

Radioaktivita

Samostatná práce



Tento článek je editován studenty 2. LF UK v rámci plnění jejich studijních povinností (seminární práce – vypracování zkuškových otázek z biofyziky). Ostatní uživatele prosíme, nezasahujte výrazněji do jeho tvorby až do doby, než bude práce odevzdána (s výjimkou malých editací – opravy překlepů, pomoci s formátováním apod.). Máte-li nějaké náměty či připomínky, uveďte je prosím v diskusi (<https://www.wikiskripta.eu/w/Diskuse:Radioaktivita>). V případě potřeby kontaktujte autory stránky – naleznete je v historii (<https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Radioaktivita&action=history>). Stránka byla naposledy aktualizována v pátek 23. 9. 2022 v 11.32.

Článek ke kontrole



Žádá se kontrola tohoto článku učitelem.
Navržený učitel: Jan Tomsa

Radioaktivita je samovolný děj, při kterém dochází k přeměně nestabilního jádra určitého prvku na stabilnější jádro jiného prvku. Během procesu se uvolňuje radioaktivní záření – uvolněné částice z přeměněného jádra.

Charakteristika jádra

Jádro atomu je částice o poloměru přibližně 10^{-15} m a je určující při stanovení celkové hmotnosti atomu. Všechna jádra obsahují **nukleony** – jaderné částice dvojího typu s téměř stejnou hmotností, ale lišící se nábojem – protony a neutrony. Nukleonové číslo nám prozrazuje celkový počet nukleonů v jádře, značí se A .

Proton vykazuje kladný náboj s hodnotou tzv. elementárního náboje ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C). Jeho počet označujeme jako číslo protonové, značí se Z .

Neutron je bez elektrického náboje. Počet neutronů určuje neutronové číslo, značí se N . Na rozdíl od protonů, neutron je nestabilní. Ve volném stavu se rozpadá na proton a další částice. (Viz Druhy radioaktivního záření)

Chemický prvek je charakterizován počtem protonů i neutronů. Ze složení jádra vyčteme jeho stabilitu i hmotnost. Pravděpodobnost, že se jádro rozpadne, závisí na poměru N a Z . (Viz Radioaktivita)

Nuklid

Látka označovaná jako nuklid se skládá z atomů se stejným protonovým i neutronovým číslem. Jedná se o chemický prvek.

Například uhlík se vyskytuje jako směs izotopu ^{12}C a izotopu ^{13}C , proto je v tabulkách uváděna relativní atomová hmotnost uhlíku jako 12,011 a nikoli přesných 12,000, jak by odpovídalo izotopu ^{12}C podle definice unifikované atomové hmotnostní jednotky.

Izotopy

Izotopy jsou atomy, jež vykazují stejný počet protonů, ale rozdílný počet neutronů. Stále se jedná o chemický prvek. Izotopy prvku se odlišují svými fyzikálními vlastnostmi, nikoliv chemickými. Rozdílný počet nukleonů v jádře způsobuje rozdílnou hmotnost a poměr mezi protonovým a neutronovým číslem, který rozhoduje o stabilitě jádra. Pro příklad uvedeme izotopy uhlíku - ^{12}C , ^{13}C a ^{14}C . ^{12}C obsahuje 6 protonů a 6 neutronů, ^{13}C o jeden neutron více, přesto jsou oba izotopy stále stabilní. ^{14}C se už chová jako radionuklid. (Viz Využití). **Radionuklidem** rozumíme radioaktivní izotop, který při svém rozpadu uvolňuje ionizující záření.

Izotopy téhož prvku mají prakticky totožné chemické vlastnosti; hlavní rozdíl spočívá v tom, že těžší izotopy reagují poněkud pomaleji.

Izobary

Izobary rozumíme různé prvky, které mají stejné nukleonové číslo, tzn., že mají součet protonů a neutronů totožný. Zákonitě se musí tedy lišit atomovým číslem (počet protonů) a neutronovým číslem (počet neutronů v jádře). Platí tedy vztah $N + Z = \text{konst.}$.

