

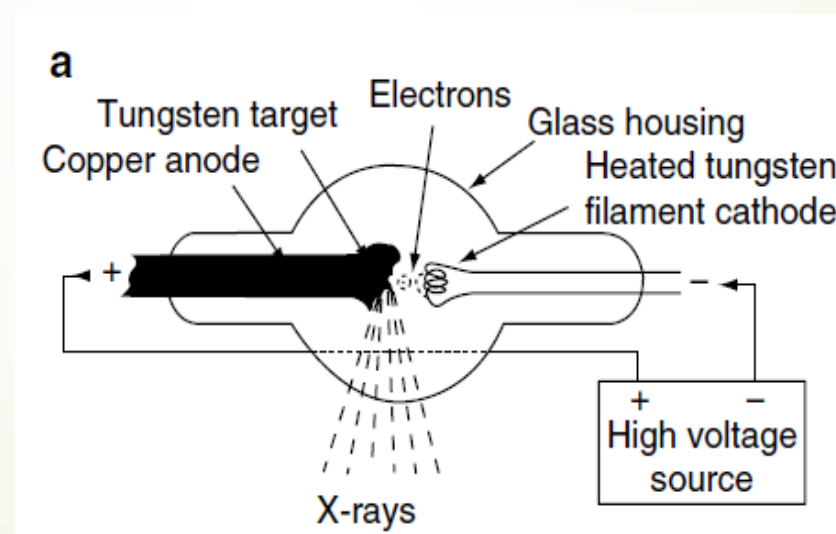


NASTANAK RENDGENSKOG ZRAČENJA

dr sci med Milana Mitric Askovic

Rendgenska cev-uvod

- Značajan deo rendgenskog aparata
- Mesto nastanka rendgenskog (X) zračenja





Rendgenska cev-istorija

- U početku radiološke ere – jonska odnosno gasna cev
- jonska odnosno gasna cev: sastoji se od staklenog balona sa 3 cilindrična kraka (2 horizontalna i 1 vertikalna)
- u horizontalnim kracima smeštene su katoda i anoda
- u vertikalnom kraku pomoćna elektroda za regeneraciju vazduha
- Anodna pličica je od platine ili volframa
- Pri uključivanju visokog napona slobodni elektroni se kreću ka elektrodama odnosno ka pozitivnoj anodi.
- Pod visokim naponom e dobijaju veliku kinetičku energiju pa se u sudaru sa atomima vazduha stvaraju novi elektroni



Rendgenska cev-istorija

- ▶ Tanjraši oblik katode koncentriše elektrone ka fokusu anode
- ▶ U sudaru katodnih elektrona sa elektronima anode nastaju X (rendgenski) zraci
- ▶ Izvor elektrona kod jonske cevi je vazduh koji se troši u radu rendgenske cevi
- ▶ Količina proizvedenih elektrona utiče i na nastajanje X zraka tj na njihov intenzitet (koji je regulisan većom ili manjom količinom vazduha)
- ▶ Regeneracija vazduha se vrši preko pomoćne elektrode

