

# Fizika munja i grmljavine

---

**Gotal, Nataša**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2014**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:296132>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-18**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Nataša Gotal

FIZIKA MUNJA I GRMLJAVINE

Diplomski rad

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: PROFESOR FIZIKE

**Nataša Gotal**

Diplomski rad

**Fizika munja i grmljavine**

Voditelj diplomskog rada: Doc. dr. sc. Damir Pajić

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

4. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2014.

## *Zahvale*

*Najljepše zahvaljujem doc. dr. sc. Damiru Pajiću na vođenju diplomskog rada, pruženom znanju, razumijevanju i brojnim korisnim savjetima.*

*Dr. sc. Maji Planinić veliko hvala na brojnim korisnim savjetima, pruženom znanju i vremenu tijekom pisanja metodičkog dijela diplomskog rada i tijekom studija.*

*Također zahvaljujem svojoj obitelji na pruženoj podršci, razumijevanju, strpljenju i ljubavi.*

## Sažetak

Strujni krug Zemlje je električni sistem građen kao sferni kondenzator sa dvije sferne koncentrične plohe, jedna je Zemljina površina, a druga je elektrosfera. Između njih nalazi se atmosfera kao dielektrik. U razdoblju lijepog vremena atmosfera je slabo vodljiva zbog djelomičnog ioniziranja atoma i molekula djelovanjem ultraljubičastog zračenja Sunca, kozmičkog zračenja i Zemljine radioaktivnosti. Između sfernih ploha postoji struja lijepog vremena od oko 1kA, ili  $2\text{pAm}^{-2}$ . Njome bi se sav naboj na Zemlji i u atmosferi mogao, ovisno o stupnju zagađenja zraka, neutralizirati u vremenskom intervalu od približno 10 minuta. Pretpostavlja se da oluje osiguravaju nadomještanje negativnog naboja na površini Zemlje stvarajući oborinske struje, struje korone i pražnjenja munjama. Postoji i ukupna struja od vrha oblaka prema elektrosferi veličine oko 0.5A po oluji. Stvaranjem jakog električnog polja, kod razvoja oluje, dio zraka postaje potpuno ionizirana plazma s temperaturom oko 30 000 K pa nastaje kanal električnog izboja koji zovemo munja. Zbog visoke temperature unutar kanala dolazi do povećanja tlaka, pa se zagrijani plin širi i izaziva stvaranje udarnog vala u zraku oko kanala. Okolni zrak stvara otpor valu i naglo ga prigušuje. Konačni efekt širenja i zgušnjavanja zraka je nastajanje valova zvuka koje zovemo grmljavina. Visoka temperatura unutar kanala električnog pražnjenja omogućuje fotokemijske reakcije pa je uočeno stvaranje reaktivnih dušikovih spojeva  $\text{NO}_x$  koji utječu na klimatske promjene. Iako danas postoje različite mjerne tehnike i uređaji kojima se došlo do novih saznanja o munjama, teorijska predviđanja procesa koji omogućuju i iniciraju munje nisu potpuno potvrđena rezultatima promatranja i izvršenim mjerenjima. Istraživanje atmosferskog pražnjenja otežava prostorna i vremenska neodređenost udara munje. Razumijevanje mehanizama iniciranja munje u atmosferi, pomoglo bi i razvijanju boljih načina zaštite od udara.

U metodičkom dijelu ovog rada prikazan je i jedan od načina kako se ova pojava može iskoristiti u nastavi.

# Physics of lightning and thunder

## Abstract

The global electrical circuit is electrical system built like spherical condenser with two concentric spherical surfaces, one is Earth's surface, the other is electrosphere. The dielectric atmosphere is between them. In fair-weather regions atmosphere has low conductivity cause of partially ionization of atoms and molecules with cosmic radiation, ultraviolet radiation from the Sun and Earth's natural radioactivity. There is a fair weather current about 1kA, or  $2\text{pAm}^{-2}$  between spherical surfaces. This current could neutralize, depending on atmospheric pollution, in about 10 min. all charge on Earth and in atmosphere. It assumes the thunderstorms insure replacement of negative charges on the Earth's surface through precipitation current, corona discharges and lightning. There is integrated upward current about 0.5 A/thunderstorm from the top part of the thundercloud to electrosphere. Developed thunderstorm generates strong electric field, therefore a part of air becomes fully ionized plasma with temperature about 30 000 K and result in electrical discharge channel that is called lightning. The pressure raises inside of channel cause of high temperature, so heated gas expands and generates shock waves into the surrounding air. Air resistance damps the wave rapidly. Finally effect from propagation and inspissation of air is production of sound waves that are called thunder. High temperature within electrical discharge channel enables photochemical reactions that produces reactive nitrogen oxides  $\text{NO}_x$  with influences on global climate change. Today are in use various experimental techniques and devices that have allowed great advances in our understanding of lightning. However theoretical presumptions of mechanisms that allow and initiate the lightning are not fully confirmed with measuring data yet. Atmospheric discharge research is difficult cause of spatial and time uncertainty of lightning discharge. If we better understand the mechanism of lightning initiation in the atmosphere, we'll be able to develop enhanced methods of lightning protection too.

In the methodical part this paper presents one method how to use this phenomenon in teaching of physics.

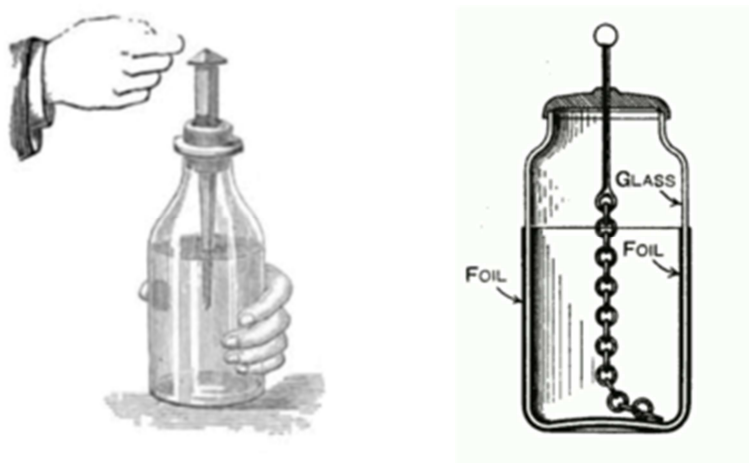
## Sadržaj:

1	Uvod.....	1
2	Atmosferski elektricitet.....	4
2.1	Strujni krug Zemlje.....	4
2.2	Struktura Zemljinog DC strujnog kruga.....	7
2.3	Schumannova rezonancija.....	10
3	Razvoj oluje.....	13
4	Mikrofizikalni procesi koji uzrokuju pojavu munje.....	17
5	Točkasta pražnjenja.....	20
6	Munje.....	22
6.1	Munje oblak-zemlja.....	23
6.2	Munje u oblacima.....	30
6.3	Kuglaste munje.....	34
6.4	Nove vrste munja.....	39
7	Atmosferska fizika visokih energija.....	44
8	Novija eksperimentalna istraživanja.....	51
9	Grmljavina.....	57
10	Utjecaj električnih pražnjenja na Zemlju.....	62
11	Zaštita od munja.....	66
12	Zaključak.....	71
13	Metodički dio.....	72
	Literatura.....	82

# 1. UVOD

Munje su atmosferske pojave nepredvidive po vremenu i mjestu nastanka, snažnog djelovanja, jer prenose veliku energiju u vrlo kratkom vremenskom intervalu, pa zato kod većine ljudi izazivaju strah, divljenje i znatiželju. Pretpostavlja se da su postojale već u ranom razvoju Zemlje i pomogle stvaranju organskih molekula potrebnih za razvoj života na planetu <sup>[1]</sup>. Arheološki nalazi starih civilizacija pokazuju da su ljudi tog vremena promatrali munje i tumačili ih kao volju bogova prema kojoj su se ravnali. Udari munja za ljude su često bili smrtonosni i izazivali su veliku materijalnu štetu o čemu postoje zapisani događaji već od razdoblja srednjeg vijeka. Potreba za zaštitom od udara munje potakla je istraživanja ove pojave. Poseban doprinos u ovom području dala su trojica istraživača : Benjamin Franklin, William Thompson ( Lord Kelvin) i Charles Thomson Rees Wilson.

Franklina su zanimali eksperimenti sa elektricitetom <sup>[1], [2]</sup>. Ustanovio je da postoje pozitivni i negativni električni naboji; da se električki neutralna tijela nalaze u električkoj ravnoteži s obzirom na broj njihovih pozitivnih i negativnih naboja; te da elektriziranjem električki neutralnog tijela dolazi do razdvajanja njegovih pozitivnih i negativnih naboja. Do ovih zaključaka došao je izvodeći eksperimente s lajdenskom bocom (eng. Leyden jar), prikazanom na slici 1, uređajem koji je bio prva verzija kondenzatora.



Slika 1: Lajdenska boca, uređaj za pohranjivanje naboja prenesenog iz vanjskog izvora preko metalne šipke spojene na unutarnju elektrodu. U ranijoj verziji uređaja unutarnja elektroda je bila voda, a vanjsku je predstavljala ruka eksperimentatora. U kasnijim verzijama uređaja unutarnja i vanjska elektroda bili su tanki slojevi metalne folije sa unutarnje i vanjske strane stakla. Unutarnja folija je bila povezana sa metalnom šipkom, a vanjska je bila uzemljena. Na folijama se skupljao naboj jednakog iznosa i suprotnog predznaka. <sup>[10]</sup>



Kada je uređaj bio elektriziran, Franklin je primijetio da se na vanjskoj strani boce skuplja pozitivni naboj, dok je unutar boce bio negativni naboj. Činjenica da je višak negativnog naboja unutar boce jednak manjku negativnog naboja izvan boce dovela ga je do zakona očuvanja naboja.

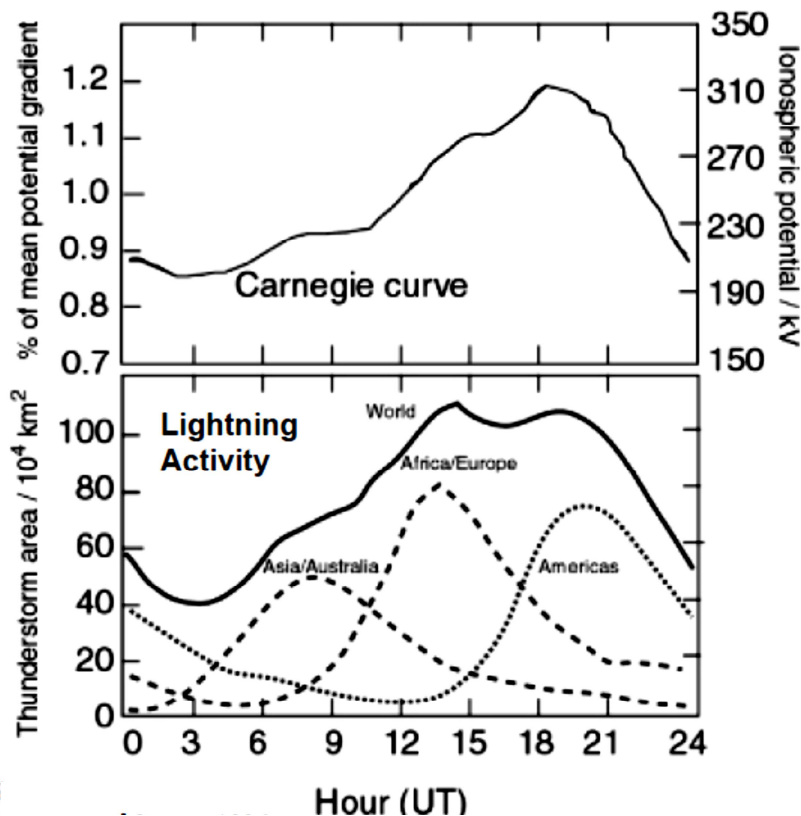
Promatranjem atmosferskih pojava,<sup>[2], [3]</sup> Franklin je prvi prikazao kretanje vlažnog zraka iz tropskog područja prema polarnom smatrajući da se tako prenosi elektricitet prema polovima i pohranjuje sve do pražnjenja u gornjoj atmosferi u obliku aurore. Ovo objašnjenje aurore pokazalo se kasnije pogrešnim, ali je cirkulacija zraka u atmosferi bila dobro prikazana. Predložio je sliku planetarnog kondenzatora s jednom pločom Zemljom, a drugu ploču činili bi nabijeni oblaci. Smatrao je da postoje sličnosti između elektriciteta kojeg proizvode ljudi i munja te se zalagao za provođenje eksperimenata kojima bi potvrdio tu pretpostavku. Svojim idejama utjecao je na Thomasa Francois Dalibarda koji je 1752. u Marly-la-Ville-u kod Pariza izveo eksperiment u kojem je, iz niskih oblaka nadolazeće oluje, dobio električne iskre koristeći dugački željezni štap uzemljen preko vinskih boca. To je bila prva potvrda postojanja elektriciteta u olujnim oblacima. Franklin je zatim izveo sličan pokus puštanjem zmaja na dugačkom užetu u olujni oblak. Na užu je zavezao ključ. Očekivao je pojavu munje, ali do nje nije došlo. Kada se užu namočilo od kiše, vidio je da su se na njemu slobodni končići uspravili i odmaknuli jedan od drugoga. Primakavši zglobov ruke ključu na užetu, osjetio je električni udar, dakle oblaci su sadržavali naboj. U ranije izvedenim eksperimentima s lajdenskom bocom ustanovio je da tijela sa šiljastim vrhom skupljaju i otpuštaju više naboja nego tijela s tupim krajem. Ideja, kako bi postavljanjem metalnog štapa sa šiljastim vrhom na najvišem dijelu zgrade (tako da mu je jedan kraj viši od zgrade, a drugi da je ukopan u zemlji), mogao odvesti naboj iz oblaka u zemlju ili prije udara munje ili za vrijeme udara, vodila je do pronalaska munjovoda (ili gromobrana). Prvi Franklinov gromobran postavljen je 1752. godine u Philadelphiji.

Lord Kelvin<sup>[3]</sup> je razvio matematički alat potreban za teorijsko razvijanje ideje Zemljinog strujnog kruga. Zalagao se za organiziranje mjerenja Zemljinog električnog polja, a i sam je vršio površinska mjerenja potencijalnog gradijenta. Predvidio je da će se mjerenja elektriciteta koristiti u budućnosti za prognozu vremena.

1920. godine C. T. R. Wilson<sup>[3]</sup> je izveo hipotezu o Zemljinom strujnom krugu u kojoj kaže: izvor napona ovog strujnog kruga su oluje koje usmjeravaju struje prema gore do vodljive ionosfere u kojoj se struje šire i u područjima lijepog vremena vraćaju na

Zemlju. Rezultati mjerenja promjena polja, povezani s munjama u oblacima, pokazali su mu da su gornji slojevi oblaka pozitivno nabijeni dok je u donjim slojevima negativni naboj. Za otkriće ćelije oblaka dobio je 1927. godine Nobelovu nagradu za fiziku. <sup>[33]</sup>

Potvrdu ideje Zemljinog strujnog kruga dali su rezultati istraživanja promjena električnog polja iznad oceana. U razdoblju od 1909. do 1929. godine na istraživačkom brodu Carnegie, provedena su mjerenja atmosferskog električnog polja u oceanskom zraku. U toku 4 plovidbe broda, svake u jednom godišnjem dobu, svakog sata bilježeni su podaci o električnom polju, a zatim su odabrana ukupno 82 dana lijepog vremena, tj. vremena sa minimalnim električkim poremećajima u atmosferi, iz kojih su se analizirale dnevne varijacije polja. Grafički prikaz dnevnih varijacija s obzirom na univerzalno vrijeme poznat je kao Carnegieva krivulja. Pretpostavlja se da je razlog varijacija u različitoj elektriziranosti atmosfere s obzirom na opći prostorni raspored oluja u univerzalnom vremenu. Slika 2 pokazuje sličnost Carnegieve krivulje i globalne varijacije olujnih područja promatrano u univerzalnom vremenu.

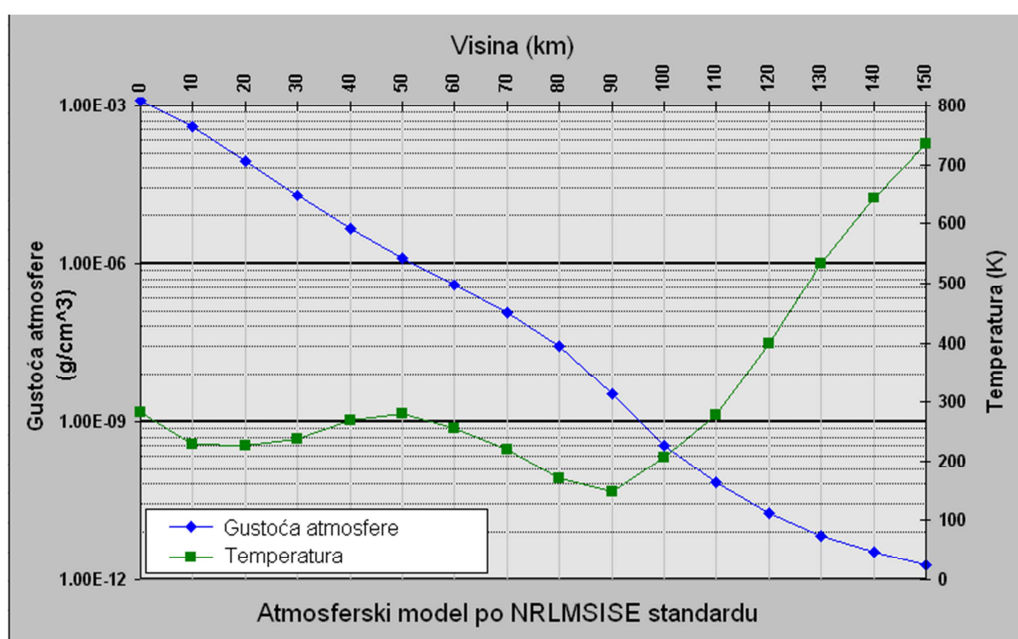


Slika 2: Usporedba Carnegieve krivulje (varijacija električnog polja iznad oceana u univerzalnom vremenu) s varijacijama područja oluja po kontinentima i u cijelom svijetu u univerzalnom vremenu <sup>[3]</sup>

## 2. ATMOSFERSKI ELEKTRICITET

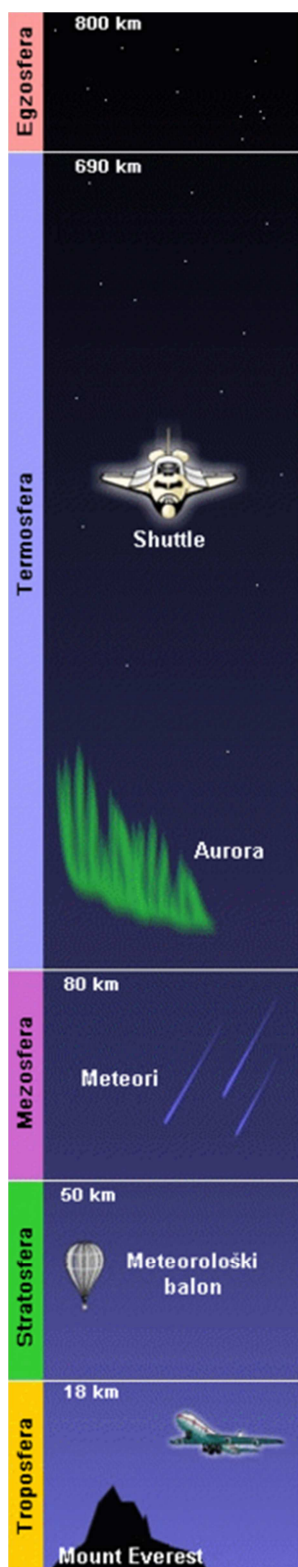
### 2.1. Strujni krug Zemlje

Oko tri četvrtine Zemljine površine čini voda. To je otopina iona pa je električki vodljiva. Svojom prisutnošću na i ispod površine kopna, voda doprinosi električkoj vodljivosti kopna<sup>[3]</sup>. Zbog djelovanja gravitacijske sile, Zemljinu površinu okružuje sloj plinova koji zovemo atmosfera. Čine je nekoliko slojeva različite gustoće, tlaka, temperature i električkih svojstava. Slika 3 prikazuje promjenu gustoće i temperature atmosfere s visinom, a slika 4 prikazuje atmosferske slojeve.



Slika 3: Promjena gustoće atmosfere i temperature s visinom<sup>[11]</sup>

Atmosferska gustoća i tlak su najveći u troposferi, a zatim se sa povećanjem visine smanjuju. U donjim slojevima atmosfere, koje čine troposfera i stratosfera, nalaze se najvećim dijelom električki neutralni atomi i molekule, ali i mala količina iona promjera 0.1 do 1 nm koja uzrokuje slabu vodljivost<sup>[2]</sup> (Pod ionima se ovdje podrazumijevaju ionizirani atomi ili molekule ili njihove nakupine koji se razlikuju po svom promjeru i pokretljivosti). Ovi ioni nastaju djelovanjem prirodne Zemljine radioaktivnosti i kozmičkih zraka. Na visinama većim od 60 km, u gornjim slojevima atmosfere, ionizaciju uzrokuju kozmičko, korpuskularno i ultraljubičasto zračenje pa nastaje mnoštvo iona i slobodnih elektrona. Slobodni elektroni, zbog veće pokretljivosti, najvećim dijelom doprinose vodljivosti i zato se ovo područje zove elektrosfera. Elektrosfera ima visoku električnu

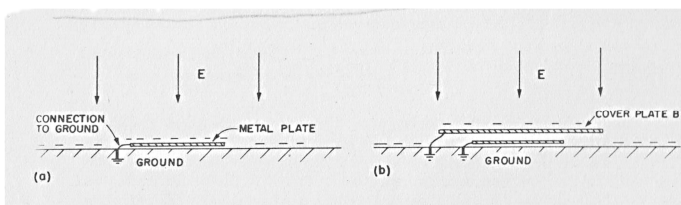


vodljivost i konstantan električni potencijal. Mjerenjima je utvrđeno da površina Zemlje predstavlja negativno nabijeni vodič, dok elektrosfera ima ukupan pozitivni naboj. Time ove dvije koncentrične sfere s nabojima istog iznosa a različitog predznaka čine sferni kondenzator. U slučaju lijepog vremena u atmosferi između ploča postoji blizu površine Zemlje, okomito električno polje oko  $E \approx 100 \text{ V/m}$  usmjereno prema Zemlji. Obično su ekvipotencijale paralelne sa zemljinom površinom. Ali ako na površini zemlje stoji čovjek, zemlja i čovjek će napraviti jednu ekvipotencijalnu površinu pa na tom mjestu ekvipotencijale neće više biti paralelne. Postavljanje mjernog uređaja u električno polje također uzrokuje utjecaj na polje pa ga je zato teško mjeriti. <sup>[6]</sup> Jedan od načina kako se izvodi mjerenje električnog polja je postavljanje izoliranog vodiča na neku udaljenost iznad zemlje tako da on bude na istom potencijalu kao zrak. Ako ga dovoljno dugo ostavimo na tom položaju, vrlo mala vodljivost zraka uzrokovat će curenje naboja iz (ili u) vodič sve dok ne dođe na isti potencijal kao zrak. Zatim vodič možemo spustiti natrag na zemlju i pritom mjeriti pomak njegovog potencijala. Drugi način je da nam vodič predstavlja kanta vode s malom rupicom. Pri istjecanju, voda iz kante odnosi i višak naboja sve dok kanta ne dođe na isti potencijal kao zrak, a tada ga možemo izmjeriti pomoću elektrometra.

Postoji i način direktnog mjerenja potencijalnog gradijenta. Kada imamo električno polje, imamo i površinski naboj na zemlji ( $\sigma = \epsilon_0 E$ , gdje je  $E$  veličina električnog polja, a  $\sigma$  je površinska gustoća naboja). Ako postavimo ravnu metalnu ploču na zemljinu površinu i uzemljimo je, negativan naboj će se raspodijeliti po

Slika 4: Atmosferski slojevi <sup>[11]</sup>

njenoj površini. Ako zatim ploču (nazovimo je A) prekrijemo drugom uzemljenom vodljivom pločom B, naboji će se raspodijeliti po gornjoj površini ploče B pa na ploči A neće više biti naboja. (prikazano na slici 5) Ako npr. galvanometrom na žici uzemljenja izmjerimo količinu naboja koja je istekla s ploče A kad smo je prekrili, možemo odrediti površinsku gustoću naboja koji je bio prije na njoj. Kada znamo površinsku gustoću naboja, možemo odrediti veličinu polja.



Slika 5: Mjerenje potencijalnog gradijenta: a) uzemljena metalna ploča A ima isti površinski naboj kao i zemlja; b) ploča A prekrivena drugom uzemljenom pločom B nema više površinski naboj.

Dogovorom je utvrđeno da je električno polje na Zemlji pozitivno ako je vektor polja usmjeren prema središtu Zemlje; a polje je negativno ako je vektor polja usmjeren prema gore od Zemlje<sup>[2]</sup> Promjena električnog polja na Zemlji je pozitivna ako označava povećanje pozitivnog tj. smanjenje negativnog naboja. Mjerenjima je utvrđeno da polje opada s visinom, pa je ukupna razlika potencijala od površine Zemlje do najviših slojeva atmosfere oko 400 000V. Zbog slabe ionizacije postoji gibanje pozitivnog naboja prema zemlji koje se naziva struja lijepog vremena. Gustoća te struje iznosi  $J \approx 2 \cdot 10^{-12} \text{ A/m}^2$  i ona uzrokuje sporo izbijanje ploča kondenzatora.

Prema Wilsonovoj hipotezi o Zemljinom strujnom krugu munje nadomještaju neutralizirani naboj i održavaju stalnu razliku potencijala između ploča na dva načina. One stvaraju struje prema vodljivoj ionosferi, tu se struje rašire i vraćaju se na zemlju u područjima lijepog vremena. Istovremeno se prema zemlji prenosi negativan naboj pomoću pražnjenja munja, oborinskih struja i struja korone. Strujni krug Zemlje možemo promatrati preko mehanizma punjenja i pražnjenja ploča kondenzatora kao istosmjerni (DC) strujni krug i kao izmjenični (AC) strujni krug u kojem atmosfera između ploča predstavlja elektromagnetski valovod o čemu će biti riječi u sljedećim poglavljima.

## 2.2 Struktura Zemljinog DC strujnog kruga

Zemljin DC strujni krug prvenstveno se odnosi na područje od površine Zemlje do visine 50 km.<sup>[3]</sup> Ionizacija u ovom području nastaje djelomično zbog prirodne Zemljine radioaktivnosti, ali najviše zbog visokoenergetskog kozmičkog zračenja koje je u ovom području izotropno. Primarni nosioci naboja su mali ioni. Ionizacijom nastaje jednak broj pozitivnih i negativnih iona, ali se njihova gustoća  $n$  (broj iona u jediničnom volumenu) razlikuje zbog više faktora kao što su vezivanje za druge čestice (atmosferski aerosol, kapljice vode), meteorološki uvjeti i sl. Prostorni naboj  $q$  (ukupni naboj u jediničnom volumenu) možemo odrediti pomoću izraza:  $q = e (n^+ - n^-)$ , gdje  $e$  označava elementarni naboj. Rezultati mjerenja pokazuju da prostorni naboj u zraku u blizini tla iznosi oko:  $q = -3 \cdot 10^{-12} \text{ Cm}^{-3}$ , dok na 10 km visine iznad tla ima vrijednost oko:  $q = +1.3 \cdot 10^{-14} \text{ Cm}^{-3}$ .

Pojava struja posljedica je nekoliko mehanizama razdvajanja pozitivnog i negativnog naboja u okomitom smjeru između Zemljine površine i ionosfere: a) prenošenja električnog prostornog naboja u planetarne granične slojeve; b) gibanja selektivno nabijenih aerosolnih čestica u atmosferi pod djelovanjem gravitacije; c) razdvajanja električnog naboja zbog mikrofizikalnih procesa koji uključuju led u kišnim i olujnim oblacima. Okomito na Zemljinu površinu teče struja prema gore i prema dolje, nazvana bipolarna struja, koju možemo izraziti kao zbroj struje pozitivnih iona i struje negativnih iona:  $I = I_+ + I_-$ . Ovu struju zovemo i struja lijepog vremena (vodljiva ili konduktivna struja) jer nastaje u električki neporemećenoj atmosferi. Mehaničko gibanje zraka prenosi električki naboj duž zračne struje i stvara konvektivnu električnu struju. Oborinska struja nastaje pri oborinama iz oblaka prema Zemlji. Oborine mogu sadržavati različite elemente oblaka npr. kapljice kiše, snježne ili ledene kristaliće, kondenzacijske i sublimacijske jezgre, koji mogu prenositi pozitivni ili negativni naboj. Ukupnu struju u određenom trenutku na nekom mjestu dobijemo kao zbroj ovih triju struja:  $I = I_{\text{konduk.}} + I_{\text{konvekt.}} + I_{\text{obor.}}$ . Iznos takve ukupne struje je jako mali pa se obično računa globalna struja lijepog vremena za cijelu Zemlju pomoću izraza:  $I_Z = J_Z \cdot P$ , gdje je  $J_Z$  gustoća struje lijepog vremena, koja iznosi  $J_Z = 2 \cdot 10^{-12} \text{ Am}^{-2}$ , a  $P$  je oplošje Zemlje koje iznosi  $P = 5.1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$ . Uvrštavanjem u formulu dobijemo iznos globalne struje lijepog vremena  $I_Z = 1000 \text{ A}$ . Minimalna atmosferska električna vodljivost nađena je kod Zemljine površine i iznosi  $\sigma_0 = 5 \cdot 10^{-14} \text{ Sm}^{-1}$ . Iznad oceana, gdje je mali broj aerosolnih čestica, električna vodljivost je eksponencijalno ovisna o visini  $z$  prema formuli:

$$\sigma(z) = \sigma_0 e^{\frac{z}{z_0}}$$

gdje je visinska skala  $z_0 = 5$  km. Pomoću Ohmovog zakona možemo odrediti električno polje u ovisnosti o visini iznad površine Zemlje kao omjer gustoće struje lijepog vremena i električne vodljivosti:

$$E(z) = \frac{J_0}{\sigma(z)} = \frac{J_0}{\sigma_0 e^{\frac{z}{z_0}}}$$

Računom na Zemljinoj površini ( $z = 0$  m) dobijemo  $E(z) = 40 \text{ Vm}^{-1}$ . Polje opada eksponencijalno s porastom visine. Ukupan pad napona kroz Zemljin sferni kondenzator dobijemo linijskim integralom okomitog električnog polja po visini od površine Zemlje do beskonačnosti:

$$V_{uk} = \int_0^\infty E(z) dz = \int_0^\infty \frac{J_0}{\sigma_0 e^{\frac{z}{z_0}}} dz = -\frac{J_0 z_0}{\sigma_0} e^{-\frac{z}{z_0}} \Big|_0^\infty = \frac{J_0 z_0}{\sigma_0}$$

Za  $z_0 = 5$  km računaska vrijednost  $V_{uk} = 200$  kV, dok je srednja vrijednost dobivena mjerenjima  $\overline{V_{uk}} = 250$  kV. Razlog odstupanja proizlazi zbog činjenice da je u računu zanemaren utjecaj aerosolnih naboja iz planetarnih graničnih slojeva i činjenica da u površinskoj zoni Zemlje na visini od 1 km vodljivost odstupa od jednostavnog eksponencijalnog oblika iz jednadžbe  $\sigma(z) = \sigma_0 e^{\frac{z}{z_0}}$ .

