

Kristian Birkeland - otkrivač porijekla polarne svjetlosti

Pavlik, Veronika

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:913281>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-19**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Preddiplomski sveučilišni studij

Kristian Birkeland - otkrivač porijekla polarne svjetlosti

Završni rad

Veronika Pavlik

Osijek, 2021.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 16.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Ime i prezime studenta:	Veronika Pavlik
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4570, 24.07.2018.
OIB studenta:	52586913364
Mentor:	Doc.dr.sc. Marina Skender
Sumentor:	Prof. dr. sc. Željko Hederić
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Kristian Birkeland - otkrivač porijekla polarne svjetlosti
Znanstvena grana rada:	Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)
Predložena ocjena završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	16.09.2021.
Datum potvrde ocjene Odbora:	22.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 29.09.2021.

Ime i prezime studenta:

Veronika Pavlik

Studij:

Prediplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

4570, 24.07.2018.

Turnitin podudaranje [%]:

5%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Kristian Birkeland - otkrivač porijekla polarne svjetlosti**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Marina Skender

i sumentora Prof. dr. sc. Željko Hederić

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	2
2. ŽIVOTOPIS KRISTIANA BIRKELANDA.....	3
2.1. Život Kristiana Birkelanda	3
2.2. Diplomski istraživanja, izumi i nagrade	7
3. SUNČEV VJETAR	9
3.1. Struktura Sunca i neke pojave vezane uz vanjske slojeve Sunca.....	9
3.2. Birkelandovo otkriće Sunčevog vjetra	12
4. TERRELLA.....	17
4.1. Birkelandova terrella.....	18
5. BIRKELANDOVE STRUJE	23
6. POLARNA SVJETLOST	25
7. ZAKLJUČAK.....	27
LITERATURA	28
SAŽETAK.....	31
ŽIVOTOPIS.....	32

1. UVOD

Govoreći o polarnim krajevima stvara se slika prekrasnog i jedinstvenog prirodnog fenomena zvanog polarna svjetlost. Veći dio ljudi se prvo sjeti Sjevernog pola iz razloga jer su sjeverna polarna područja dostupnija i provodi se puno više ekspedicija dok je južni pol manje dostupan. Polarna svjetlost naziva se još i aurora borealis i aurora australis. Izraz aurora borealis se koristi na sjeveru i znači sjeverna zora, jedan primjer je prikazan na slici 1.1. Naziv je dobila prema rimskoj božici svitanja Aurori (sestri Sunca i Mjeseca) i grčkom bogu sjevernih vjetrova Borealisu. Izraz aurora australis znači južna zora, a odnosi se na polarnu svjetlost koja je pojavljuje u južnim polarnim krajevima, primjer na slici 1.2.

U ovom završnom radu prikazana je kratka biografija Kristiana Birkelanda. Opisane su polarne ekspedicije koje je vodio u svrhu prikupljanja podataka o polarnoj svjetlosti i geomagnetskim olujama, gradnja geomagnetskog opservatorija na planini Haldde te uspostavljanje mreže geomagnetskih opservatorija. Nadalje, prikazan je niz Birkelandovih eksperimenata u kojima je magnetizirana terrella laboratorijski simulirala Zemlju, a u nekim eksperimentima i Sunce i Saturn. Ovim eksperimentima je Kristian Birkeland potvrdio svoju hipotezu da su za pojavu polarne svjetlosti odgovorne energizirane nabijene čestice koje pristižu sa Sunca.

Kristian Birkeland je ispravno zaključio da sa Sunca kontinuirano teku pozitivno i negativno nabijene čestice, što je prva znanstvena predikcija onoga što je kasnije nazvano Sunčevim vjetrom. Birkeland je shvatio da negativno nabijene čestice stimuliraju vidljive auroralne emisije. Otkrio je da električne struje koje povezuju ionizirani plin sa Sunca sa Zemljinom polarnom atmosferom bivaju intenzivirane tijekom perioda poremećenog magnetskog polja. Te struje dijelom teku duž magnetskih silnica u gornjoj atmosferi te ih se može otkriti pomoću preko smjerova i iznosa magnetskih perturbacija mjerenih na tlu.

Opisana Birkelandova pionirska otkrića o podrijetlu polarnog svjetla, o postojanju Sunčevog vjetra i postojanju Birkelandovih struja, dala su golemi doprinos današnjoj svemirskoj znanosti.

1.1. Zadatak završnog rada

Cilj ovog završnog rada jest prikazati djelo Kristiana Birkelanda, njegov teorijski rad, prikupljanje podataka te eksperimente s terrellom, pomoću kojih je potvrdio svoje hipoteze o toku nabijenih čestica sa Sunca kao ključnim uzrokom pojave polarne svjetlosti.



Slika 1.1. *Aurora Borealis iznad Aljaske 2017. godine.* [1]

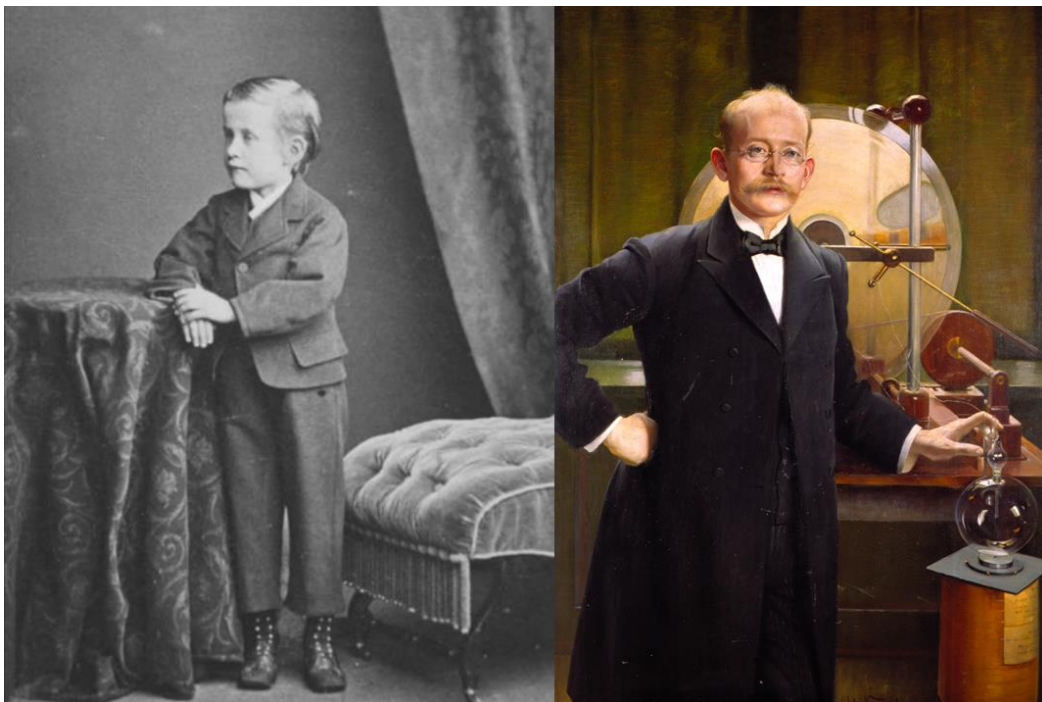


Slika 1.2. *Aurora Australis.* [2]

2. ŽIVOTOPIS KRISTIANA BIRKELANDA

2.1. Život Kristiana Birkelanda

Olaf Kristian Bernard Birkeland je rođen u Kristianiji, današnjem Oslu, 13. prosinca 1867. godine. Njegovi preci bili su poljoprivrednici iz male zajednice zvane Birkeland na najjužnijem dijelu Norveške. Kristianov otac Reinert Tonnesen Birkeland (1838. - 1899.) rođen je u blizini Flekkefjord-a, na jugu Norveške. Reinert Tonnesen Birkeland oženio se s Ingeborg Susanne Ege (1841. - 1913.) i preselili su se u Kristianiju. Reinert se kao trgovac nametnuo u uvozno-izvoznom poslu. [3]



Slika 2.1. *Fotografija lijevo prikazuje Kristiana Birkelanda kao dječaka, fotografija desno je prikaz Birkelanda u starijoj dobi.* [4]

Kristian je imao dvije godine starijeg brata, Tonnesa Gunnara koji je rođen 26. listopada 1865. Tonnes Gunnar je fizički bio jači i bavio sportom, dok je Kristian bio slabijeg zdravlja, fizički sitan te je nosio naočale. Ipak bio je vrlo aktivan i nadaren s izoštrim smislom za humor. Kristian je bio sklon učenju i pokazivao je zanimanje za matematiku, kemiju i fiziku. Vrlo rano je otkrio i prepoznao vlastite talente u znanosti. Kako je Kristian volio čitati i istraživati, roditelji su mu kupovali knjige. Čak bi svoj džeparac, od kojeg bi djeca inače kupila slatkiše i igračke, koristio za kupnju materijala i alata koji su bili potrebni za izvođenje eksperimenata. Kao učenika zanimali su ga magneti pa je tako njegova prva kupnja vlastitim novcem bila upravo kupnja magneti. Kristian i Tonnes su pohađali poznatu privatnu srednju školu Aars og Voss' skole koja se nalazi u St.Olav udaljena jedan kilometar od njihove kuće. Aars og Voss je bila

jedna od rijetkih srednjih škola u kojoj se moglo izabrati studij znanosti i suvremenih jezika umjesto latinskog jezika, koji se tada još bio korišten kao međunarodni jezik. Kristian i Tonnes su izabrali tečaj znanosti. Kristian je dobivao vrlo visoke ocjene i završio je sve akademske studijske zahtjeve godinu dana prije od Tonnesa. Srednju školu je završio 1885. godine s najvišim ocjenama u znanstvenim disciplinama. Elling Holst, Birkelandov profesor matematike iz srednje škole, primijetio je da je Birkeland izvrstan učenik. Prije završetka srednje škole objavio je tri kratka rada o geometriji u danskom časopisu „Zeuthens Tidsskrift for Mathematikk“. U posljednjoj godini svojeg srednjoškolskog obrazovanja Kristian je ručno napisao dokument od 18 stranica koji sadrži nekoliko jednadžbi i tako zatražio od Norveške akademije da ih čuva, izvadak toga rada je objavljen 1914. godine. Birkeland je kasnije smatrao to djelo, kojeg je izradio u dobi od 18 godina, svojim najvećim intelektualnim dostignućem. Birkeland je 2. rujna 1885. godine postao student na Kraljevskom sveučilištu Frederik, gdje je studirao kemiju kod poznatog profesora Petera Waagea (1833. - 1900.). Waage je bio fasciniran brzinom kojom je Birkeland savladao osnovne pojmove kemije i izvođenje eksperimenata, nakon čega je potaknuo Birkelandove roditelje da ga karijerno usmjere u područje kemije. Birkeland je ipak nastavio studirati na matematičkim studijem pod vodstvom Ellinga Hosta. Tijekom studiranja je honorarno predavao u lokalnim školama i privatno podučavao studente te tako financirao vlastito obrazovanje. Uslijed poslovnih i finansijskih problema Reinert Birkeland se izolirao od obitelji i pao u depresiju. Kristianova majka umire u veljači 1913. godine u 72. godini života. Holst se nije iznenadio kada je Birkeland jedini bio u njegovom razredu za dobivanje presretes, najviše moguće ocjene. Holston je napisao pismo Birkelandu u kojem mu govori da prepoznaje njegov jedinstveni talent za matematiku i izričući nadu da bi upravo Birkeland mogao postati novi Abel. Birkeland se istaknuo i u području teorijske i eksperimentalne fizike. Birkeland je odlučio studirati fiziku jer ga je razočarao nedostatak informacija o elektromagnetskoj teoriji u udžbeniku i u završnom radu profesora Schiotza. Dodatna motivacija za studij fizike bilo je čitanje znanstvenih časopisa. Birkeland se usredotočio na istraživanje Maxwellove teorije elektromagnetskih valova. U lipnju 1890. Birkeland je, kao najmlađi u svom razredu, sveučilišni studij završio je s najvišim ocjenama. Njegov je stupanj Matematisk Naturvitenskapelig Lærereksamen otprilike ekvivalent modernom magistru znanosti iz fizike. Bio je kvalificiran za predavanje na srednjoškolskoj razini iz tri predmeta, ali doista se nadao da će nastaviti školovanje u inozemstvu. Birkeland je bio blizak sa profesorom Henrikom Mohnom te je često bio pozvan na nedjeljne ručkove. Na nedjeljnim ručkovima bi dolazila bliža rodbina profesora, pa je jednom prilikom došla profesorova sestra Justine sa svojom kćeri Idom Charlotte Hammer. Ida je bila veoma inteligentna, neovisna i pobožna žena. Otputovala je u

