

# Přehled biofyziky

MUDr. Otto Lang, PhD.

lang@fnkv.cz

## Stavba hmoty

- Hmoty má duální charakter
- Látky
  - Převážně korpuskulární charakter
  - Soubory základních částic, makroskopické soustavy, kosmická tělesa, atd.
  - Základní částice - **fermiony**
    - Nenulová klidová hmotnost (energie), rychlost menší než rychlost světla, poločíselný spin, vylučovací princip

## Stavba hmoty

- Pole
  - Převážně vlnový charakter
  - elektromagnetické, gravitační, jaderné, mezonové atd.
  - **Bosony** – základní kvantum elmg pole (foton)
    - Nulová klidová hmotnost, rychlost světla, celočíselný spin – neplatí vylučovací princip
- Mezi základními složkami hmoty působí vzájemné síly – silové interakce

## Silové interakce

- Elektromagnetická interakce
  - Silové působení částic s elektrickým nábojem
- Silná interakce
  - Působí v jádře atomu
- Slabá interakce
  - Působí v jádře atomu (rozpad neutronů)
- Gravitační interakce
  - Působí mezi všemi hmotnými částicemi

## Fyzikální veličiny

- Hmotnost, energie, hybnost apod.
- V izolované soustavě platí zákon o jejich zachování
- V makrosvětě se jeví spojitě
- V mikrosvětě jsou nespojitě
  - Mohou nabývat jen určitých hodnot

## Základní částice

- Fotony
  - Kvanta elmg pole, nulová klidová hmotnost, spin = 1, rychlost světla
- Leptony
  - Lehké částice (elektron, mion, neutrina a jejich antičástice)
- Hadrony
  - Těžké částice (nukleony – protony, neutrony; mezony)

## Skupenské stavy hmoty

- Skupenství (fáze) látek
  - Plynné, kapalné, pevné, plazmatické
  - Vlastnosti plynou z velikosti síly, kterou jsou k sobě atomy a molekuly poutány
  - Pevná látka
    - Zachovává si objem a tvar (při dané teplotě a tlaku)
  - Kapalina
    - Zachovává pouze objem
  - Plyn
    - Přijímá tvar i objem své nádoby

## Plyny

- Dokonale mísitelné, směs je vždy plyn
- Dobře stlačitelné
- Parciální tlak
  - Tlak plynu ve směsi
  - Celkový tlak je dán součtem parciálních tlaků
- Kinetická energie molekul je úměrná teplotě
- Difuzní výměna plynů velmi rychlá
  - dýchání

## Kapaliny

- Velmi málo stlačitelné
- Izotropní – ve všech směrech stejné vlastnosti
  - Výjimka – tekuté krystaly (anizotropní), molekuly bílkovin ve svalu (mezomorfní stav)
  - Výhoda – zachování možnosti difuze (kapalina) i struktury (pevná látka)

## Pevné látky

- Atomy a molekuly prostorově uspořádány – krystalická mřížka
- Molekulové krystaly – slabá síla
- Iontové krystaly – větší síla (elektrostatická)
- Kovy – volný pohyb elektronů
- Atomový krystal – největší síla (kvalentní)
- Vrstevnaté krystaly
  - Pevná vazba ve vrstvě, slabá mezi vrstvami
    - grafit

## Změny skupenství

- Dodávání nebo odebírání energie
- Tání a tuhnutí
  - Zvyšování kinetické energie s teplotou
    - Rozpad krystalické mřížky
- Vypařování a kondenzace
  - Rovnováha kapaliny a páry při určité teplotě a tlaku
- Sublimace
  - Přechod molekul z pevné fáze do plynné

## Disperzní systémy

- Soustava nejméně dvou složek
- Disperzní podíl
  - Nespojitá fáze
- Disperzní prostředí
  - Spojitá fáze – nespojitá je v ní rozptýlena
- Veškerá vodná prostředí lidského těla
  - Krev, extracelulární i intracelulární prostředí
- Homogenní – obě složky mají stejnou fázi
- Heterogenní – dvě fáze, vzniká rozhraní

## Disperzní systémy

- Analytické
  - Velikost částic do 1 nm
  - Směsi plynů, kapalin
- Koloidní
  - Velikost částic 1 nm – 1  $\mu$ m
  - Aerosoly, krevní plazma,
- Hrubé
  - Velikost částic 1  $\mu$ m – 1 mm
  - Mlha, kouř, suspenze (krev)

## Koloidní disperze

- Disperzní prostředí je kapalné
  - Největší význam v biologii
  - Koloidní částice
    - Bílkoviny, polysacharidy, nukleové kyseliny
  - Koloidní roztoky
    - Částice se samovolně obklopují molekulami rozpouštědla (ve vodě hydrofilní)
- Koagulace
  - Spojování koloidních částic – zánik koloidního roztoku

## Elektrické vlastnosti koloid. roztoků

- Koloidní částice mají na svém povrchu elektrický náboj
- V jeho okolí se hromadí ionty rozpouštědla s opačným znaménkem
- Vytvářejí elektrickou dvojvrstvu
- Elektroforéza
  - Pohyb nabitých částic v kapalném prostředí vlivem zevního elektrického pole
  - Využívá se při dělení směsí nabitých částic
    - Bílkovin, lipidů, buněk

## Dělení složek kol. roztoků

- Dialýza
  - Difuze malých molekul z koloidního roztoku přes dialyzační membránu do čistého rozpouštědla
  - Hemodialýza
  - Peritoneální dialýza
- Ultrafiltrace
  - Filtrace přes membrány s různou propustností
  - Rozdělování podle velikosti částic

## Hrubé disperze

- Suspenze
  - Tuhé látky v kapalném prostředí
    - Pasty, masti; krev; makroagregát albuminu
- Emulze
  - Dvě nemísitelné kapaliny
    - Krémy; mléko; emulze tuků se žlučovými kyselinami v tenkém stěvě
- Aerosol
  - Tuhé látky nebo kapaliny ve vzduchu
    - Kouř, smog; aerosol DTPA

## Voda

- Ideální polární rozpouštědlo
- Převážná část hmotnosti těla
- Silně polarizovaná vazba – el. dipól
  - Vodíkové můstky – tvorba řetězců, vodních obalů koloid. částic, molekul i iontů
- Anomálie vody
  - Největší hustota při 3,98°C (život pod ledem)
- Vysoké výparné teplo (2,25MJ/kg)
  - Ochlazování při pocení

## Voda

- Funkce v organismu
  - Rozpouštění látek
  - Transport látek
  - Hydratační obaly koloidů
  - Osmotické jevy na membránách
  - Účast v chemických reakcích
  - Termoregulace

