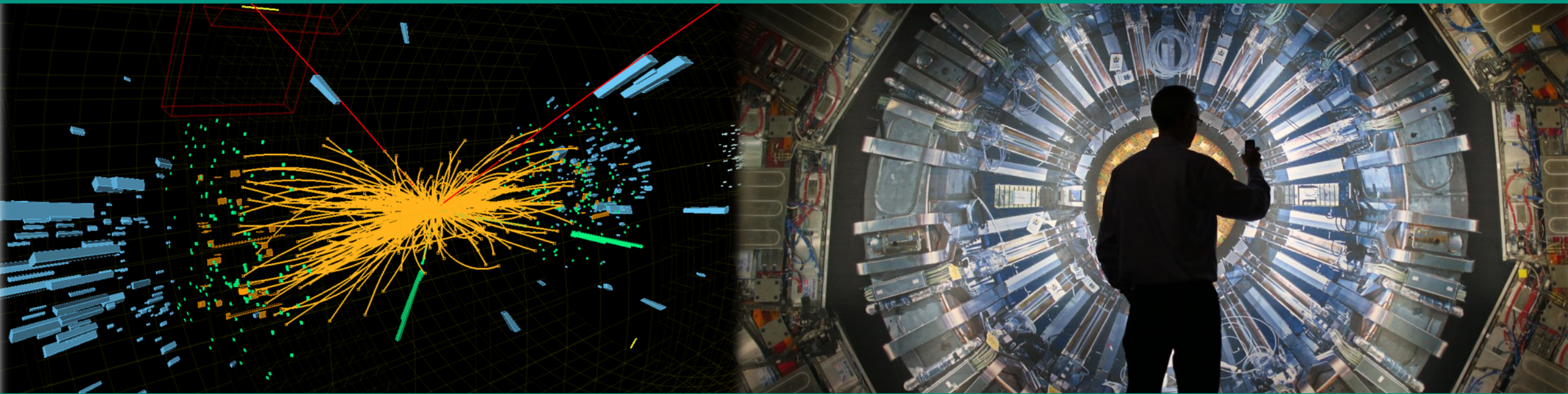


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 8

11.5.2023

Guido Drexlin & Markus Klute



Recap: Experimentelle Methoden

■ Techniken zum Teilchen-Nachweis

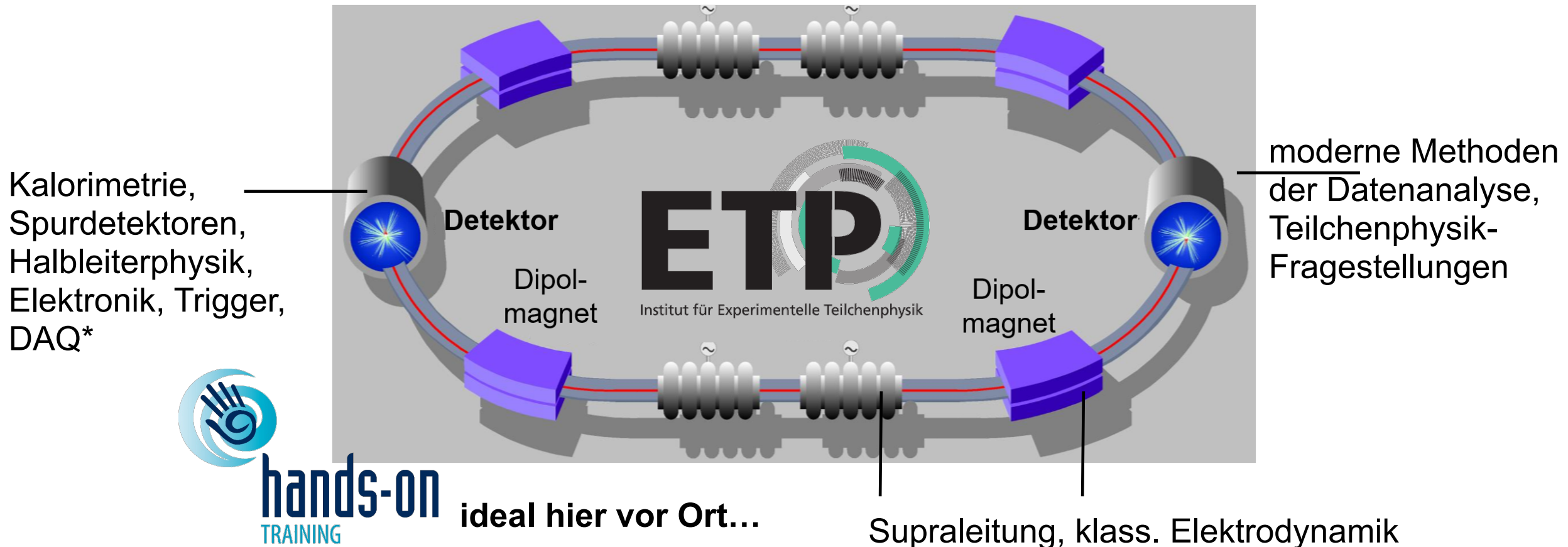
- Ionisationskammer, Zeitprojektionskammer (TPC)
- Zählrohr, Vieldrahtkammer (MWPC), **Si-Halbleiterdetektor**
- **Kalorimetrie** (elektromagnetische/hadronische Schauer) bei CMS:
 - ECAL , z.B. PbWO_4 mit $26 X_0$ (Strahlungslängen)
 - HCAL , z.B. Sampling (Szintillator/Messing) mit 6λ (had. Ww.)

■ Beschleuniger

- Zyklotron, Linearbeschleuniger, Synchrotron: bis zur TeV-Skala
- Elemente: Dipole (synchrones Hochrampen), Quadrupole (Fokussierung für hohe **Luminosität**), Kavitäten (Beschleunigung),

Recap: Beschleuniger

- **Zentrale Elemente: Magnete, Kavitäten, Detektoren**
 - höchste **Luminosität** & **Strahlenergie** für seltene Prozesse, **viele Anwendungen**



Konzept Fragen

- Wie kann man ein neutrales pion nachweisen?
- Worin unterscheiden sich elektromagnetische und hadronische Schauer?
- Woraus ergibt sich die Luminosität eines Teilchenbeschleunigers?

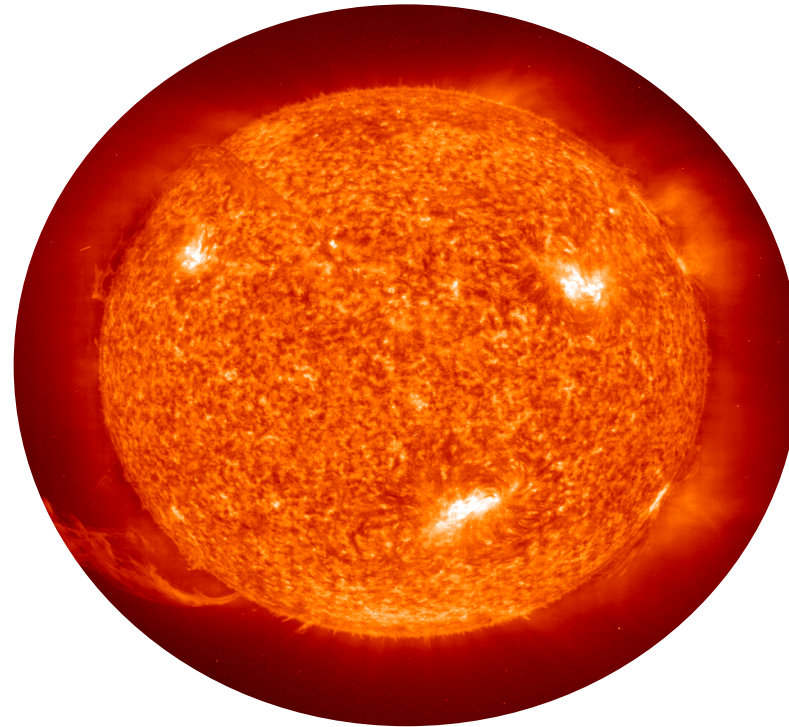
Programm heute

KAPITEL 4 - ANWENDUNGEN DER KERNPHYSIK

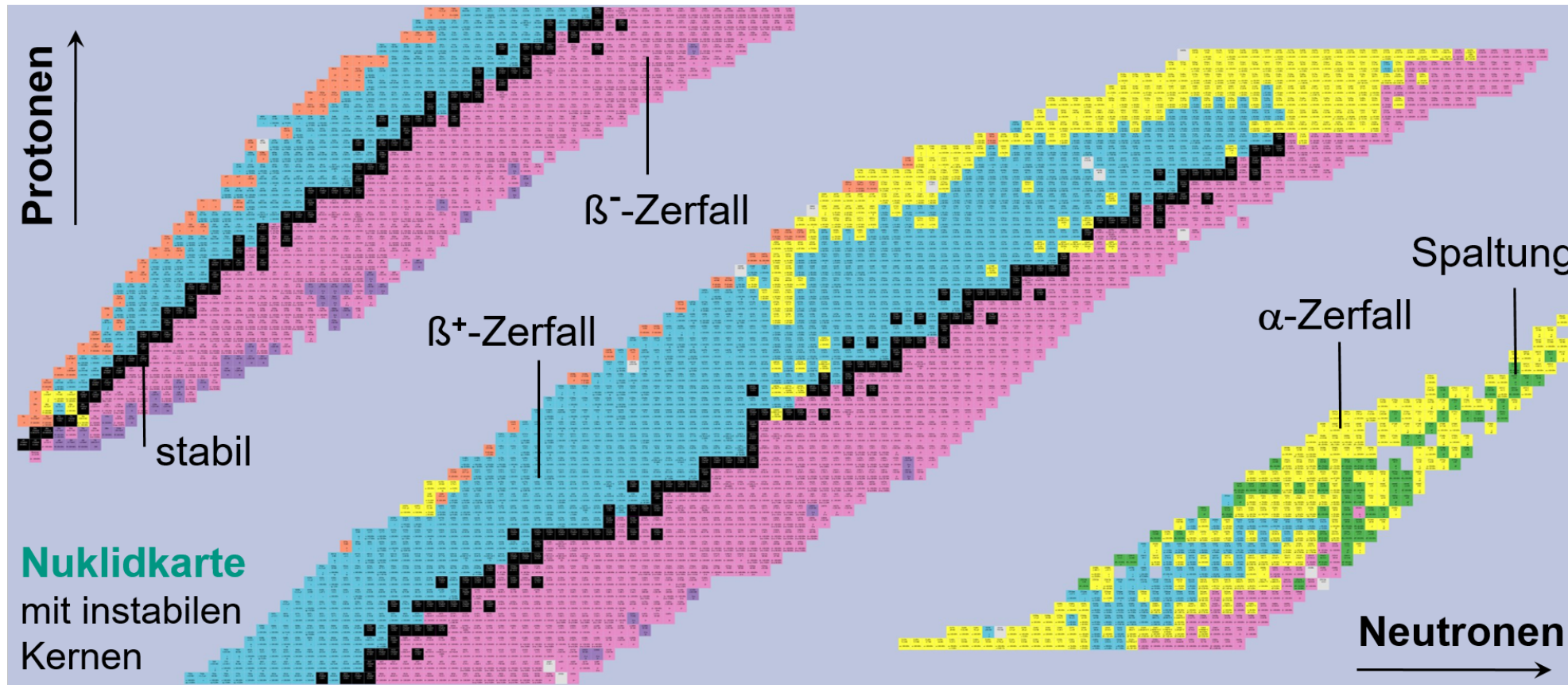
KAPITEL 4.1 - Instabile Kerne

Radioaktive Zerfälle

Alpha und Beta Zerfall



KAPITEL 4 – ANWENDUNGEN DER KERNPHYSIK



KAPITEL 4.1 – INSTABILE KERNE

Ein erster Blick auf die Nuklidkarte

- nur wenige Kerne sind stabil gegen Zerfall (α -, β -, γ - Zerfall & Spaltung)
 - **Karlsruher Nuklidkarte**: Referenz & Auflistung aller stabilen & instabilen Kerne
 - Isotope mit Häufigkeit, Isomere (angeregte Zustände, auch metastabil)
 - Spin, Parität, Anregungsenergie,...
 - Zerfallsart: α -, β -, γ -, Zerfälle
Teilchenemission (p, n), Spaltung,...
 - Zerfallsparameter:
Energien (E_0), Halbwertszeit $t_{1/2}$

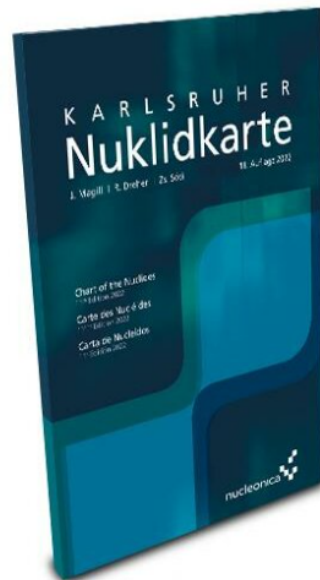
Kr 71 100 ms	Kr 72 17 s	Kr 73 26 s	Kr 74 11.5 m	Kr 75 4.5 m	Kr 76 14.6 h	Kr 77 1.24 h	Kr 78 0.355 s	Kr 79 50 s	Kr 80 2.286 s	Kr 81 13.1 s	Kr 82 11.593 s
Br 70 21 s	Br 71 21.4 s	Br 72 103 s	Br 73 3.3 m	Br 74 46 m	Br 75 1.6 h	Br 76 1.31 s	Br 77 43 m	Br 78 6.46 m	Br 79 49 s	Br 80 1.42 h	Br 81 49.31 s
Se 69 27.4 s	Se 70 41.1 m	Se 71 4.74 m	Se 72 8.5 d	Se 73 39 m	Se 74 0.89 s	Se 75 119.64 d	Se 76 9.37 s	Se 77 17.5 s	Se 78 23.77 s	Se 79 3.9 m	Se 80 49.61 s
As 68 2.53 m	As 69 15.1 m	As 70 53 m	As 71 65.28 h	As 72 26.0 h	As 73 80.3 d	As 74 17.77 d	As 75 100 s	As 76 26.4 h	As 77 38.8 h	As 78 1.5 h	As 79 8.2 m
Ge 67 18.7 m	Ge 68 270.82 d	Ge 69 39.0 h	Ge 70 20.38 s	Ge 71 11.43 d	Ge 72 27.31 s	Ge 73 7.76 s	Ge 74 36.72 s	Ge 75 47 s	Ge 76 7.83 s	Ge 77 11.3 h	Ge 78 88 m
Ga 66 9.4 h	Ga 67 78.3 h	Ga 68 67.63 m	Ga 69 60.108 s	Ga 70 21.15 m	Ga 71 39.892 s	Ga 72 14.1 h	Ga 73 4.85 h	Ga 74 8.1 m	Ga 75 2.1 m	Ga 76 32.6 s	Ga 77 13 s
Zn 65 244.3 d	Zn 66 27.975 s	Zn 67 4.102 s	Zn 68 19.024 s	Zn 69 13.8 h	Zn 70 6.031 s	Zn 71 3.9 h	Zn 72 46.5 h	Zn 73 5.8 s	Zn 74 23.5 s	Zn 75 10.2 s	Zn 76 5.6 s

Ein erster Blick auf die (Karlsruher) Nuklidkarte

- nur wenige Kerne sind stabil gegen Zerfall (α -, β -, γ - Zerfall & Spaltung)
- **Karlsruher Nuklidkarte**: Referenz & Auflistung aller stabilen & instabilen Kerne (> 4000!), von 1958 – 2017 von Gerda Pfennig et al. (KIT)



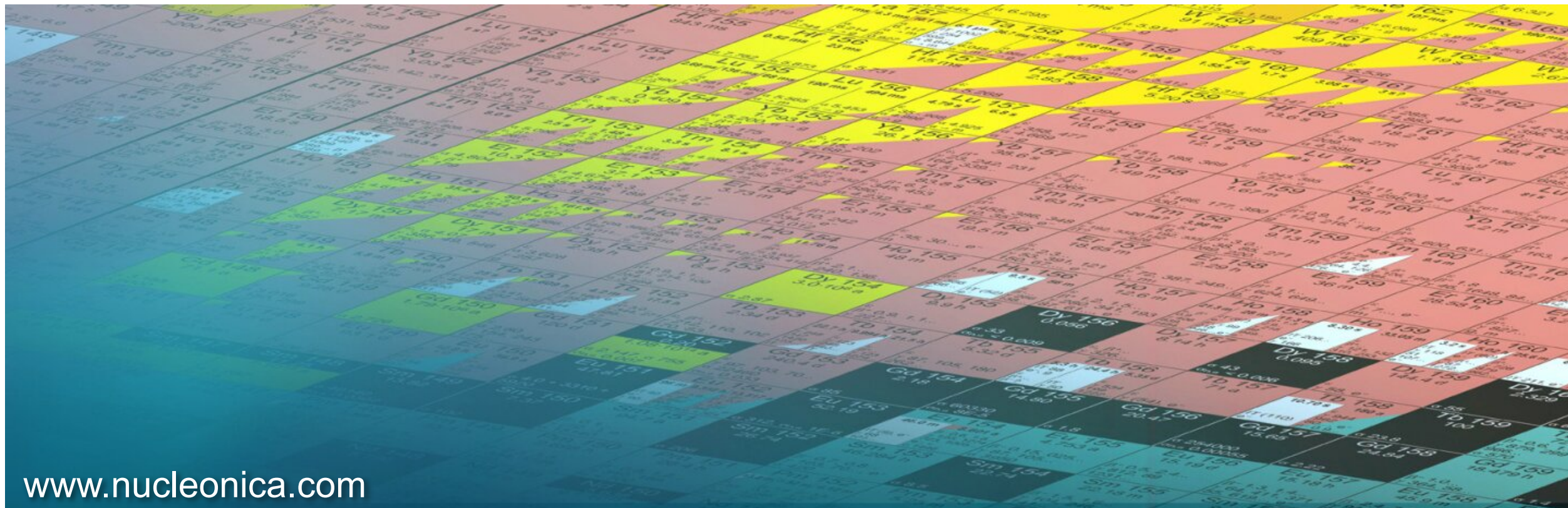
- neue Edition vom 9.3.2022 verfügbar



Q: KIT, nucleonica

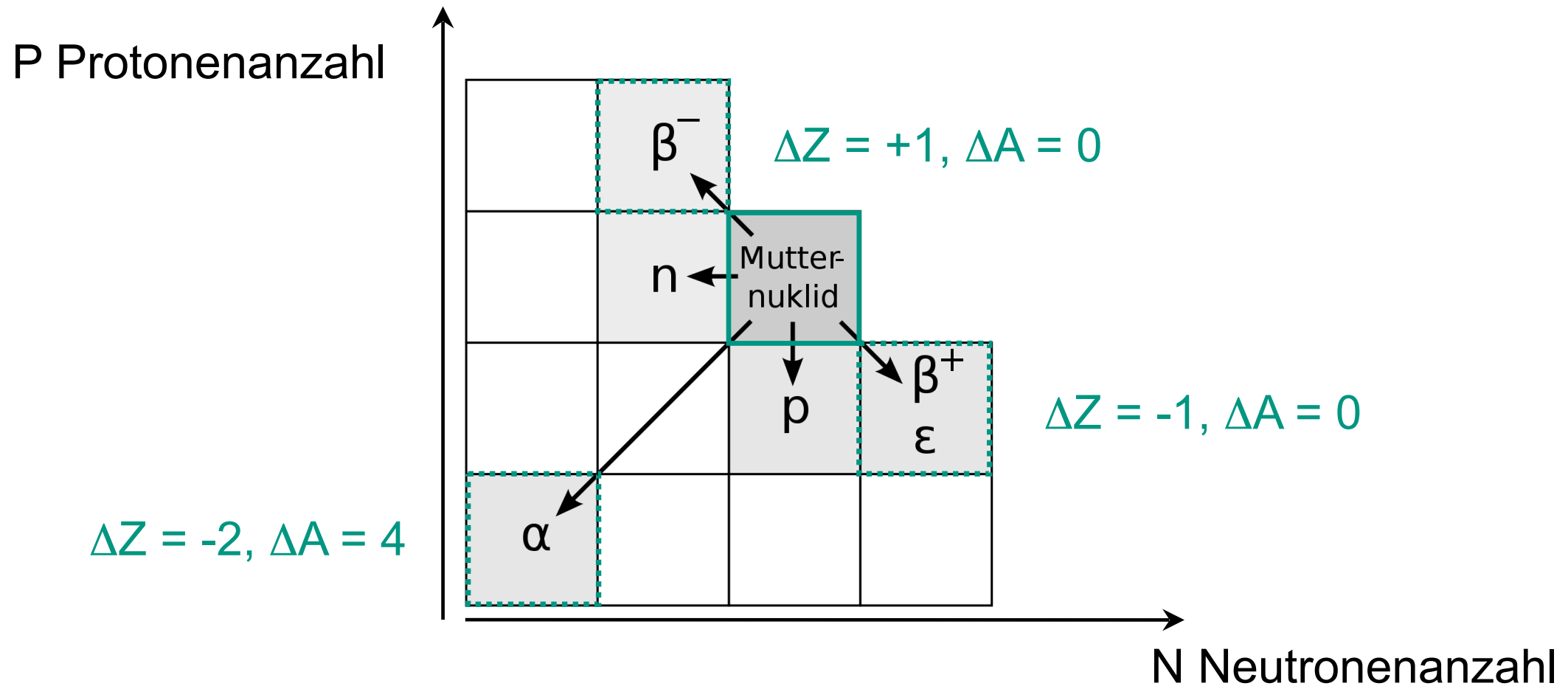
Ein erster Blick auf die online-Nuklidkarte

