

# Jadrová spektroskopia

Štiepenie jadier a  
štruktúra jadier

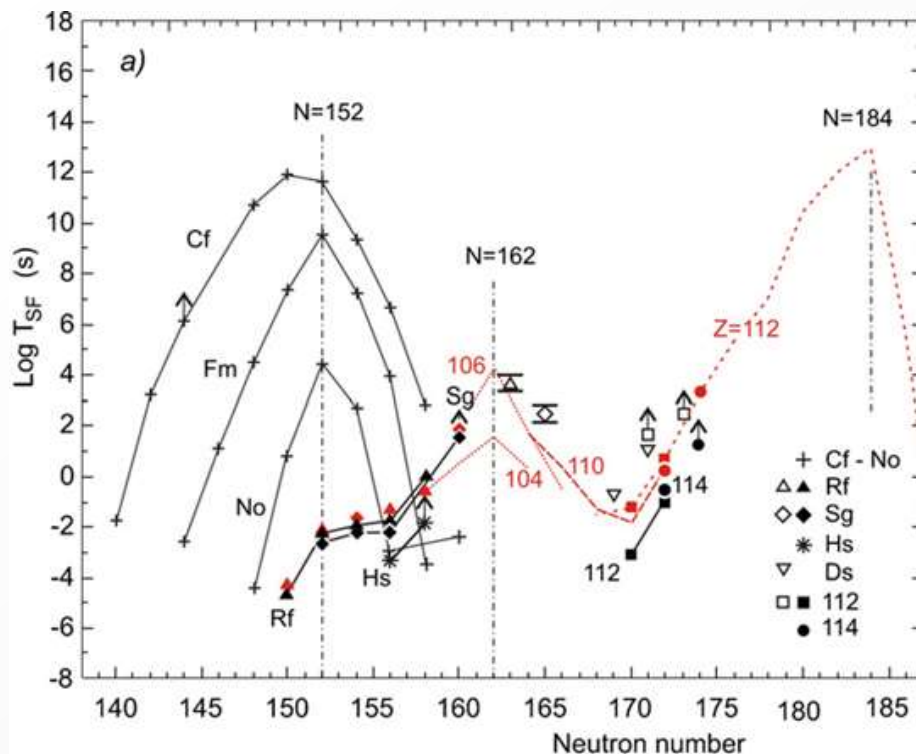


# Vlastnosti štiepenia



- Atómové jadrá z rôznych oblastí tabuľky izotopov vykazujú systematicky rôzne vlastnosti pre proces spontánneho štiepenia.
- Majú rôzne pravdepodobnosti (t.j. parciálne polčasy), rôzne kinetické energie fragmentov (súvis s uvoľnenou energiou), ale napríklad aj rôznu distribúciu hmotností fragmentov.

# Pravdepodobnosť SF transuránov



Yu. Oganessian, *J. Phys. G.* 34, R165 (2007)

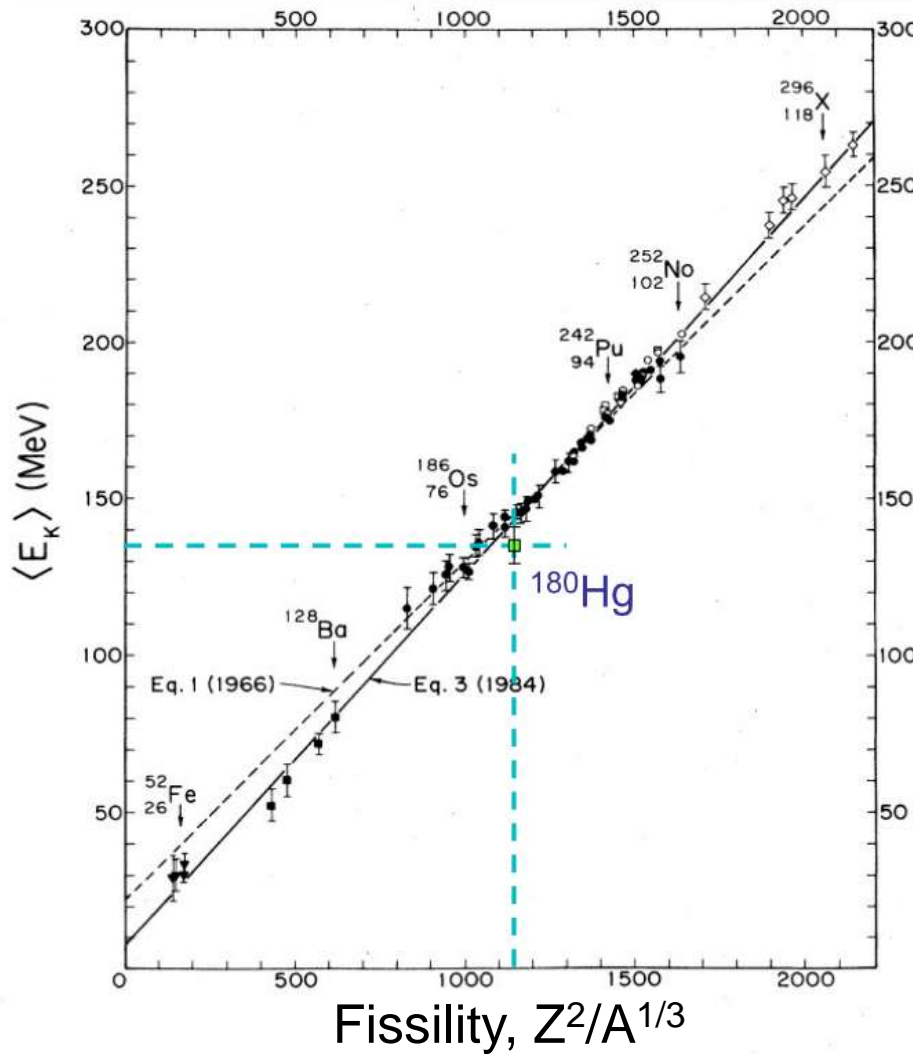
Parciálne polčasy štiepenia vykazujú lokálne maximá pre oblasti uzatvorených vrstiev – sférických aj deformovaných. Pri vyššej stabilite, sú parciálne polčasy dlhšie (o mnoho rádov – os Y je logaritmická).

N=152 a N=162 sú uzavreté deformované vrstvy neutrónov a vykazujú stabilizačné efekty.

V oblasti s N=184 je očakávaná sférická uzavretá neutrónová vrstva, ktorá taktiež prispieva k stabilite jadra.

Zaujímavé je, že napr. kým napríklad izotopy kalifornia (Cf), fermia (Fm) a nobélia (No) vykazujú lokálne maximum pre 152 neutrónov, tak izotopy rutherfordia (Rf) a seaborgia (Sg) vykazujú pritom odlišný trend. Pravdepodobne pre ne začína dominovať vplyv uzavretej vrstvy N=162 namiesto deformovanej vrstvy N = 152.