Ameriku i Englesku gdje je ovladala kulinarskim vještinama te je usput radila kao učiteljica. U svibnju godine 1905. Birkeland se ženi Idom Charlotte Hammer (slika 2.2.). Tijekom braka nisu imali djece te su se rastali 1911. godine. Kao glavni razlog rastave je bilo neulaganje u brak s Birkelandove strane, odnosno pozornost i vrijeme je davao svojim istraživanjima i radovima, no svome braku i supruzi. [3]



Slika 2.2. *Birkeland i njegova žena Ida Charlotte Hammer.* [5]

Birkeland je patio od nesanice te je koristio lijek zvan Veronal. Lijek Veronal mu je pomagao, ali ga je ujedno i činio paranoičnim. Godine 1917. odlazi u posjet kolegama na Sveučilištu u Tokiju. Dana 15. lipnja 1917. pronađen je mrtav u hotelskoj sobi. Otkriveno je da umro od predoziranja Veronalom, umjesto preporučenih 0.5 grama doza Veronala uzeo je 10 grama. [6] Norveška banka je 1994. godine uvela novu novčanicu od 200 norveških kruna sa likom Kristiana Birkelanda (Slika 2.3.). [7]



Slika 2.3. *Norveška kruna sa likom Kristiana Birkelanda.* [8]

2.2. Diplomatska istraživanja, izumi i nagrade

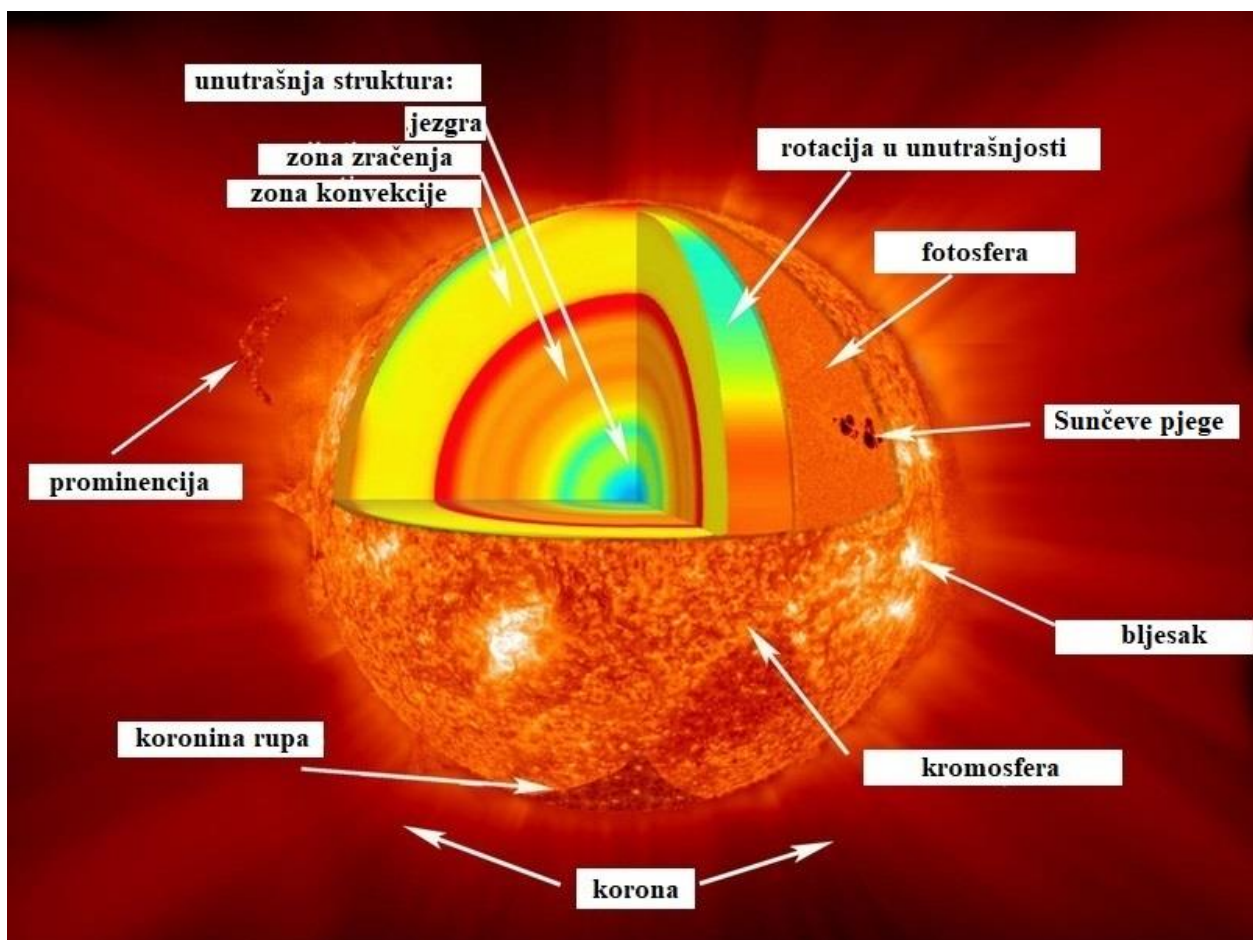
Između ljeta 1890. i kraja 1892. godine Birkeland je predavao na Aars og Voss, no nastavio je raditi honorarno kod profesora Holsta i Schiotza, izvodeći eksperimente u laboratoriju. U siječnju 1893. godine zapošljava se kao sveučilišni znanstveni novak (norv. Universitetsstipendiat) što je ekvivalentno znanstvenom asistentu. Ubrzo mu je i ponuđena stipendija za studiranje u inozemstvu, gdje je planirao provesti dvije i pol godine, na prestižnim europskim sveučilištima s namjerom da se usmjeri na implikacije Maxwellovih jednadžbi. U Parizu je istraživao pod vodstvom Henrija Poincaréa (1854. - 1913.) koji je bio međunarodno poznat po doprinosima astronomiji, teorijskoj fizici i matematici. Uz Poincaréa, Birkeland je surađivao i s Paul-Emileom Appellom (1855. - 1930.) i Emileom Picardom (1856. - 1941.). Birkeland je u Parizu započeo vlastita teorijska istraživanja vezana uz Maxwellove jednadžbe. 1895. Birkeland objavljuje svoj najvažniji teorijski rad, u kojem je pronašao opće rješenje Maxwellovih jednadžbi za izotropan medij. Nakon Pariza, Birkeland je otputovao u Ženevu gdje je radio sedam mjeseci s Edouardom Sarasinom (1843. - 1917.) i Lucienom de la Riveom (1834. - 1924.) na problemima vezanim za geofiziku. U njihovom laboratoriju je Birkeland izveo svoj prvi značajni eksperiment vezan uz električno pražnjenje. Birkeland se potom preselio u Bonn kako bi surađivao s Heinrichom Hertzom, no s njim je bilo teško uspostaviti kontakt s njim zbog teške bolesti od koje je Hertz ubrzo i preminuo. No sreća u nesreći je bila to što je u Bonnu upoznao Philippea E. Lenarda (1862. – 1947.), u suradnji s kojim je proizveo tzv. ferrum reductum. Ferrum reductum se sastoji od malih dijelova željeza koji su u tekućem parafinu. Godine 1894. Birkeland je otkrio da mali željezni dijelovi osciliraju u fazi sa ulaznim radio valovima i potpuno apsorbiraju njihovu elektromagnetsku energiju. Birkeland je surađivao sa norveškim inženjerom Samuelom Eydeom i tako formirao postupak oksidacije iz dušika pomoću električnog luka. Birkeland se zanimao za polarnu svjetlost i njezini nastanak. Svojim sustavnim istraživanjima je došao do zaključka da je Zemlja bombardirana nabijenim česticama koje dolaze sa Sunca. Također je smatrao da sa Sunca pristižu zajedno pozitivne i negativne nabijene čestice. Kako je Birkeland bio veliki domoljub pokušao je napraviti elektromagnetski top za vojsku u razdoblju do 1901. do 1903. godine. U jednom pokusu 1903. godine top je zakazao, dogodio se kratki spoj bio praćen vatrom, dimom i bukom, ipak je pogodio metu. Birkeland je početkom godine 1898. organizirao ekspedicije u svrhu geomagnetskih opažanja na udaljenijim mjestima na Islandu i sjeveru Norveške. Svojim ekspedicijama je htio zapravo pokazati i objasniti proces stvaranja polarne svjetlosti. Bio je četiri puta nominiran za Nobelovu nagradu u području fizike i kemije. Napisao je tri knjige: *Are the Solar Corpuscle Rays that Penetrate Into the Earth's*

Atmosphere Negative Or Positive Rays?, The Norwegian Aurora Polaris Expedition 1902. - 1903., On the Cause of Magnetic Storms and the Origin of Terrestrial Magnetism. [3]

