



# BIOFYZIKÁLNÍ ÚSTAV AVČR

Dpt. buněčné biologie a  
radiobiologie

Martin Falk

([falk@ibp.cz](mailto:falk@ibp.cz))

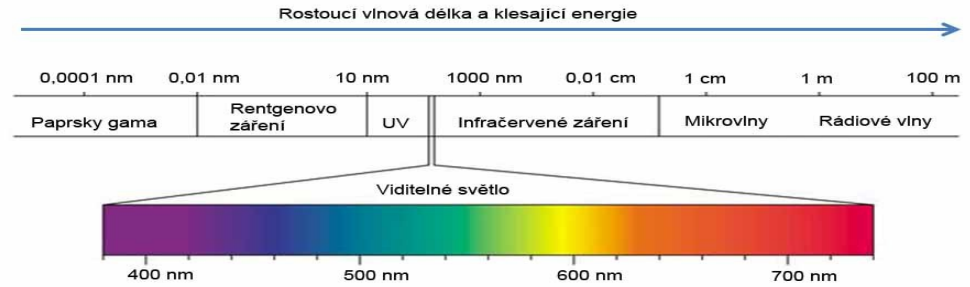
# RADIAČNÍ BIOFYZIKA 1.



Martin Falk, Biofyzikální ústav AVČR, Brno; [falk@ibp.cz](mailto:falk@ibp.cz)

# RADIOBIOLOG

- výzkum vlivu záření na biologické objekty
- v užším slova smyslu – vliv ionizujícího záření



Obr. Elektromagnetické spektrum

## OBJEV RADIOAKTIVITY a PRVNÍ VÝZKUMY

**Wilhelm Conrad Röntgen**

**8. listopadu 1895**

„To, co vidíme, jsou kosti vaší ruky...“



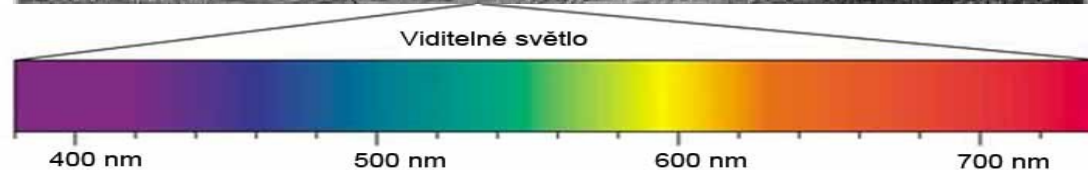
**Antoine Henri Becquerel**

**18. května 1896**

1903 – spolu s Pierre a Marií Curie - Nobelova cena za fyziku za objev radioaktivity

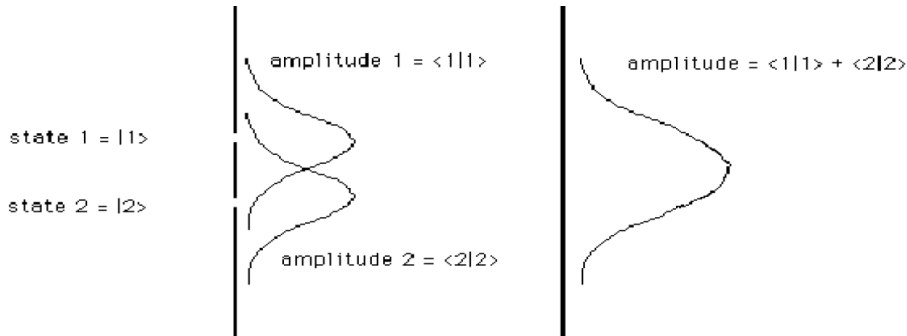


# ZÁŘENÍ



Kromě postulování tří Newtonových zákonů, které ho proslavily, zabýval se Newton také studiem světla. Používal k tomu různé hranoly a již ve svých 23 letech zjistil, že **světlo se dá rozložit na barevné spektrum** (viz obr.). Dále zjistil, že světelné spektrum se dá zase spojit použitím druhého hranolu. Vymezením se dá získat světlo určité barvy. Newton si představoval světlo jako **proud částic různé velikosti**. Jestliže narážejí v hranolu na částice stejné hmotnosti, pak nejméně se budou odrážet částice s největší hmotností.

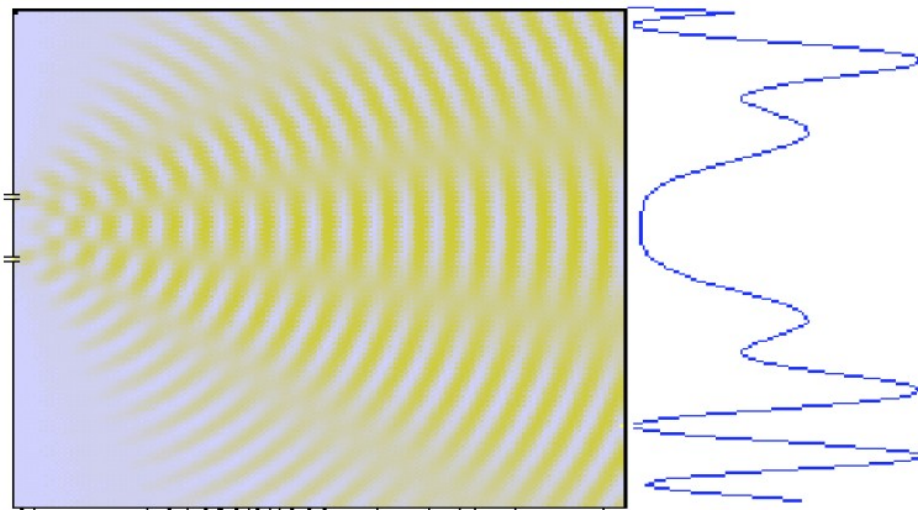
# Světlo jako vlnění



**Obr. 5.** Průchod světla dvěma štěrbinami by měl dát na stínítku součet osvětlení od jednotlivých štěrbin (vpravo)

Vlnové vlastnosti světla studoval **Thomas Young** na začátku 19. století

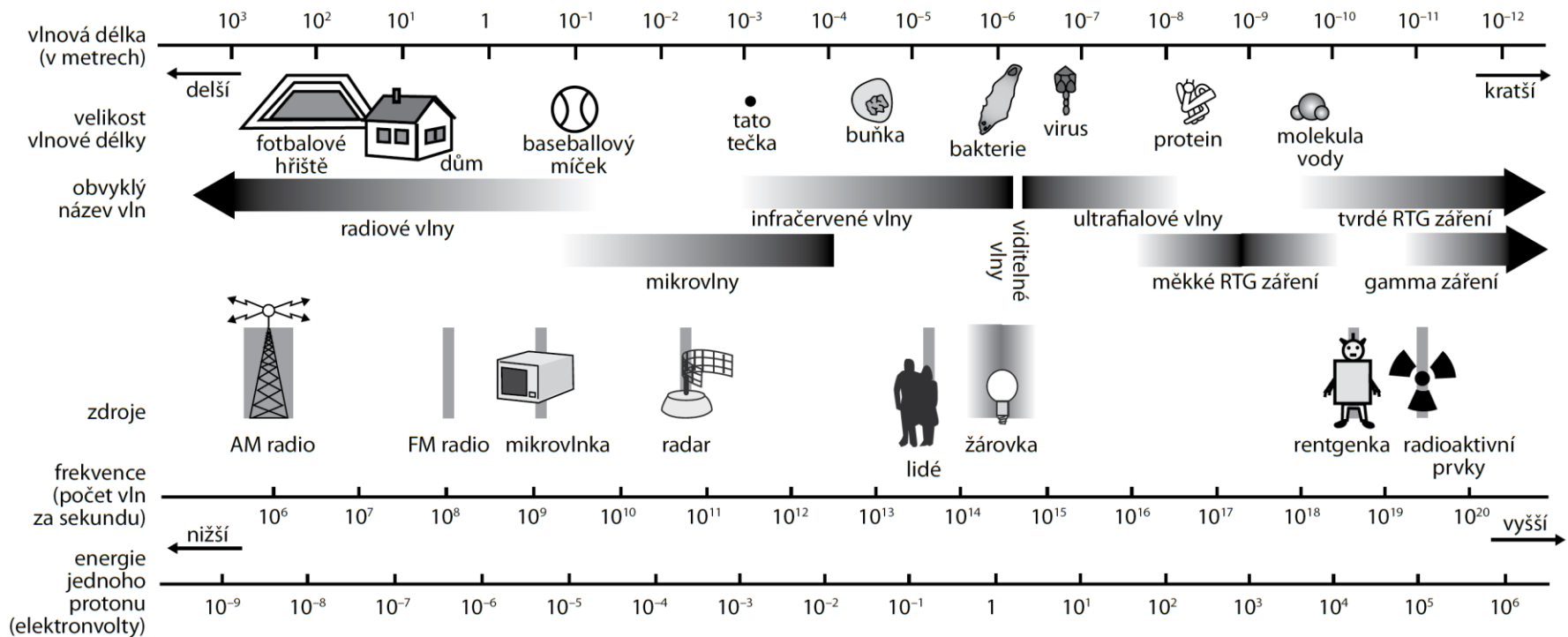
- Klasický experiment, v němž světlo prochází dvěma štěrbinami (obr. 5).
- Průchod světla dvěma štěrbinami by měl dát na stínítku součet osvětlení od jednotlivých štěrbin (vpravo)
- místo toho však pozoroval interferenční obrazec (obr. dole).
- Tento obrazec lze vysvětlit za předpokladu, že se světlo šíří ve formě vlnoploch (jako vlny na hladině rybníka), tj. v každém bodě kde světlo vnikne dochází ke vzniku nové vlnoplochy → elektromagnetické vlnění



Interference světla ze dvou štěrbin

# Druhy elektromagnetického záření

- Podle vlnové délky či frekvence můžeme rozdělit elektromagnetické vlny na několik skupin
- **Radiové vlny:** délkou odpovídají rozměrům fotbalového hřiště
- **Mikrovlny:** (v mikrovlnné troubě) mají velikost asi baseballového míčku,
- **Viditelné spektrum:** vlny rozměrově odpovídají bakteriím
- **Ionizující záření (RTG a gama záření):** < velikosti molekuly

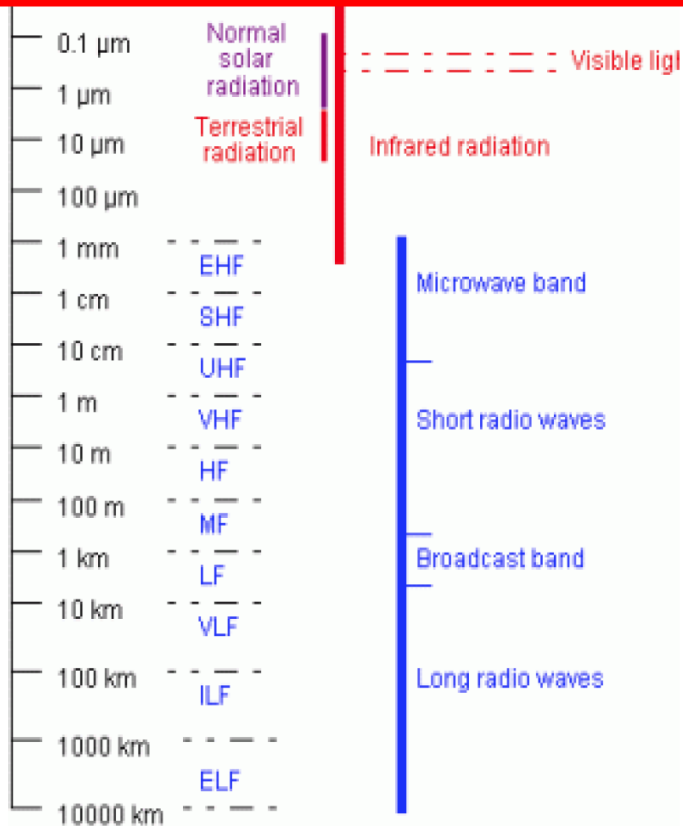


Vlnová délka [ $\lambda$ ]

Druh záření

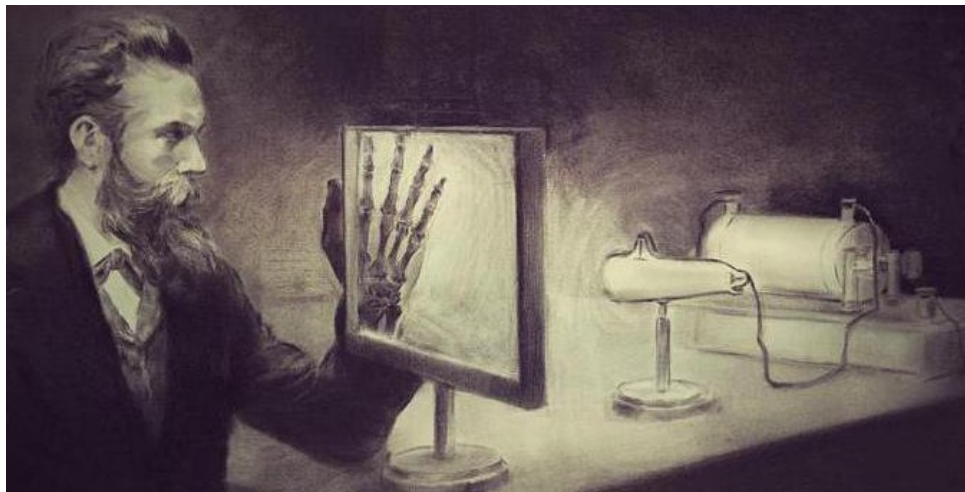
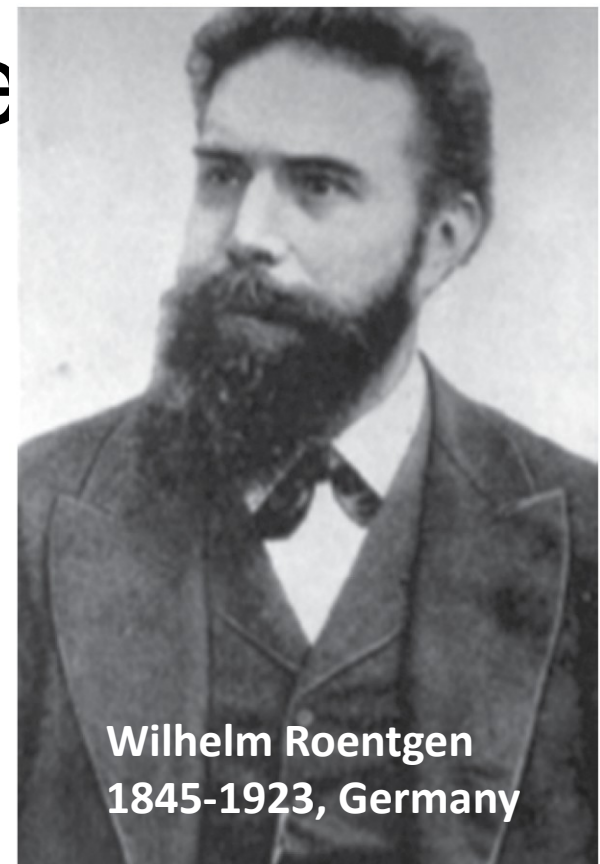
# IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

- Jak je zřejmé z vlastního pojmenování, ionizující záření definujeme jako záření, jehož kvanta mají dostatečnou energii k ionizaci atomů
- tj. odtržení elektronu z jejich elektronového obalu.
- Minimální energie potřebná k ionizaci ve vodném prostředí (cytoplazma) je **33 eV**.
- To odpovídá záření s kratší vlnovou délkou, než přísluší ultrafialovému záření, přibližně **<40 nm**.
- Vztah mezi energií fotonu a vlnovou délkou je dán rovnicí
- **$E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda$**
- kde E = energie fotonu, f = frekvence, h = Planckova konstanta a  $\lambda$  = vlnová délka.



