

Vazebná energie jádra

Vazebná energie jádra je rovna práci, kterou musíme vynaložit na jeho rozložení na jednotlivé nukleony. Je určena vztahem

$$W = \Delta m c^2$$

kde Δm je **hmotnostní defekt**, rovný **rozdílu** součtu hmotností jednotlivých **osamocených nukleonů a hmotnosti příslušného jádra**.

$$m = \sum m_p + \sum m_n$$

Vytvoření jádra z jednotlivých nukleonů je vždy spojeno s uvolněním energie W . Této energii odpovídá hmotnost,

$$\Delta m = \Delta W / c^2$$

která potom v jádře "chybí". Vzniklé jádro je o tuto hmotnost menší, má tedy jen hmotnost

$$m' = m - \Delta m$$

Klidová hmotnost protonu a neutronu

$$u \doteq 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$931,48 \text{ MeV}$$

$$m_{op} = 1,007825 u, \quad \text{resp. } m_{on} = 1,008665 u$$

Např.

pro jádro těžkého vodíku, tzv. deuteria, které se skládá z jednoho protonu a jednoho neutronu. Hmotnost deuteria je

$$m_D = 2,014102 u,$$

zatímco součet hmotností protonu a neutronu je $m_p + m_n = 1,007825 + 1,008665 = 2,016490 u$.

Hmotnostní úbytek je tedy

$$\Delta m = (m_p + m_n) - m_D = 0,002388 u,$$

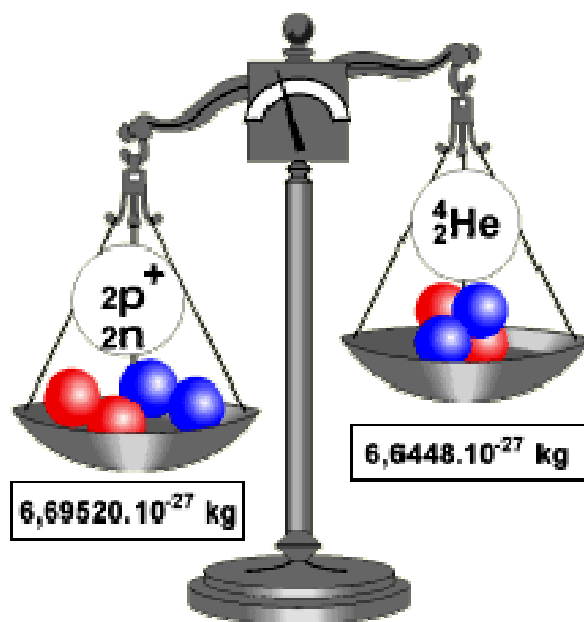
takže příslušná vazebná energie je $W_v = 2,23 \text{ MeV}$.

Na jeden nukleon připadá tedy energie

$$W^* \doteq 1,1 \text{ MeV}$$

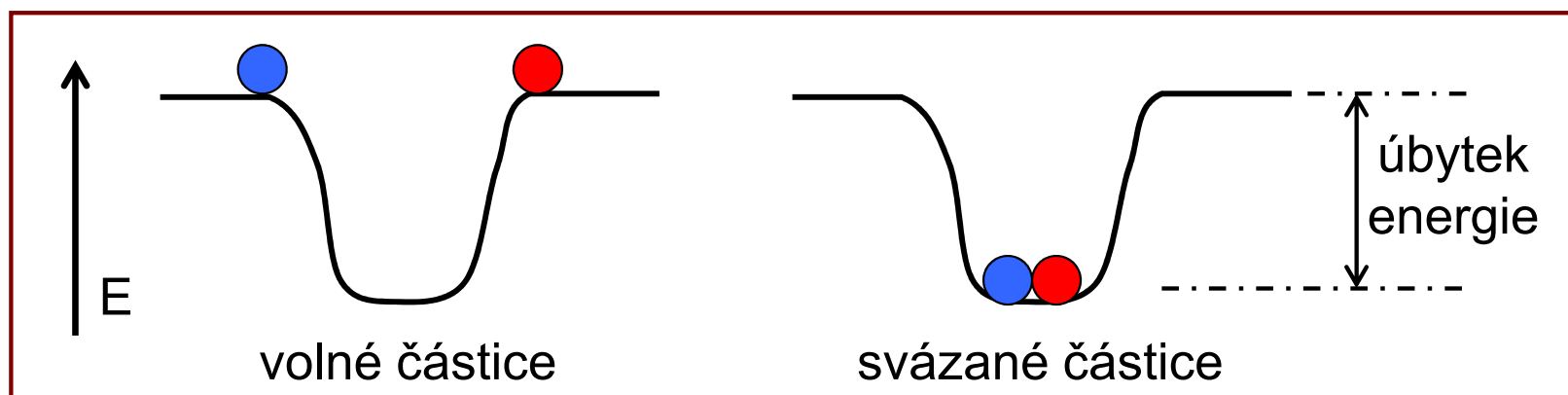
Hmotnost a vazebná energie jádra

Každá jednotlivá částice v jádře má svoji klidovou energii $E = m_0c^2$. Stejně tak má klidovou energii jádro. Tyto energie (a tedy hmotnosti) si ale nejsou rovny.



