

MI A TÖLTÉS?

Kötetlen beszélgetések diplomás fizikusok között azt a benyomást keltették bennünk, hogy az elektromos töltés, illetve általában a töltés fogalma, valamint a részecske-antirészecske megkülönböztetés meglehetősen széleskörű értelmezést kap és erősen függ az elvégzett tanulmányoktól, specializációktól. Ez a benyomás meglepő lehet, hiszen azt gondolhatnánk, hogy a töltés pontosan lehet és kellene definiálni, értelmezésében nincs helye a bizonytalanságnak. Benyomásainkat megpróbáltuk mérhetővé tenni egy gyors felmérés segítségével. Négy feleletválasztós kérdést fogalmaztunk meg három-három válaszlehetőséggel, minden esetben meghagyva egy negyedik lehetőséget, mégpedig az önálló megfogalmazását. Rövid írásunkban bemutatjuk a feltett kérdéseket, a válaszlehetőségeket és a válaszok megoszlását. Zárásként megfogalmazzuk következtetéseinket, vitára bocsátjuk javaslatainkat.

Kérdések

A négy feltett kérdés és a választható válaszok sora a következő volt:

- Mit ért elektromos töltés alatt?
 - Az elektromos erő forrását.
 - Az elektromos áramban haladó fizikai mennyiséget.
 - Az elektron csatolását az elektromágneses mezőhöz.
 - Egyéb válasz:



Seller Károly fizikus, az ELTE Elméleti Fizika Tanszék végzős doktorandusz hallgatója. Érdeklődése a részecskefizika és a kozmológia határterületére, az Univerzum első másodperceire fókuszál. Kutatásában a sötét anyag keletkezésének elméleti megalapozásával és az anyag-antianyag aszimmetria kialakulásával foglalkozik.



Trócsányi Zoltán fizikus, az MTA rendes tagja, az ELTE Elméleti Fizika Tanszék egyetemi tanára, az erős kölcsönhatás elméletének nemzetközileg elismert kutatója. *Demény András*sal társszerzője a *Fizika I.* egyetemi tankönyv Mechanika részének, *Horváth Dezső*vel pedig a *Bevezetés az elemi részek fizikájába* című, 2019-ben angolul is megjelent tankönyvnek. Emellett ismeretterjesztő előadások és művek rendszeres szerzője. Tudományos közleményeire százezernél több független hivatkozást kapott.

Seller Károly, Trócsányi Zoltán

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Elméleti Fizikai Tanszék

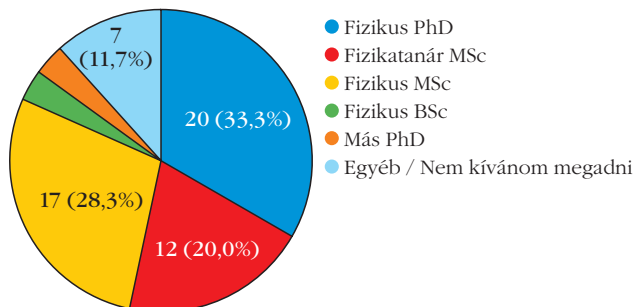
- Mit ért elemi töltés alatt?
 - A proton elektromos töltését.
 - Az elektromos töltés mértékegységét.
 - Az elektronáram és az elektromágneses mező közötti csatolás paraméterét.
 - Egyéb válasz:
- Hol megy át az elektron töltése a kétréses kísérletben?
 - Az egyik résen, de nem tudjuk melyiken.
 - Mindkét résen egyszerre.
 - A töltés nem megy át sehol.
 - Egyéb válasz:
- Mit ért egy p részecske antirészecskéje alatt?
 - Ugyanolyan részecskét, mint p , de ellentétes elektromos töltéssel.
 - A Dirac-egyenlet negatív energiájú megoldását.
 - Ugyanolyan részecskét, mint p , amelynek minden töltése ellentétes p töltésével.
 - Egyéb válasz:

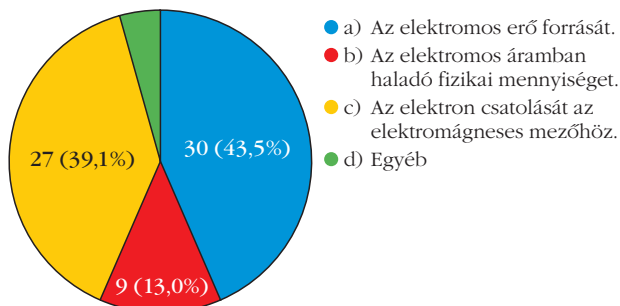
A kérdőív kitöltésére fizikus, fizikatanár diplomát, illetve doktori fokozatot szerzett kollégákat kértünk: aktív fizikatanárokat, a 2022. évi Fizikus Vándorgyűlés résztvevőit, munkatársakat, egyetemi hallgatókat. A kitöltés névtelenül történt, és hangsúlyoztuk, hogy a kérdőívben nem „helyes” vagy „helytelen” választokat várunk, pusztán a kitöltők saját véleményére vagyunk kíváncsiak. Kértük, hogy több helyesnek vélt választ, vagy más vélemény esetén használják az „Egyéb válasz” lehetőséget, beírva a saját megfogalmazásukat.

A kérdőívre 60 beküldést kaptunk a meghirdetéstől számított három héten belül. A válaszadók végzettségének megoszlását az *1. ábra* mutatja. Öröndetes, hogy mindhárom, a fizikát felsőfokon végzett szakmai csoportból jelentős számú válasz érkezett. A végzettség és a válaszok között összefüggéseket szándékosan nem kerestünk, bár az adatok rendelkezésre állnak.

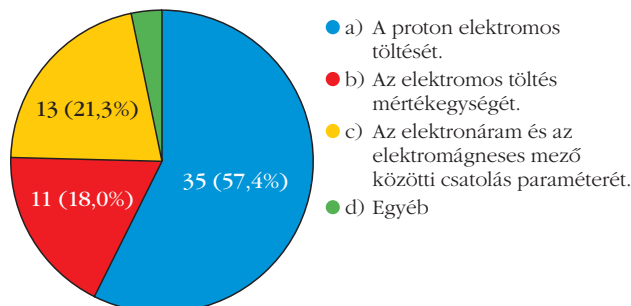
Az egyes válaszok megoszlásai kérdésenként a *2–5. ábrákon* láthatók. Az ábrákon megismert megoszlások a lehetséges válaszok között azt mutatják,

1. ábra. A válaszadók végzettségeinek megoszlása.





2. ábra. Válaszok megoszlása az első, „Mit ért elektromos töltés alatt?” kérdésre.



3. ábra. Válaszok megoszlása a második, „Mit ért elemi töltés alatt?” kérdésre.

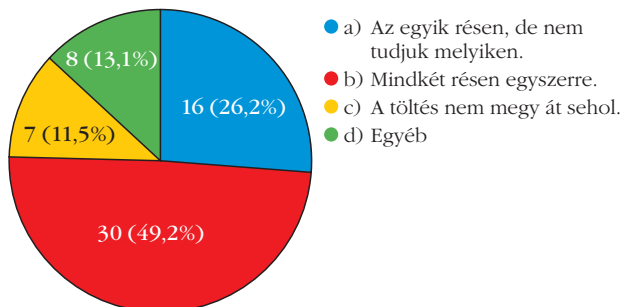
hogy a beszélgetések során szerzett benyomásaink nagyobb mintán is igazolódna: a töltés és hozzá kapcsolódó fogalmak meghatározása nem egyértelmű még a szakemberek körében sem. Természetesen a megismerés különböző szintjén más-más meghatározás lehet értelmes és hasznos. Azonban úgy véljük, hogy a szakemberek körében egységesebb nyelvezet használata lenne szükséges, egyébként nem várható, hogy eszmecsereken megértsék egymást.

Az első két kérdésre megfogalmazott válaszlehetőségek a töltés makroszkopikus tapasztalati meghatározását (a–b), illetve elméleti, mikroszkopikus értelmezését (c) sugallják. Mindhárom válaszlehetőségnek köze van a valósághoz, más-más megismerési szinten.

Az *elektromos töltés* címszó alatt a Wikipédia *Litz József* tankönyvéből [1] idéz: „Az elektromos töltés néhány elemi részecske alapvető megmaradó tulajdonsága, amely meghatározza, hogy milyen mértékben vesz részt az elektromágneses kölcsönhatásban, ami egyike az alapvető kölcsönhatásoknak. Az elektromosan töltött anyag elektromágneses teret hoz létre, és a külső elektromágneses tér befolyásolja a mozgását.” A megfogalmazás első mondata lényegét tekintve az elektromos töltés elméleti értelmezését sugallja, azaz a (c) választ tekinti helyesnek.

