

# Jaderná energetika (JE)

Pavel Zácha  
2015-02

## 2. Základní poznatky z jaderné fyziky

**Struktura atomu**

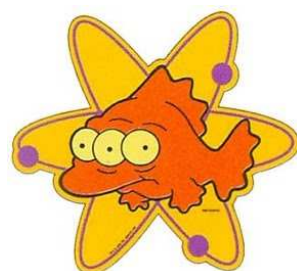
**Jaderné síly, stabilita jader**

**Vazebná energie**

**Radioaktivita**

**Jaderné reakce**

**Kvantifikace neutronů**



## 2.1 Struktura atomu

Tab. 2.1. Fyzikální konstanty používané v jaderné fyzice

Náboj elektronu	$1 e = 1,602189 \times 10^{-19} \text{ C}$
Univerzální hmotnostní jednotka	$1 u = 1,66053 \times 10^{-27} \text{ kg}$ *)
Elektronvolt	$1 \text{ eV} = 1,6021892 \times 10^{-19} \text{ J}$ **)
Energie odpovídající hmotnosti 1 u	$1 u = 931,481 \text{ MeV}$

\*) univerzální hmotnostní jednotka byla zvolena jako jedna dvanáctina hmotnosti izotopu uhlíku C12.

\*\*\*) energie jednoho elektronvoltu se přesně rovná pohybové energii elektronu, kterou získá při průchodu potenciálním rozdílem 1 V.

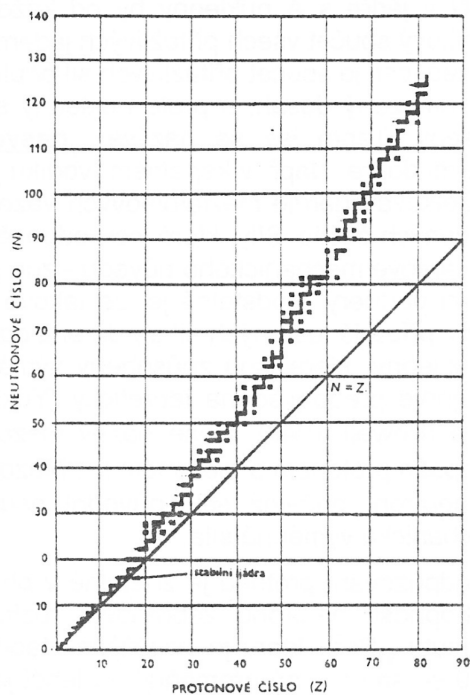
Rozměr atomu:  $10^{-10} \text{ m}$

Rozměr jádra:  $10^{-15}$  až  $10^{-14} \text{ m}$

Tab.2.2. Hmotnosti a náboje vybraných částic

Částice	Hmotnost	Náboj
	u	e
elektron	$5,48593 \times 10^{-4}$	-1
proton	1,00727647	+1
neutron	1,00866527	0
deuteron	2,013553	+1
$\alpha$ částice	4,001506	+2

## 2.2 Jaderné síly, stabilita jader



Obr.2.5. Neutron-protonový diagram pro stabilní nuklidy.

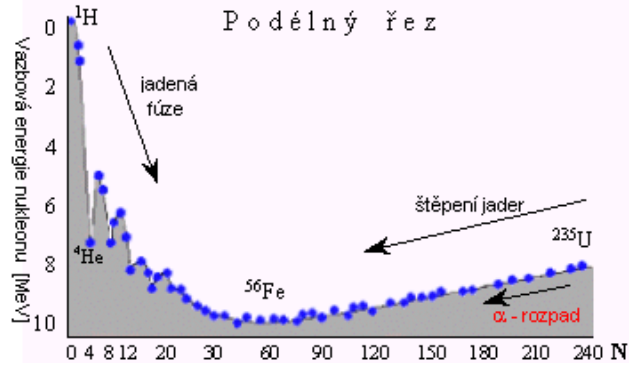
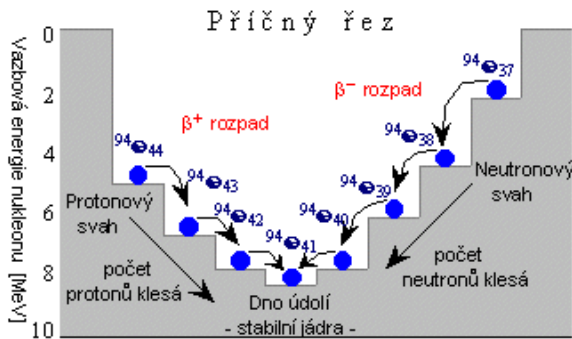
### Síly v atomu:

- přitažlivé
  - gravitační
  - jaderné (gr.  $\times 10^{39}$ ) – působí mezi nukleony
- odpudivé
  - elektrostatické (gr.  $\times 10^{37}$ ) – působí mezi protony

## 2.3 Vazebná energie

- je energie, kterou bychom museli dodat, aby se jádro rozdělilo na Z protonů a N neutronů ( $N=A-Z$ )

$$E = m \cdot c^2$$



Energetická bilance vazby atomových jader

<http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>

**Syntéza lehkých jader**

- princip tokamaku

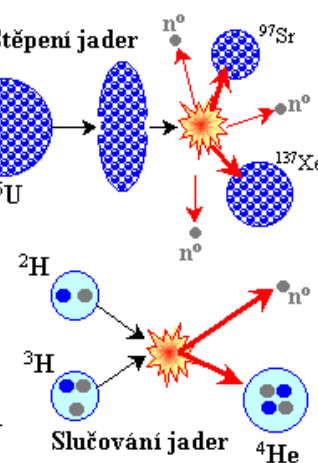
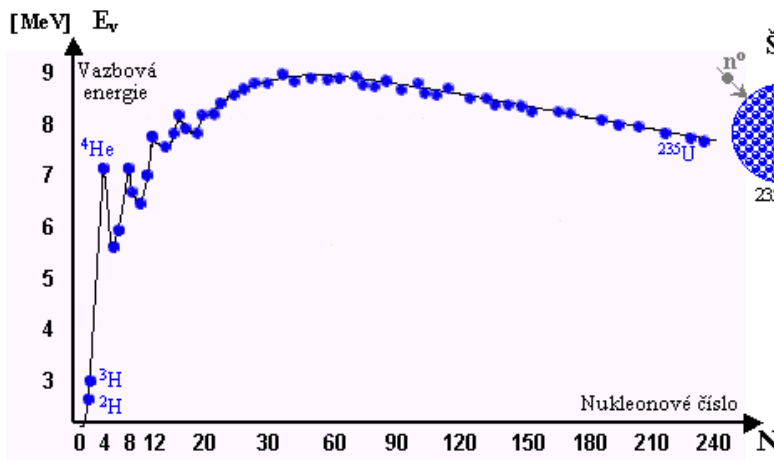
**Štěpení těžkých jader**

- princip jaderných reaktorů

## 2.3 Vazebná energie

- je energie, kterou bychom museli dodat, aby se jádro rozdělilo na Z protonů a N neutronů ( $N=A-Z$ )

