KVANTUMMECHANIKA: A LÁTHATATLAN FORRADALOM – 2. RÉSZ

Polónyi János
Strasbourg Egyetem, Strasbourg Franciaország

Az első részben arról volt szó, hogy a fizikai jelenségek és törvényszerűségek függenek a megfigyelések térbeli felbontásától. Ennek megfelelően a fizikában eddig felismert elméletek egy láncot alkotnak a proton méretének töredéke és az Univerzum belátható sugara között. Ezt a skálatartományt vágja két, egymástól radikálisan különböző részre a kvantum- és a klasszikus szintet elválasztó határvonal. A mikroszkopikus szint két zavarba ejtően új vonása az, hogy az egyértelmű valóság helyett determinisztikus láncba nem rendezhető virtuális lehetőségek sokaságát találjuk és a létezés egysége jobban felismerhető. A virtuális valóságok leírásához illeszkedő matematikai formalizmus problémájával kezdődik az alábbi, második rész.

Virtuális valóság

Indeterminisztikus matematika

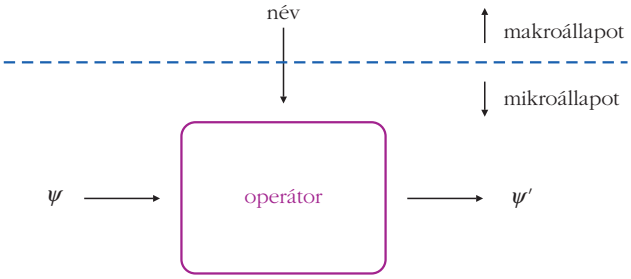
A fizika a megfigyelt tulajdonságok közti összefüggésekkel foglalkozik. De ha egy mikroszinten lévő rendszer tulajdonságai nincsenek egyértelműen, determinisztikus módon definiálva, akkor hogyan tudunk kvantitatív összefüggéseket találni közöttük? A matematikai egyenletek determinisztikus láncot alkotnak, amelynek struktúráját a Boole-algebra matematikai logikája jellemzi. Hogyan lehet egy ilyen láncra felfűzni a virtuális jelenségeket? Jelenlegi elképzeléseink alapján ezen első pillanatra megoldhatatlannak tűnő probléma megoldása a számfogalom radikális kiterjesztésén alapul.

A számokat még az írott történelem időszaka előtt vezették be. A pozitív egész számok 60-as számrendszerbeli ábrázolása Mezopotámiában i. e. 3400 körüli időre vezethetők vissza. Azóta a szám fogalma fokozatosan bővül. A nullát valószínűleg India matematikusai vezették be, az első írott nyom a 628 évből származik. A legkorábbi negatív számokat Kínában találták, i. e. 100 idejéből. A racionális számok fogalma az egyiptomi és az indiai kultúra együttes termékei, és *Eukleidésznél* érték el mai formájukat. Az irracionális számok i. e. 800 körül jelentek meg Indiában, majd *Püthagorasz* ismerte fel igazi jelentőségüket. A komplex számok a 16–18. században jelentek meg Európában. A számfogalom utolsó általánosítása az általánosított számok, az úgynevezett ferde testek, amelyek lineáris egyenletek megoldásával kaphatók meg. Négy általánosított számról tud a matematika, mindegyik szerepet játszik a részecskefizika standard modelljének felépítésében.

A matematikai nyelv érthetetlen sikere abban áll, hogy az a fogalom, amelyet feltehetően az állatok, tárgyak mennyiségének, valamint az idő múlásának jellemzésére vezettek be, a mai napig hasznosnak bizonyul a Természet jelenségeinek egyre részletesebb leírására. Erre a problémára *Wigner Jenő* hívta fel először a figyelmet [4]. A kvantummechanika szempontjából a számfogalom problémája az, hogy nemdeterminisztikus összefüggéseket kell reprezentálnia a mikroállapotok virtuális tulajdonságai között. Ez az általánosított számokon jóval túlmutató, további általánosítással oldható meg, ahol a számok szerepét operátorok veszik át. A matematikai formalizmus ilyen radikális általánosítása más, váratlan eredményekhez is vezetett, mint például *Niels Bohr* komplementaritási elvének, a részecske-hullám dualizmus általánosításának, egyszerű és elegáns megvalósításához.

Egy fizikai rendszer megfigyelése kölcsönhatás segítségével történik, amely beavatkozik a rendszer dinamikájába, például eltoljuk vagy meglökjük a rendszert. Ezek a beavatkozások fizikai mennyiségekkel – amelyek a rendszert egyik állapotából egy másikba viszik át – jellemezhetők. Ezt a lépést operátorokkal írjuk le, amelyek fekete dobozokhoz hasonlíthatók. Mindegyik doboznak van neve, amely a makroszkopikus fizikából származik, mint koordináta, impulzus stb., és egy mikroállapotot egy másikba visz át, ahogy a *4. ábrán* látható. A mikroállapotok terének lineáris

4. ábra. Egy fizikai mennyiséget reprezentáló operátor.



Készült a Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Gimnáziumban 2020. március 2-án tartott előadás alapján.

A szerző köszönettel tartozik *Kondákor Márknak* és *Simonovits Andrásnak* a kézirat elolvasásáért és gördülékenyebbé tételéért. Külön hála illeti a *Fizikai Szemle* bírálóit, *Csanád Mátét* és *Takács Gábort* rendkívül hasznos és elgondolkodtató megjegyzéseikért.

