

TALÁN A CSILLAGOK

Károlyházy Frigyes

a fizikai tudomány doktora

Biológus vagyok, de érdekel mi történik más tudományokban, legalább elmesélhető szinten. Sok évig kínlódtam, hogy vázlatos képem legyen a kvantumelmélet lényegéről anélkül, hogy el kellene sajátítanom a teljes matematikai apparátust. Jó pár évvel ezelőtt, amikor a Bolyai Kollégium nevelőtanára voltam, a kollégium meghívására Károlyházy Frigyes tartott erről előadást, amit a nagyszámú hallgató pissenés nélkül hallgatott végig, és végre nekem is megadatott a megértés öröme. Ez az emlék ma is eleven, ez volt az oka annak az erőszakosságnak, amivel sikerült öt rávennem, hogy előadását írásban is megörökítse, és Wigner Jenőre emlékező összeállításunkhoz rendelkezésünkre bocsássa. Csányi Vilmos

Ha találomra kinyitjuk a tévét, könnyen lehet, hogy éppen tanúi leszünk, amint egy történet hőseinek az arca vonaglani kezd és kigyóyszerű kitéremkedések feszítik szét annak jeléül, hogy valamely idegen galaxisból érkező gonosz szándék a földi élet meghódításának ezt az útját választotta.

A 20. század végére közhely lett, hogy a tudomány „csodákat” tárt fel. Annyira, hogy a fantasztikumok kergetése gyakran egyenesen tudományellenességbe csap át; azt sugallja, hogy több titkos összefüggés, földöntúli jelenség van annál, amennyinek a létezését a hiú, vaskalapos stb. tudósok elismerni hajlandók.

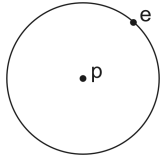
A fegyelmezett eszmefuttatásoknak ritkán van akkora hatásuk, mint a „gazdag” fantáziálásnak. (Holott az utóbbi olykor egyszerű negatívum, a már jól tudottak a

tagadása. A bűvész biztos lehet benne, hogy ha az üres cilinderből nyulat húz elő, sikere lesz, hiszen addig mindenki úgy tudta, hogy ez lehetetlenség. Ügyesség persze kell a dologhoz, de szárnyaló fantázia kevésbé.)

Ezért talán nem érdektelen rámutatni, hogy a 20. század fizikájának van egy olyan leleménye, amely a felfedezése (a 20-as évek második fele) óta eltelt évtizedek alatt semmit nem halványult, s amely eredetiségében, varázsában alighanem minden sci-fi ötletet felülmúl. Az ún. kvantummechanika egyik alapvető vonásáról van szó. A szó ne riasszon el senkit: a talányos jellegzetesség hétköznapi köntösben is megvilágítható. Ezzel próbálkozunk meg a következőkben.

Írásunkkal Wigner Jenő emléke előtt kívánunk tisztelni. A kvantummechanikából szünni nem akaróan sugárzó misztérium a 20. század középső évtizedeiben még a fizikusok túlnyomó többségét is arra a pragmatikus, olykor hipokrita vélekedésre készítette, hogy elsősorban az elmélet gyakorlati alkalmazhatóságát kell méltányolni, az ismeretelméleti, filozófiai háttér állandó feszegetése terméketlen dolog. Wigner Jenő egyike volt azon keveseknek, akik bátran vállalták a „szünni nem akaró ámulást”. (Nagyjából az 1970-es évektől kezdve, a kísérleti technika lehetőségeinek rendkívüli fejlődésével párhuzamosan, a kvantummechanikai paradoxonok közvetlen – nem pusztán spekulatív – vizsgálata egyre inkább a kísérleti fizikusok látókörébe került. Az újabb kísérletek csak erősítik a régebbiek varázsát.)

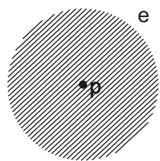
Házi használatra, első nekifutásra, a kvantummisztérium így fogalmazható meg: az



1. ábra

anyagot alkotó mikroszkopikus részecskék, mindenekelőtt az elektronok, pontszerűek, de „nem ismerik a saját helyüket”. Nemcsak a fizikusok, hanem ők maguk sem tudják, hogy pontosan hol vannak. (Kevésbé költőien, de cseppet sem világosabban fogalmazva: pontszerűek, de határozatlan a helykoordinátájuk.)

Példa: A kémiai periódusos rendszer legelső eleme a hidrogén. A kvantummechanika előtti években a hidrogénatomról szemléletes, a naprendszerre emlékeztető kép élt a fizikusok és kémikusok fejében (1. ábra). Középen helyezkedik el az atom magja, a proton, körülötte kering az – a körpálya méretéhez, más szóval az atom méretéhez képest parányi elektron. A kvantummechanika megszületése nyomán a pályán keringő elektront a protont körülvevő elektronfelhő vagy elektron-hullámfüggvény váltotta fel. Ezt érzékelteti a 2. ábra. Az árnyékolt rész ábrázolja az elektronfelhő – és ezzel együtt a H-atom – kiterjedését, azt a tartományt, amely-



2. ábra

ben az elektront leíró hullámfüggvény számottevően különbözik zérustól. A hullámfüggvény viselkedését a proton vonzaskörében ugyanolyan szigorú matematikai törvényszerűség (a Schrödingerről elnevezett egyenlet) írja le, mint a korábbi, naprendszer-szerű képből az elektron keringését.

Természetesen kezdettől fogva izgatta a szakmabelieket, hogy a hullámfüggvény pontosan „mije” az elektronnak. Schrödinger kezdetben úgy vélte, hogy – kissé pongyolán – a hullámfüggvény „maga az elektron”, más szóval, hogy az elektron nem pontszerű, hanem kiterjedt test (akkora, amekkorára a hullámfüggvény nem-zérus tartománya kiterjed). Ez az álláspont, mint nyomban látni fogjuk, hamarosan drámai módon megbukott. Mivel a kémiával kapcsolatban állók, az orvosok, a biológusok és mások szélesebb körének sem szüksége, sem lehetősége nincs a kvantummechanika alapjaival részletesen megismerkedni, azt a kérdést: „Mit csinál pontosan egy elektron a H-atomon belül?”, a mai napig gyakran jótékony kód veszi körül. Egrészt – az utolsó néhány év némelyik kísérletét nem számítva – nemigen tudunk egyetlen atom belsejében megbízhatóan turkálni, másrészt az atom mérete olyan kicsi, hogy mintegy „megbocsátjuk” az elektronnak, ha csupán egy ilyen parányi világban viselkedik netán egzotikusan, a makroszkopikus méretekben tiszteletben tartva a józan ész világát. Szerencsére nekünk sem lesz szükségünk rá, hogy az egyetlen proton által fogva tartott elektron atombeli viselkedését közelebbről firtassuk.

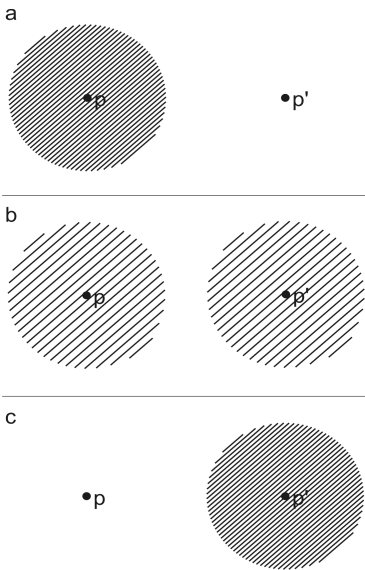
(Még egy, némileg idevágó megjegyzés. A figyelmes olvasónak feltűnhet, hogy a 2. ábrán a protont ugyanolyan kis pötty – és nem valamilyen felhő – ábrázolja, mint az előző ábrán az elektront. Pedig hát a proton is mikroszkopikus részecske, a kvantummechanikai leírásnak őrá is vonatkozni kellene. Ez valóban hanyagság, pontosabban komoly elhanyagolás, de ugyanolyan jóhi-

szemű – és pillanatnyilag hasznos –, mint amikor a hold- vagy napfogyatkozás szemléltetésénél ezeket az égitesteket gömb alakúnak tekintjük, megfedkezve pl. a föld-felszín barlangjairól.)

Az elektron azonban makroszkopikus méretekben sem tartja tiszteletben a józan ész-t.

Képzeljük el, hogy egy H-atom közelében elhelyezünk egy protont (3/a. ábra). Mi fog történni? Azt gondolhatnánk, hogy semmi, hiszen semmivel sem jobb az elektronnak a második proton körül elhelyezkedni, mint az első körül. Az elmélet (a Schrödinger-egyenlet) azonban mást mond.

A hullámfüggvény elkezd „átfolyni” az első proton körüli térségből a második proton körüli térségbe (kicsit úgy, ahogyan a víz kezd átköltözni egy edényből egy másikba, ha a kettőt alul gumicsővel összekötjük). Egy idő után – jelölje ezt az időt $t/4$ – a hullámfüggvény alakja a kétpúpú tevét idézi (3/b. ábra): a hullámfüggvény az első proton körül ugyanakkora, mint a második körül.



3. ábra

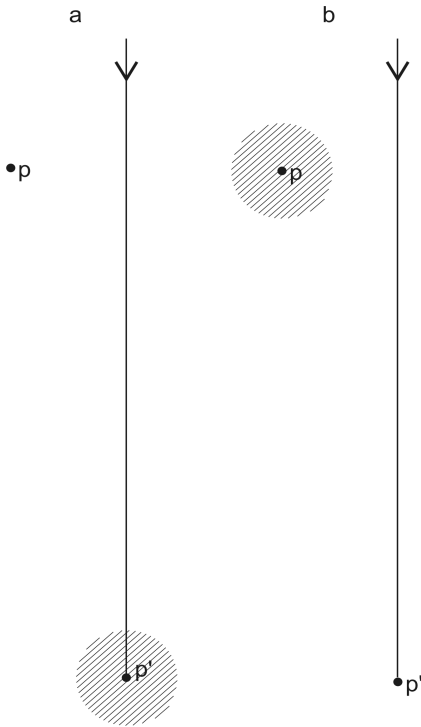
További $t/4$ idő múlva a hullámfüggvény már teljes mértékben átköltözött a második proton mellé (3/c. ábra). (A gumicsővel összekötött edényeknél ezt már nem tapasztalhatnánk.)

Ha a második protont továbbra is ott hagyjuk, ahová tettük, a folyamat megindul visszafelé, és (ugyancsak $t/2$ idő alatt) ellenkező irányban zajlik le. Ezután a „hintázás” folyamatosan ismétlődik. Az oda-vissza hintázás üteme a protonok közötti távolság növekedésével rohamosan lassul (a t periódusidő nő), az atomi méretekhez viszonyítva nagy távolság esetén gyakorlatilag leáll. Ha tehát a második protont hirtelen eltávolítjuk, amikor az elektron „éppen nála van”, akkor az elektront magával viszi – ez a sikeres csábítás esete. Ha a hirtelen eltávolításra akkor kerül sor, amikor éppen „egyedül” van, akkor a második proton üres kézzel távozik.

Hogyan lehetne a mondottakat kísérletileg ellenőrizni?

Ha megfelelő módon, alkalmas sebességgel ellőjük a második (p') protont az első (p) mellett, akkor az egymás szoros közelségében való tartózkodás „átlagos távolsága” és „átlagos ideje” pontosan a teljes elhagyásnak ($t/2$ -nek) felel meg. (Azt, hogy a p' milyen indítása alkalmas erre, a Schrödinger-egyenletből számíthatjuk ki.) Ebben az esetben az elektront a mozgó p' magával ragadja (4/a. ábra). A második proton mozgását beállíthatjuk úgy is, hogy az egymás közelében való tartózkodás a teljes visszatérésnek (t) feleljen meg. Ez esetben az elektron az eredeti helyén marad (4/b. ábra).

Hogyan bizonyosodhatunk meg arról, hogy csakugyan így zajlik le a folyamat? Például úgy, hogy p' -t útjának végén elektromos mezőn vezetjük keresztül (amely a rajta áthaladó elektromosan töltött részecskét eltéríti), majd valamilyen fényképlemezbe vagy szcintilláló ernyőbe engedjük csapódni (olyanféleképpen, amint az elektronokkal tesszük a tévé képcsövében).



4. ábra

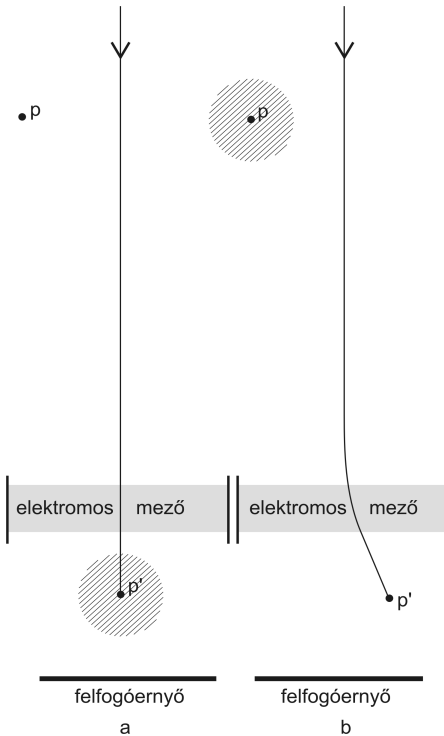
Ha p' nem térült el, akkor egy elektromosan semleges H-atom magja volt (5/a. ábra), ha eltérült, akkor „csupasz” proton (5/b. ábra). Az első beállítás ($t/2$) esetén p' soha nem térült el, a második beállítás (t) esetén mindig eltérült. A mérés eredménye tehát megegyezik azzal, amit a számítás alapján várunk.

De mi történik, ha a második protont úgy löjük el az első mellett – ezt is megtehetjük –, hogy az egymás közelében való tartózkodás az elektron félig való átjutásának ($t/4$ -nek vagy $3t/4$ -nek) feleljen meg? Az elmélet szerint az ide-oda hintázás folyamata a protonok eltávolodásával ebben az esetben is megáll, éspedig abban a stádiumban, amikor a hullámfüggvény „fele az egyik, fele a másik” protont veszi körül. Ezt a „kettévágott” és széthúzott hullámfüggvényt ábrázolja a 6. ábra.

Vajon ez mit jelent? Schrödinger eredeti elképzelése szerint két fél elektront mindkét proton körül. Ha csakugyan így lenne, azt könnyű lenne kísérletileg kimutatni. Arra számíthatnánk, hogy elektromos mezőn keresztül vezetve p' feltétlenül eltérül, akár csak a „teljesen sikertelen elcsábítás” esetén, de mindig csak feleannyira, hiszen a fél elektron félig leárnýékolja p' elektromos töltését.

A tapasztalat egészen mást mutat: p' vagy „egészen” eltérül (mint az 5/b. ábrán), vagy egyáltalán nem térül el (mint az 5/a. ábrán), azt azonban, hogy melyik eset fog bekövetkezni, előre nem tudjuk megmondani. Ha a kísérletet sokszor egymás után megismételjük, rendszertelenül hol az egyik, hol a másik lehetőség valósul meg. Más szóval: vagy ott találjuk az elektront (az egész elektront) az egyik proton mellett, vagy azt állapíthatjuk meg, hogy egyáltalán nincs ott (azaz a másik proton mellett van), de hogy melyik eredményt kapjuk, azt nem lehet megjósolni. (Azt a tényt, hogy nem létezik olyan kísérlet, amely egyidejűleg különböző helyeken mutatná ki az elektron különböző részeit, fejezzük ki röviden úgy, hogy az elektron pontoszerű.)

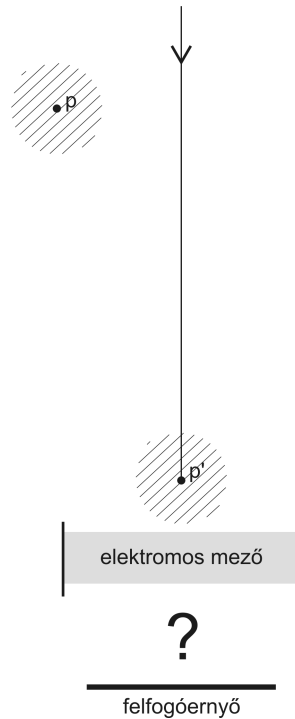
Az ehhez hasonló megfigyelésekből született meg a felismerés: bár az elektron állapotát a hullámfüggvény írja le, a hullámfüggvény nem az elektron teste. Hanem mi? Látásra egyszerűen megfogalmazva: az állapotfüggvény valószínűséget fejez ki. Az állapotfüggvény nagysága – pontosabban, bár ennek most nincs sok jelentősége számunkra, az abszolút értékének a négyzete – egy adott helyen annak a valószínűségével arányos, hogy azon a helyen találjuk meg az elektront, ha keressük. Mármost a 6. ábrán ábrázolt állapotban – még a detektoron való áthaladás előtt – ugyanúgy van valószínűsége annak, hogy a mérés folyományaként az elektront a p proton körül találjuk, mint annak, hogy a p' körül találjuk meg. Ez pedig nem jelent egyebet, mint azt, hogy a mérés



5. ábra

előtt mind a két kimenetel lehetséges, azaz a mérés előtt „maga az elektron sem tudja”, hogy melyik proton mellett fogja „elkötelezni” magát a mérőeszköz „Hol vagy?” kérdésének a hatására. Ez annál hátborzongatóbb, mivel az első és második proton távolsága a mérést megelőző pillanatban makroszkopikus nagyságú is lehet.

Vegyük észre: „A mérés hatására az elektron elkötelezi magát, hogy melyik helyen bukkanjon fel” – ez a megfogalmazás azt is jelenti, hogy a mérés ilyenkor drasztikusan megváltoztatja a mérés előtti állapotot. A mérés után már nem határozatlan, hogy melyik proton mellett van az elektron. (A mérésnek ezt a „döntésre kényszerítő” szerepét a kvantummechanika-tankönyvek rendszerint azzal hozzák összefüggésbe, hogy például egy feketedés megjelenése egy fényképlemezen mikroszkopikus szempontból



6. ábra

grandiózus, igen sok részecskére kiterjedő, visszacsinálhatatlan folyamat. Mi most beérhetjük a pusztá tapasztalati ténnyel: ez a mérés döntésre kényszeríti az addig határozatlan helyű elektront. Ha már a mérés előtt is egyértelmű volt, hogy melyik proton mellett van az elektron, azon a mérés nem változtat.)

Ezen a ponton óhatatlanul felmerül a kérdés: talán csak a fizikus nem tudja előre, hogy a 6. ábrán feltüntetett állapotban az elektron melyik protont fogja választani? Kézenfekvő gondolat, hogy az elektron esetleg mindig eldönti (belecsusszan az egyik verzióba), mihelyt a két proton távolodni kezd, hogy melyik mellett marad, de még nem látunk bele az ilyenkor működő finom mechanizmusokba, ezért tudunk csupán valószínűségi jóslatokat tenni.

E nézet szerint a hullámfüggvény gyakran inkább a fizikus hiányos ismeretét jellem-

zi, nem az elektron pontos állapotát egy-egy konkrét esetben. (Más szóval a kvantummechanikai leírás nem teljes.) Az elektronok egyszer az egyik, másszor a másik protonnal tartanak, egyetlen elektron sose kerül „tudathasadásos” állapotba, hiszen egy ilyen állapot elképzelhetetlen.

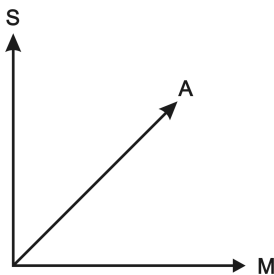
A kutatók másik táborá szerint a kvantummechanika rendkívüli – éppen az elmélet matematikai különlegességeivel összhangban álló – sikerei azt bizonyítják, hogy az állapotfüggvény és az elektron közötti szoros kapcsolatot komolyan kell venni, az elektronnak igenis létezik a 6. ábra által sugallt „skizofrén” állapota. Ha viszont ez igaz, akkor az is igaz, hogy az elektron lehetséges állapotainak halmaza visszavonhatatlanul, reménytelenül gazdagabb annál, ami a tér és anyag makroszkopikus viselkedése nyomán kialakult (velünk született) szemléletünkbe belefér.

Ez az előre kitalálhatatlan és a „józan ész” számára felfoghatatlan gazdagság a kvantummechanika csodája. Nagyot lendítene a hajlandóságunkon, hogy az újjal megbarátkozzunk, ha legalább valamilyen halvány analógiát sikerülne találni megszokott világunkban. Első pillanatra ez reménytelennek látszik. Bárkivel előfordulhat, hogy éppen nem tudja, szemüvegét az íróasztalán vagy a mosdóban keresse. De hogy egy adott pillanatban „maga a szemüveg ne tudja”, hogy hol van, azaz objektíven határozatlan legyen a helye, olyan nincs. Mégis találunk

ígéretes analógiát, ha nem is az élettelen tárgyak, hanem a lelki jelenségek területéről.

Képzeljünk el egy derék legényt, nevezük mondjuk Janinak, aki két lányhoz is – Marihoz és Sárihoz – vonzódik, de egyelőre nem tud választani közülük. (A többi lányt észre sem veszi, nem is léteznek a számára.)

Jani lelkiállapotát egy síkbeli vektorral ábrázolhatjuk, az alábbi módon (7. ábra). A vízszintes M vektor a Mari mellett való egyértelmű elkötelezettség lelkiállapotát szimbolizálja, a felfelé mutató S vektor a Sári mellett való kizárólagos elkötelezettséget. M vetülete S-re és S vetülete M-re egyaránt zérus: M „egy kicsit sem” mutat S irányába, és S sem M irányába. Az aktuális állapotot az A vektor mutatja: ennek van vetülete mind M, mind pedig S irányába. Az A vektor tükrözi Jani „határozatlanságát”. Könnyen lehet, hogy egy kissé túl konzervatív idős nagynéni vagy pap bácsi egyáltalán el sem ismeri egy A-hoz hasonló állapot létezését, mondván: „Édes fiam, ha nem tudod, melyiket akarod választani, akkor egyik iránt sem érzel semmi komolyat.” Ők csak két lehetséges állapotot tudnak elképzelni: S-et és M-et. Jani azonban a saját bőrén érzi (valószínűleg keservesen), hogy a lehetséges lelkiállapotok halmaza ennél igenis gazdagabb. Tulajdonképpen félrevezető az A állapotot határozatlannak nevezni, hiszen ez az őrlődő állapot éppen ilyen és nem másmilyen. Tényleges határozatlanság akkor lép fel, ha Janit valamilyen, a kvantumfizikai mérésnek megfelelő procedúrával döntésre kényszerítjük. Például egy távolba szakadt rokon váratlanul meghal, s hatalmas vagyonát Janira hagyja, azzal a feltétellel, hogy két héten belül megnősül. Jani – akiről feltesszük, hogy korrekt és nem bonyolódik család akciókba – néhány álmatlan éjszaka után vagy Mari, vagy Sári mellett dönt (lelkiállapota tehát megváltozik, innen kezdve vagy M, vagy S lesz), azt azonban, hogy mi lesz a döntése, senki nem tudja (Jani sem) előre megmondani. Hát ilyen az, amikor a



7. ábra

lehetséges állapotok halmaza gazdagabb, mint korábban hittük.

Ezzel a szép példával azonban ugyanaz a probléma, mint az előbb a kettéosztott hullámfüggvényű elektronnal. Háttha a Jani lelke mélyén korábban összegyűlt és elraktározott benyomások, élmények kezdettől fogva egyértelműen megszabják, hogy végül mi lesz a döntése, csak hogy ezzel eleinte Jani maga sincs tisztában? Ezt bizony nem lehet kizárni, ahogy a furcsa állapotfüggvényű elektronnal sem állíthattuk teljes bizonyossággal, hogy a viselkedését egy-egy konkrét esetben nem rejtett paraméterek irányítják.

A továbbjutás, talán meglepő módon, nem akkor következett be, amikor az elektronnal viselkedését a korábbinál még pontosabban sikerült megfigyelni, hanem akkor, amikor a fizikusok egy összetettebb és elvontabb feladattal, egyetlen elektron helyett a két kvantummechanikai részecskéből álló rendszer viselkedésével kezdtek foglalkozni. (Korábbi példánkban a protonokat klasszikus részecskékként kezeltük.) Erre térünk most rá.

A cél, ne fedjük, annak bizonyítása, hogy igenis léteznek olyan állapotok, amelyekben a rendszer maga (nem az őt vizsgáló fizikus) „nem tud” valamit, amit az ép elménk ítélete alapján mindenképpen tudnia kellene.

Ezúttal azonban rögtön a „pszichológiai analógiával” kezdjük.

Tegyük fel, hogy Jani és Mari összeházasodott és ideális pár lett, valósággal két testben egy lélek. Játsszunk el a gondolattal, milyen lehet ez a közös lélek.

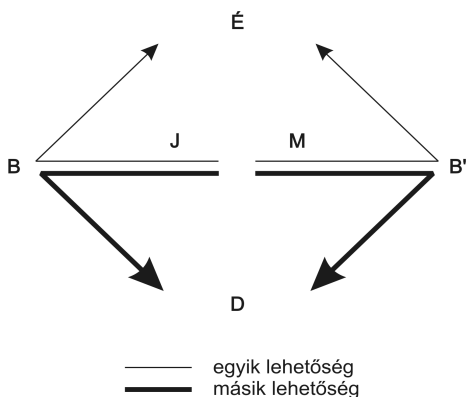
Egy szép vasárnapon reggel felébrednek pesti lakásukban. Két, egyaránt vonzó programlehetőség áll előttük. Elmehetnek északra, mondjuk Szentendrére, ahol hamarosan valami „nyári vigasság” kezdődik, vagy elmehetnek délre, mondjuk Nagytéténybe, egy helyi múzeum megnyitására. A lelkiállapotuk egyelőre határozatlan – még nem dön-

töttek, mindkettő kedvet érez mindkét programhoz –, de közös: csak együtt van kedvük elmenni bárhová. Amikor végre döntenek, mindketten ugyanazt fogják választani. Elképzelhető ez? Hát hogyan.

Élezzük egy kicsit a helyzetet. Mondjuk Janinak és Marinak mindjárt az ébredés után eszébe jut: jó lenne a B, illetve B' baráti házaspárokat is elhívni. A B házaspár a város nyugati szélén lakik, a B' pár a keleti szélén. Történetesen az egész társaságban senkinek nincs telefonja. (A mai olvasó számára talán ezt a legnehezebb elfogadni.) Az idő sürget (hosszú az út), ezért anélkül, hogy a programról döntöttek volna, szétválnak és elindulnak, Jani a B házaspárhoz, Mari a B' párhoz, azzal a szándékkal, hogy onnan közvetlenül mennek tovább észak, ill. dél felé. Mivel nem illik azzal beállítani valahova, hogy „nem tudom, mit akarok”, legkésőbb akkor, amikor becsöngetnek, Jani és Mari eldöntik, hogy mi legyen a pozíciójuk. Éspedig, „két testben egy lélek” alapon, egyformán! (Korábbi tapasztalataik alapján bíznak egymásban, azért válnak el nyugodtan.) A szituációt a 8. ábra érzékelteti.

Hát ezt vajon el lehet-e képzelni?

Józan ésszel aligha. Óhatatlanul arra kell gondolnunk, hogy Jani és Mari, ha másképp nem, legalább tudat alatt, már az elválás előtt



8. ábra

eldöntötték (egymás megnyilatkozásait figyelve), hogy mi legyen a javaslatuk, amikor a B, ill. B' párhoz érkeznek. Hogyan tudnának különben a távolból, egymást nem látva, közös elhatározásra jutni?

De hátha mégis az az igazság, hogy nem döntöttek előre, valóban csak a B, ill. B' pár lakásához közel határozzák el magukat, s közben távolról is megérik, hogy összhangban vannak-e egymással. Szöges ellentétben az egyszerűbb lelki problémával, amikor egyetlen személynek kellett – Sári és Mari között – választania, ez a kérdés kísérletileg vizsgálható.

Változtassunk egy kicsit a történeten! Gondoljuk el, hogy Jani és Mari esténként közönség előtt lépnek fel, hogy így gyümölcsöztesék távolba érző képességüket. A színpad két, egymástól szigorúan elkülönített részre oszlik, az egyik Jani, a másik Mari számára. Egy fellépés az alábbi módon zajlik le:

Valamilyen mókamester titokban kifundál és megszámoz három különböző kérdést, amelyek bármelyikére a válasz egy egyszerű választást igényel egy első és egy második lehetőség között. Például:

- I. kérdés. Hol nyaralna inkább?
 - 1.) Siófokon
 - 2.) Tihanyban
- II. kérdés. Kit kedvel jobban?
 - 1.) van Gogh-ot
 - 2.) Gauguint
- III. kérdés. Mit kér a virslihez?
 - 1.) tormát
 - 2.) mustárt

A lehetséges válaszok szerkezete ebben az esetben tömören:

Siófok	van Gogh	torma
Tihany	Gauguin	mustár

A három kérdést diszkrétan eljuttatják ide is, oda is, a két elkülönített színpadrészre. Ezután a rendezők a két helyen egymástól függetlenül, véletlenszerűen (pl. kockadobással)

kiválasztanak egyet a három megszámozott kérdés közül, és odaadják Janinak, ill. Marinak. Ők pedig válaszolnak, tehát választanak a felkínált lehetőségek közül. Amit Jani és Mari előre, nyíltan vállalnak, az a következő: Ha történetesen ugyanazt a kérdést kapják, akkor a válaszuk (a választásuk) is ugyanaz lesz, mert hiszen ők egy lélek két testben.

Képzeljük el, hogy ez a műsor már huza-mosabb ideje teljes sikerrel működik. Mi lesz a véleményünk a dologról?

Természetesen mindenki valamilyen trükkre, gorombán szólva csalásra gondolna (e sorok szerzője is). A csalás legprimitívebben a külső körülmények meg nem engedett felhasználásával történhet: pl. Jani vaktában választ, és döntéséről cinkostárs segítségével vagy egyéb, kellőképpen rafinált módon értesíti Marit. A továbbiakban zárjuk ki, mint számunkra érdektelent, az ilyenfajta külső segítség lehetőségét.

Jani és Mari akkor is százféle módon csalhat, ha csupán egymásra vannak utalva. Mindössze azt kell elérjék, hogy minden alkalommal egy-egy meghatározott, és pedig kettejük számára egyforma „stratégiával” vonuljanak fel a saját színpadrészükre.

Adott stratégia pl. az (1,1,2) stratégia, amin a következő értendő. „Ha az I. kérdést kapom, akkor – a kérdés tartalmától függetlenül – az elsőként megadott lehetőséget választom (példánkban: Siófok); ha a II. kérdést kapom, akkor is az elsőként megadottat (van Gogh); ha a III.-at, akkor a második lehetőséget (mustár).”

Könnyű felsorolni az összes lehetséges stratégiát: (1,1,1); (1,1,2); (1,2,1); (2,1,1); (1,2,2); (2,1,2); (2,2,1); (2,2,2).

Egy-egy ilyen előre eldöntött közös stratégia nemcsak elégséges, hanem szükséges is a sikerhez, ha egyszer a színpadra jutva Jani és Mari már csakugyan nem kommunikálhatnak egymással, továbbá azt is valóban a véletlen dönti el már a színpadra jutás után, hogy melyikük hányadik kérdést kapja. Csak

így érhetik el, hogy ha ugyanazt a kérdést kapják, egyforma választ adjanak.

Ravaszkodni abban lehet, hogy miféle megállapodással szabályozzák az egymás utáni fellépéseknél követendő (közös) stratégiát. (Ha pl. örökké az (1,1,1) stratégiát alkalmaznák, az nagyon hamar kiderülne.) Elképzelhető például, hogy 1-től 8-ig megszámozzák a különböző stratégiákat, utána jó előre egyszerűen megtanulnak egy lehetőleg hosszú, az 1-től 8-ig terjedő számjegyekből vaktában összeállított számsort, és minden fellépésnél eggyel tovább haladva, ebből választják ki a követendő stratégiát.

A logikai rejtvényeket kedvelőknek most bizonyára meglódul a fantáziájuk: hogyan tud Jani és Mari „gyanúra minél kevésbé okot adó” megállapodást találni, illetve hogyan lehetne őket mégis leleplezni.

Szegüljünk ellene az ingernek. Mint az előbbiekben már utaltunk rá, most az ellenkező beállítottságra lesz szükségünk.

Tegyük fel, hogy nem csálnak, hanem igazat mondanak: sohasem beszélnek össze, semmit sem határoznak el előre, csak azután döntenek, hogy a kérdést megkapják, de valamilyen telepatikus összetartozás-tudat megakadályozza őket abban, hogy egymástól eltérően válasszanak, ha ugyanazt a kérdést kapják. (Nem állítjuk, hogy ezt könnyű elképzelni, a jelen írás szerzőjének sem igazán sikerül, a további mondanivalónk megvilágítása érdekében azonban tudatosítsuk magunkban, hogy most mégis ezzel a feltevessel élünk.)

A kérdés: be lehetne-e bizonyítani, hogy nem csálnak? Válasz: ez esetleg lehetséges.

Mondjuk, a korábbi fellépésekről feljegyzés készült, így módunkban áll megvizsgálni Jani és Mari választásait azokban az esetekben is, amelyekben az adott fellépés során különböző kérdéseket kaptak, s amelyekkel ezért eddig nem törődünk. Képzeld el, hogy a vizsgálat a következő meglepő eredményt szolgáltatja: Valahányszor Jani és Mari különböző kérdéseket kapott, mindig ellen-

kező „fekvésű” választ adtak. Ha pl. a fentebbi konkrét példában Jani az I. kérdést kapta és „Siófok”-ot választott, továbbá Mari a II. kérdést kapta, akkor az ő válasza „Gauguin” volt. (Röviden: ha Jani válasza 1 volt, akkor Marié 2 volt és megfordítva, ha Janié 2, akkor Marié 1.) Akár faggathatnánk is őket, hogy ennek a furcsaságnak mi a magyarázata. Esetleg maguk sem értenék, talán arra gondolnának, hogy ösztönösen megérik, amikor nem terheli őket az ugyanolyan választás „erkölcsi kényszere”, és ez a megkönnyebbülés-érzés készíti őket arra, hogy mintegy „kirúgjanak a hámból,” ha különböző kérdést kapnak.

Ami fontos, az a következő: Ez a különös korreláció az eltérő kérdésekre adott válaszok között kizárja azt, hogy Jani és Mari minden fellépésnél előre rögzített – (1,1,2) vagy egyéb – stratégiával lépnek a színpadra, más szóval igazolja azt, hogy nem csálnak, csak ugyan van telepatikus képességük.

Bizonyítás: Tegyük fel az ellenkezőt, stratégiák titkos alkalmazását.

Nézzük meg, mire számíthatunk, ha a fellépéseknek valamilyen hányadában mondjuk (1,1,2) a stratégia. Mivel azt, hogy ki hányadik kérdést kapja, a vak véletlen dönti el, az idők folyamán nagyjából egyforma gyakorisággal fordul elő az, hogy

- a) egyikük az I., másikuk a II. kérdést kapja;
- b) egyikük az I., másikuk a III. kérdést kapja;
- c) egyikük a II., másikuk a III. kérdést kapja.

Mármint a fellépéseknek abban a hányadában, amelyben (1,1,2) a stratégia, az a lehetőség azt jelenti, hogy Jani és Mari nem ellenkező, hanem egyező „fekvésű” – Jani: 1, Mari: 1 – választ adnak! (A b) és c) esetekben Jani:1, Mari: 2, vagy pedig Jani:2, Mari:1 a válaszok jellege.) Eszerint az (1,1,2) stratégia által uralt fellépések során a különböző kérdések eseteinek harmadában nem ellentétes,

hanem egyező fekvésű válaszokat kapunk.

Pillanatok alatt belátható, hogy a többi stratégiával sem jobb a helyzet. Pl. az (1,2,1) vagy a (2,1,2) stratégiák esetén az I. és III. kérdéspáros vezet egyező fekvésű válaszokhoz stb. Sőt az (1,1,1), ill. (2,2,2) stratégiák esetén a helyzet még rosszabb, a különböző kérdésekre Jani és Mari mindig ugyanolyan fekvésű, 1,1 vagy 2,2 típusú választ ad.

Azaz: bárhogyan váltogatjuk is az előre megbeszélte stratégiákat, nem érhetjük el, hogy a különböző kérdések esetében mindig ellenkező fekvésű választ kapjunk: a különböző kérdések eseteinek legalább egy-harmadában egyező fekvést kapunk. Ha tehát a tapasztalat azt a furcsa korrelációt mutatja, hogy a különböző kérdések esetén mindig különböző fekvésű válaszokat kapunk, akkor bizonyos, hogy Jani és Mari nem előre rögzített stratégiákra támaszkodik. (Sőt, ez a következtetés már akkor is jogos, ha ugyan nem mindig, de 2/3-nál nagyobb arányban kapunk ellentétes fekvésű válaszokat.) *Quod erat demonstrandum*. A „józan ész” itt bizonyítottan padlóra kerül. Ne feledjük: azért tűnik feltétlenül szükségesnek előre megállapodni valamilyen (közös) stratégiában, hogy amikor ugyanazt a kérdést kapják, ugyanazt lehessen a válaszuk.

Ha viszont a fellépések során nincs „umbulda”, előre kigondolt válasz, az más szóval azt jelenti – és a fizika szempontjából ennek van jelentősége –, hogy a kérdésfeltevés pillanata előtt nincs eldöntve, hogy melyik kérdésre mit (1-et vagy 2-t) válaszolnak majd. Előre ők maguk sem tudják, az adandó válaszok szempontjából a lelkiállapotuk bizonyítottan határozatlan. Olyan, amilyenek a 7. ábrán az A lelkiállapotot feltételezhattük. Ott azonban nem zárhattuk ki annak a lehetőségét, hogy mielőtt Jani elkezd töprengeni, melyik kislányt válassza, a lelke mélyén már ott rejtőzik a döntés.

Az olvasó bizonyára egyetért velünk abban, hogy érdekes lenne egy ilyen „távolba

érző” házaspárra bukkanni. A Jánosok és Máriák világában ez eddig nem sikerült. A mikroszkopikus részecskék világában azonban – találtak ilyen „házaspárt”. Nem is egyet; mi egy olyan párost fogunk ismertetni, amilyenre Wigner Jenő is hivatkozott, amikor 1976-ban Budapesten előadást tartott a kvantummechanika ismeretelméleti problémáiról.

A két főszereplő két elemi részecske, amelyeket egy közös pontból elindítunk úgy, hogy egymással ellentétes irányban haladva eltávolodjanak egymástól. Mikor már jó messze (több méterre) vannak, mindkettőnek az útjába állítunk egy-egy mérőeszközt, s a segítségükkel egy-egy „kérdést teszünk fel” egyiknek is, másiknak is. Az eljárást – a „fellépést” – sokszor ismétljük (ahogy Jani és Mari is sok estét át szerepelt), s a kapott válaszokat összehasonlítjuk.

A „kérdések”, ill. a válaszok (mérési eredmények) szerkezete (egy lényegtelen „csavarintástól” eltekintve) megegyezik mindazzal, amivel Jani és Mari példájában találkozunk. Szerencsére a felmerülő fizikai fogalmakat, mennyiségeket elegendő egészen felületesen, az alábbi összefoglalás erejéig ismerni.

Ezeknek a részecskéknél van egy tengely körüli forgásra emlékeztető tulajdonságuk, amelyet egy forgási impulzusszerű, iránytal és nagysággal bíró mennyiség, a spin jellemez. (A földgolyónak is van forgási impulzusa, ez a Sarkcsillag felé mutat. Ha a Föld ellentétes irányban forogna, a Dél Keresztje felé mutatna.) A spinnel összefüggésben ezeknek a részecskéknél egy bizonyos mágnes-tű-jellegük is van – ahogy a Földnek is van északi és déli mágneses pólusa. Emiatt az ilyen részecskéket, ha mozognak, mágneses mező segítségével el lehet téríteni.

Ezek után, „kérdés és válasz” esetünkben egyszerűen azt jelenti, hogy megmérjük a közös kiindulópólusról érkező részecskék spinkomponensét egy megadott irányban.

Adott irányban úgy mérünk, hogy az eszköz belsejében a kívánt irányba mutató,

alkalmas mágneses mezőt létesítünk, és a részecskét átengedjük ezen a mezőn. (Az egyszerűség kedvéért a továbbiak során feltesszük, hogy a mérési irány mindig a haladási irányra merőleges síkba esik.)

A válasz abban áll, hogy az eszközön áthaladó részecske eltérül egy kissé, így árulja el a spinkomponensét. Számunkra elég annyi, hogy a tapasztalat szerint a mozgás iránya vagy éppen abban az irányban hajlik el egy kissé, amelyik irányban mérjük a spint, vagy pedig pontosan az ellenkező irányban. Röviden kifejezve, a részecske válasza vagy 1, vagy 2. Más eset nem fordul elő. Ha 1 a válasz, akkor pozitívnak mondjuk a mért spinkomponenst, ha 2, akkor negatívnak.

A drámai folytatás kulcsa a következő alapvető tény. Megfelelő kísérleti eljárással könnyű a két részecskét úgy elindítani egymás mellől, hogy eredő (együttes) spinjük (az összesített forgási impulzusuk) zérus legyen. (Mostantól fogva fel is tesszük, hogy a két részecske mindig így, zérus eredő spinel indul útnak. Ez a spinállapot a későbbiekben – amikor a két részecske már eltávolodott egymástól – sem változik meg magától.) Miről ismerhető fel a zérus eredő spin? Hát például arról, hogy ha egy „fellépés” alkalmával mindkét részecskének megmérjük a spinkomponensét egy tetszőleges, de a két részecskére nézve megegyező irányban, akkor a két eredmény előjele mindig ellenkező lesz: ha az egyik pozitív, akkor a másik negatív, és megfordítva – így tudja a két spin egymást „lerontani”. Röviden kifejezve: a két részecske, ha „ugyanazt a kérdést kapja”, mindig egymással ellenkező, 1 és 2 vagy 2 és 1 választ ad. (Ebben rejlik az egyetlen – a mi szempontunkból csupán nyelvtörőnek számító – különbség Jani és Mari fellépéseivel szemben: ők ugyanarra a kérdésre mindig ugyanúgy válaszoltak.)

A dolog akkor válik izgalmassá, ha felismerjük: nem vagyunk képesek előre megjósolni, hogy egy konkrét „fellépés” – a két

részecske szétszalajtása – esetén melyik lehetőség következik be, 1 vagy 2 lesz a válasza az első (mondjuk, a „balra szaladó”) részecskének (és ennek megfelelően 2 vagy 1 a „jobbra szaladó” másodiknak). Ha a kísérletet sokszor egymás után megismételjük, teljesen rendszertelenül kapjuk hol az egyik, hol a másik eredményt. A kvantumelmélet szerint ez így van rendjén: a mérés előtt elvileg határozatlan, a két részecskéből álló rendszer maga sem tudja előre, hogy a kérdéshez (mérőberendezéshez) érve melyik lehetőséget fogja választani. (Itt egyébként arra látunk példát, amikor a részecskék nemcsak a saját helyüket, hanem egyéb adataikat sem ismerik pontosan.)

A hitetlenek szerint ilyen nincs, a mi gyarló tekintetünk elől – talán örökre – megbúvó, apró részletek szabják meg, hogy az egyes konkrét esetekben mi fog történni, rejtett paraméterek, amelyeket talán csak a csillagok látnak.

Próbátétel. Mindkét oldalon – mind a két részecske számára – három kérdésre kell felkészülni. Tetszésünk szerint kijelölünk (a részecskék haladási irányára merőleges síkban) három irányt. Az „I. kérdés” az I. irányban, a „II. kérdés” a II. irányban, a „III. kérdés” a III. irányban fogja mérni a spint. Minden egyes „fellépés” során az utolsó pillanatban – mikor a két részecske már eltávolodott egymástól, és nem tud kölcsönhatni – találomra kiválasztunk egyet, a két oldalon egymástól függetlenül, a három kérdés közül és azt feltesszük az első, ill. második részecskének. Mivel az indulás pillanatában, amikor még képesek kölcsönhatni („kommunikálni”) a szereplők, nem lehet tudni, hogy milyen kérdéseket kapnak majd, a rejtett paramétereknek egy olyan programot (stratégiát) kell rögzíteni bennük, amelyik biztosítja, hogy amennyiben ugyanazt a kérdést kapják, bármelyik legyen is az, ellenkező választ fognak adni

Ilyen stratégia pl. az (1,1,2 | 2,2,1) stratégia. Az első számhármás az első, a második

számhármast a második szereplőre vonatkozóan írja elő, mit kell válaszolni az I., II., vagy III. kérdésre.

Az olvasó kitalálja a többit. Meg kell vizsgálni a feleletek egymáshoz való viszonyát azokban az esetekben is, amikor a két részecske különböző kérdéseket kapott – két különböző irányban az egyiknek, ill. másinak a spinkomponensét.

Ha az derül ki, hogy a két részecske ilyenkor mindig (vagy az esetek több mint kétharmadában) egyező (1,1 vagy 2,2) választ ad, akkor nem lehet szó előre megszabott stratégiákról. (Ha vannak ilyenek, akkor az esetek legalább harmadában különböző kérdésekre különböző válaszokat kell kapnunk.)

Mi a tényleges helyzet? Kizárja-e az itt vázolt mérésorozat a titkos determinizmus lehetőségét? Nos, a kísérletet a fenti, könnyen tárgyalható, de nehezen megvalósítható formában szigorúan véve nem végezték el. De sietünk megjegyezni: más, lényegében ekvivalens, de nehezebben elmondható formában elvégezték, és az eredmények a rejtett paraméterek léte ellen szóltak.

Továbbá: a kvantummechanika rendkívüli sikereire való tekintettel a rejtettparaméter-hívők sem szokták azt állítani, hogy a kvantummechanika „rossz”, csupán azt, hogy nem teljes, a rejtett paraméterek esetleg ugyanazt és még többet képesek szolgáltatni. Ebből a szempontból a fenti kísérletet akkor is figyelemreméltó, ha a kísérletet egyelőre nem végzik el. A kvantummechanika alapján ugyanis ki lehet számítani, hogy a különböző lehetőségek milyen valószínűek, tehát milyen gyakorisággal fordulnak majd elő. A számítás eredménye esetünkben az, hogy amennyiben a három spinmérésre szolgáló irányt alkalmasan választjuk, akkor igenis túltengenek majd a különböző kérdésekre adott ugyanolyan válaszok. Annyi tehát már a gondolat-kísérletből is bizonyos, hogy vannak olyan esetek, amikor a kvantummechanika és a

titkos determinizmus gondolata nem fér össze.

A részecskepár és a Jani-Mari páros analógiáját még nem aknáztuk ki teljesen!

Mint láttuk, a közös pontból szétszaladó két részecske úgy száguld a mérőeszközök felé, hogy „egyikük sem tudja, mit akar”. Állítsunk egy-egy mérőeszközt mind a kettő útjába, úgy, hogy mind a két eszköz az I. irányban mérje a spint, de helyezzük mondjuk a másodikat valamivel messzebbre, mint az elsőt. Az első részecske eléri a „kérdést” és dönt – a másik részecske nevében is! Mondjuk, az első részecske 1-et választ. Innen kezdve biztos, hogy a második részecske 2-t fog választani, a második részecske állapota tehát megváltozott, pedig az első részecske egy ujjal sem ért hozzá! (Nem is érhetett, hiszen messze van tőle.) Ezt a józan ész számára lenyelhetetlen paradoxont az az elvont felismerés oldja fel, hogy a kvantummechanikában az „állapot” fogalmát általában nem lehet külön alkalmazni a rendszert alkotó egyes részekre, csak a rendszer egészére. (A köznapi szemléleten ez éppen úgy túlmegy, mint ahogy a Jani és Mari „közös lelke” is túlmenne, ha lenne ilyen emberpár.) A kvantumfizikában megérdemli a nevét!

A napjainkban végzett kísérletek egyre összetettebb rendszerekről mutatják ki, hogy – összhangban a kvantummechanika formalizmusával – „bizonytalanok olyan saját adataikra vonatkozóan, amelyeket a józan ész alapján pontosan kellene ismerniük. Mégis, a polémia nem szűnik meg arról, hogy „mennyire makroszkopikus rendszereknek van még joguk határozatlankodni”, ahogy a kísértethajók is újra meg újra megvívják éjjelente utolsó csatájukat a fellázadt kalózzal. Hiszen amikor azt mondjuk, hogy egy kvantummechanikai rendszer a mérőműszerrel való találkozás hatására döntést hoz valamiről, amiben addig bizonytalan volt, a kutatók nagy része felteszi, hogy a műszer már „elég nagy

fiú” (elégé makroszkopikus) ahhoz, hogy határozott véleménye legyen pl. arról, hogy hol – melyik skálárészen – áll a mutatója. Sokan azonban ezt is vitatják. Végző soron azt kell majd tisztázni, hogy a teljes univerzum ismerheti-e a saját állapotát. Senki nem kételkedik

benne, hogy ez sürgős feladat, de szerencsére még nem futottunk ki az időből.

Kulcsszavak: *Non-classical quantum states, quantum uncertainty, quantum mystery*

IRODALOM: Wigner, J. (1977). A kvantummechanika ismeretelméleti problémái. Fizikai Szemle **27**, 81-87

