

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta pedagogická

Katedra chemie

Atomové jádro a jaderné reakce

Bakalářská práce

*Andrea Lecjaksová*

*B1001 Chemie se zaměřením na vzdělávání*

Plzeň 2013

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

Plzeň, 29. července 2013

.....  
vlastnoruční podpis

Ráda bych poděkovala PaedDr. Vladimíru Sirotkovi, CSc, za odborné vedení bakalářské práce, trpělivost, ochotu a cenné rady, které mi poskytoval při konzultacích. Také bych chtěla poděkovat ostatním zaměstnancům Pedagogické fakulty Západočeské univerzity v Plzni za získání všech odborných znalostí, které mi předali během celého studia. Nemalé díky patří také mé rodině a nejbližším, kteří mi pomáhali během celého studia.

## OBSAH

1	ÚVOD .....	- 1 -
2	HISTORIE ATOMU .....	- 2 -
2.1	POJEM ATOM .....	- 2 -
2.1.1	Thomsonův model .....	- 2 -
2.1.2	Rutherfordův model .....	- 2 -
3	STRUKTURA ATOMU .....	- 4 -
3.1	ZÁKLADNÍ POJMY .....	- 4 -
3.2	ELEMENTÁRNÍ ČÁSTICE .....	- 5 -
3.2.1	Lehké částice (leptony).....	- 6 -
3.2.2	Středně těžké částice (mezony) .....	- 6 -
3.2.3	Těžké částice (baryony).....	- 7 -
3.2.4	Kvarky .....	- 7 -
3.3	ATOMOVÉ JÁDRO .....	- 7 -
3.3.1	Hmotnostní úbytek jádra .....	- 8 -
3.4	MODELÝ ATOMOVÉHO JÁDRA.....	- 8 -
3.4.1	Kapkový model jádra .....	- 8 -
3.4.2	Slupkový model jádra.....	- 8 -
3.4.3	Další modely jádra.....	- 9 -
4	RADIOAKTIVITA .....	- 10 -
4.1	DRUHY RADIOAKTIVNÍHO ZÁŘENÍ .....	- 10 -
4.1.1	Alfa záření .....	- 11 -
4.1.2	Beta záření .....	- 11 -
4.1.3	Gama záření.....	- 12 -
4.2	PŘIROZENÁ RADIOAKTIVITA .....	- 12 -
4.3	UMĚLÁ RADIOAKTIVITA.....	- 13 -
4.4	ROZPADOVÉ ŘADY .....	- 13 -
4.5	POLOČAS ROZPADU .....	- 15 -
4.6	JADERNÁ GEOCHRONOLOGIE .....	- 16 -
4.7	MĚŘENÍ RADIOAKTIVITY .....	- 17 -
5	JADERNÉ REAKCE.....	- 19 -
5.1	ENERGETIKA JADERNÉ REAKCE .....	- 20 -
5.2	RYCHLOST A VÝTĚŽEK JADERNÉ REAKCE.....	- 20 -
5.3	REAKCE NEUTRONŮ .....	- 21 -
5.4	ŠTĚPENÍ JÁDRA A JADERNÁ ENERGIE .....	- 21 -
5.4.1	Historie štěpné reakce .....	- 22 -
5.4.2	Fenomén Oklo .....	- 23 -
5.5	TERMONUKLEÁRNÍ SYNTÉZA .....	- 24 -
5.5.1	Využití termonukleární syntézy .....	- 25 -
5.5.2	Tokamak .....	- 25 -
6	JADERNÉ REAKTORY .....	- 27 -
6.1	ČÁSTI JADERNÉHO REAKTORU .....	- 27 -
6.1.1	Palivo.....	- 27 -
6.1.2	Moderátor .....	- 28 -
6.1.3	Chladicí medium .....	- 29 -
6.1.4	Regulační tyče .....	- 29 -
6.2	TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ.....	- 29 -
6.2.1	Lehkovodní reaktory (tlakovodní).....	- 29 -
6.2.2	Varné reaktory .....	- 30 -
6.2.3	Těžkovodní reaktor.....	- 31 -

---

6.2.4	Plynem chlazené grafitové reaktory .....	- 31 -
6.2.5	Grafitové reaktory chlazené vodu .....	- 32 -
6.2.6	Rychlé reaktory .....	- 33 -
7	JADERNÁ ENERGIE.....	- 34 -
7.1	JADERNÉ ELEKTRÁRNY .....	- 34 -
7.2	HISTORICKÝ VÝVOJ JADERNÉ ELEKTRÁRNY .....	- 37 -
7.3	JADERNÉ ELEKTRÁRNY V ČR.....	- 37 -
7.4	JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN .....	- 38 -
7.5	LIKVIDACE JADERNÉHO ODPADU .....	- 39 -
7.5.1	Uložení nízkoaktivního odpadu v ČR .....	- 39 -
7.5.2	Uložení vysokoaktivního odpadu v ČR.....	- 40 -
7.5.3	Průběh ukládání vysoaktivního odpadu.....	- 40 -
7.5.4	Jaderný účet.....	- 41 -
7.6	JADERNÁ BEZPEČNOST .....	- 42 -
8	TĚŽBA URANU V ČECHÁCH .....	- 44 -
9	ZÁVĚR .....	- 47 -
10	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	- 48 -
11	SEZNAM TABULEK.....	- 49 -
12	SEZNAM LITERATURY .....	- 50 -
13	RESUMÉ.....	- 53 -

## 1 ÚVOD

19. století se nazývá stoletím páry. Vzhledem k významným objevům by se 21. století mohlo nazývat stoletím atomu. Již dávno se tušilo, že atom v sobě skrývá něco neobvyklého. Ovšem až ve 2. polovině 20. století se začala energie uložená v atomovém jádře využívat. Od této doby její výzkum a využití rychle roste. Energie z atomového jádra je naše budoucnost, neboť zásoby uhlí, zemního plynu či ropy se stále zmenšují. Je pravda, že nové zdroje uhlí nebo ropy jsou stále objevovány. Tyto zdroje však budou spotřebovány odhadem do 50 let. Proto se postupně přechází z těchto surovin na suroviny jiné např.: uran. Těžba uranových rud a následné využívání štěpných reakcí v jaderných elektrárnách je náročnější tím, že může ohrozit i lidské zdraví v podobně ozáření.

V práci je podrobně popsána struktura atomu s důrazem na atomové jádro, elementární částice a reakce, které v atomovém jádře probíhají. Dále práce seznamuje s radioaktivitou, jadernými reakcemi, podrobněji o štěpení jádra nebo termonukleární syntéze. Část je také věnována využití jaderných reaktorů, provozu jaderné elektrárny a likvidaci jaderného odpadu. Je také pojednáno o těžbě uranu v Čechách.

## 2 HISTORIE ATOMU

### 2.1 Pojem atom

S pojmem atom se setkáváme již v 5. století př. n. l. Řeční atomisté Démokritos a Leukippos popsali filozofickou představu, že hmota nejde do nekonečna dělit. Částice, které jsou dále nedělitelné, nazval atomy. Návrat k atomům pokračoval v 19. století, kdy John Dalton popsal atomovou teorii, která je shrnuta do těchto bodů:<sup>1,2</sup>

1. Prvky jsou složeny z malých, dále nedělitelných částic, které se nazývají atomy.
2. Atomy téhož prvku jsou stejné, atomy různých prvků se liší.
3. V průběhu chemických dějů se atomy spojují, oddělují a přeskupují. Nemohou však vzniknout ani zaniknout.
4. Slučováním atomů dvou či více prvků vznikají chemické sloučeniny, ve kterých se slučují jen celistvé počty jednotlivých atomů.

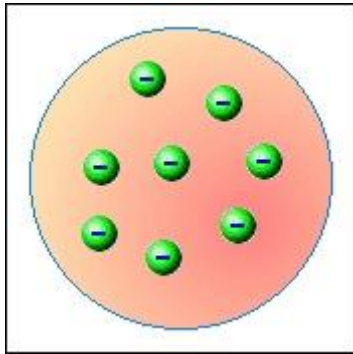
Roku 1897 objevil Joseph John Thomson elektron. Díky tomuto objevu se vyvíjely různé představy a modely atomu.<sup>1</sup>

#### 2.1.1 Thomsonův model

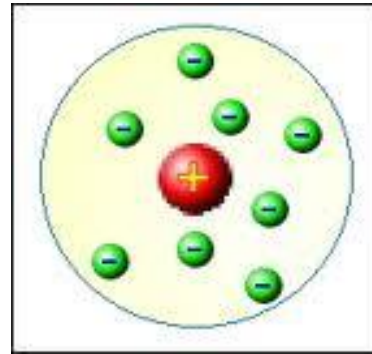
Roku 1898 popsal J. J. Thomson první model atomu. Popisoval atom jako kladně nabitou homogenní kouli, v níž jsou rovnoměrně rozptýlené elektrony. Navenek působí atom jako neutrální. Tento model se též nazývá jako pudingový, neboť Thomson popisoval model jako puding, do kterého jsou vmíchány rozinky, které představují elektrony.<sup>3</sup>

#### 2.1.2 Rutherfordův model

Roku 1911 popsal E. Rutherford model atomu. Popřel předchozí model díky pokusům, které prováděl např. s rozptylem  $\alpha$  záření na kovovou fólii. Většina prošla beze změny, pouze malá část se odrazila. Z výsledků vyplývá, že atom má malé těžké kladné jádro, okolo kterého obíhají záporně nabitě elektrony. Elektrony se pohybují v elektronovém obalu, které je rozměrově větší (asi 10 000x) než jádro atomu. Téměř veškerá hmotnost atomu je soustředěna do jádra.<sup>1,3</sup>



Obr. 1 – Thomsonův model<sup>3</sup>



Obr. 2 - Rutherfordův model<sup>3</sup>

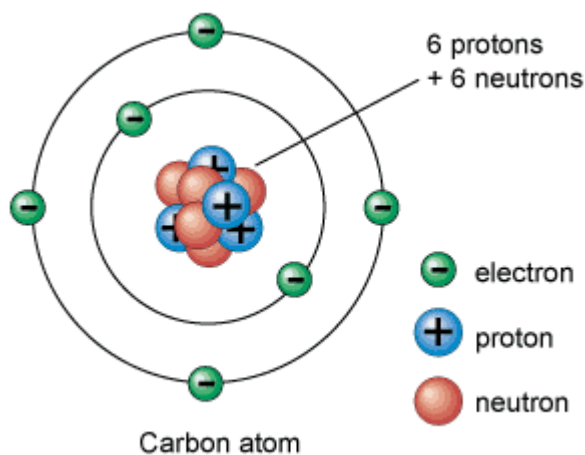


### 3 STRUKTURA ATOMU

Atom se skládá ze dvou částí - atomového jádra a atomového obalu. Navenek působí elektroneutrálně. Atomové jádro je vnitřní část atomu s kladným nábojem. Jeho rozměry jsou nepatrné, a to s průměrem okolo  $10^{-15}$  m. Hmotnost jádra je přes 99 % celkové hmotnosti atomu. Jádro je tvořeno protony a neutrony, které se společně nazývají nukleony. Protony nesou kladný náboj, neutrony jsou bez náboje. Síly, které působí mezi protony a neutrony, se nazývají jaderné síly. Atomový obal se skládá z elektronů. Významná charakteristika atomu je protonové číslo. Zapisuje se jako levý dolní index u chemické značky prvku. Protonové číslo udává pořadí prvku v periodické soustavě prvků.<sup>4,5</sup>

Tabulka 1 - Elementární částice atomu<sup>5</sup>

Elementární částice	Objevitel	Náboj [C]	Hmotnost [kg]
Proton p	Rutherford (1920)	$1,60210 \cdot 10^{-19}$	$1,67252 \cdot 10^{-27}$
Neutron n	Chadwick (1932)	0	$1,67482 \cdot 10^{-27}$
Elektron e	Thomson (1897)	$-1,60210 \cdot 10^{-19}$	$9,1091 \cdot 10^{-31}$



Obr. 3 - Struktura atomu uhlíku<sup>6</sup>

#### 3.1 Základní pojmy<sup>1,2,5,7,8</sup>

Atom - částice hmoty, která se skládá z atomového jádra obsahující protony a neutrony z atomového obalu obsahující elektrony

Atomové jádro - vnitřní část atomu, která je kladně nabitá a představuje většinou hmotnosti celého atomu, obsahuje protony a neutrony

Protony  $p$  - kladně nabitá částice nacházející se v atomovém jádře

Neutrony  $n$  - částice bez náboje nacházející se v atomovém jádře

Protonové (atomové) číslo  $Z$  - udává počet protonů v jádře daného atomu, zapisuje se dolů před značkou prvku  ${}_Z X$

Nukleonové (hmotnostní) číslo  $A$  - udává počet nukleonů (protony a neutrony) v atomovém jádře, zapisuje se vlevo nahoru  ${}^A X$

Neutronové číslo  $N$  - udává počet neutronů v jádře daného atomu, určuje se jako rozdíl počtu nukleonů a protonů ( $N = A - Z$ )

Jaderné síly - síly, které umožňují vzájemnou soudržnost kladně nabitých protonů a elektroneutrálních neutronů

Nuklidy - skupina atomů, které mají stejné protonové a nukleonové číslo

Izotopy - soubor nuklidů jednoho daného prvku, které mají stejné protonové číslo, ale jiné nukleonové (liší se v počtu neutronů)

Elektrony - záporně nabitá částice nacházející se v atomovém obalu

Elektronová konfigurace - udává uspořádání elektronů v elektronovém obalu

Hlavní kvantové číslo  $n$  - udává energii a velikost orbitalu, nabývá hodnot kladných celých čísel

Vedlejší kvantové číslo  $l$  - udává orbitální moment hybnosti elektronu, kterým určuje tvar a energii atomového orbitalu, nabývá hodnot od 0 do  $n - 1$

Magnetické kvantové číslo  $m$  - udává magnetický moment hybnosti elektronu a prostorovou orientaci atomového orbitalu, nabývá hodnot od  $-l$  do  $+l$

Spinové kvantové číslo  $s$  - určuje rotaci elektronu, nabývá hodnot  $+1/2$  a  $-1/2$

### 3.2 Elementární částice

Pojem elementární částice vyjadřuje útvar, který se dále nedělí a nemá svoji vnitřní strukturu. Všechny názory na tyto částice se měnily s postupem času

a s rozvojem fyziky. Většina z nich byla prozkoumána ve 20. století, ovšem i v současné době jsou objevovány další.

V současné době známe okolo 100 různých částic a k nim příslušné antičástice. Antičástice se vyznačují stejnou hmotností, dobou života, spinem, velikostí elektrického náboje ovšem opačným znaménkem. Částice i jejich antičástice se přeměňují na lehčí částice, případně fotony.

Částice lze dělit různými způsoby. Podle hmotnosti rozlišujeme: lehké částice, středně těžké částice a těžké částice.<sup>2,7</sup>

### 3.2.1 Lehké částice (leptony)

Hmotnost těchto částic je rovna nebo menší hmotnosti elektronu. Do této skupiny patří fotony, neutrina, elektrony a miony. Jejich spinové číslo je  $J = \frac{1}{2}$ .