## Transportní jevy

- Důsledek pohybu a vzájemné interakce molekul – přesun molekulární veličiny
- Viskozita – přesun hybnosti
- Difuze – přenos hmoty (molekul)
- Vedení tepla – přenos kinetické energie
- Vedení el. proudu – přenos elektricky nabitých částic
- Příčina – existence gradientu veličiny

## Viskozita

- Proudění
  - Přeskupování molekul
  - Posouvání rovnoběžných vrstev molekul tekutiny
  - Vznik tření
- Viskozita
  - Síla tření, které brání proudění kapaliny
  - S rostoucí teplotou klesá
- Důležitá je viskozita krve

## Difuze

- Snaha o rovnoměrné rozptýlení částic látek, které nejsou odděleny, v celém objemu
- Důsledek tepelného pohybu částic
- Zásadní pro pohyb látek uvnitř buněk
- V plynech je mnohem rychlejší než v kapalinách

## Osmotický tlak

- Vzniká na polopropustné membráně
  - Propustná pouze pro rozpouštědlo
- Oddělení roztoku od rozpouštědla
  - Mohou pronikat jen molekuly rozpouštědla
  - Dochází ke zředování roztoku - osmóza
- Osmotický tlak
  - Tlak na straně roztoku, který zastaví osmózu
  - Určen pouze počtem částic, nikoli jejich velikostí

## Osmotický tlak

- Dělení roztoků podle velikosti osmotického tlaku
  - Hypotonické
  - Izotonické (izoosmotické)
  - Hypertonické
- Rozpouštědlo vždy proudí z roztoku hypertonickeho do hypotonického
- Mezi izotonickými roztoky osmóza neprobíhá



## Osmotický tlak

- Biologické membrány mají různou propustnost
  - Buněčná stěna – propustná
  - Buněčná membrána, intracelulární membrány, kapilární stěna - polopropustné
- Změna objemu buněk v závislosti na prostředí
- Výměna tekutin mezi kapilárami a tkáněmi

## Fázové rozhraní

- Hranice mezi 2 fázemi
  - Pevná nebo kapalná se vzduchem = povrch
- Povrchové napětí
  - Působí kolmo na povrch (minimalizuje plochu)
    - Kapka vody, olej ve vodě
  - Působí kapilární vztlakovost (výživa rostlin)
  - Surfaktanty (tenzidy) – snižují povrch. napětí
- Adsorpce
  - Hromadění látky na povrchu jiné
  - Např. chemisorpce (MDP na krystaly apatitu)

## Transport látek biologickými membránami

- Podání do organismu
  - Celkové
    - Intravaskulární – nejrychlejší účinnost
      - Intravenózní, intraarteriální, intrakardiální
    - Extravaskulární – uplatní se jen část a chce to čas
      - Intramuskulární, perorální, subkutánní, rektální, inhalační
  - místní
    - Látka se nevstřebává – působí jen místně
      - Na kůži, sliznici

## Transport látek biologickými membránami

- Pohyb látek v organismu
  - Absorpce, distribuce, metabolismus, exkrece
  - Cestou procházejí řadou membrán
- Aktivní transport – vyžaduje energii
  - Pinocytóza, přenos pomocí nosičů
- Pasivní transport
  - Difuze, osmóza, filtrace, ultrafiltrace

## Distribuce látek v organismu

- Základem je rozpuštění v tělních tekutinách
- Po rozpuštění se rozdělují mezi extra a intracelulární tekutinu, váže se na povrch buněk i na struktury uvnitř buňky
- Ustanoví se dynamická rovnováha
  - Poměr mezi volnou a vázanou látkou se nemění
- Receptory – zajišťují účinek látky
  - Ta, která se na receptor neváže, je neaktivní

## Vylučování látek

- Odstraňování metabolitů
  - Katabolity (ve vyšší koncentraci toxické)
- Látky přijaté v nadbytečném množství
- Ledviny
- Trávicí trakt
- Plíce
- Žlázy
- Kůže

## Teplo

- Forma energie
  - Vždy uvolňováno při přeměně energií
- Organismus
  - Otevřený systém – vyměňuje s okolím energii
  - Hlavní zdroj energie – potrava (chemická e.)
  - Další možnosti příjmu
    - E. světelná, mechanická, elektromagnetická
    - Přenáší informaci – ovlivňuje chování
- Organismus může teplo regulovat

## Teplo

- Produkce
  - Přeměna chemické energie
    - Basální metabolismus, svalová práce, trávení, třes
- Ztráty
  - Přímé
    - Vyzařování, vedení, proudění
  - Nepřímé
    - Odpařování z plic, pocení (znatelné a neznatelné)
- Organismus teplo v těle reguluje
  - Homoiotermní (teplokrevný) – viz fyziologie

## Měření teploty

- Fyzikální veličina charakterizující stav organismu
- Teplotu měříme nepřímo
  - Závislost jiných fyzikálních veličin na teplotě
    - Délková a objemová roztažnost – lékařský rtuťový teploměr (maximální, rychloběžka)
    - Závislost odporu vodičů a polovodičů
    - Termoelektrický jev – invazivní měření teploty

## Využití tepla

- Hypertermie
  - Zvýšená teplota tkání při léčbě nádorů
  - Ohřev mikrovlnami, ultrazvukem, laserem
  - Teplota tkáně 42,5 °C – 45 °C
  - Lázeňská léčba
- Kryoterapie
  - Celková
    - Operace (v mimotělním oběhu)
  - Místní
    - Analgetický efekt – drobné chir. výkony

## Elektrická energie

- Elektrický proud
  - Usměrněný pohyb částic s elektrickým nábojem
  - Produkt dějů na membránách vzrušivých tkání a orgánů (nervy, svaly)
  - Vstupuje do organismu z vnějšku
    - Stejnosměrný – dráždivé účinky
    - Střídavý – při vysokých frekvencích tepelné účinky

## Membránový potenciál

- Nerovnoměrné rozdělení iontů na obou stranách membrány
  - Aktivní i pasivní transport iontů
- Klidový
  - -50 mV až -100 mV (negativní uvnitř buňky)
  - Mají ho všechny buňky
- Akční
  - Jen u buněk vzrušivých tkání (nervy, svaly)

## Akční potenciál

- Změna propustnosti buněčné membrány pro některé ionty při podráždění – tok sodíku do buňky – vyrovná záporný náboj
- Nutný prahový nebo nadprahový podnět
  - Zákon „vše nebo nic“
- Spontánní depolarizace
  - Samovolné dosažení prahového potenciálu
  - Buňky převodního systému v srdci