# TKE (Total Kinetic Energy)



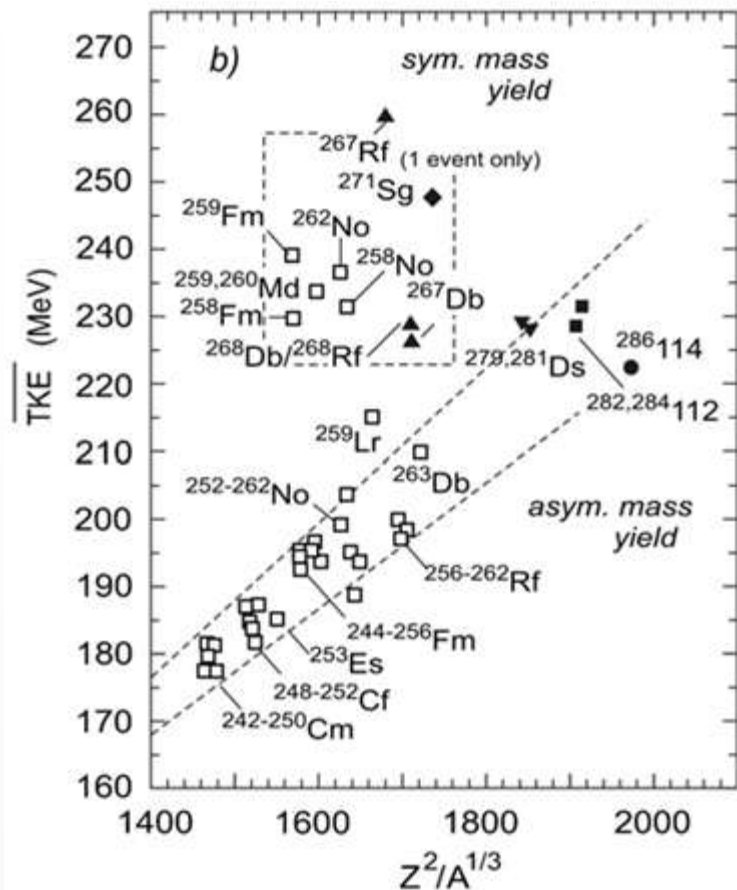
S.A Kreek et al. PRC50 (1994) 2288

Taktiež sa mení celková kinetická energia fragmentov (TKE – Total Kinetic Energy). Izotopy prvkov vykazujú systematický trend – tzv. Viola Seaborg systematiku, zobrazujúcu lineárny trend medzi TKE a štiepiteľnosťou jadra vyjadrenou ako  $Z^2/A^{1/3}$ .

Takto vieme napríklad pri syntéze nových prvkov meraním hodnoty TKE (t.j. rekonštrukciou celkovej energie fragmentov) zhruba odlišiť napríklad syntetizované supertěžké prvky od produktov transfer reakcií.

Treba mať však na pamäti, že hodnoty celkovej kinetickej energie pre niektorý z izotopov môžu mať distribúciu so šírkou aj pár 10 MeV.

# TKE v oblasti transuránov



Zaujímavý je priebeh Viola-Seaborg systematiky pre transurány. Pre väčšinu jadier vykazuje naďalej podobný lineárny trend, ale objavuje sa niekoľko výnimiek, ktoré sú lokalizované v oblasti s vyššími energiami.

Ide zväčša o izotopy, ktoré sa štiepia symetricky na dva fragmenty z oblasti dvojito magického jadra  $^{132}\text{Sn}$ . V tomto prípade sú oba fragmenty výraznejšie stabilizované, čo zvyšuje celkovú uvoľnenú energiu pri štiepení.

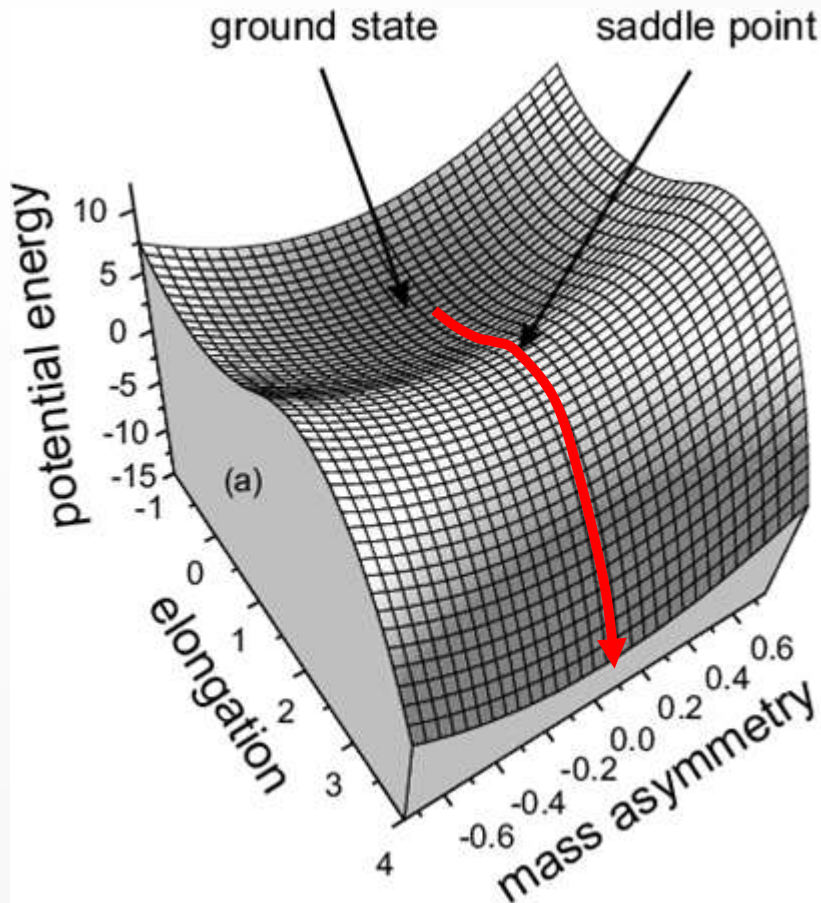
Symetria resp. asymetria rozloženia hmoty vo fragmentoch, je jednou z podstatných vlastností spontánneho štiepenia jadier a býva (zvyčajne) výrazne ovplyvnená mikroskopickými korekciami (pozn. existujú výnimky napr.  $^{180}\text{Hg}$ ).

Yu. Oganessian, *J. Phys. G.* 34, R165 (2007)

# Očakávaná distribúcia fragmentov



## Macroscopic (LDM) part only



Závislosť potenciálnej energie systému od hmotnostnej asymetrie rozloženia hmoty a predĺženia systému (v procese štiepenia sa predpokladá zvyšujúca sa deformácia jadra).

Ak by sme predpokladali iba kvapkový model, očakávali by sme symetrickú distribúciu fragmentov.

Príroda nemá totiž žiaden dôvod, aby bol jeden z fragmentov väčší.

