

**OSTRAVSKÁ UNIVERZITA V OSTRAVĚ**

---



**UNIVERSITAS  
OSTRAVIENSIS**

# **Fyzikální aspekty zátěží životního prostředí**

**DALIBOR DVOŘÁK  
IVAN JANEČEK**

**OSTRAVA 2012**

## Obsah

<b>1</b>	<b>Základní poznatky a terminologie atomové fyziky a jaderné fyziky .....</b>	<b>4</b>
	Atom .....	4
	Ionty - ionizace .....	4
	Molekula .....	4
	Atomová teorie – historie. ....	4
	Chemické vzorce – chemické reakce.....	5
	Atomové jádro .....	5
	Hmotnostní úbytek $\Delta m$ .....	6
	Jaderné reakce.....	7
	Radioaktivita.....	7
	Radioaktivní záření .....	7
	Zákon radioaktivní přeměny .....	9
<b>2</b>	<b>Zdroje a účinky ionizujícího záření, dozimetrie a ochrana před ionizujícím zářením .....</b>	<b>9</b>
	Ionizující záření .....	9
	Účinky ionizujícího záření.....	11
	Dozimetrie ionizujícího záření .....	11
	Ochrana před ionizujícím zářením.....	12
	Zákony a vyhlášky pro ochranu před IZ .....	13
	Dohled nad dodržováním pravidel ochrany před ionizujícím zářením.....	13
<b>3</b>	<b>Jaderná energetika a její vztah k životnímu prostředí.....</b>	<b>14</b>
	Štěpná jaderná reakce .....	14
	Jaderná elektrárna .....	15
	Jaderný odpad .....	17
<b>4</b>	<b>Alternativní zdroje energie .....</b>	<b>20</b>
	Vodní energie.....	20
	Větrná energie.....	21
	Sluneční energie.....	22
	Geotermální energie.....	24
	Obnovitelná biomasa .....	24
	Jaderná fúze .....	24
<b>5</b>	<b>Aplikace ionizujícího záření a metod jaderné fyziky.....</b>	<b>26</b>
	Metody analýzy materiálů .....	27
	Metoda radioaktivních indikátorů.....	27

	Principy radionuklidových datovacích metod .....	27
<b>6</b>	<b>Hluk a ochrana před nadměrnou hlukovou zátěží .....</b>	<b>28</b>
	Zvuk - základní pojmy .....	28
	Působení hluku na člověka .....	30
	Poškození sluchu hlukem .....	31
	Stanovení právních podmínek pro zátěž hlukem .....	32
	Protihluková opatření .....	33
<b>7</b>	<b>Význam ozónu v atmosféře a procesy ve stratosféře .....</b>	<b>33</b>
	Molekula ozónu .....	33
	Rozložení ozónu v atmosféře .....	33
	Měření obsahu ozónu - Dobsonovy jednotky .....	34
	Stratosférický a troposférický ozón .....	34
<b>8</b>	<b>Ztenčování ozónové vrstvy, ozónová díra a její možné následky .....</b>	<b>37</b>
	Ovlivnění stavu ozónu lidskou činností .....	37
	Ozónová díra .....	38
	Předpokládané následky ozónové díry .....	38
	Monitorování ozónové vrstvy metodami DPZ .....	39
<b>9</b>	<b>Příjem sluneční energie, skleníkové plyny .....</b>	<b>41</b>
	Elektromagnetické záření .....	41
	Slunce jako hlavní zdroj elektromagnetického záření .....	41
	Interakce elektromagnetického záření s atmosférou .....	43
	Skleníkový efekt .....	43
	Vnitřní proměnlivost klimatu a antropogenní činnost .....	47
<b>10</b>	<b>Současnost klimatu a prognózy do budoucna, důsledky klimatických změn .....</b>	<b>48</b>
	Monitorování oteplení .....	48
<b>11</b>	<b>Boj se změnou klimatu a alternativní názory .....</b>	<b>50</b>
	Česká, evropská a světová legislativa v oblasti boje proti změnám klimatu .....	50
	Sřety vědeckých názorů a využívání vědy k prosazování politických cílů .....	50
	Alternativní technologie .....	51

# 1 Základní poznatky a terminologie atomové fyziky a jaderné fyziky

## Atom

*Atomy* byly původně chápány jako nejmenší částice látky, jež nejsou dále dělitelné. Z hlediska současných poznatků nejsou atomy dále dělitelné **chemickými postupy**. Po objevu vnitřní struktury atomu a jeho jádra je zřejmé, že atomy nepředstavují základní částice látky, ale jsou pouze jednou z jejích hierarchických strukturních jednotek. Atomy se skládají z atomového obalu, který je tvořen elektrony (lehké, záporně nabitě částice) a **atomového jádra** (těžké kladně nabitě částice).

*Příklad:*

*Atom vodíku se značí H a je složen z jádra a jednoho elektronu. Atom hélia se značí He a je složen z jádra a dvou elektronů.*

Hmotnost elektronů je zanedbatelná oproti hmotnosti jader (je řádově 1000krát menší). Za běžných podmínek, kdy nejsou atomy vystaveny vysokým teplotám nebo silným elektrickým polím představují atomy elektricky neutrální systém – záporný elektrický náboj elektronového obalu je kompenzován kladným elektrickým nábojem atomového jádra. Počet elektronů elektricky neutrálního atomu určuje jeho pořadí v periodickém systému prvků. Toto pořadí, tzv. **atomové číslo**, je dáno strukturou jádra.

## Ionty - ionizace

Dojde-li k odtržení jednoho či více elektronů z atomového obalu, hovoříme o **ionizaci**. Vzniká **kationt** (kladně nabitý iont), při zachycení elektronu naopak **aniont**.

*Příklad:*

*Odtržením elektronu atomu vodíku H vzniká kationt  $H^+$  (u vodíku holé jádro).*

*Odtržením elektronu atomu He vzniká kationt  $He^+$ . Odtržením dalšího elektronu dvojnásobně nabitý kationt  $He^{2+}$ . Naopak zachycením elektronu vznikne aniont  $He^-$ .*

## Molekula

Je nejmenší částicí látky, která zachovává její chemické vlastnosti. Může být tvořena jedním, dvěma nebo více atomy. Hovoříme tak o **jednoatomové**, **dvojeatomové** nebo **víceatomové** molekule. Atomy tvořící molekulu mohou být stejné (atomy stejného prvku), v tomto případě se jedná o molekulu **homonukleární**, nebo různé, pak hovoříme o molekule **heteronukleární**. Molekula, složená alespoň ze dvou atomů může být chemickými postupy rozdělena na jednotlivé atomy, které mají i v případě homonukleární molekuly odlišné chemické vlastnosti.

*Příklady:*

*Molekula vodíku se značí  $H_2$  protože obsahuje dva atomy vodíku, je to dvojeatomová homonukleární molekula. Lze ji rozdělit na dva atomy vodíku ( $H + H$ , resp.  $2H$ ). Chemické vlastnosti  $H_2$  a  $H$  jsou odlišné, přestože se jedná o stejný prvek. Vodík se běžně nachází ve stavu dvouatomové molekuly  $H_2$ , atomární vodík  $H$  je velmi reaktivní, tzv. radikál.*

*Molekula helia je jednoatomová He (atom = molekula). Helium je běžné pouze v atomárním stavu, pouze za velmi nízkých teplot vytváří slabě vázané „molekuly“, které se označují jako shluky atomů (atomové klastry).*

*Kysličník uhličitý  $CO_2$  nebo voda  $H_2O$  jsou příkladem víceatomových (trojeatomových) heteronukleárních molekul.*

## Atomová teorie – historie.

Existenci atomů předpokládali již *LEUKIPPOS* (460-370 př.n.l.) a *DEMOKRITOS* (500-440 př.n.l.), jejich úvahy ale měly čistě spekulativní charakter, jejich hypotéza nebyla ověřena experimentem. **Atomová teorie** vzniká teprve na přelomu 18. a 19. století. Na základě rozboru základních chemických zákonů vyslovil *JOHN DALTON* (1766 – 1844) domněnku, že látky se

skládají ze základních stavebních částic – **atomů**. Zároveň postuloval základní vlastnosti atomů, čímž položil základy atomové teorie. Daltonovy představy o atomární struktuře látky umožnily objasnit pozorované chemické zákonitosti a staly se východiskem pro objasnění dalších experimentálních poznatků zejména z oblasti chemie a fyziky.

Základní postuláty Daltonovy atomové teorie:

- prvky se skládají z velmi malých dále nedělitelných částic – atomů,
- atomy téhož prvku jsou stejné, atomy různých prvků se liší hmotností, velikostí a dalšími vlastnostmi,
- v průběhu chemických dějů se atomy spojují, oddělují nebo přeskupují, přičemž ale nemohou vznikat nebo zanikat,
- slučováním dvou či více prvků vznikají chemické sloučeniny, slučování probíhá jako spojování celistvých počtů atomů prvků.

Na základě objevu elektronu, lehké částice se záporným elektrickým nábojem, která může být emitována elektricky neutrálním atomem, navrhl *WILLIAM THOMSON (1824–1907)*, první model struktury atomu. Thomsonovy, jak se později ukázalo, mylné představy o struktuře atomu můžeme dnes formulovat následujícím způsobem:

- hlavní část hmotnosti atomu představuje látka s kladným elektrickým nábojem,
- hmotnost a kladný elektrický náboj jsou spojitě rozloženy v celém objemu atomu,
- velmi lehké elektrony jsou umístěny uvnitř kladně nabitě látky v rovnovážných polohách.

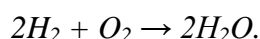
Na základě rozboru rozptylových experimentů usoudil *ERNEST RUTHERFORD (1871 – 1937)*, roku 1911, že atomy mají jádro, které má kladný elektrický náboj a připadá na něj téměř celá hmotnost atomu. Na rozdíl od Thomsonova modelu atomu však musí toto jádro zaujímat pouze malou část objemu atomu. Jeho lineární rozměr je asi desettisíckrát až stotisíckrát menší než lineární rozměr atomu (přibližně  $10^{-10}$  m).

Tento model jádra je v souladu se současnými poznatky. Z pohledu nových fyzikálních teorií však nelze určit přesnou dráhu elektronu, jak si to představoval Rutherford, ale jen pravděpodobnost jeho výskytu – „elektronový oblak“.

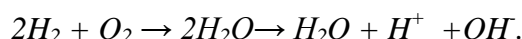
### **Chemické vzorce – chemické reakce**

Značení molekul se provádí pomocí tzv. **sumárních vzorců**, které vyjadřují pravým dolním indexem u značky chemického prvku počty atomů daného prvku v molekule. Molekuly látek spolu mohou reagovat, případně se jen rozdělovat - **disociovat**, přičemž vznikají látky nové, hovoříme o **chemických reakcích**. Jejich průběh zapisujeme jako sled stavů (často jen dvou, výchozího a konečného), který jsou odděleny šipkami, které vyjadřují směr změny stavů. Příslušné stavy popisujeme pomocí značek molekul, obvykle doplněných o číslo udávající počet těchto molekul, které jsou odděleny symbolem „+“.

*Příklad:*



*Reakce může případně pokračovat např.*



### **Atomové jádro**

Tvoří centrální část atomu o velikosti řádově  $10^{-15}$  m. Je v něm soustředěna téměř celá hmotnost atomu. Na elektronový obal připadá řádově jedna tisícina celkové hmotnosti atomu. Atomové jádro má kladný elektrický náboj.

Z hlediska vnitřní struktury představuje atomové jádro systém sestávající se nejméně z jednoho nebo více **protonů** a libovolného počtu **neutronů** (neutrální částice, přibližně stejně těžké jako proton) vázaných **jadernými silami**. Protony a neutrony se souhrnně označují jako **nukleony**.

**Protonové číslo  $Z$**  – počet protonů v jádře. Protože náboje protonu a elektronu jsou stejně velké ale s opačným znaménkem, určuje u elektricky neutrálního atomu protonové číslo i počet elektronů v atomu a také jeho pořadí v periodickém systému. Atomy daného prvku jsou jednoznačně identifikovány tímto číslem.