Izotony

Izotony jsou nuklidy, které mají rozdílný počet protonů v jádře, ale počet neutronů stejný. Automaticky můžeme říct, že nukleonové číslo je též rozdílné. Jako příklad může posloužit ^{12}B a ^{13}C , kde bor má 5 protonů a uhlík 6, leč neutronů mají oba dva prvky stejně (7 neutronů). Nejvíce stabilních nuklidů existuje pro izotony s 50 neutrony (^{86}Kr , ^{88}Sr , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{92}Mo) a s 82 neutrony (^{138}Ba , ^{139}La , ^{140}Ce , ^{141}Pr , ^{142}Nd , ^{144}Sm). Naopak neexistují žádné stabilní izotony pro N s hodnotou 19, 21, 35, 39, 45, 61, 71, 89, 115, 123 a 127.

Vazebná a separační energie

Stabilita jádra se odvíjí od vazebné energie, což je energie, kterou je třeba dodat – či chcete-li, práce, kterou je třeba vykonat – pro rozložení jádra na jednotlivé nukleony. Pracuje se nicméně spíše se separační energií, což je vazebná energie rozpočítaná na jeden nukleon. Nejvyšší separační energii má izotop $^{56}_{26}\text{Fe}$. Lze tedy říci, že tento izotop železa je nejstabilnějším izotopem vůbec – obdobně to platí i pro nuklid této látky.

Řeka stability

Stabilitu jádra však lze vyvodit také aniž bychom znali hodnoty vazebných a separačních energií. O stabilitě, popřípadě nestabilitě nuklidu vypovídá tzv. **řeka stability**, která je dána poměrem počtu protonů a počtu neutronů. Zvláště stabilní jsou nuklidy s takzvanými *magickými čísly*, jakými jsou třeba ^4_2He , $^{16}_8\text{O}$, nebo $^{40}_{20}\text{Ca}$. Obecně vzato tedy pokud je poměr nukleonového čísla ku protonovému 2:1, jedná se o velmi stabilní jádro. U těžších prvků převládají pak spíše neutrony nad protony – pravděpodobně proto, aby vyrovnaly odpudivé elektrostatické síly mezi stejně nabitými protony – a tento poměr se blíží asi 3:2. U lehkých jader bývá neutronů naopak méně než protonů – elektrostatické síly mezi p^+ nejsou tak silné – a pak je poměr se blíží i 1,5:1.

Zjednodušeně s přihlédnutím k oběma předchozím odstavcům lze říci, že stabilní jádra nabývají A od 30 do 130. Pokud se nuklid svým poměrem nachází mimo řeku stability, je považován za nestabilní. V přírodě existuje cca 50 nestabilních nuklidů.

Radioaktivní rozpadové řady

Jsou známy čtyři radioaktivní rozpadové řady, které popisují řetězec přeměn probíhající v radioaktivních nuklidech. Radioaktivní nuklidy se totiž často nerozpadají přímo na stabilní jádro, ale opět na jádro radioaktivní, které již ale má nižší energii, nicméně to se rozpadá dál dokud se nedosáhne stabilního jádra.

Těmito radioaktivními rozpadovými řadami jsou: uran-radiová rozpadová řada, dále pak uran-aktiniová, thoriová a neptuniová rozpadová řada. . Pomocí několika pravidel bylo určeno, že A jednotlivých „meziproductů“ rozpadových řad lze snadno zobecnit.

Uran-radiová radioaktivní rozpadová řada začíná u radioaktivního izotopu $^{238}_{92}\text{U}$ a končí u stabilního izotopu $^{206}_{82}\text{Pb}$, $A=4n+2$.

Uran-aktiniová radioaktivní rozpadová řada začíná izotopem $^{235}_{92}\text{U}$ a končí izotopem $^{207}_{82}\text{Pb}$ $A=4n+3$.

Thoriová radioaktivní rozpadová řada začíná $^{232}_{90}\text{Th}$ a končí $^{208}_{82}\text{Pb}$, $A=4n$.

Neptuniová radioaktivní rozpadová řada začíná $^{237}_{93}\text{Np}$ a končí $^{209}_{83}\text{Bi}$ a $A=4n+1$.

Až donedávna byly jen tři z těchto řad – uran-radiová, uran-aktiniová, thoriová – považovány za přírodní, neboť výchozí nuklidy se podařilo nalézt v přírodě, zatímco neptuniová řada byla považována za řadu umělou, protože se nedařilo nalézt neptunium v přírodě. Ukázalo se však, že je v nepatrném množství zastoupeno v uranových rudách, proto se dají za přírodní označit všechny radioaktivní rozpadové řady.

