UNIVERZITET U BEOGRADU
FIZIČKI FAKULTET
INSTITUT ZA METEOROLOGIJU

DIPLOMSKI RAD

VRSTE ELEKTRIČNIH PRAŽNJENJA U ATMOSFERI

Mentor:
dr Mlađen Ćurić

Kandidat:
Nikola Todorović

BEOGRAD, 2011.

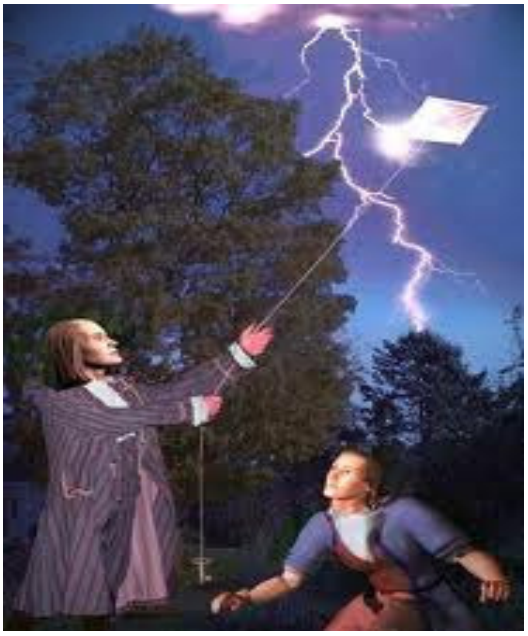
Sadržaj

1. UVOD

Leto nas ponekad užasava spektrom svojih opasnih pojava. Munje su jedna od njih. Uz munje se vezuju mnoge predrasude i teorije, mnoge su tačne, dok mnoge nemaju nikakvo fizičko objašnjenje. Zavirimo li u neku od svetskih mitologija, u gotovo svakoj ćemo naći boga munja i grmljavine. Kod starih Grka munja je bila viđena kao kazna poslata od Zevsa, dok je u Rimu Jupiter koristio munje ne samo kao kaznu nego i kao upozorenje za nedolično ponašanje. Svirepi bog Norvežana, Tor, proizvodio je munje udaranjem čekića u nakovanj, dok je gromovito jahao kroz oblake. Neka plemena u Severnoj Americi i Africi su zadržala mišljenje da munje nastaju zbog sevanja perja mističnih *thunder* ptica, čije je mahanje krilima proizvodilo zvuke grmljavine. Na primer, Aristotel je smatrao da oblak kada se kondenzuje i ohladi, snažno izbacuje vazduh koji sadrži. Vazduh udara u druge oblake i izaziva grom, dok se njegovim sagorevanjem oslobađa plamen u obliku munje.

Sledećih skoro dve hiljade godina, ova shvatanja nisu se bitno menjala, čak ni onda kada su u labaratorijama naučnika 18. veka dobijene prve električne varnice iz ćilibarskih kugli. Odlučujući prodor učinio je američki štampar (naučnik i državnik) Benžamin Frenklin (Benjamin Franklin, 1706-1790). On je uočio da se varnice iz elektrostatičke mašine ponašaju slično munjama. Frenklin je bio prvi koji je osmislio eksperiment kako bi dokazao da je munja električne prirode. Cilj eksperimenta je bio da dokaže da su oblaci naelektrisani, i ako je ovo tačno, sledi da je i munja električne prirode. Predložio je stoga da se postavi nekoliko metara visok metalni stub, izolovan pri dnu. Pri naelektrisanju do koga dolazi za vreme oluje, morale bi sa stuba da iskaču varnice na metalni obruč postavljen u blizini. Letnjeg meseca 1752. godine, francuski fizičar Dalibard (J. F. Dalibard) uspešno je izveo Frenklinov eksperiment. Osmotrene su varnice koje su iskakale sa gvozdene šipke za vreme oluje i to je bio dokaz da grmljavinski oblaci sadrže električno naelektrisanje. Mesec dana kasnije, Frenklin je i sam izveo jedan po život opasan eksperiment. Umesto gvozdene šipke koristio je zmaja, zato što je mogao da dostigne veću visinu i da leti bilo gde. Na vrhu tog zmaja bila je železna žica (koja je trebala privući elektricitet), a na rubovima konci od kanapa. Zmaja je pustio za vreme jedne oluje. Varnice su skakale sa ključa vezanog na dnu kanapa zmaja do zgloba na njegovoj ruci. Eksperiment je bio bolan, ali je dokazao pretpostavku: olujni oblaci su naelektrisani! U toku tog perioda pokazao je i da donji delovi oblaka sadrže negativno naelektrisanje.

Po Frenklinovom uverenju, time je bila nađena i efikasna zaštita od munje – gromobran. Prvi gromobran je postavljen u Filadelfiji 1754. godine. Nije prošlo mnogo vremena i gromobran je bio sveopšte prihvaćen. I, više od jednog veka ljudi su bili zadovoljni stanjem nauke na ovom području.



Slika 1. Bendžamin Frenklin, eksperiment sa zmajem

Situacija se izmenila u prošlom veku, uvođenjem tehnike jake struje i podizanjem prvih nadzemnih vodova. Provodnici i vodovi predstavljali su odličnu metu. Pri udarima munje dolazilo je do velikih oštećenja i prekida u snabdevanju strujom. Da bi se uradila adekvatna zaštita moralo se doći do određenih saznanja o munjama. Prvi je na tome počeo da radi 1930. godine švajcarski profesor Karl Berger (Karl Berger). Sa dva vagona koja su bila puna elektronskih mernih uređaja, odlazio je svakog leta na put, da bi na licu mesta merio udare munje u vodove visokog napona. Nakon nekoliko godina, shvaćeno je da je verovatnoća da se udar munje osmotri iz blizine mnogo veća u planinama nego u ravnici, tako da su kasnije istraživači svoje merne stanice sve češće postavljali u planinama. Detaljnije proučavanje munje je postalo moguće tek kada su spektroskopija i fotografija postale dostupne kao dijagnostički materijal. Izum kamere sa duplim sočivom je omogućio značajno istraživanje ove pojave zahvaljujući Šolandu (Scholand). Moderna istraživanja potiču od Vilsona, koji je dobio Nobelovu nagradu za otkriće oblačne komore za praćenje čestica visoke energije. On je bio prvi koji je koristio merenja električnog polja za procenu strukture naelektrisanja u grmljavinskim oblacima i naelektrisanja sadržana u pražnjenjima munja. Uporedo su vršena fotografska osmatranja i merenja promena električnog polja na zemljinoj površini izazvana munjama uz pomoć raznih detektora. Takođe su značajna merenja dobijena preletima aviona i raznih letilica

oko olujnih oblaka, zatim puštanje balona opremljenih sondama i mnogim instrumentima. U novije vreme su dostupna osmatranja sa satelita, koja su takođe značajna.

2. FIZIKA PROCESA PRAŽNJENJA

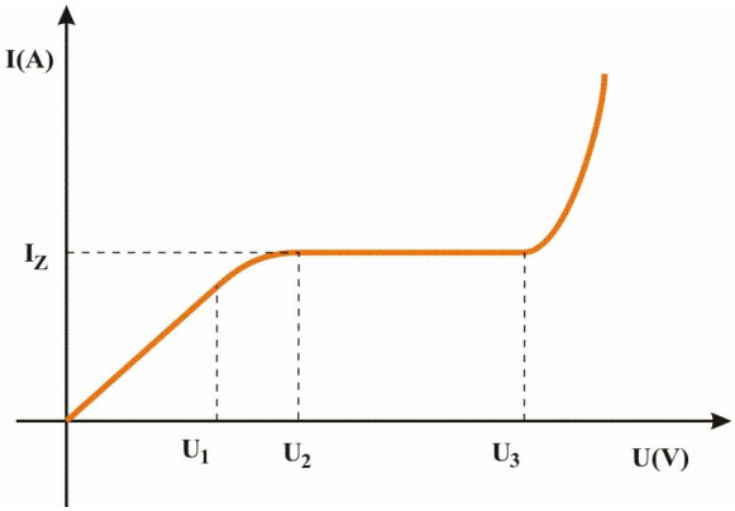
Fizika procesa pražnjenja je opisana u Platiša (). Pozanavanje zakona jonizacije je važno za razumevanje atmosferskih pojava, jer samo oni daju objašnjenje za formiranje električnih naboja i formiranje struja u gasovima. Gasovi pod normalnim uslovima sadrže veoma mali broj naelektrisanih čestica i zbog toga ne provode električnu struju. Naelektrisane čestice se mogu pojaviti u gasu zahvaljujući jonizacionim procesima koji mogu biti izazvani visokim temperaturama, ultraljubičastim zračenjem Sunca, zatim, kosmičkim i radioaktivnim zračenjem, sudarom elektrona i drugih brzih elementarnih čestica sa atomima gasa. U svim tim slučajevima, iz elektronskog omotača atoma ili molekula izbija se jedan ili više elektrona. Takav process naziva se **jonizacija,** i pri tom nastaju slobodni elektroni i **pozitivni joni**. Oslobođeni elektroni mogu se sjediniti sa neutralnim atomima ili molekulima stvarajući od njih **negativne jone**. Joni i elektroni čine gas električno-provodnim. Pozitivni i negativni joni mogu se vezivati međusobno obrazujući neutralne atome ili molekule. Taj proces se naziva **rekombinacija,** i on dovodi do smanjenja broja jona u gasu, a time i njegove provodljivosti. Električna provodljivost gasa ne opadne odjednom, nego opada postepeno, tako da je za potpunu rekombinaciju jona potrebno da protekne određeno vreme.

Pored haotičnog termalnog kretanja, naelektrisane čestice u jonizovanom gasu mogu da imaju i usmerenu komponentu brzine. Do pojave usmerenog kretanja može doći zbog prisustva električnog polja, a takođe i zbog pojave gradijenta koncentracije elektrona ili jona. U jonizovanom gasu oba ova uzroka javljaju se istovremeno. Naime, spoljašnje električno polje uslovljava prostornu raspodelu naelektrisanih čestica i prouzrokuje na taj način pojavu gradijenta koncentracije. Postojanje gradijenta koncentracije, sa druge strane, zbog različite koncentracije naelektrisanih čestica prouzrokuje pojavu električnog polja. Bez obzira na uzrok svog nastanka, usmereno kretanje naelektrisanih čestica predstavlja električnu struju. Prolaz električne struje kroz gas naziva se **gasno pražnjenje**. Pozitivni joni se kreću u smeru električnog polja, tj. od anode (+) ka katodi (-), a negativni joni i elektroni u suprotnom smeru. Karakter gasnog pražnjenja zavisi od sledećih faktora:

- prirode gasa
- prirode elektroda, njihovih oblika, dimenzija i uzajamnog položaja
- temperature i pritiska gasa
- napona, gustine struje i snage električnog izvora

Prema načinu jonizacije gasa, pražnjenja se dele na **samostalna** i **nesamostalna** gasna pražnjenja. U odsustvu električnog polja, broj jona koji se nalazi u gasu neće se beskonačno povećavati, zbog rekombinacije koja će neutralisati izvestan broj jona. Ubrzo se uspostavlja neko ravnotežno stanje u kome gas sadrži po jedinici zapremine izvestan konstantan broj jona. Kod slabijih električnih polja, ako se ukloni izvor jonizacije, struja prestaje da teče. U tom slučaju govori se o nesamostalnom električnom pražnjenju kroz gas. Kod jakih električnih polja javljaju se i neki dodatni procesi multiplikacije indirektno izazvani električnim poljem, tako da struja teče i posle uklanjanja spoljašnjeg izvora jonizacije. U tom slučaju se govori o samostalnom pražnjenju, koje se u zavisnosti od uslova deli na tinjavo i lučno. Druge vrste samostalnog pražnjenja koje se javljaju spadaju u jednu od navedene dve. Tako na primer, varnica je kratkotrajni električni luk, dok korona spada u grupu tinjavih pražnjenja.

Pri labaratorijskim proučavanjima provodljivosti jonizovanog gasa, koriste se dve ploče (elektrode) koje su priključene na određeni napon i meri se struja koja protiče sa jedne ploče na drugu. U zavisnosti od napona na oblogama, između njih se uspostavlja elektriično polje. Pod dejstvom sila električnog polja, joni se kreću, i struja između obloga teče. Struje koje nastaju u gasovima pod dejstvom spoljašnjeg jonizatora obično su male, i iznose 10^{-12} do 10^{-6} ampera. Joni koji stižu na obloge, neutralizuju se. Zbog toga, broj jona koji nestaje će biti zavistan pored rekombinacije i od neutralizacije na oblogama. Na grafiku zavisnosti jačine struje pražnjenja od napona na oblogama izdvajaju se 4 oblasti (slika 2).



Slika 2. Zavisnost jačine struje pražnjenja od napona

- **Oblast 1:** Pri malim naponima (manjim od U_1) broj naelektrisanih čestica koje nestaju na elektrodama je mnogo manji od broja nestalih u rekombinacijama. Povećanjem napona sve veći i veći broj jona učestvuje u provođenju, tj. stiže na elektrode. Zavisnost struje i napona je linearna što u suštini predstavlja Omov zakon.

- **Oblast 2:** Za neke vrednosti napona (od U1 do U_2) struja nije više linearna funkcija napona, već raste sporije od napona.

- **Oblast 3:** Od neke vrednosti napona (od U_2 do U_3) ???? jačina struje je konstantna iako se napon i dalje povećava. To je struja saturacije (zasićenja) I_z. Ovo se objašnjava na taj način, da joni, za vreme koje im je potrebno da pređu od jedne do druge obloge, ne uspevaju da se rekombinuju. Praktično svi stvoreni joni stižu na elektrode.