**Nukleonové číslo  $A$**  – počet nukleonů (protonů + neutronů) v jádře. Pomocí tohoto čísla můžeme přibližně určit hmotnost jádra. Při přesném výpočtu je nutné vzít do úvahy odlišnou hmotností protonů a neutronů a také fakt, že hmotnost jádra se nerovná prostému součtu hmotnosti jednotlivých nukleonů, ale liší se o tzv. **hmotnostní úbytek  $\Delta m$** . V jádru atomu daného prvku může být různý počet neutronů, pokud se ale liší od určitého optimálního, u lehkých prvků je to polovina počtu nukleonů v jádře, stává se jádro nestabilní a rozpadá se.

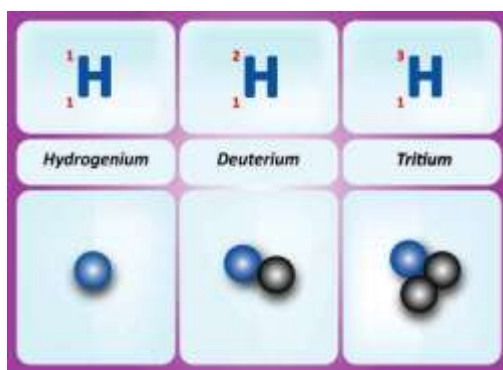
### Hmotnostní úbytek $\Delta m$

Hmotnost jádra se nerovná prostému součtu hmotností jednotlivých nukleonů v jádře protože při vzniku jádra se uvolňuje tzv. **vazebná energie  $E_V$** . Podle **Einsteinova vztahu** mezi energií a hmotností platí pro úbytek hmotnosti jádra  $\Delta m = E_V/c^2$ .

**Nuklid** je látka, u níž jsou jádra atomů jednoznačně určena protonovým  $Z$  a nukleonovým  $A$  číslem. Značení  ${}_Z^AX^{(N)}$ , kde  $X$  je značka prvku,  $N = A - Z$  je neutronové číslo – nepovinný údaj.

**Izotopy** jsou jádra daného prvku – stejné  $Z$  ale s různým nukleonovým číslem  $A$ .

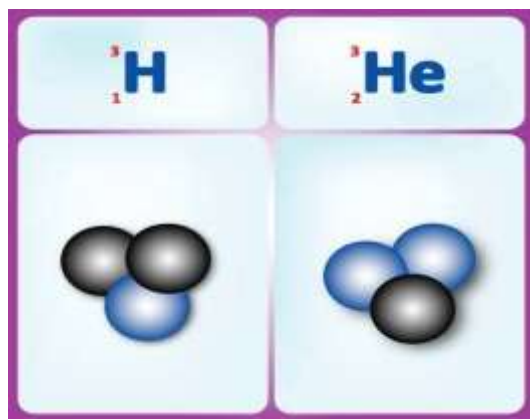
*Příklad – izotopy vodíku (vodík  ${}_1^1H^{(1)}$ , deuterium  ${}_1^2H^{(1)}$ , tritium  ${}_1^3H^{(2)}$ ), viz obr. 1.*



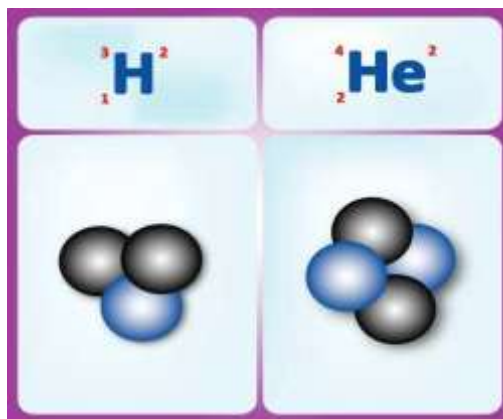
Obr. 1: Izotopy vodíku

**Izobary** – jádra se stejným počtem nukleonů, viz obr. 2.

**Izotony** – jádra se stejným počtem neutronů  $N$ , viz obr. 3.



Obr. 2: Izobary



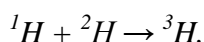
Obr. 3: Izotony

## Jaderné reakce

Podobně jako se mohou molekuly slučovat a rozpadat v chemických reakcích, tak se také atomová jádra mohou vnějším zásahem, zpravidla letící částicí, přeměňovat – slučovat nebo štěpit, na jádra jiná, přičemž kromě jader mohou vznikat i jiné částice. Tyto procesy označujeme jako **jaderné reakce**.

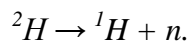
Jaderné reakce zapisujeme obdobným způsobem jako chemické reakce, tedy jako sled jednotlivých stavů oddělených šipkami. Každý stav je určen danými jádry a částicemi. Jádra atomu daného prvku značíme jeho chemickou značkou, která má vlevo nahoře uvedeno nukleonové číslo. Vlevo dole lze připsat protonové číslo. Jiné částice mají své speciální označení.

*Příklad:*

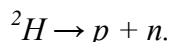


což je zápis reakce, při které se jádro vodíku tvořené pouze protonem, slučuje s jádrem jiného izotopu vodíku, tzv. deuteria, které obsahuje jeden proton a jeden neutron, na jádro dalšího izotopu vodíku, tzv. tritia, které obsahuje jeden proton a dva neutrony.

Naopak deuterium se může rozpadat



Při reakci tedy vzniká jádro obyčejného (lehkého) vodíku a neutron (značka  $n$ ). Protože  ${}^1\text{H}$  je tvořeno jen protonem, lze taky psát



## Radioaktivita

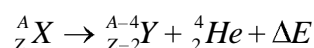
Jev spontánní jaderné přeměny radionuklidu, tzv. **radioaktivní přeměny**, která je doprovázena emisí **radioaktivního záření**  $\alpha$ ,  $\beta^+$  nebo  $\beta^-$  a  $\gamma$ , záchytem elektronů, emisí protonů nebo emisí fragmentů.

Radioaktivitu objevil v roce 1895 A. H. BECQUEREL (1852 – 1908), při výzkumu fosforescence látek. Zjistil, že některé látky vyzařovaly záření, které obdobně jako světlo způsobovalo zčernání fotografické emulze. Radioaktivita přirozených, v přírodě se nacházejících, resp. umělých, laboratorně připravených, radionuklidů se označuje jako **přirozená**, resp. **umělá radioaktivita**.

## Radioaktivní záření

### Záření alfa

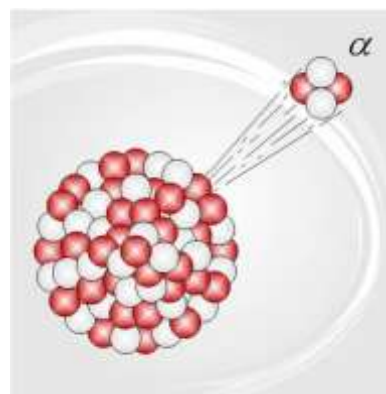
Je proud jader  ${}^4\text{He}$ , označují se též jako **částice  $\alpha$** , emitovaných jádrem při jaderných přeměnách. Rychlost částic alfa při radioaktivních přeměnách se pohybuje okolo 20 000 km/s, viz obr. 4. Obecný zápis přeměny  $\alpha$  je



kde  $X$  a  $Y$  jsou jádra izotopů před a po přeměně  $\alpha$  a  $\Delta E$  je energetický výtěžek z jedné přeměny ve formě kinetické energie částic a vzniklého jádra.

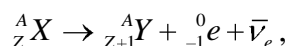
### Záření beta

Je proud elektronů neboli **částic  $\beta^-$** , resp. **pozitronů** neboli **částic  $\beta^+$** , kladně nabitých antičástic elektronů, emitovaných jádrem při jaderných přeměnách. Částice beta emitované při radioaktivních přeměnách mají rychlosti asi 280 000 km/s.

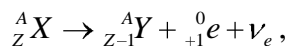


Obr. 4: Záření  $\alpha$

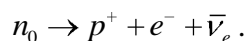
Radioaktivita se vyskytuje u jader s přebytkem neutronů, kdy dochází k rozpadu jádra podle obecného předpisu pro rozpad  $\beta^-$



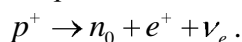
kde  $\bar{\nu}_e$  je elektronové antineutrino, viz obr. 5. Pro rozpad  $\beta^+$  pak



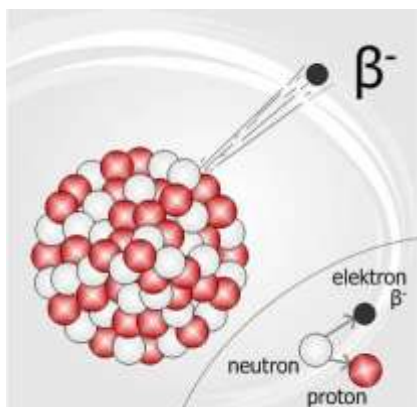
kde  $\nu_e$  je elektronové neutrino, viz obr. 6. V případě záření  $\beta^-$  dochází k transmutaci neutronu na proton a elektron



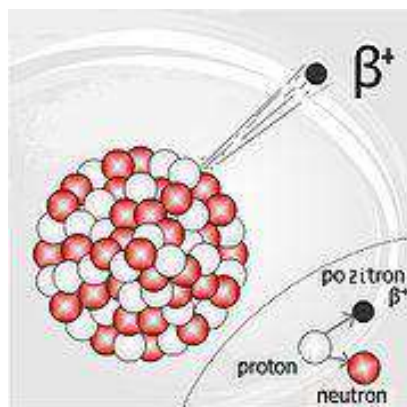
Při radioaktivitě  $\beta^+$  dochází k transmutaci protonu na neutronu a pozitronu podle rovnice



Z uvedených rovnic je zřejmé, že proton ani neutron nejsou elementární částice.



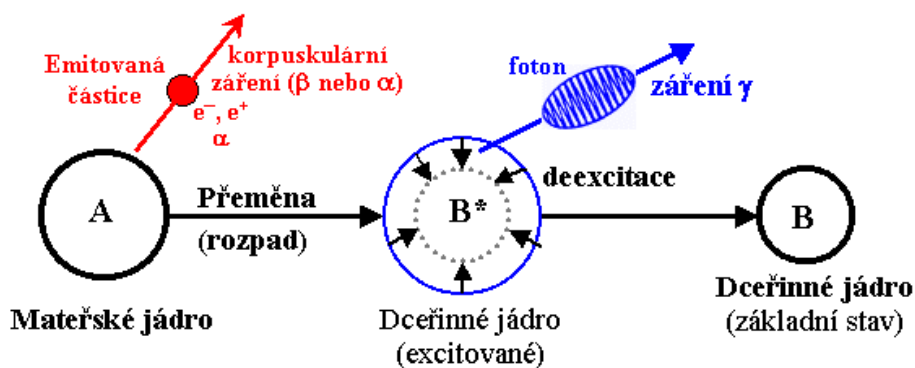
Obr. 5: Záření  $\beta^-$



Obr. 6: Záření  $\beta^+$

### Záření gama

Záření gama je vysoce energetické elektromagnetické záření vznikající při radioaktivních a jiných jaderných a subjaderných dějích. Záření gama je definováno jako záření o energii fotonu vyšší než 10 keV, přestože do tohoto spektrálního pásma zasahuje i velmi tvrdé rentgenové záření. Tyto druhy záření se liší procesem, při kterém vznikají, ale samo záření se v obou případech fyzikálně neliší. Záření gama je záření ionizující. Látkou proniká lépe než záření alfa nebo záření beta, která jsou na rozdíl od gama záření korpuskulární povahy. Ionizující účinky má však záření gama menší. Záření gama vzniká často spolu se zářením alfa či beta při radioaktivním rozpadu jader. Po vyzáření částice alfa nebo beta, bývá nové jádro v excitovaném stavu. Přejít na nižší energetický stav je spojen s vyzářením fotonu gama záření, viz obr. 7.



