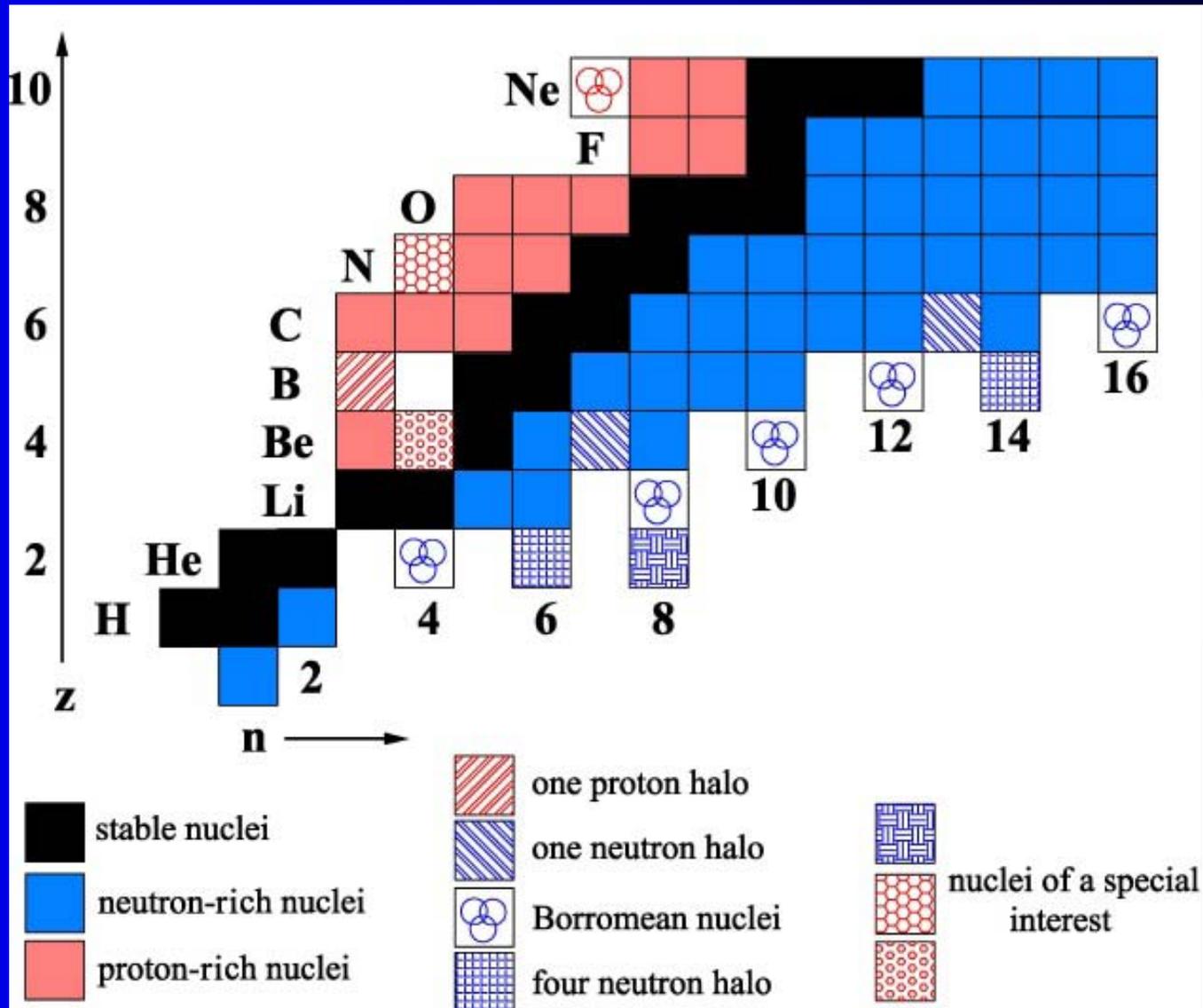
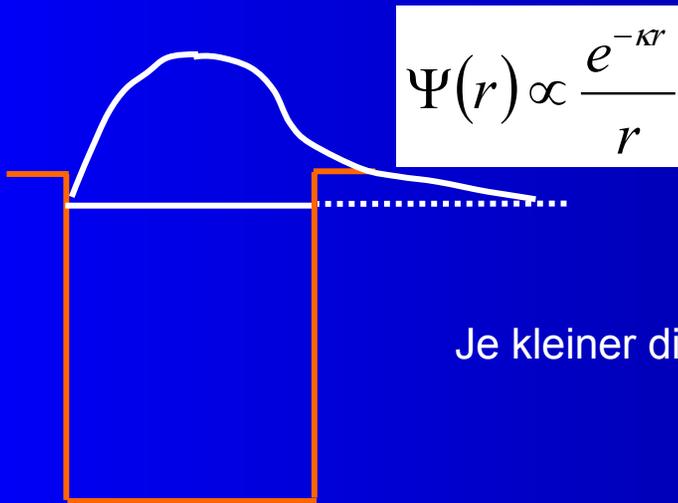


# Proton-Dripline

# Übersicht Halo Kerne



# Was kann man an der Neutronen-Dripline erwarten?



$$\kappa^2 = \frac{2\mu E}{\hbar^2}$$

Je kleiner die Bindungsenergie, je ausgedehnter die Wellenfunktion

$$A = 10 \rightarrow \mu = 1,1m_N$$

E	$\kappa^2$	$\kappa$	$1/\kappa \approx r$
7 MeV	0,35 fm <sup>-2</sup>	0,6 fm <sup>-1</sup>	1,7 fm
1 MeV	0,05 fm <sup>-2</sup>	0,2 fm <sup>-1</sup>	4,5 fm
0,1 MeV	0,005 fm <sup>-2</sup>	0,07 fm <sup>-1</sup>	14 fm

# $\alpha$ -Zerfall

Formation von  $\alpha$ -Teilchen im Kern vor der Emission

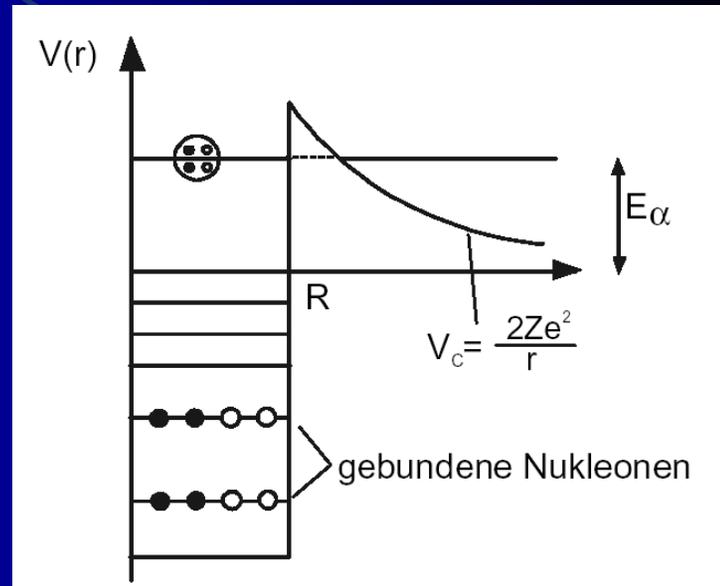
Spontaner  $\alpha$ -Zerfall

→ negative Separationsenergie

$$S_C = \sum S_p + \sum S_n - B_C$$

$S_C < 0$  wegen hoher Bindungsenergie des  $\alpha$

Teilchen	$B_C$ (MeV)	$S$ (MeV)
n		7.15
p		6.05
d	2.2	10.5
t	8.5	10.1
$^3\text{He}$	7.7	9.6
$\alpha$	28.3	-5.4



# Protonenradioaktivität

Lehrbuch:

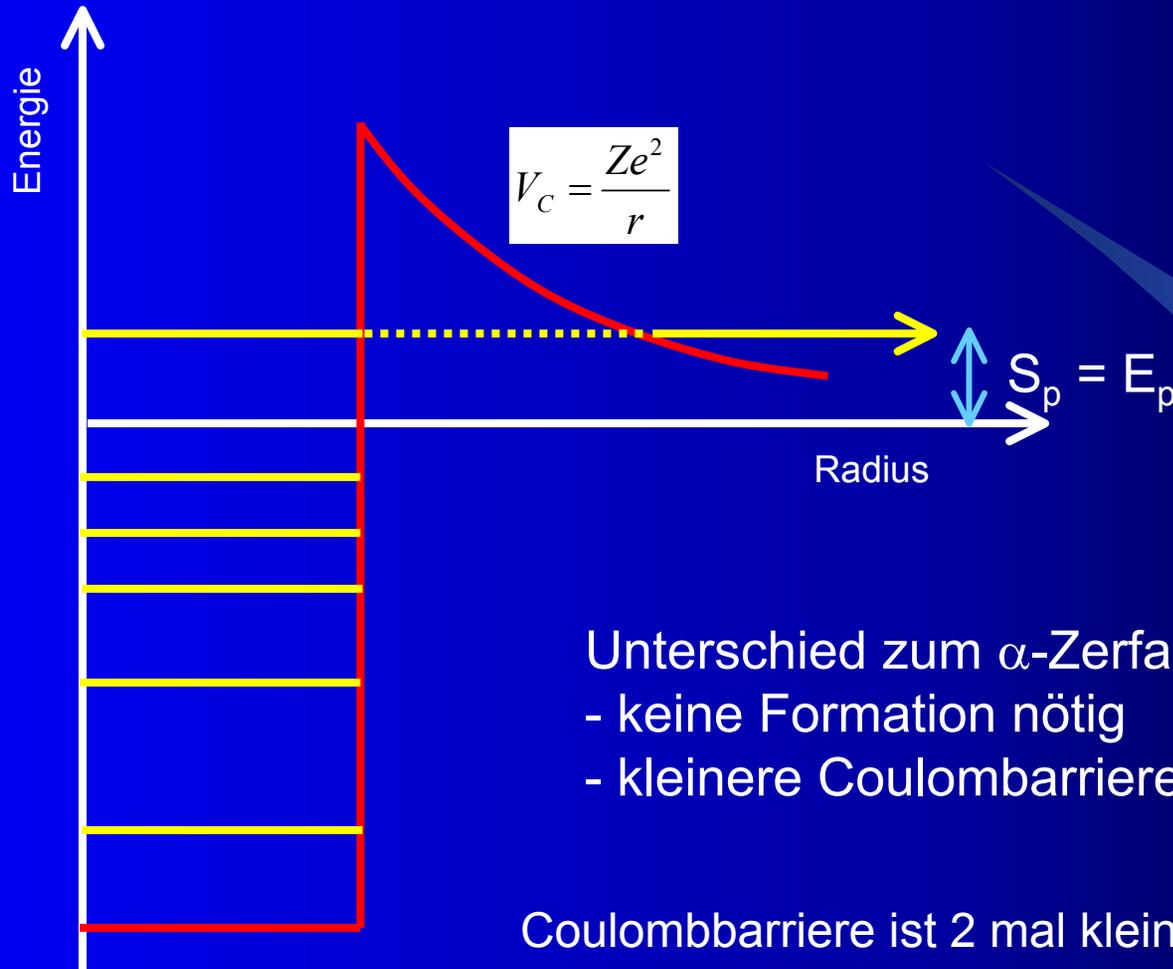
Es gibt drei Formen der Radioaktivität:

- $\alpha$ -Zerfall
- $\beta$ -Zerfall
- $\gamma$ -Zerfall

Kerne an der Protonendripline sind instabil gegen Protonenzerfall.

Protonen-Radioaktivität ist die vierte Form der Radioaktivität

# Energieverhältnisse beim Protonenzerfall



$\alpha$ -Zerfall:

$$V_C = \frac{2Ze^2}{r}$$

Proton-Zerfall

$$V_C = \frac{Ze^2}{r}$$

Unterschied zum  $\alpha$ -Zerfall:

- keine Formation nötig
- kleinere Coulombbarriere

Coulombbarriere ist 2 mal kleiner als beim  $\alpha$ -Zerfall.

# Einfluss des Bahndrehimpulses

Zentrifugalbarriere

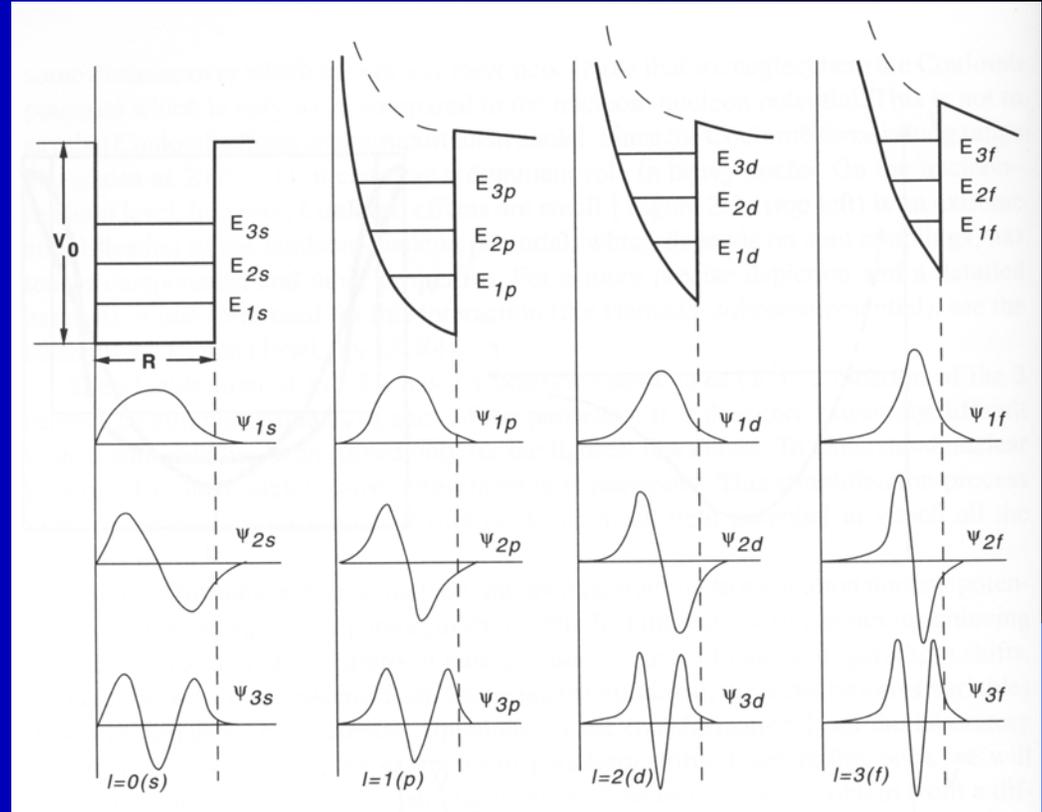
$$V_Z = \frac{\ell(\ell+1)\hbar^2}{2\mu r^2}$$

$\alpha$ -Zerfall:

$$\mu_\alpha = \frac{(A-2) \cdot 2}{A}$$

Proton-Zerfall

$$\mu_p = \frac{(A-1) \cdot 1}{A}$$



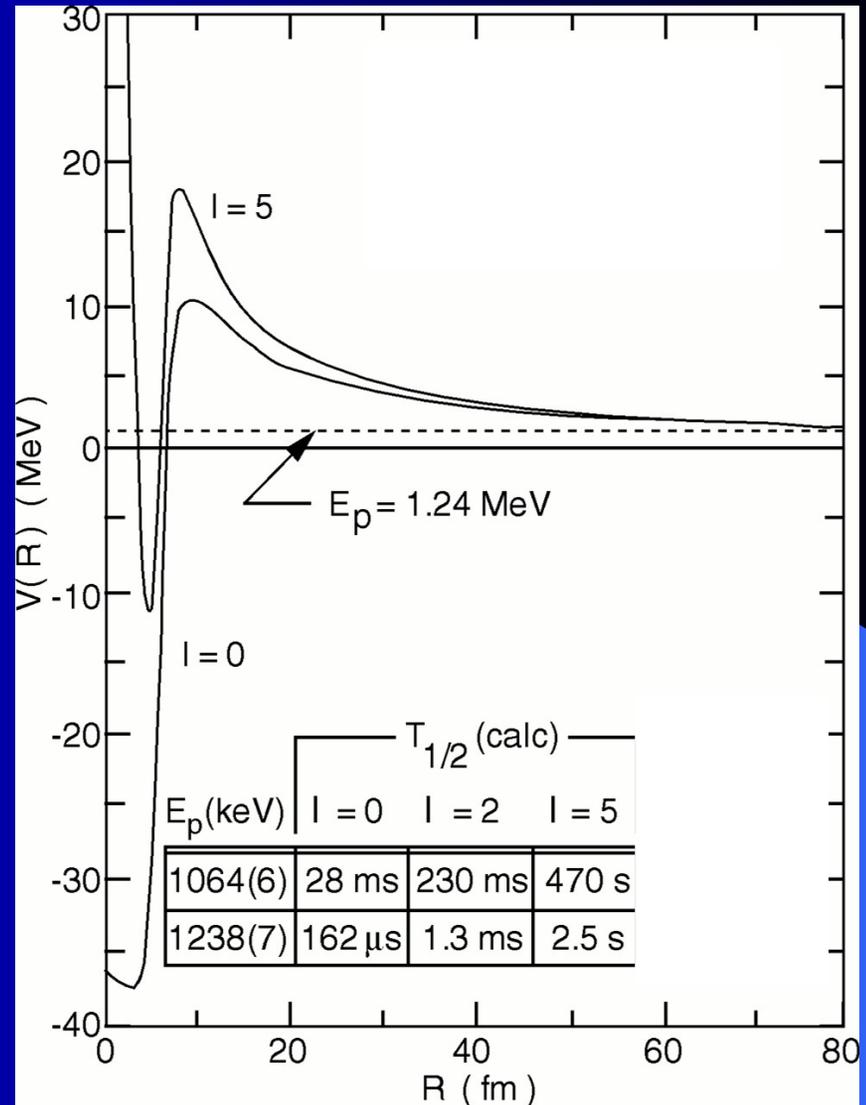
Zentrifugalbarriere ist ca. 2 mal größer als beim  $\alpha$ -Zerfall.