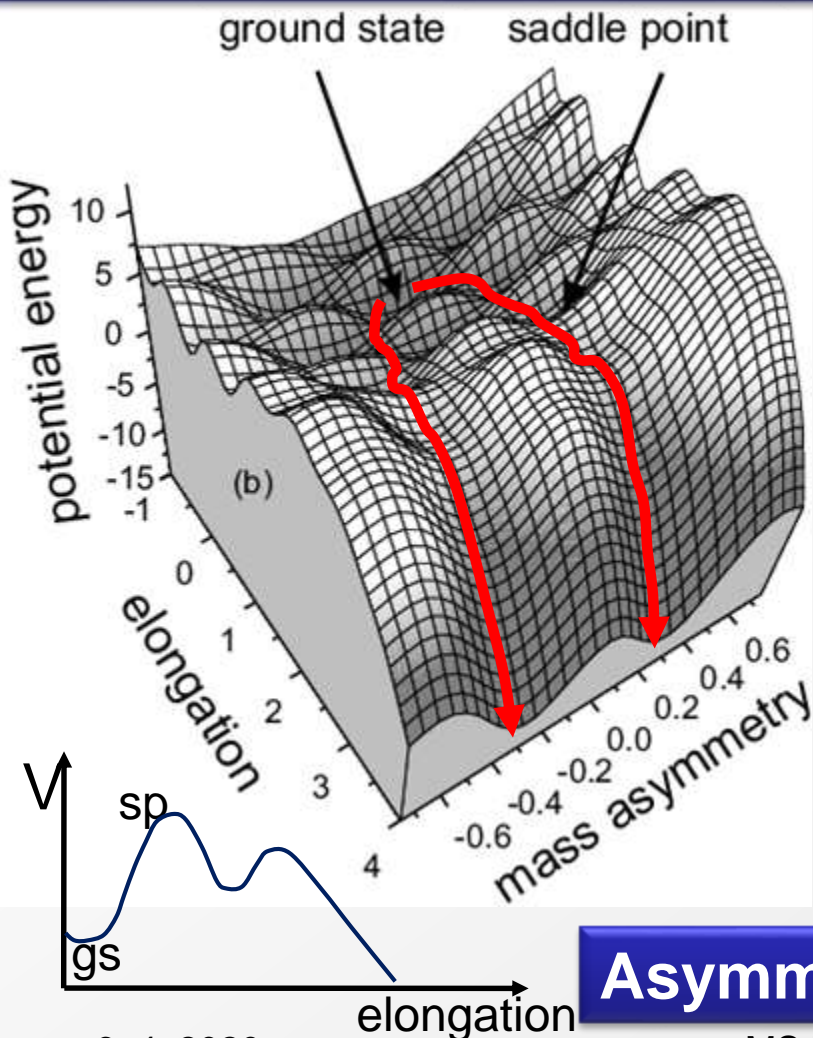
Takže existencia kvapkového modelu vedie na rovnomernú (symetrickú) distribúciu fragmentov.

## Symmetric Mass Split

# Vplyv vrstvovej korekcie



## Macroscopic + Microscopic



V dôsledku existencie vrstvových korekcií, začínajú fragmenty pri vytváraní „cítiť“ stabilizačný efekt uzavretých (zväčša deformovaných) vrstiev. Pri každej kombinácii tvaru jadra reprezentovanej jeho deformáciou a prerozdelením hmoty, je iná korekcia.

Predpoklad je, že jadro sleduje trasu zodpovedajúcu energetickým minimám a následne môže prísť k nesymetrickému prerozdeleniu jadrovej hmoty počas procesu štiepenia.

Samotné fragmenty pritom môžu v závere trasy (červené šípky) cítiť výrazne stabilizačné korekcie a jeden z fragmentov smeruje k jadru s výraznou stabilitou

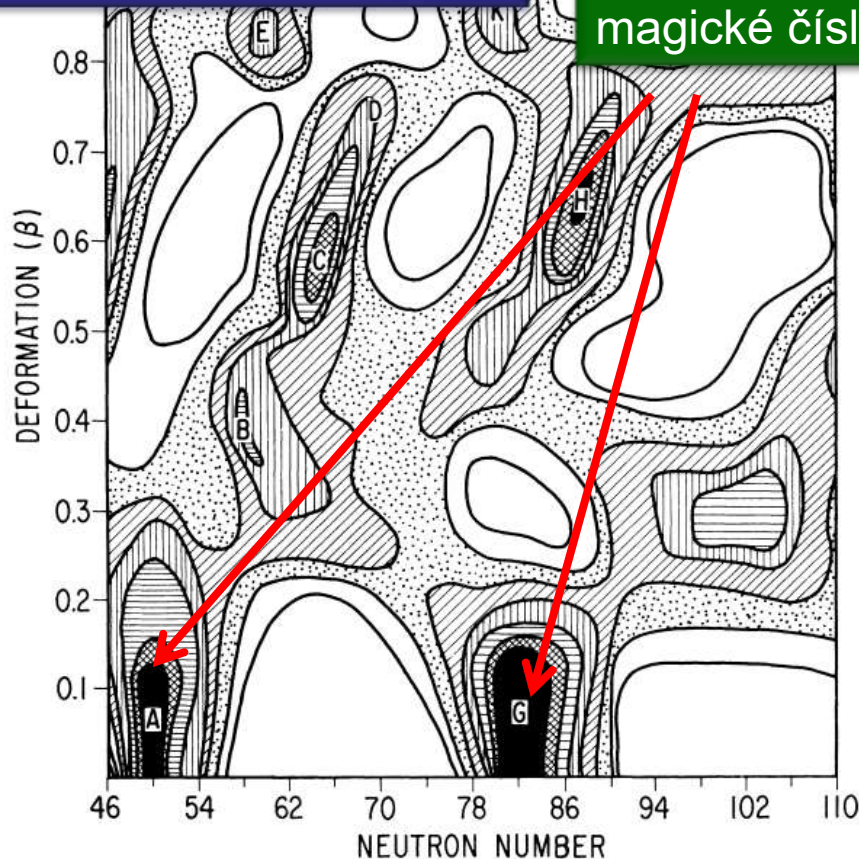
## Asymmetric Mass Split

# Aký fragment sa vytvorí?



Vrstvové korekcie pre neutróny  
(podobne aj pre protóny)

Výrazné  
minimá pre  
magické čísla



Transurány majú typicky 92 a viac protónov, teda polovica je cca 50 protónov.

Prirodzene očakávame jeden fragment z okolia  $Z=50$  (Sn).

Neutrónov je cca 130 – 170.

Polovica je cca 65 – 85.

Očakávame preto jeden fragment z okolia  $N = 82$

Teda jeden fragment by mal byť z okolia jadra s 50 protónmi a 82 neutrónmi. Takým jadrom je dvojito-magický izotop  $^{132}\text{Sn}$ .

FIG. 1. Neutron-shell corrections calculated as a function of deformation ( $\beta$ ) and neutron number. The contours are plotted at 1 MeV intervals with the black regions (representing the strongest shell corrections) containing all values lower than -4 MeV and the inner white region (representing the weakest shell corrections) containing all values greater than +2 MeV. The contours do not include any pairing or liquid-drop terms. The letters refer to particular shell regions as described in the text.



