

Kern- und Teilchenphysik

Johannes Blümer

SS2012

Vorlesung-Website

v9 22.5.12

KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik KCETA



■ Radioaktivität

- Zerfallsgesetz
- Partialbreite, totale Breite, Breit-Wigner-Verteilung
- Poissonstatistik
- Alpha-Zerfall
- Beta-Zerfall
- Gamma-Strahlung



Zerfallsgesetz

$$dN = -\lambda N dt$$

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

λ Zerfallskonstante

$\tau = 1/\lambda$ mittl. Lebensdauer

$t_{1/2} = \tau \ln 2$ Halbwertszeit

λ_i sind für gemischte Substanzen additiv

Aktivität auch $I(t) = I_0 e^{-\lambda t}$ $[I] = 1 \text{ Becquerel} = 1 \text{ Zerfall/s}$

Partialbreite, totale Breite, Breit-Wigner-Verteilung

Zerfallswahrscheinlichkeit $f(t) = a(t)^2$ Z.-Amplitude

$a(t) \rightarrow A(\omega)$ durch Fouriertransformation

$$A(\omega) = \sqrt{\lambda} \int_0^{\infty} e^{-\lambda t/2} e^{i\omega t} dt = \frac{\sqrt{\lambda}}{\frac{\lambda}{2} - i\omega}$$

$$I(\omega) = |A(\omega)|^2 = \frac{\lambda}{\omega^2 + \lambda^2/4}$$

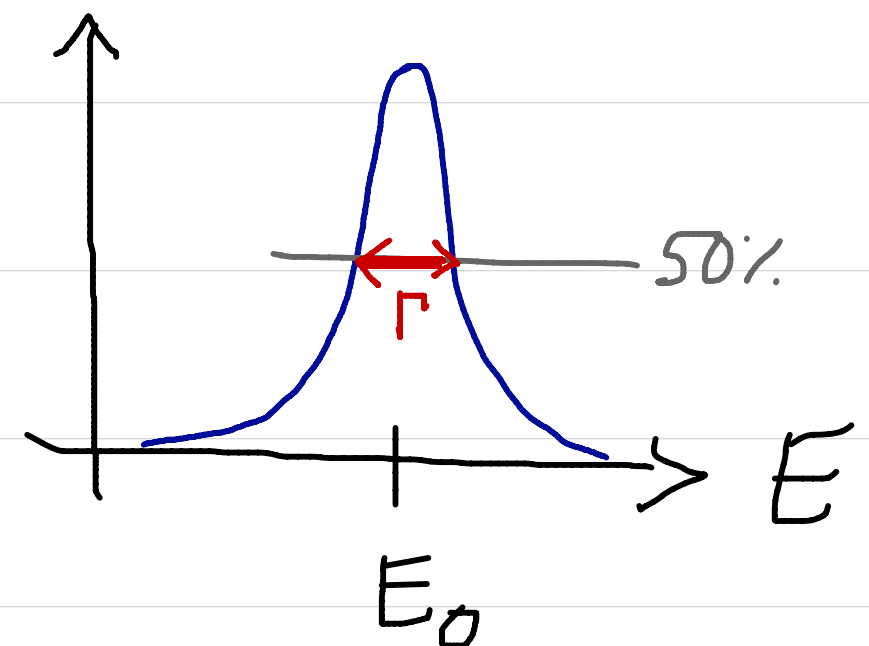
$\omega \rightarrow E - E_0$ aktuelle ...
mittlere En. des Zust.

$$I(E) = \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{1}{(E - E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}} \quad \text{mit} \quad \int_0^{\infty} I(E) dE = 1$$

Breit-Wigner-Verteilung $\Gamma \equiv \lambda$

beschreibt radioakt. Zerfall durch einen unscharfen

Zustand mit Breite $\Delta E = \Gamma$



$\lambda = \underline{\text{totale Energiebreite } \Gamma \text{ des zerfallenden Zustands}}$

gemischte Substanzen / Zustände mit mehreren Zerfallskanälen:

Γ_i sind additiv wie die λ_i : $\Gamma_{\text{tot}} = \sum \Gamma_i$
„Partialbreiten“

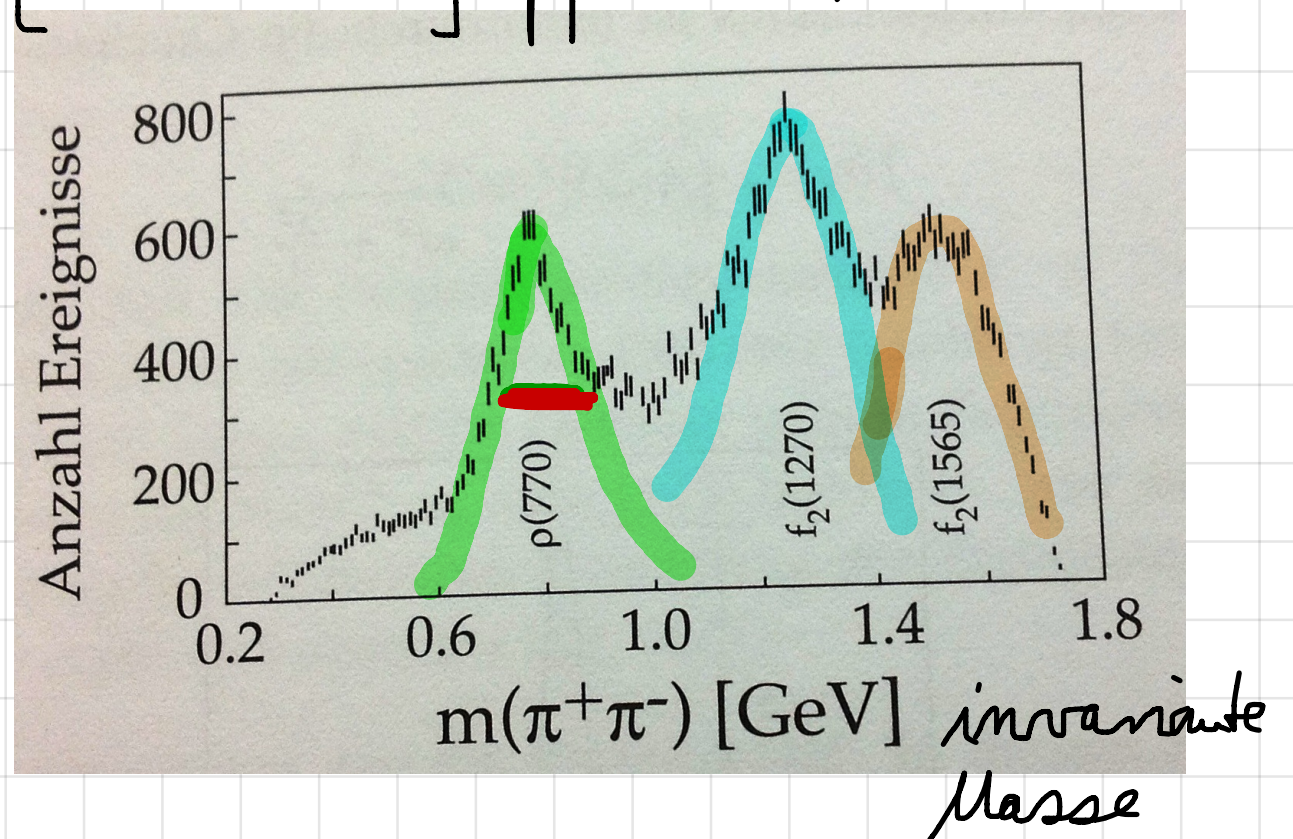
Beispiel $n \rightarrow p e \bar{\nu}_e$

$$\tau \approx 886 \text{ s}$$

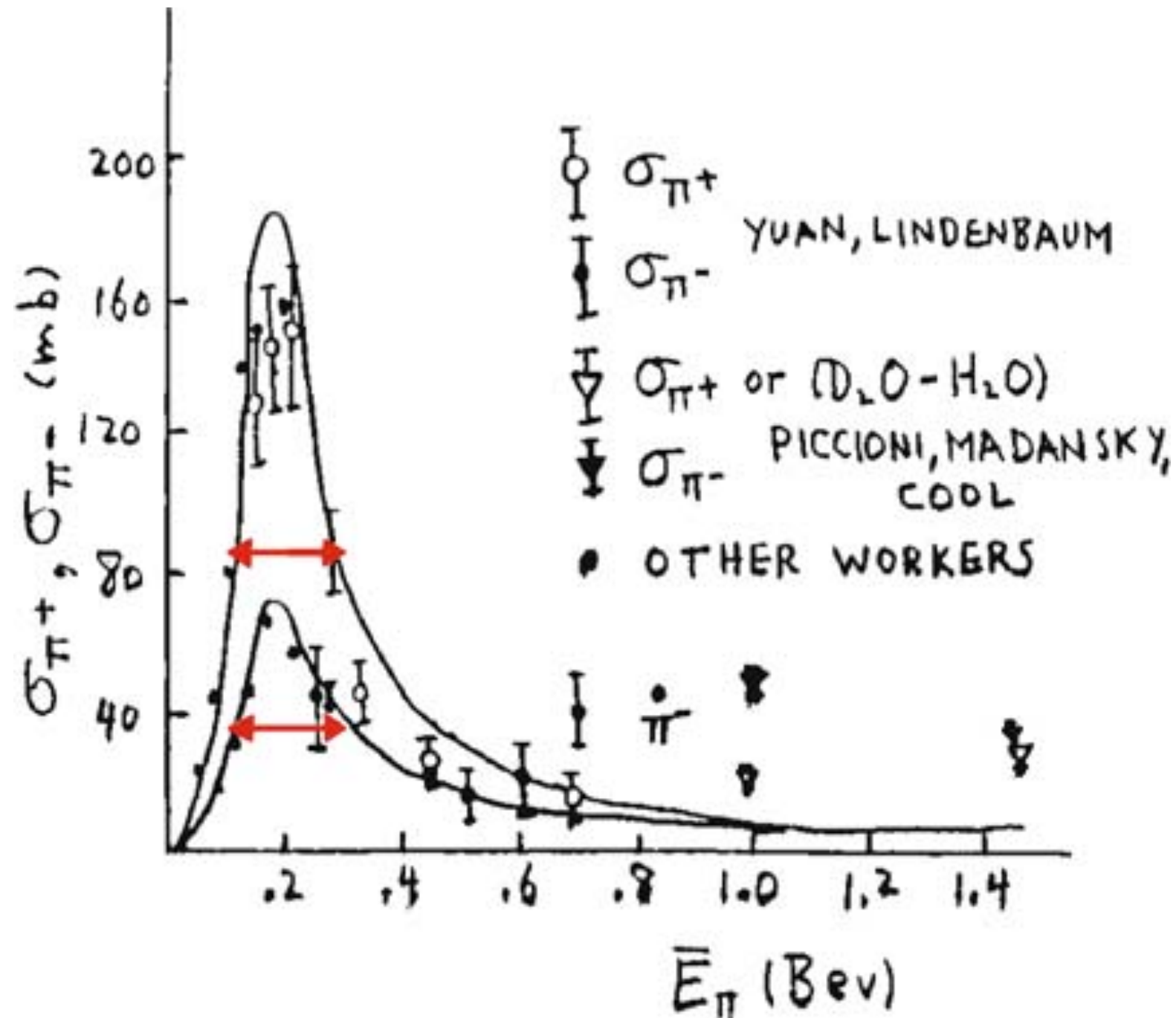
↳

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{1}{\tau} = 1.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \\ &= 3.7 \times 10^{-27} \text{ fm} \\ &= 7.3 \times 10^{-25} \text{ MeV} \end{aligned}$$