- nur wenige Kerne sind stabil gegen Zerfall (α -, β -, γ - Zerfall & Spaltung)
 - **Webportal:** Referenz & Auflistung aller stabilen & instabilen Kerne



Radioaktive Zerfälle - Zerfallsarten

- Umwandlungsprozesse von instabilen (Mutter-) Nukliden: α -, β -, γ , p, n



Radioaktive Zerfälle - Zerfallsarten

■ Zerfallsarten von Kernen: Überblick

α -Zerfall:

$$\Delta Z = -2, \Delta A = 4$$

β -Zerfall, Elektron-Einfang:

$$|\Delta Z| = 1, \Delta A = 0$$

γ -Zerfall:

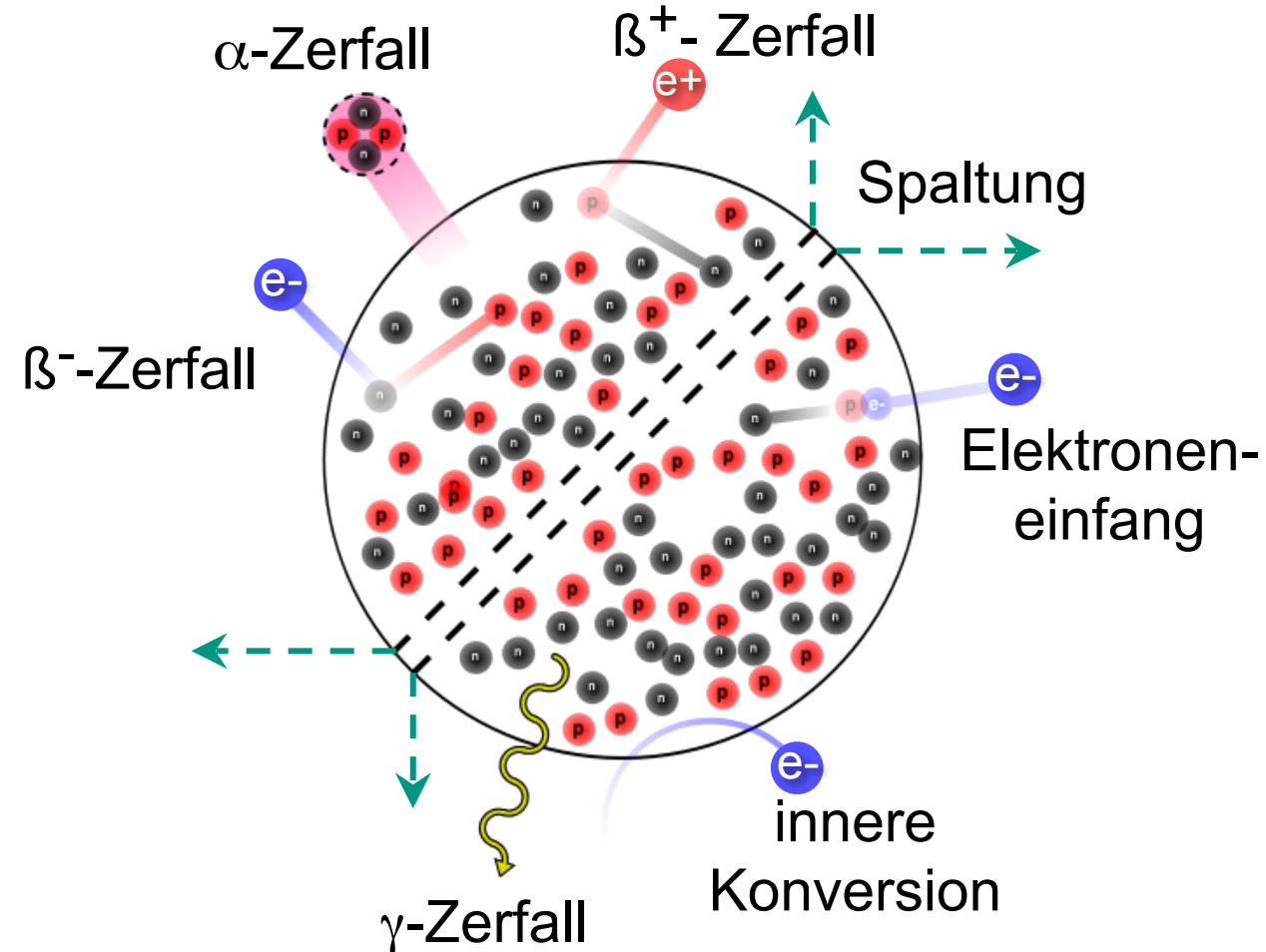
$$\Delta Z = 0, \Delta A = 0$$

Spaltung:

$$|\Delta Z| \gg 1, |\Delta A| \gg 1$$

Teilchenzerfall:

Emission p ($\Delta Z = -1$), n ($\Delta Z = 0$)

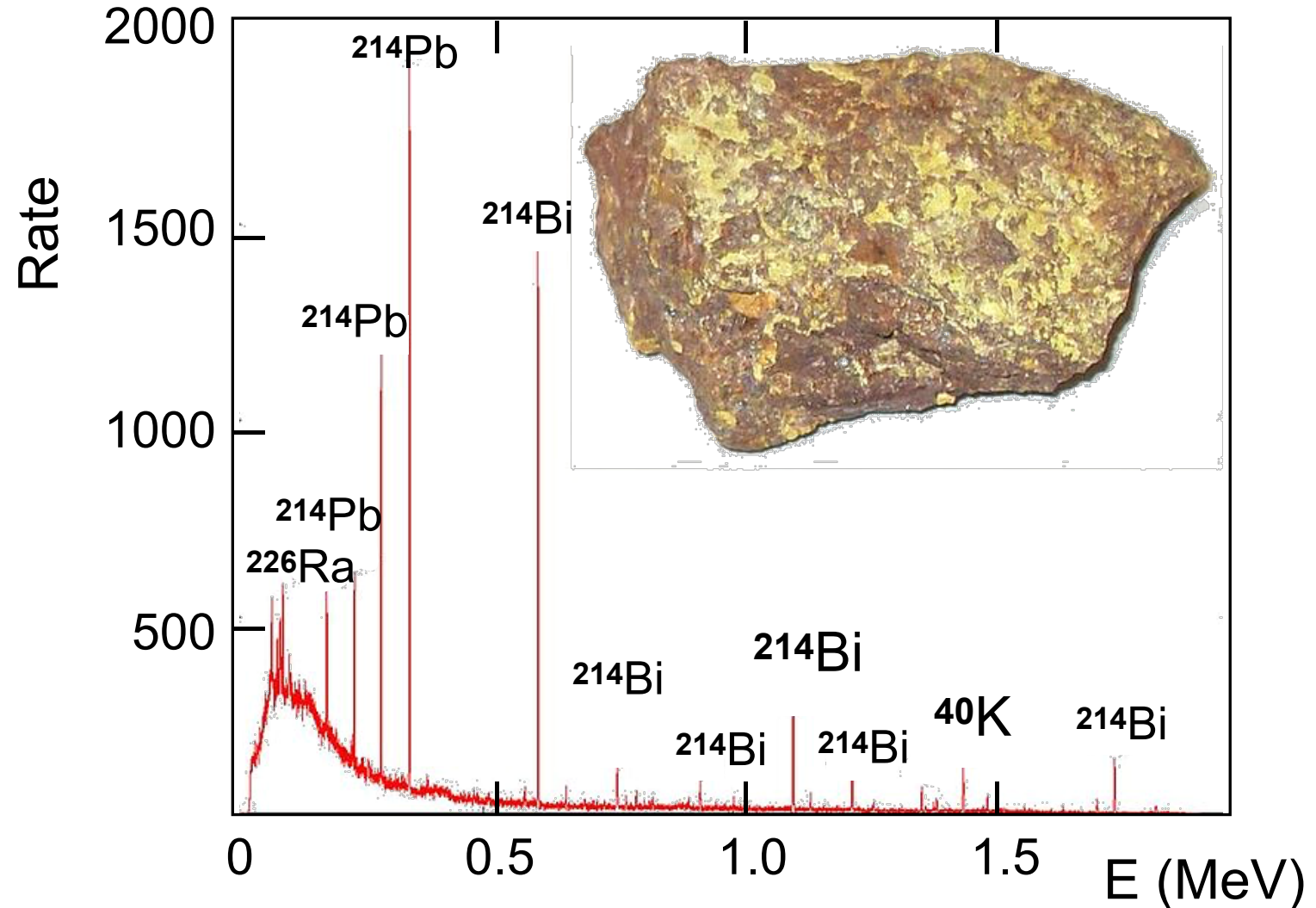


Die Nuklidkarte – ein wichtiges Hilfsmittel

- radioaktive Zerfälle
identifizieren: es ist alles
tabelliert...

- Gammaspektrum von natU

Identifikation der Isotope
über γ -Photopeaks



Radioaktive Zerfälle – Grundlagen

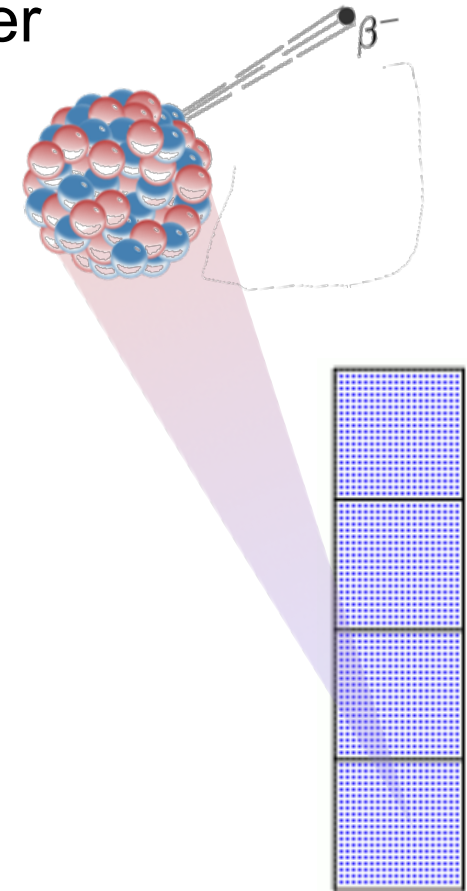
■ Exponentielles Zerfallsgesetz

- in einem Ensemble (Quelle) mit einer großen Anzahl N instabiler Teilchen bzw. radioaktiver Kerne führen **radioaktive Zerfälle** in Zeitintervall dt zu einer Abnahme dN der Ensemble-/Kern-Anzahl

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$$

Zerfallskonstante λ

neg. Vorzeichen,
da Teilchenabnahme



Radioaktive Zerfälle – Grundlagen

■ Exponentielles Zerfallsgesetz

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

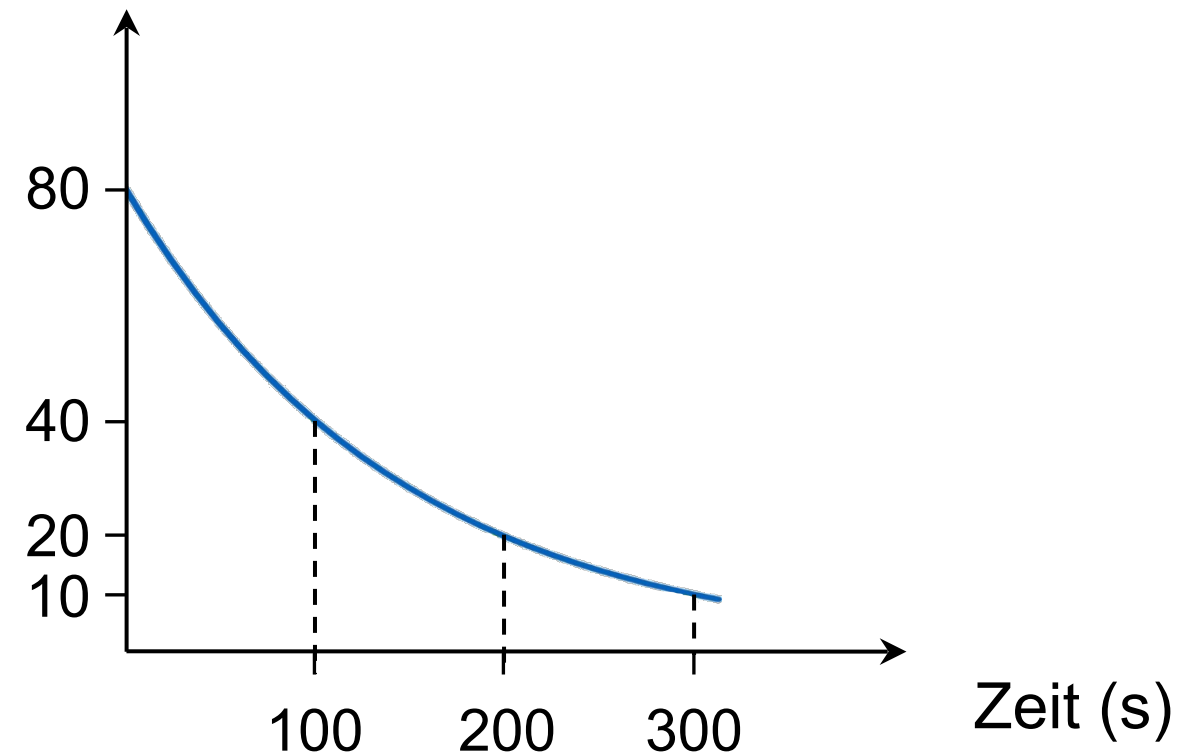
$$\int_{N_0}^N \frac{1}{N'} dN' = -\lambda \cdot \int_0^t dt'$$



$$N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Ausgangsensemble $N(0)$ bei $t = 0$,
 $t = 0$ ist beliebig wählbar!

exponentielles Zerfallsgesetz



Radioaktive Zerfälle – 2 charakterist. Zeitskalen

■ Halbwertszeit $t_{1/2}$

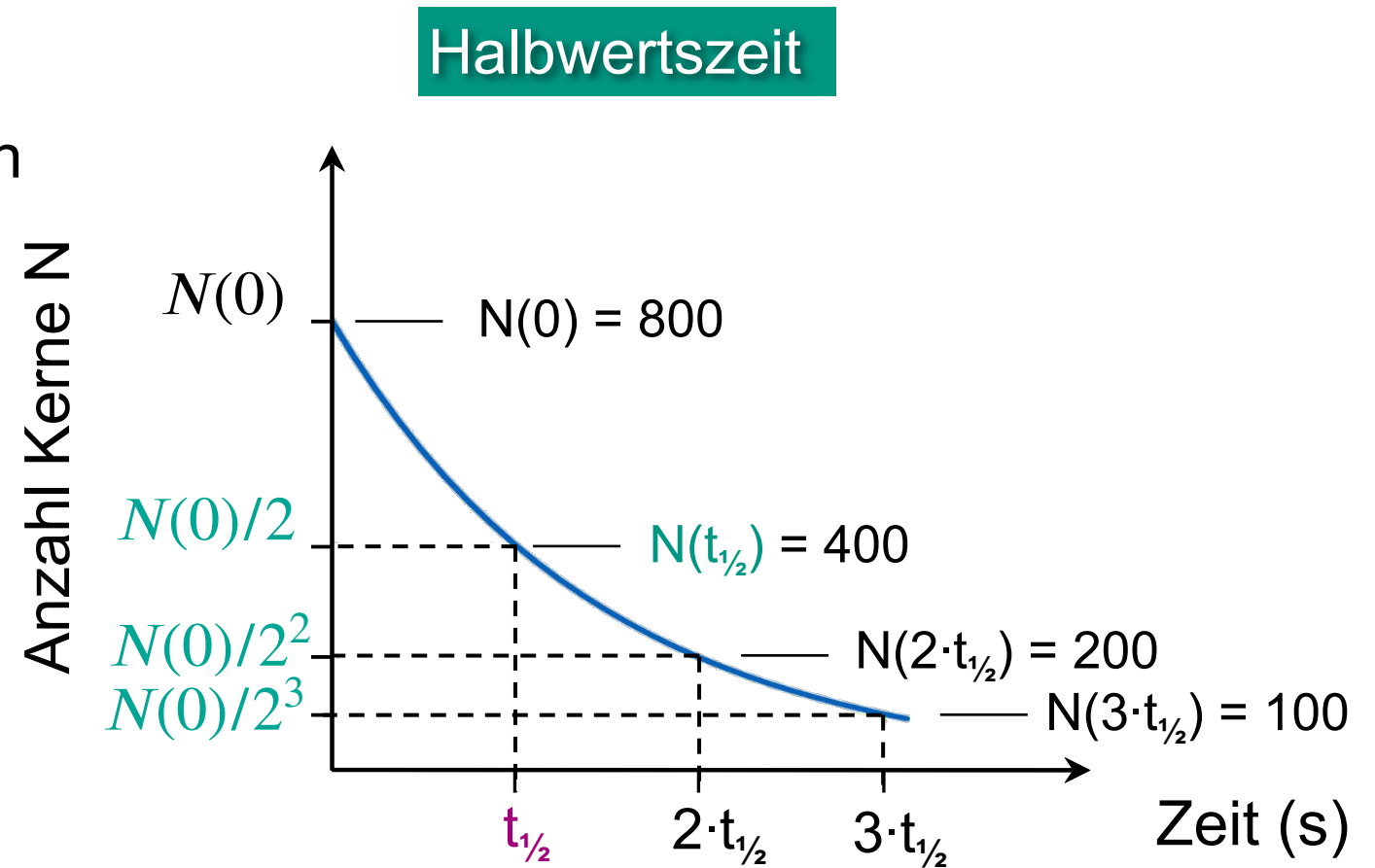
- nach Zeitintervall $t = t_{1/2}$:
 - 50% des Ensembles zerfallen
 - 50% des Ensembles nicht
- $$N(t_{1/2}) = \frac{1}{2} \cdot N(0)$$

- damit ergibt sich:

$$\frac{1}{2} = e^{-(\lambda \cdot t_{1/2})}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$$t_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$