# Asymetrické štiepenie

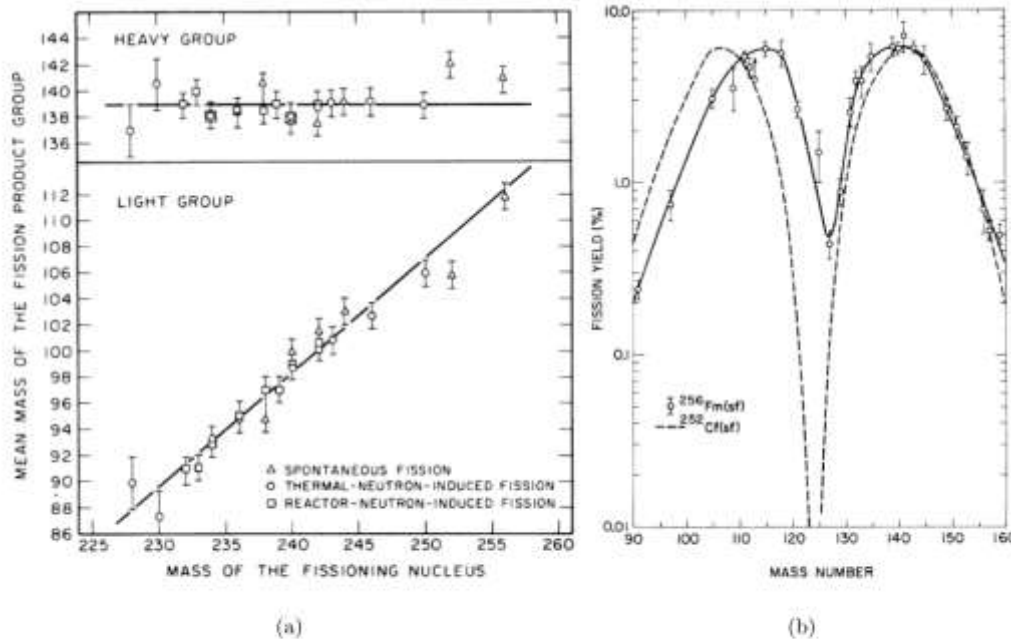


Figure 1.5: (a) Average masses of the heavy and light fragment groups as a function of the mass of the fissioning nucleus. (b) Example of the double-humped structure in the asymmetric spontaneous fission of  $^{256}\text{Fm}$  and  $^{252}\text{Cf}$  [Fly72].

Pre štiepenie väčšiny jadier vidíme asymetrické prerozdelenie – jeden z fragmentov ide do okolia  $^{132}\text{Sn}$  (nie však presne na tento izotop, ale vytvára sa izotop o niečo ťažší) a druhý je „doplnkový“.

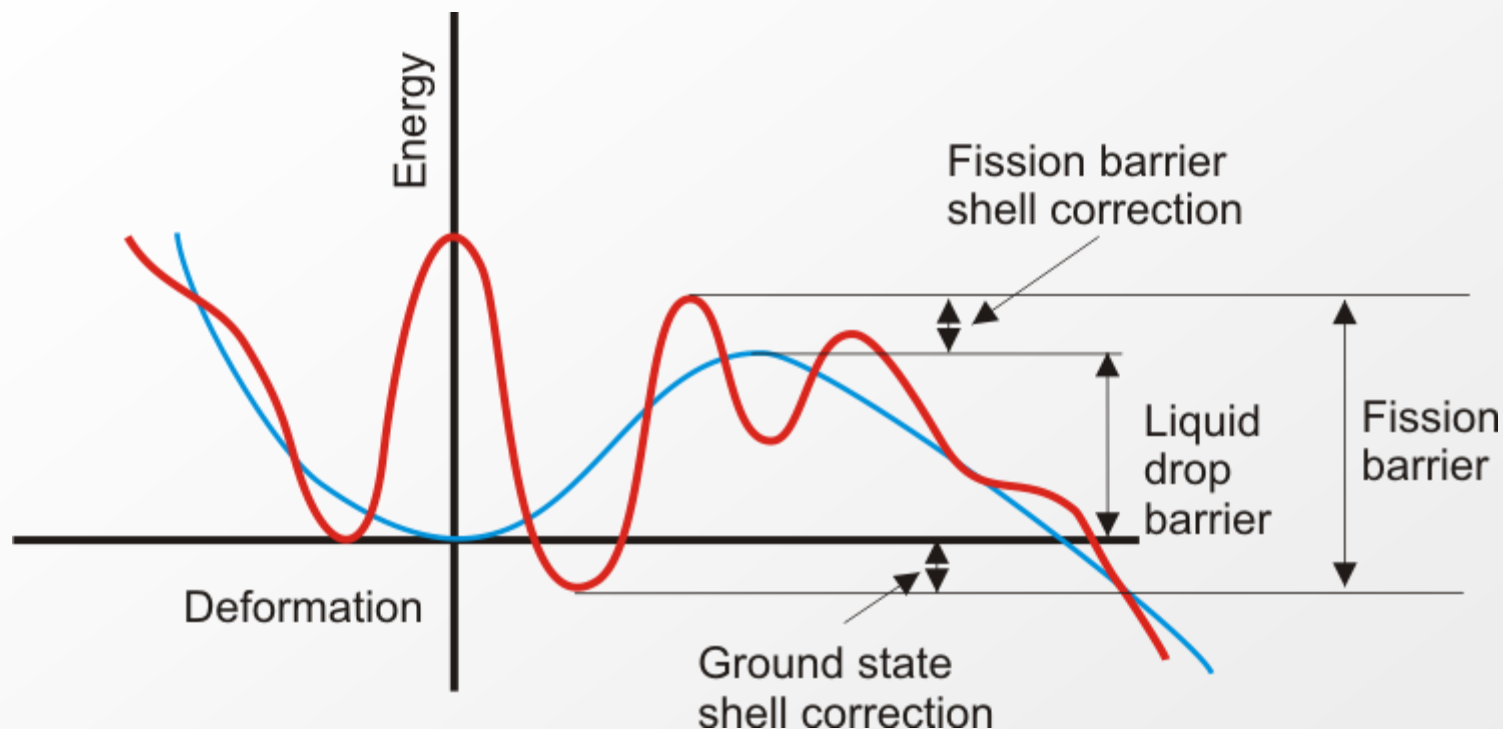
Vpravo je hmotnostná distribúcia pre  $^{256}\text{Fm}$  a  $^{252}\text{Cf}$ . Ťažší fragment ma v oboch prípadoch identickú distribúciu a ľahší je rôzny.

Vľavo sú dáta pre viacero rôznych izotopov. Horný panel – stredná hodnota pre ťažší fragment, spodný panel pre ľahší.



# ŠTIEPNA BARIÉRA

# Štiepna bariéra vs. Kvapkový model



Ako už bolo ukázané, kritickým faktorom je nielen výška, ale aj tvar štiepnej bariéry. Pri časti popisujúcej vplyv mikroskopických korekcií, sme videli ako výrazne sa môže zmeniť pôvodne plynulý priebeh štiepnej bariéry.