Pomoću Poissonove jednadžbe možemo odrediti raspodjelu prostornog električnog naboja u donjoj atmosferi sfernog kondenzatora:

$$\rho(z) = \varepsilon_0 \frac{dE}{dz} = \varepsilon_0 \frac{d}{dz} \frac{J_0}{\sigma_0 e^{\frac{z}{z_0}}} = -\frac{\varepsilon_0 J_0}{\sigma_0 z_0} e^{-\frac{z}{z_0}}$$

gdje je  $\varepsilon_0$  permitivnost vakuumu. Iz jednadžbe proizlazi da je pozitivni naboj rasprostranjen kroz atmosferu s maksimalnom vrijednošću u donjoj atmosferi. Jednaka količina suprotnog negativnog naboja ostaje na Zemljinoj površini. Gustoća negativnog naboja po jedinici površine dobije se izrazom:

$$S = \varepsilon_0 E(z=0) = \frac{\varepsilon_0 J_0}{\sigma_0}$$

Ukupan iznos negativnog naboja na Zemlji dobijemo umnoškom površine Zemlje i gustoće naboja po jedinici površine:

$$Q_{uk} = 4\pi R_Z^2 S = \frac{4\pi R_Z^2 \epsilon_0 J_0}{\sigma_0} = 2 \cdot 10^5 \text{ C}$$

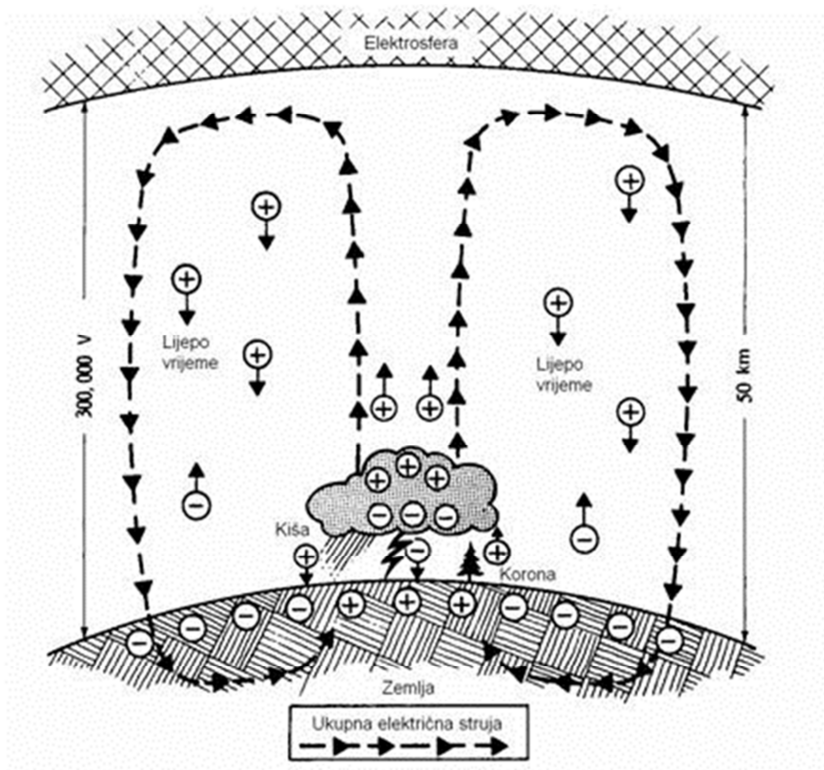
( $R_Z$  označava radijus Zemlje)

Kapacitet sfernog kondenzatora možemo odrediti koristeći izraz:  $C = \frac{Q_{uk}}{V_{uk}} \approx 1F$

Električni otpor atmosfere mijenja se s promjenom jakosti električnog polja. Ukupni otpor Zemljinog strujnog kruga možemo odrediti približno pomoću Ohmovog zakona:

$$R = \frac{V_{uk}}{I_Z} \approx \frac{200000V}{1000A} = 200\Omega$$

Vrijeme u kojem će se sferni kondenzator izbiti možemo približno odrediti kao relaksacijsko vrijeme RC kruga:  $RC = 200\Omega \cdot 1F = 200s \approx 3.3 \text{ min}$ . Ako uzmemo u obzir doprinos otpora planetarnih graničnih slojeva u kojima aerosolne čestice vežu male ione i tako smanjuju lokalno električnu vodljivost pa time povećavaju otpor, relaksacijsko vrijeme je nešto duže.



Slika 6: Shematski prikaz oluje koja se ponaša kao baterija za održavanje negativno nabijene površine Zemlje i pozitivno nabijene atmosfere. Atmosferska električna struja teče prema dolje u području lijepog vremena i prema gore u oluji. Oluje prenose naboj na Zemlju munjama, oborinama i koronskim pražnjenjima.<sup>[7.]</sup>



Carnegieva krivulja dnevnih varijacija električnog polja s obzirom na univerzalno vrijeme pokazuje da polje ima maksimalne i minimalne vrijednosti, pa možemo zaključiti da u Zemljinom strujnom krugu postoje električni izvori ili „baterije“ koje stvaraju struje koje pune sferni kondenzator. Wilson je 1920. godine formulirao hipotezu Zemljinog strujnog kruga u kojoj su olujni oblaci „baterije“ koje stvaraju struje prema gore do vodljive ionosfere. Kao što je prikazano na slici 6, struje se u ionosferi rasprostrane i vraćaju se na površinu Zemlje u područjima lijepog vremena. Dio Zemljinog strujnog kruga zovemo područjem lijepog vremena ako su zadovoljeni slijedeći uvjeti: a) nema oborina; b) naoblaka je minimalna ( manje od 4/8 uz uvjet da je potpuna naoblaka 8/8); c) slab vjetar ( brzine manje od 6m/s); d) u radijusu od oko 75 km od promatranog područja nema oluja. Struje točkastih izboja, oborina i munja prenose negativni naboj na Zemljinu površinu. Na mjestu udara munje mijenjaju lokalnu raspodjelu električnih naboja pa time lokalno mijenjaju i električno polje. Promjena električnog polja utječe na promjenu magnetskog polja pa se na mjestu udara pojavljuje elektromagnetski val koji se širi globalnim valovodom tj. šupljinom omeđenom površinom Zemlje i ionosferom, o čemu će biti riječi u sljedećem podpoglavlju.

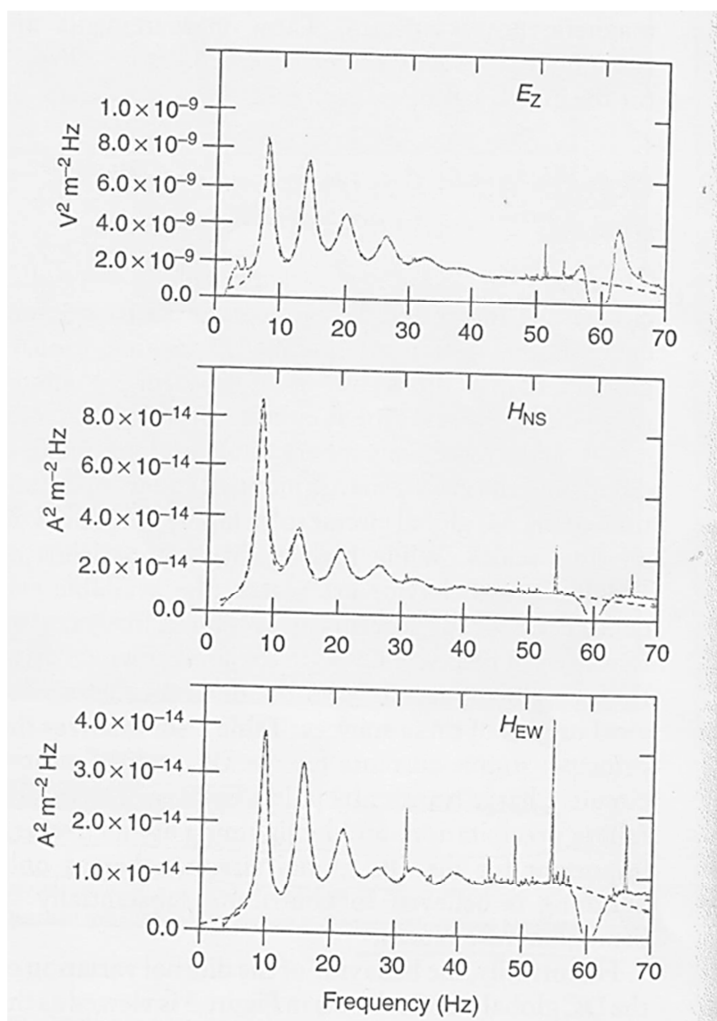
### **2.3 Schumannova rezonancija**

Izboji munja su prirodni emiteri elektromagnetskog zračenja. Winfried Otto Schumann je 1952. godine pretpostavio da globalna aktivnost munja održava elektromagnetsku rezonanciju.<sup>[2,3,8]</sup> Ova ideja potaknula je proučavanje Zemljinog AC strujnog kruga. Pojava pobuđivanja elektromagnetskih valova bljeskovima munja na cijeloj Zemlji i njihovih širenja unutar šupljine omeđene Zemljom i ionosferom, nazvana je Schumannova rezonancija. Za idealnu savršeno vodljivu šupljinu potpuno zatvorenu Zemljom – ionosferom, rezonantnu frekvenciju  $n$ -tog moda možemo približno odrediti po formuli:

$$f_n = \frac{c}{2\pi a} \sqrt{n(n+1)}$$

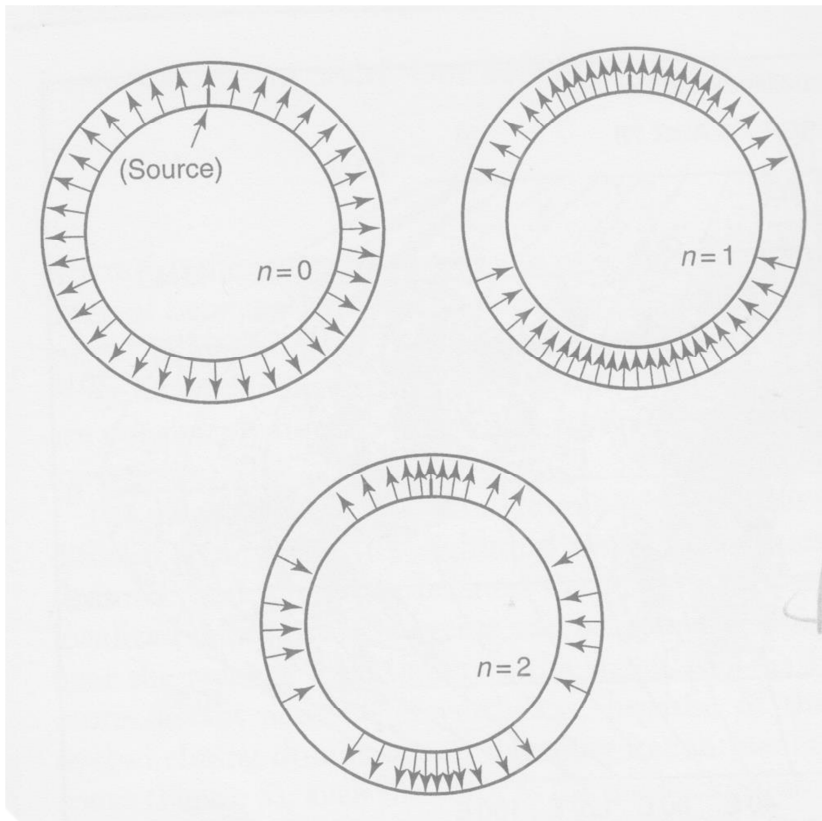
gdje je  $a$  radijus Zemlje,  $c$  brzina svjetlosti. Iz formule se dobije očekivana vrijednost osnovnog moda oko 10 Hz. Stvarna šupljina ima gubitke u ionosferi (npr. zbog poremećaja u ionosferi, dnevnim i noćnim varijacijama vodljivosti na određenom području, promjena Zemljinog magnetskog polja s obzirom na zemljopisnu širinu i sl.) pa su eksperimentalno određene nešto niže vrijednosti frekvencija. Osnovna rezonantna frekvencija je oko 8 Hz.

Viši harmonici su približno na frekvencijama 14 Hz, 20 Hz, 26 Hz, 32 Hz što možemo vidjeti na slici 7.



Slika 7: Spektar zračenja Schumannove rezonancije za Zemljino električno polje i komponente magnetskog polja u smjeru sjever-jug i istok-zapad, izmjeren u West Greenwich, Rhode Island, 1. 1. 2000. <sup>[4.]</sup>

Frekventno područje u kojem se javlja Schumannova rezonancija, nalazi se u dijelu elektromagnetskog spektra zračenja koji označavamo kao ekstremno nisko frekventno područje (ELF, od engleskog Extremely Low Frequencies) od 3 Hz do 3 kHz. Slika 8 prikazuje prva 3 rezonantna moda električnog polja u šupljini Zemlja – ionosfera. U slučaju Schumannove rezonancije nultog moda, električno polje je homogeno. To znači da Zemljin AC strujni krug za  $n = 0$  (tada nema pražnjenja munja) možemo promatrati kao Zemljin DC strujni krug.



Slika 8: Prikaz ponašanja električnog polja Zemljinog strujnog kruga za prva tri moda Schumannove rezonancije<sup>[4.1]</sup>

Grmljavinske oluje globalno stvaraju oko 100 bljeskova/s. Srednji vremenski interval između bljeskova, globalno gledajući, je 10 – 20 ms. Ovi bljeskovi nisu dovoljno energetski i interferiraju međusobno stvarajući pozadinsku rezonanciju. Vremenski interval vrlo energetskih izboja munja kojima se naboj prenosi na Zemlju i dolazi do rezonantne interakcije sa valovodom je oko 130 ms. To je Q- izbijanje ( eng. Q-burst) koje je u mjerenjima elektromagnetskih spektara zračenja vidljivo kao šiljci. Mjerenjima parametara Schumannove rezonancije (amplituda modova, frekvencija, faktora dobrote) mogu se dobiti podaci o raspodjeli aktivnosti munja širom svijeta. Faktor dobrote je određen širinom spektralnih šiljaka i definiran omjerom frekvencije moda  $f_0$  i frekventnog intervala pola snage na rezonantnoj krivulji označenog sa  $\Delta f$ . Obično je u području 3-8, a to pokazuje da Schumannove frekvencije nisu potpuno točno podešene zbog dnevnih promjena u ionosferi. Klimatološka promatranja i satelitski podaci pokazuju da je u svakom trenutku iznad površine zemlje aktivno 1000 grmljavinskih oluja pa se iz rezonantnih mjerenja ne može precizno odrediti položaj pojedine oluje.

### 3. RAZVOJ OLUJE

U području lijepog vremena oblaci su slabije električki vodljivi od zraka u svojoj okolini. Električki neutralan oblak postaje vodljiv zbog vezivanja iona iz okoline oblaka za hidrometeore na rubovima oblaka. Električna polja takvih „nenaelektriziranih“ oblaka iznose od 100 do 1000 V/m a raspodjela polja se mijenja unutar oblaka u toku njegovog gibanja. [3, 4, 5, 7] Oluje se razvijaju u područjima maksimalnog okomitog konvektivnog strujanja na koje najvećim dijelom utječu procesi zračenja. Sunce svakodnevno zagrijava zemljinu površinu snagom po jedinici površine oko 1 kW/m<sup>2</sup>. Istovremeno se gornja troposfera kontinuirano hladi zbog toplinskog zračenja molekula vode i aerosolnih čestica u smjeru izvan Zemlje. Kako Zemlja rotira, nove oluje se formiraju u području koje se u tom trenutku nalazi okrenuto prema Suncu, pa se zona razvoja oluje pomiče svakodnevno prema zapadu. Aktivna olujna zona može se horizontalno gledano protezati od 3 km u promjeru, do više od 100 km. Manje oluje mogu trajati oko 30 minuta ( kao što je uočeno u subtropskim područjima), dok neke traju oko 2 sata (npr. iznad planina u Novom Meksiku) ili duže.

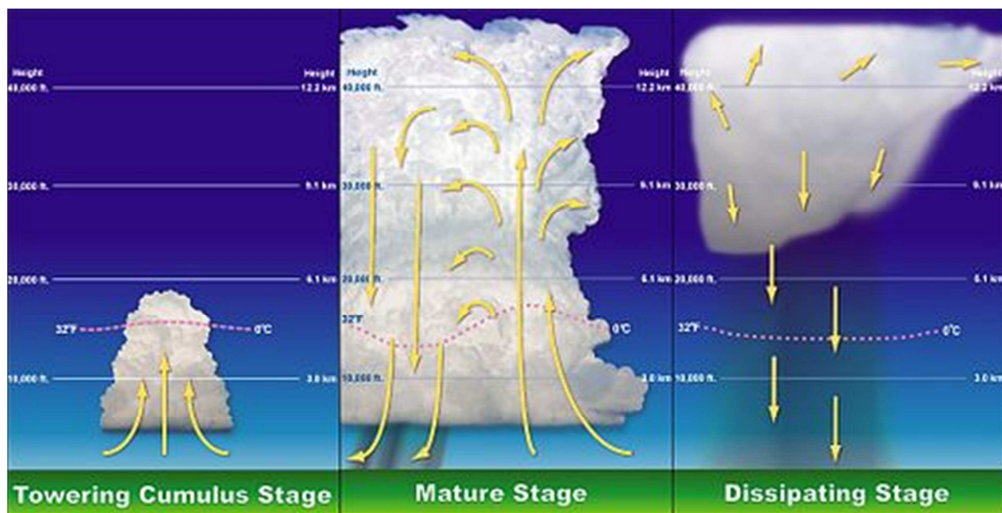
Munje se formiraju u oblacima zvanim kumulonimbusi. Oni stvaraju grmljavinske oluje, a primjer takvog oblaka prikazan je na slici 9.



Slika 9: Kumulonimbus karakterističan za razvoj grmljavinske oluje <sup>[12]</sup>

Proces razvoja oblaka odvija se u nekoliko faza kao što vidimo na slici 10. Sunce zagrijava površinu zemlje, ali se zbog težnje za postizanjem toplinske ravnoteže s okolinom, zagrijava i zrak koji je neposredno uz površinu. U podne Sunčevo zračenje može zagrijati površinski sloj zraka debljine 1m za oko 1 °C/s . Gustoća nižih slojeva zraka opada pa donja atmosfera postaje nestabilna kad vertikalni pad temperature zraka

postane negativniji od  $\frac{\partial T}{\partial z} = -9.8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ . (Na 39. Međunarodnoj olimpijadi iz fizike održanoj u Vijetnamu 2008. godine, natjecateljima je u teoretskom problemu br.3 postavljen i zadatak izvođenja matematičkog izraza za temperaturne promjene paketića zraka u vertikalnom gibanju i određivanje stabilnosti atmosfere. Računom je dobivena ista granična vrijednost vertikalnog pada temperature zraka s obzirom na stabilnost atmosfere.) Zato se javlja konvektivno gibanje zraka; topli zrak stvara uzlaznu struju, a hladniji visinski zrak stvara jednako veliku silaznu struju oko nestabilnog toplog zraka. To je početna faza stvaranja kumulusa, a prepoznajemo je po formiranju poligonalne ćelije. U unutrašnjosti ćelije zrak se uzdiže dok se na granicama ćelije spušta, a visinu ćelije određuje vertikalna distribucija temperature u atmosferi.



Slika 10: Stupnjevi razvoja grmljavinske oluje: a) početna faza stvaranja kumulusa; b) zrela faza; c) faza rasplinjavanja <sup>[12]</sup>

Budući da atmosferski tlak opada s visinom, zrak koji se uzdiže, širi se, pa mu se smanjuje temperatura. Ako se nastavi dizanje zraka, može doći do kondenziranja vodene pare na česticama prašine u zraku što stvara male tekuće kapljice raspršene unutar ćelije (hidrometeore) formirajući oblak. Daljnjom kondenzacijom kapljice se povećavaju do promjera oko  $10 \mu\text{m}$  s koncentracijom više od  $100 \text{ kapljica}/\text{cm}^3$ . Latentna toplina oslobođena pri kondenzaciji vodene pare omogućuje da se uzlazni zrak sporije hladi s porastom visine od okolne atmosfere. Zato se uzlazna struja akcelerira uvis, stvara se više vodene pare, pa se više nestabilnog zraka podiže s površine uvis. Istovremeno uzlazna struja oblaka pomiče okolni gušći, suhi zrak pa se on spušta prema dolje. Nastaju lokalne turbulencije u kojima se miješa suhi zrak s vanjske strane oblaka, sa zrakom u oblaku zasićenim vodenom parom. Na mjestima miješanja, tekuće kapljice isparavaju u suhi zrak

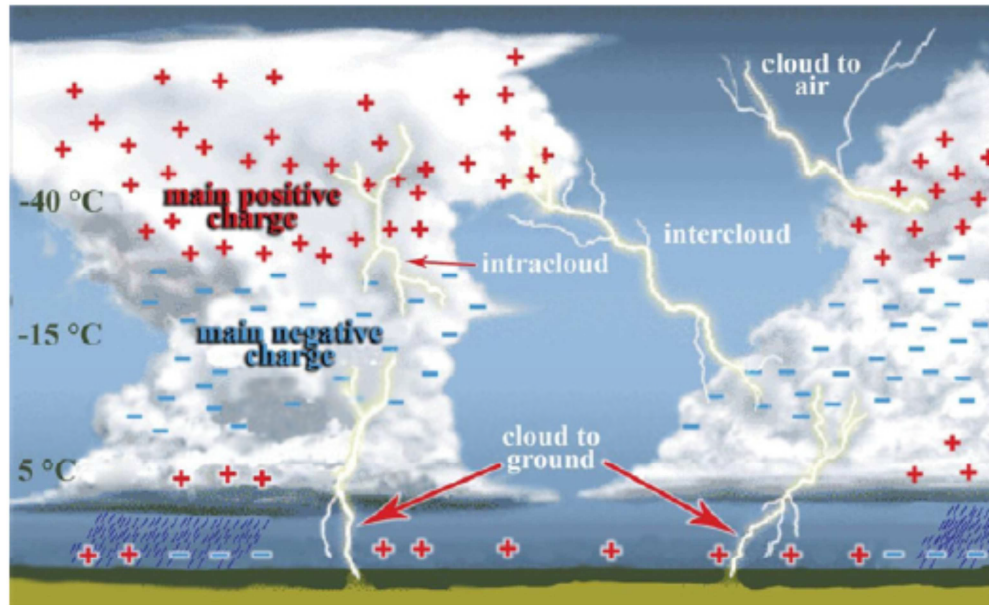
manjujući mu unutarnju energiju; zbog toga mu se smanjuje temperatura i stvara se silazno strujanje. Time oblak prelazi u zrelu fazu. Manjim jednoćelijskim oblacima izmjerene su brzine uzlaznih strujanja od 4 do 6m/s, a silazna strujanja su od 2 do 4m/s. Najčešće se oblaci razvijaju postupno kao višćelijski ili superćelijski sustavi koji imaju nekoliko područja sa simultanim uzlaznim i susjednim silaznim strujanjima u različitim stupnjevima razvoja. U tom slučaju izmjerene su brzine uzlaznih strujanja veće od 60 m/s, a silaznih od 35 m/s. Razvoj kumulusa odvija se volumno i visinski sve do termalno stabilnih slojeva atmosfere. Za najveće oblačne sisteme graničnu visinu predstavlja stabilna stratosfera. Tipični promjer uzlaznih strujanja je 300 do 2000 m. Prestankom vertikalnog gibanja, vrh oblaka skrene horizontalno, spljošti se i cijeli kumulonimbus poprimi oblik nakovnja.

U razvoju oblaka, kada temperatura padne ispod 0°C, primijećeno je da se suprotno očekivanjima, kondenzirana tekuća voda neće zalediti nego će i dalje biti u tekućem stanju u ćeliji oblaka. Do spontanog zaleđivanja dolazi tek kad se temperatura spusti do - 40 °C . Opaženo je, kada oblak dođe do toplinski stabilnog sloja, u vidljivom vrhu oblaka su pretežno snježni kristali.

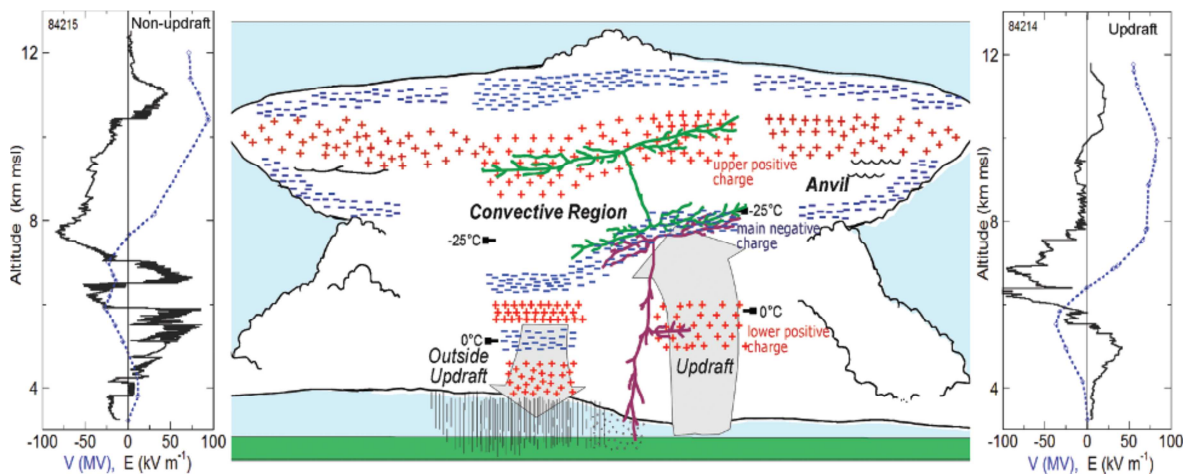
Faza rasplinjavanja počinje intenzivnim oborinama koje povlače silaznu struju zraka. Ona se akcelerira hlađenjem zbog isparavanja oblaka i oborinama. Kada padne na zemlju, silazna struja uzrokuje istjecanje hladnog stabilnog zraka, prekida uzlaznu struju nestabilnog toplog zraka. Oblak se smanjuje a veći dio kondenzirane vode isparava.

Električna polja koja stvaraju mehanizmi elektriziranja unutar oblaka dostižu 100 kV/m. Pojednostavljeni idealizirani prikaz raspodjele naboja unutar 2 izolirana olujna oblaka pokazan je na slici 11. Slika 12 predstavlja konceptualni model izolirane oluje u zreloj fazi razvoja.

Standardni tripolni model pokazuje da se u toku razvoja oblaka pojavljuju 3 područja distribucije naboja. Pozitivni naboj je rasprostranjen u difuznom gornjem području oblaka sa gustoćom naboja od nekoliko C/km<sup>3</sup>. Kod ljetnih oluja ( Florida i Novi Meksiko) taj sloj se obično nalazi na visini između 8 – 15 km iznad razine mora, dok mu je debljina u vrijeme zimskih oluja (Japan) nekoliko kilometara. Negativni naboj se nalazi u središnjem dijelu oblaka zvanom zona nabijanja, u kojem su temperature između - 10°C i - 25°C. Taj sloj se kod ljetnih oluja nalazi između 6 i 8 km nadmorske visine, a na samo 2



Slika 11: Shematski prikaz dva jednostavna izolirana olujna oblaka (standardni tripolni model) i vrste munja koje mogu nastati [5.]



Slika 12: U sredini slike je konceptualni model izolirane oluje u zrejoj fazi razvoja. Model je osmišljen na osnovu rezultata mjerenja u različitim oblacima metodom sondiranja u balonu, koje su proveli Stolzenburg, Marshall i suradnici. U području uzlazne konvekcije nađene su 4 regije naboja: one opisane standardnim tripolnim modelom i gornji zaklonjeni sloj. Sondiranja izvan uzlaznih područja pokazuju najmanje 6 regija naboja. Regije naboja teže horizontalnom uslojavanju. Zelenom bojom je prikazana mogućnost pojave munje unutar oblaka, a ljubičastom munja oblak – zemlja. Rezultati sondiranja na visinama daju prikaz električnog polja i potencijala u uzlaznom konvektivnom području (desno) i izvan tog područja ( lijevo). [8.]

km nadmorske visine kod zimskih oluja ( zbog hladnije atmosfere). Samo u tom području u oblaku se istodobno mogu naći sublimirani kristali leda, pothlađena voda i čestice tuče. Tipična količina naboja u svakom centru u maksimumu je  $Q = 10 - 100 \text{ C}$ . Sekundarni

pozitivni centar naboja nalazi se ispod negativnog naboja na donjem dijelu vidljivog oblaka (oko 2 km nadmorske visine za ljetne oluje), sa količinom naboja oko +3 C. Pretpostavlja se da su najvjerojatniji mehanizmi stvaranja ovog naboja koronarni izboji koji izbijaju iz zemlje i sudari između različitih vrsta oborinskih čestica na temperaturama višim od 0 °C. Mjerenjima je otkriveno postojanje i četvrtog sloja naboja. To je gornji zaklonjeni sloj sa negativnim nabojem. (Realno postoji određena količina zaklonjenog naboja svuda oko oblaka.) Kako je čisti zrak izvan oblaka veće vodljivosti, posebno u stratosferi iznad oluje, pojavljuju se silnice polja koje uzrokuju formiranje zaklonjenog sloja. Ovaj proces je analogan stvaranju površinskog naboja na metalnom vodiču smještenom u vanjskom električnom polju. Ovakav opis raspodjele naboja odgovara većini oluja iako postoji manji broj oluja, otkriven mjerenjima, sa zamijenjenom raspodjelom položaja centara naboja. Mehanizam koji izaziva inverziju nije još poznat.

## **4. MIKROFIZIKALNI PROCESI KOJI UZROKUJU POJAVU MUNJE**

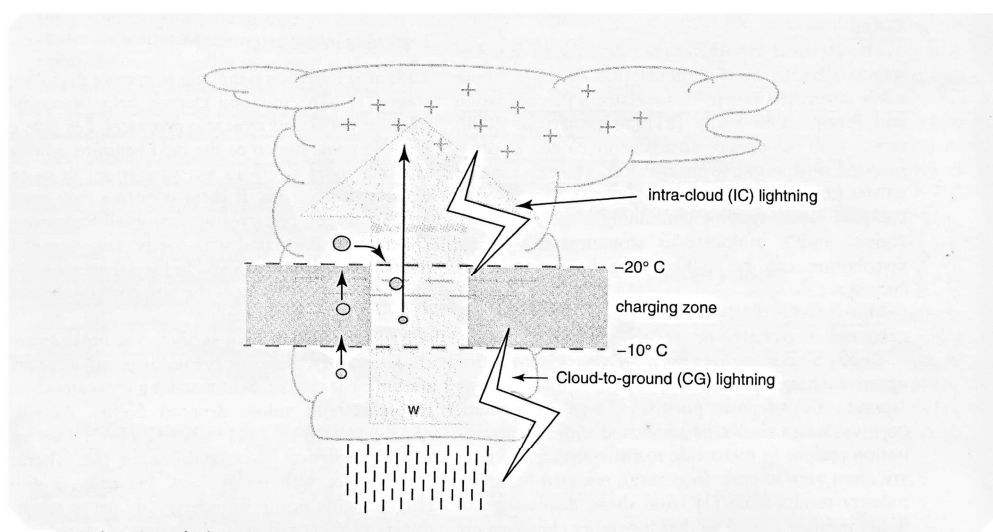
Kako se negativni centar naboja nalazi u zoni nabijanja koja je temperaturno ograničena, osim dinamičkih procesa ( uzlaznih, silaznih i turbulentnih gibanja) distribuciju električnog naboja određuju mikrofizikalne interakcije <sup>[4,5]</sup>. Glavni mehanizam nabijanja u konvektivnim strujama je razdvajanje naboja sudaranjem čestica leda. Sudari su elastični, a nakon sudara odbijene čestice nose jednako velik suprotan naboj. Mehanizam prenošenja naboja između čestica leda u toku sudara nije razjašnjen. Poznato je da veličina i predznak naboja koju čestice leda dobivaju nakon sudara ovise o temperaturi, vrsti i veličini čestice te količini i raspodjeli vode u oblaku. Mjerenjima i laboratorijskim ispitivanjima utvrđeno je da čestice tuče u sudarima na temperaturama oko - 15°C dobivaju pozitivni, a na nižim temperaturama negativni naboj. Kad u sudaru sudjeluje čestica tuče, razdvaja se oko  $10^{-14}$  C naboja po sudaru. Više naboja razdvoji se pri međusobnom sudaru dvije čestice tuče, a manje naboja dobije se sudarom dva sublimacijska kristala leda.

