

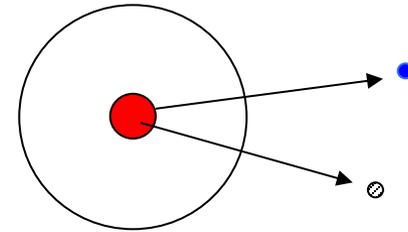
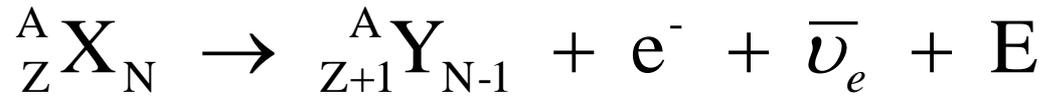
## $\beta^-$ -Tag

Institut für Kernchemie  
Universität Mainz

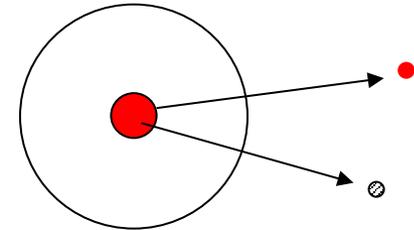
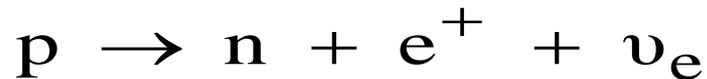
Markus Jahn, Klaus Eberhardt, Christian Siemenssen,  
Pascal Schönberg, Daniela Schönenbach

# Der $\beta$ – Zerfall

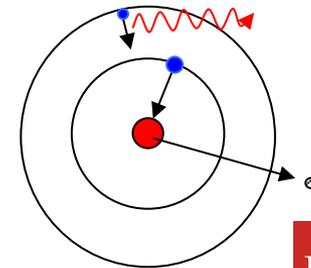
$\beta^-$  - Zerfall:



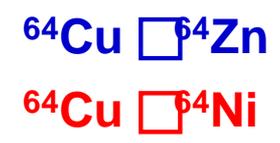
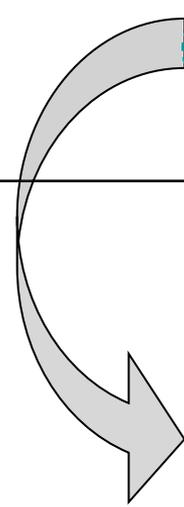
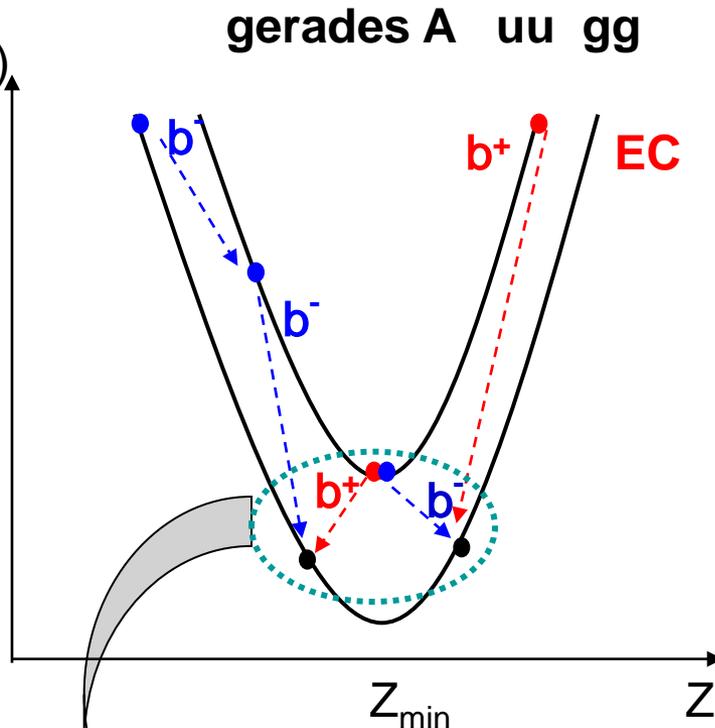
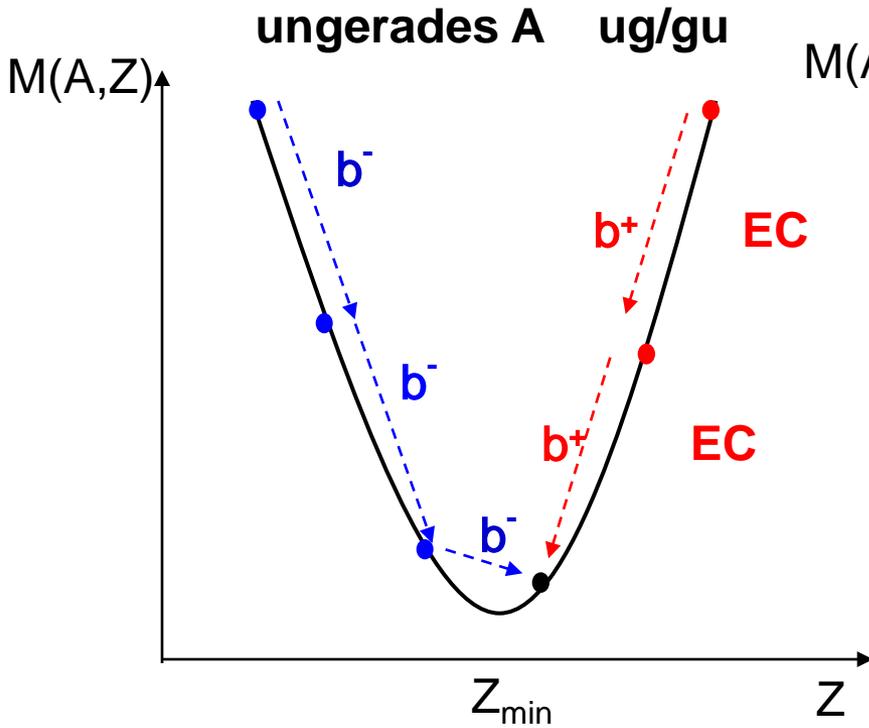
$\beta^+$  - Zerfall:



Elektroneneinfang (EC)



# Die Isobarenparabel

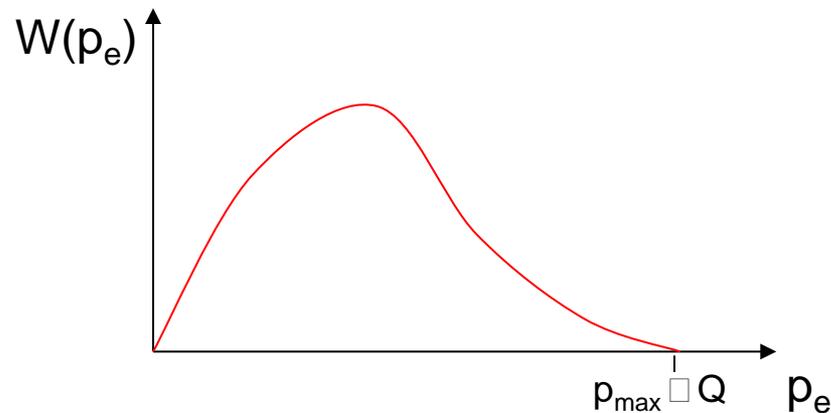


# Theorie des $\beta$ – Zerfalls

Historisches Problem:

- $\Delta E_{Z \rightarrow Z \pm 1}$  scharf;  $E_{kin, e^-}$  kontinuierlich

→ **Energieerhaltung?**



$\Delta S$  ganzzahlig,  $S_e = 1/2 \rightarrow$  **Drehimpulserhaltung?**

Pauli postulierte daher das **Neutrino** mit der **Masse 0**, **Ladung 0**, **Spin  $1/2$** , welches nur schwer nachgewiesen werden kann. Die dissipierte Energie verteilt sich auf Elektron und Neutrino. **Die im Detektor gemessenen Elektronen zeigen eine kontinuierliche Energieverteilung.**

# Fermi-Theorie (1934)

Die Zerfallsrate pro Zeit ist gegeben durch Fermis goldene Regel (aus Störungsrechnung 1. Ordnung, analog elektromagnetischer Übergänge):

$$N(p_e)dp_e = W_{i \rightarrow f} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \langle \psi_f | H_I | \psi_i \rangle \right|^2 \frac{dn}{dE} \Big|_{E=cp_e}$$

**Wahrscheinlichkeit der Emission eines  $e^-$  im Impulsintervall zwischen  $p$  und  $p + dp$**

Anfangszustand  $\Psi_i = \varphi_i$  (Ausgangskern)

Endzustand  $\Psi_f = \varphi_f$  (Endkern)  $\cdot \varphi(e^-) \cdot \varphi(\square)$