# Objev ionizujícího záře

- Den-D: 8. listopad 1895, Místo-M: Universita ve Würzburgu,
- **Wilhelm Roentgen**
- Experimentoval s katodovými paprsky v temné komoře
- zkoumal světélkující fluorescenční stínítko (pokryté fluorescenční látkou, obvykle kyanidem platičitobarnatým), ve kterém byla fluorescence indukována katodovými paprsky, jež vznikaly po dopadu elektronů na antikatuodu ve vakuové trubici (viz dále).
- Zjistil, že fluorescence nemizí ani při zaclonění trubice černým papírem, ani když mezi trubici a stínítko vložil tlustou knihu; stínítko fluoreskovalo i na vzdálenost 2 metrů
- Když poté vkládal mezi lampu a stínítko další různé předměty, zjistil, že jimi paprsky X procházejí různě intenzivně. Teprve když mezi trubici a stínítko umístil kovový předmět, na stínítku se ukázal stín
- Jednou takto vložil mezi lampu a stínítko **NÁHODOU** svou ruku a uviděl ke svému velkému překvapení kosti prstů.





# Objev ionizujícího záření

- Usoudil, že se jedná o neviditelné záření, které vzhledem k jeho neznámé povaze pojmenoval podle matematického symbolu pro něco neznámého jako **PAPRSKY X**. V roce 1896 byly na jeho počest pojmenované na rentgenové paprsky.
- Pojmenování **X-Rays** se dodnes užívá v anglosaské literatuře, u nás se většinou upřednostňuje název **RTG záření**.
- Během dvou měsíců publikoval pečlivý popis výsledků svého výzkumu. [28. prosince 1895](#) napsal předběžnou zprávu „*O novém druhu paprsků*“. Poslal ji do žurnálu [Würzburgské](#) lékařské společnosti.
- Nebýt však zakrytí výbojové trubice černým papírem (světélkování trubice narušovalo jeho experiment) a náhodného stínu na světélkujícím stínítku, nebyl by možná Roentgen vkládal mezi trubici a stínítko různé předměty (včetně své ruky). Dělal by dál zajímavé pokusy s katodovými trubicemi stejně jako desítky dalších experimentátorů v té době, ale nové pronikavé záření by asi nenašel (ostatně, toto X-záření ve stejné době nezávisle objevili H.Jackson a A.A.Campbell-Swinton).
- Objev byl natolik překvapivý, že ho jeprve odmítali i slavní vědci (např. Kelvin). Překvapen byl i sám Roentgen, který proto pronesl „I did not think, I investigated“ (tedy něco ve smyslu „Nevymyslel jsem to, ale objevil“)
- Ve skutečnosti k objevu rentgenového záření přispělo mnoho významných vědců jako Ivan Pului, sir William Crookes, Johann Wilhelm Hittorf, Eugene Goldstein, Heinrich Hertz, Philipp Lenard, Hermann von Helmholtz, Nikola Tesla, Thomas Alva Edison, Charles Glover Barkla a Wilhelm Conrad Röntgen.



Okénko Haliny Pawlowské

NEVYMÝŠLEJTE, BÁDEJTE ;-)

# Historicky první rentgenový snímek

- Roentgen popsal i další vlastnost RTG záření, např. že vyvolává zčernání fotografické desky.
- ...a měsíc po svém objevu zhotovil (opět náhodou??) historicky první rentgenový snímek na světě, obraz ruky své manželky s kovovým prstenem na fotografickou desku.
- Toto datum je pokládáno za den zrození nového lékařského oboru – **radiologie**.



# Historicky první rentgenový snímek

„To, co vidíme, jsou kosti vaší ruky...“



▲  
A historic photograph of Roentgen's wife's hand (left) contrasted with a present-day X-ray photograph (right) (source Internet)

▲  
*Ruka s prsteny* – jeden z prvních rentgenových snímků [Wilhelma Röntgena](#), na které je ruka jeho ženy (snímek byl pořízen náhodou); pořídil ji 22. prosince 1895 a prezentoval [profesoru Ludwigu Zehnderovi](#) z Institutu Fyziky na [Freiburské univerzitě](#) 1. ledna 1896

# RDG včera a dnes

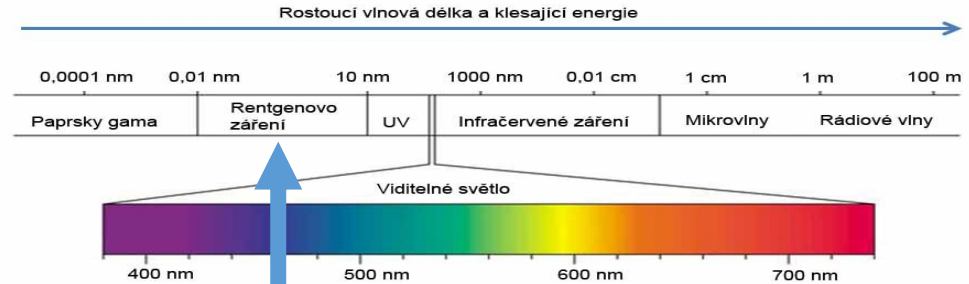


A historic photograph of Roentgen's wife's hand (left) contrasted with a present-day X-ray photograph (right) (source Internet)

# Roentgen obdržel za objev pársků X (RTG) v roce 1901 **Nobelovu cenu za fyziku**



**Wilhelm Conrad Röntgen**  
8. listopadu 1895



# Wilhelm Roentgen

- V roce 1901 získal W. C. Röntgen jako první Nobelovu cenu za fyziku, ale svůj
- objev nikdy nepatentoval, což umožnilo jeho rychlé rozšíření do praxe.
- Zemřel v roce 1923 v Mnichově zcela bez finančních prostředků.



Okénko Haliny Pawlowské

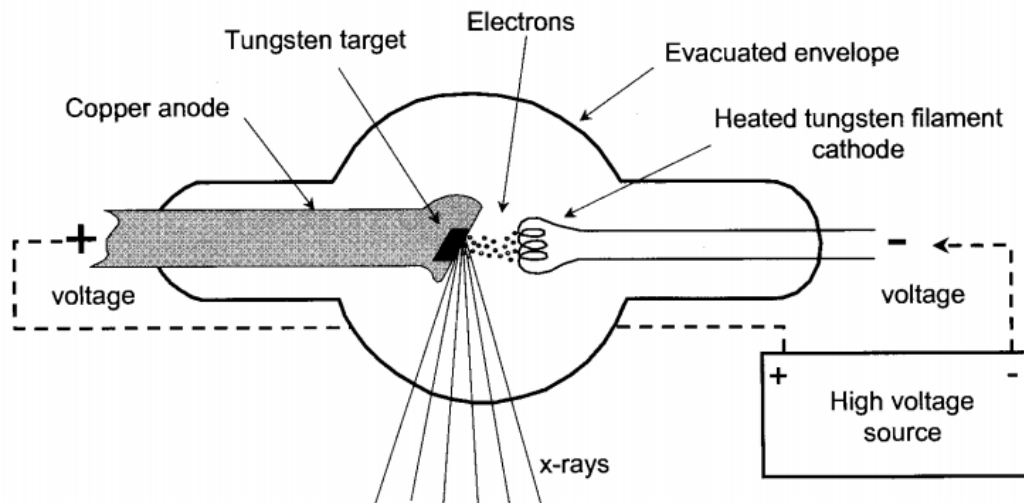
PATENTUJTE, PATENTUJTE, PATENTUJTE!

# Vznik RTG záření, RENTGENKA

Rentgenka, správně nazývaná **rentgenová lampa** (angl. *X-ray tube*).

Obecně - vakuová elektronka

Zjednodušeně je to trubice s vakuem uvnitř, jejíž součástí je (žhavená) katoda, která slouží jako zdroj elektronů. Tyto elektrony jsou urychlovány, dopadají na terčík neboli anodu, čímž vzniká rentgenové záření. Rentgenka tedy **slouží k produkci rentgenového záření**.



Katodové trubice byly vlastně prvními jednoduchými urychlovači elektronů a později se z nich vyvinuly obrazovky

# Vznik RTG záření, RENTGENKA

- Röntgen předpokládal, že pronikavé záření vzniká ve zředěném plynu katodové trubice,
- nicméně další experimenty prokázaly, že RTG záření pochází z anody při interakci zabrzděných elektronů s materiálem anody.
- Zdrojem rentgenového záření není tedy samotný výboj v plynu, kterým pouze procházejí urychlené elektrony na anodu.
- Naopak odstranění (vyčerpání) plynu a použití žhavené katody zvýší účinnost vzniku RTG záření, čehož se využívá ve vakuových rentgenkách
  - Zelektrujeme-li skleněnou tyč a přiblížíme-li k ní na určitou vzdálenost prst přeskočí elektrická jiskřička
  - Kdybychom však např. konce drátů pražské osvětlovací sítě přiblížili k sobě, nestane se nám nic podobného. Proč? Poněvadž napětí elektrického proudu je velmi malé
  - k přeskočení výboje 1 cm dlouhého je zapotřebí napětí asi 25.000 volt. Vzduch totiž klade přechodu elektřiny ohromný odpor, který dá se i při poměrně krátké dráze překonat jen vysokým napětím
  - Zředíme-li však v rentgence vzduch, elektrický výboj proběhne při stejném napětí mnohem delší dráhu než za normálního tlaku



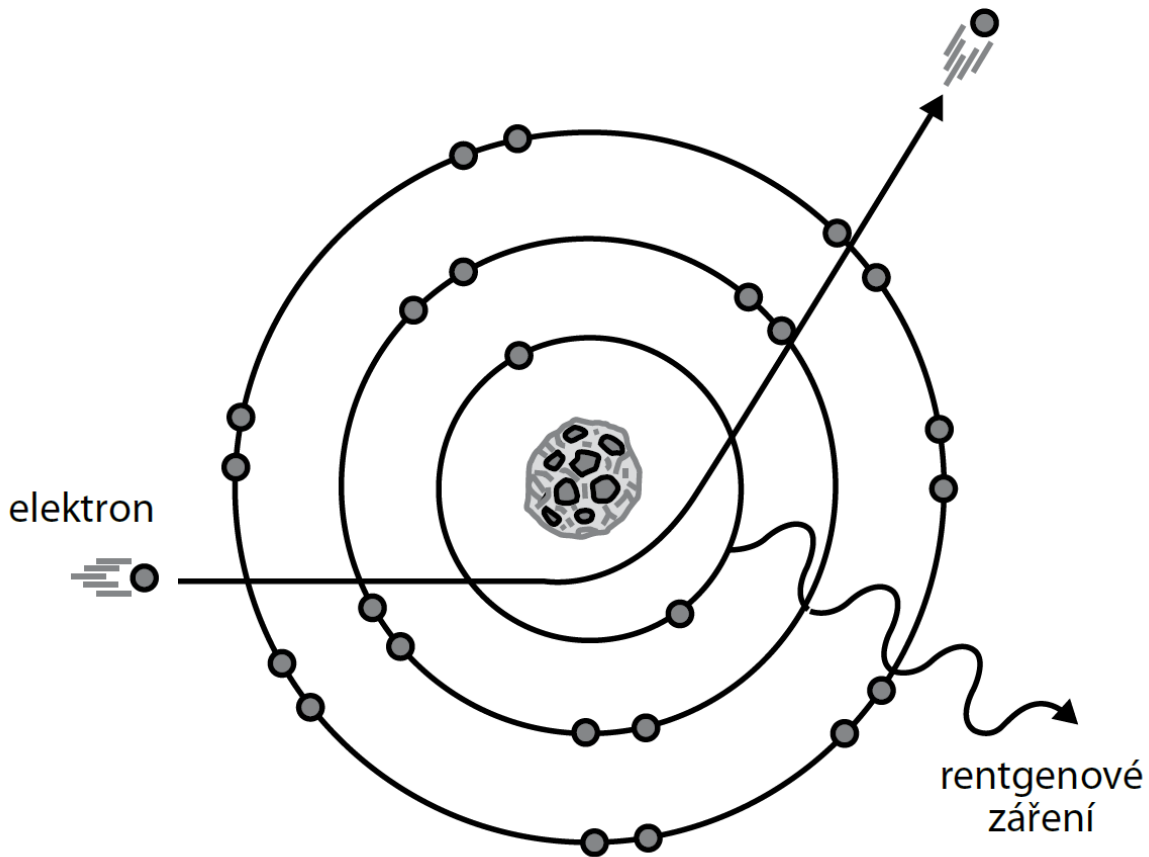
# Rentgenka

- Z elektronického hlediska je rentgenka klasická **dioda** zapojená v obvodu s vysokým napětím cca 20–200 kV
- Žhavená **katoda** (napojená na záporný pól) emituje elektrony, které jsou urychlovány silným elektrickým polem daným vysokým napětím mezi katodou a anodou.
- **Anoda** (napojená na kladný pól) je zhotovena z těžkého materiálu (nejčastěji z wolframu), který má vysokou elektronovou hustotu, takže dopadající elektrony jsou velkou odpudivou silou prudce brzděny, čímž se podle zákonitostí elektrodynamiky část jejich kinetické energie mění v brzdné elektromagnetické záření, resp. fotony RTG záření.
- Po dopadu na anodu tedy pronikají elektrony několika vrstvami atomů anody a prudce se zbrzdí, dokud neztratí svou kinetickou energii
- Většina (99 %) jejich kinetické energie se přemění na teplo. Rentgenka se proto silně ohřívá a musí se chladit
- Jen malá část kinetické energie elektronů zachycených anodou se přemění na RTG záření
- Vznikající záření RTG je dvojího druhu
  - **brzdné záření**
  - a **charakteristické záření**
- RTG záření opouští anodu a vylétá z trubice ven.