Utvrđeno je da su pozitivni ioni vode u ledu mobilniji od negativnih iona. Većina iona se stvara blizu površine leda, ali se pozitivni ioni premještaju u unutrašnjost a na



površini sublimacijskog leda ostaje ukupan negativni naboj. U toku sudara materijal dviju čestica se miješa tako da ukupan negativni naboj prelazi na česticu sporijeg rasta. Na prijenos naboja utječu različite karakteristike tuče kao što su: glatkoća površine, gustoća grančnih zrnaca, kemijski sastav smrznute vode itd.

Općenito, u početku nabijanja oblaka, veće oborinske čestice tuče gibaju se pod utjecajem gravitacije prema dolje; prolazeći kroz oblak sudaraju se sa manjim kristalima leda i pritom dobivaju ukupan negativni naboj. Na malim kristalima leda preostaje pozitivan naboj, a kako su oni lagani, uzlazno strujanje ih prenosi u više slojeve. Ovo razdvajanje naboja je shematski prikazano na slici 13.



Slika 13: Shematski prikaz idealizirane oluje. Uzlazna struja podiže hidrometeore brzinom  $w$ . Rastom čestica tuče, povećava se na njima gravitacijsko djelovanje pa se počinju gibati prema dolje. Pritom se sudaraju s malim kristalima leda. Razdvajanjem naboja u sudaru i gravitacijskim djelovanjem, čestice tuče s ukupnim negativnim nabojem ostaju u donjim slojevima oblaka, a lagani kristali leda s ukupnim pozitivnim nabojem dižu se uzlaznim strujanjem u gornje slojeve. U oblaku se pojavljuju glavni centri pozitivnog i negativnog naboja. <sup>[4.]</sup>

U kasnijoj fazi elektriziranja oblaka pojavljuju se i drugi procesi: induktivno nabijanje čestica oblaka u nastalom električnom polju, vezivanje iona na aerosolne čestice i čestice oblaka uz njegove rubne zone, preraspodjela nabijenih čestica gibanjima unutar oblačnog sistema. Svi ovi procesi utječu na povećanje električnog polja oblaka i stvaraju uvjete za pojavu munje.

Mehanizam iniciranja munje nije još uvijek razjašnjen. Smatra se da su za pojavu munje potrebna 3 uvjeta: a) pojačavanje električnog polja u oblaku mikrofizikalnim i dinamičkim procesima; b) stvaranje lavine elektrona koju uzrokuju slobodni elektroni u nekom dijelu polja koji se ubrzavaju i ioniziranjem stvaraju nove elektrone, a moguća je i

pojava struja točkastih izboja; c) zagrijavanje zbog širenja jakih električnih struja u lokalno velikim poljima, što stvara vrući, potpuno ionizirani kanal munje. U laboratorijskim uvjetima munje se mogu dobiti kad električno polje dostigne vrijednost  $E_{th} \approx 2600$  kV/m (uz površinski tlak 1000 hPa). Taj proces se zove dielektrični proboj (eng. dielectric breakdown). Polje dielektričnog proboja  $E_{th}$  definirano je kao električno polje u kojem dolazi do proboja čistog električki neutralnog zraka tako da poteče velika struja. Unutar olujnih oblaka izmjerena su električna polja oko 100 kV/m, (do najviše 400 kV/m za najjača polja) dakle 5 - 20 puta manja. Kao moguće objašnjenje ove razlike razvile su se dvije vrste hipoteza. Prva je hipoteza konvencionalnog proboja (eng. conventional breakdown hypothesis) po kojoj se problem treba promatrati lokalno. U blizini čestica leda i vode u oblaku, slobodni elektroni se ubrzavaju zbog lokalnih polja i stvaraju lokalna strujanja. Oko vodljivih hidrometeora električno polje može dostići vrijednost praga dielektričnog proboja.

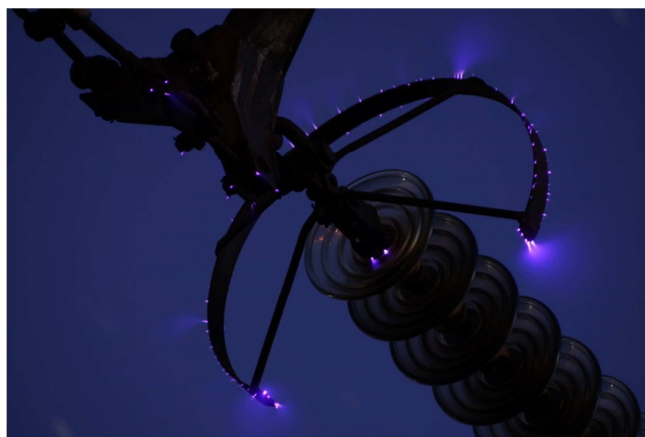
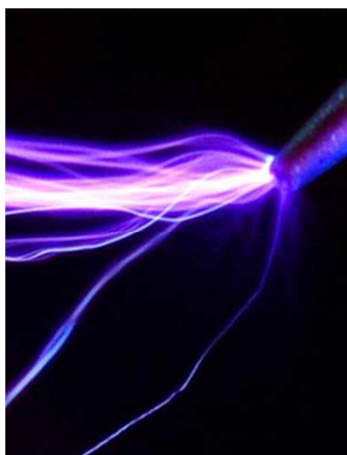
Druga je hipoteza nekontroliranog proboja (eng. runaway breakdown hypothesis ). Ona razmatra problem uzimajući u obzir cijelo električno polje u oblaku, koje se širi nekoliko kilometara. Elektron se u takvom polju ubrzava zbog djelovanja polja ali se i usporava u interakcijama s neutralnim molekulama. Dovoljno veliko električno polje može kompenzirati usporavanje, pa mi ustvari mjerimo resultantno polje nazvano polje izjednačenja (eng. breakeven field) koje je puno manje od praga dielektričnog proboja. Polje izjednačenja  $E_b$  je definirano kao polje u kojem se elektron energije 1 MeV može gibati konstantnom brzinom bez ubrzavanja ili usporavanja. Ako se polje izjednačenja proširi na dovoljnoj udaljenosti, visokoenergetski elektroni (nastali zbog kozmičkog zračenja, atmosferske radioaktivnosti, ili kratkotrajnih lokalnih jakih električnih polja) koji se kreću u njemu mogu ionizirati dovoljno sekundarnih elektrona i načiniti kanal munje.

Izmjerena električna polja u oblaku su puno manja od predviđenog polja izjednačenja, a postaju samo približno jednaka tom polju neposredno prije udara munje. Iako još uvijek nijedna od ovih hipoteza ne daje potpuno zadovoljavajuća objašnjenja, potrebno je poboljšati i tehnike mjerenja jer su sadašnja mjerenja balonom ograničena prostorno i vremenski na mali volumni dio oblaka pa su i rezultati mjerenja pregrubi da bi mogli dati dovoljno preciznu sliku o načinu iniciranja munje. Osim toga polje oluje se vremenski brzo mijenja pa je te promjene teško bilježiti. Sam mjerni uređaj bi također mogao utjecati na rezultate mjerenja jer već kad ga postavimo u područje oluje, mogao bi

na tom mjestu izazvati pražnjenje olujnog oblaka i prije nego se polje može formirati tako da izazove prirodnu inicijaciju munje.

## 5. TOČKASTA PRAŽNJENJA

Točkasta pražnjenja su energetska slabija električna pražnjenja u atmosferi koja utječu na elektriziranost atmosfere i mogućnost pojave munje.<sup>[2]</sup> Razlikujemo točkasta pražnjenja na površini zemlje i koronske izboje iz hidrometeora u oblaku. Princip točkastog pražnjenja je isti za metalnu točku ili kapljicu vode ili točkasto pražnjenje na stablu, a prikazan je na slici 14. Na metalnoj točki u zraku (metalnom vodiču sa šiljastim vrhom) proces pražnjenja započinje u malom volumenu zraka uz vrh točke, u kojem je električno polje dovoljno veliko da omogući ionizaciju molekula plina tokom sudara s elektronima dobivenim kozmičkim zračenjem ili radioaktivnim raspadom i ubrzanim u tom polju. Ionizacijom se otpuštaju novi elektroni koji su ubrzan djelovanjem polja i mogu izazvati daljnje ionizacije na isti način pa dolazi do pojave lavine elektrona.



Slika 14: Koronsko pražnjenje sa vrha metalnog šiljka ( lijevo) i na žici dalekovoda od 500 kV(desno) <sup>[13, 14]</sup>

Ako je točka u zraku pozitivnog naboja, pražnjenje će započeti kratkim pulsom tzv. početnim strujanjem koje je usmjereno iz točke, jer vlastito polje pozitivnog naboja pojačava polje u kojem se nalazi u jednom smjeru. U tom smjeru fotoionizacijom molekula kisika nastavlja se otpuštanje elektrona. Kad lavina elektrona postigne kritičnu vrijednost, strujanje će se proširiti u područje gdje je polje manje pa ne može izazvati vlastitu lavinu elektrona. Lavina elektrona se širi u smjeru porasta jačine polja (bliže zakrivljenoj površini

vodiča). Akumulirani prostorni naboj koji ostaje iza vrha strujanja uzrokuje pojavu novih strujanja, a cijeli proces dolazi u pulsevima. Daljnjim porastom primjenjenog polja, prostorni naboj se brže uklanja pa se pojavljuje iskra. Za točku u zraku s negativnim nabojem pražnjenje je slično pražnjenju točke s pozitivnim nabojem, uz stvaranje svjetlucavog područja uz vrh elektrode. Lavina elektrona se u ovom slučaju širi od vrha u smjeru smanjenja jačine polja.

Wilson je pretpostavio 1920. godine da su točkasta pražnjenja važna za prenošenje naboja između oblaka i zemlje. Točnost ove pretpostavke su potvrdili eksperimenti koje su proveli Wormell (1927), s metalnom točkom podignutom na visinu, te Schonland (1928), sa stablom. Svoje eksperimente Schonland je proveo za vrijeme oluja u Južnoj Africi. Postavio je malo stablo na izoliranim potpornjima i spojio ga preko galvanometra sa zemljom te mjerio struje točkastih pražnjenja. Integriranjem zabilježenih struja ustanovio je koliki je ukupni naboj prenesen na zemlju. Njegova mjerenja su pokazala da je prenešeni naboj u najvećem broju slučajeva negativan i prosječno 20 puta veći od naboja prenesenog bljeskom munje. 1947. godine Davis i Standring su proveli mjerenja vezanim balonima na različitim visinama sve do 2400m i ustanovili porast struje točkastih pražnjenja s visinom, potencijalnim gradijentom na zemlji i brzinom vjetra. Matematički izraz za struju točkastih pražnjenja  $I$  izveli su 1957. Large i Pierce u obliku:

$$I = a(V - V_0)(W^2 + c^2V^2)^{\frac{1}{2}}$$

gdje su  $a$ ,  $c$ , i  $V_0$  konstante,  $V$  je razlika potencijala između točke i njene okoline, a  $W$  je brzina vjetra.

Područje istraživanja koje posebno zaokuplja znanstvenike su koronska pražnjenja u olujnim oblacima, zbog pretpostavke o njihovoj povezanosti s iniciranjem munje. Koronska pražnjenja su točkasta pražnjenja u atmosferi. Brojna eksperimentalna mjerenja nastoje potvrditi hipotezu da emisija pozitivne korone s površine kišne kapi koja je jako deformirana zbog djelovanja snažnih električnih polja, predstavlja okidač za munju. U području jake zakrivljenosti kapljice, površinsko polje je uvećano u odnosu na polje u okolini. Richard i Dawson (1971) su proveli laboratorijsko istraživanje početka nestabilnosti i pojave korone na vodenim kapima veličine kišnih kapljica koje su padale određenim brzinama u okomitom električnom polju. Uočili su da nestabilnost nastaje formiranjem točke na gornjoj površini kapljice, iz koje se emitira korona, mjenjajući tako

ukupni naboj kapljice. Za nenabijenu kapljicu radijusa većeg od 2 mm polje potrebno za stvaranje nestabilnosti neovisno je o radijusu i iznosi 950 kV/m. Nosi li kapljica jako veliki naboj, polje nestabilnosti ( a time i korone) smanji se na 550 kV/m. Ako se polje zakrene pod kutem 45° prema okomici, iznos za stvaranje nestabilnosti se još više smanji. Ipak njihovi rezultati su još uvijek bili puno veći od maksimalno izmjerenih polja u olujama. Zato su postavili hipotezu da se u sudarima parova kišnih kapljica u olujnom oblaku trenutno može pojaviti grubo deformiran objekt, takav da je oblikom posebno vodljiv za početak korone u relativno slabim električnim poljima. Iako su eksperimentalna mjerenja pokazala pojavu korone, zbog kratkotrajnosti oblika kapljica iz koje nastaje korona, broj pražnjenja je bio jako mali.

Griffiths i Latham (1974) izveli su niz eksperimenata kojima su nastojali potvrditi mišljenje da je površina ledenih hidrometeora izvor korone u relativno slabim električnim poljima. Na umjetno proizvedenim komadima tuče ili sublimacijskim ledenim kristalima veličina nekoliko milimetara, postavljenim na izolirani nosač u električnom polju, uočili su da se na temperaturama iznad - 18°C pojavljuje korona ako se polje poveća do kritične vrijednosti  $E_c$ . Kritična vrijednost polja ovisi o veličini, obliku, čistoći, orijentaciji, početnom naboju i površinskim svojstvima čestice, tlaku i temperaturi. Ustanovljeno je da vrijednost  $E_c$  pada s porastom tlaka, ali i s porastom dimenzija čestice u smjeru vektora polja. Površinska vodljivost čestice opada s porastom temperature. Početni naboj, koji obično postoji na ledenim hidrometeorima u olujnom oblaku, smanjuje  $E_c$  za oko 10-20 %. Nizom pokusa Griffiths ( 1975) je zaključio da je kritično polje potrebno za emisiju korone iz komada tuče ili snježnih kristala u centru olujnog oblaka oko 400 – 500 kV/m. Pozitivna i negativna koronska pražnjenja nastaju simultano na suprotnim krajevima čestica leda.

Pretpostavlja se da koronska pražnjenja, koja se javljaju na površinama oborinskih čestica u jako elektriziranom oblaku, mogu djelovati dvojako: mogu utjecati na povećanje vodljivosti i protjecanje struja sprečavajući tako daljnji rast polja, ili mogu inicirati udar munje. U području u kojem je polje lokalno vrlo intenzivno, posebno ako zauzima veći volumen oblaka, koronske struje mogu još povećati vodljivost i utjecati na pojavu munje.

## 6. MUNJE

Munje su snažna električna pražnjenja s brzom preraspodjelom električnog naboja unutar olujnog oblaka ili između oblaka i njegove okoline. <sup>[2, 4, 5, 7]</sup> Većina munja su

električne iskre prosječne dužine 5-10 km i trajanja oko 0.5 s. Slika 10 prikazuje osnovne vrste munja koje dijelimo u 2 grupe:

- a) pražnjenja kojima se naboj prenosi od oblaka do zemlje tkz. munje oblak – zemlja
- b) pražnjenja u kojima se naboj ne prenosi do zemlje
  - munje u oblaku – cijelo pražnjenje se odvija unutar jednog oblaka ili ćelije
  - munje između oblaka – pražnjenje između 2 oblaka ili ćelije
  - munje oblak – zrak - pražnjenja između jednog područja naboja u oblaku i okolnog zraka

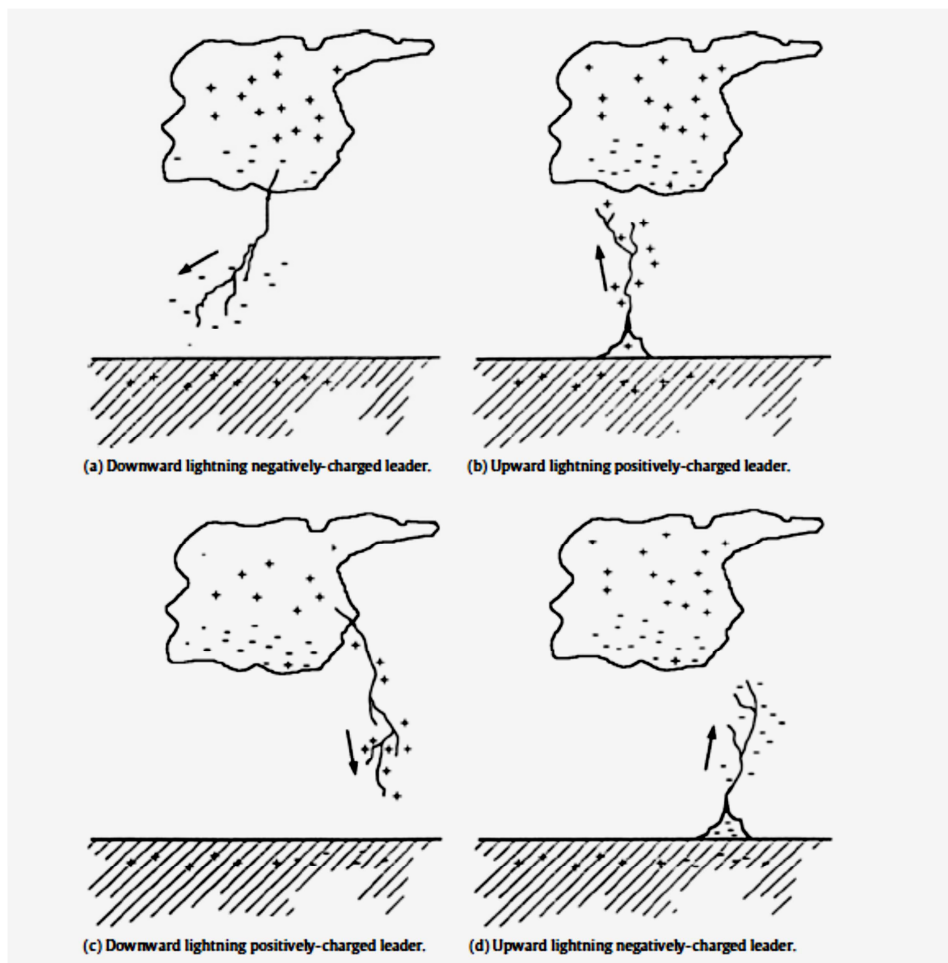
### ***6.1 Munje oblak – zemlja***

Slika 15 prikazuje primjer munje oblak – zemlja. Mala grmljavinska oluja stvara bljeskove munje do zemlje svakih 20 – 30 s u vremenskom intervalu 40 – 60 min na području površine 100 – 300 km<sup>2</sup> koji približno možemo zamisliti kao kružno područje na zemlji s radijusom između 6 i 10 km. Veliki olujni sistemi mogu proizvesti munje na području koje je 100 ili više puta veće sa više od 1 bljeska svake sekunde.



Slika 15: Primjer munje oblak – zemlja <sup>[15]</sup>

Munje oblak – zemlja su od svih tipova munja najviše proučene. Postoje 4 osnovna tipa tih munja koji su prikazani na slici 16. Razlikuju se po smjeru širenja početne vodilice i po predznaku električnog naboja koji se vodilicom prenosi. Najveći broj munja oblak – zemlja, čak do 90 %, su munje silaznih negativno nabijenih vodilica kojima se negativni naboj, koji se nalazi u središnjem dijelu oblaka, prenosi na zemlju. Oko 10 % čine munje silaznih pozitivno nabijenih vodilica kojima se pozitivni naboj iz gornjeg ili donjeg pozitivno nabijenog područja u oblaku, prenosi na zemlju. Uzlazne munje s pozitivnom ili negativnom vodilicom su rijetke i obično se javljaju s vrhova visokih planina ili najviših građevina prema oblaku.

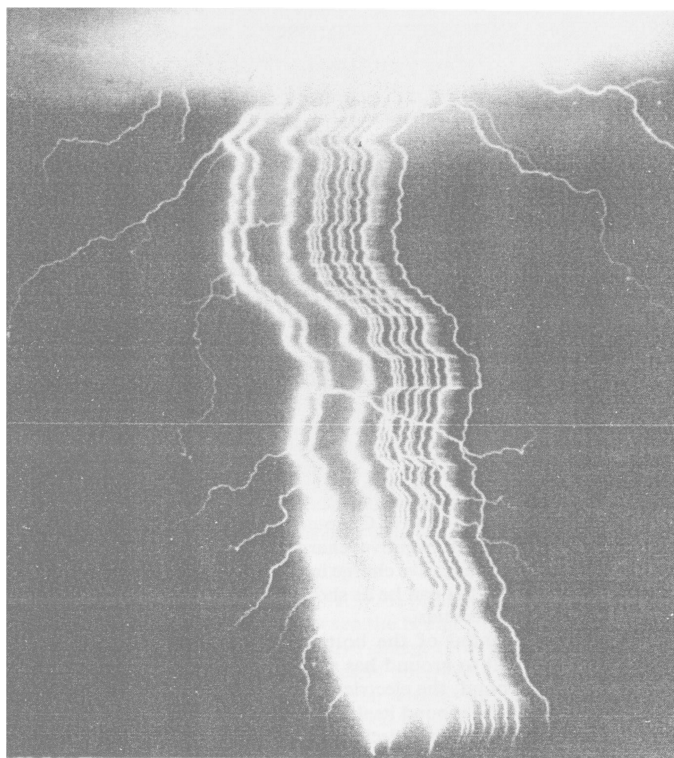


Slika 16: Četiri tipa munje oblak – zemlja; a) munja sa silaznom negativno nabijenom vodilicom, b) munja s uzlaznom pozitivno nabijenom vodilicom, c) munja sa silaznom pozitivno nabijenom vodilicom, d) munja s uzlaznom negativno nabijenom vodilicom <sup>[5]</sup>

### ***Munja oblak – zemlja sa silaznom negativno nabijenom vodilicom***

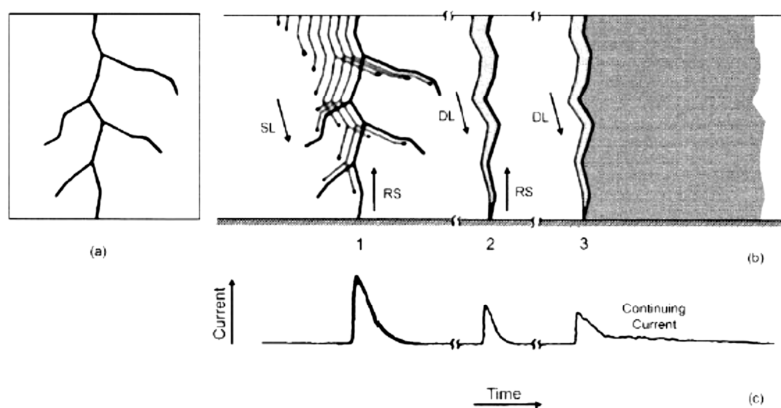
Munjom oblak – zemlja može se prenijeti oko 20 – 30 C negativnog naboja s oblaka na zemlju. Ukupno pražnjenje se zove bljesak i traje između 0.1 – 0.5 s, a čine ga najčešće 3 – 4 pulsa jake struje nazvana udari. Primjeri takvih bljeskova prikazani su na slikama 17 i 18. Svaki udar traje oko milisekunde, a vremenski razmak između udara je nekoliko desetina milisekundi. Zbog tromosti našeg oka obično vidimo bljesak a ne pojedinačne udare.

Iniciranje munje započinje u području jakog električnog polja koje se može javiti između centra negativnog naboja u oblaku i inducirane jednake količine pozitivnog naboja na zemlji. Češće se prvo pojavljuje munja unutar oblaka između centara različitog naboja (središnjeg negativnog područja i donjeg pozitivnog područja) koja se nastavi širiti prema zemlji. Pražnjenjem unutar oblaka oslobađaju se elektroni vezani za čestice tuče ili hidrometeore. Pod utjecajem električnog polja, a zbog manje mase i veće mobilnosti od hidrometeora, slobodni elektroni prelaze donje pozitivno područje oblaka, neutralizirajući pritom dio pozitivnog naboja i nastavljaju se gibati prema zemlji stvarajući vodilicu.. Proces stvaranja bljeska munje prikazan je na slici 19.

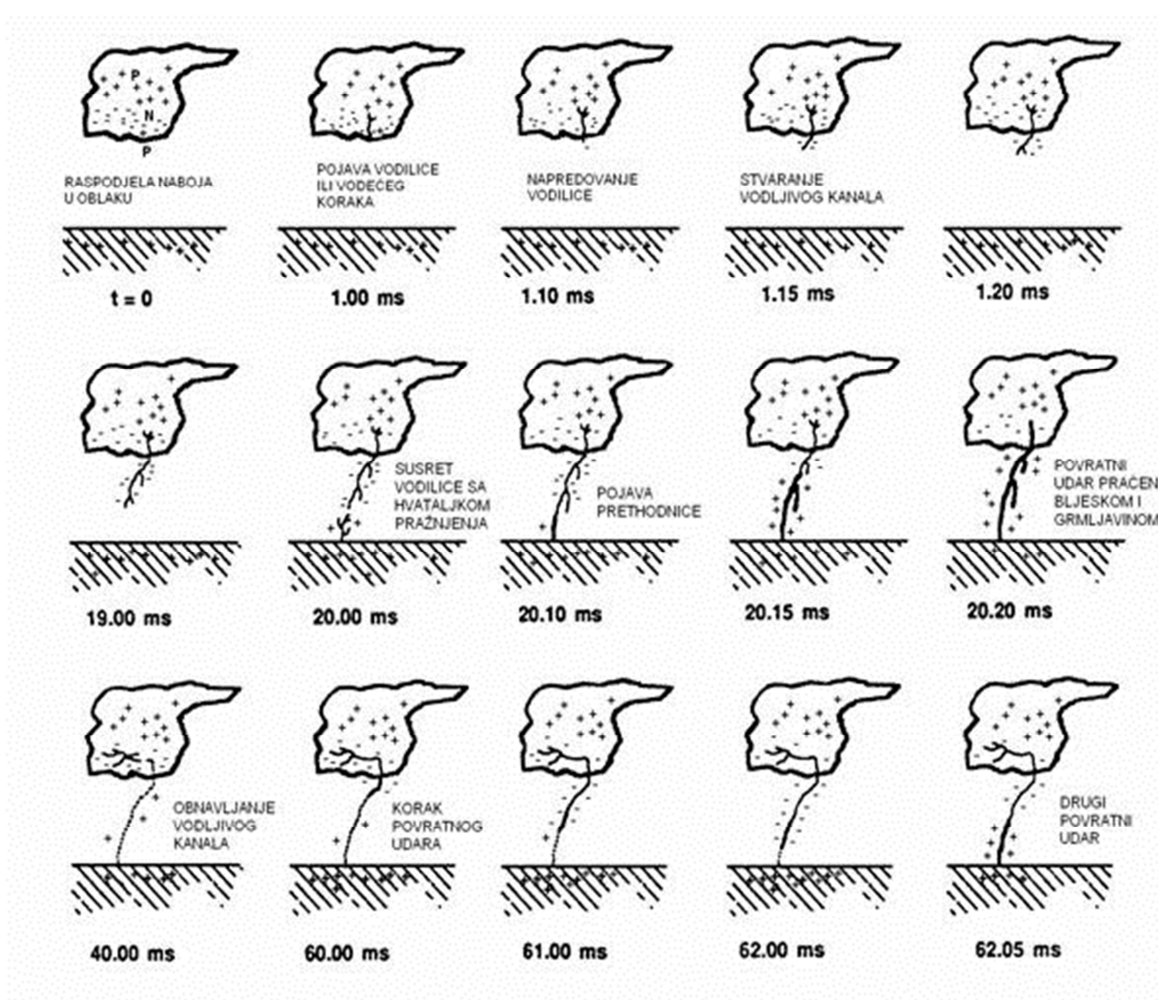


Slika 17: Bljesak munje oblak – zemlja s 12 udara u Novom Meksiku snimljen kamerom s pokretnim filmom. Prvi udar je s lijeve strane i jedini se grana. Vrijeme teče slijeva udesno i u tom smjeru se giba film kamere u toku bljeska, kako bi omogućila rezoluciju pojedinih udara. <sup>[7.]</sup>





Slika 18: a) Bljesak munje s 3 udara kakav bi snimili kamerom sa stacionarnim filmom; b) Isti bljesak munje snimljen kamerom s pokretnim filmom ( SL = stepenasta vodilica, RS= povratni udar, DL = skokovita vodilica); c) struja kanala munje [8.]



Slika 19: Faze u procesu stvaranja negativnog bljeska munje oblak – zemlja i približan trenutak pojedine faze u milisekundama [7.]

Kanal munje razvija se iz oblaka kao vodeći korak ili vodilica (eng. stepped leader) i giba se oko  $1\mu\text{s}$  u diskretnim svjetlucavim koracima duljine 2 – 50 m, uz stanke od  $50\mu\text{s}$  između koraka, kada je vodilica još daleko od zemlje i  $10\mu\text{s}$ , kad je blizu zemlje. Vodilica se u svom napredovanju može razgranati. Srednja brzina napredovanja vodilice prema zemlji je  $2 \cdot 10^5$  m/s, a za cijeli put od oblaka do zemlje potrebno je oko 20 ms. Prosječno vodilica nosi 5 C negativnog naboja raspoređenog po njenoj duljini. Kroz kanal vodilice teče prosječna struja oko 100 – 200 A, dok koraci vodilice imaju pulsnu struju oko 1 kA. U svakom koraku emitira se puls vidljive svjetlosti, puls radiofrekventne energije i puls X – zraka energije oko 200 keV. Fotografskim mjerenjima dobiven je promjer svjetleće vodilice između 1 i 10 m. Prevladava mišljenje da se u sredini izmjenjenog promjera nalazi vodljiva jezgra promjera nekoliko centimetara, kroz koju teče silazna struja vodilice, a okolo jezgre su koronska strujanja čiji je promjer nekoliko metara.

Kad se vodilica približi zemlji, električno polje negativnog naboja inducira pozitivan naboj na površini zemlje ispod. Porastom jačine električnog polja do kritične vrijednosti, formira se uzlazno pozitivno nabijeno pražnjenje tkz. hvataljka u trenutku 20. ms. Dolazi do procesa povezivanja glave kanala vodilice s hvataljkom i time je stvoren ionizirani kanal ili vodljiva staza munje. Proces povezivanja zove se faza probijanja (eng. break – through phase). U toj fazi iz točke povezivanja vodilice i hvataljke pokreću se 2 vala povratnog udara koji u osnovi služe neutraliziranju naboja vodilice. Najčešće se sav naboj ne neutralizira, ili se u kanalu vodilice i u pozitivnom dijelu oblaka pohranjuje dodatni pozitivni naboj. Negativni naboj kod glave kanala giba se naglo prema zemlji stvarajući veliki dotok struje, povećavajući ionizaciju vodilice i uzrokujući jaki sjaj kanala blizu površine zemlje. Inducirani pozitivni naboj naglo krene u ionizirani kanal stvarajući povratnu struju ili povratni udar, krećući se brzinom između  $1/3$  i  $1/2$  brzine svjetlosti i djelomično neutralizirajući negativan naboj kanala. U kanalu se tada nalazi potpuno ionizirana plazma maksimalne temperature  $30000\text{K}$ , tlak u kanalu je oko 10 atm i teče struja čija vršna vrijednost je oko 30 kA. Povratni udar stvara bljesak koji vidimo i grmljavinu koju čujemo, a nastaje širenjem udarnih valova od 10 – 100 m od ekspanzirajućeg kanala povratnog udara. Ako se sav negativni naboj neutralizira, bljesak završava s jednim udarom. Oko 80 % bljeskova munja nakon prestanka struja prvog povratnog udara, ima još 3 – 5 udara s razmakom 40 – 50 ms. Ako je nakon prvog povratnog udara ostao dodatni negativni naboj u gornjem dijelu ioniziranog kanala, kanal se obnavlja skokovitom vodilicom (eng. dart leader) tako da se ponovno negativni naboj

prenosi iz negativnog područja oblaka duž kanala i pripreme uvjeti za drugi povratni udar. Skokovita vodilica koristi najčešće prije formirani kanal munje pa se ne kreće u koracima nego kontinuirano. Vršna struja drugog povratnog udara niža je od struje prvog udara i obično iznosi 10 – 15 kA. Tipična brzina širenja je  $10^7$  m/s, a po kanalu je raspoređen ukupni naboj od 1 C.

