

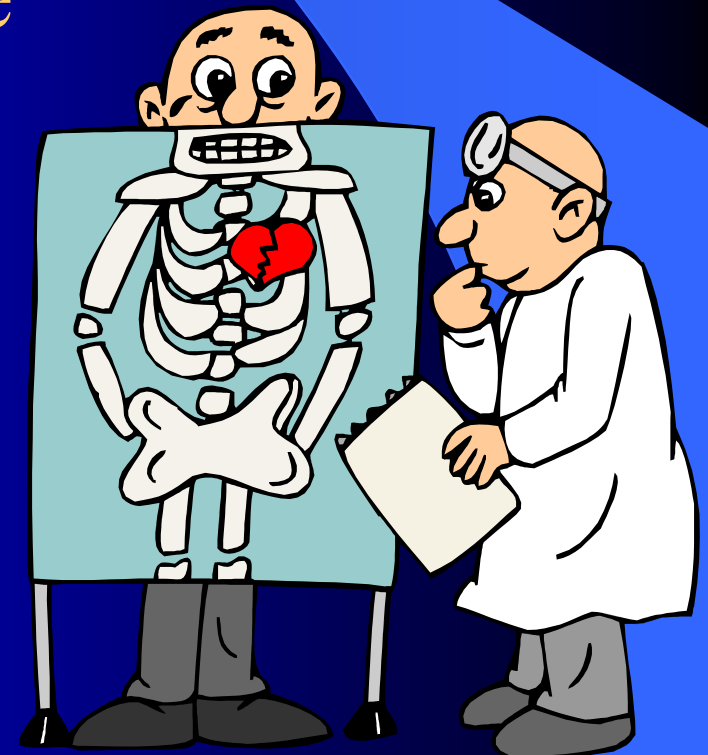
The background is a dark blue gradient that transitions to a lighter blue on the right side. A thin, curved white line starts from the left edge and curves downwards towards the center. A bright blue beam of light originates from the bottom left and spreads out towards the right, passing through the text.

I

Rentgenska svetloba

Vsebina

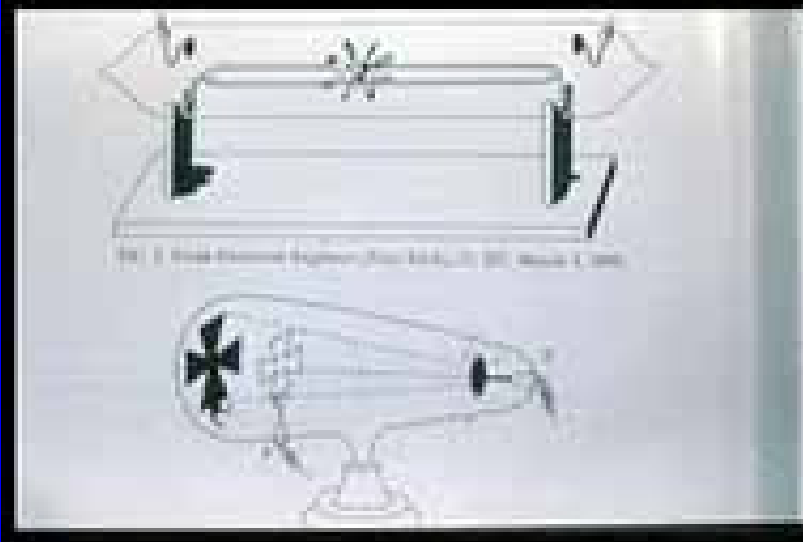
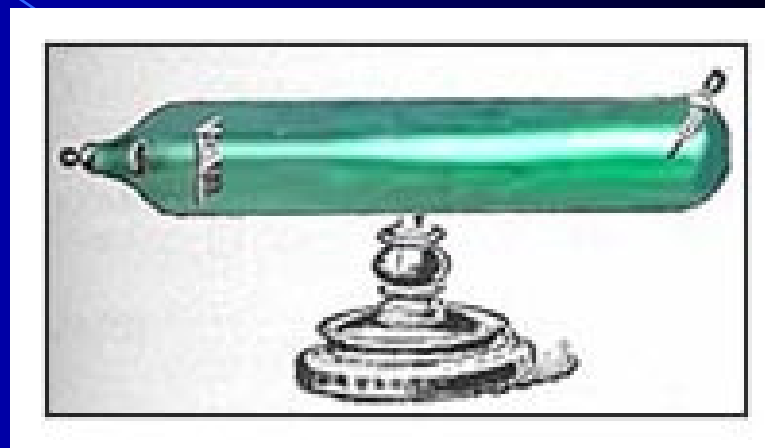
- odkritje rentgenske svetlobe (žarkov X)
- spekter rentgenske svetlobe
- interakcije rentgenske svetlobe
- količine in enote
- učinki rentgenske svetlobe



Poizkusi s katodnimi žarki

Konec 19. stoletja potekajo številni poizkusi z uporabo steklenih cevi napolnjenih s plinom, v katerih sta dve elektrodi med katerima lahko spreminjamo napetost.

Hittorf Crooksova cev: steklena bučka z razredčenim plinom in dvema elektrodama (katodo in anodo) namenjena poskusom s katodnimi žarki-delci, ki potujejo od katode proti anodi



Crooksov poskus z malteškim križcem

1879 William Crookes ugotovi, da so katodni žarki neke vrste delci, ki potujejo premočrtno in to pokaže s poskusom, kjer namesti malteški križec med katodo in anodo v cevi. Na steni cevi se izriše obris malteškega križca.



Fizikalni inštitut Univerze v Würzburgu



Laboratorij fizikalnega inštituta
Univerze v Würzburgu

- Wilhelm Konrad Röntgen konec leta 1895 opravlja naloge direktorja Fizikalnega inštituta v Würzburgu
- ukvarja se z raziskavami katodnih žarkov
- še posebej ga zanima odkritje Lenarda leta 1891, da katodni žarki lahko prodrejo tanko aluminijasto okno na koncu steklene cevi in potujejo nekaj centimetrov v zraku.



- 8. novembra 1895 W.K. Röntgen izvaja poskus pri katerem Hittorf Crooksovo cev postavi v škatlo iz neprozorne črne lepenke.
- Kljub temu opazi šibko zeleno svetlobo na fluorescenčnem zaslonu iz barijevega plationocianida, ki ga uporablja za detekcijo ultravijolične svetlobe in je oddaljen kak meter od cevi.
- Vzrok naj bi bili nevidni žarki, izvirajoči iz Hittorf Crooksove cevi, na mestu, kjer je anoda.
- Postavi se vprašanje kaj povzroča svetlikanje na zaslonu, znano je da:
 - Crooksove cevi niso izvor ultravijolične svetlobo
 - katodni žarki v zraku prodrejo le nekaj centimetrov
- skrivnostni žarki torej prehajajo skozi neprozorno črno lepenko v katero je bila zavita Crooksova cev
- Röntgen zaključi, da iz Crooksove cevi izvira neka nova vrsto sevanja neznane vrste in ga zato poimenuje žarki X
- pred formalno predstavitvijo svojega odkritja univerzitetni fizikalno medicinski zbornici, nameni dva meseca temeljitim raziskavam lastnosti žarkov X

- v tem času odkrije:

- fotografski film je prav tako občutljiv na žarke X,
- svinec je dobro zaščitno sredstvo pred žarki X
- žarki X izvirajo na delu Crooksove cevi, kjer jo zadevajo katodni žarki
- žarki X potujejo premočrtno v ravnih črtah,
- magnetno polje jih ne ukrivi, ter
- njihovo prodornost skozi različne snovi





prvi radiogram 22. december 1895

- 28. decembra 1895 predstavi svoja odkritja, skupaj s sliko ženine dlani predsedniku fizikalno medicinske zbornice
- Wilhelm Konrad Röntgen tako prvi opiše, razišče in predstavi do takrat neznane žarke.
- Tako strokovna kot širša javnost je bila nad odkritjem takoj očarana, saj je rentgenska svetloba prodrla skozi človeško telo in izrisala obrise okostja na fotografski plošči.
- Ta lastnost rentgenski svetlobi odpre vrata v medicinsko diagnostiko.

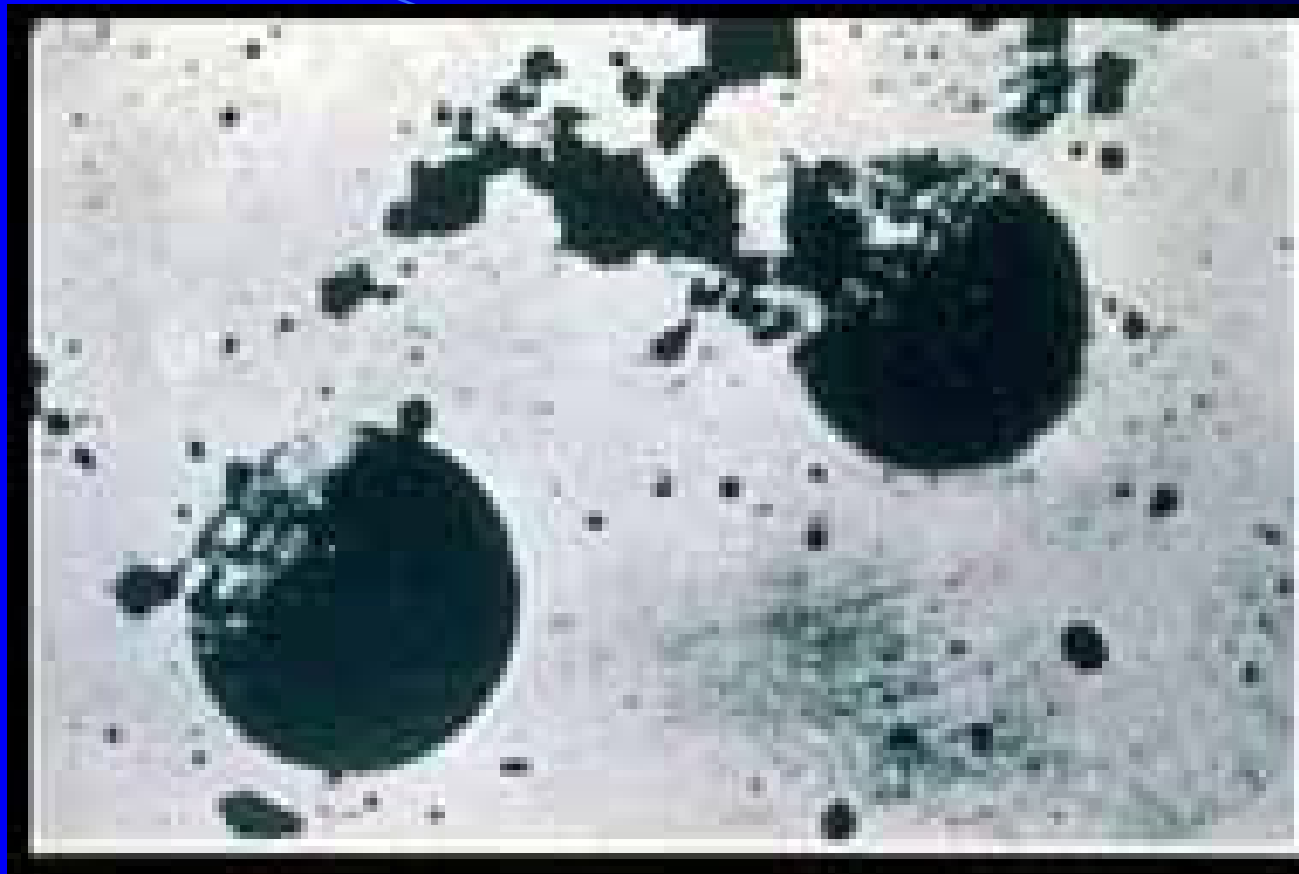
Wilhelm Konrad Röntgen (1845- 1923)



Wilhelm Konrad Röntgen
(1845- 1923)

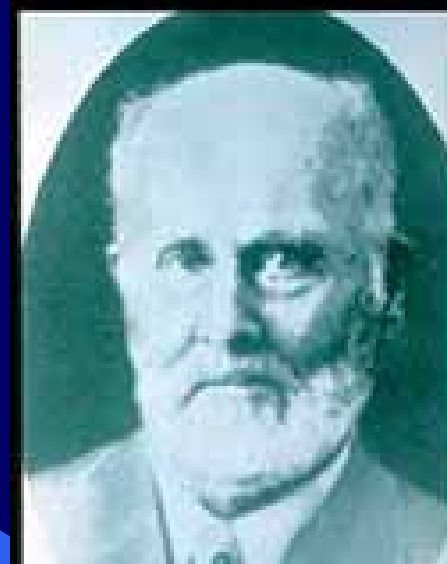


- 1901 prejme Nobelovo nagrado, prvo na področju fizike, za odkritje žarkov X, ki jih kasneje poimenujejo po odkritelju **rentgenska svetloba**



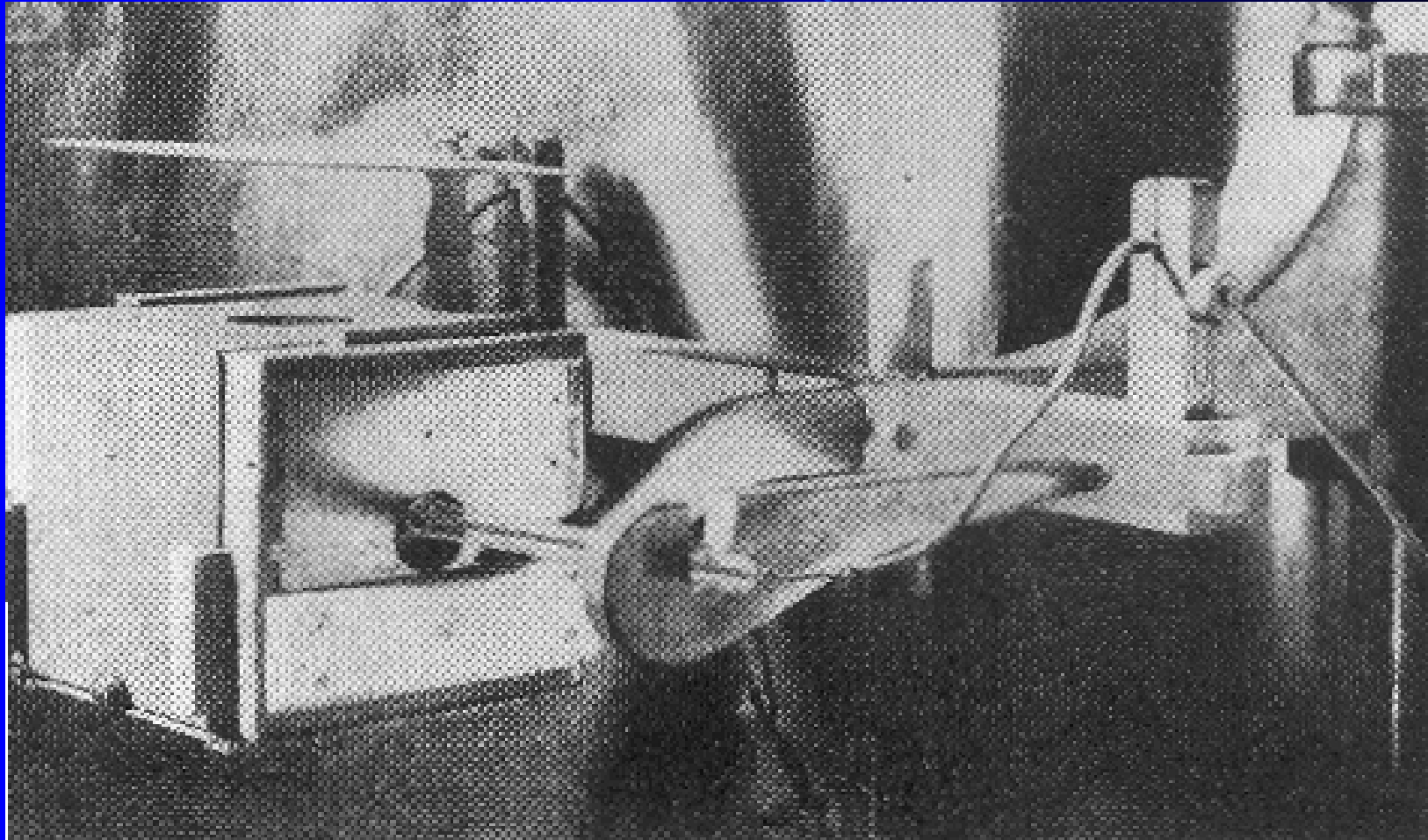
radiogram kovancev A. W. Goodspeed in W. Jennings
(22. februar 1890)

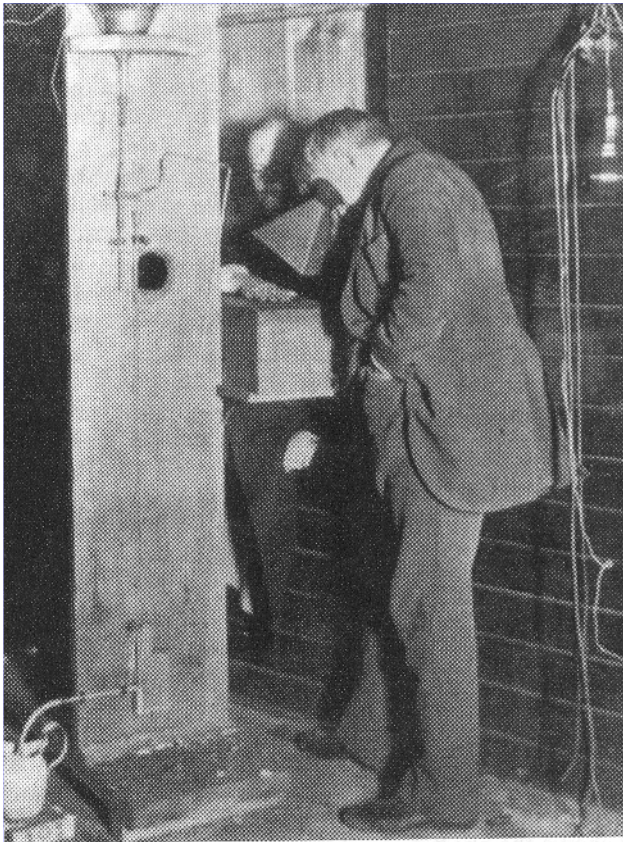
- V začetnem obdobju uporabe rentgenske svetlobe in radioaktivnih snovi je bilo navdušenja več kot znanja in le počasi so prodirala spoznanja o nevarnostih in tveganju.
- Uveljavi se je prepričanje, da uporaba rentgenske svetlobe ne more imeti negativnih učinkov, saj jo človeška čutila ne zaznajo in ne povzroča nikakršnih bolečin.
- Eden najpomembnejših pionirjev varstva pred sevanji je bil bostonski zdravnik in zobozdravnik William Rollins.
- V letih med 1900 in 1904 objavi več kot dvesto prispevkov v katerih je pozival zdravnike k uporabi krajših ekspozicijskih časov in predlagal vrsto tehničnih izboljšav s katerimi bi bilo mogoče zmanjšati izpostavljenost zdravstvenega osebja in preiskovancev.