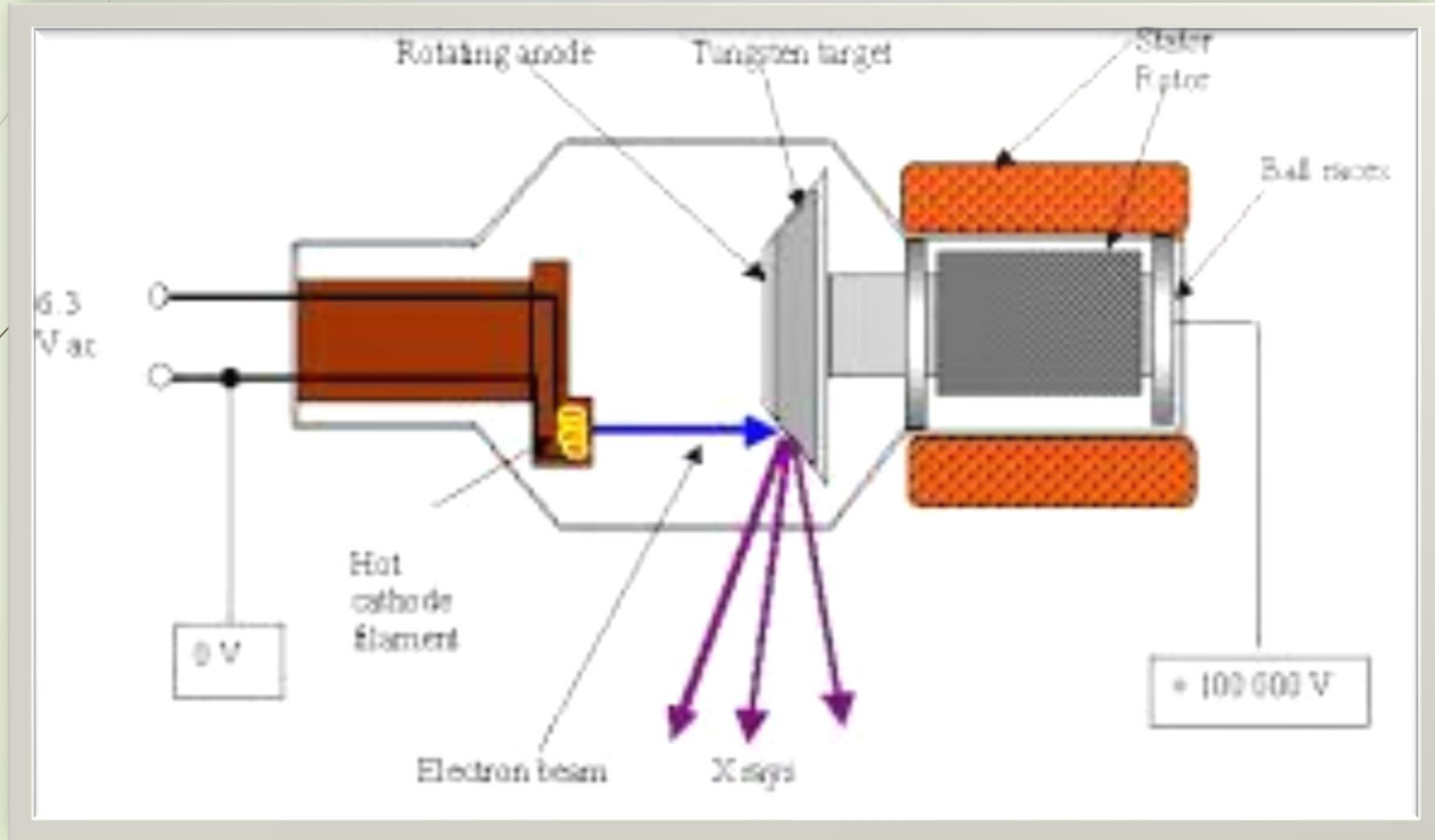
Rendgenska cev-istorija

- ▶ Nedostatak: teško regulisanje količine elektrona (vazduha) odnosno intenzitet rendgenskog zračnog snopa



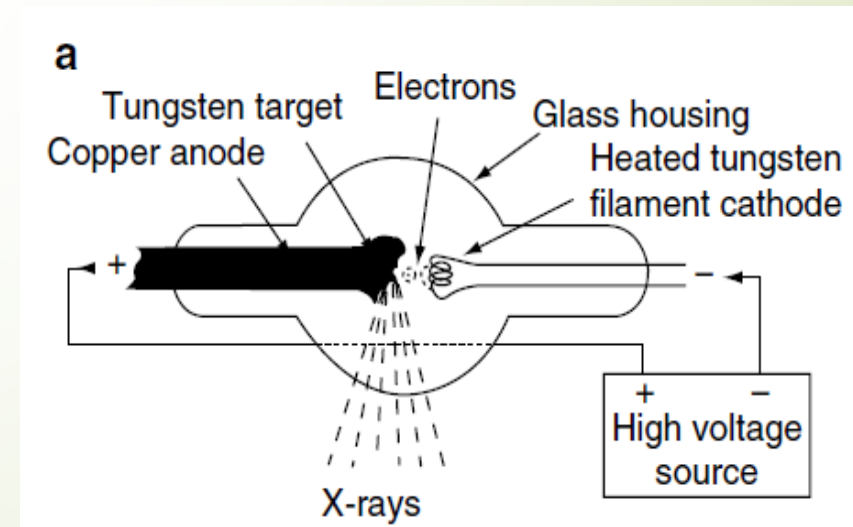
- ▶ Elektronsku rendgensku cev Kulidž konstruisana 1913. evakuisao vazduh do maksimuma odnosno do milionitog dela milimetra živonog stuba

Rendgenska cev



Nastanak rendgenskog zračenja

- **Kulidžove cevi** – staklene vakuumske cevi (pritisak do 10^{-3} mmHg) koje se sastoje od katode i anode između kojih se primenjuje visoko-energetski napon (10^6 - 10^8 V). Katoda se greje i sa nje se **termoelektronskom emisijom** emituju elektroni koji se u električnom polju koje vlada između katode i anode ubrzavaju prema anodi u koju i udaraju.



Nastanak rendgenskog zračenja

- rendgenski zraci nastaju u rendgenskoj cevi
- rendgenska cev mora biti s visokim vakuumom da se elektroni ne sudaraju s molekulama vazduha pre udara na anodu
- elektroni nastaju emisijom iz volfram spirale koja je ugrađena u sekundarnom električnom krugu u katodi.
- prolazom struje kroz taj sekundarni krug iz spirale isijavaju se elektroni koji potom ulaze u jako električno polje između katode i anode koje nastaje prolazom struje u primarnom električnom krugu

Nastanak rendgenskog zračenja

- ▶ elektroni koji udaraju u žarište na anodi imaju visoku količinu energije u obliku energije gibanja (kinetička energija)
- ▶ pri udaru u anodu elektroni stupaju u interakciju s atomima koji tu anodu grade i predaju svoju energiju na tom mestu
- ▶ pri interakciji elektroni koji u sudarima predaju svoju energiju se usporavaju ili se zaustave



Nastanak rendgenskog zračenja

- ▶ elektroni integriraju s elektronima u elektronskom omotaču atoma anode ili s jezgrom tih atoma
- ▶ u interakcijama događa se konverzija kinetičke energije u toplotnu energiju (anoda se zagreva) i u elektromagnetnu energiju (rendgenske zrake)
- ▶ najveći deo kinetičke energije upadnih elektrona pretvara se u toplotu oko 99%, a samo oko 1% kinetičke energije pretvara se u rendgensko zračenje

Nastanak rendgenskog zračenja

- ▶ upadni elektroni koji su u atomu anode izbegli interakciju s njegovim elektronima mogu doći dovoljno blizu jezgra da osećaju njen uticaj
- ▶ kako je elektron negativno naelektrisan a jezgra pozitivno naelektrisano među njima je privlačna el. sila
- ▶ jezgra sadrže mnogo protona te je privlačna elektrostatska sila jezgre snažna
- ▶ ako se elektron približava jezgru sve se više usporava, menja smer, te odlazi s smanjenom kinetičkom energijom u drugačijem smeru
- ▶ gubitak kinetičke energije pojavljuje se (zakon o očuvanju energije) u obliku fotona rendgenskog zračenja

Nastanak rendgenskog zračenja

- ▶ što je veće ubrzanje, odnosno što je veći napon (kV) to će se više fotona proizvoditi a tim se više stvaraju energijom bogati fotoni, tj. tvrdi fotoni (fotoni s kraćom talasnom dužinom)
- ▶ kod upotrebe rendgenske cevi intenzitet zračenja se podešava promenom intenziteta struje na katodi