$$E = m \cdot c^2$$



Vazebná / vazbová energie jádra vztažená na 1 nukleon

<http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>

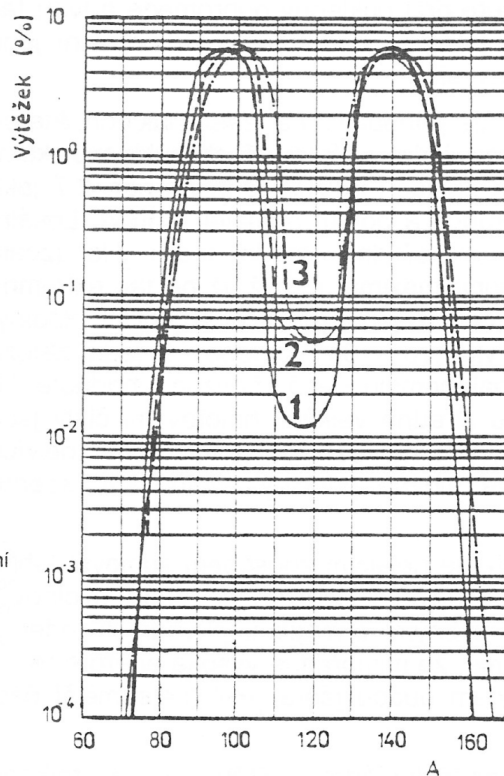
**Syntéza lehkých jader**

- princip tokamaku

**Štěpení těžkých jader**

- princip jaderných reaktorů

## 2.3 Vazebná energie



Obr.2.8. Výtěžek produktů štěpení  
 1 - U233  
 2 - U235  
 3 - Pu239

## 2.4 Radioaktivita

### Radioaktivita

– rychlost rozpadu jader radioaktivního materiálu (počet rozpadů za jednotku času)

### Radioaktivní rozpad

– samovolná přeměna jádra, při níž se emitují  $\alpha$ ,  $\beta$  nebo  $\gamma$

### Rozpadová konstanta

– míra pravděpodobnosti, že se určité jádro rozpadne za 1s (funkcí druhu jádra)

### Poločas přeměny / rozpadu

– doba, za kterou klesne počet radioaktivních jader na polovinu

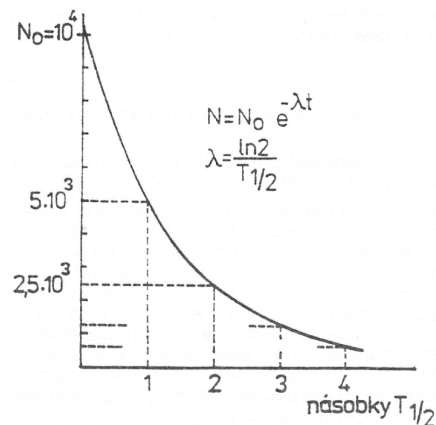
### Střední doba života (izotopu)

- převrácená hodnota jeho pravděpodobnosti rozpadu za čas

### Rozpad $\alpha$

### Rozpad $\beta$

### Rozpad $\gamma$

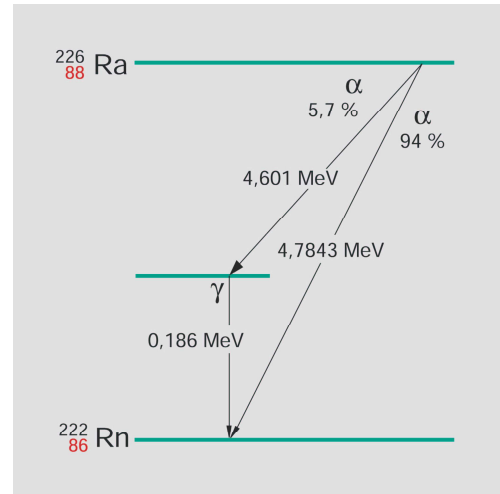
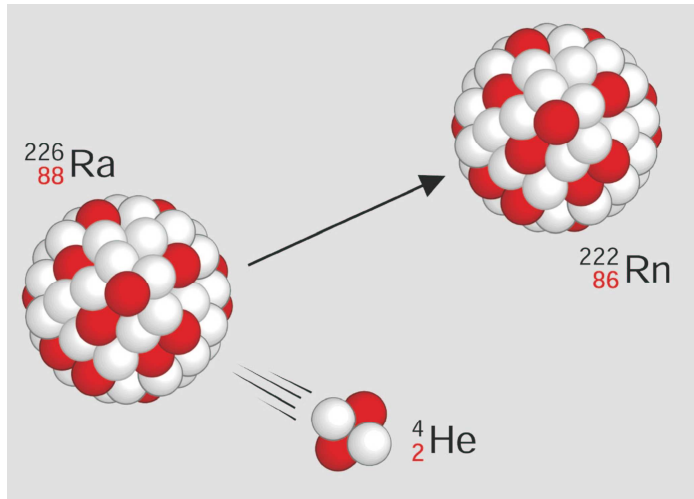