Polónyi János 1978-ban fizikus diplomát, majd 1979-ben PhD fokozatot kapott az ELTE-n. Ezután a KFKI-ban kezdett dolgozni, majd a darmstadti GSI-ben és a University of Illinois-n volt post. doc. Ezt követően az MIT-n, később az ELTE-n és végül Strasbourgban egyetemi tanár. Érdeklődési területe a kvantummechanika, a kvantumtérelmélet és a renormalizációs csoport.

struktúráját megőrizendő, az operátorok az állapottér lineáris transzformációját hajtják végre. Ezek mátrixokkal jellemezhetők.

Előfordulhat, hogy egy O lineáris transzformáció egy vektort önmagával párhuzamos vektorba visz át: $O\psi = a\psi$, ahol a egy komplex szám. Ekkor a ψ vektort az O operátor a sajátértékű sajátvektorának hívjuk. Vegyük észre, hogy a sajátvektor-egyenlet alapján az operátort a sajátértéke reprezentálja, ha egy sajátvektorára hat, és ily módon az operátor minden egyes sajátértékét reprezentálhatja. Az

$$O \rightarrow \{a \mid O\psi = a\psi\}$$

általánosítás a számfogalom olyan radikális kiszélesítése, amelyre itt szükségünk van.

A kvantummechanikában a fizikai mennyiségeket operátorokkal képviseljük, amelyek az adott rendszer fizikai állapotainak terében hatnak. Mivel a fizikai mennyiségek valós számokkal írhatók le, olyan operátorokat használunk ábrázolásukra, amelyek sajátértékei valósak. Ezeket a matematikában önadjungált, a fizikában gyakran hermitikus operátoroknak hívják. Ezek sajátvektorai az állapottérben egy bázist adnak, amely szerint bármely állapot kifejthető a következőképpen:

$$\psi = \sum_a c_a \psi_a .$$

A ψ állapotban az O mennyiség mérése egy sajátértéket eredményez és Born szabálya alapján az a sajátérték $p(a) = |c_a|^2$ valószínűséggel adódik. Ez a szabály azt is jelenti, hogy a rendszer ψ_a állapotában végrehajtott mérés determinisztikus módon, mindig az a sajátértéket adja eredményül. Egy azonos állapotú, független rendszerek sokaságán egy-egy mérést elvégezve az eredmény átlaga

$$\bar{O} = \sum_a |c_a|^2 a,$$

ahol az a-ra való összegzést az indeterminisztikus kvantumfluktuációkra való összegzésnek tekintjük.

Az eddig említett szabályok a fizikai mennyiségek mikroszintjét jellemző struktúrát vezetnek be. Két fizikai mennyiséget kompatibilisnek nevezünk, ha a hozzájuk tartozó operátorok közös sajátvektorrendszert alkotnak. Az inkompatibilis mennyiségeket leíró operátorok pedig értelemszerűen különböző sajátvektorokkal rendelkeznek. Tegyük fel, hogy az O_1 és az O_2 kompatibilis mennyiséget egy közös, ψ sajátvektorral jellemzett állapotban mérjük meg. Eredményül az a_1 és az a_2 mennyiséget kapjuk, ahol $O_1\psi = a_1\psi$ és $O_2\psi = a_2\psi$. Tehát kompatibilis fizikai mennyiségek determinisztikus összefüggéseket elégítenek ki a közös sajátvektorokkal jellemzett állapotokban.

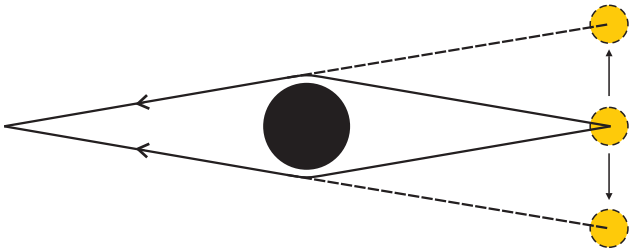
Az inkompatibilis mennyiségek mérése során új köntösben mutatkozik meg a számfogalom általánosításának újdonsága, miszerint olyan operátoregyenletek merülhetnek fel, amelyeknek nincsen megoldásuk a számok körében. Példaképp tekintsük az $A+B+C = 0$ operátoregyenletet egy ψ állapotra alkalmazva, $(A+B+C)\psi = 0$, ahol $A\psi = a\psi$. Először tegyük fel, hogy az operátorok közül bármely kettő kompatibilis párt alkot, emellett $B\psi = b\psi$ és $C\psi = c\psi$. Ekkor $(a+b+c)\psi = 0$ és $a+b+c = 0$, tehát az operátoregyenlet „átváltozott" számokra vonatkozó megoldható determinisztikus egyenletté, és az A, a B és a C mennyiségeket a ψ állapotban együttesen megmérve mindig ezt az egyenletet kielégítő eredményt ad. Ezután tegyük fel, hogy B és C inkompatibilis. Ekkor az (A, B) vagy pedig az (A, C) párokat megmérve determinisztikus eredményt kapunk, azonban ez nem így van a (B, C) pár mérésekor. Ekkor az operátoregyenlet nem fordítható le a sajátértékekre vonatkozó egyenletté úgy, hogy minden egyes operátort egy sajátértékével helyettesítünk, bármelyik állapotra is hat. Ilyenkor a B és C mért értékei fluktuálnak és a fluktuációk nagyságára egy határozatlansági reláció jelenik meg, amely a virtuális valóságból az „igazi", egyértelmű valóság kiválasztása körüli fluktuációkra vonatkozik.

