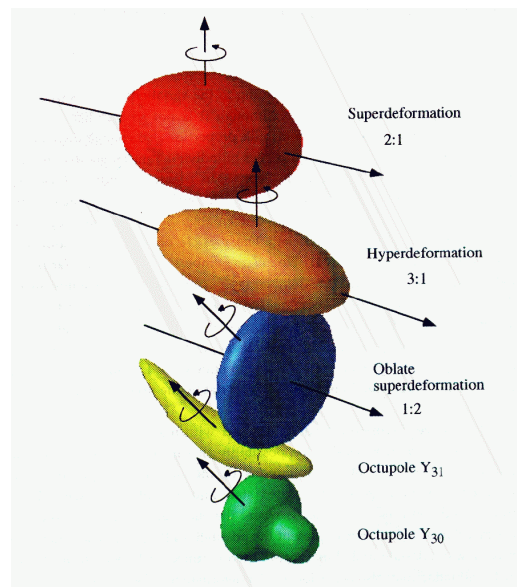


Spektroskopie im 2. und 3. Minimum von Aktinidenkernen

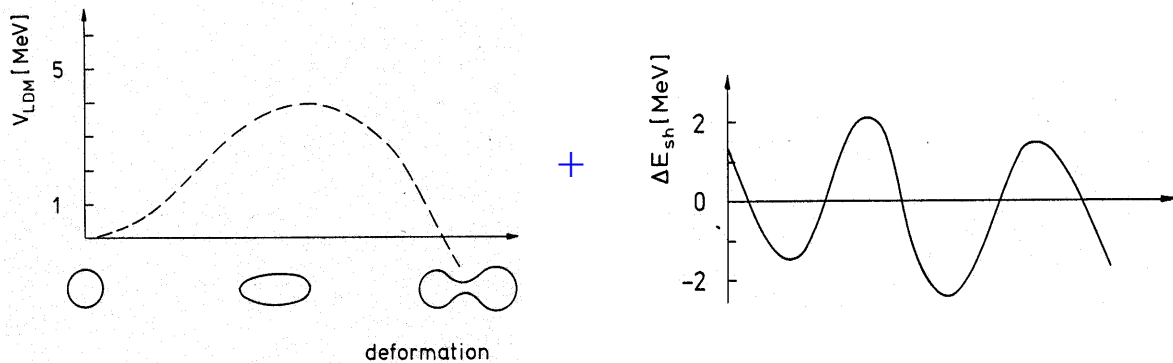
P.G. Thirolf, LMU München



- Einleitung: Doppelhöckerige Spaltbarriere, Spaltisomere
- Experimente im superdeformierten 2. Minimum: ^{240}Pu
 - γ -Spektroskopie
 - Konversionselektronen-Spektroskopie
 - Transmissionsresonanz-Spektroskopie
- Experimente im hyperdeformierten 3. Minimum
 - Rotationsbanden-Struktur und Potentialtiefe in ^{234}U
 - Untersuchung der Kernform im 3. Minimum
- Zusammenfassung und Ausblick

(Superdeformiertes) 2. Minimum

- Doppelhöckerige Spaltbarriere:



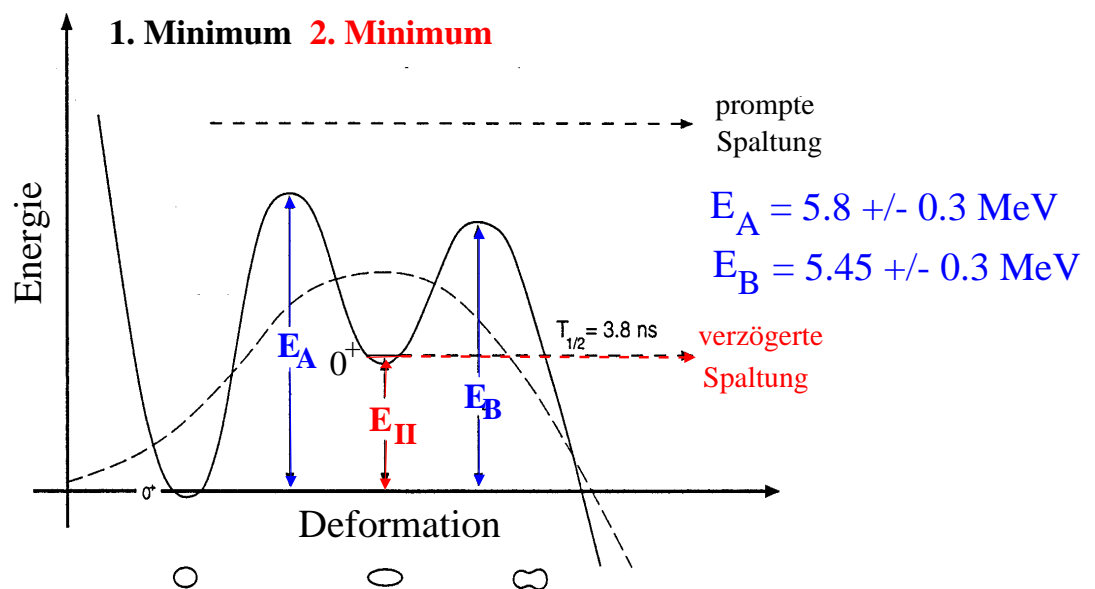
(makroskopisches)
Tröpfchenmodell

+

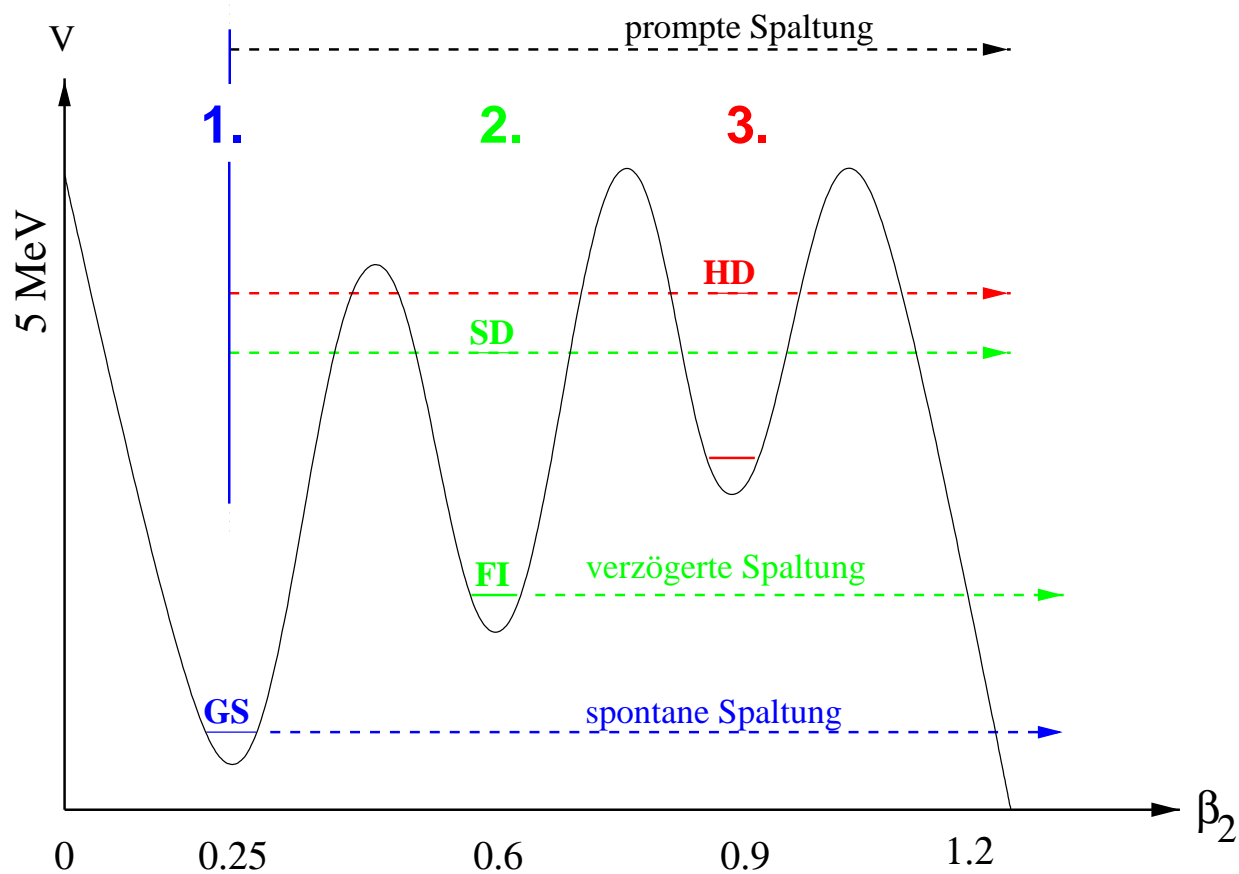
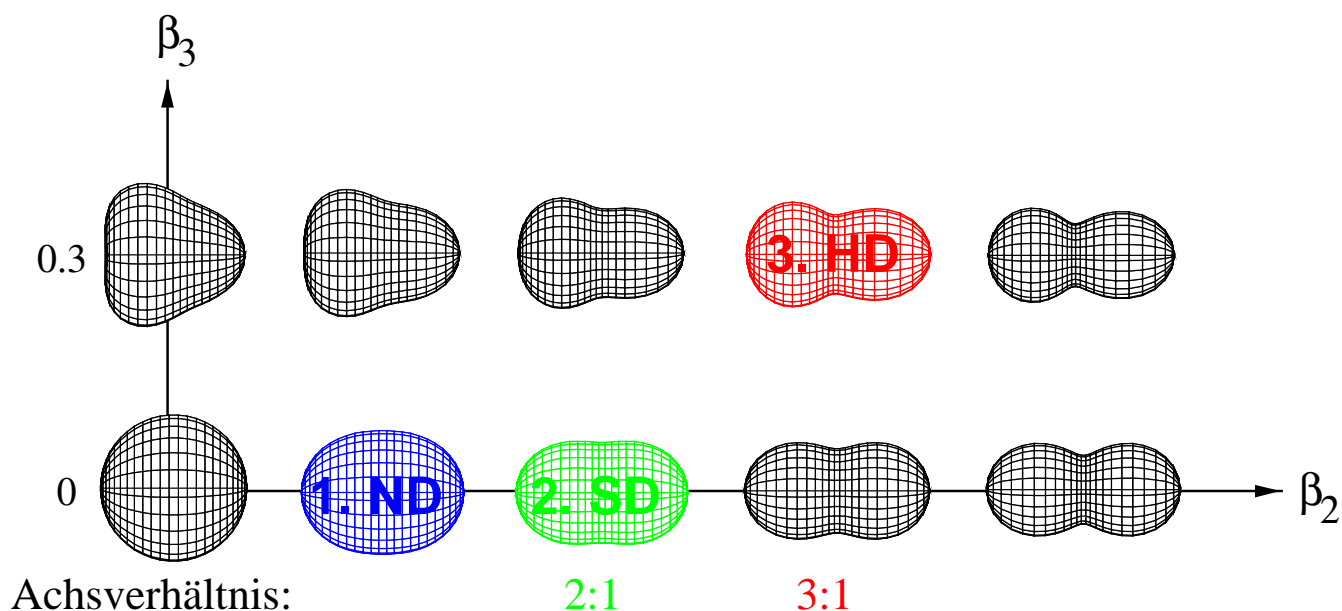
(mikroskopische)
Schalenkorrekturen
(Strutinsky, 1967)