## Elektrodiagnostika

- Sledování změn potenciálů na povrchu těla
- EKG
  - Grafický záznam elektrické aktivity srdce
- EEG
  - Elektrická aktivita mozku
- EMG
  - Vyšetřování nervosvalového přenosu - parézy
- další

## Léčebné využití el. proudu

- Zvyšuje prokrvení, tlumí bolest, uvolňuje svalové napětí, urychluje vstřebávání otoků
- Užití hlavně v rehabilitaci, u porážkových stavů, zánětů šlach, stavy po obrnách
- Galvanický proud – stejnosměrný
- Diodynamické proudy – nízkofrekvenční
- Další proudy – nižší riziko poškození tkání

## Elektrostimulace

- Nepřímá
  - Dráždíme přírodní nervové vlákno
- Přímá
  - Dráždíme přímo sval
- Elektrogymnastika
  - Udržování dočasně denervovaných kosterních svalů – zábrana atrofie (úrazy, mozkové příhody), prevence trombózy

## Kardiostimulace

- Poruchy srdeční automacie
- Zevní - dočasná
- Vnitřní – trvalá
  - Kardiostimulátory (pacemakery)
- Defibrilace a kardioverze
  - Fibrilace komor nebo síní
  - Výboj depolarizuje naráz všechny buňky
    - Možnost nastolení fyziologické stimulace
    - ICD – trvalá stimulace s možností defibrilace

## Diatermie

- Vysokofrekvenční proudy – tepelný účinek
  - Zlepšení prokrvení a výživy, uvolnění spasmů
  - Použití v rehabilitaci – bolesti páteře, kloubů, svalů, degenerativní choroby kloubů,
- Vysokofrekvenční elektrochirurgie
  - Elektrocauter
    - Drobné výkony, současně staví krvácení koagulací
  - Elektrotomie
    - Tepelná destrukce (řezání) tkání

## Magnetoterapie

- Pulzní magnetická pole
  - Permanentní – statické, zdrojem je magnet
  - Proměnné – vzniká v okolí vodiče při průchodu el. proudu – cívky = aplikátory
- Efekt magnetomechanický a mgelektrický
  - Změny propustnosti membrán
  - Aktivace imunitního systému, uvolnění spasmů
- Hlavně analgetický efekt
  - Revmatologie, rehabilitace

## Optika

- Optické záření
  - Část spektra elmg vlnění
    - Infračervené ( $4 \cdot 10^{-4}$  až  $8 \cdot 10^{-7}$  m)
    - Viditelné – světlo ( $7,9 \cdot 10^{-7}$  až  $3,9 \cdot 10^{-7}$  m) 790-390 nm
    - Ultrafialové ( $4 \cdot 10^{-7}$  až  $10^{-8}$  m)
  - Vlnová délka určuje barvu
    - Nejkratší = červená, nejdelší = fialová, směs = bílá
- Šíří se ve vlnoplochách
- Paprsek
  - Udává směr šíření (kolmý na vlnoplochu)

## Světlo

- Odraz a lom
  - Při průchodu mezi dvěma prostředími, v nichž má světlo různou rychlost šíření
- Šíření světla v různém prostředí
  - Průhledné – ani absorpce ani rozptyl
  - Průsvitné – částečně se rozptyluje
  - Neprůhledné – na povrchu se odrazí
- Disperze (hranol)
  - Rozklad bílého na monochromatické složky

## Zdroje světla

- Přirozené
  - Slunce, atmosférické výboje
- Umělé
  - Tepelné (žárovky, plamen)
  - Luminiscenční (výbojky, diody)
  - Laser
    - Light amplification by stimulated emission of radiation
    - Mnoho druhů – různé využití

## Detektory světla

- Nepřímé – změna fyzikálního stavu detektoru přijetím energie elmg záření
- Tepelné
  - Termistory, termočlánky
- Fotoelektrické
  - Přeměna na el. proud, polovodičové fotodiody
- Fotochemické
  - Oko, fotografické materiály

## Optické metody

- Světelná mikroskopie
  - Různé možnosti zobrazení
    - Světlé pole, fázový kontrast, ultrafialová, laserová,...
- Elektronová mikroskopie
  - Světelné záření nahrazeno svazkem elektronů
  - Transmisní (TEM) a rastrovací (REM)
- Polarimetrie, nefelometrie, refraktometrie
- Endoskopie, fibroendoskopie

## Oko

- Světlořadný aparát – vytváří obraz na sítnici
  - Rohovka, čočka, sklivec
  - Optická mohutnost + 60 dioptrií
- Světločivný aparát
  - Sítnice – tyčinky a čípky
- Blízky bod
  - Nejbližší, který oko vidí ostře (dospělý 25 cm)
- Daleký bod
  - Nejdálší ostrý bod, v nekonečnu (>5m)

## Refrakční vady oka

- Emetropické oko = zdravé
- Ametropické oko = porucha optické části
- Sférické ametropie
  - Krátkozrakost (myopie) – obraz je před sítnicí
    - Axiální (dlouhá oční koule), refrakční
  - Presbyopie – stařecká vetchozrakost
  - Dalekozrakost (hypermetropie) – obraz za sítnicí
- Asférické ametropie
  - Astigmatismus – nestejně zakřivení rohovky

## Fototerapie

- Lázeňství – helioterapie, umělé zdroje
- Lasery
  - Terapeutické – kožní, gynekologie, stomatologie, rehabilitace, neurologie
  - Chirurgické – různé druhy – excimérové (oční)
- Polarizované světlo – menší efekt než laser
- Infračervené záření – tepelné účinky
- Ultrafialové záření – A, B a C; kožní

## Akustika

- Zabývá se studiem zvuku
  - Slyšitelný zvuk – frekvence 16 – 20 000 Hz
  - Infrazvuk – frekvence do 16 Hz
  - Ultrazvuk – frekvence nad 20 kHz
- Zvuk – mechanické vlnění (nešíří se ve vakuu)
  - Kmitavý pohyb částic, kterým se šíří – postup drobných deformací (zředování a zhušťování)
  - Popisné veličiny
    - Frekvence, rychlost, vlnová délka

## Rychlost šíření zvuku

Prostředí	Rychlost m/s
Vzduch 0°C	332
Vzduch 20°C	344
Vodík	1270
Voda 13°C	1441
Voda 20°C	1484
Led 0°C	3200
Guma	1440
Ocel	5000
Sklo	6000