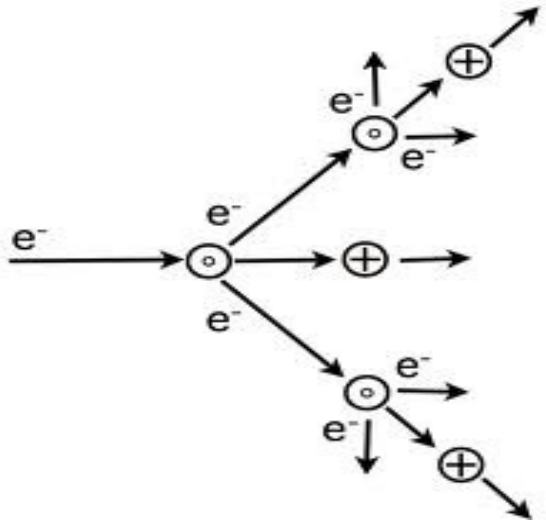
- **Oblast 4:** Za napon veći od neke vrednosti (od U_3) jačina struje najpre sporo a zatim vrlo brzo poraste i raste brže od napona među oblogama. To znači da se pojavljuje novi unutrašnji izvor jona. Ako se u nekoj tački u ovoj oblasti spoljašnji jonizator isključi, pražnjenje se ne prekida. Od nesamostalnog prelazi se na samostalno pražnjenje, zbog obrazovanja novih jona usled unutrašnjih procesa u samom gasu.

2.1. Samostalno pražnjenje

Atomi i molekuli se inače nalaze u tzv. osnovnom stanju, tj. najnižem energetskom stanju, i tada su u električno neutralnom stanju. Sadrže jednake količine pozitivnog naelektrisanja u jezgru i negativnog u elektronskom omotaču. U njemu se brzo kreću elektroni sa kinetičkim energijama koje su strogo definisane orbitama po kojima se kreću. Ako se atomu dovede energija (povećanjem temperature, bombardovanjem vrlo brzim česticama ili zračenjem), atom tada prelazi iz osnovnog stanja u neki nivo više energije tj. **pobuđeno** ili **stanje eksitacije**. Ovo stanje se pre svega ispoljava u promeni energije elektrona u spoljnoj ljusci, koji je slabije vezan u atomu. Atom u pobuđenom stanju provede u proseku oko 10^{-18} sekundi, a onda prelazi u niže energetsko ili osnovno stanje. Tom prilikom emituje se kvant svetlosti (foton) čija je energija jednaka energetskoj razlici ta dva stanja, a prilikom rekombinacije elektrona i jona oslobađa se u obliku kvanta svetlosti energija jonizacije. Ako je spolja uneta energija dovoljna da otrgne elektron iz omotača, nastupa jonizacija. Minimalna energija dovoljna za jonizaciju naziva se **energija jonizacije**. Sudari elektrona (a takođe i jona) sa atomima

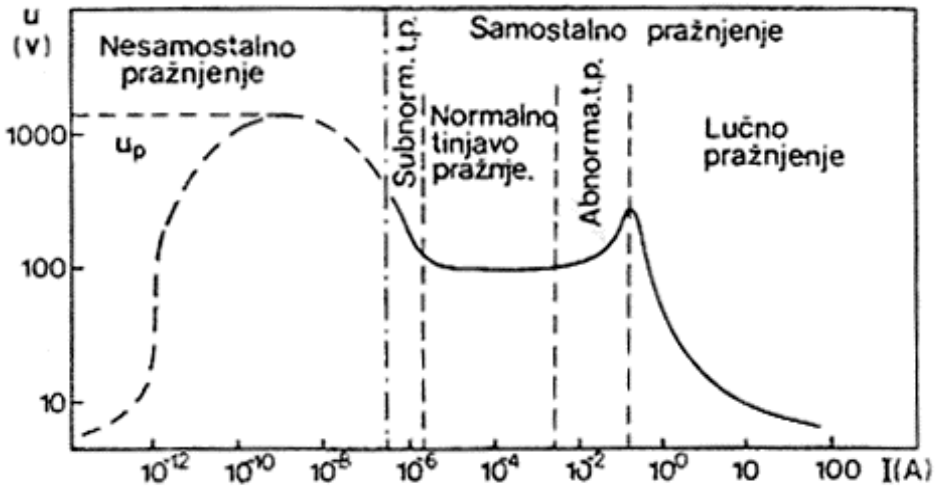
mogu imati neelastični i elestični karakter. Ako se pri sudaru atom ne može prevesti u pobuđeno stanje onda je takav sudar elastičan. Pri tom, elektron predaje atomu (ili molekulu) samo vrlo mali deo svoje energije i pri tom se odbija od molekula kao loptica od zida, ne menjajući intezitet brzine. Elastični sudari dominiraju u nesamostalnom pražnjenju. U slučaju veće energije elektrona, atom (ili molekul) može biti pobuđen ili jonizovan. U tom slučaju sudar je **neelastičan**. Skoro sva energija bombardujuće čestice se može preneti na molekul i pobuditi ga ili jonizovati. Što je masa bombardujuće čestice manja u odnosu na masu atoma (ili molekula) utoliko se veća energija prenosi u neelastičnom sudaru.

Pod dejstvom sile električnog polja, elektroni između dva sudara sa molekulima gasa mogu da dobiju energiju. Povećanjem napona između obloga raste i jačina el. polja, odnosno energija elektrona. Kada je napon veći od neke kritične vrednosti (oblast 4 na slici 2), struja počinje naglo da raste i dolazi do jonizacije zbog sudara elektrona sa molekulima gasa, tzv. **udarne jonizacije**. Energija koju elektroni dobiju u polju, između dva sudara, sada je veća od energije jonizacije. Napon na kome se to dešava zavisi od oblika i rastojanja između elektroda, vrste i pritiska gasa. Mehanizam udarne jonizacije radi na principu lančane reakcije. Kada je elektron u polju čija je energija porasla preko enegije jonizacije, tada elektron jonizuje molekul pri sudaru. Tada nastaje jedan pozitivan jon i jedan elektron. Umesto jednog elektrona sada postoje dva. Posle ubrzanja u električnom polju oni jonizuju nova dva molekula, pa se broj elektrona povećao na četiri. Ovaj proces se nastavlja, i broj elektrona raste u obliku lavine. On raste eksponencijalno, a samim tim i jačina struje koja je srazmerna broju elektrona (slika 3).



Slika 3. Lančana reakcija jonizacije

Pokazuje se da elektronska udarna jonizacija nije dovoljna za održavanje pražnjenja bez spoljašnjeg jonizatora. Potrebno je da električno polje toliko ojača da bi pozitivni joni dobili dovoljnu energiju za stvaranje sekundarnih elektrona. To je sekundarna elektronska emisija, pojava izbijanja elektrona sa površine čvrstih ili tečnih tela pri bombardovanju elektronima ili jonima. Pozitivni joni, kada dobiju dovoljnu energiju, vrše udarnu jonizaciju i sekundarnu emisiju elektrona sa površine katode. Sada se u gasu obrazuje dvosmerna lavina elektrona i pozitivnnih jona. Jonizacija se vrši u svim delovima zapremine gasa između elektroda i broj stvorenih elektrona i jona je veći od onoga koji stvara spoljašnji jonizator. U slučaju gašenja jonizatora pražnjenje bi se nastavilo. Tako vidimo da pri dovoljno visokom naponu pražnjenje između elektroda prelazi iz nesamostalnog u samostalno. Sam prelaz između nesamostalnog i samostalnog pražnjenja je dosta neodređen i odigrava se u trenutku kada struja dostigne vrednost reda 10 μA. Oblast samog prelaza odgovara tzv. subnormalnom tinjavom pražnjenju, što se može zapaziti sa slike 4. Sa daljim povećanjem jačine struje, pražnjenje prelazi u oblast normalnog tinjavog pražnjenja (10^{-5}-10^{-2} A) koja se karakteriše konstantnom vrednošću napona između elektroda. Sa daljim povećanjem jačine struje napon ponovo počinje da raste i pražnjenje prelazi u abnormalno tinjavo pražnjenje. Povećanje struje do jačine reda 10^{-1} A izaziva nagli prelaz u oblast lučnog pražnjenja u kome napon na elektrodama opada sa povećanjem jačine struje. Ovaj prelaz se naziva **električni proboj u gasu**, a odgovarajući napon **probojni napon**. Da bi kod ovoga napona došlo do proboja neophodno je da u gasu postoji izvestan početni broj slobodnih naelektrisanja, koja služe kao "okidač". Kosmičko zračenje kao i radioaktivne supstance na površini Zemlje praktično uvek obezbeđuju potrebna početna naelektrisanja. Potencijal potreban za električni proboj je karakterističan za svaki gas. Za vazduh on je reda 30 000 kVcm^{-1}.



Slika 4. Vrste pražnjenja

2.2. Strimerno pražnjenje

Pri velikim električnim poljima (oko $3 \cdot 10^4$ V/cm), u vazduhu koji se nalazi na normalnom atmosferskom pritisku javlja se pražnjenje u obliku varnice. Varnica ima oblik vrlo svetlog, krivudavog i razgranatog kanala-strimera. Strimer, preko koga ide formiranje varnice, povezuje oblasti (tačke) u gasu sa različitim potencijalima. U toku formiranja električne varnice, gas u svetlom kanalu karakteriše velika električna provodnost. Zbog toga temperatura u kanalu može da naraste na hiljadu do nekoliko desetina hiljada stepeni. Usled različite temperature u kanalu i van njega gas se naglo širi što izaziva pucketanje ili prasak.

Pri kojem naponu će se pojaviti varnica zavisi od rastojanja između elektroda i pritiska gasa, zatim od vrste gasa kao i oblika i veličine elektroda. Usled naglog pražnjenja kroz gas napon obično opadne u velikoj meri te prestaje efekat udarne jonizacije i varnica se gasi. Ovo varnično pražnjenje je uslovljeno lavinom elektrona i jona, koju izaziva udarna jonizacija, fotojonizacija i izbijanje elektrona sa katode (sekundarna emisija).

2.3. Pražnjenje u obliku korone

Korona je specijalna vrsta pražnjenja u nehomogenom električnom polju. Javlja se u vazduhu i u drugim gasovima u blizini vrhova ispupčenih površina elektroda i duž žica kada se nalaze na visokim potencijalu u odnosu na svoju okolinu. Kod elektrodnih sistema javlja se uvek oko one elektrode u čijoj se blizini nalazi jače polje. Takve elektrode se nazivaju **aktivne**. Elektrode sa slabijim poljem u okolini su **pasivne** i služe kao kolektor. Korona može biti pozitivna i negativna, što zavisi od toga uz koju se elektrodu vrši pražnjenje. Ako je aktivna elektroda na pozitivnom potencijalu formiraće se **pozitivna korona**, u protivnom nastaje **negativna korona**.

Pražnjenje u oblasti korone je određeno oblikom polja, vrstom gasa, pritiskom, temperaturom i drugim uslovima. Ono se manifestuje kao svetlucanje raznih boja u okolini aktivne elektrode i zavisi od sredine. Ponekad se javlja zvučni signal u obliku šuštanja i krckanja u blizini elektroda sa malim radijusom.

2.4. Plazma

U mnogim oblicima samostalnog pražnjenja stepen jonizacije gasa može biti vrlo velik. Visoko jonizovani gas, sa jednakim brojem pozitivnih jona i elektrona u jedinici zapremine, naziva se **plazma**. Ona nastaje u toku i tihog i lučnog pražnjenja. Plazma predstavlja posebno stanje materije, koje se često naziva i četvrto agregatno stanje. Takvo stanje materije postoji u centru Sunca i drugiih zvezda. Prema stepenu jonizacije razlikuju se tri tipa plazme: *slabo jonizovana* (stepen jonizacije dela procenta), *srednje jonizovana* (stepen jonizacije nekoliko procenata) i *potpuno jonizovana* plazma. Uopšte, negativni nosioci naelektrisanja u plazmi su elektroni, jer se negativni joni brzo rekombinuju sa pozitivnim jonima. Plazma gasnog pražnjenja nastaje zbog elektronske udarne jonizacije gasa, usled čega ne postoji termodinamička ravnoteža između elektrona i jona. Zbog toga su temperature u plazmi znatno više od temperatura neutralnog gasa.