Az *elemi töltés* a Wikipédia meghatározása szerint a következő: „Az elemi töltés egy fizikai állandó, melynek értéke a CODATA 2017-es ajánlása szerint [2]: $e = 1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.” Bár az elektromosság alapegysége az SI-ben továbbra is az amper (A), az új SI definíció lényegében a töltés SI egységét (coulomb, C) rögzíti pontosan, és abból származtatja az amper, $A = C/s$. Az elemi töltés nagyságát elsőként *Millikan* és munkatársai mérték meg mindannyiunk rémálma, a

4. ábra. Válaszok megoszlása a harmadik, „Hol megy át az elektron töltése a kétréses kísérletben?” kérdésre.

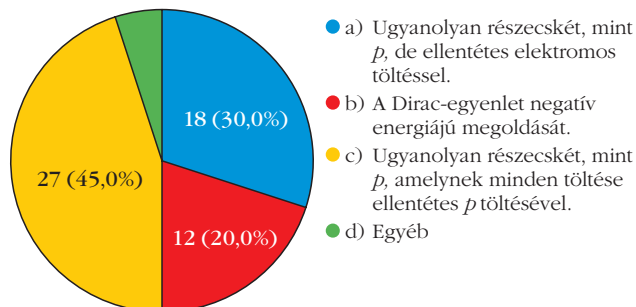


híres olajcseppkísérletben. Eredménye – amiért 1923-ban Nobel-díjat kapott – mindössze 0,62%-kal volt kisebb a ma pontosnak elfogadott értéknél. Eszerint a 2. kérdésre a (b) az általánosan elfogadott válasz, bár lehet ellene érvelni (lásd lentebb). Érdekes tapasztalat, hogy a válaszadók erre a kérdésre adtak leginkább egyöntetű választ, de nem mértékegységként, hanem fizikai mennyiségként (a proton elektromos töltése) tekintenek az elemi töltésre.

3. kérdésünket azzal a céllal fogalmaztuk meg, hogy elgondolkoztassuk a válaszadókat, mi lehet az elektromos és az elemi töltés olyan meghatározása, amely nem ütközik ellentmondásba a tapasztalattal, vagy másként szólva mi a megismerés legmélyebb szintjén is következetes definíció. Ismert, hogy a kétréses kísérlet [3] következetes értelmezése, hogy az elektronra valószínűségi amplitúdóként (kvantummechanika) vagy kvantummezőként (mezőelmélet) kell gondolnunk, és így mindkét résen átmegy mindaddig, amíg más külső mező nem hat rá. Az elektron elektromos töltése csak mint az elektronmező tulajdonsága „megy át” a résen, nem mint fizikai mennyiség. Ez a tulajdonság azt fejezi ki, hogy milyen erősen csatolódik az elektronáram az elektromágneses mezőhöz. A kétréses kísérletben a töltés áthaladását ahhoz hasonlíthatjuk, hogy a hajunk színe sem megy át az ajtón, csak mi a hajszínünkkel, mint tulajdonságunkkal. Véleményünk szerint a megadott lehetőségek közül ehhez legközelebb a (c) válasz áll: sehol.

Az elektromos töltést tulajdonságként (csatolás-ként) definiálva felmerül az ellentét: az SI-ben szerepel az elektromos töltés egysége (C), tehát annak mégiscsak fizikai mennyiségnek kell lennie. Ezzel kapcsolatban érdemes kitérni a 2019 óta hivatalos

5. ábra. Válaszok megoszlása a negyedik, „Mit ért egy p részecske antirészecskéje alatt?” kérdésre.



modern SI mértékegységrendszer definícióira. A ma érvényes meghatározások szerint *a mindennapokban használt mértékegységeket*, például a métert, a kilogrammot vagy az ampert *nem mérési eredményekre alapozott mennyiségeken*, hanem *természetes állandókon keresztül definiáljuk*. Ez lényegi különbség a korábbi közmegegyezéshez képest, hiszen nyíltan kijelenti, hogy *az általunk használt*, a makroszkopikus világunkban viszonylag kényelmes *egységrendszer önkényes*. Ezt a kijelentést döntően arra építjük, hogy létezik az alapvető fizikai állandók olyan csoportja, amelyen keresztül minden SI mértékegység pontosan definiálható. Ebből az irányból megközelítve az elemi töltésre vonatkozó kérdést nyilvánvalóvá válik, hogy bár a coulomb fogalma hasznos a makroszkopikus világban, valójában az elektromos töltés mértékegysége az elemi töltés.