William Rollins
(1852 - 1929)

- Prvi je uporabljal zaščitna ohišja za rentgenske cevi in zaslanjanje ter filtracijo koristnega snopa rentgenske svetlobe.

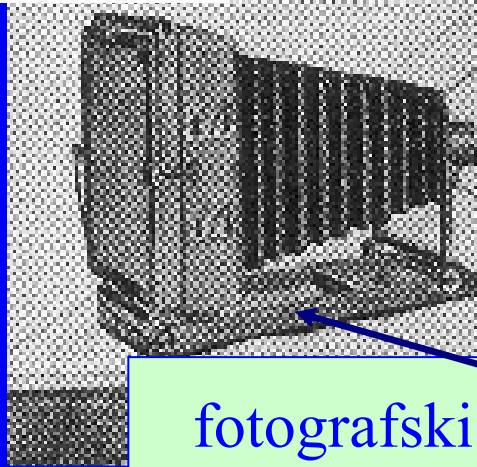




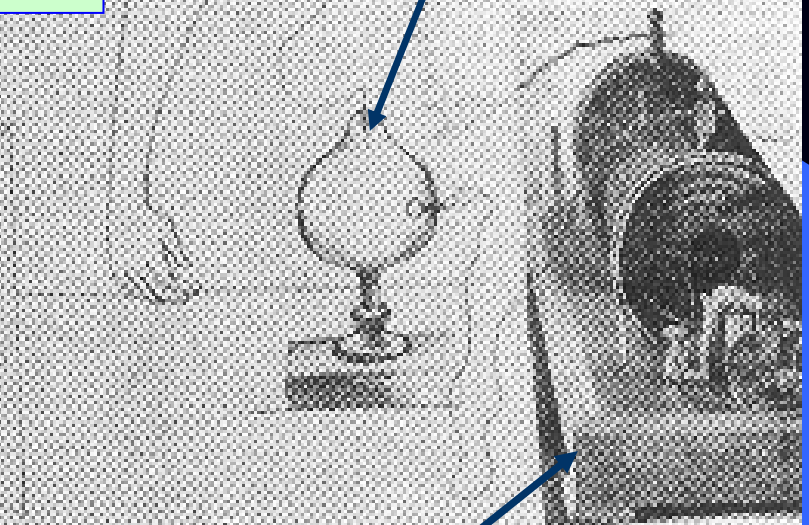
- Thomas Edison 1896 skonstruira različne naprave, ki jih poimenuje, skiaskop, vitaskop - kasneje fluoroskop

florescenčni zaslon

Crooksova cev



fotografski aparat



generator napetosti

skiaskop s fotografskim aparatom (1896)

- pri izvajanju poskusov z žarki X spozna, da izpostavljenost sevanju lahko povzroči tudi degenerativne spremembe na koži, ki so eno izmed prvih znanih in jasnih opozoril o nevarnostih, ki jih povzroča rentgenska svetloba.

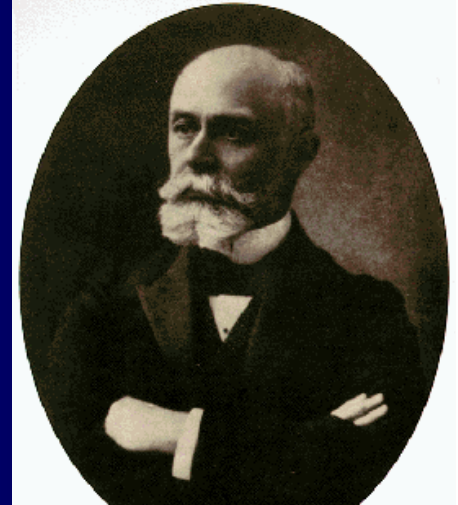


- Prekomerne izpostavljenosti rentgenski svetlobi že v začetku 1896 niso bile redke, saj so tako Thomas Edison, Nikola Testa kot tudi drugi opozarjali na možne poškodbe oči in kože.
- Ekspozicijski časi diagnostičnih rentgenskih posegov so zaradi nizkih napetosti na rentgenski cevi trajali tudi več kot 60 minut.
- Tudi številna poročila o vnetjih, opeklinah, epilaciji in drugih sevalnih poškodbah navdušenja nad uporabo rentgenske svetlobe niso zmanjšali.

- Globoko zakoreninjenost prepričanosti o neškodljivosti rentgenske svetlobe so podpirale teorije, ki so popolnoma zanikale posledice prekomerne izpostavljenosti oziroma so škodljive posledice pripisovale posameznikovi preobčutljivosti.
- Na žalost je tako pojmovanje privedlo do tega, da je za marsikaterega radiologa spoznanje in zavedanje o resničnih posledicah prekomerne izpostavljenosti prišlo prepozno.
- Epidemiološke raziskave potrjujejo, da je bila smrtnost zaradi raka pri britanskih radiologih, ki so v svoji stroki začeli delati pred letom 1920, za tri četrtine večja kot pri kontrolni skupini zdravnikov drugih strok.

Odkritje naravne radioaktivnosti

- Nekaj tednov po odkritju rentgenske svetlobe Henri Becquerel odkrije naravno radioaktivnost.
- Leta 1898 zakonca Marie in Pierre Curie odkrijeta še radioaktivno snov radij.
- Uporaba radija se je hitro razširila, saj je v javnosti veljalo prepričanje, da je radij univerzalno zdravilo za vse bolezni in so ga zato kot takega širom uporabljali.
- Zavedanje o nevarnostih, ki jih je prinesla uporaba radioaktivnih snovi pa ni bilo prav nič večje kot pri rentgenski svetlobi.



Antoine Henri
Becquerel
(1852-1908)



Marie Curie Skłodowska
(1867-1934)
Pierre Curie (1859-1906)

- Prenajanje radioaktivnih snovi brez ustrezne zaščite je pogosto povzročalo vnetja in opekline na koži.
- Tudi Becquerel in Curie pri tem nista bila izjemi.
- Šele številna obolenja in smrti delavcev, ki so med prvo svetovno vojno nanašali radioaktivne svetilne barve s čopiči, ki so jih zaradi večje učinkovitosti oblikovali z ustnicami in tako zaužili velike količine radija, so bila prvo resnejše opozorilo, ki ga ni bilo mogoče spregledati.

Svet odkriva žarke X



javne predstavitve učinkov
žarkov X

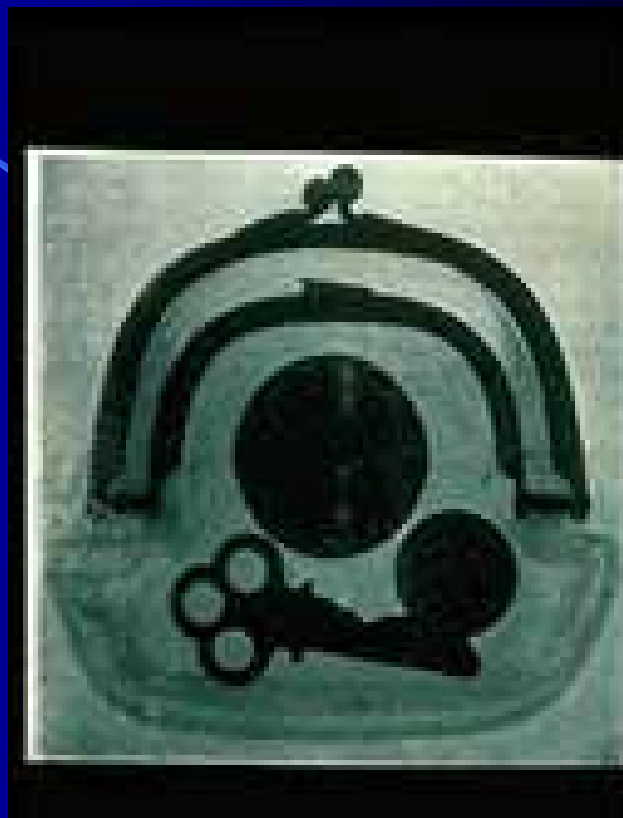


studiji namenjeni
izdelavi kostnih
portretov

Uporaba žarkov X



noga v škornju (marec 1896)



pogled v notranjost
ženske torbice

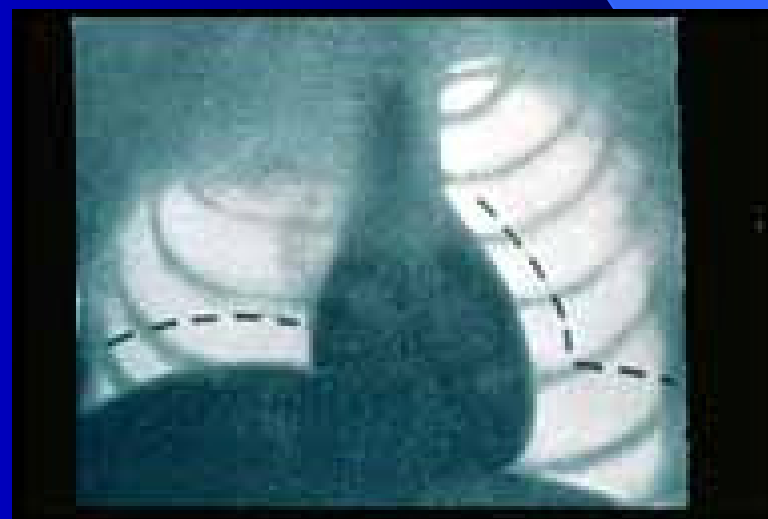
Žarki X vstopijo v medicinsko prakso

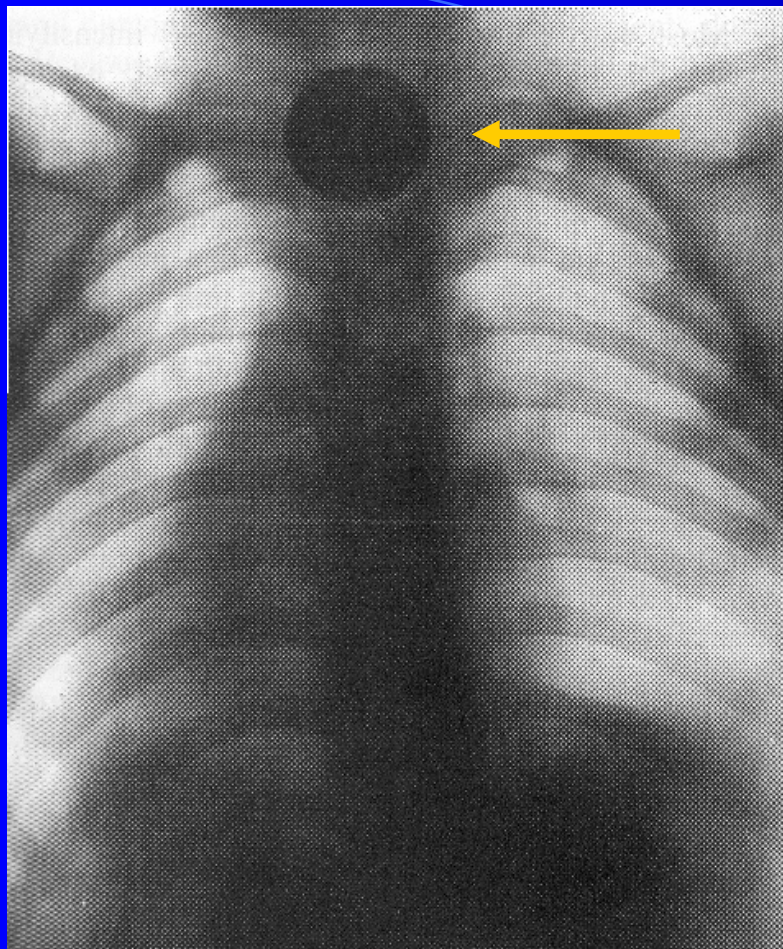


- to je pomenilo vstop naprave v odnos med zdravnikom in bolnikom, kar je bilo za tedanjo medicinsko prakso novost in je odpiralo številna vprašanja. Kdo lahko :
 - uporablja napravo,
 - izdeluje slike,
 - interpretira slike

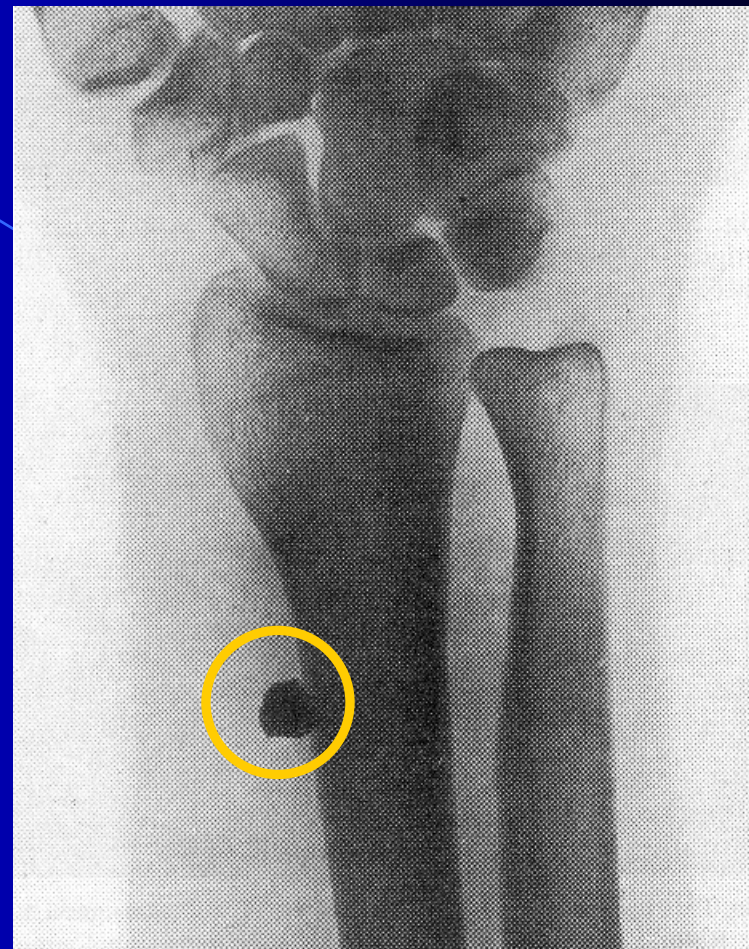


zdravnik je svoja
opažanja s
fluorescenčnega zaslona
prerisal na tanek
prosojen papir





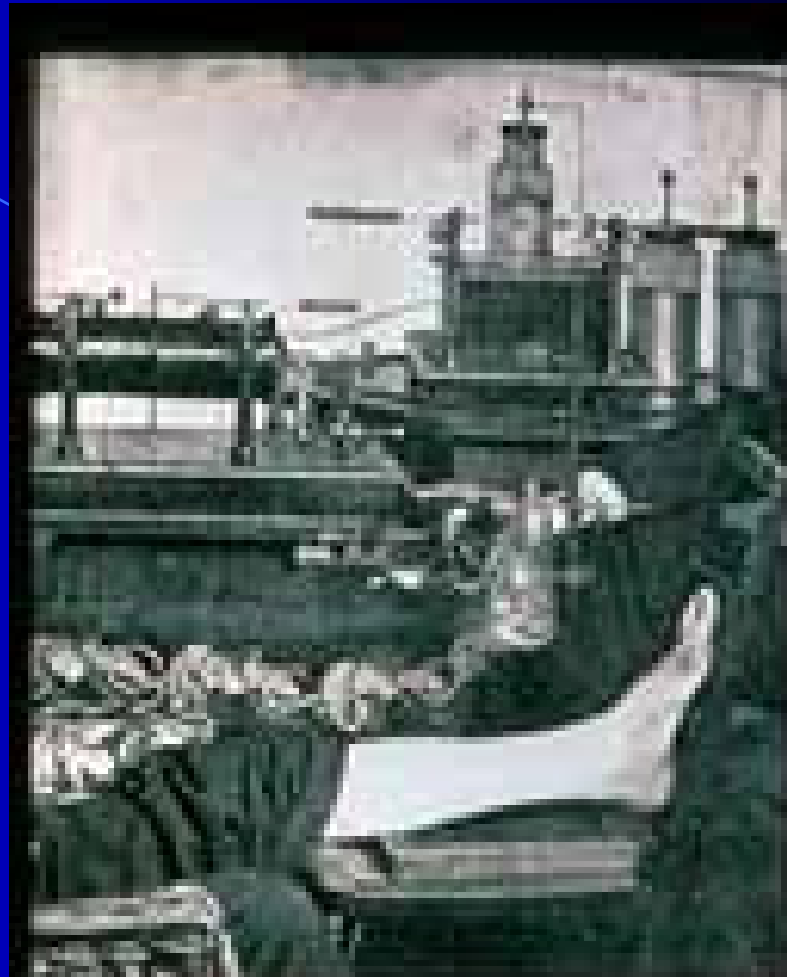
radiogram pljuč
otroka s kovancem v
požiralniku (1897)



radiogram podlakti in
zapestja s kovinskim
fragmentom
(F. H Williams 1901)

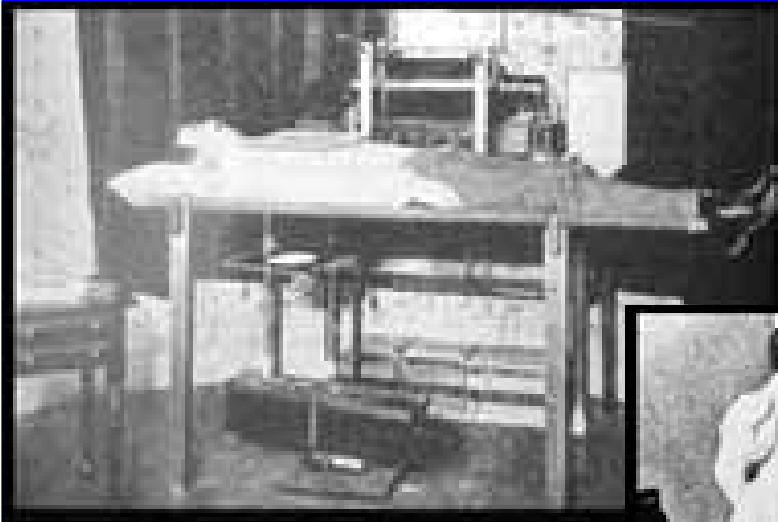


radiogram dlani s
šibrami
(Mihajlo Pupin
1896)