[Amster Abb 26] $p\bar{p} \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$

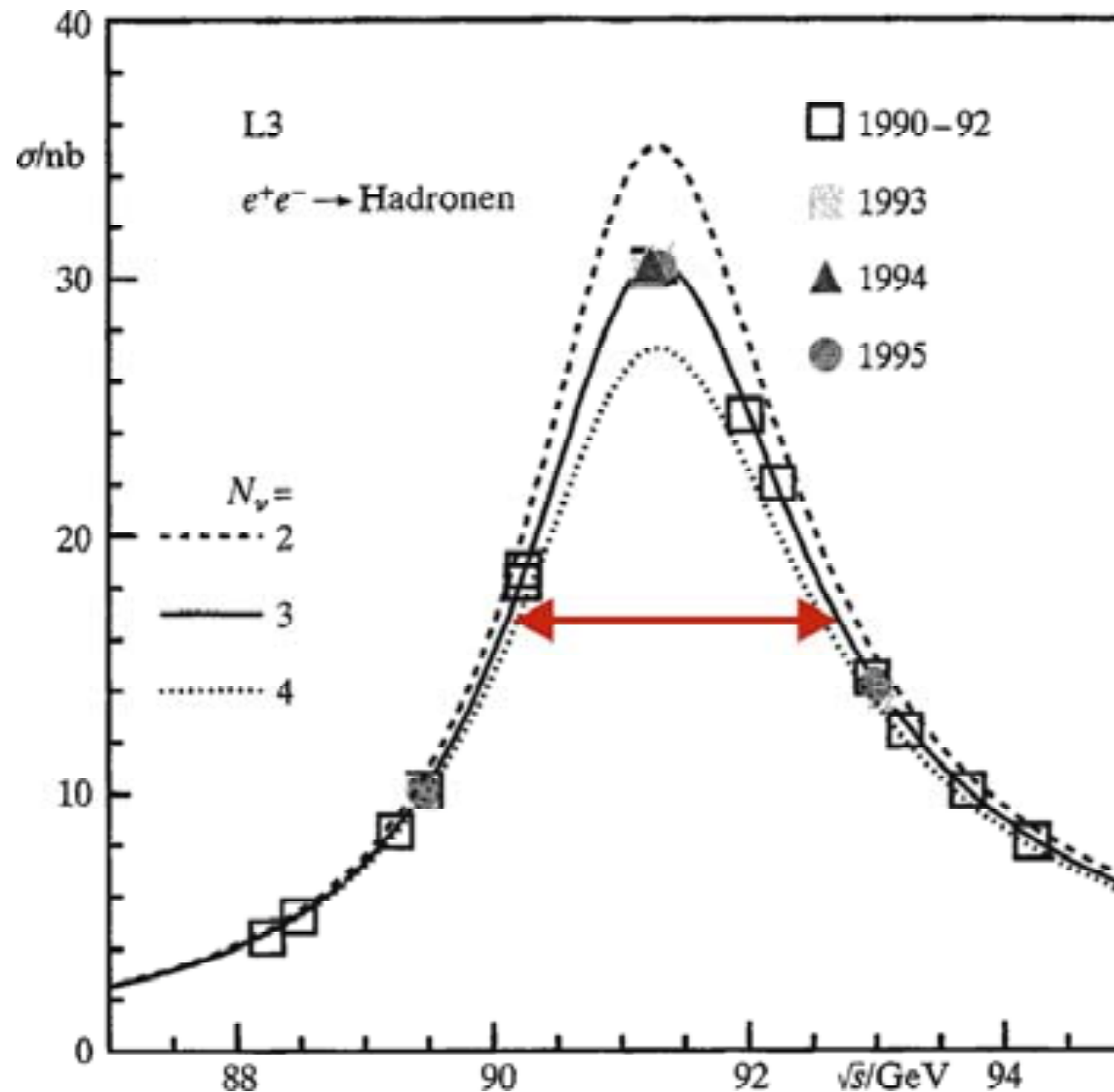


$$\Gamma_\rho \approx 150 \text{ MeV} \hat{=} \tau \approx 4 \cdot 10^{-24} \text{ s}$$



[B-N]

Abb. 6.4 Die erste Beobachtung der natürlichen Linienbreite bei Bildung und Zerfall eines neuen Elementarteilchens: die Δ -Resonanz des Nukleons, hier gebildet bei Streuung von Pionen an Protonen (Handskizze für einen Konferenzvortrag 1954). Die **Halbwertsbreite** bei π^- und π^+ (*rote Pfeile* nicht im Original) ist übereinstimmend **200 MeV**, die Lebensdauer des Resonanz-Teilchens entsprechend **$\tau = 3 \cdot 10^{-24}$ s.** (Abbildung nach [48])



[B-N]

Abb. 6.5 Natürliche Linienbreite bei Bildung und Zerfall des Z^0 , mit 91 GeV Ruhemasse eins der schwersten bisher gefundenen Elementarteilchen. (Abbildung nach [24]).

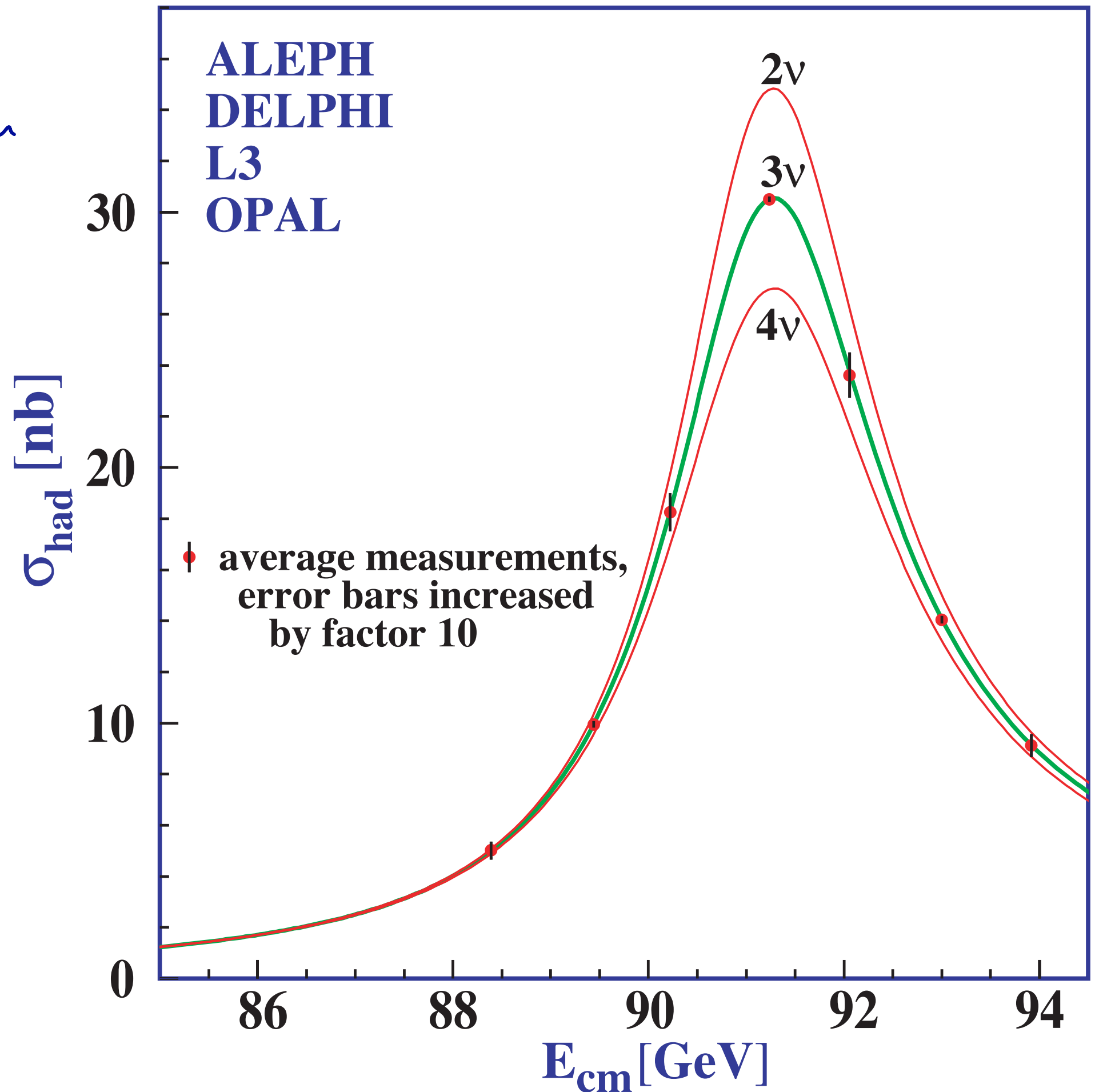
Die Halbwertsbreite (*roter Pfeil*) dieser Resonanzkurve ist 2,2 GeV, die Lebensdauer entsprechend $\tau = 3 \cdot 10^{-25}$ s.

(Die *mittlere* der drei eingezeichneten Kurven ist die Vorhersage des Standard-Modells der Elementarteilchen für genau $N_\nu = 3$ verschiedene Familien von Leptonen – siehe Kap. 10, 12 und Abschn. 14.2)

