

Tapasztalati tény, hogy elektromosan töltött testek egymással kölcsönhatnak. Két, inerciarendszerben nyugvó pont-töltés (töltött részecske) kölcsönhatásának erőtvénnye a Coulomb-törvény:

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1},$$

ahol $\vec{r}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ a két részecske relatív helyvektora, q_1 , ill. q_2 a részecskék töltése és $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}(\vec{F}_{2 \rightarrow 1})$ az 1. (2.) részecske által a 2. (1.) részecskére kifejtett erő. A testeket akkor nevezzük pontszerűnek, ha a testek lineáris mérete kicsiny az egymástól való távolságukhoz képest. Két nyugvó, töltött részecske kölcsönhatásának potenciális energiája

$$U_{12} = k q_1 q_2 / r_{12}.$$

Ekkora munkát végez a nyugalomban levő 1. (2.) részecske által kifejtett erő a 2. (1.) részecskén, amíg azt a végtelenbe vesszük.

Az erőhatások függetlenségének elvét felhasználva a Coulomb-törvény alapján tetszőleges töltött testek (töltésrendszerek) kölcsönhatását értelmezhetjük, mint a testek kicsiny, töltött térfogatelemei kölcsönhatásának eredményét. Így például készíthetünk kicsiny töltéssűrűzőket, amik a ponttöltéseknél egy fokkal bonyolultabb töltésrendszerek. Ezekben egy $-q$ és egy q töltés helyezkedik el egy $\vec{l}$ elmozdulásvektor kezdő-, ill. végpontjában. Ezt a töltésrendszert elektromos dipólusnak nevezzük és $\vec{d} = q\vec{l}$ elektromos dipólusmomentumával jellemezzük. A Coulomb-törvényből következik, hogy két elektromos dipólus ($\vec{d}_1$ és $\vec{d}_2$) kölcsönhatásának erőtvénnye, vagy – ami ezzel egyenértékű – potenciális energiája a dipólusok relatív távolságán kívül a dipólusok irányításától is függ:

$$U_{12} = -k \left[\frac{3(\vec{d}_1 \vec{r}_{12})(\vec{d}_2 \vec{r}_{12})}{r_{12}^5} - \frac{\vec{d}_1 \vec{d}_2}{r_{12}^3} \right],$$

ahol $\vec{r}_{12}$ a két dipólus relatív helyvektora.

Ugyancsak tapasztalat, hogy léteznek elektromosan semleges testek, mint pl. a mágnesűk (elhanyagolható vastagságú mágnesrudak) vagy az áramjárta szolenoidok, amelyek között nem gravitációs és nem elektromos kölcsönhatás van. Ezt a kölcsönhatást mágneses kölcsönhatásnak nevezzük.

Vezessük be a stacionárius (időben állandó) i erősségű árammal átjárt szolenoid jellemzésére az $\vec{m} = ifN\vec{n}$ mágneses dipólusmomentumot, ahol f a szolenoid keresztmetszete, N a menetszáma és $\vec{n}$ a szolenoid tengelyével párhuzamos egységvektor, amely az áramirányhoz a jobbkéz-szabály szerint illeszkedik. (L. az ábrát!)

1985-05-227-1.eps

Ekkor két szolenoid közti kölcsönhatás erőtvénnye pontosan olyan alakú, mint két elektromos dipólus közti kölcsönhatása.

A kölcsönhatás potenciális energiája:

$$U_{12} = -k' \left[\frac{3(\vec{m}_1 \vec{r}_{12})(\vec{m}_2 \vec{r}_{12})}{r_{12}^5} - \frac{\vec{m}_1 \vec{m}_2}{r_{12}^3} \right].$$

Egy mágnesű egy szolenoiddal való mágneses kölcsönhatása szempontjából ekvivalens módon helyettesíthető egy szolenoiddal, amelynek áramát alkalmasan választjuk meg. A mágnesű mágneses dipólusmomentumát definíció szerint egyenlőnek vesszük az ekvivalens szolenoid mágneses dipólusmomentumával. Azt mondhatjuk tehát, hogy mind a szolenoid, mind a mágnesű mágneses dipólusként viselkedik.

