

# Radiační biofyzika ~ radiobiologie

Přednáška 1

2023





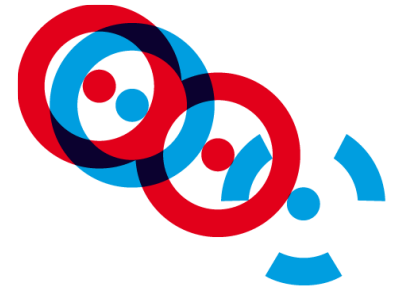
**Kontakt:**

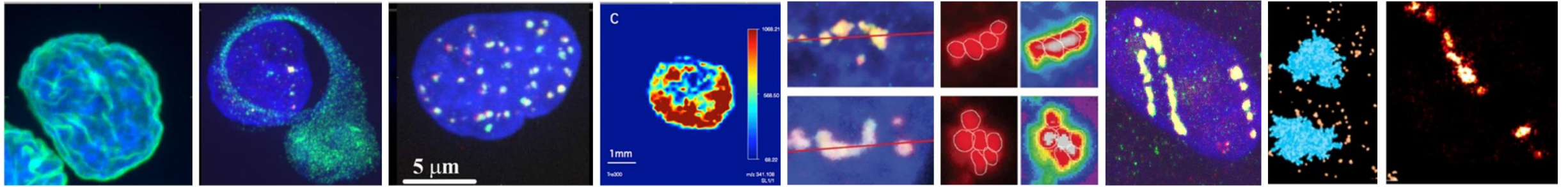
**BIOFYZIKÁLNÍ ÚSTAV  
AVČR**

Dpt. buněčné biologie  
a radiobiologie

Doc. RNDr. Martin Falk, Ph.D.

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



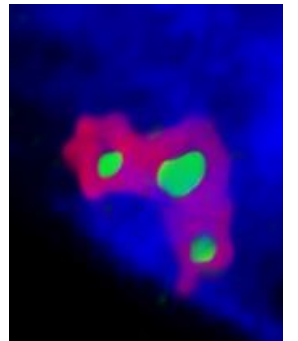


# Radiační biofyzika ~ radiobiologie

a) studium interakcí ionizujícího záření (IZ)

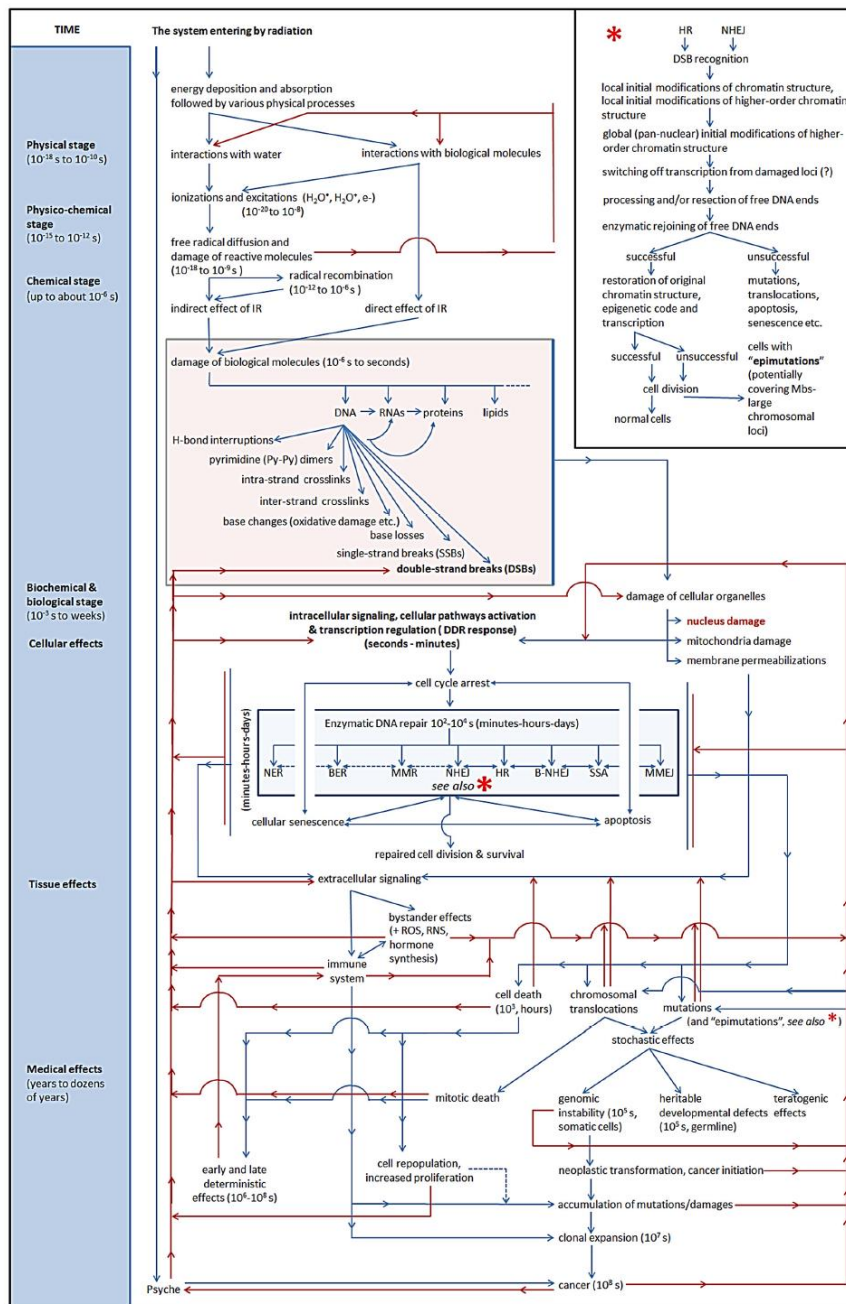
s biologickými systémy

b) 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

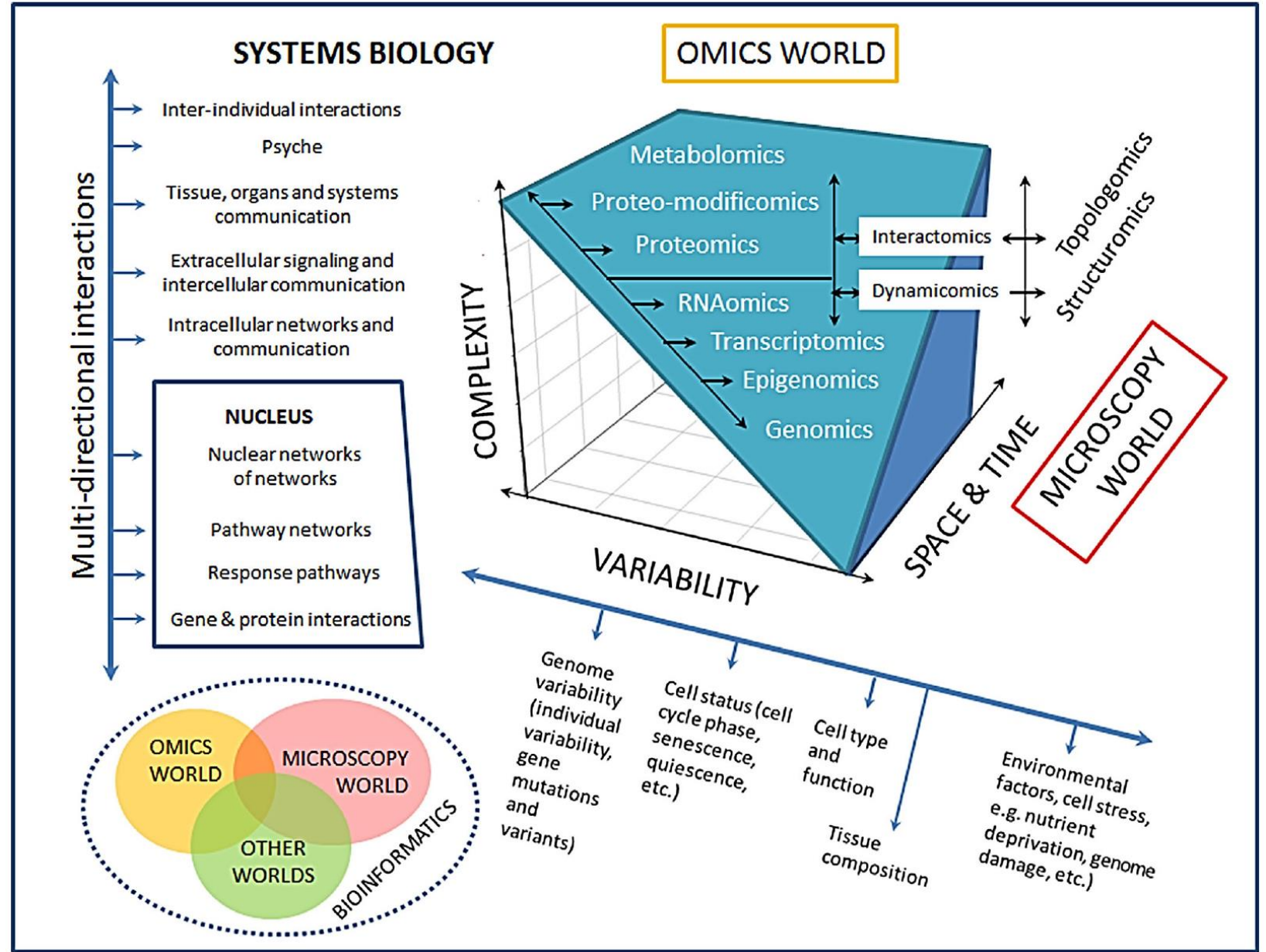
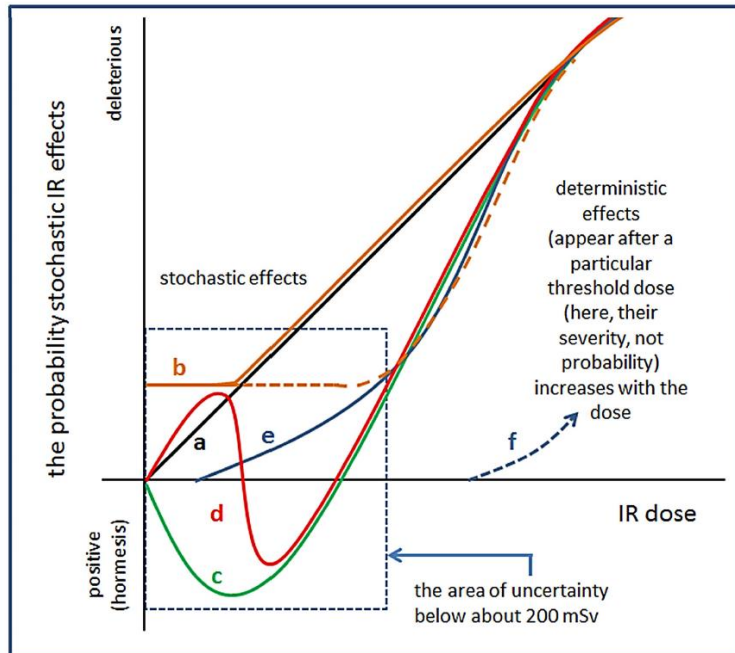
Biologie

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

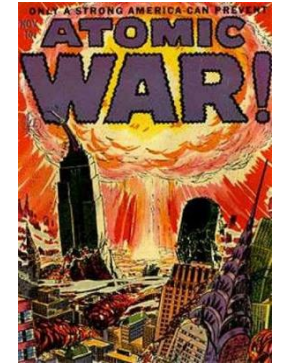


# Etapy a cíle radiační biofyziky/RB

## I. etapa

## II. etapa

## III. etapa



A lack of appropriate research methods

Single-molecule localization microscopy (SMLM)

Energetics

Manned long-term space flights

Chernobyl

Radiotherapy

PFGE

CRISPR/Cas9

The Cold War

Chromosomal aberrations

Ion-Beam Cancer Therapy

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

Project Manhattan, Hiroshima + Nagasaki

Micronuclei

The Cold War II ??