Nastanak rendgenskog zračenja

- zbog "kočenja" elektrona u blizini jezgre ovaj proces se zove i zakočno zračenje
- upadni elektron pri kočenju može izgubiti bilo koji deo svoje energije: od 0 do svoje početne upadne energije. Npr. elektron koji je ubrzan u polju od 70 kV ima pri udaru u anodu energiju 70 keV
- mnoštvo takvih elektrona koji udaraju u metu i interreagiraju s jezgrom svaki za sebe mogu izgubiti različite količine od te početne energije: od 0 do 70 keV, te kažemo da imamo kontinuirani spektar rendgenskog zračenja

Nastanak rendgenskog zračenja

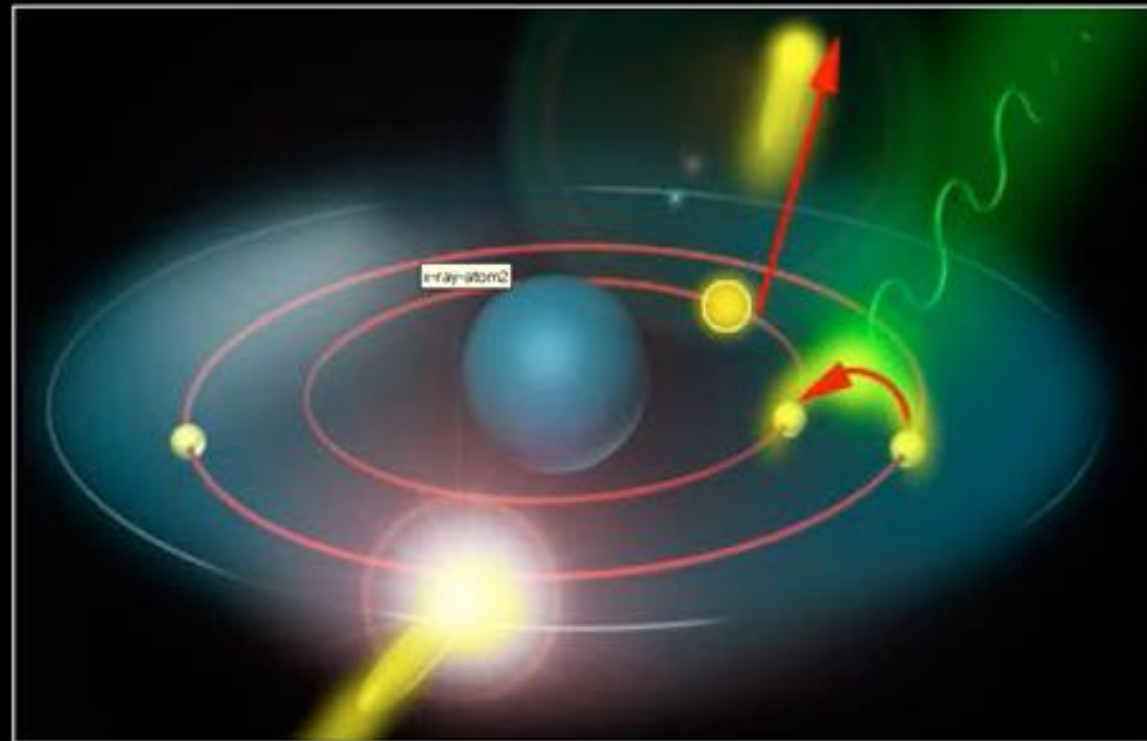
- ▶ na otvor kućišta se stavlja sistem zaslona (blende) koji služi za podešavanje veličine otvora kroz koji se propušta primarni snop rendgenskih zraka
- ▶ od veličine otvora zavisi ozračenje pacijenta
- ▶ u tom sistemu zaslona, na putu primarnom snopu postavljene su metalne pločice od aluminija-filtri koji služe za apsorpciju fotona malih energija koji su štetni, jer ih telo pacijenta potpuno apsorbuje (veća je doza) a ne doprinose kvaliteti dijagnostičke slike
- ▶ zbog toga se pomoću filtara uklone pre nego dođu do tela pacijenta

Nastanak rendgenskog zračenja

- postoje dve vrste X-zračenja, zaključno i karakteristično
- ove dve vrste zračenja razlikuju se po mehanizmu nastanka i po energetsom spektru koji ih karakteriše
- u procesu interakcije ubrzanih elektrona sa elektrostatičkim poljem jezgra materijala nastaje zaključno zračenje, dok karakteristično zračenje nastaje izbacivanjem elektrona iz omotača atoma sa ljuski koje su bliže jezgru K,M,L ...

