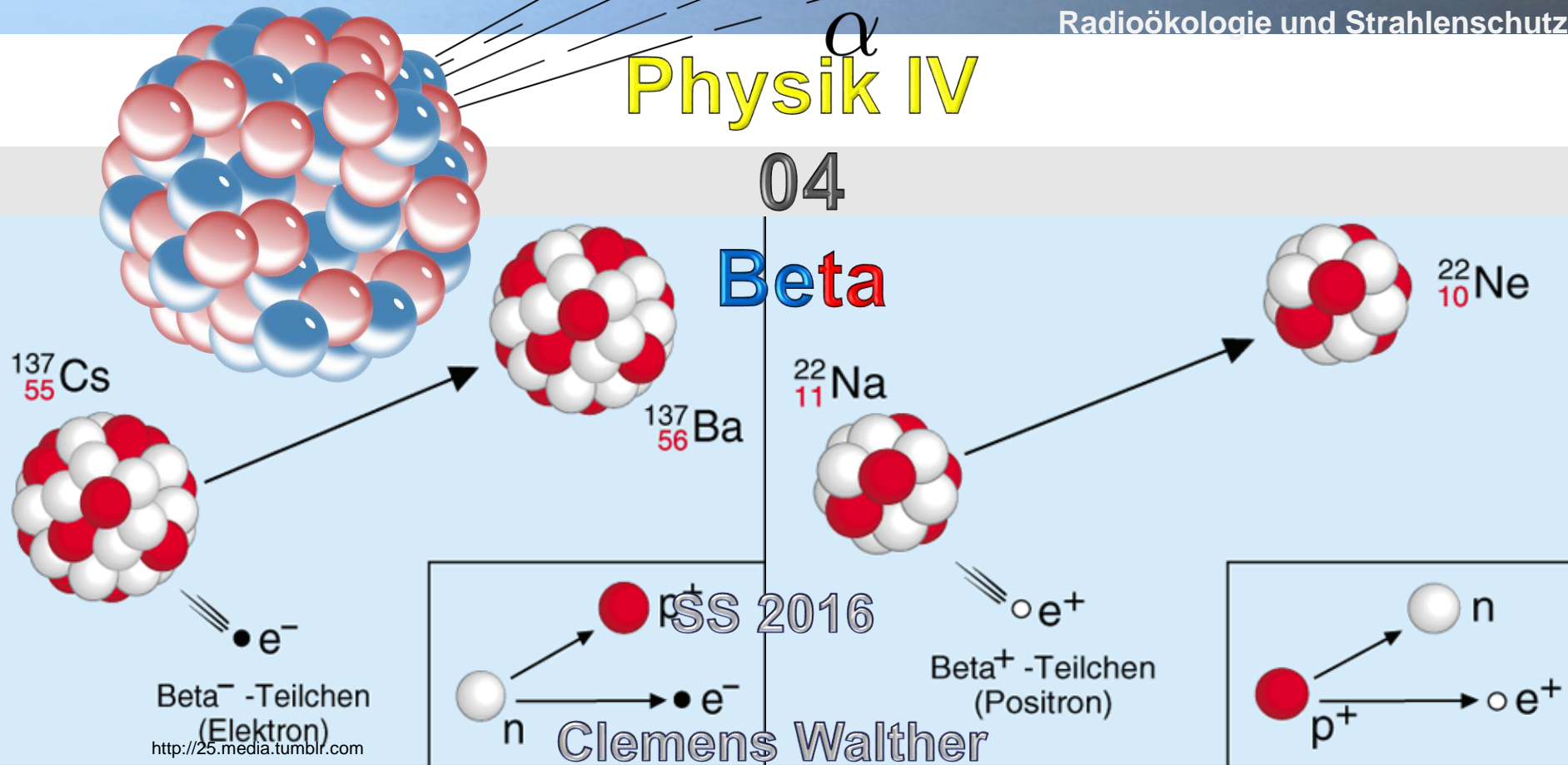


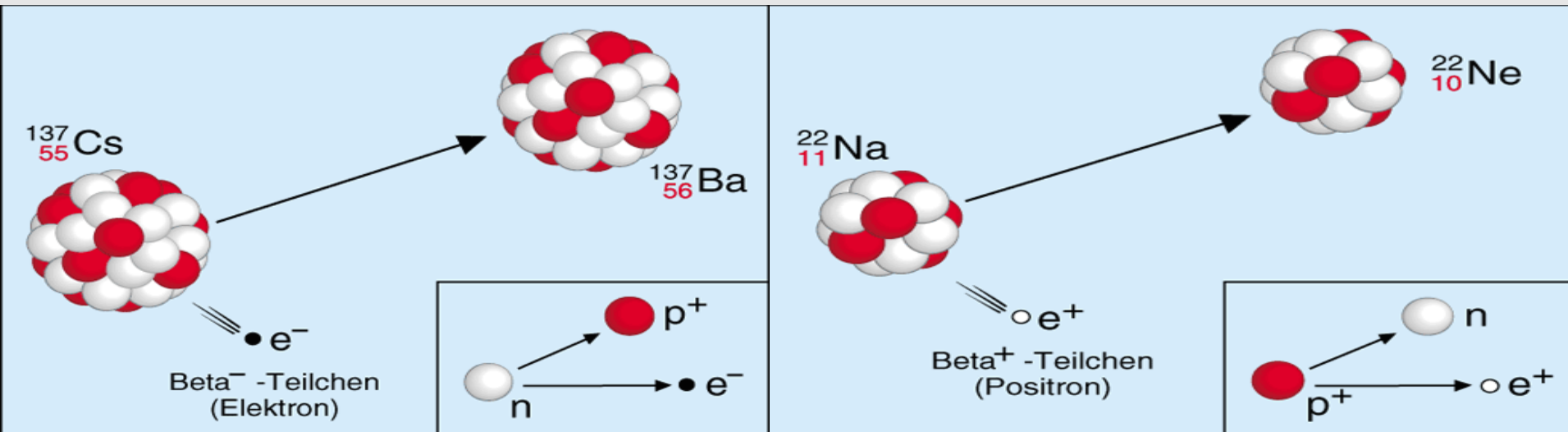
# Physik IV

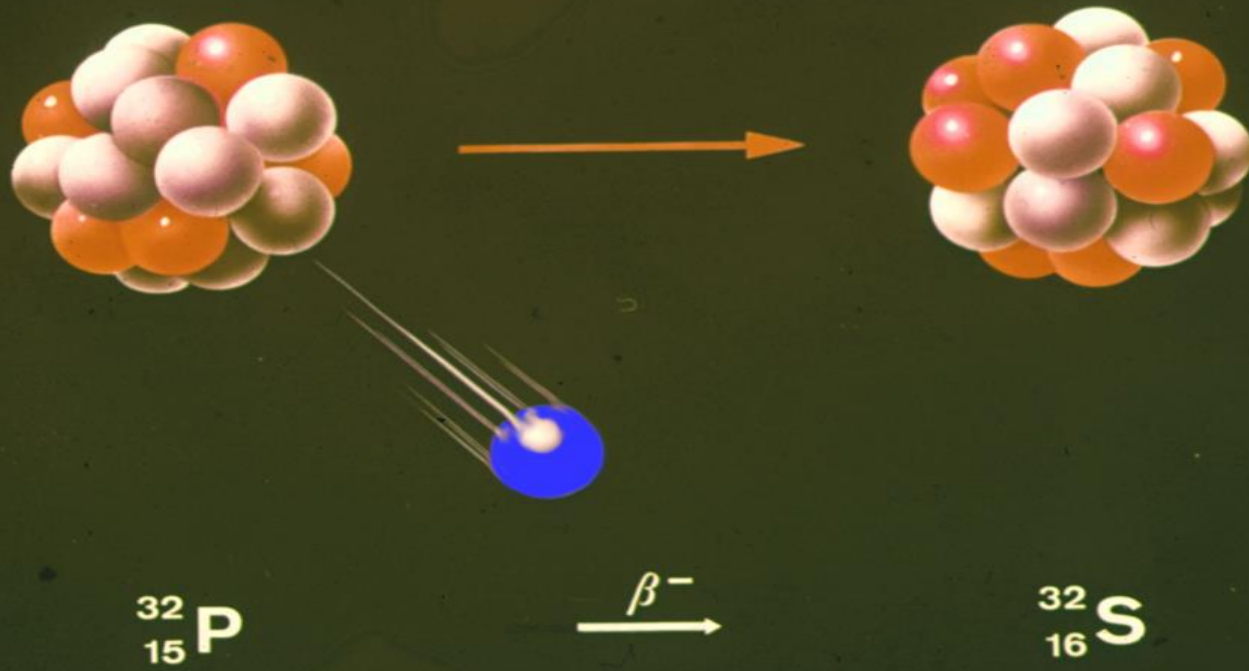
04

Beta



# $\beta$ - Zerfall und schwache Wechselwirkung



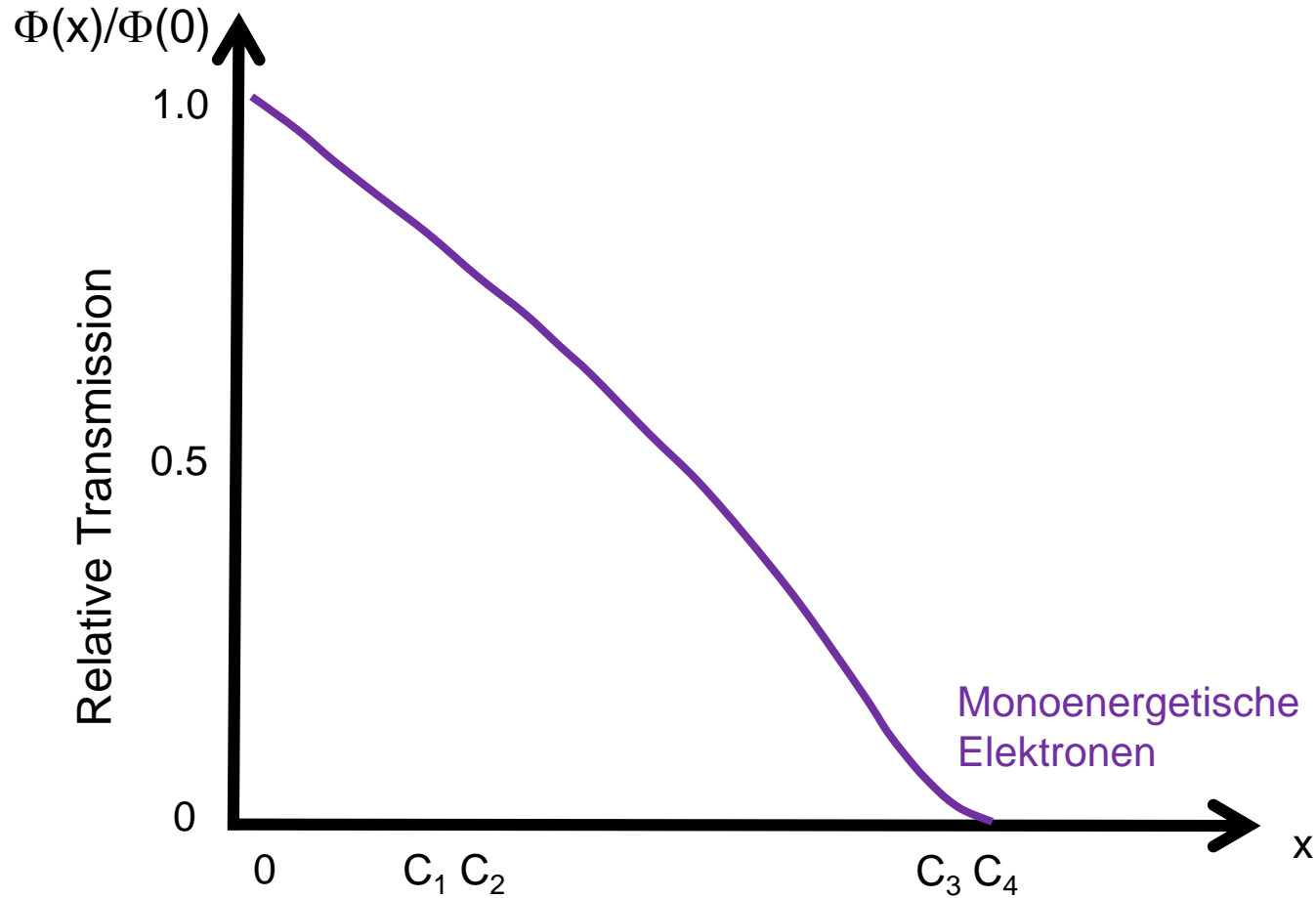


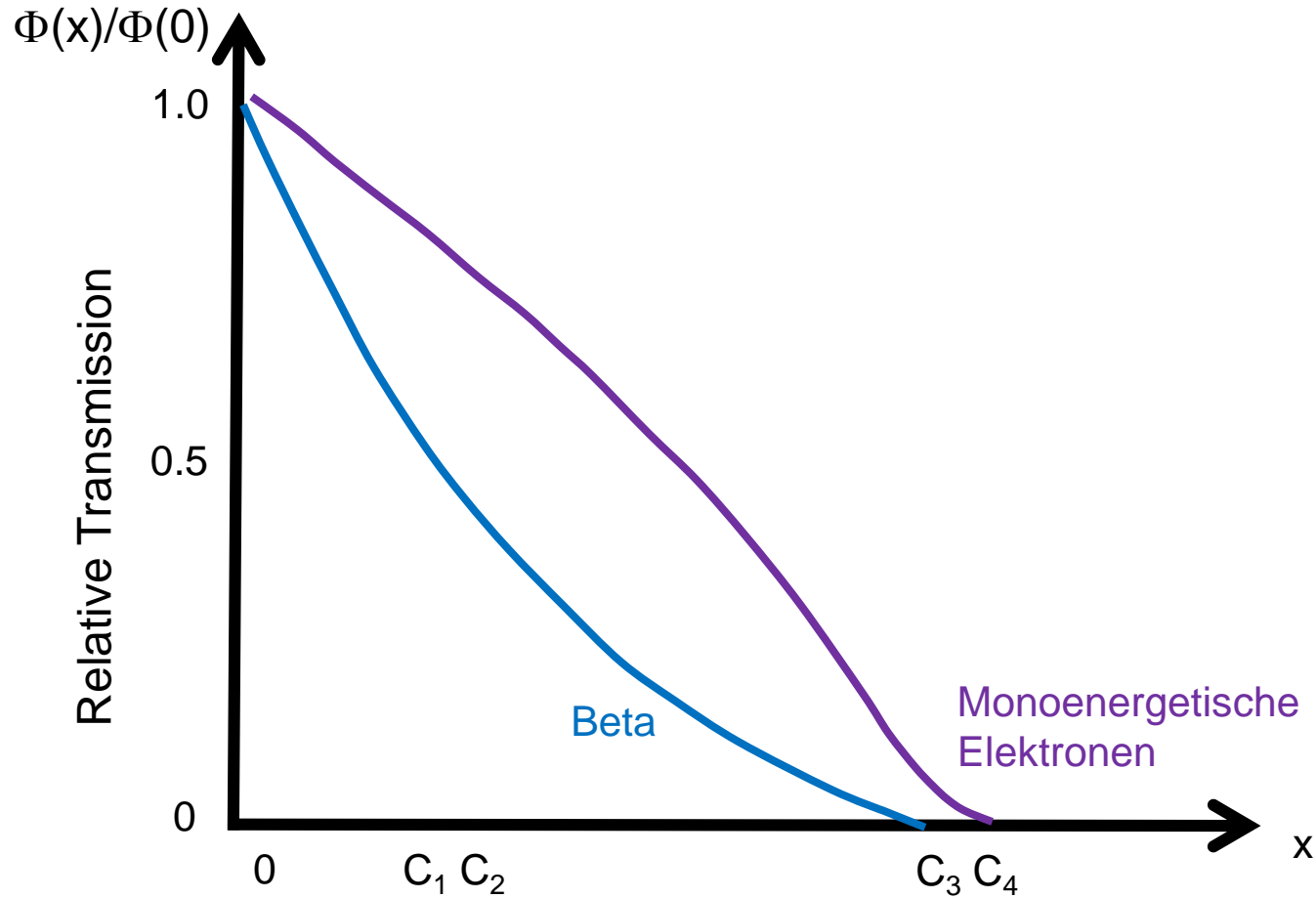


# Reichweiten und LET\* verschiedener Strahlenarten in Luft und Wasser

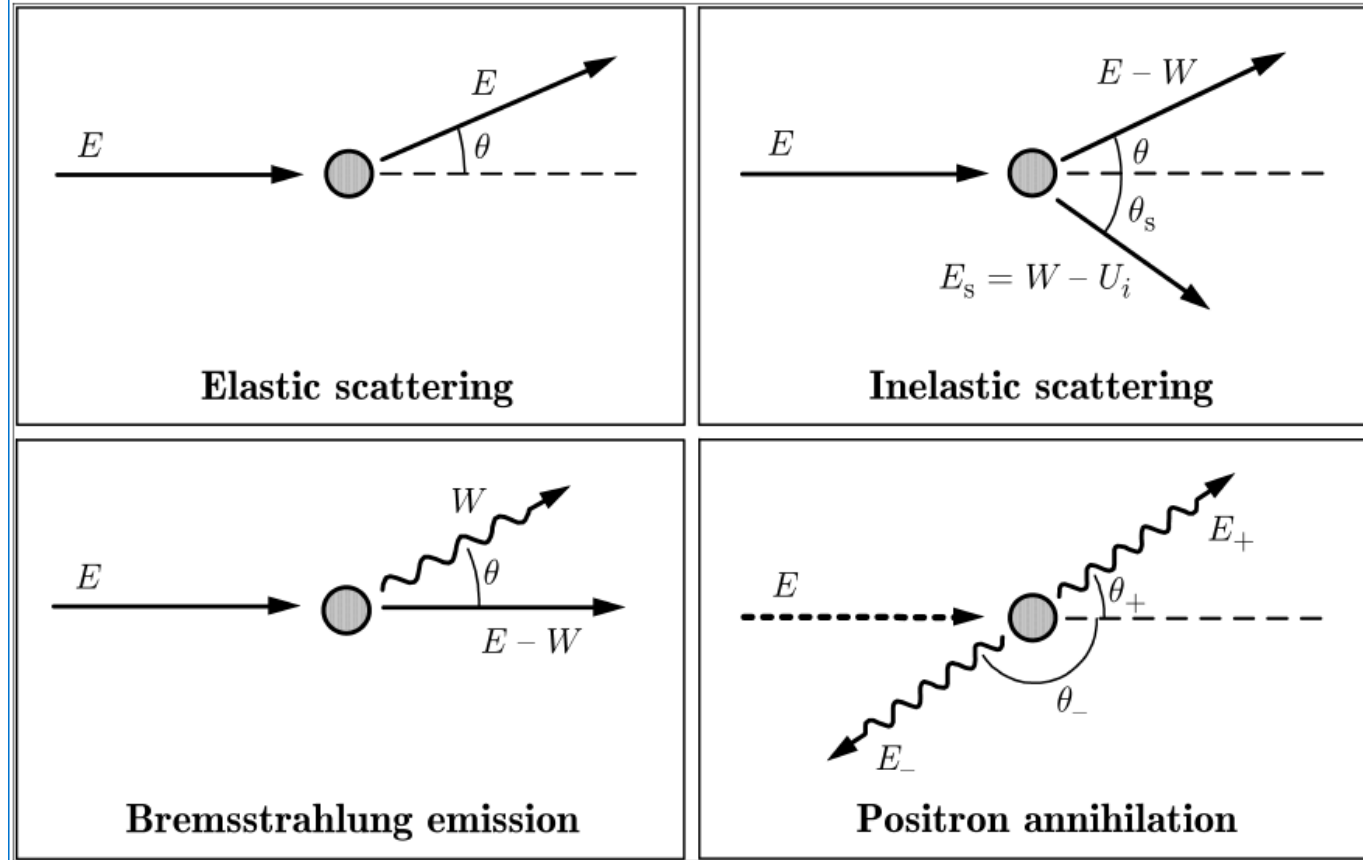
\*linear energy transfer

Radiation	Energy (MeV)	Maximum range		Average LET value in water (keV $\mu\text{m}^{-1}$ )
		cm air	mm water	
Electron	1	405	4.1	0.24
	3	1400	15	0.20
	10	4200	52	0.19
Proton	1	2.3	0.023	43
	3	14	0.014	21
	10	115	1.2	8.3
Deuteron	1	1.7	—	—
	3	8.8	0.088	34
	10	68	0.72	14
Helium	1	0.57	0.0053	190
	3	1.7	0.017	180
	10	10.5	0.11	92
Fiss. fragment	100	2.5	0.025	3300



