

BESZÉLGETÉS AZ ELEKTRON MÉRETÉRŐL

Horváth Dezső – MTA Wigner FK Részecske- és Magfizikai Intézet

Oláh Éva – Mechatronikai Szakközépiskola, Budapest

Sükösd Csaba – BME Nukleáris Technikai Intézet

Varga Dezső – MTA Wigner FK Részecske- és Magfizikai Intézet

Patkós András – ELTE Atomfizikai Tanszék – lábjegyzeteivel

A kvantumfizika szó hallatára az emberek általában valami nagyon nehéz, számukra érthetetlen dologra gondolnak, pedig már az általános iskola hetedik osztályában találkoznak az elektron fizikájával. Abban az életkorban a diákoknak nem tűnik fel még az sem, hogy az elektront egyszer golyócskának képzelik és ennek segítségével magyarázzák az atomok elektron-szerkezetét, máskor pedig az atommagot körülvevő elektronfelhőről hallanak. Tulajdonképpen anélkül, hogy tudatosulna bennük, első pillanattól kezdve „barátkoznak” az elektron eme furcsa kettősségével, amely a kvantumfizika legfőbb gondolata. A kis méretek tartományában megtanulják az atom, illetve az atommag méretét, de esetleg fel sem merül bennük, hogy mekkora is valójában az elektron, vagy hogy e kérdésnek egyáltalán van-e értelme. A modern fizika témakörei azért nehezebbek a klasszikus fizikában tanultaknál, mert nehéz szemléltetni a mikrovilágban lejátszó jelenségeket. Felmerül a kérdés, hogy ezt ilyen formában taníthatjuk-e diákjainknak, illetve hogy milyen mélységben kell részletezni ezen elképzelhetetlenül kicsi (vagyis végül is mekkora?) elemi részecskék tulajdonságait. Középfokú oktatásban mind a diák, mind a tanár számára elegendőnek bizonyul, ha ezt a párhuzamot „finomítjuk” annak megfelelően, amit az elektron kettős természete kapcsán tanítunk. De mi történik, ha a magfizikus vagy részecskefizikus szembesül azzal az ábrával, amelyen az atommag körül golyószerű elektronok keringenek (1. ábra)? „Természetesen” vitatkozik: érvel, cáfol, egyetért, kiegészít, pontosít, míg ki nem alakul a vitapartnerek között egy konszenzus.

Így történt ez 2014 júliusában, amikor *Oláh Éva* fizikatanár, az ELTE Fizikatanári Doktori Iskola doktorandája (témavezetői *Varga Dezső* és *Horváth Dezső*) részecskefizikáról szóló előadásra készült középisko-

lásoknak és a CERN-es HTP-2014 fizikatanári továbbképzés résztvevőinek. *Sükösd Csabát* is megkérték arra, hogy nézze át az előadás fóliáit és véleményezze azokat. Az ábrák között szerepelt egy, amely a Li-atom szerkezetét a Rutherford-féle atommodell szokásos elektronpályáival mutatta be. Sükösd Csaba kifogásolta a fólián feltüntetett azon tételt, miszerint az elektron pontszerű részecske, sugara 10^{-18} m-nél kisebb. A két Dezső ezt védelmezte, és a kérdésről egy jó néhány napig tartó levelezés alakult ki közöttünk. Úgy gondoltuk, tanulságos az érveket és ellenérveket összefoglalni egy *Fizikai Szemle* cikkben. Valamennyi levelet mind a négyen megkaptuk, bár azokat kifejezetten egyikünk valamelyikünknek címezte. A levelet lényegi változtatás nélkül közöljük, bizonyos helyeken kihagyva zsákutcákat vagy témához nem tartozó egyéb tartalmakat.

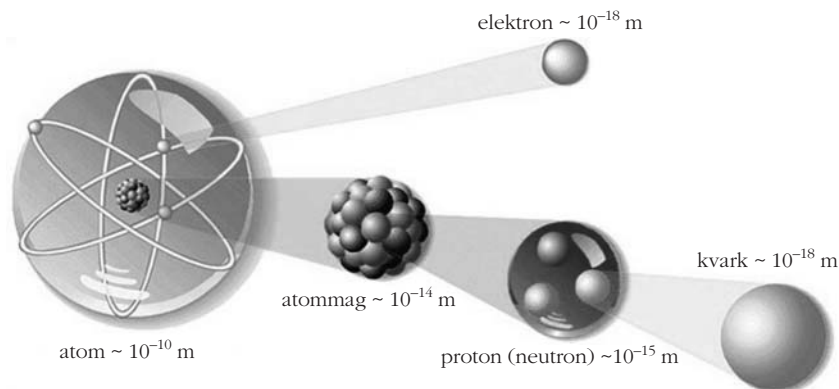
S.Cs. → O.É.