Fotony jsou nepárové částice, které nemají klidovou hmotnost. Neutrina jsou velice důležitá při radioaktivních přeměnách. Hmotnost neutrin je velice malá, nemají elektromagnetické pole a náboj. Z důvodu nízké hmotnosti, jsou tyto částice velice dobře pronikavé. Elektrony se dělí na záporné elektrony  $e^-$  tzv. negatrony a kladné elektrony  $e^+$  neboli pozitrony. Negatrony byly objeveny jako první a mohou existovat volně, jsou to velice stabilní částice. Pozitron je antičásticí k negatronu. Pozitron je také velmi stabilní částice ovšem pouze ve vakuu. Společně mohou vytvořit útvar, který je velice podobný atomu vodíku, který se nazývá pozitronium, kde oba elektrony rotují kolem sebe. Miony se svojí hmotností mohou řadit do skupiny středně těžkých částic. Avšak pro jejich vlastnosti jsou zařazovány mezi lehké. Jejich hmotnost je asi 200x větší než hmotnost elektronu.<sup>2</sup>

### 3.2.2 Středně těžké částice (mezony)

Do skupiny středně těžkých částic patří ty částice, které mají větší hmotnost než elektrony avšak menší než nukleony. Spinové číslo je  $J = 0$ .

Mezony  $\pi$  (piony) se vyskytují jako částice neutrální nebo jako nabitě částice a antičástice. Částice, které jsou těžší než piony, se nazývají mezony K (kaony). Vyskytují se také ve formě neutrálních a nabitých částic.<sup>2</sup>

### 3.2.3 Těžké částice (baryony)

Baryony mají spinové číslo  $J = \frac{1}{2}$ . Patří sem nukleony, hyperony, jádra a hyperjádra. Nukleony se dělí na protony a antinukleony. Proton má téměř stejnou hmotnost jako neutron. Mezi antinukleony patří antiproton a antineutron. Mezony a baryony se nazývají společně jako hadrony. Částice, které jsou těžší než nukleony, se nazývají hyperony. Nejtěžšími útvary jsou jádra a hyperjádra. Jde o atomová jádra.<sup>2</sup>

### 3.2.4 Kvarky

Další zjednodušenou klasifikací jsou popsány kvarky. Tyto částice tvoří trojice, ze kterých jsou složeny hadrony s vnitřní strukturou např. protony. Je známo celkem 6 druhů kvarků (viz tab. 2). Kvarky jsou rozděleny pomocí termínu vůně. Jsou známy kvarky  $d, u, s, c, b, t$ . Kvarky  $s, c, b$  a  $t$  jsou zajímavé tím, že mají určité vlastnosti. Mezi ty patří podivnost (kvantové číslo  $S$ ), půvab (kvantové číslo  $C$ ), krása (kvantové číslo  $B$ ) a pravda (kvantové číslo  $T$ ). Toto označení nevyjadřuje konkrétní vlastnosti kvarků, slouží pouze k lepšímu vysvětlení a rozdělení.<sup>2,7</sup>

Tabulka 2 - Vlastnosti kvarků<sup>7</sup>

Kvark	Vůně	Hmotnost ( $u$ )	$Z$	$S$	$C$	$B$	$T$
$d$	Down	0,0086	$-1/3$	0	0	0	0
$u$	Up	0,0054	$2/3$	0	0	0	0
$s$	Strange	0,17	$-1/3$	-1	0	0	0
$c$	Charm	1,61	$2/3$	0	1	0	0
$b$	Bottom	4,56	$-1/3$	0	0	1	0
$t$	Top	193	$2/3$	0	0	0	1

( $Z$ -protonové číslo, vlastnosti kvarků:  $S$ -strangesess-podivnost,  $C$ -charm-půvab,  $B$ -beauty-krása,  $T$ -truth-pravda)

## 3.3 Atomové jádro

Atomové jádro je centrem téměř veškeré hmoty. Působí zde silné jaderné síly, které umožňují vzájemnou soudržnost protonů a neutronů. Jaderné síly mají velmi krátký dosah, přibližně  $10^{-15}$  m.<sup>4,7</sup>

### 3.3.1 Hmotnostní úbytek jádra

Hmotnost atomového jádra v klidu je dána jako součet hmotnosti všech nukleonů v atomu zmenšený o tzv. hmotnostní úbytek jádra  $\Delta m$ .<sup>7</sup>

$$\Delta m = m_{\text{teoretická}} - m_{\text{experimentální}}$$

Vazebná energie jádra je energie, která vzniká při rozložení jádra na jednotlivé nukleony. Je závislá na nukleonovém čísle  $A$ .

Poloměr atomového jádra závisí na počtu nukleonů. Lze ho také definovat jako vzdálenost od středu atomu, kde působí jaderné síly. Vyjadřují se v jednotkách fm ( $10^{-15}$  m). Vztah závislosti poloměru jádra na počtu nukleonů byl získán empiricky<sup>4,7</sup>

$$r = r_0 A^{1/3},$$

kde  $r_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$  m.

Nejjednodušší představa o tvaru jádra je koule.<sup>5</sup>

## 3.4 Modely atomového jádra

V jádře působí různé síly, které musí být známy, aby bylo možno popsat sestavu protonů a neutronů. Dosud nebyl popsán ani vytvořen univerzální model, který by popisoval chování a vlastnosti jakékoliv jádra. Zatím známe pouze modely, které popisují jen určité jaderné jevy.<sup>4,7</sup>

### 3.4.1 Kapkový model jádra

Tento model popisuje systém nukleonů v atomovém jádře, který si můžeme představit jako systém molekul v kapce nestlačitelné kapaliny. Tento typ modelu uvádí, že objem jádra je úměrný počtu nukleonů v jádře (protony + neutrony), hustota jádra je konstantní a nezávislá na rozměrech jádra. Uplatňují se 3 nejdůležitější vlivy: objemová (kondenzační) energie, povrchová energie a korekce na coulombické odpuzování protonů.<sup>4,7</sup>

### 3.4.2 Slupkový model jádra

Podle slupkového modelu (též hladinový model) lze výstavbu atomového jádra přirovnat k výstavbě elektronového obalu. Jádro má podle tohoto modelu zákonitou

strukturu. Atomová jádra jsou mimořádně stabilní se sudým počtem nukleonů např.:  ${}^4_2\text{He}$ . Oproti kapkovému modelu jsou vzájemné interakce malé nebo žádné.<sup>4,7</sup>

### 3.4.3 Další modely jádra

Kolektivní model kombinuje kapkový a slupkový model a je založený hlavně na kvantové mechanice. Jádro je neustále vystaveno působení sil z nukleonů ze slupek např. vzácných zemin, které ovlivňují tvar jádra.

Optický model vysvětluje atomové jádro jako polopropustnou kouli s optickými vlastnostmi pro vlny dopadajících nukleonů, např. láme, pohlcuje a odráží vlny dopadajících nukleonů.<sup>4,7</sup>

## 4 RADIOAKTIVITA

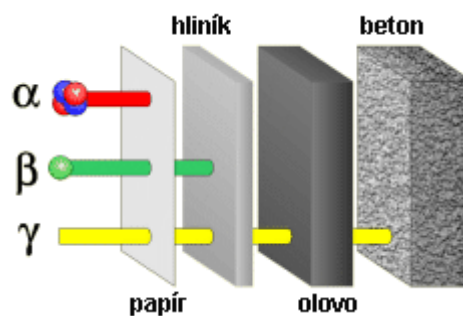
Proces samovolné přeměny jader nuklidů na jádra jiná za současného vysílání radioaktivního záření se nazývá radioaktivita. Radioaktivitu dělíme na přirozenou a umělou. Přirozená radioaktivita probíhá samovolně běžně v přírodě a také v živých tkáních. Pro vznik umělé radioaktivity je podmínkou vnější zásah, který způsobí přeměnu stabilního atomového jádra. Vnější zásah může být např. ostřelování částicemi  $\alpha$ . Nová jádra, která byla takto uměle připravena, se běžně v přírodě nevyskytují.

Je známo přibližně 226 stálých nuklidů z celkových 2000. Při radioaktivní přeměně vzniká několik druhů záření. Radioaktivní prvky se mohou přeměňovat na jiné radioaktivní prvky, až vznikne stabilní prvek. V přírodě se běžně vyskytuje v takovém množství, které není nebezpečné pro život.<sup>4,7,9</sup>



Obr. 4 - Označení radioaktivity<sup>10</sup>

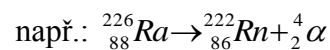
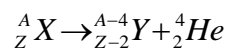
### 4.1 Druhy radioaktivního záření



Obr. 5 - Pronikavost jednotlivých druhů záření<sup>11</sup>

#### 4.1.1 Alfa záření

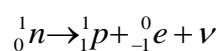
Záření  $\alpha$  je proud rychle letících jader atomu  ${}^4_2\text{He}$ . Jedná se o slabší jaderné záření, které může být zastaveno listem papíru. Alfa částice mají silné ionizační účinky, ovšem pohybují se velmi pomalu a jsou velmi málo pronikavé. Tento zářič může být velmi nebezpečný při vdechnutí nebo požití, neboť začne působit uvnitř organismu. Toto záření se vychyluje jak v magnetickém tak i v elektrickém poli. Představuje svazek letících jader atomu helia s dvěma protony a dvěma neutrony a je tedy kladně nabitě.<sup>2,7,12</sup>



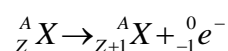
#### 4.1.2 Beta záření

Částice, které jsou vysílány do prostoru při beta záření, se nazývají elektrony nebo pozitrony. Tyto částice se pohybují velmi rychle, mají vyšší pronikavost než alfa částice. Beta záření můžeme zastavit pomocí kovového plechu širokého 1 mm nebo 1 m vzduchu. Beta záření je dvojího druhu  $\beta^-$  a  $\beta^+$ .<sup>5,13,14</sup>

Záření  $\beta^-$  je tvořené rychle letícími elektrony, které vznikají rozpadem neutronu a vylétají z jádra atomu. Toto záření je součástí přirozené radioaktivity. Nastává při nadbytku neutronů v jádře, kdy se neutron přemění na proton za současného vysílání záporného elektronu a elektronového neutrina<sup>5,13,14</sup>

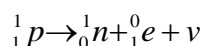


Při tomto druhu záření vzniká prvek, který má o jeden proton navíc. Z atomu vylétne elektron s elektronovým antineutrinem.<sup>5,13,14</sup>

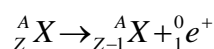


Záření  $\beta^+$  je tvořené kladně nabitými pozitrony  $e^+$ , které vznikají rozpadem protonu. Pozitron je antičástice elektronu. Nastává při nadbytku protonů v jádře. Ovšem takové jádro se běžně nevyskytuje, je nutné ho připravit uměle. Neutron zůstává v jádru na rozdíl od pozitronu, který jádro opouští jako částice  $\beta^+$  dle rovnice





Při tomto druhu záření vzniká prvek, který má o jeden proton méně.<sup>5,13,14</sup>



### 4.1.3 Gama záření

Gama záření je proud rychle letících fotonů. Reakce fotonů se také nazývají jako fotojaderné reakce. Foton, který aktivuje vytržení jednoho nebo více nukleonů z terčového jádra, musí mít mnohem větší energii, než jakou vazebnou energii mají emitované částice. Tyto reakce jsou endoergické. Při tomto záření nedochází ke změně jádra.<sup>4,7</sup>

## 4.2 Přirozená radioaktivita

Podmínkou přirozené radioaktivity je přítomnost nestabilních nuklidů v přírodě a jejich aktivita, která je závislá na přeměnové konstantě. Radioaktivita má významné postavení v tepelné bilanci Země a v zásobách geotermální energie. Výchozími nuklidy tzv. přirozených radioaktivních přeměnových řad jsou radionuklidy  ${}^{232}\text{Th}$ ,  ${}^{235}\text{U}$  a  ${}^{238}\text{U}$ .

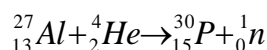
V roce 1896 byla Henrym Becquerelem objevena radioaktivita. Zjistil, že soli uranu vysílají určité záření působící na fotografickou desku. Jedná se o spontánní děj, který nelze ovlivnit. Při jeho přednáškách na pařížské akademii to vysvětlil na síranu uranylo-draselném  $\text{K}_2(\text{UO}_2)(\text{SO}_4)_2$ , který po zásahu slunečním světlem, vyzařuje paprsky, procházející hmotou a po jejich zasažení zčernají fotografické desky. Tento jev probíhá i ve tmě, tudíž zde není závislost na kvalitě ani intenzitě světla. Paprsky jsou vysílány samovolně bez vnějších faktorů a nelze to ovlivnit chemickými nebo fyzikálními vlastnostmi této chemické látky. V roce 1900 byla tato vlastnost zjištěna u thoria, polonia a radia.<sup>5,15</sup>

Jádra těchto prvků, které vykazují přirozenou radioaktivitu, podléhají samovolnému procesu, při kterém vznikají atomová jádra jiných prvků. Z hlediska fyzikálních vlastností jsou nuklidy vzniklé přirozenou cestou stejné jako uměle připravené.<sup>5,15,16</sup>

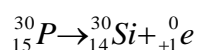
Všechny tyto jevy a situace objasnili v roce 1898 Marie Curie-Sklodowská a Pierre Curie. Roku 1903 dostali manželé Nobelovu cenu za fyziku. Roku 1911 byla Marie Curie-Sklodowska oceněna Nobelovou cenou za chemii.<sup>16,17</sup>

### 4.3 Umělá radioaktivita

Umělá radioaktivita byla objevena v roce 1934 manželé Frédéricem a Iréne Joliot-Curie. V roce 1935 za tento objev získali Nobelovu cenu za chemii. Zjistili, že ostřelováním hliníku  ${}^{27}_{13}\text{Al}$  částicemi  $\alpha$  vznikne nový v přírodě neexistující nestabilní nuklid fosforu  ${}^{30}_{15}\text{P}$  a neutron podle reakce:



Fosfor  ${}^{30}_{15}\text{P}$  má poločas přeměny přibližně 135 sekund. Při jeho přeměně se uvolňuje pozitron, což je typické pro umělou radioaktivitu.



V současné době se umělé radionuklidy připravují průmyslově ostřelováním atomových jader nabitými částicemi z urychlovačů anebo neutrony z jaderných reaktorů. Využití umělých radionuklidů je velmi široké, např. ve vědě, v medicíně atd. Ostřelováním jader neutrony a dalšími částicemi byly získány radionuklidy s protonovým číslem větším než 92, které se nazývají tzv. transurany. Radioaktivní záření negativně působí na organismus. V současné době je okolo 1500 uměle připravených nuklidů.<sup>4,18</sup>

### 4.4 Rozpadové řady

Rozpadovou řadu tvoří skupina radioaktivních nuklidů. Z primárního nuklidu dochází postupnými přeměnami  $\alpha$  a  $\beta$  ke snižování protonového čísla ( $Z$ ) a nukleonového čísla ( $A$ ), dokud nevznikne stabilní nuklid. Zářeními  $\alpha$  se rozpadají jádra těžkých jader, tím byla popsána neptuniová řada podle  ${}^{237}\text{Np}$ , který má poločas rozpadu  $2,16 \cdot 10^6$  roku. Neptuniová řada je zajímavá tím, že žádný její člen není v přírodě až na poslední člen řady, kterým je bizmut.

