

VYUŽITIE IONIZUJÚCEHO ŽIARENIA V MEDICÍNE

Kapitola sa zaoberá históriou objavu ionizujúceho žiarenia a zdrojmi ionizujúceho žiarenia v medicíne. Popisuje vyšetrovacie zobrazovacie metódy rádiologickej diagnostiky a rádionuklidovú diagnostiku v nukleárnej medicíne. Oboznámime sa s históriou a najmä súčasnosťou prístrojovej techniky v rádiodiagnostike, a v nukleárnej medicíne.

UČEBNÉ CIELE

Študent má vedieť vysvetliť princíp vzniku röntgenového žiarenia a jeho charakteristiku. Má poznať vlastnosti základných rádiofarmák, používaných v nukleárnej medicíne. Má vedieť rozčleniť a charakterizovať základné vyšetrovacie metódy rádiologickej diagnostiky. Študent má poznať princípy tomografie. Mal by ovládať základy fyzikálnych princípov rádiologických zobrazovacích metód. V oblasti nukleárnej medicíny by mal poznať základné charakteristiky diagnostických metód – gamagrafie, SPECTu, PETu. Študent by mal mať prehľad o prístrojovej technike v radiačnej medicíne.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Röntgenové žiarenie, tomografia, počítačová tomografia (CT), ultrasonografia (USG), magnetická rezonancia (MR), gamagrafia, jednofotónová emisná počítačová tomografia (SPECT), pozitronová emisná tomografia (PET)

1 HISTÓRIA VYUŽITIA IONIZUJÚCEHO ŽIARENIA V MEDICÍNE

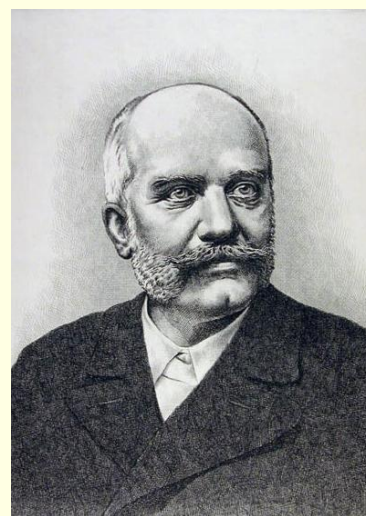
Medicína využíva mnoho spôsobov zobrazovania a liečby ochorení ľudského tela, jeho orgánov, ktoré sú založené na poznatkoch atómového jadra. Všetky pochádzajú z obdobia posledných dvoch storočí.



Obr.1 Wilhelm Conrad Röntgen



Obr. 2 Prvá rtg snímka ruky



Obr.3 Vojtech Alexander

Jeden z najvýznamnejších dní mnohých medicínskych odborov je **8. november 1895**, keď nemecký fyzik **Wilhelm Conrad Röntgen** (pôvodom strojní inžinier- obr. 1) spozoroval zvláštny jav pri svojich pokusoch v tmavej komore s katódovým žiarením, a to slabé zelené

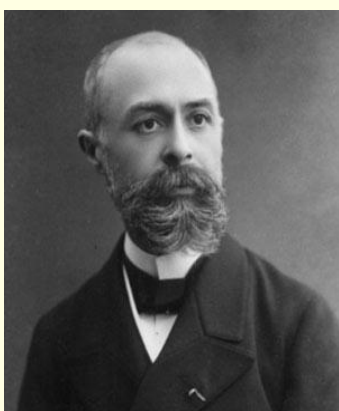
svetlo, vznikajúce pri dopade katódových lúčov (rýchle sa pohybujúcich elektrónov) na vákuovú trubicu. Sledoval svetielkovanie vyvolané zabrzdzením lúčov na luminiscenčnom tienidle, ktoré bolo pokryté vrstvou kyanidu platinobarnatého. Zistil, že luminiscenčné tienidlo svetielkuje aj vtedy, keď zakryl katódovú trubicu čiernym papierom alebo vložil do cesty lúča hrubú knihu. Keď však umiestnil medzi trubicu a tienidlo kovový predmet, na tienidle sa objavil tieň. Pri vložení svojej ruky do cesty lúča sa objavili slabé obrisy kostí. Röntgen usúdil, že z katódovej trubice vychádzajú neznáme prenikavé lúče (pôvodne nazvané **lúče X**, neskôr **röntgenové žiarenie**), ktoré sú schopné prenikať papierom i mäkkým ľudským tkanivom, ale tvrdé kovové predmety a kosti sú nepriehľadné. Zistil tiež, že toto žiarenie vyvoláva sčernenie fotografickej dosky, a tak zhotovil prvý historický röntgenový obraz, a to obraz ruky svojej manželky, Berthy Röntgenovej (obr.2).

Röntgen si uvedomil, že využitie prenikavosti tohto žiarenia pre zobrazenie vnútorných častí ľudského tela má obrovský význam pre medicínu. Za tento objav bola v roku 1901 Röntgenovi udelená Nobelova cena za fyziku.

Röntgenové žiarenie sa takmer okamžite ujalo v medicíne a vytvoril sa nový odbor röntgenológia (neskôr rádiagnostika, dnes diagnostická rádiológia). V krátkej dobe sa skonštruovali prvé diagnostické röntgenové prístroje a vznikali nové vyšetrovacie metódy, umožňujúce sledovanie takých fyziologických a patologických zmien v ľudskom organizme, ktoré do tej doby neboli dostupné.

K rozvoju svetovej röntgenológie veľmi významne prispel rodák z Kežmarku, **Vojtech Alexander** (obr. 3), jeden z najvýznamnejších priekopníkov nového medicínskeho odboru. V rokoch 1882 – 1906 rozvíjal metódy röntgenológie v Kežmarku, neskôr pôsobil najmä v Budapešti, kde zhotovil prvú stereoskopickú snímku a vypracoval metodiku tzv. plastického snímkovania, čím získal svetové uznanie.

Biologický účinok žiarenia sa veľmi rýchle začal využívať aj na liečebné účely pri zápalových a nádorových ochoreniach (radioterapia). Objav röntgenových lúčov však bol začiatkom dlhodobého a intenzívneho bádania zameraného na výskum a využitie rádioaktívneho žiarenia v oblasti lekárskeho vied, čo prinieslo dlhý rad objavov, ktoré spôsobili revolučný prevrat v dobovom chápaní podstaty hmoty, energie a života.



Obr.4 Antoine Henri Becquerel



Obr.5
Becquerelova
fotografická doska
ožiarená
rádioaktívnym
žiarením

Jedným z prevratov bolo, keď v r. 1896 francúzsky fyzik **Antoine Henri Becquerel** pri štúdiu fluorescencie uránových solí objavil **prirodzenú rádioaktivitu**. Becquerel v tom čase v Paríži vykonával rôzne pokusy s luminiscenciou rôznych nerastov, vrátane uránových minerálov, ktoré dostal od svojho otca. Nerasty vystavoval slnečnému žiareniu a na základe sčernenia fotografických dosiek posudzoval ich luminiscenciu. Raz, keď sa obloha zatiahla a Becquerel nemohol vystaviť nerasty slnečnému žiareniu, uložil ich do zásuvky stola na fotografickú dosku, ktorá bola zabalená do čierneho papiera. Po niekoľkých dňoch dosku vyvolal náhodne (pre kontrolu kvality, resp. chemického pôsobenia minerálov bez prístupu

svetla) a s prekvapením spozoroval jediné zmenu - čierny obraz nerastu - na doske, ktorá bola v styku s uránovými soľami. Sčernenie nemohlo spôsobiť žiadne vonkajšie svetlo, ani luminiscencia a preto sa domnieval, že zo skúmaných solí vychádza neviditeľné žiarenie.

Becquerel za svoj objav (spočiatku ho nazval „uránovým žiarením“) dostal v r. 1900 **Rumfordovu medailu**. V r. 1903 spolu s manželmi Curieovými získal Nobelovu cenu za fyziku za skúmanie radiačných javov.

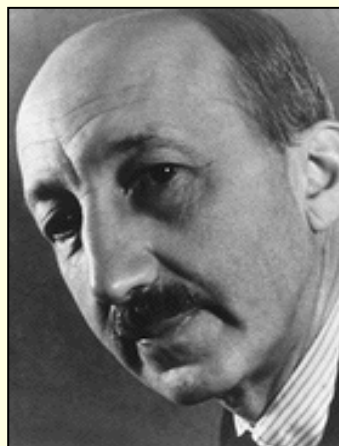
V r. 1898 o výskum a popis rádioaktívneho žiarenia a jeho zdrojov sa snažili aj manželia **Maria Sklodowska - Curie** a **Pierre Curie**, ktorí objavili polónium Po (1898) a rádium Ra (1910) a vykonávali pokusy pre ich praktické využitie. V roku 1911 za svoje objavy obdržali Nobelovu cenu za chémiu.



Obr. 6
Maria Sklodowska- Curie



Obr. 7
Pierre Curie



Obr. 8
György von Hevesy

Od r. 1913 sa uskutočnili výskumy **chemických stopovacích metód** pomocou prírodných rádioaktívnych látok ako indikátorov.

Prvé biologické výskumy pomocou rádioaktívnych indikátorov olova uskutočnil **György von Hevesy** až v roku 1923, keď ukázal možnosť sledovania pohybu rádioaktívneho olova v rastlinách. Zistil, že umelo dodané rádioaktívne olovo v rastlinách sa postupne vymení za inaktívne, ktoré rastlina prijala z pôdy. Hevesy prekvapene skonštatoval, že aj v rastlinnom organizme dochádza k látkovej výmene. O rok neskôr pokračoval vo výskume na zvieratách, keď sledoval pohyb rádioaktívne označeného bizmutu v živom organizme (bizmut toho času mal dôležitú rolu pri liečení syfilisu). Neskôr spolu s nemeckým lekárom **Kroghom** určili obsah vody v ľudskom tele, pobyťový čas molekuly vody v ľudskom organizme a skúmali permeabilitu kože žaby pomocou ťažkej vody, aby mohli pochopiť funkciu tkanivových membrán.

Fyzikálne výskumy pokračovali smerom k výrobe umelých rádionuklidov (objavenie pozitronov - **Carl David Anderson** - 1932, prvé pokusy na výrobu umelých pozitronových žiaričov - **Frederic Joliot** a **Irène Joliot-Curie** - 1934) a k rozvoju nukleárnej techniky pre priemyselné aplikácie. Po objavení **reťazovej reakcie** (**Leó Szilárd** - 1934), po spustení prvých urýchľovačov (**Ernest Lawrence** - 1939) a skonštruovaní prvého atómového **reaktora** (**Enrico Fermi** - 1942) sa vytvorila možnosť výroby rádioizotopov a umelých pozitronových žiaričov.

Po roku 1935 nastal aj širší rozvoj stopovacích metód, keď sa začali vyrábať umelé rádionuklidy. Hevesy pravidelne dostával od svojho priateľa Ernsta Lawrence, konštruktéra cyklotrónu rádioizotopy ^{32}P , ^{24}Na a ^{42}K pre svoje výskumy. Pomocou nich skúmal vlastnosti kostnej stavby. Pomocou ^{32}P sledoval kostnú prestavbu potkanov a došiel k záveru, že kostný systém sa chová dynamicky, neustále prijíma a vylučuje fosfor a je v akejsi rovnováhe. Tento

záver znamenal prelom vo vtedajšom pohľade biológov a fyziológov na ďalší rozvoj vedecko-výskumného smeru. Hevesy a Krogh pokračovali v štúdiu zabudovania fosforu do zubov a zubnej skloviny. Spolupráca Hevesyho s mnohými známymi osobnosťami vedy priniesla mnoho ďalších nových vedeckých poznatkov pre svet. Hevesy je objaviteľom hafnia. V roku 1943 György von Hevesy dostal Nobelovu cenu za rozvoj stopovacích metód.

Biologické stopovacie metódy tvorili základ ďalšieho nového medicínskeho odboru na báze využitia rádioaktívneho žiarenia – vzniká odbor **nukleárna medicína**.

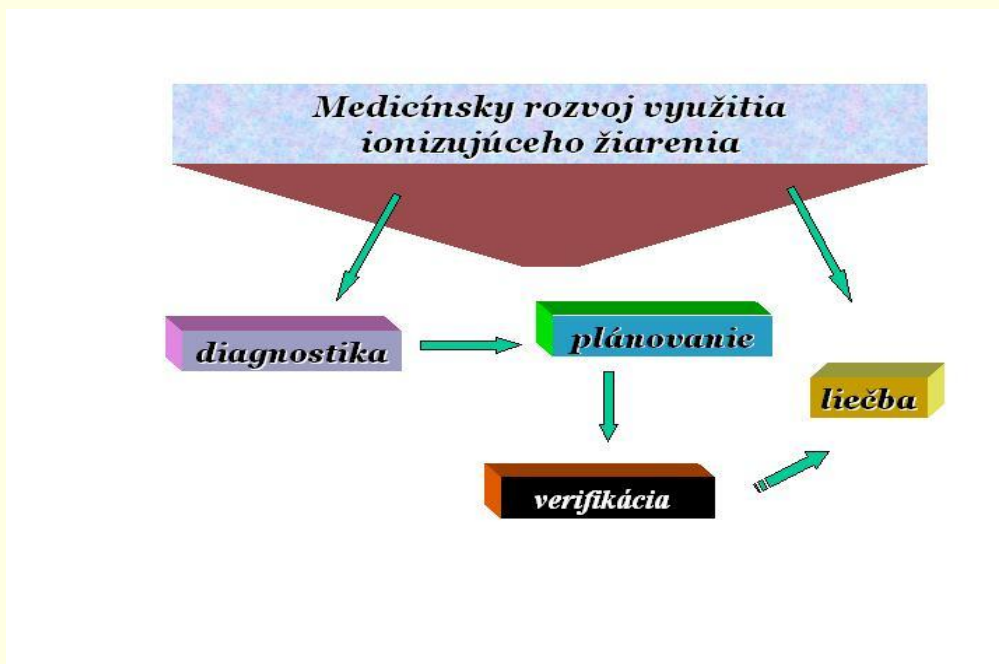
Praktické využitie novoobjavených prvkov a röntgenového žiarenia vytvorilo základy nových medicínskych odborov a umožnilo rozvoj nových diagnostických a terapeutických postupov pomocou rádioaktívneho žiarenia.

2 ZDROJE IONIZUJÚCEHO ŽIARENIA A ICH APLIKÁCIA V MEDICÍNE

Ionizujúce žiarenie v medicíne sa dnes používa tak na diagnostické, ako aj na terapeutické účely. Rozmanitosť využitia vyžaduje kategorizácia medicínskych odborov a metód využívajúcich ionizujúce žiarenie.

Pre **diagnostické účely** sa ionizujúce žiarenie využíva pri všetkých druhoch ochorení, sledovaných pomocou moderných **zobrazovacích metód - v rádiologickej diagnostike** (starý názov rádiodiagnostika, röntgendiagnostika) a v **nukleárnej medicíne** (aplikácia otvorených žiaričov).

Pre **terapeutické účely** sa ionizujúce žiarenie využíva v podobe uzavretých žiaričov v odbore **rádioterapia** a v podobe otvorených žiaričov v **nukleárnej medicíne**.



Obr.9
Rozvoj radiačných medicínskych odborov

2.1 Ionizujúce žiarenie v rádiologickej diagnostike

Rádiologická diagnostika, predtým nazývaná rádiodiagnostika, je medicínsky odbor, ktorý využíva **röntgenové žiarenie** a ďalšie fyzikálne javy (najmä ultrazvuk a magnetickú rezonanciu) na diagnostiku chorôb.

Röntgenové žiarenie – röntgenové lúče - **žiarenie X** –**rtg-žiarenie** (►Príloha 1) je elektromagnetické žiarenie v rozsahu vlnovej dĺžky 1 nm až 100 pm. Vzniká prudkým zabrzdzením urýchlených elektrónov (brzdné žiarenie) alebo prechodom elektrónov na nižšie energetické hladiny v atóme (charakteristické žiarenie).

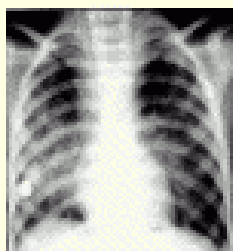
Základným zdrojom röntgenového žiarenia je **röntgenová trubica** (röntgenka, elektrónka). Ďalšími zdrojmi röntgenového žiarenia sú niektoré **radionuklidy**, vyskytuje sa však aj pri **urýchľovačoch** nabitých častíc, jeho prirodzeným zdrojom sú najmä hviezdy. Röntgenové žiarenie okrem medicíny sa využíva aj pri štruktúrnej a spektrálnej analýze látok, v radiačnej chémii a v defektoskopii.

Röntgenka je sklená vákuová **trubica** (►Príloha 2) s 2 elektródami (diódy), na ktoré je vložené vysoké napätie v rozmedzí 20 až 200 kV. Žeravená katóda emituje elektróny, ktoré sú priťahované anódou, pričom sú silným elektrickým poľom urýchľované na energiu $E = Q U$, danú vysokým napätím U ($E \sim 20 - 200$ keV). Anóda je vyhotovená z ťažkého materiálu (najčastejšie z volfrámu), ktorý má vysokú elektrónovú hustotu, takže dopadajúce elektróny sú

prudko zabrzdené veľkou odpudivou silou, čím sa podľa zákonitostí elektrodynamiky časť ich kinetickej energie mení na brzdné elektromagnetické žiarenie - fotóny X-žiarenia.

Účinnosť tohto procesu je však pomerne malá - len asi 1% celkovej kinetickej energie elektrónov je transformované na fotóny žiarenia X, zbytok sa mení na teplo. Dôvodom je, že len asi 1% elektrónov prenikne dostatočne hlboko dovnútra atómov materiálu anódy, až ku energetickej hladine L alebo K elektrónového obalu, kde pôsobia veľké Coulombovské elektrické sily, spôsobujúce prudkú zmenu rýchlosti elektrónov a tým efektívne budenie tvrdého brzdného žiarenia. Ostatné elektróny odovzdávajú svoju kinetickú energiu elektrónom a atómom kryštálovej mriežky, čím vzniká teplo.

Röntgenové žiarenie pre svoje špecifické vlastnosti sa dobre využíva na anatomické vyšetrenia v medicíne. Šíri sa priamočiario v priestore a riadi sa zákonitosťami optiky. Čím má kratšiu vlnovú dĺžku, tým má väčšiu energiu a hlbšiu prenikavosť hmotou. (V rádiológii sa pre energiu používa aj termín tvrdosť.) Röntgenové žiarenie má odlišnú absorpciu v rôznom tkanive, čo je podstatou zobrazovania v rádiologickej diagnostike. Princíp röntgenového zobrazenia spočíva v transmisii röntgenového žiarenia vyšetrovaným objektom. Prenikavé elektromagnetické žiarenie X, vznikajúce v röntgenovej trubici, prechádza vyšetrovaným objektom (tkanivo organizmu), pritom sa časť žiarenia absorbuje v závislosti na hustote tkaniva, zbytok prechádza tkanivom a je zobrazované buď fotograficky, alebo na luminiscenčnom tienidle, v prípade moderných diagnostických zariadení pomocou elektronických detektorov. Vzniká tak röntgenový obraz ako projekcia žiarenia X s tieňovým obrazom rôznej hustoty sčernenia, zobrazujúcim rozdiely v hustote vyšetrovaného tkaniva.



Obr.10
Rtg obraz pľúc

Tkanivové štruktúry rôznych hrúbok v organizme majú rozdielne absorpčné koeficienty. Mäkké tkanivo má menšiu hustotu a nižšiu absorpčnú schopnosť, čo sa na röntgenovom obraze prejaví väčším sčernením fotografického materiálu. Pevné tkanivo a kosti sú hutnejšie a silnejšie absorbujú rtg-žiarenie, na fotografickom filme sa objaví menej intenzívny obraz s menším sčernením (obr.10).

Pri dopade rtg-žiarenia na niektoré chemické zlúčeniny vzniká viditeľné žiarenie - **luminiscencia** - s intenzitou závislou od množstva dopadajúceho žiarenia. Tento jav sa donedávna využíval v röntgenových prístrojoch na zníženie dávky žiarenia tým, že sa do nich zabudovali rôzne zosilňovacie fólie zhotovené z gadolína, resp. lantánu, získaného zo vzácnych zemín.

Fotochemický účinok rtg-žiarenia na zlúčeniny striebra nanosené na fotografický film umožňuje trvalé zachytenie rtg snímky daného predmetu. Donedávna sa tento spôsob zobrazovania používal pri všetkých vyšetrovacích metódach v rádiologickej diagnostike. Dnes sa používa len pri konvenčných röntgenoch starších typov a v rádiologickej stomatológii (tu bez zosilňovacích fólií), pri ostatných rádiologických postupoch je nahradený modernou digitalizovanou zobrazovacou technikou.