U vremenskom intervalu između završetka prvog povratnog udara i pojavljivanja skokovite vodilice, u oblaku nastaju J i K procesi. J – proces se opisuje kao relativno spora pozitivna vodilica koja se širi od izvora bljeska u područje negativnog naboja. K – proces je relativno brzo povratno strujanje koje počinje na vrhu pozitivne vodilice i širi se prema izvoru bljeska. Oba procesa služe prijenosu dodatnog negativnog naboja u i duž postojećeg kanala, pa se K – proces promatra i kao probna skokovita vodilica. Na kraju zadnjeg udara u bljesku, odvija se završni F – proces koji je sličan J – procesu.

Radijus kanala povratnog udara je oko 3 cm, a vodljivost je oko  $10^4$  S/m. Između 30 % i 50 % svih negativnih bljeskova oblak – zemlja ima nakon udara bar 1 interval od oko 40 ms sa kontinuiranom strujom jačine od 10 – 100 A, slabog sjaja, koja se zove M – komponenta. Kontinuirana struja je relativno stalan tok naboja između područja negativnog naboja u oblaku i zemlje. Procesom povratnog udara naboj se prenosi na zemlju u 2 koraka; prvo naboj prijeđe iz oblaka na kanal vodilice po njegovoj duljini, a zatim se iz dna kanala isprazni u zemlju.

### ***Munja oblak – zemlja sa silaznom pozitivno nabijenom vodilicom***

Munje s pozitivno nabijenim vodilicama su rijetke, slabijeg sjaja i zato slabije proučene. Slika 20 prikazuje primjer ove munje. Primijećeno je da pozitivnom bljesku prethode pražnjenja u oblaku u trajanju oko 100 ms, pa se pretpostavlja da je pozitivna munja oblak – zemlja samo ogranak proširenog pražnjenja u oblaku. Ishodište munje češće je u gornjem pozitivnom dijelu oblaka tkz. nakovnju, a pražnjenja se mogu proširiti na većim udaljenostima od ishodišta horizontalno u oblaku prije nego vodilica krene prema zemlji. Koraci vodilice su manje uočljivi. Vršna vrijednost struje pozitivnog povratnog udara izmjerena na zemlji može dostići 300 kA, a srednja vršna vrijednost je 30 kA. Pozitivna pražnjenja najčešće imaju samo jedan povratni udar, nakon kojeg je relativno duži period kontinuirane struje. Njima se prosječno može prenijeti puno veća količina naboja nego negativnim pražnjenjima. Za vrijeme udara stvaraju se brojni valovi vrlo niskih ( VLF ) i ekstremno niskih (ELF) frekvencija.



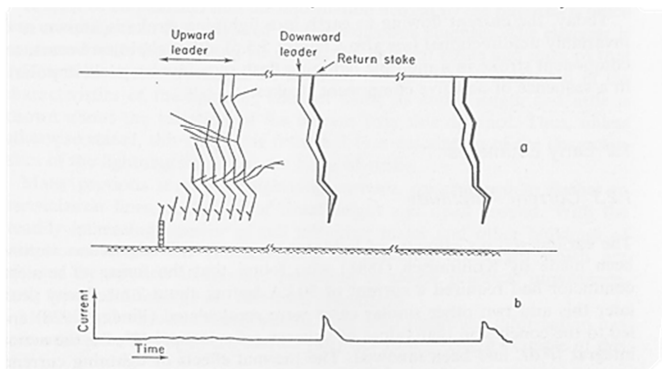
Slika 20: Munja oblak (nakovanj) – zemlja sa silaznom pozitivno nabijenom vodilicom <sup>[16]</sup>



Slika 21: Munja od objekta na zemlji prema oblaku <sup>[16]</sup>

### *Uzlazne munje oblak – zemlja*

Kod uzlaznih munja prva vodilica se širi od visokog objekta na zemlji prema oblaku, kao što je vidljivo na slici 21. Kada dođe do naboja u oblaku, nije uočeno pojavljivanje povratnog udara ili procesa koji bi sličio povratnom udaru. Nakon što vodilica poveže područje naboja u oblaku i zemlju, prestaje teći početna struja, pa mogu nastati uzastopni udari koje stvaraju silazne skokovite vodilice iz naboja u oblaku. Vremenski razvoj uzlaznog pražnjenja prikazan je na slici 22. Najvjerojatniji razlog, zašto se kod prve vodilice ne uočava silazni povratni udar, je nepostojanje dobro definiranog područja u oblaku u kojem bi postojala velika potencijalna razlika prema vodilici. Po tome se uzlazne munje razlikuju od silazne negativne vodilice kod koje je negativni potencijal  $10^7 - 10^8$  V u odnosu na potencijal Zemlje od 0 V.

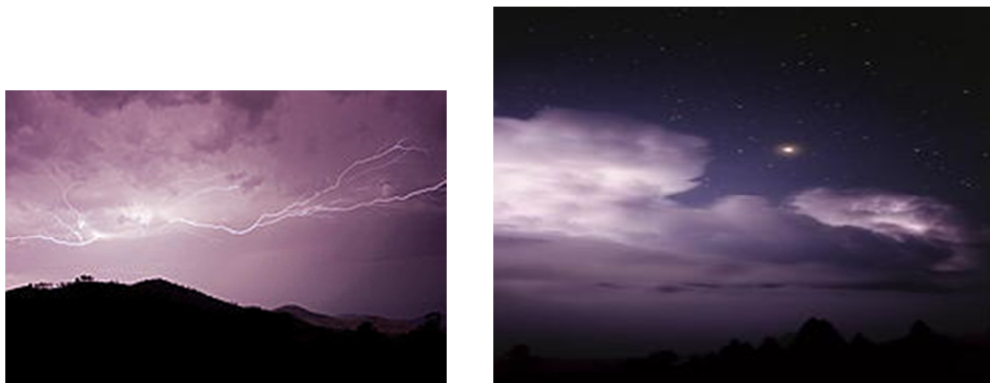


Slika 22: a) Grafički prikaz vremenskog razvoja uzlaznog pražnjenja oblak – zemlja, prema snimkama bljeska načinjenim pokretnom kamerom b) pripadni strujni pulsovi <sup>[2.]</sup>

## 6.2 Munje u oblacima

Slika 23 prikazuje primjere munja u oblacima. Većina munja nastaje unutar oblaka, ili između oblaka, ili između oblaka i okolnog zraka, ali one su do sada slabo istražene djelomično zbog poteškoća u provedbi eksperimentalnih mjerenja i analiziranju dobivenih rezultata, a djelomično zbog slabijeg interesa za njihovo istraživanje jer ne uzrokuju direktne probleme ljudima. <sup>[7]</sup> Dosadašnji eksperimentalni podaci, a posebno mjerenja električnih polja, ne pokazuju razliku u osobinama ovih tipova munja.

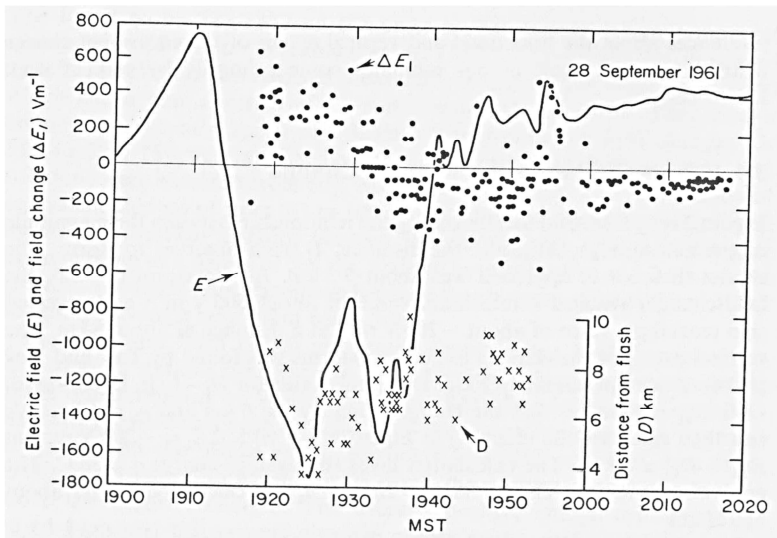
Pražnjenja unutar oblaka obično nastaju između područja pozitivnog i negativnog naboja u ukupnom vremenskom trajanju oko pola sekunde. Njima se prenese desetak kulona naboja preko ukupne prostorne udaljenosti u horizontalnom smjeru od 5 – 10 km.



Slika 23: Munje u oblacima; vidljivi dio (lijevo) i pražnjenje potpuno unutar oblaka (sijevanje, desno) <sup>[17]</sup>

Pretpostavlja se da kontinuirano rasprostirana vodilica stvara slabe povratne udare nazvane odbojna strujanja (eng. recoil streamers) koja su povezana s električnim poljima nazvanim K – promjene. Kod K – promjena vodilica se spoji s džepovima nakupina prostornog naboja suprotnog predznaka od naboja na vodilici.

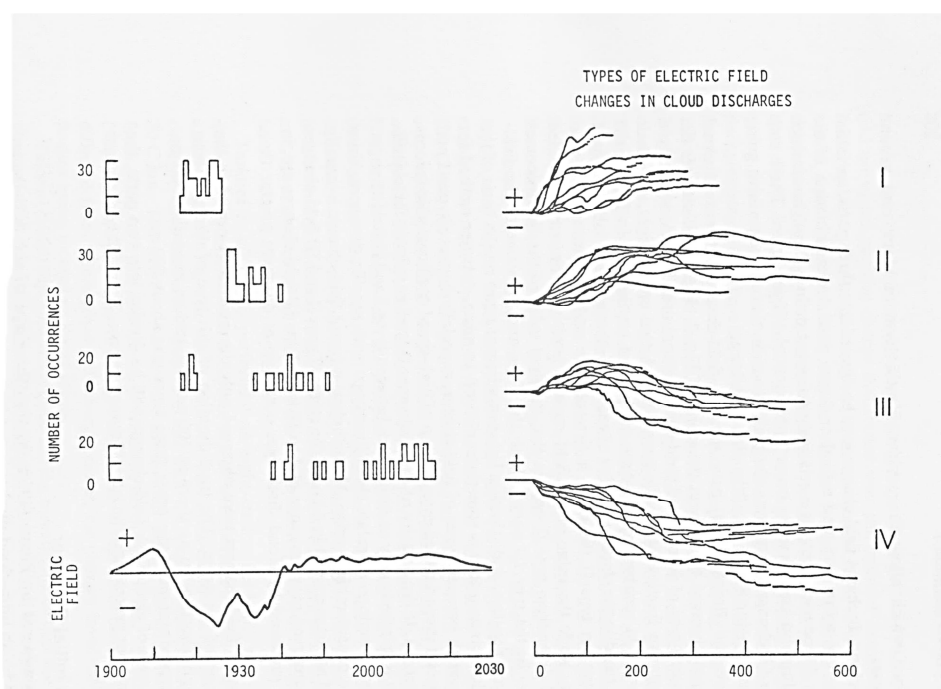
Snimanja promjena električnog polja uz visoku vremensku rezoluciju pomoću sporih ili brzih antena i uspoređivanja s direktnim ili fotografskim promatranjima omogućila su razlikovanje vrsta promjena polja. <sup>[2]</sup>



Slika 24: Grafikon mjerenja električnog polja  $E$  (puna linija) i promjene električnog polja  $\Delta E_1$  (točkice) kao funkcije vremena, za izoliranu oluju uočenu 28. 9. 1961. u Soccoru u Novom Meksiku. Križićima je označena približna udaljenost od oluje u danom vremenu. Oluja je prolazila pored promatračnice na udaljenosti oko 4 km. Mjerenje je izvedeno kontinuiranim snimanjem sporom antenom. U vremenskom intervalu od 19:17 do 20:27 MST zabilježeno je oko 600 promjena polja prouzročenih pražnjenjima u oblaku.  $\Delta E_1$  teži pozitivnim vrijednostima za bljeskove na manjim udaljenostima, a negativnim vrijednostima za udaljenije bljeskove. Kada je polje  $E$  negativno, promjena polja  $\Delta E_1$  je pozitivna i obrnuto. [2.1]

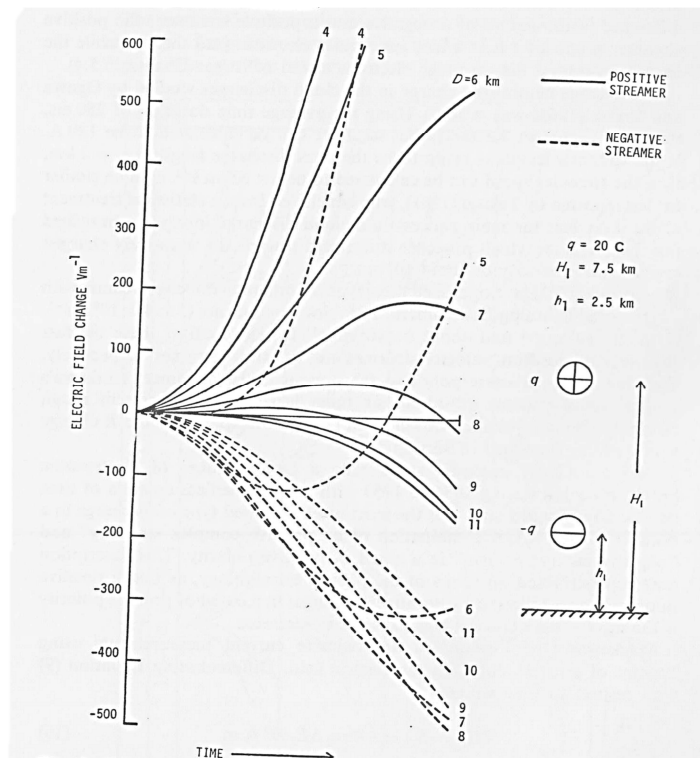
Promjene polja kod pražnjenja u oblaku mogu se podijeliti u 3 dijela: početni dio, aktivni dio i konačni dio ili J – tip, kako je pokazano na primjeru izolirane oluje u Novom Meksiku na slici 24. U J – tipu je uočeno područje s kratkotrajnim stepeničastim promjenama u razmacima od približno 10 ms, nazvanim K – promjenama, koje daje glavni doprinos završnom dijelu pražnjenja u oblaku. Postoje osnovna 4 tipa promjene polja unutar oblaka, a prikazana su na slici 25 na primjeru oluje iz Novog Meksika.

Krivulje tipa I imaju pozitivan i nagib i veličinu promjene polja. Kod tipa II nagib je prvo pozitivan a zatim se mijenja u negativan dok vrijednost polja ostaje pozitivna. Tip III mijenja i nagib i vrijednost polja iz pozitivne u negativnu. Krivulje tipa IV imaju negativan i nagib i veličinu promjene polja. Tipovi promjene polja I i II mogu se lakše razlikovati promatranjem polariteta K – promjena na kraju pražnjenja. Za tip I polaritet je pozitivan, a za tip II je negativan. Iako postoji značajno preklapanje ova 4 tipa, vidljiva je korelacija tipova i specifične udaljenosti na kojima ih se može uočiti. Promjene polja tipa I obično se promatraju na udaljenostima unutar 6 km od oluje i samo u ranom stupnju razvoja oluje u trajanju od 100 – 300 ms. Tipovi II i III mogu se uočiti u rasponu od 4 do 10 km. Promjene polja tipa IV posljedica su pražnjenja u oblaku na udaljenostima većim od 8 km. Prosječno trajanje tipova II, III i IV je oko 500 ms.



Slika 25: Tipovi promjena polja pri pražnjenjima u oblaku i njihovo pojavljivanje u različitim stanjima oluje ( desno); Krivulja električnog polja u kojem se pojavljuju ovi tipovi promjene polja ( lijevo dolje); Učestalost pojavljivanja po tipovima i u vremenu ( lijevo gore) <sup>[2.1]</sup>

Pierce je postavio hipotezu da se krivulje promjene polja mogu interpretirati kao okomito gibanje naboja u oblaku. <sup>[2]</sup> Sporu pozitivnu promjenu polja može proizvesti silazna vodilica iz negativnog područja naboja u oblaku, a složenu promjenu polja dobijemo kombinacijom 2 vodilice iz negativno nabijenog područja, tako da jedna napreduje uzlazno a druga silazno. Ogawa i Brook su povezali strujanje s početnim i aktivnim dijelom pražnjenja u vremenu oko  $\frac{1}{2}$  ukupnog trajanja pražnjenja. Pretpostavili su matematički model oblaka sa sferosimetričnim pozitivno nabijenim volumenom koji se nalazi na nekoj visini  $H$  iznad sferosimetričnog negativno nabijenog volumena. Između ovih područja oblaka postoji vertikalno strujanje konstantnom brzinom  $v$  i to silazno strujanje pozitivnog naboja i uzlazno strujanje negativnog naboja. Proračun promjena polja u vremenu i u ovisnosti o udaljenosti od promatrača do bljeska prikazali su grafički kako je prikazano na slici 26.



Slika 26: Računski određene promjene električnog polja kao funkcije vremena i udaljenosti od promatrača do munje u slučaju okomitog strujanja. Punom linijom prikazana su silazna pozitivna strujanja, a isprekidanom linijom uzlazna negativna strujanja [2.]

Uspoređivanjem početnog i aktivnog dijela pražnjenja (prva polovica na krivuljama promjene polja na slici 25) s rezultatima proračuna (slika 26) zaključili su da podaci potkrepljuju model silaznog pozitivnog strujanja. Za vodilicu duljine oko 2 kilometra (ukupna duljina pražnjenja) i prosječnog trajanja oko 250 ms, prosječna struja vodilice je 120 A, a brzina strujanja oko  $10^4 \text{ m/s}$ . Takagi i Ishikawa su neovisno jedan o drugom na osnovu statističkih analiza podataka dobivenih mjerenjima i opažanjima također zaključili da su u oblacima najčešće vidljive pozitivno nabijene vodilice sa negativnim K – promjenama.

Do sasvim suprotnog zaključka došli su Smith i Nakano, koji su utvrdili u svojim analizama mjerenja, da pražnjenja u oblaku pokreću uzlazne negativne vodilice. Smith je vršio simultana mjerenja promjena električnog polja na 2 stanice udaljene 13.2 km na Floridi. Uzimajući u obzir snimljenu promjenu polja i udaljenost pojedine stanice od munje, mogao je odrediti predznak i smjer gibanja naboja unutar oblaka. Pretpostavio je 2 modela pražnjenja: okomiti pozitivni dipol i okomiti negativni dipol, u kojima se giba samo jedan točkasti naboj. Analiziranjem podataka dobivenih od 54 pražnjenja u oblaku, za 39 je zaključio da predstavljaju model pozitivnog dipola u kojem je bilo 30 slučajeva



uzlaznog gibanja negativnog naboja i 9 slučajeva silaznog gibanja pozitivnog naboja. Preostalih 15 pražnjenja pripadala su modelu negativnog dipola s 9 slučajeva uzlaznog gibanja pozitivnog naboja i 6 slučajeva silaznog gibanja negativnog naboja. Pražnjenja po modelu pozitivnog dipola događala su se na većim visinama u oblaku. Smith je zaključio da se oko 80 % izmjerenih sporih promjena polja može zadovoljavajuće objasniti modelom točkastog naboja tj. jednolikim okomitim gibanjem jednog naboja unutar oblaka.

Nakano je vršio mjerenja na 3 – 7 stanica u Japanu. Utvrdio je da se centar negativnog naboja u oblaku nalazi u području s temperaturama između - 6 i - 10 °C.

Liu i Krehbiel su predložili model početnog dijela vodilice kao proizvoljno orijentiranu jednoliko nabijenu liniju koja se širi iz sferosimetričnog izvora naboja. Vodilica ima fiksnu orijentaciju samo u prvih 5 – 10 ms. Nakon toga slijedeća stepenica vodilice može se od završetka prijašnjeg dijela širiti pod proizvoljnim kutom. Cijeli model vodilice građen je od povezanih linearnih segmenata s različitom orijentacijom, duljinom i nabojem. Ovaj model pokazao se zadovoljavajućim samo u prvih nekoliko perioda od po 5 – 10 ms. Liu i Krehbiel su nadalje pretpostavili da male rastuće olujne ćelije stvaraju okomita pražnjenja u oblaku, dok oluje u zreloj ili rasplinjavajućoj fazi imaju horizontalnija pražnjenja.

K – promjene su promjene električnog polja mjerene u milisekundama koje nastaju kod pražnjenja u oblaku. Nazvane su prema skraćenom njemačkom nazivu „Kleine Veränderungen“ i slične su K- promjenama u munjama oblak – zemlja. Predstavljaju odbojne ili povratne udare suprotnog polariteta. Ako na primjer pretpostavimo da imamo okomito silazno pozitivno strujanje kao vodilicu, K – promjena je negativni povratni udar koji putuje unazad od vrha kanala kojeg su načinili raniji procesi strujanja. U završnom dijelu pražnjenja u oblaku ukupna promjena polja je suma pojedinačnih K – promjena, a polaritet K – promjena određuje nagib J – tipa.

### ***6.3 Kuglaste munje***

Kuglaste munje su sjajne ili vatrene kugle koje se mogu pojaviti uz uobičajene vrste munja u snažnim olujama. <sup>[2]</sup> U prirodi su vrlo rijetke i nepredvidive pa se rezultati eksperimentalnih mjerenja iz opažanja dobivaju jedino ako se pri proučavanju ostalih vrsta

munja slučajno pojavi i kuglasta munja. Tako su dobivene i njihove rijetke snimke, a nekoliko je prikazano na slici 27.



Slika 27: Snimka kuglaste munje koju je slučajno napravio jedan student iz Japana ( lijevo); kuglasta munja snimljena 28. 6. 2011. u Maastrichtu u Nizozemskoj <sup>[18]</sup>

Poznate su neke njihove karakteristike. Oblik munje može biti približno sferni ( u 10 – 20% slučajeva), ili poput prstena ili diska. Prosječni promjer je 25 cm iako su uočene i munje promjera nekoliko metara. Iz centralnog dijela može se širiti korona ili se pojavljuju iskrenja. Boja sfere je najčešće crvena ili narančasta, ali su zabilježene i munje žute, plave, zelene i intenzivno sjajne bijele boje. Trajanje munje je obično 1 – 5 s iako su zabilježeni ekstremni slučajevi kad je munja bila vidljiva nekoliko minuta. Svjetlosne ili vatrene lopte mogle su ući u zgrade. Srednja brzina gibanja je 1 – 2 m/s. Putanja im može biti okomita, vodoravna, krivudava, rotacijska ili mogu stajati na mjestu. Munja se može pojaviti u tišini ili praćenja pucketanjima poput električnih pražnjenja, a ponekad je to popraćeno mirisom nalik sumporu, ozonu ili dušikovom dioksidu. Mnoge sfere nestaju u tišini, neke mogu i eksplodirati, neke pritom ne stvaraju oštećenja a neke su vrlo destruktivne.

Zbog nepredvidivosti ovog fenomena i širokog raspona njegovih obilježja među znanstvenicima su trajale rasprave o autentičnosti pojave. Postavljeno je više različitih teorija koje su pokušale objasniti kuglaste munje, ali nijedna od njih nije se pokazala dovoljno točna. U nekim laboratorijskim eksperimentima dobiveni su efekti vizualno slični prirodnim kuglastim munjama, ali dosad još nije utvrđeno postoji li veza između prirodnih i laboratorijskih pojava. Skupina znanstvenika iz Northwest Normal University u Lanzhou u Kini snimala je u srpnju 2012. god. digitalnom kamerom, kamerom za brza snimanja s 3000 sličica/s i spektrografom s 2 pukotine munje oblak – zemlja i pritom su snimili pojavu kuglaste munje. <sup>[18]</sup> Kuglasta munja se pojavila na udaljenosti 900m nakon udara munje oblak – zemlja u zemlju. Kamerom za brza snimanja snimljeno je zadnjih 0.78s

njenog horizontalnog kretanja prije nego je nestala. Slika 28 pokazuje digitalni snimak kretanja kuglaste munje i njen spektar. Na slici 29 prikazani su emisijski spektri munje oblak – zemlja i kuglaste munje. U spektru kuglaste munje nađene su emisijske linije neutralnih atoma silicija, kalcija, željeza, dušika i kisika. Spektar munje oblak – zemlja uglavnom je imao emisijske linije ioniziranog dušika. Uočene su oscilacije svjetlosnog intenziteta emisije dušika i kisika na frekvenciji 100 Hz što je pripisano utjecaju elektromagnetskog polja iz okoline. Temperatura kuglaste munje je bila niža od temperature kanala munje oblak – zemlja. Znanstvenici su zaključili da se njihovi podaci slažu sa isparavanjima sa zemlje i da kuglasta munja reagira na električno polje.

Danas postoji nekoliko glavnih teorija o kuglastim munjama <sup>[2, 18]</sup>.

a) Radio – frekvencijska teorija (hipoteza mikrovalne šupljine)

Teoriju je predložio Pyotr Kapitsa na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja u kojima se radiofrekvencijskim pražnjenjima proizvela plazma vidljiva još 0.5 – 1 s nakon gašenja aparature. Mjerenjima u prirodi uočeno je mikrovalno zračenje 0.1 – 0.4 s nakon vodilice. Pretpostavljeno je da zračenje proizvodi rezonancija transverzalne plazme u kanalu munje. Do rezonancije dolazi kada magnetsko polje udara munje pojača magnetsko zakočno zračenje i Čerenkovljevo zračenje elektrona u kanalu.

Dawson i Jones su postavili hipotezu mikrovalne šupljine. Pri ponovnom udaru u bljesku struja teče uglavnom u vanjskom dijelu kanala munje i reflektira valne duljine manje od milimetra u kanal gdje ostaju zarobljene i skupljene. Zbog nestabilnosti kanala, dio kanala se odvoji i formira kuglastu munju. Hladni zrak koji uđe u sferu, nakon zagrijavanja je izbačen uvis ili sa stražnje strane. Ionizirani vanjski plinovi čine ovojnici koja zadržava mikrovalove u šupljini i elektrodinamički izbacuje formirane ione. Zbog porasta vanjskog tlaka raste i energija pohranjena u šupljini.

b) Hipoteza o plazmi

Hipotezu je postavio Bergström uzimajući u obzir jake interakcije kod okupljanja nabijenih čestica. Pretpostavljeno je postojanje jakog dielektrično – dijamagnetskog privlačenja koje može nadvladati kulonsko odbojno djelovanje kod interakcija na malim udaljenostima. Interakcije se promatraju kao reakcija sistema na promjene da bi ih se umanjilo, npr. kada se električni naboj akcelerira u električnom polju, elektromagnetskom indukcijom se stvara električno polje suprotno izvornom. Bergström je pretpostavio da

snažne struje i polja u oluji mogu proizvesti malo područje pozitivnog naboja smanjenjem koncentracije elektrona zbog njihove velike mobilnosti. Jaka interakcija nastaje kao reakcija na ubrzavanje iona u gustom pozitivno nabijenom oblaku. Energija koja se dobije ovim modelom odgovara redu veličina energije kuglaste munje.

c) Nuklearna teorija

Mc Nally je pretpostavio nuklearnu reakciju u kojoj su pozitivni ioni izbačeni iz jezgre u kojoj ostaju elektroni. Ioni iz fuzijske reakcije usporavaju se rezultatnim električnim poljem i skreću u vanjski ionski strujni sloj. Ionska struja drži zarobljenu plazmu u unutrašnjosti.

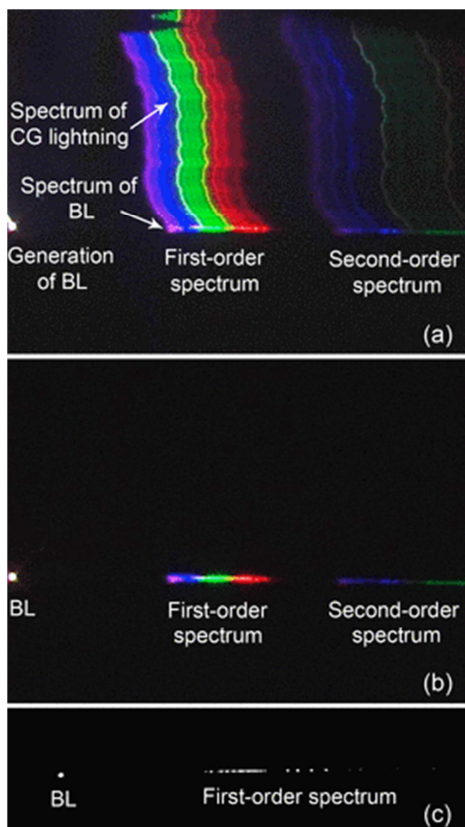
d) Teorija elementarnih čestica

Ashby i Whitehead su pretpostavili da visokoenergetska kuglasta munja nastaje od vrlo malih čestica antimaterije, meteorske prašine iz gornje atmosfere. Čestice antimaterije radijusa  $5\mu\text{m}$  i mase  $5 \cdot 10^{-10}$  g mogle bi anihilacijom osloboditi  $10^5$  J energije. Proces bi mogao nastati u oluji zbog koncentracije prašine antimaterije negativnog naboja iz fotoemisije pozitrona i sekundarne emisije iz odbijenih dijelova. Prašina negativnog naboja teče zajedno sa negativnom strujom oluje prema zemlji. Trenutnom reakcijom antimaterije i materije nastaje kuglasta munja.

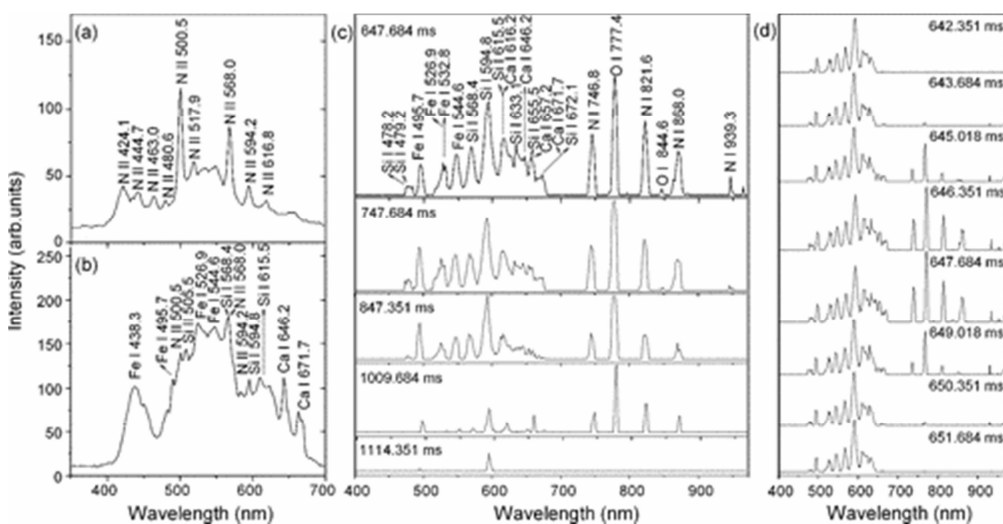
e) Hipoteza silicijevih isparavanja – kemijska teorija

Udar munje o zemljino tlo može na neki način odvojiti kisik iz silicijeva dioksida i uzrokovati isparavanje silicija. Hlađenjem se silicij može kondenzirati u lebdeći aerosol koji sjaji zbog oslobađanja topline pri ponovnoj reakciji s kisikom.

Postoji još mnogo hipoteza o mehanizmu stvaranja kuglaste munje, ali se još nijedna nije pokazala zadovoljavajućom, jer se ne može provjeriti opažanjima niti usporediti opažanja s pražnjenjima izvedenim u laboratoriju.