- ^{240}Pu :

- magische Neutronenzahl $N=146$
- Spaltisomer: $t_{1/2} = 3.8 \text{ ns}$

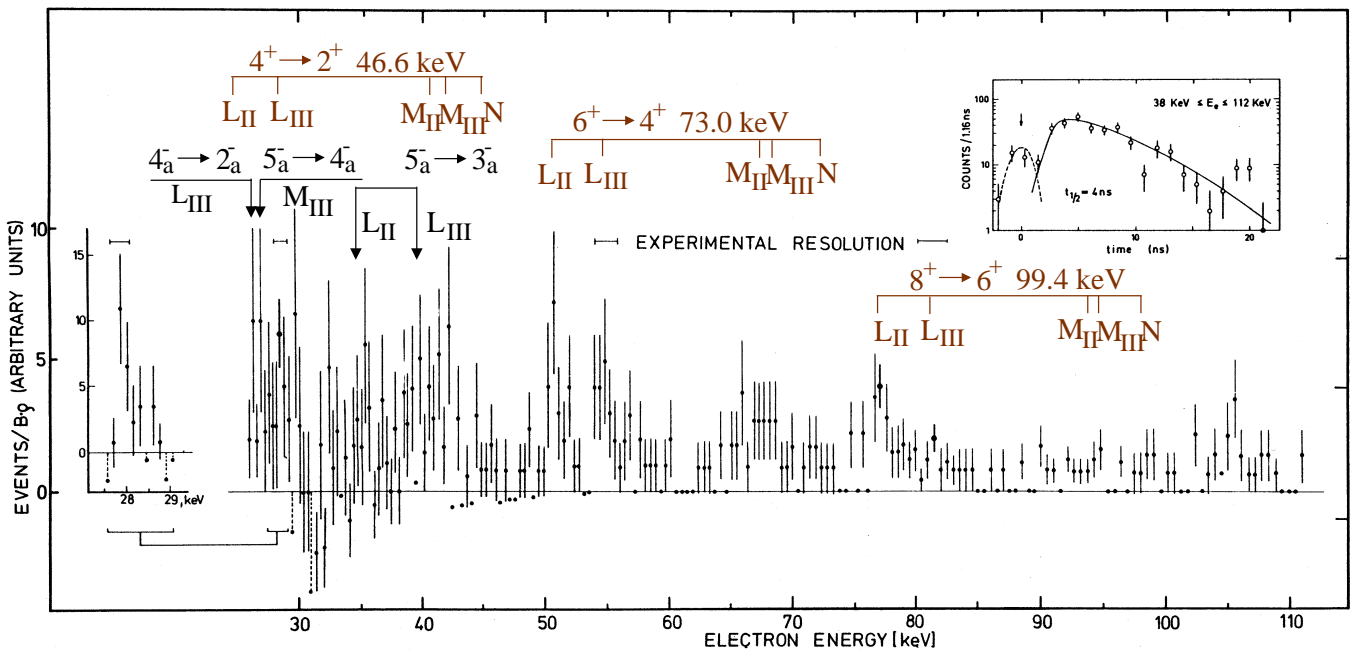


Zweites und Drittes Minimum in leichten Aktinidenkernen

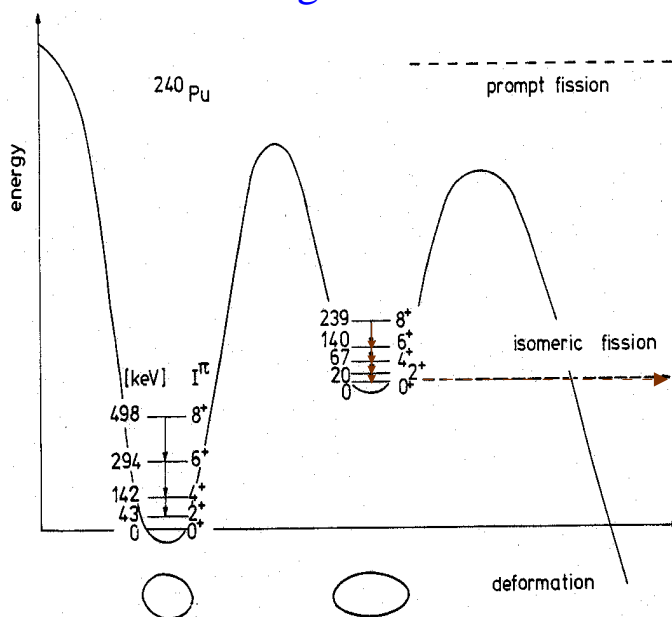


240f Pu: Pionierexperiment

- Grundzustands-Rotationsbande: Specht et al., Phys. Lett. B 41 (1972) 43
- $^{238}\text{U}(\alpha, 2n) ^{240}\text{fPu}$, $E_\alpha = 25 \text{ MeV}$
- Konversionselektronen in Koinzidenz mit verzögerter Spaltung



