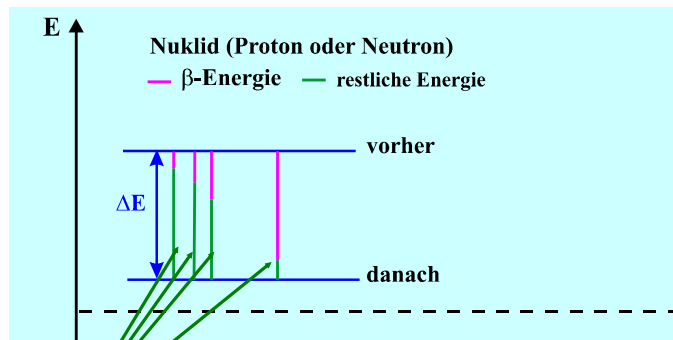
13

Das Spektrum der β -Strahlung

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



14

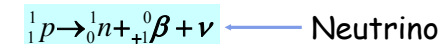


Die Energiedifferenz, ΔE ist zwischen β -Teilchen und einem neutralen Teilchen, dem **Neutrino**, aufgeteilt - Pauli 1930.

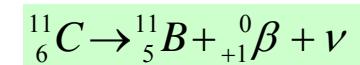
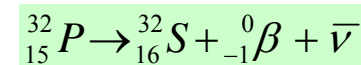
15



Elektron



Positron

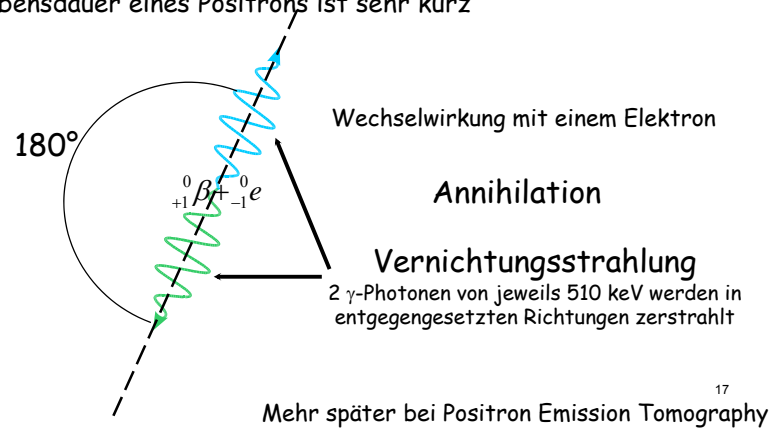


Erhaltungsgesetze: Energie, Ladung, Impuls, ...

16

Bemerkungen:

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



Reichweite der β - Strahlung

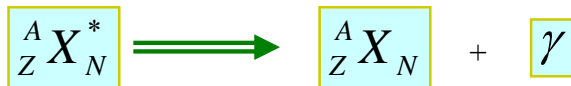
mehrere Kollisionen – zick-zack-förmige Bahn

Ionisationsvermögen $\sim 1\,000\times$ kleiner als bei den α - Teilchen

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

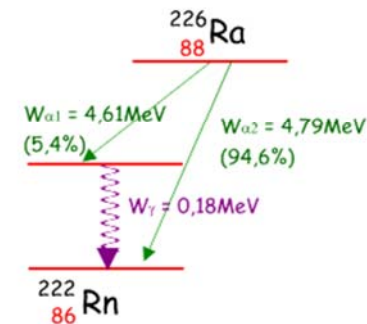
18

γ - Strahlung



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

19



Der Tochterkern befindet sich häufig im angeregten Zustand

Beim Übergang in den Grundzustand wird γ - Strahlung emittiert

$$W_{\text{kin},\alpha} + \sum W_{\gamma} = \text{const}$$

20

γ -Strahlung

Charakterisierung:

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

21

Das Spektrum der γ -Strahlung

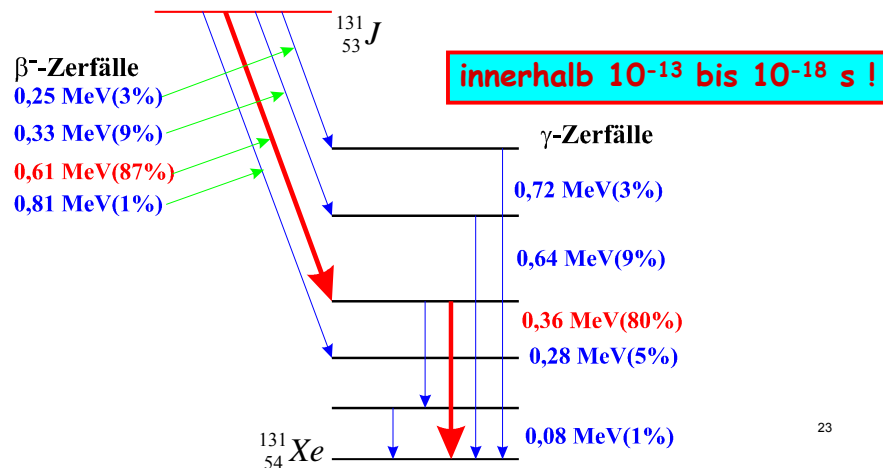
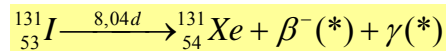
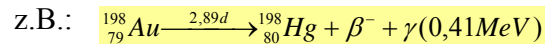
- Linienspektrum
- charakteristisch für Isotop

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

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

22

Prompte γ -Strahlung



23

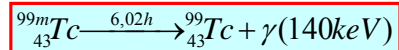
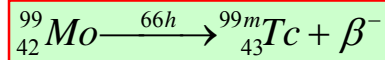
Prompte γ -Strahlung

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.

24

Isomerer Übergang



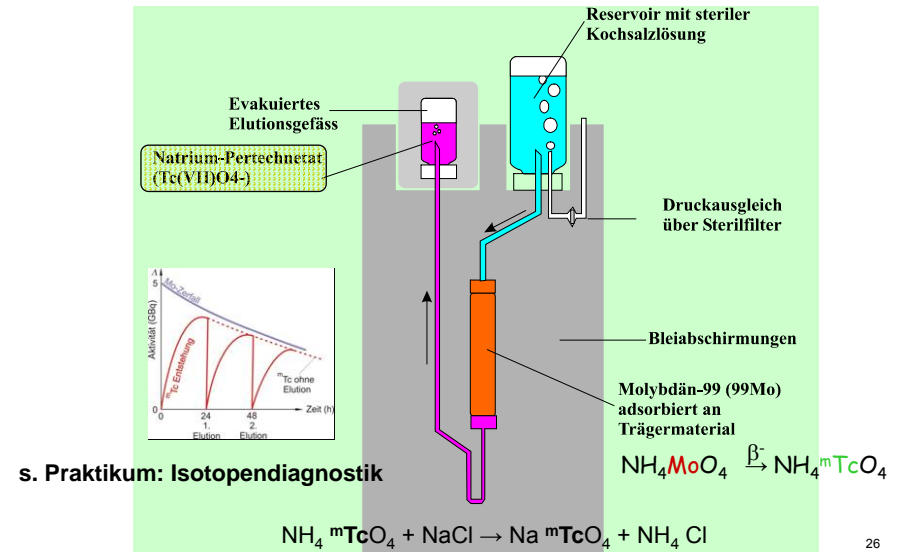
Der Kern bleibt nach der Teilchenemission für eine relativ lange Zeit (länger als 10^{-10} s) in angeregtem Zustand.

metastabiler Zustand

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

→ Technetium Generator

Technetium Generator

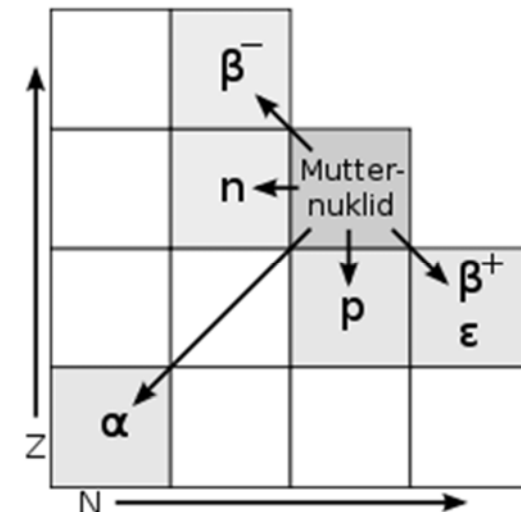


26

➤ ${}^{99m}\text{Tc}$ -99 ist das meistbenutzte 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 Choleszintigraphie, Bestimmung der hepatobiliären Funktion;