Slika 28: a) Pojava kuglaste munje (bijela točkica na slici lijevo) nakon udara munje oblak – zemlja snimljena digitalnom kamerom; b) Kanal munje oblak – zemlja je nestao, a ostala je kuglasta munja i njen snimljeni spektar (snimka digitalnom kamerom); c) crno – bijela snimka kuglaste munje načinjena kamerom za brza snimanja <sup>[19]</sup>

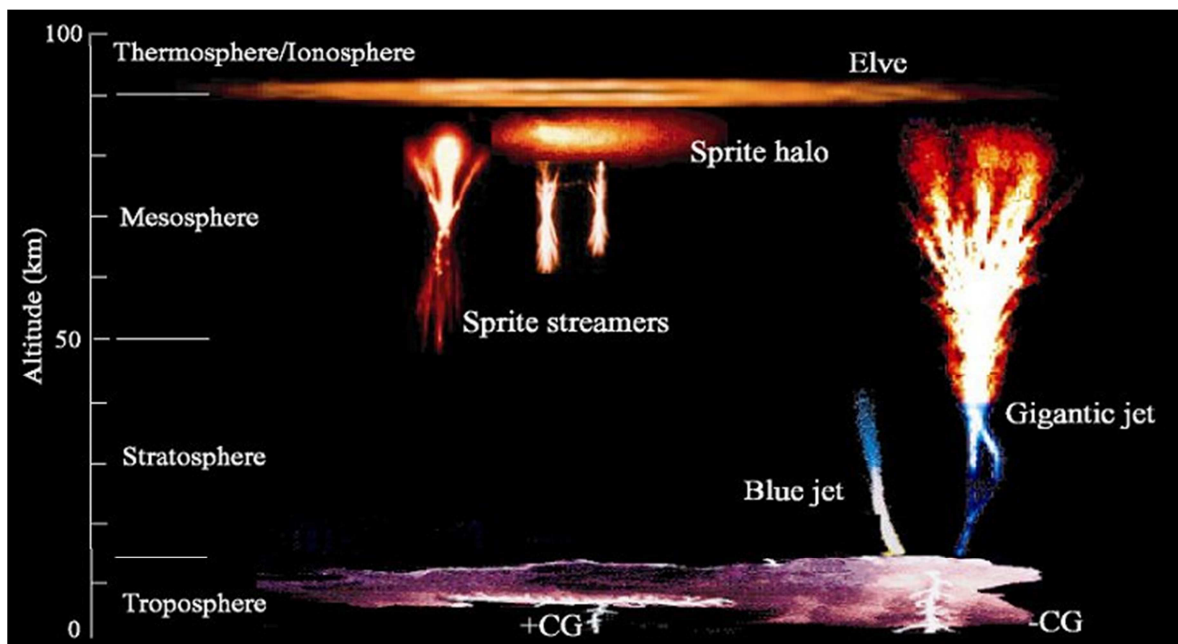


Slika 29: Grafički prikaz spektralne analize ovisnosti intenziteta o valnoj duljini : a) spektar kanala munje oblak – zemlja; b) spektar kuglaste munje u 0ms; c) spektar kuglaste munje u kasnijem trenutku snimljen kamerom za brzo snimanje; d) promjene spektra kuglaste munje u ciklusu od 642.351 do 652.351 ms. Prikazano je 8 grafikona u vremenskom intervalu od 1.333 ms, od ukupno 33 snimljena spektralna grafikona. <sup>[19]</sup>

## 6.4 Nove vrste munja

Već u 19. stoljeću pojavili su se izvještaji o čudnim svjetlosnim pojavama primijećenim iz vrha oblaka uvis. Znanstvenici su dugo zanemarivali takve pojave sve dok 1925. god. C. T. R. Wilson nije pretpostavio da bi mogla postojati pražnjenja između vrha oblaka i ionosfere, te da su ona povezana s pražnjenjima prema tlu. Danas su takva pražnjenja poznata pod nazivom prijelazni svjetlosni događaji (eng. Transient luminous events) ili TLEs. <sup>[3,5]</sup>

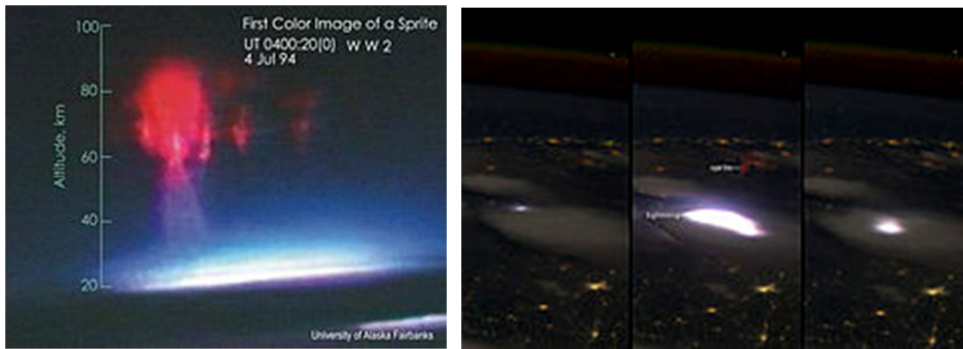
TLEs su kratkotrajne emisije vidljive svjetlosti iznad grmljavinskih oblaka u stratosferu, mezosferu i donju ionosferu. Stvaraju ih uzlazna pražnjenja ili su reakcija na munje u oblacima i munje oblak – zemlja. Razlikujemo nekoliko tipova TLEs-a: vilenjac, svjetlosni krugovi, patuljci, plavi starteri, plavi mlazovi, gigantski mlazovi, prikazanih na slici 30.



Slika 30: Vrste prijelaznih svjetlosnih događaja ili TLEs-a <sup>[20]</sup>

### Vilenjaci i svjetlosni krugovi (eng. sprites and halos)

Slika 31 pokazuje snimke vilenjaka.



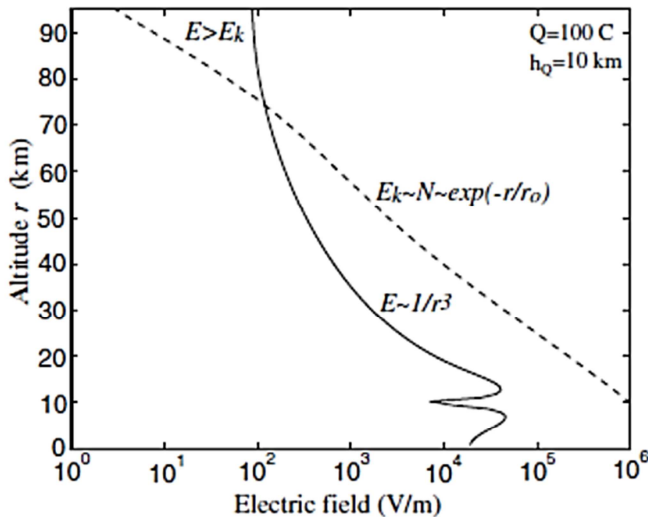
Slika 31: Prva slika vilenjaka u boji snimljena iz aviona ( lijevo); Vilenjaci iznad Malezije snimljeni iz Međunarodne svemirske stanice (desno) <sup>[20]</sup>

Vilenjaci nastaju u bazi ionosfere na visini oko 80 km, gibaju se prema dolje brzinom oko 10 000 km/s, traju nekoliko desetina milisekundi i mogu se vidjeti očima adaptiranim na mrak. Ako se rasprostiru silaznim pozitivnim strujanjem, zovu se stupčasti ili C – vilenjaci. Kada nakon silaznih slijede uzlazna strujanja, nastaju mrkva – vilenjaci. Svjetlosni krugovi su kratkotrajni silazni ionizacijski valovi, promjera manjeg od 100 km, koji prethode ili prate vilenjake. <sup>[3,5,9]</sup> Smatra se da se stvaraju istim procesom kao vilenjaci, ali sa manjom ionizacijom tako da se ne mogu pojaviti strujanja.

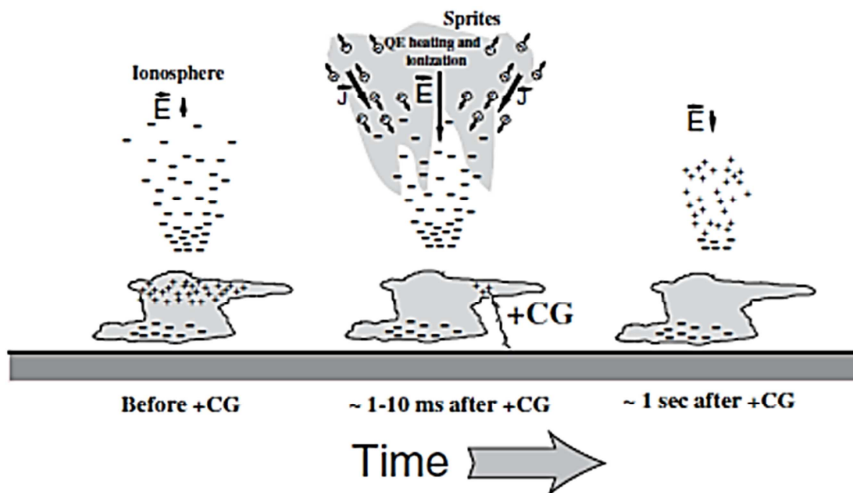
Vilenjaci obično nastaju nakon intenzivnih pozitivnih pražnjenja munja oblak – zemlja uz velike kontinuirane struje. Budući da su pozitivna pražnjenja puno rjeđa nego negativna, vilenjaci se rijetko pojavljuju. Zabilježeno je u cijelom svijetu dnevno oko 1000 vilenjaka, dok se istovremeno dogodi 4 000 000 bljeskova munje. Uglavnom se pojavljuju iznad kontinenata jer se ovdje formiraju veliki grmljavinski sustavi. Snimaju se noću kamerama osjetljivim na svjetlost jer je tada ionosfera na većim visinama pogodnim za stvaranje vilenjaka.

Mogućnost pojave pražnjenja iznad oblaka prvi je 1925. god. predvidio Wilson, kako je prikazano na slici 32. Elektrostatsko polje E proizvedeno pozitivnim pražnjenjem munje oblak – zemlja inicira vilenjake. Zbog velike vodljivosti atmosfere iznad olujnog oblaka, kako se oblak nabija, električno polje se širi u prostor iznad oblaka i izaziva stvaranje gornjeg zaklonjenog sloja naboja, kako je prikazano na slici 33. Gibanje naboja zbog munje stvara brzu promjenu dipolnog momenta unutar troposfere. Električno polje se zbog pojave dipola brzo proizvodi i širi do ionosfere, opadajući kubno s porastom visine iznad oluje. Istovremeno dogovorno polje proboja proporcionalno je s gustoćom zraka koja opada eksponencijalno s visinom. Ako je bljesak munje dovoljno velik, lokalno električno polje stvoreno iznad oblaka, postat će veće od dogovornog polja proboja. Na slici je

vidljivo da se to događa na visini od 70 do 80 km u kratkom vremenskom intervalu oko 1 – 10 ms. Zbog električnog polja stvaraju se pozitivna strujanja koja se razvijaju i granaju oblikujući vilenjake. Strujanja prenose naboj prema ionosferi održavajući rad zemljinog strujnog kruga kao što je prikazano na slici 34.



Slika 32: Wilsonov fizikalni mehanizam za stvaranje vilenjaka iz pražnjenja munje.  $E$  je dipolno električno polje generirano munjom.  $E_k$  je dogovorno polje praga proboja definirano jednakošću koeficijenata ionizacije i disocijativnog povezivanja. Povećanjem visine  $r$ ,  $E_k$  opada brže od  $E$ , pa na visinama između 70 i 80 km može doći do pražnjenja [5.]

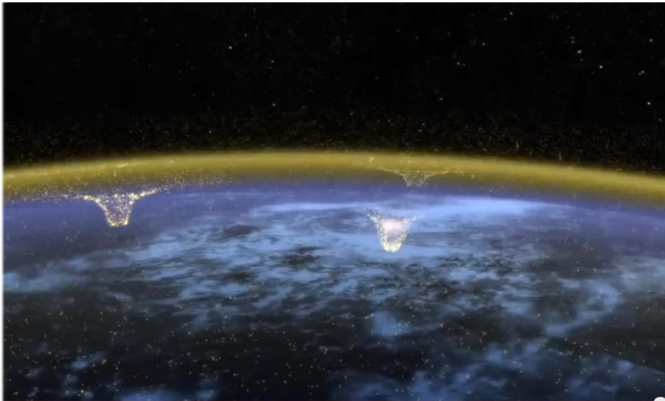


Slika 33: Prikaz mehanizma prodiranja velikog električnog polja do mezofere i formiranja vilenjaka [9.]

Zbog velikih visina na kojima se vilenjaci pojavljuju, pražnjenja nemaju dovoljno vremena da zagriju zrak toliko da se može formirati vrući kanal vodilice, pa su vilenjaci slični



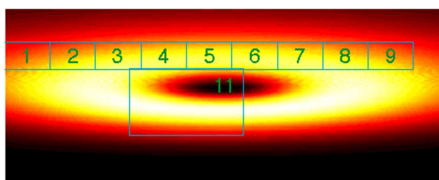
koronskim pražnjenjima. Zato proučavanje vilenjaka omogućuje bolja saznanja o koronskim pražnjenjima i općenito o strujama pražnjenja, koje su važne za razumijevanje procesa inicijacije munja.



Slika 34: Prikaz kako vilenjaci prenose naboj u gornju ionosferu <sup>[22]</sup>

### *Patuljci ( eng. elves )*

Patuljci su svjetlosni prsteni koji se šire velikom brzinom do promjera oko 300 km u donjoj atmosferi. <sup>[5]</sup> Primjer patuljka prikazan je na slici 35.



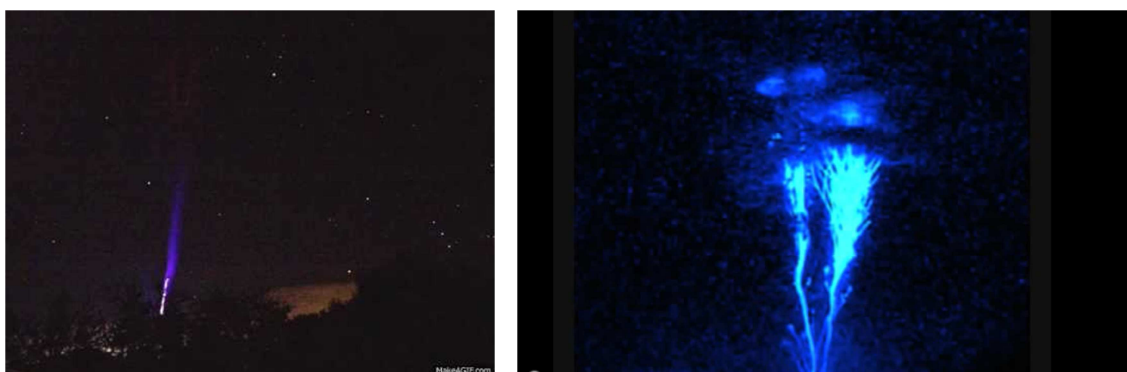
Slika 35: Slika patuljka <sup>[21]</sup>

Proizvode ih elektromagnetski pulsovi (EMP) iz povratnog udara munje. Naziv „elves“ je u engleskom jeziku kratica za emisiju svjetlosti i poremećaje vrlo niskih frekvencija uzrokovane izvorima elektromagnetskih pulsova. Obično se pojavljuju iznad oceana najvjerojatnije jer munje češće imaju veću vršnu struju ( $>80$  kA) iznad oceana nego iznad kontinenta. Iz baze kanala munje elektromagnetski puls se širi kao sferni val uvis. Kada

stigne do donje ionosfere, proširi se kao prsten. Smatra se da električno polje EMP-a zagrijava slobodne elektrone, povećavajući sudare, ionizaciju i emisiju vidljive svjetlosti. Omjer pojavljivanja patuljaka prema vilenjacima je 9:1.

*Plavi starteri, plavi mlazovi, gigantski mlazovi ( eng. blue starters, blue jets, gigantic jets)*

Slika 36 prikazuje plavi mlaz.



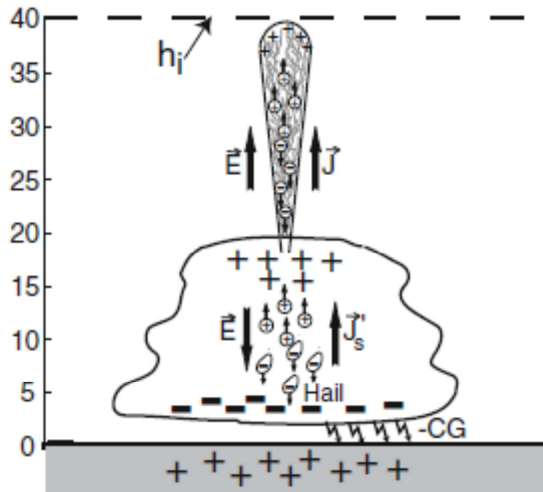
Slika 36: Plavi mlaz (lijevo) i gigantski mlaz (desno) <sup>[23, 24]</sup>

Plavi starteri i plavi mlazovi mogu se promatrati kao munje koje se iz vrha oblaka kreću u gornju atmosferu s dosegom oko 25 km za startere i oko 40 km za mlazove. Plavi mlazovi se rasprostiru brzinom oko  $10^5$  m/s u vremenskom periodu oko 300 ms. <sup>[5]</sup> Gigantski mlazovi se mogu proširiti do vodljive ionosfere na oko 90 km visine. Karakterizira ih plava svjetlost, konusni oblik, a vidljivi su očima prilagođenim na mrak.

Pretpostavlja se da plavi mlazovi nastaju zbog električnog pražnjenja između gornjeg područja pozitivnog naboja u oblaku i gornjeg zaklonjenog sloja. Neposredno nakon pražnjenja oblak – zemlja ili pražnjenja u oblaku dolazi do neravnotežne raspodjele naboja u oluji koja rezultira uzlaznim rasprostiranjem munje prema stratosferi. Model nastajanja plavog mlaza dan je na slici 37. Gigantski mlazovi započinju kao uobičajene munje u oblaku, ali se prošire prema ionosferi.

Kako su se prijelazni svjetlosni događaji počeli ozbiljnije proučavati tek od 1990. god. skupljeno je malo podataka o uvjetima potrebnim za njihovo nastajanje. Zato se u znanstvenim krugovima organiziraju promatračke misije sa svemirskih postaja, satelitima se prati pojavljivanje TLEs-a, vrše se snimanja i mjerenja sa zemlje i balona. Prikupljanje i

analiziranje podataka omogućiti će testiranje postavljenih hipoteza i konačno razumijevanje mehanizma nastanka TLEs-a.



Slika 37: Grafički prikaz procesa formiranja plavog mlaza <sup>[9.]</sup>

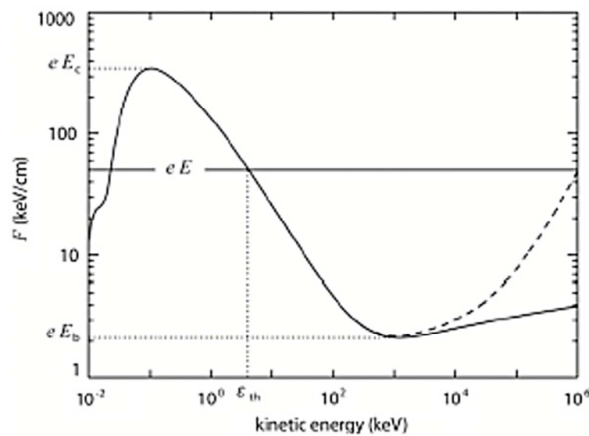
## 7. ATMOSFERSKA FIZIKA VISOKIH ENERGIJA

Razvoj atmosfere fizike visokih energija započeo je 1925. god. kada je C. T. R. Wilson objavio rad o stvaranju energetskih elektrona u atmosferi. <sup>[5]</sup> To je pokrenulo intenzivna istraživanja o zračenjima visokih energija koja su posljedica oluja ili munja. Danas je poznato da je visokoenergetsko zračenje prisutno od površine zemlje i razine mora uvis, u cijeloj atmosferi.

### *Fizika odbjeglih elektrona (eng. runaway electron physics)*

Odbjegli elektroni nastaju kada je zbog električnog polja koje nastaje elektriziranjem oblaka prosječni dio gubitaka energije u mediju manji od prosječnog dijela dobitaka energije tako da elektroni mogu imati visoke energije. <sup>[5]</sup> Takvi elektroni poznati su i kao Wilsonovi odbjegli elektroni U standardnim uvjetima zraka relativistički elektroni s energijom nekoliko desetina MeV gube energiju zbog ionizacije i atomskih pobuđenja. Na višim energijama nastaju i gubici energije zbog zakročnog zračenja. Minimalno

ionizirani elektroni oko 1MeV, imaju gubitke energije po jediničnoj dužini elektronskog puta  $f_{min} = 2.18 \cdot 10^5 \text{ eV/m} \cdot n_{zrak}$ , gdje je  $n_{zrak}$  gustoća zraka relativno prema gustoći zraka na razini mora u standardnim uvjetima. Da bi dobitak energije po jedinici duljine  $eE_b$  bio jednak minimalnom ionizacijskom gubitku energije, potrebno je električno polje  $E_b = 2.18 \cdot 10^5 \text{ eV/m} \cdot n_{zrak}$ . Polje  $E_b$  zove se polje podmirenja i koristi se kao standardno referentno polje. Slika 38 pokazuje grafički prikaz gubitaka energije elektrona (ili pozitrona) po jedinici duljine u zraku, kao funkciju kinetičke energije  $\varepsilon$ .



Slika 38: Prikaz ovisnosti energijskih gubitaka po jediničnoj dužini (efektivna sila trenja) slobodnog elektrona (ili pozitrona), koji se giba zrakom u standardnim uvjetima, o kinetičkoj energiji. Puna linija prikazuje neelastično raspršenje elektrona s molekulama zraka. Isprekidana linija označava efekt emisije zakočnog zračenja. Vodoravna linija označava električnu silu od električnog polja veličine  $5 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ .  $\varepsilon_{th}$  je energija praga.  $E_c$  je kritično električno polje za koje će niskoenergetski termalni elektroni pobjeći.  $E_b$  je polje podmirenja. <sup>[5.]</sup>

Ako je električno polje  $E$  manje od  $E_b$ , promjena energije će biti negativna:

$$d\varepsilon = (eE - f_{min}) dz < 0 \quad \text{za } eE > 0$$

elektron tada gubi energiju, usporava i uhvaćen je na atom u zraku ili se veže s pozitivnim ionom. Ako  $f_{min}$  promatramo kao efektivnu silu trenja,  $eE - f_{min}$  predstavlja ukupnu silu u smjeru gibanja elektrona duž silnice polja. Ukupna sila je tada negativna pa elektron usporava.  $E < E_b$  znači da svi energetski elektroni gube energije i mogli bi se zaustaviti. Ako je  $E > E_b$ , promjena energije je pozitivna:

$$d\varepsilon = (eE - f_{min}) dz > 0$$

minimalno ionizirani elektroni će pobjeći zbog energije koju su dobili od polja. Količina energije koju dobiju ovisi o veličini polja.

Kako je vidljivo na grafikonu, da bi elektron pobjegao, njegova početna kinetička energija mora biti iznad energije praga  $\epsilon_{th}$ . Takve elektrone možemo dobiti iz vanjskih izvora, kozmičkim zračenjem ili radioaktivnim raspadom. Ako je električno polje ispod kritičnog polja  $E_c$  (kao na slici) odbjegle elektrone možemo dobiti samo ako imamo dovoljan broj elektrona s  $\epsilon > \epsilon_{th}$ . Tim elektronima Wilsonov mehanizam odbjeglih elektrona povećava energije i njihove duljine puta kroz zrak. U slučaju da električno polje naraste iznad kritičnog polja  $E_c$ , iznad krivulje gubitaka energije za sve kinetičke energije, svi slobodni elektroni mogu pobjeći. To vrijedi i za slobodne termalne elektrone nastale na niskim energijama. Zato se ovaj mehanizam zove „hladni bijeg“ ili „termalni bijeg“.

Prosječno kritično polje je  $E_c \approx 3 \cdot 10^7 \text{ V/m} \cdot n_{\text{zrak}}$  dok je uobičajeno polje podmirenja zraka  $E_k = 3 \cdot 10^6 \text{ V/m} \cdot n_{\text{zrak}}$ . Polje veličine  $E_c$  ne može dugo postojati u zraku jer će doći do proboja koji će uzrokovati izbijanje polja. Zato se pretpostavlja da takva polja mogu kratkotrajno proizvesti vodilice munja i vršne struje.

***Lavine relativističkih odbjeglih elektrona (eng. relativistic runaway electron avalanches = RREAs)***

Osim vanjskim izvorom i termalnim bijegom početne odbjegle elektrone (koji imaju  $\epsilon > \epsilon_{th}$ ) možemo dobiti procesom lavine koji je uveo Gurevich 1992. godine.<sup>[35]</sup> Mehanizam lavine relativističkih odbjeglih elektrona ili kraće RREA – mehanizam odnosi se na energetske odbjegle elektrone koji se raspršuju sa atomskim elektronima u zraku. Jedan dio raspršenih atomskih elektrona ima kinetičke energije veće od energije praga, pa se pridružuju početnim odbjelim elektronima. Tako dobijemo lavinu relativističkih odbjeglih elektrona koja raste eksponencijalno s vremenom i udaljenošću. U mehanizmu RREA postoji dio elektrona koji nisu odbjegli nego brzo izgube energiju. Oni omogućuju dodatne ionizacije. Prosječna energija odbjeglih elektrona je 7.3 MeV. Njihova putanja je krivudava zbog elastičnih raspršenja elektrona s atomskim jezgrama, pa kako napreduju, lavina elektrona se širi bočno.

***Relativistički povratni mehanizam (eng. relativistic feedback mechanism)***

Dwyer je 2003. god. uveo relativistički povratni mehanizam za opisivanje procesa stvaranja odbjeglih elektrona.<sup>[5]</sup> U tom procesu pozitroni i energetski fotoni stvaraju pozitivni povratni efekt koji eksponencijalno povećava lavinu odbjeglih elektrona. Lavina emitira X – zrake zakočnog zračenja koje se mogu ili Comptonski raspršiti unazad, ili

stvarati parove u zraku. Ako se unazad raspršeni fotoni prošire do početnog dijela područja lavine i pritom Comptonским raspršenjem ili fotoelektričnom apsorpcijom proizvedu nove odbjegle elektrone, formira se druga lavina. Ovaj proces zove se povratni mehanizam X – zraka ( ili povratno gama – zračenje ili fotonski povratni mehanizam).

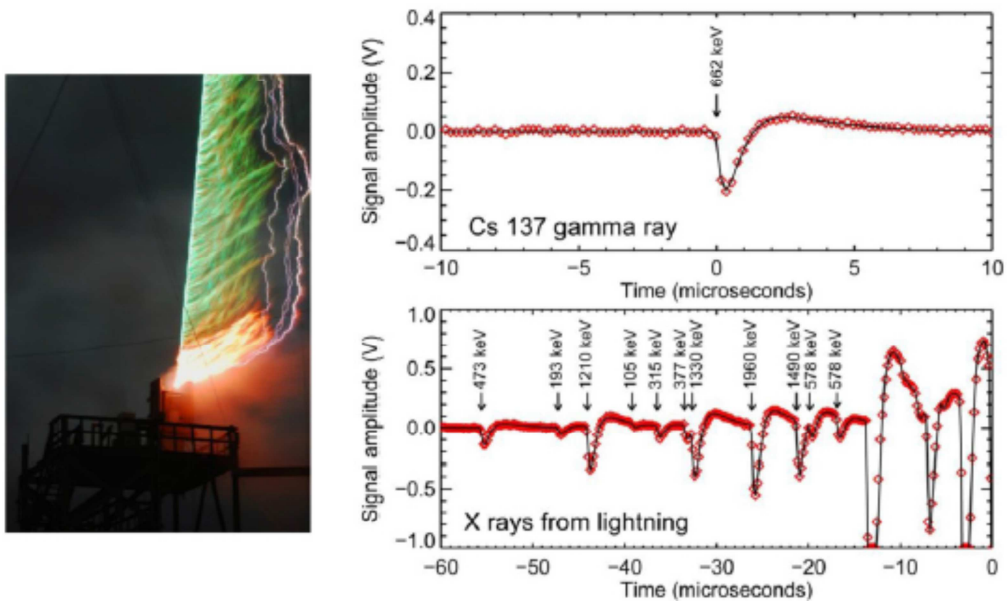
Proces se umjesto fotonima može odvijati i s pozitronima. Pozitroni dobiveni stvaranjem parova elektron - pozitron od gama zraka, često se okrenu u okolnom električnom polju i gibaju u suprotnom smjeru od elektrona. Kako udarni presjek pozitronske anihilacije opada s energijom, a pozitroni se mogu brzo akcelerirati do više desetaka MeV-a , prije anihilacije mogu prijeći oko 1 km na morskoj razini. Ako se prošire do početnog dijela lavine, tvrdim elastičnim raspršenjima s elektronima vezanim za atome u zraku (Bhabha raspršenjima) proizvesti će dodatne odbjegle elektrone i načiniti sekundarnu lavinu. To je pozitronski povratni mehanizam. Druga lavina može ponovljenim procesom proizvesti treću itd. Drugi povratni mehanizam je obično mali (<10%) u usporedbi s prvim. Budući da Comptonски unazad raspršeni fotoni prijeđu kraće udaljenosti od odbjeglih pozitrona, povratni mehanizam X – zraka ima kraće područje lavine od pozitronskog povratnog mehanizma i dominantan je za jača električna polja (> 750 kV/m · n<sub>zrak</sub>). Pozitronski povratni mehanizam dominira na slabijim poljima.

### *Energetska zračenja u atmosferi*

#### *X - zrake*

Kako je teoretski bilo poznato do 2001. god. da je za emisiju X – zraka potrebno veliko električno polje, očekivalo se da su za nju odgovorne oluje.<sup>[5]</sup> Formiranje olujnih oblaka stvara velika polja na većem području što omogućava stvaranje RREA mehanizma iz pozadinskog kozmičkog zračenja. Smatralo se da munje smanjuju emisiju X – zraka zbog odvođenja naboja pri pražnjenju; traju prekratko da bi dogovorno polje proboja postojalo dovoljno dugo za stvaranje lavine elektrona, a najveća temperatura koju munja stvara pri povratnom udaru je oko 30000 K što omogućuje emisiju vidljive i ultraljubičaste svjetlosti ali je nedovoljno za energetske X – zrake. Tek su rezultati istraživanja munja oblak – zemlja, koje su proveli Moore i suradnici na planinama Novog Meksika, pokazali postojanje snažnog energetskog zračenja pri formiranju stepenaste vodilice.<sup>[34]</sup> Pomoću fotomultiplikatorskog detektora snimljeni su veliki MeV pulsovi zračenja u trajanju 1 – 2

ms prije početka povratnog udara za 3 udara munje u blizini. Zatim su Dwyer i suradnici, sustavom raketnog iniciranja munja u Međunarodnom centru za istraživanje i testiranje munja na Floridi, zabilježili energetska zračenja kod skokovite vodilice u 31 od 37 sljedova vodilica - povratni udar. Zračenje se uvijek pojavljivalo prije povratnog udara, pa je zaključeno da ga proizvodi vodilica munje. Kasnijim mjerenjima utvrđeno je da je uočeno zračenje ustvari X – zrake s energijama oko 250 keV u trajanju kraćem od mikrosekunde. Ishodište zraka je bilo nekolikom stotina metara pri dnu kanala vodilice, izvor se kretao silazno s vodilicom prema tlu. Kako su energije ovih zraka puno manje od prosječne energije lavine odbjeglih elektrona, koja iznosi 7.3 MeV, pretpostavljeno je da X – zrake nisu dobivene RREA mehanizmom nego mehanizmom termalnog (hladnog) bijega i da termalne odbjegle elektrone stvaraju strujanja. Slika 39 pokazuje X - zračenje snimljeno kod raketom iniciranih munja. U prosjeku X –zračenje se emitira izotropno od vodilice. Kako se vodilica približava tlu, povećava se X – zračenje i luminoznost energetskih elektrona u kanalu vodilice s vršnom vrijednošću  $10^{16}$  elektrona/s. U tom slučaju moglo bi doći do fotonske emisije X- zraka i stvaranje početnih RREA čestica.



Slika 39: Fotografija raketno inicirane munje proizvedene u Međunarodnom centru za istraživanje i testiranje munja (ICLRT) u Camp Blanding-u na Floridi. Od ravne osvijetljene žice za iniciranje, vjetrom su otpuhnuta 4 slijeda vodilica-povratni udar (lijevo); Odsaleni signal 662 keV-a gama zrake iz radioaktivnog izvora Cs 137 privremeno postavljenog na vrh instrumenta (desno gore); Signal mjerenja inicirane munje u vremenskom periodu neposredno prije povratnog udara. Strelice pokazuju trenutak i energiju detektiranih X – zraka (desno dolje) <sup>[5.]</sup>

Daljnijim mjerenjima nađena je veza između emisije X- zraka i struje povratnog udara. Postoji struja praga oko 4 kA od koje se mogu detektirati X – zrake. Porastom struje

intenzitet X - zraka eksponencijalno raste do oko 10 kA kada dolazi do zasićenja s maksimalnom luminoznošću odbjeglih elektrona između  $10^{16}$  i  $10^{17}$  elektrona/s. Pretpostavlja se da je emisija X – zraka povezana s gustoćom naboja vodilice jer se zračenje uočava kod silazne vodilice prije povratnog udara.

Pretpostavlja se da se munja može promatrati prvenstveno kao uobičajeno pražnjenje, a stvaranje odbjeglih elektrona je nuspojava vodilice i strujanja u zraku. Uz pretpostavku da je vrh negativnih strujanja vjerojatni izvor odbjeglih elektrona, prisutnost X – zraka nam pokazuje da električno polje u strujanjima može doseći kritično polje  $E_c$  koje je 10 puta veće od konvencionalnog polja proboja  $E_k$ .

### *Gama zrake*

Sijevanje gama zraka (eng. gamma-ray glows) iz olujnih oblaka definira se kao emisija sekundnih do minutnih X- zraka i gama zraka iz oblaka ili iz njegove blizine. <sup>[5]</sup> Pretpostavlja se da nastaje RREA emisijom kad su grmljavinske oluje u stanju visoke elektriziranosti između bljeskova munja. Aktivni doprinos elektriziranju oblaka i povećanju električnog polja može dati relativistički povratni mehanizam jer se njime može proizvesti veliki tok odbjeglih elektrona.

Zemaljske bljeskove gama zraka (eng. terrestrial gamma-ray flashes) ili kraće TGFs otkrio je Fishman i suradnici analizirajući rezultate mjerenja izvršenih Space Shuttle-om 1991. god. u niskoj Zemljinj orbiti. <sup>[5]</sup> Smatralo se u početku da proizlaze iz pražnjenja na velikim visinama, tj da su povezani s vilenjacima, ali danas je poznato da im je ishodište u području oblaka te da su obično povezani s munjama u oblaku. Hipoteza kojom se objašnjava nastanak TGFs-a bazirana je na modelu vodljivosti gornje atmosfere iznad oblaka i stvaranju zaklonjenog, obično negativnog, sloja naboja kojeg proizvodi snažno električno polje naboja u oblaku, a silnice mu se šire i izvan oblaka. Veliko pražnjenje munje može neutralizirati većinu naboja u oblaku, ali ne i zaklonjeni sloj naboja. Zato električno polje iznad oluje opada s visinom  $z$  kao dipolno polje (približno kao  $1/z^3$ ). Gustoća zraka istovremeno opada eksponencijalno s visinom ( $n \approx e^{\frac{-z}{8.5 \text{ km}}}$ ), pa zato i polje praga odbjeglih elektrona ( $E_{th} = 2.84 \cdot 10^5 \text{ V/m} \cdot n_{zrak}$ ) i konvencionalno polje proboja ( $E_k = 3 \cdot 10^6 \text{ V/m} \cdot n_{zrak}$ ) opadaju eksponencijalno s visinom. Kako dipolno polje  $E$  opada sporije od  $E_{th}$  i od  $E_k$ , na određenim visinama vrijedi  $E > E_{th}$  (na visinama iznad vrha oblaka) i  $E > E_k$  (na oko 70 km visine). Po modelu proboja odbjeglih elektrona na velikim



visinama, TGFs nastaju snažnim uzlaznim snopom odbjeglih elektrona nastalih nakon bljeska munje na visinama na kojima je  $E > E_{th}$ . Ovaj model je bio prihvaćen do 2005. god. Niz mjerenja i istraživanja provedenih iz orbite i na zemlji zajedno sa Monte Carlo simulacijama emisije RREAs i gama zraka pokazalo je neslaganje s teorijskim predviđanjima. Zato se 2005. god. pojavila ideja da TGFs ne nastaju pražnjenjima na velikim visinama i nisu povezani s vilenjacima, nego su proizvedeni ili unutar oblaka ili neposredno iznad njega. Posljedica ove pretpostavke je da luminoznost odbjeglih elektrona i gama zraka na izvoru mora biti veća od prije pretpostavljene, što je u skladu s prosječno nađenim  $10^{17}$  odbjeglih elektrona kad je izvor na visini od 15 km. To bi moglo predstavljati potencijalni rizik od zračenja osobama u avionima kada lete kroz oluju.

#### ***Zemaljski elektronski snopovi (eng. terrestrial electron beams) ili TEBs***

Dwyer i suradnici su 2004. god. osmislili model elektronskog snopa <sup>[5]</sup> u kojem energetske elektroni u prostoru koji izlaze iz atmosfere nisu odbjegli elektroni nego sekundarni elektroni nastali Comptonovim raspršenjem i tvorbom parova od gama zraka u TGF. Količina zraka koji je prisutan na visini oko 40 km je dovoljna za interakcije gama zraka, ali nedovoljna da zaustavi sve energetske sekundarne elektrone i pozitroni od izlaženja u svemir. Nakon što su stvorene, energetske sekundarne čestice se rasprostiru duž silnica Zemljinog magnetskog polja stvarajući snop čestica. Slika 40 pokazuje umjetnički prikaz kako se pod utjecajem oluje snopovi čestica izbacuju u svemir.



Slika 40: Umjetnički prikaz kako oluja izbacuje snopove čestica u svemir; prikazani su TGF (ljubičasto) i TEB (elektroni su žuti, a pozitroni su zeleni) koji se gibaju duž silnica Zemljinog magnetskog polja jer dolaze u smjeru silnica <sup>[25]</sup>

Pomoću Monte Carlo simulacije utvrdilo se da elektron / pozitron snop ima oko 2% od ukupnog broja fotona od gama zraka u TGF-u. Pri daljnjem rasprostiranju gama zraka u TGF-u njihov intenzitet opada s visinom kao  $1/r^2$ . Nabijeni elektroni i pozitroni ostaju vezani na geomagnetske silnice pa im intenzitet približno ostaje jednak onom s kojim su

napustili atmosferu. Zato na niskim Zemljinim orbitama TEBs imaju gotovo dvostruko veći utjecaj od TGFs.

### *Neutroni*

Pri olujama i munjama primijećen je porast broja neutrona. Pretpostavljeni mehanizam koji objašnjava povećanje neutrona je stvaranje neutrona fotonima kod sudara gama zraka (TGFs) s jezgrama u zraku. Moguća je i pojava neutrona kao nusprodukt gama zraka iz RREAs-a. Vlada mišljenje da munje ne doprinose povećanju broja neutrona.

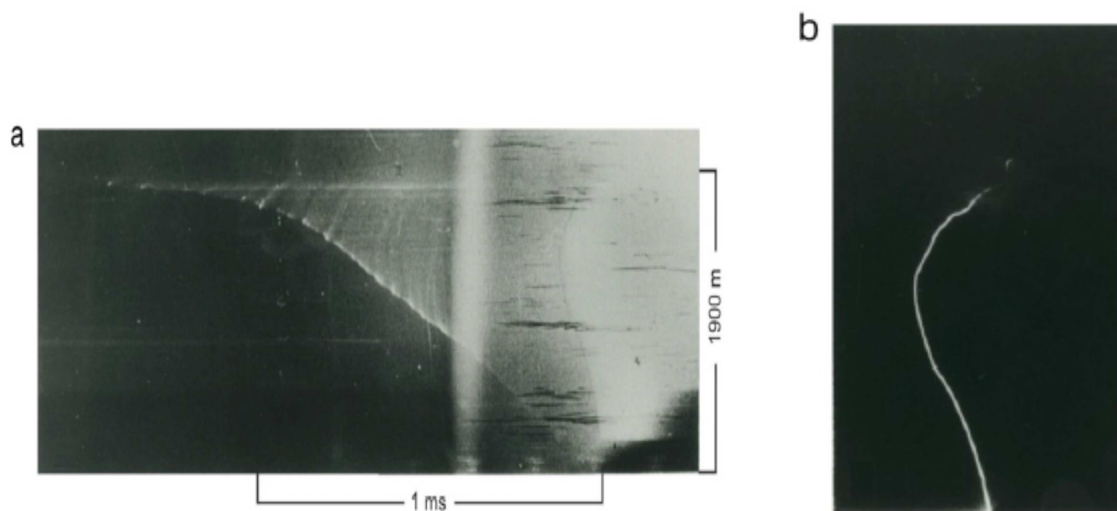
## **8. NOVIJA EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA**

Istraživanje Zemljinog strujnog kruga zahtijeva razvoj posebnih mjernih tehnika i postupaka zbog specifičnosti pojava koje se proučavaju. Grmljavinske oluje razvijaju se visoko iznad površine zemlje, pa je teško direktno promatrati koji se točno procesi odvijaju bez istovremenog utjecaja na njih samim mjernim uređajem. Većina pojava odvija se u vrlo kratkim vremenskim intervalima što zahtijeva korištenje uređaja za posebna snimanja. Pojave su vremenski i prostorno nepredvidive pa to otežava postavljanje uređaja i mjerenja, a hipoteze je teško potvrditi. Unatoč svim tim poteškoćama, razumijevanje fizikalnih procesa koji održavaju Zemljin strujni krug je važno zbog njegovog utjecaja na meteorološke pojave, na život ljudi i uopće na razvoj fizike.

Osnovni način bilježenja pojava je snimanje i fotografiranje.<sup>[2,5]</sup> Snimke se mogu raditi stacionarnim filmom, ali se tada ne vide pojedinosti. Zato se koristi i snimanje pokretnim filmom. Za snimanja pražnjenja munje koristila se prvo Boysova kamera. Schonland je modificirao kameru koristeći rotirajući film. Danas se koriste različite kamere visoke brzine snimanja. Slika 41 pokazuje snimke istog udara načinjene s različitim kamerama. Uz kamere se koriste i spektrometri i fotometri. Spektrometri su uređaji za ispitivanje svojstava svijetlosti mjerenjem i analiziranjem elektromagnetskih spektara.

Zbog lakšeg proučavanja munje razvijen je sustav za umjetno iniciranje munje iz prirodnih olujnih oblaka raketnom tehnikom i uz pomoć žice.<sup>[5]</sup> Raketni sustav za munje nazvan i Betts-sustav (patentirao ga je Robert E. Betts 2003. god.) čine raketna rampa

povezana s detekcijskim uređajem za mjerenje prisutnosti elektrostatskih i ionskih promjena u neposrednoj blizini rampe i ispaljivanje raketa. <sup>[26]</sup> Sustav je prikazan na slici 42. Rakete mogu biti punjene krutim gorivom u kojem su dodane cezijeve soli. (Cezij je vrlo reaktivna tvar i u dodiru sa zrakom ili na malo povišenoj temperaturi, oksidira i sam se zapali. U dodiru s vodom reagira eksplozivno čak i kod niskih temperatura.) Izbacivanjem rakete prema olujnom oblaku ispušni plinovi stvaraju vodljivi put. Vodljiva žica koja je uzemljena i smještena uz lansirnu cijev, zagrijava se i isparava kako bi se moglo kontrolirati vrijeme i mjesto udara. Raketa može biti punjena i tekućim gorivom, a



Slika 41: a) Snimak udara munje udaljene 3.3 km načinjen kamerom za brzo snimanje. Snimljena je zadnja milisekunda pozitivne vodilice koju slijedi povratni udar; b) snimka istog udara načinjena sa istog mjesta kamerom sa stacionarnim filmom <sup>[5]</sup>

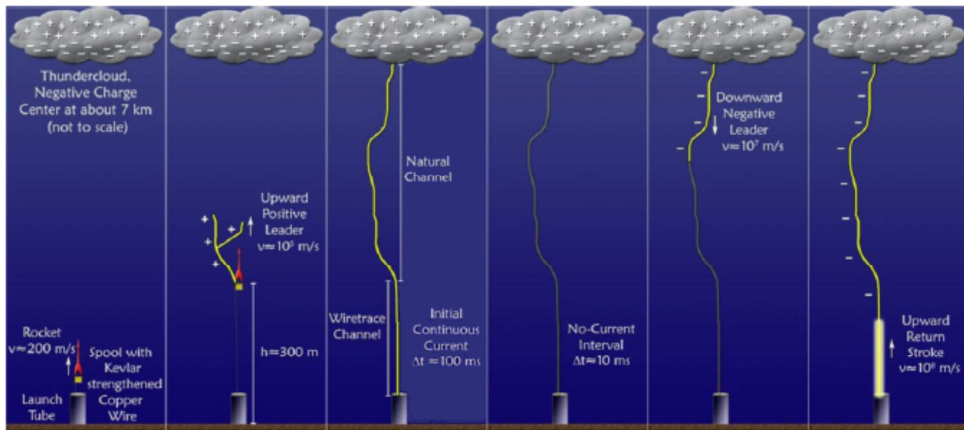


Slika 42: Prikaz pojedinih dijelova Betts-sustava iz ICLRT u Camp Blanding-u na Floridi; male rakete za iniciranje munja u oblaku (lijevo); toranj za lansiranje raketa povezan s detekcijskim uređajem (sredina); bakar-kevlar žica za povlačenje koja usmjerava munju prema zemlji. Žica isparava pa povratni udar naliči prirodnoj munji tako da se može koristiti za istraživanje (desno). <sup>[27]</sup>

tada se obično koristi otopina kalcijevog klorida za formiranje vodljivog puta iz oblaka. U toku leta rakete prema oblaku sa stražnje strane se izbacuje tekućina koja u zraku formira stupac čestica veće električne vodljivosti od okolnog zraka. Stupac usmjerava udar munje prema zemlji, pa se tako postiže kontrola mjesta i vremena udara munje. Slika 43 pokazuje slijed udara munje ostvaren nakon lansiranja rakete. Formiranjem vodljivog puta, povećava se električno polje oko i iznad vrha žice, toliko da se inicira uzlazna pozitivno nabijena vodilica prema negativno nabijenom oblaku. Slika 44 prikazuje shematski prikaz procesa umjetnog iniciranja munje Betts-sustavom.

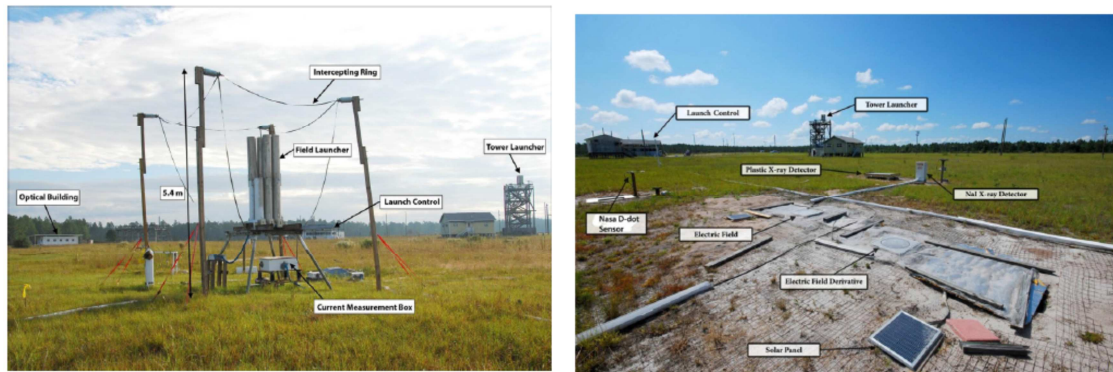


Slika 43: Slijed udara munje nakon lansiranja rakete. Prvi udar se formira prema tornju po vodljivom putu nastalom nakon isparavanja žice. Ostale slike pokazuju povratne udare. <sup>[27]</sup>



Slika 44: Shematski prikaz procesa umjetnog iniciranja munje pomoću raketnog sustava za iniciranje munja. Prikazano je formiranje uzlazne pozitivne vodilice, stvaranje prirodnog kanala munje sa silaznom negativnom vodilicom i povratni udar. [J. R. Dwyer, M. A. Uman, 2013.]

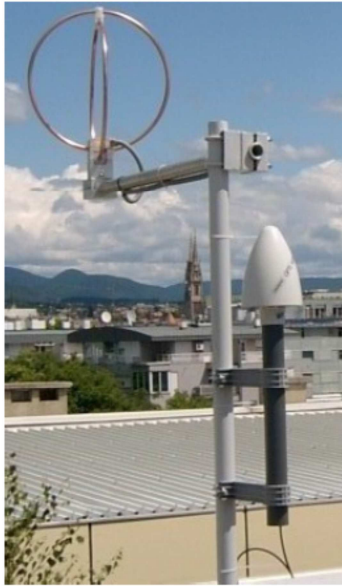
U svijetu postoji više centara za promatranja, snimanja i praćenja prirodnih munja i istraživanja umjetnim iniciranjem munja npr. centar Mount San Salvatore, istraživački centri u Italiji, Francuskoj, Južnoafričkoj Republici, Rusiji i SAD-u. Slika 45 pokazuje primjer jednog takvog centra.



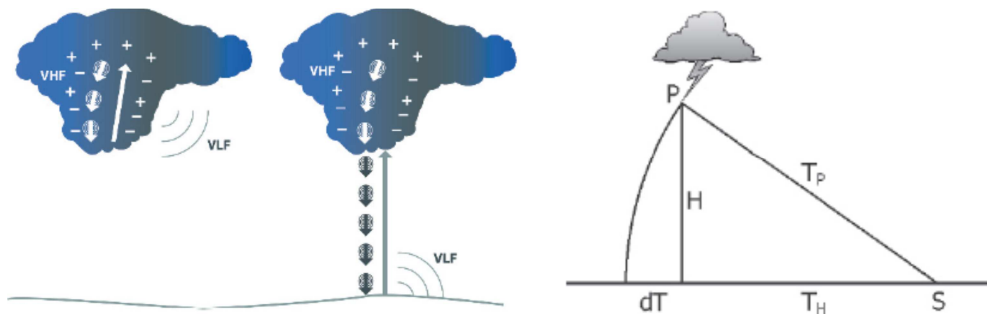
Slika 45: Međunarodni centar za istraživanje i testiranje munja (ICLRT) u Camp Blanding-u na Floridi; Raketni sustav za iniciranje munja s kontrolnim tornjem i optičkom analizom (lijevo); Sustav senzora i detektora (desno) [5.]

Osim sa zemlje mjerenja i promatranja se vrše pomoću balona koji se puštaju do visina unutar oblaka, iz aviona, sa satelita i sa svemirske postaje koja je u niskoj orbiti oko Zemlje, ali ta promatranja su vezana za istraživačke projekte. Geostacionarni meteorološki sateliti GOES i METEOSAT danas daju svakodnevne podatke o kretanju zračnih masa, a postoji ideja da se opreme optičkim detektorima munja kako bi bilo moguće kontinuirano praćenje položaja i učestalosti aktivnosti munja na Zemlji. [8]

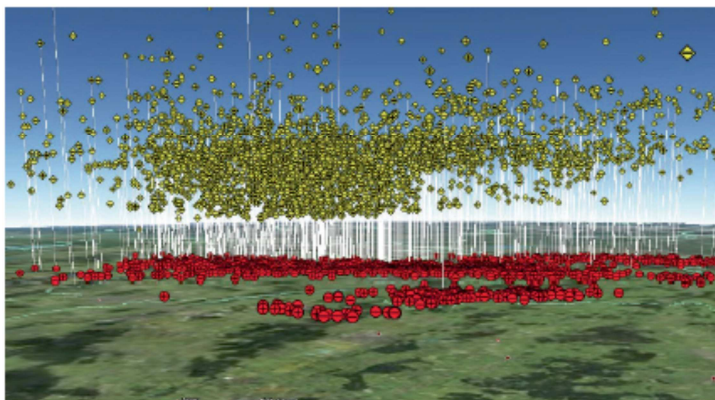
U Europi je prije nekoliko godina pokrenuta Međunarodna VLF/LF mreža za detekciju munja (eng. International VLF/LF lightning detection network) ili kraće LINET.<sup>[8,30]</sup> Ovaj sustav za praćenje aktivnosti munja razvijen je na sveučilištu u Münchenu, a čine ga preko 100 senzora raspoređenih u 17 zemalja (među kojima je i Hrvatska). Razmak između susjednih senzora je između 200 i 250 km. Njemački meteorološki zavod skuplja i obrađuje podatke pa ih šalje drugim zemljama. Podaci se mogu pratiti u realnom vremenu ili analizirati prije snimljeni i pohranjeni. Oni daju informacije o datumu i vremenu udara munje, GPS položaj, amplitudu strujnog udara, vrstu pražnjenja (IC ili CG), visinu IC pražnjenja i 2D lokacijsku pogrešku izraženu u metrima. U Hrvatskoj su LINET senzori postavljeni u 5 gradova: Zagreb, Rijeka, Zadar, Split i Dubrovnik. Zajedno s 20 senzora u nama susjednim zemljama pokriven je cijeli teritorij Hrvatske. Jedan od senzora prikazan je na slici 46. Senzori direktno mjere  $B_x(t)$  i  $B_y(t)$  gustoću magnetskog toka kao funkciju vremena pomoću 2 ortogonalne bakrene petlje. Dobiveni pojačani signal je inducirana struja, a konačni rezultat je vremenski ovisna magnetska indukcija u području od 0.1 do 130 nT. Sustav može detektirati i slabe signale podjednako za munje oblak – zemlja kao i za munje u oblaku, a može ih i razlikovati jer je opremljen tkz. 3D „vrijeme dolaska“ (skraćeno TOA, eng. Time-Of-Arrival) metodom i metodom određivanja smjera (DF, eng. Direction Finding). LINET sustav prima VLF/LF signale pražnjenja koje munja oblak – zemlja emitira u ioniziranom kanalu blizu površine zemlje, dok VLF/LF signali od pražnjenja munja u oblaku dolaze s neke visine iznad površine zemlje. Razlika u vremenu dolaska signala od iste GPS lokacije emitiranja do senzora pokazuje o kojoj vrsti munja se radi. Slika 47 pokazuje razliku u dolasku signala različitih vrsta munja, a na slici 48 je prikazano kako se LINET sustavom može pratiti stanje grmljavinskog sustava i njegovo kretanje. Za svaku oluju skupljaju se podaci s barem 5 okolnih senzorskih stanica kako bi se dobio što točniji prikaz stanja oluje.



Slika 46: LINET senzor koji čine GPS antena, antena za mjerenje magnetskog toka (dva ortogonalna bakrena prstena) i senzor PC – aktivna jedinica <sup>[30]</sup>



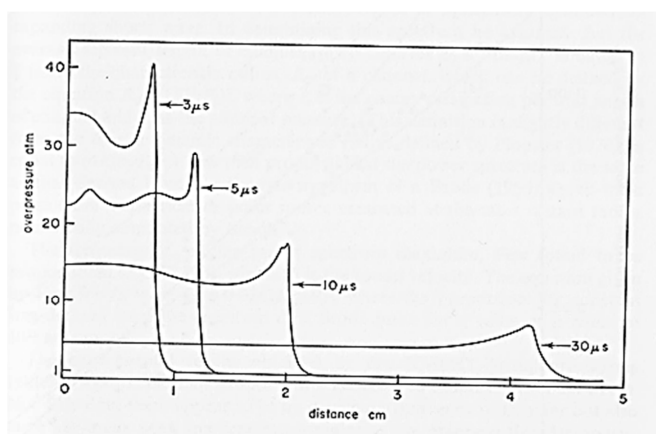
Slika 47: Shematski prikaz VHF i VLF emisije kod munje u oblaku i munje oblak – zemlja (lijevo); princip metode TOA;  $dT = T_p - T_h$  je vremenska razlika u dolasku signala munje u oblaku i munje oblak – zemlja iz iste lokacije, P = centar VLF emisije, S = senzor, H = visina izvora emisije (desno) <sup>[8.]</sup>



Slika 48: 3D prikaz oluje koja se približavala Münchenu 7. 7. 2007. U vremenu od 17 do 18 UTC. Prikaz je dobiven LINET sustavom. Žuto su prikazane munje u oblaku, a crveno munje oblak – zemlja. Broj munja u oblaku bio je 4 puta veći nego broj munja oblak – zemlja što pokazuje veliku elektriziranost oblaka tj. veliki grmljavinski sustav. <sup>[8.]</sup>

## 9. GRMLJAVINA

Kad govorimo o grmljavini obično mislimo na zvuk koji čujemo, a nastaje zbog munje. Ipak nove tehnike mjerenja s osjetljivim mikrofonom, oscilografima i digitalnim računalima pokazale su da grmljavina obuhvaća i infrazvuk iako su te frekvencije preniske za ljudsko uho. [2] Danas je općeprihvaćena teorija, da je uzrok grmljavine stvaranje visokotlačnog udarnog vala zbog intenzivne struje u kanalu munje. Val opada s udaljenošću i na velikim udaljenostima postaje glasan zvuk, praćen intenzivnim infrazvukom. Smatra se da je infrazvuk posljedica relaksacije elektrostatske napetosti u oblaku jer se zbog pražnjenja munje mijenja raspodjela naboja. Slika 49 pokazuje kako valna fronta udarnog vala opada s udaljenošću.



Slika 49: Opadanje udarne fronte s udaljenošću od kanala munje. Odnos prevelikog pritiska u kanalu i udarne fronte o udaljenosti dan je za 4 vremena u početnom slijedu povratnog udara. Početni radijus cilindričnog izvora je 0.6 mm. Strujni puls munje dan je izrazom  $I = I_0 [e^{-at} - e^{-bt}]$ , gdje je  $I_0 = 30000A$ ,  $a = 3 \cdot 10^4 s^{-1}$ ,  $b = 3 \cdot 10^5 s^{-1}$ . [2]

Trajanjem grmljavine mjeri se razlika udaljenosti od najbliže do najdalje točke kanala munje, a to je minimalna moguća duljina kanala. [7] Fleagle je pokazao da se grmljavina uglavnom čuje do udaljenosti 25 km od izvora. Newton – Laplaceova jednadžba za brzinu zvuka glasi:  $v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ , gdje je  $K$  modul elastičnosti, a  $\rho$  gustoća sredstva.  $K$  možemo zapisati kao  $K = \gamma \cdot p$ , gdje je  $\gamma$  faktor proporcionalnosti, a  $p$  je tlak. Ako zrak zamislimo kao idealni plin, iz jednadžbe stanja plina dobijemo da je  $p = \frac{nRT}{V}$ , gdje je  $n$  broj molova plina,  $V$  je volumen plina,  $T$  je temperatura,  $R$  je univerzalna plinska konstanta. Kako je brzina zvuka proporcionalna kvadratnom korijenu temperature, a temperatura općenito opada s visinom, prema Snellovom zakonu zvučni val će se lomiti



prema gore. Uz pretpostavljeno linearno opadanje temperature s visinom, valna zraka zvuka koji se širi od kanala u jednom trenutku postat će tangenta na zemljinu površinu i imati će približno parabolnu putanju. Ako je izvor zvuka na visini 4 km, a tipično odstupanje je 7.5 K/km, uz zanemarivanje vjetra, najveća udaljenost do koje ćemo čuti zvuk je 25 km ( valna zraka je na toj udaljenosti tangenta na Zemljinu površinu). To znači da zvukove čiji je izvor niže od 4 km, nećemo moći čuti na udaljenosti 25 km. Ako uzmemo u obzir vjetar i ako je njegova brzina 4 m/s, putanja zvuka može se ispraviti za isto odstupanje, pa ćemo moći povećati udaljenost čujnosti. Na udaljenost čujnosti mogu utjecati karakteristike terena, temperaturna inverzija i sl.

Holmes i suradnici su na planinskim vrhovima u Novom Meksiku, na oko 3 km iznad razine mora, vršili mjerenja povećanog pritiska i energije grmljavine. <sup>[7]</sup> Izmjereni su podaci grmljavina za ukupno 40 munja u oblaku i munja oblak – zemlja koje su se pojavile u području nekoliko kilometara od točke mjerenja. Grmljavinski spektar u oblaku pokazao je srednju vršnu vrijednost akustične snage na 28 Hz sa srednjom ukupnom akustičnom energijom  $1.9 \cdot 10^6$  J u području energija  $1.8 - 3.1 \cdot 10^6$  J. Kod munja oblak – zemlja grmljavinski spektar je imao srednju vršnu vrijednost akustične snage na 50 Hz sa srednjom ukupnom akustičnom energijom  $6.3 \cdot 10^6$  J u području energija  $1.1 - 17 \cdot 10^6$  J, dakle postojala je značajna razlika između ovih vrsta munja. Holmes je izračunao i koeficijent efikasnosti pretvorbe električne energije u akustičnu za munje oblak – zemlja. Pretpostavio je pritom da je disipacija energije po jedinici duljine kanala za prvi udar  $2.3 \cdot 10^5$  J/m. Za prosječnu duljinu kanala munje do zemlje pretpostavio je da iznosi 4 km. Iz toga je dobio energiju prvog udara  $9.2 \cdot 10^8$  J. Daljnja pretpostavka je bila da svi slijedeći udari zajedno imaju energiju prvog udara, pa je ukupna energija bljeska  $1.8 \cdot 10^9$  J. Ako se prosječna akustična energija od 11 munja oblak – zemlja, koja iznosi  $3.26 \cdot 10^6$  J, podijeli s ukupnom električnom energijom bljeska dobijemo akustičnu efikasnost 0.18 %.

#### ***Mehanizam stvaranja grmljavine koju čujemo***

Mjerenjima optičkom spektroskopijom utvrđeno je da u kanalu povratnog udara temperatura dosegne 30000 K u vremenu kraćem od  $10 \mu\text{s}$ .<sup>[7]</sup> Zbog porasta temperature mora doći do porasta tlaka u kanalu jer se u tako kratkom vremenu ne stigne značajno promijeniti gustoća čestica. Rezultati mjerenja pokazuju da je u prvih  $5 \mu\text{s}$  prosječni tlak kanala oko 10 bara. Preveliki pritisak kanala uzrokuje njegovu ekspanziju iza udarnog

vala. U toku ekspanzije u desetak mikrosekundi, tlak kanala opada u odnosu na atmosferski.

Valna fronta povratnog udara prelazi za  $0.01 \mu s$  po 1 m kanala vodilice. Pritom se radijus ekspanzirajućeg kanala povećava oko  $3 \text{ mm}/\mu s$ . Potpuno formiran kanal ima radijus reda centimetra.

Smatra se da pri osmišljavanju modela grmljavine treba uzeti u obzir i fizikalni opis ekspanzije kratkog dijela kanala i krivudavost cijelog kanala. <sup>[7]</sup> Hill je u mjerenjima kanala munje oblak – zemlja našao: da je duljina pojedinih segmenata kanala između 5 i 70 m; da je promjena smjera uzastopnih segmenata nasumična; da je ovisno o duljini pojedinog segmenta srednja apsolutna vrijednost promjene smjera kanala oko  $16^\circ$ . Zato je model kanala munje osmišljen kao niz kratkih cilindričnih segmenata koji su međusobno povezani. Teorija cilindričnog udarnog vala primjenjiva je u slučaju kad je radijus segmenta manji od njegove duljine. Ako je radijus veći od duljine segmenta javlja se približno sferna divergencija udarnog vala.

Few i suradnici su dali kvantitativnu teoriju grmljavine. Definirali su relaksacijski radijus  $R_s$  za sfernu i  $R_c$  za cilindričnu ulaznu energiju, kao radijus volumena stvorenog ako se sva ulazna električna energija koristi za obavljanje rada  $pV$  na okolnu atmosferu (atmosfera ima konstantni tlak  $p_0$ ). Ukupna ulazna energija u sfernom slučaju  $E_t$  je:

$$E_t = p_0 \frac{4}{3} \pi R_s^3$$

Ulazna energija po jedinici duljine u cilindričnom slučaju  $E_L$  je:

$$E_L = p_0 \pi R_c^2$$

Pretpostavlja se da se sva ulazna energija munje prenosi na zagrijavanje plina, koji pokreće udarni val. U mjerenjima je nađeno da su radiofrekventno zračenje i optičko zračenje relativno mali, pa je pretpostavka razumna. Definirana je bezdimenzionalna koordinata  $X_{s,c}$  za svaku od predloženih geometrija kao:

$$X_s = \frac{r_s}{R_s} \quad , \quad X_c = \frac{r_c}{R_c}$$

gdje su  $r_s$  udaljenost od sfernog i  $r_c$  udaljenost od cilindričnog izvora. Ako je  $X_c = X_s = 1$ , tlačni pulsovi iz cilindričnog i sfernog izvora imaju slične amplitude i valni oblik. Rješenje

hidrodinamičke jednadžbe udarnog vala ( $X_{s,c}$ ) za obje geometrije je neovisno o ulaznoj energiji jer je  $X_{s,c}$  normalizirana po toj energiji.

Definiran je parametar  $\chi$  kao duljina pravocrtnog segmenta  $L$  koja doprinosi grmljavini:

$$\chi = \frac{L}{R_c}$$

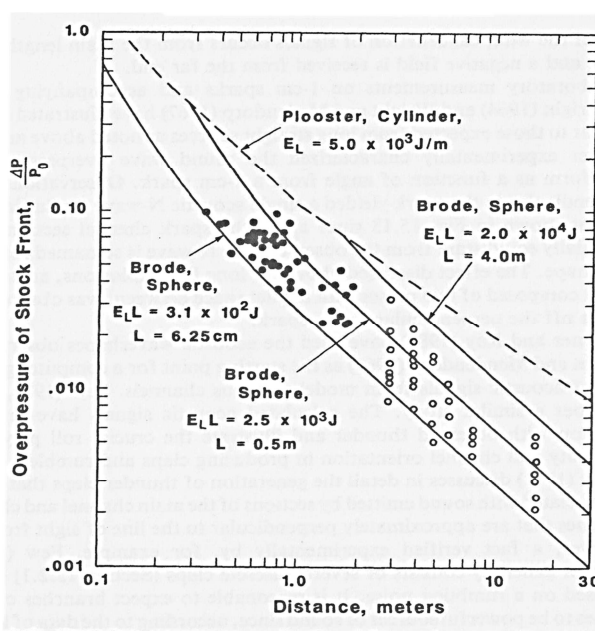
Segmenti kanala za koje je  $\chi \ll 1$  nazivaju se mikrokrivudanja i oni neće doprinosti ekspandirajućem udarnom valu. Segmenti za koje je  $\chi \gg 1$ , zovu se makrokrivudanja. Ti dugački segmenti proizvode praskove kada su usmjereni okomito prema promatraču. Prask se definira kao nagao glasan zvuk koji se javlja u odnosu na pozadinsko produljeno tutnjanje. Sami dugački segmenti moraju pokazivati u smanjenoj mjeri srednju zakrivljenost s vrijednošću  $\chi \approx 1$ , a kako je  $\chi$  proporcionalna s  $L$ , vrijednost  $L$  određuje uočene frekvencije u spektru grmljavine.

Pretpostavlja se da za  $X > \chi$ , udarni val divergira kao sferni val s energijom izvora  $E_L L$  što je u skladu s proračunom sličnih svojstava sfernog i cilindričnog vala blizu  $X = 1$ . Brode je Fourierovom analizom za  $X = 10$  matematički dobio spektar snage grmljavine i predvidio izraz za određivanje maksimuma frekvencije  $f_m$  u akustičkom spektru:

$$f_m = 0.63 v_0 \left( \frac{p_0}{E_L} \right)^2$$

gdje je  $v_0$  brzina zvuka. Proračuni su provedeni uz pretpostavku da se promatra valni oblik zvuka blizu 4 metarske laboratorijske iskre, a određeno je da je  $\chi = 4/3$ . Pokazalo se prilično slaganje predviđenih vrijednosti s izmjerenim akustičkim spektrom snage laboratorijski proizvedene 4 metarske iskre za maksimume frekvencije između 40 i 100 Hz. Ali proračunima se nisu mogle objasniti izmjerene vršne vrijednosti u području od 10 Hz, a to je značilo da izvor infrazvuka nije isti kao izvor čujnog dijela grmljavine. Slika 50 pokazuje izmjerene podatke prevelikog tlaka u odnosu na udaljenost od 4 m laboratorijske iskre i krivulje teorijskih predviđanja za cilindrične i sferne izvore.

Sa slike je vidljivo da su izmjereni i nadtlak tlak i njegovo trajanja puno manji od predviđanja dobivenih cilindričnom teorijom udarnog vala. Najbolje slaganje podataka vidljivo je za krivulju kod koje je pretpostavljeno da pojedinačni udarni visokotlačni pulsovi odgovaraju sfernim valovima s ulaznom energijom  $2.5 \cdot 10^3$  J uz 0.5 m segmente kanala iskre.



Slika 50: Prikaz visokotlačne udarne fronte kao funkcije udaljenosti od 4 m laboratorijske iskre. Puni kružići predstavljaju podatke dobivene piezoelektričnim mikrofonom, dok su prazni kružići podaci od kapacitivnog mikrofona. Krivulje pokazuju odgovarajuća teorijska predviđanja za cilindrični i sferni udarni val. [7.]

### *Infrazvučna grmljavina*

Mjerenja pokazuju da infrazvučna grmljavina dolazi u diskretnim pulsovima, karakterizira ju početna kompresija i uočavamo je ispod grmljavinskih oblaka. [2,7] Već je Wilson predviđao da će električna napetost u oblaku nakon opuštanja, koje nastaje djelovanjem munje, znatno utjecati na grmljavinu. Colgate i McKee su utvrdili da stepenasta vodilica pohranjuje približno 1/10 od ukupnog naboja tipično pohranjenog u prosječnom povratnom udaru munje. Proračunali su da će se taj naboj raspršiti radijalno od početnog stupca duljine 2.5 m do približno stupca s radijusom 15 m u vremenu napredovanja vodilice. S raspršivanjem naboja povezano je stvaranje kompresijskog vala u zraku. Dominantna frekvencija tog vala jednaka je inverznom vremenu koje treba razrjeđenju da se reflektira od osi stupca vodilice. (Razrjeđenje je povezano s kompresijskim valom ali se širi u suprotnom smjeru.) Za početni cilindar radijusa 2.5 m i brzinu koja je približno jednaka brzini zvuka, dominantna frekvencija bila bi približno 130 Hz. Omjer povećanog pritiska i pritiska vodilice je približno:  $\Delta p/p_0 \approx 4 \cdot 10^{-4}$ . Pretpostavlja se da će ta frekvencija prethoditi intenzivnom kanalu grmljavinskog vala u vremenu u kojem je vodilica ispred povratnog udara, pa je zato uočljiva. Zbog naglog opuštanja napetosti u oblaku, koje nastaje prelaskom naboja na vodilicu, razvija se

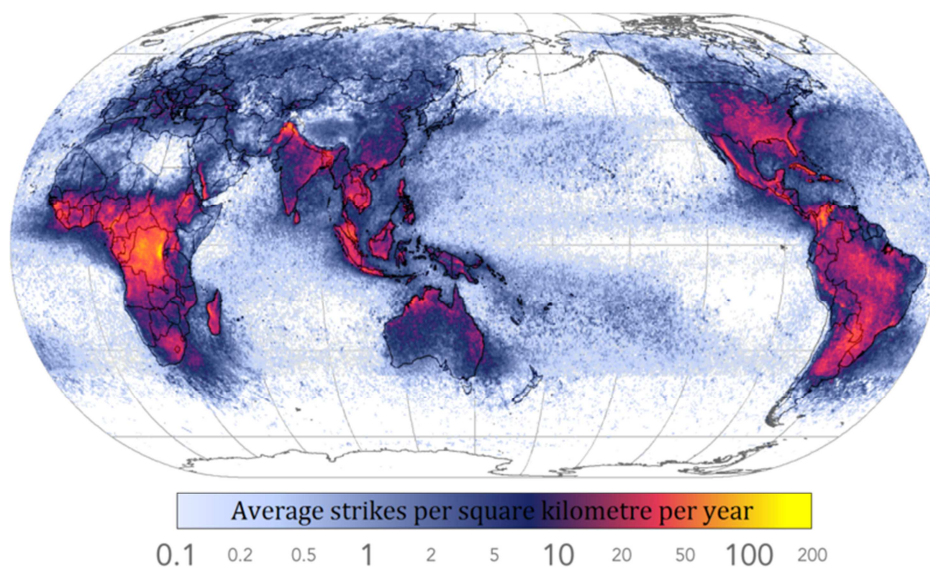
niskotlačni val od približno 4 Pa, približne frekvencije 0.5 Hz. Taj val prethodi čujnom zvuku.

Dessler je osmislio 2 modela elektrifikacije oblaka koji pražnjenjima stvaraju tlačne pulsove. Jedan model pretpostavlja oblak kao dugačak cilindar. Po drugom modelu oblak je plošan s promjerom 5 km i debljinom 0.5 km. Ako je električno polje na površini oblaka veličine između  $10^5$  i  $10^6$  V/m i u tipičnom bljesku munje se isprazni 40 C naboja, onda se računom dobije tlačna amplituda između  $1 \cdot 10^{-6}$  i  $50 \cdot 10^{-6}$  atm, a frekvencija je između 0.2 i 2 Hz. Dessler je dalje pretpostavio da je kanal infrazvuka izrazito usmjeren pa je to objašnjenje zašto infrazvuk nije ranije detektiran i zašto kod njega nema uočljivih varijacija između događaja. Posljedica ove usmjerenosti mogla bi biti stvaranje značajnog poremećaja u ionosferi na mjestu gdje je atmosferski tlak okoline usporediv s veličinom infrazvučnog podtlaka. Mjerenjima su u toku grmljavinske oluje otkriveni neobjašnjivi poremećaji radio – prijenosa u ionosferi koji bi se možda mogli pripisati rasprostiranju infrazvuka.

## **10. UTJECAJ ELEKTRIČNIH PRAŽNJENJA NA ZEMLJU**

Razvoj ekološke osviještenosti i zabrinutost zbog klimatskih promjena koje su započele u prošlom desetljeću i imaju veliki utjecaj na cijelu Zemlju, pokrenule su pitanje i o utjecaju električnih pražnjenja na Zemlju. Uočena je veza između električnih pražnjenja i temperature <sup>[3]</sup> npr. veća vjerojatnost za munju je u vrućem poslijepodnevu nego u hladnijim noćima; munje su češće u vrućim ljetima nego u hladnim zimama; češće se pojavljuju nad zagrijanom zemljom nego iznad hladnog oceana. Optičkim promatranjima pomoću satelita dobivena je globalna distribucija munja, kako je prikazano na slici 51. Slika pokazuje da je najučestalije pojavljivanje munja nad Afrikom, pa zatim nad Amerikom koja je i po Carnegiovoj krivulji (slika 2) najaktivnija u 19.00 UT. Carnegiova krivulja također pokazuje najveći doprinos globalnoj aktivnosti munja od pražnjenja nad Afrikom i Amerikom. Mjerenjima je nađeno da je Zemljin strujni krug osjetljiv na temperaturu površinskog zraka općenito u području 10 – 100% po °C. Utjecaj dugoročnog

povećanja temperature zbog globalnog zagrijavanja na Zemljin strujni krug nije još dovoljno istražen, mada neka predviđanja govore o povećanju broja munja.



Slika 51: Globalna distribucija frekvencije udara munje mjerena u bljeskovima po  $\text{km}^2$  godišnje, dobivena iz kombiniranih podataka od 1995. do 2003. god. pomoću optičkog tranzientnog detektora i od 1998, do 2003. god. pomoću optičkog senzora za munje <sup>[16]</sup>

Globalni godišnji prosječni iznos munja oblak – zemlja je  $12 - 16 \text{ s}^{-1}$ , dok je maksimalni prosječni iznos na sjevernoj hemisferi u ljetnim mjesecima iznad kopna oko  $55 \text{ s}^{-1}$  (pojavljuje se između 30 i 100 bljeskova/s). Oko 70% svih munja nastaje u području između  $30^\circ$  južne i  $30^\circ$  sjeverne geografske širine. U tropskim područjima nema sezonskih ciklusa pri promatranju učestalosti munja. Područje srednjih geografskih širina pokazuje sezonski ciklus tj. više munja ima u ljetnim mjesecima, jer su tada češće grmljavinske oluje. Maksimalni iznos munja je dnevno između 15.00 i 18.00 sati po lokalnom vremenu. Uočeno je da kod usporedbe ukupnog broja oluja  $F_{\text{oluje}}$  koje se razvijaju iznad mora ili iznad kopna općenito vrijedi:

$$F_{\text{oluje}} (\text{kopno}) = 10 \cdot F_{\text{oluje}} (\text{ocean})$$

Pretpostavlja se da do ovakve razlike dolazi zbog većeg zagrijavanja kopna od mora i zbog razvoja većih olujnih sustava nad zemljom nego nad morem. Raspodjela električnog polja u i ispod oluje određuje kakav će biti odnos između količine pojavljivanja munja u oblaku i munja oblak – zemlja. Općenito je utvrđeno da je taj odnos IC/CG  $\approx 1 : 5$ , ali se još povećava s povećanjem zemljopisne širine, vjerojatno zbog povećanja visine na kojoj je baza zone nabijanja i povećanja dubine zone nabijanja u tropskim područjima prema srednjim geografskim širinama.

Zemljin strujni krug bi mogao pokazivati stupanj zagađenja atmosfere u graničnim slojevima na globalnoj bazi jer na otpornost planetarnih graničnih slojeva utječe količina aerosola koja veže male ione i smanjuje lokalnu električnu vodljivost. Općenito šumski požari i zagađenja zraka iz urbanih područja stvaraju anomalije u količini bljeskova munja oblak – zemlja, njihovom intenzitetu ( vršnoj struji, zračenju) i predznaku naboja koji munje donose na zemlju. To je posljedica varijacija u distribuciji aerosolnih čestica, kemijskim modifikacijama u procesu prijenosa naboja, modifikacijama zvuka zbog anomalnog površinskog zagrijavanja i sl.

Utvrđeno je da munje stvaraju dušikove okside  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}$  = dušikov oksid i  $\text{NO}_2$  = dušikov dioksid) u troposferi.<sup>[3]</sup> Spojevi  $\text{NO}_x$  nastaju pod utjecajem čovjeka sagorijevanjem fosilnih goriva, ali su munje najveći prirodni izvor tih spojeva. Mjerenjima u grmljavinskim olujama nađena je visoka koncentracija  $\text{NO}_x$ , posebno u području nakovnja do kojeg je  $\text{NO}_x$  došao uzlaznim strujanjem i munjama u oblaku. Vrijeme života  $\text{NO}_x$  raste s visinom u atmosferi. U graničnim slojevima  $\text{NO}_x$  ima vrijeme života nekoliko sati, dok u gornjoj troposferi opstaje nekoliko dana.  $\text{NO}_x$  proizveden pomoću svjetlosti je ključan u fotokemijskim reakcijama koje određuju troposfernu i stratosfernu koncentraciju ozona. Ako je u troposferi visoka koncentracija  $\text{NO}_x$ , proizvodi se ozon (ozon nastaje kemijskom reakcijom vezanja atomskog i molekularnog kisika:  $\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3$ ). Ako je pak koncentracija  $\text{NO}_x$  mala, ozon se uništava, jer uz prisutan neparni vodik (neparni vodik, ili eng. odd hydrogen, je u meteorologiji naziv za kemijski skup koji čine vodikov atom  $H$ , hidroksilni radikal  $OH$  i hidroperoksilni radikal  $HO_2$ ), kisik se veže za vodik ( $\text{HO}_x = \text{OH} + \text{HO}_2$ ). Kako je ozon jaki staklenički plin, koncentracija  $\text{NO}_x$  utječe na globalne klimatske promjene. Reakcije  $\text{NO}_x$  s hidroksilnim radikalom  $OH$  utječe na sposobnost atmosfere da oksidira i ukloni zagađenja. Što je manje  $OH$  više zagađenja ostaje u atmosferi. Reakcije između  $\text{NO}_2$  i  $OH$  omogućuju stvaranje relativno stabilne dušične kiseline  $\text{HNO}_3$ , koja se oborinama prenosi iz atmosfere na zemlju i tako predstavlja izvor nitrata za biosferu. Zato se pretpostavlja da su munje utjecale na razvoj života na Zemlji.

Kod svakog pražnjenja munjom oblak – zemlja oslobađa se energija od približno  $10^2 - 10^3$  MJ uz porast temperature kanala munje do 30000K u nekoliko mikrosekundi (što je veća temperatura od površinske temperature Sunca).<sup>[7]</sup> Sva ta energija nalazi se u uskom kanalu promjera nekoliko centimetara, a ukupne duljine više stotina kilometara zbog mnogo grananja. ( Sama udaljenost od oblaka do zemlje je između 5 i 10 km.) Ako se pretpostavi da globalno imamo 100 bljeskova/s, kada bismo mogli spremiti svu tu energiju,

imali bismo maksimalnu snagu  $10^{12}$  W ( za usporedbu u SAD-u je 1980. god. iskorištena vršna električna snaga između  $0.5 - 0.6 \cdot 10^{12}$  W). Zato su postojali mnogi pokušaji „hvatanja“ i pohranjivanja energije munja, ali svi su bili bezuspješni. Glavni razlozi nemogućnosti pohranjivanja energije munje su: a) veći dio energije je disipativna energija, pretvorena u grmljavinu, toplinsku energiju, zračenja, a samo manji dio iz kanala baze mogao bi se koristiti; b) munje su vremenski i lokalno nepredvidive. Na istom mjestu npr. visokim tornjevima ne bi se mogle uhvatiti značajne količine energije. Kao primjer poznato je da toranj visine 300 m na Floridi pogode munje 100 puta godišnje, pa bi bilo potrebno mnogo desetina tornjeva za korištenje energije po kućanstvu.

Nikola Tesla je također eksperimentirao s munjama u svom laboratoriju u Colorado Springsu. <sup>[28]</sup> Uspio je proizvesti munje duljine 30 m. Otkrio je stojne valove u prostoru između površine zemlje i ionosfere i izračunao rezonantnu frekvenciju od 8 Hz. Tvrdio je da je uspio proizvesti kuglaste munje, lopte usijanih plinova koje su trajale oko desetak sekundi nakon isključivanja napona od  $12 \cdot 10^6$  V. Smatrao je da bi se ljudi mogli opskrbljivati strujom dobivenom iz stojnih valova koji bi se gibali neprestano između sjevernog i južnog električnog pola, a za dobivanje energije kućanstvima bi bio potreban samo uređaj koji bi imao dio za ugađanje radiosignala, uzemljenje i metalnu šipku visine kuće. Tesla je 1901. god. patentirao (patent br. 685957) Uređaj za korištenje izračene energije-napravu za hvatanje Sunčevih kozmičkih zraka i njihovo pretvaranje u električnu struju. Konceptija uređaja uključuje postavljanje izolirane metalne ploče što više u zrak. Druga metalna ploča utisnuta je u tlo. Obje ploče su žicama spojene na ploče kondenzatora. Sunce zračenjem izbacuje pozitivno nabijene čestice koje udarajući na gornju ploču prenose električni naboj. Kako je suprotna ploča spojena sa tlom, ona predstavlja spremnik negativnog naboja. U kondenzatoru se punjenje može događati sve do točke pucanja dielektrika i tada poteče struja. Ovaj patent bio je inspirativan za kasnije radove o korištenju „zelene“ energije. Mnoga njegova predviđanja su se u kasnijim godinama pokazala točna.



## 11. ZAŠTITA OD MUNJA

Zbog velike energije koju imaju munje, na mjestu udara mogu izazvati velika materijalna oštećenja ili vrlo ozbiljne ozljede ljudi. <sup>[29]</sup> Slike 52, 53 i 54 pokazuje primjere takvog djelovanja.



Slika 52: Posljedice pražnjenja munje oblak – zemlja na drvetu. Toplinska energija iz kanala munje može uzrokovati pri udaru u drvo isparavanje biljnog soka zbog kojeg sr događa snažna eksplozija debla. <sup>[16]</sup>



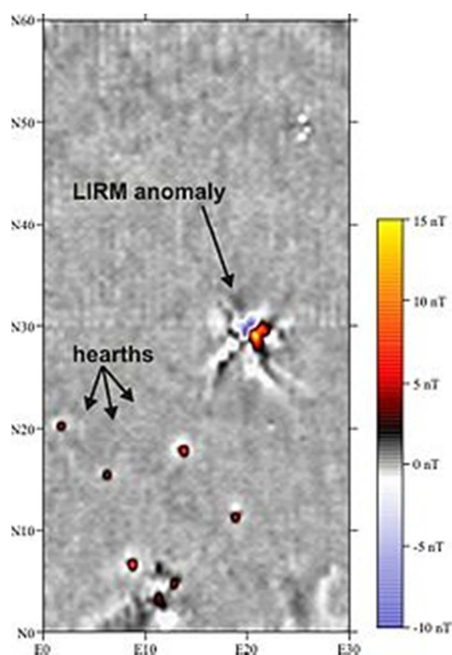
Slika 53: Okamenjene munje ili fulguriti; posljedica su toplinskog djelovanja udara munje u pjeskovito tlo. Nastaju zbog izgaranja ili topljenja sastojaka tla ( naročito ako sadrže čestice kvarca), koji se zatim brzo ohlade. <sup>[16]</sup>

Jedna od posljedica djelovanja munja je i pojava munjom inducirane remanentne magnetizacije materijala. <sup>[2]</sup> Poznato je da naboji u gibanju proizvode magnetsko polje. Intenzivne struje munja proizvode prolazna toliko jaka magnetska polja da metali ili materijali u stijenama ili zemlji, kroz koje prođe munja, mogu postati permanentno magnetizirani. Jedna od teorija smatra da su na sličan način u zemlji nastali magnetiti u

ranom razvoju zemlje. Slika 55 pokazuje primjer područja u kojem su zabilježene magnetske anomalije uzrokovane prolaskom munje kroz tlo.



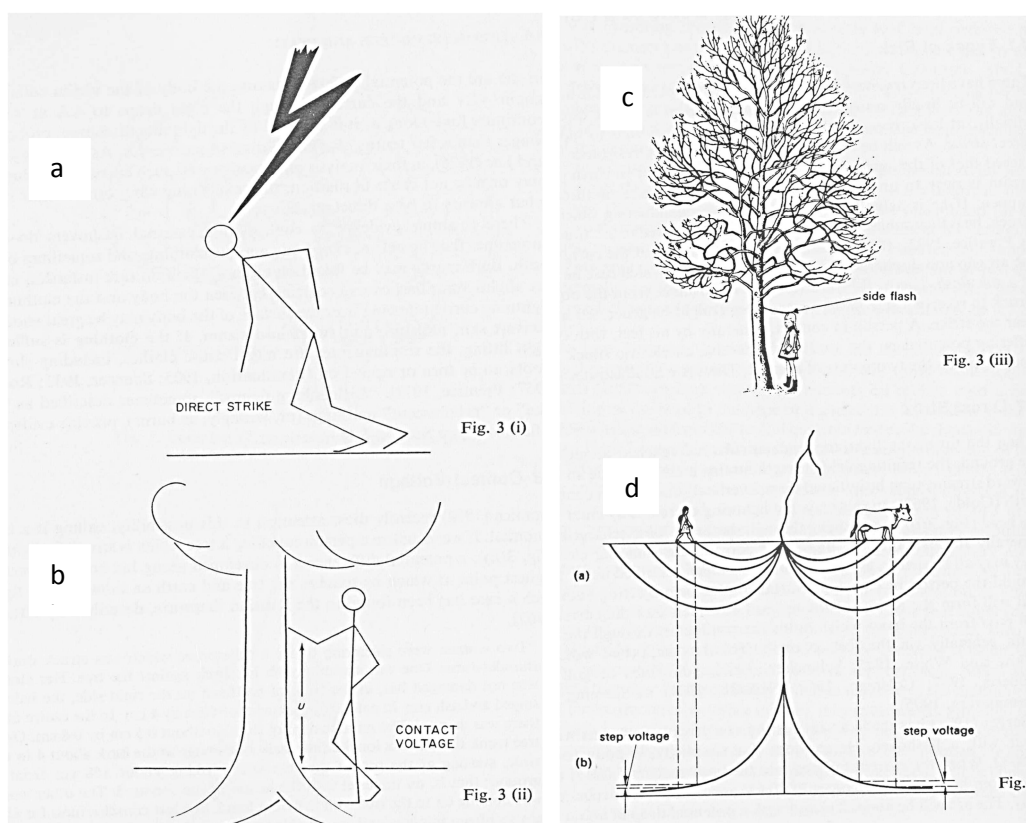
Slika 54: Erupcija vulkana može inicirati munju. Gustoća prašine i plinova izbačenih erupcijom u atmosferu i njihovo stalno gibanje u smjeru erupcije kontinuirano stvara elektrostatsku ionizaciju koja može inicirati pražnjenje <sup>[16]</sup>



Slika 55: Magnetizacija zaostala djelovanjem munje, zabilježena u toku analize gradijenta magnetskog polja na arheološkom nalazištu u Wyomingu u SAD-u. Analizom magnetiziranog materijala može se potvrditi da je izvor magnetizacije munja i mogu se odrediti vršne struje pražnjenja. <sup>[16]</sup>

Udar munje može na različite načine djelovati na predmete i na ljude. <sup>[29]</sup> Ljudsko tijelo je vodič jer se većim dijelom sastoji od vode u kojoj su otopljeni minerali. Električni otpor koji će tijelo pružiti prolazu struje je različit i ovisi o fiziološkoj građi organizma. Različitim ispitivanjima utvrđeno je da električni otpor tijela opada nelinearno s obzirom na napon, a najveće opadanje je kad se primjene naponi manji od 100 V (za strujni put od ruke do noge vrijednost otpora opada za oko 25 %). Kada se primjene naponi oko 1000 V

ili viši, otpor tijela se vrlo malo mijenja i nalazi se u području između 500 i 1000  $\Omega$ . Struja munje obično prolazi kroz tijelo od glave, vrata i ramena prema stopalima. Efekti djelovanja elektriciteta na ljudsko tijelo mogu se podijeliti na direktne i indirektne. Direktne nastaju direktnim prolazom struje kroz tijelo i uzrokuju poremećaje funkcioniranja organa, a indirektni su posljedice tog prolaska kao npr. različiti lomovi zbog pada uzrokovanog naglim kontrakcijama mišića, opekline dijelova tijela i sl. Najteže posljedice udara munje, koje mogu biti smrtonosne, su poremećaj rada srca i prestanak disanja, a obje su uzrokovane nepravilnim i naglim kontrakcijama mišića nastalim prolaskom struje kroz mišićno tkivo. Postoje razlike u načinima udara munje koji ljudi mogu doživjeti, a prikazane su na slici 56.



Slika 56:a) direktni udar; b) kontaktni napon; c) postrani udarac; d) step-napon  $d_{(a)}$  distribucija struje,  $d_{(b)}$  pad napona duž površine zemlje <sup>[29.]</sup>

Kada se vodilica munje nalazi oko 10 m iznad zemlje, jačina električnog polja dostiže kritičnu vrijednost pa se pojavljuju uzlazna strujanja iz okomitih vodiča koji su u kontaktu sa zemljom. Strujanja mogu krenuti i od dijelova tijela čovjeka (obično od glave) pa čovjek može doživjeti direktni udar munje prolazom struje munje kroz tijelo i obično

pražnjenjem preko stopala u zemlju. Ako više osoba stoji blizu jedna drugoj, sve mogu osjetiti udar. Postojali su i slučajevi površinskih bljeskova, koji se pojavljuju između tijela i odjeće. Tada struja munje teče površinom tijela jer vlaga i znoj na koži počinju strujati. Ako je odjeća uska, nastali površinski tlak može je razderati.

Kontaktni napon može se pokazati na primjeru sa slike 56 b). Ako čovjek dodiruje drvo koje je udarila munja, stvara se kroz njegovo tijelo potencijalna razlika između najviše točke u kojoj dodiruje drvo i zemlje na kojoj stoji.

Kada čovjek stoji ispod drva, on je „uzemljen“ tj. i vrh glave mu je na potencijalu nula. Struja munje u prolasku kroz drvo može u visini ljudskog tijela stvoriti tako veliko polje da se ionizira zrak između drva i glave čovjeka. Kako je tada manji otpor prolazu munje kroz ionizirani zrak nego kroz ostatak debla do zemlje, čovjek može doživjeti postrani udarac.

U slučaju udara munje na otvorenu, ravnu jednoliku površinu, pražnjenje struje je podjednako na sve strane oko mjesta udara. Ako čovjek stoji blizu mjesta udara, između njegovih stopala se javlja potencijalna razlika određena izrazom:

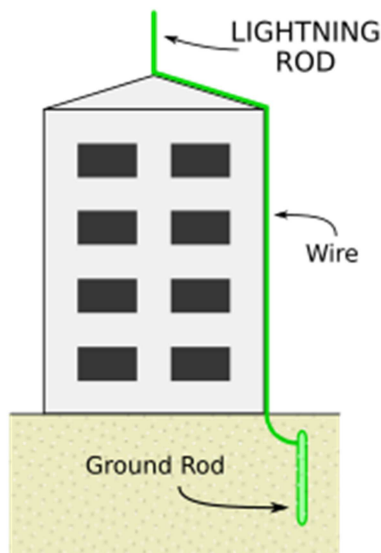
$$u = i \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{s}{d(d+s)}$$

gdje je  $i$  veličina struje munje izražena u [A],  $\rho$  je otpornost zemlje u [ $\Omega\text{m}$ ],  $s$  je dužina koraka u [m],  $d$  je udaljenost od točke udara do noge koja je bliže toj točki izraženo u [m]. Zbog potencijalne razlike poteći će struja kroz donji dio tijela i ta pojava se zove step-napon.

Iz navedenih slučajeva je vidljivo da čovjek može na različite načine biti ugrožen zbog udara munje, pa se pokušavaju razviti i usavršiti što efikasniji sustavi i načini zaštite. U mnogim zemljama se koristi neki oblik sustava za praćenje munja. Sustavi mogu raditi tako da snimaju područje vrlo niskih frekvencija (3-30kHz) i otkrivaju položaj munja (na sličnom principu radi LINET sustav), zatim mogu se promatrati promjene veličine električnog polja ili mjeriti sama veličina polja i utvrditi da li se približava kritičnoj vrijednosti. Kod svakog sustava postoji pogreška u predviđanju koja se može javiti jer je udar munje predaleko mjernom uređaju pa ga on ne može registrirati, jer oluja može promijeniti predviđeni smjer, jer se oluja može pojačati ili smanjiti suprotno predviđanjima i sl. S druge strane pravovremena upozorenja na mogućnost munja na nekom području su

važna ljudima koji obavljaju neku aktivnost na otvorenom (poljoprivrednici, planinari, izletnici i sl.) kako bi se mogli zaštititi.

Jedan od najviše korištenih načina zaštite objekata od udara munje je postavljanje gromobrana (ili munjovoda), kao što prikazuje slika 57.