Radioaktive Zerfälle – 2 charakterist. Zeitskalen

■ mittlere Lebensdauer τ

- nach Zeitintervall $t = \tau$:
 - $1/e$ (= 36,8%) des Ensembles ist nicht zerfallen

$$N(\tau) = N(0)/e$$

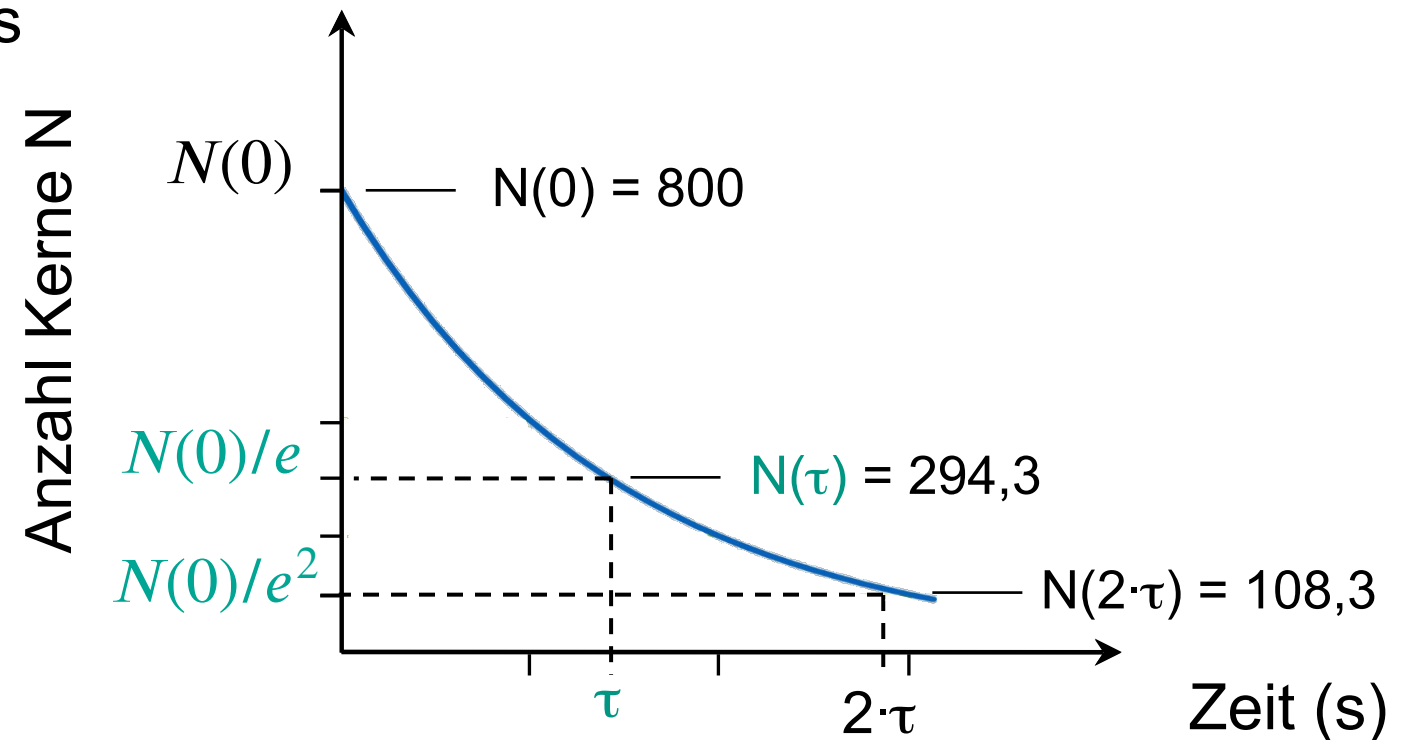
- damit ergibt sich:

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

- zerfallen ist $1 - 1/e = 63,2\%$

Lebensdauer

$$\tau = 1,443 \cdot t_{1/2}$$



Radioaktive Zerfälle – Beispiele für λ

■ Zerfallskonstante λ – Bedeutung:

- statistische Wahrscheinlichkeit des Kerns, im Zeitintervall $dt = 1 \text{ s}$ zu zerfallen

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



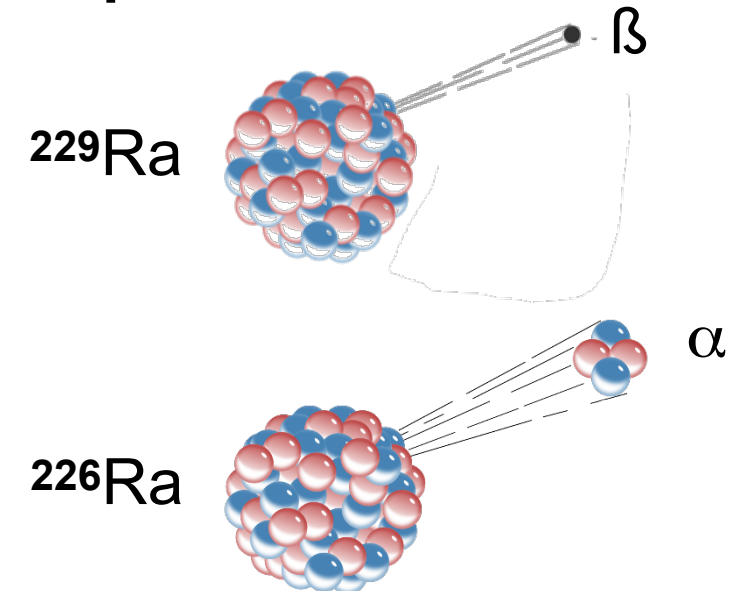
■ Zerfallskonstante λ ist spezifisch für jedes Isotop, Beispiele:

Beispiel: β -Zerfall von ^{229}Ra [$\tau = 346 \text{ s}$]

$$\lambda = 2,9 \cdot 10^{-3} / \text{s}$$

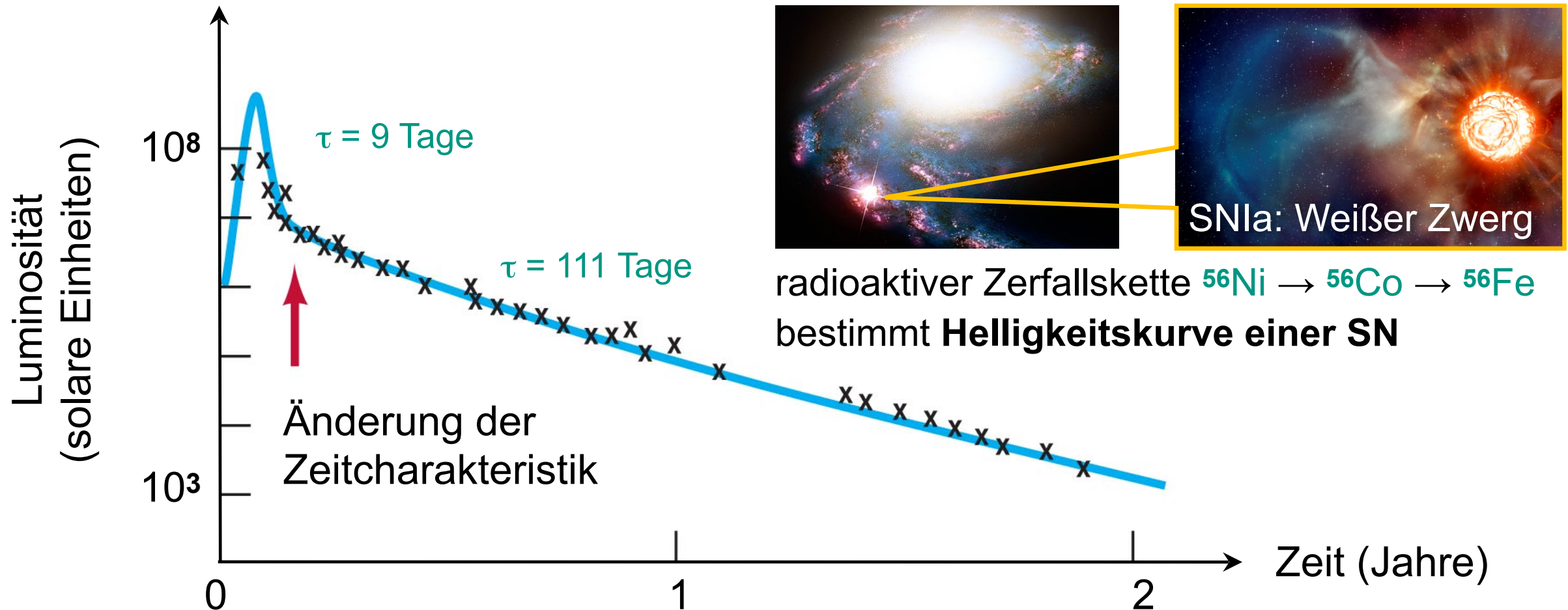
Beispiel: α -Zerfall von ^{226}Ra [$\tau = 2309 \text{ Jahre}$]

$$\lambda = 1,4 \cdot 10^{-11} / \text{s}$$



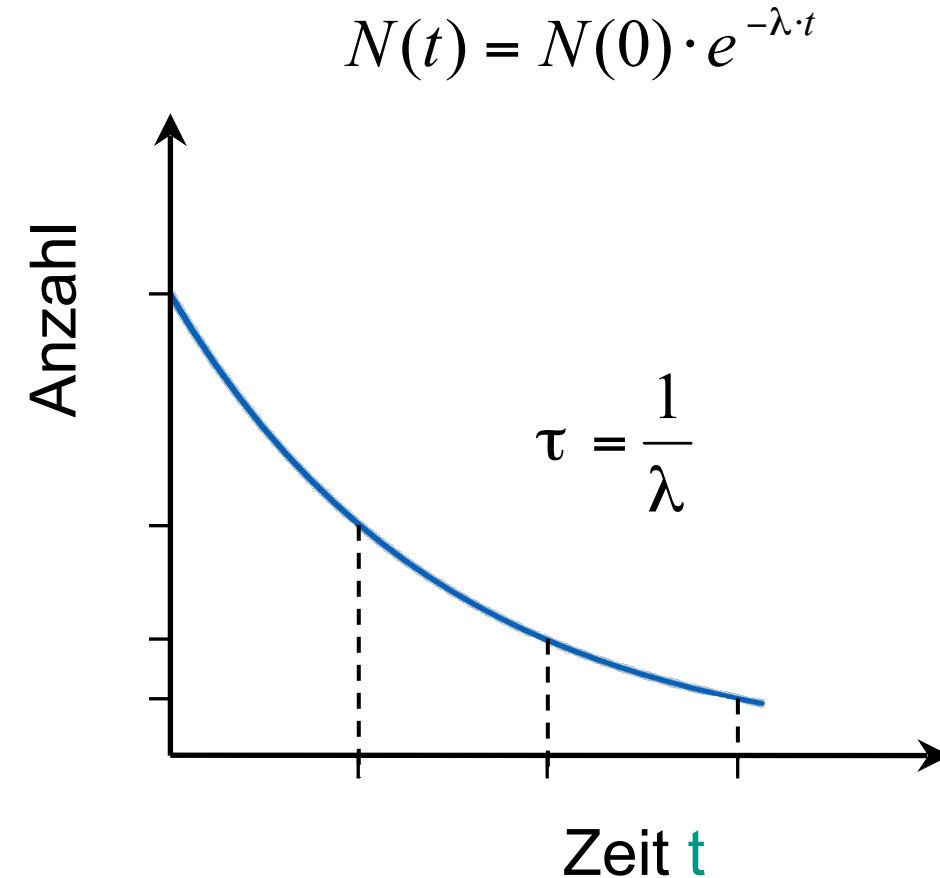
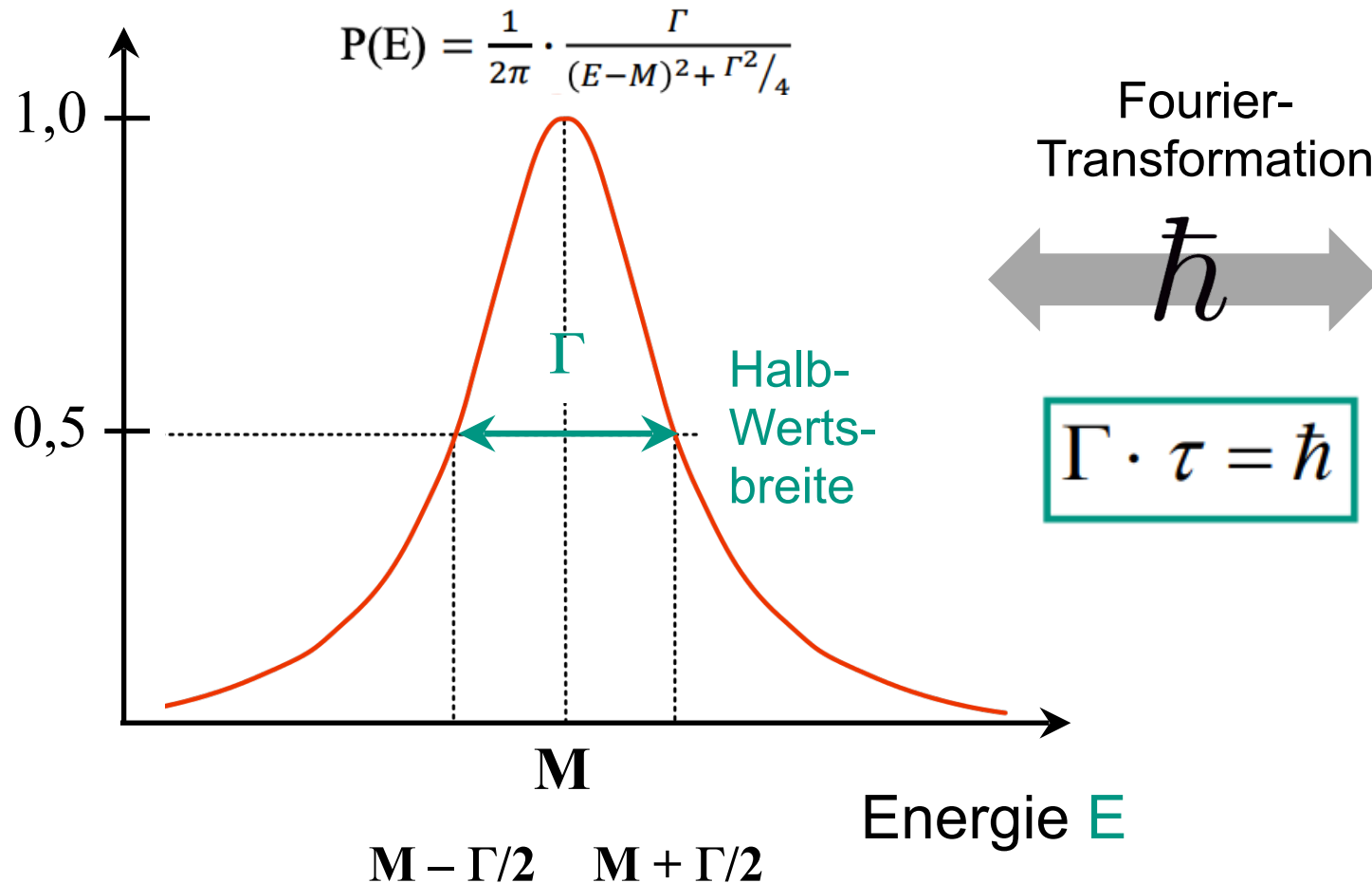
Radioaktive Zerfälle – Beispiel Supernovae Typ Ia

- Explosion Weißer Zwerg*: Erzeugung von großen Mengen an Ni-56



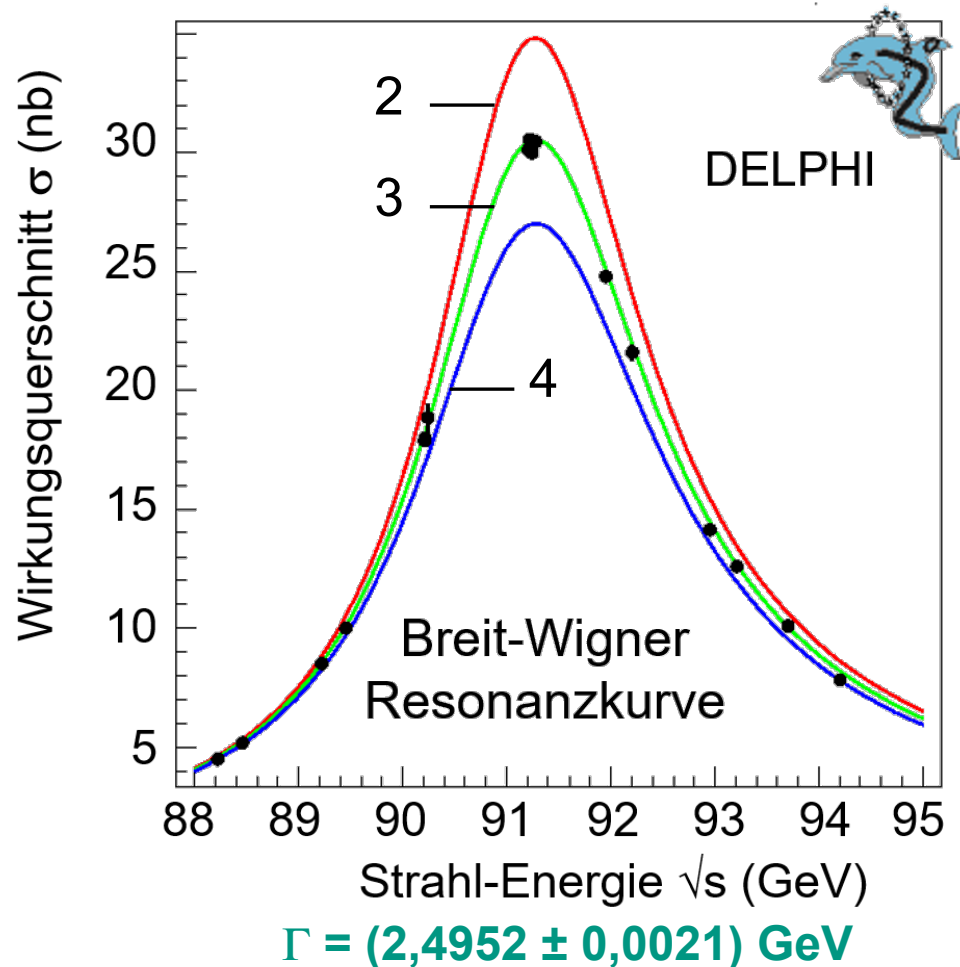
Exponentieller Zerfall & Zerfallsbreite*

■ Resonanzen mit Breite Γ & Lebensdauer τ



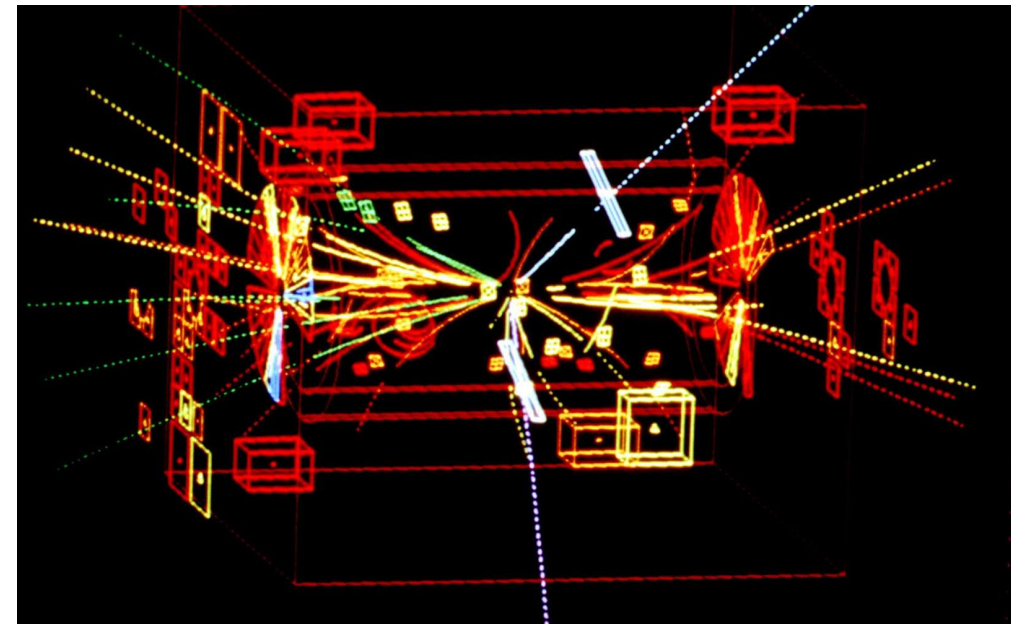
Exponentieller Zerfall & Zerfallsbreite des Z^0

- Z^0 -Resonanz in e^+e^- Kollisionen am Beschleuniger LEP: 3 Generationen!



$$\Gamma \cdot \tau = \hbar$$

$$\text{Reichweite} \sim \frac{1}{M(Z^0)} \sim 10^{-18} \text{ m}$$



Signal eines Z^0 -Zerfalls

Radioaktive Zerfälle – Aktivität A

■ Definition:

- beschreibt die Zahl dN der Zerfälle pro Zeiteinheit dt
- ist keine konstante Größe, da die Ensemblezahl N durch die Zerfälle abnimmt, damit nimmt auch A ab
- Aktivität $A \sim \lambda$ (Zerfallskonstante)

$$\boxed{A = \frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N} \longrightarrow \boxed{A(t) = A(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}}$$

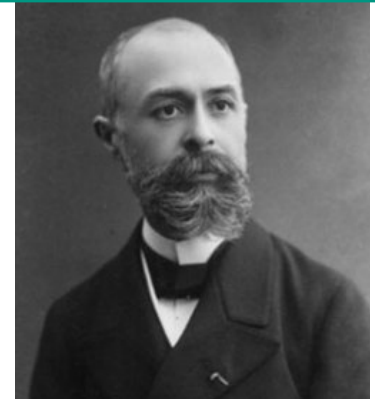
die Aktivität $A(t)$ einer Quelle nimmt exponentiell mit t ab

Radioaktive Zerfälle – Aktivität A

■ Einheiten:

1 Becquerel = 1 Zerfall/s

1 Bq = $2,70 \cdot 10^{-11}$ Ci
(nach *Henri Becquerel*)



1 Curie = $3,7 \cdot 10^{10}$ Zerfälle/s

1 Ci = Aktivität von 1 g
Radium (^{226}Ra)
(nach *Pierre Curie*)



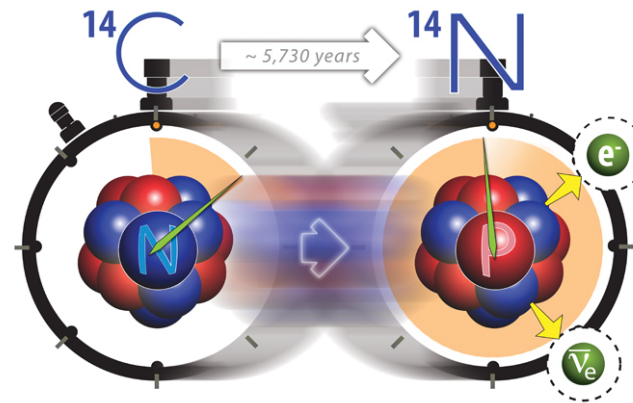
Radioaktive Zerfälle – Aktivität A

■ Abgeleitete Größen:

- spezifische Aktivität [Bq/kg] : Aktivität pro Masse
- Aktivitätskonzentration [Bq/m^3] : Aktivität pro Volumen



$${}^3\text{H} = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Bq/g}$$



$${}^{14}\text{C} = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ Bq/g}$$



$$\text{natU} = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Bq/g}$$

Radioaktive Zerfälle – Aktivität A

■ Abgeleitete Größen: BED – „*banana equivalent dose*“

- spezifische Aktivität [Bq/kg] : Aktivität pro Masse
- Aktivitätskonzentration [Bq/m^3] : Aktivität pro Volumen



~15 Zerfälle/s pro Banane*



Radioaktive Zerfälle – Aktivität A, nachgefragt

■ Wie aktiv ist Leonard Hofstadter?

