

D-344/1

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
INSTITUT ZA FIZIKU

Bekvalac Gordana

FARADEJ, MEKSVEL, TESLA – PRISTUP ISTRAŽIVANJU
ELEKTROMAGNETIZMA

diplomski rad

Novi Sad, septembar 1994.

Raditi, završiti, objaviti.
(To work, to finish, to publish.)

Michael Faraday

Svaki veliki čovek jedinstven je.
Svako od njih u istorijskoj povorci ima
određen zadatak i određeno mesto.

James Clerk Maxwell

Meni ne treba pomoć nego teškoća. Što
teže to bolje. Ja najbolje radim u borbi.

Nikola Tesla

Mali je broj diplomskih radova vezanih za istoriju fizike održanih na Institutu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, a ovo je prvi takav rad od uvođenja Istorije fizike kao predmeta. Lično mislim da je istorija nauke uopšte, a posebno prirodnih nauka, zanemarena u našoj zemlji, što se može argumentovati malim brojem prevedenih i knjiga naših autora iz ove oblasti. Želela sam stoga da dam svoj skromni doprinos ovoj oblasti nauke.

Ovaj rad je imao za cilj da na jednom mestu da osnovne biografske podatke o trojici velikana nauke, prikaz njihovih radova iz oblasti elektromagnetizma i pristup istraživanju. Da bi se on ostvario bilo je potrebno prikupiti i obraditi obimni materijal. Problem preobimnosti posebno je bio prisutan kada je u pitanju Nikola Tesla, ali je zahvaljujući sugestijama kustosa "Muzeja Nikole Tesle" iz Beograda delimično izbegnuto rasplinjavanje u moru prigodno objavljenih knjiga o našem geniju. Koliko god je to bilo moguće, zbog dostupnosti, korišćeni su originalni radovi. Knjige dr Milorada Mlađenovića bile su mi orijentir i velika pomoć u određivanju mesta ova tri naučnika u istoriji nauke.

Kod nas je pre dvadeset godina objavljena knjiga dr ing Milinka Šaranovića *O suštini fizičkih teorija Faradeja i Maksvela*. Iako njen sadržaj delimično pokriva temu kojom se bavi ovaj rad, naime obrađuje dva od tri naučnika koji su njen predmet, pristup joj je sasvim drugačiji od moga. Moj rad se drži hronologije iako to ponekad ide nauštrb celovitosti slike o ispitivanju jedne pojave, dok M.Šaranović prikazuje njihovo učenje o odnosu polje-korpuskularnost-etal citirajući pasuse iz radova dvojice naučnika koji će potvrditi polazni stav. Uz dužno poštovanje rada dr Šaranovića mislim da mu je viđenje teorije Faradeja i Meksvela zamaglilo poznavanje svega što je iz teorije ove dvojice proisteklo. Osim toga, nalazila sam materijalne greške nastale verovatno pri prevodenju. Npr citat šestog Meksvelovog zakona iz rada *O Faradejevim linijama sile* u njegovom prevodu glasi: "Elektromotorna sila na ma kom elementu provodnika mjeri se trenutnom brzinom promjene elektrotoničkog intenziteta u tom elementu, bez obzira na veličinu i orijentaciju". A upravo je suština zakona u promeni "elektrotoničkog intenziteta", odnosno vektorskog potencijala, po intenzitetu ili pravcu.

Što se tiče materijala o Tesli prevashodna orijentacija mi je bila na literaturu koju je objavio "Muzej Nikole Tesle", radovi ing Slavka Bokšana, Teslinog savremenika i poštovaoca, i reprint izdanja knjige *Nikola Tesla i njegova otkrića* prof Đorda M. Stanojevića iz 1894. godine, u to vreme profesora fizike na Velikoj školi u Beogradu i Teslinog ličnog prijatelja. Slavko Bokšan je posebno doprineo objektivnijem pristupu Teslinim dostignućima. On je naime diplomirao na Velikoj tehničkoj školi u Šarlotenburgu i zatim sedam godina radio u Berlinu kao inženjer. U to vreme (dvadesete godine našeg veka) u Nemačkoj je bio evropski centar elektrotehničke industrije, te se Bokšan posebno zaineresovao za udeo Nikole Tesle u

teorijskom i praktičnom razvoju elektrotehnike. Narednih trideset godina bavio se time prikupivši svu literaturu o Tesli i njegovim pronalascima, originale njegovih patenata, dosijee sudskih parnica oko njih i sav izvedeni dokazni materijal, i započeo borbu za otklanjanje netačnosti i priznanje njegovih zasluga.

Struktura ovog rada je sledeća: Prvo poglavlje bavi se istorijom elektromagnetizma do Faradeja; drugo, treće i četvrtto poglavlje daju prikaz biografije, naučnih radova i metoda istraživanja Majkla Faradeja, Džemisa Klarka Meksvela i Nikole Tesle respektivno. Završno, peto poglavlje daje uporednu analizu pristupa nauci ova tri velikana.

Kako je za pisanje ovog rada bilo neophodno obezbediti adekvatnu literaturu želim se zahvaliti nekim svojim prijateljima koji su mi u tome pomogli, gđinu Mićiću iz Biblioteke "Matice srpske" na razumevanju i posebno mom mentoru dr Darku Kaporu koji me je bukvalno zatrپавао literaturom, kao i na tome što mi je ostavio potpunu slobodu u interpretaciji.

S A D R Ž A J :

1. Istorija elektromagnetizma do Faradeja	1
2. Majkl Faradej	8
2.1.Biografija sa pregledom radova van oblasti elektromagnetizma	9
2.2. Pregled radova iz elektromagnetizma	13
2.3. Pristup istraživanju	22
3. Džems Klark Meksvel.....	26
3.1. Elektromagnetizam između Faradeja i Meksvela	27
3.2. Biografija sa pregledom radova van oblasti elektromagnetizma	28
3.3. Pregled radova iz elektromagnetizma	34
3.4. Pristup istraživanju	46
4. Nikola Tesla.....	50
4.1. Biografija.....	51
4.2. Pregled radova iz elektromagnetizma	56
4.3. Pristup istraživanju	63
5. Zaključak – uporedna analiza metode istraživanja	67
6. Literatura.....	71

1. ISTORIJA ELEKTROMAGNETIZMA DO FARADEJA

Istorijska nauke, poput mnogih stvari, za pripadnike zapadne civilizacije počinje u antičkoj Grčkoj. Po pravilu se doprinos vavilonskih, indijskih, kineskih i arapskih mislilaca tek sporadično pominje. Razvitak filozofije prirode istoka i zapada išao je istim putem, ali su jednom prednjačili jedni, drugi put drugi. Npr pripadnici jonske škole (Tales, Anaksimandrit, Heraklit,...) smatrali su da postoji neka pramaterija (voda, vatra, vazduh, zemlja) iz koje nastaju sve prirodne pojave, a isti stav se javlja i u drevnom indijskom spevu *Mahabharata* i u kineskoj *Knjizi promena* samo sa pet paelemenata (voda, vatra, drvo, metal, zemlja). Antički period je period empirijskih teorija. Bilo je uočeno da protrijani ili zagrejani čilibar privlači luke predmete i da jedna ruda gvožđa privlači gvozdene opiljke, pa su na osnovu toga izgrađeni modeli koji reprezentuju te pojave. Prvi modeli su bili: animistički – koji su električne i magnetne pojave tumačili postojanjem duše u telima (Tales), i emanacijski – po kojima ove pojave nastaju isticanjem fine supstance iz tela (Empedokle, Demokrit, Lukrecije). Međutim, bavljenje elektricitetom i magnetizmom bila je tek uzgredna pojava, naukom je dominirala mehanika.

U prvih deset vekova nove ere ništa se posebno ne dešava u otkrivanju pojave iz elektriciteta i magnetizma. Arapski mislioci ovog perioda listom prihvataju antička shvatanja ne dajući im nikakav doprinos. Jedino što je od značaja je početak upotrebe kompasa – u Kini u 3. veku, u Japanu u 7., u Evropi u 12. veku.

Prva značajna rasprava o magnetizmu javlja se u 13. veku. Njen autor je **Pjer de Marikur** (Pierre de Maricourt). On uvodi pojam magnetni pol, odreduje im znakove i opisuje njihovo međusobno dejstvo. Prvi spominje mogućnost magnetisanja metalne igle i prvi opisuje polovljenje magneta.

Pravi početak teorije elektriciteta i magnetizma predstavlja knjiga **Vilijama Džilberta** (William Gilbert, 1544–1603) *O magnetu* (De Magnete) koja je objavljena 1600. godine. Osnovnu novinu predstavljalo je otkriće da Zemlja predstavlja jedan veliki magnet. Ostalo što ima da saopšti o magnetizmu samo je ponavljanje onoga što je pre njega Marikur već učinio. Mnogo veći doprinos ovoga dela je u oblasti elektriciteta. Džilbert tela koja trljanjem stiču sposobnost da privlače luke predmete naziva električnim i navodi brojna tela koja imaju to svojstvo (smola, sumpor, staklo, vuna, dragi kamenje, ...). Za ispitivanje privlačenja, jer jedino njega registruje, konstruiše prvi elektroskop. Prvi je napravio distinkciju između električnih i magnetnih osobina tela. Tako naglašava da se električna svojstva izazivaju trljanjem tela i da električno dejstvo može biti samo privlačno, dok su magnetna svojstva imanentna telu, magnetno dejstvo je i privlačno i odbojno, i tela ne mogu izgubiti svoje magnetne osobine. Džilbertova shvatanja elektriciteta i magnetizma nailazila su na veliki otpor savremenika jer je

uticaj aristotelovaca bio ogroman. Njegov značaj je i tome što prvi dosledno primjenjuje eksperimentalni metod.

Još jedan važan doprinos u 17. veku predstavljala je konstrukcija preteče elektrostatičke mašine koju je izveo Gerike (Otto von Guericke, 1602–1686). Ova "mašina" bila je vrlo primitivna. Sastojala se od sumporne lopte na drvenoj osovini oko koje se rotirala i na čijoj površini je trenjem pomoću ruke proizvođen statički elektricitet. Zbog mogućnosti dobijanja veće količine elektriciteta pomoću ove "mašine" stvoreni su preduslovi za nova eksperimentalna istraživanja. Gerikeov doprinos je i u tome što je prvi registrovao električno odbijanje.

Robert Bojl (Robert Boyle, 1627–1691) čini veliki doprinos, iako to nije posebno zapaženo, time što uočava da se električna i magnetna dejstva ne smanjuju kada se iz prostora u kome one deluju evakuiše vazduh.

18. vek predstavlja vek sakupljanja naučnog materijala, ali se u njemu otkrivaju i neki od fundamentalnih zakona iz elektriciteta. To je vek u kome ideja o mehaničkoj interpretaciji svih prirodnih pojava i procesa očvršćava u dogmu.

1729. Grej (Stephen Gray, 1670–1736) otkriva pojavu kretanja elektriciteta. Naime, dotada se znalo samo za statički elektricitet. To svojstvo mu je poslužilo da tela podeli na provodnike i neprovodnike. Pošto se elektricitet može prenositi sa tela na telo po analogiji sa provođenjem toplote on uvodi pojam "električni fluid". Eksperimentišući sa dve kocke od hrastovine od kojih je jedna puna, a druga šuplja on zapaža razliku između "električnog" i "topltnog fluida". Kako se nanelektrisane kocke ponašaju na isti način on zaključuje da se nanelektrisanje raspoređuje po površini tela. Kada se zagreju istom količinom toplote kocke imaju različite temperature, pa provođenja nanelektrisanja i toplote moraju predstavljati dva različita oblika kretanja. Grej je bio prvi koji je uočio dejstvo šiljka.

1734. Dife (Charles Francois du Fay, 1698–1739) uvodi hipotezu o postojanju dve vrste nanelektrisanja što je ustanovio uočivši da jedno isto nanelektrisano telo neka tела privlači, a neka odbija.

Četrdesete godine 18. veka obeležava razvoj dva instrumenta koji akumuliraju veće količine statičkog elektriciteta.

Prvi je tzv električna mašina koja ustvari predstavlja poboljšanu konstrukciju Gerikeovog uređaja. Umesto sumporne lopte koristi se stakleni valjak, umesto ruke za proizvodnju elektriciteta uvedeni su trljači, a veća brzina rotacije obezbeđena je pogonskim koturima sa kaišem.

Drugi je "Lajdenska boca" tj prvi kondenzator koji je 1745. konstruisao **Mušenbruk** (Pieter von Mussenbroeck, 1692–1761). Do njenog otkrića došlo je slučajno. Mušenbruk je želeo

da ustanovi da li će se voda bolje nanelektrisati ako se stavi u staklenu bocu. Slučajni posmatrač je pokušao da ponovi ogled ne primetivši da se u boci nalazi metalna žica koja dopire do električne mašine. Kada je udaljio bocu i pokušao da izvadi žicu osetio je udar. Mušenbruk je ovo neprijatno iskustvo nesrećnog amatera znalački iskoristio da napravi uređaj koji će biti osnovno sredstvo u eksperimentima brojnih naučnika narednih decenija. Smatra se da je nešto ranije do istog otkrića došao **fon Klajst** (Ewald Georg von Kleist, 1700–1748), ali je svoj rad objavio posle Mušenbruka te se ovaj vodi kao pronalazač Lajdenske boce.

Eksperimentišući sa Lajdanskom bocom **Votson** (William Wotson, 1715–1797) postavlja teoriju "električnog etra" koji se ne može ni stvoriti ni uništiti. Punjenje Lajdenske boce objašnjava akumulacijom tog etra. Pošto se "električni etar" samo prenosi sa tela na telo može se reći da Votsonova teorija predstavlja zakon održanja nanelektrisanja u rudimentarnom obliku.

Franklin (Benjamin Franklin, 1706–1790) je još jedan od naučnika kome je osnovni uređaj za eksperimentisanje Lajdenska boca. Serijska veza ovih boca dugo će se zvati Franklinovom baterijom. Franklin je razvio model jednog električnog fluida koji prožima celokupnu običnu materiju. Po njemu čestice električnog fluida se međusobno odbijaju, a kako se privlače sa česticama obične materije. Svako telo može da sadrži određenu količinu električne materije pa se višak koji dobija spolja raspoređuje po površini formirajući "električnu atmosferu". Pozitivno nanelektrisana tela se međusobno odbijaju zbog odbijanja njihovih "atmosfera". Negativno nanelektrisana tela su tela sa manjkom električne materije, pa nemaju "električnu atmosferu" i nemaju čime da se odbijaju. Tu se njegov model ruši, jer ne može da objasni pojavu odbijanja negativno nanelektrisanih tela koju je eksperimentalno registrovao. Iako ovaj model nije bio uspešan, značajno je što Franklin sa njim prvi put uvodi pojam pozitivnog i negativnog nanelektrisanja. Pri tome je staklu pripisao sposobnost da se nanelektriše pozitivno. A kako je smatrao da se pri nanelektrisavanju "električna materija" ne stvara, već samo raspodeljuje kada se jedno od tela nanelektriše pozitivno, ostala tela nanelektrišu se negativno. Eksperimentišući sa šiljcima Franklin dolazi do zaključka da je munja električne prirode i saglasno tome do ideje o konstrukciji gromobrana. Zahvaljujući tome postao je slavan.

Epinus (Franz Aepinus, 1724–1802) razvija teoriju "električnog fluida" i primenjuje je na magnetizam. Teoriju dejstva na daljinu primenio je na elektricitet i magnetizam, i sledstveno tome prepostavio da sila među nanelektrisanimima, poput gravitacione, opada sa kvadratom rastojanja.

Prisli (Joseph Prisley, 1733–1804) i **Kevendiš** (Henry Cavendish, 1731–1810) su takođe, zahvaljujući eksperimentalnim činjenicama, došli do zaključka da električna sila ima isti oblik kao gravitacionu.

Uporedo sa izučavanjem međusobnih odnosa nanelektrisanih i namagnetisanih tela otkriveno je još nekoliko pojava i razvijene su teorije o prirodi elektriciteta i magnetizma. Tako

su Kanton (John Canton, 1718–1772) i **Vilke** (John C. Wilcke, 1732–1796) otkrili električnu polarizaciju, a **Simer** (Robert Symmer, ?–1763) i **Bergman** (Tobern Bergman, 1735–1784) postavili teoriju tj model dva fluida po kome je telo pozitivno nenelektrisano kada ima više jednog fluida, a negativno kad ima više drugog. U osnovnom stanju telo je neutralno jer ima istu količinu ova dva fluida.

Dotadašnje teorije o obliku sile koja deluje među nenelektrisanim telima konačnu eksperimentalnu potvrdu dobijaju Kulonovim radom. Naime, radeći na konstruisanju brodskog kompasa **Kulon** (Charles Augustin Coulomb, 1736–1806) razvija torzionu vagu koja će mu poslužiti za merenje sile među nenelektrisanim kuglicama. 1785. objavljuje prvi od sedam radova o ovome, te se ta godina smatra godinom otkrića Kulonovog zakona elektrostatičke sile:

$$F = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (1.1)$$

Kulon izvodi i prvi kvantitativni zaključak o delovanju magnetne sile. Ova sila je istog oblika kao električna samo što umesto proizvoda količina nenelektrisanja $q_1 \cdot q_2$ sadrži proizvod "količina magnetizacije" $m_1 \cdot m_2$. Ovakav početak teorije magnetizma uslovio je da njen dalji razvoj bude praćen nizom nejasno definisanih pojmove. To je stoga što je izgrađivana na nepostojećim izolovanim magnetnim polovima i na analogiji sa elektrostatikom. No, sam Kulon je šest godina kasnije predložio molekularni model magnetizma po kome su magnetni fluidi zatvoreni unutar molekula i ne mogu prelaziti iz jednog molekula u drugi, ali se kasnijim istraživačima ovaj model činio manje privlačnim.

Dakle, do kraja 18. veka izučava se uglavnom elektrostatika i permanentni magneti. U prvim decenijama 19. veka izgrađuje se odgovarajući matematički aparat za opisivanje električnih i magnetnih pojava.

Odranje je u mehanici bila poznata tzv Laplasova jednačina koja opisuje ekvipotencijalne površine. **Poason** (Simeon Denis Poisson, 1781–1840) ovu jednačinu primenjuje na elektrostatiku dajući je u opšijem obliku:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -4\pi\rho \quad (1.2)$$

gde je ρ gustina nenelektrisanja u maloj zapremini oko posmatrane tačke.

Grin (Georg Green, 1793–1841) je razmatrao osobine funkcije V i nazvao je potencijalom. Postavio je princip po kome je funkcija V suma količnika nenelektrisanja ili namagnetisanja i odgovarajućih rastojanja od posmatrane tačke tj:

$$V_e = \sum \frac{q}{r} \quad V_m = \sum \frac{m}{r} \quad (1.3)$$

1839. u radu pod nazivom *Opšta teorija privlačnih i odbojnih sila koje su obrnuto сразмерне kvadratu rastojanja Gaus* (Carl Friedrich Gauss, 1777–1855) razrađuje opštu teoriju potencijala i formuliše teoremu koja kaže: Fluks električnih linija sile kroz ma koju zatvorenu površ сразмерan je količini nanelektrisanja unutar te površine.

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot q \quad (1.4)$$

Krajem 18. veka počinje da se izučava elektrodinamika. Prvi korak na tom polju napravio je **Galvani** (Luigi Galvani, 1737–1798) otkrivši grčenje mišića laboratorijske žabe kada se oni dotaknu sa dva različita metala. Ali, njegova interpretacija ove pojave bila je pogrešna – smatrao je da je otkrio animalni elektricitet. Kao fizičar, **Volta** (Alessandro Volta, 1745–1827) se pre svega zainteresovao za njenu fizičku stranu. Iako je u početku i sam verovao da je uzrok ove pojave animalni elektricitet, kada je registrovao proticanje struje i kroz vlažne predmete između dva metala zaključio je da su uzročnici upravo metali. Po njemu metali različito deluju na "električni fluid", pa kada se vlažno telo dodirne različitim metalima dolazi do kretanja "električnog fluida". Stoga je predložio da se umesto animalni elektricitet koristi termin metalni elektricitet. Kasnije će se ova pojava interpretirati tzv kontaktnom razlikom potencijala. Ispitujući kontakte različitih metala Volta dolazi na ideju da napravi prvi trajni izvor električne struje. Ideju realizuje u dve varijante: jedan izvor sa tečnošću, a drugi sa natopljenim kartonom (tzv Voltin stub).

Tokom razvoja teorije do 18. veka elektricitet i magnetizam su tretirani kao dve autohtone pojave. Mada je uočeno da munja izaziva magnetizaciju i da utiče na kompas tek početkom 19. veka počinje istraživanje veze između elektriciteta i magnetizma.

Ispitivanje magnetnog dejstva električne struje počinje sa otkrićem **Danca Ersteda** (Hans Christian Oersted, 1786–1853) da struja koja protiče kroz provodnik izaziva skretanje magnetne igle u njegovoj blizini. On je to tumačio formiranjem vrtloga oko provodnika.

Erstedovo otkriće iz 1819. izazvalo je veliko interesovanje i uticalo da se niz naučnika angažuje da dalje razradi njegove rezultate. Tako je 1820. **Arago** (Dominique F. Arago, 1786–1853) pokazao da se gvožđe u blizini provodnika namagnetiše. Erstedovo otkriće i Aragoova demonstracija pobuduju **Ampera** (André-Marie Ampère, 1775–1836) na bavljenje elektromagnetizmom. On otkriva da se provodnici kroz koje protiče struja međusobno privlače ili odbijaju u zavisnosti od smera struja. Kasnije će dati i izraz za silu između dva strujna elementa:

$$dF = \frac{I_1 I_2 ds_1 ds_2}{r^2} \cdot \left(\cos \epsilon - \frac{3}{2} \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \right) \quad (1.5)$$

I_1, I_2 – jačina struje kroz provodnike

ds_1, ds_2 – elementi provodnika

ϵ – ugao između provodnika tj između $d\vec{s}_1$ i $d\vec{s}_2$

θ_1 – ugao između $d\vec{s}_1$ i \vec{r}

θ_2 – ugao između $d\vec{s}_2$ i \vec{r}

Amperov doprinos je i u tome što je jasno razdvojio dinamiku od statike i uveo termine jačina električne struje i električni napon. Osim toga, on je prvi konstruisao kalem da bi mu "imitirao magnet" i u naučnu terminologiju uveo pojam solenoid.

Nešto posle Ampera Bio (Jean Baptiste Biot, 1774–1862) i Savar (Félix Savart, 1791–1841) daju zakon, koji će nositi njihovo ime, a koji izražava silu kojom električna struja u linearnom provodniku deluje na magnetno polje. Negov originalni oblik je:

$$dF = k \cdot m \cdot \frac{I \sin \theta}{r^2} \cdot ds \quad (1.6)$$

k – konstanta

m – "magnetna masa"

θ – ugao između \vec{r} i $d\vec{s}$

Pojam otpora javlja se mnogo ranije kao posledica diferencijacije provodnika i izolatora, ali pravi fizički smisao dobija sa Omovim (Georg Simon Ohm, 1787–1854) radovima. On je do svog zakona došao primenom analogije sa provođenjem toplote, ali oslanjajući se pre svega na rezultate sopstvenih eksperimenata. Njima je utvrđio da jačina struje zavisi od dužine i debljine provodnika i od broja primenjenih galvanskih elemenata. Otkrivenu zakonitost izrazio je formulom:

$$X = \frac{ma}{mb + x} \quad (1.7)$$

X – jačina struje merena torzionom vagom

a – konstanta srazmerna elektromotornoj sili

b – konstanta srazmerna otporu uređaja

x – dužina žice

m – broj izvora struje

Nakon toga dao je još jedan izraz:

$$X = k \cdot \frac{w}{l} \cdot a \quad (1.8)$$

k – koeficijent provodnosti

w – poprečni presek provodnika

l – dužina provodnika

a – napon na krajevima provodnika

Sva ova otkrića postavila su osnovu za nove naučne prodore i sinteze koje su usledile u delima trojice velikana kojima se bavi ovaj rad.

2. Michael Faraday
(1791-1867)



2.1. BIOGRAFIJA SA PREGLEDOM RADOVA VAN OBLASTI ELEKTROMAGNETIZMA

Majkl Faradej je rođen 22.09.1791. u Njuingtonu (Newington) kraj Londona. Otac mu je bio kovač, a majka seljanka. Kao dete doseljava se u severni London u kome završava samo osnovno obrazovanje kojim se opismenjava i stiče osnove iz računa. Sa 13 godina (1804) počinje da uči knjigovezački zanat. Uz učenje zanata bavi se i raznošenjem štampe i knjiga. Tada razvija naviku čitanja knjiga kome posvećuje sve svoje slobodno vreme. Po vlastitom priznanju oduševio se popularnom knjigom *Razgovori o hemiji*. To ga podstiče da posećuje večernja predavanja o filozofiji prirode. Od jednog redovnog kupca knjiga dobija ulaznice za kurs ser Hemfri Dejvija (Sir Humphry Davy, 1778-1829) u Kraljevskoj instituciji (Royal Institution). Brižljivo vodi beleške na kursu i veoma ih lepo ilustruje. Nakon kursa pismeno se obraća Dejviju, priloživši svoje beleške od 386 strana, moleći za nekakav posao u laboratoriji. Dejvi ga angažuje kao prepisivača i knjigovesca. No, kako je nekoliko nedelja kasnije Dejvi bio prinuđen da otpusti svog asistenta, njegovo mesto zauzima Faradej. Dakle, 1813 Fardej postaje asistent laboratorije u Kraljevskoj instituciji, tada najboljoj i najpoznatijoj ustanovi za eksperimentalni rad. Ubrzo Dejvi kreće na put po Evropi na koji vodi i novog asistenta. Osamneastomesečno putovanje obuhvata Francusku, Italiju, Švajcarsku i Nemačku. Ono je za Faradeja bilo izuzetna škola: sreća je mnogo naučnika, prisustvovao njihovim raspravama, video mnoge laboratorije i asistirao Dejviju u izvođenju eksperimenata. Faradejev prijatelj J.H.Gledston je rekao "Evropa je bila njegov Univerzitet, a profesori njegov poslodavac i oni slavni ljudi koje je upoznao zahvaljujući Dejvijevom ugledu".