V minerálech a horninách, které obsahují uran a thorium, probíhají tři přirozeně rozpadové řady a jedna uměle připravená:<sup>4,7</sup>

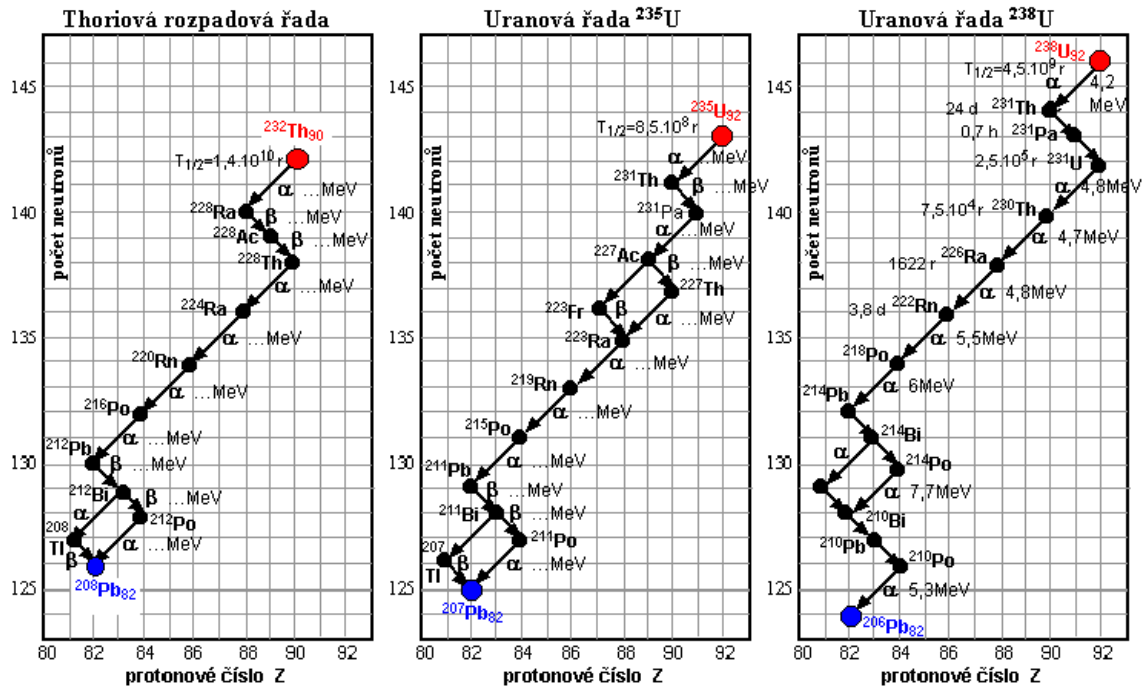
Tabulka 3 - **Rozpadové řady**<sup>19</sup>

Název	Počáteční nuklid	Konečný nuklid	Nukleonové číslo
Uranová	$^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}$	$A = 4n + 2$
Aktinuranová	$^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}$	$A = 4n + 3$
Thoriová	$^{232}\text{Th}$	$^{208}\text{Pb}$	$A = 4n$
Neptuniová	$^{237}\text{Np}$	$^{209}\text{Bi}$	$A = 4n + 1$

První tři řady končí stabilním izotopem olova a vyskytuje se v ní určitý izotop radonu. Uměle připravená neptuniová řada, která ovšem izotop radonu neobsahuje, končí nuklidem  $^{209}\text{Bi}$ .

Některých nuklidů z radioaktivních řad se využívá například v geochemii nebo archeologii k určování stáří úbytkem aktivity určitého členu.<sup>7,19</sup>

V thoriové rozpadové řadě dochází k 7 přeměnám  $\alpha$  a 5  $\beta$ . V uranové rozpadové řadě dochází k 9 přeměnám  $\alpha$  a 6  $\beta$ . V aktinuranové řadě dochází k 9  $\alpha$  a 7  $\beta$ . V uměle připravené neptuniové řadě dochází k 8  $\alpha$  a 5  $\beta$ .<sup>1</sup>


 Obr. 6 - Rozpadové řady<sup>20</sup>

## 4.5 Poločas rozpadu

Poločas rozpadu je doba, za kterou se přemění právě polovina částic. Byl zjištěn experimentálně. Důležitá veličina je rozpadová konstanta  $\lambda$ . Tato konstanta představuje pravděpodobnost přeměny, kdy se daný atom rozpadne. Vyjadřuje se vztahem

$$\lambda = -\frac{dN}{dt} \cdot \frac{1}{N},$$

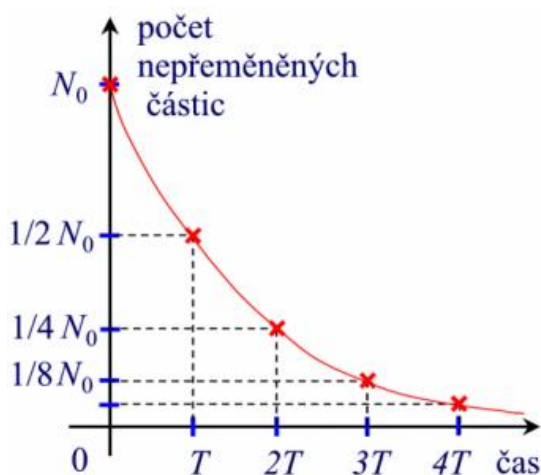
kde  $N$  je počet radioaktivních atomů,  $t$  je čas.

Poločas rozpadu se značí  $T$  a lze ho vyjádřit vztahem:<sup>2,7</sup>

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda T},$$

z toho

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Obr. 7 - Závislost počtu přeměněných jader na čase<sup>21</sup>

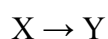
Pro každý izotop je jeho rozpadová konstanta individuální. Radioaktivní nuklidy se dělí na radionuklidy s krátkou dobou života (např. polonium  $^{212}\text{Po}$  a thorium  $^{223}\text{Th}$ ) a radionuklidy s dlouhou dobou života (např. uran  $^{238}\text{U}$ , thorium  $^{232}\text{Th}$ ). Poločas rozpadu může nabývat hodnot od milisekund až po několik miliard let.<sup>21,22</sup>

Tabulka 4 - Poločas rozpadu<sup>22</sup>

Izotop	Poločas rozpadu
$^8\text{Be}$	$6,7 \cdot 10^{-17}$ s
$^{212}\text{Po}$	0,3 $\mu\text{s}$
$^{35}\text{S}$	87,5 dní
$^{40}\text{K}$	1,26 miliardy let
$^{209}\text{Bi}$	$1,9 \cdot 10^{19}$ let

## 4.6 Jaderná geochronologie

Díky oboru jaderné geochronologie lze určit stáří nerostů. Při přeměně se z nuklidu X stává nuklid Y



Pro určení stáří hornin a minerálů se používá vztahu<sup>7</sup>

$$N_Y = N_X (e^{\lambda t} - 1),$$

kde  $N_X$  je počet původních atomů nuklidu a  $N_Y$  je počet vytvořených atomů nuklidu.

Podmínkou je přítomnost malého množství radioaktivního nuklidu, který má dlouhý poločas rozpadu. Nerost a nuklid musí být přibližně stejně staré. Stáří nerostu se určuje jako doba od vzniku krystalizace nerostu do současnosti. Okamžik krystalizace nerostu je brán jako počátek  $t = 0$ . Stáří nerostu určíme z rovnice. Musí být ovšem znám současný obsah nuklidů:

$$t = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{N_Y}{N_X} + 1 \right)$$

Mezi nejpoužívanější metody patří metoda draslík-argonová a metoda rubidium-stronciová.<sup>7</sup>

#### 4.7 Měření radioaktivity

Radioaktivita je fyzikální jev, který není běžně cítit. Člověk, který pracuje v radioaktivním prostředí, by měl být vybaven speciální ochranou a přístroji, které zjistí přítomnost a intenzitu záření. Tato zařízení jsou velmi drahá, přesto v dnešní době je na trhu velké množství měřidel, které si může pořídit kdokoliv pro osobní informovanost o svém okolí.<sup>23</sup>

Mezi nejznámější zařízení, které mohou změřit ionizující záření, patří dozimetry. Princip dozimetru je ve změně obsahu látek, které obsahuje. Využívají se v lékařství a vojenství. Prstový dozimetr je založen na termoluminiscenci. Mezi další zařízení, která měří ionizační záření, patří scintilační detektor pracující na principu excitace elektronu do vyššího energetického stavu záření. Návrat do původního stavu se projeví jako záblesk. Dalším přístrojem je Geiger-Müllerův počítač, který se skládá z trubice a vláknem obklopeným plynem. Materiálové detektory jako jsou např.: 3D gelové detektory mají poměrně malé využití.<sup>24,25</sup>

Hlavní jednotkou radioaktivity je becquerel  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ . V praxi se používají většinou její násobky dle soustavy SI-kBq, MBq, GBq atd. Dříve se používala jednotka curie (Ci). Vztah mezi těmito jednotkami je<sup>25</sup>

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}.$$

Mezi další jednotky radioaktivity patří Sievert (Sv). 1 Sv vyjadřuje biologické účinky na organismus. Dávka 1 Sv záření má stejné účinky jako dávka 1 Gy. Značka Gy je pro jednotku 1 Gray, který je mírou fyzikálních účinků ionizačního záření. Nevyjadřuje účinek na živé organismy. Další jednotkou je 1 Rem. Je to zastaralá jednotka, která byla nahrazena Sievertem. Vztah mezi těmito jednotkami je<sup>25</sup>

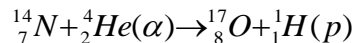
$$100 \text{ Rem} = 1 \text{ Sv.}$$

## 5 JADERNÉ REAKCE

Jaderná reakce je přeměna jádra, která je zapříčiněna vzájemným působením (srážkou) s jiným jádrem nebo elementární částicí. Jaderné reakce se zapisují podobně jako chemické reakce.

terčové jádro + jaderný projektil  $\rightarrow$  jádro (jádra) + menší částice (foton, nukleon)

Jaderné reakce můžeme zapisovat klasicky, např.:



nebo zkrácenou formou  ${}^{14}N(\alpha, p){}^{17}O$ .

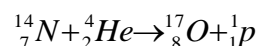
Častější a výhodnější je zkrácená forma.<sup>7</sup>

U jaderných reakcí je důležité psát u značek prvků také počet protonů a nukleonů. Každá jaderná reakce musí splňovat zákon zachování hmotnosti, zákon zachování elektrického náboje a zákon zachování hybnosti a energie.

Jaderné reakce můžeme rozdělit podle vztahu mezi původními a vzniklými jádry.<sup>2,5,7</sup>

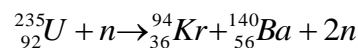
### 1. Transmutace

- z původního jádra vznikne jádro, které není příliš odlišné od původního (viz kap. č. 4 Radioaktivita), např.:



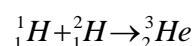
### 2. Štěpení jádra (jaderná fisí)

- z původního těžkého jádra vzniknou dvě velmi podobná jádra ve hmotnostním poměru přibližně 2:3 za současného uvolnění energie, např.:



### 3. Termonukleární syntéza (jaderná fúze)

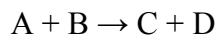
- dvě lehká jádra se spojí za vzniku jádra s větším protonovým číslem (zdroj energie v nitru hvězd). Uvolní se při tom velké množství energie, např.:<sup>7</sup>





## 5.1 Energetika jaderné reakce

Energie jaderné reakce  $Q$  je závislá na tom, zda součet klidových hmotností produktů je větší nebo menší než součet klidových hmotností interagujících částic. Jaderné reakce se dělí podobně jako chemické na exoergické a endoergické reakce. Dále se dělí podle změny hmotnosti nebo teploty. Změna hmotnosti je dána rozdílem hmotností produktů a výchozích látek dle reakce



$$\Delta m = (m(C) + m(D)) - (m(A) + m(B))$$

Je-li  $\Delta m < 0$  a  $Q > 0$  jde o exoergickou reakci, při které vzniká energie. Z důvodu využití vznikající energie je o tyto reakce větší zájem. Druhým typem jsou reakce endoergické kde  $\Delta m > 0$  a  $Q < 0$ , při kterých se musí energie dodat z vnějšího okolí.<sup>7</sup>

## 5.2 Rychlost a výtěžek jaderné reakce

Rychlost jaderné reakce je časová změna počtu atomů nuklidu  $N^*$ , kterých za tu dobu vzniká. Rychlost jaderné reakce je závislá na počtu atomů a počtu projektilů, které dopadají na plošnou jednotku terče. Jedná se o veličinu tok částic  $\Phi$ . Ten velmi ovlivňuje pravděpodobnost, že projektil zasáhne terčové jádro. Tím je ovlivněn vznik nového nuklidu. Rychlost jaderné reakce se vyjádří vztahem<sup>7</sup>

$$R = \frac{dN^*}{dt} = \sigma \phi N$$

Veličina  $\sigma$  je účinný průřez jaderné reakce ( $m^2$ ). Je závislý na energii projektilu a druhu jaderné reakce.<sup>7</sup>

Poměr počtu atomů, které vznikají k počtu projektilů, které dopadají na terč, se nazývá výtěžek jaderné reakce  $B$ .

$$B = \frac{\sigma N}{S},$$

kde  $N$  je počet částic a  $S$  je plocha terče  $S$ .

Výtěžek jaderných reakcí se vyjadřuje pomocí aktivity, neboť vzniká tak malý počet atomů  $N^*$ . Aktivita je počet přeměn za určitý čas.<sup>7</sup>

### 5.3 Reakce neutronů

Největší výhodou reakce neutronů jsou vysoké výtěžky při nízkých energiích neutronů. Čím pomaleji neutron kolem terčového jádra letí, tím je pravděpodobnost zachytu větší. Neutrony můžeme rozdělit podle velikosti jejich kinetické energie:<sup>4</sup>

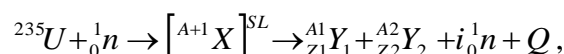
1. *pomalé neutrony* ( $E < 1 \text{ keV}$ )
2. *středně rychlé neutrony* ( $1-500 \text{ keV}$ )
3. *rychlé neutrony* ( $0,5-10 \text{ MeV}$ )
4. *velmi rychlé neutrony* ( $E > 10 \text{ MeV}$ ),

Radiační zachyt neutronů je nejčastější reakcí pomalých neutronů. Zápis této reakce je  ${}^A_Z X(n, \gamma) {}^{A+1}_Z X$ , konkrétně např.:  ${}^{235}_{92}\text{U}(n, \gamma) {}^{236}_{92}\text{U}$ . Tato reakce je velmi významná v průmyslové výrobě mnoha radioaktivních nuklidů.<sup>7</sup>

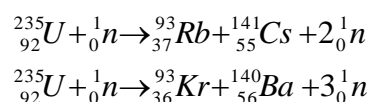
### 5.4 Štěpení jádra a jaderná energie

Štěpné reakce, při kterých vzniká jaderná energie, mají široké průmyslové využití. Tento typ radioaktivní přeměny je velmi podobný samovolnému rozpadu s tím rozdílem, že tento typ jaderné reakce je vyvolán jaderným projektilem. Při štěpení se nejvíce využívá nuklidu  ${}^{235}_{92}\text{U}$  (obsah v přírodním uranu je asi 0,72 %) a  ${}^{239}\text{Pu}$ .