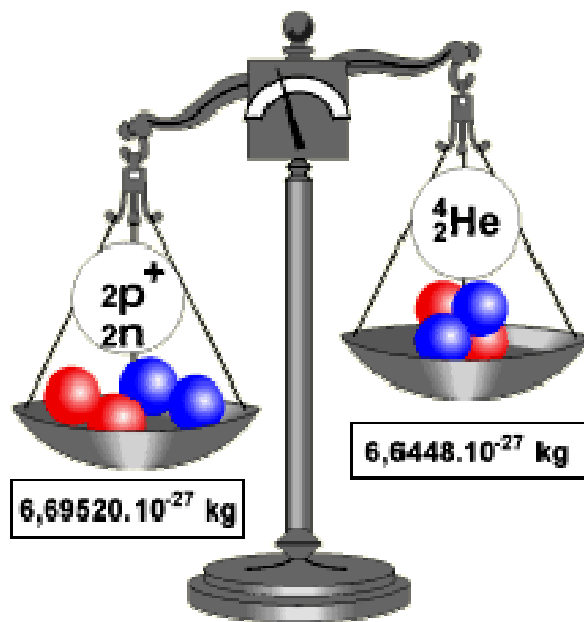
$$m_{\text{He}} < 2 \cdot m_n + 2 \cdot m_p$$

Úbytek hmotnosti je dán vazebnou energií – tedy energií, která byla uvolněna při „svázání“ částic jádra dohromady.



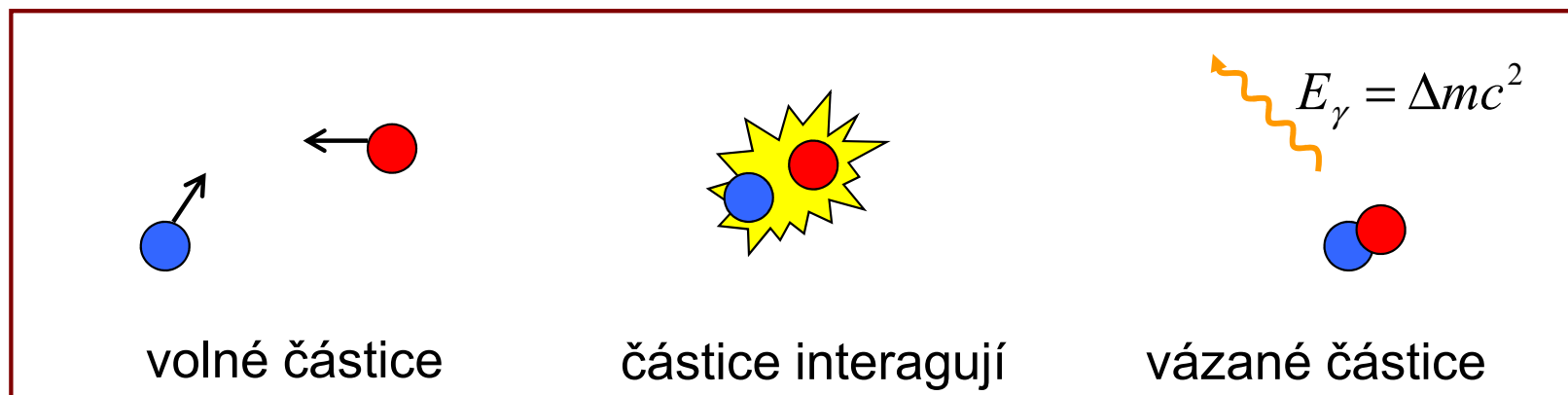
Hmotnost a vazebná energie jádra

Každá jednotlivá částice v jádře má svoji klidovou energii $E = m_0c^2$. Stejně tak má klidovou energii jádro. Tyto energie (a tedy hmotnosti) si ale nejsou rovny.

