

**JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
Zdravotně sociální fakulta**



RADIOLOGICKÁ FYZIKA I.

*doplňkové texty pro posluchače kombinované formy studia
studijního programu „B5345 – Specializace ve zdravotnictví“*

studijního oboru „Radiologický asistent“

Doc.RNDr. Přemysl Záškodný,CSc.

ČESKÉ BUDĚJOVICE 2007

RADIOLOGICKÁ FYZIKA 1

(IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ A NEIONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ A JEJICH APLIKACE V RADIOLOGII)

1. Ionizace prostředí, prostředky a způsoby ionizace, ionizující záření

Klíčová slova: Ionizace prostředí, Prostředky ionizace, Způsoby ionizace, Elektromagnetické spektrum, Přehled ionizujících a neionizujících záření a vlnění používaných v radiologii

1.1. Proces ionizace prostředí

Elektrický proud v kovech je spojen s pohybem téměř volných elektronů, které vznikly odtržením valenčních elektronů od atomů kovu. Vedení proudu v kovech (a pevných látkách obecně) lze vysvětlit zonální teorií pevných látek.

Z hlediska typu vodivosti a možných chemických změn je odlišná situace u látek, které mají iontovou vodivost. **Mezi látky s iontovou vodivostí patří elektrolyty** (elektrolyty jsou většinou kapalné látky). U elektrolytů vznikají ionty procesem disociace molekul. Vznik iontů v elektrolytech je důsledkem procesu disociace, nikoliv procesu ionizace.

Plyny jsou za normálních okolností nevodivé - jsou velmi dobrými izolanty. Vodivými se stávají procesem ionizace. **Ionizace plynů** je vznik volných elektronů a kladných iontů v plynu v důsledku rozštěpení neutrální molekuly nebo atomu na kladný iont a elektron. Ionizace je vyvolávána různými způsoby pomocí prostředků ionizace. Děj opačný k ionizaci se nazývá rekombinace. **Prostředky a způsoby ionizace** lze popsat následujícím přehledem:

a) Vysoká teplota může být příčinou ionizace nárazem.

b) Elektrické pole může být příčinou ionizace nárazem, jestliže již v plynu existují ionty.

c) Korpuskulární záření (tj. jaderná i nejaderná záření látkových částic) - **ionizace nárazem**, jaderná i nejaderná záření tvořená nabitými částicemi mohou vedle ionizace nárazem **ionizovat přímo**. Jaderná záření tvořená nenabitými částicemi mohou vedle ionizace nárazem **ionizovat nepřímo**.

d) Elektromagnetické záření jaderného či nejaderného původu se rovněž může stát ionizátorem vyvolávajícím ionizaci plynu. Ionizace částic plynu nebo i jiného prostředí může nastat absorpcí fotonu např. ultrafialového záření, rentgenového záření či gama záření nebo procesem nepřímé ionizace, který byl popsán již u korpuskulárních záření.

Obecně lze ionizaci prostředí vymezit jako přeměnu původních elektricky neutrálních mikroobjektů prostředí na elektricky nabitě částice.

Prostředky ionizace jsou ionizátory a příčiny ionizace. Ionizátorem mohou být korpuskulární nebo elektromagnetická záření, příčinami ionizace může být vysoká teplota nebo elektrické pole. Ionizátory lze nazvat ionizujícími zářeními.

Způsobem ionizace může být ionizace nárazem látkovou částicí (vznik např. páru iont, elektron), ionizace absorpcí fotonu (opět např. vznik páru iont, elektron), **přímá ionizace korpuskulárním zářením nabitých částic** (vznik obrovského počtu párů např. iont, elektron) a **nepřímá ionizace korpuskulárním zářením nenabitých částic** nebo elektromagnetickým zářením (opět vznik např. obrovského počtu párů iont, elektron).

Radiologie jako vědní směr byla z hlediska medicínské praxe zkráceně definována jako klinický obor založený na diagnostickém a terapeutickém využití ionizujícího záření, tj. klinický obor vycházející z ionizujícího záření a jeho aplikací v medicíně (v této zkratce je implicitně skryto i využití neionizujících záření a mechanického ultrazvukového vlnění). Proto je potřebné popsat celý proces radiologického využití ionizujícího záření. To znamená stručně popsat vedle zdrojů ionizujícího záření, interakce ionizujícího záření s prostředím a měření ionizujícího záření také fyzikální základy radiodiagnostiky a radioterapie a fyzikální základy dílčích radiodiagnostických a radioterapeutických postupů.

1.2. Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetickým spektrem je nazýván přehled druhů elektromagnetického záření uspořádaný od největších vlnových délek až k vlnovým délkám nejkratším. Přehled druhů elektromagnetického záření je uveden v Tab.1.