## Zvuk

- Akustický tlak
  - Tlakové změny vznikající kmitáním částic prostředí, kterým se zvuk šíří
- Akustická impedance
  - Různá v různých prostředích
  - Na rozhraní dochází k odrazu a k ohybu
  - Část energie se absorbuje – přemění v teplo, naruší strukturu prostředí
  - Významná při zobrazování ultrazvukem

## Zvuk

- Intenzita zvuku
  - Energie, která projde jednotkovou plochou kolmou na směr šíření za jednotku času
  - Práh slyšení =  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  (při frekvenci 1 kHz)
  - Práh bolesti =  $10 \text{ W/m}^2$  – rozdíl 13 řádů
  - Zavedena **hladina intenzity zvuku** – odráží subjektivní vjem (logaritmická závislost)
  - Práh slyšení = 0 dB, práh bolesti = 130 dB
  - 1 dB = nejmenší slyšitelný rozdíl

## Hladiny hlasitosti

Hladina hlasitosti dB	Zdroj zvuku
0	Práh slyšení
10	Mírný pohyb listů stromů
20	Šepot, tichá ulice
40	Normální hlasitost řeči
50	Osobní auto, normální hlas
60	Rádio
70	Rušná ulice, křik
80	Velmi rušná ulice
90	Troubení auta
110	Pneumatické kladivo na kov
120	Letecký motor zblízka
130	Práh bolesti

## Vlastnosti zvuku

- Hluk, šum
  - Nepravidelné kmitání (také řeč)
- Hudební zvuk
  - Periodické kmitání
  - Výška tónu – daná základní frekvencí
    - Subjektivně vnímáme logaritmus frekvence
      - Subj. vjem roste aritmeticky, frekvence roste geometricky
  - Barva zvuku – daná harmonickými frekvencemi
    - Celočíselné násobky základní frekvence

## Poruchy sluchu

- Převodní nedoslýchavost
  - Porucha zevního nebo středního ucha
- Percepční nedoslýchavost
  - Porucha vnitřního ucha nebo sluchového nervu
- Možnosti vyšetření
  - Orientační
    - Hlasitá řeč, šepot, ladičky
  - Přesné
    - Audiometrie

## Audiometrie

- Určení sluchového prahu pro čisté tóny
- V tichých komorách, zvlášť pro každé ucho
- Tónová audiometrie
  - Závislá na spolupráci pacienta
- Objektivní audiometrie
  - Měří evokované potenciály vzniklé zvukovým stimulem
  - Nezávislá na spolupráci pacienta

## Infrazvuk

- Práce těžkých strojů, zemětřesení, silný vítr
- Šíří se půdou (zemí) i zdivem
- Nevnímáme sluchem
- Frekvence 5-7 Hz vnímáme
  - Bolesti hlavy, změny krevního tlaku, panická hrůza

## Ultrazvuk

- Pro člověka neslyšitelné frekvence nad 20 kHz
- Pes do 35 kHz, kočka do 50 kHz, netopýr do 100 kHz
- Vznik – piezoelektrické generátory
  - Nepřímý piezoelektrický jev, nutný dobrý akustický kontakt (gely)
- Detekce – přímý piezoelektrický jev
  - Vznik el. náboje při deformaci destičky

## Účinky ultrazvuku

- Způsobeny absorpcí mechanické energie
- Mechanické
  - Kavitace – rozrušení struktury materiálu
- Tepelné
- Fyzikálně chemické
  - Velmi jemné suspenze, aerosoly
- Chemické
  - Polymerizace (tvrdnutí pryskyřic), zčernání fotografického materiálu

## Biologické účinky UZ

- Komplexní – kombinace všech
- Zvýšení permeability membrán
  - Zrychlení difuze ve tkáních
- Porucha vodivosti nervových vláken
  - Tlumivý účinek
- Analgetický a spasmolytický účinek
- Změkčování jizevnaté tkáně
- Zvýšení prokrvení a metabolismu

## Použití ultrazvuku

- Diagnostika
  - Frekvence 1-20 MHz
  - Odraz vlnění na akustických rozhraních
  - Dopplerův jev – zobrazení pohybu struktur
- Terapie
  - Frekvence 800-1000 kHz (výrazně nižší)
  - Rehabilitace
  - Zubní lékařství
    - Odstraňování zubního kamene
  - LERV – litotripse extrakorporální rázovou vlnou (drcení kamenů)

## RTG záření

- Objeveno 1895 prof. Röntgenem
- Je to elmg vlnění krátkých vlnových délek
  - V diagnostice 10 nm – 50 pm ( $10^{-9}$  až  $10^{-12}$  m)
  - Je tvořeno fotony – kvanty energie
- Šíří se přímočaře a proniká hmotou
  - Je různě absorbováno
    - Více s rostoucí měrnou hmotností a tloušťkou
  - Rozptyluje se a ionizuje
- Má účinky luminiscenční a fotochemické
  - Účinkuje na fotografický materiál

## Elmg spektrum

Kvantum energie [eV]	Kmitočet [Hz]	Vlnová délka [m]	Označení
$4,1 \cdot 10^{-15}$	1	$3 \cdot 10^8$	
$4,1 \cdot 10^{-12}$	$10^3$	$3 \cdot 10^5$	Nizké kmitočty
$4,1 \cdot 10^{-9}$	$10^6$	$3 \cdot 10^2$	Radiové kmitočty
$4,1 \cdot 10^{-6}$	$10^9$	$3 \cdot 10^{-1}$	Mikrovlny
$4,1 \cdot 10^{-3}$	$10^{12}$	$3 \cdot 10^{-4}$	Infračervené záření
4,1	$10^{15}$	$3 \cdot 10^{-7}$	Ultrafialové záření
$4,1 \cdot 10^3$	$10^{18}$	$3 \cdot 10^{-10}$	Rtg záření
$4,1 \cdot 10^6$	$10^{21}$	$3 \cdot 10^{-13}$	Gama záření
$4,1 \cdot 10^9$	$10^{24}$	$3 \cdot 10^{-16}$	Kosmické záření
$4,1 \cdot 10^{12}$	$10^{27}$	$3 \cdot 10^{-19}$	

## Rtg záření

- Zdrojem je rentgenka
  - Elektronka (evakuovaná skleněná trubice se žhavenou katodou a anodou z wolframu)
  - Katoda je žhavena samostatným elektrickým obvodem – uvolňuje elektrony – urychleny napětím mezi anodou a katodou (stovky kV)
  - Při dopadu na anodu reagují s materiálem anody za vzniku rtg záření
    - 99% energie elektronů se změní na teplo, 1% na rtg záření – anoda se musí chladit

