

UČEBNÍ TEXTY
UNIVERZITY KARLOVY

ZÁKLADY RADIOLOGIE A ZOBRAZOVACÍCH METOD

**Hana Malíková
a kolektiv**

KAROLINUM

ZÁKLADY RADIOLOGIE A ZOBRAZOVACÍCH METOD

Hana Malíková a kolektiv

Recenzovaly:

doc. MUDr. Andrea Burgetová, Ph.D.

MUDr. Barbora Míková

Autoři:

Josef Bárta

Miroslava Burghardtová

David Girsá

Monika Grilli Wagnerová

Michal Holešta

Václav Janík

Hana Malíková

Jan Šprindrich

Jiří Weichet

Vydala Univerzita Karlova

Nakladatelství Karolinum

jako učební text pro 3. LF UK

Sazba DTP Nakladatelství Karolinum

Vydání první

© Univerzita Karlova, 2019

© Hana Malíková a kol., 2019

ISBN 978-80-246-4036-5

ISBN 978-80-246-4100-3 (pdf)



Univerzita Karlova
Nakladatelství Karolinum 2019

www.karolinum.cz
ebooks@karolinum.cz

OBSAH

Úvod (<i>Hana Malíková</i>)	6
1. ZÁKLADY OBECNÉ RADIOLOGIE	
(<i>Hana Malíková, Jiří Weichet, Michal Holešta</i>)	7
1.1 Rentgenové záření	8
1.2 Rentgenový přístroj, princip skiografie, skiaskopie a digitální subtrakční angiografie	15
1.3 Základy výpočetní tomografie (CT)	21
1.4 Základy magnetické rezonance	28
1.5 Základy lékařského ultrazvuku	40
1.6 Základy intervenční radiologie	49
1.7 Hybridní metody	53
1.8 Kontrastní látky	54
2. ZÁKLADY SPECIÁLNÍ RADIOLOGIE	64
2.1 Základy zobrazování v osteologii (<i>Jan Šprindrich</i>)	64
2.2 Základy zobrazování hrudníku (<i>Václav Janík, Hana Malíková, Michal Holešta</i>)	78
2.3 Základy vyšetření trávicího systému (<i>David Girsá</i>)	103
2.4 Úvod do uroradiologie (<i>Monika Grilli Wagnerová, David Girsá</i>)	124
2.5 Úvod do neuroradiologie (<i>Hana Malíková</i>)	133
2.6 Mamární diagnostika a screening rakoviny prsu (<i>Josef Bárta</i>)	149
Obrazová dokumentace (<i>Miroslava Burghardtová, Ferko Kusý a kol.</i>)	

ÚVOD

Zobrazovací metody jsou v současné době rozsáhlým oborem, který kromě vyšetření založených na aplikaci ionizujícího, rentgenového záření pracuje i s metodami, které jsou zcela bez radiační zátěže, jako je ultrazvuk a magnetická rezonance. Podkladem pro vlastní obor radiologie byl objev záření X Wilhelmem Konradem Roentgenem (1845–1923) dne 8. 11. 1895. Roentgen za svůj objev v roce 1901 získal Nobelovu cenu za fyziku. V prvních letech po tomto převratném objevu nebylo vůbec jasné, jaké bude mít praktické využití. V USA vznikaly pojezdňé X-rays laboratoře, které nabízely snímky kostry jako pouťovou atrakci. Brzy však našlo rentgenové záření široké uplatnění v medicíně.

V dnešní době je Radiologie a zobrazovací metody oborem značně rozsáhlým se řadou specializací a subspecializací. Diagnostická větev svou historii započala výše zmíněným objevem paprsků X a dnes se zabývá neinvazivní diagnostikou ve všech modalitách, prostým snímkem počínaje, přes výpočetní tomografii (CT), ultrazvuk (UZ) až magnetickou rezonancí (MR) konče. Kromě diagnostické větve se čím dál více profiluje větev invazivní a intervenční. Intervenční radiologie se zdaleka již nezabývá pouze digitální subtrakční angiografií (DSA) a terapeutickými postupy na ni navázanými, ale rozšířila se o celé spektrum nevasculárních výkonů prováděných pod kontrolou některé z radiologických metod. Krom toho se samostatně profiluje i radiologie dětských nemocí (Pediatrická radiologie) a počíná se formovat subobor zabývající se hybridními metodami a radiologie kardio-vasculární. Celé spektrum oboru je jednoznačně mimo možnost této publikace, která má sloužit studentům lékařských fakult v základní orientaci v oboru. Naopak publikace je svým rozsahem nedostačující pro postgraduální vzdělávání v oboru Radiologie a zobrazovací metody.