Sloupce tabulky postupně uvádějí: název záření, přibližné hranice pro vlnové délky, frekvenci v Hz, energii jednoho fotonu v eV, charakteristickou teplotu Θ (teplota vyplývající ze srovnání „kvantové“ energie fotonu a „klasické“ energie $k\Theta$, kde k je Boltzmannova konstanta).

Druh záření (název)	Vlnová délka λ v metrech (m)	Frekvence ν v Hertzích (Hz)	Energie fotonu $\varepsilon = \hbar\omega$ (eV)	Charakteristická teplota $\Theta = \hbar\omega / k$ (K)
Rozhlasové vlny dlouhé střední krátké	1 – 15 km 200 – 700 m 2 – 100 m	$10^6 - 10^5$ $10^7 - 10^6$ $10^8 - 10^7$	$10^{-9} - 10^{-10}$ $10^{-8} - 10^{-9}$ $10^{-7} - 10^{-8}$	$10^{-5} - 10^{-6}$ $10^{-4} - 10^{-5}$ $10^{-3} - 10^{-4}$
Hertzovy vlny	0,1 – 2 m	$10^9 - 10^8$	$10^{-6} - 10^{-7}$	$10^{-1} - 10^{-2}$
Mikrovlny	1 – 100 mm	$10^{11} - 10^{10}$	$10^{-4} - 10^{-5}$	$10^1 - 10^{-1}$
Tepelné záření	10 – 1000 μ m	$10^{13} - 10^{12}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	$10^3 - 10^1$
Světlo infračervené	0,75 – 10 μ m	$10^{14} - 10^{13}$	$10^0 - 10^{-1}$	$10^4 - 10^3$
Světlo viditelné	0,35 – 0,75 μ m	$10^{15} - 10^{14}$	$10^1 - 10^0$	$10^5 - 10^4$
Světlo ultrafialové	0,014 – 0,35 μ m	$10^{16} - 10^{15}$	$10^2 - 10^1$	$10^6 - 10^5$
Měkké RTG záření	10 – 1000 Å	$10^{17} - 10^{16}$	$10^3 - 10^2$	$10^7 - 10^6$
Tvrdé RTG záření	1 – 10 Å	$10^{18} - 10^{17}$	$10^4 - 10^3$	$10^8 - 10^7$
Měkké záření γ	0,1 – 1 Å	$10^{19} - 10^{18}$	$10^5 - 10^4$	$10^9 - 10^8$
Tvrdé záření γ	000,1 – 0,1 Å	$10^{21} - 10^{19}$	$10^7 - 10^5$	$10^{11} - 10^9$
Zánikové záření	$10^{-13} - 10^{-12}$ m	$10^{21} - 10^{20}$	$10^7 - 10^6$	$10^{11} - 10^{10}$
Penetrantní záření	$10^{-15} - 10^{-13}$ m	$10^{23} - 10^{21}$	$10^9 - 10^7$	$10^{13} - 10^{11}$

Tab. 1 Elektromagnetické spektrum

Stručný popis jednotlivých druhů záření uvedených v tabulce elektromagnetického spektra bude obsahovat: typický zdroj záření v přírodě, umělý zdroj záření, způsob detekce záření a schopnost ionizovat atomy prostředí.

Rozhlasové vlny (neionizující záření)

Typickým zdrojem v přírodě jsou přechody v systému jaderných spinů (především v oblasti velmi krátkých vln), mezi umělé zdroje patří vedle vysílače s vysílací anténou (otevřeného elektrického obvodu) např. magnetrony a klystrony (speciální elektronky ve vysokofrekvenčních generátorech, které mohou pracovat jako vysokofrekvenční oscilátory o velmi vysokých frekvencích řádově GHz). Detekce rozhlasových vln využívá přijímačů s přijímací anténou, důležitou součástí je činnost např. krystalových detektorů, jejichž činnost je v podstatě činností usměrňovací.

Mikrovlny (neionizující záření)

Typickým zdrojem v přírodě jsou přechody v systému elektronových spinů, mezi umělé zdroje patří radary, jejichž vysílací anténa vyzáří najednou značnou elektromagnetickou energii - pak se vysílání přeruší. Tyto pulsy se opakují mnohokrát za 1 s. Detekce je založena na přepojení antény na přijímač po každém pulsu - např. po tisícíně sekundy se vše opakuje.

Tepelné záření (neionizující záření)

Typickým zdrojem v přírodě jsou všechna tělesa s teplotou vyšší než je teplota absolutní nuly. V těchto tělesech se odehrávají přechody mezi kvantovými stavy rotačními (např. molekul) a vibračními (např. molekul). Umělé zdroje jsou rovněž spojeny s použitím vhodného tělesa zahřátého na potřebnou teplotu. Mezi detektory patří např. baterie termočlánků, termokamery.

