

HIHETŐ-E A HIHETETLEN?*

Károlyházy Frigyes

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Elméleti Fizikai Tanszék
karolyhazy@general.elte.hu

A XIX. század végén, a XX. század elején a tudomány valóságos csodákat tárt fel. Lassan ezek annyira természetessé váltak, hogy elkezdődött a különböző fantazmagóriák kergetése. Amiről itt beszélni akarok, az nem szélhámós fantáziálás, hanem a tudomány szigorú része, ami titokzatosságában és érdekességében mégis minden elképzelést felülmúl. Ez a hihetetlen és értehetetlen állítás röviden ennyi: *az atomi részecskék nem ismerik a saját helyüket.*

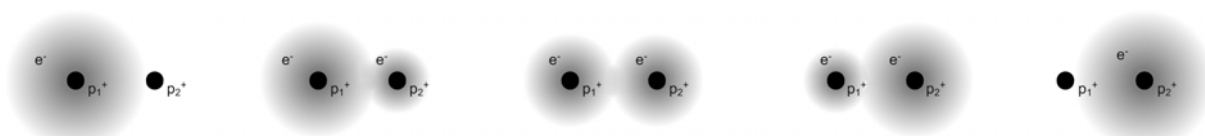
A XX. század elején a hidrogénatomot kis Naprendszernek tekintették (lásd 1.a. ábra.), s 1925 táján ennek a helyére lépett a kvantummechanikai kép. Eszerint az elektront a hidrogénatomban a mag körül szétkent felhőként képzelhetjük el. (1. b. ábra). Ezt a felhőt, vagy hullám formációt, a hidrogénatom alapállapotának nevezzük. Ennek **alakját** pontosan leírja a Schrödinger-egyenlet, ami ugyanolyan szigorúan egzakt, mint a klasszikus mechanika.



1. ábra. A hidrogénatom klasszikus (a) és kvantumos modellje (b). Az árnyékolt tartomány azt mutatja, hogy az elektront leíró hullámfüggvény hol különbözik számottevően zérustól.

Helyezzünk a hidrogénatom mellé, gondolatban, egy másik protont! Mi történik? Azt gondolhatnánk, hogy semmi, hiszen az elektronnak a másik proton körül sem lenne előnyösebb, tehát nem indokolja semmi, hogy otthagyja az eredeti protont. De nem ez történik! Az elektronfelhő - látszólag indokolatlanul - átfolyik a másik proton közelébe. Az elektron hullám átmeneti állapotait szemléltetik 2. ábra fázisrajzai. Az eredeti proton mellett időben egyre fogy, az új proton mellett egyre nő a hullám amplitúdója. Lesz olyan pillanat, amikor a két amplitúdó egyenlő. Azt gondolhatnánk, hogy itt már megáll a folyamat, pedig nem! Az elektronhullám egészen átfolyik az új proton köré úgy, hogy az eredeti proton mellett semmi nem marad belőle. Ha a protonok továbbra is a helyükön maradnak, az elektronhullám változása folytatódik. Az előbbi folyamat ellentétes irányúra fordul, azaz az elektronfelhő visszafolyik az első protonhoz, és így hintázik ide-oda a továbbiakban. Az az időtartam, mely alatt az elektron az egyik protontól teljesen átkerül a másikhoz, a protonok távolságától függ és a Schrödinger-egyenlettel kiszámítható.