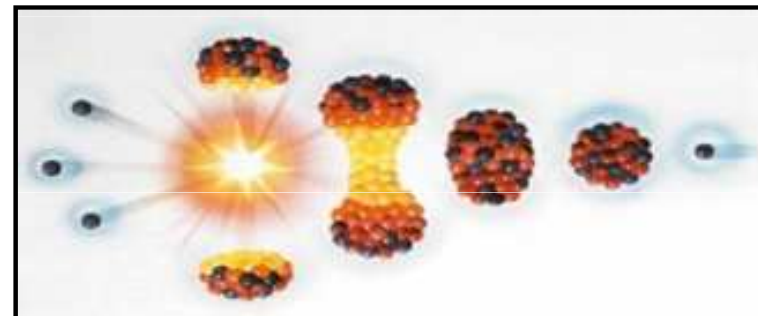
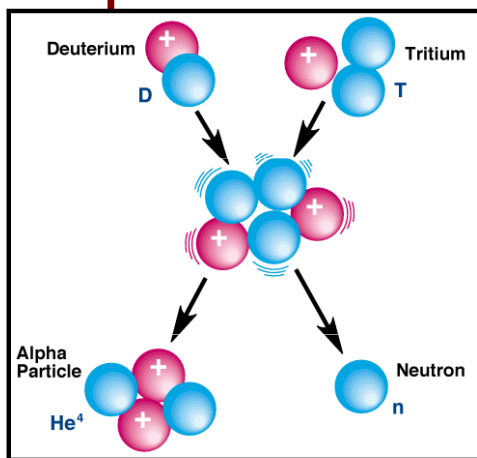
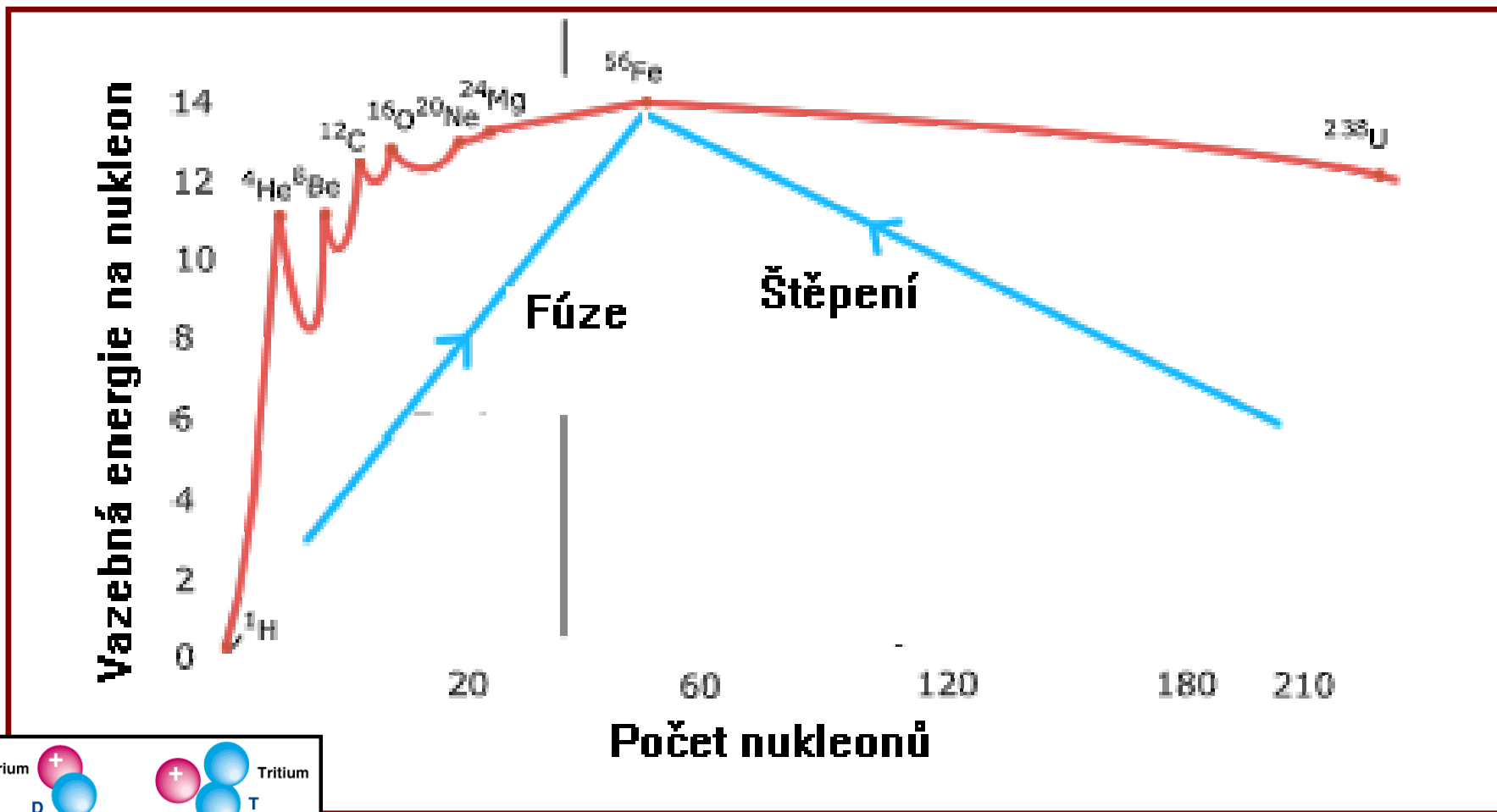


$$m_{\text{He}} < 2 \cdot m_n + 2 \cdot m_p$$

Úbytek hmotnosti je dán vazebnou energií – tedy energií, která byla uvolněna při „svázání“ částic jádra dohromady.