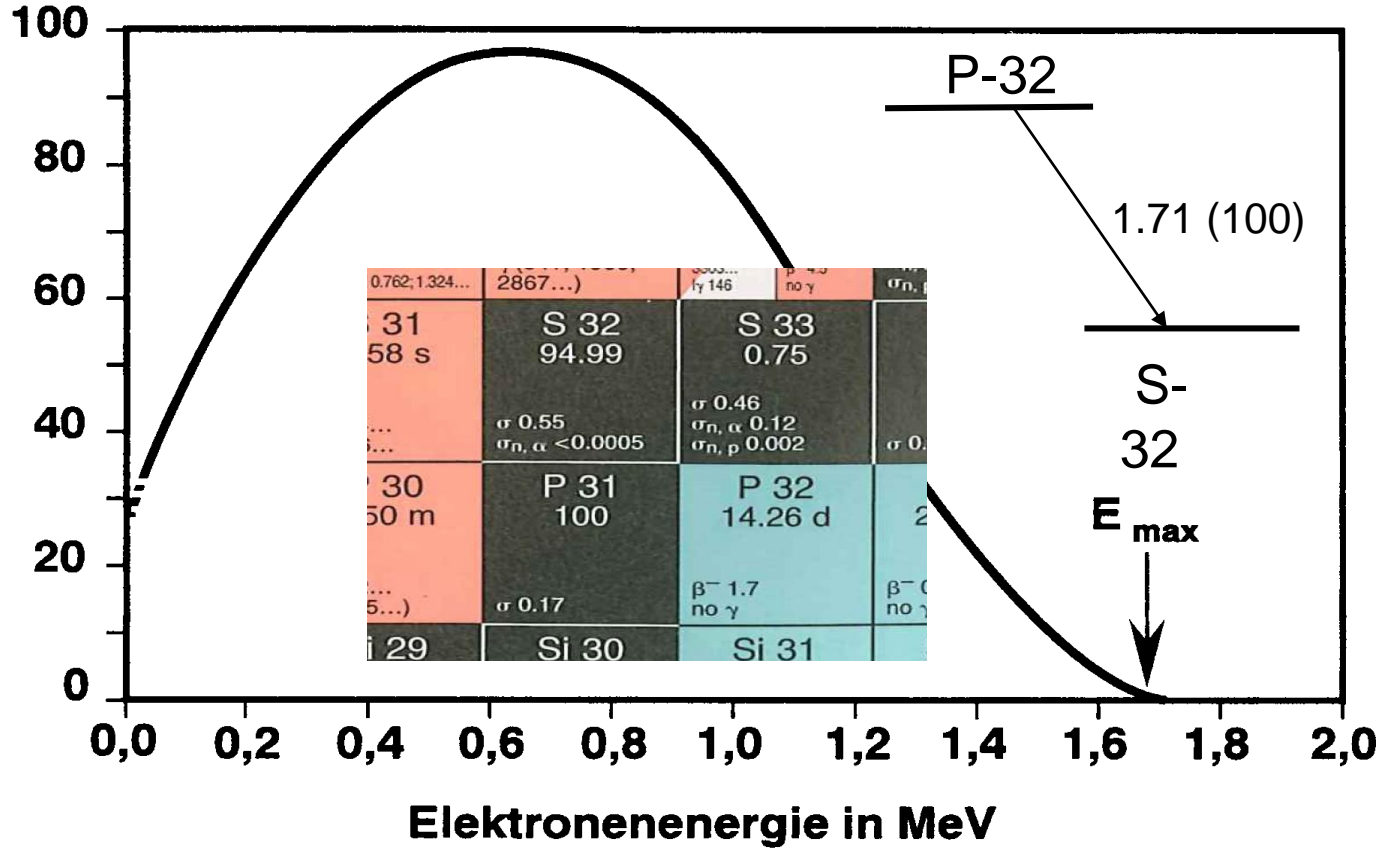


- Ionisation
- Anregung
- Bremsstrahlung
- Vernichtungsstrahlung
- Cerenkov-Strahlung





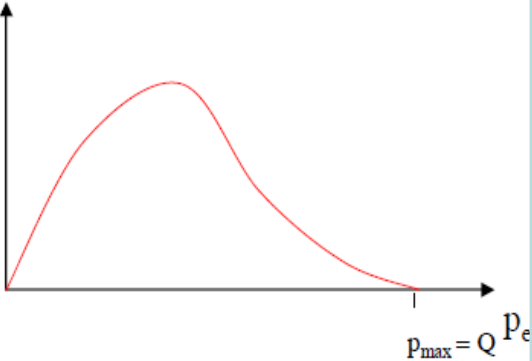
Zahl der emittierten Elektronen  
pro Energieintervall und  
pro 100 Kernprozesse





- Historisch:  
SODDY:  $Z$  (Kernladung) ändert sich um 1 bei konstantem  $A$  (Nukleonenzahl)  
CHADWICK (1914 ): kontinuierliche Elektronenenergie



Elektron/Positron	Kern	Energieerhaltung?
<p>■ <b>Energie:</b> <math>W(p_e)</math></p> 	<p>Aber: (Grund)zustände wohldefiniert</p> $ I\rangle \rightarrow  F\rangle$	
<p>■ <b>(Dreh)Impuls:</b></p>	<p><math>\Delta J = 0, 1, 2 \dots</math></p>	<p>Impulserhaltung?</p>
<p>■ <b>Leptonenzahl:</b></p>	<p>0</p>	<p>Leptonenzahl- erhaltung?</p>

$$S = 1/2$$

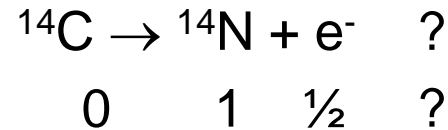
$$L = \pm 1$$

- von griechisch λεπτός leptós ‚dünn‘, ‚klein‘, ‚fein‘
- (sind *eigentlich* leichter als Mesonen und Baryonen)
- unterliegen der **schwachen Wechselwirkung** und der Gravitation. Wenn geladen auch elektromagnetische Wechselwirkung.
- sind **Fermionen** und besitzen einen **Spin  $\frac{1}{2}$** .

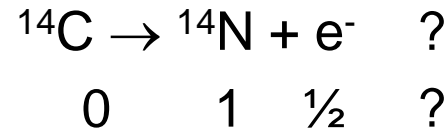
Name	Symbol	<u>Elektrische Ladung</u>	(Ruhemasse · c <sup>2</sup> ) in <u>MeV</u>	Lebensdauer in <u>s</u>
<u>Elektron</u>	<b>e</b>	-1	0,511	(stabil)
<u>Elektron-Neutrino</u>	$\nu_e$	0	$< 2 \cdot 10^{-6}$	(stabil)
<u>Myon</u>	$\mu$	-1	105,66	$2,197 \cdot 10^{-6}$
<u>Myon-Neutrino</u>	$\nu_\mu$	0	$< 0,17$	(stabil)
<u>Tauon</u>	$\tau$	-1	1777	$3,4 \cdot 10^{-13}$
<u>Tauon-Neutrino</u>	$\nu_\tau$	0	$< 15,5$	(stabil)

1. Ein kontinuierliches  $\beta$ -Spektrum mit dem Zerfall  
 ${}^A_Z \rightarrow {}^A_{(Z+1)} + e^-$  verstößt gegen die Energieerhaltung.  
 Dies wurde durch Kalorimeter Experimente bestätigt

1. Ein kontinuierliches  $\beta$ -Spektrum mit dem Zerfall  
 ${}^A_Z \rightarrow {}^A_{(Z+1)} + e^-$  verstößt gegen die Energieerhaltung.  
 Dies wurde durch Kalorimeter Experimente bestätigt
  
2. Ebenso verstößt dies gegen die Drehimpulserhaltung:

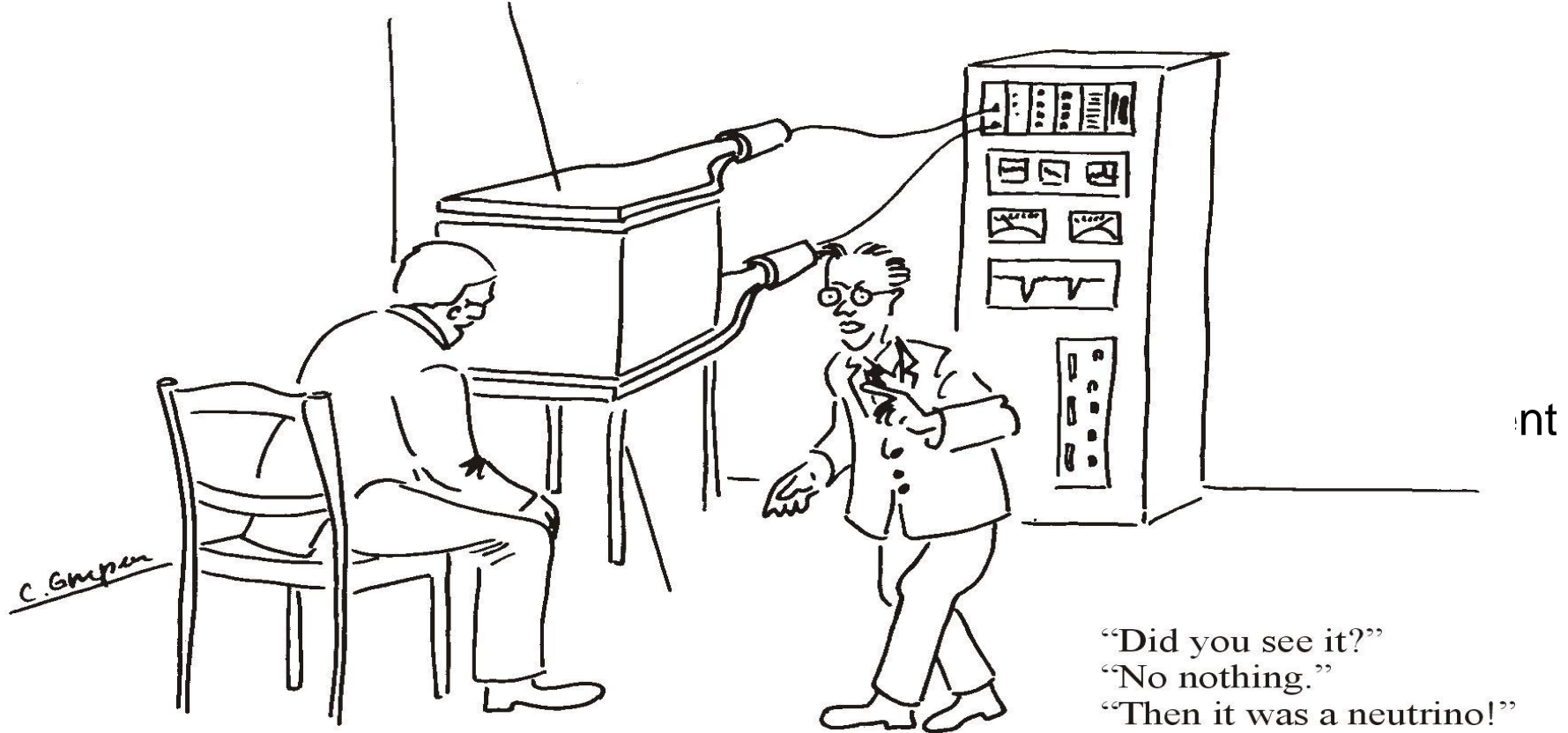


1. Ein kontinuierliches  $\beta$ -Spektrum mit dem Zerfall  
 ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^-$  verstößt gegen die Energieerhaltung.  
 Dies wurde durch Kalorimeter Experimente bestätigt
  
2. Ebenso verstößt dies gegen die Drehimpulserhaltung:

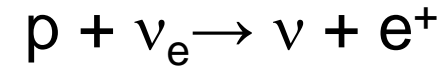


Pauli (1930): Neutrino Hypothese  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e$

$I_n = 1/2 \quad m_{n,0} = 0 \quad \exists \bar{\nu}_e, \nu_e, \bar{\nu}_\mu, \nu_\mu \rightarrow \text{Leptonenzahl Erhaltung}$

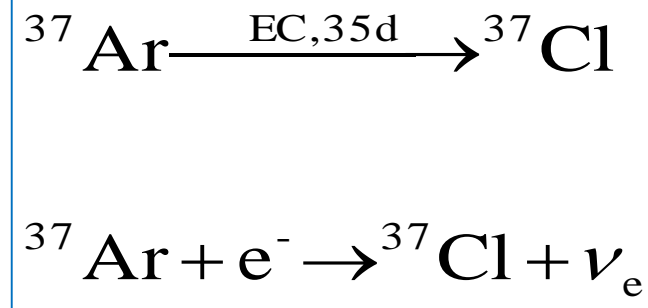


Nachweis erst 1959 REINES / COWAN

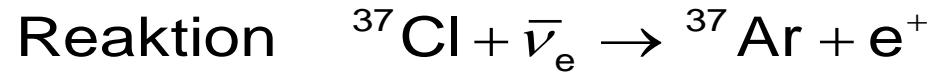




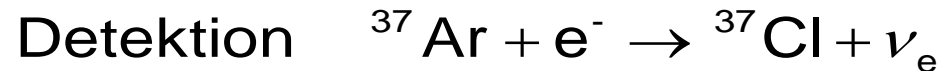
Rückstoßexperiment  
in Edelgasen:



Direkte Messung von  $\nu$ -induzierten Reaktionen durch inversen  $\beta$ -Zerfall und nachfolgende Detektion der radioaktiven Zerfallsprodukte



$$\sigma = (0,3 \pm 0,4) \times 10^{-45} \text{ cm}^{-2}$$



Reines & Cowan (1956) Homestake Mine,  $\text{CCl}_4$

## The Nobel Prize in Physics 2015



Photo © Takaaki Kajita

**Takaaki Kajita**

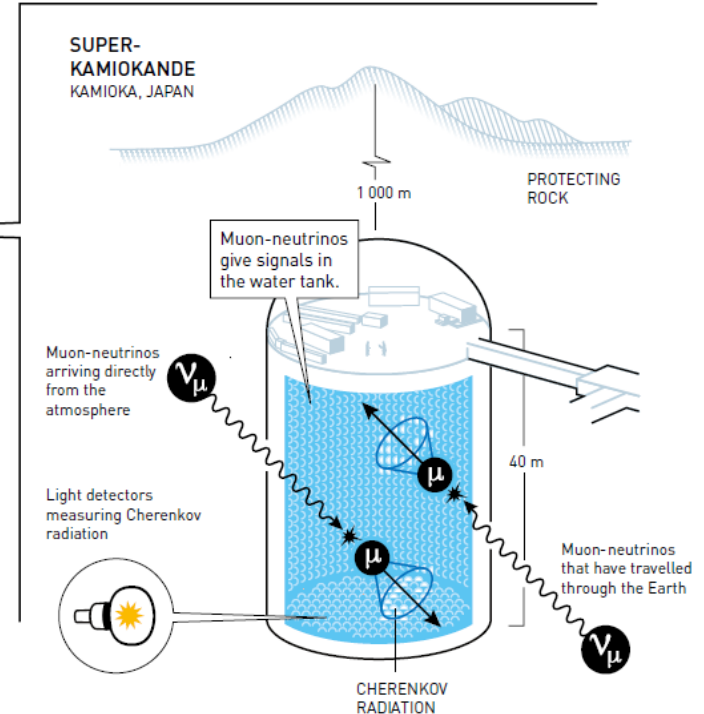
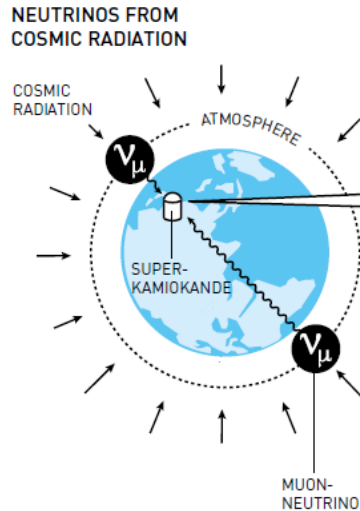
Prize share: 1/2



Photo: K. MacFarlane.  
Queen's University  
/SNOLAB

**Arthur B. McDonald**

Prize share: 1/2



The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald *"for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"*



m: Kernmasse, M: Atommasse, Q: Zerfallsenergie

**$\beta^-$  Zerfall:**



$$\begin{array}{rclcl} m_Z & = & m_{Z+1} & + m_e & + Q_{\beta^-} \\ zm_e & = & zm_e & & \\ \hline M_Z & = & M_{Z+1} & & + Q_{\beta^-} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{rclcl} m_Z & = & m_{Z+1} & + m_e & + Q_{\beta^-} \\ zm_e & = & zm_e & & \\ \hline M_Z & = & M_{Z+1} & & + Q_{\beta^-} \end{array}} \right\}$$

$\Delta Q_{\beta^-} > 0$  wenn  $\Delta M > 0$   
( $\Delta M = M_Z - M_{Z+1}$ )

**$\beta^+$  Zerfall:**



$$\begin{array}{rclcl} m_Z & = & m_{Z-1} & + m_e & + Q_{\beta^+} \\ zm_e & = & zm_e & & \\ \hline M_Z & = & M_{Z-1} & + 2m_e & + Q_{\beta^+} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{rclcl} m_Z & = & m_{Z-1} & + m_e & + Q_{\beta^+} \\ zm_e & = & zm_e & & \\ \hline M_Z & = & M_{Z-1} & + 2m_e & + Q_{\beta^+} \end{array}} \right\}$$

$\Delta Q_{\beta^+} > 0$  wenn  $\Delta M > 2m_e$   
( $\Delta M = M_Z - M_{Z-1}$ )  
(1.022 MeV)

