

## Úloha vzťažnej sústavy v klasickej elektrodynamike

Elo Scholtz\*, Gymnázium Košice

Formovanie predstavy o elektromagnetickom poli vo vyučovaní stredoškolskej fyziky je zložitý a náročný proces. Výber poznatkov a metodika výkladu javov, ktoré sú predmetom elektrodynamiky a sú zaradené do gymnaziálneho kurzu fyziky, má svoju dlhú a zaužívanú tradíciu. Táto sa odvíja aj v súčasných učebných osnovách a učebničiach pre druhý a tretí ročník štvorročného gymnázia. Zahŕňuje základné poznatky elektrostaticity, poznatky o stacionárnom elektrickom a magnetickom poli, javy súvisiace s nestacionárnym elektrickým a magnetickým polom ako aj modernejšie spracované kapitoly o vzniku, vlastnostiach a šírení elektromagnetického pola.

Ak má poznávací proces v rámci štúdia zákonov klasickej fyziky vyústiť do pochopenia základných ideí a dôsledkov špeciálnej teórie relativity (ŠTR), je potrebné uskutočňovať a postupne rozvíjať relativistický prístup v chápaní a opise fyzikálnych javov nielen v mechanike, ale oveľa dôslednejšie aj v elektrodynamike.

Poznatky, ktoré patria do elektrodynamiky sú v učebných osnovách pre gymnázium rozložené do 2. až 4. ročníka. Absencia akýchkoľvek náznakov informácií o vplyve volby vzťažnej sústavy na hodnotenie a opis elektrodynamických javov v učebnicových textoch nedáva žiakom príležitosť k tomu, aby si uvedomili ich vzájomnú jednotu, a v konečnom dôsledku aby pochopili východiská a závery ŠTR v oblasti elektrodynamiky.

Tento príspevok samozrejme nepredstavuje ucelený a vyčerpávajúci výklad a riešenie danej problematiky. Ide skôr o stručné poznámky k metodiike rôzvijania pojmu elektromagnetického pola v nerelativistickej elektrodynamike na úrovni gymnaziálneho kurzu fyziky. Poukazuje sa v nich hlavne na potrebu zvýraznenia úlohy vzťažnej sústavy v elektrodynamike, a naznačuje sa možnosť používania modelových myšlienkových experimentov.

### 1. ETAPY FORMOVANIA POJMU ELEKTROMAGNETICKÉHO POĽA V KLASICKEJ ELEKTRODYNAMIKE.

- Prvotné poznatky o pojme materiálneho poľa ako takého – druhy vzájomného pôsobenia v prírode, charakteristiky jednotlivých druhov interakcie na konkrétnych javoch, prejavy existencie elektromagnetického poľa (základná škola, 1. ročník gymnázia).
- Štúdium javov spojených s existenciou stacionárneho elektrického a magnetického poľa, charakteristiky týchto polí, ich silové túčinky na nabité častice a telesá, možnosti indikácie prítomnosti elektrického a magnetického poľa. Poukázanie na relativistický charakter elektrických a magnetických javov z hľadiska rôznych vzťažných sústav rozbohom bežne dostupných experimentov (2. a 3. ročník gymnázia).
- Nestacionárne elektrické a magnetické pole – štúdium javu elektromagnetickej indukcie, opis a vysvetlenie týchto javov z hľadiska rôznych vzťažných sústav, vzájomná jednota elektrických a magnetických javov a ich relativny charakter. Elektromagneticke pole ako pole elektrodynamické, ktoré má dva relatívne prejavy závislé na volbe vzťažnej sústavy (3. ročník gymnázia).
- Štúdium vzniku tlmených a netlmených elektromagnetických kmitov, vznik a šírenie elektromagnetického vlnenia. Niektoré poznatky a závery Maxwellovej teórie elektromagnetického poľa (3. ročník gymnázia).

