

Radiační biofyzika ~ radiobiologie

Přednáška 2

2023

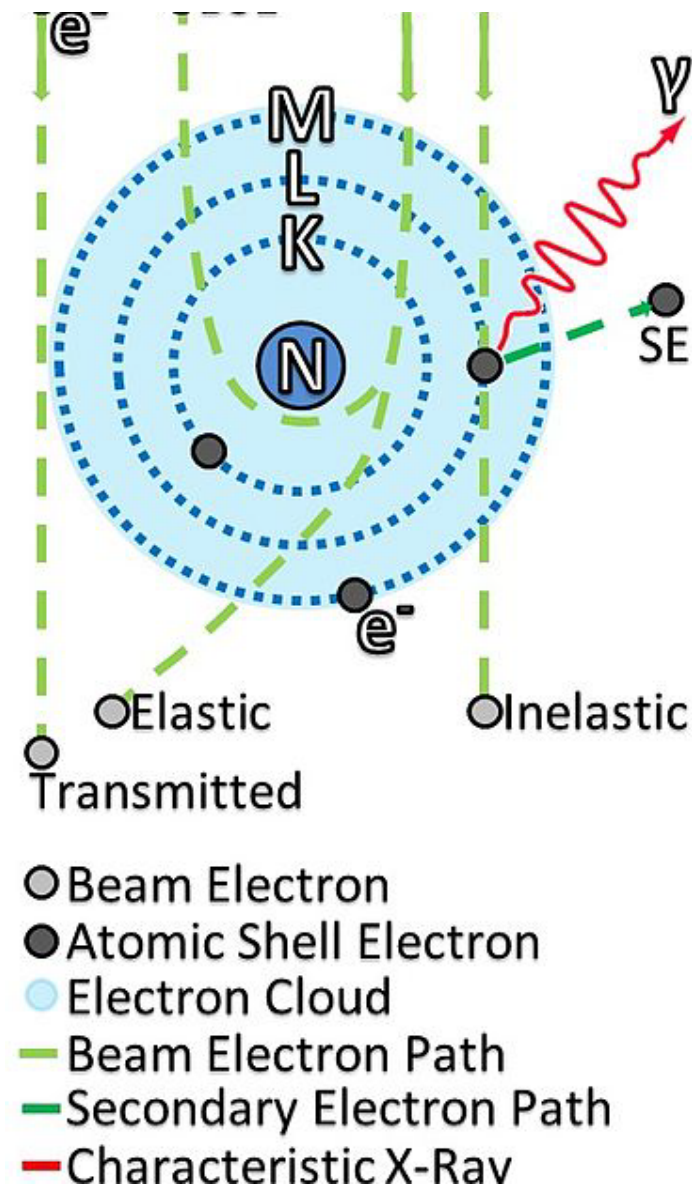


Vícenásobné Nobelovy ceny

- John Bardeen
 - Nobelova cena za fyziku (1956 a 1972).
- Marie Curie-Sklodovská
 - Nobelova cena za fyziku (1903),
 - Nobelova cena za chemii (1911).
- Frederick Sanger
 - Nobelova cena za chemii (1958 a 1980).

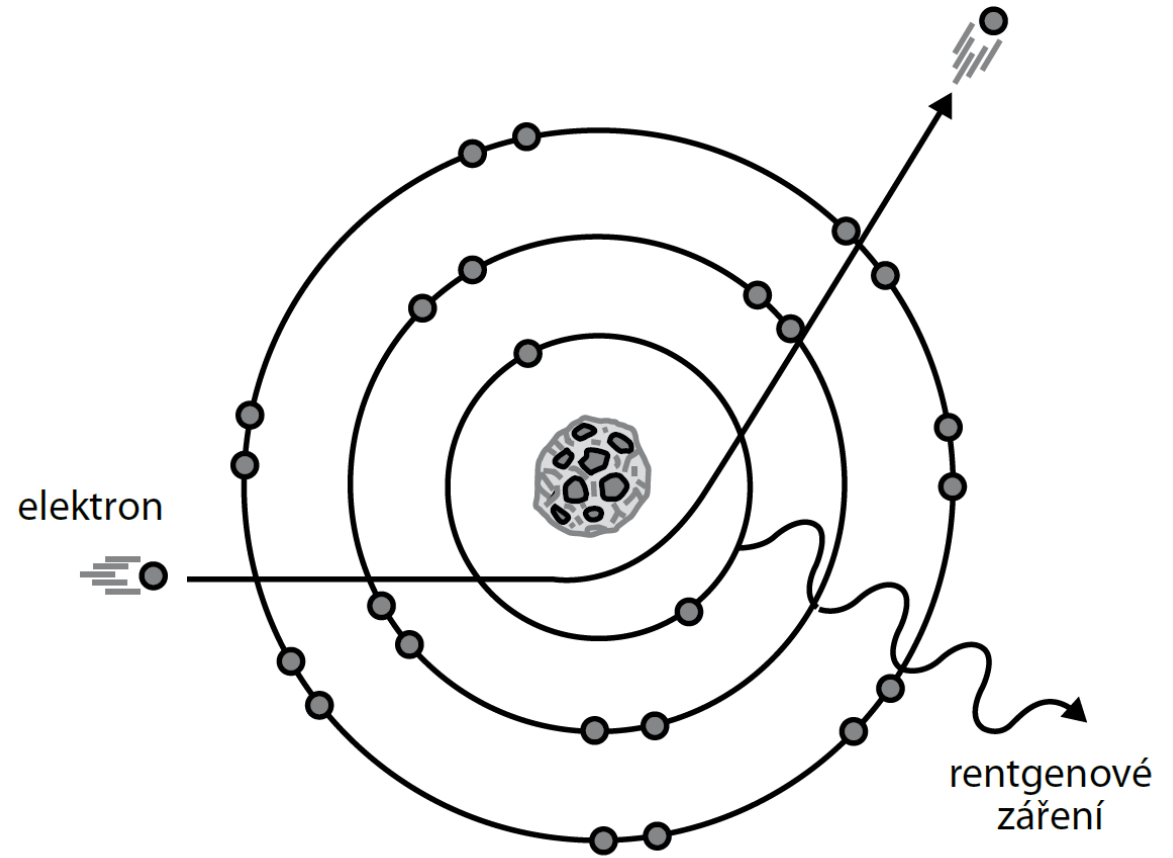
Vznik RTG záření

- 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 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



Interakce urychlených e- s polem jádra atomu

→ brzdné záření

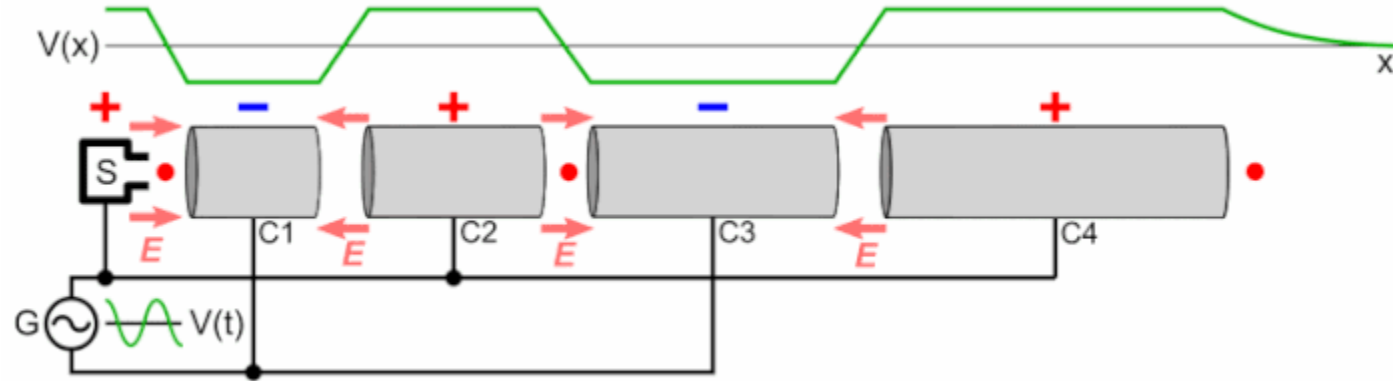


Brzdné RTG záření

- 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 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**



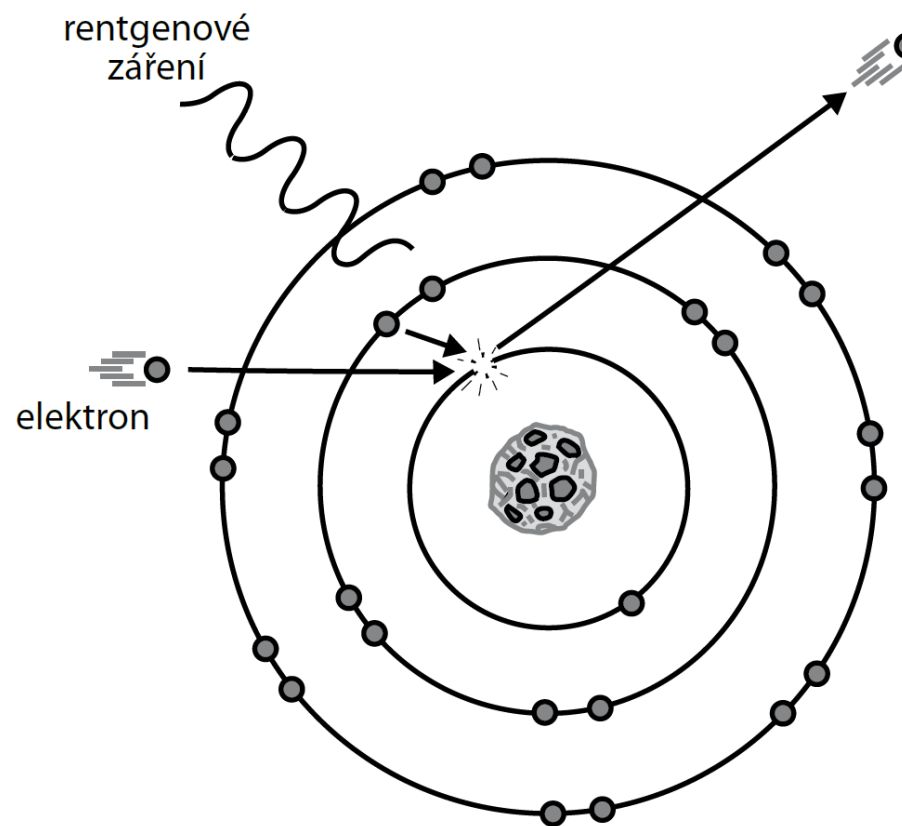
Brzdné RTG záření



- 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

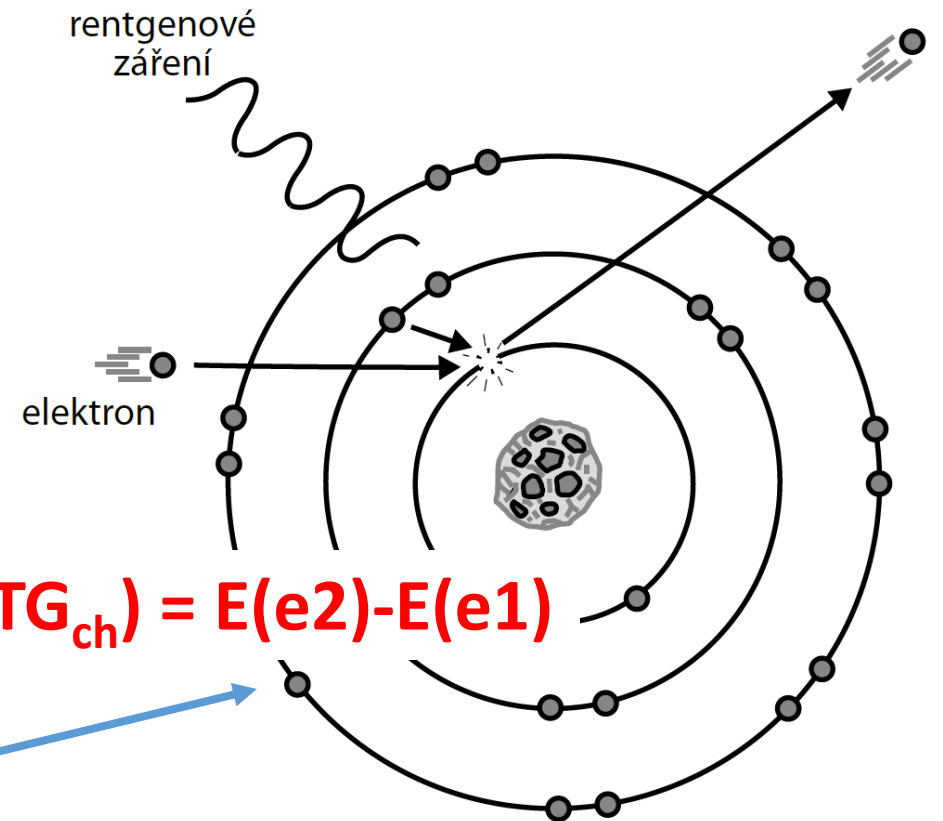
Charakteristické RTG záření vzniká při srážce letícího e⁻ (z katody rentgenky) a e⁻ z elektronového obalu atomu na anodě.

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 záleží na materiálu, ze kterého je anoda vyrobená (e⁻ mají specifickou E dle konfigurace e⁻ obalu)

čím je protonové číslo (Z) kovu anody vyšší, tím vyšší je energie charakteristického záření.



$$E(\text{RTG}_{\text{ch}}) = E(e_2) - E(e_1)$$

$$\uparrow Z(\text{anoda}) \rightarrow \uparrow E(\text{RTG}_{\text{ch}})$$

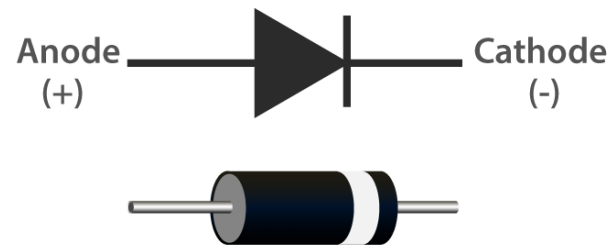
Charakteristické rentgenové záření



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**.



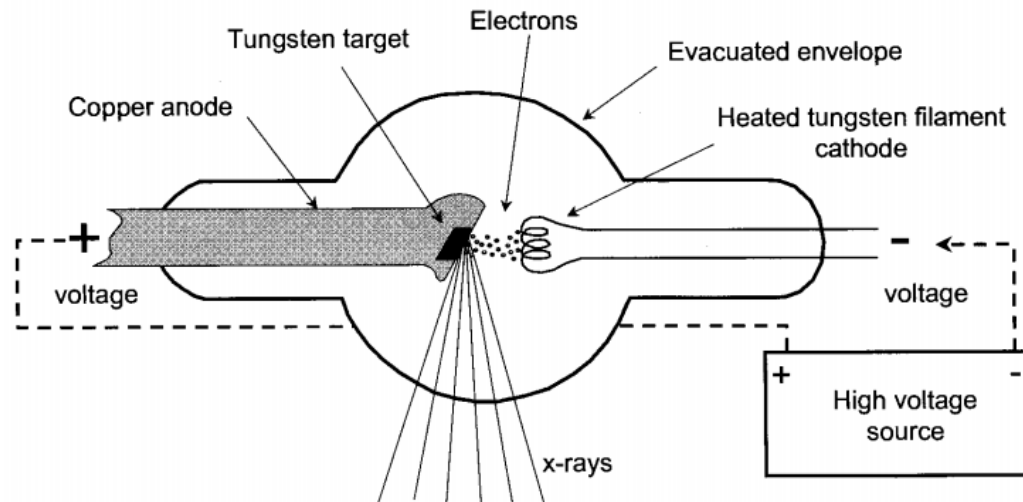
Rentgenka
– zdroj RTG záření

Vznik RTG záření, RENTGENKA

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

Obecně - vakuová elektronika

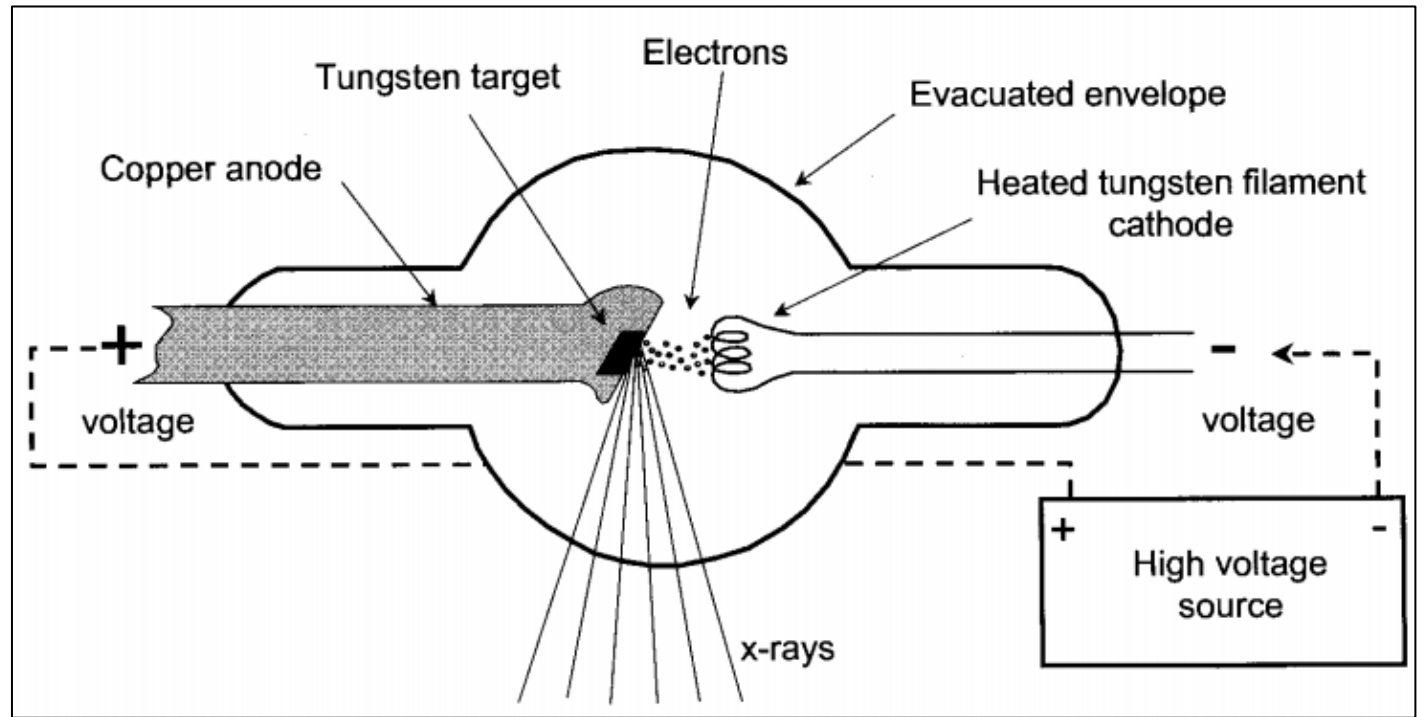
Zjednodušeně je to trubice s vakuem uvnitř, jejíž součástí je (žhavená) katoda, která slouží jako zdroj elektronů. Tyto elektrony jsou urychlovány, dopadají na terčik neboli anodu, čímž vzniká rentgenové záření. Rentgenka tedy **slouží k produkci rentgenového záření**.



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)

Rentgenka

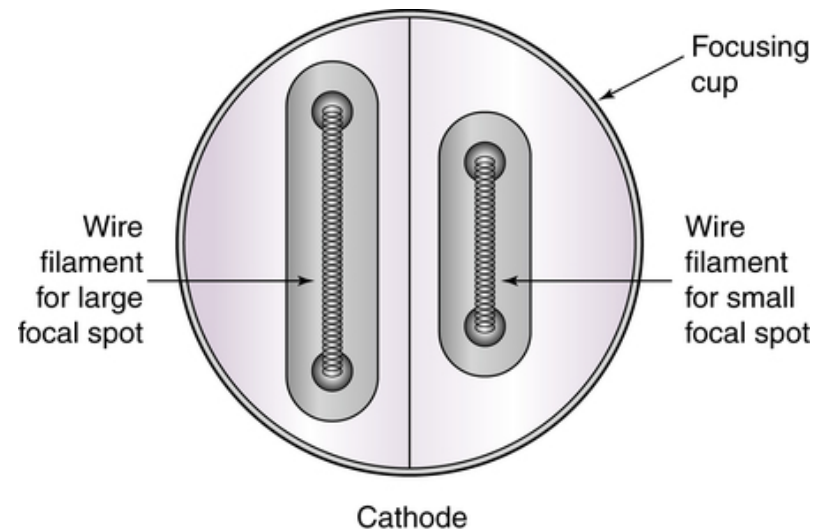
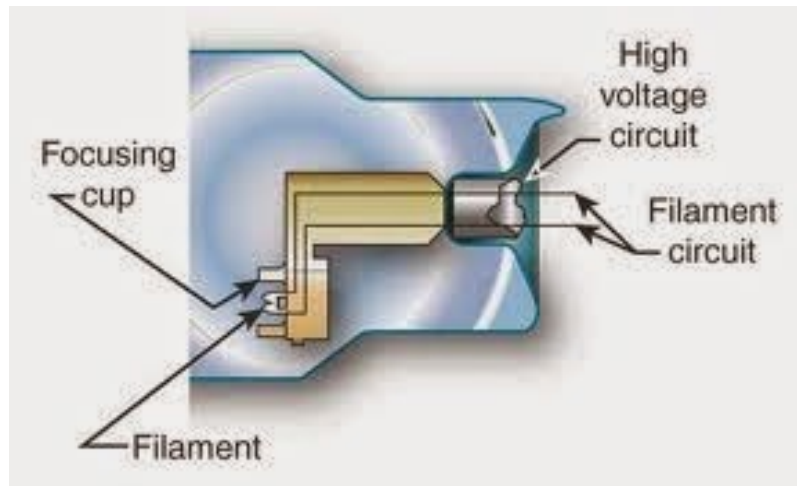
- Z elektronického hlediska je rentgenka klasická **dioda** zapojená v obvodu s vysokým napětím cca 20–200 kV
- Žhavená **katoda** (napojená na záporný pól) emituje elektrony, které jsou urychlovány silným elektrickým polem daným vysokým napětím mezi katodou a anodou.



- Po dopadu na **anodu** tedy pronikají elektrony několika vrstvami atomů anody a prudce se brzdí, 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.

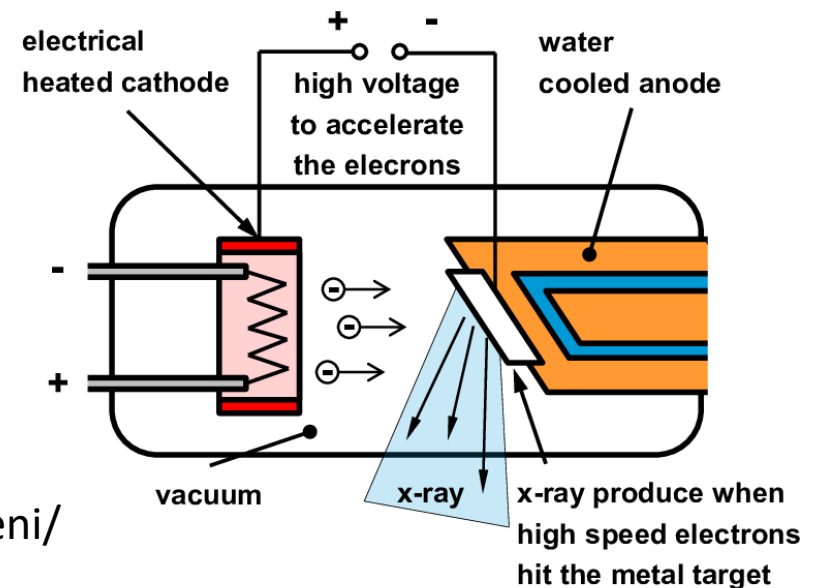
Konstrukce rentgenky

- **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 (2.000 °C) k termoemisi elektronů (Edisonův efekt)**.



