

Téma 24

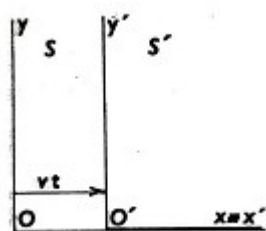
Ondřej Nývlt nyvlt01@fel.cvut.cz

Lorentzova transformace, speciální teorie relativity, relativistická energie. Záření těles, Bohrov model atomu vodíku, dualismus vln a částic, pravděpodobnost a neurčitost v kvantové mechanice, Schrödingerova rovnice a její užití, kvantové jevy v látkách. Jaderné síly, radioaktivita, jaderná energetika, subnukleární částice.

1. Lorentzova transformace, speciální teorie relativity, relativistická energie

Einsteinovy postuláty:

1. Princip relativity: všechny fyzikální zákony mají stejný tvar ve všech inerciálních vztažných soustavách.
2. Princip konstantní rychlosti světla: Rychlost šíření světla ve vakuu je stejná ve všech inerciálních soustavách $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a je nezávislá na pohybu zdroje či pozorovatele.



Lorentzova/Einsteinova t.: máme 2 inerciální vztažné soustavy S a S' s navzájem rovnoběžnými odpovídajícími osami x, x', y, y', z, z' . Druhá se pohybuje konstantní rychlostí v v kladném smyslu podél osy x vůči první tak, že osy x a x' trvale splývají. Využijeme 2. tedy že $c=c'$. Potom:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t + \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

a obráceně
$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' - \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Lorentzova t. nahradila chybnou (Max. rovnice) Galileovou t. (a Newtonovy zákony) kde $x' = x - vt, y' = y, z' = z, t' = t$

Relativnost současnosti a kauzalita: Současnost je pojem relativní – 2 současné události vzhledem k jedné soustavě nejsou obecně současné k soustavě jiné.

Kdykoli máme 2 události A a B, jejichž prostorová odlehlost $|\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A|$ je větší než dráha, kterou může světlo proběhnout za časový interval $|t_B - t_A|$,

$$|\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A| > c|t_B - t_A|$$

pak nemohou být kauzálně tyto 2 události spojeny. Jsou kvazisoučasné, fyzikálně nespojené, jedna nemůže být příčinou druhé- nemohou tedy existovat síly působící na dálku (tj. okamžitě). Pokud ale

$$|\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A| < c|t_B - t_A|$$

pak je časové pořadí obou událostí absolutní a ve všech soustavách shodné.

Kontrakce délek: V soustavě S' máme tyč na ose x' délky $l' = x_b' - x_a' = l_0$ - vzhledem k této soustavě je tyč v klidu. Potom vzdálenost vzhledem k S:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

dochází ke kontrakci délky – zkracování délky těles ve směru pohybu (příčné rozměry se zachovávají), tedy $l < l_0$.

Dilatace času: V soustavě S' máme hodiny, jež jsou vůči S' v klidu. Počátek a konec časového intervalu, měřeného těmito hodinami (např. dva tiky), jsou 2 události, které jsou v S' „soumísné“ a časový interval mezi nimi činí $\Delta t' = t_B' - t_A'$. Časové údaje lze přepočítat na S, vůči které se hodiny pohybují, potom pro $\Delta t = t_B - t_A$ můžeme vzhledem k $x_B' = x_A'$ napsat:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Tedy hodiny v S' se jeví pozorovateli v S jako jdoucí pomaleji než hodiny jeho.

Kontrakce i dilatace vychází z Lorentzovy t. a při malých rychlostech jsou oba jevy zanedbatelné. Oba jevy reciproční (vzájemné) efekty.

Skládání rychlostí: skládáním rychlostí nelze překročit rychlost světla ve vakuu. Hmotný bod se pohybuje podél osy x' rychlostí u' (y a z složka $u' = 0$) pak rychlost u (y a z složka $u = 0$) vůči S je:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

u je tedy rychlost vzniklá složením 2 rovnoběžných rychlostí u' a v .

Relativistická energie: hmotnost m závisí na rychlosti – jinak by zrychlováním tělesa při konstantní m šlo dosáhnout libovolné rychlosti.