# Was bestimmt die Halbwertszeit für Protonemitter?

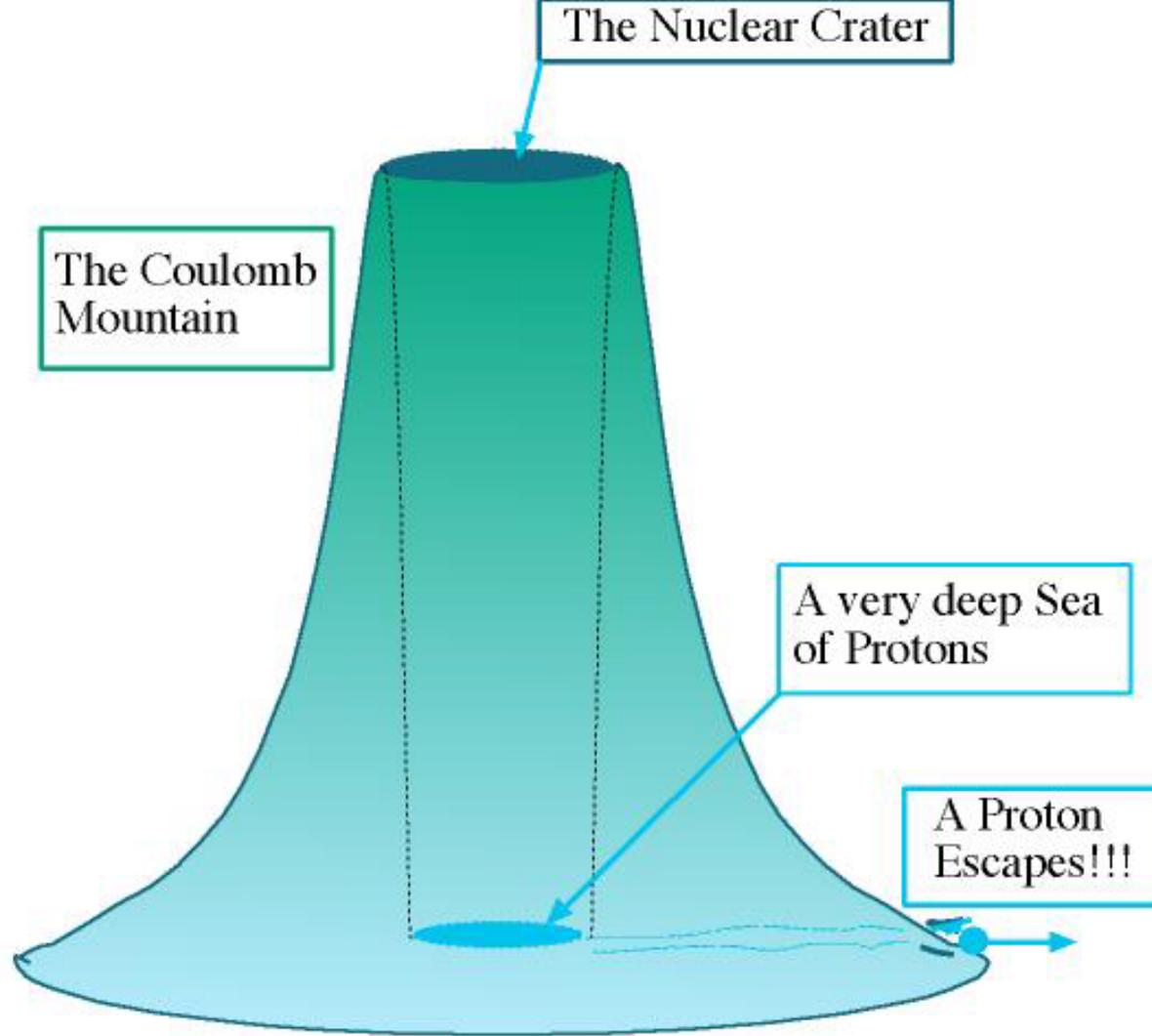
- Protonenseparationsenergie (= Q-Wert)
- Coulomb Barriere
- Bahndrehimpuls (größere Zentrifugalbarriere für höheren Bahndrehimpuls des Protons)

Halbwertszeiten werden berechnet aus:

- Einteilchenwellenfunktion
- Coulomb-Barriere
- Zentrifugalbarriere
- Tunnelprozess (WKB-Näherung)



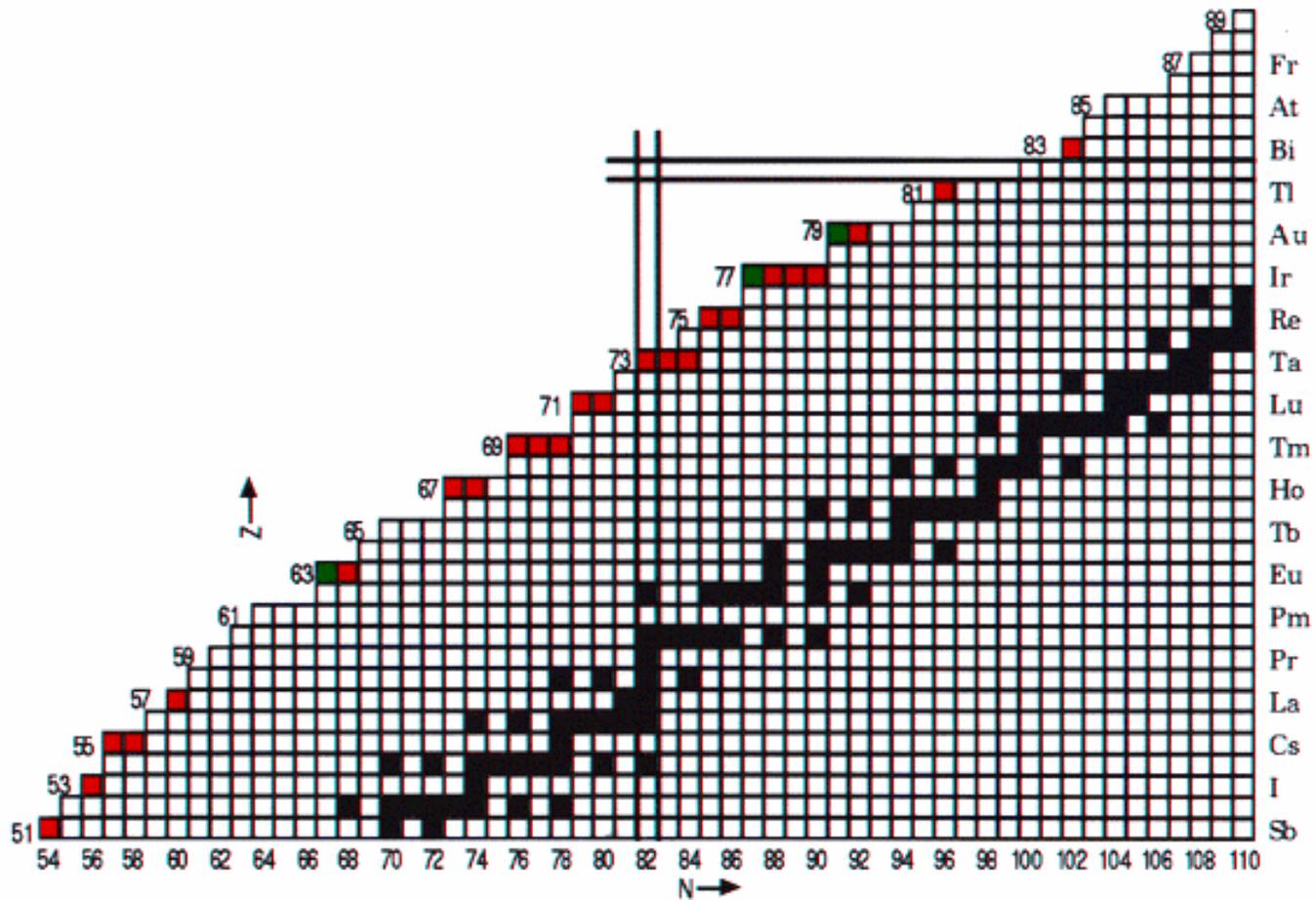
Coulomb Barriere und Zentrifugalbarriere führen dazu, dass Protonenungebundene Kerne eine signifikante Halbwertszeit haben können.



A Schematic Diagram of Proton Decay

# Bekannte Protonenemitter

## KNOWN PROTON RADIOACTIVITIES



# Keine Grundzustandsprotonenemitter unterhalb von $Z=50$

Unterhalb von  $Z=50$  ist die Coulomb-Barriere so klein, dass die Halbwertszeiten sehr klein werden.

Beispiel:  $^{69}\text{Br}$

Aus der Massensystematik extrapoliert man:  $S_p = -180 \text{ keV}$

Daraus ergibt sich eine partielle Protonhalbwertszeit von:  $T_{1/2} = 10^3 \text{ sec}$   
( Die partielle Halbwertszeit für  $\beta$ -Zerfall ist kleiner 100 ms)

Das experimentelle Limit liegt jedoch bei  $T_{1/2} < 24 \text{ ns}$

Daraus ergibt sich eine Separationsenergie von kleiner  $S_p < -500 \text{ keV}$

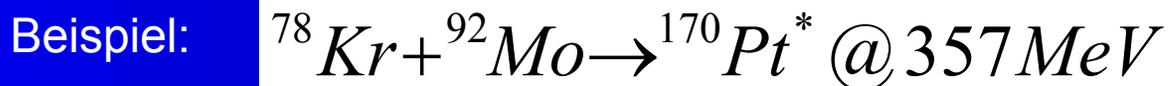
**300 keV Energieunterschied resultieren in 11 Größenordnungen  
Unterschied in  $T_{1/2}$  !!**

Für Kerne mit  $Z > 50$  ist der Einfluss nicht mehr so dramatisch!!

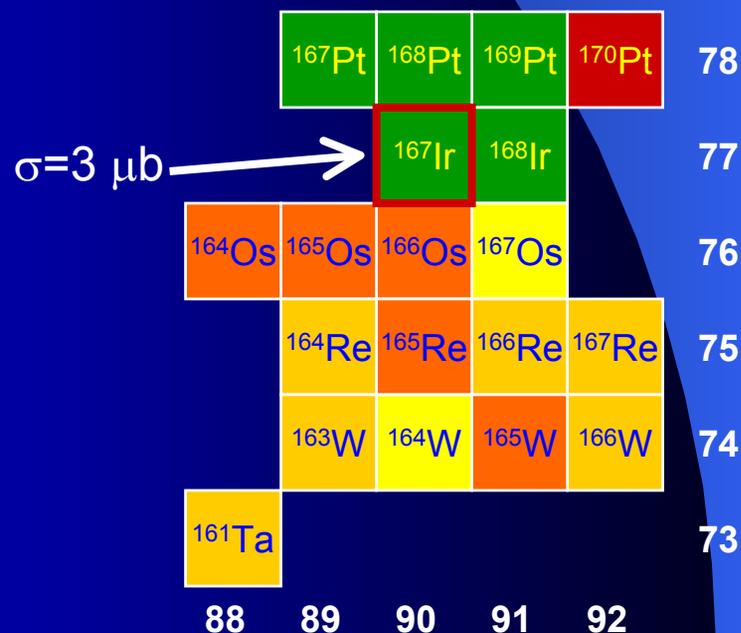
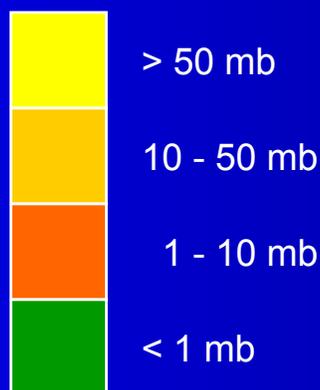
# Experimentelle Methode

Produktion durch Schwerionen-Fusionsreaktion:

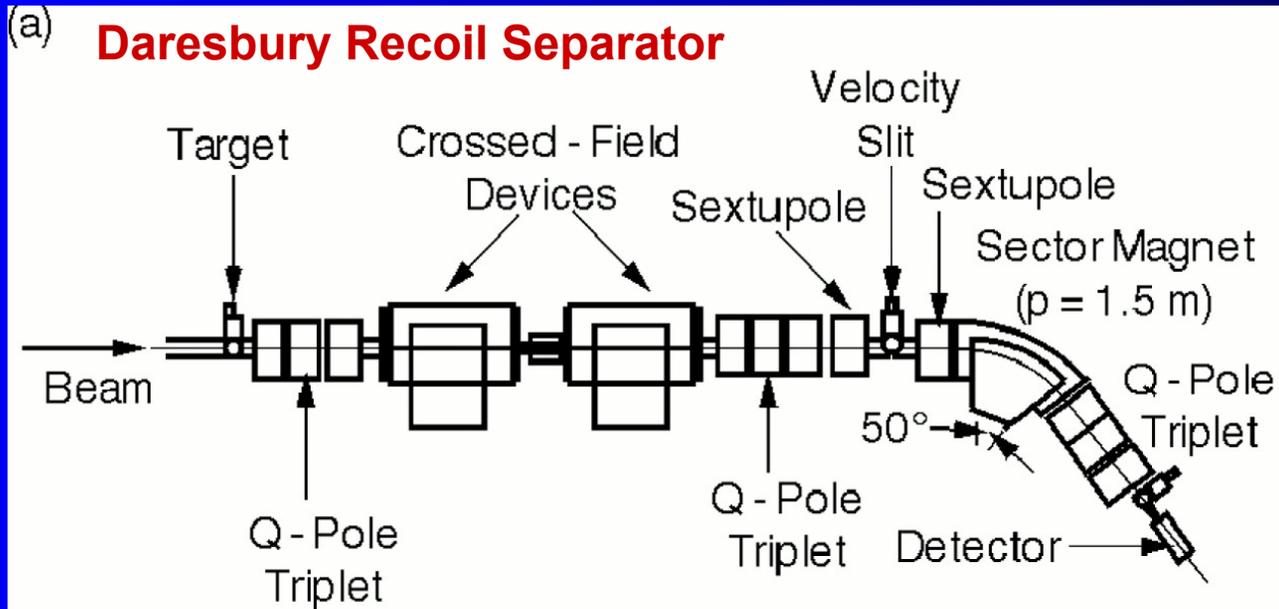
Problem: Die Wirkungsquerschnitte für die Reaktionskanäle zur Protonendripline sind sehr klein:



Totaler Fusionsquerschnitt: 360 mb

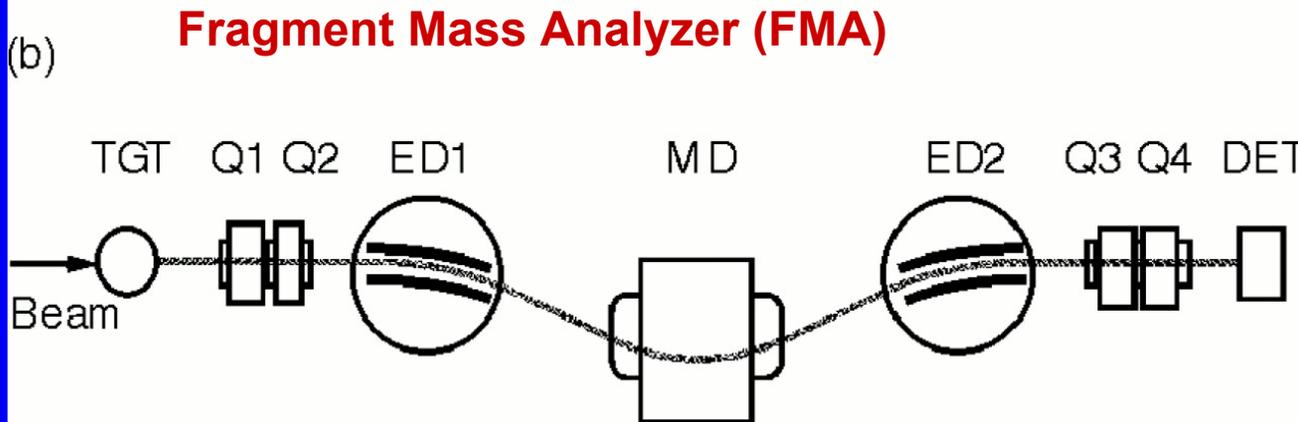


# Massenseparatoren



Energie Akzeptanz  
 $\pm 4 \%$

M/Q Akzeptanz  
 $\pm 1,2 \%$



Energie Akzeptanz  
 $\pm 20 \%$

M/Q Akzeptanz  
 $\pm 4 \%$

$\Omega = 8 \text{ msr}$

$\Delta M/M = 1/300$

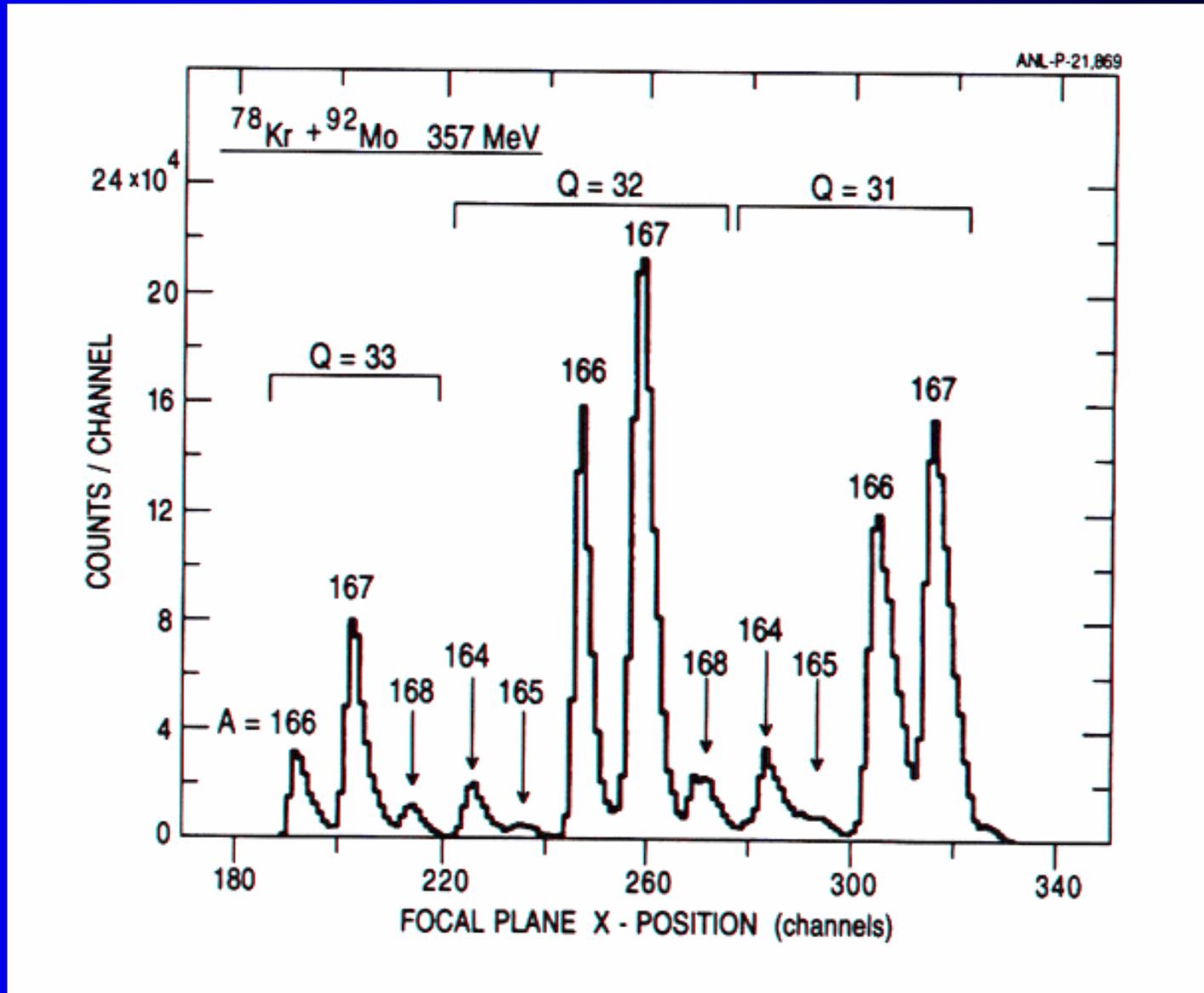
Dispersion = 10 mm / %

# Fragment Mass Analyzer (FMA)



# Separation nach Masse und Ladung

FMA

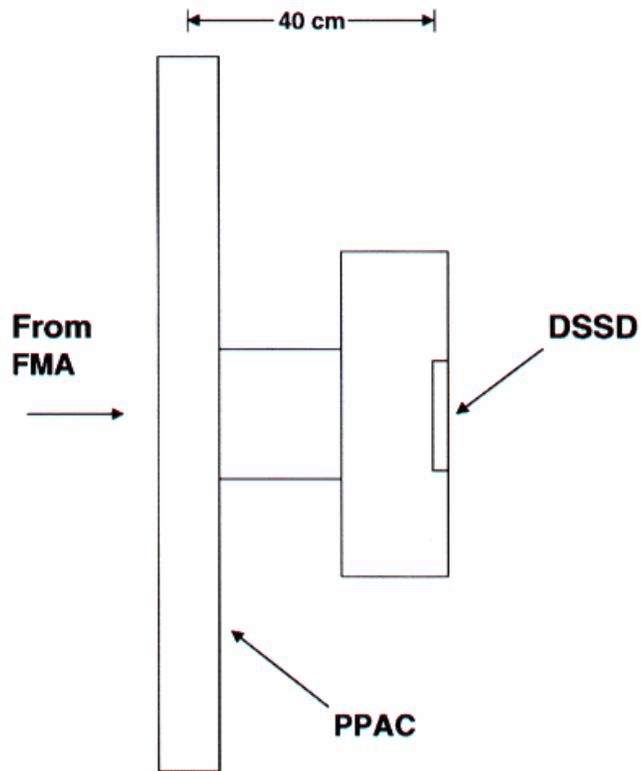


# Nachweis des Protonenzerfalls in der Fokalebene

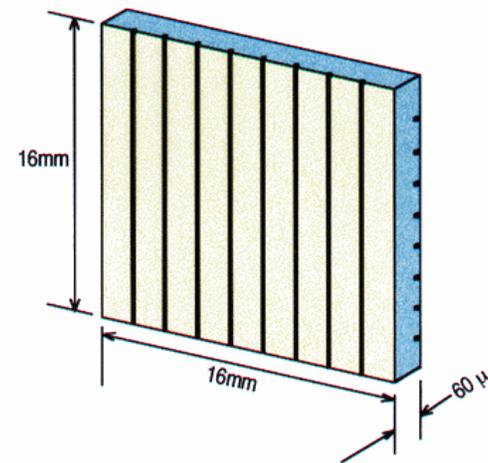
- Es werden ständig Reaktionsprodukte im Fokalebeneendetektor implantiert
- Gleichzeitig kommt es sehr selten zu Protonenzerfällen
- Um die Halbwertszeit zu messen, muss man folgendes erreichen:
  - Man muss zwischen Implantation und Zerfall unterscheiden
    - Energie der Rückstoßkerne: 140 MeV
    - Energie der Protonen:  $\sim 1$  MeV
  - Der gemessene Ort der Implantation und des Zerfalls muss identisch sein
  - Man muss die Zeit zwischen Implantation und Zerfall messen

# Aufbau der Fokalebene

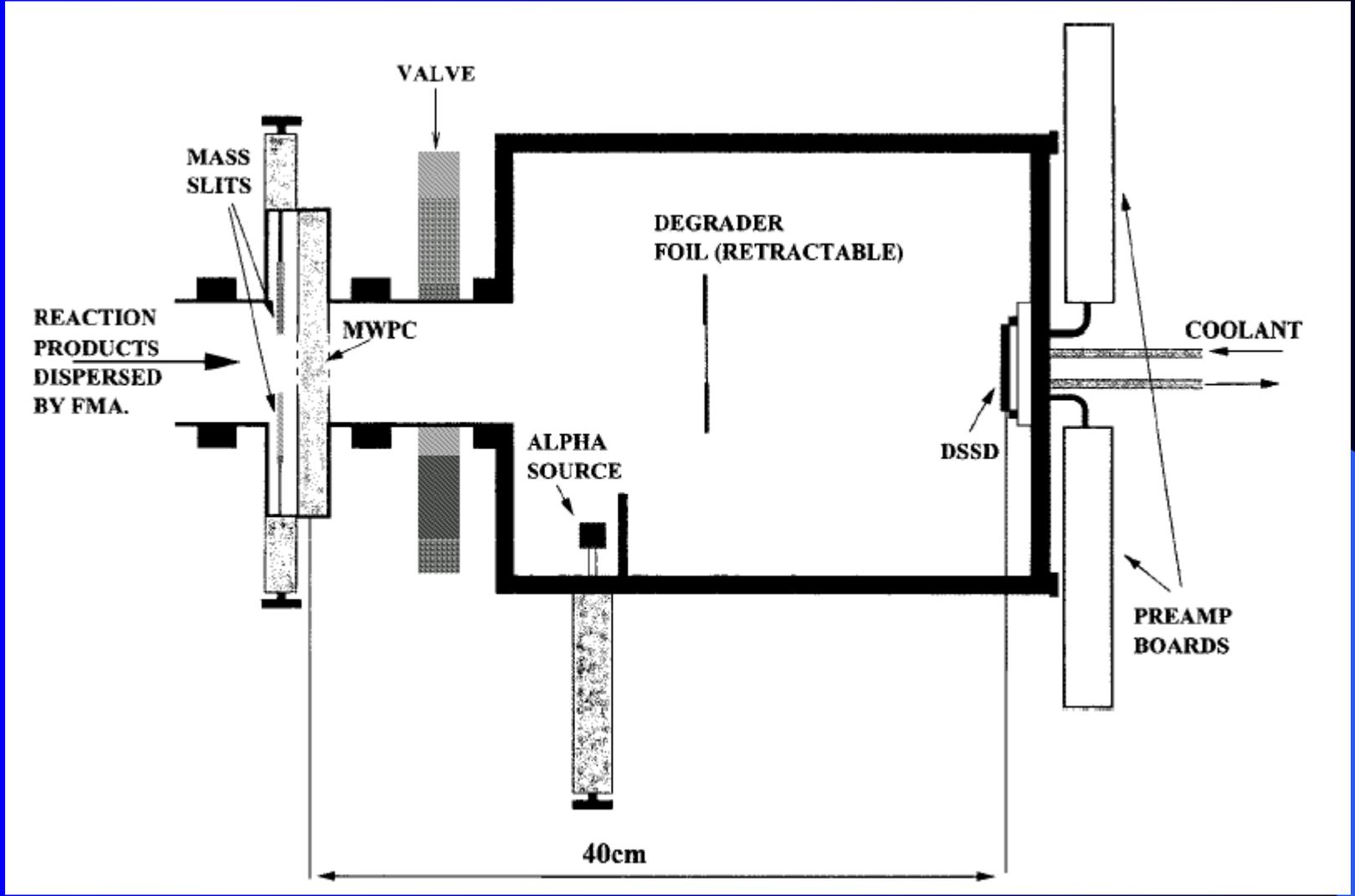
## FMA Focal Plane Implantation Facility