Druhy radioaktivního záření

Záření α

je proud letících **jader helia** tzv. **α -částic**. Tyto částice si můžeme představit jako klasický atom helia, ze kterého byl odstraněn elektronový obal, tedy **He^{2+}** . Z toho je patrné, že částice alfa je tvořena **dvěma protony a dvěma neutrony**, je tedy kladně nabitá s elektrickým nábojem o hodnotě $+2e$ a má nenulovou klidovou hmotnost.

Záření α vzniká radioaktivní přeměnou **izotopů těžkého prvku**, kdy se **emituje částice α a uvolní se energie** odpovídající hmotnostnímu úbytku v systému.

Nuklid vzniklý rozpadem α má z důvodu zachování nukleonového čísla a elektrického náboje **protonové číslo o 2 nižší**, je tedy v periodické soustavě prvků posunut, vzhledem k původnímu jádru, **o dvě místa vlevo**. Je zřejmé, že emitovaná částice má malou hmotnost ve srovnání s hmotností emitujícího jádra. Kinetická energie jádra při emisi částice je tímto prakticky zanedbatelná. Samo jádro těžkého prvku se vrací z excitovaného stavu do stavu energeticky základního emisí kvant záření gama. Proto je běžné, že tento typ radioaktivní přeměny je zářením gama doprovázen.

Sumarizovat by se dala tato reakce asi takto: $^A_Z\text{X} \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + ^4_2\text{He}$;

Konkrétní příklad by pak vypadal takto: $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He}$.

Záření alfa má silné **ionizační účinky**, má však **malou pronikavost**, rychlost šíření (až 10^7 m.s^{-1}), která odpovídá asi 10% rychlosti světla a proniká jen několikacentimetrovou vrstvou vzduchu. Tyto vlastnosti lze přičíst tomu, že částice α mají poměrně velkou hmotnost, jsou velké a mají i elektrický náboj. Proto při vylétání z jádra reagují téměř s čímkoliv, s čím přijdou do styku a proto netrvá dlouho, než svou energii předají jinam.

Odstínit se dá i běžným listem papíru. Vnější působení na člověka nemá prakticky žádný účinek, neboť je záření pohlceno buňkami dlaždicového kožního epitele. Vnitřní působení záření (např. v plicích) však může poškodit genetický materiál a tak vést ke vzniku nádorového onemocnění. Alfa záření lze využít také k léčebným účelům. Jeho působení v určitých dávkách aktivuje obranné mechanismy buněk.

Mezi látky, které jsou zdroji záření α patří například **uran**, **radium** nebo **radon**.

Záření β

jsou částice emitovány radioaktivními jádry prvku při jejich β rozpadu. Tyto částice nesou buď kladný β^+ (pozitrony) nebo záporný β^- (elektrony) elektrický náboj. Souhrnně vylétávají z jádra částice s elektrickým nábojem a velmi malou klidovou hmotností. Zvláště kvůli malé klidové hmotnosti se záření β dokáže šířit daleko rychleji, to konkrétně asi 40-99 % rychlosti světla. Konkrétní rychlost pak závisí na jednotlivých nuklidech. Částice β se pohybují velmi rychle a pronikavost částic je vyšší než u α záření, mohou proniknout materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou. Zastavit by jej měla např. hliníková folie.

Záření β^-

Jedná se o proud elektronů vycházející z jádra. Elektrony opravdu vychází z jádra, neboť dochází k tomu, že se rozpadá neutron na proton a elektron. Protony zůstávají při této reakci v jádře, ven vylétávají jen elektrony. Kromě těchto elektronů z jádra vylétá také elektricky nenabitá částice s malou hmotností – antineutrino. Nastává **posun** v periodické tabulce **o jedno místo vpravo**.

Tuto reakci lze zapsat takto: $^1_0\text{n} \rightarrow ^1_1\text{p} + ^0_{-1}\text{e} + \text{antineutrino}$.

Reakci v rámci celého atomu se pak zapisuje asi takto: $^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z+1}\text{Y} + ^0_{-1}\text{e}$

Záření β^+

Záření β^+ je mnohem složitěji pozorovatelné. Jedná se totiž o proud pozitronů z jádra. Pozitron je částice opačná elektronu. Má stejně jako elektron malou hmotnost a elementární náboj, nicméně kladný. Pozitrony se vyskytují v antihmotě, což je hmota opačná hmotě, která se nachází všude kolem nás. β^+ je složitě pozorovatelné, proto, že když dojde ke styku hmoty s antihmotou, dojde k anihilaci (úplné uvolnění energie), což je pozorováno jako exploze. Pozitrony lze pozorovat pouze v urychlovačích částic, nebo v tomto případě při reakci umělých nuklidů. Při záření β^+ se rozpadá proton na pozitron a neutron. Vše je doplněné neutrinem. Neutron zůstává v jádře a pozitron z něj vylétá analogicky k záření β^- . Nastává tedy **posun** v periodické tabulce **o jedno místo vlevo**.