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

m_0 se nazývá klidová hmotnost – naměříme v klidu. Pro $v \rightarrow c$ se $m \rightarrow \infty$.

přírůstek kinetické energie - práce kterou dáme do částice aby se urychlila = vložená práce

Kinetická energie $E_k = mc^2 - m_0c^2$ = je tedy dána jako rozdíl celkové energie $E = mc^2$ a klidové energie, která je utajena v tělese i když je v klidu. Platí zákon zachování energie, ale klidová hmotnost se

nezachovává. Pro $v \ll c$ se používá známý vzorec $E_k = \frac{1}{2} m_0 v^2$

Hybnost: $p = \frac{E v}{c^2}$

Foton: má nulovou klidovou hmotnost a jeho hybnost $p = \frac{E}{c}$

2. Záření těles, Bohrov model atomu vodíku, dualismus vln a částic, pravděpodobnost a neurčitost v kvantové mechanice, Schrödingerova rovnice a její užití, kvantové jevy v látkách.

Záření těles:

$H_{e\lambda}(\lambda, T)$ **spektrální hustota zářivosti tělesa** – při teplotě T vysílá ze jednotku času jednotková plocha povrchu zahřátého tělesa energii, která je rozložena na různé vlnové délky podle této funkce.

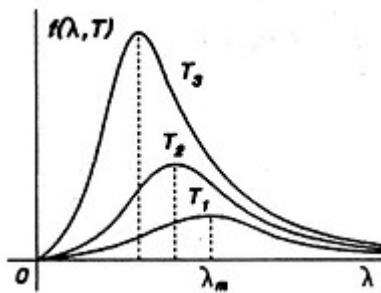
$a(\lambda, T) = \frac{dE_{pohl}}{dE_{dop}}$ **spektrální hustota poměrné pohltivost** - Udává poměr pohlcené k energii dopadající –

závisí na teplotě tělesa a vlnové délce.

Těleso, které všechno dopadající záření absolutně pohlcuje a tedy $a(\lambda, T) = 1$, nazýváme **absolutně černé těleso**. Neexistuje ale přibližuje se mu např.: povrch Slunce

Funkce $H_{e\lambda}(\lambda, T)$ a $a(\lambda, T)$ nejsou nezávislé – poměr mezi nimi musí být pro všechna tělesa dán toutéž univerzální funkcí, nezávislou na materiálu tělesa: $f(\lambda, T) = H_{e\lambda}(\lambda, T) / a(\lambda, T)$

Viz obrázek – s rostoucí T se vrchol posouvá doleva a roste:



Experimentálně nalezené zákony:

1) **Stefan-Boltzmannův** – celková zářivost H_e (výkon vyzařovaný jednotkou plochy) roste s 4.mocninou absolutní teploty T :

$$H_e = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

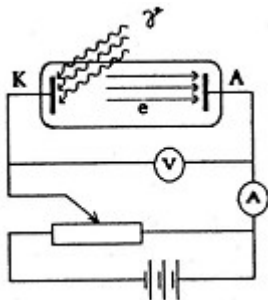
2) **Wienův** – vlnová délka kdy f dosahuje maxima a na níž těleso nejintenzivněji vyzařuje je nepřímo úměrná T .

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, b = \text{konstanta}$$

Vzorec pro $f(\lambda, T)$ našel až Max Planck a použil odvážný předpoklad, že energie je mezi látkovým prostředím a zářením vyměňována ne spojité ale v kvantech energie, záviselých na frekvenci:

$\Delta E = h \cdot f =$ kvantová hypotéza; $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Js = Planckova konstanta

Fotoelektrický jev – vysvětlen pomocí kvantové hypotézy.



- dopadá-li na katodu záření, pak jsou z povrchu emitovány elektrony a v obvodu může procházet el.proud.

Vlastnosti – nelze je vysvětlit z klasické elektrodynamiky:

- elektrony emitovány (teče proud) jen když záření má vyšší frekvenci než kritická hodnota (závisí na materiálu). Většinou UV
- množství elektronů a velikost vzniklého proudu závisí na hodnotě osvětlení (intenzitě) ne na frekvenci
- elektrony se uvolňují bez spoždění
- brzdné napětí (energie elektronů) je lineární fci frekvence

Toto vše vysvětlil Einstein: světlo lze chápat jako tok kvant energie elmag pole, tzv. fotonů. Bilance energie při dopadu a pohlcení fotonu:

$$hf = A + \frac{1}{2} m_0 v^2 \quad \text{energie fotonu} = \text{výstupní práce (k jejímu překonání aby el. mohl uniknout z materiálu)}$$

+ kinetická energie kterou si uvolněný elektron bere s sebou

- musí $hf > A = hf_0$ aby el. unikl
- čím větší intenzita světla tím více fotonů a více uvolněných el.
- spoždění není nutné, stačí jediný foton

- fotoelektrický jev má široké uplatnění – fotočlánky, fotonásobiče....