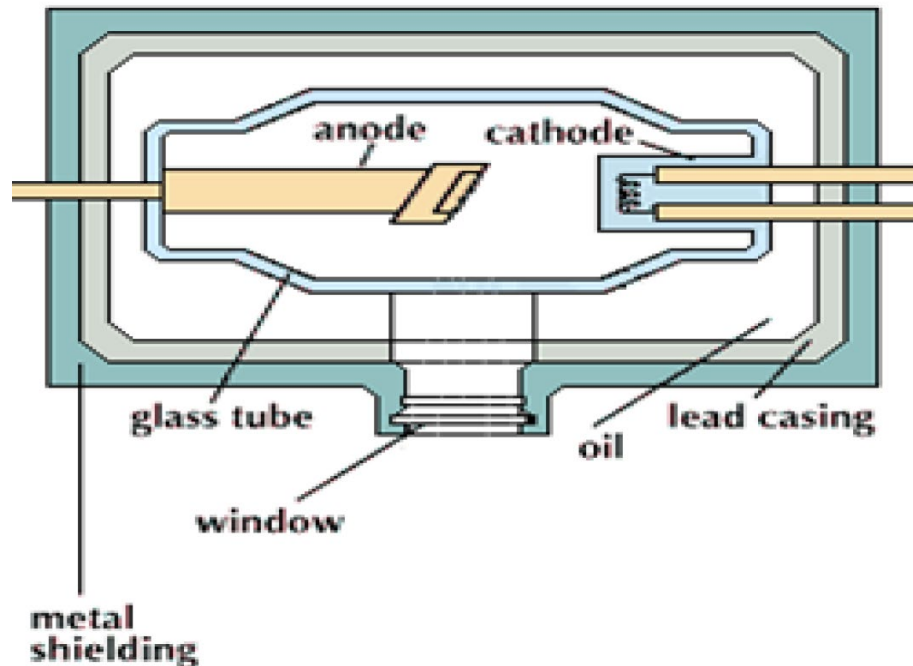
Konstrukce rentgenky

- **Anoda** (napojená na kladný pól) je zhotovena z **těžkého materiálu (nejčastěji z wolframu)**, který má **vysoký bod tání** i **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 (díky **vyššímu atomovému číslu** se zvyšuje produkce fotonů rentgenového záření)
- Aby se zabránilo tepelnému zničení anodového terčíku, je potřeba vhodně zvolit materiál anody a taktéž dostatečně odvádět nepotřebné teplo. 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



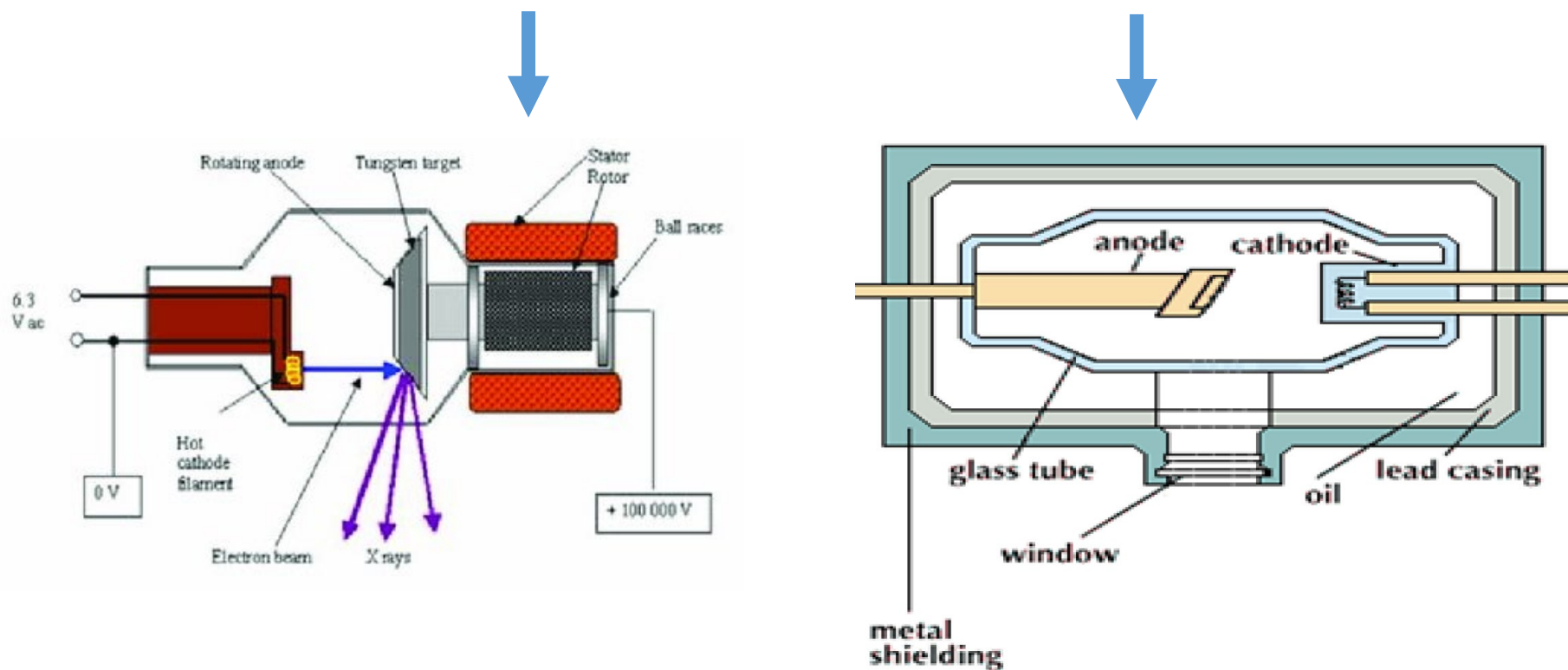
Konstrukce rentgenky

- **Evakuovaná baňka** rentgenky, ve které je umístěna katoda i anoda, je obvykle vyrobena ze skla a její hlavní funkcí je udržování vakua v trubici.
- **Chlazení + stínění:** 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



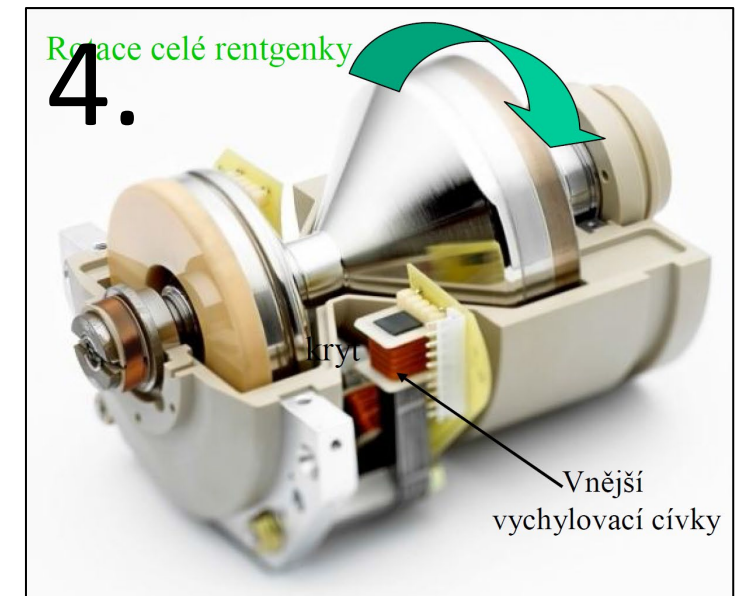
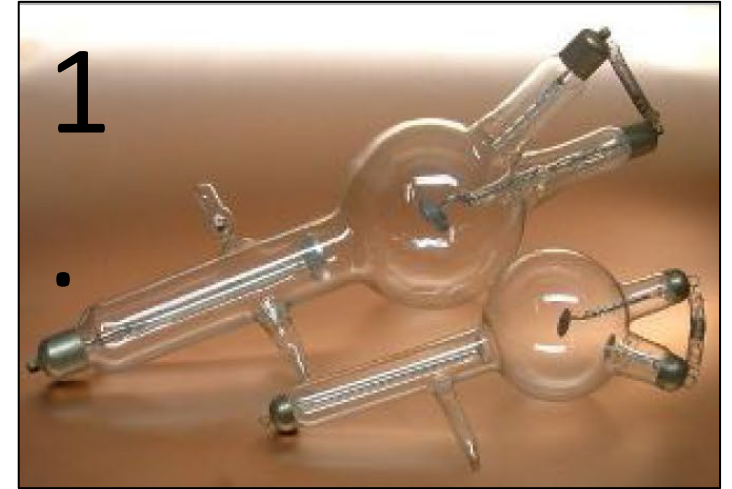
99 % E urychlených e- = Q → nutné účinné chlazení

- Rotor, případně rotuje celá rentgenka



Generace a některé typy rentgenek

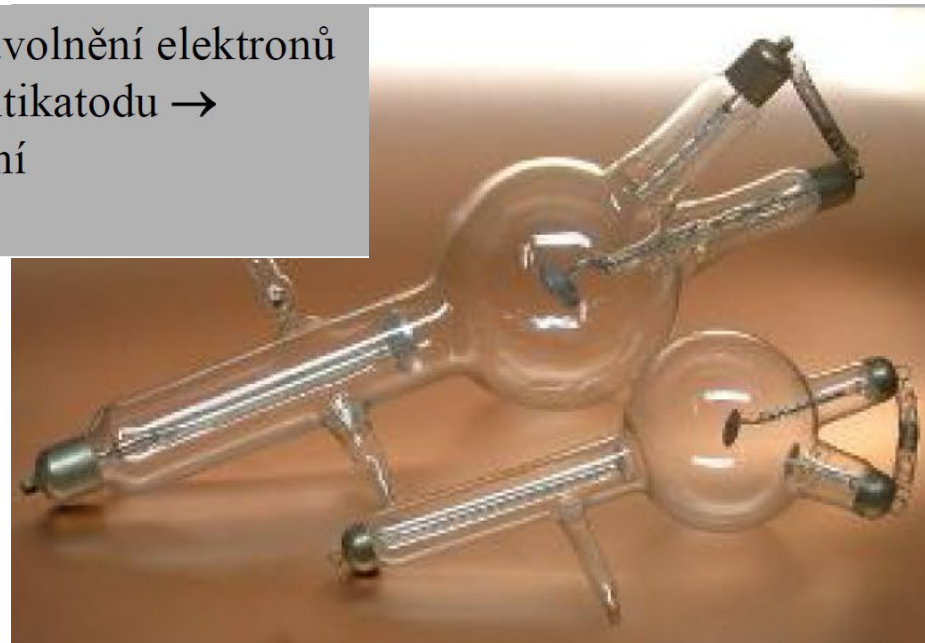
1. Rentgenky se studenou katodou
2. Rentgenky se žhavenou katodou
3. Rentgenky se žhavenou katodou a rotující anodou
4. Rentgenky s žhavenou katodou rotující celé



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



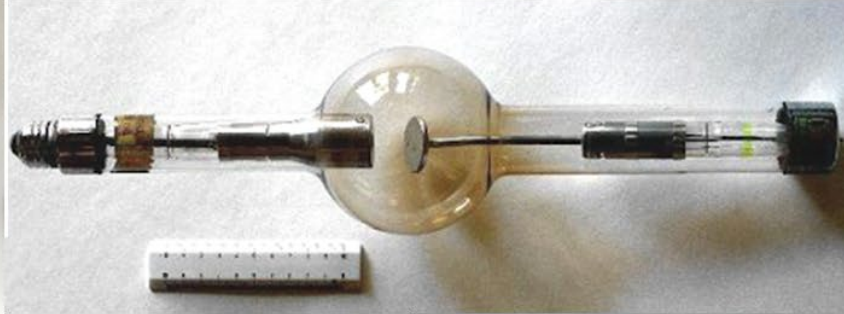
Výboj ve zředěném plynu → ionizace → uvolnění elektronů
→ urychlení k anodě → dopad na antikatodu →
→ vznik brzdného X-záření



VAKUOVÉ RENTGENKY SE ŽHAVENOU KATODOU:

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

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

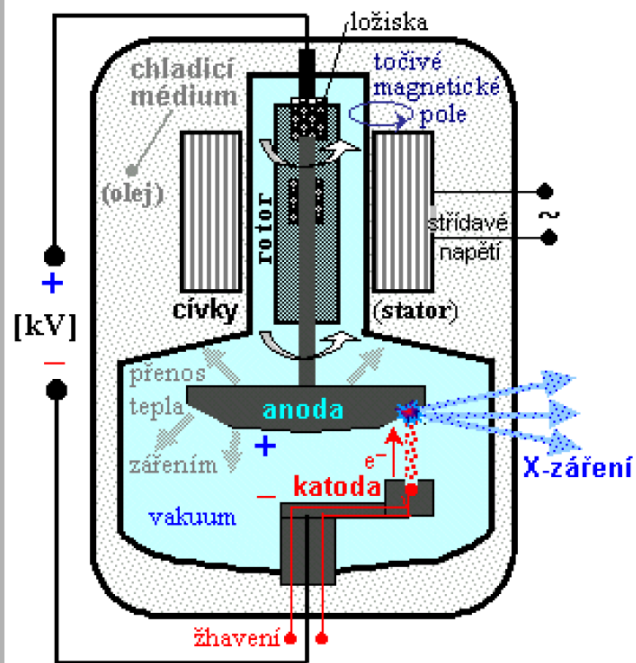


VAKUOVÉ RENTGENKY SE ŽHAVENOU KATODOU

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

a

ROTUJÍCÍ ANODOU:

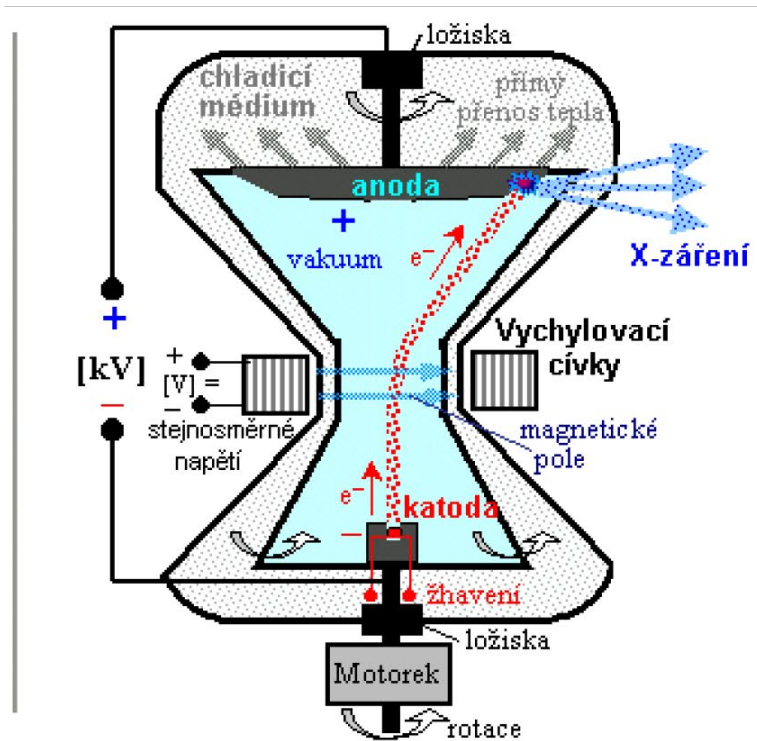


Rentgenka s excetrickou katodou a s anodou rotující uvnitř vakuové trubice

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

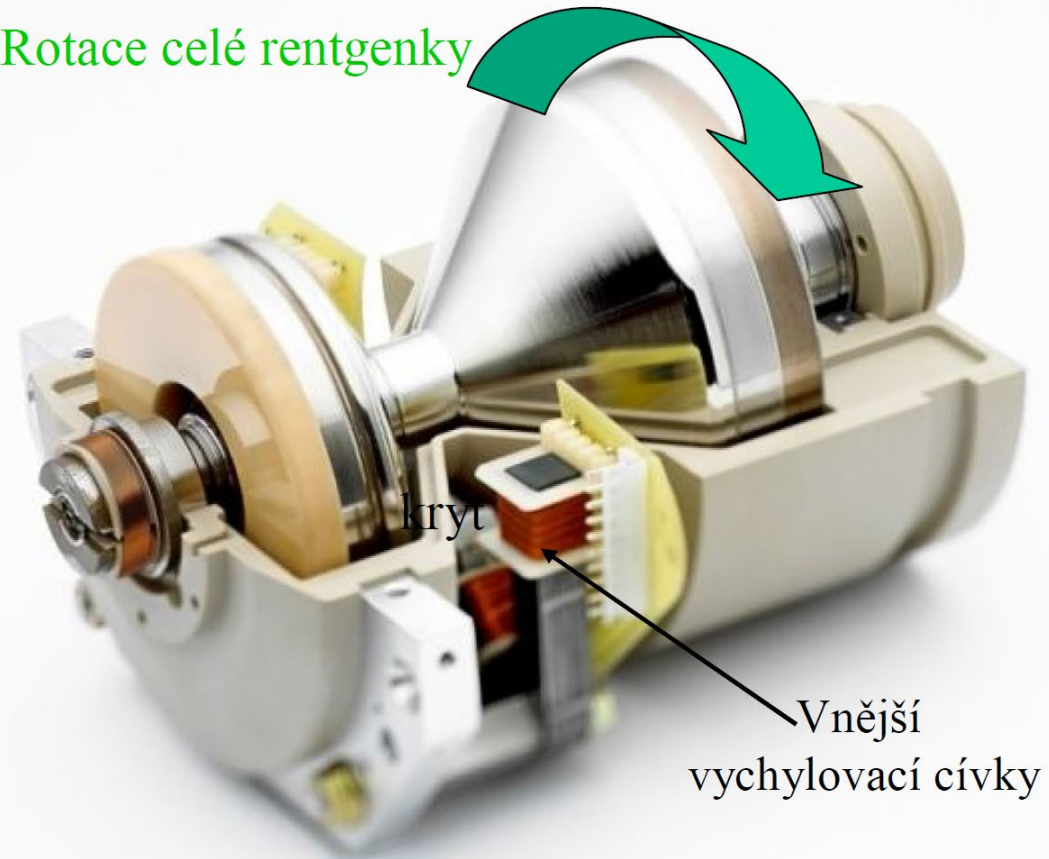
Rentgenka rotující jako celek

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



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

Rotace celé rentgenky



Rentgenka typu STRATON

REGULACE PRODUKCE RTG NA RENTGENE

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

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.

- **Minimální vlnová délka (tj., maximální energie) RTG spektra záleží na voltáži urychlovacího napětí a nezáleží na materiálu anody:**

- Pokud máme **urychlovací napětí V** , potom energie E předaná okolí elektronem na anodě je dána vztahem:

maximal energy at a keV = tube kV

$$E = eV$$

- Pro výpočet minimální vlnové délky, λ_{\min} , pak platí Duane-Huntův zákon a Plankova rovnice pro energii kvanta záření:

- ...a tedy:

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

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

Kde:

e = elementární náboj elektronu

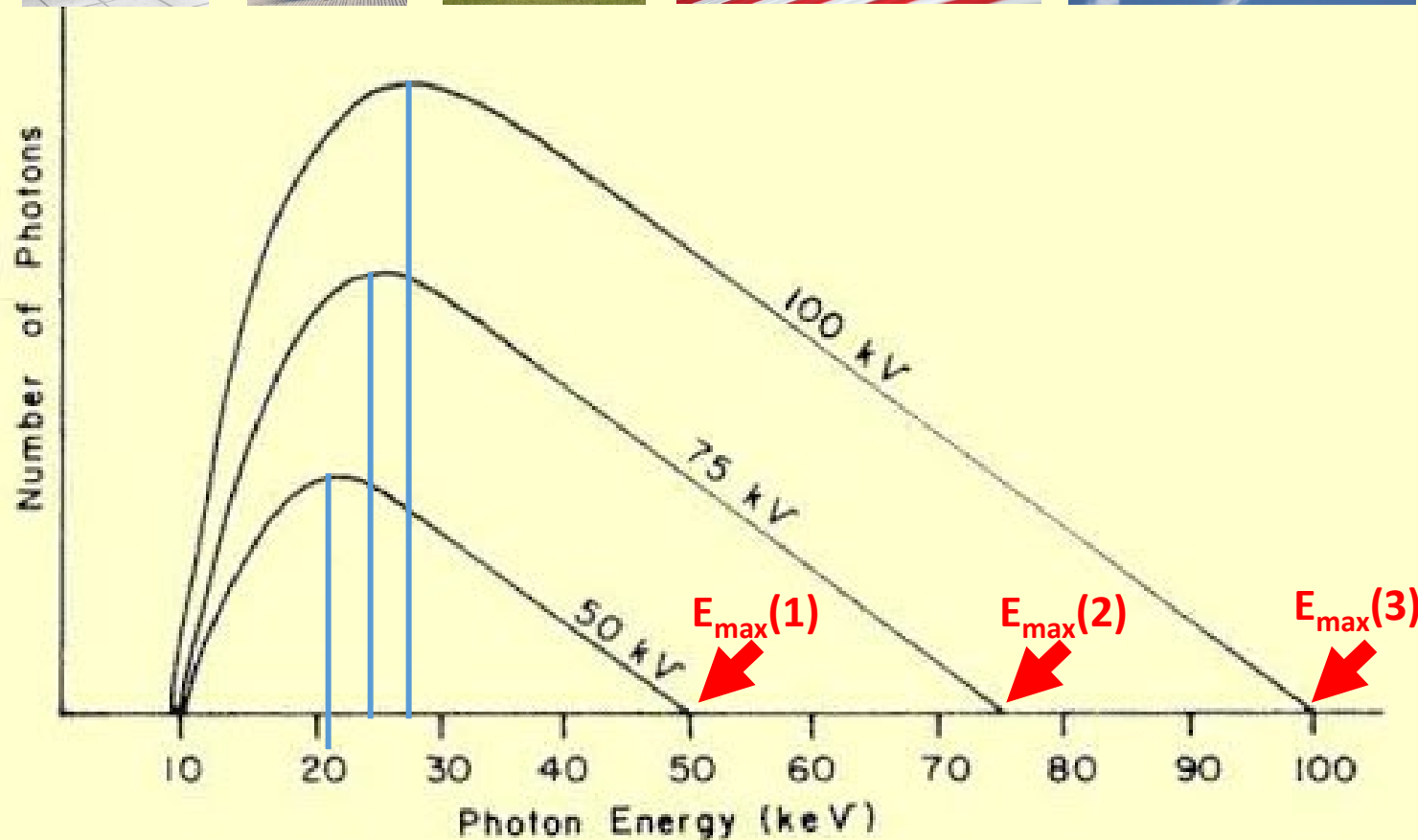
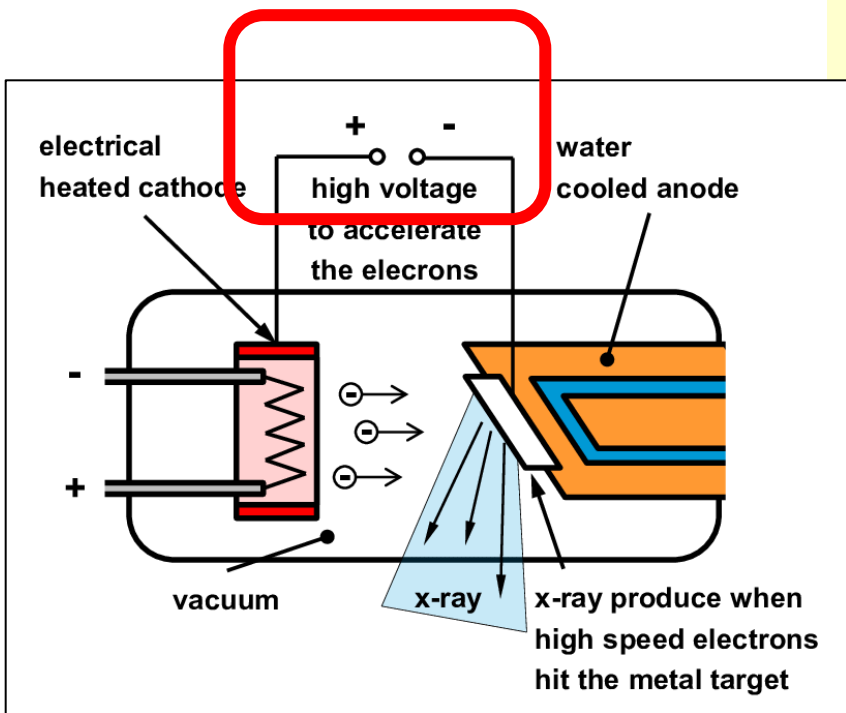
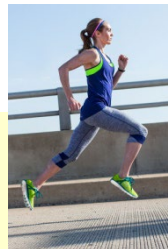
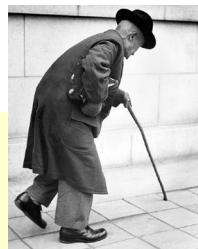
U (U_a) = anodové napětí

h = Planckova konstanta

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

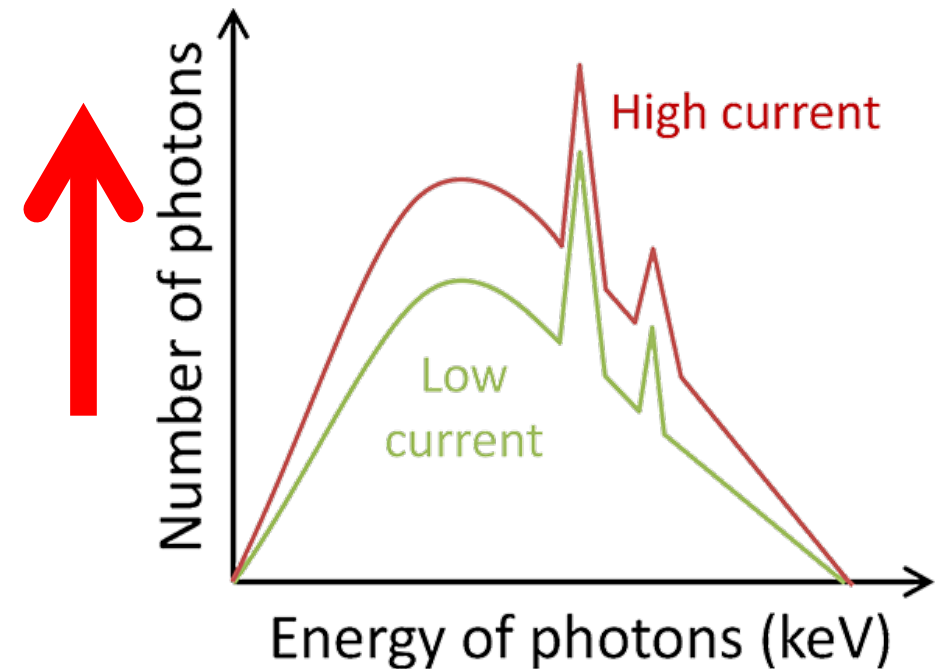
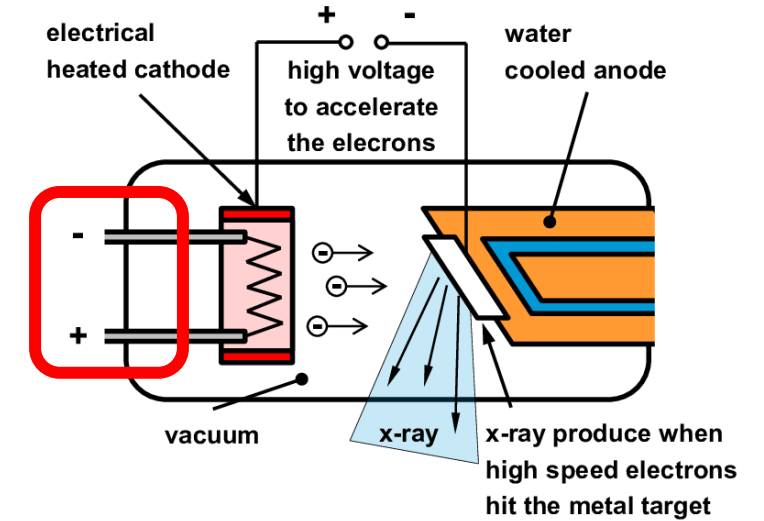
1. Anodové (urychlovací) napětí

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



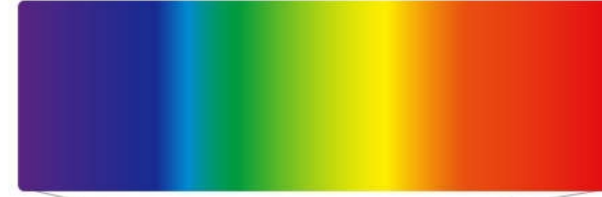
2. Katodový (žhavicí) proud (žhavení katody)

- (+ 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).