## Rtg zobrazování

- Skiaskopie
  - Prosvěcování a současné pozorování obrazu na skiaskopickém štítu – vyšší dávka
  - V zatemněné místnosti, horší rozlišení, možnost pozorovat obrazy v pohybu
- Skiografie
  - Snímkování na film (+ zesilovací fólie)
- CT
  - Výpočetní tomografie
    - Matematická rekonstrukce obrazu z mnoha projekcí

## Rtg terapie

- Nutno dodat do tkáně dostatek energie, aby byl dosažen letální efekt při minimálním poškození zdravých tkání
- Povrchová
  - Nejvyšší dávka na kůži, dosah 1-1,5 cm
- Hloubková
  - Vysoká energie produkovaných fotonů (řádově v MeV) - urychlovače

## Ionizující záření

- Předpokládané znalosti
  - Středoškolská fyzika
  - Znalost radioaktivity
  - Interakce ionizujícího záření s hmotou
  - Biologické účinky ionizujícího záření
  - Ochrana před ionizujícím zářením
  - Detekce ionizujícího záření
- [www.astronuklfyzika.cz/](http://www.astronuklfyzika.cz/)

## Ionizující záření

- Korpuskulární
  - Velký biologický efekt
  - Užívané v terapii (beta)
- Fotonové
  - Malý biologický efekt
  - Užívané v diagnostice (gama)
- Smíšené
  - Užívané v terapii
  - Možno zobrazit distribuci v těle

## Základní pojmy

- Klinická odpovědnost za ozáření
  - Zdůvodnění, optimalizace, klinické hodnocení
- Otevřený zářič
  - Tekutiny, plyny
- Vnitřní ozáření
  - Zdroj ionizujícího záření uvnitř těla
- Zevní ozáření
  - Zdroj ionizujícího záření mimo tělo



## Radiační zátěž

- Absorbovaná dávka D [Gy = J/kg; mGy]
  - Energie záření absorbovaná objemem hmoty o jednotkové hmotnosti
  - Různá v různých tkáních a orgánech
- Ekvivalentní dávka H [Sv; mSv]
  - Vyjadřuje biologický účinek záření
  - Součin dávky a váhového (jakostního) faktoru
- Efektivní dávka E [Sv; mSv]
  - Součet ekvivalentních dávek
  - Vyjádřena jedním číslem pro celé tělo - srovnání

## Příklady efektivních dávek [mSv]

GER	0,47	Sci nádorů	10
Sentinelové uzliny	1,0	Perf. myokardu TI	24
Dyn sci ledvin	1,8	Sci galiem	30
Sci plic perfuzní	2,2	Rtg hrudníku	0,02
Hepatobiliární sci	4,3	Rtg páteře	1,0
Scinti skeletu	4,6	Vylučovací urograf.	2,5
Perf mozku SPECT	5,9	Irigoskopie	7,0
Sci leukocyty	6,6	CT hrudníku	8,0
Perfuze myokardu	9,0	CT pánve	10
PET FDG	9,5	+ kontrast	>20

## Radiační riziko

- Dáno stochastickými účinky záření
- Riziko úmrtí v důsledku zhoubného nádoru
- Představuje tzv. **přidatné riziko**
  - Riziko úmrtí na spontánně vzniklý nádor je v ČR 20-25%, přidatné riziko je 5%/1 Sv
- Má **hypotetický** charakter
  - Může se projevit s latencí mnoha let

## Srovnání rizika úmrtí

- Průměrné radiační riziko
  - 1:20 000 na 1 mSv (5%/1 Sv)
- Jízda 100 km vlakem
  - 1:100 000
- Život ve velkém městě
  - 1:160
- Kouření 10 cigaret denně
  - 1:5

## Radiační ochrana

- Každé ozáření má být plánované a ALARA (as low as reasonably achievable)
- Optimalizace ochrany
  - Zdůvodnění, systém jakosti, dohled apod.
- Limity ozáření
  - Obecné (pro obyvatele) 1 mSv/rok (5 mSv/5 let)
  - Pro radiační pracovníky 50 mSv/rok (100/5)
  - Pro studenty (16-18 let) 6 mSv/rok

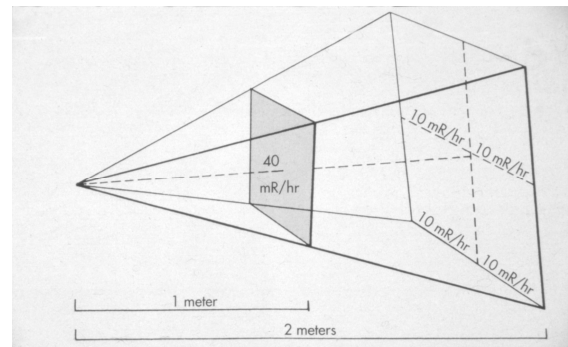
## Lékařské ozáření

- Nepodléhá limitům ozáření
- Odpovídá indikující i provádějící lékař
- Princip zdůvodnění
  - Přínos výsledku musí převážit riziko
- Princip optimalizace
  - ALARA dávky – aplikace aktivity, která zaručí dostatečnou diagnostickou informaci při co nejnižší radiační zátěži pacienta
- U žen nutno zjistit graviditu a laktaci

## Ochrana před zářením

- Principy
  - Vzdálenost, čas, stínění
  - Problematika vnitřní kontaminace
- Pracovníci
  - Kvalifikace (přezkušování), osobní dozimetrie, ochranné pomůcky
  - Provozní, havarijní a monitorovací program
- Pacienti
  - Kontrolované pásmo – omezený pohyb
  - Indikace, provedení, ovlivnění kinetiky RF

## Ochrana vzdáleností



## Ochrana stíněním



## Zdroje ionizujícího záření

- Přírodní
  - Kosmické záření, radon
- Umělé
  - Jaderný reaktor
  - Urychlovač částic
    - Cyklotron, lineární urychlovač
  - Generátor radionuklidů
  - Radiofarmaka

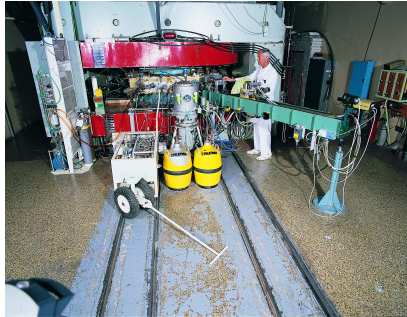
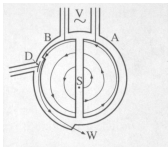
## Radionuklid