Nejdříve vznikne zachycením neutronů složené jádro. Je více způsobů, jak se jádro může rozpadnout, což je důsledkem jeho vysoké excitace. Nuklidy, které vznikají rozpadem, mají značný nadbytek neutronů, a tak probíhá ještě radioaktivní přeměna  $\beta^-$ . Postupnými přeměnami  $\beta^-$  z každého jádra vznikají stabilní izobary, které nazýváme štěpné produkty. Vždy vznikají středně těžké prvky, jejichž nukleonová čísla jsou v poměru 2:3. Tuto reakci lze obecně vyjádřit:<sup>7</sup>

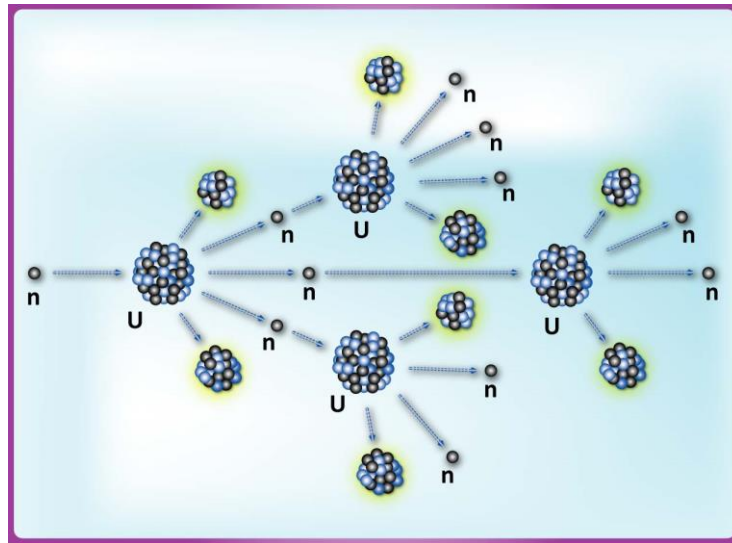


kdy  $Y_1$  a  $Y_2$  jsou vznikající prvky. Konkrétně např.:



Při tomto štěpení vznikají dva až tři neutrony. Neutrony vznikající při rozštěpení složeného jádra se nazývají štěpné či okamžité.

Roku 1939 objevili a popsali štěpnou reakci O. Hahn a F. Strassmann při štěpení jádra uranu. Vznikají přitom 2 středně těžké nuklidy, velké množství energie a neutrony, které mohou vyvolat další štěpení, které se lavinovitě šíří. Štěpná reakce může být řízená nebo neřízená. Řízená štěpná reakce se využívá v jaderných reaktorech a neřízená např. v atomové bombě.<sup>2,7,26</sup>



Obr. 8 - Schéma štěpné reakce<sup>27</sup>

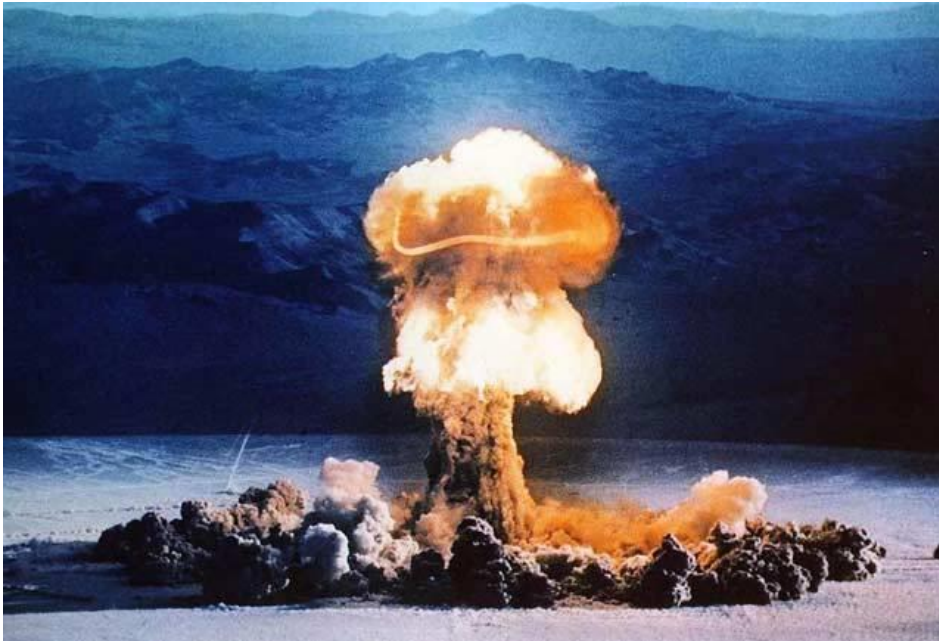
#### 5.4.1 Historie štěpné reakce

Roku 1935 zjistili L. Meitnerová a O. Hahn několik dalších aktivit  $\beta$  o různém poločasu. Tento složitý výklad nebyl dostatečně vysvětlen. Po popsání štěpné reakce se zaměřili O. Hahn a F. Strassmann na izolaci izotopu radia.<sup>2</sup>

První jaderný výbuch proběhl pod vedením Roberta Jacoba Oppenheimera a Enrica Fermiho 16. července 1945 v poušti White Sands nedaleko města Alamogordo v USA. 6. srpna 1945 byla svržena na Hirošimu uranová jaderná puma Little Boy a 9. srpna 1945 na Nagasaki plutoniová bomba Fat Man. Při těchto útocích zemřelo 130 000 lidí a dalších 100 000 lidí umíralo na následky výbuchu.<sup>28</sup>

V roce 1949 proběhl pod vedením SSSR další výbuch zařízení Joe-1. Roku 1961 byla otestována největší jaderná bomba v historii Car-bomba. Ještě při 3. oběhu kolem Země byla naměřitelná tlaková vlna po výbuchu.

V současné době vlastní jadernou zbraň Velká Británie, Francie, Čína, Indie, Pákistán, Severní Korea a pravděpodobně Izrael, který to oficiálně nepotvrdil.<sup>28</sup>



Obr. 9 - Atomový hřib<sup>29</sup>

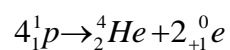
#### 5.4.2 Fenomén Oklo

V roce 1972 bylo objeveno několik míst v rovníkové západní Africe, kde před asi 2 miliardami let muselo pracovat několik přírodních jaderných reaktorů. Geologické průzkumy prověřily, že ložiska uranu, která se zde nacházejí, daly možnost vzniku a udržení štěpné reakce po dobu asi 150 tisíc let. Vše probíhalo stejným mechanismem jako v dnešních jaderných reaktorech.<sup>30</sup>

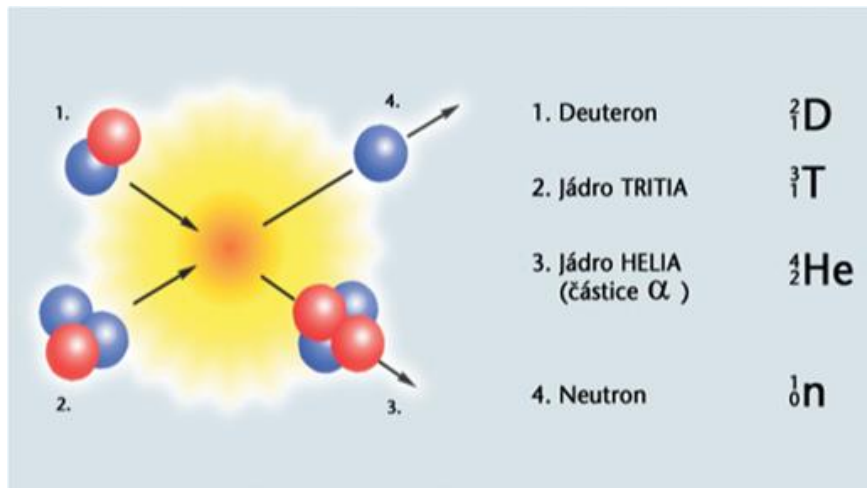
Obr. 10 - Fenomén Oklo<sup>30</sup>

## 5.5 Termonukleární syntéza

Termonukleární syntéza je reakce exoergická, při níž dochází ke slučování lehkých jader za vzniku těžšího jádra. Je to opak štěpných reakcí. Tyto reakce jsou nejvíce rozšířené ve vesmíru. Vesmír je složen z 90 % z vodíku, 9 % helia a 1 % jiných prvků. Jaderná energie, která je uvolňována z hvězd ve vesmíru, je velice malá. Syntéza helia z protonu je nejtypičtější příklad fúze, při kterém vzniká obrovské množství energie:



Za normálních podmínek tyto reakce vůbec neprobíhají. Jsou k tomu nutné velmi vysoké teploty a tlak. Při teplotách až  $10^7$  K až  $10^9$  K probíhají termonukleární reakce.<sup>4,7</sup>



Obr. 11 - Schéma termonukleární syntézy<sup>31</sup>

### 5.5.1 Využití termonukleární syntézy

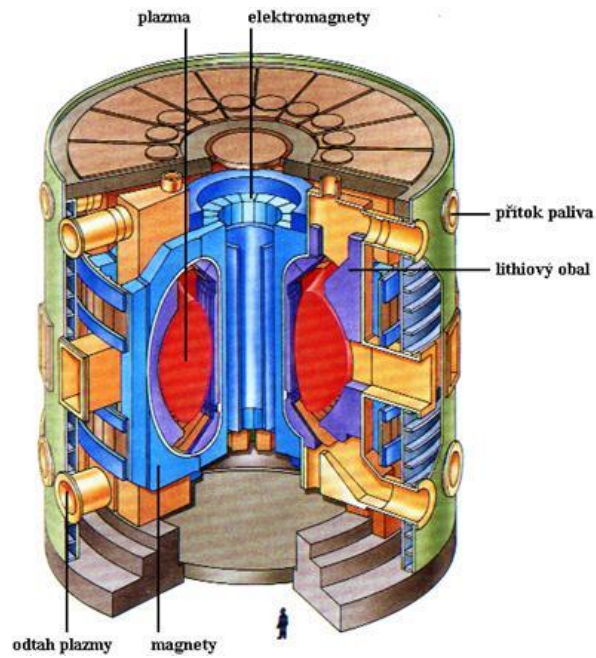
První test výbuchu založený na principu termonukleární syntézy byl proveden 1. července 1946 na ostrovech Bikini v Tichém oceánu. Následovaly zde další testy, které měly ničivé účinky. 1. 11. 1952 byla odpálena bomba, která již byla třístupňová. Nukleární hřib dosáhl výšky až 36 km. 1. 3. 1954 byla odpálena vodíková bomba, která byla o 44 % silnější.<sup>32,33</sup>

Vodíková bomba je druh atomové bomby. Jako palivo se používají izotopy vodíku nebo lithia v podobě deuteridu lithného. Jadernou fúzi nastartují vysoké teploty, které vznikají na začátku výbuchu. Na podobném principu probíhají reakce ve vesmíru.<sup>34</sup>

### 5.5.2 Tokamak

Tokamak je zařízení, které funguje jako transformátor. Sekundární cívka má jeden závit ve tvaru dutého prstence. Uvnitř v plazmě se nachází deuterium a tritium. V sekundárním obvodu je elektromotorické napětí indukováno elektrickým proudem, který vzniká v primárním okruhu. V plynu v prstenci vznikne výboj, indukovaný proud je ionizován a zahřívá plyn na vysokou teplotu. Udržení magnetického pole způsobí chlazení stěn prstence, který má tvar toroidu. Po zvýšení teploty dochází ke vzniku termonukleární fúze a je uvolňována energie, která je unášena neutrony a ohřívá chladivo, kterým je většinou voda. Voda z primárního okruhu proudí do výměníku

tepla, ten ohřívá vodu v sekundárním okruhu a vzniklá pára pokračuje k parní turbíně. Parní turbína pohání generátor střídavého proudu.<sup>35</sup>

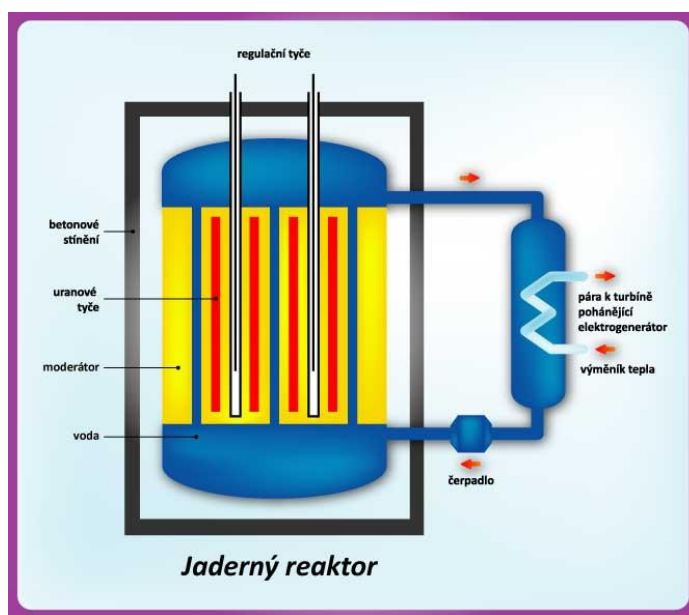


Obr. 12 - Schéma Tokamaku<sup>35</sup>



## 6 JADERNÉ REAKTORY

Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém probíhá řízená štěpná řetězová reakce a uvolňuje se energie ve formě tepla. Teplo, které tu vzniká, se plynule odvádí a využívá k pohonu parní turbíny. Místo, kde dochází k řetězové štěpné reakci v jaderném reaktoru, se nazývá aktivní zóna. Ta kromě paliva obsahuje ještě moderátor, řídicí tyče a chladicí medium.<sup>7</sup>