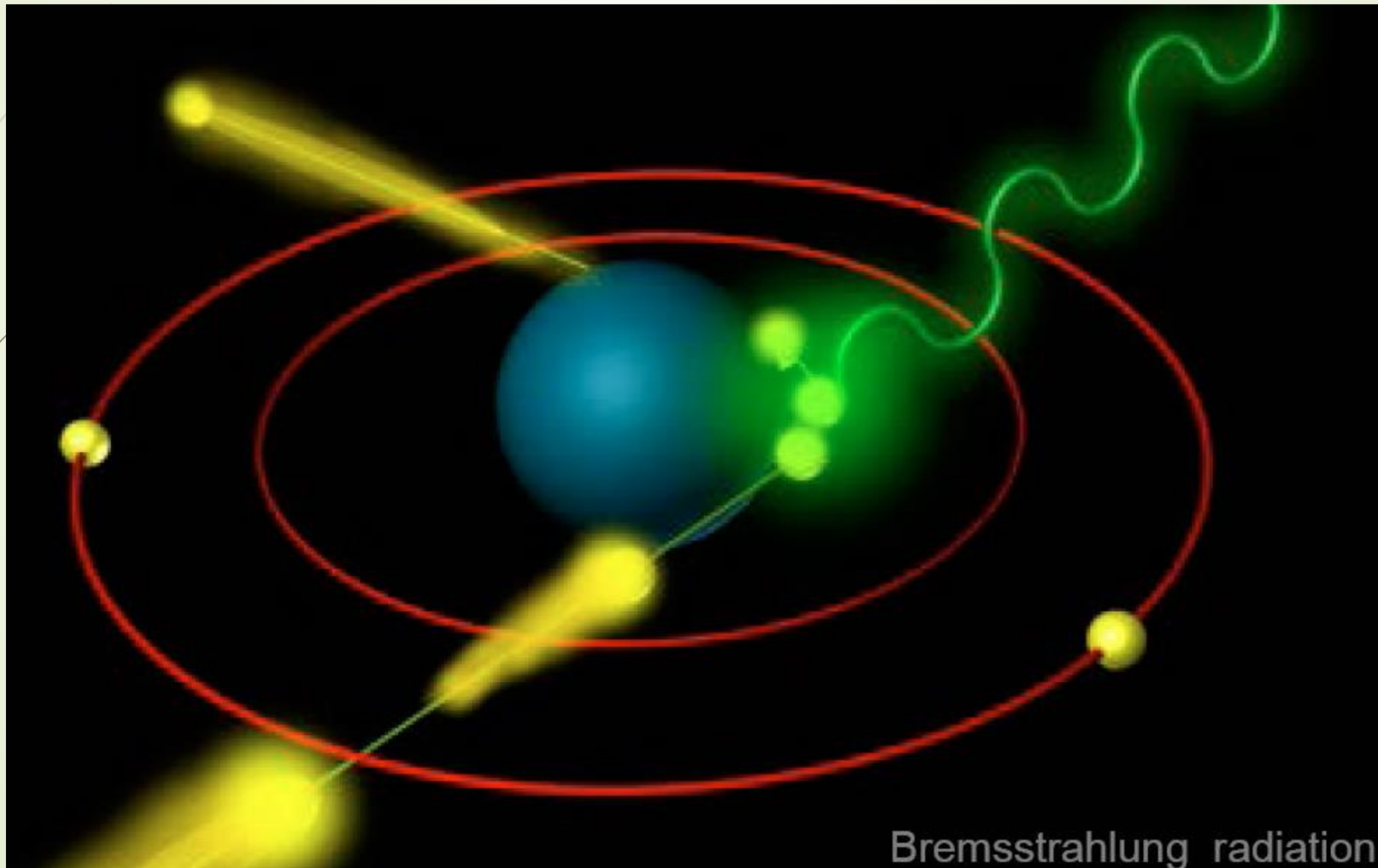
Linijski spektar

Karakteristično zračenje - linijski spektar





11/39

Karakterističan spektar



Nastanak rendgenskog zračenja

- ▶ Elektronsku rendgensku cev Kulidž- postoji samo jedan izvod za visoki napon na anodnom kraju i dva izvoda na katodnom od kojih je jedan za visoki napon i drugi za niski napon a oba su vezana za katodni transformator
- ▶ Katoda- spiralu od volframa koja može da se greje do 2000°C
- ▶ Preko katodnog transformatora i izvoda za niski napon zagreva strujom od nekoliko desetina volti i 3-12 A.
- ▶ Pri zagrevanju katodna spirala termojonskim putem otpušta elektrone (srazmerno struju zagrevanja)
- ▶ Oslobodjeni e stvaraju oblak katodnih elektrona

- 
- 
- ▶ Ukoliko se uspostavi razlika u potencijalu između katode i anode onda e odbija negativna katoda a privlači pozitivna anoda.
 - ▶ Polazna brzina e je mala na izlazu ali se brzo i progresivno povećava srazmerno razlici u potencijalu visokog napona između katode i anode.
 - ▶ Katodni e udaraju u anodu različitom brzinom i energijom oni prodiru u njene manje ili više površinske slojeve pri čemu se i njihova brzina manje ili više usporava-rendgenskog zračenja koje je polohromatsko




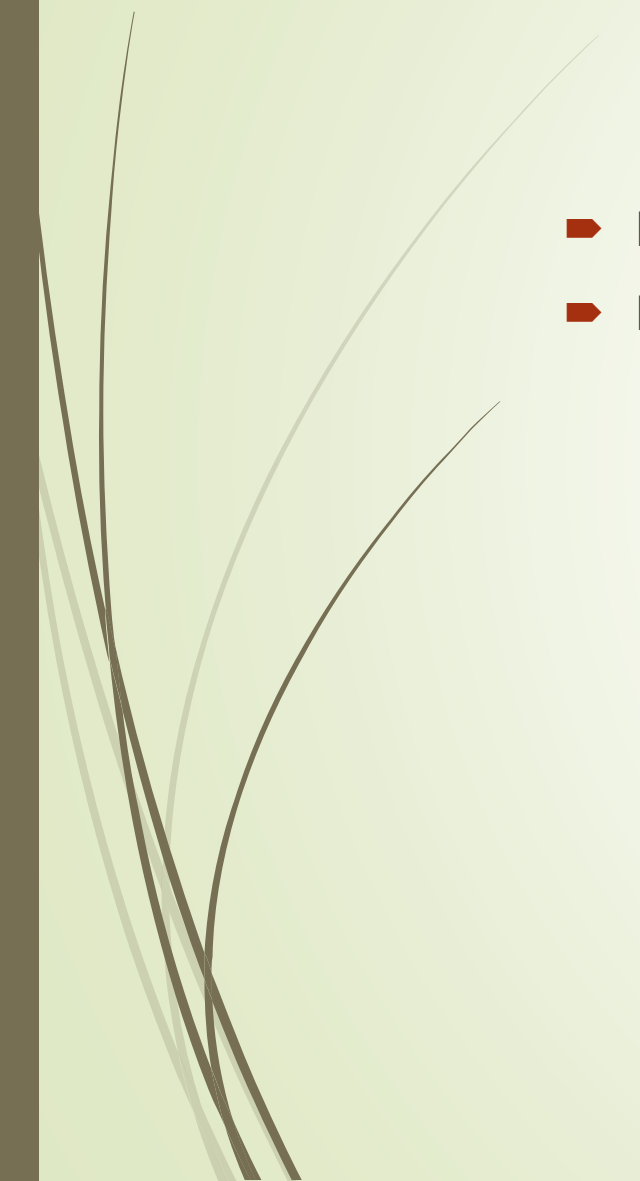
Razlika jonske i elektronske rendgenske cevi