A fenti a gondolatmenet nem csak az elektromos töltés témakörére vonatkozik, hanem a fizikában általános elv: *minden fizikai állandó valójában olyan áttérési állandó, amely összeköti az emberiség által a makroszkopikus világban hasznos fizikai mennyiségeket a természet által definiált skálákkal*. Az átváltások inverzét véve gondolhatunk az alapvető fizikai állandókra is mint az alaplómértékegységekre, és az SI egységekre, mint *nem-fizikai állandókra, amelyek átváltják a természetes egységeket a makroszkopikus világban könnyebben használhatóbbakra*.

Jó példa az SI-ből származtatott egységekre a csillagászatban használatos parsec. Bár az SI mértékegység a távolságra a méter lenne, az a csillagközi távolságok mérésére – két ok miatt – teljesen alkalmatlan. Egyrészt nem tudjuk az asztrofizikai távolságokat méterpontosággal megmérni, másrészt a métert használva kényelmetlenül nagy mérőszámok jelennének meg. Ezért definiáltak egy új mértékegységet, amely természetesebben illeszkedik a problémakörhöz. Ez azonban nem jelenti azt, hogy akár a méter, akár a parsec természetesebb volna a fizika szempontjából. Csupán annyit mutat, hogy bármilyen egységet definiálhatunk, ami éppen hasznos az adott mérési feladathoz. Azonban észben kell tartanunk, hogy akármit is vezetünk be, végeredményként minden új mértékegységünk visszavezethető lesz alapvető fizikai állandók alkalmas kombinációjának számszorosára. Az új mértékegység újdonsága egyedül ebben a számszorozóban van, és nem tulajdoníthatunk neki elemi fizikai jelentőséget, csak kényelmi szerepet.

Az, hogy az elektromos töltés nem létezik fizikai mennyiségként, nem jelenti azt, hogy a töltés fogalmát nem használhatjuk. Ellenkezőleg, *sokféle töltést definiálunk, amelyek kvantumszámokat jelentenek*. A töltések a fermionmezők – legismertebb példa rájuk az elektronmező – sajátértékei a különböző kölcsönhatásokhoz rendelt töltésoperátorok hatására. Erről részletesebben olvashatunk például a [4] hivatkozásban, ebben a számban.

A negyedik kérdésre is meglehetősen megoszoló válaszok érkeztek. A kérdés alapos vizsgálata azt mutatja, hogy ezen a téren még a kutatók véleménye sem teljesen egyöntetű, ugyanis a neutrínók esetében még nem sikerült pontosan megtudnunk, hogyan kell az antirészecskét definiálni.

Következtetések

A harmadik kérdésre elfogadott (c) válasz azt jelenti, hogy az első két kérdésre is csak a (c) választ fogadjhatjuk el következetesen. Természetesen ezzel nem kívánjuk azt sugallni, hogy rögtön ezt kellene tanítani az első találkozáskor az elektromos jelenségekkel. A megismerésnek ezen az első szintjén jól használható absztrakció a ponttöltés fogalma, amelynek „kézzelfogható” megnyilvánulása az elektron. A ponttöltés így válhat az elektromos erő (vagy mező) forrásává, áramolhat az elektromos áramban, amelyek a klasszikus elektromágnességben jól használható megfogalmazások. A felsőfokú képzéskor azonban célszerű lenne ellentmondásmentes definíciót adni a megkérdezett fogalmakra, és ez a csatolás az elektromos töltés esetén.

Tapasztalataink alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy érdemes a *Fizikai Szemlében* külön cikk keretén belül is foglalkozni az itt felvetett kérdéssel [4].

Irodalom

1. Litz József: *Elektromosságtan és mágnességtan*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest (1998) 569 oldal.
2. D. B. Newell et al.: The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI. *Metrologia* 55 (2018) L13; <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa950a>
3. O. Donati, G. P. Missiroli, G. Pozzi: An Experiment on Electron Interference. *American Journal of Physics* 41 (1973) 639; <https://doi.org/10.1119/1.1987321>.
4. Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: Antirészecskék?. *Fizikai Szemle* 72 (2022) 347–351.

Az Eötvös Társulat fönt van a facebook -on!



<https://www.facebook.com/pages/Eötvös-Loránd-Fizikai-Társulat/434140519998696?fref=ts>