Nem értek egyet az elektron és a kvark „méretének” feltüntetésével. Ehelyett azt kellene írni, hogy ezek elemi részek és jelenlegi tudásunk szerint tovább nem bonthatók. Az a (*Rutherfordtól* származó) modell is túlhaladott, hogy az atomban az atommag „körül” pontszerűnek tekinthető elektronok szaladgálnak. Jelenlegi (kvantummechanikai) modellünk szerint az atomban az elektronok egy körülbelül 10^{-8} cm sugarú térrészbe vannak „bezárva”, és lényegében KITÖLTIK azt a térrészt. Tehát ott az elektron „mérete” ilyen nagy. Hasonlóan, a kvarkok is nukleon méretű „zsákokba” vannak bezárva (bár nagyon sűrű elhelyezkedés esetén, például neutroncsillagok központi tartományában a „zsákok” falai átjárhatókká lesznek) és lényegében kitöltik azt a térrészt, tehát a „méretük” az atommagban ekkora. Az $r_0 < 10^{-18}$ m pontosabban fogalmazva azt jelenti, hogy a kísérletek során sikerült már – elegendően nagy energiakoncentrációval – ilyen kis térrészre „beszorítani” ezeket a részecskéket anélkül, hogy további alkotóelemekre bomlottak volna szét. Ha ezt nem magyarázod el, csak odaírod, hogy „méretük” $< 10^{-18}$ m, azt a teljesen hibás képet sugallod a hallgatóknak, hogy ezek MINDIG ilyen kicsikék.

H.D. → S.Cs.

Minden Évának írt megjegyzéssel, tanácsoddal egyet értek, a részecskék méretét kivéve. Az elemi

1. ábra. Az atommag körül golyószerű elektronok keringenek?



részecskék a mérések szerint tényleg pontszerűek, legalábbis 10^{-18} m alattiak. Ami az elektronok atomi és a kvarkok hadronbéli kiterjedését illeti, az valószínűségeloszlás: a pontszerű részecske különböző valószínűséggel található a pálya vagy térrész különböző pontjain. Ezért repül át a pontszerű és oszthatatlan elektron a fésű összes fokán egyszerre, saját magával interferálva. A távoli csillagból jövő foton is egyszerre található a sok fényévnyi átmérőjű gömbfelület valamennyi pontján, amíg el nem nyelik, de közben pontszerű marad.

S.Cs. → H.D.

Vitatkoznom kell Veled a részecskék „méretét” illetően. Én úgy tanultam, hogy a kvantummechanikában a részecskék mérete nem értelmes fogalom, mint ahogy a részecskék pályája sem.

De persze nem az a lényeg, hogy én hogy tanultam, mert a tudomány fejlődött azóta is. Viszont: a Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés alapján, ha Te egy elektront $\Delta x = 10^{-18}$ m térrészbe szorítasz be, akkor a Δp_x impulzusbizonytalansága óriásira nő (és persze a másik két dimenzióban ugyanúgy) – más szóval az állapotfüggvényében igen nagy impulzusú (és energiájú) komponensek is megjelennek. Az elektront bizonyos nagyenergiájú kísérletekkel persze be lehet „szorítani” ilyen kis térrészbe – ezt írtam korábban is – de ez éppen azt mutatja, hogy „elemi” részecske, tovább nem bontható – még akkor sem, ha az állapotfüggvényében ilyen igen nagy energiájú komponensek is jelen vannak. De hogy az atomban lévő elektronoknak nem lehet ilyen nagy energiájú komponense, az teljesen világos (különben a mag nem tudná őket kötött állapotban tartani). Ergo, nem lehetnek ilyen kis térrészre „beszorítva” sem, azaz az atombeli „méretük” nem lehet ilyen kicsi.

Számomra valaminek a mérete egyenlő annak a térrésznek a méretével, ahol az illető valamit meg lehet találni. A szekrény mérete, az asztal mérete stb. így van definiálva. A mikrorészecskék térbeli „elhelyezkedését” az állapotfüggvény mondja meg: megmutatja, hogy a részecskét a tér mely részében lehet megtalálni (ahol a megtalálási valószínűség különbözik nullától). Számomra ez a részecske „mérete” az adott állapotban. Nem hallottam olyanról, hogy a „méret” saját (intrinsic) tulajdonság, paraméter vagy kvantumszám lenne. Ezért nem hasonlítható sem a tömeghez (amely lényegében a gravitációs töltés, illetve energia), sem pedig az elektromos töltéshez vagy a spinhez. Szerintem ez az oka annak, hogy a hivatalos adatgyűjteményekben a „méret” sehol nincs feltüntetve.