3. ATMOSFERSKI ELEKTRICITET

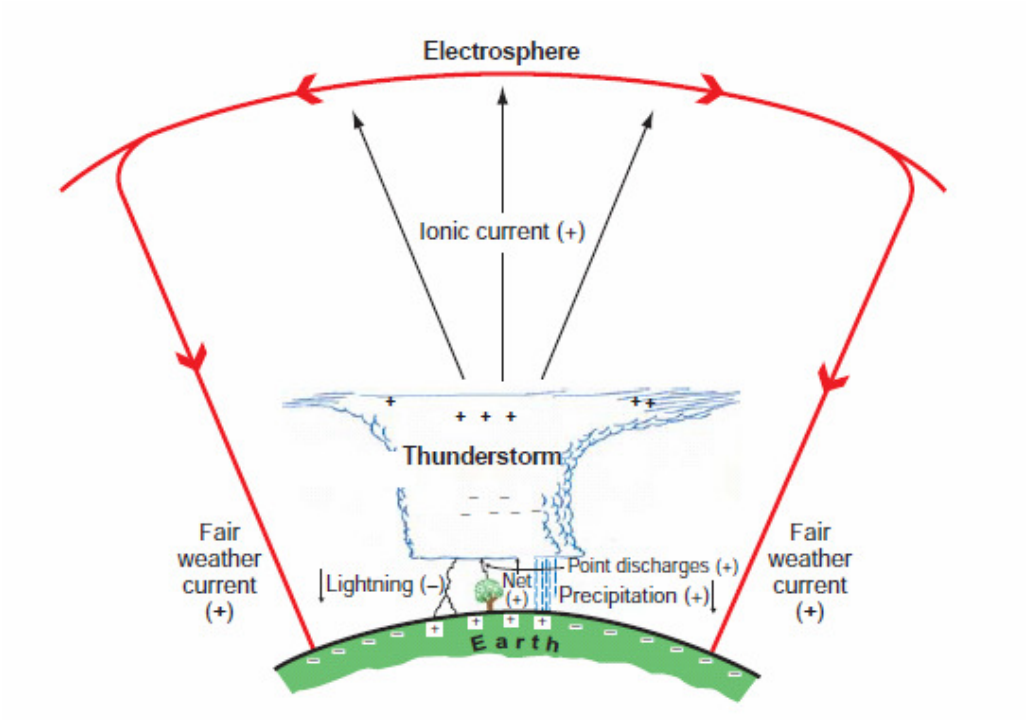
3.1. Kruženje naelektrisanja u atmosferi

Prvi koji je primetio da je vazduh provodljiv bio je Kulon (Coulomb) još 1795. godine. Krajem 19. veka utvrđeno je da je atmosfera naelektrisana i da sadrži određeni broj pozitivnih i negativnih jona vazduha. Glavni jonizatori su radioaktivno, kosmičko, Sunčevo, ultraljubičasto i rendgensko (X) zračenje. Radioaktivne supstance u Zemljinoj kori i delovima atmosfere neposredno iznad nje odgovorni su za stvaranje jona u nižim slojevima atmosfere. Kosmički zraci prolaze kroz celu atmosferu i zato predstavljaju izvor jona u svim njenim slojevima. Delovi Sunčevog zračenja koji su odgovorni za stvaranje naelektrisanih čestica velikim delom bivaju absorbovani na putu do Zemljine površine tako da su oni glavni jonizatori u visokim slojevima atmosfere. Istraživanjima je utvrđeno da je broj jona u nižim gušćim slojevima atmosfere veoma mali. To je zbog rekombinacije. Zbog smanjenja uslova za rekombinaciju, i sve većeg uticaja ultraljubičastog zračenja, koje je glavni jonizator, broj jona se povećava u višim, ređim slojevima atmosfere. Time se povećava njihova provodljivost.

Sloj atmosfere sa povećanim brojem jona, tj. sa povećanom eleltričnom provodljivošću, naziva se **jonosfera**. Donja granica je približno na visini od 60 km, a gornja se praktično poklapa sa gornjom granicom atmosfere. Jonosfera se sastoji od više slojeva, ali za razmatranje atmosferskog elektiriciteta, cela se može posmatrati kao jedan provodni sloj. Važna činjenica je da su struje u njoj male, tako da cela mora biti na istom

potencijalu. Procenjeno je da je njen potencijal pozitivan i iznosi $3 \cdot 10^5$ - $4 \cdot 10^5$ V, kao i da varira u zavisnosti od doba dana i godine. Za procenu električnog polja atmosfere, čiji se intenzitet određuje vertikalnim gradijentom potencijala u V/m korišćene su dve vrste merenja. Merenja razlike potencijala između dve tačke na različitim visinama, od kojih je jedna obično na zemljinoj površini, i merenjem vezanog naelektrisanja na nekim delovima zemljine površine ili telima vezanim za nju. Za gradijent potencijala električnog polja atmosfere pri vedrom vremenu dobijene su različite vrednosti u opsegu od 100 do 190 V/m . U stratokumulusima i altokumulusima on je od 100 - 200 V/m , a u Nimbostratusu 300 – 700 V/m. U oblasti kumulonibusnih oblaka gradijent potencijala u proseku iznosi 40000 V/m, a u njegovim ograničenim delovima (između njegovog pozitivno naelektrisanog donjeg dela i negativno naelektrisanog dela ispod 0 °C) može dostići vrednosti 10 – 100 MV/m, pa i više.

Poznato je da Zemljina površina i atmosfera pri vedrom vremenu imaju postojano električno polje. Zemljina površina je naelektrisana negativno, a gornji slojevi atmosphere, jonosfera, pozitivno. Iz ovoga sledi da Zemlja predstavlja ogromni prirodni kondenzator u kome je količina električne energije postojana. Iako je vazduh slab provodnik elektriciteta, on ga ipak prenosi. Naelektrisanja suprotnih znakova iz Zemljine površine i gornjih slojeva atmosfere bi se zbog toga neutralisala za nekoliko minuta. Kako do toga ne dolazi, mnogi naučnici su pretpostavili da elektricitet obnavljaju, tj. održavaju postojano električno polje, Zemljina površina – atmosfera, kumulonimbusni oblaci. Takvo električno polje se odražava **globalnim kruženjem elektriciteta** (slika 5.). Po teoriji koju je formulisao Vilson (Wilson), grmljavinski oblak prenosi pozitivno naelektrisanje prema gornjem provodnom delu atmosfere. Tu se ono preraspodeljuje bočno, u oblast bez oblačne aktivnosti, održavajući tako potencijal atmosfere lepog vremena od $3 \cdot 10^5$ V. Apleton (Appleton) je 1925. godine prvi sugerisao da bi promena gradijenta potencijala u neporemećenim uslovima mogla biti jednaka promeni koja dolazi od aktivnosti ukupnog broja kumulonimbusnih oblaka iznad cele zemlje. Njih u svakom trenutku ima oko 10000, a grmljavinski aktivnih oko 2000. Da ta povezanost postoji, utvđeno je novijim merenjima.



Slika 5. Globalno kruženje atmosferskog elektriciteta

Šta se zapravo dešava?

Usled prenosa elektriciteta nastaju električne struje u atmosferi kao i u Cb oblacima. Prenos može biti uslovljen mehaničkim i električnim silama. Kao komponente električne struje unutar konvektivnih oblaka javljaju se:

- električna struja provodljivosti,
- električna struja konvektivnog prenosa,
- električna struja padavina, i
- električna struja električnih pražnjenja.

U atmosferi uvek postoje električna struja provodljivosti, koju čine kretanja jona duž linija sila električnog polja. Većina autora se slaže da su električne struje u Cb-u bar za red veličine veće nego u mirnoj atmosferi. Električna struja provodljivosti je usmerena ka Zemlji i na Zemlju donosi pozitivan elektricitet.

Konvektivne električne struje nastaju usled prenosa naelektrisanja konvektivnim, uzlaznim strujanjima. Gustina ove komponente je za oko 100 puta manja od gustine električne struje provodljivosti.

Padavine mogu da budu nosioci kako pozitivnog tako i negativnog elektriciteta. Prenos tog elektriciteta padavinama obrazuje električnu struju padavina. Padavine koje nose pozitivan elektricitet se češće opažaju, tako da ova komponenta, sumarno gledano, donosi Zemlji pozitivan elektricitet. Pri jačim pljuskovima gustina ove struje dostiže vrednost od 10^{-8} A/m^2 .

Od svih električnih pražnjenja na Zemlju, oko tri četvrtine je negativno, a jedna četvrtina donosi pozitivan elektricitet. Po nekim proračunima gustina struje koja potiče od električnih pražnjenja, za celu Zemljinu sferu je reda 10^{-12} A/m^2.

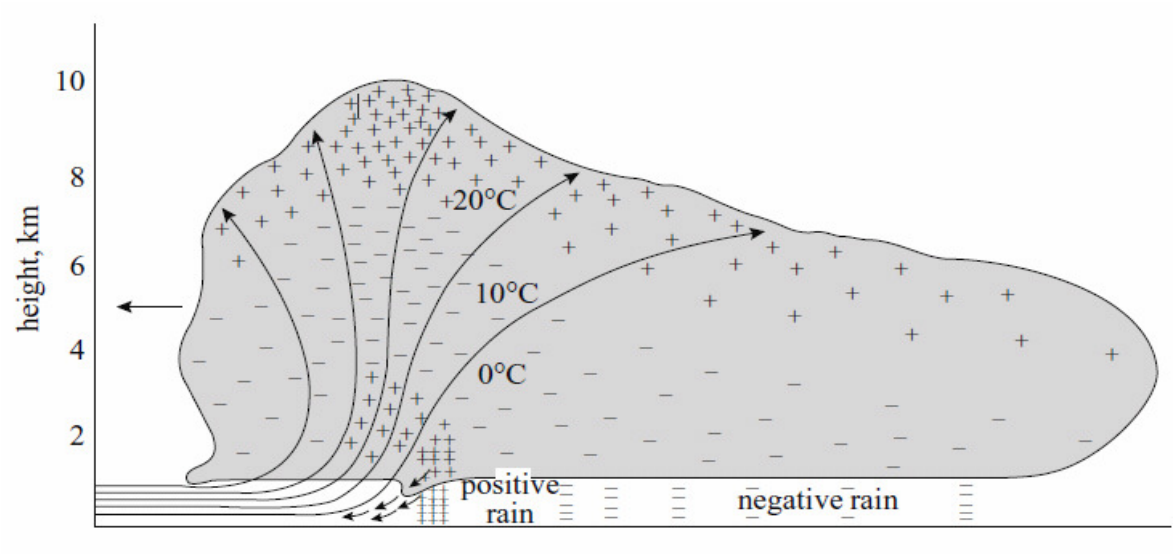
Gradijent potencijala električnog polja u blizini površine Zemlje ispod Cb-a može dostići velike vrednosti (10^3 V/m). Usled toga, nastaje koronalno elektrostatičko pražnjenje, uglavnom sa visokih i oštrih predmeta, a tako i nastajanje jonizovanih struja.

U konvektivnim oblacima dolazi do vertikalnog razdvajanja raznoimenog naelektrisanja, pozitivno pri vrhu, a negativno na nivou baze oblaka. To omogućuje isticanje pozitivnog elektriciteta sa „šiljkova" u oblastima ispod konvektivnog oblaka. Pozitivan elektricitet, prešavši u atmosferu neutralizuje deo negativnog elektriciteta u oblaku. Pozitivan elektricitet sa vrhova oblaka se rasejava oko Zemljine sfere kroz gornje slojeve atmosfere gde je veća provodljivost. Na kraju se to pozitivno naelektrisanje vraća Zemlji u vidu struja provodljivosti. Tako je načinjen zatvoreni sistem elektrostatičkih polja i električnih struja sa promenljivim intenzitetima, koji zavise od intenziteta i nepogoda na Zemljinoj kugli. Tako grmljavniski oblaci deluju kao električni generator, dovodeći gornje slojeve atmosfere pod visoki električni potencijal u odnosu na Zemlju. Zahvaljujući tom potencijalu moguće je proticanje električne struje između Zemljine površine i visokih slojeva atmosfere. Na taj način postoji ravnoteža između električne struje nastale u nepogodama i električne struje koja nastaje u oblastima lepog vremena. (slika 5). Ova uprošćena šema se može nazvati *šema sfernog kondenzatora*, pri čemu je unutrašnja ploča površina Zemlje (negativno naelektrisana), a spoljašnja ploča je jonosfera (pozitivno naelektrisana). U stvarnosti ova šema je mnogo složenija.

3.2. Električno polje i procesi elektrifikacije u konvektivnim oblacima

Model strukture naelektrisanja grmljavinskih oblaka razvijen je početkom 1930-ih. Model je dobijen na osnovu prizemnih merenja električnih polja povezanih sa statičkim oblačnim nalelektrisanjem i merenjem promene električnih polja povezanih sa efektivnim neutralizacijama delova ovih oblačnih naelektrisanja delovanjem munje. U ovom modelu primarna naelekrisanja grmljavinskog oblaka su u obliku pozitivnog

električnog dipola, tj. pozitivno naelektrisanje je raspoređeno u višim delovima, a negativno u nižim delovima oblaka, iznad nivoa topljenja. Kasnih 1930-ih verifikovano je postojanje ove osnovne dipolne strukture merenjima u oblaku pomoću balona opremljenih instrumentima. I pored toga, identifikovana je lokalizovana oblast pozitivnog naelektrisanja na bazi oblaka kao što je ilustrovano na slici 6.



Slika 6. Tipična raspodela naelektrisanja u grmljavinskom oblaku

Veliki problem u razvijanju osnovnog modela statičkog oblačnog naelektrisanja je taj da ni polja niti naelektrisanja koja ih proizvode nisu zaista vremenski ustaljena. Između ostalih efekata, postoji znatno brža promena polja naelektrisanja usled munje i kasnijeg sporijeg obnavljanja polja. Ukupno naelektrisanje povezano sa oblašću negativnog naelektrisanja nije uniformno raspoređeno, ali je donekle lokalizovano u džepovima relativno visoke prostorne koncentracije. Evidencija o ovim lokalnim koncentracijama naelektrisanja nađena je u činjenici da individualni povratni udari u višestrukoj zemljinoj munji pogađaju različite oblasti negativnog naelektrisanja.