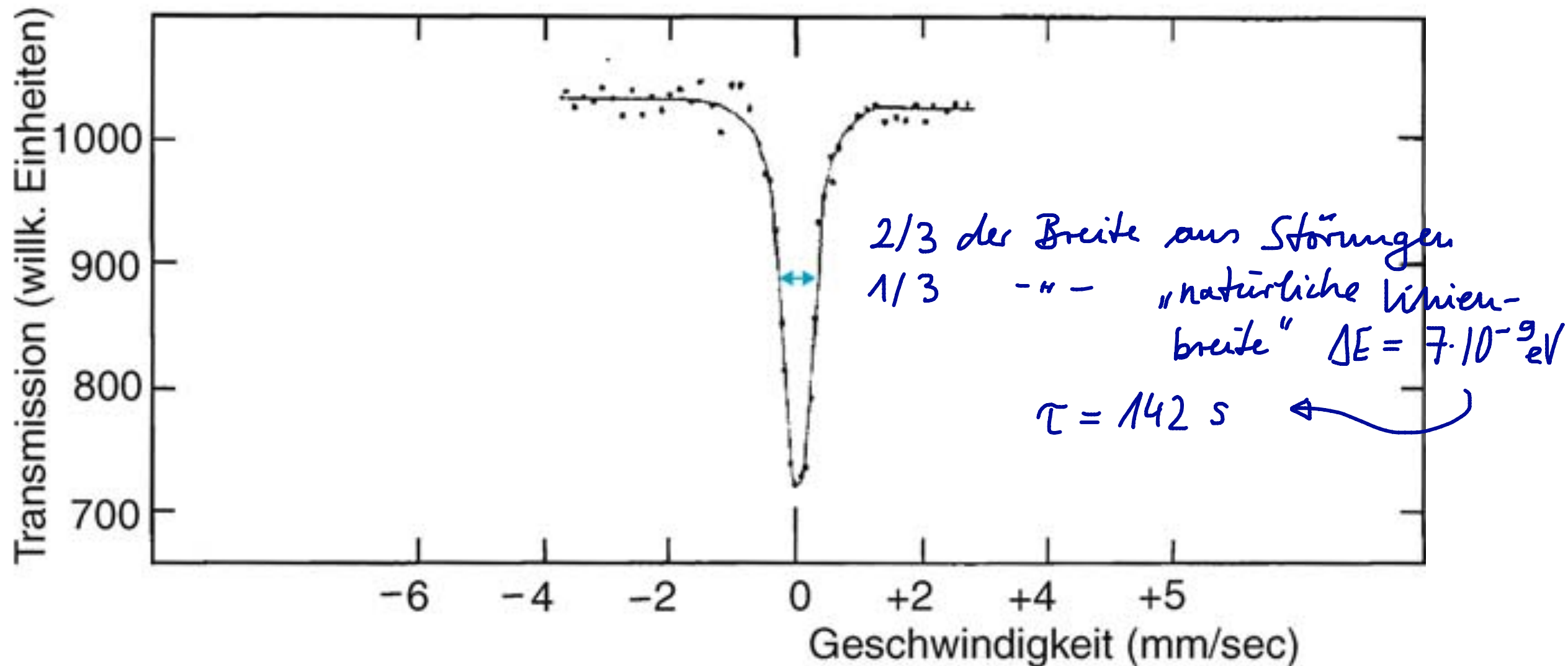
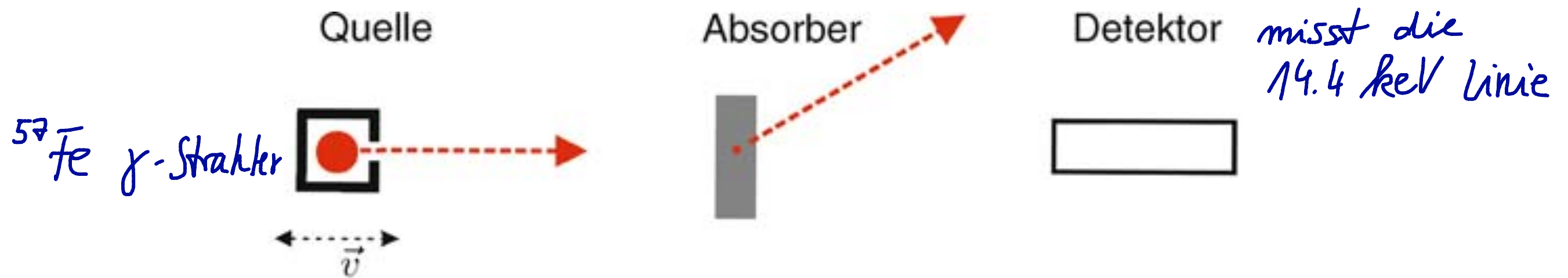
aktuelle Version
 $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{Hadronen}$

[rpp2010]

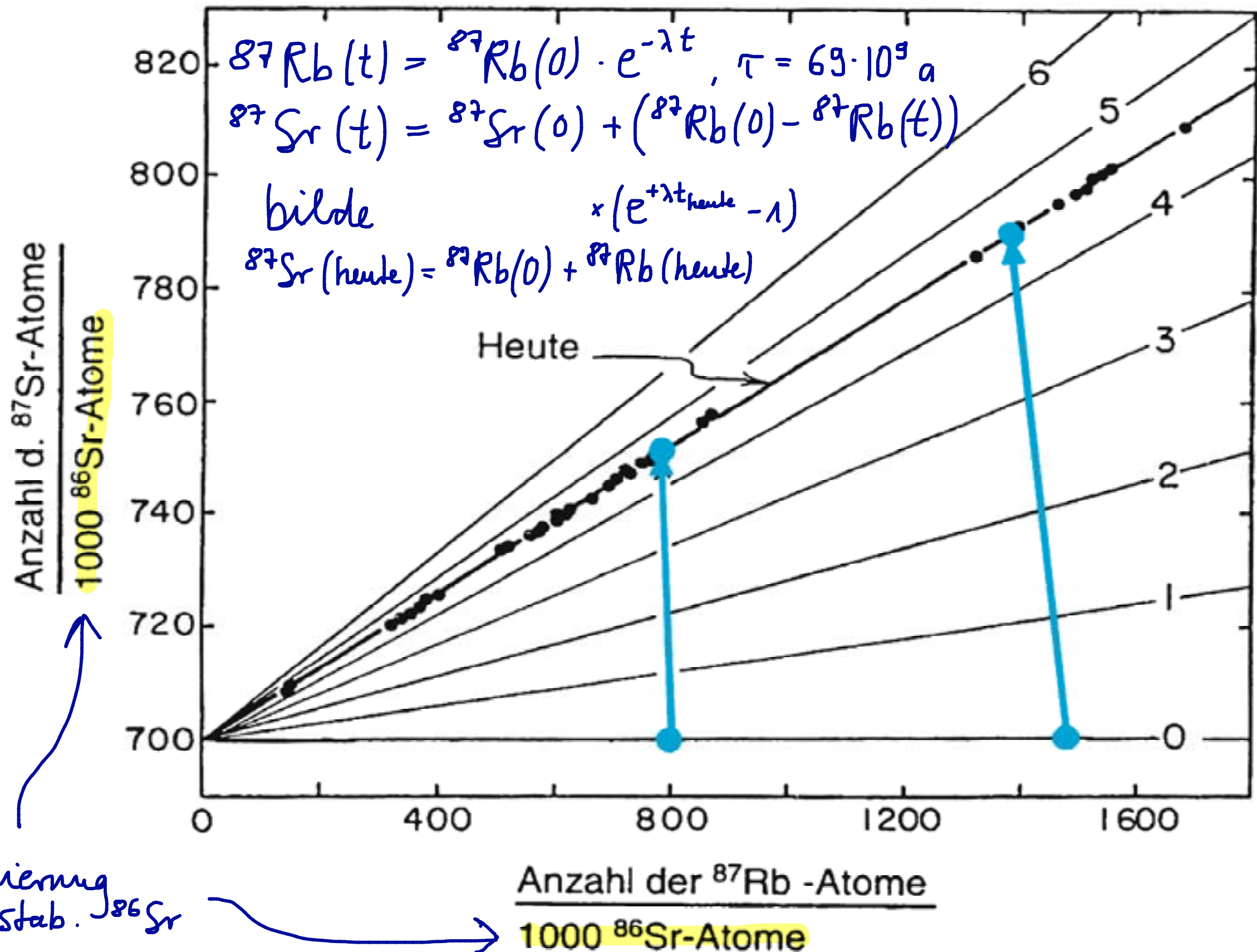
Figure 41.8: Combined data from the ALEPH, DELPHI, L3, and OPAL Collaborations for the cross section in e^+e^- annihilation into hadronic final states as a function of the center-of-mass energy near the Z pole. The curves show the predictions of the Standard Model with two, three, and four species of light neutrinos. The asymmetry of the curve is produced by initial-state radiation. Note that the error bars have been increased by a factor ten for display purposes.



Mössbauereffekt [B-N]

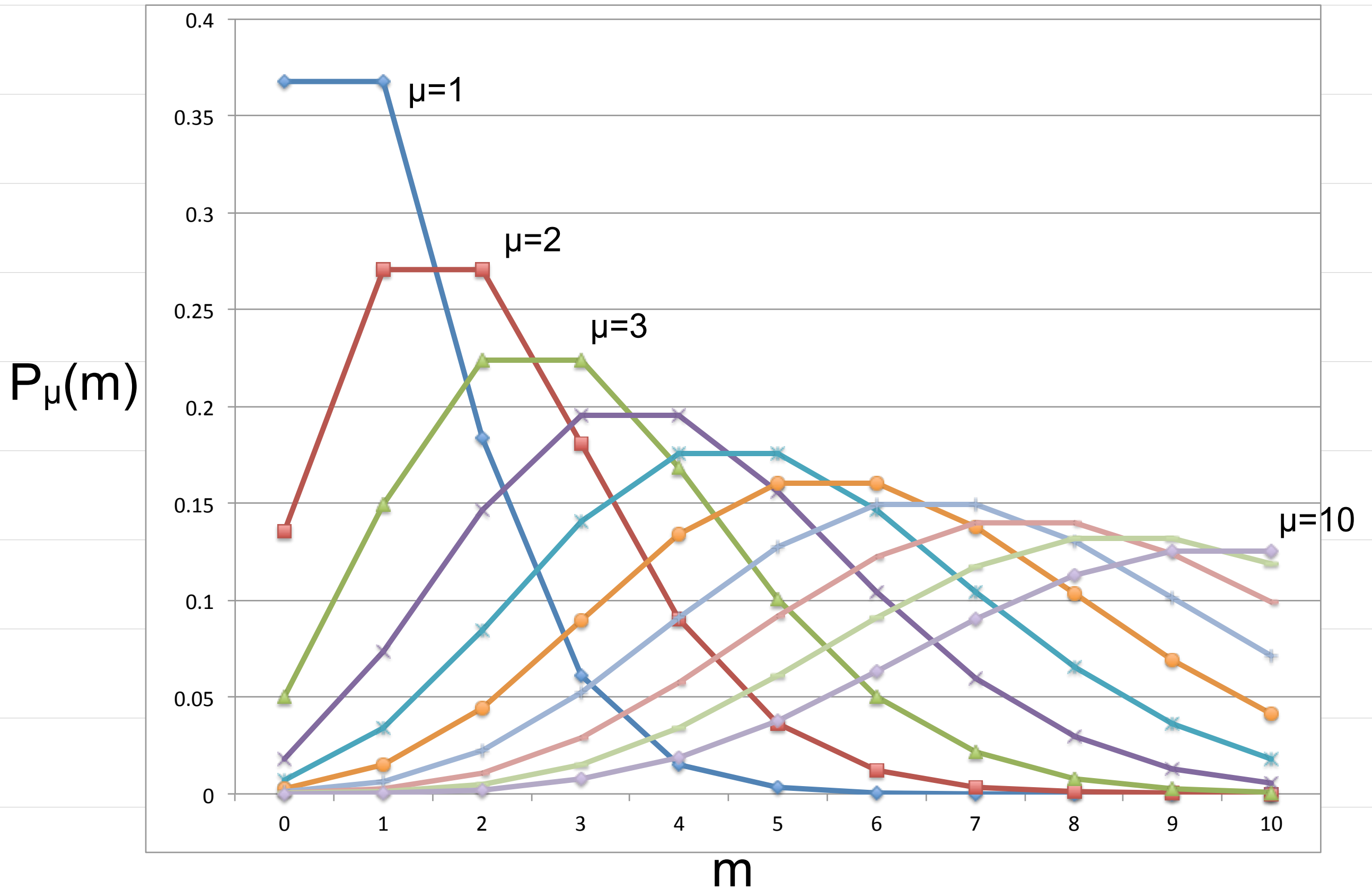


Alter von Meteoriten [B-N]

