

# Radiační biofyzika ~ radiobiologie

Přednáška 1

2021

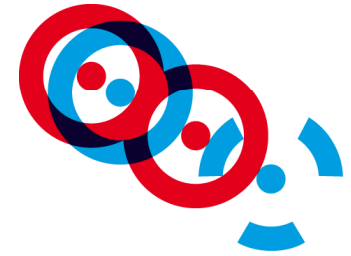




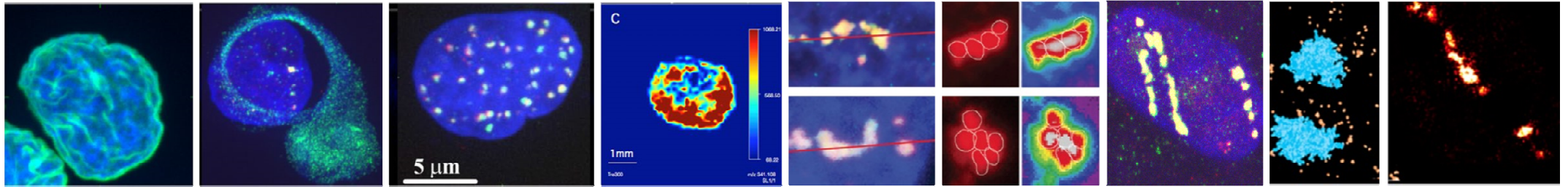
Kontakt:

BIOFYZIKÁLNÍ  
ÚSTAV AVČR

Dpt. buněčné biologie  
a radiobiologie



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

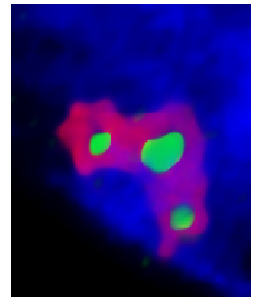
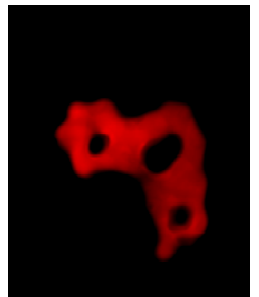


# Radiační biofyzika ~ radiobiologie

studium interakcí ionizujícího záření (IZ)

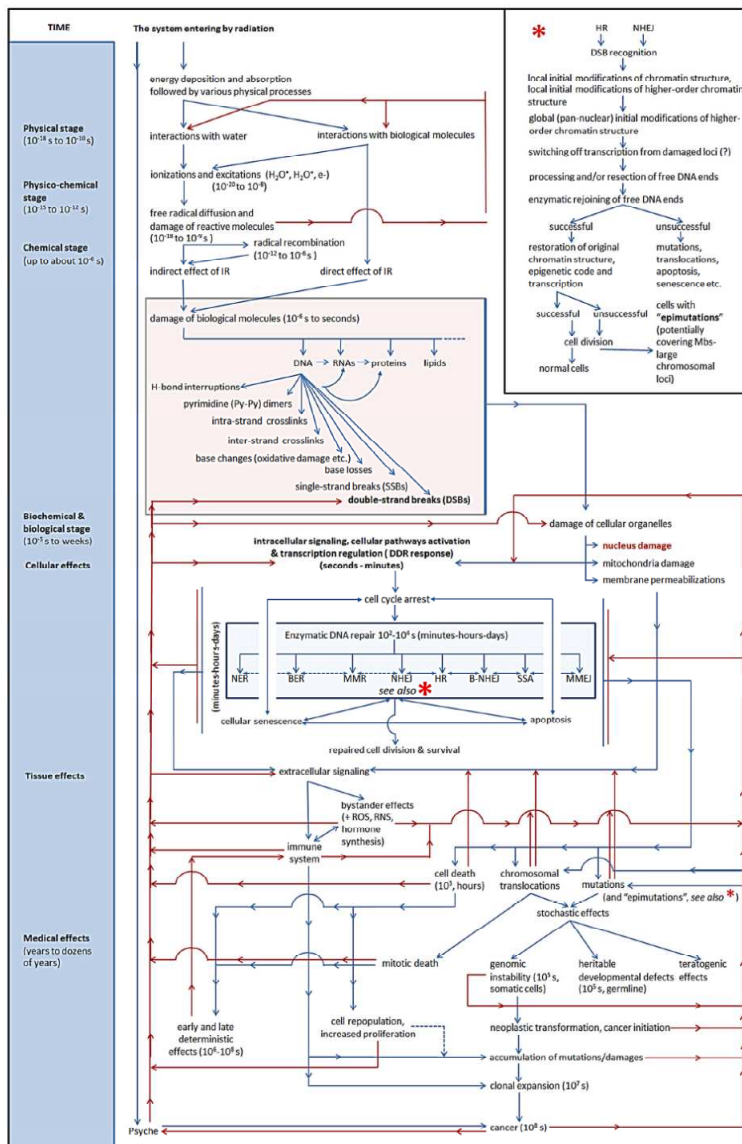
s biologickými systémy

a biologických efektů ionizujícího záření



# Multidisciplinární charakter a komplexita zkoumaných dějů: Problém a krása „radiobiologie“ zároveň

Radiačně vyvolané procesy zahrnují fyzikální, chemické, biologické a medicínské fenomény pokrývající extrémní škálu časových a prostorových dimenzí



(10<sup>-18</sup> s)

Fyzika

Fyzikální chemie

Chemie

Biologie

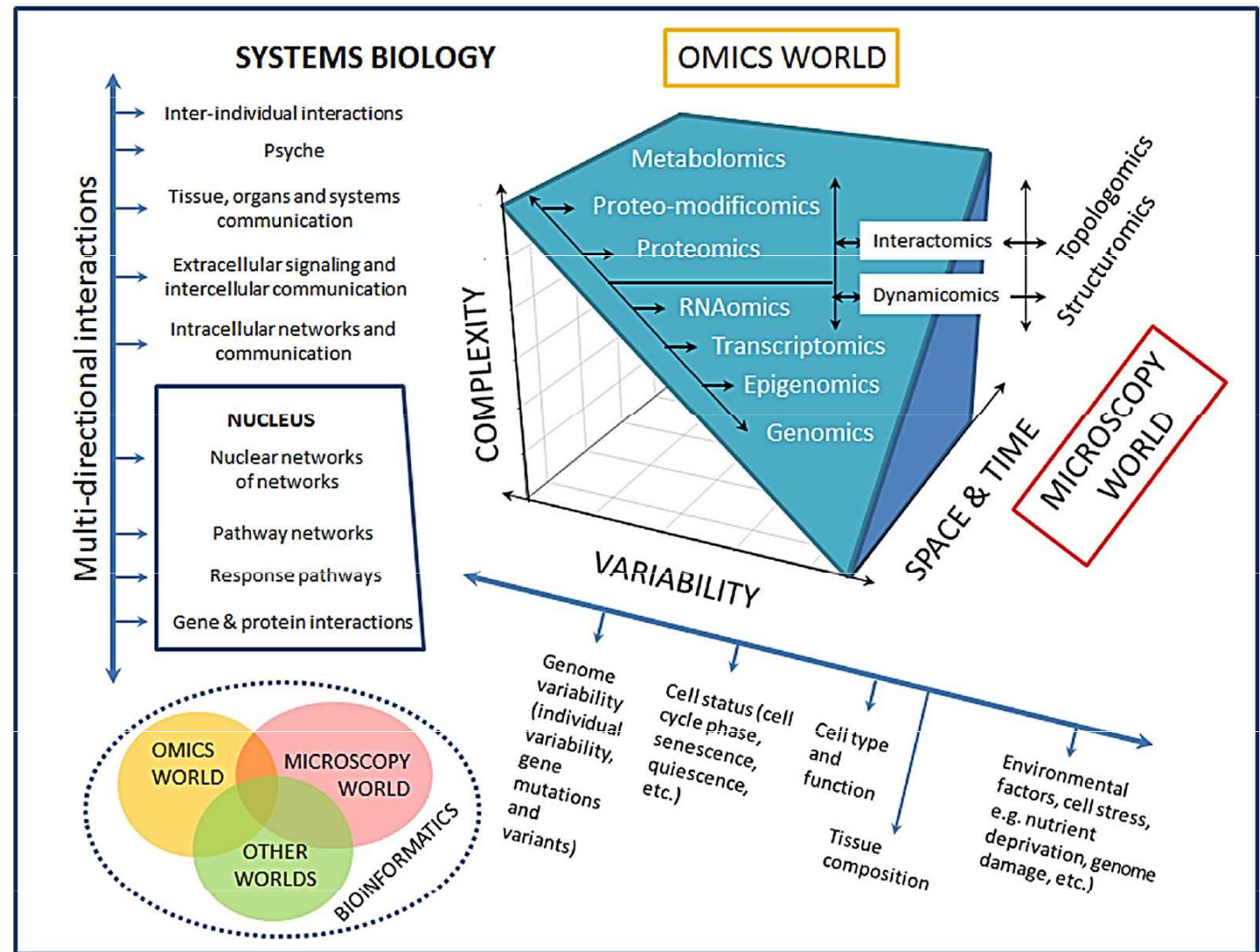
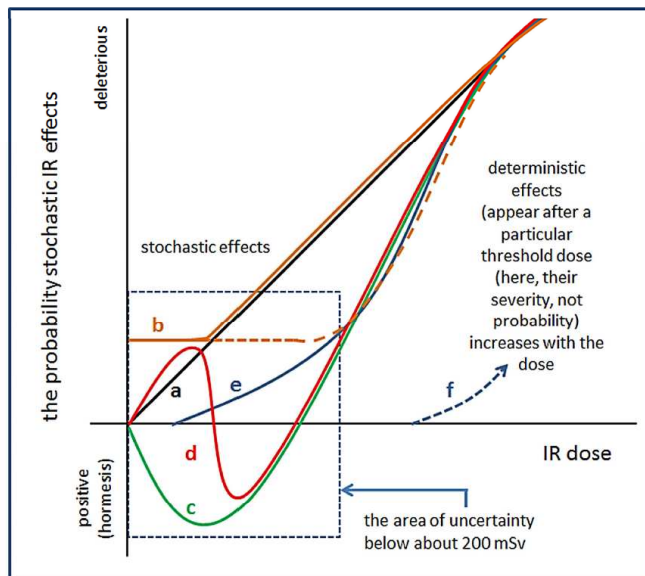
Medicína

(minuty až desítky let)



# RADIOBIOLOGIE: nejen komplexita, ale i variabilita biologických systémů

Některé zásadní otázky RB tak stále zůstávají nezodpovězené v současné době máme ale mnohem dokonalejší technologie k jejich zodpovězení

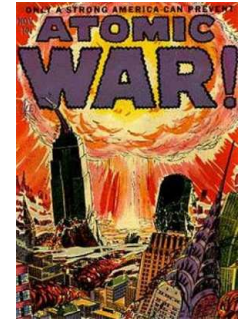


# Etapy a cíle radiální biofyziky/RB

I. etapa

II. etapa

III. etapa



A lack of appropriate research methods

Energetics

Chernobyl

Manned long-term space flights

Single-molecule localization microscopy (SMLM)

CRISPR/Cas9

Radiotherapy

PFGE

Ion-Beam Cancer Therapy

Live cell microscopy, FLIP, FRAP, FRET...

The Cold War

Chromosomal aberrations

The Cold War II ??

Brutal sequencing

Project Manhattan, Hiroshima + Nagasaki

Micronuclei

Fukushima disaster

Chips-on-chips

Flow cytometry

Cell survival

Terrorism

RNA expression chips

LS-MS, DESI, DART

Blood cell analyses

Particle accelerators

"Radium Girls"

Clinical symptoms

Computer power

General enthusiasm

Radiation = cure for everything

\*1895 X-Rays, radioactivity

A tremendous progress in technology and method development



THESE DAYS: RENAISSANCE OF RADIOBIOLOGY

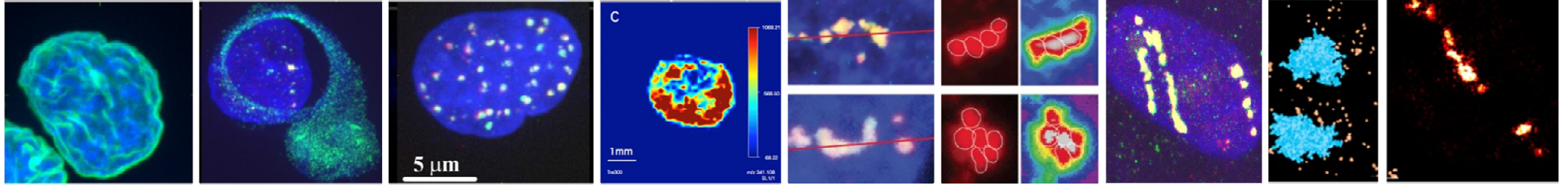
# NOVE VYZVY + NOVE METODY – RENESSANCE



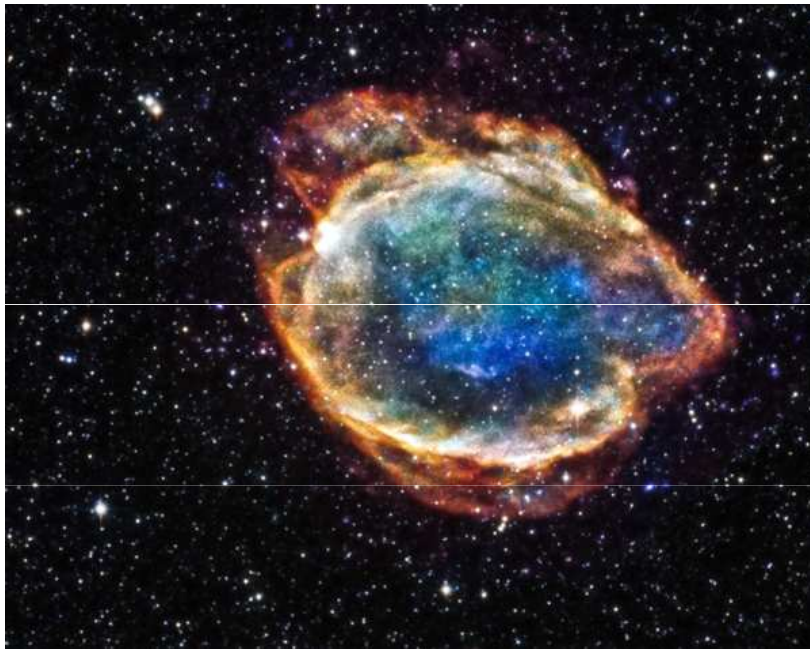
**IZ: neskutečně užitečné i velmi nebezpečné, přičemž ho nemůžeme vnímat našimi smysly – málokterý fenomén proto ve společnosti vyvolává tak rozporuplné emoce, jako právě IZ**



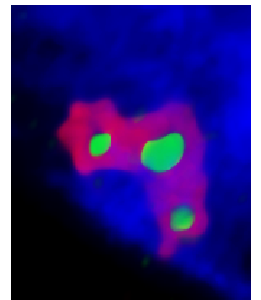
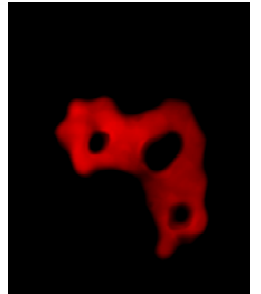
# Ionizující záření jako experimentální nástroj



## Od buněčného nanokosmu po vesmírné dálavy

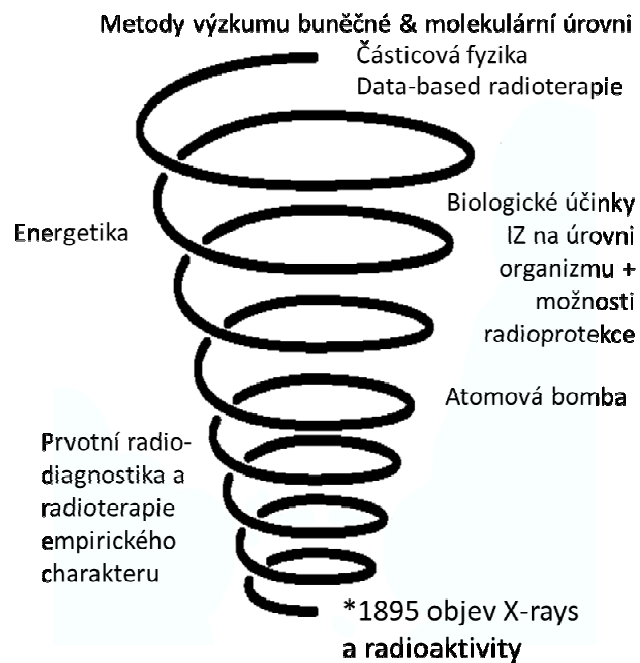


- Cílené poškozování DNA za účelem studia uspořádání buněčného jádra a mechanismů základních buněčných procesů
- Studium karcinogeneze
- Výzkum vesmíru
- Mutageneze rostlin (šlechtitelství), ...





# Jen málo fenoménů vyvolává tak silné a protichůdné emoce jako IZ



## Radiobiologie excelující i stále tajemná

EDITORIAL

Čas. Lék. Čes. 2020, 159: 251

S objevem radioaktivity a ionizujícího záření svět vstoupil do nové éry atomového věku, aby poté už nikdy nebyl stejný jako dříve. Od tohoto epochálního přelomu uplynulo již mnoho let a došlo k udělení řady Nobelových cen za objevy spjaté se zářením, které se mezitím dočkalo aplikací v nejrůznějších oblastech lidského činnosti, včetně medicíny.

Ačkoliv by se však mohlo zdát, že radiobiologie má zlatý věk již za sebou, v posledních letech zažívá svou renesanci. Znovu se před námi otvírají některé stěžejní otázky doprovázející radiobiologii od samého jejího počátku, jež ovšem dosud nebyly experimentálně uchopitelné. Jako bychom se tedy po pomyslné spirále vrátili do časů původního nadšení pro výzkum ionizujícího záření, přičemž se však nacházíme o jednu otáčku výše, respektive hlouběji uvnitř buněčného nanokosmu, disponující dříve nedostupnými technologiemi a experimentálními možnostmi. Současná situace nám poskytuje obrovskou šanci k zásadnímu prohloubení znalostí o působení ionizujícího záření různého typu na biologické systémy na molekulární úrovni a jejich následné převezení do klinické praxe a radiální ochrany.

Léčbu ionizujícím zářením dnes v určité fázi choroby podstupuje, často velmi úspěšně, přibližně polovina onkologických pacientů. Technologický rozvoj též vedl k výraznému zpřesnění zobrazovacích metod doprovázenému extrémním nárůstem počtu radiodiagnostických vyšetření, nežádka však málo opodstatněných. Zejména v některých zubních ordinacích je „rentgen“ prováděn již téměř automaticky, s nadsázkou při každé návštěvě, a z USA hrozí svým rozšířením do světa jako nový „výdobytek“ medicíny preventivní celotělové CT.

Mimo lékařské aplikace se přitom v mnoha státech napopak značně stupňuje radiofobie, vedoucí např. až k iracionálnímu a téměř sebeustručujícímu tlaku na uzavření všech jaderných elektráren ve státech EU (Německo budí tragickým příkladem). Zmíníme-li ještě aktuálnost „radiobiologie“ a potažmo radiální ochrany v kontextu plánování prvního pilotovaného letu na Mars a bohužel také stupňujícího se rizika zneužití radioaktivních materiálů, či dokonce atomových zbraní teroristy nebo teroristicky smýšlejícími státy, nikoho nepřekvapí, že málokterý fenomén vyvolává ve společnosti aktuálně tak protichůdné emoce jako právě ionizující záření. Šíření hlubšího a racionálního povědomí o biologických účincích ionizujícího záření je proto v dnešním světě velice důležité. Naplňovat tento úkol se snaží mj. Společnost pro radiobiologii a krizové plánování České lékařské společnosti Jana Evangelisty Purkyně (SRKP ČLS JEP, [www.srkp.cz](http://www.srkp.cz)), mezi jejíž členy patří i většina autorů, kteří přispěli do tohoto vydání *Casopisu lékařů českých*.

Připravili jsme celkem 7 článků, jež se v logické posloupnosti dotýkají vybraných horkých radiomedicinských a radiobiologických témat. Kromě představení české radiobiologie a jejích úspěchů v historickém kontextu je – vzhledem k zaměření časopisu – prostor věnován zejména novým poznatkům o biologických účincích ionizujícího záření, možnostem jejich terapeutického ovlivnění a radioterapii. S důrazem na přístrojové vybavení dostupné pro pacienty v Česku se seznámíme s nejnovějšími trendy

v radioterapeutických přístupech. Zásadního zdokonalení se dočkaly zejména metody zacílení dávky do oblasti nádoru a plánování radioterapie, jež nyní dovolují zohlednit i pohyb a změny cílové oblasti v průběhu ozařování. Nové naděje přináší také využití protonového záření a v několika centech ve světě rovněž iontových svazků. Díky těmto možnostem dnes dokážeme likvidovat nebo alespoň kontrolovat i nádory v kritických oblastech lidského těla, kde by obdobný zákrok v minulosti byl nepředstavitelný. Biologickým účinkům těchto typů ionizujícího záření však doposud zcela nerozumíme.

Problémy, se kterými se radioterapie i přes dosažené pokroky stále potýká, jsou ilustrovány na léčbě nádorů hlavy a krku. Zhruba polovina těchto nádorů totiž na radioterapii nereaguje, přičemž důvody tohoto chování nejsou známy. Vystává tak závažné dilema výběru primární léčebné modality, poukazující na nutnost a zároveň obtížnost identifikace biomarkerů radiorezistence umožňujících personalizovanou onkologickou péči.