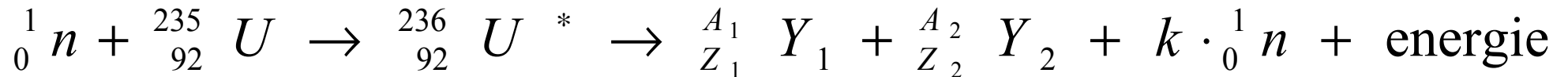
Hmotnost a vazebná energie jádra



Jaderné štěpení



Všechny prvky od uranu výš se štěpí samovolně – rozpadají se na menší jádra. Systém má po rozpadu nižší energii než před ním, přebytek energie se vyzáří ve formě fotonů a předá se úlomkům jako kinetická energie. Pravděpodobnost štěpení můžeme výrazně zvýšit přidáním neutronu do jádra.



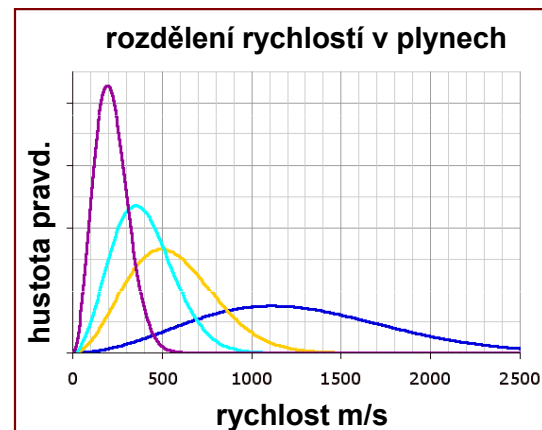
Základní, nejjednodušeji realizovatelná štěpná reakce. Vstupní neutron musí být pomalý, reakce pak má vysokou pravděpodobnost, že proběhne.

Stejně snadno probíhají štěpné reakce s izotopy ${}_{94}^{239} P$ a ${}_{92}^{233} U$, ty jsou však vzácné. Pro další štěpné reakce, například na ${}_{92}^{238} U$, je třeba použít rychlé neutrony a reakce jsou mnohem méně pravděpodobné.

Rychlé neutrony – energie > 1 eV

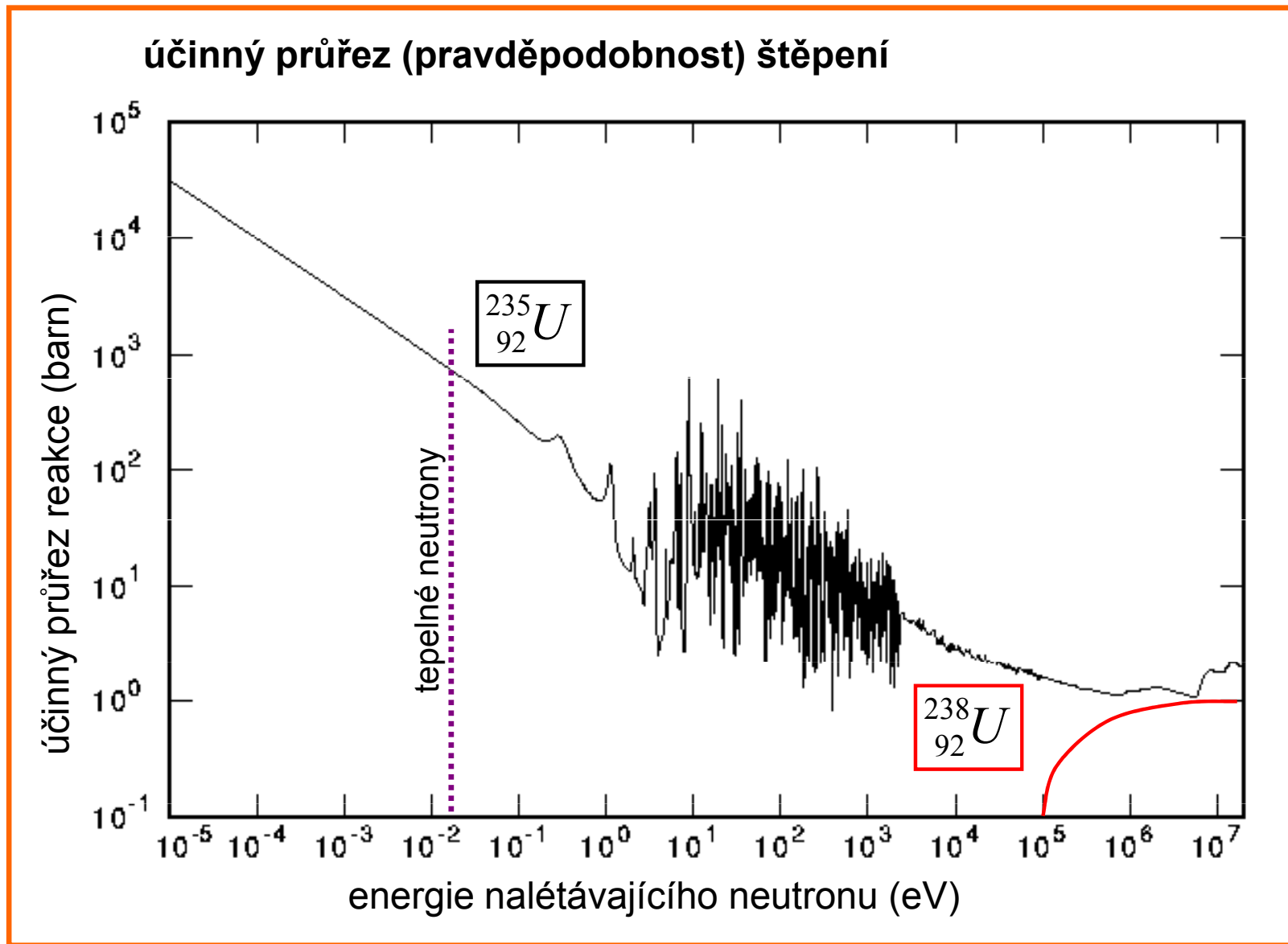
Pomalé neutrony – energie < 1 eV.