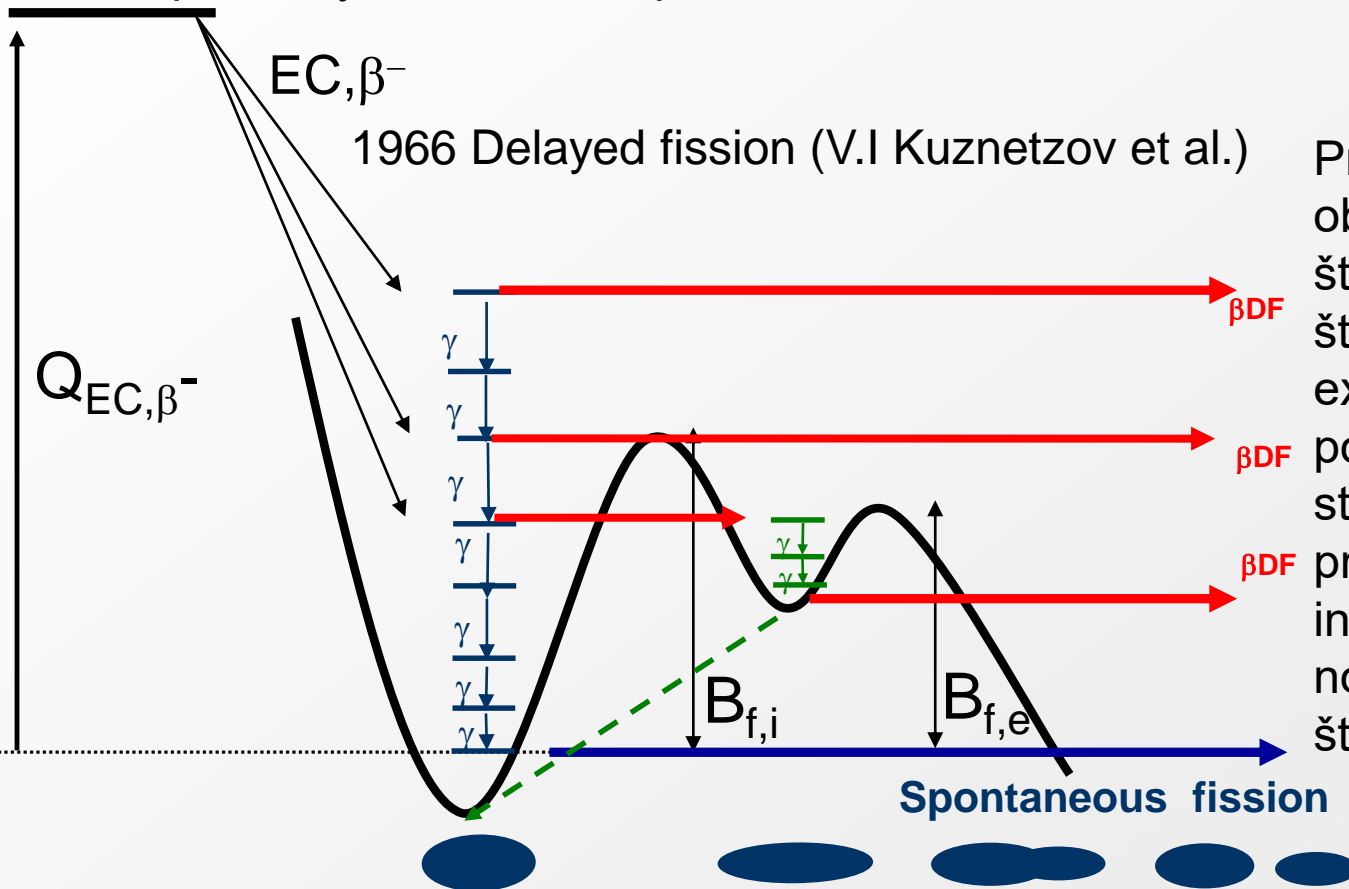
Horný obrázok zobrazuje ekvivalent v rámci jednoduchej bariéry, zobrazujúci princíp vytvárania potenciálových maxím a miním, ktoré ovplyvnia proces štiepenia.



# Beta delayed fission ( $\beta\text{DF}$ , $T_{1/2,f}=T_{1/2,b}$ )



Veľmi zriedkavý spôsob rozpadu jadier – oneskorené štiepenie po beta premene. Materské jadro pri rozpade môže obsadiť (pri dostatočnej  $Q$  hodnote beta premeny) stav, s energiou vzбудenia porovnateľnou, príp. vyššou ako štiepna bariéra a jadro sa následne prakticky okamžite štiepi.