1. ZÁKLADY OBECNÉ RADIOLOGIE

Na prvním místě je třeba zmínit některé obecně platné principy v radiologii, které by měly být vodítkem každému klinickému lékaři.

Obecné zásady indikace a kontraindikace rentgenových vyšetření

- Radiologická vyšetření pracující s rentgenovým zářením jsou možná výhradně na základě **lékařské indikace** (zákon 202/2017 Sb.).
- Indikující lékař vystaví žádanku na radiologické vyšetření, kde svůj požadavek definuje a zdůvodní, rovněž uvede potřebné klinické informace.
- Indikující lékař je povinen posoudit všechny informace o zdravotním stavu pacienta tak, aby zabránil zbytečnému ozáření.
- Indikaci musí schválit aplikující odborník (obvykle radiolog; v případě skiagramů radiodiagnostický asistent vyjma dětských pacientů mladších 3 let a těhotných žen, u kterých musí být **všechna** radiologická vyšetření schválena lékařem, radiologem), který také odpovídá za posouzení klinické výtěžnosti.
- Jedinou relativní kontraindikací je těhotenství, absolutní kontraindikace není.

Než vyplíšete žádanku na vyšetření spojené s radiačním ozářením, odpovězte si na následující otázky!

- Je vyšetření opravdu třeba?
- Nemá alternativu (zvláště pak jiné vyšetření bez ozáření pacienta)?
- Nebylo už provedeno jinde?
- Je vhodně načasované?
- Má radiolog k dispozici všechny relevantní informace?
- Při pochybách konzultujte radiologa!

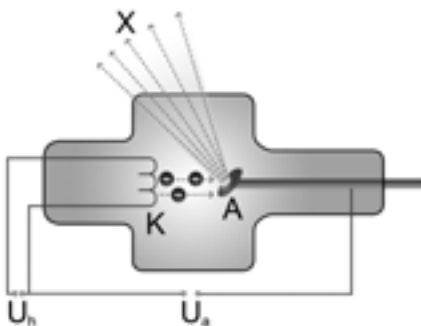
1.1 Rentgenové záření

Vznik rentgenového záření, jeho účinky a ochrana před ním

Rentgenové (RTG) záření je elektromagnetické vlnění vlnových délek 10^{-8} – 10^{-12} m, které vzniká při interakci rychle letících elektronů s atomy kovu, kdy se jejich energie přemění na elektromagnetické záření. Mezi zobrazovací metody, které pracují s RTG zářením, patří skiografie, skiaskopie, výpočetní tomografie (CT), digitální subtrakční angiografie (DSA), hybridní metody jako je PET (SPECT)/CT a kostní denzitometrie.

Vznik RTG záření

Zdrojem RTG záření jsou vakuované elektronky – rentgenky (**obr. 1**). Rentgenka je klasická dioda zapojená v obvodu s vysokým napětím cca 20–200 kV. Ze žhavené katody rentgenky jsou emitovány elektrony, které jsou urychlovány vysokým elektrickým napětím mezi katodou a anodou a dopadají na anodu, která je ve většině případů vyrobena z wolframu. Proud protékající katodou určuje množství emitovaných elektronů a tím i množství produkovaného RTG záření (čím vyšší proud, tím více elektronů se z katody uvolní a tím více RTG záření vznikne). Na anodě elektrony pronikají vrstvami obalů atomů anody, interagují s nimi a ztrácejí tím svoji kinetickou energii, která se z velké většiny přemění na teplo, pouze asi **1 % jejich energie se přemění na RTG záření**. Toto záření je dvojího druhu: **brzdné a charakteristické**.



