

FYZIKA DĚJŮ A PROCESŮ

Jaderná fyzika



Jaderná fyzika

Stavba atomu

- atomy - jádro - protony a neutrony
 - obal - elektrony
- jaderná fyzika - děje na úrovni atomových jader
- atomová fyzika - děje na úrovni elektronových obalů atomů
- protony - jeden kladný elementární elektrický náboj
- elektrony - jeden záporný elementární náboj
- neutrony - bez elektrického náboje
- počet protonů v jádře – protonové číslo Z - jednoznačně určuje, o jaký prvek se jedná
- počet neutronů v jádře – neutronové číslo N - může se lišit u jednotlivých atomů stejného prvku, pak se jedná o různé izotopy téhož prvku

Jaderná fyzika

- součet protonů a neutronů – nukleonové číslo A
- schématické značení jádra prvku: A_ZX
- neutrální atom - počet elektronů v obalu shodný s počtem protonů v jádře
- kladný iont – méně elektronů než protonů - převládá kladný náboj jádra a atom se jeví jako kladně nabitý
- záporný iont – více elektronů než protonů - převládá záporný náboj obalu a atom se jeví jako záporně nabitý
- hmotnost protonů a neutronů cca 1800x větší než hmotnost elektronů \Rightarrow
 \Rightarrow téměř všechna hmota atomu soustředěna v jádře
- průměry atomů řádově 10^{-10} m
- průměry jader řádově 10^{-15} m

Jaderná fyzika

Radioaktivita

- nuklid - soubor atomů se stejným počtem protonů i stejným počet neutronů
- nuklid je např. soubor atomů ${}_{92}^{235}\text{U}$ s 92 protony a 143 neutrony
- izotopy – nuklidy téhož prvku (tj. se stejným počtem protonů), s různým počtem neutronů
- Jednotlivé izotopy prvků se buď vyskytují v přírodě, nebo mohou být vytvořené uměle
- izotopy se liší fyzikálními vlastnostmi, například stabilitou jádra
- stabilita jádra – schopnost jádra setrvávat v neměnném stavu
- neutrony ovlivňují vzdálenosti jednotlivých protonů a tím i silové poměry v atomovém jádře – pokud jsou silové poměry nepříznivé, jádro je nestabilní a časem se samovolně přemění na jádro stabilnější

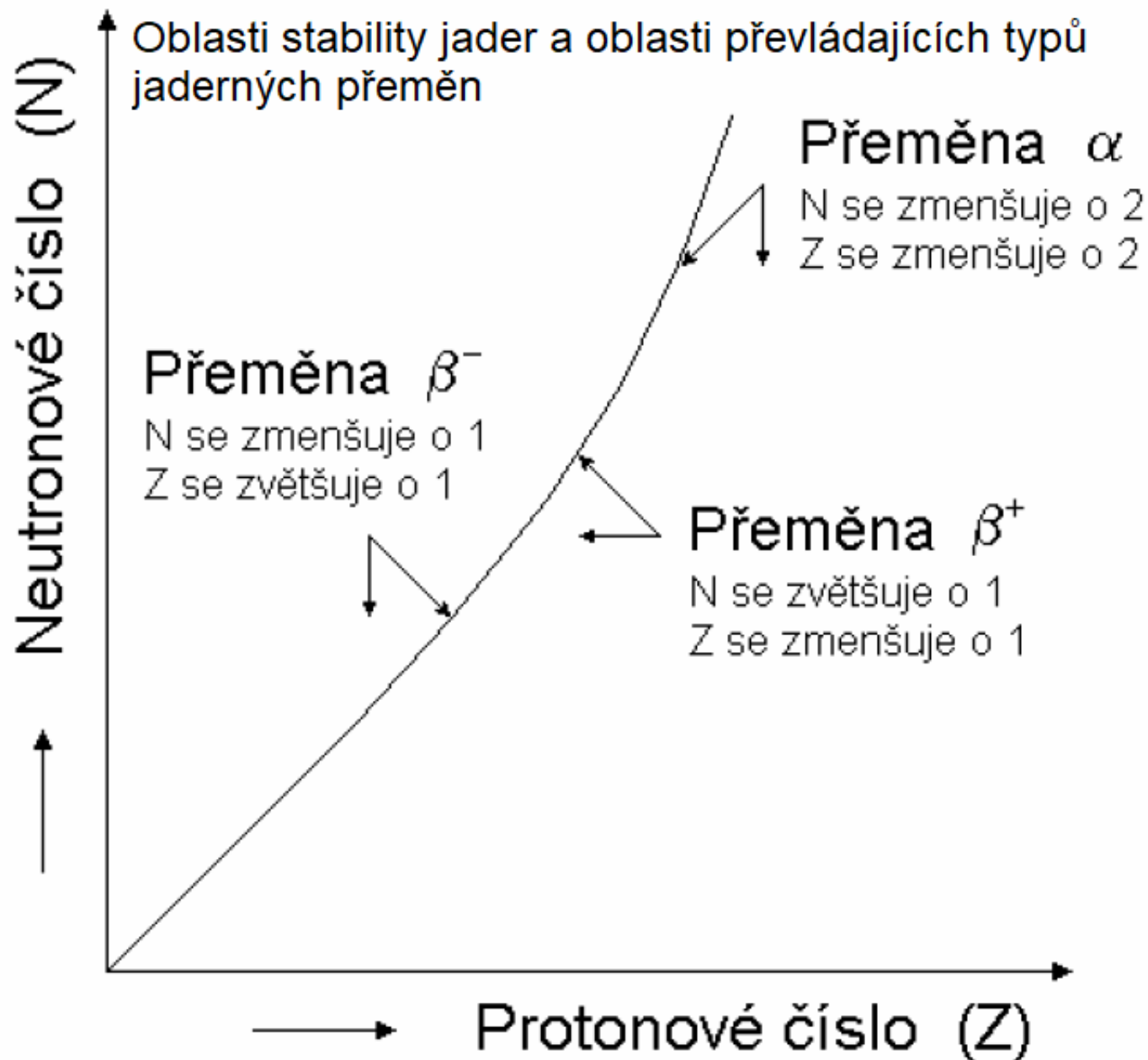
Jaderná fyzika

- radionuklidy - nestabilní nuklidy, jejichž jádra podléhají samovolné přeměně doprovázené emisí záření
- radioaktivita - schopnost nestabilních jader samovolně se přeměňovat
- přeměnou může vzniknout jádro opět nestabilní, nebo zcela stabilní

Obecné zákonitosti radioaktivních přeměn

- přirozeně radioaktivní radionuklidy - vyskytují se v přírodě
- x umělé radionuklidy
- při přeměně radionuklidů dochází k emisi částic alfa (jader hélia) nebo elektronů nebo pozitronů a také fotonů s vysokou energií (záření gama)
- radioaktivní přeměny – v jádrech atomů, nezávislé na vnějších podmínkách
- náhodné procesy, řídí se zákony statistiky; pro jednotlivá jádra nelze předpovědět, zda se v určitém časovém intervalu přemění, nebo ne

Jaderná fyzika



Jaderná fyzika

- úbytek počtu nepřeměněných radioaktivních jader $-dN$ z původního počtu N za čas dt : $-dN = N \lambda dt \Rightarrow$