Do 1820. uglavnom asistira Dejviju u hemijskim istraživanjima. Tako je na primer učestvovao u ispitivanju koje je dovelo do konstrukcije tzv Dejvijeve lampe koja signalizira prisustvo eksplozivnih gasova u rudarskim okнима. Osim toga, često je za Dejvija vršio hemijske analize različitih sirovina. 1816. je objavio svoj prvi rad, ali on nije bio od posebnog značaja.

1820. pažnju poklanja pripremi nerđajućeg čelika. Time se bavio nekoliko godina, ali bez uspeha. No, te iste 1820. otkriva dva nepoznata hlorida ugljenika i nova jedinjenja ugljenika, joda i vodonika.

1821. Faradej se ženi Sarom Bernar (Sarah Barnard) i čini svoje prvo značajnije otkriće u oblasti elektromagnetizma koje mu donosi slavu. To je otkriće rotacije žice oko magneta kada kroz nju prolazi struja, što čini princip rada elektromotora. Kako u svom radu ne pominje

engleskog fizičara Volastona (William Hyde Wollaston, 1766-1822) čijim je neuspešnim pokušajima izvođenja ovog eksperimenta Faradej prisustvovao, između Dejvija i Faradeja nastaje sukob.

1823. Faradej uspeva da izvrši likvefakciju (utečnjavanje) hlora. U izveštaju u kome obaveštava o ovome Faradej ne spominje Dejvija koji je inicirao istraživanje i dao korisne sugestije, te mu Dejvi osporava originalnost rada.

Zbog ova dva postupka, kao predsednik Kraljevskog društva (Royal Society), Dejvi se suprotstavio prijemu Faradeja u ovu instituciju. Međutim, 1824. Faradej ipak postaje akademik kao rezultat akcije koju je par godina ranije pokrenula grupa naučnika na čelu sa Volastonom.

1825. Faradej uspeva da iz uljnog goriva izoluje benzol. Istovremeno počinje sa istraživanjem teškog optičkog stakla. Teško staklo je kasnije imalo značajnu ulogu u Faradejevom otkriću rotacije ravni polarizacije svetlosti u magnetnom polju.

Iste godine Faradej postaje direktor laboratorije Kraljevske institucije i to na predlog ser Hemfri Dejvija. Kao direktor nastavlja sa prepodnevnim popularnim predavanjima, a uvodi "Skupove petkom uveče" na kojima članovi Institucije izlažu rezultate svojih istraživanja, kao i "Božićna predavanja za mlade" kojima se mlađi ljudi upoznaju sa dometima pojedinih oblasti nauke (sam Faradej je tokom trideset godina održao devetnaest kurseva).

1827. Faradej odbija mesto profesora na novoosnovanom Londonskom Univerzitetu.

1831. počinje drugi period Faradejevih istraživanja. Naime, do tada se uglavnom bavio hemijom uz povremene pokušaje da magnetizam prevede u elektricitet tj da proizvede električnu struju u stacionarnim provodnicima raspoređenim među nepokretnim magnetima. Naravno pokušaji su bili neuspešni. Ideja pretvaranja magnetizma u elektricitet rodila se u Faradejevoj glavi još 1822. godine.

1831. Faradej otkriva elektromagnetnu indukciju čime počinje era njegovih velikih otkrića u elektromagnetizmu.

1833. dokazuje identičnost elektriciteta iz različitih izvora, opisuje elektrostatičku zaštitu (tzv Faradejev kavez), izučava provođenje elektriciteta kroz tečnosti i razvija ideju o samoindukciji.

Faradejev doprinos provođenju elektriciteta kroz tečnosti tj elektrohemiji je značajan zbog nekoliko otkrića vezanih za ovu pojavu, kao i zbog uvođenja terminologije koja do danas važi. Fardej je otkrio da led za razliku od "vode", nije provodnik. Takođe, da vrlo čista voda nije provodnik, već da provođenju doprinose supstance (prevashodno soli) prisutne u vodi. Umesto izraza pol on uvodi pojam elektroda želeći da naglasi da se odlučujući činioc koji

izaziva provođenje ne nalazi na polovima, već unutar tečnosti. Elektrodu definiše kao površinu, bilo vazduha, vode, metala ili nekog drugog tela, koja označava granicu do koje se razlaže materija u smeru električne struje. Pa je anoda površina na koju ulazi struja, negativni kraj razložene supstance na kom se oslobađa kiseonik, hlor, "kiseline", koji je u kontaktu sa pozitivnim polom. Katoda je površina na kojoj struja napušta razloženu supstancu, a koja predstavlja njen pozitivni kraj. Na njoj se oslobađaju "zapaljiva tela", metali, "alkalije", a u kontaktu je sa negativnim polom. Do tada se smatralo da su atomi proizvod razlaganja molekula tečnosti kroz koju prolazi struja, te da su oni elektronegativni, odnosno elektropozitivni, i da kao takvi bivaju privučeni ka pozitivnom, odnosno negativnom polu. Kako su osobine elektropozitivnosti i elektronegativnosti atoma bile samo hipotetičke, Faradej problem razrešava uvođenjem pojma jon. Joni su česice koje nastaju razlaganjem molekula: anjom naziva česticu koja ide ka anodi, a katjom onu koja dolazi do katode. Novu terminologiju ove oblasti on zaokružuje uvođenjem pojmljova elektroliza i elektrolit.

Faradej formuliše dva zakona elektrolize na osnovu rezultata svojih brojnih eksperimenata.

Prvi zakon: "Hemijska moć električne struje direktno je сразмерna absolutnoj količini elektriciteta koja protekne". Odnosno, danas bi se reklo: Masa supstance iz rastvora izdvojena na elektrodi сразмерna je ukupnoj količini nanelektrisanja koja prođe kroz rastvor. Faktor сразmere između mase i količine nanelektrisanja naziva se elektrohemijskim ekvivalentom supstance. On je karakteristika svakog elementa, odnosno ne zavisi od vrste jedinjenja u kome se nalazio u vodenom rastvoru.

$$m = k \cdot q \quad (2.1.1)$$

k – elektrohemski ekvivalent supstance

Drugi zakon: "Elektrohemski ekvivalenti сразмерni su hemijskim ekvivalentima". Ili, mase supstanci koje se oslobođe na elektrodi pri prolasku iste količine nanelektrisanja odnose se kao njihovi hemijski ekvivalenti.

$$k = \frac{1}{F} \frac{M}{n} \quad (2.1.2)$$

M/n – hemijski ekvivalent supstance

M – molekulska masa

n – valenca

F = 96.5 10³ C/mol – Faradejeva konstanta

1833. Faradej biva postavljen na mesto profesora hemije.

Počev od 1831. zbog napornog rada Faradejevo zdravlje slabi, te on postepeno odustaje od obaveza van laboratorije i predavanja studentima. Iako je celog života bio slabijeg pamćenja, njegova bolest počinje da se manifestuje u potpunim gubicima memorije i povremenim nesvesticama, da bi se razvila do psihotičkog stanja straha od okoline.

1840. potpuno prekida naučni rad da bi se dvadeset meseci odmarao u Švajcarskoj.

1844. počinje redovnije da radi. Oporavak je postepen, ali potpun. Time otvara treći i poslednji period stvaralačkog rada, period izuzetne inventivnosti i kreativnosti. On obuhvata ispitivanje: odnosa električnih i magnetnih sila, dijamagnetizma, magnetokristalnih pojava, magnetnih linijskih sile, veza između elektriciteta i gravitacije, električnog provođenja i prirode materije.

1858. povlači se u zasluženu penziju koju provodi u udobnoj kući u Hampton Kortu (Hampton Court) koju mu je obezbedila kraljica Viktorija. Ali i tada ga karakteriše živ duh i interes za nauku. Tako 1862. pokušava da ustanovi uticaj magnetnog polja na svetlosne zrake, ali neuspešno. (35 godina kasnije Zeman će otkriti cepljanje spektralnih linijskih u jakom magnetnom polju). Zdravlje mu postepeno kopni i umire 25.08.1867.

Važnije bibliografske odrednice:

Hemiske manipulacije (Chemical Manipulation, 1827)

Eksperimentalna istraživanja iz elektriciteta (Experimental Researches in Electricity, 1831-1855), zbornik radova

Eksperimentalna istraživanja iz hemije i fizike (Experimental Researches in Chemistry and Physics, 1859)

Kurs od šest predavanja o hemijskoj istoriji sveće (A Course of Six Lectures on the Chemical History of the Candle, 1861)

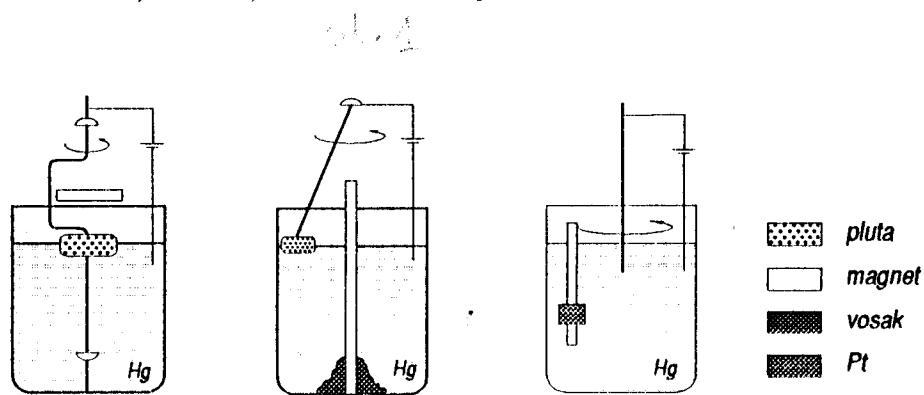
O različitim silama u prirodi (On the Various Forces in Nature, 1875), objavljeno posmrtno.

U periodu 1932-1936 objavljen je Faradejev dnevnik koji se sastoji iz osam tomova. Kako je pažljivo beležio datume uz svaki svoj zapis, iz dnevnika i svih publikovanih radova mogao se detaljno rekonstruisati celokupni stvaralački život ovog naučnika.

2.2. PREGLED RADOVA IZ ELEKTROMAGNETIZMA

Kako je već rečeno 1820. danski fizičar Ersted objavljuje svoje otkriće da kada se kroz žicu koja je paralelna magnetnoj igli propusti struja dolazi do skretanja igle. Godinu dana kasnije Volaston, vođen Erstedovim otkrićem, dolazi na ideju da bi u magnetnom polju žica kroz koju protiče struja trebalo da rotira (ali izgleda da je mislio da bi žica trebalo da rotira oko sopstvene ose). Njegovim neuspelim eksperimentima prisustvuju Dejvi i Faradej. Nakon izvesnog vremena Faradej samostalno izvodi ogled stavljući pravu žicu koja je vezana za voltinu bateriju i magnetnu iglu u različite međusobne položaje i prateći šta se dešava sa iglom, odnosno žicom. On otkriva da kada je žica fiksirana magnet rotira oko nje, i obrnuto kada je magnet fiksiran žica rotira oko njega. Faradej je izvršio 16 varijacija osnovne ideje eksperimenta. Time je potvrdio Erstedovo tvrđenje da "električni konflikt deluje na okrećući način" tj da efekat koji se javlja oko provodnika uzrokuje rotaciju magneta.

Prve tri verzije Faradejevih "rotacionih aparata" :

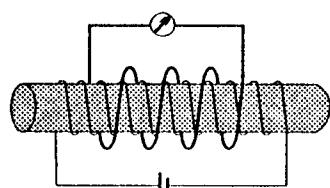


Još 1822. Faradej sebi postavlja za cilj "Pretvoriti magnetizam u elektricitet". Ali put do ostvarenja tog zadatka nije bio lak. Povremeni pokušaji su mu bili neuspuni jer je zanemarivao faktor kretanja, odnosno pokušavao je da stacionarnim rasporedom magneta izazove proticanje električne struje u nepokretnim provodnicima.

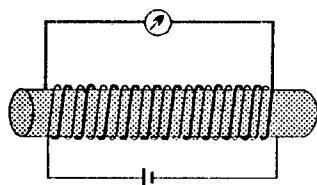
U periodu između avgusta i novembra 1831. Faradej vrši niz eksperimenata i 24.11.1831. u Kraljevskom društvu čita svoj prvi rad koji će ući u zbornik *Eksperimentalna istraživanja iz elektriciteta* pod nazivom *Indukovane struje*. Rad je bio podeljen u dva dela. Prvi s nazivom *Indukcija električne struje* počinje analogijom koja ga je podstakla na istraživanje. Naime, Faradej polazi od pretpostavke da se može očekivati da električna struja u indiferentnoj

materiji u svojoj blizini indukuje neko posebno stanje kao što statički elektricitet indukuje elektricitet suprotnog znaka na susednim telima.

Detaljan i marljiv u zapisivanju rezultata svoga rada ostavio je značajan dokument iz koga se vide koraci koji su ga doveli do otkrića elektromagnetne indukcije.



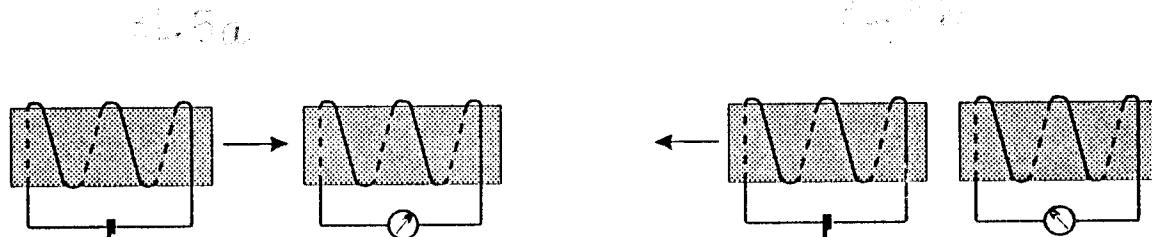
Hronološki je prvi ogled sa dvanaest spirala od bakra namotanih jedna na drugu i na drveni cilindar, među-sobno izolovanih pamučnim platnom. Krajeve neparnih spirala je vezao jedan za drugi čime je dobio jedan kalem koji je povezao s galvanometrom. Parne spirale je spojio na isti način i vezao za galvansku (ili kako to on kaže voltaičku) bateriju. Igla galvanometra je ostala nepokretna. Ovaj eksperiment je varirao praveći kalemove od kombinacije bakarnih i spirala od gvožđa, kao i drugih metala, zatim međusobnom zamenom mesta galvanometru i bateriji, ali je rezultat uvek bio isti. Dakle, struja u jednom kalemu ne indukuje struju u njemu paralelnom kalemu.



Drugi ogled je izveden sa bakarnom spiralom namotanom na drveni cilindar između čijih namotaja je umetnuta spirala od iste žice uz izolaciju pamučnim platnom. Jedan kalem je vezao za galvanometar, a drugi za bateriju. Galvanometar je registrovao struju samo pri uspostavljanju i prekidanju kontakta sa baterijom. Pri uključivanju baterije igla galvanometra je skretala u jednu stranu, a pri isključivanju na drugu. Ogled je ponavljao sa baterijom veće snage. Efekat je ostajao isti. Kada je ponovio prvi eksperiment opazio je isto dejstvo pri uključivanju i isključivanju baterije. Dakle, struja u drugom kalenu se indukuje samo pri promeni struje u prvom.

Nakon toga je testirao svoju ideju da bi struja indukovana u drugom provodniku morala namagnetišati čeličnu iglu. Umesto galvanometra je vezao malu spiralu namotanu na staklenu cev. Pre vezivanja baterije u cev stavlja čeličnu iglu koju vadi brzo nakon uključivanja baterije i uočava da je namagnetišana. Nakon uključivanja baterije opet u cev stavlja iglu koja se namagnetišala, ali sa polovima suprotno orijentisanim u odnosu na iglu u prethodnom slučaju. Zatim objedinjuje ova dva ogleda: pre uključenja baterije nenamagnetišanu čeličnu iglu stavlja u staklenu cev, uključi bateriju i nešto kasnije je isključi iz kola. Igla ostaje nenamagnetišana. Stoga zaključuje da je dejstvo koje je izazvala struja indukovana pri uključenju baterije neutralisana dejstvom indukovane struje koja se javlja pri isključenju.

U prethodnim ogledima provodnici su bili stacionarni, a indukcija se javljala u momentima spajanja i prekidanja kontakta s baterijom. Sledeća Faradejeva ideja je bila da struju u jednom provodniku indukuje pomoću struje drugog provodnika koji se kreće u odnosu na njega. Stoga na dve drvene ploče namotava žice u obliku slova W, pri čemu jednu vezuje za bateriju, a drugu za galvanometar.



Pri približavanju prvog provodnika drugom igla galvanometra skreće na jednu stranu i zaključuje da su indukovana i indukujuća struja suprotnih smerova. A pri udaljavanju igla skreće na drugu stranu, te su ove dve struje istog smera. Takođe registruje da se pri zaustavljanju pokretnog provodnika galvanometarska igla vraća na nulu tj da se tada ne javlja indukcija.

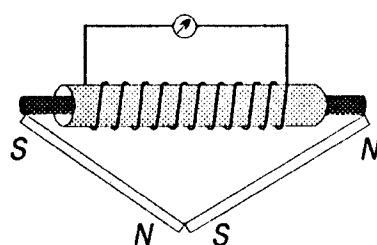
Dakle, struja se indukuje pri kretanju jednog kola u odnosu na drugo. Ovaj tip indukcije Faradej je nazvao voltaelektričnom indukcijom. Iako pojavu registruje i daje joj ime on još uvek smatra da je to nekakva granična pojava.

Drugi deo Faradejevog rada nosi naziv 'Evolucija magnetizma u elektricitet'. On sadrži najpoznatiji eksperiment iz ove oblasti, onaj sa indupcionim prstenom. Indukcioni prsten je prsten od mekog gvožda na koga su namotane dve spirale od izolovane bakarne žice koje su međusobno razdvojene. Pri uključivanju baterije galvanometar je reagovao u daleko većem stepenu nego u eksperimentima bez gvozdenog jezgra. Isto se dešavalo i pri prekidanju kontakta uz skretanje igle u suprotnom smeru u odnosu na prvi slučaj. Indukovana struja u njegovim eksperimentima je bila toliko jaka da je igla galvanometra često čak zarotirala 4-5 puta pre nego bi se zaustavila zbog prestanka indukcije (zbog konstantnosti struje ili njenog odsustva u primarnom kolu).

Sl. 6a.



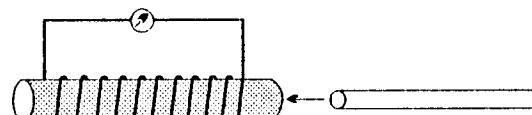
Nešto slabiji efekat se javio i kada je u ravne kaleme namotane na šupalj kartonski cilindar umetnuo valjak od gvožđa. Kada je umesto njega koristio bakarni valjak galvanometar je ostao indiferentan.



Faradej je nakon toga dva pločasta magneta spojio suprotnim polovima formirajući magnet nalik potkovičastom. Slobodne krajeve novoformiranog magneta je prislonio na krajeve gvozdenog jezgra kalema koji je koristio u prethodnom ogledu. Gvozdeni valjak se namagnetisao i u kalemu se indukovala struja. Održavanjem kontakta igla galvanometra se postepeno vraća u početni položaj. Prekidanjem kontakta s magnetom igla ponovo skreće, ali u suprotnom smjeru od prethodnog da bi kasnije opet postala indiferentna.

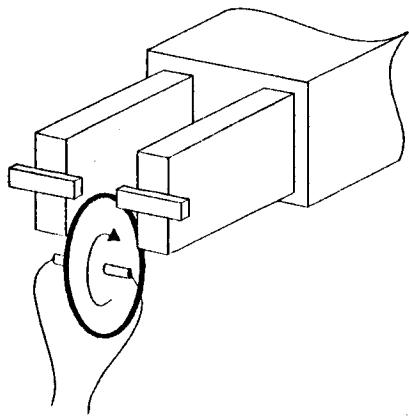
Ideje o korišćenju gvozdenog jezgra (u obliku prstena ili valjka) i dva spojena magneta predstavljale su kvalitativan skok u istraživanju, ali inače veoma detaljni Faradej ne spominje odakle mu one.

U sledećem eksperimentu umesto jezgra od mekog gvožđa Faradej koristi magnet oblika valjka. Njegovim kretanjem kroz kalem galvanometarska igla je skretala na jednu ili drugu stranu u zavisnosti od toga da li je magnet uvlačen ili izvlačen iz kalema. Dakle, u solenoidu se indukovala struja pri kretanju magneta kroz njega.



Pojavu da se struja indukuje dejstvom magneta ili magnetnog polja struje Faradej naziva magnetoelektričnom indukcijom.

Takođe, on je rotirao bakarni disk između polova velikog elektromagneta i pokazao da se na taj način dobija permanentna električna struja koja se približno prostire duž radiusa diska. Ovaj eksperiment se naziva Aragoovim, jer je on prvi uočio indukciju na ovakovom uređaju, opisao je, ali je nije objasnio.



Dalje Faradej detaljno opisuje različita kretanja provodnika ili magneta i ukazuje da se u provodniku indukuje struja kada on seče "magnetske krive" (magnetne linije sile).

Potvrdu ispravnosti svog otkrića on nalazi u činjenici da indukovana struja ispoljava magnetna, hemijska, mehanička i toplotna svojstva, kao i obična struja.

Pokušavajući da objasni pojavu koju je otkrio Faradej uvodi pojam elektrotoničkog stanja u koje tела dolaze u prisustvu električne struje ili magneta, a koje se ne manifestuje nikakvim električnim efektima. Tek relativnim kretanjem sistema telo-magnet ili telo-provodnik menja se elektrotonično stanje, što rezultuje pojmom elektromagnetne indukcije.

Dakle, ovaj rad o indukciji je samo zbir eksperimenata koji kvalitativno opisuju ovu pojavu. U njemu nema nikakve kvantitativne veze između fizičkih veličina čime bi se preciznije definisala "proizvodnja elektriciteta iz magnetizma". Ipak, ovde je dat tako detaljno jer upućuje na Faradejev metod rada. Osim toga otkriće elektromagnetne indukcije smatra se njegovim glavnim otkrićem na kome je zasnovana savremena elektroenergetika.

1832. Faradej u Kraljevskom društvu drži tzv "Bejkersko predavanje" u kome izlaže eksperimente sa indukovanim strujama u Zemljinom magnetnom polju. Očekivao je da će Zemljin magnetizam indukovati stalnu struju u provodniku čime bi dobili električni perpetuum mobile. U drugom delu predavanja saopštava rezultate deset eksperimenata u kojima je ispitivao odnos između indukovane struje i vrste metala (Cu,Fe,Zr,Zn,Pb) od kojeg je provodnik, kao i petnaestak ogleda u kojima je razmatrao različite međusobne položaje i smerove kretanja tih provodnika i magneta. Naime, od žica različitih metala formirao je spirale i vezivao ih redno i paralelno, no nikakve zaključke ne izvlači osim prostog opisa. Ovo je indikativna situacija, jer Faradej ni šest godina posle Omovog otkrića nije znao za njegov zakon.

A iz ostalih eksperimenata konstatuje da indukovana struja zavisi od pravca i brzine kretanja provodnika, ali ne daje nikakav matematički izraz za to.

1832. Faradej se bavio izučavanjem prirode elektriciteta iz različitih izvora. Tada su se razlikovali: obični (dobijen trljanjem), Voltin, magnetski (indukovani), termički i animalni elektricitet. Zaključio je da su bez obzira na njihov izvor u svojoj prirodi istovetni. O tome januara 1833. obaveštava Kraljevsko društvo. U svom radu on analizira tuda razmatranja ovog problema dopunjajući ih sa desetak sopstvenih eksperimenata.

Faradej je elektricitet delio na statički, okarakterisan naponom i dinamički, okarakterisan strujom. Statički (napon) proizvodi privlačenje i odbijanje, a dinamički (struja) toplotni efekat, hemijsko razlaganje, magnetizam, pojavu varnice, fiziološki efekat i pražnjenje toplim vazduhom.

U istom radu prvi put pominje uređaj za elektrostatičku zaštitu tzv Faradejev kavez koji je u radu koristio za zaštitu galvanometra. On se sastojao iz staklenog cilindra iznutra i spolja prekrivenog staniolom, a sa gornje strane zatvorenog žičanom mrežom. Sve metalne delove uzemljuje vezujući ih za metalne cevi vodovoda i gasovoda.

Maja 1833. u Kraljevskom društvu čita rad *Novi zakon električne provodljivosti*. Faradej uvodi svojstvo provodnosti, dotada nepoznato, za koga smatra da je "na neki način povezano s osobinama i uzajamnim odnosima čestica materije". On tvrdi da je električna provodljivost opšta osobina svih materijala (od metala do gasova) i da se ostvaruje na isti način, ali da se manifestuje u vrlo različitim stepenima. Ovakav zaključak je čudan pošto nešto kasnije navodi niz supstanci za koje njegov "vrlo opšti zakon" ne važi. Takođe, naglašava vezu između električne i toplotne provodnosti, odnosno registruje činjenicu da se kod nekih tela provodljivost povećava zagrevanjem, a kod nekih smanjuje. I u vezi sa tim naglašava da brojna klasa tela (voda, hloridi,...) pri očvršćavanju (solidifikaciji) gubi osobinu provodljivosti. Tek u fusnoti na kraju članka napominje da je njegov mentor Dejvi trideset godina ranije uočio ovu osobinu. Desetak godina kasnije Faradej sam opovrgava opštost ovog zakona navodeći da samo vodenii rastvori raznih jedinjenja imaju svojstvo da očvršćavanjem postaju izolatori.