Röviden, a kvantummechanika csak egy bizonyos értelemben vett átlagokat tud megjósolni, egyedi mikroszkopikus jelenségekre nincs matematikai leírásunk. Egy lehetséges kiút ebből a szokatlan helyzetből a rejtett paraméterek elmélete, amelyre később térünk ki. Azonban már most megjegyezzük, hogy az egyedi jelenségek leírásának ilyen megmentése még mélyebb krízishez vezet, mint az indeterminizmus, nevezetesen a kontextualitás problémájához, amire később térünk ki. Az egyedi folyamatok a természettudomány jelenlegi határain túlmutatnak, ez maga a forradalmi helyzet.

Interferencia

Az inkompatibilis fizikai mennyiségek szerepét jól szemlélteti az interferencia jelensége. A fény interferenciája ismerős a klasszikus fizikából. Az oszcilláló elektromágneses tér átlagos hatása általában az intenzitásával jellemezhető, amely a térerősség négyzetével arányos. Ezért, ha egy monokromatikus fényhullám két résen áthaladva jut el egy pontba, akkor az intenzitás kiszámolásakor a különböző terjedési pályán a megfigyelési pontba érkező sugárzási térerősségértékeket összeadjuk és az összeget emeljük négyzetre. Az $(a+b)^2 = a^2+b^2+2ab$ algebrai szabály alapján könnyedén belátható, hogy az intenzitás nem additív a különböző pályákra, hiszen az interferenciaképlet utolsó tagja attól függően változtatja meg az eredményt, hogy – a fény hullámhosszában kifejezve – mennyire különbözik a két pálya hossza. Mivel a hullámhossz rövid a makroszkopikus skálákhoz képest, a megfigyelési pont megváltoztatását követő gyors intenzitásoszcilláció a fényterjedés hullámtermészetének eltéveszthetetlen bizonyítéka.

Hasonló kísérletet anyaghullámokkal is el lehet végezni, ahol egy ernyő két pontján áthaladó részecske hullámfüggvényének interferenciáját figyelik meg. Az ilyen jellegű mérések fontos eredménye, hogy tetszőlegesen kis intenzitású részecskeforrás esetén is



5. ábra. A gravitációslencse-hatás a galaxisok mögötti fényforrások képét megsokszorozza.

találnak interferenciát, még akkor is, amikor biztosak lehetünk abban, hogy minden pillanatban csak egyetlen részecske tartózkodik az mérőeszközben. Tehát a részecske önmagával interferál. A részecske, amely lehet akár foton, akár elektron vagy akár egy radioaktív atommag, sokkal kisebb méretű, mint a két rés közti távolság, ami miatt az adott kísérletben eleminek tekinthető, így igaz, hogy mindkét résen egyidejűleg halad át – ez mutatja hullámtermészetét. Ugyanakkor ezzel ellentmondó helyzet is felmerül, amikor a részecskeképben gondolkodva, pontosabban egy részecskét egy jól definiált pontnak elképzelve azt a rést próbáljuk beazonosítani, amelyen keresztül a részecskének kellett haladnia. Ezt a réshez rakott részecskedetektorral lehet kimérni. Eredményül az adódik, hogy minden alkalommal, amikor a részecske nyomot hagy maga után a detektorban, az interferencia elvész. Ilyenkor az elemi részecske lokalizált módon csak az egyik résen halad át, vagyis részecsketermészetet mutat.

A hullám- és a részecskeviselkedés két egymással inkompatibilis fizikai mennyiséggel, a részecske impulzusával és a koordinátájával írható le, hiszen a részecskét a hely-, a hullámot pedig a hullámvektorral lehet jellemezni – ez utóbbit az impulzus Planck-állandó egységében felvett értékével tudjuk kifejezni. A két mennyiség közt fennálló határozatlansági reláció arra kényszerít bennünket, hogy vagy az egyik, vagy pedig a másik kép alapján képzeljük el a részecske mozgását. A két kép közül a mérőberendezés elrendezésével döntünk, vagyis nincs lehetőségünk a két leírás együttes használatára. A részecske egyidejűleg virtuálisan hullám- és lokalizáltrészecske-állapotban van minden ellentmondás nélkül, mielőtt belép az interferométerbe. A makroszkopikus kísérleti berendezéssel való kölcsönhatása kényszeríti a virtuális lehetőségek közti választásra, és a makroszkopikus szint egyértelmű valóságának megjelenítésére. Ezt a kényszert neveztem a virtuális valóság bevezetésekor a Természet csapdába ejtésének.