$H_I$ : Hamiltonoperator der schwachen Wechselwirkung

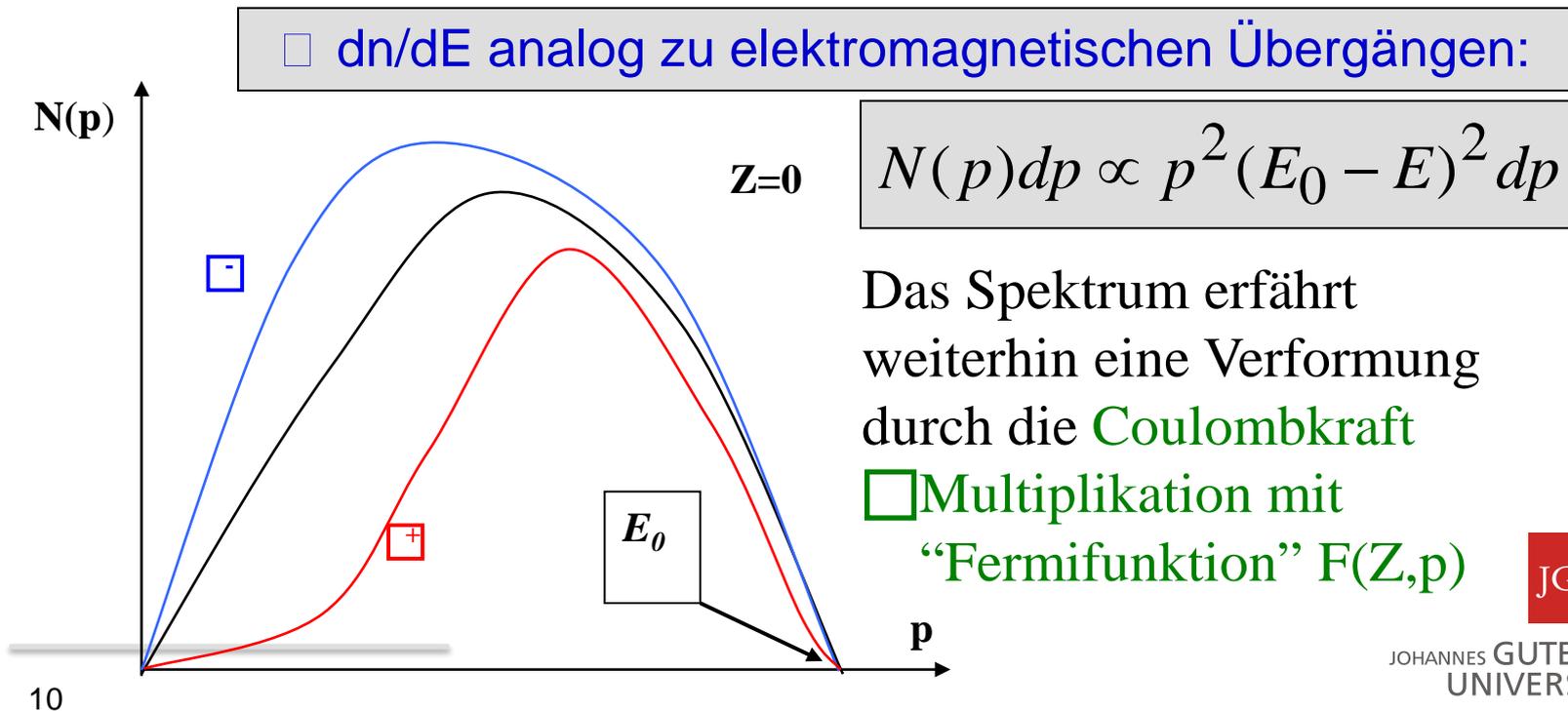
$dn/dE$ : Dichte der möglichen Endzustände pro Energieintervall

**Experimentell: Form der  $\square$ -Spektren ist im Wesentlichen durch  $dn/dE$  (Zustandsdichte der Endzustände) bestimmt.**



# Fermi-Theorie (1934)

- das Matrixelement  $\langle f | H_I | i \rangle = H_{fi}$  ist nur **schwach energieabhängig**; es ist Maß für Übergangswahrscheinlichkeit, also die Halbwertszeit für den  $\beta$ -Zerfall  $T^{1/2}$ .
- $f$  kann auch ein angeregter Zustand des Tochterkerns sein.
  - $\lambda(2 \text{ MeV-Elektron}) \approx 10^{-11} \text{ cm} \approx \text{Kernradius}$
  - $\varphi(e^-)$  □ konstant über das Kernvolumen



# Fermi-Theorie (1934)

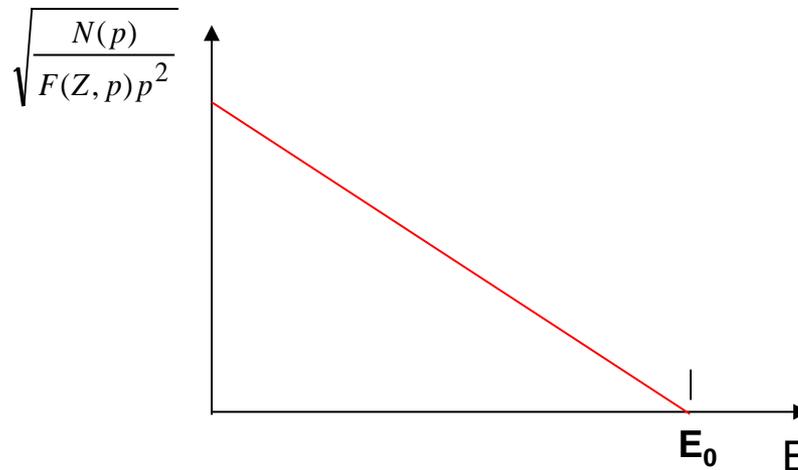
Daraus folgt letztendlich:

$$N(p) \propto F(Z, p) p^2 (E_0 - E)^2$$

bzw.

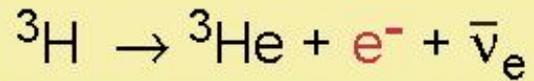
$$\sqrt{\frac{N(p)}{F(Z, p) p^2}} \propto (E_0 - E); \quad F(Z, p) = \frac{|\varphi_e(0, p)_{coul}|^2}{|\varphi_e(0, p)_{frei}|^2}$$

Für  $m_v=0$  ergibt sich eine Gerade (Fermi-Kurie-Plot)