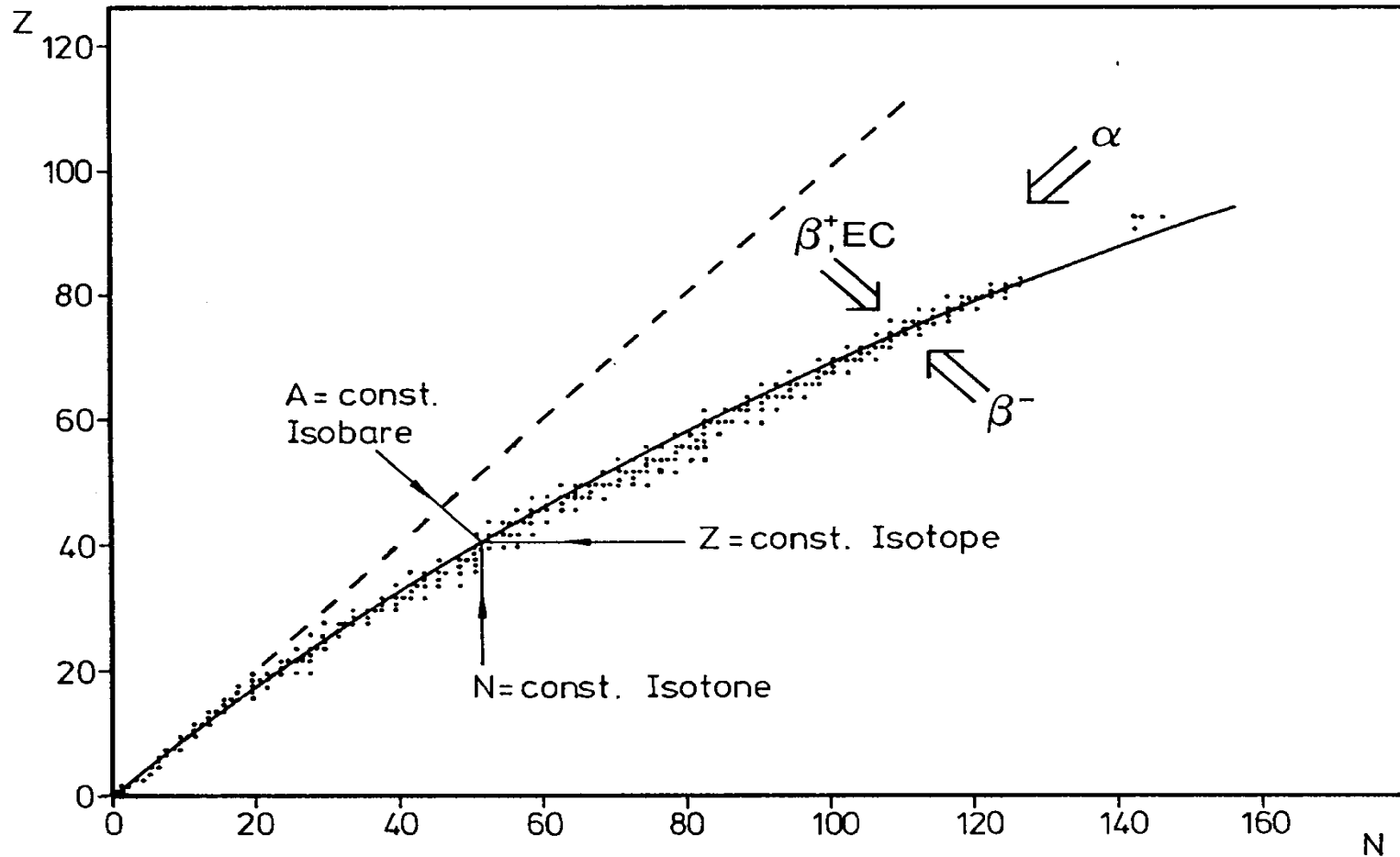
**Elektronen**

**Einfang:**



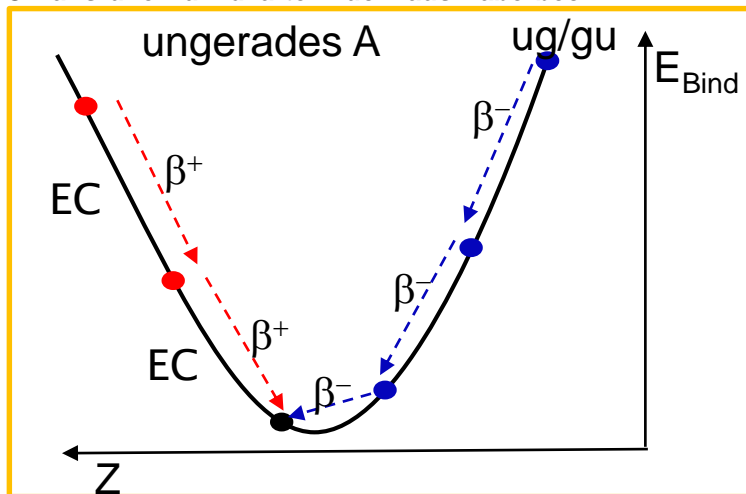
$$\begin{array}{rclcl} m_Z + m_e & = & m_{Z-1} & & + Q_{EC} \\ (Z-1)m_e & = & (Z-1)m_e & & \\ \hline M_Z & = & M_{Z-1} & & + Q_{EC} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{rclcl} m_Z + m_e & = & m_{Z-1} & & + Q_{EC} \\ (Z-1)m_e & = & (Z-1)m_e & & \\ \hline M_Z & = & M_{Z-1} & & + Q_{EC} \end{array}} \right\}$$

$\Delta Q_{EC} > 0$  wenn  $\Delta M > 0$   
( $\Delta M = M_Z - M_{Z-1}$ )



<b>Se 72</b> 8,5 d $\epsilon$ no $\beta^+$ $\gamma$ 46	<b>Se 73</b> 39,1 h $\epsilon$ 269; 4 $\beta^+$ 1,1 $\gamma$ 67, 68, 64, 393...	<b>Se 74</b> 3,89 $\epsilon$ 46	<b>Se 75</b> 119,64 d $\epsilon$ 265; 136; 280; 121; 401... $\alpha$ 330	<b>Se 76</b> 9,36 $\alpha$ 22 + 63	<b>Se 77</b> 17,5 s $\gamma$ 162 $\alpha$ 42	<b>Se 78</b> 23,78 $\alpha$ 0,38 + 0,05
<b>As 71</b> 65,28 h $\epsilon$ $\beta^+$ 0,8... $\gamma$ 175; 1095...	<b>As 72</b> 26,0 h $\beta^+$ 2,5; 3,3... $\gamma$ 834; 630...	<b>As 73</b> 3,3 d $\epsilon$ no $\beta^+$ $\gamma$ 53...	<b>As 74</b> 77 d $\epsilon$ $\beta^+$ 0,9; 1,4... $\gamma$ 596; 635...	<b>As 75</b> 100 $\alpha$ 4,3	<b>As 76</b> 26,4 h $\beta^-$ 3,0... $\gamma$ 559; 657; 1216...	<b>As 77</b> 38,8 h $\beta^-$ 0,7... $\gamma$ 239; 521; 2300... g
<b>Ge 70</b> 21,23 $\alpha$ 3,0	<b>Ge 71</b> 11,43 d $\epsilon$ no $\gamma$	<b>Ge 72</b> 27,66 $\alpha$ 0,9	<b>Ge 73</b> 7,73 $\alpha$ 15	<b>Ge 74</b> 35,94 $\alpha$ 0,14 + 0,2	<b>Ge 75</b> 47 s $\gamma$ 140... $\beta^-$ 1,2... $\gamma$ 205; 199... $\gamma$ (280)...	<b>Ge 76</b> 7,44 $1,53 \cdot 10^{21}$ a $\epsilon$ 28... $\alpha$ 0,09 + 0,06
<b>Ga 69</b> 60,108 $\alpha$ 1,68	<b>Ga 70</b> 21,15 m $\beta^-$ 1,7... $\gamma$ (1040; 176)	<b>Ga 71</b> 39,892 $\alpha$ 4,7	<b>Ga 72</b> 14,1 h $\beta^-$ 1,0; 3,2... $\gamma$ 834; 2202; 630; 2508...	<b>Ga 73</b> 86 h $\beta^-$ 1,2... $\gamma$ 297; 53... $\epsilon$ 7...	<b>Ga 74</b> 8,1 m $\beta^-$ 2,6; 1,9... $\gamma$ 199; 600... $\gamma$ 67... $\beta^-$ 7...	<b>Ga 75</b> 2,1 m $\beta^-$ 3,3... $\gamma$ 253; 575... g
<b>Zn 68</b> 18,8 $\alpha$ 0,072 + 0,8	<b>Zn 69</b> 13,8 h $\gamma$ 439 $\gamma$ (574) $\beta^-$ 0,9... $\gamma$ (319)...	<b>Zn 70</b> 0,6 $\alpha$ 0,0081 + 0,063	<b>Zn 71</b> 3,9 h $\beta^-$ 1,5; 2,5... $\gamma$ 386; 497; 510; 390...	<b>Zn 72</b> 46,5 h $\beta^-$ 0,3... $\gamma$ 145; 192...	<b>Zn 73</b> 23,5 s $\gamma$ 198 $\gamma$ 216; 191... $\gamma$ 42...	<b>Zn 74</b> 96 s $\beta^-$ 2,7; 2,3... $\gamma$ 49; 144; 193... m; g

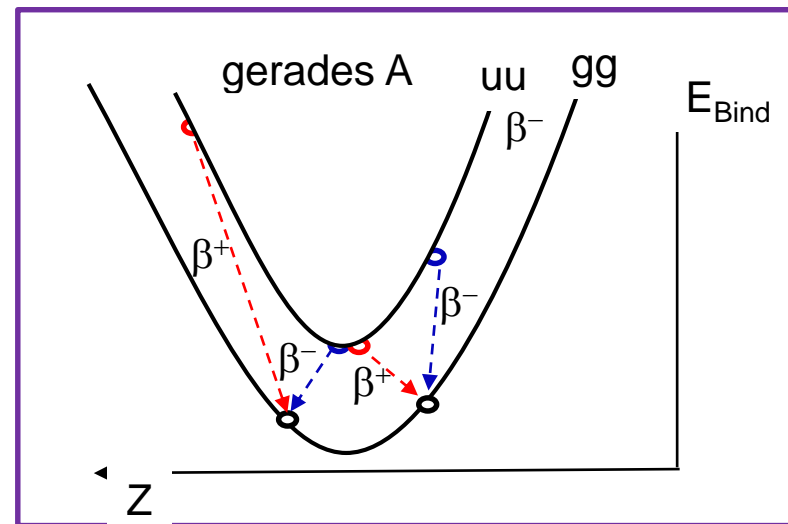
© Karlsruhe Nuklidkarte Druckhaus Haberbeck

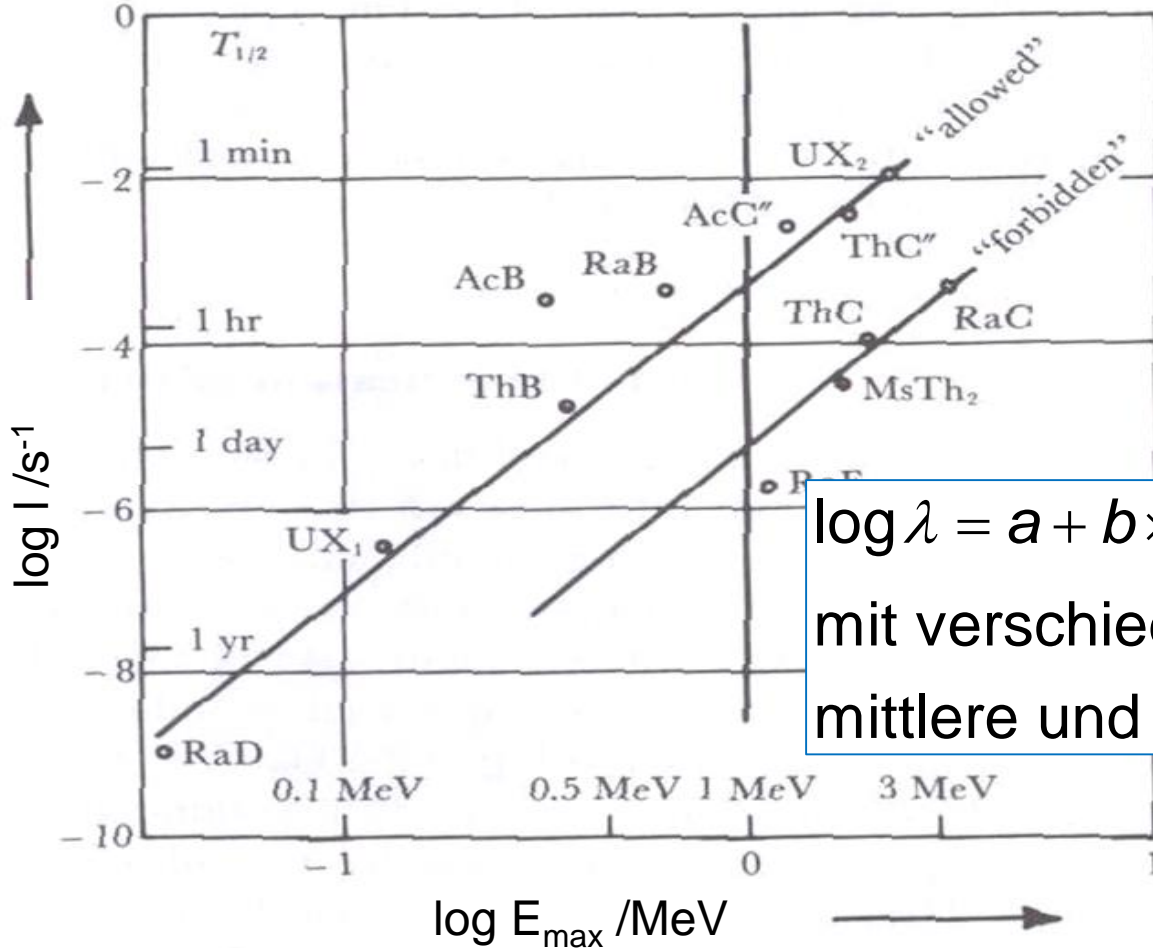


## Erinnerung: Tröpfchenmodell



$$E_{Bind} = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3} - a_a \frac{(Z - A/2)^2}{A} + a_p A^{-1/2}$$





$$\log \lambda = a + b \times \log E_{\beta, \max}$$

mit verschiedenem  $a, b$  für leichte  
mittlere und schwere Kerne.

Gesucht:  $N(E) dE$  und  $I(E_{\text{bmax}})$





Gesucht:  $N(E) dE$  und  $I(E_{\text{bmax}})$



Parameterisierung  $W = \frac{E + m_0 \cdot c^2}{m_0 \cdot c^2}$  (Gesamtenergie)

$N(E) dE \leftrightarrow N(p) dp \leftrightarrow N(W) dW$  und  $I(W_0) \leftrightarrow I(E_{\text{bmax}})$



Gesucht:  $N(E) dE$  und  $I(E_{\text{bmax}})$

Parameterisierung  $W = \frac{E + m_0 \cdot c^2}{m_0 \cdot c^2}$  (Gesamtenergie)

$N(E) dE \leftrightarrow N(p) dp \leftrightarrow N(W) dW$  und  $I(W_0) \leftrightarrow I(E_{\text{bmax}})$

Fermi's Goldene Regel, Zeitabhängige Störungsrechnung 1. Ordnung:

$$N(p) dp = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot |H_{if}|^2 \cdot \frac{dn}{dE_0}$$

Übergangsmatrixelement (Hamiltonian)

Phasenraum-  
faktor

$$N(p) dp = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot |H_{if}|^2 \cdot \frac{dn}{dE_0}$$

$$|H_{if}|^2 = |\langle i | H | f \rangle|^2 \text{ entwickeln um } r = 0 :$$

$$|H_{if}|^2 = g^2 \cdot |\phi_e(0)|^2 \cdot |\phi_\nu(0)|^2 \cdot |M_{if}|^2$$

$$\text{mit } |M_{if}|^2 = \left| \int \phi_f^* m \phi_i d\tau \right|^2$$



$$N(p) dp = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot |H_{if}|^2 \cdot \frac{dn}{dE_0}$$

$$|H_{if}|^2 = |\langle i | H | f \rangle|^2 \text{ entwickeln um } r = 0 :$$

$$|H_{if}|^2 = g^2 \cdot |\phi_e(0)|^2 \cdot |\phi_v(0)|^2 \cdot |M_{if}|^2$$

$$\text{mit } |M_{if}|^2 = \left| \int \phi_f^* m \phi_i d\tau \right|^2$$

$$N(p) dp = \text{consts} \cdot |M_{if}|^2 \cdot F(Z, W) \cdot p^2 (E_0 - E)^2 dp$$


$$N(W) dW = \text{consts} \cdot |M_{if}|^2 \cdot F(Z, W) \cdot W (W^2 - 1)^{1/2} (W_0 - W) dW$$

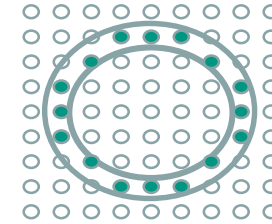
$$W = m_0 c^2 + E$$


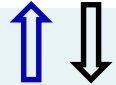


$$N(p_e)dp_e = \frac{2\pi}{\hbar} \underbrace{|\langle I | H | F \rangle|^2}_{H_{if}} \frac{dn}{dE_o}$$

WS für Impuls  
des Elektrons

$$|H_{fi}|^2 = g_\nu^2 M_F^2 + g_A^2 M_{GT}^2$$

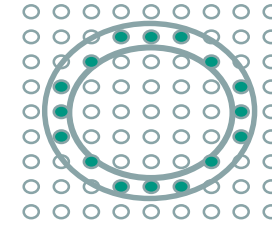




Matrix	Name	Kern spin	e <sup>-</sup> v <sub>e</sub>
$g_\nu^2 M_F^2$	Fermi		
$g_A^2 M_{GT}^2$	Gamov Teller		

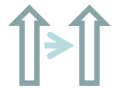
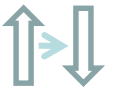
$$N(p_e)dp_e = \frac{2\pi}{\hbar} \underbrace{|\langle I | H | F \rangle|^2}_{H_{fi}} \frac{dn}{dE_o}$$







WS für Impuls  
des Elektrons



Dichte d. Endzustands

$$|H_{fi}|^2 = g_\nu^2 M_F^2 + g_A^2 M_{GT}^2$$

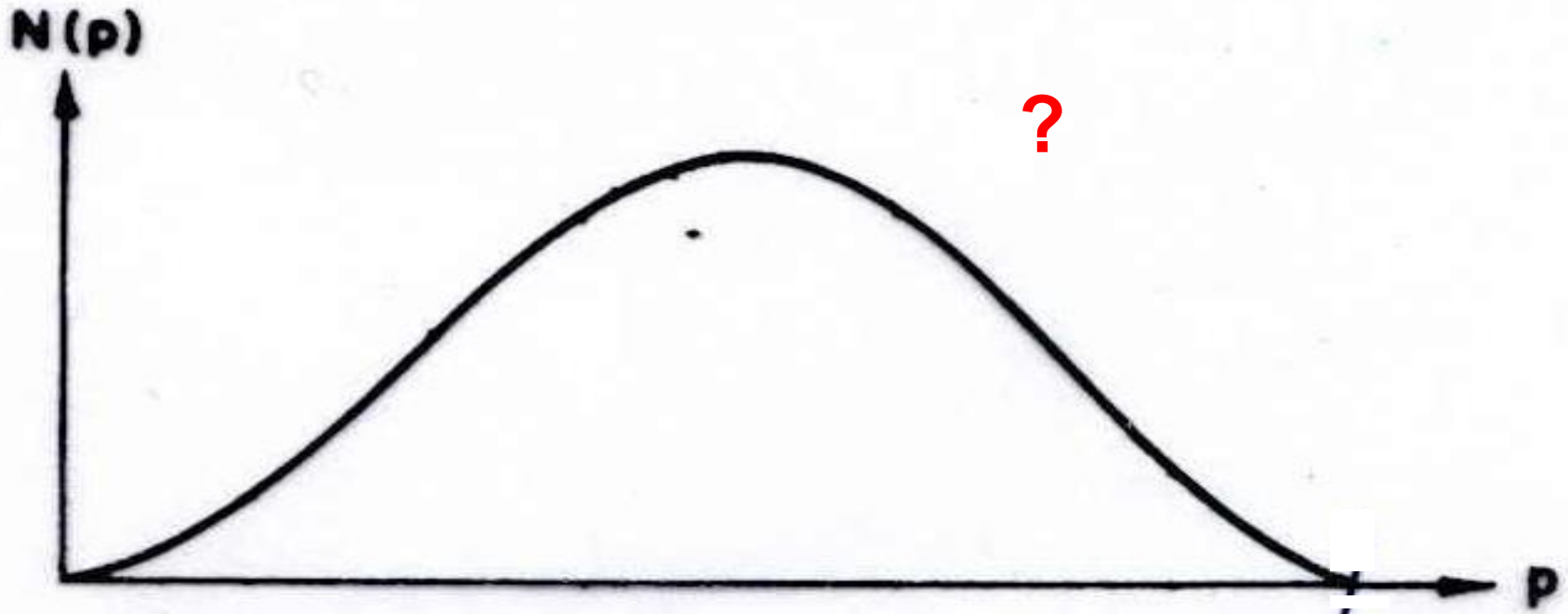
Matrix	Name	Kern spin	e <sup>-</sup>	v <sub>e</sub>
$g_\nu^2 M_F^2$	Fermi			
$g_A^2 M_{GT}^2$	Gamov Teller			