Obr. 13 - Schéma jaderného reaktoru<sup>27</sup>

### 6.1 Části jaderného reaktoru

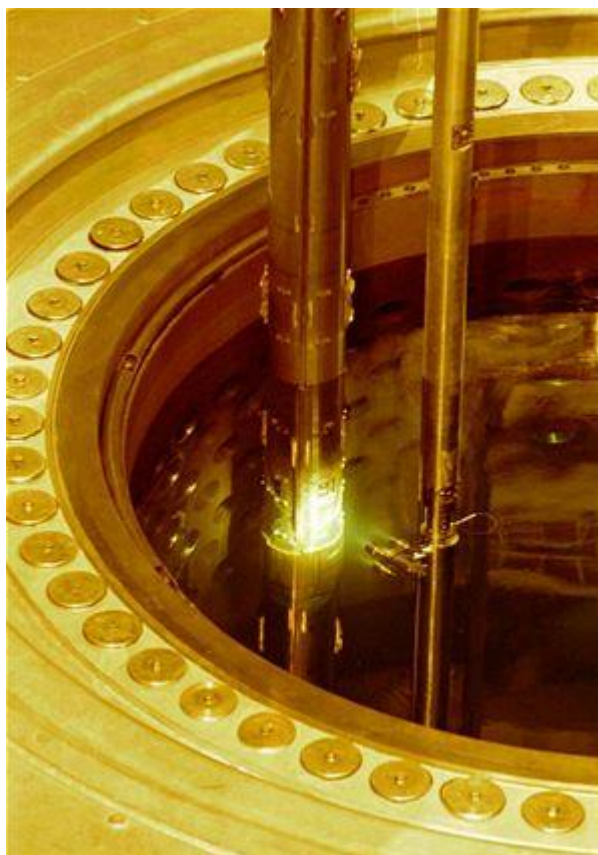
#### 6.1.1 Palivo

Palivový cyklus představuje sled technologických postupů uranové rudy od její těžby až po bezpečné uložení jako jaderný odpad. Přírodní nebo obohacený uran poskytuje uranové palivo do jaderného reaktoru. Palivo se používá ve formě kovového uranu nebo  $\text{UO}_2$ . Pro zlepšení mechanických vlastností se přidávají různé legované kovy. Uranové palivo se připravuje ve dvou formách. Palivo z obohaceného uranu se připravuje jako tablety o velikosti přibližně 1 x 1 cm, které se nazývají keramické palivo. Za to palivo z kovového uranu ve tvaru prutů je pokryté vrstvou slitiny hořčíku a hliníku. Dalším druhem je palivo ze směsi, které obsahuje  $^{239}\text{PuO}_2$  a  $\text{UO}_2$ . Palivo, které je pokryto kovovým obalem, se nazývá palivový element. Aktivní zóna je vysoká



kolem 2-3 m, což je dáno výškou sloupce paliva. Soubor palivových elementů se nazývá palivový článěk. Těch se nachází v reaktoru až několik set. Ve vysokoteplotních reaktorech je palivo ve formě malých kuliček, které mají průměr několik desetin milimetrů. Tyto malé kuličky, které pokrývá vrstva pyrolytického uhlíku nebo grafitu, se využívají v reaktorech chlazených plynem.<sup>7</sup>

Výměna vyhořelého paliva za čerstvé se může provádět při plném provozu nebo se výkon reaktoru na tuto dobu sníží. Například v Jaderné elektrárně Dukovany probíhá výměna jedné třetiny palivových článků jednou ročně. Vyjmuté články, které jsou částečně vyhořelé, se na určitý čas uloží do bazénu s vodou, která proudí v primárním okruhu elektrárny.<sup>7</sup>



Obr. 14 - **Zavážení paliva**<sup>36</sup>

### 6.1.2 Moderátor

Moderátor je látka, která zpomalí rychlé neutrony při srážce s jádry a je snadno dostupná. Mezi nejpoužívanější patří lehká voda, těžká voda, grafit nebo oxid uhličitý.<sup>7</sup>

### 6.1.3 Chladicí medium

Teplo vznikající v palivových článcích je nutné odvádět z aktivní zóny reaktoru vhodným chladicím mediem. Nejčastějším chladicím mediem je voda, oxid uhličitý, helium nebo sodík. Mezi nejdůležitější vlastnosti vhodného chladicího media patří dobrá tepelná vodivost.<sup>7</sup>

### 6.1.4 Regulační tyče

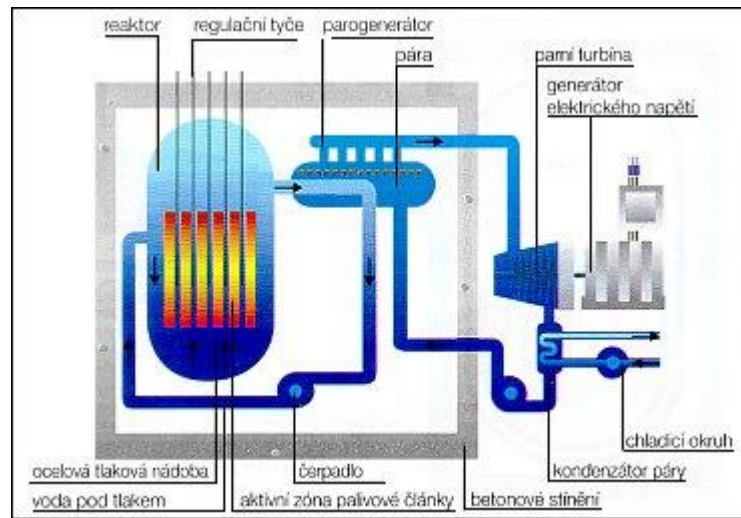
Regulační tyče ovlivňují výkon reaktoru. V jaderných reaktorech se nachází celkem 3 druhy tyčí: kompenzační tyče, řídicí tyče a havarijní tyče. Hlavní funkcí kompenzačních tyčí je jejich spuštění do aktivní zóny v případě většího množství štěpného materiálu v reaktoru. Všechny náhlé změny kontrolují řídicí tyče. Ty se přizpůsobují buď zasunutím nebo vysunutím z aktivní zóny. Třetím druhem jsou havarijní tyče, které při normálním provozu nejsou v aktivní zóně vůbec. Při větší poruše jsou připraveny k rychlému zastavení štěpné reakce. Tyto tyče obsahují velké množství slitiny bóru, kadmia nebo hafnia.<sup>7</sup>

## 6.2 Typy jaderných reaktorů

V dnešní době jsou nejvíce v provozu reaktory lehkovodní (75 %), grafitové chlazené plynem (9 %), těžkovodní (7 %), grafitové chlazené vodou (5 %), rychlé (2 %) a ostatní (2 %). Z lehkovodních reaktorů je 66 % tlakovodních a zbytek jsou varné.<sup>7</sup>

### 6.2.1 Lehkovodní reaktory (tlakovodní)

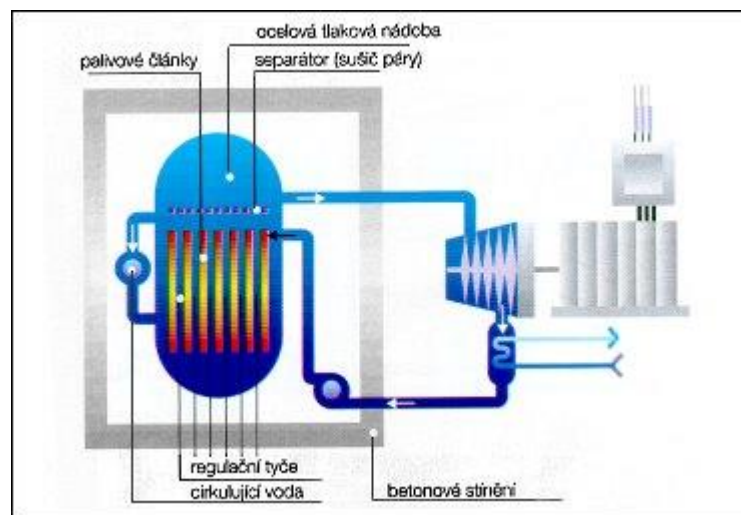
Lehkovodní reaktory se označují anglicky PWR (Pressurized light-Water cooled and moderated Reactor) nebo rusky VVER (Vodo-Vodjanyj Energetičeskij Reaktor). Tento typ jaderného reaktoru najdeme v České republice v obou jaderných elektrárnách. Palivem je zde obohacený uran ve formě oxidu uranu  $UO_2$  jako malé tabletky. Moderátorem a zároveň chladivem se zde uplatňuje voda. Tento typ reaktoru je dvouokruhový.<sup>7,37</sup>



Obr. 15 - Schéma reaktoru PWR<sup>38</sup>

### 6.2.2 Varné reaktory

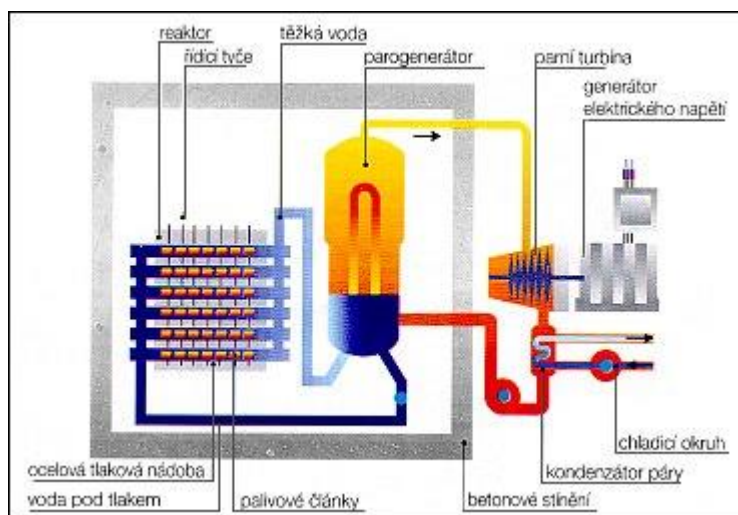
Varné reaktory se označují anglicky BWR (Boiling Water Reactor). Varné reaktory mají jako palivo také oxid uraničitý ovšem ve formě válečků. Obyčejná voda zde působí jako chladicí medium i jako moderátor. V tlakové nádobě nad aktivní zónou jsou separátory vlhkosti. Zde se pára, která přichází kanály, zbavuje zbytků vody. Tlaková nádoba je zde velice vysoká, dosahuje až do výšky 20 m. Tento typ reaktoru je jednookruhový. Byl použit v jaderné elektrárně ve Fukušimě v Japonsku.<sup>7,37</sup>



Obr. 16 - Schéma reaktoru BWR<sup>38</sup>

### 6.2.3 Těžkovodní reaktor

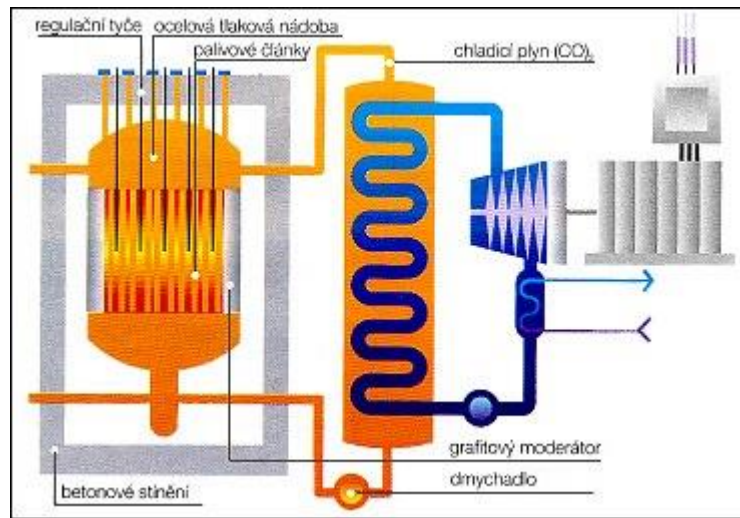
Těžkovodní reaktory se označují anglicky CANDU (Canada Deuterium Uranium). Těžkovodní reaktory mají jako palivo přírodní uran ve formě oxidu uraničitého. Jako chladicí medium či moderátor zde funguje těžká voda  $D_2O$ . V položeném válci, který je dlouhý 8 m a má průměr 8 m, je vložena aktivní zóna. Tento typ reaktorů se používá v Pákistánu, Koreji nebo Rumunsku.<sup>7,37</sup>



Obr. 17 - Schéma reaktoru CANDU<sup>38</sup>

### 6.2.4 Plynem chlazené grafitové reaktory

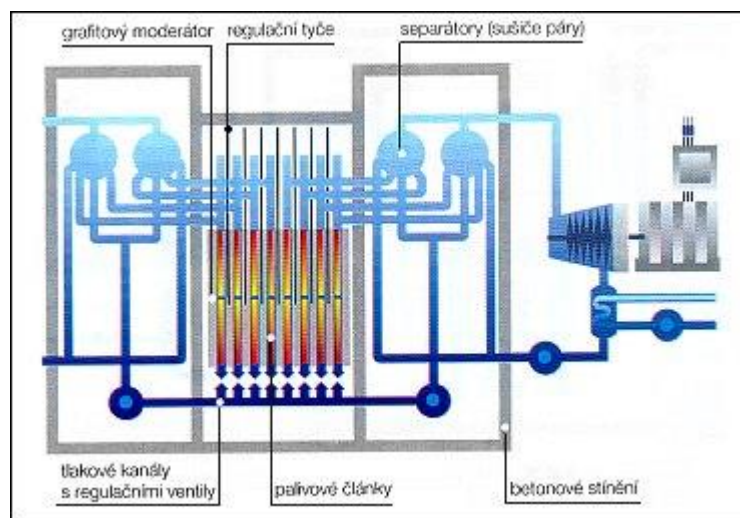
Plynem chlazené grafitové reaktory se označují anglicky GCR či MagNO (Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor). Tento typ reaktorů je rozšířen hlavně ve Velké Británii. Jako palivo se používá kovový uran, který je pokrytý vrstvou hořčíku. Reaktor je chlazen heliem a pracuje za vysokého tlaku 3-5 MPa. K tomuto typu reaktoru lze přirovnat i první jaderný reaktor, který byl postaven v roce 1942 v Chicagu pod vedením E. Fermiho.<sup>7,37</sup>



Obr. 18 - Schéma reaktoru MagNO<sup>38</sup>

### 6.2.5 Grafitové reaktory chlazené vodou

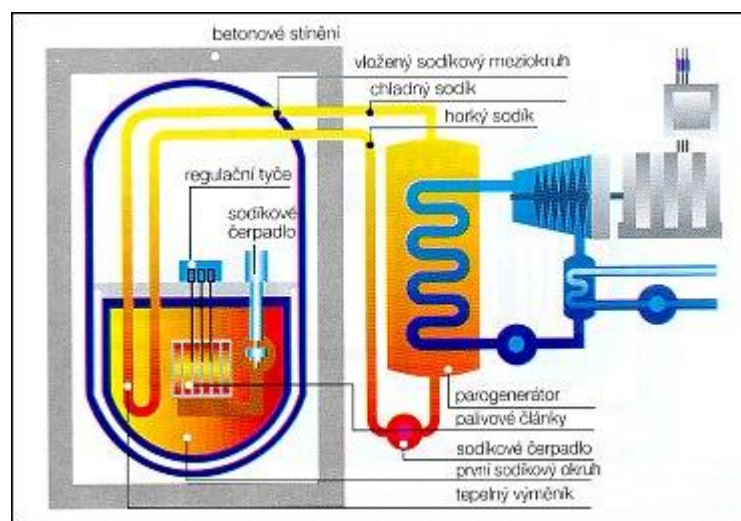
Grafitové reaktory chlazené vodou se označují anglicky LWGR (Light Water Cooled, Graphite Moderated Reactor) či rusky RBMK (Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj). Tento typ reaktoru se stavěl pouze na území bývalého SSSR a fungoval v Černobylu, kde se 26. dubna 1986 stala jaderná havárie, která postihla velkou část Evropy. Reaktory tohoto typu se dnes už nestaví. Jako palivo se zde užívalo  $UO_2$ . Jako moderátor zde fungoval grafit. Reaktor je chlazený obyčejnou vodou. Elektrárny s tímto typem reaktoru jsou dvouokruhové.<sup>7,37</sup>