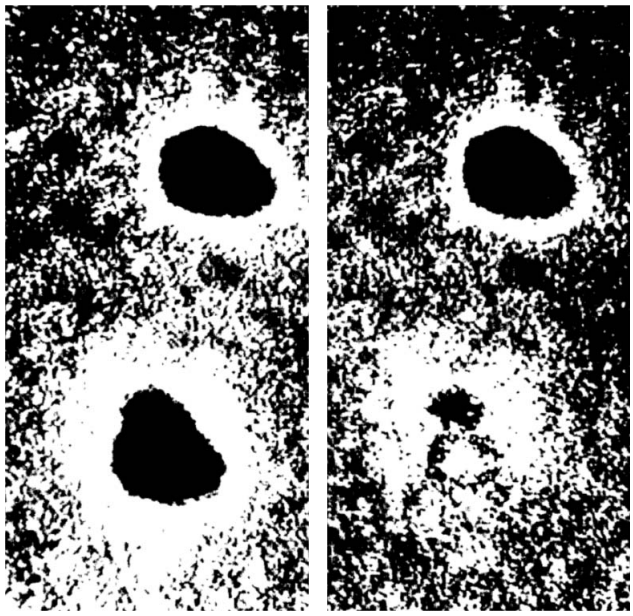
Láttuk, hogy ez a csapda két összetevőből, a dekoherenciából és a választásból áll. A dekoherencia akkor jelenik meg, amikor a részecske beérkezik az interferométerbe, a virtuális valóságok közti választás pedig a részecske-interferométer kölcsönhatással egyidejűleg történik meg. Jó közelítéssel azt mondhatjuk, hogy a részecske hullámtermészetét mutatja, ha szabadon mozog, és lokalizált természetét a környezetével való kölcsönhatás hívja elő.

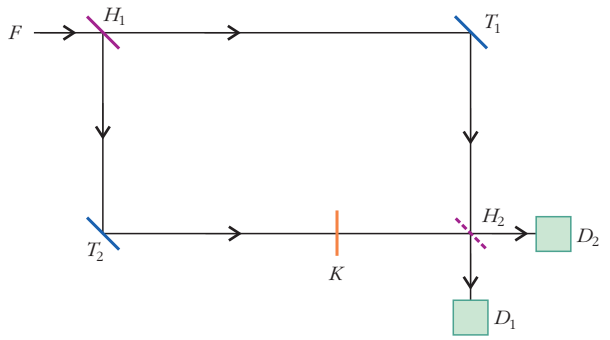
A most említett interferenciakísérletben még egy új, fontos jelenséget is találhatunk, ha jobban figyelünk az idő szerepére: ez a késleltetett választás kísérlete. Az alapötlet eredetileg Niels Bohr és Albert Einstein vitájából származik, de igazi jelentőségét *Archibald Wheeler* ismerte fel [5], aki a gravitációs lencse gondolatából inspirációt merítve fogalmazta meg ötletét. Egy galaxis közelében haladó fény iránya elgörbül, így a galaxis mögött lévő fényforrások képe látszólagosan megkettőződik a teleszkópokban, ahogy az *5. ábra* mutatja. A gondolatkísérlet abból áll, hogy a teleszkópban két képet vesznek fel, az egyiken megengedik a látszólag különböző forrásból érkező hullámok interferenciáját, a másikban csak egyik (látszólagos) forrásból eredő sugárzást használnak fel, a másik forrást elhanyagolják. Az első módszerrel készített felvételben interferálnak a különböző úton érkező nyalábok, a másodikban pedig nem. A felvétel módjától függően a foton vajon a galaxis mindkét oldalán halad, vagy pedig csak az egyiken? A fotonméréssel kapcsolatos „döntés” a megfigyelés pillanatában történik, miután a foton esetleg már évmilliárdok óta haladt a galaxis elhagyása után, míg a teleszkópunkba ért. Ezt az utazást írja át a megfigyelés módjának megválasztása.

A *6. ábra* bal oldalán öt egyperces infravörös digitális felvétel összege a tőlünk 5000 fényév távolságban található 0957+561A,B kvazár megkettőzött képét mutatja. A jobb oldali kép úgy készült, hogy a felvételekről eltávolították az alsó képnek megfelelő helyen lévő csillag átlagos sugárzását. A két kép közti különbség több ezer év propagálását írja át, a foton enynyi késéssel dönti el, hogy mindkettő, avagy csak az egyik nyalábban haladt-e.

Wheeler érve valahol a gondolat és az igazi kísérlet között van. A késleltetett választás módszerét azóta sikerült laboratóriumi körülmények között is végrehajtani [6]. A *7. ábrán* felvázolt kísérletben egy ré-

6. ábra. A késleltetett válasz kísérlet asztrofizikai „megvalósítása”.





7. ábra. Laboratóriumi körülmények között elvégzett késleltetett választás kísérlete.