Tepelné neutrony – nejpravděpodobnější energie kolem 0.025 eV.



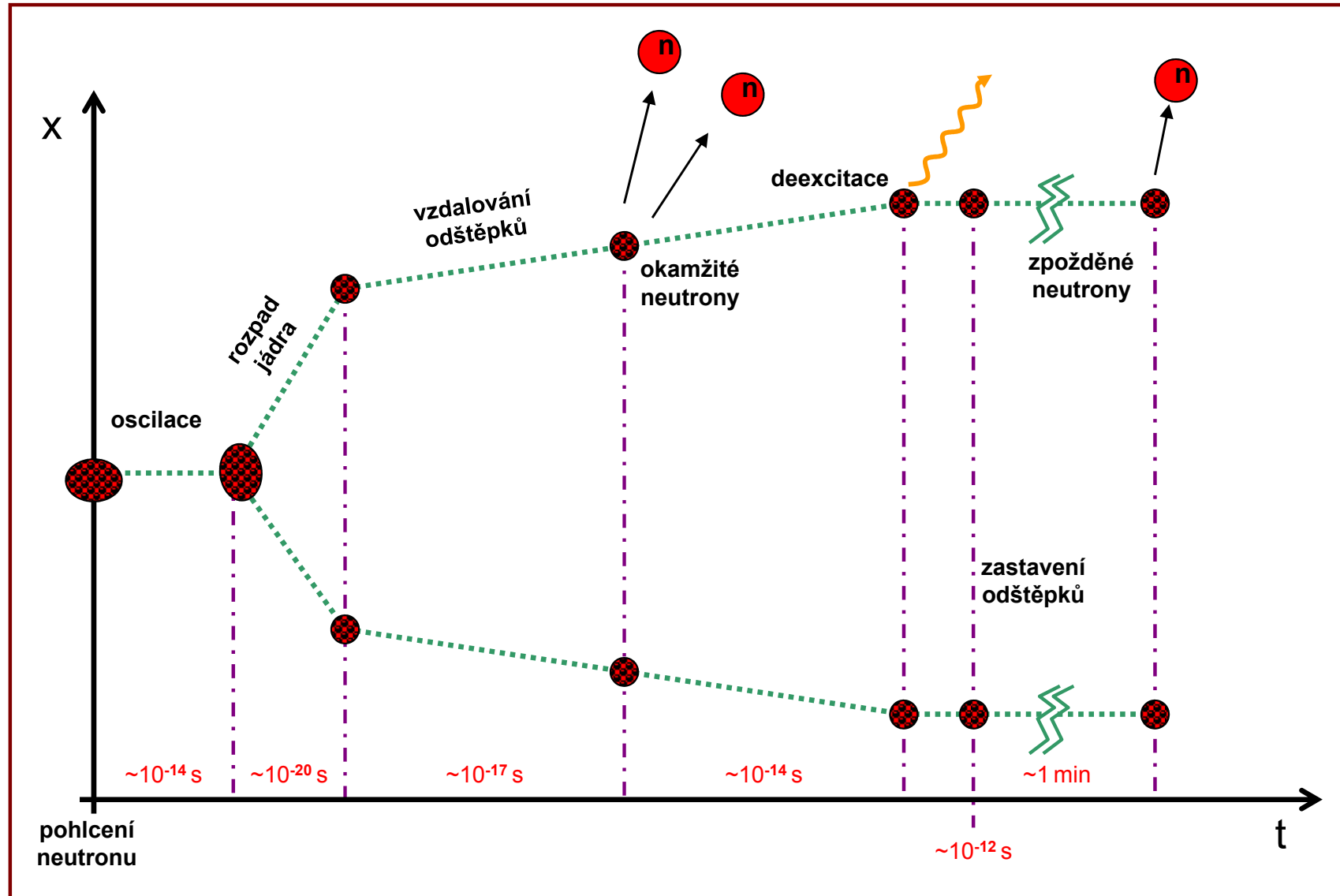
Rychlost, energie a teplota spolu souvisí přes tzv. Maxwell-Boltzmannovo rozdělení.