Damit erhält man sehr genau die Endpunktsenergie  $E_0$

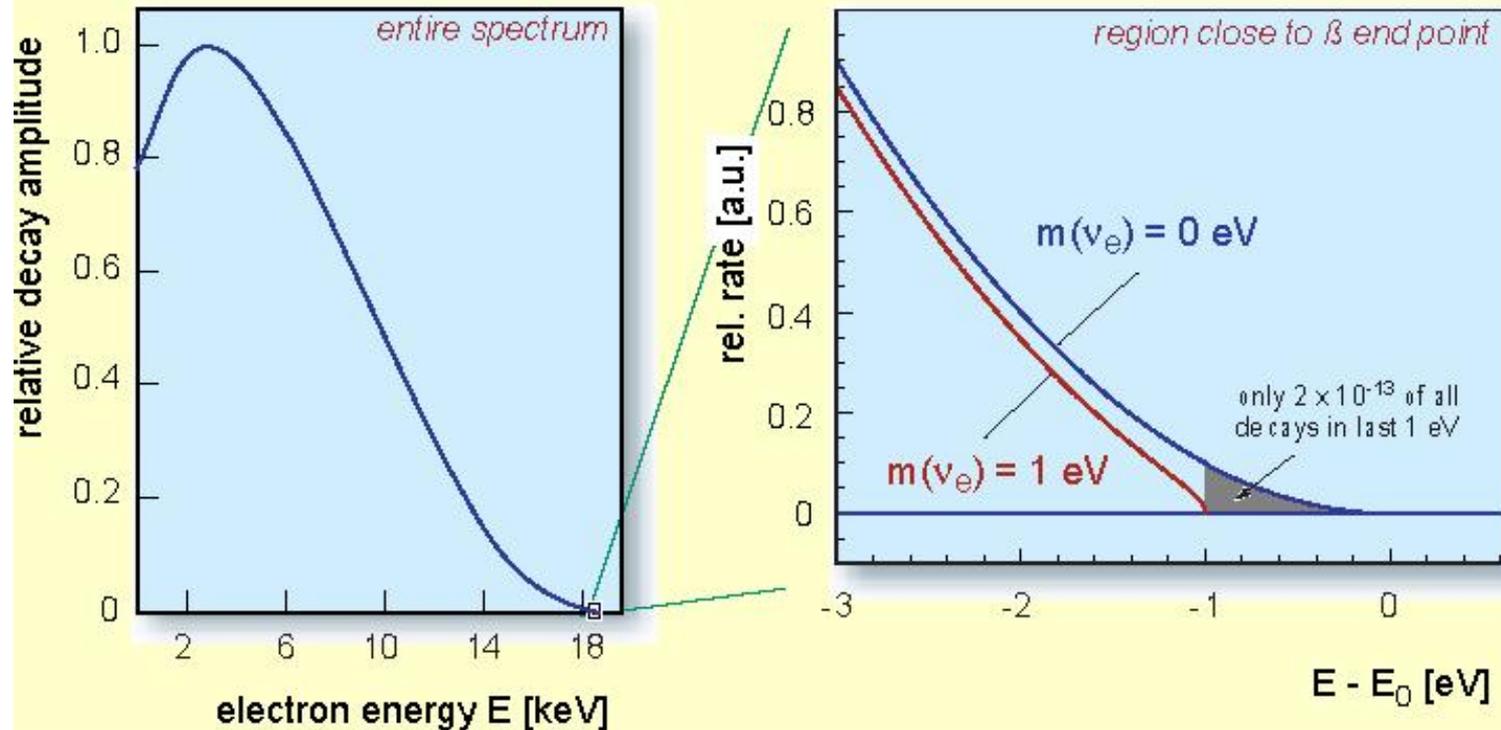
## tritium $\beta$ -decay and the neutrino rest mass



superallowed

half life :  $t_{1/2} = 12.32 \text{ a}$

$\beta$  end point energy :  $E_0 = 18.57 \text{ keV}$



# Das KATRIN Spektrometer



Folie Nr. 13  
Datum: 18.01.2017

# Das KATRIN Spektrometer



# Heute im Praktikum: 1. Das $\beta$ -Spektrum

- Aufnahme des energieabhängigen  $\beta$ -Spektrums von  $^{32}\text{P}$  mit einem Halbleiterdetektor
- Kanal-Energie-Kalibration des Spektrums mit Hilfe von Konversionselektronen ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{207}\text{Bi}$ )
- Umformung von Energie- in Impulsspektrum:

$$N(p) = N(E) \cdot c \cdot \sqrt{1 - \frac{511^2}{(511 + E(\text{keV}))^2}}$$

$$\frac{p}{m_0 c} = \sqrt{\left(\frac{E(\text{keV}) + 511}{511}\right)^2 - 1}$$

(oder ablesen aus Skript)