Comptonův jev – Compton pozoroval při rozptylu rentgenového záření na vhodných látkách, že v rozptýleném záření se vedle původní vlnové délky objevuje i nová větší než původní – další důkaz existence fotonů a slouží i popisu jejich vlastností

foton – kvantum elmag. z.

- hybnost $p = E/c = hf/c$

- nulová klidová hmotnost

Povaha světla je dvojaká (vlnění i částice) – vedle vlnových (dominují na dlouhých vlnách) má i korpuskulární kvantové aspekty (dominují na krátkých vlnách – gamma). A světlo je uprostřed.

Bohrův model atomu:

1. model Rutherford (objevil jádro díky odrazům alfa záření na kovových foliích) – sporný planetární

Bohrův model – model kvantových elektronových drah. Základem pro jeho model atomu bylo studium spektra (spektrálních čar, jejich sérií) vodíku. Bohrovy předpoklady:

Postulát o stacionárních stavech: atomy se mohou po dlouhou dobu nacházet jen v určitých stacionárních stavech, v nichž nevyzařují energii.

Postulát o vyzařovaných frekvencích: Při přechodu z jednoho stavu do jiného vyzařují nebo pohlcují atomy monochromatické záření určité frekvence, pro kterou platí:

$$f = \frac{E_s - E_n}{h}, E_s, E_n \text{ jsou hodnoty energie stacionárních stavů}$$

Dále podle Bohra trajektorie elektronů jsou kružnice a jako kvantovou podmínku přijal požadavek aby stac. stavům odpovídaly jen dráhy kde moment hybnosti kroužícího elektronu je roven celistvému násobku redukované Planckovy konstanty:

$$L = mvr = n\hbar, \hbar = \frac{h}{2\pi}, n = 1, 2, 3, \dots$$

pak **jediné přípustné hodnoty poloměru drah:**

$$r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m Ze^2} \text{ kvantové číslo } n = 1, 2, 3, \dots \text{ Ze – je náboj jádra}$$

příklad: pro $n=1$ $Z=1$ (vodík) je $r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10}$ m – odpovídá rozměrům atomu vodíku

Smyslem Bohrovy teorie je ale nalezení **kvantových hodnot energie:**

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{Z^2 m e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \text{ tato energie je záporná, protože vytváří vázaný stav soustavy jádro-elektron. Pro}$$

základní stav $n=1$ dostáváme $E_1 = -13,5$ eV. Takovou energii je třeba dodat abychom elektron od jádra vzdálili.

Rozvinutí Bohrovy teorie: Sommerfeld nahradil kružnice elipsami, to vede na další kvantovou podmínku a další kvantové číslo. Rozlišujeme hlavní kvantové číslo n (určuje velikost hlavní poloosy a udává energii kvantového stavu) a vedlejší l (určuje velikost vedlejší poloosy a souvisí s kvantováním velikosti momentu hybnosti L). Spolu s L je kvantován i magnetický moment a jeho průmět M_z . Pohyb elektronu je ale 3D problém – nutnost 3. čísla, které kvantuje průmět L_z do směru osy z – m . Toto číslo bývá označováno jako magnetické kvantové číslo. $L_z = m\hbar$

- Bohrova teorie ale má omezení a nedokázala vysvětlit ani stavbu atomu Helia a složitější.

Vlnové vlastnosti částic: i částice (z mechaniky) mají vlnové aspekty (tedy rozpor vlna-částice nejen u elmag jevů) = dualismus částice-vlna i pro elektrony a jiné „zřetelně částicové“ objekty.

Každá částice může mít vlnový aspekt a obráceně. L. de Broglie rozšířil platnost vztahů pro fotony i na částice s nenulovou klidovou hmotností:

vlnová délka: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ p – hybnost, h – Planckova konstanta

frekvence: $f = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h}$

grupová rychlost – rychlost přenosu energie a rychlost „vlnového balíku“ - je zde rovna rychlosti částice.

Myšlenka o vlnových vlastnostech mikročástic vedla na Schrödingerovu rovnici.