V závěru se potom z klinické praxe přeneseme do základního výzkumu, abychom se pokusili lépe porozumět vztahům mezi fyzikálními vlastnostmi různých typů ionizujícího záření, charakterem poškození DNA, výběrem reparačních mechanismů, efektivitou reparace DNA a přežíváním ozářených buněk. Toto poznání je důležitým předpokladem nejen rozvoje hadronové radioterapie, ale také třeba efektivní ochrany posádek plánovaných vesmírných misí. Využívající superrozlišovací mikroskopie přivádějí autoři čtenáře až na samotnou hranici rozlišitelnosti buněčných struktur a procesů v intaktních buňkách.

Předkládané články, přestože všechny přehledového charakteru, pokrývají pouze špičku špičky současného dění v radiobiologii. Zájemcům o získání širšího povědomí o „nových trendech“ v radiomedicíně a radiobiologii proto nelze než doporučit k nahlédnutí obsáhlejší odbornou literaturu, např. nedávno vydanou knihu kolektivu zde prezentujících autorů (Klinická radiobiologie, *Grada*, 2020) nebo sborník příspěvků z posledního Mezinárodního kongresu radiálního výzkumu (ICRR 2019) proběhnuvšího v anglickém Manchesteru.

Zdá se až neuvěřitelné, jak daleko radioterapie dospěla od časů svého zrodu. Už jen vizuální porovnání původních ozařovačů a dnešních urychlovačů je nade vše výmluvné. Přesto však řada nádorů zůstává k radioterapii rezistentní a stále nerozumíme ani řadě základních radiobiologických problémů. V potaz musíme bohužel brát rovněž „ekonomickou“ toxicitu moderních radioterapeutických technologií. Leckterého čtenáře tak po vyplnění namíchaného kotkolu patrně dosti rozbolí hlava, poté co se absorbované informace plně rozvinou v protichůdné pocity nadšení, naděje a zároveň jisté deprese.

Přesto všem přeji zajímavé čtení a autorům srdečně děkuji za jejich ochotu přispět k popularizaci radiobiologie v naší zemi.

**RNDr. Martin Falk, Ph.D.**  
vědecký sekretář Společnosti pro radiobiologii a krizové plánování ČLS JEP

# Čím se budeme zabývat:

- Základní charakteristika IZ a jeho interakcí
- Vliv IZ na biologické systémy, vztah mezi fyzikálními parametry IZ a biologickými účinky
- Radiační ochrana
  - nutno zabrousit do mnoha vědeckých oborů,
  - nejedná se však o přednášku z:
    - částicové / jaderné fyziky
    - kvantové fyziky, atd.



## Orientační sylabus – část 1

- **Vlastnosti a zdroje ionizujícího záření, jeho interakce s hmotou, ochrana před IZ**
- Úvod – Radiobiologie a její náplň v kontextu dějin
- Vlastnosti elektromagnetického záření, základní vlastnosti ionizujícího záření (IZ), objev Rentgenova záření, rentgenka, základní aplikace v medicíně a některé další aplikace
- Objev přirozené radioaktivity, záření gama, stavba atomu, elementární částice, typy ionizujícího záření, rozpadové řady
- Interakce různých typů ionizujícího záření s hmotou
- Základní veličiny (ve radiační biofyzice, dosimetrii a radiační ochraně)
- Základy radiační ochrany, vnější ozáření, vnitřní kontaminace, biogenní radionuklidy
- Přírodní a umělé zdroje IZ, radon, terestriální a kosmické záření, IZ v diagnostice a radioterapii, průměrné absorbované dávky IR v běžném životě a při specifických činnostech
- **Účinky IZ na úrovni tkání a organismů:**
- Deterministické a stochastické účinky IZ, akutní nemoc z ozáření (ARS)
- účinky nízkých dávek IZ, hypersenzitivita, hormeze, tkáně citlivé a rezistentní k deterministickým a stochastickým účinkům, časně a pozdní účinky, somatické a gametické účinky, radiosenzitivita různých organismů
- Jaderné havárie: Černobyl, Fukushima, Three Mile Island, Majak, Jaslovské Bohunice, ..., klasifikace jaderných havárií, plynoucí poznatky a ponaučení pro radiobiologii a radiační ochranu

## Orientační syllabus – část 2

- **Účinky záření na buněčné úrovni:**
- Přímý a nepřímý účinek ionizujícího záření, lineární přenos energie (LET), IZ s nízkým a vysokým LET, základy radiační chemie
- Buňka, stavba buňky, radiační poškození proteinů, lipidů, RNA a DNA; funkce a radiační poškození membrán a buněčných organel
- DNA jakožto kritický cíl pro ionizující záření, struktura buněčného jádra, chromatinu a DNA
- Chromozómy, karyotyp člověka, chromozomální a chromatidové aberace (translokace, delece, inverze), vliv LET na charakter poškození chromozómů
- Biodosimetrie pro krizové události
- Radiační poškození DNA na molekulární úrovni – typy radiačních lézí DNA, mutageneze, IZ s nízkým a vysokým LET – mikrodosimetrie, vztah mezi LET a relativní biologickou účinností IZ (RBE)
- Cytoplasmatické účinky IZ – bystander effect
- Karcinogeneze, klonální expanze, chromothripsis, protoonkogeny a nádorové supresory, onkogeny, solidní nádory a leukémie
- Buněčný cyklus ve vztahu k radiorezistenci, reparaci DNA a karcinogenezi; transkripce a replikace DNA, typy buněčné smrti – apoptóza, nekróza, mitotická smrt, autofagie
- Reparační mechanizmy DNA – základní reparační dráhy BER, NER, zejména pak NHEJ, HR a alternativní reparační dráhy dvouřetězcových zlomů DNA, bodové mutace a epimutací



## Orientační sylabus – část 3

- **Aplikace IZ – radiodiagnostika a radioterapie**
- Princip radioterapie – odpověď normálních a nádorových buněk na ozáření, zevní terapie, frakcionované ozařování, moderní přístupy v radioterapii, brachyterapie, boron-capture therapy
- Hadronová terapie – protony a urychlené těžké ionty s vysokým LET (též v souvislosti s kosmickými lety), fyzikální výhody
- Radiorezistence nádorů – hypoxie, kyslíkový efekt (OER), genetické faktory (např. mutace p53), selekce radiorezistentních klonů
- Možnosti radioprotekce normálních buněk a radisenzitizace nádorových buněk – chemické (amifostin), biologické (inhibitory reparace DNA, imunomodulátory, apod.), a fyzikální
- **Nemedicínské aplikace IZ**
- Elektronová mikroskopie a další výzkumné metody
- Atomové elektrárny
- Atomové zbraně
- **Metody v radiobiologickém výzkumu**
- **Aktuální témata v radiobiologii (+ představení výzkumu DBBR AVČR Brno, M Falk)**

KOLOKVIUM (don't worry, be happy ☺)

# Literatura

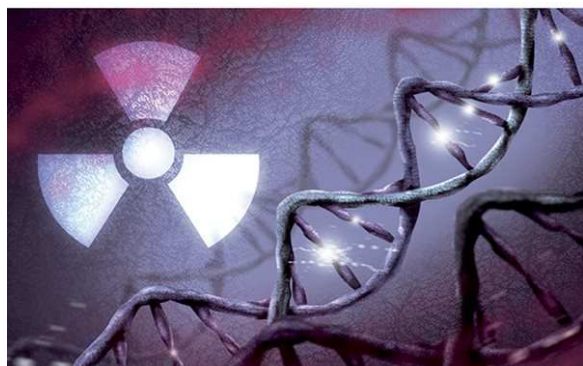
GRADA

Renata Havránková – editor

---

## Klinická radiobiologie

---



# Jak získat KOLOKVIUM (don't worry, be happy)

- Koupit si knihu ----->

nebo

- stát se členem „Společnosti radiobiologie a krizového plánování ČLS JEP; Societas Radiobiologiae et Crisium Dispensationi Colendis“; [www.srkp.cz](http://www.srkp.cz) (což ale nevyvazuje z povinnosti koupit si knihu)

nebo

- Alespoň 10 lajků na <https://www.facebook.com/srkp.cz>

nebo

- Přihlásit se k Bc./Mgr. práci na DCBR IBP Brno

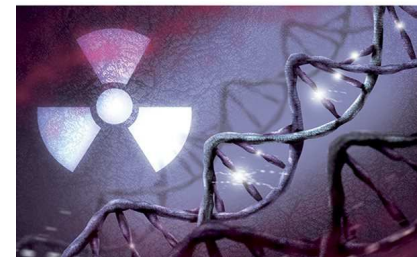
nebo

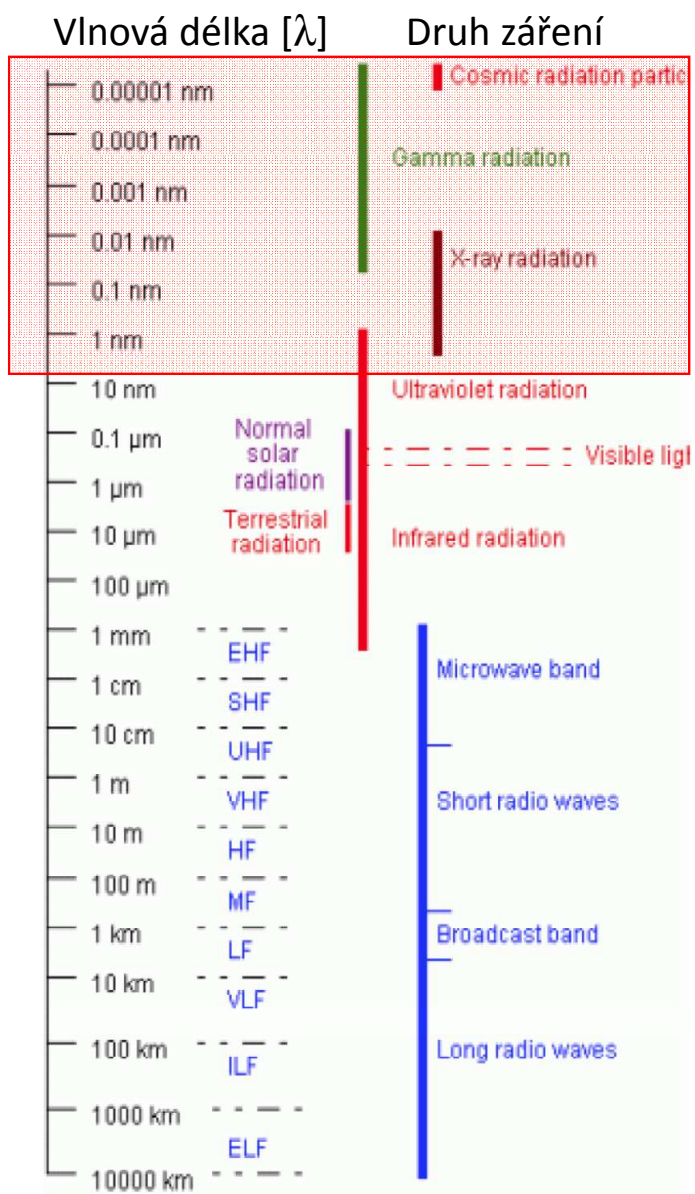
- Společně vysvětlit, proč jsou odpovědi v závěrečném testu označené jako správné skutečně správné ;-)
- PLUS: zpracovat rešerši na jedno z výše uvedených témat dle výběru a jeho diskuse v rámci úvodu jedné z přednášek



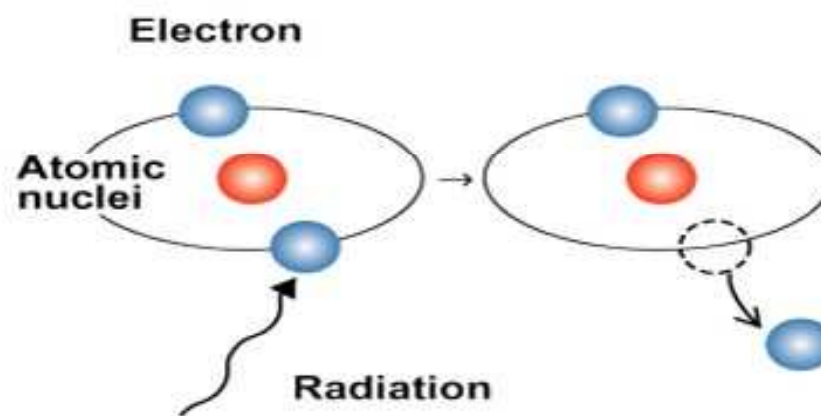
Renata Havránková – editor

**Klinická  
radiobiologie**





# IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ - Definice

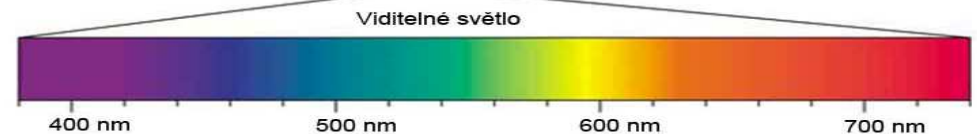


- Jak je zřejmé z vlastního pojmenování, ionizující záření definujeme jako záření, jehož kvanta mají **dostatečnou energii k ionizaci atomů**
- tj. odtržení elektronu z jejich elektronového obalu.
- Minimální energie potřebná k ionizaci ve vodném prostředí (cytoplazma) je  **$E > 33 \text{ eV}$** .
- To odpovídá záření s kratší vlnovou délkou, než přísluší ultrafialovému záření, přibližně  **$\lambda < 40 \text{ nm}$** .



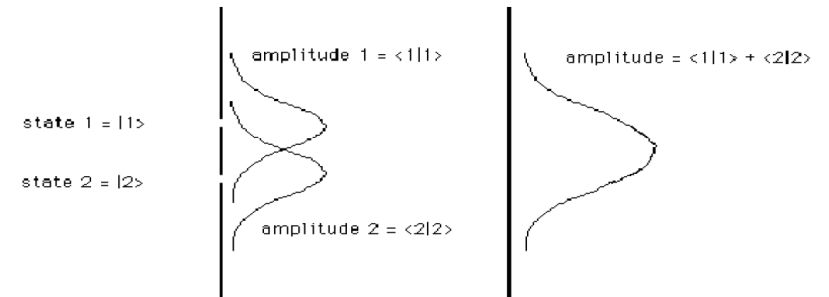
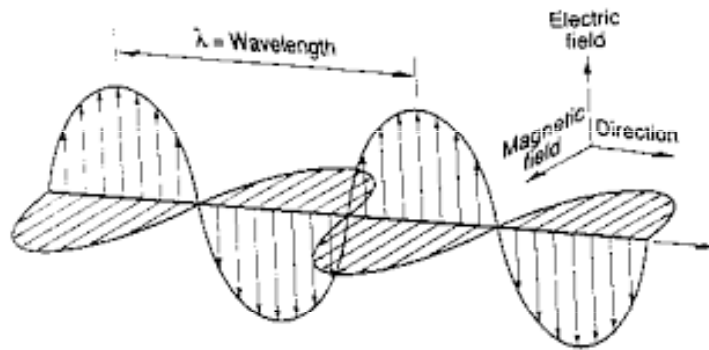
# Duální povaha ZÁŘENÍ (podrobněji později)

## 1. Světlo jako částice



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.

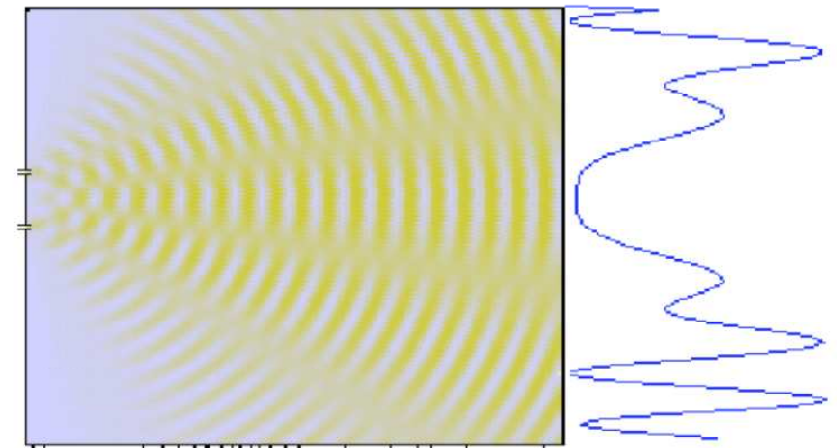
## 2. Světlo jako vlnění



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

# Frekvence vs. Vlnová délka

## Electromagnetic Spectrum

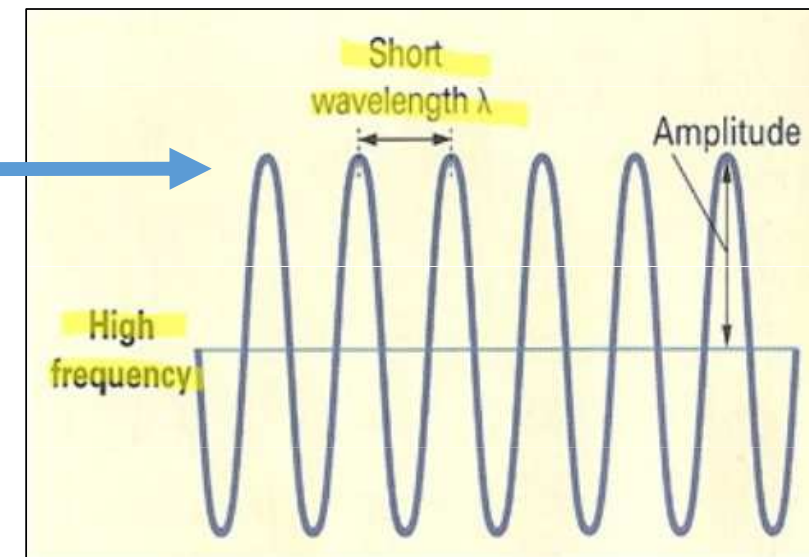
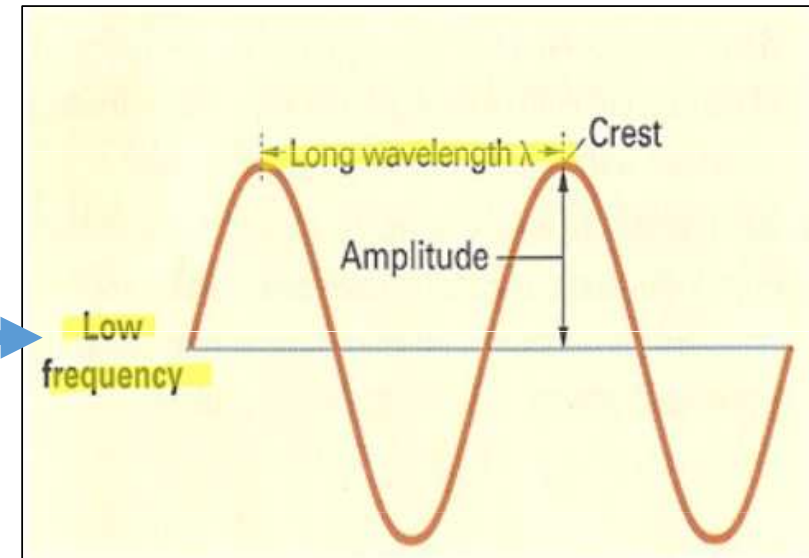
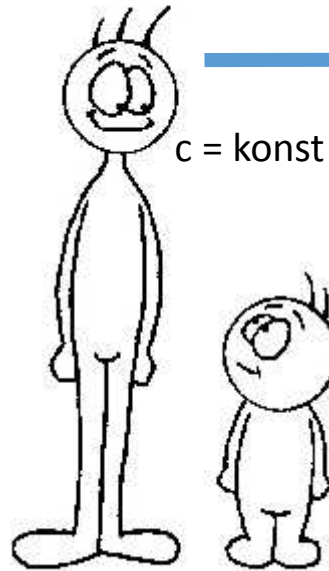
- Frequency & wavelength are inversely proportional

$$c = \lambda \nu$$

$c$ : speed of light ( $3.00 \times 10^8$  m/s)

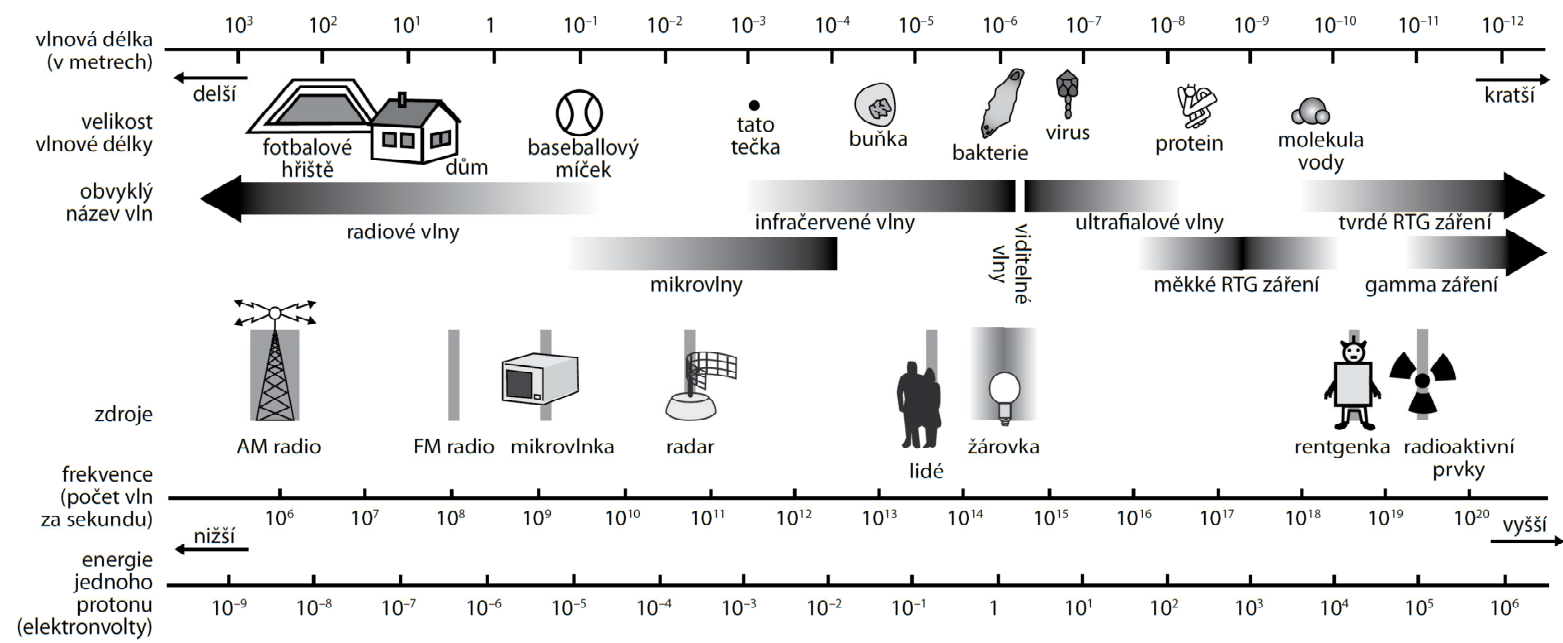
$\lambda$ : wavelength (m, nm, etc.)