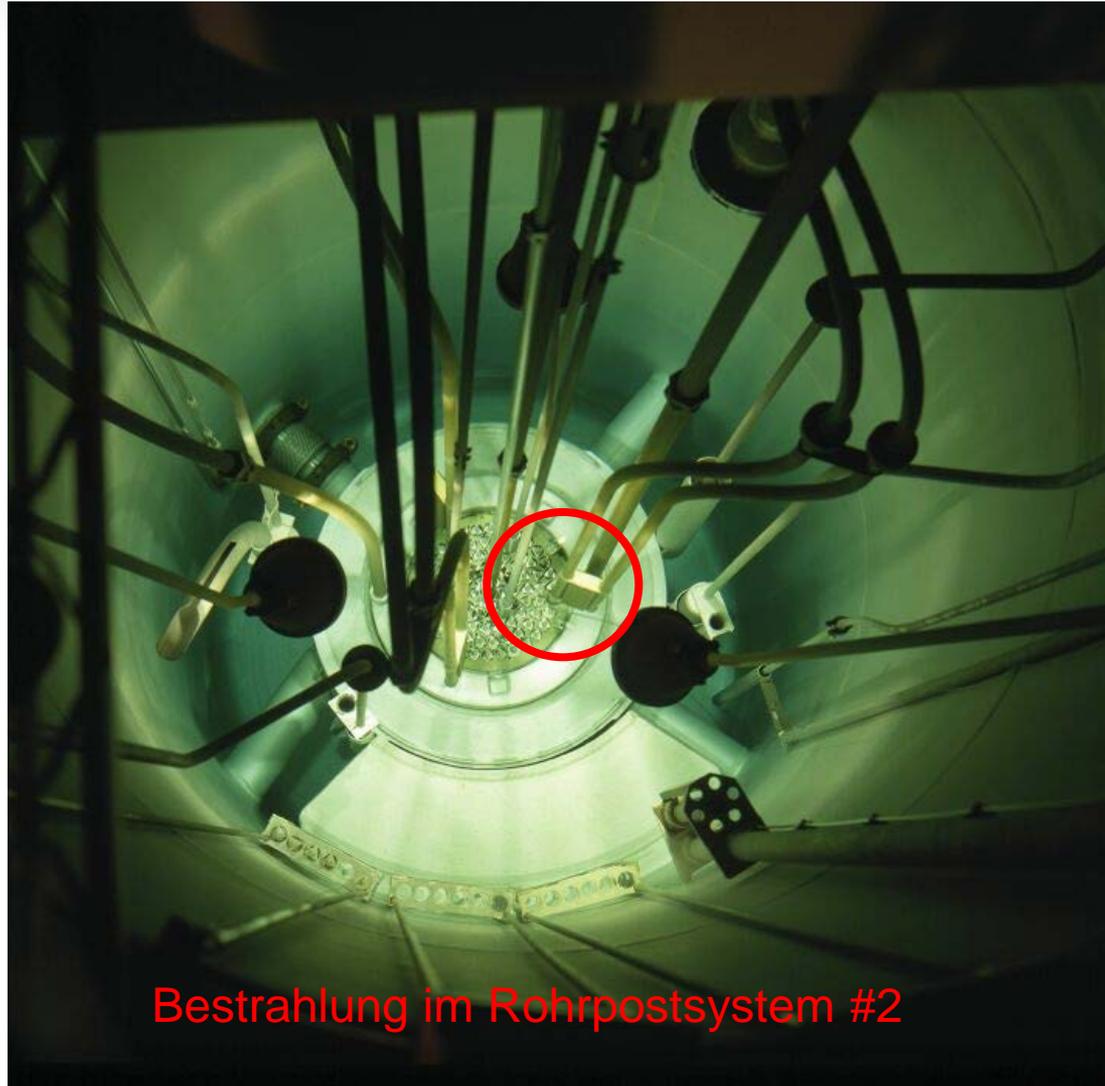
- Ablesen der zugehörigen Fermifunktion  $F(16, p)$  (Skript)
- Berechnung von:

$$\sqrt{\frac{N(p)}{p^2 \cdot F(Z, p)}} = C(E - E_{\beta_{\max}})$$

- Erstellung eines Fermi-Kurie-Plots durch auftragen gegen  $E$
- Bestimmung der  $\beta$ -Endpunktenergie aus linearem, hochenergetischem Teil



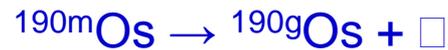
2.  $\alpha$ -Spektroskopie von Os-Isotopen
3.  $\beta$ -verzögerte Neutronen-Messungen



Bestrahlung im Rohrpostsystem #2

## 2. $\alpha$ -Spektroskopie von $^{190m}\text{Os}$

- In  $(n, \alpha)$ -Reaktionen entsteht  $^{190m}\text{Os}$ .



- Die niedrigliegenden metastabilen Zustände sind Rotations- und Vibrations-eigenzustände
- Ein halbklassisches Modell für die Rotationszustände:

$$E_{rot}(I) = \frac{\hbar^2}{2\theta} \cdot (I \cdot (I + 1)) \quad \text{mit } I = 0, 2, 4, \dots$$

ist konstant

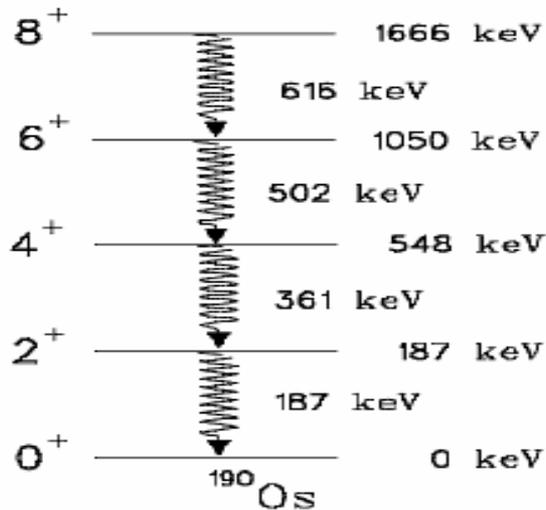
- Durch Bestrahlung im Reaktor:  $^{nat}\text{Os}$ -Proben  $(n, \alpha) \rightarrow ^{190m}\text{Os}$ ;  
 $T_{1/2} = 9,9 \text{ min}$
- $\alpha$ -Aktivität nach 2, 4, 6 ....20 min bestimmen