Jaderné štěpení



Štěpení běžnějšího uranu ${}^{238}\text{U}$ rychlými neutrony je technicky mnohem obtížnější než štěpení ${}^{235}\text{U}$.

Jaderné štěpení



časový diagram štěpné reakce

Jaderné štěpení

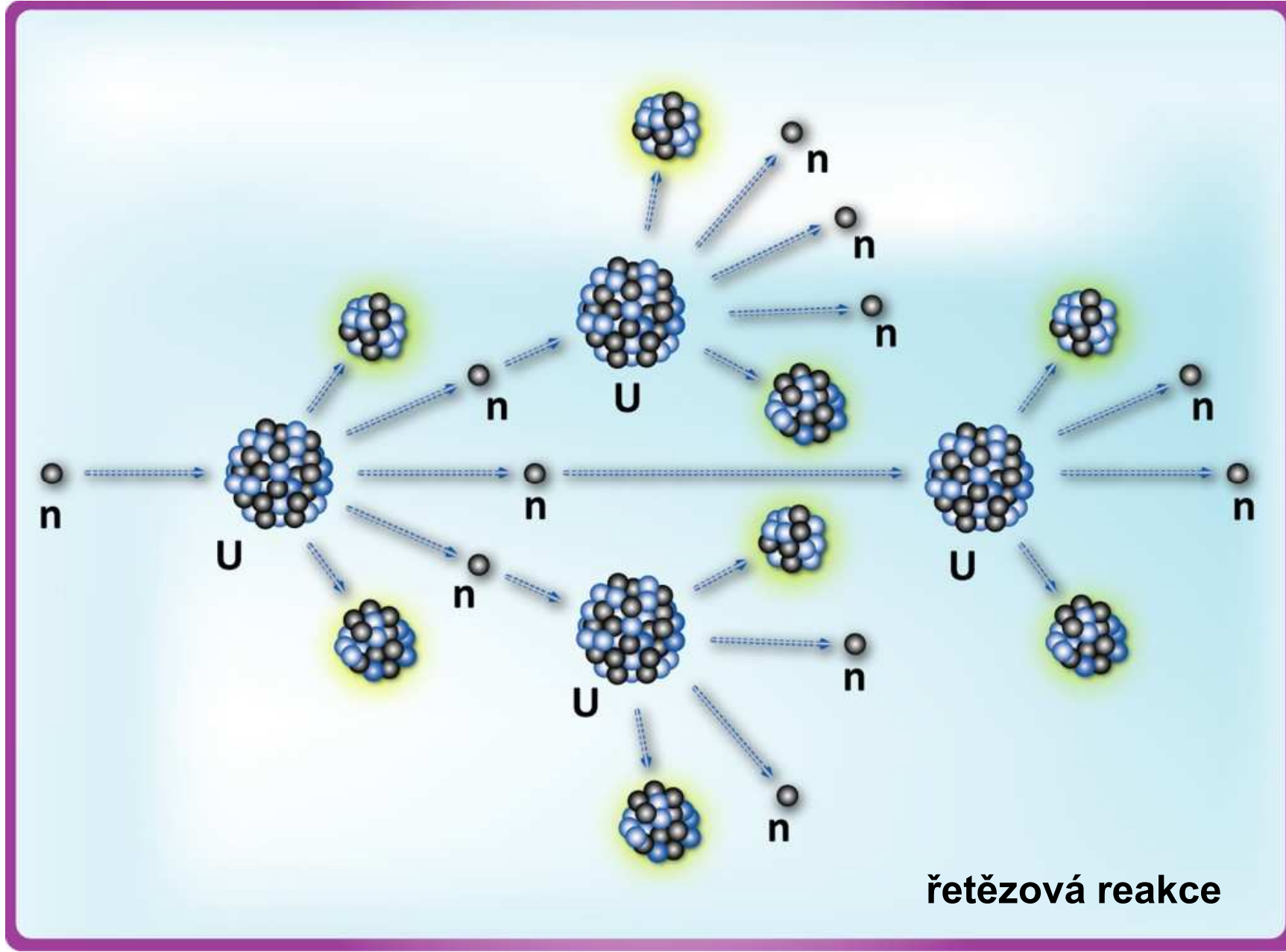


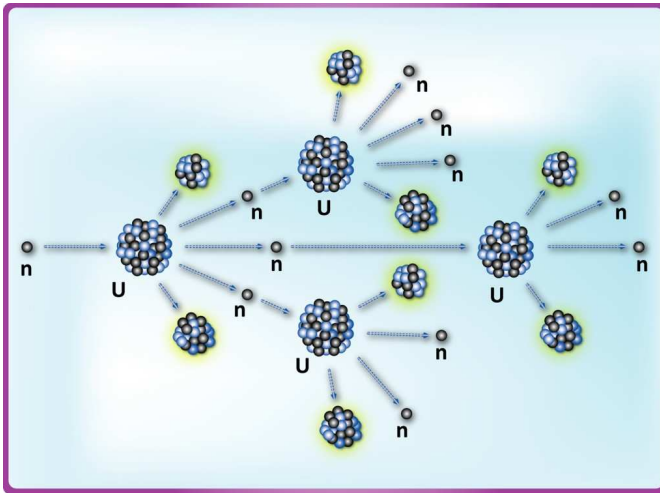
Schéma zobrazuje ideální případ. Ve skutečnosti se mnoho neutronů ztratí – uletí z reakční zóny nebo zinteraguje jiným způsobem.

Jaderné štěpení

Počet zužitkovaných neutronů pro další štěpení lze vyjádřit číslem:

$$\vartheta = P_{\text{palivo}} \cdot P_{\text{stepeni}} \cdot k - P_{\text{absorb}} - P_{\text{utek}}$$

kde P_{palivo} je pravděpodobnost, že emitovaný neutron zasáhne jádro uranu, P_{stepeni} pravděpodobnost, že v takovém případě dojde k štěpné reakci a k je průměrný počet neutronů emitovaných při jedné reakci (2 až 3). P_{absorb} je pak pravděpodobnost toho, že se neutron chytí v něčem jiném, než v palivu a P_{utek} je pravděpodobnost opuštění aktivní zóny.