\Rightarrow přeměnový (rozpadový) zákon: $N = N_0 e^{-\lambda t}$, kde

N - okamžitý počet původních jader v čase t ,

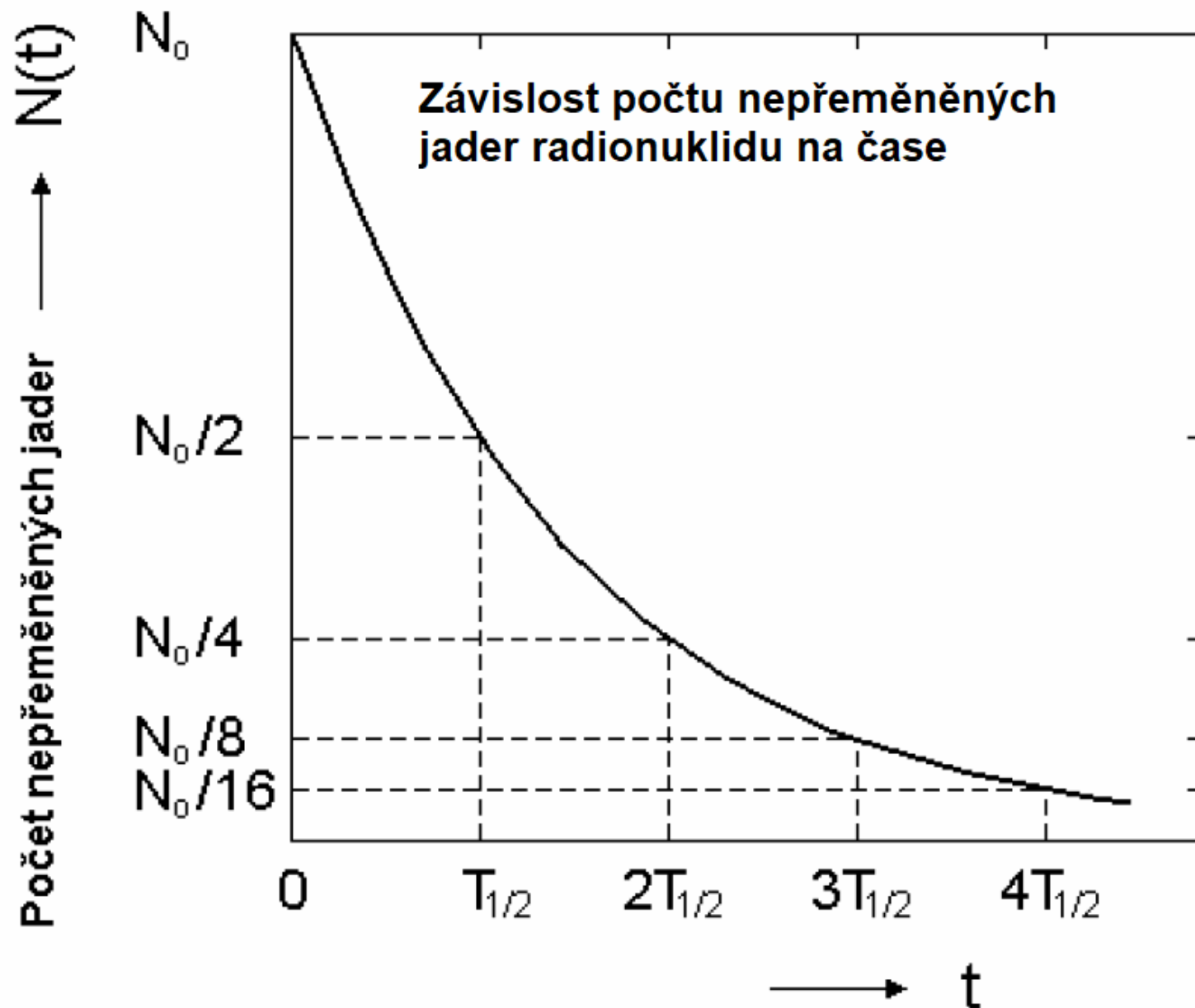
N_0 - původní počet jader v čase 0

λ - přeměnová konstanta odrážející rychlost přeměny daného radionuklidu

- charakteristika radionuklidu - poločas přeměny $T_{1/2}$ - střední čas, za který se původní počet atomů daného radionuklidu zmenší na polovinu

- po dosazení do přeměnového zákona: $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$

Jaderná fyzika



Jaderná fyzika

- hodnota poločasu přeměny $T_{1/2}$ je charakteristická pro určitý radionuklid
- poločasy známých radionuklidů v širokém rozmezí $T_{1/2} \approx 10^{-7} - 10^{22}$ s

Příklady hodnot poločasů přeměny pro vybrané radionuklidy:

Radionuklid	${}_{90}^{232}\text{Th}$	${}_{38}^{90}\text{Sr}$	${}_{7}^{13}\text{N}$	${}_{2}^{6}\text{He}$	${}_{84}^{212}\text{Po}$
Poločas přeměny	$1,4 \cdot 10^{10}$ roků	28 roků	0,9993 min	0,823 s	$3 \cdot 10^{-7}$ s

- podle způsobu radioaktivní přeměny se rozlišuje přeměna alfa a přeměna beta

Přeměna alfa

- z jádra emitována částice α (jádro ${}_{2}^{4}\text{He}$)
- nukleonové číslo se zmenší o 4 a protonové číslo se zmenší o 2
- schematicky lze vyjádřit: ${}_{Z}^{A}\text{X} \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}\text{Y} + {}_{2}^{4}\text{He}$

Jaderná fyzika

- konkrétní příklady: ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$, ${}^{241}_{95}\text{Am} \rightarrow {}^{237}_{93}\text{Np} + {}^4_2\text{He}$
- energie vysílaných α částic v rozmezí 4 - 9 MeV
- přeměna alfa výhradně u těžkých radionuklidů

Přeměna beta

- nemění nukleonové číslo jádra A , mění se pouze protonové číslo Z
- přeměna beta dvěma různými způsoby:

1) *přeměna β^-* - emise elektronu a antineutrína z jádra

- neutron se změnil v proton a elektron (elektron je částice β^-)
- schematicky lze popsat: ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e \Rightarrow {}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$
- konkrétní příklad: ${}_{27}^{60}\text{Co} \rightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni} + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$, $T_{1/2} = 5,26$ roku

Jaderná fyzika

Přeměna beta

2) přeměna β^+ - emise pozitronu a neutrina z jádra

- pozitron – antičástice k elektronu

- proton se změnil v pozitron a neutron (pozitron je částice β^+)

- schematicky lze popsat: ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_1^0e \Rightarrow {}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_1^0e + \nu$

- konkrétní příklad: ${}_{11}^{22}Na \rightarrow {}_{10}^{22}Ne + {}_1^0e + \nu$, $T_{1/2} = 2,58$ roku

- energie částic vysílaných β částic max. jednotky MeV

- přeměna beta i u lehčích radionuklidů

Jaderná fyzika

Izotopy kyslíku, jejich zastoupení v přírodě a u nestabilních rovněž typy přeměn

Izotop	$^{13}_8\text{O}$	$^{14}_8\text{O}$	$^{15}_8\text{O}$	$^{16}_8\text{O}$	$^{17}_8\text{O}$	$^{18}_8\text{O}$	$^{19}_8\text{O}$	$^{20}_8\text{O}$
% zastoupení v přírodě	0	0	0	99,40	0,40	0,20	0	0
Typ přeměny	β^+	β^+	β^+	stabilní			β^-	β^-

Elektronový záchyt (záchyt elektronu jádrem)

- schematicky lze popsat: $^1_1\text{p} + ^0_{-1}\text{e} \rightarrow ^1_0\text{n} + \nu \rightarrow ^A_Z\text{X} + ^0_{-1}\text{e} \rightarrow ^A_{Z-1}\text{Y} + \nu$