Postoje mnoge pretpostavke o razdvajanju naelektrisanja u kumulonimbusu. Stvorene su razne teorije da bi se objasnilo kako u jednom oblaku tipa kumulonimbusa mogu da budu proizvedeni električni naboji da izazovu pražnjenje tako spektakularno kao što je munja i da se ova pražnjenja ponavljaju sa takvom čestinom kao što je u nekim olujama. U osnovi postoje dva tipa teorije o generisanju osnovnog dipolnog oblačnog naelektrisanja:

1. Teorija padavina
2. Konvektivna teorija

U teoriji padavina, teži padajući delići interaguju sa lakšim delićima nošenim uzlaznom strujom. Interakcioni procesi elektrišu teže deliće negativno a lakše deliće pozitivno, nakon čega gravitacija i uzlazna struja razdvajaju suprotno naelektrisane deliće i formiraju oblačni dipol. Transfer naelektrisanja može biti izvršen kolizijom u kojoj dva početna nenaelektrisana delića postaju, nakon kolizije, suprotno naelektrisana. Takođe, transfer se može obaviti indukcijom u kojoj se dva nenaelektrisana ali polarizovana padavinska delića sudaraju na takav način da mali laki hidrometeori absorbuju naelektrisanje od donjeg dela većeg i težeg padavinskog elementa, kako se lakši delić premešta naviše. U konvektivnoj elektrifikaciji, naelektrisanje koje je bilo akumulirano blizu zemljine površine ili preko oblasti promenljive provodljivosti vazduha i oblaka, premešteno je u velikoj meri na osmotrenu lokaciju vazdušnom strujom koja je povezana sa grmljavinskom olujom.

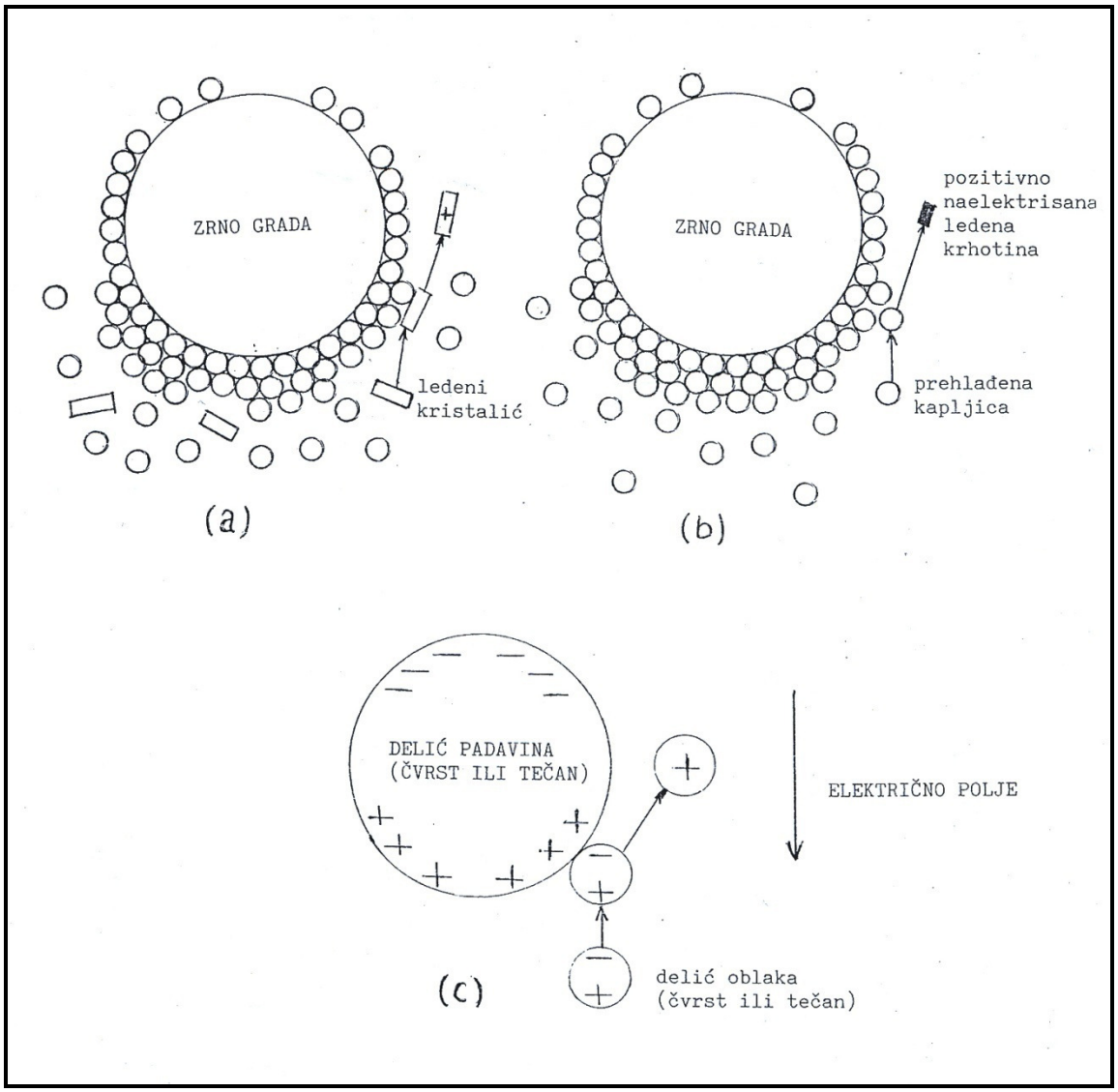
Smatra se da se mehanizam elektrifikacije sastoji od prikupljanja, zamrzavanja i rasprskavanja prehlađenih kapljica u kontaktu sa zrnima grada ili krupe. Gravitacionim razdvajanjem pozitivno naelektrisanih ledenih kristalića i mnogo težih zrna grada stvara se električno polje kakvo je osmotreno u oblaku.

Poznato je da su neki od molekula vode disocirani na pozitivne (H^+) i negativne (OH^-) jone i da se njihov broj povećava sa povećanjem temperature. U komadiću leda može postojati gradijent temperature, tj. njegovi delovi mogu imati različite vrednosti temperature. Pošto joni teže da se kreću iz oblasti sa većom ka oblasti sa manjom koncetracijom, u oblasti sa ledom će se oni kretati od toplijih ka hladnijim delovima. Međutim, kako je pokretljivost pozitivnih jona za red veličine veća od pokretljivosti negativnih to će se prema hladnijem delu premeštati samo pozitivni joni. Tu će se nagomilati pozitivno naelektrisanje koje će na kraju sprečavati dalji dolazak pozitivnih jona u tu oblast. Na ovaj način se u ledu formira razlika potencijala sa pozitivno naelektrisanim hladnim i negativno naelektrisanim toplim delom. Ovo je takozvani *termoelektrični efekat*.

Rejnolds (Reynolds) je pretpostavio jedan mehanizam razdvajanja zasnovan na termoelektričnom efektu: površina zrna grada ili krupe koji padaju je toplija od površine ledenih kristala koji lete u oblaku zbog latentne toplote zamrzavanja koja se oslobađa pri sudaru zrna grada sa prehlađenim kapljicama. Za vreme kontakta ledenog kristala sa zrnom grada zbog ovog efekta zrno grada će se naelektrisati negativno, a kristal pozitivno. Kristalići leda bi uzlaznom strujom bili nošeni u gornje delove oblaka, koji bi na taj način postali pozitivno naelektrisani, a zrna grada bi nosila negativno naelektrisanje u donje delove oblaka (slika 7a). Laboratorijski eksperimenti, izvedeni sa ciljem da simuliraju opisani proces davali su dosta različite rezultate.

Drugi mehanizam naelektrisanja koji je povezan sa padanjem zrna grada kroz mešoviti oblak i termoelektričnim efektom potiče od Vorkmana (Workman) i Rejnoldsa. Eksperimentalno je pokazano da se pri mržnjenju prehlađene vodene kapljice u okolni vazduh mogu razleteti ledene krhotine. Kada se prehlađena kapljica sudari sa zrnom grada počinje da se zamrzava formirajući prvo tanak ledeni sloj koji, zatim, zadebljava ka unutrašnjosti kapljice. Spoljašnja površina ledenog sloja se hladi zbog temperature okolnog vazduha, dok je unutrašnja strana u dodiru sa tečnom vodom i ima temperaturu od 0ºC. Zbog ovoga se javlja temperaturna razlika između spoljašnje i unutrašnje površine ledene kore, pa će termoelektrični efekat dovesti do akumuliranja pozitivnog naelektrisanja na spoljnjoj strani. Kako se krhotine odlamaju od spoljašnjih delova, one će poneti ovo pozitivno naelektrisanje, ostavljajući zrno grada sa odogovarajućim negativnim naelektrisanjem. Ledene krhotine se prenose u više, dok zrna grada padaju u niže delove oblaka (slika 7b). Rezultati laboratorijskih eksperimenata su i u ovom slučaju kontradiktorni i ne omogućavaju da se utvrdi ispravnost ove pretpostavke.

Sledeći mehanizam koji je predložen od strane Sartora (Sartor) je *mehanizam indukcionog naelektrisavanja*. U prisustvu električnog polja čvrsti i tečni padavinski i nepadavinski oblačni elementi biće polarizovani tako da su njihove donje površine nalektrisane pozitivno, a gornje negativno. Prilikom padanja, padavinski element se sudara sa oblačnim delićima. Pod uslovom da se odbijaju, negativno naelektrisanje će biti preneto na padavinski element i naelektrisanja suprotnih znakova će se na mestu sudara neutralizovati. Delići oblaka koji ostaju pozitivno naelektrisani biće nošeni naviše vazdušnom strujom oko kapi (slika 7 c). Na ovaj način će biti pojačano postojeće električno polje. Ovakvo razdvajanje naelektrisanja je osmotreno u laboratoriji, ali se ne može odgovoriti u kojoj meri se ono dešava u prirodi. Pretpostavlja se da u početku dominiraju neindukcioni mehanizmi razdvajanja naelektrisanja u oblaku, ali sa jačanjem električnog polja značaj indukcionog naelektrisavanja raste, da bi na kraju postao dominantan.



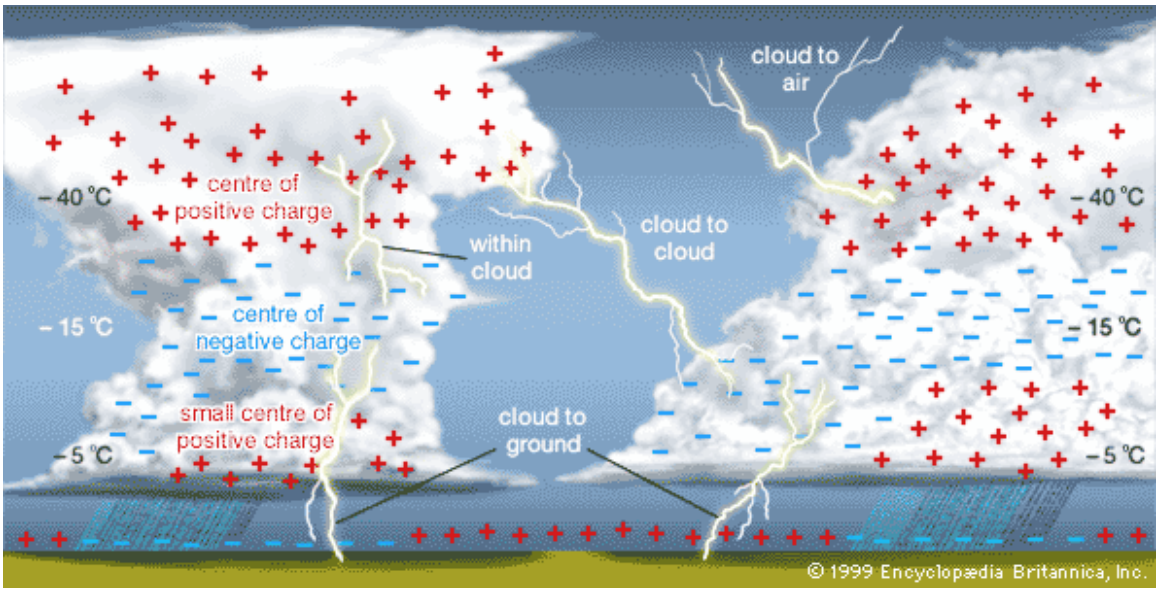
Slika 7. Tri mehanizma naelektrisavanja kumulonimbusa: slike (a) i (b) prikazuju mehanizme zasnovane na termoelektričnom efektu; slika (c) prikazuje mehanizam indukcionog naelektrisanja

Ovi opisani mehanizmi objašnjavaju nastanak dva glavna centra nalektrisanja u kumulonimbusnim oblacima. Postojanje manje oblasti sa pozitivnim naelektrisanjem ispod nulte izoterme objašnjava se naelektrisavanjem čvrstih delića padavina zbog topljenja. Eksperimentalno je pokaznao da ledeni delići mogu dobiti pozitivno naelektrisanje zbog pucanja vazdušnih mehurova, koji su u vezi sa ugljendioksidom.