Nežiadúcimi vlastnosťami rtg-žiarenia je jeho rozptyl a ionizačný účinok. Žiarenie pri dopade na ožarovaný predmet sa rozptyľuje do celého priestoru, čo spôsobuje rozmazávanie obrazu a znižovanie kontrastu. Ionizácia poškodzuje najmä DNA ľudského organizmu

2.2 Ionizujúce žiarenie v nukleárnej medicíne

Najmladším interdisciplinárnym medicínskym odborom využívajúcim ionizujúce žiarenie je **nukleárna medicína**, zaoberajúca sa diagnostikou a liečbou pomocou otvorených rádioaktívnych žiaričov. Vyšetrovacie metódy nukleárnej medicíny patria medzi neinvazívne medicínske postupy. Na rozdiel od rádiologickej diagnostiky, ktorá je založená na anatómii, nukleárna medicína umožňuje získavať informácie na anatomicko-morfologickej úrovni, najmä však o orgánových funkciách a metabolickej činnosti organizmu.

Princípom nukleárnej medicíny je vpraviť do živého organizmu **rádionuklid**, rádioizotopom označenú molekulu chemickej substancie. Rádionuklidy naviazané na rôzne chemické substancie - tzv. **rádiofarmaká** - sa aplikujú intravenózne alebo perorálne (požitím) pacientom za účelom diagnostiky alebo liečby rôznych funkčných a nádorových ochorení. Tieto chemické substancie vstupujú do metabolických dejov a zabudujú sa do rôznych tkanivových štruktúr. V diagnostickom procese indikujú vnútornú funkciu organizmu na podklade fyziologických a metabolických dejov. Použitý rádioindikátor je špecifický pre jednotlivé orgány a druhy vyšetrení. Pomocou špeciálnej detekčnej techniky je možné sledovať tkanivové rozdelenie rádioaktívnych molekúl registráciou žiarenia značkovacieho rádionuklidu.

Pri liečbe rádiofarmakami sa uplatňuje rádiobiologický účinok ionizujúceho žiarenia. **Rádiofarmakum** je prípravok obsahujúci jeden alebo viac rádionuklidov. Skladá sa z dvoch častí - rádionuklidu, tj. značkovacieho rádioaktívneho prvku a neaktívnej látky, ktorá zodpovedá za chovanie, resp. distribúciu výsledného **rádiofarmaká** (► Príloha 3) v organizme.

Spektrum použitých rádionuklidov a ich izotopov pre značkovanie rôznych chemických substancií je dnes relatívne široké. Ich škála sa rýchlym tempom mení v závislosti od rozvoja reaktorových a urýchľovačových technológií, kde sa tieto rádionuklidy vyrábajú a od farmakokinetických vlastností použitých substancií.

V jadrovom reaktore reakciou (n,γ) sa pre medicínske účely najčastejšie vyrábajú rádionuklidy ^{131}I , $^{99}\text{Mo}(\square^{99\text{m}}\text{Tc})$, ^{59}Fe , ^{51}Cr , ^{125}I a iné γ žiariče. Možno však získať ďalšími reakciami (n, γ) a (n,p) aj iné medicínsky využiteľné rádionuklidy. Pomocou chemických separačných metód sa dajú získať aj zo štiepnych zmesí niektoré izotopy ako ^{99}Mo , ^{133}Xe , resp. ^{137}Cs a to s vysokou hmotnostnou aktivitou.

Cyklotróny (kruhové urýchľovače nižších energií (11 – 36 MeV) umožnia vyrábať ďalšie rádionuklidy ^{67}Ga , ^{123}I , ^{111}In , ^{201}Tl , $^{81}\text{Rb}(\square^{81\text{m}}\text{Kr})$ a ultrakrátkožijúce pozitronové žiariče ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O a ^{18}F . Ich paleta sa dynamicky mení.

Rádiofarmaká musia vyhovovať **kritériam Liekopisu** (► Príloha 4) (vysoká rádionuklidová a rádiochemická čistota, sterilita, apyrogenita, netoxičnosť, biologický polčas). Rádionuklidy musia mať vhodné fyzikálne vlastnosti (druh emitovaného žiarenia, fyzikálny polčas premeny), aby očakávaný prínos z vyšetrenia, resp. terapie bol vyšší ako poškodenie z negatívneho rádiobiologického účinku žiarenia. Pre diagnostiku sa využívajú ultrakrátkožijúce a krátkožijúce rádionuklidy s fyzikálnou dobou polpremeny niekoľko sekúnd až dní, emitujúce gama žiarenie, čo je veľmi významné z hľadiska radiačnej záťaže. Parametre kvality daného rádiofarmaka sa overujú pravidelnými kontrolami tak u výrobcu, ako aj u užívateľa. Na pracoviskách nukleárnej medicíny sa pre každého pacienta pripravujú individuálne.

Približne 90 - 95 % vyrobených rádiofarmák slúži k **diagnostickým** účelom pre zobrazovacie metódy funkčných i nádorových ochorení. Zobrazením distribúcie a sledovaním

farmakokinetiky definovanými kvalitatívnymi a kvantitatívnymi parametrami sa posudzujú poruchy metabolizmu v cieľových orgánoch.

Asi 5 až 10 % rádiofarmák slúži k priamej cielenej **terapii** niektorých ochorení. Terapeutickým efektom je ciele lokálne ožiarenie patologického tkaniva s jeho následným zničením. Vďaka významnému rozvoju terapeutických metód a účinnejším liečivám pôsobiacim na molekulárnej úrovni v posledných rokoch sa rozširuje aj druh a množstvo rádiofarmák pre tieto účely, najmä v nádorovej terapii, v imunoterapii a v paliatívnej medicíne.

Tab.1 Rádionuklidy používané v nukleárnej medicíne

Rádionuklid - Kit	A _{pouz.} (MBq)	Využitie	Rádionuklid - Kit	A _{pouz.} (MBq)	Využitie
F-18 – pozitron. ž.	130 - 370	diagnostické	Sr-89	150 – 300	terapeutické
1C-11 – pozitron. ž.	185 - 370	diagnostické	Y-86		diagnostické
N-13 – pozitron. ž.	185 - 370	diagnostické	Y-90	185 - 1200	terapeutické
O-15 – pozitron. ž.	185 - 370	diagnostické	P-32	150	terapeutické
Cu-64 – pozitron. ž.	185 - 370	diagnostické	I-124 – pozitron. ž.		diagnostické
Ga-67 – citrát	100 – 200	diagnostické	I-125	600 - 1200	terapeutické
Ga-68 – pozitron. ž.	500 - 600	diagnostické	I-131	370 - 11000	terapeutické
Br-74– pozitron. ž.	185 - 370	diagnostické	Re-186		terapeutické
Rb-81/Kr-81m	3000 - 6000	diagnostické	Re-188		diagnostické
Tc-99m - rôzne	37 - 800	diagnostické	Sm-153		terapeutické
In-111 - chlorid	185 - 370	diagnostické	At-211		terapeutické
I-123 - rôzne	150 - 200	diagnostické	Lu-177		terapeutické
I-125 – in vitro	1	diagnostické	Ho-166 - MAG		terapeutické
I-131 –NaI	1,85 - 370	diagnostické	Dy-165		terapeutické
Tl-201 - chlorid	37 - 185	diagnostické	198Au		terapeutické

Základné rozdelenie rádiofarmák podľa ich zloženia je:

- čisté, beznosičové rádionuklidy (napr. 81mKr),
- anorganické zlúčeniny (soli, koloidy),
- organické zlúčeniny (bielkoviny, cukry, lipidy, cheláty apod.)
- značené krvné elementy.

Ich fyzikálna podoba môže byť :

- **roztok** alebo **koloidná disperzia** pre intravenózne aplikácie (do žily)
- roztok alebo tobolka **perorálne** (požitím) podané
- **inhalačný** prípravok (vdýchnutím)
- **topický** prípravok (pre lokálnu diagnostiku vzťahujúcu sa k určitému prostrediu záujmovej oblasti).

Dnes dominantné postavenie pre diagnostické účely má ^{99m}Tc ($T_{1/2} = 6,02$ hod). Využíva sa asi v 80% in vivo vyšetrení. Získava sa z tzv. ⁹⁹Mo-^{99m}Tc-generátora na mieste použitia. Princípom tohto rádionuklidového generátora je, že má v sebe zabudovaný materský rádionuklid s relatívne dlhou dobou polpremeny ⁹⁹Mo ($T_{1/2} = 66,2$ hod), z ktorého vzniká

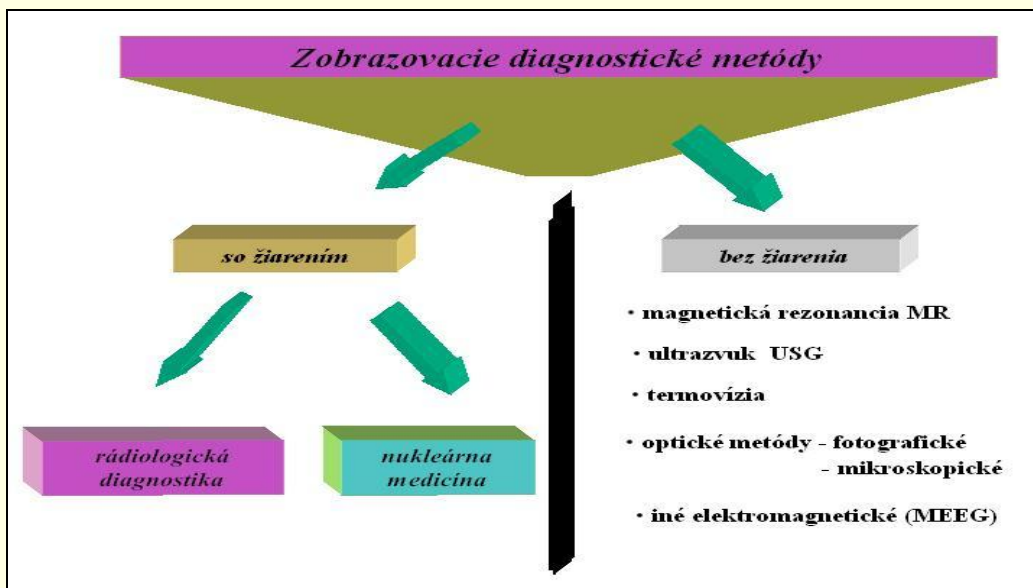
dcérsky produkt s krátkou dobou polpremeny ^{99m}Tc , ktorý je možné elúciou oddeliť od materského nuklidu. Eluát ^{99m}Tc (prekurzor) sa môže použiť v čistej forme, alebo sa s ním dá značkovať neaktívny nosič (kit), ktorý sa v takejto forme ako rádiofarmakum aplikuje pacientom.

Pre terapeutické účely hlavnú úlohu hrá ^{131}I v podobe Na^{131}I ako jediný a nenahraditeľný prípravok pre elimináciu zvyškového tkaniva po chirurgickom odstránení štítnej žľazy pri malígnej strume (zhubný nádor štítnej žľazy). Ostatné terapeutické rádiofarmaká zatiaľ tvoria len malý podiel z celkovo použitého množstva, aj keď v poslednom období sa silne rozvíja aj výskum iných terapeutických rádiofarmák. Okrem medicínskeho a ekonomického aspektu má to aj sociálno-spoločenské príčiny.

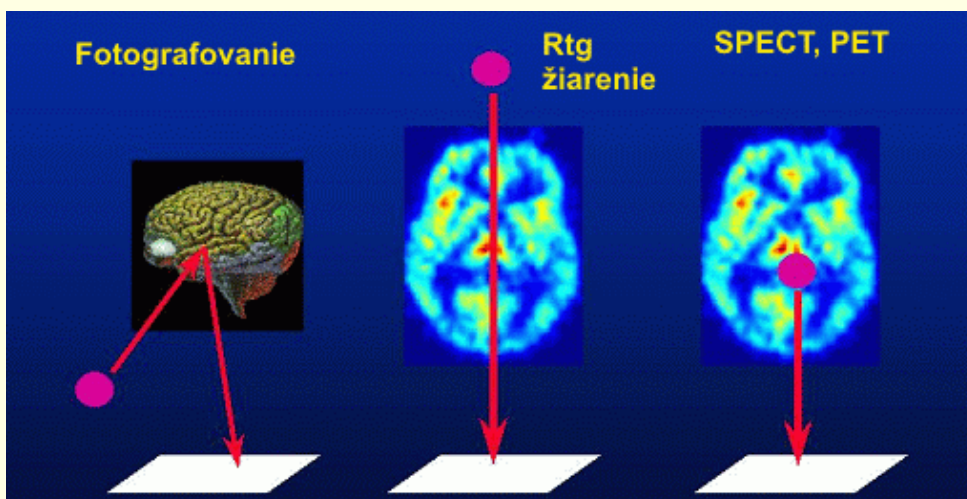
KONTROLNÉ OTÁZKY

1. Ako vzniká röntgenové žiarenie?
2. Čo viete o histórii objavu röntgenového žiarenia?
3. Vysvetlite princíp röntgenového transmisného zobrazenia. Ako sa uplatňuje v medicíne?
4. Popíšte zdroje röntgenového žiarenia používané v medicíne!
5. Vymenujte oblasti medicíny, kde sa používajú zdroje ionizujúceho žiarenia.
6. Čím sa zaoberá nukleárna medicína?
7. Popíšte princíp využitia ionizujúceho žiarenia v nukleárnej medicíne!
8. Čo sú rádiofarmaká? Ako sa pripravujú?
9. Ako členíme rádiofarmaká?
10. Vymenujte najpoužívanejšie rádionuklidy v nukleárnej medicíne!

3 VYŠETROVACIE ZOBRAZOVACIE METÓDY V MEDICÍNSKEJ DIAGNOSTIKE



Ionizujúce žiarenie (ale aj ďalšie fyzikálne javy, najmä ultrazvuk a magnetickú rezonanciu) najfrekventovanejšie využíva najrozšírenejší, najmä však najdôležitejší medicínsko-diagnostický odbor **rádiologická diagnostika**. Významne sa však uplatňuje aj pri **in vivo diagnostike v nukleárnej medicíne**. Diagnostická informácia sa pri lekárskych vyšetreniach získava v podobe obrazu (snímky) na fotografickej doske a v súčasnosti aj v digitálnej forme, uchovateľnej a reprodukovateľnej pomocou elektronických médií. Tieto diagnostické metódy zobrazujú ľudské telo v jeho anatomickej podobe, v detailnej štruktúre, poskytujú informácie o morfológických zmenách a metabolických dejoch v organizme. Majú spoločný názov **zobrazovacie metódy** (obr.11). Základný princíp využitia ionizujúceho žiarenia v jednotlivých druhoch zobrazovacích metód je vysvetlený na obr. 12.



Obr.12 Princíp využitia ionizujúceho žiarenia pri jednotlivých zobrazovacích metódach

Medzi diagnostické zobrazovacie metódy patria aj vyšetrovacie postupy bez ionizujúceho žiarenia, využívajúce iné fyzikálne javy. Na prvé miesto sa v tejto skupine radí diagnostika pomocou **magnetickej rezonancie** (MR, predtým MRI), ktorá sa v posledných rokoch značne rozšírila a vydobyla si jedno z najpoprednejších miest z najmodernejších metód v zobrazovacej diagnostike. Veľmi užitočné sú diagnostické metódy využívajúce **ultrazvuk** (USG,

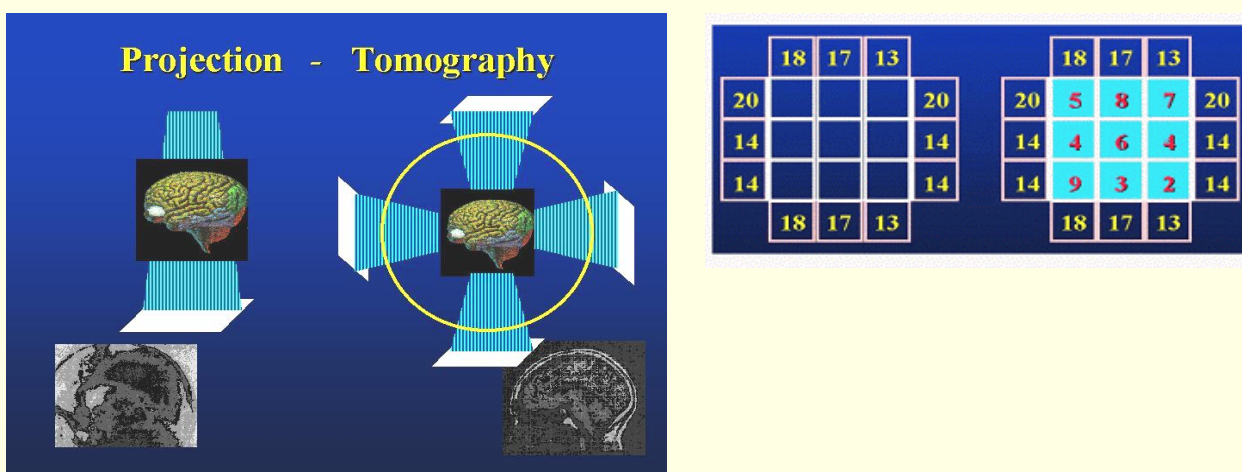
ultrasonografia), a to najmä pre funkčnú diagnostiku. V laboratórnej medicíne sa významne uplatňujú metódy využívajúce elektrónové mikroskopy (molekulárna biológia, patológia, a pod.).

V diferenciálnej diagnostike onkologických ale aj iných ochorení, majú dnes veľký význam počítačová tomografia a magnetická rezonancia. Metódy sa využívajú najmä na diagnostiku širokého spektra poranení a chorôb.

Tomografia

Tomografia (grécky tomos = rez) - je vyšetrovací postup, pri ktorom sa zobrazí len zvolená vrstva tkaniva v hĺbke tela bez rušivého vplyvu okolitého tkaniva, susediaceho so záujmovou oblasťou. Tomografické zobrazenie je tvorené určitými primárne transverzálnymi **rezmi**, ich väčší počet vytvára trojrozmerný obraz.

Moderné počítačové tomografy, využívajúce röntgenové žiarenie a matematické modelovanie pomocou počítačov, umožňujú získať anatomické informácie o morfológických zmenách v ľudskom organizme s niekoľko milimetrovou presnosťou.



Obr. 13 Princíp tomografie

Princípom tomografie je matematická úloha: Na základe súčtu čísel v stĺpkoch a riadkoch určiť, aké čísla stoja v jednotlivých "obrázkových prvkoch", ktoré sú nositeľmi biologických informácií (obr.13). Vyriešiť túto matematickú úlohu sa podarilo **Allanovi Mac Cormackovi** (Nobelova cena – 1980).

Využívajúc Cormackovo vtipné riešenie skonštruoval **Godfrey N. Hounsfield** v r. 1980 prvý **počítačový tomograf**, ktorý sa stal základom najmodernejších zobrazovacích metód (CT, MRI, SPECT, PET) (Nobelova cena - 1980).

Zvláštnosťou tomografického princípu je, že bol vyvinutý pre najmladšiu rutinne zavedenú zobrazovaciu metódu – pre pozitronovú emisnú tomografiu. Prehľad **zobrazovacích metód** (► Príloha 5) založených na tomografii je uvedený v prílohe.

3.1 Vyšetrovacie metódy rádiologickej diagnostiky

Využitie žiarenia v rádiologickej diagnostike má mnoho modalít a vyšetrovacích postupov. Rádiologická diagnostika sa delí podľa prístrojovej techniky a fyzikálnej podstaty zobrazovacích metód na:

„Klasická“ alebo „konvenčná“ rádiológia:

- **skiaskopia**,
- **skiagrafia**,
- **konvenčná tomografia**

Predovšetkým sem patria **klasické röntgenologické** (►Príloha 6) vyšetrenia pľúc, kostí, prsníkov, hrudných, brušných a iných orgánov pomocou klasických röntgenových zariadení pracujúcich na princípe fotografovania pomocou ionizujúceho žiarenia. Vyšetrenia prsníkov pomocou röntgenového žiarenia sa uskutočňuje na pracoviskách mamografie. Pri snímkovaní zubov sa čoraz viac začína presadzovať panoramatické snímkovanie.

Klasické rtg-zobrazenie je **planárne** - je to **dvojrozmerná projekcia** hustoty tkaniva do určitej roviny. Skutočné tkanivo je však objekt **trojrozmerný**, takže planárny obraz, ktorý je dvojrozmernou projekciou skutočnosti, môže zachycovať len časť reality, o treťom „hĺbkovom rozmere“, kolmom na zobrazenú rovinu neposkytuje informácie. Súčasne je planárny obraz zanesený prekryvaním, superpozíciou obrazu a sumovaním informácie z rôznych hĺbok tkaniva.