Obr.2.9. Počet jader radioaktivního izotopu klesá exponenciálně s časem

## 2.4 Radioaktivita

### Rozpad $\alpha$

- prostředek zvyšování stability u velmi těžkých jader
- málo pronikavé (náboj +2e)



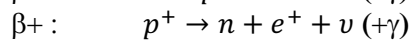
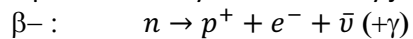
Quelle: Informationskreis KernEnergie

Quelle: Informationskreis KernEnergie

## 2.4 Radioaktivita

### Rozpad $\beta$

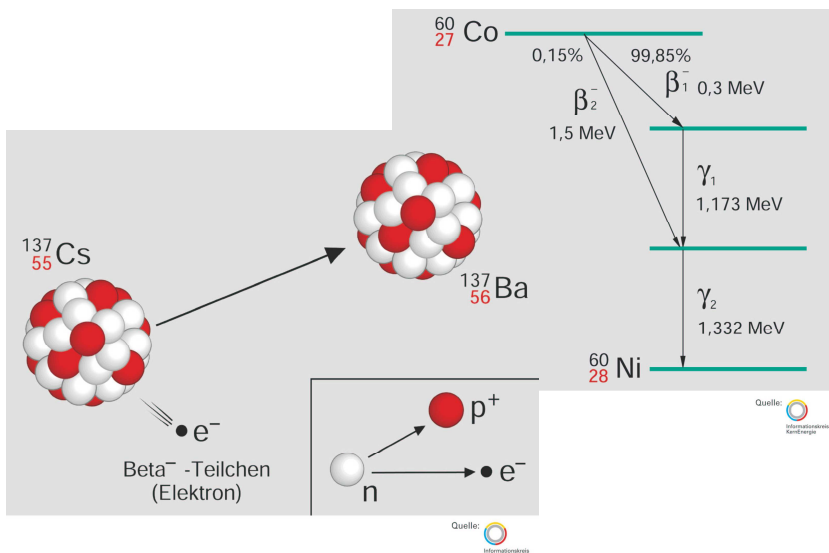
- prostředek zvyšování stability jader



- málo pronikavé (náboj +1e)

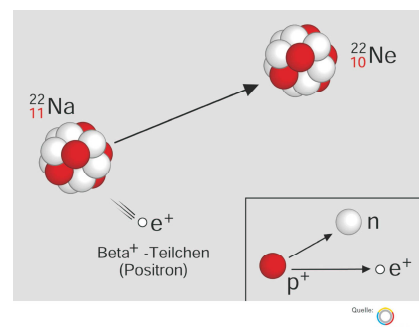
- jádra, která mají nadbytek neutronů

- jádra, která mají nadbytek protonů



Quelle: Informationskreis KernEnergie

Quelle: Informationskreis KernEnergie

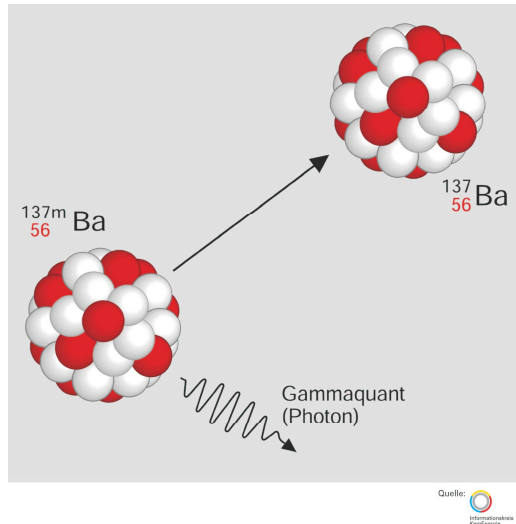


Quelle: Informationskreis KernEnergie

## 2.4 Radioaktivita

### Rozpad $\gamma$

- prostředek zvyšování stability - jádro se vrací zpět do (nové) energetické hladiny
- nemá náboj – vysoce pronikavé záření