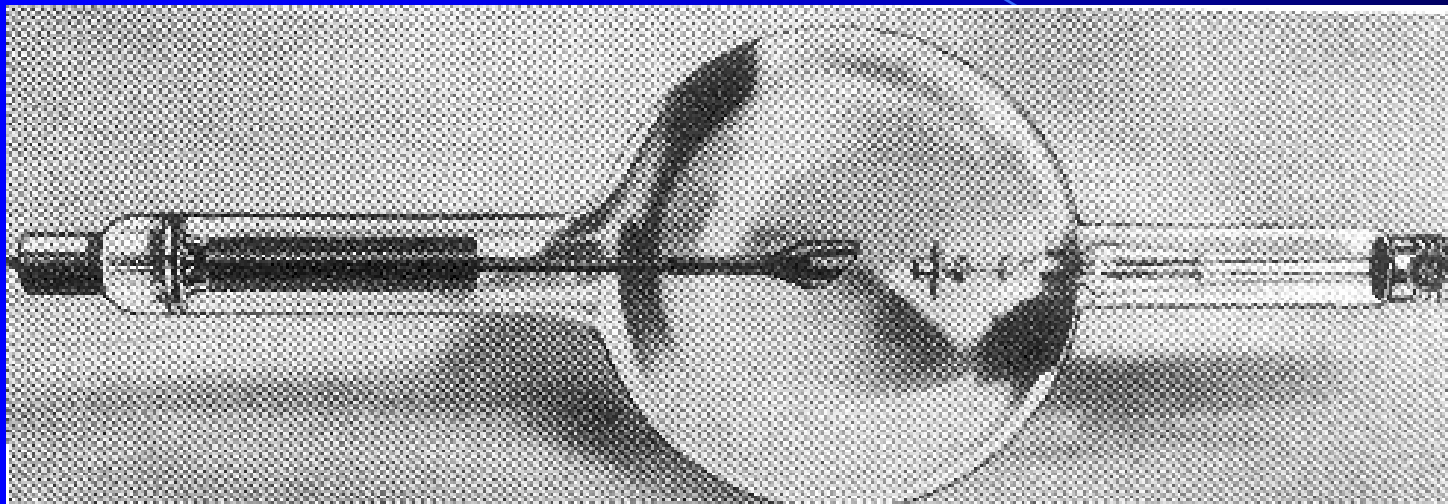
slikanje noge, zlom
(1896)

Žarkom X namenijo prostor v bolnišnicah



uporabnost radiologije v diagnostične in terapevtske namene je omogočila izvajanje dejavnosti v bolnišnicah in oblikovanje radioloških oddelkov

Izboljšave delovanja rtg cevi

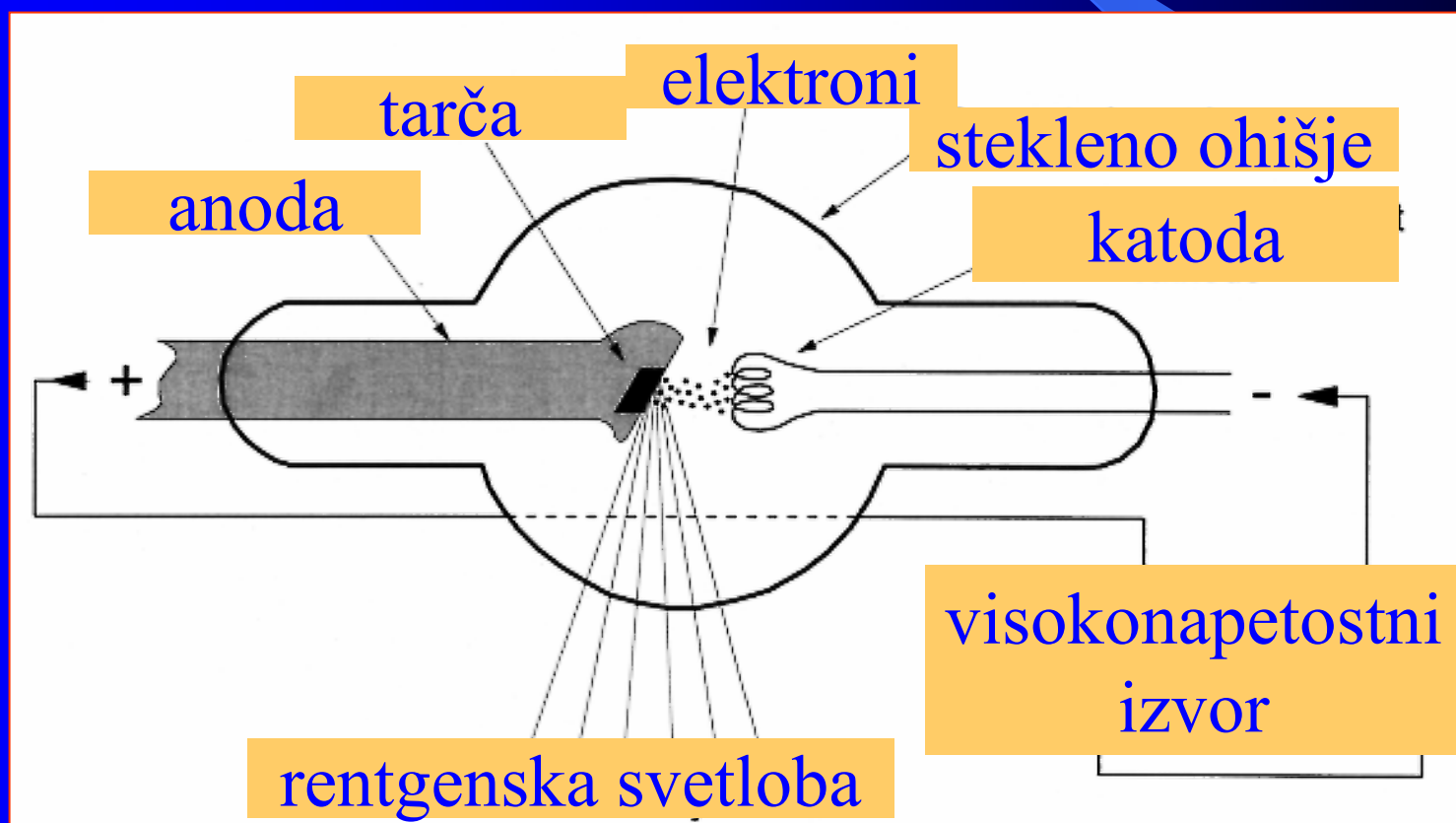


William David
Coolidge

- 1913 GE General Electric izdeluje tudi rentgenske cevi, ki jih modificira z dodatno volframovo žarilno nitko, kot izvorom elektronov (molekule plina v cevi niso potrebne kot izvor elektronov zato postane delovanje cevi stabilnejše)
- nova cev omogoča delovanje v vakuumu, kar dovoljuje uporabo višjih napetosti to pa pomeni tudi višjo energijo žarkov X in s tem zdravljenje ne samo površinskih tumorjev

Rentgenska cev- shematsko

- Rentgenska cev je evakuirana posoda iz steklenega ali kovinskega ohišja, v kateri sta nameščeni katoda in anoda.

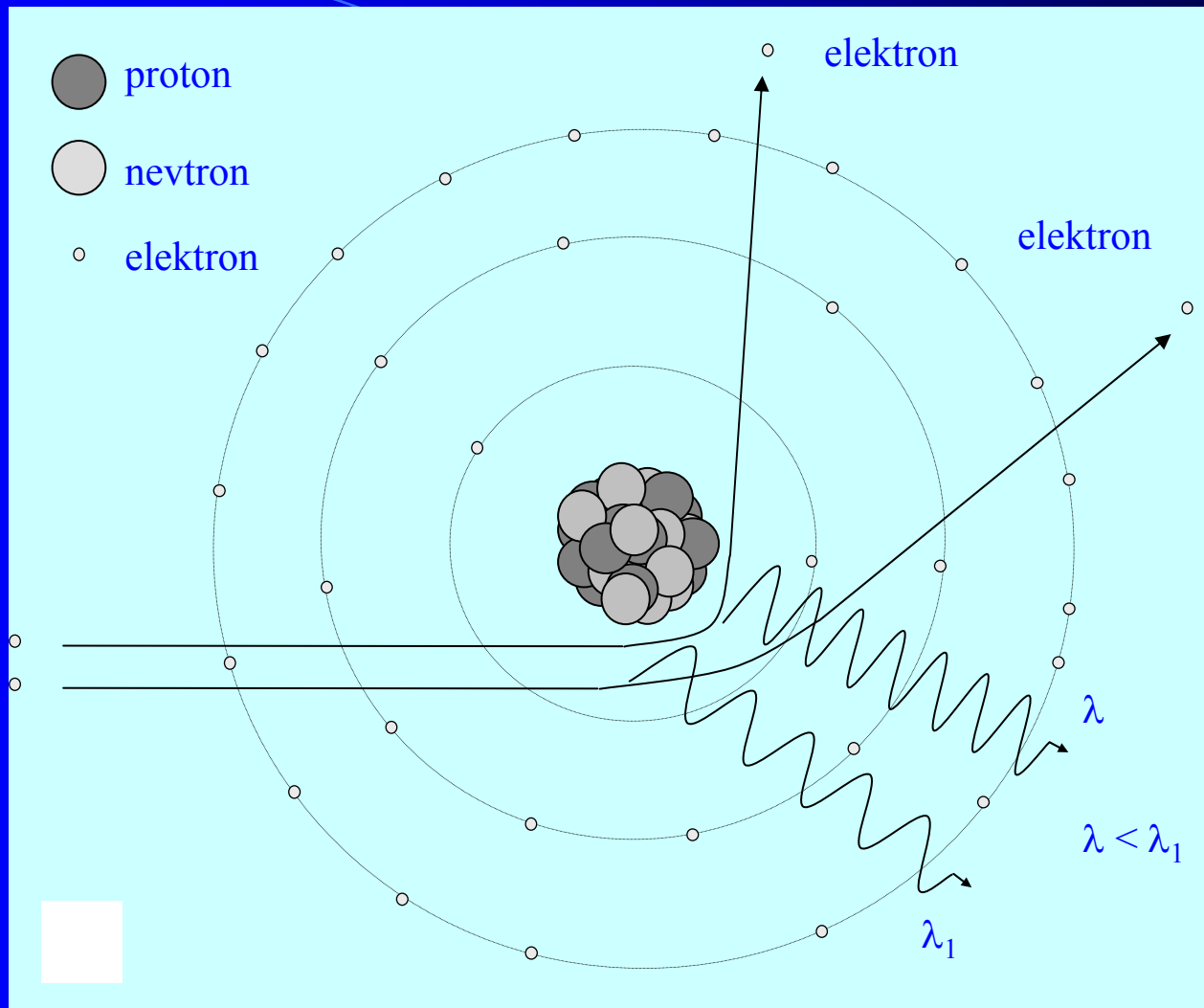


Zavorno sevanje

- Električno polje med anodo in katodo v rentgenski cevi pospeši elektrone in ti dosežejo kinetično energijo eU_{\max} , ko udarijo na anodo.
- Pojav pri katerem nastane foton, ko se zmanjša kinetična energija hitrega elektrona imenujemo zavorno sevanje.
- Tak pojav je mogoč, če se giblje nabiti delec v električnem polju drugega nabitega delca.
- Hitri elektron izgublja kinetično energijo pri gibanju po anodi ob trkih z elektroni atomov, ne da bi zavorno seval. Lahko pa seva v električnem polju težkega atomskega jedra.
- Foton, ki nastane pri zavornem sevanju elektrona v električnem polju jedra, prevzame poljuben del elektronove kinetične energije.
- V primeru, da foton prevzame vso kinetično energijo in da je elektron prej še ni nič izgubil, je energija fotona

$$h\nu_{\max} = eU_{\max}$$

Nastanek zavornega rentgenskega sevanja



- Elektronu, ki leti bližje jedru se kinetična energija bolj spremeni, zato ima foton rentgenske svetlobe, ki pri tem nastane višjo energijo in s tem manjšo valovno dolžino, kot v primeru, če je vpliv jedra na elektron šibkejši

- Energija $h\nu_{\max}$ je največja mogoča energija fotona pri zavornem sevanju.
- Spekter zavornega sevanja ali zavorni spekter je zvezen. V njem so zastopane sestavine z vsemi frekvencami, ki so manjše kot mejna frekvenca

$$\nu_{\max} = \frac{eU_{\max}}{h}$$

- Frekvenci ν_{\max} ustreza kratkovalovna meja spektra

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU_{\max}}$$

- V enačbi nastopa koeficient

$$\frac{ch}{e} = 1240 \text{ Vnm}$$

- Pri napetosti 60 kV na rentgenski cevi je kratkovalovna meja 0,021 nm, pri napetosti 120 kV pa 0,01 nm.

- Večino kinetične energije zgubijo elektroni pri gibanju po anodi ob trkih z elektroni.
- Le majhen delež skupne kinetične energije elektronov se porabi za nastanek rentgenske svetlobe ob trkih z jedri.
- Fotoni, ki nastanejo pri zavornem sevanju elektronov v zelo tanki anodi so enakomerno porazdeljeni po energiji od 0 do mejne energije $h\nu_{\max}$.
- Spekter rentgenske svetlobe, ki jo seva tanka anoda, je po tem

$$\frac{dj_{\nu}}{d\nu} = \textit{konst.}$$

za

$$0 \leq \nu < \nu_{\max}$$

- Debelo anodo si mislimo sestavljeno iz tankih plasti. V vrhnji plasti hitri elektroni zaradi trkov z elektroni v atomih izgubijo kinetično energijo $eU_{\max} - \Delta W_k$.
- V drugo plast priletijo elektroni s kinetično energijo $eU - \Delta W_k$. Spekter rentgenske svetlobe, ki jo seva druga plast, je tedaj $dj/dv = \text{konstanta}$ za področje $0 \leq v < v_{\max} - \Delta W_k/h$
- Tudi v drugi plasti izgubijo elektroni kinetično energijo ΔW_k in priletijo v tretjo plast s kinetično energijo $eU - 2\Delta W_k$.
- Po enakem sklepu kot prej je spekter rentgenske svetlobe, ki jo seva tretja plast, je tedaj $dj/dv = \text{konstanta}$ za področje $0 \leq v < v_{\max} - 2\Delta W_k/h$ in tako naprej ...
- Upoštevana je samo izguba kinetične energije zaradi trkov hitrih elektronov z elektroni v atomih, ne pa tudi izguba energije zaradi zavornega sevanja, saj zaradi tega elektroni izgubijo samo majhen delež kinetične energije.

Spekter zavornega sevanja

Pri tanki anodo velja

$$dj/d\nu = \text{konstanta}$$

$$0 \leq \nu < \nu_{\max} - \Delta W_k/h$$

verjetnost za nastanek fotonov rentgenske svetlobe se zmanjšuje z višanjem njihove energije

$dj/d\nu$

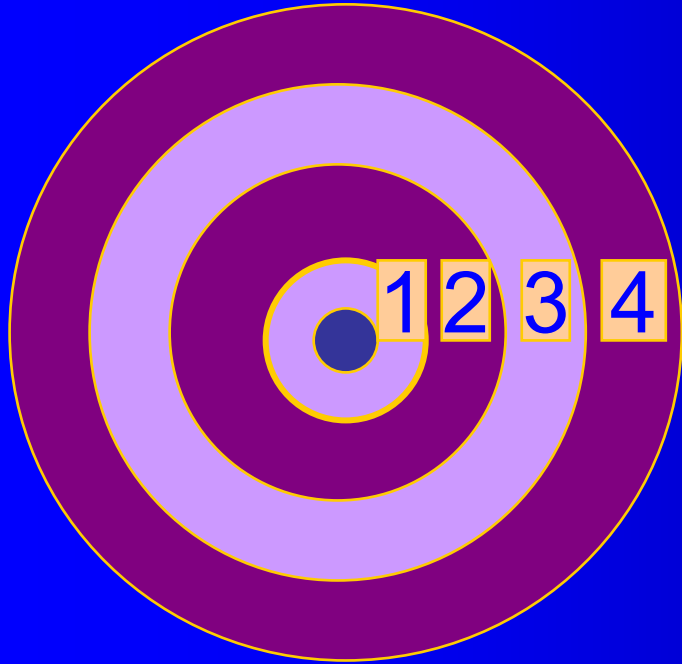


ν

iz oblike spektra sledi, da je število fotonov rentgenske svetlobe sorazmerno kvadratu pospeševalne napetosti U_{\max}

$$P = S \int_0^{\nu_{\max}} \left(\frac{dj_{\nu}}{d\nu} \right) d\nu = k \left(\nu_{\max} \nu - \frac{\nu^2}{2} \right) \Big|_0^{\nu_{\max}} = k \nu_{\max}^2$$

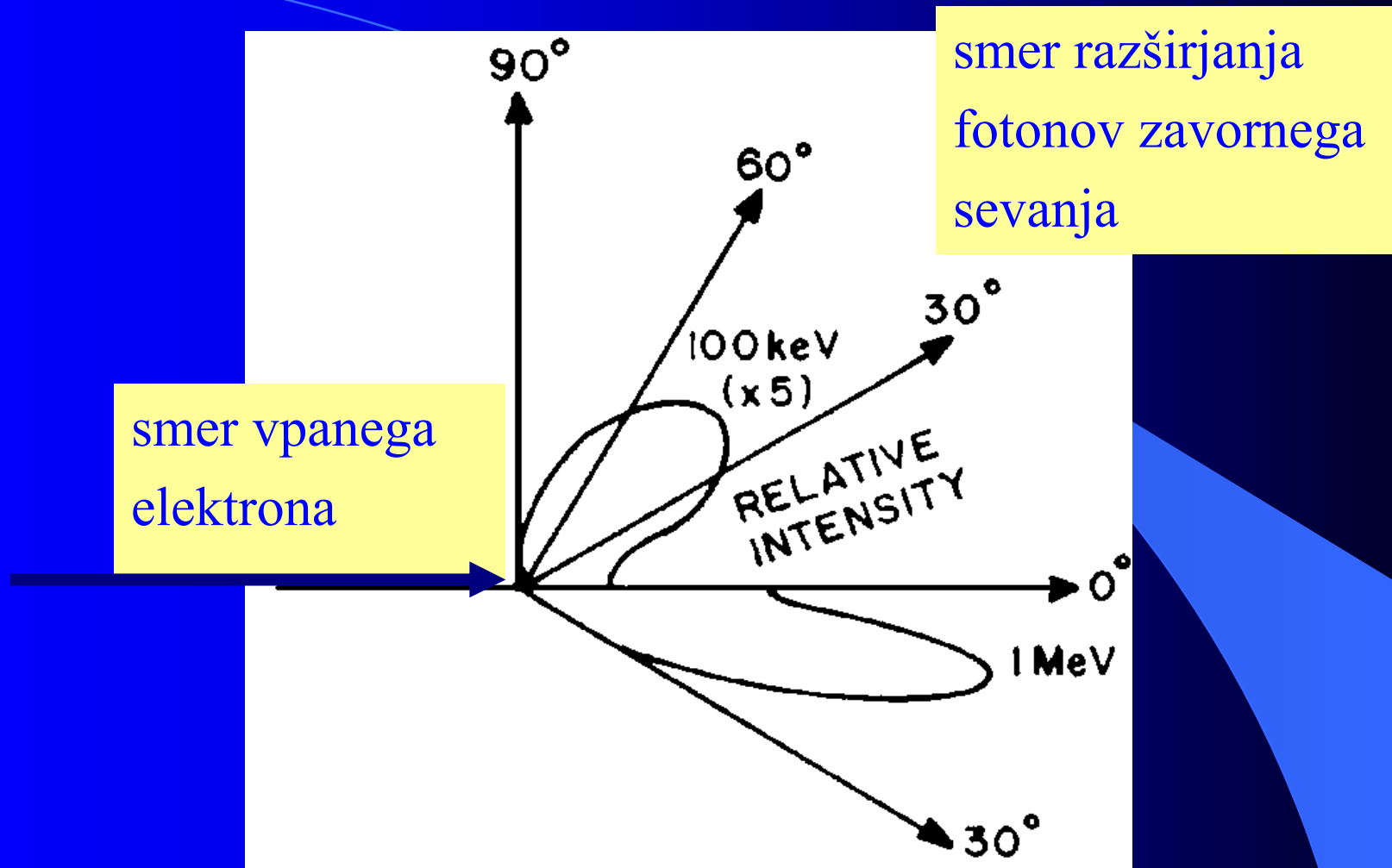
Enostavna razlaga oblike spektra



ploščine kolobarjev z oznakami 1, 2, 3 in 4 so

$2\pi r_1 h$, $2\pi r_2 h$, $2\pi r_3 h$ in $2\pi r_4 h$, če je r radij kolobarja in h njegova širina

kolobarji predstavljajo predele okoli jedra atoma na katerih elektroni zavorno sevajo, energija fotonov rentgenske svetlobe je največja v kolobarju z oznako 1 in najmanjša v kolobarju z oznako 4, število fotonov rentgenske svetlobe različnih energij je sorazmerno s ploščino Kolobarjev.