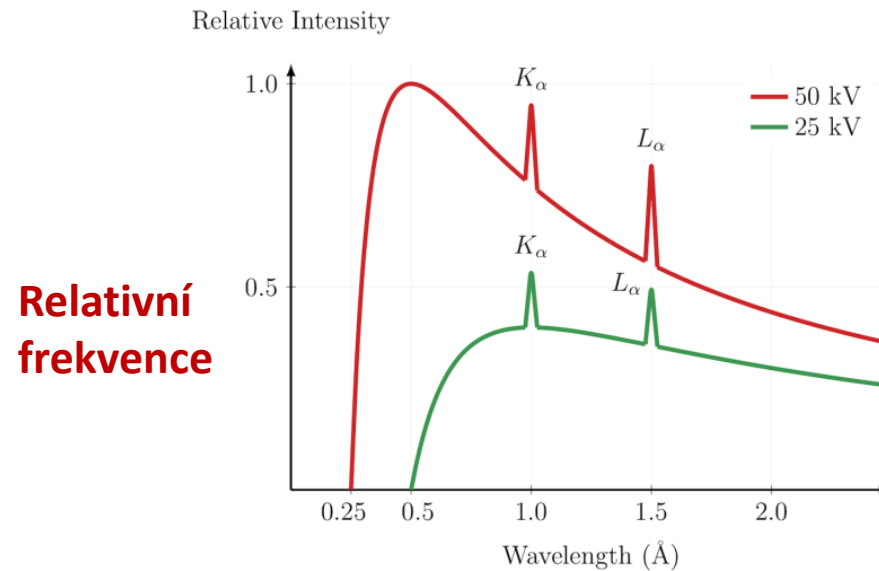


SPEKTRA RTG záření

VISIBLE SPECTRUM

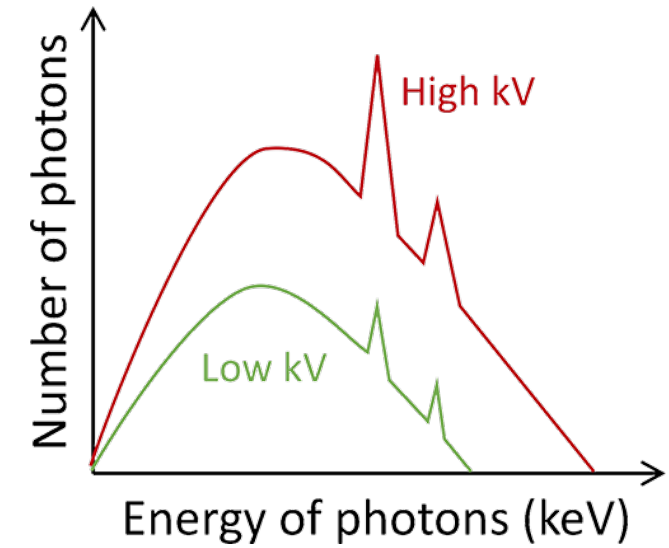


- Spektrum – většinou si představíme obrázek viditelného světla rozloženého na jednotlivé barvy, červenou, oranžovou, žlutou, zelenou...
- U RTG záření, které je neviditelné, spektrum představuje graf relativní intenzity záření vynesené proti vlnové délce. (totéž lze samozřejmě udělat i pro viditelné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



Relativní
frekvence

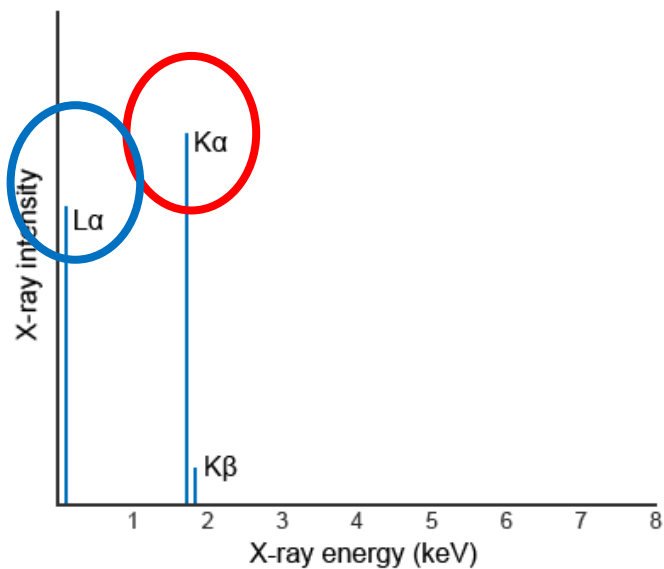
Vlnová délka



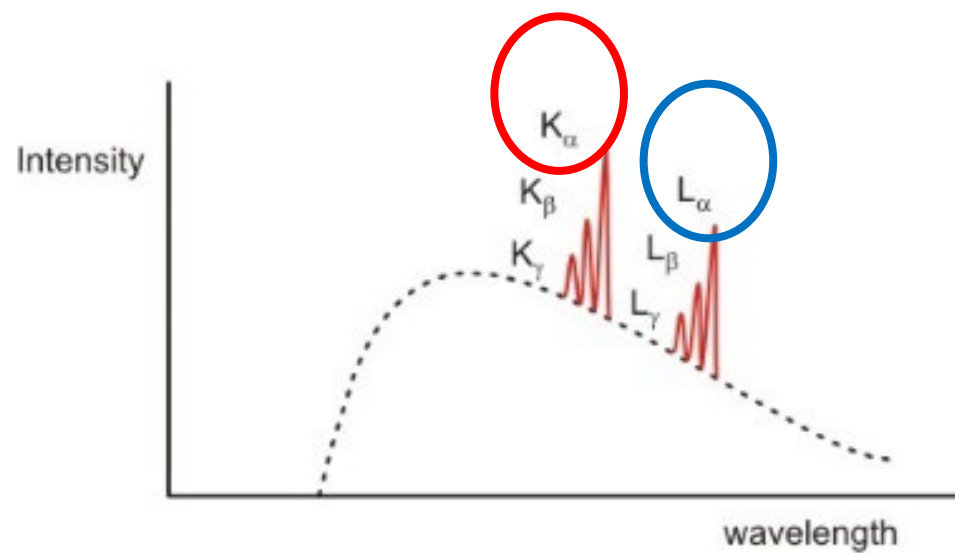
Energie

Ve spektrech pozor na energii versus vlnovou délkou

Intensity
(relative
frequency)

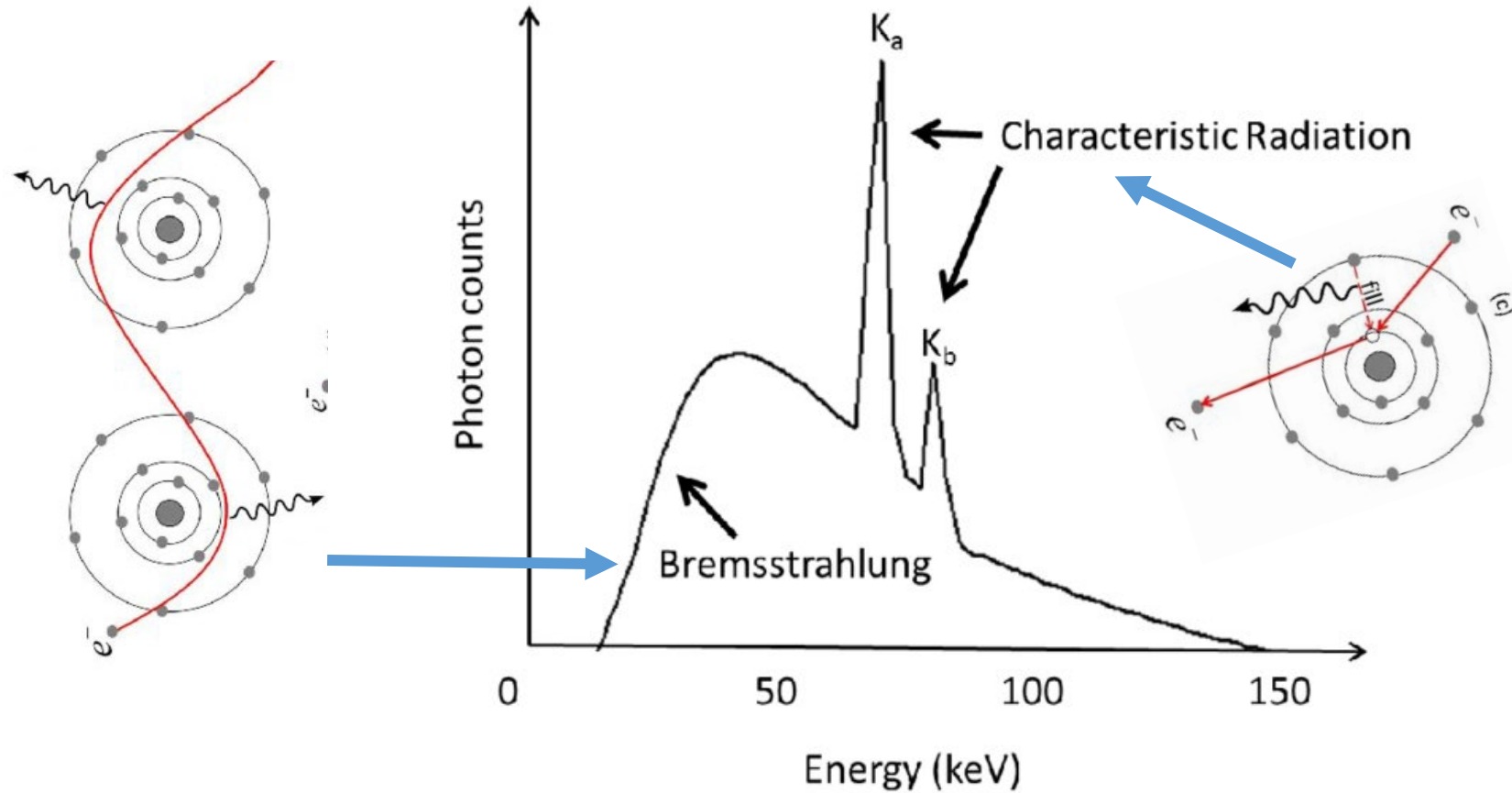


Energie



Vlnová délka

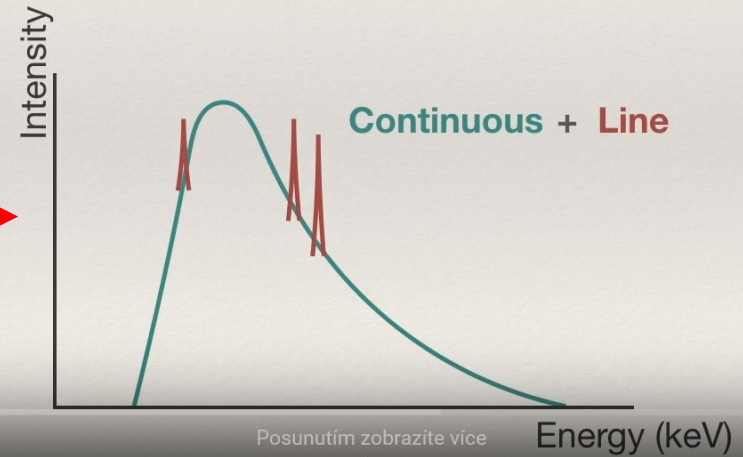
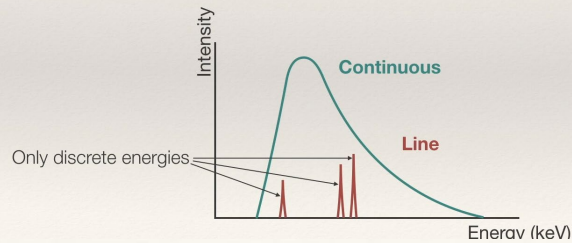
SPEKTRA RTG záření



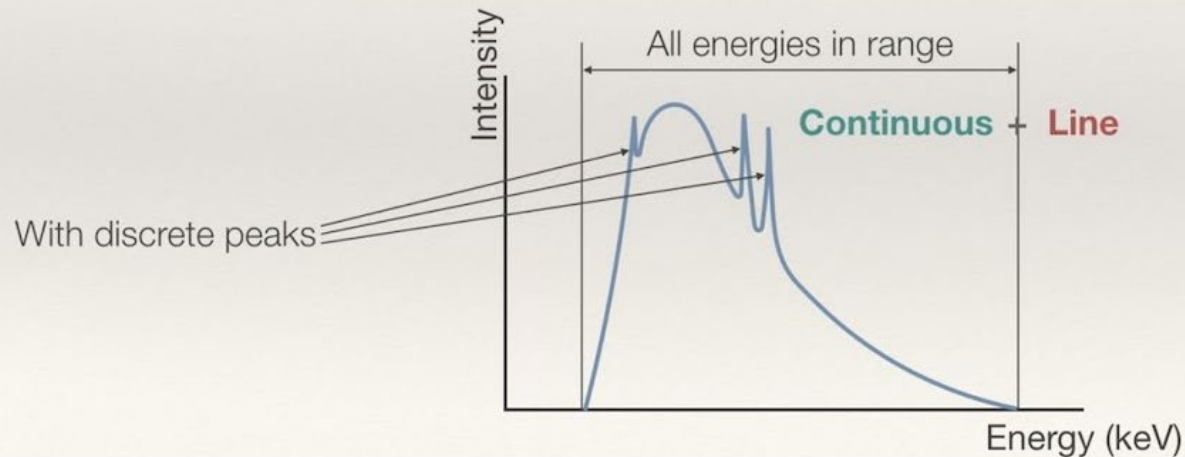
X-ray spectrum of a tungsten anode (without filtering) at tube acceleration voltages of 150 kVp (peak kilo-voltage).

Line Spectra v. Continuous Spectra

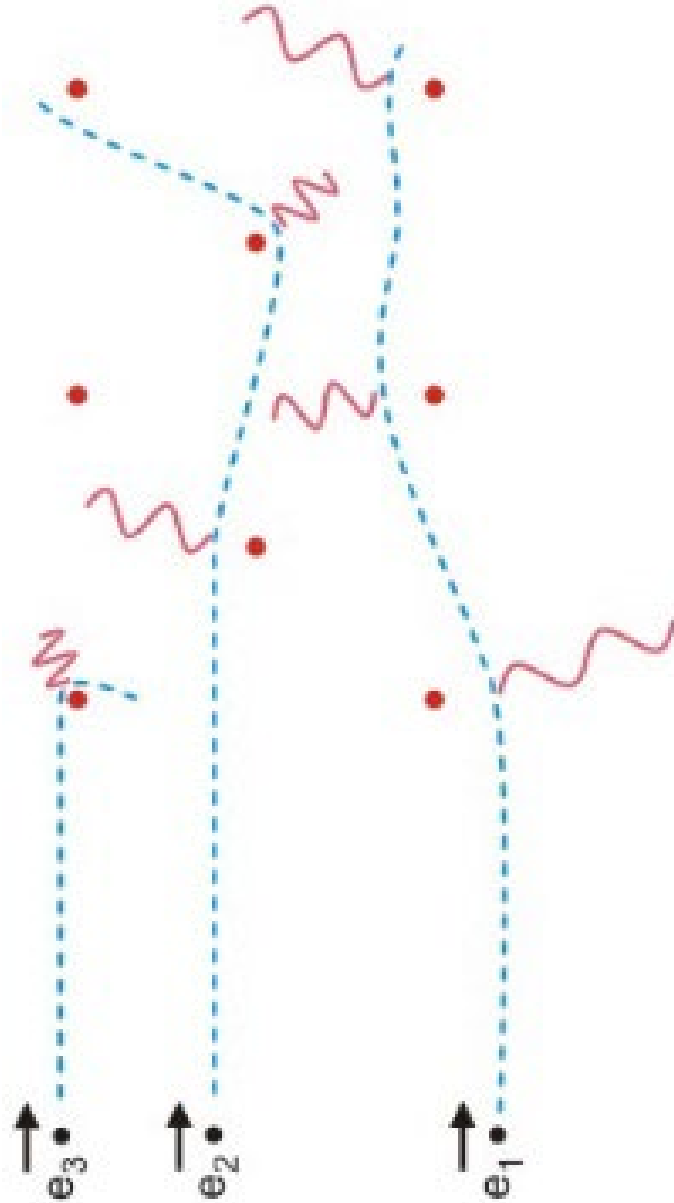
- ❖ A continuous spectrum contains all photon energies (or frequencies / wavelengths) in a range.
- ❖ A line spectrum is discrete; it contains only certain energies in a range.



- ❖ 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 e_3 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

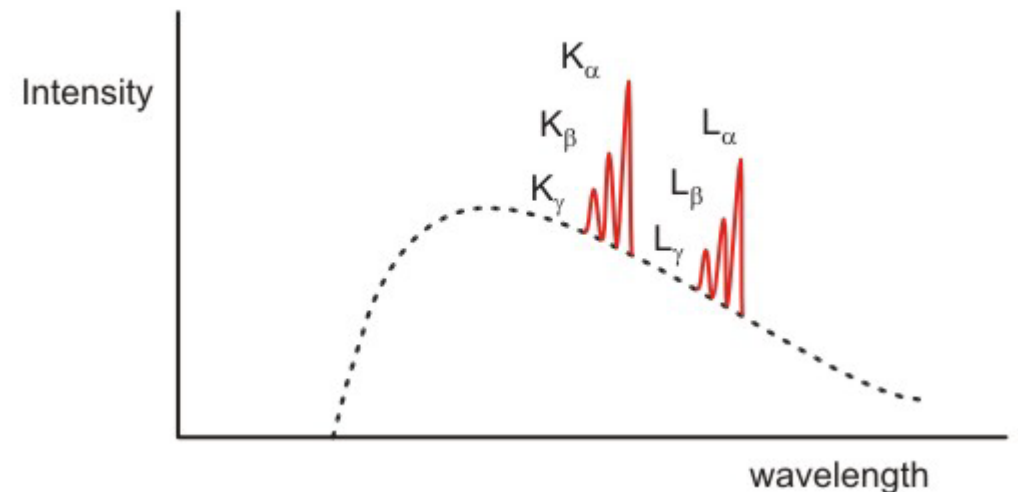
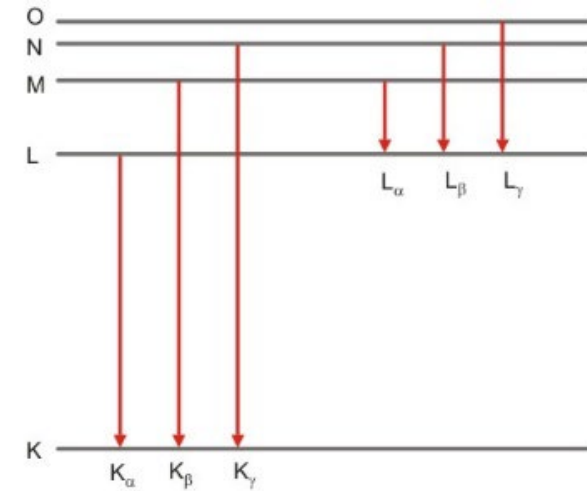
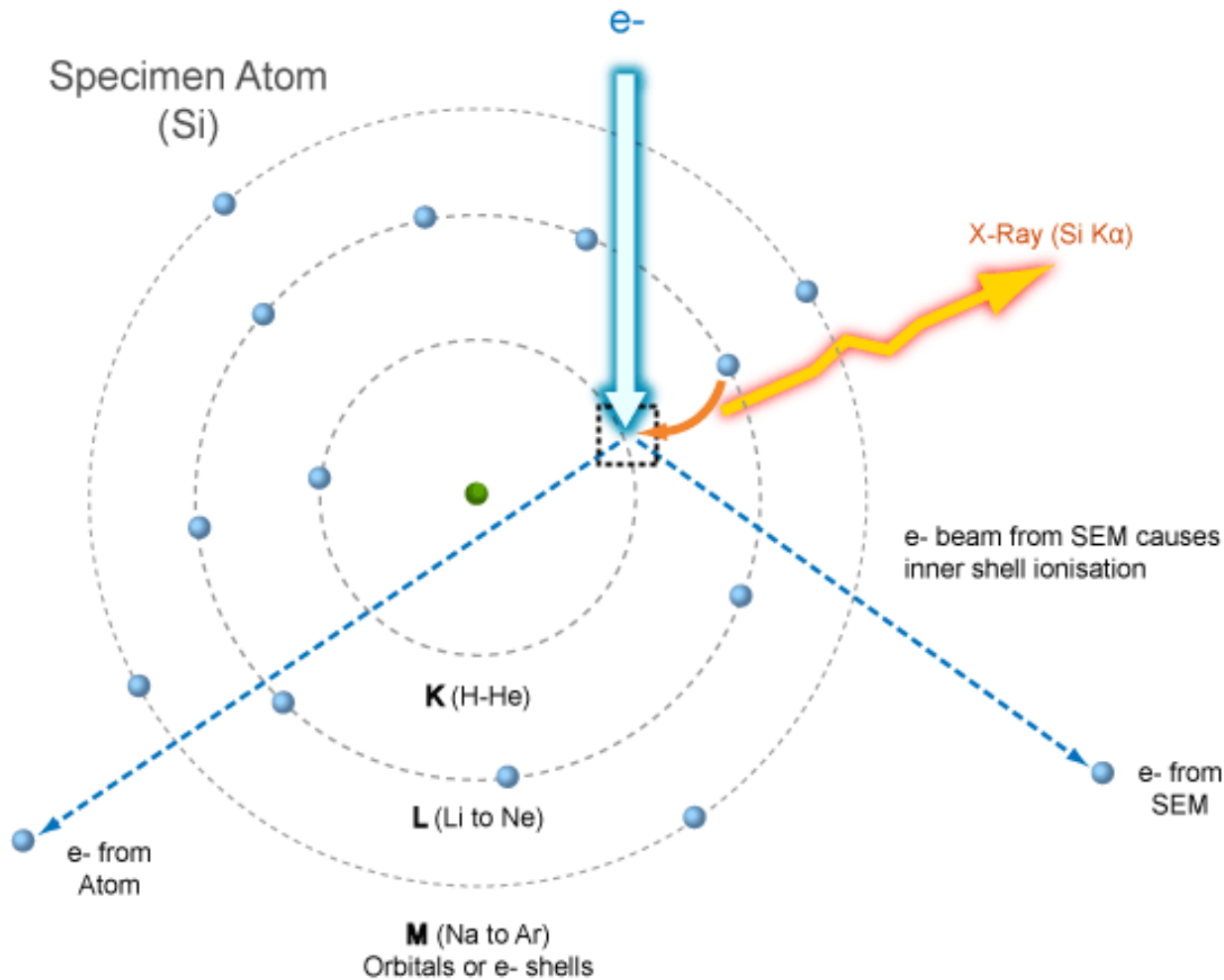
Brzdné záření – předchozí slide

- **Elektron e3:** Elektron ztratí veškerou svou energii již při první kolizi, jeho celková energie se přemění na kinetickou energii fotonu $E = hf_{\max}$
- The λ_{\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 λ delší než λ_{\min} a energie menší než E_{\max} .
- **Spektrum je proto kontinuální**

SPECIFICKÉ RTG ZÁŘENÍ

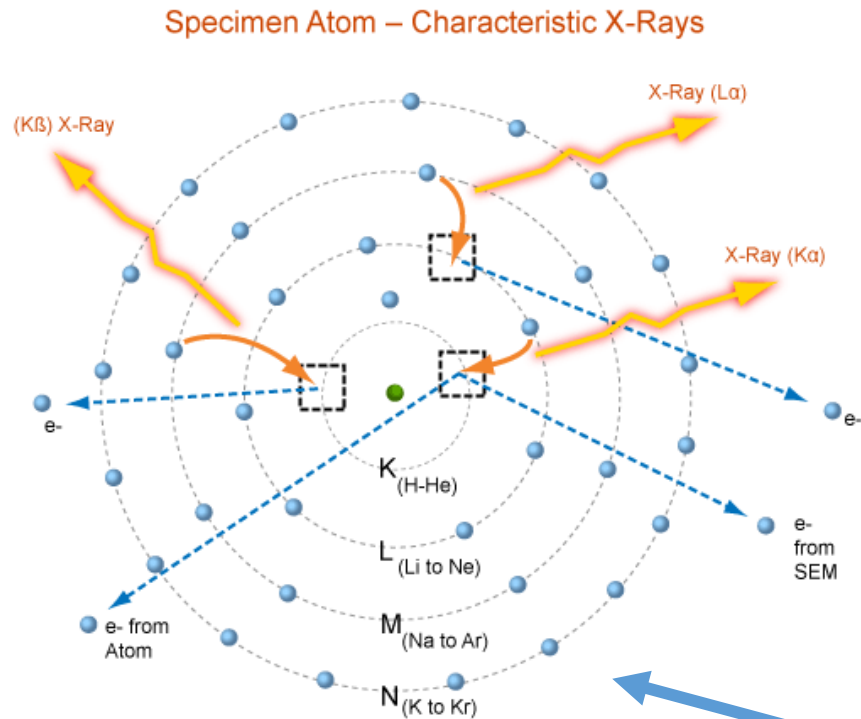
Characteristic X-Ray Production

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.



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

- 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. **α** is the most intense line, followed by **β** and **γ** .
- 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 ~ 1.83 keV is the **Si $K\beta$** line.



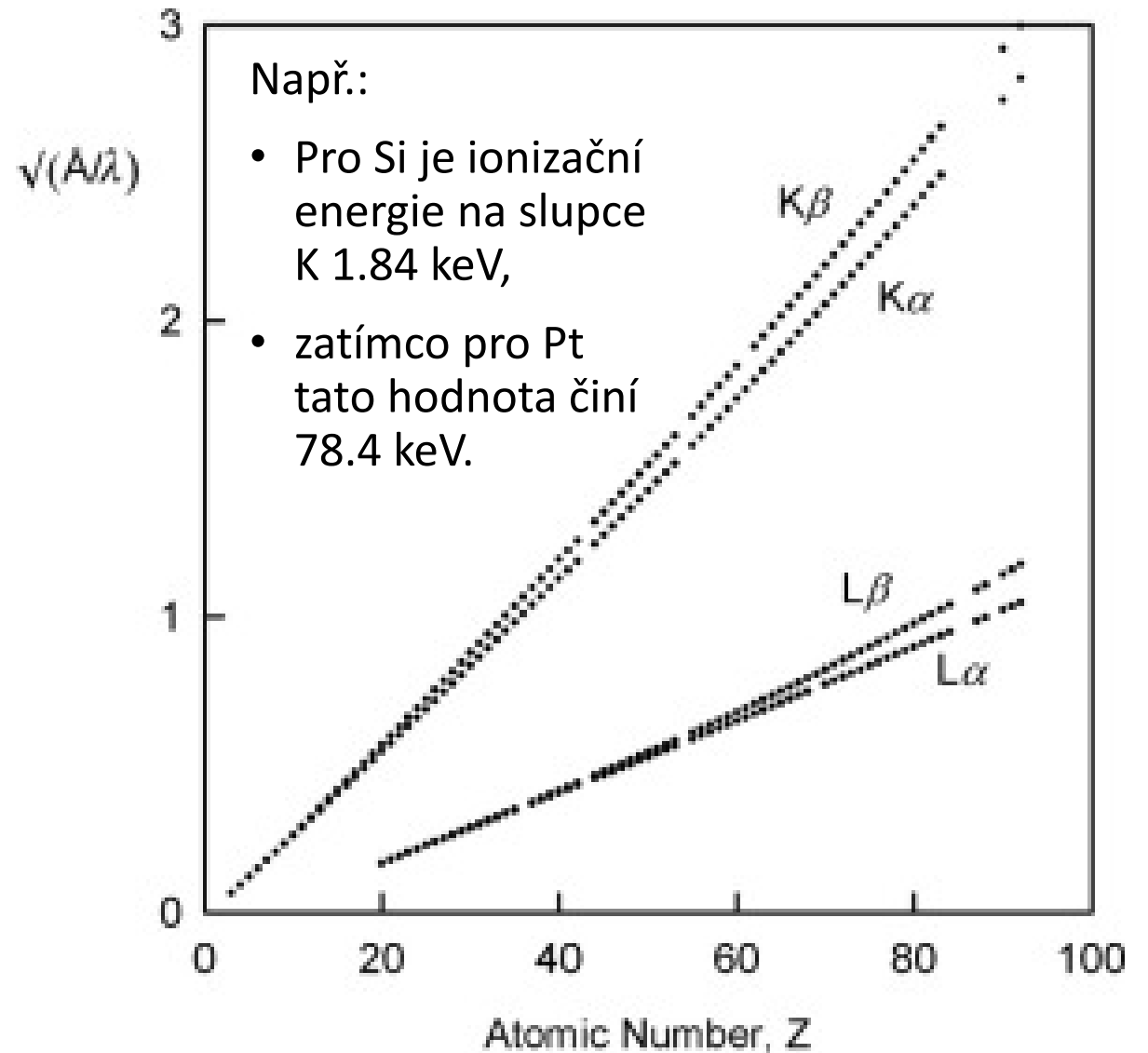
$$E_K > E_L > E_M$$

CHARAKTERISTICKÉ RTG záření

- Slupka **K** má v elektronovém obalu **nejvyšší ionizační energii** (neboli kritickou ionizační energii)
- K-elektrony jsou nejpevněji přitahovány k jádru; 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.