\* scholtz@ns.srobarka.sk

- e) Elektromagnetické žiarenie – spektrum elektromagnetického žiarenia, svetlo a optika. Neinvariantnosť teórie elektromagnetického poľa vzhľadom na Galileiho transformáciu. Úloha elektromagnetického (svetelného) signálu v špeciálnej teórii relativity, elektrodynamika a elektromagnetické pole z hľadiska tejto teórie (3. a 4. ročník gymnázia).
- f) Kvantové vlastnosti žiarenia, súvislosť vlnových a časticových vlastností elektromagnetického žiarenia (4. ročník gymnázia).

## 2. PREJAVY EXISTENCIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POĽA (EMP).

- a) EMP môžeme registrovať jedine na základe jeho účinkov na čästice s elektrickým nábojom, alebo na elektricky nabité telesá. Iné možnosti nie sú.
- b) Silové účinky EMP charakterizujú tzv. silové vektory – elektrická intenzita  $\vec{E}$  a magnetická indukcia  $\vec{B}$ .

**Elektrické pole** s intenzitou  $\vec{E}$  pôsobí na čästicu s nábojom  $Q$  elektrickou silou

$$\vec{F}_e = Q \cdot \vec{E}, \quad (1)$$

ktorej smer je podľa vzťahu (1) určený smerom elektrickej intenzity a znamienkom náboja. Elektrická síla pritom pôsobí nielen na čästicu, ktorá je v pokoji, ale aj na pohybujúcu sa čästicu.

Na **elektrický dipól** s bodovými nábojmi o veľkosti  $Q$  a dipólovou vzdialenosťou  $d$ , umiestnený v homogénnom elektrickom poli s intenzitou  $\vec{E}$ , pôsobí dvojica elektrických sôl, ktoré majú veľkosť danú vzťahom (1). Ich otáčavý účinok na dipól je vyjadrený momentom dvojice sôl, pre veľkosť ktorého platí vzťah

$$M = \vec{E} \cdot Q \cdot d \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

kde  $\alpha$  je ostrý uhol zovretý smerom spojnice nábojov a smerom intenzity elektrického poľa. Dvojica elektrických sôl orientuje elektrický dipól do smeru intenzity elektrického poľa.

**Magnetické pole** s indukciami  $\vec{B}$  pôsobí na čästicu s nábojom  $Q$  a rýchlosťou  $\vec{v}$ , zvierajúcou s indukciami uhol  $\alpha$ , magnetickou silou  $\vec{F}_m$  o veľkosti

$$\vec{F}_m = B \cdot Q \cdot v \cdot \sin \alpha. \quad (3)$$

Vektor  $\vec{F}_m$  je kolmý na rovinu určenú vektorovými priamkami vektorov  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$ , jeho smer je určený smerom vektorového súčinu vektorov  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$  a znamienkom náboja. Keď vektorov  $\vec{B}$  a  $\vec{v}$  majú rovnaký smer, magnetická síla je nulová.

Zo skúsenosti vieme, že otočne uložený tyčový magnet (magnetka) sa v homogénnom magnetickom poli správa podobne, ako elektrický dipól v elektrickom poli. Nazvime ho **magnetický dipól**. Homogénne magnetické pole pôsobí na magnetický dipól dvojicou magnetických sôl, ktorá má na tento dipól orientujúci účinok. Uvažovaný magnetický dipól sa v dôsledku toho natočí do smeru magnetickej indukcie.

Analogický efekt pozorujeme, ak do homogénneho stacionárneho magnetického poľa umiestníme otočne uložený rovinný závit s prúdom (žiaci gymnázia sú oboznámení s pôsobením magnetického poľa na vodiče s prúdom i s pojmom magnetického momentu závitu s prúdom). Ak má závit tvar obdĺžnika so stranami o dĺžke  $a, b$  (plošným obsahom  $S = a \cdot b$ ), prechádza ním prúd  $I$  a normálkový vektor plochy zviera s indukciami  $\vec{B}$  magnetického poľa ostrý uhol  $\alpha$ , pôsobí naňho dvojica magnetických síl. Moment dvojice týchto síl má veľkosť

$$M = B \cdot I \cdot S \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

a má na závit orientujúci účinok. Závit sa otocí do polohy, v ktorej normálkový vektor plochy závitu je rovnobežný s magnetickou indukciami.