Relativna jakost pri energiji elektronov 100keV in 1 MeV

(Data from Scherzer, O. *Ann Phys* 1932; **13**:137; and Andrews, H. *Radiation Physics*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall International, 1961.)

Učinkovitost

- učinkovitost pretvorbe kinetične energije elektrona v rentgensko svetlobo lahko zapišemo

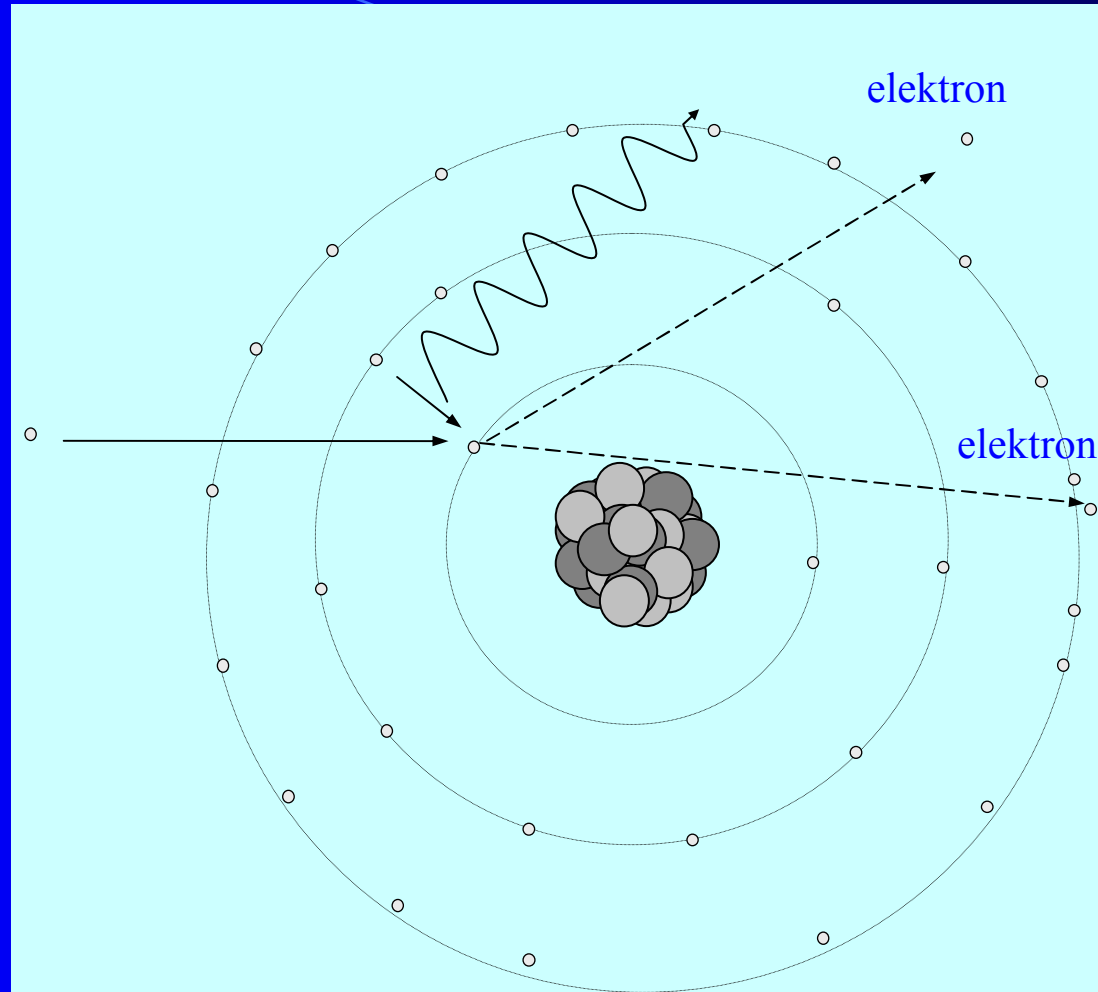
$$\eta_z(\%) \propto U \cdot Z \cdot 10^{-7}$$

- kar pomeni, da nastane več rentgenske svetlobe, če je napetost med katodo in anodo (U) čim večja in če je vrstno število snovi iz katerega je anoda tem večje

Karakteristično sevanje

- Pri trkih elektrona z atomom lahko elektron z dovolj veliko kinetično energijo izbije elektron s kakšnega nivoja v sredici. Na tem nivoju nastane vrzel, ki jo je lahko izpolni elektron s kakšnega višjega, zasedenega nivoja.
- Z nivoja na nivo preide elektron, ki je močno vezan na atom.
- Energija izsevanih fotonov je zato zelo velika in valovna dolžina leži na rentgenskem območju.
- Energija fotonov v črti je značilna za element iz katerega je anoda in jim pravimo značilne ali karakteristične črte - govorimo o značilnem ali karakterističnem rentgenskem sevanju.
- Karakteristično sevanje se razlikuje od zavornega sevanja, ki ima zvezni spekter in na katerega sestav anode ne vpliva.

Nastanek karakterističnega rentgenskega sevanja



- Elektron z dovolj veliko kinetično energijo lahko izbije elektron iz notranjih lupin atoma. Pri tem nastane vrzel, ki jo lahko izpolni elektron z energijsko višje, zasedene lupine. Z nivoja na nivo preide elektron, ki je močno vezan na atom, zato je energija izsevanih fotonov v območju rentgenske svetlobe .

- Energija nivoja je odvisna od glavnega kvantnega števila n in od tirnega kvantnega števila l .
- Pri glavnem kvantnem številu $n=1$ imamo dva nivoja $1s$. Pri glavnem kvantnem številu $n=2$ imamo 2 nivoja $2s$ in 6 nivojev $2p$, skupaj 8.
- V težjih atomih so vsi ti nivoji zasedeni z elektroni iz sredice. Dokler ostanejo zasedeni, ne morejo imeti nobene vloge pri prehodih.
- V rentgenski spektroskopiji uporabljamo posebne oznake.
- Stanje atoma z vrzeljo na nivoju z glavnim kvantnim številom $n=1$ označimo s K .

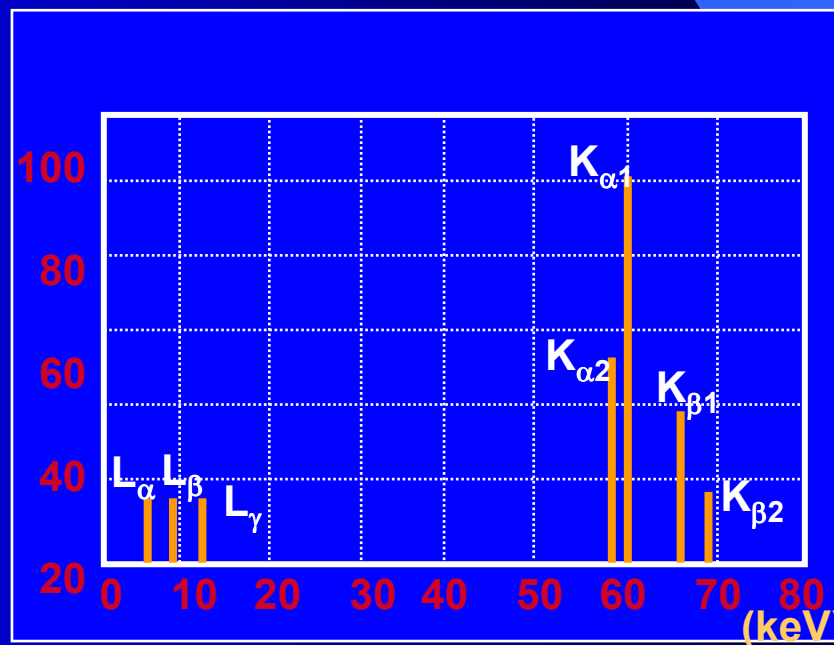
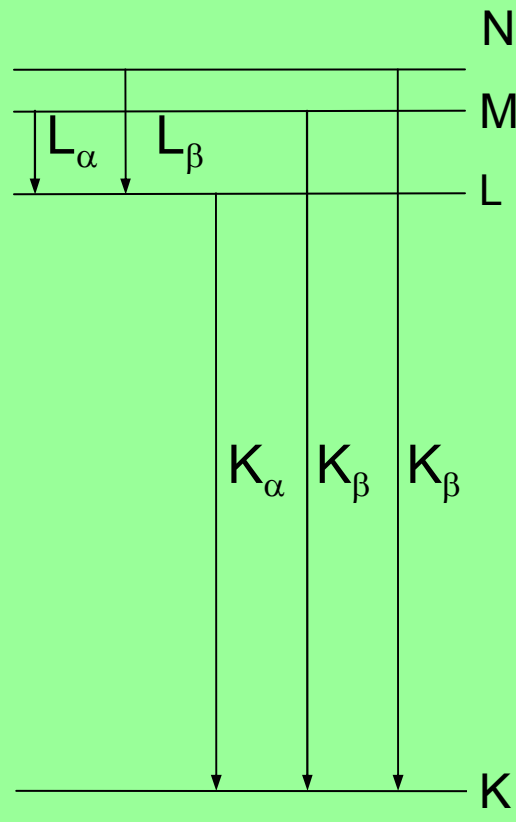
Oznake v rentgenski spektroskopiji

- Stanje atoma z vrzeljo na nivoju z glavnim kvantnim številom $n = 2$ označimo z L. Podrobneje označimo stanje atoma z L_I , če je vrzel na nivoju 2s, z L_{II} in z L_{III} , če je vrzel na nivoju 2p.
- Stanje atoma z vrzeljo na nivoju z glavnim kvantnim številom $n=3$ označimo z M in dalje po abecedi.
- Atom v stanju K ima večjo energijo kot atom v stanju L.
- Spektralno črto, ki nastane pri prehodu iz stanja K v stanje L, imenujemo $K\alpha$.
- Pri prehodu iz stanja K v stanje M ali iz stanja K v stanje N, ki so zelo blizu stanjem M, nastane spektralna črta $K\beta$.
- Pri prehodu iz stanja L v stanje M nastaneta spektralni črti $L\alpha$ in $L\beta$.

Karakterističen spekter rentgenske svetlobe

začetno stanje	končno stanje	oznaka prehoda	anoda		
			${}_{74}\text{W}$	${}_{45}\text{Rh}$	${}_{42}\text{Mo}$
			energija (keV)		
L_{II}	K	$K_{\alpha 2}$	58,0	20,1	17,4
L_{III}	K	$K_{\alpha 1}$	59,3	20,2	17,5
M_{II}	K	$K_{\beta 3}$	66,9	22,7	19,6
M_{III}	K	$K_{\beta 1}$	67,2	22,7	19,6
N_{II}	K	$K_{\beta 2}$	69,0	23,2	19,9
N_{III}	K	$K_{\beta 2}$	69,1	23,2	19,9

energija fotonov (keV)



- V rentgenskem spektru kateregakoli elementa so najizrazitejše črte K in od njih je najizrazitejša črta $K\alpha$. Ta črta ustreza prehodu z nivoja z $n=2$ na nivo z $n=1$, torej prvi črti Lymanove serije v vodikovem spektru z valovno dolžino 121,6 nm.
- Efektivni naboj jedra za elektron na enem od obeh nivojev 1s je $(Z-1)e$, ker mu drugi elektron zastira naboj golega jedra Ze .
- Pri približnem računu upoštevamo kot efektivni naboj jedra pri prehodu z nivojev z $n=2$ na nivo z $n=1$ kar $(Z-1)e$. Približno valovno dolžino črte $K\alpha$ dobimo potem iz enačbe

$$1/\lambda_{K\alpha} = (Z-1)^2/\lambda_0 \quad (\lambda_0 = 121,6 \text{ nm})$$

- Približni enačba nosi ime po angleškem fiziku Henry Moselyju

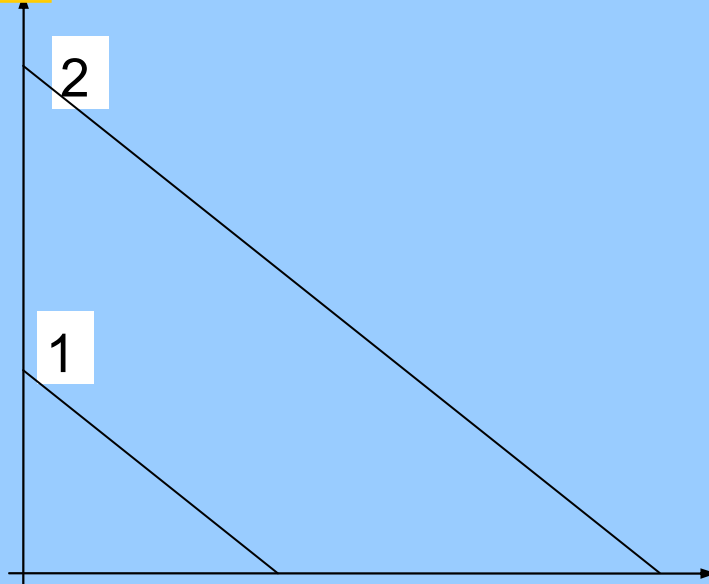
$$\lambda_{K\alpha} = \lambda_0 / (Z-1)^2 \quad (\lambda_0 = 121,6 \text{ nm})$$

- Enačba da za valovno enačbo črte $K\alpha$ bakra (Cu) z vrstnim številom $Z=29$, $\lambda_{K\alpha} = 121,6 \text{ nm} / 28^2 = 0,155 \text{ nm}$, kar se zadovoljivo ujema z izmerjeno valovno dolžino 0,154 nm.

Spekter rentgenske svetlobe

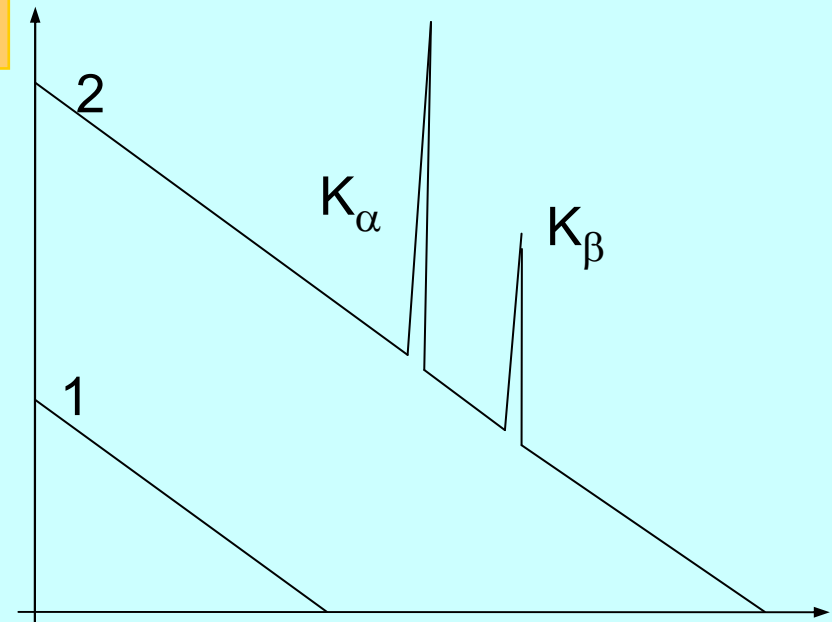
- Zvezni oziroma zavorni del spektra rentgenske svetlobe pri dveh napetostih na rentgenski cevi U_1 in U_2 pri čemer je $U_2 > U_1$ (brez filtracije)
- Zvezni oziroma zavorni in karakteristični del spektra rentgenske svetlobe pri dveh napetostih na rentgenski cevi U_1 in U_2 pri čemer je $U_2 > U_1$. V prvem primeru je napetost prenizka za karakteristični del spektra. (brez filtracije)

dj/dv



energija fotonov (keV)

dj/dv



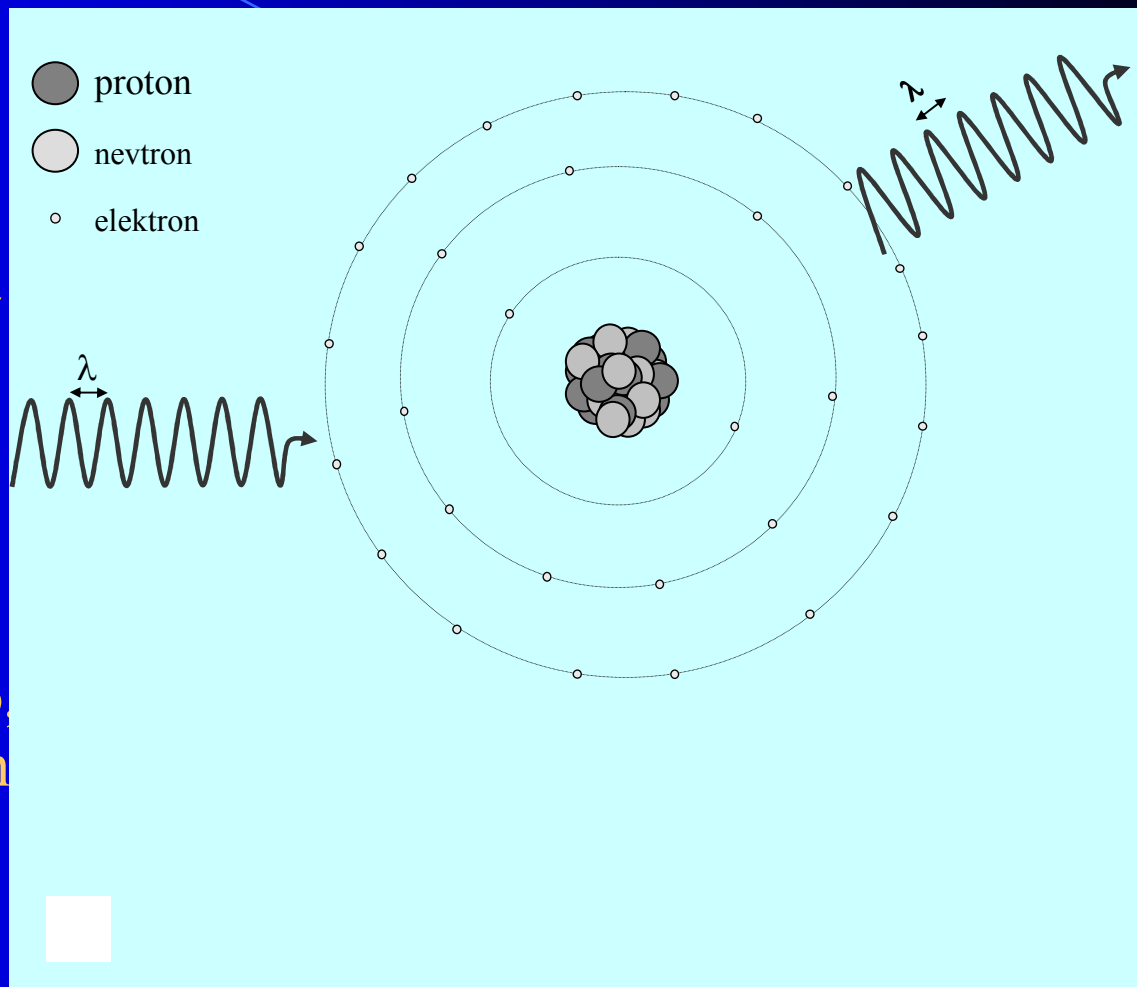
energija fotonov (keV)