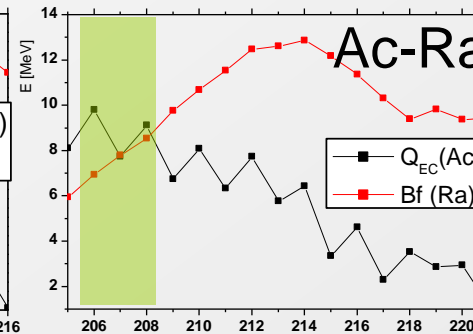
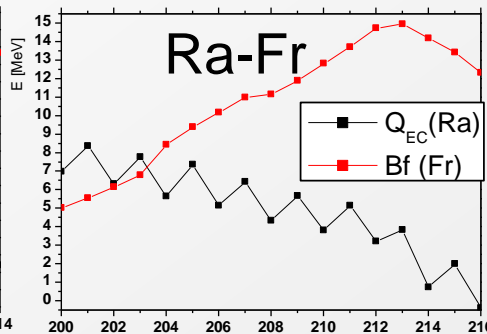
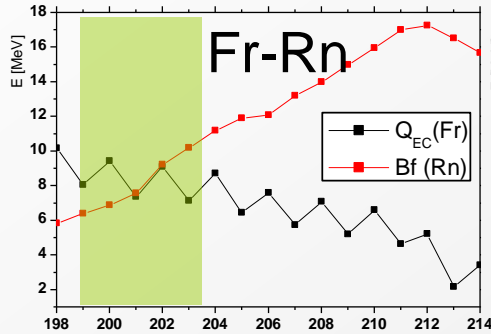
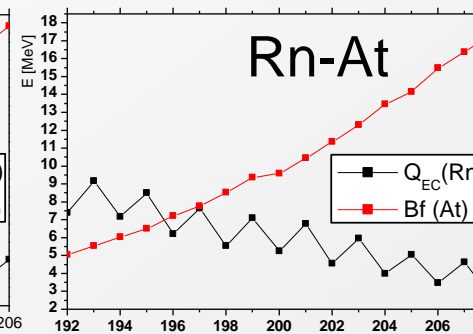
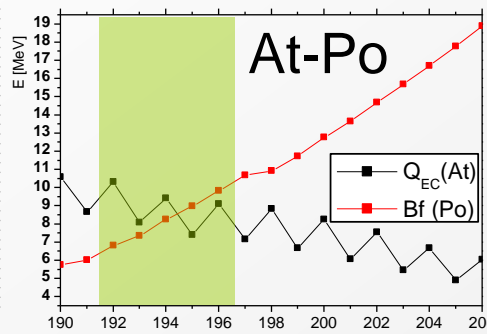
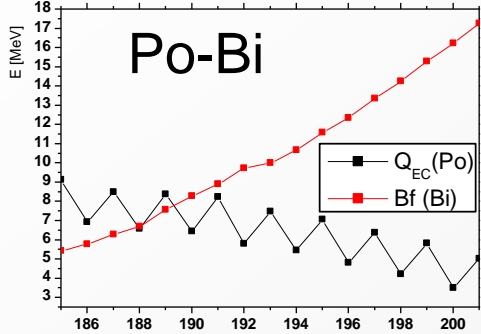
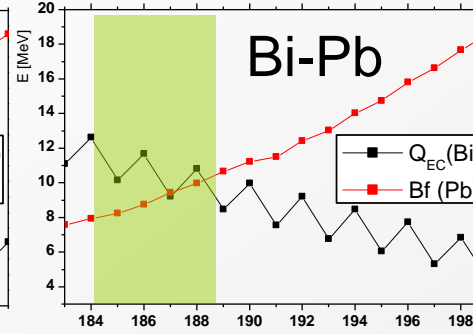
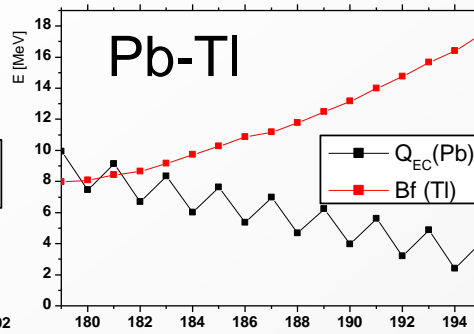
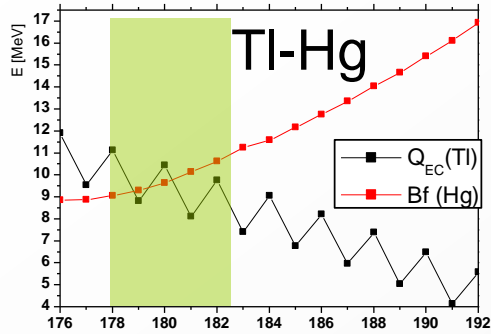


Prvá interpretácia pri objave bola, že tento typ štiepenia zodpovedá štiepnym izomérom s extrémne dlhými polčasmi izomérených stavov. Až neskôr sa prijala teoretická interpretácia, že ide o nový mechanizmus štiepenia jadier

# Podmienky pre štúdium $\beta$ DF



S. Antalic 20.03.2007 16:22:56



Podmienka pre tento proces:  
Q hodnota beta premeny musí byť väčšia ako štiepna bariéra.

Červená čiara – výška štiepnej bariéry pre jednotlivé izotopy

Čierna čiara – Q hodnoty beta premien (nepárno-nepárne izotopy majú vyššie Q hodnoty kvôli párovaniu)

Fission Barriers: W.D. Myers, W. Swiatecki Phys. Rev. C60 (1999) 014606

Masses: P. Moller et al. At. Data and Nucl. Data table 59 (1995) 185

# ECDF probability

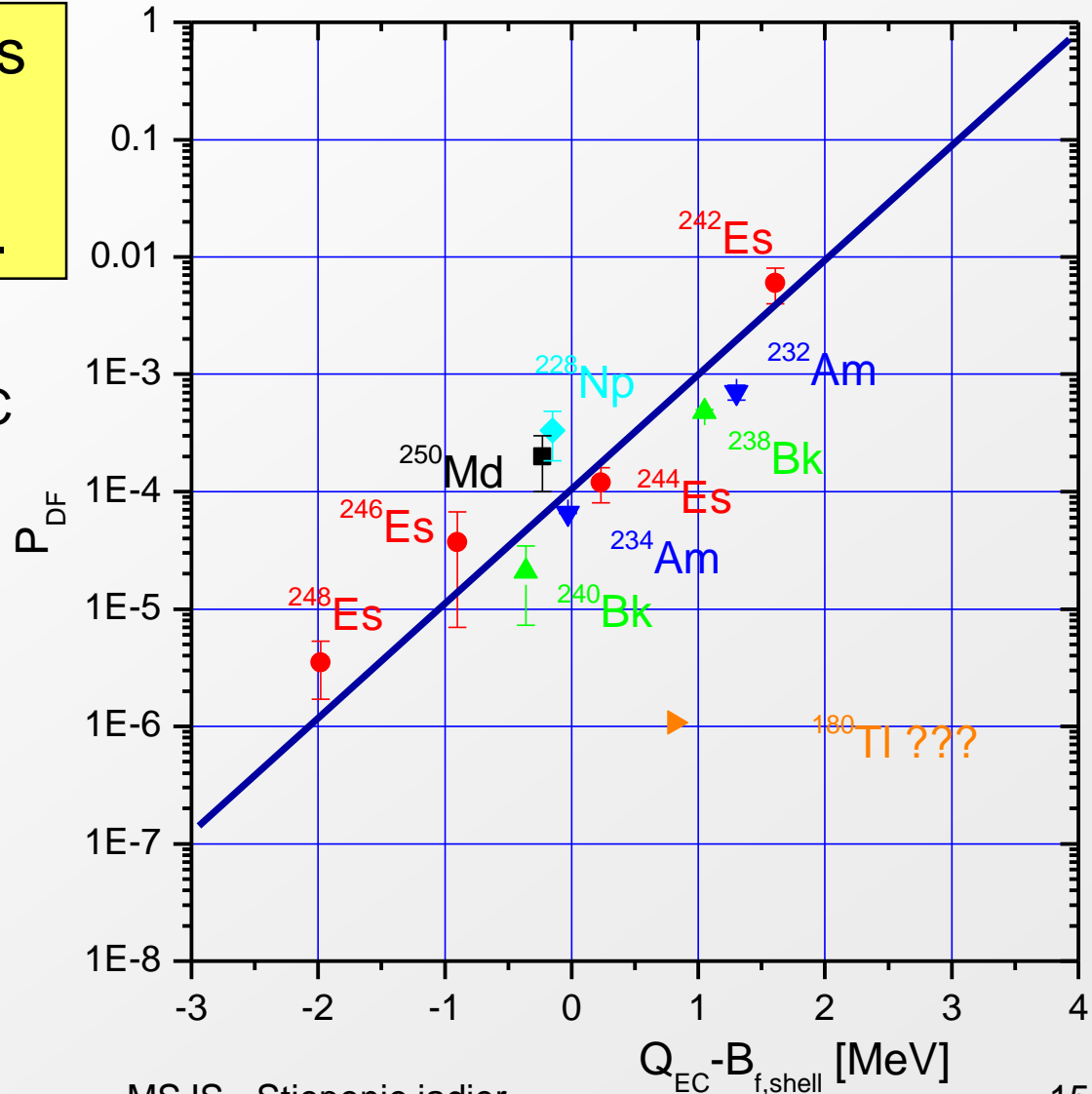


Several known cases for ECDF mostly in transuranium region.

$$p_{\text{ECDF}} = N_{\text{ECDF}} / N_{\text{EC}}$$

Pravdepodobnosť oneskoreného štiepenia je pomerom medzi počtom štiepení po EC resp.  $\beta^+$  a samotných beta premien.