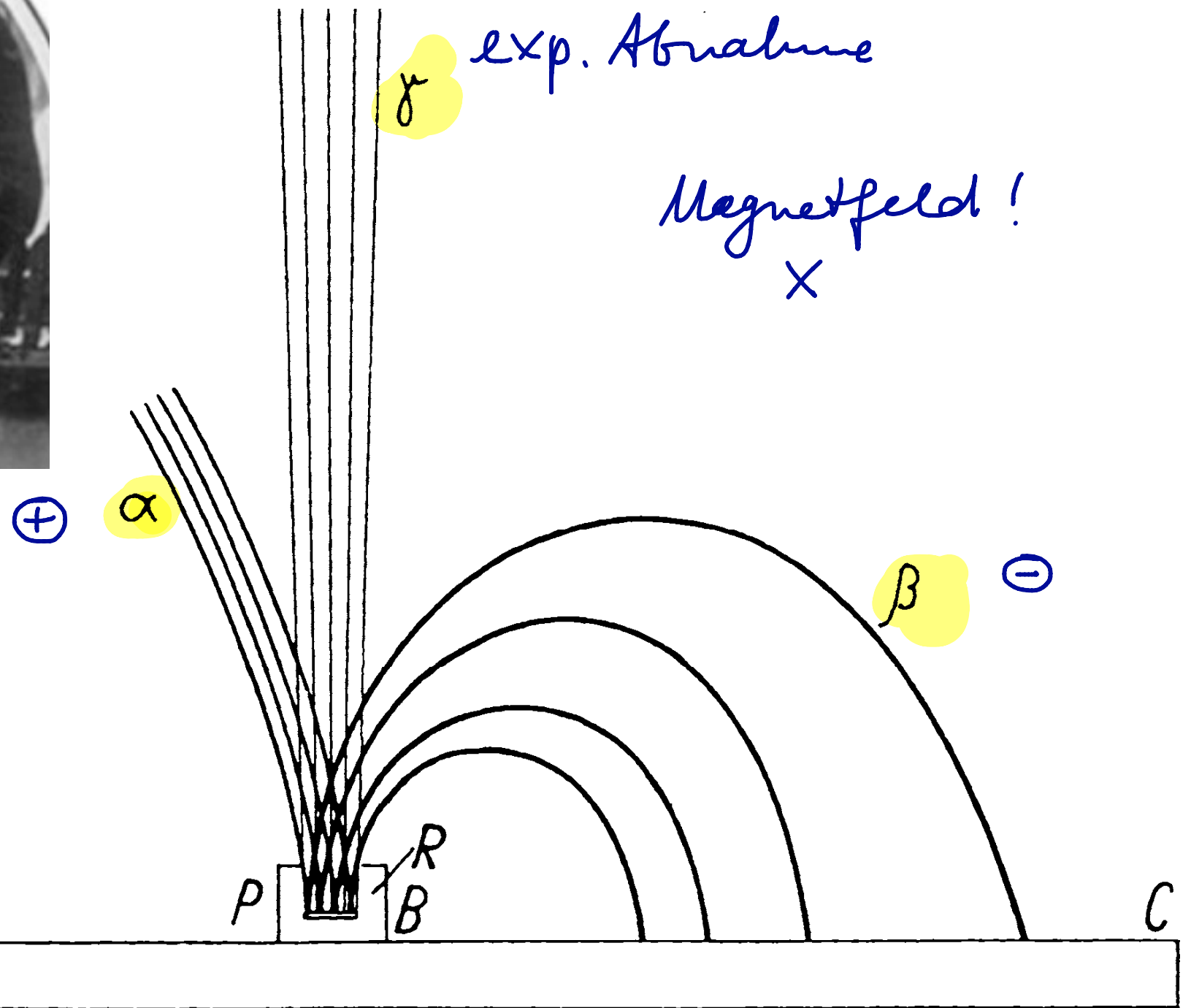


Poissonstatistik

$$P_{\mu}(m) = \frac{\mu^m}{m!} e^{-\mu}$$

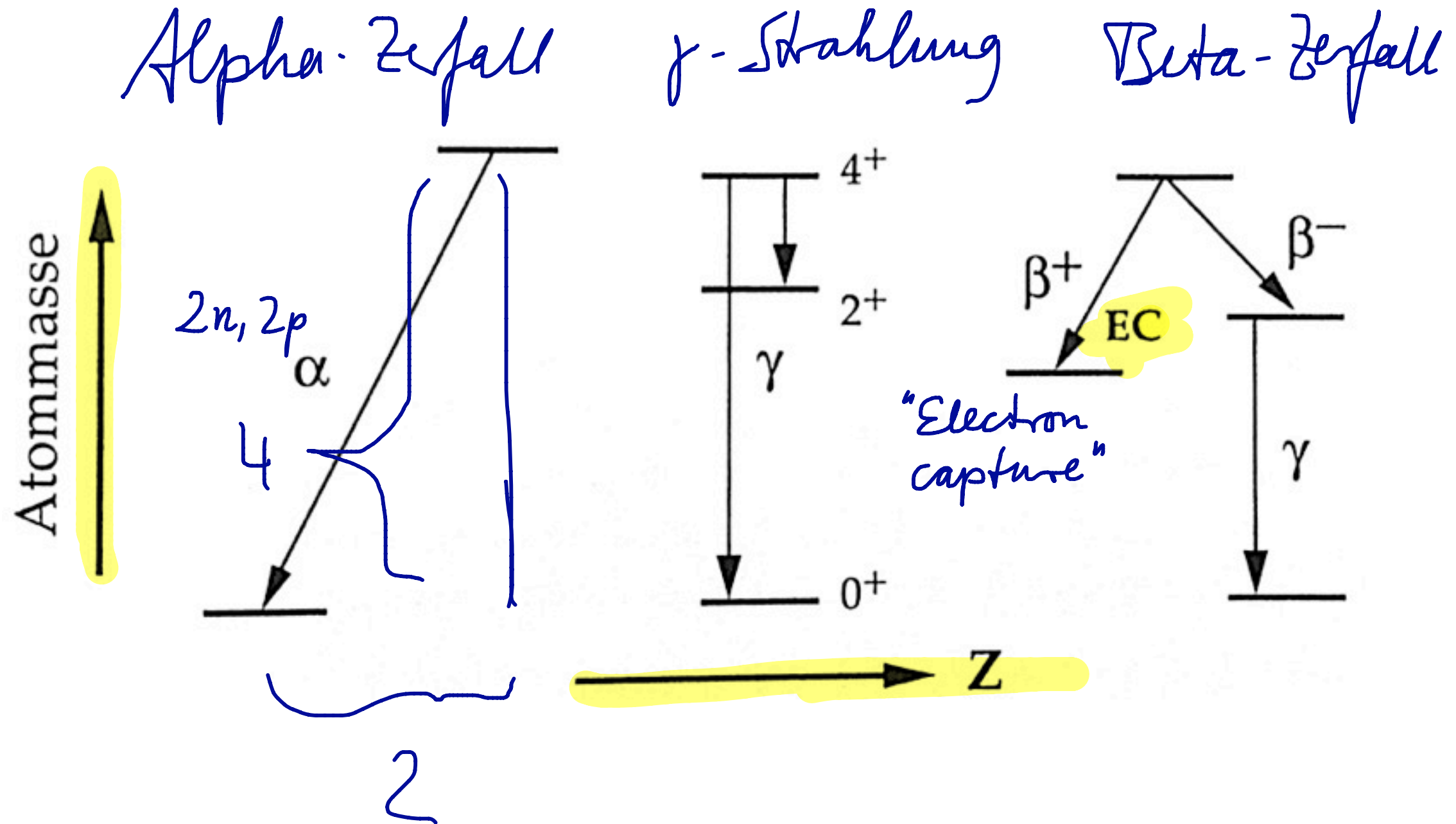


3 Typen von Strahlung



[B-N]

3 Typen von Strahlung [Amsler]



Gamma-Strahlung

Emission von Photonen aus einem angeregten Kern-Zustand
 Monoenergetisch, $E_\gamma = \text{keV} \dots \text{MeV}$ *vgl. Atomhülle! eV... keV*

Verfügbare Energie „Q-Wert“ = $\Delta \text{Atommassen}$ [$\downarrow$ Rückstoß]

Drehimpulsbetrachtungen! $\vec{J}_i = \vec{J}_f + \vec{l}$, $\vec{l} = \vec{L} + \vec{s}$
 $\left\{ \begin{array}{l} \text{Photon spin 1} \\ \text{vom } \gamma \text{ weggetragen. Dreh.} \end{array} \right.$

z Photomrichtung; proj. $\vec{l}$ auf z $\rightarrow m = \pm 1 \Rightarrow l \geq 1$, $|J_i - J_f| \leq l \leq J_i + J_f$
 Bahn-WF der Kerne sind gerade/ungerade unter Spiegelung (Parität ± 1)

L	s	l	ΔP	Name
0	1	1	y	E1
1	1	1, 2	n	M1, E2
2	1	1, 2, 3	y	E1, M2, E3
3	1	1, 2, 3, 4	n	E2, M3, E4

*keine γ -Übergänge
für 0-0 Kerne*

Beim „innere Konversion“ $E_\gamma \rightarrow e$ aus Hülle $\leftarrow$ $\leftarrow$ $\leftarrow$
 Rö-Strahlung „Auger-Elektronen“
 e-Emission aus äußeren Schalen