Obr. 7: Záření  $\gamma$



## Zákon radioaktivní přeměny

**Aktivita** – počet přeměn za sekundu, resp. rychlost přeměny  $A = dN/dt$  je přímo úměrná počtu dosud nepřeměněných jader  $N$  daného radionuklidu

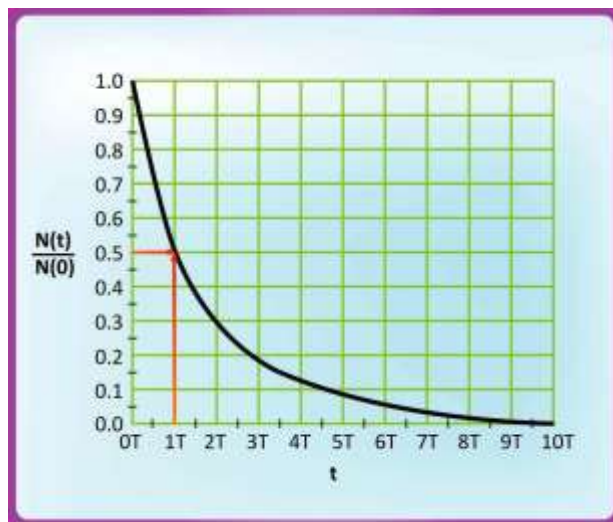
$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N,$$

kde  $\lambda$  je **konstanta přeměny** pro daný radionuklid. Jednotkou aktivity je **Becquerel**, značka  $Bq$ , definovaný jako 1 rozpad za 1 sekundu; rozměr jednotky je  $s^{-1}$ . Starší jednotka curie, značka  $Ci$  odpovídá  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq.

Časový úbytek jader radionuklidu lze charakterizovat pomocí **poločasu přeměny**  $T$ , resp.  $T_{1/2}$ , dříve též **poločasu rozpadu**, je to doba, za níž se přemění polovina z počátečního počtu  $N(0)$  dosud nepřeměněných jader. Tato závislost má matematické vyjádření

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} = N(0)\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}},$$

kde  $N(t)$  je počet dosud nepřeměněných jader v čase  $t$ ,  $N(0)$  je počet jader na počátku v čase  $t=0$ . Mezi poločasem přeměny  $T$  a konstantou přeměny platí vztah  $T = \ln 2 / \lambda$ . Na obr. 8 je graficky znázorněn časový průběh úbytku radioaktivních jader.



Obr. 8: Časová závislost rozpadu jader

Příklady poločasu přeměn pro různé radioaktivní látky jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1: Příklady poločasu rozpadu jader

Nuklid	Poločas přeměny
${}_{92}^{238}U$	$4,5 \cdot 10^9$ let
${}_{88}^{226}Ra$	$1,62 \cdot 10^3$ let
${}_{47}^{115}Ag$	20 min
${}_{84}^{212}Po$	$3 \cdot 10^{-7}$ s

## 2 Zdroje a účinky ionizujícího záření, dozimetrie a ochrana před ionizujícím zářením

### Ionizující záření

Je elektromagnetické záření nebo proud částic, např. elektronů, jader helia, neutronů, iontů a dalších částic, které jsou schopny způsobit ionizaci atomů dané látky. Často se definuje jako záření s energií větší než 5 keV (1 eV odpovídá energii, kterou elektron získá při napětí 1V).

**Přímo ionizující záření** je tvořeno nabitými částicemi (protony, elektrony, pozitrony aj.), které ionizují prostřednictvím elektrického pole svého náboje.

**Nepřímo ionizující** záření zahrnuje nenabité částice (např. neutrony nebo fotony.), které prostředí samy neionizují, ale při interakci s prostředím uvolňují sekundární přímo ionizující

částice. Ionizace je v tomto případě způsobena těmito sekundárními částicemi.

Mezi ionizující záření patří uvedené **radioaktivní záření** (alfa, beta plus, beta minus, gama), ale také obecněji chápané tzv. **jaderné záření** (mimo částic uvedené u radioaktivního záření to mohou být i další částice např. neutrony), které vzniká obecně při jaderných přeměnách, dále pak **kosmické záření**, které na Zemi dopadá z kosmu a z horních vrstev atmosféry a **rentgenové záření**.

### **Rentgenové záření - paprsky X**

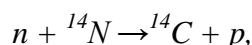
Je elektromagnetické vlnění o vlnových délkách  $10^{-8}$  až  $10^{-15}$  m. Rozlišujeme dva druhy Rentgenova záření.:

- **brzdné záření**, vzniká brzděním nabitých částic, většinou elektronů, v poli atomů, iontů či jader, jeho frekvenční spektrum je spojité,
- **charakteristické záření**, vzniká při deexcitaci atomů, tj. při snížení energie elektronů atomu přechodem na nižší energetickou hladinu, jeho frekvenční spektrum je diskrétní a charakteristické pro daný prvek.

Zdroje ionizujícího záření jsou **přirozené** (radioaktivita, Slunce, kosmické záření) a **umělé** (zdroje RTG záření, jaderné reaktory, urychlovače).

Mezi přirozené zdroje ionizujícího záření patří

- **radionuklidy**, které se vyskytují v přírodě a jsou zdrojem radioaktivního záření. Tyto tzv. přirozené radionuklidy vznikají buď trvale v důsledku jaderných reakcí, které jsou vyvolány dopady částic kosmického záření v atmosféře (**kosmogenní radionuklidy**), např. izotop uhlíku  $^{14}\text{C}$  vznikající reakcí



nebo existovaly na Zemi již v době jejího vzniku a díky dlouhým poločasům rozpadu se vyskytují dodnes (**primordiální radionuklidy**), např. nuklidy  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  a dále radionuklidy, např. radium  $^{226}\text{Ra}$  a radon  $^{222}\text{Rn}$ , které jsou součástí rozpadových řad.

- **kosmické záření**, což je proud velmi rychlých částic, který dopadá na Zemi z kosmického prostoru (tzv. **primární složka**), nebo částic vznikajících v důsledku srážek s horními vrstvami atmosféry (**sekundární složka**). Primární složka pochází ze vzdálených částí kosmického prostoru (**galaktická složka**), ze Slunce (**sluneční kosmické záření**) a záření z mraků částic, které jsou zachyceny magnetickým polem Země ve vzdálenostech 3 – 20 tisíc km od Země (**van Allenovy radiační pásy**).

Primární kosmické záření obsahuje hlavně protony, v daleko menší míře pak alfa částice. Van Allenovy pásy obsahují protony a elektrony. Součástí sekundární složky jsou zejména miony a elektrony.

Příklady umělých zdrojů radioaktivního záření:

- různé typy urychlovačů,
- jaderný reaktor,
- tzv. lékařské rentgeny a obecně všechna zařízení, používající rentgenky (CT, mamografy),
- zařízení pro scintilační a stopovací diagnostické metody,
- terapeutická zařízení – rentgenové ozařovače, cesiové a kobaltové gama ozařovače,
- Leksellův gama-nůž,
- radiofarmaka,

- zařízení, pracující s brzdovým či rtg zářením (mimo jiné barevné CRT monitory a TV obrazovky).

## Účinky ionizujícího záření

### Fyzikální a chemické účinky

Ionizující záření interaguje s látkou a v důsledku této interakce dochází v látce k fyzikálním a chemickým procesům, které vedou k vratným nebo nevratným změnám struktury těchto látek.

Mezi fyzikální účinky patří ionizace a excitace atomů a molekul, tepelný ohřev látek a následné změny chemické struktury a složení látek např. disociace molekul, nebo změny skupenství, v případě velmi energetického záření pak může docházet i k přeměnám jader, např. k přeměně stabilních izotopů, které představují zdroj ionizujícího záření – neradioaktivní (indukovaná) radioaktivita.

### Biologické účinky

Narušení struktury látek, z nichž se skládá živý organismus, a z toho vyplývající změny v biochemických pochodech těchto organismů vedou k narušení funkčnosti organismu jako celku, případně se mohou negativně projevit při reprodukci těchto organismů.

Na příklad vznik iontů a radikálů (reaktivní zbytky po rozpadu molekul) vede k poškození buněčných tkání a poškození buňky. Při dlouhodobém působení vyšších intenzit ionizujícího záření může velké množství takto vzniklých nežádoucích látek vést až k záhubě buňky. Ionizující záření může také způsobit chemické změny ve struktuře DNA, která je nositelkou dědičné informace a může tak způsobit defekty organismu v dalších generacích.

**Nemoc z ozáření** způsobuje celkové poškození organismu působením ionizujícího záření. Její účinky závisejí na velikosti dávky ozáření a na době jeho působení.

**Akutní nemoc z ozáření** při ozáření do 1 Gy bez příznaků, při větším ozáření vzniká postupně dřeňová a centrálně nervová forma nemoci z ozáření. Smrtelná dávka ozáření u člověka je 4 Gy.

**Chronická forma nemoci z ozáření** vzniká pozvolně a nenápadně jako následek zevního ozáření. Projevuje se únavou, neuropsychotickými potížemi, celkovým chátráním organismu. Vyskytují se známky poškození kostní dřeně.

**Pozdní následky z ozáření** se objeví po několika letech latence. Vyvolávají vznik chorob – leukémie, rakoviny plic, kůže, štítné žlázy, aj. Mohou vyvolat změny na organismu během embryonálního vývoje. Ozáření může vést ke genetickému poškození, které se projeví až v dalších generacích.

## Dozimetrie ionizujícího záření

Účinky ionizujícího záření v látce závisejí jednak na schopnosti záření danou látku ionizovat, tj. na **ionizačních účincích**, jednak na celkové energii, kterou látka absorbovala, tj. na **energetických účincích**. Pro kvantitativní určení těchto účinků se zavádějí dozimetrické veličiny.

### Absorbovaná dávka

Je množství energie absorbované v daném objemu látky vztažené na hmotnost látky v tomto objemu. Jednotkou je **Gray**, značka Gy, rozměr jednotky J/kg. Starší jednotkou je stokrát menší **rad**.

*Pozn.: Další veličiny jako kerma a expoziční, které určovaly celkový náboj jednoho znaménka vzniklého nepřímou ionizací, se postupně přestávají v dozimetrii užívat.*

### **Ekvivalentní dávka**

Pro určení biologických účinků se používá *dávkový ekvivalent*, resp. *ekvivalentní dávka*. Je to dávka vynásobená tzv. *jakostním faktorem*  $Q$ , který zohledňuje fakt, že různé typy záření mají ve svém důsledku různé účinky při stejné absorbované dávce. Jestliže je ionizující záření složeno z více druhů ionizující záření, je celková ekvivalentní dávka rovna součtu ekvivalentních dávek jednotlivých složek. Jakostní faktor pro fotony a elektrony má hodnotu 1, pro neutrony podle energie od 5 do 20, pro protony 5 a částice alfa a těžká jádra 20. Jednotkou je *Sievert*, značka Sv, rozměr je stejný jako u dávky. Starší jednotkou je stokrát menší *rem*.

### **Efektivní dávka**

Je rovna součtu součinů tkáňových váhových faktorů  $w_T$  a ekvivalentní dávky v ozářených orgánech a tkáních. Pro gonády má  $w_T$  hodnotu 0,20, pro červenou kostní dřev, tlusté střevo, plíce a žaludek 0,12, pro močový měchýř, mléčné žlázy, játra, jícen a štítnou žlázu 0,05, pro kůži a povrchy kostí 0,01 a pro ostatní orgány a tkáně 0,05. Efektivní dávku pro celý organismus získáme tak, že ekvivalentní dávky absorbované v jednotlivých tkáních vynásobíme váhovým faktorem a sečteme.

### **Ochrana před ionizujícím zářením**

Ochrana před ionizujícím zářením znamená omezení působení ionizujícího záření, jinými slovy jde o snahu snížit absorbovanou dávku. Toho lze docílit:

- omezením doby působení na organismus, toho se docílí zejména zkrácením doby pobytu v zamořeném prostoru,
- dodržováním bezpečné vzdálenosti od zdroje,
- odstínění zdrojů ionizujícího záření vhodným absorbujícím materiálem,
- zabránění kontaminace radioaktivními materiály,
- dekontaminací zasaženého prostoru.

### **Dozimetrická kontrola**

Představuje spolu se stanovením přípustných limitů aktivní součást ochrany. Je třeba provádět měření aktivity zdrojů a absorbovaných dávek zejména v případě osob, tzv. *osobní dozimetrie*.