Szóval, kérlek, hogy definiáld, mit kell érteni egy részecske „saját” méretén, és hogyan kell azt megmérni.

H.D. → S.Cs.

Kísérleti fizikus lévén nem fogom a fejem elméleti méretdefinícióra törni, elég, ha megmondjuk, hogyan kell mérni. Minden részecskéhez tudsz kísérleti sugarat rendelni, csak különböző energián szórítani (üt-

köztetni) kell őket egymáson és megmérni a rugalmas ütközés valószínűségét. Ez a rugalmas ütközés a kvantummechanikai számolások szerint közvetlen kapcsolatban van a részecske méretével, alakjával. A rugalmas ütközés alatt azt értjük, hogy a kezdeti állapotban ugyanolyan típusú részecskék vannak, mint az ütközés után.

Kezdjük a protonnal. Mivel hibahatáron belül ugyanazt a sugarat kapod a protonra elektron- és müonszórással, proton-proton ütközésekben, valamint az elektron- és müonhidrogén átmeneteinek a proton véges méretével történő korrekcióival, akkor azt a proton méretének kell tekintened.

Ha a proton mérete megvan, akkor jöhet a müon és az elektron sugara. Szóratod őket más részecskéken (például protonon vagy egymáson, tele a világ elektron-pozitron ütköztetővel) és illesztesz az eredményhez müon- és elektronméretet. Így találtuk meg a kvarkokat (partonokat) a protonban: a nagyenergiás elektronok pontszerű szórócentrumokat észleltek benne. A szórási szögeloszlásból egyből látszik a pontszerűség, illetve annak hiánya (analógia: Rutherford-szórás). A kapott részecskeméretet a mérés pontossága fogja meghatározni, ez az a sokszor leírt $r_e < 10^{-18}$ m.

A részecske megtalálási térrészének tehát nincs köze a sugarához. Példaként: a lassú neutron állapot-hulláma akkora, hogy visszaverődik a grafitfelületen, jöllehet a neutron közel akkora, mint egy proton.

V.D. → S.Cs. és O.É.

Csatlakozva Dezső legutóbbi magyarázatához, pár analógia, amellyel látható, hogy mit lehet „méret”-en érteni. A kvantummechanikai szórási (kölcsonhatási) valószínűség leírható egy alakfaktorial vagy szerkezeti függvénnyel, amely pontszerű esetben dimenziótlan (és egyszerű, például fordítottan arányos az ütközési energia négyzetével). Bonyolultabb esetben tartalmazhat „dimenziós” mennyiségeket – azokat akár nevezhetjük „méret”-nek.

A probléma az így definiált részecskemérettel:

- Függ a folyamat részleteitől, különböző folyamatok között kiszámítható, de nem egyszerű a kapcsolatuk (egy amorf krumpli méretét nem egyszerű definiálni).

- Függ az energiától. Egy proton az LHC-nél háromezer „nagyobb”, mint az atommagban. De ez sok mindennel így van, például az elektromos töltés sem állandó, hanem növekvő energiával növekszik.

Az tehát, hogy egy részecskének messzire terjedő hullámfüggvénye van, nem mondja meg a „méretét”. A részecske mérete (és tömege, töltése, dipólmomentuma stb.) egy-egy paraméter valamilyen szórási hatáskeresztmetszetben (ez utóbbiak a mérhető mennyiségek). Horváth Dezső által említett példa esetében az elektron-elektron rugalmas ütközés valószínűsége éppen olyan, mint amit pontszerű esetben várnánk, a proton-proton ütközés pedig nem enged meg nagy impulzuscserét, sőt, érdekes struktúrát mutat.

S.Cs. → H.D.

Örülök, hogy konvergálunk! Ha jól értem, az általad írt mérési mód a nagyenergiás limit: egyre nagyobb energiájú részecskenyalábokkal (egyre kisebb hullámhosszakkal, egyre jobb felbontással) mérünk. Az „egyszerű”, tovább már nem bontható objektumoknál (elektron, kvark) a felbontás (rendelkezésre álló energia) határozza meg a „saját méret” felső határát. Az összetett objektumoknál pedig (atom, proton stb.) a belső szerkezet megváltoztatásához szükséges energia (hullámhossz).