Gamma-Spektroskopie

Beispiel $^{137}_{56}\text{Ba}^*$

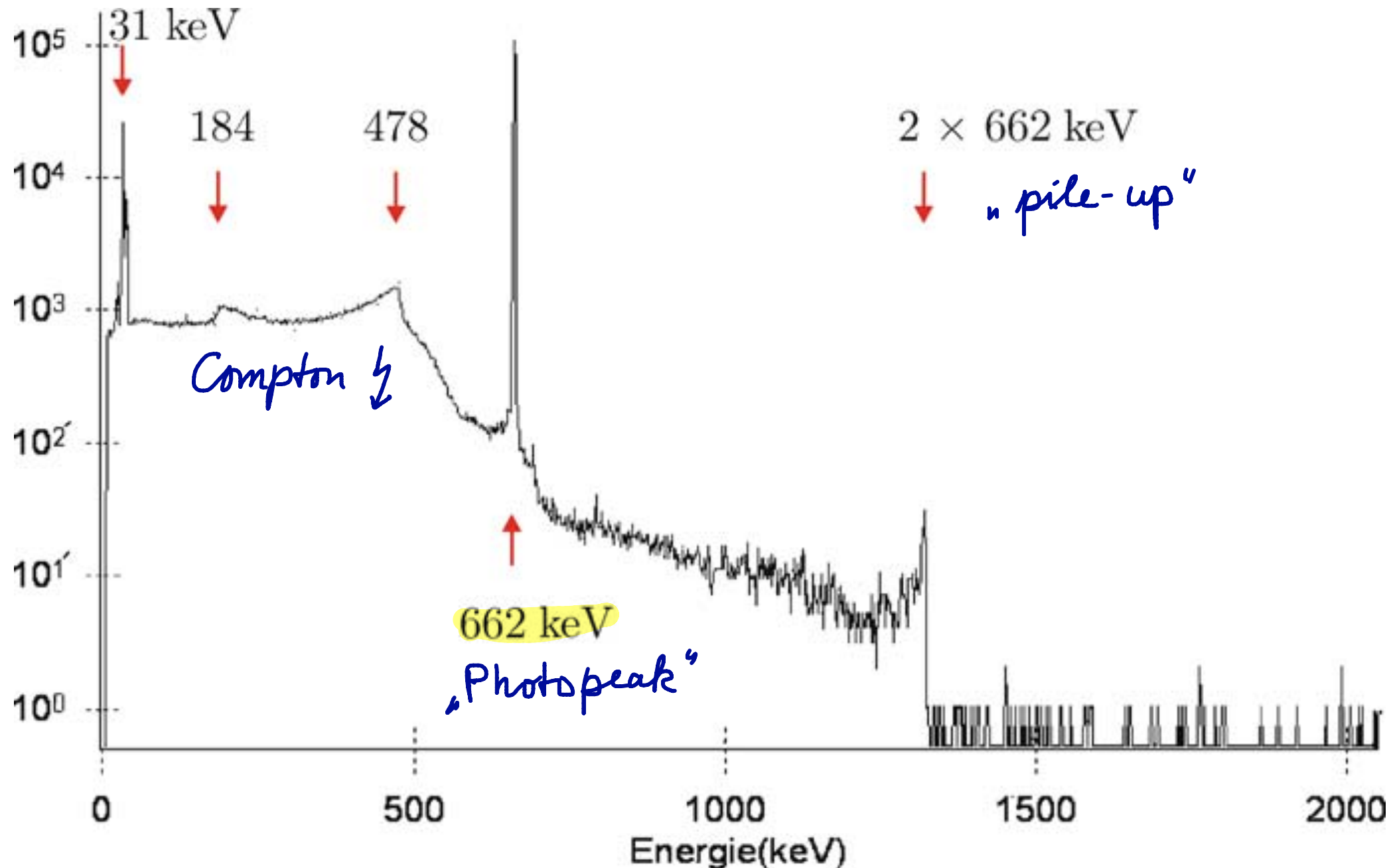
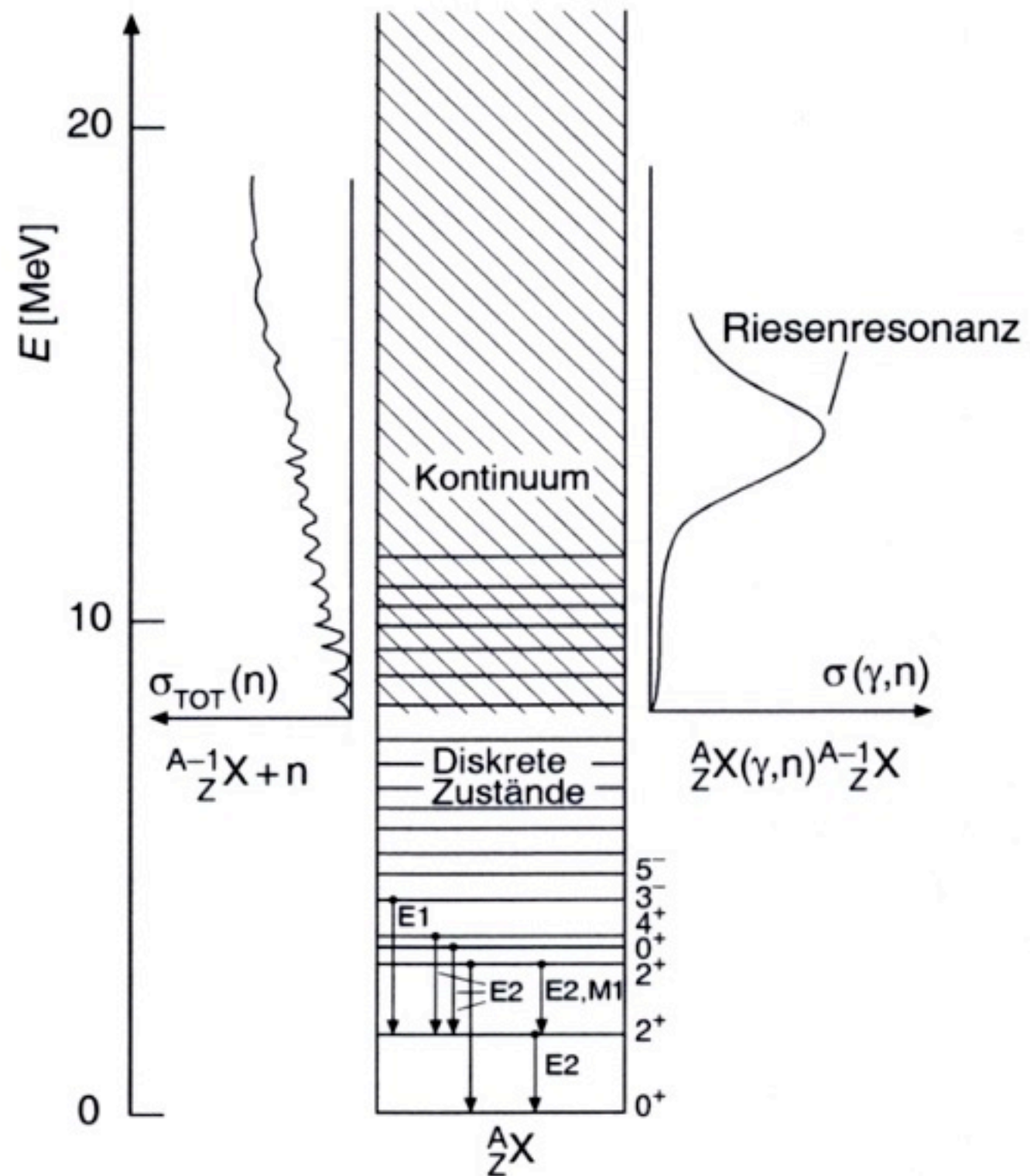


Abb. 6.14 γ -Spektrum eines monoenergetischen Strahlers aufgenommen mit einem hpGe Halbleiter-Detektor (Standard-Messung in der Landesmessstelle für Radioaktivität an der Uni Bremen, Dank an Bernd Hettwig)

Niveauschema



[Povh]

Abbildung 3.10. Typisches Niveauschema eines Kerns (schematisch). Als Beispiel wurde ein gg-Kern gewählt, dessen Grundzustand die Quantenzahlen 0^+ hat. Links davon ist schematisch der totale Wirkungsquerschnitt für die Reaktion des Kerns ${}^{A-1}_ZX$ mit Neutronen (elastische Streuung, inelastische Streuung, Einfang) dargestellt, rechts davon der totale Wirkungsquerschnitt für die γ -induzierte Emission von Neutronen ${}^A_ZX + \gamma \rightarrow {}^{A-1}_ZX + n$.

Alphastrahlung

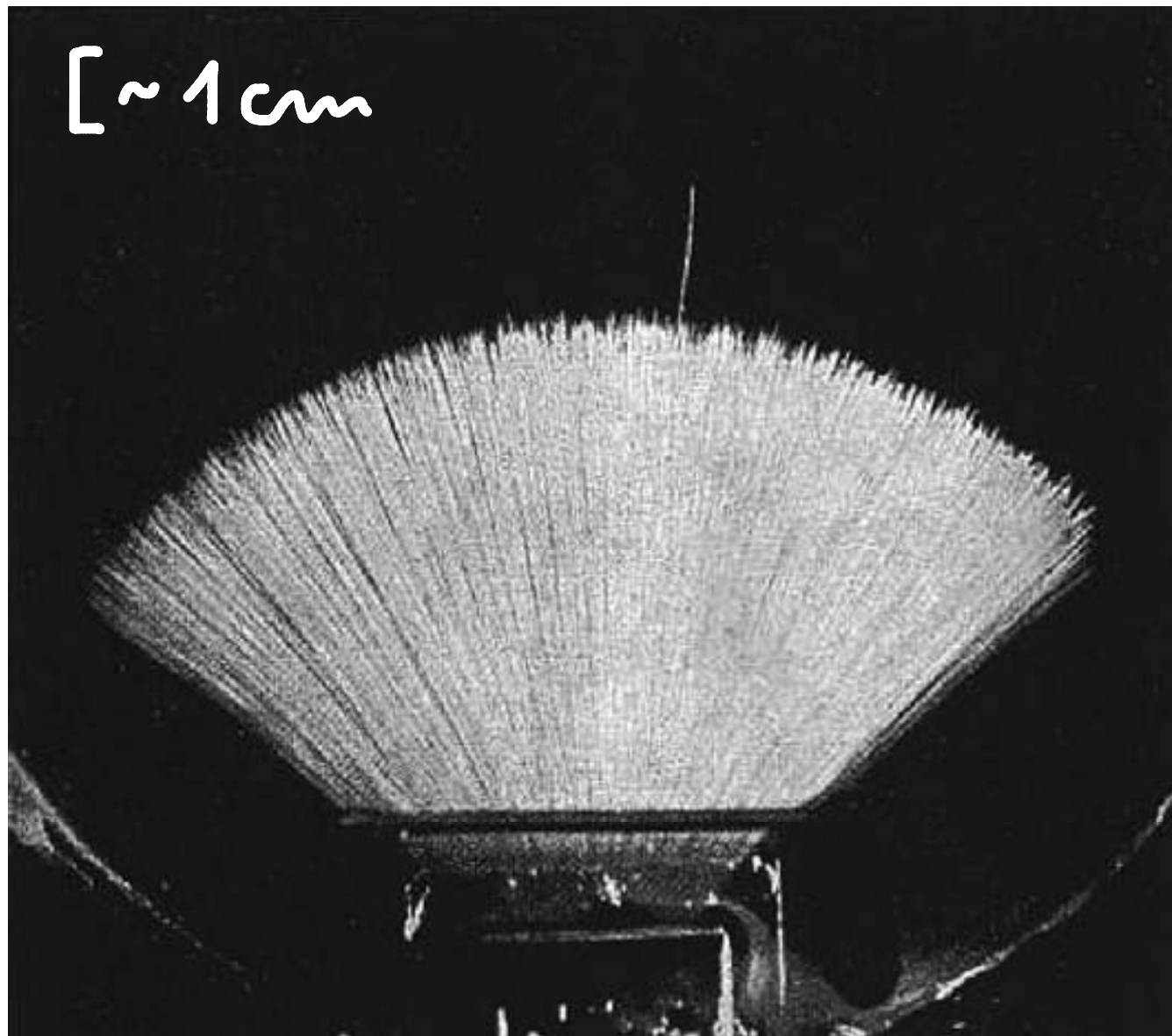


Abb. 2.3 Typische Spuren von α -Teilchen. Die einzelne längere Spur stammt von einem Teilchen deutlich höherer Energie. (Abbildung aus [72]) [\[B-N\]](#)