Brutal sequencing

Cell survival

Fukushima disaster

Chips-on-chips

Flow cytometry

"Radium Girls"

Blood cell analyses

Terrorism

RNA expression chips

LS-MS, DESI, DART

General enthusiasm

Clinical symptoms

Particle accelerators

Radiation = cure for everything

Computer power

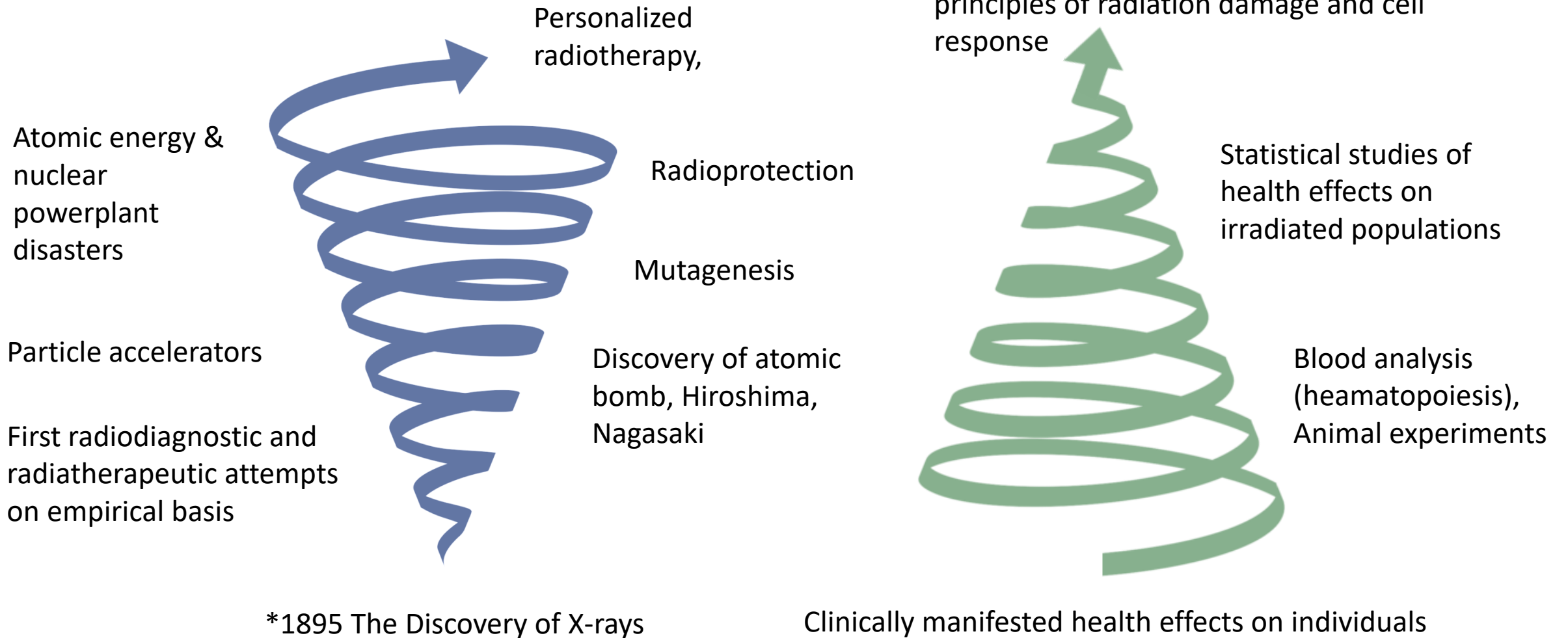
\*1895 X-Rays, radioactivity

A tremendous progress in technology and method development



THESE DAYS: RENAISSANCE OF RADIOBIOLOGY

# HISTORY OF RADIATION BIOPHYSICS



# Nové výzvy + nové metody = RENESANCE

**IZ: neskutečně  
užitečné i velmi  
nebezpečné, přičemž  
ho nemůžeme vnímat  
našimi smysly**

**– málokterý fenomén  
proto ve společnosti  
vyvolává tak  
rozporuplné emoce,  
jako právě IZ**



**IRAQ SAYS TERRORISTS SEIZED NUCLEAR  
MATERIALS, COULD USE THEM FOR BOMB**



## Radiobiologie excelující i stále tajemná

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 spojené se zářením, které se mezitím dočkalo aplikací v nejrůznějších oblastech lidského činnosti, včetně medicíny.

Ačkoli by se však mohlo zdát, že radiobiologie má zlatý věk již za sebou, v posledních letech zažívá svou renesanci. Znovu se před námi otevírají některé stěžejní otázky doprovozázející 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 otázku 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 převedení do klinické praxe a radiční 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, nezřídka však málo opodstatněných. Zejména v některých zubních ordinacích je „rentgen“ prováděn již téměř automaticky, s nadšátkou 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 naopak značně stupňuje radiofobie, vedoucí např. až k iracionálnímu a téměř sebedestruktivnímu tlaku na uzavření všech jaderných elektráren ve státech EU (Německo budíž tragickým příkladem). Zmíníme-li ještě aktuálnost „radiobiologie“ a potažmo radiční ochrany v kontextu plánování prvního pilotovaného letu na Mars a bohužel také stupňujícího se rizika znečištění 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 důležitá. 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 *Časopisu lékařů českých*.

Připravili jsme celkem 7 článků, jež se v logické posloupnosti dotýkají vybraných horčkových radiomedicínských 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 clové oblasti v průběhu ozařování. Nové naděje přináší také využití protonového záření a v několika centech ve světě rovněž iontových svazků. Díky těmto vymoženostem dnes dokážeme likvidovat nebo alespoň kontrolovat i nádory v kritických oblastech lidského těla, kde by obdobný zákrok v minulosti byl nepřestavitelný. 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 modalit, 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. Zájmem o získání širšího povědomí o „nových trendech“ v radiomedicině 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 radičního 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 polaz musíme bohužel brát rovněž „ekonomickou“ toxicitu moderních radioterapeutických technologií. Leckterého čtenáře tak po vypití námi namíchaného koktejlu patrně dosti rozbolí hlava, poté co se absorbované informace plně rozvinou v protichůdné pochybnosti, naděje a zároveň jisté deprese.

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

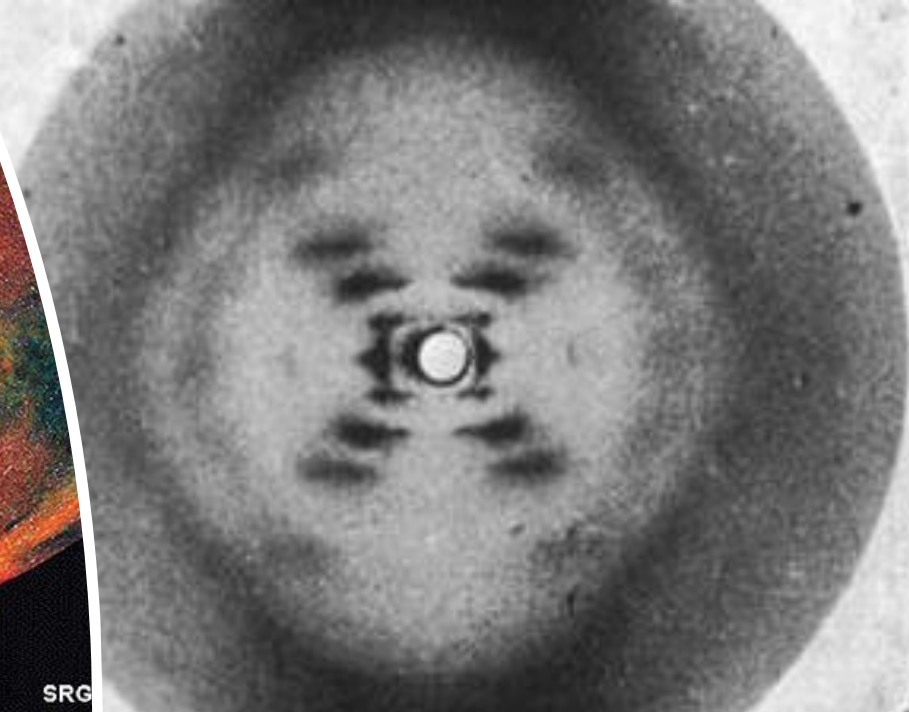
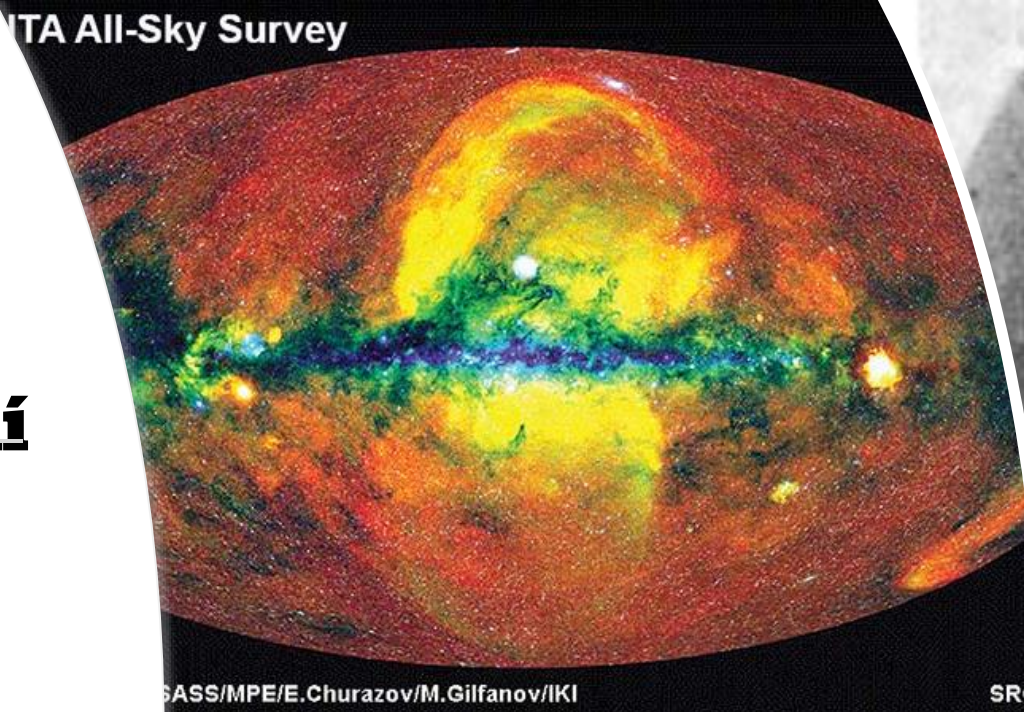
**RNDr. Martin Falk, Ph.D.**

vědecký sekretář Společnosti pro radiobiologii  
a krizové plánování ČLS JEP

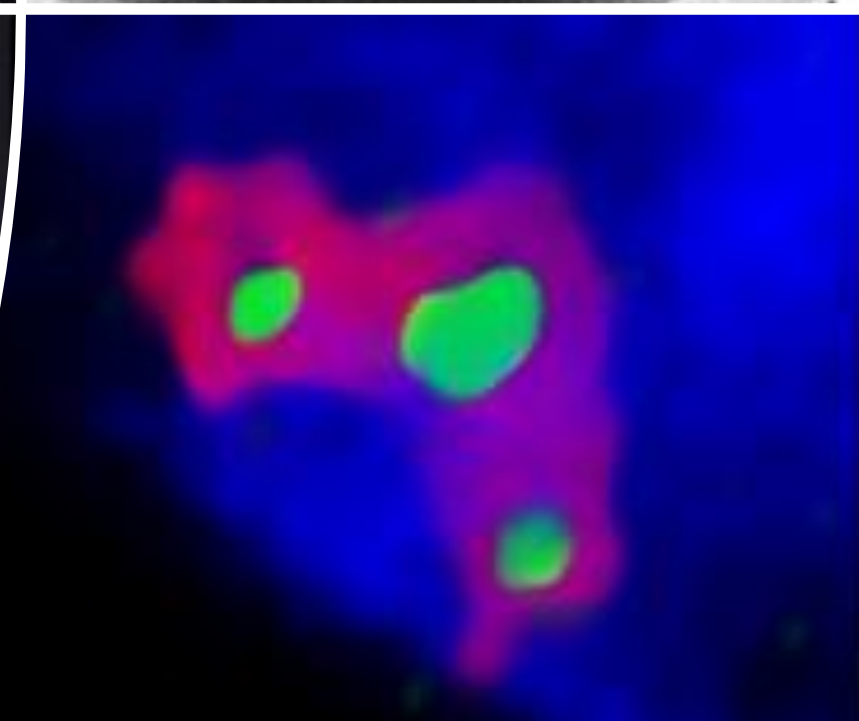
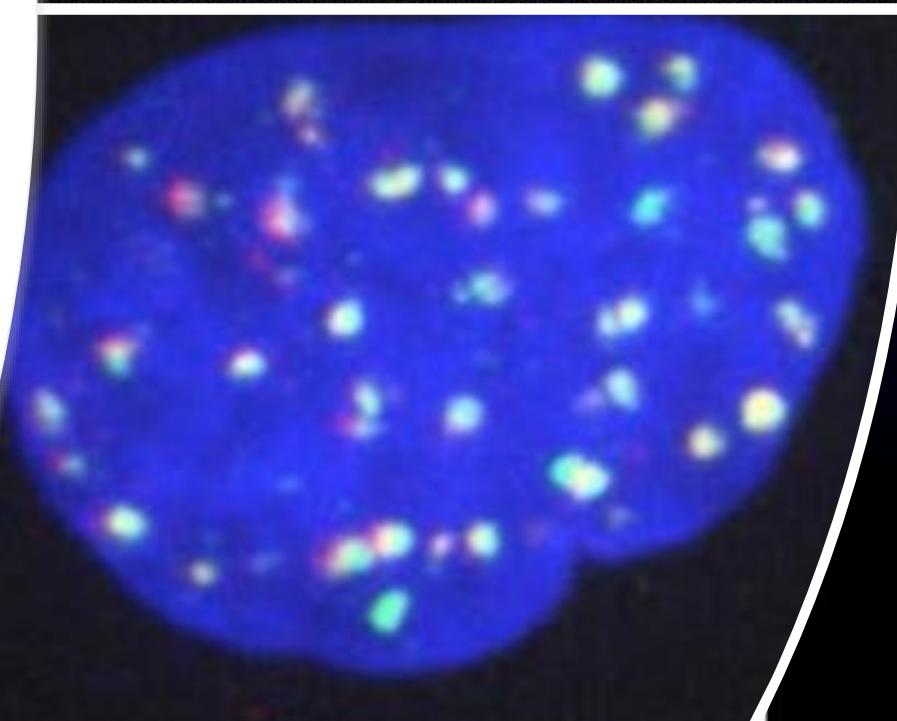


# Jen málo fenoménů vyvolává tak silné a protichůdné emoce jako IZ

**Ionizující  
záření jako  
experimentální  
nástroj**



**Od vesmírných  
dálav až do nitra  
buněčného  
nanokosmu**



# Čím se budeme zabývat?

Základní charakteristikou IZ  
a jeho interakcemi s hmotou

Vlivem IZ na biologické systémy,  
vztahem mezi fyzikálními parametry  
IZ a jeho biologickými účinky