A) Aktivität ist $A < 1 \text{ Bq}$ (schwer nachweisbar)



B) Aktivität ist $A \sim 10^2 \text{ Bq}$ (gut nachweisbar)



C) Aktivität ist $A \sim 10^4 \text{ Bq}$ (gefährlich für
low-activity Experimente)

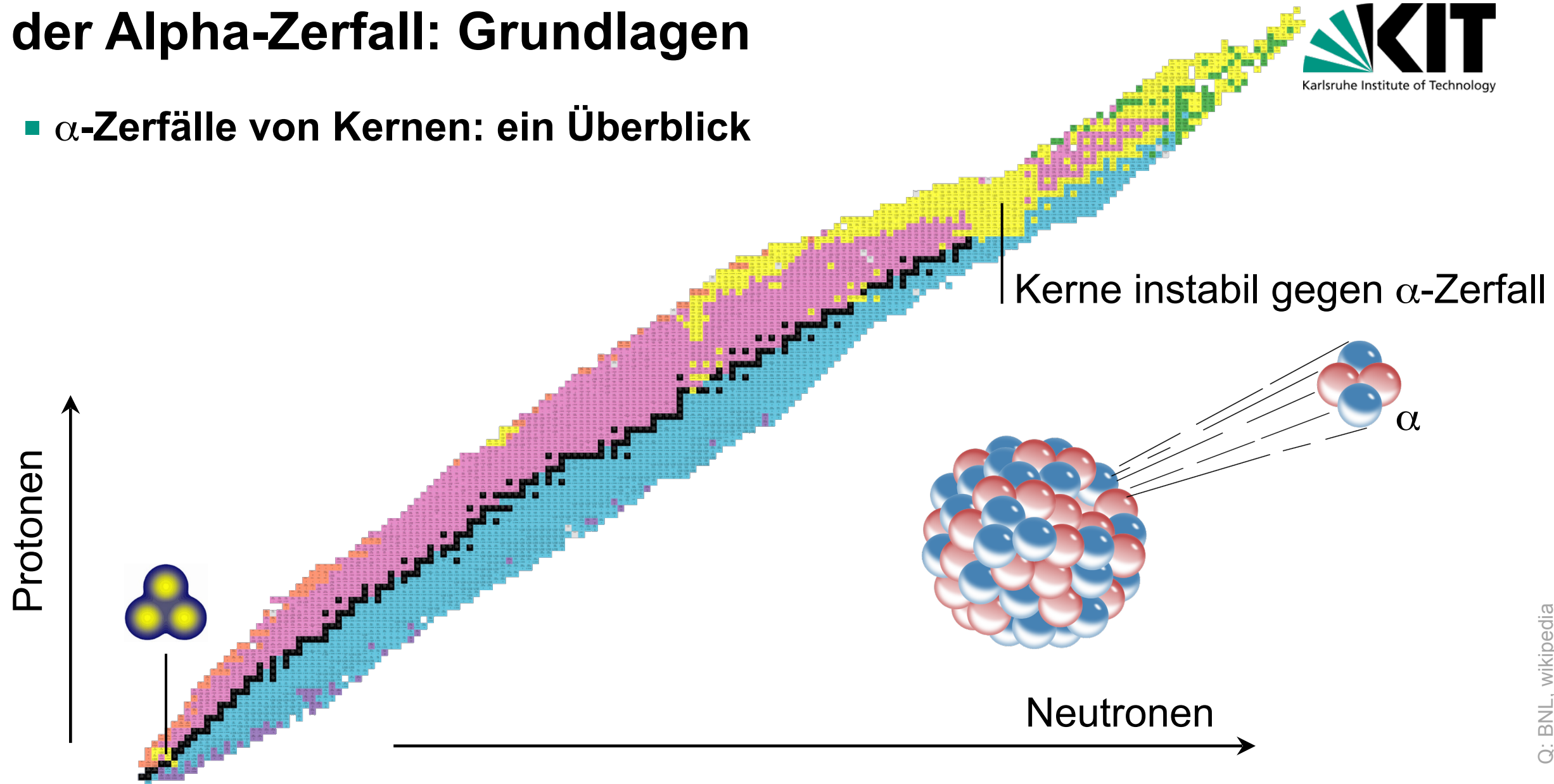


... und dann gibt es Katzen



der Alpha-Zerfall: Grundlagen

■ α -Zerfälle von Kernen: ein Überblick



der Alpha-Zerfall: Grundlagen

- hier Fokus auf schwere Kerne $A > 150$ (Sm), die via α -Emission zerfallen

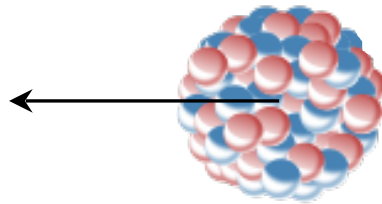
- Bedingung: der Q-Wert des α -Zerfalls muss $Q_\alpha > 0$ sein

$$Q_\alpha = \underbrace{B(Z-2, A-4)}_{\text{Tochterkern (TK)}} - \underbrace{B(Z, A)}_{\text{Mutterkern (MK)}} + \underbrace{B_\alpha(28,3 \text{ MeV})}_{\alpha\text{-Teilchen}} > 0$$

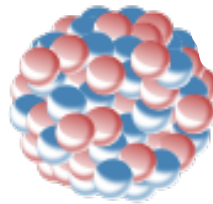
Tochterkern
(TK)

Mutterkern
(MK)

α -Teilchen



$E_{\text{kin}}(\text{TK})$



$E_{\text{kin}}(\text{MK}) = 0$



$E_{\text{kin}}(\alpha)$

Rückstoß-Energie Tochterkern

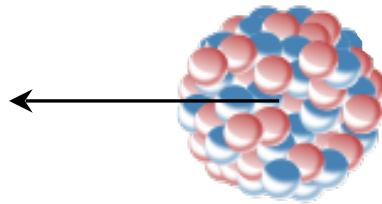
kinetische Energie α -Teilchen

der Alpha-Zerfall: Zerfallskinematik

- leichtes α -Teilchen trägt Großteil der Zerfallsenergie weg

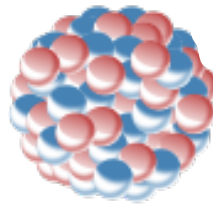
- aus Massen-Verhältnis $\frac{M_\alpha}{M_{TK}} \cong \frac{4}{A-4}$ ergeben sich folgende kinetische Energien:

$$\boxed{E_{kin}(TK) \cong \frac{4}{A} \cdot Q_\alpha} \quad \Rightarrow \quad \boxed{E_{kin}(\alpha) \gg E_{kin}(TK)} \quad \Leftarrow \quad \boxed{E_{kin}(\alpha) \cong \frac{A-4}{A} \cdot Q_\alpha}$$



$E_{kin}(TK)$

Rückstoß-Energie Tochterkern



$E_{kin}(MK) = 0$



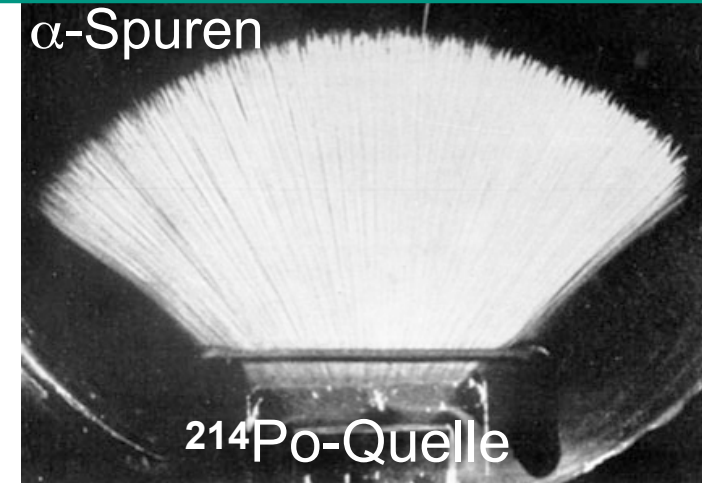
$E_{kin}(\alpha)$

kinetische Energie α -Teilchen

der Alpha-Zerfall: Zerfallskinematik

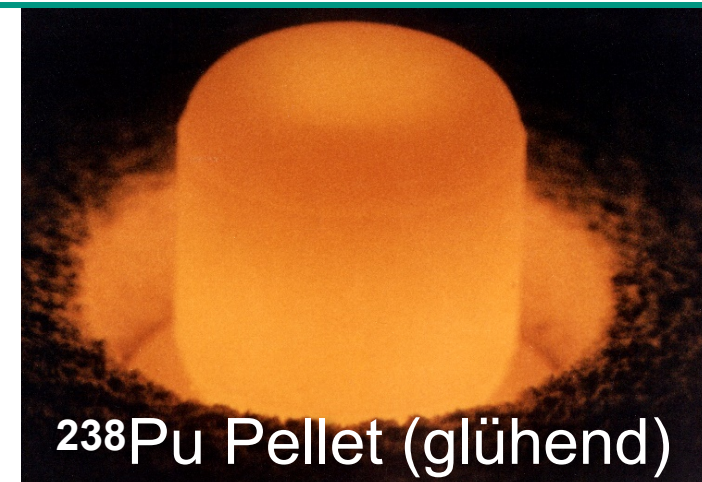
■ α -Teilchen: monoenergetisch & stark ionisierend in Materie

- typischer Wert: $E_{\text{kin}} \sim \text{einige MeV}$
- Visualisierung von α -Energien in Nebelkammer-Aufnahmen: alle α 's weisen die gleiche Reichweite auf



- α 's weisen eine hohe Ionisationsrate auf & besitzen daher eine **geringe Reichweite**

- ↳ radiologische Konsequenzen
- ↳ Verwendung als langlebige Radionuklidbatterien (Raumfahrt)

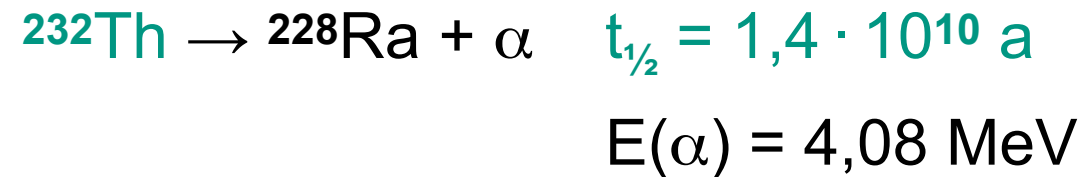


der Alpha-Zerfall: Halbwertszeiten

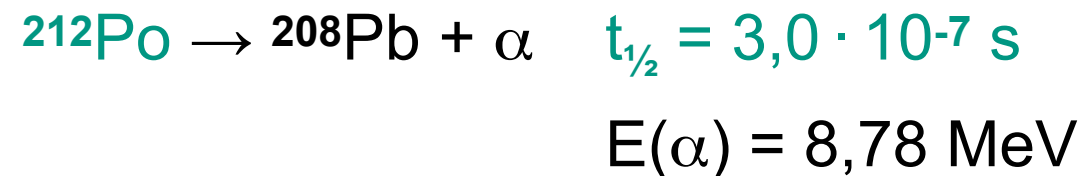
■ Thorium-232 und Polonium-212: 24 Größenordnungen

- Q-Wert $Q_\alpha = E_{\text{kin}}(\alpha)$ entscheidend für die Halbwertszeit $t_{1/2}$ des Isotops:

- langsamster α -Zerfall:



- schnellster α -Zerfall:



der Alpha-Zerfall: Tunnelprozess

■ Grundlage: quantenmechanischer Tunnelprozess*

- G. Gamow & E. Condon, 1932:

$$T \propto e^{-G}$$

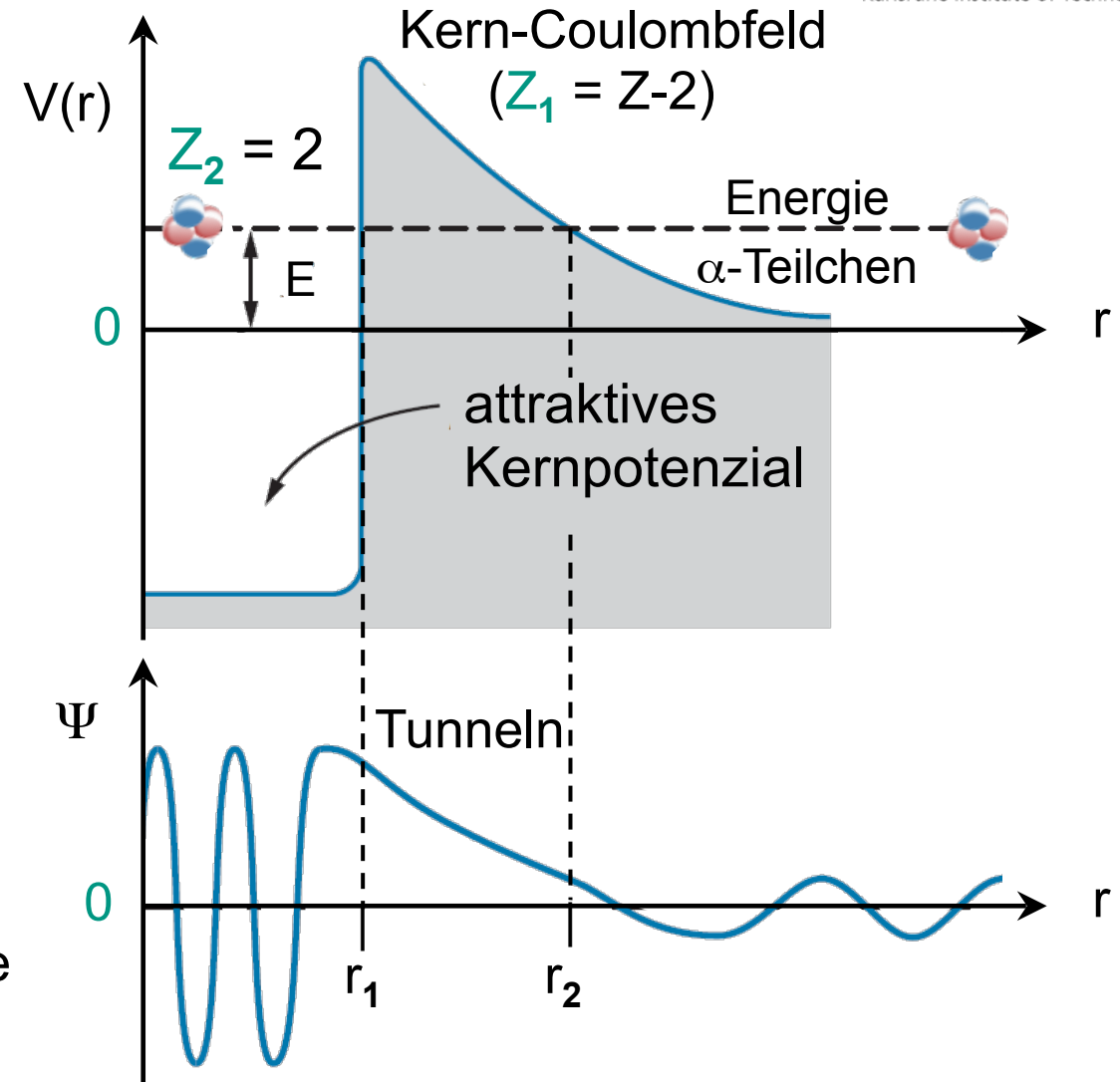
Gamow-Faktor

- mit:

$$G(E) = \sqrt{\frac{2m \cdot c^2 \cdot (\pi \cdot \alpha \cdot Z_1 \cdot Z_2)^2}{E_{kin}}} = \sqrt{\frac{E_G}{E_{kin}}}$$

M: reduzierte Masse, α = Feinstrukturkonstante

E_{kin} : kinet. Energie α -Teilchen



der Alpha-Zerfall: Tunnelprozess von Po-212

■ Lebensdauer von Po-212

- Bildung eines α -Teilchens im Kern
- Transmissionswahrscheinlichkeit T durch die 17,9 fm breite Coulomb-Barriere: $T \sim 2,1 \cdot 10^{-15}$