### **Limity**

Současná hodnota ročního limitu pro pracovníky činí 50 mSv, pětiletý limit 100 mSv. Základní limity pro ostatní obyvatelstvo jsou stanoveny ve výši 1 mSv / rok. Limity se určují na základě dvou typů škodlivých účinků

- *deterministické účinky*, u kterých lze jednoznačně stanovit prahovou dávku, při níž nedochází k poškození,
- *stochastické účinky*, u kterých nelze stanovit prahovou dávku pro škodlivý účinek, lze jen určit, jak velká část populace bude či nebude poškozena.

### **Osobní dozimetr**

Je zařízení, které pracovníci se zářením nosí u sebe tak, aby byly vystaveny působícím dávkám záření. Pomocí příslušného vyhodnocovacího zařízení lze určit absorbovanou dávku. Toto vyhodnocení se provádí v pravidelných intervalech. Typy osobních dozimetrů:

- filmový,
- termoluminiscenční,
- neutronový.

### ***Filmový dozimetr***

Funguje na principu zčernání citlivého filmu vlivem ionizujícího záření. Dozimetr navíc obsahuje různé filtry. Zčernání se vyhodnocuje denzitometrem a jeho stupeň určuje absorbovanou dávku záření.

### ***Termoluminiscenční dozimetr***

Funguje na principu excitace termoluminiscenční látky vlivem ionizujícího záření. Po zahřátí termoluminiscenční látky tato látka uvolňuje absorbovanou energii ve formě luminiscenčního záření, jehož intenzita je závislá na absorbované dávce záření. Používá se hlavně ke kontrole expozice končetin i jako celotělový dozimetr.

### ***Neutronový dozimetr***

Slouží k registraci speciálně neutronového záření. Neutrony ve vhodném materiálu vyvolají štěpení jader. Úlomky štěpných produktů prorazí polyesterovou fólii, a vytvoří tzv. stopu. Z počtu stop se určí dávka.

### ***Kontrolované pásmo***

Je prostor vymezený k práci s ionizujícím zářením, ve kterém se musí dodržovat zvláštní režim ochrany před zářením včetně dozimetrické kontroly.

### ***Stínění***

Představuje pasivní způsob ochrany. Účinnost stínění závisí na absorpčních vlastnostech stínění, tj. schopnosti pohlcovat daný typ ionizujícího záření. Stínící účinek závisí na materiálu použitého ke stínění, na jeho tloušťce, případně na jeho hustotě. Pro odhad tloušťky se používá pojem tzv. ***polovrstvy***, což je tloušťka daného materiálu, která zeslabí intenzitu záření na polovinu.

V případě záření gama nebo rentgenového záření lze ke stínění použít olovo, používá se také beton nebo dokonce voda. Záření beta má menší pronikavý účinek, pro ochranu stačí i plexisklo nebo slabší tloušťky materiálů. Složitějším problémem je stínění neutronů vyzařovaných reaktorem – je nutné použít tři různé typy materiálů. Ke zpomalení neutronů např. parafín, k absorpci bór či kadmium a k odstínění gama záření vzniklého při absorpci olovo.

## **Zákony a vyhlášky pro ochranu před IZ**

- Zákon č. 18/1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření stanovuje obecná pravidla,
- Vyhlášky SÚJB č. 146/1997, č. 184/1997, č. 214/1997, č.307/2002a č. 499/2005.

## **Dohled nad dodržováním pravidel ochrany před ionizujícím zářením**

### ***Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB)***

SÚJB vykonává státní správu a dozor při využívání jaderné energie a ionizujícího záření v oblasti radiační ochrany a v oblasti jaderné, chemické a biologické ochrany. Dohlíží a koordinuje celý komplex opatření pro bezpečné používání zdrojů ionizujícího záření. Kromě legislativní činnosti SÚJB posuzuje projekty pracovišť se zdroji ionizujícího záření, vydává příslušná povolení a vykonává inspekční činnost na těchto pracovištích.

### ***Státní ústav radiační ochrany (SÚRO)***

Je rozpočtovou organizací zabývající se odbornou činností v oblasti ochrany obyvatelstva před ionizujícím zářením. Zajišťuje následující činnosti

- vydává informace o okamžité radiační situaci na území České republiky a o výsledcích měření radioaktivních izotopů v potravinách, ovzduší atd.,

- vydává dokumenty a publikace týkající se radiační ochrany, vypracované buď ústavem, nebo ve spolupráci s jinými institucemi a rovněž legislativní dokumenty týkající se radiační ochrany,
- poskytuje informace o problematice radioaktivního radonu a jeho výskytu v obytných prostorech, o radioaktivitě stavebních materiálů a vody.

### Dozor na pracovištích

Na každém pracovišti s ionizujícím zářením musí být ustaven dohlížející pracovník, který se přímo na místě zabývá otázkami radiační ochrany a vede příslušnou dokumentaci. Dohlížející pracovník se účastní kursů a seminářů pořádaných SÚJB a dalšími organizacemi a odbornými společnostmi.

## 3 Jaderná energetika a její vztah k životnímu prostředí

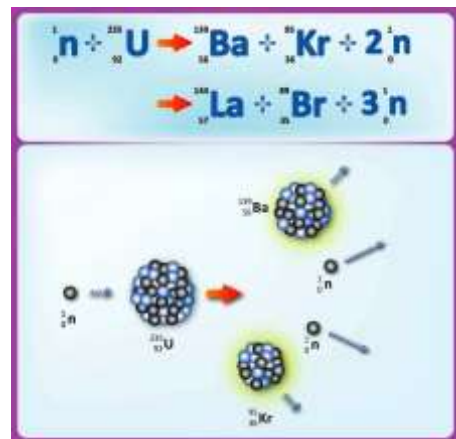
### Štěpná jaderná reakce

Je jaderná reakce, při níž dochází k rozštěpení původního atomového jádra na nejméně dvě částice či nová lehčí jádra, tzv. *fragmenty*.

#### Štěpení uranu

Štěpení uranu  $^{235}\text{U}$  může být vyvoláno pohlcením pomalého neutronu. Při této reakci vznikají dva fragmenty a dva až tři neutrony, viz obr. 9.

Kromě neutronů vznikají i fotony gama záření. Při reakci jsou splněny příslušné zákony zachování. Pro vyvolání štěpení jádra uranu musí být dodána **aktivační energie** pohlcením neutronu jádrem. To je možné pouze u tzv. **pomalých neutronů**, jejichž kinetická energie je menší než 0,3 eV. **Energie reakce** v případě štěpení uranu je průměrně 200 MeV/atom. Energetické změny při chemických reakcích jsou řádově v jednotkách eV/částici. Při štěpení se tedy uvolní přibližně milionkrát více energie!!



Obr. 9: Štěpení uranu

Štěpení uranu může probíhat jako řetězová reakce, pokud rychlé neutrony vzniklé při reakci jsou zpomaleny tak, aby mohly štěpit další dostupná jádra uranu, hovoříme pak o **štěpné řetězové reakci**.

#### Moderace neutronů

Podmínkou vzniku štěpné řetězové reakce uranu je zpomalení, tzv. **moderace neutronů**. Ke zpomalení neutronů se používá jejich průchod vhodnou látkou, tzv. **moderátorem**. Jako moderátor se používá například **grafit**, (**lehká voda**  $\text{H}_2\text{O}$  nebo **těžká voda**  $\text{D}_2\text{O}$ ).

#### Řetězová reakce

Pokud v jedné reakci vznikne více produktů (jader, částic), z nichž každý je schopen reagovat s dalšími jádry paliva, bude se počet jaderných reakcí a tedy i jaderných přeměn s časem stále zvětšovat lavinovitě geometrickou řadou, vzniká **lavinovitá řetězová reakce**.

Štěpení uranu může probíhat lavinovitě, protože při něm vznikají 2 až 3 neutrony, které pokud jsou zpomaleny, mohou způsobit štěpení dalších 2 až 3 jader uranu. K takovému lavinovitému štěpení dochází při explozi jaderné bomby.

#### Řízená řetězová reakce

V případě, že vhodným způsobem zajistíme, aby počet reakcí za časovou jednotku byl v čase stálý, případně jej ovlivňujeme žadáním směrem, hovoříme o **řízené řetězové reakci**.

V případě štěpení uranu vznikají při štěpné reakci dva až tři rychlé neutrony. Pokud budou všechny moderovány, bude řetězová reakce lavinovitě narůstat. Pohlcováním určitého počtu neutronů pomocí vhodných látek - **absorbátorů neutronů** můžeme štěpnou reakci řídit.

### Absorbátory neutronů

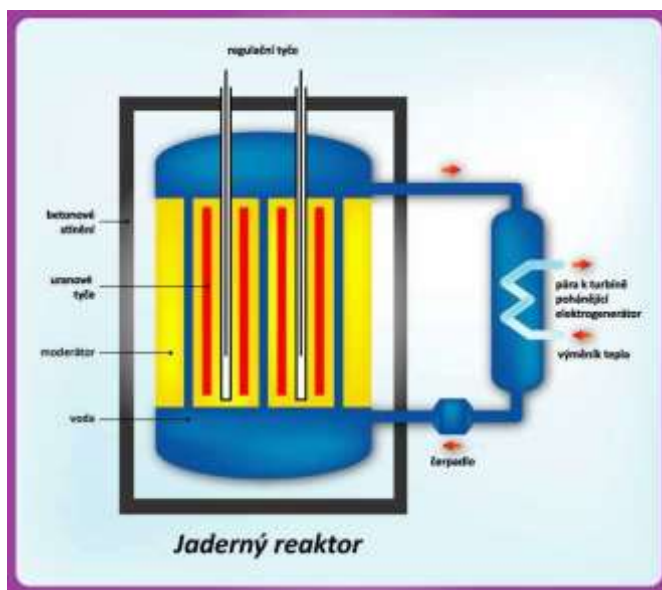
Neutrony jsou pohlcovány například jádry **bóru** a **kadmia**. V případě bóru se řízení provádí změnou koncentrace kyseliny borité, kadmium se používá ve formě tyčí a řízení se provádí změnou počtu nebo hloubkou zasunutí tyčí do jaderného reaktoru.

### Jaderná elektrárna

Jaderná elektrárna je elektrárna, ve které se jako zdroj tepelné energie využívá jaderný reaktor. Teplo vzniklé při štěpení jader v reaktoru je využíváno k výrobě páry pro parní turbíny pohánějící generátor elektrické energie.

### Jaderný reaktor

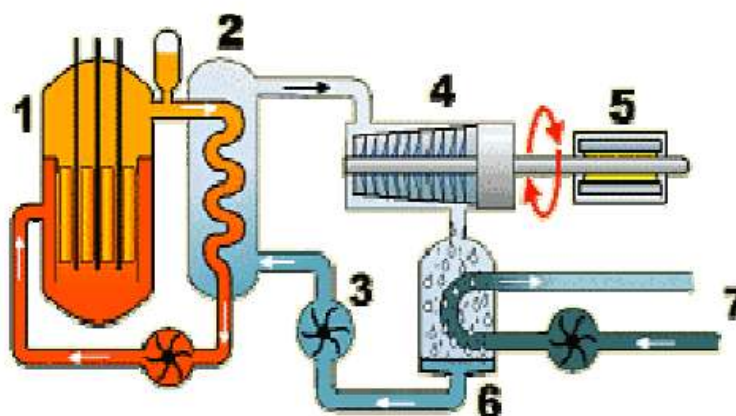
Je zařízení, ve kterém se uskutečňuje řízená štěpná řetězová reakce. Využívá se jako zdroj tepelné energie. Jaderný reaktor musí být chlazen, nejčastěji vodou v **primárním okruhu**. Získané teplo se ve výměníku tepla slouží k výrobě páry pro parní turbínu, která pohání elektrický generátor, viz obr. 10.



Obr. 10: Jaderný reaktor

### Schéma jaderné elektrárny

Elektrická energie se získává ve většině elektráren z generátoru, který je poháněn zdrojem mechanické energie. V případě větrné elektrárny to je vrtule, u vodních elektráren jsou to vodní turbíny nejrůznějších typů. V tepelné a v jaderné elektrárně je použita parní turbína.



1. jaderný reaktor, 2. parogenerátor, 3. čerpadlo, 4. parní turbína, 5. generátor,
6. kondenzátor, 7. chladicí okruh.