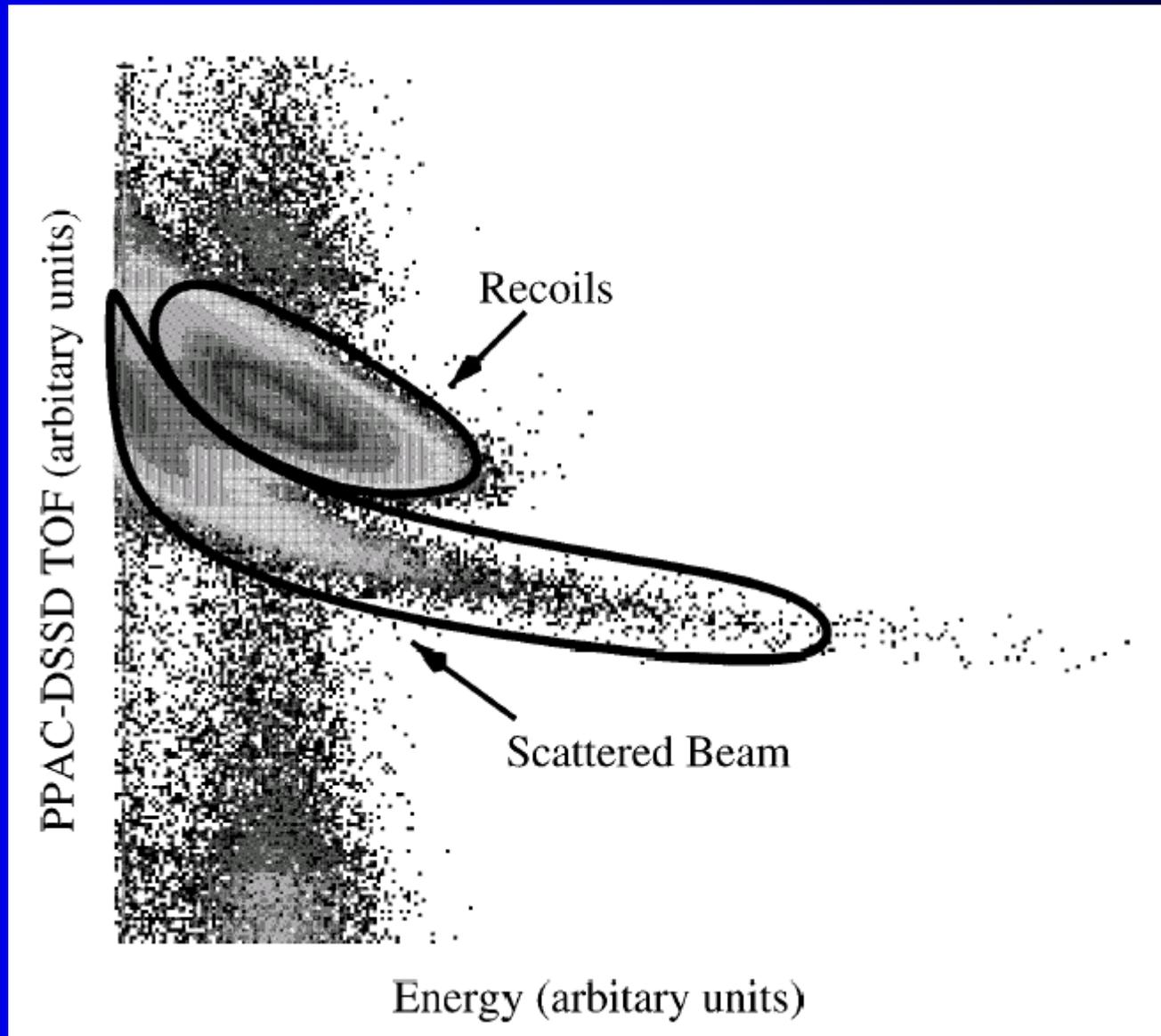
## DOUBLE-SIDED SILICON STRIP DETECTOR



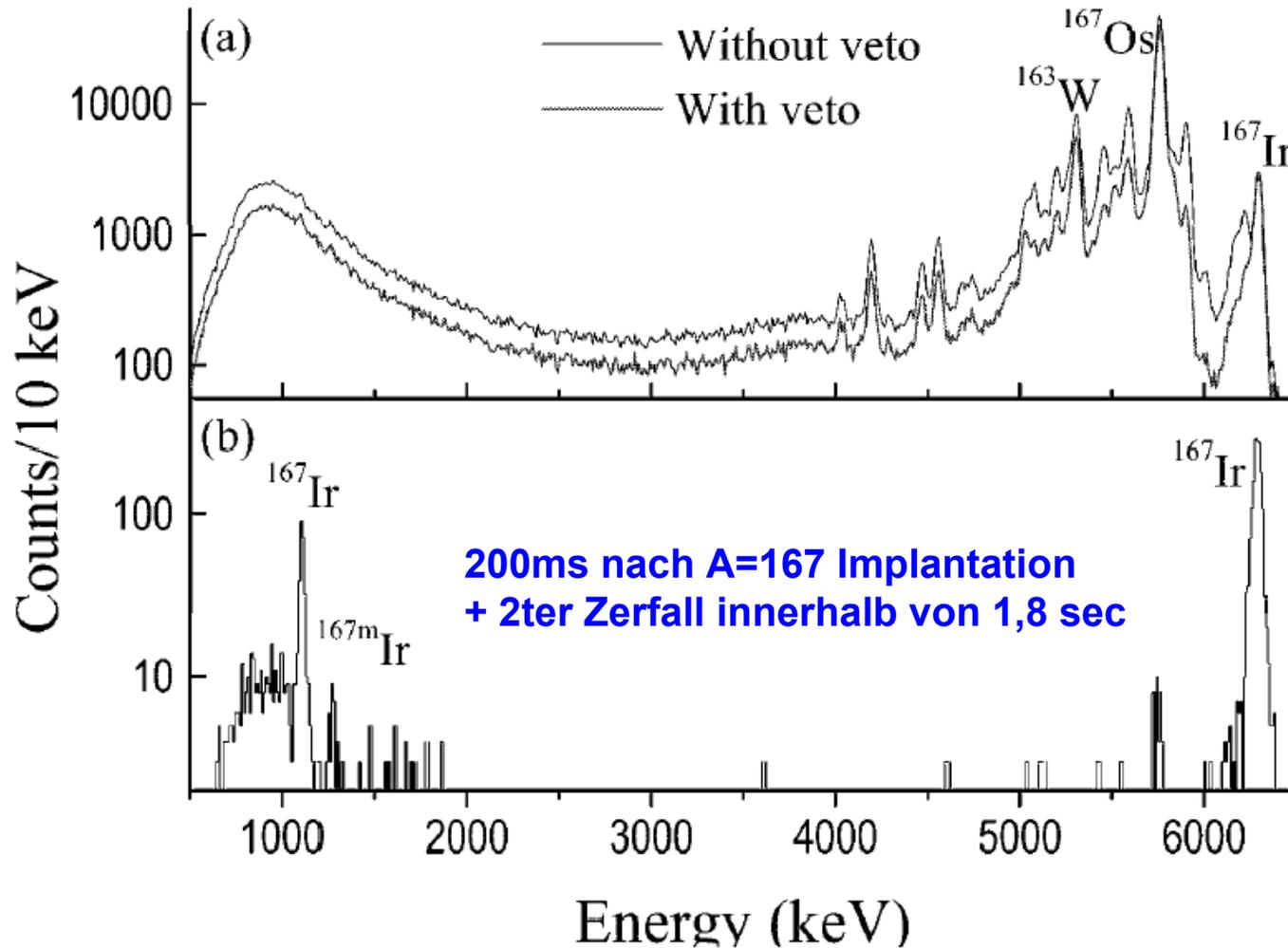
# FMA Fokalebene



# Separation von Strahl und Fusionsprodukten

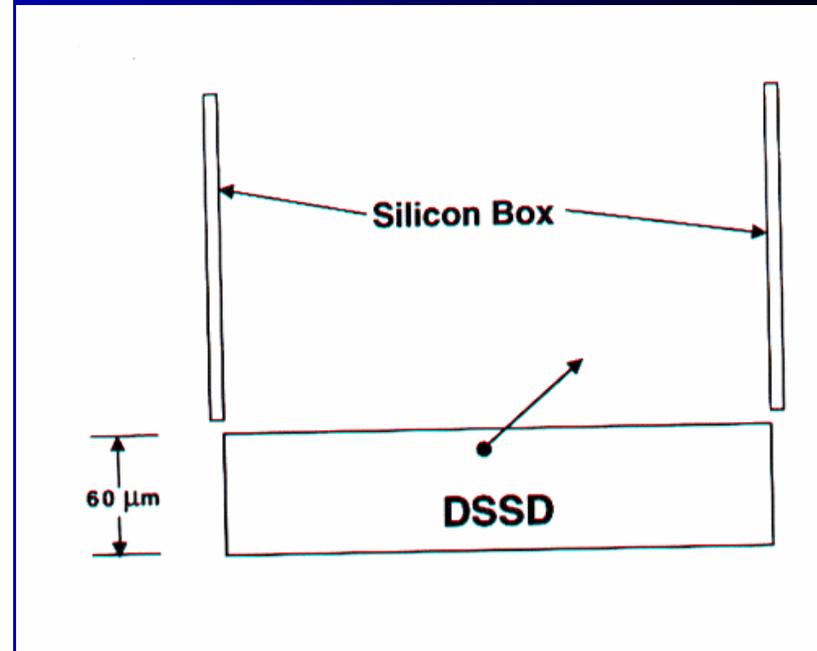
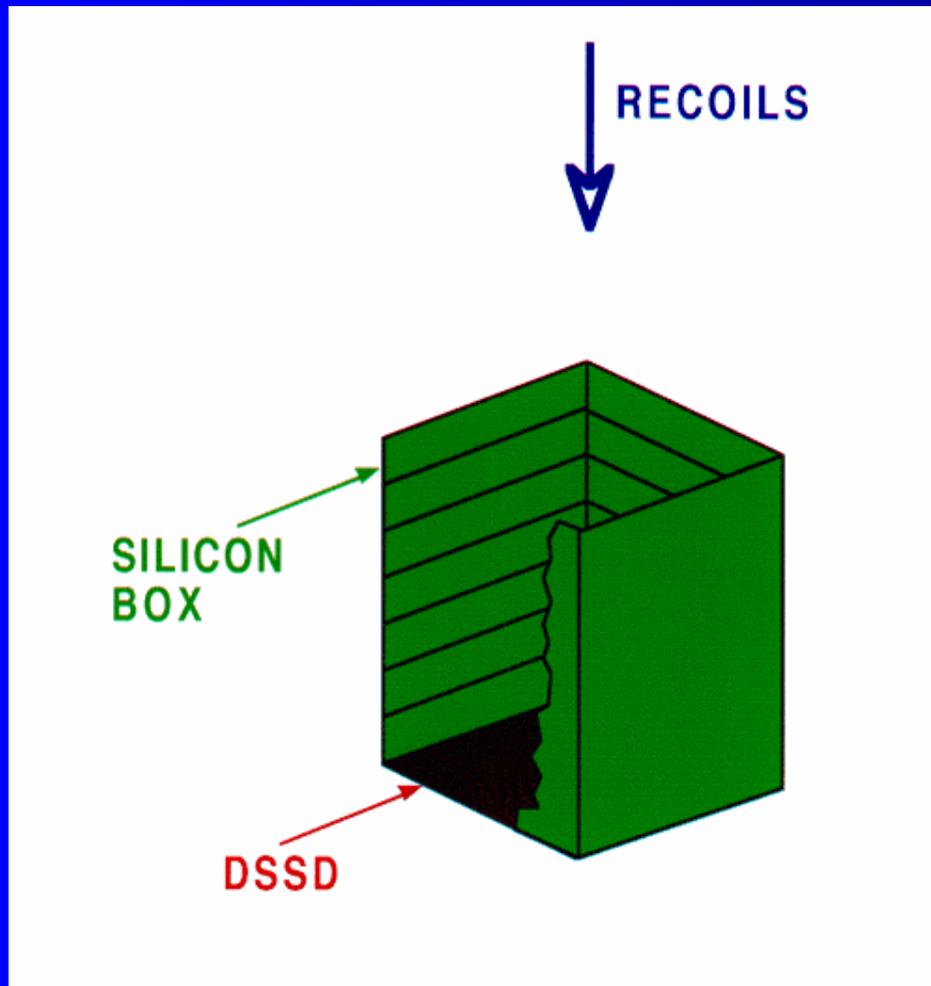


# DSSD Spektren

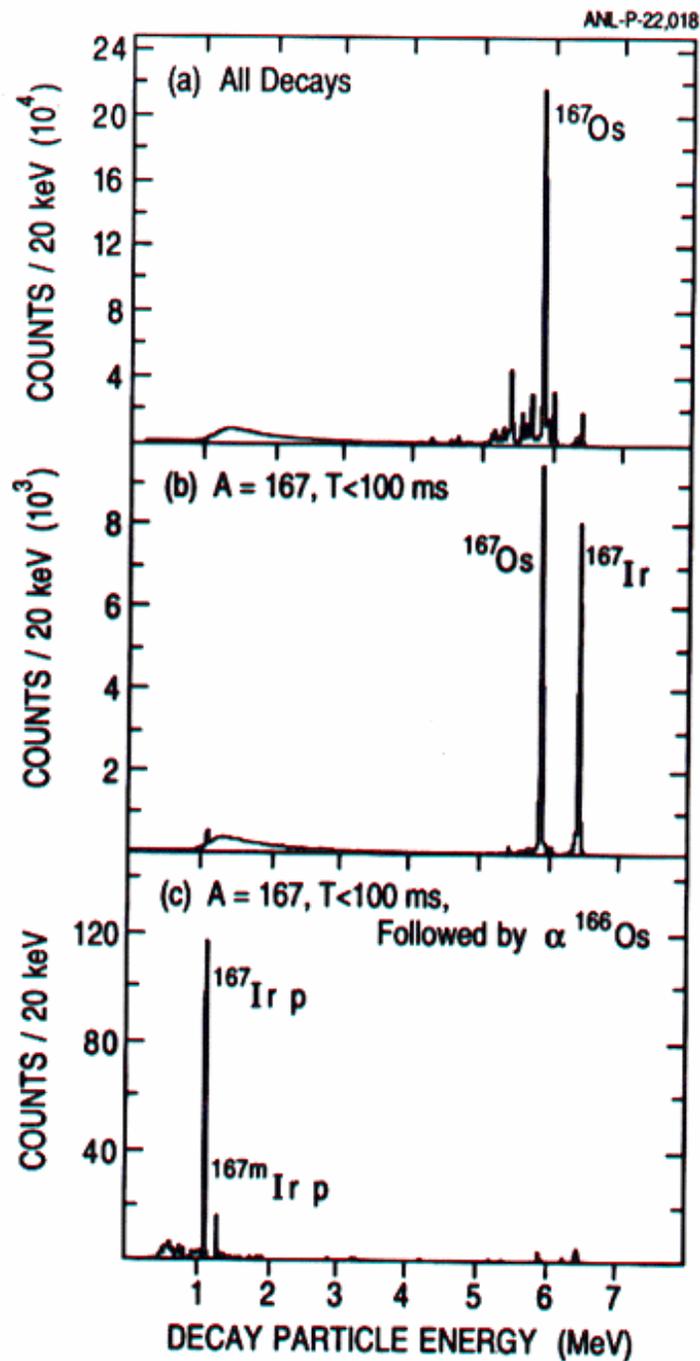
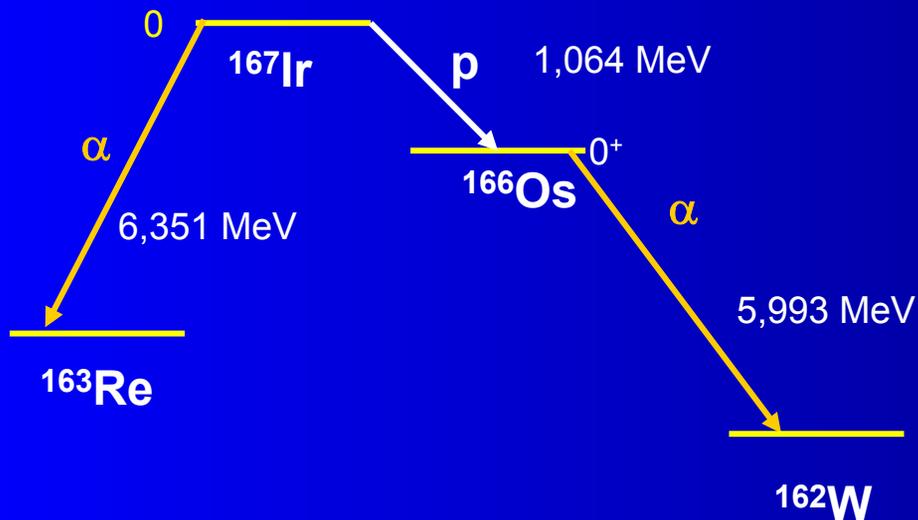


Veto: gleiche Energie auf beiden Seiten des Detektors

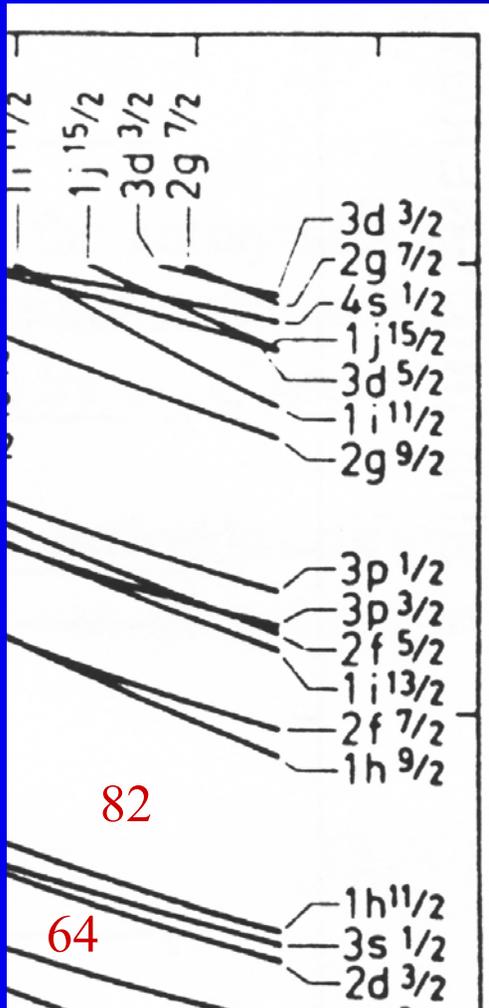
# Verbesserte Nachweiseffizienz durch Siliziumbox



# Zerfallsspektrum für $^{78}\text{Kr} + ^{92}\text{Mo}$

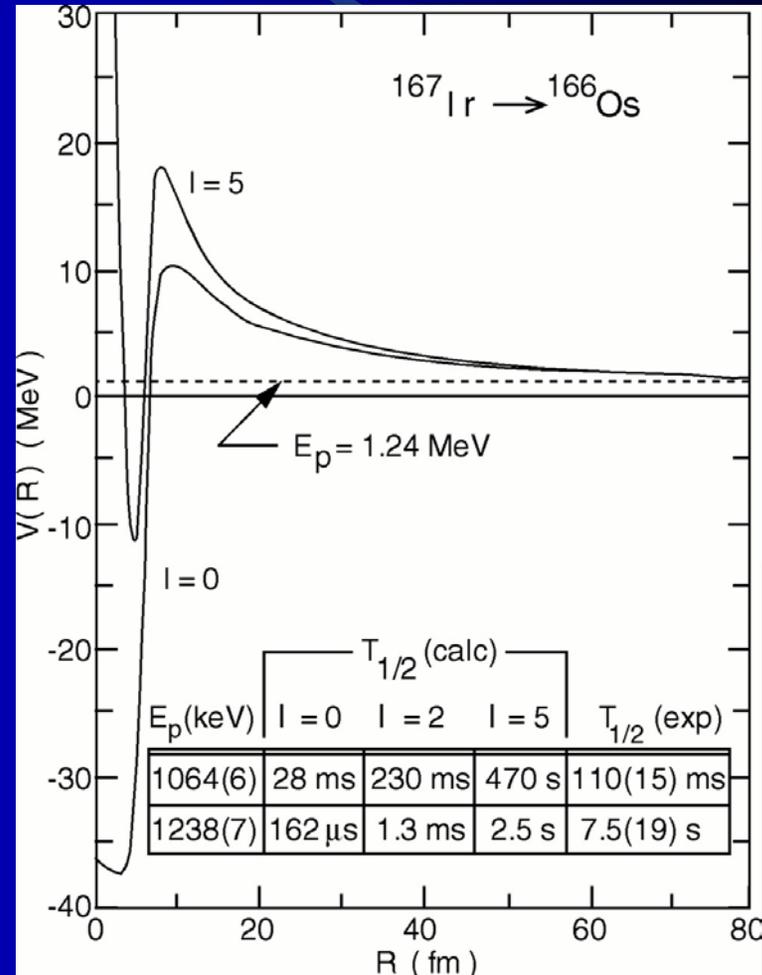


# Schalenstruktur für N=90, Z=77

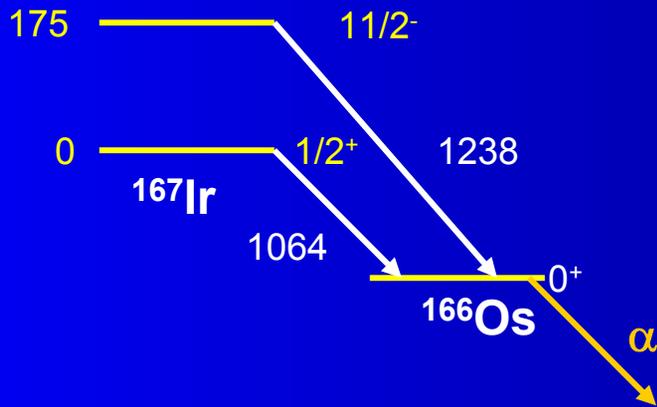


Frage:

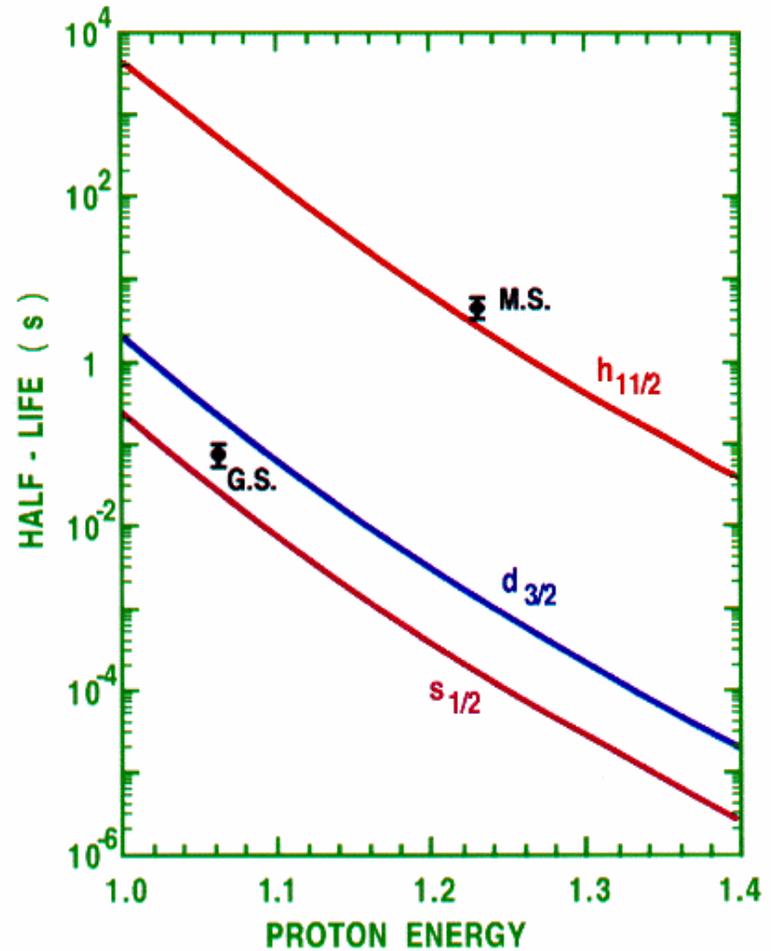
Wie ist die Position und Reihenfolge der Einteilchenorbitale an der Protonendripline