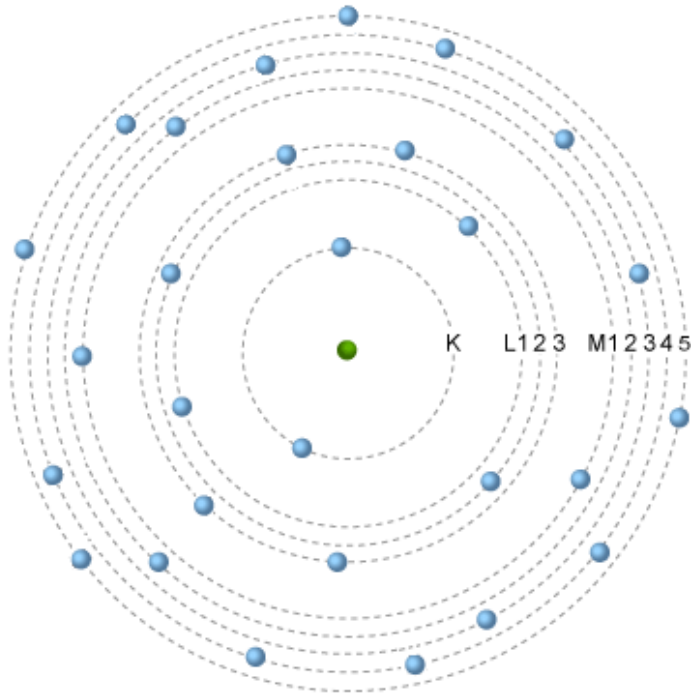
Moseley's law:

- 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**



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 **nejenergetičtější 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 :



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-

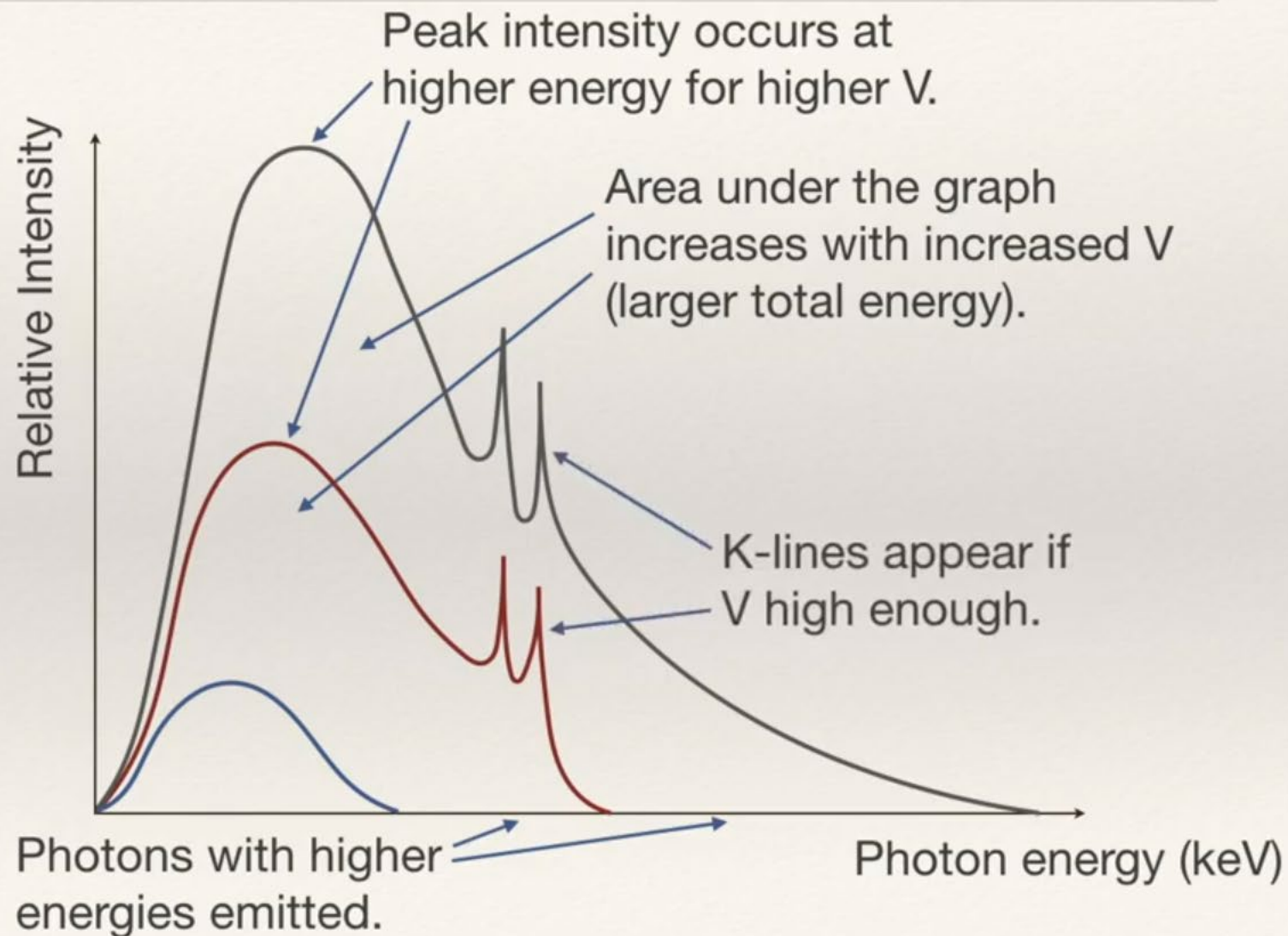
Slupka M má 5 podslupek a maximálně 18 e-

atd.



Spectra for Different Tube Voltages

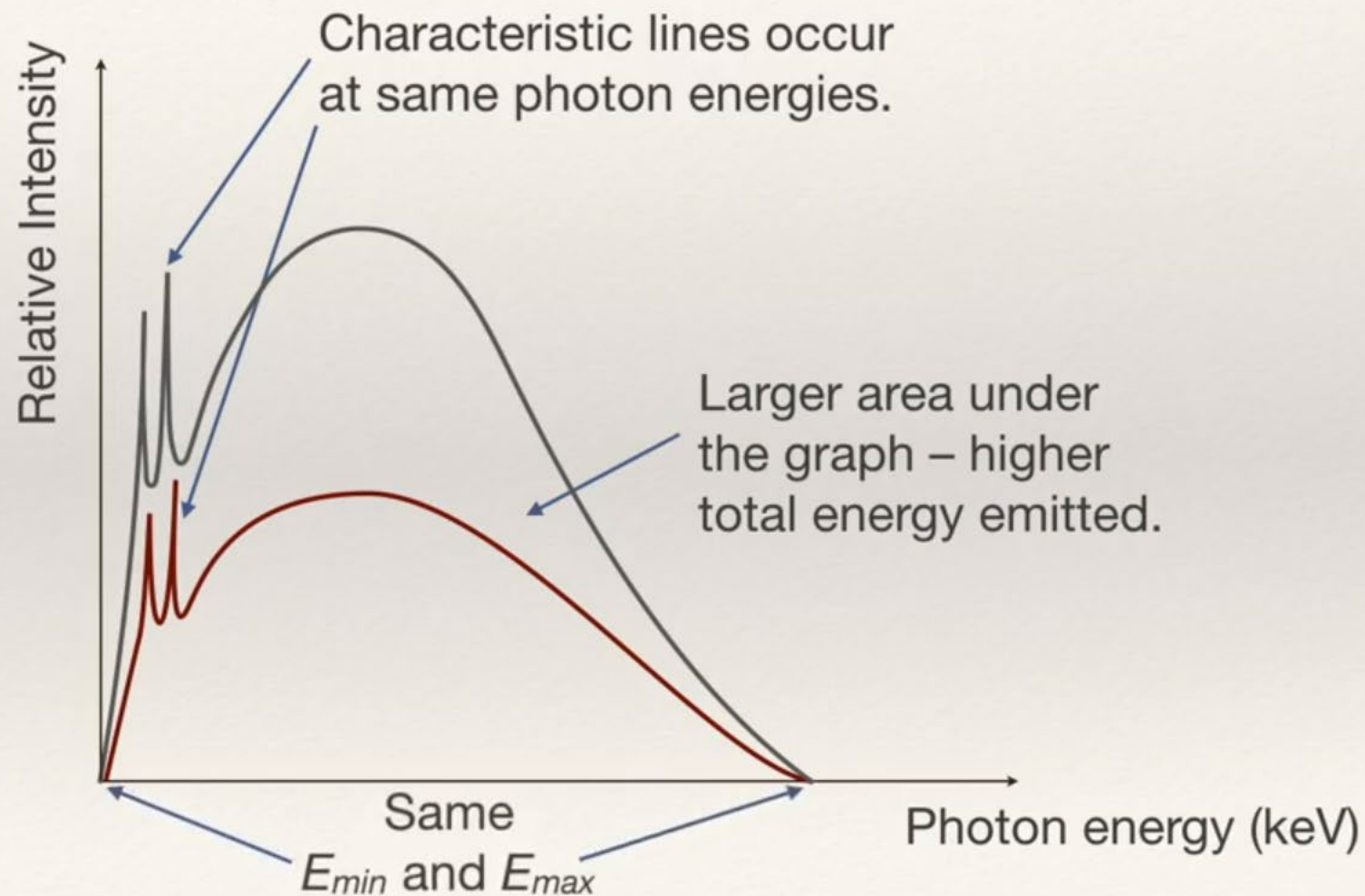
- ❖ Different tube voltages:
 $V_1 > V_2 > V_3$
- ❖ Increasing voltage increases work done on electrons
 \Rightarrow larger KE
- ❖ New subatomic transitions possible.





Spectra for Different Tube Currents

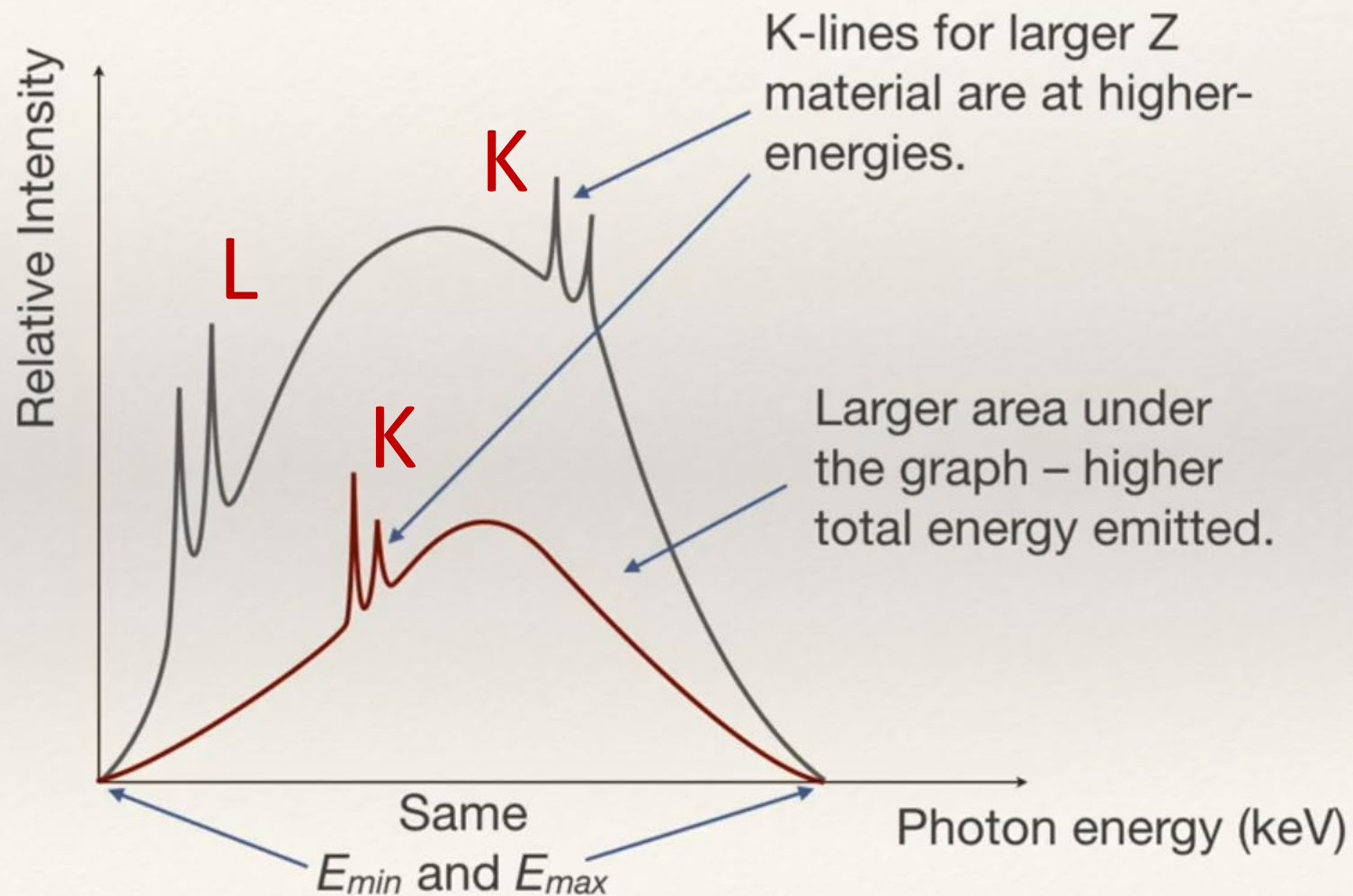
- ❖ Different tube currents:
 $I_1 > I_2$
- ❖ Larger current \Rightarrow larger rate of flow of charge \Rightarrow more electrons arriving per unit time.
- ❖ More x-ray photons produced per unit time.
- ❖ Max. and min. electron KE unaffected.





Spectra for Different Target Metals

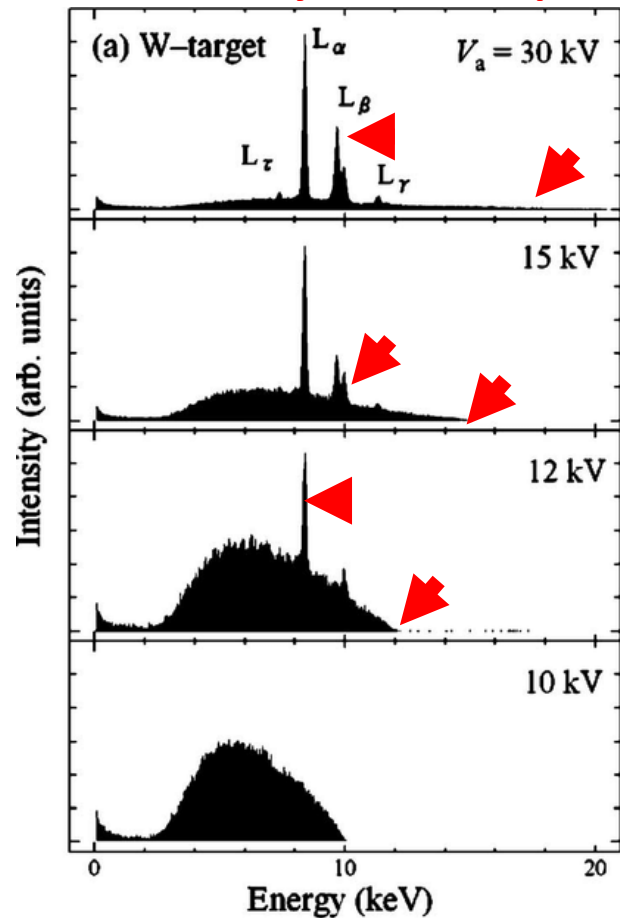
- ❖ Different target material:
 $Z_1 > Z_2$
- ❖ More photons at each energy for increased Z .
- ❖ K-lines occur at higher energies if Z increased.



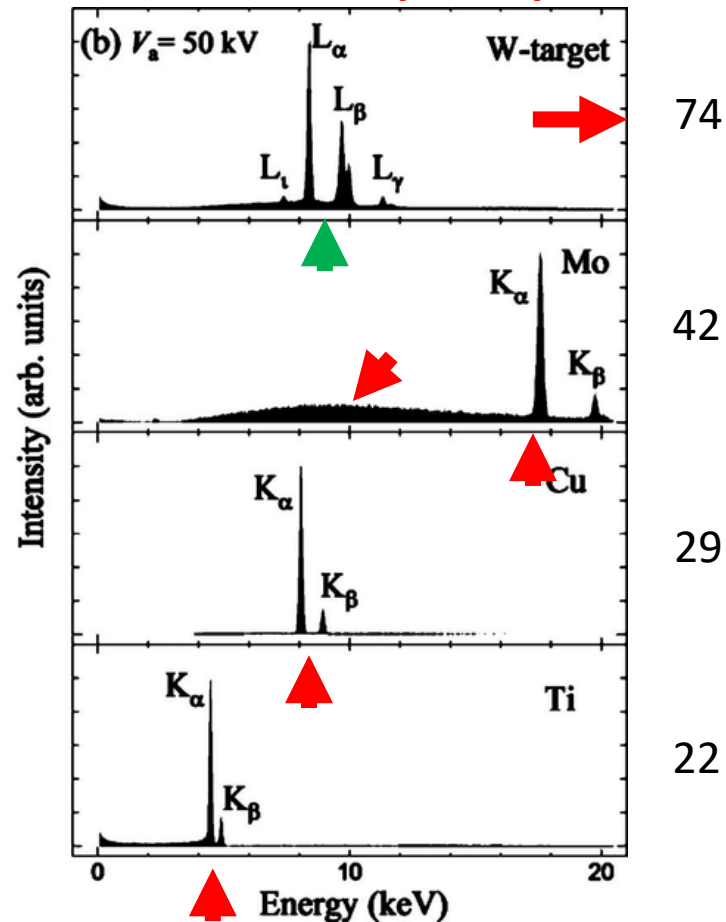
kV



Různá urychlovací napětí



Různé materiály anody

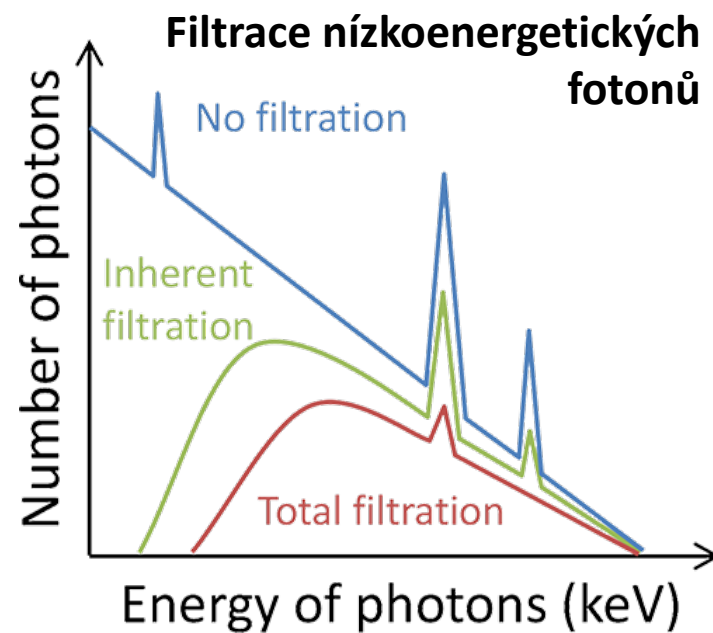
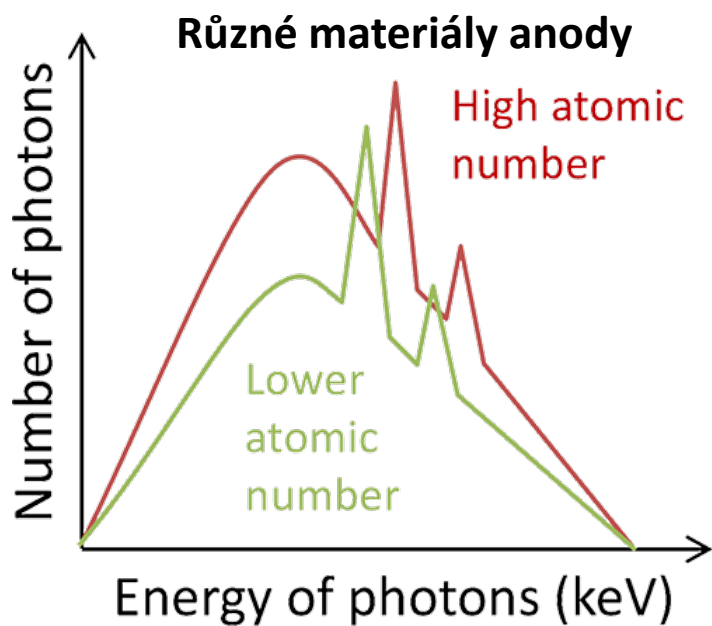
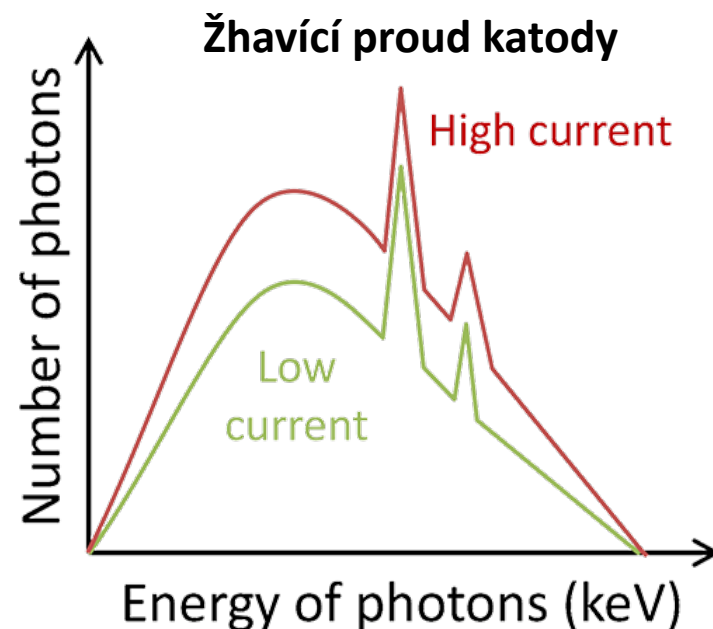
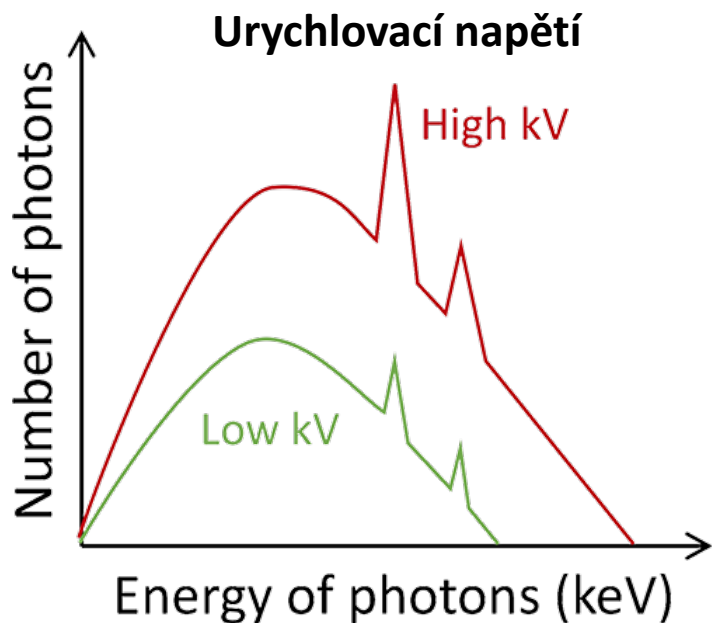


Z

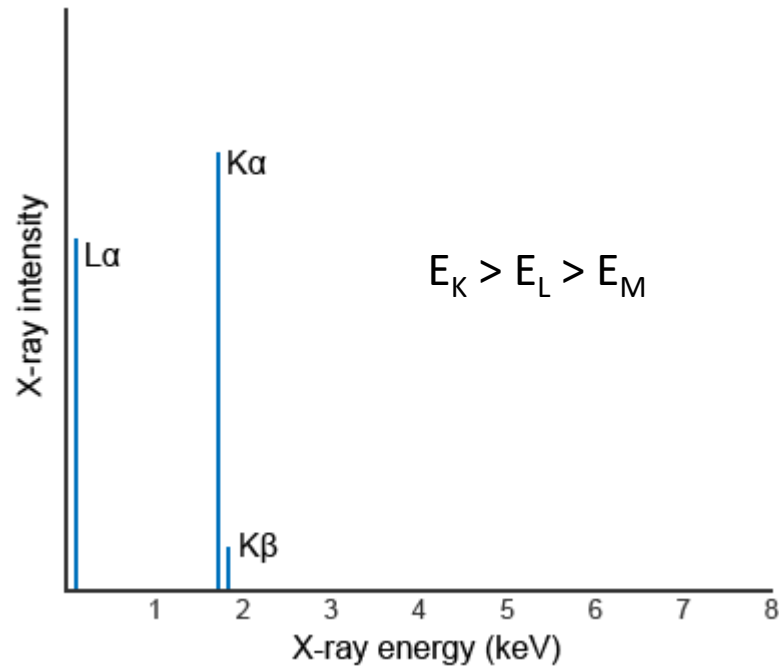


Energy spectra of the x-rays radiated from the metal targets.

- 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)



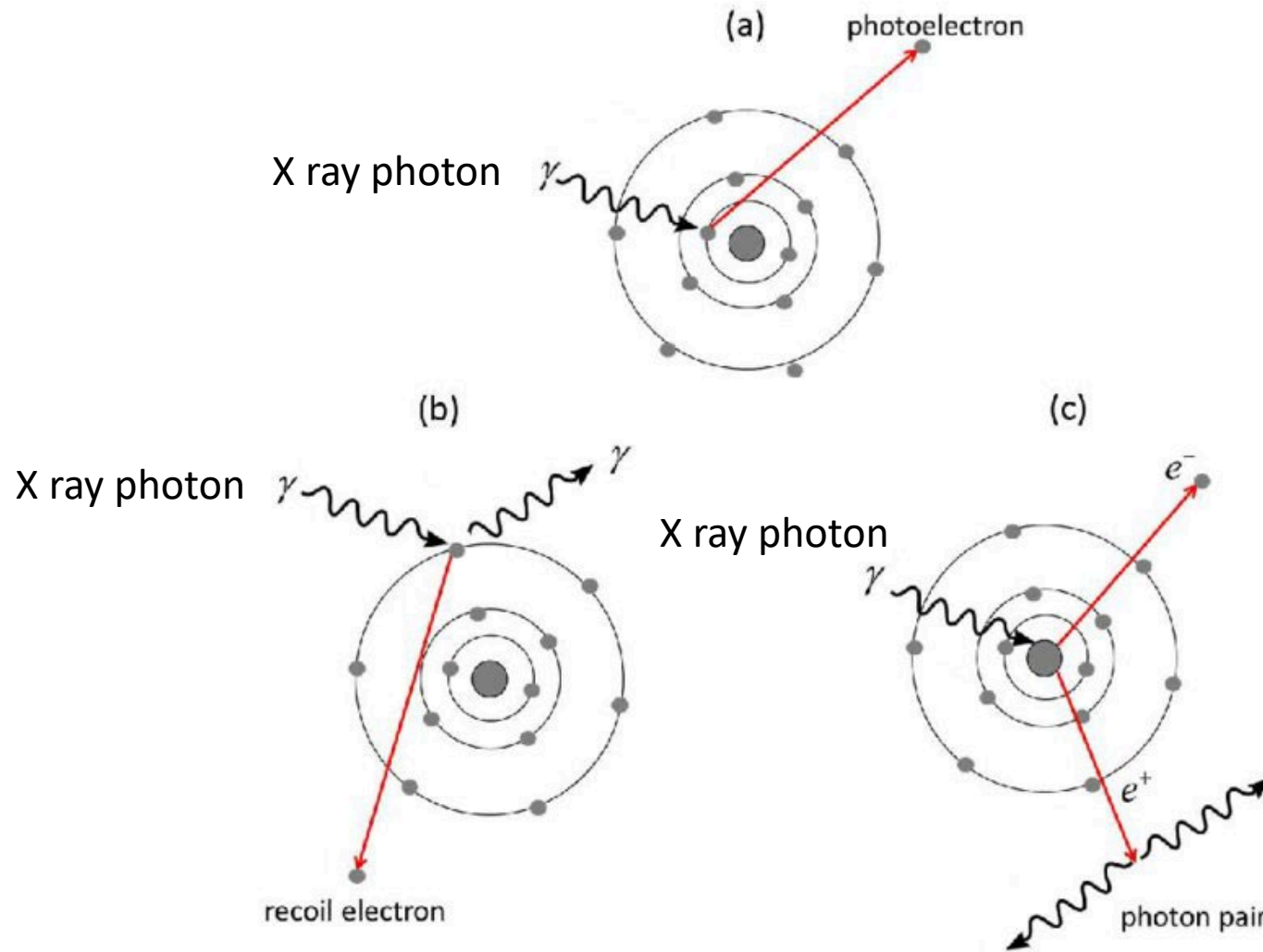
PŘÍKLAD



The ideal Characteristic X-ray spectrum for Si. The Characteristic X-ray lines, K α , K β and L α , 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 ~ 0.10 keV and the ionization energy of the M shell is ~ 0.01 keV.
- The Characteristic X-ray spectrum for Si shows three spectral lines.
- The line at low energy (~ 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 ~ 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 (~ 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).