Obr. 11: Schéma jaderné elektrárny

V jaderné elektrárně, viz obr. 11, se využívá teplo uvolněné v jaderném reaktoru (1) k výrobě páry ve výměníku, tzv. parogenerátoru (2), ta pohání parní turbínu (4), která pohání generátor

(5) elektrické energie. Pára se následně ochlazuje v kondenzátoru (6) pomocí chladicího okruhu kondenzátoru (7).

### Přednosti a problémy jaderné elektrárny

Energie získaná z 1 kg uranu odpovídá přibližně energii, kterou bychom dostali spálením 3 000 000 kg uhlí.

Z uvedeného příkladu je zřejmé, že využití jaderného paliva je energeticky efektivnější než využití fosilních paliv. Určitým problémem by mohla být emise radioaktivních látek při provozu jaderné elektrárny. Ta je však menší než v případě tepelných elektráren, které produkují při spalování rovněž určité množství radioaktivního spadu.

Problém při provozu jaderné elektrárny představuje nebezpečí havárie jaderné elektrárny a bezpečné uskladnění či likvidace vyhořelého paliva. Při havárii jaderné elektrárny se může uvolnit do okolí velké množství radioaktivních látek. Riziko je ovlivněno především konstrukcí a dodržením pravidel provozu jaderné elektrárny. Při normálním provozu představuje výskyt poruch statistický problém, protože poruchy se vyskytují u všech technických zařízení.

Riziko havárie nelze však podceňovat, už vzhledem k tomu, že k haváriím, včetně těch opravdu závažných, již došlo. Z dlouhodobého hlediska představuje závažný problém pak především vyhořelé jaderné palivo, které je vysoce aktivním materiálem, který musí být bezpečně uskladněn po dobu, během níž dojde ke snížení jeho aktivity na přípustnou mez. Novou možností, která se ovšem teprve ověřuje, je využití přeměny radioaktivních látek na stabilní nuklidy cílenými jadernými reakcemi. Výhody a nevýhody jaderné elektrárny ve srovnání s elektrárnou tepelnou jsou uvedeny v tab. 2

Tab. 2: Výhody a nevýhody jaderné elektrárny ve srovnání s elektrárnou tepelnou

Parametr	Jaderná elektrárna	Tepelná elektrárna
Emise popílku	Není	Pouze uhelné elektrárny
Produkce SO <sub>2</sub> a NO <sub>x</sub>	Není	Ano
Provozní únik radioaktivních látek	Ano (malá množství)	Ano (malá množství)
Poměr vyrobené energie na jednotku hmotnosti paliva J/kg	$2.1 \times 10^{12}$	$3.3 \times 10^7$
Náklady spojené z dopravou paliva	Malé	Velké
Vyčerpatelnost zdrojů paliva	Ano (později než u fosilních paliv)	Ano
Množství „popela“ resp. vyhořelého paliva	Malé	Velké
Náklady spojené s likvidací vyhořelého paliva	Velké (dané hlavně nebezpečností a nutností dlouhodobého uskladnění)	Velké (dané hlavně velkým objemem)
Riziko vzniku velké havárie	Malé	Malé
Následky případné velké havárie	Velké	Malé



## **Možnosti ohrožení životního prostředí při provozu jaderné elektrárny**

### ***Dobývání uranových rud a jejich zpracování***

Představuje významný zdroj radioaktivního prachu zejména při povrchovém dobývání. Při dobývání dochází rovněž k uvolňování radioaktivního radonu.

### ***Obohacování uranu***

Je úprava paliva, probíhá v uzavřených prostorech a riziko úniku radioaktivních látek je malé.

### ***Doprava paliva***

Nepředstavuje rovněž významné riziko. K přepravě paliva se používají testované speciální přepravní kontejnery, které jsou odolné i vůči velkým nárazům.

### ***Normální provoz***

Normální provoz jaderné elektrárny představuje i ve srovnání s jinými technologiemi srovnatelné riziko. Nezbytností je oddělení primárního okruhu, který může obsahovat v chladicí vodě nečistoty s indukovanou radioaktivitou. Nutností je monitorování radiačního stavu (provoz – technologie, areál, okolí).

### ***Vyhořelé palivo***

I když ho zatím není velké množství, představuje významný problém, protože obsahuje i vysoce aktivní materiály, navíc palivové články mohou být během provozu poškozeny a existuje tak možnost úniku radioaktivních látek.

## **Jaderný odpad**

Vyhořelé palivo z jaderné elektrárny tvoří méně než 1 % objemu všech jaderných odpadů na světě, avšak produkuje přes 90 % celkové radioaktivity. I když bývá vyhořelé jaderné palivo považováno za odpad, může se stát cenným zdrojem surovin nebo jaderným palivem pro nové typy jaderných elektráren. Obě české jaderné elektrárny během dosavadní doby svého provozu vyprodukovaly celkem cca 3 000 tun vyhořelého jaderného paliva. I když se hovoří o likvidaci vyhořelého paliva, jedná se zatím jen o jeho bezpečné uložení na místo, kde přirozenými radioaktivními přeměnami přejde do stavu, kdy nebude nebezpečný pro okolí. Tento proces však trvá stovky až tisíce let.

### **Způsoby uložení jaderného odpadu**

Jaderný odpad se dočasně ukládá na 40 až 50 let do *meziskladů*, dále do vodních bazénů u jaderných reaktorů nebo mimo ně. Využívá se tzv. suché skladování ve stíněných ocelových kontejnerech, popř. v betonových sklípcích nebo betonových kontejnerech. Definitivní uložení jaderného odpadu umožní až *hlubinná úložiště*.

### **Uložení nízkoaktivních a středněaktivních radioaktivních odpadů**

Nízkoaktivní a středněaktivní radioaktivní odpad z JE Dukovany a JE Temelín jsou upraveny k uložení ve zpevněné formě nebo ve schválených obalech. Technologie *bitumenace*, použitá na úpravu kapalných radioaktivních odpadů v obou jaderných elektrárnách, zaručuje dlouhodobou stabilní ochranu proti účinkům radiace. Pevné radioaktivní odpady jsou tříděny podle svých vlastností. Tento způsob nakládání umožňuje průkaznější určení radionuklidů, kterými jsou odpady kontaminovány. Poté jsou skladovány a před konečnou úpravou se lisují do sudů o objemu 200 litrů. Konečná úprava probíhá kampaňovitě, sudy s předlisovaným odpadem jsou slisovány vysokotlakým lisem. Výlisky jsou umístěny do větších sudů (tzv. overpaků o objemu 300 až 400 litrů) a takto ukládány do úložiště radioaktivních odpadů. Výsledná redukce objemu je šestinásobná. Vytríděná neaktivní část odpadů je zneškodněna konvenčními způsoby, které jsou používány při nakládání s neaktivními odpady.

## **Uložení vysokoaktivních odpadů**

Vysokoaktivní odpady, představují nejzávažnější problém, skladují se ve speciálních kontejnerech uložených v meziskladech před tím, než budou uloženy definitivně do hlubinného úložiště. Ročně se do meziskladu ukládají 4 kontejnery s aktivními odpady.

## **Hlubinné úložiště**

Vytvářejí bariéry proti úniku radioaktivních látek do okolí. Inženýrské bariéry jsou tvořeny vlastní konstrukcí úložiště, způsobem ukládání odpadů do úložiště a dále např. obalem nebo matricí, do nichž jsou odpady vloženy a ukládány.

Přírodní bariéru při ukládání radioaktivního odpadu představují geologické vlastnosti prostředí, ve kterém je úložiště radioaktivního odpadu situováno. Při výběru lokality jsou přitom velmi přísně posuzována zákonem stanovaná kritéria pro umístění těchto zařízení. Úložiště jaderného odpadu nemůže být umístěno např. v zátopové nebo krasové oblasti, kde by jeho přítomnost mohla znehodnotit zásoby podzemních či minerálních vod apod. Příznivými charakteristikami pro umístění jsou nepropustnost podloží, dostatečná vzdálenost od vodních toků nebo ploch a dostatečná vzdálenost od míst trvalého osídlení.

Práce na projektu hlubinného ukládání vyhořelého paliva probíhají i v ČR. Příprava hlubinného úložiště byla zahájena již v roce 1990, úložiště by mělo být vybudováno v období let 2030-2040. V případě potřeby by se vyhořelé palivo mohlo v kontejnerech ukládat do prostoru vybudovaného v neporušené skalní formaci, která je geologicky, seismicky a hydrogeologicky stabilní. Na základě hodnocení archivních geologických informací podle bezpečnostních a legislativních kritérií bylo počátkem roku 2003 doporučeno 6 lokalit. Na podzim 2003 na nich proběhla letecká geologicko-fyzikální měření s cílem získat podrobnější data pro budoucí zúžení území lokalit na rozlohu cca 10 km<sup>2</sup>.

Problémem likvidace uložením je, že celé úložiště musí být monitorováno po celou dobu provozu, resp. po dobu dokud neklesne aktivita uložených materiálů pod bezpečnou úroveň. To představuje ekonomickou zátěž do budoucna.

Další možností likvidace vyhořelého paliva je jednak jeho přepracování a další využití v reaktorech, což je zatím ekonomicky nevýhodné, jednak by mohlo být zlikvidováno pomocí urychlovače, který vyvolá cílené jaderné reakce, které vytvoří z radionuklidů stabilní nuklidy.

## **Chemické přepracování vyhořelého paliva**

Vyhořelé palivové články z dnešních jaderných elektráren stále ještě obsahují přes 95% nevyhořelého uranu, z toho přibližně 1% <sup>235</sup>U, a dále pak další štěpitelné prvky jako například plutonium. Pouze 3% vyhořelého paliva připadá na štěpné fragmenty a transurany, tedy na prvky, které představují skutečný odpad. Hlavní podíl radioaktivity tvoří mezi štěpnými produkty cesium <sup>137</sup>Cs. V jaderném odpadu z 1000 MW reaktoru je ho zhruba 32 kg a dále stroncium <sup>90</sup>Sr, se zhruba 13 kg. Oba tyto štěpné produkty mají poločas rozpadu okolo třiceti let. V důsledku radioaktivního rozpadu ztrácí postupně vyhořelé palivo radioaktivitu a četné radioizotopy přecházejí na neaktivní prvky.

Již od počátku jaderného výzkumu se objevila idea na chemické přepracování vyhořelého paliva. Zhruba ve čtyřicátých letech minulého století se pak tato metodika začala ve vyspělých zemích i realizovat. Prakticky se věc provádí tak, že se z palivových kazet odstraní ochranný zirkonový obal a palivové články se rozpustí v kyselině dusičné a z roztoku se chemicky oddělují jednotlivé prvky.

Plutonium se opět použije jako palivo. Uran se uskladní nebo použije pro výrobu nového paliva. Zbytky kovového pokrytí palivových článků se zpracují jako středněaktivní odpad. Štěpné produkty se oddělují a vitrifikují (zatajují do skla). Z jedné tuny vyhořelého paliva tak vznikne pouze 115 litrů vysokoaktivního jaderného odpadu převedeného do formy skla.

Závody na přepracování vyhořelého paliva existují například ve francouzském Marcoule, či anglickém Sellafieldu. Jejich nevýhodou je poměrně malá kapacita a ne úplně bezpečný provoz. V současné době je proto stále levnější těžba nového uranu, než přepracování použitého jaderného paliva.