4. LINIJSKA MUNJA

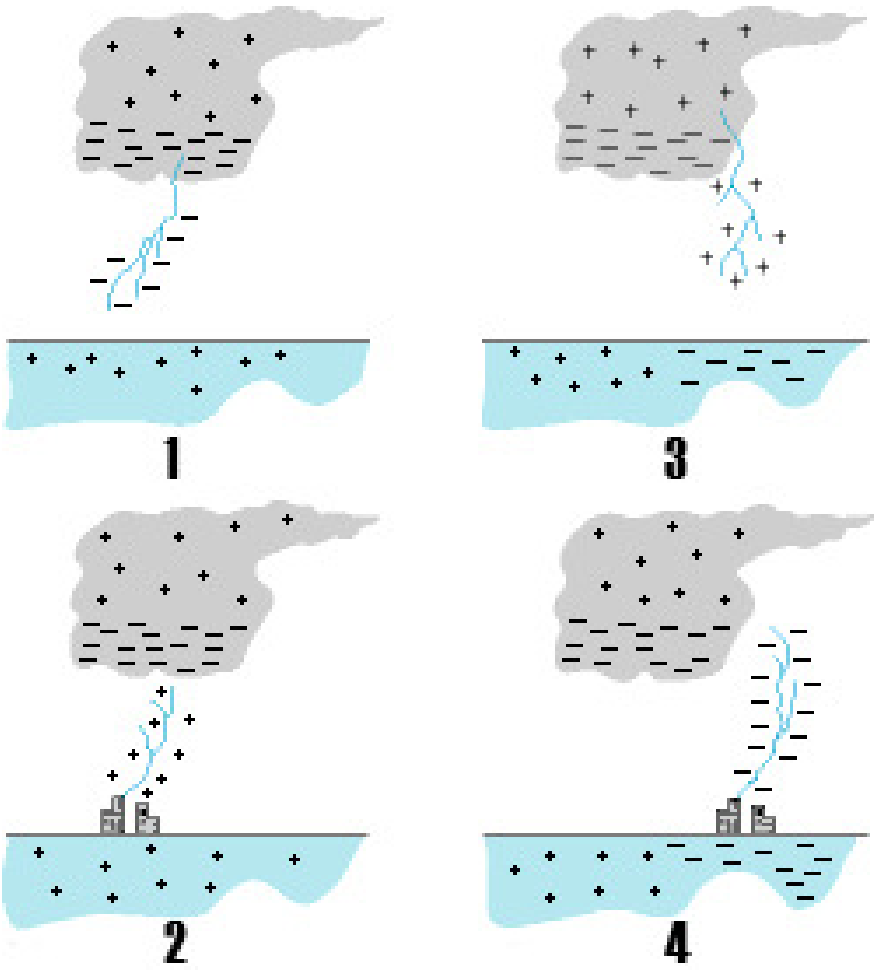
4.1. Kategorizacija električnih pražnjenja kumulonimbusnog oblaka

Munja je kratkotrajno visokostrujno električno pražnjenje čija putanja može biti dugačka kilometrima. Više od polovine svih električnih pražnjenja javlja se unutar olujnih oblaka i ova pražnjenja se nazivaju *unutaroblačnim pražnjenjima*. Uobičajena pražnjenja *oblak-zemlja* (nazvana *linijske* ili *račvaste* munje) izučavane su više od ostalih munja, kako zbog praktičnog interesa, tako i zbog toga što su kanali munje ispod oblaka lakši za fotografisanje i proučavanje optičkim instrumentima. One su najčešće uzrok povreda, smrti, smetnji u energetskim i komunikacionim sistemima, kao i izazivači šumskih požara. Oblak-oblak i oblak-vazduh (takozvana vazdušna pražnjenja) pražnjenja su ređa od pražnjenja unutar oblaka ili pražnjenja oblak-zemlja. Sva ova, izuzev oblak-zemlja, često se svrstavaju zajedno i nazivaju oblačnim pražnjenjima. Na slici 8 su šematski prikazane razne vrste linijske munje.



Slika 8. Linijske (račvaste) munje

Berger (Berger, 1978) kategorizuje munje između oblaka i Zemlje u smislu pravca kretanja, naviše i naniže, i u smislu znaka naelektrisanja lidera, na pozitivne i negativne. Ova kategorizacija je ilustrovana na slici 9.



Slika 9. Četiri tipa munje prema Bergeru (1978)

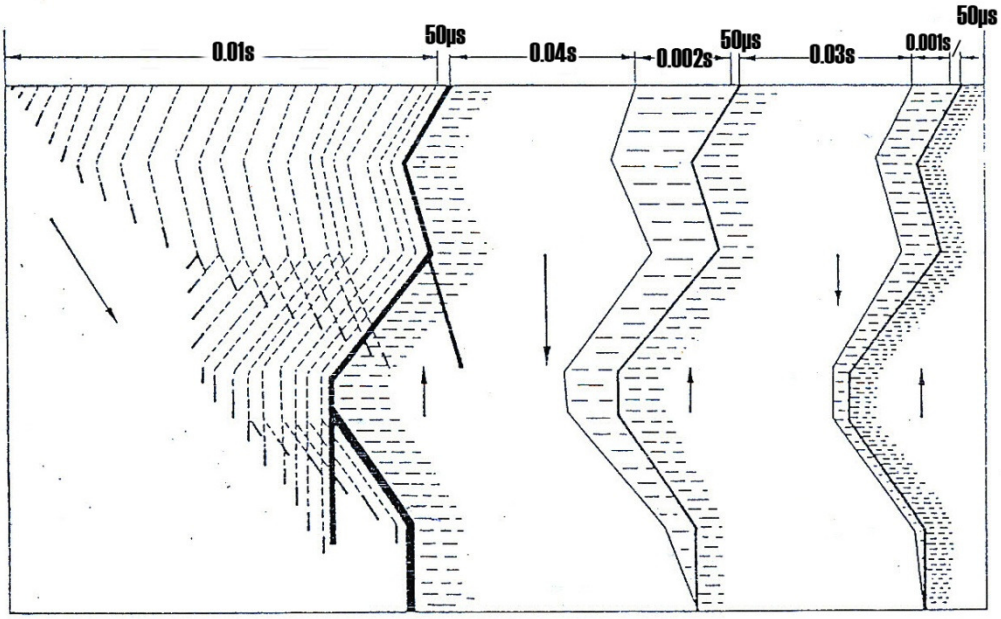
Kategorija (1) je najčešća vrsta pržnjenja oblak-zemlja. Ovaj vid pražnjenja čini oko 90% ukupnih pražnjenja oblak-zemlja širom sveta. Ono je inicirano naniže usmerenim kretanjem (od oblaka ka tlu) negativno naelektrisanog lidera kao što je prikazano, i na taj način se spušta negativno naelektrisanje do zemlje. Kategorija (3) je isto tako inicirana naniže usmerenim kretanjem lidera, ali koji je pozitivno naelektrisan, i samim tim na zemlju spušta pozitivno naelektrisanje. Manje od 10% pražnjenja oblak-zemlja širom sveta su ovog tipa. Kategorije (2) i (4) inicirane su liderima koji se kreću naviše (od zemlje ka oblaku) i oni se ponekad nazivaju pražnjenjima zemlja-oblak. Ova pražnjenja relativno su retka i uglavnom se javljaju oko planinskih vrhova i visokih građevina. Druga kategorija munja ima pozitivno naelektisan lider koji vodi do smanjenja negativnog naelektrisanja oblaka, dok četvrta kategorija ima negativno naelektrisan lider (predvodnik) koji vodi do smanjenja pozitivnog naelektrisanja oblaka.

Da pojasnimo gore spomenutu frazu „spuštanje naelektrisanja”. Često se u literaturi o munjama govori o smanjenju oblačnog naelektrisanja ili o neutralizaciji oblačnog naelektrisanja munjama, mada to možda i nije baš ono što se i zaista u fizici dešava. Na primer, u slučaju pozitivnog, naviše usmerenog lidera, verovatno je da će pozitivno naelektrisanje u početku biti deponovano u oblaku u donjem delu negativno naelektrisane oblasti i da će kasnije nešto negativnog oblačnog naelektrisanja biti preneto naniže postojećim kanalom pa će doći do ukupnog efektivnog smanjenja negativnog oblačnog naelektrisanja.

4.2. Mehanizam pražnjenja munjama

Detaljnije naučno istraživanje ove pojave započinje njenim fotografisanjem. Bojs (Boys) je 1926. godine konstruisao specijalnu kameru koja je korišćena u proučavanju strukture munje. Ona se sastojala u početku od fiksirane filmske ploče i para sočiva koji rotiraju oko horizontalne ose. Prvi ju je koristio Šonland (Schonland) sa saradnicima u Južnoj Africi (gde su pražnjenja izuzetno česta). Oni su istovremeno fotografisali udare munje i merili promene u električnom polju između oblaka i zemljine površine izazvane munjama. Ispostavilo se da je ono što se vidi kao jedan bljesak, u stvari serija udara.

U početnom stadijumu razvoja munje, tzv. **strimer** ili **svetlosni zrak** spušta se za kratko rastojanje i zaustavlja se; posle kratkog vremenskog perioda novi strimer se spušta duž prethodnog i produžuje ga još malo. Ovaj proces se nastavlja dok poslednji strimer ne dođe do 5-50 m iznad tla. Ova putanja naziva se **stepenasti lider** (stepenasti predvodnik). Ponekad se mogu videti grane koje polaze iz lidera, ali one ne stižu do Zemljine površine. Kada se vrh stepenastog lidera približi tlu, drugi strimer krene iz neke tačke sa tla (uglavnom sa istaknutih predmeta), produžujući se uvis do vrha lidera i formirajući tako **povratni** ili **glavni udar** koji se puno jasnije vidi od lidera. Intenzitet svetlosti povratnog udara opada nakon dostizanja svake tačke iz koje polaze grane i postaje veoma mali u gornjem delu kanala. Nakon 0,04 sekunde istim kanalom iz oblaka polazi drugi, brži i nerazgranati takozvani **strelasti (dart) lider**. Za njim sledi povratni udar, i tako može više puta (slika 10).



Slika 10. Struktura jednog bljeska munje. Isprekidanim linijama prikazan je stepenasti lider, punom debelom linijom prvi povratni udar, a punim tankim linijama naredni strelasti lider i povratni udar.

Na prethodnoj slici su prikazana tri udara. Oko 25% ukupnih pražnjenja su jednostruke munje, a ostatak su višestruke sa izmerenim maksimumom od 26 udara po munji. Tabela 1 daje neke osnovne karakteristike sevanja munje. Prema Šonlandu (Schonland), na osnovu merenja električnog polja i njegovih promena, možemo razlikovati dve vrste električnog pražnjenja: **diskretno** i **hibridno**. Dikretno se sastoji od delimično odvojenih pražnjenja koja proizvode iznenadnu svetlost i strujne impulse. Hibridno se sastoji, takođe, od više pojedinačnih udara, ali za razliku od prethodnog sadrži još jednu komponentu koja pokazuje produženu svetlosnu emisiju. Svako novo rasvetljavanje prethodno stvorenog kanala, prouzrokuje da električno polje iznenada poraste, dok između tih naglih promena polje ostaje konstantno ili vrlo sporo raste. U hibridnom pražnjenju polje raste sve vreme trajanja produžene svetlosne emisije.

Tabela 1. Karakteristike sevanja munje

	minimum	tipična vrednost	maksimum
broj udara	1	3 – 4	26
interval između udara (s)	0,003	0,04	0,1
trajanje sevanja (s)	0,02	0,2	2
preneto naelektrisanje (C)	3	25	90

4.3. Stepenasti lider

Silazni lider napreduje od oblaka ka zemljinoj površini, dok je smer uzlaznog lidera obratan. Uzlazni povezujući lider je definisan kao pražnjenje od zemlje (ili nekog objekta) koji presreće silaznog lidera iz oblaka i ponovo se vraća ka zemlji. U zavisnosti od znaka naelektrisanja koje nosi, definisaćemo lider kao pozitivan ili negativan.

Postoje dva tipa stepenastog lidera: α i β. Osnovne karakteristike ovih lidera su prikazane u tabeli 2. Za razliku od tipa α, lideri β tipa imaju srednje brzine prostiranja koje su u početku velike, a onda opadaju duž njihove putanje, tako da ponekad udar ne stigne do tla. β lideri su u početku dosta razgranati i jasni, sa dugačkim koracima, a kasnije su sve manje vidljivi i koraci su im kraći. Struja koja protekne kroz kanal koji je stvorio lider β tipa je oko četri puta jača od struje koja protekne kroz kanal lidera α tipa.

Tabela 2. Karakteristike stepenastog lidera

	minimum	tipična vrednost	maksimum
α lider			
dužina koraka (m)	3	50	200
trajanje koraka (μs)		1	
interval između dva koraka (μs)	30	50	125
efektivna brzina širenja (m/s)	$1 \cdot 10^5$	$1{,}5 \cdot 10^5$	$2{,}6 \cdot 10^5$
naelektrisanje u kanalu (C)	0,2	1	6
struja (A)		620	
β lider			
efektiva brzina širenja (m/s)	$1 \cdot 10^5$		$6 \cdot 10^5$
struja (A)		2600	

Prečnik kanala stepenastog lidera je određen i iznosi od 1-10 m. Struja jačine u proseku 100 – 1000A prolazi kroz tanko, provodno jezgro u centru ovoga kanala (poluprečnika nekoliko milimetara), a okolo nje je omotač sačinjen od korona pražnjenja. Provodljivost jezgra je puno veća nego u ostalom delu kanala. Prosečna osmotrena brzina prostiranja stepenastog lidera je $2 \cdot 10^5$ m/s, koja se približno poklapa sa brzinom napredovanja struje elektrona izazvane električnim poljem od oko 10^6 V/m na vrhu ovog lidera. Odnos dužine koraka i vremenskih intervala između njih je približno konstantan. Šonland (Schonland) je postulirao postojanje takozvanog **pilot lidera** ili **strimera**, koji

putuje kontinualno na dole ispred stepenastog lidera brzinom jednakom brzini lidera. On deluje, u principu, kao elektroda na čijem kraju je intenzitet elektrostatičkog polja veliki, pa omogućuje stvaranje novih strimera. Generalno objašnjenje ovog mehanizma je sledeće: Intenzitet električnog polja je mnogo veći u oblaku nego u blizini površine i ta polja su uglavnom nehomogena. U nižim delovima oblaka mogu postojati manji regioni sa jako koncentrisanim negativnim naelektrisanjem, čije su linije električnih sila vrlo zgusnute, analogno tačkastom naelektrisanju. Kada polje na kraju ovih oblasti dostigne kritičnu vrednost (probojni napon ili napon loma) javiće se jonizacija. Jonizovani svetleći deo, tj. korak, će se prostirati na dole dok intenzitet ovog polja ne opadne. Koraci se prostiru u dužinu prosečno 5 – 50 m, u trajanju oko 1 μs sa pauzama između koraka oko 50 μs. Kad se elektroni ponovo nagomilaju, proces će se ponoviti, i tako lider skokovito (stepenasto, kaskadno) napreduje. Bitno je istaći da ovakav mehanizam omogućava da se lider prostire kroz oblasti sa mnogo slabijim el. poljima od onih koja su potrebna za iniciranje pražnjenja.