Vše lze zapsat asi takto: $^1_1\text{p} \rightarrow ^1_0\text{n} + ^0_{+1}\text{e} + \text{neutrino}$.

Děje odehrávající se v celém jádře se popisují takto: $^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z-1}\text{Y} + ^0_{+1}\text{e}$

Záření γ

je elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou s velkou energií a pronikavostí jeho částic. Oproti záření α a β , které jsou korpuskulární, proniká γ záření do materiálu lépe a jeho dokonalé odstínění je téměř nemožné (na snížení intenzity záření se používají vrstvy materiálů obsahujících těžké prvky např. olovo).

Radionuklidy jsou nestabilními nuklidy. Rozlišujeme přirozené radionuklidy (vyskytující se v přírodě) a umělé radionuklidy (vytvořené pomocí jaderných reakcí). Podle toho rozlišujeme přirozenou a umělou radioaktivitu.

Přirozená radioaktivita

je samovolná přeměna nestabilních jader na stabilní za současného vysílání záření. Přirozenou radioaktivitu objevil v r. 1896 francouzský fyzik H. Becquerel a studovali ji především Pierre Curie a jeho žena Marie Curie-Sklodowská. Za přínos v tomto oboru všichni tři zmínění obdrželi v roce 1903 Nobelovu cenu za fyziku. Marie Curie-Sklodowská později získala i Nobelovu cenu za chemii za izolaci čistého radia.

Umělá (indukovaná) radioaktivita

je přeměna atomů vyvolána jadernými reakcemi. K objevení umělé radioaktivity došlo v roce 1934 ostřelováním hliníku částicemi α . Podíleli se na tom manželé Frédéric a Irene Joliot-Curieovi.

Radioaktivní rovnováha

stav, kdy se za jednotku času promění v řadě radioaktivních izotopů stejný počet atomů

A - k rovnováze nedochází, protože fyzikální poločas proměny mateřského prvku (T_1) je kratší než poločas proměny dceřina radionuklidu (T_2)

B - nastává přechodná (transientní) radioaktivní rovnováha, kdy T_1 je delší než T_2

C - může dojít k trvalé (sekulární) radioaktivní rovnováze s poločasem přeměny T_1 prvku mnohem delším než poločas T_2 prvku

Nestabilita jádra

Všechna atomová jádra nejsou stabilní, naopak většina z nich se po určité době samovolně přemění na jádra jiná. Většina jader připravených uměle jsou nestabilní.

Radioaktivní přeměna(rozpad)

je jev, při kterém nestabilní atomy vyzařují svoji energii ve formě částic nebo elektromagnetických vln.

Fyzikální poločas proměny(poločas rozpadu)

dobu, za kterou se promění (rozpadne) polovina původního počtu jader

Biologický poločas rozpadu

čas, za který se z organismu vyloučí polovina množství dodaného prvku

Efektivní poločas

kombinuje biologický a fyzikální poločas dohromady, tedy efektivní poločas je čas, za který klesne aktivita nuklidu na polovinu díky radioaktivní přeměně a biologickému vylučování.

Ochrana před škodlivými účinky radioaktivního záření

 Podrobnější informace naleznete na stránce *Ochrana před škodlivými účinky radioaktivního záření*.

Využití

Radioaktivita nabízí mnoho využití v řadě oblastí. Jednou z nich je defektoskopie, metoda značkových atomů, při které pacient sní např. radioaktivní fosfor a lékař pak může sledovat, kudy fosfor prochází. Další možnosti využití se týkají nejen medicíny, ale i energetického průmyslu či archeologie.

Jaderná energetika

Jaderná energetika spočívá ve využití energie jaderné reakce, je to jedno z nejvýznamnějších využití nestability radionuklidů. Jaderné reakce jsou založeny na přeměnách jader s menší vazebnou energií, na jádra s větší vazebnou energií, rozdíl energií se uvolňuje. Přičemž vazebná energie jádra je veličina, která charakterizuje stabilitu jádra. Nejstabilnější jsou jádra s nukleonovým číslem mezi 30 a 130. Je to energie, která se uvolní při vzniku jádra z jednotlivých nukleonů nebo kterou je nutné dodat na rozštěpení jádra na jednotlivé nukleony.