„Špeciálna“ rádiológia:

- **vákuová mamotómia**

odstránenie malých lézií mliečnej žľazy z prsníka bez klasického operačného zákroku - pozostáva z presného stereotaktického zacielenia patologického ložiska v prsníku v príslušných rovinách pomocou mamografie alebo ultrasonografie (USG). Následne sa pri lokálnom znecitlivení do ložiska zavádza hrubšia bioptická ihla, do ktorej je vákuom nasaté a následne odsaté patologické tkanivo. Výhodou tohto postupu je to, že ihla môže zostať zavedená v ložisku a z daného miesta odobrať podstatne väčšie množstvo tkaniva ako pri klasickej biopsii, niekedy dokonca odstrániť celé podozrivé ložisko. Navyše materiálu je dostatočné množstvo i na podrobnejšie imunohistochemické vyšetrenia. Touto metódou sa snažíme šetriť pacienta pred zložitým chirurgickým zákrokom a odstrániť mikrolézie z prsníku ambulantným spôsobom.

- **röntgenové vyšetrenia s použitím kontrastných látok**

Najznámejšia je angiografia a koronarografia. Kontrastné látky sa však používajú aj pri vyšetrení zažívacieho (tráviaceho) traktu (ezofagografia, gastrografia, duodenografia, enteroklýza, irrigografia, fistulografia, myelografia, endoskopická retrográdna cholangio-pankreatikografia, cholangiografia).

Počítačová tomografia (CT)

Pre získanie komplexného zobrazenia štruktúr v rôznych hĺbkach pomocou röntgenového žiarenia bola vyvinutá počítačová (computerová) tomografia, poskytujúca **trojrozmerné zobrazenie** hustoty tkaniva v organizme. Tomografické röntgenové zobrazenie sa dosahuje tým, že vyšetovaná oblasť sa prežaruje z **rôznych uhlov** (v rozsahu 0-180-360°). Z množstva integrálnych hodnôt počítačovým spracovaním dostávame denzitný **obraz priečného rezu** vyšetovanou oblasťou - **tomografický** obraz. Na takomto obraze sú s vysokým rozlíšením zobrazené tkanivové štruktúry uložené v rôznych hĺbkach v organizme. Veľké množstvo informácií, ktoré sa takýmto spôsobom získa, je možné spracovať a vykonávať na nich rekonštrukčné procedúry len pomocou výkonných počítačov. Z tohto dôvodu táto vyšetovacia procedúra dostala pomenovanie **počítačová tomografia (CT)** (Computer Tomography). Presný výraz “ **röntgenová transmisiá**“ (►Príloha 7) počítačová tomografia" (X-ray Transmission Computerized Tomography) sa pre zdĺhavosť názvu neujal. Podľa technického prevedenia zariadení CT rozlišujeme dnes 4 základné skupiny:

- **konvenčná počítačová tomografia**
- **špirálová počítačová tomografia**
- **multidetektorová počítačová tomografia**
- **tomografia s elektrónovým zväzkom**

Multidetektorovou CT sa otvorili nové možnosti počítačovej tomografie - CT virtuálna endoskopia a kolonoskopia, CT-koronarografia, CT-angiografia, CT-volumetria, CT-

myelografia, CT-enteroklýza, CT-irrigografia, CT-fistulografia, perfúzne **CT štúdie** (►Príloha 8) a mnoho ďalších.

Ultrasonografia (USG)

Ultrazvuk je mechanické vlnenie s frekvenciou vyššou ako 20 kHz, čo je medza počuteľnosti. Pre diagnostické účely sa využíva ultrazvuk s frekvenciou rádovo megahertzov. Ultrazvukové vlny sa v mäkkých tkanivách a tekutinách šíria ako pozdĺžne vlnenie a v kostiach aj ako priečne vlnenie. Každé prostredie môžeme charakterizovať fázovou rýchlosťou šírenia sa ultrazvuku v ňom, akustickou impedanciou a útlmom. Diagnostická informácia je získavaná zachytením a spracovaním ultrazvukových signálov, odrazených od rôznych tkanivových rozhraní. Odrazený signál – echo – je nositeľom morfologickej informácie o reflektancii jednotlivých tkanivových štruktúr.

Dopplerovská ultrasonografia využíva fyzikálny jav – tzv. Dopplerov princíp: ak sa pozorovateľ a zdroj vlnenia navzájom približujú, bude pozorovateľ vnímať vyššiu frekvenciu, a pri vzájomnom vzdďalovaní nižšiu frekvenciu ako je skutočná frekvencia vysielaná zdrojom. Farebným kódovaním môžeme potom odlíšiť napríklad smer toku krvi, zvyčajne tok od sondy je modrý, k sonde červený, jas farby je funkciou rýchlosti toku.

Diagnostická metóda, využívajúca spracovávanie ultrazvukových signálov prechádzajúcich rôznymi tkanivami, sa nazýva **ultrasonografia** a členíme ju na:

- dvojrozmerná
- dopplerovská
- echokardiografia

V súčasnosti sa využívajú dynamické systémy zobrazovania vyšetrovanej oblasti, umožňujúce aj sledovanie pohybu. Veľmi časté je napríklad pozorovanie **vývoja embrya** (►Príloha 9) v tele matky.

Magnetická rezonancia (MR)

Nukleárna magnetická rezonancia – NMR – je metóda založená na **orientovaní magnetických** (►Príloha 10) momentov jadier vo vonkajšom magnetickom poli. Ak umiestnime vyšetovaný objekt do silného magnetického poľa, magnetické momenty jadier sa zorientujú v smere indukčných čiar. Ak potom vyšleme krátky striedavý elektromagnetický signál, magnetické momenty jadier sa dočasne vychýlia z tohto smeru. Jadro vykonáva precesný pohyb okolo smeru magnetickej indukcie za súčasného vyžarovania elektromagnetickej vlny, až pokým sa nevráti do pôvodného smeru. Časy návratu, tzv. spin-mriežkový a spin-spinový relaxačný čas sú nositeľmi dôležitej informácie o vzájomnom pôsobení jadier a charakterizujú biochemické vlastnosti a štruktúru vyšetovaného tkaniva. Magnetickú rezonanciu môžeme pozorovať len u jadier s nepárnym počtom nukleónov, ako sú izotopy ^1H , ^{13}C , ^{15}N , ^{19}F . Najčastejšie sa metódou MR zobrazujú vodíkové jadrá, a to protónová hustota a relaxačné časy, ktoré sú odlišné pre rôzne **druhy tkaniva** (►Príloha 11) a závisia od jeho fyziologického, či patologického stavu. Na zvýšenie kontrastu zobrazovania určitých štruktúr sa používa feromagnetická kontrastná látka na báze gadolína. Rozlišujú sa dve oblasti:

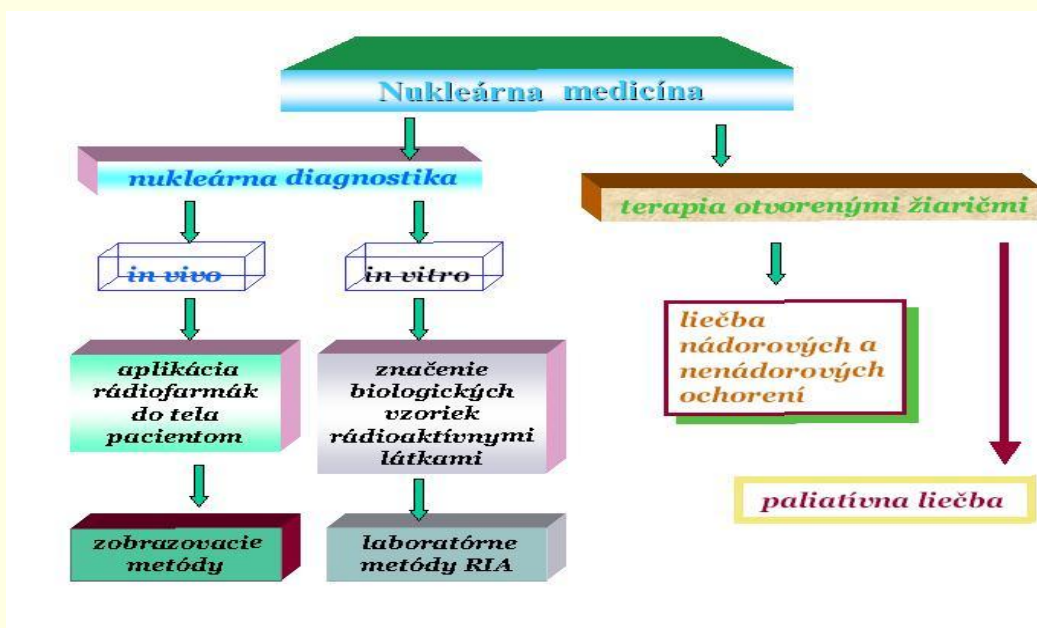
- MR angiografia
- MR spektroskopia

Posledné 2 skupiny zobrazovacích metód – ultrasonografia a magnetická rezonancia – síce nevyužívajú ionizujúce žiarenie, ale majú nenahraditeľné uplatnenie medzi diagnostickými metódami v medicíne. V anatomickej i fyzikálnej podstate vyšetrení a v technike zobrazovania sú najbližšie k rádiologickým metódam a preto sú zaradené do odboru rádiologickej diagnostiky.

3.2 Rádionuklidová diagnostika v nukleárnej medicíne

Nukleárno-medicínska diagnostika sa delí na dve v zásade rozdielne skupiny vyšetrení – **in vivo** (v tele) a **in vitro** (mimo tela pacienta).

Ak sa laboratórne vyšetruje rádioaktívnou látkou označená biologická vzorka, odobratá pacientovi, hovoríme o **in vitro** vyšetreniach. Základom diagnostických in vitro vyšetrení sú rádiosaturačné analýzy - **rádioimunoanalytické metódy (RIA)** - slúžiace k stanoveniu prítomnosti a koncentrácie hormónov a ich metabolitov a tumormarkerov. Na základe toho je možné sledovať prítomnosť tumorov v ľudskom organizme, resp. efektívnosť liečby nádorových i nenádorových ochorení. Metódami rádioimunoanalýzy sa vyšetrujú biologicky dôležité parametre.



Obr. 14 Schéma využitia ionizujúceho žiarenia v nukleárnej medicíne

Laboratórne metódy RIA využívajú **stopovaciu schopnosť** rádionuklidu ^{125}I ako otvoreného žiariča naviazaného na rôzne väzbové bielkoviny, schopné tvoriť bielkovinové komplexy. Princípom metód je, že k vyšetrovanej zložke patientskej vzorky naviazanej na špecifické bielkoviny (ligand) sa pridajú ich ^{125}I -značkované druhy, s ktorými tvoria komplex. Z pôvodného množstva ligandu a z počtu väzbových miest bielkovín po rovnovážnom stave sa určí pomer vzniknutého komplexu a voľných zložiek, čo je vlastne koncentrácia sledovaného hormónu resp. tumormarkeru.

V prípade, že sa rádioaktívna látka aplikovala do živého organizmu ľudského tela, hovoríme o **in vivo** vyšetrení. **Diagnostické in vivo metódy** nukleárnej medicíny dovoľujú odhaľovať patologický proces na funkčno-morfologickej úrovni skôr ako iné zobrazovacie metódy. Distribúcia rádiofarmák v živom organizme závisí okrem fyzikálno-chemických vlastností aj na schopnosti organizmu - orgánových tkanív tieto látky akumulovať. Moderné detekčné techniky a zobrazovacie metódy nukleárnej medicíny umožnia stopovať tieto deje, zobrazíť funkčnosť orgánov, lokalizovať a diferencovať patologické zmeny, čo je podstata diagnostických postupov v nukleárnej medicíne.

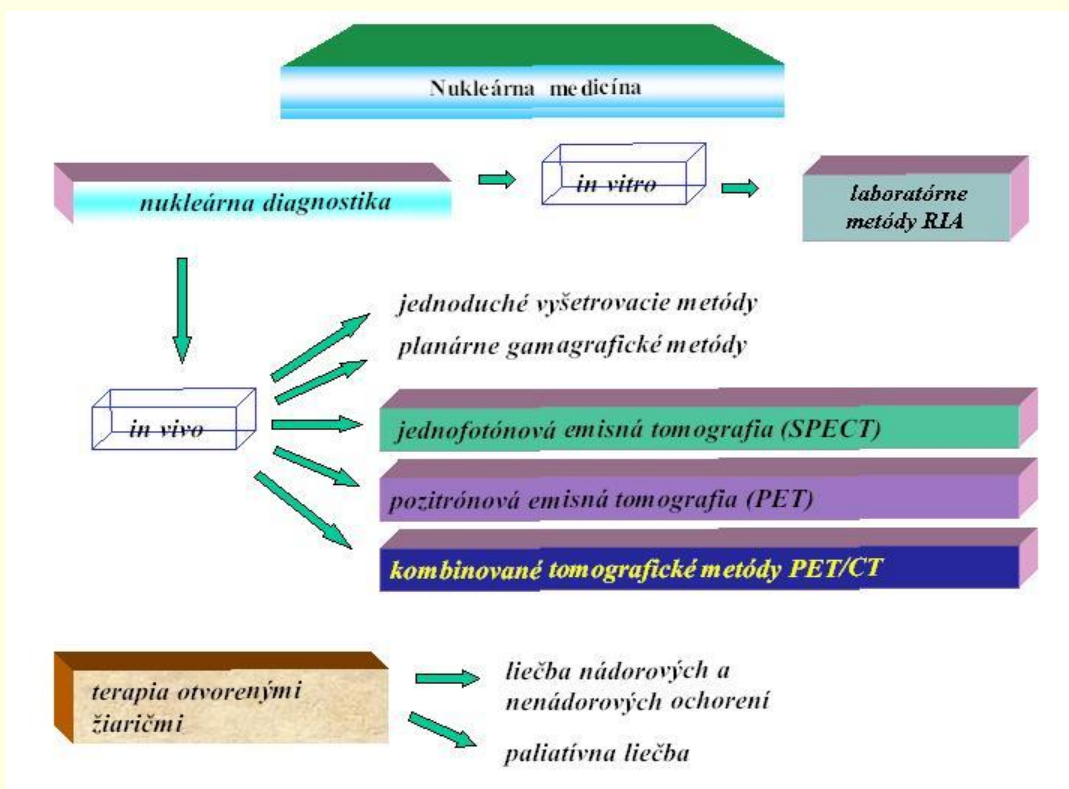
Pri diagnostike sa uplatňuje **gama žiarenie**. Je prenikavé, prechádza ľudským telom v závislosti od svojej energie. Na rozdiel od toho žiarenie alfa a beta majú vyšší ionizujúci účinok na kratšej dráhe, svoju energiu odovzdávajú v menšom objeme tkaniva a neprenikajú ľudským telom. V prípade vyšších energií beta sa v dôsledku absorpcie prejaví slabý prienik brzdného žiarenia na povrchu tela. Z toho vyplýva, že pre diagnostické účely je žiadúci čo najčistejší gama-žiarič.

Pre **terapeutické** účely sa výhodne používajú **beta žiariče** s takou energiou, ktorá sa pohltí v cieľovom objeme s čo najmenším nežiadúcim (vedľajším) účinkom v okolitom tkanive.

Biologický princíp pozitronovej emisnej tomografie

Uhlík, kyslík, dusík a vodík sú základnými biogénnymi prvkami živého organizmu. Ich rádioaktívnymi izotopmi (miesto vodíka fluór), emitujúcimi beta žiarenie (pozitronové žiariče) sú označené stopovacie látky, ktoré sa podávajú vyšetrovaným pacientom za účelom zistenia rôznych funkčných a nádorových ochorení, ich druhu, stupňa, resp. vývoja. Pomáhajú odhaliť tieto ochorenia a určovať zhubnosť nádoru. Takéto funkčno-metabolicko-morfologické zobrazenie umožní diagnostikovať malígny nádor o niekoľko mesiacov až rok skôr, ako iné metódy (vrátane iných „klasických“ SPECT a planárnych metód nukleárnej medicíny).

Metódy a postupy nukleárnej medicíny sa delia podľa nasledovnej schémy:



Obr. 15 Vyšetrovacie metódy a postupy nukleárnej medicíny

Diagnostické in vivo metódy

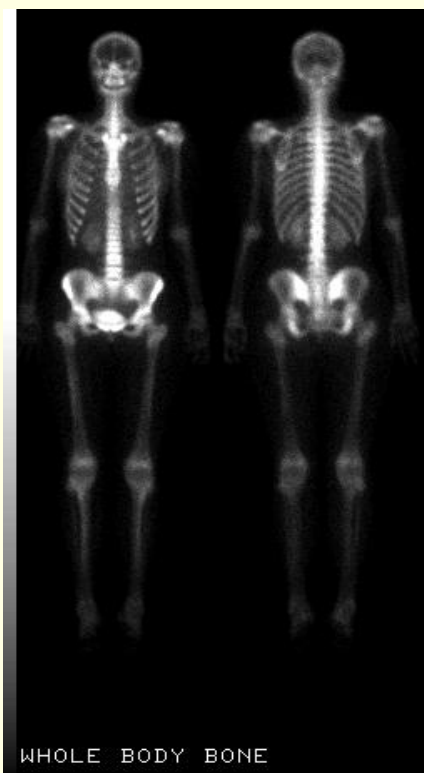
Jednoduché vyšetrovacie metódy

Aplikované rádiofarmakum vstúpi do metabolizmu organizmu, distribuuje sa podľa svojho chemického zloženia a fyziologicky či patologicky sa hromadí v určitých orgánoch a v ich častiach, následne sa vylučuje, resp. presúva sa a ukladá sa inde. Žiarenie gama, emitované podaným a deponovaným rádionuklidom sa detekuje pomocou scintilačného detektora a elektronickej aparatúry so záznamovým zariadením. Získa sa tak mapa rozloženia podanej rádioaktívnej látky v tele pacienta.

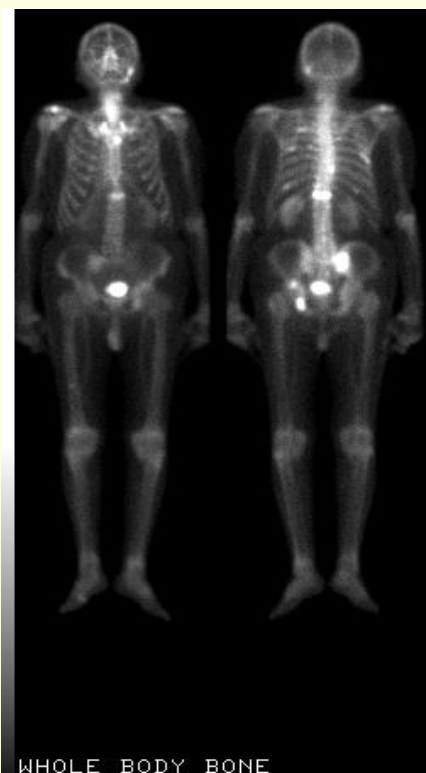
Jednoduché vyšetrovacie metódy a aparatúry sa používajú pri vyšetreniach štítnej žľazy - na zistenie akumuláčnej schopnosti štítnej žľazy, za účelom určenia presnej diagnózy pri funkčných ochoreniach alebo pre výpočet terapeutického množstva aktivity rádiojódu pri karcinóme štítnej žľazy. Rýchlo a jednoducho sa sleduje pomocou nich vylučovacia schopnosť obličiek, niektoré ochorenia urogenitálneho systému, vznik a kinetika trombov, a pod.

Planárne gamagrafické metódy

Tieto metódy už umožňujú okrem sledovania distribúcie rádiofarmák a lokalizácie anomálií v metabolizme tkanív aj kvantitatívne hodnotenie hromadenia a vylučovania rádiofarmák. Matematickým vyhodnotením scintigrafických štúdií môžeme získať krivky časového priebehu distribúcie rádioindikátora a vypočítať dynamické parametre, charakterizujúce funkciu príslušných orgánov. Z nich možno posúdiť funkčné, ale i nádorové ochorenie na metabolickej úrovni. Vyšetrovacia metóda sa nazýva **gamagrafia** či **scintigrafia**. Na obr. 16 je porovnanie gamagrafického zobrazenia skeletu pri negatívnom a pozitívnom náleze.