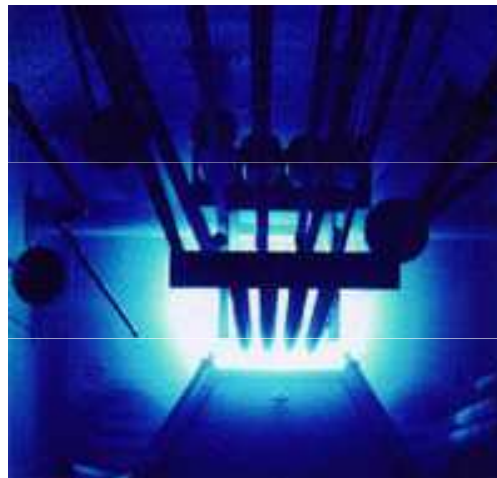
$$\vartheta < 0$$

podkritický stav – reakce má tendenci se zastavit



$$\vartheta = 0$$

kritický stav – reakce běží a lze ji kontrolovat

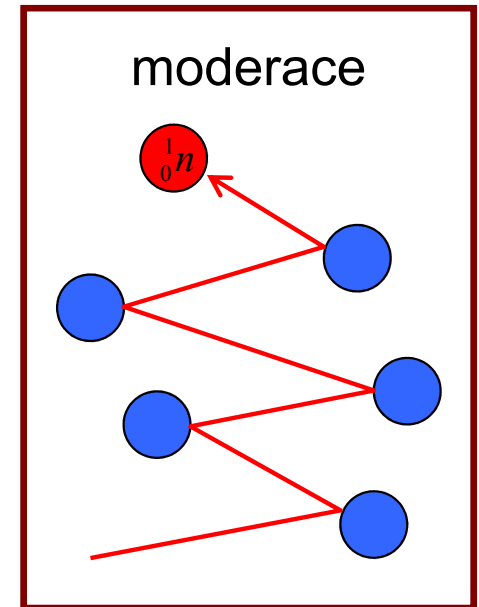
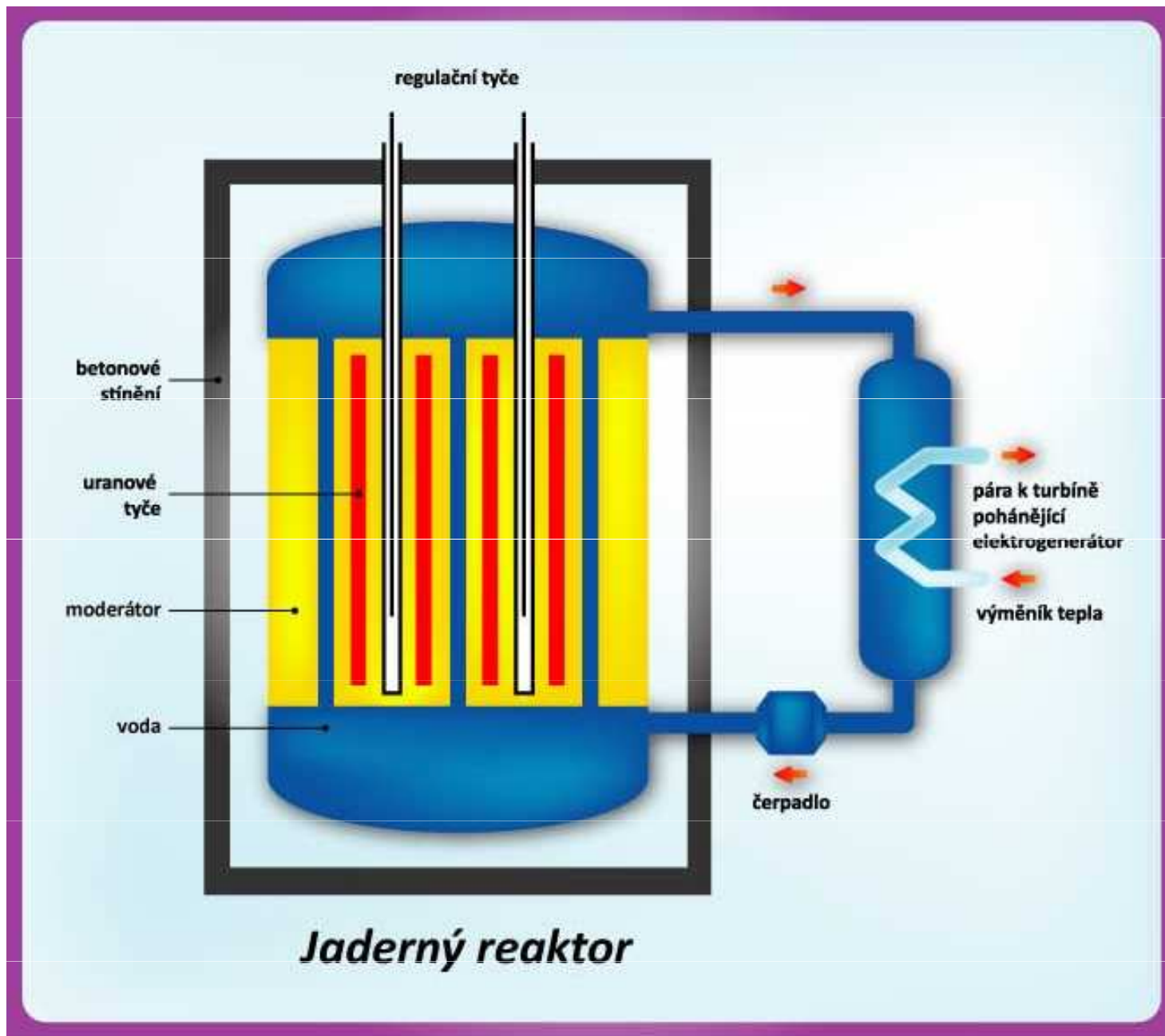


$$\vartheta > 0$$

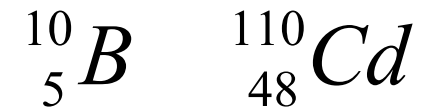
nadkritický stav – rychlost reakce exponenciálně vzrůstá



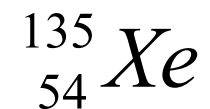
Jaderné štěpení



pohlcování neutronů



reaktorový jed



Jaderné reaktory v ČR



Školní reaktor FJFI ČVUT



Výzkumné reaktory LVR-15 a LVR-0 v ÚJV Řež