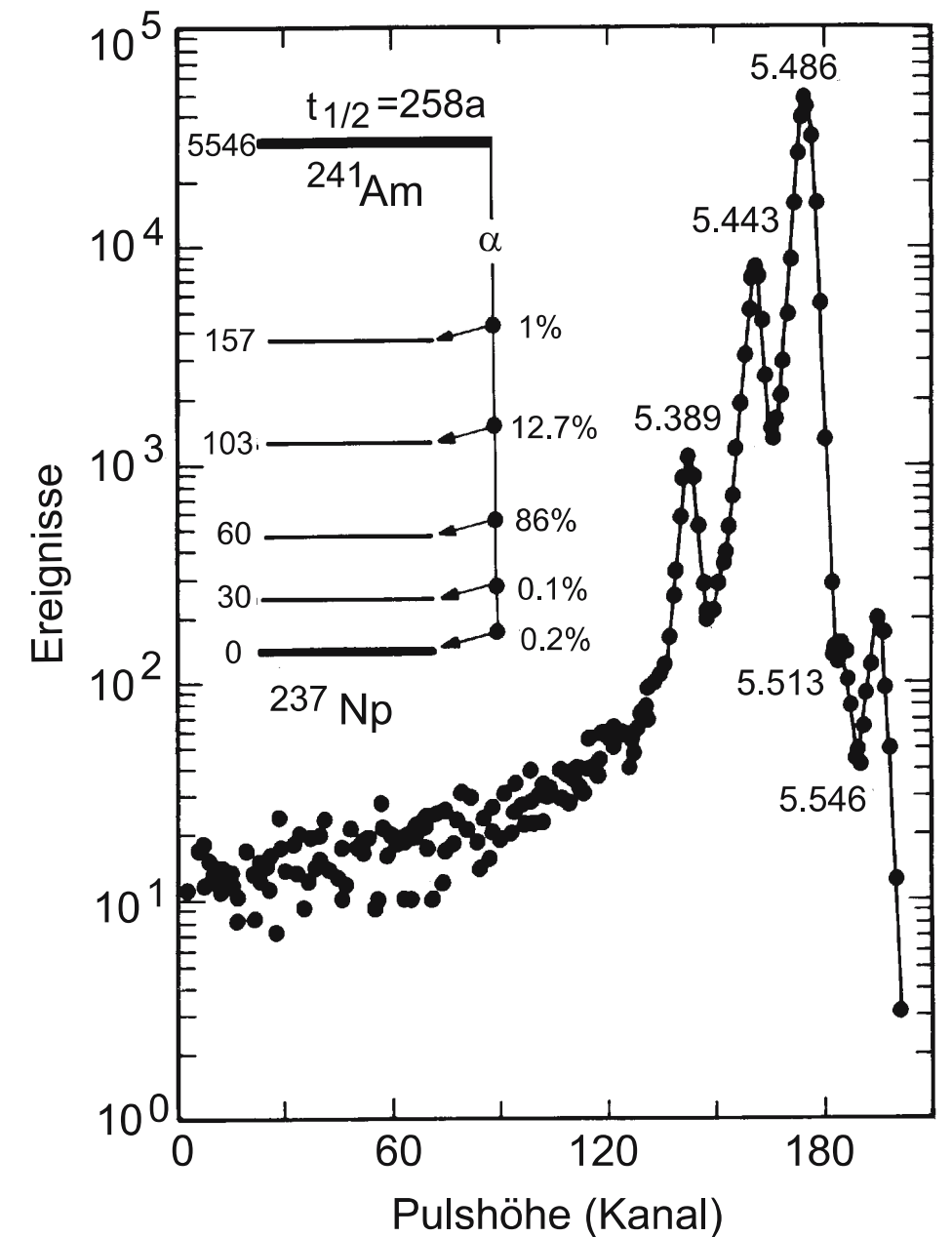


Bild 7.6. Spektrum der α -Zerfälle des ^{241}Am

[\[BWW = Bethge Walter Wiedemann, Kernphysik\]](#)

Alpha-Zerfall

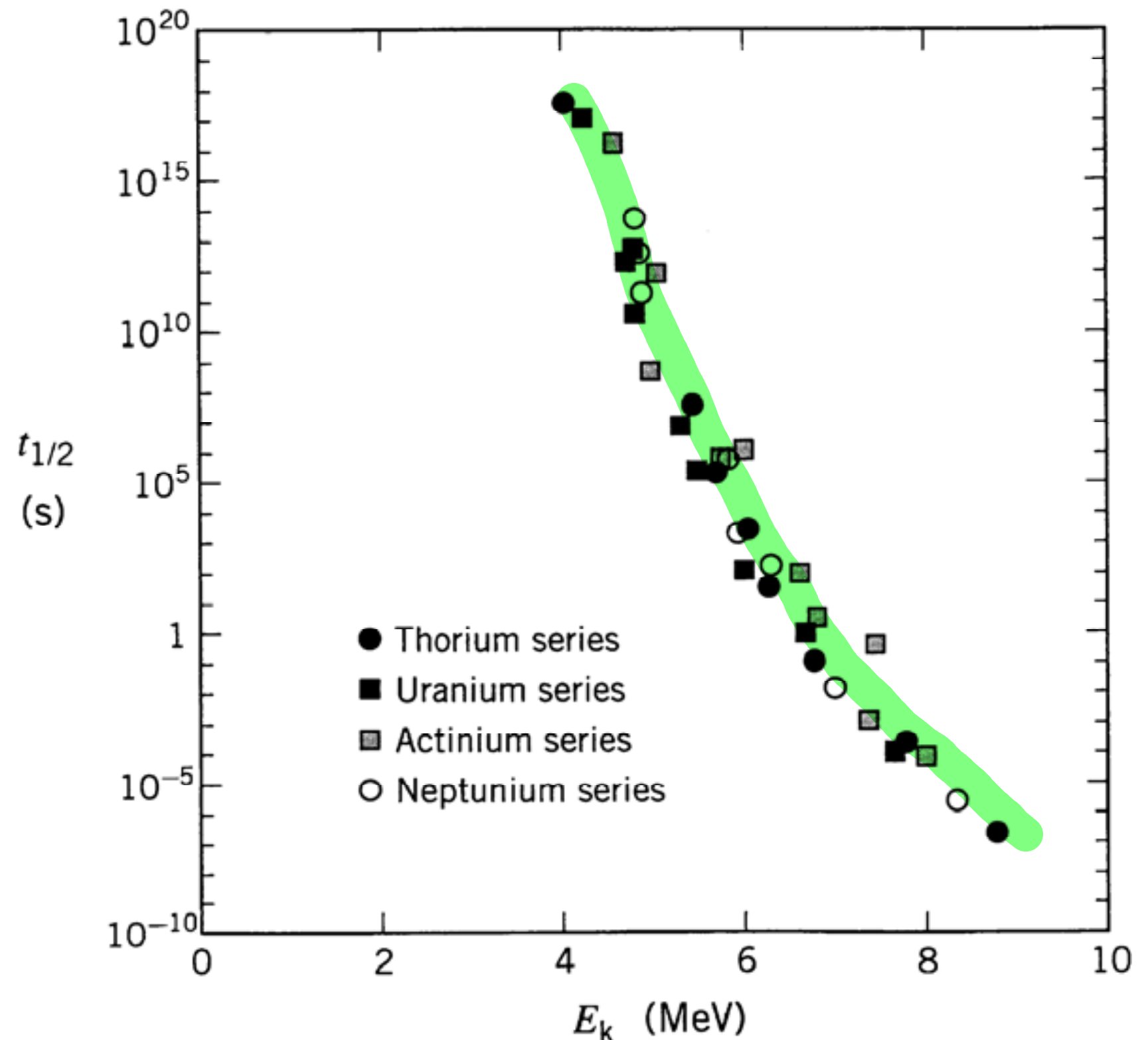


Abb. 6.9 Halbwertszeiten vs. α -Teilchen-Energie E_α von natürlichen (und im Fall der Neptunium-Reihe künstlichen) α -Strahlern: eine fast universelle Kurve, wobei $T_{\frac{1}{2}}$ über 25 Zehner-Potenzen variiert, die kinetische E_α als offenbar maßgeblicher Parameter aber nur um einen Faktor ~ 2 . (Uranium series = Uran-238-Reihe, Actinium series = Uran-235-Reihe.) (Aus [157]) [\[B-N\]](#)

Stabilitätsbedingung...
für $A \geq 150$ erfüllt
aber $T_{\alpha} \approx 0 \dots$

Vier Zerfallsketten:

Uranserie



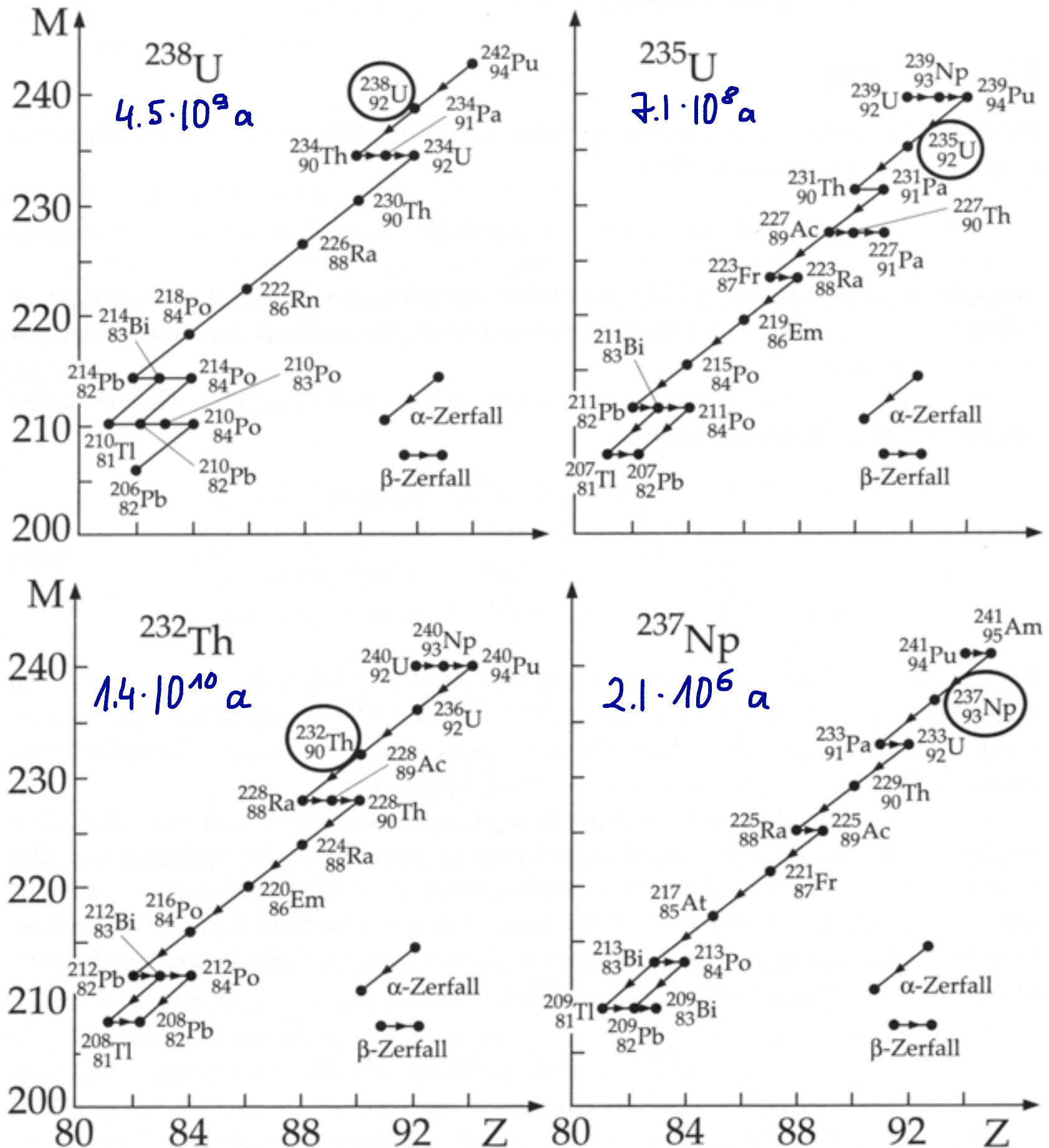
Aktiniumserie



Thoriumserie

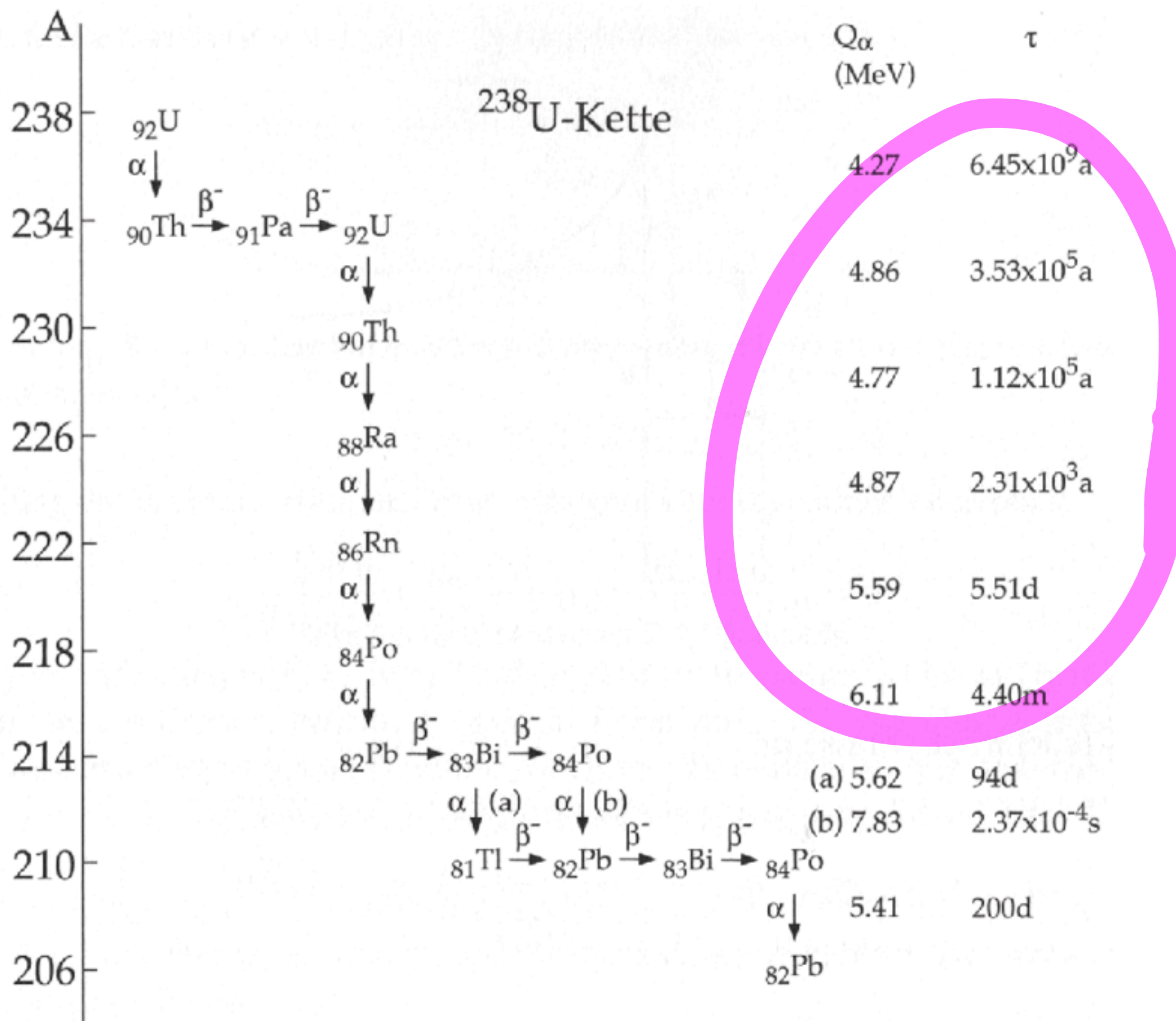


Neptuniumserie



[Amsler]

Abbildung 35: Zerfallsschemen der vier α -Serien (nach [21]).



[Amsler] Abbildung 36: ^{238}U -Zerfallskette (nach [15]).

Alpha-Zerfall n. Geiger-Nuttal

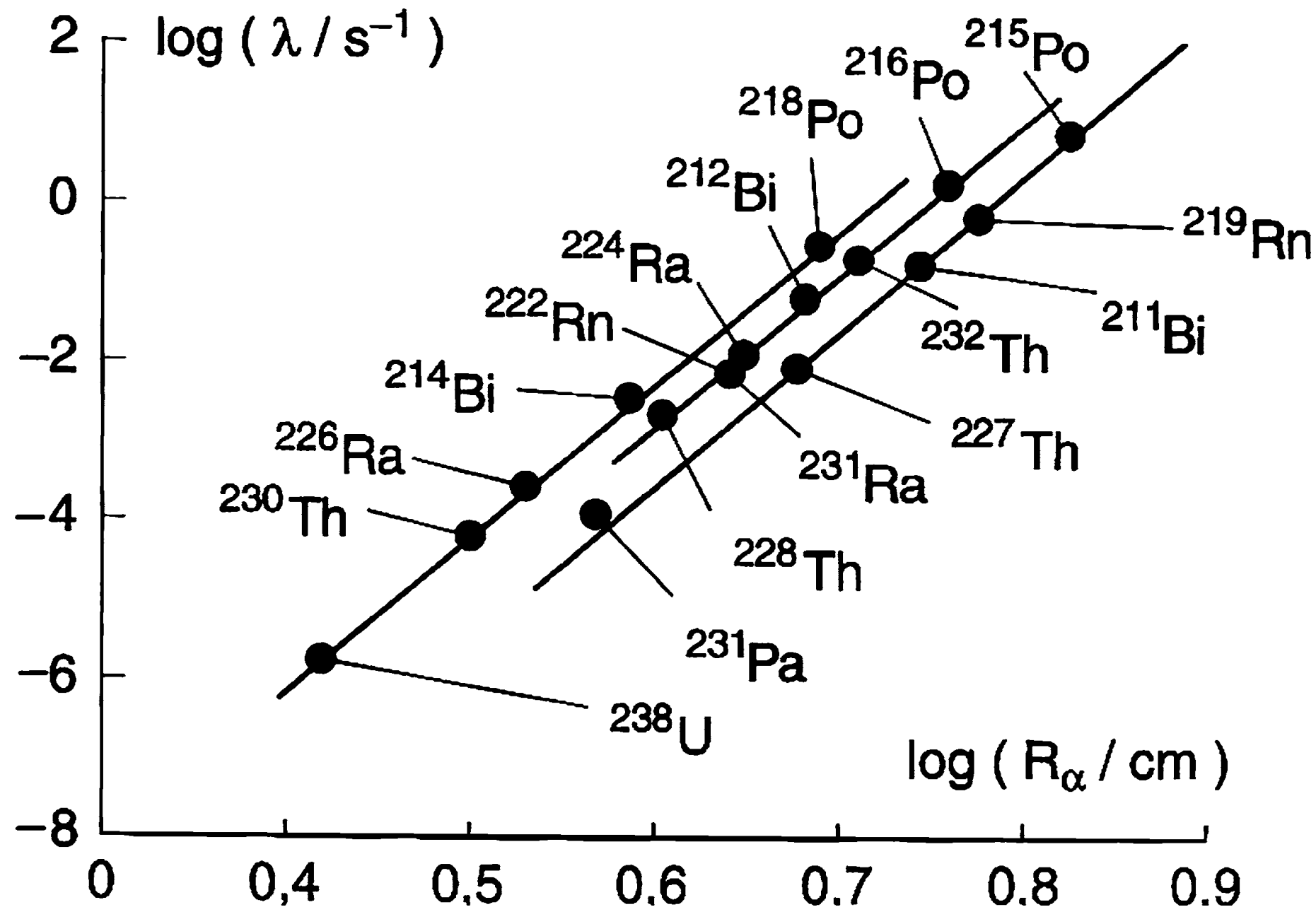


Abb. 6.10 In der Auftragung nach Geiger und Nuttall – Zerfallskonstante gegen Reichweite der α -Strahlen in Luft, doppelt-logarithmisch – sieht man für jede der drei natürlichen Zerfallsreihen eine eigene *Gerade*. (Die gegenüber Abb. 6.9 umgekehrte Steigung entsteht durch die umgekehrte Orientierung der *y*-Achse, weil $\lambda \propto T_{\frac{1}{2}}^{-1}$.) (Abbildung aus [58]) [\[B-N\]](#)