Využitím IZ  
a Radiační ochranou

NUTNO ZABROUSIT DO MNOHA  
OBORŮ  
nejedná se však o přednášku z:

**X**

částicové / jaderné / kvantové fyziky



# Orientační syllabus – 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

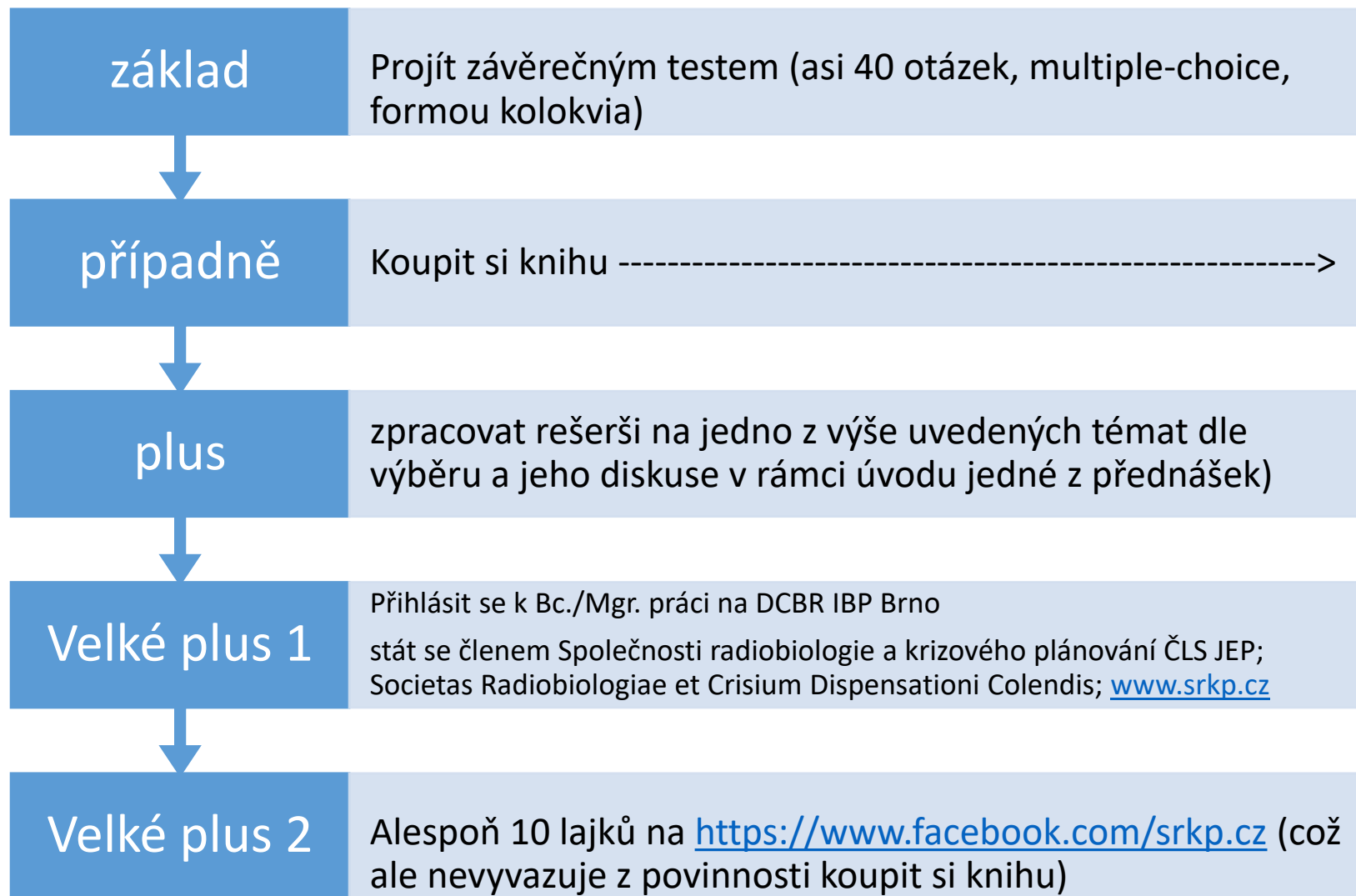
# Orientační syllabus – část 2

- **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 syllabus – 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)**

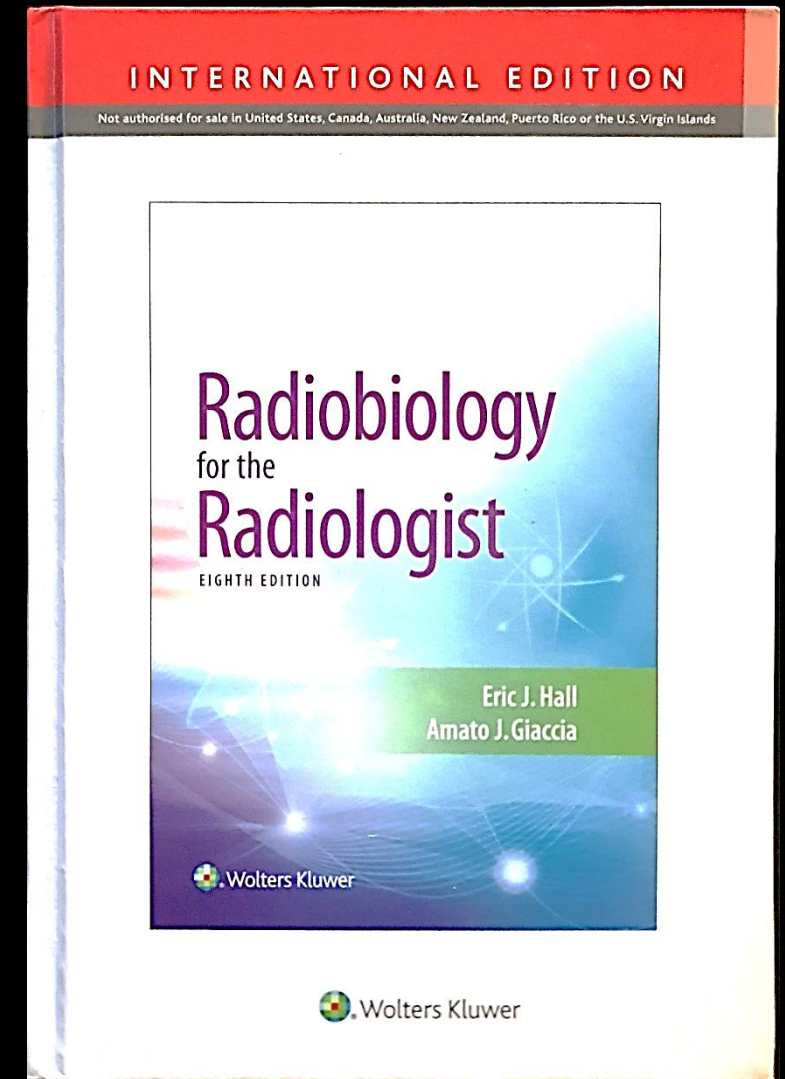
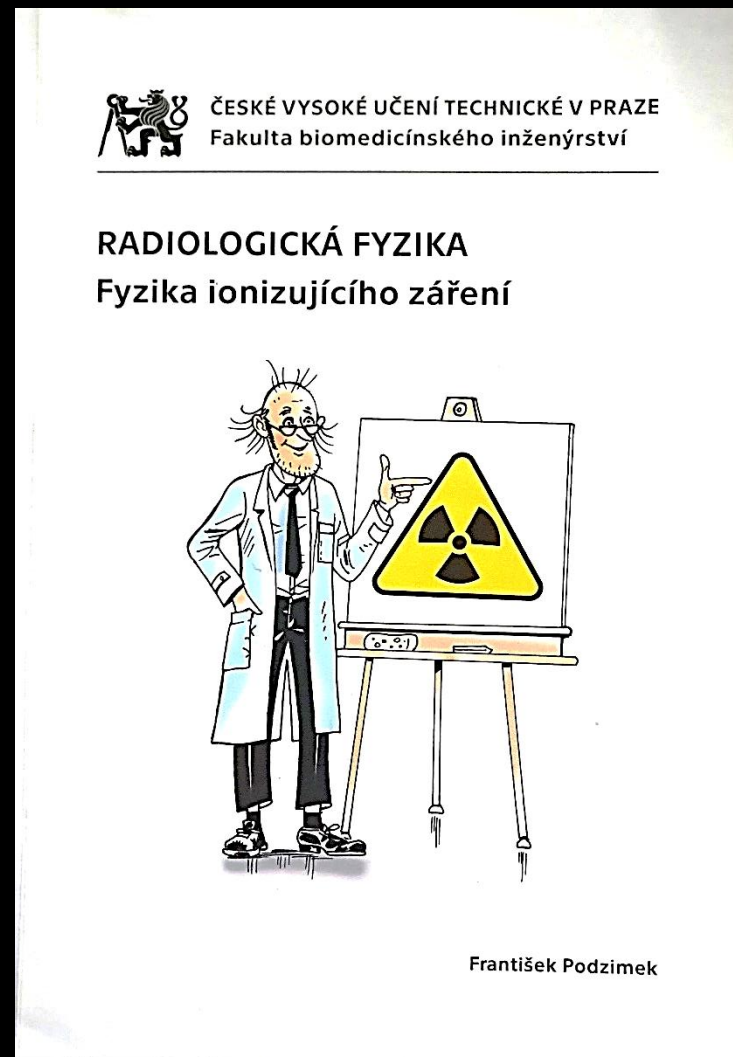
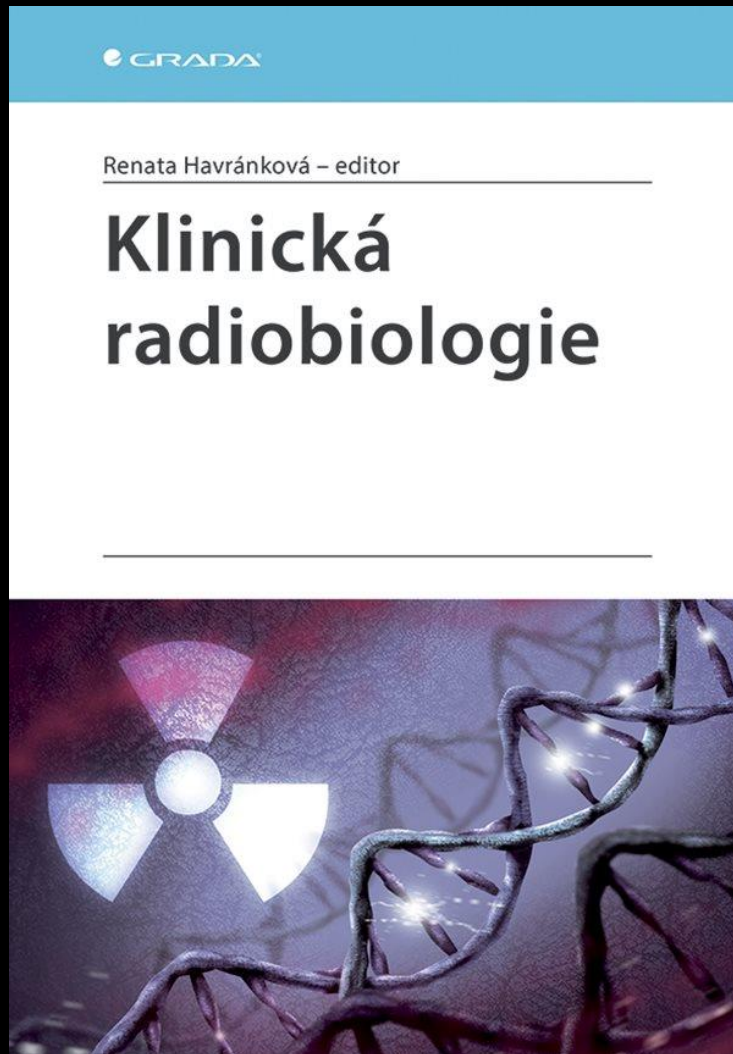
# Jak získat KOLOKVIUM