Světlo infračervené, viditelné, ultrafialové (neionizující záření)

Typickým zdrojem v přírodě jsou přechody mezi kvantovými stavy vnějších elektronů v atomech, ale také mezi vibračními stavy molekul. Mezi umělé zdroje patří např. výboj v plynu, obloukový a jiskrový výboj, rozžhavená vlákna. Vhodnými detektory jsou vedle termočlánků také fotobuňky a fotonásobiče.

Rentgenové záření (ionizující záření)

Typickým zdrojem v přírodě jsou přechody mezi kvantovými stavy vnitřních elektronů v atomech. Mezi umělé zdroje patří především rentgenka. Vhodnými detektory jsou Geigerovy a scintilační počítače a ionizační komůrky, ale také vhodné filmy. Při detekci se využívají především luminiscenční a fotochemické účinky rentgenového záření.

Gama záření (ionizující záření)

Typickým zdrojem v přírodě jsou vedle reakcí fundamentálních částic přechody mezi kvantovými stavy v jádrech atomů. Mezi umělé zdroje patří vedle uměle vyrobených radionuklidů (např. v radionuklidových generátorech) také urychlovače částic, např. betatrony a elektronové synchrotrony, které mohou poskytovat gama záření vlnové délky až 10^{-15} m (formálně takové gama záření patří již do oblasti zánikového a penetrantního záření - tzv. ultragama záření). Mezi detektory lze opět zařadit scintilační počítače, krystalové počítače a ionizační komůrky s vhodnými rozsahy voltampérových charakteristik.

1.3. Přehled ionizujících a neionizujících záření a vlnění používaných v radiologii

Schematický a jen orientační přehled obsahuje pro každý druh záření či vlnění údaje o vlnové délce a frekvenci, o přírodním a umělém zdroji, o způsobu detekce a o zařazení do příslušné oblasti radiologie. U elektromagnetických záření bylo využito spektra elektromagnetických záření podle Tab.1. U korpuskulárních záření nejsou uvedeny typy látkových částic, z této příčiny je uveden jen obecný vzorec pro de Broglieovu vlnovou délku a frekvenci příslušné pravděpodobnostní vlny.

Schematický přehled záření a vlnění používaných v radiologii je uveden v následující tabulce Tab.2:

a) Gama záření (nepřímě ionizující záření, ionizace absorpcí fotonu)		
Vlnová délka:	$10^{-13} - 10^{-12}$ m	Frekvence: $10^{20} - 10^{21}$ Hz
Přírodní zdroj:	Přechody v jádře atomu	
Umělý zdroj:	Urychlovače, radioizotopy	
Detekce:	Plynové, jiskrové, scintilační detektory	
Oblast radiologie:	Nukleární medicína	
b) Rentgenové záření (nepřímě ionizující záření, ionizace absorpcí fotonu)		
Vlnová délka:	10^{-10} m	Frekvence: 10^{18} Hz
Přírodní zdroj:	Přechody v obalu atomu	
Umělý zdroj:	Rentgenka	
Detekce:	Plynové, krystalové, scintilační, fotochemické detektory	
Oblast radiologie:	Rentgenová diagnostika (rentgen, výpočetní tomografie), Rentgenová terapie	
c) Infráčervené záření (neionizující záření)		
Vlnová délka:	10^{-5} m	Frekvence: 10^{13} Hz
Přírodní zdroj:	Vibrace a rotace molekul	
Umělý zdroj:	Tělesa s teplotou vyšší než 0 K	
Detekce:	Radiotermometry, termokamery	
Oblast radiologie:	Termografie	
d) Rádiové vlny (neionizující záření)		
Vlnová délka:	$10^0 - 10^4$ m	Frekvence: $10^4 - 10^8$ Hz
Přírodní zdroj:	Pohyb téměř volných elektronů	
Umělý zdroj:	Vysílač vysokofrekvenčního elektromagnetického signálu	
Detekce:	Přijímač vysokofrekvenčního elektromagnetického signálu	
Oblast radiologie:	Nukleární magnetická rezonance	
e) Ultrazvukové vlny (mechanické vlnění)		
Vlnová délka:	10^{-3} m	Frekvence: $10^6 - 10^7$ Hz
Přírodní zdroj:	Chvění těles	
Umělý zdroj:	Magnetostrikční a piezoelektrický oscilátor	
Detekce:	Magnetostrikční a piezoelektrický oscilátor	
Oblast radiologie:	Sonografie	
f) Korpuskulární záření (přímě a nepřímě ionizující záření, ionizace nárazem)		
Vlnová délka:	de Broglieova vlnová délka $\lambda = h / mv$	Frekvence: $\nu = mc^2 / h$
Přírodní zdroj:	Přirozeně radioaktivní prvky	
Umělý zdroj:	Uměle radioaktivní prvky, urychlovače	
Detekce:	Plynové, jiskrové, krystalové, scintilační detektory	
Oblast radiologie:	Nukleární medicína, radioterapie	