- ▶ I Nasuprot jonskoj elektronska rendgenska vec ima visok stepen evakuisanosti vazduha koji omogućava veću brzinu katodnih elektrona jer oni nailaze na manji otpor pri svom kretanju od katode do anode.
- ▶ II ugrađena katodna spirala koja termojonskim putem otpušta katodne elektrone čija se količina može regulisati strujom zagrevanja i na taj način direktno uticati na intenzitet rendgenskog zračnog snopa






Zasićena, stacionarna struja rendgenske cevi

- ▶ Intenzitet elektronske struje rendgenske cevi je u funkciji visokog napona na krajevima rendgenske cevi
- ▶ Pri konstantnom zagrevanju katodne spirale elektronska struja rendgenske cevi najpre raste srazmerno naponu a zatim kada dostigne jednu određenu vrednost ostaje ista iako se napon povećava tada rendgenska cev radi sa zasićenom strujom
- ▶ Kada visoki napon dostigne određenu vrednost svi emitovani elektroni su prebačeni na anodu, od tada intenzitet elektronske struje rendgenske cevi se više ne može povećati jer je struja zasićena a njena jačina nezavisna od daljeg povećanja napona (osim ako se ne poveća struja zagrevanja katodne spirale tj emisija katodnih spirala)

- 
- RTG dijagnostika: rendgenske cevi sa zaspićenom strujom
 - Radioterapija: rendgenske cevi sa nezaspićenom strujom
- 

- 
- 
- Broj elektrona je srazmeran struji grejanja , meri se u mA
 - radioskopija: 2-4mA † 2250°C
 - radiografija: 400mA † 2350 °C
 - Prodornost (penetrantnost) rendgenskog zračenja: određuje razlika u potencijalu visokog napona između negativne katode i pozitivne anode
 - Što je veća brzina elektrona veća je i njihova energija a posledično i penetrantnost (prodornost) rendgenskog zračenja

- 
- Brzinu elektronima daje visoki napon  što je veći napon zranci su kraće talasne dužine i prodorniji
 - U praksi: savremene rendgenske cevi brzina elektrona 30000-130000
- 

Katoda rendgenske cevi

- Spirale od volframa čija je tačka topljenja 3350°C
- Spirala: r 0,2-0,3mm a zagreva je katodni transformator od 24V
- Pri usijanju na t 2300-2500 $^{\circ}\text{C}$ katodna spirala termojonskim efektom oslobađa e ukoliko su oni brojniji utoliko je struja rendgenske cevi veća
- Oko katodne spirale postavljena je metalna kapa za usmeravanje katodnih elektrona ka anodnom fokusu
- Rendgenske cevi sa duplim fokusom imaju dve katodne spirale a svaki fokus po jednu koje su postavljene jedna iznad ili jedna pored druge.
- Postoje cevi i sa tri spirale

Anoda rendgenske cevi

- ▶ Stojeća i obrtna
- ▶ Stojeća anoda je načinjena od bakarnog tela u kome je na strani prema katodi utisnuta pločica od volframa koja se naziva fokus anode


Bakarno telo je dobar provodnik toplote i prema vrsti i nameni rendgenske cevi može se na različite načine hladiti


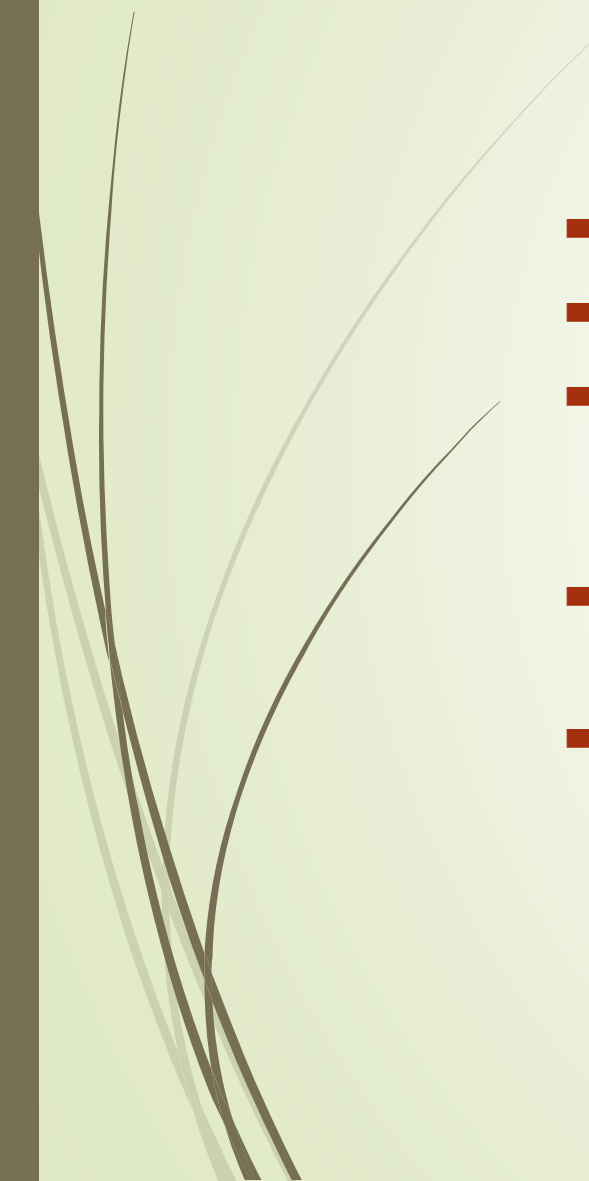
- ▶ Obrtna anoda sačinjena je u vidu diska- tanjira od volframa i preko tanke osovine vezana je za prošireni deo koji služi kao rotor, a materijal od kog je načinjena je od bakra

Ceo koncentrični prsten predstavlja fokus anode, snop katodnih e fokusiran je tako da dolazi uvek na isto mesto na anodi

Kako se anoda okreće snop e pada u svakom trenutku na drugi deo staze.