**Elektromagnetické pole** má elektrickú zložku s intenzitou  $\vec{E}$  a magnetickú zložku s indukciami  $\vec{B}$ .

Pre elektrodynamickú (elektromagnetickú) silu  $\vec{F}$  (Lorentzova sila) pôsobiacu na časti cu s nábojom  $Q$  platí vo všeobecnosti vzťah

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = Q \cdot [\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})]. \quad (5)$$

Táto sila a jej rozdelenie na elektrickú a magnetickú zložku závisí od voľby vzťažnej sústavy. Nerelativistická fyzika založená na Galileiho transformácii to nie je schopná opísť uspokojivým spôsobom. Problém transformácie zložiek elektromagnetického poľa pre inerciálne vzťažné sústavy správne rieši až špeciálna teória relativity.

V predchádzajúcim texte sme sa zaoberali reakciu indikátorov na pole. Náboje a dipóly sú zároveň zdrojmi poľa. Toto pôsobenie sa nedá vo všeobecnosti opísť ako výsledok okamžitej interakcie častíc na diaľku. Problém súvislosti medzi poľom a zdrojmi rieši Maxwellova teória elektromagnetického poľa, ktorej hlbšie pochopenie umožňuje až špeciálna teória relativity. V ďalšom však budeme potrebovať iba najjednoduchšie prípady tejto súvislosti. Medzi rovnobežnými doskami, ktoré sú elektricky nabité alebo slúžia ako póly magnetu, vzniká stacionárne (časovo nepremenné) elektrické či magnetické pole, ktoré je (v idealizácii, keď dosky sú dostatočne rozsiahle) na tieto dosky kolmá a homogénne (konštantné v priestore). Charakter týchto polí je možné vysvetliť z Coulombovho zákona pre elektrické pole nehybného náboja a z Biotovho-Savartovho zákona pre magnetické pole stacionárneho prúdu – za predpokladu, že magnet je vlastne sústavou elementárnych prúdových okruhov, ako to naznačuje skôr opisaná analógia medzi pôsobením magnetického poľa na magnetický dipól a na závit s prúdom.

- c) Opísané experimentálne poznatky motivujú k úvahе o možnom indikátore charakteru elektromagnetického poľa vo zvolenej vzťažnej sústave, založeného na jeho experimentálne pozorovateľných účinkoch na elektrický, alebo magnetický dipól.

Uvažujme o modelových indikátoroch elektrického a magnetického poľa, napr. podľa obrázka 1 pre

elektrické pole – dve guľové, opačne elektricky nabité telieska s malým polomerom, tvoriace otočne uložený elektrický dipól,

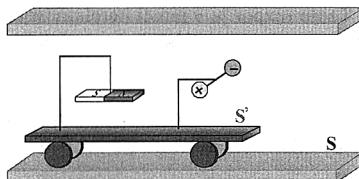
magnetické pole – malý, otočne zavesený permanentný magnet, alebo elektromagnet, predstavujúci magnetický dipól.

Tieto modely môžeme používať ako indikátory elektromagnetického poľa v rôznych myšlienkových pokusoch a urobiť rozbor ich správania z hľadiska rôznych inerciálnych vzťažných sústav. To nám umožní rozhodnúť, aký charakter má toto pole vzhľadom na zvolenú vzťažnú sústavu a zdôvodniť pozorované správanie sa indikátorov. Napríklad ak pole pôsobí z hľadiska zvolenej vzťažnej sústavy na nehybné aj na pohybujúce sa nabité

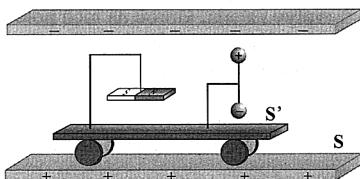
častice a veľkosť pôsobiacej sily závisí od smeru vektora ich rýchlosťi, tak toto pole má nenulovú elektrickú aj magnetickú zložku.