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)

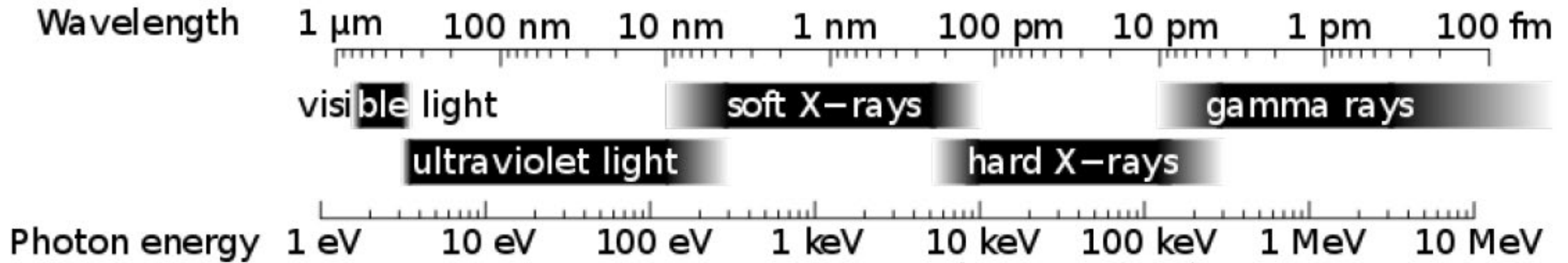
- RTG záření je pronikavé elektromagnetické záření o velmi krátkých vlnových délkách 10^{-11} m to 10^{-8} m (0.01 – 10 nm) a vysokých frekvencích.
- prochází hmotou i vakuem, jeho intenzita **slábne se čtvercem vzdálenosti** od zdroje
- šíří se přímočaře
- **má ionizační účinky** (což znamená, že množství energie, které nese, stačí na uvolnění elektronu z atomu).

Efekty RTG záření:

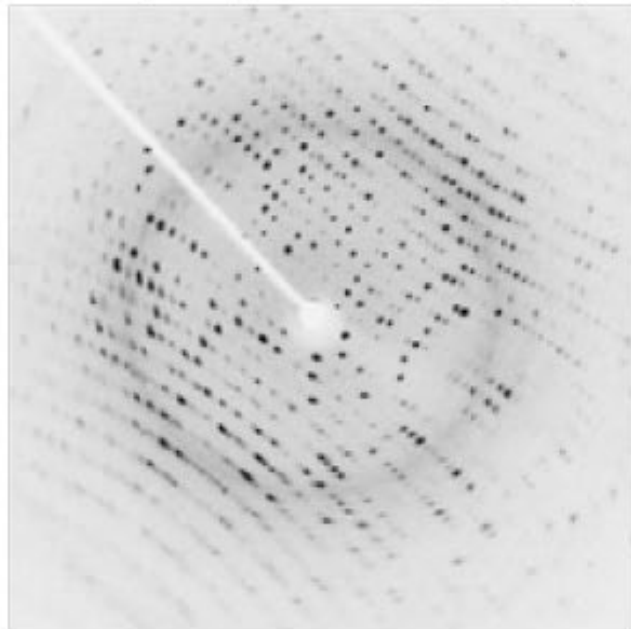
- **Luminiscenční efekt.** Rentgenové záření má schopnost přeměnit se na viditelné záření, ale pouze při interakci s určitými látkami.
- **Fotochemický efekt.** Působením RTG záření na fotografický materiál dochází ke změnám v jeho chemickém složení.
- **Ionizační efekt.** Energie, kterou rentgenové 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.

Měkké a tvrdé RTG záření

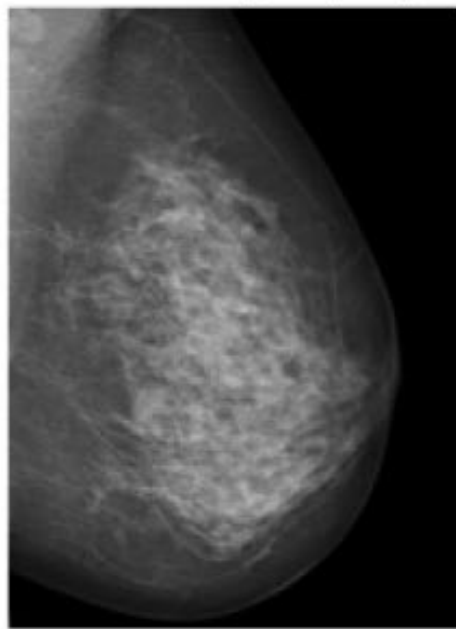
- Roentgenovy trubice mohou být vyčerpány buď více nebo poněkud méně
- v prvním případě **(vysoké vakuum) vzniká tvrdé RTG** záření (<0.1 nm)
- v druhém případě **(nižší vakuum) měkké RTG** záření (>0.1 nm)
- **Měkké RTG trubice**: vydávají paprsky, které jsou hustými tělesy snadno pohlcovány, tak že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



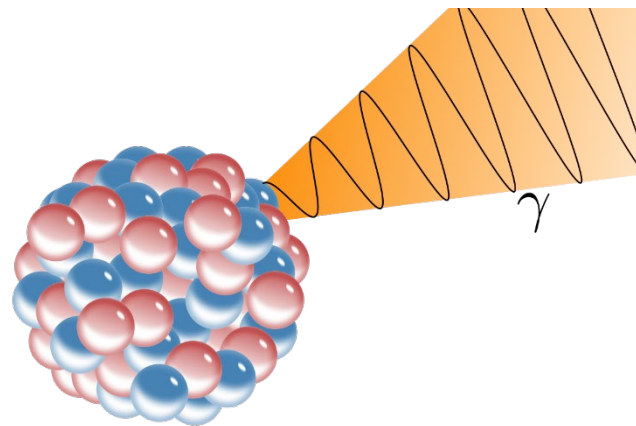
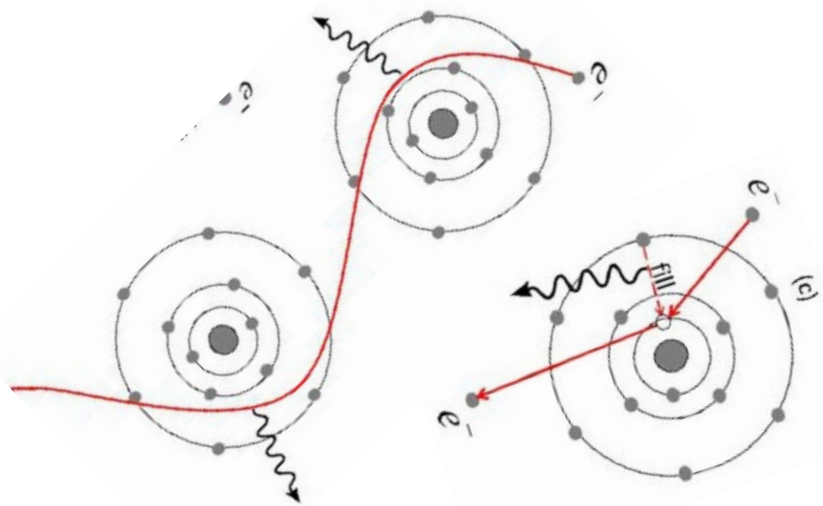
Airport security



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



γ



PRVNÍ LÉKAŘSKÁ APLIKACE RTG

- Lancet, 23. ledna 1896
- Roentgenovy paprsky použity pro detekci úlomku nože v páteři opilého námořníka, který byl po rvačce díky tomuto zranění paralyzován, dokud mu nebyl úlomek vyjmut.
- Poté se RTG diagnostika prudce rozvíjí jak v Evropě tak USA

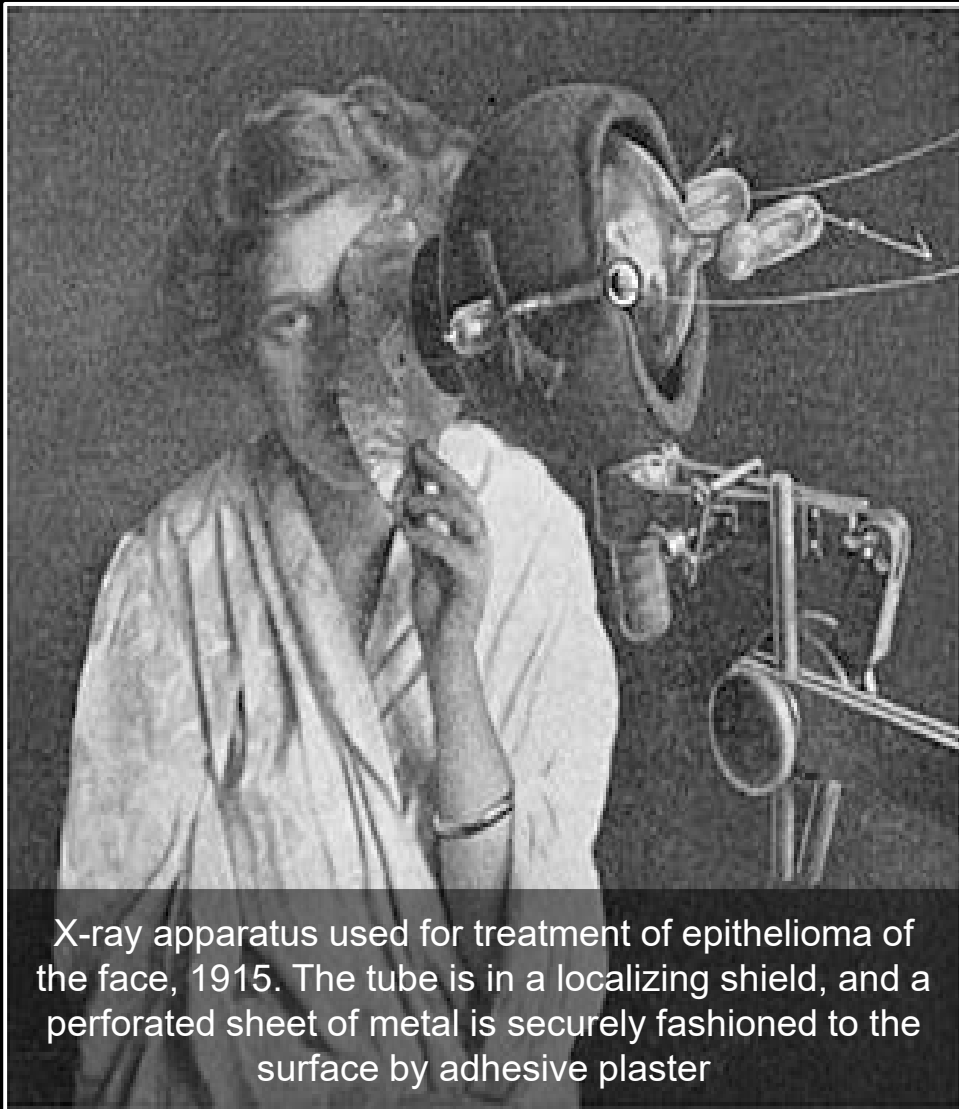
Just Months After Its Discovery, the X-Ray Was in Used in War



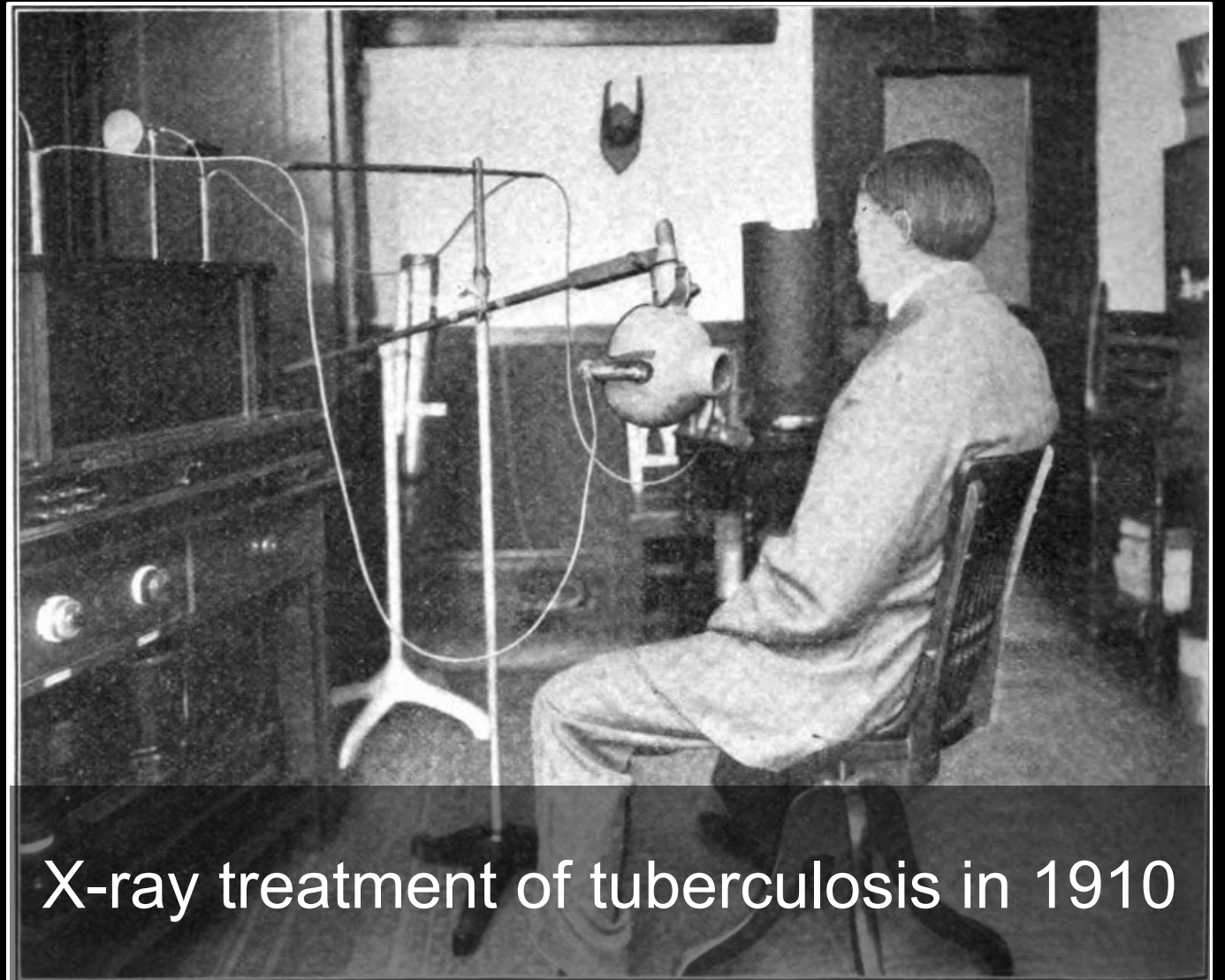
A technician takes **an X-ray fluoroscope** of a female patient. Fluoroscope exams delivered much more radiation exposures than modern X-rays. (National Cancer Institute, public domain)

Radioterapie paprsky X

Research Article: <https://www.birpublications.org/doi/epdf/10.1259/bir.1926.0081>



X-ray apparatus used for treatment of epithelioma of the face, 1915. The tube is in a localizing shield, and a perforated sheet of metal is securely fashioned to the surface by adhesive plaster



X-ray treatment of tuberculosis in 1910

IR and Tuberculosis

MM. Robert Coliez et Lucien Mallet

345

THE RADIOTHERAPY OF PULMONARY TUBERCULOSIS.*

By PROF. VITTORIO MARAGLIANO, GENOA.

SINCE the early days of the Röntgen discoveries, the radiotherapy of pulmonary tuberculosis has been the goal, hitherto unattained, of

many research workers.

Among Italian investigators alone, we have Viganò, Fornari, Attili, Gortan and Brunetti, while numerous foreigners, and more especially Bacxmeister and Fraenkel, have devoted themselves assiduously to the study of this problem.

Up to the present the results obtained, though encouraging, are not such as to justify our considering X rays as a reliable therapeutic remedy in practical medicine.

It was very soon shown that all hope of acting directly on the tubercular bacilli must be abandoned and the fundamental principles, on which the therapy of tuberculosis is based, may be reduced to the two following :—

1. The rays promote the neo-formation of connective pulmonary tissue and consequently the process of sclerosis or fibrosis, as it is sometimes called.

2. The rays augment the defensive substances circulating in the blood. This end is attained by subjecting to the influence of the rays the hæmatopoietic organs and especially the spleen, in accordance with the theory of Manouchkin, who admits that by means of such radiation the lysis of the white globules is accelerated, as is also the entry into circulation of the defensive substances contained in these globules. Moreover, the systematic radiation of the spleen would also, according to

Research Article: <https://www.birpublications.org/doi/epdf/10.1259/bir.1926.0081>

the lysis of the white globules is accelerated, as is also the entry into circulation of the defensive substances contained in these globules. Moreover, the systematic radiation of the spleen would also, according to Stephan, have the effect of increasing the coagulating power of the blood, thus preventing hæmoptysis as far as possible. (Gortan, Brunetti, etc.)

* Read before the First International Congress of Radiology, London, 1925.

INTERNATIONAL JOURNAL OF MYCOBACTERIOLOGY 4 (2015) 337–340

HOSTED BY



ELSEVIER

Available at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/IJMYCO



Short Communication

Reactivation of pulmonary tuberculosis during cancer treatment



Ramon E.A. Jacobs ^{a,*}, Ping Gu ^b, Abraham Chachoua ^b

^a Department of Medicine, Division of General Internal Medicine, New York University School of Medicine, New York, NY, USA

^b Department of Medicine, Laura and Isaac Perlmutter Cancer Center, Division of Hematology and Medical Oncology, New York University School of Medicine, New York, NY, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 May 2015

Received in revised form

25 May 2015

Accepted 30 May 2015

Available online 18 July 2015

ABSTRACT

Reactivation of *Mycobacterium tuberculosis* can occur in patients with latent tuberculosis (TB) with risk factors including chronic disease (i.e., malignancy). We herein describe the case of an immigrant from Hong Kong with lung cancer and no known TB disease who presents with reactivation of TB in the setting of chemotherapy and radiation therapy.

© 2015 Asian African Society for Mycobacteriology. Production and hosting by Elsevier Ltd.

All rights reserved.

Radiační biofyzika 2

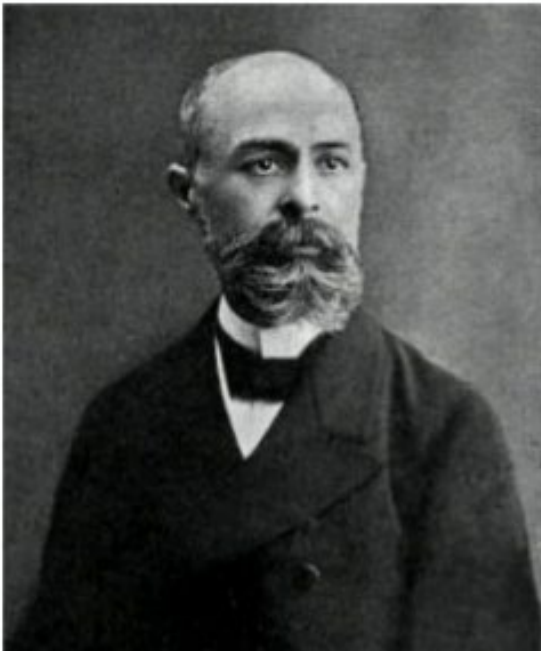
Objev přirozené radioaktivity a další vývoj

Martin Falk, falk-at-ibp.cz, Biofyzikální ústav AVČR, Brno



18. května 1896, Antoine Henri Becquerel Objev přirozené radioaktivity

(1852/12/15 - 1908/08/25)



Henri Becquerel

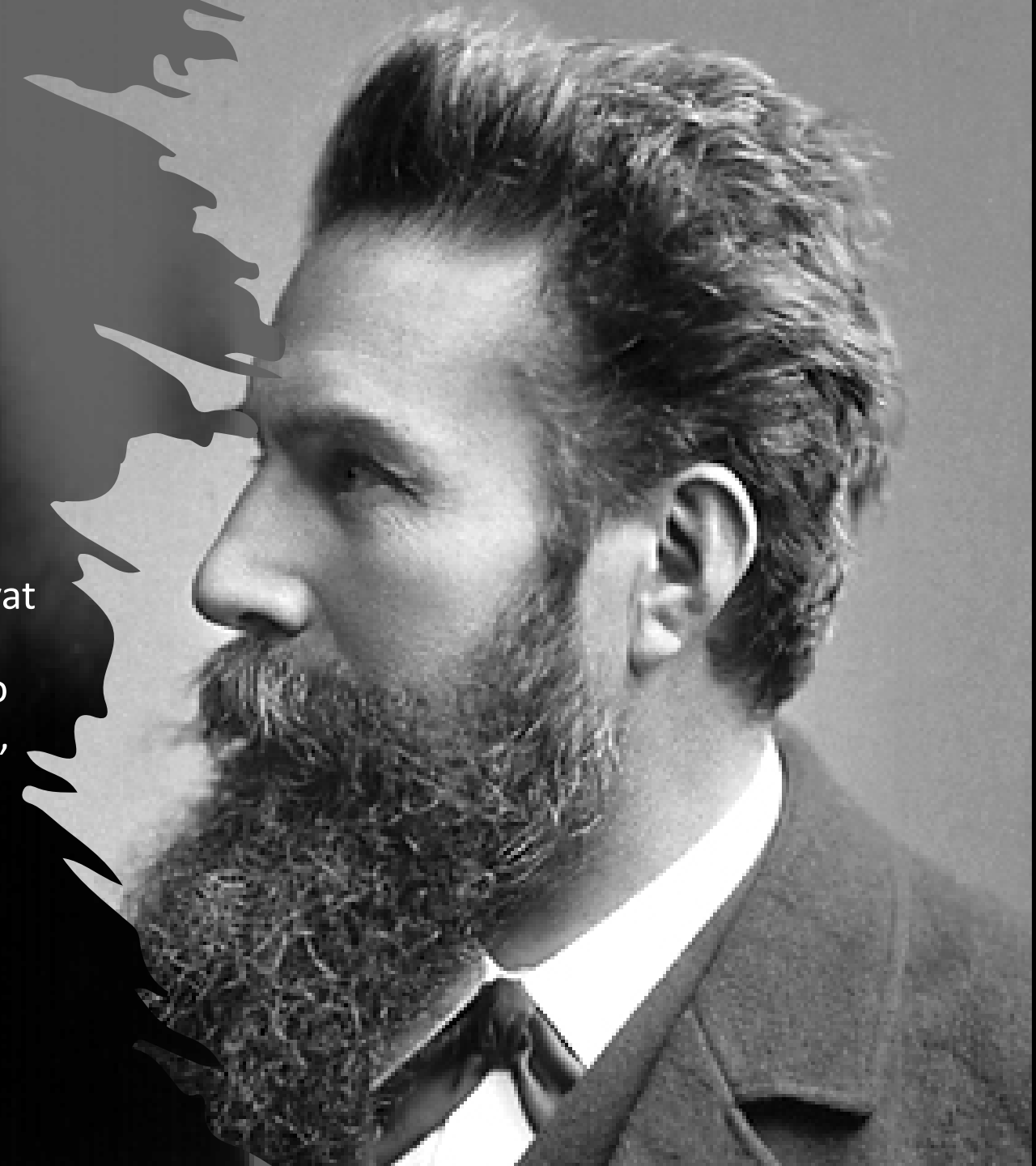


How can such a "nothing spot" lead to a Nobel Prize?

Inspirace pro Becquerelův objev

1. FASCINACE OBJEVEM „MAGICKÝCH“ PAPRSKŮ X

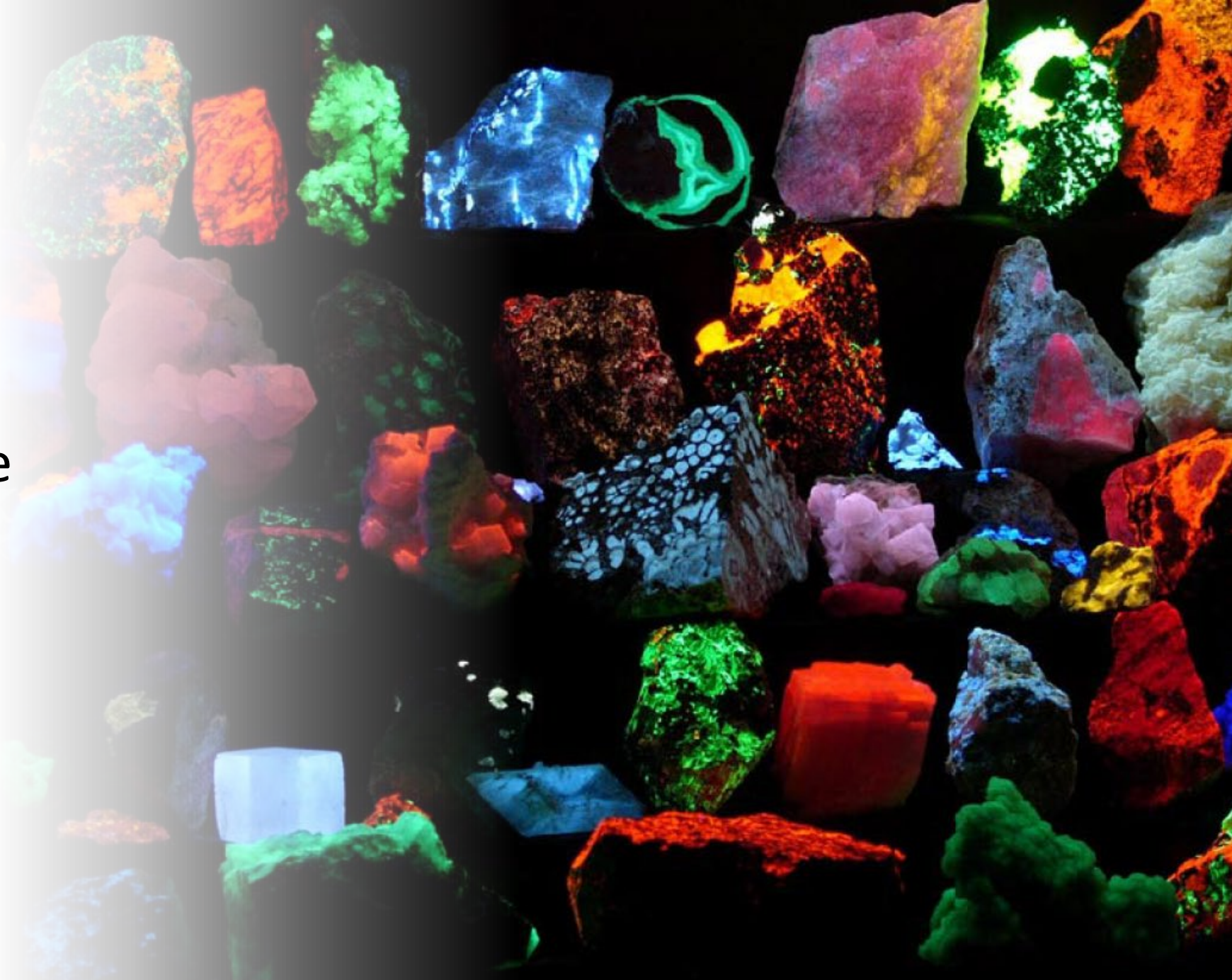
- Wilhelm Conrad Röntgen krátce předtím zjistil, že záření vznikající při průchodu elektronů vakuovou trubicí dokáže pronikat pevnými látkami a zanechávat stopy na fotografické desce, stejně jako obyčejné světlo. Snímek kostí ruky i s kovovým prstenem jeho manželky obletěl svět a uvedl vědce do varu. Záření, které dokáže zobrazovat věci dosud neviditelné!
- 20. února 1895. Jako řádný člen francouzské Akademie věd se Becquerel spořádaně dostavil na zasedání této ctihodné instituce, aby tu vyslechl přednášku svého kolegy a přítele jeho otce Henriho Poincarého [poňtaré] o Röntgenových pokusech s katodovými paprsky.