Obr. 19 - Schéma reaktoru RBMK<sup>38</sup>

### 6.2.6 Rychlé reaktory

Rychlé reaktory se označují anglicky FBR (Fast Breeder Reactor). Tento typ reaktoru má velkou budoucnost. Již funguje v Rusku, Velké Británii či Francii a plánuje se stavba např.: v Německu a Japonsku. Jako palivo se používá směs oxidu plutoničitého a uraničitého. Je zajímavé, že aktivní zóna neobsahuje moderátor. Jako chladicí médium je tu použit roztavený sodík. Voda nebo helium by nebyly schopny odvádět tak velké množství tepla. Elektrárny s tímto typem reaktoru jsou tříokruhové. Nejpokročilejší typy reaktorů jsou francouzské reaktory Phénix a Superphénix.<sup>7,37</sup>



Obr. 20 - Schéma reaktoru FBR<sup>38</sup>

## 7 JADERNÁ ENERGIE

Jaderná energie vznikající v jaderných reaktorech má široké využití. Největší význam jaderné energie je výroba elektřiny v jaderných reaktorech. Jaderná energie se dále používá k pohonu ponorek a lodí, ale také k dalšímu výzkumu izotopů. Problematika jaderné energetiky je poměrně široké téma.<sup>7</sup>

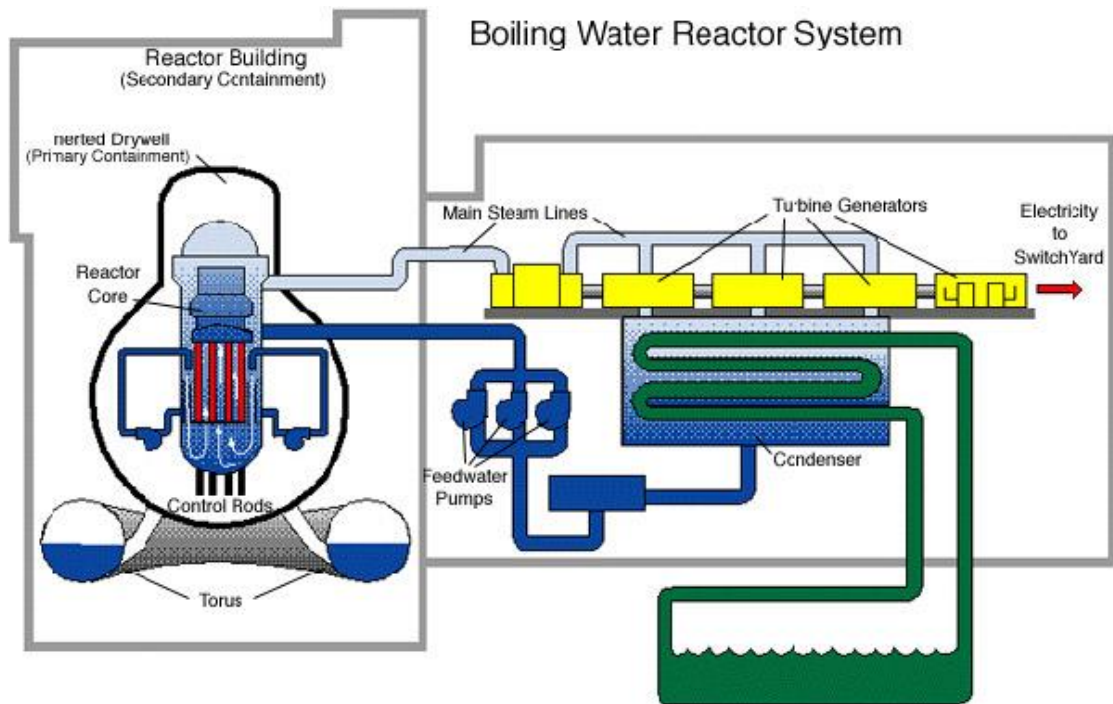
### 7.1 Jaderné elektrárny

Zdrojem tepla v jaderné elektrárně je jaderný reaktor, ve kterém probíhá štěpná reakce. Jde vlastně o tepelnou elektrárnu. Rozdíl je v tom, že jaderná elektrárna nemá parní kotel ale jaderný reaktor. Existují tři typy a to jednookruhové, dvouokruhové, tříokruhové. Dvouokruhové elektrárny jsou rozděleny na dva okruhy-primární a sekundární.

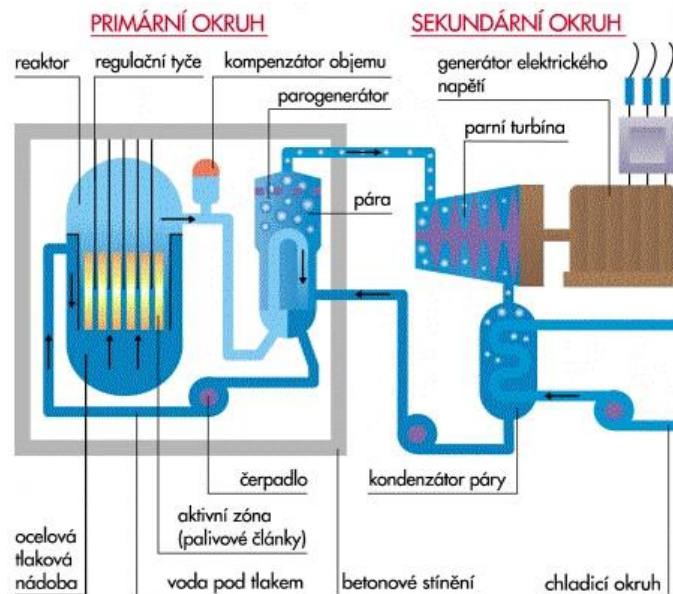
Pro jednookruhové elektrárny je typické, že chladicí médium funguje zároveň pro pohon turbíny. Proto se v těchto elektrárnách nenachází výměník tepla.

V dvouokruhové elektrárně je primární okruh složen z výměníků tepla neboli parogenerátorů, systému cirkulace chladicího media a reaktoru. Primární okruh je uložen v kontejnmentu, který je z oceli a betonu. V aktivní zóně je chladivo ohříváno a následně ve výměníku ohřívá vodu, která cirkuluje v sekundárním okruhu. Později páry kondenzují a voda se vrací do výměníku tepla. Ohřátá voda odchází chladicími věžemi.<sup>7</sup>





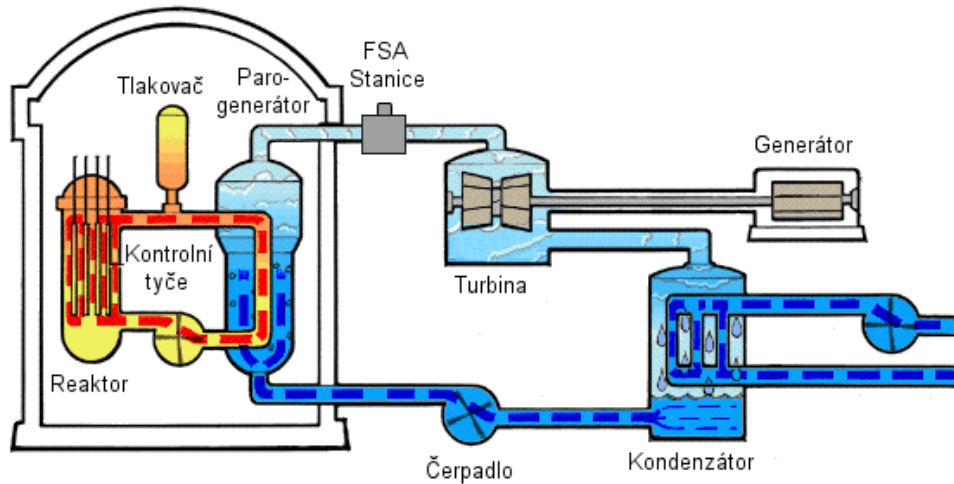
Obr. 21 - Schéma jednookruhové jaderné elektrárny<sup>39</sup>



Obr. 22 - Schéma dvouokruhové jaderné elektrárny<sup>40</sup>

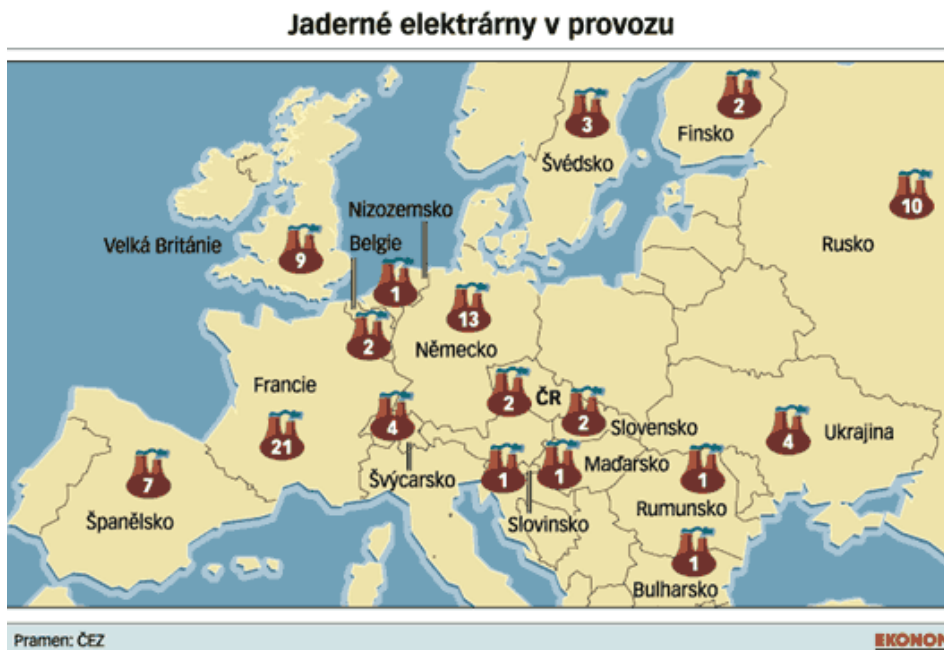
Existují ještě elektrárny s rychlými reaktory, které mají terciární okruh, ve kterých je od sebe oddělen primární a sekundární okruh dalším okruhem, ve kterém cirkuluje kapalný sodík.<sup>7</sup>





Obr. 23 - Schéma jaderné elektrárny s terciárním okruhem<sup>41</sup>

V jaderné elektrárně může stát jeden či více reaktorů. Reaktor je hlavní součástí tzv. bloku. Tento blok má svůj vlastní chladič systém a tepelné výměníky.<sup>7</sup>



Obr. 24 - Mapa jaderných elektráren v Evropě<sup>42</sup>

## 7.2 Historický vývoj jaderné elektrárny

První jaderný reaktor byl spuštěn 2. prosince 1942 v Chicagu. Reaktor, který byl spuštěn týmem Enrica Fermiho, se nazýval Chicago Pile-1. První jaderná elektrárna byla postavena v Sovětském stavu ve městě Obninsk roku 1954. Největší rozvoj nastal v 70. letech 20. století, kdy bylo postaveno nejvíce jaderných elektráren po celém světě.<sup>43</sup>

V současné době se nejvíce jaderných elektráren na území Evropy nachází ve Francii, Velké Británii a Španělsku. Oproti tomu žádné jaderné elektrárny se nenacházejí na území Rakouska, Polska nebo Irska.<sup>42</sup>

Nejvíce jaderných elektráren se nachází na území USA v počtu 104 reaktorů v provozu, dále 53 v Japonsku a 31 v Rusku.<sup>44</sup>

## 7.3 Jaderné elektrárny v ČR

Na území Československa spustila provoz v roce 1972 1. jaderná elektrárna v Jaslovských Bohunicích. Fungují zde tlakovodní reaktory s obohaceným uranem.<sup>45</sup>

V České republice v současné době fungují dvě jaderné elektrárny a to Jaderná elektrárna Dukovany a Jaderná elektrárna Temelín. Nyní se jedná o dostavbě JE Temelín a tím i většího využití jejího výkonu. Z toho můžeme usuzovat, že jaderná energie je na vzestupu. Zdrojem této energie je uranová ruda, která prochází složitými postupy na přípravu ke zpracování. Už při těžbě musí být dodrženy jasné postupy, a to z důvodu ochrany životního prostředí.

Důležité pro stavbu jaderné elektrárny je výběr lokality a bezpečnost celého objektu. Několikrát za dobu fungování jaderných elektráren ve světě se staly nehody. V roce 1979 došlo v Pensylvánii k částečnému roztavení reaktoru a následnému úniku radiace do životního prostředí. Největší nehoda, která ovlivnila životy milionů lidí, se stala 26. dubna 1986 na území tehdejšího SSSR v Černobylu. Dodnes se vedou spory o tom, proč k nehodě došlo. Další velká nehoda se stala 11. března 2011 ve Fukušimě v Japonsku. V tuto dobu totiž Japonsko zasáhlo zemětřesení a vlna tsunami. Každá tato nehoda vede k dalšímu zdokonalení v oboru jaderné bezpečnosti.<sup>46,47</sup>

## 7.4 Jaderná elektrárna Temelín

Jaderná elektrárna Temelín funguje a od roku 2003 je největším energetickým zdrojem s elektrickým výkonem 2000 MW v České republice. Jaderná elektrárna Temelín se nachází nedaleko Českých Budějovic v jižních Čechách. Fungují zde dva výrobní bloky s tlakovodními reaktory VVER 1000 typu V 320. Voda, která je nezbytná pro chod celé jaderné elektrárny, se odčerpává z vodního díla Hněvkovice na Vltavě.

Myšlenka postavit jadernou továrnu o 4 blocích typu VVER 1000 byla dovršena investičním záměrem stavby, který byl vydán roku 1979. V únoru 1985 byl vypracován projekt Energoprojektem Praha. V listopadu roku 1986 bylo vydáno stavební povolení a v únoru 1987 se začalo stavět. Po listopadu 1989 byla přehodnocena situace a ustoupilo se od původního plánu stavby 4 bloků na pouhé 2 bloky. V červenci 2000 bylo dodáno první palivo do reaktoru a 21. prosince 2000 byla vyrobena první elektřina.