Interakcije fotonov rentgenske svetlobe s snovjo

- Rayleighovo ali elastično sipanje
- Comptonovo ali neelastično sipanje
- Fotoefekt
- Nastanek parov

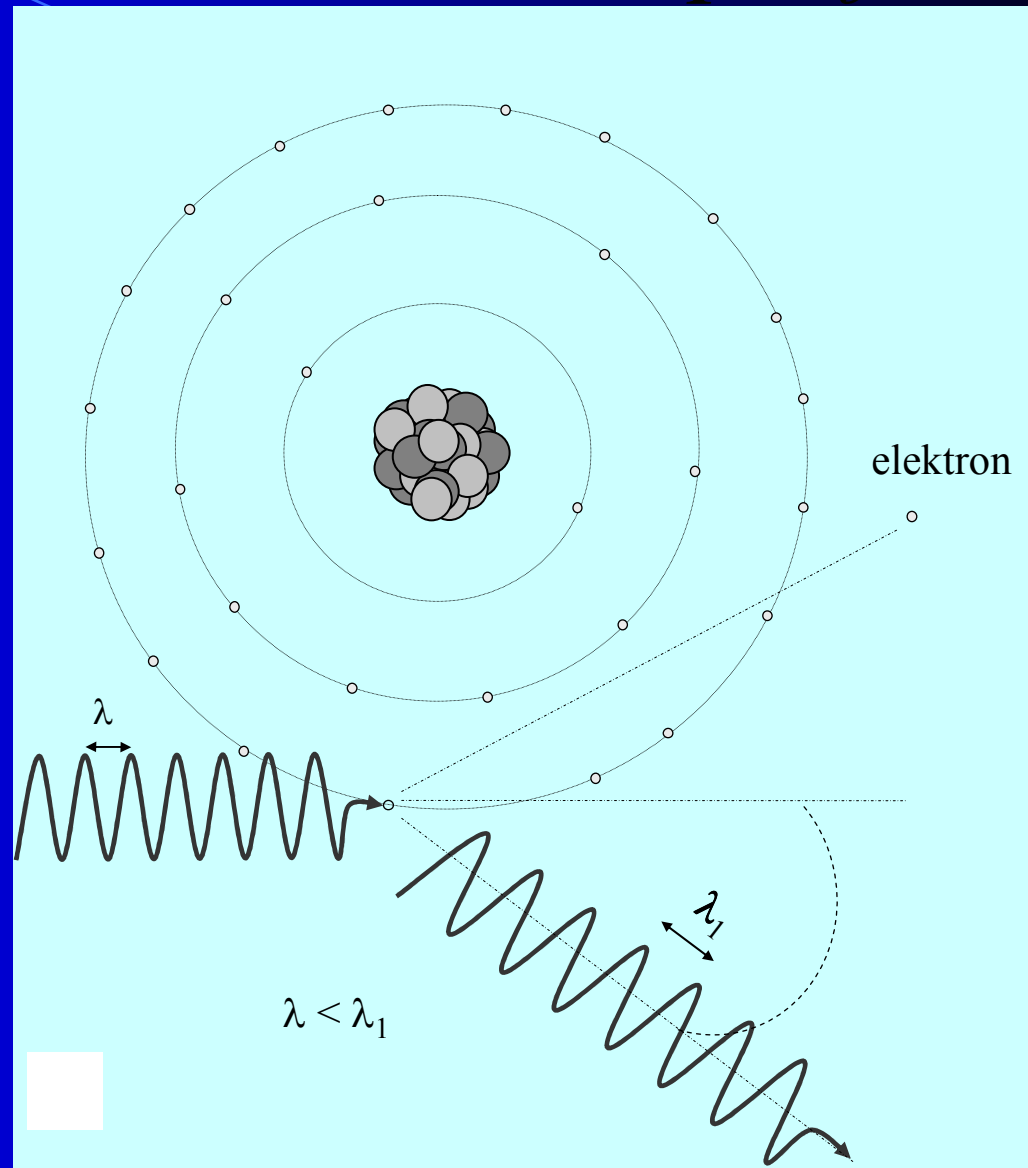
Rayleighovo ali elastično sipanje

- Shematska predstavitev Rayleighovega sipanja z vpadnim fotonom valovne dolžine λ , ki interagira z elektroni atoma in nastanek sipanega fotona z enako valovno dolžino, ki je le malo odklonjen od smeri vpadnega fotona.

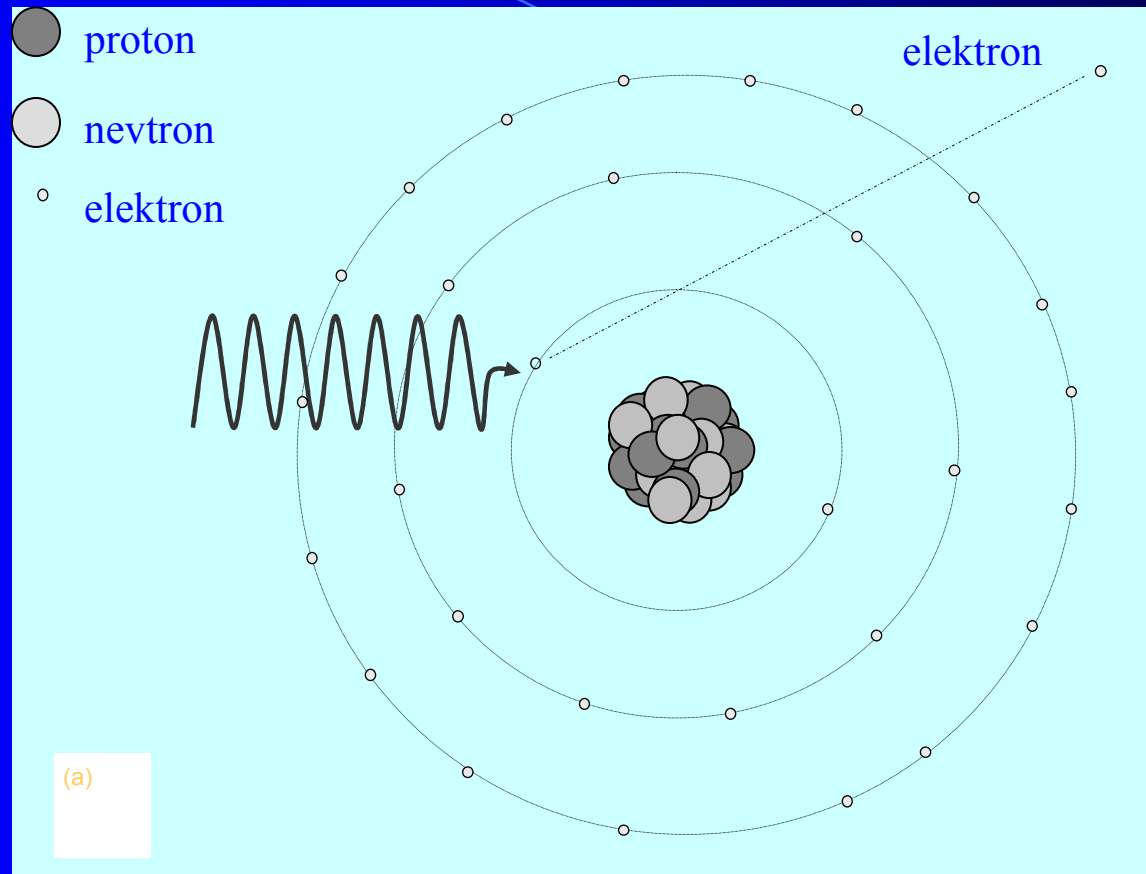


Comptonovo ali neelastično sipanje

- Shematski prikaz Comptonovega sipanja, pri čemer se energija vpadnega fotona porazdeli med izbiti valenčni elektron in novonastali Comptonov foton, ki ima spremenjeno smer razširjanja in večjo valovno dolžino.

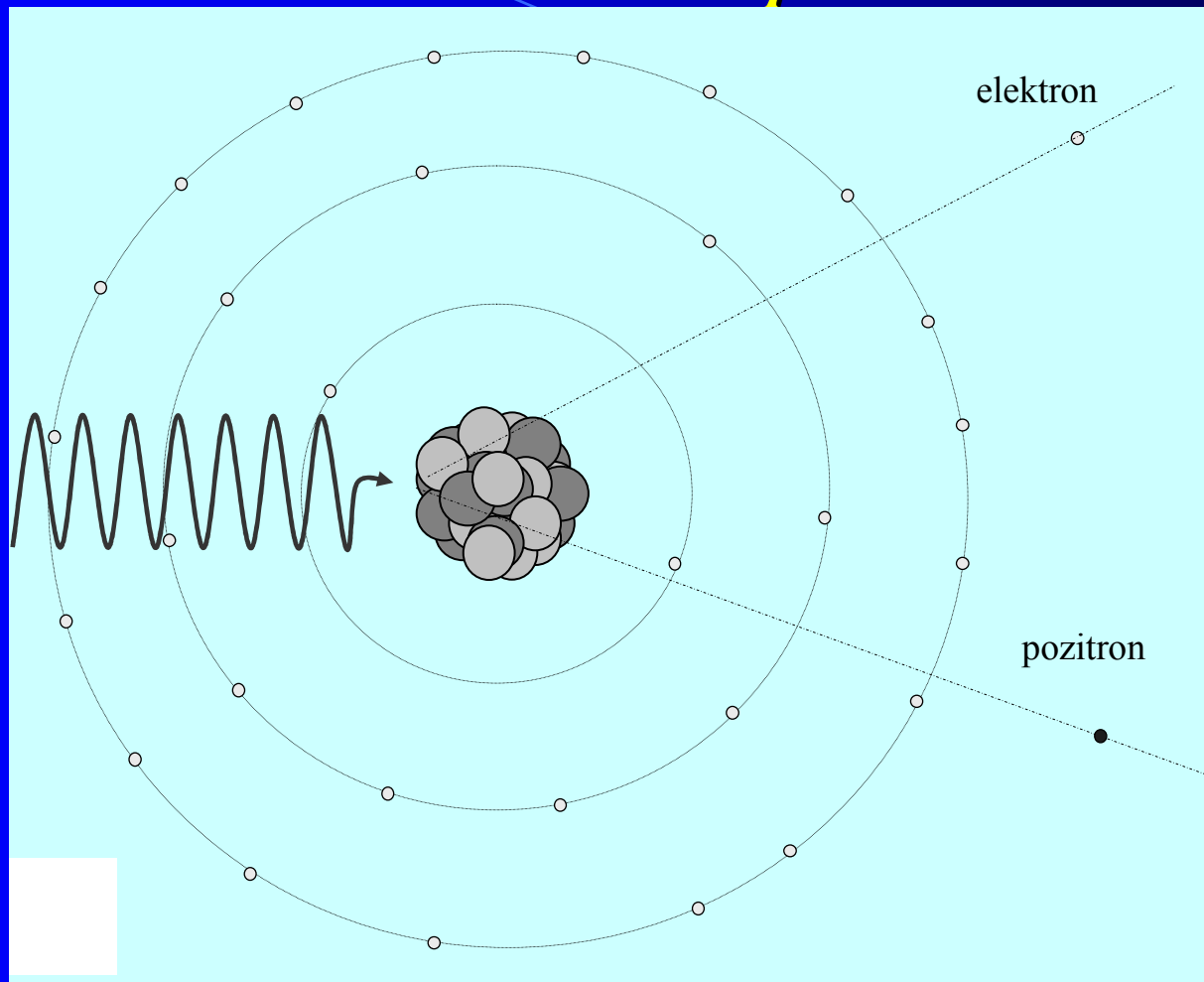


Fotoefekt



- Foton izbije elektron na nivoju lupine K, pri tem ima izbiti elektron kinetično energijo, ki je enaka razliki energije vpadnega fotona in vezavne energije elektrona na nivoju te lupine. Pri fotoefektu vso energijo vpadnega fotona prevzame elektron.

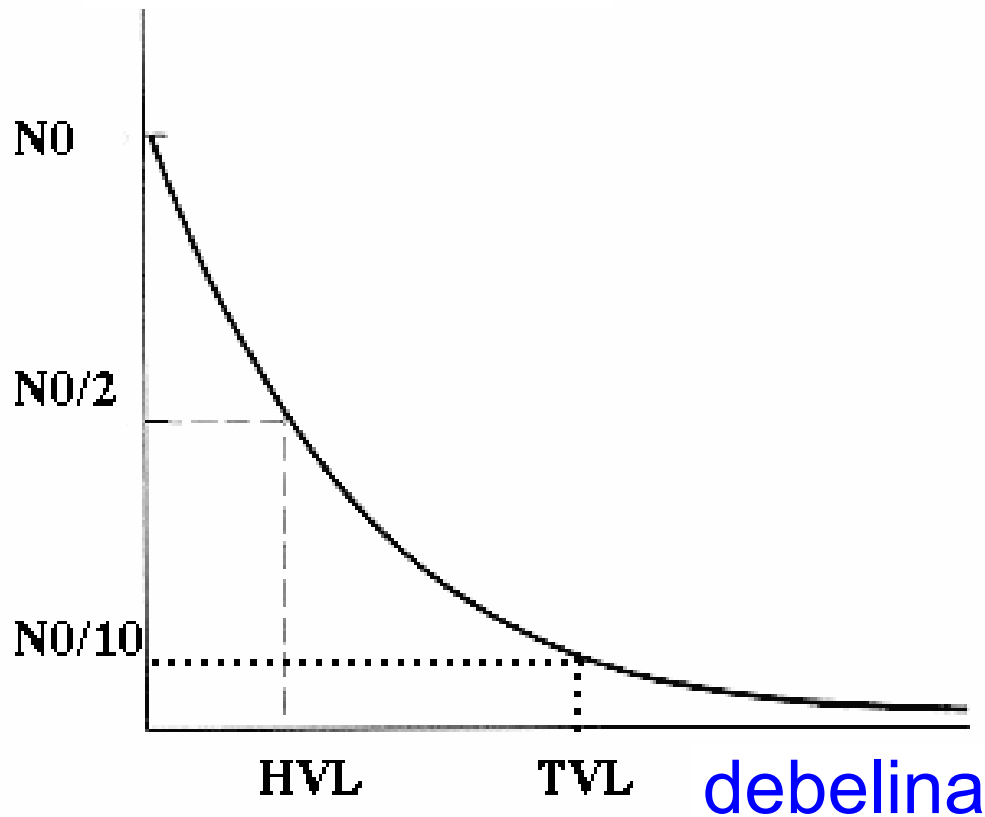
Nastanek parov



- Shematska predstavitev pojava nastanka para, pri katerem se energija fotona v bližini jedra pretvori v par elektron- pozitron.

Atenuacija-oslabitev toka fotonov

število fotonov



$$N = N_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

d : debelina absorberja

μ : atenuacijski koeficient

$$\mu = \mu_f + \mu_c + \mu_{np} + \mu_{el}$$

μ_f - fotoefekt

μ_c - Comptonovo sipanje

μ_{np} - nastanek parov

μ_{el} - elastično sipanje

HVL: razpolovna debelina (half value layer)

TVL: debelina, ki prepusti 10 % vpadnih fotonov
(tenth value layer-desetdebelina)

- Gostota enobarvnega (ista frekvenca oziroma valovna dolžina) rentgenskega toka pojema eksponentno z debelino plasti.