4.4. Povratni udar

Kada vrh negativno naelektrisanog stepenastog lidera dospe do zemlje, naelektrisanje iz lidera se brzo transportuje u tlo putanjom stvorenom liderom. Ovo je povratni ili glavni udar. Mada se čini da se kreće ka oblaku, kao da je pozitivno naelektrisan, on je u stvari naelektrisan negativno i kreće se ka zemlji. To je zato što je pokretljivost pozitivnih jona ekstremno mala u poređenju sa pokretljivošću elektrona. Ako se negativno nalektrisani lider približi zemlji, između njegovog vrha i zemlje će porasti električno polje. Zbog toga je moguće da će pražnjenje biti inicirano sa istaknutih predmeta ili vrhova na zemlji i kretati se na gore, gde će sresti lider u nekoj tački iznad zemlje i tako će inicirati povratni udar. Brzina povratnog udara je za 2-3 reda veličine veća od brzine stepenastog lidera i iznosi $2\cdot10^7$ – $1.5\cdot10^8$ m/s. Prečnik kanala ovog udara je 10-25 m. Neke karakteristike povratnog udara date su u tabeli 3.

Tabela 3. Karakteristike povratnog i strelastog udara

	minimum	tipična vrednost	maksimum
Povratni udar			
brzina širenja (m/s)	$2 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$1{,}4 \cdot 10^8$
vršna struja (kA)		10 – 20	
preneto naelektisanje (C)	0,2	2,5	20
dužina putanje pražnjenja (km)	2	5	14
Dart lider			
brzina širenja (m/s)	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$2{,}1 \cdot 10^6$
preneto naelektrisanje (C)	0,2	1	6

Spektralnim analizama povratnih udara dobijeno je da je temperatura jezgra približno 30000 K. Ovo je veoma impresivno ako se uzme u obzir da je temperatura površine Sunca 6000 K. Kao posledica pregrejanog vazduha u kanalu dolazi do emitovanja svetlosti. Prvo se javlja svetlost izazvana liderom, a zatim sledi intenzivnija svetlost kraćeg trajanja glavnog udara. Ponavljanje ovog procesa, s obzirom na veoma kratke vremenske razmake, neuhvatljivo je za ljudsko oko zbog čega ga ono prima kao jednu pojavu, tj. kao jednu munju.

4.5. Strelasti (dart) lider

Ako negativno naelektrisanje nije u potpunosti ispražnjeno povratnim udarom i deo tog naelektrisanja je ostao u oblaku iznad kanala pražnjenja, pojaviće se strelasti lider i prostiraće se prethodno jonizovanim kanalom od oblaka ka zemlji. Kako putanja već postoji, nije potreban pilot strimer i neće biti stepenika ni grananja tako da je brzina kretanja ovog lidera za red veličine veća od brzine stepenastog lidera, ali manja je od brzine povratnog udara koji joj je prehodio. Neke karakteristike strelastog lidera su date u tabeli 3.

4.6. Prateći efekti

Zbog naglog povećanja temperature vazduha u kanalu munje, vazduh nema vremena da se širi. Zato pritisak u kanalu poraste gotovo trenutno na 10000 mb pa čak i na 100000 mb. Ovaj kanal visokog pritiska se naglo širi izazivajući snažni udarni talas

koji u početku putuje brzinom većom od brzine zvuka. Ovaj zvučni efekat munje se zove *grom*. Zvučni efekat udaljenih pražnjenja, naročito ako se jave između oblaka, obično je dužeg trajanja i naziva se *grmljavina*. Veoma udaljene munje daju produženu grmljavinu-*grmljenje*.

Jedan od efekata atmosferskih pražnjenja se koristi za njihovu registraciju na određenom području. Amosferska pražnjenja su praćena emisiijom elektromagnetnih talasa, nazvanih **atmosferici** ili **sferici**. To su u stvari elektromagnetni impulsi koji, u većoj ili manjoj meri, ometaju radio prenos. U radio prijemnicima izazivaju karakteristično pucketanje, a mogu u potpunosti da onemoguće radio prijem zbog čega se nazivaju još i **atmosferskim smetnjama**. Domet i intenzitet atmosferika zavisi od intenziteta uzroka njihove pojave. Najmoćniji atmosferici mogu se širiti 6000-7000 km u svim pravcima. Određivanjem njihovog inenziteta i oblasti javljanja pomoću odgovarajućih prijemnika može se odrediti tačan položaj grmljavinskih oblaka, kao i njihov pravac i brzina kretanja. Takođe je moguće pomoću specijalnih brojača odrediti broj pražnjenja u određenoj oblasti.

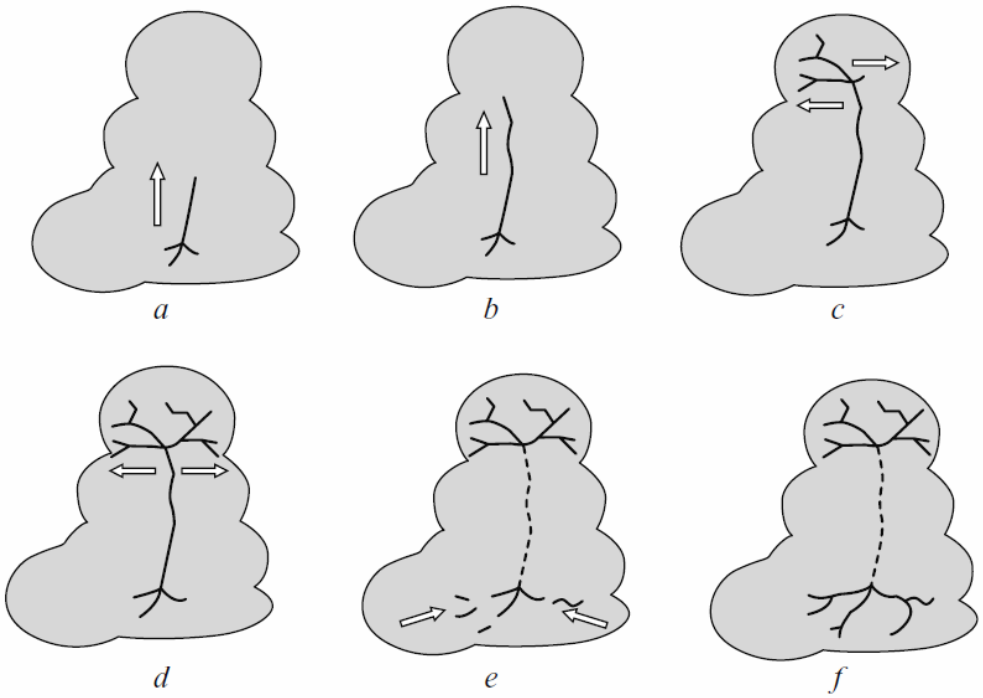
Još jedna pojava se može posmatrati u vezi sa intenzivnim električnim pražnjenjem. Naime, različita merenja i osmatranja, ukazuju na početak pljuska kiše, neposredno nakon javljanja pražnjenja. Pokazano je da u oko 75% slučajeva padavine iz grmljavinskih oblaka počinju u intervalu od 5 min nakon prvog obližnjeg električnog pražnjenja. Ona služe kao okidač za slivajući mehanizam obrazovanja padavina.

4.7. Oblačna pražnjenja

Oblačno pražnjenje definišemo kao munju koja ne dolazi do Zemlje. Većina pražnjenja dešava se unutar granica oblaka. Oblačna pražnjenja mogu biti podeljena na pražnjenja unutar oblaka, međuoblačna pražnjenja i pražnjenja oblak-vazduh (vazdušno pražnjenje). Nema eksperimentalnih podataka o postojanju razlike u karakteristikama između ova tri tipa pražnjenja. Na osnovu evidencija električnih polja, može se zaključiti da postoji značajna sličnost između ovih tipova pražnjenja. Izraz oblačno pražnjenje je donekle dvosmislen jer bi neki mogli smatrati da se on odnosi na one delove bljesaka ka Zemlji koji se odvijaju u oblaku.

Pražnjenja u okviru jednog oblaka (unutraoblačno pražnjenje) obično se javljaju između pozitivno i negativno naelektrisanih delova oblaka i njihovo ukupno vreme trajanja je oko pola sekunde (slika 11). Pražnjenje između dva grmljavinska oblaka (međuoblačno pražnjenje) ima oblik vijugave linije čija dužina može da premaši 20 km. Ono se javlja između suprotno naelektrisanih delova između dva oblaka. Vazdušno pražnjenje počinje u oblaku, ali ne doseže do tla. Putanja mu je vijugava ,uglavnom sa

dugačkim horizontalnim delovima, i dosta je razgranata. Pretpostavlja se da je ovakvo pražnjenje u vezi sa koncentracijom prostornog naelektrisanja u vazduhu.



Slika 11. Mehanizam oblačne munje. Oblačna munja kreće iz centra negativnog naelektrisanja ka pozitivnom, i manje ili više ima vertikalni pravac. To je početno stanje (a i b). Ovo stanje je praćeno aktivnim stanjem u kome se munja horizontalno širi i kreće na više, a u isto vreme se naelektrisanje transportuje od nižeih ka višim nivoima duž vertikalnog kanala (c i d). U sledećem delu ove aktivne faze, odvija se sužavanje kanala u donjem delu (e). U završnom stadijumu, provodljivost vertikalnog kanala se smanjuje i viši nivo kanala biva odsečen od nižeg nivoa kanala (f). Strelice pokazuju pravac napredovanja električnog pražnjenja.

4.8. Različiti mehanizmi okidanja

Na Zemlji, pražnjenja slična munji, koja nisu povezana sa grmljavinskim oblacima osmotrena su u oblacima pepela i dima koje izbacuju aktivni vulkani kao što se vidi sa slike 12. Ova pražnjenja su dugačka stotine metara. Kraća pražnjenja dužine oko 1 m osmotrena su u peščanim olujama u Novom Meksiku. Trenutni svetlosni fenomeni koji mogu biti posledica električnih pražnjenja odavno su posmatrani u toku zemljotresa i pripisivani električnim poljima generisanim deformacijama. Konačno, na osnovu

detonacija termonuklearnih bombi na površini Zemlje, negativno naelektrisanje je deponovano u atmosferi i to izaziva pražnjenja dugačka kilometrima (slika 13). Uzlazni lideri povezani sa ovim tzv. *nuklearnim munjama* su naizgled inicirani malim strukturama na Zemljinoj površini i veruje se da su slični ostalim oblicima uzlaznih inicirajućih lidera.

Slika 12. Munja izazvana erupcijom vulkana Sakurajima u Japanu

Slika 13. Munja izazvana eksplozijom a - bombe

5. NEUOBIČAJENA (RETKA) PRAŽNJENJA

Takozvane toplotne i pljosnate munje ne postoje kao posebni fizički entiteti. *Toplotna munja* je ime za munju ili osveljenje indukovano munjom u oblaku koje nije povezano sa grmljavinom zbog toga što je oblak izvan rastojanja na kome se grmljavina može čuti, najčešće oko 25 km i više. *Pljosnata munja* je takođe pražnjenje unutar jednog oblaka. Ona daje rasplinutu svetlost i njen kanal se ne može videti jer je zaklonjen oblakom. Uglavnom se javlja u intervalu između dva pražnjenja oblak – zemlja (slika 14).

Trakasta munja se javlja kada je putanja oblak-zemlja pomerena vetrom za vreme između udara tako da je svaki udar u flešu odvojen horizontalno. Jedan primer prikazan je na slici 15.

Raketna munja je ime za dugačka pražnjenja oblak-vazduh koja se najbolje vide noću, koja daju utisak relativno spore progresije u horizontalnom pravcu, verovatno zbog toga što su novi delovi putanje osveljeni u vremenskim intervalima reda 10 msec. Raketna munja je najčešće normalni deo oblačnog pražnjenja, (slika 16).

Slika 14. Pljosnata munja

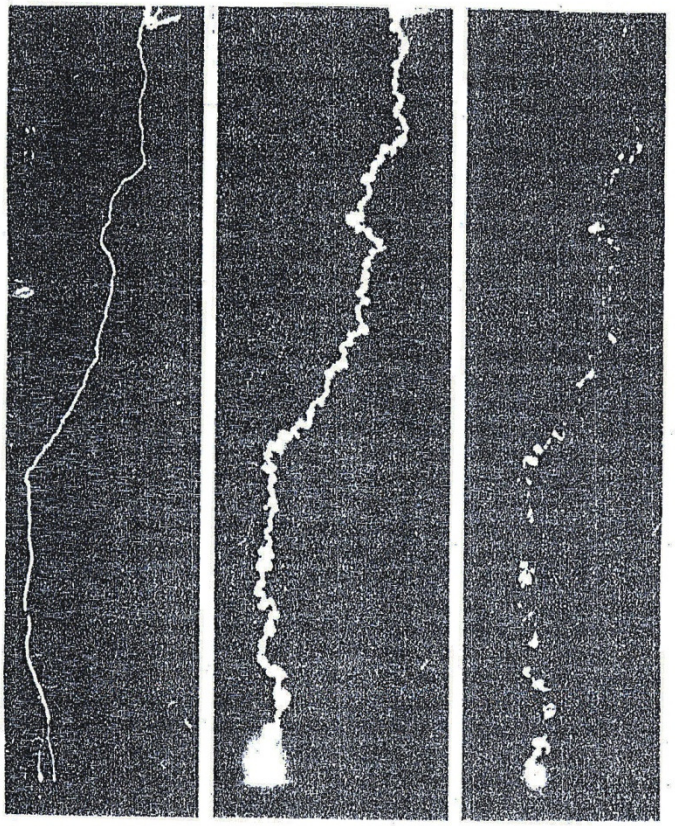
Slika 15. Trakasta munja

Slika 16. Raketna munja

Perlasta munja

Mnogo ređe od linijskih munja mogu se sresti tzv. *perlaste munje*. One, takođe, predstavljaju pražnjenje između oblaka i zemljine površine. Perlasta ili isprekidana munja izgleda kao svelteća tačkasta linija, slična nizu perli. Sastavljena je od 50-200 svetlećih lopti prečnika oko 20 cm koje su raspoređene na približno jednakim rastojanjima. Ona je prateća pojava munje koja se račva iznad Zemljine površine. U ovom slučaju, kanal se razbija na fragmente dužine od oko 50 m koji postaju približno loptasti i mogu trajati izvesno vreme. Ova munja se retko može osmotriti golim okom, ali je lako uočljiva na

fotografiji. Pretpostavlja se da predstavlja prelazni oblik od linijske ka loptastoj munji. Na slici 17 su prikazane tri etape u životu jedne munje. U prvoj fazi munja se cepa u blizini tla u dva kraka. Pola sekunde kasnije kanal počinje da se raspršuje, a na mestu udara pojavljuje se blještava lopta. Posle 0,06 s munja izgleda kao niska svelećih traka, dok lopta još zadržava svoj sjaj.