Obr. 1: Schéma jednoduché vodou chlazené rentgenky

K – katoda; A – anoda; U_h – žhavicí katodové napětí; U_a – anodové napětí; X – emitované RTG záření.

Brzdné záření (obr. 2) vzniká interakcí přilétajícího elektronu s jádrem atomu materiálu anody (většinou vyrobené z wolframu). Kladně nabitě jádro přitahuje elektron, který změni směr letu a zpomalí. Rozdíl kinetické energie je vyzářen ve formě fotonu RTG záření o určité vlnové délce (vlnová délka fotonu je nepřímo úměrná jeho energii, čím je kratší vlnová délka tím vyšší energie). Vlnová délka, tj. energie vyzářeného fotonu RTG záření závisí na rychlosti dopadajících elektronů, která je přímo úměrná napětí mezi katodou a anodou a nastavením tohoto napětí tak určujeme tvrdost, penetraci rentgenového záření (čím vyšší anodové napětí, tím tvrdší – pronikavější RTG záření). Zároveň energie, vlnová délka, vyzářeného fotonu závisí i na vzdálenosti průletu elektronu od jádra, která je proměnná (čím blíže k jádru elektron proletí, tím více je zabrzděn a tím více energie je předáno vyzářenému fotonu).

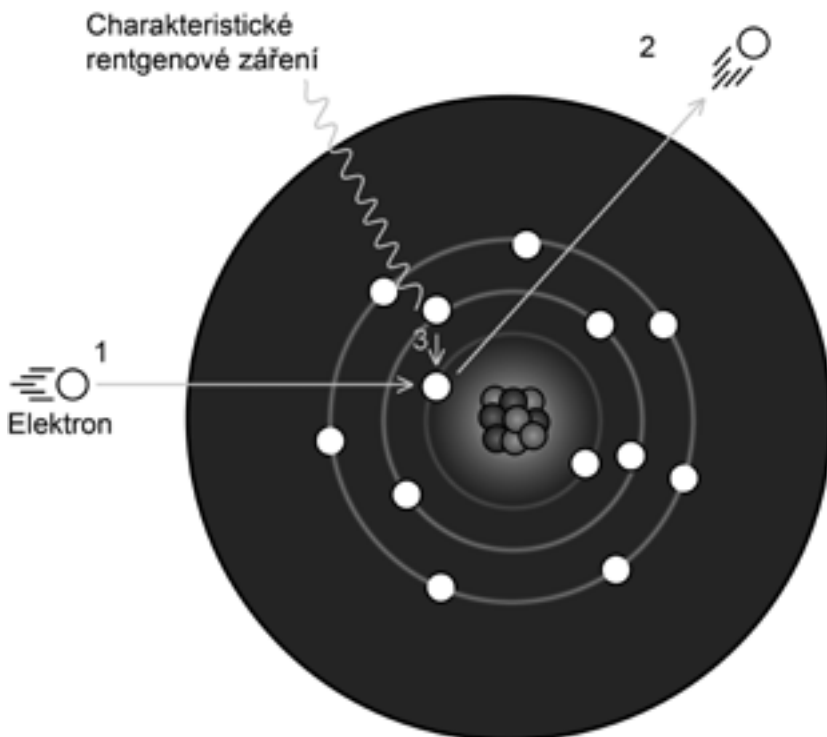


Obr. 2: Schematické znázornění vzniku brzdného záření

Maximální energii vyzářený foton získá při srážce letícího elektronu s jádrem (tj. zabrzdění na nulovou rychlost). **Energetické spektrum brzdného záření je tak spojité.**

Charakteristické záření (obr. 3) vzniká při srážce letícího elektronu s elektronem z obalu atomu na anodě. Interakcí je původní elektron z obalu

vyražen, vznikne „díra“, která je zaplněna elektronem jedné z hladin vzdálenějších od jádra, přičemž se vyzáří foton charakteristického RTG záření. Jeho energie je dána rozdílem energií jednotlivých hladin, mezi kterými došlo k přesunu elektronu. Rozdíl energií mezi jednotlivými energetickými hladinami je u daného materiálu stále stejný, pro něj charakteristický. Čím vyšší protonové číslo anody, tím vyšší energie charakteristického záření. **Energetické spektrum charakteristického záření je čárové a závisí na materiálu, ze kterého je vyrobeno ohnisko anody.**