# Brzdné RTG záření

- Brzdné RTG záření je převažující typ záření vznikajícího v rentgence.
- Vzniká zpomalením letícího elektronu blízko jádra atomu. Jádro je kladně nabitě a přitahuje elektron, který změní směr letu a zpomalí. Rozdíl energie je přeměněn na záření různých frekvencí.
- Čím blíže se dostane elektron k jádru a čím větší je jeho energie, tím větší bude energie vznikajícího kvanta RTG záření.
- Charakteristiky brzdného záření tedy nezáleží na materiálu anody

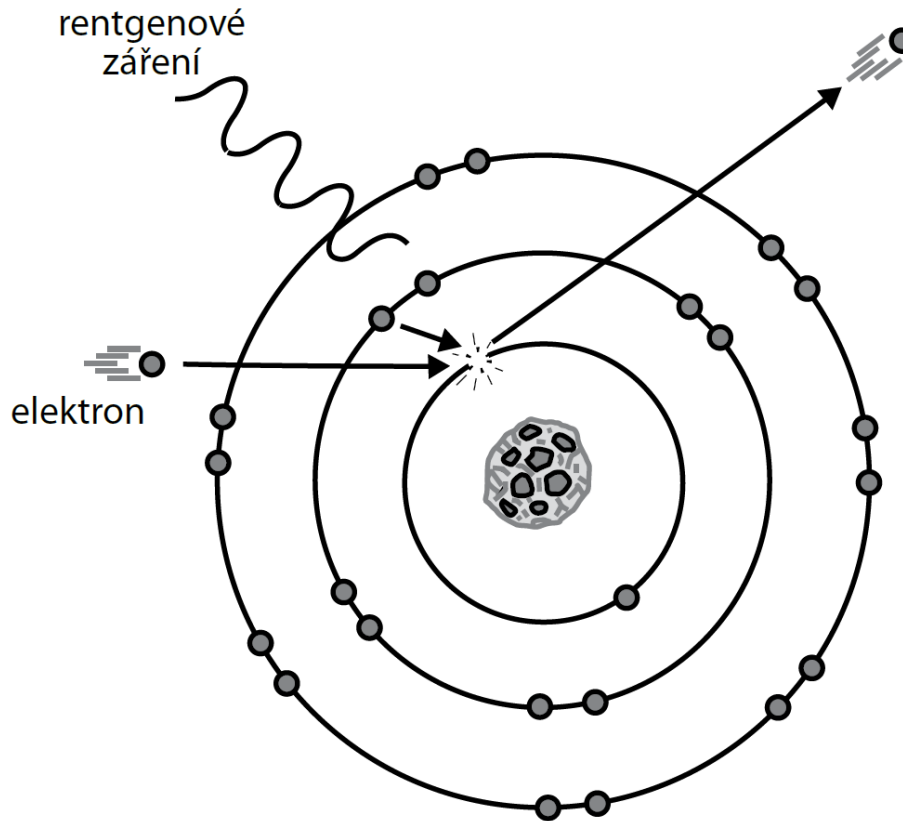
- **brzdné záření** vzniká následkem **interakce s polem jádra atomu**



# Charakteristické RTG záření

- Charakteristické RTG záření vzniká při srážce letícího elektronu (z anody rentgenky) a elektronu z elektronového obalu atomu na katodě.
- Původní elektron je vyražen ven z atomu (ionizace). Vznikne „díra“, která je ale následně zaplněna elektronem z jedné z hladin vzdálenějších od jádra, přičemž se uvolní značné množství energie ve formě fotonu RTG záření.
- Energie záření je rovna energetickému rozdílu mezi elektronovými hladinami, mezi kterými došlo k přeskoku elektronu
- Energie charakteristického RTG záření tak záleží na materiálu, ze kterého je anoda vyrobena
- čím je protonové číslo kovu anody vyšší, tím vyšší je energie charakteristického záření.

**brzdné záření** vzniká následkem **interakcí s obalovými elektrony**



# Konstrukce rentgenky

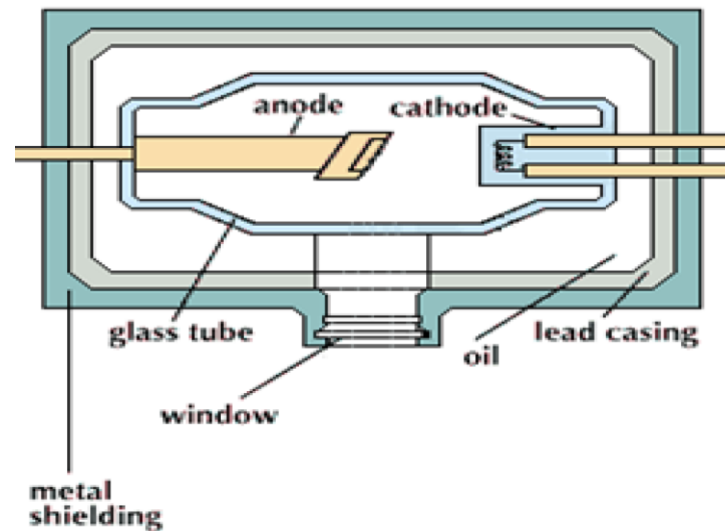
- Základní součástí každé rentgenky je **katoda** a **anoda**, mezi kterými je udržován elektrický potenciál. Další nepostradatelnou součástí rentgenky je **rotor** a **evakuovaná baňka**
- **Katoda** tvořená spirálovitě navinutým wolframovým vláknem (s příměsí thoria, které zvyšuje efektivitu emise elektronů a prodlužuje životnost katody) o tloušťce 0,2 mm, proto někdy nazývaná katodové vlákno, **slouží k produkci elektronů**.
- Toto vlákno je elektricky připojeno ke žhavicímu obvodu. Při průchodu elektrického proudu o velikosti cca 6-8 A žhavicím obvodem, a tedy i katodovým vláknem, dochází vlivem velké teploty (2000 °C) k termoemisi elektronů (Edisonův efekt).

# Konstrukce rentgenky

- Aby se zabránilo tepelnému zničení anodového terčíku, je potřeba vhodně zvolit materiál anody a také dostatečně odvádět nepotřebné teplo.
- **Anoda** je nejčastěji vyrobena z wolframu, protože wolfram má vysoký bod tání.
- Wolfram je vhodný také z toho důvodu, že díky vyššímu atomovému číslu se zvyšuje produkce fotonů rentgenového záření (více dále).
- Pro lepší odolnost terčíku se do wolframu přidává přibližně 10 % rhenia. V mamografii se místo wolframového terčíku používá terčík molybdenový a rhodiový
- **Rotační anoda.** U rotační anody dopadá svazek elektronů na plošinku terčíku, který však stále rotuje a teplo je tedy rozloženo na větší plochu. To umožňuje větší zatížení rentgenky. Rotační anody jsou s výhodou používány ve většině diagnostických aplikací, protože efektivněji odvádějí teplo a umožňují tak produkci většího množství fotonů potřebných pro prozáření větších objemů, aniž by došlo ke zničení terčíku.

# Konstrukce rentgenky

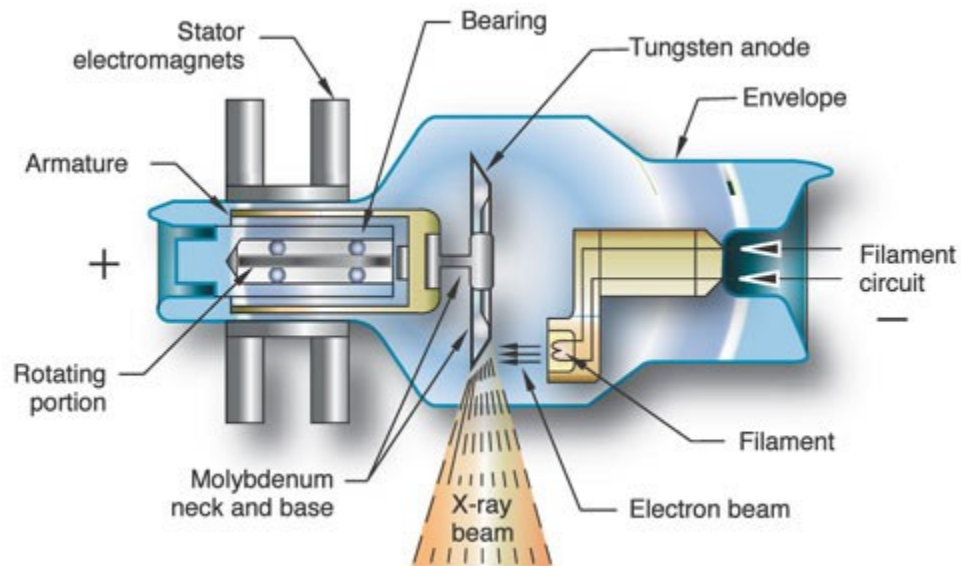
- **Evakuovaná baňka** rentgenky, ve které je umístěna katoda i anoda, je obvykle vyrobena ze skla a její hlavní funkcí je udržování vakua v trubici.
- Baňka je obtékána olejem, který tak odvádí teplo z rentgenky. Baňka bývá ještě uschována v krytu, jehož součástí je i olovo, které slouží k odstínění nepotřebného mimoohniskového záření



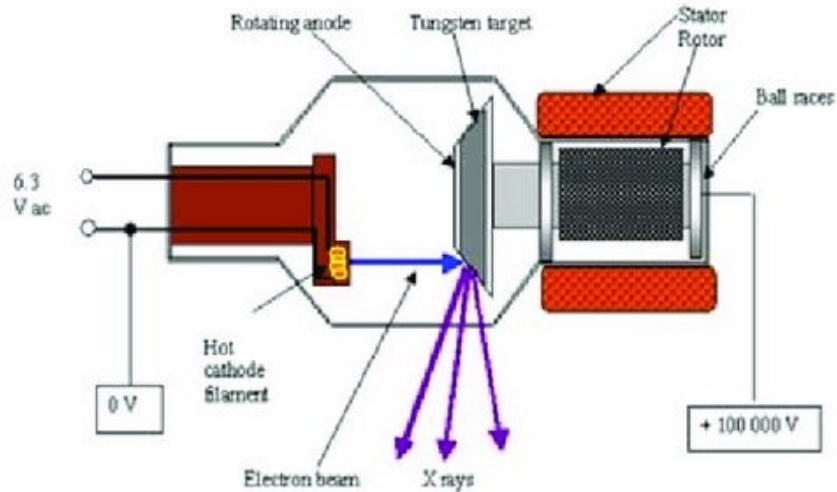


# Konstrukce rentgenky

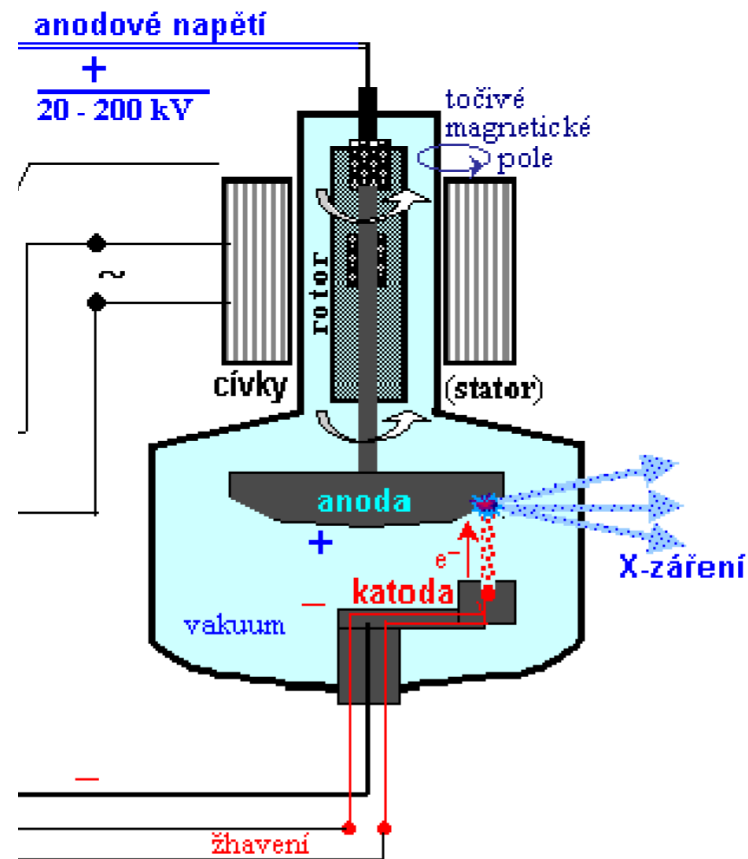
- Uvnitř evakuované baňky je umístěn také **rotor**. Rotor je tvořen měděným blokem, na kterém je molybdenová osa pro upevnění terčíku. **Stator**, tvořený elektromagnety, je umístěn vně evakuované baňky. Stator a rotor tvoří společně indukční motor, kterým je poháněn terčík. Rotační anoda rotuje s frekvencí až 10 000 otáček za minutu



# Konstrukce rentgenky



Již pokročilejší rentgenka



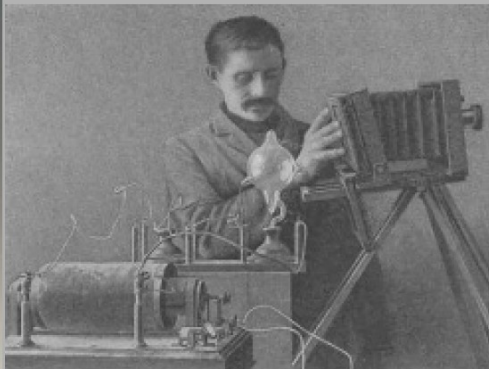
# Elektrické napájení rentgenky a regulace produkce RTG záření

- Rentgenka, jako elektronický zdroj záření, vyžaduje patřičné elektrické napájení dodávající elektrickou energii generující RTG záření a zajišťující další funkce nezbytné pro správný provoz zařízení. Rentgenka má tři základní zdroje napájení: žhavicí napětí, anodové napětí, rotace anody
- **Anodové napětí** – určuje maximální i střední energii fotonů výsledného RTG záření, tj. jeho „tvrdost“. V praxi se anodové napětí pohybuje v širokém rozmezí od cca 20 kV do 200 kV (v závislosti na druhu zobrazovaných struktur); nižší napětí = měkčí záření.
- **Anodový proud, expozice** protékající rentgenkou určuje intenzitu RTG záření emitovaného rentgenkou. Lze jej regulovat **změnou žhavení katody**, žhavicího proudu, a tím teploty vlákna katody. Při vyšším žhavení vlákna katody je emitováno více elektronů, rentgenkou protéká vyšší proud a je vyzařována vyšší intenzita RTG záření. Průměrný proud rentgenkou se pohybuje v rozmezí jednotek mA – až asi 200 mA, okamžitý proud může být i podstatně vyšší (v pulzním režimu).

# Elektrické napájení rentgenky a regulace produkce RTG záření

- Z rentgenodiagnostického hlediska: Celkové množství fotonů RTG záření (expozice) určuje kvalitu RTG snímků a též radiační zátěž pacienta.
- Kvalita je dána součinem intenzity záření (fluence fotonů/s) a expozičního času  $T$ ,
- je tedy úměrná součinu anodového proudu rentgenkou (mA) a expozičního času (s): „**miliampér-sekundy**“  $\text{mA}\cdot\text{s} = Q$
- Pro pořizování běžných skiagrafických snímků
  - měkkých tkání se používá expozice na rentgence asi 2–6 mAs
  - u skeletu cca 20–80 mAs, u CT i 200 mAs
- Trendem u moderních RTG přístrojů schopných pracovat v pulzním režimu s vysokým okamžitým výkonem se pro dosažení požadované expozice (mAs) dává přednost vysoké hodnotě proudu (mA) při krátkém expozičním času (s) – snižuje se tím riziko rozmazání snímku pohybem pacienta.