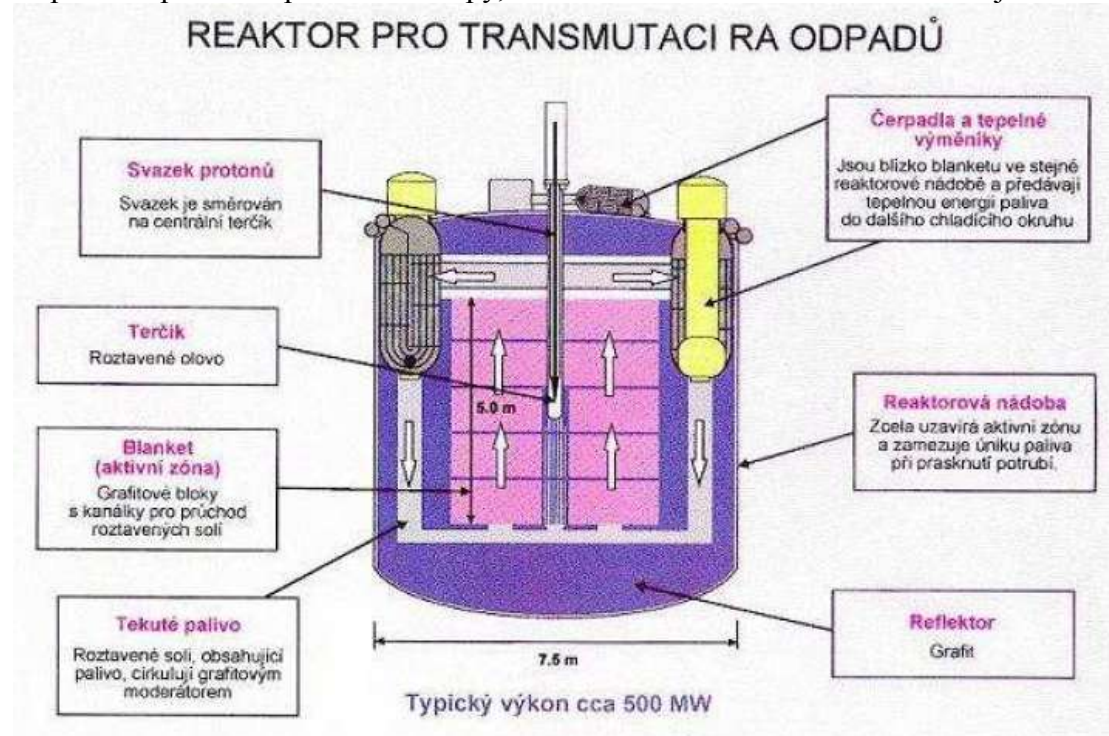
S postupem doby se objevují i další možnosti, jak palivo přepracovat. Tyto nově vyvíjené metody by měly umožnit získat z paliva další energii i během jeho přepracování a navíc by jejich provoz mohl být bezpečnější, než u metody chemického přepracování. I z tohoto důvodu je v současné době výhodné použít palivo prozatím skladovat v meziskladech do doby, než se vývoj nových metod, především technologie ADTT ukončí. Dalším důvodem proč je výhodné s přepracováním paliva vyčkat je fakt, že radioaktivita ve vyhořelém palivu postupně klesá a tedy pozdější přepracování je snadnější a levnější.

### Technologie ADTT (urychlovačem vyvolaná transmutační technologie)

Princip ADTT byl navržen již v padesátých letech 20. století a dnes se jím zabývají především vědci v americké laboratoři Los Alamos, v evropském CERNu a v ruské Dubně. Technologie ADTT představuje novou moderní alternativu k chemickému přepracování paliva.

Je vyvíjen zcela nový typ jaderného reaktoru kombinovaného s výkonným urychlovačem, viz obr. 12. Tento reaktor by umožňoval využívat i taková štěpná jaderná paliva, která nejsou samostatně schopna udržet řetězovou reakci, tedy např. vyhořelé palivo z dnešních jaderných elektráren, přírodní thorium apod. Z 12 gramů thoria lze uvolnit tolik energie jako spálením 30 tun uhlí. Reaktor s takovýmto složením aktivní zóny je **podkritický**, a tak přísun chybějících neutronů musí zajistit vedlejší zdroj, kterým je výkonný urychlovač protonů, který ostřeluje jádra těžkých prvků (olovo, wolfram,...) v terčiku, umístěném uvnitř aktivní zóny reaktoru a vyráží z nich potřebné neutrony, které udrží řetězovou štěpnou reakci.

Proton z urychlovače nárazem do terčiku uvolní pro další reakci zhruba 15 neutronů, které procházejí přes základního moderátor, vrstvu těžké vody do vlastní aktivní zóny reaktoru. Zde ve vhodném prostředí, většinou se navrhuje roztavené fluoridové soli, je štěpný materiál rozpuštěn spolu s odpadními isotopy, které chceme transmutovat. Ve vnější části reaktoru



Obr. 12: Schéma reaktoru ADTT

může docházet k transmutaci thoria  $^{232}\text{Th}$ . Zásoby thoria v zemské kůře jsou asi třikrát větší než uranu. Vznikající uran  $^{233}\text{U}$  se dodává do střední části reaktoru, kdy absorpcí neutronů dochází k jeho štěpení doprovázené uvolněním jaderné energie. Jelikož reaktor pracuje trvale v podkritickém režimu, je provozně bezpečný, neboť nemůže dojít k nekontrolované řetězové štěpné reakci. Rychlost reakce je totiž určena tokem protonů z urychlovače a při jeho vypnutí se reakce zastaví.

Sled štěpných reakcí – transmutace a  $\beta$  rozpady, které probíhají v ADTT reaktoru, by sloužily jednak jako zdroj jaderné energie, jednak jako účinná „spalovna“ radioaktivních odpadů, kde by se radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu postupně transmutovaly na radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu nebo i na nuklidy stabilní.

Do okruhu ADTT reaktoru by musela být zařazena jednotka účinné chemicko-isotopové separace, která by oddělovala isotopy s dlouhým poločasem rozpadu a případně spolu s  $^{233}\text{U}$  je navracela zpět do aktivní zóny reaktoru. Radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu a stabilní isotopy by se pak již mohly ukládat na běžná úložiště; jejich aktivita by za několik desítek let poklesla na úroveň přírodního radioaktivního pozadí.

Elektrická energie by se vyráběla za tepelným výměníkem v sekundárním okruhu klasickými parními turbínami. Při technicky pokročilém řešení by urychlovač spotřebovával cca 20% vyrobené energie, zbytek by mohl dodávat do sítě. Po překonání technických obtíží, zejména s urychlovačem, by se tak v budoucnu mohlo podařit uspokojivě uzavřít jaderný palivový cyklus i u štěpných reaktorů. Bude-li tento reaktor schopen přeměnit 99 % svých zplodin, bude k dispozici téměř neomezený a bezodpadový zdroj energie, protože zásoby uranu by se staly, alespoň pro nejbližší generace prakticky nevyčerpatelné. Dokonce by se mohla omezit, ne-li úplně zastavit těžba uranu. V současné době není zcela jasné, zdali budoucnost při získávání elektrické energie bude opřena o technologii ADTT, neboť do úvahy přicházejí i jiné možnosti, například termojaderná fúze.

### **Likvidace jaderné elektrárny**

Samotná jaderná elektrárna má omezenou životnost. Nelze ji však jednoduše rozebrat, protože řada konstrukčních prvků může být radioaktivních. Jsou tedy dvě možnosti, buď elektrárnu rozebrat a s radioaktivními komponentami naložit stejně jako s vyhořelým palivem, nebo celou elektrárnu zakonzervovat a monitorovat, což stojí další náklady na zařízení, které už je mimo provoz.

## **4 Alternativní zdroje energie**

### **Vodní energie**

Jedná se o čistý zdroj energie, který umožňuje kumulaci energie a její uvolnění v případě potřeby, přináší ovšem řadu problémů. Pro dosažení dobré účinnosti je nutný dostatečný spád, vyžaduje proto budování přehradních jezer, která představují zásah do místních ekosystémů a systému podzemních vod, brání volné migraci vodních živočichů. Požadavky energetiky mohou být někdy i v protikladu k požadavkům protipovodňové ochrany.

Vedle *průtokových vodních elektráren* patří mezi nejznámější typy vodních elektráren *elektrárny akumulací*. Jsou součástí vodních děl - nádrží. Tato vodní díla kromě akumulace vody pro výrobu elektrické energie stabilizují průtoky říčním korytem, chrání před povodněmi a podporují plavební možnosti daného toku.

K využití potenciálu vodních toků v ČR slouží i kategorie tzv. *malých vodních elektráren* (zdroje elektrické energie s instalovaným výkonem do 10 MW). Většina malých vodních

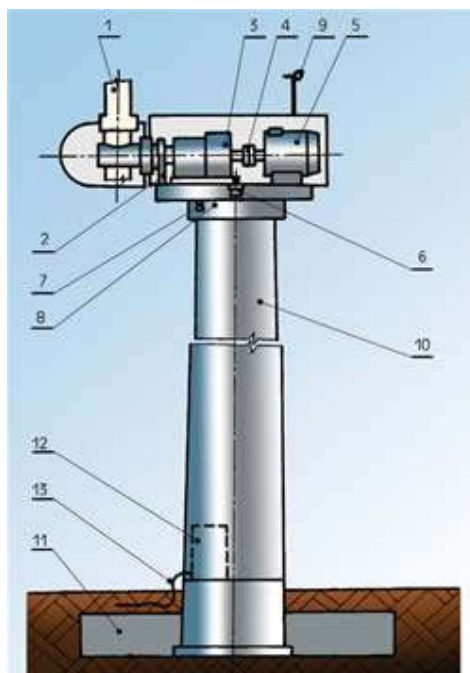
elektráren slouží jako sezónní zdroje. Průtoky toků, na kterých jsou zřizovány, jsou kolísavé a silně závislé na počasí a na ročním období.

**Přečerpávací vodní elektrárnu** tvoří soustava dvou výškově rozdílně položených vodních nádrží spojených tlakovým potrubím, na němž je v jeho dolní části umístěna turbína s elektrickým generátorem. Ta vyrábí elektřinu pro elektrizační soustavu v době energetické potřeby; v době útlumu se voda z dolní nádrže přečerpává "levnou elektřinou" do nádrže horní, kde její potenciální energie čeká na využití v době energetických špiček.

### Větrná energie

Je technologií, která se v současnosti velmi rozvíjí. Větrné elektrárny jsou konstruovány do výkonu cca 2 MW. Nové moderní generátory se od původních větrných mlýnů podstatně liší. Na vrcholu vysokého ocelového nebo betonového sloupu jsou upevněny rotory s dvěma až třemi listy. Ty uvádějí do pohybu hřídel, která pohání elektrický generátor. Výkon zařízení závisí na výšce sloupu a velikosti listů, protože s výškou nabývá vítr na intenzitě a větší plocha listu zachytí více větrné energie, viz obr. 13.

Dalším důležitým faktorem je rychlost větru, protože získaný výkon je úměrný třetí mocnině rychlosti větru. Většina větrných generátorů pracuje v rozmezí rychlosti větru 21 – 97 km/h. Hřídel s listy u klasických větrných elektráren musí směřovat ve směru větru. Větrné elektrárny s hřídelem kolmo ke směru větru, tzv. **Darreiovy větrné elektrárny** tuto podmínku nevyžadují. Generátor je u těchto elektráren umístěn na zemi, nikoli na vrcholu sloupu, čímž je zatížení sloupu mnohem menší. V praxi se však tento typ větrných elektráren příliš neuplatnil, neboť u nich dochází k mnohem vyššímu dynamickému namáhání, které značně snižuje jejich životnost. Nevýhodou je i malá výška rotoru nad terénem, tj. i menší rychlost větru.



1) rotor s rotorovou hlavicí, 2) brzda rotoru, 3) planetová převodovka, 4) spojka, 5) generátor, 6) servopohon natáčení strojovny, 7) brzda točny strojovny, 8) ložisko točny strojovny, 9) čidla rychlosti a směru větru, 10) několikadílná věž elektrárny, 11) betonový armovaný základ elektrárny, 12) elektrorozvaděče silnoprůběžného a řídicího obvodu, 13) elektrická přípojka.

Obr. 13: Schéma větrné elektrárny

Větrné elektrárny jsou situovány v místech se stabilním prouděním větru – na místech některých horských průsmyků, zejména však na mořském pobřeží. Velmi výhodnou variantou jejich umístění jsou šelfy mělkých moří, kde pracují spolehlivě a neomezují žádné další využívání prostoru.