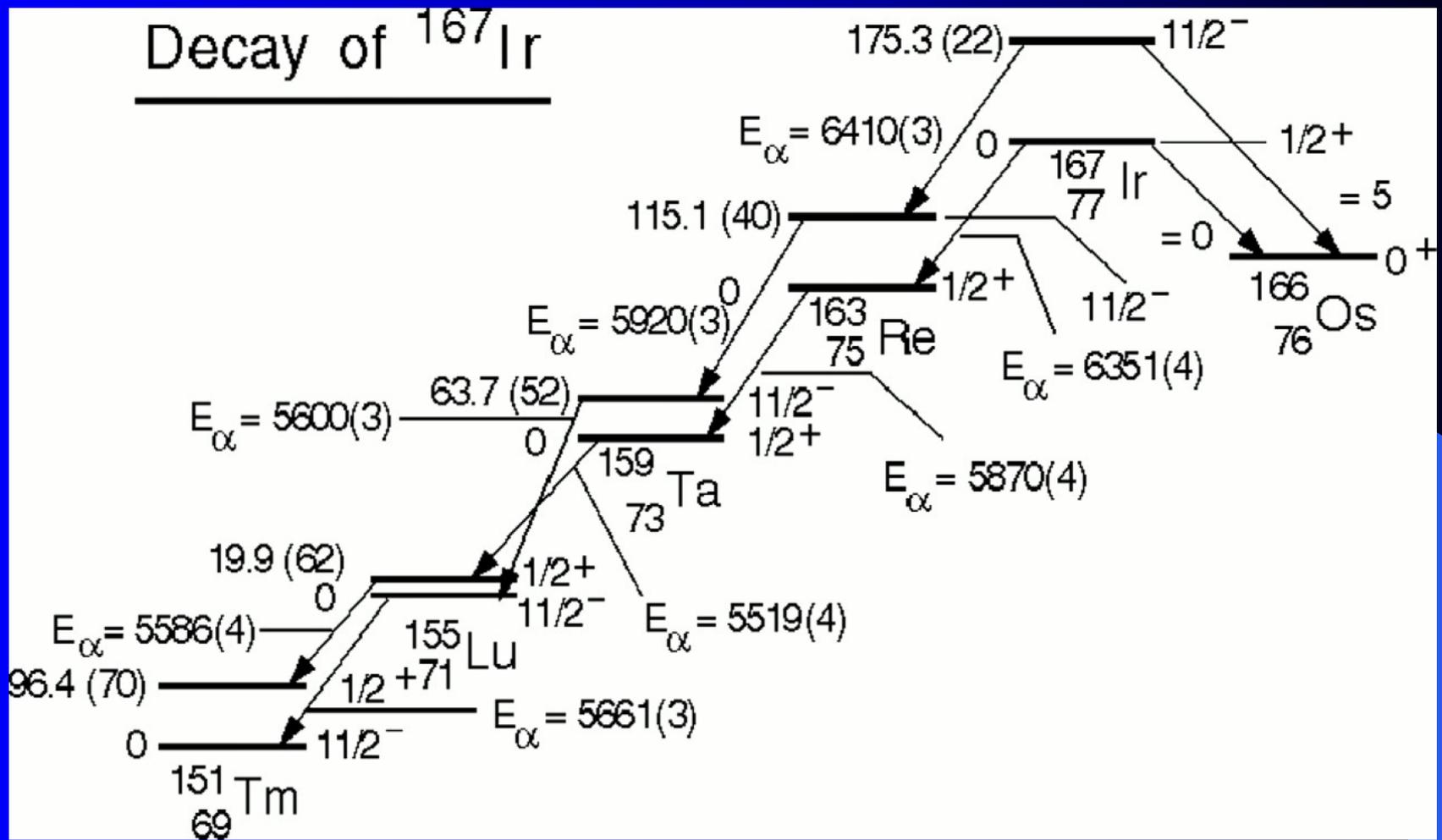
# Einteilchenstruktur von $^{167}\text{Ir}$



CALCULATED HALF-LIFE for  $^{167}\text{Ir}$  PROTON DECAY



# Zerfallsschema von $^{167}\text{Ir}$



# Untersuchung von Kernstruktur mit Protonenzerfall

Messung der Halbwertszeit

Vergleich mit theoretisch berechneter Halbwertszeit

Definition eines experimentellen spektroskopischen Faktors:

$$S = \frac{T_{1/2}^p(\text{calc})}{T_{1/2}^p(\text{exp})}$$

Mit dem spektroskopischen Faktor kann man die Besetzung der Einteilchen-Wellenfunktion testen.

$$S_j = \left| \langle \Psi_i(Z+1, A+1) | a^{j+} | \Psi_f(Z, A) \rangle \right|^2$$

# Reduktion der spektroskopischen Faktoren

$$S_j = \left| \langle \Psi_i(Z+1, A+1) | a^{j+} | \Psi_f(Z, A) \rangle \right|^2$$

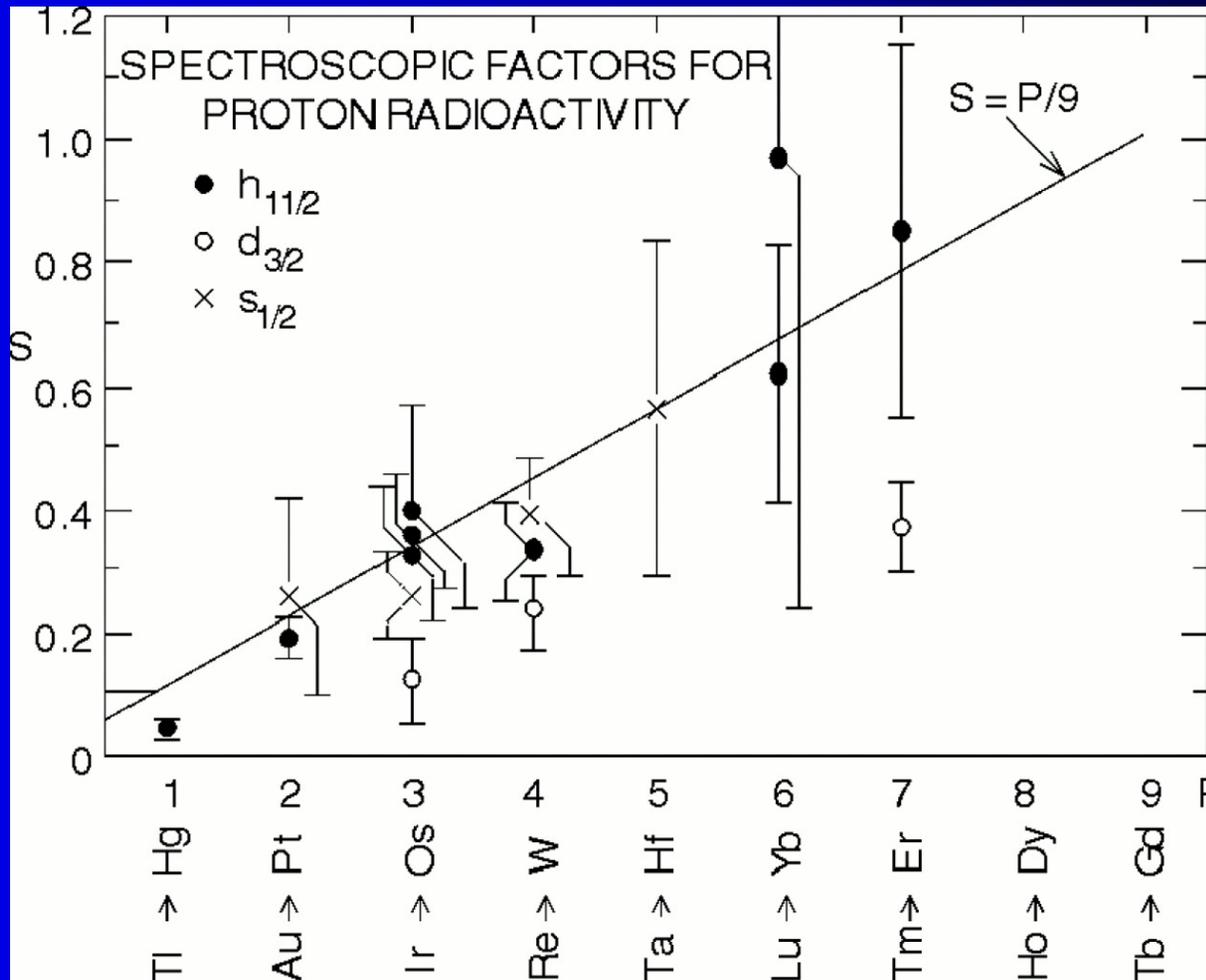
Der Zustand im Mutterkern besitzt ein Loch in einem Teilchenorbital, das im Tochterkern unter Umständen vollständig besetzt sein kann.

Dies kann man mit einem einfachen Modell testen:

- zwischen  $Z=64$  und  $Z=82$  sind  $s_{1/2}$ ,  $d_{3/2}$  und  $h_{11/2}$  Orbitale aktiv
- Für  $Z=80$  sind bis auf ein Lochpaar alle Unterzustände besetzt.
- Aufgrund der Paarwechselwirkung ist aber auch dieses Orbital substantiell besetzt (Paarstreuung)
- Daher hat das 81ste Proton keinen großen Überlapp mit dem Zustand der aus  $Z=80$  Grundzustand plus ein Proton im Orbital  $j$  entsteht.
- Für  $Z=70$  gibt es jedoch viele freie Zustände und man erhält einen großen Überlapp.

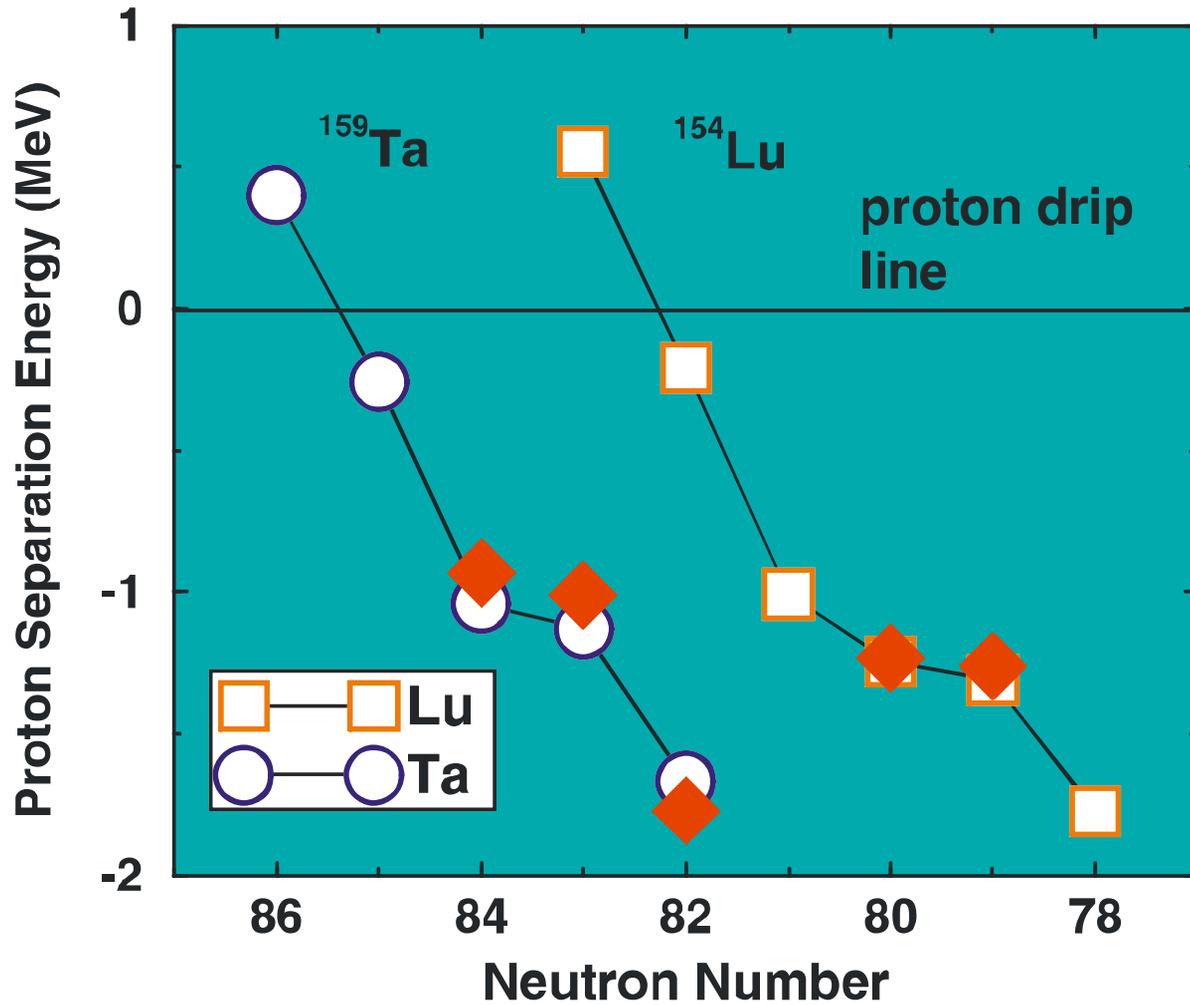
**Danach sollte der spektroskopische Faktor einfach von der Zahl der freien Paarzustände unterhalb der  $Z=82$  Schale abhängen.**