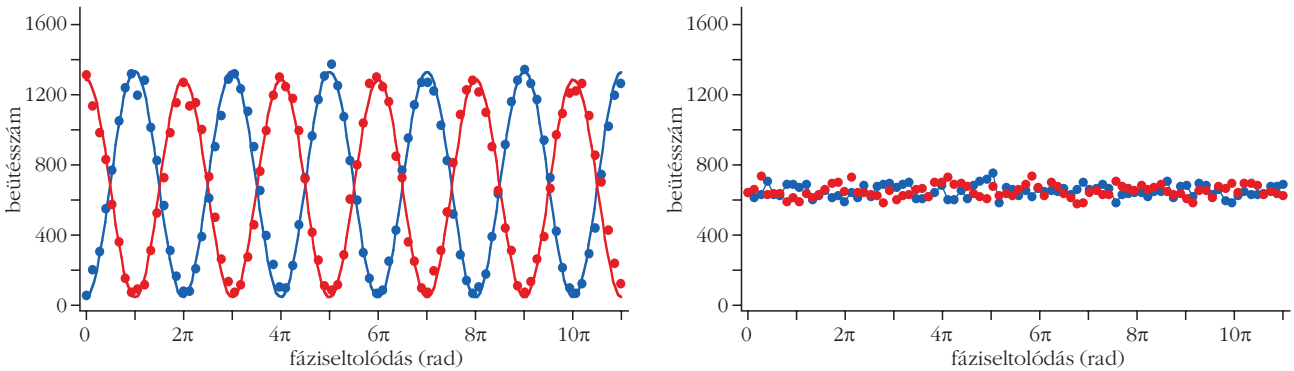
szecskét küldünk az F forrásból a H_1 félig áteresztő felületre, amely a beeső hullámot két részre osztja: az egyiket átengedi, a másikat visszaveri. Innen egymástól függetlenül halad tovább az interferométer két karjában a két hullámcsomag a T_1 és a T_2 tükörről visszaverődve. Az egyik karban helyezzünk el egy K fáziskésleltetőt, amely egy általunk szabadon megválasztható fáziskésést okoz a rajta áthaladó nyalábon. Szabadon dönthetünk arról, hogy a két nyaláb találkozási pontjában elhelyezünk-e egy második félig áteresztő lemezt, H_2-t vagy sem. Ha H_2 ott van, akkor rajta interferencia jön létre, és megfelelő valószínűséggel megszólalnak a detektorok. A megszólalási valószínűségek függnek az általunk beállított fáziskésés nagyságától. Ha nem rakjuk be H_2-t, akkor a két nyaláb nem interferál egymással, így a részecske csak az egyik, véletlenszerűen kiválasztott detektorba ér a hozzá tartozó útvonalon. Ekkor csak az egyik detektor jelez, és az ezek közti gyakoriság független a fáziskéséstől.

Mindkét kar megközelítően 48 m hosszú volt a kísérletben. Ez lehetővé tette, hogy egy radioaktív bomlással vezérelt kvantum véletlenszám-generátor által meghozott döntés kellően későn történjen meg, amikor az út jó részét a részecske már megtette. Ha akkor is döntésünknek megfelelő különbséget találunk a detektorok megszólalásában, akkor a részecske kénytelen volt utólag átírni mozgásának módját úgy, hogy a H_2 jelenlétében mindkét karban, a H_2 távollétében pedig csak az egyik karban halad. A *8. ábra* tanúsága, azaz a kísérleti eredmények szerint az interferencia a Wheeler által elképzelt módon alakul ki.

A kísérlet eredményét úgy lehet röviden összefoglalni, hogy a virtuális valóságok közül a „valódi”, a klasszikus fizikából ismert egyértelmű valóság csak a mérés, illetve a makroszkopikus mérőberendezéssel való kölcsönhatás után történik. Még rövidebben úgy is fogalmazhatunk, hogy egy tulajdonság csak akkor létezik, amikor megfigyelik. Talán ez a gondolat járt Einstein fejében az esti princetoni sétán. Azt is hozzá kell tenni, hogy mindez arra utal, hogy a fizikai tulajdonságok nem egy objektumra vonatkoznak, hanem az objektum és a megfigyelő kölcsönható kettősére.

A makroszint valóságának megjelenését Wheeler a barkochba játék kvantumváltozatával próbálja számunkra elfoghatóbbá tenni [5]. Mint ismeretes a barkochba játékban először egy embert kiküldünk a szobából, és megállapodunk valamiben, akár tárgyban, akár személyben vagy akár fogalomban, majd miután az illető visszatért, eldöntendő kérdéseket tesz fel a többi résztvevőnek, hogy kitalálja, azok miben állapodtak meg. E játék kvantumváltozata abból áll, hogy miután kiküldtük a kérdezőt, abban állapodunk meg, hogy nem állapodunk meg semmiben. Pontosabban az első kérdésre tetszőleges lesz a válasz és a továbbiakban is csak arra figyelünk, hogy ellentmondásmentesen válaszoljunk. Ezek után bejön a kérdező, felteszi az első kérdést, meghallgatja a véletlenszerű választ, majd jön a második kérdés. Akit megkérdezett, az bármire gondolva válaszolhat, az egyetlen szabály, hogy a válasz ne legyen ellentmondásban az előző válasszal. És így tovább, mindenki tetszőleges valamire gondolhat válaszának kialakításában, amennyiben az illik az összes előző válaszhoz. Ahogy ez a játék egy nem egyértelműen meghatározott gondolatok körül forog, úgy mikroszinten is minden mérés egy olyan makroszintű választ provokál, amely illik a makrovilág determinisztikus láncolatába. Einstein a kvantummechanika világával való ellenérzését egyszer úgy foglalta össze Bohrnak, hogy nem hiszi, hogy Isten dobókockajátékként kormányozná véletlenek sorával a világot. A

8. ábra. A detektorok megszólalási statisztikája a fáziskésés függvényében [6]. Balra: H_2-t beillesztve a két detektor megszólalási valószínűségének oszcilláló fáziskésésfüggése a két kar interferenciáját bizonyítja. Jobbra: H_2-t kivéve a detektorok megszólalási valószínűsége független a fáziskésleltetéstől, ami az interferencia hiányát mutatja.



késleltetettválasztás-kísérlet alapján azt is hozzátehette volna, hogy ráadásul Isten dobókockáján még csak jól meghatározott számok sincsenek, csak virtuálisak.