Samo deo staze (na koji padaju e) se zagreva a ostali se hladi.



- 
- ▶ Fokus : izvor X- zračenja i predstavlja površinu anode na koju udaraju elektroni. Fokus se nalazi na jednoj pločici ili disku (tanjiru) od volframa čistog ili u leguri sa renijumom
 - ▶ Realni fokus: površina anode na koju padaju katodni elektroni a optički fokus predstavlja geometrijsku projekciju realnog fokusa
 - ▶ Realni fokus ima oblik pravougaonika
 - ▶ Optički fokus ima oblik kvadrata gledanog od objekta koji se snima (projekcija u pravcu CZ)



- 
- 
- ▶ Fokus se greje i brzo dostiže visoku temperaturu.
 - ▶ Što je fokus manji (finiji) rendgenska slika je preciznija
 - ▶ Mora da podnese veliku energiju znači mora da ima veliku površinu odnosno veliki realni fokus odnosno treba da ima što manju veličinu da bi slika bila preciznija
 - ▶ Oba oba zahteva postignuta su nagibom anode tako da je realan fokus dovoljno velik optički fokus dovoljno mali
 - ▶ Ounačava se u mm²



Brzina obrtanja anodnog tanjira

- ▶ Brzina obrtanja anodnog tanjira iznosi 3000 obrtaja/minutu ili 50 obrtaja/sekundi
- ▶ Povećanjem brzine obrtaja anodnog tanjira povećava se i snaga svakog fokusa a anoda bolje hladi jer se sa njene površine lakše odvodi toplota
- ▶ Savremene rendgenske cevi: 9000obrtaja/minuta 150obrtaja/sekundi a jedan obrtaj iznosi 1/150s

- 
- 
- Materijal anode: da bi se postigla bolja emisija i kvalitet rendgenskih zrakova potreban je materijal većeg rednog broja (Z) u periodnom sistemu sa viskom tačkom topljenja odnosno potrebno je da materijal bude dobar provodnik toplote
 - Površina anodne staze načinjena je od volframa ili legure volframa sa renijumom a sam anodni tanjir koji na svojoj površini nosi anodnu stazu načinjen je od molibdena ili grafita
 - Legura volframa sa renijumom osigurava bolju emisiju X zraka s obzirom na veće redne brojeve

- 
- 
- Osnova odnosno anodni prsten je od molibdena jer je lakši od volframa i prima veću količinu toplote
 - Osnova od grafita ima prednost da je moguće napraviti i lakšu anodu a kako grafit prima još veću količinu toplote koju svojom crnom bojom lakše evakuiše putem zračenja izvan anode to je i njeno hlađenje bolje



Hlađenje anode

- ▶ Hlađenje anode: odvođenje toplote sa fokusa prema metalnom nosaču anode zavisi od toplote provodljivosti metala i temperaturne razlike između anodne staze i nosača anode (temperaturni gradijent)
- ▶ Tri sistema za hlađenje:
 - 1) Vazdušno hlađenje pomoću ugrađenog ventilatora (malo efikasno)
 - 2) Ugljno hlađenje
 - 3) Vodeno hlađenje



Maksimalni napon

- Maksimalni napon :
- Radiološkoj dijagnostici:
 - napon 20-150kV – radiografija

napon 50-110kV – radioskopija

Maksimalno opterećenje rendgenske cevi zavisi od fokusa, struje kroz cev, vremena tj dužine ekspozicije i visokog napona

Opterećenje fokusa zavisi od: njegove veličine i brzine obrtanja anode

Termički kapacitet rendgenske cevi

- ▶ Termički kapacitet rendgenske cevi: za vreme radiografije i radioskopije manji deo energije se pretvara u X zrake a znatno veći deo u toplotu koja zagreva fokus anode
- ▶ Telo anode mora da ima manju temperaturu da bi prihvatilo toplotu sa anodnog fokusa → između tela anode i fokusa mora da postoji temperaturna razlika
- ▶ Svako prekoračenje termičkog kapaciteta dovodi do oštećenja anode
- ▶ Određivanje termičkog kapaciteta rendgenske cevi vrši se u kilovatsekundama
- ▶ Termički kapacitet se može povećati upotrebom gafita u anodnoj konstrukciji



Termički kapacitet rendgenske cevi

- ▶ Kod serijskih radiografija (npr. angiografija) termičko optereženje je veliko jer se toplota serijskim ekspozicijama brzo akumulira
- ▶ Između serije snimaka potrebno je rashladiti i odmoriti anodu
- ▶ Radiografija sa dužim ekspozicijama mnogo više zagreva anodu nego radiografija sa kratkotrajnom ekspozicijom
- ▶ Radioskopija permanentnije opterećuje rendgensku cev a dodatno ciljano snimanje još više zagreva anodu



Rendgenska cev- podela

- Rendgenske cevi:
 - 1) sa fiksnom anodom
 - 2) sa obrtnom anodom
 - 3) sa rešetkom