Ahhoz, hogy a mágneses és az elektromos kölcsönhatás analógiája teljes legyen, „mágnesesen töltött” testeket kellene találni. Ilyen makroszkopikus testek azonban jelen ismereteink szerint nem léteznek. A mágnesrúd és a szolenoid sem fogható fel mágneses töltésekből készített súlyzónak, ugyanis hiába daraboljuk fel a mágneset kicsiny darabokra, vagy a szolenoidot meneteire, az egyes mágnesdarabkák és a szolenoid egyes menetei (körvezetők) ugyanúgy mágneses dipólusok, mint az egész mágnes vagy az egész szolenoid. A testek közötti mágneses kölcsönhatás így nem vezethető vissza egy „mágneses Coulomb-törvény”-re.

Az eddigieket összefoglalva, kísérleti bizonyítékaink vannak arra, hogy létezik elektromos és mágneses kölcsönhatás, amelynek révén a makroszkopikus testek egymással való közvetlen érintkezés nélkül is kölcsönhatnak. Az ilyen kölcsönhatás jellegét tekintve távolhatás. Mivel a fenti erőtvénnyek az időt közvetlenül nem tartalmazzák, így hallgatólágosan azt feltételezzük, hogy az erőhatást valamely t pillanatban a testek adott pillanatban elfoglalt helyzete határozza meg, és ha az egyik test kicsit odébb mozdul, akkor a másikra ható erő azonnal, késedelem nélkül megváltozik.

Mind az elektromos, mind a mágneses kölcsönhatás leírható azonban a fizikai mezőfogalom felhasználásával, mint lokális kölcsönhatás, közelhatás a mező és a beléje helyezett test között. Amíg a nyugvó töltések és a nyugvó mágnesűk (ill. az időben állandó áramok) sztatikus kölcsönhatását vizsgáljuk, addig a jelenségek leírása a távolhatás és a közelhatás nyelvén egyenértékű.

Coulomb törvénye átírható

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = q_2 \vec{E}(\vec{r})$$

alakba, ahol

$$\vec{E}(\vec{r}) = k \frac{q_1}{r^2} \frac{\vec{r}_1}{r}$$

egy vektormezőt definiál, amely csak a q_1 töltéstől függ. Az $\vec{E}(\vec{r})$ vektormezőt elektromos térerősségnek nevezzük. Az $\vec{E}(\vec{r})$ térerősséget az $\vec{r}$ helyvektorú pontba helyezett egységnyi pozitív töltésre ható erő definiálja. Azt mondhatjuk tehát, hogy az elektromosan töltött testek maguk körül elektromos mezőt keltenek. Az elektromos mezőt az $\vec{E}(\vec{r})$ térerősség-vektormező írja le matematikailag, amely megadja, hogy a mező (közelhatás révén) milyen erőt gyakorol a belé helyezett (zérus kezdősebességű) egységnyi töltésű részecskére. (Mozgó töltött részecskére az elektromos mező szintén $\vec{F} = q\vec{E}(\vec{r})$ erőt gyakorol.) A térerősséget az erő kifejezésében mindig abban a pontban kell venni, amelyben az a q ponttöltés tartózkodik, amelyre ható erőt meg akarjuk kapni. Ez mutatja, hogy a kölcsönhatás lokális. (Elvben olyan is lehetne a kölcsönhatás, hogy az $\vec{r}$ helyvektorú pontba helyezett ponttöltésre ható erő attól is függhetne, hogy más pontokban mekkora a térerősség.)

Hasonlóképpen azt várjuk, hogy a mágnesű maga körül egy mágneses mezőt hoz létre, ami aztán erőt gyakorol a beléje helyezett másik mágnesűre. A mágneses mező jellemzésére kézenfekvő lenne bevezetni az egységnyi „mágneses töltésre” ható erőt. Mivel azonban mágneses töltések nincsenek, másképpen kell eljárunk. Az elektromos és a mágneses dipólus közötti analógia van a segítségünkre. Kicsiny elektromos dipólusra a külső elektromos mező

$$\vec{M} = \vec{d} \times \vec{E}(\vec{r})$$

forgatónyomatékat * gyakorol, amelynek hatására a tömegközéppontjában felfüggesztett elektromos dipólus beáll a térerősség irányába, és ekkor stabil egyensúlyi helyzetbe kerül. Ugyanígy külső mágneses mezőben a mágnesű is beáll egy irányba, amelyben az egyensúlyi helyzete stabil. A forgatónyomaték most