Heisenbergovy relace neurčitosti:

-operátor $\hat{x} \equiv x$ odpovídá měření souřadnice x

-operátor odpovídající x-ové souřadnici hybnosti $\hat{p}_x = -j\hbar \frac{\partial}{\partial x}$

-tyto dva operátory spolu nekomutují, platí: $\hat{x}\hat{p}_x - \hat{p}_x\hat{x} = j\hbar$,

takže souřadnice x a x-ová složka hybnosti nemohou mít současně ostré hodnoty. „Změříme-li přesně polohu, pak nelze přesně změřit hybnost a obráceně“.

Pro součin neurčitosti polohy Δx a hybnosti Δp lze odvodit Heisenbergovu relaci neurčitosti:

$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$ (ve 3D platí pro tento vzorec podél všech 3 os). „Určíme-li přesně x pak Δx malé ale Δp hodně velké = nepřesné určení hybnosti“.

-podobnou relaci lze odvodit pro čas a energii:

$\Delta t \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$ Δt – trvání stavu, ΔE – neurčitost v určení energie.

-Heisenbergova relace neurčitosti vede na skutečnost, že elektron atomu nemá trajektorii:

$m \approx 10^{-30}$ kg, neurčitost polohy $\Delta x \approx 10^{-10}$ m \Rightarrow neurčitost rychlosti pak $\Delta v \approx 10^6$ m.s⁻¹. Neurčitost v rychlosti je stejného řádu jako rychlost sama – pojem trajektorie ztrácí smysl.

Schrödingerova rovnice: -rovnice vlnového typu popisující svět částic

- je to další rozšíření teorie o vlnových vlastnostech mikročástic

časově závislá Schrödingerova rovnice (závislá na 3 prostorových souřadnicích):

$$j\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + V(x, y, z) \Psi$$

$V(x,y,z)$ – potenciální energie působící na částici = pohybuje se v silovém poli

\hbar - redukovaná Planckova konstanta

Δ - Laplaceův operátor $\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

Ψ - vlnová funkce (vlna) popisující chování volné částice

- „vypovídá o pohybu částice v silovém poli“

- „vlnový děj spojený s pohybem částice“

dále můžeme stanovit Schrödingerovu rovnici nezávislou na čase - **nečasová** (Ψ závisí jen na \mathbf{r} (souřadnice polohového vektoru) nezávisí na čase). Je to rovnice pro stacionární stavy:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}) + V(\mathbf{r}) \Psi(\mathbf{r}) = E \Psi(\mathbf{r})$$

- můžeme dále zavést operátor celkové energie = hamiltonián $\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\mathbf{r})$

- potom Sch. rovnice pro stacionární stavy:

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

- poznámka: $|\Psi(\mathbf{r})|^2$ je hustota pravděpodobnosti výskytu částice v místě \mathbf{r}

Schrödingerova rovnice:

- je východiskem k hledání stacionárních stavů a jejich konstantních hodnot energie

- díky ní lze popsat a vysvětlit tunelový jev = průchod potenciálovou bariérou

Kvantové jevy:

- **tunelový jev** (průchod potenciálovou bariérou)

- **spin** je kvantový jev – vnitřní moment hybnosti částice (elektronu např.). Spinový moment $S = \sqrt{s(s+1)}\hbar$ kde s je spinové kvantové číslo (elektron $s=1/2$ $\mathbf{m}_s = \pm 1/2$ – kvantové číslo pro průmět spinu do zvoleného směru, to). Dále existuje ještě úhrnný moment, který je také kvantován (j, m_j) $J = L+S$.

- **laser** – stimulovaná (indukovaná, vynucená) emise

- **supravodivost** je případ kdy kvantové efekty vystupují až na makroskopickou úroveň. Řada kovů (často špatné vodiče) a slitin při nízkých teplotách pod kritickou hodnotu (blízko absolutní nule) vykazuje náhlou změnu rezistivity – klesá o mnoho řádů. Vzniká tam Cooperův pár - spřažený elektronový pár, který se pohybuje bez překážek.

Pauliho vylučovací princip – v určitém stavu s úplnou čtveřicí kvantových čísel n, l, m, m_s se může nacházet maximálně 1 elektron.