Další inspirace pro Becquerelův objev

EXPERIMENTY
světélkování látek ve
slunečním světle
JEHO OTCE.

(otcem H.B. byl
Alexandre Edmond
Becquerel, 1820-
1891, též významný
fyzik)

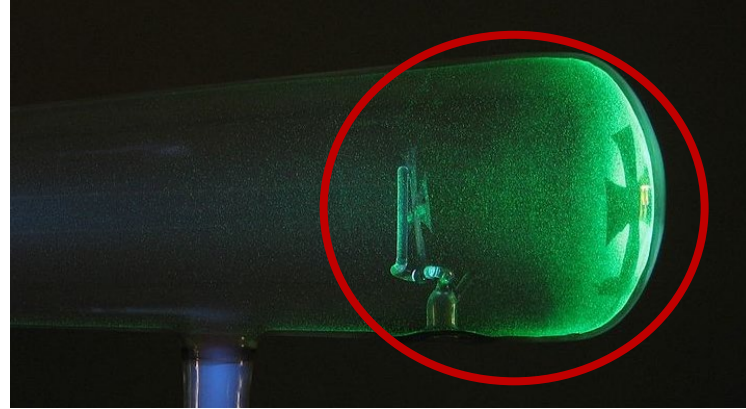


Becquerel's idea

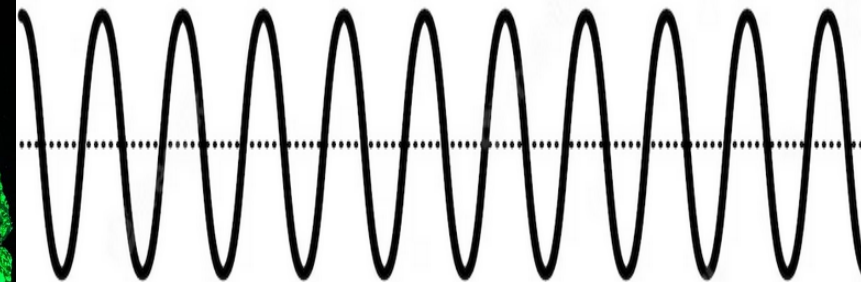
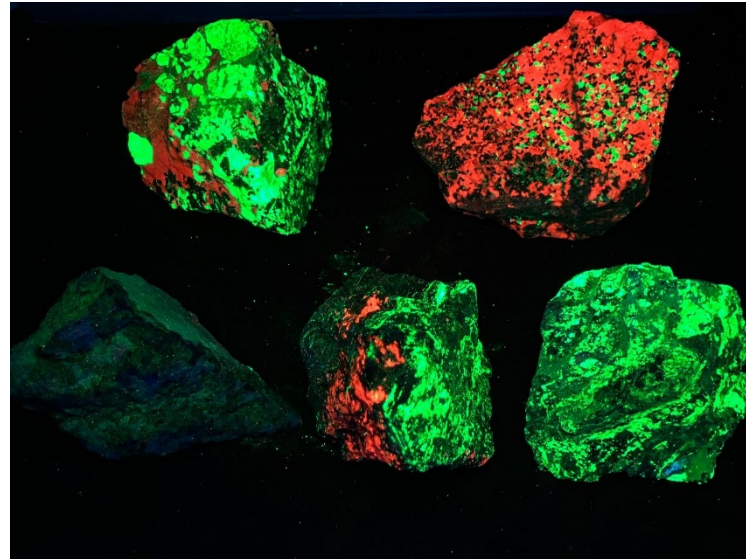
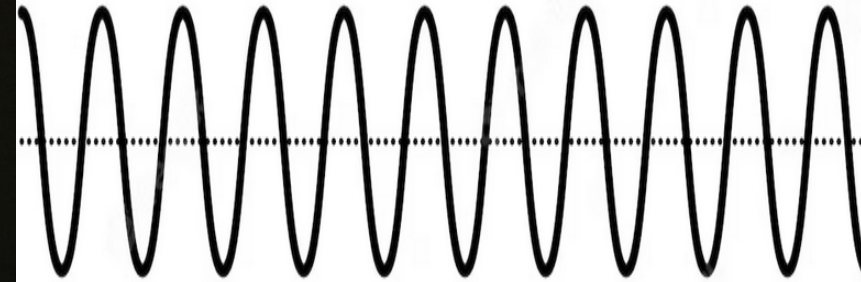


(+)

(-)



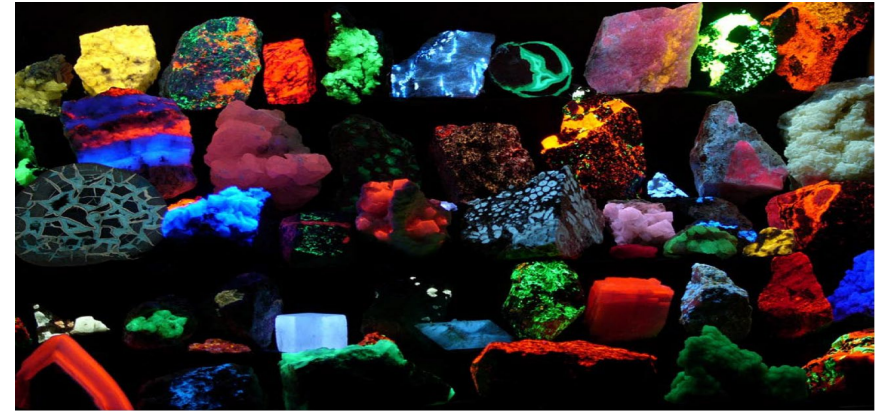
Catodic rays
+ X-rays !



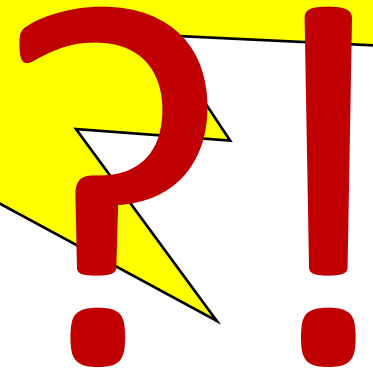
?

Phosphorescence
+ X-rays ???

H. Becquerela tak napadlo, zdali světélkující nerosty také nevydávají paprsky X....

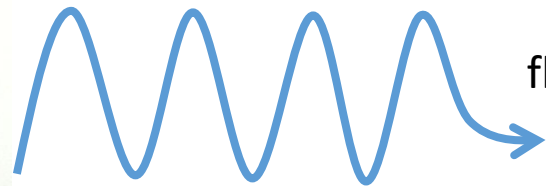
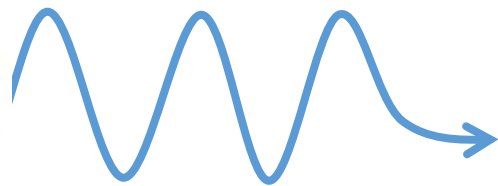


Aren't visible light and invisible X-rays produced together by the same mechanism?



EXPERIMENT 1:

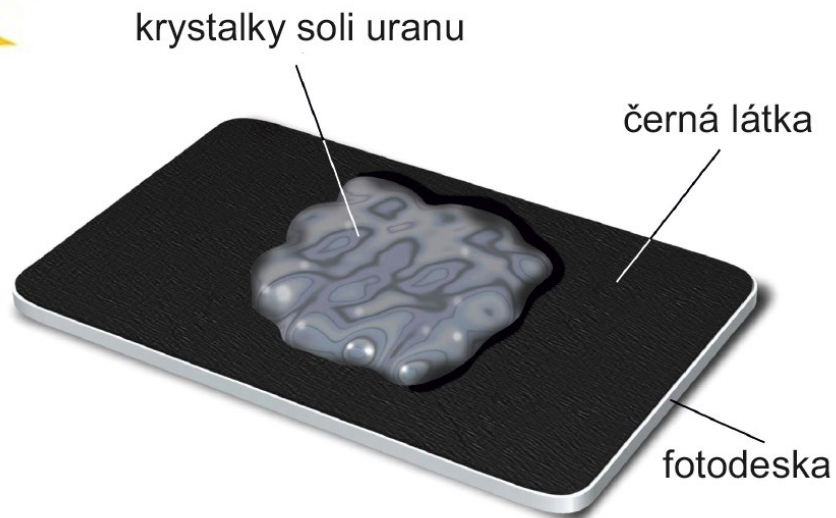
Nejprve si myslel, že nerosty mohou vydávat tajemné neviditelné záření jen tehdy, když viditelně světélkují.



fluorescence

paprsky-X

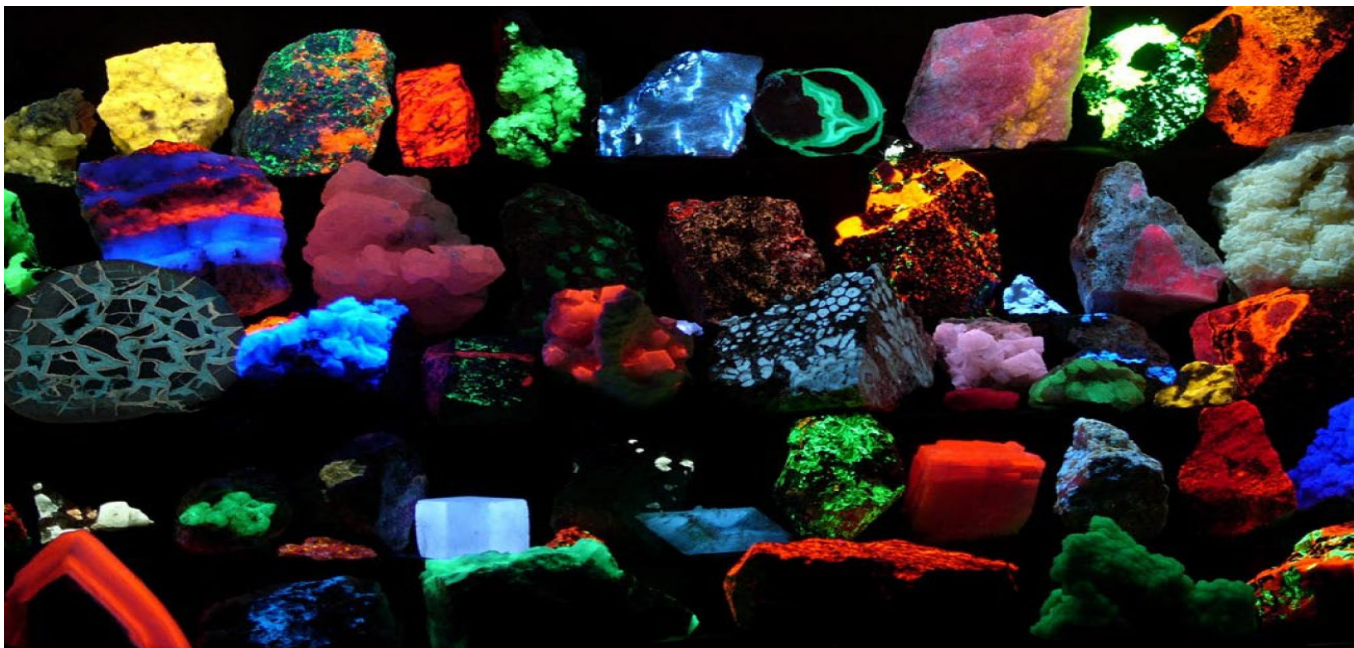




Epochální Becquerelův experiment

- Dal vybrané kameny z otcovy sbírky na slunce, a **když se dostatečně "nasvítily" a začaly samy pěkně zářit,**
- položil je na světlotěsně zabalené fotografické desky (alternativně: dal důkladně světlotěsně zabalení fotografické desky na několik hodin na slunce)
- a po čase je vyvolal



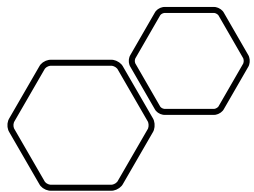


VÝSLEDEK BECQUERELOVA EXPERIMENTU:

Nestačil divit!!

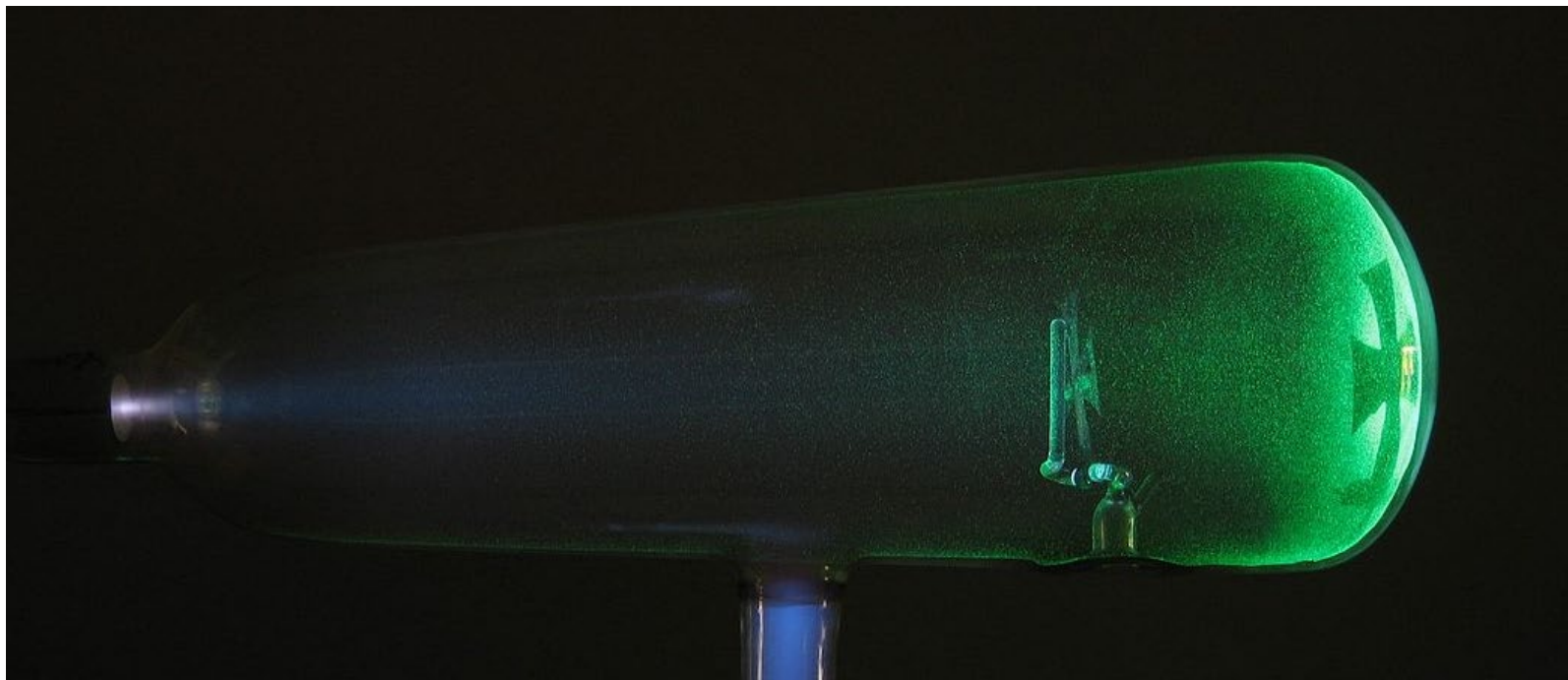


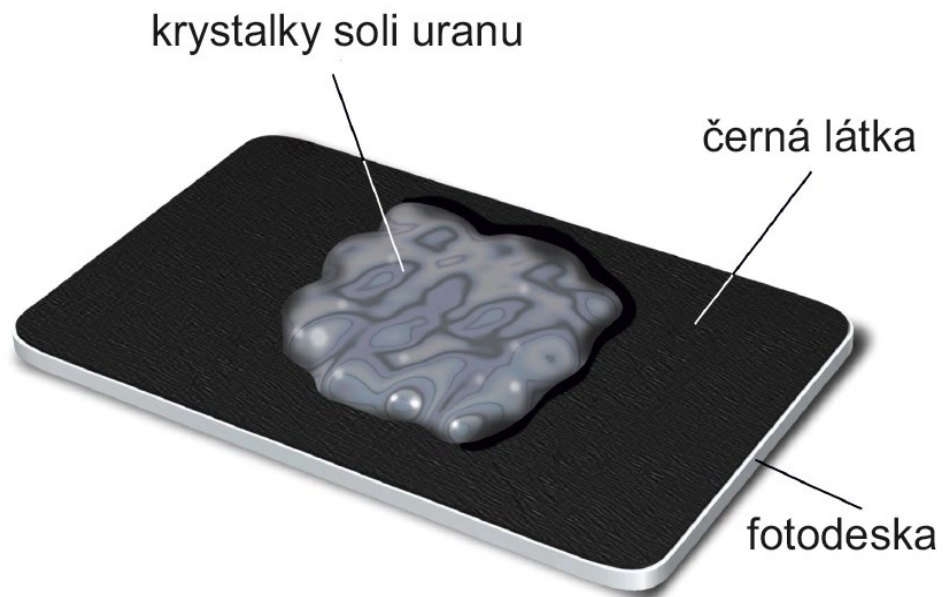
Většina desek
zůstala naprosto
nezměněná, **jen pod
několika vzorky
zčernaly**



EXPERIMENT II.

- Uranové soli a sklo pod UV-světlem světélkují podobně jako katodový konec trubice emitující paprsky X,
- to H. B. fascinovalo a dovedlo ho to k vykonání dalšího převratného experimentu...



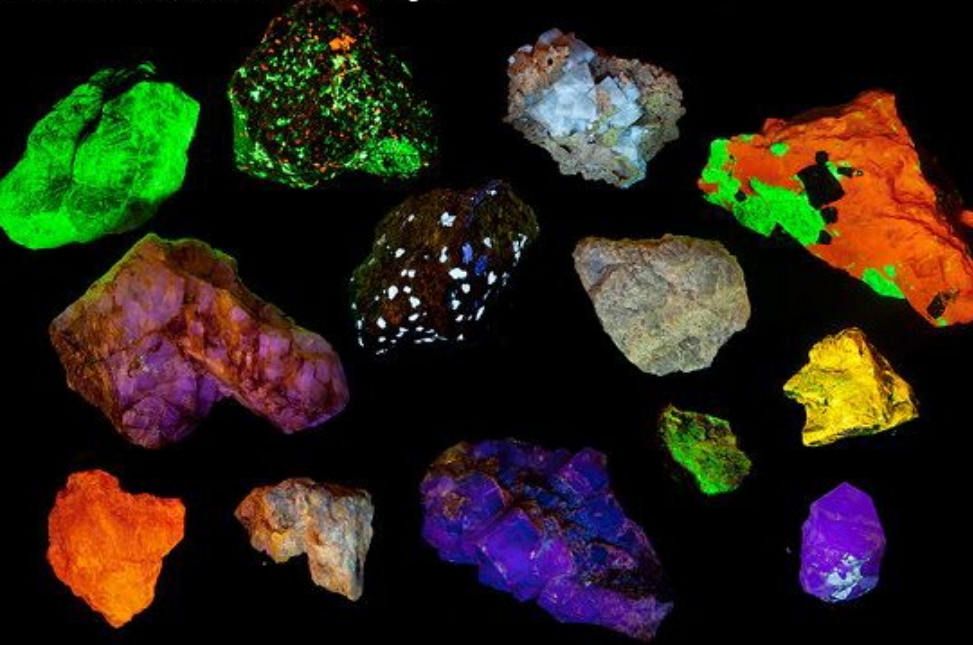


Becquerelův experiment. Soli uranu osvítily zakrytou fotografickou desku.



Ukázalo se, že jde
o fluoreskující
soli uranu!

irradiation under short wave ultraviolet light



irradiation daylight



Becquerelovo záření

- Becquerel se podivným zářením z nitra uranu dále intenzivně zabýval a zjistil, že:
 - **černání fotografických desek způsobují všechny sloučeniny obsahující uran, zatímco luminiscencí se vyznačují jen některé jeho soli**
 - **Jiné fosforeskující látky naopak neznámé záření nevyzařovaly**

Becquerelův experiment

- Rok po Poincarého přednášce (24. února 1896) Becquerel informoval Akademii o svém objevu:

"Uran vydává záření pronikající hmotou i bez vysokého napětí katodové trubice."

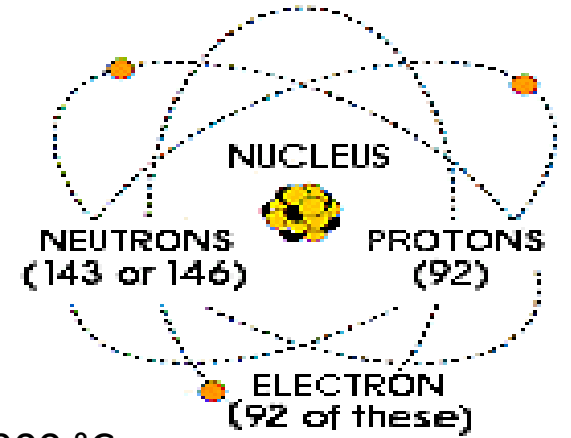
- To byl nepochybně významný poznatek, ale k objevu přirozené radioaktivity stále ještě nesměřoval.
- Becquerel se totiž stále ještě domníval, že záření souvisí s luminiscencí uranových solí
- vedly ho k tomu i chyby v jeho experimentech týkajících se vlastností objeveného záření (Martins, Roberto de Andrade. „BECQUEREL'S EXPERIMENTAL MISTAKES „ in Historical Essays on Radioactivity. Extrema: Quamcumque Editum, 2021.

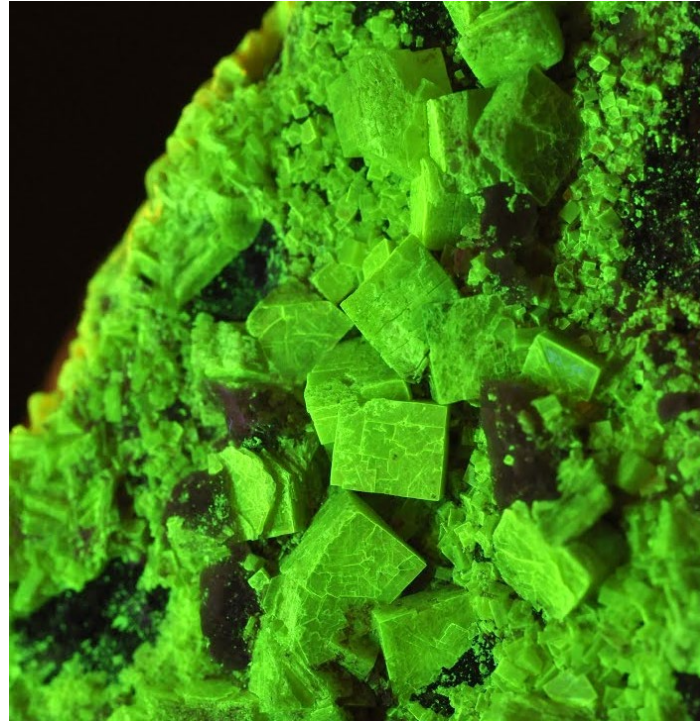
URAN –

Roku 1789 objevil německý chemik a lékárník **Martin Heinrich Klaproth** novou rudu. Vymyslel si pro ni název uran podle planety, objevené právě v tomto desetiletí.

- **nejtěžší přirozeně se vyskytující prvek na Zemi (Z=92)**
- **prvek s „nakumulovanou silou supernov“**
- **objev U změnil svět od základu**

Protonové číslo: 92, **Teplota tání:** 1 130 °C, **Teplota varu:** 3 900 °C,
Molární hmotnost: 238,03 g·mol⁻¹, **Hustota:** 19 050 kg·m⁻³





Izolace URANU

Eugène-Melchior Péligot [péligò] (1811–1890, Paříž)

francouzský chemik

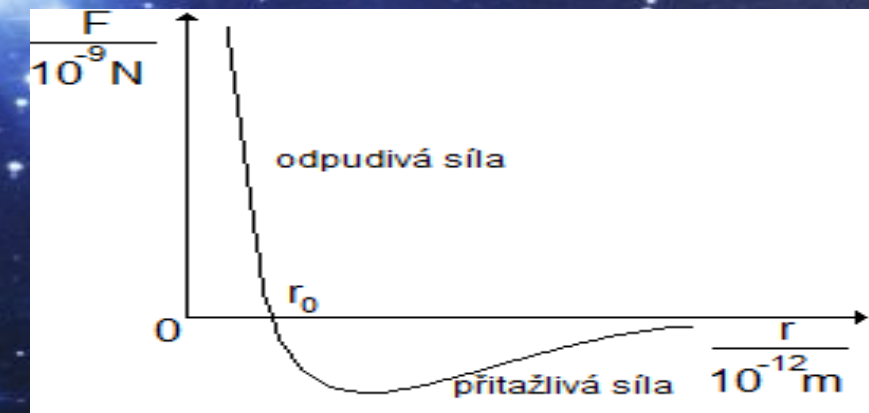
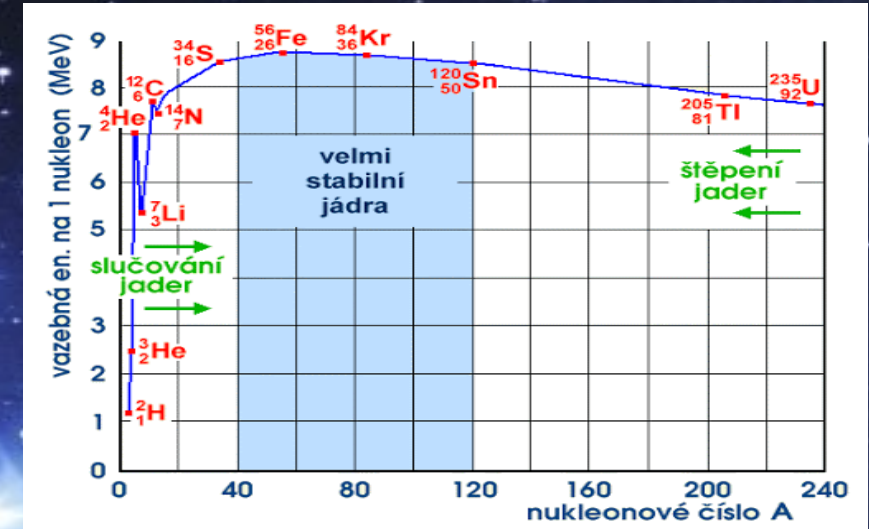
1841 jako první izoloval čistý kovový uran a použil termín „uranyl“ (pro označení žlutých solí uranu).

Uran začal být zajímavý pro barvení skla, stále však trpělivě čekal, až přijde jeho čas...