## 2.5 Jaderné reakce

### Jaderná reakce

- interakce mezi jádrem a dopadající částicí, nebo mezi dvěma jádry

### Mikroskopický účinný průřez $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ]

- terčová plocha jednoho jádra

### Makroskopický účinný průřez $\Sigma$ [ $\text{m}^{-1}$ ]

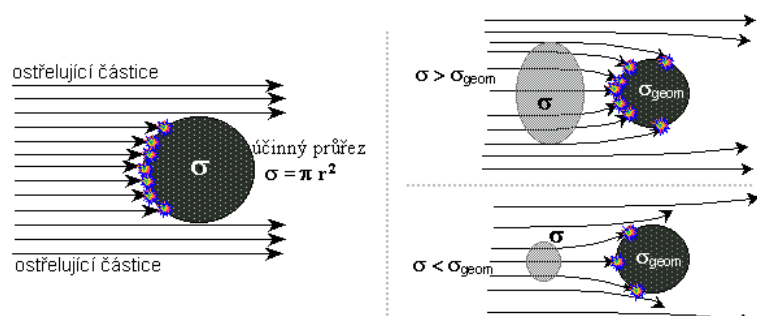
- pravděpodobnost jaderné reakce částice v daném materiálu s počtem částic  $N$

### Střední volná dráha částice $\lambda$ [ $\text{m}$ ]

- střední vzdálenost, kterou částice urazí v materiálu dříve, než interaguje s některým jeho jádrem

### Významné interakce

- pružný rozptyl
- nepružný rozptyl
- absorpce (radiační záchyt)
- reakce  $n, \alpha$
- reakce  $n, p$
- štěpení  $n, f$



Vyjádření pravděpodobnosti jaderné reakce pomocí účinného průřezu

## 2.5 Jaderné reakce

**Tab.2.3.** Energie uvolněná při štěpení U235

Forma uvolněné energie	Uvolněná energie		Vzdálenost od místa štěpení	Zpoždění
	[MeV]	[%] přibližně		
Kinetická energie štěpných trosek	167±5	81.5	<0,1 mm	ne
Okamžité záření gama	6±1	3	~1 m	ne
Kinetická energie štěpných neutronů	5	2.5	0,1 - 1 m	ne
Rozpad štěpných trosek:				
beta	8±1,5	4	<0,1 mm	ano
gama	6±1	3	~1 m	ano
Neutrino	12±2.5	6		ano
Celková energie uvolněná na jedno štěpení	204±7	100		

## 2.6 Kvantifikace neutronů

**Hustota počtu neutronů  $n$  [1/m<sup>3</sup>]**

- počet neutronů v jednotce objemu

**Hustota neutronového toku  $\Phi$  [1/m<sup>2</sup>.s]**

- dána součinem hustoty počtu neutronů a jejich rychlosti; odpovídá celkové délce dráhy, kterou neutrony v jednotce objemu urazí za jednotku času

$$\Phi = n \cdot v$$

## 2. Základní poznatky z jaderné fyziky

### výstupy z kapitoly

#### Pochopit fyzikální základy mikrosvěta

- atom je téměř „vzduchoprázdný“
- soudržnost jádra je dána celkovým množstvím a podílem počtu protonů a neutronů
- => čím větší jádro, tím větší podíl neutronů

#### Radioaktivita

- je všudypřítomná, záleží jen na druhu záření a jeho intenzitě
- všechny rozpady jsou prostředkem zvyšování stability

#### Jaderné reakce

- pružný rozptyl – princip kulečnickových koulí (zpomalování jader => šíření tepla)
- absorpce = radiační záchyt nebo štěpení
- energie ze štěpení se projevuje zejména kinetickou energií štěpných produktů (štěpných trosků a neutronů)