Hlavní kvantové číslo $n = 1, 2, 3, \dots$

Vedlejší kvantové (orbitální) číslo $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$, kvantuje přípustné hodnoty velikosti momentu hybnosti L :

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$$

Magnetické kvantové číslo m = hodnoty mezi $-l$ a l , kvantuje $2l+1$ možných hodnot průmětu momentu hybnosti do zvoleného směru (osy z) $L_z = m\hbar$

3. Jaderné síly, radioaktivita, jaderná energetika, subnukleární částice.

Číslo Z se nazývá protonovým číslem = počet protonů v jádře

Číslo A se nazývá hmotnostní (nukleonové) = počet nukleonů v jádře (protony+neutrony)

Rozměr jádra 10^{-14} m (atomu 10^{-10}) a je v něm téměř veškerá hmotnost atomu.

Jeden prvek má i více izotopů – liší se počtem neutronů v jádře (nuklidu). Některé nuklidy jsou stabilní jiné ne.

Jaderné síly

- jsou jimi poutány v jádře protony a neutrony

- nejsou ani elektromagnetické ani gravitační povahy

vlastnosti:

a) nezávisí na elektrickém náboji – stejné mezi protony i neutrony

b) velmi malý dosah, vně jádra ve vzdálenostech 10^{-14} m se již neprojevují

c) v jejich dosahu je jejich intenzita mimořádně vysoká, nejsilnější známé síly, určované silnou interakcí

d) mají saturační vlastnosti – 1 nukleon může interagovat jen s omezeným počtem dalších nukleonů

e) nejsou to síly centrální, závisí na vzájemné orientaci spinů nukleonů

Mezonový výklad: mezi nukleony dochází k výměně částic tzv. pionů (nosiťel jaderných sil; nestabilní, mění se na miony či elektrony), které mohou být nabitě i neutrální. Po krátkou dobu je při tom narušen zákon

zachování energie.

Radioaktivita: radioaktivita je přirozená a umělá

Přirozená r.: záření α , β a γ

Paprsky α : nesou kladný elektrický náboj velikosti $2e$ – jádra helia ${}^2\text{He}^4$

- částice alfa uniká z jádra díky tunelovému jevu

- částice alfa ionizuje velmi intenzivně – pohltí je i tenká kovová fólie, dolet několik cm a pro různé prvky téměř stejný

Paprsky β : proud elektronů

- vznik – přeměna neutronu na proton a elektron + vzniká neutrino

- ubývá částic postupně s tloušťkou absorbujícího prostředí

- pronikavost = maximální dolet D_m – bývá několik mm (sklo 5mm ho zastaví)

Paprsky γ : tvrdé elektromagnetické záření (tvrdé fotony) s velkou energií jednotlivých kvant

- často doprovází α , β

- emituje se rozdíl energie při přechodu z excitovaného do základního stavu

- má největší pronikavost

rozpady:

(α): ${}_Z\text{X}^A \rightarrow {}_{Z-2}\text{Y}^{A-4} + {}_2\text{He}^4$, (β): ${}_Z\text{X}^A \rightarrow {}_{Z+1}\text{Y}^A + {}_{-1}\text{e}^0$, (γ): ${}_Z\text{X}^A \rightarrow {}_Z\text{X}^A + \gamma$

λ - rozpadová (přeměnová konstanta), platí $-dn = \lambda n dt$, dn – počet atomů který se přemění za čas dt

Časová závislost počtu atomů radioaktivního prvku $n(t) = n_0 \cdot e^{-\lambda t}$ (n_0 – počet v čase t) – tedy exponenciálně jich ubývá (přeměňují se)

Poločas rozpadu T: doba za kterou se přemění z daného vzorku polovina z původního množství atomů:

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

Přirozené rozpadové řady: urano-radiová, thoriová, urano-aktiniová – podle počátečních prvků. Samovolný rozpad až na olovo. První členy mají velmi dlouhý poločas rozpadu.

Aktivita – pro posouzení mohutnosti radioaktivního zdroje = počet přeměn které ve vzorku nastávají za jednotku času. Jednotka je becquerel (Bq). Aktivita s časem ubývá s poločasem T radionuklidu.

$$A = \left| \frac{dn}{dt} \right| = \lambda n$$

Absorbovaná dávka záření: množství látkou pohlcené energie. Jednotka Gray (Gy) = absorpce energie 1 joule v 1 Kg látky. Nehledí na druh záření – různé biologické účinky. K tomu slouží ekvivalentní dávka Q (jednotka Sievert). 1 Gy = 1 Sv pro β a γ , pro α je 1 Gy = 20 Sv