- Frequenz f der Wandstöße des α an der Coulombwand $R_{Po} = 9,1$ fm:

$$f = v / 2R_{Po} \sim 1,1 \cdot 10^{21} / s$$

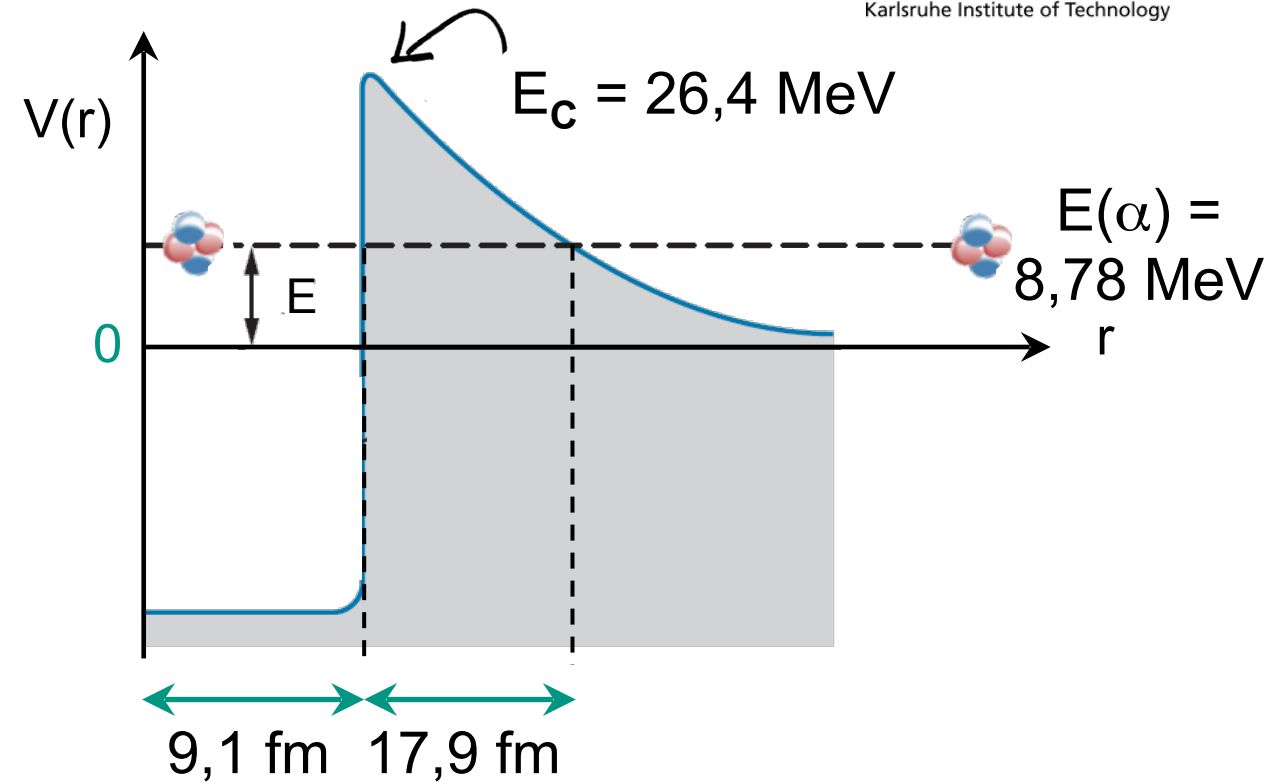
- Zerfallswahrscheinlichkeit λ :

$$\lambda = f \cdot T = 2,3 \cdot 10^6 / s$$



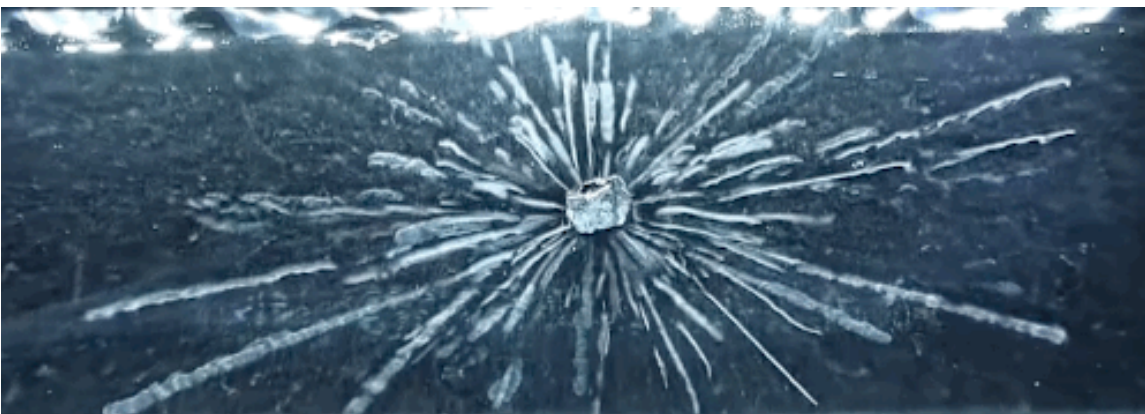
$$\tau = 1 / \lambda = 0,43 \mu s$$

$$t_{1/2} = \ln 2 \cdot \tau = 0,30 \mu s$$



der Alpha-Zerfall: Geiger-Nuttall Regel

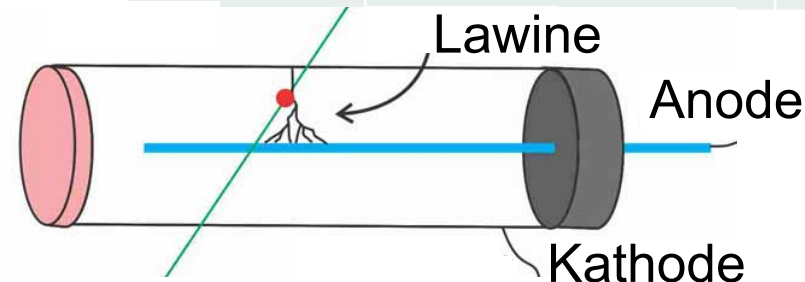
- **1911:** Hans Geiger & John M. Nuttall - empirische Regel zwischen Reichweite bzw. $E_{\text{kin}}(\alpha)$ eines α -Teilchens & der gemessenen Halbwertszeit $t_{1/2}$ des α -Zerfalls (Messungen mit Nebelkammer)



Kern	$t_{1/2}$	$E_{\text{kin}}(\alpha)$	T_{α}
^{212}Po	0,3 μs	8,78 MeV	$1,3 \cdot 10^{-13}$
^{224}Ra	3,64 Tage	5,7 MeV	$5,9 \cdot 10^{-26}$
^{235}U	$7,1 \cdot 10^8 \text{ a}$	4,6 MeV	$\sim 10^{-36}$
^{232}Th	$1,39 \cdot 10^{10} \text{ a}$	4,05 MeV	$\sim 5 \cdot 10^{-38}$

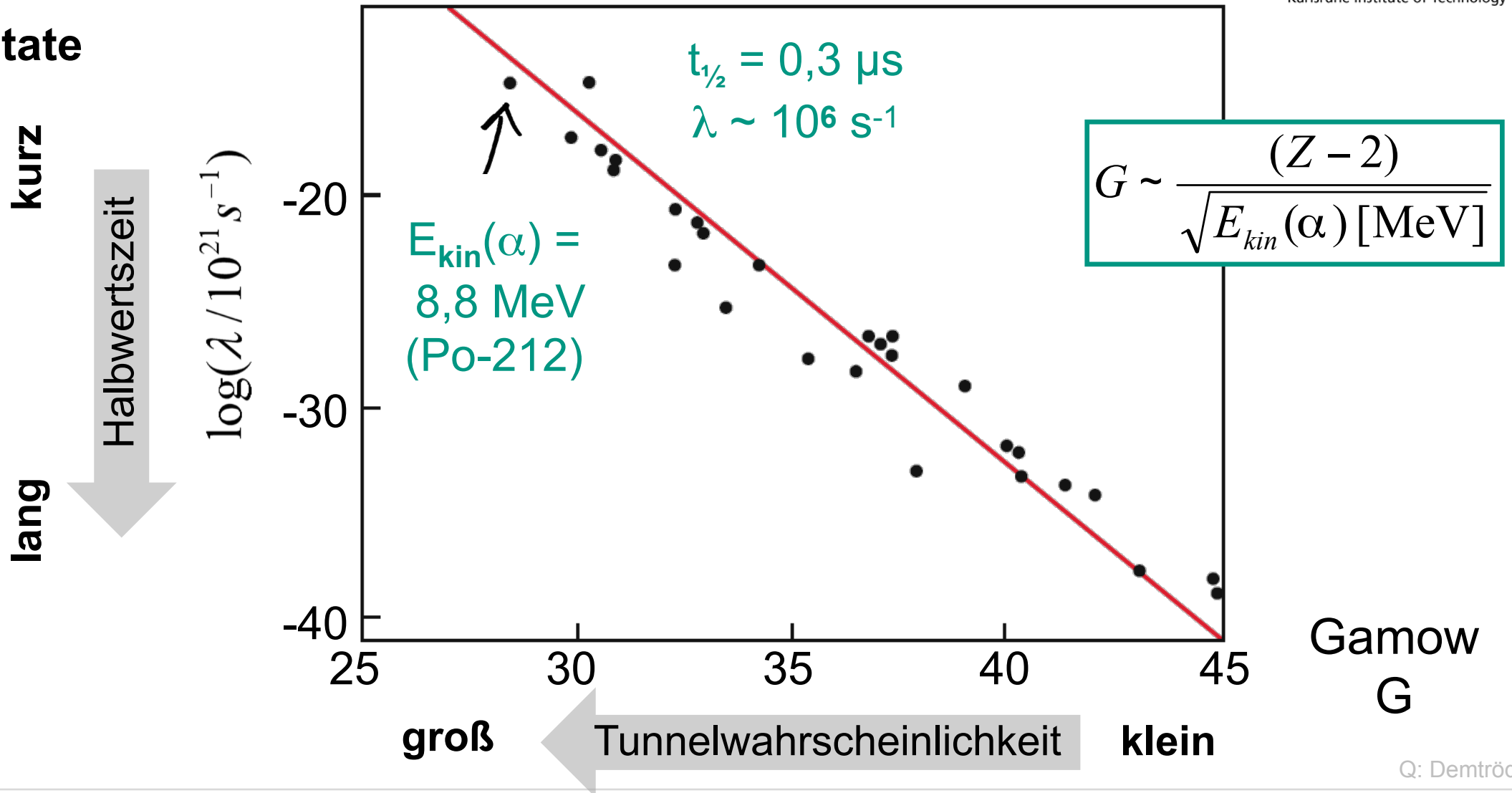


Hans Geiger
(„Geiger-Müller Zählrohr“)



der Alpha-Zerfall: Geiger-Nuttall Regel

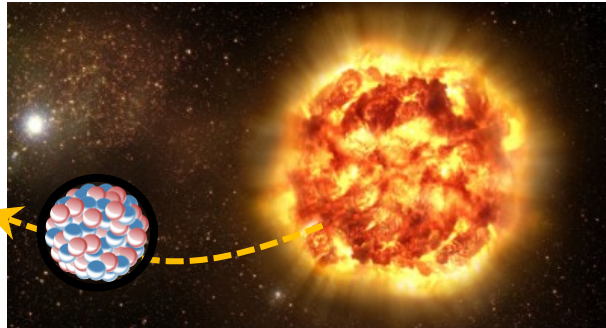
■ Resultate



Q: Demtröder 4

Primordiale Zerfallsketten

■ Die 4 primordialen Ketten



langlebige Mutterisotope: $10^6 - 10^{10}$ a

^{232}Th – ^{237}Np – ^{238}U – ^{235}U



^{208}Pb – ^{209}Bi – ^{206}Pb – ^{207}Pb

stabile End-Isotope

^{232}Th - Reihe: $A = 4 \cdot j + 0$

^{237}Np - Reihe: $A = 4 \cdot j + 1$

^{238}U - Reihe: $A = 4 \cdot j + 2$

^{235}U - Reihe: $A = 4 \cdot j + 3$



Zerfallskette Th-232

- Beispiel: von **Th-232** zu **Pb-208**



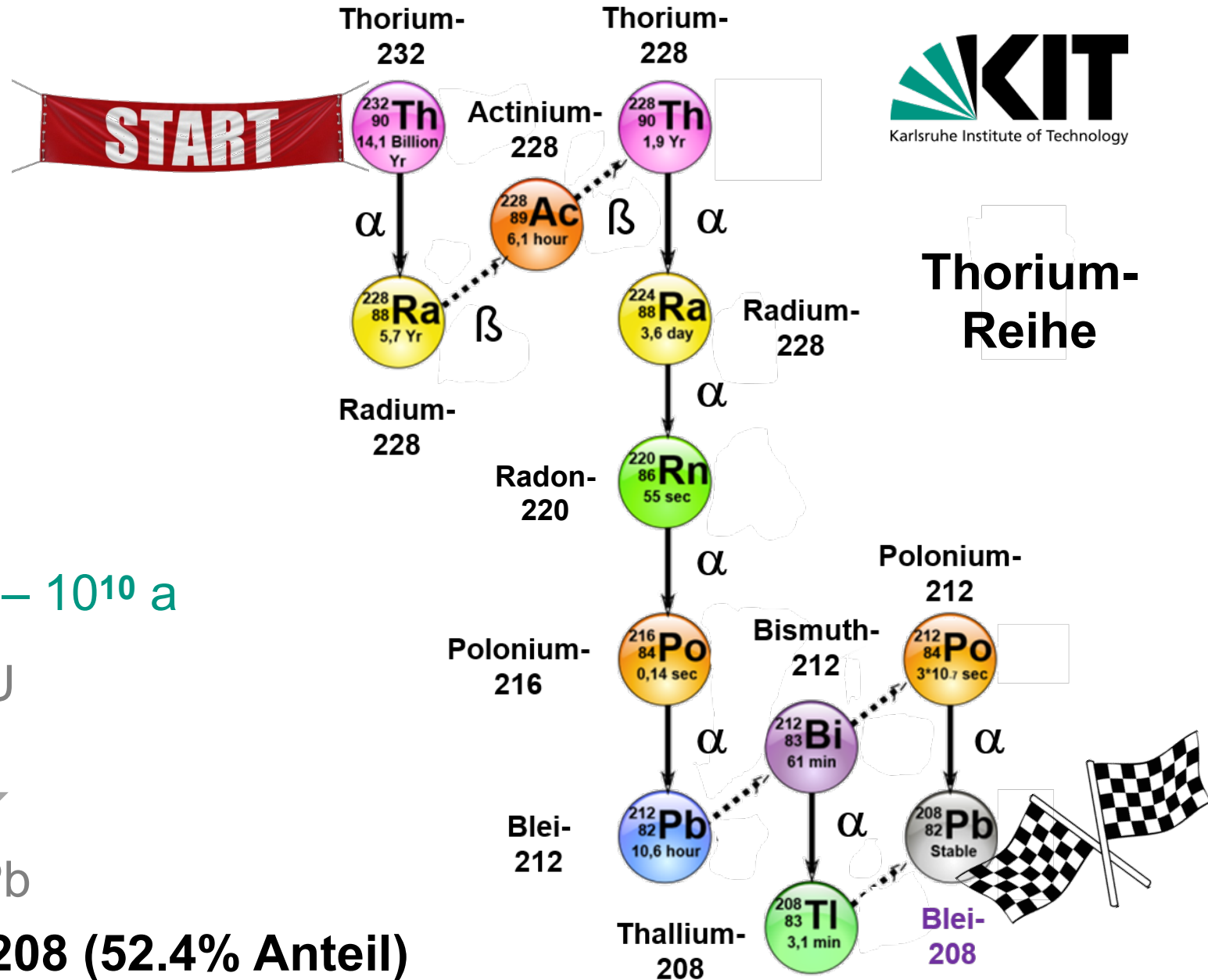
langlebige Mutterisotope: $10^6 - 10^{10}$ a

^{232}Th – ^{237}Np – ^{238}U – ^{235}U



^{208}Pb – ^{209}Bi – ^{206}Pb – ^{207}Pb

stabiles End-Isotop Pb-208 (52.4% Anteil)



Primordiale Zerfallsketten

■ Radioaktive Zerfallskette

- aus Ausgangsisotop werden radioaktive **Tochterkerne** erzeugt, die ihrerseits wieder zerfallen (**Ende: stabiles Isotop**)

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1$$

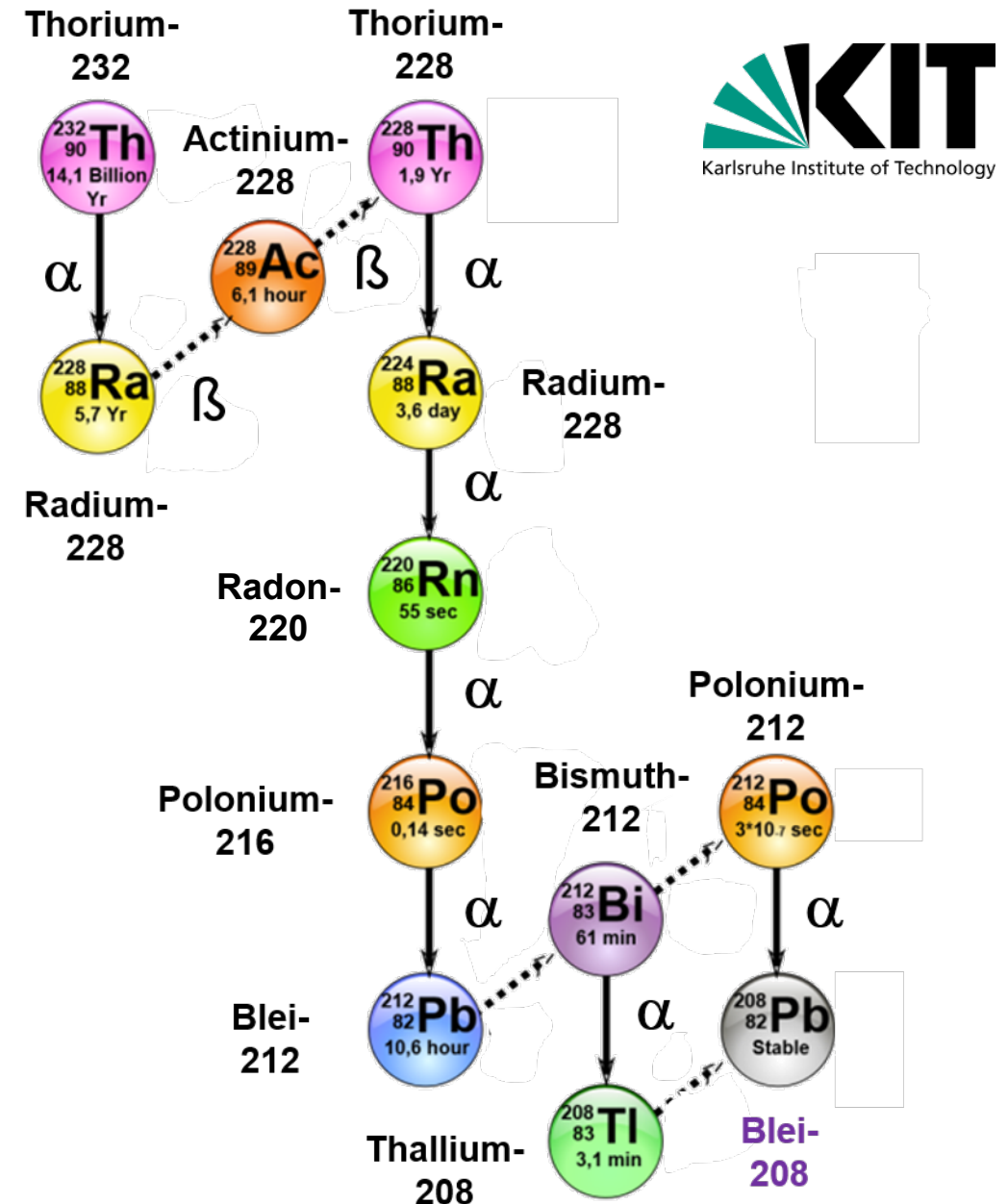
Zerfall Mutterkern

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2$$

Erzeugung Tochterkern & Zerfall Tochterkern

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 \cdot N_2 - \lambda_3 \cdot N_3$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$



Primordiale Zerfallsketten

- radioaktive Zerfallskette

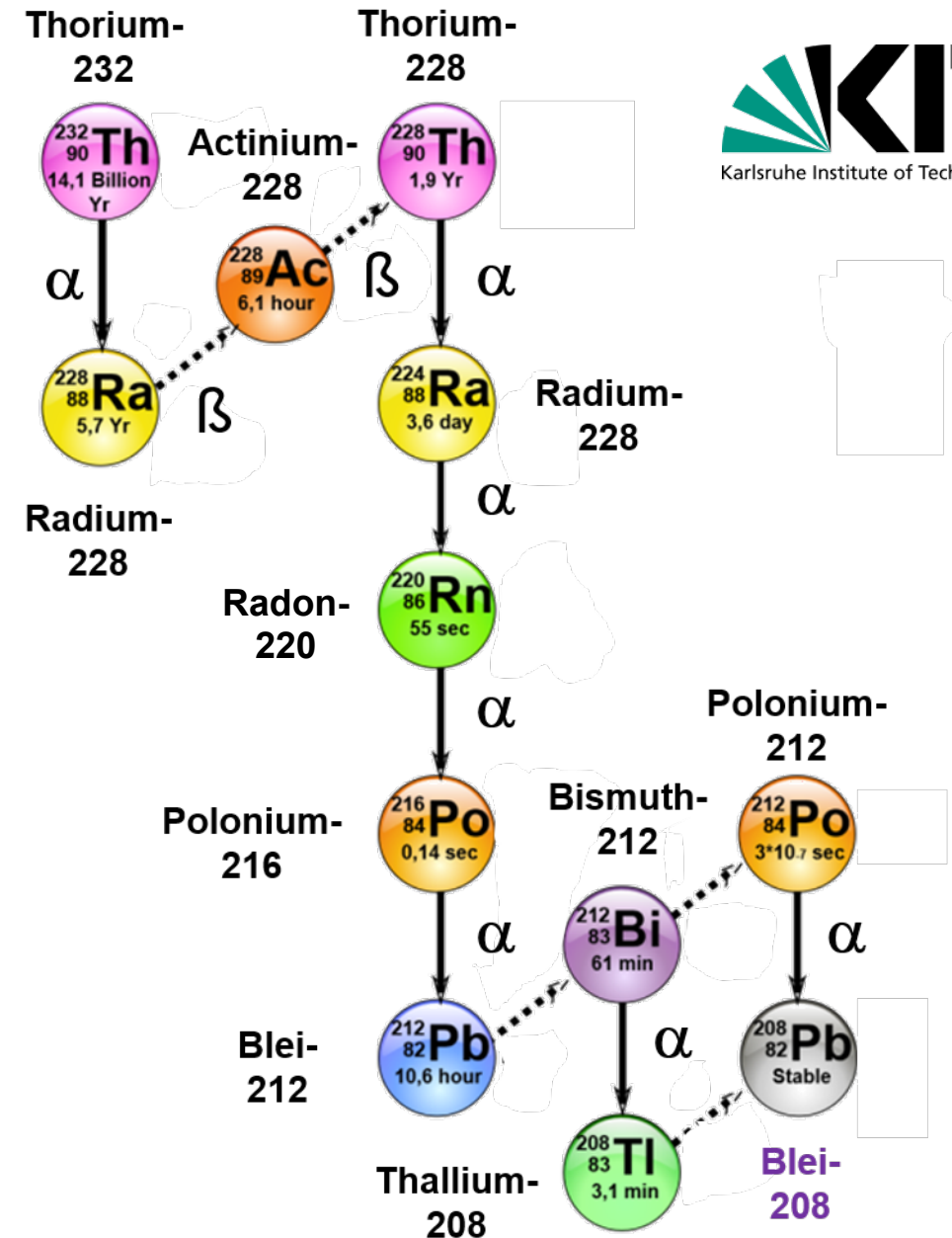
- **säkulares Gleichgewicht:**

die **Aktivität** A_i aller Isotope der Kette ist identisch & die **Häufigkeit** N_i der Isotope ist konstant