OBROVSKÁ ENERGIE URANU

→ Vznik lehkých a těžších prvků

- **H, He, (Li)** – prvotní nukleogeneze (celý vesmír do cca. 3 vteřin po velkém třesku) + jaderná fúze v prvních hvězdách
- **Li, Be, B**: specifický vznik v mezihvězdném prostoru (interakce produktů supernov s kosmickým zářením?)
- **Těžší prvky až po železo**: Obrovský tlak hmoty zažehl v nitrech hvězd termojadernou fúzi, jež po spotřebování H „spaluje“ hélium... následkem postupně vznikají těžší prvky až po železo
- **ANI JADERNÁ FÚZE OVŠEM NESTAČÍ K PRODUKCI PRVKŮ $>Fe$**

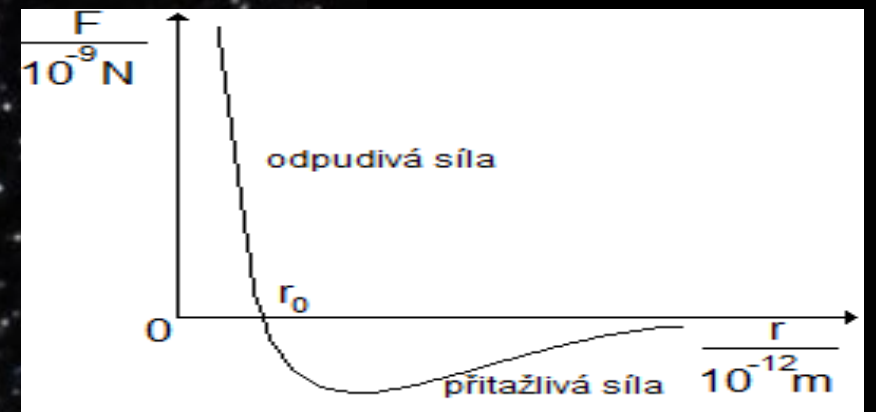


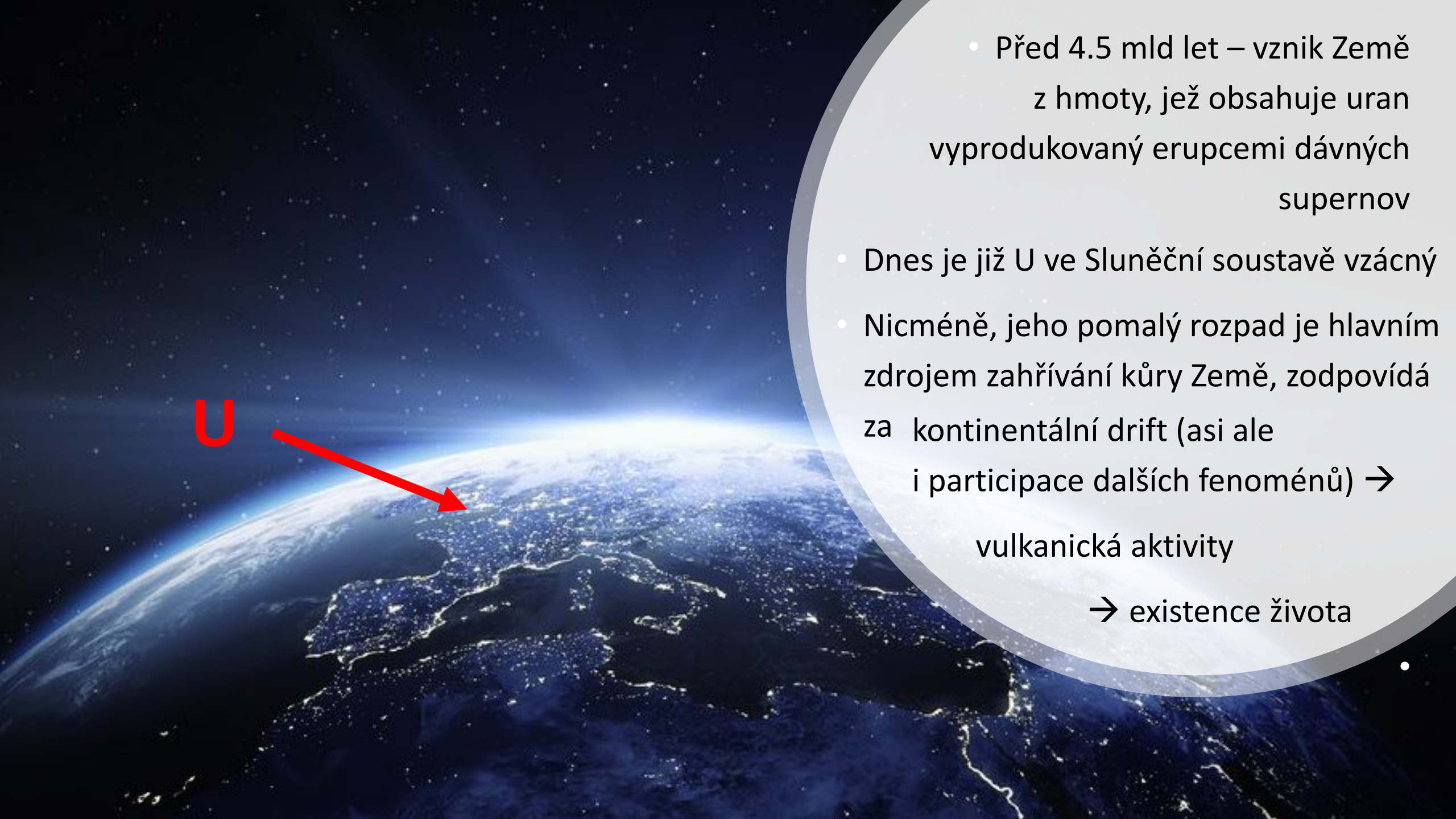
Vznik nejtěžších prvků → URAN



Prvky těžší než Fe:

- Exploze prvních supernov a/nebo srážky neutronových hvězd
- Nepředstavitelně obrovská energie umožňující vznik jader v endotermických reakcích
- Vznik těžších prvků než Fe, včetně U (asi -6.6 mld. let)





U



- Před 4.5 mld let – vznik Země z hmoty, jež obsahuje uran vyprodukovaný erupcemi dávných supernov
- Dnes je již U ve Sluneční soustavě vzácný
- Nicméně, jeho pomalý rozpad je hlavním zdrojem zahřívání kůry Země, zodpovídá za kontinentální drift (asi ale i participace dalších fenoménů) → vulkanická aktivity → existence života

Becquerelův experiment III. – A ZASE TA NÁHODA!

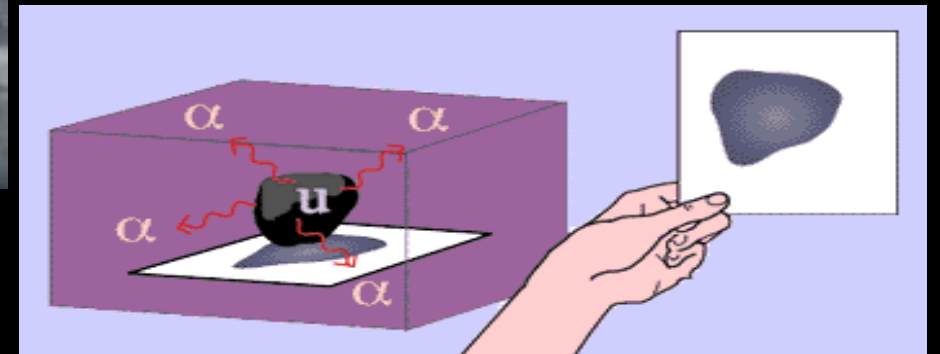
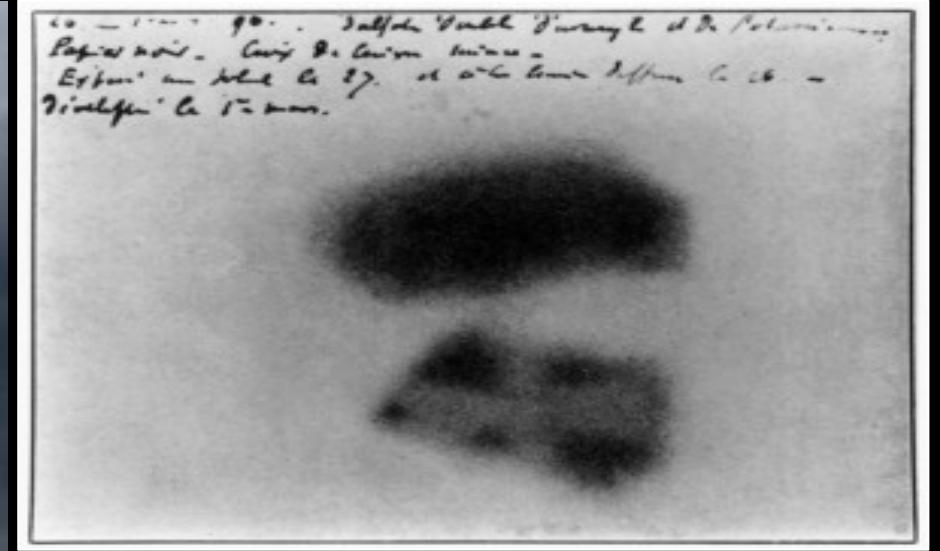
Když chtěl pokus opakovat,

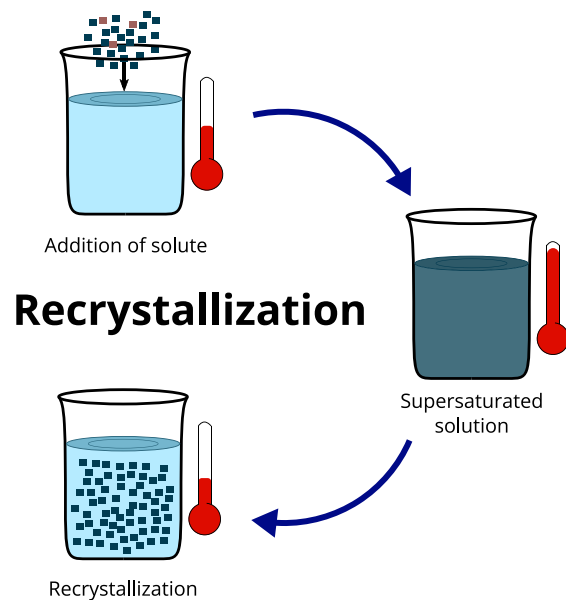
neočekávaně se zatáhlo

... rozhodl se proto experiment odložit
a neexponované desky i s uranem uklidil na několik
dní do šuplíku

Posléze desky ale přesto z nejasných pohnutek
vyvolal, a byl udiven ještě více: opět ztmavly!

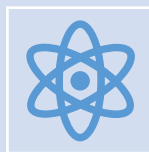
Bylo zřejmé, že sluncem vyvolané světélkování nebylo příčinou expozice desek.





Becquerelovo záření

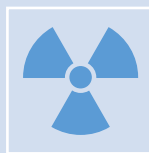
- Becquerel se podivným zářením z nitra uranu dál intenzivně zabýval a zjistil, že:



Luminescenční krystaly solí uranu přitom vydávaly neznámé záření i poté, co následkem rekrystalizace ztratily schopnost fosforeskovat

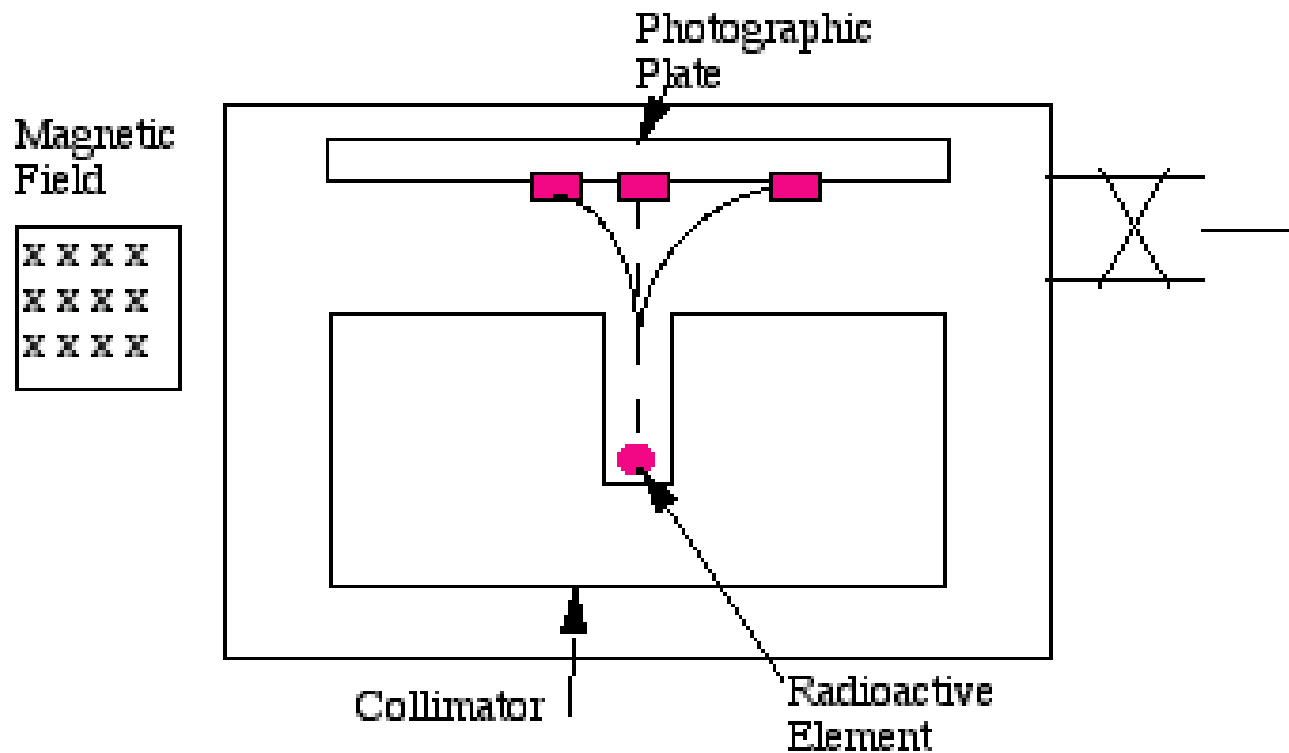


18. května 1896 konstatoval: "**Pronikavá zářivost je vlastností samotného uranu bez ohledu na jeho fyzikální či chemickou formu.**"



PRÁVĚ TAK OBJEVIL PŘIROZENOU RADIOAKTIVITU, nejprve nazývanou jako Becquerelovo záření

Becquerel zjistil některé další zajímavé charakteristiky záření vycházejícího z uranu:



- **ionizuje vzduch**
- **lze jej odklonit pomocí magnetického pole.**
- Tento poznatek zveřejnil v roce 1899. Vyplývalo z něj, že se neznámé záření (přinejmenším z určité části) skládá **z elektricky nabitých částic.**
- Na jeho podstatu však přijít nedokázal.

**RADIOAKTIVITA,
Marie a Pierre
Curieovi**



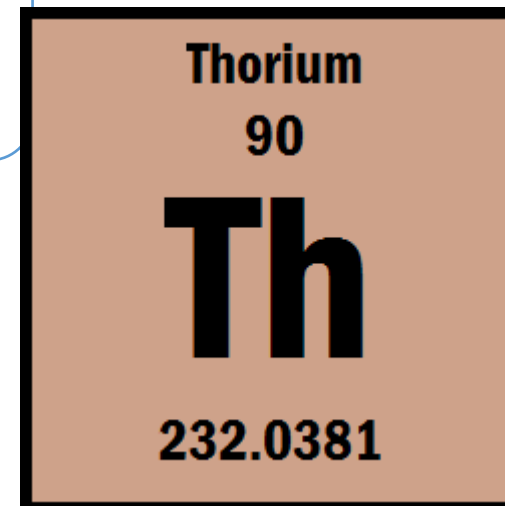
Pierre Curie (1859-1906)

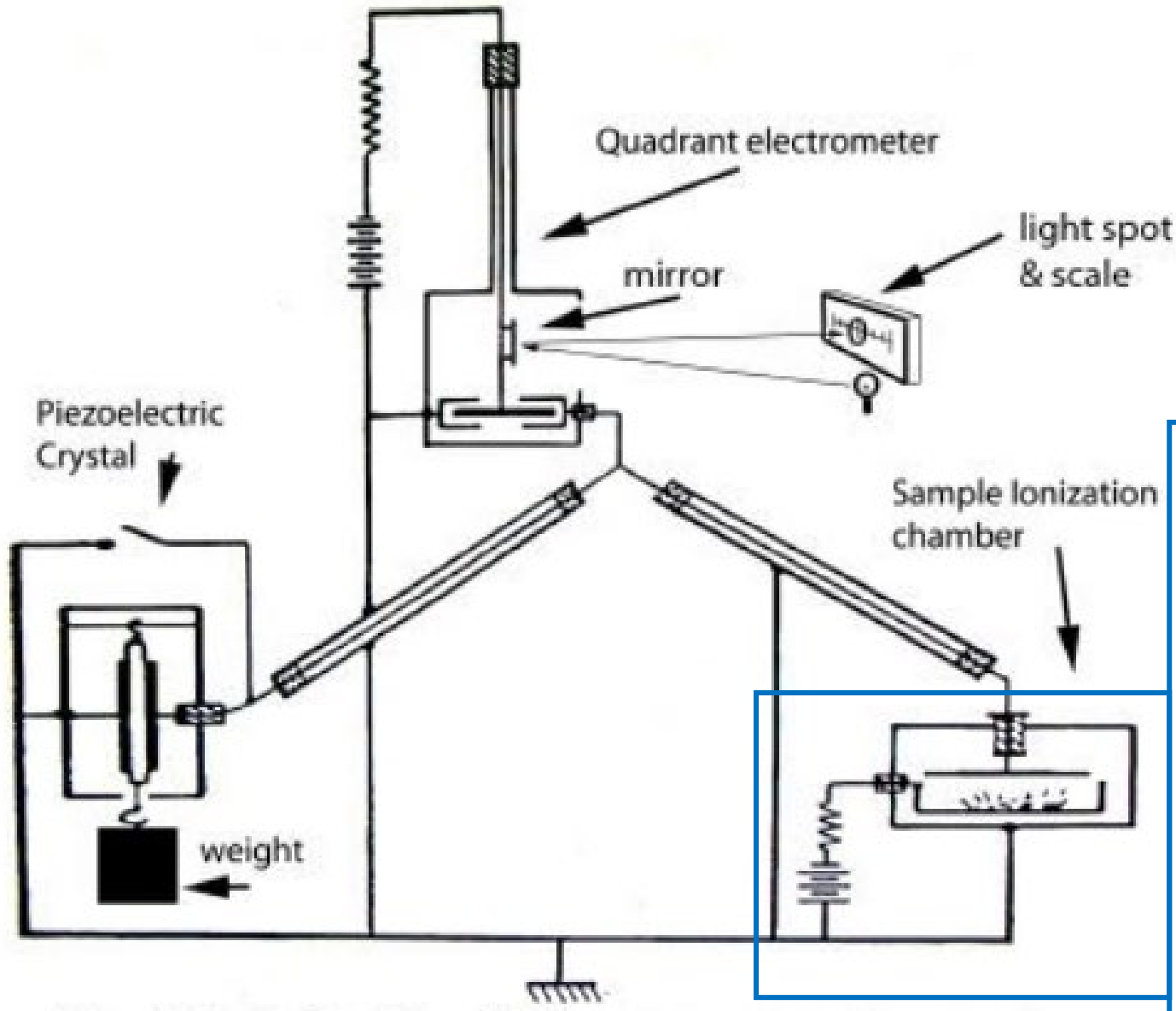
Marie Sklodowska-Curie (1867-1934)

Štafetu od H.B. převzali manželé **Marie a Pierre Curieovi** (byli to spolupracovníci H. Becquerela - Pierre Curie měl pracovnu jen několik kroků chodbou od laboratoře profesora Becquerela a sdílel ji se svou mladou manželkou Marií).

Marie Curie, tehdy ještě Sklodovská, byla polského původu, a jednou z Becquerelových studentek a právě se vdala za fyzika Pierra...

- Curieovi již v roce 1896 zjistili, že stejné záření jako uran vydávají také sloučeniny thoria - na světě tedy existuje přinejmenším ještě jeden „zářící“ prvek
- (prvenství objevu bylo nicméně přiřknuto Gerhardu Carlemu Schmidtovi)
- Marie a Pierre Curie začali svou experimentální práci systematickým studiem uranu a jeho sloučenin, přičemž měřili a tabelovali jejich ionizační proudy.

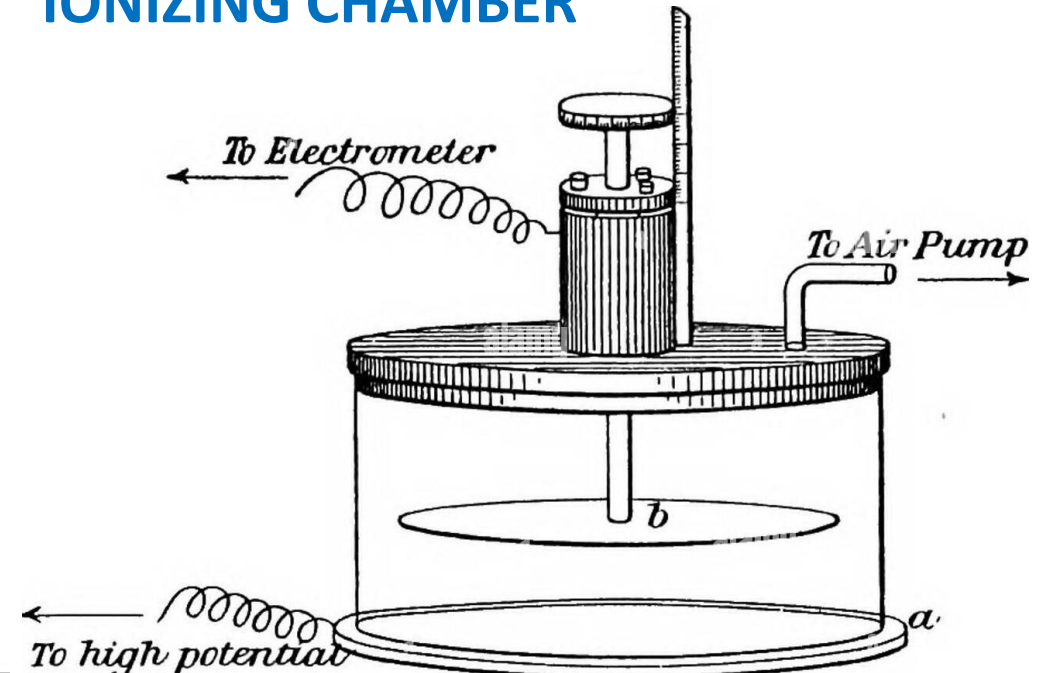




Electrometer apparatus

developed by Pierre Curie and his brother Jacques for the precise measurement of very weak currents (of the order of tenths of picoamperes) following their discovery of piezoelectricity in 1880.

IONIZING CHAMBER





Zjistili značné rozpětí od největších po nejmenší proudy...



...a že ionizační proudy jsou úměrné množství uranu přítomného ve vzorku (totéž platilo pro thorium).

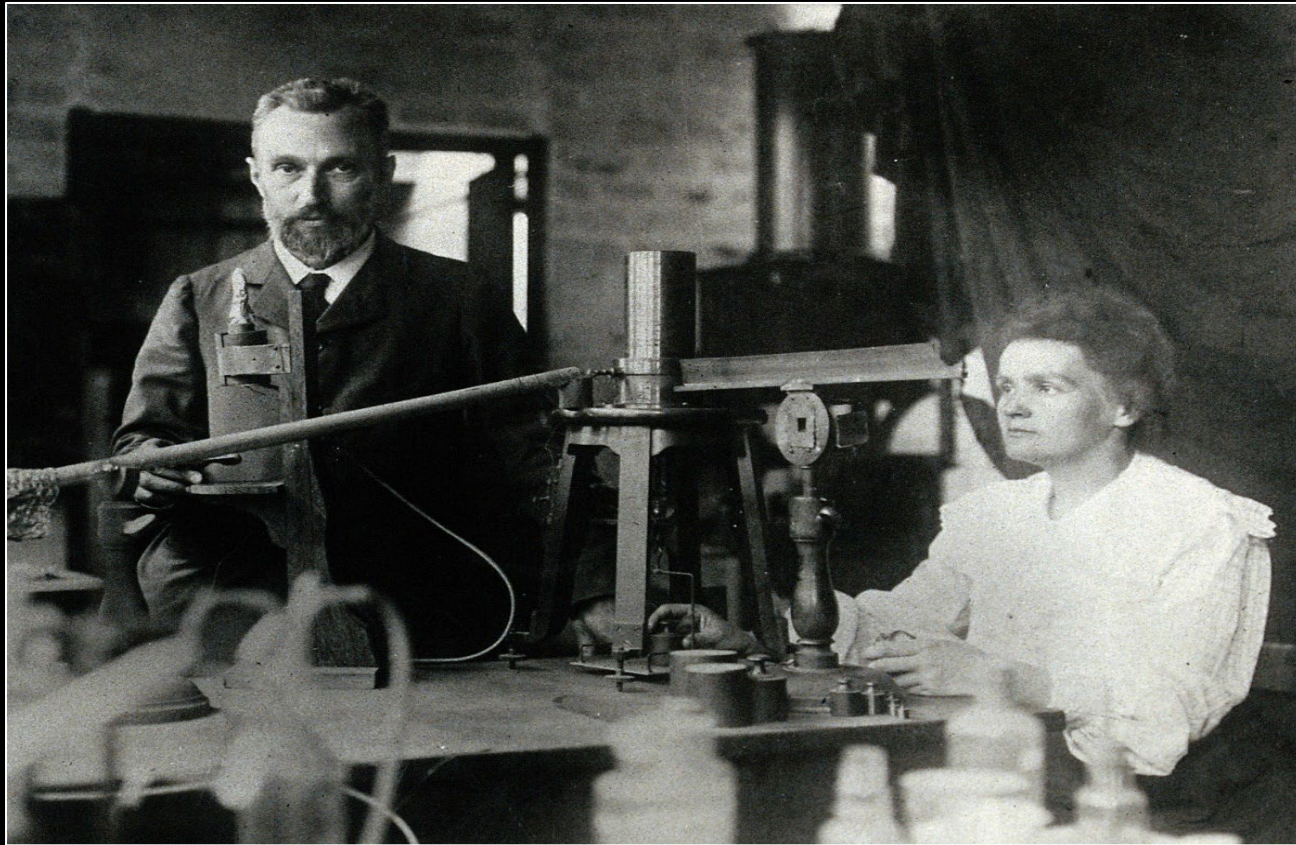


Z pohledu chemika to byl záhadný výsledek. Vlastnosti chemických sloučenin téhož prvku obecně závisí na tom, s čím je sloučenina složena, a na uspořádání atomů v molekule. Naměřená (radio)aktivita však byla nezávislá na složení nebo struktuře molekul.