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}(\vec{r})$$

alakba írható a tapasztalat szerint. A $\vec{B}(\vec{r})$ vektormező, amelyet mágneses indukciónak nevezünk, csak a mágneses mezőt keltő testtől függ, és értékét a mágneses dipólusra ható forgatónyomaték mérésével a tér tetszőleges pontjában meghatározhatjuk. Ehhez megkeressük a mágneses dipólus stabil egyensúlyi helyzetét, majd választunk egy síkot, amelyben benne fekszik az egyensúlyi helyzetben levő dipólus dipólmomentum-vektora. Ebben a síkban elforgatjuk a dipólust stabil egyensúlyi helyzetéhez képest merőleges állásba, és megmérjük, hogy ekkor mekkora M forgatónyomaték hat az m dipólmomentumú dipólusra. A mágneses indukció nagysága $B = M/m$, iránya pedig párhuzamos a stabil egyensúlyi helyzetben levő dipólus mágneses dipólmomentumával.

A mágneses mező a nyugvó töltött részecskére nem gyakorol erőt. Ugyanakkor ha a tér valamely pontjából különböző $\vec{v}$ kezdősebességgel töltött részecskéket lövünk ki, akkor azok eredeti mozgásirányuktól eltérülnek. Kezdeti gyorsulásuk méréséből meghatározható a mágneses mező mozgó töltött részecskére gyakorolt hatásának erőtvénye. Ennek alakja

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}(\vec{r}).$$

(Az $\vec{r}$ vektor megint a q töltésű részecske tartózkodási helyét jelöli.)

Az áramjárta vezetők mágneses mezőt keltenek, és rájuk a mágneses mező erőt, ill. forgatónyomatékat gyakorol. Ez a tapasztalat arra vezethető vissza, hogy általában a mozgó töltések mágneses mezőt keltenek, és a mágneses mező a mozgó töltésekre erőt gyakorol. A mágnesűben is áramok folynak az egyes atomokon belül, és ezen atomi áramok rendeződése révén válhat az anyag mágnessé.

Mivel a sztatikus elektromos és mágneses kölcsönhatás a távolhatás nyelvén is leírható, felvetődik a kérdés, hogy több-e az elektromos és mágneses mező, mint matematikai segédeszköz. Hogy az elektromos és a mágneses mező valóságos fizikai objektum, arra már ezen a ponton következtethetünk. Az energiamegmaradás törvénye ugyanis a mezőfogalom felhasználásával csak úgy fogalmazható meg, ha az elektrosztatikus és a magnetosztatikus mező minden egyes kicsiny ΔV térfogateleméhez a benne uralkodó térerősség, ill. mágneses indukció által egyértelműen meghatározott energiát rendelünk. Belátható, hogy az elektromos mező energiasűrűsége:

$$w_e = (1/2)\epsilon_0 E^2.$$

A mágneses mezőhöz pedig

$$w_m = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (\mu_0 = 4\pi k')$$

energiasűrűséget kell rendelni, ha a mezőfogalom használatakor is meg akarjuk őrizni az energiamegmaradás törvényét.

Az elektromos és a mágneses mezőnek tehát energiája, sőt energiasűrűsége van, ugyanúgy, mint a kondenzált testeknek.

*A képletben használt $\times$ jel a vektoriális szorzást jelenti.

Eddig csak az időben nem változó, sztatikus elektromos és mágneses mező esetével foglalkoztunk. Most látni fogjuk az időben változó elektromos és mágneses mező példáján, hogy az elektromos és a mágneses mező egymástól elválaszthatatlan. Állítsunk össze egy áramkört tekercsből és árammérő műszerből! Ha a tekercsben mágneset mozgatunk, akkor az áramkörben áram indul meg. Az áramot csak elektromos térerősség hozhatja létre. Így a kísérlet azt bizonyítja, hogy az időben változó mágneses mező elektromos mezőt indukál.

Joggal feltehető a kérdés, hogy vajon megfigyelhető-e a fordított jelenség, vagyis hogy az időben változó elektromos mező mágneses mezőt kelt. Helyezzünk most egy síkkondenzátorba a fegyverzetekkel párhuzamosan egy toroidtekercset, amelynek két kivezetését árammérő műszerhez kötjük, és kapcsoljunk a kondenzátorlemezre nagyfrekvenciás feszültséget! A tapasztalat szerint a toroidban áram indukálódik. Ebből arra következtetünk, hogy a toroid belsejében változó mágneses mező van jelen. Az időben változó mágneses mezőt azonban nem vezetési áram kelti ebben az esetben, mert ilyen nem folyik a fegyverzetek között. Ugyanakkor a toroid középvonala által határolt felületen időben változik az elektromos térerősség fluxusa. A kísérlet arra enged következtetni, hogy az időben változó elektromos mező mágneses mezőt kelt. Általában mind az indukált elektromos mező, mind az indukált mágneses mező örvénymező, amelynek erővonalai önmagukba záródnak.