$\nu$ : frequency (Hz)



# 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





# Wavelength and Frequency

Vztah mezi energií fotonu a vlnovou délkou je  
dán rovnicí

$$c = \nu \lambda$$

$c$  = speed of light ( $3 \times 10^8$  m/s)

$\nu$  = frequency ( $s^{-1}$ )

$\lambda$  = wavelength (m)



$$E = h \nu$$

$E$  = energy (Joules or J)

$h$  = Planck's constant ( $6.6 \times 10^{-34}$  J/s)

$\nu$  = frequency ( $s^{-1}$ )

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$h = 6,62607015 \times 10^{-34}$  J·s

$h = 4,135\ 667\ 696 \dots \times 10^{-15}$  eV Hz<sup>-1</sup>

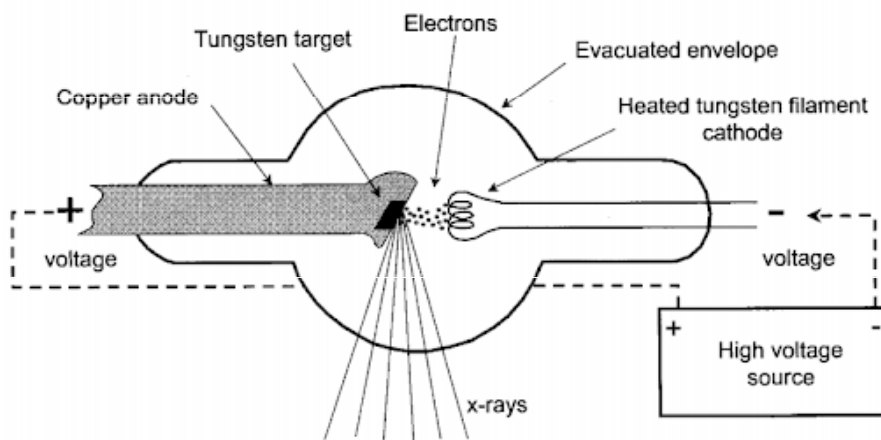


## 1985 - OBJEV PAPRSKŮ X

Wilhelm Conrad Röntgen

8. listopadu 1895

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

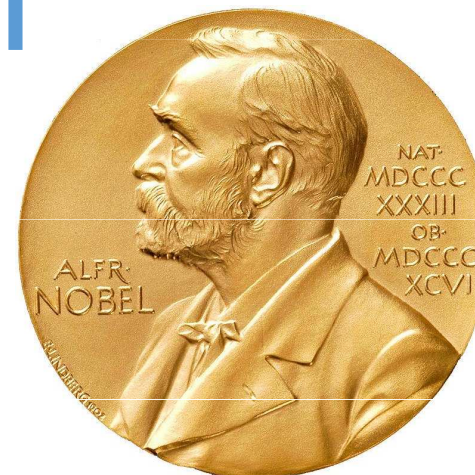
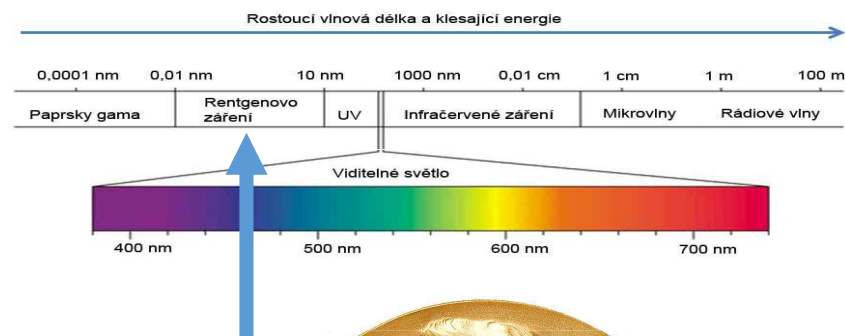


# OBJEV RADIOAKTIVITY A IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Wilhelm Conrad Röntgen

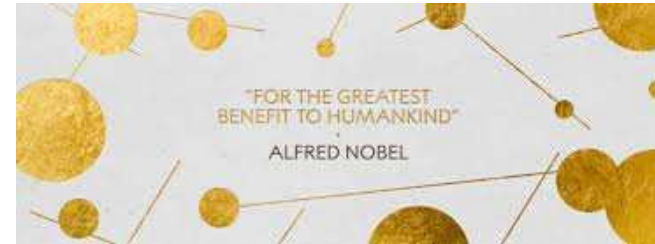
8. listopadu 1895

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



Roentgen obdržel za objev parsků X (RTG) v roce 1901 vůbec první **Nobelovu cenu za fyziku**

The first Nobel Prize in Physics in 1901. He was the first of more than 20 Nobel Prizes awarded for research related to radioactivity in the 20th century.

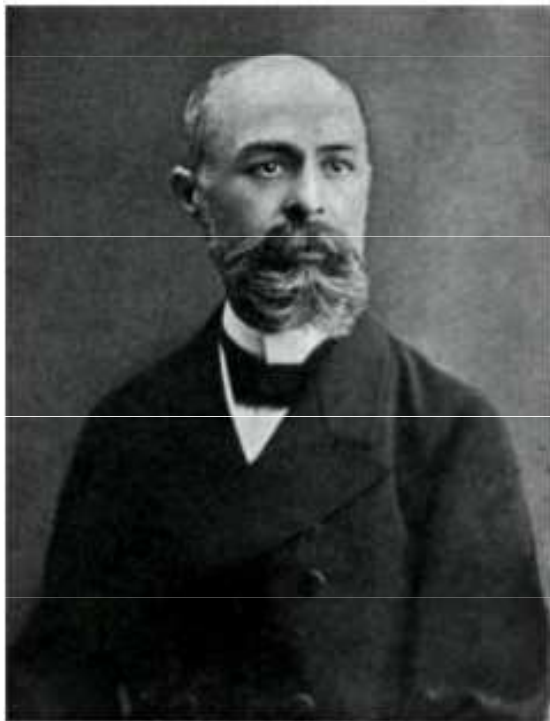



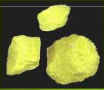


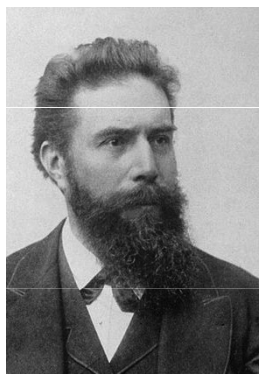
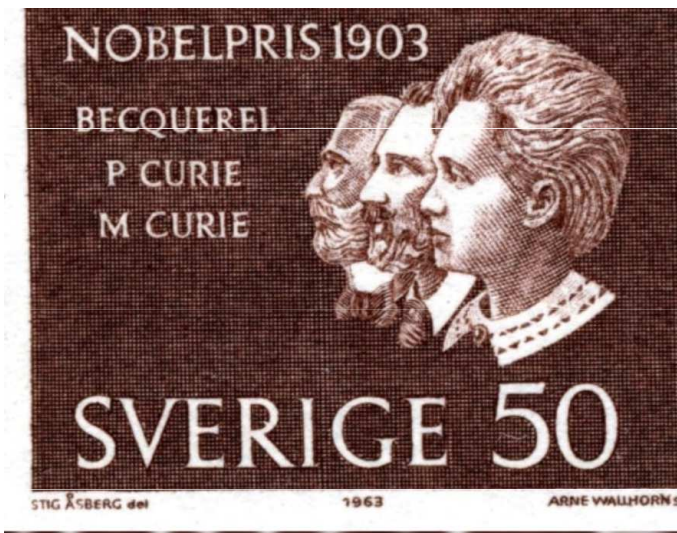
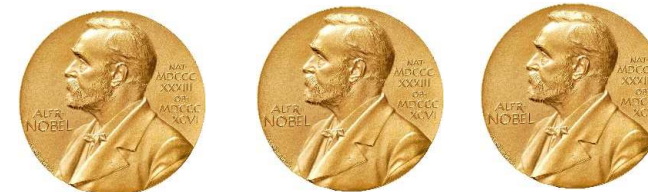
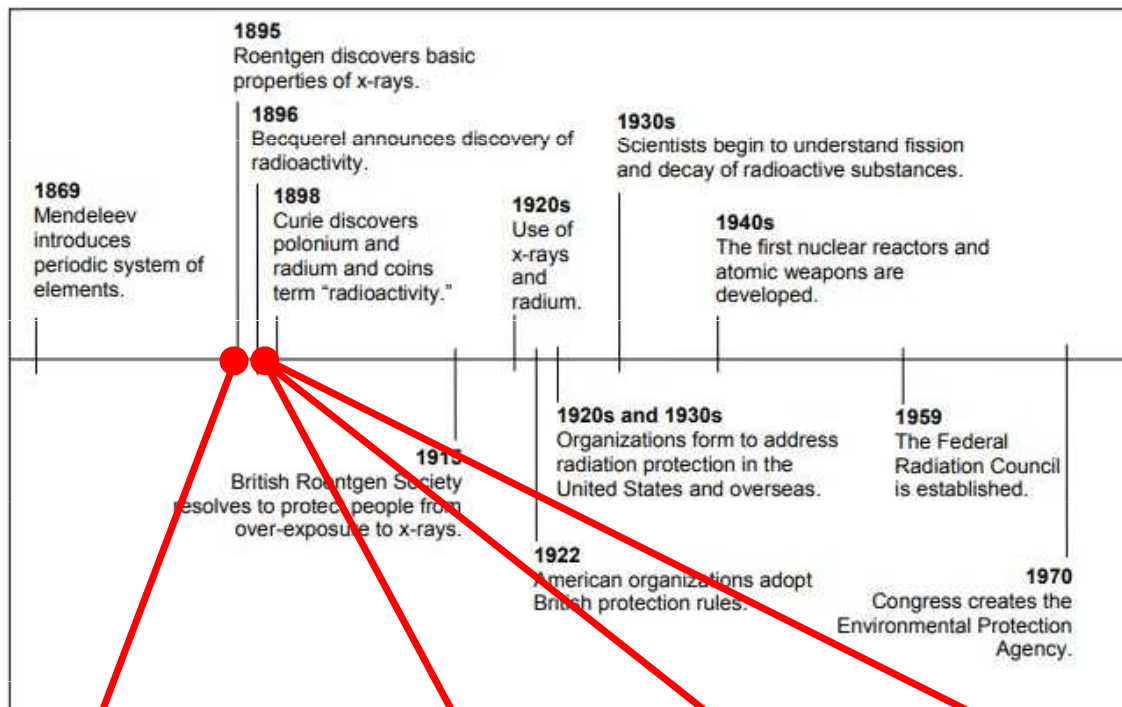
# OBJEV PŘIROZENÉ RADIOAKTIVITY

Antoine Henri  
Becquerel  
18. května 1896

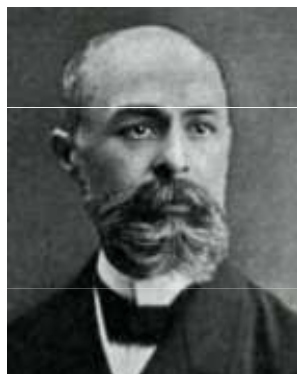
1903 – spolu s Pierre a Marií Curie - Nobelova  
cena za fyziku za objev radioaktivity



(226) 88 <b>Ra</b> Radium [Rn] 7s <sup>2</sup>	(209) 84 <b>Po</b> Polonium [Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup>
<b>Radium a Polonium</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Radium (Ra) z rady kovů alkalických zemin, silně radioaktivní prvek, vznikající v rozpadové řadě uranu a thoria.</li><li>• Polonium (Po) je radioaktivní prvek. Byl objeven roku 1898 Marií Curie-Skłodowska a pojmenován na počest její vlasti – Polska. Patří mezi kovy.</li></ul>	
 RADIUM	 POLONIUM



1901 vůbec první NB za fyziku



1903 Nobelova cena za fyziku



Marie Curie  
První žena oceněná Nobelovou cenou  
Původně měl být ale oceněn jen Becquerel a Pierre Curie!!

# Fenomenální Marie Curie-Sklodowska



**1903: Nobelova cena za fyziku za objev radioaktivity**, spolu s Pierrem a A.H. Becquerelem

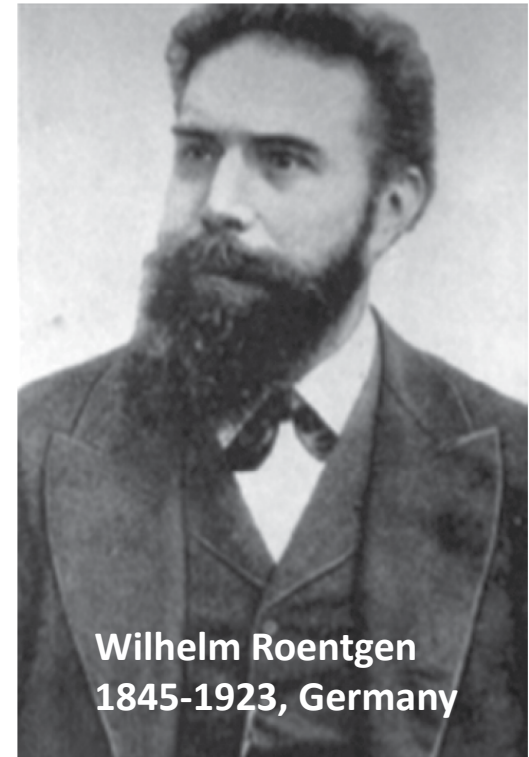


**1911: druhá Nobelova cena, nyní za chemii**, za izolaci radia a objev polonia, plus další objevy ohledně radioaktivity



# Objev ionizujícího záření

- **Den-D:** 8. listopad 1895, podvečer
- **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 antikatodu ve vakuové trubici (viz dále).





# Co předcházelo objevu paprsků X



Každý  
správný  
fyzik tehdy  
zkoumal  
katodové  
výboje v  
plynech  
(katodové  
paprsky)

NEON  
LIGHTS



BEAUTY  
SUPPLY

# Vznik katodového záření (e-/sklo)



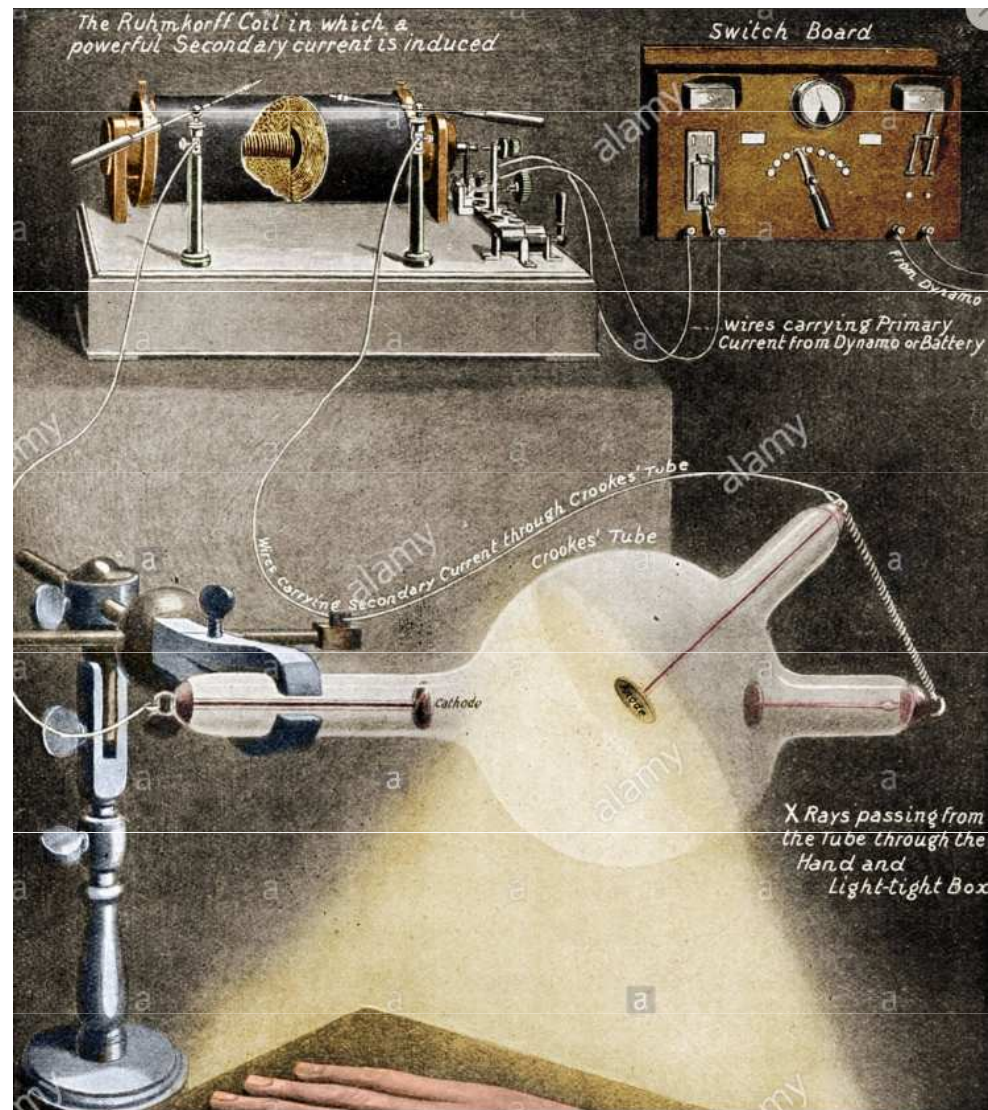
- Po odsátí trubice na vysoké vakuum mizí katodové paprsky, avšak začíná zelenožlutě svítit sklo v okolí anody
- Charakteristika záření (barva) nezávislé na náplni trubice

# Cherche z la femme



- Ze záhadných (neznámých důvodů zakryl výbojovou trubici černým papírem
- Možná její světélkování narušovalo experiment, možná v tom měla prsty jeho manželka ;-)
- Každopádně sehrála hlavní roli náhoda, díky níž se objevilo světélkování/ stín na NEUKLIZENÉM světélkujícím stínítku... (Flemingovi zplesnivěly kultury na penicilin, objev přirození radioaktivity – opět náhoda ;-)
- Nebýt této události, nebyl by asi 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 neobjevil (ostatně, toto X-záření ve stejné době nezávisle objevili H.Jackson a A.A.Campbell-Swinton).

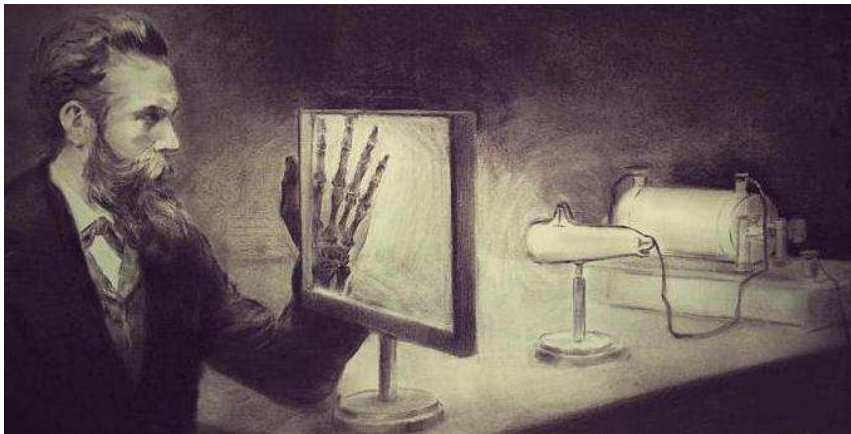
- Zjistil, že **fluorescence nemizí ani při zaclonění trubice** černým papírem, ani když mezi trubicí a stínítko vložil tlustou knihu; stínítko fluoreskovalo i na vzdálenost 2 metrů
- Když poté vkládal mezi lampu a stínítko další různé předměty, zjistil, že jimi **paprsky X procházejí různě intenzivně**. Teprve když mezi trubicí a stínítko umístil kovový předmět, na stínítku se ukázal stín



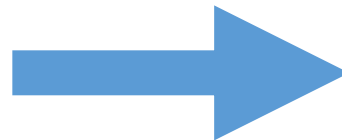


# „I Have Seen My Death“ aneb Mrs. Roentgen podruhé

- Jednou takto vložil mezi lampu a stínítko **NÁHODOU** svou ruku a uviděl ke svému velkému překvapení kosti prstů.