A létezés egysége

A klasszikus fizika makroszkopikus objektumai egymástól jól szétválaszthatók, elkülöníthetők. Ezzel szemben az alapvetőbb kvantumszint törvénye szorosabb, szinte elválaszthatatlan kapcsolatba hozza az elemi részecskéket, a létezés elemi egységeit. Ezt két példával érzékeltetjük, az elemi részecskék megkülönböztethetetlenségével, valamint az összefonódással.

Elemi részecskék megkülönböztethetetlensége

Vegyünk gondolatban két pontszerű részecskét, amelyeket két különböző pontból indítsunk útjukra. Mozgásuk minden pillanatában fennmarad különbségük a klasszikus fizikában, hiszen trajektóriáik alapján beazonosítható, hogy melyik részecske honnan indult. Ezért a részecskék itt megkülönböztethetők.

Ezt a helyzetet alapjában megváltoztatja a határozatlansági elv, hiszen kizárja a részecske koordinátájának és impulzusának egyidejű megismerését. Ugyanis ennek következtében nem lehet a kvantumvilágban a részecske térbeli mozgását egy trajektóriával jellemezni, mert deriváltjának ismerete megsértené a határozatlansági elvet. Tehát ha a két kvantumrészecskét egy ideig szabadon hagyjuk haladni, utána már nem tudjuk kideríteni, melyik honnan indult. Általában nem lehet fizikai méréssel egymástól megkülönböztetni azokat az elemi részecskéket, amelyek azonos tömeggel, töltéssel és egyéb jellemző mennyiséggel rendelkeznek.

A megkülönböztethetetlenségtől egy kis ugrás az azonosság. Wheeler 1940 őszének egyik szombat estéjén felhívta posztgraduális diákját, *Richard Feynmant* [7]:

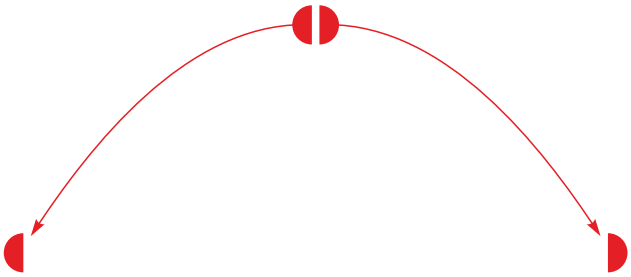
– Feynman, tudom, hogy miért van különböző elektronoknak ugyanolyan tömege és töltése.

– ?

– Mert mind ugyanaz az elektron.

E kép részletes kidolgozása Feynman pályaintegrál-formalizmusával a legtermészetesebb. Eredményül kapjuk például, hogy a részecskefizika nagy egyesített elméletének Univerzumunkban való megvalósulását egyetlen részecskével le lehet írni. E részecske rendkívül komplikált, időben előre-hátra haladó mozgása a részecskefizika teljes leírásához vezet.

Két makroszkopikus test egymástól vagy megkülönböztethetetlen, vagy éppenséggel ugyanabból a részecskéből áll – a durva felbontású megfigyelések alapján kialakuló függetlenségük elvész a finomabb, jobb felbontású mérések során. A makroszkopikus testek különbsége nem az őket alkotó elemi részecskék különbségéből, hanem azok kombinációjának



9. ábra. Egy bomba két egyenlő részre esik szét, amely egymástól egyenlő távolságban éri el a vízszintes talajt.

különbségéből áll. Világunk gazdagsága tehát nem a benne foglalt részecskék számából, hanem azok elrendezéseinek nagy számából fakad.

Összefonódás

Az elemi részecskék megkülönböztethetetlenségének általánosítása vezethet el az összefonódáshoz. Ez utóbbi lehetőségét már *Erwin Schrödinger* is felismerte, de fontosságát csak később, Einstein vette észre. Tekintsünk először egy gondolatkísérletet, amely az Einstein–Podolsky–Rosen-jelenség makroszkopikus hasonmása. Ebben egy bombát két egyenlő tömegű részből rakunk össze. Ezután a bombát egy mozdulatlanul lebegő helikopterről kiejtünk, majd felrobbantjuk úgy, ahogy ez a *9. ábrán* látható. Még azt is tegyük fel, hogy a bombadarabok vízszintes irányban távolodnak el egymástól, illetve a talaj vízszintes, azaz a két darab egymással ellenkező irányban, ideális körülmények közt a robbanás helyétől ugyanakkora távolságban, ugyanakkor csapódik a talajba. Ugyan nem tudjuk, hogy a robbanás után milyen irányban kezdenek el repülni a darabok, azonban abban a pillanatban, amikor az egyik darab földet ért, annak helyéből pontosan tudjuk, hol van a másik darab. Nincsen semmi meglepő abban, hogy ekkor az egyik test mozgásából ismerjük a tőle távol lévő másik test mozgását, hiszen mozgásuk kezdettől fogva korrelált.