# PRVNÍ RENTGENKY se „studenou katodou“: katodové trubice se speciálně upravenými elektrodami



Jacksonova rentgenka s  
konkávní fokusační katodou



Výboj ve zředěném plynu → ionizace → uvolnění elektronů  
→ urychlení k anodě → dopad na antikatodu →  
→ vznik brzdného X-záření

# VAKUOVÉ RENTGENKY SE ŽHAVENOU KATODOU:

žhavaná katoda → termoemise elektronů → urychlení k anodě → brzdné X-záření



W.D.Coolidge r.1913:  
rentgenka se žhavenou katodou



Kenotron Philips 28136

Kenotron - usměrňovací vysokonapěťové diody se žhavenou katodou



Coolidgeovy rentgenky

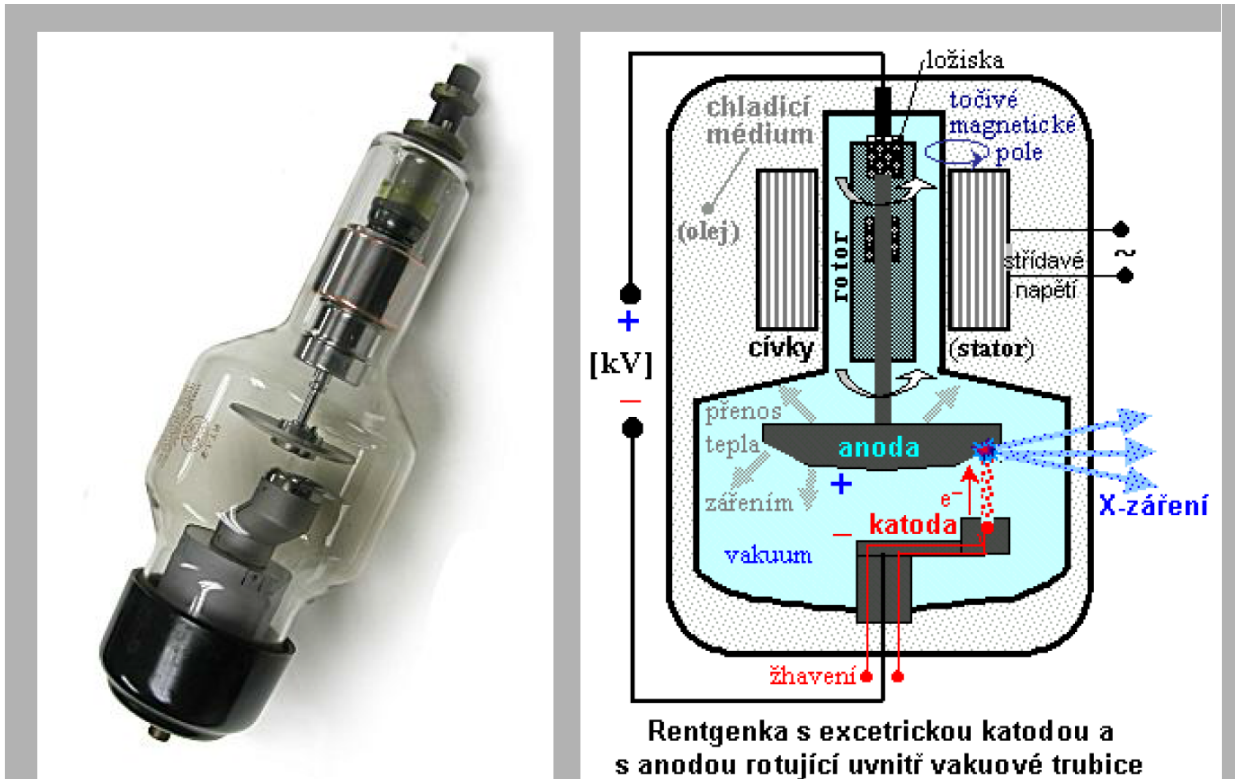


# VAKUOVÉ RENTGENKY SE ŽHAVENOU KATODOU

žhavaná katoda → termoemise elektronů → urychlení k anodě → brzdné X-záření

a

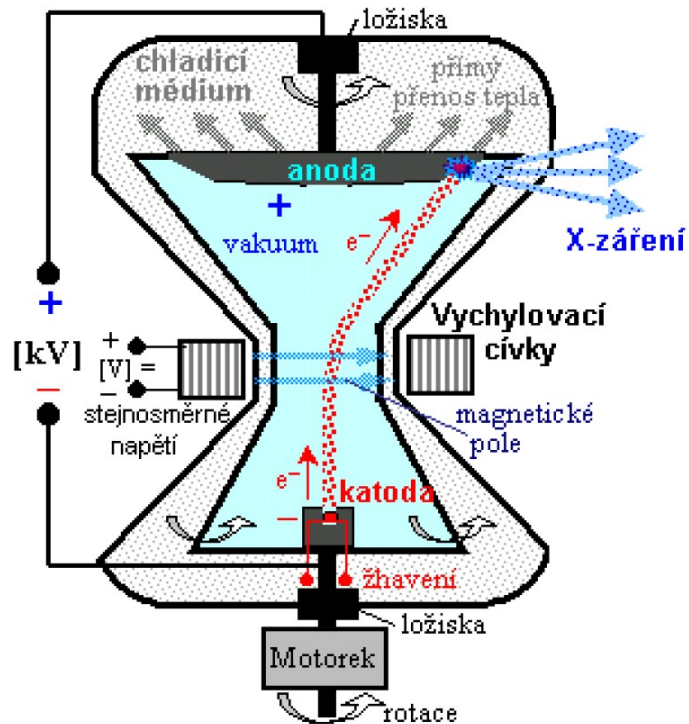
## ROTUJÍCÍ ANODOU:



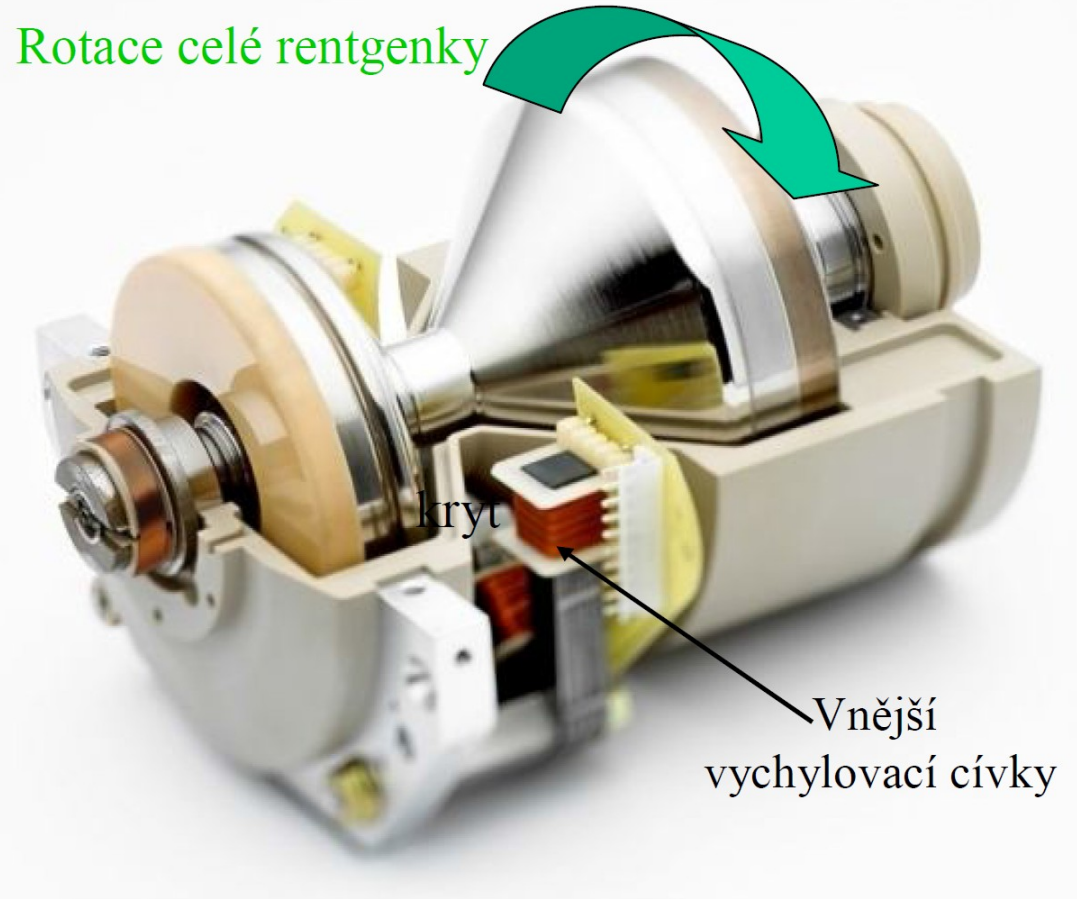
W.D.Coolidge r.1915 + General Electric  
rentgenka se žhavenou katodou a rotující anodou

# Rentgenka rotující jako celek

s čelní anodou v přímém styku s chladicím médiem  
a s magnetickým vychylováním elektronového toku



Rentgenka rotující jako celek s čelní anodou  
a magnetickým vychylováním elektronového svazku



Rentgenka typu STRATON

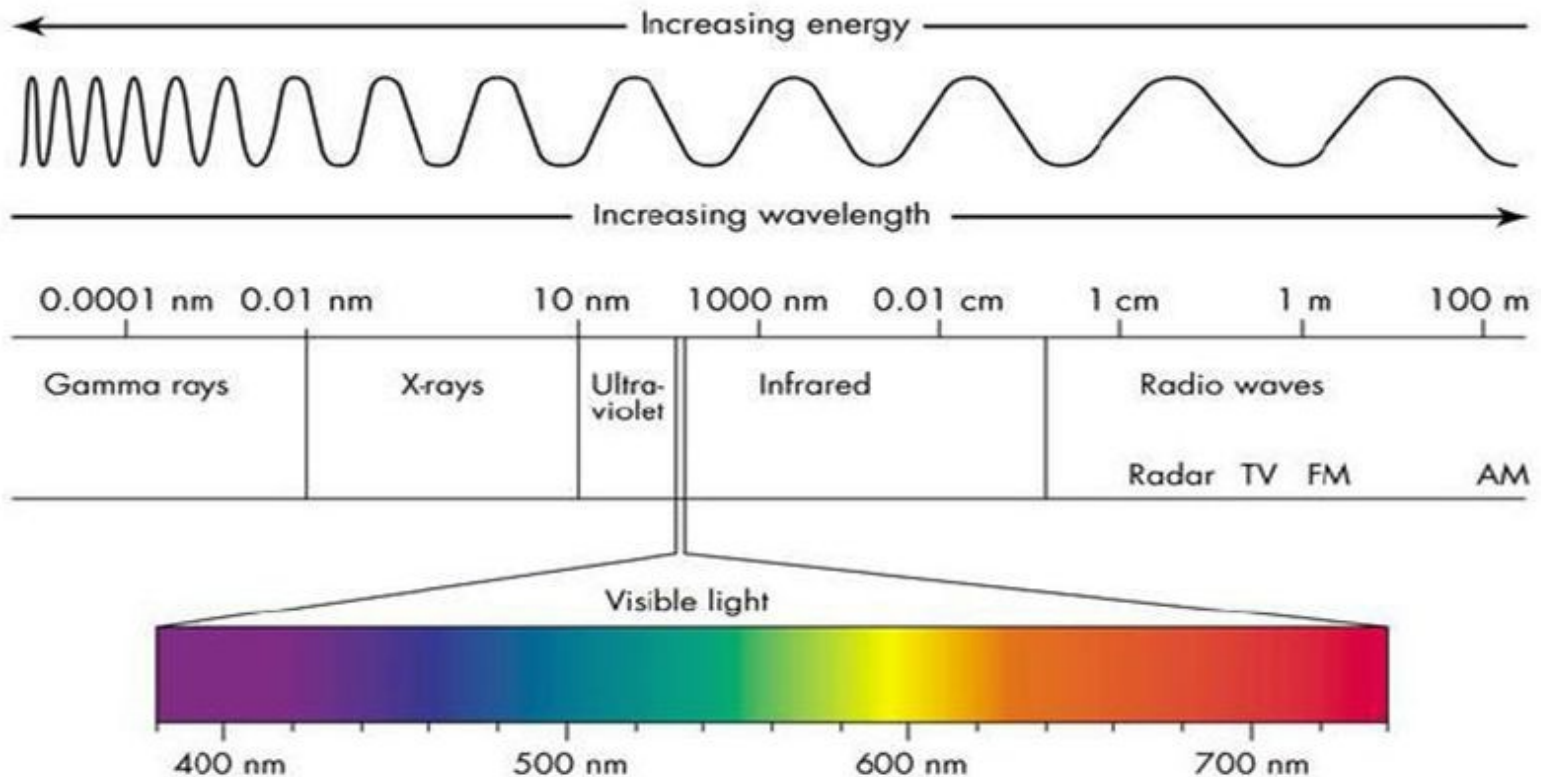


# Vlastnosti RTG záření (paprsky X)

- RTG záření je pronikavé elektromagnetické záření o velmi krátkých vlnových délkách  $10^{-11}$  m to  $10^{-8}$  m a vysokých frekvencích.
- prochází hmotou i vakuem, jeho intenzita slábne se čtvercem vzdálenosti od zdroje
- šíří se přímočaře
- má ionizační účinky (což znamená, že množství energie, které nese, stačí na uvolnění elektronu z atomu).
- **Efekty RTG záření:**
- **Luminiscenční efekt.** Rentgenové záření má schopnost přeměnit se na viditelné záření, ale pouze při interakci s určitými látkami.
- **Fotochemický efekt.** Působením RTG záření na fotografický materiál dochází ke změnám v jeho chemickém složení.
- **Ionizační efekt.** Energie, kterou rentgenové záření nese, je postačující k ionizaci atomů nebo molekul ozářené látky. To znamená, že při působení na elektricky neutrální atomy se z nich stávají elektricky nabitě ionty.

# Introduction

- X-rays are a part of electromagnetic spectrum.
- X-rays have a wavelength in ranges of 0.01nm to 10nm.70-200pm for (AP).
- Produced by the deceleration of high-energy electrons.
- Electronic transition of electrons in the inner orbitals of atoms.