- d) Štúdium významu vzťažnej sústavy v elektrodynamike – rozbor myšlienkových pokusov opierajúcich sa o skúsenosti z reálnych experimentov v homogénnom stacionárnom poli nabitého kondenzátora, alebo magnetu. S kondenzátorom spojime vzťažnú sústavu S a s vozíkom, na ktorom sú umiestnené indikátory, spojime vzťažnú sústavu S'.

- A) Situácia pred nabitím kondenzátora (obrázok 1) a po jeho nabití (obrázok 2), keď indikátory a kondenzátor sú vzhľadom k sebe nehybné.



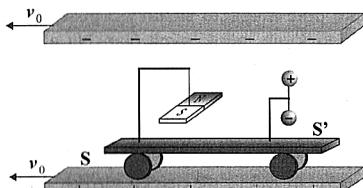
Obr. 1



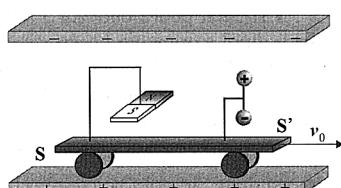
Obr. 2

Indikátory po nabití kondenzátora svojim správaním svedčia o prítomnosti elektrostatického poľa – elektrický dipól sa orientuje do smeru elektrických siločiar, magnet svoju polohu nezmení.

- B) Kondenzátor sa vzhľadom na vozík pohybuje stálou rýchlosťou  $\bar{v}_0$  (obrázok 3), t.j. vozík má vzhľadom na kondenzátor rovnako veľkú rýchlosť opačného smeru (obrázok 4).



Obr. 3



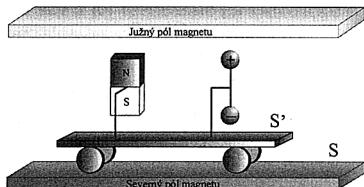
Obr. 4

Pri relatívnom pohybe indikátorov a kondenzátora zostáva elektrický dipól v rovnakej polohe ako v kľúdu, zatiaľ čo magnetka sa vychýli. Hodnotenie príčin tohto javu je z hľadiska inerciálnych sústav S a S' rôzne:

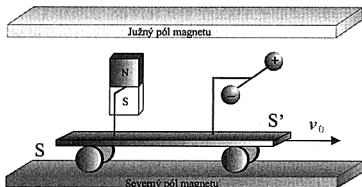
S': Z hľadiska sústavy vozíka môžeme pootočenie magnetu vysvetliť tak, že náboje pohybujúceho sa kondenzátora vytvárajú konvekčný prúd, ktorý budí stacionárne magnetické pole. Dvojica magnetických síl orientuje magnetku kolmo na smer rýchlosťi  $\bar{v}_0$  pohybu kondenzátora a kolmo na vektor  $\vec{E}$ . V sústave spojenej s vozíkom budia rovnomerne priamočiaro sa pohybujúce elektrické náboje kondenzátora stacionárne elektrické aj magnetické pole.

S: Z hľadiska sústavy kondenzátora je príčinou pootočenia dipólu rovnako, ako v sústave vozika, elektrické pole kondenzátora. Vysvetliť interakciu pohybujúceho sa magnetu s nehybnými nábojmi nabitého kondenzátora a z toho vyplývajúce pootočenie podľa obrázka 4 je ľahšie. Z výsledku pokusu je evidentné, že elektrické pole pôsobí na pohybujúci sa magnet. Ale prečo? Je možné využiť analógie. Magnetické pole podľa (3) zrejme pôsobí na pohybujúce sa náboje elektrického dipólu silami rovnakej veľkosti a opačného smeru, čím vzniká dvojica síl. Preto by malo aj elektrické pole podobne pôsobiť na pohybujúci sa magnetický dipól. Presvedčivejšie by však bolo založiť vysvetlení v súlade s predchádzajúcim na tom, že magnet je vlastne sústava elementárnych prúdov. Pretože však pôsobení elektrického poľa na nabité časticie nezávisí na ich rýchlosťi, zdalo by sa, že pohyb prúdových okruhov v elektrickom poli nemá vplyv na silu, ktorou na nich pole pôsobí. Tento rozpor je v rámci nerelativistickej fyziky neriešiteľný a nás pokus tak poukazuje na to, že pre dôsledné vysvetlenie elektromagnetických javov je nevyhnutná špeciálna teória relativity.

