

Rentgensko slikanje



BARBARA ROVŠEK

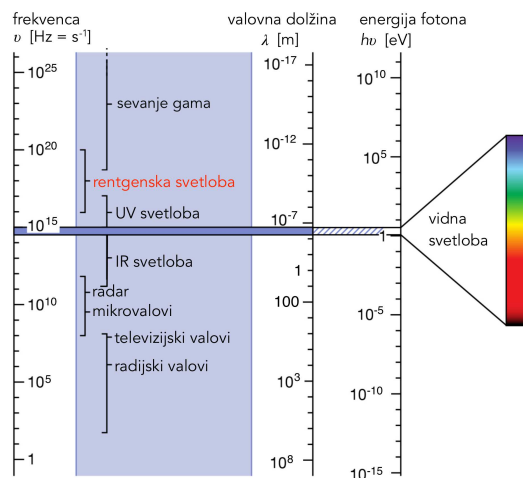
→ V življenju se zgodi, da človek pade in si zlomi nogo ali roko. Ker se zlomov kosti skozi kožo ne vidi ali se jih ne sluti dovolj natančno, pošlje zdravnik pacienta na rentgensko slikanje. Potem, ko si zdravnik sliko ogleda, lahko odredi nadaljnje potrebne ukrepe, da se zlom pozdravi. V nadaljevanju bomo povedali, kaj je rentgenska svetloba, kako nastane, kaj je rentgensko slikanje in kaj prikazuje slika na naslovnici.

Rentgenska svetloba je elektromagnetno valovanje (EMV), kamor sodijo tudi vidna, ultravijolična (UV) in infrardeča (IR) svetloba, mikrovalovi (v pečici, za brezžično komunikacijo, astronomiji), radijski valovi in sevanje gama. Vsa ta valovanja potujejo skozi prazen prostor z isto hitrostjo $c_0 = 3,00 \cdot 10^8$ m/s. Med seboj se razlikujejo po valovni dolžini λ oziroma frekvenci ν ⁴ oziroma energiji fotonov E_ν ⁵, s katerimi si s snovjo izmenjujejo energijo. Valovna dolžina rentgenske svetlobe je v območju med 10^{-11} m in 10^{-8} m (oziroma 0,01 nm in 10 nm), energija fotonov pa med 124 eV⁶ in 124 keV. Manjša kot je va-

⁴Med parametri, s katerimi opišemo vsako valovanje, so hitrost valovanja c , valovna dolžina λ in frekvenca valovanja ν . Te tri količine povezuje zveza $c = \lambda \cdot \nu$.

⁵Foton si lahko predstavljamo kot paket energije, ki ga svetloba izmenja s snovjo (ko ne potuje več po praznem prostoru, ampak osvetljuje predmete, ki so iz snovi). Energija fotona je premo sorazmerna s frekvenco svetlobe, $E_\nu = h \cdot \nu$. Sorazmerno-stna konstanta je Planckova konstanta h , ki je pomembna konstanta v atomski, jedrski in fiziki osnovnih delcev. Njena vrednost je $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js

⁶Enota eV je *elektronvolt* in je majhna enota za energijo, primerna za uporabo v atomski in jedrski fiziki. V kombinaciji eV pomeni e kar osnovni naboj (z enoto As vred), $e = e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ As. Za 1 eV se poveča kinetična energija nabitega delca z nabojem $e = \pm e_0$, ki ga pospeši napetost 1 V, za 1 keV pa, ko ga pospeši napetost 1 kV = 1000 V. Velja 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J.



© Encyclopaedia Britannica, Inc.

SLIKA 1.