Szerintem ez elfogadható, mint definíció, illetve mérési utasítás, hiszen egyértelmű, és talán egyértelmű eredményt is ad. Ugyanakkor nem szabad elfelejteni, hogy egy ilyen mérés komolyan „beszól” a mérendő objektum állapotába: azaz nem azt az állapotot mérjük, amely korábban volt (például amely az atomhéjban lévő elektronállapotban van). Persze az is igaz, hogy minden mérés megváltoztatja a rendszer állapotát (kvantummechanikailag „beugrasztja” a lehetséges állapotok közül valamelyikbe). Konkrét esetben a megtalálási valószínűség által leírt sok lehetséges állapot egyikébe.

Ugyanakkor továbbra is fenntartom, hogy ez a modell – ha nem tudjuk pontosan, hogy mi van mögötte – nagyon komoly ellentmondásokat tartalmazó kép kialakulásához vezethet (a diákokban és tanároknál): „felélesztheti” például a Rutherford-féle Naprendszermodell, ahol pontszerű elektronok szaladgálnak valahogyan az atommag körül. Ezt – szerintem – mindenféleképpen el kellene kerülni. Ezért változatlanul elfogadhatóbb, szemléletes képnek (modellnek) érzem azt, amiben a H-atom elektronjának „méretét” az elektron megtalálási valószínűségének kiterjedése adja meg; természetesen úgy, hogy tudjuk, ha egy nagyon rövid hullámhosszú (nagy térbeli felbontású) részecskével meg akarjuk találni az elektront, akkor ezen a gömbön belül „valahol” lényegében pontszerűen találjuk meg.

S.Cs. → V.D.

Köszönöm, ezeket értem. Az, amit írsz, hogy az ilyen alapokon definiált részecskeméret nem egyértelmű, hanem több mindentől is függ, kicsit magyarázza azt is, hogy miért olyan nehéz a méretet a részecske saját intrinszc belső tulajdonságaként definiálni. A különböző folyamatokban persze előfordulnak hosszúságdimenziójú mennyiségek (ilyen például az ismert klasszikus elektronsugár, vagy különböző szórási hosszak, hatótávolságok stb.), de szerintem ezek egyikét sem célszerű a részecske „saját méretének” tekinteni.

Számomra egyébként azért fogadható el H. Dezső mérési utasítása, mert az egy limesz: a végtelen energiás limesz. Ez – remélhetőleg – egyértelmű. Végtelenül rövid hullámhosszúságú nyalábbal dolgozó, végtelenül jó felbontású „mikroszkóppal” való helymeghatározás.

A részecske hullámfüggvénye (illetve abszolútértékének négyzete) a részecske megtalálási valószínűségeit adja meg. Ha a részecske „méretét” a

végtelen energiás limeszsel definiáljuk, akkor persze semmi köze sincs a kettőnek egymáshoz. De, ha azt kérdezzük, hogy az a részecske mégis a tér mely tartományában található meg egyáltalán, akkor azt – tetszik, nem tetszik – az állapotfüggvény abszolútérték-négyzete, illetve annak kiterjedése mutatja meg.

Én ezért szeretem inkább a „pontszerű” elektron helyett azt mondani, hogy az elektron „szerkezet nélküli” (legalábbis jelen tudásunk szerint), és a geometriai méret fogalmát, mint állapottól független, „saját” tulajdonságot – a Rutherford-féle klasszikus pályafogalomhoz hasonlóan – elkerülni.

V.D. → S.Cs.

Alapvetően egyetértek azzal, amit írsz, egyetlen „érzésem” az, ha klasszikus fogalmakat igyekszünk a kvantum-mezőelméleti mérések mögé rakni, akkor nem biztos, hogy az helyes következtetésre vezet. A „végtelen energiás határérték” majdnem jó vezérlő elv, annyi teendő hozzá, hogy van egy (jól kiszámítható) függvény, amely szerint még nagyon nagy energiákon is változnak bizonyos mennyiségek (lásd például a DGLAP-egyenleteket az erős kölcsönhatásnál, ahol minden betű egy-egy nagy nevet takar...).

Valóban, a legfontosabb kérdés az, amit megfogalmaztál: hogyan csapódjon le mindez a középiskolás tanároknál, milyen üzenetet közvetítsenek a (szakértőnek aztán tényleg nem mondható) kisdíjak felé? Ilyen értelemben fontos ez a vita, és nagyon támogatom, hogy a klasszikus kvantummechanikai kép fő gondolata számukra érthető legyen.

S.Cs. → H.D.