- Superdeformation: Trägheitsmoment

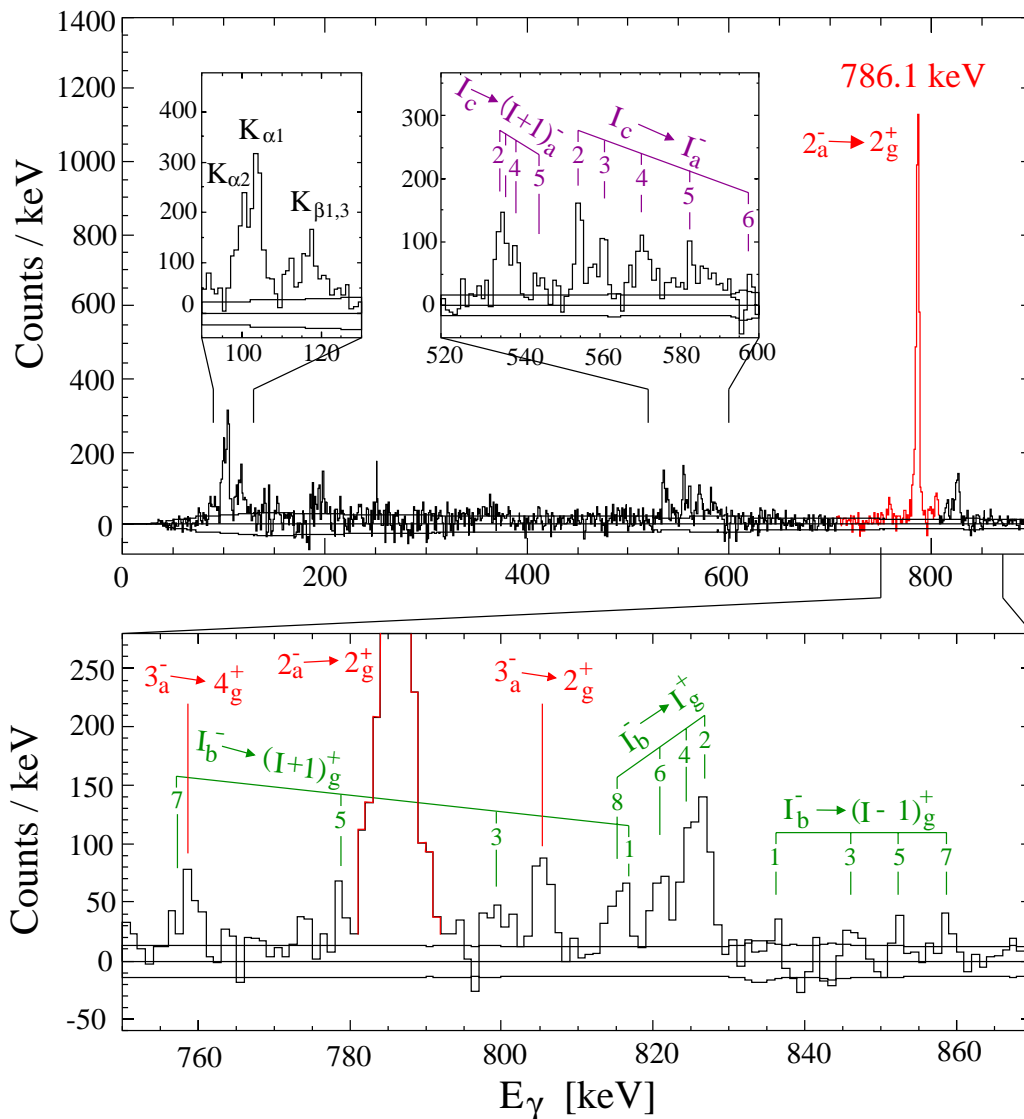


$$\hbar^2 / 2\Theta = 3.34 \text{ keV}$$

(Achsverhältnis 2:1)

γ -Spektroskopie in ^{240}fPu

- 6 Ge-CLUSTER der dt. EUROBALL-Kollaboration: 42 Detektoren
- $^{238}\text{U}(\alpha, 2n)^{240}\text{fPu}$ ($t_{1/2} = 3.8$ ns), 440 Std. Strahlzeit
- verzögerte Koinzidenz mit Spaltfragmenten

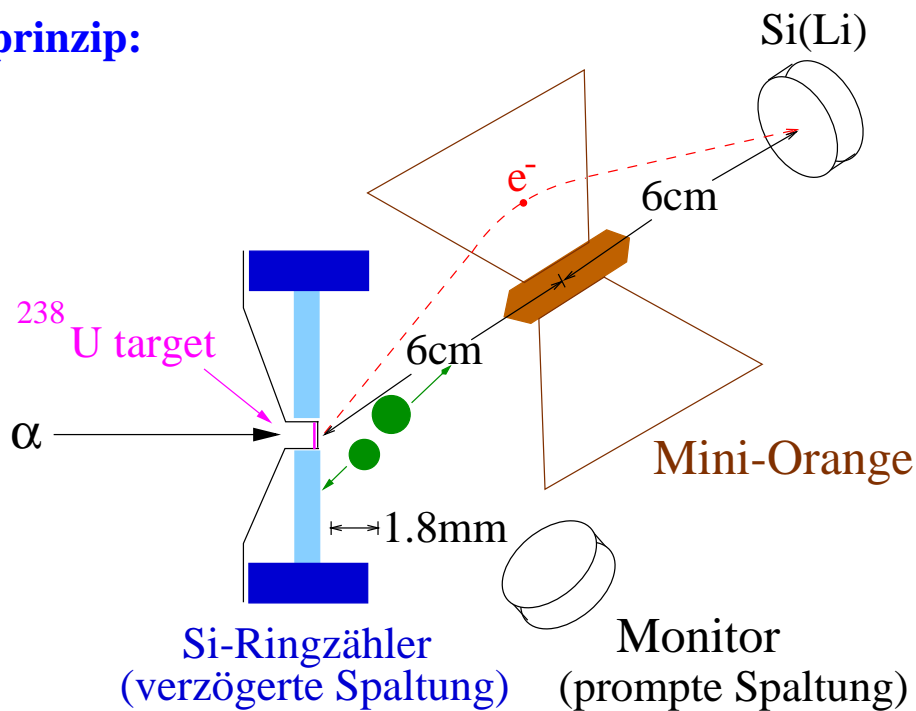


- eine intensive γ - Linie (786.1 keV, 36.6 %) + schwächere Linien
- regelmässige Rotationsbandenstruktur: Ansatz f. Niveauschema

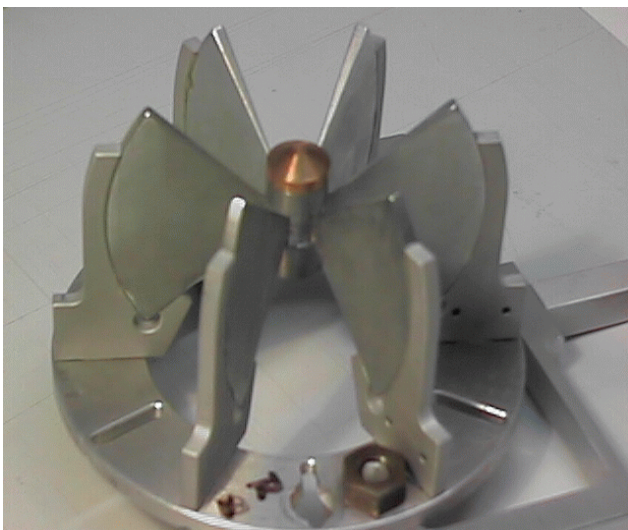
D. Pansegrau et al., Phys. Lett. B 484 (2000) 1

Mini-Orangen-Aufbau zur Konversionselektronen-Spektroskopie

Messprinzip:



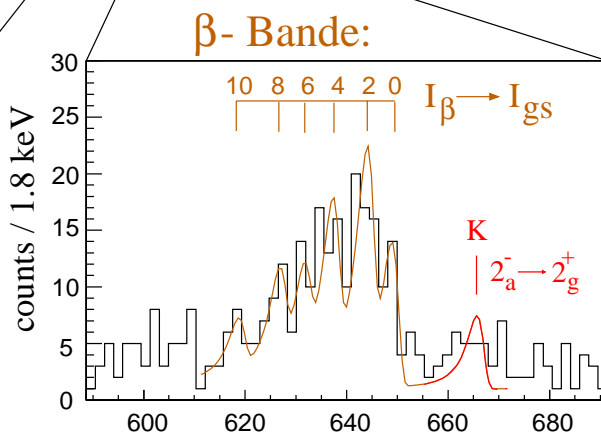
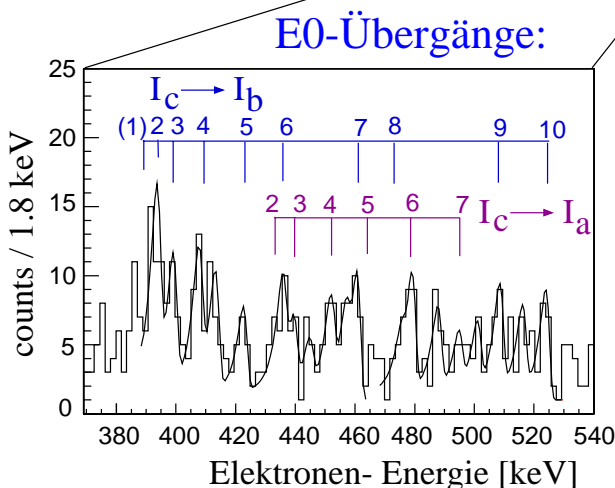
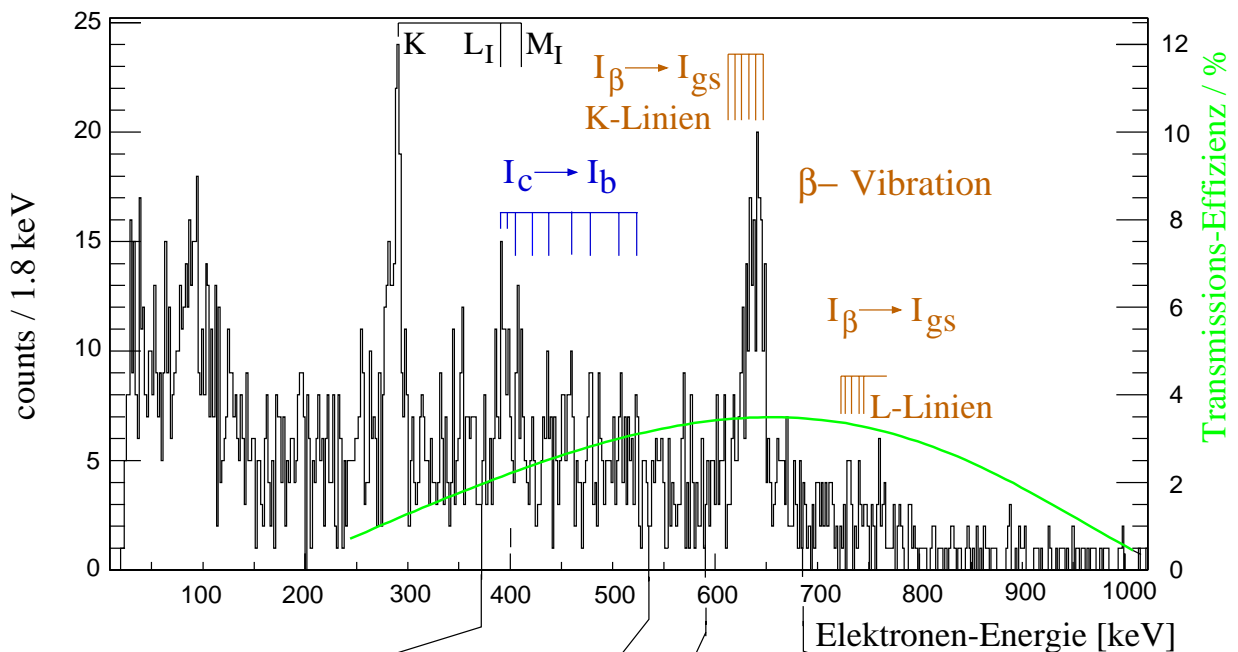
Mini-Orangen:



- 6 (5) keilförmige Permanentmagnete
- toroidales Magnetfeld
 $B = 90 \text{ mT}$ (80 mT)
- zentraler Pb-Absorber:
Abschirmung der γ 's vom Target
- Transmissionskurve optimiert für
600-800 keV (300-600 keV)
- Gegenstands-/Bildweite einstellbar
- 3 (gekühlte) Si(Li)-Detektoren
- Gesamt-Effizienz: 5.4 % (625 keV)

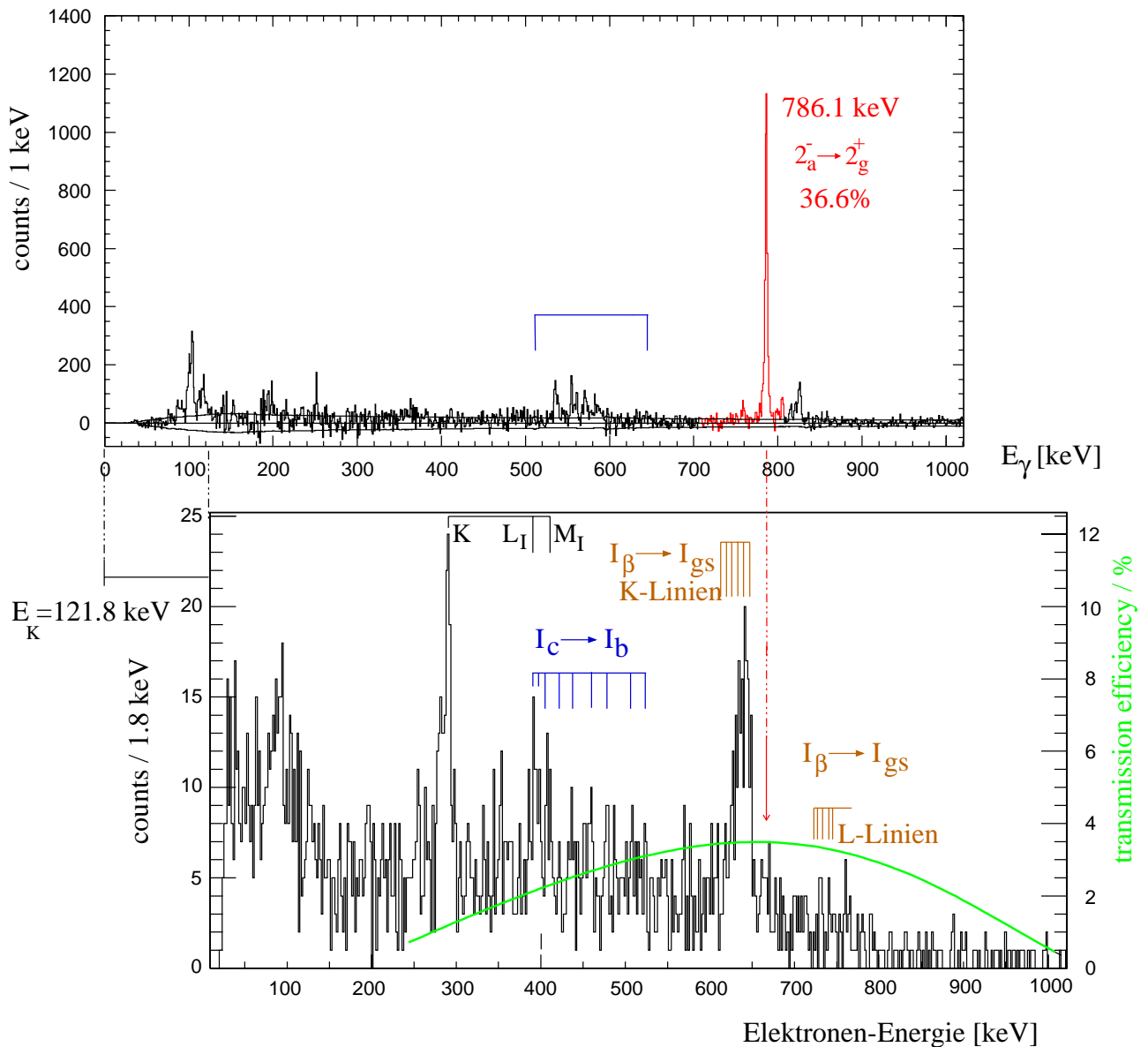
Konversions-Elektronen von ^{240}fPu

- aus 2 Experimentserien (ca. 570 Std. Strahlzeit):
Transmission optimiert für 300-600 keV, 600-800 keV
- Reaktion: $^{238}\text{U}(\alpha, 2n)^{240}\text{fPu}$ $E_\alpha = 25 \text{ MeV}$



- Elektronen in verzögerter Koinzidenz mit Spaltfragmenten
- Untergrundfreies Elektronenspektrum aus Übergängen im zweiten Minimum

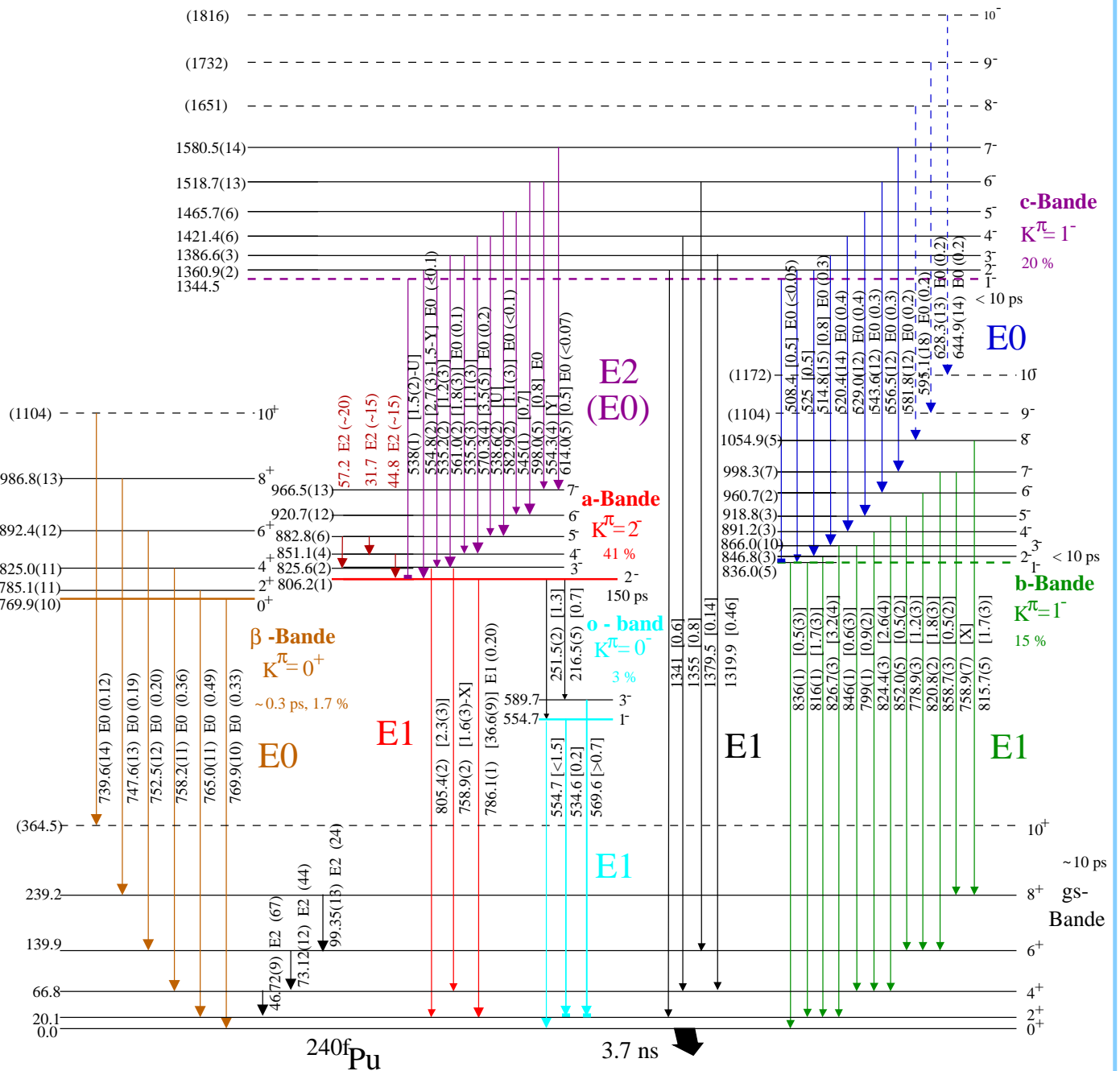
Kombinierte Analyse: γ 's + Konversionselektronen