- C) Indikátory sú v homogénnom poli magnetu (sústava S), voči ktorému sú bud' v pokoji (obrázok 5), alebo sa voči nemu rovnomerne priamočiaro pohybujú (obrázok 6).



Obr. 5



Obr. 6

S': V situácii podľa obrázka 5 magnetické pole magnetu sústavy S pôsobí na magnetický dipól a orientuje ho do smeru magnetických indukčných čiar. Na elektrický dipól, ktorého náboje sú v pokoji, magnetická sila nepôsobí (na rozdiel od predchádzajúcich obrázkov je tu ako východzia poloha elektrického dipólu za neprítomnosť polí zvolená poloha zvislá). V poli pohybujúceho sa magnetu podľa obrázka 6 sa elektrický dipól orientuje kolmo na vektor  $\vec{v}_0$  a zároveň kolmo na vektor  $\vec{B}$  poľa magnetu. Z toho usúdime, že pole pohybujúceho sa magnetu má aj elektrickú zložku tohto smeru. To naznačil už predchádzajúci pokus. Videli sme, že elektrické pole nabitých dosiek pôsobí na pohybujúci sa magnet. Podľa zákona akcie a reakcie aj pohybujúci sa magnet pôsobí na nehybné dosky. To však môže robíť iba prostredníctvom elektrického poľa, ktoré vyvoláva.

S: Ako už bolo povedané v rámci rozboru predchádzajúceho experimentu, pole nehybného magnetu pôsobí na pohybujúci sa elektrický dipól dvojicou síl a preto sa elektrický dipól pootočí.

Ukázali sme, že pre úplný opis elektromagnetických javov je treba brať do úvahy nielen pôsobenie poľa na zdroje, ale aj to, ako zdroje vyvolávajú pole. Charakter poľa častic s elektrickým nábojom, alebo poľa elektricky nabitého telesa, závisí od volby vzťažnej sústavy. V sústave, v ktorej je častica v pokoji, má jej pole povahu elektrického poľa. Avšak vzhľadom na vzťažnú sústavu, voči ktorej sa táto častica pohybuje, jej pole má mimo elektrickej zložky aj

magnetickú zložku. Práve to umožňuje vysvetliť magnety ako sústavy elektrických prúdov, ktoré budia magnetické pole, a zároveň mu podliehajú. Vo vzťažnej sústave, v ktorej sa nabity kondenzátor pohybuje, je jeho pole doplnené o magnetickú zložku. Rovnako pole permanentného magnetu vo vzťažnej sústave, v ktorej sa pohybuje, je magnetické pole doplnené o elektrickú zložku. Uvedené skutočnosti vedú k predstave o elektrodynamickom poli budenom elektricky nabitymi časticami, pričom jeho pôsobenie hodnotíme v závislosti od volby vzťažnej sústavy. Preto pre elektrodynamické pole používame názov *elektromagneticke pole*. Problém úplného opisu elektrodynamického pola z hľadiska rôznych inerciálnych vzťažných sústav teoreticky rieši špeciálna teória relativity.

### 3. JAV ELEKTROMAGNETICKEJ INDUKCIE.

- a) Rozbor pozorovaní pri experimentoch, v ktorých dochádza k javu elektromagnetickej indukcie (EMI), viedie k odlišeniu dvoch rôznych procesov, ktoré indukované napätie vyvolali. Je to
- pohyb vodiča v stacionárnom magnetickom poli;
  - zmena magnetického poľa v okolí vodiča.

Tieto dva procesy je treba od seba odlišiť aj napriek tomu, že po zovšeobecnení ich môžeme vyjadriť rovnakým zákonom v tvare

$$u_i = -\frac{\partial \Phi}{dt}, \quad (6)$$

kde  $u_i$  je napätie indukované vo vodiči pri časovej zmene magnetického indukčného toku  $\Phi$ .