- Podruhé už raději podruhé požádal o ruku svou manželku ;-)

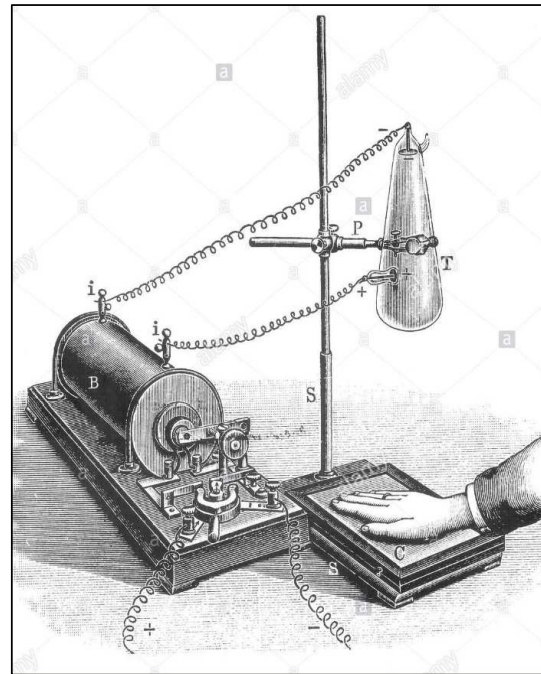


# Historicky první rentgenový snímek

- 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.**

*Anna Bertha (Ludwig) Roentgen*



Anny Berthy. Na rozdíl od svého muže ji obraz kostí se snubním prstenem příliš nenadchl; údajně jej velice překvapila a zklamala, když prohlásila: „Viděla jsem vlastní smrt.“

# X-Rays: 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. **28.12.1895 napsal předběžnou zprávu „O novém druhu paprsků“**. Poslal ji do žurnálu Würzburgské lékařské společnosti.
- Objev byl natolik překvapivý, že ho nejprve odmítali i slovutní 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.

# Zasedání společnosti lékařů a přírodovědců → RENTGENOVY paprsky

- Již v lednu příštího roku (23.1.1896) byl Roentgen pozván na zasedání společnosti lékařů a přírodovědců, kde zhotovil fotografický snímek ruky tehdy významného anatoma Rudolfa Alberta von Köllikera.
- Ten potom navrhl, nadšen tím co viděl a za mohutné podpory publika, **aby se paprsky X nazvali rentgenovými**. Návrh byl přijat s velkým nadšením. Paprsky rychle nabyly obrovského významu ve vědeckém výzkumu, technice i lékařství.



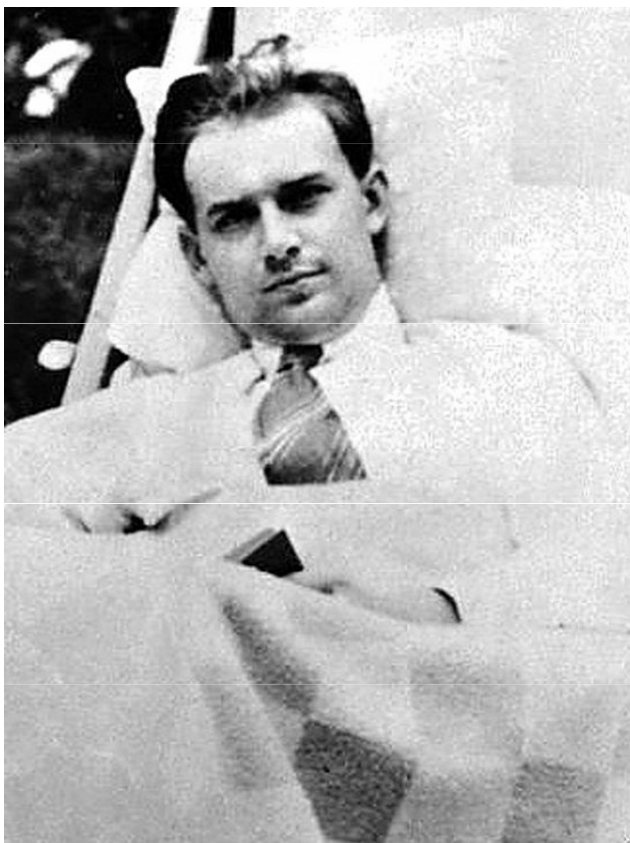
Experimenter in 1890s (*top right*) examining his hand with fluoroscope.



- Taking an X-ray image with early Crookes tube apparatus, late 1800s. The Crookes tube is visible in center.
- The standing man is viewing his hand with a **fluoroscope screen**
- The seated man is taking a **radiograph** of his hand by placing it on a **photographic plate**
- No precautions against radiation exposure are taken; its hazards were not known at the time.



# Paprsky X v poezii – mystičnost a fascinace



## Jiří Wolker : U roentgenu

To není Faustova jizba a duše  
zde nevchází v prokletí,  
to je Roentgenův přístroj s  
magickou krásou XX. století

[https://www.psanci.cz/literatura\\_dilo.php?id=331](https://www.psanci.cz/literatura_dilo.php?id=331)

# Wilhelm Roentgen - zajímavosti

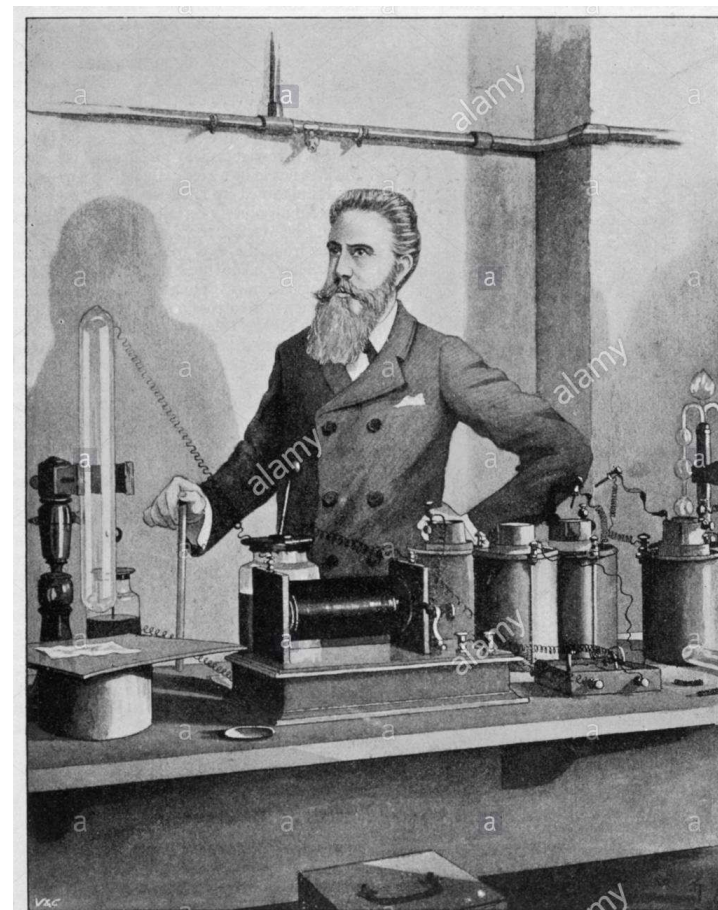
- Jako jediný díky své plachosti a skromnosti **nepřednesl nobelovskou přednášku**
- **objev nikdy nepatentoval**, což umožnilo jeho rychlé rozšíření do praxe. Kategoricky odmítal také všechny firemní nabídky k jeho komerčnímu využití. Zastával názor, že dílo vykonané na univerzitní půdě s pomocí veřejných prostředků by mělo sloužit zdarma úplně všem: proto **dobrovolně odevzdal svůj vynález veškerému lidstvu**.
- také odmítl povýšení do šlechtického stavu (jakožto pomíjivé)
- **Zemřel zcela bez finančních prostředků**.
- zemřel v 77 letech (v roce 1923) v Mnichově na **leukémii v důsledku dlouhodobého ozáření jako chudý a osamělý člověk**



# Röntgenův názor na badatelskou práci:

*„Experiment je nejmocnější a nejspolehlivější pákou, již můžeme na přírodě vynutit její tajemství; musí vždy být nejvyšší instancí při rozhodování otázky, zda lze nějakou hypotézu uznat, nebo zavrhnout.*

*Každý jev je třeba co nejpřesněji pozorovat a popsat ve všech jednotlivostech a teprve potom se člověk může odvážit podat nějaké vysvětlení.“*

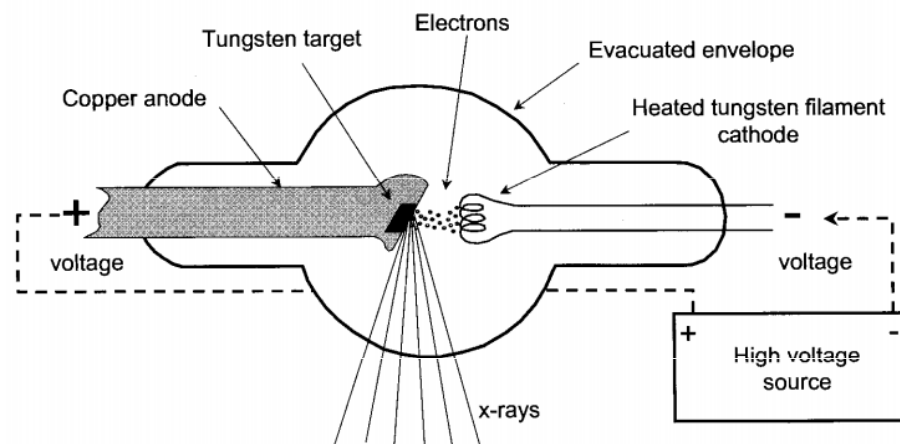


# Vznik RTG záření, RENTGENKA

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

Obecně - vakuová elektronika

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**.

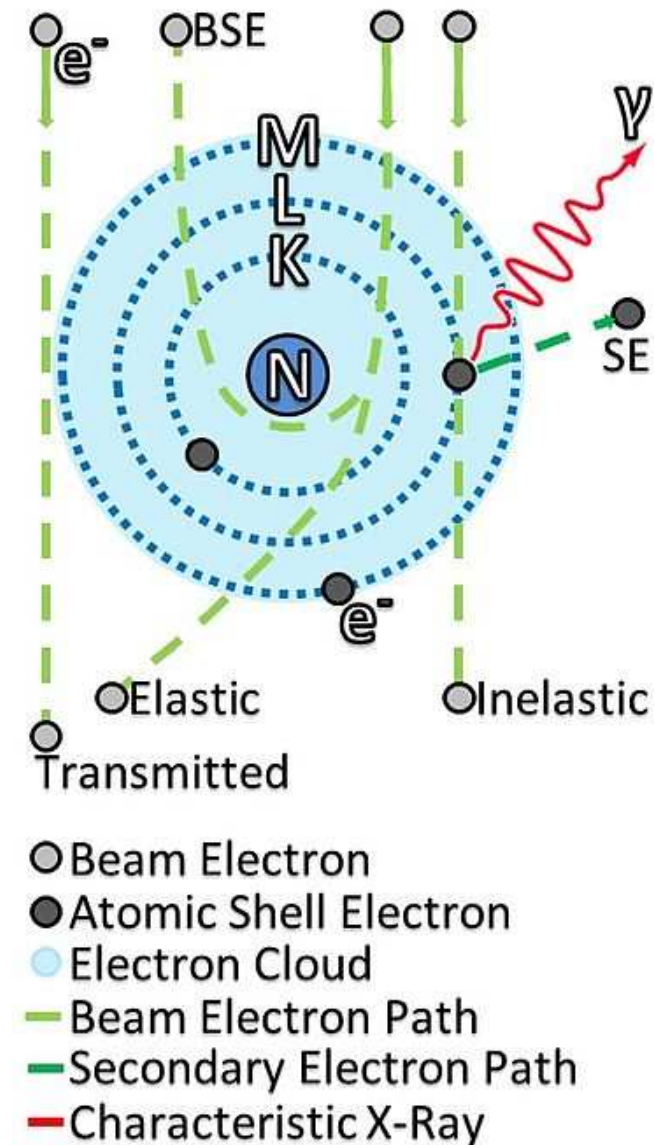


Katodové trubice byly vlastně prvními jednoduchými urychlovači elektronů a později se z nich vyvinuly obrazovky (v jisté formě slouží i dnes jako zdroj e- pro urychlovače)



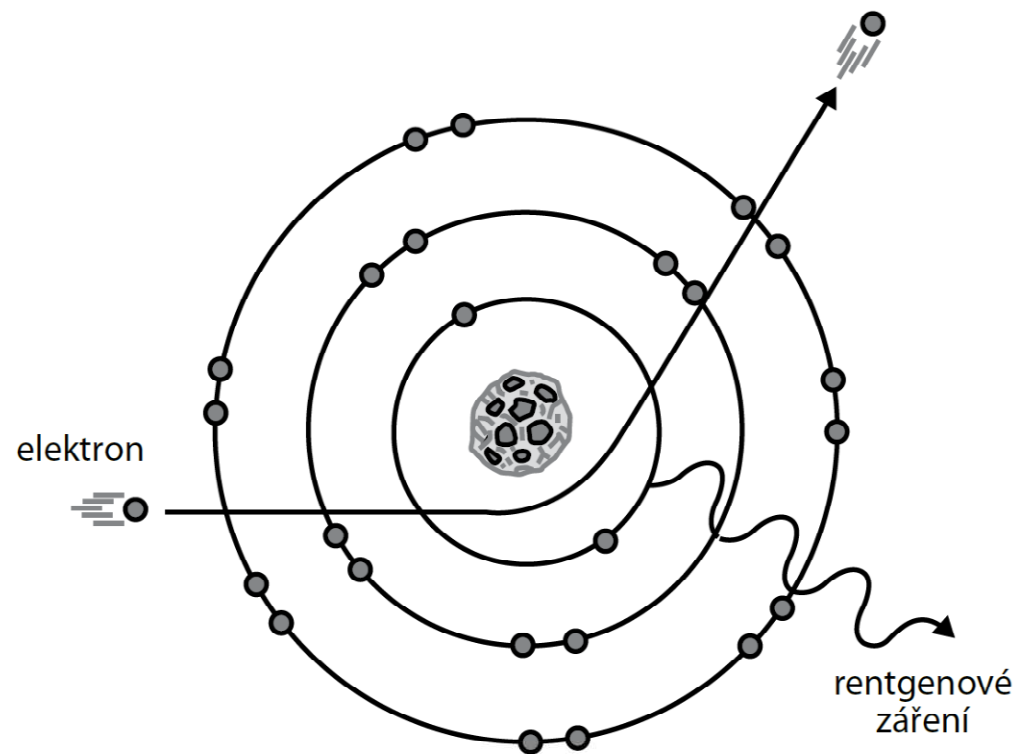
# Vznik RTG záření, RENTGENKA

- 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
  - k přeskočení výboje 1 cm dlouhého je zapotřebí napětí asi 25.000 volt. Vzduch totiž klade přechodu elektriny 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



# Interakce urychlených e- s polem jádra atomu

→ brzdné záření



# 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 změnil směr letu a zpomalil. 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**

- **Minimální vlnová délka (maximální energie) RTG spektra** závisí na voltáži urychlovacího napětí:
- Pokud máme **urychlovací napětí  $V$** , potom energie  $E$  předaná okolí elektronem na anodě je dána vztahem: maximal energy at a keV = tube kV

$$E = eV$$

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

$$E = eU = \frac{hc}{\lambda}$$

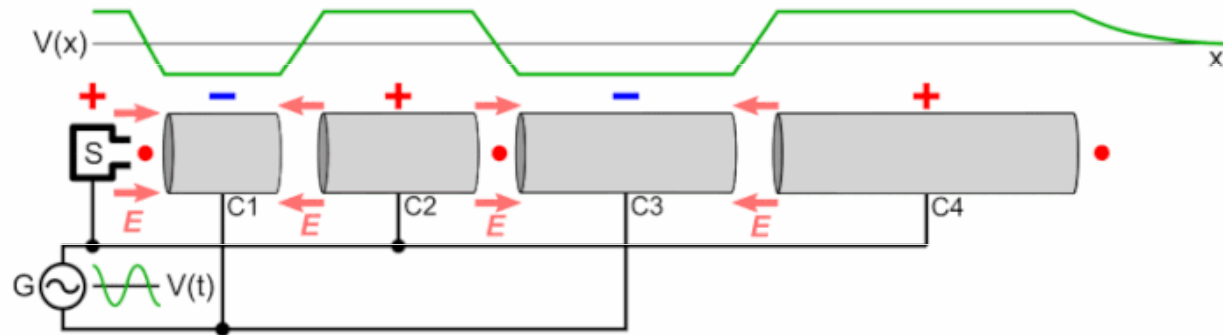
- ...a tedy:

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU} \cong 1,24 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{U} \quad [\text{m}].$$

**average energy = about 1/3 of the maximum energy.**



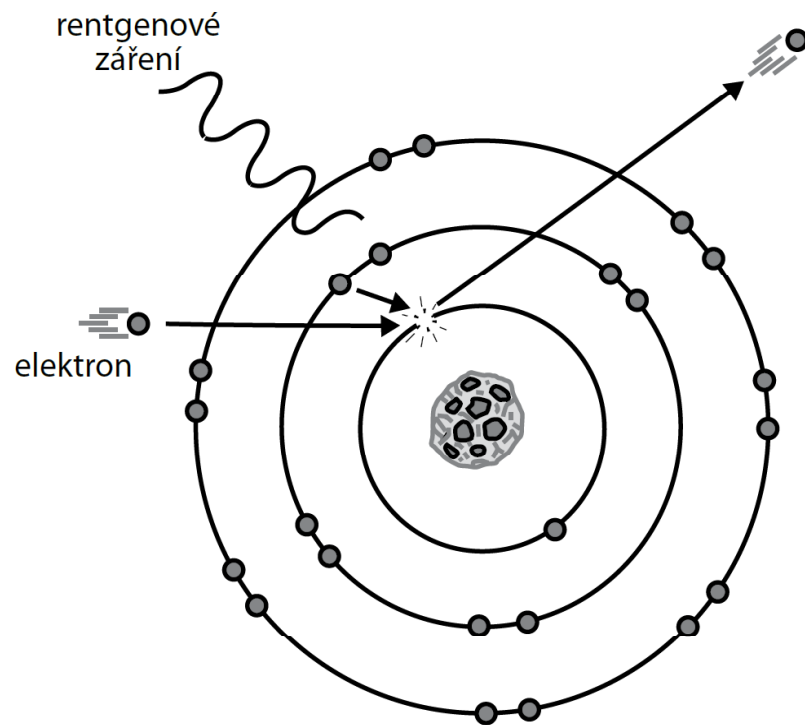
# Brzdné RTG záření



- 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.
- Brzdné záření se používá v lékařské diagnostice (např. [PET](#), [SPECT](#), [CT](#)), v [radioterapii](#) a v průmyslu v defektoskopii.