- alle starken Elektronenlinien sind E0-Übergänge
- Verbindende E0-Übergänge zwischen angeregten Rotationsbanden
- Konversions-Koeffizient des 786.1 keV - Übergangs: **E1**
- Erstes angeregtes β -Vibrationsphonon: **769.9 keV**

Niveauschema von ^{240}Pu

- kombinierte Analyse von γ - und Elektronen-Daten:



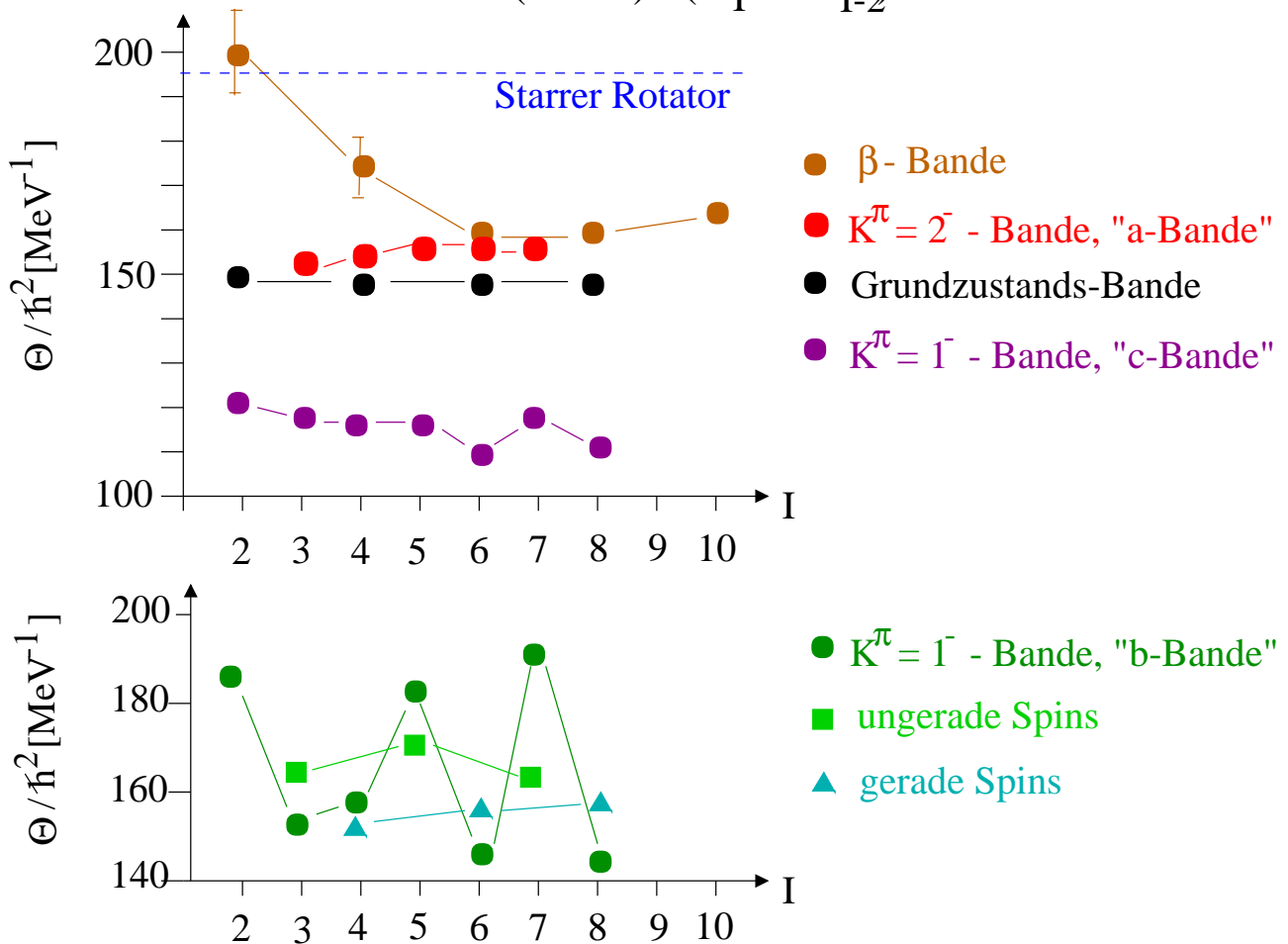
- angeregte Zustände im 2. Minimum: ca. 98% negative Parität

Trägheitsmomente

● (Dynamische) Trägheitsmomente:

$$E = (\hbar^2 / 2\Theta) (I(I+1))$$

$$\Theta / \hbar^2 = (2I - 1) / (E_I - E_{I-2})$$

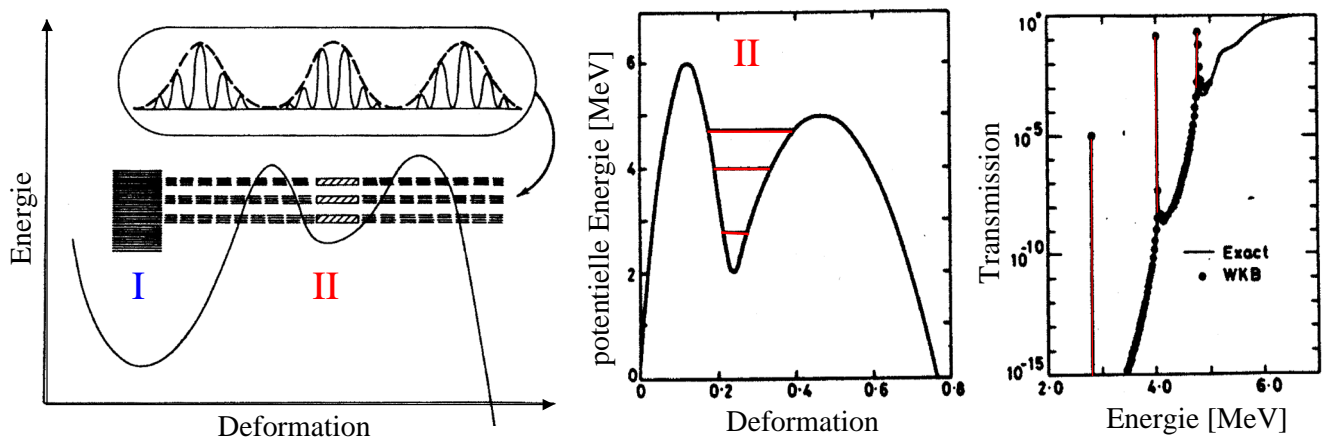


● Variation der Trägheitsmomente:

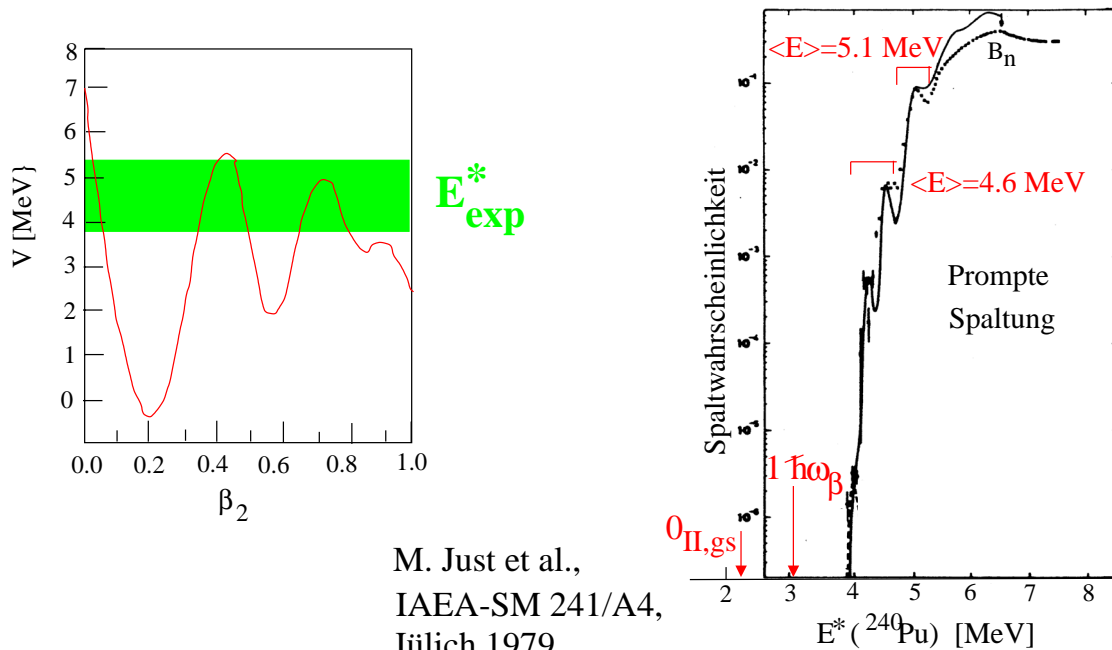
- in β -Bande vom Limit des Starren Rotators (niedrige I) bis Wert der gs-Bande (hohe I)
- odd-even-Staggering in b-Bande bekannt von $K = 1^-$ - Banden im 1. Minimum von Aktiniden
- separat glatter Verlauf für gerade/ungerade Spins in b-Bande

Multi-Phonon β -Vibrationen: Transmissionsresonanzen

- Transmissionsresonanzen (in prompter Spaltwahrscheinlichkeit):
 - Ankopplung der (in direkter Reaktion populierten) Compound-Zustände im 1. Minimum an kollektive Vibrationszustände im 2. Minimum
 - optisches Analogon: Fabry-Perot-Interferometer



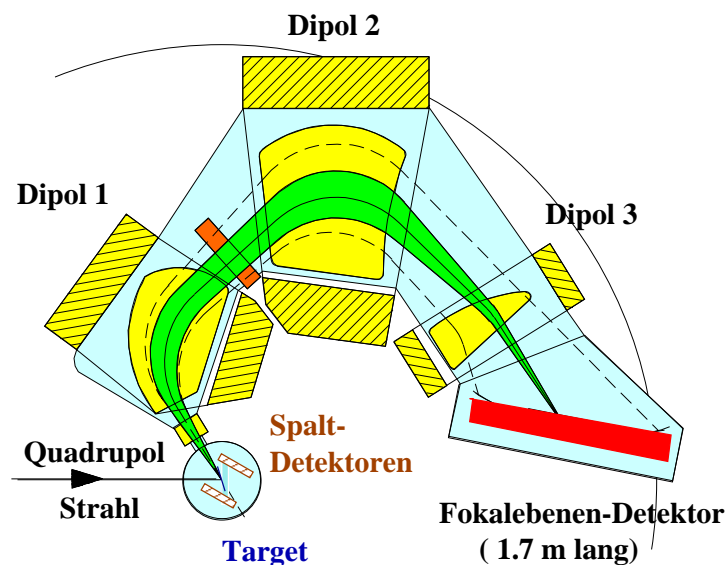
- Transmissionsresonanzen in $^{239}\text{Pu}(d,pf)$:



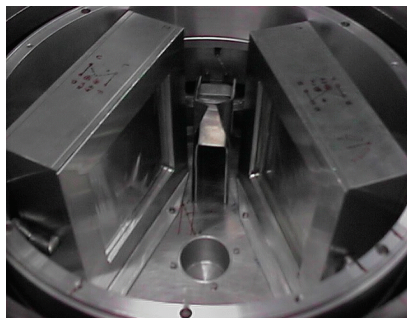
M. Just et al.,
IAEA-SM 241/A4,
Jülich 1979

Transmissionsresonanzen in ^{240}Pu : experimenteller Aufbau

- **Reaktion:** $^{239}\text{Pu}(d, pf) ^{240}\text{Pu}$, $E_d = 12.5 \text{ MeV}$
Target: $30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (99% ^{239}Pu),
Radioaktives Targetlabor München
- **Münchener Q3D-Magnetspektrograph:** (10 msr, $\theta = 130^\circ$)



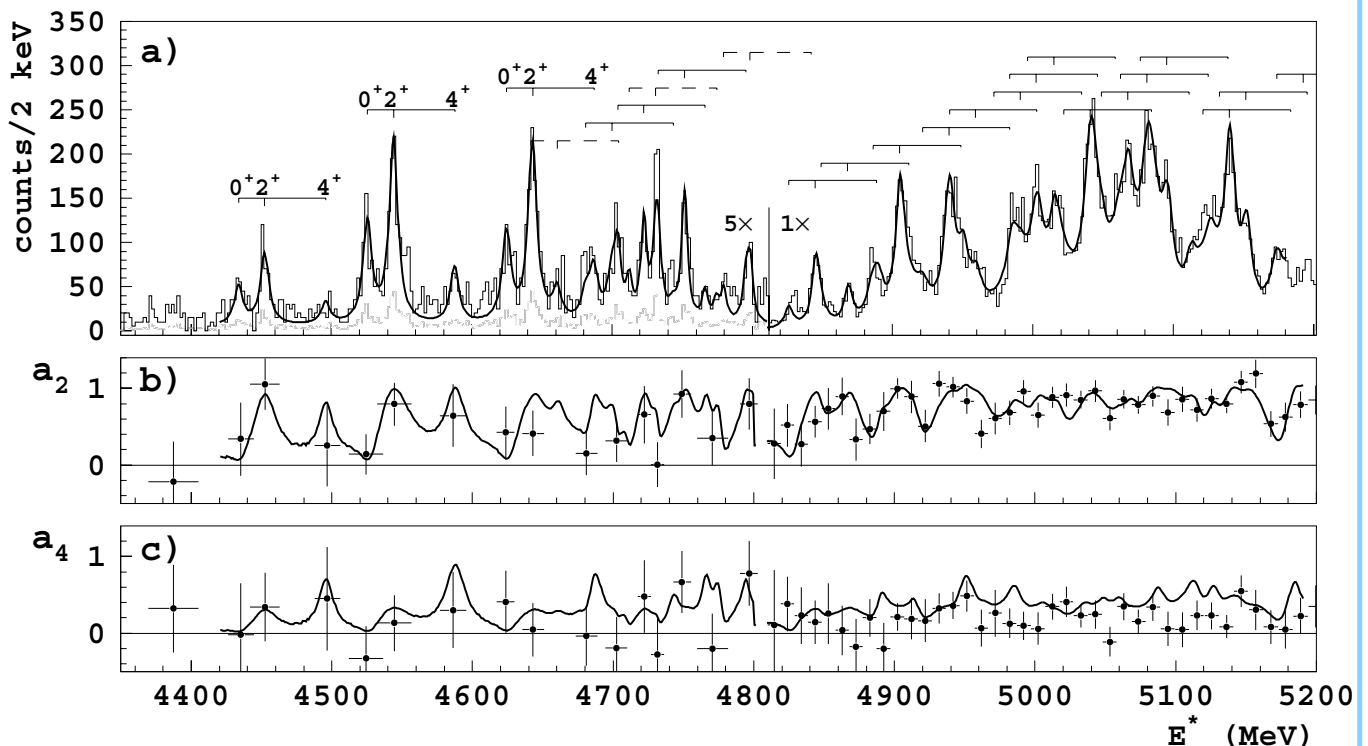
- **Protonen-Nachweis:** **Fokalebene-Detektor für leichte Ionen**
 - grosser dynamischer Bereich (1.7 m lang)
 - Energieauflösung: ca. 6 keV
- **Spaltfragment-Nachweis:** 2 ortsempfindliche Parallelplattenzähler



(von Debrecen-Gruppe)

239Pu(d,pf): Protonen-Spektrum

● Protonen-Energien in Koinzidenz mit Spaltfragmenten:



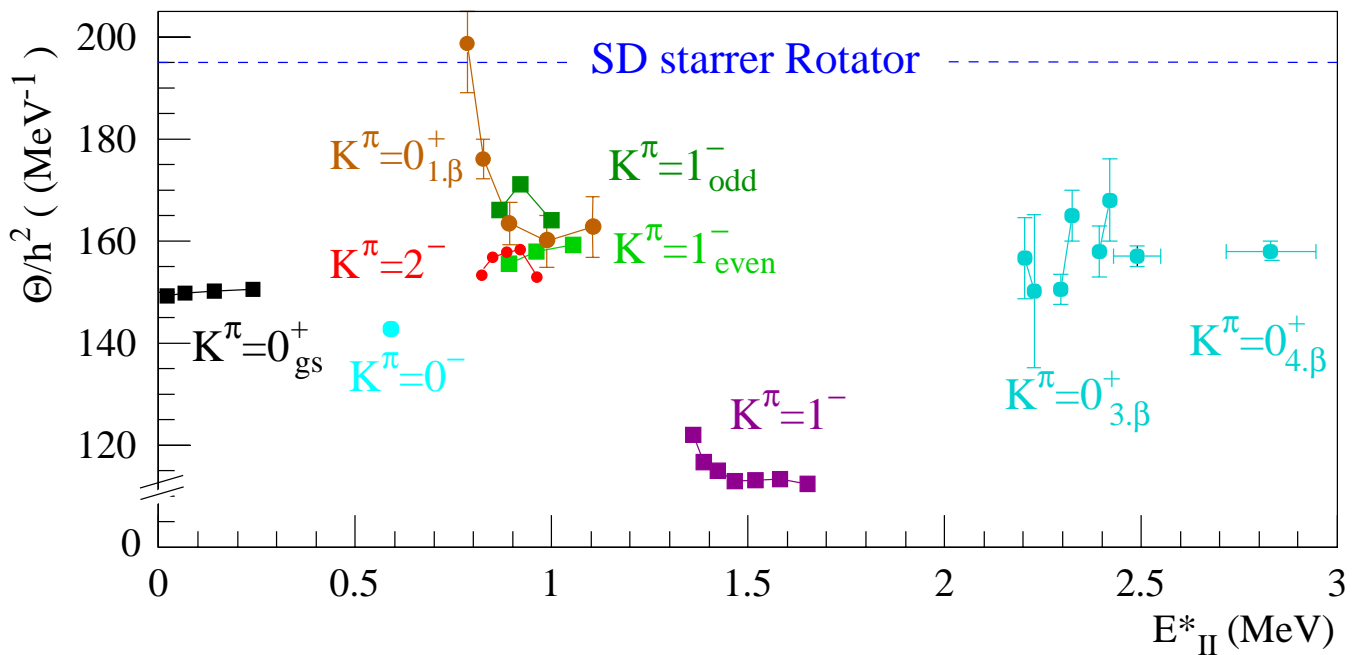
● Rotationsbanden-Struktur:

- 2 Vibrationsresonanz-Gruppen bei 4.6 und 5.1 MeV
- Rotationsbanden identifiziert
- Rotationsparameter: $\hbar^2/2\Theta = 3.19 \pm 0.17 \text{ keV}$
(Grundzustandsbande: 3.3 keV, Specht et al., 1972)
- aus Intensitätsverhältnissen: $K^\pi = 0^+$ (superdeformierte)
Rotationsbanden, gekoppelt an β -Vibrationszustände

● Test der Interpretation:

- Spektrum mit Rotationsbanden gefittet
(fester Rotationsparameter, Intensitätsverhältnis)
- Spin-Zuordnung mit Spaltfragment-Winkelverteilung geprüft

Dynamische Trägheitsmomente



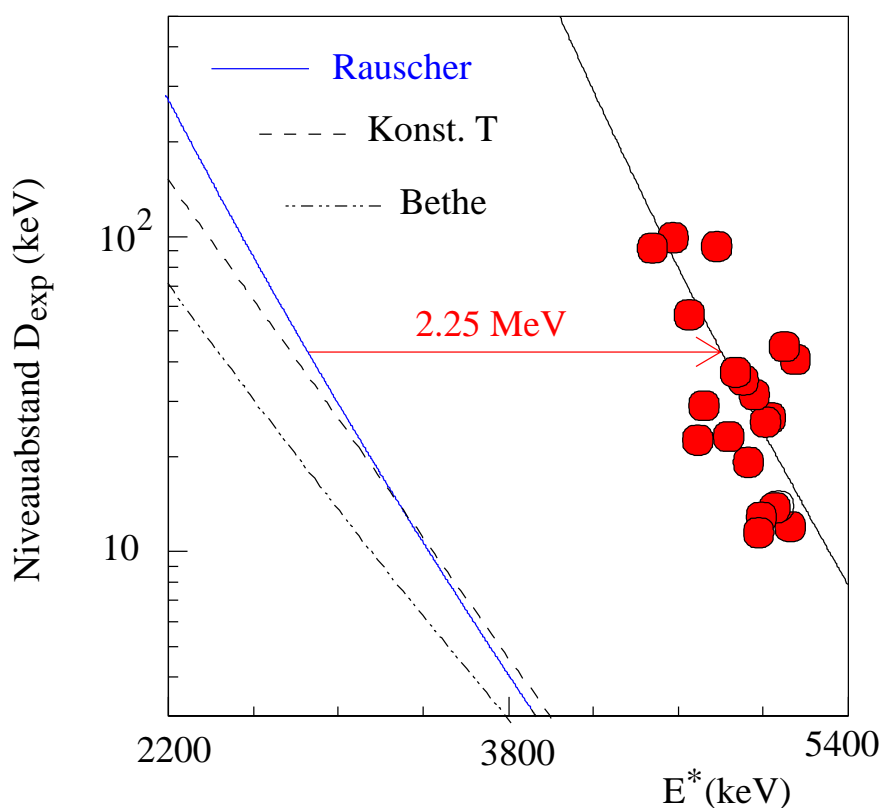
- - Erwartung: Trägheitsmomente bei höheren Anregungsenergien in der Nähe des Wertes für starren Rotator
- Messung: Θ nahe am Wert der gs-Rotationsbande
- kollektive Beimischungen bei höheren Anregungsenergien ?

Analyse der 0^+ - Niveaudichte

- **Komplette Spektroskopie von 0^+ - Niveaus:**

- statistische Analyse der 0^+ - Niveauabstände
- Vergleich mit berechneten Abständen nach back-shifted Fermi-Gas Modell

(Parametrisierung nach Rauscher et al., Phys. Rev. C56 (1997) 1613)



- **Neue Methode zur Bestimmung der Grundzustands-Energie im 2. Minimum:**

- Beschreibung der 0^+ -Verteilung im 2. Minimum durch Variation des back-shift Terms:

Grundzustandsenergie im 2. Minimum: $E_{\text{II}} = 2.25 \pm 0.2 \text{ MeV}$

- gute Übereinstimmung mit E_{II} aus Messungen von $(\alpha, 2n)$ - Anregungsfunktionen

Vibrationsanregungen in $^{240}\text{f Pu}$

Innere Barriere

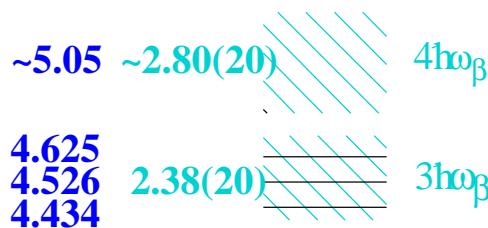
$E_A = 5.8 \text{ MeV}$

Quadrupol-Phononen:

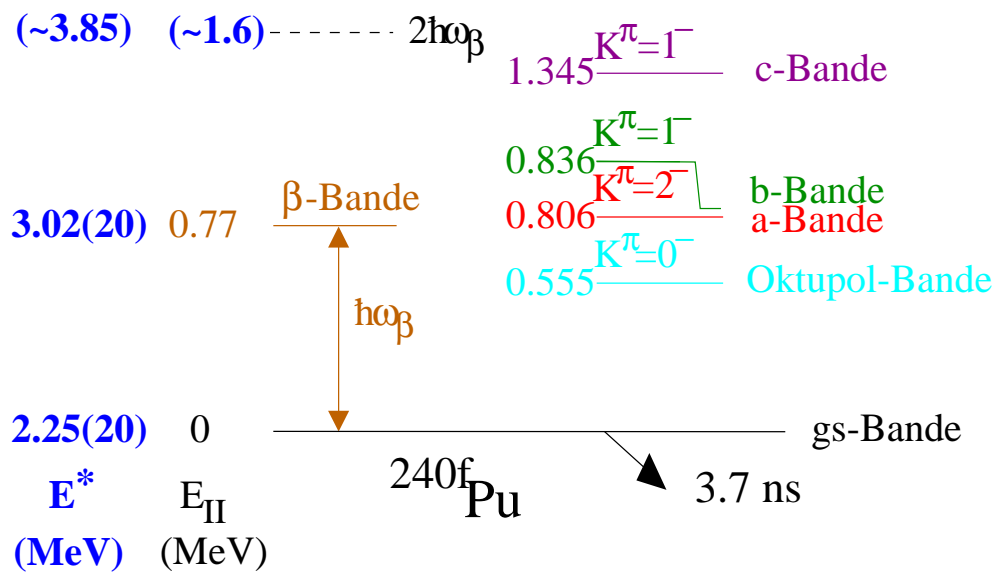
$(K^\pi = 0^+)$

Äussere Barriere

$E_B = 5.45 \text{ MeV}$



Oktupol-Phononen:



- **Oktupol-Phononen:** Kollektivität, Reihenfolge der energetisch tiefsten Banden in Übereinstimmung mit theoret. Vorhersagen (V.G. Soloviev et al., Z. Phys. A 358 (1997) 117)
- **Quadrupol-Phononen:** harmon. Vibrationsspektrum, gestaucht nahe Barrierenmaximum

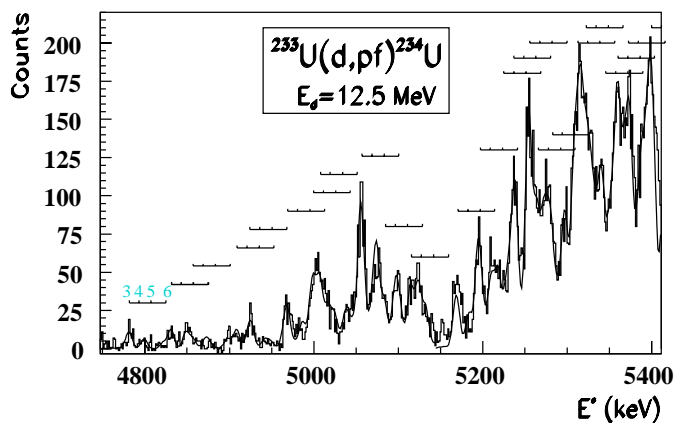
M. Hunyadi et al., Phys. Lett. B in print

Hyperdeformiertes 3. Minimum in ^{234}U

- Experimentelle Methode:

- $^{233}\text{U}(d, pf)^{234}\text{U}$; $E_d = 12.5 \text{ MeV}$
- Analog zu ^{240}fPu : Q3D, 2 PSAD

- Protonen-Spektrum:



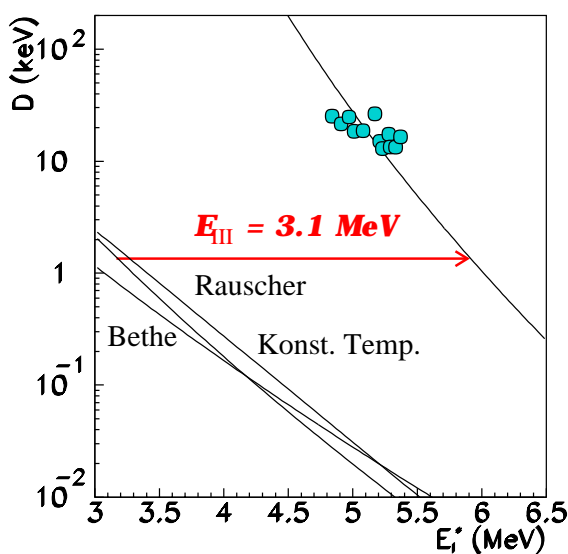
Beobachtung einer Rotationsbanden-Struktur: $(K=3)$

$$\hbar^2/2\Theta = 2.1 \text{ keV}$$

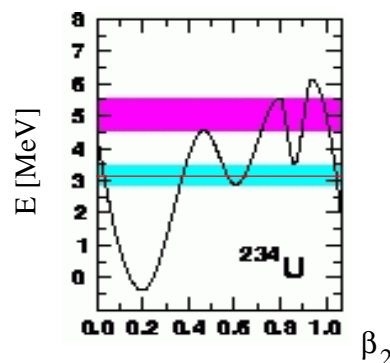
→ Hyperdeformation (3:1)

- Niveaudichte-Analyse ($J=3$):

- Bestimmung der Grundzustandsenergie im HD 3. Minimum:



$$E_{\text{III}} = 3.1(0.4) \text{ MeV}$$

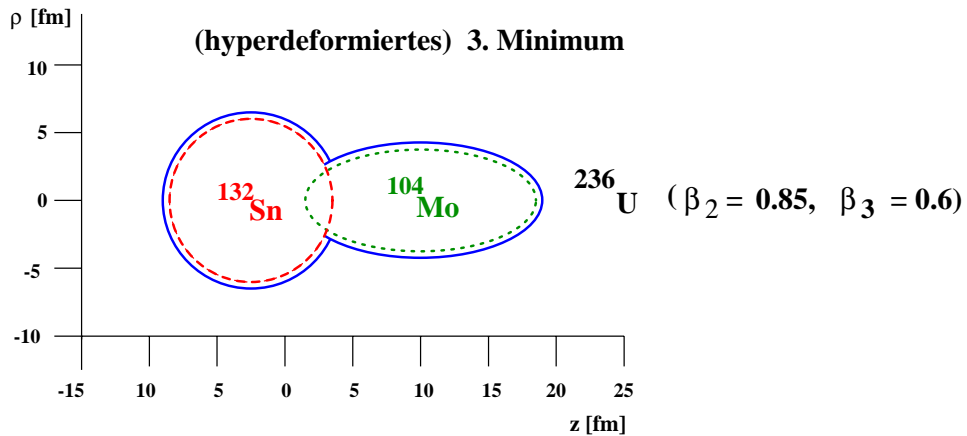


3. Minimum erstaunlich tief

Untersuchung der Kernform im hyperdeformierten 3. Minimum

- Theoretische Vorhersage: S. Cwiok et al., Phys. Lett. B 322 (1994) 304

- Clusterstruktur: sphärisch + stark deformiert

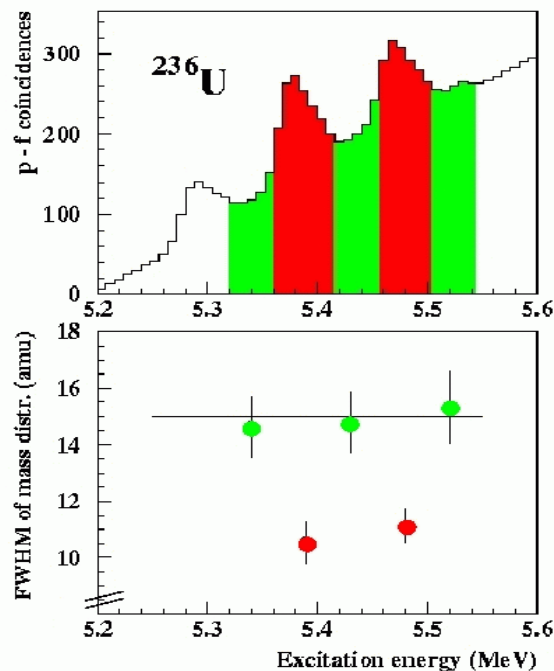


- aufgrund der Nähe zum Spaltsattel sollte sich die Clusterstruktur in einer charakteristischen Spaltfragment-Massenverteilung zeigen

- Experimenteller Ansatz:

- Messung der Spaltfragment-Massenverteilung im 3. Minimum

- Erste Ergebnisse:



Zusammenfassung:

- Vorteil der Spaltisomere:
 - niedrige Drehimpulse, wenig K-Mischung
 - klare Trennung von Vibrations- und Rotationsanregungen
- Superdeformiertes 2. Minimum:
 - Identifikation superdeformierter kollektiver Banden
 - Festlegung der β -Phononen-Energie
 - detailliertes Niveauschema
 - Identifikation von mehr als 20 Rotationsbanden
 - neue Methode zur Bestimmung der Potentialtiefe
- Hyperdeformiertes 3. Minimum:
 - Identifikation von über 20 Rotationsbanden
 - erstmalige Bestimmung der Tiefe des 3. Minimums
 - Hinweise auf Clusterstruktur der Kernform

Dank an die Kollaboration:



Inst. Nucl. Research,
Debrecen/Ungarn

[A. Krasznahorkay](#)
[M. Csatlós](#)
[J. Gulyás](#)
[M. Hunyadi](#)
[Z. Máté](#)



LMU München

[D. Gassmann](#) [G. Graw](#)
[D. Habs](#) [R. Hertenberger](#)
[M.J. Chromik](#) [Y. Eisermann](#)
[P. Reiter](#) [A. Metz](#)
[H.J. Maier](#) [PGT](#)



TU München

[T. Faestermann](#)



Univ. Bonn

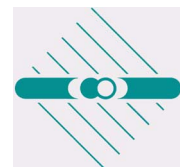
[H. Hübel](#)
[E. Mergel](#)
[J. Domscheit](#)
[A. Görgen](#)
[S. Neumann](#)
[A. Neusser](#)
[G. Schönwasser](#)

CEA/Saclay

[K. Hauschild](#)

CSNSM Orsay

[A. Lopez-Martens](#)



MPI Heidelberg

[D. Pansegrau](#)

[H. Bauer](#)
[T. Härtlein](#)
[F. Köck](#)
[H. Scheit](#)
[D. Schwalm](#)