3. SUNČEV VJETAR

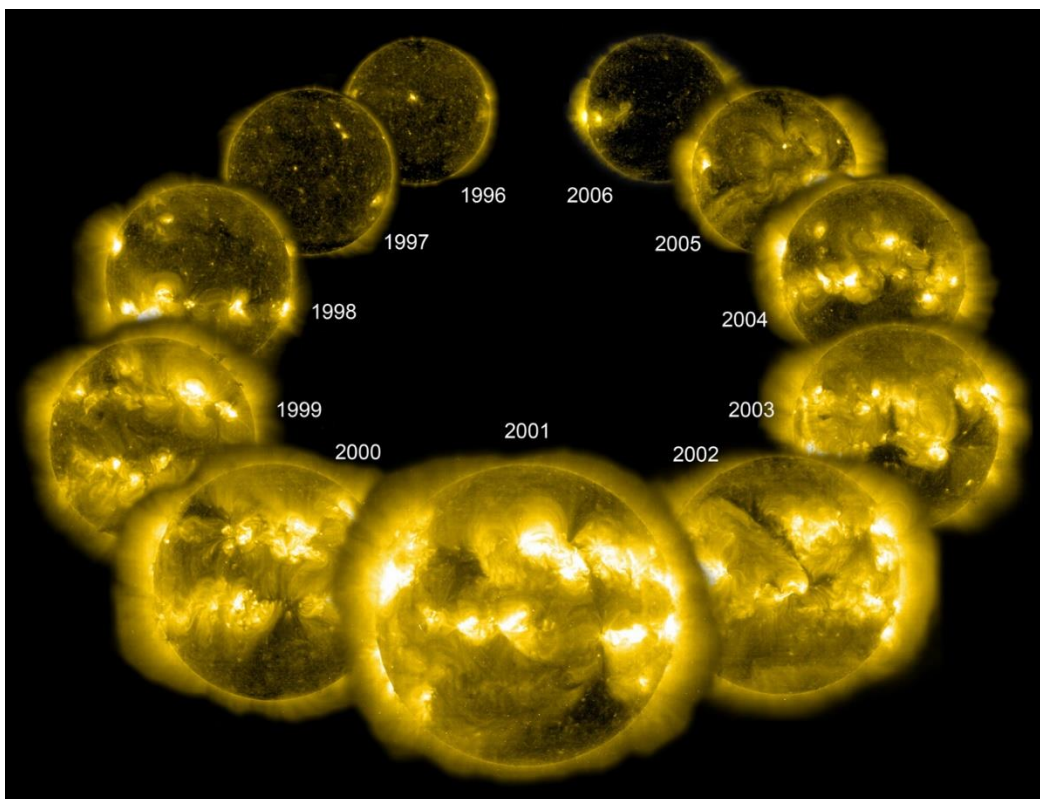
3.1. Struktura Sunca i neke pojave vezane uz vanjske slojeve Sunca

Sunce je nama najbliža zvijezda te ujedno izvor najvećeg dijela svjetlosti i energije na Zemlji. Sunce se nalazi u središtu Sunčevog sustava, a građeno je od stanja materije koje nazivamo plazma. Najveći je objekt u Sunčevu sustavu, sadržeći ~99.8% mase cijelog sustava. Maseni udio vodika na Suncu jest 73.46%, a helija 24.85%. Sunce se sastoji od više slojeva, od kojih su osnovni: jezgra, zona zračenja, zona konvekcije, fotosfera, kromosfera i korona. Građa Sunca ilustrirana je na slici 3.1., na kojoj možemo uočiti i pojave poput Sunčevih pjega, prominencija i bljeskova. Fotosfera, odnosno onaj dio koji je nama vidljiv, ima temperaturu približno 5777K. [9]



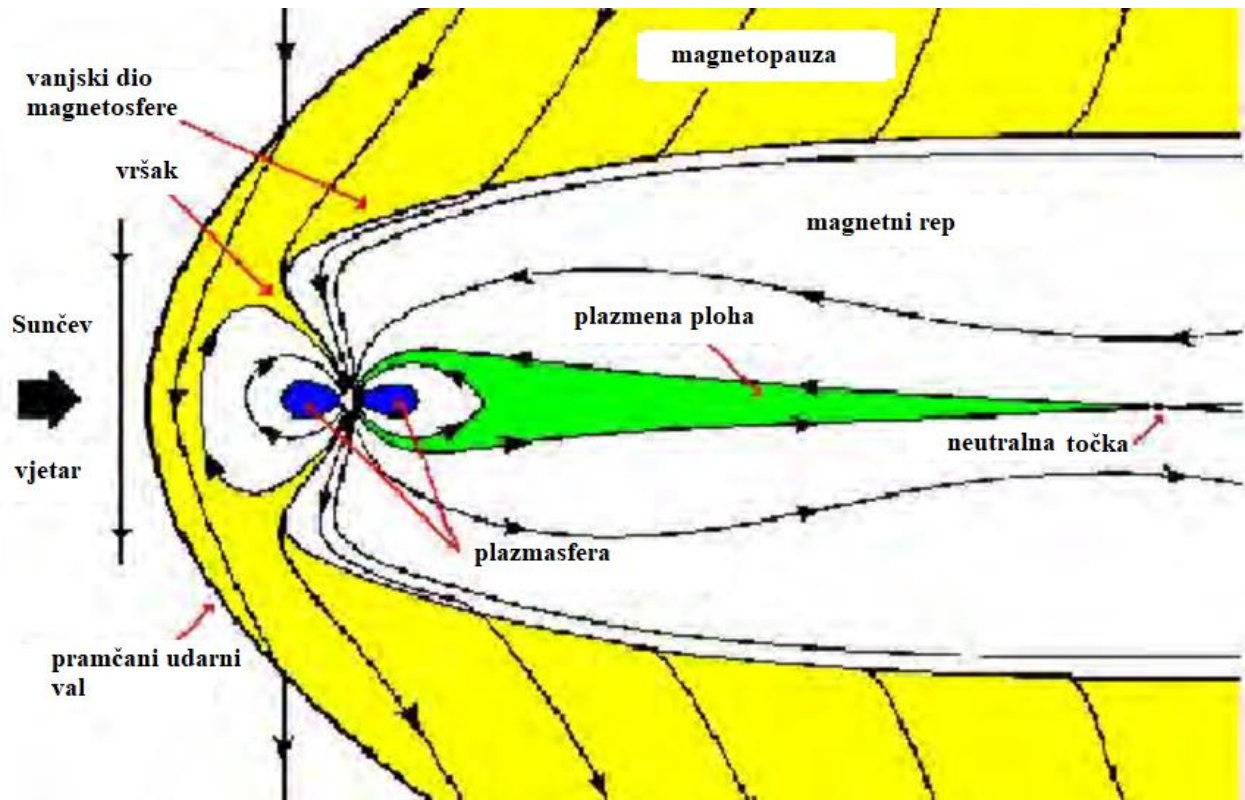
Slika 3.1. Struktura Sunca [10]

Sunčeve pjege nastaju probijanjem magnetskog polja kroz fotosferu i ta područja su tamnija i hladnija područja od okolne fotosfere. Broj Sunčevih pjega raste i opada u 11-godišnjem ciklusu. [9]



Slika 3.2. 11-godišnji ciklus Sunčeve aktivnosti u UV svjetlosti, SOHO EIT 284 Å. [11]

Sunčeva korona čini vanjski sloj Sunčeve atmosfere, a doseže temperaturu i od dva milijuna K. Korona ekspandira u međuplanetarni prostor, a tok nabijenih čestica plazme nosi sa sobom Sunčevo magnetsko polje. Ovaj tok nabijenih čestica naziva se Sunčev vjetar, a na udaljenosti od nekoliko Sunčevih radijusa postaje supersoničan. Prostor u kojem dominira Sunčev vjetar naziva se heliosfera. Sunčev vjetar pojavljuje se u dvije osnovne vrste: brzi i spori. Spori Sunčev vjetar u blizini Zemlje doseže brzinu od 300-500 km/s, temperaturu od ~100 MK, a sastavom je sličan koroni. Brzi Sunčev vjetar u blizini Zemlje ima brzinu od ~750 km/s, temperaturu od 800 MK, a sastavom je sličan fotosferi. Spori Sunčev vjetar je otprilike dvostruko gušći od brzog, te znatno promjenjiviji. Interakcija Sunčevog vjetra sa Zemljinim magnetskim poljem je kompleksna, a u najosnovnijim elementima skicirana je na slici 3.3. Na površini Zemlje smo velikim dijelom zaštićeni od Sunčevog vjetra Zemljinim magnetskim poljem. U blizini Zemljinih magnetskih polova Sunčeve magnetske silnice ulaze u Zemlju, a po njima dolaze i nabijene čestice sa Sunca, koje udaraju u molekule zraka, uzrokujući tako emisiju svjetlosti poznatu kao polarna svjetlost. [9] [12]



Slika 3.3. Prikaz Sunčevog vjetra i magnetosfere [13]

3.2. Birkelandovo otkriće Sunčevog vjetra

Određene eksperimentalne simulacije Birkeland je izvodio pomoću terrelle¹, kako bi razumio uzrok opažanih auroralnih i geomagnetskih aktivnosti. 1895. započeo je pionirsko proučavanje katodnih zraka, toka elektrona u vakuumskoj boci koji je pojavljuje zbog visokog napona između negativnih i pozitivnih nabijenih elektrona. Birkeland je zaključio da se katodne zrake sastoje od električnih nabijenih čestica i da ih se može kontrolirati magnetskim poljem. Upravo ovo ga je dovelo do njegovog glavnog znanstvenog otkrića kojim je povezao polarnu svjetlost sa Suncem. [14][15]

Već 1896. Birkeland je postavio važnu pretpostavku da Sunce kontinuirano emitira katodne zrake, tj. nabijene čestice, zajedno sa fotonima. Ovu hipotezu je temeljio na učestalom pojavljivanju polarnog svjetla u Arktičkom krugu. Prethodno Richard C. Carrington 1859. godine sugerirao da su tijekom Sunčevog bljeska čestice tekle iz Sunca prema Zemlji. 1910. je Arthur Eddington sugerirao postojanje Sunčevog vjetra, ne nazivajući ga tako. Birkeland je bio prvi koji je predložio da se sa Sunca izbačeni materijal sastoji i od iona i od elektrona. Procjenio je da bi se u međuplanetarnom prostoru trebao nalaziti oko 8 čestica u kubičnom centimetru, što je izuzetno blizu prosječnoj gustoći Sunčevog vjetra mjenjenog danas. [14][15]

Birkeland je načinio niz raznih eksperimenata u vakuumskim posudama. Prve su bile u cijevima za izbijanje. 1896. načinio je prvu umjetnu auroru unutar "auroralne staklenke". Koristeći elektromagnet mogao je stvoriti magnetsko polje oko terelle, koje je nalikovalo Zemljinoj magnetosferi. Atmosfera je bila sloj fluorescentne boje koja bi zasvijetlila kada bi u nju udarila nabijena čestica. [14][15]

Birkeland je također zaključio da iste čestice koje uzrokuju polarno svjetlo stvaraju i sustav električnih struja u Zemljinoj atmosferi. Takvi tokovi mogu objasniti magnetske poremećaje uočene tijekom jakih aurora. [14][15]

Birkeland je hio odrediti na kojoj je nadmorskoj visini se nalazi aurora te je 1899. izgradio dva mala opservatorija na planinama Haldde i Talvikstoppen. Učestalo nevrijeme, dim te velika lavina 1900. su gotovo zaustavili aktivnosti na opservatorijima. Stoga mjerenje na kojoj se visini

¹ Terrella, od latinskog "mala Zemlja", je mali magnetizirani kuglasti model planeta Zemlje, korišten za eksperimentalno simuliranje Zemljine magnetosfere.

nalazi aurora nije bilo uspješno. 1912. godine, nakon ekspedicije u Egipat, Birkeland je uspio pronaći sredstva za građenje većeg, stalnog opservatorija. Nakon toga je pored opservatorija Haldde počelo živjeti nekoliko obitelji tijekom cijele godine. Birkeland je osnovao i mrežu geomagnetskih opservatorija. [14][15]