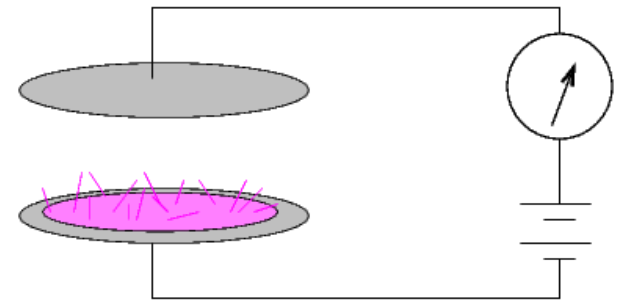
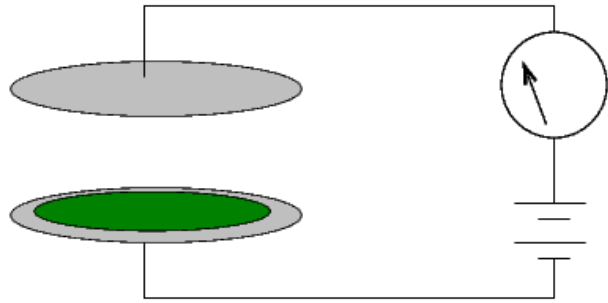
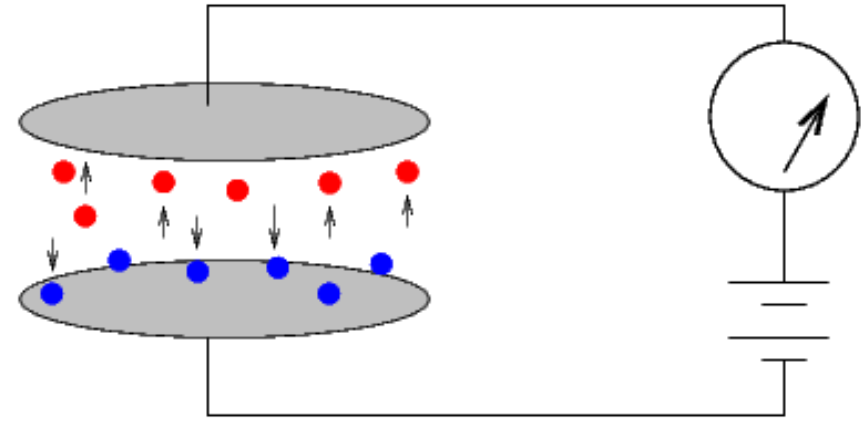
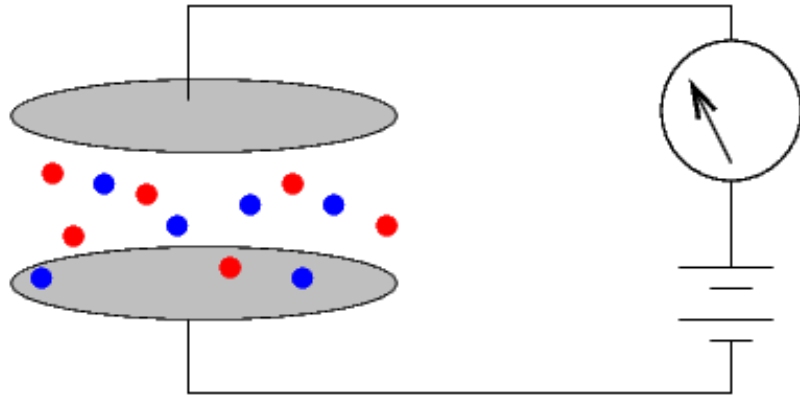


Curieová dospěla k závěru, že radioaktivita je vlastností atomu - nazvala ji *une propriété atomique*. Neměla na mysli atom uranu nebo thoria, ale atom jako zobecněnou hmotnou jednotku s předpokládaným vnitřkem, z něhož vycházejí radioaktivní emise. To je hluboká koncepce, kterou Marie Curie významně přispěla k rozvoji fyziky.

Radioaktivita, Marie a Pierre Curieovi



- Zobecnění Becquerelova objevu
- Tehdy Marie Curie pro tuto vlastnost (které se zpočátku říkalo **Becquerelovy paprsky**) **poprvé použila název radioaktivita**.
- Objevitel záření (H.B.) však o fyzikální zvěčnění svého jména nakonec přece jen nepřišel: byla po něm pojmenována **jednotka radioaktivity**
(1 Becquerel [1 Bq] vyjadřuje takovou aktivitu zdroje při níž se za 1 sec rozpadne 1 atom)



Material	picoamps
Uranium	24
Black oxide of uranium	27
Hydrated uranic acid	6
Pitchblende from Johanngeorgenstadt	83
Pitchblende from Joachimstahl and from Pzibran	67
Natural chacolite	52
Artificial chacolite	(see below)

A partial copy of the table in *Rayons Emis par les Composes de L'Uranium et du Thorium*

- M a P Curie brzy zjistili, že s horninami a radioaktivitou něco neseďí:

- Radioaktivita nerostů uranitu a chalkolitu byla mnohem vyšší, než by odpovídalo zastoupení uranu a thoria ve vzorcích



>>



???

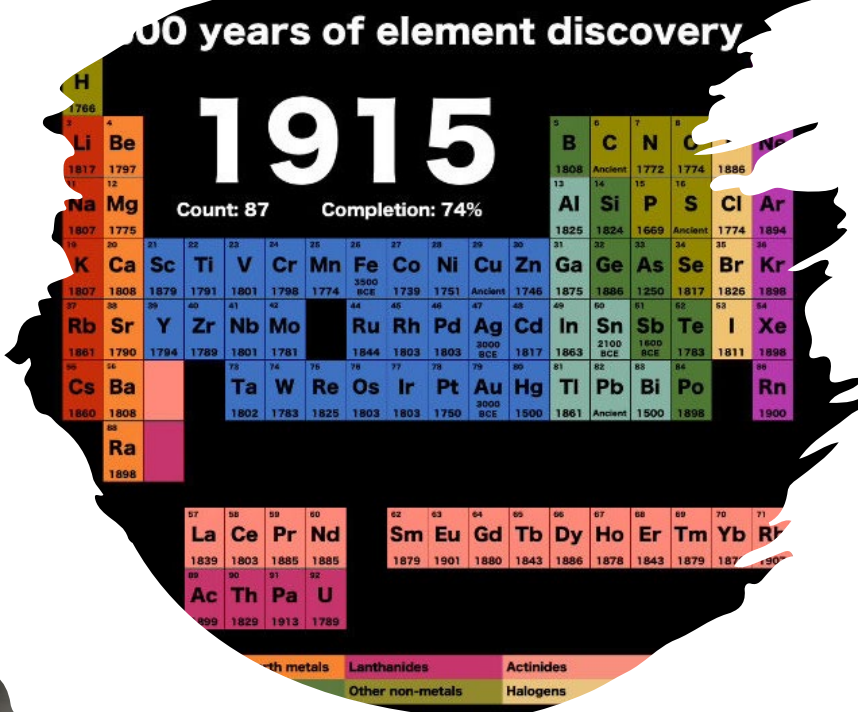


SMOLINEC



ČISTÝ URAN / URANOVÉ SOLI

- Jediným logickým vysvětlením bylo, že rudy obsahují **další dosud neznámé prvky, jejichž radioaktivita je ještě výrazně vyšší.**



Marie Curie's next brilliant idea

- According to the periodic table, new elements have been predicted but have not yet been isolated
- If there was a large content of them, they would have already been isolated
- It means, the unknown radioactive elements in pitchblende must be very small in number, but they must be incredibly radioactive!

PECHBLENDE (SMOLINEC Z JÁCHYMOVA)



Jáchymov, dnešní ČR, kdysi dávno...



Quelle: Deutsche Fotothek

Stříbrné doly

Na začátku byly stříbrné mince, které byly raženy v Jáchymově v Krušných horách. Německý název pro Jáchymov byl **Joachimstal** a ta mince, která se tam razila, se nazývala **joachimstaler**. A protože to bylo dlouhé slovo, bylo zkracováno na **taler**. Z toho se pak vyvinulo české **tolar**. To se šířilo do různých zemí Evropy, protože **tyto mince měly dobrý zvuk, a dostaly se i do Anglie, kde byly přijaty v podobě dollar**. Když v 18. století hledaly Spojené státy získaly nezávislost, hledaly vhodný název pro svoje oficiální platidlo, protože se chtěly odlišit od Francie, Anglie atd., a sáhly po tomto pojmenování dollar, které od 16. století v Anglii žilo, ale nebylo prakticky využíváno. **Takže v původu amerického dolaru je český tolar, který vznikl z jáchymovské mince na počátku 16. století.**" (etymolog z Ústavu českého jazyka a komunikace Filosofické fakulty UK PhDr. Jiří Rejsek).



PECHBLENDE (SMOLINEC)

Po roce **1515** se rozvíjí těžba stříbra v Jáchymově
V dolech se těžily nejdříve stříbrné rudy, později rudy kobaltu
a arsenu

Během těžby někdy horníci narazili na žílu podivné horniny,
jejíž nalezení znamenalo pro horníky „smůlu“

Nazvali ho proto **PECHBLENDE** (pech = smůla, blende = nekov)
z toho **SMOLINEC** (nosící smůlu), později nazýván **URANIT**



PROČ “SMOLINEC” ?



„smolné blejno“
(typická jáchymovská uranová ruda –
ledvinitý smolnec v žíle s růžovým
dolomitem a tmavě fialovým fluoritem)

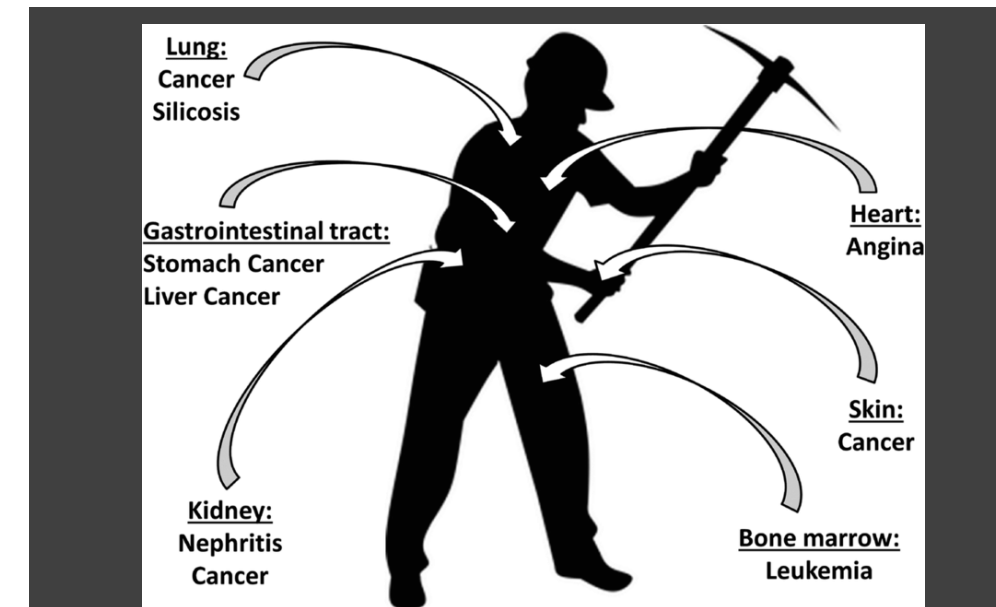
1.



2.



3.





„smolné blejno“
(typická jáchymovská uranová ruda –
ledvinitý smolinec v žíle s růžovým
dolomitem a tmavě fialovým fluoritem)

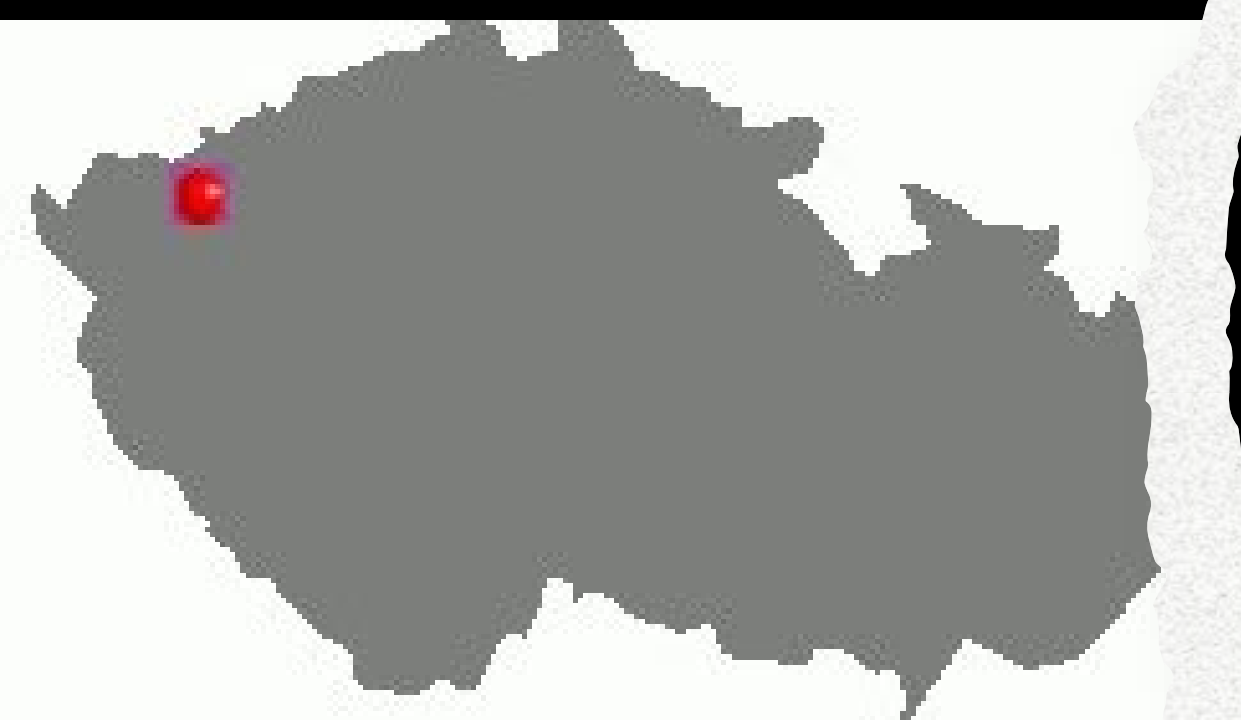
PROČ „SMOLINEC“ ?

- jednak **vypadá jako pryskyřice (smůla)**,
- pak ho mohli takto označit horníci ve stříbrných dolech, protože se vyskytuje tam, kde se nevyskytuje stříbro, a mohl jim tak přinášet **smůlu v těžbě**.
- Jako třetí původ smolného označení se nabízí možnost, že si horníci spojili jeho nálezy se **zvýšenou úmrtností kolegů**, i když se v té době ještě nevědělo o rakovině plic a její spojitosti s touto horninou (a jejími štěpnými produkty).

PECHBLENDE (SMOLINEC)

Smolinec proto nejprve končil na haldách kolem dolů jakožto naprosto bezcenný materiál...





Marie a Pierre Curieovi a smolince z Jáchymova

- Manželé Curieovi pak prováděli pečlivá měření v různých horninách (uranitu a chalkolitu).
- **Hlavní roli zde hrál SMOLINEC Z JÁCHYMOVA**
- Bádání bylo nesmírně náročné na množství výchozího materiálu
- M.C. proto požádala **vídeňského ministra orby**, hraběte Buquoye, o zaslání vzorku smolince z Jáchymova. Ten jí nechal poslat **několik tun odpadu z továrny na uranové barvy v Jáchymově.**
- (nakonec M-C. získala **0.1 g Po z několika tun smolince**)



počátek větrání
smolince



směs síranů a uhličitánů
(uranopilit, zippeit, zellerit)



uranové karbonáty
(světle žlutý zellerit s liebigitem)



uranové sírany
(zelený johannit, žlutý zippeit)



tmavě zelený andersonit a světle
žlutý schröckingerit (karbonáty)



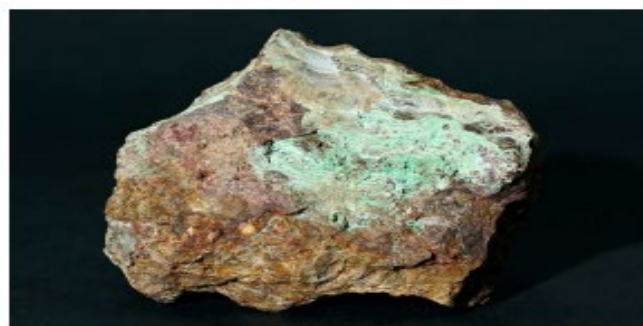
uranophan,
(silikát uranu)



metatorbernit
(fosforečnan uranu)



žlutý autunit
(fosforečnan uranu)



metazeunerit
(arzeničnan uranu)

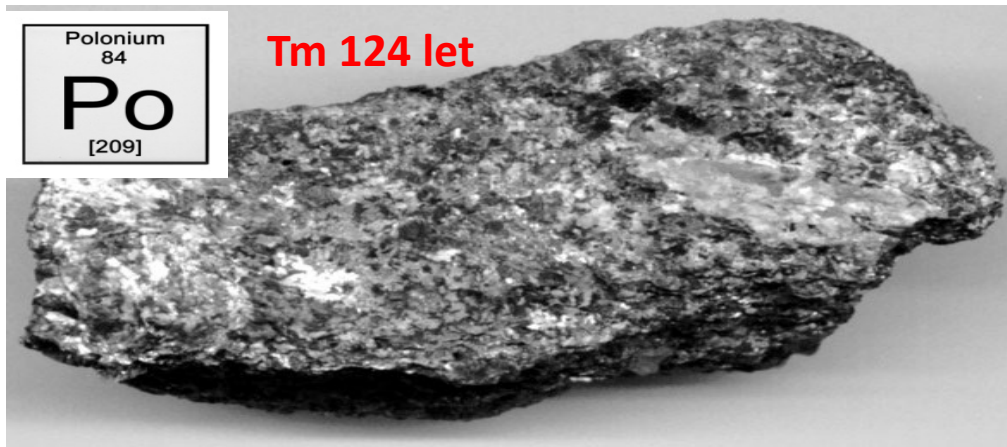
zvětráváním jáchymovského smolince vzniká pestrá škála nápadně barevných druhotných uranových minerálů, okrů a slíd, kterých si mj. povšimli i skláři

(Jáchymov, 2010)

Marie a Pierre Curieovi – objev nových radioaktivních prvků, polonia a radia

Nejprve identifikovali **polonium**, které bylo **150x radioaktivnější** než uran.

Později ještě objevili **radium**, jehož aktivita byla **dokonce 900x** vyšší než u uranu. Proto ho také pojmenovali „radium“ = zářící



POLONIUM (Po)

stříbřitě bílý, silně radioaktivní kov

Existuje **42 izotopů** polonia s atomovou hmotností 194 až 218 (izotopy = liší se počtem neutronů)



Malé množství radia vyelektrolyzované na tenký měděný plíšek a překryté polyurethanem k zabránění reakce se vzduchem (stříbřitý kov alkalických zemin)

34 známých radioaktivních izotopů, s nukleonovými čísly 201 až 234

Maria Curie-Skłodowska

- Během I. sv. války prosadila zřízení **polních rentgenologických stanic**, které z pozice vedoucího vojenské lékařské buňky organizovala a řídila. Tyto stanice vyšetřily **více než 3.000.000 milionů případů zranění** vojáků.
- Po válce cestovala po světě a **iniciovala zakládání Ústavů pro léčbu rakoviny**. V této době patří mezi její žáky **František Běhounek** – zakladatel československé atomové fyziky. V roce **1925** Marie Curie-Skłodovská **navštěvuje město, které stálo na počátku její vědecké kariéry – Jáchymov**. Zde sfárala do dolu Svornost a navštívila i lázně. Zde prokázala neúčinnost pitných kúr a naopak vhodnost koupelí v radiové vodě.
- Zemřela v nemocnici Sallanches v Savoy u Paříže (1934, 67 let) na **aplastickou anémii**, kterou si pravděpodobně **přivodila absolutní absencí ochranných opatření při práci s radioaktivními látkami**.
- Pro zásluhy na poli vědy byly její ostatky v roce 1995 slavnostně přeneseny do pařížského Panteonu.



Marie Curie driving the Renault car that she converted into a radiological unit during the first World War, 1917



Prvenství Marie Curie-Skłodowské, 7. 11. 1867 - 4. 7. 1934

- Z Polska odešla do Francie, kde v roce 1891 složila **jako první žena v historii přijímací zkoušky na fakultu fyziky a chemie pařížské Sorbonny.**
- Becquerel na doporučení Pierra nabídl Marii doktorandské studium ve své laboratoři.
- V roce 1903 **jako první žena na světě obdržela i titul doktora fyziky na Sorbonně.**
- Díky své práci byla **jako první žena na světě dvakrát oceněna Nobelovu cenou, navíc ve dvou oborech:**
 - Nejprve v roce 1903 za fyziku (společně s Becquerelem) za zkoumání radiačních jevů
 - Poté v roce 1911 za chemii za objev a izolaci polonia a radia (společně s Pierrem)
- jmenována na místo svého zesnulého manžela a stala se **tak historicky první profesorkou na Sorbonně.**
- **V roce 1925 navštívila Jáchymov** a některé její připomínky k lázeňským procedurám se používají dodnes. Dnes její jméno nese lázeňský hotel Curie.

BOHUSLAV BRAUNER

Český chemik

- **Spektra smolince → čáry patřící neznámým prvkům**
- Žádá vídeňské ministerstvo školství o zakoupení uranové hlušiny z jáchymovských dolů, ale zamítnuto
- O cca. 25 let později, ta samá žádost, avšak od manželů Curieových a přes jiné ministerstvo je schválena...

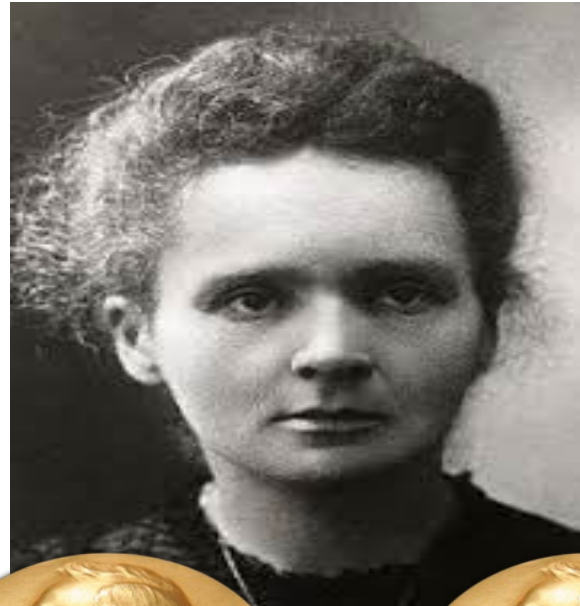


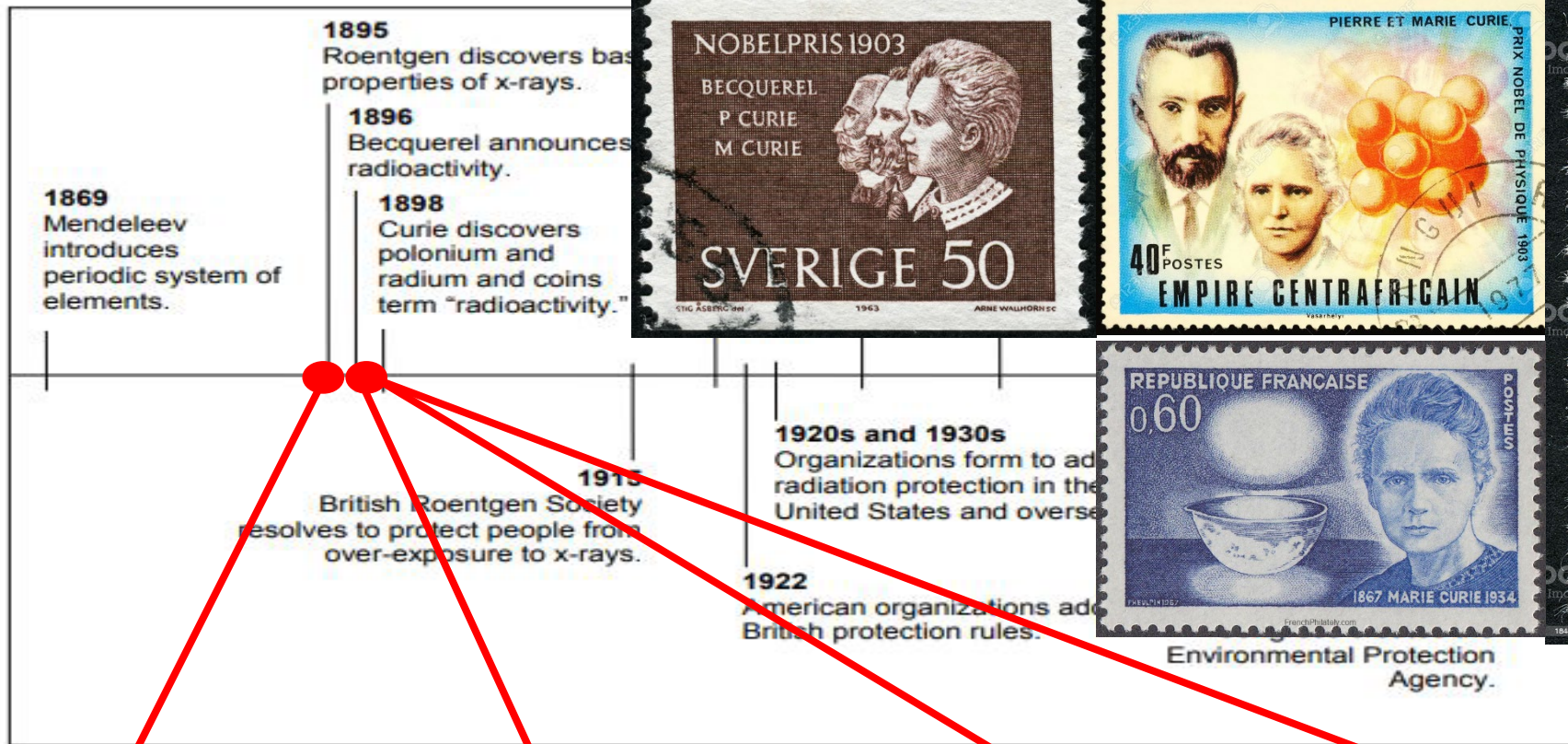
Fenomenální Marie Curie-Sklodowska



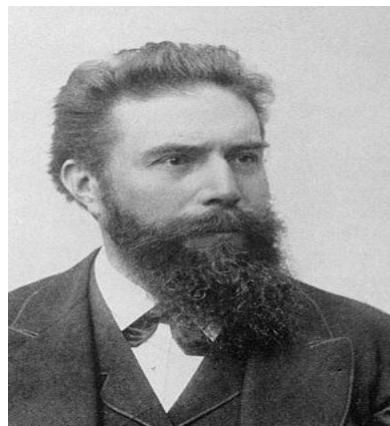
1911: druhá Nobelova cena, nyní za chemii, za izolaci radia a objev polonia, plus další objevy ohledně radioaktivity

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





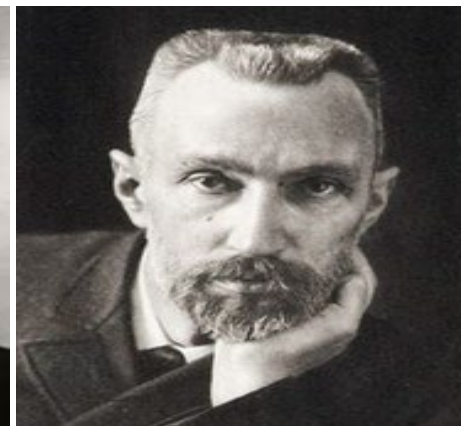
Marie Curie
První žena
oceněná
Nobelovou cenou
Původně měl být
ale oceněn jen
Becquerel a Pierre
Curie!!



1901 vůbec první NB za fyziku



1903 Nobelova cena za fyziku; 1911 NC za chemii



- Objev paprsků X vedl až k jisté posedlosti
- Zdravotní rizika tehdy ještě neznámá
 - aplikace paprsků X a „radioaktivity“ všude, kde se dalo“