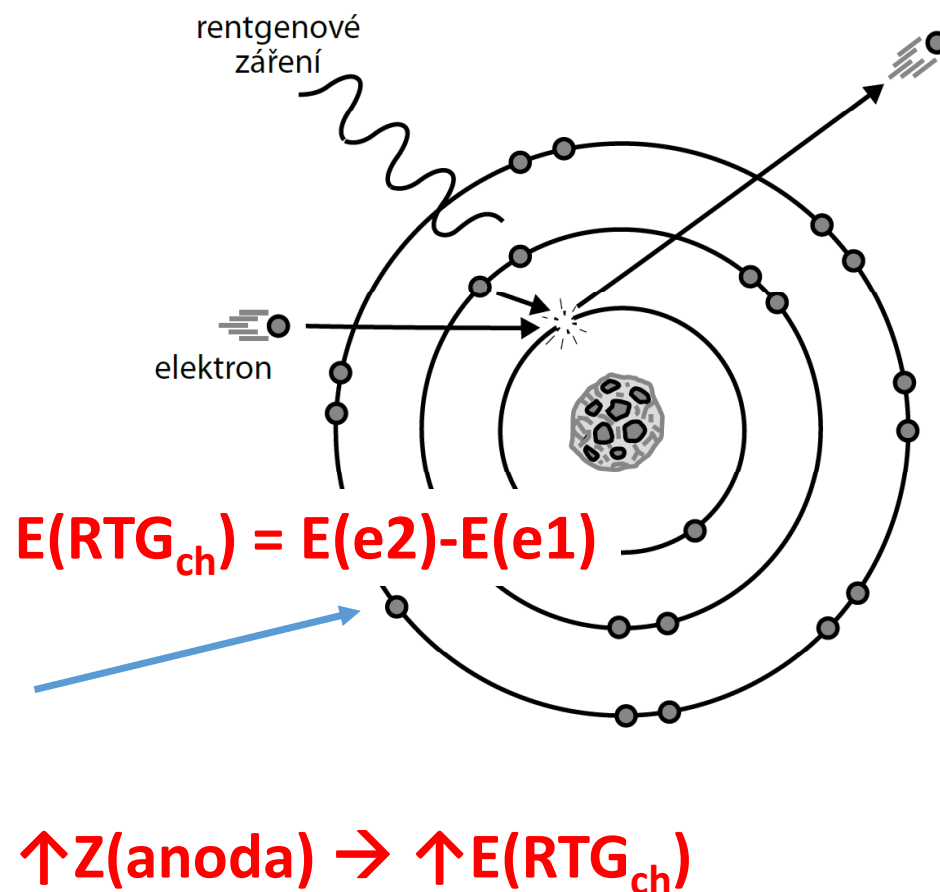
# Interakce urychlených e- s e- atomových obalů na vnitřních slupkách (K, L, M)

→ charakteristické RTG záření



# Charakteristické RTG záření

- Charakteristické RTG záření vzniká **při srážce letícího e- (z anody rentgenky) a e- z elektronového obalu atomu na katodě.**
- Původní e- je vyražen ven z atomu (**ionizace**). Vznikne „díra“, která je **ale následně zaplněna e- 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 závisí na materiálu, ze kterého je anoda vyrobena (e- mají specifickou E dle konfigurace e- obalu)**
- **čím je protonové číslo kovu anody vyšší, tím vyšší je energie charakteristického záření.**

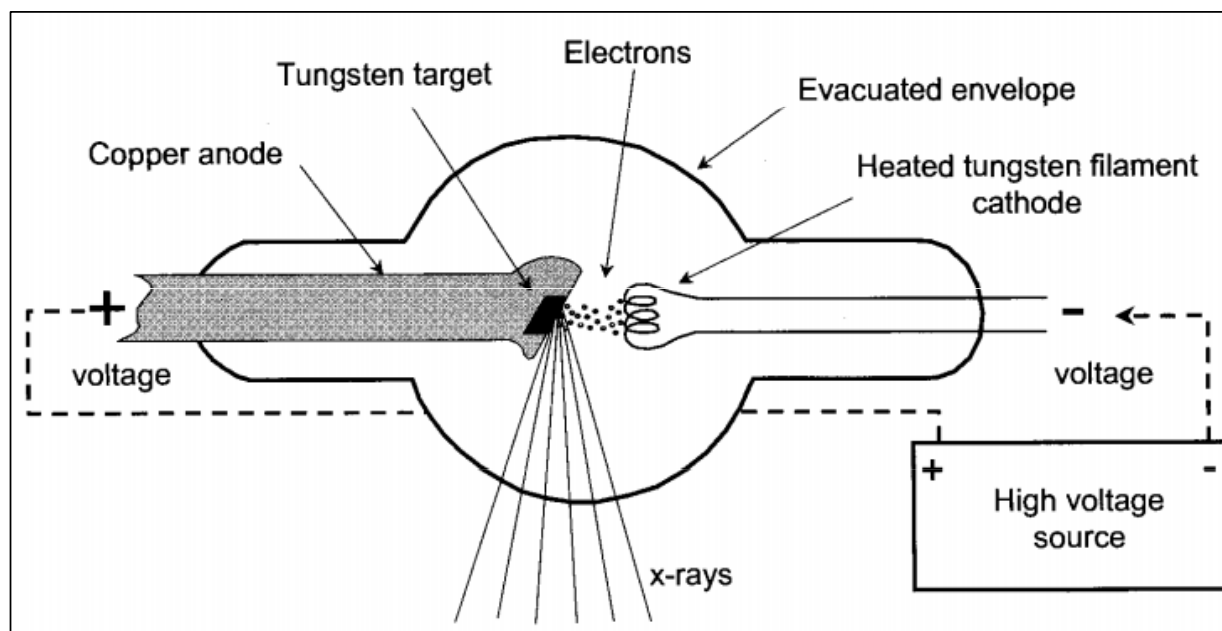


# Charakteristické rentgenové záření

- 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**.

# 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.

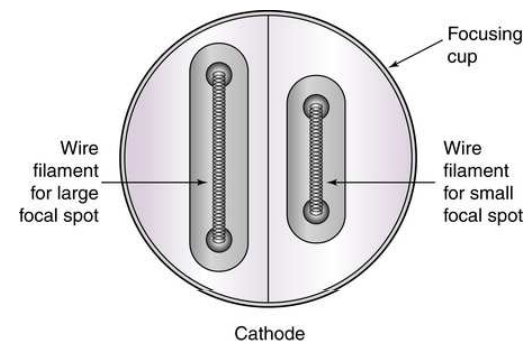
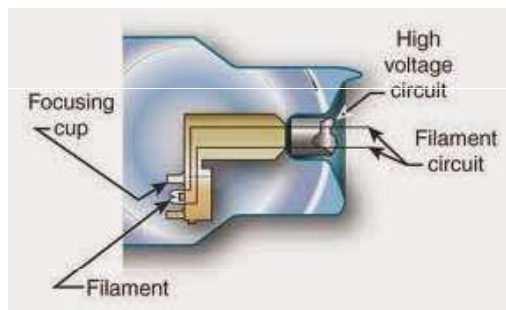
Po dopadu na anodu tedy pronikají elektrony několika vrstvami atomů anody a prudce se zbrzdí, dokud neztratí svou kinetickou energii

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. RTG záření opouští anodu a vylétá z trubice ven.



# Konstrukce rentgenky

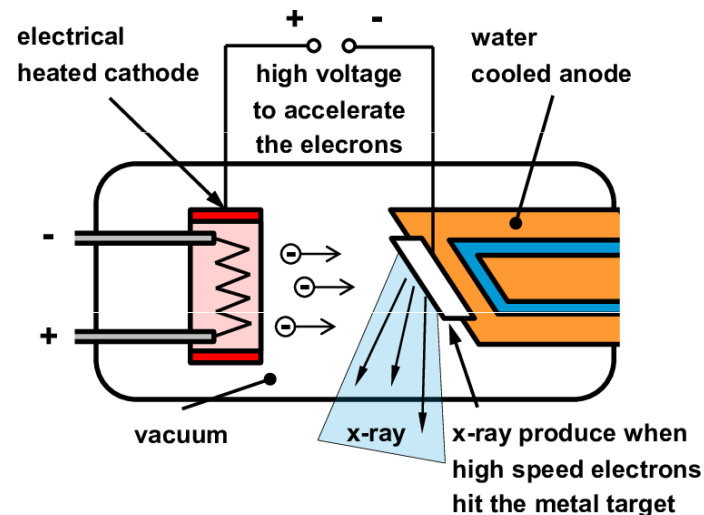
- **Katoda** tvořená spirálovitě navinutým tungstenovým/wolframovým vláknem (s příměsí thoria, které zvyšuje efektivitu emise elektronů a prodlužuje životnost katody) o tloušťce 0,2 mm, proto někdy nazývaná katodové vlákno, **slouží k produkci elektronů**.
- Toto vlákno je elektricky připojeno **ke žhavicímu 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)**.



<http://www.sukupova.cz/rentgenka-a-produkce-rentgenoveho-zareni/>

# Konstrukce rentgenky

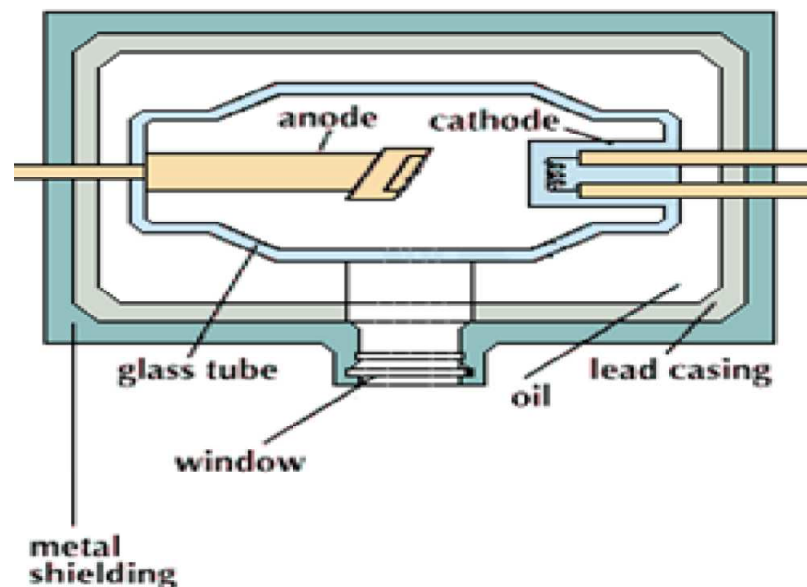
- Aby se zabránilo tepelnému zničení anodového terčíku, je potřeba vhodně zvolit materiál anody a taktéž dostatečně odvádět nepotřebné teplo.
- **Anoda** je nejčastěji vyrobena z **wolframu**, protože wolfram má **vyšší bod tání**.
- Wolfram je vhodný taktéž z toho důvodu, že díky **vyššímu atomovému 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 → poté měď pro co nejúčinnější odvod tepla



<http://www.sukupova.cz/rentgenka-a-produkce-rentgenoveho-zareni/>

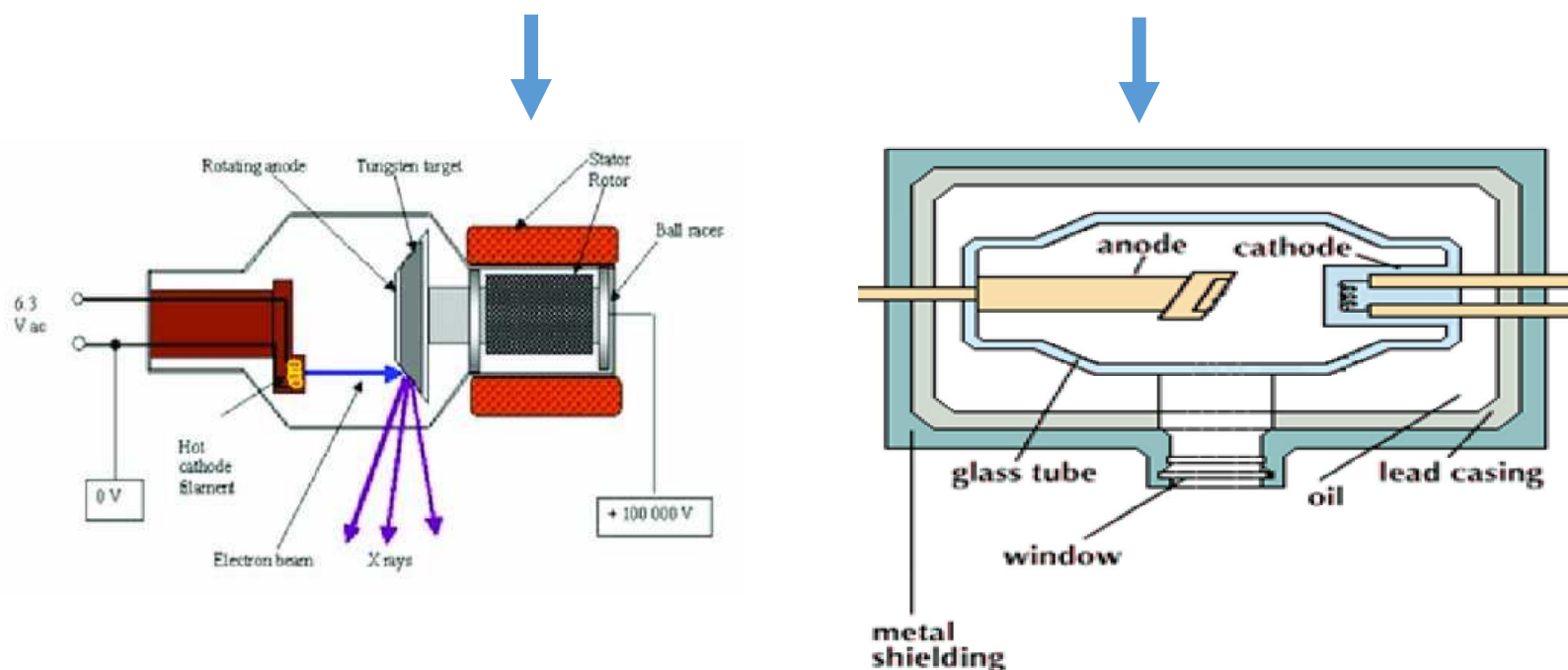
# Konstrukce rentgenky

- **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



# 99% E urychlených e- = Q → nutné účinné chlazení

- Rotor, případně rotuje celá rentgenka

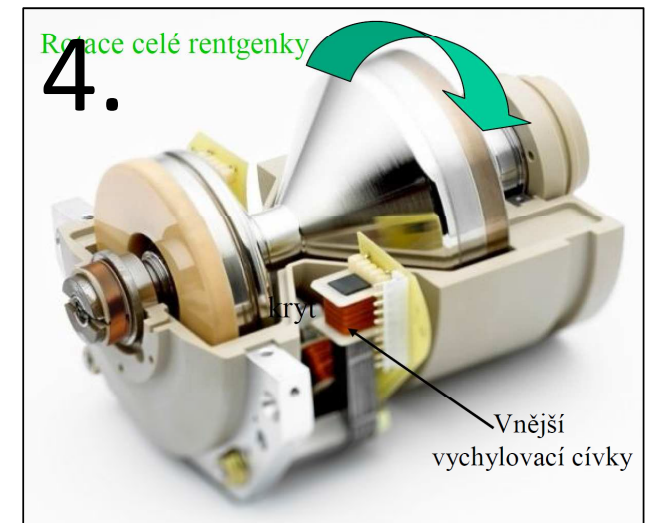
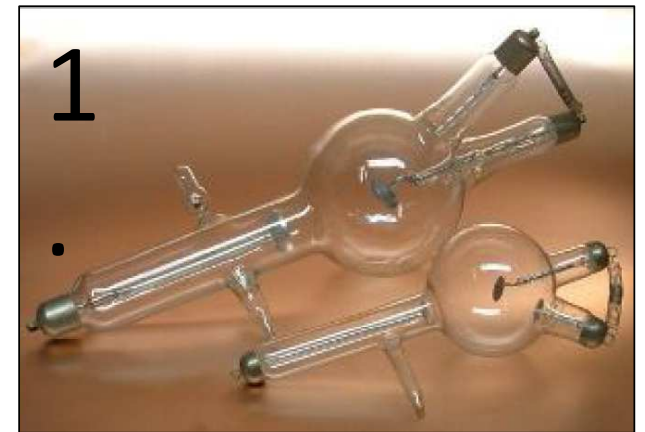


<http://www.sukupova.cz/rentgenka-a-produkce-rentgenoveho-zareni/>



# Generace a některé typy rentgenek

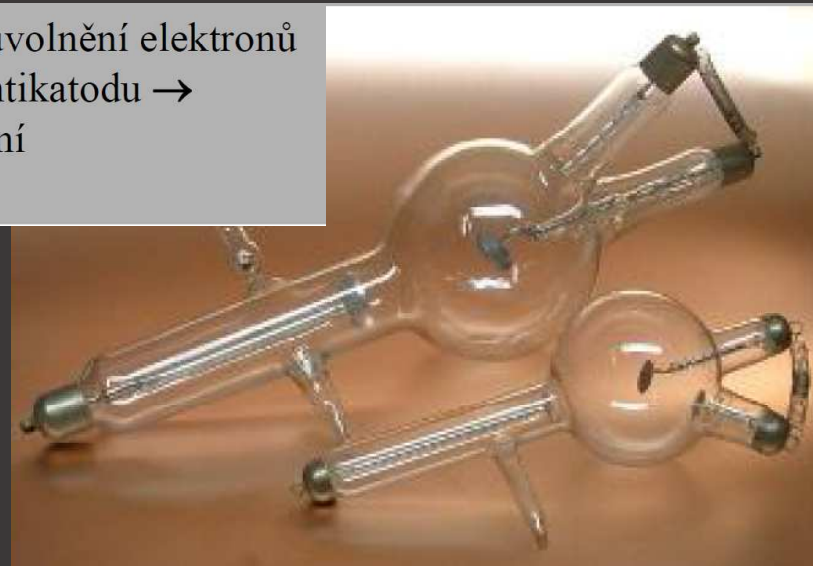
1. Rentgenky se studenou katodou
2. Rentgenky se žhavenou katodou
3. Rentgenky se žhavenou katodou a rotující anodou
4. Rentgenky s žhavenou katodou rotující celé



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



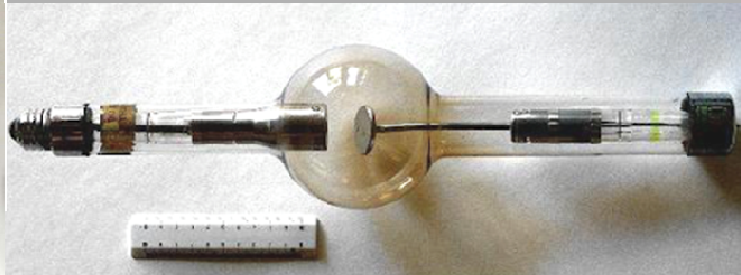
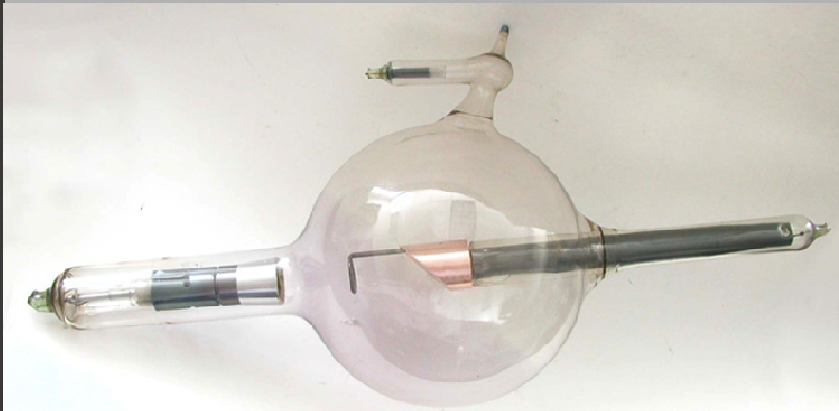
Výboj ve zředěném plynu → ionizace → uvolnění elektronů  
→ urychlení k anodě → dopad na antikatodu →  
→ vznik brzdného X-záření



## VAKUOVÉ RENTGENKY SE ŽHAVENOU KATODOU:

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

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

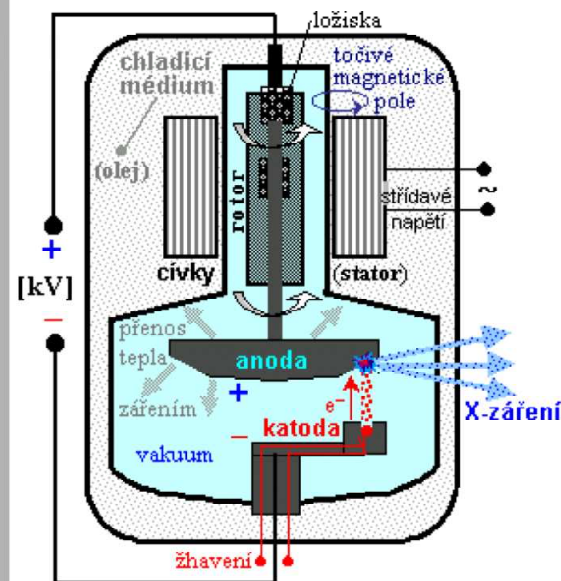


## VAKUOVÉ RENTGENKY SE ŽHAVENOU KATODOU

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

a

## ROTUJÍCÍ ANODOU:



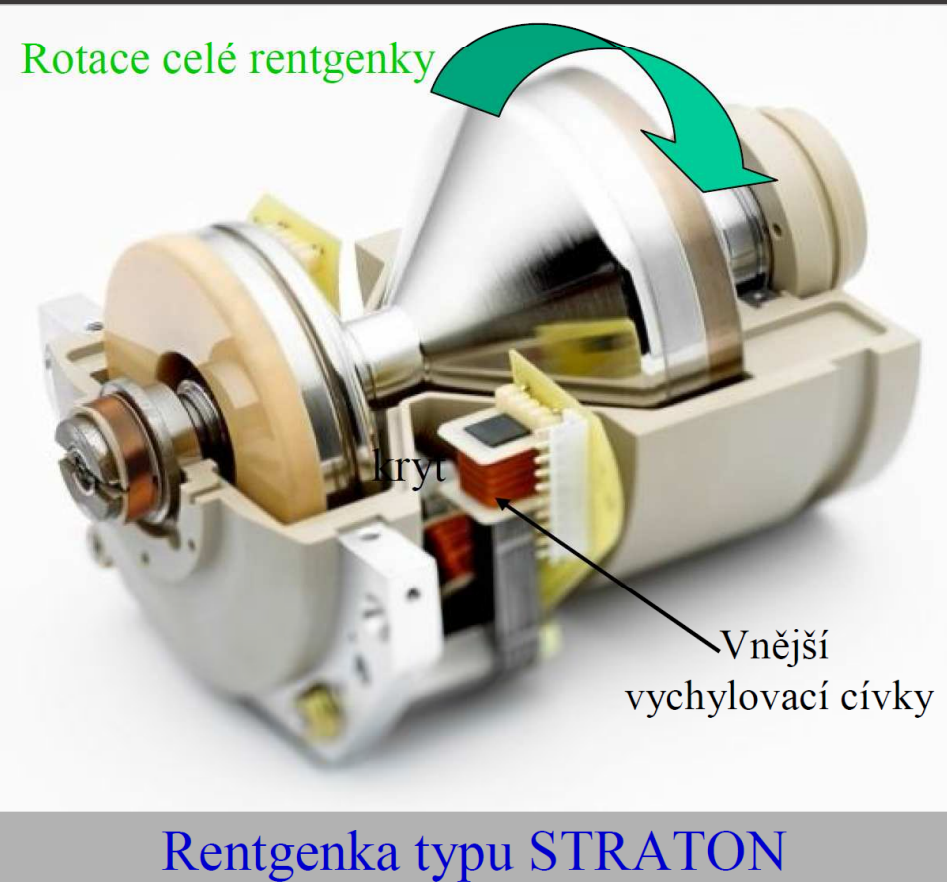
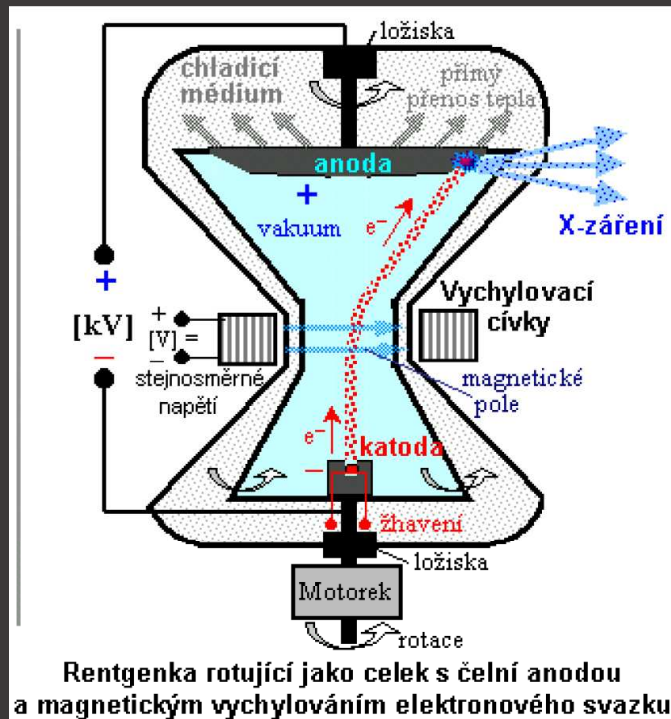
Rentgenka s excetrickou katodou a s anodou rotující uvnitř vakuové trubice