A mi „vitánk” – vagy nevezük inkább beszélgetésnek – tipikusan a fizika két különböző területén dolgozó fizikus beszélgetése. Rutherford számára az atommag is pontszerű volt, mivel „mikroszkópja” (a néhány MeV-es alfa-részecskéknek) hullámhossza nem volt még elég rövid ahhoz, hogy méretet is tudjon mondani: csak felső korlátot tudott megadni a mag méretére. Később, az atomi spektrumok – pontszerű vonzócentrumot feltételező, elméletileg kiszámíthatóhoz viszonyított – apró eltéréseiből közvetve, majd nagyenergiájú elektronszórásból már közvetlenül is lehetett „látni”, hogy az atommag nem pontszerű, hanem van valamekkora kiterjedése. Hasonlóan, amíg nem álltak rendelkezésre GeV-es nyalábok, addig a proton és a neutron is „pontszerű” volt, és csak jóval később sikerült közvetlenül is megfigyelni a kvarkok három szórócentrumát, és a proton, illetve neutron kiterjedt voltát.

Értem én, hogy a részecskefizikus számára abszolút lényegtelen, hogy milyen elképzelése van az elektronokról az elektronvoltos és tized-elektronvoltos energiatartományokban dolgozó atomfizikusnak vagy kvantumkémikusnak. A részecskefizikust „A RÉ-SZECSKE” érdekli. Önmagában, meztelenül. Ahogy keletkezik, ha megfelelő energiakoncentráció létrejön, és ahogy elbomlik. Másik oldalról viszont az atomokat és molekulákat vizsgáló fizikusnak teljesen

mindegy, hogy milyennek látja a részecskefizikus az elektront, ha sok GeV vagy TeV energiával birizgálja. A szilárdtestfizikusokat meg a neutron esetében sem érdekli, hogy abban hány szórócentrum van 100 GeV-es energián, amikor a KFKI hideg neutronos nyalábjával neutron-holográfiát csinálnak, vagy neutronszórást vizsgálnak kondenzált anyagokon (kristályokon, amorf anyagokon, folyadékokon). Számukra az a fontos, hogy a neutronok haladásuk és az anyag (kristály) szerkezetével való kölcsönhatásuk során eléggé kiterjedt, akár sok atomréteg „méretű” hullámokként viselkednek. No persze tudják, hogy amikor a neutronot detektálják, akkor ott mindig egyetlen neutronot észlelnek, amely egyetlen atommaggal lép kölcsönhatásba; tehát detektáláskor a „mérete” sokkal kisebb, mint amit a terjedése során figyelembe kell venni.

Az alacsony energiás fizikában – és az atomok fizikájában, amit a középiskolások számára kell(ene) valahogyan érzékelteni – nem a nagyenergiás elektronkép a legmegfelelőbb (legalábbis szerintem), hanem sokkal inkább a „kiterjedt” elektron „állóhullám”. De ez a szép a fizikában, hogy nincsenek egyedül üdvöztető elméletek és modellek. A különböző jelenségcsoportokra mindig is az arra leginkább alkalmas modellt használtuk – jóllehet tudtuk, hogy az csak a teljes igazságnak (amit nem is ismerünk) csak egy töredéke.

Abban teljesen igazatok van, hogy a makroszkopikus fogalmak nem alkalmasak a mikrorészecskék tökéletes leírására. Ezért használunk modelleket, amelyek a teljes valóságnak csak egy-egy kis részletét írják le. Megboldogult *Károlyházy Frigyes* mondta egyszer: „az elektron részecskének hullám, hullámnak részecske, de legjobban önmagára hasonlít”. Középszkolások gyerekekkel (és az őket tanító tanárokkal) viszont nem indulhatunk ki a jelenlegi absztrakt matematikai modellekből. Nekik olyan dolgokhoz kell hasonlítanunk, ami a makroszkopikus világból ismert a számukra (például golyó és hullám). Az sem baj, ha különböző szempontok szerint különböző modelleket kell használnunk. Még az sem baj, ha ezek a modellek ellentmondani látszanak egymásnak! Sőt, talán ez benne az igazán szép és izgalmas! *Bohr* után elmondhatjuk, hogy „*Contraria non contradictionaria, sed complementaria sunt*” – azaz, ezek nem ellentétek, hanem egymást kiegészítik, mivel NINCS egyetlen olyan makroszkopikus dolog, amelyhez a mikrorészecskék minden szempontból hasonlíthatók. Ilyen módon kapnak legalább valami kis fogalmat a világ – és a részecskék – sokszínűségéről, és makroszkopikus fogalmainkhoz szokott szemléletünket messze meghaladó végtelenségéről.

O.É. → S.Cs.