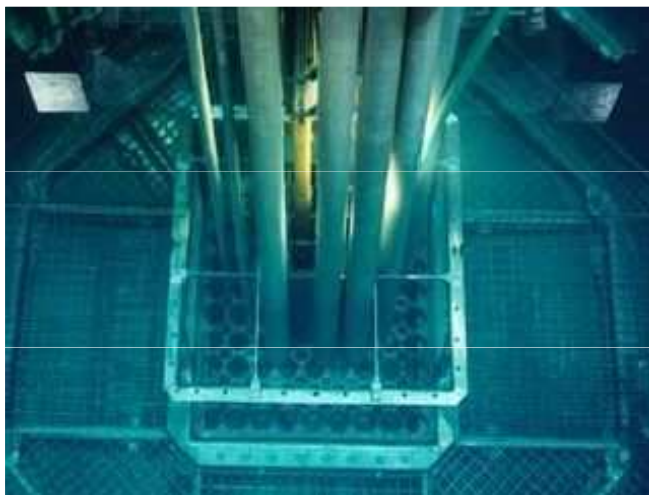


JE Temelín



JE Dukovany

Školní reaktor FJFI VR-1



| | |
|-------------------------|--|
| Typ: | lehkovodní, bazénový |
| Nominální výkon: | 1kW (tepelný), krátkodobě 5kW |
| Palivo: | Typ IRT-4M, obohacení do 20 % uranem 235 |
| Rozměry nádob: | vnitřní průměr 2300 mm, výška 4720 mm, tloušťka stěny 15 mm |
| Stínění : | boční: demineralizovaná voda min. 850 mm + těžký beton 950 mm nad aktivní zónou: 3000 mm vrstva demineralizované vody |
| Provozovatel: | FJFI -katedra jaderných reaktorů |