$\alpha$  Aus  $\alpha$ -Spektrum Bestimmung von  $T_{1/2}$  und  $\alpha$  von  $^{190m}\text{Os}$

# Kernniveauschema von $^{190m}\text{Os}$

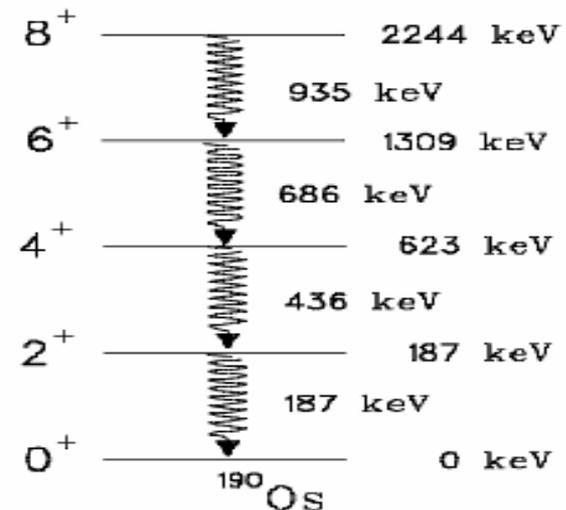
Gemessen

Real:



Vorhersage mit Modell  
starrer Rotator ( $\square \neq \text{const.}$ )

Starrer Rotator:



$$E_{rot}(I) = \frac{\hbar^2}{2\theta} \cdot (I \cdot (I+1))$$

$$\square E(I_{n+2} \rightarrow I_n) = k [I_{n+2}(I_{n+2}+1)] - k [I_n(I_n+1)]$$



# 3. □-verzögerte Neutronen

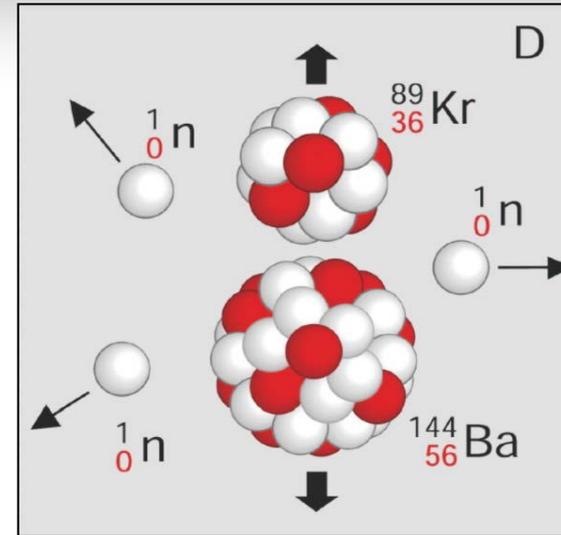
## Spaltung von $^{235}\text{U}$ :

2,4 prompte Neutronen

Emission  $\sim 10^{-15}$  s

Moderation  $\sim 10^{-3}$  s

□ nicht geeignet zur Regelung



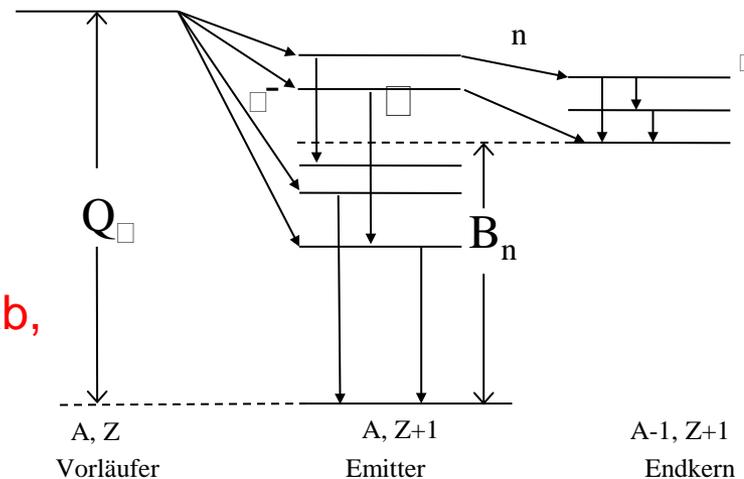
## Spaltprodukte:

- Betazerfall
- bei genügend Anregungsenergie:  
Neutronenemission

Zeitskala:

$\beta^-$  Zerfall von Vorläufern ( $^{87/89}\text{Br}$ ,  $^{94}\text{Rb}$ ,  
 $^{135}\text{Sb}$ ,  $^{137}\text{I}$  ...)