- konkrétní příklad: $^{65}_{30}\text{Zn} \rightarrow ^{65}_{29}\text{Cu} + \nu$

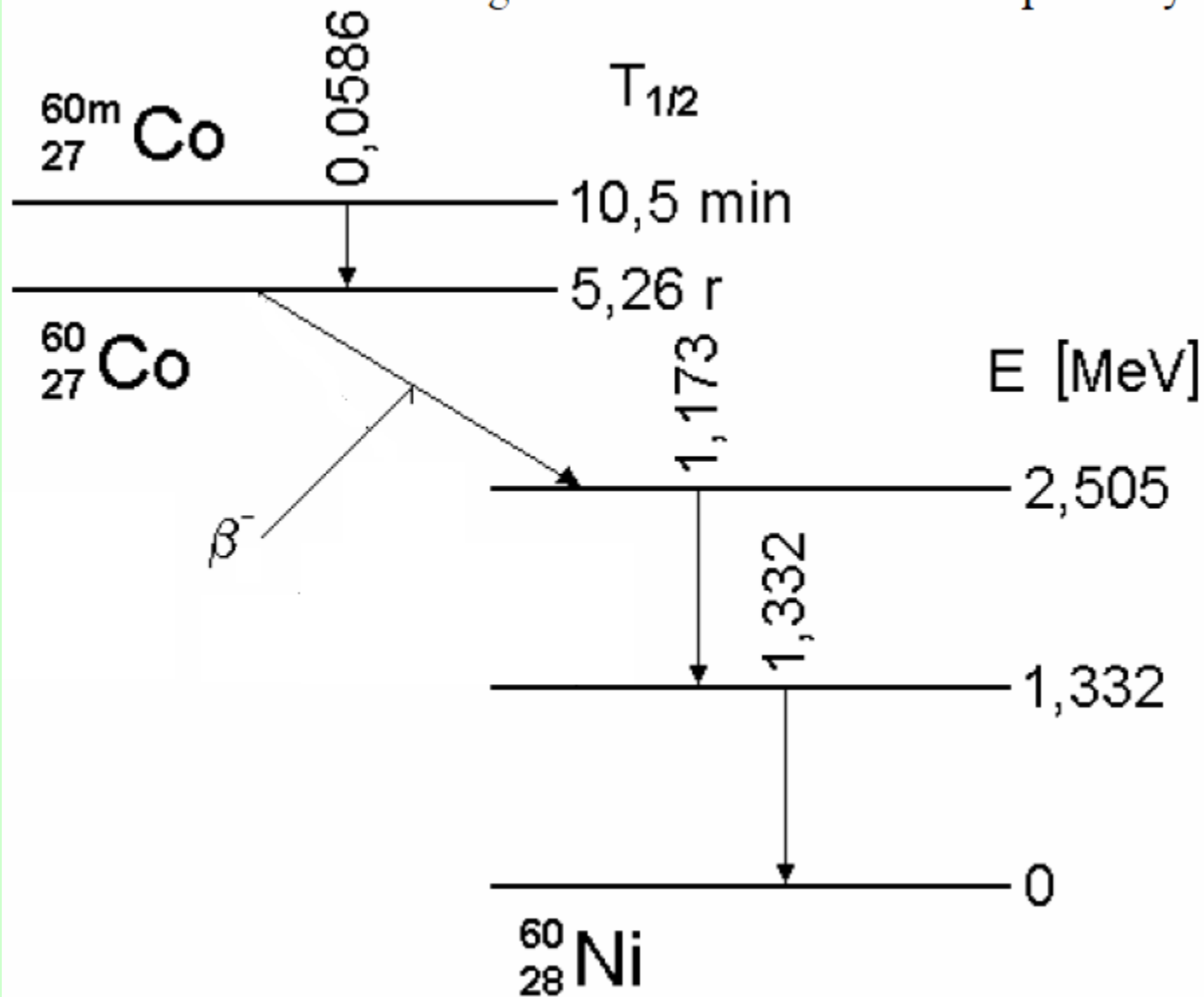
Jaderná fyzika

Emise záření gama

- obvykle doprovází přeměny alfa či beta, neboť po těchto přeměnách vzniknou jádra, která jsou v excitovaném stavu
- přebytek energie se vyzáří po přechodu do nižšího excitovaného nebo až do základního stavu ve formě záření gama, tj. fotonů s velmi krátkou vlnovou délkou a s energií až několik MeV
- fotony jsou vysílány pouze s určitými hodnotami energií, které odpovídají rozdílu energií mezi jednotlivými excitovanými stavy jádra
- kromě mechanismu přímé emise záření gama z excitovaného jádra existuje ještě další způsob, jak se jádro může zbavit přebytečné energie:
 - energie excitace se předá elektronu z elektronového obalu atomu
 - elektron je poté uvolněn s kinetickou energií rovnou rozdílu mezi energií excitace předanou jádrem a vazbovou energií elektronu v atomu
- tento jev se nazývá vnitřní konverze

Jaderná fyzika

Energetické schéma radioaktivní přeměny



Jaderná fyzika

- většina jader v excitovaném stavu vyzařuje přebytečnou energii téměř okamžitě po přeměně alfa či beta
- existují však i jádra nazývaná izomery, která mohou setrvávat v excitovaném stavu značně dlouho
- takový stav jádra se nazývá metastabilní
- pokud jádro vzniklé přeměnou je nestabilní, nastane časem opět některá z výše popsaných přeměn

- příklad postupné přeměny: ${}_{38}^{90}\text{Sr} \rightarrow {}_{39}^{90}\text{Y} \rightarrow {}_{40}^{90}\text{Zr}$, obě přeměny jsou typu β^-
- první probíhá s poločasem přeměny 28,8 roku
- druhá s poločasem přeměny 64,1 hodin
- jedná se o tzv. přeměnové řady, na jejichž konci je stabilní jádro

Jaderná fyzika

Interakce ionizujícího záření s prostředím

- ionizující záření může způsobovat chemické změny v buňkách a poškozovat DNA
- ionizující záření (alfa, beta, gama, neutrony apod.) při průchodu látkovým prostředím interaguje s jeho atomy
- pro nabité částice s nenulovým magnetickým momentem - především elektromagnetická interakce
- mezi neutrony a prostředím - interakce především v důsledku jaderných sil (tzv. silná interakce)
- vlivem interakcí částice ionizujícího záření mění směr dráhy a ztrácejí energii
- ztráty energie jsou důsledkem pružného a nepružného rozptylu záření na elektronech a jádrech okolních atomů, důsledkem jaderných reakcí apod.

Jaderná fyzika

- jedním z hlavních výsledků interakcí při průchodu ionizujícího záření prostředím je tzv. ionizace, kdy jsou uvolňovány elektrony z elektronových obalů atomů látkového prostředí
- ionizující záření - přímo ionizující a nepřímo ionizující:
 - přímo ionizující záření - nabité částice (elektrony, pozitrony, částice alfa apod.), které mají k ionizaci dostatečnou energii
 - nepřímo ionizující záření (fotony, neutrony apod.) - v důsledku různých procesů uvolňuje přímo ionizující nabitě částice nebo vyvolává jaderné reakce, které jsou provázené emisí přímo ionizujících částic
- popis průchodu ionizujícího záření prostředím je rozdělen podle způsobů interakce do tří skupin - nabitě částice, fotony, neutrony

Jaderná fyzika

Interakce nabitých částic s prostředím

- ionizace - důsledek nepružného rozptylu elektricky nabitých částic ionizujícího záření na elektronech atomů prostředí, ke kterému dochází v důsledku elektromagnetické interakce
- přitom ztratí ionizující částice takovou část své kinetické energie, která je potřebná k uvolnění elektronu z elektronového obalu (např. střední ionizační energie pro vzduch za normálních podmínek je cca 34 eV
- během průletu nabitě částice hmotným prostředím se tento proces opakuje (mnohonásobný rozptyl) dokud kinetická energie nabitě částice již nestačí k ionizaci ani k excitaci okolních atomů (při excitaci není uvolněn elektron z obalu atomu, ale pouze přejde na některou z vyšších energetických hladin)