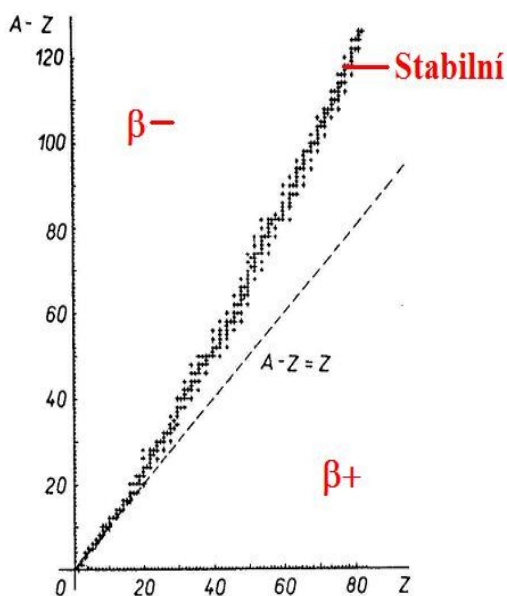
Umělé přeměny jader: 1919 Rutheford – atom dusíku srážkami s α částicemi na atom kyslíku

1930 objev neutronu – volný neutron je nestabilní ($T=12$ min) a samovolně se přeměňuje na proton, elektron a neutrino. Ve vázaném stavu v jádrech je stabilní.

K přeměnám lze využít α částice, urychlené protony, deutrony (jádra těžkého vodíku ${}^2\text{H}^2$) či neutrony. Vznikají uměle tak i nuklidy které v přírodě neexistují – jádra transuranových prvků se $Z > 92$ – všechna jsou nestabilní. Nejdůležitější je Plutonium ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ – pro štěpné reakce a vyrábí se pomocí 2 beta přeměn z U238 – lehce se vyrábí.

Umělá radioaktivita a její využití: stabilních nuklidů je asi 260, všech uměle připravených kolem 1600. Většina je nestabilní a radioaktivní. Pokud má uměle připravený izotop nějakého prvku přebytek neutronů – leží nad oblastí stabilních nuklidů, pak se mění neutron na proton a pozorujeme radioaktivitu β^- s vyzářením elektronu (rozpad na proton, elektron a antineutrino). Pokud je přebytek protonů – tedy leží pod oblastí

stability, pak pozorujeme radioaktivitu β^+ s vyzářením pozitronu (mění se proton na neutron, pozitron a neutrino).



Důležitý je radioaktivní izotop uhlíku C 14 – využití v archeologii určení stáří předmětů .



Využití uměle připravených radionuklidů: věda, technika, zemědělství, medicína – značkování....

Jaderná energetika: nejpevněji jsou vázána jádra středně těžká ($A \approx 50-100$) – to znamená, že složíme-li středně těžké jádro ze 2 lehkých jader nebo naopak, rozdělíme-li velmi těžké jádro na 2 jádra střední, tak dojde k uvolnění jistého množství energie.

Štěpení těžkých prvků – uranu a plutonia: vnikne-li do jádra U235 neutron, vznikne přechodně jádro U236, poté může nastat jedna z možností:

- neutron je z jádra opět vypuzen (nepružný rozptyl)
- uvolněná energie je emitována z jádra ve formě kvanta γ (radiační zachycení neutronu)
- jádro zůstává přechodně v excitovaném stavu, dochází k jeho deformaci a posléze k rozdělení na 2 přibližně stejné části (štěpení) – uvolnění energie 200 MeV, většina jako kinetická energie odštěpků. Vzniká asi 90 různých nestabilních nuklidů. Při štěpení se uvolňují další 2 až 3 neutrony \rightarrow štěpení dalších jader. Další se uvolňují později – důležité pro ovládání reaktorů.

U235 je nejpravděpodobnější výsledek štěpení. U235 – vhodný pro štěpení - jen 0.7% v přírodě oproti U238 – nevhodný pro štěpení. Další vhodný prvek je Pu 239.

Každý uvolněný neutron může štěpit další jádra.... - to může vést k lavinovému narůstání počtu štěpných jader = řetězová štěpná reakce. Praktická realizace ale není snadná.

Účinného štěpení lze dosáhnout obohacením směsi izotopem U235 nebo vhodným zpomalením neutronů ze štěpení, na malé rychlosti (nejlépe se štěpí pomalými neutrony).