Vykazuje exponenciálnu závislosť.



# 1984 „Cluster decay“



- Existuje jadrový typ rozpadu jadra medzi emitovaním alfa častice a štiepením jadra?
- Pri výpočte Q hodnôt sa zistilo že pre niektoré jadrá je povolená emisia  $^{14}\text{C}$   
Identifikované ako prvé pre jadro  $^{223}\text{Ra}$  ktoré sa s pravdepodobnosťou  $10^{-7}$  rozpadá na  $^{209}\text{Pb}$ .
- Neskôr bolo identifikovaných cca 25 prípadov s emisiou jadier až po  $^{34}\text{Si}$
- Parciálny polčas rozpadu je  $10^{14} - 10^{27}$  rokov



# 1994: Electromagnetic fission



Nuclear Physics A 614 (1997) 400-414

NUCLEAR PHYSICS A

## Fission barriers from electromagnetic fission of 430-A MeV radioactive ion beams\*

A. Grewe<sup>a</sup>, S. Andriamonje<sup>c</sup>, C. Böckstiegel<sup>a</sup>, T. Brohm<sup>a</sup>,  
H.-G. Clerc<sup>a</sup>, S. Czajkowski<sup>c</sup>, E. Hanelt<sup>a</sup>, A. Heinz<sup>b</sup>, M. G. Itkis<sup>d</sup>,  
M. de Jong<sup>a</sup>, A. Junghans<sup>a</sup>, M. S. Pravikoff<sup>c</sup>, K.-H. Schmidt<sup>b</sup>,  
W. Schwab<sup>b</sup>, S. Steinhäuser<sup>a</sup>, K. Sümmerer<sup>b</sup>, B. Voss<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institut für Kernphysik, Schloßgartenstr. 9, 64289 Darmstadt, Germany  
<sup>b</sup> Gesellschaft für Schwerionenforschung, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt, Germany  
<sup>c</sup> CEN Bordeaux-Madaragan, Gradignan, France  
<sup>d</sup> JINR, Dubna, Russia

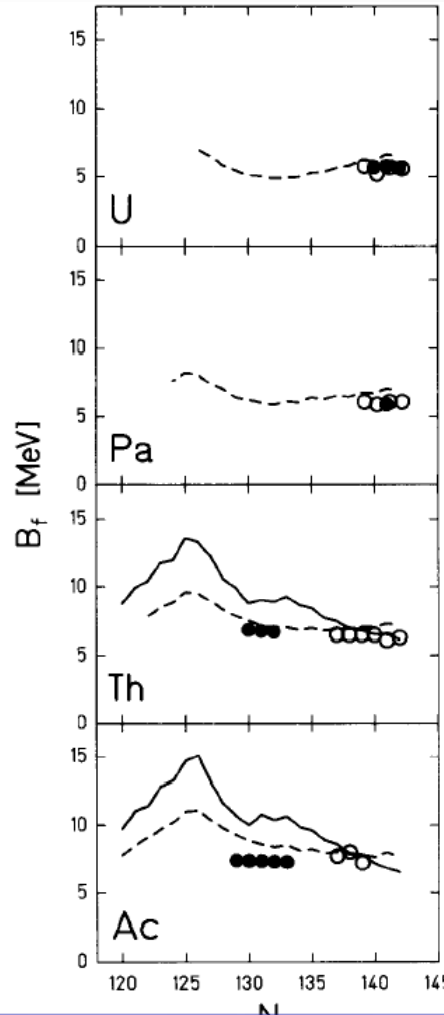
Received 19 August 1996; revised 29 October 1996

### Abstract

For isotopically separated secondary beams of neutron-deficient nuclei delivered by the SIS-FRS facility at the GSI, electromagnetic fission-in-flight induced at 430-A MeV in a secondary lead target was observed. Electromagnetic fission cross sections were measured for <sup>232,233,234</sup>U, <sup>232</sup>Pa, <sup>229,231,232</sup>Th, <sup>218,...,222</sup>Ac and <sup>215,217,218,219</sup>Ra. By using a simple analysis, fission barriers were derived from the electromagnetic fission cross sections. For the U- and Pa-isotopes, these barriers agree with those measured previously by other methods. The new barriers for Th- and Ac-isotopes are smaller than predicted theoretically.

PACS: 24.75.+i; 24.30.Cz; 25.70.De; 25.85.-w; 25.60.-t; 25.60.Dz; 27.80.+w; 27.90.+b

Keywords: Nuclear reaction; Radioactive beams; Electromagnetic excitation; Fission <sup>232,233,234</sup>U( $\gamma,f$ ), <sup>232</sup>Pa( $\gamma,f$ ), <sup>229,231,232</sup>Th( $\gamma,f$ ), <sup>218,...,222</sup>Ac( $\gamma,f$ ) and <sup>215,217,218,219</sup>Ra( $\gamma,f$ ); Measured  $\sigma_{\text{obs}}^f$ ; Deduced fission barriers

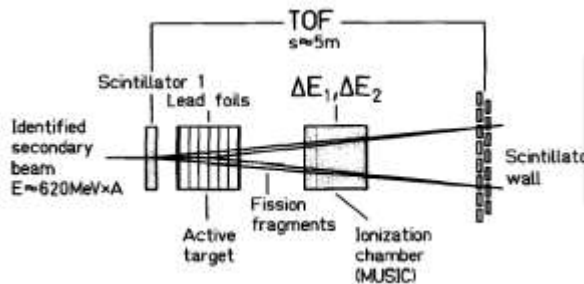


Pri fragmentácii jadier je možné vytvoriť z fragmentov sekundárny zväzok. Následne tento zväzok môžeme nechať interagovať s inými ťažkými jadrami (napr. jadrá olova). Pri následnej interakcii prichádza k tzv. kulombovskému vzbudzeniu, ktoré sekundárne ióny excituje. V prípade akcítácie nad štiepnu bariéru prichádza k ich štiepeniu.

Jedna z možností ako študovať výšky štiepných barrier jadier, ktoré sa neštiepia.