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 chladícím médiem  
a s magnetickým vychylováním elektronového toku



# REGULACE PRODUKCE RTG NA RENTGENE

- Rentgenka má tři základní zdroje napájení:
  1. Žhavicí (katodové) napětí
  2. anodové napětí
  3. Zdroj pro rotaci anody

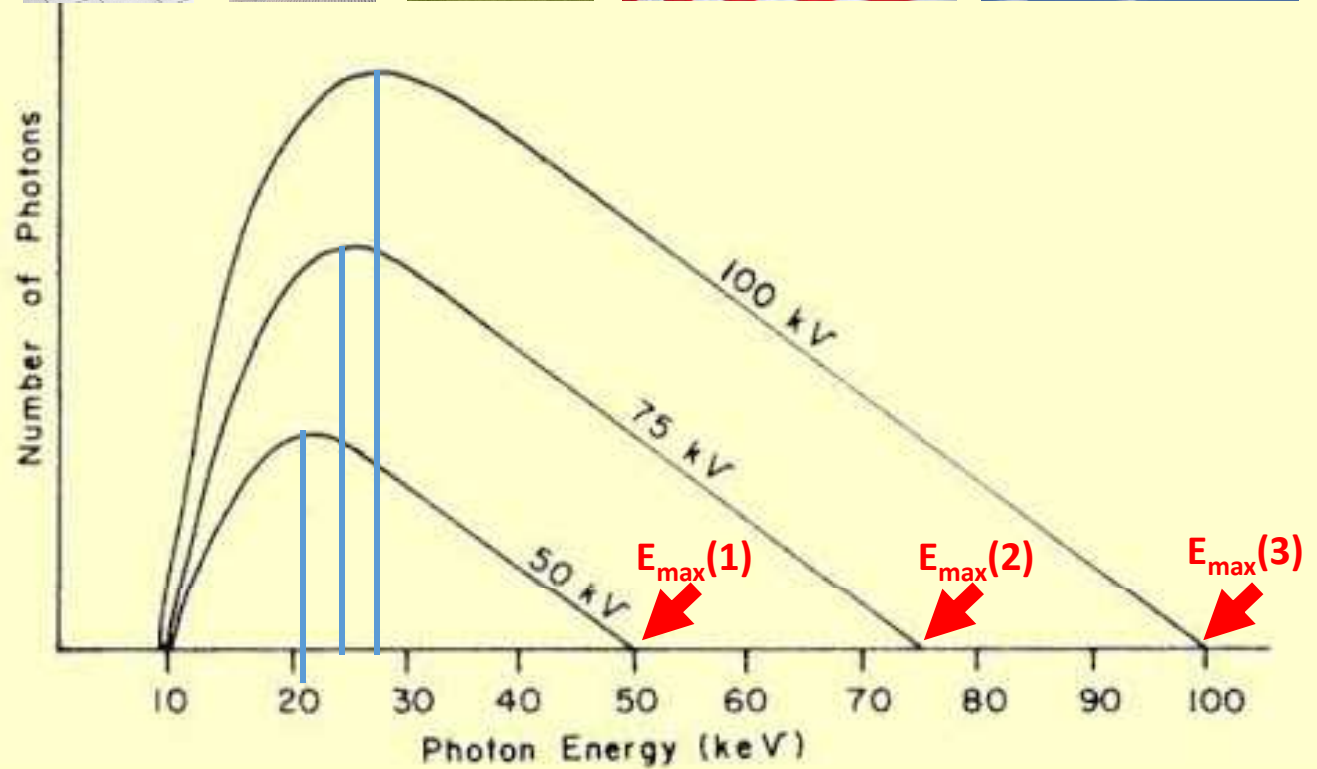
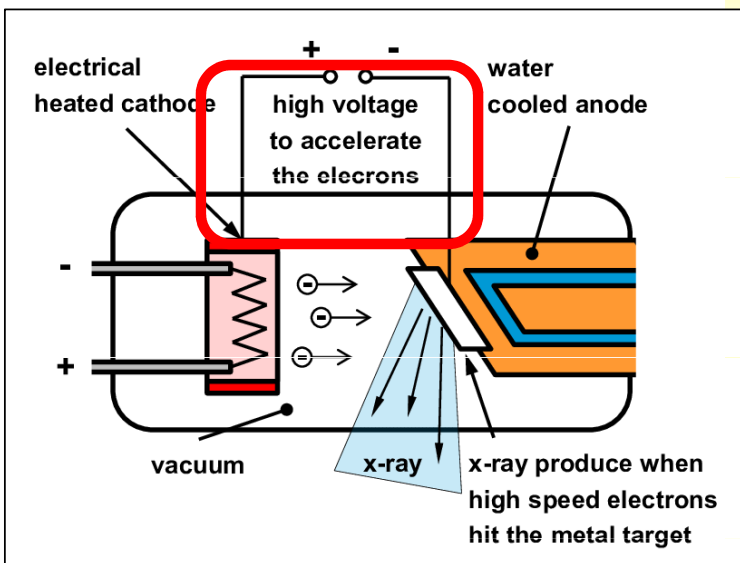
# Elektrické napájení rentgenky a regulace produkce RTG záření

## 1. Anodové napětí

- Určuje urychlení (energii) emitovaných e- při dopadu na anodu,
- Tudíž i maximální a střední energii fotonů výsledného RTG záření (jeho „tvrdost“)
- Zvyšuje produkci (kvantitu) fotonů X (díky „vyšší“ interakci e- s anodou, nikoliv díky vyšší produkci e- na katodě)
- Při dostatečném napětí se objevuje specifické záření X (charakteristické píky)
- Rostoucí napětí → nižší kontrast snímků
- 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.

# Anodové napětí

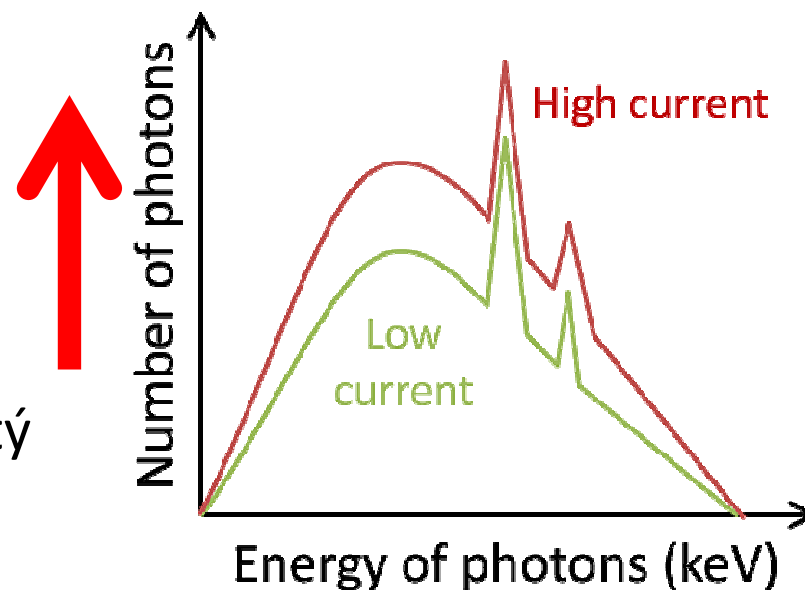
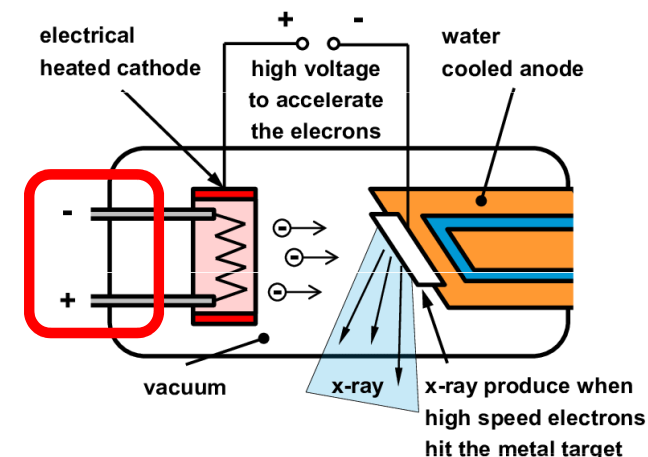
Určuje urychlení emitovaných e-  
tzn., jejich energii  
a následně tvrdost RTG záření





# Elektrické napájení rentgenky a regulace produkce RTG záření

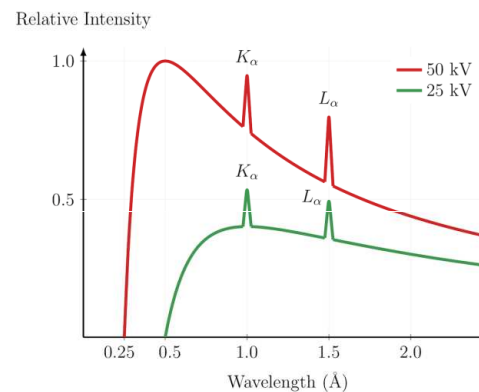
- **2. Katodový proud (žhavení katody)**
- (+ čas expozice) určuje **intenzitu termoemise e- na katodě**
- A následně intenzitu RTG záření emitovaného rentgenkou
- Zvyšuje se expozice (kvalita) snímků
- Průměrný proud rentgenkou se pohybuje v rozmezí jednotek mA – až asi 200 mA, okamžitý proud může být i podstatně vyšší (v pulzním režimu).



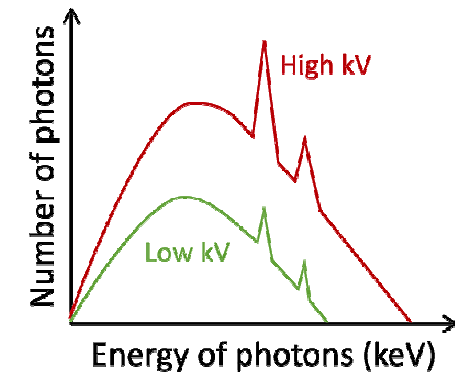
# SPEKTRA RTG záření

- 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)

**Relativní  
frekvence**

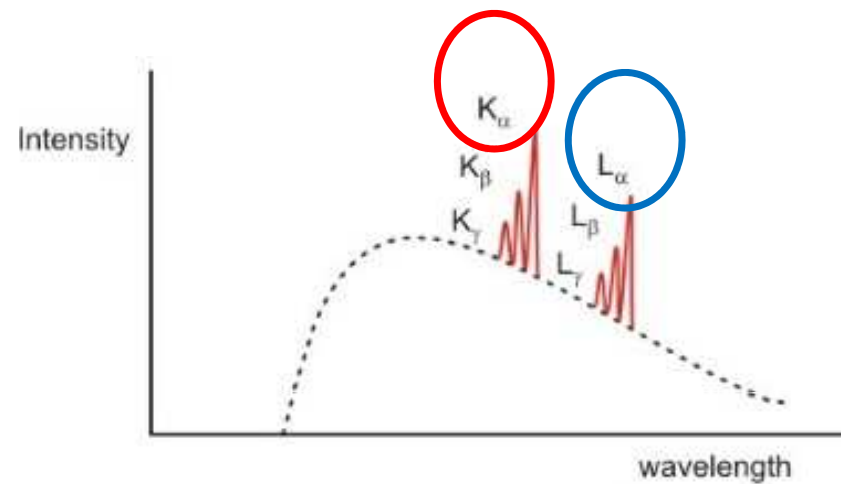
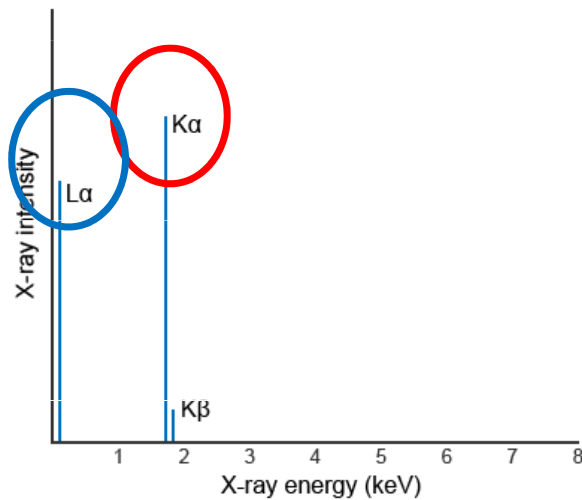


**Vlnová délka**

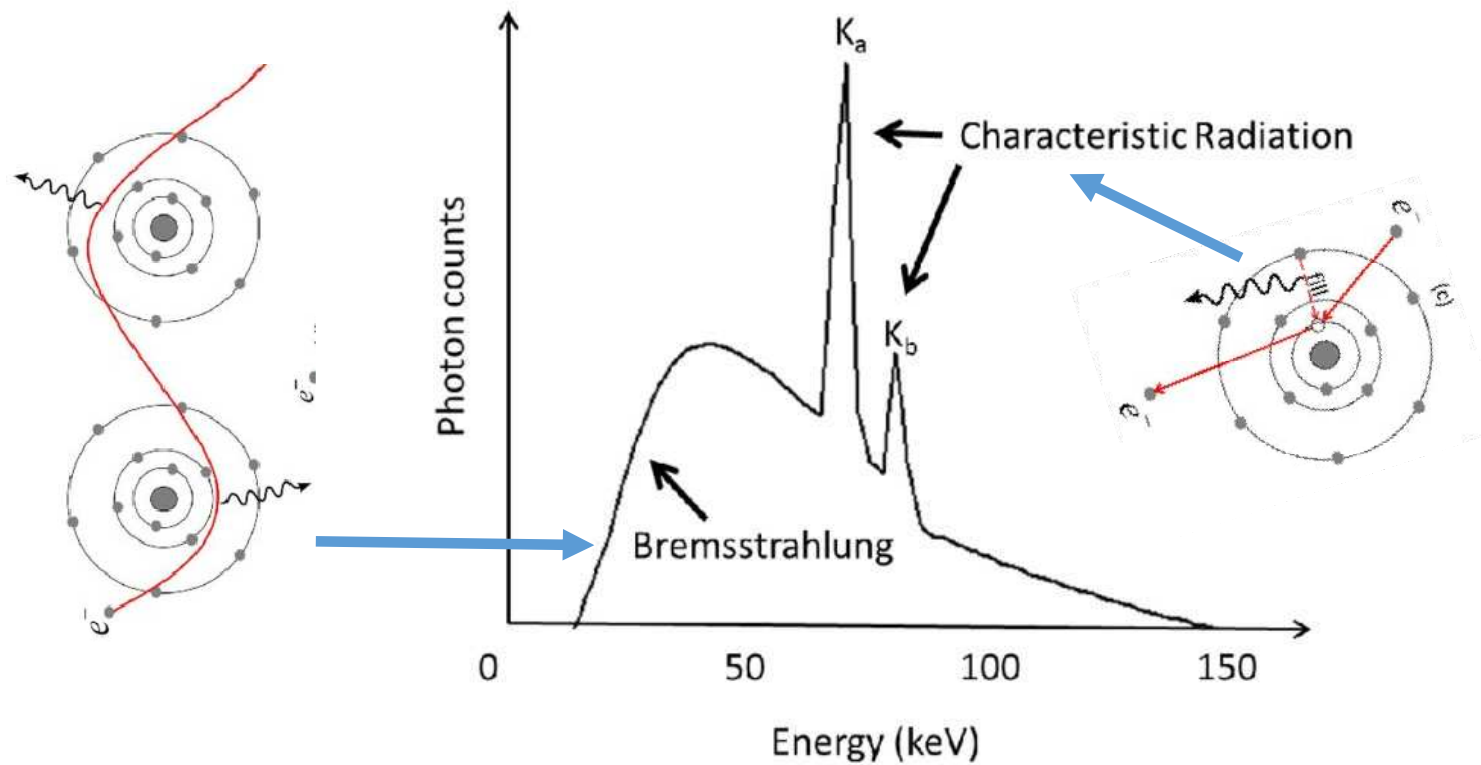


**Energie**

# Ve spektrech pozor na energii versus vlnovou délku



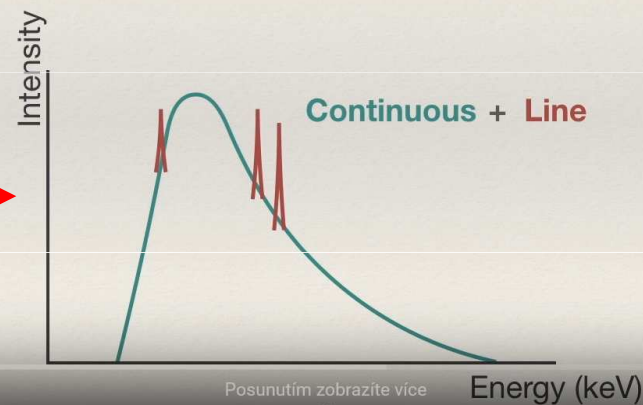
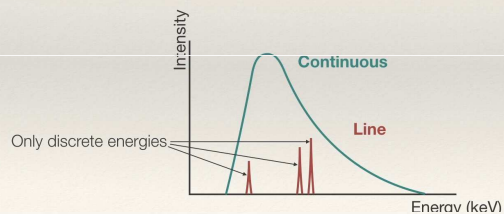
# SPEKTRA RTG záření



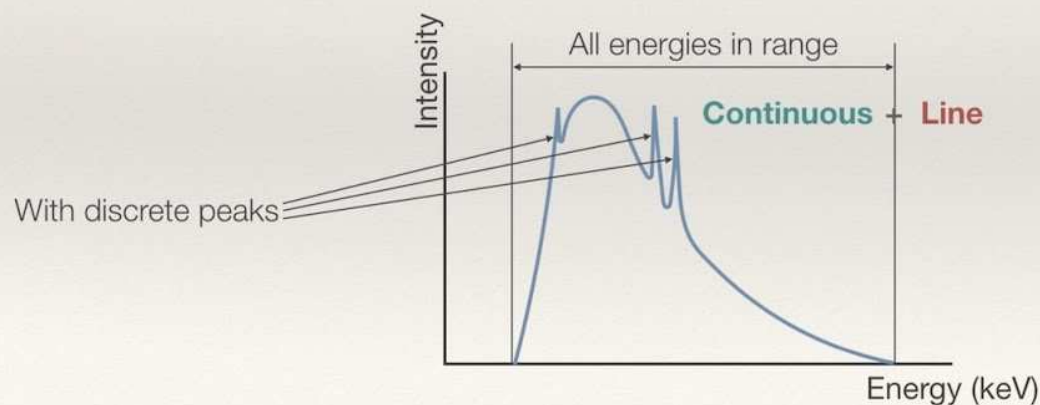
X-ray spectrum of a tungsten anode (without filtering) at tube acceleration voltages of 150 kVp (peak kilo-voltage).

## Line Spectra v. Continuous Spectra

- ❖ A continuous spectrum contains all photon energies (or frequencies / wavelengths) in a range.
- ❖ A line spectrum is discrete; it contains only certain energies in a range.

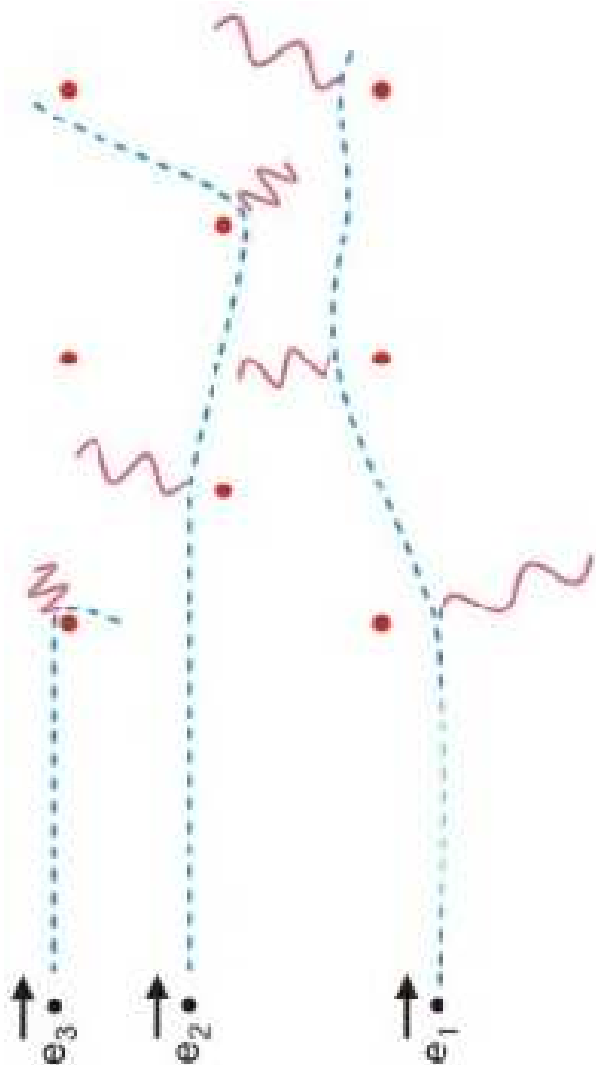


- ❖ An X-ray spectrum is **continuous** with a line spectrum **superimposed** on it.