Tento vzťah je v gymnaziálnej učebnici fyziky vyjadrený v tvare

$$u_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (7)$$

Príčinou zmeny magnetického indukčného toku, pre veľkosť ktorého v jednoduchom prípade homogénneho magnetického poľa a rovinnej plochy  $S$  platí vzťah

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha, \quad (8)$$

kde  $\alpha$  je uhol medzi vektormi  $\vec{B}$  a  $\vec{S}$ , je zmena veľkosti  $S$  plochy, ktorou magnetické pole prechádza, alebo zmena veľkosti  $B$  magnetickej indukcie (nestacionárne pole).

Spoločný princíp, ktorým sa javy dvoch zodpovedajúcich skupín experimentov riadia, nie je na prvý pohľad zrejmý, preto je potrebné príslušné súvislosti žiakom objasniť.

Podstatu javov prvej skupiny experimentov môžeme vysvetliť pôsobením elektrodynamickej sily, ktorá je vyjadrená vzťahom (5) a závisí od volby vzťažnej sústavy. Pre úplné pochopenie javov, ktoré súvisia s pohybom vodiča v elektrickom alebo v magnetickom poli, je treba poznať, ako sa transformujú vektoru  $\vec{E}$  a  $\vec{B}$  pri prechode od jednej inerciálnej vzťažnej sústavy (IVS) ku druhej. Tento problém rieši ŠTR.

Pre uskutočnenie príslušných experimentov je potrebné vytvoriť homogénne magnetické pole. V nehomogénnom poli magnetu sa totiž zároveň s efektom vyvolaným relativným pohybom vodiča vzhľadom na magnet uplatní aj efekt, spôsobený zmenou magnetickej indukcie poľa, v ktorom sa vodič nachádza.

V učebnici fyziky pre 3. ročník gymnázia sa dospieva ku vzťahu (2) rozborom situácie, v ktorej na volné elektróny v pohybujúcej sa časti obdĺžnikového kovového závitu pôsobí magnetická sila a v dôsledku toho dochádza k rozdeleniu elektrických nábojov. Tým sa vysvetluje vznik indukovaného napäťia na koncoch tejto časti závitu. Vzťah vyjadrujúci Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie je vyvodený s použitím úvahy o

tom, akú intenzitu by malo mať elektrické pole, ktoré by na elektróny pôsobilo rovnako veľkou elektrickou silou.

- b) Javy druhej skupiny experimentov súvisia podľa Maxwellovej teórie elektromagnetického poľa so skutočnosťou, že pole s premennou magnetickou indukciami vyvoláva vznik elektrického poľa, ktoré nemá svoje zdroje v elektrických nábojoch (tzv. výrové pole). V tom prípade uvažujeme, že na voľné elektróny vo vodiči pôsobí indukované elektrické pole, ktoré v uzavretej slučke vytvorí indukovaný prúd. Je to prejav vzájomnej späťosti a neoddeliteľnosti elektrických a magnetických javov.

V prípade, že obvod nie je uzavretý, rozdelenie elektrických nábojov účinkom vzniknutého (indukovaného) elektrického poľa umožní registrovať na koncoch vodiča rozdiel potenciálov

$$u_i = |\varphi_2 - \varphi_1|, \quad (9)$$

ktorý nazývame *indukované napätie*.

Ak je  $d$  dĺžka vodiča a  $E$  veľkosť intenzity homogénneho elektrického poľa, tak

$$u_i = E \cdot d. \quad (10)$$

Indukované napätie má veľkosť rovnakú vzhľadom na všetky IVS a je určené veľkosťou práce súčinu sile príslušného poľa, ktorá je potrebná na premiestnenie jednotkového náboja.

V sústave spojenej s vodičom pôsobí na náboj  $Q$  elektrická sila o veľkosti  $F_e = Q \cdot E$  a v sústave spojenej s magnetom, vzhľadom na ktorý sa vodič pohybuje rýchlosťou  $\vec{v}$  kolmo na vektor  $\vec{B}$ , pôsobí magnetická sila, ktorá má veľkosť  $F_m = Q \cdot v \cdot B$ . Pritom platí vzťah

$$E = B \cdot v. \quad (11)$$