$T_{1/2} = 2 \dots 56$  s



# Gruppen von Vorläufern

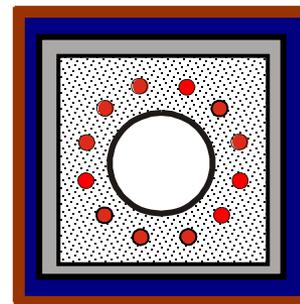
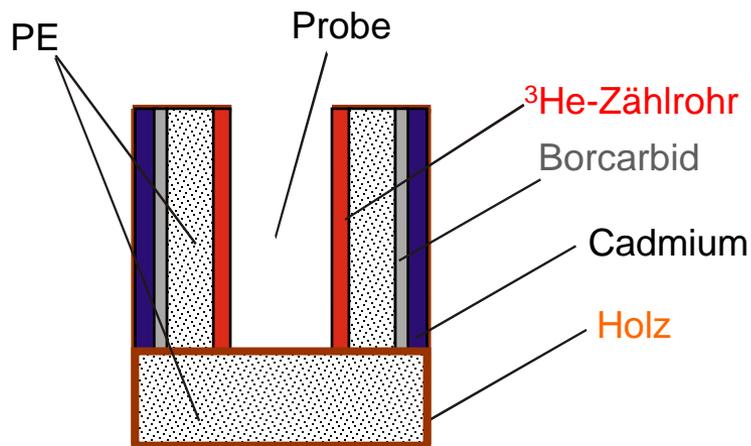
Gruppe	$T_{1/2}$ [s]	Energie [keV]	Verzweigungsverhältnis bei thermischer Spaltung [%]		
			$^{233}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$
1	55	250	0,022	0,021	0,007
2	23	560	0,077	0,140	0,063
3	6,2	430	0,065	0,126	0,044
4	2,3	620	0,072	0,253	0,068
5	0,61	420	0,013	0,074	0,018
6	0,23	-----	0,009	0,027	0,009

# Apparativer Aufbau DNAA

Bestimmung von spaltbaren Elementen (U, Pu) in Urin, Böden, Pflanzen und huminsäurehaltigen Lösungen

Zyklus: 2 min. (100 kW/RP) – 20 sec. Abklingzeit – 1 min. Messzeit

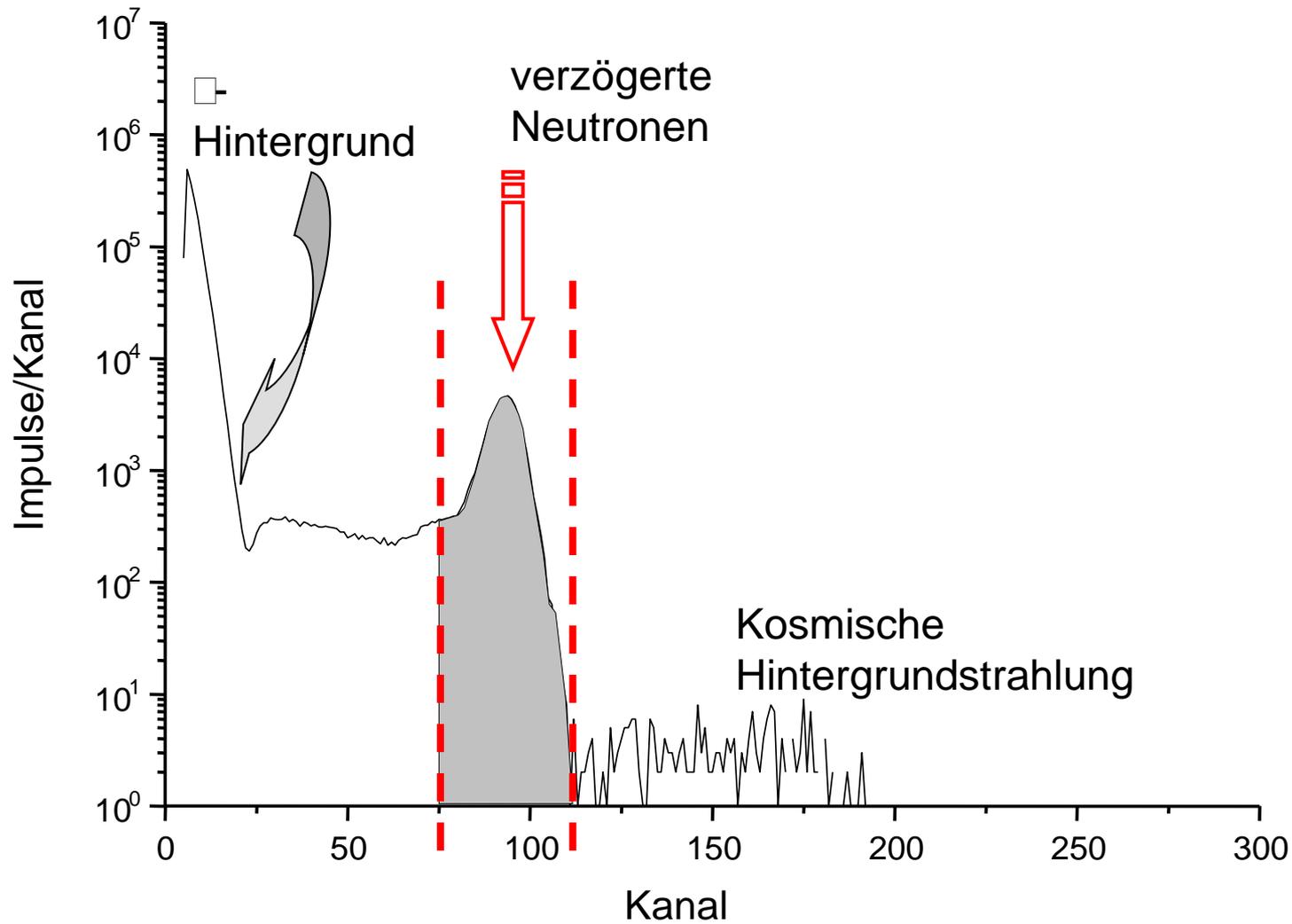
Messung  $\square$ -verzögerter Neutronen in speziellem n-Detektor  ${}^3\text{He}(n,\gamma)\text{T}+p$ :