Tab. 2 Přehled ionizujících a neionizujících záření používaných v radiologii

Kontrolní otázky:

- 1) Co je ionizace prostředí?
- 2) Co je to ionizace nárazem?
- 3) Co je to přímá a nepřímá ionizace?
- 4) Jak jsou děleny prostředky ionizace?
- 5) Která elmg. záření patří mezi ionizující?
- 6) Vyjmenujte složky profilu radiologického asistenta
- 7) Která záření a vlnění charakterizují jednotlivé složky profilu

2. Zdroje ionizujícího záření a interakce ionizujícího záření s prostředím

Klíčová slova: Přírodní zdroje, Umělé zdroje, Interakce s obaly, Interakce s jádry
Interakce s krystalovou mříží, Interakce s biologickým prostředím

2.1. Popis zdrojů

a) Přírodní zdroje

b) Umělé zdroje

b1) Rentgenka

b2) Cyklotron, betatron (kruhový urychlovač)

b3) Lineární urychlovač

b4) Generátory krátkodobých nuklidů

b5) Jaderný reaktor

2.2. Popis interakcí

a) Interakce ionizujícího záření s obaly atomů

a1) Excitace

a2) Ionizace

a3) Rozptyl

a4) Brzdné elektromagnetické záření

b) Interakce ionizujícího záření s jádry atomů

c) Interakce ionizujícího záření s krystalovou mříží

d) Účinky ionizujícího záření v biologickém prostředí

Dávka ionizujícího záření absorbovaná biologickým prostředím vyvolává **časově uspořádaný sled účinků:**

- **fyzikální účinky** (fyzikální typy interakcí spojené s přenosem energie, doba uskutečnění interakce v řádu biliontin sekundy limitována rychlostí polních částic),
- **fyzikálně-chemické účinky** (vlastní procesy excitací a ionizací s přenosem energií na úrovni molekulárních struktur s dobou trvání miliardtin sekundy),
- **chemické účinky** (primární ovlivňování jednoduchých biologických struktur s dobou trvání miliontin sekundy),

- **biologické účinky** (ovlivnění a reakce biologických struktur od nejjednodušší buněčné úrovně až k úrovni celého organismu s dobou trvání sekundy až roky).

Ionizující záření v biologickém prostředí má účinky **užitečné a škodlivé**. **Užitečné účinky** jsou spojeny s principy vyšetřovacích metod v radiologii a s principy léčby ionizujícím zářením. Např. při radionuklidové terapii (při aplikaci radiofarmaka) nebo při rentgenové terapii jsou užitečné účinky spojeny s poškozením nebo destrukcí nádorové tkáně. Radioaktivní farmakon je chemická látka, jejíž některé molekuly obsahují radioaktivní atomy, a současně splňují kritéria farmaka podle Lékopisu. Při diagnostických metodách in vivo (radioaktivní farmakon podáváno do organismu) nebo při rentgenové diagnostice jsou užitečné účinky ionizujícího záření spojeny se zevní detekcí radioaktivního záření (po interakci s organismem) s cílem dobrat se spolehlivé diagnózy.

Škodlivé účinky ionizujícího záření v biologickém prostředí jsou dány patogenesisí poškození biologických struktur. Škodlivé účinky lze dělit na přímé (absorpce dávky s např. možným rozpadem zasažené buňky) a na nepřímé (např. radiolýza vody při absorpci dávky vede k tvorbě agresivních volných radikálů s možností následného poškození důležitých molekul). **Formy poškození** mohou mít **stochastický charakter** a **deterministický charakter**. **Stochastický charakter** se projevuje vznikem pravděpodobnosti vyvolání patologických změn v organismu - somatických (nebezpečí vzniku nádoru) nebo dědičných (postižení potomků ozářeného jedince). **Deterministický charakter** se projevuje vznikem akutní nemoci z ozáření při jednorázové dávce nebo chronické nemoci z ozáření po účincích malých opakovaných dávek. **Ochrana před ionizujícím zářením** může mít charakter **biologický** (zvyšování odolnosti), **chemický** (podávání radioprotektivních látek) a **fyzikální** (respektování tří základních faktorů - vzdálenost, zkrácení času, princip stínění).

Jelikož interakce ionizujícího záření s biologickým prostředím spočívá v předávání energie (ať již ve smyslu ztráty nebo ve smyslu cílené dávky) při průchodu absorbujícím prostředím, je základním zákonem fyzikálního popisu interakcí absorpční zákon. **Tři základní faktory fyzikální ochrany před ionizujícím zářením jsou vzdálenost, zkrácení času a stínění**. Z hlediska stínění je ochrana před alfa zářením jednoduchá - vzhledem k doletu D několik desítek μm stačí běžný oděv. Ochrana před beta zářením (dolet D v měkkých tkáních je několik mm) je spojena se stíněním lehkými např. hliníkovými materiály (vůči doletu beta částic) v kombinaci s několika centimetrovou vrstvou olova (pro odstínění brzdného rentgenového záření vznikajícího ve stínícím hliníku). Pro ochranu před gama zářením je již potřebné používat materiály s vysokým protonovým číslem (olovo, ocel, beton s vhodnými příměsemi).