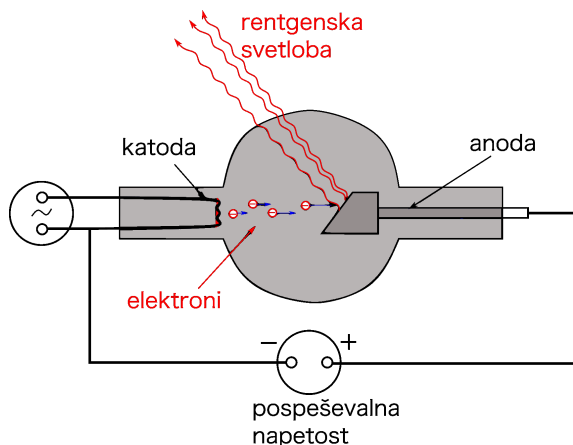
Spekter elektromagnetnega valovanja: različne vrste EMV, kot so urejene po valovni dolžini, frekvenci in energiji fotonov (prirejeno po: Encyclopaedia Britannica, www.britannica.com/science/electromagnetic-spectrum#/media/1/183297/106806)

lovna dolžina svetlobe, višja je njena frekvenca in večja je energija njenih fotonov. Spekter EMV – območja valovnih dolžin, frekvenc in energij fotonov – prikazuje slika 1.

Rentgenska svetloba je dobila ime po svojem odkritelju, nemškem fiziku Wilhelmu Conradu Röntgenu, ki je o njej poročal leta 1895. Wilhelm Conrad je sicer ni poimenoval po sebi; ker je bila do odkritja nepoznana, jo je sam imenoval X-žarki (angl.: X-rays).

Obstajata dva glavna mehanizma, po katerih v katodni cevi, ki jo prikazuje slika 2, nastane rentgenska svetloba: **zavorno sevanje** in **karakteristično sevanje**. Zavorno sevanje oddajajo elektroni, ki jih do velike hitrosti (in velike kinetične energije, ki je primerljiva z energijo fotonov rentgenske svetlobe) najprej pospeši visoka napetost (oziroma električno polje) med katodo in anodo v katodni cevi, potem pa se jim ob trku z anodo med gibanjem v anodi in v električnem polju jeder atomov, ki gradijo anodo, hitrost in kinetična energija na zelo kratki razdalji močno zmanjšata (se tam zavrejo, ustavljajo); in medtem zavorno sevajo. Pri tem posamezni elektron odda foton rentgenske svetlobe, ki je z energijo omejen navzgor: največja energija fotona, ki ga lahko odda

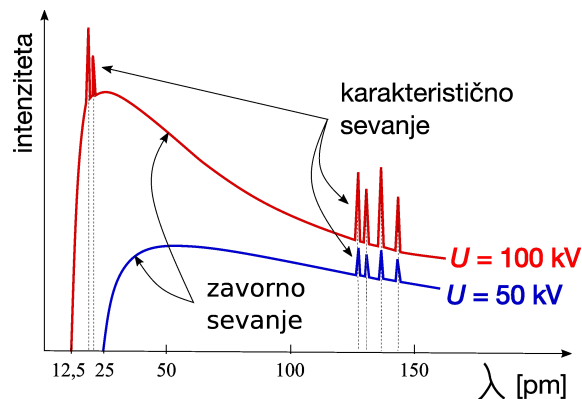



SLIKA 2.

Katodna cev: v stekleni cevi, v kateri je vakuum, sta elektrodi, med katerima je visoka napetost. Katoda, ki jo greje izmenični električni tok, da z nje izhlapevajo elektroni, je negativna, pozitivna pa je anoda iz kovine (volfram, molibden). Elektrone proti anodi pospeši visoka pospeševalna napetost. Ko se elektroni zaletijo v anodo, sevajo oni (zavorno sevanje) ali atomi kovine, iz katere je anoda (karakteristično sevanje).

hitri elektron ob trku z anodo, je enaka njegovi celotni kinetični energiji pred trkom. Fotoni z največjo energijo imajo najkrajšo valovno dolžino, ki ji rečemo kratkovalovna meja spektra rentgenskega sevanja λ_m . Večina fotonov zavornega sevanja pa ima energijo, manjšo od največje mogoče (in valovno dolžino daljšo od λ_m), ker se večina elektronov po tem, ko se zaletijo v anodo, svoje celotne kinetične energije ne znebi v enem zamahu. In znebijo se je lahko še na druge načine, ne le tako, da oddajo foton(e) zavornega sevanja. Porazdelitev fotonov zavornega sevanja po energiji (ali frekvenci), ki jo imajo, imenujemo spekter zavornega sevanja. Spekter zavornega sevanja je zvezen in ga prikazuje slika 3.