MSJS - Štiepenie jadier

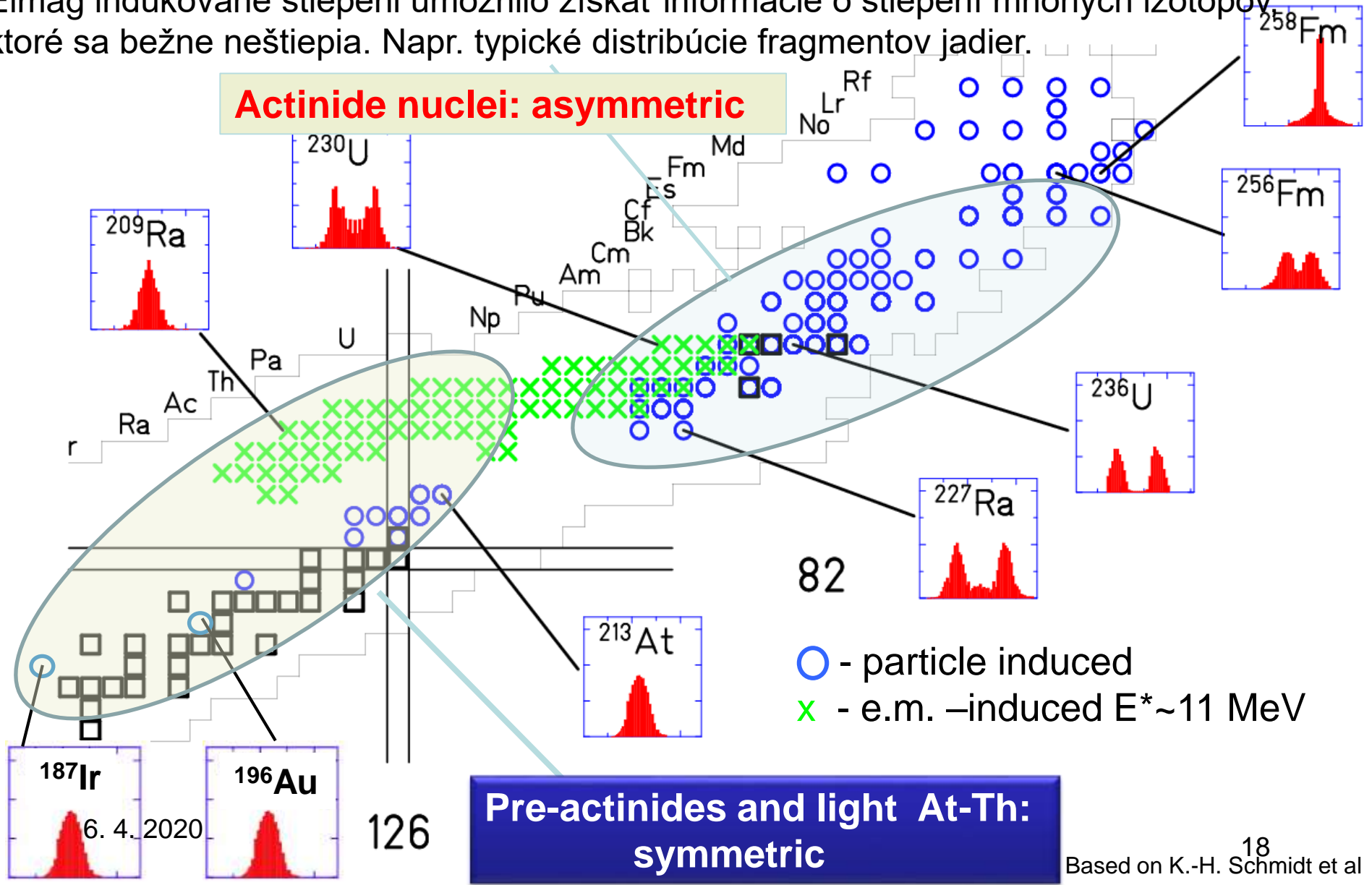
17/23



# Experimental information on low-energy fission



Elmag indukované štiepení umožnilo získať informácie o štiepení mnohých izotopov ktoré sa bežne neštiepia. Napr. typické distribúcie fragmentov jadier.





# FAKTOR POTLAČENIA ŠTIEPENIA

# Faktor potlačenia štiepenia



160

Napriek plynulej zmene parciálnych polčasov, vykazujú vetviace pomery nerovnomerný trend pre jednotlivé izotopy. Izotopy s nepárnym počtom nukleónov sú systematicky stabilnejšie voči štiepeniu.

# Faktor potlačenia štiepenia

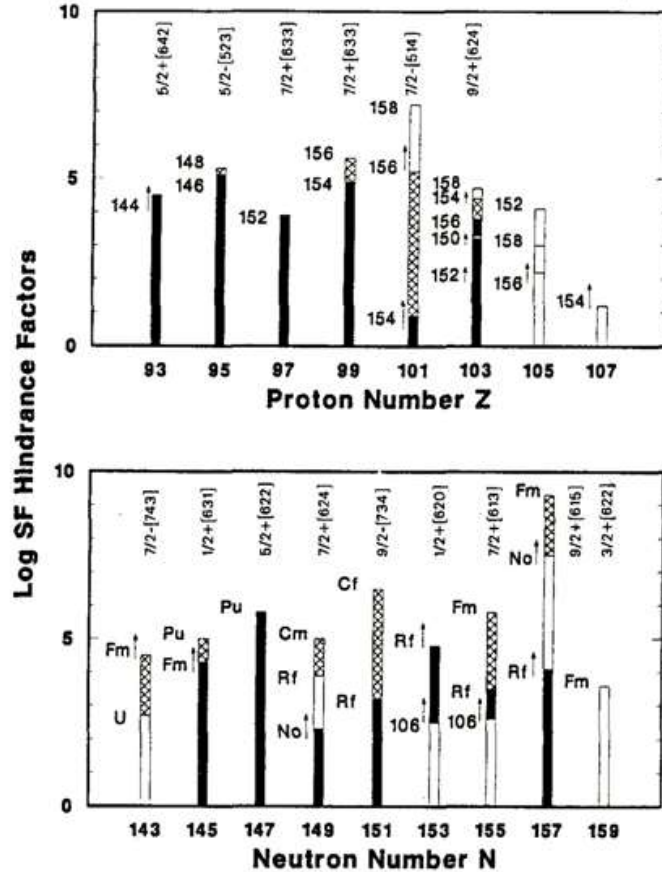


Fig. 3. Logarithms of SF hindrance factors (HF) for odd-neutron and odd-proton nuclides. Lower limit values are indicated by arrows. An open bar indicates that the HF was calculated relative to only one e-e neighbor. A filled or hatched bar indicates that the HF was calculated relative to two e-e neighbors. [From Ref. [11].]

Aj pri štiepení sleduje potlačenie parciálnych polčasov rozpadov jadier. Pre nepárno-párne izotopy sú parciálne polčasy štiepení potlačené aj o niekoľko rádov.

Tento faktor potlačenia sa zvyčajne odhaduje ako pomer polčasu pre nepárno-párny izotop a priemeru polčasov pre susedné páro-párne izotopy

$$HF = \frac{T_{1/2,o-e}}{\text{avg}(T_{1/2,e-e})}$$

Jednotlivé prísupy sa môžu líšiť. Taktiež ostáva otvorenou otázkou, či nepárno-nepárne izotopy majú násobne vyšší faktor potlačenia ako nepárno-párne.