Obr. 3: Schematické znázornění vzniku charakteristického záření

Vlastnosti RTG záření

Penetrace: penetrace znamená pronikavost RTG záření, čím je záření „tvrdší“ tj. energeticky bohatší, tím vyšší má penetraci. S touto vlastností

souvisí **absorpce** tkáněmi, tedy schopnost různých látek pohlcovat rentgenové paprsky. Tato vlastnost závisí především na **protonovém čísle** prvků absorbující tkáň a tloušťce objektu. Kostí absorbují výrazně, plíce minimálně.

Fotochemické účinky: RTG záření způsobuje zčernání fotografického filmu.

Luminiscenční účinky: při dopadu RTG záření na některé materiály – luminofory – vzniká viditelné záření.

Přímočaré šíření ze zdroje: RTG záření se šíří do prostoru na všechny strany a jeho **intenzita ubývá se čtvercem vzdálenosti**.

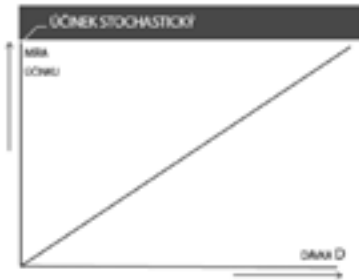
Rozptyl záření: při interakci fotonu s hmotou (elektronem) dochází k vychýlení paprsku a snížení jeho energie (zvětší se vlnová délka). Jde o negativní vlastnost pro diagnostiku, snižuje kontrast na snímku.

Biologické účinky: RTG záření může svými ionizačními účinky poškodit tkáň živých organismů.

Biologické účinky rentgenového záření

Absorpce energie ionizujícího záření má kvantový charakter, energie záření je předávána elektronům v obalech atomů a molekul ozařované hmoty či tkáň, kde dochází k excitacím a ionizacím atomů (vyrazení elektronu z obalu atomu). Radiolýzou vody zde vznikají vysoce reaktivní produkty jako např. hydroxylový radikál OH^- , vodíkový radikál H^+ , peroxid vodíku H_2O_2 . Každá biologická tkáň je jinak senzitivní k ionizujícímu záření, nejsenzitivnější jsou tkáň s velkou proliferační aktivitou, tj. kostní dřev, výstelka střev a kůže. Poškození tkáň závisí na dávce a na radiosenzitivitě tkáň. Biologické účinky rentgenového záření lze dělit na **deterministické** a **stochastické**. Účinky **deterministické se projevují na úrovni tkání**, mají určitý **přáh** a závisí na absorbované dávce (vyjadřují se v Gy). Účinky **stochastické** spočívají v indukci mutací v **jádrech buněk**, **jsou bezprahové** a pravděpodobnost jejich výskytu roste s efektivní dávkou (vyjadřují se v Sv). Nedá se tedy říct, že zcela nezávisí na dávce. Pro lepší pochopení věnujte pozornost rovněž níže přiloženým grafům (**obr. 4** a **obr. 5**). Klinicky dělíme biologické účinky na časně a pozdní. Z tohoto důvodu je třeba každé ozáření dobře zvážit a použít co nejnížší dávku záření dostačující pro kvalitní zobrazení, **princip ALARA (As Low As Reasonable Achievable)**. Efektivní dávka v radiodiagnostice se udává v milisievertch (mSv). Pro představu, prostý snímek hrudníku se pohybuje okolo 0,02–0,05 mSv, snímek páteře 1–2 mSv. Z přírodních zdrojů

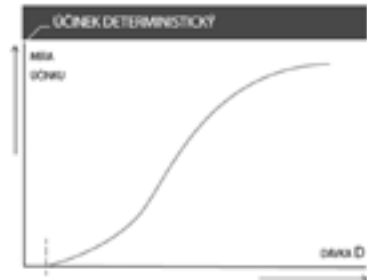
je přítom člověk v České republice ozářen dávkou zhruba 3 mSv/rok. V **obr. 6** najdete rovněž příklady některých expozičních limitů platných v ČR. **Tab. 1** přináší přehled rizika radiační zátěže na lidský plod během těhotenství.