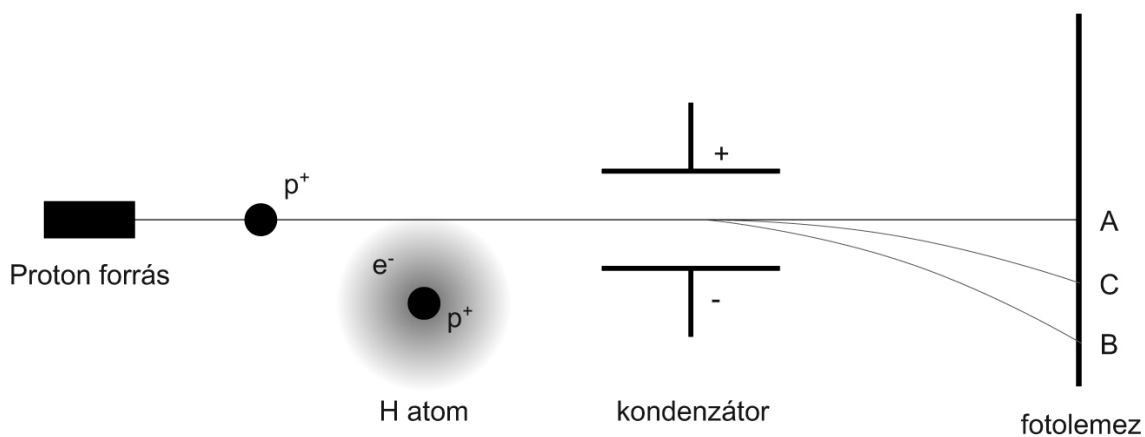
* Az előadást hangfelvételtől lejegyezte Vető Balázs



2. ábra. Az elektronfelhő vándorlása a hidrogénatom közelében lévő proton hatására. Balról jobbra haladva, az időpillanatok egymás után következnek. Az utolsó állapot után a folyamat visszafordul.

Az elmondottakat kísérletileg igazolni lehetne a következő módon. Csak annyi ideig tartsuk a második protont a hidrogénatom közelében, amíg az elektron teljesen átmegy hozzá, majd abban a pillanatban távolítsuk el onnan. Azt várjuk, hogy a második proton magával viszi az elektront. Ez így is van, ez a sikeres „elektroncsábítás” esete. Ha tovább várunk, addig hogy az elektron visszamenjen eredeti helyére, és akkor távolítjuk el a második protont, akkor az elektron természetesen az első protonnál marad – azaz a csábítás nem sikerül.

Az elektroncsábítást vizsgáló kísérlet végrehajtható a következőképpen: A második protont ellőjük a hidrogénatom mellett, majd a továbbhaladó részecskét kondenzátor elektromos térén vezetjük keresztül és a kondenzátor mögé foto-lemezt helyezünk (l. 3. ábra). Ha az ellőtt proton, mozgás közben annyit tartózkodott a hidrogén közelében, amennyi a teljes csábítás idejének megfelel, akkor a proton magával viszi az elektront és semleges hidrogénatomként halad tovább. A semleges atomot az elektromos tér nem téríti el, tehát az az ábrán jelölt **A** pontba csapódik be. Ha a proton olyan lassan halad a hidrogénatom mellett, hogy az elektron átmegy, de van ideje visszamenni, akkor a csábítás nem sikerült, és a továbbhaladó pozitív töltésű protont a kondenzátor tere eltéríti a **B** pontba.



3. ábra. Proton és semleges hidrogénatom mozgása elektromos térben. Az **A**, **B**, **C** betűk három elvileg lehetséges végállapotot mutatnak. A valóságban csak **A** és **B** fordulhat elő.

Felmerül a kérdés, mi történik akkor, ha úgy választjuk meg a tartózkodási időt, hogy az elektronfelhőnek a fele jut át a második protonhoz, a másik fele az első protonnál marad? Ez a kérdés már Schrödingernek is nagy gondot okozott. A két proton a két „félhullámmal” több méterre is eltávolodhat egymástól. Milyen eredmény várható, ha ebben az esetben térítem el a kondenzátor elektromos terével az elhaladó protont?

Ha az ember bízik a Schrödinger-egyenletben, akkor azt mondhatja, hogy az elektron felhő fele-fele arányban szétszakadt a két proton közt, vagyis feleakkora pozitív töltése lesz az elhaladó összetett részecskének, mint egy protonnak. Várható tehát, hogy a részecske a kondenzátorban eltérül, de kevésbé mint a proton, és így a rajzon jelölt **C** pontba csapódik be. A kísérletek ennek ellentmondanak. Becsapódást csak az **A** vagy a **B** pontban tapasztaltak, a **C** pontban soha sem. Ez azt jelenti, hogy a becsapódásnál az, ami becsapódik, vagy teljesen