Obr.16 a Gamagrafické zobrazenie skeletu – negatívny nález

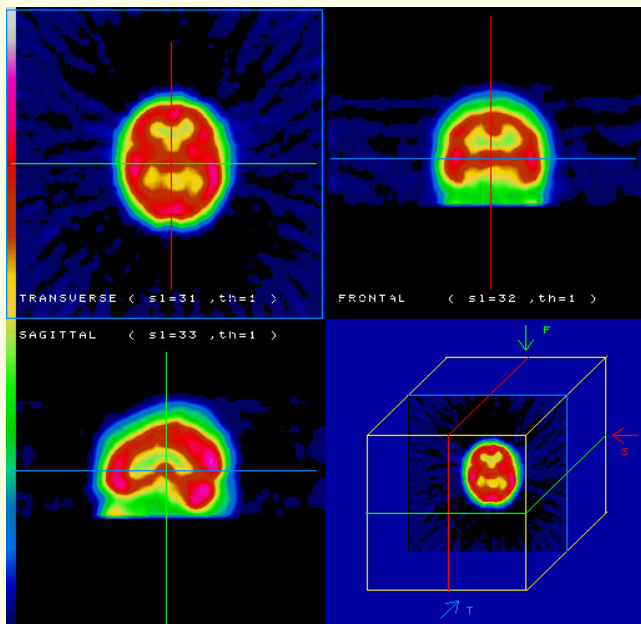


Obr. 16 b Gamagrafické zobrazenie skeletu – pozitívny nález – mnohopočetná kostná metastáza

Diagnostika pomocou SPECT

SPECT - jednofotónová emisná počítačová tomografia - Single Photon Emission Computer Tomography – metóda poskytujúca tomografický obraz orgánu. Základný princíp tejto metódy spočíva opäť zo skutočnosti, že pri rádioaktívnej premene jadier niektorých nuklidov dochádza priamo k vyžarovaniu gama žiarenia. Rádionuklid (vpravený do organizmu príslušným rádiofarmakom) vyžaruje z tela pacienta gama žiarenie a kamery rotujúce okolo pacienta detegujú potom distribúciu tohto žiarenia a zo získaných údajov pomocou počítačového spracovania sa vytvorí trojrozmerné zobrazenie rozmiestnenia rádionuklidovej látky v tele. Pomocou SPECTu sa dajú získať trojrozmerné informácie o tumoroch, o infekciách, dá sa sledovať kostné tkanivo, distribúcia značenej chemickej látky v mozgu pomáha odhaliť napr. demenciu, Alzheimerovu chorobu. Na obr.17 vidíme tomografický obraz mozgu, získaný metódou SPECTu.

Ak **porovnáme princíp** (► Príloha 12) činnosti röntgenovej transmisnej počítačovej tomografie s princípom SPECTu, v prvom prípade ide o transmisiu ionizujúceho žiarenia cez vyšetrovaný orgán s následnou detekciou prejdeho žiarenia, v druhom prípade ide o emisiu ionizujúceho žiarenia zvnútra organizmu a jeho detekciu.



Obr.17 Tomografický obraz mozgu metódou SPECT

Diagnostika pomocou PET

PET - pozitronová emisná tomografia (Positron Emission Tomography) je ďalšia z neinvazívnych tomografických metód nukleárnej medicíny. **Pozitronová emisná** (►Príloha 13) tomografia je založená na časovo súčasnej - **koincidenčnej detekcii fotónov** žiarenia gama s energiou 511 keV, ktoré sú emitované pri anihilácii elektrónu s pozitronom vznikajúcim pri β^+ premene pozitronových žiaričov, aplikovaných do organizmu. Metódou PET je možné sledovať pozitronovými emitormi značkové biologické „indikátorové“ molekuly, ich časové a priestorové rozdelenie a tak sledovať biologické, metabolické, farmakodynamické a farmakokinetické procesy a veľmi presne ich anatomicky lokalizovať.

Základnými biogénnymi prvkami živého organizmu sú uhlík, kyslík, dusík a vodík. Najväčšou prednosťou metódy PET je, že žiaričmi sú aj pozitronové rádionuklidy týchto základných biogénnych prvkov – rádioaktívne izotopy ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O a namiesto vodíka ^{18}F fluor. Takýmto spôsobom je možné zobraziť tkanivá a patologické procesy na metabolicko-biochemickej úrovni. Napríklad pri vyšetrení srdca sa využíva glukóza metabolizujúca sa v srdcovom svale. Aby bola zaznamenaná táto činnosť, glukóza je označená rádionuklidom – fluorom 18.

PET sa používa na diagnostikovanie kardiovaskulárnych chorôb, na vizualizáciu mozgových procesov, pri identifikácii nádorov a metastáz. Nádorové tkanivo vykazuje väčšiu metabolickú aktivitu a preto absorbuje viac rádionuklidu, čo sa prejaví výraznejším obrazom. PET má uplatnenie predovšetkým v onkológii, kardiológii a neurológii, ale ukazuje sa jej potreba napr. aj v rekonštrukčnej chirurgii, neurochirurgii, a pod. Umožňuje kvantitatívne zobrazenie metabolických funkcií a základných biochemických reakcií v živom organizme s vysokou citlivosťou a selektivitou. Trojdimenzionálne zobrazenie pomocou **PET je v prílohe** (►Príloha 14).

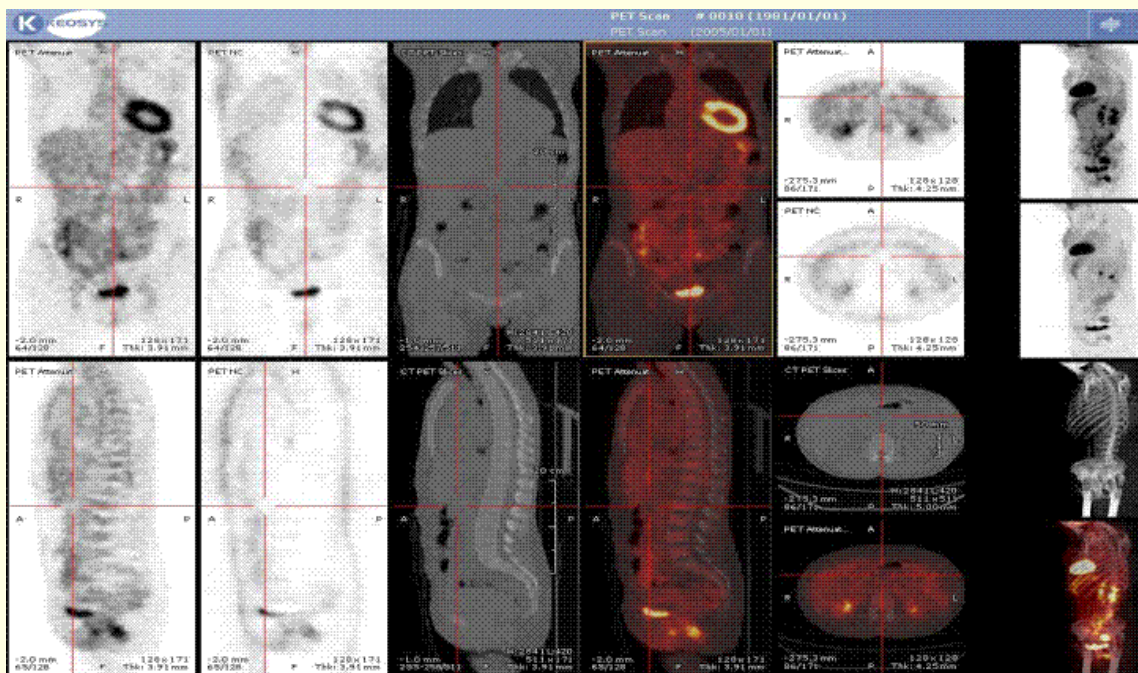
Rozvoj PET-u a jej široké možnosti využitia priniesli revolučné zmeny v klinickej diagnostike, vo výskume mozgu, v metabolickom výskume, ale aj vo výskume a rozvoji liečiv.

Kombinované tomografické metódy

Pri **fúzii** (►Príloha 15) (**koregistrácii**) **nálezov** PET so zobrazenými morfológickými nálezmi pomocou CT alebo MR je možné získať cenné patologicko - morfológické informácie. Metódy nukleárnej medicíny sú nenahraditeľné doplnkové metódy k doteraz používaným

zobrazovacím technikám ako sú magnetická rezonancia (MR) alebo počítačová tomografia (CT). Pomocou pozitronovej emisnej tomografie (PET) sa v mnohých smeroch diagnostiky a liečby dosahujú lepšie výsledky. Kombinované techniky umožňujú presnejšiu lokalizáciu sledovaných lézií. Na obr.18 vidíme fúziu CT a PET vyšetrenia.

Vysoká kvalita zobrazovacích prístrojov, náročnosť technických parametrov, fúzia kvalitných nálezov dnes umožňujú vykonávať vyšetrenia na úrovni molekulárneho zobrazenia.



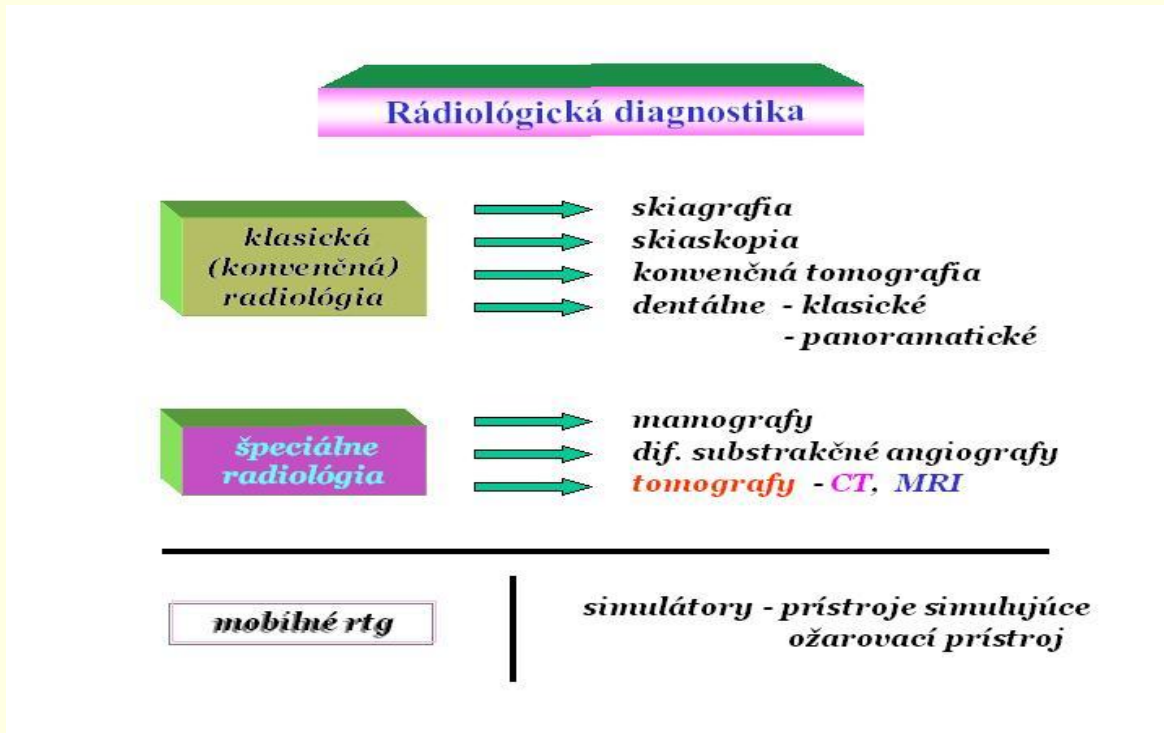
Obr. 18 Fúzia obrazov CT a PET vyšetrení

KONTROLNÉ OTÁZKY

11. Vysvetlite princíp a odlišnosť zobrazovacích diagnostických metód využívajúcich ionizujúce žiarenie.
12. Vymenujte niektoré zobrazovacie metódy založené na využití neionizujúceho žiarenia v medicíne.
13. Aké rádiologické vyšetrovacie metódy poznáme? Zadeľte ich podľa fyzikálnej podstaty, resp. podľa použitej prístrojovej techniky.
14. Čo je počítačová tomografia?
15. Popíšte princíp fungovania počítačovej tomografie!
16. Aký je princíp ultrasonografie?
17. Na akom princípe pracuje dopplerovská ultrasonografia?
18. Aký je fyzikálny princíp magnetickej rezonancie?
19. Čo sú to rádioimunoanalytické metódy?
20. Ako členíme diagnostické in vivo metódy v nukleárnej medicíne?
21. Čo je základný princíp všetkých in vivo diagnostických metód v nukleárnej medicíne?
22. Popíšte gamagrafické vyšetrovacie metódy!
23. Vysvetlite princíp činnosti SPECTu a porovnajte ho s CT zobrazením!
24. Vysvetlite fyzikálny princíp PET zobrazenia!
25. Čo je biologickým princípom pozitronovej emisnej tomografie (PET)?
26. Čo je najväčšou prednosťou diagnostickej metódy PET?
27. Aké kombinované tomografické metódy poznáte?
28. Čo je fúzia (koregistrácia) obrazov?

4 PRÍSTROJOVÁ TECHNIKA V RÁDIODIAGNOSTIKE A V NUKLEÁRNEJ MEDICÍNE

4.1 Diagnostická technika v rádiológii



Obr. 16 Prístrojová technika v rádiologickej diagnostike

Konvenčná rádiológia

Skiagrafia alebo snímkovanie je základná rádiologická zobrazovacia metóda, ktorej podstata je fotografia časti ľudského tela s pomocou röntgenového žiarenia. Je metódou, s ktorou sa pacient stretáva najčastejšie. Na moderných pracoviskách sa dnes už pracuje pomocou digitálnych rádiodiagnostických zariadení ako sú **digitálne skiaskopy** (► Príloha 16), digitálne **röntgenové prístroje** (► Príloha 17) všetkých druhov, vrátane panoramatického **zubného** (► Príloha 18) **röntgenu** (i keď väčšina pracovísk má ešte klasický zubný röntgen), digitálne prístroje pre **mamografické** (► Príloha 19) vyšetrenia, umožňujúce vykonať okrem bežného snímkovania aj vákuovú mamotómiu ambulantnou formou. Klasické röntgenové prístroje sú postupne zamieňané modernými digitalizovanými zobrazovacími technikami, ako je napríklad **röntgenový tomograf** (► Príloha 20).

Pri snímkovaní žiarenie X, prechádzajúce ľudským telom dopadá na fotografický film obsahujúci halogenidy striebra (bromid strieborný) a fotochemickou reakciou dochádza k uvoľneniu striebra. Vzniká latentný obraz, ktorý sa po vyvolaní vo vývojke zviditeľní – hustota sčernenia filmu je úmerná prechádzajúcemu množstvu žiarenia X. Vzniknutý fotografický obraz predstavuje negatívne zobrazenie hustoty tkaniva – miesto s nízkou hustotou (mäkké tkanivo) má nižšiu absorpciu a preto vysoké sčernenie, miesto s vysokou hustotou (napr. kosti) silnejšie absorbuje rtg-žiarenie a je preto na filme zobrazené svetlejšie (s nízkym sčernením).

Pre rtg snímkovanie sa používajú špeciálne filmy, na ktorých je hrubšia emulzia so zvýšeným obsahom halogenidov striebra v porovnaní s bežnými fotografickými materiálmi. Filmy sa vyrábajú v rôznych veľkostiach - cca 2x2 cm (pri zubnej rtg diagnostike) až cca 43x43 cm (snímkovanie pľúc), 96x20 cm (pre chrbticu). Pri vlastnom snímkovaní sú filmy uložené v

špeciálnej **svetlotesnej kazete**. Na okraji kazety sú kovové značky a písmená, ktoré po vyvolaní sú viditeľné aj na filmoch a pomáhajú v geometrickej orientácii a pri identifikácii snímku. Filmy sú vyvolávané v tmavej komore pomocou špeciálnych koncentrovaných vývojkov, poskytujúcich **vysoký kontrast** a sýtosť sčernenia. Procesy vyvolávania, ustáľovania a sušenia sa vykonávajú vo vyvolávacích automatoch. V súčasnosti sa od tohto "mokrého procesu" ustupuje a nahradzuje sa elektronickým snímaním žiarenia a digitalizáciou röntgenového obrazu.

Skiagrafia má dve technické podoby – tzv. **priama** a **nepriama** skiagrafia.

Nepriama skiagrafia v minulosti používala techniku snímkovania zo štítu na princípe flouorádiografie, fotofluorografie. Používala sa najmä na snímkovanie hrudníka pri tuberkulóze, neskôr ako skrínigová metóda tejto choroby. Dnes je nahradená modernejšími, kvalitnejšími metódami s významne nižšou radiačnou záťažou.

Priama skiagrafia s tzv. bezfóliovými snímkami z dôvodu vyššej radiačnej záťaže sa v súčasnosti používa len na snímkovanie zubov. Pri ostatných metódach sa využívajú luminiscenčné zosilovacie fólie, ktoré prevedú rtg-žiarenie na viditeľné svetlo, čo skraca dobu expozície a tým znižujú radiačnú záťaž.

Skiascopia je priame vizuálne zobrazenie röntgenového obrazu na fluorescenčnom tienidle (štít).

Počítačový tomograf

Röntgenka a naproti nej umiestnený detektor röntgenového žiarenia **rotujú** okolo tela pacienta, pričom úzky zväzok röntgenového žiarenia **prežaruje** vyšetřované tkanivo. Intenzita röntgenového žiarenia je detekovaná v závislosti od jeho zoslabenia v dôsledku absorpcie v tkanive a následne prevedená na elektrický signál, ktorý sa vyhodnocuje. Z množstva integrálnych hodnôt získaných prežarovaním z mnohých uhlov 0-360° sa metódou spätnej projekcie vykoná **rekonštrukcia** absorbčnej mapy, čím vznikne denzitný **obraz priečneho rezu** vyšetřovanej oblasti - **tomografický** obraz. Z hľadiska technického prevedenia vyšetřovacích prístrojov je dnes možné rozdeliť **počítačovú tomografiu** (► Príloha 21) na 4 základné typy:

→ **konvenčná počítačová tomografia**

Je to dvojrozmerná zobrazovacia metóda, pri ktorej sa po každom posune vyšetřovacieho stola vyhotoví snímok priečneho rezu telom pacienta. Vyšetřenie je pomalé a prakticky neumožňuje napríklad dynamické štúdie cievneho zásobenia orgánov.

→ **špirálová (helikálna) počítačová tomografia**

Je modernejším typom počítačovej tomografie, vyvinutým na princípe technológie slip-ring (kízávé prstence), ktorá umožňuje prenos dát a energie medzi rotujúcim systémom röntgenka - detektory a samotným prístrojom bez toho, aby bola ich rotácia obmedzovaná spojením dátovými či elektrickými káblami. Samotné snímanie prebieha tak, že pacient je plynulým pohybom vsúvaný do otvoru prístroja, kde rotujú oproti sebe postavená röntgenka a rad detektorov. Ak si tento pohyb znázorníme vzhľadom k pacientovi, výsledkom je niečo, čo sa podobá strune od pera a v geometrii sa nazýva **helix** - z toho vzniklo pomenovanie helikálne CT. Zaužívaný termín „špirálové CT“ (► Príloha 22) nie je presný (špirála je iným geometrickým útvarom). Je to trojrozmerná zobrazovacia metóda, ktorá zbiera dáta z určitého objemu (vyšetřovanej časti tela). Následne sa z týchto dát, ktoré sa označujú ako „surové dáta“ (angl. termín „raw data“), rekonštruujú rezy v požadovaných rovinách. Okrem možností rekonštrukcií rezov v ľubovolnej rovine je veľkou výhodou i rýchlosť - vyšetřenie trvá dosť krátko na to, aby bol pacient schopný zadržať dych.

→ **multidetektorová** (alebo tzv. „**multi-slice**“) **počítačová tomografia** - **MDCT** alebo **MSCT**

Multidetektorová tomografia je najmodernejšia forma počítačovej tomografie. Je to v princípe helikálne CT, ktoré má však namiesto jedného niekoľko radov detektorov (256 až 1000) uložených v prstenci husto vedľa seba v axiálnom (pozdĺžnom) smere - **MDCT** (MultiDetector CT). Primárny zväzok z röntgenky je pomocou kolimátorov usmerňovaný do tvaru lievika (vejára) s uhlom cca 40°, naproti nej je odpovedajúca kruhová výseč so sústavou detektorov.

Pri vhodnom tvarovaní zväzku X-žiarenia z röntgenky to umožňuje súčasné snímanie niekoľkých transverzálnych rezov vedľa seba, vyšetrenie niekoľkých tenkých vrstiev súčasne. Doba snímania 1 rezu sa skraca pod 1 sekundu. Výsledkom je, že helix okolo pacienta sa zahusť 256 až 1000-krát a teda i množstvo a presnosť dát je rádovo vyššia. Hovoríme o "viac-rezových", tzv. **multi-slice CT** (angl. *slice* = rez) - 4, 6, 8, 16, 64 - slice-ových.