V katodni cevi nastanejo fotoni rentgenske svetlobe še na drug način. Ko hitri elektron trči ob anodo (ki je seveda sestavljena iz atomov), ima dovolj energije, da včasih iz posameznega atoma v anodi izbije katerega od notranjih (nevalenčnih) elektronov. Nastali ion ima v nižjeenergijskih elektronskih stanjih (mestih v notranjih orbitalah) vrzel, ki jo kmalu zasede kateri od njegovih višjeenergijskih in od jedra atoma bolj oddaljenih elektronov. Ko se tak elektron seli iz bolj zunanje orbitale v nezasedeno


SLIKA 3.

Spekter rentgenske svetlobe, ki jo oddaja katodna cev. Gladka (zvezna) krivulja ustreza zavornemu sevanju, zobci na krivulji pa karakterističnemu sevanju volframove anode. Ko elektrone v cevi pospeši večja napetost (rdeča krivulja), je najkrajša valovna dolžina pri zavornem sevanju ($\lambda_m = 12,5 \text{ pm} = 12,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}$) krajša od najkrajše valovne dolžine pri manjši napetosti (modra krivulja, $\lambda_m = 25 \text{ pm} = 25 \cdot 10^{-12} \text{ m}$).

stanje v bolj notranji orbitali, se odvečne energije znebi v obliki fotona karakterističnega rentgenskega sevanja. Zakaj karakterističnega? Ker so energije elektronskih stanj odvisne od snovi, iz katere je tarča (del anode, v katerega se zaletavajo hitri elektroni) in so zato za to snov značilne tudi razlike med energijami teh stanj. Razlika med energijama dveh stanj pa je enaka energiji (karakterističnega) fotona, ki ga izseva (ali absorbira, če selitev elektrona poteka v drugi smeri), elektron, ki se seli med tema stanjema. Ker je elektronskih stanj v atomu končno mnogo, je tudi energij teh stanj končno mnogo, in končno mnogo je tudi razlik med energijami teh stanj. Karakteristično sevanje ima zato črtast (zobčast) spekter. In zakaj rentgenskega? Ker so razlike med energijami elektronskih stanj v območju energij, ki jih imajo fotoni rentgenske svetlobe.

Rentgenske cevi sevajo na oba načina, zavorno in karakteristično. Primer celotnega spektra sevanja za anodo iz volframa prikazuje slika 4.

Rentgensko slikanje je medicinska diagnostična metoda, pri kateri del človeka osvetlijo, obsevajo, z rentgensko svetlobo, ki jo oddaja katodna cev v obsevalni napravi. Vidna svetloba ne gre skozi človeka, rentgenska pa. Na drugo stran namestijo film (v mo-

dernih časih pa CCD/CMOS/NMOS senzorje). Svetlobo, ki gre skozi človeka, zazna film (ali drugačen senzor).

Rentgenska svetloba skozi človeka ne potuje neovirano; človeška tkiva film (ali senzor) pred rentgensko svetlobo nekoliko zasenčijo. Rentgenska svetloba se namreč v tkivih delno vpije ali absorbira⁷, a ne v vseh tkivih enako. Za vsako diagnostično metodo je bistveno, da se to, kar se v telesu s svetlobo (ali z ultrazvokom ali s pozitroni ali z magnetnim poljem) zgodi, v različnih tkivih zgodi različno. Rentgenska svetloba se najbolj vpija v kalciju, ki ga je največ v kosteh in zobeh. Kostni zobje zato bolje zasenčijo film kot drugo tkivo, v katerem so voda ali maščobe, to tkivo pa zasenči film bolje kot tkiva, v katerih je zrak (npr. pljuča). Ko rentgenska svetloba potuje od svojega vira skozi človeka do filma, jo različna človeška tkiva bolj ali manj zasenčijo in na rentgenski sliki lahko opazimo sence teh tkiv, ki so različno svetle – od bele do črne in vmes različne stopnje sive. Lahko vidimo, kako smo sestavljeni, ali imamo vseh 200 in še nekaj kosti in ali so cele. Ugotovimo lahko tudi, ali smo zdravi, ali imamo pljučnico. Tkivo bolnih pljuč je spremenjeno in rentgensko svetlobo na obolelih delih vpija drugače kot zdravo tkivo, kar lahko izkušen radiolog hitro opazi.