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt}$$

$$A_1 = A_2 = A_3$$

$$\lambda_1 \cdot N_1 = \lambda_2 \cdot N_2 = \lambda_3 \cdot N_3$$

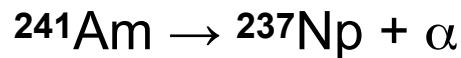
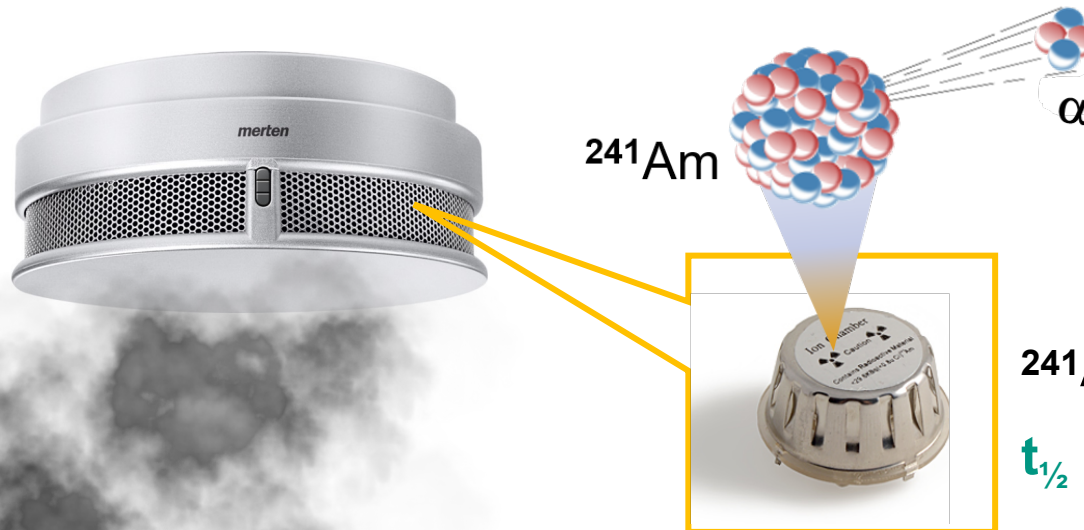


Zerfallskette von Np-237

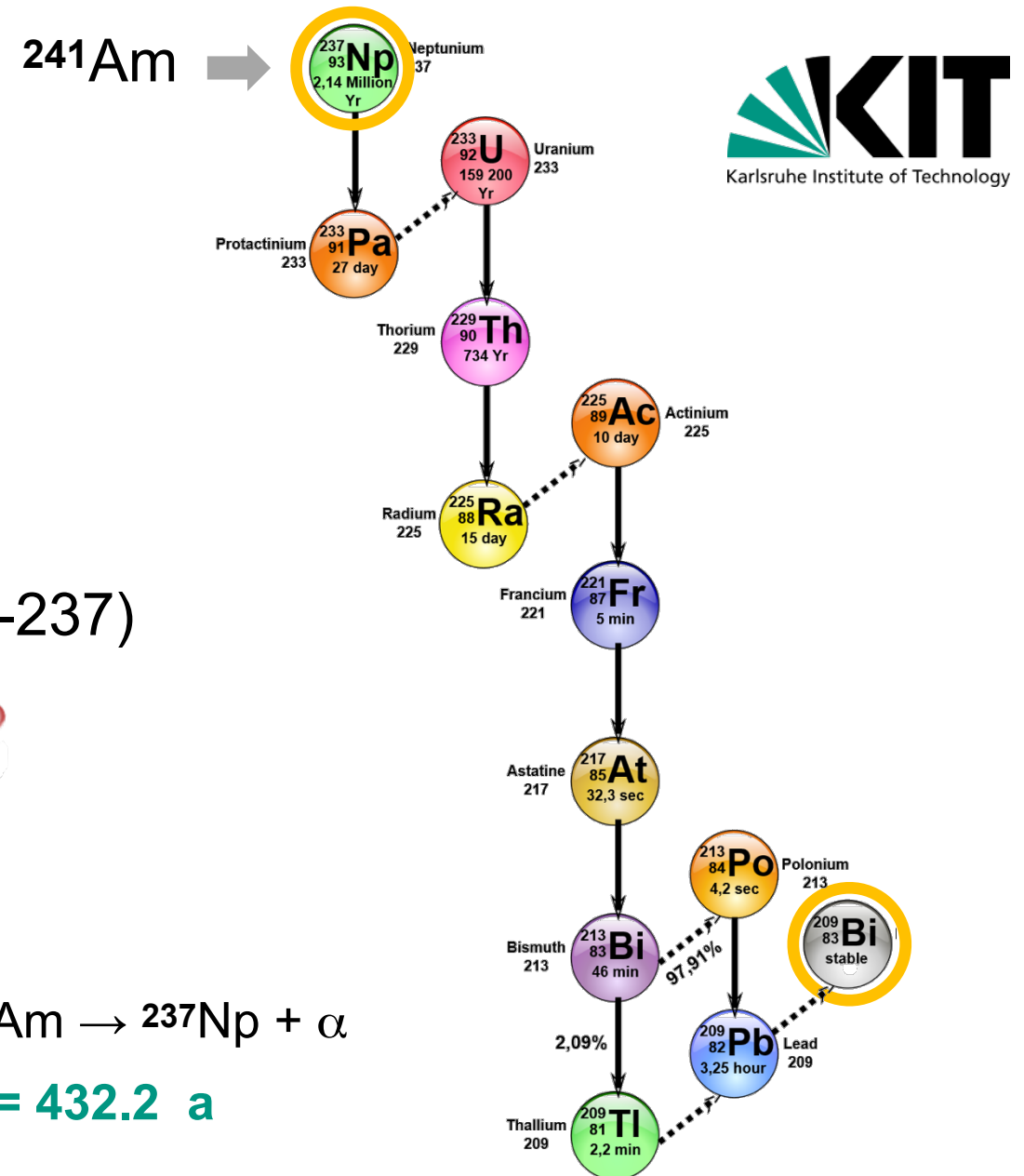
■ Neptuniumserie: $A = 4 \cdot j + 1$



Rauchmelder können ^{241}Am enthalten
(künstlich erzeugtes Mutter-Isotop von Np-237)



$$t_{1/2} = 432.2 \text{ a}$$

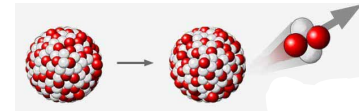


Zerfallskette von U-238

■ Isotope **Po-210** & **Pb-210**

1951: **Gilbert's Atomic Energy Lab**

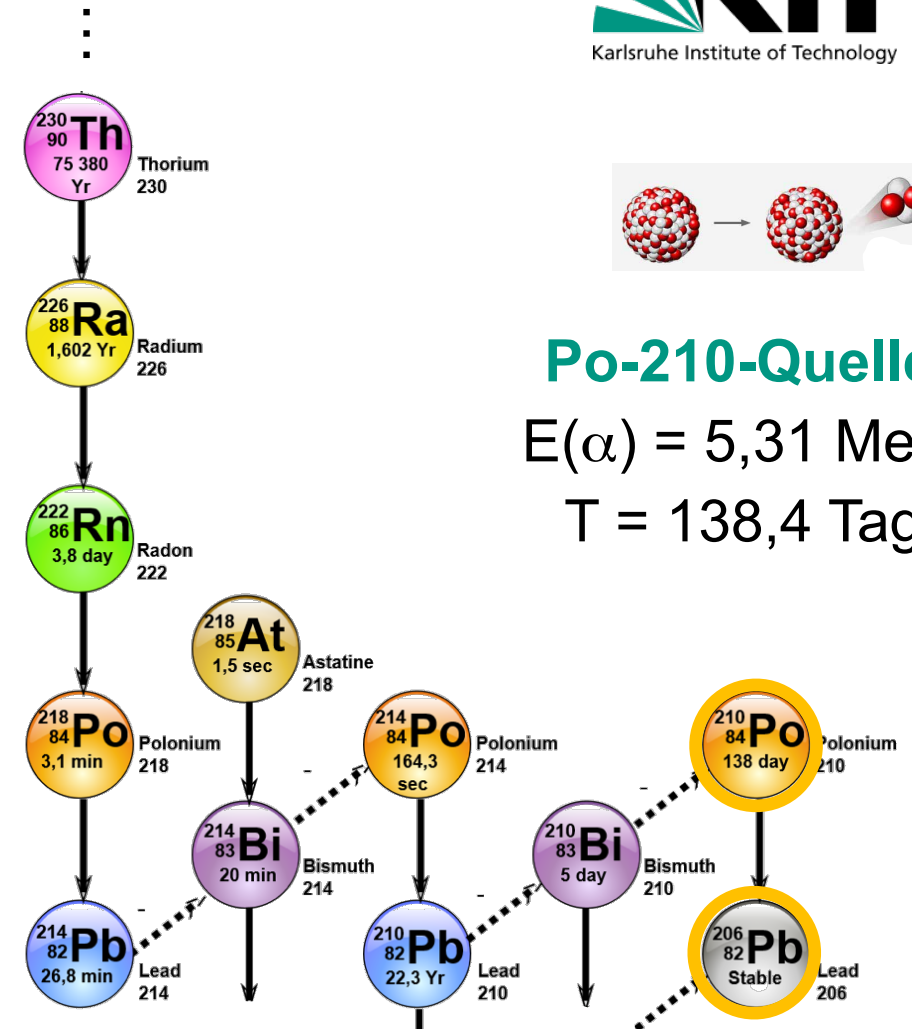
- mit α -Quellen:
Po-210, Pb-210
- Kosten 49.50 \$



Po-210-Quelle:

$$E(\alpha) = 5,31 \text{ MeV}$$

$$T = 138,4 \text{ Tage}$$

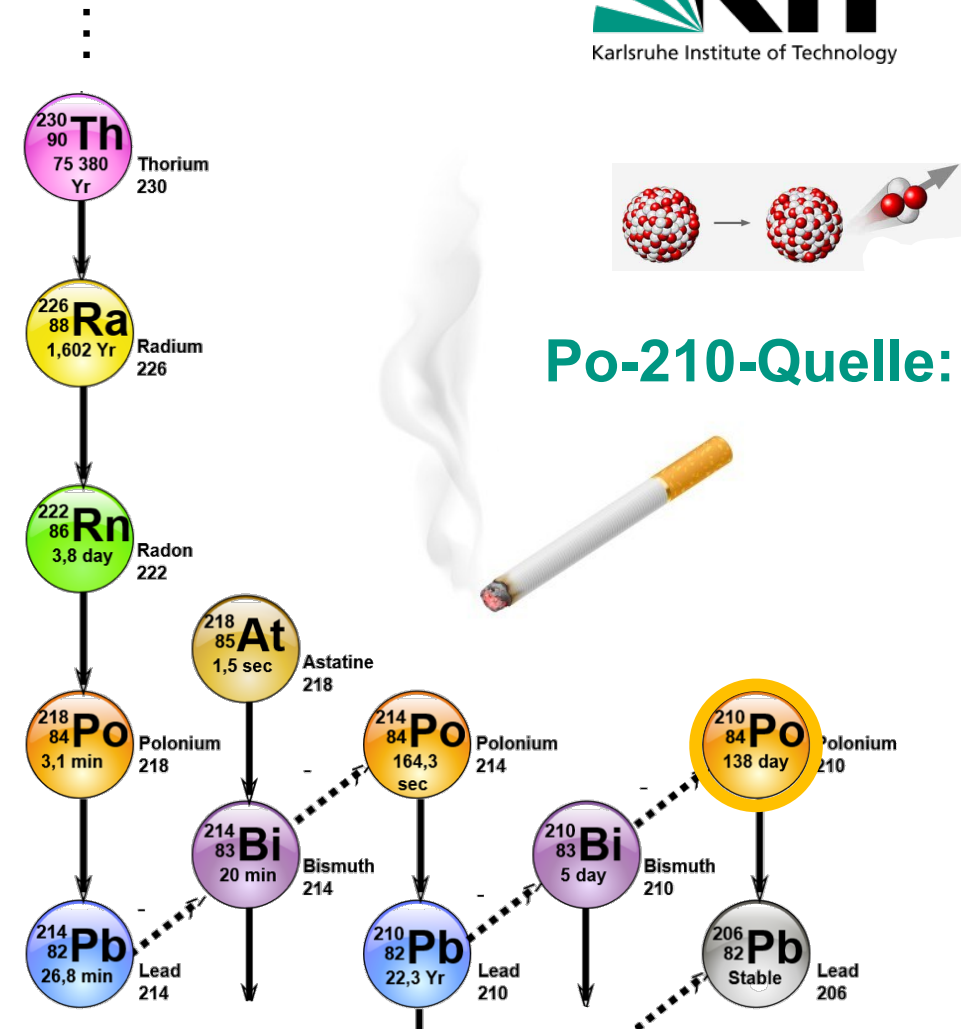


Zerfallskette von U-238

■ Isotope **Po-210** & Pb-210

1951: Gilbert's Atomic Energy Lab

- mit α -Quellen:
Po-210, Pb-210
- Kosten 49.50 \$

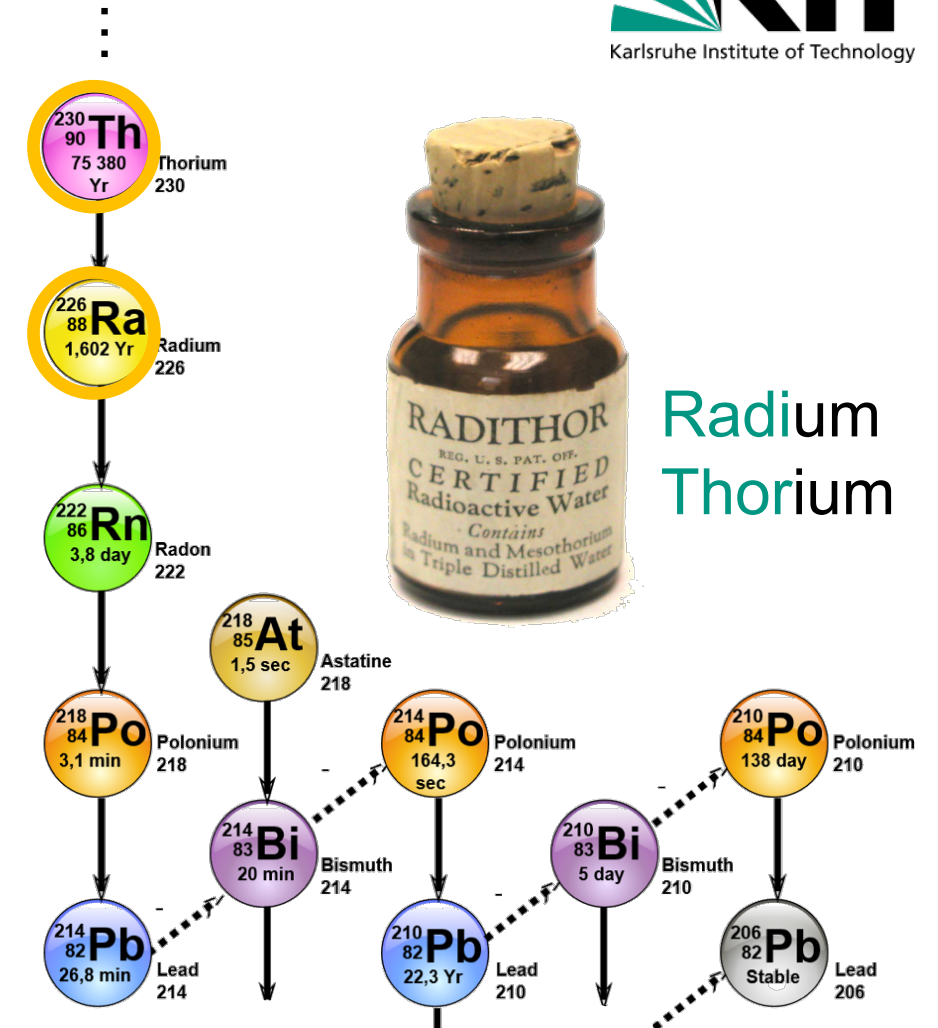


Po-210-Quelle:

Zerfallskette von U-238

- Isotop Ra-226: frühe Bedenkenlosigkeit...