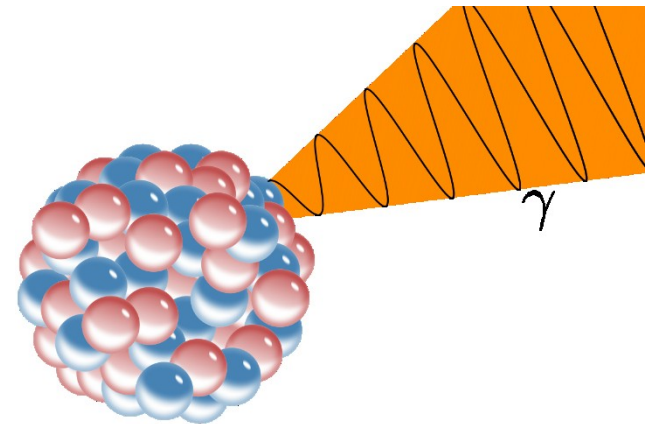
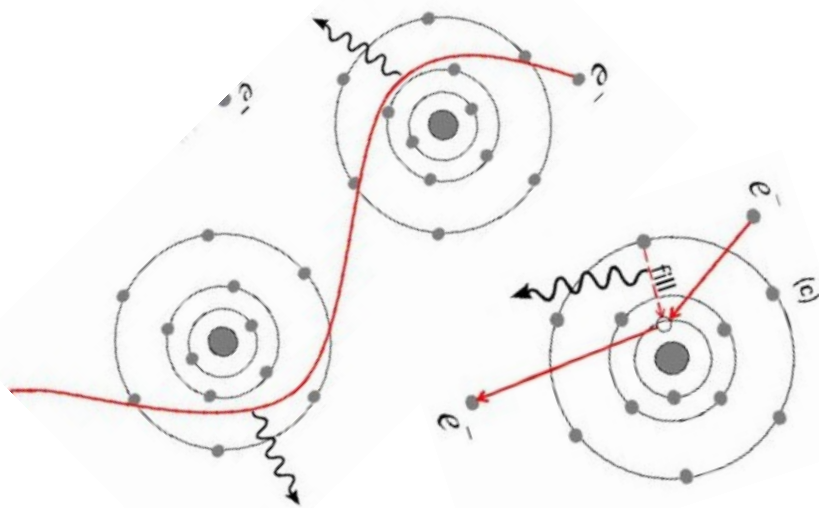


# Měkké a tvrdé RTG záření

- Roentgenovy trubice mohou být vyčerpány buď více nebo poněkud méně
- v prvním případě vzniká tvrdé RTG záření ( $<0.1$  nm)
- v druhém měkké RTG záření ( $>0.1$  nm)
- Měkké RTG trubice: vydávají paprsky, které jsou hustými tělesy snadno pohlcovány, tak že dávají např. obrázky ruky velmi pěkné, s ostře vyznačenými rozdíly mezi kostmi a masem
- tvrdé RTG trubice: vysílají paprsky, které jsou poměrně málo pohlcovány a proto nejsou obrazy lidského těla příliš zřetelné

# Tvrdé záření RTG vs. záření gama

- Vlnové délky nejenergičtější části RTG záření se částečně překrývají s vlnovými délkami [záření gama](#). Rozlišujeme je však podle původu:
- [Foton](#) rentgenového záření vzniká při interakcích vysoce energického [elektronu](#),
- kdežto záření gama při procesech uvnitř jádra [atomu](#).



# Typy rentgenového záření

- Z hlediska vzniku existují dva typy rentgenového záření – tzv. brzdné rentgenové záření a charakteristické rentgenové záření.
- **Brzdné rentgenové záření**
- Rychle letící elektrony se po dopadu na terč brzdí a dochází ke změně jejich dráhy. Energie, kterou elektrony při průchodu terčem ztratily, se vyzáří ve formě tzv. brzdného rentgenova záření.
- Toto záření je charakteristické širokým, spojitým energetickým spektrem.
- Čím je větší energie (rychlost) elektronů, tím tvrdší záření vzniká.
- Energie brzdného rentgenova záření nezávisí na materiálu terče (např. anody rentgenovy trubice), ale jen na rychlosti elektronů (tedy na velikosti napětí na anodě rentgenovy trubice)
- Elektrony ale mohou být urychleny i jiným způsobem – v urychlovačích částic např. v tzv. [lineárním urychlovači](#), betatronu, mikrotronu, u nichž se dosahuje výrazně vyšších energií než u rentgenovy trubice. Energie záření se udává zpravidla v [elektronvoltech](#) (eV).
- Brzdné záření se používá v lékařské diagnostice (např. [PET](#), SPECT, [CT](#)), v [radioterapii](#) a v průmyslu v defektoskopii.

# Typy rentgenového záření

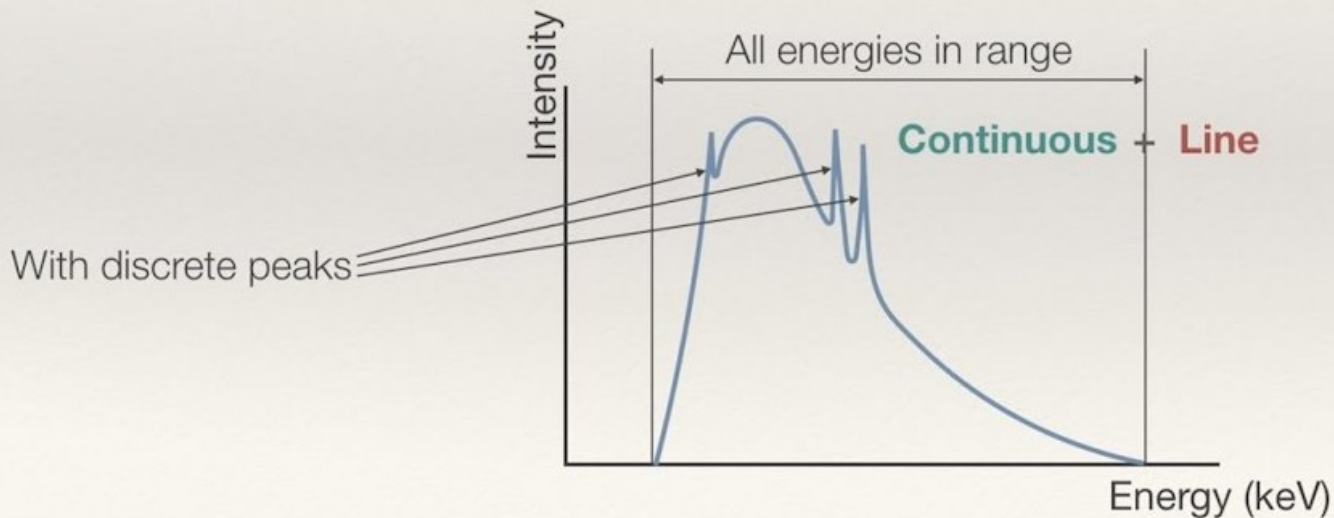
- **Charakteristické rentgenové záření**
- Rychle letící elektron v tomto případě odevzdá svou kinetickou energii elektronu vnitřní slupky atomového obalu materiálu anody, až dojde k jeho excitaci nebo ionizaci. Následný návrat do základního energetického stavu je spojen s vyzářením fotonu charakteristického rentgenového záření.
- jeho energie nezávisí na anodovém napětí, ale jen na materiálu anody.
- Takové rentgenové záření je charakteristické pro konkrétní prvek; jeho energie je tím vyšší, čím vyšší je protonové číslo materiálu anody.

# SPEKTRUM RTG záření

- Spektrum – většinou si představíme obrázek viditelného světla rozloženého na jednotlivé barvy, červenou, oranžovou, žlutou, zelenou...
- U RTG záření, které je neviditelné, spektrum představuje graf relativní intenzity záření vynesené proti vlnové délce. (totéž lze samozřejmě udělat i pro viditelné světlo)

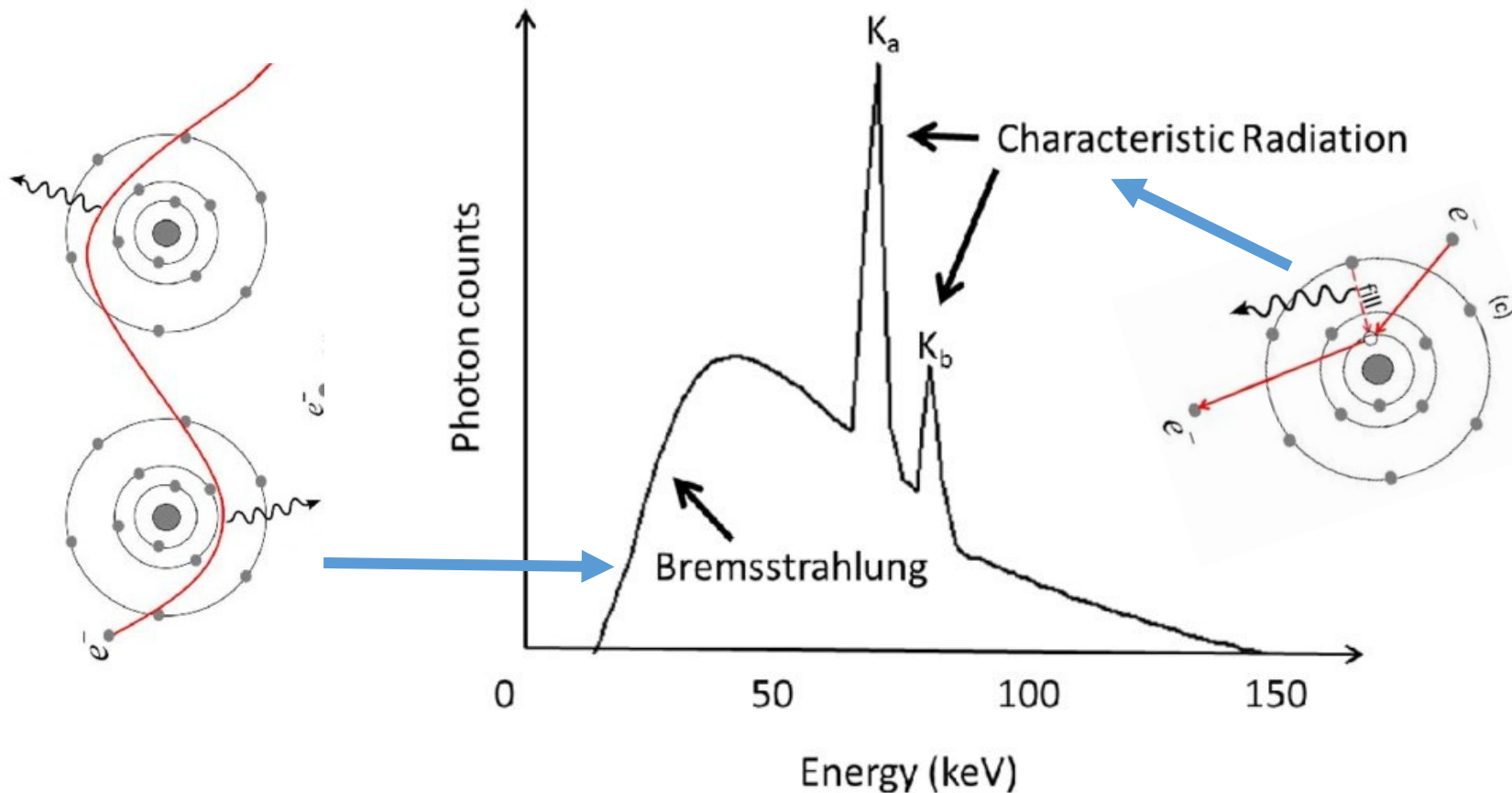
# SPEKTRUM RTG záření

- ❖ An X-ray spectrum is **continuous** with a line spectrum **superimposed** on it.





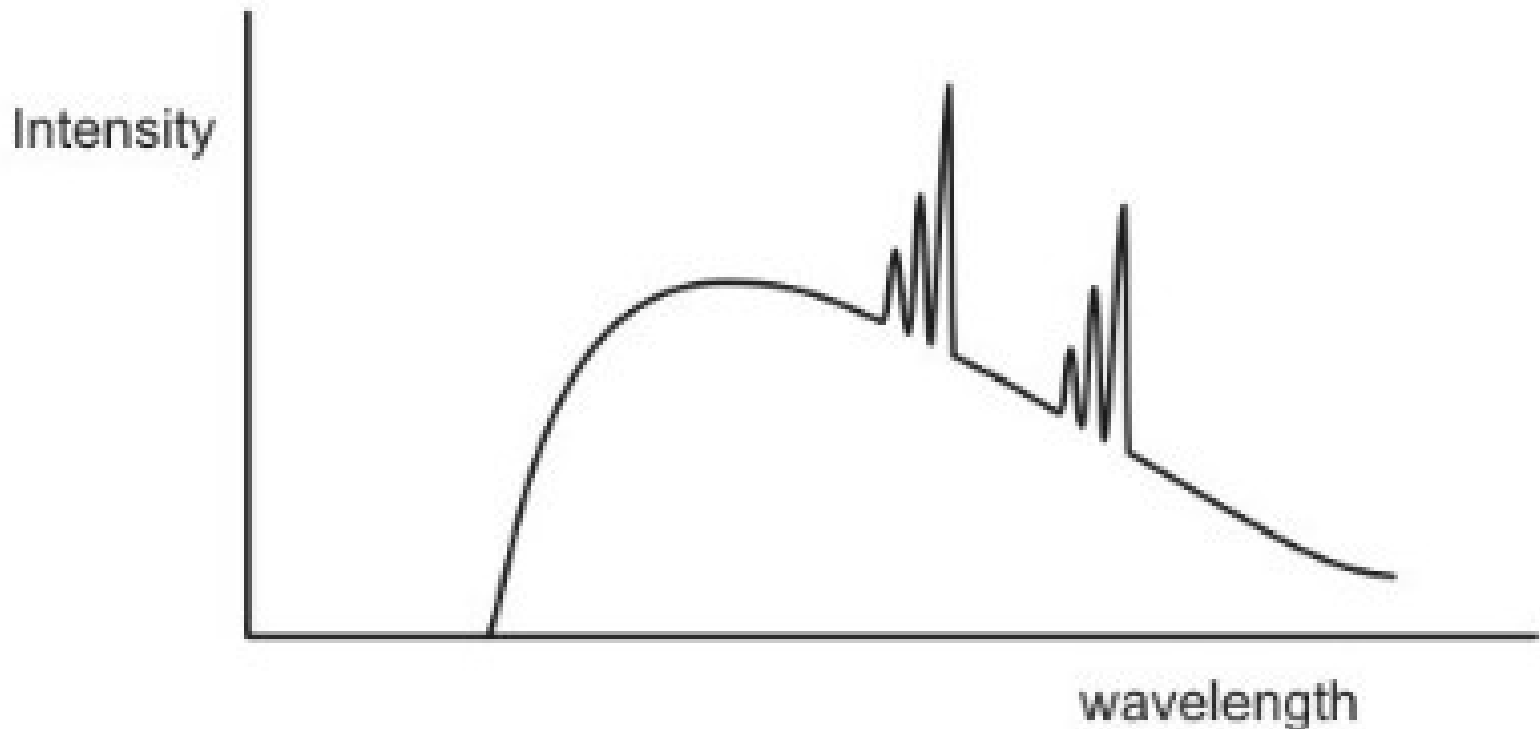
# SPEKTRUM RTG záření



X-ray spectrum of a tungsten anode (without filtering) at tube acceleration voltages of 150 kVp (peak kilo-voltage).

# The graph below shows a typical x-ray spectrum.

The graph can be considered to consist of two parts, a *continuous spectrum* (the curve) and a *line spectrum* (the peaks).