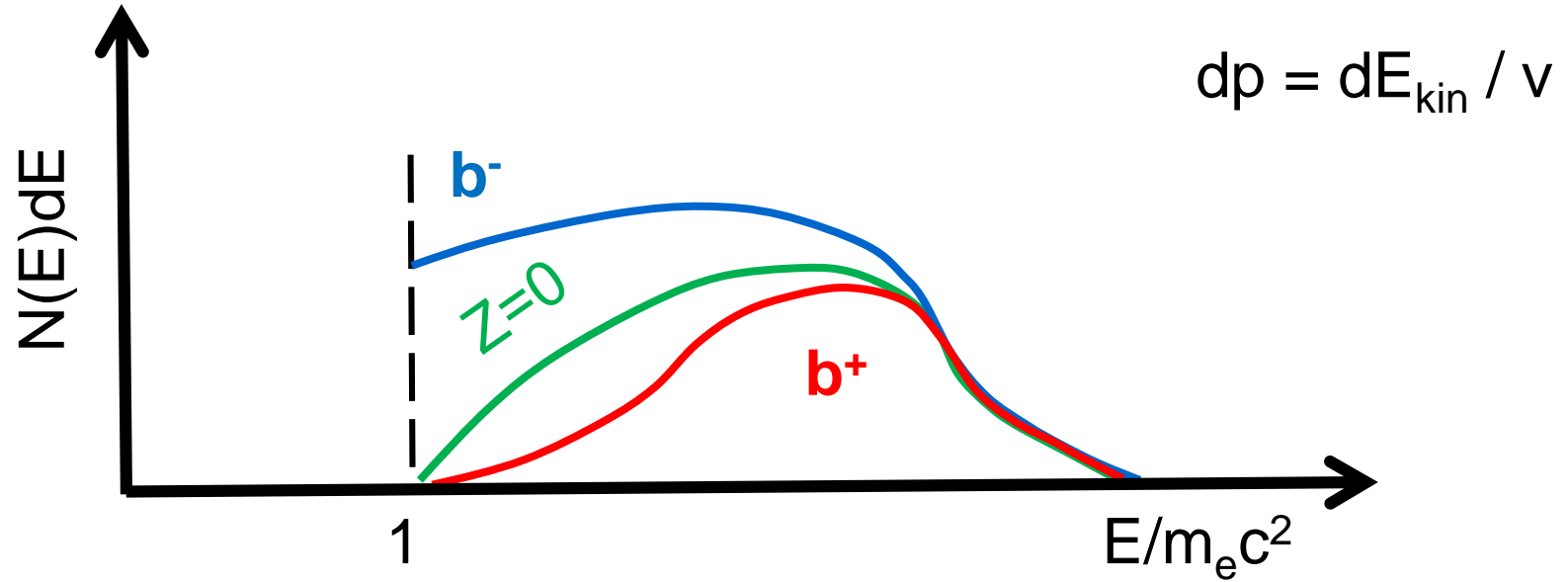
$$\eta = \frac{p}{m_0 c^2}$$

$$N(\eta_e)d\eta_e = \frac{g_\nu^2 M_F^2 + g_A^2 M_{GT}^2}{B} F(Z, \eta) \eta^2 (\epsilon_0 - \epsilon)^2 d\eta$$

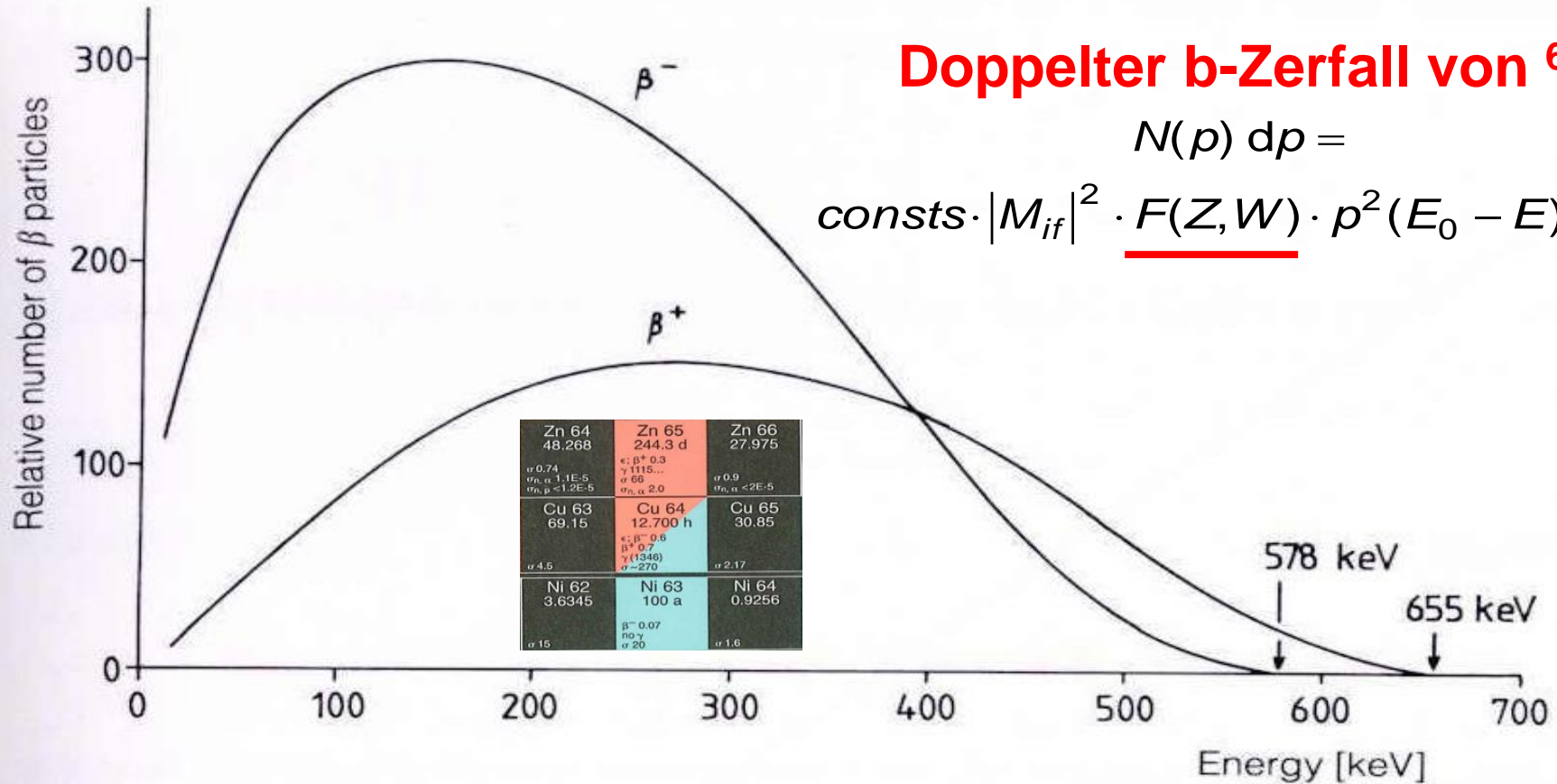
Fermifunktion:  
e- durch Kern gebremst  
e+ durch Kern beschleunigt

$$N(p) dp = \text{consts} \cdot |M_{if}|^2 \cdot F(Z, W) \cdot p^2 (E_0 - E)^2 dp$$

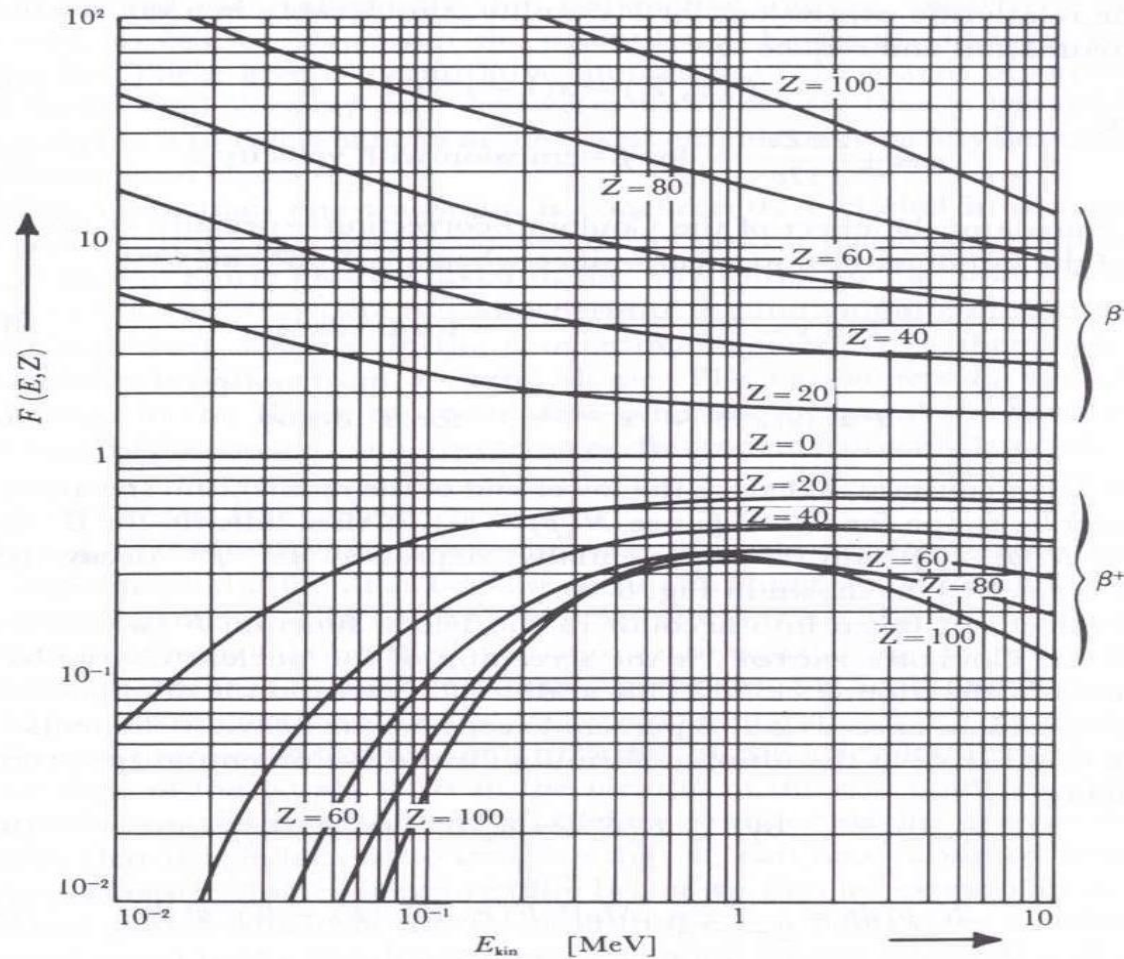








# Die Fermi Funktion abhängig von $Z$ und der $\beta$ -Energie



$$N(\eta_e)d\eta_e = \frac{g_v^2 M_F^2 + g_A^2 M_{GT}^2}{B} F(Z, \eta) \eta^2 (\epsilon_0 - \epsilon)^2 d\eta$$

Def.:  $f(Z, \eta) = \int_0^{\eta_0} F(Z, \eta) \eta^2 (\epsilon_0 - \epsilon)^2 d\eta$

$$\lambda = \int_0^{\eta_0} N(\eta) d\eta = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

$$ft = f(Z, \eta) t_{1/2} = \frac{B \ln 2}{g_v^2 M_F^2 + g_A^2 M_{GT}^2}$$

Maß für Kernmatrixelement und Kopplungsstärke

$$\lambda = \int_0^{E_0} N(\eta) d\eta$$

$$\lambda = \frac{g^2}{2\pi^3 \cdot \hbar^7 \cdot c^3} |M_{if}|^2 \int_0^{E_0} F(Z, E) \cdot \eta^2 \cdot (E_0 - E)^2 d\eta$$

$$\lambda = \frac{g^2 \cdot m_e^5 \cdot c^4}{2\pi^3 \cdot \hbar^7} |M_{if}|^2 \int_0^{E_0} \underline{F(Z, W) \cdot \sqrt{W^2 - 1} \cdot (W_0 - W)^{1/2} \cdot W} dW$$

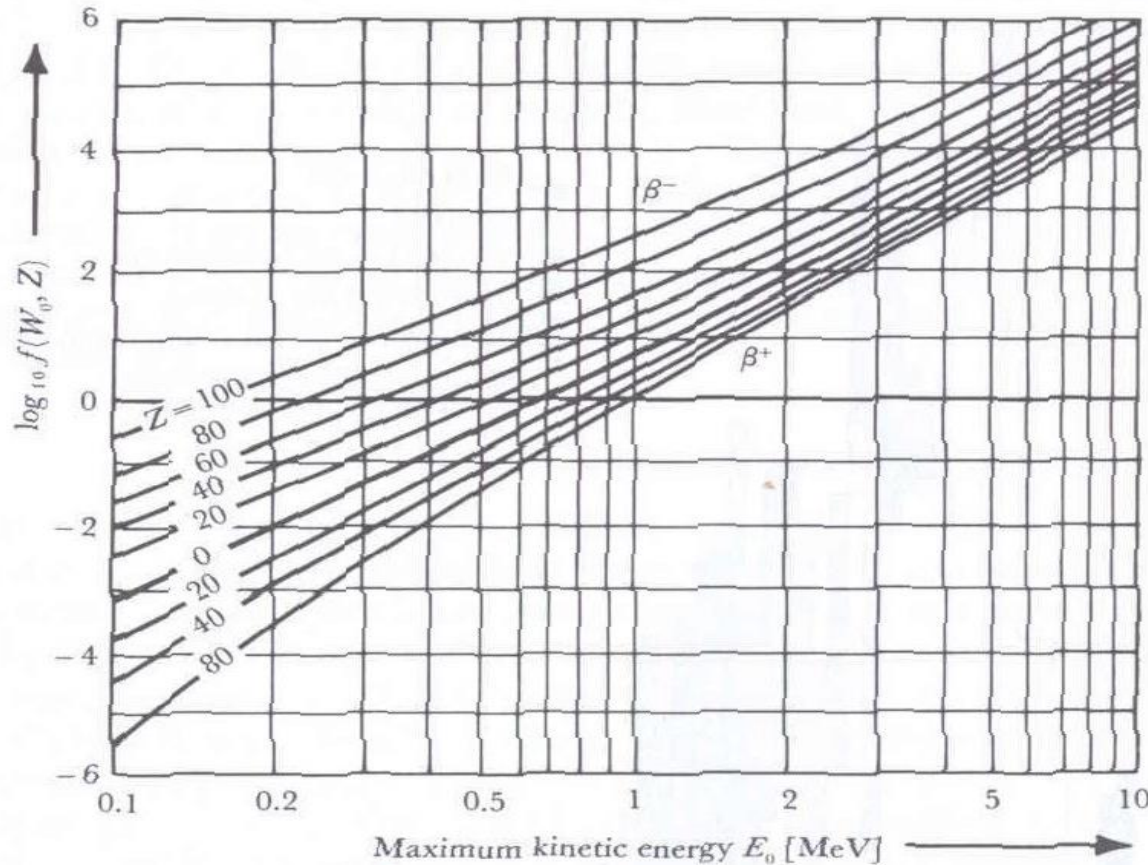
$$\lambda = \frac{g^2 \cdot m_e^5 \cdot c^4}{2\pi^3 \cdot \hbar^7} |M_{if}|^2 \cdot \underline{f(Z, W_0)}$$

$f(Z, W_0) \propto W_0^5$

Das Fermi Integral

# Das Fermi Integral versus $\beta$ -Endpunktenergie \*

\* maximale beta Energie



$$f(Z, W_0) \propto W_0^5$$

$$\log f_{\beta^-} = 4,0 \cdot \log E_0 + 0,80 + 0,02 \cdot Z - 0,005 \cdot Z \cdot \log E_0$$

$$\log f_{\beta^+} = 4,0 \cdot \log E_0 + 0,80 + 0,0077 \cdot Z - 0,009 \cdot Z \cdot \left(\log \frac{E_0}{3}\right)^2$$

$$\log f_{EC} = 2,0 \cdot \log E_0 + 3,5 \cdot \log Z - 5,6$$

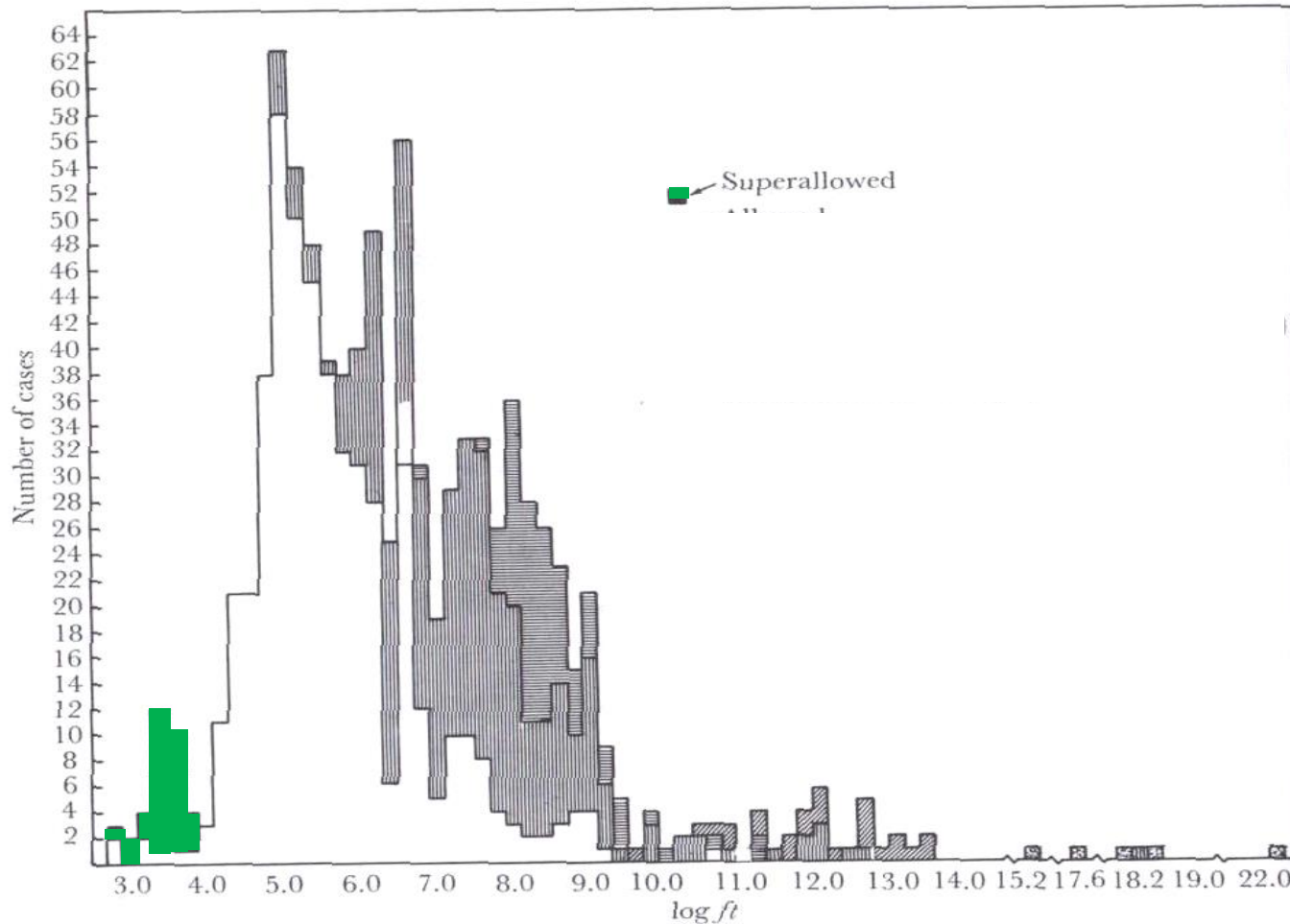
$$\lambda = \frac{g^2 \cdot m_e^5 \cdot c^4}{2\pi^3 \cdot \hbar^7} |M_{if}|^2 \int_0^{E_0} F(Z, W) \cdot \sqrt{W^2 - 1} \cdot (W_0 - W)^{1/2} \cdot W \, dW$$

$$\lambda = \frac{|M_{if}|^2}{\tau_0} \cdot f(Z, W_0) \quad \text{mit} \quad \tau_0 = \frac{2\pi^3}{g^2} \frac{\hbar^2}{m_0^5 \cdot c^4} \approx 10^4 \, \text{sec}$$