Én csak ámulok és bámulok, milyen fantasztikus beszélgetés alakult ki, *Galilei: Dialogo* című művét juttatta eszembe. Megfontolandó lenne, hogy ez a párbeszéd ne jelenjen-e meg valamilyen formában, tudósnak, tanárnak épülésére szolgálna a fizika szép-

ségének, sokrétűségének ilyenfajta bemutatása. Számomra, mint mezei fizikatanárnak a konklúzió mindenképpen az, amit eszerint tanítok is, hogy az elektron egy furcsa „jóság”, a modellekben golyóknak tekinthetjük, kémiaórán már 7. osztályban elektronfelhőről beszélünk, majd a kétréses kísérlet kapcsán hullámok interferenciáját figyelhetjük meg. (Persze azt is csak addig, amíg egy „szem” meg nem figyeli, mi is történik tulajdonképpen.) Előadásomban mindenféleképpen utalnék erre a kettős természetre. Köszönöm ezt az élvezetes továbbkést.

H.D. → S.Cs.

Végül is értjük egymást. Két dologban azonban nem értünk egyet.

1. Az elektron (és persze a standard modell összes többi elemi részecskéje) pontszerű, amelynek állapotát (és persze mozgását is) valószínűség eloszlás írja le és nem anyaghullám. Ezt kell és el is lehet magyarázni, ez az egész probléma kulcsa. Mihelyt ezt elmondjuk, azonnal elhullik a körpályán rohangáló vagy véges kiterjedésű részecske hibás fogalma.

2. Nem igaz, hogy nagy energián az elektron egyre pontszerűbbnek látszik, sőt! A LEP-nél a 200 GeV-es ütközésekben az elektron-pozitron kölcsönhatásban már a részecskék által hurcolt fotonterek felbomlott fotonjaiban megjelenő virtuális töltött részecskék özöne jelent meg. Jó pár magyar diplomamunka és PhD-dolgozat született az elektron-pozitron ütközésben, azaz foton-foton kölcsönhatásban keletkező hadronzárók elemzéséről. A pontos kijelentés az, hogy a kísérleti adatok elemzésénél feltételezünk egy részecskeméretet, és megnézzük, azok mekkorát engednek meg. Ez persze már túlmegy a középiskolás szinten, csak nekünk fontos tudnunk, amikor beszélünk róla.

V.D. → H.D.

Dezső, hogy definiáld azt a fogalmat, hogy „pontszerű”? Ugye kvantummechanikai objektumról van szó... ☺

H.D. → S.Cs.

A pontszerűséget pontosan abban az értelemben lehet csak használni, amilyen értelemben leírtam a mérését: véges méretet tulajdonítasz neki és megpróbálsz értelmezni a méréseket. A pontszerűség viszont nem okoz olyan paradoxonokat, hogy miért nincs végtelen nagy energiája az elektronnak, ha éppen az atommag helyén találjuk: a valószínűségi leírás térben is, nemcsak időben igaz.

S.Cs. → H.D.

Úgy érzem, konvergálunk. Te írod: „valószínűségi leírás térben, nemcsak időben igaz”. Azaz, az elektron „elhelyezkedésének” leírására (tudatosan nem „kiterjedést” írtam) a térben kiterjedt (valószínűségi) hullámok modellje jobb, mint a pontszerű golyó. Addig, amíg nem „figyeljük meg” az elektront, nem kérdezzük le méréssel azt, hogy „hol vagy most éppen?”,

addig a hullámmodellt jobb alkalmazni. Abban nem találunk ellentmondásokat sem a végtelen potenciális energia miatt, és az interferencia-képességet is jól le tudjuk írni. Amikor viszont az elektront „detektáljuk”, mérést hajtunk rajta végre, lekérdezzük, hogy „hol vagy most éppen?”, akkor viszont a pontszerű golyó a megfelelő modell. De szerintem éppen ezt tanítjuk, ez van a középiskolai anyagban is.

S.Cs. → H.D.¹

Engedj meg még egy érvet – vagy inkább paradoxont – a „pontszerű” elektronnal kapcsolatban. Az elektromosságtan szerint egy Q töltéssel homogénean feltöltött, r_0 sugarú gömb elektrosztatikus energiája:

$$\frac{3}{5} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{r_0}$$

Ha ide behelyettesítjük az elektron $Q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C elemi töltését, és az általad említett $r_0 = 10^{-18}$ m sugarat, akkor az elektrosztatikus energiára $1,38 \cdot 10^{-10}$ J jön ki, ami átszámítva 864 MeV! Ez több nagyságrenddel nagyobb, mint az elektron $\sim 0,511$ MeV nyugalmi tömegének megfelelő energia! Ha tehát az elektron teljes egészében ténylegesen ilyen kis térrészre lenne beszorítva, akkor – elektrosztatikus energiája miatt – tömege is ilyen óriásra nőne! Ezért az elektron nem lehet ilyen kis térfogatra lokalizálva, hacsak nem adunk neki ennyire nagy energiát. Ez ugyancsak azt támasztja alá, hogy csak nagy energiájú folyamatokban tud az elektron „pontszerűvé” válni. Kis energiájú folyamatokban az elektron „kiterjedése” sokkal nagyobb kell legyen – azaz a töltése sokkal nagyobb térrészen (delokalizálva) kell, hogy megtalálható legyen.²