Jaderná energie se dá v zásadě dělit na 2 druhy:

- Syntéza jader (termonukleární reakce) – Z jader lehčích vznikají jádra těžší a přitom se uvolňuje obrovské množství energie. Pro tyto reakce je potřebná vysoká teplota a tlak (uvnitř hvězd). Např. Protium + Tritium dá vzniknout heliu. Tímto způsobem vznikaly všechny prvky, ale je nutno dodat, že se tak v případě těžších prvků stává při extrémních podmínkách, jakými je třeba výbuch supernovy. Nejsnáze pozorovatelná je jaderná fúze na Slunci
- Štěpení jader (štěpná reakce) – Při štěpení jader dojde ke vzniku dvou středně těžkých jader atomů v poměru cca 2:3, uvolnění několika neutronů a velkého množství energie. Vzniklé neutrony se používají k štěpné reakci. Štěpení jader se dále dělí na řízené a neřízené. Řízené probíhá v jaderných reaktorech. Nechá se působit pouze jeden vzniklý neutron, který štěpí další jádra a tak se energie uvolňuje postupně. Takto uvolněná energie se převádí v jaderných elektrárnách na elektrickou. Oproti tomu u neřízeného štěpení jader, tedy v praktickém využití hlavně atomová bomba, vzniklé neutrony způsobí řetězovou reakci a energie se uvolní naráz.



Mezinárodní symbol radioaktivity

Jaderná elektrárna

Štěpná reakce probíhá v jaderném reaktoru, celý blok sestává z několika okruhů, aby se zamezilo únikům radioaktivity. Uvolněná tepelná energie zahřívá vodní páru, která následně pohání turbínu a ta pak roztáčí rotor generátoru. K řízení rychlosti jaderné reakce se používají kadmiové regulační tyče, které rády pohlcují vzniklé neutrony a kyselina boritá.

Neutronové záření

V jaderných elektrárnách se pro získání energie využívá tzv. neutronové záření.

Jak již napovídá název – je to proud neutronů. Kvůli jaderným silám není snadné neutron z jádra uvolnit, nicméně pokud se to podaří, má to značné výhody. Neutron, jakožto částice bez náboje – nereaguje příliš snadno s okolními atomy, reaguje pouze s jejich jádry. Toto záření se nevychyluje v elektrickém ani magnetickém poli a samo neionizuje okolí.

Neutrony se dají uvolnit z jader v urychlovačích částic, nebo rozpadem těžkých jader transuranů (kalifornium, $A=252$), v přírodě je nenalezneme. V praxi se nejčastěji používá beryllium, které je ozářeno α zářením, čímž je z jádra Be vyražen neutron. Neutrony vzhledem ke své malé velikosti a zároveň malé velikosti jádra musí „potkat“ mnoho částic, než konečně bude reagovat.

Neutronové záření může reagovat s okolím hned dvěma způsoby. Prvním způsobem jsou tzv. **pružné srážky**, při kterých neutron předá část své energie a pokračuje dále se sníženou energií – rychlostí. Největší efekt předání energie je u jader vodíku tzn. u částic s hmotností nejbližší neutronu, proto jsou lehké prvky vhodné pro zpomalování neutronů. U jader těžkých prvků se předá méně energie. Proto se pro zpomalování neutronů používá především tzv. moderátor, kterým může být třeba těžká voda (= oxid deuteria).

Při **nepružných srážkách** naráží neutron do jádra a zůstává v něm. Takto vzniklá jádra jsou většinou velmi nestabilní, proto se často samy rozpadají při vyzařování β^- a γ záření, nebo tyto částice jen emitují. Nepružné srážky velmi dobře fungují především s pomalými neutrony. Velmi dobře neutrony zachycují bor nebo kadmium, které se kvůli tomu používají jako regulátory v jaderných reaktorech.

Tuto reakci lze zapsat asi takto: ${}^1_0n + {}^A_ZX \rightarrow {}^{A+1}_ZY$.