eltérül, azaz proton, vagy láthatóan nem térül el, azaz semleges hidrogénatom. De az is igaz, hogy ilyenkor lehetetlen *előre* megmondani, hogy melyik (az **A** vagy a **B**) eset következik be, a kettészakadt hullámú állapotokkal végzett kísérlet ismétlése *véletlenszerűen* vezet hol az **A**, hol a **B** pontba való becsapódáshoz. Hiába következik a Schrödinger-egyenletből, hogy van olyan lehetőség, hogy az elektronhullám egyik fele az egyik, a másik a másik protonnál van, a kísérletben fél elektron soha nem jelentkezik. Ez csak úgy értelmezhető, hogy ebben az állapotban az elektron maga sem tudja, hogy hol van. Ha rákényszerítem arra, hogy valljon színt, hogy itt van, vagy nincs itt, akkor rákényszerül a választásra. Akkor eldönti - véletlenszerűen! -, hogy az egyik vagy a másik proton mellett bukkan fel, egészben.

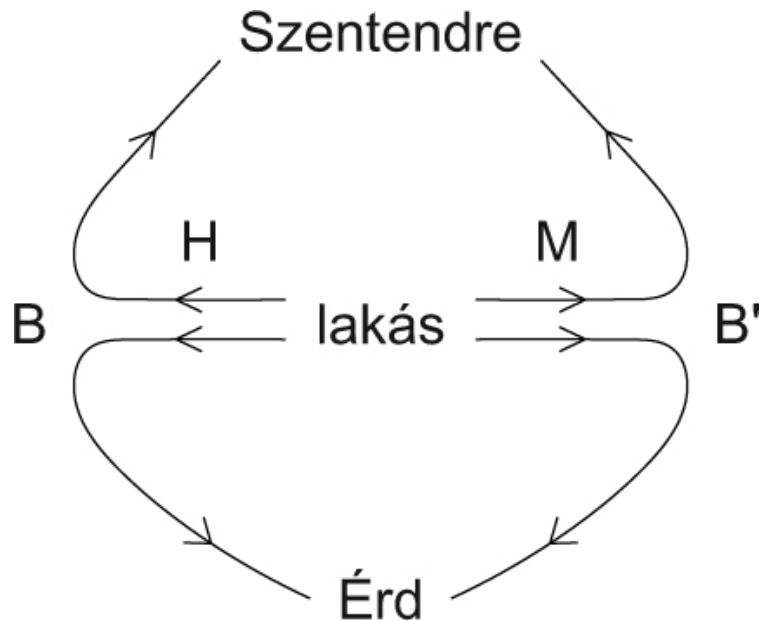
A fizikusok döntő többsége 70 esztendeje még azt hitte, hogy a kvantummechanikai leírás nem teljes, és ha teljessé válik, megoldást ad majd a fenti problémára is. Nos, nem ez a helyzet! Bármennyire hihetetlen is, az elektron állapota valóban bizonytalan lehet, amíg nem teszem útjába a detektort. Ebben a bizonytalan állapotban az elektron maga sem tudja, hogy ide vagy oda fog dönteni, ha a kísérlet kényszere döntésre kényszeríti [1]. Hogyan lehet ez? Nem tudjuk elképzelni, de a tény jobban elfogadhatóvá válik, ha a hétköznapi életből vett példával illusztráljuk.

Köznap életünkben, a lelkiállapotok tekintetében létezhet határozatlan állapot. Tegyük fel, hogy a faluban két lány van, Mari és Juli, és jön egy Harry nevű legény. Harry lehet szerelmes Mariba, és lehet szerelmes Juliba. Ez két világosan megkülönböztethető és észrevehető lelki állapot. De - és itt van analógia az elektronnal -, Harry lelkiállapota lehet bizonytalan is. És lehet, hogy Harry életében vannak nagynénik vagy nagybácsik, akik számára ez a határozatlanság elképzelhetetlen (éppúgy, mint ahogy az volt az elektront hetven évvel ezelőtt figyelő fizikusok számára.). Ők ezt nem értik és ezt mondják is Harrynek: „édes fiam, nem létezik, hogy nem tudsz dönteni, vagy egyiket sem szereted!”