Jaderná fyzika

- ionizující částice kromě ztrát energie ještě mění svůj směr pohybu - to je způsobeno nejen nepružným rozptylem ale také pružným rozptylem
- pružný rozptyl - kinetická energie částic se nespotřebovává na ionizaci či excitaci atomů \Rightarrow energetický stav atomu je před rozptylem a po rozptylu stejný
- rozptyl probíhá převážně na elektronech elektronových obalů atomů prostředí \Rightarrow podstatně více rozptylováno záření beta obsahující elektrony nebo pozitrony než záření alfa tvořené jádru helia, která mají přibližně o tři řády větší hmotnost \Rightarrow těžké částice se pohybují po téměř přímých drahách, avšak dráhy elektronů nebo pozitronů jsou ve větších hloubkách značně pokriveny
- pohyb elektronů často označován jako difúzní pohyb elektronů

Jaderná fyzika

- odlišné chování těžkých a lehkých částic při ionizačních energetických ztrátách:
- lineární brzdná schopnost - popisuje úbytek energie částice vlivem ionizace na jednotku dráhy při průchodu látkou - charakterizuje vlastnosti prostředí z hlediska ionizace
- tato veličina závisí nepřímo úměrně na druhé mocnině rychlosti částice
⇒ ionizující částice se stejnou energií ale různou hmotností ionizují okolní prostředí odlišně:
- těžké částice při stejné energii mají nižší rychlost a ionizační ztráty jsou proto větší než u lehkých částic
- k největším ztrátám energie částic dochází na konci dráhy, kdy je rychlost částic v prostředí již relativně malá

Jaderná fyzika

Interakce záření gama s prostředím

- záření gama - elektromagnetické záření tvořené fotony - elektricky neutrální kvazičástice s nulovou klidovou hmotností pohybující se rychlostí světla
- interakce fotonů s jinými částicemi probíhá vlivem jejich nulové klidové hmotnosti odlišně než v případě elektricky nabitých částic
- interakce fotonů s látkou prostřednictvím tří základních procesů - fotoelektrického jevu, Comptonova rozptylu a tvorby párů
- tyto jevy probíhají při interakci s elektrony resp. v případě tvorby párů v elektrostatickém poli atomových jader
- mimo to mohou výjimečně probíhat také interakce s jádry atomů - jaderný fotoefekt a jaderné reakce
- v důsledku uvedených procesů jsou uvolňovány elektrony, které dále interagují s prostředím

Jaderná fyzika

1) Fotoelektrický jev - může probíhat pouze na vázaných elektronech v elektronovém obalu

- jeho pravděpodobnost klesá s rostoucí energií fotonů a roste s pátou mocninou atomového čísla Z

- při fotoelektrickém jevu interaguje foton s atomem jako s jediným celkem

- energie fotonu $E = h \nu$, kde h – Planckova konstanta, ν – frekvence

- všechna energie fotonu předána některému elektronu z elektronového obalu atomu, který je z atomu uvolněn

- uvolněný elektron opustí atom s energií $E_e = h \nu - W$,

kde W – výstupní práce, tj. vazebná energie elektronu, čili energie potřebná k jeho uvolnění z atomu

- výstupní práce - pro různé prvky v rozmezí $10^1 \text{ eV} - 10^5 \text{ eV}$

Jaderná fyzika

2) Comptonův rozptyl - pružný rozptyl fotonů na volných elektronech (volný elektron – jeho vazbová energie je podstatně nižší než energie fotonu)

- energie původního fotonu se rozdělí mezi elektron, na kterém rozptyl probíhá, a rozptýlený foton

- rozptýlený foton je jediný foton s menší energií a tedy větší vlnovou délkou

- původní foton v interakci zanikl

- ze zákonů zachování energie a hybnosti plyne vztah pro vlnovou délku λ a energii rozptýleného fotonu E v závislosti na úhlu rozptylu φ :

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \varphi), E = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

kde c – rychlost světla, h – Planckova konstanta, ν – frekvence

Jaderná fyzika

3) Tvorba párů – při pohybu fotonu v elektromagnetickém poli nabitě částice, může dojít k jeho přeměně na pár částice-antičástice

- jev s prahovou energií, tj. energie fotonu musí být nejméně rovna součtu klidových energií částice a antičástice

částice a antičástice mají stejnou hmotnost \Rightarrow minimální potřebná energie fotonu $W_{\min} = 2 m_0 c^2$,

kde c – rychlost světla, m_0 – klidová hmotnost vzniklé částice (antičástice)

- nejčastější tvorba párů elektron-pozitron (pozitron je antičásticí k elektronu), protože tento proces má nejnižší prahovou energii - 1,02 MeV

- pokud foton má vyšší energii nežli prahovou, rozdělí se zbývající část energie mezi částici a antičástici stejným dílem

- pravděpodobnost vzniku páru elektron-pozitron vzrůstá se zvyšující se energií fotonu a s druhou mocninou atomového čísla prostředí

Jaderná fyzika

- fotonů ve směru šíření během průletu látkovým prostředím postupně ubývá

- tento úbytek popisuje exponenciální vztah pro absorpční zákon:

$$N = N_0 e^{-\mu x}, \text{ kde}$$

N_0 – původní počet fotonů,

N – počet fotonů po průchodu látkovým prostředím o tloušťce x

μ – lineární součinitel zeslabení

- zeslabovací koeficient μ je součet zeslabovacích koeficientů pro jednotlivé jevy - fotoelektrický jev, Comptonův rozptyl a tvorba párů:

$$\mu = \mu_f + \mu_C + \mu_P$$

- zeslabující koeficienty závisí na atomovém čísle Z a na energii fotonů

Jaderná fyzika

Interakce neutronového záření s prostředím

- neutrony - elektricky neutrální částice \Rightarrow při průchodu látkovým prostředím se chovají jinak než nabitě částice
- interakce neutronů s elektrony prostřednictvím elektromagnetické interakce je o šest řádů slabší než elektromagnetická interakce v případě nabitých částic
- průchod neutronů prostředím ovlivňován hlavně silnou interakcí (jadernými silami) s atomovými jádry

5 základních procesů vyvolaných silnou interakcí:

- závorky (a,b) znamenají symbolické označení jaderné reakce, kde a označuje nalétávající částici na jádro X
- po střetu částice a s jádrem X dojde k interakci, po které vznikne jádro Y , ze kterého je emitována částice b

Jaderná fyzika

1) Pružný rozptyl (n,n) - počáteční energie neutronu se rozdělí mezi neutron a jádro

- po tomto rozptylu zůstává jádro v základním energetickém stavu

- s klesající hmotností jádra roste část kinetické energie, kterou neutron jádru předá \Rightarrow využití lehkých jader ke zpomalování neutronů v jaderných reaktorech

2) Nepružný rozptyl (n,n) - proces možný pouze pro neutrony s energiemi 0,5 MeV až 20 MeV (rychlé neutrony)

- po tomto rozptylu zůstává jádro v excitovaném stavu - na to se spotřebuje část kinetické energie interagujícího neutronu

Jaderná fyzika

3) *Radiační záchyt (n, γ)* - neutron zachycen jádrem, které v důsledku toho přejde do vzbuzeného stavu

- při přechodu jádra do základního stavu emitováno záření gama

- radiační záchyt možný pouze v případě pomalých neutronů, které mají energie v rozmezí 10^{-6} eV až 10^{-3} eV

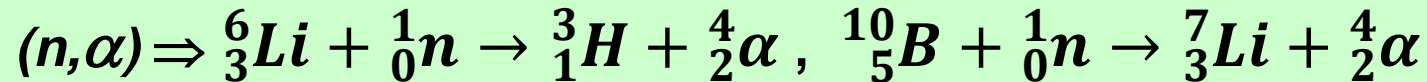
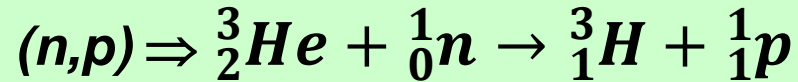
- uvedený jev se využívá pro odstínění neutronového záření, které bylo předtím zpomaleno moderátorem