12  ${}^3\text{He}$ -Zählrohre  
Effizienz: 18 %  
Untergrund: 4 counts/60 s

Vorläufernuklide:  ${}^{87/89}\text{Br}$ ,  ${}^{94}\text{Rb}$ ,  ${}^{135}\text{Sb}$ ,  ${}^{137}\text{I}$  ( $T_{1/2} = 2 - 56$  s)

# Spektrum eines $^3\text{He}$ -Zählrohres

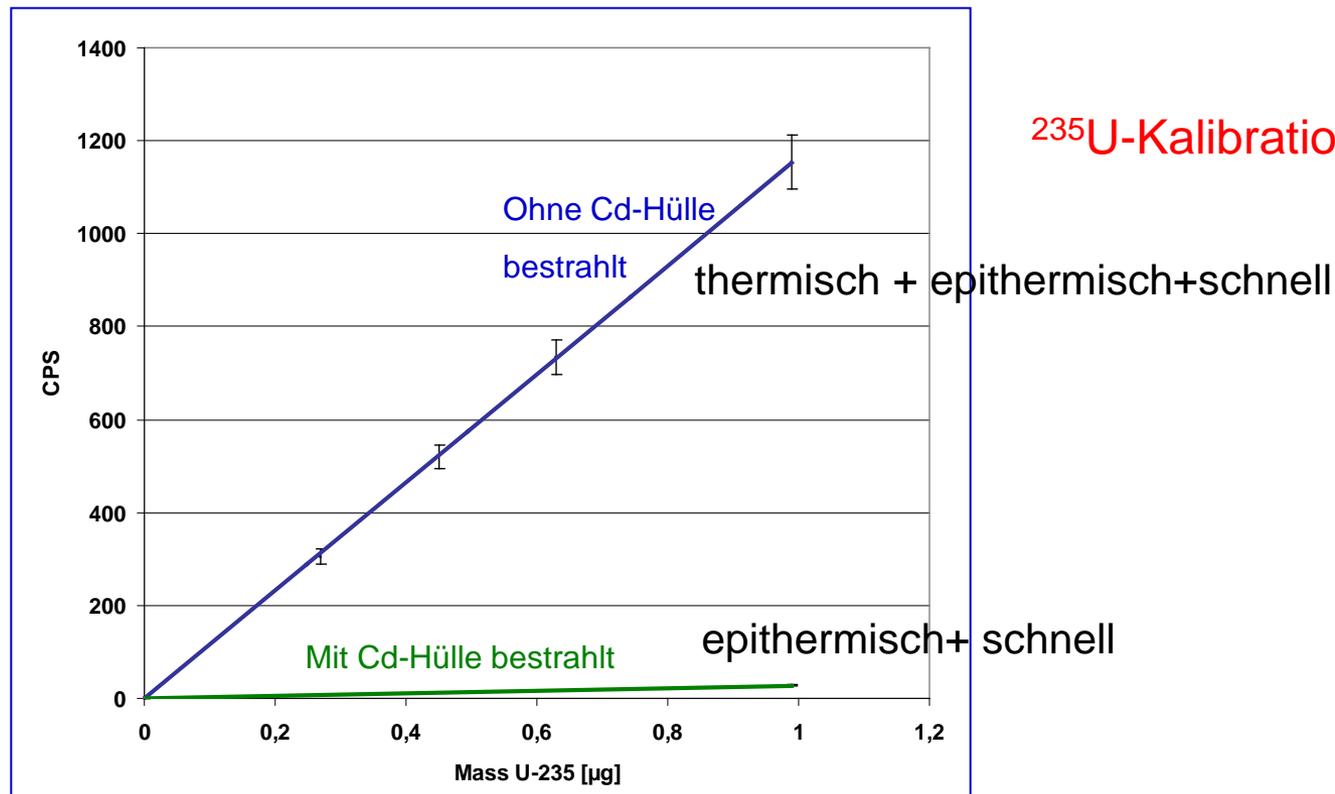


# Praktikumsversuch DNAA

Jede Gruppe bestrahlt 3 Proben mit und ohne Cd-Abschirmung: 2 Standards mit bekanntem  $^{235}\text{U}$  bzw.  $^{232}\text{Th}$  -Gehalt; 1 Probe mit unbekanntem  $^{235}\text{U}$ -Gehalt.

Messzyklus: 2 min Bestrahlung, 20 s Abklingen, 1 min Realtime messen. Lifetime-Korrektur wegen Totzeit.

Alle Standardwerte werden in Diagramm eingetragen und ergeben Kalibrationskurve.  $^{235}\text{U}$ -Gehalt der unbekannt Probe wird bestimmt.



$^{235}\text{U}$ -Kalibrationsgerade

thermisch + epithermisch + schnell

epithermisch + schnell