Kontrolní otázky:

- 1) Který fyzikální zákon dominuje při popisu zdrojů?
- 2) Který fyzikální zákon dominuje při popisu interakcí?
- 3) Charakterizujte přírodní a umělé zdroje
- 4) Charakterizujte interakce s obaly
- 5) Charakterizujte interakce s jádry
- 6) Charakterizujte interakce s krystalovou mříží
- 7) Charakterizujte interakce s biologickým prostředím

3. Měření ionizujícího záření

Klíčová slova: Veličiny a jednotky ionizujícího záření, Detekce, Dozimetrie,
Zařízení založená na ionizačním a excitačním principu,
Zařízení založená na fotochemickém a kombinovaném principu

3.1. Veličiny a jednotky ionizujícího záření

a) Veličiny a jednotky ionizujícího záření z hlediska parametrů zdroje

Veličiny a jednotky z hlediska parametrů zdroje lze uvést v následujícím přehledu:

- **Aktivita zářiče** $A = \lambda \cdot n$, jednotka Bq
- **Rozpadová konstanta** λ , **poločas rozpadu** T . Vedle fyzikálního poločasu rozpadu T lze zavést biologický poločas rozpadu T_b jako čas, za který se z organismu vyloučí právě polovina jednorázově dodaného umělé radioaktivního prvku. Pak lze také vztahem

$$\frac{1}{T_{ef}} = \frac{1}{T} + \frac{1}{T_b}$$

zavést tzv. efektivní poločas rozpadu.

- **Emise zdroje** E jako počet částic emitovaných ze zdroje za 1 s. Jednotkou emise zdroje E je s^{-1} .

b) Veličiny a jednotky ionizujícího záření z hlediska interakce s prostředím

Veličiny a jednotky z hlediska interakcí s prostředím lze uvést v následujícím přehledu:

- Intenzita I ionizujícího záření, Pohlčená dávka D , Expozice (ozáření) X , Dávkový ekvivalent H , Koeficient absorpce μ , Polotloušťka absorbující látky a , Účinný průřez σ interakce, Dolet ionizující látkové částice D
- **Kerma** s jednotkou $J \cdot kg^{-1}$ jako veličina charakterizující nepřímo ionizující záření (elektromagnetické záření fotonů, korpuskulární záření neutronů) jako součet počátečních kinetických energií nabitých částic vzniklých interakcemi částic nepřímo ionizujícího záření v prostředí o jednotkové hmotnosti.

3.2. Detekce a dozimetrie ionizujícího záření

Detekce ionizujícího záření (zjišťování existence ionizujícího záření) a dozimetrie ionizujícího záření (měření veličin ionizujícího záření) jsou popsány v uvedené literatuře. Fyzikálním základem detekce a dozimetrie ionizujícího záření je přeměna energie ionizujícího záření na registrovatelné formy energie. Členění detektorů, dozimetrů a jejich kombinací s výpočetní technikou a potřebnou elektronikou podle způsobu přeměny energie ionizujícího záření je následující (výčet zařízení si nečiní nároky na úplnost):

- a) **Zařízení založená na ionizačním principu spojeném s vedením proudu v plynech, včetně výbojů v plynech**
- b) **Zařízení založená na excitačním principu spojeném s vedením proudu v pevných látkách nebo s fluorescenční či termoluminiscenční přeměnou energie**
- c) **Zařízení založená na fotochemickém principu spojeném s přeměnou energie pomocí fotografických metod**
- d) **Kombinovaná zařízení využívající několika způsobů přeměny energie a spojená s výpočetní technikou (umožňující např. Fourierovské matematické rekonstrukce) a potřebnou elektronikou**

Kontrolní otázky:

- 1) Charakterizujte jednotky a veličiny popisující zdroje
- 2) Charakterizujte jednotky a veličiny popisující interakce
- 3) Popište princip detekce
- 4) Popište princip dozimetrie
- 5) Vyjmenujte zařízení založená na ionizačním a excitačním principu
- 6) Vyjmenujte zařízení založená na fotochemickém principu
- 7) Vyjmenujte zařízení využívající několika způsobů přeměny energie

4. Fyzikální popis radiodiagnostiky a radioterapie

Klíčová slova: Struktura fyzikálního popisu, Základ radionuklidové diagnostiky, Základ rentgenové diagnostiky, Základ radionuklidové terapie, Základ rentgenové terapie

Fyzikální základy radiodiagnostiky a radioterapie jsou spojeny z hlediska radiologie s užitečnými účinky ionizujícího záření v biologickém prostředí. Příkladem může být radionuklidová terapie po aplikaci radiofarmaka nebo rentgenová terapie, kdy jsou užitečné účinky spojeny s poškozením nebo destrukcí nádorové tkáně (viz 14.kap., odst.14.2., bod d)).