4) *Jaderné reakce (n, p), (n, α)* - proces nejpravděpodobnější pro lehká jádra

- vlivem interakce je neutron jádrem pohlcen a z jádra je emitována nabitá částice

Jaderná fyzika

- konkrétní příklady uvedených reakcí:



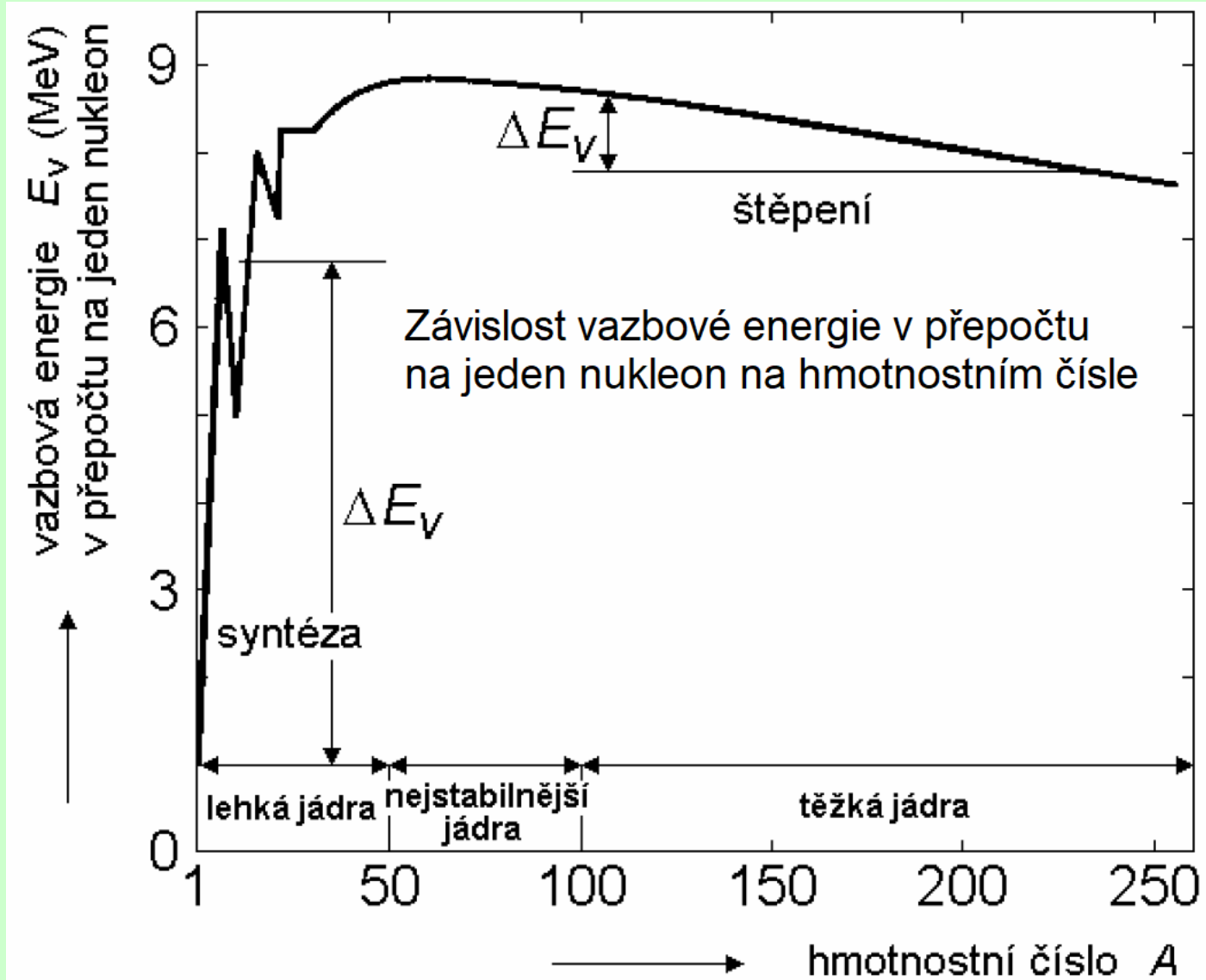
5) Štěpení jader (n,f) - jádro v důsledku interakce neutronu a jádra rozštěpeno obvykle na dva až tři fragmenty f (fishion)

- při štěpení z jádra uvolněny dva až tři neutrony, tj. více než kolik jich do interakce vstoupilo - na tom je založena řetězová reakce např. v jaderném reaktoru a při jaderném výbuchu

- v případě izotopů ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$ a ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ nastává štěpení vlivem tepelných neutronů, s energiemi $5 \cdot 10^{-3}$ eV až $5 \cdot 10^{-1}$ eV

Jaderná fyzika

Uvolnění jaderné energie

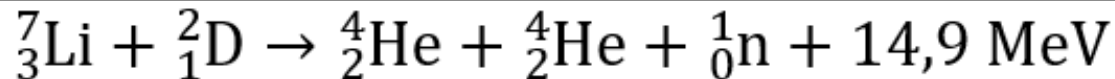
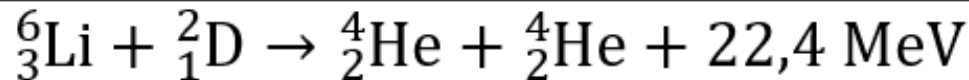
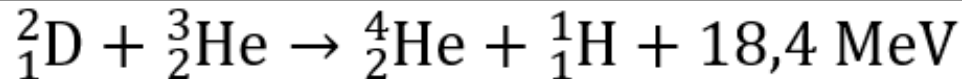
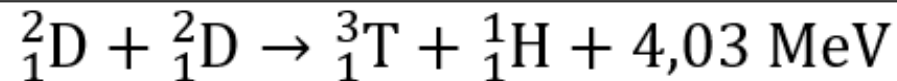
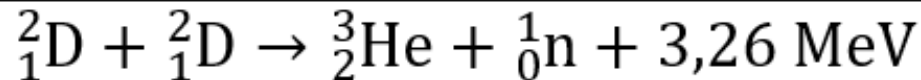
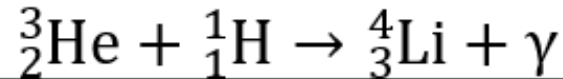
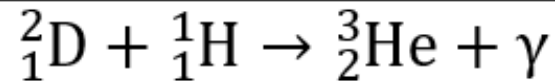


Jaderná fyzika

- jádro má menší hmotnost, než jaký je součet klidových hmotností všech nukleonů, ze kterých je jádro složeno
- energii lze uvolnit spojením lehkých jader na těžší, která jsou v oblasti nejstabilnějších jader, nebo štěpením těžkých jader na jádra lehčí opět v oblasti nejstabilnějších jader – viz obr.
- spojování lehkých jader - termonukleární reakce resp. jaderná fúze - probíhá samovolně v jádrech hvězd
- hmotu Slunce tvoří především jádra vodíku a volné elektrony, malé zastoupení jader helia a stopové příměsi jader lithia
- pro jadernou fúzi nutná vysoká teplota v řádu 10^7 K, protože jádra jsou kladně nabitá a musí mít dostatečnou energii, aby dokázala překonat odpudivé elektrostatické síly a přiblížit se na dosah působení jaderných sil, tj. na vzdálenost 10^{-15} m

Jaderná fyzika

Příklady některých reakcí probíhajících v jádru Slunce a množství uvolněné energie:



Jaderná fyzika

- **umělé dosažení jaderné fúze:**
- **neřízená reakce - výbuchem vodíkové bomby**
- **řízená reakce - v zařízeních zvaných tokamak**
- **řízená reakce není dosud technicky zvládnuta natolik, aby byla použitelná k výrobě energie**

- **štěpení těžkých jader:**
- **neřízená reakce - jaderným výbuchem**
- **řízená reakce - ve štěpných jaderných reaktorech**
- **řízená štěpná řetězová reakce technicky zvládnuta již od r.1942 (první jaderný reaktor v USA)**
- **štěpné jaderné reaktory – v jaderných elektrárnách k výrobě energie, nebo jako zdroj neutronů k vědeckému výzkumu**

Jaderná fyzika

Detekce ionizujícího záření

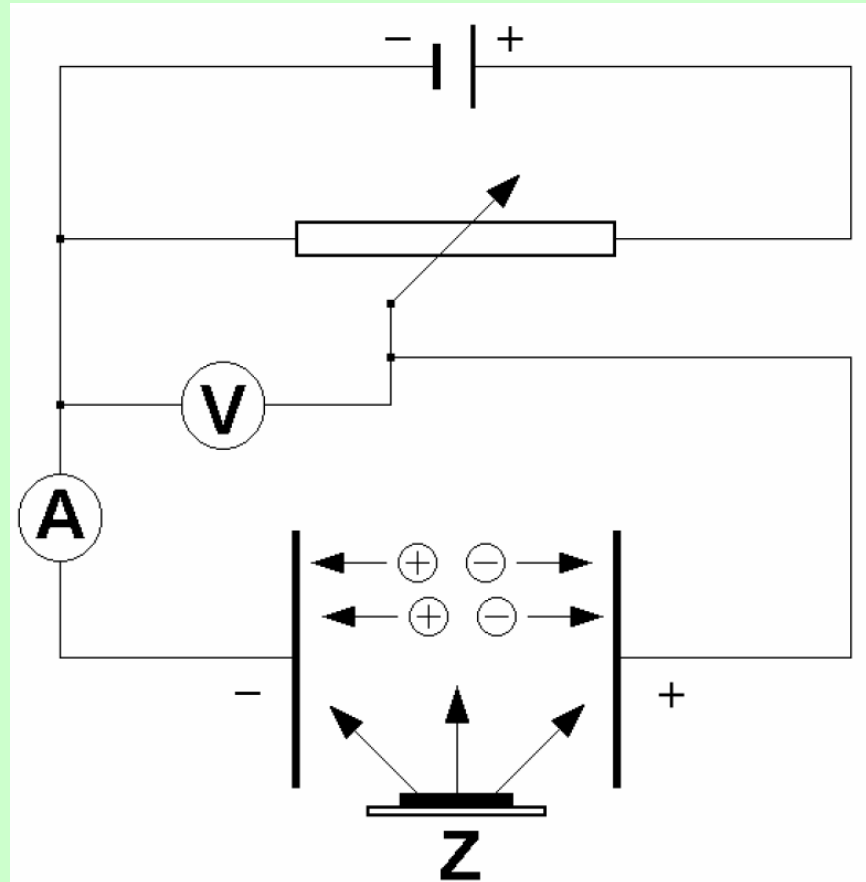
- detektory ionizujícího záření - určeny ke stanovení jeho základních fyzikálních charakteristik
- založeny na interakcích ionizujícího záření s hmotným prostředím
- detektory: plynové, scintilační a polovodičové
- konečným výstupním signálem z uvedených druhů detektorů obvykle po zaregistrování jedné částice napěťový impuls, který je dále zpracováván a vyhodnocován
- amplituda tohoto impulsu často úměrná energii zaregistrované částice
- důležitý i tvar napěťového impulsu v závislosti na čase

Jaderná fyzika

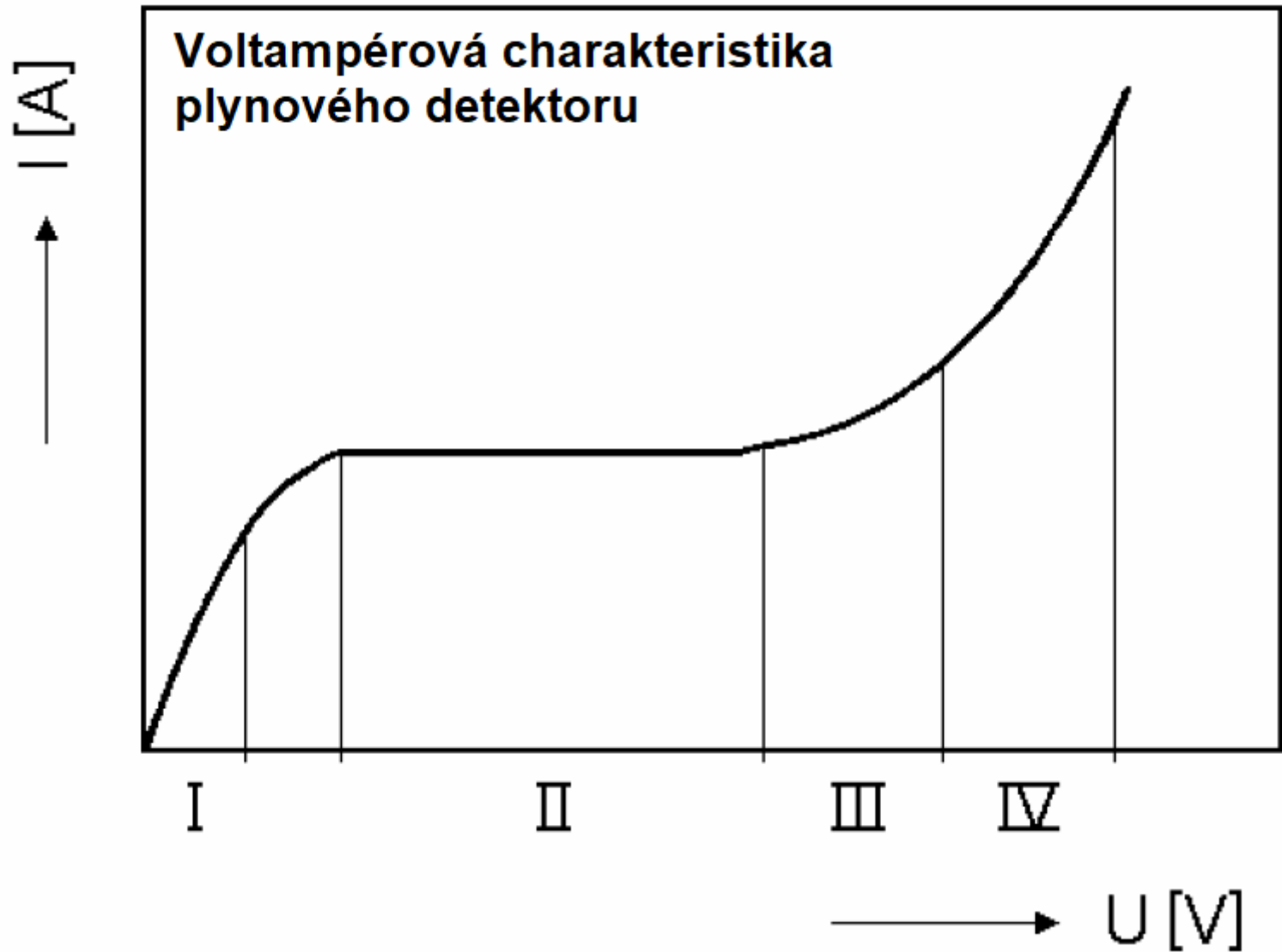
Plynové detektory

1) Ionizační komory: založeny na schopnosti ionizujícího záření ionizovat plyn

- komůrka vyplněná plynem, kde jsou umístěny dvě elektrody:



Jaderná fyzika



Jaderná fyzika

- ionizující záření prochází plynovým detektorem \Rightarrow plyn se ionizuje \Rightarrow
 \Rightarrow vznikají páry kladně nabitých iontů a záporně nabitých elektronů
- když je mezi elektrodami potenciálový rozdíl, kladné ionty se pohybují k záporné elektrodě a záporné elektrony ke kladné elektrodě \Rightarrow
 \Rightarrow v uzavřeném elektrickém obvodu teče elektrický proud
- rychlost, jakou se elektrony a ionty pohybují, závisí na velikosti napětí mezi elektrodami
- při nízkém napětí je rychlost iontů a elektronů poměrně malá a dochází k jejich rekombinaci ještě dříve, než dojdou k elektrodám, neboť pravděpodobnost rekombinace roste s klesající vzájemnou rychlostí elektronů a iontů
- s rostoucím napětím tedy proud roste až do tzv. nasyceného proudu – v této oblasti VA charakteristiky všechny vytvořené elektrony doletí až k elektrodám, proto se zvyšujícím se napětím už proud nemůže růst

Jaderná fyzika

Plynové zesílení:

- při vysokých napětích elektrony získávají při urychlování v elektrickém poli takovou energii, že ionizují další atomy plynu (sekundární ionizace), takže proud mezi elektrodami lavinově narůstá.

2) *Proporcionální počítače:* jejich geometrické uspořádání obdobné jako u ionizačních komor

- pracují v oblasti proporcionality III - viz obr. - zde se začíná projevovat ionizace nárazem, tj. elektrony mezi dvěma srážkami získají v elektrickém poli energii postačující k další ionizaci plynu

Jaderná fyzika

- 3) Geigerovy-Müllerovy počítací: jejich uspořádání obdobné jako u ionizačních komor nebo proporcionálních počítáčů**
- pracují v Geigerově oblasti IV voltampérové charakteristiky - viz obr.
 - koaxiální uspořádání elektrod
 - tlak plynné náplně obvykle nižší než 10^5 Pa
 - pro zvýšení účinnosti detektoru se do plynné náplně obvykle přidává malé množství organických látek, např. alkoholu, etylénu, trimetylbóru
 - napětí na elektrodách GM počítací se nastavuje pod hodnotu způsobující samostatný výboj
 - proletí-li ionizující částice, plyn se stane vodivý, vznikne nesamostatný výboj a obvodem teče proud
 - na sériově zapojeném rezistoru stoupne napětí \Rightarrow na elektrodách GM trubice klesne napětí, což způsobí zhašení výboje
 - elektronika počítá počet pulsů, tj. počet částic, které trubicí prolétly

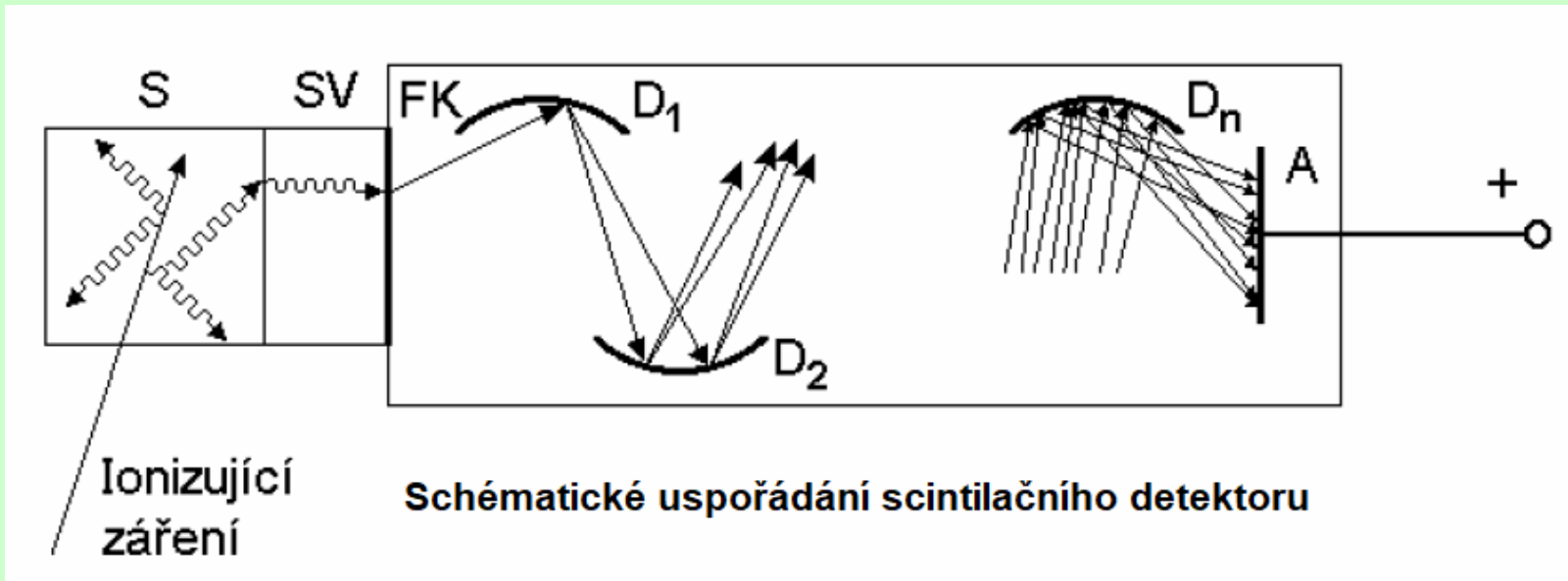
Jaderná fyzika

Scintilační počítače

- detekce ionizujícího záření prostřednictvím scintilačních detektorů je jedna z nejstarších metod

- princip metody - nabitě částice mohou v některých látkách vyvolávat krátké záblesky v oblasti viditelného nebo ultrafialového světla

Jaderná fyzika



- částice ionizujícího záření pronikne do scintilační látky S a vyvolá světelné záblesky
- takto vzniklé fotony po průchodu scintilátorem jsou světlovodem SV vedeny na fotokatodu FK fotonásobiče
- na fotokatodě vyvolají fotony fotoelektrický jev
- elektrony uvolněné z fotokatody dopadají na elektrody ve fotonásobiči - dynodě D, kde dopadající elektron vyvolá emisi několika dalších elektronů