## Klinická radiobiologie

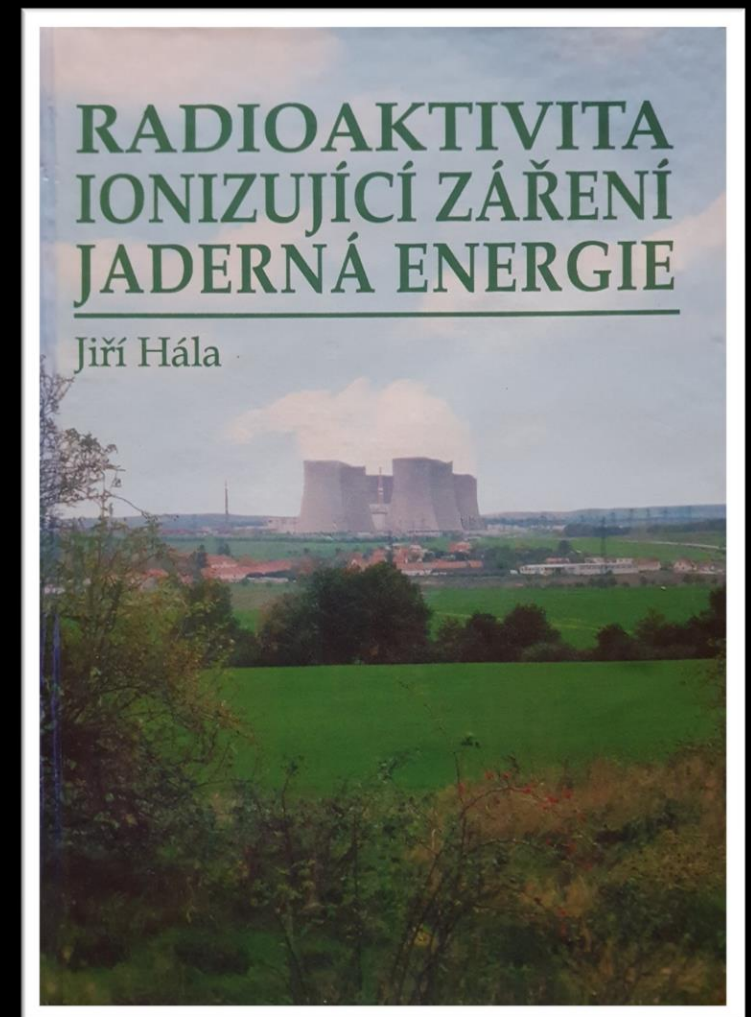
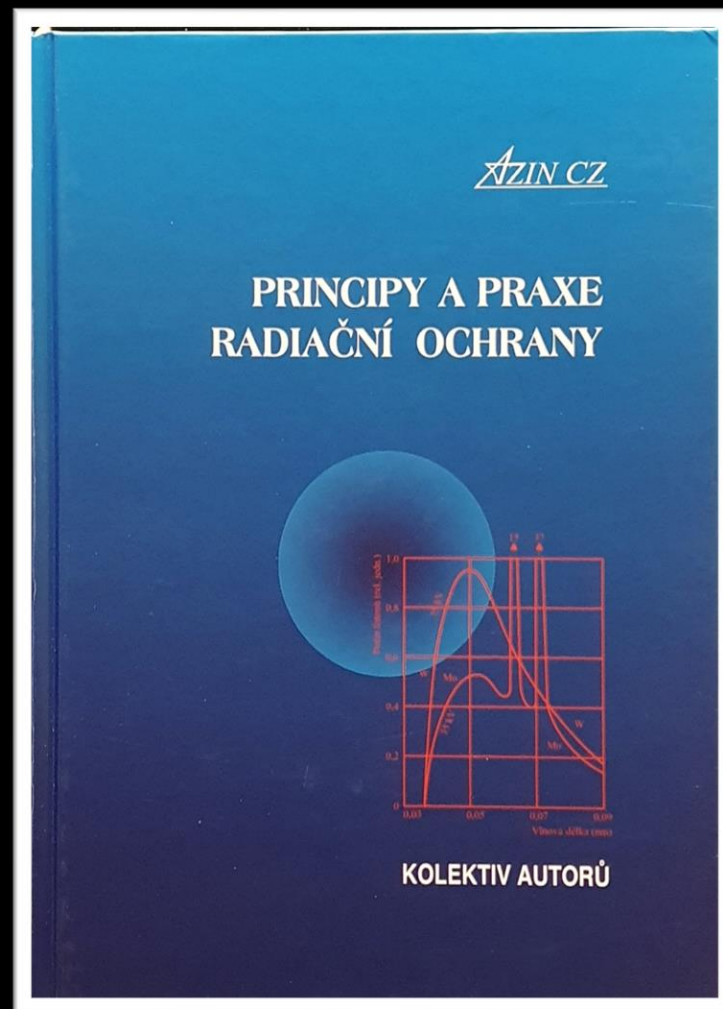


# Basic Literature:

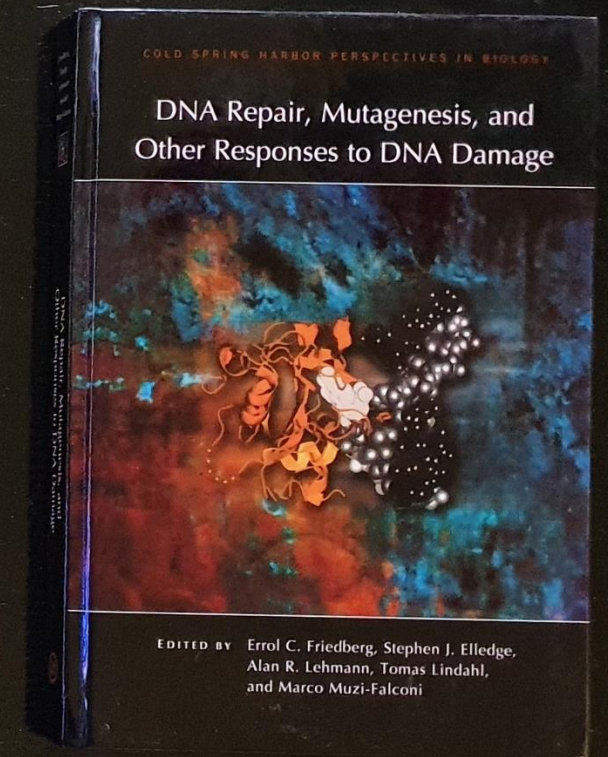
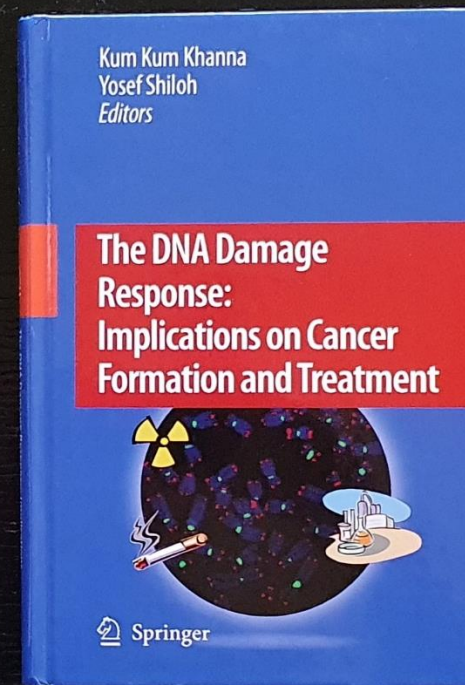
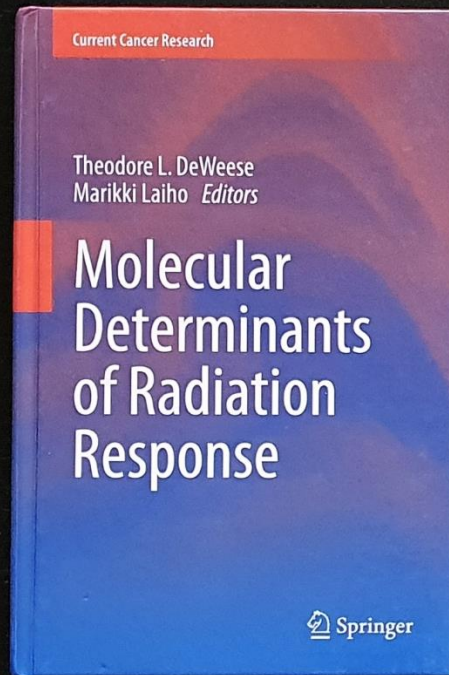
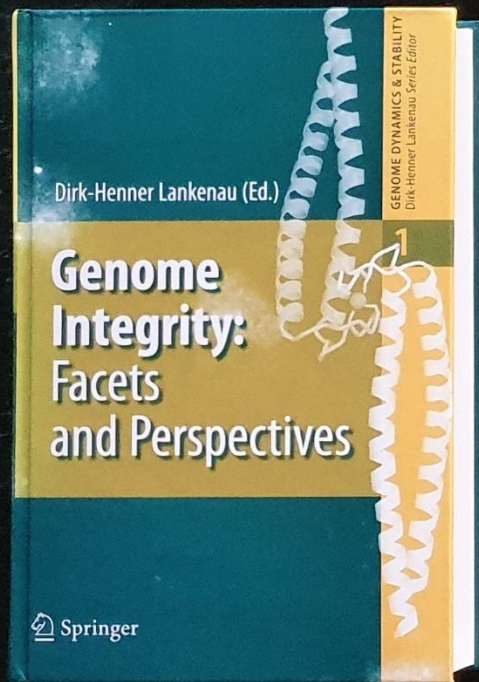




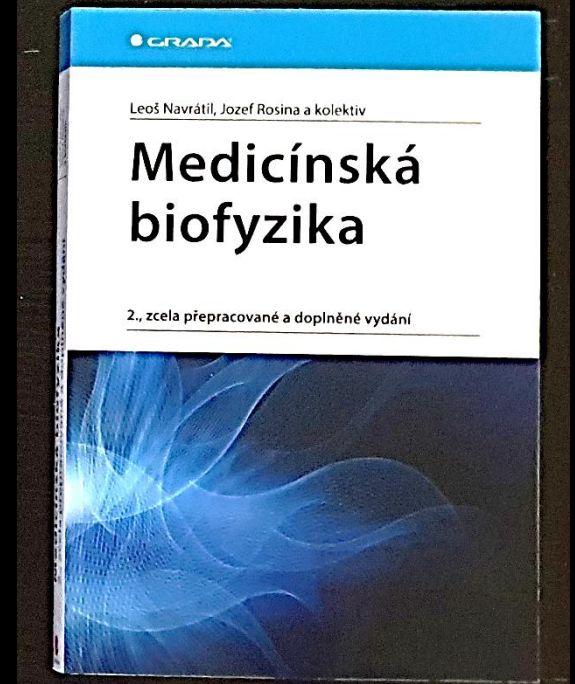
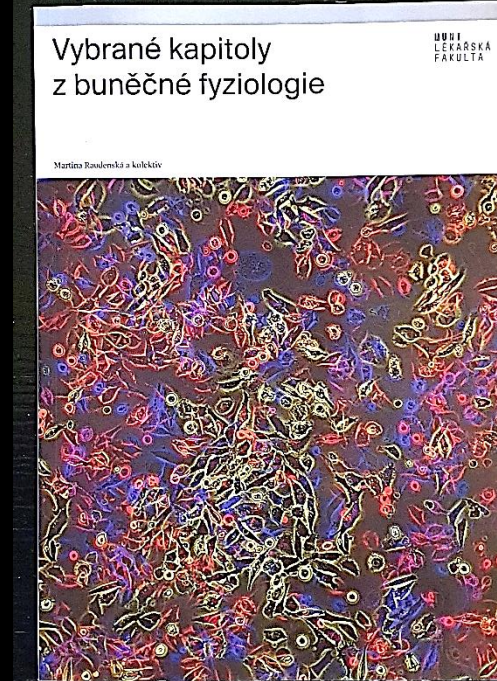
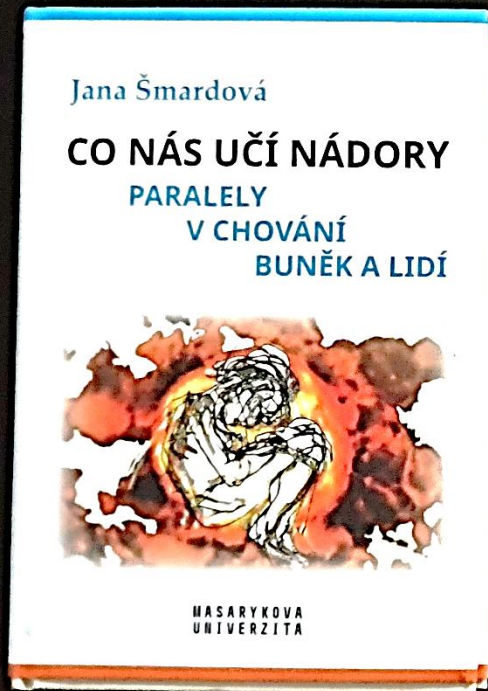
# Basic Literature (optional):



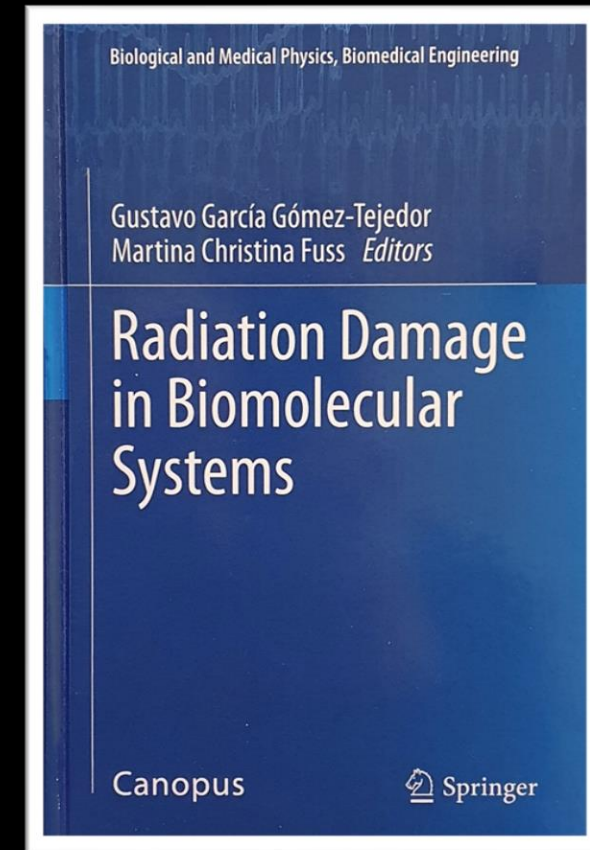
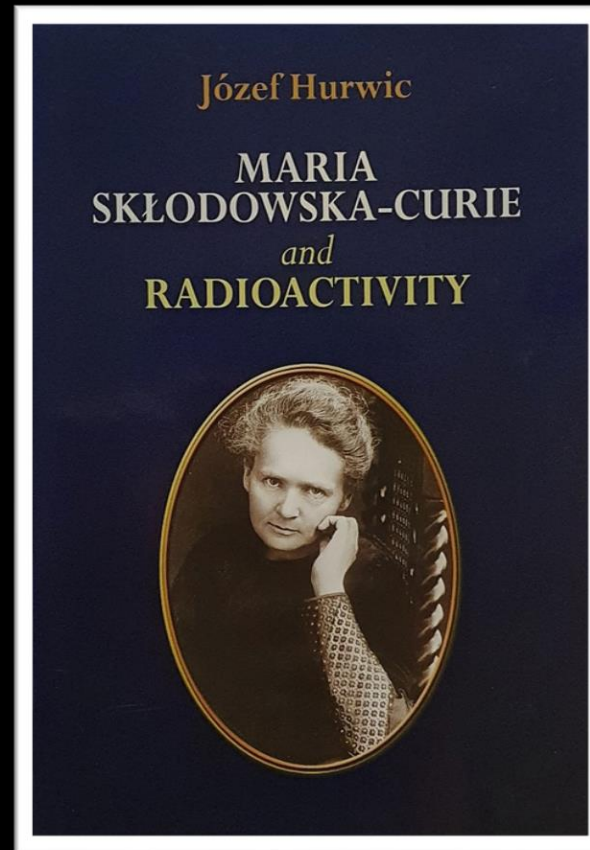
# Literature (optional): Cell Response to IR, DNA Damage and Repair



