Primjena niskotlačnog izboja za električnu propulziju svemirskih brodova

Sičanica, Petar

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:249426

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Petar Sičanica

PRIMJENA NISKOTLAČNOG IZBOJA ZA ELEKTRIČNU PROPULZIJU SVEMIRSKIH BRODOVA

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER NASTAVNIČKI

Petar Sičanica

Diplomski rad

Primjena niskotlačnog izboja za električnu propulziju svemirskih brodova

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Damir Veža

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2018.

Sažetak

Dok se u kemijskim raketnim motorima koristi kemijska reakcija tijekom koje se propelant velikom brzinom izbacuje iz motora i tako ostvaruje potisak, u sustavima za električnu propulziju propelant se potiskuje iz motora korištenjem električnog polja. Propelant na koji djeluje električno polje čine ioni koji na svemirskoj letjelici nastaju procesom ionizacije neutralnog plina. Samu ionizaciju je moguće ostvariti na brojne načine, a jedan od njih je i sudarima u kojima sudjeluju elektroni dovoljne energije i neutralni atomi plina. Neutralni plin se u svemirskoj letjelici nalazi pohranjen u spremnicima, a elektroni se dobivaju iz niskotlačnog izboja kojeg je moguće ostvariti korištenjem šuplje katode. Na ovaj način ostvareni pogoni električne propulzije se koriste za održavanje satelita u željenim orbitama, ali i na svemirskim letjelicama koje moraju prijeći veliku udaljenost. Iako je akcelaracija koju omogućuje električna propulzija mala s vremenom će svemirska letjelica financijski i energetski jeftinije postići brzinu koja može biti znatno veća od one postignute kemijskim raketnim pogonom. Nabrojane prednosti električne propulzije ne znače kraj kemijskom raketnom pogonu u svemirskim misijama, jer jedan pogon ispravlja mane drugog, ali sigurno električnoj propulziji otvaraju vrata prema svijetloj budućnosti.

Ključne riječi: raketa, niskotlačni izboj, šuplja katoda, električna propulzija

Application of low-pressure discharge for electric propulsion of space ships

Abstract

While chemical rocket engines use chemical reactions during which the propellant is being ejected at high speeds thereby generating thrust, electric propulsion system utilize an electric field to achieve thrust. The electric field acting on the propellant, consisting of ions of an ionized neutral gas generated within the spacecraft. The ionization itself is possible to achieve in numerous ways, one of them is colliding high energy electrons with neutral atoms from the gas. Neutral gas is stored on the spacecraft in pressurised containers, while electrons are gained through a low-pressure discharge by means of using a hollow cathode. Elecric propulsion drives developed in this manner are used in maintaining satellites in desired orbits, and in spacecrafts required to travel great distances. Acceleration achieved through electric propulsion drives is small, but the spacecraft using it will reach greater velocities at a lower price financially. A spacecraft using the electric propulsion drive will be far more energy efficient and provide better results than a chemical rocket engine. Advantages for the electric propulsion drive numbered here do not mean the end of chemical rocket engines in space missions. One propulsion system helps correct the flaws of the other, but it surely opens the electric propulsion drive a gate to the stars.

Keywords: rocket, low-pressure discharge, hollow cathode, electric propulsion

Sadržaj

1 Uvod **1**

2 Povijest raketne tehnike i električne propulzije **3**

2.1 Povijest raketne tehnike 3

2.2 Povijest električne propulzije 6

3 Niskotlačni izboji **13**

3.1 Šuplja katoda 15

4 Električna propulzija **19**

4.1 Vrste električne propulzije 21

4.1.1 Ionski pogon 22

4.1.2 Princip rada 23

4.1.3 Hallov pogon 27

4.1.4 Princip rada 29

5 Metodički dio **32**

5.1 Nastavna priprema 32

6 Zaključak **39**

Literatura **40**

1 Uvod

Znanost i znanstvena fantastika često su inspiracija jedna drugoj. Tri stoljeća prije korištenja kemijskog raketnog pogona za slanje prvog umjetnog satelita i prvog čovjeka u svemir Francuz Cyrano De Beregerac piše znanstveno fantastično djelo u kojem se po prvi puta spominje korištenje kemijskog raketnog pogona za putovanje svemirom. Sredinom 19. stoljeća, jedno stoljeće prije spomenutih događaja vezanih za stvarni put u svemir puno poznatiji Francuz Jules Verne piše *Put na mjesec* i tim djelom ostavlja snažan dojam na mlade ljude od kojih će neki kasnije postaviti temelje astronautike, područja znanosti i tehnologije koje se bavi umjetnim objektima za putovanja izvan Zemljine atmosfera.

Vizionari koji zbog geografske udaljenosti samostalno razvijaju brojne identične koncepte o kemijskom raketnom pogonu. Također već razmišljaju i o električnoj propulziji, koja ni dan danas još nije ostvarila namjenu koju su joj predviđali, let ljudi do drugih planeta za čiji je daljni razvitak potrebno napustiti. Sama ideja o električnoj propulziji je time stara više od jednog stoljeća i brojni bitni koncepti za njezinu primjenu su rano razrađeni, ali zbog političkih situacija i tehnoloških dostignuća u 20. stoljeću ideja je stavljena u drugi plan, iza kemijskog raketnog pogona.

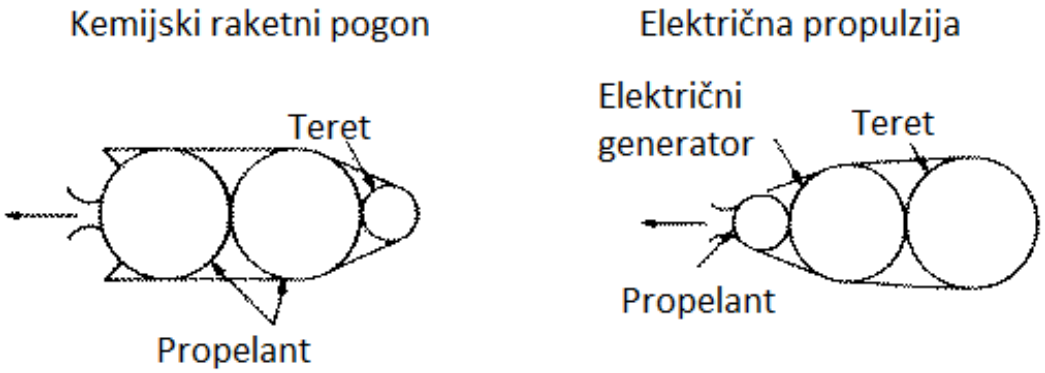
Usprkos preprekama električna propulzija je u posljednjih 20 godina 20. stoljeća, a pogotovo nakon rušenja Berlinskog zida i otvorene suradnje, te izmjene iskustva znanstvenika i inženjera iz Sjedinjenih Američkih Država i onih iz država bivšeg Saveza Sovjetskih Socijalističkih Republika postajala sve popularnija. Do danas je iskorištena u više od 200 satelita koji se nalaze u Zemljinoj orbiti i nekoliko svemirskih misija.

Vozilo	Udio propelanta u ukupnoj masi vozila
Veliki brod	3%
Auto	4%
Lokomotiva	7%
Vojni avion	30%
Teretni avion	40 %
Raketa	85%

Tablica 1.1: Postotak udjela goriva u nekim vozilima na Zemlji [1]

Rast popularnosti električne propulzije je razumljiv kada se uzme u obzir činjenica da 85% ukupne mase rakete, koja koristi kemijski raketni, prilikom lansiranja sa

Zemlje u Zemljinu orbitu čini upravo propelant, što ostavlja tek 15% ukupne mase za daljnje potrebe misije. Treba imati na umu kako je rezultat od 85% postignut inženjerskim rješenjima kao što su višestupanjske rakete, različiti propelanti u pojedinim stupnjevima i još neki bez kojih bi se postotak mase goriva u ukupnoj masi rakete približio 100% .



Slika 1.1: Grafički prikaz masa u svemirskim letjelicama koje koriste kemijski raketni pogon i električnu propulziju [2]

Kada se konačno nađe u svemiru i svemirska letjelica krene u nastavak svoje misije sa slike (1.1) vidimo kako će masa korisnog tereta, kojeg mogu činiti npr. ljudi i instrumenti, biti opet znatno manja od one mase rezervirane za propelant u slučaju kemijskog raketnog pogona. Kod svemirske letjelice koja koristi električnu propulziju istu misiju je moguće ostvariti s manjom masom propelanta, većim korisnim teretom i generatorom električne energije kojeg je moguće koristiti i za propulziju i za potrebe tereta.

Sada kada su sumnje u korisnost proučavanja električne propulzije otklonjene nastavimo s poviješću kemijskog raketnog pogona i razvoja električne propulzije. U radu će biti opisan i niskotlačni izboj bez kojeg bi električna propulzija barem za sada bila neostvariva, te dva najzrelija ostvarenja pogona električne propulzije. Jedan razvijan u Sjedinjenim Američkim Državama, a drugi u bivšem Sovjetskom Savezu. Uz te dvije izvedbe postoje i brojne druge, no neke od izvedbi su već odbačene, a ostale se tek ozbiljnije testiraju u laboratorijima ili postoje samo kao ideje.

2 Povijest raketne tehnike i električne propulzije

2.1 Povijest raketne tehnike

Prve rakete na kemijski raketni pogon se pojavljuju oko 10. stoljeća izumom baruta u Kini. Uz korištenje istih za vatromete prilikom proslava i religijskih obreda ubrzo se počinju koristiti i u vojne svrhe. Najraniji povijesni zapis o korištenju tako pogonjenih raketa u vojne svrhe jest onaj iz 1232. godine gdje Kinezi iz grada pod opsadom raketama gađaju Mongole. Grad je u toj bitci obranjen, ali taj povijesni period je obilježen agresivnim mongolskim osvajanjima i stvaranjem jednog od najvećih carstava u ljudskoj povijesti tako da je na kraju osvojen i taj grad zajedno sa cijelom Kinom.



Slika 2.1: Bambusova stabljika napunjena kalijevim nitratom, sumporom i ugljenovom prašinom je korištena za vatromet prilikom proslava kraja žetve u Istočnoj Aziji [4]

Nakon spomenute bitke Mongoli i sami počinju koristiti rakete, te kroz svoja osvajanje šire znanje o njima. Tako i Europa i Bliski Istok saznaju za rakete koje od tada, pa do 20. stoljeća imaju faze rasta i pada popularnosti u bitkama različitih povijesnih perioda. Nepreciznost je bila najveća mana tih ranih raketa i veći napredak je u tome segmentu postignu tek u 19. stoljeću. Do tada je vjerojatnost pogotka cilja raketom bila mala, pa su se koristile u velikom broju i za gađanje velikih meta, kao što su gradovi pod opsadom. Usprkos povećanju preciznosti u 19. stoljeću rakete su izgubile u natjecanju popularnosti s topovima.

Rakete ponovno počinju biti popularne 1903. godine, kada započinje i službena povijest astronautike. Iste godine braća Wright po prvi put uspješno lete s letjelicom ”težom od zraka”. Te godine Rus Konstantin Eduardovič Ciolkovski, samouki

nastavnik matematike, u časopisu *Znanstveni pregled* izdaje članak koji sadrži izvod za jednadžbu rakete, osnovnu jednadžbu za raketni pogon. Ciolkovski time pokazuje kako je putovanje svemirom moguće ostvariti uređajem kojeg čovječanstvo već poznaje.

Do Ciolkovskove jednadžbe dolazimo promatranjem rakete mase M iz koje propelant izlazi brzinom v_{pr}. Pošto masa samog proplenata čini većinu ukupne mase rakete moramo uzeti u obzir kako se njegovim izlaskom iz rakete masa rakete s vremenom mijenja. Potisak nastao zbog gorenja propelanta iznosi

$$F = v_{pr}\frac{dM}{dt}. \tag{2.1}$$

Primjenom drugog Newtonovog zakona dolazimo do akceleracije koju ima raketa koja proizvodi potisak F

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{F}{M}. \tag{2.2}$$

Uvrštavanjem izraza (2.1) dolazimo do

$$\frac{dv}{dt} = -v_{pr}\frac{dM}{dt}\frac{1}{M}, \tag{2.3}$$

što možemo zapisati kao

$$dv = -v_{pr}\frac{dM}{M}, \tag{2.4}$$

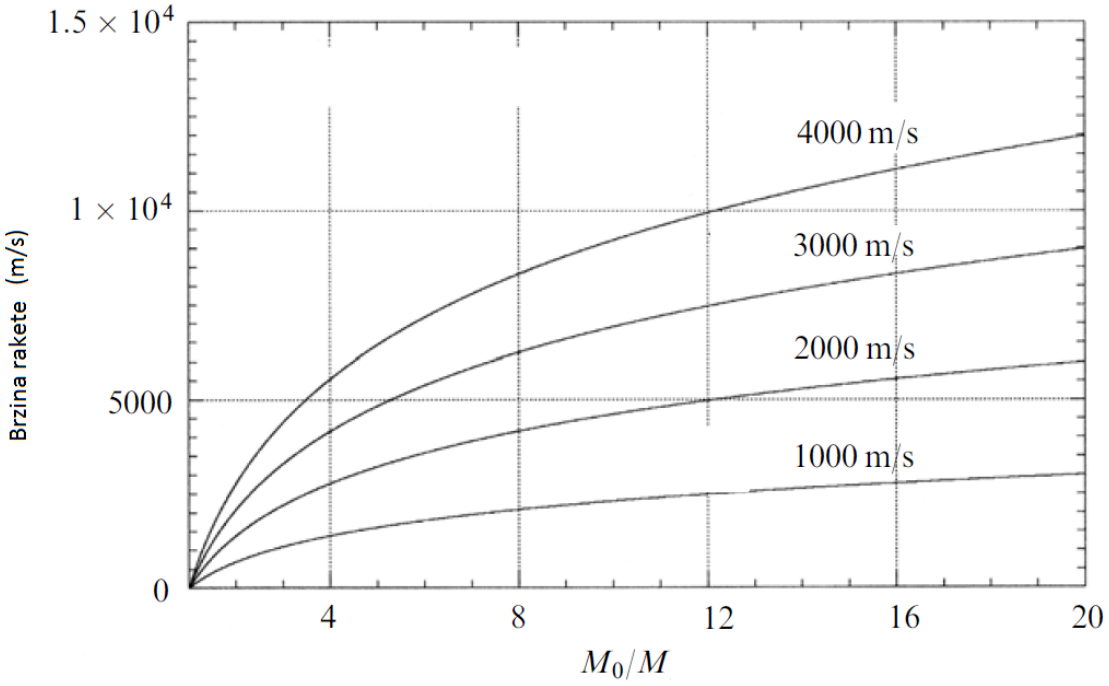
integracijom možemo saznati kako izraz za brzinu rakete ovisi o preostaloj masi u bilo kojem trenutku. Kao donje granice integracije koristimo v_0, brzina rakete prije paljenja pogona, i M_0, masa rakete prije nego što je gorivo potrošeno prilikom promjene brzine. Kao gornje granice integracije koristimo M i v, tj. konačnu masu rakete i konačnu brzinu rakete.

$$\int_{v_0}^{v} dv' = -\int_{M_0}^{M} v_{pr}\frac{dM'}{M'} = -v_{pr}\int_{M_0}^{M}\frac{dM'}{M'}, \tag{2.5}$$

$$v - v_0 = -v_{pr} ln\frac{M}{M_0} = v_{pr} ln(\frac{M_0}{M}). \tag{2.6}$$

Jednadžba (2.6) je jednadžba rakete od strane K.E. Ciolkovskoga. Nažalost izdavač časopisa u kojem je članak objavljen ubrzo umire i časopis se gasi. Sam broj časopisa s člankom zbog toga ima malu nakladu i do 1960.-ih se mislilo kako nitko izvan

Sovjetskog Saveza nije vidio taj broj časopisa.