# Spektroskopische Faktoren

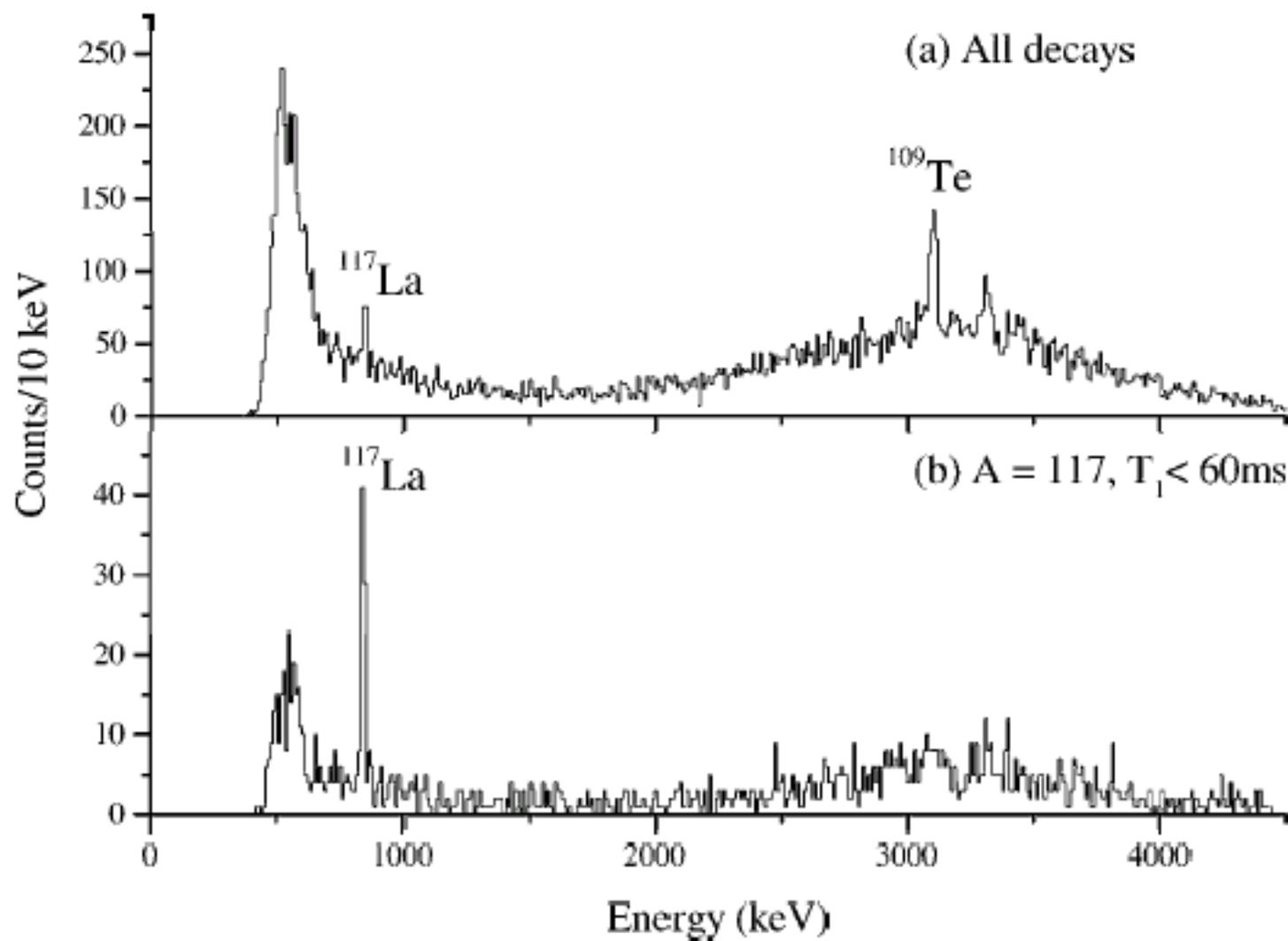


P=Anzahl der Paare von Protonenlöcher unterhalb von Z=82

# Theoretische Beschreibung (Mikroskopische Modelle)



# $^{58}\text{Ni} + ^{64}\text{Zn}$ @ 300 MeV

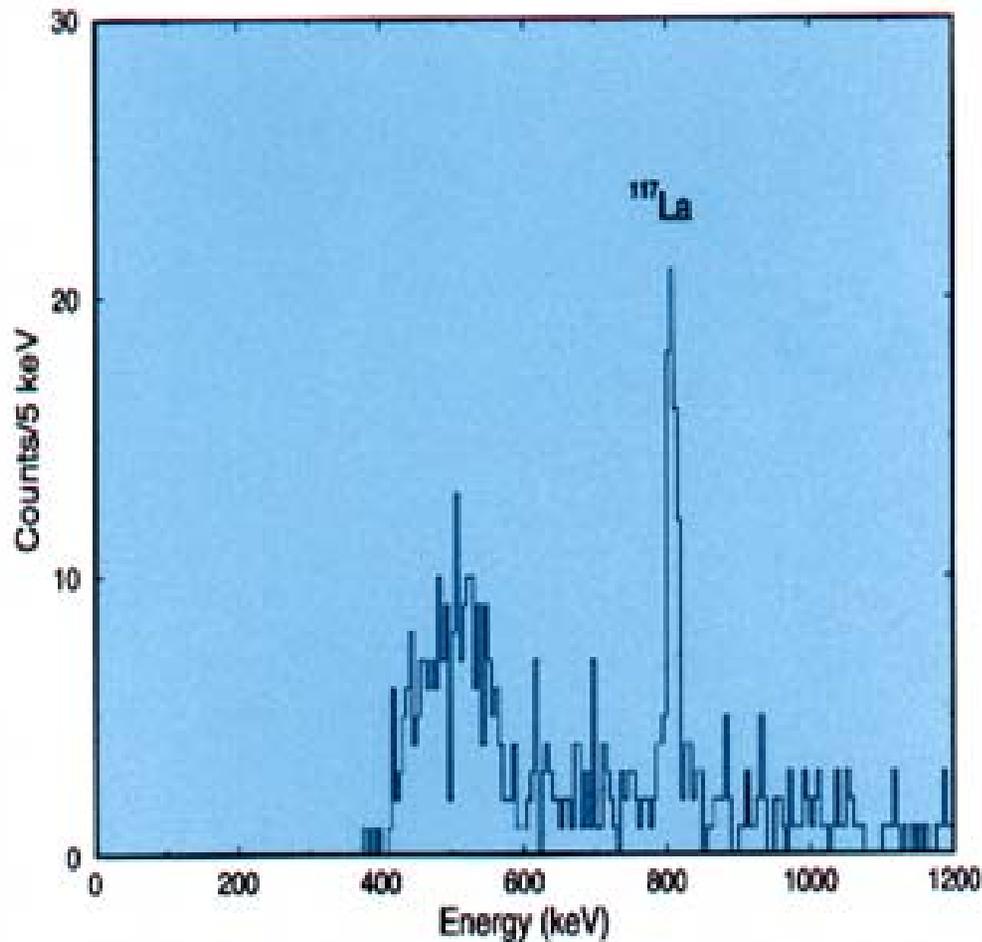


# Protonenemitter $^{117}\text{La}$



Protonen Energie:  
802 (5) keV

Halbwertszeit:  
 $T_{1/2} = 24 (3) \text{ ms}$



# Vorhersagen für die Halbwertszeiten

Protonen Energie: 802 (5) keV

Halbwertszeit:  $T_{1/2} = 24 (3) \text{ ms}$

$d_{3/2}$  \_\_\_\_\_

$s_{1/2}$  =====

$h_{11/2}$

$g_{7/2}$  \_\_\_\_\_

56

$d_{5/2}$  \_\_\_\_\_

## Sphärisches Schalenmodell:

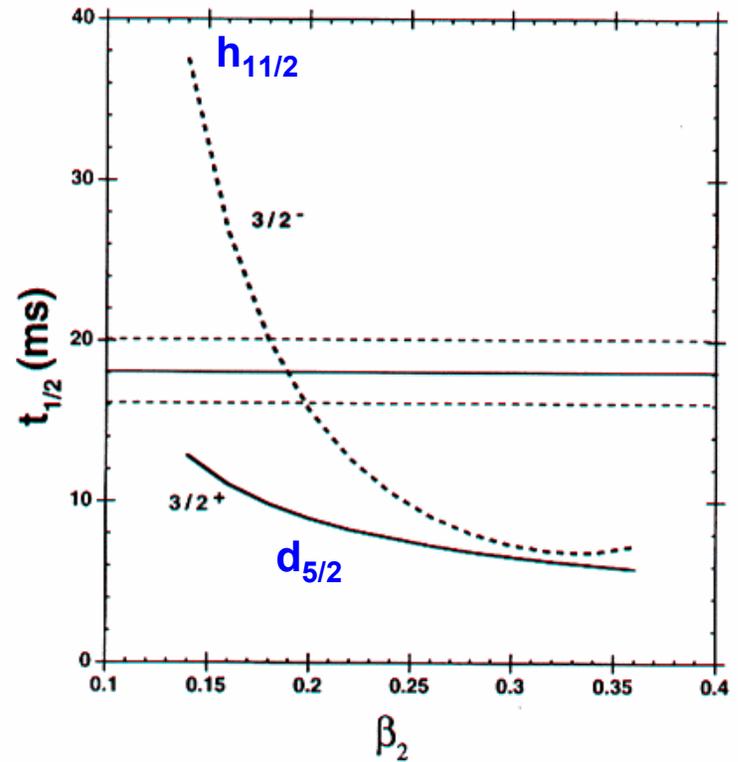
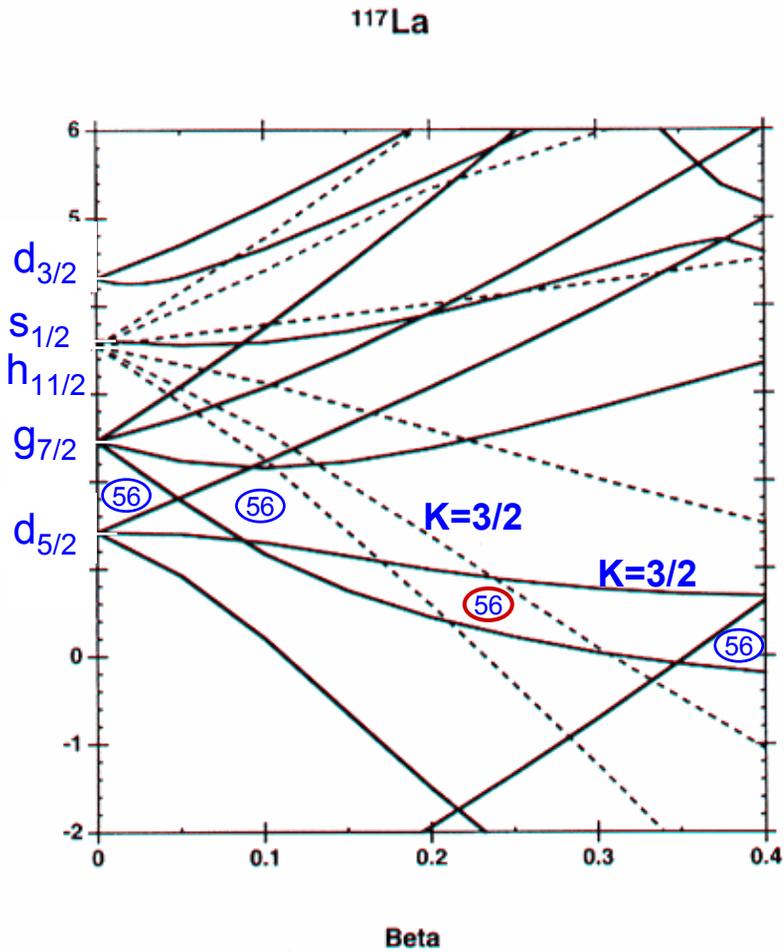
$$T_{1/2} (\pi g_{7/2}) = 86 \text{ ms} \quad \rightarrow \quad S = 3,6 \text{ (unphysikalisch)}$$

$$T_{1/2} (\pi d_{5/2}) = 234 \text{ } \mu\text{s} \quad \rightarrow \quad S = 0,01 \text{ (unrealistisch klein)}$$

**Dieser Protonenzerfall kann nicht einfach im sphärischen Schalenmodell erklärt werden!**

→ Deformation

# Nilsson Model und Protonenzerfall

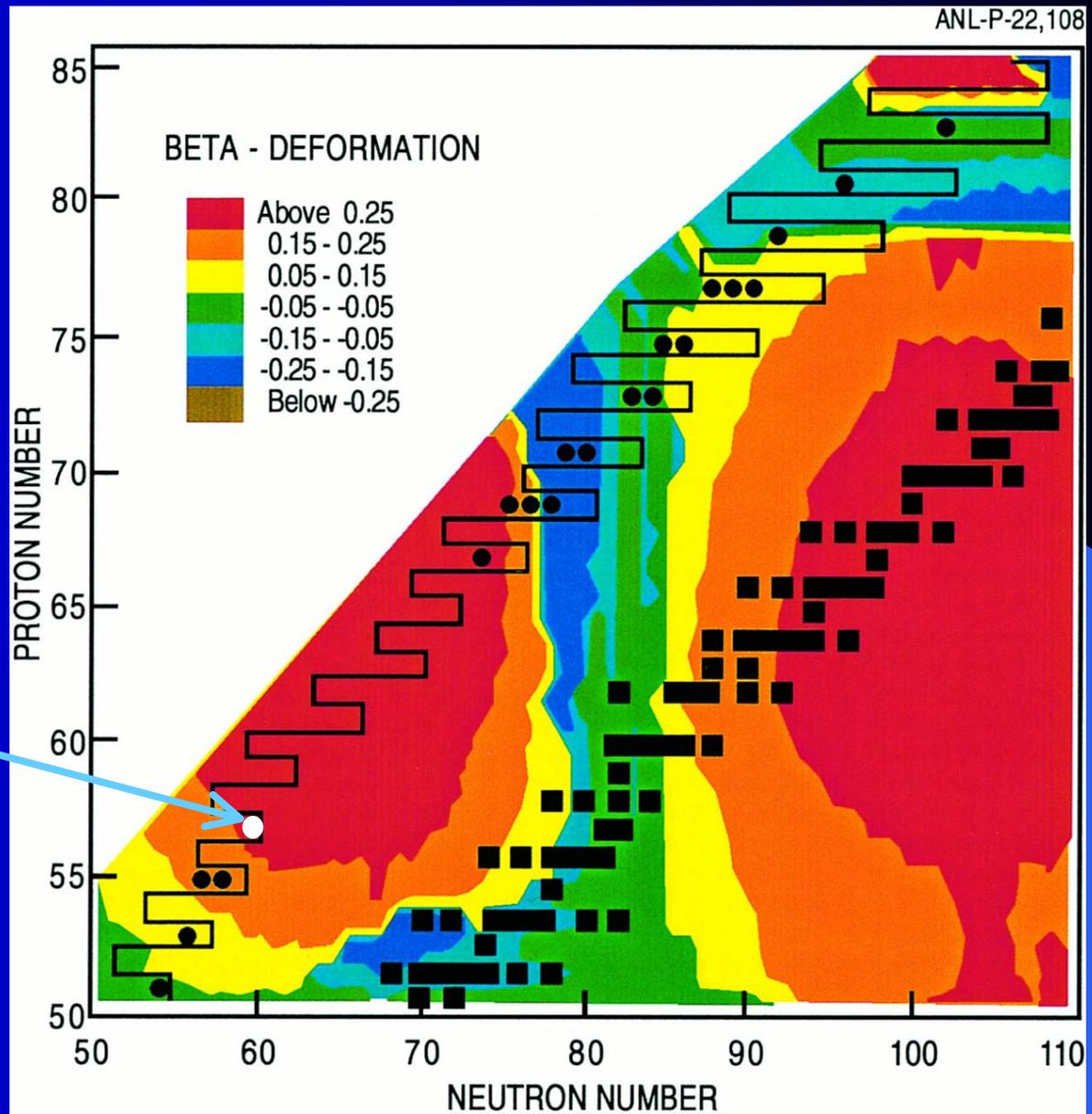


$$\beta_2(^{117}\text{La}) \sim 0,2$$

# Protondripline und Deformation

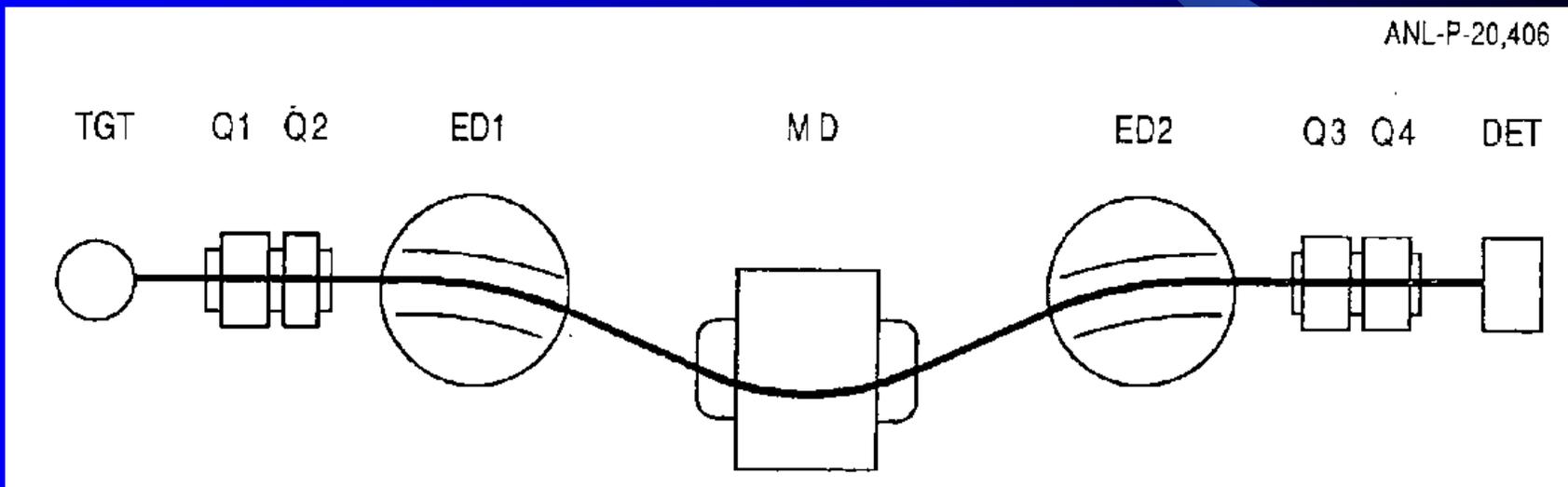
$\beta_2(^{117}\text{La}) \sim 0,2$

$^{117}_{57}\text{La}_{60}$



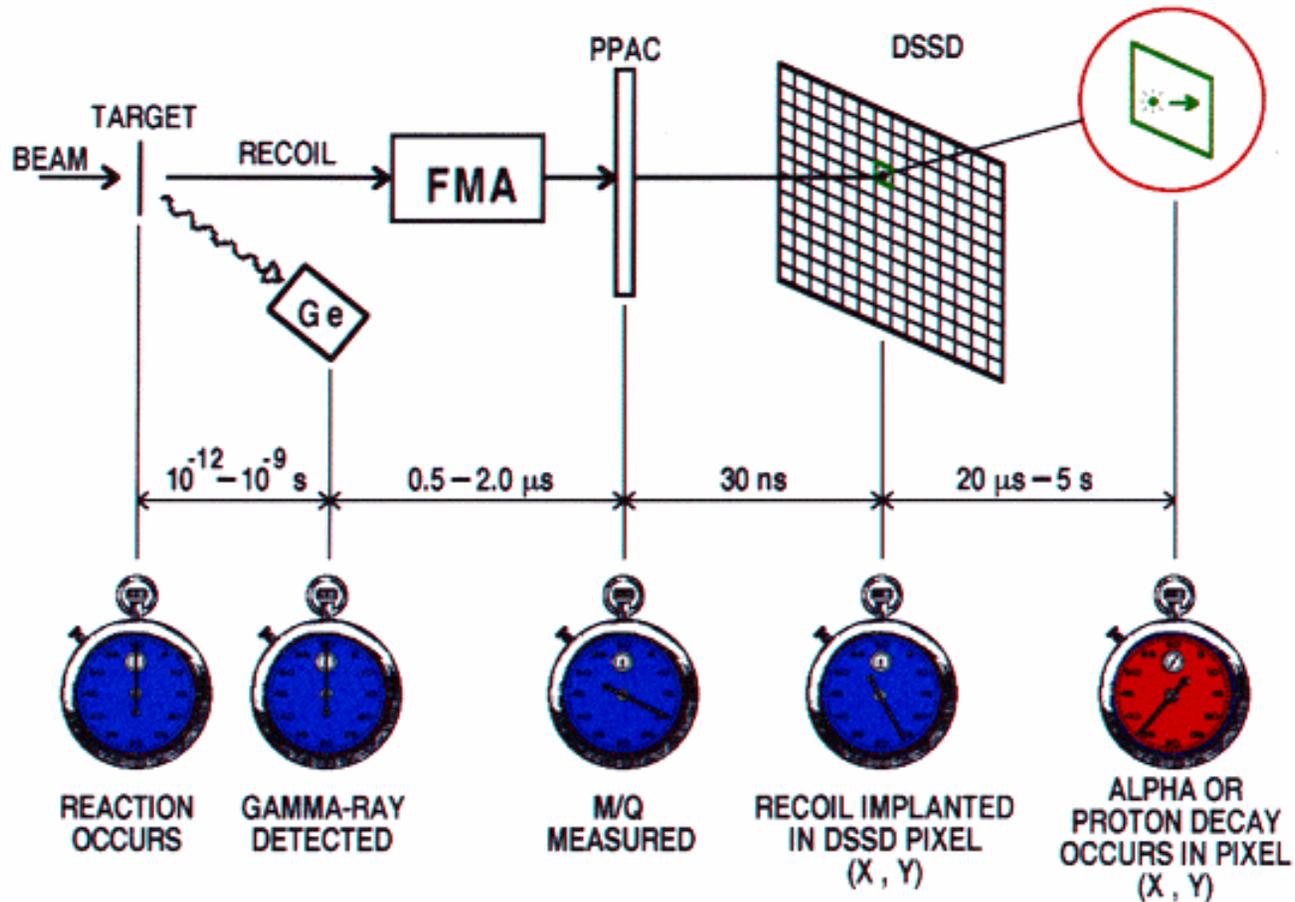
# Spektroskopie angeregter Zustände in Protonemittern