Fyzikální základy radiodiagnostiky budou popsány prostřednictvím rentgenové a radionuklidové diagnostiky, obdobně fyzikální základy radioterapie budou popsány prostřednictvím rentgenové a radionuklidové terapie.

Shrnující popisy budou obsahovat:

- vystižení fyzikální podstaty,
- používané zdroje ionizujícího záření,
- druh interakce ionizujícího záření s prostředím,
- u radiodiagnostiky také charakteristiku detekce a dozimetrie.

4.1. Popis radiodiagnostiky

a) Fyzikální popis rentgenové diagnostiky

Vystižení fyzikální podstaty:

Zdroj:

Druh interakce:

Charakteristika detekce a dozimetrie:

b) Fyzikální popis radionuklidové diagnostiky

Vystižení fyzikální podstaty:

Zdroj:

Druh interakce:

Charakteristika detekce a dozimetrie:

3.2. Popis radioterapie

a) Fyzikální popis rentgenové terapie

Vystižení fyzikální podstaty:

Zdroj:

Druh interakce:

b) Fyzikální popis radionuklidové terapie

Vystižení fyzikálního základu:

Zdroj:

Druh interakce:

Kontrolní otázky:

- 1) Jaká je struktura fyzikálního popisu?
- 2) Jaký je fyzikální základ rentgenové terapie?
- 3) Jaký je fyzikální základ radionuklidové terapie?
- 4) Jaký je fyzikální základ rentgenové diagnostiky?
- 5) Jaký je fyzikální základ radionuklidové diagnostiky?

5. Fyzikální popis zobrazovacích postupů

Klíčová slova: Členění fyzikálního popisu, Základ nukleární medicíny, Základ rentgenů, Základ termografie, základ sonografie

Popis jednotlivých zobrazovacích postupů bude mít **přehledový charakter a následující členění:**
Vystižení fyzikální podstaty a cílů, použité zdroje záření a vlnění, druh interakce s prostředím, charakteristika detekce a dozimetrie, odkazy na fyzikální metodologický základ a na dílčí fyzikální základy.

5.1. Nukleární medicína

Fyzikální podstatou nukleární medicíny je umělá radioaktivita
Cílem nukleární medicíny je využití otevřených radioaktivních zářičů (radioaktivních farmak značených vhodnými radionuklidy) při diagnostickém zobrazování, v radioterapii a v lékařském výzkumu.
Zdroje ionizujícího záření, **interakce** s biologickým prostředím a **detekce a dozimetrie**
Potřebným fyzikálním metodologickým základem jsou „Klasická mechanika“, „Kvantová mechanika“ a „Relativistická mechanika“.
Dílčí fyzikální základy nukleární medicíny lze charakterizovat skupinou pojmů

5.2. Rentgen

Fyzikální podstatou rentgenové diagnostiky a rentgenové terapie je vyzařování brzdného rentgenového záření a charakteristického rentgenového záření.
Fotony rentgenového záření pronikají všemi prostředními a jsou těmito prostředními v různé míře absorbovány - **cílem rentgenové diagnostiky** je využít různé míry absorpce a vytvořit rentgenové obrazy biologického prostředí, kterým prošlo rentgenové záření. **Cíl rentgenové terapie** spočívá v destrukci nádorového ložiska prostřednictvím fotonů rentgenového záření.
Zdroje ionizujícího záření, **interakce** s biologickým prostředím a potřebná **detekce a dozimetrie** v rámci rentgenové diagnostiky a rentgenové terapie
Potřebným fyzikálním metodologickým základem jsou „Klasická mechanika“, „Kvantová mechanika“ a „Relativistická mechanika“.
Dílčí fyzikální základy rentgenové diagnostiky a rentgenové terapie lze charakterizovat skupinou pojmů.