Slika 2.2: Brzina rakete za različite brzine izlaska propelanta korištenjem Ciolkovskove jednadžbe [9]

Iz jednadžbe rakete vidimo kako konačna brzina rakete ovisi jedino o omjeru početne mase rakete i konačne mase rakete, te brzini izlaska propelanta. Na brzinu izlaska propelanta sam dizajn rakete ima mali utjecaj, brzina izlaska većinom ovisi o kemijskom sastavu samog propelanta. Barut i drugi popelanti koji su bili popularni u 19. stoljeću dozvoljavali su izlaznu brzinu propelanta od $2000\frac{m}{s}$. Ciolkovski je znao vrijednost druge kozmičke brzine koja iznosi $11000\frac{m}{s}$ i koristeći (2.6) vidimo kako bi ona mogla biti postignuta čak i s brzinom izlaska propelanta od $2000\frac{m}{s}$.

Sa slike (2.2) vidimo kako u jednom trenutku povećanje mase goriva, tj. povećanje konačnog omjera masa, više nema veliki utjecaj na konačnu brzinu rakete, a u realnosti omjer masa veći od 10 je gotovo nemoguće ostvariti. Ciolkovski je koristeći dotadašnje znanje kemije o temperaturama na kojima tvari gore i masama molekula ostvario tekuća goriva koja mogu propelenat izbaciti brzinom i do $4000\frac{m}{s}$. Današnji propelanti tu brzinu podižu i do $4500\frac{m}{s}$, što je ujedno i blizu teorijskog limita koji se može postići oslobađanjem kemijske energije. Uz sve to, kao što je već spomenuto u uvodu, sam put u svemir bi bio nemoguć bez brojnih dodatnih inženjerskih rješenja.

Ista slika nam pokazuje i kako rakete mogu putovati brže od brzine izlaska propelanta. Plamen koji vidimo kod raketa ustvari više nema nikakav utjecaj na gibanje

rakete i ne služi, kako se popularno misli, za “odgurivanje rakete” od nečeg. Potisak djeluje unutar same rakete na rubove komore u kojoj se gorenje odvija i tako joj daje ubrzanje koje je neovisno o brzini same rakete.

2.2 Povijest električne propulzije

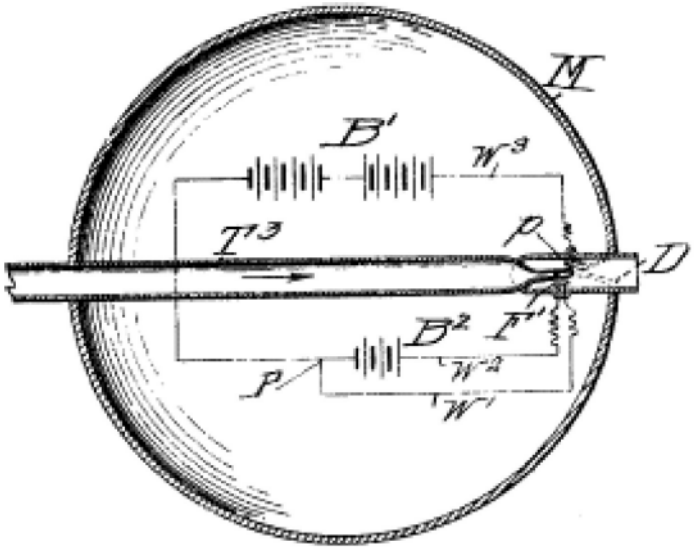
Osam godina kasnije Ciolkovski izdaje novi članak u kojem se po prvi put u povijesti spominje ideja električne propulzije. Što ne treba čuditi, jer su elektronske cijevi u to vrijeme bile popularne među znanstvenicima. Kada pogledamo jednadžbu (2.6) i vidimo kako promjena brzine rakete ovisi o brzini kojom propelant izlazi iz rakete, te kada usporedimo brzinu propelanta kod rakete na kemijski pogon i brzinu elektrona u elektronskim cijevima brzina elektrona je 6000 do 20000 puta veća. Stoga ne čudi što je Ciolkovski došao na ideju električne propulzije, uporabu električne energije za ubrzavanje čestica koje bi se onda izbacivale iz rakete. Valja napomenuti kako se u to vrijeme znalo jedino za postojanje elektrona kao negativno nabijenih čestica.

Ciolkovski je u ranoj mladosti skoro u potpunosti izgubio sluh, te iako nije završio osnovnu školu vrijeme je provodio okružen knjigama. Sa 16 godina, otac ga šalje na 3 godine u Moskvu koje provodi u knjižnicama, u tome periodu čita i Jules Vernov Put na Mjesec, tako stječe široko znanje, koje mu kasnije omogućuje i polaganje ispita za nastavnika. Ostatak života provodi predajući matematiku u dva manja mjesta u okolici Moskve. To sve je Ciolkovskom ograničilo pristup informacijama, te se smatra kako nikada nije imao potrebno znanje iz elektrostatike i magnetizma za ozbiljnu analizu električne propulzije. Njegov rad se uglavnom temeljio na proučavanju kemijskog raketnog pogona, a električnu propulziju je vidio kao, u to doba, neostvarivi san.

Sljedeći čovjek bitan za električnu propulziju jest Amerikanac Robert Hutchings Goddard. Kao mladi fizičar preko dana se bavio pojavama u elektrostatici i magnetizmu, a u slobodno vrijeme raketnim pogonima. Takva kombinacija provođenja vremena nekako je prirodno dovela do ideje o električnoj propulziji. To se dogodilo 1906. godine, u 24. godini života. U tom periodu je promišljao o problemu gibanja elektrona brzinom svjetlosti, te što bi se dogodilo kada bi se elektron gibao brže od brzine svjetlosti.

Goddard se ne slaže s idejom beskonačne količine gibanja elektrona koji se kreće

brzinom svjetlosti, ali se nadao kako će se eksperimentalno uskoro moći ubrzati elektrone blizu brzine svjetlosti. Goddard tada još nije znao za radove Alberta Einsteina koji su objavljeni 1905. godine, koja je kasnije u znanstvenim krugovima prozvana *Annus mirabilis*, što ne treba čuditi jer su ti radovi shvaćeni ozbiljno tek 1908. godine kada Planck i Minkowski objavljuju svoje ideje o specijalnoj teoriji relativnosti. U to vrijeme katodne cijevi elektrone su mogle ubrzati na brzine koje su teško usporedive s brzinom svjetlosti, te je 1940.-ih bilo moguće s elektronima postići brzine slične onima brzini svjetlosti.



Slika 2.3: Shema treće varijante prvog elektrostatičnog pogona kako ga je zamislio Goddard u svome patentu iz 1917. godine [7]

Ubrzavanje elektrona razlikom potencijala donosi i neke tehničke poteškoće koje bi bilo teško ostvariti na svemirskom brodu, ponajviše veličina potrebnog akceleratora. Goddard uskoro uviđa prednosti akceleracije iona u elektrostatičkom akceleratoru te napušta ideju o korištenju elektrona kao propelanta u električnoj propulziji. Štoviše jedan od 214 njegovih patenata je upravo i elektrostatički ionski akcelerator kojemu je jedna od navedenih namjena prilikom registracije bila ubrzavanje iona u svrhu propulzije.

Drugi bitan patent za električnu propulziju koji se koristi i danas jest onaj za stvaranje električno nabijenih čestica. Magnetsko polje se koristi za zarobljavanje stvorenih elektrona koji se nalaze u neutralnom plinu, te dok elektroni kruže u magnetskom polju postoji veća vjerojatnost za sudar s neutralnim česticama plina i na taj

način pobude ili ioniziraju atome plina.

Još jedan bitan problem za električnu propulziju koji je Goddard uočio je potreba za neutraliziranjem nabijenih čestica jednom kada napuste raketu. Naime, ako bi pozitivno nabijene čestice napuštale sustav on bi s vremenom postao toliko negativno nabijen da više ne bi bilo moguće odvojiti i ubrzati pozitivne čestice. Stoga negativne čestice moraju biti odstranjene iz sustava u jednakoj mjeri kao i pozitivne čestice.

Godine 1917. Sjedinjene Američke Države ulaze u Prvi svjetski rat i Goddard, tada pomoćni profesor na Sveučilištu Clark, prelazi u Institut Smithsoninan kako bi radio na raketama na kemijski pogon kojima od toga trenutka posvećuje svu svoju pažnju, a daljni rad na električnoj propulziji zanemaruje.

Dok je država najveći neprijatelj ruskih znanstvenika u Americi su to mediji. Goddard je u privatnim bilješkama često pisao o putovanju kroz svemir, ali je to rijetko spominjao u službenim tekstovima. Obično bi u svojim znanstvenim publikacijama pisao o metodama za postizanje velikih visina, sve zbog članka koji ismijava njegove ideje o putovanju kroz vakuum svemira objavljenog 1920. godine u dnevnim novinama New York Times. Sam smatra kako je to dovelo do formiranja negativnog mišljenja javnosti o interplanetarnoj upotrebi raketa, te slabe potpore za daljnja istraživanja u tom području.

Sljedećeg ćemo spomenuti Rusa poznatijeg kao Juri Vasiljevič Kondratjuk, pravog imena Alexandar Ignjatijevič Šargei. Već u ranoj mladosti pokazuje interes za matematiku i fiziku. Za vrijeme studija izbija Prvi svjetski rat i on je regrutiran kao časnik u Carsku vojsku. Godine 1917. na vlast u Rusiji dolaze Boljševici i Šargei mijenja svoje ime kako bi izbjegao probleme s novom vlašću.

Dok je boravio na fronti zapisuje svoje ideje o letu u svemir. Opisuje raketu čiji će se dijelovi odvajati tijekom leta, slijetanje jednog dijela letjelice na Mjesec, dok drugi kruži u Mjesečevoj orbiti, te sam proračun putanja. Ideju usvajaju Amerikanaci za svoj Program Apollo, čiji je cilj bio odvesti čovjeka na Mjesec, u čemu 1969. godine uspijevaju.

Kondratjuk izostavlja električnu propulziju iz svoje knjige iz 1929. godine, jer ju je doživljavao kao spekulaciju ostvarivu u dalekoj budućnosti, no spominje je u svojim bilješkama. Piše o problemu energije potrebne za ubrzavanje elektrona, pogotovo o golemoj energiji potrebnoj za ubrzavanje elektrona na brzinu bliskoj brzini svjetlosti. Kasnije u svojim razmišljanjima mijenja elektrone s ionima. Prvi uviđa i korisnost

solarne proizvodnje električne energije na letjelicama s električnom propulzijom.

Zbog ideja u toj knjizi, kao što je između ostaloga i ona o gravitacijskoj praćki, i drugih inovativnih rješenja u svakodnevnom životu, Kondratjuk koji je tada radio kao postavljač bojlera i mehaničar upada u oko Narodnom komesarijatu unutrašnjih poslova, NKVD. NKVD ga šalje na 3 godine u Odjel za istraživanja koji je bio u sklopu Gulaga. Nakon izlaska iz zatočeništva do smrti, kao volonter u Drugom svjetskom ratu, neuspješno radi na dizajniranju vjetroelektrana i uspješno na skrivanju svoga pravog indentiteta od NKVD-a unatoč brojnim drugim avanturama.

Uz Ciolkovskog i Goddarda postoji još jedan znanstvenik kojem se pridodaje titula Otac astronautike, to je Njemac Hermann Julius Oberth. On nije pridonio napretku električne propulzije nekim izumom ili razvitkom bitnih koncepata, već time što je kao priznati i poznati znanstvenik električnoj propulziji posvetio cijelo poglavlje u svojoj knjizi iz 1929. godine *Putovi k astronautici*. Knjiga je kasnije postala obavezna literatura za sve koji su se zanimali za astronautiku. Električna propulzija je konačno predstavljena svijetu kao tehnologija vrijedna razvitka.

Putovi za svemirsku navigaciju je ustvari nadopunjeno treće izdanje Oberthove knjige iz 1923. godine *Rakete u planetarne prostore*. Godinu dana ranije, dok je pisao *Rakete u planetarne prostore*, Oberth saznaje za Goddardov rad, te ga citira u knjizi i počinju skupa komunicirati. Izdanje iz 1923. godine i drugo prošireno izdanje iz 1925. godine su ubrzo nakon izlaska iz tiskare rasprodani. Time Oberth postaje slavan, a za Ciolkovskog još nitko nije čuo iako Oberth objavljuje koncepte i jednadžbe slične onima koje je on već objavio 1903. godine. Konačno 1927. godine se sva trojica nalaze na istom mjestu, u Moskvi na izložbi vezanoj uz interplanetarne uređaje, i tom prilikom Ciolkovski je priznat kao začetnik astronautike od strane Goddarda i Obertha.

Oberth je u *Putevima k astronautici* pisao o električnoj propulziji kao tehnologiji kojoj će trebati manje propelanta za isti učinak nego raketama na kemijski pogon, to bi dovelo do značajno manje mase samog sustava rakete. Pisao je i o upotrebi električne propulzije isključivo van Zemljine atmosfere, te korištenju iona plina kao propelanta. Unatoč tome što je nakon 1929. godine ideja o električnoj propulziji dosegla brojne umove diljem svijeta nju su koristili samo autori znanstvene fantastike u svojim djelima. U znanstvenim krugovima električna propulzija ostaje na do sada prikazanim idejama još 20 godina.