Jaderná puma – bez moderátoru – reakce U235 nebo Pu239 s rychlými neutrony.

Jaderný reaktor – zde se neutrony zpomalují a používá se přírodního uranu nebo obohacené směsi. Materiály pro zpomalování se nazývají moderátory (voda, grafit, těžká voda) – nesmí mít nečistoty, které zachycují neutrony.

Kritické množství – minimální rozměr a hmotnost štěpného materiálu nezbytné pro štěpení. Pokud je méně neutrony uniknou dříve než způsobí štěpení.

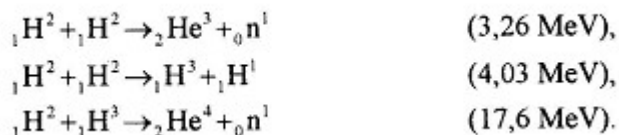
Palivo reaktoru – tyče s kysličíkem uranu.

Regulace – regulační elementy pohlcující intenzivně neutrony (bór, kadmium)

K odvádění tepla a chlazení se používá voda nebo těžká voda či tekutý kov.

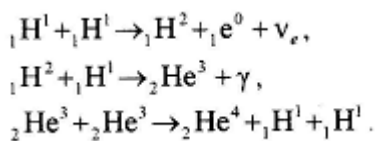
Elektrárna má 2 okruhy – vnitřní, který vstupuje do reaktoru a přes výměník tepla je oddělen od vnějšího. Vnější pohání turbíny a slouží k výrobě el. energie. Problém odpadu, celosvětově 15% výroby.

Termonukleární reakce: uvolnění energie při slučování lehkých jader. Je třeba překonat odpuzivé síly mezi jádry a přiblížit je – je třeba vysoká teplota $T \approx 10^7 - 10^8$ K. Tento vysoce zahřátý plyn je držen ve hvězdách gravitací a na Zemi při pokusech silným magnetickým polem. Snaha o řízenou termonukleární reakci – první pokusy -tokamaky. Příklady – reakce izotopů vodíku:



Explozivní reakce = vodíková puma.

Pomalé termonukleární reakce probíhají v hvězdách – vodík je spalován na helium. Jedna z těchto reakcí je „vodíkový cyklus“:



Subnukleární (elementární) částice: - protony, neutrony, elektrony, pozitrony, neutrina, piony, miony, kaony...

- většina je nestabilní a samovolně se mění na lehčí částice

- klasifikace pomocí různých kvantových čísel, pro která při jejich přeměnách platí určitá pravidla a zákony zachování

Bosony a fermiony: bosony (foton, piony, kaony) jsou částice s celočíselným spinovým číslem (spin = vlastní, vnitřní moment hybnosti – spin má každá částice) $s = 0, 1, 2, \dots$. Fermiony (elektrony, miony, hyperony, neutrina...) jsou částice s poločíselnou hodnotou $s = 1/2, 3/2, \dots$. Liší se i rozdělením – fermiony: Fermi-Diracovo, bosony: Bose-Einstein. Pro fermiony platí Pauliho vylučovací princip, ne pro bosony.

Částice a antičástice: ke každé částici existuje její antičástice. V některých charakteristikách se shodují (spin, hmotnost), v jiných se liší znaménkem (el. náboj). Vysoko převažují částice nad antičásticemi. Částice a antičástice se často rodí v párech a v nich i zanikají (př. kreace elektron-pozitronového páru). Příklady: pozitron e^+ je antičástice elektronu, antiproton k protonu, antineutron k neutronu... Foton, pion a mezon jsou samy sobě antičásticemi. Antičástice k neutrálním částicím se liší v jiných char. než nábojem.

Leptony: samostatná rodina elementárních částic: elektron, neutrino, mion, mionové neutrino, těžký lepton tau a jeho neutrino a jejich antičástice. Všechny mají $s = 1/2$, s ostatními interagují elektromagneticky nebo slabou interakcí.

Hadrony: částice interagující silnou interakcí. Dělí se na skupinu mezonů a baryonů. Hadrony jsou složeny z kvarků – kvarků ($s=1/2$, náboj $1/3$ a $2/3$ elementárního el. náboje) je 6 lišících se vůči. Dále každý kvark může být v 3 barvách. Mezony jsou ze 2 kvarků či antikvarků, baryony ze 3.

Literatura:

1. Doc.RNDr. Josef Jelen: Fyzika II