Iako je još u prvom saopštenju pomenuo pojavu samoindukcije, tek 1834. počinje rad na tu temu koju će publikovati pod nazivom *O uticaju indukcije električne struje na samu sebe*. Na to ga je podstakao izvesni Vilijam Dženkin (William Jenkin) koji je registrovao pojavu neobičnog elektroudara pri prekidanju kontakta žice s baterijom, ako ona (žica) okružuje elektromagnet. Faradej ovaj udar proučava za različite geometrije provodnika (prav provodnik različitih dužina, različiti kalemovi i prstenasti elektromagnet) i uočava da je efekat najslabiji za kratku pravu žicu, našto jači za dužu žicu, još jači za kalem i najjači za elektromagnet. Da se radi

o pojavi dodatne struje najpre je registrovao prostim držanjem krajeva provodnika, zatim galvanometrom, a onda i hemijskim efektima koje izaziva struja, kao i pojavom varnice. Dakle, zbog promene jačine struje u provodniku menja se i magnetno polje oko njega, te se u provodniku javlja indukovana struja. Vrlo je zanimljivo da je Faradej u samom radu pomenuo imenom jednog apsolutnog amatera Dženkina kao inicijatora istraživanja, dok u mnogim drugim potpuno ignoriše respektabilna imena iz sveta nauke. Ovaj čin govori nešto o njegovoj naučničkoj sujeti.

U periodu novembar 1837.– jun 1838. Faradej objavljuje četiri rada kojima zaokružuje svoj model elektriciteta. On smatra da indukcija predstavlja osnovni mehanizam nastanka električnih pojava, te svoj model naziva teorijom indukcije. Nasuprot tada vladajućem mišljenju on je zagovornik teorije bliskog dejstva. Smatrao je da je indukcija, kao osnovni princip, uvek dejstvo među susednim česticama (molekulima). Ustvari, Faradej samo dejstvo na makrorastojanjima svodi na dejstvo na neku konačnu mikroudaljenost. Faradejeva greška je što elektromagnetne pojave objašnjava mehanistički, pa dejstvo na blizinu predstavlja mehaničkim kontaktom čestica. Pošto se dejstvo na udaljenost ostvaruje po pravoj liniji mislio je da ako pokaže da se indukcija ostvaruje i po krivoj liniji potvrдиće svoj stav o dejstvu na blizinu. I na nizu jednostavnih eksperimenata sa statičkim elektricitetom pokazuje da su linije sile krive. Zaključuje da se u ovim eksperimentima javlja odbijanje među linijama sile tj neka vrsta poprečnog napona. A upravo je naponsko stanje u prostoru između nanelektrisanih tela, okarakterisano linijama sile, osnovno svojstvo električnog i magnetnog polja. Dakle, Faradej postavlja osnove na kojima će se izgraditi teorija elektromagnetskog polja.

Po Faradejevom modelu elektriciteta dielektrik predstavlja osnovni medijum kroz koga ili preko koga deluju električne sile. On ga definiše kao skup čestica (molekula) koje imaju sposobnost da se polarizuju. U normalnom stanju one su nepolarizovane, ali ako se nađu na "liniji induktivne akcije" postaju polarizovane "prenošenjem polarne sile". Pa ako se ove sile lako prenose između susednih čestica nastupa provođenje, u suprotnom javlja se izolacija. Pošto je uočio da razni dielektrici imaju različit "stepen indukcije" uvodi veličinu "specifični induktivni kapacitet" koji definiše numerički u odnosu na vazduh i određuje joj vrednost za neke čvrste materijale (šelak 2.10, flint staklo 1.76, sumpor 2.24). U današnjoj terminologiji ova veličina je poznata kao električna propustljivost (permitivnost) sredine.

Držeći se indukcije kao glavne pojave Faradej opovrgava postojanje apsolutnog nanelektrisanja pošto smatra da je svako nanelektrisanje stvoreno isključivo indukcijom.

Pomoću indukcije objašnjava i električno pražnjenje. Pod ovim pojmom on podrazumeva proces suprotan izolaciji koji obuhvata provođenje, elektrolitičko pražnjenje, probojno pražnjenje i konvekciju.

- Po Faradeju do provođenja dolazi kada polarizacijom čestice steknu sposobnost da prenesu "električne sile". Tim prenosom smanjuje im se polarizacija, te kod provodnika čestice ne mogu biti permanentno polarizovane. (U to vreme pojam energija nije bio izdvojen, mada se sporadično koristi, pa se često iza reči sila ustvari skriva termin energija).
- Do elektrolitičkog pražnjenja dolazi kada su čestice dielektrika dovedene u polarizovano stanje do takvog stupnja da dolazi do njihovog razdvajanja u dve elementarne čestice koje nose u pravcu odgovarajućih elektroda deo "sila" (energije) koju su primile tokom polarizacije.
- Proboj nastaje kada napon (jačina električnog polja) među česticama postane tako veliki da jedna prethodno polarizovana čestica gubi svoju polarnost izazivajući takvu promenu kod drugih čestica čime počinje proces nalik lavini.

Problem nastupa kada pokušava da objasni pražnjenje u vakuumu, jer kao protivnik teorije dejstva na daljinu nije mogao da definiše tip interakcije među česticama. Stoga prihvata hipotezu etra kao "uzastopne delove ili centre delovanja" tj etra kao nevidljive elastične sredine bez težine koja prožima sva tela, čije deformacije su uzrok svih električnih i magnetnih pojava.

Kao protivnik postojanja apsolutnog nanelektrisanja Faradej struju definiše kao bipolarni entitet tj misli da se ona sastoji iz pozitivnog i negativnog fluida. Njegova rogočatna definicija ("Struja je jedna nevidljiva stvar, jedna osovina snage, u čijem svakom delu nalazimo električne sile u jednakim količinama") ništa ne govori o prirodi struje i o načinu provođenja.

1844. tokom "Skupa petkom uveče" u Kraljevskoj instituciji Faradej izlaže svoj koncept o vezi električne provodnosti i prirode materije. To je bila njegova najspekulativnija hipoteza. On odbacuje mogućnost postojanja praznog prostora, već smatra da je on kontinualno popunjeno atomima. Pod atomima podrazumeva Boškovićevo shvatanje atoma kao centara sila, ali bez dimenzija. No, zanemaruje sve iz modela Ruđera Boškovića što se ne uklapa u njegovu hipotezu (da su atomi materijalne čestice određenih dimenzija, da se atomi mogu međusobno približiti samo do određenih malih udaljenosti na kojima sila između njih postaje beskonačno odbojna). Faradejev atom je do krajnosti pojednostavljen, njega ne zanimaju njegova svojstva, već samo efekti koje izaziva. Verovatno je i sam bio nesiguran u ovu svoju hipotezu pa je ne promoviše u vrhunskim naučnim krugovima, već samo u formi večernjeg predavanja i članka u manje važnom časopisu ("Londonski i edinburški filozofski magazin").

Kao što je već rečeno, 1845. počinje treći period Faradejevih istraživanja u kome se intezivno bavi magnetizmom. Te godine otkriva rotaciju ravni polarizacije svetlosti u magnetnom polju. Ploču od teškog optičkog stakla, koje je sam pronašao, on postavlja duž svetlosnog snopa. Iza nje stavlja Nikolovu prizmu koju podešava tako da ne propušta polarizovanu svetlost. Celu konstrukciju smešta između polova elektromagneta. Uključenjem elektromagneta na izlazu iz Nikolove prizme javlja se svetlost zbog rotacije ravni polarizacije za izvesni ugao. Konstatuje da je ugao rotacije srazmeran dužini ploče i jačini magnetnog polja, a da smer rotacije zavisi od smera polja. Kasnije ovaj efekat uočava kod mnogih čvrstih i nekih tečnih tela, ali ne i kod gasova. Zaključuje da se pojava ne javlja zbog dejstva magnetne sile na svetlost, već zbog posredstva supstance.

Iste godine publikuje rad u kome obznanjuje svoje otkriće dijamagnetizma. Pretpostavlja se da je do njega došlo slučajno. Za razliku od radova s početka karijere gde je detaljno opisivao sve korake koji su ga doveli do otkrića, ovi kasniji radovi kreću in medias res, te je logično smatrati da je do otkrića dijamagnetizma došlo temeljnim radom na prethodnom istraživanju. Naime, verovatno je korišćenjem sve jačeg magnetnog polja došlo do rotacije uzorka od teškog optičkog stakla tako da zauzme položaj normalan na magnetne linije sile. Faradej zaključuje da se javlja neka vrsta magnetnog odbijanja kojim se uzorak pomera iz jačeg u slabije magnetno polje. Ovu pojavu naziva dijamagnetizam, iako je ovaj pojam tada označavao nešto drugo. Faradej dalje sistematski ispituje razne supstance i nalazi da se praktično sve one koje nisu magnetne ponašaju na ovaj način. Pet godina kasnije (1850) on nalazi da u dijamagneticima ne postoji neka stalna polarnost kao što je to slučaj kod magneta.

Faradej eksperimentiše u velikoj meri sa bizmutom kao najjačim dijamagnetikom. Od rastopljenog bizmута izliva nekoliko cilindara, veša ih u magnetno polje i prati položaje koje zauzimaju ovi uzorci. Na njegovo čuđenje komadi bizmутa se ponašaju nepredvidljivo. Stoga zaključuje da se radi o interakciji "magnetne sile i sile čestica kristala" i uvodi magnetokristalnu silu. Nju karakteriše svojstvo da teži da se postavi paralelno ili tangencijalno na linije sile.

1850. pokušava da izvede eksperiment koji će potvrditi njegovo snažno ubedjenje da, pošto sve sile prirode zavise jedna od druge, mora postojati veza između gravitacije i elektriciteta. U tu svrhu solenoid vezan sa galvanometrom pušta da pada sa visine od oko deset metara. Očekivao je da će se u kalemu indukovati struja. Zatim solenoid vezuje za vibrator čime omogućuje veće brzine, ali se indukcija ipak nije javila. Izveštaj o svojim idejama završava rečima "Ovo su bili moji pokušaji zasada. Rezultati su negativni, ali nisu uzdrmali moje jako uverenje da postoji veza između gravitacije i elektriciteta." Veliki problem mu je predstavljalo kako povezati činjenicu da su gravitacione sile samo privlačne i da za gravitaciono polje važi

teorija dejstva na daljinu po kojoj se dejstvo između tela prostire beskonačno brzo, sa time da električne sile mogu biti i privlačne i odbojne, i da za elektromagnetne pojave važi dejstvo na blizinu i konačna brzina prostiranja dejstva. Ali on se i nije previše udubljivao u ovaj problem.

1851. Faradej Kraljevskom društvu šalje saopštenje pod nazivom *O fizičkom karakteru magnetnih linija sile*. Liniju sile definiše kao liniju na koju je tangentna vrlo mala magnetna igla, odnosno kao liniju duž koje se ne indukuje struja u neku poprečnu žicu, odnosno kao liniju koja se poklapa sa magnetokristalnom osom kristala bizmuta. Po njemu "linije sile jednostavno predstavljaju raspored sila". No, za razliku od gravitacionih linija sile koje su apstraktne tj bez ikakvog fizičkog sadržaja, magnetne silnice "imaju jasno izraženu fizičku egzistenciju".

Poslednji članak pod nazivom *O nekim tačkama magnetne filozofije* objavljuje februara 1855. u "Filozofskom magazinu". Decembra iste godine Meksvel Filozofskom društvu u Kembridžu saopštava rad *O Faradejevim linijama sile*.

2.3 PRISTUP ISTRAŽIVANJU

Faradejev istraživački rad traje preko četrdeset godina. Sve što je u tom periodu objavio iz oblasti elektromagnetizma sakupljeno je u obimnu knjigu od preko šesto enciklopedijskih strana pod nazivom *Eksperimentalna istraživanja iz elektriciteta*. Ona sadrži oko sto deset eksperimentalnih criteža i šezdesetak njihovih varijacija, te detaljne opise preko hiljadu ogleda. Samo ovaj podatak je dovoljan da ukaže da je Faradej bio čisti eksperimentalac... Kao nekadašnji asistent u laboratoriji sve svoje uređaje je sam osmislio, a veoma često i sam izradio. Konstrukcije uređaja su mu vrlo jednostavne i funkcionalne, a criteži koji ih prikazuju detaljni i vrlo lepi. Faradej svojim uređajima pridaje mnogo pažnje, što je razumljivo, jer su oni jedino sredstvo kojim stiže do saznanja. Uređaje i način njihove upotrebe opširno opisuje. U svom opisu ide toliko daleko da čak navodi i dužinu žica kojom povezuje uređaj s baterijom, kao i koliko je galvanometar udaljen od ostatka kola. Diskutabilno je da li su ovi nepotrebni detalji posledica toga što Faradej ne zna šta ustvari uzrokuje efekte koji se javljaju u ogledu, ili time što hoće da omogući reproducibilnost eksperimenta jer se jedino na taj način može dobiti potvrda da se data pojava javlja i odvija na način na koji je on opisuje.

Eksperimente izvodi precizno i varira ih koliko god mu to mašta dopušta. Ovu osobinu dr Mlađenović naziva horizontalnom ekstenzivnošću, frazom koja savršeno opisuje Faradejev metod rada. Naime, kada registruje neku pojavu Faradej je detaljno ispituje sa svih strana vršeći izvesne promene na postavljenoj aparaturi, posmatrajući je na čvrstim, tečnim i gasovitim

telima. Pri istražnom eksperimentisanju javljaju se i negativni rezultati, ali Faradej i njih opisuje. Ovo svojstvo njegovog načina rada najverovatnije je posledica nepoznavanja matematike, te samim tim nedostatak striktnih, matematičkom formulom opisanih, odnosa među fizičkim veličinama koje karakterišu posmatranu pojavu, Faradej nadoknađuje "multiplikacijom dokaza" (Džon Tindal).

Dakle, Faradejevo znanje samo elementarne matematike je faktor koji je presudno odredio njegov metod rada. U njegovom ogromnom radu iz oblasti elektromagnetizma nema nijedne funkcije, izražene formulom ili nacrtane, nema nijedne jednačine, ni njegove, ni tuđe. On sadrži samo ogromnu količinu tabelarno prikazanih brojeva koji su dobijeni merenjem. Sva matematika se svodi na četiri računske operacije i na proporcije (linearnu i kvadratnu). S današnjeg stanovišta je neshvatljivo kako je uopšte mogao doći do brojnih otkrića sa tako niskim nivoom znanja matematike, kao ni to zašto nije zagazio u izučavanje više matematike kad se već ozbiljno počeo baviti fizikom. Ajnštajn je jednom rekao da Faradejev "um nikad nije zaronio u formule".

Nedostatak znanja matematike Faradej nadomeštava slikom ili nizom crteža koji pokazuju razvoj mehanizma koji proučava. Tako u teoriju elektromagnete indukcije uvodi pojam linije sile kao reprezenta stanja koje se javlja u električnom ili magnetnom polju. Linije sile su učinile da prostor između nanelektrisanih tela i polova magneta dobije svojstvo realnog objekta koji se kreće i deformatiše, a čija se stanja ispoljavaju kao električne, odnosno magnetne pojave. Iako je bio poznat i priznat Faradej je doživljavao teške udarce od sledbenika Ampera i Vebera koji su sa prezirom gledali na njegove "grube materijalne linije sile koje su plod plebejskih fantazija knjigovesca i čuvara laboratorije". Kasnije će Meksvel izboriti pravo na postojanje Faradejeve teorije i to kako je Miliken slikovito opisao "oblačenjem golog plebejskog tela Faradejevih predstava u aristokratsku odeždu matematike".

Faradej u zaključivanju primjenjuje induktivni metod. Brojne činjenice koje registruje u svojim eksperimentima on sintetizuje u jednu zaokruženu teoriju. Tako od niza efekata koje uočava pri promeni struje ili pri kretanju magneta kroz solenoide kreće korak po korak u objašnjavanju pojave da bi je potpuno uopštio i kao takvu primenio i na druge pojave.

Pri izvođenju teorija Faradej se rukovodi nekolikim principima. Princip simetrije ga navodi da započne rad na svojem najvećem otkriću. On polazi od toga da ako se već može pretvoriti elektricitet u magnetizam zašto ne bi bilo moguće i obrnuto. Takođe, pri radu sa indukovanim strujama pravi logičan korak – ako već promena struje u nepokretnom provodniku indukuje struju u drugom provodniku, zašto do toga ne bi došlo kada bi se provodnik sa stalnom strujom kretao u odnosu na drugi provodnik. Sa principom simetrije tesno je povezan i

princip jedinstva. Pod ovim se podrazumeva princip jedinstva materije, pri čemu on u materiju eksplisitno ubraja supstancu, a implicitno i elektromagnetno polje. Faradej je ubeden da se kretanje materije održava i da se ta kretanja mogu pretvarati jedna u druga, a da se transformacija manifestuje u obliku sila. Dalje, on čvrsto veruje u princip kauzalnosti koji ga dovodi do jedne uopštene formulacije zakona održanja energije. Dakle, svaki uzrok mora imati svoju posledicu. Faradej kaže "Mnogo je procesa kod kojih oblik sile može pretrpeti takve izmene da se javlja uzajamno pretvaranje jedne sile u drugu. Tako možemo pretvoriti hemijsku silu u električnu struju, ili struju u hemijsku silu. Izvanredni Zebekovi i Peltijevi ogledi pokazuju uzajamnu transformabilnost toplove i elektriciteta, a iz drugih Erstedovih i mojih eksperimenata proizilazi uzajamna transformabilnost elektriciteta i magnetizma. I nema takvog slučaja, ne isključivši šta više ni električne rive, gde bi sila bila stvorena ili dobijena bez odgovarajućeg utroška nečeg što je napaja." (Napomenimo ponovo da je tada pojam sile označavao i silu i energiju). Takođe, koristi se i principom analogije. Analogija je bila inicijalna kapisla koja je podstakla istraživanje indukcije (pogledati poglavlje 2.2. str 13). U nauci prve polovine devetnaestog veka još uvek je bilo uobičajeno da se sve fizičke pojave svode na mehaničke. Zato i Faradej pribegava hipotezi etra svodeći elektrodinamiku na mehaniku etra. On svoje teorije prikazuje mehaničkim modelima. Modele razvija na nivou molekula kao osnovne jedinice tela. Najvažnijom osobinom molekula kao takvog smatra njegovu polarizabilnost koja se izaziva indukcijom. Stoga je prnuđen da prihvati koncept dejstva na blizinu. On, naime, električne procese shvata kao prenos električne sile (energije) između niza polarizovanih molekula. Od poretku molekula zavisi da li će linije sile biti prave ili krive. Ovakav pristup funkcionišao je dobro za dielektrike, ali je problem nastao kod objašnjavanja provodenja kroz metalne provodnike i pražnjenja kroz gasove. Poslednja dva procesa on onda interpretira nekakvim mehanizmima koji dovode do smanjenja i gubljenja polarnosti. Kasnije, ispitujući vezu između električne provodnosti i prirode materije, prvi put pominje atom kao osnovnu česticu. Atome shvata kao centre sila preko kojih se ostvaruje prenos energije i kao entitete koji popunjavaju prostor kontinualno. O tome je Dž.Dž.Tomson rekao "Faradej je bio duboko ubeden u aksiomu, ili ako hoćete dogmu, da materija ne može delovati tamo gde je nema."

Faradejev metod rada bitno opredeljuje i njegovo predznanje o problemu kojim se bavi. Kako prethodno znanje uslovljava tip hipoteze koja će se postaviti, a samim tim i smer istraživanja, nedovoljno poznavanje tadih radova o predmetu kojim se bavi za Faradeja je nekad prednost, ali često i hendičep. Stoga mu se dešava da otkrije već otkriveno ili da zapadne u poteškoće pri interpretaciji. Tako ne zna za Henrijevo (Joseph Henry, 1799-1878) otkriće samoindukcije dve godine ranije, ne zna za otkriće dijamagnetizma koje su pre njega izvršili Bekerel, Zebek, Le Belif i Segi, ne zna da je pet godina pre njega Grin (Georg Green, 1793-1841)

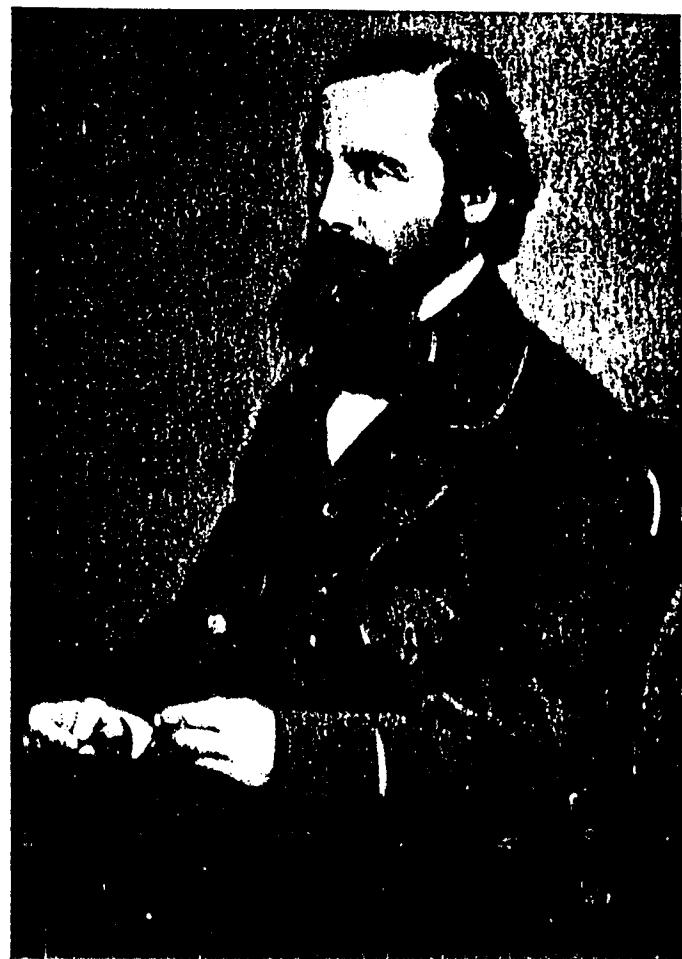
koncipirao uredaj koji će biti poznat pod nazivom Faradejev kavez. Nepoznavanje teorijskih radova ga dovodi do pogrešne argumentacije u interpretiranju neke pojave. Tako da bi odbranio svoj stav o dejstvu na blizinu on polazi od različitog dejstva gravitacione i električne sile. Međutim, da je znao za radove Laplasa i Poasona koji matematički tertiraju gravitaciono i električno polje na isti način ne bi napravio ovu grešku, jer ako su gravitaciona i električna sila istog oblika ne može se očekivati da deluju na različite načine. Ova Faradejeva osobina je posledica njegovog neznanja stranih jezika. On je bio upoznat samo sa radovima na maternjem jeziku, sa onima na italijanskom i francuskom sporadično, ali mu uopšte nisu bila poznata dostignuća objavljena na nemačkom.

Koliko se ignorantski odnosio prema tuđem radu svoj je uzdizao na pijedastal. Smatrao je da je bitno biti prvi, a da ostali nisu važni. Koliko je pitanje prioriteta njemu bilo važno može se argumentovati time što je na svakoj strani svojih saopštenja upisivao datum kada je ono bilo pročitano u Kraljevskom društvu. Takođe, iako je bio upoznat sa Aragoovim eksperimentom kojim je otkrivena indukcija, tek uzgred ga pominje jer nije stigao do kraja puta tj nije objasnio ono što je otkrio. A u prilog ovom stavu ide i priča o sukobu sa Volastonom i Dejvijem. Zbog takvih svojih postupaka od ulaska u naučni svet prati ga stigma.

Ukazala bili još na nešto što je Faradeja formiralo kao čoveka i naučnika. Bila je to njegova pripadnost ekskluzivnoj hrišćanskoj sekci sledbenika Roberta Sandemana. Prema Faradejevom biografu Krauteru (Crowther) princip neširenja sekte je značajno uticao na to da celog stvaralačkog veka radi sam, samo uz pomoć majstora i tehničara, bez ijednog saradnika i učenika. Takav odnos su samo pojačali skandali sa početka karijere.

Uprkos svim nedostacima Faradej se smatra najvećim eksperimentalnim fizičarem devetnaestog veka. Njegovi radovi su utrli put izgradnji teorije elektromagnetizma. Meksvel koji je tu teoriju zaokružio bio je Faradejev najistrajniji branilac, koji je ono što su drugi smatrali nedostatkom smatrao potencijalnom prednošću. On kaže: "Moguće da je za nauku dobra okolnost što Faradej nije bio upućen u matematiku, iako je bio savršeno upoznat s pojmovima prostora, vremena i sile. Stoga se nije udubljavao u interesantno, ali čisto matematičko istraživanje. ... Zahvaljujući tome imao je dovoljno vremena za rad koji je odgovarao njegovom mentalnom ustrojstvu, kojim je uskladio svoje ideje sa otkrićima i izgradio ako ne tehnički, ono prirodni jezik za izražavanje svojih rezultata."

3. James Clerk Maxwell
(1831-1879)



J C. L. Maxwell

3.1. ELEKTROMAGNETIZAM IZMEĐU FARADEJA I MEKSVELA

Lenz (Heinrich Lenz, Эмилий Христианович Ленц, 1804–1865) tri godine posle Faradejevog otkrića indukcije formuliše svoje pravilo po kome se u provodniku koji se kreće u blizini drugog provodnika kroz koji protiče struja ili magneta indukuje struja takvog smera da se njeno magnetno polje suprotstavlja pojavi koja je izazvala indukciju. Godinu dana kasnije objavio je kvantitativne rezultate merenja indukcije. Uočio je da indukovana elektromotorna sila zavisi samo od broja namotaja kalemata, a ne i od prečnika namotaja, debljine žice i vrste materijala. Osim toga, registrovao je da i za indukovane struje važi Omov zakon.

Fehner (Gustav Theodor Fehner, 1801–1887) 1845. objavljuje svoju hipotezu dvokorpuskularne struje. Naime, struju je shvatio kao dvosmernu tj. kao pojavu proticanja pozitivnih i negativnih čestica u suprotnim smerovima. Saglasno tome interakcija dva strujna provodnika manifestuje se kao privlačenje kada se nanelektrisanja iste vrste kreću u istom smeru.