Die angeregten Zustände eines Protonenemitters geben detailliertere Informationen über die Struktur der Dripline Kerne



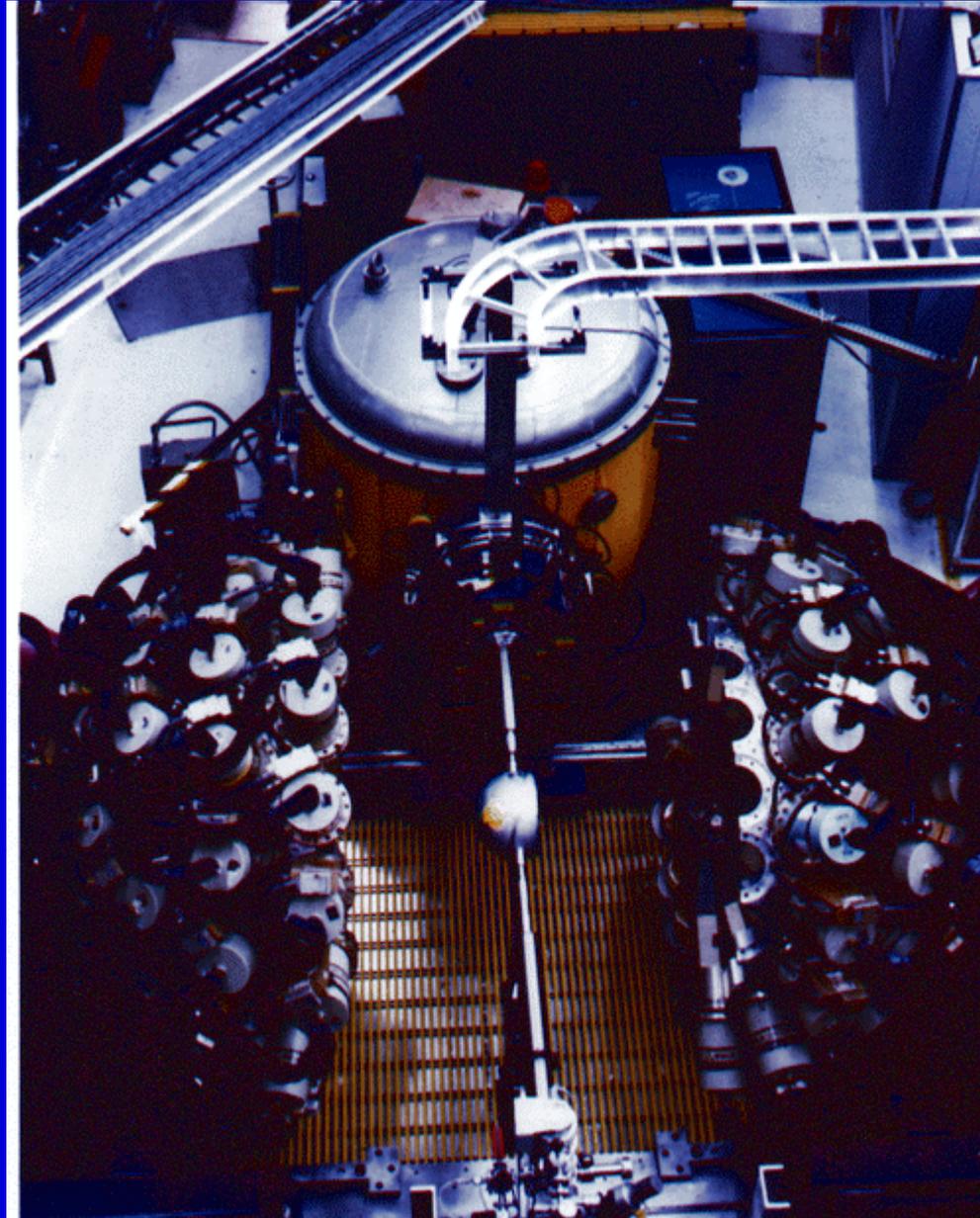
# Recoil Decay Tagging Methode (RDT)

## RECOIL DECAY TAGGING METHOD



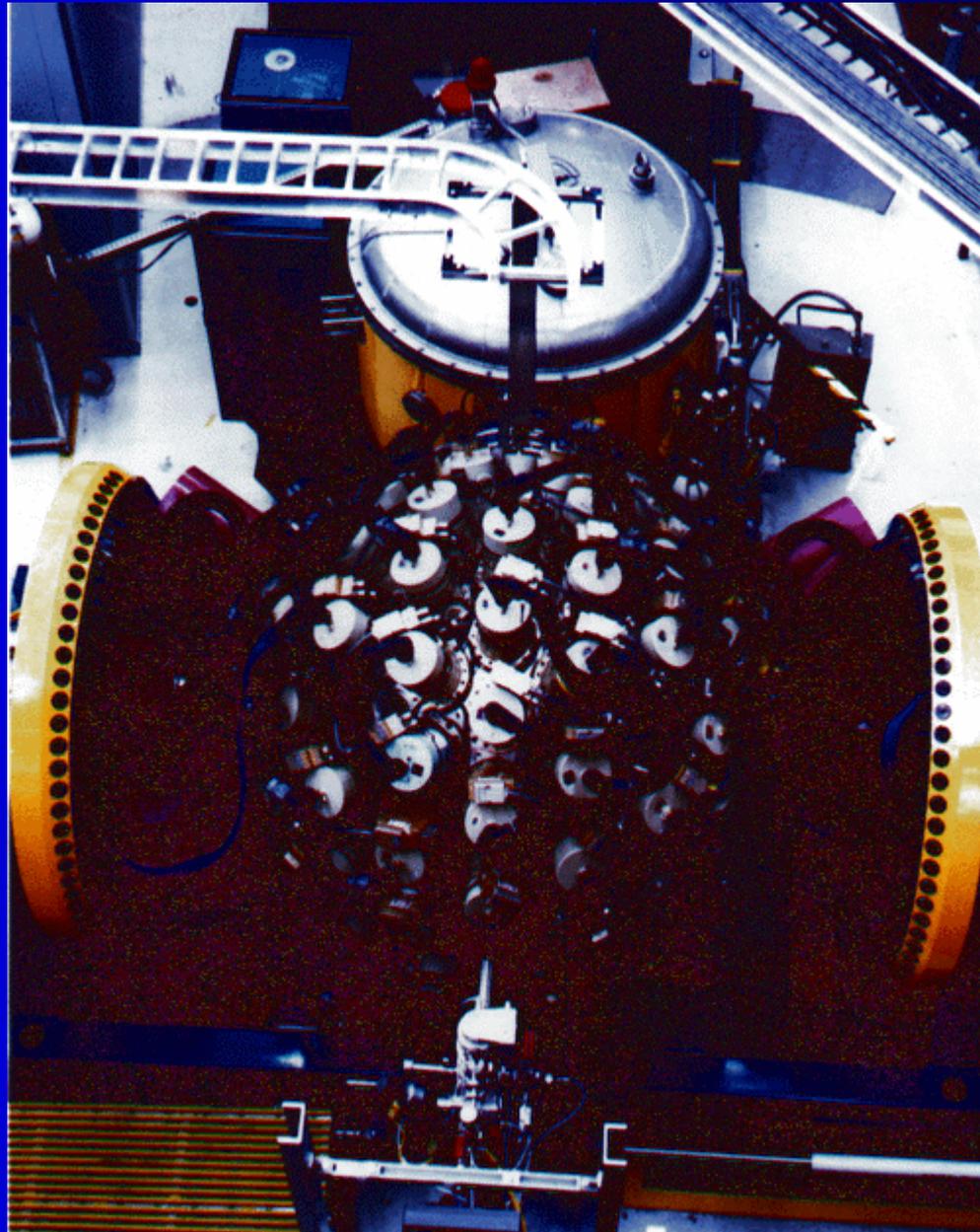
- 1 Prompt  $\gamma$ -rays correlated with M/Q and (X, Y) position of recoil in DSSD
- 2 Decay proton or alpha identifies nucleus that emitted the  $\gamma$ -rays

# Gammasphere plus FMA 1



$\epsilon_{\text{ph}} = 9\%$

# GammaSphere plus FMA 2

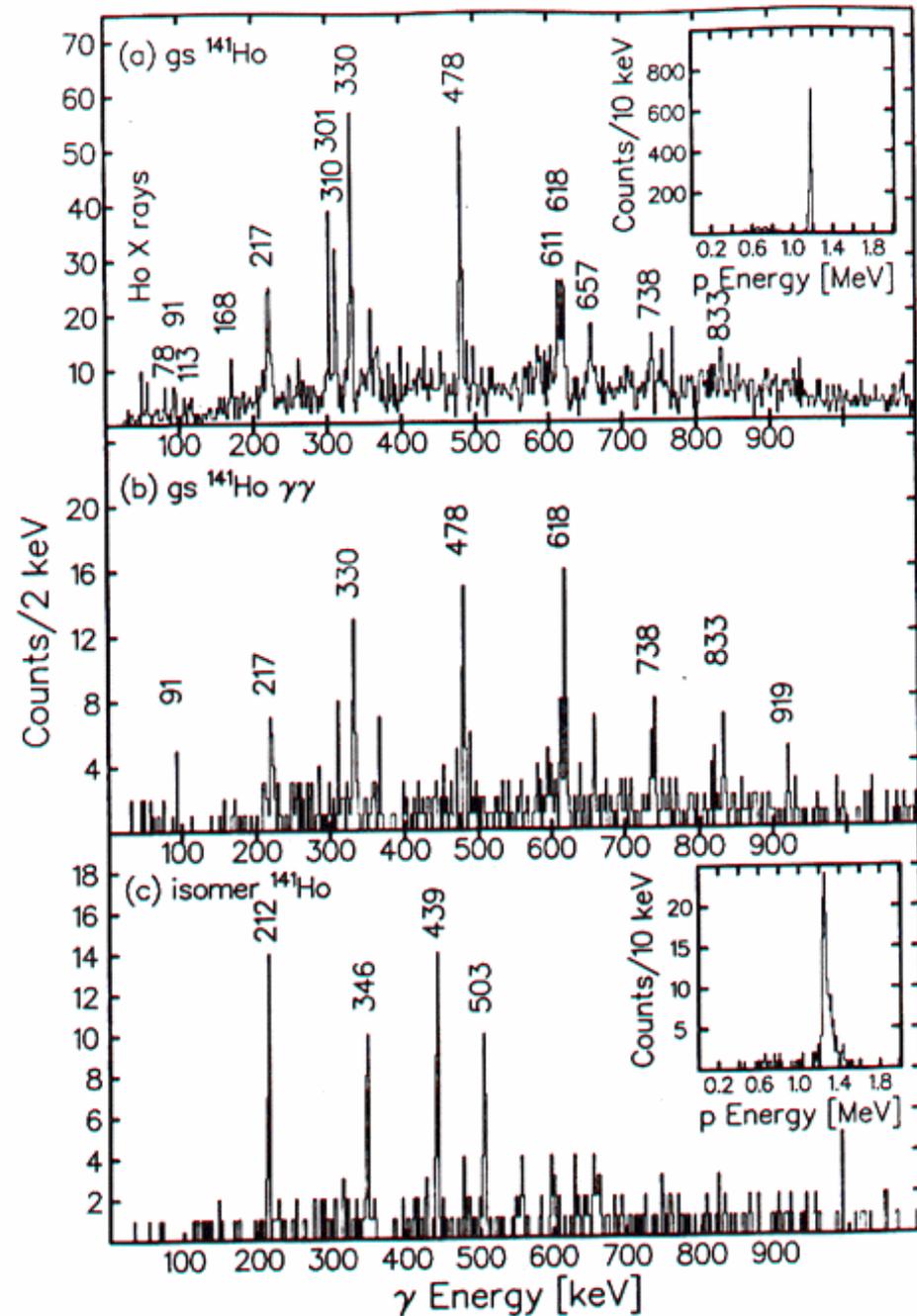


# Gammaspektren für $^{141}\text{Ho}$

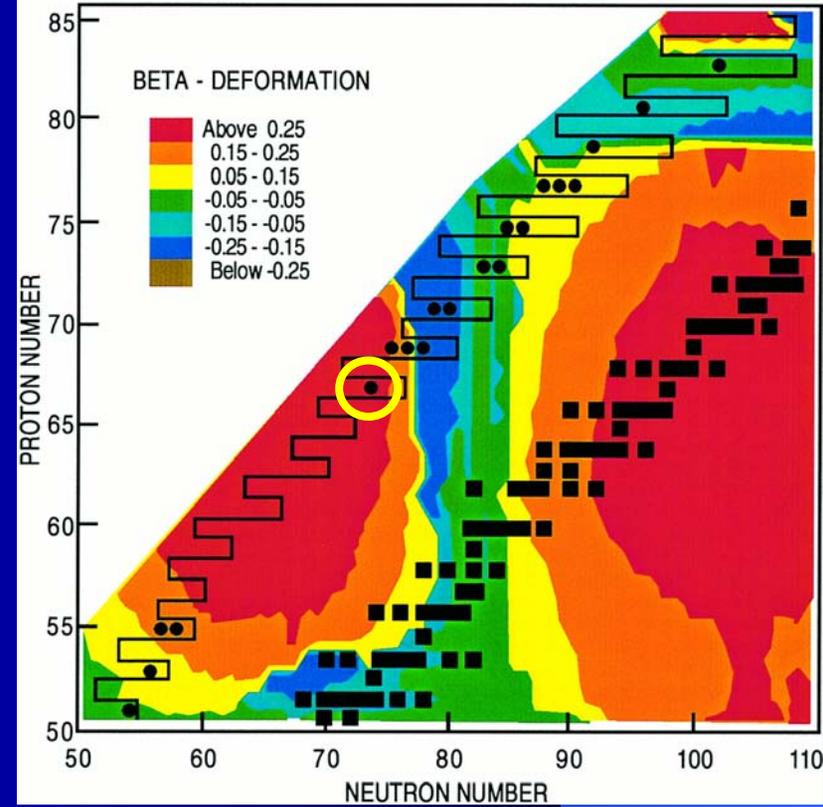
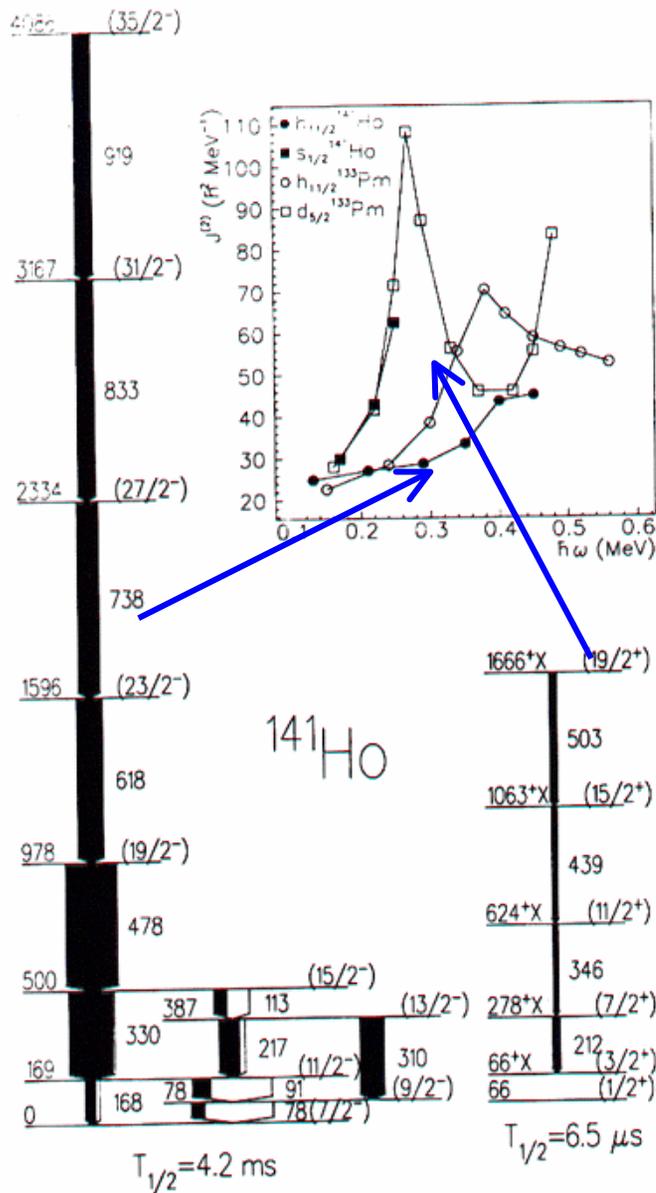
$\sigma_{\text{tot}} \sim 200 \text{ mb}$

$\sigma = 140 \text{ nb}$

Spektroskopie auf dem  $10^{-6}$  Niveau !!