Az indukció jelensége tehát abban áll, hogy az időben változó elektromos mező mágneses mezőt indukál, az időben változó mágneses mező pedig elektromos mezőt kelt. Az elektromos és a mágneses mező így egymástól elválaszthatatlan. Ezért azt mondjuk, hogy egyetlen elektromágneses mező létezik, amelyet két vektormező, az elektromos térerősség és a mágneses indukció megadásával jellemezhetünk. Az elektromágneses mező egy q töltésű részecskére

$$\vec{F} = q(\vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{v} \times \vec{B}(\vec{r}, t))$$

erőt gyakorol. Ez az erőtvény lehetővé teszi az elektromos térerősség és a mágneses indukció mérését a tér tetszőleges $\vec{r}$ helyvektorú pontjában. Az elektromágneses mezőnek a töltött részecskével való kölcsönhatása lokális: a töltött részecskére ható erő valamely t pillanatban csak az szabja meg, hogy milyen a térerősség és a mágneses indukció az adott t pillanatban a töltött részecske tartózkodási helyén.

Az elektromágneses mező törvényei az alábbiakban foglalhatók össze. Az elektromos mezőt részben árnyékolatlan töltések, részben az időben változó mágneses mező kelti. A töltések az elektromos mező forrásai, belőlük erővonalak indulnak ki és bennük erővonalak végződnek. Ugyanakkor az időben változó mágneses mező elektromos örvénymezőt kelt, amelynek erővonalai önmagukban végződnek. A mágneses mezőnek – az elektromos mezővel ellentétben – nincsenek „forrásai”, vagyis nincsenek mágneses töltések, amelyekből mágneses indukcióvonalak indulnának ki, vagy amelyekben azok végződnének. A mágneses mező így olyan örvénymező, amelyet az áramok (mozgó töltések) és az időben változó elektromos mező keltenek. A fenti törvényeket Maxwell fogalmazta meg egységes elmélet keretében. Az ő nevéhez fűződik az elektromos és a mágneses kölcsönhatás egyesítésének forradalmi gondolata.

Az elektromágneses mező fontos tulajdonsága, hogy benne az elektromágneses zavar véges sebességgel terjed. Az elektromágneses zavar tovaterjedését elektromágneses hullámnak nevezzük. A fény is elektromágneses hullám, és az elektromágneses hullámok c terjedési sebessége a fénysebesség. Elektromágneses zavart kelthetünk pl. úgy, hogy egy antennában az elektronokat rövid τ ideig rezgésbe hozzuk. Ennek hatására elektromágneses zavar keletkezik: az antenna $c\tau$ sugarú környezetében az elektromos térerősség és a mágneses indukció zérustól különböző lesz. Az indukciós törvények értelmében a változó elektromos és mágneses mező kölcsönös egymásba alakulása révén a zavar „le tud szakadni” az antennáról és c sebességgel tovaterjed a térben egy kb. $c\tau$ vastagságú gömbrétegben. Ebben a gömbrétegben az energiasűrűség is különbözik zérustól, így az elektromágneses hullámban energia áramlik fénysebességgel, ami újra csak azt mutatja, hogy az elektromágneses mező is felruházható olyan fizikai tulajdonságokkal, mint a kondenzált testek.

Az elektromágneses zavar véges terjedési sebességének fontos következménye, hogy az elektromágneses mezőt keltő töltések és áramok átrendeződéséről egy megfigyelő csak bizonyos időközesséssel szerez tudomást. Ha nem akarjuk, hogy az elektromágneses zavar energiája a zavar keletkezése és a megfigyelés pillanata között „elvesszen”, akkor az elektromágneses mező létének feltételezése a kiút, hiszen a mező hordozza a zavar energiáját az észlelésig, s így az energia mindvégig megmarad. Mivel az elektromágneses zavar terjedési sebességének végessége kísérletileg bizonyított tény, az elektromágneses mező mint egy sajátos fizikai test létét is el kell fogadnunk.