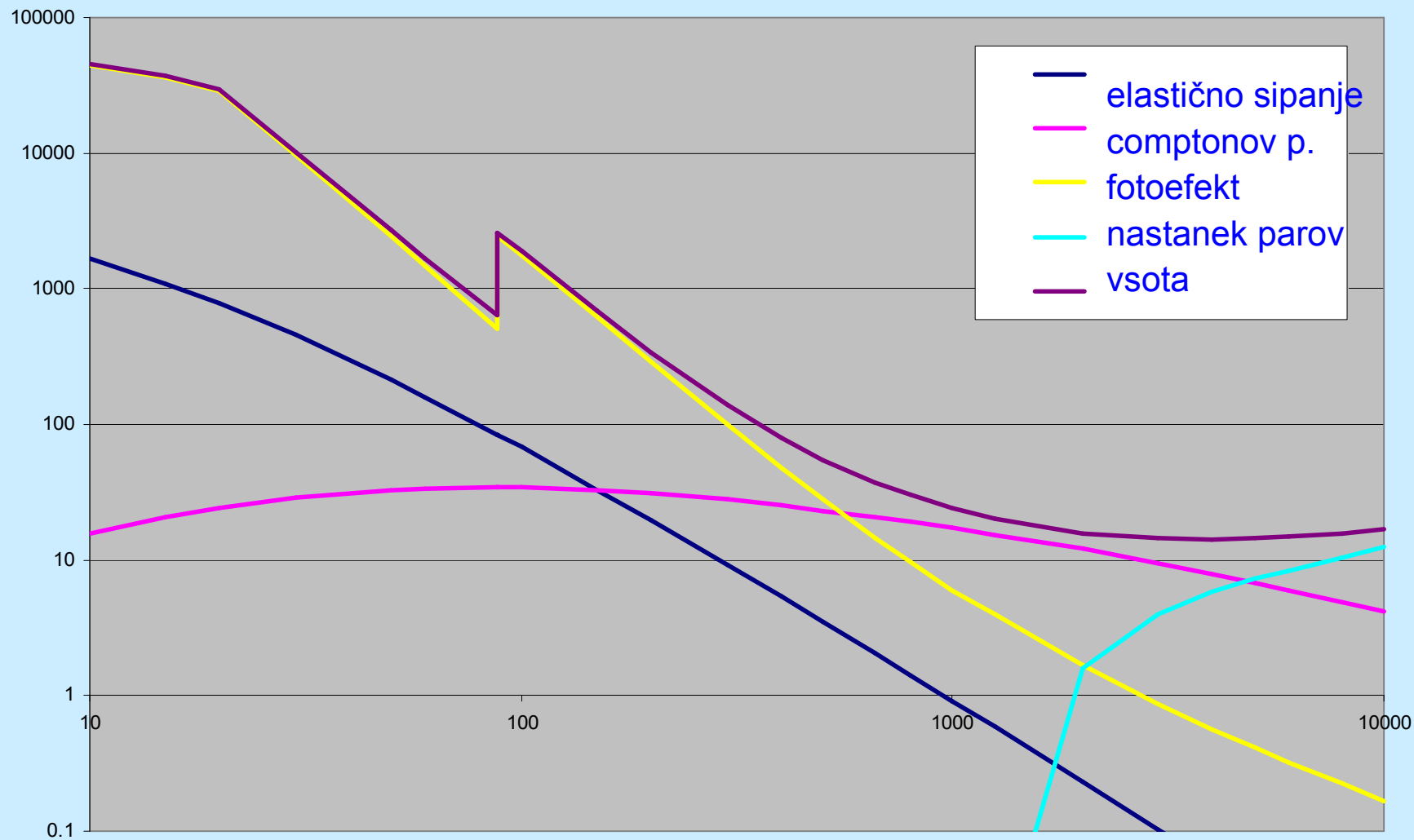
$$j = j_0 e^{-\mu x} = j_0 e^{-(\mu/\rho) \rho x}$$

pri tem je μ atenuacijski koeficient in
 μ/ρ masni atenuacijski koeficient

- Običajno za rentgensko svetlobo navedemo masni atenuacijski koeficient μ/ρ , ki se od snovi do snovi še manj spreminja kot atenuacijski koeficient.
- Atenuacijski koeficient tem večji čim večja je gostota elektronov in čim večja je valovna dolžina.
- Merjenja kažejo, da je absorpcijski koeficient v grobem sorazmeren približno s kubom valovne dolžine in s četrto potenco vrstnega števila. $\mu \propto \lambda^3 Z^4$

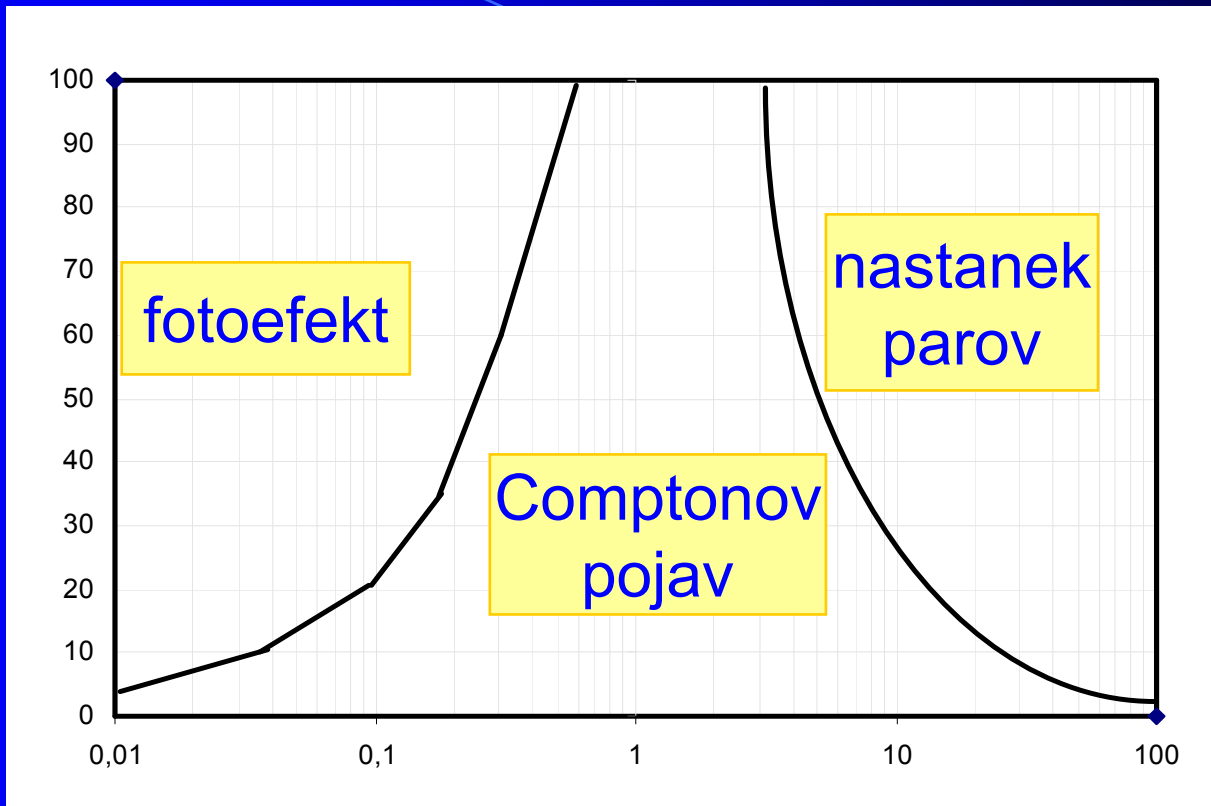
Odvisnost masnega atenuacijskega (oslabitvenega) koeficienta od energije fotonov

masni atenuacijski koeficient (μ/ρ)



energija (keV)

vrstno število (Z)



energija fotonov(MeV)

Prevladujoči procesi interakcij fotonov v različnih snoveh (različna vrstna števila) v odvisnosti od energije

tip interakcije	odvisnost od vrstnega števila (Z) in masnega števila (A)	odvisnost od energije fotonov
Fotoefekt	Z^4/A	E^{-3}
Comptonov pojav	Z/A	$E^{-1/2}$
Nastanek parov	Z^2/A	za $E > 1.02 \text{ MeV}$ $\log E$

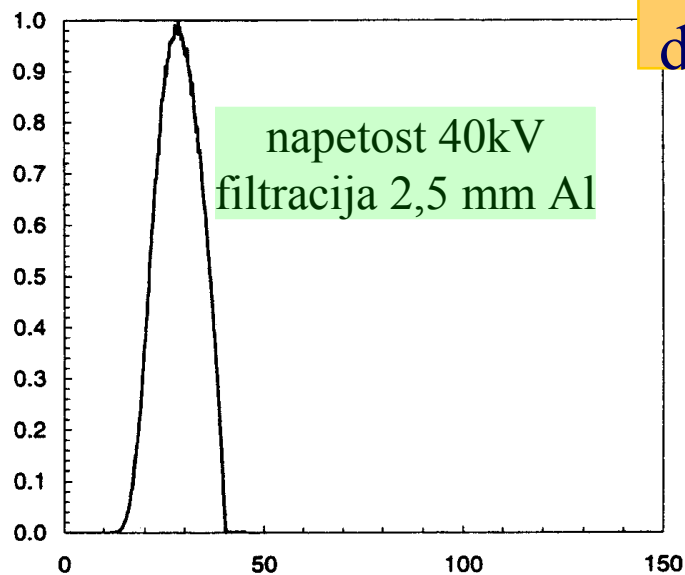
Odvisnost interakcij fotonov glede na različna vrstna in masna števila in energijo fotonov

Filtriranje rentgenske svetlobe

- Snop rentgenskega spektra gre, preden pade na objekt še skozi stekleno ohišje in skozi dodatne filtre. Ti so navadno iz bakra in ali aluminija.
- S filtracijo se znebimo nizko energijskih fotonov, ki jih drugače zaustavijo že zgornje plasti tkiva in ne dosežejo filma. Tako prispevajo k prejeti dozi ne pa tudi k izboljšanju slike.
- Spekter sevanja, ki ga prepusti filter, vsebuje relativno več visoko energijskih fotonov.
- Z dodajanjem filtrov postaja spekter vse ožji in trši.
- Z dodajanjem filtrov se zmanjšuje tudi jakost snopa in zato je potrebno ustrezno podaljševati trajanje ekspozicije.
- Pri nekaterih rentgenskih aparatih lahko filtre menjamo in tako lahko poiščemo idealno filtracijo za izbrano preiskavo.

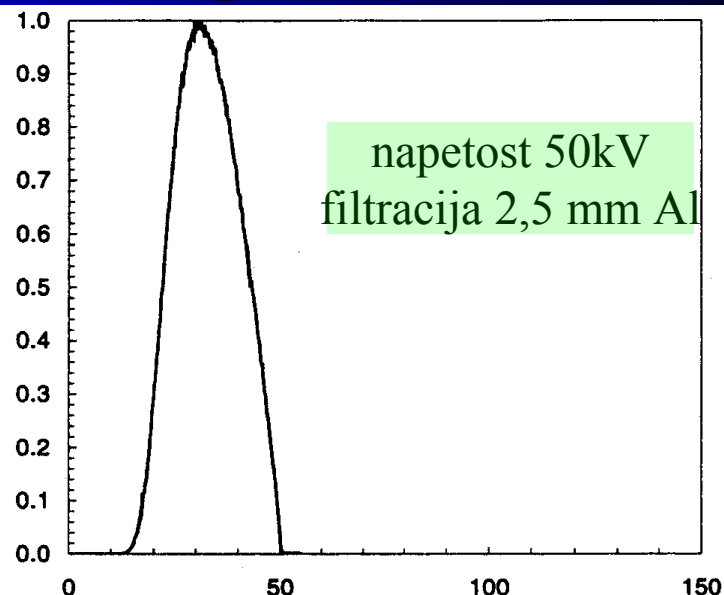
Spektri rentgenske svetlobe pri različnih napetostih in anodi iz W

dj/dE



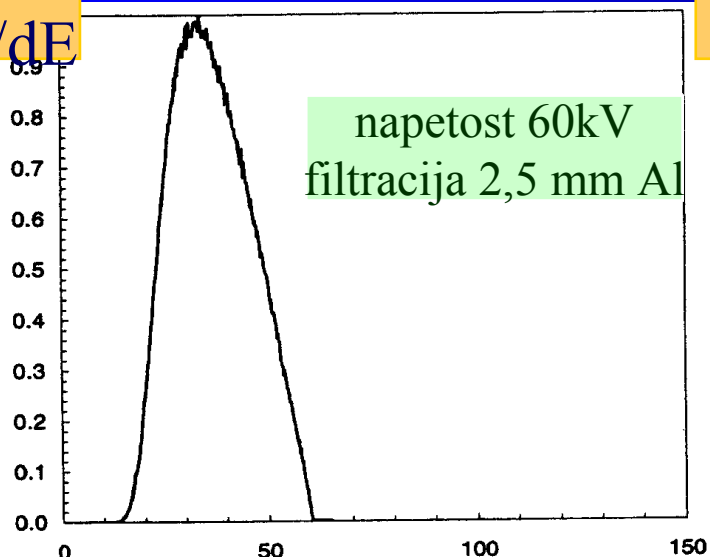
energija fotonov (keV)

dj/dE



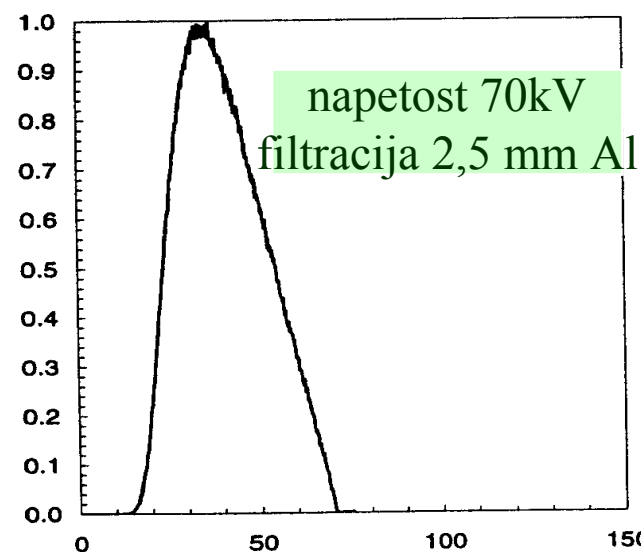
energija fotonov (keV)

dj/dE



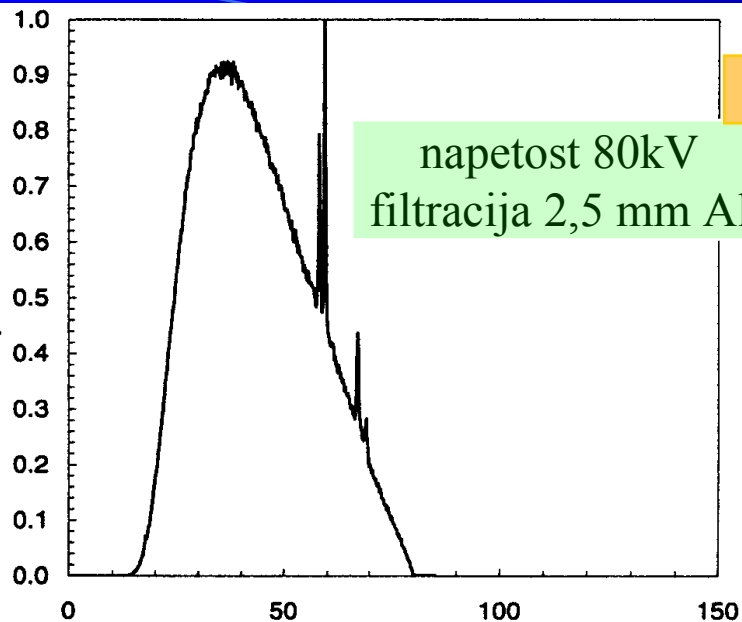
energija fotonov (keV)

dj/dE



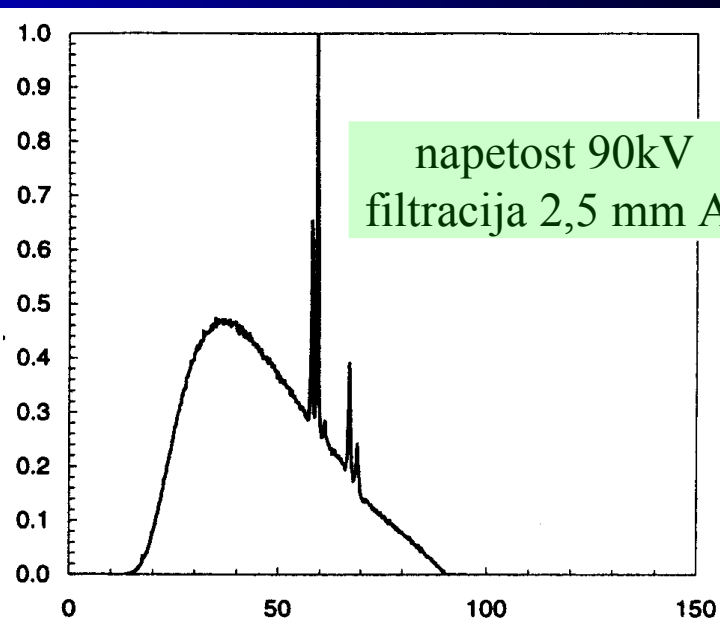
energija fotonov (keV)

dj/dE



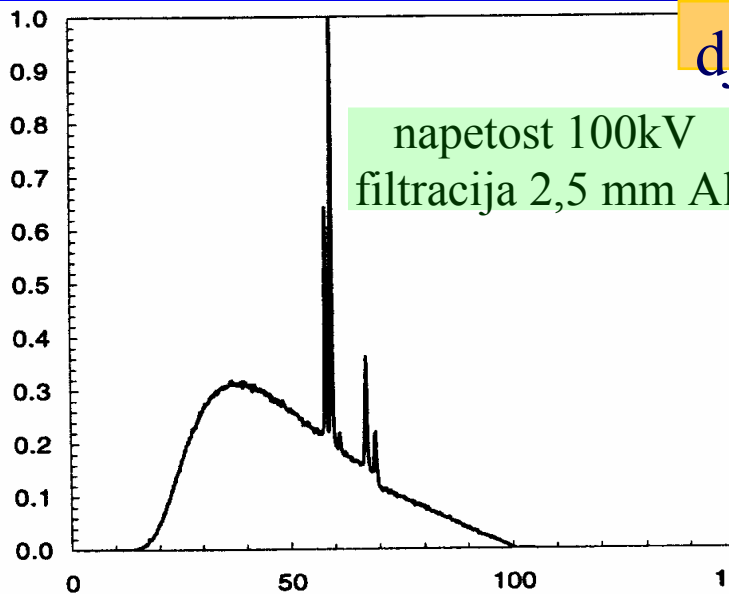
energija fotonov (keV)