1908. Birkeland započinje niz terrella eksperimenata povezanih sa Suncem i njegovim magnetskim poljem. Smatrao je da su Sunčeve pjege otisci električnih izbijanja. Također je snimio detaljnu sliku Sunčeve korone tijekom totalne pomrčine Sunca, što mu je poslužilo za argument da zračenje sa terelle nalikuje Sunčevoj koroni. Kada je dodao jako magnetsko polje u terellu "Sunčeve pjege" na terelli pomicale su se bliže ekvatoru. [14][15]

Kako je Birkeland bio uvjeren da skoro istodobne aktivnosti na Suncu i na Zemlji nisu slučajne, bila su potrebna dva koraka da bi shvatio i dokučio što uzrokuje polarnu svjetlost. Prvi korak je bio da se prikupi što više fizikalnih podataka o polarnoj svjetlosti i geomagnetskim pojavama i smetnjama. U drugom koraku je morao uočiti fizikalne procese koji su materiji i energiji omogućili putovanje kroz 149600 000 km. [14]

Birkeland je imao sljedeće pretpostavke o Sunčevom vjetru:

- Prva pretpostavka je bila da sa Sunca dolaze pozitivne i negativne nabijene čestice koje struje prema Zemlji. To je bila ujedno prva znanstvena predikcija Sunčevog vjetra.
- Shvatio je da će i pozitivne i negativne čestice biti privučene u Zemljino magnetsko polje te da će utjecati na gornju atmosferu, odnosno poticati će stvaranje polarne svjetlosti.
- Smatrao je kako su tamna područja, koja su se pojavljivala na terelli, analogna Sunčevim pjegama. Danas je poznato da Sunčeve pjege nastaju drugačije, iz unutarnjih dijelova Sunca.
- Električne struje koje povezuju ionizirani plin sa Sunca sa Zemljinom polarnom atmosferom bile su pojačane u periodima u kojima su bile opažene geomagnetske oluje. Te struje dijelom teku duž magnetskih silnica kroz gornju atmosferu u putanjama koje se otkrivaju preko smjerova i jakosti magnetskih perturbacija mjerenih sa tla. [15]

Organizirao je dvije ekspedicije na Sjevernom polu te koristio opažanja sa četiri stanice. Iz prve ekspedicije je zaključio da auroralna svjetla dolaze s visina daleko iznad planina i izradio je prvu globalnu kartu sustava polarne struje koju je karakterizirao dvočelijski uzorak. [14][15]

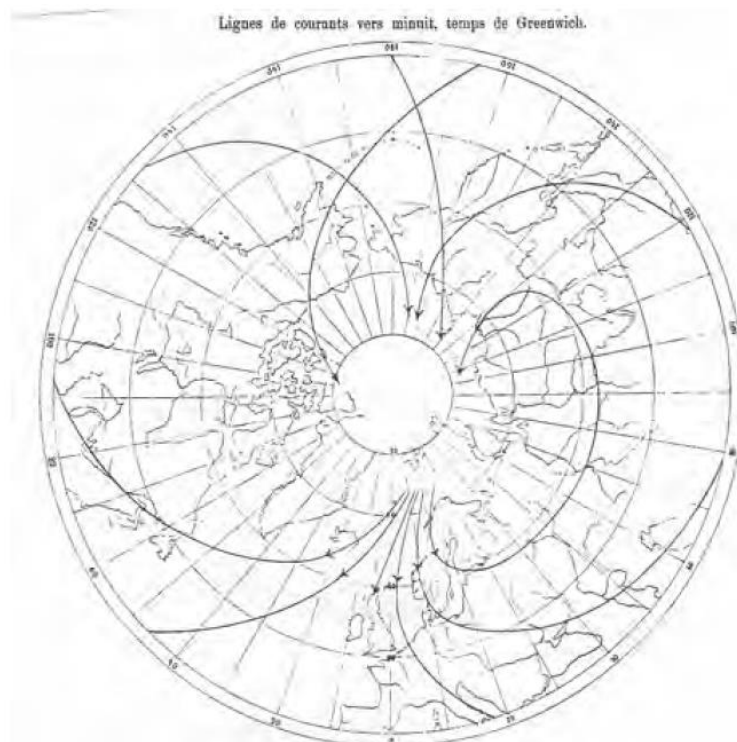
U drugoj ekspediciji su se provodila mjerenja auroralnih emisija i magnetskih poremećaja i to na 4 različite lokacije. Postaje su bile na:

- Kåfjord, u Finnmarku, u blizini opservatorija Haldde,
- Dyrafjord, Island,
- Axeløen u arhipelagu Svalbard,
- Matotchkin Schar na Novaya Zemlya, Rusija.

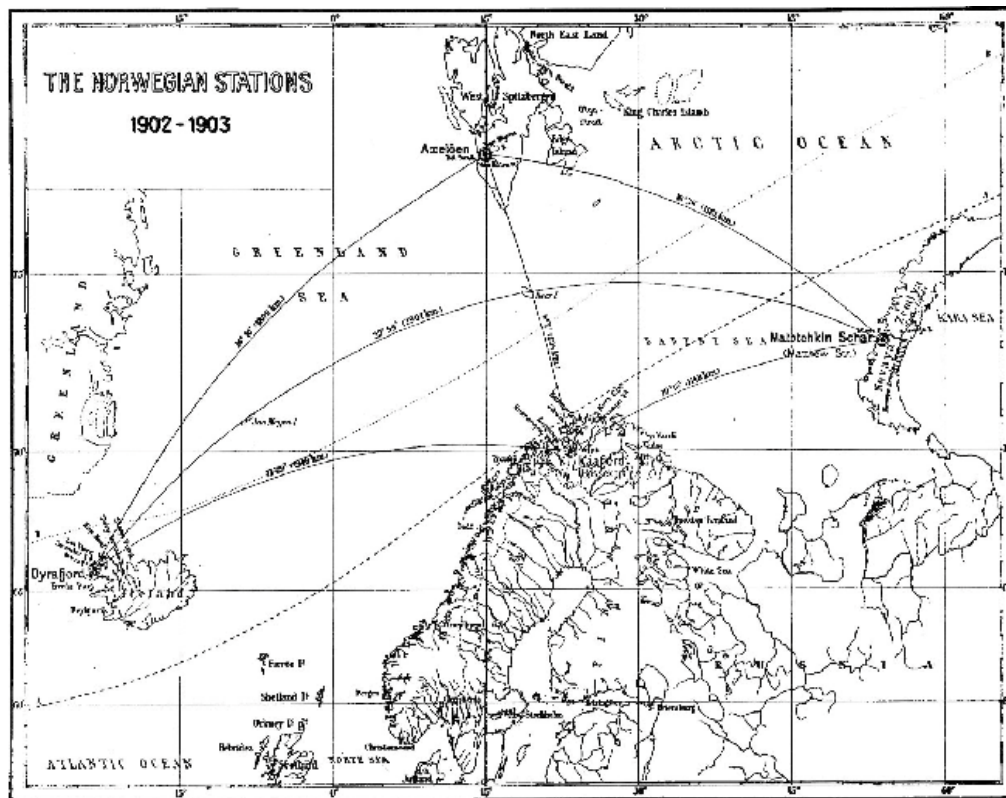
Te stanice su mu omogućile da otkrije način odvijanja magnetskih poremećaja. [14]

Opisao je tri tipologije pronađene na:

1. auroralnim geografskim širinama blizu lokalne ponoći
2. svim geografskim širinama i lokalnom vremenu
3. ekvatorijalnim geografskim širinama blizu lokalnog podneva. [14]



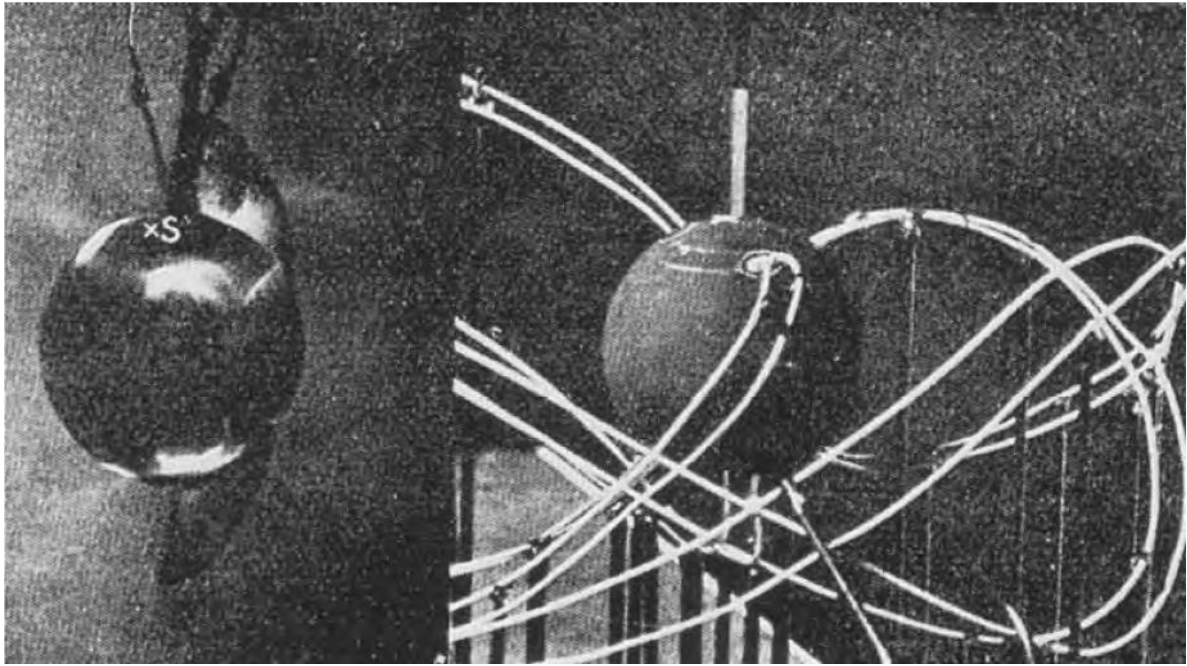
Slika 3.4. Krivulje koje se nalaze na ovoj karti Birkeland ih nazvao „Linije struja u ponoć, po Greenwichkom vremenu“. Globalne ionosferske struje prikazane su u koordinatnom sustavu u čijem središtu se nalazi Sjeverni pol. [16]



Slika 3.5. Karta na kojoj su označene četiri lokacije stanica. [17]

Laboratorijske eksperimente, koje je provodio, je podijelio u dva osnovna oblika – u prvom obliku je snop elektrona usmjeravao prema terrelli dok je u drugom obliku sama terrella bila izvor katodnih zraka. Magnetizirane terelle je koristio kao anode, koje su imale pozitivan potencijal, ili kao katode, koje su imale negativan potencijal, za simulaciju različitih položaja planeta odnosno tijela u Sunčevom sustavu, što se u ovom slučaju odnosi na Zemlju i Sunce. Katodne zrake je ispaljivao na terellu iz daljine i potom je fotografirao raspodjelu vidljive svjetlosti koja je nastala oko magnetskih polova. [14]