→ **tomografia s elektrónovým zväzkom - Electron Beam CT (EBCT)**

Vedľa "klasického" CT s rotujúcou röntgenkou bolo vyvinuté celkom odlišné, fyzikálne zaujímavé riešenie bez röntgenky. Žiarenie X tu vzniká dopadom rýchlych elektrónov, vystreľovaných "**elektrónovým delom**", na kovový terčíkový prstenec - anódu, vo vnútri ktorého je umiestnený vyšetřovaný objekt. Elektrónový lúč z **elektrónového dela** (►Príloha 23) je do požadovaného miesta terčíkového prstenca smerovaný magnetickým vychyľovaním pomocou vychyľovacích cievok, napájaných vhodným elektrickým signálom. Napájaním vychyľovacích cievok striedavým elektrickým prúdom vhodného periodického priebehu elektrónový zväzok rotuje s uhlovou frekvenciou ω a pri tomto kruhovom pohybe postupne zasahuje jednotlivé miesta na obvode terčíkového prstenca. V každom takto zasiahnutom mieste vzniká **brzdé žiarenie X**, prežarujúce vyšetřovaný objekt (telo pacienta) pod odpovedajúcim uhlom. Rotujúci elektrónový zväzok tým generuje rotujúci zdroj žiarenia X po obvode terčíkového prstenca, podobne ako keby rotovala röntgenka. Brzdé žiarenie X prechádza prstencovým kolimátorom s radiálne orientovanými septami, ktoré ho tvarujú do vejárovitého (lievikovitého) zväzku. Toto žiarenie X, ktoré prešlo vyšetřovaným objektom (tkanivom pacienta), je **detekované elektronicky** (rovnako ako u klasickej CT) pomocou prstencovo usporiadaného poľa detektorov, zvnútra prekrývajúcich kolimátor. Pri vhodnom geometrickom usporiadaní septy kolimátora odtieňujú žiarenie X, ktoré by prichádzalo priamo od terčíkového prstenca k zadnej strane jednotlivých detektorov. Novšie typy EBT prístrojov majú niekoľko vedľa seba radených terčíkových prstencov a niekoľko prstencových polí detektorov.

Toto konštrukčné riešenie má dve výhody:

- neobsahuje žiadne mechanicky pohyblivé diely - rotácia lúča je elektromagnetická,
- umožňuje veľmi rýchlu tomografiu, rádovo 25-50 ms - elektromagneticky vychyľovaný zväzok môže rotovať podstatne rýchlejšie, ako je dosiahnuteľné pri mechanickej rotácii. To je výhodné pre sledovanie rýchlych dejov ako je hradlovaná (gatovaná) CT srdca. Nevýhodou je však značná zložitosť a cenová náročnosť zariadenia, preto sa tento typ zariadení zatiaľ do praxe veľmi nerozšíril a ani sa neočakáva v budúcnosti, nakoľko rýchly technický pokrok v konštrukcii vysokorychlostných multidetektorových systémov MDCT (prípadne s 2 röntgenkami) tieto výhody poskytuje tiež a to lacnejšie a pre bežnú prax výhodnejšie.

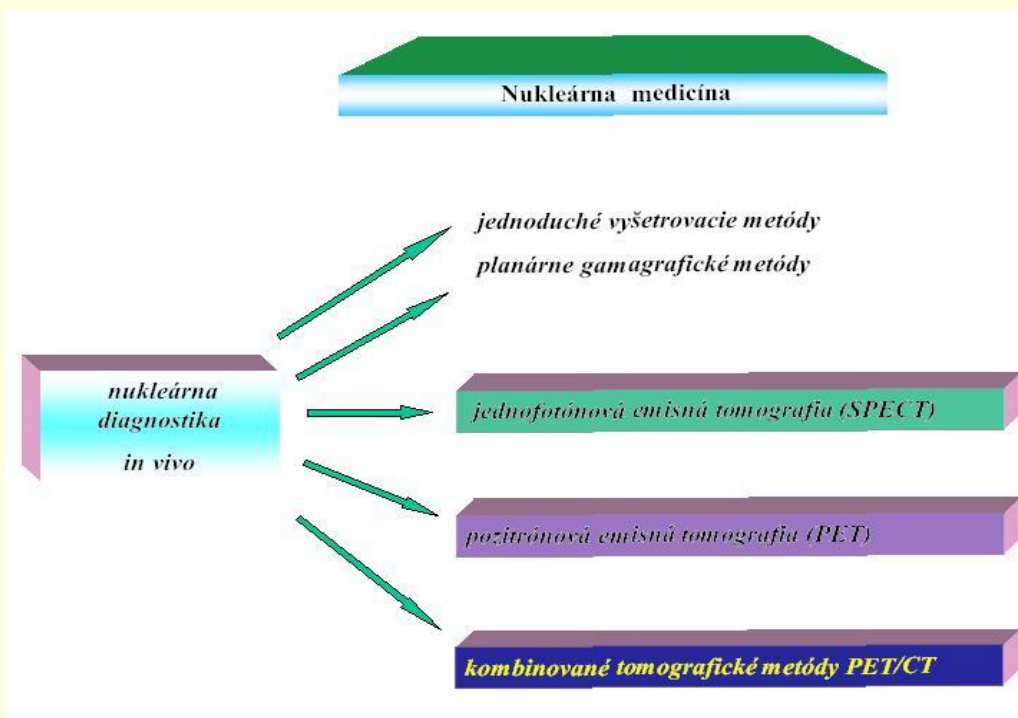
Ultrasonograf

Prístroj sa skladá z generátora ultrazvukových vln a detektora odrazených signálov. Zachytený odrazený signál sa pomocou analógovo-digitálneho prevodníka ďalej spracováva počítačovou technológiou. Súčasné **ultrasonografy** (►Príloha 24) pracujú už s trojdimenzionálnym zobrazením, alebo aj s tzv. 4D zobrazením, kde štvrtým rozmerom je čas. Technológia rekonštrukcie obrazu je analogická ako pri iných tomografických metódach.

Magnetická rezonancia

Základom prístroja **magnetickej rezonancie** (►Príloha 25) je zdroj silného homogénneho magnetického poľa. Môže to byť permanentný magnet, elektromagnet, v súčasnosti najčastejšie supravodivý elektromagnet, chladený tekutým héliom. Magnetická indukcia tohto poľa má hodnotu od 0,1 do 3 T. Priestorovo-geometrické kódovanie súradníc vo vyšetřovanom objekte je dosiahnuté superponovaním prídavného gradientného magnetického poľa, vytváraného dvojicami gradientných cievok. Celé zariadenie je kvôli tieneniu umiestnené vo Faradayovej klietke, aby sa zabránilo interferencii s iným elektromagnetickým vlnením.

4.2 Zobrazovacie a iné detekčné prístroje v nukleárnej medicíne



Obr. 17 Prehľad metód a prístrojovej techniky v nukleárnej medicíne pri diagnostických in vivo metódach

Jednoduché detekčné systémy

Základ vyšetrovacej techniky tvorí **scintilačný detektor**, ktorý sníma emisiu gama-žiarenia z vyšetrovaného objektu po aplikácii rádioaktívnych látok.. Tento **princíp** (► Príloha 26) je využívaný pri všetkých typoch nukleárno-medicínskych vyšetrení v menej zložitej či zložitejšej vyšetrovacej technike.

Najstarším vyšetrovacím prístrojom založeným na tomto princípe bol pohybový gamagraf s jednootvorovým kolimátorom. Detektor sa pohyboval nad pacientom meandrovitým pohybom a pohybové záznamové zariadenie (písatko) zaznamenávalo miesto vyslaného žiarenia. Mapa distribúcie rádioaktívnej látky v tele pacienta zodpovedá tak získanému planárnemu obrazu a to v skutočnej veľkosti sledovanej lézie.

Ďalším jednoduchým vyšetrovacím prístrojom je jednokanálová scintilačná súprava (zv. „jednokanáľ“), pozostávajúca z detektora so širokým kolimátorom, umiestneným na dlhom pohyblivom vysúvacom ramene, z jedno- resp. dvojkanálovej elektronickej jednotky pre spracovanie signálov (počítadlo zaznamenaných impulzov).

Gamakamery

Zdokonalenými zariadeniami, ktoré sú založené na rovnakom princípe, sú **gamakamery** (tzv. scintilačné kamery). Gamakamery sú vybavené výkonnou počítačovou technikou.

Gamakamera (► Príloha 27) pozostáva z veľkoplošného scintilačného detektora - monokryštálu jodidu sodného aktivovaného táliom - NaI(Tl). Nad monokryštálom sa nachádza niekoľko desiatok fotonásobičov (ozn. PMT – photomultiplier tube) – v moderných gamakamerách ich býva 80 až 100. Kvôli zlepšeniu optického kontaktu medzi kryštálom a fotonásobičom sa občas používa svetlovodič.

Interakciou fotónov gama-žiarenia s kryštálom vzniká scintilácia (záblesk) - svetelné fotóny sa šíria v kryštále všetkými smermi. Fotóny vystupujúce z kryštálu dopadajú na fotonásobič. Najviac svetla sa zachytí fotonásobičom, ktorý je najbližšie k miestu vzniku. Na výstupe fotonásobiča vznikne impulz, ktorého amplitúda je väčšia ako u vzdialených fotonásobičov. Na

základe hodnotenia odozvy všetkých fotonásobičov sa určia výsledné súradnice scintilácie [X,Y].

Súčasne s určením polohy scintilácie sa vykoná aj analýza intenzity scintilácie, ktorá pri scintilačných kryštáloch odpovedá energii gama-žiarenia absorbovaného v scintilátore – generuje sa signál označovaný ako Z. Tento proces zabezpečujú tzv. sumačné obvody, ktoré sčítajú veľkosti odoziev jednotlivých fotonásobičov. Takto vytvorený signál vstupuje do amplitúdového analyzátora. Pri každom záblesku je určená jeho poloha a energia fotónu gama-žiarenia, ktorý záblesk vyvolal. Ak energia fotónu spadá do užívateľom prednastaveného energetického okna, je tento impulz zaznamenaný v obrazovej matici na mieste o súradniciach [X,Y]. Poloha scintilácie v kryštále odpovedá (pri použití kolimátora) určitej polohe miesta emisie fotónu z tela pacienta a obraz v počítači je verným obrazom týchto miest. Zachycuje sa rozloženie rádiofarmaka v tele pacienta, vzniká planárny obraz.

Tieto systémy však neposkytujú presné, anatomicky hodnotiteľné informácie. Dostaneme len planárnu, 2-dimenzionálnu anatomickú mapu rozloženia rádionuklidov v tele – klasická nukleárna medicína – neumožňuje 3-rozmernú kvantifikáciu. Obrovské množstvo informácií, pomocou ktorých nám rádionuklidy prezrádzajú tajomstvá ľudského organizmu pri 3-dimenzionálnom zobrazení, vieme kvantifikovať len od r. 1975 – od vyvinutia prvého pozitronového emisného tomografu, resp. od presného chápania a využitia tomografického princípu, od 1980.

SPECT

Základom je gamakamera s možnosťou rotácie okolo záujmovej oblasti. Moderné prístroje pre **SPECT** (►Príloha 28) majú 2 až 3. resp. aj 4 detekčné hlavy. Detektory sa otáčajú okolo pacienta po malých uhloch alebo plynulo. Na základe snímaného gama-žiarenia pomocou príslušnej elektroniky vytvárajú obrazy (projekcie), ktoré sa ukladajú do pamäti počítača. Z veľkého počtu projekcií sa rekonštruje trojrozmerný obraz vo vyšetrovanej oblasti, z ktorého je možné vyhotoviť tomografické vrstvy (rezy) s rozložením rádioaktívnej látky v tkanive.

PET

PET - kamera je sústava desiatok tisíc (18432 ks a viac) miniatúrnych detektorov, usporiadaných do prstenca. Každý z nich je zapojený do koincidencie s niekoľkými protilaňými detektormi. Získa sa tak súbor projekcií vyšetrovanej časti tela z mnohých uhlov. Z týchto projekcií - obdobne ako u SPECTu – sa rekonštruje obraz distribúcie pozitronového žiariča vo vyšetrovanej oblasti. Detektory **PET-kamery** (►Príloha 29) nemajú mnohooťvorové kolimátory ako klasické gamakamery - kolimácia sa zabezpečuje elektronickou cestou, čo dáva podstatne vyššiu citlivosť PET-u v porovnaní so SPECT-om.

Základom PET-kamery sú scintilačné detektory BGO (trigermaničitan tetrabizmutitý - $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, najnovšie LSO = lutetium oxyorthosilicate) a fotonásobiče. Detektory majú rozmery rádovo mm, hrúbky desiatky mm (typický rozmer je 8,5x9,8x30).

Podstatnou podmienkou úspešnosti tejto významnej diagnostickej metódy je dostupnosť vhodných pozitronových žiaričov. Potrebné rádionuklidy na diagnostiku ale aj liečbu viacerých druhov ochorení sa produkujú v cyklotróne – kruhovom urýchľovači častíc. Nakoľko ide o rádionuklidy s veľmi krátkou strednou dobou života (od 3 minút -kyslík ^{15}O , až po fluór ^{18}F – 173 minút) je potrebné riešiť promptnú distribúciu rádionuklidov na pracoviská nukleárnej medicíny. V Bratislave sa nachádza takýto **cyklotrón** (►Príloha 30) v Cyklotrónovom centre SR v areáli Slovenského metrologického ústavu.

Kombinovaná zobrazovacia technika SPECT/CT a PET/CT

V súčasnosti najdokonalejšou technikou **kombinácie** (►Príloha 31) rádiologických a nukleárno-medicínskych zobrazení sú zariadenia obsahujúce súčasne aj zdroje röntgenového

žiarenia s príslušnou detekčnou technikou (CT) a detekčný systém pre jednofotónovú emisnú tomografiu (SPECT), resp. pre pozitronovú anihiláciu (PET) - tieto prístroje nesú názov **SPECT/CT** resp. **PET/CT**. Oproti samostatnému skenovaniu s CT a následne nezávisle s PET, po ktorých nasleduje časovo náročná fúzia obrazov, kombinované vyšetrovacie zariadenie umožňuje vykonať obidva skeny v jednom „sedení s pacientom“ bez anatomicko-morfologických zmien, ktoré by mohol spôsobiť časový odsun jednotlivých vyšetrení a zmena klinického stavu pacienta.

KONTROLNÉ OTÁZKY

29. Čo je základným prístrojom konvenčnej rádiológie?
30. Čo je to mamografia?
31. Aké druhy CT poznáme? Aká je odlišnosť medzi nimi?
32. Čo je základom prístroja magnetickej rezonancie?
33. Z čoho pozostáva gamakamera?
34. Aké je prístrojové vybavenie jednofotónovej emisnej počítačovej tomografie (SPECT)?
35. Popíšte princíp PET-kamery!
36. Aká je odlišnosť medzi SPECT a PET?
37. Čo je SPECT/CT resp. PET/CT?

SÚHRN

Pre **diagnostické účely** sa ionizujúce žiarenie využíva pri všetkých druhoch ochorení, sledovaných pomocou moderných **zobrazovacích metód - v rádiologickej diagnostike** (starý názov rádiodiagnostika, röntgendiagnostika) a v **nukleárnej medicíne** (aplikácia otvorených žiaričov).

Pre **terapeutické účely** sa ionizujúce žiarenie využíva v podobe uzavretých žiaričov v odbore **rádioterapia** a v podobe otvorených žiaričov v **nukleárnej medicíne**.

Röntgenové žiarenie je elektromagnetické žiarenie v rozsahu vlnovej dĺžky 1 nm až 100 pm. Vzniká prudkým zabrzdением urýchlených elektrónov (brzdové žiarenie) alebo prechodom elektrónov na nižšie energetické hladiny v atóme (charakteristické žiarenie). Základným zdrojom röntgenového žiarenia je **röntgenová trubica**, ďalej niektoré **rádionuklidy**, vyskytuje sa však aj pri **urýchľovačoch** nabitých častíc.

Princípom nukleárnej medicíny je vpraviť do živého organizmu **rádionuklid**, rádioizotopom označenú molekulu chemickej substancie. Rádionuklidy naviazané na rôzne chemické substancie - tzv. **rádiofarmaká** - sa aplikujú intravenózne alebo perorálne pacientom za účelom diagnostiky alebo liečby rôznych funkčných a nádorových ochorení.

Tomografia - je vyšetrovací postup, pri ktorom sa zobrazí len zvolená vrstva tkaniva v hĺbke tela bez rušivého vplyvu okolitého tkaniva, susediaceho so záujmovou oblasťou. Tomografické zobrazenie je tvorené určitými primárne transverzálnymi **rezmí**, ich väčší počet vytvára trojrozmerný obraz.

Rádiologická diagnostika sa delí podľa prístrojovej techniky a fyzikálnej podstaty zobrazovacích metód na: **konvenčnú** rádiológiu (*skiaskopia, skiagrafia, konvenčná tomografia*) a **špeciálnu** rádiológiu (*vákuová mamotómia, röntgenové vyšetrenia s použitím kontrastných látok*), **počítačovú tomografiu**, ultrasonografiu a magnetickú rezonanciu.

Nukleárno-medicínska diagnostika sa delí na dve v zásade rozdielne skupiny vyšetrení – **in vivo** a **in vitro**.

Základom diagnostických **in vitro** vyšetrení sú rádiosaturačné analýzy - **rádioimunoanalytické metódy (RIA)** - slúžiace k stanoveniu prítomnosti a koncentrácie hormónov a ich metabolitov a tumormarkerov.

Diagnostické **in vivo** metódy v nukleárnej medicíne sú: jednoduché a planárne **gamagrafické metódy, SPECT a PET.**

SPECT - jednofotónová emisná počítačová tomografia - Single Photon Emission Computer Tomography – metóda poskytujúca tomografický obraz orgánu. Rádionuklid vyžaruje z tela pacienta gama žiarenie a kamery rotujúce okolo pacienta detegujú potom distribúciu tohto žiarenia a zo získaných údajov pomocou počítačového spracovania sa vytvorí trojrozmerné zobrazenie rozmiestnenia rádionuklidovej látky v tele.

PET - pozitronová emisná tomografia (Positron Emission Tomography) je založená na časovo súčasnej - **koincidenčnej detekcii fotónov** žiarenia gama s energiou 511 keV, ktoré sú emitované pri anihilácii elektrónu s pozitronom vznikajúcim pri β^+ premene pozitronových žiaričov, aplikovaných do organizmu.

Pri **fúzii (koregistrácii) nálezov PET** so zobrazenými morfológickými nálezmi pomocou CT alebo MR je možné získať cenné patologicko - morfológické informácie.

Základnými prístrojmi konvenčnej rádiológie sú **röntgenové** prístroje s postupne digitalizovanými zobrazovacími technikami.

Základný princíp počítačových tomografov je rotácia röntgenky a detektora okolo tela pacienta. Rozlišujeme 4 typy tomografov: **konvenčný, špirálový** (helikálny), **multidetektorový** (multi-slice), **tomograf s elektrónovým zväzkom.**

Základ vyšetrovacej techniky v nukleárnej medicíne tvorí **scintilačný detektor**, ktorý sníma emisiu gama-žiarenia z vyšetrovaného objektu po aplikácii rádioaktívnych látok.

Gamakamera pozostáva z veľkoplošného scintilačného detektora - monokryštálu jodidu sodného aktivovaného táliom - NaI(Tl). Nad monokryštálom sa nachádza niekoľko desiatok fotonásobičov. Takto vytvorený signál vstupuje do amplitúdového analyzátora.

Pri **SPECTe** je základom prístrojového vybavenia gamakamera s možnosťou rotácie okolo záujmovej oblasti. Moderné prístroje pre SPECT majú 2 až 3. resp. aj 4 detekčné hlavy.