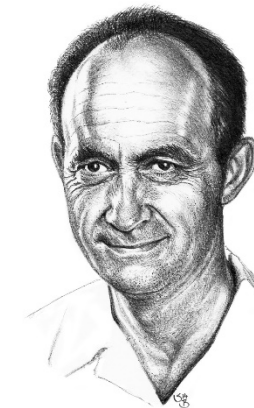
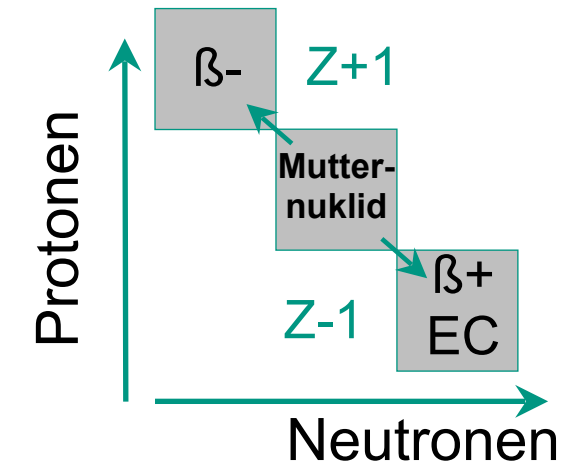
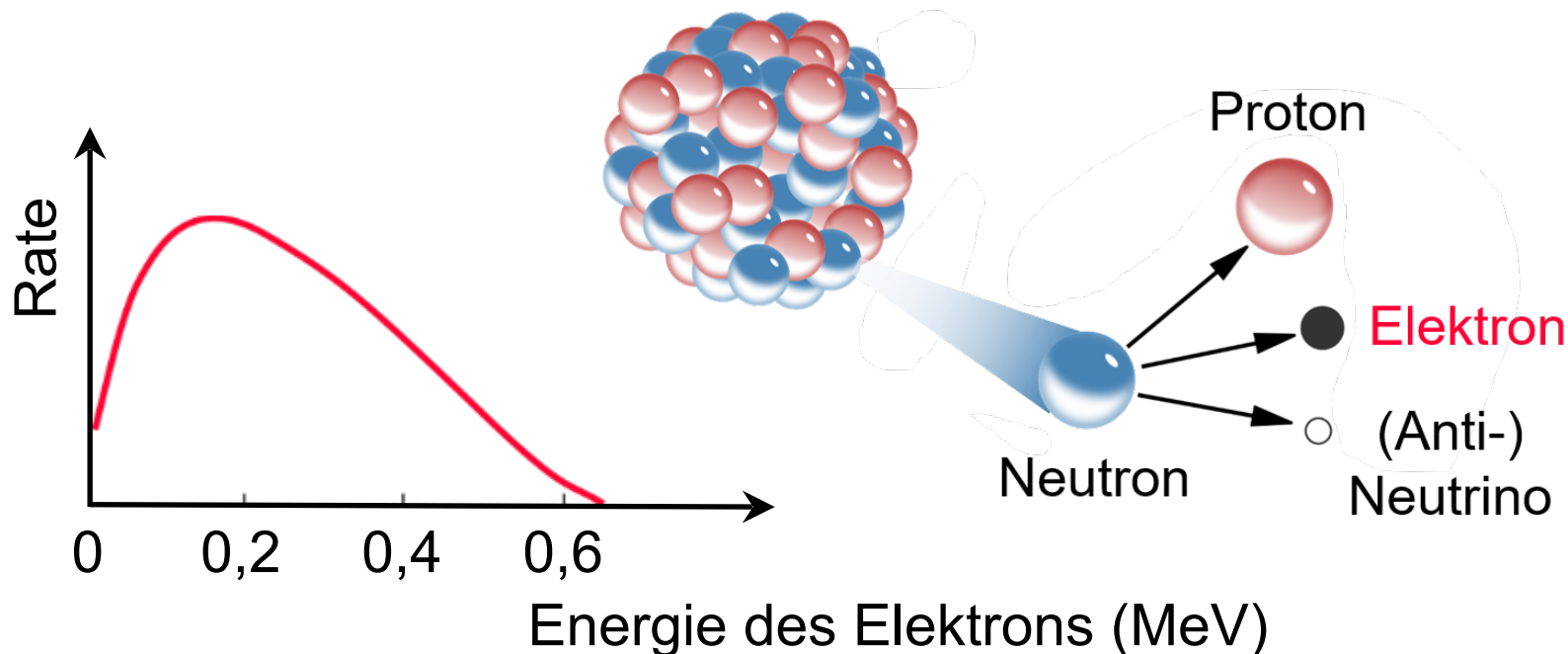
- Radiumwasser (Radithor) & Co. ...



der Beta-Zerfall: Grundlagen

■ Kern- β -Zerfälle: Änderung der Ordnungszahl Z um ± 1

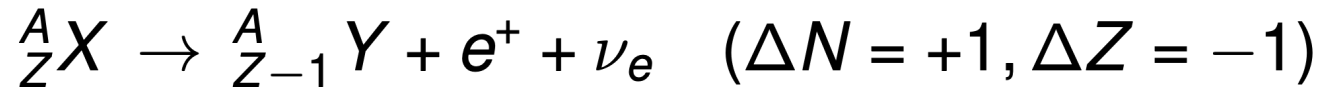
- Prozesse der schwachen Wechselwirkung in der klassischen Kernphysik $\Rightarrow$ **instabile Isotope**, falls zu hoher Überschuss an Neutronen oder Protonen



Enrico Fermi:
Beschreibung
von β -Zerfällen

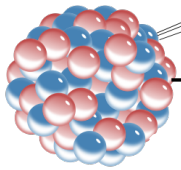
der Beta-Zerfall: Grundlagen

■ Kern-β-Zerfälle:



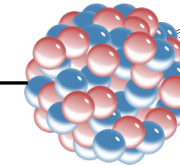
sehr **protonenreiche** Kerne

β^+ , EC*



sehr **neutronenreiche** Kerne

β^-

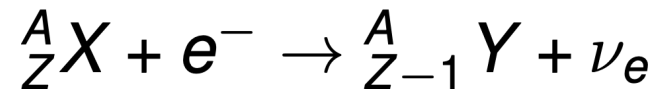


Protonen

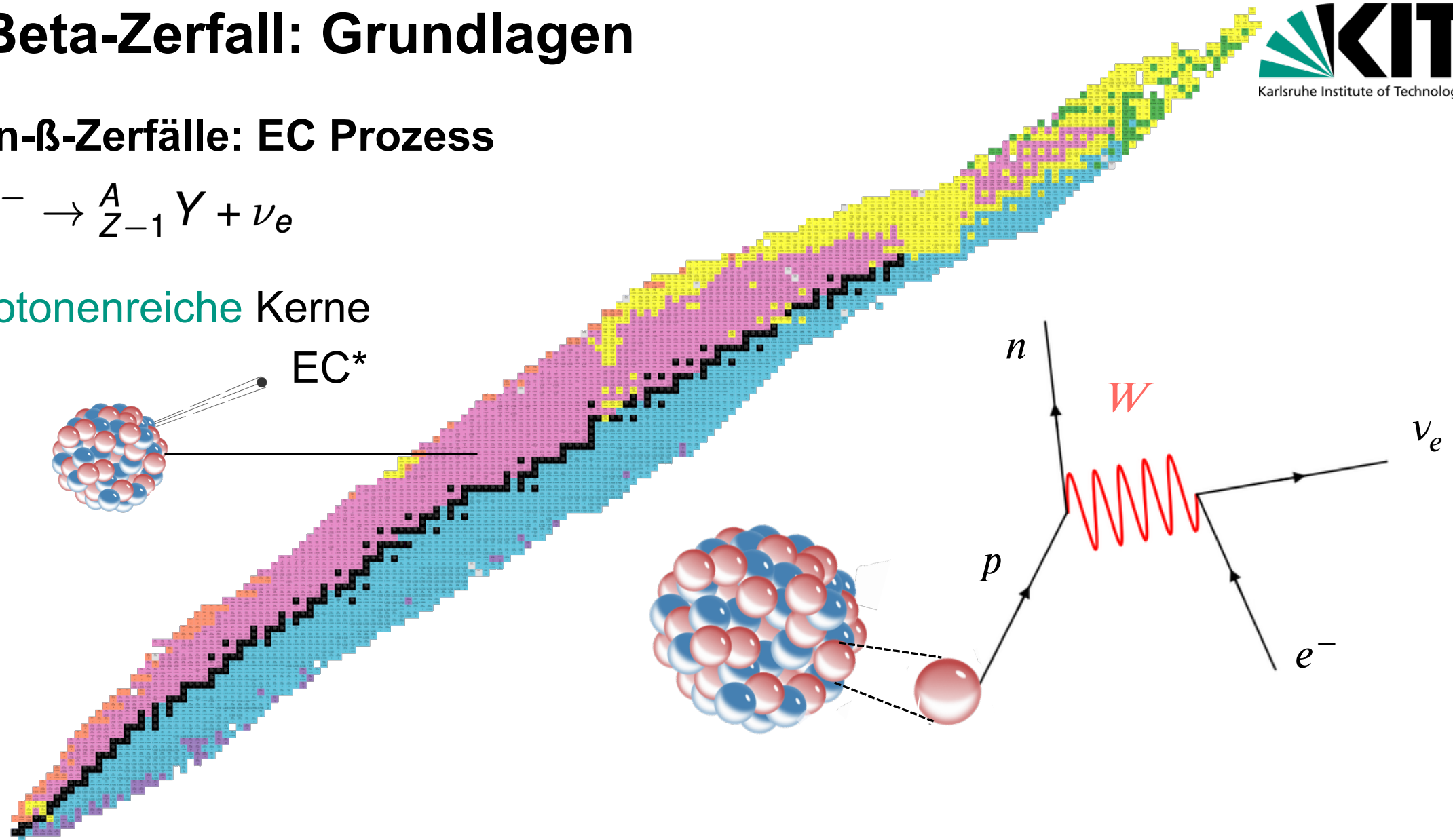
Neutronen

der Beta-Zerfall: Grundlagen

■ Kern- β -Zerfälle: EC Prozess

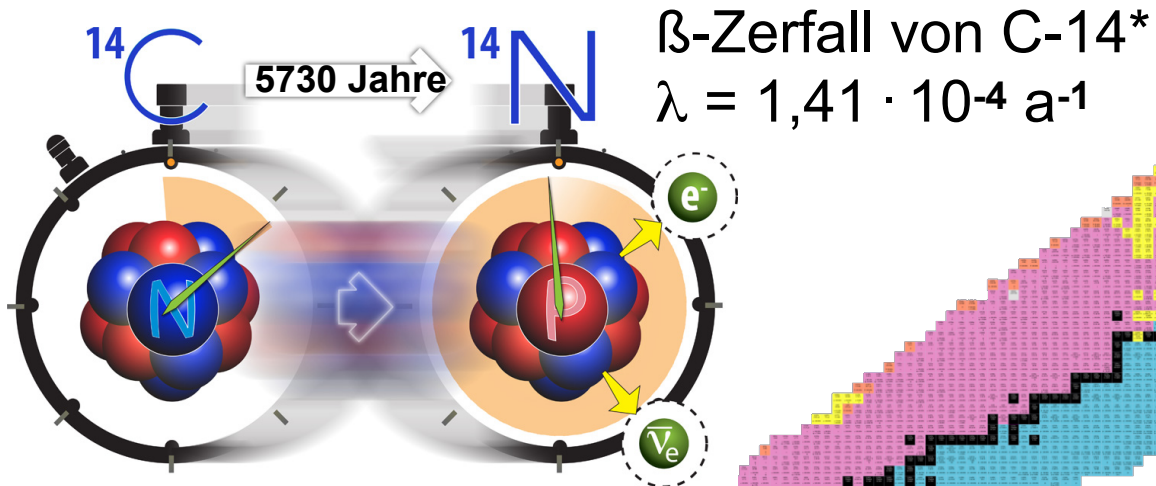


sehr **protonenreiche** Kerne



der Beta-Zerfall: Grundlagen

■ Kern-β-Zerfälle: lange Halbwertszeiten

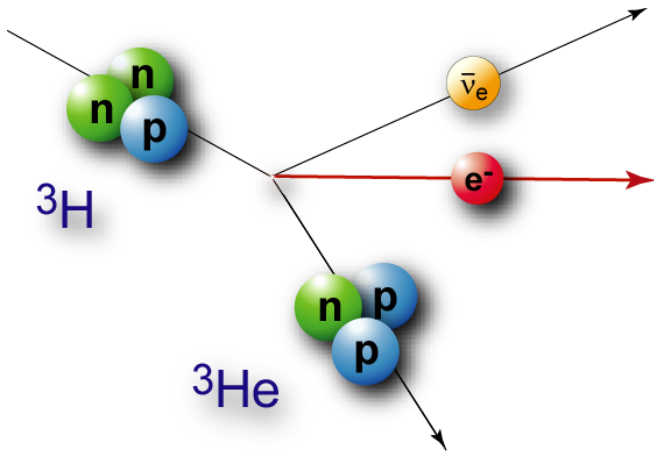


- **sehr kleine Übergangswahrscheinlichkeiten**
im Vergleich zu Prozessen der elektromagnetischen
bzw. der starken Wechselwirkung

der Beta-Zerfall: Grundlagen

■ Kern- β -Zerfälle: lange Halbwertszeiten

β -Zerfall von ^3H (Tritium)
 $t_{1/2} = 12,3 \text{ a}$



Isotop	$t_{1/2}$
^3H	12,23 Jahre
^{14}C	5730 Jahre
^{33}P	24,4 Tage
^{90}Sr	27,7 Jahre
^{99}Tc	$2,1 \cdot 10^5$ Jahre

schwache Wechselwirkung

$10^{-3} \text{ s} - 10^{16} \text{ Jahre}$

starke Prozesse

10^{-24} s

elektromagnetische Prozesse

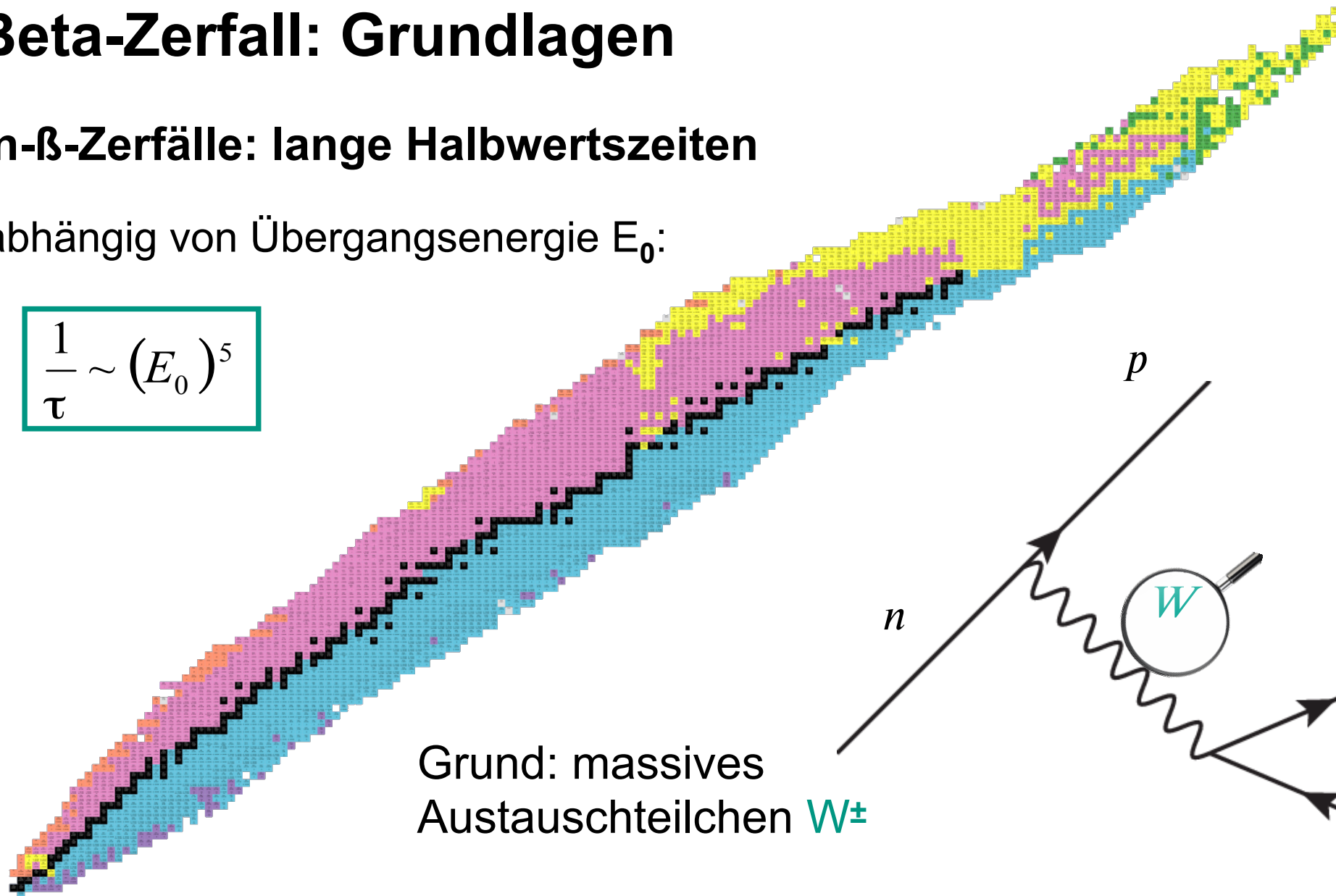
10^{-12} s

der Beta-Zerfall: Grundlagen

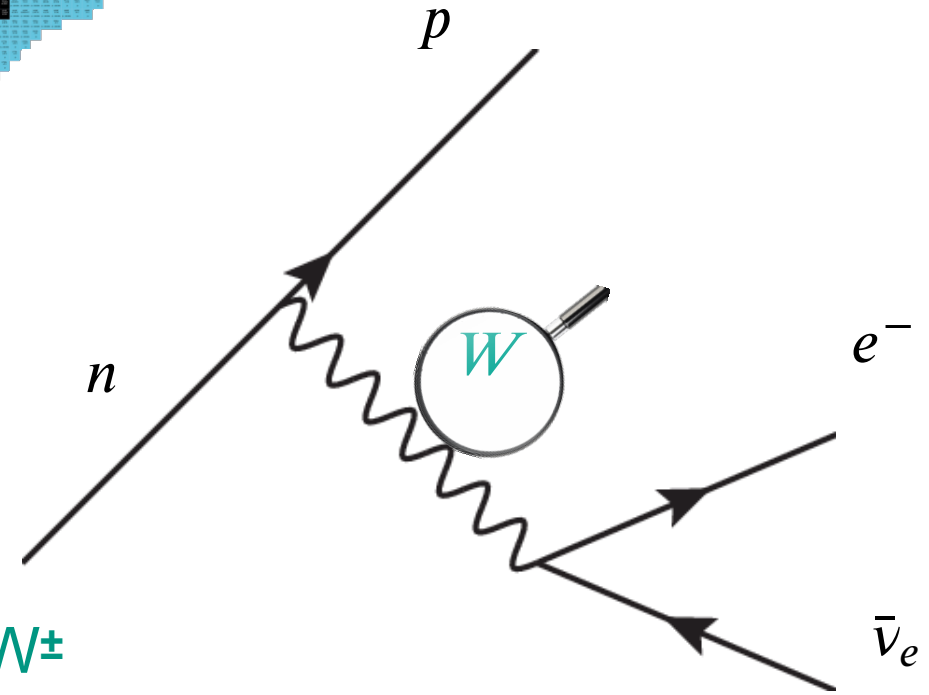
- Kern- β -Zerfälle: lange Halbwertszeiten

stark abhängig von Übergangsenergie E_0 :

$$\frac{1}{\tau} \sim (E_0)^5$$



Grund: massives
Austauschteilchen $W^\pm$



der Beta-Zerfall: Grundlagen

- Kern- β -Zerfälle: vermittelt über W-Bosonen

- W-Bosonen sind extrem schwer ($\sim$ mittelgroßer Kern), daher **extrem kleine Reichweite** und sehr kleine Übergangsraten

Grund: massives
Austauschteilchen $W^\pm$

4B Kräfte



W⁺

Spin = 1 (Boson)
$M_W = 80,385 \text{ GeV}$
$\tau = 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$
$Q = +1 \quad P = -1$
Kräfte: schwach elektromagnetisch