Tegyük fel, hogy külső körülmények Harryt gyors és egyértelmű döntésre kényszerítik. Például jön egy levél Amerikából, hogy egy régen távolba szakadt rokona végrendeletében minden vagyonát, több millió dollárt Harryre hagyja, azzal a feltétellel, hogy két héten belül megnősül. Harry korrekt ember, nem manipulál a látszat házassággal, a kényszer hatására dönt. Lehet, hogy éjszakákon át gyötrődik, hogy kit válasszon, de végül dönt. És ez a döntés komoly és végleges. Eldönti, kihez köti az életét és kit felejt el örökre. Világos, hogy Harry ezzel a ez a döntéssel az állapotát igenis drasztikusan megváltoztatja.

A hasonlat jó, de mégis motoszkal bennünk a kétely, vajon nem lehet, hogy Harry lelke mélyén már korábban döntött, a külső kényszer csak a színvallást siettette. Erősítsük meg egy másik példával, hogy mit is jelent az, hogy határozatlan állapot!

Tegyük fel, hogy Mari és Harry összeházasodtak, házasságuk ideális - két testben egy lélek. Vasárnap reggel felébrednek és elhatározzák, hogy kitalálnak valamilyen programot. Több lehetőség is kínálkozik: lehet északra menni, mondjuk Szentendrére, mert ott van valami vigasság, de mehetnének Érdre is, mert ott egy érdekes kiállítást nyitnak meg. Mindkettőhöz kedvük lenne, a lényeg csak az, hogy együtt menjenek, mert olyan szerelmes állapotban vannak. Van két baráti házaspár (az egyik házaspárt jelöljük B családnak a másikat B' családnak), akiknek már megígérték egy közös programot, és tudják ők, is szívesen mennének mindkét esetleges helyszínre. Egyik házaspárnak sincs telefonja. (no ezt manapság már tényleg nehéz elképzelni, de tessék megpróbálni!), s a két házaspár épp ellenkező irányban lakik, de mindkét lehetséges úti céltól egyenlően messze (4. ábra).



4. ábra. Vázlat a vasárnapi kirándulás lehetséges kimeneteleiről.

Harry tehát elindul balra, a B házaspárhoz, Mari pedig jobbra, a B' párhoz. Elindulnak, de nem beszélnek meg semmit véglegesen, hiszen út közben ráérnek dönteni. Tudják, hogy két testben egy lélek és így egyformán fognak dönteni. Mire Harry B házaspárhoz ér, addigra már eldönti, hogy Szentendrére mennek. Mari is odaér B'-ékhez és természetesen ő is Szentendrére választja. De az is lehet, hogy Harry, mikor B-hez ér, úgy dönt, hogy Érdre mennek, akkor természetesen Mari is így fog dönteni. A döntésnek megfelelően indulnak el mindketten a baráti párral, hogy a célban találkozzanak. Ez a hasonlat még nehezebben hihető, mint az előző példa! Joggal gondolja az ember, hogy ha ez így történik, az azt jelenti, hogy már az indulás előtt valahogy döntöttek és azt, ha nem is beszéltek meg, de kiolvasták egymás szeméből.

Tegyük fel mégis, hogy nem így van, és létezik a „két testben egy lélek” állapot! Az állítást az alábbi kísérleti algoritmussal ellenőrizni lehet.

Harry és Mari színpadon, nyilvánosan vállalja, hogy bemutatja különleges képességét. A színpadot két részletre osztják, egyik részen van Harry, a másikon Mari. A házaspár nem látja egymást. Velük szemben ülnek a nézők, akik mindkettőjüket látják. Ekkor a játékvezető titokban kitalál és megszámoz három eldöntendő kérdést. Legyenek például a kérdések:

- I. *Hová menne inkább nyaralni?* - 1) Görögországba, 2) Spanyolországba.
- II. *Melyik festőt szereti jobban?* - 1) Gauguin, 2) van Gogh.
- III. *Mit kér a kolbászhoz inkább?* - 1) mustár, 2) tormar.