27



28

Beschreibung des Zerfallsprozesses

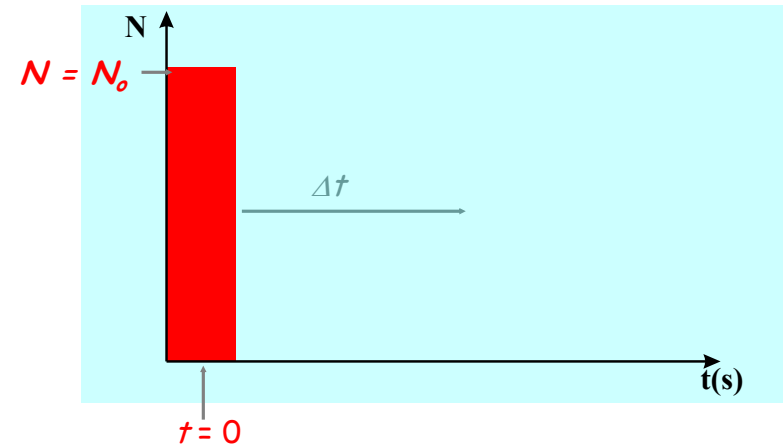


Radioaktiver Zerfall ist ein zufälliger Vorgang.
Die einzelnen Umwandlungen in einem Radionuklid-Präparat
erfolgen zeitlich und räumlich völlig ungeordnet.

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

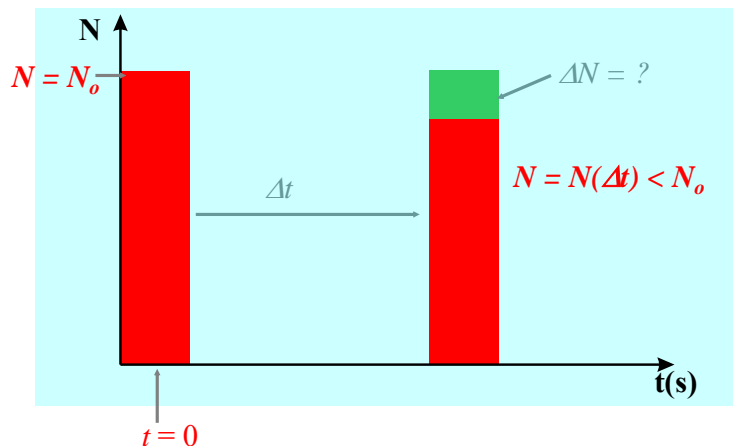
29

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

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:

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

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

λ – Zerfallskonstante

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

33

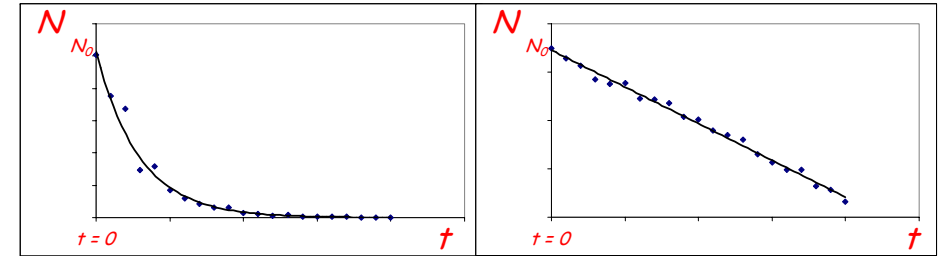
Zerfallsgesetz

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

N_o – die Anzahl der instabilen Kerne zur Zeit $t = 0$

e – Eulersche Zahl; $e = 2,718281828$

λ – Zerfallskonstante



lineare Darstellung

halblogarithmische Darstellung

34

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.

35

λ – Zerfallskonstante

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

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.

36

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.

37

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

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

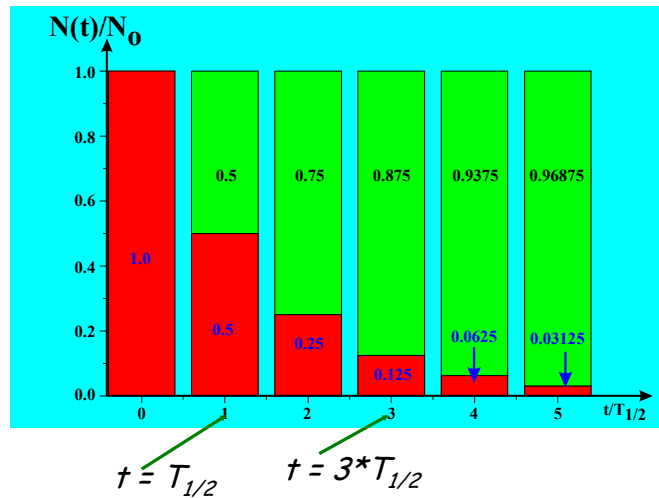
$$\Rightarrow 2 = e^{\lambda \cdot T_{1/2}}$$