Prije nego što je električna propulzija mogla dalje napredovati bilo je potrebno poslati raketu na kemijski pogon u svemir, budući da je domena rakete na električni pogon vakuum svemira. Trebale su se razviti i brojne druge tehnologije kako bi električna propulzija s električnim poljem bila uopće moguća van teorije. Kako je svijet u to vrijeme prolazio kroz pripremu, a kasnije i Drugi svjetski rat, sve što nije moglo odmah poslužiti u vojne svrhe je stavljeno na čekanje.

Svaka od zaraćenih strana u Drugom svjetskom ratu je imala prednost u nečemu nad drugima. Njemačka prednost je bila tehnološka, a kada njemački znanstvenici nisu radili na još većem povećanju te prednosti po željama državnog vrha intervenirala bi Državna tajna policija, Gestapo. Prednost u razvitku raketa na kemijski pogon u vojne svrhe Njemačka nad drugim državama stječe zbog potpisivanja Versajskog ugovora nakon gubitka Prvog svjetskog rata. Versajski ugovor je branio Njemačkoj razvitak i posjedovanje nekih oružja, ali se na tome popisu nisu našle i rakete. Prije promjene političke slike Njemačke razvoj kemijskih raketa je išao u smjeru osvajanja svemira, željela se postići što veća visina leta. Hitler dolazi na vlast 1933. godine i istraživanja na raketama za postizanje velikih visina se pretvaraju u istraživanja za postizanje točnih udaljenosti.

Prije službene kapitulacije Njemačke krenula je utrka između Sjedinjenih Američkih Država i bivšeg Saveza Sovjetskih Socijalističkih Republika za tajnama iza Njemačke tehnologije koja je trajala i nakon službenog završetka rata. Sjedinjene Američke Države su kroz operaciju Spajalica dovele više od 1600 njemačkih znanstvenika na svoj teritorij, a bivši Savez Sovjetskih Socijalističkih Republika je to učinio operacijom Osoaviahim s više od 2000 njemačkih znanstvenika. Dovedeni znanstvenici su bili iz svih područja znanosti, ali oni najvažniji vezani s raketnim pogonom su završili u Sjedinjenim Američkim Državama. Nakon Drugog svjetskog rata ti znanstvenici nastavljaju raditi u utrci za naoružavanjem prozvanom Hladni rat.

Zbog operacije Spajalica Oberth 1947. godine upoznaje Ernesta Stuhlingera u vojnoj bazi u Texasu. Tom prilikom Oberth dijeli svoje ideje o električnoj propulziji sa Stuhlingerom koji nekoliko godina kasnije kao veliki autoritet na području raketnog pogona objavljuje radove koji o električnoj propulziji govore na pozitivan način i kao nešto što treba što prije ostvariti, ali prije tih bitnih radova električna propulzija je spomenuta još nekoliko puta kao vizija koju će biti moguće ostvariti u dalekoj budućnosti.

Britanski fizičari Leslie Robert Shepherd i Arthur Valentine Cleaver 1949. godine u svome članku "Atomska raketa" prvi ukazuju na mogućnost korištenja nuklearnog reaktora kao izvora električne energije koja bi se potom koristila u električnoj propulziji. U istom radu prvi kvantitativno analiziraju upotrebljivost ubrzanih iona pomoću elektrostatičkog polja u letjelicama kojima bi bio zadatak međuplanetarno putovanje i za takve letjelice koriste naziv ionske rakete.

Prvo su utvrdili kako je ionska propulzija prihvatljiva sa svojom velikom izlaznom brzinom propelanta, a opet niskim iznosom akceleracije u prostoru slobodnom od djelovanja gravitacijskog polja i kod satelita koji zahtijevaju stalne orbite, a nakon toga su prepoznali neutralizator, katodu smještenu s vanjske strane svemirske letjelice koja ima zadatak sa svojim izbačenim elektronima neutralizirati samu ionsku zraku, kao bitan element samog pogona.

Članak je potvrdio još neka teorijska očekivanja od ionske propulzije i ona bi bila proglašena budućnošću putovanja kroz svemir da nije analizirana i količina električne energije potrebne za rad samog pogona. Analizirali su situaciju u kojoj bi letjelica imala akceleraciju $0.01g$, a brzina izlaza propelanta bi bila $100\frac{km}{s}$. Takvi uvjeti su ih doveli do rezultata koji u idealnom slučaju iznosi $5\frac{kW}{kg}$, što ionsku propulziju ne čini prihvatljivom za dugo međuplanetarno putovanje.

Takva analiza je moglo biti kobna za električnu propulziju, ali dvije godine kasnije astrofizičar Lyman Spitzer još uvijek ne zna za negativni zaključak od starne Shepherda i Cleavera i sam analizira električnu propulziju i daje joj zeleno svijetlo. Spitzerov rad je objavljen 1951. godine i u tome trenutku je njegov interes za astronautikom bio još nov, pa nije svjestan postojanja niti jednog prethodnog rada na tu temu. Njegov pozitivan zaključak dolazi zbog 30 puta manje akceleracije koju svemirska letjelica treba imati što je kako će se pokazati blisko realnoj situaciji. Misija Deep Space 1 lansirana pola stoljeća kasnije sastoji se od svemirske letjelice bez posade mase $500kg$ čija akceleracija iznosi $10^{-5}g$, a brzina izlaska propelanta $30\frac{km}{s}$ što na godišnjoj razini uzrokuje promjenu brzine od $3\frac{km}{s}$, troši $50kg$ propelanta i $1kW$ električne energije.

Već spomenuti Stuhlinger 1954. godine izdaje svoj prvi rad na temu električne propulzije. U radu detaljno opisuje sinergiju pogonske jedinice električne propulzije i izvora električne energiju u obliku solarne elektrane, daje i nove ideje oko dizajna samog pogona koje su postale standard u daljnjem razvitku. Brojne matematičke po-

tvrde prijašnjih i svojih novih ideja nastavlja i u značajnim radovima iz 1955. i 1956. godine, ali tada njegov dizajna više ne koristi pretvorbu solarne energije u električnu, već je u svemirskoj letjelici smješten nuklearni reaktor koji svojim mogućnostima dalje otvara vrata električnoj propulziji.

Time završava povijesni pregled razvoja ideje električne propulzije, svaka sumnja u njegovu korisnost je otklonjena i dana su mu krila za daljnji razvitak. Kasnije u radu ćemo vidjeti najuspješnije realizacije same električne propulzije.

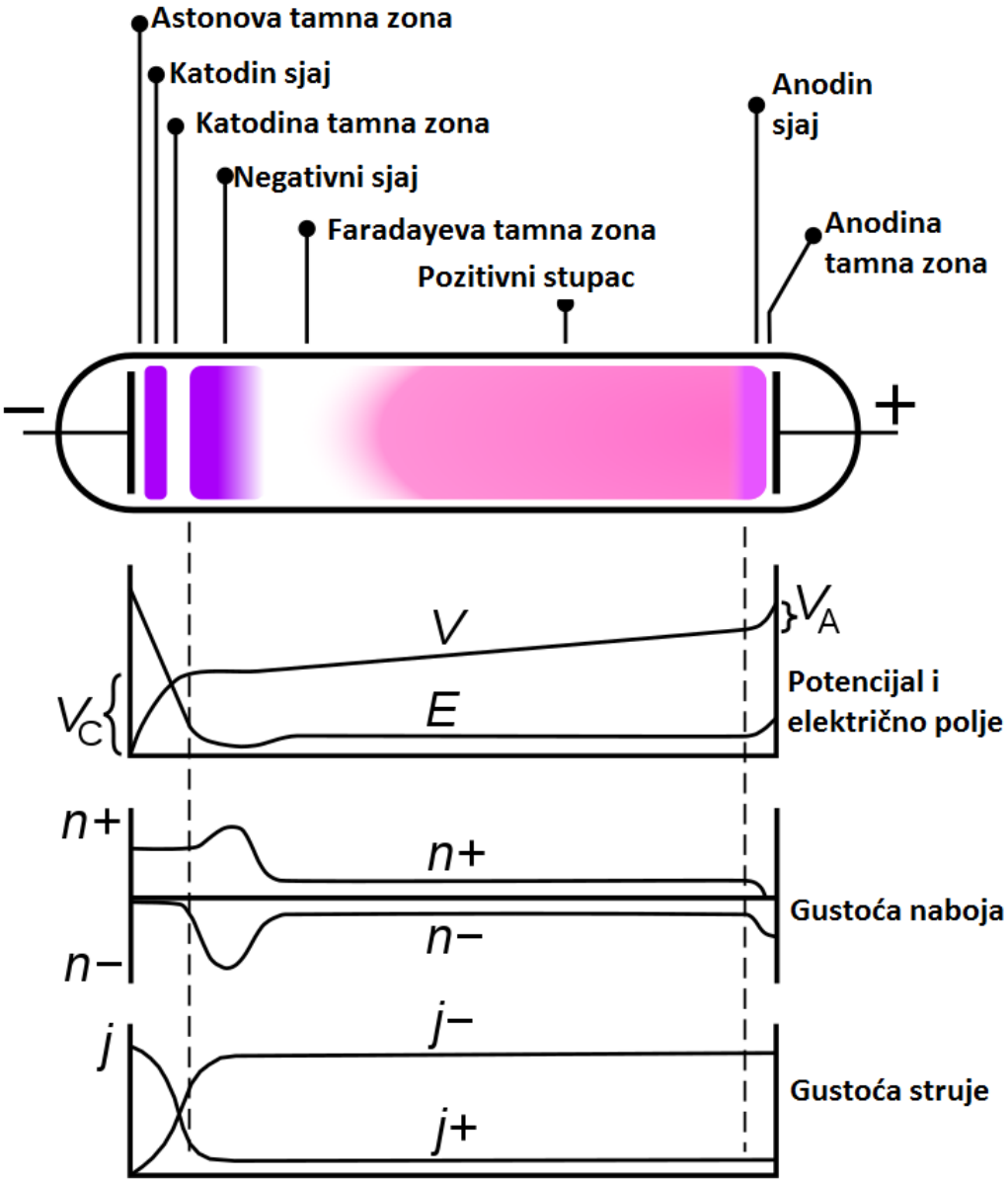
3 Niskotlačni izboji

Električna propulzija bi bila nemoguća bez ionizacije atoma plina koja se može izvesti na brojne načine, ali kod izvedbe samih pogona pokazalo se najučinkovitije ionizaciju vršiti kroz sudare elektrona i neutralnih atoma plina. Neutralni plin se kao propelant nalazi pohranjen u letjelici, a kao izvor elektrona koristi se katoda.

Rane izvedbe električne propulzije razvijane prije 30-40 godina su kao katodu koristile onu napravljenu od volframa koja bi zagrijavanjem ispuštala elektrone(termionska emisija). Kako bi došlo do dovoljnog iznosa struje elektrona volfram se trebao zagrijavati na visoke temperature, više od $2600K$, prilikom čega bi se izgubio veliki dio uložene energije na neželjeni proces i efikasnost pogona jest bila niska. Uz nisku efikasnost volframova katoda je bila izložena i bombardiranju od strane iona što je njezin radni vijek svelo na stotinjak sati, nedovoljno za bilo kakvu smislenu svemirsku misiju. Katodu od volframa je zbog tih nedostataka trebalo zamijeniti nečim efikasnijim i zato ćemo promotriti niskotlačni izboj kojeg je moguće izvesti na nekoliko načina, a u električnoj propulziji se koristi izvedba sa šupljom katodom.

Najjednostavniju izvedbu niskotlačnog izboja čine dvije elektrode spojene na izvor istosmjerne struje smještene u staklenoj cijevi u kojoj se nalazi plemeniti plin pri tlaku od $100Pa$ do $2500Pa$. Kada se uspostavi dovoljno velika razlika električne potencijalne energije između anode i katode će poteći struja koju čine elektroni i ioni, a možemo vidjeti i prostore različitih inteziteta sjaja. Uz katodu se nalazi tamni Astonova zona kojeg slijedi uska zona slabog sjaja, katodin sjaj, između kojih ponekad nije jasna linija odvajanja. Nakon zone katodinog sjaja dolazi katodina tamna zona koji je jasnom granicom odvojen od zone negativnog sjaja. Negativni sjaj polako gubi na intezitetu sve do Faradayeve tamne zone kojeg slijedi pozitivni stupac. Pozitivni stupac kroz cijelu svoju dužinu ima jednaki intezitet sjaja ili se na jednakim udaljenostima kroz stupac nalaze intenzivnije linije sjaja. Na kraju pozitivnog stupca se mogu naći anodina tamna zona i anodin sjaj nakon kojeg slijedi sama anoda.

Promotrimo elektron koji se nalazi uz samu katodu. Zbog elektrostatskog polja između katode i anode počne se kretati akcelerirano prema anodi, na svome putu sudara se s neutralnim atomima plemenitog plina i može doći do ionizacije što dovodi do povećanja broja elektrona. Udaljavanjem od katode utjecaj elektrostatskog polja na elektrone slabi i na granici katodine tame zone i zone negativnog sjaja broj elek-



Slika 3.1: Niskotlačni izboj Preuzeto:https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/66/Glow_discharge_structure_-_English.svg

trona koji mogu još uvijek sudjelovati u ionizaciji se smanjuje. Kako broj elektrona koji su oslobođeni procesom ionizacije raste tako raste i broj iona u tom istom prostoru. Prisutni ioni se kreću prema katodi i zabijaju se u nju, što dovodi do njezinog uništavanja. Uz ione s katodom se mogu sudariti i pobuđeni atomi plina, neutralni atomi plina s velikom brzinom i radijacija što kao posljedicu ima oslobađanje elektrona iz katode. Također mijenjanjem položaja katode u odnosu na položaj anode, rotiranjem ili mijenjanjem udaljenosti, primjećujemo kako negativne zone, prostor između katode i Faradayeve tamne zone, prate kretanje katode i uvijek su jednake

duljine dok pozitivni stupac mijenja svoju duljinu i ispunjava ostatak prostora do anode. Možemo zaključiti kako u procesu stvaranju i održavanju izboja elektrona anoda nema bitnu ulogu što će se iskoristiti kod šupljih katoda, ali prije nego što promotrimo šuplju katodu nastavimo dalje s pručavanjem zona između anode i katode.

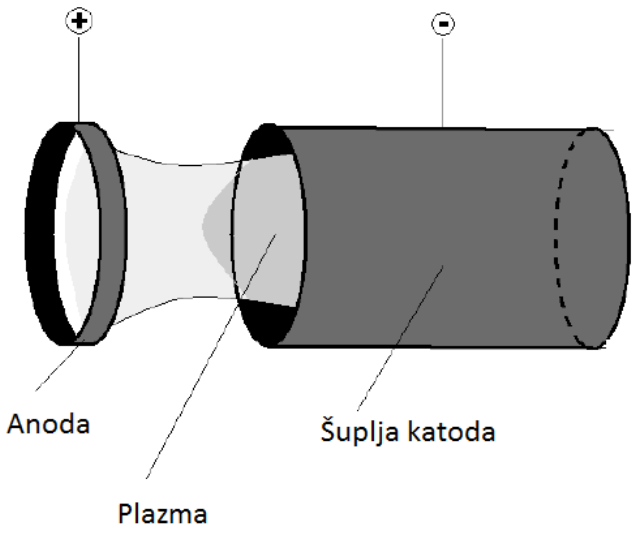
Elektroni koji ulaze u zonu negativnog sjaja imaju ili nisku ili visoku energiju, ovisno o broju sudara u prethodnim zonama. Brzi elektroni nastavljaju s ionizacijom, dok spori elektroni više nemaju dovoljnu energiju za ionizaciju neutralnih atoma, ali ih zato mogu pobuditi i tako nastaje zona negativnog sjaja. Pri tome elektroni gube dodatnu energiju i u jednom trenutku je moguća rekombinacija eletkrona i iona. Rekombinacija oslobađa sjaj niskog inteziteta i ona se obično događa u dijelu zone negativnog sjaja koja je najudaljenija od katode, što vidimo kao smanjenje inteziteta sjaja zone negativnog sjaja udaljavanjem od katode. Broj rekombinacija opada kada se još više udaljimo od katode i dolazimo do tamnog Faradayevog prostora, zone koja ima svojstva zone negativnog sjaja i pozitivnog stupca.

Kako se približavamo anodi iznos elektrostatičnog polja raste i prvo ćemo naići na svijetlije linije u pozitivnom stupcu kojima je potrebna niža energija pobuđenja. Ukoliko je sjaj pozitivnog stupca konstantnog inteziteta tada je i jakost električnog polja unutar stupca konstantna, broj elektrona je jednak broju iona u tome prostoru. Elektrostatično polje i dalje privlači elektrone prema anodi, a odbija ione od anode. Približavanjem anodi elektroni se opet ubrzavaju i ispred same anode opet imaju dovoljno energije za ioniziranje neutralnog plina što vidimo stvaranjem zone anodinog sjaja tik ispred same anode.

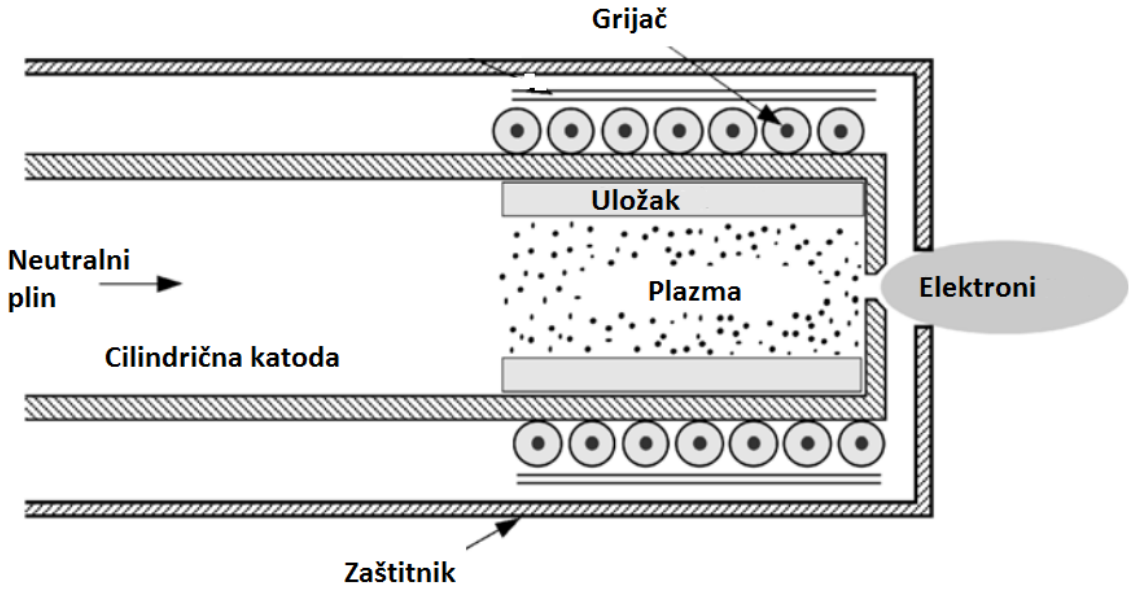
3.1 Šuplja katoda

Šuplja katoda iskorištava činjenicu kako na stvaranje i održavanje niskotlačnog izboja anoda ima mali utjecaj. Kad se katodi približi druga katoda pri niskom tlaku dolazi do preklapanja negativnih zona i stvaranja izboja šuplje katode. U realnoj izvedbi umjesto dvije ravninske katode koristi se jedna cilindrična katoda, a prethodno opisane zone su još uvijek prisutne no ovog puta imaju valjkasti oblik.

Sa slike (3.2) vidimo kako se šuplja katoda sastoji od cijevi cilindričnog oblika u kojeg ulazi neutralni plemeniti plin na jednom kraju, a pločica s otvorom na suprotnom kraju. Kod pločice s otvorom postavljen je uložak čiji je zadatak izdašno



Slika 3.2: Sustav cilindrične šuplje katode i prstenaste anode [15]

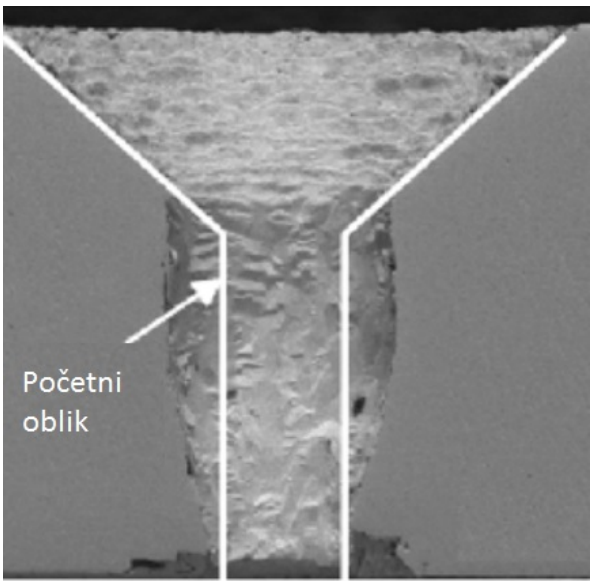


Slika 3.3: Shema šuplje katode [8]

emitiranje elektrona. Dio cijevi gdje se nalazi uložak omotan je s grijačem čiji je zadatak pokrenuti termionsku emisiju iz uloška. Šuplje katode korištene u električnoj propulziji su dodatno zaštićene čuvarom, anodom koja štiti grijač i pločicu s otvorom od sudara s ionima koji su stvoreni izvan šuplje katode.

Prisutni grijač se nakon uspostave dovoljnog broja sudara između plazme i uloška gasi, te se ograničena količina električne energije na svemirskoj letjelici više ne treba trošiti na nepotrebno zagrijavanje što je bila glavna zamjerka prvih izvedbi električne

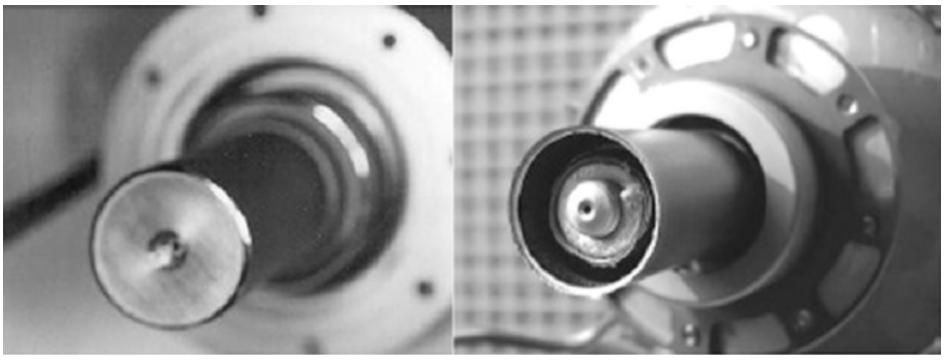
propulzije. Šuplja katoda može nastaviti održavati potrebnu temperaturu sama kroz mehanizme zagrijavanja otvorom, ionima i elektronima. Ako misija zahtjeva izboj niske jakosti struje tada se zagrijavanje vrši pomoću postavljanja uskog otvora koji dovodi do povećanja tlaka u plazmi koja se nalazi u području uloška i otvora. Plazma ima veliki otpor za vođenje struje kroz izboj i time joj se povećava temperatura što dovodi do prelaska topline iz plazme na uložak. Povećanje otvora smanjuje tlak plazme u šupljoj katodi i primarno se uložak zagrijava sudarima između njega i iona prisutnih u plazmi. Ukoliko je za misiju potreban visok iznos jakosti struje izboja tada se ionima u zagrijavanju uloška pridružuju i prisutni elektroni.



Slika 3.4: Erozija otvora šuplje katode nakon 30152 sati rada [8]

Spomenuta plazma nastaje ioniziranjem neutralnih atoma plemenitog plina i elektronima oslobođenim iz uloška, isti proces se događa u blizini katode kod najjednostavnijeg oblika niskotlačnog izboja koji je prethodno opisan. Broj prisutnih elektrona se udvostručuje svakom pojedinom ionizacijom i ispuštaju se kao snop kroz otvor na katodi dalje u pogon električne propulzije. Dobrim odabirom veličine otvora se može dodatno povećati broj elektrona dobiven ioniziranjem. Kada snop elektrona prolazi kroz uski otvor njegova gustoća struje je velika, najveća što će ikada biti, što dovodi do velikog broja sudara s prisutnim ionima i neutralnim atomima plina. Zbog toga se temperatura i energija elektrona povećaju i oni opet mogu ionizirati prisutne neutralne atome plina. Uz međusobne sudare prisutne čestice se s većom energijom zabijaju i u stijenke otvora čime se dodatno uništava.

Prolaskom kroz otvor u ionizacijsku komoru pogona izboj se širi i više nema



Slika 3.5: Šuplja katoda zaštićena čuvarom i isti sustav nakon 30 352 sati rada [8]

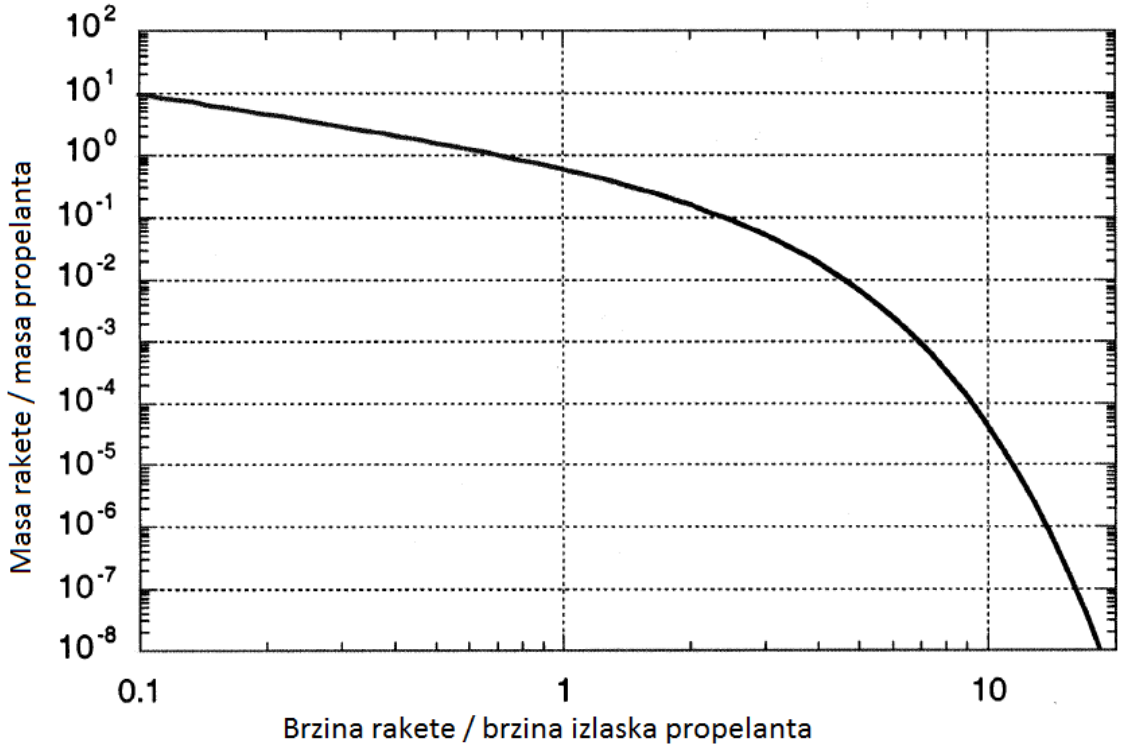
međusobnih sudara u zraci. Pristigli elektroni ioniziraju propelant što stvara ione koji dodatno ubrzavaju elektrone iz katode svojim elektrostatskim poljem. Prisutni ioni u ionizacijskoj komoru su također privučeni elektrostatskim poljem kojeg stvara šuplja katoda i žele se zabiti u nju. Od tih iona katodu štiti čuvar koji ne stvara jako elektrostatko polje jer bi time nepotrebno raspršavao elektrone koji izlaze iz šuplje katode, ali je polje dovoljnog iznosa da uspori ione i tako se cijelom pogonu produžuje radni vijek.

4 Električna propulzija

U povijesnom dijelu smo vidjeli kako brzina rakete može biti veća od brzine izlaska propelanta i to se događa zbog omjera masa prisutnih u jednadžbi (2.7). Iz jednadžbe (2.7) možemo doći do izraza

$$\frac{1}{\frac{M_0}{M}-1} = \frac{1}{e^{\frac{V}{v_{pr}}}-1}, \tag{4.1}$$

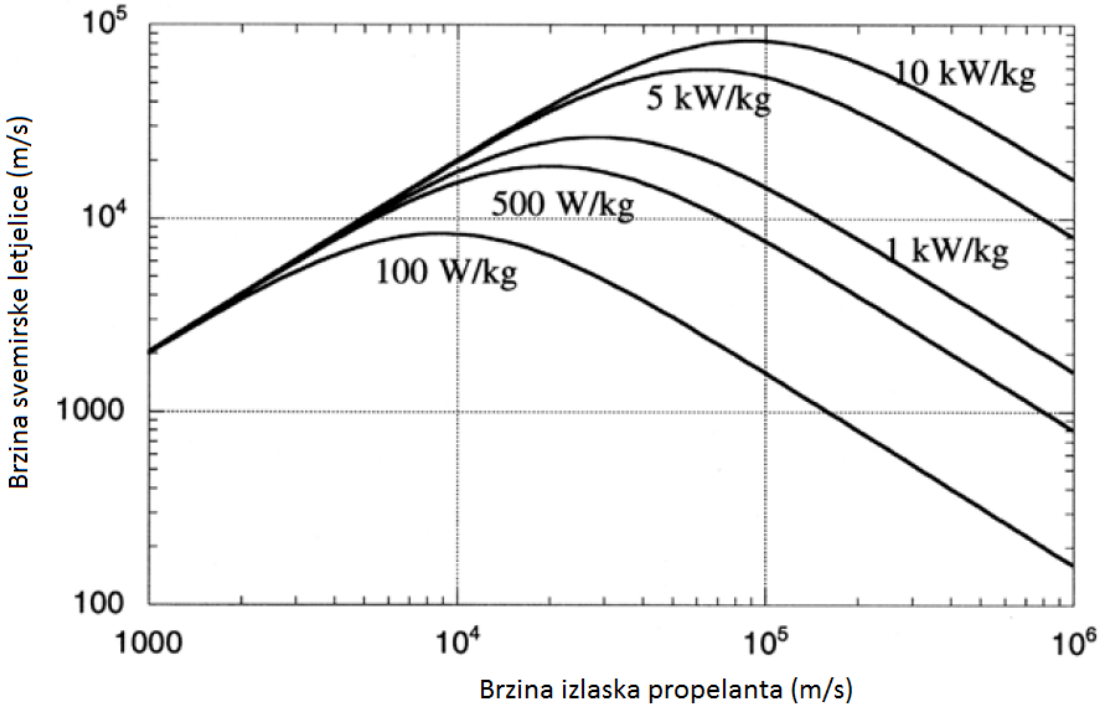
čiji grafički prikaz na slici (4.1) nam pokazuje kako omjer masa postaje realno neostvariv za postizanje velikih brzina koje su potrebne letjelicama koje bi putovale velikim udaljenostima u svemiru.



Slika 4.1: Grafički prikaz omjera masa i brzina [9]

Električna propulzija je nastala iz ideje da se više energije preda propelantu nego što je on može dobiti iz kemijske reakcije i tako se smanji početna masa propelanta. Načini na koje električnu energiju možemo prenijeti na propelant uključuju njegovo zagrijavanje ili djelovanje električnog i magnetskog polja na isti. Možemo zaključiti kako je izlazna brzina propelanta ograničena jedino izvorom električne energije dostupnim u svemiru, a to su za sada baterije, solarne ploče, radioaktivni termalni i fisijski generatori.

Svaki od spomenutih izvora ima svoje prednosti i nedostatke. U baterijama je već pohranjena dostupna energija, ali njezina količina jest ograničena. Solarne ploče pretvaraju maksimalno 20% sunčeve energije u električnu i iako količinu sunčeve energije možemo smatrati neograničenom količina električne energije proizvedena u solarnim pločama je limitirana površinom samih ploča. Pokrivena površina se želi napraviti što većom, ali to povećava masu izvora električne energije i u jednom trenutku postaje neproduktivno kao i povećavanje mase kemijskog propelanta. Uz to povećanje površina ploča znači i više površine koja se nalazi pod utjecajem radijacije prisutne u svemiru koja ih uništava. Intezitet sunčeve energije opada s kvadratom udaljenosti tako da su svemirske letjelice koje koriste solarne ploče kao izvor električne energije za električnu propulziju ograničene putovanjima do Marsa i Merkura, jer i previše sunčeve energije negativno utječe na proizvodnju električne.



Slika 4.2: Brzina svemirske letjelice kao funkcija izlazne brzine propelanta i efikasnosti izvora električne energije [9]

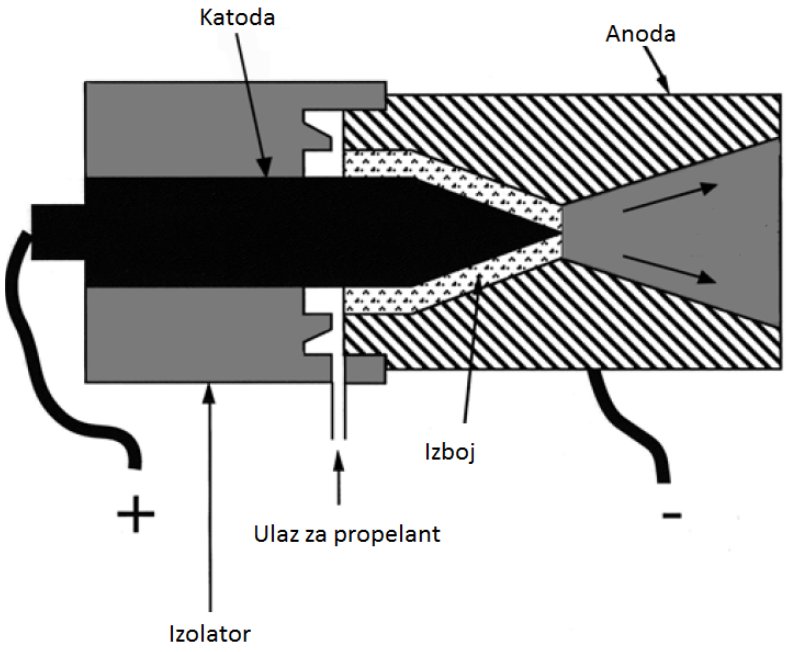
Radioaktivni termalni generatori su nastali kao odgovor na probleme sa solarnim pločama. Oni toplinu iz radioaktivnog raspada pretvaraju u električnu energiju. Kemijski element koji će se raspadati ovisi o parametrima misije, ako je vrijeme poluraspada predugačko neće se dobivati dovoljno topline, a s prekratkim vremenom poluraspada sustav neće imati dovoljno dugo energiju. Ovaj sustav generacije

električne energije najviše efikasnosti gubi zbog sigurnosnih mjera koje osiguravaju radioaktivni materijal od otpuštanja u atmosferu u slučaju nezgoda prilikom lansiranja i ponovnog ulaska u istu. Izvor električne energije koji koristi fisiju se trenutno vidi kao onaj uz koji će električna propulzija postići svoj maksimum. Paljenjem ovog generatora tek kada se nalazi u svemiru bi se izbjegla opasnost od ulaska radioaktivnog materijala u atmosferu i za razliku od spomenutog radioaktivnog termalnog generatora u kojem je količina proizvedene toplina teško kontrolirati kod fisije se to radi relativno jednostavno s kontroliranjem broja neutrona koji se nalaze u sustavu zajedno s uranom.

4.1 Vrste električne propulzije

Prva ostvarena električna propulzija je koristila grijač za zagrijavanje propelanta. Pošto se propelant nalazi u plinovitom obliku, a plinovi su loši vodiči topline samo se povećavala energija česticama plina koje su se nalazile u neposrednoj blizini grijača. Zbog niske efikasnosti prijenosa energije ograničavajuća je bila i temperatura na kojoj se grijač mogao nalaziti. U raketama na kemijski pogon zidovi prostora u kojem dolazi do gorenja propelanta se mogu hladiti, tako da temperatura plamena može biti i viša od temperature taljenja istih zidova. Grijač se ne može hladiti tako da je njegova temperatura, a time i moguća ostvarena energija ograničena njegovom temperaturom tališta. Prednost mu je što propelant može biti odabran s više slobode nego onaj kod pogona koje ćemo sljedeće promatrati, npr. predloženo je da se na međunarodnoj svemirskoj postaji za popravljanje orbite kao propelant za električnu propulziju koristi prethodno iskorištena voda na postaji.

Sljedeća ostvarena vrsta električne propulzije je koristila električni izboj za zagrijavanje propelanta, slika (4.3). Kada se plin nađe u dovoljno jakom električnom polju dolazi do ionizacije. Nastali pozitivni ioni i elektroni se gibaju prema katodi i anodi kroz neutralni plin s čijim se česticama sudaraju i tako ih zagrijavaju. Anoda i katoda su obično napravljeni od wolframa i razmaknuti su dovoljno za prolaz neutralnog propelanta kroz prostor gdje dolazi do izboja. Pošto se zagrijavanje propelanta odvija u samom plinu, a ne zahvaljujući grijaču kao u prethodnom slučaju toplina koja se može prenijeti propelantu je viša kod ove izvedbe pogona.



Slika 4.3: Shema električne propulzije koja koristi električni izboj za zagrijavanje propelanta [9]

Sljedeće ćemo promotriti pogone u kojima je prisutan niskotlačni izboj i kod kojih električno i magnetsko polje izravno djeluju na propelant i na taj način se može otvariti najviša brzina izlaska istoga.

4.1.1 Ionski pogon

Ionski pogon je podskupina elektrostatičnih potisnika. Nastali ioni se ubrzavaju samo pomoću električnog polja, unutar uređaja za električnu propulziju koje konceptualno počinje razvijati Stuhlinger. [7] Od prve upotrebe, 1964. godine prilikom leta letjelice SERT I, do danas u laboratorijima su se pojavile brojne nove opcije za kreiranje iona, no samo neki od tih postupaka zadovoljavaju kriterije visoke učinkovitosti, male mase uređaja i izvora potrebne električne energije, te duljine života za njihovu upotrebu u svemirskim letjelicama.

U Sjedinjenim Američkim Državama su se odlučili na stvaranje iona pomoću elektronskog bombardiranja atoma plemenitog plina i pogon koji koristi tu opciju ćemo predstaviti u daljnjem radu. Pogon s elektronskim bombardiranjem je na početku izgledao kao dugački cilindar u kojem su zavojnice, koje su smještene van cilindra, stvarale homogeno magnetsko polje, a termoelektronskom emisijom iz katode se dolazilo do potrebnih elektrona za bombardiranje atoma i stvaranje iona. Današnji

pogoni koriste nehomogena magnetska polja i šuplje katode kako bi se veličina pogonske jedinice smanjila i njezin životni vijek produžio.



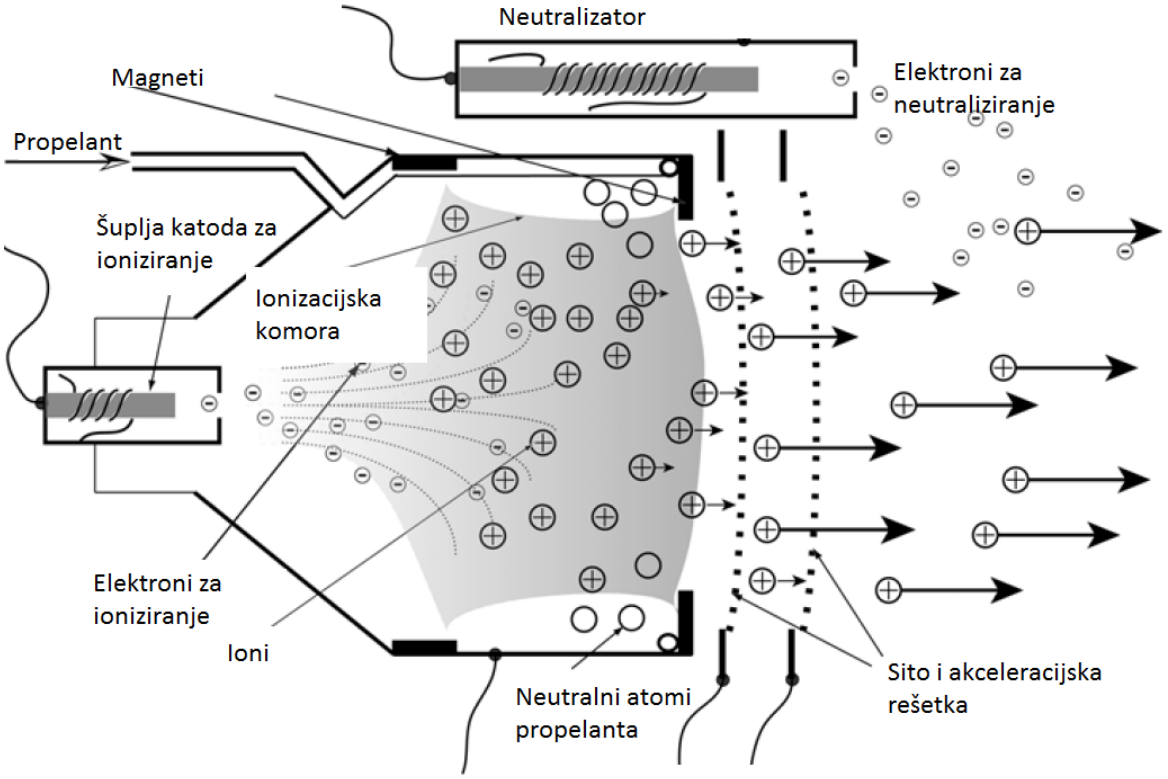
Slika 4.4: Ionski motor s promjerom akceleracijske rešetke od $57cm$ [8]

Trenutačni napori znanstvenika su usmjereni prema dodatnom produljenju vijeka trajanja impulsnog motora, koji je za sada najviše ograničen duljinom trajanja šuplje katode, i stvaranjem modela koji će precizno opisati impulsni motor.

4.1.2 Princip rada

Glavne elemente ionskog motora vidimo na slici (4.5).

Centralno smještena katoda u ionizacijskoj komori izbacuje elektrone, primarni elektroni. Na svome putu do anode ioniziraju neutralne atome plina. Nakon nekog vremena u komori prisutni ioni, neutralni atomi i elektroni počinju činiti plazmu. Elektroni koji su izbačeni iz neutralnog atoma prilikom procesa elektronskog bombardiranja i prijašnji primarni elektroni koji su izgubili dio energije prilikom ionizacije sada se nazivaju sekundarni elektroni, najčešće više nemaju potrebnu energiju za daljnju ionizaciju neutralnih atoma. Broj sekundarnih elektrona u plazmi raste puno većom brzinom nego broj primarnih elektrona, tako da se i broj sekundarnih elektrona koji imaju mogućnost ponovne ionizacije neutralnih atoma povećava. Zbog toga je poželjno zadržati takve sekundarne i primarne elektrone što je dulje moguće u ionizacijskoj komori pomoću magnetskih polja. Primijenjeno magnetsko polje elektronima povećava duljinu puta kroz ionizacijsku komoru i time se povećava vjerojatnost sudara s neutralnim atomima, povećava se efikasnost procesa ionizacije. Djelovanje magnetskog polja na ione je svedeno na minimum.



Slika 4.5: Shema pogona [8]

Neki primarni elektroni i neki sekundarni elektroni, kao posljedica zagrijavanja plazme u ionizacijskoj komori, mogu imati dovoljnu energiju za ponovnu ionizaciju već ioniziranih atoma. Dvostruko ionizirani atomi otežavaju željeni rad uređaja i stoga su nepoželjni. Uz potrebu za niskom potrebnom energijom za prvu ionizaciju i visoku potrebnu energiju za ponovnu ionizaciju plin koji se koristi kao propelant mora biti jednostavan za čuvanje, slabo kemijski aktivan, siguran za čovjeka i atomi plina moraju imati što veću masu. Zahtjev za što većom masom vidimo iz relacije [7]:

$$A \approx \left(\frac{Td^2}{v_{izlaz}^4}\right)\left(\frac{q}{m_i}\right)^2, \tag{4.2}$$

gdje je A površina izlaza za ione, T potisak, d duljina potisnika, v_{izlaz} brzina kojom ioni izlaze iz letjelice, te q naboj i m_i masa iona. Iako je ubrzavanje do željene brzine lakih atoma, ili još lakših elektrona, elektrostatičnim poljem manje energetski zahtjevna iz prethodne relacije vidimo kako ioni veće mase trebaju manju površinu izlaza. Masa iona je ustvari jedina varijabla te jednadžbe koja nije ograničena parametrima misije, T i v_{izlaz}, ili ograničenim prostorom na svemirskoj letjelici, d i A.

Uzevši sve to u obzir kao najbolja opcija za propelant se prvo koristila živa u plinovitom stanju, ali su zbog njezine otrovnosti i moguće kondenzacije u nepoželjnim dijelovima svemirske letjelice pronađeni alternativni propelanti ksenon i argon.

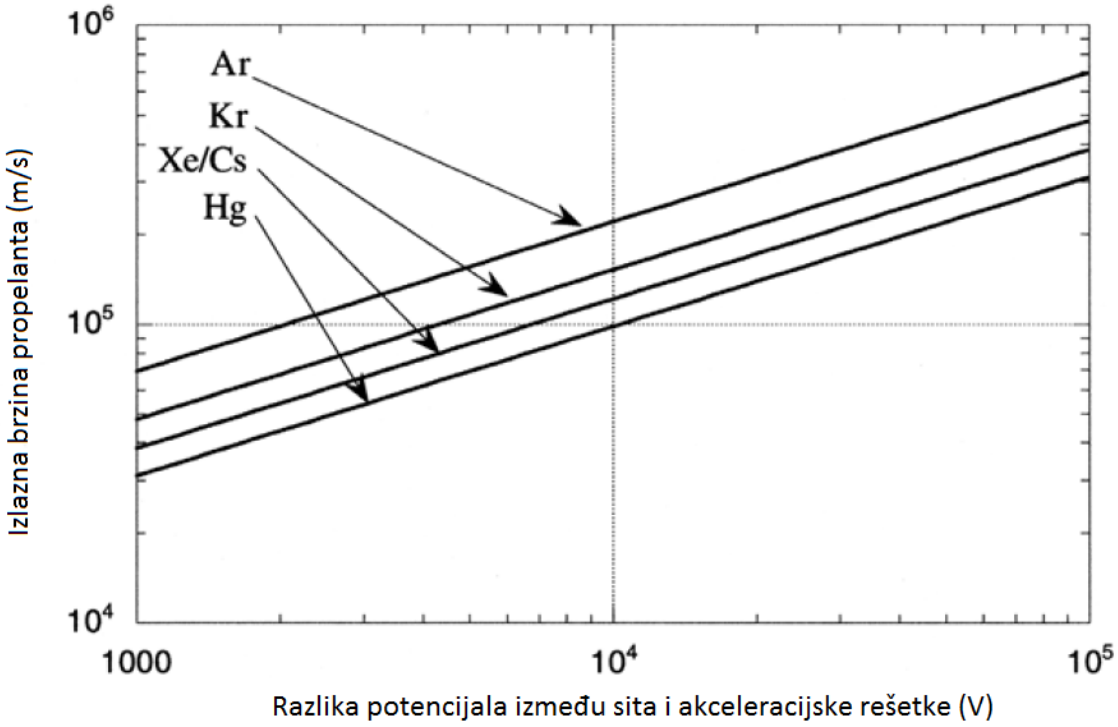
Svojstvo	Hg	Ar	Xe	Utjecaj
Prva energija ionizacije (eV)	10.43	15.8	12.13	Hg ima najnižu, najmanje energije potrebno uložiti za izbijanje elektrona.
Druga energija ionizacije (eV)	29.2	27.6	33.3	Veća vrijednost potrebne energije smanjuje prisustvo dvostruko ioniziranih atoma.
Treća energija ionizacije (eV)	63.4	45	65.5	Dovoljno visoka da se ne postigne.
Atomska masa	200.59u	39.9u	131.3u	Veću masu treba ubrzati na manju brzinu kako bi se postigao isti impuls.
Vrelište (C)	356.58	-189.2	-107	Hg se skladišti u tekućem stanju.
Kemijska aktivnost	Visoka	Nepostojeća	Nepostojeća	A i Xe su sigurni.

Tablica 4.1: Fizikalna i kemijska svojstva propelanata, te njihov utjecaj na pogon [13]

Iz tablice (4.1) vidimo kako je ksenon puno bliži živi po svojstvima, ali zbog visoke cijene proizvodnje razmatra se i argon iako u odnosu na prethodne dvije opcije ima lošija odgovarajuća svojstva.

Kako bi ioni bili ubrzani iz ionizacijske komore i konačno bili izbačeni iz svemirske letjelice trebaju se naći u električnom polju. To električno polje u našem slučaju potječe od jedne rešetke, akceleracijske rešetke, koja se nalazi na puno nižem električnom potencijalu od samih iona. Ioni na svome putu mogu proći kroz otvore na toj rešeci, ali se isto tako mogu i zabiti u samu rešetku. Kako se ta rešetka ne bi brzo uništila u sudarima s ionima dodaje se još jedna rešetka ispred nje, sito. Sito uz to što minimizira broj neutralnih atoma koji napuštaju ionizacijsku komoru također stvara električno polje, ali ono je puno manjeg iznosa od onog stvorenog od strane akceleracijske rešetke i cilj takvog polja je zadržavanje elektrona u plazmi. Kada se jednom nađu između sita i akceleracijske rešetke ioni počnu mijenjati prisutno polje, ako ih je dovoljno prisutno mogu potpuno zasjeniti sito i tako zaustaviti mogućnost akceleracije propelanta prema izlazu iz letjelice. Visoku transparentnost rešetki za ione, a

nisku za neutralne atome i elektrone treba uravnotežiti s potrebnom duljinom života rešetki kako bi zadana misija bila ostvarena.



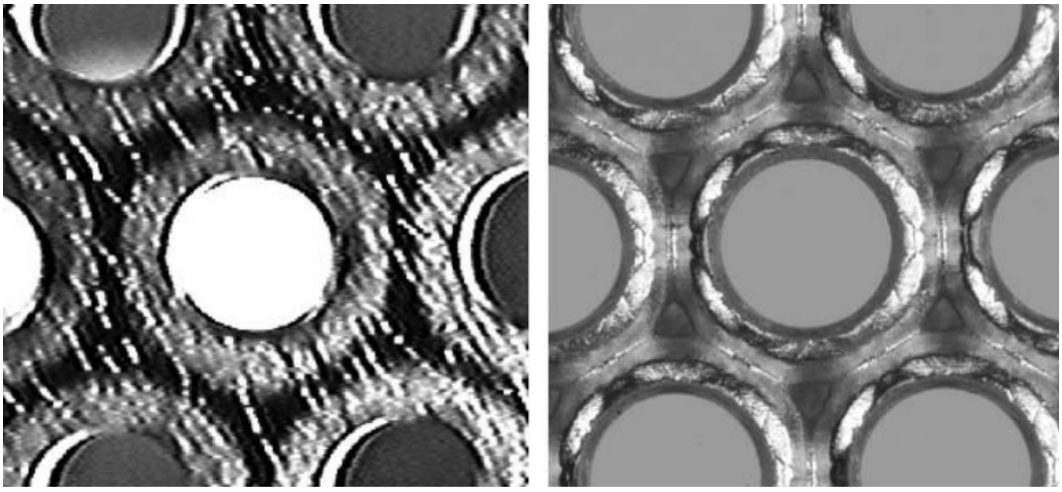
Slika 4.6: Brzina izlaska propelanta i vrste propelanta [9]

Nemoguće je izbjeći prijenos topline iz okolne plazme na rešetke što dovodi do termalnog širenja metalnih rešetki. Taj proces narušava idealni položaj rupa i samih rešetki jedne u odnosu na drugu. Mijenjanje položaja rupa utječe na izgled elektrostatskog polja i sudari iona s rešetkama time postaju vjerojatniji, a razmak između sita i akceleracijske rešetke se može smanjiti do razine kada izboji između samih rešetki postaju sve brojniji što dodatno ubrzava proces uništavanja rešetki.

Nakon što ionska zraka izađe iz letjelice ona biva neutralizirana od strane elektrona koji dolaze iz posebno smještene vanjske šuplje katode, neutralizatora. Elektroni imaju veću mobilnost od samih iona i potrebno ih je nekako zaustaviti prije nego što svi završe u ionizacijskoj komori privučeni elektrostatikim poljem akceleracijske rešetke. Zbog toga se postavlja još jedna rešetka koja stvara odbijajuće elektrostatsko polje za elektrone. Kako ta rešetka ne bi pretjerano utjecala na fokus zrake iona stvoreno polje ne sprječava sve elektrone u dolasku do svemirske letjelice, takvi elektroni dodatno uništavaju sve čemu podignu temperaturu prilikom sudara.

Uz šuplju katodu koja služi za ionizaciju u ionizacijskoj komori akceleracijske rešetke predstavljaju drugi element na čiji radni vijek utječu sudari s česticama. Ioni,

elektroni i neutralni atomi sudarima s rešetkama polako povećavaju početne pukotine dok se u jednom trenutku rešetke jednostavno ne raspadnu ili stvorena električna polja više ne obavljaju potrebne zadatke.

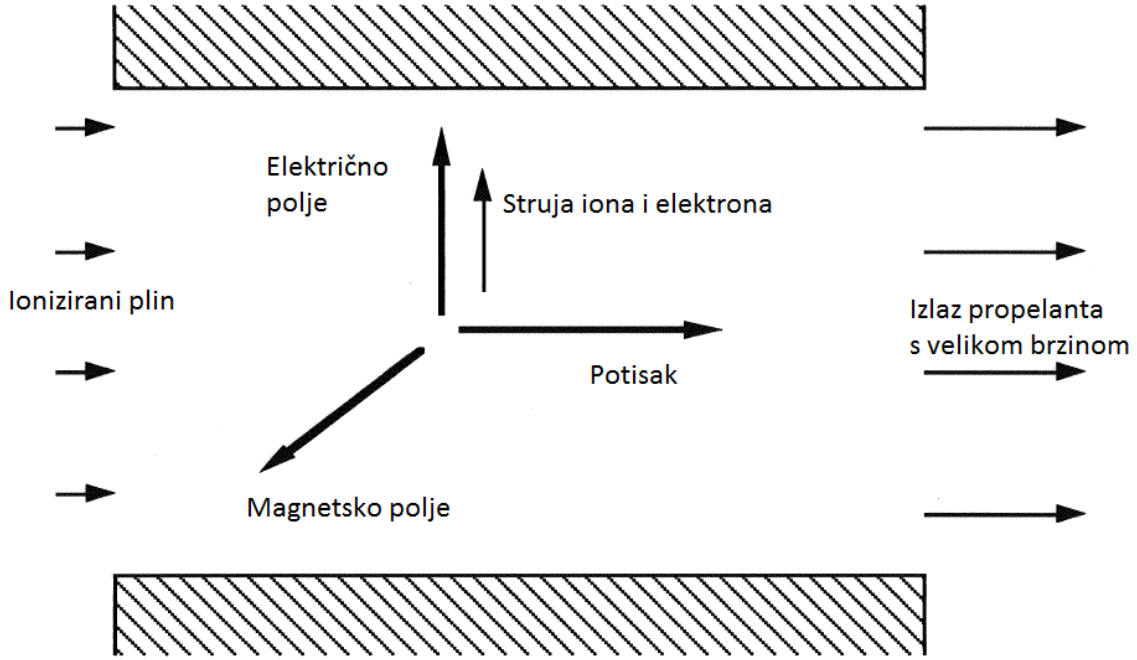


Slika 4.7: Akceleracijska rešetka nakon 125 sati i nakon 30352 sati rada ionskog pogona [8]

4.1.3 Hallov pogon

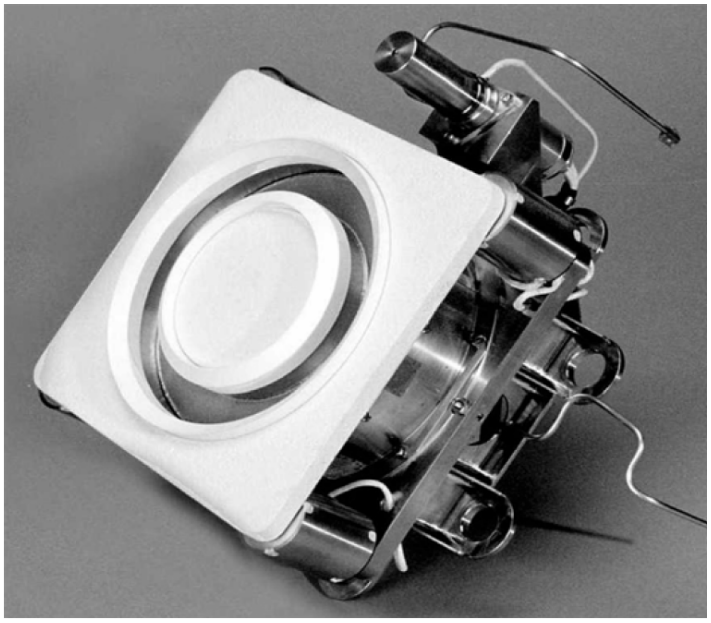
Hallov pogon također spada pod elektrostatske potisnike, ali sada se koristi plazma, a ne samo ioni u stvaranju potiska i dio uloga koje su obavljali sito i akceleracijska rešetka kod ionskog pogona sada preuzima magnetsko polje. To dovodi do jednostavnijeg dizajna pogona s manje potrebnih izvora struje, ali je zato interakcija između električnog i magnetskog polja složenija, te je ta interakcija jedan od bitnih čimbenika trajanja rada pogona.

Na slici (4.8) vidimo princip rada Hallovog pogona. Ionizirani plin ulazi u područje gdje se nalazi električno i magnetsko polje koja su okomita na njegovu putanju. Nastala struja nastala gibanjem elektrona i iona u smjeru električnog polja kroz interakciju s magnetskim poljem stvara potisak paralelan s kanalom kroz koji se plazma giba. Pošto je cjelokupna plazma akcelerirana u istom smjeru ne dolazi do nakupljanja naboja i ne dolazi do ograničenja u gustoći plazme koja se može ubrzati kao što dolazi do ograničenja gustoće iona kod ionskog pogona zbog zasjenjenja sita od strane prisutnih iona. Princip rada je jednostavno opisati, ali elektroni i ioni stvaraju vlastita električna i magnetska polja kojim djeluju jedni na druge, te se kroz sudare plin i plazma dodatno zagrijavaju što dovodi do znatnih poteškoća u stvaranju modela koji bi opisao Hallov pogon.



Slika 4.8: Princip rada Hallovog pogona [9]

Pogon je izgrađen prije 60 godina u Sjedinjenim Američkim Državama, ali je uskoro napušten u korist ionskog pogona koji se brže razvijao zbog svoje jednostavnije fizikalne pozadine. Kasnije je ustvrđeno kako ionski pogon nije dovoljno efikasan i ne pokriva dobro interval količine potiska koja je idealna za održavanje satelita u željenoj orbiti, te je to ostao problem na Zapadu sve do pada Berlinskog zida.



Slika 4.9: Hallov pogon [8]

U istom vremenskom periodu, pretpostavlja se samostalno, i u bivšem Sovjetskom Savezu je došlo do sastavljanja Hallovog pogona. Sovjetski znanstvenici su se susreli s istim problemima kao i Amerikanci, ali su zahvaljujući korištenjem efekta magnetske boce u dizajnu pogona uspjeli postići bolju kontrolu nad plazmom i tako su značajno smanjili utjecaj iste na rad pogona.

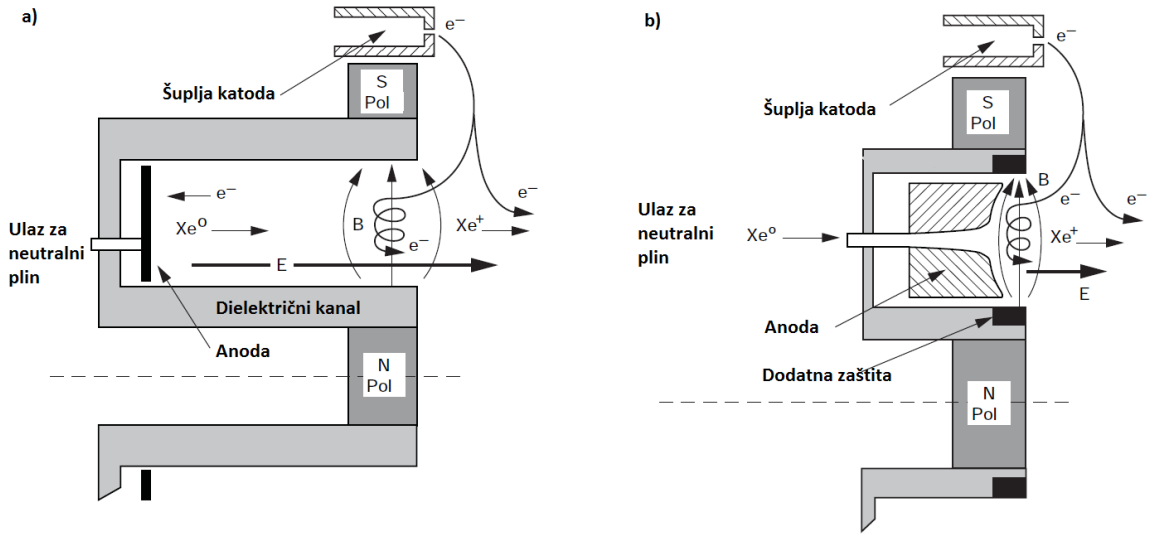
Pad Berlinskog zida je otklonio komunikacijsku barijeru između podijeljenih strana, te su od 1991. godine i Amerikanci mogli proučavati do tada prikupljene podatke u više od 50 svemirskih misija koje su ostvarene Hallovim pogonom u bivšem Sovjetskom Savezu. Zajednički napori su od tada uloženi u produljenje radnog vijeka pogona, 10000 sati mogućeg rada Hallovog pogona je znatno manje od 30000 sati ionskog pogona, i daljnjem minimaliziranju problema s plazmom koji su prisutni od samog početka proučavanjem ionizacije, zarobljavanju elektrona u magnetskom polju i razlozima gubitka energije.

4.1.4 Princip rada

Trenutačno se diljem svijeta u laboratorijima mogu naći brojne varijacije Hallovog pogona, ali postoje dvije generične opisane u literaturi. Razlikuju se u materijalu koji se koristi u području s plazmom tako da jedna opcija koristi dielektrik i može se naći pod brojnim nazivima: Hallov pogon, pogon s Hallovim efektom, pogon sa stacionarnom plazmom, a druga opcija koristi vodljivi metalni materijal koji predstavlja anodu. Unatoč navedenim razlikama osnovni princip rada je jednak kod svih.

Kao što vidimo sa slike (4.10a) u Hallovom pogonu s dielektričnim kanalom anoda zajedno s produktima u plazmi sudjeluje u proizvodnji električnog polja koje paralelno s dielektrikom. Na drugom kraju kanala nalazi se magnetsko polje koje zatoči elektrone, koji dolaze iz vanjske šuplje katode, efektom magnetske boce. Elektroni zarobljeni u području se gibaju spiralnom putanjom, ali zbog dodatnog prisustva električnog polja to gibanje dobiva još i smjer okomit na vektorski umnožak električnog i magnetskog polja (u našem slučaju to je u papir), tj. imamo gibanje slično onome u Hallovom efektu.

Kao što je već spomenuto interakcija električnog i magnetskog polja je iznimno bitna za rad pogona i zbog njezine kompliciranosti su Amerikanci odustali rano u samostalnom razvitku ovog pogona. Magnetsko polje treba zarobiti što više elektrona i onemogućiti ione u sudarima s anodom i zidovima kanala, a opet ne smije



Slika 4.10: Shema pogona a) verzija s dielektrikom, b) verzija s vodljivim materijalom [8]

previše utjecati na ione koji trebaju biti što učinkovitije ubrzani od strane električnog polja. Efekt magnetske boce se stvori u blizini izlaza iz samog pogona i letjelice, u tome području djelovanje magnetskog polja je najveće, a kako se približavamo anodi magnetsko polje isčezava.

Uz to u istom području međudjelovanja dvaju polja elektroni imaju najveću energiju i zato se tu događa veliki dio ukupne ionizacije sudarima elektrona i neutralnih atoma plina koji su dovedeni kroz cijev smještenu kod anode. Prisutno električno polje odmah ubrzava i izbacuje ione iz letjelice koji su potom neutralizirani elektronima koji dolaze iz već spomenute katode.

Preklapanjem područja u pogonu gdje se odvija ionizacija i akceleracija iona smanjuje se broj potrebnih komponenata za izradu samog pogona, ali velike količine prisutnog naboja na istom mjestu stvara dovoljno velika vlastita električna i magnetska polja koja utječu na fokusiranost i brzinu izlazne zrake iona.

Druga generalna opcija kod dizajna Hallovog pogona je stavljanjem vodljivog metalnog materijala, slika (4.10b), umjesto dielektrika. Povećanje anode i njezin oblik omogućuje smanjenje duljine kanala kojim se giba neutralni plin i plazma. Anoda ne ulazi u samo područje djelovanja magnetskog polja, ali se nalazi u njegovoj blizini. Zbog toga je više izložena sudarima s elektronima, dolaze isto iz vanjske šuplje katode, koji imaju najveću energiju u cijelom sustavu upravo u magnetskom polju. Ioni u plazmi su također ubrzani prisutnim električnim poljem, te je zraka iona kasnije

neutralizirana istom katodom.

Koliko će dugo Hallov pogon raditi ovisi o učinkovitosti magnetskog polja u sprječavanju iona i elektrona u sudarima s i uništavanjem komponenata pogona. Uništavanje kanala pogona dovodi do promjene njegove dimenzije i u jednom trenutku rad više nije jednostavno održiv.

5 Metodički dio

Tradicionalni tip nastave, koji od učenika traži pasivno sudjelovanje u nastavi i memoriranje gradiva, ne zadovoljava suvremene zahtjeve obrazovanja. Alternativa takvom načinu održavanja nastave jest interaktivna i istraživački usmjerena nastava. Interaktivne nastavne metode kao što su razredna rasprava, konceptualna pitanja s karticama, rješavanje zadataka u manjim grupama, interaktivno izvođenje pokusa i računalne interaktivne metode se koriste za uključivanje što je moguće većeg broja učenika u ostvarivanju istraživačkog dijela nastave koji se najčešće svodi na vođeno istraživanje. Vođeno istraživanje od nastavnika zahtjeva usmjeravanje i pomoć učenicima koji ipak imaju dovoljno prostora u samostalnom traženju odgovora na znanstvena pitanja, formuliranju i testiranju hipoteza, osmišljanju i provođenju pokusa, zapisivanju predviđanja, opažanja i zaključaka, te prezentiranju i argumentiranju istih pred drugima.

Priprema za istraživački usmjerenu nastavu ima strukturiran sat koji se sastoji od uvodnog, središnjeg i završnog dijela sata. U uvodnom dijelu se učenici kroz pitanje ili problem uvode u tematiku ostatka sata. Povezivanje tog pitanja ili problema s njihovim iskustvima će pobuditi njihov interes i želju za sudjelovanjem u nastavi. Središnji dio sata započinje istraživačkim pitanjem kroz koje učenici saznaju što će se istraživati i prema kojem cilju je usmjeren ostatak sata. Učenici daju svoje hipoteze i prijedlozima mogu sudjelovati u konstruiranju eksperimenta kojim će se istražiti cilj istraživačkog pitanja. Prije samog eksperimenta, kojeg mogu izvesti u malim grupama ili frontalno, učenici iznose svoje pretpostavke. Nakon eksperimenta učenici samostalno iskazuju i zapisuju svoja opažanja, skiciraju pokus, te izvode zaključke koji se potom prezentiraju i raspravljaju u razredu. Završni dio sata služi nastavniku za provjeru razumijevanja novostečenog znanja, a učenicima omogućuje uvid u korištenje istoga.

5.1 Nastavna priprema

Nastavna priprema je napisana za nastavnu jedinicu *Širenje svemira i Hubbleov zakon*. Navedena nastavna jedinica bi trajala jedan školski sat i nastavnik je ima priliku provoditi u četvrtim razredima gimnazija koje provode opći, prirodoslovni i prirodoslovno – matematički program.

OBRAZOVNI ISHODI (OČEKIVANA UČENIČKA POSTIGNUĆA)

- opisati i objasniti crveni pomak spektralnih linija u spektrima galaksija
- navesti i protumačiti Hubbleov zakon
- primijeniti Hubbleov zakon u primjerima
- razvijati sposobnost logičkog i znanstvenog razmišljanja, te usmenog i pismenog izražavanja

ODGOJNI ISHODI

- uvažavanje tuđeg mišljenja
- izražavanje vlastitog mišljenja
- poštivanje osnovnih pravila komunikacije
- poštovanje prema drugima
- razvijanje interesa za znanost

VRSTA NASTAVE: Interaktivna istraživački usmjerena nastava
NASTAVNE METODE

- metoda razgovora - razredna rasprava
- Kooperativno rješavanje zadataka u skupinama
- metoda pisanja/crtanja

OBLICI RADA

- frontalni
- rad u skupinama

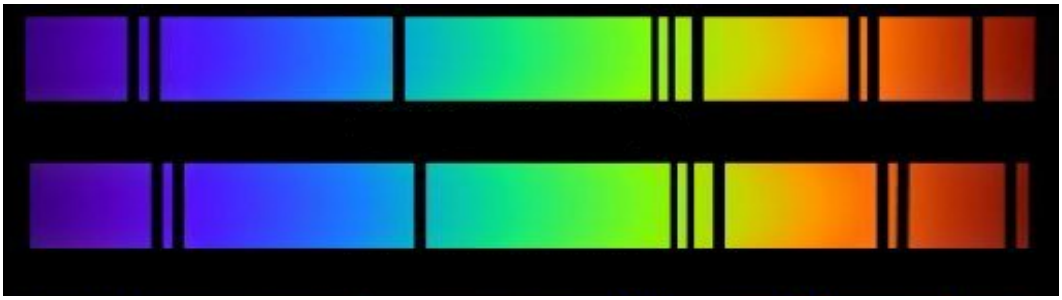
KORELACIJA S DRUGIM PREDMETIMA: matematika
NASTAVNA POMAGALA I SREDSTVA: ploča, kreda, računalo, projektor, balon

TIJEK NASTAVNOG SATA

Uvodni dio: otvaranje problema, prikupljanje ideja, upoznavanje pojave

UVODNI PROBLEM

U učionici je projicirana slika (1.1). Učenike se upoznaje kako slika sadrži dva apsorpcijska spektra. Gornji linijski spektar prikazuje apsorpcijski spektar dobiven u laboratoriju puštanjem bijele svjetlosti kroz pare nekog kemijskog elementa. Atomi tog elementa apsorbiraju neke valne duljine i po valnim duljinama koje nedostaju u spektru možemo znati kroz koji element je svjetlost prošla. Donji spektar pripada svjetlosti iz udaljene galaksije. Što zaključujete o prikazanim spektrima? (pomoćna pitanja: Razlikuju li se crne linije u spektrima? Razlikuju li se udaljenosti između linija u prikazanim spektrima? Radi li se u oba slučaja o istom kemijskom elementu? Što se dogodilo s linijama donjeg spektra? Prema kuda su pomaknute?)



Slika 5.11: Dva apsorpcijska spektra, gornji pripada spektru nekog elementa u laboratoriju, a drugi je spektar istog elementa izvučen iz spektra galaksije, Preuzeto: `http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/cosmic_reference/images/dopplerspec.jpg`

- Učenici zaključuju kako su prikazani spektri isti, kako se radi o istom kemijskom elementu, ali su linije donjeg spektra pomaknute u desno za isti iznos.

Kako biste nazvali taj pomak? Učenike se upoznaje s pojmom crvenog pomaka, gdje su spektralne linije iz galaksije pomaknute prema desno, tj. prema crvenom dijelu spektra.

Gdje smo već imali priliku uočiti postojanje razlike između valnih duljina koje izvor proizvodi i onih koje promatrač opazi? Kakve su valne duljine linija koje su pomaknute prema crvenom dijelu spektra? Kako se ta galaksija onda giba u odnosu na Zemlju?

- Učenici se prisjećaju Dopplerovog efekta, zaključuju kako spektralne linije detektirane iz udaljene galaksije imaju veću valnu duljinu i kako se galaksija udaljava.

Edwin Powell Hubble je proučavao spektre iz udaljenih galaksija i uočio je kako su njihovi spektri pomaknuti u odnosu na laboratorijske spektre, ali ne uvijek za istu vrijednost. Što možemo zaključiti o svemiru iz njegovih rezultata?

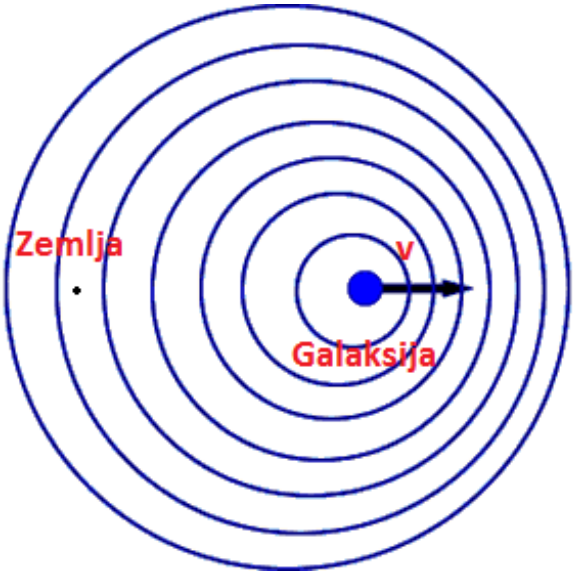
- Učenici zaključuju kako se i druge galaksije odmiču od nas, različitim brzinama, te se zbog toga i cijeli svemir širi.

Nastavnik predstavlja naslova: "Širenje svemira".

Središnji dio: konstrukcija modela - fizikalni i matematički opis pojave

ISTRAŽIVAČKO PITANJE: Kako opisati širenje svemira?

Učenike se pita kako bi mogli odrediti brzinu kojom se galaksije udaljavaju od nas. Nakon slušanja prijedloga trebaju nacrtati Zemlju, koja miruje, i galaksiju, emitira svjetlost valne duljine λ i perioda T, koja se udaljava brzinom v, te valne fronte svjetlosti koje detektiramo na Zemlji iz te galaksije. Napišite kolika je valna duljina svjetlosti koju mjerimo na Zemlji, označite tu valnu duljinu s λ_Z.



Slika 5.12: Skica udaljavanja galaksije od Zemlje i valne fronte elektromagnetskog vala, Preuzeto: `http://www.school-for-champions.com/science/images/waves_doppler_effect.gif`

- Učenici zapisuju

$$\lambda_Z = \lambda + vT, \tag{5.3}$$

gdje je λ_Z detektirana valna duljina, λ valna duljina bez crvenog pomaka, v brzina udaljavanja galaksije i T period.

Prikažite brzinu udaljavanja u ovisnosti o valnim duljinama i brzini svjetlosti.

- Učenici izvode

$$\lambda_Z - \lambda = vT = \frac{v\lambda}{c}, \tag{5.4}$$

$$v = c\frac{\lambda_Z - \lambda}{\lambda}. \tag{5.5}$$

$\lambda_Z - \lambda = \Delta\lambda$ je upravo crveni pomak. Što nam govori izraz (1.3)?

- Učenici zaključuju kako veći crveni pomak znači i veću brzinu udaljavanja galaksije.

Učenike se dijeli u grupe. Svaka grupa dobiva sliku grafa koji prikazuje ovisnost brzine udaljavanja galaksije od Zemlje o njenoj udaljenosti od Zemlje.

Što biste zaključili iz grafa?

- Učenici zaključuju kako su varijable proporcionalne.

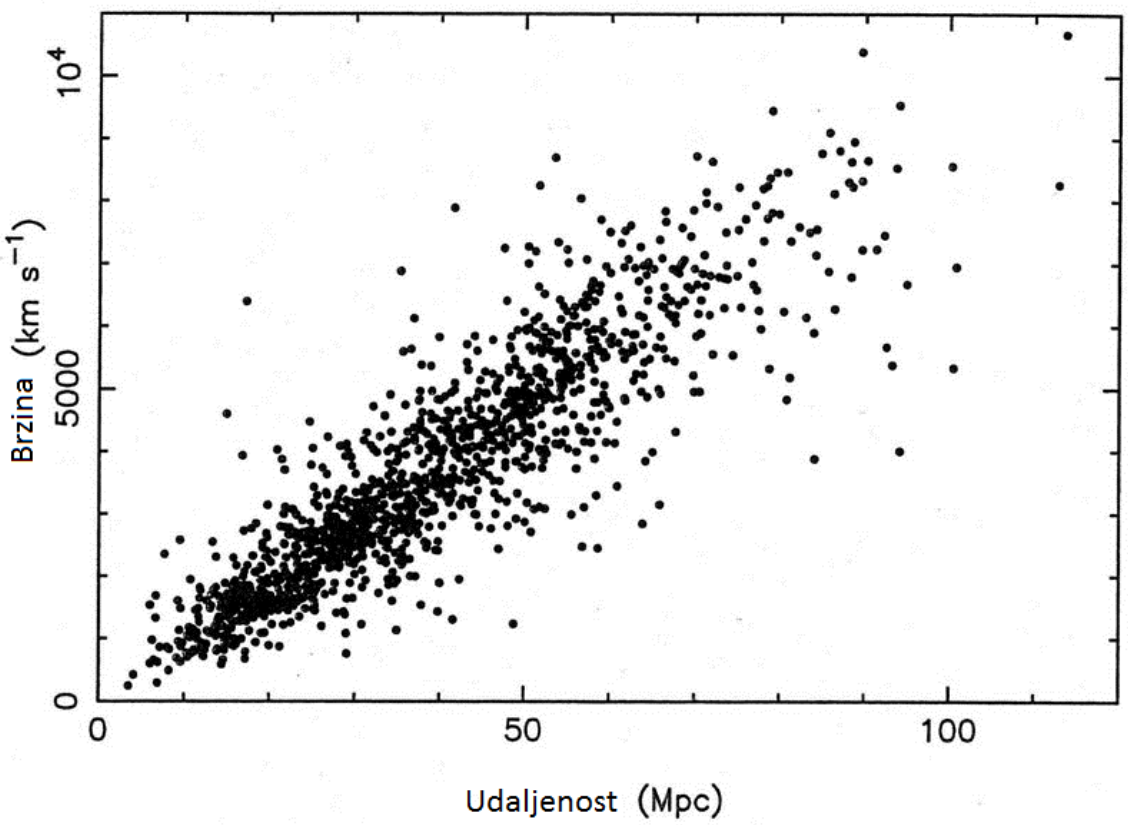
Učenici trebaju odrediti koeficijent proporcionalnosti. Učenici crtaju pravac koji prolazi kroz ishodište i najbolje opisuje označene rezultate u grafu. Zapisuju matematičku jednadžbu pravca i određuju koeficijent smjera istoga. Jednadžba pravca je ustvari Hubbleov zakon

$$v = H_0 r, \tag{5.6}$$

gdje je H_0 koeficijent smjera pravca i Hubbleova konstanta koja trenutačno iznosi $H_0 = 71.9\frac{\frac{km}{s}}{Mpc} = 2.3 \cdot 10^{-18} s^{-1}$, a Hubble je za nju dobio vrijednost od $500\frac{\frac{km}{s}}{Mpc}$.
Učenike se upoznaje s jedinicom parsek, simbol: pc, kao mjernom jedinicom kojom se u astronomiji označavaju udaljenosti i kako 1pc odgovara udaljenosti od 3.26 svjetlosnih godina.
Koje je značenje Hubbleovog zakona?

- Učenici zaključuju kako se udaljenije galaksije od Zemlje udaljavaju većom brzinom.

Što možemo zaključiti o širenju svemira?



Slika 5.13: Grafički prikaz mjerenja iz kojih učenici traže Hubbleo zakon, Preuzeto: `http://physicsanduniverse.com/wp-content/uploads/2014/02/Hubble-Law-2010.jpeg`

- Učenici zaključuju kako se svi dijelovi svemira udaljavaju od svih ostalih na isti način na koji se promatrane galaksije udaljavaju od Zemlje.

Ako se sve galaksije od nas udaljavaju, znači li to kako smo mi u središtu svemira?

- Učenici kroz raspravu zaključuju kako Zemlja nije u središtu svemira, jer se galaksije udaljavaju ne samo od Zemlje već i međusobno, pa je svejedno iz koje točke promatramo svemir.

Prije prelaska na završni dio sata grupama se daju baloni s kojima će se pomoći u vizualizaciji širenja svemira. Na balon učenici crtaju točke koje predstavljaju galaksije, ali prije rasprave o očekivanjima u njih ne upuhuju zrak.
Što će se dogoditi s točkama na balonu kada upušemo zrak u njega? Skicirajte i opišite u bilježnicu.

- Učenici skiciraju i opisuju kako će se dovođenjem zraka balon raširiti, a razmak između točaka će se povećati što je u njega upuhano više zraka.

Učenici izvode pokus.

Završni dio: primjena modela - korištenje novostečenog znanja u novim situacijama, provjera ostvarenosti obrazovnih ishoda

1.)Prije koliko godina se dogodio Veliki prasak?

$$t = \frac{r}{v} = \frac{r}{H_0 r} = \frac{1}{H_0} = 4.3 \cdot 10^{17} s = 1.4 \cdot 10^{10} godina \tag{5.7}$$

Iz računa svemir je nastao prije $1.4 \cdot 10^{10}$ godina.

Koje pretpostavke smo koristili tokom računanja?

Koristili smo pretpostavku da se svemir uvijek jednako brzo širio.

2.)Spektralne linije različitih elemenata su detektirane u zračenju galaksije iz zviježđa Velikog Medvjeda. Jedna od uočenih linija je i linija kalcija na valnoj duljini $\lambda_Z = 414nm$. Na kojoj udaljenosti od Zemlje se nalazi spomenuta galaksija? Spektralna linija kalcija u laboratoriju se nalazi na $\lambda = 393nm$. ($H_0 = 7.1 \cdot 10^4 \frac{\frac{m}{s}}{Mpc}, 1pc = 3.26$ svjetlosne godine)

$$v = c\frac{\lambda_Z - \lambda}{\lambda} = c\frac{414 - 393}{393} = 0.0534c = 1.6 \cdot 10^7 \frac{m}{s} \tag{5.8}$$

$$r = \frac{v}{H_0} = 226Mpc = 2.26 \cdot 10^8 pc = 6.98 \cdot 10^{24} m \tag{5.9}$$

Galaksija se nalazi na udaljenost od $6.98 \cdot 10^{24} m$ od Zemlje.

6 Zaključak

Kao što je često slučaj sa novim tehnologijama i električnoj propulziji je trebao određeni period vremena dok nije postala prepoznata i prihvaćena zbog rada brojnih vizinara i znanstvenika. Više od pola stoljeća je trebalo proći prije nego što je električna propulzija uspjela dobiti ozbiljnija sredstva za pomak s papira i iz glava u fizički svijet laboratorija, a kasnije i svemira. Ratovi i političke podjele 20. stoljeća su preferirale kemijski raketni pogon zbog mogućnosti uništenja ciljeva na Zemlji, no utrka u pokazivanju svoje premoći u jednom trenutku više nije bila vezana samo za Zemlju. Sjedinjene Američke Države i bivši Savez Sovjetskih Socijalističkih Republika zasebno stvaraju planove o osvajanju svemira, a upravo se tu električna propulzija pokazala korisna. Dizajnirana tako da njezini parametri rada odgovaraju održavanju satelita u njima dodjeljenim orbitama prije kraja Hladnog rata već je iskorištena više od 50 puta od strane Sovjetskog Saveza. Rušenje Berlinskog zida omogućuje cjelovitiju podjelu podataka između podijeljenih skupina znanstvenika i inženjera, te se u zadnjih 25 godina električna propulzija kreće bliže cilju koju su pred nju stavili prvi vizionari, a to je svemirska letjelica koja će sa posadom putovati između planeta.

Literatura

[1] The Tyranny of the Rocket Equation, NASA, https://www.nasa.gov/mission_pages/station/expeditions/expedition30/tryanny.html, 8.1.2018.

[2] INTRODUCTION TO ELECTRIC PROPULSION, (26.02.2004.), Advanced Propulsion Concepts, https://web.archive.org/web/20040226011057/http://www.islandone.org:80/APC/Electric/00.html, 8.1.2018.

[3] Brief History of Rockets, NASA, https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/TRC/Rockets/history_of_rockets.html, 8.1.2018.

[4] Rockertry before 20th century, (11.04.2017.), Russian Space Web, http://www.russianspaceweb.com/rockets_pre20th_cent.html, 8.1.2018.

[5] Tsiolkovsky, Russian Space Web,http://www.russianspaceweb.com/tsiolkovsky.html, 8.1.2018.

[6] Yuri Kondratyuk, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Yuri_Kondratyuk, 8.1.2018.

[7] Choueiri, E.Y. : A Critical History of Electric Propulsion: The First 50 Years (1906–1956) // JOURNAL OF PROPULSION AND POWER Vol. 20, No. 2, March–April 2004

[8] Goebel, D.M.; Katz, I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. 1st ed. Wiley, 2008.

[9] Turner, M.J.L. Rocket and Spacecraft Propulsion: Principles, Practice and New Developments. 2nd ed. Springer, 2004.

[10] Operation Paperclip, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Operation_Paperclip, 8.1.2018.

[11] von Engel, A.: Ionized Gases. 2nd ed. Oxford. The Clarendon Press, 1955.

[12] Mavrodineanu, R. Hollow Cathode Discharges: Analytical Applications // JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards Vol. 89, No. 2, March-April 1984

[13] Session 10-11: Electrostatic Thrusters (Kaufman Ion Engines), MIT OpenCourseWare, https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-522-space-propulsion-spring-2015/lecture-notes/MIT16_522S15_Lecture10-11.pdf, 8.1.2018.

[14] Session 16: Hall Thrusters, MIT OpenCourseWare, https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-522-space-propulsion-spring-2015/lecture-notes/MIT16_522S15_Lecture16.pdf, 8.1.2018.

[15] Derežić, D. Niskotlačni izboji i neke njegove primjene. Diplomski rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2012.

[16] Planinić, M. (2015). Istraživački usmjerena nastava fizike – kako je približiti školskoj zbilji?, Zbornik XII. hrvatskog simpozija o nastavi fizike, Zagreb: HFD, 8-15.

[17] Paar, V. Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazije, 3.izdanje, Školska knjiga, Zagreb 2006.

[18] Labor, J. Fizika 4, udžbenik za četvrti razred gimnazije, 2.izdanje, Alfa, Zagreb, 2008.

[19] H. D. Young, R.A. Freedman- University Physics, 12th ed., Addison-Wesley, 2007.