Rentgenska slika je torej senčna slika notranjosti človeka. Ali so kosti videti bele in so pljuča črna, ali pa je ravno obratno, je odvisno od tega, ali gledamo negativ ali pozitiv slike (oba sta na sliki 4). Si že opazil, da obstajajo eni in drugi?

⁷Absorpcija rentgenske svetlobe v snovi je posledica štirih procesov, v katerih lahko svetloba odda snovi oziroma elektronu te snovi vso ali del ali nič svoje energije. Ti procesi so: elastično sipanje, neelastično (Comptonovo) sipanje, fotoefekt in tvorba parov. Pri elastičnem sipanju se rentgenski svetlobi ob interakciji z elektroni v nekem atomu spremeni smer potovanja, ne spremeni pa se energija valovanja. Pri neelastičnem (Comptonovem) sipanju svetloba (foton) odda del svoje energije nekemu valenčnemu (šibko vezanemu) elektronu v snovi, ki zato zapusti svoj atom (kot rečemo v žargonu, foton iz atoma izbije elektron), foton (ki ni več isti kot prej) pa potuje v spremenjeni smeri in z manjšo energijo kot prej. O fotoefektu govorimo, ko foton rentgenske svetlobe odda svojo celotno energijo (sebe v celoti) elektronu iz notranjih orbital atoma (močno vezanemu elektronu), ki nato zapusti svoj atom. Tvorba parov pa nastane, ko ob podpori težkega atoma foton v bližini jedra nekega atoma izgine, pri tem pa iz sebe ustvari par delcev elektron – pozitron. V kolikšni meri potekajo posamezni od teh procesov, je odvisno od snovi (vrstnega števila, ki pove nekaj o gostoti elektronov) in od energije fotonov rentgenske svetlobe.



SLIKA 4.

Pozitiv in negativ istega rentgenskega posnetka

Vpogled v telo, ki ga nudi rentgensko slikanje, je nedvomno koristen. Naprave neprestano izboljšujejo in doze, ki jih prejmemo ob slikanju, so bistveno manjše kot pred desetletji. Pri enostavnem slikanju prsnega koša je doza na primer približno enaka dozi, ki jo prejmemo iz naravnega okolja v desetih dnevih, pri enostavnem slikanju zob pa dozi, ki jo iz naravnega okolja prejmemo v enem dnevu. Po drugi strani pa je bolj zapletena rentgenska diagnostična preiskava, kot je na primer CT (computed tomography), povezana s precej večjim tveganjem za zdravje. Doza, ki jo prejmemo pri enkratnem CT slikanju prsnega koša ali trebušnega predela je enaka kar dveh do trem letnim dozam sevanja iz naravnega okolja. Odločitev o tem, ali je koristi pri slikanju več od tveganja za škodo in ali potrebujemo slikanje ali ne, prepustimo zdravnikom.

Če te zanima še več podrobnosti o rentgenski svetlobi in njeni uporabi v medicini, si lahko pogledaš na spletni strani www-f9.ijs.si/~krizan/sola/medfiz/slides/fiz-anat-slik/1FAS-RTGsvetlobaCB.pdf. Če te zanima, kako je rentgensko svetlobo odkrival W. C. Röntgen, pa si preberi članke o njem v starejših letnikih Preseka, na primer tega: www.presek.si/22/1232-Strnad-Conrad.pdf.

× × ×