A három kérdést kiküldik titokban a színpad két elválasztott részére. Ott pedig kocka dobásával, vagy egyéb objektív módon a három kérdésből egyet véletlenszerűen kiválasztanak, és azt felteszik. Például, először Harrynak sorsolják ki az egyik kérdést és ő megadja az 1), vagy 2) választ. Utána Marinak sorsolnak kérdést és ő is válaszol. A házaspár azt vállalja, hogy ha ugyanazt a kérdést kapják, akkor ugyanazt a választ adják (mert ők két testben egy lélek). Vagyis, ha mindketten azt a kérdést kapnák, hogy „*Hová menne inkább nyaralni?*”, akkor ugyanazt a választ választják. Ha különböző kérdéseket kapnak, akkor nem érdekes a válasz, mert a lelki rokonság ott nem derül ki. Tegyük fel, hogy sikeresen járják a világot ezzel a műsorral. Ha ugyanazt a rész kérdést kapják, akkor ugyanazt a választ adják.

Természetesen sokan svindlit sejtenek a mutatvány mögött, és keresik, hogy mi a trükkjük lényege. Mi közelítsünk fordítva! Bízunk bennük, és tegyük fel hogy nem csalnak!

Be lehet-e ezt valahogy bizonyítani? Válaszunk, hogy esetleg *igen*. Ha ugyanis csalnak, az csak abból állhat, hogy mielőtt elindulnak a fellépésre, már van egy titkolt stratégiájuk. Ilyen stratégia lehet, hogy az adott válaszok sorrendjében előre megállapodnak, pl.: (1,1,2). Ez tehát azt jelenti, hogy ha az első kérdést kapom, akkor az 1) választ adom, ha a másodikat, akkor is, ha a harmadik kérdést kapom, akkor a 2) választ adom. Így, és csak is így lehet biztosítani, hogy azonos kérdésekre mindig azonos legyen mindkettejük válasza, hiszen a feltett kérdéseket a helyszínen kockadobással döntik el. Csak akkor egyezhet a két válasz, ha előre tudják, hogy melyik kérdésre melyik választ fogják adni. Mivel a fejükbe senki nem láthat bele, majdnem azt lehet mondani, hogy az ilyen csalást kizárni nem lehet.

Valakinek egyszer eszébe jut, hogy vizsgálják meg, milyen válaszokat adnak akkor, ha nem ugyanazt a kérdést kapják. Ez eddig egyáltalán nem volt fontos, mert mindig az azonos kérdésre adott válaszokra koncentrált mindenki. Tegyük fel, hogy azt tapasztaljuk, hogy különböző kérdésekre mindig *ellenkező* választ adnak a szereplők. Ez bizonyíték lenne arra, hogy nem csalnak, és mielőtt a kérdést megkapják valóban teljesen határozatlanok az adandó válaszban. Miért bizonyíték?

Tegyük fel, hogy használnak valamilyen stratégiát, pl. az (1,1,2) stratégiát! Ha mondjuk a sorsolással Harry az első kérdést kapta, Mari pedig a másodikat, akkor a fenti stratégia szerint mindketten az 1) választ adják, azaz egyező választ. A véletlen sorsolás folytán ilyen esetek okvetlenül elő fognak fordulni. Könnyű belátni, hogy ha akármilyen stratégiában egyeznek is meg, *mindig* lesz olyan kérdéspár, amire azonos választ fognak adni, noha a kérdések különböztek. Ha ez mégsem történik meg, és azonos kérdésekre mindig azonos, különböző kérdésekre mindig különböző választ adnak a szereplők, akkor nem beszélhetek össze.

A nehezen elképzelhető házaspár-példát most fordítsuk vissza a fizikára! Két kvantum-részecske szalad egy közös pontból indulva ellenkező irányban. Közben egyetlen közös állapotuk van. Ha a részecskéknek mérőműszerek segítségével itt és ott is kérdéseket teszünk fel, akkor az adott válaszok közötti korrelációkban ugyanazt a szabályszerűséget fedezzük fel, mint a házaspár esetén (a részecskék világában előfordulhat, hogy azonos kérdésre ellenkező, különböző kérdésekre azonos választ kapunk). Így bizonyítást nyer, hogy az állapot igenis határozatlannak vagy olyan válaszokat, melyek a klasszikus szemlélet szerint nem lehetnek határozatlanok. Ezt elképzelni nem lehet, de elhinni, ha mindezt komolyan vette az olvasó, lehet.

IRODALOMJEGYZÉK

1. E. J. Squires, *The Mystery of the Quantum World*, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1994 (2nd edition).