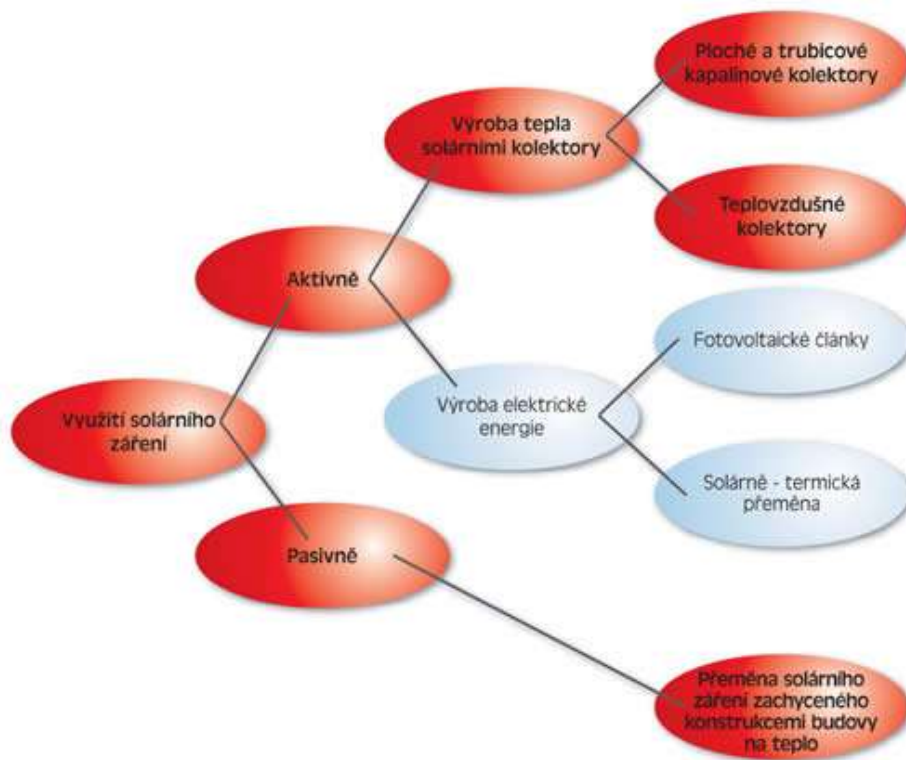
V současné době se větrné elektrárny nacházejí na více než padesáti lokalitách v ČR, jejich nominální výkon se pohybuje od 0,004 až po 2 MW. V roce 2006 vyrobily větrné elektrárny na území ČR téměř 50 GWh elektrické energie, nejvíce na severozápadě ČR a na střední Moravě. Na celkové výrobě elektřiny v ČR se větrné elektrárny podílely pouze 0,4 %, což je přibližně třetina průměrného podílu v zemích EU. Potenciál větrné energie v České republice je omezen na několik oblastí, nicméně i tak představuje celkový potenciál 10 – 20% celkové současné energetické spotřeby.

Životní prostředí zatěžují větrné elektrárny především svojí hlučností. Zvuky, které větrné elektrárny generují, mají dvě příčiny: 1) otáčející se mechanické prvky ve strojovně (zejména převodovka, generátor a další mechanismy), 2) proudění vzduchu kolem listů vrtule. Pokud mají větrné elektrárny stát v blízkosti obytných domů, je důležité zpracovat odborný posudek – akustickou studii. Výsledek musí potvrdit dodržení platných hygienických limitů hluku. Větrné elektrárny rovněž představují nebezpečí po letící ptáky.

### Sluneční energie

Téměř veškerá energie, kterou na Zemi máme k dispozici, pochází ze Slunce. Sluneční záření lze přímo využívat k výrobě tepla, chladu a elektřiny, nepřímo jako energii vodních toků, větru, mořských vln, tepelnou energii prostředí. Nejvýznamnější je využití sluneční energie "uskladněné" v rostlinách a jiné živé hmotě - biomase.

Přeměna solárního záření na teplo (fototermální přeměna) může být pasivní (pomocí pasivních **solárních prvků** budov - prosklené fasády, zimní zahrady) nebo aktivní (pomocí přídavných technických zařízení - sluneční kolektory). Podrobné rozdělení možností ukazuje obr. 14. Elektrická energie se získává ze sluneční energie přímým a nepřímým způsobem.



Obr. 14: Možnosti využití ze solárního zařízení

## Přímá přeměna

Využívá **fotovoltaický jev**, při kterém se v určité látce působením světla (fotonů) uvolňují elektrony. Tento jev existuje u některých polovodičů (např. u křemíku, germania, selenu, telluru, kadmia aj.). **Fotovoltaický článek** je tvořen nejčastěji tenkou destičkou z monokrystalu křemíku, použít lze i polykrystalický materiál. Sluneční články se zapojují buď za sebou, abychom dosáhli potřebného napětí (na jednom článku je 0,5 V), nebo vedle sebe tak, abychom získali větší proud. Spojením více článků vedle sebe a za sebou vzniká sluneční panel. Pro distribuci vyrobené elektrické energie je pak nutný převod na střídavé napětí.

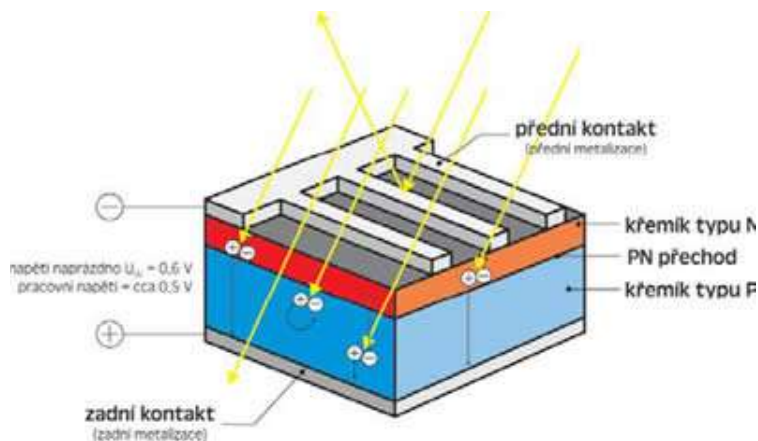
## Nepřímá přeměna

Je založena na získání tepla pomocí slunečních sběračů. V ohnisku sběračů jsou umístěny termočlánky, které mění teplo v elektřinu. Termoelektrická přeměna spočívá na tzv. **Seebeckově jevu** – v obvodu z drátů ze dvou různých kovů vzniká elektrický proud, pokud jejich spoje mají různou teplotu. Jednoduché zařízení se skládá ze dvou vodičů z různých kovů, jejichž konce jsou spájeny, které tvoří termoelektrický článek. Jeho účinnost závisí na vlastnostech obou kovů, z nichž jsou vodiče vyrobeny, a na rozdílu teplot mezi teplým a studeným spojením. Větší množství termoelektrických článků vhodně spojených označujeme jako **termoelektrický generátor**.

## Fotovoltaické panely

Pracují na principu fotoelektrického jevu: částice světla – fotony, dopadají na článek s **PN přechodem**, na kterém vytvářejí elektromotorické napětí, viz obr. 15. Se stejnými základními stavebními prvky - solárními články, je možné realizovat jak aplikace s nepatrným výkonem (napájení kalkulačky), tak elektrárny s výkonem v MW.

V současné době jsou nejrozšířenější solární články vyrobeny z krystalického křemíku ve formě monokrystalu (účinnost 14 až 17 %) nebo polykrystalu (účinnost 12 až 15 %). Levnější články na bázi amorfního křemíku (účinnost 5 až 9 %) jsou na ústupu. V laboratořích již byly vyvinuty články s účinností až 28 %. Účinnost nejlepší současné komerčně vyráběných solárních článků dosahuje 20 %.



Obr. 15: Princip činnosti solárního článku.

Propojením solárních článků vznikne po jejich zapouzdření **fotovoltaický panel**. Sério-paralelním elektricky spojením jednotlivých článků se dosáhne potřebné napětí a proud. Panel musí zajistit hermetické zapouzdření solárních článků, dostatečnou mechanickou a klimatickou odolnost vůči silnému větru, krupobití, mrazu apod.

V současné době neuvážená vládní podpora především fotovoltaických zdrojů, přijatou nemístně vysokou výkupní cenou elektrické energie vyrobené těmito zdroji, vyvolala skokový nárůst ceny elektrické energie spojený s ekonomickými a sociálními problémy.

## Geotermální energie

Geotermální elektrárny se využívá k výrobě tepla a elektřiny pomocí tepelné energie z nitra Země. Využívá se ohřátá voda z termálních pramenů nebo vrtů. První geotermální elektrárna byla vybudována v roce 1904 u města Larderello v severní Itálii.

Na Novém Zélandu, Filipínách, v Kalifornii a v Mexiku byly geotermální elektrárny postaveny na místech s přírodním únikem zemského tepla, ale ve většině případů se místo musí zpřístupnit vrty. V některých případech se využívá teplo horkých hornin, které ohřívají vodu vhněnou nucenou cirkulací.

V České republice existují v dostupných hloubkách pouze zdroje geotermální vody o nízké teplotě 25-35 °C, které lze využít např. k instalaci tepelného čerpadla. V současné době existuje projekt na využití geotermální energie v Děčíně s plánovaným tepelným výkonem asi 10 MW a v Litoměřicích, kde je plánován vrt o hloubce 6 000 m. Další možnosti se podle nových geologických průzkumů ukazují na jižní Moravě, tj. v severní části Vídeňské pánve, kde se nacházejí zdroje vody o teplotě 60 až 70 °C, kterou by bylo možné využívat bez tepelného čerpadla.

## Obnovitelná biomasa

Biomasa je organická hmota rostlinného nebo živočišného původu. Je získávána jako komunální odpad ze zemědělské a průmyslové činnosti. Je odjakživa využívána lidmi jako zdroj energie. Má obnovitelný charakter. Efektivní a ekologické využití biomasy má minimální negativní vliv na životní prostředí.

Biomasu je možné využívat jak přímým spalováním, tak i k výrobě ušlechtilých paliv, které podstatně méně zatěžují životní prostředí než klasická paliva. Dobře se skladuje a umožňuje následné využití v klimaticky nevýhodných obdobích.

Základní technologie zpracování biomasy se dělí na *suché procesy* (termochemická přeměna) jako je spalování, zplyňování a pyrolýza, a *mokrý procesy* (biochemická přeměna), které zahrnují anaerobní vyhnívání (metanové kvašení), lihové kvašení a výrobu biovodíku.

Zvláštní podskupinu potom tvoří lisování olejů a jejich následná úprava, což je v podstatě mechanicko-chemická přeměna, např. výroba bionafty a přírodních maziv.

Zpracování biomasy je ve srovnání s dobýváním fosilních paliv pro životní prostředí spíše přínosem (likvidace odpadů, zalesňování nevyužité a často nevyužitelné půdy). Negativní vliv se může projevit nepřímo – např. produkce a využití biopaliv vyvolává zvýšení cen potravin.

V České republice jsou vzhledem k velké rozloze půdy, která je využívána k zemědělským a lesnickým účelům, asi 87% z celkové rozlohy, dobré podmínky pro energetické využití biomasy. Oproti některým evropským státům, např. Rakousku, Nizozemí, Dánsku a Německu, jsou u nás velké rezervy ve využití biomasy v komunální energetice, domácnostech, průmyslu a zemědělství.

## Jaderná fúze

Při slučování (fúzi, syntéze) lehkých atomových jader se uvolňuje velké množství energie. Na jednotku hmotnosti paliva je to ještě více než v případě štěpení jader.

Fúze probíhá v nitrech hvězd včetně Slunce nebo jako lavinovitá neřízená reakce (exploze – jaderný výbuch) ve vodíkové pumě. K průběhu fúze jsou nezbytné vysoké teploty 10<sup>8</sup>K, což je jedna z obtíží kterou je nutno překonat při konstrukci technického zařízení, které by využívalo fúzi k výrobě energie.

Další podmínkou využití je udržení řízené řetězové reakce po dostatečně dlouhou dobu, to znamená, že při provozu reaktoru nesmí klesat počet jader, v opačném případě dojde



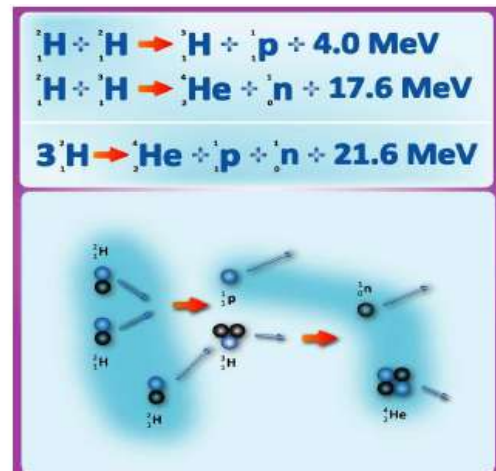
k zastavení reakce. Opačný případ – nekontrolovatelný exponenciální nárůst vyústí v explozi – jaderný výbuch. Příkladem jaderné fúze je syntéza tří jader deuteria na jádro helia, při které se uvolňuje energie ve formě kinetická energie produktů reakce, vnímaná makroskopicky jako uvolněné teplo.