# BRZDNÉ RTG záření – energetické spektrum



- 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

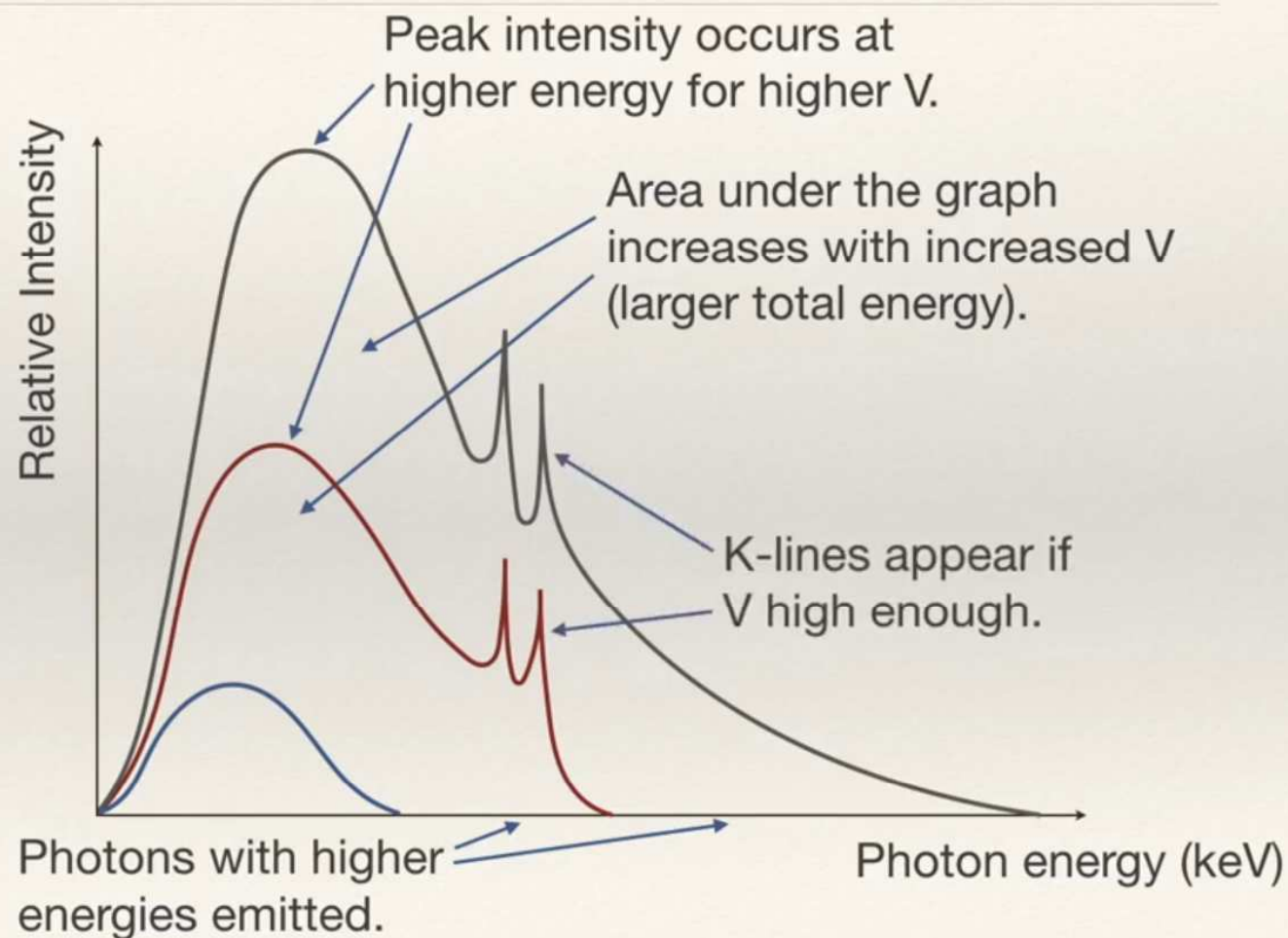
# Brzdné záření – předchozí slide

- **Elektron e3:** Elektron ztratí veškerou svou energii již při první kolizi, jeho celková energie se přemění na kinetickou energii fotonu  $E = hf_{\max}$
- The  $\lambda_{\min}$  corresponds to  $f_{\max}$ .
- **Elektron e1 a e2:** Pro velkou energii elektronů neztratí většina z nich svou energii při první kolizi, ale při různém počtu kolizí  $\rightarrow$  různé vlnové délky fotonů  $\lambda$  delší než  $\lambda_{\min}$  a energie menší než  $E_{\max}$ .
- **Spektrum je proto kontinuální**



# Spectra for Different Tube Voltages

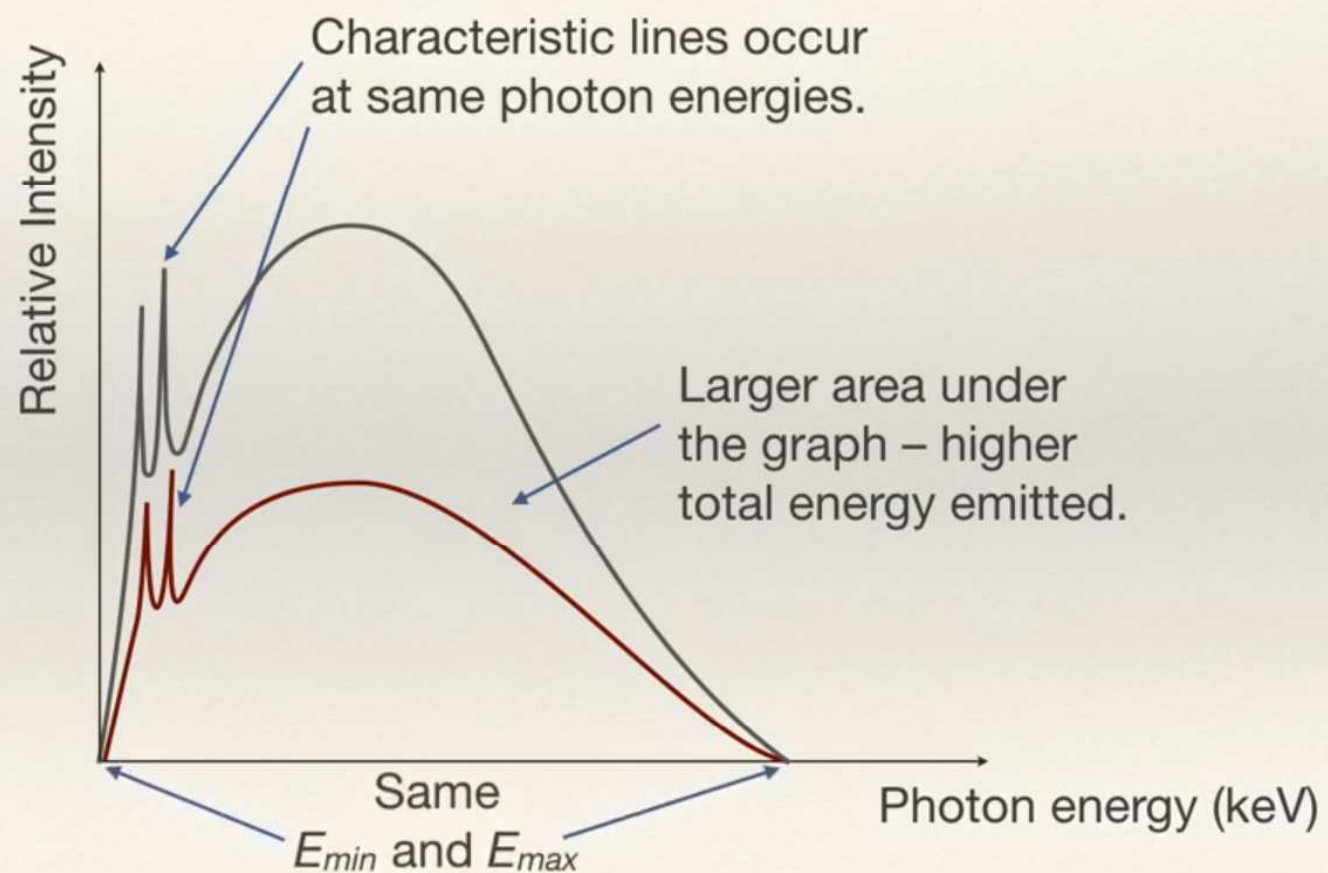
- ❖ Different tube voltages:  
 $V_1 > V_2 > V_3$
- ❖ Increasing voltage increases work done on electrons  
⇒ larger KE
- ❖ New subatomic transitions possible.





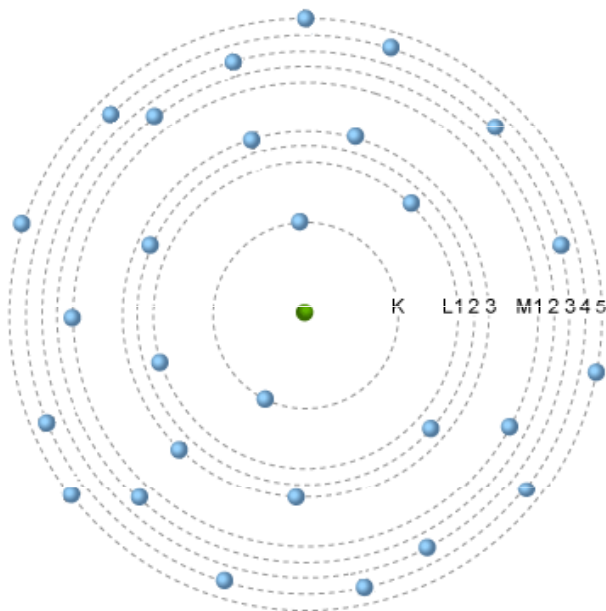
# Spectra for Different Tube Currents

- ❖ Different tube currents:  
 $I_1 > I_2$
- ❖ Larger current  $\Rightarrow$  larger rate of flow of charge  $\Rightarrow$  more electrons arriving per unit time.
- ❖ More x-ray photons produced per unit time.
- ❖ Max. and min. electron KE unaffected.



# CHARAKTERISTICKÉ RTG záření

- Elektrony v elektronovém obalu mají určité energie a pohybují se tak na určitých energetických hladinách neboli **elektronových slupkách**.
- Nejblíže 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 e-

**Slupka L** má 3 podslupky a maximálně 8 e-

**Slupka M** má 5 podslupek a maximálně 18 e-

atd.

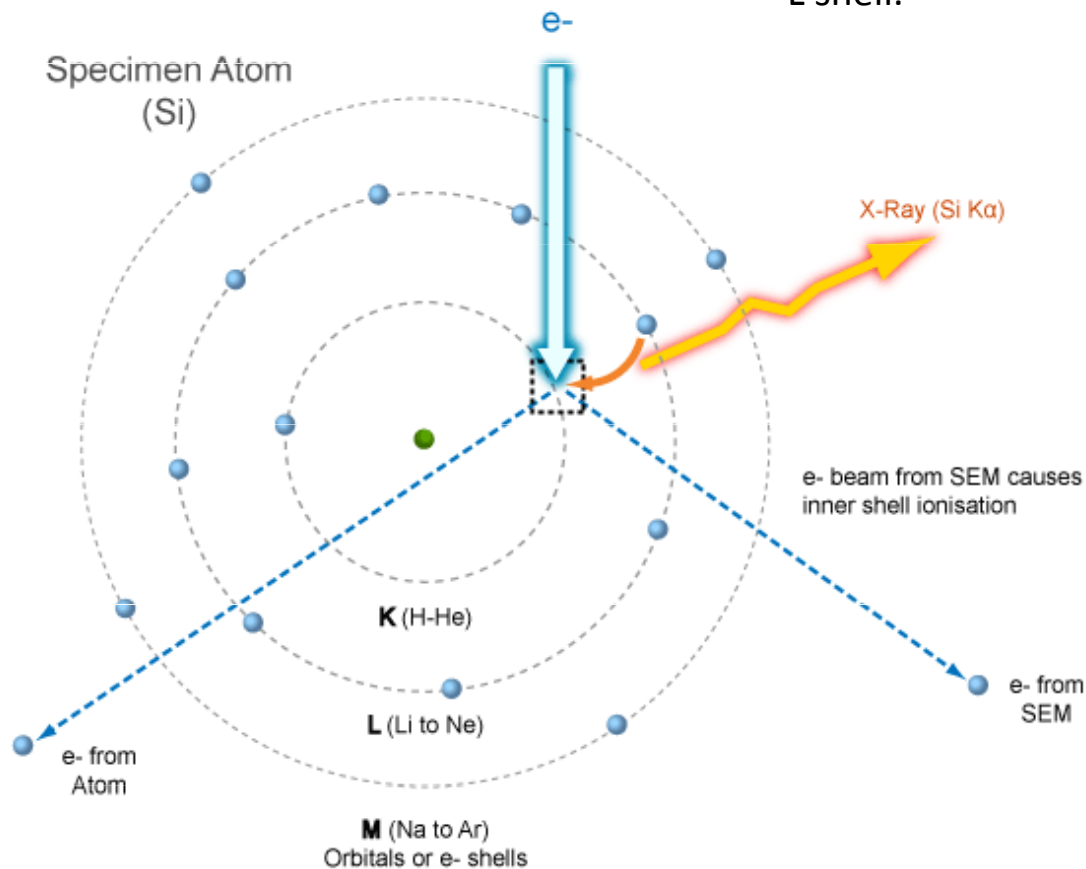


# CHARAKTERISTICKÉ RTG záření

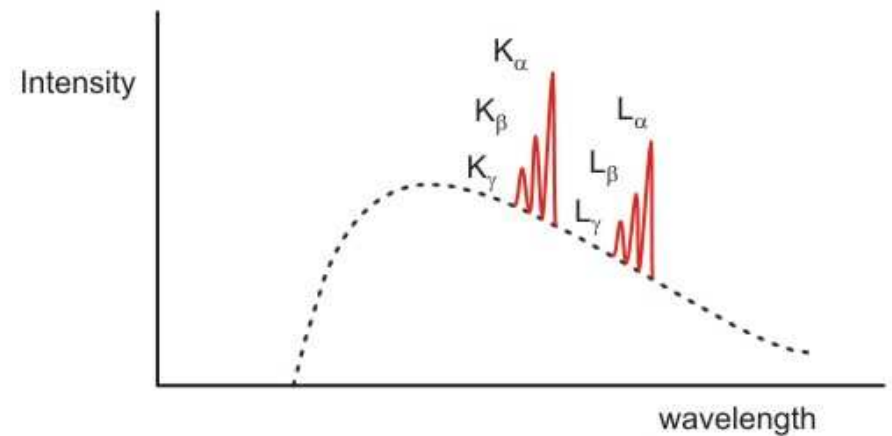
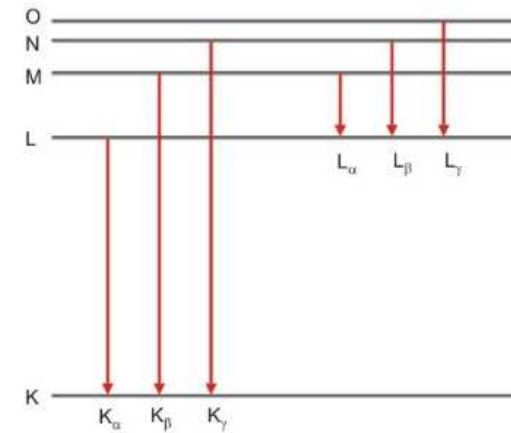
- Slupka **K** má v elektronovém obalu **nejvyšší ionizační energii** (neboli kritickou ionizační energii)
- To znamená, že k odebrání elektronu z této slupky potřebujeme nejvíce energie
- **Čím dále jsou pak další slupky od jádra vzdáleny, tím je ionizační energie nižší.**
- Elektrony na jednotlivých 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.

# PŘÍKLAD

## Characteristic X-Ray Production

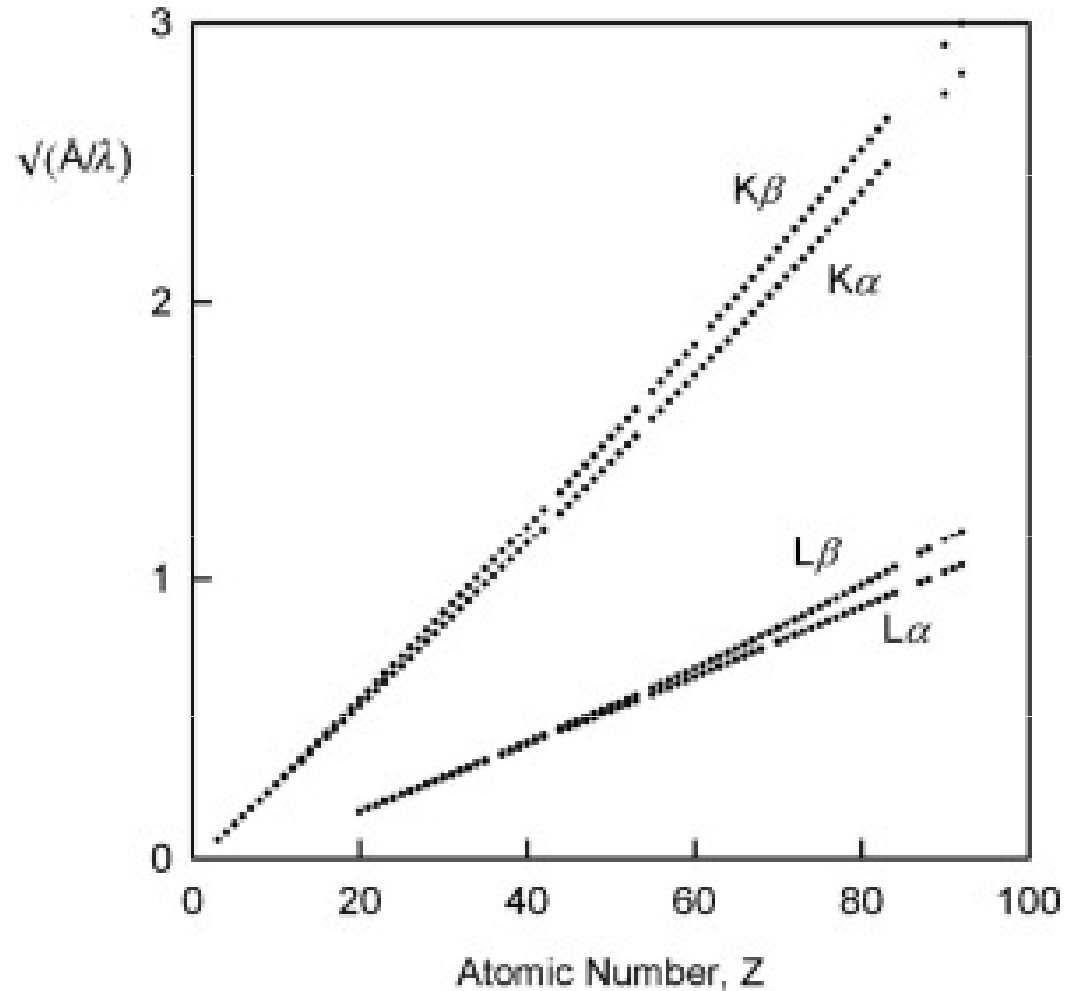


An electron from the primary beam dislodges an electron from the K shell of a Si atom in the sample. An electron from the L shell fills the vacancy and a Si  $K\alpha$  X-ray is generated. The energy of the X-ray is equal to the ionization energy of the K shell minus the ionization energy of the L shell.