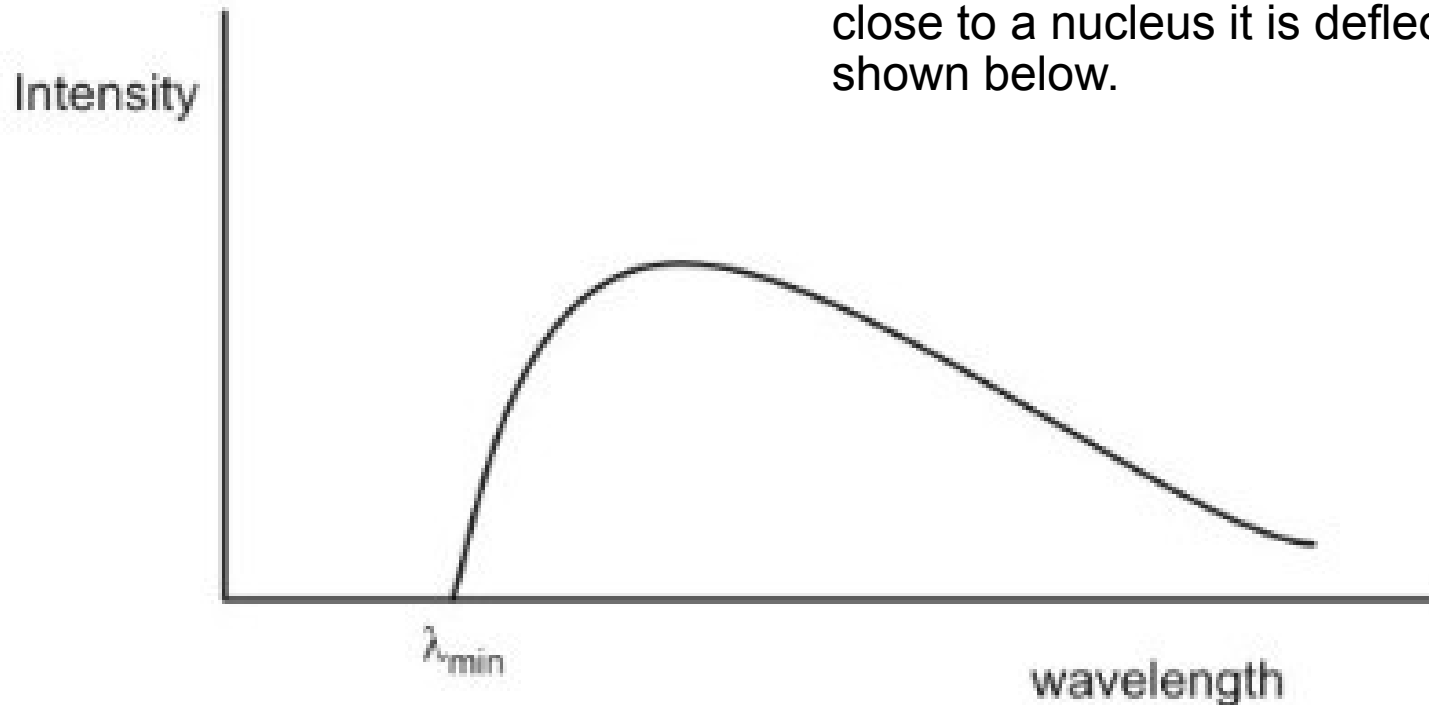
# BRZDNÉ RTG záření

## The Continuous Spectrum

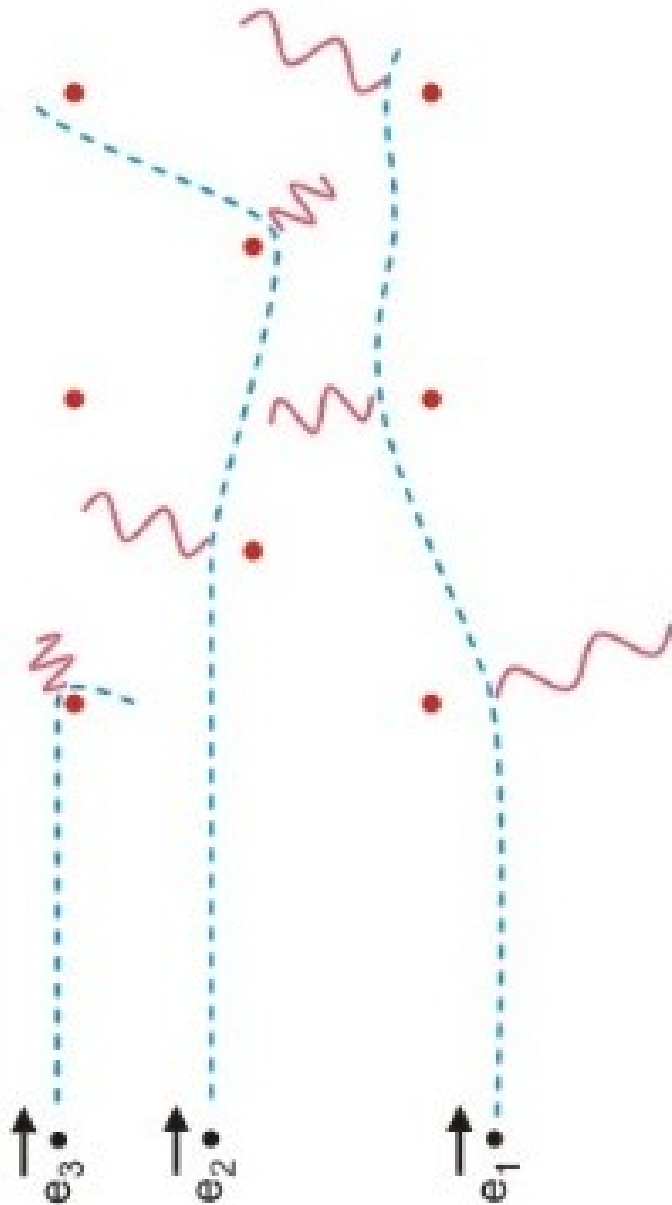
### Bremsstrahlung X-rays

This part of the spectrum does not depend on what type of metal is used for the target.

When a fast moving electron passes close to a nucleus it is deflected as shown below.



# BRZDNÉ RTG záření



- Změna směru → akcelerace elektronu → emise el.-mag záření.
- Pokud akcelerace dostatečná → kvantum uvolněného záření energeticky odpovídá RTG záření.
- Pokud elektron prolétne **velmi blízko jádra** (jako např. elektron e3 na obrázku vlevo) může být jeho kinetická energie uvolněna **v jediném kvantu**
- Toto je tedy největší možné kvantum předatelné elektrony za daných podmínek a odpovídá **nejkratší vlnové délce** emitovaného záření RTG

- **Minimální vlnová délka RTG spektra** závisí na voltáži urychlovacího napětí:
- Pokud máme **urychlovací napětí  $V$** , potom energie  $E$  předaná okolí elektronem na anodě je dána vztahem:

$$E = eV$$

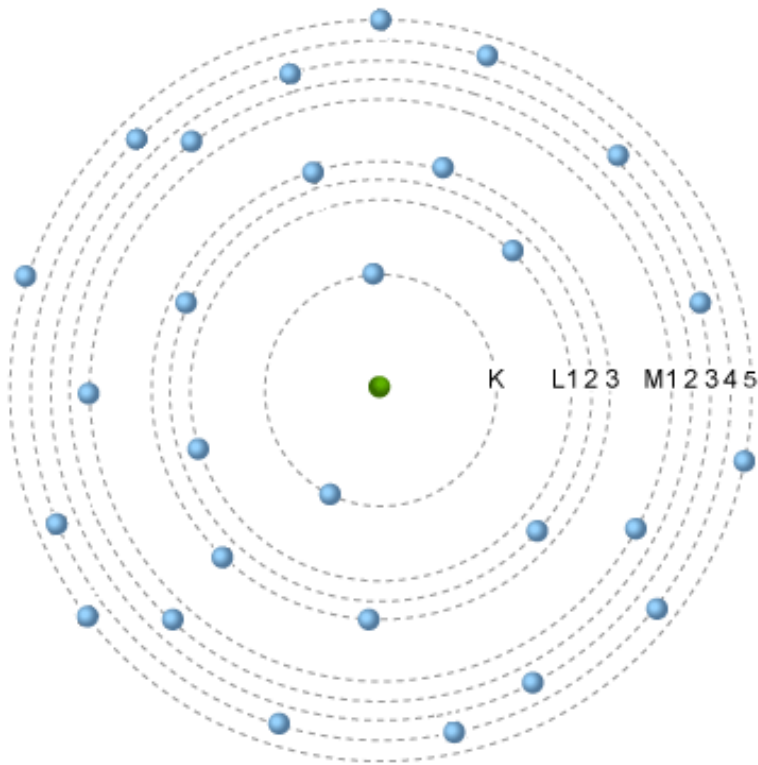
- Kde  **$e$**  je **náboj elektronu**
- Pro výpočet minimální vlnové délky,  **$\lambda_{\min}$** , pak platí Plankova rovnice pro energii kvanta záření:

- ...a tedy:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$
$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV}$$

# CHARAKTERISTICKÉ RTG záření

- Elektrony v elektronovém obalu mají určité energie a pohybují se tak na určitých energetických hladinách neboli **elektronových slupkách**.
- Nejbližší k jádru je **slupka (hladina) K**, směrem od jádra pak následovaná **slupkami L, M, N, O, P a Q**.
- Vyjma slupky K mají všechny další slupky své **podslupky** → elektrony v těchto podslupkách se nepatrně liší svými energiemi.



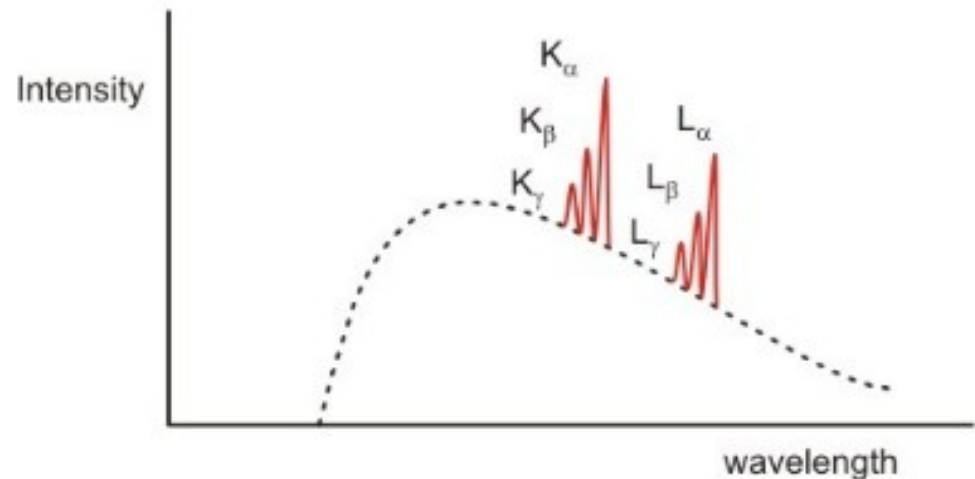
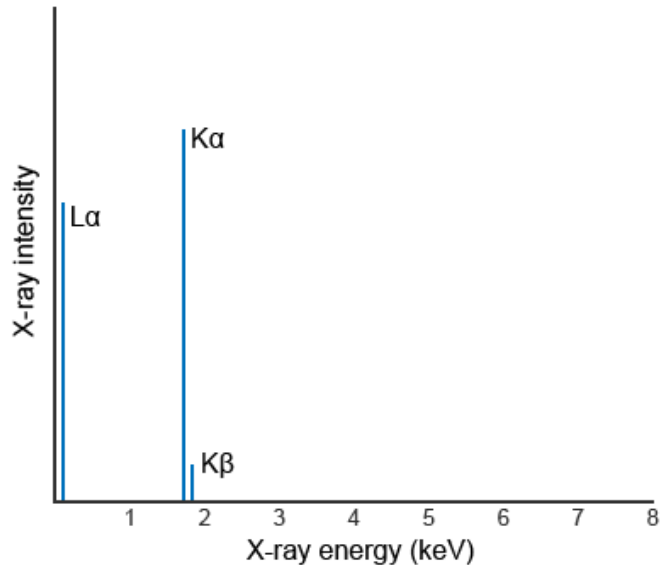
Schematický náčrt atomu znázorňující jádro obklopené elektronovými slupkami K, L a M.  
**Slupka K** může mít maximálně 2 elektrony  
**Slupka L** má 3 podslupky a maximálně 8 e-  
**Slupka M** má 5 podslupky a maximálně 18 e-  
atd.

# CHARAKTERISTICKÉ RTG záření

- Slupka L má 3 podslupky, the M shell has five subshells, and so on.
- Slupka K má v elektronovém obalu nejvyšší ionizační energii (neboli kritickou ionizační energii)
- To znamená, že k odebrání elektronu z této slupky potřebujeme nejvíce energie  
Čím dále jsou pak další slupky od jádra vzdáleny, tím je ionizační energie nižší.
- Elektrony na jednotlivých slupkách a podslupkách mají tedy své specifické ionizační energie,
- ... a ty se liší pro různé prvky,
- Např. pro křemík (Si) je ionizační energie na slupce K 1.84 keV, zatímco pro platinu (Pt) tato hodnota činí 78.4 keV.

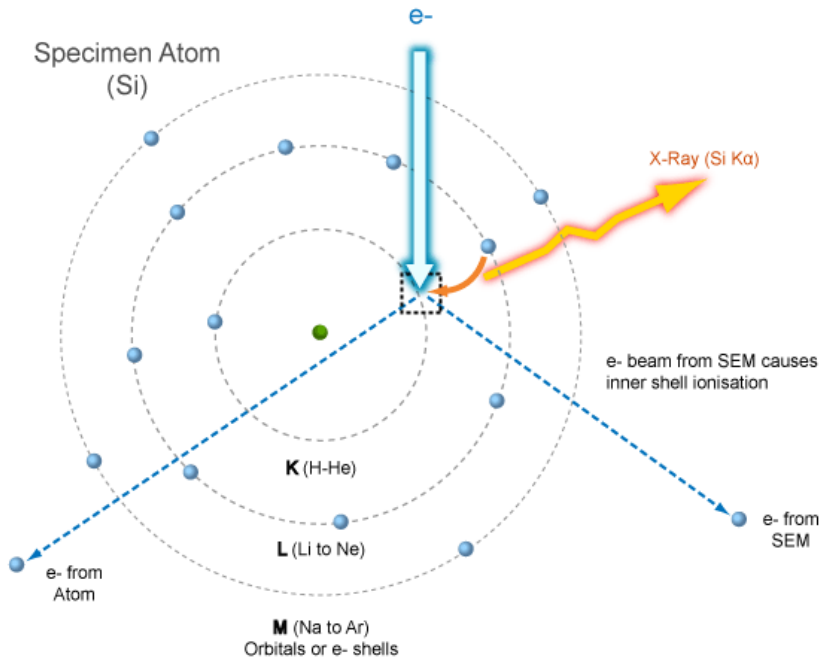
# Characteristic RTG, Spectrum

- To explain the existence of these peaks we consider collisions between electrons in the beam (from the cathode) and electrons in low energy orbits in atoms of the target.
- Line or Characteristic Spectrum
- The electron in the atom can be excited to a higher energy state by the collision.
- An electron in the atom can then fall down to the lower energy state which has been made available.
- The peaks of intensity occur at wavelengths which depend on the type of metal used for the target.