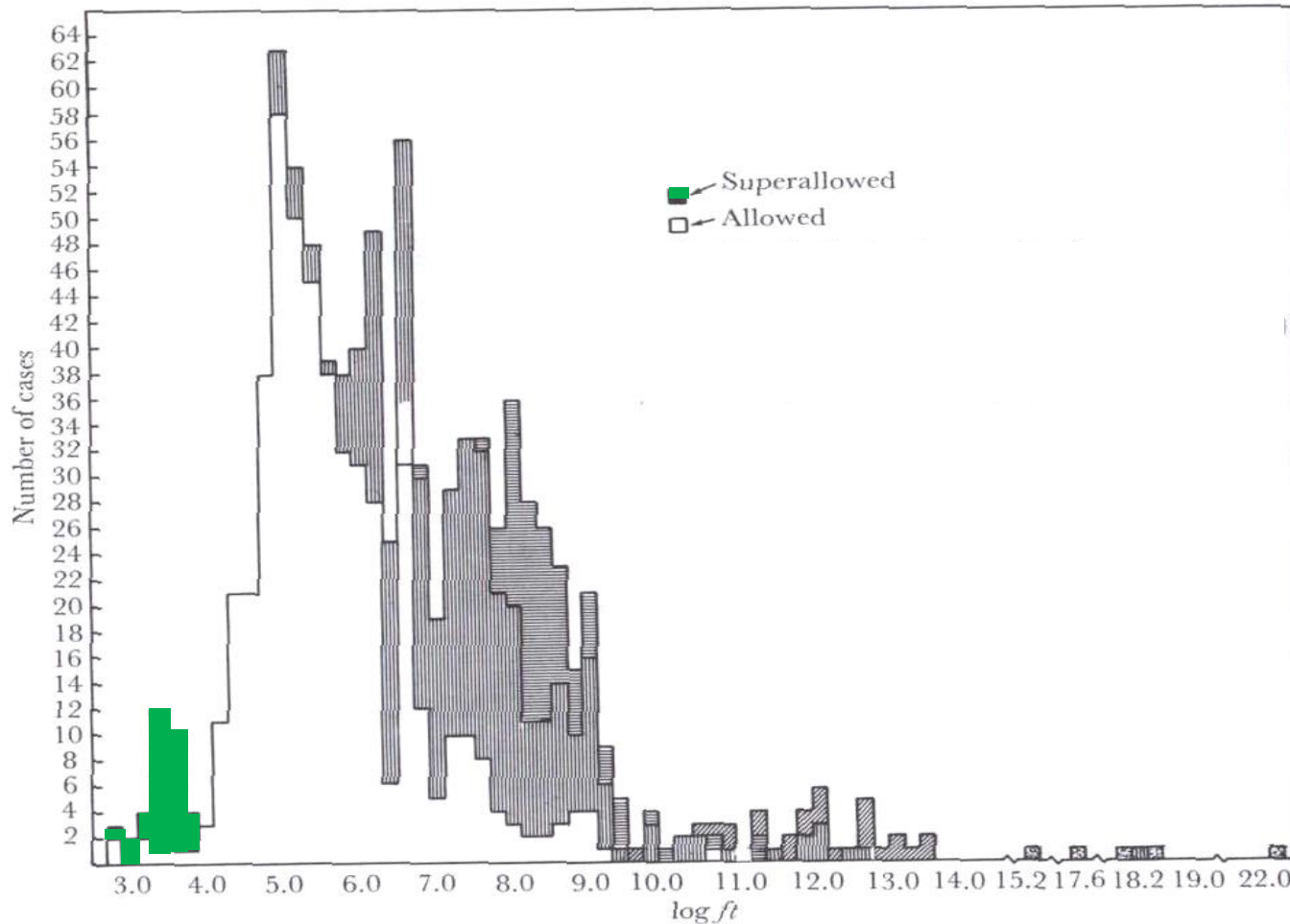
$$f(Z, W_0) \cdot T_{1/2} = \frac{\tau_0 \cdot \ln 2}{|M_{if}|^2}$$

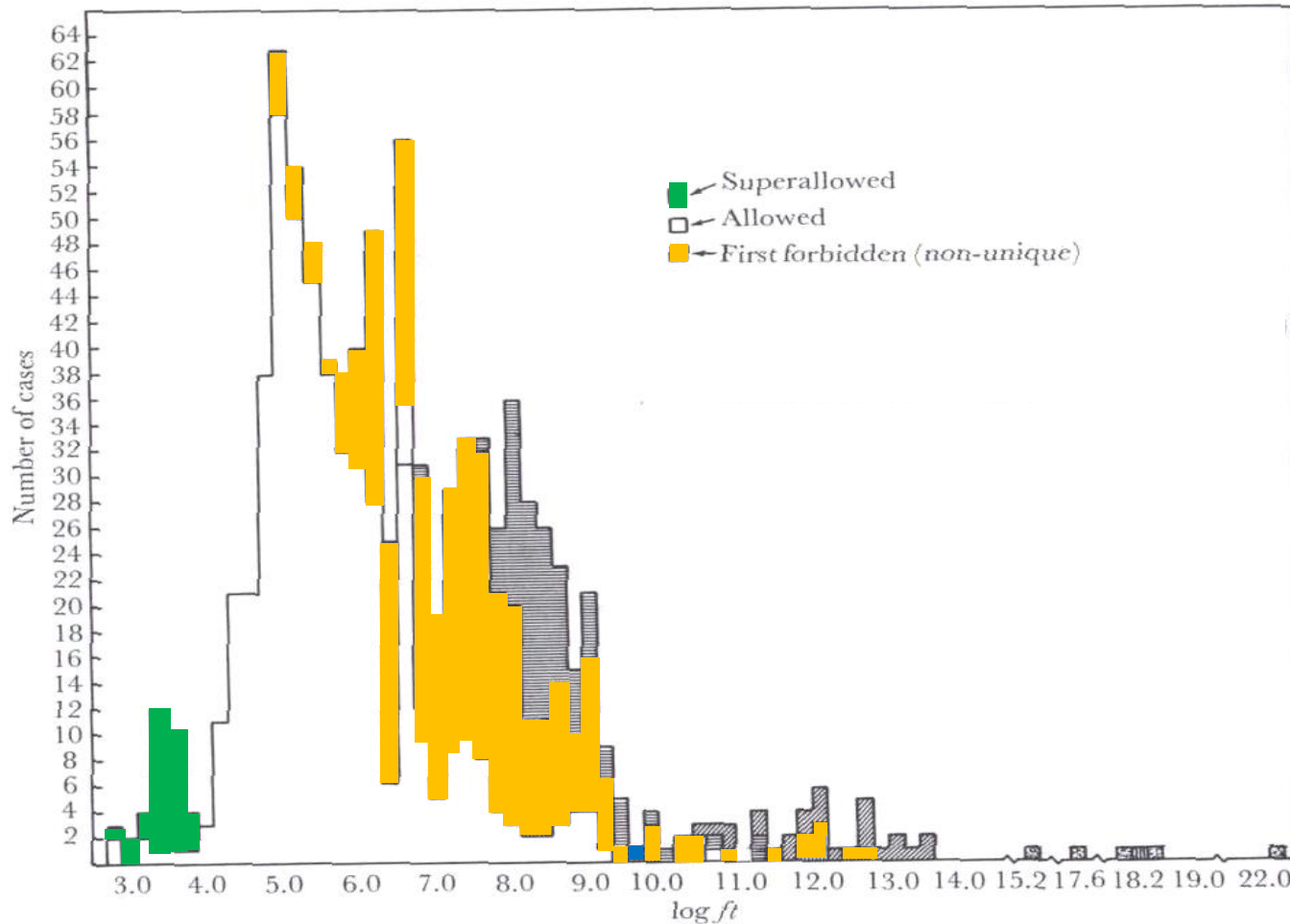


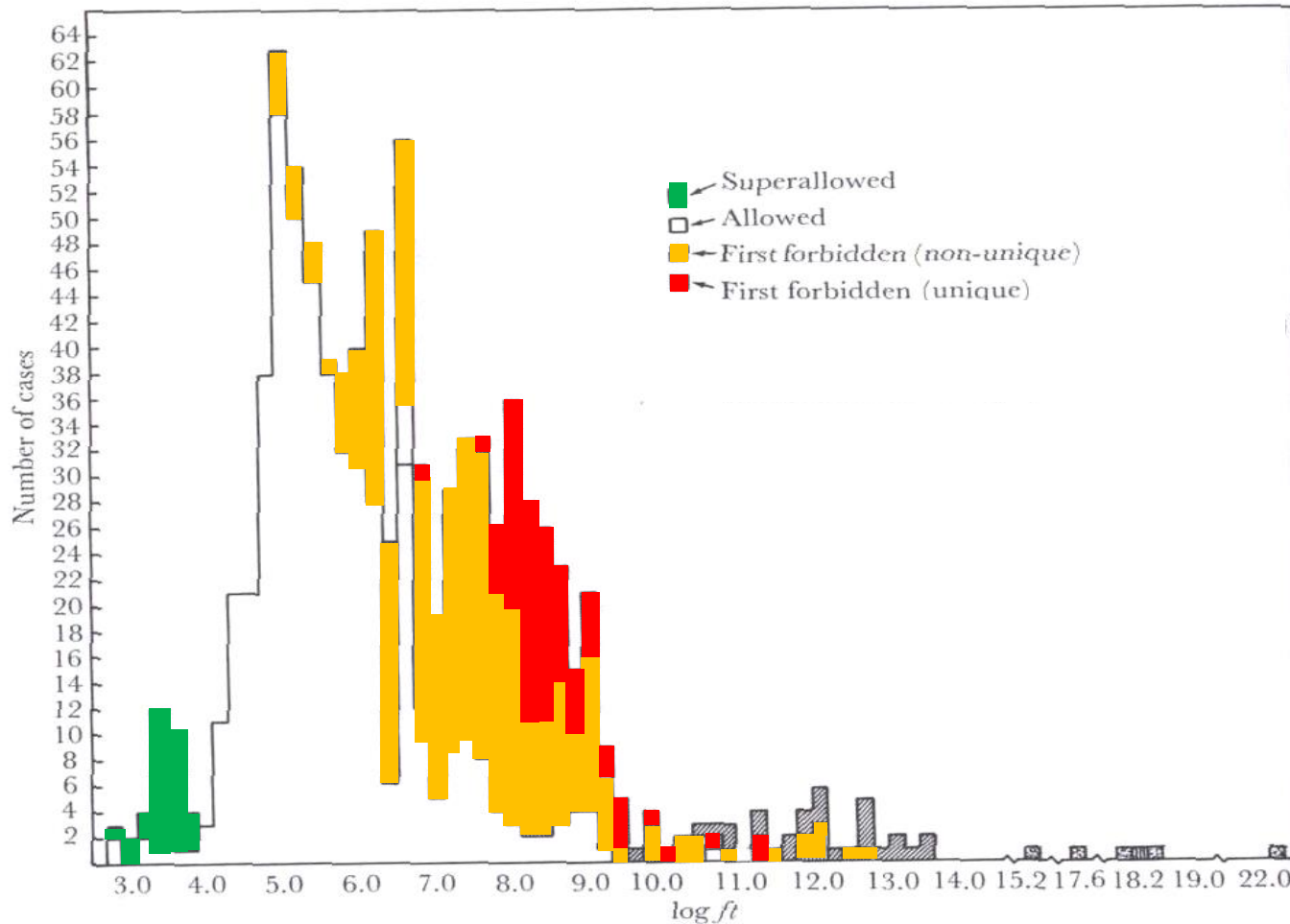
***fT*-values, more frequently  $\log(fT)$**

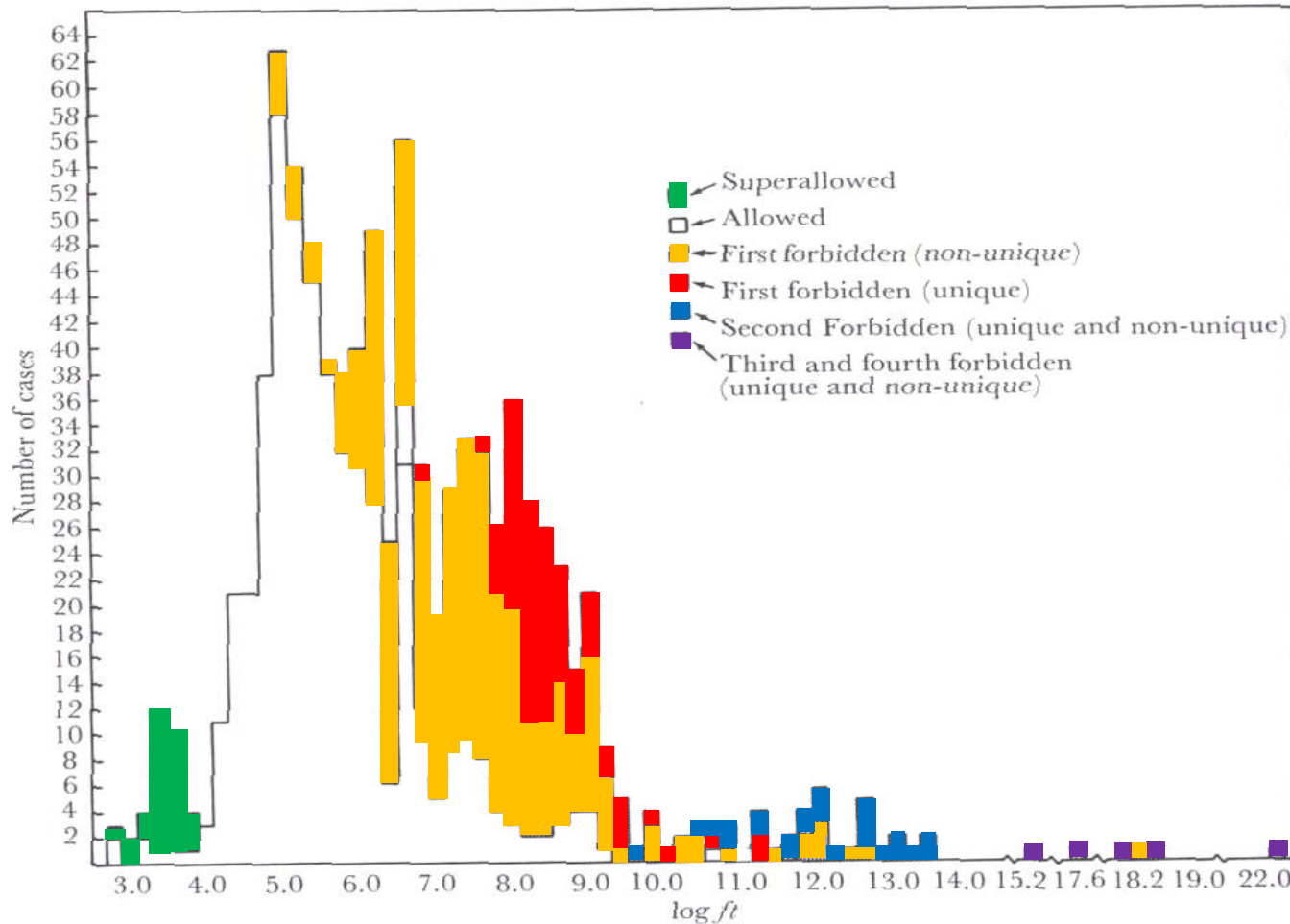








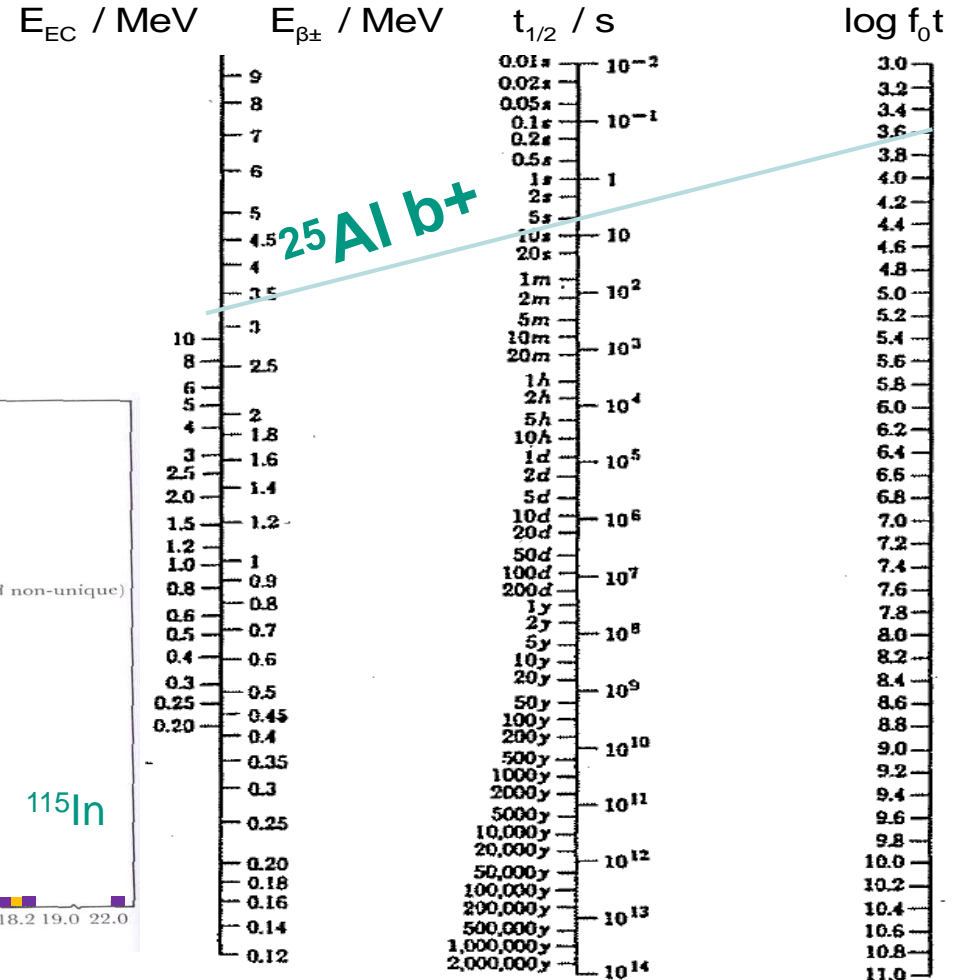
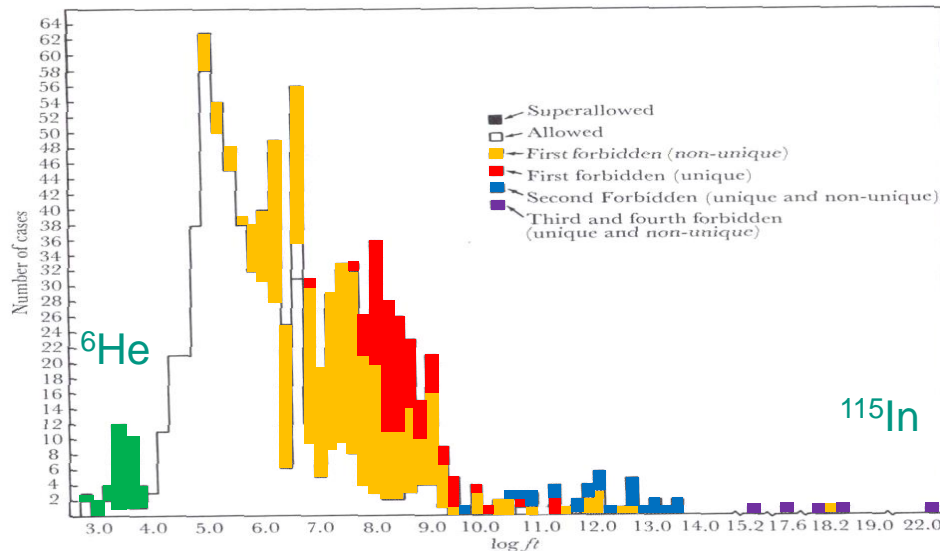