Rendgenska cev sa fiksnom anodom

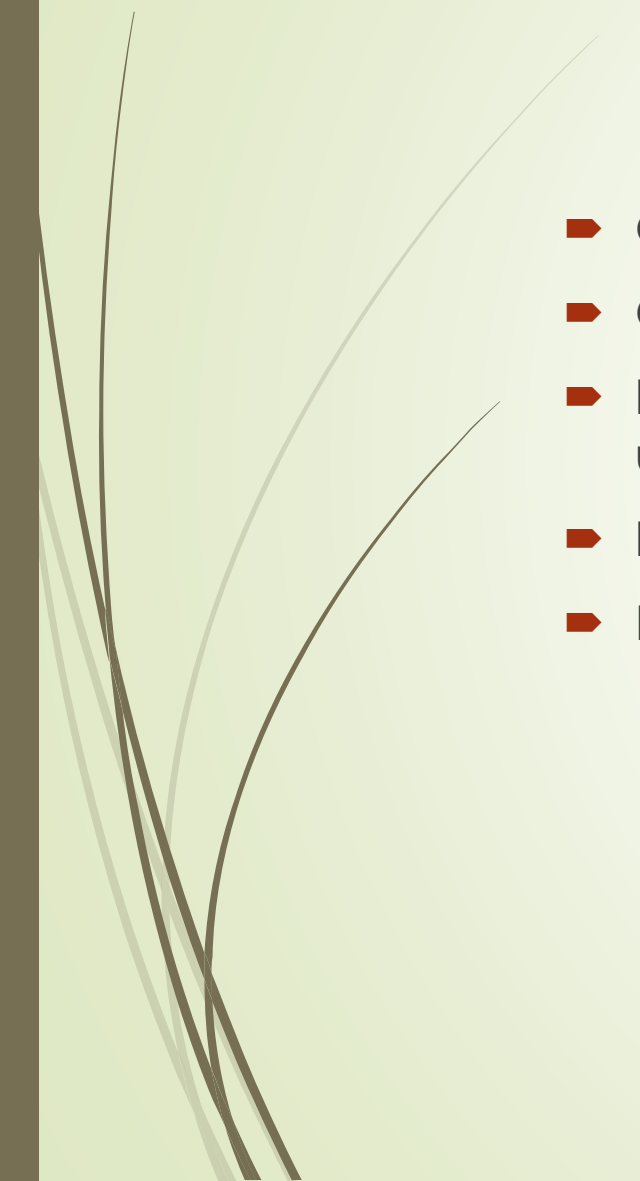
- ▶ Anodni fokus od folframa i nalazi se na držaču od bakra, bakar je dobar provodnik toplote i predaje je ulju koja ga okružuje
- ▶ Nagib anode je 45°
- ▶ Površina anode velika

Nedostatka: nije jako velike snage

Koristi se za radioskopiju i radiografiju u bolesničkim sobama, stomatološkim apartaima

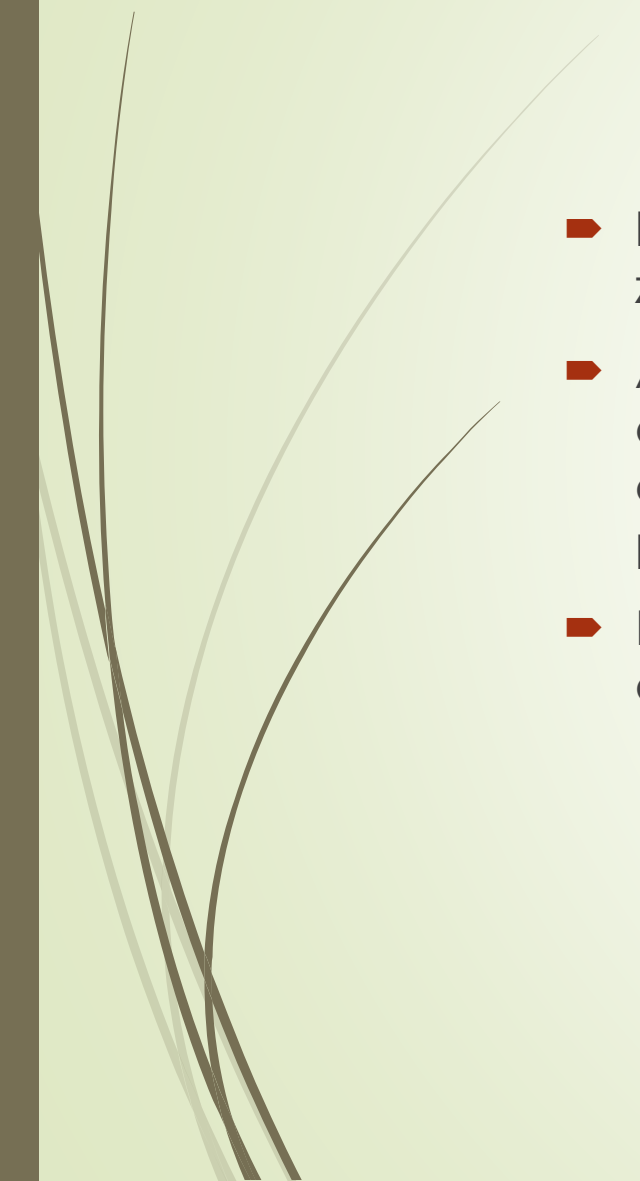


Rendgenska cev sa obrtnom anodom

- Od volframa u leguri sa renijumom
 - Osnova anode je od molibdena ili grafita
 - Ima dva fokusa čije su anodne staz postavljene pod različitim nagibnim uglom
 - Imaju veliku snagu
 - Koriste se kod svih većih rendgen uređaja
- 



Rendgenska cev sa rešetkom

- Između katode i anode se nalazi rešetka čiji je zadatak da prekine emisiju X zraka prema elektronskoj komandi
 - Aktiviranje i blokiranje emisije X zraka vrši se prekidanjem snopa katodnih elektrona koji su pod direktnom kontrolom napona rešetke na način da se oni zaustavljaju pri naponu ispod 2000V a preko 2000V oslobađaju da lete prema anodi
 - Rendgenske cevi sa polarizovanom rešetkom omogućavaju vrlo kratke ekspozicije i seriju brzih snimaka (npr. angiografija)
- 



Hauba

- ▶ Rendgenska cev sve vreme nalazi na visokom naponu mora se zaštititi da se dodirne rukom, dopustiti prolazak zračenja samo kroz kontrolisan prolaz



smeštanje rendgenske cevi u zaštiti metalni oklop
(tuto oklop- hauba)