## 3. Štěpná řetězová reakce

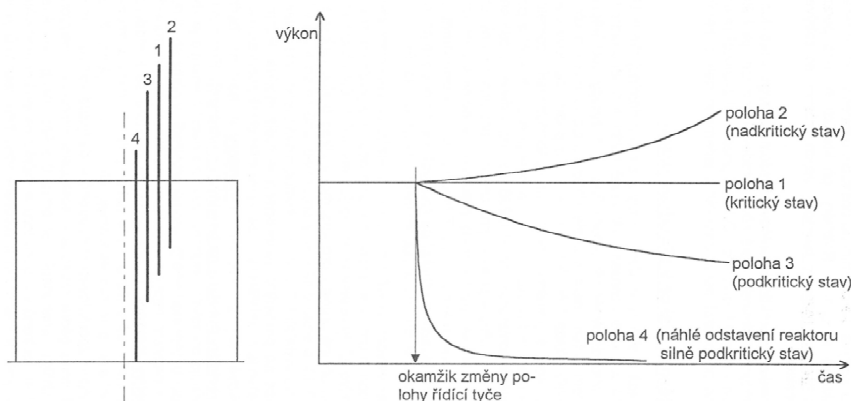
### 3.1 Multiplikační faktor $k$

- je dán poměrem počtu neutronů ve dvou po sobě následujících generacích neutronů:

$$k = \frac{n_i}{n_{i-1}}$$

Hodnoty  $k$  můžeme rozdělit na:

- kritický ( $k = 1$ ) - počet neutronů v reakci je ustálený, reakce se udržuje samočinně
- podkritický ( $k < 1$ ) - počet neutronů v řetězové reakci klesá, reakce se nemůže sama udržet
- nadkritický ( $k > 1$ ) - reakce je divergentní, počet neutronů exponenciálně roste



Obr. 3.1. Závislost výkonu reaktoru na poloze řídicí tyče



## 3.2 Podmínky pro štěpení

### a) složení paliva

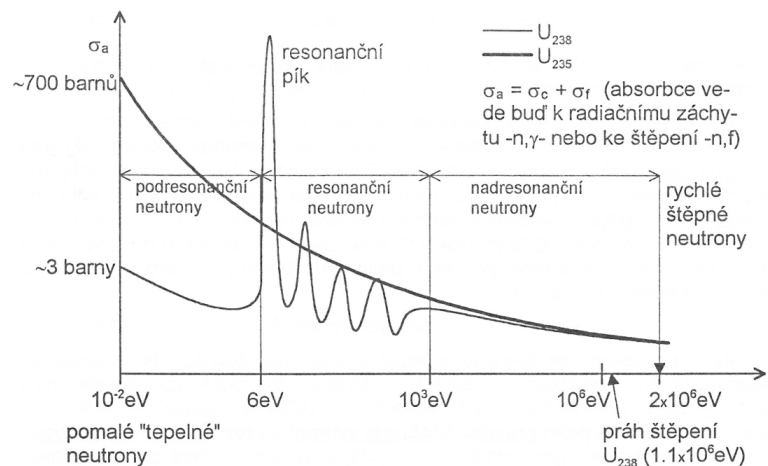
- přírodní uran
- mírně obohacený uran
- vysoce obohacené palivo

### b) štěpitelnost paliva

- rychlými neutrony
- rezonančními neutrony
- tepelnými neutrony

### c) typy jaderných reaktorů

- reaktory pracující na tepelných neutronech
- reaktory pracující na rychlých neutronech



Obr. 3.2. Orientační závislost účinného průřezu pro absorpci na energii neutronu pro  $U_{235}$  a  $U_{238}$

## 3. Štěpná řetězová reakce

### výstupy z kapitoly

#### Multiplikační faktor k

- kritičnost reaktoru udává, v jakém stavu se reaktor nachází
- počet neutronů v čase se mění exponenciálně

#### Podmínky pro štěpení

- štěpitelné je vše (cca od izotopu 230), jen je velmi různá pravděpodobnost ( $\sigma_f$ )
- velmi záleží na energii neutronů a na složení paliva
- pro zlepšení podmínek štěpení lze palivo obohacovat ( $U_{235}$ ,  $U_{233}$ ,  $Pu_{239}$ )