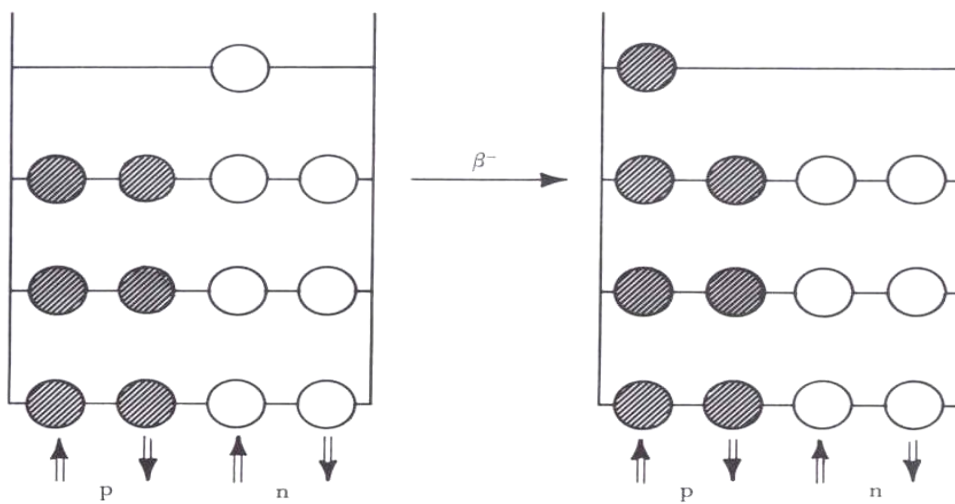


Maß der „Verbotenheit“ :  
Spin, Parität

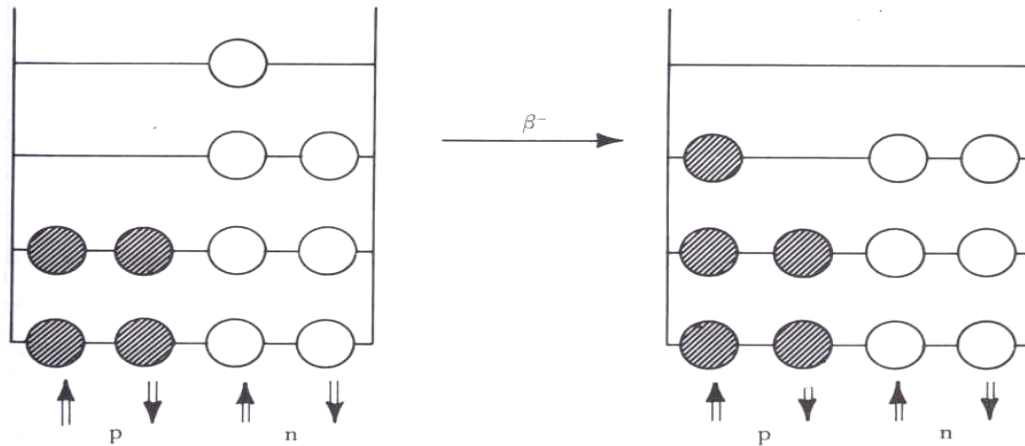
$$\log ft = \log f_0 t + \log C$$

Beitrag Coulomb Feld





**Fig. 8-28.** Schematic illustration of the change in level occupation following a  $\beta^-$  transition between mirror nuclei. Protons are indicated by darkened circles, neutrons by open circles. The arrows indicate spin orientation.



**Fig. 8-29.** A  $\beta^-$  transition between nuclei which are *not* mirror partners involves a more radical change in the nuclear wave functions than one between mirror nuclei (Fig. 8-28). Hence the overlap integral, and therefore the transition matrix element  $M_{fi}$ , is smaller by about one order of magnitude.

## Kategorisierung des $\beta$ -Zerfalls

- super erlaubt
- erlaubt
- einfach verboten
- doppelt verboten
- dreifach verboten
- vierfach verboten

# Kategorisierung der $\beta$ -Übergänge

Classification	Change of the quantum number of orbital spin, $\Delta L$	Change of the nuclear spin, $\Delta I$	Change of the parity	$\log ft$	Examples
Allowed (favoured)	0	0	No	2.7–3.7	n, $^3\text{H}$ , $^6\text{He}(\Delta I = 1 !)$ , $^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{17}\text{F}$ , $^{19}\text{Ne}$ , $^{21}\text{Na}$ , $^{23}\text{Mg}$ , $^{25}\text{Al}$ , $^{27}\text{Si}$ , $^{29}\text{P}$ , $^{31}\text{S}$ , $^{33}\text{Cl}$ , $^{35}\text{Ar}$ , $^{37}\text{K}$ , $^{39}\text{Ca}$ , $^{41}\text{Sc}$ , $^{43}\text{Ti}$
Allowed (normal)	0	0 or 1	No	4–7	$^{12}\text{B}$ , $^{12}\text{N}$ , $^{35}\text{S}$ , $^{64}\text{Cu}$ , $^{69}\text{Zn}$ , $^{114}\text{In}$
Allowed (1-forbidden)	2	1	No	6–9	$^{14}\text{C}$ , $^{32}\text{P}$
First forbidden	1	0 or 1	Yes	6–10	$^{111}\text{Ag}$ , $^{143}\text{Ce}$ , $^{115}\text{Cd}$ , $^{187}\text{W}$
First forbidden (special cases)	1	2	Yes	7–10	$^{38}\text{Cl}$ , $^{90}\text{Sr}$ , $^{97}\text{Zr}$ , $^{140}\text{Ba}$
Second forbidden	2	2	No	11–14	$^{36}\text{Cl}$ , $^{99}\text{Tc}$ , $^{135}\text{Cs}$ , $^{137}\text{Cs}$
Second forbidden (special cases)	2	3	No	$\approx 14$	$^{10}\text{Be}$ , $^{22}\text{Na}$
Third forbidden	3	3	Yes	17–19	$^{87}\text{Rb}$
Third forbidden (special cases)	3	4	Yes	18	$^{40}\text{K}$
Fourth forbidden	4	4	No	$\approx 23$	$^{115}\text{In}$





$$E_{\alpha} = \frac{p_{\alpha}^2}{2m_{\alpha}} \quad E_{\text{Rückstoß Kern}} = \frac{p_{\alpha}^2}{2m_A}$$

$$E_{\text{Rückstoß Kern}} = \frac{2m_{\alpha}}{2m_A} E_{\alpha} = \frac{m_{\alpha}}{m_A} E_{\alpha} \approx \frac{4}{A} E_{\alpha}$$

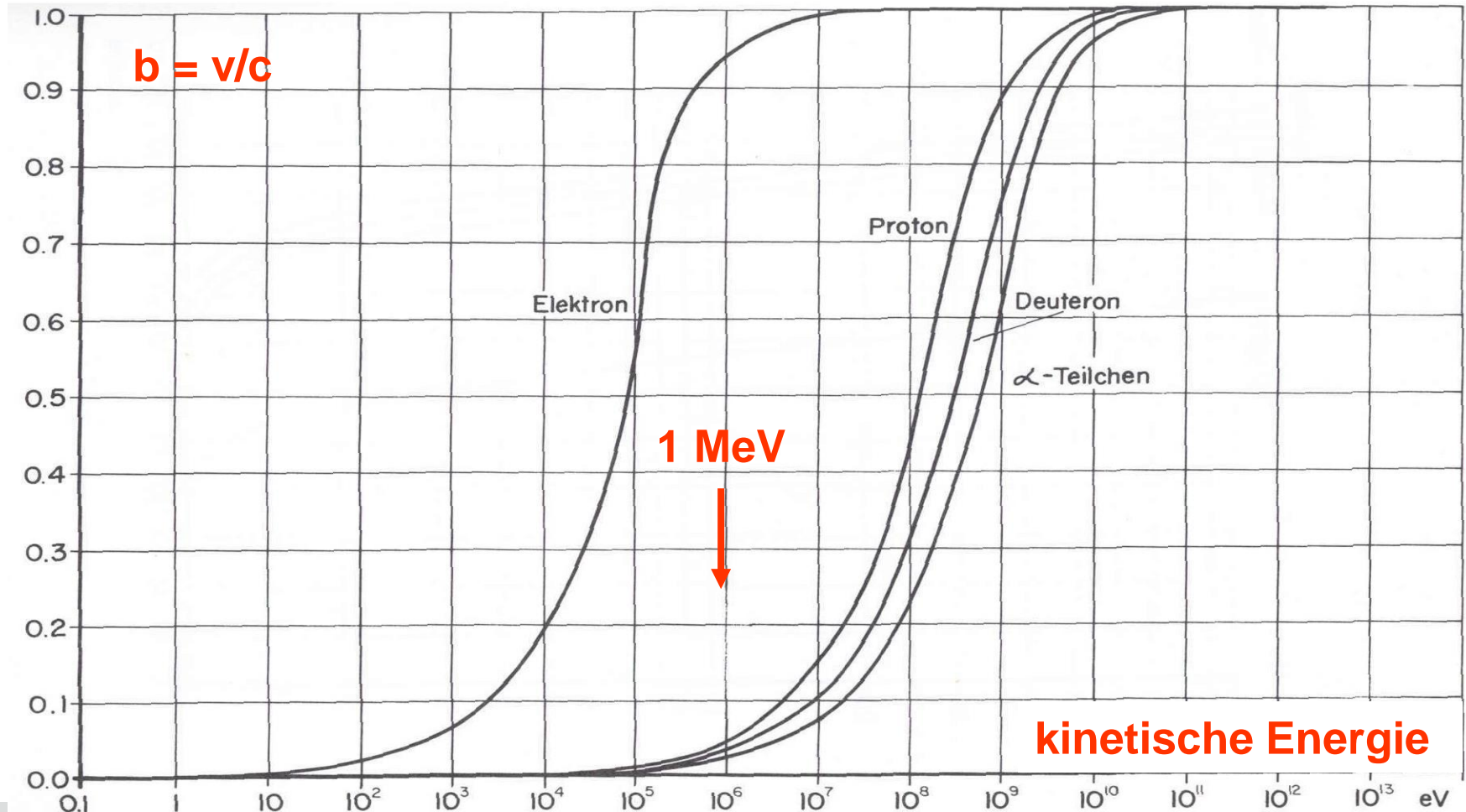
Für  $A = 200$  und  $E_{\alpha} = 5 \text{ MeV}$  ergibt sich

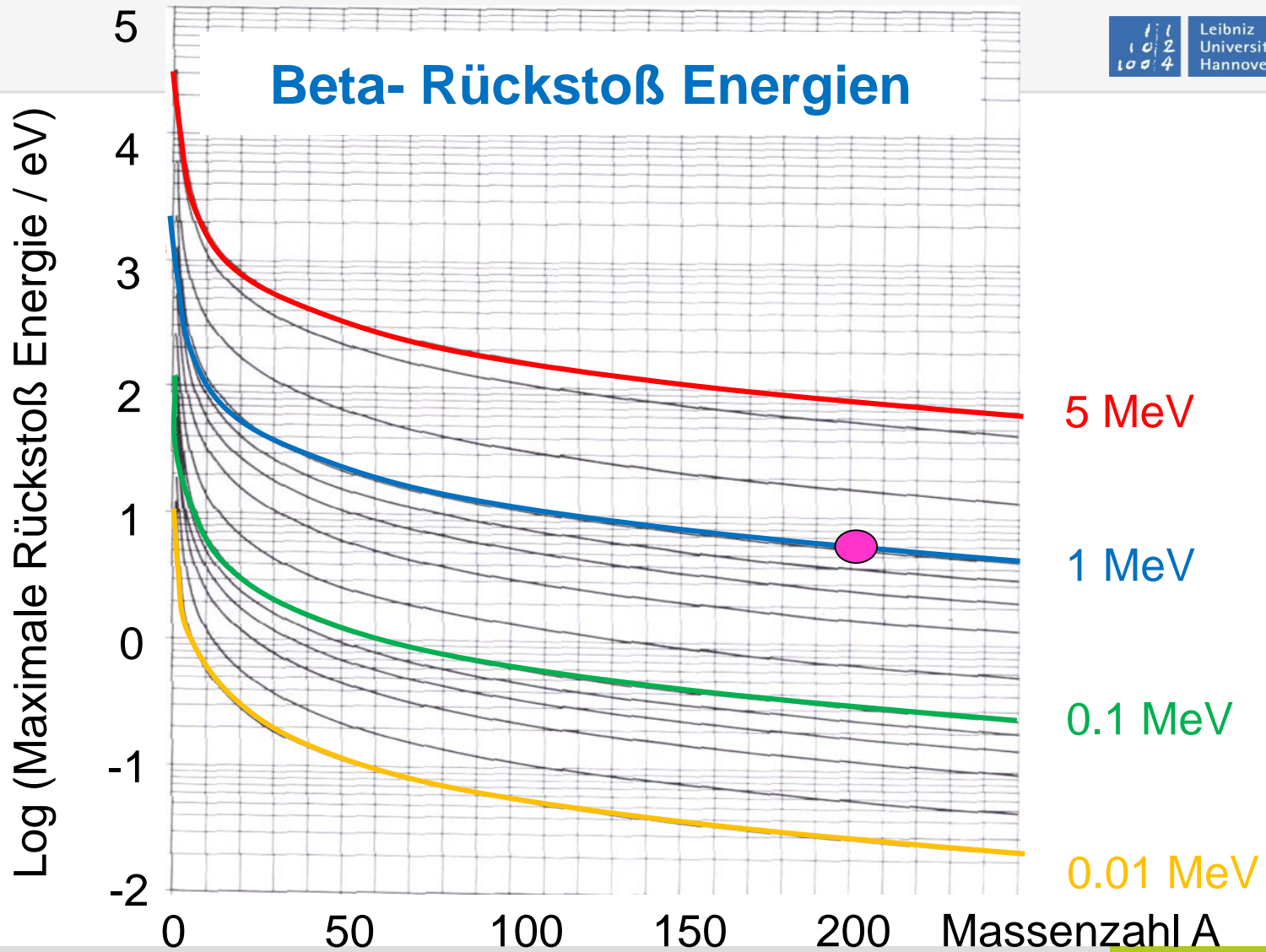
$$E_{\text{Rückstoß Kern}} = 100 \text{ keV.}$$

$$E_{\text{Rückstoß Kern}} = \frac{m_{e,o}}{m_A} E_\beta + \frac{E_\beta^2}{2m_A c^2}$$

← relativistische  
Massenkorrektur

$$m_e = \frac{m_{e,o}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

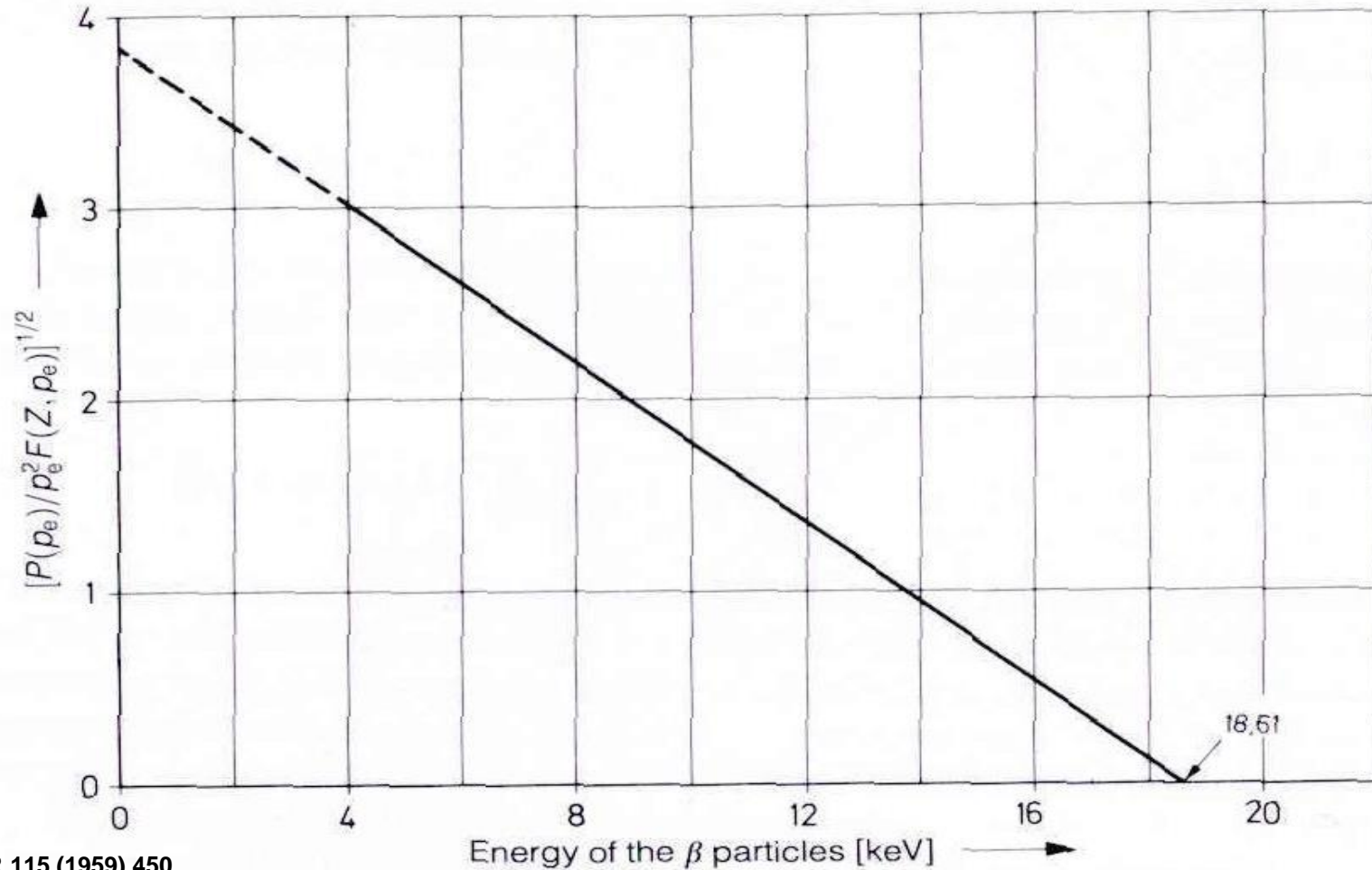




$$N(p) \, dp = \text{consts} \cdot |M_{if}|^2 \cdot F(Z, W) \cdot p^2 (E_0 - E)^2 \, dp$$