Én ezért szeretem inkább a „pontszerű” elektron helyett azt mondani, hogy az elektron „szerkezet nélküli” (legalábbis jelen tudásunk szerint), és a geometriai méret fogalmát, mint állapottól független, „saját” tulajdonságot – a Rutherford-féle klasszikus pályafogalomhoz hasonlóan – elkerülni.

H.D. → S.Cs.

Azt hiszem, erre a paradoxonra is az a válasz, hogy a valószínűségi eloszlás nemcsak időben, de térben is teljesül. A kísérletileg pontszerűnek talált elektron a tér különböző pontjain különböző valószínűséggel tartózkodik, tehát töltésének is így kell megoszlania. Egyébként be kell, hogy ismerjem, ilyenkor mindig a *Richard Feynmannak* tulajdonított szöveg jut eszembe: amikor

¹ A beszélgetés ezen része már nem e-mailben zajlott, hanem 2014. augusztus 17-én este, 40 magyar fizikatanár jelenlétében, a CERN-ben kiállított BEBC (Big European Bubble Chamber, Nagy európai buborékkamra) mellett.

² Ez a gondolat kísérlet nem fér be az egyetlen elektront leíró klasszikus vagy kvantummechanikai szemléltetésbe. Egy fenti r_0 méretű elektron (saját) energiájába jelentős járulékat adnak a nagyon rövid (ezzel a mérettel nagyjából azonos) hullámhosszúságú kvantumfluktuációk: a tömegéhez ezek energiája is járulékat ad, amelynek nagysága éppen ezért a fenti egyszerű modellel értelmezhetetlen. Itt menthetetlenül átszaladunk a kvantum-elektrodinamika területére. (P.A.)

megkérdezték tőle, mi a véleménye a kvantummechanikai valószínűség (koppenhágainak nevezett) értelmezéséről, azt válaszolta: *Hallgass és számolj!* Ezt azonban a középiskolában nem mondhatjuk.

Epilógus

Reméljük, a tisztelt olvasó is (közel) annyira élvezte ezt a levelezési vitát, mint mi, a résztvevői. Rávilágít, hogyan gondolkodik az elemi részecskékről az atomfizikus, a magfizikus és a részecskefizikus. Be kell ismerjünk, hogy újraolvasva négyünknek egyre jobban tetszett, ezért is döntöttünk úgy, hogy megfelelő gyomlálás után közreadjuk. Érzékelteti azt az (enyhén?) kötözködő vitástílust, amelyet a fizikusok szerte a világban, ha nem is az anyatejjel, de az egyetemi levegővel szívznak magukba, és amely általában nagyon tetszik az esetleges hallgatósnak. A magyar fizikatanárok CERN-i továbbképzése immár 9 éve folyik a szerzők részvételével, és a tanárok visszajelzése szerint az ilyen viták mindig rendkívül népszerűek voltak. A 2014 augusztusában lezajlott vitát a hallgatóság így értékelte egy csasztuskában (<https://indico.cern.ch/event/268114/>): *Elektronnak a mérete / Nagy vitának kezdete. / Nehogy azt biggye a Dezső, / Szópárbajban ő a nyertő! / DÖNTETLEN!*

A szórakoztatás mellett talán cikkünk közvetlen pedagógiai haszna sem lesz elhanyagolható. Éppen ezért az alábbiakban összefoglaljuk a vita tanulságait a fiatalságnak – remélhetőleg – továbbadható formában:

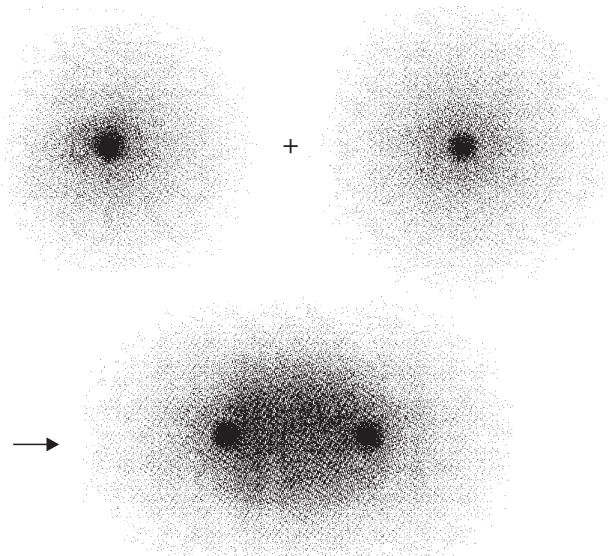
- A fizika jelenlegi állása szerint a körülöttünk látható világot *elemi* részecskék alkotják: leptonok, kvarkok, a kölcsönhatásokat közvetítő bozonok és a Higgs-bozon. Közöttük a leginkább ismert az elektron, mint az egyetlen szabadon létező és tanulmányozható elemi részecske.