Hauba

- Metalni oklop- hauba ima cilindričan oblik a na svojim krajevima ima dva roga
- Na srednjem delu metalni oklop ima okruglo prozorče
- S unutrašnje strane obložen je olovnim limom debljine do 3mm koja služi kao zaštita od rasipnog štetnog zračenja
- U rogovima su smeštene šolje od visokoizolacionog materijala (araldit) i one služe za prihvatanje završetka visokonaponskih kablova
- Prozorče na haubi je od materijala koji lako propušta rendgenske zrake



Hauba

- ▶ Metalni oklop ima veći prečnik nego stakleni balon rendgenske cevi i međuprostor se ispunjava uljem
- ▶ Ulje ima dva zadatka:
 - 1) da služi kao izolacioni materijal
 - 2) da služi kao sredstvo za hlađenje rendgenske cevi




Sopstveno filtriranje rendgenske cevi

- ▶ Za zaustavljanje mekih rendgenskih zraka veće talasne dužine radi zaštite pacijenta od kožnih oštećenja i za homogenizaciju zračnog snopa u cilju smanjenja rasipnog zračenja koji izaziva neoštrinu snimka (radiografija) upotrebljavaju se filteri od aluminijuma i bakra
- ▶ Filteri su pravougaone pločice od aluminijuma ili bakra koje se postavljaju ispred prozorčića rendgenske cevi i u naročito podešen otvor na haubi (zračnik) ili svetlosnom viziru

Sopstveno filtriranje rendgenske cevi

- Filteri se mogu menjati uzvisnosti od prodornosti zračnog snopa i vrednosti visokog napona
- Filteri:
 - 1) ZS manji od 60kV aluminijumski filtri debljine 2mm
 - 2) ZS 60-120kV aluminijumski filtri debljine 0.5mm
 - 3) ZS veći od 120kV



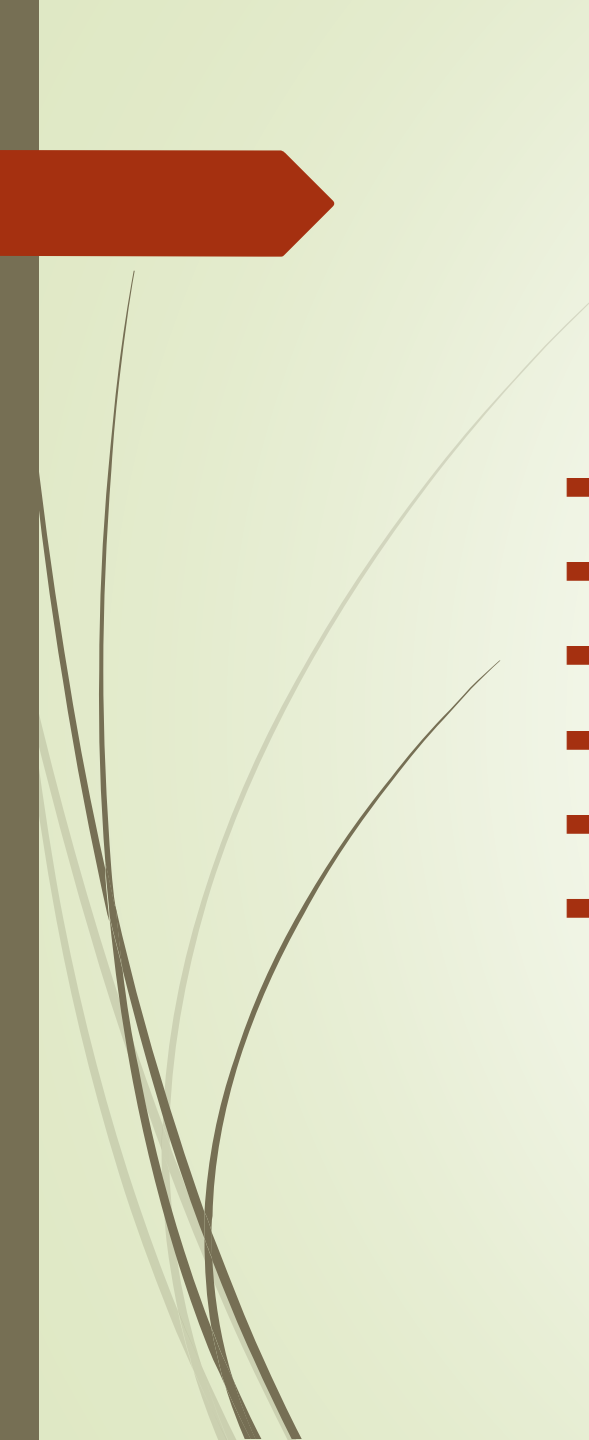
Oštećenje rendgenske cevi

- 1) Fisura (ako se fokus optereti preko max termičkog kapaciteta)
- 2) Smanjenje anodnog ugla (naglog opterećenja anode dok su njene ivice još hladne)
- 3) Prelom anode (intenzivnim opterećenjem hladne rtg cevi za kratko vreme, anoda se naglo usija i dolazi do njenog pucanja, posto nije još dostigla radnu temperaturu)



Oštećenje rendgenske cevi

- 4) Topljenje fokusa (kada se blokira obrtanje anode)
- 5) Ispravljavanje volframa (nastaje ako se temperatura podigne preko 2000°C)
- 6) Prskanje staklenog zida (može biti izazvano mehaničkim udarom, vibracijom i prelomom anode)
- 7) Gubitak vakuma (da se izgubi kontakt sa vakumom ili da se on smanji)

- 
- <https://www.youtube.com/watch?v=UkywJG9QPuE>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=bkaECMbLy58>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=uPoD0jv93Ks>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=qcXLLxDZ1IA>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=M9S1ULdwav8>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=IsaTx5-KLT8>



HVALA NA PAŽNJI!