Slika 57: Munjovod (ili gromobran) postavljen na visoku zgradu <sup>[31]</sup>

Munjovod je metalni štap smješten iznad visokih objekata koji je metalnim vodičem povezan s elektrodom postavljenom u zemlju. U slučaju udara munje, štap privlači udar pa se pražnjenje preko munjovoda odvodi u zemlju i tako se objekt štiti od posljedica udara. Ipak upotreba takvih munjovoda ima ograničenja u pogledu zaštite. Ustanovljeno je da položaj metalnog štapa na vrhu kuće određuje koliko je područje zaštite kuće tj. hoće li neki dio kuće unatoč postavljenom munjovodu biti ugrožen od udara. Zato je definiran omjer  $d/h$  (gdje je  $d$  udaljenost najdalje točke kuće u horizontalnom smjeru od položaja štapa, a  $h$  je okomita udaljenost od najniže točke krova do vrha štapa) kao „omjer zaštite“. Istraživanja su pokazala da se s potpunom sigurnošću ne može odrediti koliki je omjer zaštite zbog razgranatog kanala vodilice. Danas je tendencija da se klasični munjovodi zamjene korištenjem strukturalnih komponenata zgrade kao dijelova sistema zaštite. Metalne trake koje se postavljaju duž rubova krova, koriste se kao krovni vodiči, čelični potpornji ili metalne šipke u pojačanoj čeličnoj konstrukciji zamjenjuju posebne odvodne vodiče, a teški betonski temelji se koriste kao uzemljenje. Tako se cijelom

zgradom struja munje odvodi u zemlju, a u slučaju eventualnog oštećenja nekog dijela strukture, učinak djelovanja munje je manji jer se dio naboja ipak odvede u zemlju.

Za alternativnu metodu zaštite predloženo je korištenje Faradayevog kaveza. Faradayev kavez je vodljivo šuplje tijelo čija površina je potpuno metalna ili građena kao zatvorena metalna mreža. Postavljanjem takvog tijela u vanjsko električno polje, naboji se rasporede tako da se djelovanje naboja u unutrašnjosti tijela poništi pa je polje unutar tijela nula. Sav naboj preostaje na vanjskoj strani tijela. Stavljanjem nekog predmeta ili osobe unutar Faradayevog kaveza, oni ostaju zaštićeni od utjecaja vanjskog polja. Zato se Faradayev kavez koristi za zaštitu elektroničkih uređaja od elektrostatskih pražnjenja i od udara munje.

## 12. ZAKLJUČAK

Interes za razumijevanje nastanka munja započeo je zbog potrebe ljudi da zaštite sebe i imovinu od posljedica njenog udara. Ta sasvim praktična potreba pomogla je skupljanju znanja koja su omogućila razvoj novog područja fizike elektriciteta. Pokušaji objašnjavanja mehanizama pojave munja potakli su razvoj raznovrsnih mjernih tehnika i postupaka kojima su se testirale hipoteze i skupljala nova znanja počevši od lajdske boce, pa sve do današnjih kamera za brza snimanja, spektrografa, satelitskih snimanja itd. Što se primijenjena oprema više usavršavala, to je otkriveno više detalja o munjama, a svaki novi rezultat mjerenja otvarao je nova neriješena pitanja. Za objašnjenja otkrivenih pojava koriste se fizikalni modeli iz vrlo širokog područja fizike od elektromagnetizma, teorije zvuka, termodinamike, nuklearne fizike do fizike čestica. Testiranje hipoteza je još uvijek problem zbog same prirode ove pojave. Prirodne munje su nepredvidive prostorno i vremenski pa ih je teško proučavati iako na cijeloj Zemlji dnevno ima približno 9 milijuna pražnjenja. Bljesak munje traje samo oko 0.5 s, a prenese oko  $10^2$  MJ energije na zemlju. Nama nove vrste munja poput vilenjaka otkrivene su tek od 1990. god. a godišnje ih se pojavljuje oko 300 000 i svaki traje oko 1/1000 s. Cijeli niz pitanja je još uvijek predmet intenzivnih istraživanja poput:

- Kojim fizikalnim mehanizmom se inicira munja u oblaku? Uključuje li on procese visokih energija kao što su mehanizam odbjeglih elektrona, x-zrake i  $\gamma$ -

zrake? Kakva je u tome uloga različitih oblika leda i vode koji postoje u oblaku?

- Koji fizikalni mehanizmi upravljaju širenjem različitih tipova vodilica (kao što su negativna stepenasta, prva pozitivna, negativna skokovita, negativna stepenasta skokovita i sl.) pri njihovom kretanju između oblaka i zemlje i kod vodilica u oblaku?
- Koji fizikalni mehanizam određuje privlačenje vodilice i spajanje sa uzlaznim strujanjem s određenog visokog objekta na zemlji ili s ravne površine? Kakve su osobine uzlaznih vodilica koje kreću s visokih objekata ili čak sa zemlje prema oblaku?
- Kakav je fizikalni mehanizam povezanih pražnjenja unutar oblaka (eng. compact intra-cloud discharges ili CIDs) koja stvaraju uski bipolarni širokopojasni puls električnog polja, mnogostruko reflektirajuće valove, koji se rasprostiru unutar pojasa visine 1 km, te HF i VHF zračenje? Je li CID povezan s ostalim pulsovima početnog pražnjenja ili s uočenim zemaljskim bljeskovima gama zraka (TGFs) ili s prijelaznim svjetlosnim događajima (TLEs)? Satelitima su snimljene pojave TLEs-a iznad takvih oblaka, a posebno su uočene pojave gigantskih mlazova, ali se ne može reći što ih je proizvelo.
- Kakva je uloga X-zraka u rasprostiranju munje? Predstavljaju li X-zrake i TGFs potencijalnu opasnost za zdravlje svih osoba koje često putuju avionima ili rade u njima?
- Kakav je utjecaj TLEs-a na gornju atmosferu i ionosferu?
- Kako objasniti pojavu kuglaste munje?

Navela sam samo neka od brojnih pitanja na koja se traže odgovori koji bi mogli pomoći i daljnjem razvoju ostalih područja fizike.

## 13. METODIČKI DIO

Fizika munja i grmljavine nije predviđena u planu i programu nastave fizike u srednjoj školi kao posebna nastavna jedinica, ali se za objašnjenje pojave munje koriste mnogi fizikalni koncepti iz elektromagnetizma, termodinamike i zvuka koji se nalaze predviđeni u školskim programima. Zato bi se tema o munjama mogla iskoristiti kao

izborni sadržaj u redovnoj nastavi fizike, ili kao nastavna jedinica za satove dodatne nastave ili kao tema za učeničke projekte. Također, postojanje električnog polja Zemlje i pojava munja može se postaviti kao motivacijsko pitanje za satove na kojima se obrađuje npr. električno polje, potencijal, kondenzatori. U ovom radu prikazati ću jedan od načina kako se električno polje Zemlje može iskoristiti u obradi nastavne jedinice o kondenzatorima. Nastavnu jedinicu bih izvodila u obliku interaktivne, istraživački usmjerene nastave, a predvidjela sam je za prirodoslovno-matematičke gimnazije. Kako glavni cilj nastave nije samo usvajanje činjeničnog znanja, nego razvijanje razumijevanja, logičkog razmišljanja i zaključivanja i primjene znanja, interaktivna istraživački usmjerena nastava ima u tome višestruke prednosti pred predavačkim tipom nastave. U predavačkom tipu nastave učitelj je aktivan i objašnjava gradivo, a učenik je uglavnom pasivan. Takav tip nastave nije pogodan za razvijanje razumijevanja i zaključivanja, što je ključno za nastavu fizike. Od učenika se u interaktivnoj, istraživački usmjerenoj nastavi očekuje visok stupanj intelektualne angažiranosti, aktivno sudjelovanje u nastavnom satu, promatranje pojava, raspravljanje i izvođenje zaključaka te primjena znanja. Tako učenik uči već tijekom sata, za učenje novog gradiva mora koristiti prije stečena znanja pa usput ponavlja staro gradivo i uči novo, nastavne sadržaje može lakše povezati i dulje pamtiti. Uloga nastavnika u ovom tipu nastave također je promijenjena. Nastavnik treba motivirati učenike za rad i pomagati im u svladavanju novog znanja korištenjem različitih metoda poput otvaranja problema i vođenja usmjerene rasprave dok učenici ne izvedu ispravne zaključke, rješavanja zadataka u skupinama, interaktivnog izvođenja pokusa, konceptualnih pitanja s karticama i interaktivne nastave pomoću računala. Takvim metodama rada već u tijeku sata nastavnik može uvidjeti kakve poteškoće u učenju imaju učenici, pa tako može odmah pomoći učenicima u njihovom rješavanju.

Nastavna jedinica „Kondenzatori“ predviđena je u nastavnoj cjelini „Elektricitet i magnetizam“, koja se obrađuje u srednjoškolskom gradivu u 2. razredu. Potrebno predznanje učenici su dobili u prije obrađenim jedinicama, u kojima su učili o vrstama i osobinama električnih naboja i načinu elektriziranja tijela, o djelovanju električne sile, o električnom polju, potencijalu i o naponu. Predvidjela sam da se „Kondenzatori“ obrađuju u trajanju dva školska sata ili idealno kao blok-sat.

Prije izvođenja sata nastavnik treba odrediti obrazovne ciljeve. Oni uključuju sve ono što očekujemo da će učenici nakon sata moći navesti, objasniti, primijeniti, opisati, zaključiti, a nastavnik to može na slijedećim satovima provjeriti. Prema obrazovnim



ishodima radi se artikulacija sata. Za nastavnu jedinicu „Kondenzatori“ očekivani obrazovni ishodi bi bili da učenici mogu:

- objasniti princip kondenzatora
- matematički opisati i kvalitativno zaključivati o vezi između naboja, napona i kapaciteta kondenzatora
- opisati punjenje i pražnjenje kondenzatora
- eksperimentalno istražiti i matematički opisati ovisnost kapaciteta pločastog kondenzatora o površini ploča, razmaku među njima i o dielektriku između ploča
- objasniti pojavu munje u prirodi.

U toku sata trebaju se ostvariti i funkcionalni i odgojni ciljevi. Funkcionalni ishodi sata obuhvaćaju rad na razvijanju određenih sposobnosti učenika, a u ovom slučaju to bi bile sljedeće sposobnosti:

- sposobnost logičkog razmišljanja i zaključivanja
- sposobnost pismenog i usmenog izražavanja
- sposobnost povezivanja
- razvijanje komunikacijskih vještina.

Odgojni ishodi ili vrijednosti koje učenici trebaju usvojiti tokom sata su:

- međusobna suradnja i uvažavanje tuđeg mišljenja
- sloboda govora
- razvijanje samopouzdanja i samokritičnosti
- radoznalost i motivacija za učenje

U tijeku sata interaktivno bih izvodila pokuse, provela bih usmjerenu raspravu i koristila bih računalo. Interaktivno izvođenje pokusa uključuje na početku upoznavanje učenika s eksperimentalnim postavom i postavljanje eksperimentalne situacije koju ćemo istraživati. Prije izvođenja pokusa učenici trebaju razmisliti o mogućem ishodu i predvidjeti rezultat pokusa. Zatim se izvodi pokus koji se po potrebi ponovi više puta kako bi svi učenici uočili bitno. Učenici trebaju iskazati što su uočili u pokusu i pokušati objasniti pojavu. O iskazanim objašnjenjima vodi se argumentirana rasprava kojoj je cilj da učenici obrazlažući svoja stajališta o pojavi zajednički dođu do konačnog ispravnog zaključka. Od učenika se očekuje aktivno sudjelovanje u nastavi, predviđanje rezultata, promatranje pokusa i zaključivanje o uočenim pojavama.

Artikulacija sata sastoji se od uvodnog dijela, središnjeg dijela i završnog dijela sata. U uvodnom dijelu otvara se problem pitanjem ili pokusom i učenici se upoznaju s pojavom. Uvodni dio treba motivirati učenike za rad. Središnji dio sata čini konstrukcija fizikalnog modela i matematički opis. Završni dio sata je primjena i testiranje modela. Ovdje se možemo vratiti na uvodni problem i pokušati ga pojasniti na osnovu novih saznanja, a mogu se postavljati i konceptualna pitanja kako bi se mogao provjeriti stupanj usvojenosti gradiva.

### *Tijek sata*

Uvodni dio sata:

Uvodni problem bi mogao biti sljedeći:

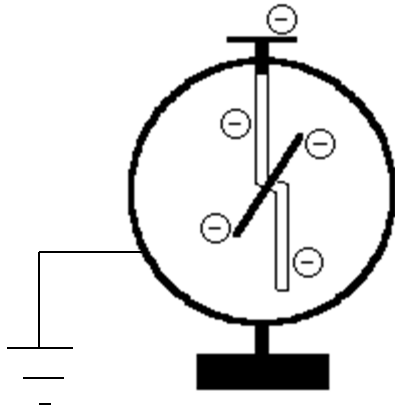
*U ljetnim mjesecima česte su ljetne oluje, a tada dolazi do pojave munja. Zašto se pojavljuju munje?*

Kako učenici imaju vlastito iskustvo o grmljavinskim olujama, od njih se očekuje da razmisle o tom fenomenu koristeći dosadašnje znanje fizike. Cilj uvodnog problema je privlačenje učeničke pozornosti na rad, buđenje interesa za temu sata, te prikupljanje učeničkih ideja. Očekuje se učeničko povezivanje pojave munja s idejom o postojanju određenih raspodjela naboja u sustavu Zemlja – oblak, te s idejom da naboji u prostoru stvaraju električno polje.

Središnji dio sata:

Pokušat ćemo istražiti vezu između količine naboja na nekom tijelu i njegovog napona prema Zemlji.

Nastavnik opisuje eksperimentalni postav i izvodi pokus. Pločica elektroskopa čije je kućište uzemljeno nabije se pomoću naelektriziranog plastičnog štapa (kao na slici 58).



Slika 58: Elektroskop nabijen pomoću naelektriziranog plastičnog štapa

*Što pokazuje otklon kazaljke elektroskopa? Zašto kućište moramo uzemljiti?*

Učenici obično povezuju otklanjanje kazaljke elektroskopa samo pokazivanjem prisutnosti naboja. Moj cilj bi ovdje bio navesti učenike da veličinu otklona kazaljke povežu s veličinom napona između kazaljke i kućišta. Zbog postojanja negativnog naboja na kazaljki elektroskopa, na kućištu se inducira naboj tako da se bliže kazaljki nalazi pozitivan naboj, a dalje od nje je negativan naboj. Elektroskop je uzemljen kako bi se negativni naboj s kućišta odveo u zemlju. Tako dobijemo električno polje između kazaljke i kućišta, a ono je povezano s naponom, pa nam otklon kazaljke pokazuje veličinu napona.

*Što pretpostavljate da će se dogoditi ako nabijenoj pločici elektroskopa približimo uzemljenu metalnu pločicu tako da bude paralelna s pločicom elektroskopa, ali je ne dotiče? Kako možemo objasniti to što smo uočili?*

Učenici na osnovu rezultata pokusa trebaju zaključiti da će se, zbog prisutnosti negativnog naboja na elektroskopu, na pločici razdvojiti naboji, ostavljajući pozitivan naboj na donjoj strani pločice koju smo približili elektroskopu. Taj pozitivan naboj će smanjiti električno polje u elektroskopu, a time i napon. Kako se napon smanjio, tako se smanjio otklon kazaljke elektroskopa.

*Što će se dogoditi ako odmaknemo uzemljenu metalnu pločicu? Što se događa kada je ponovno približimo?*

Kad odmaknemo pločicu, otklon se povećava jer se povećava potencijalna razlika između kućišta i kazaljke elektroskopa. Kada je ponovno približimo, otklon se opet smanjuje, dakle smanjuje se napon.

*Mijenja li se količina naboja na elektroskopu u slučaju kad je pločica primaknuta i kad je odmaknuta? Što se mijenja u tim slučajevima?*

Na elektroskopu je uvijek ista količina naboja (i kad je pločica primaknuta i kad je odmaknuta). Druga pločica smanjuje napon pločice elektroskopa prema Zemlji. Dakle sustav dvije pločice na manjem naponu može pohraniti istu količinu naboja kao i sama pločica ranije, pa nam je povoljniji jer možemo dodati još naboja na dvije pločice. Kažemo da dvije pločice imaju veći kapacitet nego samo jedna. Kapacitet definiramo kao fizikalnu veličinu koja opisuje odnos između naboja i napona. Sustav dvije pločice zovemo kondenzator. Matematički definiramo kapacitet kondenzatora:  $C = Q/U$ .

*Što nam govori ovaj izraz?*

Kapacitet kondenzator će biti toliko veći, koliko se više naboja može pohraniti na ploče kondenzatora uz manji napon.

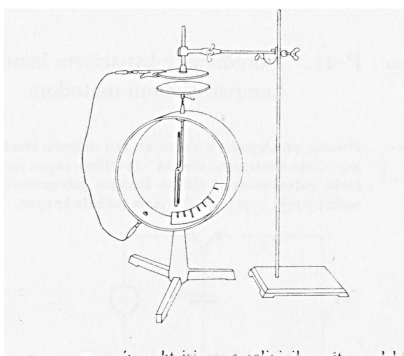
*O čemu bi mogao ovisiti kapacitet pločastog kondenzatora?*

Učenici raspravljaju. Očekuje se da zaključe kako bi kapacitet mogao ovisiti o površini pločica, njihovoj udaljenosti i sredstvu koje se nalazi između pločica.

*Kako bismo mogli provjeriti o čemu ovisi kapacitet kondenzatora?*

Učenici osmišljavaju pokus i raspravljaju što moramo držati konstantnim kada provjeravamo ovisnost dviju varijabli.

Nastavnik izvodi slijedeći pokus: složimo postav kao na slici 59.



Slika 59: Istraživanje ovisnosti pločastog kondenzatora o površini ploča, razmaku između ploča i o dielektriku između ploča

*Što mjeri kazaljka elektroskopa ako donju ploču spojimo s kućištem? Što će mjeriti kazaljka elektroskopa u ovom postavu?*

Kada je donja ploča elektroskopa spojena s kućištem, otklon kazaljke pokazuje napon između kazaljke i kućišta. Ako je gornja ploča spojena s kućištem, otklon pokazuje napon između ploča.

Pokusom učenici trebaju ispitati o čemu ovisi kapacitet pločastog kondenzatora. Pritom moraju uočiti koje veličine su konstantne, a koje mijenjamo (kontrola varijabli).

Donju ploču nabijemo pomoću plastičnog naelektriziranog štapa.

*Što uočavate? Što će se dogoditi ako smanjimo razmak između ploča, a što ako ga povećamo? Što možemo zaključiti o kapacitetu kondenzatora?*

Udaljavanjem gornje ploče od donje uz ostale veličine konstantne, otklon kazaljke se povećao, napon je porastao, a zbog nepromijenjenog naboja, kapacitet se smanjio. Smanjivanjem razmaka između ploča otklon kazaljke je manji, napon se smanjuje, a kapacitet raste. Na osnovu mnogih mjerenja utvrđeno je da je  $C \sim 1/d$ .

*Što se događa ako gornju ploču pomaknemo ustranu ( smanjimo površinu kojom se ploče međusobno prekrivaju)?*

Smanjenjem površine kojom se ploče prekrivaju tj. pomicanjem gornje ploče u stranu, otklon kazaljke se povećao, napon se povećao, a zbog nepromijenjenog naboja, kapacitet se smanjio. Vraćanjem ploče u prvobitni položaj, otklon kazaljke pada, napon se smanjuje, a kapacitet raste. Mjerenjima su znanstvenici utvrdili da je  $C \sim S$ .

*Ako razmak između ploča postavimo na početnu udaljenost, što će se dogoditi kad između ploča stavim papir?*

Postavljanjem dielektričnog sredstva (papira) između ploča, otklon kazaljke pada, dakle napon se smanjuje pa uz isti naboj kapacitet raste. Mnogobrojnim mjerenjima znanstvenici su utvrdili da je  $C \sim \epsilon_r$ .

*Kako možemo matematički zapisati što smo uočili?*

Zapisujemo matematički izraz za kapacitet kondenzatora:  $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$

Završni dio sata:

Vraćamo se na uvodni problem.

*Postoji li u prirodi sličan kondenzator? Što su njegove ploče? Ima li i u prirodi pražnjenja prirodnog kondenzatora? Kada će doći do pojave munje?*

Zaključak: Zemlju i donju atmosferu možemo promatrati kao dvije ploče sfernog kondenzatora. Pri formiranju olujnih oblaka dolazi do sudaranja i trenja kristalića leda pa se oblak elektrizira. Zbog skupljanja naboja u oblaku inducira se naboj na tlu i objektima na zemlji koji su ispod oblaka u području djelovanja električnog polja oblaka. Dakle dobijemo sferni kondenzator. Što se više naboja skuplja u oblaku i na zemlji, to je jače električno polje. U jednom trenutku dolazi do djelomičnog ioniziranja kisika i dušika u zraku između oblaka i zemlje tj. pojave plazmenih segmenata kojima se stvara staza za prijenos naboja iz oblaka u zemlju i obrnuto. U tom trenutku pojavljuje se munja.

Razmatramo jedno konceptualno pitanje.

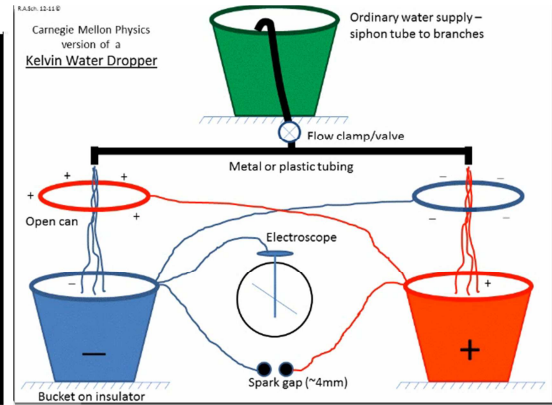
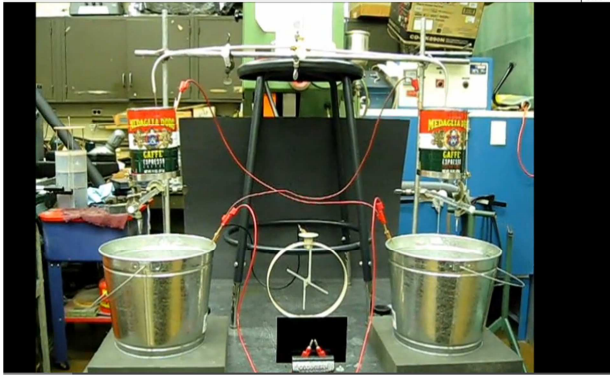
*Što bi se dogodilo kada bismo stavili jako veliku količinu naboja na ploče kondenzatora?*

Učenici raspravljaju. Trebali bi zaključiti da se povećavanjem količine naboja na pločama povećava i električno polje između ploča. U jednom trenutku polje postaje toliko veliko da se zrak između ploča djelomično ionizira pa dolazi do izboja kondenzatora.

Kako bi učenici lakše došli do navedenog zaključka poslužiti ću se filmom na kojem je prikazan pokus koji je izveo još Kelvin, a poznat je kao „Kelvinova vodena kapaljka s elektroskopom“ ili „Kelvinova grmljavinska oluja“. Film se nalazi na internetskoj adresi:

<http://youtu.be/8Jx1pvFiaol>,

To je jedna od mnogobrojnih verzija istog pokusa. Pokus se izvodi vrlo jednostavnim priborom i mogao bi se izvesti i „uživo“ u učionici, jer bi tada doživljaj učenicima bio još bolji. Kroz pokus ću voditi učenike jednako kao u prijašnjim pokusima dakle predstavljajući im eksperimentalni postav, objašnjavajući kako će pokus započeti i vođenjem pomoću pitanja tražiti da zakluče i povežu što su vidjeli. Eksperimentalni postav pokusa prikazan je na slici 60.



Slika 60: Kelvinova vodena kapaljka s elektroskopom; snimka postava u laboratoriju (lijevo), skica postava (desno)

U pokusu voda na jednaki način curi sa dvije strane u kante prolazeći pritom kroz šuplje limenke. Svaka limenka je žicom spojena sa kantom koja joj stoji nasuprot. Jedna od kanti spojena je s elektroskopom pa se može promatrati prisutnost naboja u kanti. Za svaku kantu vezana je jedna elektroda. Elektrode stoje jedna razmaknuta od druge za oko 4 mm.

*Što ste uočili?*

Što se vidi u pokusu:

- Elektroskop se otklanja i vraća u prvobitni položaj naizmjenično
- Tok vode se mijenja u vremenu (što se može i čuti), čas teče po sredini punog mlaza, a čas se mlaz širi i otklanja
- U trenutku vraćanja kazaljke elektroskopa u prvobitni položaj pojavljuje se iskra između elektroda

*Jesu li kante i limenke elektrizirane u početku pokusa? Kako to možemo zaključiti? Zašto je došlo do otklona kazaljke elektroskopa u jednom trenutku? Zašto se kazaljka ponovno vratila u prvobitni položaj? Kada se kazaljka vraća u prvobitni položaj? Zašto se mlazovi vode šire i skupljaju? Zašto se pojavljuje iskra?*

Objašnjenja:

Kante i limenke su u početku električki neutralne. Kako voda teče dolazi do male neravnoteže naboja i elektrostatskog nabijanja vode, kanta i limenki. Kante i limenke vezane međusobno žicom nabijaju se istim nabojem. Kako se istoimeni naboji odbijaju, voda se ionizira tako da prolazeći kroz limenku s negativnim nabojem, negativni naboj vode nastoji se udaljiti od limenke i prelazi preko kanala kojim voda teče na suprotnu

stranu gdje je limenka s pozitivnim nabojem. Voda s negativnim nabojem proteći će kroz limenku s pozitivnim nabojem ( zato će se mlaz početi širiti prema limenki) i padati će u kantu s negativnim nabojem. S druge strane će biti obrnuta situacija. Kako se kanta nabija vidimo po otklonu elektroskopa. Kada skupljeni naboj prijeđe kritičnu vrijednost, dolazi do pojave iskre između elektroda i u tom trenutku se kazaljka elektroskop vraća u početni položaj. To znači da je došlo do pražnjenja naboja na kanti. Ponovnim skupljanjem naboja cijeli postupak se ponavlja sve dok voda teče. U ovom pokusu kante su ploče kondenzatora koji se puni nabojem. Kada se skupi prevelika količina naboja dolazi do pražnjenja pa se pojavi iskra.

Vraćamo se na prije postavljeno pitanje: *možemo li na ploče staviti jako velike količine naboja?*

Postoji najveća moguća količina naboja koju može primiti kondenzator, a da ne dođe do izbijanja.



## Literatura

- [1] Rakov, V. A. ; Uman, M. A. Lightning: Physics and Effects. 1st ed. Cambridge University Press, 2003.
- [2] Golde, R. H. Lightning: Physics of Lightning. ( Vol.1) Academic Press Inc. (London) ltd, 1977.
- [3] Holton, J. R. ; Curry, J. A. ; Pyle, J. A. Encyclopedia of Atmospheric Sciences // Electricity, Atmospheric. Elsevier Science Ltd, Academic Press, 2003. Str. 724 – 746
- [4] Holton, J. R. ; Curry, J. A. ; Pyle, J. A. Encyclopedia of Atmospheric Sciences // Lightning. Elsevier Science Ltd, Academic Press, 2003. Str. 1216 – 1227
- [5] Dwyer, J.R.; Uman, M.A. The physics of lightning// Physics Reports 534 (2014) Str. 147-241
- [6] Feynman, R.P.; Leighton, R.B.; Sands, M.L. The Feynman Lectures on Physics: Electromagnetism and Matter. Vol II, Part 1, Addison- Wesley Publishing Company, 1977. Str. 9.1- 9.19
- [7] Uman, M.A. The Lightning Discharge. Dover Publications Inc. (Mineola, New York), 2001.
- [8] Lightning : Principles, Instruments and Applications// Review of Modern Lightning Research/ edited by Betz, H.D.; Schumann, U.; Laroche, P. , Springer Science and Business Media, 2009.
- [9] Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges/ edited by Füllkrug, M.; Mareev, E.A.; Rycroft, M.J. , NATO Science Series, Series II: Mathematics, Physics and Chemistry – Vol. 225, Springer, 2006.
- [10] Leyden jar, wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Leyden\\_jar](http://en.wikipedia.org/wiki/Leyden_jar), 4. 5. 2014.
- [11] Zemljina atmosfera, wikipedia, [http://hr.wikipedia.org/wiki/Zemljina\\_atmosfera](http://hr.wikipedia.org/wiki/Zemljina_atmosfera), 4. 5. 2014.
- [12] Thunderstorms, wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Thunderstorm>, 4. 5. 2014.
- [13] Corona discharge, wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Corona\\_discharge](http://en.wikipedia.org/wiki/Corona_discharge), 20. 6. 2014.

- [14] Corona discharge, dpchallenge,  
[http://www.dpchallenge.com/image.php?IMAGE\\_ID=42109](http://www.dpchallenge.com/image.php?IMAGE_ID=42109), 20. 6. 2014.
- [15] Lightning, youtube ( 13. 2. 2010.), <http://youtu.be/gmCqKBxTaPs>, 4. 5. 2014.
- [16] Lightning, wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Lightning>, 4. 5. 2014.
- [17] Atmospheric electricity and lightning, NASA MSFC Earth Science Office,  
<http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/>, 4. 5. 2014.
- [18] Ball lightning, wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Ball\\_Lightning](http://en.wikipedia.org/wiki/Ball_Lightning), 20. 6. 2014.
- [19] Cen, Jianyong; Yuan, Ping; Xue, Simin (17 January 2014). "[Observation of the Optical and Spectral Characteristics of Ball Lightning](#)". *Physical Review Letters* (*American Physical Society*) **112** (35001). Retrieved 19 January 2014.
- [20] Upper – atmospheric lightning, wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Upper-atmospheric\\_lightning](http://en.wikipedia.org/wiki/Upper-atmospheric_lightning), 4. 5. 2014.
- [21] Rapid Lateral Expansion of Optical Luminosity in Lightning-Induced Ionospheric Flashes Referred to as `Elves', stanford edu.,  
<http://nova.stanford.edu/~vlf/optical/fly/lateralExpansion.html>, 20. 6. 2014.
- [22] storm chasing in a jet – capturing upper – atmospheric lightning, youtube (8. 12. 2013.), <http://youtu.be/vSCwiQWzMa0>, 20. 6. 2014.
- [23] Lightning seen from space station: Red sprites, jets, and elves photos and video (Photos), wn.com,  
[http://article.wn.com/view/2013/05/15/Lightning\\_seen\\_from\\_space\\_station\\_Red\\_sprites\\_jets\\_and\\_elves/](http://article.wn.com/view/2013/05/15/Lightning_seen_from_space_station_Red_sprites_jets_and_elves/), 20. 6. 2014.
- [24] Blue jets and red sprites, youtube, (13. 12. 2009.), <http://youtu.be/pnAAB0z2o-k>, 20. 6. 2014.
- [25] How thunderstorms launch particle beams into space, NASA's Goddard Space Flight Center/J. Dwyer, Florida Inst. of Technology  
[http://www.nasa.gov/pdf/509357main\\_Trio\\_noshadow\\_300dpi.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/509357main_Trio_noshadow_300dpi.pdf), 20. 6. 2014.
- [26] The lightning rocket system, USA patents, [www.google.com/patents/US6597559](http://www.google.com/patents/US6597559), 20. 6. 2014.

- [27] The lightning rocket system, skydiary,  
<http://skydiary.com/gallery/chase2002/chase2002g.html>, 20. 6. 2014.
- [28] Nikola Tesla, wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Nikola\\_Tesla](http://en.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla), 20.6. 2014.
- [29] Golde, R. H. Lightning: Lightning protection ( Vol. 2), Academic Press Inc. (London) ltd., 1977.
- [30] Franc, B. Postavljanje novog LINET sustava u Hrvatskoj,  
FER u Zagrebu, [http://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/LLS.pdf](http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/LLS.pdf), 8. 7. 2014.
- [31] Lightning rod, wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Lightning\\_rod](http://en.wikipedia.org/wiki/Lightning_rod), 8. 7. 2014.
- [32] Kelvin Water Dropper with Electroscope: Thunderstorm Warning, youtube,  
<http://youtu.be/8Jx1pvFiaol>, 8. 7. 2014.
- [33] Nobelova nagrada za fiziku,nobelprize.org,  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1927/wilson-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1927/wilson-bio.html), 8. 7. 2014.
- [34] Moore, C. B. Eack, G. D. Aulich, W. Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders, Geophys.Res. Lett 28(2001) 2141-2144
- [35] Gurevich, A. V. Milikh,G. M. Roussel-Dupre, R. A. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm, Phys. Lett. A 165 (1992) 463-467