# Literature (optional): Cell Biology, Cancer Biology and Radiation Physics



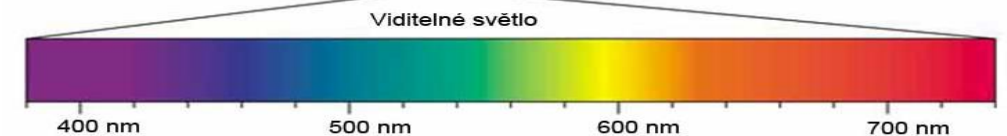
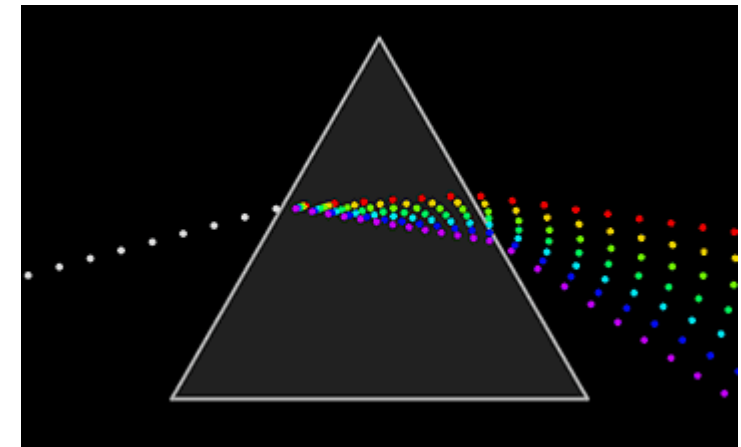
# Literature (optional): History, CVs etc.



# Duální povaha ZÁŘENÍ

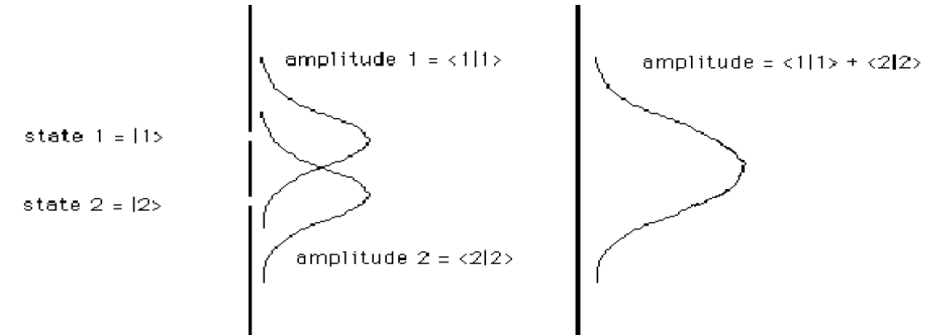
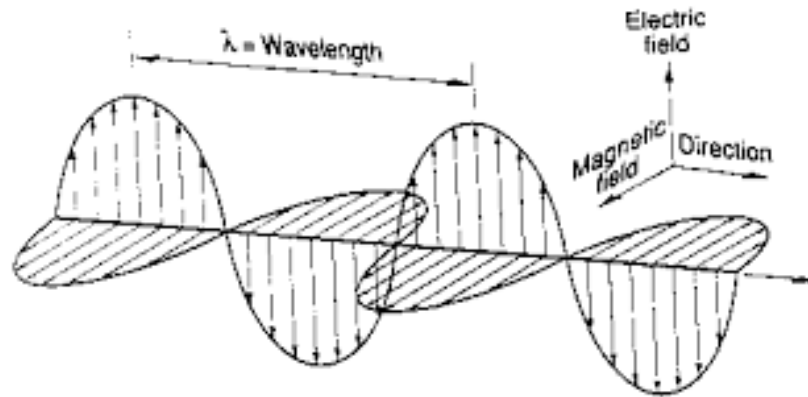
(podrobněji později)

## 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.

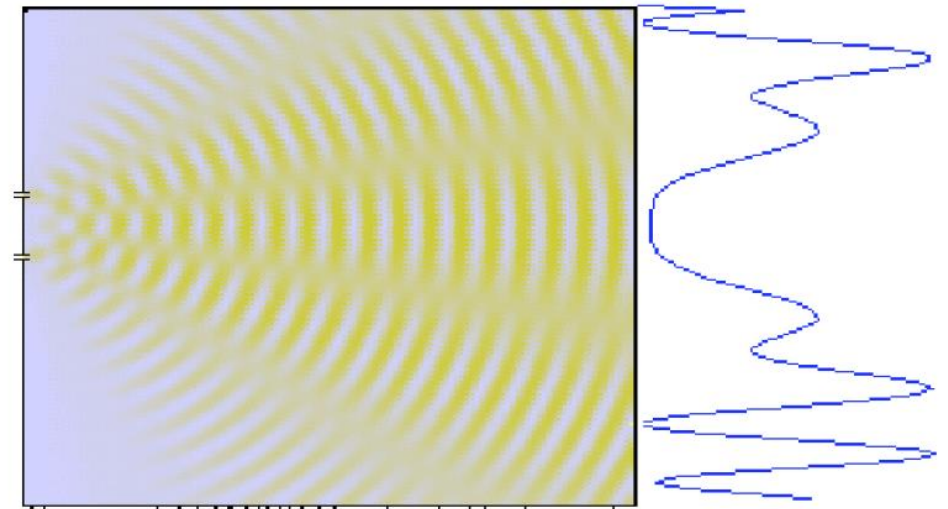
## 2. Světlo jako vlnění



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

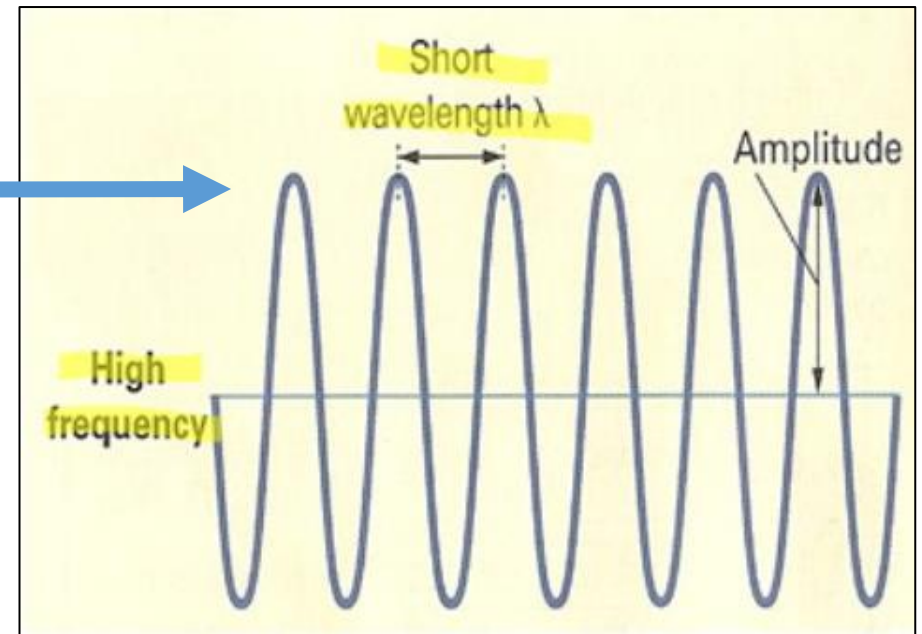
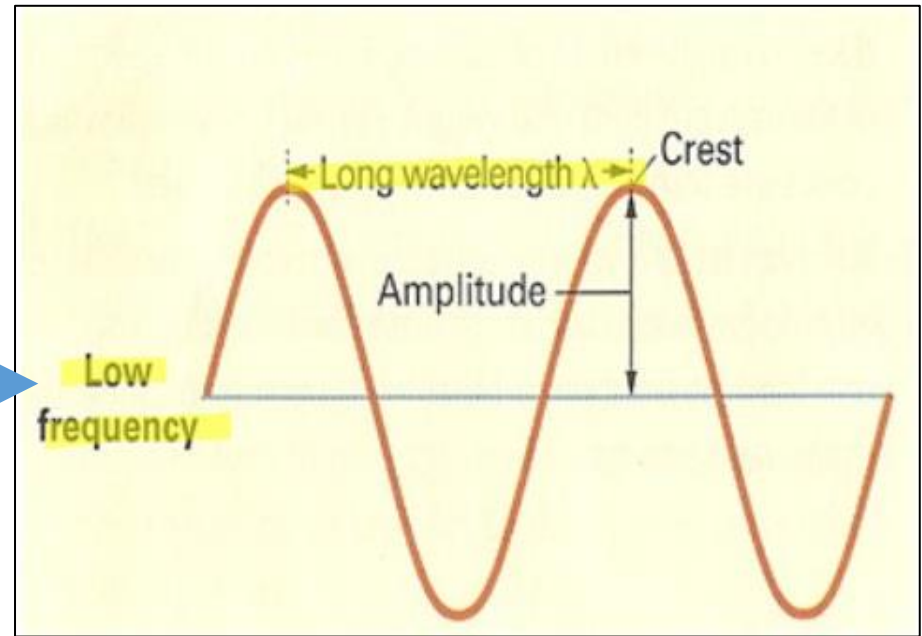
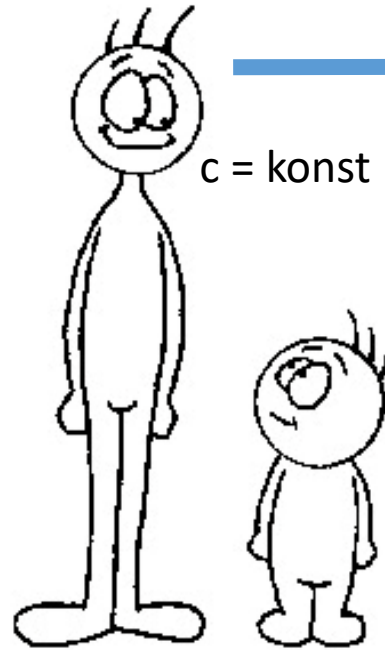
- Frequency & wavelength are inversely proportional

$$c = \lambda \nu$$

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

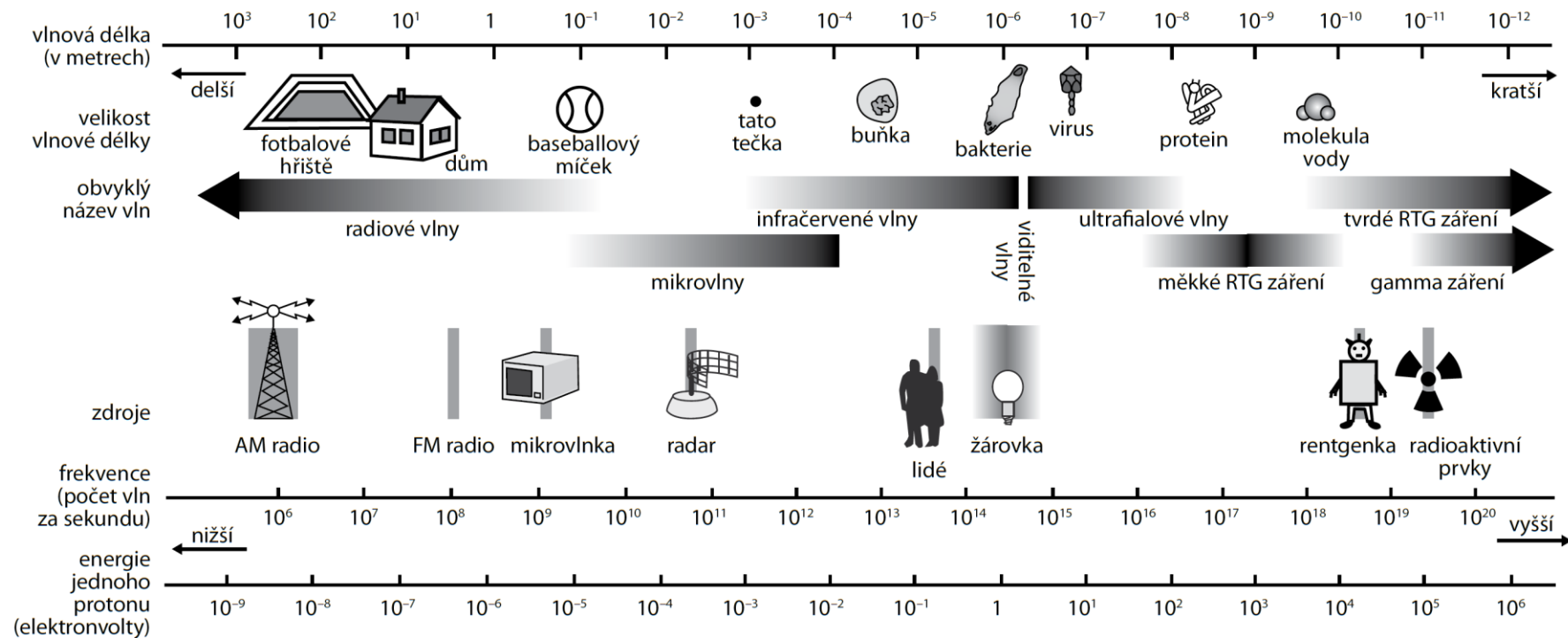
$\lambda$ : wavelength (m, nm, etc.)