Slika 17. Perlasta munja

Loptasta munja

Loptasta munja je ime dato pokretnoj svetlećoj sferi koja se ponekad može osmotriti u toku grmljavinskih nepogoda. Naziva se još i *kuglasta munja* ili *vatrena lopta*. Prvi naučnik koji je pisao o ovom fenomenu bio je francuski fizičar Arago (Arago) 1837. god. Od tada su objavljeni mnogi pregledi, a jula 1988. god. održana je prva konferencija o loptastim munjama u Tokiju. Dugo se postavljalo pitanje da li uopšte i postoje. Postojanje ovog fenomena potvrđuju uglavnom svedočenja očevidaca. Zbog toga su mnogi negirali njeno postojanje i opisivali je kao optičku varku koja je posledica bljeska obične munje, ili su ih poistovećivali sa Elmovom vatrom.

Tvrđenje da je u pitanju optička iluzija lako se može opovrgnuti, a pogotovo u slučajevima kada je više svedoka prisustvovalo pojavi. Pored ovoga, optičkom varkom se ne mogu objasniti neke pojave koje prate loptastu munju kao što su zvuk, miris i eventualne materijalne štete. Takođe, lako se može obezvrediti i tvrđenje da je loptasta munja, u stvari, Elmova vatra. Naime, i vatra sv. Elma može imati sferni oblik, ali za razliku od loptaste munje, ona ostaje vezana za provodnik i može da se kreće duž njega. Pored ovoga, Elmova vatra može trajati mnogo duže od loptaste munje.

Danas, istraživači iz oblasti atmosferskog elektriciteta ne sumnjaju u postojanje ove vrste munje. Neki od njih posvetili su veliku pažnju njenom proučavanju. Vršeni su mnogobrojni eksperimenti i urađeni neki analitički modeli u cilju da se objasne uzroci i načini njenog formiranja. Proučavanje ovog fenomena se u početku zasnivalo samo na svedočenjima očevidaca. Postoji dosta svedočenja još iz davnih vremena, pa se zato može reći da je loptasta munja relativno retka pojava. Fotografija za koje se veruje da prikazuju ovaj fenomen ima veoma malo.

Osnovne karakteristike

Pokušaj da se opiše prava priroda loptastih munja korišćenjem izjava očevidaca pokazao se nimalo lakim. Naime, velike su razlike u podacima koji su davali svedoci. Tako, na primer, prema kazivanjima, prečnik lopte varira od 1 cm do 1 m, boja od bele do crvene, trajanje od delića sekunde do jednog časa, itd.

Na osnovu ovih mnogobrojnih svedočenja mogu se dati osnovne karakteristike loptastih munja. Najveći broj loptastih munja je osmotren za vreme trajanja letnjih grmljavinskih nepogoda. Većina njih javlja se gotovo istovremeno sa pražnjenjima u obliku munje između oblaka i zemljine površine. Čestina javljanja loptaste munje je oko milion puta manja od čestine javljanja obične linijske munje. Najčešće su sfernog oblika, u 80-90% slučajeva. Takođe je primećen i prstenast oblik, ili plavičasti oreol, ili svetao kolut koji se produžava iz centralne mase. Nekada lopte emituju i blještave zrake. U proseku su veličine 10-20 cm, mada se opseg dijametara kreće od 1 cm-1 m, i više. Mogu biti različitih boja, najčešće su crvene, narandžaste ili žute, a viđene su i bele. Obično nisu blještave i zaslepljujuće. Uglavnom daju konstantnu svetlost i ne menjaju veličinu tokom svog trajanja. Trajanje ovih munja je obično manje od 5 s. Neznatan broj zapisa ukazuje na to da ono može biti dužine preko jednog minuta. Postoje čak svedočenja o ogromnim loptastim munjama koje su trajale više od sat vremena. Takve "super" loptaste munje susretane su u oblastima vulkanskih erupcija. Postoji priča o tome kako je jedna ovakva, veličine 6 metara, trajala dva sata i uznemiravala obližnje stanovništvo.

Loptaste munje se obično kreću horizontalno, brzinom od nekoliko metara u sekundi, u proseku oko 4 m/s. Takođe, mogu lebdeti u vazduhu nepomične, ili se mogu spuštati iz oblaka ka zemlji. Retko se kreću u vis, kao što bi trebalo da bude slučaj ako bi one bile sfere pregrejanog gasa na atmosferskom pritisku u prisustvu samo gravitacione sile. U mnogim izveštajima opisane su loptaste munje koje rotiraju, kao i one koje pale ambare i tope žice. Uglavnom poseduju naročiti miris koji je oštar, neprijatan, sličan mirisu gorećeg sumpora ili azotnog oksida. Njenu pojavu ponekad može pratiti šišteći ili prašteći zvuci. Vrlo često se dešavalo da su ove munje bile privučene objektima kao što su žičane ograde i telefonske linije. Neke, možda čak sve, ovakve pojave se, zaista, mogu poistovetiti sa Elmovom vatrom. Mogu se pojaviti u metalnom zatvorenom prostoru, kao što je unutrašnjost aviona ili podmornice. Zapaženo je, čak, da su se formirale sa unutrašnje strane zatvorenog prozora.

Loptaste munje mogu iščeznuti na dva načina: tiho ili uz eksploziju i snažnu buku. Tiho iščezavanje se može odvijati ili brzo ili sporo. Može se dogoditi čak i da se jedna loptasta munja raspadne na dve ili više. Postoje neka svedočenja o njihovoj destruktivnoj prirodi. Njihovo dejstvo na ljude slično je dejstvu obične munje.

Na osnovu mnogobrojnih svedočenja mogu se evidentirati tri klase ovoga fenomena koje mogu dati osnovu za različito tumačenje njegovog uzroka i prirode. U prvu grupu se svrstavaju loptaste munje koje ostaju u kontaktu sa tlom ili nekim predmetom, a javljaju se za vreme grmljavinskih nepogoda. Prečnik im je obično između 10 i 30 cm, a trajanje im je od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. U drugu kategoriju se svrstavaju one pojave koje se mogu videti neposredno pre udara linijske munje. Ova pojava se, po pravilu, događa na otvorenom prostoru. U stvari, u ovakva svedočenja se sumnja jer se pretpostavlja da je, ipak, postojalo pražnjenje u blizini koje nije zapaženo. U treću grupu spadaju svetleće kugle koje slobodno lete nekoliko sekundi, ne dodirujući pri tome ni jedan predmet. Za istraživače u ovoj oblasti ovo je prava loptasta munja. Ova pojava se razlikuje od onih iz prethodne dve grupe koje ostaju u kontaktu sa žicom, tlom, zidom i sl. Pojava je retka. Ustvari, retka su odgovarajuća svedočenja. Ovakva loptasta munja je često u vezi sa usamljenom kućom starijeg tipa ili avionom. Građevine novijeg datuma kao da nikada ne privlače ove munje.

Ukupnu energiju loptaste munje je nemoguće tačno odrediti, ali se može odrediti njen red veličine. Za ovo je poslužio primer kada je jedna upala u sud sa vodom i okončala u njemu, dovodeći vodu do ključanja i njenog potpunog isparenja. Znajući količinu vode koja je isparila izračunata je je vrednost od 1 MJ. Procene zasnovane na drugim događajima kreću se od 1-2 MJ. Potrebno je naglasiti da loptastu munju ne treba poistovećivati sa nekim sekundarnim pražnjenjima koja se mogu pojaviti. Npr. u toku jedne nepogode munja je udarila u krov jedne stare zgrade i svedoci su tvrdili da su videli

vatrenu loptu koja je iskočila iz slavine. Ovde, u stvari, nije bila u pitanju loptasta munja već sekundarno pražnjenje u obliku obične munje koja je udarila u rezervoar za vodu postavljen na krovu, i preko cevi stiglo do slavine.

Mehanizmi nastajanja

Dati su brojni kvalitativni i analitički modeli kojima je pokušano da se objasni mehanizam ovog fenomena. Postoje dve osnovne grupe u koje se mogu svrstati svi ovi modeli:

- modeli sa unutrašnjim izvorom energije
- modeli sa spoljašnjim izvorom energije

U grupu modela sa unutrašnjim izvorom energije spadaju razne pretpostavke da je loptasta munja vazduh, ili neki određeni gas koji se ponaša "neuobičajeno". Tu se pretpostavlja da je u pitanju sporo gorući gas, ili da je ova munja prouzrokovana hemijskim reakcijama zbog prisustva čestica prašine, čađi i dr. u vazduhu, zatim da je zračenje posledica dugotrajnog meta stabilnog stanja elemenata vazduha itd. Jedan od njih je tzv. kristalni model po kome je loptasta munja veoma gusta plazma koja pokazuje kvantno-mehanička svojstva karakteristična za čvrsto stanje tačke. Hil (Hill) je 1960. godine predložio kvalitativni model sa razdvajanjem naelektrisanja u kome je rekombinacija usporena. Učinjeni su i pokušaju da se razne osobine ove vrste munje objasne nekim hemijskim reakcijama, kao što su raspadanje ozona ili sjedinjavanje atoma azota i kiseonika, koja mogu nastati zbog pražnjenja u obliku linijske munje.

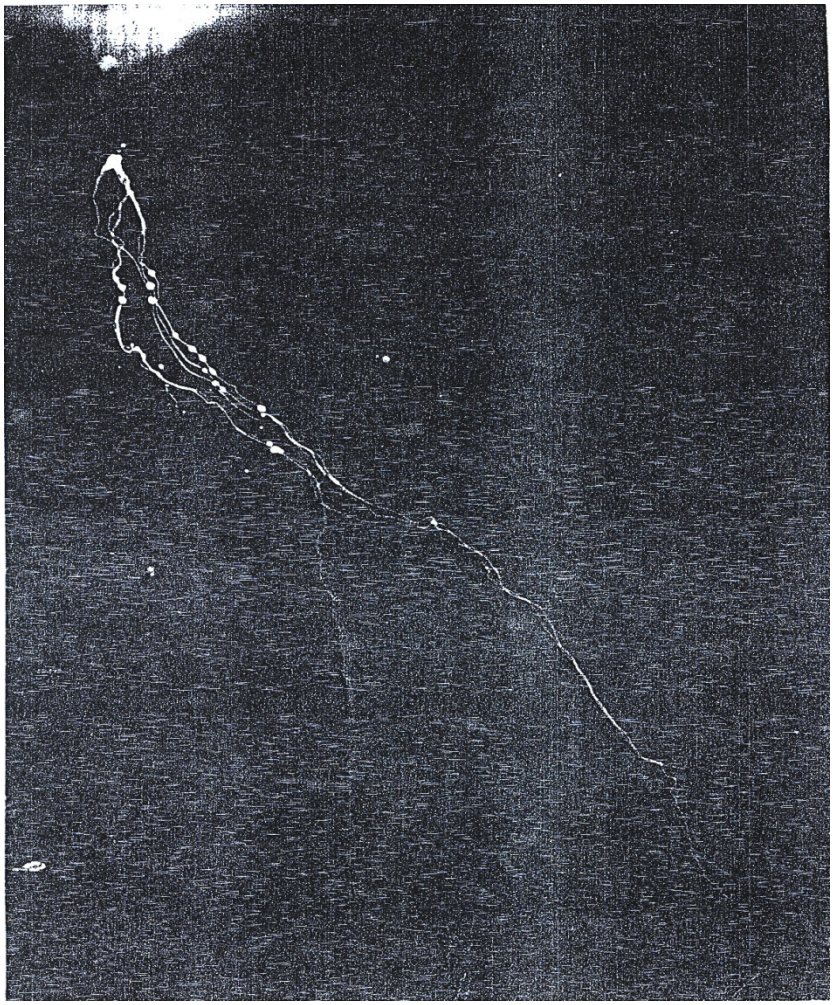
U modele sa spoljašnjim izvorom energije spada Kapičin (Kapica) model stojećih talasa. On je pretpostavio da mora postojati jak izvor radio-frekventnog (RF) zračenja (frekvencije veće od 100 MHz) izvan lopte koji bi mogao da zadovolji njene energetske potrebe. Po njemu, loptasta munja je sferni plazmoid koji nastaje u polju formiranom odbijanjem i susretanjem elektro-magnetnih mikro talasa koji se stvaraju u toku grmljavinskih nepogoda i obrazovanja stojećih talasa. Ovi talasi mogu da prolaze kroz staklo ne odbijajući se od njega. Prema drugom modelu, lopta je sačinjena od jonizovanog gasa, nastalog energijom koja iz oblaka stiže kanalom lidera. Lopta je samo tačka usred sređivanja struje iz pražnjenja, uz blještavost, što je rezultat energije pristigle preko veze nedovoljno svetle da bi se mogla videti.