Kirhof (Gustav Kirhof, 1824–1887) iste godine struju reprezentuje strujnim linijama na koje su normalne površi napona. Za ove površi pokazuje da su definisane dvodimenzionalnom Laplasovom jednačinom. Kirhof formuliše dva zakona koja su od fundamentalnog značaja za rešavanje strujnih kontura. Prvi, koji je posledica zakona održanja količine nanelektrisanja, kaže da je suma struja u nekom čvoru jednaka nuli ($\sum I_i = 0$). I drugi po kome je suma napona u zatvorenom kolu jednaka sumi proizvoda struja i otpora ($\sum U_i = \sum I_i R_i$).

Džaul (James Prescott Joule, 1818–1889) 1841. publikuje rad u kome je pokazao rezultate svojih merenja toplote koja se oslobodi na nekom provodniku i na osnovu njih formulisan zakon koji će kasnije nositi njegovo ime. On kaže "toplota oslobođena u nekom metalnom provodniku za dato vreme srazmerna je otporu provodnika pomnoženog sa kvadratom električnog intenziteta" ($Q = I^2 R t$).

Veber (Wilhelm Weber, 1804–1891) u radu čiji prvi deo objavljuje 1846., a drugi 1848. daje najopštiju jednačinu elektromagnetizma formulisanu pre Meksvela. Ona predstavlja sintezu Kulonovog i Amperovog izraza. Pri formiranju jednačine Veber polazi od Fehnerovog modela korpuskularne struje i za silu između dve nanelektrisane čestice, odnosno dva elementa struje dobija izraz:

$$F = \frac{e_1 e_2}{r^2} \cdot \left[1 - \frac{1}{c^2} \cdot \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2r}{c^2} \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} \right] \quad (3.1.1)$$

r – rastojanje između čestica (strujnih elemenata)

c – brzina svetlosti

Nojman (Franz Ernst Neumann, 1789–1895) daje prvu matematičku interpretaciju indukcije 1845 godine. Po njemu pojavu elektromotorne sile u elementu provodnika $d\vec{s}$ izaziva promena struje koja se predstavlja vektorskim potencijalom $\vec{\Lambda}$.

$$\mathcal{E} = \int \frac{\partial \vec{\Lambda}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (3.1.2)$$

Helmholc (Hermann Ludwig Helmholtz, 1821–1894) do izraza za indukovani struju tj indukovani elektromotornu silu dolazi 1847. polazeći od zakona održanja energije.

$$J = -\frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1.3)$$

Φ — magnetni fluks kroz konturu kola

3.2. BIOGRAFIJA SA PREGLEDOM RADOVA VAN OBLASTI ELEKTROMAGNETIZMA

Džems Klark Meksvel je rođen 13.11.1831. u Edinburgu (Edinbourg), Škotska, u zemljoposedničkoj porodici u kojoj je bilo trgovaca, političara, umetnika, sudske poslove. Njegov otac Džon je po struci bio advokat, ali se veoma interesovao za tehničke novine. Ženidbom sa Fransis Kej, preduzimljivom i sposobnom ženom, kod ser Džona se javlja ljubav prema seoskom načinu života i nakon smrti prvorodene kćeri porodica se sa sinom Džemsom preseljava na zapušteno porodično imanje. Džens odrasta na selu gde mu se razvija prirodna radoznalost i veština izrade uređaja-igračaka koju nasleđuje od oca. Uz majku stiče naviku čitanja (čitali su Bibliju, Džona Miltona, Džonatana Svista, Šekspira, škotske balade,...). Pored roditelja obrazovao ga je i privatni učitelj, ali zbog za to vreme uobičajenih metoda kažnjavanja učenje je sporo napredovalo. Otac odlučuje da ga na jesen 1841. upiše na Edinburšku akademiju (Edinbourg academy), školu tipa klasične gimnazije. Susret sa školom za Džemsa je bio neprijatan, što zbog nostalгије za selom, što zbog podsmeha koji je izazivala njegova bizarna

odeća. Stoga se povlači u sebe i više vremena posvećuje čitanju. Vršnjaci su ga smatrali stidljivim i glupim.

Od dvanaeste godine otac ga vodi na predavanja u Edinburškom kraljevskom društvu.

Kada se u petom razredu (1844) počelo sa nastavom geometrije Džems je "konstruisao tetraedar, dodekaedar i dva druga edra čije nazive još ne znam".

U četrnaestoj godini (1845) dobija nagradu kao najbolji učenik iz matematike i engleskih stihova. Iste godine sa ocem u Kraljevskom društvu sluša predavanje o formi etruskih pogrebnih urni, gde se pojavio problem konstrukcije pravilnih ovala. Nakon par nedelja razmišljanja Meksvel rešava problem pomoću dva štapa i kanapa i piše rad pod nazivom *O čitanju ovala i o ovalima sa više fokusa*. Profesor Edinburškog univerziteta Džems Forbs (James David Forbes, 1809–1868) ovaj rad čita u Kraljevskom društvu 16.04.1846. kada je Meksvetu bilo četrnaest i po godina.

1847. upisuje se na Edinburški univerzitet u kome će provesti tri godine. U to vreme zanima ga je magnetizam i polarizacija svetlosti o čemu je više naučio od svog profesora Vilijama Nikola (William Nicol, 1786–1851) tvorca čuvene polarizacione prizme. Tadašnji univerziteti su studentima ostavljali veliku slobodu u organizaciji sopstvenih studija. Meksvel je to iskoristio da bi proučavao matematiku, fiziku, hemiju i filozofiju, kao i da bi se bavio istraživanjima. Pažnju posebno posvećuje teoriji elastičnosti i 1850. u Kraljevskom društvu čita rad *O ravnoteži elastičnih tela*. Dokazao je teoremu važnu za teoriju elastičnosti (kasnije nazvanu Mekselovom teoremom) i izučavao zakone rotacije krutog tela. U taj ozbiljni rad uključio je optički metod analize napona u providnim materijalima, analize pomoću polarizovane svetlosti.

Edinburški univerzitet ga nije više zadovoljavao i u jesen 1850. on prelazi u Kembridž na čuveni Triniti koledž (Trinity college) poznat po veoma kvalitetnom kursu matematike, koji je obuhvatao i "filozofiju prirode", i po nizu čuvenih fizičara poniklih iz njega. Mekselovo znanje je bilo ogromno, ali nesistematisovano na užas njegovog tutora Hopkina koji u Džemušu ipak vrlo brzo raspoznaće izuzetan talenat. Kasnije je Hopkins o Meksvetu rekao "On je najneobičnija osoba koju sam ikad sreo. Bio je organski nesposoban da o fizici misli netačno". Osim matematike Meksvel je izučavao mehaniku, astronomiju, fiziku. Intenzivno je učio i mnogo čitao koristeći bogati bibliotečki fond Kembridža.

Januara 1854. diplomirao je kao drugi u klasi iz vesnog kanadskog matematičara. Njih dvojica su podelila Smitovu nagradu koja se dodeljivala za samostalni rad. Meksvel je obradio Stoksov teoremu kojom se površinski integral prevodi u linijski.

Nakon diplomiranja Meksvel ostaje na Triniti koledžu pripremajući ispit za člana saveta koledža tj za zvanje profesora. Imao je obavezu da predaje (predavao je hidrostatiku i optiku) i da istražuje (bavio se teorijom boja). Rotirao je diskove izdeljene u sektore koji su obojeni različitim bojama. Različite kombinacije boja davale su različite nijanse. Zaključio je da su tri osnovne boje crvena, zelena i plava, i da se njihovom kombinacijom dobijaju sve ostale boje. Takođe, ustvrdio je da normalno oko boje vidi na isti način i da ono zavisi od tri parametra, dok kod daltonista viđenje zavisi samo od dve promenljive. Nešto kasnije svoju teoriju izložio je u Kraljevskom društvu. Kako su istraživanja ovog tipa tada bila u modi, Meksvel će 1860. dobiti Rumfordovu nagradu. Baveći se teorijom boja dolazi na ideju o izradi fotografije u boji. Nju će demonstrirati 17.05.1861. u Kraljevskoj instituciji kao prvi kome je to pošlo za rukom. (Istina u savremenom smislu reči to i nije bila kolor fotografija već samo projekcija tri dijapozitiva osnovnih boja na ekran).

Neposredno posle diplomiranja Meksvel počinje proučavanje literature o elektromagnetizmu (prevashodno Ampera i Faradeja) i decembra 1855. saopštava prvi deo svog rada *O Faradejevim linijama sile*.

Kako postdiplomske studije nije mogao završiti na Kembridžu, jer kao Škot nije pripadao Anglikanskoj crkvi, 1856. prihvata profesuru na Aberdinskom univerzitetu u Marišal koledžu (Marischal college), mesto koje mu je našao njegov prvi profesor Džems Forbs. Škotski univerziteti su, za razliku od engleskih, uveli posebne katedre za fiziku i Meksvel dobija zadatku da kurs organizuje prema vlastitim idejama. Tada, a ni kasnije Meksvel nije važio za dobrog predavača. Mada su mu reči bile jasne i precizne zbog ekscentričnosti kojom ih je izlagao (s aluzijama, ironijom, igrom reči) i zbog složenih problema koje je ubacivao u nastavu suština lekcije se gubila. Pored toga bio je zahtevan ispitivač.

1858. Meksvel se ženi Ketrin Meri Djuar (Catherine Mary Dewar) kćerkom direktora Marišal koledža.

Po Meksvelovom dolasku u Aberdin Kembridžski univerzitet je objavio konkurs na temu *Objasnite kako neki materijalni sistem, koji izgleda kao Saturnovi prstenovi, može da se održava u permanentnom kretanju pokoravajući se zakonima gravitacije*. Kako se još kao dete veoma interesovao za astronomiju, Meksvel se prihvata rada na ovu temu koji će mu oduzeti gotovo dve godine (1857–1859). Pošto je Laplas dokazao da prstenovi ne mogu biti od čvrstog materijala, Meksvel je dokazao da ne mogu biti ni tečni jer bi se rasuli u kapi. Zaključio je da ova struktura može biti stabilna samo ako se sastoji od jata međusobno nevezanih meteorita. Za svoj esej od dobija Adamsovnu nagradu i biva proglašen vodećim matematičkim fizičarem.

Rad na teoriji Saturnovih prstenova pobudio je kod Meksvela interes za kinetičku teoriju gasova. Na sastanku Britanskog društva u Aberdinu 21.09.1859. čita rad *Ilustracije dinamičke teorije gasova*. Polazna pretpostavka u izgradnji teorije bila mu je da se molekuli gasa zbog sudara kreću različitim brzinama i da te brzine rastu sa temperaturom. Naime, do tada se smatralo da se molekuli kreću ravnomerno pravolinijski i jednakim brzinama. Primenom teorije verovatnoće Meksvel nalazi distribuciju brzina molekula gasa. Ona je danas poznata kao Meksvelova raspodela. Nakon što je opisao osobine krive raspodele on nalazi izraz za srednji slobodni put, izvodi Bojlov zakon i primenuje svoju teoriju na tri fizička procesa: viskoznost, difuziju i prenos toplotne. Izrazi za koeficijent viskoznosti, srednji slobodni put, otpor toplotnom provođenju dobili su potvrdu svoje tačnosti vrlo dobrim slaganjem sa eksperimentalnim rezultatima. Kako su rezultati njegove teorije i za samog Meksvela bili iznenađujuće dobri, a i zbumnjivalo je svojstvo proisteklo iz teorije da viskoznost ne zavisi od gustine gase, on odlučuje da je eksperimentalno proveri. Sam konstruiše uređaj čiji princip rada je vrlo jednostavan: Na jednoj osovini nalaze se pokretan i nepokretan disk. Prvi disk se primora da osciluje, a zatim se prati amortizovanje tih oscilacija. Ono zavisi od dva nezavisna doprinosova - torzije žice i viskoznosti gase. Kako se torzioni doprinos zna zahvaljujući Kulonovom radu mogla se izračunati viskoznost gase. Ogledi su dali dva rezultata: Koeficijent viskoznosti ne menja vrednost pri promeni pritiska na konstantnoj temperaturi, i viskoznost raste približno сразмерno apsolutnoj temperaturi. Ovaj eksperiment smatra se najlepšim koji je Meksvel ikad izveo.

1860. zbog integracije dva koledža Aberdinskog univerziteta Meksvel ostaje bez katedre. Ali kako je za četiri aberdinske godine stekao naučnu reputaciju, a relativno mladi Londonski univerzitet je imao velike ambicije, Kings koledž (King's college) angažuje Meksvela za profesora "filozofije prirode" i astronomije. Naseljava se u otmenom delu Londona i na mansardi oprema laboratoriju u kojoj će uz asistenciju supruge vršiti eksperimente iz optike i viskoznosti. U to vreme Meksvel će upoznati starog i bolesnog Faradeja koji će s pažnjom pratiti dalji rad mладог kolege.

Londonski period je za Meksvela bio vrlo plodotvoran i naporan. Predavanja na koledžu odvijala su se devet meseci godišnje, a držao je i večernja predavanja za radnike i zanatlije. Tokom perioda 1861–1864 Meksvel zaokružuje svoju elektromagnetsku teoriju radovima *O fizičkim linijama sile* (u pet nastavaka) i *Dinamička teorija elektromagnetskog polja*. Paralelno s istraživanjima piše i udžbenike o elektromagnetizmu i o toploti. A povrh svega učestvuje u radu "Komiteta za etalone" koji se bavio eksperimentalnim određivanjem standarda električnih jedinica. (Iz ovog Komiteta će kasnije izrasti poznata "Nacionalna fizička laboratorija").

Septembra 1865. Meksvel donosi odluku da napusti katedru i da se vrati na porodično imanje Glenler. Pretpostavke o motivima ovog čina su različite: od toga da je zbog napornog rada oboleo i da mu je supruga poboljevala u Londonu, da je bio nezadovoljan radom sa studentima, da nije imao dovoljno vremena za teorijski rad, do toga da je čeznuo za zavičajem.

U Glenleru veliki deo svoga vremena Meksvel posvećuje naučnom radu i pisanju dveju knjiga.

1866. vraća se izučavanju kinetičke teorije gasa, ali kreće od strožih fizičkih pretpostavki i matematički temeljnije obrađuje temu. Meksvel pribegava mehaničkom modelu gasa smatrujući molekule najpre elastičnim sferama određenog radijusa, a onda tačkastim centrima koji se međusobno odbijaju silom obrnuto сразмерnom petom stepenu rastojanja. (Eksponent pet je odabrao jer su neki eksperimenti o viskoznosti upućivali na to, a osim toga iz integrala za broj molekula dve vrste nestaje relativna brzina molekula te neposredna integracija postaje moguća). Krećući od samih osnova Meksvel stiže do diferencijalnih jednačina transfera koje omogućavaju izračunavanje brzine transporta mase, impulsa, energije i drugih fizičkih veličina.

1870. završava pisanje prve knjige - udžbenika *Teorija topote*. U njoj se nalazi jedan misaoni eksperiment čiji je značaj za istoriju fizike velik. Naime, Meksvel uvodi mikrobiće koje bi kroz neki mikrootvor propušтало molekule po vlastitom izboru čime bi narušilo ravnotežu s dve strane mikrootvora tj stvorilo stanje koje zabranjuje drugi princip termodinamike. Iako je sa stanovišta kvantne mehanike to biće ustvari makrobiće jer merenjem ne utiče na stanje molekula, značaj misaonog eksperimenta je što ukazuje da je fizika koju čovek formuliše limitirana ljudskim mogućnostima. Pored toga posredno ukazuje da samo živi organizmi mogu uzrokovati povećanje entropije.

Drugi udžbenik pod nazivom *Rasprava o elektricitetu i magnetizmu* izaći će iz štampe 1873. To je obimno delo od oko 1000 strana u kome Meksvel daje pregled svojih i tuđih radova iz ove oblasti. Podeljena je u dva toma: prvi koji obrađuje elektrostatiku i električnu struju, i drugi koji se bavi magnetizmom i elektromagnetizmom. *Rasprava* je prva monografija koja zaokružuje jednu oblast fizike nakon mehanike. Prevodena je na brojne jezike i smatrana uzorom kako treba pisati knjige.

1867. po savetu lekara odmara se na Azurnoj obali i italijanskoj Rivijeri. U Firenci sreće svog druga iz školskih dana Luisa Kempbela koji će 1882. objaviti prvu Meksvelovu biografiju (*Lewis Campbell & William Garnet - The Life of James Clark Maxwell*).

1868. Džems Forbs pokušava da ubedi Meksvela da prihvati mesto rektora Univerziteta Sv Endru (St Andrew University) iz Edinburga, ali ovaj to odbija.

1871. na Kembridžu se formira katedra za eksperimentalnu fiziku, a samim tim javlja se potreba za uglednim naučnikom koji će rukovoditi njenim radom. Vilijam Tomson-lord Kelvin (William Thomson, 1824–1907) i Herman Helmholc (Hermann Ludwig Helmholtz, 1821–1894) nisu bili zainteresovani i tek Meksvel prihvata katedru. On će laboratoriju prvo bitno nazvanu Devonširska, ali poznatiju po kasnijem imenu Kevendiš laboratorijski, temeljno ustrojiti i valjano opremiti tako da će narednih sedam decenija ona biti nosilac najvećih eksperimentalnih otkrića. Meksvel je eksperimentalni rad smatrao "potrebom vremena" i insistirao na saradnji eksperimentalaca i teoretičara. Svakodnevno je obilazio laboratoriju, raspitivao se o toku ogleda i diskutovao o problemu koji se ispitivao. Mnogo vremena je provodio u radu uprave univerziteta i ukazivao na potrebu specijalizacije i interdisciplinarne komunikacije. Često je izražavao brigu zbog pada broja originalnih istraživača koji će obogatiti fond ljudskih znanja.

1873. objavljena je knjiga *Materija i kretanje* u kojoj je Meksvel pojasnio svoju sliku atoma. Naime, sam pojam atom ("nedeljiv") nije mu se dopadao. Smatrao je da se atom mora sastojati iz mnogo materijalnih čestica. Naglašavao je potrebu da se prouči kretanje materije mikro i makrosveta. Njegovo uverenje u postojanje elementarnog nanelektrisanja ("molekule elektriciteta") bilo je primano sa skepsom, ali su se mnogi setili ovog stava kada je dvadesetak godina kasnije otkriven elektron.

1878. u jednom članku teoriju izniklu iz kinetičke teorije gasova naziva "statističkom mehanikom", terminom koji će se potpuno odomaćiti.

Poslednje godine života posvetio je sakupljanju radova Henrika Kevendiša (Henry Cavendish, 1731–1810) i njihovoj pripremi za izdavanje. Kevendiš je bio vešt eksperimentator koji je imao značajnih otkrića (12 godina pre Kulona otkrio je zakon interakcije električnih naboja, 65 godina pre Faradeja izučio je ponašanje dielektrika u kondenzatoru, pre samog Oma otkrio je Omov zakon), ali ih nikad nije publikovao. Dvadeset paketa njegovih rukopisa nalazilo se u porodičnoj zaostavštini. Njegov potomak vojvoda od Devonšira, koji je finansirao izgradnju Kevendiš laboratorijske, 1874. predaje Meksvelu svojeručni prepis svih radova svog pretka na čijoj će obradi ovaj raditi pet godina. 1890. zbornik Kevendiševih radova biće objavljen pod nazivom *Istraživanja elektriciteta časnog Henri Kevendiša*. (Electrical Researches of the Hon. Henry Cavendish)

05.11.1879. Džems Klark Meksvel umire od raka. Nije doživeo potvrdu svoje teorije, jer su se eksperimentalci suočavali sa nepremostivim teškoćama. Ali njegova teorija biva

prihvaćena od brojnih evropskih fizičara koji je dalje razraduju. Stoga je Meksvel danas nezaobilazna referenca u istoriji fizike.

Važnije bibliografske odrednice:

O stabilnosti kretanja Saturnovih prstenova (On the Stability of the Motion of Saturn's Rings, 1859)

Teorija topote (Theory of Heat, 1870)

Uvodno predavanje o eksperimentalnoj fizici (Introductory Lecture on Experimental Physics, 1871)

Rasprava o elektricitetu i magnetizmu (A Treatise on Electricity and Magnetism, 1872)
u dva toma

Materija i kretanje (Matter and Motion, 1873)

Elementarna rasprava o elektricitetu (An Elementary Treatise on Electricity, 1881)

Naučni radovi Džemsa Klarka Meksvela (The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, 1890) zbornik radova u dva toma.

3.3. PREGLED RADOVA IZ ELEKTROMAGNETIZMA

Meksvelova teorija elektromagnetizma izložena je u njegova tri rada: *O Faradejevim linijama sile* (1855–1856), *O fizičkim linijama sile* (1861–1862) i *Dinamička teorija elektromagnetskog polja* (1864). Oni pokazuju kako se razvijalo Meksvelovo razmišljanje o ovom problemu. Prvi rad, kako mu to samo ime kazuje, zasniva se na Faradejevoj teoriji i predstavlja njenu matematičko uopštavanje. Drugi članak sadrži razradu mehaničkog modela vrtloga i njegovu primenu na elektromagnete pojave, za koga ideju dobija od Kelvina i Helmholca. U trećem radu Meksvel napušta vrtložni model i razvija teoriju elektromagnetskog polja. U njemu definiše 20 veličina koje određuju elektromagnetne pojave za koje daje 20 jednačina. Ova tri članka, koja predstavljaju fundament Meksvelove teorije, ukazuju na koje se naučnike i njihove ideje on nadovezao. Od Faradeja preuzima njegov koncept linija sile i teoriju dejstva na blizinu. Od Kelvina princip analogije tj stvaranje mehaničkih modela. A od Hamiltona (William Rowan Hamilton, 1805–1865) preuzima matematički aparat, prevashodno vektorski račun.

Kao što je već rečeno 1854. Meksvel počinje da proučava Faradejeva *Ekperimentalna istraživanja iz elektriciteta*. Svesno pravi izbor da prvo iščita ove čisto eksperimentalne rade, ne želeći da se bavi matematikom povezanim sa elektromagnetskim pojavnim i procesima. U tadašnjem naučnom svetu postojalo je predubedjenje da između Faradejeve teorije i matematičke interpretacije elektromagnetskih pojava stoji prava provalija. Ali Meksvel zaključuje da je Faradejev jezik matematički iako ne koristi matematičke simbole i formule. Tvrdi se da je Meksvelov način razmišljanja bio grafički tj da je težio stvaranju slika o svemu, pa mu je Faradejev geometrijski model koji operiše električnim i magnetnim linijama sile bio vrlo blizak. Stoga Meksvel sebi za zadatok postavlja "pojednostavljanje rezultata prethodnih istraživanja u formu čisto matematičkih formula ili fizičkih hipoteza". Ali sam ne kreće tim putem, već primenjuje analogiju. U prvom delu rada *O Faradejevim linijama sile* Meksvel razmatra analogiju između hidrodinamike i elektromagnetizma. Razlog tome je kaže "da predstavi umu matematičke ideje u otelovljenom obliku kao sistemi linija i površina, a ne kao obične simbole". Ideju za to dobija uočivši analogiju između zaokruženog hidrodinamičkog modela, koji su izgradili Kelvin i Helmholtz, i Faradejevog modela. Osim toga, od Faradeja prihvata i hipotezu o elektrotoničnom stanju. Drugi deo rada u kome će dati svoju prvu verziju osnovnih zakona elektromagnetizma Meksvel počinje definisanjem osnovnih veličina i pojmove. Pojmu elektrotoničnog stanja pridružuje vektorsku veličinu \vec{A} koju naziva elektrotonički intenzitet (dan danas se ona zove vektorski potencijal), čije komponente A_x, A_y, A_z naziva elektrotoničkim funkcijama. U ovoj prvoj verziji Meksvel daje šest zakona koje formuliše samo rečima ne dajući im matematičku formu.

I zakon: "Ukupni elektrotonički intenzitet oko granice nekog elementa površine meri količinu magnetne indukcije koja prolazi kroz tu površinu ili, drugim rečima, broj linija magnetne sile koje prolaze kroz tu površinu".

Prevedeno na jezik matematike to bi bilo:

$$\left. \begin{aligned} \int_L \vec{A} \cdot d\vec{l} &= \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \\ \int_L \vec{A} \cdot d\vec{l} &= \int_S \text{rot } \vec{A} \cdot d\vec{S} \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{rot } \vec{A} = \vec{B} \quad (3.3.1)$$

(Druga relacija predstavlja Stoksov teoremu)

II zakon: "Magnetni intenzitet u ma kojoj tački povezan je sa količinom magnetne indukcije jednačinama nazvanim jednačine provodljivosti"

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.3.2)$$

III zakon: "Ceo magnetni intenzitet duž granice neke površine meri količinu električne struje koja prolazi kroz tu površinu".

$$\left. \begin{aligned} \int_L \vec{H} \cdot d\vec{l} &= \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \\ \int_L \vec{H} \cdot d\vec{l} &= \int_S \text{rot } \vec{H} \cdot d\vec{S} \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{rot } \vec{H} = \vec{J} \quad (3.3.3)$$

Kada se jednačina (3.3.3) dopuni članom za struju pomeraja biće to jednačina danas poznata kao četvrta Meksvelova jednačina.

IV zakon: "Količina i intenzitet električne struje vezani su sistemom jednačina provodljivosti".

Kako pod količinom struje podrazumeva jačinu struje, a pod intenzitetom struje napon, ovo je ustvari Omov zakon.

V zakon: "Ukupni elektromagnetski potencijal zatvorene struje meri se proizvodom količine struje i celog elektrotoničkog intenziteta određenog u istom smeru duž kola".

Ukupni elektromagnetski potencijal predstavlja ukupnu energiju strujnog kola, pa je:

$$W = J \cdot \int_L \vec{A} \cdot d\vec{l} = J \cdot \int_S \text{rot } \vec{A} \cdot d\vec{S} = J \cdot \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (3.3.4)$$

VI zakon: "Elektromotorna sila koja deluje na neki element provodnika meri se trenutnom brzinom promene elektrotoničkog intenziteta na tom elementu, bilo po veličini ili po pravcu".

$$\vec{E} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (3.3.5)$$

\vec{E} – jačina električnog polja

"Elektromotorna sila u zatvorenom provodniku meri se promenom celog elektrotoničkog intenziteta duž celog kola u jedinici vremena".

$$\mathcal{E} = \int \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot d\vec{l} \quad (3.3.6)$$

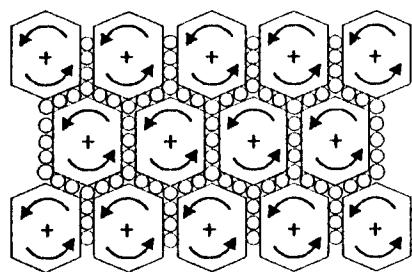
\mathcal{E} – elektromotorna sila

Ovo je ustvari zakon koji matematički opisuje elektromagnetu indukciju, i identičan je izrazu za elektromotornu силу коју је добио Нојман.