dj/dE



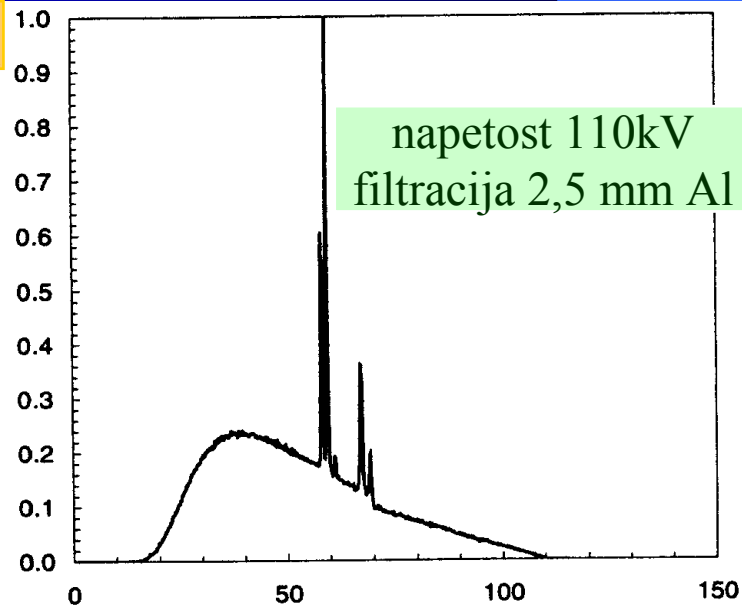
energija fotonov (keV)

dj/dE



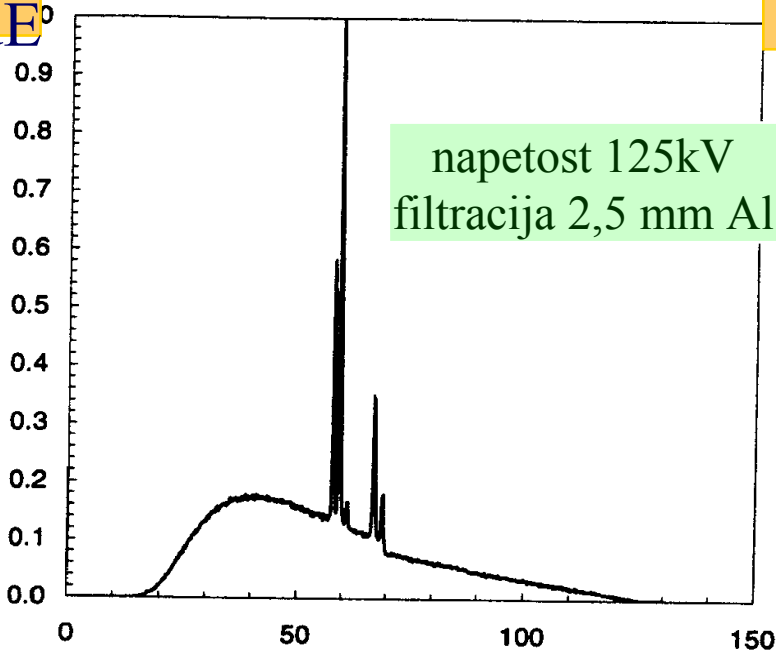
energija fotonov (keV)

dj/dE



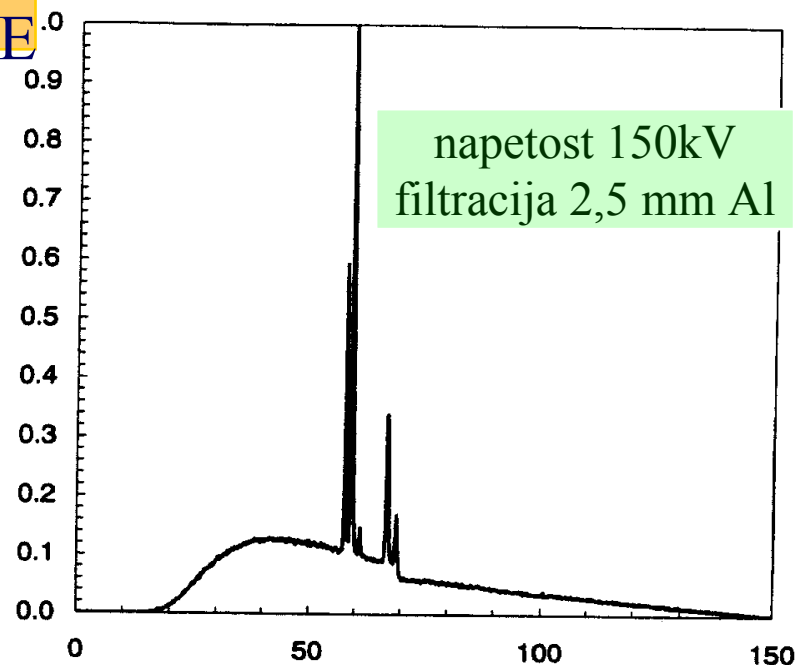
energija fotonov (keV)

dj/dE



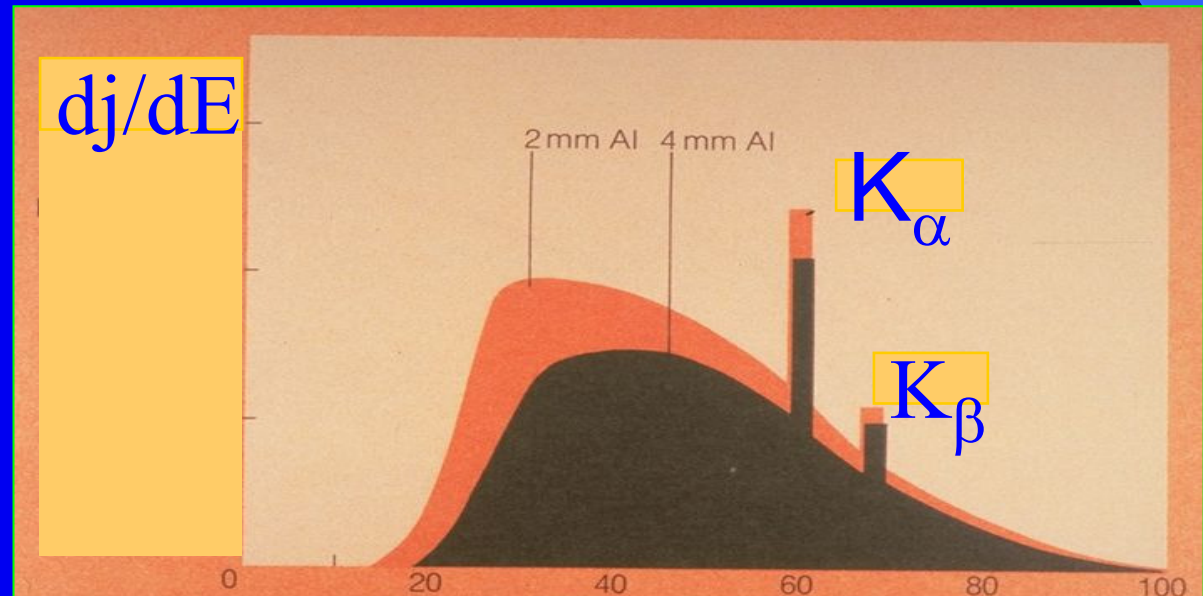
energija fotonov (keV)

dj/dE



energija fotonov (keV)

dj/dE



energija fotonov rentgenske svetlobe (keV)

Učinki ionizirajočih sevanj

spremembe v celicah -
posledica ionizirajočega sevanja

somatske celice

spolne celice

vpliv na
obsevano
osebo

dedni
učinki

akutni-
zgodnji
učinki

pozni
učinki

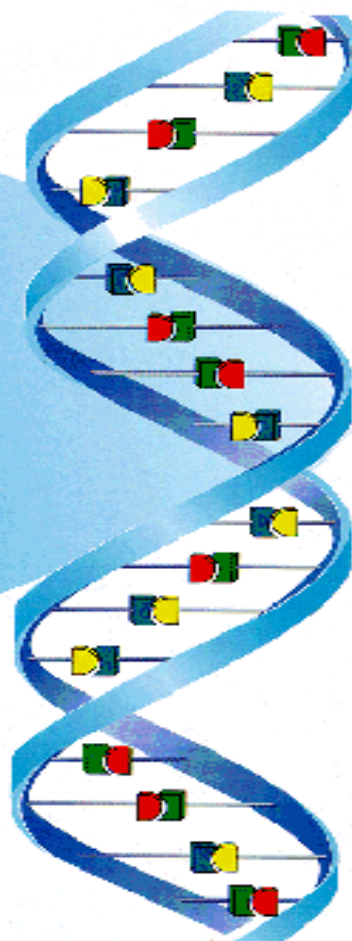
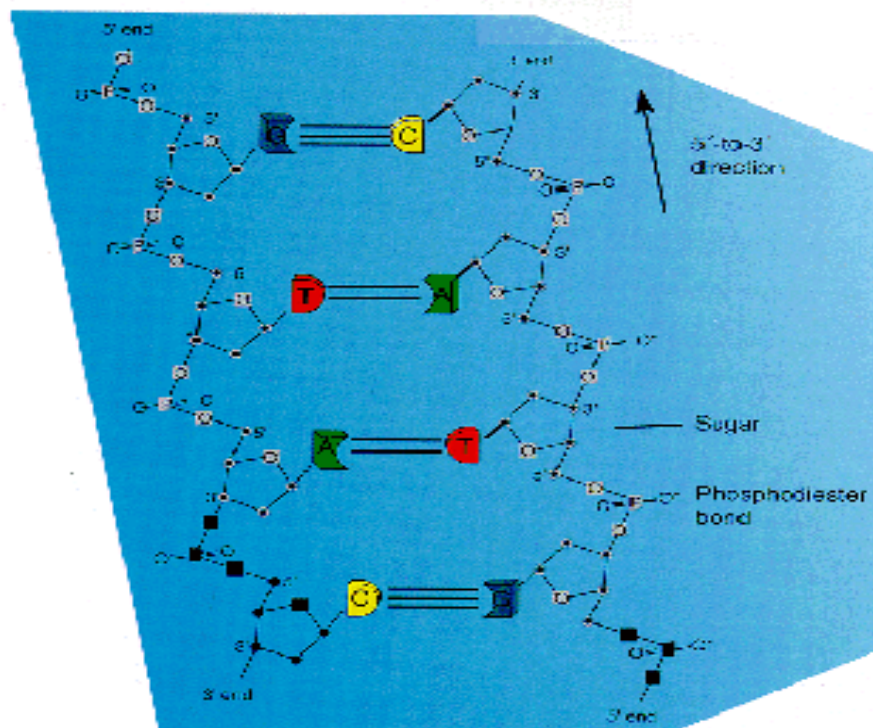
maligne
tvorbe

genetske
spremembe

deterministični učinki

stohastični učinki

Mehanizem bioloških učinkov



baze deoksiribonukleinske kisline

citozin

timin

Pyrimidines

C — yellow

T — red

Purines

A — green

G — blue

adenin

gvanin

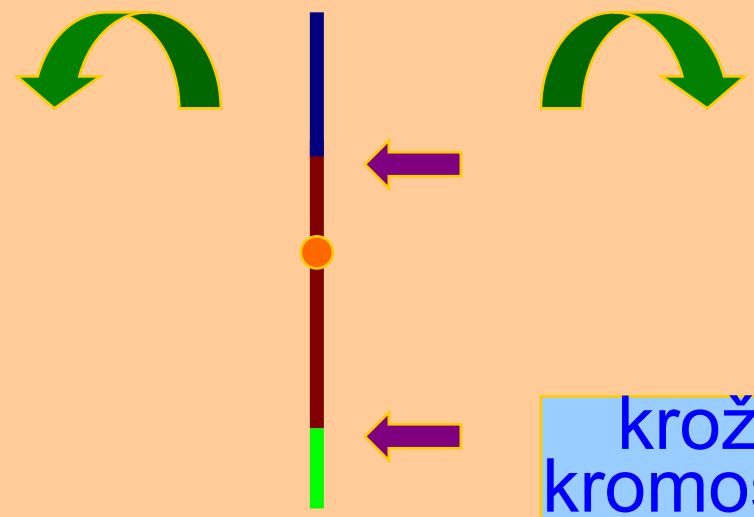
dvojna
vijačnica

ionizirajoče
sevanje
ogroža živo
snov, če
spreminja
molekule, ki
so bistvene
za življenje
celice:
osrednji
položaj ima
DNK

Kromosomske nepravilnosti - aberacije

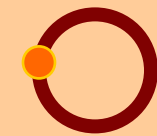
centromera

inverzija



krožni kromosom

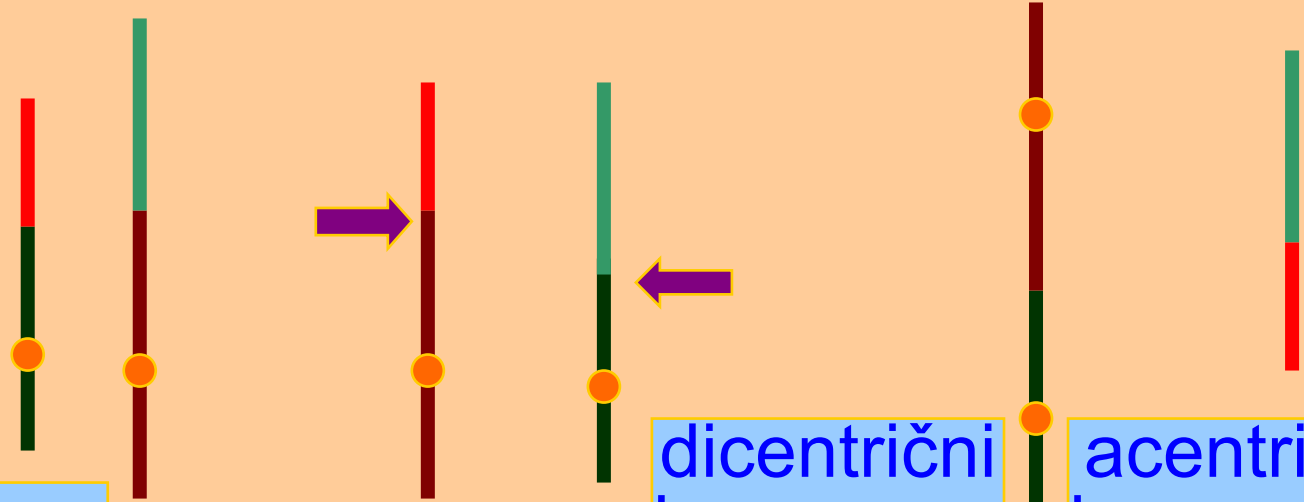
acentrični kromosom



translokacija

dicentrični kromosom

acentrični kromosom



Spremembe

- popravljive
- nepopravljive
 - smrt celice
 - preživetje celice

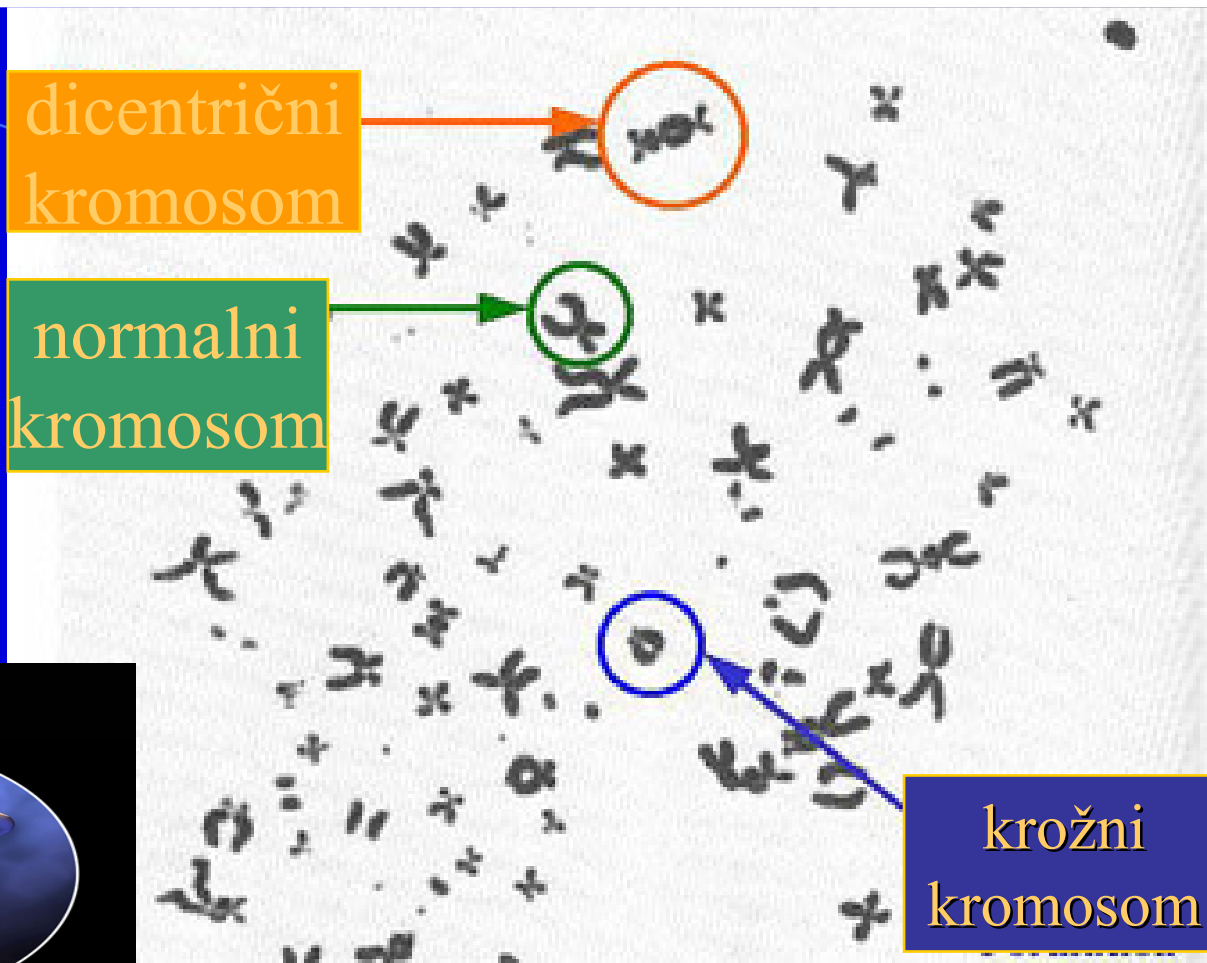
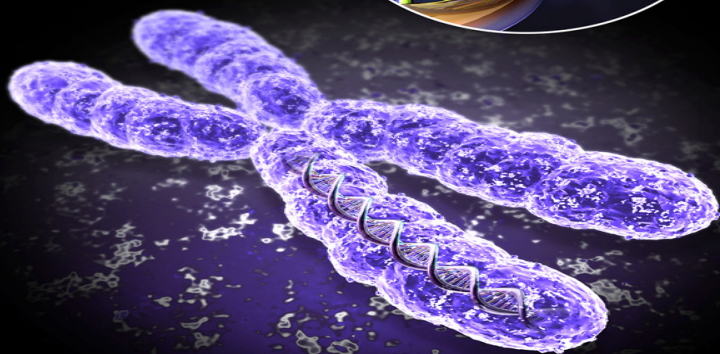
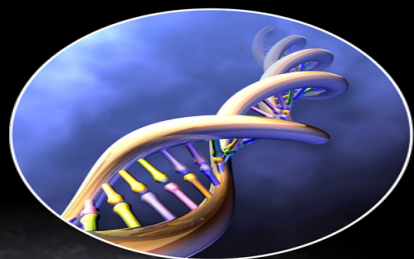
dicentrični
kromosom

normalni
kromosom

krožni
kromosom

kromosomske aberacije

Sevanje okvarja dednino
neposredno ali posredno preko
tvorbe prostih kisikovih radikalov

