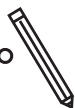
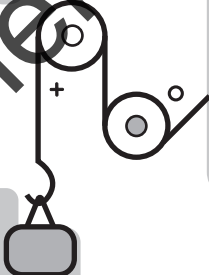
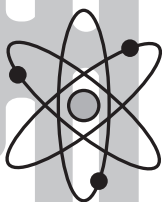
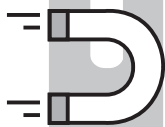


# LEKCIJE

5. dio

element.hr



# Elektrostatika<sup>44</sup>

## Uvod

U prethodnim sam lekcijama pozornost posvetio temama koje učenici susreću u prvoj godini srednjoškolskog obrazovanja (iznimka je dio vezan za dinamiku rotacije krutog tijela). Ispisujući ih često sam dramatično naglašavao njihovu *svemirsku važnost*, ponajviše se nadajući da bi netko od *kreatora kurikula* fizike mogao pomisliti: *Što smo to “uvalili” djeci?* Ne trebate se brinuti, to se neće dogoditi i vi ćete i dalje učiti *matematiku misleći da je to fizika*. Pitajući se kako bih mogao osmisliti petu lekciju, a da bude *prirodan nastavak* prethodnih, odlučio sam krenuti u *nevidljivo područje* elektromagnetizma. To su ujedno teme zastupljene u drugom razredu učenja fizike. Motiv je bio prirodan. Poželio sam priču o električnom polju povezati s pričom o gravitacijskom polju – i *preuzeti slične rezultate*. Drugi motiv je važniji. Želim vas što prije upoznati s još

<sup>44</sup> Tales iz Mileta (600. pr. Kr.) zabilježio je da jantar (grč. ἤλεκτρον, *ēlektron*) kada se tare, privlači sitne čestice tvari, a William Gilbert otkrio je da i druge tvari, a ne samo jantar, imaju “električno” svojstvo. Pojavu električnoga odbijanja prvi je 1672. opazio Otto von Guericke, a 1663. konstruirao je prvi elektrostatski stroj na trenje. Razliku među vodičima i izolatorima otkrio je Stephen Gray. Francuski kemičar Charles François de Cisternay du Fay utvrdio je 1734. različitost električnoga naboja nastaloga trljanjem stakla od naboja nastaloga trljanjem smole, a Georg Christoph Lichtenberg nazvao je pozitivnim električni naboj nastao trljanjem stakla. Leidenska boca, prvi oblik električnoga kondenzatora, konstruirana je 1745. Oko 1747. Benjamin Franklin zaključio je da se trenjem stvaraju uvijek jednake količine pozitivnog i negativnog električnog naboja. Istraživanjem sila koje djeluju među česticama nabijenima električnim nabojima bavili su se Henry Cavendish i Joseph Priestley, a zakon o ovisnosti privlačne ili odbojne sile o električnim nabojima i udaljenosti među česticama nabijenima električnim nabojima formulirao je 1785. na osnovi pokusa Charles Augustin de Coulomb, pa se po njemu mjerna jedinica električnoga naboja naziva kulon (C). (*Hrvatska enciklopedija*, mrežno izdanje, LZMK, 2021.)



jednim *svemirski moćnim svojstvom materije* da bismo što lakše krenuli prema temi: *zakoni očuvanja*.

**Elektrostatika** (elektro- + -statika), grana fizike koja se bavi istraživanjem polja, sila i pojava nastalih među mirnim česticama nabijenima električnim nabojem. (*Hrvatska enciklopedija*, mrežno izdanje, LZMK, 2021.)

## Električni naboj

Ako ste pogledali fusnotu, jasno vam je da je ova priča počela davno i strpljivo čekala svoj nastavak više od dvije tisuće godina. Puno duže od *mehaničke priče*. Nazvao bih to prirodnim razvojem znanosti. Ljudi najprije počinju promišljati neposrednu okolinu koja izravno utječe na njihove živote. Korisnost znanja o tome zašto jantar privlači peke čestice, bila je tada zanemariva. Priču ću započeti *in medias res* (u središte radnje, u središte zbivanja). Prepoznali smo svojstvo tvari, nazvali ga (električni) naboj i krenuli u istraživanje. Do sada smo se već navikli da je prvi korak istraživanja vezan za (vidljivo) djelovanje. Dakle, trebalo je *pronaći silu* kojom jantar djeluje na čestice. Istraživanja su pokazala da je djelovanje *privlačno, odbojno* i *“nezainteresirano”*. Prema djelovanju nazvali su (električni) naboj: pozitivni, negativni i neutralni. Utvrđeno je da se naboji *“istog naziva” odbijaju*, a suprotnog privlače. Neutralnom naboju (kao svojstvu) dugo nisu posvećivali pozornost. Pokazalo se da su međudjelovanja naboja značajno intenzivnija u odnosu na intenzitet djelovanja između masa, tako da su bila u području puno učinkovitijih mjerenja. Recimo da je Charles Augustin de Coulomb uspio otkriti zakon međudjelovanja.

Ukratko ću navesti matematičku interpretaciju električnog djelovanja, prije svega upućujući na sličnost s matematičkim zapisom gravitacijskog djelovanja.

**Električni naboj** je osnovno svojstvo materije. Manifestira se kao pozitivan, negativan i neutralan. Najmanja količina naboja (kvant naboja) iznosi

$$e = \pm 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Nosioći elementarnog naboja su proton, pozitron ( $+e$ ) te elektron ( $-e$ ). Masa protona iznosi

$$m_p = 1,6724 \cdot 10^{-27} \text{ kg},$$

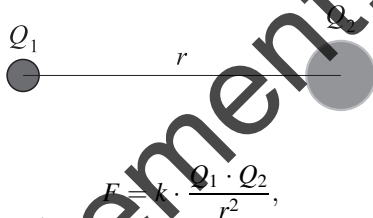
a pozitrona i elektrona

$$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ kg}.$$

Bilo koja se količina naboja može prikazati kao određeni broj ( $N$ ) elementarnih naboja

$$Q = Ne.$$

**Coulombova (električna) sila** je sila koja opisuje međudjelovanje naboja. Sila je privlačna ako su naboji različitog predznaka, odnosno odbojna ako su naboji istog predznaka. Električno djelovanje ne postoji ako je naboj neutralan. Sila je proporcionalna umnošku naboja, a obrnuto proporcionalna kvadratu njihove udaljenosti,



$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}, \quad \epsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}.$$

Mislim da se lako može prepoznati da je  $Q$  simbol koji predstavlja naboj. Navedene konstante su:  $k$ , kulonova konstanta i  $\epsilon_0$  permitivnost, konstanta koja upućuje na električna svojstva sredstva (u ovom slučaju vakuuma/ zraka). Spomenute su (elementarne) čestice proton, elektron i pozitron, ali i elementarni naboj.

Postupkom *in medias res* izbjegao sam sve priče koje su prethodile stvaranju ovog matematički elegantnog i jednostavnog zakona. Fizika se prepoznaje u prirodi djelovanja (privlačno, odbojno), u ovisnosti o nabojima te međusobnoj udaljenosti naboja. Za one bez znatiželje to je dovoljno. Dobili su jednostavan alat za rješavanje mnogih elektrostatskih problema. Ovakav pristup fizici je u udžbenicima fizike nažalost uobičajen. Temelji se samo na razumijevanju matematičkih odnosa. Priču sam započeo s:



*električni naboj je osnovno svojstvo materije.* Budući da su lekcije usmjerene prema razumijevanju, krećem prema značenjima *svojstvo materije* (tvari) i riječi *električni naboj*. Prva sintagma je u zoni samorazumljivosti, a drugu možemo prepoznati u fusnoti u kojoj jantar (elektron) povezujemo s navedenim pojavama. Međutim, riječ *naboj* je u hrvatskom jeziku poput kameleona, u značenjima od *gnojne upale do količine neke vrste energije u nekom tijelu*. Ja sam se opredijelio za značenje vezano samo za *upalu*, koju interpretiram kao *promjenu stanja tijela*. Dakle, kad *imaš naboj (upalu)*, *promijenjeno ti je stanje* i u takvom stanju *imaš neka nova svojstva*.

Namjerno inzistiram na ovakvom definiranju riječi naboj jer se dobiva spektar u kojem je prirodno najaviti barionski naboj, leptonski naboj... Ako pretpostavimo da nam je sada jasno značenje rečenice, još uvijek nam nije jasno što je električni naboj. Suočeni smo s problemom koji smo već sreli u pokušajima razumijevanja mase i energije. Jedino što nam predstoji jest, *intuitivna spoznaja i zaključak: takva je priroda*.

## Električno polje

Nastavak priče naslućujemo. Budući da u *prostoru oko naboja* vidimo samo posljedice djelovanja na tijelo, zaključujemo kako je riječ o *fizičkom polju*, ali drukčije prirode od polja koje je “*proizvela masa*” (izvor polja<sup>45</sup>). Ovo polje djeluje na čestice koje imaju električni naboj. Mislim da je u električnom naboju lako prepoznati izvor takvog polja i zaključiti: *električni naboj stvara električno polje*<sup>46</sup>. Fizičko polje karakterizira se jednom fizikalnom veličinom: potencijalom. Iz funkcije potencijala se jednostavnim matematičkim zahvatom lako dobije funkcija jakosti polja (ona nam je zanimljiva jer opisuje intenzitet vidljivog djelovanja, silu). Budući da je matematički prikaz gravitacijske

<sup>45</sup> Na ovom mjestu moram reći da Feynman *kao izvor gravitacijskog polja navodi energiju*. Masu intepretira kao oblik energije, pa je zaključak logičan. Takva je interpretacija preapstraktna i za one koji razumijevaju fizikalne procese. Budući da je ovo priča za srednje škole, a nije u zoni pogrešnosti, nastavljam s masom kao izvorom polja.

<sup>46</sup> Neki vole reći da električni naboj “ne postoji bez polja”, tj. da svoje polje *nosi sa sobom*.

sile isti kao i matematički prikaz električne sile, možemo samo preuzeti poznate nam matematičke formule za jakost i potencijal u električnom polju. To i činimo s dodatkom. Riječ je o centralno simetričnom električnom polju. Ovaj dodatak otvara novo područje u promišljanju polja. Kad je bila riječ o gravitacijskom polju, taj sam detalj naveo “usputno” i samo zbog ove intervencije. Naime, primjetna gravitacijska polja u pravilu stvaraju masivna tijela sfernog oblika. Neke složenije priče aktiviraju se na svemirskim razinama. Ali kad je riječ o električnim poljima, puno se češće susrećemo sa složenim poljima. Međutim, ako ne dođemo u zonu razumijevanja sfernosimetričnog polja, nerazumijevanje električnih fenomena bit će nam trajna konstanta. Dakle, **centralno (sferno) simetrično polje** stvara točkasti naboj, odnosno naboj raspodijeljen po površini kugle. Jakost i potencijal električnog polja matematički su definirani funkcijama

$$E(r) = k \cdot \frac{Q}{r^2}, \quad \varphi(r) = k \cdot \frac{Q}{r},$$

gdje je  $Q$  – naboj koji stvara polje, a  $r$  – udaljenost točke u polju od središta “izvora” polja  $Q$ . Naravno, preuzimamo i:

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q, \quad E_p = \varphi \cdot q,$$

gdje je  $q$  naboj tijela koje se našlo u električnom polju, koje je stvorilo tijelo naboja  $Q$ .

## Izgled (struktura) polja

Zamišljanje izgleda nekog fizičkog polja je proces koji nas odvodi u apstraktne svjetove. Vizualizacija gravitacijskog polja dugo je ostala u apstraktnom području jer je mjerenje gravitacijskih učinaka u laboratorijskim uvjetima prezahtjevno. Budući da su naša iskustva povezana samo sa sfernosimetričnim gravitacijskim poljem, nismo se zamarali pokušajima vizualizacije, međutim “složenost” električnih polja tražila je “potporu” u pokušaju vizualizacije. I domišljene su silnice. Naziv sugerira povezanost sa (nezaobilaznom) silom.

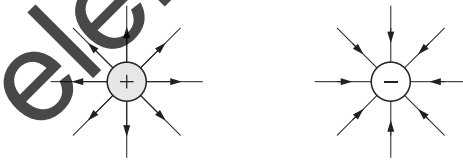
**Digresija.** Idemo se malo zabaviti. Mislim da su sintagme *riječna struja* i *strujanje rijeke* svima u zoni vidljivosti i razumijevanja. Pretpostavljam, ipak, da su se rijetki priupitali za



značenje riječi *strujanje* jer svi će strujanje prepoznati kad ga vide, osjete i sl. Međutim, ako riječ promislite s pozicije jezika, bit će jasno da je riječ o *glagolskoj imenici* koja opisuje određeni tip gibanja. Tu smo već “kod kuće”. Poznati su nam nazivi za neka: titranje, njihanje, podrhtavanje... i recimo, analogno tim imenicama, tip gibanja koji se prepoznaje kad komad drveta isпустimo u potok, nazvan je *strujanje* (fluida). Razlikuje se od navedenih prema *putanji*, ali i djelovanjima koji određuju takvu putanju. I evo nas kod silnica. *Strujnice* smo prepoznavali kao putanje komada drveta ispuštenog u potok i dobivali podatke o samom potoku. Isto ćemo napraviti stavljajući (jedinični pozitivni, probni) naboj u električno polje. Putanju probnog naboja u polju određivat će djelovanje polja (nekom silom) na to tijelo i evo nam *silnica*<sup>47</sup>. Polje se zgodno opisuje *silnicama*.

- Silnice su moguće putanje probnog (pozitivnog) naboja u polju.
- Silnice “izlaze” iz pozitivnog naboja (okomito na površinu nabijenog tijela).
- Silnice “ulaze” (okomito na površinu nabijenog tijela) u negativni naboj.
- Silnice se ne sijeku.

Prilažem prikaz sferosimetričnih polja.



## Napon

***Pad napona ne postoji!*** Motiv za ispisivanje ovih Lekcija pronašao sam u čitanju novih udžbenika fizike za srednje škole, pisanih prema *novom kurikulumu fizike*. Naime, naišao sam

<sup>47</sup> Danas te putanje nazivaju *linije polja*, što mi se čini točnije, ali meni riječ *silnica* bolje opisuje polje.

na mnoštvo pogrešnih (navodno samorazumljivih) sintagmi, a čak i na materijalne pogreške<sup>48</sup>. Pri druženju s učenicima, koji poneki put zatraže pomoć, otkrio sam da većina profesora fizike i dalje živi u nekom “svojem svijetu”, niti ne pokušavajući mijenjati svoj naučeni “stručni jezik fizike”. Recimo, užasavam se sintagmi: sila djeluje, suprotan smjer, tlak djeluje..., nekad je postojala i elektromotorna sila. I sâm sam nekad upotrebljavao te sintagme po inerciji... I evo nas opet u fizici koja jasno kaže da se sustav (tijela – profesori fizike) inercijom opiru promjenama<sup>49</sup>. Pogledajmo što o padu napona misli Institut za hrvatski jezik i jezikoslovlje: *Pad napona je razlika potencijala između dviju točaka strujnoga kruga*. Ne znam tko je autor ove definicije i koji je razlog da se napon definira kao pad napona. Nije mi jasno ni to zašto se napon povezuje samo sa strujnim krugom. Autor se dodatno zapetljava napomenom: *Pad napona omskoga otpora jednak je umnošku struje<sup>50</sup> koja teče dijelom strujnoga kruga i omskoga otpora toga dijela kruga. Naziv se upotrebljava u elektrotehnici i u drugim primjenama fizike. Izmišlja se pad napona omskog otpora umjesto da se kaže kako je riječ o naponu između rubnih točaka otpornika*.

Pomislite samo za trenutak – kome danas možemo, uopće, vjerovati. Možda meni i ovoj knjizi jer u knjizi inzistiram na logičkim interpretacijama svega. Logiku je utemeljio Aristotel. I do danas se temelji koje je postavio nisu doveli u pitanje. Za mene je logika usporediva s matematikom.

Pad napona ne postoji. Riječ je zapravo o *interpretaciji* prijelaza naboja iz stanja većeg iznosa potencijala u stanje manjeg iznosa potencijala (kad se naboj nađe u nekoj točki električnog polja).

**Digresija.** Elektromotorna sila je dugo godina *harala* hrvatskim školskim sustavom. Ne znam kome je *palo na pamet*

<sup>48</sup> Osvrti su objavljeni na [www.zpg.hr](http://www.zpg.hr)

<sup>49</sup> Iz iščitavanja postojećeg kurikulumu fizike nisam dokučio zbog čega je taj tekst uopće dobio naziv kurikulum. Navodim samo argument: o jeziku struke (u fizici) uopće nije bilo riječi. Zaključak koji izvodim je zabavan: **politički podobna povjerenstva, odabrana za mijenjanje bilo čega, nikada neće ništa promijeniti.**

<sup>50</sup> Donedavno je na popisu osnovnih fizikalnih veličina bila **jakost struje** (*I*). Ne znam tko je i zašto, na popisu osnovnih fizikalnih veličina, **jakost struje** zamijenio **električnom strujom**. Naime, struja (strujanje) je pojava. Ni slučajno fizikalna veličina. Mjeriti možemo samo fizikalne veličine koje karakteriziraju pojavu.





da to *nije sila*. Mislim da je proteklo više od desetak godina dok se u udžbenicima (i zbirkama zadataka) iz fizike nije objavio *elektromotorni napon*. Meni ni danas nije jasno zašto riječ *elektromotorni* treba naponu.

Potražite li dalje na mreži značenje riječi napon (napetost) lako ćete zaključiti da nakon čitanja o naponu znate još manje, odnosno, da baš ništa ne razumijete. Naime, radi se o riječi čije se značenje iščitava uglavnom iz fizikalnih fenomena. To je zapravo poruka: nauči fiziku, pa ćeš znati što je napon. Lekcijama pokušavam promijeniti takav pristup učenju. Dakle, zamislimo dva čovjeka. Razlikuju se sasvim sigurno. Jesu li prijatelji ili nisu, može se naslutiti iz njihove komunikacije. Gledajući ih, najprije ćete zaključiti da između njih *postoji nekakav odnos*. U jednom trenutku možete pomisliti da u komunikaciji situacija postaje – *napeta*. Riječ je izgovorena u značenju – *sad bi se moglo nešto dogoditi*. Ako je ovaj primjer razumljiv s pozicije uočavanja riječi: *različiti položaji, odnos i napetost*, mislim da će se i značenje električnog napona osvijestiti.

## Električni napon

Idemo sada u fizičko polje. To je sada za nas prostor obilježen točkama s posebnim svojstvima (potencijal, jakost polja). Nije teško zaključiti *da se točke razlikuju* prema navedenim svojstvima i da između njih *postoji nekakav odnos*. Recimo, u jednoj točki je potencijal  $\varphi_1$ , a u drugoj potencijal  $\varphi_2$  pa možemo utvrditi da postoji razlikovanje potencijala  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ . Za sada se ne događa ništa dramatično. Samo obična matematika. Međutim, kad u točku polja koja ima veći potencijal stavimo nabijeno tijelo, priča se dramatično mijenja. Naime, jasno nam je da sada tijelo ima neku energiju (određenu potencijalom). Tada se aktivira zakon: *svaki sustav u prirodi teži stanju minimalne energije*. Ako kojim slučajem to tijelo držimo u ruci, osjetit ćemo napetost. Pogledajmo kako to izgleda matematički:

$$W = \Delta E = E_{p2} - E_{p1} = q \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = q \cdot \Delta\varphi.$$

Budući da smo već dugo u problemu suočavanja sa svojstvima fizičkog polja, ovaj se podatak treba promisliti. U igri je promjena

energije koju smo prije povezali s radom. Sad nam je jasno što se događa kad se tijelo pojavi u nekoj točki polja: tijelo teži prema točki koja ima manji potencijal. Kad je dosegne – *promijenilo je svoju energiju i obavilo rad*.

$$W = q \cdot U \quad U = \varphi_2 - \varphi_1$$

Česte definicije koje slijede iz ove rasprave su tipično matematičke: *Napon je razlika potencijala* i *napon je rad po jedinici naboja*. Fizika to definira drukčije: napon je fizikalna veličina kojom opisujemo fizičko polje. Naponom uspostavljamo odnos između dvije točke u fizičkom polju. Napon pokazuje koliki će se rad obaviti kad tijelo prijeđe iz jedne točke polja u drugu. Nije nevažno napomenuti da polje djeluje na tijelo i obavlja rad. Nije pogrešno reći i ovo: tijelo je iz polja uzelo energiju i obavilo rad. Budući da je u ovom slučaju riječ o električnom polju, napon je nazvan: *električni napon*.

Na kraju se pitam: *što se događalo i što se dogodilo?* U prvoj fazi uočili smo novo svojstvo materije (električni naboj) te sličnost (i razlike) u manifestaciji s drugim svojstvom tvari, masom. Preuzimanjem prethodnih “rezultata” brzo sam ispisao “formule” za opis električnog polja. Međutim, pojavile su se poteškoće vezane za imenovanje novih veličina. Tome sam posvetio pozornost jer je tema posvećena *mističnom svijetu* koji se dramatično objavljuje u *našem okružju*. Pokušao sam “mističnost” malo raskrinkati i s par “lingvističkih istraživanja” sugerirati da mističnost proizlazi iz nerazumijevanja (i zaboravljanja prethodnog). Zapravo se u toj “fazi imenovanja” nije događalo ništa od onoga s čime se nismo sreli. Na kraju smo spomenuli električni **napon**. Električni napon je, u praktičnom svijetu elektromagnetizma neizostavna karika u lancu razumijevanja procesa. Oni koji dosegnu razumijevanje napona na dobrom su putu da postanu fizičari.