$\nu$ : 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





# Energy of radiation

## 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)

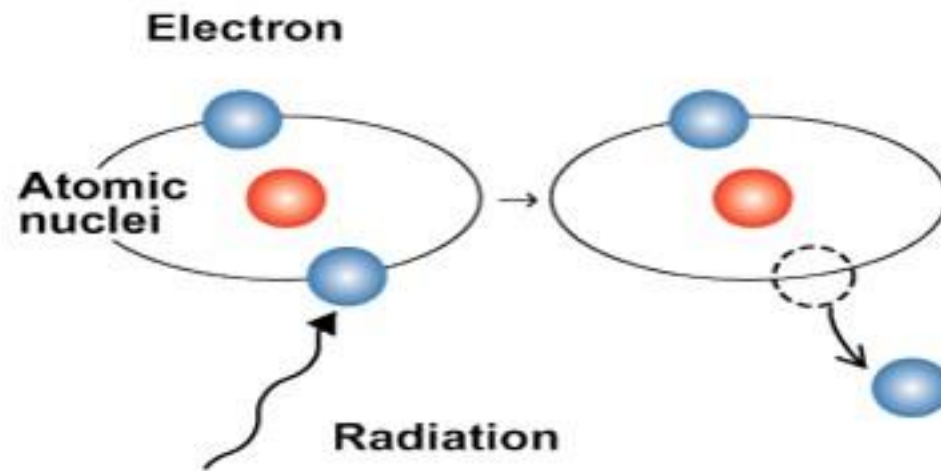
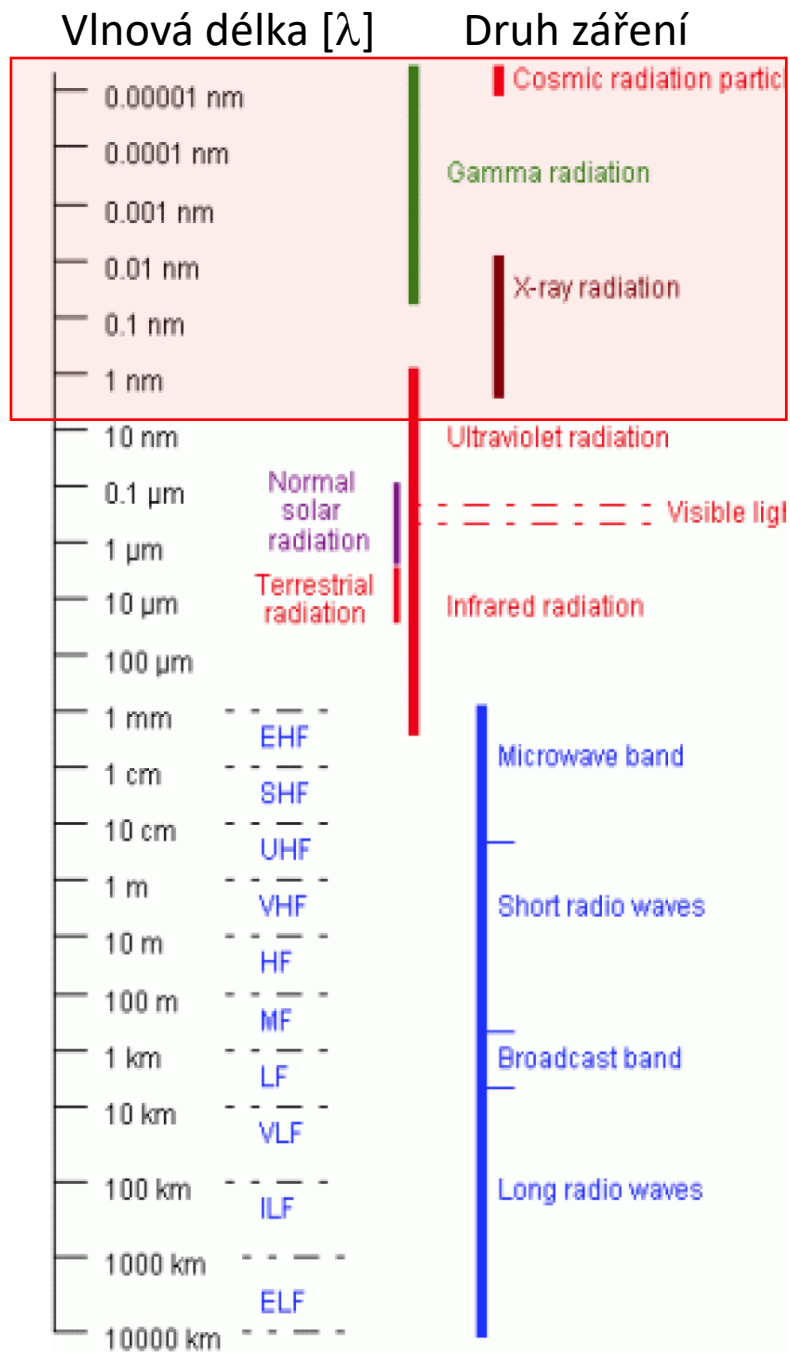
$\nu$  = frequency ( $s^{-1}$ )

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

$h = 6,62607015 \times 10^{-34}$  J·s

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

# 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  **$E > 33$  eV.**

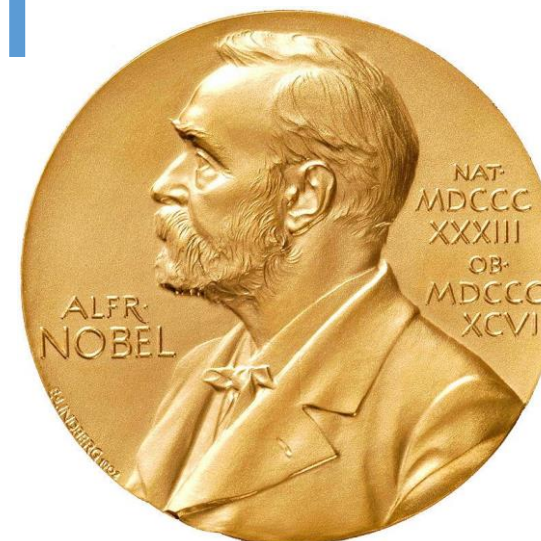
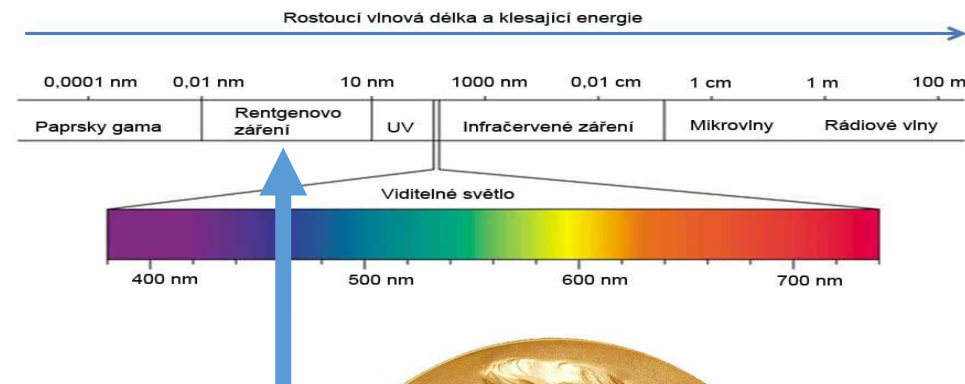
To odpovídá záření s kratší vlnovou délkou, než UV, přibližně  **$\lambda < 40$  nm.**

# OBJEV RADIOAKTIVITY A IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

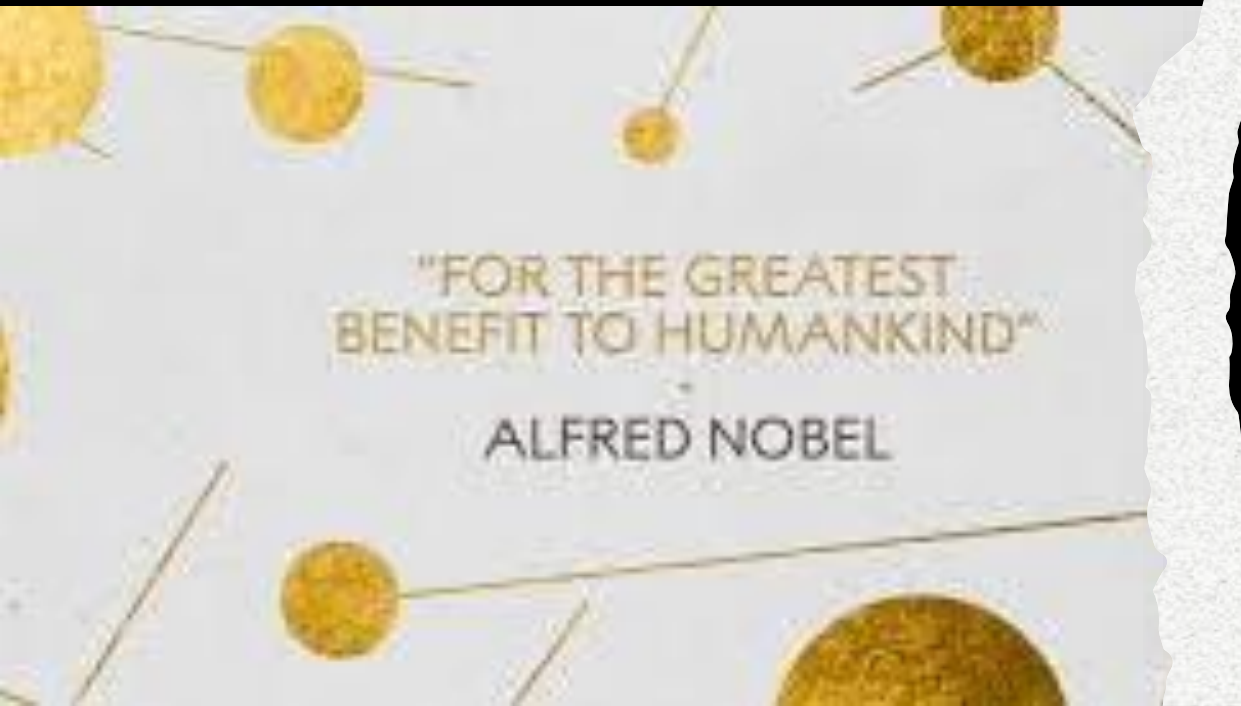
Wilhelm Conrad Röntgen

8. listopadu 1895

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



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



- The first Nobel Prize in Physics in 1901. His 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>
---------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### Radium a Polonium