$$\sqrt{\frac{N(p) \, dp}{p^2 \cdot F(Z, W)}} = \text{consts} \cdot (E_0 - E)$$

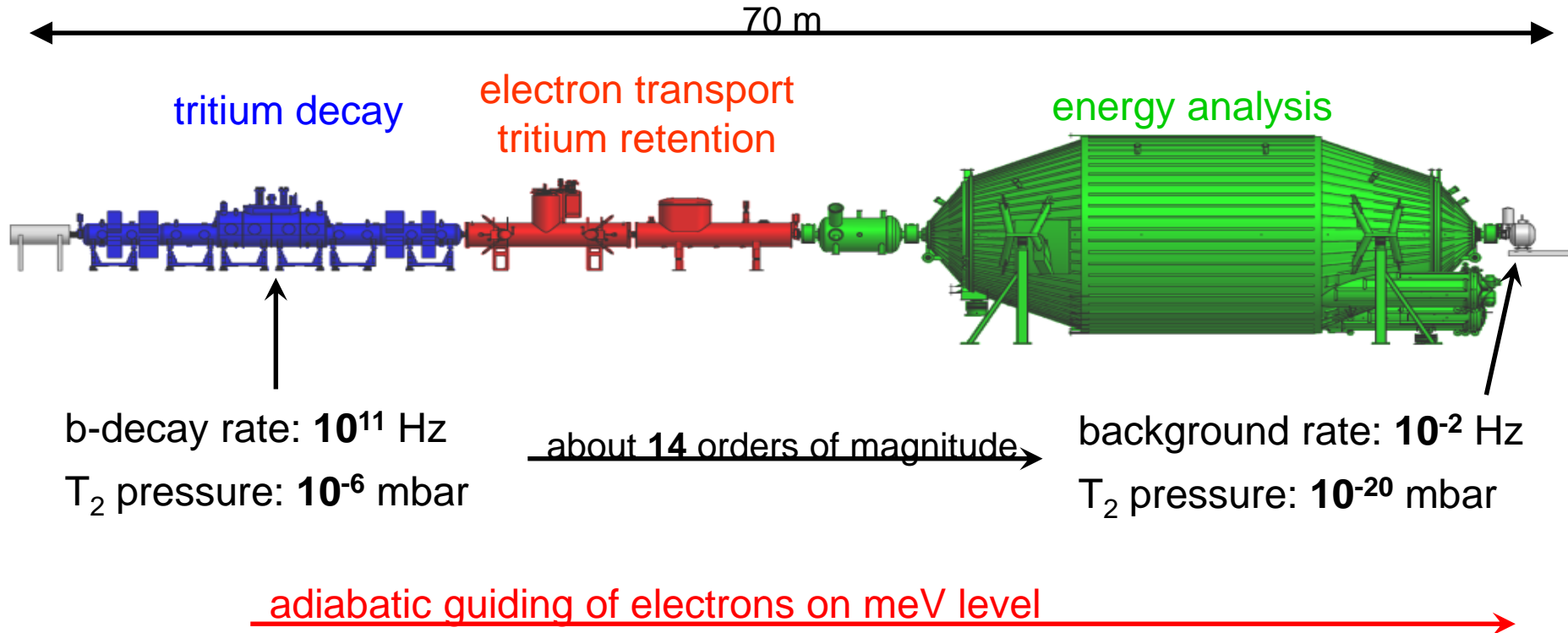
Linearisierung des b-Spektrums,  
Ein Werkzeug,  $m_{n,0}$  zu bestimmen



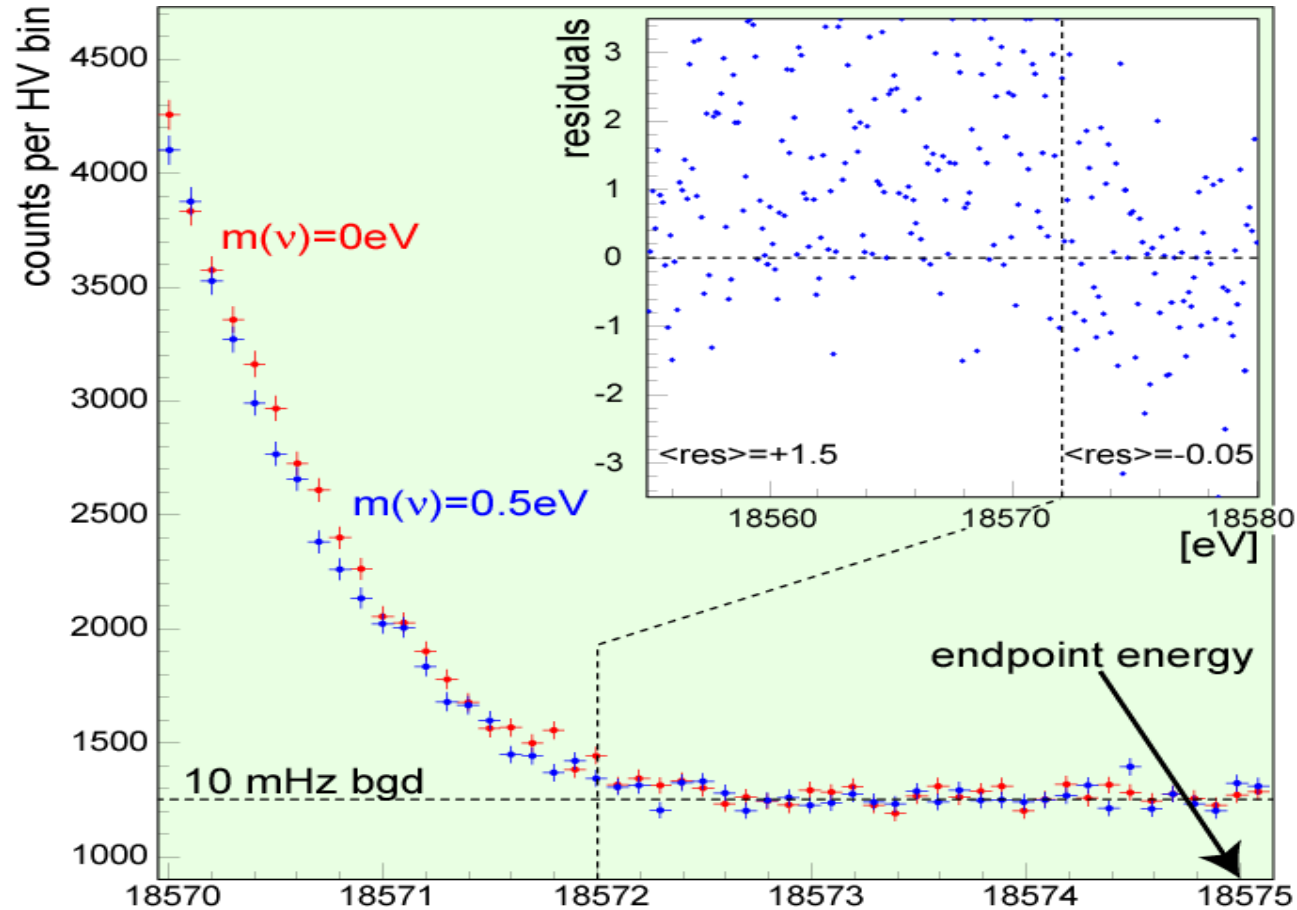
# KATRIN: Ein Experiment zuur Bestimmung der Neutrinomasse



(KARlsruhe TRItium Neutrino experiment, location: Forschungszentrum Karlsruhe)



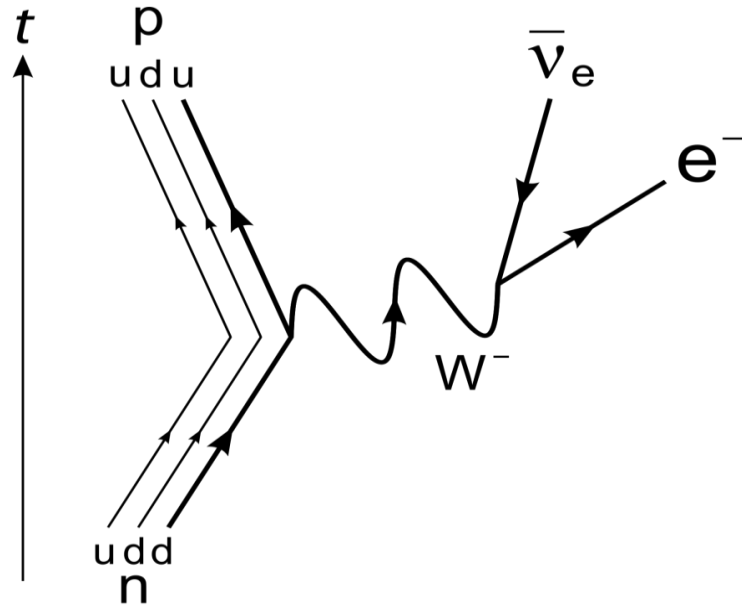




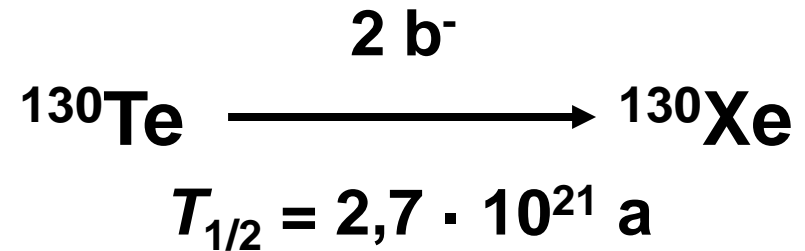
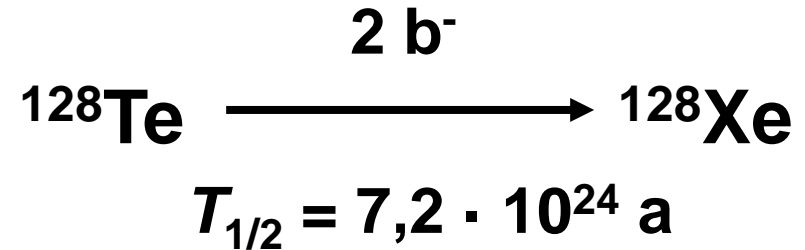
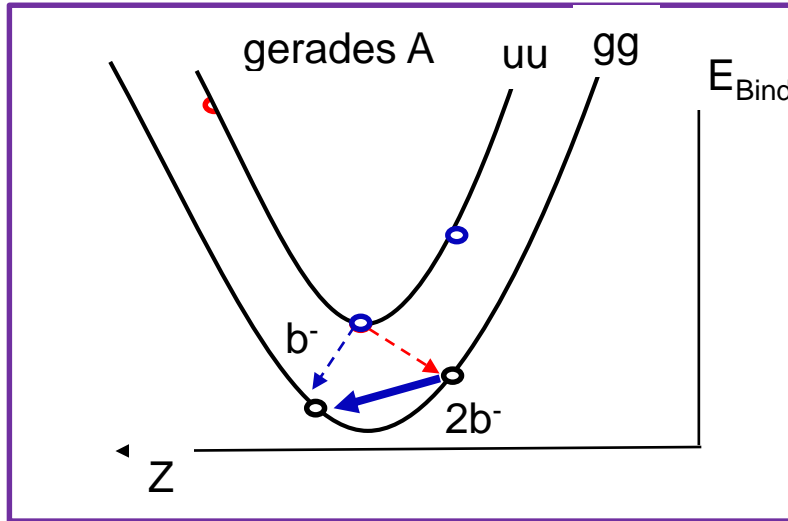
KATRIN

Transport

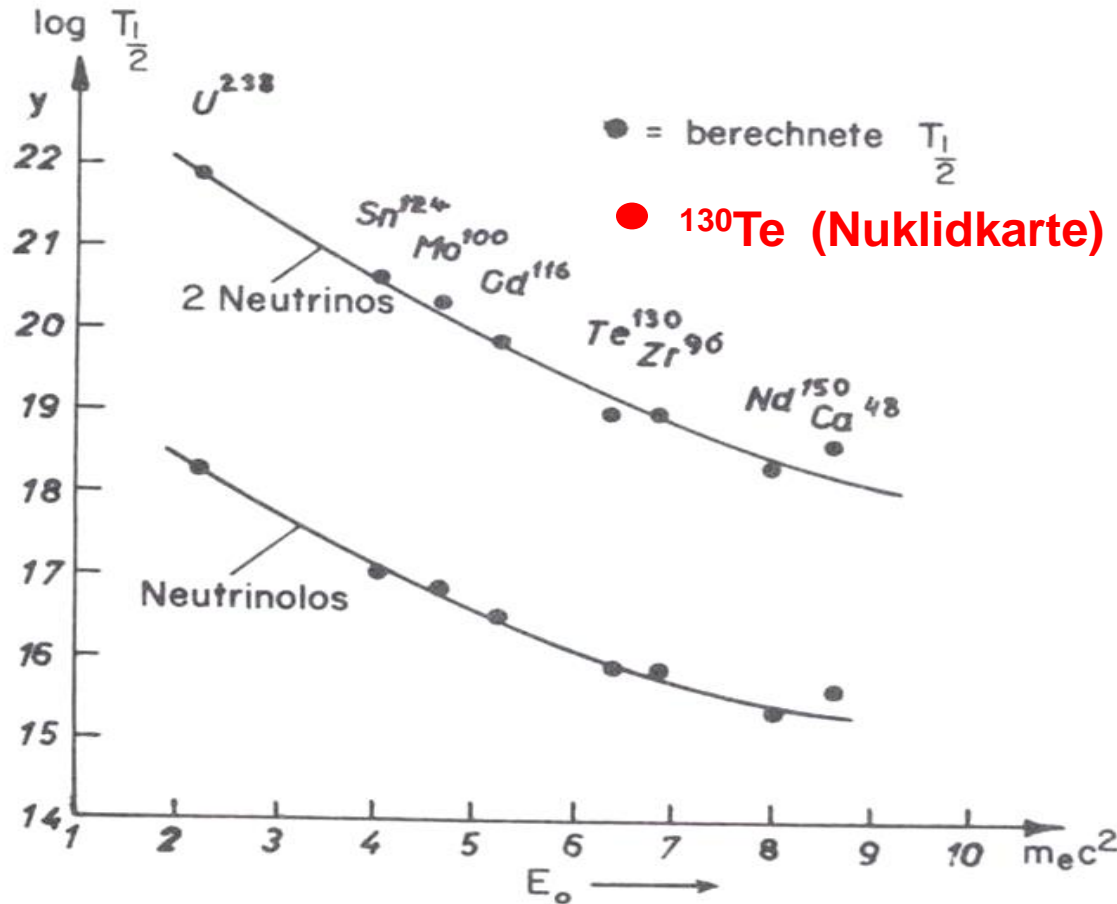




Kopplung:	Massive Vektorbosonen $W: \sim 80 \text{ GeV}/c^2$ $Z: \sim 90 \text{ GeV}/c^2$
Reichweite	Comptonwellenlänge $\frac{\hbar}{mc} \sim 10^{-3} \text{ fm}$
Paritäts- verletzung	$e^-$ , $\nu_e$ haben Schraubensinn!



Erste experimentelle Beobachtung bei der Isotopenanalyse von Xenon in datierten Tellur Erzen durch Kirsten und Mitarbeiter.



## Doppelter $\beta$ -Zerfall

Zur Geschichte des doppelten  $\beta$ -Zerfalls : H.V. Klapdor-Kleingrothaus, Sixty Years of Double Beta Decay, World Scientific, Singapore, 2001.

Marmier, 1960



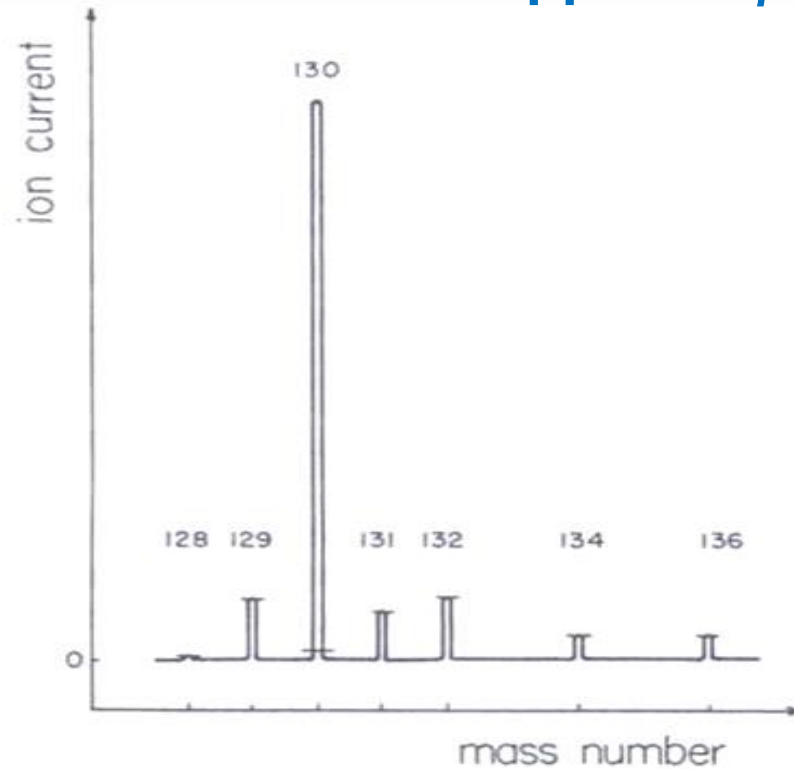
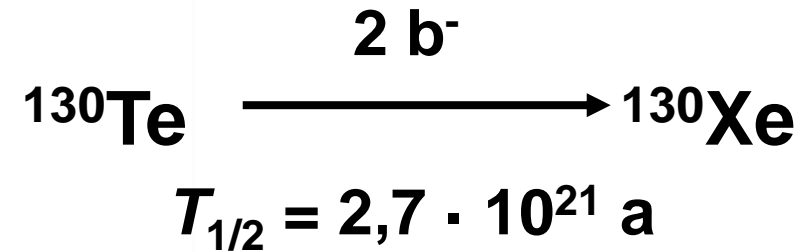


FIG. 1. Isotopic composition of xenon extracted from native tellurium ore (run No.2). The horizontal lines indicate the maximum contribution of atmospheric xenon.