ÚČINEK JE BEZPRAHOVÝ
PRŮBĚH JE LINEÁRNÍ

- genetické účinky
- karcinogeneze

Obr. 4: Graf stochastického biologického účinku ionizujícího záření



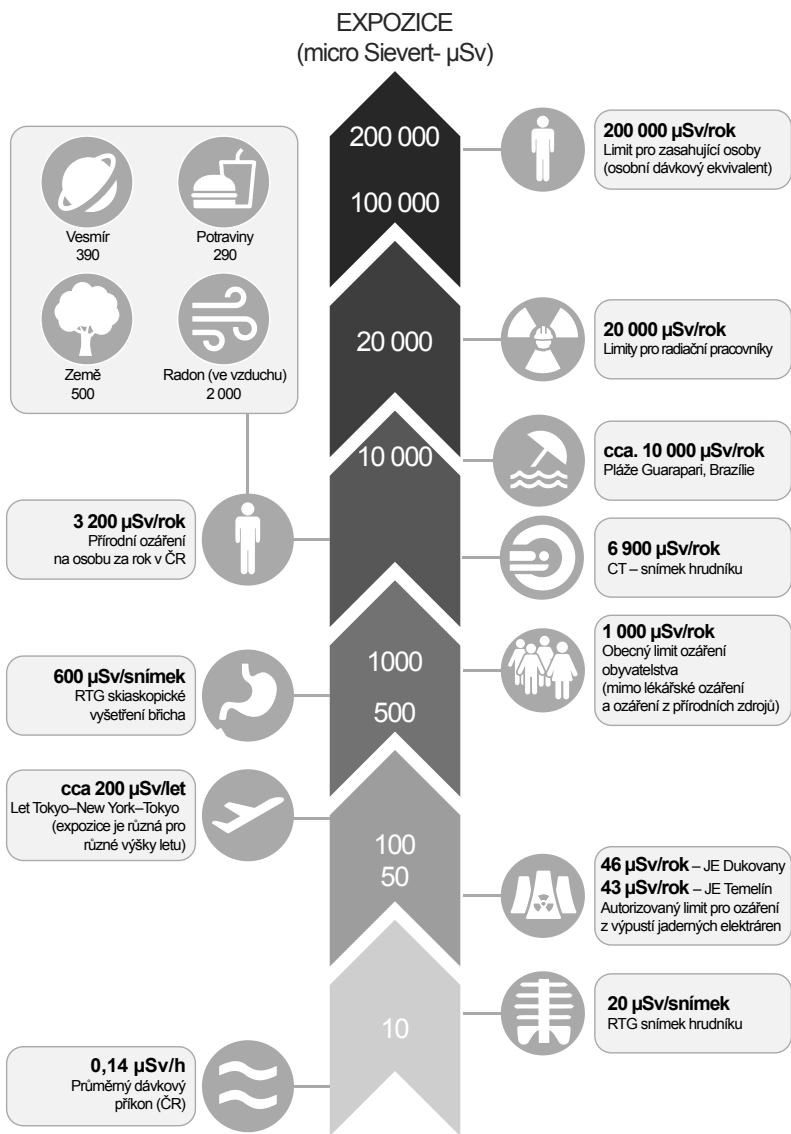
ÚČINEK MÁ PRAH
PRŮBĚH JE NELINEÁRNÍ

- poškození tkání
- nemoc z ozáření

Obr. 5: Graf deterministického biologického účinku ionizujícího záření

Tab. 1: Rizika radiační zátěže na lidský plod během těhotenství

Týden gravidity	Možný typ poruchy	Přirozený výskyt	Zvýšení rizika – dávka 100 mSv	Zvýšení rizika – dávka 1 mSv
0–2	spontánní potrat	25–50 %	0.50 %	zanedbatelné (menší než 1 : 100 000)
4–10	růstová retardace	5 %	0.01 %	není
8–25	mentální retardace	5 %	0.01 %	není
3–13	karcinogeneze leukemie	0.05 %	0.02 %	zanedbatelné
13–40	karcinogeneze leukemie	0.05 %	0.02 %	zanedbatelné
8–40	redukce IQ	1 %	0.01 %	není