4B Kräfte

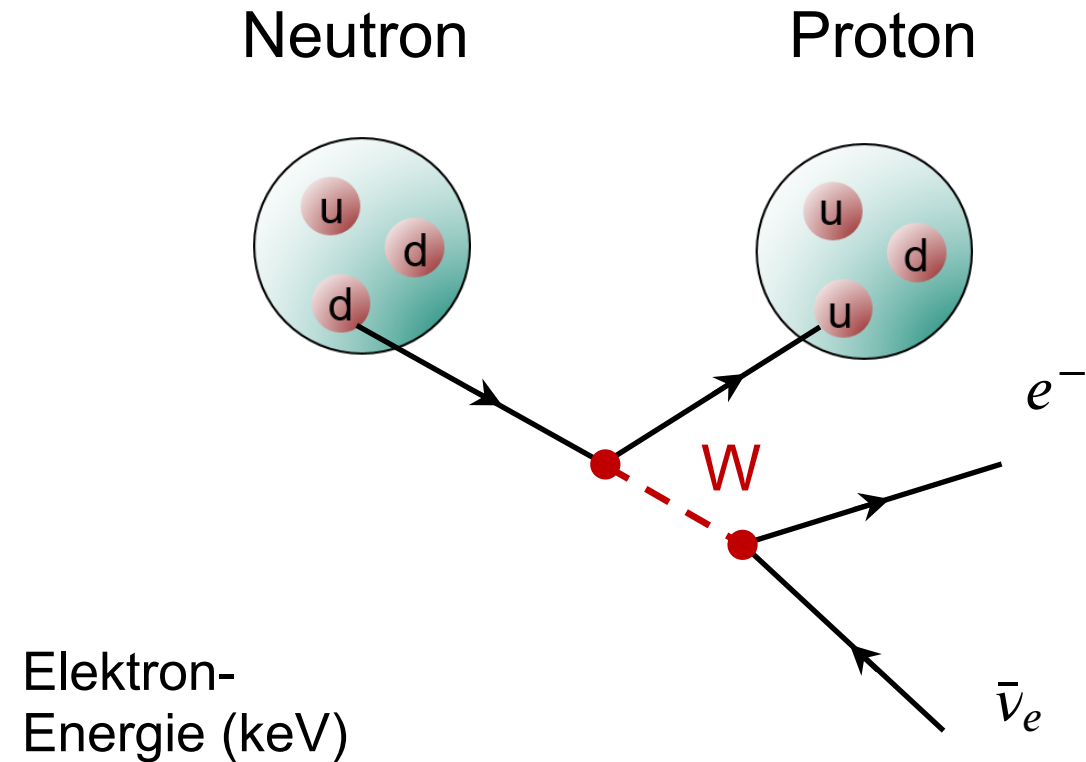
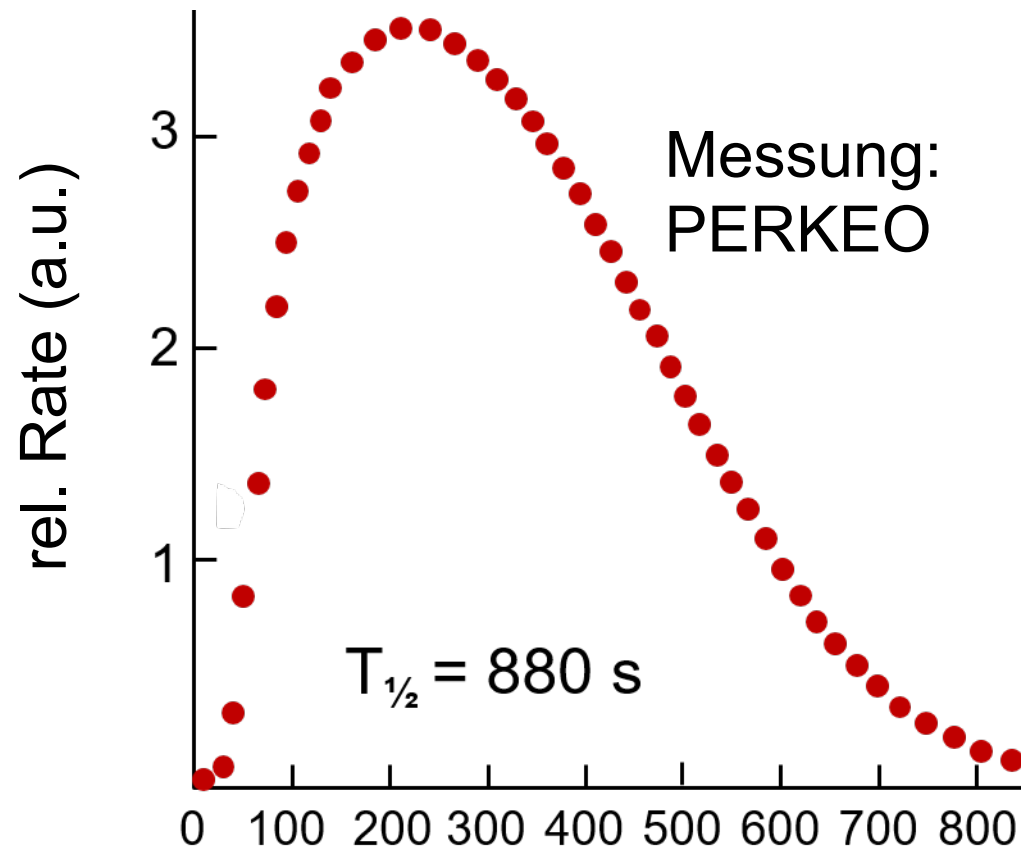


W⁻

Spin = 1 (Boson)
$M_W = 80,385 \text{ GeV}$
$\tau = 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$
$Q = -1 \quad P = -1$
Kräfte: schwach elektromagnetisch

der Beta-Zerfall des Neutrons

- Neutron- β -Zerfall: Aufteilung der Energie auf Elektron & (Anti-)Neutrino
 - kontinuierliches Spektrum der Elektronen: **Neutrino Hypothese von Pauli**



der Beta-Zerfall des Neutrons

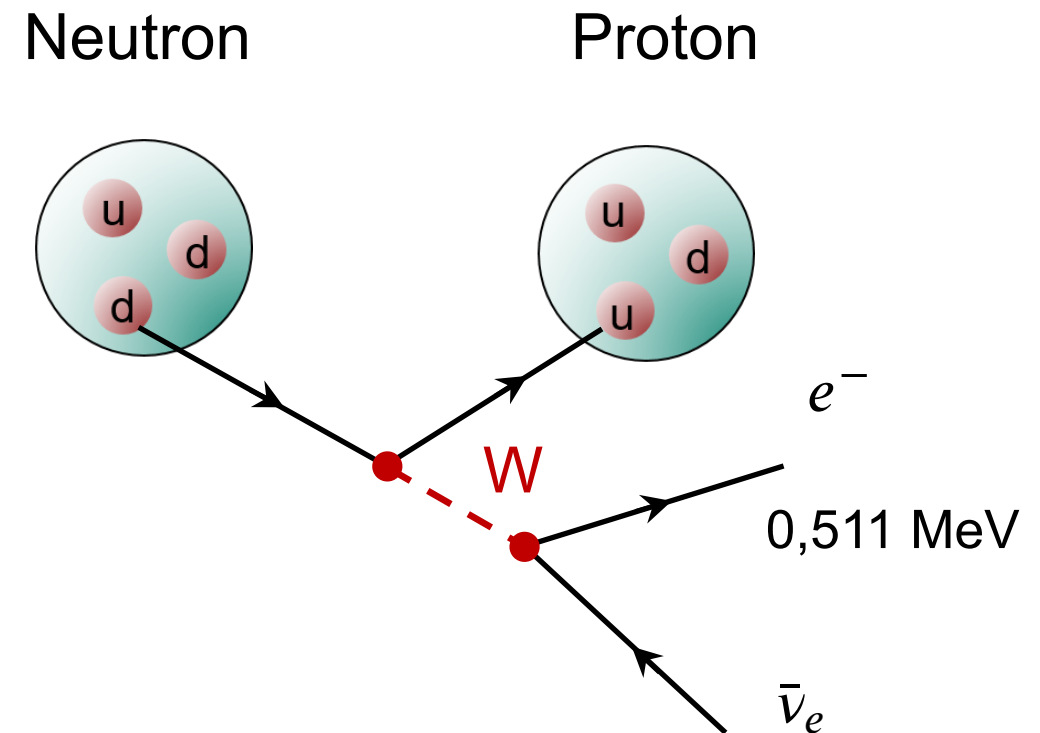
- Neutron- β -Zerfall: Aufteilung der Energie auf Elektron & (Anti-)Neutrino
 - kontinuierliches Spektrum der Elektronen: **Q-Wert & max. e- Energie E_0**

Masse Neutron:
939,566 MeV

Masse Proton:
938,272 MeV

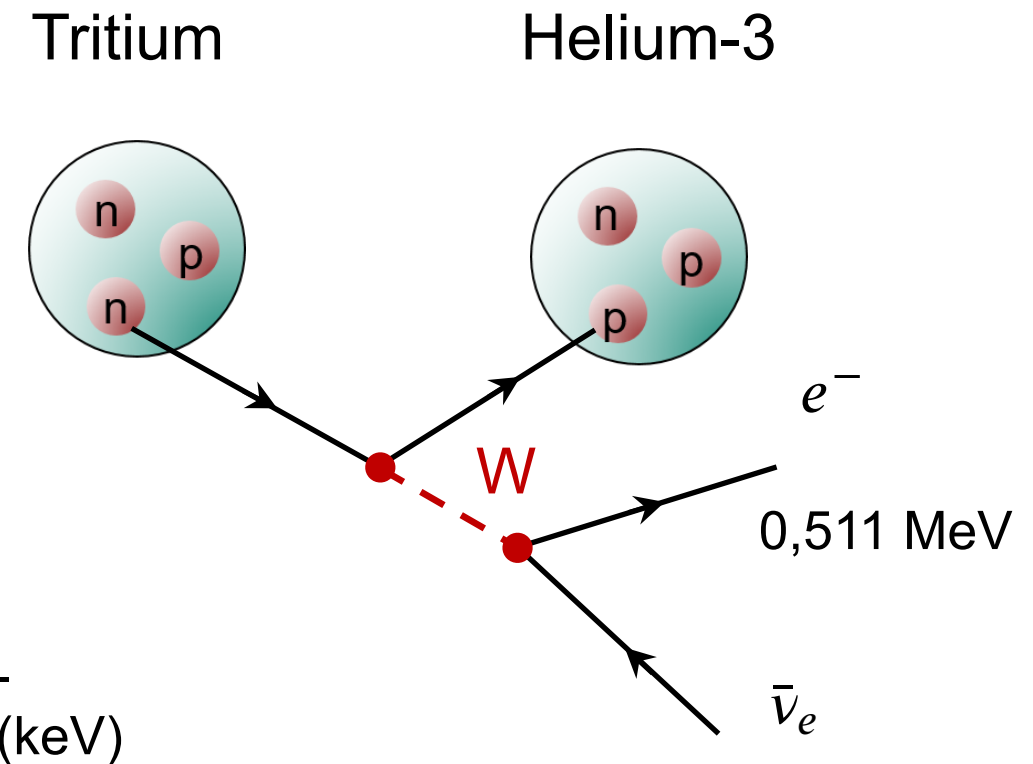
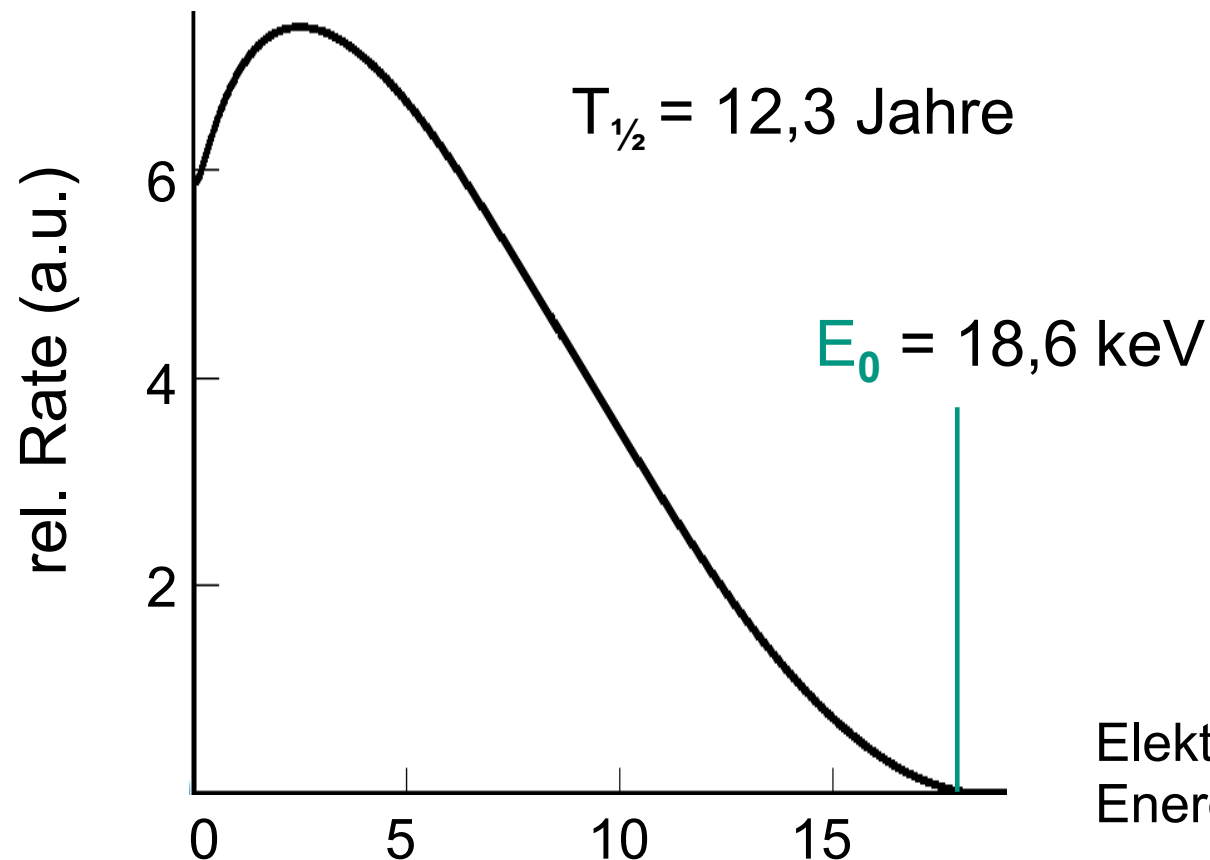
Q-Wert = 1,294 MeV

$$\begin{aligned} E_0 &= 1,294 \text{ MeV} - 0,511 \text{ MeV} \\ &= 0,783 \text{ MeV} \end{aligned}$$



der Beta-Zerfall von Tritium (^3H)

- Kern- β -Zerfall: Aufteilung der Energie auf Elektron & (Anti-)Neutrino
 - kontinuierliches Spektrum der Elektronen: **Fermi-Theorie**



der Beta-Zerfall: Historie

■ grundlegende Erkenntnisse durch Kern- β -Zerfälle

1914: J. Chadwick - beim Kern- β -Zerfall $\Rightarrow$ **kontinuierliches Energiespektrum**

1930: W. Pauli postuliert die Existenz des **Neutrinos**

1934: E. Fermi: effektive Theorie für den β -Zerfall (**goldene Regel**)

1956: F. Reines & C. Cowan entdecken das Neutrino (**inverser β -Zerfall**)

1958: Lee & Yang postulieren **Verletzung der Parität** im β -Zerfall

1959: C.S. Wu demonstriert **maximale Paritätsverletzung**

der Beta-Zerfall: 'ein verzweifelter Ausweg'

- 1930: Wolfgang Pauli postuliert ein leichtes, neutrales, Spin = $\frac{1}{2}$ (Fermion)
Partnerteilchen des Elektrons

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

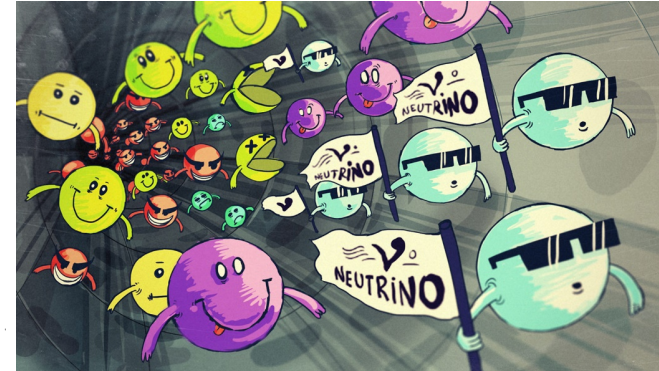
Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst
anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen **verzweifelten Ausweg**
verfallen um den "Wechselatz" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls **nicht grösser als 0,01 Protonenmasse**. Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

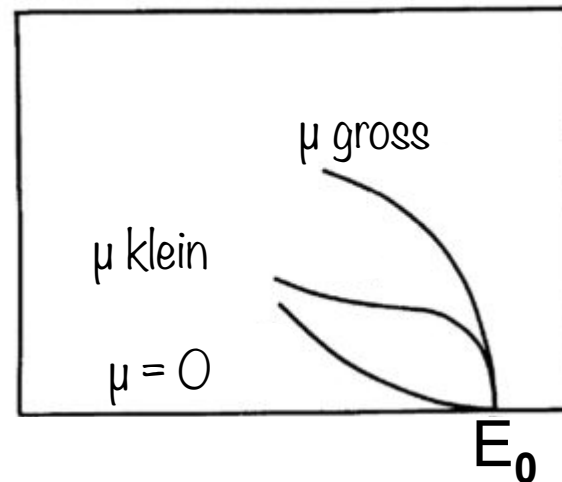


Wolfgang Pauli

der Beta-Zerfall: Fermi's Theorie des β -Zerfalls

- Enrico Fermi gibt dem neuen Teilchen seinen Namen: 'Neutrino'

- Erhaltung von Energie & Drehimpuls beim Kern- β -Zerfall
- sehr kleine Ruhemasse μ erwartet*



Neutrino =
das kleine Neutrale



Enrico Fermi Wolfgang Pauli

- sehr kleiner Wirkungsquerschnitt erwartet

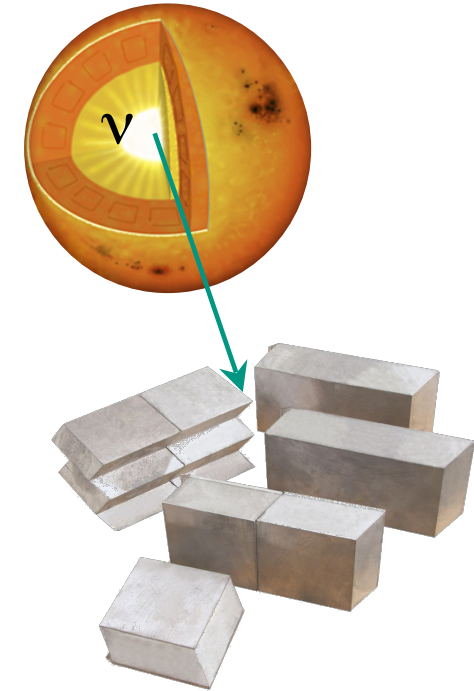
Neutrino-Wirkungsquerschnitte, nachgefragt

■ Wie massiv muss eine Abschirmung gegen Sonnenneutrinos sein?

A) eine **einige km** dicke Bleiabschirmung reicht aus!
(Größe Karlsruhe)

B) eine **150 Mio. km** dicke Bleiabschirmung reicht aus!
(Abstand Sonne-Erde)

c) eine **einige Lichtjahre** dicke Bleiabschirmung reicht aus!
(Abstand zu Sonnen-nahen Sternen)



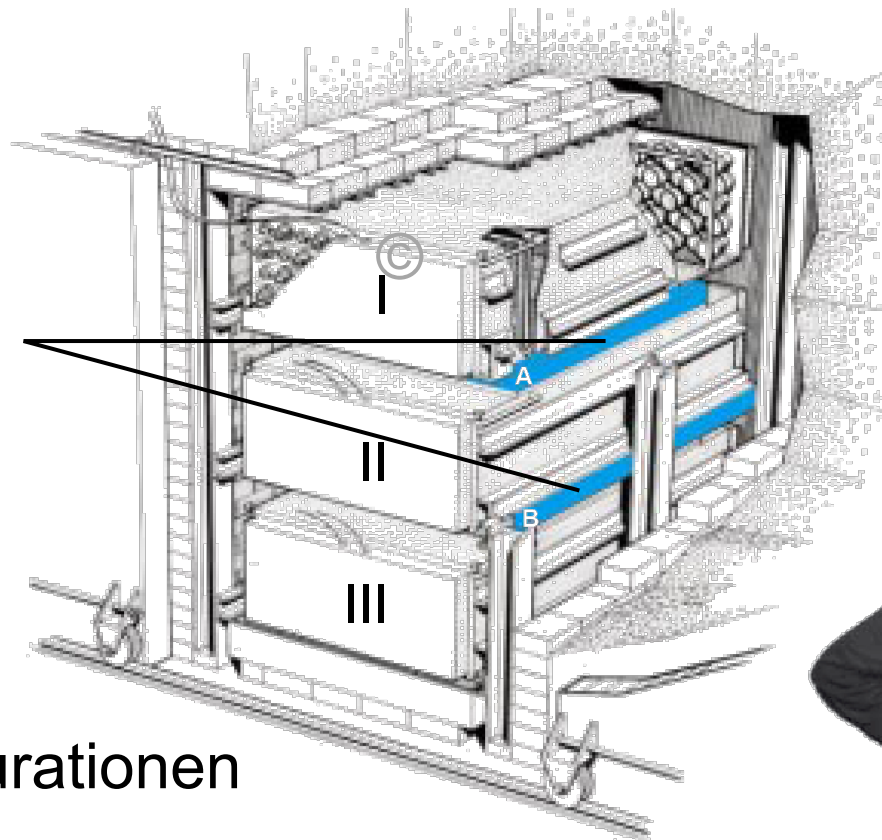
Beta-Zerfall: erster Nachweis des Neutrinos

- **Projekt Poltergeist (Homestake): Fred Reines & Clyde Cowan**
 - Experiment am Savannah River bringt (endlich) den Durchbruch

I,II,III: 4200 l
Szintillator

A, B: 200 l
 H_2O -Target
+ CdCl_2

- Serie von Messungen von 1953-1956 mit verschiedenen Konfigurationen



Beta-Zerfall: erster Nachweis des Neutrinos

■ Projekt Poltergeist (Homestake): Fred Reines & Clyde Cowan

- Experiment am Savannah River bringt den (ersehnten) Durchbruch



*“Proved the
Existence
of the Neutrino”*



...nach 39 Jahren...