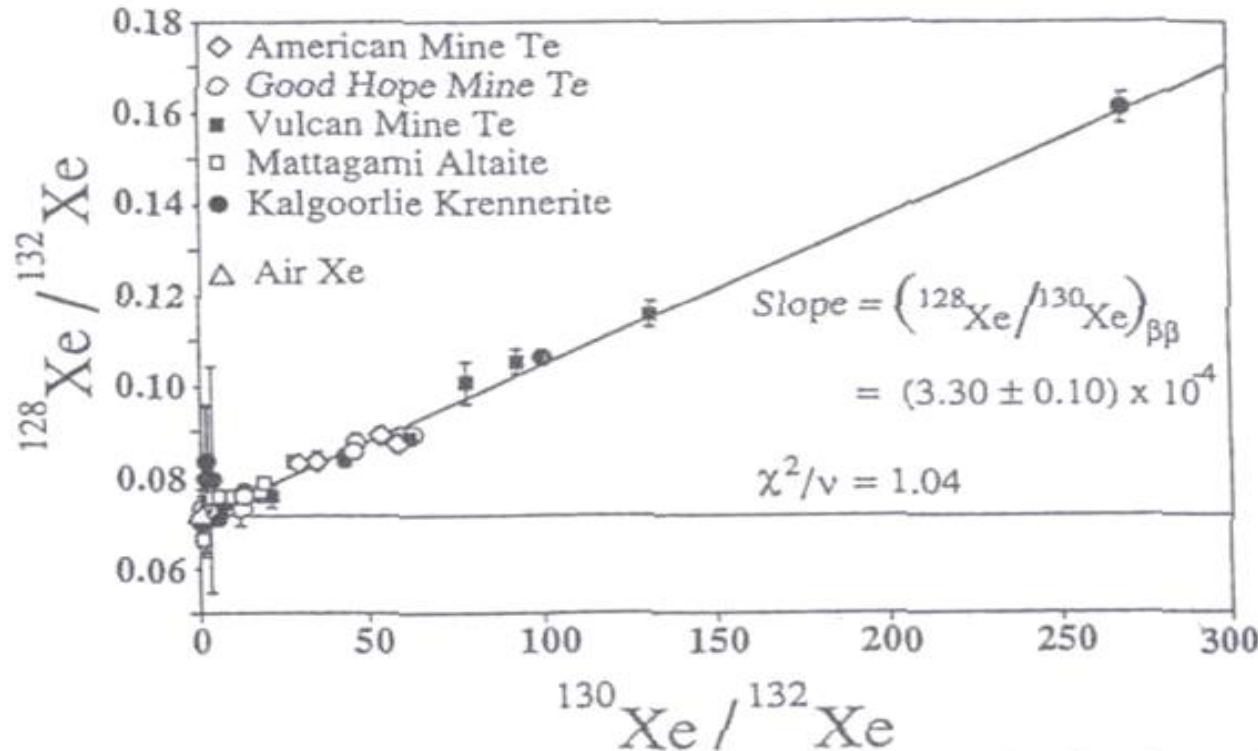
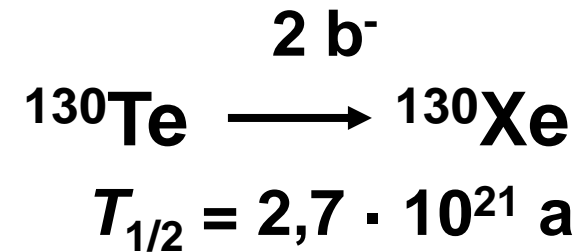
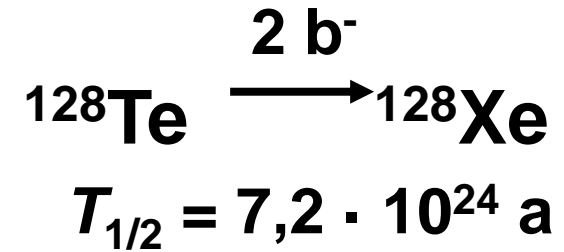


FIG. 1. Xe data for vacuum crushing and stepwise heating of ancient Te ores (see Table I). The data are consistent with a mixture of Xe from air and from  $\beta\beta$  decay of  $^{128}\text{Te}$  and  $^{130}\text{Te}$ . See text for discussion.





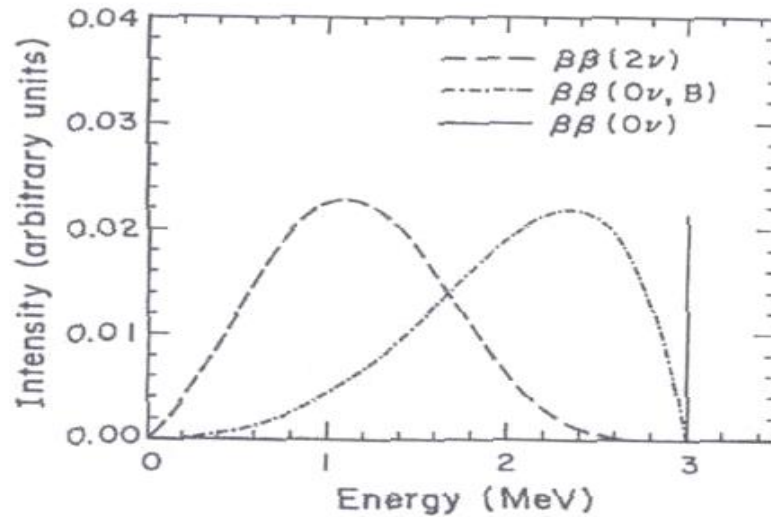
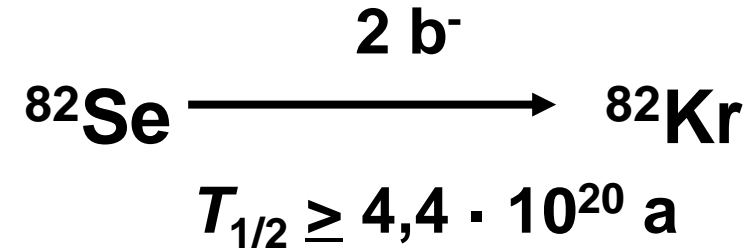


FIG. 1. Theoretical sum-energy spectra of the two electrons for three modes of double-beta decay in  $^{82}\text{Se}$ . The normalizations are arbitrary.

<b>Kr 82</b> 11.593 $\sigma 14 + 7$	<b>Kr 83</b> 1.83 h 11.500 $I_\gamma 9... e^-$ $\sigma 183$	<b>Kr 84</b> 56.987 $\sigma 0.09 + 0.02$
<b>Br 81</b> 49.31 $\sigma 2.4 + 0.24$	<b>Br 82</b> 6.1 m 35.34 h $I_\gamma (46) e^-$ $\beta^- 3.1... \gamma (776...)$ $\beta^- 0.4... \gamma 776; 554; 619...$	<b>Br 83</b> 2.40 h $\beta^- 0.9... \gamma 530; 520... m$
<b>Se 80</b> 49.61 $\sigma 0.05 + 0.54$	<b>Se 81</b> 57.3 m 18 m $I_\gamma 103 e^-$ $\beta^- ... \gamma (260; 276...)$ $\beta^- 1.6... \gamma (276; 290...)$	<b>Se 82</b> 8.73 $1.08 \cdot 10^{20} a$ $2\beta^- \sigma 0.039 + 0.0052$



Detektion über Kernspuren,  
Elektron Spektroskopie  
oder auch radiochemisch

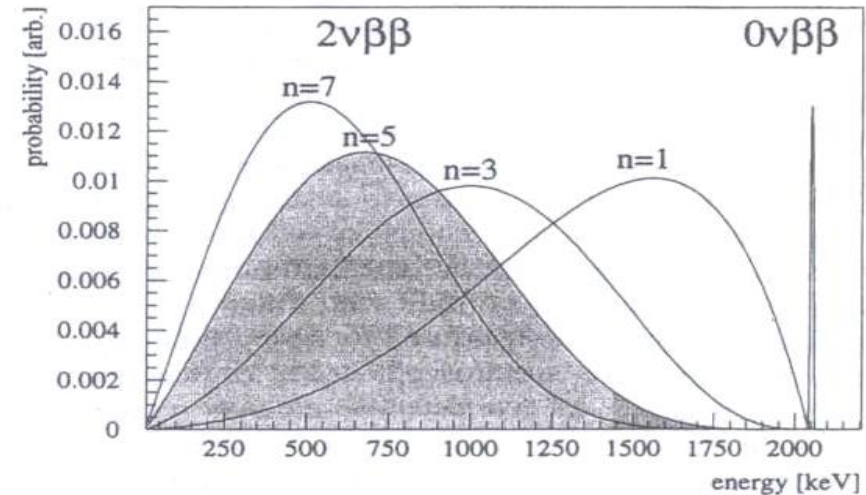
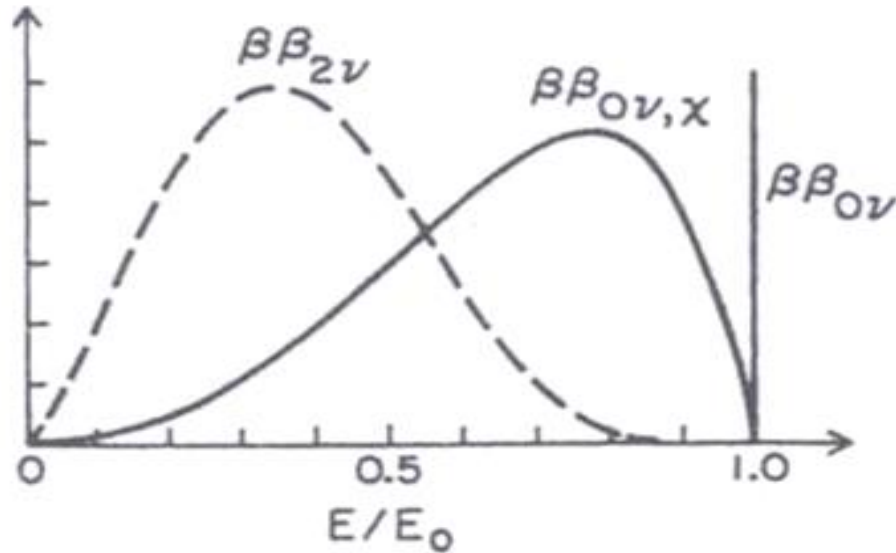
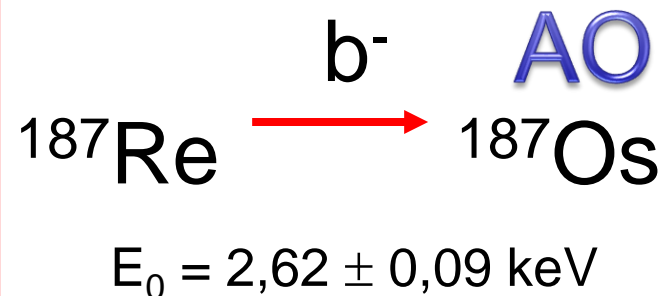


FIG. 1. Spectral shapes of the different investigated double- $\beta$  decay modes; the continuous spectra are classified by their spectral index  $n$ . The spectral index for  $2\nu\beta\beta$  decay is  $n=5$ .

Beim “bound state decay”, gelangt das vom Kern emittierte Elektron nicht ins Kontinuum sondern wird in einem Orbital des Tochterkerns eingefangen.



Lebensdauer bei direkter  
Messung des Zerfalls

(Brodzinsky & Conway, 1965)

$$T_{1/2} = (6,6 \pm 1,3) \cdot 10^{10} \text{ a}$$

Lebensdauer durch  
Isotopenanalyse des Os in  
Molybdeniten bekannten Alters

(Herr et al., 1955)

$$T_{1/2} = (4,3 \pm 0,5) \cdot 10^{10} \text{ a}$$

$$G_{\text{bound}}/G_{\text{continuum}} = 0,5 \pm 0,3$$

An der (GSI) in Darmstadt, wurde dieser Zerfall an vollständig ionisiertem  $\text{Dy}^{+66}$  in einem Speicherring gemessen

Neutrales  $^{163}\text{Dy}$  : stabil  
 Vollständig ionisiert: Zerfall zu  $\text{Ho}^{+66}$  ( $Z = 67$ )  $T_{1/2}=47$  (+5,-4) d

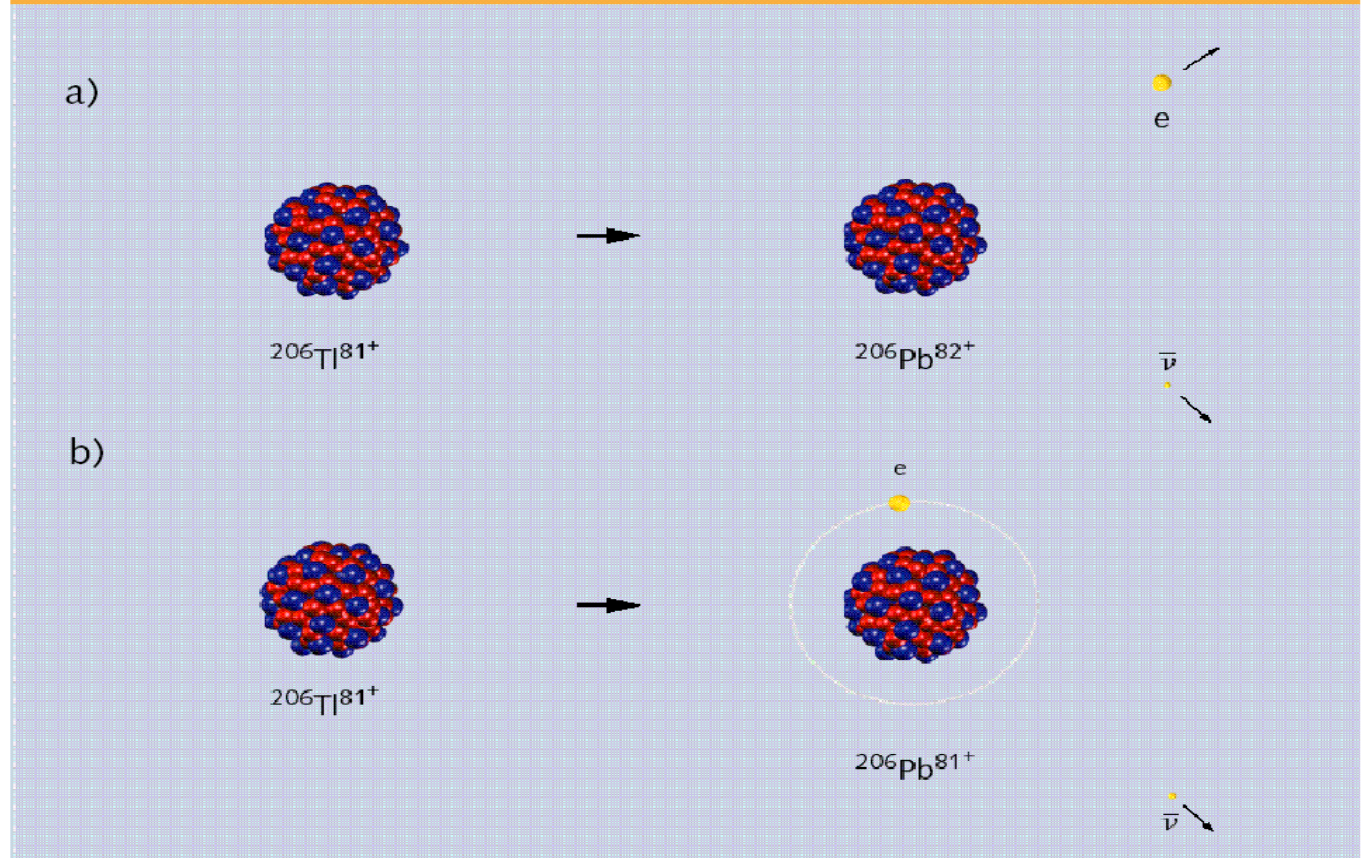
“Bound state  $\beta$  Decay” ist von **geringer Relevanz für neutrale Atome** aber der Hauptzerfallsweg für hochgeladene Atome wie die in stellaren Plasmen während der **Nukleosynthese**

M. Jung et al., Phys. Rev. Lett., 12 Oct. 1992.

F. Bosch et al.,  
PRL 77 (1996) 5190

## Modes of Beta Decay of $^{206}\text{Tl}^{81+}$

GSII

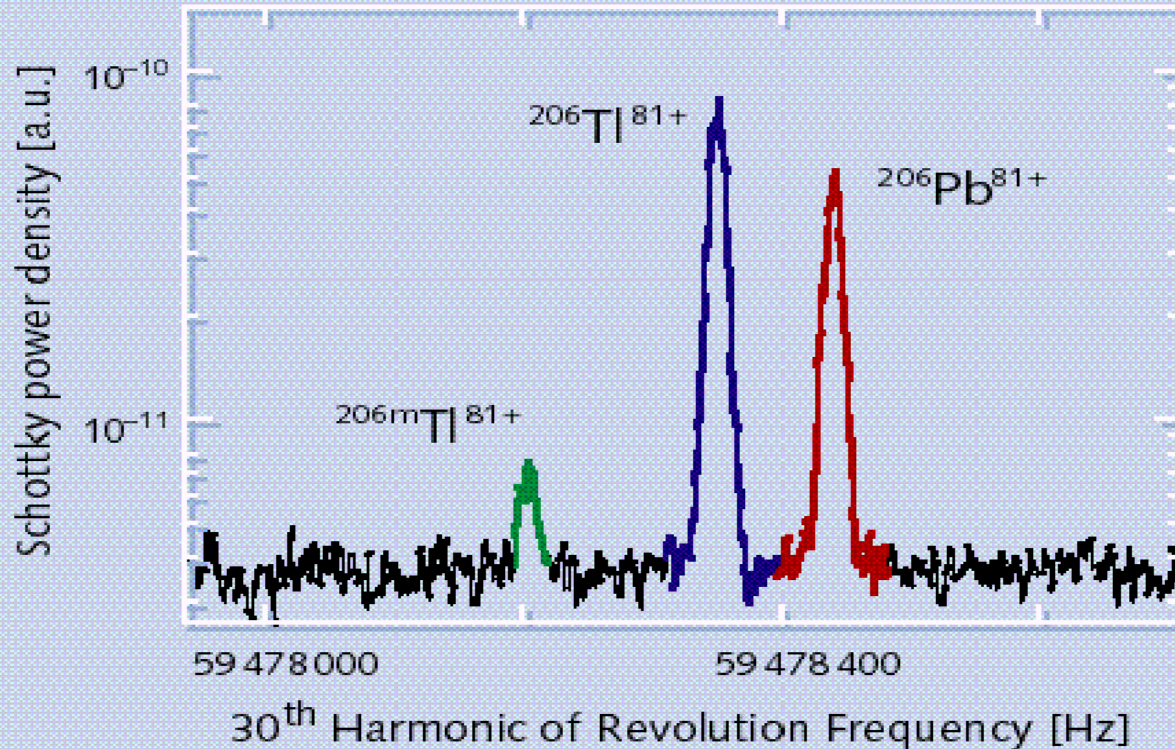


**Figure 1:** While in usual  $\beta$  decay the electron goes into a continuum state (a), it is captured and bound in an inner atomic shell in bound  $\beta$  decay (b).



## The Schottky Signals of the Stored Ion Species in the ESR

GSI



GSI-Nachrichten, 1/01

**Figure 2:** Schottky frequency spectrum of  $^{206}\text{Tl}^{81+}$  and  $^{206}\text{Pb}^{81+}$  recorded by the 30th harmonic of the revolution frequency. The picture shows the well-resolved Schottky signals of the bare  $^{206}\text{Tl}^{81+}$  ions in an isomeric nuclear state ( $^{206\text{m}}\text{Tl}^{81+}$ , green), bare  $^{206}\text{Tl}^{81+}$  ions in the nuclear ground state ( $^{206}\text{Tl}^{81+}$ , blue), and their hydrogen-like bound  $\beta$  decay daughters  $^{206}\text{Pb}^{81+}$  (red).