Az 1935-ben megfogalmazott Einstein–Polodsky–Rosen-jelenség az 1951-es, *Bohm* által módosított változatában két foton képezi kísérletünk tárgyát, ezek olyan állapotból indulnak ki, amelyben a két foton spinje, illetve belső impulzusmomentuma, egymással ellentétes. A fotonok spinjét egy adott irányba eső vetületével azonosíthatjuk. Használjunk e célból a függőleges irányt, tehát egy lehetséges kétfotonállapotot ($\uparrow\downarrow$)-vel jelölhetünk. Mivel a fotonok megkülönböztethetetlenek, ugyanakkora eséllyel jöhet szóba a két nyíl felcserélésével kapott állapot, így két foton kezdeti állapota:

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow\downarrow) + \frac{1}{\sqrt{2}}(\downarrow\uparrow).$$

(Az $1/\sqrt{2}$ faktorok egy adott mérésben megjelenő valószínűségek összegét 1-nek állítják be.) Ezután a két fotont eltávolítjuk egymástól anélkül, hogy azok a környezetükkel kölcsönhatnának és ennek következtében

spinjük megváltozna. Végül megmérjük az egyik foton spinjének irányát. Nyilvánvaló, hogy egyidejűleg megtudjuk a másik foton spinjét is, hiszen az a mért iránynyal ellentétes kell legyen. A mérés előtt a foton spinje a két irányba mutató virtuális valóságok kombinációja, a spin egyértelmű iránya pedig még nem is létezett egyik foton esetén sem. A megfigyelés során egyidejűleg megjelenő spinirányok viszont látszólag ellentmondásba kerülnek a speciális relativitáselmélet kauzalitásfeltételezésével, amely szerint a jelenségek hatásai legfeljebb fénysebességgel terjedhetnek.

A két foton spinje nem független egymástól, egymással ellentétesek, ugyanakkor az egyik spin sem mutat valamilyen meghatározott irányba. Ezt a helyzetet úgy nevezzük, hogy a két foton összefonódott állapotban van. Az összefonódás tehát determinisztikus korreláció a virtuális valóságok között. Ennek analógiája a bomba esetében az lenne, hogy a bombáknak nincs „igazi", egyértelmű állapotuk, amíg a levegőben vannak. Addig bármely virtuális irányba mozoghat az egyik darab, a másik mindig az ellentétes irányban mozog. Csak akkor alakul ki egyidejűleg mindkét darab helye, amikor becsapódnak a földbe. (Ez így mondva azonban nem igaz valódi bombákra, mert azok makroszkopikusak, így a környezetükkel végbemenő intenzív és folyamatos kölcsönhatás azonnal a klasszikus fizika egyenleteinek eleget tevő pályára állítja őket.) Az Einstein–Podolsky–Rosen-jelenség úgy foglalható össze, hogy a „valódi", egyértelmű spin választásához szükséges információ az összefonódás által akauzális módon jelenik meg. *Alain Aspect* és munkatársai 1982-ben kísérletileg bebizonyították, hogy ez így is történik. Azért kellett a kísérletre a 80-as évekig várni, mert rendkívüli technológiai problémákat okoz többek között az a feltétel, hogy a két spin irányát ugyanakkor mérjék meg. Ez az első kísérlet, amelyben két, akauzális jelenséget hasonlítottak össze, és eredményül rögtön a speciális relativitáselmélet mikroszkopikus szintű problémáit vetette fel.

Jelenti-e Aspect és kollégái eredménye azt, hogy a speciális relativitáselmélet hibás? Einstein 1905-ben javasolt elmélete méterrudak és órák segítségével fogalmazódik meg, azaz a klasszikus fizika makroszkopikus szintjére vonatkozik. Ezen szint fontos jellemzője, hogy az egyedi eseményeket kontrollálni tudjuk, oda helyezünk egy tárgyat, ahova akarjuk, akkor olvassuk le az óra által mutatott időt, amikor nekünk tetszik, továbbá az elemi részecskék pontszerűnek vannak elképzelve. A makroszkopikus törvényszerűségek két alkotóelemből állnak: a mozgásegyenletekből és a kezdeti feltételekből. Az első képviseli magát a törvényt. Az pedig a természettudományok egy alapvető feltételezése, hogy a másodikat tetszőlegesen megválaszthatjuk, hiszen ennek hiányában semmi értelme sincs törvényről beszélni. A speciális relativitáselméletben az általunk kibocsátott jeleket azért tudjuk a megfigyelőhöz érkezésükkor beazonosítani, valamint azzal a kauzalitást ellenőrizni, mert kibocsátásuk részleteit szabadon megválaszthatjuk. 1982-es kísérletben a virtuális valóságok listájáról az „igazi" valóság kiválasztásának terjedési sebessége jelenik meg, azonban a spin mérésével talált valóságot nem mi választjuk meg. Mérőeszközeink túl nagyok, túl durvák ahhoz, hogy egy tetszőleges valóságot válasszunk ki kezdeti feltételként, amelynek terjedésére ellenőrizzük a kauzalitást. Tehát a klasszikus fizika speciális relativitáselméletének törvényeit nem érintik az ilyen jellegű kísérletek.

Két független részecske összefonódik, amikor kölcsönhat. De az összefonódás energiacsere nélkül is kialakulhat – ez a kölcsönhatás mikroszkopikus szintű általánosítása. Két részecske összefonódott állapotának fontos jellemzője a nemlokalitás. Ez abban áll, hogy amikor az egyik részecske kölcsönhatásba lép környezetével, annak hatására a két részecske közös állapota változik meg. Ez az, ami a speciális relativitáselmélet számára veszélyes, mert aláássa a fizikai jel terjedési sebességének egyértelműségét. Az összefonódás során a részecskék elveszítik egyedi tulajdonságukat. Egy kétfotonállapot nem két egyfotonállapot. Ezen a ponton a makroszkopikus világ segítségével kialakított nyelvünk elveszti értelmét és olyan fogalmakhoz használunk, mint „virtuális valóság" és „információ", amelyek fizikai jelentése további nehéz, egyelőre nem teljesen tisztázható kérdéseket vet fel.