Obr. 6: Ikonogram příkladů některých expozic ionizujícího záření včetně limitů platných v ČR

Příklady biologických účinků ionizujícího záření z praxe

Deterministické účinky

Smrt či akutní nemoc z ozáření (katastrofy jaderných elektráren jako Černobyl, Fukushima). Postiradiační chronická dermatitida rukou „starých“ radiologů, kteří si při skiaskopických a angiografických vyšetřeních nechránili ruce. Postiradiační kolitida u pacientů podstupujících radioterapii v oblasti břicha (léčba karcinomu prostaty). Postiradiační tuková degenerace kostní dřevě je běžně patrná u pacientů po radioterapii v dané oblasti.

Stochastické účinky

Genetické mutace zvířat v oblasti Černobylu, v lesích okolo Černobylu žijí těžce mutovaná zvířata. Leukemie, karcinogeneze u obyvatel přeživších jaderné katastrofy.

Ochrana před ionizačním zářením

Vlastní ochrana před ionizujícím zářením začíná již v momentě indikace radiologického vyšetření. Každý indikující lékař by měl pečlivě zvážit, zdali je radiologické vyšetření nutné ke stanovení diagnózy, co mu přinese a zdali by ke stejnému výsledku nemohl dospět jinými metodami, které s ionizujícím zářením nepracují. Dle národních radiologických standardů jakékoliv lékařské ozáření u dětí mladších 3 let a u těhotných žen musí schválit lékař radiolog a stejně tak musí schválit i každé CT, skiaskopické a angiografické vyšetření.

Radiologické přístroje jsou konstruovány tak, aby paprsek rentgenového záření byl maximálně možným způsobem kolimován a docházelo k minimálnímu vzniku sekundárního záření. Na každém pracovišti jsou vypracovány expoziční tabulky pro skiagrafická vyšetření a při všech rentgenových vyšetřeních se používají clony k vymezení primárního svazku záření paprsku (blíže bude osvětleno v kapitole 1.2), což výrazně přispívá k redukci dávky podobně jako práce s expoziční automatikou.

CT přístroje mají rovněž přednastavené protokoly s maximální snahou o redukci dávky a je rovněž možné využívat v některých případech nízkodávkové (low dose) CT. Nové typy sofistikovaných iterativních rekonstrukcí CT obrazů z nasnímaných dat redukuje šum v obrazu a umožňují tak vyšetřovat s nižší dávkou.

Na radiologických odděleních jsou rovněž povinné speciální stavební úpravy, které vycházejí ze zákonných norem, jako např. barytové omítky, olověná skla a dveře. Jsou vymezena sledovaná a kontrolovaná pásma, kde je zvláštní režim s monitorací všech osob vstupujících do místa, kde hrozí ozáření. Radiologičtí pracovníci jsou povinni nosit osobní dozimetry k monitoraci obdržené dávky, chránit se olověnými zástěrami a nákrčníky v případě, že pracují přímo v místnosti, kde dochází k produkci ionizujícího záření (skiaskopie a skiografie, DSA). Pokud se jejich ruce dostávají do blízkosti primárního rentgenového svazku, pak je monitorována i dávka obdržená na ruce prstovým (prstýnkovým) dozimetrem.

1.2 Rentgenový přístroj, princip skiografie, skiaskopie a digitální subtrakční angiografie

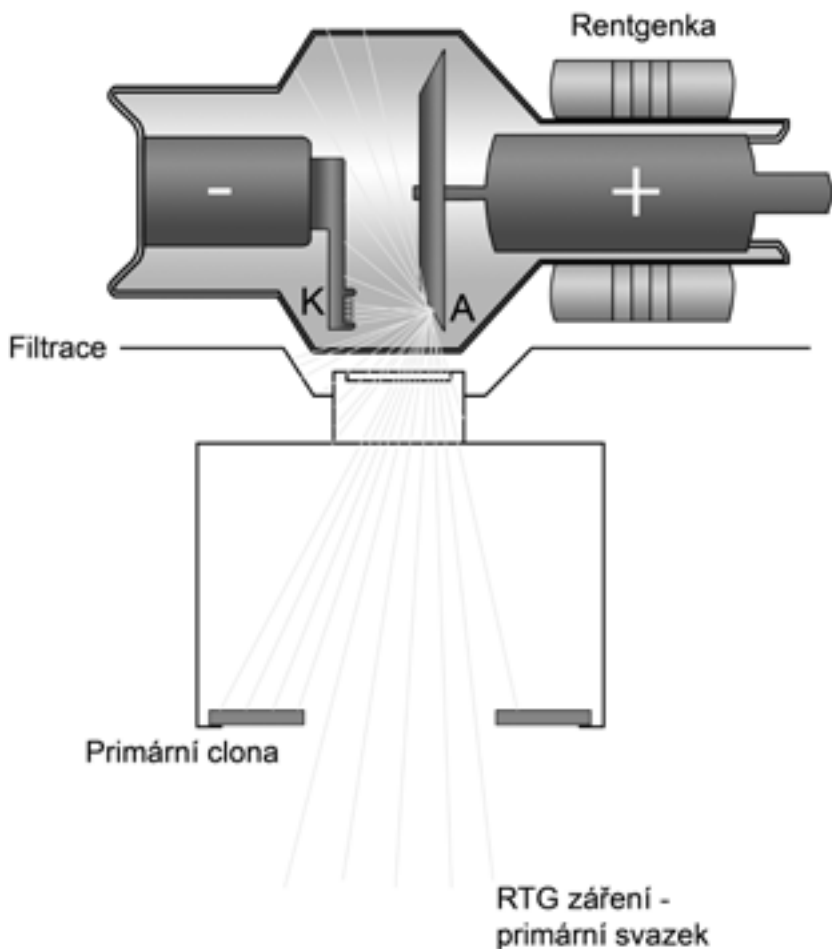
Konstrukce rentgenového přístroje

Rentgenové přístroje se skládají z následujících součástí (**obr. 7**):

- rentgenka,
- systém filtrace (filtr),
- kolimační systém – primární clony,
- světelný lokalizační systém,
- sekundární clona (mřížka),
- receptor obrazu (film, detektor).

Filtry slouží k odfiltrování měkkého RTG záření (záření delších vlnových délek) od tvrdšího záření s penetrací potřebnou pro vlastní snímkování. Měkké záření způsobuje nežádoucí radiační zátěž pacienta. Filtry se vyrábějí z hliníku, mědi, cínu, berylia, molybdenu, wolframu atd. Primární clony určí, na jak velký prostor má svazek RTG záření dopadat. Jsou uloženy mezi pacientem a rentgenkou. Sekundární clona (mřížka) eliminuje sekundární záření (rozptýlené záření vznikající ve vyšetřovaném těle rozptylem), je umístěna mezi pacientem a detektorem. K detekci RTG záření se dnes již nepoužívají filmy, snímky se zhotovují digitálně, a to nepřímou či přímou digitalizací.

Přímá digitalizace (digital radiography – DR) je založená na principu přímého převodu RTG záření na digitální signál v plochem detektoru (flat panel). Odpadá manipulace s kazetami a fóliemi (**obr. 8**).



Obr. 7: Zjednodušené schéma rentgenového přístroje (K – katoda; A – anoda)

Při **nepřímé digitalizaci (computed radiography – CR)** RTG záření dopadá na kazetu s paměťovou fólií s citlivou vrstvou obsahující luminofor, která je stimulována v závislosti na množství dopadajícího záření. Tato obrazová informace je dekodována „čtecím zařízením – CR čtečka“, do které je třeba snímkanou kazetu manuálně založit. Ve čtečce je paměťová fólie skenována laserem, množství uvolněné energie v každém místě