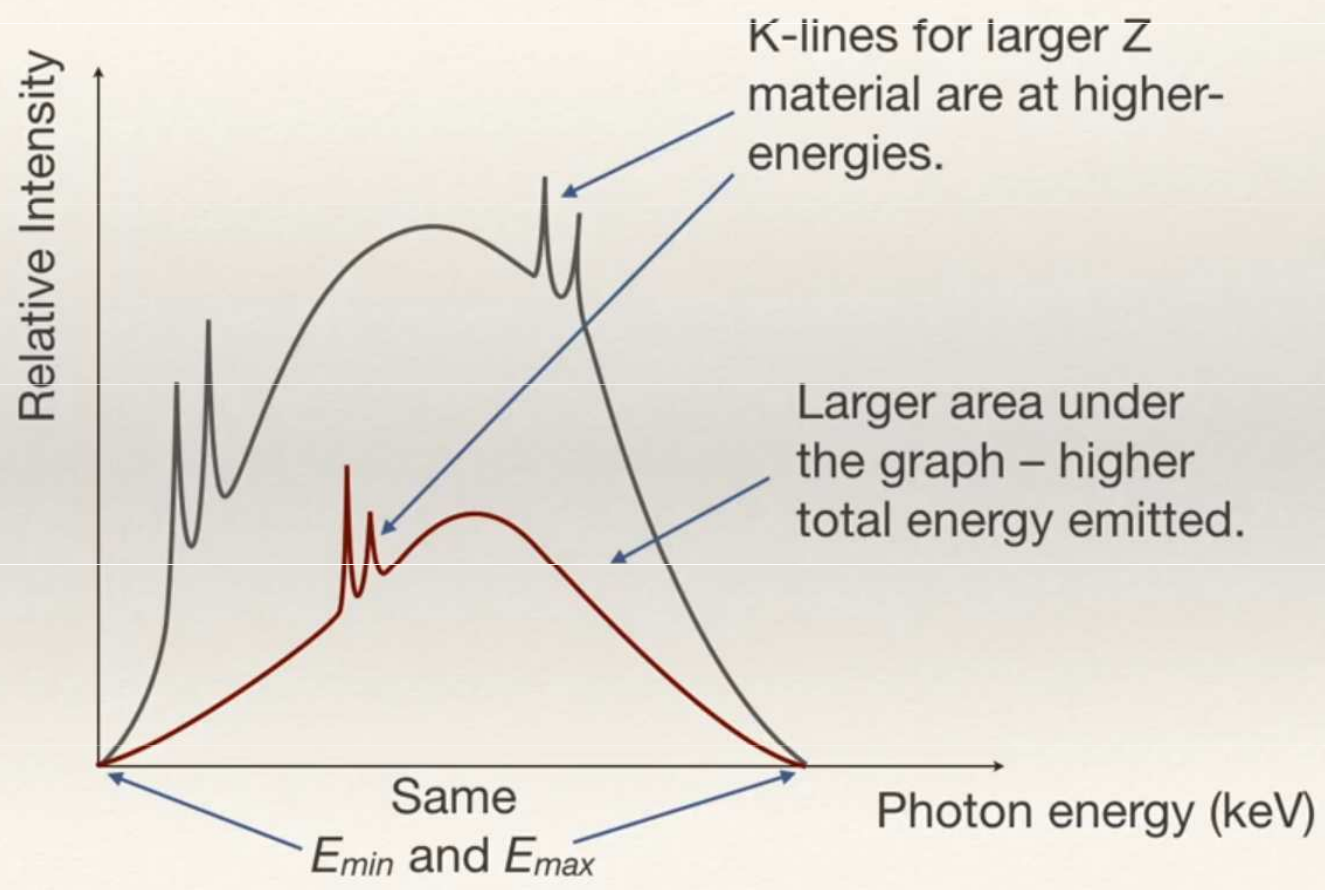
# Moseley's law:

- There is a **relationship between the energy of the characteristic X-ray lines for each element and its atomic number (Z)**:
- **$E \propto Z^2$      $1/\lambda \propto Z^2$**
- 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**

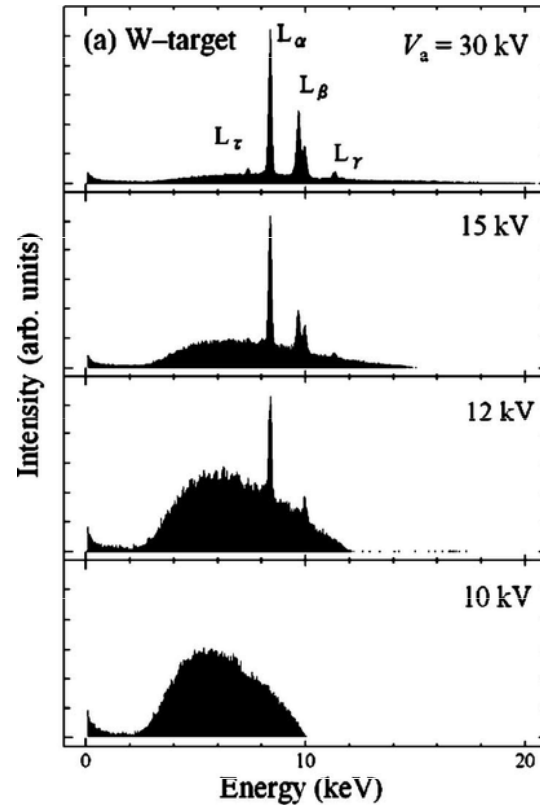


# Spectra for Different Target Metals

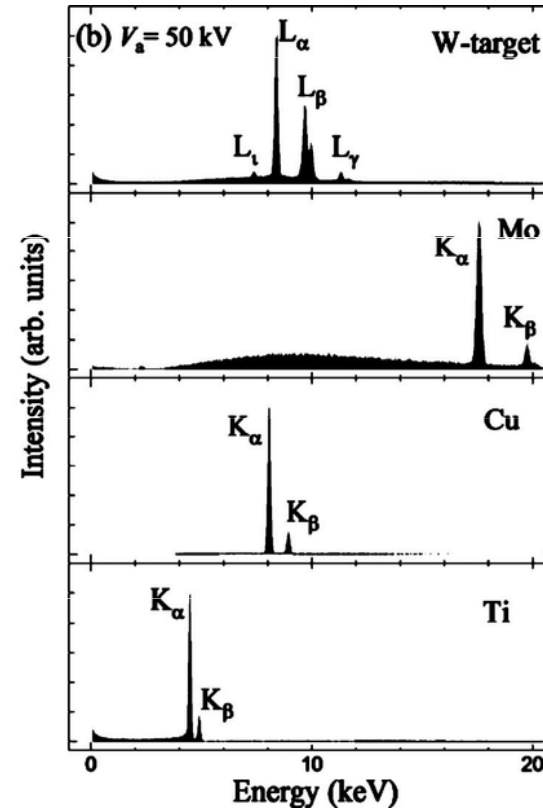
- ❖ Different target material:  
 $Z_1 > Z_2$
- ❖ More photons at each energy for increased Z.
- ❖ K-lines occur at higher energies if Z increased.



### Různá urychlovací napětí



### Různé materiály anody

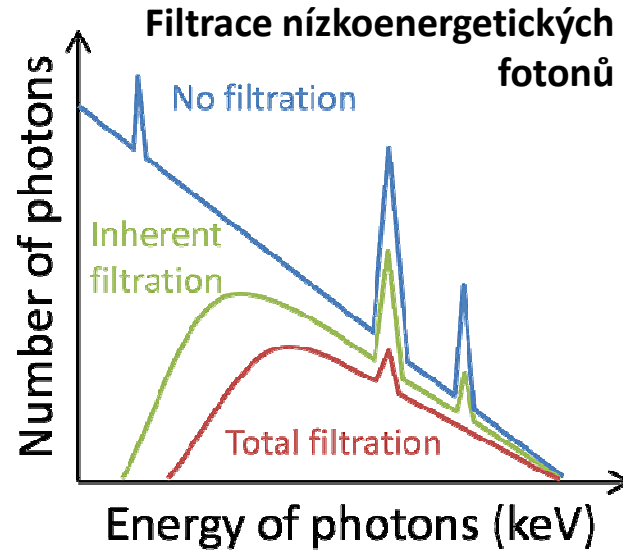
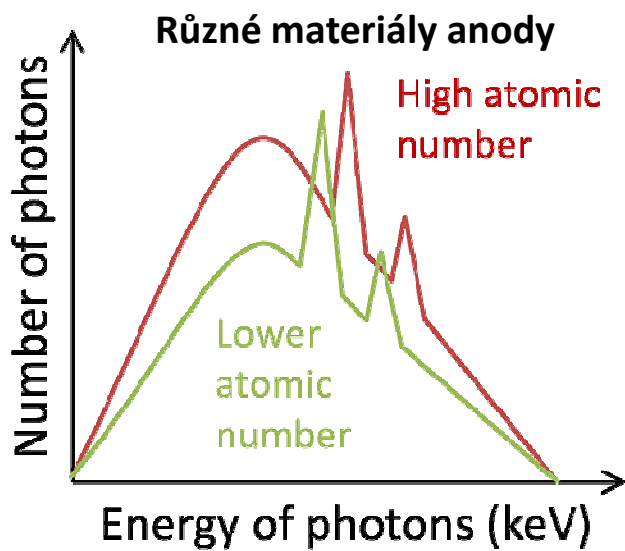
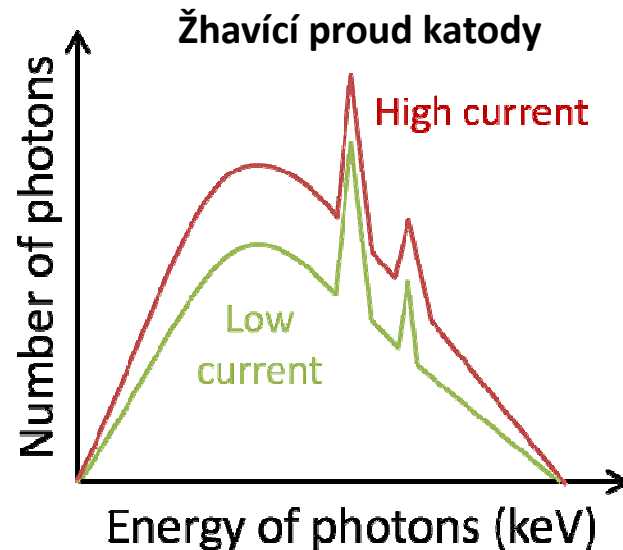
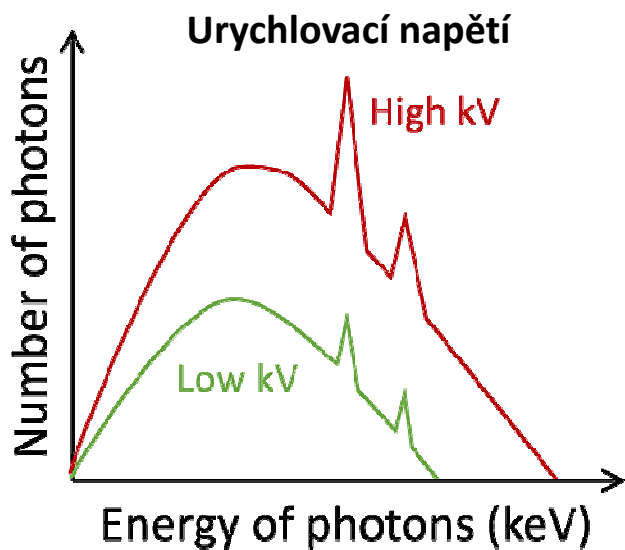


Energy spectra of the x-rays radiated from the metal targets.

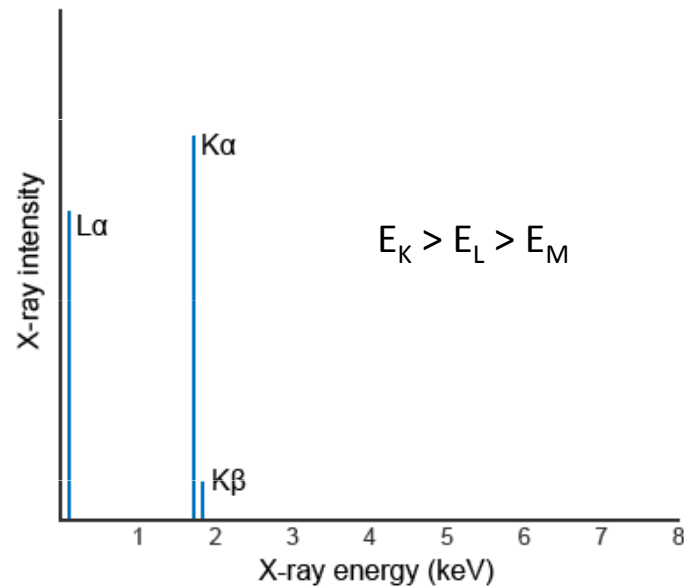
a Acceleration voltage  $V_a$  dependence of the x-ray spectra measured for W-target.

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)





# PŘÍKLAD

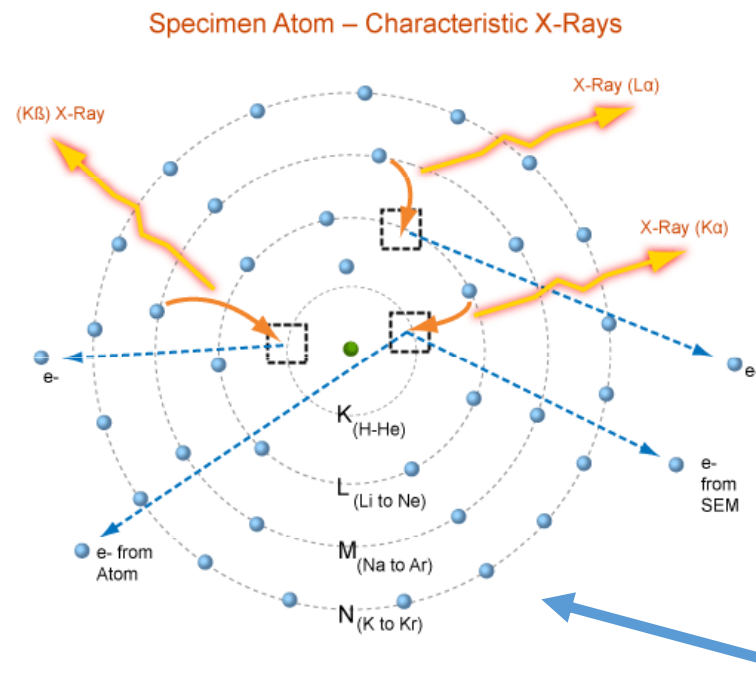


The ideal Characteristic X-ray spectrum for Si. The Characteristic X-ray lines,  $K\alpha$ ,  $K\beta$  and  $L\alpha$ , have discrete energies.

- 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).

# PŘÍKLAD

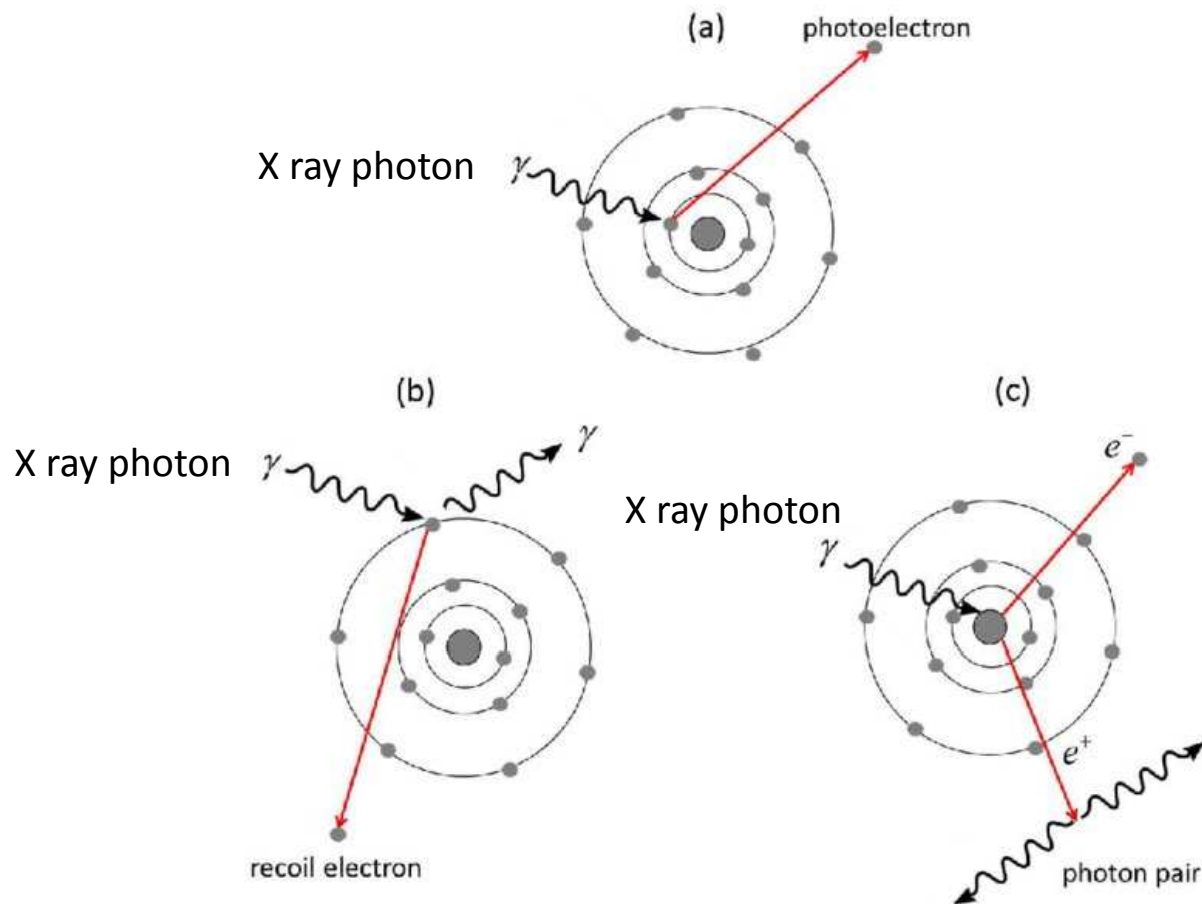
## Naming convention for Characteristic X-ray lines is the Siegbahn notation.



$$E_K > E_L > E_M$$

- 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



Possible X-ray photon interaction processes with the matter:

- (a) photoelectric absorption (fotoefekt);
- (b) Compton scattering;
- (c) pair production.

# 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.



# Vlastnosti RTG záření (paprsky X)

- RTG záření je pronikavé elektromagnetické záření o velmi krátkých vlnových délkách  $10^{-11} \text{ m}$  to  $10^{-8} \text{ m}$  (0.01 – 10 nm) 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.

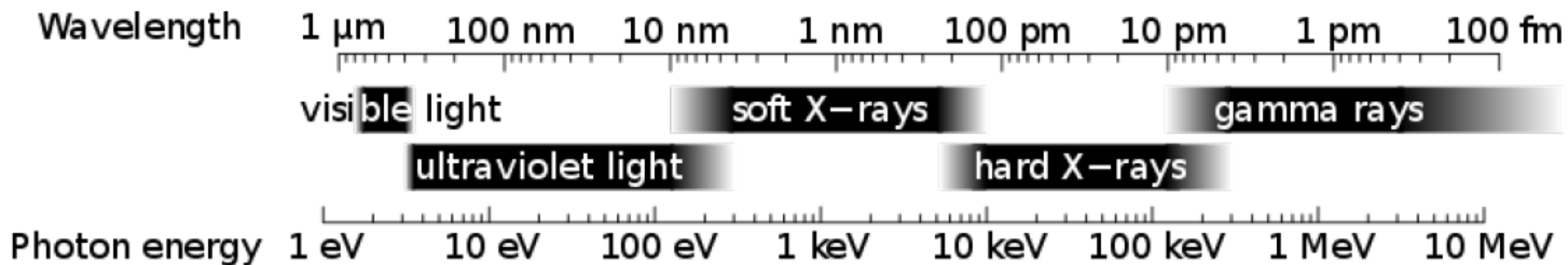
## Just Months After Its Discovery, the X-Ray Was in Use in War



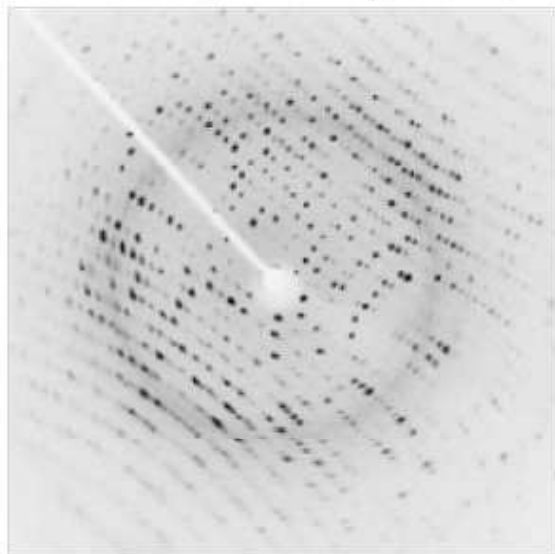
A technician takes **an X-ray fluoroscope** of a female patient. Fluoroscope exams delivered much more radiation exposures than modern X-rays. (National Cancer Institute, public domain)

# Měkké a tvrdé RTG záření

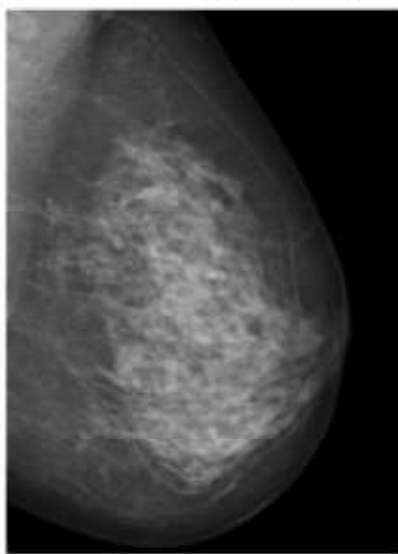
- Roentgenovy trubice mohou být vyčerpány buď více nebo poněkud méně
- v prvním případě **(vysoké vakuum) vzniká tvrdé RTG** záření ( $<0.1$  nm)
- v druhém případě **(nižší vakuum) měkké RTG** záření ( $>0.1$  nm)
- **Měkké RTG trubice**: vydávají paprsky, které jsou hustými tělesy snadno pohlcovány, 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



X-ray crystallography



Mammography



Medical CT



Airport security



# Tvrdé záření RTG vs. záření gama

- Vlnové délky nejenergičtější části RTG záření se částečně překrývají s vlnovými délkami [záření gama](#). RTG a gama záření není rozlišováno podle energie (častá chyba vyučovaná na středních školách)
- **Rozlišujeme je však podle původu:**
- RTG: vzniká v elektronovém obalu atomu (excitace/ionizace → deexcitace s emisí RTG fotonu),
- záření gama: vzniká následkem deexcitace atomového jádra

**X**