(Napomena: Odgovarajući izrazi rezultат су моје транскрипције писаног језика на језик математике)

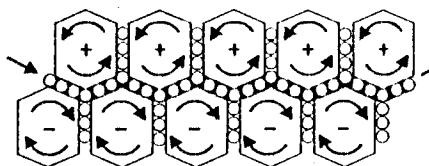
Dakle, у раду *O Faradejevim linijama sile* појављује се само једна од једначина које данас називамо Мекслевовим и то непotpuna. Концепт електротоничког стања и даље остaje прiličно неодређен, па га и сам Мекслев напушта. А механички модел не слуžи објашњењу електромагнетних појава, већ их само илуструје. Због свега тога не чуди што Мекслев о свом раду каže: "Не мислим да у овоме има и трунке праве физичке теорије".

Tоком 1861. и 1862. у часопису "Philosophical Magazine" у пет nastavaka излази Мекслевов рад *O fizičkim linijama sile*. Он садржи један од најсложенијих механичких модела за немеханичке процесе. Мекслевово настојање да изгради што прецизнији механички модел логична је последица времена у коме је живео и радио. Наиме, по правилу физичари тога периода стремили су да све појаве сведу на механичке, јер је механика била једина свестрано разрадена и чврсто fundirana наука. У овом раду Мекслев развија метод вртлога. Он настаје као последица његовог верovanja да линије сile представљају неко реално физичко стање и његове чврсте убедености у исправност теорије дејства на близину. Стога вртлоzi представљају објекте помоћу којих показује шта се дешава у простору између тела која интерагују.



Vrтloge reprezentuju као цеви испunjene rotirajućом материјом или етром чији су пресеци шестоугаонici. Осе цеви су паралелне магнетним линијама сile које представљају правце минималног притиска. Неједнакост притиска у простору сматра последицом постојања вртлога. Густина вртлога је "сразмерна капацитету супстанце за магнетну индукцију" и узима да је тај капацитет за ваздух jednak јединици. Дејство вртлога не зависи од њихових димензија, већ од њихове густине и

periferne brzine. Vrtlozi su međusobno odvojeni jednim slojem okruglih čestica koje imaju ulogu elektriciteta i koje se između vrtloga kotrljaju bez klizanja. One zbog toga izazivaju rotaciju u suprotnim smerovima dva susedna vrtloga s kojima su u kontaktu. Čestice se slobodno kotrljaju između vrtloga menjajući svoj položaj, ali pri tome ostaju unutar molekula supstance ne gubeći svoju energiju. Dakle, čestice su mnogo manje od vrtloga, a ovi mnogo manji od molekula.



Pri usmerenom kretanju čestica one prelaze iz jednog molekula u drugi savlađujući otpor, što se manifestuje njihovim gubljenjem energije i stvaranjem toplote. Usmereno kretanje čestica predstavlja električnu struju, tangencijalna sila kojom materija u ćelijama deluje na čestice predstavlja elektromagnetnu силу (po savremenoj terminologiji jačinu električnog polja), a pritisak

koji čestice vrše jedna na drugu odgovara naponu. Dakle, električna struja izaziva rotaciju vrtloga u smeru struje. Čestice koje dotiču spoljni deo vrtloga kretajuće se u smeru suprotnom od smera struje, pa se indukuje struja smera suprotnog od primarne struje. Kada ne bi bilo otpora kretanju ovih čestica primarna i indukovana struja bile bi jednakog intenziteta, te bi indukovana struja sprečila delovanje primarne. No, ako postoji otpor kretanju čestica koje formiraju indukovani strujni deoni, oni deluju na udaljenje vrtloga izazivajući njihovu rotaciju. Kada se pokrenu svi vrtlozi brzina njihove rotacije je takva da se čestice koje su u kontaktu sa njima ne kreću usmereno, već se slobodno kotrljaju između vrtloga.

Pojavu indukovane struje u provodniku, koja nastaje kada se u njegovoj blizini kreće magnet ili drugi provodnik kroz koji protiče struja, objasnio je promenom brzine rotiranja vrtloga u njemu.

Teoriju vrtloga primenjuje i na objašnjenje elektromagnetskih pojava u dielektriku. Kod dielektrika spoljašnje električno polje deluje na čestice između vrtloga tako što ih pomera na neko konačno rastojanje od ravnotežnog položaja izazivajući na taj način deformaciju ćelija tj polarizaciju dielektrika. Nakon prestanka dejstva električnog polja čestice se vraćaju u ravnotežni položaj, kao što se elastično telo nakon prestanka spoljašnjeg pritiska vraća u polazni oblik. Meksvil onda uvodi struju pomeranja kao struju koja se javlja pri udaljavanju, odnosno približavanju čestica ravnotežnom položaju. Nalazi da veličina pomeranja čestica nosilaca elektriciteta zavisi od jačine primjenjenog električnog polja i od prirode supstance, te daje relaciju za jačinu na taj način stvorenog polja:

$$\vec{E} = -4\pi \cdot c_1^2 \cdot \vec{D} \quad (3.3.7)$$

gde je c_1 koeficijent koji zavisi od prirode dielektrika, a \vec{D} električni pomeraj (displacement).

Struju pomeraja definiše kao vremenski izvod pomeraja \vec{D} :

$$\vec{J}_d = \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (3.3.8)$$

Zatim struju pomeraja \vec{J}_d uvrštava u izraz za struju iz jednačine (3.3.3) tj ukupnu struju predstavlja kao sumu struje provodljivosti \vec{J}_p i struje pomeraja \vec{J}_d dobijajući konačan oblik jednačine koju nazivamo četvrtom Meksvelovom jednačinom:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_p + \vec{J}_d \quad (3.3.9)$$

Zanimljivo je da Meksvel u ovom, a ni kasnijim radovima ne pokušava da detaljnije objasni koncept električnog pomeranja. Mnogi mu to zameraju i daju primedbe na neadekvatan izbor termina za tu pojavu. Naime, neki naučnici (npr Dž.Dž.Tomson) smatraju da bi više odgovarao pojam polarizacija. Međutim, polarizacija se ne može prihvati za vakuum jer on ne sadrži čestice koje bi se polarizovale. Ali kako Meksvel smatra da je vakuum ispunjen "etarskom supstancom", to što svojstvo polarizabilnosti primenjuje i na njega ne predstavlja protivrečnost.

Primenom teorije vrtloga objašnjava i obrtanje ravni polarizacije svetlosti u magnetnom polju i izračunava ugao rotacije ravni kao funkciju karakteristika materijalne sredine i magnetnog polja. Da bi matematičkim putem dobio potrebnii rezultat Meksvel operiše "imaginarnom magnetnom materijom".

Na kraju ovog rad javlja se nagoveštaj onoga što će kasnije biti elektromagnetna teorija svetlosti. Naime, uočivši da se vrednost brzine transverzalnih talasa u elektromagnetsnom polju koju su izračunali Kolrauš (Kohlrausch) i Veber podudara sa vrednošću brzine svetlosti iz Fizoovih (Fizeau) optičkih eksperimenata Meksvel zaključuje da se "svetlost sastoji iz trasverzalnih oscilacija iste sredine koja je uzrok električnih i magnetnih pojava".

1864. Meksvel objavljuje članak *Dinamička teorija elektromagnetsnog polja* koji predstavlja vrhunac njegovog rada na teoriji elektromagnetizma. U njemu napušta mehaničke modele i uvodi koncept polja kao prostora oko nanelektrisanih ili namagnetisanih tela u kome se odvija kretanje materije. Smatrao je da materija prožima celokupni prostor, te vakuum kao potpuno prazan prostor za njega ne postoji. Kada hoće da označi da prostor ne sadrži običnu materiju koristi termin "tzv vakuum" i objašnjava da je to prostor ispunjen "etarskom supstancom" koja je mnogo finija od "velike materije" kako je on naziva. Dejstvo između obične

materije, smatra on, ostvaruje se posredstvom etra. A kako su kretanja delova etra međusobno zavisna dejstvo se ne može prostirati beskonačnom brzinom. Ovim on daje dodatnu argumentaciju zašto smatra da se mora prihvati teorija dejstva na blizinu.

Pošto se materija između tela tј u polju kreće u njemu postoje dve vrste energije: "aktuelna" (kinetička) energija koja je rezultat kretanja čestica materije, i potencijalna "koja se sastoji od rada koji vrši sredina oporavljujući se od pomeranja nastalih usled njene elastičnosti". Stoga se pri talasnom kretanju materije u polju energija naizmenično transformiše iz jednog oblika u drugi.

Teorijom polja objašnjava zatim elektrolizu i polarizaciju, i to na način koji se do danas održao, kao pojavu disocijacije na pozitivne i negativne jone koji se onda kreću ka odgovarajućoj elektrodi generišući električnu struju (elektroliza) i pojavu pomeranja centara pozitivnog i negativnog nakelektrisanja unutar molekula kao rezultat dejstva električnog polja (polarizacija).

Dakle, prvi deo rada sadrži sistematski izloženu teoriju elektromagnetskog polja. Na njegovom kraju Meksvel navodi svoj put istraživanja korak po korak, koji će kasnije izraziti jednačinama. Osnovni proces od koga polazi je elektromagnetna indukcija. Iz zakona indukcije izvodi mehanička dejstva među strujama i uvodi veličinu "elektromagnetna količina kretanja struje". Ova veličina ustvari predstavlja fluks magnetnog polja. Kvantitativno je definiše kao broj linija sile koje prolaze kroz zatvorenu konturu u polju. Pažnju poklanja i koeficijentima samoindukcije L i međusobne indukcije M .

Zanimljivo je da se u izvođenju jednačina elektromagnetskog polja javljaju jednačine za struju i elektromotornu silu koje su sinusnog oblika u kojima figuriše fazni pomeraj. Osim toga uveo je i impedansu kola ρ . Da li je to anticipacija naizmenične struje ili samo zgodna matematička vežba, teško je reći. Navešću par originalnih Meksvelovih izraza:

$$X = \frac{E}{\rho} \sin(pt - \alpha) \quad (3.3.10)$$

$$\rho^2 = R^2 + L^2 \cdot p^2 \quad (3.3.11)$$

$$\tan \alpha = \frac{L \cdot p}{R} \quad (3.3.12)$$

Drugi, glavni, ali relativno kratki deo ovog rada sadrži dvadeset jednačina kojim Meksvel definiše šest vektorskih (\vec{E} , \vec{D} , \vec{H} , \vec{B} , \vec{J} , $\vec{\Lambda}$) i dve skalarne (V , ρ) veličine. Ovoliki broj

jednačina se javlja pošto Meksvel ne koristi vektorsku notaciju, već sve vektorske veličine izražava pomoću njihovih komponenti. Kasnije će u *Raspravi* ove jednačine dati u vektorskem obliku. Radi preglednijeg zapisa i lakšeg poređenja sa njegovim prethodnim i kasnijim jednačinama ja će ih dati u vektorskem zapisu.

Prva grupa jednačina izražava odnos između gustina struje provođenja i ukupne struje, i električnog pomeraja (električne indukcije). Ona ne predstavlja ništa novo, do nje je došao još u prethodnom radu.

$$\vec{J}_t = \vec{J}_p + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.3.13)$$

Druga grupa jednačina predstavlja jednačine magnetnog polja. Ona daje vezu između "magnetskih linija sile i induktivnih koeficijenata kola", odnosno vezu između jačine magnetnog polja (ili magnetske indukcije) i vektorskog potencijala.

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (3.3.14)$$

Tokom izvođenja ove, konačno vrlo jednostavne jednačine, koja će se koristiti i kao definicija vektorskog potencijala, dao je vezu između magnetske indukcije i jačine magnetnog polja:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.3.15)$$

μ – magnetska propustljivost, magnetska permeabilnost

pa je drugi oblik jednačine (3.3.14) sledeći:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A} \quad (3.3.16)$$

Treću grupu jednačina Meksvel naziva jednačinama struje. Ona prikazuje vezu između gustine ukupne struje i magnetnog polja koje se javlja oko nje.

$$\text{rot } \vec{H} = 4\pi \cdot \vec{J}_t \quad (3.3.17)$$

Faktor 4π koji se javlja u originalnim jednačinama je posledica elektrostatickog CGS sistema jedinica zasnovanog na mehaničkom dejstvu među nanelektrisanim telima u kome su jednačine izvedene. On nestaje kada se primeni elektromagnetni sistem jedinica, zasnovan na mehaničkom dejstvu među strujama.

Cetvrta grupa jednačina izražava jačinu električnog polja koje se javlja zbog kretanja provodnika u magnetnom polju, zbog promene samog magnetnog polja i zbog promene potencijala duž polja. Ove jednačine Meksvel naziva jednačinama elektromotorne sile, ali treba

napomenuti da je tim terminom on označavao i elektromotornu silu i jačinu električnog polja. Stoga se grupa od tri skalarne Meksvelove jednačine tj vektorska jednačina u stvari naziva jednačinom električnog polja.

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad } V \quad (3.3.18)$$

Ova jednačina je jedina u sistemu jednačina koje Meksvel daje u ovom radu u kojoj uzima u obzir i kretanje provodnika, pa je nekonzistentna sa ostalima i prvi član u njoj se čini da predstavlja višak.

Peta grupa jednačina daje vezu između jačine električnog polja \vec{E} i električnog pomeraja \vec{D} . Do njih Meksvel dolazi na osnovu ranije eksperimentalno utvrđene činjenice da se dielektrik u električnom polju polarizuje. Dakle, ove jednačine karakterišu materijalnu sredinu i Meksvel ih naziva jednačinama električne elastičnosti.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.3.19)$$

Šesta grupa jednačina povezuje električnu struju i električno polje koje izaziva tu struju. Ona u stvari predstavlja jedan oblik Omovog zakona i nazvana je jednačinom električnog otpora.

$$\vec{J}_p = \lambda \vec{E} \quad (3.3.20)$$

Sedma jednačina je u Meksvelovoj notaciji skalarna. Ona pokazuje vezu između količine slobodnog nanelektrisanja u nekoj tački i električnog pomeraja u njenoj blizini. Stoga je on naziva jednačinom slobodnog elektriciteta. U savremenom obliku ona glasi:

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (3.3.21)$$

Poslednja jednačina koju daje je takođe skalarna i izražava vezu između brzine promene slobodnog nanelektrisanja i električnih struja u okolini. Ustvari Meksvel jednačinu kontinuiteta iz hidrodinamike prenosi u ovu oblast.

$$\text{div } \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.3.22)$$

Na završetku ovog dela rada Meksvel se vraća energiji elektromagnetičnog polja s namerom da pojasni svoje stavove. On naglašava da je energija u elektromagnetičnim pojavama u stvari mehanička energija pošto se manifestuje na taj način. No, čini se da ga više interesuje gde se ta energija nalazi i odmah odgovara da ona počiva kako u polju, tako i u samim telima.

Nakon toga izračunava ukupnu energiju elektromagnetskog polja kao zbir rada koji se vrši pri električnoj polarizaciji sredine i unutrašnje energije magnetnog polja. Tako dobija izraz:

$$W = \frac{1}{2} \int_V (\epsilon E^2 + \mu H^2) dV \quad (3.3.23)$$

Šesto poglavlje ovog rada nosi naziv *Elektromagnetna teorija svetlosti*. Smela i neočekivana novost za to vreme, doduše stidljivo pomenuta u prethodnom radu, predstavlja jedan od vrhunaca Meksvelove teorije elektromagnetskog polja. Sam Meksvel kaže da je zadatak ovog poglavlja da "razmatra da li su osobine elektromagnetskog polja, izvedene samo iz elektromagnetskih pojava, dovoljne da objasne prostiranje svetlosti kroz iste supstance". U analizi polazi od ravnog talasa i svojih jednačina polja, i zaključuje da takav talas ima osobine polarizovane svetlosti, odnosno da je "svetlost elektromagnetni poremećaj koji se prostire kroz polje po elektromagnetskim zakonima". Dokaz za to, osim onog koji je već našao – da se talasi kroz elektromagnetno polje prostiru brzinom svetlosti, nalazi uočivši vezu između indeksa prelamanja svetlosti n i dve veličine koje karakterišu elektromagnetna svojstva sredine: električne ϵ i magnetne propustljivosti μ .

$$n^2 = \epsilon \cdot \mu \quad (3.3.24)$$

Ovaj izraz će kasnije biti nazvan Meksvelovom formulom za indeks prelamanja. Ona važi za plemenite gasove i simetrične molekule, odnosno za supstance koje nemaju permanentne dipole.

1873. iz štampe izlazi Meksvelovo kapitalno delo *Rasprava o elektricitetu i magnetizmu* koje detaljno obraduje celokupni elektromagnetizam. Pored prikaza tadašnjeg stupnja znanja iz ove oblasti Meksvel u njemu dalje razrađuje svoju teoriju elektromagnetskog polja. Dva poglavlja su od posebnog interesa za ovaj rad: deveto pod nazivom *Opšte jednačine elektromagnetskog polja* i dvadeseto *Elektromagnetizam*.

U devetoj glavi daje pregled osnovnih jednačina elektromagnetizma najpre analitički i to osim u Dekartovim i u cilindričnim i u sfernim koordinatama, a zatim i u vektorskoj notaciji koristeći simbol ∇ (nabla). Ukupno trinaest jednačina. Od toga sedam jednačina prenosi iz *Dinamičke teorije elektromagnetskog polja* (od (3.3.13) do (3.3.21), osim (3.3.16)), izostavljajući samo jednačinu kontinuiteta. Relacijom:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{I} \quad (\text{u njegovoj notaciji } \vec{B} = \vec{H} + 4\pi \cdot \vec{I}) \quad (3.3.25)$$

uvodi pojam jačine magnetizacije \vec{I} (danasa se koristi oznaka \vec{M}).

Primenom simetrije između električnih i magnetnih pojava jednačina (3.3.21) nalazi pandan u jednačini:

$$\operatorname{div} \vec{I} = M \quad (3.3.26)$$

gde je M zapreminska gustina magnetizma.

Istim principom jednačini (3.3.18) nalazi analogon:

$$\vec{H} = -\operatorname{grad} \Omega \quad (3.3.27)$$

gde je Ω magnetni potencijal.

Pored toga daje i jednačinu kojom definiše vektorski potencijal:

$$\operatorname{div} \vec{\Lambda} = 0 \quad (3.3.28)$$

i jednačinu za zapreminsku gustinu sile:

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} + \rho \vec{E} - \rho \cdot \operatorname{grad} V \quad (3.3.29)$$

Dakle u *Raspravi* Meksvel je dao samo dve jednačine u konačnoj formi: prvu - (3.3.21) i četvrtu - (3.3.17), dok se druga nalazi primenom divergencije na (3.3.14):

$$\operatorname{div} \vec{B} = \operatorname{div} \operatorname{rot} \vec{\Lambda} = 0 \quad (3.3.30)$$

pošto je divergencija rotora proizvoljnog vektora uvek jednak nuli.

Treća jednačina se takođe može dobiti iz navedenih jednačina, ali Meksvel to ne čini. Nju će 1885. uvesti Hevisajd u nastojanju da iz sistema jednačina datih u *Raspravi* izbaci "dva nepodesna i nedovoljno razumljiva potencijala"

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= \operatorname{rot} \left(\vec{v} \times \vec{B} - \frac{\partial \vec{\Lambda}}{\partial t} - \operatorname{grad} V \right) = \\ &= \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) - \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{\Lambda}) - \operatorname{rot} \operatorname{grad} V = \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} \cdot \operatorname{rot} \vec{\Lambda} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.3.31)$$

pošto je rotor gradijenta uvek jednak nuli.

Konačan sistem Meksvelovih jednačina, ali u analitičkoj formi, daće Herc 1889. godine. On kaže " Poželjno je svakako da sistem koji je tako savršen po sadržaju bude koliko je to

moguće usavršen i po formi. Sistem treba sastaviti tako da se njegove logičke osnove lako prepoznaju; sve nebitne ideje treba ukloniti, a odnose između bitnih ideja treba svesti na najjednostavniju formu".

Dakle, sistem koji se danas naziva Meksvelovim jednačinama u najkonciznijem obliku sadrži dva para jednačina – jedan koji izražava prirodu električnog i magnetnog polja, i drugi koji izražava kako se promena u jednom polju odražava na drugo. On je oblika:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (3.3.32)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (3.3.33)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.3.34)$$

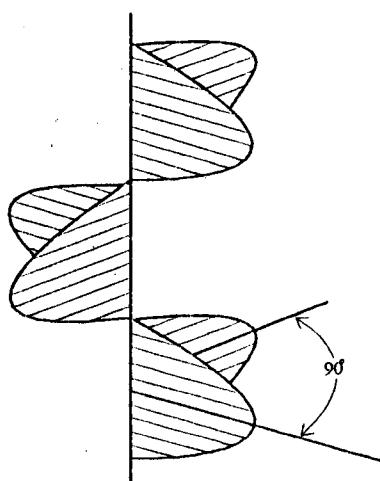
$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.3.35)$$

Da bi on bio potpun sistem jednačina potrebno je uvesti tzv jednačine stanja sredine:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (3.3.36)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (3.3.37)$$

a njih je Meksvel dao u *Raspravi*.



U glavi uopštenog naziva *Elektromagnetizam* nalazi se razrada teorije elektromagnetne prirode svetlosti koju je fundirao u *Dinamičkoj teoriji elektromagnetskog polja*. Meksvel prvo proverava tačnost svoje formule za indeks prelamanja svetlosti koristeći numeričke podatke iz literature. Kako su slaganja bila u okviru eksperimentalne greške bila je to prva potvrda valjanosti njegove teorije. Analizirajući ravne talase pokazao je da su električno i magnetno polje međusobno normalni i normalni na pravac prostiranja talasa. Uz ovo daje crtež kojim ilustruje svoju predstavu o elektromagnetskom talasu.

Takođe izvodi poznatu talasnu jednačinu za neprovodne sredine:

$$\nabla^2 \vec{B} = \epsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (3.3.38)$$

i konstatiše da je ona slična jednačini kretanja elastičnog nestišljivog fluida.

Pored drugih stvari kojima se bavio u ovoj glavi (termičko dejstvo svetlosti, njeno prostiranje kroz kristale i neprovodne sredine) Meksvel izvodi i izraz za pritisak svetlosti, pojavu koja je rezultat njene čestične prirode. Po njemu pritisak po jedinici površine jednak je energiji talasa po jedinici zapremine. Ovaj odnos je kasnije eksperimentalno verifikovan.

Poslednju glavu *Rasprave* Meksvel posvećuje teoriji dejstva na daljinu. U njoj on analizira formule Ampera, Gausa i Vebera, teorije Rimana i Nojmana, priznaje njihove rezultate, ali im zamera što u obzir ne uzimaju prisustvo sredine. Naglašava da upravo iz tih razloga dotadašnja teorija svetlosti nije uspela objasniti razne optičke pojave. Toliko je siguran u ispravnost teorije dejstva na blizinu da stav iz predgovora Njutnovih *Principa* koji glasi "dejstvo na daljinu je jedno od primarnih svojstava materije, i nikakvo objašnjenje ne može biti razumljivije od te činjenice" naziva dogmom par ekselans.

3.4. PRISTUP ISTRAŽIVANJU

Iako je živeo relativno kratko (48 godina) Meksvelov stvaralački rad traje preko trideset godina. Najveće domete postiže u periodu svoga rada na Kigs koledžu (1860–1865) kada razvija teoriju i formira tri od četiri osnovne jednačine elektromagnetskog polja. Celokupan rad mu karakteriše sintetizovanje dostignuća prethodnika uz veliki kreativni doprinos.

O Meksvelu se govori kao o savršenom teoretičaru, o naučniku koji je svoju teoriju izgradio pomoću olovke i papira, i gotovo uvek se navodi kao antipod Faradeju, čistom eksperimentalcu. No, mislim da je to pojednostavljenje njegovog kompleksnog naučnog pristupa. Meksvelovi biografi navode da nikoga nisu toliko ljutile "hladne apstrakcije koje su same sebi cilj" kao njega. Glavnu osobinu njegovog načina razmišljanja čini neraskidiva veza između konkretnog i apstraktnog, sposobnost stvaranja jednostavnih grafičkih predstava pri rešavanju apstraktnih problema. Stoga njegovi radovi sadrže niz mehaničkih modela koje detaljno opisuje i ilustruje citežima. Doduše u tome je velikog udela imala i praksa njegovog vremena u kome su fizičari težili da sve fizičke pojave svedu na mehaničke. Lord Kelvin je to opisao rečima: "Pravi odgovor na pitanje da li dati fizički problem shvatamo leži u tome

možemo li konstruisati odgovarajući mehanički model". Pored toga, otac je u Meksvelu razvio naklonost ka mašinama i različitim mehanizmima, pa kada je spoznao kako mehanički modeli mogu dobro demonstrirati fizičke pojave i procese gotovo sa strašću se bacio na izgradnju takvih modela. Kaže se da nikad nije stao na jednom modelu, već je konstruisao po nekoliko, čak i deset, puštajući drugima da procene koji najviše odgovara suštini pojave. U izgradnji modela je improvizovao, pa su mu neki vrlo grubi i primitivni, a neki vrlo složeni. Ali za razliku većine fizičara svoga vremena Meksvel u mehanici traži samo spoljašnju sličnost i analogiju, a nikako ne i objašnjenje pojave koja se izučava. Sam Meksvel kaže da je dužnost nauke da postane opštedostupna, pa kako je relativno mali broj ljudi sposobljen da shvati šta se krije iza matematičkog formalizma, ilustracije su sredstvo koje im približava samu teoriju. Modeliranje i primena analogija su dva naučna postupka koja imaju svoju težinu i koja prate prirodne nauke. Oni služe da se proučavana pojava učini bližom, dakle da se konkretizuje apstraktno. I fizika dvadesetog veka ima mnogo takvih modela, na primer model kapi i model ljušaka u nuklearnoj fizici. Od svih Meksvelovih modela svakako je najpoznatiji model vrtloga, a analogijom uspostavlja vezu između načina prostiranja toplove i proticanja struje, ponašanje dielektrika opisuje koristeći analogiju sa hidrodinamikom, pa pojavu električne polarizacije interpretira kao neku vrstu pritiska. Sa ovom karakteristikom njegovog načina rada povezana je i činjenica da je postavljao znatno smelije hipoteze od ostalih istraživača zakona prirode sredine devetnaestog veka.