Prvi koji je loptastu munju proizveo u laboratoriji bio je Nikola Tesla. Godine 1899. u svojoj labolatoriji vršio je eksperimente sa oscilatorom ogromne snage. Kada je uređaj bio uključen dolazilo je do pražnjenja i iz njega je izlazio veliki broj varnica. One

su bile različitih dužina, boja, neke su se granale ili račvale. Na nekim vrlo dugim i snažnim mogle su se videti svetleće tačke, tj. vatrene lopte, kako ih je Tesla nazivao. Ove lopte su veoma kratko trajale i bile su jako blještave. Svoje otkriće, kao i pokušaj da teorijski objasni ovu pojavu, Tesla nikad nije objavio, ali ih je zabeležio u svoj dnevnik koji je sačuvan. Kako sam tu priznaje, nije verovao u postojanje loptastih munja sve dok ih slučajno nije proizveo. Do tada je smatrao da je u pitanju optička iluzija.

Sovjetski naučnik Smirnov (Smirnov) uvideo je nedostatak svih modela koji ne sadrže hemijsku energiju. Sa razvojem koncepta fraktala i fizike difuzno-ograničene agregacije krajem 70ih i sredinom 80ih godina, bio je u mogućnosti da razvije analitički model sa unutrašnjim izvorom energije. Energija oslobođena u toku hemijskih reakcija, pored toga što se troši na pobuđivanje atoma, može povisiti temperaturu cele lopte, ali samo za oko 60 K. Ovim se može objasniti činjenica da ni jedno svedočenje o loptastoj munji ne sadrži podatak o osetnoj toploti. Smirnov, na kraju pretpostavlja da ako postoji oblak prašine koji pada u polju gravitacije, prolazeći kroz vazduh on se trenjem može naelektrisati. Ovim bi se moglo objasniti pojavljivanje loptaste munje u odsustvu grmljavinske nepogode.

Premda postoji veliki broj članaka, publikacija i seminarskih radova o loptastim munjama, mali je broj laboratorijskih eksperimenata u kojima su one stvorene. Još je manji broj onih u kojima su proizvedene pod uslovima koji se mogu sresti u prirodi. Američki naučnici Korum i Korum (K. L. Corum and J. F. Corum) su 1988. godine u svojoj laboratoriji proizveli loptaste munje koje su se mogle održati nakon isključenja spoljašnjeg izvora energije, i koje su pokazivale osobine onih osmotrenih u prirodi, npr. prolaženje kroz prozorsko staklo, pojavljivanje u avionima, kretanje duž ograda itd. Slika 18 prikazuje strujnice sa loptastim munjama dobijenim u ovom eksperimentu.

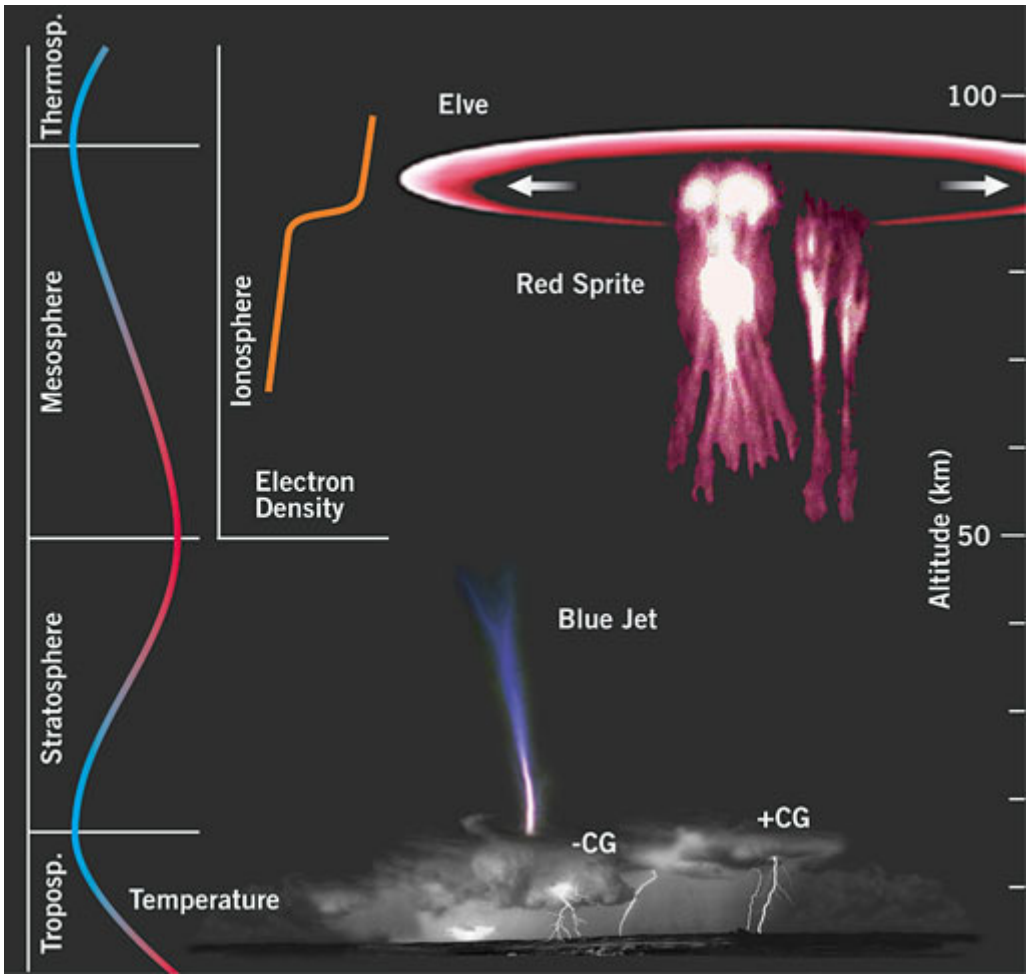


Slika 18. Fotografija loptastih munja dobijenih u laboratorijskom eksperimentu Koruma i Koruma

Loptaste munje koje su dobili na ovaj način bile su prečnika 1-3 cm i trajale su 1-2 sekunde. Uspeli su da pokažu da se, kada strimer dobijen pomoću dva rezonatora pogodi staklo uokvireno drvenim ramom, sa druge strane stakla može formirati više svetlećih lopti. Loptaste munje iz ovih eksperimenata bile su različitih boja: bele, crvene, zelene, žute, plavičaste i purpurne. Njih dvojica smatraju da loptaste munje koje su dobili u svojoj laboratoriji, kao i one koje je pre njih dobio Tesla, najbolje može objasniti analitički model Smirnova, koji je u stanju da zadovolji svaku zapaženu osobinu ovih munja. Oni veruju da su dobili loptaste munje jednake onima koje se pojavljuju u prirodi i zaključuju da je ovaj fenomen RF porekla.

Pražnjenja u gornjoj atmosferi

Pored do sada pomenutih pražnjenja u donjim slojevima atmosfere, mogu se osmotriti pražnjenja i u stratosferi i mezosferi kao što su sprites (duhovi), elves (vilenjaci), blue jets (plave struje), slika 19.



Slika 19. Prolazna svetlosna emisija u sratosferi i mezosferi

Sprites su svetlosna pražnjenja koja traju od nekoliko do nekoliko stotina milisekundi. Mogu se prostirati i do 90 km u visini i oko 40 km u horizontalnom pravcu. Obično su crvene boje sa plavim primesama svetlosti u nižim regionima, pa se zbog toga ponekad mogu videti i golim okom. Veruje se da su nastali pulsiranjem električnog polja kada veća količina pozitivnog naelektrisanja bude preneta iz olujnog oblaka ka zemlji linijskom munjom. Suprotno kanalima običnih munja, koji su potpuno jonizovani, sprites kanali su slabo jonizovani.

Elves su svetli prstenovi koji traju nekoliko mikrosekundi i mogu se prostirati i do 90 km u visini. Šire se horizontalno brzinom svetlosti i prouzrokovani su atmosferskim zagrevanjem proizvedenim elektromagnetnim pulsevima proizvdenih linijskom munjom. Nisu vidljivi golim okom.

Blue jets su delimično jonizovane svelte kupe koje se prostiru naviše od vrhova oluja i do 40 km krećući se pri tome brzinom od oko 100 km/s. Stvaraju visoko – jonizovanu električnu vezu između grmljavinske oluje i jonosfere. Ova retka pražnjenja nisu direktno povezana sa pražnjenjima oblak – zemlja. Traju od 100 – 200 ms i teško ih je videti golim okom pa čak i noću.

Ovi različiti fenomeni električnog pražnjenja igraju ulogu u globalnom kruženju elektriciteta, a možda i u hemijskom sastavu stratosfere i mezosfere na način koji tek treba da bude razjašnjen.

6. ZAKLJUČAK

Munja je verovatno bila prisutna u vremenskom periodu evolucije života na Zemlji i činjenica je da su munje bile izvor stvaranja neophodnih molekula iz kojih život može evoluirati.

Munja je izvor izazivanja šumskih požara i otuda ona igra značajnu ulogu u određivanju vrsta drveća i biljaka u mnoštvu svetskih šuma. Napori da se spreče i očuvaju šume od požara može dovesti do toga da žbunje raste još gušće što dovodi do još većih požara. Pored toga što je munja proizvođač vatre, ona je " ubica" po tome što može direktnim udarom uništi drvo ili grupu stabala. Munja proizvodi hemikalije u, i oko svog kanala pražnjenja, koji inače ne bi postojali u atmosferi, bar ne u tom izobilju, uključujući i azot koji biljke koriste u procesima proizvodnje hrane.

Grmljavinske oluje i munje igraju ulogu u održanju električnog polja lepog vremena (oko 100 V/m usmerenog nadole), usled negativnog naelektrisanja na zemlji i pozitivnog naelektrisanja u atmosferi. Napon između zemlje i elektrosfere u oblastima vedrog vremena je oko 300 kV. Da održi ovaj napon zemlja ima oko 10^6 C negativog naelektrisanja na svojoj površini i isto toliko pozitivnog naelektrisanja distribuiranog kroz atmosferu. U oblastima vedrog vremena, amosferske sruje od 1000 A kontinualno smanjuju ovo naelektrisanje. Iz ovoga možemo zaključiti da grmljavinski sistem deluje kao neka vrsta baterije koja održava sisem naelektrisanja lepog vremena.

Pored do sada pomenutih efekata, munje dovode do smrti i povreda ljudi i životinja, oštećenja građevina, aviona, telekomunikacionih i dalekovodnih sistema, kao i kvarova osetljivih elekronskih komponenti i uređaja.

Na kraju, prikladno je prokomentarisati postojanje nepraktičnosti korišćenja munja kao izvora energije. Svako pražnjenje oblak – zemlja obuhvata energiju od 10^9 do 10^{10} J. Ako širom sveta do zemlje stigne 100 munja u sekundi i ako sva ova energija bude apsorbovana, maksimalna raspoloživa snaga koja može da se iskoristi bi bila reda 10^{12} W. Međutim, poostoje za sada dva nerešiva problema povezana sa iskorišćavanjem snage munje: 1) najveći deo eneergije se pretvara u grmljavinu, vruć vazduh i radio talase, koji ne mogu biti obnovljeni, ostavljajući samo mali deo dostupan i to za trenutnu upotrebu. 2) Nepraktično je uhvatiti neku značajnu količinu energije munje, sa visokih tornjeva i sličnih struktura. Na primer, ukupna energija pojedinačne munje, koja je prikupljena, bila bi dovoljna da jedna sijalica radi nekoliko meseci. Toranj u Floridi, visine 300 m, u proseku je bio pogođen munjom oko 100 puta godišnje. Iz toga sledi, da bi bilo potrebno više desetina ovakvih tornjeva da napaja električnom strujom samo jedno, prosečno domaćinstvo. Ovakav sistem prikupljanja električne energije, pored svih negativnih efekata, bio bi i estetski neprihvatljiv.

Literatura

1. Berger, K., 1978:
2. Ćurić, M. (2001) Modifikacija vremena, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, 11000 Beograd, Kneza Višeslava 66.
3. Jayaratne, R., Thunderstorm electrification mechanisms and Cooray, V., The mechanism of the lightning flash (2008), In: The lightening flash, Edited by: Cooray, V., Published by The Institution of Engineering and Technology, London, UK.
4. Magono., C. (1980) Thunderstorms, Elsevier Scientific Publishing Company, 335 Jan van Galenstraat, Amsterdam, The Netherlands.
5. Mesinger, F. i Janjić, I. Z. (1985) Meteorologija deo II, Institut za meteorologiju, Fizički fakultet, Beograd.
6. Platiša, M. (1997) Elektromagnetizam i elementi atomske fizike, Univerzitet u Beogradu, Beograd, broj strana.
7. Radivojević, J. D. (1984) Karakteristike električnih pražnjenja u olujnim oblacima, Diplomski rad, Fizički fakultet, Institut za meteorologiju, Beograd.
8. Uman., A. M. (1987) The lightning Discharge, Academic Press, Inc., Orlando, Florida 32887.
9. Wallace, M. J. and Hobbs, V. P. (2006) Atmospheric Science: an introductory survey, 2nd ed., Academic Press, Elsevier, 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA.