

Primljen: 27.09.2018.
Prihvaćen: 5.11.2018.

Stručni rad
UDK: 539.1:537.63

Lorentzova sila

Lorentz force

Elizabeth Hedl

studentica Tehničkoga veleučilište u Zagrebu, Vrbik 8, 10 000 Zagreb

e-mail: elizabeth.hedl@gmail.com

Sažetak: *U radu je opisana Lorentzova sila koja se može definirati kao sila na naboj koji se kreće magnetskim i električnim poljem. Za opisivanje Lorentzove sile je zaslužan Hendrik Antoon Lorentz, nizozemski fizičar. U radu je spomenuta putanja čestice pod utjecajem Lorentzove sile. Čestica ovisi o predznaku naboja, a Lorentzova sila djeluje bočno. Lorentzovu silu povezujemo s Faradayjevim zakonom elektromagnetske indukcije, Teorijom relativnosti, rezultatom električnoga i magnetskoga polja, silom na vodič kroz koji teče struja i elektromotornom silom.*

Ključne riječi: *Lorentz, sila, čestica, Teorija relativnosti*

Abstract: *The paper describes Lorentz's force, which can be defined as a force on a charge that moves through magnetic and electric field. For describing Lorentz's forces is credited by Hendrik Antoon Lorentz, a Dutch physicist. The work of this particle is influenced by the Lorentz force. The particle will depend on the charge sign, and the Lorentz force will always act laterally. We associate Lorentz's force with Faraday's Law of Electromagnetic Induction, Theory of Relativity, the result of the electric and magnetic field, the force on the conductor through which flows the current and the electromotive force.*

Keywords: *Lorentz, force, particle, Theory of Relativity*

1. Uvod

Lorentzova sila pojavljuje se u fizici, u posebnoj grani elektromagnetizam, kao kombinacija električne i magnetske sile. Čestica naboja q koja se kreće kroz električno polje E i magnetsko polje B , na sebi počinje osjećati silu:

$$F = qE + qv \times B$$

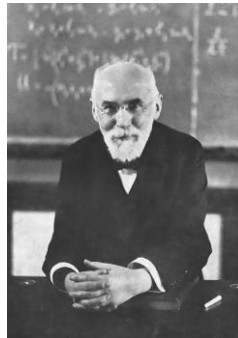
U varijacijama ove formule opisuje se magnetska sila na vodiču koji nosi struju, elektromotorna sila u petlji vodiča koja se kreće kroz magnetsko polje i sila na česticu naboja koja bi mogla putovati blizu brzine svjetlosti (relativistički oblik Lorentzove sile). Magnetska sila ima smjer okomit na brzinu v i na magnetsko polje B te je proporcionalna naboju q i veličini vektorskoga produkta $v \times B$. Uzevši u obzir kut ϕ između v i B , sila je jednaka $q \cdot v \cdot B \cdot \sin \phi$. Zanimljiv rezultat je gibanje nabijene čestice u jedinstvenom magnetskom polju. Ako je v okomito na B (s kutom od 90 stupnjeva), čestica će slijediti kružnu putanju s radijusom $r = mv/qB$. Ako je kut manji od 90 stupnjeva orbita čestice će biti spirala osi koja je paralelna s poljem linija. Ako je kut nula, neće biti magnetske sile. Upravo ciklotroni koriste činjenicu da se čestice kreću u kružnoj orbiti kada su v i B pod pravim kutom. Pažljivo vremenski određeno električno polje daje česticama dodatnu kinetičku energiju što im omogućuje da putuju u sve veće orbite. Magnetska sila na naboju u pokretu otkriva znak naboja nositelja u vodiču. Struja koja teče s desna na lijevo u vodiču može biti rezultat pozitivnih nositelja naboja koji se gibaju s desna na lijevo ili negativnih naboja koji se gibaju s lijeva na desno. Kada se vodič postavlja u magnetsko polje okomito na struju, magnetska sila na oba tipa nositelja naboja je u istom smjeru. Ova sila dovodi do male potencijalne razlike između strana vodiča. Pojava je nazvana Hall efektom i rezultira kad je električno polje poravnato sa smjerom magnetske sile. Dalje će u radu u drugom poglavlju biti navedena povijest o znanstvenicima koju su radili na elektromagnetskoj sili. Treće poglavlje opisuje gibanje čestice u magnetskom polju, četvrto značaj Lorentzove sile – kao definicija električnoga i magnetskoga polja, kao sila na vodič koji nosi struju, u elektromotornoj sili, kroz Faradayjev zakon i na kraju kroz specijalnu teoriju relativnosti.

2. Povijest

U povijesti je značajan broj znanstvenika radio na elektromagnetskim silama. Velika imena poput Johana Tobiasa Mayjera, Henryja Cavendisha, Charlesa Augustina de Coulomba,

Hansa Cristiana Ørsted, Andrea Marie-Ampere, Michaela Faradayja, Lorda Kelvina, Jamesa Clerka Maxwella, Sira Josepha Johna Thomsona, Olivera Heavisidea i na kraju je Hendrik Antoon Lorentz dao kompletno rješenje. Lorentz je bio nizozemski fizičar koji je pridonio teorijskom djelu fizike u objašnjenju Zeeman efekta, izveo je jednačbe transformacije koje podupiru Einsteinovu specijalnu teoriju relativnosti.

Slika 1. Hendrik Antoon Lorentz



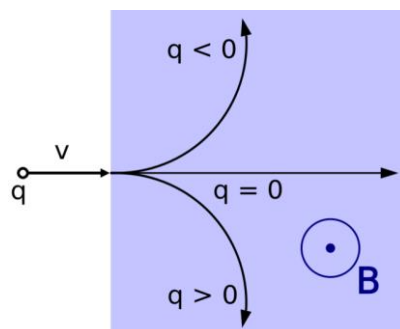
Izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hendrik_Antoon_Lorentz.jpg

Lorentz je teorizirao da se atomi mogu sastojati od nabijenih čestica i naveo da su oscilacije tih nabijenih čestica izvori svjetlosti. Bio je uz Einsteina od samog početka kod formiranja Opće teorije relativnosti, ali i pisao je i radove o kvantnoj mehanici.

3. Putanja čestica prema Lorentzovoj sili

Putanja čestice u magnetskom polju ovisi o predznaku naboja, a Lorentzova sila djeluje na česticu bočno.

Slika 2. Ovisnost putanje čestice o predznaku naboja



Izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz_force#/media/File:Lorentz_force.svg

Zbog okomitoga djelovanja sile ubrzanje čestice predstavlja i centripetalno ubrzanje. Dolazi se do drugoga Newtonovoga zakona koji govori da je ubrzanje čestice:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Navedeni zakon govori da čestica mijenja samo smjer, a ne iznos, tj. vektor mijenja samo smjer, a ne iznos. Ako je iznos centripetalne sile konstantan, gibanje je jednoliko po kružnici. Gibanje električno nabijenih čestica u magnetskom polju (elektron ili ion u plazmi) može biti tretirano kao superpozicija relativno brzoga kružnoga gibanja oko točke koja se zove centar za vođenje i relativno sporoga pomicanja ove točke. Brzina je ovisna o stanju naboja, masi ili temperaturi što rezultira električnim strujama ili kemijskim odvajanjem.

4. Značaj Lorentzove sile

Maxwell je jednadžbama opisao kako električne nabijene čestice i struje ili naboji u gibanju dovode do magnetskoga i električnoga polja, a Lorentz je završio priču s opisom sile koja djeluje na pokretni naboj q u elektromagnetskom polju. Fizičar Maxwell je napisao set od osam jednadžbi koje konstituiraju kompletni opis električnoga i magnetskoga fenomena. Lorentzov zakon sile opisuje učinak na naboj, ali to i dalje nije kompletna slika. Čestice s nabojem su vjerojatno povezane s drugim silama, kao što su gravitacijska i nuklearna.

4.1. Zakon Lorentzove sile kao definicija električnog i magnetskog polja

Kod spominjanja Lorentzove sile, klasika je pomisliti na definiciju magnetskoga i električnoga polja iz čega sljedi sljedeća tvrdnja, elektromagnetska sila F na "testnom" naboju u određenoj točki i vremenu je određena funkcija njegovog naboja q i brzine v , što se može parametrirati s točno dva vektora E i B u danom obliku:

$$F = q(E + v \times B)$$

Ovo vrijedi čak i za čestice koje se približavaju brzini svjetlosti. Tako su dva vektora E i B definirana kroz prostor i vrijeme magnetskoga i električnoga polja. U tekstu je spomenuta testna čestica koja je u teorijskoj fizici idealizirani model čija se fizikalna svojstva poput mase, naboja i veličine mogu zanemariti za potrebe istraživanja što pojednostavljuje problematiku. Polja su definirana svugdje u prostoru i vremenu s obzirom koju će silu primiti

testni naboj bez obzira da li je naboj prisutan da bi osjetio silu. Kao definicija električnoga i magnetskoga polja, Lorentzova sila je samo definicija načela jer stvarna čestica (suprotno od testnog naboja koji ima izuzetno malu masu i naboj) bi generirala konačno električno i magnetsko polje koje mijenja elektromagnetsku silu koju doživljava. Ako naboj doživljava ubrzanje i ako je nekim vanjskim pritiskom prisiljen na zakrivljenu putanju neke trajektorije, emitira radijaciju koja uzrokuje kočenje gibanja. Ti se učinci javljaju izravnim učinkom (sila reakcije radijacije) i neizravno (utječući na gibanje obližnjih naboja i struja). Neto snaga mora uključivati gravitacijsku, slabu i bilo koju drugu osim elektromagnetske.

4.2. Sila na vodič koji nosi struju

Kada je vodič koji nosi električnu struju smješten u elektromagnetsko polje, svaki pokretni naboj na sebi osjeti Lorentzovu silu. Kao posljedica se može stvoriti sila koja djeluje na vodič – Laplace sila. Za ravni vodič vrijedi sljedeće:

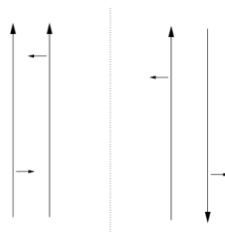
$$F = Il \times B$$

l je vektor čija je veličina određena duljinom žice i čiji je smjer duž žice, poravnat sa smjerom konvencionalnoga toka struje I . Ako žica nije ravna računa se prema:

$$F = I \int dl \times B$$

Navedeno se koristi u Amperovom zakonu o sili, koji opisuje kako dva vodiča koja prenose struju mogu privlačiti ili odbijati jedan drugoga.

Slika 3. Dva vodiča koja se privlače ili odbijaju



Izvor: <http://web.mit.edu/sahughes/www/8.022/lec10.pdf>

Razlog je Lorentzova sila koju svaki vodič osjeti s drugoga magnetskoga polja.

4.3. Elektromotorna sila

Magnetska komponenta Lorentzove sile odgovorna je za pokretnu elektromotornu silu što se koristi u generatorima. Elektromotorna sila nastaje kada se vodič pomakne u magnetskom polju i kada magnetsko polje vrši suprotne sile na elektrone u žici. U drugim električnim generatorima magneti se pomiču, dok vodiči ostaju stacionarni. Kod toga slučaja elektromotorna sila je zbog električne sile određena u jednadžbi Lorentzove sile. Električno polje je kreirano promjenom magnetskoga polja što rezultira elektromagnetskom silom kao što je opisano u Maxwell-Faradayjevim jednadžbama. Obje elektromagnetske sile, unatoč njihovim različitim izvorima, opisane su s istom jednadžbom, tj. elektromagnetska sila je brzina promjene magnetskoga toka kroz vodič. Dalje se može nadovezati na Einsteinovu specijalnu teoriju relativnosti. Električno i magnetsko polje su različita područja istoga elektromagnetskoga polja. Pri micanju iz jednog inercijalnoga okvira u drugi, vektor polja električnoga polja može se djelomično ili u cijelosti promijeniti u magnetsko polje ili obrnuto.

4.4. Lorentzova sila i Faradayjev zakon elektromagnetske indukcije

Faradayjev zakon je jednadžba koja opisuje dvije pojave: pokretnu elektromagnetsku silu generiranu od strane magnetske sile u pokretnom vodiču (Lorentzova sila) i elektromagnetsku silu generiranu od strane električne sile zbog promjenjivoga magnetskoga polja (Maxwell-Faraday). Na temu dolazi i Richard Feynman i govori o "pravilu toka", elektromagnetska sila u krugu je jednaka brzini promjene magnetskoga toka kroz krug bilo da se tok mijenja zbog promjene polja ili zbog kruga koji je u pokretu (ili zbog obje stvari). Ipak, za objašnjenje ovih dviju pojava se koristilo dva različita zakona. Promjena kruga kao:

$$v \times B$$

Promjena polja kao:

$$\nabla \times E = -\dot{\vartheta}_t$$

4.5. Lorentzova sila u teoriji relativnosti

Einsteinova specijalna teorija relativnosti igra bitnu ulogu u elektromagnetizmu. Specijalna teorija relativnosti je razvijena od svih fundamentalnih principa; fizički zakoni imaju istu formu u svim referentnim okvirima i brzina svjetlosti je uvijek konstantna. Prije svega,

formulira kako se elektromagnetski predmeti (električna i magnetska polja) mijenjaju pod Lorentzovom transformacijom iz jednog inercijalnoga referentnoga okvira u drugi. Sljedeća stvar za istaknuti je kako prikazuje vezu između elektriciteta i magnetizma, pokazujući kako referentni okvir određuje pratimo li magnetske ili zakone elektrostatike. Sljedi primjer specijalne teorije relativnosti i elektromagnetizma. Naboj miruje u referentnom okviru A. Promatrač koji miruje vidi statično električno polje E. Naboj se giba u referentnom okviru A' i promatrač se giba brzinom v relativno prema A i vidi promjenjivo električno polje i magnetsko polje zbog gibanja naboja. Upravo o ovome govori specijalna teorija relativnosti; fizika mora biti konzistentna u svakom referentnom okviru. Referentne okvire definiraju promatrači koji se gibaju obzirom na drugog promatrača pri različitim brzinama. Neka se uzme u obzir dugi vodič u laboratoriju kroz koji prolazi struja I. U ovom referentnom okviru laboratorija vodič će generirati magnetsko polje. Neka se pretpostavi i da se naboj giba s brzinom v paralelno navedenom vodiču. Magnetsko polje vodiča dovodi do privlačne sile između naboja i žica. Neka se sljedeće pretpostavi da se situacija promatra s pogleda naboja (drugi referentni okvir). S pogleda naboja, on je potpuno miran. Ako je u stanju mirovanja ne može postojati magnetska sila. U referentnom okviru naboja zato postoji električno polje. Drugim riječima magnetsko polje u prvom referentnom okviru je isto što i električno polje u drugom referentnom okviru.

4.6. Primjena Lorentzove sile

Primjena Lorentzove sile vidi se na principu rada komore za mjehuriće. Princip je jednostavan, postoji vanjsko magnetsko polje koje će "zastraniti" čestice i ukupna sila trenja će usporiti čestice (mjehuriće). Komora za mjehuriće se definira kao mjerni instrument koji prati ionizirajuće zračenje i sastoji se od komore u kojoj je pregrijana tekućina u kojoj ioni stvoreni prolaskom ionizirajuće čestice omogućuju stvaranje mjehurića bilježeći na taj način putanju čestice. Sljedeći primjer na kojem se vidi djelovanje sile je magnetsko zrcalo. Magnetsko zrcalo je takvo magnetsko polje koje nije homogeno već se indukcija razmjerno mijenja kroz prostor u kojem djeluje. U ovom polju javlja se efekt zrcala: nabijena čestica uleti u polje pod kutom (ukoso prema silnicama) te se nastavi gibati po spirali uzduž silnica. Upravo to gibanje je potaknuto Lorentzovom silom. Zadnji primjer koji će biti naveden je magnetska boca. Primjer magnetske boce je neuniformno magnetsko polje Zemlje. Postoje područja u kojima se nalaze zarobljene nabijene čestice koje se gibaju od pola do pola po

spiralnoj putanji (pojasevi zračenja). Kada se čestice nalaze kod polova sudaraju se s atomima u atmosferi i emitira se svjetlo (Polarna svjetlost).

5. Zaključak

Kao što je navedeno u cijelom radu, Lorentzova sila definira se kao naboj na česticu u gibanju u elektromagnetskom polju. Navedena sila ima zapravo razne primjene jer djeluje gdje god se elektromagnetsko polje isprepliće s nabojem – a to se događa relativno često. Jedan od već navedenih i zanimljivih primjera je komora za mjehuriće. Lorentzova sila se najbolje može vidjeti i na primjeru elektromotora. U radu je opisana važnost Lorentzove sile i pozadinska karakteristika u svijetu fizike.

Literatura

1. Encyclopedia Britannica. Lorentz force. <https://www.britannica.com/science/Lorentz-force> (31.08.2018.)
2. Huges, S. Massachusetts Institute of Technology. Department of Physics. Lecture 10: Magnetic force; Magnetic fields; Ampere's law. <http://web.mit.edu/sahughes/www/8.022/lec10.pdf> (02.09.2018.)
3. Feynman, R.; Sands, M. The Feynman lectures on Physics http://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_toc.html (26.09.2018.)
4. Fitzpatrick, R. The University of Texas at Austin. Classical Electromagnetism: An intermediate level course <http://www.physics.fntua.gr/ph03/doc/Fitzpatrick.R.@.Classical.Electromagnetism.pdf> (26.09.2018.)
5. University of Liverpool. PHYS370. Advanced Electromagnetism. Part 9: Electromagnetism and Special Relativity <http://pcwww.liv.ac.uk/~awolski/Teaching/Liverpool/PHYS370/AdvancedElectromagnetism-Part9.pdf> (26.09.2018.)
6. Lorentz, H.A. (1916.). The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat. <https://archive.org/details/electronstheory00lorerich> (26.09.2018.)