Výběr lokality pro stavbu jaderné elektrárny musel splňovat mnoho podmínek, např.: odolnost vůči klimatickým účinkům, zátopám, dopadu letících předmětů (letadel), tlakové vlny od explozí či zemětřesení.<sup>48,49</sup>



Obr. 25 - Jaderná elektrárna Temelín<sup>49</sup>

Tabulka 5 - Výrobní jednotka JE Temelín a JE Dukovany<sup>48,49</sup>

	<b>JE Temelín</b>	<b>JE Dukovany</b>
<b>Výkon</b>	2 x 1000 MW	4 x 510 MW
<b>Rok uvedení do provozu</b>	2000-2002	1985-1988
<b>Typ reaktoru</b>	VVER	VVER

## 7.5 Likvidace jaderného odpadu

Veškeré lidská činnost je spojena s produkcí jakéhokoli odpadu, tak tomu je i v případě jaderné energetiky. V zemích EU vzniká každý rok přibližně dvě miliardy tun odpadu. Nebezpečného odpadu je přibližně 35 milionů tun. Do skupiny nebezpečných odpadů patří např.: těžké kovy a azbest. Radioaktivního odpadu je oproti tomu velice málo. Na 1 osobu ročně to je přibližně 0,13 litru radioaktivního odpadu oproti klasickému odpadu, kdy na 1 osobu vychází asi 80 kg. V EU se vyprodukuje přibližně 50 000 m<sup>3</sup> radioaktivního odpadu. Ovšem tomuto druhu odpadu se přikládá mnohem větší pozornost z důvodu bezpečnosti. Existuje nízkoaktivní odpad a vysokoaktivní odpad, kterého je asi 10% a který se může dále zpracovat a vzniká z něj nízkoaktivní odpad. V našich dvou jaderných elektrárnách vzniklo v průběhu provozu přibližně 3 000 tun odpadu. Jako palivo se zde používá obohacený oxid uraničitý UO<sub>2</sub>, kdy izotop <sup>235</sup>U je obohacen přibližně na 2-4 %. Vyhořelé jaderné palivo se dá po přepracování dále používat.<sup>50</sup>

### 7.5.1 Uložení nízkoaktivního odpadu v ČR

Do nízkoaktivního odpadu patří např.: ozářené nářadí a filtry. Technologie nízkotlakého lisování a bitumentace funguje i v České republice. Tato technologie slouží pro zpracování kapalných odpadů. Pevné odpady jsou uloženy do pouzder ve stíněných kobkách v areálu jaderné elektrárny. Tento zpracovaný radioaktivní odpad se lisuje do připravených sudů, které mají objem 200 litrů. Tyto sudy jsou ještě jednou lisované a uloženy do sudů s objemem až 400 litrů a následně uloženy do betonových obalů do podzemí.<sup>50</sup>

### 7.5.2 Uložení vysokoaktivního odpadu v ČR

Jaderný odpad z jaderné elektrárny Dukovany se dříve převážel do skladu v areálu jaderné elektrárny Jaslovské Bohunice na Slovensku a dále na území bývalého SSSR. Po rozpadu Československa byl odpad postupně vracen a uložen do skladu v areálu Jaderné elektrárny Dukovany. Nyní jsou v Jaderné elektrárně Dukovany 2 sklady a uvažuje se o výstavbě dalšího skladu i v areálu Jaderné elektrárny Temelín. Je připraven další plán na výstavbu třetího meziskladu a to v lokalitě Skalka. Plánuje se také výstavba hlubinného úložiště na území ČR.<sup>50</sup>

### 7.5.3 Průběh ukládání vysoaktivního odpadu

Palivo je v reaktoru vystaveno teplotě okolo 300 °C a tlaku 12 MPa. Kazety na sobě mají vrstvičku slitiny zirkonia. Palivo je vyjmuto z aktivní zóny a převezeno do bazénu, který je určen pro vyhořelé palivo. V bazénu je uloženo na 5 až 10 let. Voda v bazénu má funkci chladiče a zároveň ochrany před zářením. Za tuto dobu je teplota poloviční a manipulace je jednodušší. Poté je uloženo do skladu na dobu asi 50 let, kde je prostor velice kontrolovaný.<sup>50</sup>

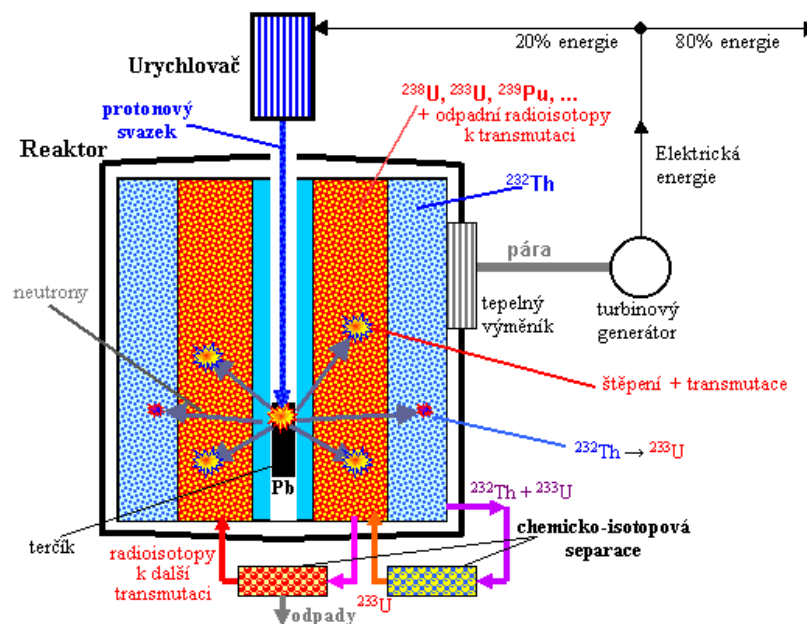
Hlavním důvodem zpracování radioaktivního odpadu je zmenšení objemu odpadu a převedení radioaktivních nuklidů na stabilní. Dále se musí odpad uložit do vhodných obalů, aby v budoucnu nedošlo k úniku radioaktivních látek do prostředí. S nebezpečným radioaktivním odpadem je možná dvoje manipulace.

1. Ukládání odpadu na bezpečná úložiště. Tam by měla být zajištěna úschova vyhořelého paliva na několik tisíc let bez úniku do biosféry.
2. Přepřacování vyhořelého paliva je možné některé složky znovu využít. To je výhodné z pohledu ukládání jaderného paliva i z finanční stránky.<sup>51</sup>

ad 1) Je mnoho způsobů uložení vyhořelého paliva. Úložiště mohou být jednoduchá podpovrchová, která se nacházejí několik metrů pod povrchem země. Úložiště s betonovými jímkami ve tvaru obdélníků jsou umístěny na povrchu terénu nebo několik metrů pod povrchem. Tento typ se nachází v areálu jaderné elektrárny v Dukovanech. Hlubinná úložiště v menších hloubkách jsou nejvíce využívány ve Švédsku a Finsku v hloubce 60 m pod mořským dnem. Hlubinná úložiště ve větších hloubkách jsou v hloubce přibližně 800 m nejvíce rozšířeny v Německu.<sup>7</sup>

Podle způsobu ukládání paliva se rozdělují mokré a suché mezisklady. V mokrých meziskladech jsou uloženy palivové články do hlubokých bazénů. Musí zde cirkulovat voda. Stěny bazénu jsou z nerezové oceli. Mokrý mezisklady se nacházejí ve Francii a Švédsku. Suché mezisklady jsou budovy, kam se ukládají palivové články ve speciálních kontejnerech. Chlazení se děje cirkulací vzduchu. Tento typ se nachází v Kanadě, ale také v jaderné elektrárně Dukovany.<sup>7</sup>

ad 2) Technologie ADTT (Accelerator-Driven Transmutation Technology) se zabývá přepracováním vyhořelého paliva. Reaktory ADTT jsou schopny zpracovávat toto palivo, které již samo neudrží řetězovou reakci. Uvnitř aktivní zóny v terčiku jsou výkonným urychlovačem protonů ostřelovány jádra těžkých prvků (např.: olovo). Tento urychlovač dodává chybějící neutrony, které jsou potřebné pro další štěpení. Jako moderátor zde funguje těžká voda, přes kterou neutrony procházejí do aktivní zóny reaktoru. Zde je rozpuštěný štěpný materiál a odpadní izotopy. Transmutace těchto látek je žádoucí z hlediska bezpečného uložení jaderného odpadu. Vývoj této technologie není ještě ukončen a stále vyvíjí.<sup>52</sup>



Obr. 26 - Schéma reaktoru ADTT<sup>52</sup>

### 7.5.4 Jaderný účet

U České národní banky je zřízen jaderný účet, který spravuje Ministerstvo financí ČR. Na tento účet musí každý provozovatel pravidelně odvádět peníze za uložení použitého radioaktivního odpadu. Za každou MWh, která je vyrobena v jaderné

elektrárně, se musí odvést na jaderný účet 50 Kč. V Jaderné elektrárně Temelín se vyrobí přibližně 13 miliard MWh ve dvou blocích za rok. Znamená to, že za rok zaplatí okolo 650 miliard korun. Přibližně stejný výkon má i Jaderná elektrárna Dukovany.<sup>50</sup>

## 7.6 Jaderná bezpečnost

Pod pojmem jaderná bezpečnost si představujeme situaci, kdy je elektrárna schopna zabránit nekontrolovanému rozvoji štěpné reakce a nadměrného úniku radioaktivity do okolí. S touto situací se musí počítat už při plánování a výběru lokality.<sup>7</sup>

O jadernou bezpečnost se stará Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Vláda České republiky jmenuje do jeho čela předsedu. Úřad obhospodařuje svůj vlastní rozpočet a je rozdělen na 3 části: Úsek jaderné bezpečnosti, Úsek radiační ochrany a Úsek řízení a technické podpory.<sup>53</sup>

Pro popis událostí byla zavedena stupnice, která udává vliv na životní prostředí. Události stupně 0 až 3 jsou brány jako poruchy, události stupně 4 až 7 už jako havárie.<sup>7</sup>

### 0. Událost pod stupnicí.

- *Událost, při které nejsou překročeny provozní limity a podmínky a která je bezpečně zvládnutá vhodnými postupy.*

### 1. Odchylka

- *Funkční nebo provozní odchylka od povolených limitů, která nepředstavuje riziko, ale odhaluje nedostatky bezpečnostních opatření. Může být způsobena selháním zařízení, chybou obsluhy nebo nevhodným provozním postupem.*

### 2. Porucha

- *Porucha nebo odchylka, která neovlivňuje bezpečnost elektrárny, ale může vést k přehodnocení bezpečnostních opatření.*

### 3. Vážná porucha

- *Porucha, při které by další selhání bezpečnostních systémů mohlo vést k havárii. Porucha s únikem radioaktivity mimo elektrárnu nad povolené*

limity. Individuální dávka pro nejzasáženější skupinu obyvatelstva v okolí elektrárny je řádově desetiny mSv, vně elektrárny nejsou nutná zvláštní opatření. Porucha s vysokou úrovní radioaktivity nebo zamoření uvnitř elektrárny, kdy je personál nadměrně ozářen.

#### 4. Havárie s účinky v jaderné elektrárně

- Částečné poškození aktivní zóny tavením nebo mechanicky, kdy ozáření pracovníků může vyvolat okamžité účinky (dávky řádově Sv (jednotka sievert). Malý únik radioaktivity mimo elektrárnu, který vede k ozáření nejzasáženější skupiny obyvatelstva dávkou řádově mSv. Vně elektrárny se provádí kontrola potravy.

#### 5. Havárie s účinky na okolí

- Poškození velké části aktivní zóny tavením nebo mechanicky. Únik  $10^{14}$ - $10^{15}$  izotopu Bq  $^{131}\text{I}$  nebo jiných biologicky významných štěpných produktů mimo elektrárnu. Částečné zavedení opatření podle místních havarijních plánů (evakuace, ukrytí), aby se omezila pravděpodobnost zdravotních následků.

#### 6. Závažná havárie

- Únik  $10^{15}$ - $10^{16}$  izotopu Bq  $^{131}\text{I}$  nebo jiných biologicky významných štěpných produktů mimo elektrárnu. Je nutné úplné použití místních havarijních plánů.

#### 7. Velké havárie

- Únik více než  $10^{16}$  Bq štěpných produktů. Možnost okamžitých zdravotních následků v okolí elektrárny, pozdní následky se mohou projevit na velkém území mimo elektrárnu. Dlouhodobé následky pro životní prostředí.



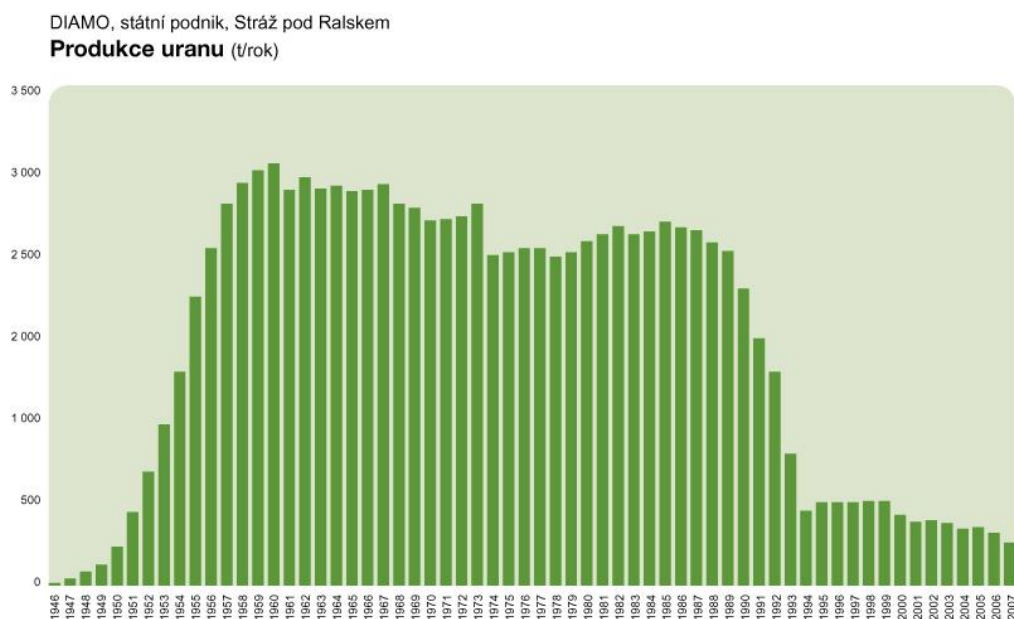
## 8 TĚŽBA URANU V ČECHÁCH

V dřívější době se uran těžil na více místech v Čechách, např.: v Jáchymově, Horním Slavkově, Příbrami a Stráži pod Ralskem.

V současné době se v České republice uran těží již pouze poblíž Dolní Rožínky a Žďáru nad Sázavou. To jsou jediná místa v Evropské unii, kde se těží uran. Na našem území se odhaduje asi 136 044 tun uranu.

Po použití atomové zbraně ve 2. světové válce se začaly otvírat uranové doly. V té době se již vědělo, že uran je energeticky bohatá surovina. V této době se nejvíce těžilo v okolí Jáchymova a Příbrami. Ke konci války uzavřelo Československo se Sovětským svazem mezivládní dohodu. Tato dohoda se zabývala průzkumem, těžbou a zpracováním rudy. Dohoda měla zajišťovat, že veškerá vytěžená ruda, bude vyvážena do SSSR. Začátkem 90. let 20. století byla postupně ukončena těžba rudy z důvodu její klesající ceny. V 80. letech byl český uran využíván na provoz jaderných elektráren Jaslovské Bohunice a Dukovany.