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

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

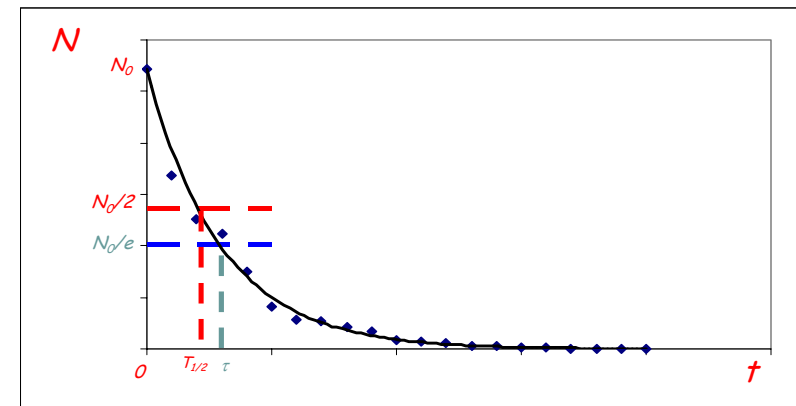
$$N(t) = N_o e^{-\lambda t} \quad \longleftrightarrow \quad \frac{N(t)}{N_o} = 2^{-t/T_{1/2}}$$

38



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

39



40

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

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

41

Bemerkung:

1. spezifische Aktivität
- auf die Masseneinheit bezogene Aktivität

Einheit: Bq/g

2. Aktivitätskonzentration
- auf die Volumeneinheit bezogene Aktivität

Einheit: Bq/ml

42

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

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!!!

43

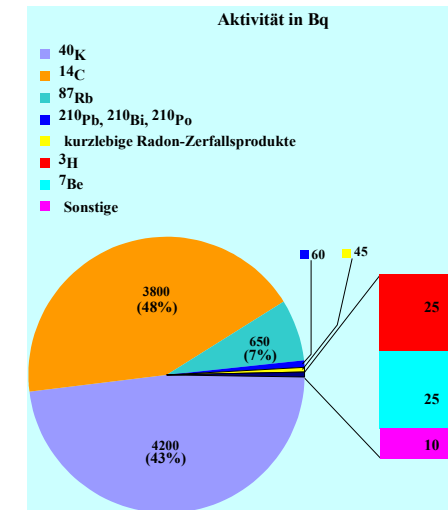
Nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Verwendung
Tc-99m	6h	IÜ(100)	D
J-131	8,05d	β^-	T/D
Co-57	270d	EE	D
Cr-51	27,7d	EE	D
Xe-133	5,3d	β^-	D
Kr-81m	13s	IÜ	D
P-32	14,3d	β^-	T
C-11	20,4m	β^+	D
O-15	122s	β^+	D
Cs-137	30a	β^-	

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

Verwendung: D: Diagnostik, T: Therapie

44

Radioaktive Isotope im menschlichen Körper



auf 70 kg bezogend
Gesamtaktivität ~ 9000 Bq

45

46

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.

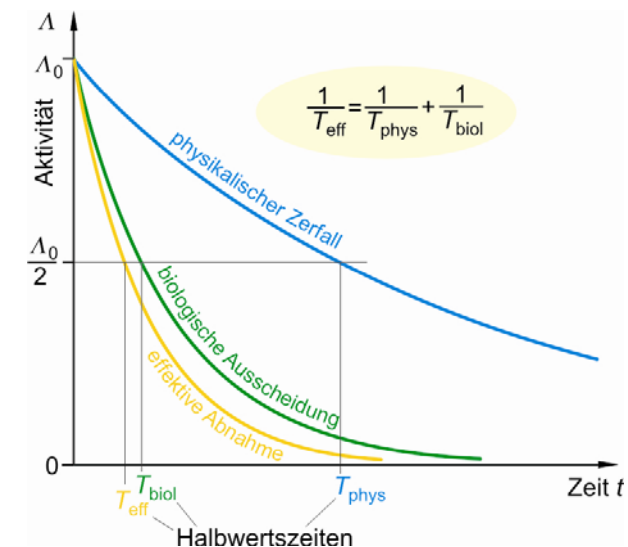
$$\lambda_{eff} \cdot \Delta t = \lambda_{phys} \cdot \Delta t + \lambda_{biol} \cdot \Delta t$$

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

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

47

Biologische und effektive Halbwertszeit



48