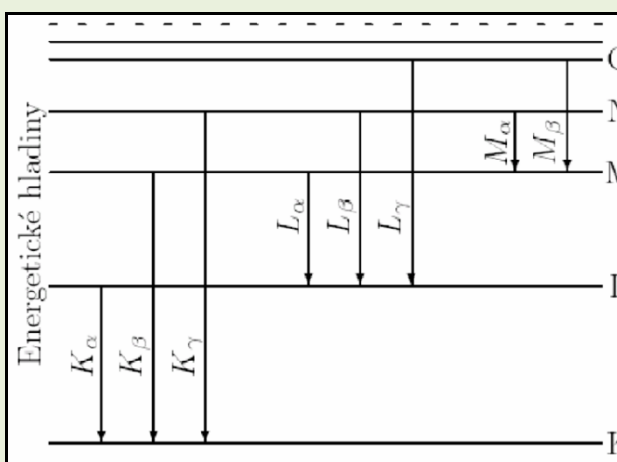
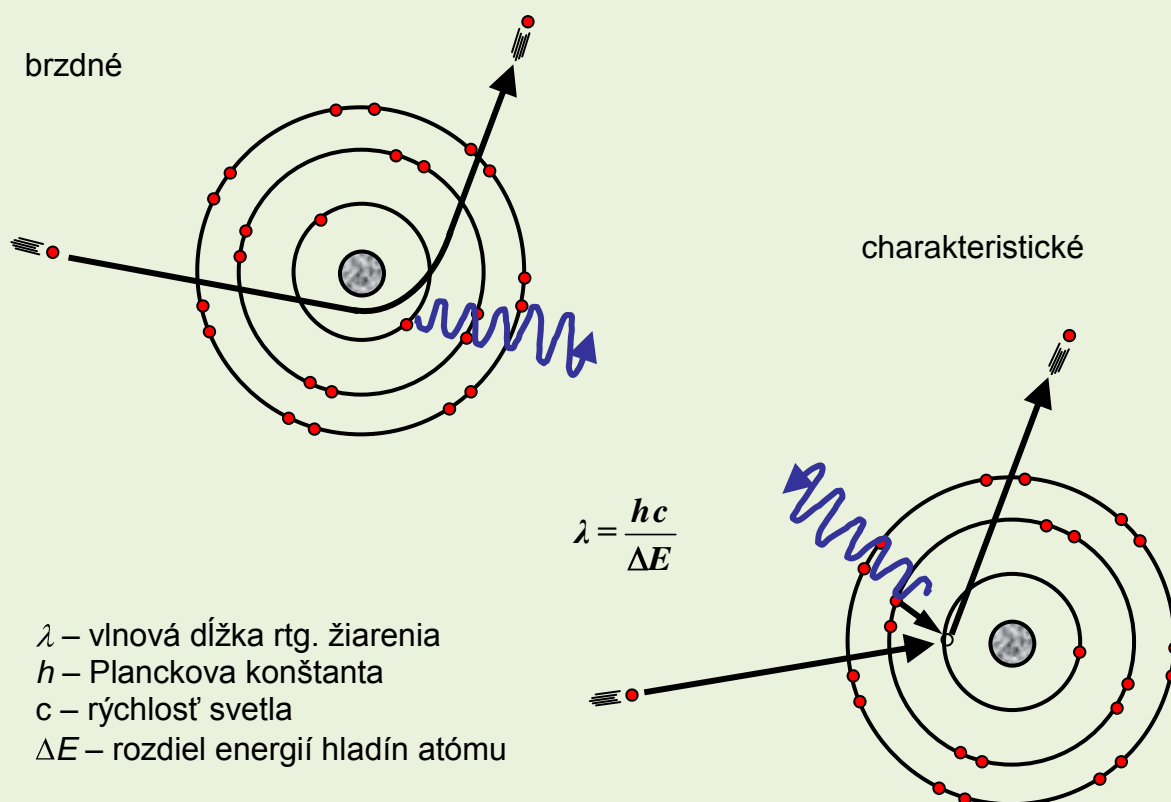
PET – kamera je sústava desiatok tisíc miniatúrnych detektorov, usporiadaných do prstenca. Každý z nich je zapojený do koincidencie s niekoľkými protiľahlými detektormi.

Ako detektory sa používajú scintilačné detektory BGO, LSO.

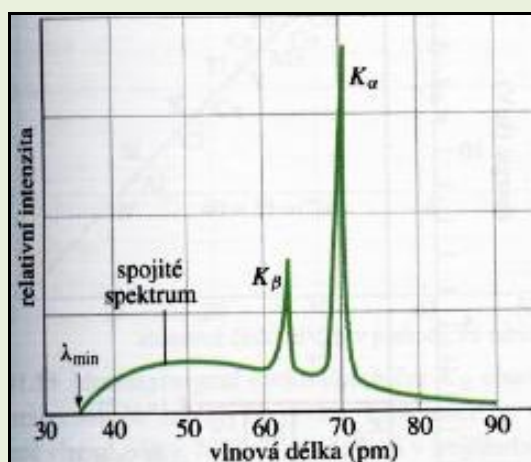


Návrat z acrobat readera - ❌ (zatvorením okna)

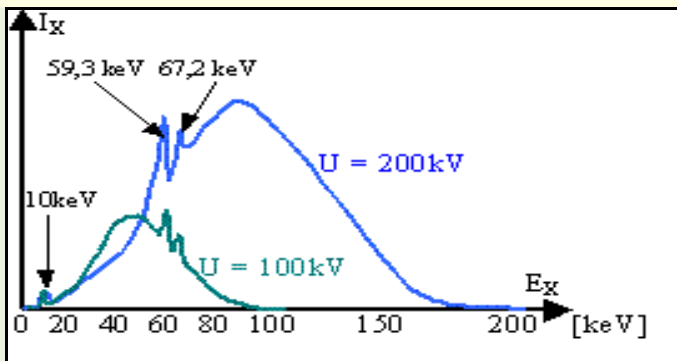
VZNIK RÖNTGENOVÉHO ŽIARENIA A JEHO SPEKTRÁ



Energetické hladiny elektrónového obalu atómu



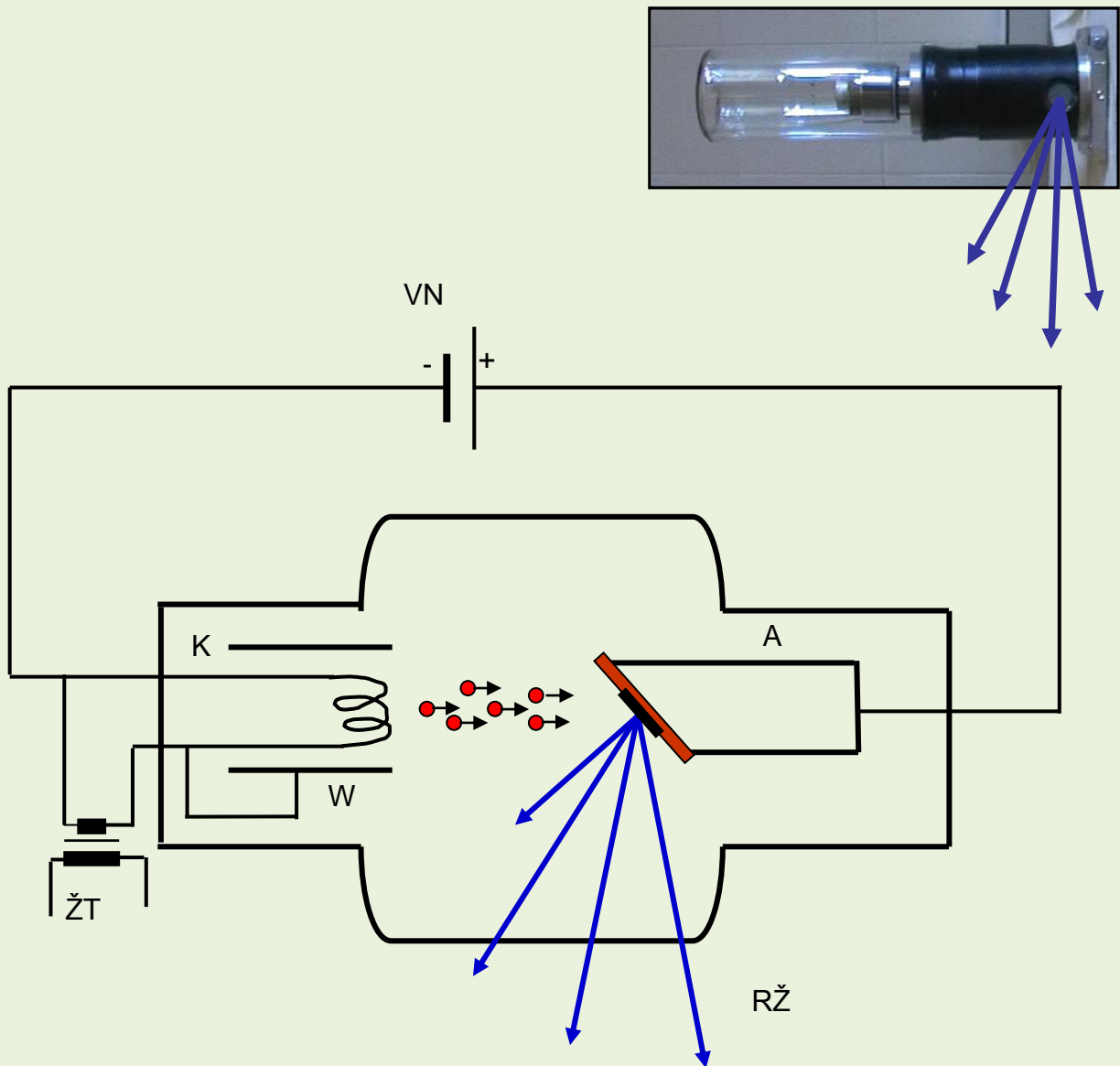
Závislosť relatívnej intenzity žiarenia od vlnovej dĺžky



Energetické spektrum röntgenového žiarenia

← Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

SCHÉMA RÖNTGENOVEJ LAMPY



A – anóda K – katóda
W – Wehneltov valec VN – zdroj vysokého napätia
RŽ – röntgenové žiarenie ŽT – žeraviaci transformátor

APLIKÁCIA NIEKTORÝCH RÁDIOFARMÁK V NUKLEÁRNEJ MEDICÍNE A RADIČNÁ ZÁŤAŽ PACIENTOV

Vyšetrenie	Rádiofarmakum	Aplikovaná aktivita [MBq]	Dávka v najviac zaťaženom orgáne [mGy]	Efektívna dávka [mSv]
scintigr. kostí	^{99m} Tc-fosfáty	600	37,8 – kostná dreň	3,0
stat. scint. obličiek	^{99m} Tc-DMSA	160	27,2 – obličky	1,4
dyn. scint. obličiek	^{99m} Tc-DTPA	400	26,0 – moč. mechúr	2,1
	^{99m} Tc-MAG3	300	33,0 – moč. mechúr	2,0
renografia	¹³¹ I- hippuran	1	0,96 – obličky	0,053
vyš. perfúzie mozgu	^{99m} Tc-HMPAO	800	27,2 - obličky	7,5
scintigr. myokardu	²⁰¹ Tl-chlorid	80	44,8 – varlatá, obličky	18,4
zobraz. zápalov a nádorov	⁶⁷ Ga-citrát	200	177 – povrchy kostí	22,0
scint. štítnej žľazy	^{99m} TcO ₄	200	12,4 – hrubé črevo	2,4
cholescintigrafia	^{99m} Tc-HIDA	150	16,6 - žlčník	2,25
perf. scint. pľúc	^{99m} Tc-MAA	100	6,7 - pľúca	1,1
PET	¹⁸ F-FDG	370	- mozog	2-8



Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

ZOZNAM DIAGNOSTICKÝCH RÁDIOFARMÁK

Nasledujúci zoznam obsahuje kategórie ATC klasifikačného systému, prípadne do nich zaradené lieky.

V09A Centrálny nervový systém

- V09AA Technécium (99mTc) zlúčeniny
- V09AA01 Technécium (99mTc) exametazim
- V09AA02 Technécium (99mTc) bicisát
- V09AB Jód (123I) zlúčeniny
- V09AB01 Jód jofetamín (123I)
- V09AB02 Jód joloprid (123I)
- V09AB03 Jód joflupan (123I)
- V09AX Iné rádiofarmaceutické diagnostiká centrálného nervového systému
- V09AX01 Indium (111In) kyselina pentetová
- V09AX02 Fludeoxyglukóza (18F)

V09B Skeleton

- V09BA Technécium (99mTc) zlúčeniny
- V09BA01 Technécium (99mTc) oxidrónová kyselina
- V09BA02 Technécium (99mTc) medronová kyselina
- V09BA03 Technécium (99mTc) pyrofosfát
- V09BA04 Technécium (99mTc) butedrónová kyselina

V09C Renálny (obličkový) systém

- V09CA Technécium (99mTc) zlúčeniny
- V09CA01 Technécium (99mTc) kyselina pentetová
- V09CA02 Technécium (99mTc) sukcimér
- V09CA03 Technécium (99mTc) mertiatid
- V09CA04 Technécium (99mTc) gluceptát
- V09CA05 Technécium (99mTc) glukonát
- V09CX Iné rádiofarmaceutické diagnostiká renálneho systému
- V09CX01 Nátriumjodohipurát (123I)
- V09CX02 Nátriumjodohipurát (131I)
- V09CX03 Nátriumjotalamát (125I)
- V09CX04 Chrómiumedetát (51Cr)

V09D Hepatálny a retikuloendoteliálny systém

- V09DA Technécium (99mTc) zlúčeniny
- V09DA01 Technécium (99mTc) disafenín
- V09DA02 Technécium (99mTc) etifenín
- V09DA03 Technécium (99mTc) lidofenín
- V09DA04 Technécium (99mTc) mebrofenín
- V09DA05 Technécium (99mTc) galtifenín
- V09DB Technécium (99mTc) častice a koloidy
- V09DB01 Technécium (99mTc) nanokoloid
- V09DB02 Technécium (99mTc) mikrokoloid
- V09DB03 Technécium (99mTc) milimikrosféry
- V09DB04 Technécium (99mTc) koloid cínu
- V09DB05 Technécium (99mTc) koloid síry
- V09DB06 Technécium (99mTc) koloid réniumsulfidu

V09DB07 Technécium (99mTc) fytát

V09DX Iné rádiofarmaceutické diagnostiká hepatálneho a retikuloendoteliálneho systému

V09DX01 Selén (75Se) tauroselcolová kyselina

V09E Respiračný systém

V09EA Technécium (99mTc) inhalanciá

V09EA01 Technécium (99mTc) pentetová kyselina

V09EA02 Technécium (99mTc) technický plyn

V09EA03 Technécium (99mTc) nanokoloid

V09EB Technécium (99mTc) častice na injekciu

V09EB01 Technécium (99mTc)

V09EB02 Technécium (99mTc) mikročastice

V09EX Iné rádiofarmaceutické diagnostiká respiračného systému

V09EX01 Kryptó (81Kr) plyn

V09EX02 Xenón (127Xe)

V09EX03 Xenón (133Xe)

V09F Štítina žľaza

V09FX Rôzne rádiofarmaceutické diagnostiká štítnej žľazy

V09FX01 Technécium (99mTc) pertechnetát

V09FX02 Jodid sodný (123J)

V09FX03 Jodid sodný (131J)

V09G Kardiovaskulárny systém

V09GA Technécium (99mTc) zlúčeniny

V09GA01 Technécium (99mTc) sestamib

V09GA02 Technécium (99mTc) tetrafosmin

V09GA03 Technécium (99mTc) teboroxim

V09GA04 Technécium (99mTc) ľudský albumín

V09GA05 Technécium (99mTc) furifosmin

V09GA06 Technécium (99mTc) cínatým činidlom značené bunky

V09GA07 Technécium (99mTc) acitid

V09GB Jód (125I) zlúčeniny

V09GB01 Fibrinogén (125I)

V09GB02 Jód (125I) ľudský albumín

V09GX Iné rádiofarmaceutické diagnostiká kardiovaskulárneho systému

V09GX01 Tálium (201Tl) chlorid

V09GX02 Indium (111In) imciromab

V09GX03 Chróm (51Cr) chrómnanom značené bunky

V09H Detekcia zápalu a infekcie

V09HA Technécium (99mTc) zlúčeniny

V09HA01 Technécium (99mTc) ľudský imunoglobulín

V09HA02 Technécium (99mTc) exametazimom značené bunky

V09HA03 Technécium (99mTc) antigranulocytové protilátky

V09HA04 Technécium (99mTc) sulesomab

V09HB Indium (111In) zlúčeniny

V09HB01 Indium (111In) oxinátom značené bunky

V09HB02 Indium (111In) tropolonátom značené bunky

V09HX Iné rádiofarmaceutické diagnostiká na detekciu zápalu a infekcie

V09HX01 Gálium (67Ga) citrát

V09I Detekcia nádorov

V09IA Technécium (99mTc) zlúčeniny

V09IA01 Technécium (99mTc) antiCarcinoEmbryonicAntigénové protilátky

V09IA02 Technécium (99mTc) antimelanómové protilátky

V09IA03 Technécium (99mTc) pentavalentný sukcinát

V09IA04 Technécium (99mTc) votumumab

V09IA05 Technécium (99mTc) depreotid
V09IA06 Technécium (99mTc) arcitumomab
V09IB Indium (111In) zlúčeniny
V09IB01 Indium (111In) pentetretid
V09IB02 Indium (111In) satumomab pendetid
V09IB03 Indium (111In) protilátky proti karcinómu ovária
V09IB04 Indium (111In) kapromab pendetid
V09IX Iné rádiofarmaceutické diagnostiká na detekciu nádorov
V09IX01 Jobenguan (123I)
V09IX02 Jobenguan (131I)
V09IX03 Jód (125I) CC49-monoklonálne protilátky

V09X Iné rádiofarmaceutické diagnostiká

V09XA Jód (131I) zlúčeniny
V09XA01 Jód (131I) norcholesterol
V09XA02 Jodocholesterol (131I)
V09XA03 Jód (131I) ľudský albumín
V09XX Rôzne rádiofarmaceutické diagnostiká
V09XX01 Kobalt (57Co) kyanokobalamín
V09XX02 Kobalt (58Co) kyanokobalamín
V09XX03 Selén (75Se) norcholesterol
V09XX04 Železitý (59Fe) citrát



Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

PREHĽAD ZOBRAZOVACÍCH METÓD ZALOŽENÝCH NA TOMOGRAFII

Porovnanie zobrazovacích tomografických metód

	CT	MRI	SPECT	PET
Fyzikálny princíp	rtg. lúče	Nukleárna magnetická rezonancia	Jednofotónová emisia	Pozitrónová emisia, koincidenčná detekcia
Nuklidy, izotopy		^1H , ^{23}Na , ^{31}P	^{123}I , ^{131}I , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{133}Xe	^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F
Rozlíšenie [mm]	1	1	5	3



Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

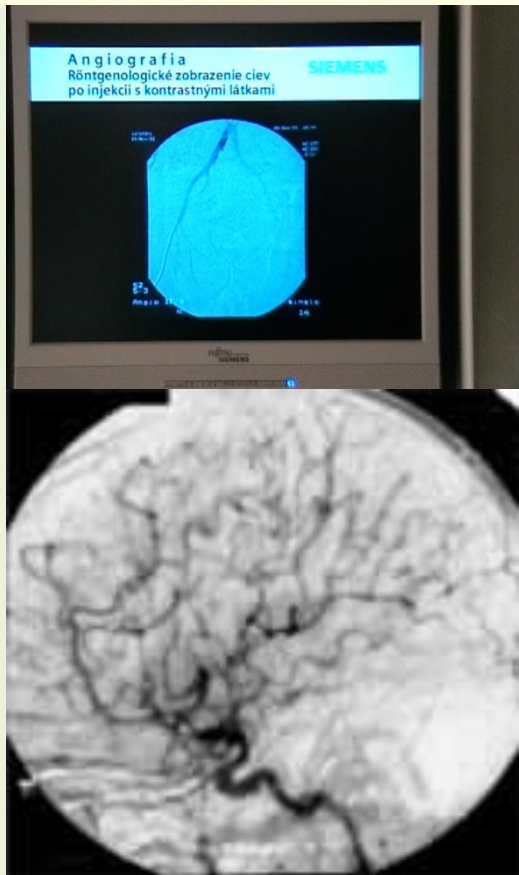
RÖNTGENOVÉ SNÍMKY HRUDNÍKA, ZUBOV A RTG. ANGIOGRAFIA



Röntgenový snímok hrudníka



Panoramatické snímky zubov

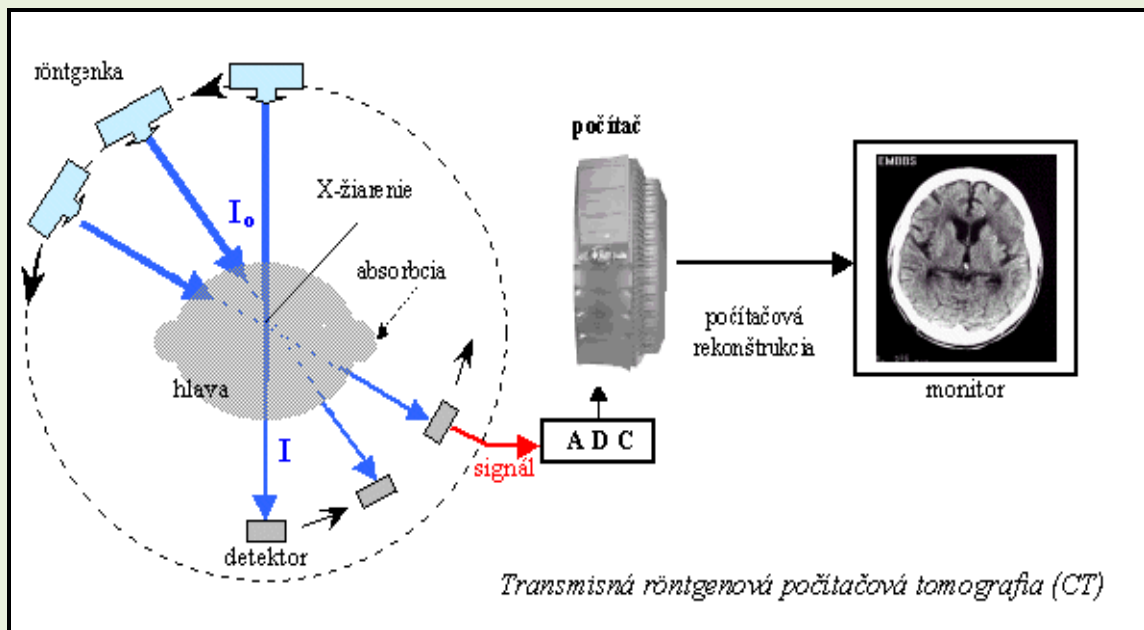
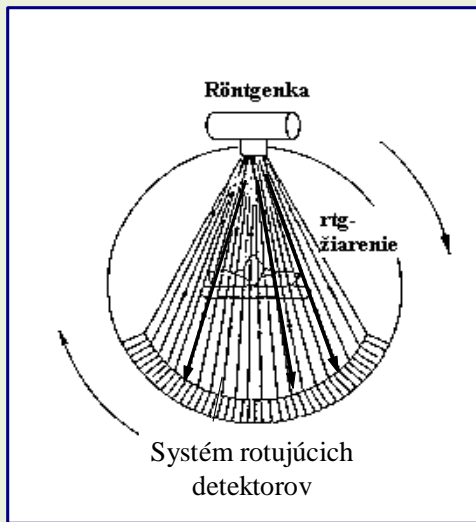