Dakle, iako mu je pristup istraživanju, definitivno, čisto teorijski Meksvela karakteriše natprosečan osećaj za realno.

Meksvel je veliku pažnju poklanjao instrumentima i uredajima, od konstrukcionih detalja do obrade eksperimentalnih rezultata. *Rasprava* obiluje detaljnim opisima eksperimenata, uređaja i tehnike merenja raznih električnih i magnetnih veličina. Međutim, ma koliko da je vladao eksperimentalnom tehnikom Meksvel nije uspeo (a ni želeo) da eksperimentima prati svoju teoriju. Izvodio je oglede iz optike, viskoznosti, teorije toplove, ali ne i iz elektromagnetizma. Rad u laboratoriji mu nije bio stran, jer je još kao dete u porodičnoj kući imao vlastitu laboratoriju, kao i kasnije u Londonu. Posedovao je veština da postavi eksperiment, da izradi uređaj potreban za njega i što je najvažnije da ga detaljno osmisli. Ali nije imao otkrića, pa se ova oblast njegovog rada zanemaruje. Možda nije naodmet pomenuti da je Meksvel voleo da smišlja zabavne oglede kojim je razveseljavao društvo. Kaže se da je sa mehurovima od sapunice pravio čuda.

Dakle, Meksvel na izuzetan način kombinuje fizičku intuiciju i izuzetan osećaj za odnose među objektima sa velikom matematičkom sposobnošću da na najbolji način uspostavi relacije među različitim svojstvima i pojavnama.

U izgradnji elektromagnetne teorije Meksvel polazi od Faradejeve empirijske baze čime je srušio mit o nematematičnosti Faradejeve teorije, ali je time stvorio mit da njegova teorija nije fizička, već isključivo izvedena iz matematike. Koliko je to bila pogrešna predstava potvrdila je opšteprihvaćenost njegove teorije polja.

Matematika za Meksvela nije sama sebi cilj, ona predstavlja oruđe saznanja. Još u uvodu rada *O Faradejevim linijama sile* on kaže: "Koliko je to moguće izbegavaču pitanja koja mogu postati predmet korisnih vežbi za matematičare, ali nisu u stanju da prošire naša naučna znanja". Doduše, potom odlazi u ekstrem izbegavajući da bilo koji zakon koji definiše da i u matematičkoj formi. Iako poznaje i visoko ceni vektorski račun kao prirodniji za izražavanje fizičkih veličina, kao i operator nabla, kojima se zakoni mogu dati u preglednijem i elegantnijem zapisu sam ih ne koristi sve do *Rasprave*. Osim toga ne koristi oznake grad, div i rot (odnosno curl što je oznaka koju koriste Britanci), već jednačine piše preko proizvoda operatora ∇ i odgovarajućih skalara i vektora.

Svoj odnos između matematike i fizike izložio je u predavanju održanom 15.09.1870. u Liverpulu na sednici Matematičke i fizičke sekcije Britanskog društva. Po njemu zadatak matematičara je utvrđivanje raznih formi operacija sa simbolima i načina transformacije tih formi jedne u drugu. A zadatak fizičara je razmatranje prirodnih pojava koje su rezultat beskonačno složenog sistema uslova i njihovo povezivanje zakonom. Taj put, koga se sam držao, opisuje na sledeći način: "Mi se bavimo analizom tih složenih uslova i pojavu razmatramo posebnom metodom, koja je sama po sebi jednostrana i nesavršena, izabiramo jednu po jednu osnovnu crtu pojave, počevši sa onom koja najviše privlači našu pažnju. Na taj način postepeno saznajemo kako treba razmatrati pojavu u celini da bi dobili što jasnije i preciznije predstave o njoj". Držeći se svog recepta Meksvel formuliše opšte zakone koje će primeniti na brojne elektromagnetne pojave. Dakle, naučni postupak koji primenjuje je deduktivan. Međutim, kod Meksvela se nazire i izvesni pozitivizam u pristupu istraživanju tj izbegavanje izučavanja pojava koje objektivno postoje, ali nisu opservabilne. On kaže: "U proučavanju ma kojeg kompleksnog objekta našu pažnju moramo usredsrediti na elemente toga objekta koje smo u stanju posmatrati i istraživati njihovu promenu, a ignorisati one elemente koje ne možemo ni posmatrati, ni uticati na njihovu promenu."

Meksvelova *Rasprava* je predstavljala pravu prekretnicu u načinu pisanja stručnih knjiga. Kao što je već rečeno ona obuhvata kompletan elektromagnetizam. U njoj Meksvel jasno

izlaže i ranija shvatanja i shvatanja svojih savremenika, pa nakon toga polemiše sa njima i pobija ih kada je to potrebno. No, bio je izuzetno objektivan opisujući tuđe teorije i zakone tražeći u njima uvek ono što je prihvatljivo.

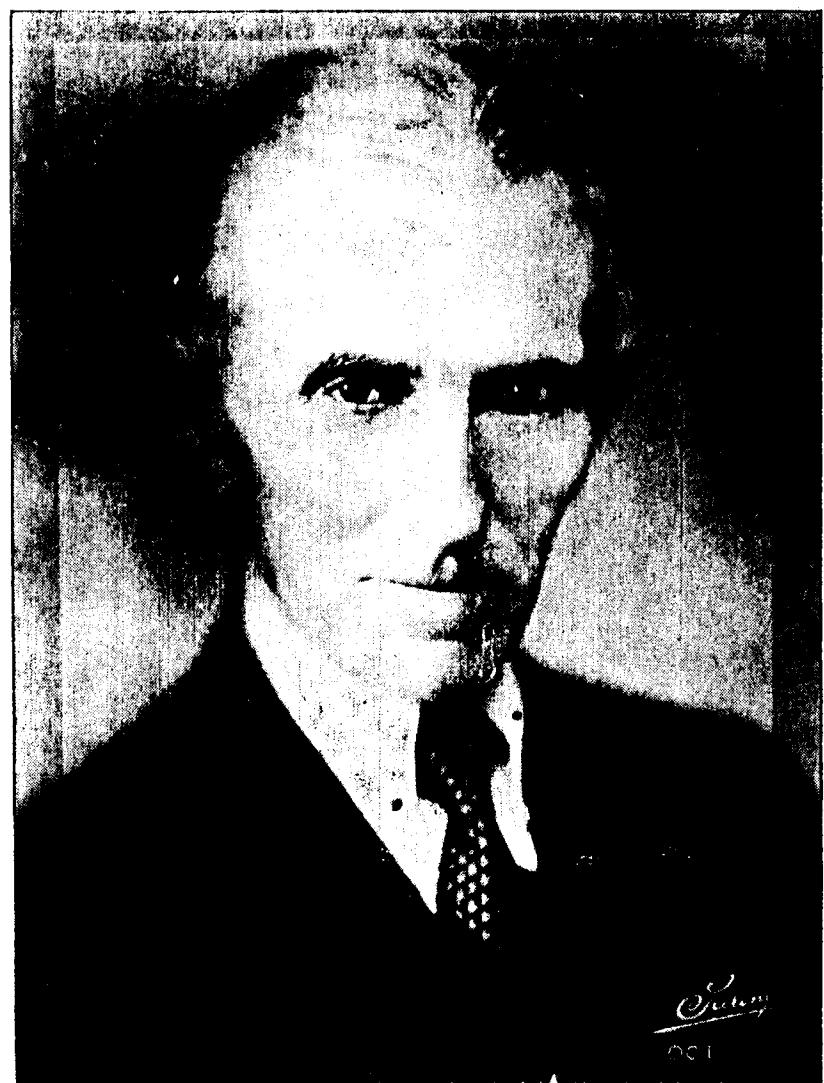
Pravio je i greške, i to one bezazlene kao što je netačno izračunavanje zbog istovremenog korišćenja kontinentalnog i britanskog sistema jedinica, ali i materijalne pa Hevisajd kaže: "Ne vidim zašto bi se prešlo preko mnogih grešaka u Meksvelovoj knjizi (misli se na *Raspravu*). ... U mnogome je Meksvelova greška što su njegovi pogledi tako sporo prihvatani."

Ono što se nikako nije svidalo njegovom tutoru Hopkinsu, a to je nedostatak sistematičnosti, pratilo ga je i u daljem radu. Poenkare, koji je Meksvelov rad smatrao vrhunskim dometom matematičke fizike, o tome kaže: "Meksvel ne teži da izgradi jedinstvenu, definitivnu i dobro sredenu strukturu, on izgleda kao da podiže veliki broj provizornih i nezavisnih kuća među kojima su komunikacije teške, a povremeno i nemoguće." Ili Alfred O'Rajli: "Nikad nijedan fizičar nije izbacio takvu masu nekoherentnih ideja mirno nastavljući svoj put sa intuitivnom genijalnošću kroz zbrku protivrečnih teorija."

Iako su mu rečenice savršeno jasne, čitanje njegovih radova zahteva poseban intelektualni napor, odnosno izuzetnu strpljivost i veliko predznanje. Nekoherentnost i nekonzistentnost su osnovni uzroci tih teškoća. I njegov veliki poštovanac Herc jednom je rekao: "Iako sam gajio najveće divljenje prema Meksvelovim matematičkim koncepcijama, nisam uvek bio siguran da sam shvatio značenje njegovih iskaza". Onda ne čudi što je celokupan njegov rad sažeо u jednu rečenicu: "Meksvelova teorija je Meksvelov sistem jednačina". Ironija prethodne konstatacije je u tome što je upravo Herc dopunio i zaokružio taj sistem jednačina primenom principa simetrije (simetrije električnog i mađnetnog polja). Osim toga, praćenje jednačina otežava i način obeležavanja koji je sa današnjeg stanovišta izuzetno složen. Na primer elektromotornu silu obeležava slovom ξ , a njene komponente (P, Q, R), jačinu struje sa X , komponente vektora jačine magnetnog polja su mu (α, β, γ), a struja J_p i J_t su (p, q, r) i (p', q', r') respektivno, itd.

U svemu što je radio Meksvel je dao izuzetan doprinos. Može se reći da je postavio vanredno čvrste temelje na kojima će se dalje graditi teorija polja.

4. Nikola Tesla (1856-1943)



Nikola Tesla

4.1. BIOGRAFIJA

Nikola Tesla je rođen 10.07.1856. u Smiljanu kraj Gospića. Otac mu je bio pravoslavni sveštenik, a majka koja je poticala iz svešteničke porodice bila je domaćica. Još kao dete Tesla je ispoljavao naročite sklonosti ka tehnički. Pravio je različite sprave koristeći vrlo primitivna sredstva iz svoje okoline (npr sa samo pet godina napravio je svoj prvi vodeni točak). Takođe sa pažnjom je čitao knjige iz biblioteke svoga oca.

1862. sa šest godina kreće u osnovnu školu u Smiljanu. Nastaviće je u Gospicu jer se porodica tamo preselila nakon tragične smrti četrnaestogodišnjeg sina Daneta. Prelazak u grad za Nikolu je predstavljao šok, te se povlači u sebe i gotovo svo slobodno vreme provodi čitajući. Otac ga je podučavao kako da vežba samokontrolu i sposobnost pamćenja. Budući da je bio pristaša prosvjetiteljskih ideja Dositeja Obradovića mnogo pažnje je posvećivao obrazovanju dece, ali se istovremeno trudio da ograniči opsesivnu strast za knjigom svoga sina Nikole, koji je umeo nekoliko dana bez prestanka da čita, da mu se ne bi narušilo ionako tanano zdravlje.

1866. Tesla se upisuje u Nižu realnu gimnaziju u kojoj se nastava odvijala na nemačkom jeziku. U njoj se susreće sa modelima mehaničkih i električnih naprava, i biva očaran povremenim demonstracijama i ogledima koje su izvodili nastavnici. Iisticao se u matematici, posebno svojim brzim računanjem, ali je inače bio prosečan đak. Jedino je kao levak imao problema sa crtanjem. Tokom školovanja u Nižoj realki bavio se mišlju o konstruisanju nekave vrste gasnog "perpetuum mobile"-a, a nastavio je i da na lokalnoj reci pravi vodenice.

1869. Tesla se prvi put ozbiljno razboleo.

1870. upisuje se u Veliku realku u Rakovcu kraj Karlovca, prestižnu školu koja je pripremala učenike za studije tehničke. I u ovoj školi je bio osrednji đak, a jednog je polugodišta čak imao i nedovoljnu ocenu iz matematike, verovatno kao posledicu dvomesečne bolesti. U tom periodu na njega je presudno uticao profesor Martin Sekulić koji se sam bavio naučnim radom. On je svoje učenike informisao i o najvećim dostignućima nauke i tehničke, posebno elektriciteta. Tesla mu je ponekad pomagao u izvođenju ogleda.

1873. Tesla maturira sa čvrstom željom da studira tehniku. Njegov otac pak, imao je plan da Nikola postane sveštenik. Po povratku kući u Gospic Nikola oboljeva od kolere koja će ga devet meseci prikovati za krevet. Teško bolestan uspeva da od oca dobije obećanje "Ići ćeš u najbolju tehničku ustanovu na svetu".

1875. sa zakašnjenjem od dve godine Tesla počinje studije na Visokoj školi u Gracu za koje dobija stipendiju tadašnje Vojne krajine. Prvu godinu završava sa briljantnim uspehom što je logična posledica njegovog izuzetnog predznanja, korišćenja literature na nekoliko jezika i spartanskog režima rada (od 03 do 23 časa svakog, baš svakog dana). Izuzetan student skreće pažnju svojih profesora Rognera (Rogner) – aritmetika i geometrija, Alea (Allé) – integrali i diferencijalne jednačine i Pešla (Poechl) – teorijska i eksperimentalna fizika. Za Alea Tesla je rekao da je najbolji predavač koga je ikad slušao, a koji je podsticao Nikolin napredak ostajući da radi sa njim i posle nastave. S Pešlom je vodio raspravu o Gramovoj mašini. Naime, Tesla je smatrao da je ona nepraktična i da je rad motora možda moguć i bez komutatora i četkica. Prema samom Tesli na to je dobio odgovor: "Gospodin Tesla će možda ostvariti velika dela, ali ovo sigurno neće uraditi. To bi bilo ekvivalentno pretvaranju jedne stalne sile, poput gravitacione, u rotacionu. To je perpetuum mobile, nemoguća ideja."

Drugu godinu studija je upisao uslovno, jer mu je ukinuta stipendija Vojne krajine koja je tada prestala da postoji kao posebna teritorijalna jedinica.

Za tu 1876. godinu je vezana jedna zanimljivost. Tesla je u listu *Srbadija* objavio članak *O kapilarnim cevima*, rad o temi koja je bila predmet prvih naučnih radova Alberta Ajnštajna (Albert Einstein) i Nilsa Bora (Niels Bohr).

Zbog nedostatka sredstava za život nastupa najteži i najproblematičniji period u njegovom životu. Od "Matice srpske" u Novom Sadu moli za stipendiju, ali biva odbijen. Tada se odaje kockanju. Novembra 1878. ponovo od Matice traži stipendiju i navodi da je prethodnu izgubio jer zbog bolesti nije polagao ispite. Nakon ponovnog odbijanja Tesla nestaje. Obreo se u Mariboru gde je neuspešno tražio posao. Kako nije imao izvora prihoda lokalne vlasti ga deportuju marta 1879. u rodno mesto. Nedugo zatim umire mu otac (29.04.1879.) i Tesla donosi odluku da se prene iz malodušja. Prvi korak bilo je zapošljavanje u Gospičkoj realki.

Januara 1880. Tesla putuje u Prag da nastavi studije na Praškom univerzitetu, ali ne biva primljen jer u gimnaziji nije učio grčki. Ipak, samoinicijativno je posećivao predavanja iz matematike i fizike. Ali besparica ga i dalje prati.

Januara 1881. Zapošjava se kao cirač u Ugarskoj upravi pošta u Budimpešti. Mesto mu nalazi ujak Paja Mandić preko svog prijatelja Feranca Puškaša. No, zahvaljujući svom pronalazačkom daru tj zbog usavršavanja telefonskog pojačavača ubrzo biva postavljen za vodu ekipa.

Početkom 1882. zbog napornog rada Tesla oboljeva od "jedinstvene i neizlečive" bolesti koja njegova čula višestruko pojačava i gotovo ga dovodi do nervnog sloma. Po savetu svoga prijatelja mehaničara Antala Szigetija (Antal Szigety) počinje da se bavi gimnastikom i odlazi u duge šetnje. Tokom jedne od šetnji "bljesne" mu ideja u vidu slike o obrtnom

magnetnom polju. Time počinje dvomesečni period u kome je Tesla razradio sve svoje tipove motora, vreme u kome postiže vrhunac svog pronalazaštva i vreme njegovog najplodnijeg stvaralaštva. Ti izumi su predstavljali revoluciju u primjenom elektromagnetizmu – bilo je to otkriće naizmenične struje i polifaznog sistema.

Kako sa svojim pronalaskom nije mogao napraviti proboj u Budimpešti Ferenc Puškaš ga upućuje svome bratu Tivadaru koji je bio glavni stručnjak za telefone u Edisonovoj kompaniji za Evropu sa sedištem u Parizu. Tako se u jesen 1882. zajedno sa svojim priateljem Sigelijem Tesla zapošljava u Kompaniji u kojoj će raditi na instaliranju električnih centrala jednosmerne struje. Službovao je za Kompaniju i u Strazburu (Strasbourg) gde će konstruisati svoj prvi motor koji je radio na principu obitnog magnetnog polja, i čiji rad će demonstrirati na svoj dvadesetsedmi rođendan. Demonstraciju će ponoviti proleća 1884. u Parizu nakon čega mu saradnici savetuju da ode direktno kod Edisona u Ameriku.

06.06.1884. Nikola Tesla stiže u Ameriku sa izvanrednom preporukom Bečelora (Batchellor), Edisonovog predstavnika u Parizu ("Poznajem dva velika čoveka, jedan ste Vi, a drugi ovaj mladi čovek koga Vam preporučujem."). Dobija posao u Edisonovim radionicama, ali isključivo za rad sa jednosmernim strujama. Zbog potpune nezainteresovanosti Edisona za njegov rad Tesla ga napušta januara 1885.

Krajem marta iste godine, na nagovor i uz novčanu podršku kolega iz Edisonovih radionica, Tesla osniva kompaniju *Tesla Electric Light and Manufacturing Company*. Po zahtevu deoničara Kompanija se morala baviti izradom lučnih svetiljki i generatora jednosmerne struje za njihov pogon dok se ne isplati uloženi kapital. Tada nastaju Teslini patenti vezani za ovu oblast. Kada je trebalo da krene u izučavanja koja njega zanimaju izbjiga ekomska kriza i Kompanija bankrotira. Za Teslu tada nasupa drugi težak period potpune besparice u kome se bavio fizičkim radovima samo da bi preživeo.

Godinu dana kasnije od kompanije *Western Union* (Western Union) dobija zajam od pola miliona dolara za osnivanje vlastite kompanije. Aprila 1887. *Tesla Electric Company* počinje sa radom. Već 12.10.1887. Tesla prijavljuje prvi patent da bi ih u naredne četiri godine sistematski prijavljivao zaokruživši na taj način polifazni sistem (ukupno 40 patenata).

16.05.1888. u Američkom institutu elektroinženjera (American Institution of Electric Engineers) održao je predavanje *O novom sistemu motora i transformatora naizmenične struje* uz demonstraciju motora. Nakon predavanja obraća mu se Džordž Vestinghaus (George Westinghouse) sa ponudom da tih 40 patenata otkupi za milion dolara i da mu za svaku proizvedenu konjsku snagu plati po jedan dolar. Pored toga nudi mu i mesto inženjera-konsultanta za platu od dve hiljade dolara mesečno. Stoga Tesla gasi svoju kompaniju i ostavlja samo laboratoriju za dalji rad.

Jula 1889. Tesla postaje američki državljanin ne bi li olakšao proceduru za prijavu patenata.

Od septembra 1889. do januara 1890. odmara se u Parizu i u zavičaju.

Od povratka u Njujork pa sve do 1901. Tesla se bavio visokim naponima i visokofrekventnim strujama tj izradom odgovarajućih generatora. U tom periodu *General Electric Company*, iza koje stoji Edison, otkupljuje od Vestinghausa sve Tesline patente. Ironija sudbine dovele je žestokog borca protiv naizmenične struje u situaciju da kupuje patente upravo iz te oblasti. 20.01.1891. održao je drugo predavanje pred članovima Američkog instituta elektroinženjera pod nazivom *Ogledi sa naizmeničnim strujama vrlo visokih frekvencija i njihova primena u metodama veštačke rasvete*. Publiku je impresionirao luminiscentnim svetiljkama koje su mu bleštale u golid rukama. Dakle, otkrio je tzv skin efekat. Isto predavanje će sledeće godine održati u Londonu i Parizu, a nakon velikih počasti od kolega odlazi da poslednji put vidi majku.

1893. na Svetskoj izložbi u Čikagu (Chicago) Tesla doživljava trijumf. Počinje sa izlaganjem svoje teorije o prenosu energije bez žica uz korišćenje Zemlje kao rezonatora i u vreme najintezivnijeg rada na tom predmetu (13.03.1893) laboratorijski mu nestaje u palamenu, a sa njom i svi uredaji i kompletan dokumentacija. Između ostalih u požaru mu je nestao i materijal o posebnom zračenju koje oštećuje fotografske ploče. Nakon Rendgenove (Röntgen) objave otkrića x-zraka nastavio je svoja predašnja ispitivanja i tokom 1896. objavio niz članaka na ovu temu u *Electrical Review*. Međutim, Morganova banka daje pola miliona dolara na izgradnju nove laboratorije koja će početi sa radom već jula 1895., a i 15.04.1895. počinje sa radom prvi agregat elektrane u Nijagari, pa je to unekoliko ublažilo veliki gubitak.

Od aprila 1896. do aprila 1898. Tesla prijavljuje niz patenata u vezi sa bežičnim prenosom energije i signala. Oni su predstavljali pripremu za izgradnju radiostanice od 200 kW u Kolorado Springsu (Colorado Springs). U Springsu boravi od jula 1899. do januara 1900. ispitujući oscilatore velike snage, bežični prenos energije, prijem i slanje signala, kao i prateće efekte visokofrekventnih električnih polja. Osim toga, tamo razvija "Pojačavački odašiljač" (Magnifying Transmitter), po vlastitim rečima svoj najveći izum. On je trebalo da omogući bežičnu komunikaciju po celoj Zemljinoj kugli. 1901. je na Long Ajlandu (Long Island) počela gradnja stanice sa tornjem koja bi omogućila realizaciju njegovog otkrića. Ali izgradnja je kasnila zbog povećanja troškova, a decembra iste godine Markoni (Marconi) uspostavlja bežične telegrafske veze Evrope i Amerike na "jednostavniji i jestiniji način" i izgradnja potpuno staje 1906. godine.

Januara 1902. Tesla prijavljuje svoj poslednji patent iz oblasti elektrotehnike Aparat za prenos električne energije kojim bi se energija transportovala u sve krajeve sveta bez žica. Zbog

ovoga proglašavaju ga ludim i Morgan zavrće sve slavine. Tesla biva prinuđen da prestane sa radom i vrati dugove. Nakon toga bavi se mehanikom fluida. Jedan od patenata iz ove oblasti je turbina bez lopatica.

Dva poslednja patenta vezana su za avijaciju. Prvi potiče iz 1921. i drugi, definitivno poslednji 1928. godine. Nakon toga Tesla se povlači u samotnjački život.

Nikola Tesla umire 07.01.1943. u hotelskoj sobi u Njujorku sa sveskom na noćnom ormariću na kojoj piše "Poslednja izračunavanja".

Od prestanka aktivnog rada do smrti obasipali su ga nagradama i počasnim doktoratima, ali najveću potvrdu stvaralačkog genija prestavlja to što Međunarodni komitet za mere i tegove 1960. jedinicu za magnetnu indukciju naziva Tesla.

Tesla je bio vizionar, čovek koji je početkom veka govorio o radaru, televiziji, teledirigovanim projektilima, robotima, elektroterapiji, pisaćoj mašini koja se pokreće ljudskim glasom, električnoj regulaciji saobraćaja, ...

Najsažetiji opis Teslinog rada dao je dr Tomo Bosanac: "Nikola Tesla, to je 112 njegovih najznačajnijih patenata i pronalazaka iz električnih strojeva, transformatora, prijenosa energije, visokofrekventne tehnike, radiotehnike, telemehanike, rasvjete, parnih turbina, 73 članka u različitim časopisima, 39000 dokumenata tehničke i naučne dokumentacije. To je 29 diploma i priznanja raznih sveučilišta, akademija i društava. To su brojni članci u časopisima i novinama pisani o njemu. To je neumoran rad ispunjen stvaralaštvom, neviđenim u historiji razvoja tehnike."

Važnije bibliografske odrednice:

Moji pronalasci (My Inventions), objavljen 1919. godine u nekoliko nastavaka u časopisu "Electrical Experimenter"

Gdin Nikola Tesla o motorima na naizmeničnu struju (Mr Nikola Tesla on Alternating Current Motors), objavljeno u "The Electrical World", Njujork, 25.05.1877.

Novi sistem motora i transformatora na naizmeničnu struju (A New System of Alternate Current Motors and Transformers), predavanje održano 16.05. 1888. u AIEE (Američkom institutu elektroinženjera – American Institution of Electric Engineers) i objavljeno u "AIEE Transactions", Njujork 1888.