U suradnji s Carlom Størmerom, Birkeland je izračunom i eksperimentom provjeravao putanje katodnih zraka u magnetskom polju terelle. Na slici 3.6. se može vidjeti simulirana polarna svjetlost koja je proizvedena u blizini Birkelandove magnetizirane terelle koju bombardiraju katodne zrake, isto tako i bombardiraju Størmerove putanje čestica koje se približavaju terelli. U eksperimentu kojeg su provodili nisu mogli utvrditi jesu li energije od simuliranih polarnih čestica jednake onima koje se nalaze u prirodi. Kako nisu mogli potvrditi svoje hipoteze, nisu isključili objašnjenje da je Sunce krajnji uzrok polarne svjetlosti. [15]



Slika 3.6. Slika lijevo prikazuje Birkelandovu terellu dok je desna slika prikaz izračunatih Størmerovih putanja. [18]

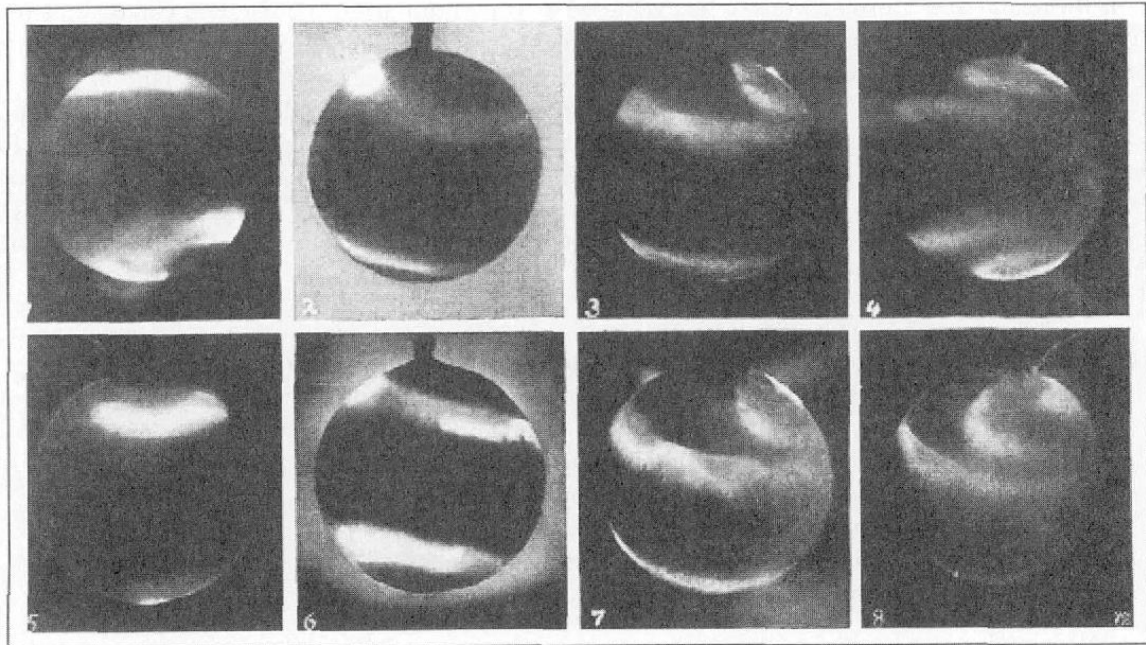
Kada bi u terelli promijenio električni polaritet, tada ona više nije meta nego postaje izvor snopa elektrona. Odašiljani elektroni su više odlazili iz magnetsko-polarnih područja, a tek onda bi se uvijali prema ekvatoru širenjem od simuliranog Sunca. Tijekom eksperimenta uočio je kako je to širenje odašilanih elektrona proizvelo na terelli nešto slično Sunčevim pjegama, za koje je smatrao da su izvor odašiljanja elektrona. [14][15]

Na kraju tih pokusa je objasnio da katodne zrake, negativni ioni, koje izlaze iz Sunca sa sobom povuku i pozitivne ione, što znači da prostor između Zemlje i Sunca mora biti neutralan ionizirani plin tj. da mora imati približno isti broj pozitivnih i negativnih nabijenih čestica. [15]

Birkeland je sugerirao da je opažani 11-godišnji ciklus Sunčevih pjega povezan sa Sunčevim magnetskim poljem, nastalim od unutarnjih električnih struja. Shvatio je da bi dipolno magnetsko polje Sunca inhibiralo emisiju nabijenih čestica na ekvatorijalnim širinama. Nabijene čestice koje izlaze iz polarnih širina zavijale bi svoju putanju prema ekvatorijalnoj ravnini. [15]

4. TERRELLA

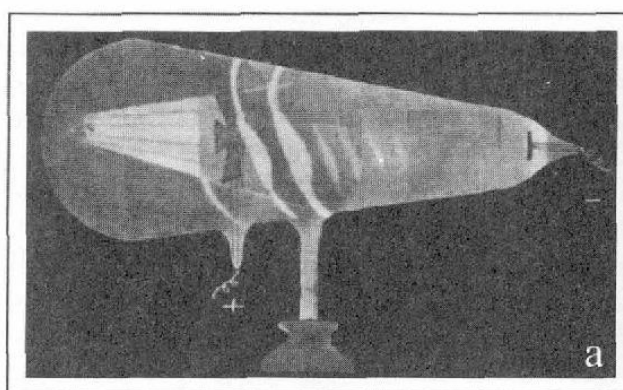
Terrella dolazi iz latinskog jezika što znači mala zemlja. Terrella je bila magnetizirana kugla koja je u eksperimentima predstavljala Zemlju i njezina magnetska svojstva. Koristila se u znanstvenim eksperimentima od 16. stoljeća za potrebe istraživanja i prikazivanja magnetskih, elektrostatičkih i elektromagnetskih pojava. Birkeland je koristio elektromagnetsku terellu i pomoću nje je stvorio umjetnu polarnu svjetlost i Sunčeve pjege. Kroz svoja istraživanja je upotrebljavao različite veličine terelle, promjera od 2.5 centimetara do 36 centimetara. U Birkeladovim terellama su se nalazile elektromagnetske zavojnice koje su unutar sfere bile od aluminijske ili mesingne. Brojni znanstvenici su je koristili i unaprjeđivali, no danas su je zamijenile računalne simulacije. [19]



Slika 4.1. Prikaz fotografija terelle snimljene iz različitih smjerova s cijevi u položaju koji odgovara zimskom solsticiju i magnetskom južnom polu u položaju 6 ujutro. [20]

4.1. Birkelandova terrella

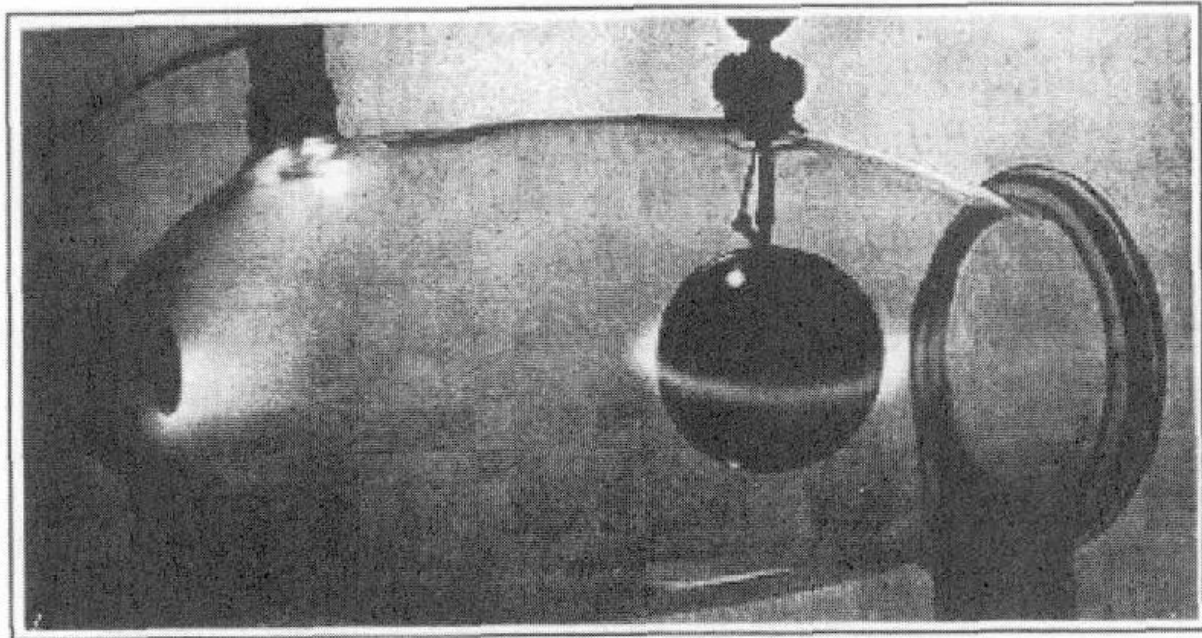
Zanimajući se za eksperimente sa sfernim elektromagnetom, Birkeland je htio dokazati svoje hipoteze vezano uz Sunce i polarnu svjetlost koje je djelomično podupro tijekom ekspedicija na Arktiku. U dvije posude za plinska izbijanja dobio je rezultate koje je protumačio kao strujanje vrtloga oko metalne kugle obojane fosforescentnim materijalom, koja sadrži unutra elektromagnet. U eksperimentu je kugla predstavljala Zemlju i oponašala njezino magnetsko polje. Oko polova kugle se moglo vidjeti dva uska svjetlosna prstena koja su predstavljala umjetnu polarnu svjetlost. Nakon brojnih pokusa sferni elektromagnet je prozvaio malom zemljom tj. terrellom. [21] [22]



Slika 4.2. Prikaz Birkelandove prve umjetne aurore, ožujak 1896. Na slici se može vidjeti katodna cijev. [23]

U razdoblju od 1900. do 1913. godine je koristio razne vrste terrella koje su se razlikovale po veličini. U zapisima eksperimenata koristio je terelle s promjerom od 2.5 centimetara do 36 centimetara. Kako je terellu koristio za istraživanje polarne svjetlosti, služio se njome i pri istraživanju Sunčevih pjega, geomagnetskih oluja, Saturnovih prstenova i kometa. U početku je koristio samo dvije terelle promjera 5 i 7.5 centimetara, te je tada terrella bila zapravo elektromagnet s jezgrom i namotajima koji su činili oblik kugle. Površinski sloj terelle je bio tanki sloj mesinga, ali je on još dodatno bio prekriven slojem od barijevog platinocijanida. Pri izvođenju eksperimenata bio je svjestan da ne može dostići tu kvantitativnu sličnost s prirodnim magnetskim uvjetima. Kada bi koristio terellu promjera 7.5 centimetara, tada je ona $1.7 \cdot 10^8$ manja od promjera Zemlje, što znači da bi bilo potrebno analogno magnetsko polje koje će okružiti terellu i biti $1.7 \cdot 10^8$ puta jačeg intenziteta od intenziteta geomagnetskog polja. Naravno to nije bilo moguće izvesti u praksi. Eksperimente koje je izvodio s terrellom, u kojem su zavojnica i magnetska os bili nagnuti u odnosu na vertikalnu os. Uspio je da se terrella rotira oko vertikalne osi, pa je proučavao učinak ekscentričnosti Zemljinih magnetskih polova na

polarnu svjetlost odnosno udaljavanje polarne svjetlosti od magnetskih polova. Što znači da se polarna svjetlost stvara oko Zemljinog magnetskog pola, poput "vijenca" čije je središte na magnetskom polu. Kada je započinjao sa sustavnim pokusima s terrellom koristio je cilindrične cijevi i to zapremnine približno od 12 litara (slika 4.3.). [21]