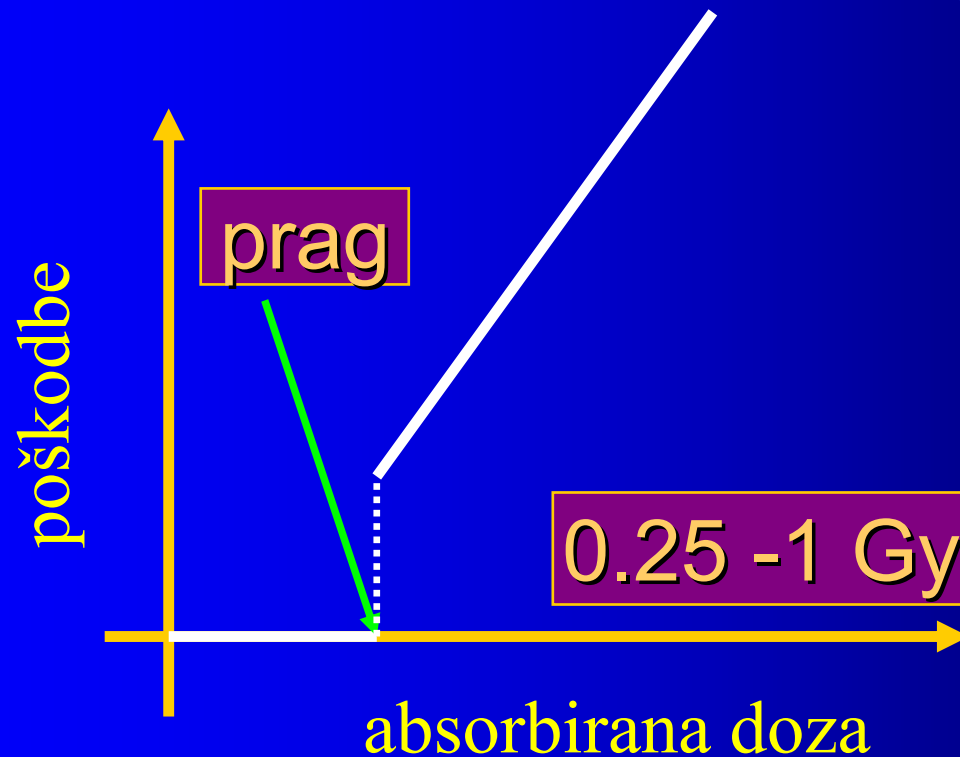


Učinki sevanj

- **Deterministični učinki** sevanja so klinično ugotovljive okvare obsevanega organa, tkiva ali organizma zaradi poškodovanja celic. Za nastanek posameznega determinističnega učinka so določljive vrednosti doz, pri katerih se deterministični učinek pojavi. Za te vrednosti doz pa velja, da je za doze, ki jih presegajo, deterministični učinek večji, če je vrednost doze večja.
- **Stohastični ali naključni učinki** so statistično ugotovljive okvare zaradi spremenjenih lastnosti obsevanih celic, ki se lahko razmnožujejo. Stohastični učinki, kot so nastanek malignih rakov ali dednih posledic v genih, niso odvisni od doze in zanje prag ne obstaja, vendar je njihov nastanek verjetnejši pri višji dozi;

deterministični učinki

vzročno nujne posledice sevanja, ki se pojavijo, kadar je prizadet zadosten odstotek celic kakega tkiva ali organa

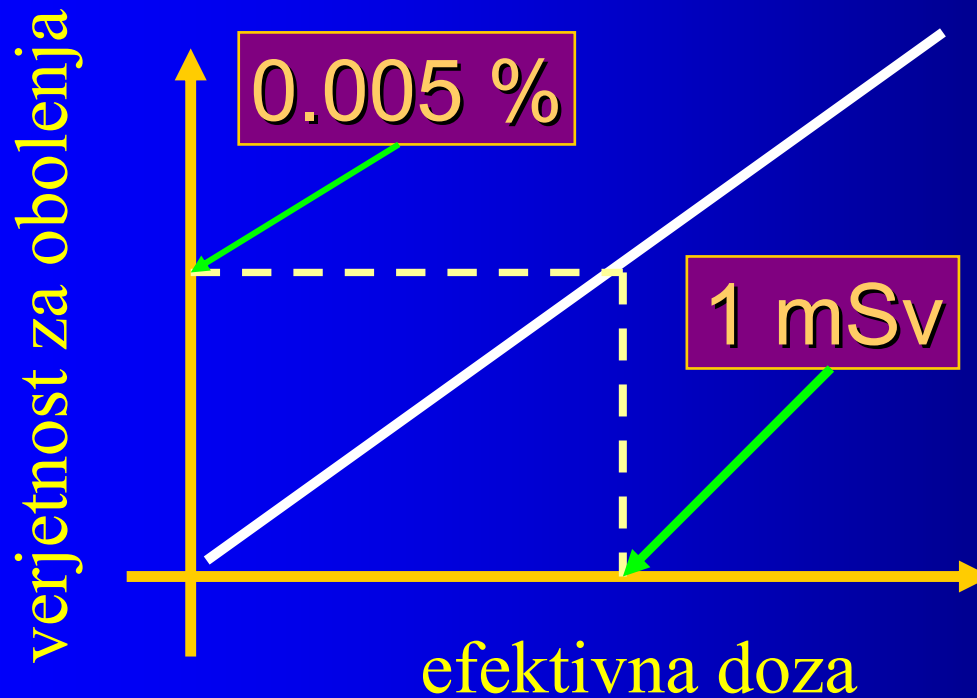


stopnja poškodb je sorazmerna z izpostavljenostjo nad pragom

imajo prag: sledijo šele od neke mejne doze naprej

stohastični učinki

stopnja škode ni odvisna od ravni izpostavljenosti



verjetnost za škodo je sorazmerna z izpostavljenostjo

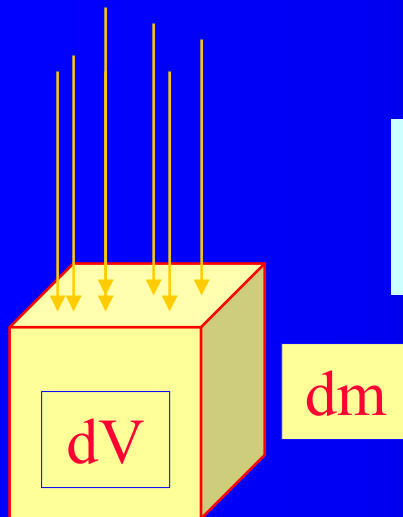
nimajo praga: pojavijo se lahko že pri nizkih dozah

Količine in enote

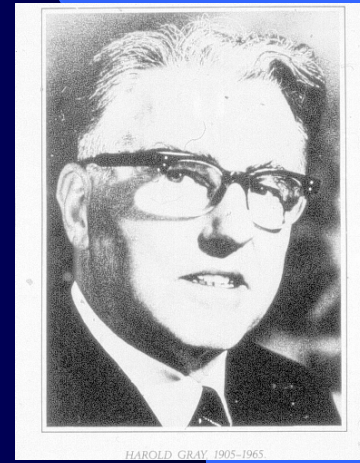
Absorbirana doza (D) (*absorbed dose*) je osnovna dozimetrična količina definirana kot povprečni vrednosti energije (ε), ki jo ionizirajoče sevanje preda snovi v **prostorninskem elementu** (dV), katerega masa je (dm)

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

Absorbirana doza je tako enaka celotni znotraj prostorninskega elementa podeljeni energiji, deljeni z maso te prostornine.



Enota za absorbirano dozo je joule na kilogram (J/kg), imenovana **gray**(Gy)



Harold Gray
1905-1965

Ekvivalentna doza (H) (*equivalent dose*) je produkt absorbirane doze z ustreznim utežnim faktorjem vrste sevanja

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ je absorbirana doza zaradi sevanja vrste R, povprečena po tkivu ali organu T

w_R je utežni faktor sevanja vrste R

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

Enota za ekvivalentno dozo je joule na kilogram(J/kg), imenovana **sievert** (Sv)



Rolf Sievert
(1896-1966)

Efektivna doza (E) (*effective dose*) je seštevek produktov tkivnih ekvivalentnih doz in ustreznih tkivnih utežnih faktorjev

$$E = \sum_T w_T H_T$$

$$H_T = \frac{H_T^M + H_T^F}{2}$$

H_T je ekvivalentna doza v tkivu ali organu T

H_T^M je ekvivalentna doza v tkivu ali organu T moškega

H_T^F je ekvivalentna doza v tkivu ali organu T ženske

w_T je tkivni utežni faktor za tkivo ali organ T

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

Enota za efektivno dozo je joule na kilogram(J/kg), imenovana **sievert** (Sv)

tkivo ali organ	utežni faktor tkiva ali organa
kostni mozeg	0,12
debelo črevo	0,12
pljuča	0,12
želodec	0,12
dojke	0,12
spolne žleze	0,08
mehur	0,04
jetra	0,04
požiralnik	0,04
ščitnica	0,04
koža	0,01
kostna povrhnjica	0,01
možgani	0,01
slinavka	0,01
ostalo	0,12
vsota	1,00

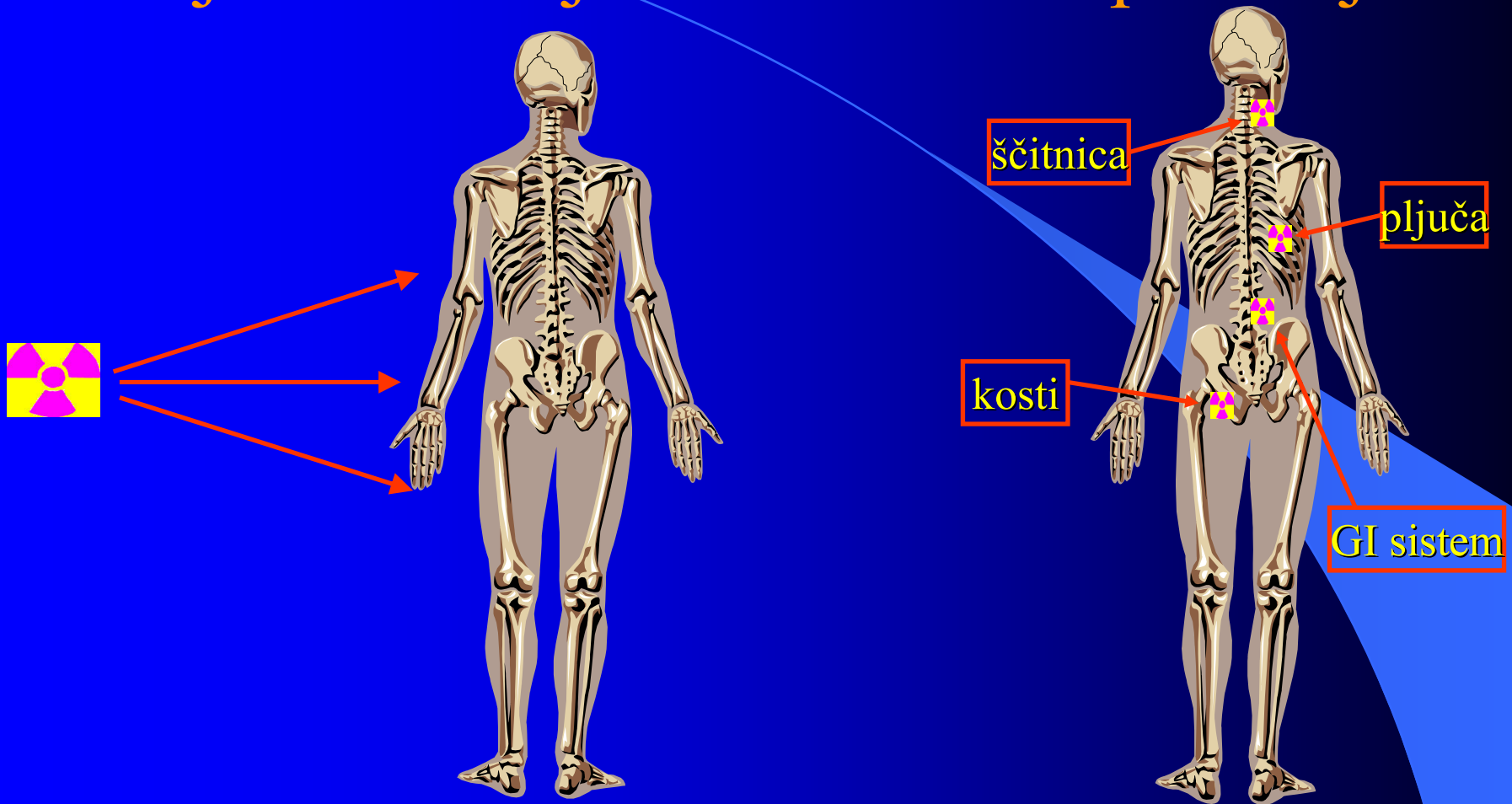
Rubrika ostalo opredeljuje trinajst organov ali tkiv in sicer :

nadledvično žlezo,
(nosno, ustno votlino, žrelo in grlo),
žolčnik,
srce,
ledvici,
bezgavke,
mišice,
ustno sluznico,
trebušno slinavko,
(prostato/maternični vrat),
tanko črevo,
vranico in
priželjc

$$H_{ost}^M = \frac{1}{13} \sum_T^{13} H_T^M$$

$$H_{ost}^F = \frac{1}{13} \sum_T^{13} H_T^F$$

Zunanja in notranja obsevanost - izpostavljenost



*zunanja obsevanost
(external exposure)*

*notranja obsevanost
(internal exposure)*

vnos radioaktivne snovi v telo in zunanja izpostavljenost

fantom moškega telesa
absorbirana doza D_T^M

fantom ženskega telesa
absorbirana doza D_T^F

referenčni
moški

W_R

referenčni
ženska

ekvivalentna doza H_T^M

ekvivalentna doza H_T^F

ekvivalentna doza H_T
povprečje po obeh spolih

W_T

referenčni
človek

efektivna doza E

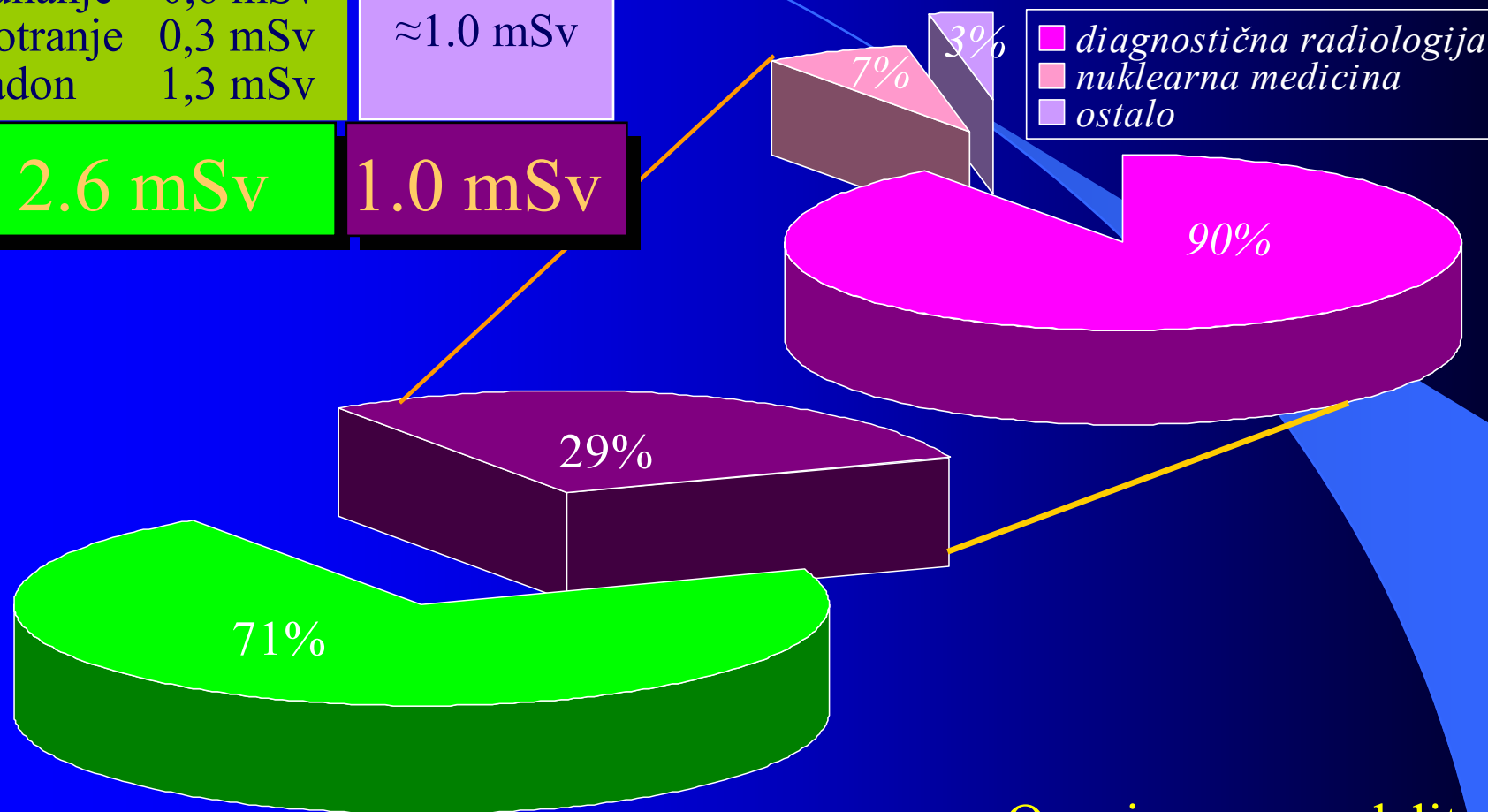
Ocena povprečne izpostavljenosti za prebivalstvo

kozmično	0,4 mSv
zunanje	0,6 mSv
notranje	0,3 mSv
radon	1,3 mSv

zdravstvo
≈1.0 mSv

2.6 mSv

1.0 mSv



Ocenjena porazdelitev izpostavljenosti posameznika ionizirajočim sevanjem