Fenomen naizmeničnih struja vrlo visokih frekvencija (Phenomena of Alternate Currents of Very High Frequency), objavljeno u "The Electrical World", Njujork, 21.02.1891.

Elektrostatički indukcioni aparat naizmenične struje, (Alternate Current Electrostatic Induction Apparatus), objavljeno u "The Electrical Engineer", Njujork, 06.05.1891.

Bežični prenos električne energije, objavljeno u "Electrical World and Engineer", 05.03.1904.

Čudesni svet koji će stvoriti elektricitet, objavljeno u "Manufacturer's Record", 09.09.1915.

4.2. PREGLED RADOVA IZ ELEKTROMAGNETIZMA

Faradejevo otkriće elektromagnetne indukcije omogućilo je da se električna energija proizvodi pomoću mehaničke. Mnogi pronalazači pokušavaju sa manjim ili većim uspehom da konstruišu dinamomašinu tj generator jednosmerne struje. Sa jednom od njih, Gramovom, Tesla se susreće još u školskim danima. Tragajući za motorom bez kolektora tj za otklanjanjem glavne mane Gramovog motora Tesla 1882. godine otkriva indukcioni motor koga pokreću polifazne naizmenične struje. Ovaj motor je predstavljao rešenje problema prenosa električne energije na daljinu zbog mogućnosti transformacije naizmenične struje u visoke napone kako bi transport bio efikasniji i u niske napone za praktičnu upotrebu. Ali od prijave patenta ovog motora i do njegove realizacije proteći će pet godina. Naime, nedostatak sredstava i nerazumevanje stručnjaka onemogućili su mu da dalje radi na svojim pronalascima.

Kako je po dolasku u Ameriku prvo radio u Edisonovojoj kompaniji, a zatim u deoničarskom preduzeću, prvih deset patenata prijavljenih u SAD u periodu maj 1885. – januar 1886. bili su vezani za regulatore lučnih lampi i za generatore jednosmene struje.

Kada je oformio vlastitu kompaniju *Tesla Electric Company* teorijska rešenja o polifaznim naizmeničnim strujama koja su u njemu sazrevala u proteklom periodu dobijaju formu patenata. Tako za svega pet meseci prijavljuje sedam patenata koji će mu biti odobreni istog dana 01.05.1888. To su patenti od kapitalnog značaja za izgradnju sistema naizmeničnih struja. Oni sa još 28 patenata podnetih uglavnom tokom 1888. i 1889. formiraju zaokružen sistem proizvodnje, prenosa i eksploatacije naizmenične struje, koji će do današnjih dana ostati gotovo nepromenjen. On obuhvata otkrića: polifaznih naizmeničnih struja, obrtnog magnetnog polja, principa transformacije polifaznih struja, sprezanja kalemova u zvezdu i u trougao, kao i proizvođenja faznog pomeraja pomoću kondenzatora. Na tim otkrićima zasnovani su njegovi praktični pronalasci: sinhroni i asinhroni generatori i motori, statički i obrtni transformatori, sistem prenosa i razvođenja polifaznih struja. Kako kaže B.A.Berend (B.A.Behrend): "Kada se najnapornije radilo na razvijanju i usavršavanju mašina jednosmerne struje, pojavilo se senzacionalno delo Nikole Tesle, koje je sprečilo svaku dalju koncentraciju misli na ma šta drugo osim na naizmenične struje i njihove kombinacije u polifazne struje."

Kaže se da je osnovna karakteristika naučnika istraživača da ume da postavi pravo pitanje. Upravo je to slučaj sa Teslom. Ako već dinamomašine (generatori jednosmerne struje) proizvode naizmenične struje koje se zatim ispravljaju pomoću komutatora ("komplikovanog mehanizma, a može se reći i izvora većine nezgoda na koje se nailazi u radu mašina") da bi se ponovo vratile u naizmenično stanje, jer jedino u tom režimu motor radi, u čemu je onda uloga komutatora? Tesla kaže: "Uloga komutatora je sasvim nebitna, i ni na koji način ne utiče na sam rad mašina. Stvarno, sve mašine rade sa naizmeničnim strujama, a jednosmerne struje se javljaju samo u spoljašnjim kolima tokom svog puta iz generatora u motor". Ovaj jednostavan odgovor je od dalekosežnog značaja za celokupnu civilizaciju.

U prilogu su dati crteži iz patentne prijave koji ilustruju princip rada dvofaznog motora, kao i konstrukciju dvofaznog i trofaznog motora. Dijagrami 1-8 prikazuju faze kroz koje prolaze namotaji generatora, a 1a-8a odgovarajuće promene magnetnog polja motora. Rotor generatora se sastoji od dva medusobno normalna kalema u kojima se pri njihovom kretanju između polova elektromagneta indukuje struja fazne razlike 90° . Krajevi ova dva kalema vezani su za dva medusobno izolovana kontaktna prstena. Stator motora je formiran iz dva prstena od tankih izolovanih pločica gvozdenog lima na koga su simetrično namotana četiri kalema, pri čemu su po dva suprotna kalema povezana, a preostala četiri slobodna kraja ovih kalemova su vezana na kontaktne prstenove rotora generatora. Na taj način su obrazovana dva nezavisna strujna kola. Unutar prstena nalazi se disk čija se osa poklapa sa osom prstena.

U kalemu B se struja od nule (sl 1) obrtanjem povećava do maksimalne (sl 3), opada do nule (sl 5) nakon čega menja smer da bi opet postigla maksimum, ali u suprotnom smeru (sl 7). Kolo u kome se nalazi kalem B sadrži namotaje C'C'. Prolaskom naizmenične struje kroz njih formira se magnetno polje koje se menja sa promenom struje. Takođe i kalemi CC obrazuju magnetno polje. Ova dva polja formiraju rezultujuće polje koje predstavlja vektorski zbir polja dva kalema. Stupnji promene ovog polja jasno su prikazani na slikama 1a-8a. Dakle, magnetno polje se obrće. Kako disk D ima tendenciju da se postavi u položaj u kome zahvata najveći broj magnetskih linija sile obrtno magnetno polje izaziva njegovu rotaciju. Kasnije je umesto diska koristio armature. Tesla je na taj način dao osnovne principe rada dvofaznog sinhronog motora, kod koga je sinhronizovan rad generatora i motora.

Princip rada trofaznog motora je isti, samo što motor sadrži šest kalemova kroz čije namotaje protiče naizmenična struja iz trofaznog generatora tj iz generatora u kome tri kalema zaklapaju ugao od 120° . Tesla već u ovom radu ističe da trofazni sistem daje snažnije polje i preporučuje ga kao bolji.

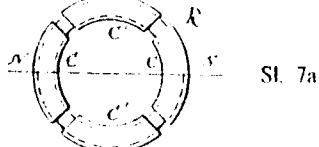
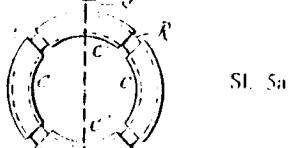
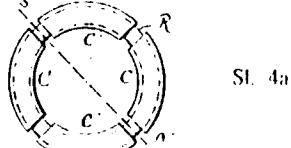
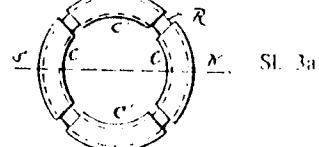
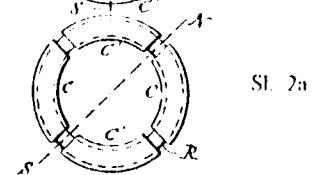
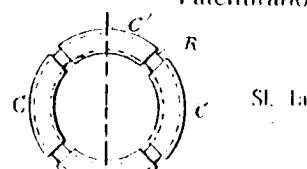
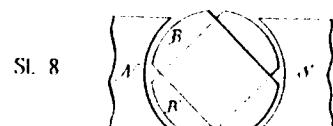
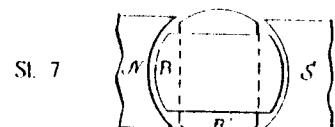
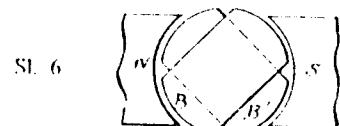
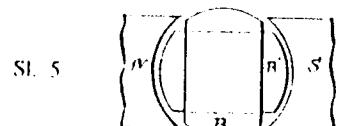
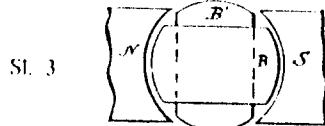
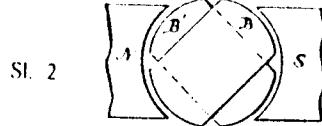
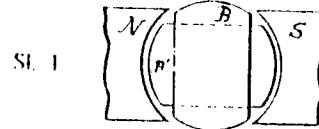
(Bez modela)

N. TESLA

ELEKTROMAGNETSKI MOTOR

Br. 381,968.

Patentirano: Maj 1, 1888.



Svedoci:

Hiram E. Hawley
Frank A. Murphy

Propalažac:

Nikola Tesla
Advokat:
Duncan, Lentz, & Page

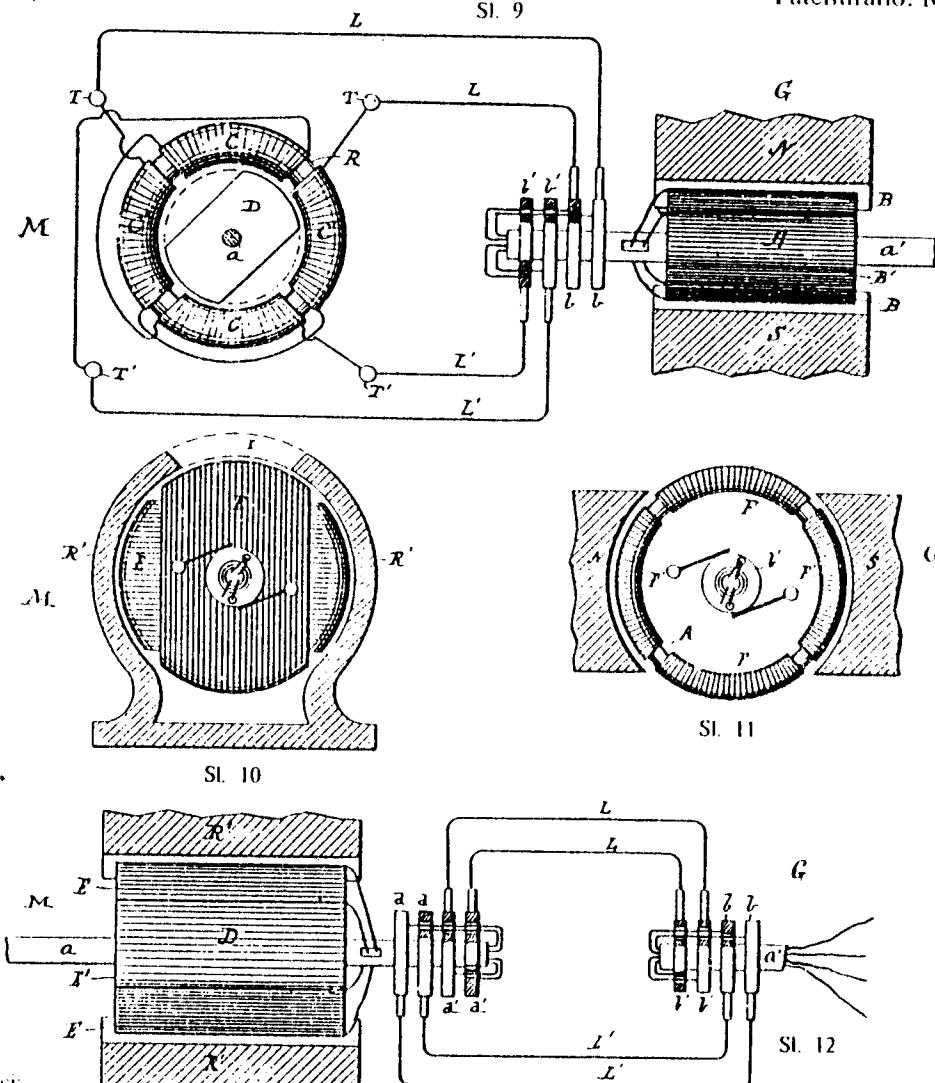
(Bez modela)

N. TESLA

ELEKTROMAGNETSKI MOTOR

Br. 381,968.

Patentirano: Maj 1, 1888.



Svedoci:

Frank E. Hartley.

Pronalazač:

Frank B. Munsell. Nikola Tesla, Duncan, Curtis & Kite

Advokati:

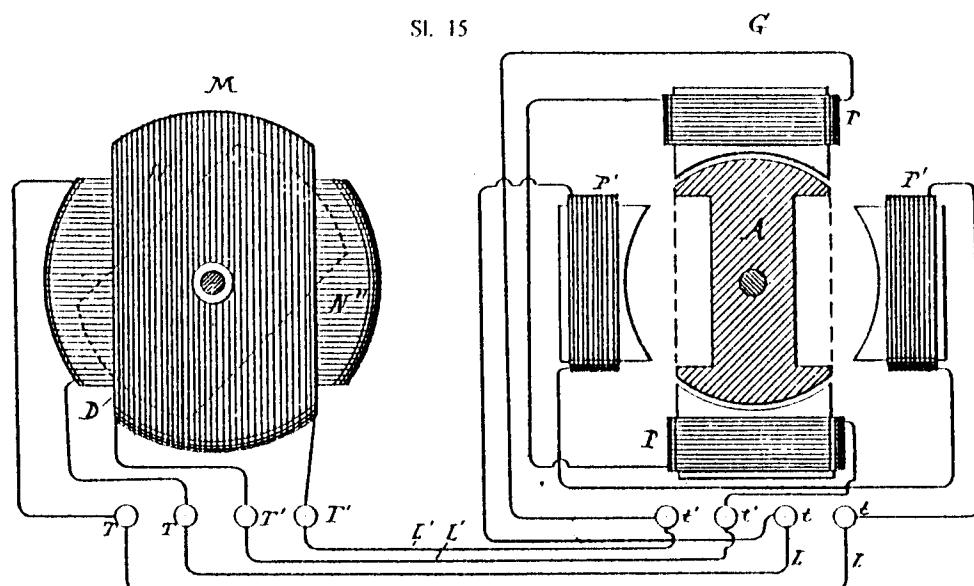
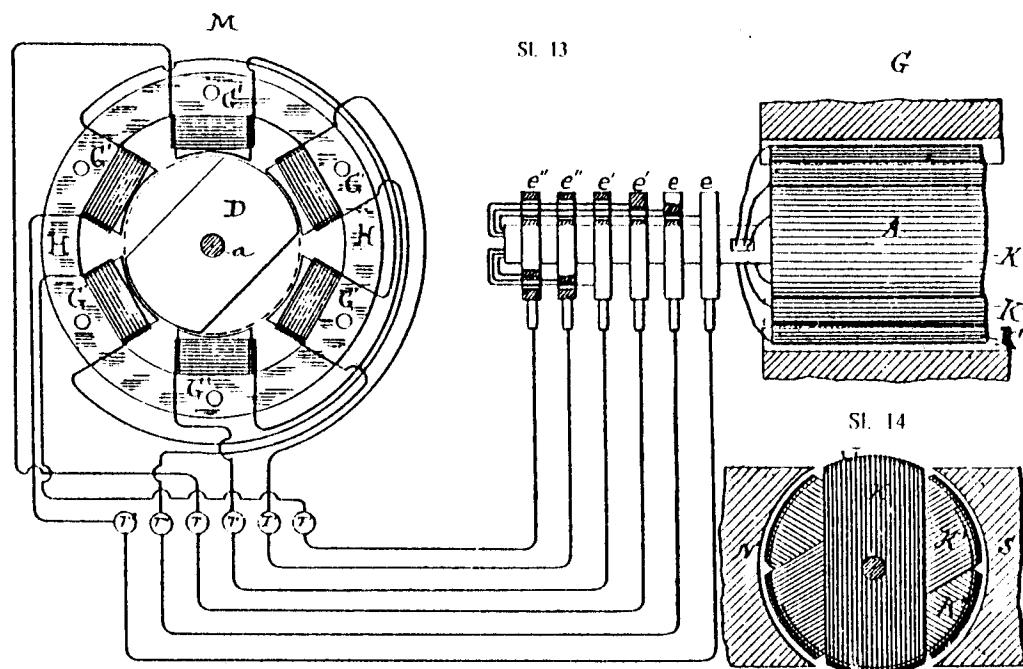
(Bez modela)

N. TESLA

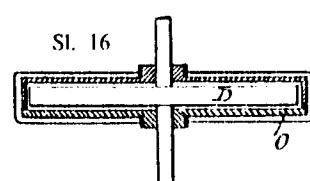
ELEKTROMAGNETSKI MOTOR

Br. 381,968

Patentirano: Maj 1, 1888.



Svedoci:
Frank C. Horsley.
Frank B. Murphy.



Pronalažač:
N. Nikola Tesla.
Advokati:
Dr. Duncan, Curtis & Page

Ovakvi motori imaju čitav niz prednosti nad motorima za jednosmernu struju: u normalnom režimu rada brzina motora je ravnomerna, povećan je stepen korisnog dejstva, konstrukcija je jednostavnija i jestinija, radom motora se lakše upravlja i manje se kvare.

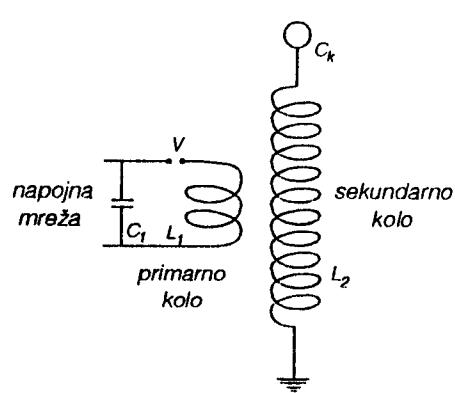
Mesec dana posle ovog patenta Tesla prijavljuje drugi u kome daje princip rada i dve konstrukcije asinhronog motora. Dok se kod sinhronog motora armatura rotira sinhrono sa obrtnim magnetnim poljima, kod asinhronog obitanje armature kasni za rotacijom magnetnog polja i to tim više što je motor jače opterećen. Do ovoga dolazi stoga što obrtno magnetno polje u namotajima proizvodi jake indukovane struje čije je magnetno polje toliko jako da se kombinacijom magnetnog polja statora i rotora postiže veliki obrtni moment.

Tesla je proučavao i načine vezivanja strujnih kola sa polifaznim strujama i ustanovio da postoje razna rešenja. Posebno je značajno što je otkrio da se kod trofaznih struja može koristiti sprega u zvezdu sa tri ili četiri provodnika i sprega u trougao sa tri provodnika.

Tadašnje monofazne električne centrale koje je Vestinghaus gradio isključivo za osvetljavanje radile su sa strujama od 124 i 133 Hz, ali Tesla predlaže niže frekvencije – 50 i 60 Hz dajući za to teorijska objašnjenja vezana za struju magnetizacije i druge fizičke procese koji se odvijaju u motoru.

1890. Tesla počinje da razrađuje ideje generisanja i primene visokofrekventnih naizmeničnih struja. Svojim pronalascima u ovoj oblasti utro je put čitavom nizu tehnika od kojih je najvažnija radiotehnika.

Istraživači njegovog vremena izbegavali su da eksperimentišu sa strujama opravdano ih smatrajući veoma opasnim. Jedna uzrečica glasi "Čovek se plaši onoga što ne poznaje", a Tesla očigledno nije posedovao strah od struja! Kako je gornja granica frekvencija naizmeničnih struja bila limitirana konstrukcionim rešenjima generatora, prvi korak u istraživanju predstavljalo je osmišljavanje konstrukcije multipolnih mašina. One su omogućavale proizvodnju struja znatno viših frekvencija.



Ubrzo potom Tesla izvodi čuveni varnični oscilator koji je u sebi sadržao tzv Teslin transformator. Novina je bila u tome što on nije sadržao gvozdeno jezgro, kao što je to slučaj kod običnih transformatora. Varnični oscilator je predstavljao kvalitativni skok u tehnici visokih frekvencija. Primarno kolo oscilatora sadrži varničar, kondenzator i primarni Teslinog transformatora, dok je u drugom kolu sekundarni Teslinog transformatora.

Pre Tesle kondenzator je predstavljao uređaj za sakupljanje statičkog elektriciteta, čijim je pražnjenjem dobijan elektricitet za potrebe istraživanja. Doduše, 1853. je lord Kelvin razradio teoriju oscilatornog kola (kola koje sadrži kalem i kondenzator), ali ponašanje kondenzatora uobičajnom kolu naizmenične struje uopšte nije ispitivano. Tek kada je konstruisao visokofrekventne generatore Tesla dolazi do epohalnog otkrića da se brzim punjenjem i pražnjenjem kondenzatora mogu ostvariti neprekidne oscilacije vrlo visoke frekvencije.

Kada su dva kola varničnog oscilatora u rezonanciji na krajevima sekundara Teslinog transformatora uspostavlja se potencijalna razlika reda 10^5 V i više, te se javljaju veoma duge varnice. Približavanjem staklene cevi sa razređenim gasom i to bez elektroda ona svetli pošto je indukovano električno polje toliko jako da može da jonizuje atome i molekule gasa. Tesla je čak razvio ideju o fosforisanju stakla tj. o njegovom prekrivanju nekakvim izolatorskim materijalom da bi se svetlosni efekat pojačao. Time je postavio temelje tehnologije izrade fluorescentnih cevi.

1892. po povratku iz Evrope Tesla intenzivno ispituje primenu visokofrekventnih struja u radiokomunikacijama. Ideju o četiri oscilatorna kola (dva emisiona i dva prijemna) razradio je naredne godine, ali je patentirao tek 1897.

Još je jedna oblast kojoj je Tesla postavio temelje - telemehanika tj. upravljanje pokretnim objektima sa daljine pomoću radio talasa. 1898. godine je Američkom patentnom birou prijavio svoj teledirigovani brodić. Ali, ova tehnika je bila toliko neshvatljiva, čak i inženjerima Biroa, da je Tesla bio primoran da svoj rad demonstrira u jednoj Njujorškoj luci.

Kao što je već rečeno 1891. Tesla je održao predavanje pod nazivom *Ogledi sa naizmeničnim strujama vrlo visokih frekvencija i njihova primena u metodama veštačke rasvete*. To je jedino predavanje ili članak, bar koliko je meni poznato, koje sadrži fizičko tumačenje elektriciteta u fundamentalnom smislu. Iako u svojim patentnim prijavama operiše pojmom linije sile u ovom predavanju etar je glavni nosilac električnih i magnetnih pojava. Prihvata mišljenje da se etar ponaša kao nestišljiva tečnost i da se ne može ni stvoriti ni uništiti. Smatra da su pojave vezane za statički elektricitet posledica etra pod pritiskom, a da električne struje i elektromagnetne pojave nastaju kretanjem etra. U jednom trenutku čak tvrdi da etar jeste elektricitet. No, sumnja u hipotezu etra javlja se kad je u pitanju etar kao nosioc električne struje. Jer ako se etar ponaša kao tečnost, a kroz tečnost se ne mogu provesti transverzalni talasi frekvencije nekoliko kiloherca kako se onda može očekivati da provodi oscilacije reda 10^8 Hz kolika je frekvencija visokofrekventnih struja. Ovo je vrlo nejasna argumantacija, jer svetlost prolazi kroz providne tečnosti a njena frekvencija je reda 10^{14} Hz. Doduše, ako podrazumeva prostiranje talasa na ogromnim rastojanjima, reda kilometra i više, njegov stav stoji. U tom slučaju došlo bi do apsorpcije talasa navedenih frekvencija u tečnosti.

Tesla ne veruje u postojanje dve vrste nacelektrisanja. On kaže: "Ako dakle takva stvar kao što je elektricitet postoji, onda može postojati samo jedan takav entitet i onda je vrlo moguće da višak ili manjak tog entiteta ili još verovatnije neka njegova svojstva daju čas privlačan, čas odbojan karakter. Stara Franklinova teorija, iako nas u nekim prilikama izdaje, sa izvesne tačke gledišta među svima je najzgodnija. Pa ipak, pored svega toga, teorija o postojanju dva elektriciteta je opšteprihvaćena, jer prividno objašnjava električne pojave na zadovoljavajući način. Ali teorija koja izvesne činjenice bolje objašnjava ne mora biti i istinita. Genijalni umovi izmišljaju teorije, koje se slažu sa posmatračkim činjenicama i obično svaki mislilac ima svoj stav o nekom predmetu". Ovakav stav je pogrešan. No, treba imati u vidu da je publikovan 1891. i da je verovatno s vremenom evoluirao.

Ipak, kao najverodostojniji Tesla smatra sledeći model – Molekuli i atomi se kreću po nekakvim planetarnim putanjama kovitlajući sa sobom i etar tj noseći statički elektricitet. Električne struje i magnetne pojave predstavljaju posledicu "elektrostatičkih molekulskih sila".

Ove protivrečnosti su možda posledica toga što Teslu praktičara one u principu i ne zanimaju previše. ("Među svim električnim pojавama najvažnije za proučavanje su električne struje radi njihovih već sada velikih i svakim danom rastućih primena u industrijske svrhe")

4.3. PRISTUP ISTRAŽIVANJU

O Teslinom metodu istraživanja vrlo je teško dati konačan sud. Analitičari, impresionirani njegovim ogromnim delom, gledali su samo u konačne rezultate, a kako je do njih došlo nije ih zanimalo. Sam je Tesla o svom istraživačkom postupku sklon da pravi mistifikacije. U autobiografiji *Moji pronalasci* previše ističe svoju mentalnu sposobnost stvaranja slika.

Da bi se stvorila nekakva predstava o njegovom istraživačkom postupku treba imati u vidu da je završio najbolje gimnazije (nižu i višu), da je Velika realka u Rakovcu "odgojila više tehnika nego i jedan drugi zavod u našoj domovini" (V.Muljević), da je pohađao jednu od najboljih Viših tehničkih škola u Evropi. Treba znati da se radi o eruditu obrazovanom na probranoj svetskoj literaturi i filozofiji, da je reč o poligloti koji je tečno govorio nemački, francuski, engleski, italijanski.