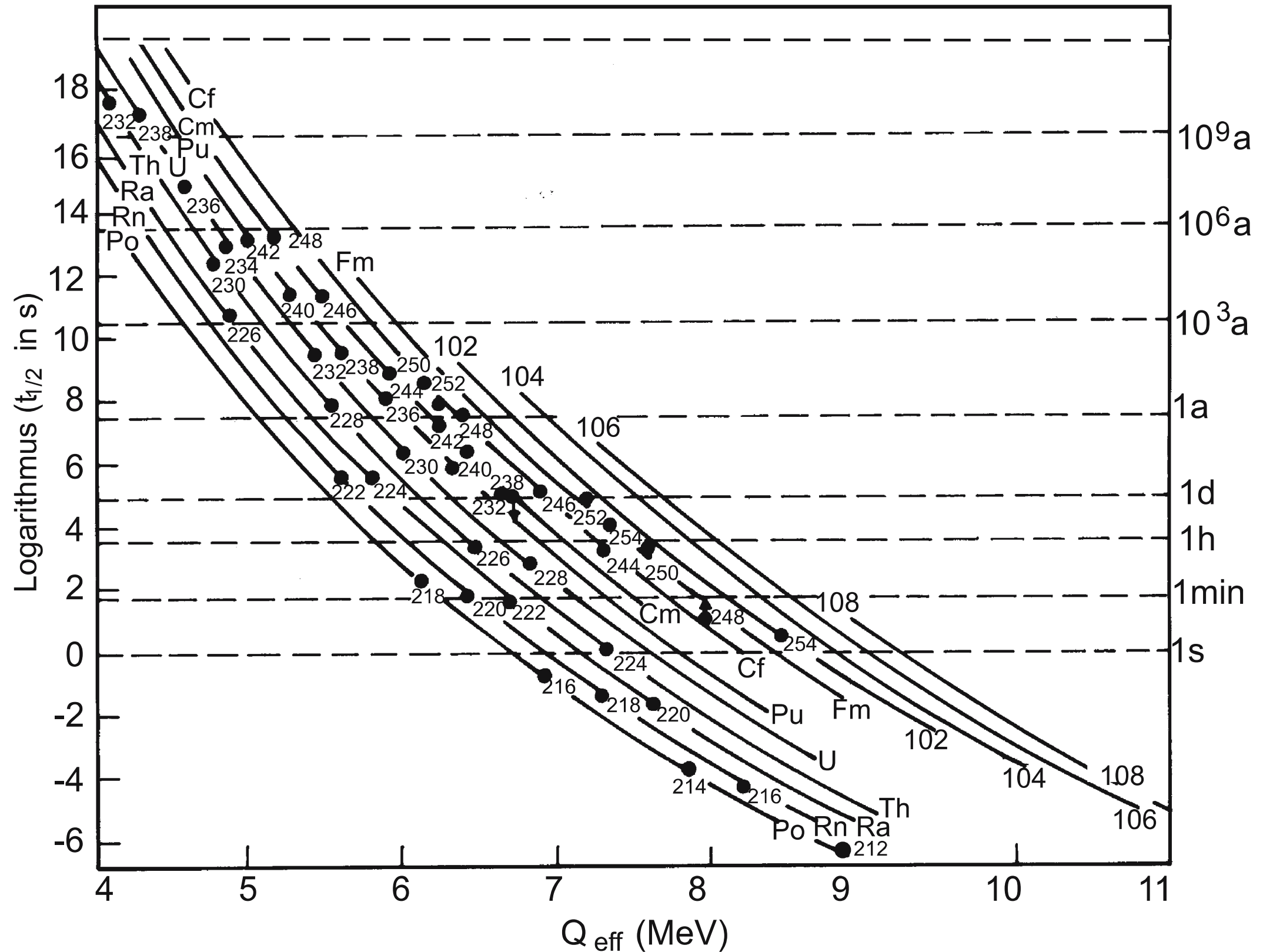
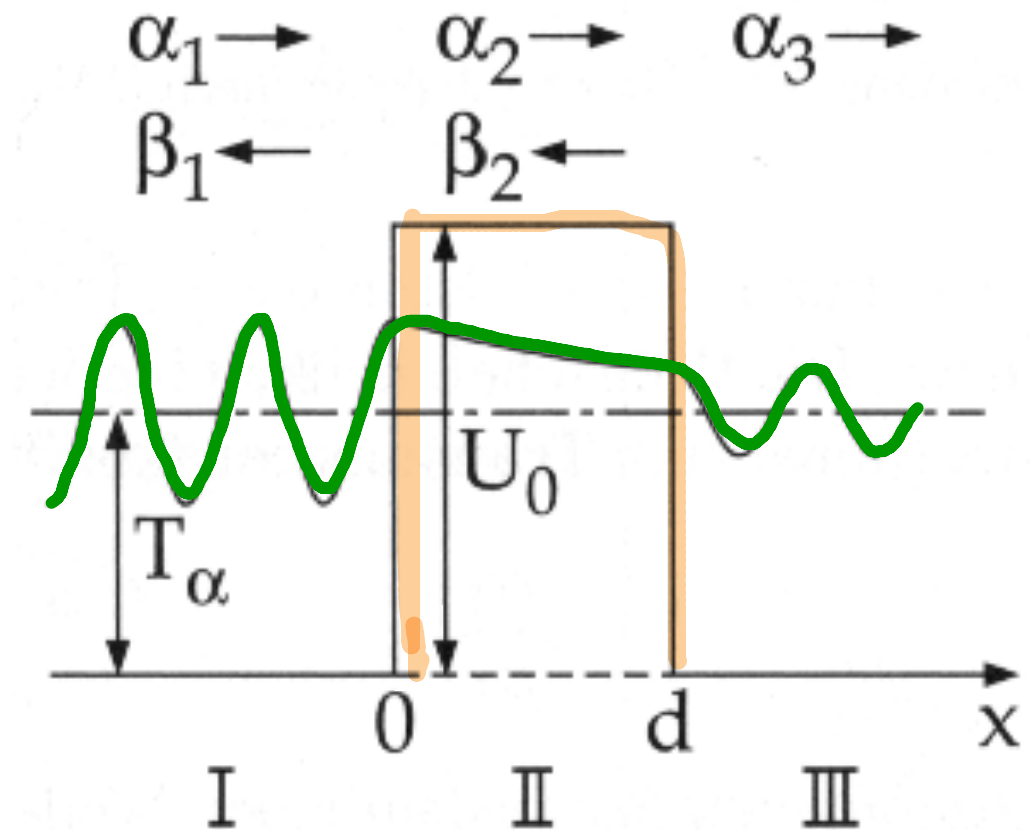
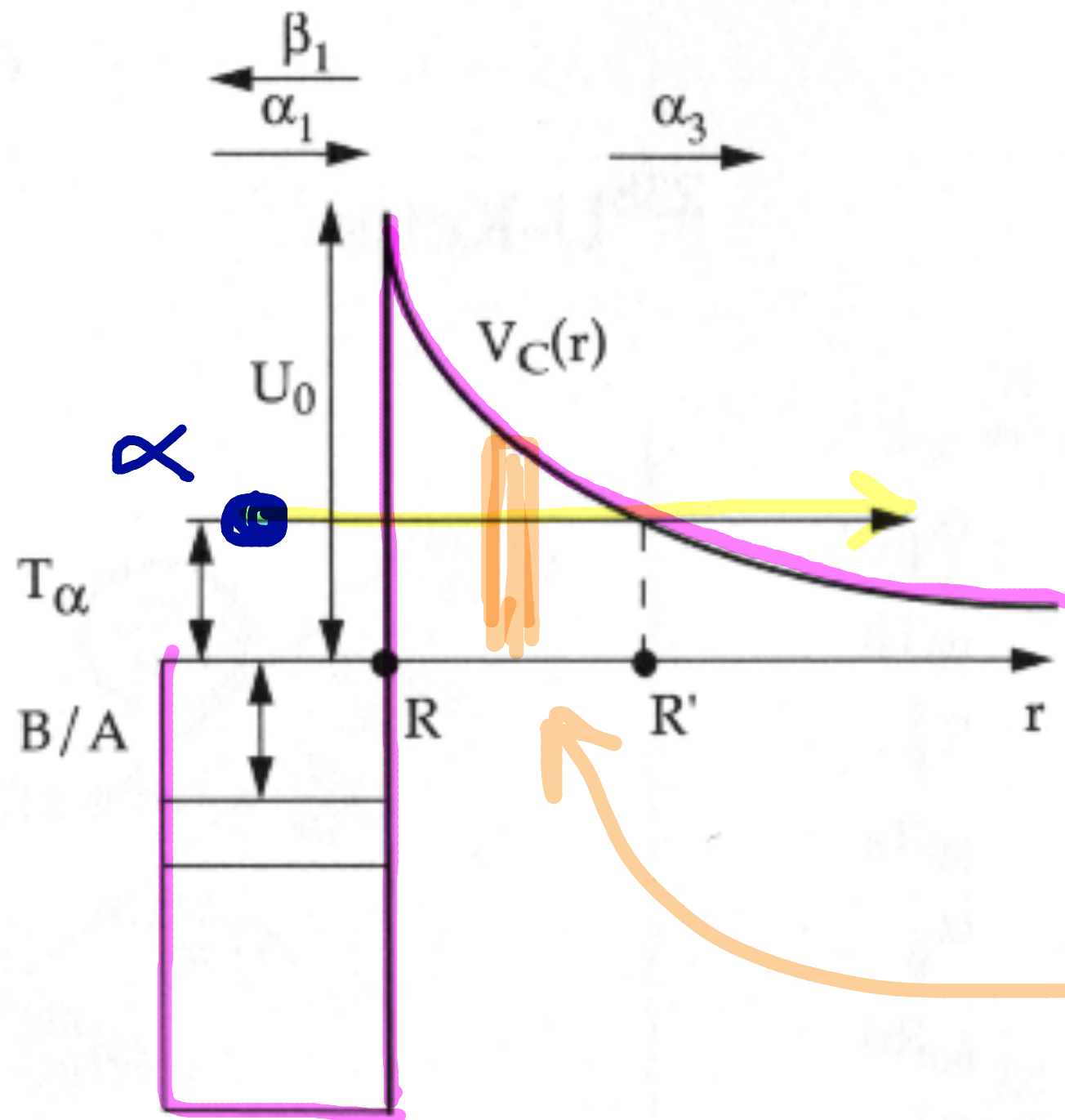


Bild 7.7. Abhängigkeit des Logarithmus der Halbwertszeit vom Q -Wert des α -Zerfalls [GA57] [\[BWW\]](#)

Alpha-Zerfall und Tunneleffekt

[Bilder und Herleitungsskizze nach
Amsler Kap. 5.3; Rechnung z.B.
BWW Kasten 7.2]



Gamov-Plot

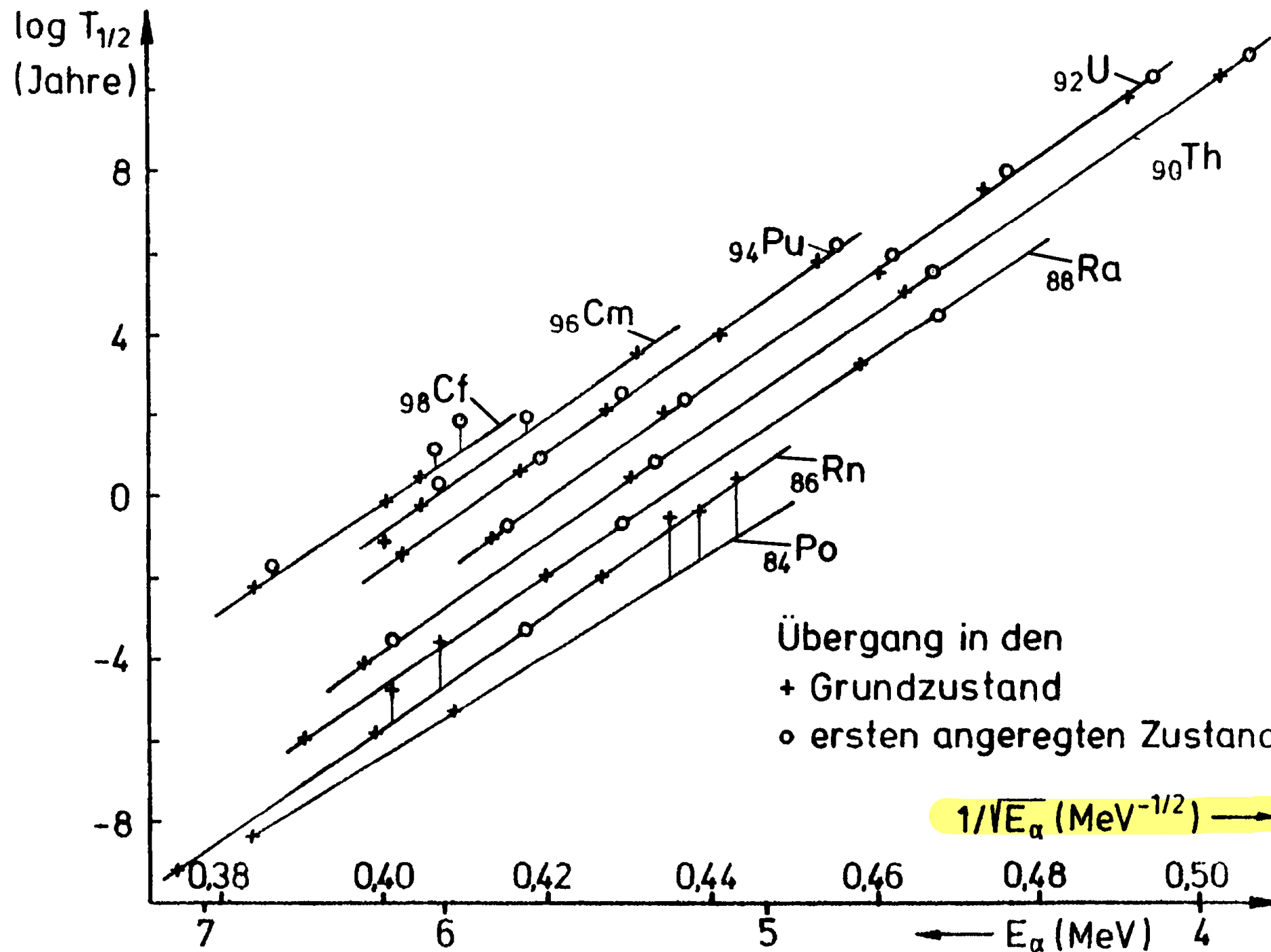


Abb. 6.11 Halbwertszeit vs. Energie der α -Strahler aufgetragen nach der aus dem Gamov-Modell erwarteten linearen Formel. Jede Linie gehört zu einem Element (Z am chem. Symbol angegeben, auch künstliche Elemente sind aufgeführt, aus [143]). (Hier ist die x -Achse anders herum orientiert als in Abb. 6.9)