# Struktur von $^{141}\text{Ho}$



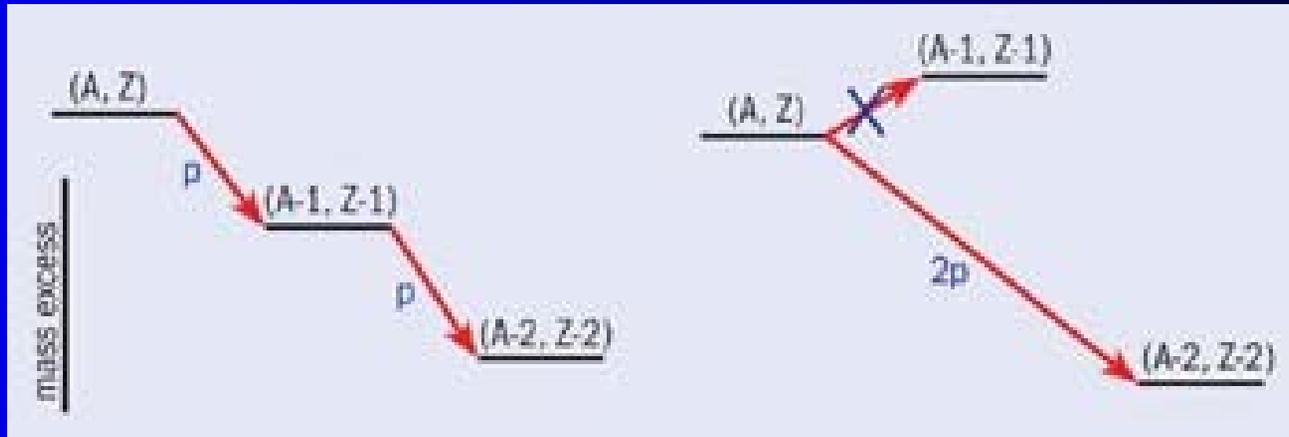
$$R_{4/2} = 500/169 = 2.96$$

Rotor  $\rightarrow$  Deformation

# Heutige Grenzen der Untersuchung von Protonemittern

Emitter	Evaporation Channel	Measured Cross-section
$^{177}\text{Tl}$	$p2n$	10 nb!
$^{185}\text{Bi}$	$pn$	60 nb
$^{131}\text{Eu}$	$p4n$	90 nb
$^{165}\text{Ir}$	$p4n$	200 nb
$^{141}\text{Ho}$	$p4n$	250 nb
$^{130}\text{Eu}$	$p5n$	~10 nb

# Zwei-Protonen Emission

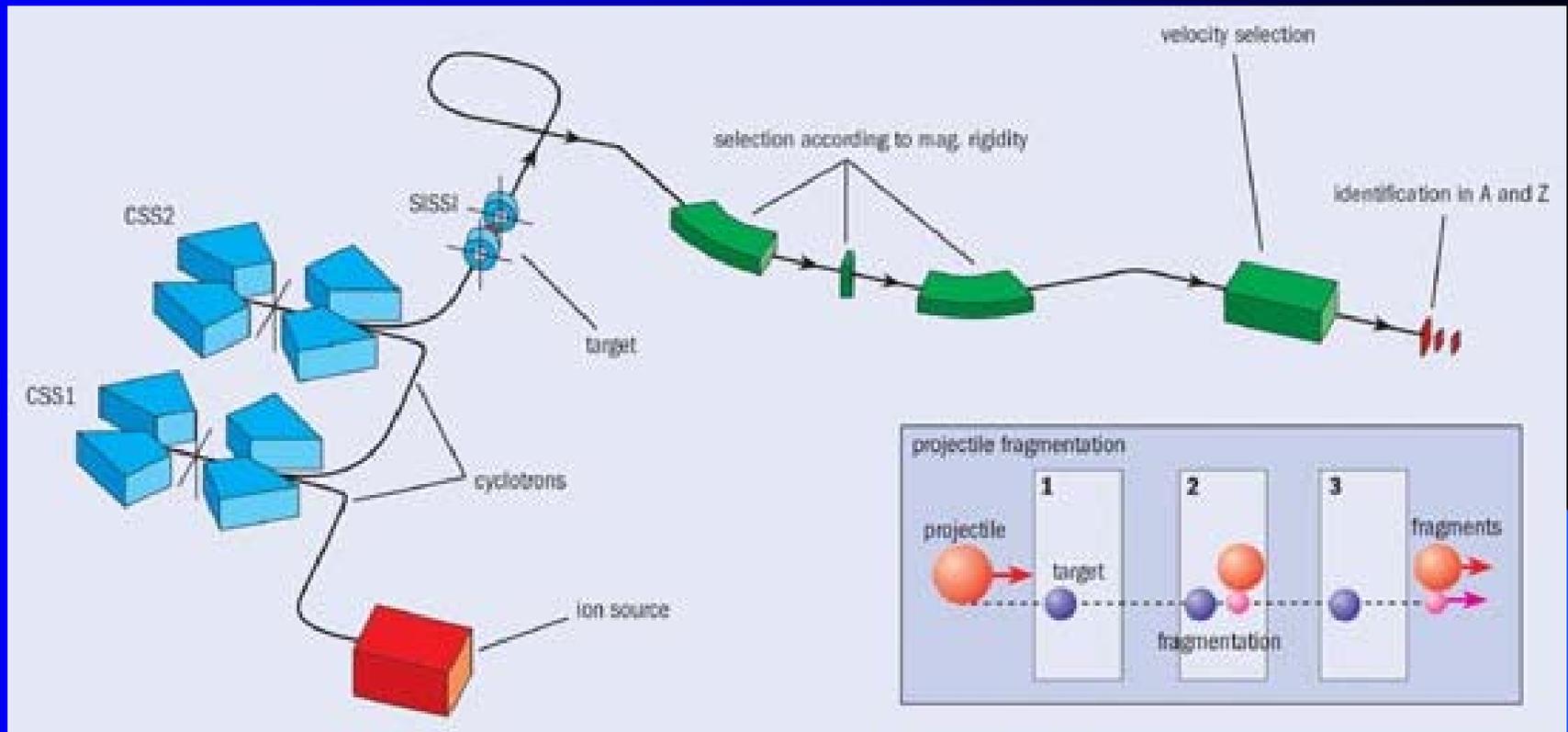


Sequentieller Zerfall  
mit 2 Protonen möglich

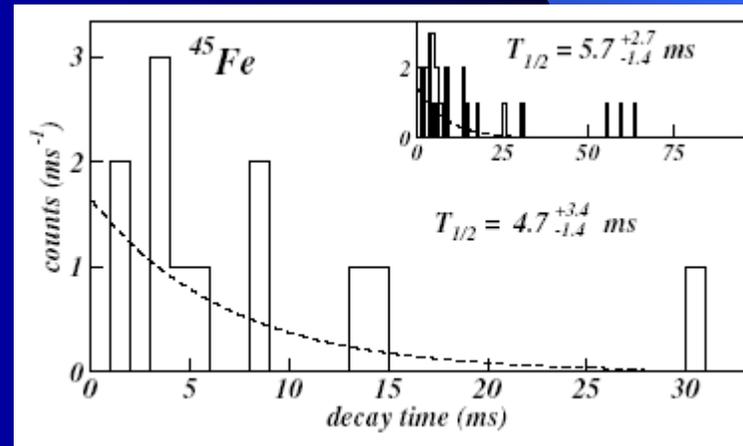
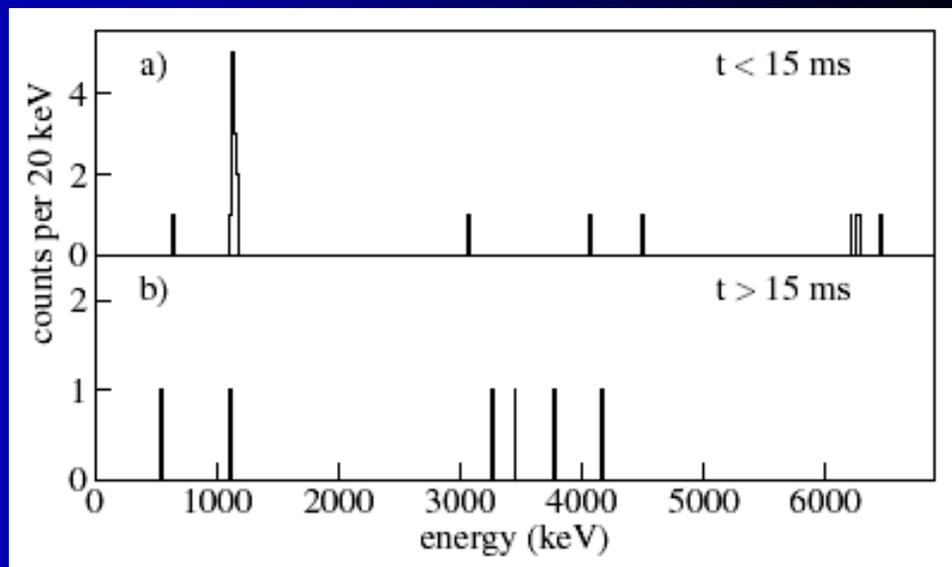
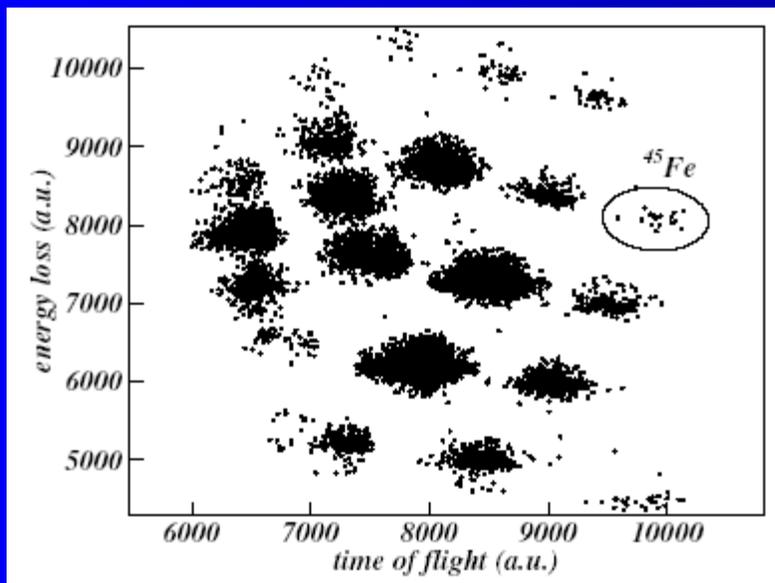
Mur simultaner  
2 Protonenzerfall möglich

Beispiel:  $^{45}\text{Fe}$

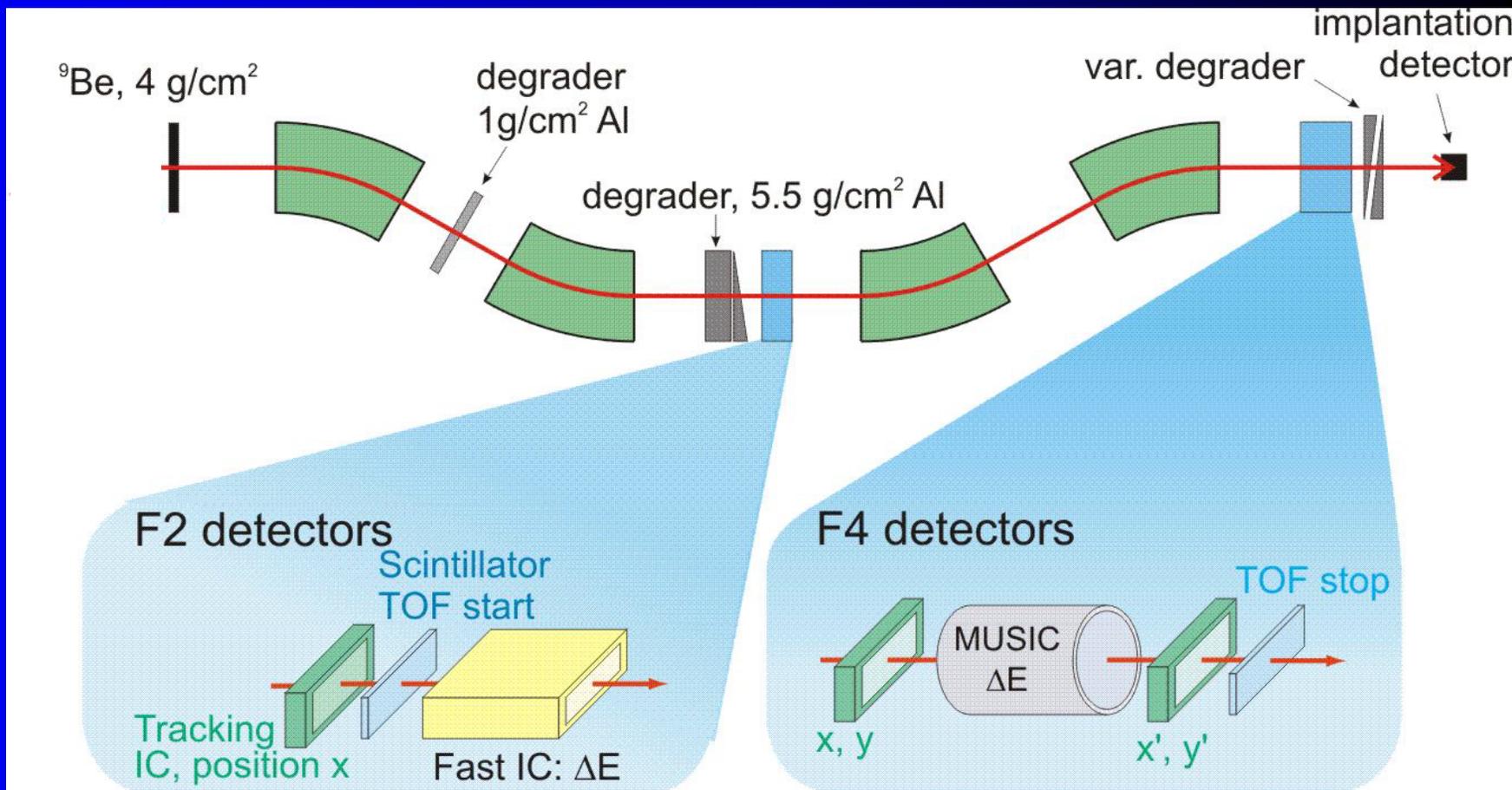
# $^{45}\text{Fe}$ Experiment bei GANIL



# Nachweis des 2p Zerfalls von $^{45}\text{Fe}$

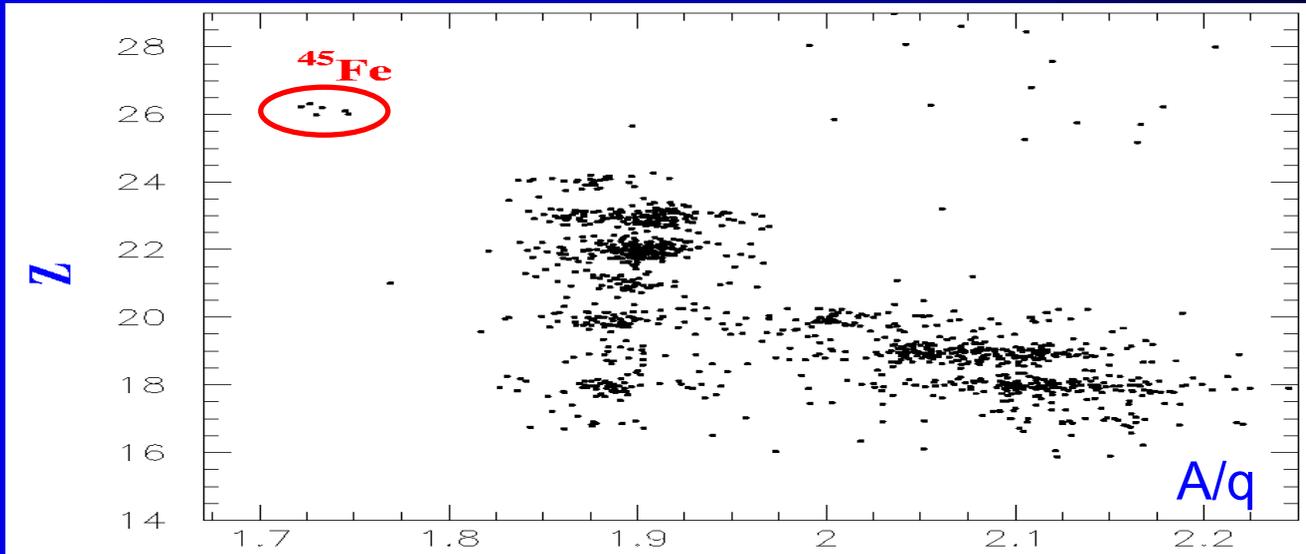


# $^{45}\text{Fe}$ Produktion am FRS der GSI



**Position x-y**  $\rightarrow$  Bahn  $B_p \rightarrow p, A/Z$   
**TOF**  $\rightarrow v \rightarrow A$   
**dE/dx**  $\rightarrow Z$

# Nachweis des 2p Zerfalls von $^{45}\text{Fe}$



5 correlated decay events identified