U mladosti, posebno za studentskih dana u Gracu i Pragu, mnogo vremena proveo je u biblioteci. Proučio je temeljno matematičku i fizičku literaturu (iz članaka se vidi da poznaje radove Franklina, Ampera, Aragoa, Faradeja, Kruksa, lorda Kelvina,...).

Tesla je posedovao izuzetnu sposobnost koncentracije i istrajnost u radu. U bučnom Njujorku u kome je proveo veći deo stvaralačkog života uspeo je da se izoluje od svakodnevice i da istražuje. A sam kaže da je imao manju da sve što započne i završi. Za ilustraciju može poslužiti anegdota po kojoj je nakon početka čitanja Voltera saznao da ovaj ima napisano oko sto tomova, i naravno sve ih je savladao.

Dobro potkovan znanjem sa gotovo fanatičnim radnim elanom, jer kako drugačije nazvati radni dan koji traje od 16 do 20 sati, kretao je u analizu i realizaciju svojih početnih ideja. Njegova primarna laboratorijska radionica bio je njegov um. Zbog fantastične memorije i pomenute mentalne sposobnosti u trenutku kada ideja stavlja na papir to je već potpuno zaokružen teorijski sistem sa izgrađenom konstrukcijom spremnom za aplikaciju. Da bi to ilustrovala citiraču poduži odlomak iz *Mojih pronađenih*:

"S ushićenjem sam primetio da mogu vrlo lako predočiti stvari. Nisu mi trebali uzorci, crteži ili eksperimenti. Mogao sam ih realno predočiti u svom mozgu."

Tako sam nesvesno razvijao, kako sam smatrao, novu metodu oživljavanja pronađenih zamisli i ideja koja je radikalno suprotna čistom eksperimentisanju, a po mom mišljenju, i mnogo brža i efikasnija. Od trenutka kada se napravi plan pa do časa kada se nezrela ideja počne praktično primenjivati, čovek je neizbežno sputan detaljima i greškama aparature. Kad započne usavršavati i rekonstruisati snaga njegove koncentracije opada i on zaboravlja velika osnovna načela. Rezultati se mogu postići, ali uvek na štetu kvaliteta.

Moja je metoda drugačija. Ne žurim sa praktičnim radom. Kada dobijem ideju počinjem da je gradim u svojoj mašti. Menjam konstrukciju, usavršavam je i u mislima puštam u rad. Apsolutno mi je nevažno da li turbinu pokrećem u mislima ili je ispitujem u laboratorijskim uslovima. Čak primećujem kad nešto nije uređu. Nema nikakve razlike, rezultati su isti. Na taj način mogu brzo razviti i usavršiti zamisao, a da ništa ne dodirnem."

Kad sam toliko odmakao u pronađenu da mogu sve usavršiti i kad ne otkrijem nikakvu grešku, uobičavam taj konačan proizvod uuma. Moji pronađeni radijatori radije upravo kako sam i zamislio, a ogledi teku tačno kako sam planirao. U dvadeset godina nema nijednog izuzetka. A zašto bi ga i bilo? Elektrotehnika i mehanika to potvrđuju svojim rezultatima. Jedva da postoji nešto što se ne bi moglo matematički obraditi, čiji se učinci ne bi mogli izračunati ili rezultati odrediti unapred iz teorijskih i praktičnih podataka. Provodenje nezrele ideje u praksi, kako se uglavnom radi, smatram da nije ništa nego gubitak energije, novca i vremena."

Kako je Tesla po vokaciji inženjer-pronađenik sve u njegovom radu je posvećeno konačnom cilju – konstrukciji uređaja. Ceo misaoni proces koji mu prethodi je u suštini priprema za eksperiment. On nesumljivo predstavlja teorijsku razradu modela, ali na način na koji ga Tesla prezentira, to je neka vrsta misaonog eksperimenta. On svoj model vizualizuje, pa

ga zatim tretira kao laboratorijski uređaj sa kojim vrši oglede. Tako otkriva nove pojave i principe (npr obitno magnetno polje) njima posvećuje manje pažnje, već se usredsreduje na njihovu primenu. Tako temeljno osmišljen pronalazak ulazi u fazu laboratorijske izrade i testiranja.

Laboratorije je Tesla sam stvarao i opremao finansirajući njihov rad iz sredstava koje je dobio prodajom prava na korišćenje patenata. Tesline laboratorije bile su čuvene i privlačile su pažnje naučnog sveta (Helmholc, lord Kelvin) zbog uređaja za ispitivanje i merenje koje je sam pronalazio i izrađivao, i koje je neprekidno usavršavao.

Mada kaže da se njegova otkrića mogu matematički obraditi on sam to ne radi. Tek u pokojem članku može se naći neka jedanačina i to vrlo jednostavna (obično trigonometrijska pošto se radi o naizmeničnim strujama). Osnovno sredstvo za demonstriranje principa su mu slike tij crteži. Oni su fantastično jasni, očišćeni od svih detalja koji bi zamutili suštinu.

Tesline patentne prijave predstavljaju njegove naučne radove. Koliko je danas poznato u SAD Tesla ima registrovanih 112 patenata i još 109 manje više istih po sadržaju u 25 drugih zemalja sveta među kojima su, osim evropskih, i zemlje kao Meksiko, Indija, Rodezija, Novi Južni Vels, Japan, Novi Zeland,... Patentne prijave je smatrao najpogodnijim oblikom publikacije, pošto su po ustaljenom običaju zahtevale precizan teorijski opis otkrića, detaljno razrađene principe i ilustracije, kao i samu konstrukciju. Pored toga patentna forma je na najbolji način omogućavala da njegovi pronalasci što pre dobiju praktičnu primenu. Stoga Tesla lično nikad nije pravio pitanje o povredama svojih patentnih prava. Sudski procesi koji su o tome vođeni pokretale su Kompanije koje su ta prava otkupile.

Patentni sporovi:

Nikola Tesla – Galileo Feraris (Galileo Ferraris). Spor oko otkrića obitnog magnetnog polja.

Feraris je 18.03.1888. objavio saopštenje u kome razmatra eliptično obitno polje monofazne struje i na osnovu toga je smatrao da je on nosilac prioriteta. Osim toga, motor koji je konstruisao na principu ovog otkrića karakterisao je mali koeficijent korisnog dejstva pa ga je sam Feraris predlagao samo za školske demonstracije i za merne uređaje. Nasuprot tome nalaze se dve Tesline patentne prijave iz 12.10.1887. i 20.12.1887. koje se odnose na dvofazne i trofazne struje i odgovarajuće elektromotore sa detaljnim opisom obitnog magnetnog polja. Ipak spor se vukao do 1900., ali nakon toga Teslin prioritet više niko nije dovodio u pitanje.

Nikola Tesla – M.O.Dolivio-Dobrovolski (M.O.Dolivio-Dobrowolsky). Pitanje prioriteta oko otkrića polifaznog sistema.

Dolivio-Dobrovolski, daroviti konstruktor nemačkog koncerna AEG poznavajući Tesline patente iz 1887. i 1888. za relativno kratko vreme uspeva da izgradi trifazni motor s vrlo dobrim stepenom korisnog dejstva. Na osnovu unetih manjih konstrukcionih novina 08.03.1889. u Nemačkoj podnosi patentnu prijavu, pa je u Evropi on važio kao pronalazač polifaznog sistema. Ali dve godine kasnije sam Dolivio-Dobrovolski priznaje "da prvenstvo za polifazne mašine pripada Tesli".

Nikola Tesla - Darsonval. Pitanje prioriteta oko otkrića fiziološkog dejstva visoko-frekventnih struja.

Dvojica naučnika su nezavisno došla do ovog otkrića, ali je Tesla svoje objavio dva meseca ranije. Međutim, u literaturi se dugo održao pojam darsonvalizacija za jednu medicinsku tehniku.

Nikola Tesla - Aleksandar Stjepanovič Popov.

Popova mnogi smatraju pronalazačem antene i osnova radiokomunikacije na osnovu njegovih radova iz 1896. Ali Popov kaže: "Markonijeva upotreba uzdignute katarke u predajnoj i prijemnoj stanci sa izolovanom žicom u cilju prenošenja signala pomoću električnih oscilacija nije, međutim, bilo ništa novo. U Americi je još 1893. poznati elektrotehničar Nikola Tesla izvršio opite uz prenošenje signala".

Nikola Tesla - Duljermo Markoni (Guglielmo Marconi, 1874–1937)

1911. u Francuskoj firma Marconi- S.F.R. pokreće spor protiv Tesle. Markoni se dotada u Evropi prikazao kao pronalazač četiri oscilatorna kola u rezonanciji na osnovu pogrešno izdatog evropskog patentu iz 1900. Od toga je Markoni imao ogromne prihode. Par godina nakon pokretanja spora Markoni se sam odrekao prava na licencu za ovaj pronalazak, ali samo za Francusku i uz uslov da S.F.R. ovome ne daje nikakav publicitet. Svaki komentar je izlišan!

1916. englesko društvo Markoni pokreće u SAD spor protiv povrede Markonijevog patentu. Ovaj sudski spor je završen tek juna 1943., posle Tesline smrti, uz komentar da je Teslin patent prijavljen sedam godina pre Markonijevog. Dodela Nobelove nagrade Markoniju 1909., a bio je kandidovan već 1901., za razvoj bežične telegrafije ostaće jedna od senki na ovu respektabilnu nagradu.

Navodno je 1915. postojala namera da se Nobel za fiziku dodeli zajednički Tesli i Edisonu. Po toj priči bez potvrde od ideje se odustalo zbog Teslinog odbojnog stava prema nagradama i zbog međusobne netrpeljivosti dvojice velikih pronalazača.

Tesla je na području elektrotehnike stvarao petnaest godina (1885–1900). Koliki je trag ostavio na nauku i tehniku, a posebno na svakodnevni život, svojim pronalascima lako se može oceniti. Dovoljno je zamisliti svet bez njegovih otkrića.

5. ZAKLJUČAK – UPOREDNA ANALIZA METODE ISTRAŽIVANJA

Ishodište (background) i formalno obrazovanje su faktori koji mogu bitno, ali ne i presudno, uticati na razvojni put tj odabir oblasti istraživanja naučnika. Stoga od njih i počinje ova analiza.

Faradej potiče iz siromašne i neobrazovane porodice. Formalno, stekao je samo osnovno obrazovanje. On predstavlja arhetip samoukog naučnika. Znanja je sticao prevashodno kroz praksu, odnosno kroz rad uz druge istraživače, a znatno manje samostalnim izučavanjem stručne literature.

Nasuprot njemu nalazi se Meksvel koji je ogromno znanje stekao već u krugu svoje porodice. Povrh toga završio je elitne škole i univerzitete, poput Triniti koledža čiji su diplomci bili jedan Njutn i lord Kelvin.

Tesla se nalazi negde između. Po evropskim standardima (bilo bi besmisleno praviti komparaciju s prethodnom dvojicom, a držati se standarda koji važi za Liku) porodica mu je bila siromašna, ali obrazovana. Tesla je završio najbolje škole u zemlji, a zbog loše finansijske situacije ne uspeva da okonča studije na vrhunskim školama u Gracu i Pragu. Međutim, u neku ruku i Tesla se može smatrati samoukim. Ali za razliku od Faradeja znanja stiče samostalnim proučavanjem obimne stručne literature u bibliotekama evropskih centara tehnike.

Po jednoj definiciji nauka predstavlja organizovano znanje. Zato je prvi korak u razvoju bilo koje nauke sakupljanje činjenica. Kada je broj akumuliranih činjenica dovoljan kreće se u njihovu interpretaciju nekakvim opštim principom. Da bi se taj princip smatrao teorijom ili zakonom mora dati objašnjenje već registrovanih činjenica, kao i onih koje će tek biti otkrivene. 18. vek je za elektromagnetizam bio vek prikupljanja činjenica na kojima će se u narednom veku izgraditi moćna teorija. Faradej i Meksvel predstavljaju dva stožera te teorije. Uloga Tesle ima drugačiju specifičnu težinu, njegov primaran doprinos je u "primenjenoj fizici".

Uobičajeno je da se pristup istraživanju deli na teorijski i eksperimentalni. Ali se ova dva postupka gotovo uvek dodiruju i to na jedan od sledeća tri načina: kada se naučna teorija proverava putem ogleda, primenom teorije u planiranju ogleda ili primenom teorije za postizanje nekog praktičnog cilja. Zato se za jednog naučnika ne može reći da je čist eksperimentalac u najširem smislu reči, mada je Faradej najbliži toj odrednici.

Radovi tri istraživača su na neki način komplementarni – primarni Faradejev doprinos na polju elektromagnetizma je eksperimentalni, Meksvela teorijski, a Tesle praktični.

Faradeja i Teslu karakteriše eksperimentalni metod rada u širem smislu, ali se međusobno bitno razlikuju. Naime, treba imati u vidu da se eksperiment odvija u tri stadijuma: planiranje i osmišljavanje, izrada uređaja i postavka, i konačno samo izvođenje.

Faradejeva priprema za izvođenje ogleda je minimalna. Posebno ga ne planira, već se mahom oslanja na uređaje i eksperimente svojih kolega savremenika. Obično u ovoj fazi nema nikakvih novina. Tek u samom praktičnom radu, kako se koji ogled završi, sa fantastičnom intuicijom vrši izmene u postavci. Njegovo izvođenje eksperimenta spada u kategoriju metoda zajedničke promene, po kome jedna pojava uvek izaziva promenu druge. Veza između dveju pojava je uzročno-posledična, a metod je kvantitativan pa zahteva merenje.

Za razliku od Faradeja, Teslino planiranje i osmišljavanje ogleda je veoma temeljno. On već u ovom stadijumu obilno eksploatiše teoriju. Početnu ideju Tesla teorijski analizira, razrađuje principe i konačno osmišljava aparatuру do najsitnijih detalja. Priprema za rad u laboratoriji je tako kvalitetno izvedena da izrada uređaja i realizacija eksperimenta teče bez teškoća.

Ono što bitno razlikuje pomenutu dvojicu naučnika je i put kojim idu nakon izvođenja ogleda. Faradej kreće u teorijsku interpretaciju rezultata, dok se Tesla koji već ima oformljenu teoriju usmerava na praktičnu primenu svog otkrića.

Meksvel je teoretičar i njegov primarni cilj je da otkrivene posmatračke činjenice opiše fizičkim zakonom koji će dati i u matematičkoj formi. Pored toga on već formulisane zakone oblači u matematičko ruho.

Ono što je zajedničko Faradeju i Meksvelu je primena principa analogije i sa njim povezana izgradnja mehaničkih modela. Obojica svoje modele razvijaju na nivou molekula i atoma. Obojica prihvataju koncept etra. Ali, Meksvel je znatno izdašniji u modeliranju.

Svu trojicu karakteriše sklonost da svoju teoriju ilustruju crtežima. To je Faradeja dovelo do koncepta linija sile koji je postao opšteprihvaćen. Meksvel potrebu za ilustracijama pravda potrebom da teoriju približi ljudima. Tesli su crteži neophodno sredstvo, pošto patentna prijava i kasnija realizacija uređaja to zahtevaju.

O pristupu istraživanju Faradeja, Meksvela i Tesle može se dati jedna pojednostavljena slika formulacijom pitanja koje su sebi postavljali u radu. Tako Faradeju odgovara pitanje "Šta?". On nema na početku jasnu sliku o pojavi koju istražuje. Zato kad je registruje razmišlja šta je uzrokuje i šta su njena svojstva. Meksvelovo pitanje je "zašto?". Iz eksperimentalnih radova drugih fizičara on zna činjenice o nekoj pojavi, ali želi da dâ objašnjenje zašto se ona javlja i stoga formira modele ili kasnije gradi teoriju polja. Osnovno Teslino pitanje je "kako?" iza koga se skriva praktičar. On stalno razmišlja kako da usavrši postojeće konstrukcije uređaja i kako da ostvari neku ideju iz čega proizilaze sva njegova otkrića.

Još jedna zajednička karakteristika im je da su radili sami, bez saradnika. Za Meksvela je to bilo za očekivati, jer je teorijski rad po definiciji samostalan. Dok su Faradej i Tesla izabrali taj put prevashodno zbog strukture svoje ličnosti. Faradej je bio opsednut prioritetom, iznad svega mu je bilo važno da bude prvi, jer je verovao da niko ne može da uradi ono što on zamisli. Tesla je u onom što je bitno, a to je rad na otkriću, radio sam, a u realizaciji je imao asistenta. Stalne saradnike, osim Sigenija, nije imao jer je najpre često menjao mesto boravka, kako nije imao sredstava da plaća asistente, pošto je u početku rada malo ljudi verovalo u njegov sistem polifaznih struja, a kasnije zbog promene oblasti rada sam nije imao potrebe za saradnicima.

S ovim je povezan i odnos prema mentorima, kao i odnos prema stručnjacima koji su osporavali njihov rad. Jako izražena naučnička sujeta je svojstvena Faradeju, pa se ignorantski odnosio prema svima čije je naučne domete smatrao nižim od svojih. Iako je doživljavao teške udarce tokom celog radnog veka ostao je dosledan do kraja. Bio je vrlo osjetljiv na napade, ali ih je podnosio sa stočkom istražnošću. Stupao je u polemiku, ali se ograničavao samo na činjenice puštajući da one govore same za sebe. Meksvel i Tesla su uvek o svojim profesorima govorili sa dužnim poštovanjem. Meksvelovi saradnici o njemu govore kao o uvek smirenom i apsolutno iskrenom čoveku koga je svako mogao kritikovati. Nije stremio slavi i nije bio egoista, ali su mnogi strepeli od njegovog presinjenog sarkazma.

Sva trojica istraživača u nasleđe su ostavila obimnu literaturu (članke, knjige, predavanja, patentne prijave). Ako je Faradeju svojstvena "multiplikacija dokaza" još više ga odlikuje multiplikacija podataka. Radovi su mu preobimni jer sadrže mnoštvo nepotrebnih stvari, pa se suština izgubi ako čitalac nije pažljiv. Iz ličnog iskustva mogu reći da npr, iako znam kako glase tzv Faradejevi zakoni elektrolize, nekoliko puta sam morala pročitati originalni rad da bih našla formulaciju smeštenu na kraju ili u sredini pasusa koji obiluje sporednim podacima. Osim toga, otežavajuća okolnost je u tome što naučni jezik 18. veka još nije jasno izdiferencirao neke osnovne pojmove, pa postoji nedoumica na koji se od njih tvrdjenje odnosi. Meksvelovi radovi su takođe obimni, ali glavnu zamerku predstavlja nekonzistentnost. Teslin stil pisanja, već zbog zahteva koje pred izumitelja postavlja forma patentne prijave, je primer preglednosti i jasnoće. Nadopunjjen savršenim tehničkim crtežima predstavlja udžbeničku građu za inženjere elektrotehnike.

O metodu zaključivanja teško je doneti sud prvenstveno zbog protivrečnih i različito definisanih pojnova indukcije i dedukcije u literaturi iz filozofije nauke. Ako se induktivni metod shvati kao onaj koji polazi od singularnih iskaza (rezultati posmatranja i eksperimenata) i kreće se ka formiranju univerzalnih iskaza (hipoteze, teorije) tj kao metoda kojom se utvrđuje materijalna istinitost premisa, Faradej primenjuje ovaj metod. Nasuprot tome, Meksvel je pripadnik deduktivne škole, jer ovaj metod ne zanima da li je premisa tačna ili nije u doslovno

materijalnom smislu, već samo da nema unutrašnjih protivrečnosti, kao i protivrečnosti s filozofskim principima.

Razvoj nauke predstavlja evolutivni proces sa povremenim diskontinuitetima. Radovi ove trojice naučnika predstavljaju te skokove u razvoju elektromagnetizma. Kod svake iole obrazovanje osobe prve asocijacije koje se javi pri pomenu njihovih imena su: Faradej – elektromagnetna indukcija, Meksvel – teorija elektromagnetskog polja, Tesla – Naizmenične polifazne struje. Nauku 19. veka karakteriše materijalizam i striktni determinizam. Krajem veka glavni zagovornici korpuskularne teorije elektriciteta bili su Faradej i Meksvel. Na osnovu njihove teorije Lorenc (Hendrik Antoon Lorenz, 1853–1928) razvija tzv elektronsku teoriju koja predstavlja novu etapu u razvoju elektromagnetizma. Osim što je dopunio i zaokružio Meksvelov sistem jednačina, Herc je ispitivao elektromagnetne talase i dobio "zrake električne sile" tj radiotalase. U njima je Kruks (William Crookes, 1832–1919) video mogućnost bežične telegrafije, koju će tehnički osmislići Tesla. Teslin doprinos uvođenju i razvijanju sistema polifaznih naizmeničnih struja i radiotehnike odrazio se drastično na poboljšanje uslova života i privredivanja.

1891. Tesla je rekao: "Ništa nije primamljivije za proučavanje od prirode. Shvatiti taj veliki mehanizam, pronaći sile koje u njemu deluju i zakone koji njime upravljaju, jeste najuzvišeniji zadatak ljudskog uma". Faradej, Meksvel i Tesla tom najuzvišenijem zadatku posvetili su svoje živote. Otrgnuvši mrvu tajni Prirode zadužili su čovečanstvo.

LITERATURA

1. Milorad Mlađenović - Razvoj fizike (Mehanika)
IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1986.
 2. Milorad Mlađenović - Razvoj fizike (Elektromagnetizam)
IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1987.
 3. Milorad Mlađenović - Razvoj fizike (Termodinamika)
Naučna knjiga, Beograd, 1989.
 4. Milorad Mlađenović - Koraci otkrića prirode
IR Gradina, Niš, 1991.
 5. Milorad Mlađenović & Mirko Jakšić - Istorija klasične fizike (za učenike srednjih škola)
Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd i Zavod za udžbenike, Novi Sad, 1993.
 6. Džems Džins - Fizika kroz vekove (prevod sa engleskog)
Novo pokolenje, Beograd, 1952.
 7. Борис Иванович Спасский - История физики (у два тома)
Библиотека школы, Москва, 1977.
 8. Branko Đurić - Veliki fizičari
Tehnička knjiga, Beograd, 1964
 9. Svetislav Marić - Na izvorima fizike
Kulturni centar, Novi Sad, 1971.
 10. William Francis Magie - A Source Book in Physics
Harvard university Press, Cambridge, Massachusetts, 1969.
 11. Encyclopædia Britannica, London, 1963.
 12. Milinko Šaranović - O suštini fizičkih teorija Faradeja i Maksvela
BIGZ, Beograd, 1971.
 13. N Šahovska & M Šik - Majkl Faradej; Pripovest o životu i radu maloga knjigovesca koji je postao veliki naučnik (prevod sa ruskog)
Tehnička knjiga, Beograd, 1956.
 14. Джемс Клерк Максвелл - Статьи и речи
Наука, Москва, 1968.
 15. Ivan Supek - Teorijska fizika i struktura materije I deo
Školska knjiga, Zagreb, 1988
 16. Đorđe Mušicki - Uvod u teorijsku fiziku III - Elektrodinamika sa teorijom relativnosti
Građevinska knjiga, Beograd, 1982.
-

17. Branko Popović - Osnovi elektrotehnike 1
Građevinska knjiga, Beograd, 1982.
 18. Branko Popović - Osnovi elektrotehnike 2
Građevinska knjiga, Beograd, 1981.
 19. Branko Popović - Elektromagnetika
Građevinska knjiga, Beograd, 1980.
 20. Nikola Tesla - Moji pronalasci (prevod sa engleskog)
Školska knjiga, Zagreb, 1977.
 21. Slavko Bokšan - Delo Nikole Tesle
Naučna knjiga, Beograd, 1950.
 22. Nikola Tesla - Radovi iz oblasti elektroenergetike (zbornik)
Naučna knjiga, Beograd, 1988.
 23. Đorđe M. Stanojević - Nikola Tesla i njegova otkrića (reprint izdanja iz 1894. godine)
Institut za stručno usavršavanje i specijalizaciju zdravstvenih radnika, Beograd, 1976.
 24. Nikola Tesla, povodom njegove 80-godišnjice
Društvo za podizanje Instituta Nikole Tesle, Beograd, 1936.
 25. Teslin čudesni svet elektriciteta (zbornik)
Fond Nikola Tesla, Muzej Nikola Tesla, Društvo za širenje naučnih saznanja Nikola Tesla, Beograd, 1984.
 26. Nikola Tesla - Radiotehnika (zbornik)
Muzej Nikola Tesla i Elektroprivreda Srbije, Beograd
 27. Katalog Teslinih patenata
Muzej Nikola Tesla, Beograd, 1987.
 28. Ćiril Petešić - Genij s našeg kamenjara
Dečje novine, Gornji Milanovac, 1979.
 29. Dragiša Ivanović - Nikola Tesla
Kolarčev narodni univerzitet, Beograd, 1948.
 30. Aleksandar B. Damjanović - Teslino delo u elektrotehnici
Narodna knjiga, Beograd, 1952.
 31. Džon O'Nil - Nenadmašni genije, život Nikole Tesle
 32. Vladimir Bazala - Pregled povjesti znanosti (Razvoj ljudske misli i obrazovanja)
Školska knjiga, Zagreb, 1980.
 33. Turning Points in Physics
Harper Torchbook, New York
 34. James Jeans - The New Background of Science
University Press, Cambridge, 1934.
 35. Alfred Nort Vajthed - Nauka i moderni svet (prevod sa engleskog)
Nolit, Beograd, 1976
-

36. Aleksandar Koare - Naučna revolucija (prevod sa francuskog)
Nolit, Beograd, 1981.
 37. Branko U. Pavlović - Filozofija prirode
Naprijed, Zagreb, 1979.
 38. Марио Бунге - Философия физики
Прогресс, Москва, 1975.
 39. Moris Koen & Ernest Najgel - Uvod u logiku i naučni metod (prevod sa engleskog)
Zavod za izdavanje udžbenika SRS, Beograd, 1965.
 40. Karl Popper - Logika naučnog otkrića (prevod sa engleskog)
Nolit, Beograd, 1973.
 41. Zdenko Dizdar - Nobelove nagrade za nauku
Glosarijum, Beograd, 1991.
-