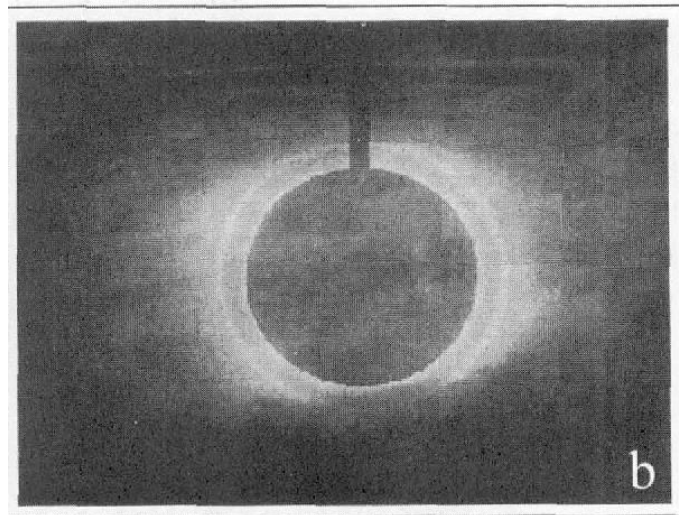


Slika 4.3. Prikaz eksperimentalne simulacije "Ekvatorijalni prstenovi svjetlosti" koja je izvedena u prvoj staklenoj cijevi od 12 litara s terrellom od 10 cm. Ovo je eksperimentalni uređaj sa početka Birkelandovog niza sustavnog korištenja eksperimentalne terelle. Ovaj eksperiment je bio iskorišten za usporedbu sa proračunatim orbitama Carla Størmera. [24]

Prilikom simulacija polarne svjetlosti terrellom, trebalo je stvoriti određene eksperimentalne uvjete. Prva metoda je bila da u slabim pražnjenjima površina terelle bude prekrivena fosforescentnom bojom i da stvara vidljivu svjetlost kada su u nju udarale zrake. Druga metoda se odvijala tako da je kroz magnetsku zavojnicu prolazila velika struja, dok se površina terelle zagrijavala i stvarao se plin. Potom se moralo smanjiti magnetsko polje na određenu vrijednost, započeti pražnjenje i tada bi se počela oslikavati "polarna svjetlost". Treća metoda je bila da se terellina površina prekrije tankim slojem ulja koje se koristilo za pumpe, dok je to ulje isparavalo tijekom ispuštanja plina. Kroz sve njegove laboratorijske eksperimente je koristio krhke staklene cijevi. U tim cijevima je dolazilo do loma svjetlosti i kroz zakrivljene staklene stijenke je lom svjetlosti davao iskrivljenje prostorne informacije na fotografijama koje je izrađivao. Kako je znao da ne dobiva prave sliku koje se događaju odlučio je stvoriti komoru za terellu. Komora je bila napravljena od dvije metalne ploče koje su se nalazile na dnu i na vrhu komore i sa četiri stakla na četiri strane komore. Volumen komore je bio 22 litre, a staklo je bilo

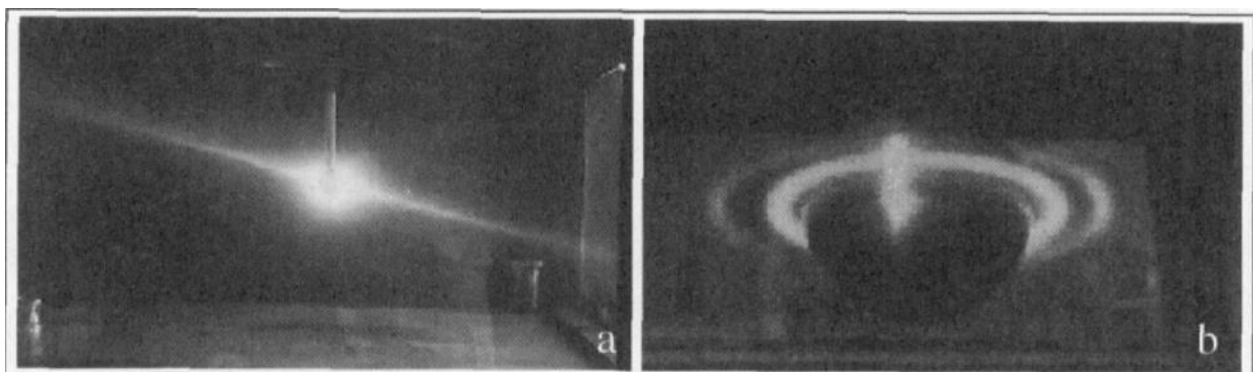
debljine 2 centimetra. Pomoću nove komore je mogao puno bolje proučavati električno pražnjenje. S tom komorom je započeo i eksperiment za simulaciju Sunca, repova kometa i prstenova Saturna. [21][22]

Za simuliranje Sunca bila je potrebna terrella koja je bila bez fosforescentne prevlake, kako bi bila negativna i ujedno poslužila kao katoda (slika 4.4.). [21]



Slika 4.4. Simulacija Sunčeve korone izvedena s terrellom od 24 cm i s vrlo niskim magnetskim poljem. [25]

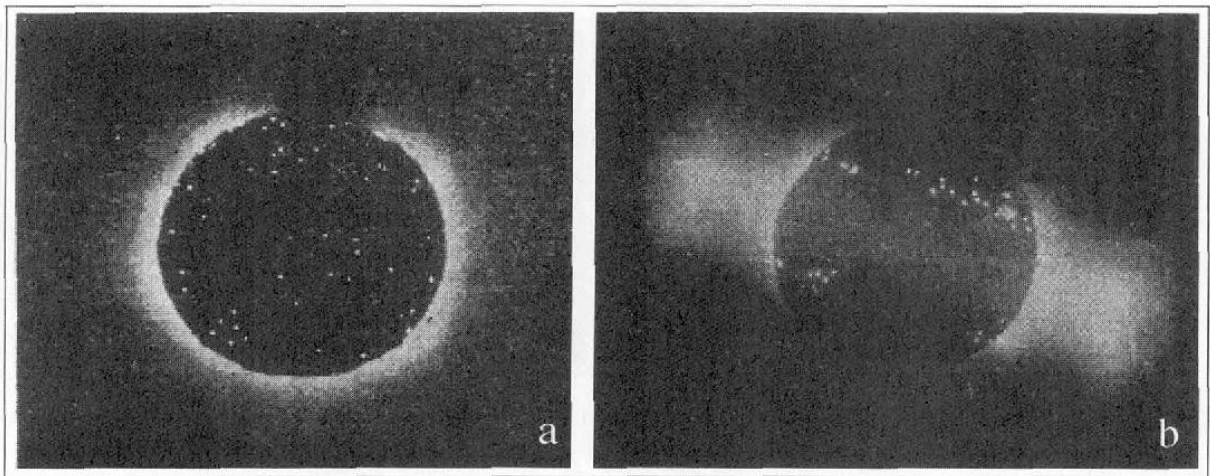
Birkeland je, pogrešno, vjerovao da iz Sunčevih pjega izlaze najintenzivniji snopovi elektrona, koji su zapravo uzrok polarnog svjetla. Shvatio je tijekom eksperimenata kako ometajuća pražnjenja mogu zračiti iz točke na površini katodne terrelle. Mogao je razviti luk od točaka na površini samo ako bi uz nizak tlak plina imao jaku struju pražnjenja i bez magnetskog polja terrelle. [21][22]



Slika 4.5. Lijevo: Zodijsko svjetlo. U središtu se nalazi najmanja terrella promjerom 2.5 cm koja predstavlja Sunce. Terrella je prekrivena sjajem, Sunčevom koronom, a zodijsko svjetlo vidimo sa strane kao tanak disk svjetlosti u ekvatorijalnoj ravnini terrelle. **Desno:** Saturnovi

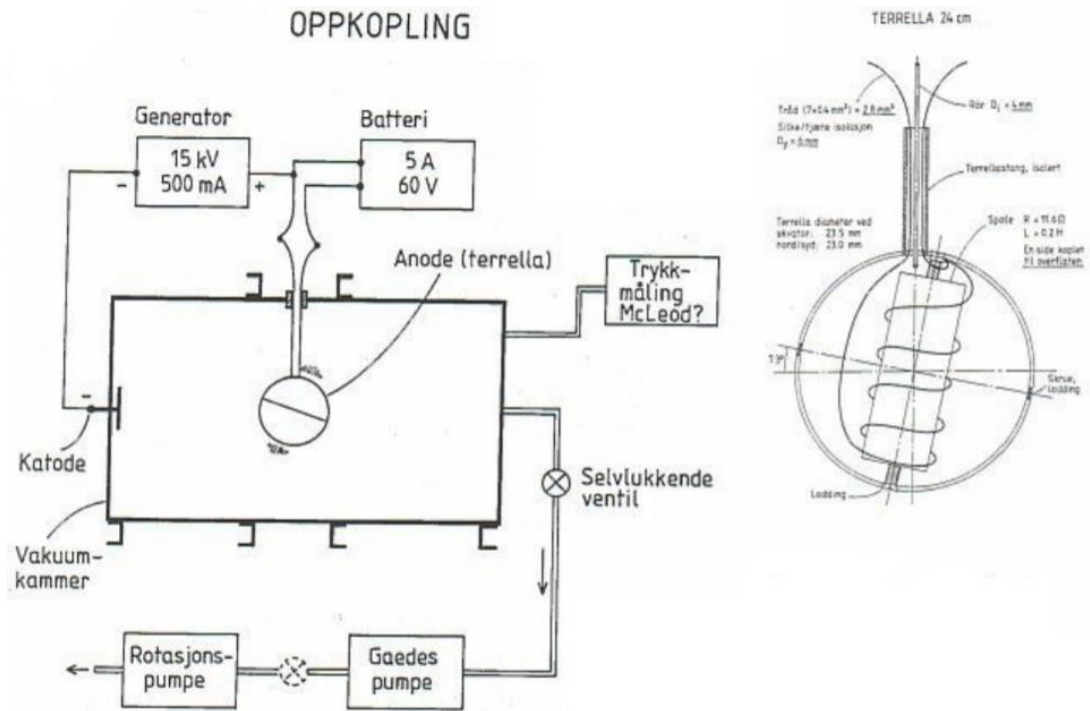
prstenovi. Ovaj eksperiment proveden je u trećoj komori volumena 320 litara sa terrellom promjera 24 cm. Ova terrella bila je katoda koja je bila jako magnetizirana. [26]