Jaderné zbraně

 *Podrobnější informace naleznete na stránce Využití radioaktivity.*

Radioterapie

Radioterapie je konzervativní metoda, která se používá na léčbu zhoubných nádorů v lidském organismu. Dochází k ozařování postižené tkáně, kdy využíváme různé druhy ionizujícího záření. Cílem je zničení nádoru a co nejmenší poškození okolní zdravé tkáně. Dle charakteru nádoru se volí různá intenzita i druh záření. Při **teleterapii** se provádí ozařování pomocí zdroje, jenž se nachází mimo organismus. **Brachyterapie** vyžaduje umístění zdroje na povrch nádoru či přímo dovnitř nádoru. Z fyzikálního hlediska používané ionizující záření je dvojího typu - elektromagnetické a korpuskulární. Elektromagnetické zahrnuje záření X (rtg) a záření γ . Korpuskulární záření, také částicové obsahuje protony, neutrony, α -částice i elektrony (β -částice). Dle zdroje existuje celá řada metod - protonová léčba, léčba pomocí lineárního či kruhové urychlovače (X-záření) či hloubková terapie pomocí kobaltu (záření γ).

Radiosensitivita buněk je vlastnost, která charakterizuje schopnost buňky reagovat na ozáření. Minimálně diferencovaná buňka vykazuje větší citlivost na záření než buňky, které jsou zralé, popřípadě vysoce diferencované.

Analýza stáří archeologických objevů

Pro určení stáří některých objevů v archeologii je vhodná tzv. **radiouhlíková metoda**.^[1]

Uhlík je schopen tvořit tři základní izotopy - ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}$ a ${}^{14}\text{C}$. (Viz Izotopy) Izotop ${}^{14}\text{C}$ je radioaktivní, tzv. radionuklid s poločasem rozpadu 5730 let. V přírodě jsou zastoupeny všechny tři izotopy a ve stálém poměru. Z tohoto vyplývá, že při odumření organismu čili při zastavení přísunu uhlíku je poměr izotopů stejný jako v okolní přírodě. Radionuklid se začíná rozpadat a poměr mezi izotopy roste. Dle počtů rozpadů za minutu v 1 g radioaktivního uhlíku je možné určit stáří nálezů.

Historie

 *Podrobnější informace naleznete na stránce Historie objevů v oblasti radioaktivity.*

Henri Becquerel jako první v roce 1896 objevil radioaktivitu díky zjištění, že minerály vyzařují jiné záření než světelné, když položil fluorescenční materiál mezi fotografické desky a fotografické desky byly netknuté. Následně pak Marie Curie Skłodowska na počátku 20. století zkoumala radioaktivitu a mimo jiné objevila nové prvky (radium a polonium). Zkoumala, proč uranová ruda je radioaktivnější, než samotný uran. Po čtyřech letech objevila polonium (pojmenovala ho po své vlasti), poté objevila ještě radioaktivnější radium. Marie Curie Skłodowska byla první ženou, která získala Nobelovu cenu za fyziku (spolu se svým manželem a H. Becquerelem r. 1903) a později i ze chemie. Byla také první profesorkou na Sorbonně. Zasloužila se o využití radia v lékařství. Její dcera, Irène Joliot-Curie s manželem Frédéricem Joliot-Curiem obdrželi v roce 1935 Nobelovu cenu za objevení uměle vyvolané radioaktivity a prokázali, že hmotnosti protonu a neutronu jsou přibližně stejné. Oba patřili mezi aktivní bojovníky za mír.

První jaderný reaktor byl uveden do provozu v USA v roce 1942. První jaderná elektrárna byla otevřena v roce 1954 v Rusku.

Odkazy

1. MAREČEK, Aleš a Jaroslav HONZA. *Chemie pro čtyřletá gymnázia*. 3. vydání. Praha : Nakladatelství Olomouc s. r. o., 1998. 242 s. ISBN 80-7182-055-5.

Literatura

- NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA, et al. *Medicínská biofyzika*. 1. vydání. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
- SVOBODA, Emanuel, et al. *Přehled středoškolské fyziky*. 3. vydání. Praha : Prometheus, 2003. ISBN 80-7196-116-7.
- ZEMAN, Miroslav, et al. *Chirurgická propedeutika*. 2. vydání. Praha : Grada, 2000. ISBN 80-7196-705-2.
- KLENER, Pavel, et al. *Klinická onkologie*. 1. vydání. Praha : Galén, 2002. ISBN 80-7262-151-3.

Externí odkazy

- <https://www.surao.cz/cze>
- <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/802-radioaktivita>