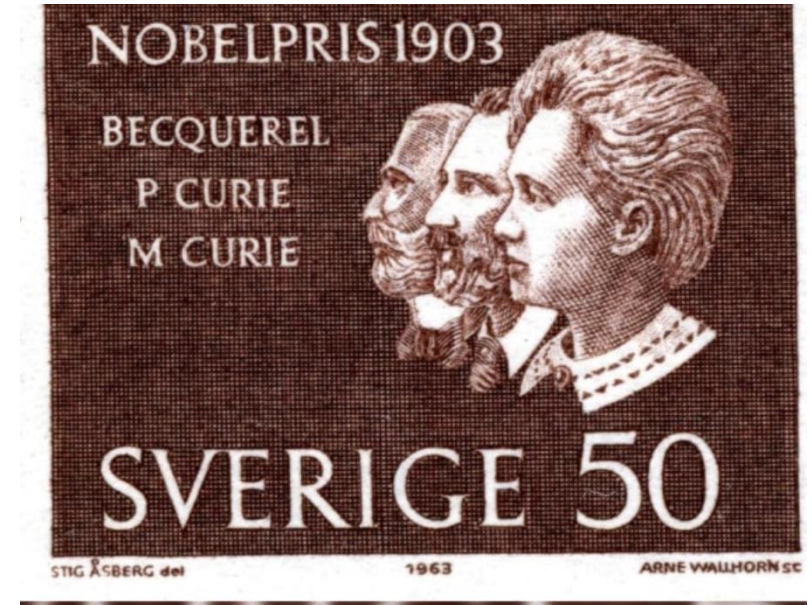
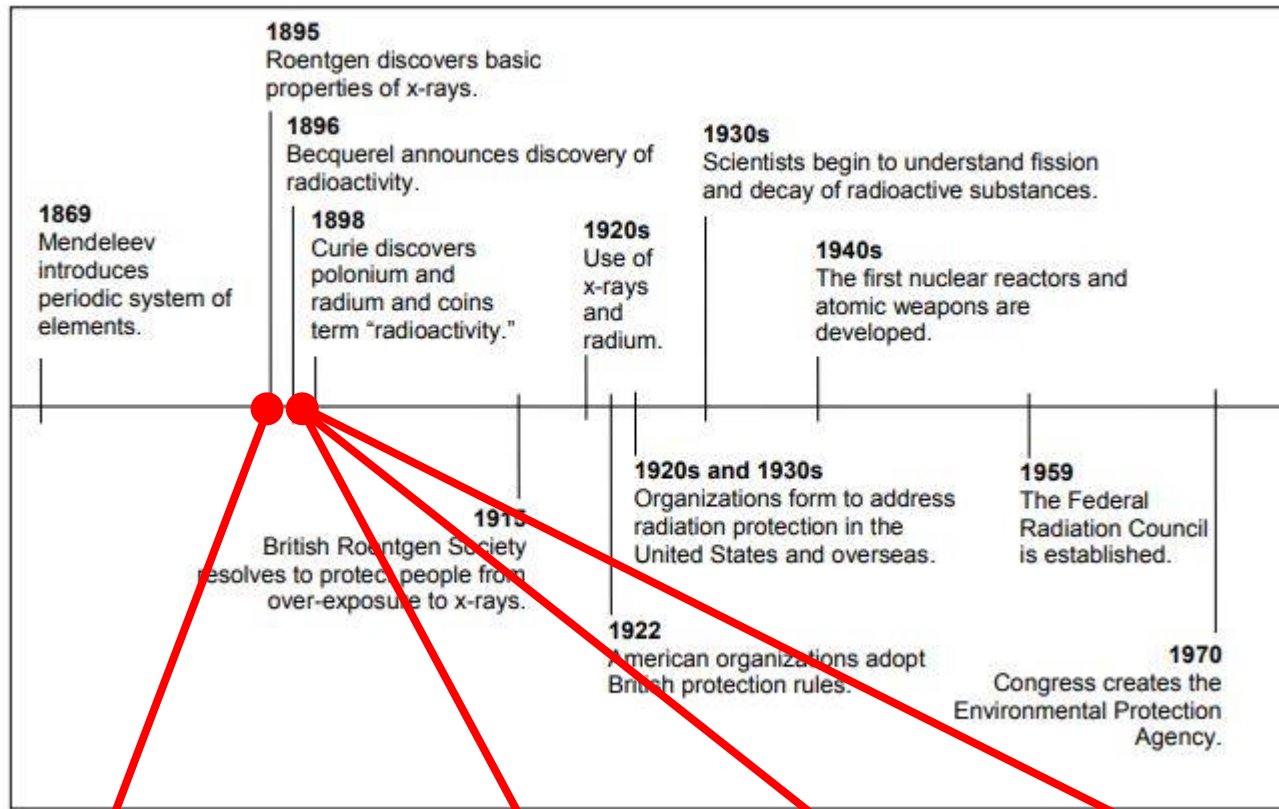
- Radium (Ra) z řady kovů alkalických zemin, silně radioaktivní prvek, vznikající v rozpadové řadě uranu a thoria.
- Polonium (Po) je radioaktivní prvek. Byl objeven roku 1898 Marií Curie-Sklódovská a pojmenován na počest její vlasti – Polska. Patří mezi kovy.



RADIUM



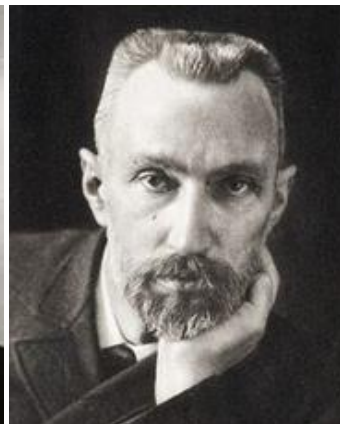
POLONIUM



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

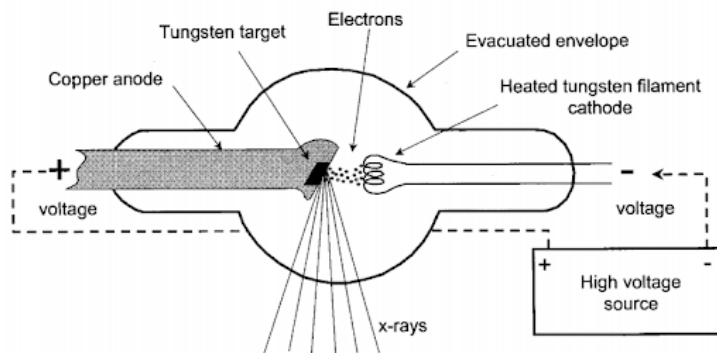


1903: Nobelova cena za fyziku za objev radioaktivity, spolu s Pierrem a A.H. Becquerelem



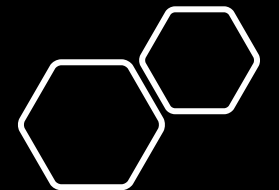
1911: druhá Nobelova cena, nyní za chemii, za izolaci radia a objev polonia, plus další objevy ohledně radioaktivity





# LESSON I: The Discovery of X-Rays, X-Rays

- **Wilhelm Conrad Röntgen**
- **8. listopadu 1895**
- „To, co vidíme, jsou kosti vaší ruky...“





# Objev ionizujícího záření



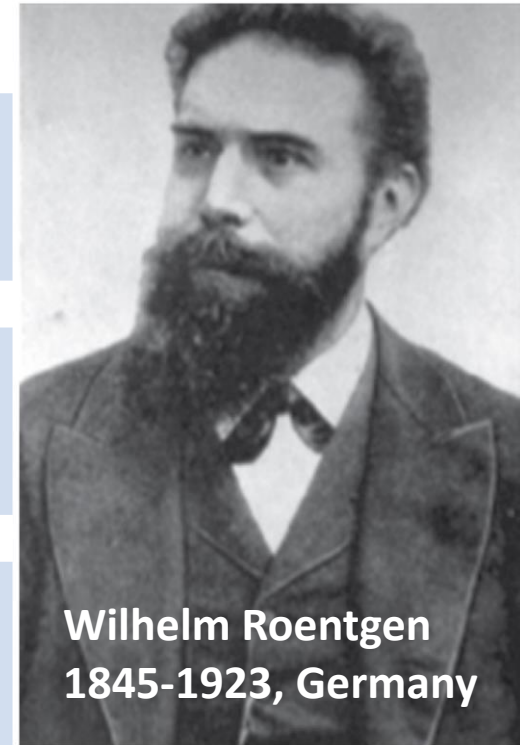
**Den-D:** 8. listopad 1895, podvečer



**Místo-M:** Universita ve Würzburgu,



**Wilhelm Roentgen**



**Wilhelm Roentgen**  
1845-1923, Germany



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)

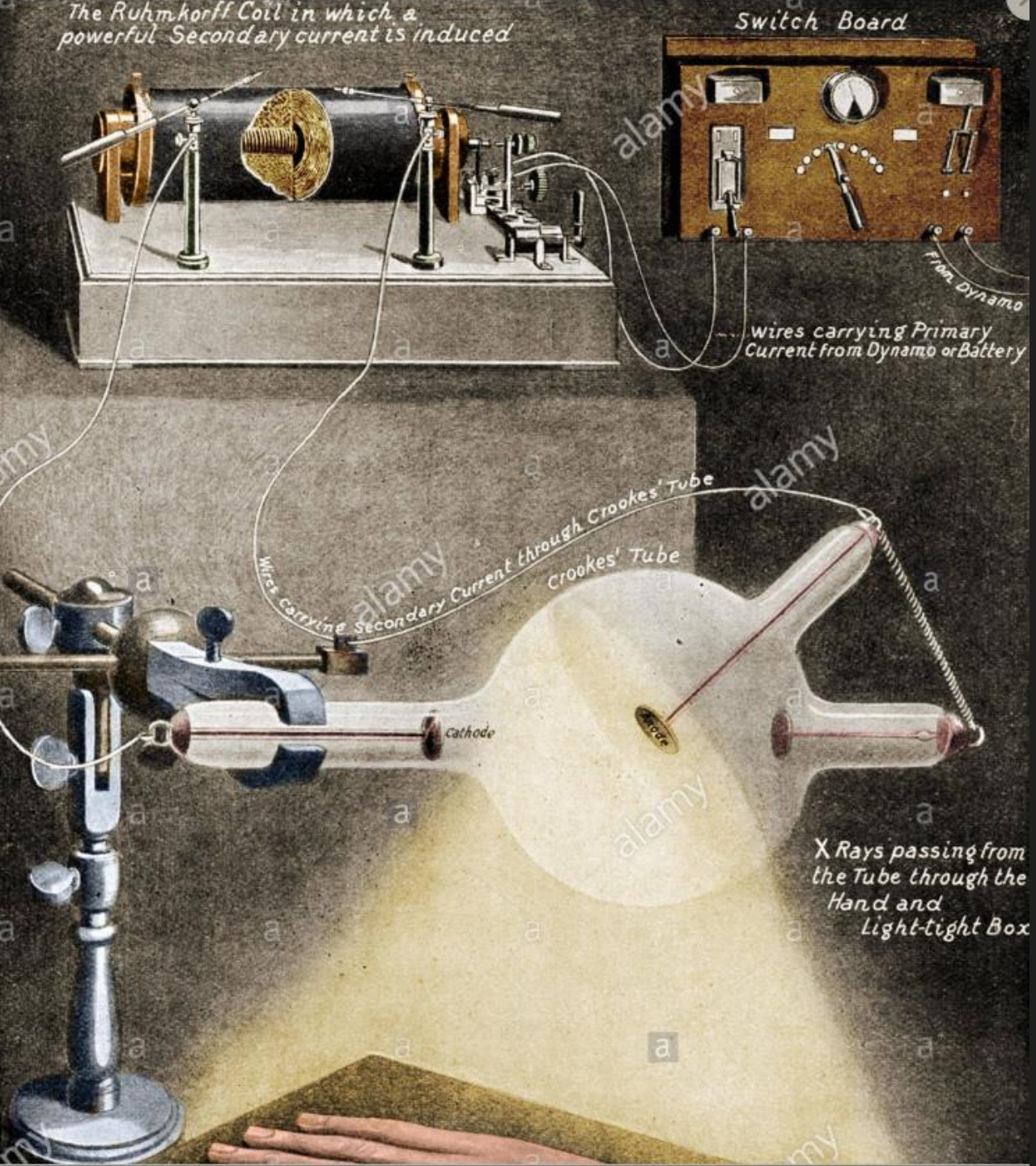


- Po odsátí trubice na vysoké vakuum mizí katodové paprsky, avšak začíná zelenožlutě svítit sklo v okolí anody
- Charakteristiky záření (barva) nezávislé na náplni trubice

# Cherchez 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, stejně tak jako ukrajinský vědec působící Praze - **Ivan Pului**.)



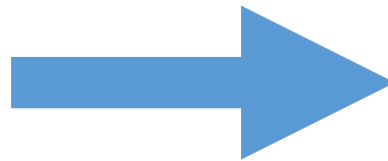
- Zjistil, že **fluorescence nemizí ani při zaclonění trubice černým papírem**, ani když mezi trubicí a stínítko vložil tlustou knihu; stínítko fluoreskovalo i na vzdálenost 2 metrů
- Když poté vkládal mezi lampu a stínítko další různé předměty, zjistil, že jimi **paprsky X procházejí různě intenzivně**. 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 požádal o ruku svou manželku ;-)

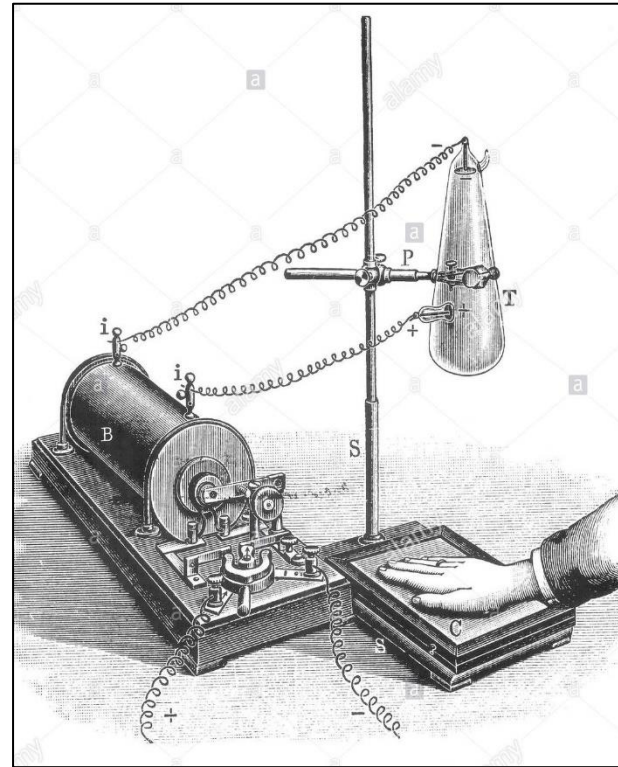


# Historicky první rentgenový snímek

- 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

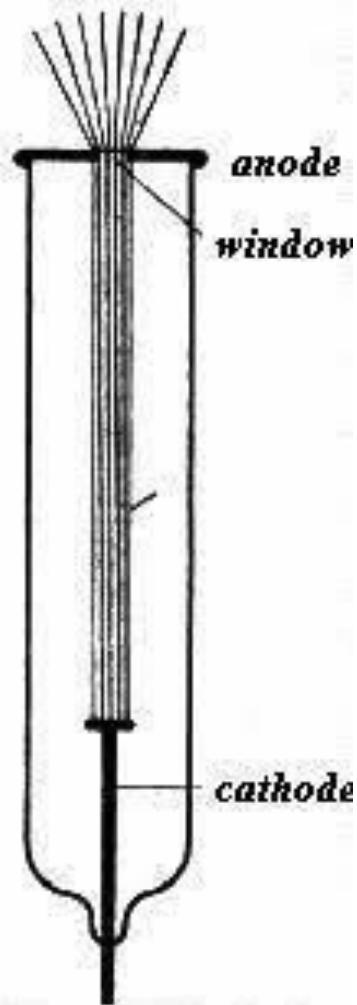


Fig. 516 Cathode ray tube with Lenard window

Roentgenovy paprsky nemohly představovat vystupující katodové záření – to jen velmi omezený dosah (cca. 2 cm) i při využití Lenardova okénka v trubici.