- Nestabilní jádro atomu konkrétního prvku
- Přeměňuje se v čase (náhodný děj)
  - Vyzáření energie (foton gama, X)
    - izomerní přechod, chemicky se nemění
  - Uvolněním částice
    - proton, elektron, pozitron, neutron – chemická změna
  - Záchytem částice
    - Elektron z obalu – chemická změna
- Fyzikální poločas přeměny
  - Jedinečný pro daný radionuklid

## Výroba radionuklidů (RN)

- Jaderné reaktory
  - Cílené ozařování tokem neutronů
  - Izolace z vyhořelého paliva
  - $^{131}\text{I}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,
- Urychlovače částic
  - Převážně cyklotrony
  - Jednofotonové RN:  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{123}\text{I}$
  - Pozitronové RN:  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$
- Radionuklidové generátory
  - Sekundární zdroj RN

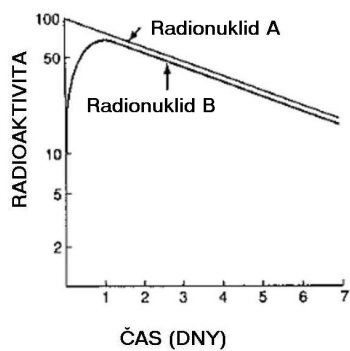
## Cyklotron



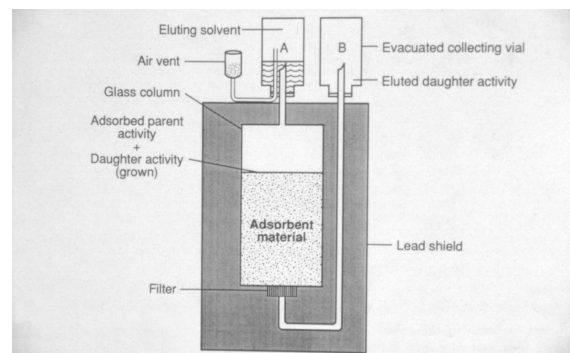
## Radionuklidový generátor

- Výroba krátkodobých RN na pracovišti
- Dvojice radionuklidů, získává se dceřiný
  - Mateřský 10-50 x delší  $T/2$  než dceřiný
  - Množství dceřiného rychle narůstá až do přechodné rovnováhy (za 4  $T/2$  dceřiného)
  - Dceřiný chemicky odlišný - separace
  - Nový nárůst dceřiného po separaci
- Příklady
  - $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{81}\text{Rb}$ - $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ;  $^{82}\text{Sr}$ - $^{82}\text{Rb}$  (PET)

## Přechodná rovnováha



## RN generátor - schéma



## RN generátor - průřez



## RN generátor v laminárním boxu



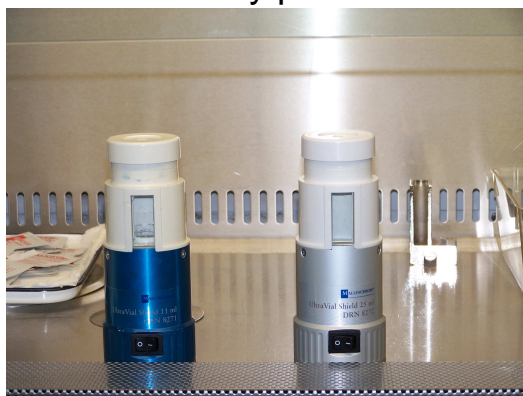
## Box s laminárním prouděním vzduchu



## Pomůcky pro eluci



## Pomůcky pro eluci



## Vlastnosti vybraných RN pro dg

RN	Druh záření	Energie záření [keV]	poločas
$^{99m}\text{Tc}$	gama	140	6 hod.
$^{131}\text{I}$	gama (beta)	364	8 dní
$^{123}\text{I}$	gama	159	13 hod.
$^{67}\text{Ga}$	gama	93, 184, 300	78 hod.
$^{201}\text{Tl}$	gama, X	167; 69-83	73 hod.
$^{18}\text{F}$	anihilační	511	110 min.

## Nemoc z ozáření

- Akutní
  - Vznik po jednorázovém velkém celotělovém zevním ozáření
  - Převládá poškození systémů v závislosti na dávce a radiosenzitivitě
- Chronická
  - Opakované malé dávky nebo následek akutní
- Komplex patologických změn
  - Pronikavost záření, ionizační hustota, časový faktor, způsob expozice apod.

## Akutní nemoc z ozáření (ANO)

- Typicky probíhá ve čtyřech fázích
- 1. Prodromální (počáteční) příznaky
  - Objevuje se hned (velké dávky) nebo během několika hodin
  - Celková nevolnost, slabost, nauzea, zvracení, sucho v ústech, žízeň, bolesti hlavy event. i průjemy (vysoké dávky), někdy porucha vědomí a spánku
  - Čím dříve zvracení, tím horší prognóza

## Akutní nemoc z ozáření (ANO)

- 2. Latentní fáze (bez příznaků)
  - Délka v závislosti na dávce
    - Čím menší dávka, tím delší
  - Potíže mizí – zapojení obranných mechanismů
- 3. klinická fáze (plný rozvoj nemoci)
  - Trvá 2-3 týdny
  - Horečka, krvácení, záněty sliznic GIT, zvracení a průjemy s krví, dehydratace, selhání ledvin, jater, porucha krvevotroby, infekce
  - Může nastat smrt

## Akutní nemoc z ozáření (ANO)

- 3. Rekonvalescence (uzdravení)
  - Částečné nebo i úplné (menší dávky)
  - Ustupují potíže i příznaky, klesá teplota
  - Pozvolna se upravuje krvevotroba
- Pozdní následky
  - Leukémie a jiné nádory
  - Neplodnost u žen
- Vnitřní kontaminace
  - Většinou pozdní účinky (léta) - nádory

## Zobrazovací metody

## Ultrazvuk

- Mechanické vlnění, frekvence  $10^6$ - $10^7$  Hz
- Rychlost v měkkých tkáních cca 1500 m/s
- Odraz na rozhraní s různou impedancí (echo)
  - Kost-měkká tkáň, vzduch-měkká tkáň
- Odraz od pohyblivého rozhraní
  - Změna frekvence (Dopplerův jev)
- Zobrazení 1D, 2D a 3D (event. i 4D)
  - Nutnost počítačového zpracování signálu

## Parametry ultrazvuku

Tkáň	Akustická impedance	Rychlost m/s
Krev	1,62	1580
Kost	3,75-7,38	3360
Mozek	1,55-1,66	1538
Játra	1,64	1570
Sval	1,65-1,74	1568
Voda	1,5	1500
Vzduch	0,0004	340

## Magnetická rezonance

- Sledování změn chování buněk v silném magnetickém poli
- Jádro atomu s lichým počtem protonů se chová jako malý magnet – např. vodík
- Fyziologicky je orientace „magnetů“ nahodilá
  - Tkáň se chová nemagneticky
- V silném zevním magnetickém poli se „magnety“ uspořádají podélně podle siločar
  - Tkáň se chová magneticky

## Magnetická rezonance

- „Magnety“ uspořádané podél siločar
  - Vektor podélné tkáňové magnetizace nelze měřit
    - Nutno změnit orientaci - dodat elmg impulz
- Vznikne vektor příčné magnetizace
  - Lze změřit (frekvence v oblasti radiových vln)
- Po skončení impulzu se systém vrací do základního stavu – dochází k relaxaci
  - Relaxační časy
    - T1 (300-2000 ms) a T2 (30-150 ms)
  - Proces závisí na chemické struktuře tkáně

## Magnetická rezonance

- Elmg impulzy
  - Různé typy (90° a 180°, dnes 10°-60°) a r úzně rychle opakované
    - TR – time to repeat a TE – time to echo
      - Mění se časy T1 a T2 – změny se zobrazí ve stupních šedi
  - Obrazy T1 vážené (TR = 500 ms, TE = 15 ms)
  - Obrazy T2 vážené (TR = 200 ms, TE = 90 ms)
  - Obrazy vážené podle hustoty protonů (TR = 1000 ms, TE = 15 ms)
  - Obecně slabý signál=černá, silný signál=bílá

## Magnetická rezonance

- T1 vážené obrazy
  - Měkké tkáně světlé, tekutina šedá
- T2 vážené obrazy
  - Měkké tkáně tmavé, tekutina bílá
- Obrazy vážené podle protonové hustoty
  - Tekutina tmavě šedá
- Dnes – gradient-echo sekvence
  - Jiné typy elmg impulzů, přídatné magnety
    - Zkrácení doby vyšetření

## Magnetická rezonance

- MR angiografie
  - Protony („magnety“) v cévách nevysílají signál
    - při toku jsou nahrazovány „nezmagnetizovanými“
  - Céva se jeví jako černá
    - Změnou časování lze dosáhnout i zesílení signálu
      - Céva bude bílá
- Kontrastní látky
  - Paramagnetické látky – zesilují signál
    - Gadolinium DTPA

## Nukleární medicína

- Používá otevřené zářiče
- Zdroj záření je radiofarmakum v pacientovi
- Metody neinvazivní
- Převaha diagnostických zobrazovacích metod – „diagnostické zobrazování“
- Zobrazování funkční morfologie
- Integrace hybridního zobrazení (CT)
- Terapie pouze ve speciálních indikacích

## Nukleární medicína

- Základní principy oboru
  - Detekce záření, které vychází z pacienta
  - Zdrojem záření je radionuklid
  - Distribuci záření určuje radiofarmakum
  - Distribuci radiofarmaka určují tělesné pochody (metabolismus, prokrvení apod.)
  - Zobrazovací přístroje jsou detektory záření
  - Záření je možno měřit a kvantifikovat
  - Kvantitativní měření tělesných pochodů na intaktním živém organismu

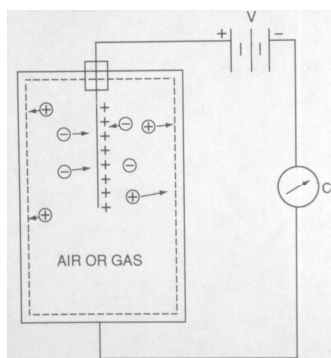
## Nukleární medicína

- Povolení k provozu od SÚJB
- Dohlížející osoba
- Klinický úsek (lékaři, sestry, laboranti)
- Diagnostika in vivo a terapie
- Laboratorní úsek (lékárníci, laboranti)
- Diagnostika in vitro
- Úsek radiofarmacie
- Fyzikálně elektronický úsek (inženýři, technici)

## Přístrojová technika I.

- Nezobrazovací
  - Plynové detektory
    - Ionizační komora
      - Měřič aktivity
    - Geiger-Müllerova trubice
      - Měřiče kontaminace povrchů
      - Detekční sondy (monitorovací systém)
  - Scintilační detektory
    - Studnový detektor – měření in vitro
    - Scintilační sonda – měření nad orgány

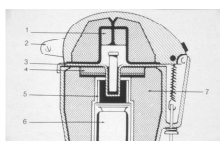
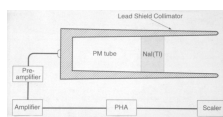
## Princip plynového detektoru



## Použití plynového detektoru



## Použití scintilačního detektoru



## Přístrojová technika II.

- Zobrazovací
  - Gamakamera
    - Jednofotonová
      - Planární, SPECT
    - Pozitronová (dvoufotonová)
      - PET
    - Nová zařízení
  - Hybridní systémy
    - PET/CT
    - SPECT/CT



## Příklady gamakamer



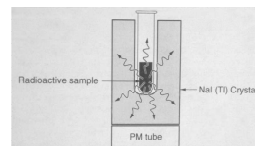
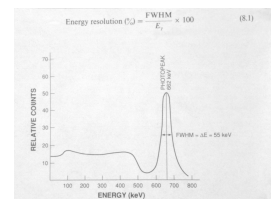
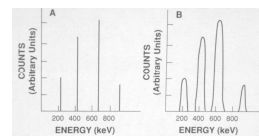
## PET kamera



## Základní parametry detektorů

- Stabilita – kontrola denně
- Správnost – kontrola jednou za rok
- Linearita – správné měření různých aktivit
- Geometrie měření – různé objemy
- Pozadí – měřená četnost bez vzorku
- Energetické rozlišení – pološířka fotopíku
- Detekční účinnost – záření, krystal
- Mrtvá doba – ztráta detekce
- Homogenita – homogenní odezva

## Vybrané parametry



## Zobrazení

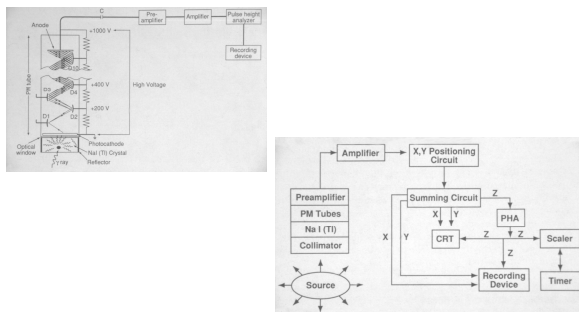
- Proces tvorby obrazu
  - Přenos informace
    - Orgán – detektor – fotonásobič – elektronika – monitor (display)
- Možnosti zobrazení
  - Velikost objektu
  - Kontrast objektu
    - Poměr informace v objektu a v jeho okolí
  - Způsob odlišení od okolí
    - Akumuluje více – „horké“ ložisko
    - Akumuluje méně – „studené“ ložisko

## Proces zobrazení

- Distribuce RF v orgánu nebo tkáni v okamžiku vytváření obrazu
- Detekce fotonů  $\gamma$  scintilátorem (krystalem)
- Přeměna na světelné fotony
- Přeměna na elektrony a zesílení fotonásobičem (PMT)
- Zpracování a zobrazení elektronickou aparaturou (počítač)



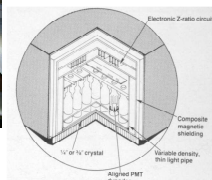
## Princip zobrazení



## Detektor gamakamery

- Kolimátor
  - Vymezuje zorné pole, různé druhy
- Krystal
  - Vlastní detekce, NaI(Tl), polovodiče
- Fotonásobiče
  - Přeměna na elektrický proud
- Analogově digitální (AD) převodník
  - Digitalizace signálu

## Detektor gamakamery



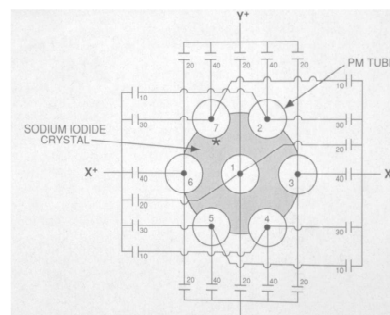
## Kolimátory a fotonásobič



## Elektronika gamakamery

- Zpracování signálu a tvorba obrazů
  - Předzesilovač
    - Tvaruje impulsy
  - Zesilovač
    - Zesiluje signál (zvyšuje amplitudu impulsů)
  - Analyzátor impulsů
    - Propouští jen impulsy žádoucí velikosti
  - Poziční obvod
    - Vytváří souřadnice interakcí
  - Počítač
    - Analyzuje data, vytváří a zpracovává obrazy

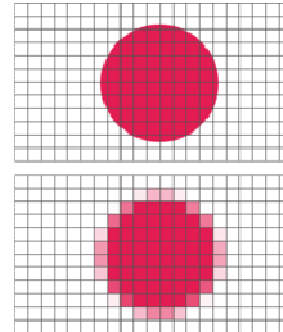
## Poziční obvod - schéma



## Obraz

- Dvouzměrný objekt
  - Tvořen vzájemně odlišnými body uspořádanými do matice (bitmapa)
  - Kvalita daná počtem, velikostí a odlišností bodů
- Zobrazení
  - Funkce přiřazující prvkům jedné množiny (distribuce radionuklidů v orgánu) jednoznačně prvky jiné množiny (body matice na monitoru počítače)

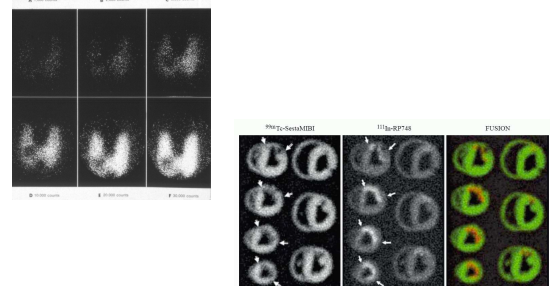
## Analogový a maticový (digitální) obraz



## Scintigrafický obraz

- Obrazová matice
  - Velikost (počet pixelů) – nejčastěji 64, 128
  - Hloubka – počet bitů na pixel (byte 8, word 256)
- Vlastní obraz
  - Počet bodů – závisí na toku informací (četnosti) a době snímání
  - Informační hustota ID – počet bodů na  $\text{cm}^2$
  - Černobílý nebo barevný – různé škály barev, různé stupnice zobrazení (lineární, exponenciální, logaritmická, apod.)

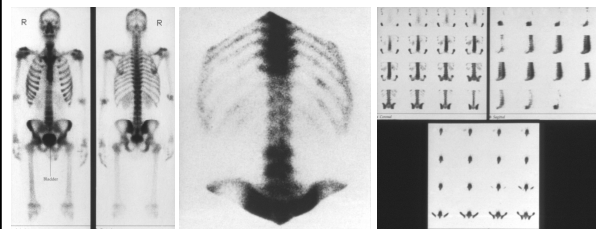
## Příklady scintigrafických obrazů



## Záznam dat (akvizice) I

- Statický
  - Distribuce RF v orgánu se nemění vzhledem k době snímání
  - Celotělový záznam (whole-body, WB)
    - Zobrazuje objekt větší než je zorné pole detektoru
  - Cílené snímky
    - Obraz odpovídá velikosti zorného pole detektoru
  - SPECT
    - Tomografické zobrazení, 3D, řezy ve 3 rovinách
  - Zobrazení možno opakovat (při nezdaru)

## Statické obrazy



Celotělové zobrazení

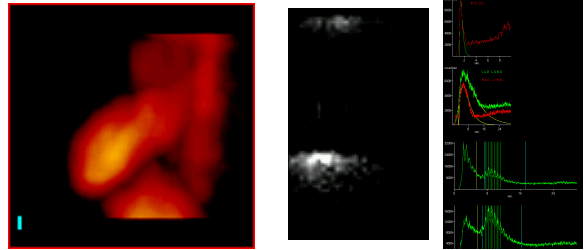
Cílený obraz

SPECT

## Záznam dat (akvizice) II

- Dynamický
  - Distribuce RF se relativně rychle mění v čase
  - Zobrazení nelze při nezdaru opakovat
    - Nutná další aplikace RF
  - Časové rozlišení – doba trvání jednoho obrazu
    - Závisí na rychlosti děje, který sledujeme
      - Milisekundy až desítky sekund
  - Synchronizovaný záznam (gated)
    - Speciální případ u srdce (synchronizace periodické činnosti biologickým signálem – EKG)
    - Vysoké časové rozlišení při dobré ID

## Dynamické obrazy



## Termografie

- Grafické znázornění rozložení teploty vyšetřovaného objektu
- Kontaktní a bezkontaktní
- Využívá tekuté krystaly
  - S teplotou mění barvu
  - Používají se ve formě termografických desek
- Hlavní indikace
  - Záněty, cévní poruchy, nádory