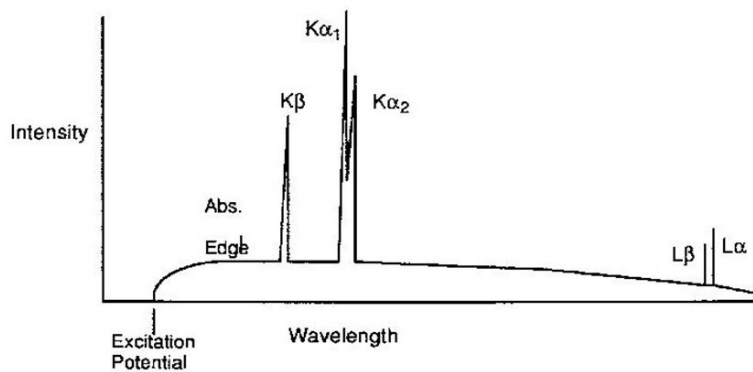
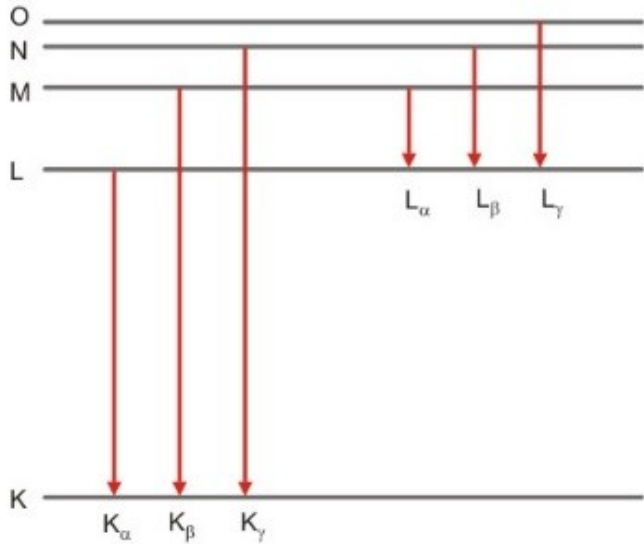
### Characteristic X-Ray Production



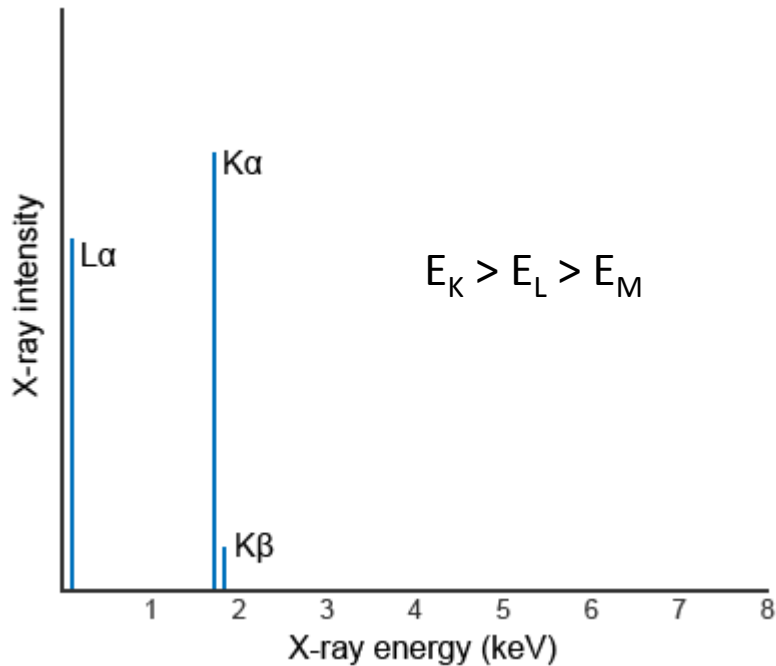
- The production of Characteristic X-rays is a **two-stage process**:
- **ionization** followed by **relaxation**
- Firstly, an **electron is removed** from one of the inner shells of the atom by an electron from the primary beam so that the atom is ionized and in an unstable state.
- Secondly, the atom regains stability when an electron from an outer shell **fills the inner shell vacancy** and an **X-ray photon is emitted**.
- The energy of the emitted X-ray is equal to the difference between the ionization energies of the electrons involved in the transition.

An electron from the primary beam dislodges an electron from the K shell of a Si atom in the sample. An electron from the L shell fills the vacancy and a Si K $\alpha$  X-ray is generated. The energy of the X-ray is equal to the ionization energy of the K shell minus the ionization energy of the L shell.

# Characteristic RTG, Spectrum

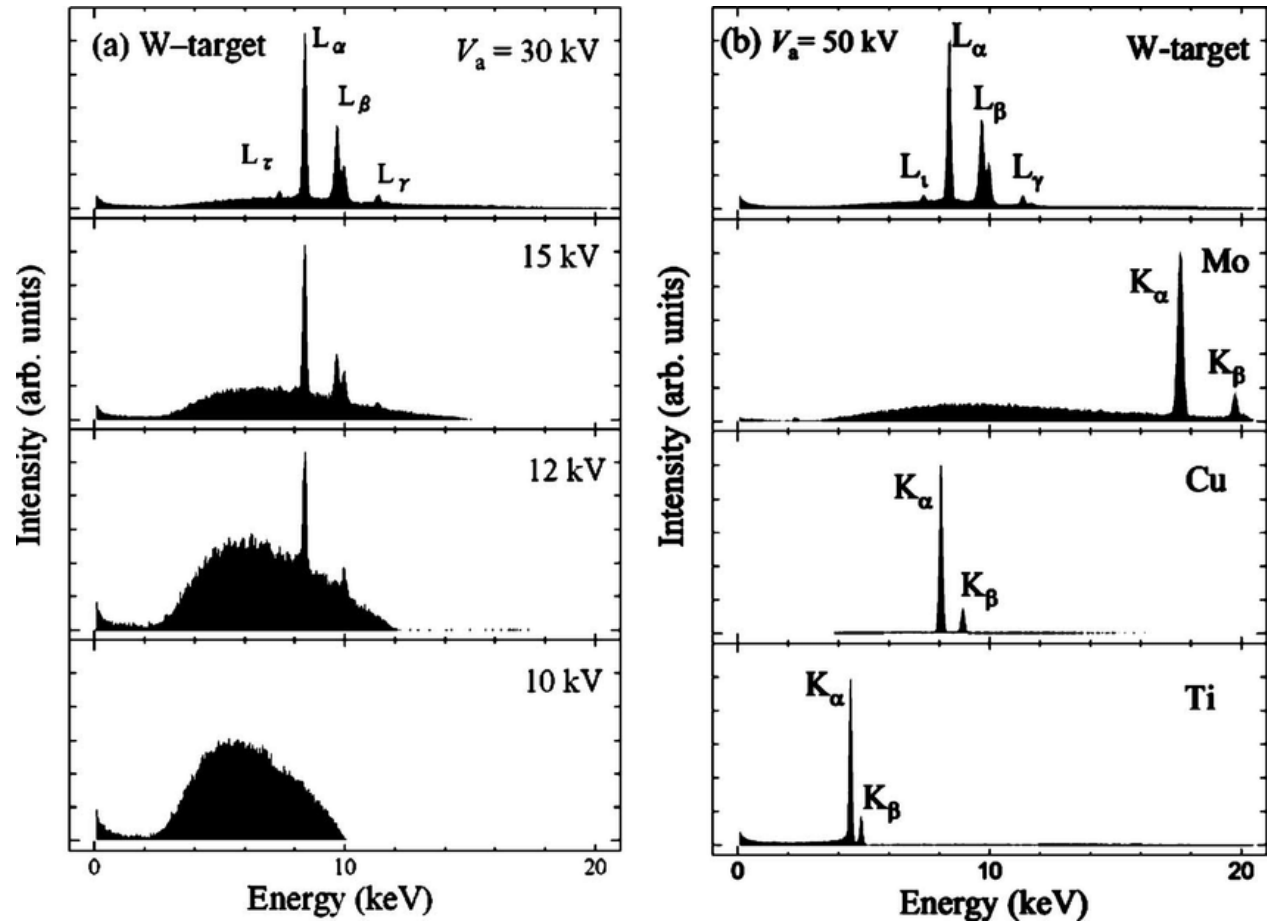


- When an electron falls to the lower energy level a quantum of radiation is emitted.
- The energy possessed by this quantum (and therefore its wavelength) depends on the energy difference between the two levels in the atom.
- This depends on what type of metal it is.
- **Moseley's law:**
- There is a **relationship between the energy of the Characteristic X-ray lines for each element and its atomic number:**
- the **energy is proportional to the square of the atomic number,  $Z$ .**
- This means that as the atomic number increases, the  $K_{\alpha}$  X-ray line, for example, will plot at a higher energy in the spectrum. (This relationship, known as Moseley's Law, was discovered by Henry Moseley in 1913)
- **The lines in the spectrum (the peaks of intensity) are named after the energy level to which an electron falls**



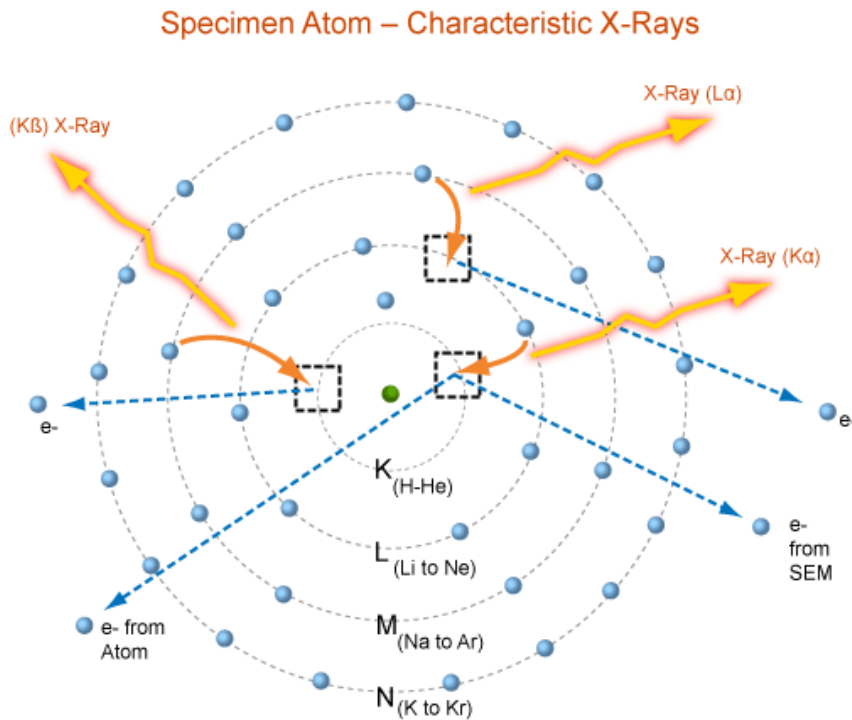
The ideal Characteristic X-ray spectrum for Si. The Characteristic X-ray lines,  $K\alpha$ ,  $K\beta$  and  $L\alpha$ , have discrete energies.

- As each element has specific ionization energies for each subshell, so the **difference between the energies is characteristic of the element** involved in producing the X-ray photon.
- For Si, the ionization energy of the K shell is 1.84 keV, the ionization energy of the L shell is  $\sim 0.10$  keV and the ionization energy of the M shell is  $\sim 0.01$  keV.
- The Characteristic X-ray spectrum for Si shows three spectral lines.
- The line at low energy ( $\sim 0.09$  keV) results from ionization of the L shell with an electron from the M shell filling the vacancy:  $E = 0.10 - 0.01$  keV. (This line would be at or below the limit of detection for most EDS detectors.)
- The line at  $\sim 1.74$  keV results from ionization of the K shell with an electron from the L shell filling the vacancy ( $E = 1.84 - 0.10$  keV),
- whereas the smaller peak at higher energy ( $\sim 1.83$  keV) results from ionization of the K shell and an electron from the M shell filling the vacancy ( $E = 1.84 - 0.01$  keV).



Energy spectra of the x-rays radiated from the metal targets. a Acceleration voltage  $V_a$  dependence of the x-ray spectra measured for W-target. b Target dependence of the x-ray spectra measured for the Ti, Cu, Mo, and W at  $V_a = 50$  kV. Kita S. et al. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS **103**, 064505 2008

# Naming convention for Characteristic X-ray lines is the Siegbahn notation.



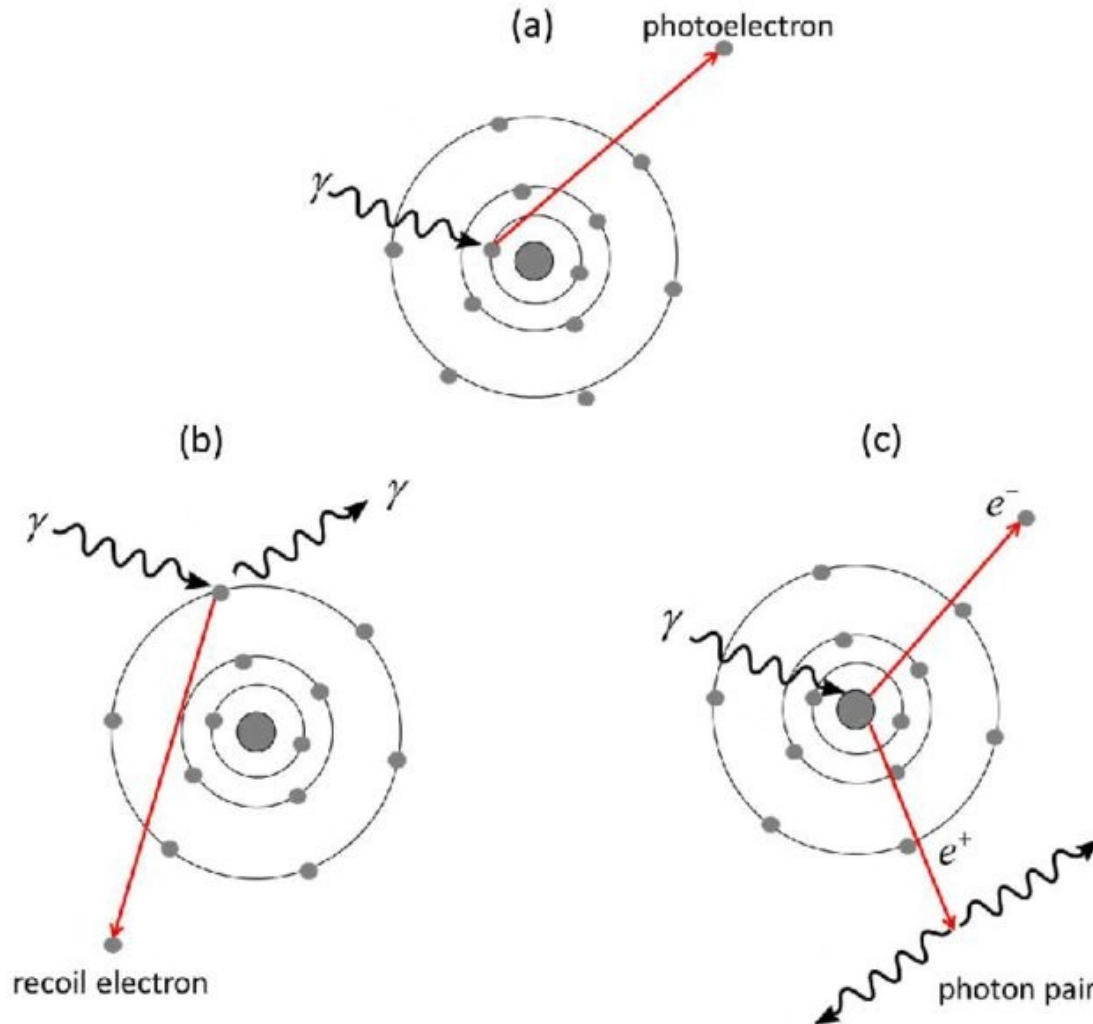
$$E_K > E_L > E_M$$

- The first component of the name is the element involved, e.g. Si.
- The second component is the electron shell that was ionized to produce the X-ray, e.g. K, L or M.
- The third component reflects the relative intensity of the line within each shell, e.g.  $\alpha$  is the most intense line, followed by  $\beta$  and  $\gamma$ .
- The lines within each shell make up a family, or series, of lines for that shell, e.g., the K family comprises the K $\alpha$  and K $\beta$  X-ray lines.
- In the Si spectrum, the lowest energy X-ray line is the Si L $\alpha$  line; the line at 1.74 keV is the Si K $\alpha$  line and the line at  $\sim$ 1.83 keV is the Si K $\beta$  line.