- Az elemi részecskének nincs belső szerkezetük, nincsenek alkatrészeik. A nagyenergiás szórás kísérletekből (ütközéses kölcsönhatásokból) az is látszik, hogy *képződéskor* és átalakuláskor vagy *elnyelődéskor* nincs kiterjedésük (mérési hibán belül zérus), tehát ebben az értelemben pontszerűnek tekinthetők.

- Ugyanakkor kvantummechanikai objektumok, hullámtermészetük térben és időben egyaránt megmutatkozik: *terjedése* során egy elektron egyidejűleg több részen is áthalad és felhőként tölti meg az atomi állapotokat. Ez azonban nem anyag-, hanem valószínűségi hullám: a tér különböző pontjain különböző valószínűséggel tartózkodik.

- Mindenki másképpen képzei el az elektront – más modellt alkalmaz rá – aszerint, hogy mekkora energián tanulmányozza: atomi állapotot betöltő felhőként (*2. ábra*), téridőben táncoló pontszerű golyóként, vagy végtelen kiterjedésű, elektromágneses teret hurcoló erőtercsomagként.

- Sok olyan részecskét ismerünk, amelynek „mérete” véges, ilyen például a proton. Ezekről a részecskékről kivétel nélkül kiderült, hogy véges geometriai



2. ábra. A hidrogénmolekula formálódása.

méretük belső szerkezetüknek köszönhető. Így kapjuk az atomok méretét is: a (szerkezet nélküli) elektronok és az (icipici kiterjedésű) atommagok kölcsönhatása különleges objektumot hoz létre.

- Geometriaiméret-fogalom azonban nem alkalmazható az elektronra (sem semmilyen más, szerkezet nélküli, *elemi* részecskére például kvarkokra).

- Az hogy az elektron „pontszerű”, fizikus virágnyelven megfogalmazott állítás, és azt jelenti, hogy SEMMILYEN szerkezete nincs, akár végtelen nagy energián is nézzük (végtelen nagy felbontással – bár eddig csak $r_0 \sim 10^{-18}$ m-ig jutottunk el).³

³ 1954-ben *Abrikosov*, *Landau* és *Halatnyikov* megvizsgálták, hogyan árnyékolják le a vákuumpolarizációban felbukkanó-eltűnő elektron-pozitron párok egy r_0 sugarú gömbön valahogy lokalizált e_0 nagyságú elektromos töltés terét. Azt találták, hogy nagyjából

$$e^2(r) = \frac{e_0^2}{1 + K e_0^2 \log\left(\frac{r}{r_0}\right)}$$

függvényt követ az r távolságon mért leáryékolt töltés (K egy konstans). Landau fordítva is kérdezett: tudjuk, hogy a Thomson-szórásban mért elektrontöltés mekkora (ez van a középiskolai táblázatokban). Mi van, ha jóval nagyobb felbontással, egyre kisebb tartományon szeretnénk megmérni az álló elektron töltését? Más szóval $e^2(r)$ -t rögzítve hogyan változik e_0^2 , ha r_0 -t csökkentjük. A fenti egyenlet átrendezésével bárki meggyőződhet, hogy egy véges r_0 értéknél e_0^2 végtelenné válik. Azaz a kvantumelektrodinamikát nem lehet tetszőleges kis méretek tartományára kiterjeszteni! A Landau-szingularitásnak nevezett jelenség miatt biztosan tudható, hogy az elméletet valami más váltja fel. Szerencsére ez a veszély a standard modell jóval kisebb skálán történt felfedezésével elhárult. A standard modellnek is van Landau-szingularitása, de ez elég közel van a Planck-hosszhoz, ahol a kvantumtérelmélet és a gravitáció egységes elmélete nélkül nem értelmezhető a fizika. Így az elektron töltéssugara nem lehet nulla. E megjegyzés tanulsága az, hogy a kvantumtérelméletben elvész a kis- és nagyenergiás jelenségek szétválasztásának lehetősége. (P.A.)