### Syntéza deuteria

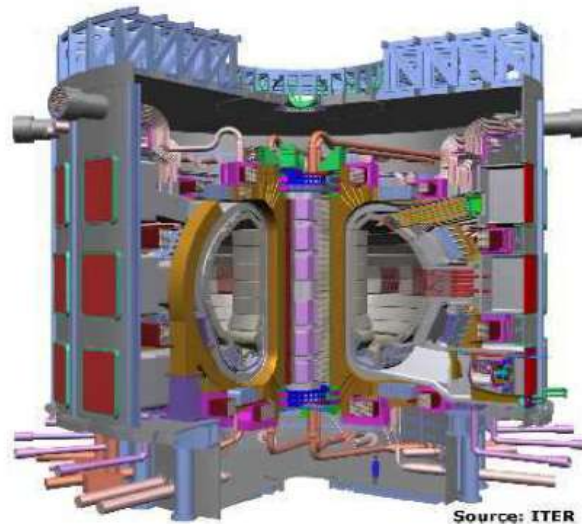
Probíhá ve dvou fázích, během první dochází ke sloučení dvou jader deuteria na jádro tritia, které se ve druhé fázi sloučí s dalším jádrem deuteria, viz obr. 16.

### Projekt ITER

Evropská unie, Kanada, Japonsko a Rusko spolupracují na výzkumném projektu jaderné fúze nazvaném ITER (mezinárodní experimentální termonukleární reaktor). Úkolem je prokázat vědeckou a technickou proveditelnost řízené jaderné fúze. ITER bude prvním zařízením na úrovni elektrárny využívajícím jadernou fúzi k výrobě tepelné energie. Pro fúzi bude využito zařízení tokamak, viz obr. 17.



Obr. 16: Fúze deuteria



Obr. 17: Reaktor TOKAMAK pro jadernou fúzi

Fáze nukleární fúze v tomto zařízení jsou následující:

- Plnění palivem – několik gramů paliva je vloženo do jádra zařízení, vakuové komory se silnými ocelovými stěnami obloženými teplovzdušnými obklady.
- Zahřívání paliva a zážeh – palivo je zahříváno do vysokoteplotního stavu nazývaného *plasma*, označované jako čtvrté skupenství hmoty. Supravodivé magnety okolo toroidní nádoby zakřívují plasmu tak, aby se nedotýkala stěn, a zároveň v ní indukují elektrický proud, čímž ji zahřívají k zážehu.
- Fúze – deuterium a tritium se slučují a uvolňují energii. Výsledné teplo je odváděno vodou chladicího systému.

Reakci jaderné fúze lze udržovat pouze za následujících podmínek:

1. Do jádra reaktoru jsou průběžně dodávána malá množství paliva, tak aby množství plasmu v ITERu bylo dostatečné pro zajištění podmínek zážehu. Pokud by byla dodávka paliva zastavena, reakce jaderné fúze se zastaví.
2. Energie produkovaná jadernou fúzí je odváděna neutrony, které procházejí stěnou ITERu. Neutrony jsou zachyceny a jejich energie pohlcena v absorbující vrstevné struktuře. Tou je ohřívána voda a produkována pára, která je využita pro pohon turbogenerátorů na výrobu elektrické energie.

Výhody jaderné fúze zůstávají i přes uvedené obtíže s jejím zvládnutím velmi přitažlivé:

- dostupnost paliva (těžký vodík je obsažen v mořské vodě),
- energetická hustota paliva,
- bezpečnost.

## 5 Aplikace ionizujícího záření a metod jaderné fyziky

Při aplikaci ionizujícího záření se využívají přímé účinky záření na látky či organismy nebo jejich tkáně, kdy dochází ke změně ve struktuře či chemickém složení látek, v případě organismů pak k jejich poškození, mutaci či zničení.

Na základě změn ve vlastnostech odraženého nebo prošlého záření se dá určit struktura či chemické složení látek (metoda aktivací analýzy, difraktometrie).

Využívá se rovněž detekce radioaktivního záření radionuklidů v látkách či organismech. Tyto radionuklidy mohou být cíleně přidány, metoda radioaktivních indikátorů, nebo mohou být v látkách běžně přítomny, radionuklidové datovací metody.

Příklady využití uvedených principů:

- strojírenství – defektoskopie, procházející záření odhaluje vady materiálů,
- chemie – radiační polymerace, záření vyvolá chemickou reakci vedoucí ke vzniku polymerů, které jsou základem materiálů používaných v předmětech denní potřeby,
- kriminalistika – určování původu oběti na základě znalosti chemického složení, např. různý obsah chemických prvků v různých zdrojích vody, označování peněz při únosech (radioaktivní indikátory), kontrola zavazadel na letištích,
- archeologie – určování stáří nálezů pomocí radionuklidových datovacích metod, určování původu keramických výrobků na základě analýzy chemického složení hrnčířské hlíny,
- restaurátorská činnost – ionizující záření usmrtí škůdce ve dřevěných i jiných exponátech, ničení dřevokazných hub a plísní,
- geologie – určování stáří hornin pomocí radionuklidových datovacích metod, určování chemického a strukturního složení hornin,
- vodní hospodářství – měření průtoků řek pomocí radioaktivních indikátorů,
- potravinářství – sterilizace potravin ionizujícím zářením,
- lékařství – studium absorpce látek orgány pomocí radioaktivních indikátorů, léčení zhoubných nádorů radiofarmaky a přímým ozařováním, chirurgie pomocí gama nože, sterilizace lékařského materiálu, lázeňská radioterapie (Jáchymov),
- zemědělství – šlechtění nových odrůd pomocí mutací vyvolaných ionizujícím zářením.

## Metody analýzy materiálů

### Aktivační analýza

Vystavíme-li vzorek zkoumaného materiálu působení vhodně zvoleného jaderného záření (protony, neutrony, částicemi alfa apod.), mohou se původně stabilní nuklidy detekovaného prvku přeměnit jadernou reakcí na známé radionuklidy. Tento proces označujeme jako **aktivaci** vzorku. Vzniklé radionuklidy se přeměňují některým typem **radioaktivní přeměny**. Jejich aktivita, tj. intenzita emitovaného radioaktivního záření, je úměrná počtu vzniklých radionuklidů, a tedy počtu původních nuklidů detekovaného prvku. Tak je možné v principu určit počet atomů daného prvku ve vzorku látky.

Nejčastěji se používá komparační (srovnávací) metoda tzn., že nejdříve aktivujeme srovnávací vzorek látky se známým zastoupením detekovaného prvku a poté totéž provedeme s měřeným vzorkem. Intenzity záření měřené vždy po uplynutí stejné doby od aktivace jsou ve stejném poměru jako množství detekovaného prvku v obou vzorcích. Takto určíme množství sledovaného prvku v měřené látce.

### Rentgenofluorescenční analýza

Je metoda využívající detekci tzv. charakteristického záření vyvolaného ozářením zkoumané látky ionizujícím zářením. Nejčastěji se aplikuje gama nebo rentgenové záření, používají se ale i urychlené ionty. Záření po dopadu způsobí excitaci elektronů vnitřních slupek atomů zkoumané látky. Při následné deexcitaci, přechází excitované elektrony zpět z vyšších energetických hladin na hladiny vnitřních slupek a nadbytečná energie je vyzářena ve formě elektromagnetického – rentgenového záření s přesně danými vlnovými délkami, které jsou charakteristické pro atomy konkrétního prvku. Tak lze určit zastoupení prvků v látkách.

Rentgenofluorescenční analýzu je možné využít například při studiu historických památek, jako jsou stavební prvky, sochy, fresky apod. Rentgenofluorescenční analýza byla použita i k analýze měsíčních hornin v rámci projektu Apollo, nebo hornin na Marsu pomocí kosmických sond, které nesou dálkově řízené rentgenofluorescenční spektrometry (sondy Viking, Pathfinder).

### Metoda radioaktivních indikátorů

Migraci nebo lokalizaci zvýšené koncentrace vybrané chemické látky v rámci určitého systému, což může být živý organismus, ekosystém nebo průmyslový provoz, lze zjišťovat metodou radioaktivních indikátorů. Využívá se přitom skutečnosti, že chemické vlastnosti prvku závisejí především na stavbě jeho elektronového obalu. Migrace prvku se tudíž neovlivní, pokud místo stabilního jádra bude obsahovat jádro nestabilní. Ve sledované látce nahradíme některý stabilní izotop vybraného prvku izotopem radioaktivním (radioizotopem).

Radioaktivní záření vzniklé jeho přeměnou můžeme detekovat a z naměřené aktivity určit s použitím zákona radioaktivní přeměny množství dané látky v příslušné části zkoumaného systému.

### Kriminalistika

Zajímavou aplikací uvedené metody je přibližné určení původu oběti trestného činu podle obsahu  $^{226}\text{Ra}$ , které se dostává do těla s pitnou vodou. Obsah tohoto nuklidu ve zdrojích pitné vody se v různých oblastech liší.

### Principy radionuklidových datovacích metod

Podle zákona radioaktivní přeměny závisí počet nepřeměněných jader vybraného radionuklidu exponenciálně na čase. Tuto závislost je možné využít k určování stáří hornin nebo archeologických nálezů. Je třeba ovšem zvolit vhodný radionuklid obsažený ve vzorku.

Dále musí být zajištěno, že od určitého okamžiku nedochází k jiným změnám počtu atomů daného radionuklidu, než k jejich úbytku radioaktivní přeměnou. Je třeba definovat pojem stáří vzorku a zvolit počáteční okamžik. Změřit počet nepřeměněných atomů nebo jejich aktivitu v aktuální době nečiní problém. Pro určení absolutního stáří je nutné zjistit příslušné hodnoty v počátečním okamžiku. Podle volby radionuklidu a způsobu určení počátečního množství jeho atomů rozlišujeme různé metody určování stáří.

### **Metoda radioaktivního uhlíku**

Jde o metodu, která využívá radioaktivní izotop uhlíku  $^{14}\text{C}$ , který vzniká v ovzduší vlivem kosmického záření. Ve formě  $\text{CO}_2$  jej přijímají rostliny i živočichové, takže se vytvoří určitá rovnováha mezi jeho zastoupením v ovzduší a v živých organismech. Předpokládá se, že v historické době se jeho koncentrace v ovzduší a tudíž ani jeho rovnovážná hodnota v živých organismech nemění, tím je určena počáteční koncentrace radionuklidu. Měřením jeho aktivity, jde o zářič beta, určíme jeho aktuální koncentraci.

Používá se především k datování archeologických nálezů. Stáří nálezu je určováno od okamžiku, kdy ustala výměna  $\text{CO}_2$  zajišťující ustavení rovnováhy, tedy od doby úmrtí živého organismu. Uvedený popis je zjednodušený a praktické použití metody může mít řadu problémů.

### **Metoda radiogenního olova**

Stabilní izotop  $^{206}\text{Pb}$  je konečným produktem urano-rádiové rozpadové řady, jejímž počátečním prvkem je  $^{238}\text{U}$ . Nemůže-li docházet ke změně počtu atomů dané látky interakcí s okolím, potom za předpokladu, že veškeré olovo obsažené v materiálu pochází z radioaktivní přeměny, je množství uranu na počátku radioaktivního rozpadu rovno součtu zjištěného počtu atomů olova a aktuálního počtu atomů izotopu uranu  $^{238}\text{U}$ . Pomocí zákona radioaktivní přeměny pak lze určit, před jakou dobou byl radioaktivní uran vázán v daném materiálu. Vzhledem k dlouhému poločasu přeměny  $^{238}\text{U}$ , 4,5 miliardy let, který je srovnatelný s dobou existence Země, se tato metoda používá v geologii k určování stáří hornin, tj. doby od jejich posledního utuhnutí. Ke změně počtu atomů může totiž docházet jen v kapalném stavu.