5.3. Termografie

V modelovém přiblížení vychází fyzikální podstata termografie ze záření černého tělesa.
Zákony záření černého tělesa.
V modelovém přiblížení daném zářením černého tělesa vyzařuje povrch každého tělesa s teplotou T vyšší než je teplota absolutní nuly do prostoru elektromagnetické záření např. z oblasti neionizujícího infračerveného záření, jehož vlastnosti souvisejí s teplotou T povrchu. **Cílem termografie** je měření teplot a znázornění rozložení teplot na povrchu zkoumaného objektu.
Detekce a měření příslušného infračerveného záření jsou spojeny s **bezkontaktní termografií** a s **kontaktní termografií**
Potřebným fyzikálním metodologickým základem jsou „Klasická mechanika“, „Kvantová mechanika“, „Relativistická mechanika“ a „Statistická fyzika“
Dílčí fyzikální základy termografie lze charakterizovat skupinou pojmů

5.4. Nukleární magnetická rezonance

Fyzikální a technická podstata magnetické rezonance bude popsána v 5. kapitole. **Cílem nukleární magnetické rezonance** je zobrazovací metoda založená na sledování změn v chování buněk různých tkání při působení silného magnetického pole \vec{B} . **Používá se strukturní a funkční magnetická rezonance.**
Zdroje neionizujícího záření, **interakce** s biologickým prostředím a potřebná **detekce a dozimetrie**
Potřebný fyzikální metodologický základ nukleární magnetické rezonance vychází ze „Klasická mechanika“, „Kvantová mechanika“ a „Relativistická mechanika“.
Dílčí fyzikální základy pro zobrazovací metodu „magnetická rezonance“ lze charakterizovat skupinou pojmů.

5.5. Sonografie

Fyzikální podstatou sonografie (ultrazvukových zobrazovacích metod) jsou vlastnosti speciálního typu mechanických vln - podélných ultrazvukových vln.

Cílem sonografie je především echografické zobrazení planárních struktur měkkých tkání a na principu Dopplerova jevu měření rychlosti pohybujících struktur (např. měření rychlosti toku krve).

Zdrojem i detektorem ultrazvuku jsou magnetrostrikční a piezoelektrické oscilátory.

Interakce ultrazvukového vlnění s prostředím vede jednak k zeslabování intenzity ultrazvuku podle absorpčního zákona, jednak k obvyklým vlnovým jevům (reflexe, refrakce, difrakce) na rozhraní dvou prostředí.

Potřebným fyzikálním metodologickým základem jsou „Klasická mechanika“, „Kvantová mechanika“ a „Relativistická mechanika“.

Dílečtí fyzikální základy sonografie lze charakterizovat skupinou pojmů.

Kontrolní otázky:

- 1) Co je fyzikálním základem nukleární medicíny
- 2) Co je fyzikálním základem rentgenu
- 3) Co je fyzikálním základem magnetické rezonance
- 4) Co je fyzikálním základem termografie
- 5) Co je fyzikálním základem monografie
- 6) Jaké je členění fyzikálního popisu zobrazovacích metod

6. Fyzikální základy magnetické rezonance

Magnetická rezonance je zobrazovací metoda založená na sledování změn v chování buněk různých tkání při působení silného magnetického pole \vec{B} . Fyzikální a technická podstata magnetické rezonance musí vystihnout, jak působí silné magnetické pole na lidské tělo a jak lze tohoto působení technicky využít při zobrazování.

6.1. Fyzikální podstata

Fyzikální podstata magnetické rezonance vychází z původní **Rabiovy metody magnetické jaderné rezonance** (viz 9.kap., odst.9.4.) a je založena na **dvou parametrech tvaru „pravděpodobnostních oblaků“ protonů** (viz 9.kap., odst.9.1., odst.9.4.). Zaměření na protony při zkoumání parametrů pravděpodobnostních oblaků je dáno faktem, že lidské tělo je tvořeno ze 60 % vodou. Proto v magnetické rezonanci velmi průkazně vystupují jádra atomů vodíku, tj. protony.

První parametr je dán vlastními hodnotami operátoru \hat{S}_z (viz (B37) a (B38)) **z-ové složky S_z spinového momentu hybnosti \vec{S} protonu** (viz 9.kap., odst.9.3.). Tyto dvě vlastní hodnoty umožňují prostorovou orientaci paralelně nebo antiparalelně s orientací vektoru magnetické indukce \vec{B} magnetického pole (směr vektoru \vec{B} necht' je identický se směrem osy z souřadnicové soustavy). Antiparalelní orientace je energeticky náročnější - proto se větší část protonů z makrosystému protonů atomů vodíku ${}^1\text{H}$ orientuje paralelně, vzniká nenulový spinový magnetický moment hybnosti a tím i nenulový magnetický moment $\vec{\mu}_s$ (viz (B41) a (B42)). S vektorem $\vec{\mu}_s$ vztaženým na jednotku objemu je spojen vektor podélné tkáňové magnetizace.