Usoudil proto, 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.



# X-Rays: Objev ionizujícího záření

Pojmenování **X-Rays** se dodnes užívá v anglosaské literatuře, u nás se většinou upřednostňuje název **RTG záření**.

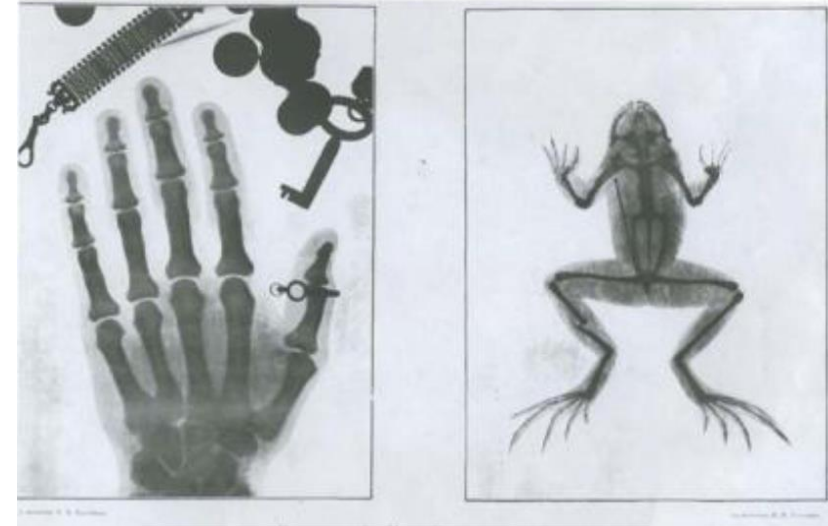
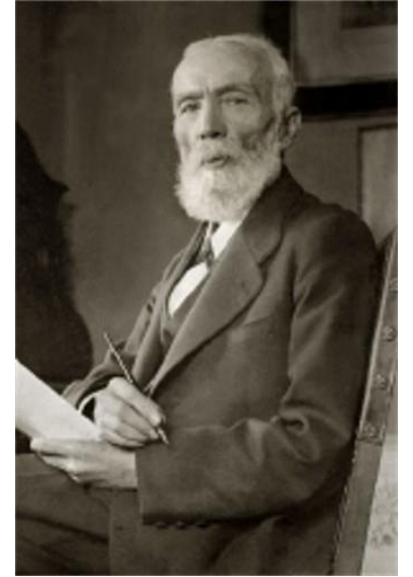
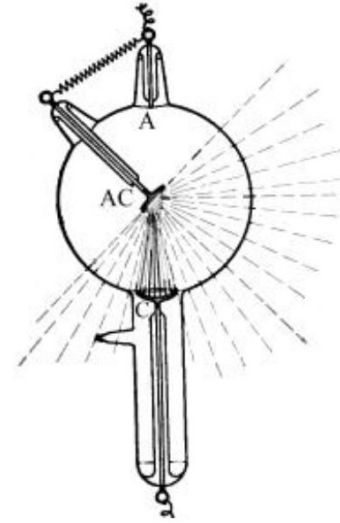
Během dvou měsíců publikoval pečlivý popis výsledků svého výzkumu. **28.12.1895 napsal** **předběžnou zprávu „O novém druhu paprsků“**. Poslal ji do žurnálu Würzburgské lékařské společnosti.

Objev byl natolik překvapivý, že ho nejprve odmítali i slovní 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**.

# Ivan Pului

- (2 February 1845 – 31 January 1918) was a Ukrainian physicist and inventor, who has been championed as an early developer of the use of X-rays for medical imaging. His contributions were largely neglected until the end of the 20th century.
- He served as the **rector of the Higher Technical School in Prague (German part)** in 1888–1889. Puluj also worked as a state adviser on electrical engineering for Bohemian and Moravian local governments.
- In addition he completed a translation of the Bible into the Ukrainian language.
- **Approximately one month prior to W. Roentgen, I. Puluj officially informs about the effect of ionizing actions of X-rays** on the rests of gas in vacuum tubes, having shown experimentally.
- **While Puluj's finding were essentially X-rays, he reported his results 6 weeks after Wilhelm Conrad Röntgen published his,**[5] and can not be credited with the discovery of X-rays.



# 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  
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.
- 



*Hand and Wrist 1895*



**1895**

*Prof. Robert  
Tracy '75*

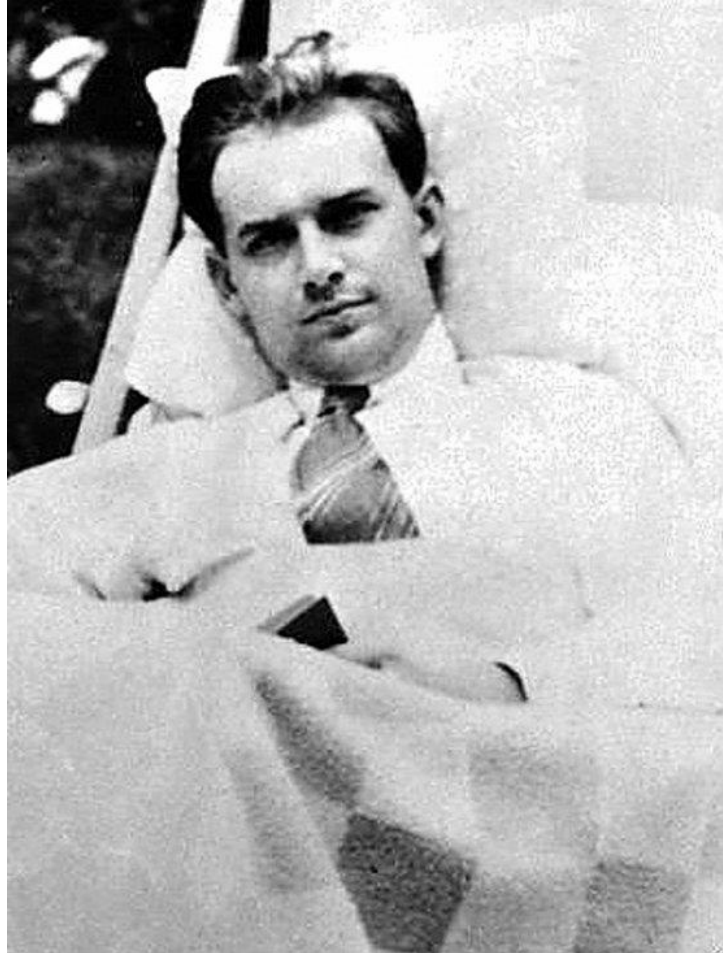


**R**

**2022**



# 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



CONSTANCE CHARLOTTE  
RÖNTGEN GEB. FROWEIN  
★ 28 FEBR. 1806 † 8 AUG. 1880

FRIEDRICH KONRAD  
RÖNTGEN  
★ 11 JAN. 1801 † 12 JUNI 1884

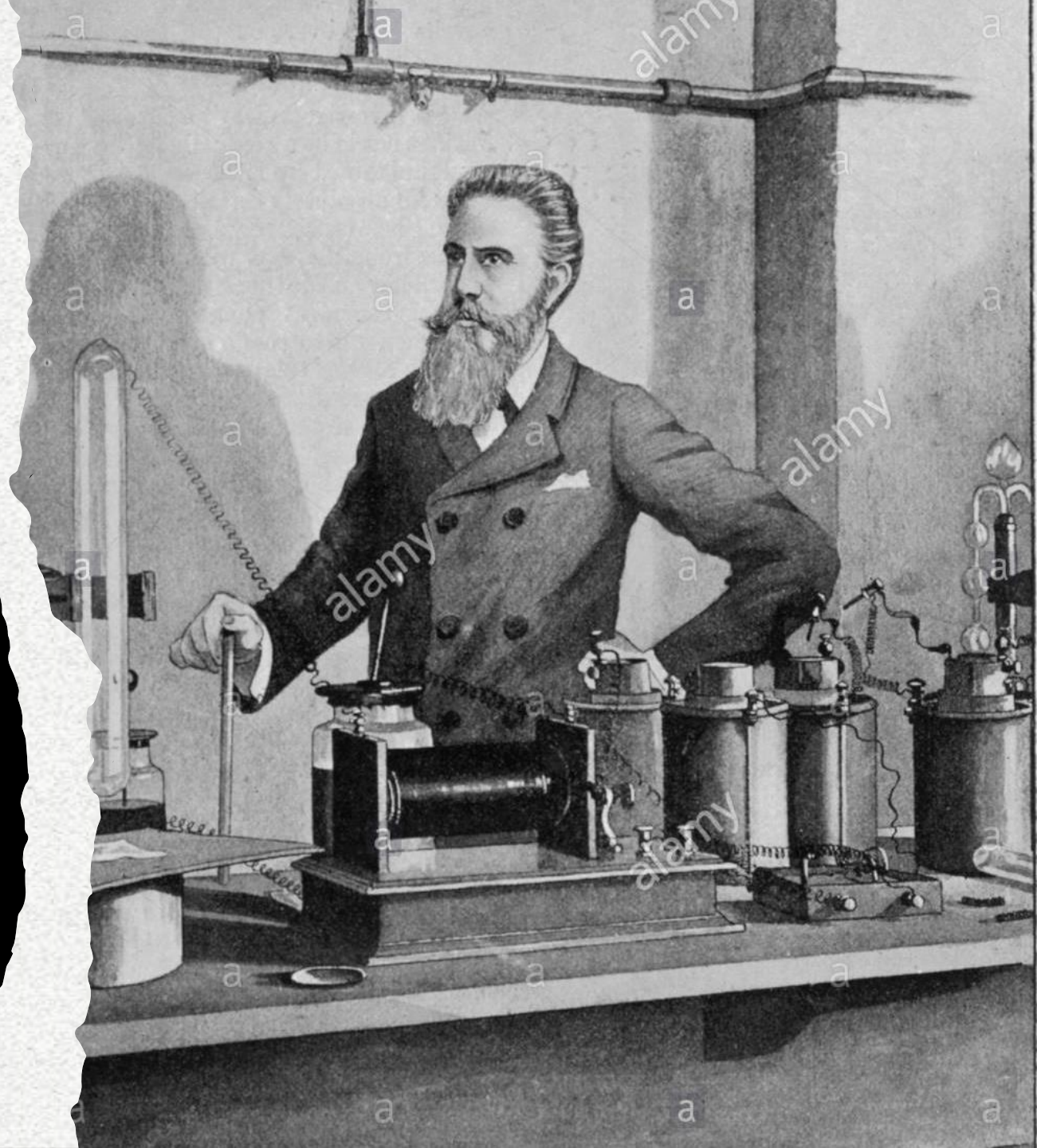
BERTA RÖNTGEN  
GEB. LUDWIG  
★ 22 APRIL 1839 † 31 OKT. 1919

WILHELM KONRAD  
RÖNTGEN  
★ 27 MARZ 1845 † 10 FEBR. 1923

# 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.“*



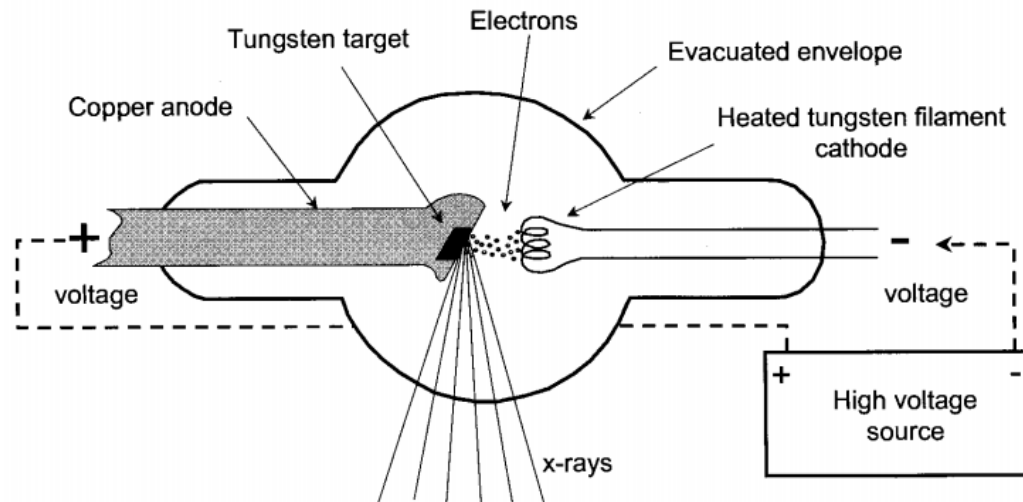


# Vznik RTG záření, RENTGENKA

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

Obecně - vakuová elektronka

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)

# 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 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