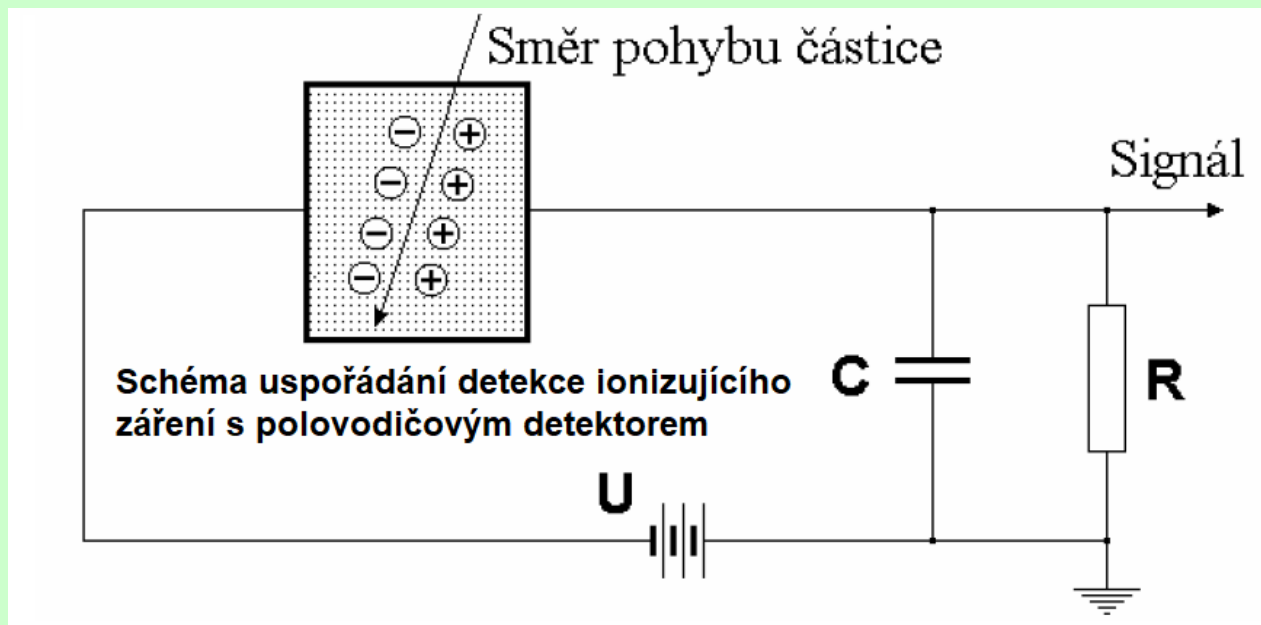
Jaderná fyzika

- dynod je ve fotonásobiči několik podle požadovaného zesílení
- z poslední dynody jsou elektrony vedeny na anodu A, ke které je připojen přes uzemňovací odpor R kondenzátor C, kde se průlet ionizující částice scintilátorem projeví napět'ovým impulsem

Jaderná fyzika

Polovodičové detektory

- v polovodičových materiálech jsou dopadem ionizující částice generovány páry elektron-díra
- napětí přiložené na detektor způsobí tok elektronů ke kladné elektrodě a tok děr k záporné elektrodě
- dopad částice se projeví jako napěťový impuls na sériově zapojeném rezistoru - viz obr.



Jaderná fyzika

Radioaktivní zářiče

Základní veličiny charakterizující zářič

- radioaktivní látky široce využívány ve fyzikálním výzkumu a dalších oborech vědy a techniky - např. v lékařských aplikacích
- každý zářič charakterizován typem přeměny, ke které v jeho jádrech dochází (přeměna alfa, beta, emise záření gama, emise neutronů)
- k přeměně dochází s určitou pravděpodobností, tj. s určitým poločasem přeměny $T_{1/2}$, který je pro daný zářič konstantou
- aktivita - charakterizuje množství a rychlost radioaktivních přeměn:

$$A = \frac{dN}{dt}, \text{ tj. podíl středního počtu } dN \text{ samovolných jaderných přeměn}$$

z daného energetického stavu v určitém množství radionuklidu za časový interval dt a délky tohoto intervalu dt

Jaderná fyzika

- jednotkou aktivity je becquerel (Bq) o rozměru s^{-1}

- pro posouzení účinků záření na látky a živé organismy se užívá veličina dávka (absorbovaná dávka) D , jednotka gray (Gy), rozměr $m^2 \cdot s^{-2}$:

$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$, kde $d\bar{\varepsilon}$ je střední sdělená energie, tj. energie předaná ionizujícím zářením látce o hmotnosti dm v daném místě

- dávkový příkon: $\dot{D} = \frac{dD}{dt}$ (jednotka $Gy \cdot s^{-1}$, rozměr je $m^2 \cdot s^{-3}$),

tj. podíl přírůstku dávky dD za časový interval dt tohoto intervalu dt

Jaderná fyzika

- biologický účinek ionizujícího záření závisí nejen na absorbované dávce záření, ale také na druhu záření
- pro účely ochrany před zářením je tedy nutné zavést veličinu zohledňující různé biologické účinnosti jednotlivých druhů záření
- jako referenční zdroj záření se obvykle používá rentgenové záření s energií 200 keV
- biologická účinnost záření vztažená k účinnosti referenčního zdroje - jakostní faktor Q - charakterizuje závažnost biologických účinků určitého druhu záření

Jaderná fyzika

- hodnoty jakostního faktoru Q pro vybrané druhy záření:

záření $X, \gamma, \beta^-, \beta^+$	1
částice α	20
tepelné neutrony	2,3
neutrony s neznámým energetickým spektrem.....	10

- dávkový ekvivalent H - charakterizuje biologické účinky záření

(již s ohledem na různé druhy záření):

$H = D \cdot Q \cdot N$ (jednotka Sievert - Sv),

kde D - absorbovaná dávka (Gy),

Q - jakostní faktor (bezrozměrné číslo),

N - modifikující faktor, obvykle roven jedné

Jaderná fyzika

Radioaktivní zářiče

1) Zářiče alfa - buď jako přirozené radionuklidy, nebo je lze připravit uměle pomocí jaderných reakcí

- jednou z předností - obrovské rozmezí poločasů rozpadu při relativně malých rozdílech v energii emitovaných částic:

Příklady: ^{212}Po - energie alfa částic 8,78 MeV, poločas rozpadu $3,04 \cdot 10^{-7}$ s,
vs. ^{232}Th - energie alfa částic 3,98 MeV, poločas rozpadu $1,39 \cdot 10^{10}$ roků

- další přednost - čárové energetické spektrum vysílaných částic - hodnoty energií určeny s přesností cca 0,1 %, tj. jednotek keV

- vysoká přesnost v určení hodnot energie a malá přirozená šířka píků ve spektru \Rightarrow použití zářičů alfa pro energetickou kalibraci a určení energetického rozlišení detektoru

Jaderná fyzika

2) Zářiče beta - emitují elektrony nebo pozitrony

- zářiče β^- - emitované elektrony jsou přirozeného původu nebo také připravované uměle pomocí jaderných reakcí

- zářiče β^+ - emitované pozitrony se přírodě nenacházejí, dají se připravit pouze uměle pomocí jaderných reakcí v urychlovačích nebo v jaderných reaktorech

- pro emisi elektronů i pozitronů platí: čím větší je energie uvolňovaná při přeměně, tím kratší je poločas přeměny beta

- nejkratší poločasy při přeměně beta řádově 10^{-2} s - odpovídá jim energie cca 10 MeV uvolňovaná při přeměně

- energetické spektrum záření beta spojitě, charakteristickou veličinou maximální energie ve spektru

Jaderná fyzika

- výsledné jádro po přeměně beta většinou ve vzbuzeném stavu \Rightarrow
 \Rightarrow prakticky současně s emisí elektronů či pozitronů dochází i k emisi záření gama
- když je zářič beta zdrojem pozitronů \Rightarrow vznikají navíc v materiálu zářiče nebo podložky fotony s energií $0,511 \text{ MeV}$ v důsledku anihilace pozitronů s elektrony

3) Radioaktivní zdroje záření gama - obvykle radionuklidy, v nichž probíhá přeměna beta

- výhodou možnost dosažení vysoké aktivity
- energie emitovaného záření gama pro různé radionuklidy v intervalu od několika keV až do 20 MeV

Jaderná fyzika

4) Zdroje neutronů – ty zdroje, v nichž probíhají jaderné reakce typu (α, n) nebo (γ, n) s použitím radioaktivního zářiče jako zdroje částic alfa nebo záření gama

- využití např. vysoce pravděpodobné reakce: ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$

- pro reakce typu (α, n) se jako zdroj částic alfa pro tuto reakci

z radioaktivních zářičů používá buď radionuklid ${}^{210}\text{Po}$ nebo ${}^{226}\text{Ra}$

- pro reakce typu (γ, n) lze jako radioaktivní zářiče použít jádra nuklidů

${}^9_4\text{Be}$ a ${}^2_1\text{H}$

- největší toky neutronů poskytují jaderné reaktory - z celého povrchu aktivní zóny reaktoru vystupuje až 10^{18} neutronů za sekundu o energiích od 10^{-3} eV až do 20 MeV