# INTERAKCE RTG záření s hmotou

- RTG záření integruje s atomy tkáně dvěma procesy: **fotoefekt** a **Comptonův rozptyl** (tvorba *elektron-pozitronových párů* zde nenastává vzhledem k nízké energii fotonů).
- Oba tyto procesy se podílejí na rozdílné absorpci záření v jednotlivých tkáních v závislosti na tloušťce, hustotě látky a protonovém čísle atomů.
- Právě na této rozdílné absorpci RTG záření v různých tkáních jakož i jejich fyziologických či patologických stavech je založena RTG diagnostika.

# INTERAKCE RTG záření s hmotou



Possible X-ray photon interaction processes with the matter: (a) photoelectric absorption; (b) Compton scattering; (c) pair production.

# DETEKCE RTG

- V případě skiografie je vzniklý obraz zaznamenáván na filmový materiál.
- O skiaskopii mluvíme tehdy, jestliže je obraz pozorován pouze na stínítku bez trvalého uchování obrazu.
- Skiaskopie umožňuje sledovat pohyby orgánů nebo použitých kontrastních látek v těchto orgánech, případně jejich funkci.
- V současné době u moderních digitálních přístrojů se rozdíl mezi skiagrafií a skiaskopií do značné míry stírá, v počítačovém systému lze volit, zda záznam digitálního obrazu bude statický či dynamický.
- **Fokusace elektronů, ohnisko**
- Rentgenky pro RTG diagnostiku používají fokusaci elektronového svazku do ohniska, což je podmínkou dosažení dobré ostrosti a rozlišení projekčního stínového transmisního obrazu při RTG diagnostice, resp. je zapotřebí, aby svazek X-záření vycházel z téměř bodového zdroje.



- **1. Skiografie**

- Při prostém RTG snímkování, zvaném skiografie, dopadá RTG záření prošlé vyšetřovanou tkání na fotografický film obsahující halogenidy stříbra (bromid stříbrný), v němž fotochemickou reakcí dochází k uvolňování stříbra z jeho vazby ve sloučenině
- – vzniká latentní obraz, který je při vyvolání ve vývojce zviditelněn pomocí hustoty zrníček koloidního stříbra, zbylý bromid stříbra se rozpustí v ustalovači.
- Hustota zčernání filmu je úměrná množství prošlého RTG záření. Vzniklý RTG fotografický obraz představuje negativní zobrazení hustoty tkáně: místa s nízkou hustotou (měkké tkáně) mají nižší absorpci, a proto vysoké zčernání, místa s vysokou denzitou (např. kosti) více absorbují RTG záření a jsou proto na filmu zobrazena světlé.

- **2. Skiaskopie**

- Jako skiaskopie či fluoroskopie se označuje přímé vizuální pozorování obrazu prošlého RTG záření, původně přímo na fluorescenčním stínítku („štítu“). Přímá skiaskopie patřící dříve k běžnému vyšetření je vzhledem **k vysoké radiační zátěži vyšetřujícího rentgenologa (též pacienta)** využívána v současné době velmi sporadicky.
- Nepřímou skiaskopii umožňuje zesilovač obrazu s elektronickým snímáním obrazu, nověji přímým elektronickým, digitálním snímáním obrazu. Tato nepřímá skiaskopie je výhodná k vyšetřování dynamických dějů (koronární arteriografie, transhepatální cholangiografie...), dále při intervenčních výkonech, kde je nutná vizuální kontrola a navigace při zavádění různých sond a katétrů, implantaci kardiostimulátorů, koronární angioplastice, zavádění stentů...



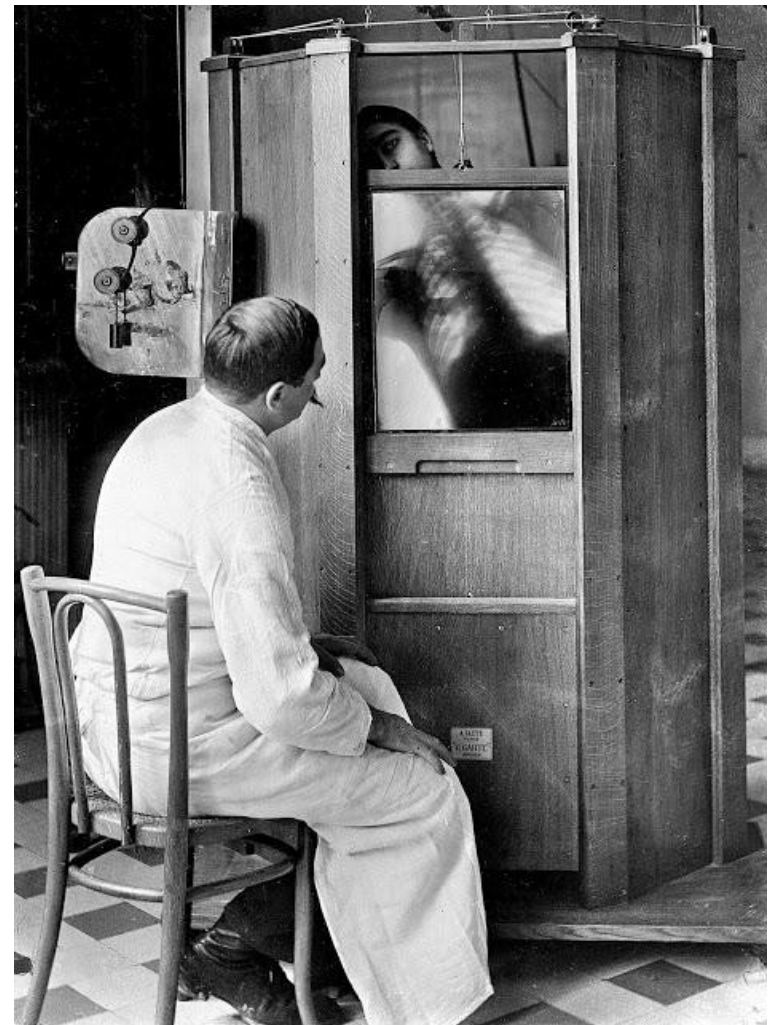
Rentgenování hlavy mladé ženy pomocí nového aparátu v Londýně roku 1934. Příklad se stával dostupnějším, přenosnějším a mohl být tudíž používán prakticky kdekoliv



Pacient při rentgenování hrudi u profesora Menarda v nemocnici Cochin v Paříži roku 1914.



1896: The first x ray to be used clinically was by two british scientist. The military also used it to located bullets in wounded soldiers.



Pacient při rentgenování hrudi u profesora Menarda v nemocnici Cochin v Paříži roku 1914.



Filmová hvězda Judith Allen s radiovým snímkem svých zad kolem roku 1930.



Muž se ženou demonstrují, jak funguje rentgenové zařízení. To představovalo zázrak moderního lékařství a léčení (1928)

**Od 30. let se již rentgenologové začínali chránit od škodlivého záření nošením obleků.**

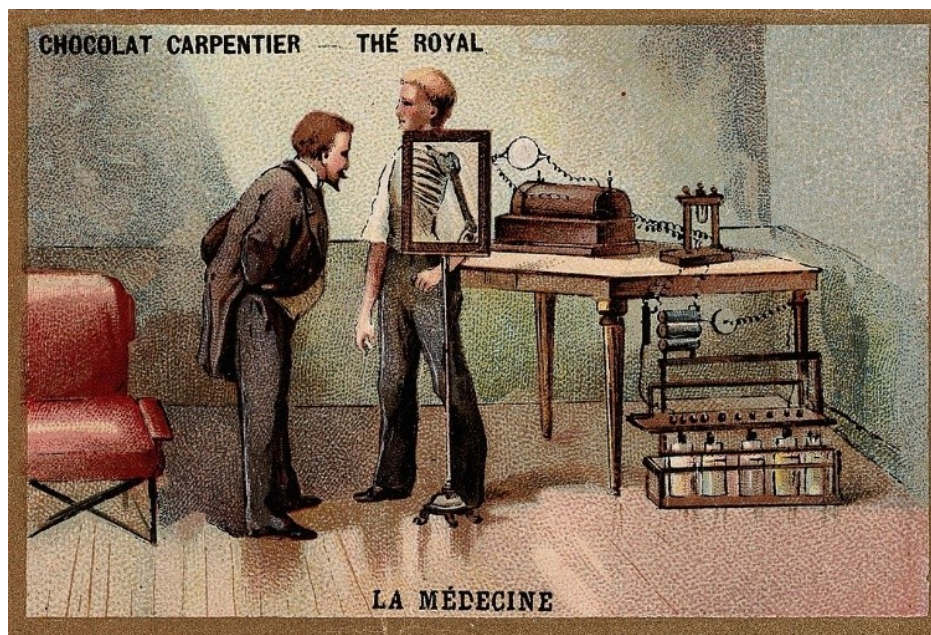


Westminster, 1934, Imagno - Getty Images



Jeden z výstřelků pocházející z Rentgenového Institutu v německém Frankfurtu z roku 1929. Zvláštní vynález měl umožnit rentgenologovi se dívat skrz přístroj na pacienta a mělo se tak zabránit nadměrnému ozařování lékaře.

# HAZARD s RTG zářením



*prof. Dr. Jaroslav Jeništa a  
inženýr Emil Žižka.*

*Vydáno péčí redakce  
populárního technického  
časopisu VYNÁLEZY A POKROKY.  
V Praze tiskem a nákladem F.  
Šimáčka 1908.*

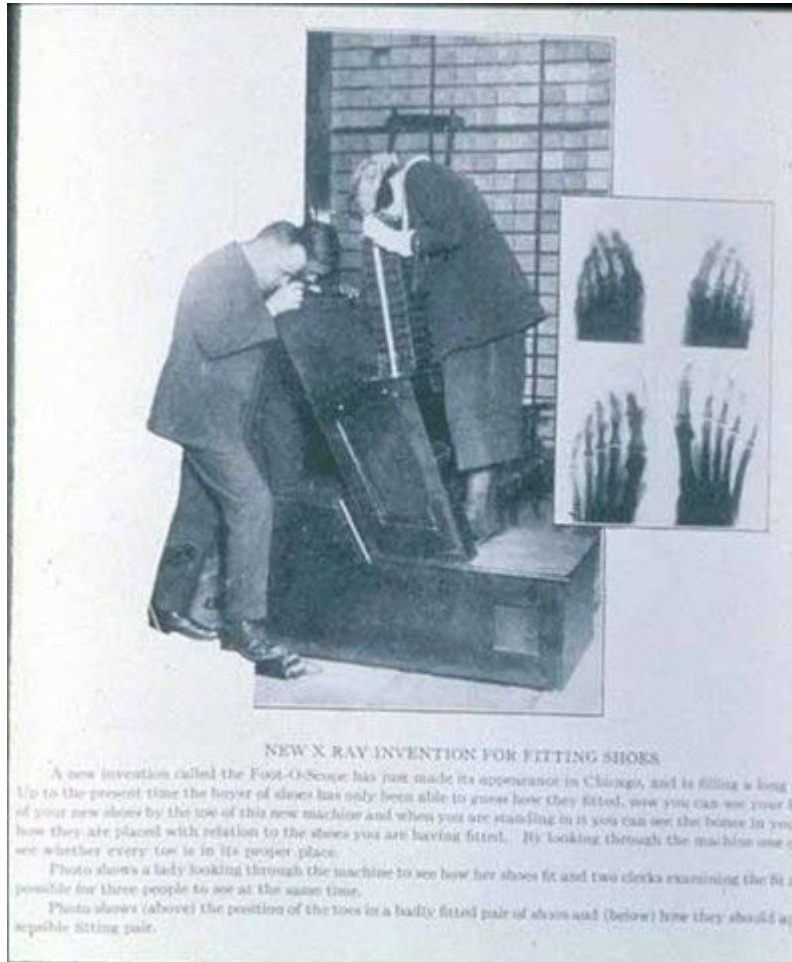
- *Napsali ...a hojné přednášky byly konány, k nimž vábila zejména ta okolnost, že **při pokusech každý mohl spatřiti svou vlastní kostru**, kterážto věc, do té doby naprosto nemožná, zajistila právě celému objevu největší popularnost.*
- *...v lékařství je neocenitelný, ale nutno na to upozorniti, že vliv jejich na lidské tělo je také v mnohém ohledu škodlivý. Vznikají na př. jejich působením **nebezpečné kožní záněty** a pod., tak že každý, kdo pracuje s těmito paprsky, má hleděti k tomu, aby co nejvíce tělo své před nimi chránil předměty kovovými, nejlépe olověnými, jež velmi nepatrně paprsky tyto propouštějí.*

# HAZARD s RTG zářením

- **Zajímavosti o otevření**
- Ihned po vydání Roentgenova článku se objevil obrovský počet inteligentních podnikatelů, kteří tvrdili, že pomocí x-záření se můžete **podívat do lidské duše**.
- Více světově propagovaných zařízení, údajně **umožňujících vidět přes oblečení**.
- Například v USA, Edison nařídil vývoj **dalekohledů využívajících záření**. A ačkoliv tato myšlenka selhala, způsobilo to velmi vzrušení.
- Obchodníci, kteří prodávali oblečení, propagovali své výrobky tak, že tvrdili, **že jejich výrobek nedovoluje, aby se paprsky skrz šaty dostaly**, a ženy se tak mohou cítit v bezpečí. Výrazně to zvýšilo prodej.



# Zkoušení obuvi (i dětské) pomocí RTG



## We Fit Them by X-RAY!

You don't need to take our word, or anybody's word that Simplex Flexies fit. You walk over and see for yourself just how the shoes fit your youngster's foot. Seeing is believing . . . and the X-Ray method of fitting means certain satisfaction.



# Zbytečné RDG vyšetření a preventivní celotělní CT

- V současné době dramaticky narůstá počet RDG vyšetření, zejména pomocí CT. **Často i zcela zbytečná vyšetření...**
- Zejména v USA velká obliba **PREVENTIVNÍCH CELOTĚLNÍCH CT!!**



# Nepříliš známé riziko RTG záření

Roku [1895](#) [Thomas Alva Edison](#) vyvinul fluoroskop, který se stal standardem lékařských vyšetření rentgenovým zářením.

Přesto Edison ukončil výzkum záření roku [1903](#), potom, co zemřel Clarence Madison Dally, jeden z jeho foukačů [skla](#).

Dally **zkoušel trubice na své ruce**, čímž si přivodil jejich [rakovinu](#). Obě ruce mu byly [amputovány](#) v marné snaze ho zachránit.

# Další využití RTG

- Rentgenové záření je též využíváno v [analytické chemii](#). Částice látky jsou ionizovány rentgenovým zářením. Vzniklé sekundární rentgenové záření, které je charakteristické pro [prvky](#), je analyzováno detektorem a přiřazeno konkrétním prvkům, ze kterých se analyzovaná látka skládá. Tato analytická metoda se nazývá rentgenfluorescenční spektroskopie.
- Rentgenoskopie atd.