Uočio je da je Sunčeve pjegice lako razviti ako je površina terrelle gruba. Na terrelli se moglo vidjeti da su pjegice većinom grupirane u dvije zone: oko sjeverne i oko južne „heliografske“ širine. Ako bi povećao u eksperimentu magnetsko polje, pjegice bi na terrelli promijenile oblik u svjetlosne trake koje bi se spajale na ekvatoru. A ako bi povećao polja zona tj. područje oko Sjevernog pola u kojima se pojavljuju pjegice na terrelli, pjegice bi se samo približile ekvatoru terrelle (slika 4.6.). [21][22]

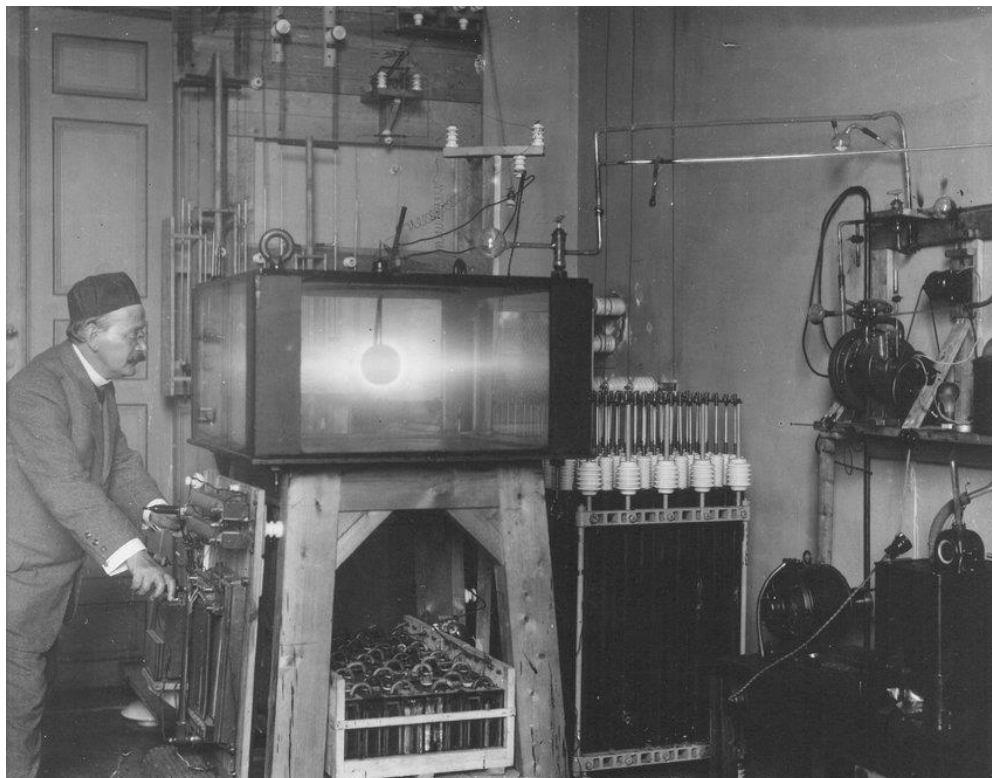


Slika 4.6. Prikaz “Sunčevih pjega” na jednoj od manjih terrella. Pjegice su vruće točke na gruboj katodnoj površini terrelle pri velikom izboju naboja. (a) Bez magnetskog polja pjegice su raširene po cijeloj terrelli. (b) Prikaz terrelle s magnetskim poljem u kojem su Sunčeve pjegice raspoređene u dva pojasa. [27]

Dok je izvodio razne eksperimente i koji su s vremenom postali precizniji, shvatio je da utjecaj na pokus imaju strop i pod komore iz razloga što su bili od magnetiziranih čeličnih ploča. Zato je napravio drugu komoru koja je bila kapaciteta od tisuću litara, dok je terrellama promjer bio 24 i 36 centimetara. Glavna konstrukcija je bila od četiri stupa koja su bila na uglovima. Komora je imala četiri strane od staklenih blokova koja su bila debljine 4.7 centimetara što je bilo dosta čvrsto, širine 100 centimetara i visine 70 centimetara. Pod i strop su bili od mjedene ploče. No na vrhu komora je bio otvor koji je bio postavljen zbog mogućih popravaka, preinaka i održavanja. Terrella je bila na sredini komore, obješena s gornje ploče. [21]



Slika 4.7. Shema komore s terrellom promjera 24 centimetara. [28]



Slika 4.8. Kristian Birkeland upravlja komorom volumena 1000 litara. [29]

5. BIRKELANDOVE STRUJE

Birkelandova struja je električna struja koja se nalazi u ionosferi², a koja većim dijelom prati smjer magnetskog polja.[30]

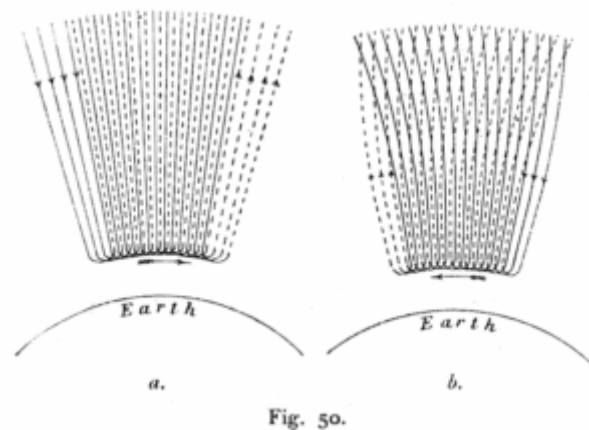


Slika 5.1. *Birkelandova struja na Jupiteru teče kroz prostor koji vidimo kao svjetlo plave “krivulje”. [31]*

U počecima se naziv Birkelandova struja odnosio samo na onu struju koja je doprinosila stvaranju polarne svjetlosti, dok se danas izraz Birkelandova struja koristi za svaku električnu struju koja je paralelna s magnetskim poljem u bilo kojoj svemirskoj plazmi. [30]

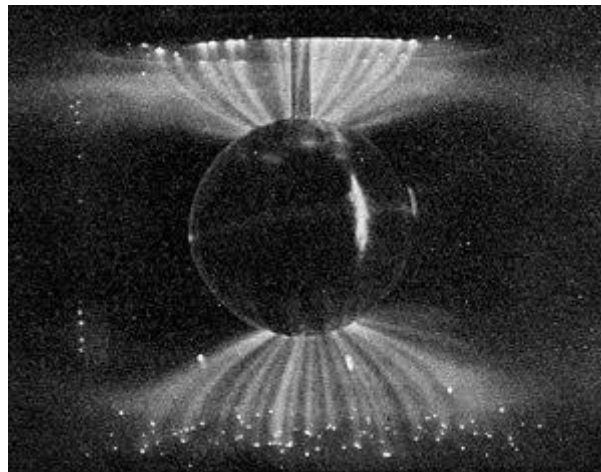
Birkelandova struja je uzrokovana međudjelovanjem plazme Sunčevog vjetra sa Zemljinom magnetosferom. Birkeland je crtežom prikazao ovu struju, slika 5.2. Njegovo razmišljanje je bilo da struja iz Svemira dođe do Zemlje na jedan kraj luka i vrati se u Svemir na drugom kraju.[30]

² Ionosfera je gornji sloj Zemljinog plinovitog omotača.



Slika 5.2. Strujni sustavi paralelni s magnetskim poljem kako ih je sugerirao Birkeland 1908. godine. [32]

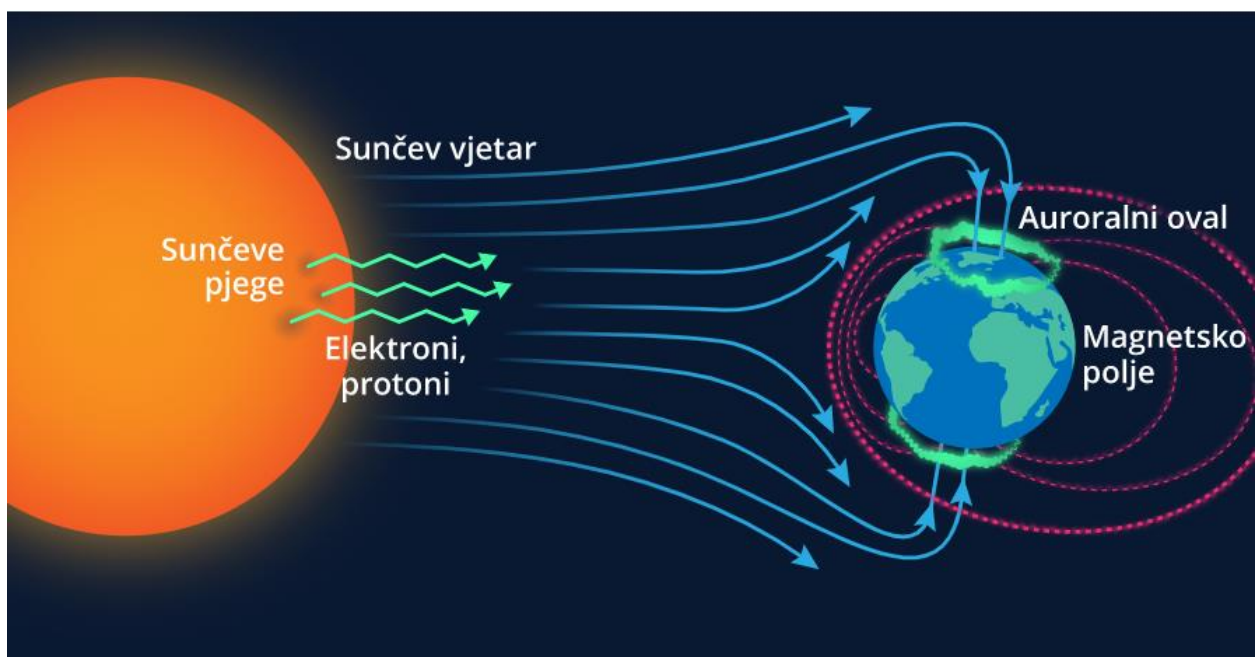
Za gornje slojeve atmosfere je smatrao kako moraju biti struje veličine do 1 milijun ampera i da takve velike struje može proizvesti i održavati samo Sunce. Gornju atmosferu ne samo da tolika velika struja zagrijava već i smanjuje gustoću elektrona i iona. Birkelandove struje se mogu stvoriti i pokazati preko eksperimenata i to impulsnim generatorima snage više terawatta. [30]



Slika 5.3. Birkelandova struja eksperimentalno simulirana pomoću terrelle. [33]

6. POLARNA SVJETLOST

Polarna svjetlost se pojavljuje na visini od 97 do 1000 kilometara iznad Zemlje. Ključnu ulogu pri stvaranju polarne svjetlosti ima Sunčev vjetar koji se sastoji od pozitivnih i negativnih iona. Na Suncu se nalaze Sunčeve pjege, koje su nastale probijanjem unutarnjeg magnetskog polja Sunca kroz fotosferu. Sunčev vjetar kontinuirano struji sa Sunca te prolazi kroz plazmu međuplanetarnog prostora. Imamo dvije vrste Sunčevog vjetra: brzi i spori Sunčev vjetar. Spori Sunčev vjetar se kreće brzinom oko 300-500 km/s, dok brzi Sunčev vjetar ima brzinu približno oko 750 km/s. Djelić Sunčevog vjetra dolazi do Zemlje i susreće se s magnetosferom. Magnetosfera je dio u Svemiru oko Zemlje gdje dominira Zemljino magnetsko polje. Čestice iz Sunčevog vjetra koje su ušle u Zemljinu magnetosferu sudaraju se sa česticama atmosferskih plinova pri čemu će se dogoditi da atom ili molekula, koja se sudari s elektronom, izbací elektron u pobuđeno stanje. Potom će elektron iz pobuđenog stanja se vratiti u osnovno stanje pri čemu će emitirati polarnu svjetlost. Ovo se događa u blizini polova, većim dijelom zbog toga što čestice koje se rekonektiraju na dnevnoj strani Zemlje odlaze u magnetorep te iz repa, s noćne strane, nakon novih kompleksnih plazminih procesa slijedeći magnetske silnice idu prema polovima. [34][35]



Slika 6.1. *Pojednostavljeni prikaz procesa stvaranja polarne svjetlosti.* [36]

Birkeland je svojim ekspedicijama i eksperimentima potvrdio svoju hipotezu da je polarna svjetlost uzrokovana sa Sunca dolazećim nabijenim česticama, što je u njegovo vrijeme bio zaključak koji je izazivao nevjericu u znanstvenoj zajednici.

Polarna svjetlost se otkriva promatraču u pojavnostima koje su nazvane zavjesa, pruge, luk i korona. Polarna svjetlost može privremeno mirovati, kretati i mijenjati oblik. Kada se kisikovi atomi u Zemljinoj atmosferi sudare s pristiglim elektronima svjetlost će biti zelena. Ako se pak dušikove molekule sudare s elektronima tada će polarna svjetlost biti ljubičasta. [34]



Slika 6.2. *Prikaz zelene polarne svjetlosti* [37]



Slika 6.3. *Prikaz ljubičaste i žutozelene polarne svjetlosti.* [38]

7. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu predstavljen je rad u svom vremenu neshvaćenog norveškog znanstvenika Kristiana Birkelanda vezan uz otkrivanje uzroka polarne svjetlosti.

Dan je kratki životopis Kristiana Birkelanda s naglaskom na njegovom obrazovanju i velikim znanstvenim imenima onoga doba s kojima je bio u kontaktu te su navedena i njegova najvažnija teorijska otkrića, izumi i nagrade.

Predstavljeno je, u onom vremenu teško prihvatljivo, shvaćanje Kristiana Birkelanda da su Sunčeve elektromagnetske oluje povezane s pojavom polarne svjetlosti na Zemlji. Opisane su dvije ekspedicije u polarne krajeve koje je vodio u svrhu prikupljanja podataka o polarnoj svjetlosti, gradnja magnetskog opservatorija na Haldeu za praćenje geomagnetskih uvjeta na tlu, uspostavljanje mreže geomagnetskih opservatorija kako bi se moglo sustavno pratiti geomagnetske uvjete, te niz eksperimentalnih simulacija magnetiziranom terrellom kojima je Birkeland potvrdio svoje teorijske slutnje.

Na temelju ovih istraživanja Birkeland je dao prvu znanstvenu predikciju o postojanju Sunčevog vjetra kao permanentnog toka negativnih i pozitivnih naboja sa Sunca. Shvatio je da negativni naboji stimuliraju emisiju polarne svjetlosti. Iako nije mogao u ono vrijeme dokraja ispravno zaključiti o ulozi Sunčevih pjega, razumijevao je da su Sunčeve pjege povezane s jakim magnetskim poljima.

Kristian Birkeland bio je genij neshvaćen u svom vremenu, a njegov rad dao je golem doprinos počecima današnje svemirske znanosti. Njemu u spomen danas nazivamo Birkelandovim strujama struje koje povezuju Zemljinu magnetosferu sa ionosferom visokih geografskih širina, a pogoni ih Sunčev vjetar, međuplanetarno magnetsko polje te pripadna konvekcija unutar magnetosfere.

LITERATURA

- [1] https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/aurora-image-gallery/index.html
- [2] <https://spaceplace.nasa.gov/aurora/en/>
- [3] Alv, Egeland; William J., Burke; Kristian Birkeland: The First Space Scientist, 2005.
- [4] Lijeva slika:
<http://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2017/ISWI%20Boston/ISWIBostonDay2/31.pdf>
- Desna slika: <https://www.lindahall.org/kristian-birkeland/>
- [5] <https://digitaltmuseum.no/011014281807/kristian-birkeland-og-hans-kone-ida-hjemme-i-inkognitogaten/media?slide=0>
- [6] <https://www.famousscintists.org/kristian-birkeland/> - posjetila 27.2.2021.
- [7] <https://www.norges-bank.no/en/topics/notes-and-coins/withdrawn-notes-coins/banknote-series-VII/200-krone-note/description-200/> - posjetila 10.3.2021.
- [8] <https://www.lindahall.org/kristian-birkeland/>
- [9] <https://www.space.com/22215-solar-wind.html> - posjetila 14.4.2021.
- [10] <https://svemir.blog/2013/06/26/velika-koronarna-rupa-na-suncu/>
- [11] https://soho.nascom.nasa.gov/hotshots/2007_12_02/284cycle_dates.jpg
- [12] <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/solar-wind> - posjetila 25.4.2021.
- [13] https://www.researchgate.net/figure/Interactions-between-Earth-magnetosphere-and-the-solar-wind-2_fig2_221915859
- [14]
https://www.researchgate.net/publication/234482941_Kristian_Birkeland's_pioneering_investigations_of_geomagnetic_disturbances - posjetila 10.7.2021.
- [15] 2005: Wiliam J. Burke, Air Force Geophysics Laboratory, USA: “Kristian Birkelands Message from the Sun – Its meaning then and now” (University of Oslo, 22. September 2004)
- [16] Alv, Egeland; William J., Burke; Kristian Birkeland: The First Space Scientist, 2005.
- [17] Alv, Egeland; William J., Burke; Kristian Birkeland: The First Space Scientist, 2005.
- [18] Wiliam J. Burke, Air Force Geophysics Laboratory, USA: “Kristian Birkelands Message from the Sun – Its meaning then and now” (University of Oslo, 22. September 2004), 2005
- [19] <http://www.mhs.ox.ac.uk/about/sphaera/sphaera-issue-no-7/the-birkeland-terrella/> - posjetila 9.7.2021.

- [20] <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Birkeland-Terrella-Experiments-and-their-for-of-Rypdal-Brundtland/275dfe6a9a3fba709a5eccfab50ed5c8dc99dc8d>
- [21] <http://www.mhs.ox.ac.uk/about/sphaera/sphaera-issue-no-7/the-birkeland-terrella/> - posjetila 9.7.2021.
- [22] https://www.researchgate.net/publication/45847731_The_Birkeland_Terrella_Experiments_and_their_Importance_for_the_Modern_Synergy_of_Laboratory_and_Space_Plasma_Physics - posjetila 11.7.2021.
- [23] <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Birkeland-Terrella-Experiments-and-their-for-of-Rypdal-Brundtland/275dfe6a9a3fba709a5eccfab50ed5c8dc99dc8d>
- [24] <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Birkeland-Terrella-Experiments-and-their-for-of-Rypdal-Brundtland/275dfe6a9a3fba709a5eccfab50ed5c8dc99dc8d>
- [25] <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Birkeland-Terrella-Experiments-and-their-for-of-Rypdal-Brundtland/275dfe6a9a3fba709a5eccfab50ed5c8dc99dc8d>
- [26] <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Birkeland-Terrella-Experiments-and-their-for-of-Rypdal-Brundtland/275dfe6a9a3fba709a5eccfab50ed5c8dc99dc8d>
- [27] <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Birkeland-Terrella-Experiments-and-their-for-of-Rypdal-Brundtland/275dfe6a9a3fba709a5eccfab50ed5c8dc99dc8d/figure/4>
- [28] Alv, Egeland; William J., Burke; Kristian Birkeland: The First Space Scientist, 2005.
- [29] https://www.researchgate.net/figure/Professor-Kristian-Birkeland-at-one-of-his-vacuum-chambers-performing-Terrella_fig5_228445172
- [30] <https://www.plasma-universe.com/birkeland-current/> - posjetila 18.7.2021.
- [31] <https://www.plasma-universe.com/birkeland-current/>
- [32] <https://www.plasma-universe.com/birkeland-current/>
- [33] <https://www.plasma-universe.com/birkeland-current/>
- [34] <https://geek.hr/znanost/clanak/polarna-svjetlost/> - posjetila 19.7.2021.
- [35] <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/aurora/> - posjetila 15.9.2021.
- [36] <https://www.goopti.com/hr/o-nama/goopti-blog/aurora-borealis-gdje-mozete-vidjeti-sjevernu-polarnu-svjetlost-u-2021>
- [37] <https://www.goopti.com/hr/o-nama/goopti-blog/aurora-borealis-gdje-mozete-vidjeti-sjevernu-polarnu-svjetlost-u-2021>
- [38] <https://nordicpoint.net/island/prirodne-ljepote/polarna-svjetlost/>

SAŽETAK

U ovom završnom radu predstavljeno je otkriće Kristiana Birkelanda o povezanosti polarne svjetlosti na Zemlji s elektromagnetskim olujama na Suncu. Dan je kratak životopis Kristiana Birkelanda te je opisano njegovo sustavno prikupljanje podataka o aurori i geomagnetskim olujama. Prikazan je niz Birkelandovih laboratorijskih simulacija s magnetiziranom terrellom. Ovo pionirsko istraživanje Kristiana Birkelanda dovelo ga je do zaključka da je permanentan tok energiziranih negativnih i pozitivnih čestica sa Sunca ključni uzročnik polarne svjetlosti te da Sunce pogoni i strujni krug odgovoran za geomagnetske poremećaje. Dok je ovo otkriće u prvo vrijeme izazivalo nevjericu, danas ga se prepoznaje kao golem doprinos Kristiana Birkelanda svemirskoj znanosti.

Ključne riječi: Kristian Birkeland, Sunčev vjetar, Birkelandove struje, terrella, polarna svjetlost

ABSTRACT

This final paper presents Christian Birkeland's recognition of the physical connections between the polar lights on Earth and electromagnetic storms from the Sun. A short biography of Christian Birkeland is presented. His acquisition of systematic information about the aurora and geomagnetic disturbances is described. Birkeland's sequence of laboratory simulations with magnetized terrella is presented. Kristian Birkeland's pioneering research led to the conclusion that the permanent flow of energised negative and positive charges coming from the Sun is a key cause of polar lights and that the Sun also drives the circuit responsible for magnetic disturbances. While this discovery initially caused disbelief, today we recognize Kristian Birkeland's enormous contribution to space science.

Keywords: Kristian Birkeland, solar wind, Birkeland currents, terrella, polar light

ŽIVOTOPIS

Veronika Pavlik rođena je 30.9.1999. godine u Požegi. Osnovnu školu je završila u Jakšiću te poslije završene osnovne škole upisuje Tehničku školu u Požegi. Nedugo nakon srednje škole, koju je završila 2018. godine, upisuje preddiplomski studij elektrotehnike i informacijskih tehnologija na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Poslije prve godine studija izabire blok Komunikacije i informatika. Nakon treće godine planira nastaviti studiranje.