Nejvíce uranu se vytěžilo v roce 1960 a to 3000 tun uranu (viz obr. 28). Celkem se na území České republiky těžilo na 66 místech, ovšem prozkoumáno bylo přes 160 ložisek. Celkem vzniklo 550 šachet a 46 mil. m<sup>3</sup> hlušiny. V letech 1946-2004 bylo celkem vytěženo 109 tisíc tun uranové rudy. Díky této hodnotě je Česká republika na 7. místě v produkci uranových rud (viz tab. 6).<sup>54,55,56</sup>



Obr. 27 - **Produkce uranu v jednotlivých letech**<sup>57</sup>

Tabulka 6 - **Produkce uranu v t/rok**<sup>54</sup>

	<b>Stát</b>	<b>Tuny U</b>
1.	Kanada	386 705
2.	USA	357 447
3.	Německo	219 360
4.	Jižní Afrika	154 055
5.	Rusko	126 313
6.	Austrálie	122 733
7.	Česká republika	108 954
8.	Uzbekistán	103 382
9.	Kazachstán	102 097
10.	Niger	94 284

Těžba uranových rud probíhá buď v povrchových nebo v podpovrchových dolech. Po mechanickém zpracování následuje chemické zpracování. Loužení uranu probíhá buď roztokem uhličitanu sodného nebo roztokem kyseliny sírové. Po vysrážení roztokem amoniaku vzniká diuranan amonný  $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ . Ten se rozloží na  $\text{UO}_3$ , který je redukován na  $\text{UO}_2$  vodíkem. Ten dále reaguje s fluorovodíkem a vzniká  $\text{UF}_4$ . Následující postupy jsou závislé na tom, jaký typ paliva je potřebný, zda kovový nebo oxidický. Výroba oxidického paliva probíhá z uranu obohaceného izotopem  $^{235}\text{U}$ . Kovový se vyrábí z neobohaceného uranu a získá se redukcí hořčíku z  $\text{UF}_4$ . Reakcí s fluorem vzniká plynný  $\text{UF}_6$ , který obsahuje  $^{235}\text{UF}_6$  a  $^{238}\text{UF}_6$ . Ty je od sebe možné oddělit centrifugací. Obohacením  $^{235}\text{U}$  vzniká  $\text{UO}_2$ .<sup>7</sup>



Obr. 28 - Uranová ruda<sup>58</sup>

## 9 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo utřídit informace o atomovém jádře a jaderných reakcích, které v jádře probíhají.

Postupně bylo pojednáno o historii atomu, struktuře atomu, elementárních částicích a modelech jádra atomu. V práci jsou popsány radioaktivita a druhy záření, jaderné reakce a další část je věnována jaderné elektrárně, jejímu popisu a provozu.

Mezi informace, které práce přinesla, patří určitě široké využití atomového jádra a v něm probíhajících procesů. Velice zajímavé je fungování jaderného účtu v České republice. A přestože se na území České republiky fungují jen 2 jaderné elektrárny, stále se zde těží uranová ruda a to na jediném místě v Evropské Unii.

Na světě se stalo mnoho katastrof a určitě mezi ně patří použití atomové bomby nebo nehody v jaderných elektrárnách. Mezi nejznámější patří nehoda v sovětském Černobylu nebo nedávná v japonské Fukušimě. Člověk by si měl uvědomit, jakou energii skrývá atom a lépe ji využívat k prospěchu lidstva. Mezi nejvýznamnější využití jaderných reakcí patří bezesporu jaderné elektrárny nebo medicínské metody pro pomoc při diagnóze.

**10 SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 – Thomsonův model .....	- 3 -
Obr. 2 - Rutherfordův model .....	- 3 -
Obr. 3 - Struktura atomu uhlíku .....	- 4 -
Obr. 4 - Označení radioaktivity .....	- 10 -
Obr. 5 - Pronikavost jednotlivých druhů záření .....	- 10 -
Obr. 6 - Rozpadové řady .....	- 15 -
Obr. 7 - Závislost počtu přeměněných jader na čase .....	- 16 -
Obr. 8 - Schéma štěpné reakce .....	- 22 -
Obr. 9 - Atomový hřib .....	- 23 -
Obr. 10 - Fenomén Oklo .....	- 24 -
Obr. 11 - Schéma termonukleární syntézy .....	- 25 -
Obr. 12 - Schéma Tokamaku .....	- 26 -
Obr. 13 - Schéma jaderného reaktoru .....	- 27 -
Obr. 14 - Zavážení paliva .....	- 28 -
Obr. 15 - Schéma reaktoru PWR .....	- 30 -
Obr. 16 - Schéma reaktoru BWR .....	- 30 -
Obr. 17 - Schéma reaktoru CANDU .....	- 31 -
Obr. 18 - Schéma reaktoru MagNO .....	- 32 -
Obr. 19 - Schéma reaktoru RBMK .....	- 32 -
Obr. 20 - Schéma reaktoru FBR .....	- 33 -
Obr. 21 - Schéma jednookruhové jaderné elektrárny .....	- 35 -
Obr. 22 - Schéma dvouokruhové jaderné elektrárny .....	- 35 -
Obr. 23 - Schéma jaderné elektrárny s terciárním okruhem .....	- 36 -
Obr. 24 - Mapa jaderných elektráren v Evropě .....	- 36 -
Obr. 25 - Jaderná elektrárna Temelín .....	- 38 -
Obr. 26 - Schéma reaktoru ADTT .....	- 41 -
Obr. 27 - Produkce uranu v jednotlivých letech .....	- 44 -
Obr. 28 - Uranová ruda .....	- 46 -

**11 SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 - Elementární částice atomu.....	- 4 -
Tabulka 2 - Vlastnosti kvarků.....	- 7 -
Tabulka 3 - Rozpadové řady .....	- 14 -
Tabulka 4 - Poločas rozpadu.....	- 16 -
Tabulka 5 - Výrobní jednotka JE Temelín a JE Dukovany .....	- 39 -
Tabulka 6 - Produkce uranu v t/rok .....	- 45 -

**12 SEZNAM LITERATURY**

- 1 Vacík J.: Obecná chemie. Státní pedagogické nakladatelství, Praha 1986
- 2 Majer V. a kol.: Základy jaderné chemie. SNTL, Praha 1981
- 3 [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005\\_13\\_mic.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_13_mic.php), staženo 11. 7. 2013
- 4 Grambal F.: Úvod do jaderné chemie. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, 1996
- 5 Klikorka J., Hájek B., Votinský J.: Obecná a anorganická chemie. SNTL, Praha 1989
- 6 <http://www.universetoday.com/56637/atom-model/>, staženo 11. 7. 2013
- 7 Hála J.: Radioaktivita, ionoziující záření, jaderná energie. Konvol, Brno 1998
- 8 Majer V. a kol.: Základy užití jaderné chemie. SNTL, Praha 1985
- 9 [http://cs.wikipedia.org/wiki/Atomov%C3%A9\\_j%C3%A1dro](http://cs.wikipedia.org/wiki/Atomov%C3%A9_j%C3%A1dro), staženo 11. 7. 2013
- 10 <http://www.surao.cz/cze/Media/Images/radioaktivita-symbol>, staženo 11. 7. 2013
- 11 [http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/druhy\\_5.html](http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/druhy_5.html), staženo 11. 7. 2013
- 12 <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/803-zareni-alfa>, staženo 11. 7. 2013
- 13 Úlehla I., Suk M., Trka Z.: Atomy jádra částice. ACADEMIA, PRAHA 1990
- 14 Theo Mayer-Kuckuk.: Fyzika atomového jádra. SNTL, Praha 1979
- 15 Navrátil O. a kol.: Jaderná chemie. Academia/Praha 1985
- 16 [http://cs.wikipedia.org/wiki/Nobelova\\_cena\\_za\\_fyziku](http://cs.wikipedia.org/wiki/Nobelova_cena_za_fyziku), staženo 11. 7. 2013
- 17 [http://cs.wikipedia.org/wiki/Nobelova\\_cena\\_za\\_chemii](http://cs.wikipedia.org/wiki/Nobelova_cena_za_chemii), staženo 11. 7. 2013
- 18 <http://radioaktivita.yc.cz/index.php?link=umelaradioaktivita.php>, staženo 11. 7. 2013
- 19 <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/809-rozpadove-rady>, staženo 11. 7. 2013
- 20 <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika4.htm>, staženo 11. 7. 2013

- 21 <http://www.enviroexperiment.cz/fyzika-2-stupen-zs/1668-jaderne-premeny>, staženo 11. 7. 2013
- 22 [http://cs.wikipedia.org/wiki/Polo%C4%8Das\\_p%C5%99em%C4%9Bny](http://cs.wikipedia.org/wiki/Polo%C4%8Das_p%C5%99em%C4%9Bny), staženo 11. 7. 2013
- 23 <http://radioaktivita.cz.sweb.cz/radioaktivita.htm>, staženo 11. 7. 2013
- 24 [http://cs.wikipedia.org/wiki/Detektor\\_ionizuj%C3%ADc%C3%ADho\\_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Detektor_ionizuj%C3%ADc%C3%ADho_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD), staženo 11. 7. 2013
- 25 <http://atominfo.cz/2012/05/sievert-becquerel-rentgen-jak-merime-radioaktivitu/>, staženo 11. 7. 2013
- 26 [http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1\\_reakce](http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_reakce), staženo 11.7.2013
- 27 [http://artemis.osu.cz/mm fyz/jm/jm\\_2\\_3\\_3.htm](http://artemis.osu.cz/mm fyz/jm/jm_2_3_3.htm), staženo 11. 7. 2013
- 28 [http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1\\_zbra%C5%88](http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_zbra%C5%88), staženo 11. 7. 2013
- 29 <http://21stoleti.cz/blog/2009/05/19/ztracene-atomove-bomby-5-pojistek-nestaci/>, staženo 11. 7. 2013
- 30 <http://akademon.cz/article.asp?source=oklo>, staženo 11. 7. 2013
- 31 <http://web.vscht.cz/hrotkovr/jadro/jadernafuze.html>, staženo 11. 7. 2013
- 32 <http://cs.wikipedia.org/wiki/Bikini>, staženo 11. 7. 2013
- 33 [http://technet.idnes.cz/co-dokazi-nejstrasnejsi-atomove-bomby-na-svete-mizely-ostrovy-vyparoval-se-beton-gjo-/tec\\_technika.aspx?c=A060831\\_152144\\_tec\\_technika\\_NYV](http://technet.idnes.cz/co-dokazi-nejstrasnejsi-atomove-bomby-na-svete-mizely-ostrovy-vyparoval-se-beton-gjo-/tec_technika.aspx?c=A060831_152144_tec_technika_NYV), staženo 11. 7. 2013
- 34 <http://fyzika-pascal.webnode.cz/vodikova-bomba/>, staženo 11. 7. 2013
- 35 <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/825-tokamak> , staženo 11. 7. 2013
- 36 [http://technet.idnes.cz/jak-funguje-temelin-byli-jsme-primo-v-srdci-reaktoru-f9n-/tec\\_reportaze.aspx?c=A070417\\_135542\\_tec\\_technika\\_rja](http://technet.idnes.cz/jak-funguje-temelin-byli-jsme-primo-v-srdci-reaktoru-f9n-/tec_reportaze.aspx?c=A070417_135542_tec_technika_rja), staženo 11. 7. 2013
- 37 <http://www.jaderna-energie.cz/jaderny-reaktor-ty.py.htm>, staženo 11. 7. 2013
- 38 [http://ok1zed.sweb.cz/s/el\\_reaktor.htm](http://ok1zed.sweb.cz/s/el_reaktor.htm) , staženo 11. 7. 2013
- 39 <http://www.nazeleno.cz/energie/jaderna-energie/jaderna-elektrarna-fukusima-opravdu-neni-cernobyl.aspx>, staženo 11. 7. 2013



- 40 <http://leccos.com/index.php/clanky/jaderna-elektrarna>, staženo 11. 7. 2013
- 41 <http://www.kky.zcu.cz/cs/research-fields/nuclear-power-plants-diagnostics>, staženo 11. 7. 2013
- 42 <http://ekonom.ihned.cz/c1-22196840-jadro-stepi-politiku>, staženo 11. 7. 2013
- 43 <http://history.webgarden.cz/rubriky/historie-objevu-jaderne-energie>, staženo 11. 7. 2013
- 44 <http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/staty/>, staženo 11. 7. 2013
- 45 [http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1\\_elektr%C3%A1rna\\_Jaslovsk%C3%A9\\_Bohunice](http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Jaslovsk%C3%A9_Bohunice), staženo 11. 7. 2013
- 46 [http://www.cez.cz/eede/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/havarie\\_7.html](http://www.cez.cz/eede/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/havarie_7.html), staženo 11. 7. 2013
- 47 <http://otazky-fukusima.cvrez.cz/web/>, staženo 11. 7. 2013
- 48 <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/jaderna-energetika/jaderna-elektřiny-cez/edu/historie-a-soucasnost.html>, staženo 11. 7. 2013
- 49 <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/jaderna-energetika/jaderna-elektřiny-cez/ete/historie-a-soucasnost.html>, staženo 11. 7. 2013
- 50 Radioaktivní odpady a skupiny ČEZ-brožura
- 51 <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika3.htm#Odpady>, staženo 11. 7. 2013
- 52 <http://web.vscht.cz/hrotkovr/jadro/jebudoucnosti.html>, staženo 11. 7. 2013
- 53 [http://cs.wikipedia.org/wiki/St%C3%A1tn%C3%AD\\_%C3%BA%C5%99ad\\_pro\\_jadernou\\_bezpe%C4%8Dnost](http://cs.wikipedia.org/wiki/St%C3%A1tn%C3%AD_%C3%BA%C5%99ad_pro_jadernou_bezpe%C4%8Dnost), staženo 11. 7. 2013
- 54 <http://proatom.luksoft.cz/view.php?cislocclanku=2006061901>, staženo 11. 7. 2013
- 55 [http://www.rychleby.cz/index.php?id=tezba\\_uranu.html](http://www.rychleby.cz/index.php?id=tezba_uranu.html), staženo 11. 7. 2013
- 56 [http://www.calla.ecn.cz/data/energetika/ostatni/uran\\_brozura.pdf](http://www.calla.ecn.cz/data/energetika/ostatni/uran_brozura.pdf), staženo 11. 7. 2013
- 57 <http://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/js13/geograf/web/pages/05-prumysl-podnikani.html>, staženo 11. 7. 2013
- 58 <http://aktualne.centrum.cz/domaci/zivot-v-cesku/fotogalerie/2007/11/27/dole-v-uranovem-dole/foto/115230/?cid=514982>, staženo 11. 7. 2013

## **13 RESUMÉ**

The structure of an atom is described in detail with an emphasis on the atomic nucleus, elementary particles and reactions that take place in the nucleus. The thesis is also introducing radioactivity, nuclear reactions, and detail about nuclear fission or thermonuclear synthesis. A section is also devoted to the use of nuclear reactors, operation of nuclear power plants and nuclear waste disposal. It also mentions uranium mining in the country.