Druhý parametr je spojen s vlastními hodnotami operátoru \hat{b}_z **z-ové složky b_z orbitálního momentu hybnosti \vec{b} protonu** (opět viz (B37) a (B38) a 9.kap., odst.9.3.). Jelikož z-ová složka b_z a složky x-ová b_x a y-ová b_y nejsou současně měřitelné, bylo nezbytné kvantovat vedle velikosti také přípustné směry orbitálního momentu hybnosti \vec{b} (z-ová složka b_z je současně měřitelná jen se čtvercem orbitálního momentu hybnosti b^2). Tento způsob prostorového kvantování směru orbitálního momentu hybnosti \vec{b} byl spojen s přípustnými hodnotami z-ové složky b_z a byl vyjádřen prostřednictvím periodického děje konaného s úhlovou frekvencí Ω . Snaha o vyvinutí klasické analogie nakonec vedla k představě, že vektor orbitálního momentu hybnosti \vec{b} opisuje s frekvencí Ω kužel - **koná precesní pohyb** (viz (B44)). Podle vztahu (B44) je tato Larmorova úhlová frekvence přímo úměrná velikosti vektoru magnetické indukce \vec{B} , konstantou přímé úměrnosti je gyromagnetický poměr. Pro daný proton je nenulový orbitální moment hybnosti \vec{b} spojen s dalším magnetickým momentem (viz (B41) a (B42)), který je kolmý na směr vektoru magnetické indukce \vec{B} . Pro celý makrosystém protonů např. atomů vodíku ${}^1\text{H}$ je vzhledem k jejich náhodné distribuci v rovině kolmé na směr \vec{B} výsledný magnetický moment $\vec{\mu}$ roven nulovému vektoru. Opět ve vazbě na jednotku objemu je s magnetickým momentem $\vec{\mu}$ spojen vektor příčné tkáňové magnetizace.

Fyzikální podstata magnetické rezonance (vyjádřená vektory podélné a příčné tkáňové magnetizace) vychází z parametrizace tvaru „oblaku pravděpodobnosti“ **pomocí kvantových čísel spojených se z-ovými složkami S_z a b_z spinového a orbitálního momentu hybnosti**. Tato kvantová parametrizace umožňuje nepoužívat častá rčení „protony neustále rotují kolem své vlastní osy a tento pohyb je označován jako spin“ nebo „protony umístěné v magnetickém poli konají kromě svého původního rotačního pohybu (spinu) ještě pohyb precesní (po plášti rotačního kužele)“.

6.2. Fyzikální základy technického využití

Technická podstata magnetické rezonance je tedy spojena s působením silného magnetického pole \vec{B} , které vede ke vzniku vektorů podélné (nenulový vektor) a příčné (nulový vektor) tkáňové magnetizace.

Rozhodující jsou pak následné elektromagnetické impulsy odpovídající elektromagnetickým rádiovým vlnám (viz 8.kap., odst.8.5.) s úhlovou frekvencí rovnající se Larmorově frekvenci Ω . Vzhledem k rovnosti frekvencí je oprávněn název „magnetická rezonance“. Fotony elektromagnetických vln jsou absorbovány protony, které jsou excitovány do vyšších energetických stavů. V důsledku energetické excitace se zvýší počet protonů s vektory podélné tkáňové magnetizace, které budou mít antiparalelní orientaci vůči vektoru \vec{B} (zmenší se výsledný magnetický moment $\vec{\mu}_s$). Rovněž souborová střední hodnota vektoru příčné tkáňové magnetizace u makrosystému protonů již nebude nulová (objeví se výsledný magnetický moment $\vec{\mu}$ odlišný od nulového vektoru). K urychlení procesu magnetické rezonance se používá ke změnám orientace výsledného magnetického momentu $\vec{\mu}$ přídavné gradientní pole (tím se nahrazuje režim „spin-echo sekvence“ režimem „gradient-echo sekvence“).

Po ukončení elektromagnetického impulsu rádiových vln se bude makrosystém protonů vracet do původního stavu, tj. v relaxačním čase T_1 se obnoví magnetický moment $\vec{\mu}_s$ a v příčném relaxačním čase T_2 zanikne magnetický moment $\vec{\mu}$. Při návratu do původního stavu předá makrosystém protonů nadbytečnou energii do strukturní mřížky tkáně a tkáň vyše zpětný signál. Časy mezi elektromagnetickými impulsy se mění tak, aby se změny relaxačních časů T_1 a T_2 promítly do rozdílů ve stupních šedi při zobrazení v rámci strukturní magnetické rezonance.

Kontrolní otázky:

- 1) Co jsou to kvantová čísla
- 2) Co charakterizuje magnetické kvantové číslo
- 3) Co charakterizuje spinové magnetické kvantové číslo
- 4) Jaká je fyzikální podstata magnetické rezonance
- 5) Jaká je fyzikální podstata technického využití

Literatura:

**Záškodný,P.: Přehled základů teoretické fyziky (s aplikací na radiologii).
Didaktis, Bratislava, 2005**

**Záškodný,P.: Survey of Principles of Theoretical Physics (with application
to radiology). Algoritmus, Avenira Foundation, 2006**

**Kozlovská,D., Skalická,Z., Záškodný,P.: Úvod do praktika z radiologické
fyziky. JU, České Budějovice, 2005**