Angiografia - röntgenologické zobrazenie ciev



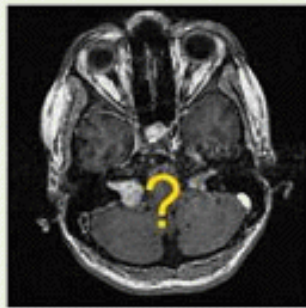
Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

TRANSMISNÁ RÖNTGENOVÁ POČÍTAČOVÁ TOMOGRAFIA



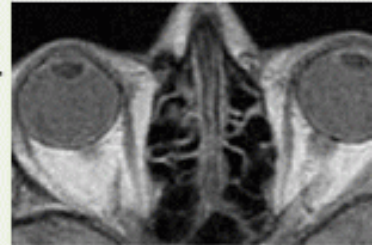
Princíp transmisnej röntgenovej počítačovej tomografie - CT

CT SNÍMKY OČÍ A MOZGU

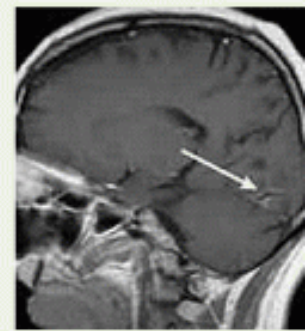
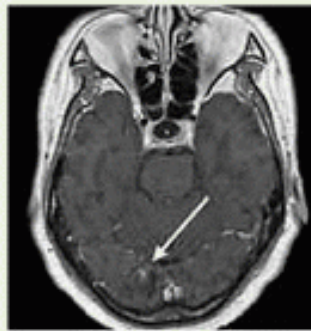
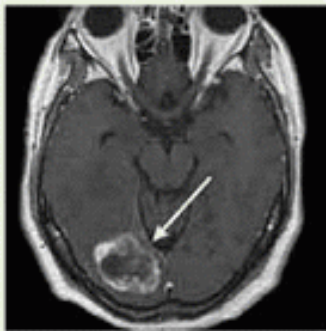


CT mozgu

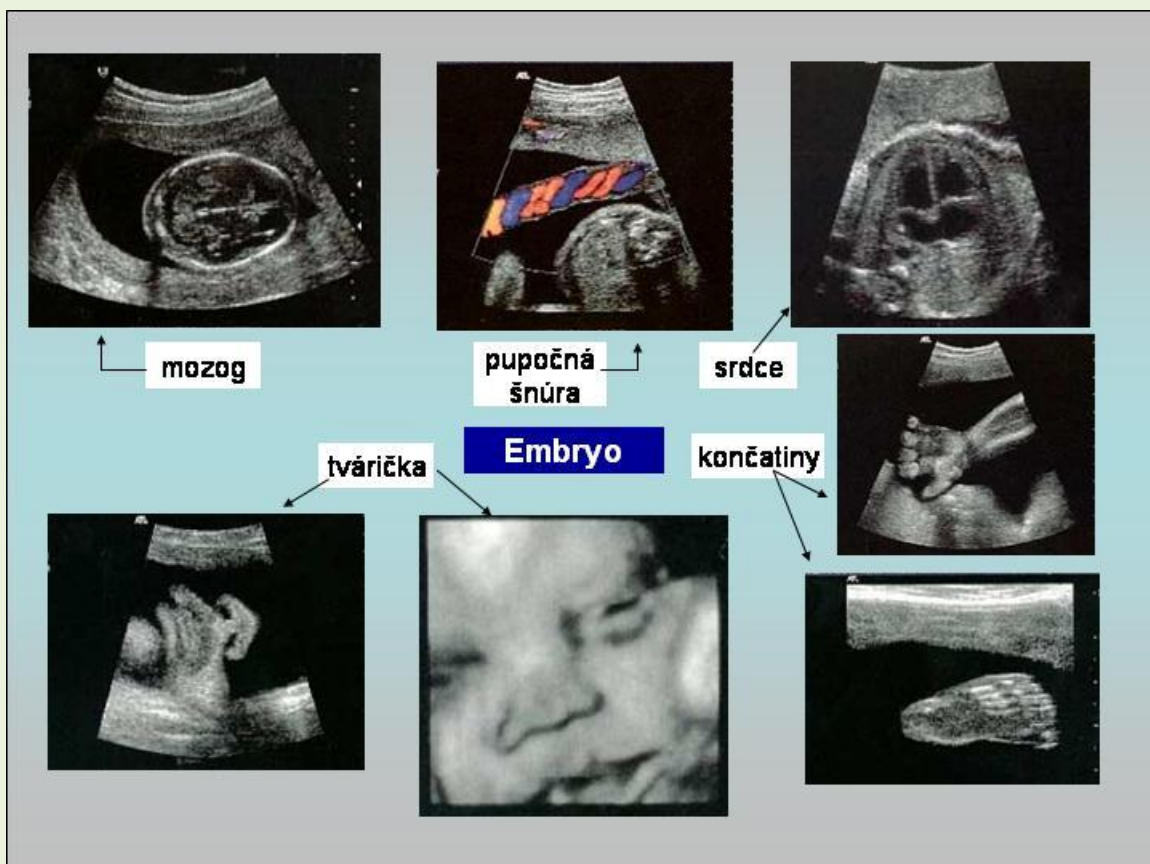
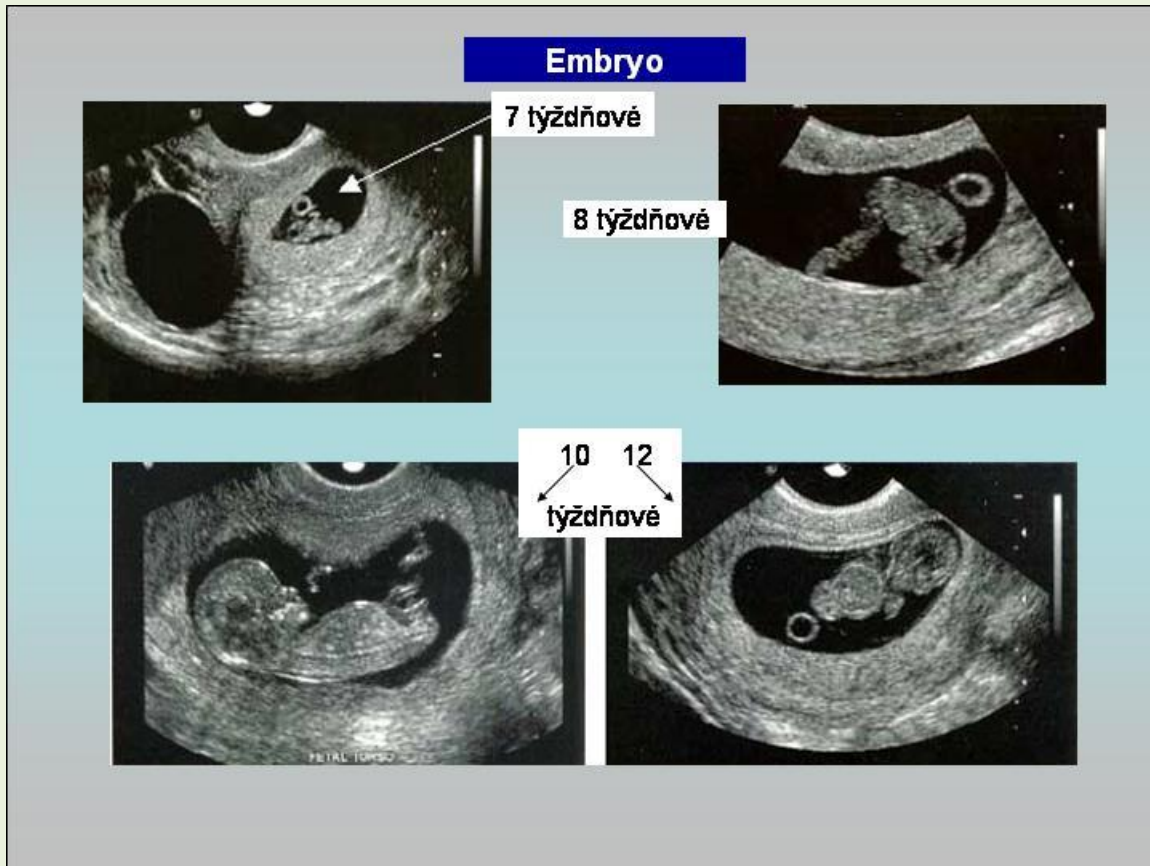
CT očí



CT - metastázy v mozgu



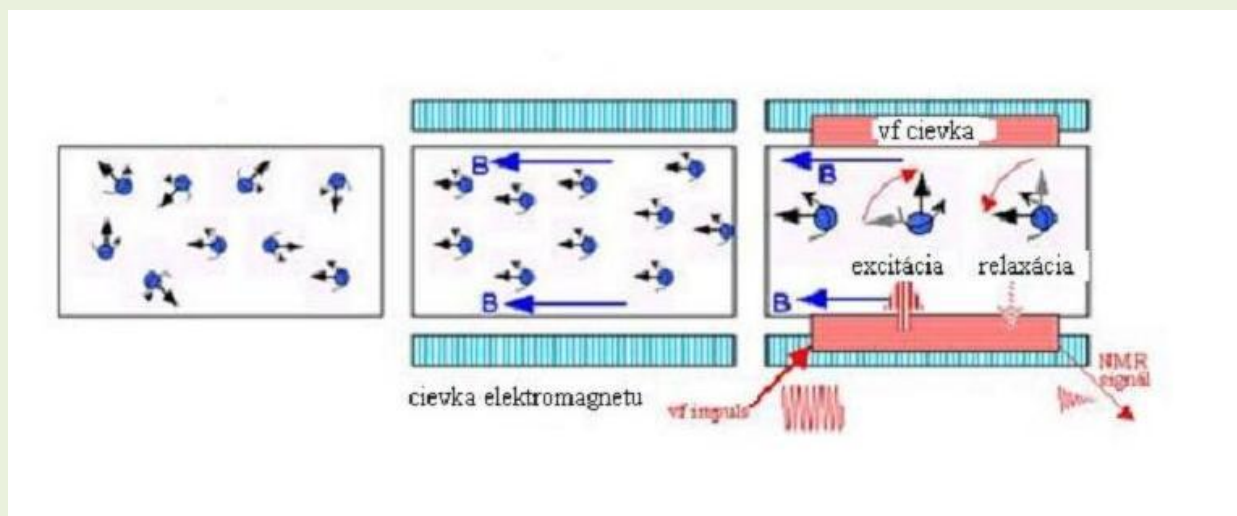
SNÍMKY Z ULTRASONOGRAFIE



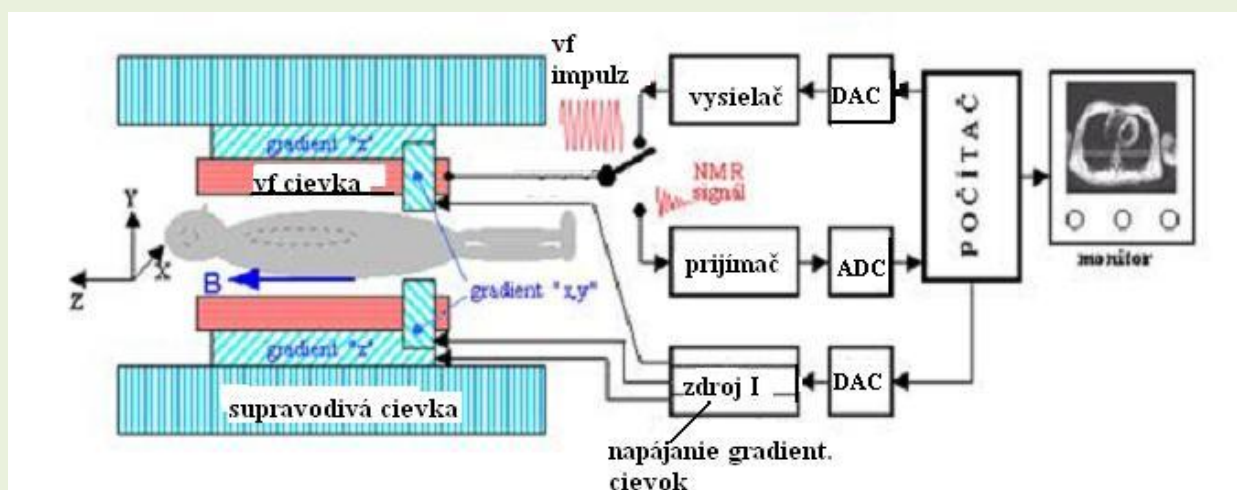


Návrat z přílohy pomocí: Alt + ←

MAGNETICKÁ REZONANCIA

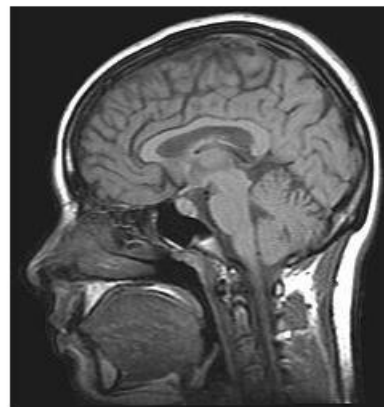
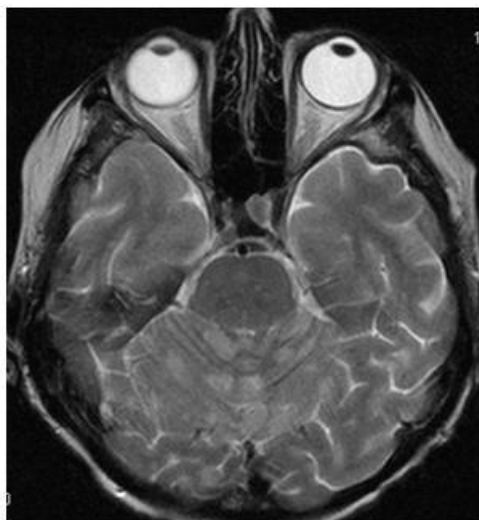


Princíp nukleárnej magnetickej rezonancie



Princíp zobrazovacej metódy magnetickej rezonancie

SNÍMKY Z MAGNETICKEJ REZONANCIE



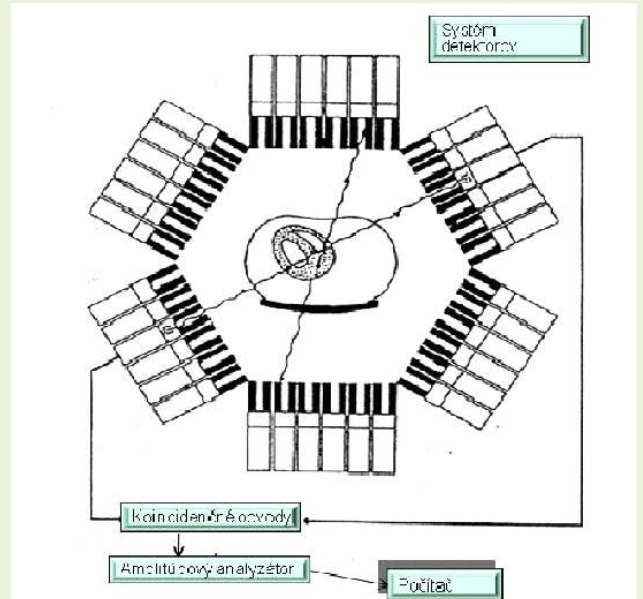
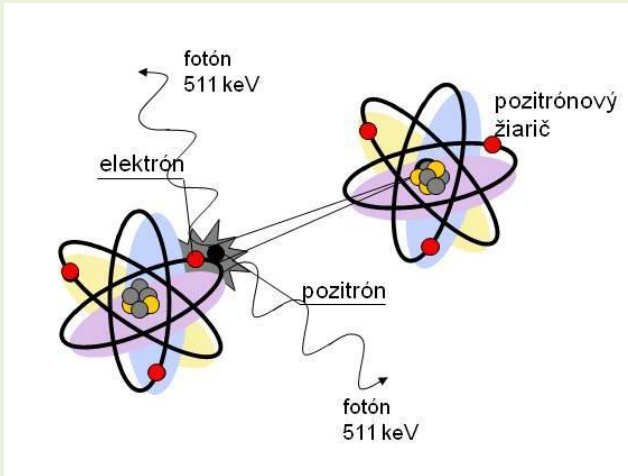
MRI – rez ľudskou hlavou

T₂ vážený obraz mozgu s metastázami
rakoviny prsníka. Sekvencia typu TSE.



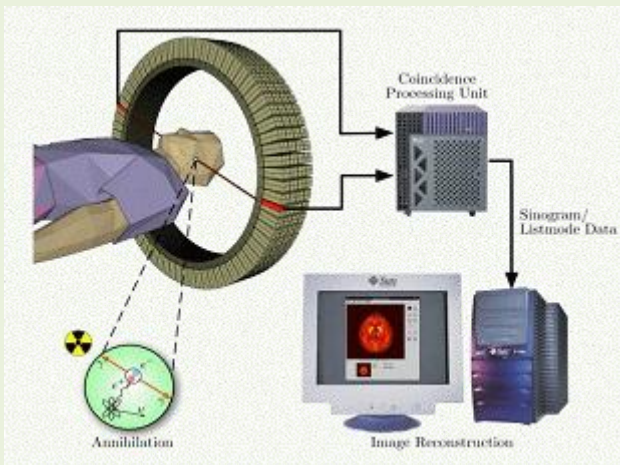
Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

PRINCÍP PET



Anihilácia elektrónu s protónom a vznik dvoch fotónov

Systém koincidenčnej detekcie fotónov

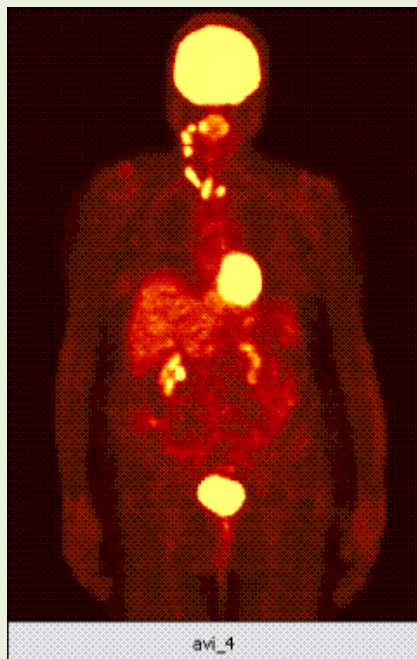
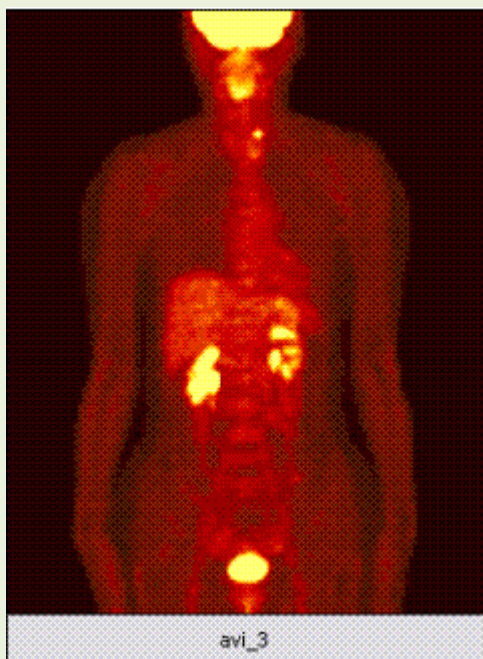
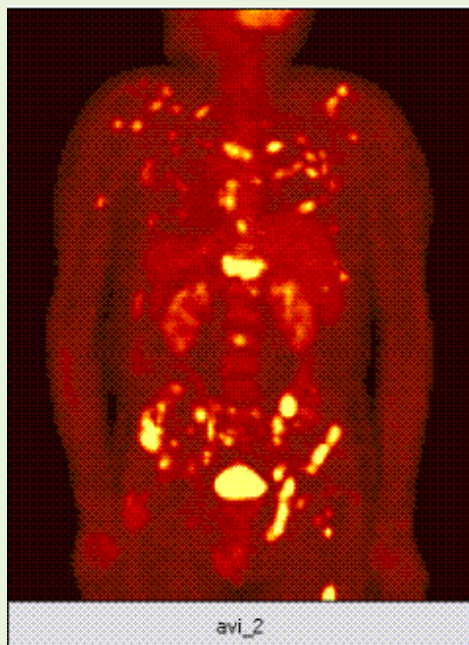
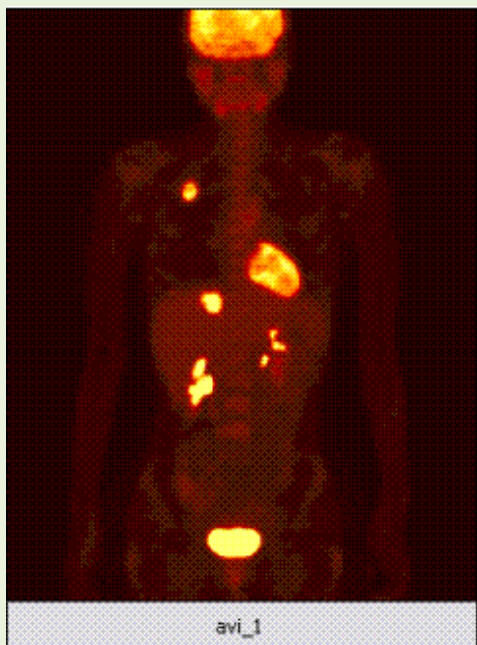


Princíp pozitronovej emisnej tomografie - PET



Registrácia páru fotónov s 511 keV pri anihilácii pozitronu s elektrónom vo vyznačenom priestore medzi dvomi scintilačnými detektormi

3 D ZOBRAZENIE POMOCOU PET KAMERY

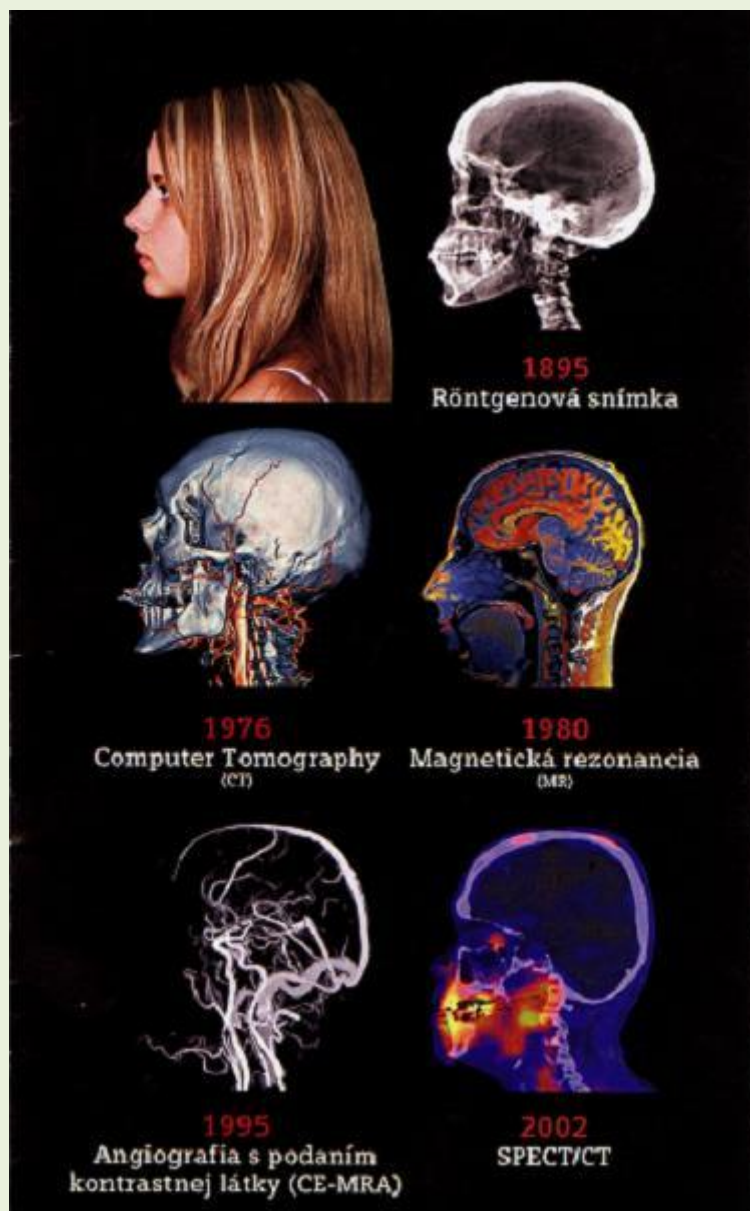


(3D animácia uvedených 4 prípadov je spustiteľná zo vstupného menu tohto dokumentu)



Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

POROVNANIE SNÍMOK RÔZNYCH ZOBRAZOVACÍCH METÓD A FÚZIA NÁLEZOV



Porovnanie rôznych zobrazovacích metód

CT



PET



fúzia CT+ PET



Fúzia CT + PET



Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

KONVENČNÉ RÖNTGENOVÉ PRÍSTROJE



Klasický konvenčný skiagraf



Skiaskopia - digitálna multifunkčná sklopná stena na pracovisku OUSA v Bratislave



Ovládacía miestnosť ku skiaskopickému pracovisku

DIGITÁLNY RÖNTGEN



Digitálny röntgen na pracovisku OUSA v Bratislave

← Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

ZUBNÝ RÖNTGEN



Klasický zubný röntgen



Klasický zubný röntgen (vpravo) a panoramatický zubný röntgen (vľavo)

MAMOGRAFY



Mamografy



Mamograf na pracovisku OUSA v Bratislave



Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

RÖNTGENOVÝ TOMOGRAF



Röntgenový tomograf



Návrat z přílohy pomocí: Alt + ←

Počítačový TOMOGRAF (CT)

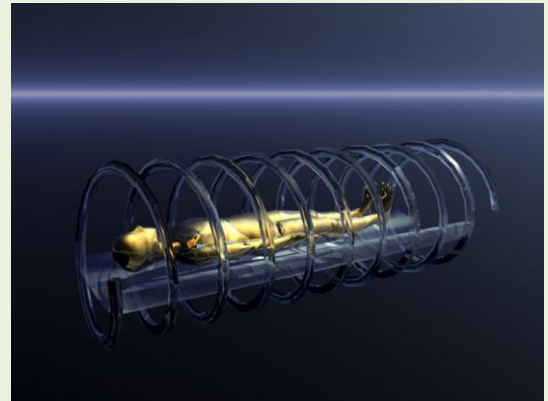
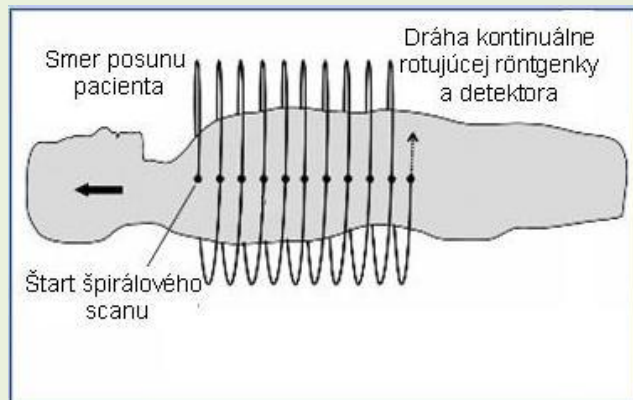


Počítačový tomograf (CT) a ovládacia kabína röntgenologického pracovníka



Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

ŠPIRÁLOVÉ CT



← Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

SCHÉMA ELEKTRÓNOVÉHO DELA

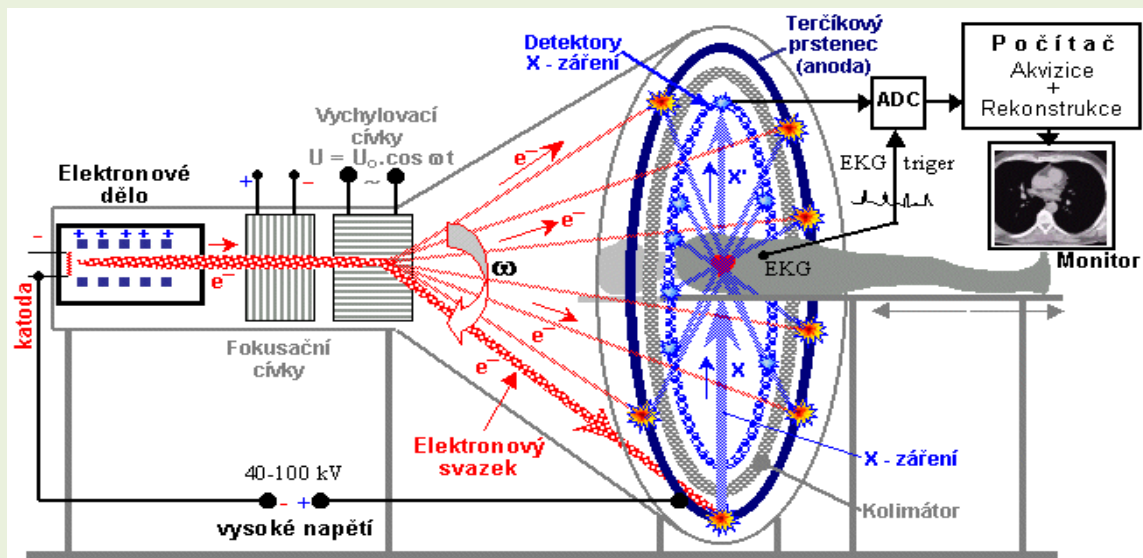


Schéma využitia elektrónového dela v rádiologickej diagnostike

ULTRASONOGRAF



Návrat z přílohy pomocí: Alt + ←

MAGNETICKÁ REZONANCIA

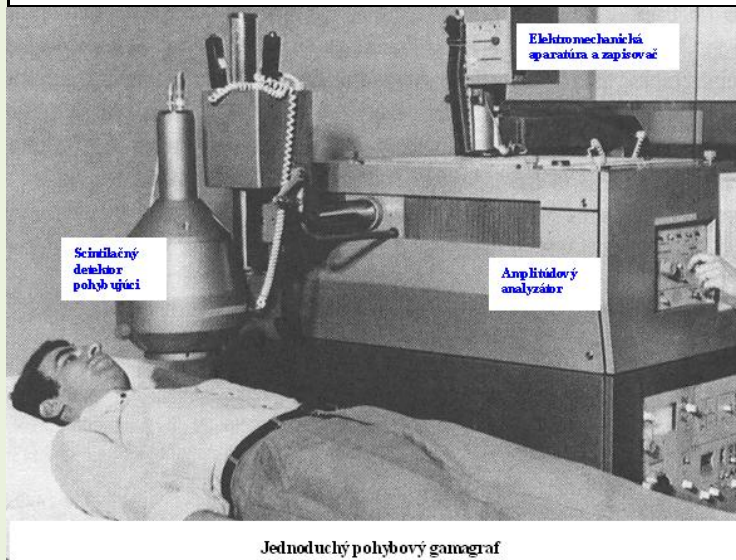
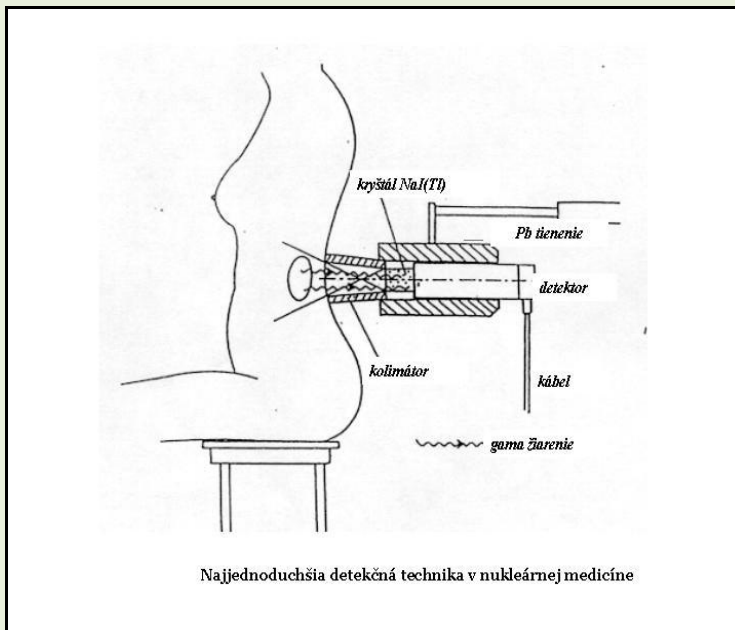


Zariadenie magnetickej rezonancie



Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

ZÁKLADNÉ DETEKČNÉ TECHNIKY V NUKLEÁRNEJ MEDICÍNE

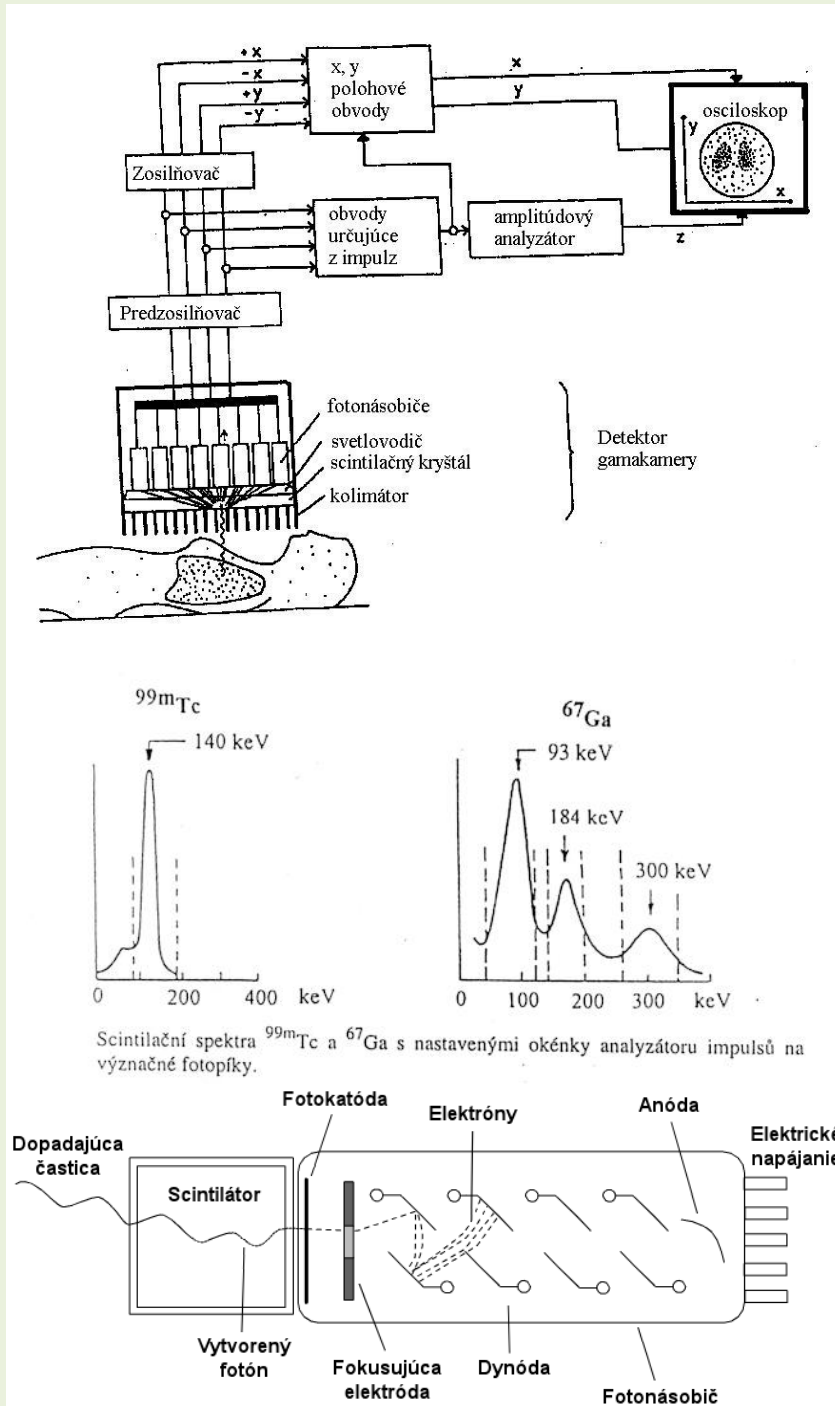


Scintilačný detektor - základ vyšetrovacej techniky v nukleárnej medicíne



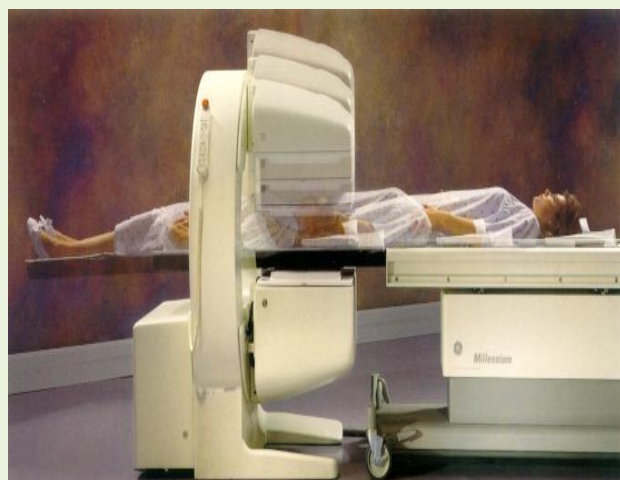
Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

GAMAKAMERA



Princíp činnosti scintilačného detektora, fotonásobiča a analyzátoru impulzov v gamakamerách

SPECT KAMERY

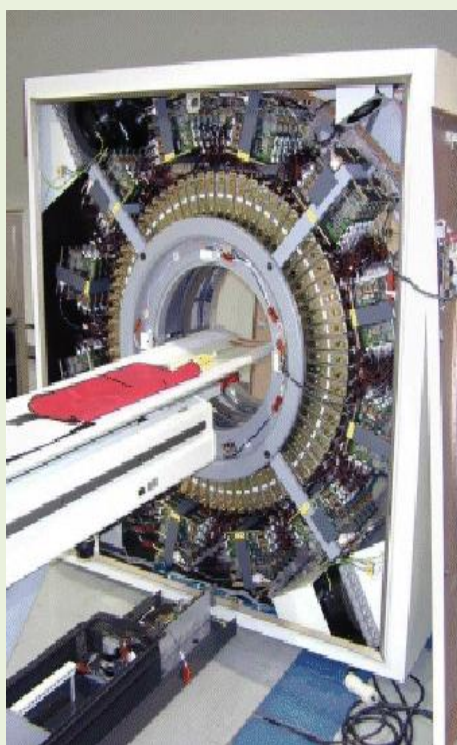
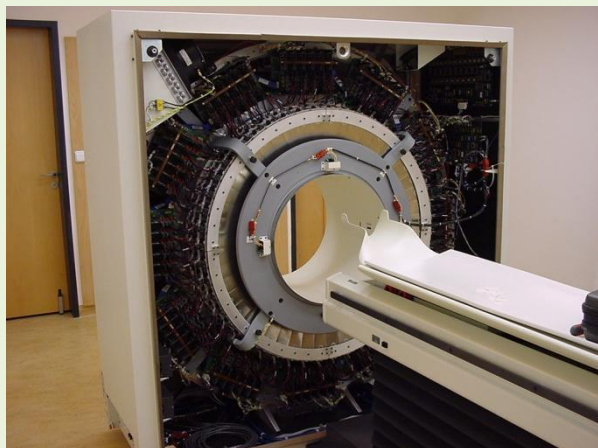


Jednofotónová emisná počítačová tomografia
Single Photon Emission Computer Tomography - SPECT



Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

PET KAMERY



Pohľad dovnútra PET kamery



Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

CYKLOTRÓN



Cyklotrónové centrum SR – areál SMÚ v Bratislave



Cyklotrón IBA Cyclone 18



Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

KOMBINOVANÉ TECHNIKY



Kombinované zobrazovací
techniky PET +CT