Az összefonódás nem gyengül a távolsággal, csupán szétterül az összefonódott részecske környezetére. Nem lehet kétségünk afelől, hogy a minket felépítő elemi részecskék össze vannak fonódva embertársainkkal, az Univerzum távoli galaxisában található anyaggal. Az összefonódások zuhatagában élünk anélkül, hogy annak információtartalmát felfognánk. Egy fontos különbség összefonódás és telepátia között az, hogy a közvetítendő üzenet megválasztásának lehetőségét feltételezzük az utóbbinál. Ennek ellenére a kvantummechanika jó időfelbontású kísérletei és a sumér béljósok módszerei látszólag veszélyes közelségbe kerültek.

Megmenthető-e a klasszikus fizika?

Mielőtt egy nagy sóhajjal elfogadnánk a kvantumvilág furcsaságait, végig kell gondolni, nem lehet-e mégis valahogy megmenteni a régi, jól ismert klasszikus fizikát? Mivel az csak a finomabb, jobb felbontású megfigyelések esetén válik használhatatlanná, természetesnek tűnik az a kiút, hogy a klasszikus fizika ezekben a jelenségekben is érvényben marad, csupán itt olyan szabadságfokok hatásait is látjuk, amelyeket megfigyeléseink még nem tudnak közvetlenül felbontani. Ez a klasszikus fizika kísérletileg mindig is cáfolhatatlanul maradó mentsvára.

Nem is nehéz ilyen rejtett paramétereket tartalmazó klasszikus elméleteket találni. Azonban az a feltétel, hogy a rejtett paraméterek elmélete a kvantummechanikával megegyező valószínűségi törvényeket adjon, elegendő annak bizonyítására, hogy bármely rejtettparaméter-elmélet nemlokális és kontextuális [8] kell legyen. Az utóbbi tulajdonságot egy olyan *A, B* és *C*

fizikai mennyiségek példájával lehet érzékeltetni, amelyek közül (A, B) és (A, C) pár kompatibilis, azonban (B, C) inkompatibilis. Tehát A és B, vagy A és C egyszerre megmérhető, azonban B és C nem. Kontextualitás azt jelenti, hogy A értéke a kontextustól függ, attól hogy mérésekor még B-t vagy C-t figyeltük meg. Ez olyan, mintha egy ember testsúlya attól függne, hogy mérés közben a kezére vagy a lábára nézünk.

Ez elfogadható ár a klasszikus fizika determinisztikusságának megmentésére? Elképzelhető, hogy később talán jobban meg tudjuk indokolni a nemlokalitás és a kontextualitás felléptét. Számomra azonban természetesebbnek tűnik az a következtetés, hogy szemléletes fogalmaink csak a makroszkopikus világhoz illeszkednek, amíg a mikroszkopikus szint törvényei más fogalmakra alapulnak. Ekkor azonban el kell fogadnunk a kvantummechanika misztikusnak tűnő törvényszerűségeit.

Filozófia

Az a kép, hogy a makroszkopikus szint a mikroszkopikusból származik, filozófiai kérdéseket vet fel. Ezeket nem lehet a természettudomány módszereivel tárgyalni, most inkább arról lesz szó, hogy számomra milyen fontos, a szigorúan értelmezett fizikán túlmutató szempontváltozásokhoz vezetett a kvantummechanika. A határozatlansági elv miatt fel kell adnunk azt a reményt, hogy akár egy elemi részecske állapotának teljes információtartalmát kinyerjük. Ha a kvantummechanika nem tudja megmondani, hogy milyen információt rejt magában egy elemi részecske, akkor miről szól? A kvantummechanika legtermészetesebbnek tűnő interpretációja az, hogy az a részleges információk módszeres és optimalizált használatának törvényeit gyűjti össze. Míg a klasszikus fizika ontológiai szinten jelenik meg és azonosítja a létezőket a róluk alkotott elképzeléseinkkel, a kvantummechanika csupán az ismeretelmélet szintjén fogalmazódik meg, és azzal foglalkozik, hogy mit tudhatunk meg a világról anélkül, hogy ontológiai kérdésekre választ adna. Talán ez az oka, hogy a kvantummechanika az egyetlen fizikai (keret)elmélet, amelynek alkalmazhatósági határát még nem értük el, eddig minden körülmények között igaznak találtuk. E siker ára az ontológiáról való lemondás. A kvantummechanika egyenletei egy vershez hasonlíthatók, amely szavak helyett matematikai szimbólumokból áll (legalábbis az általunk használt formalizmusig), és a rímeket a szimbólumok fizikai jelentése váltja fel.

Természetesnek tűnik, hogy a fizikai törvények réteges szerkezete filozófiai kérdésekben is új szempontokat nyújt. Ez nyilvánvaló korunkban, amikor a filozófiai fogalomalkotás egyre inkább a szaktudományokra támaszkodik. De nézzünk a távolabbi múltba, amikor a filozófusok inkább a józan ész és az introspekció alapján gondolkodtak, és vegyük például az idealizmus és a materializmus történelmi versengését. Az idealizmus az érzékeket másodrendűeknek tartja, amivel szemben a materializmus csak az érzékek által közvetített világot fogadja el létezőnek. A két elképzelés vetélkedésének története dióhéjban összefoglalva a következő. A zsidó-keresztény kultúránk az egységet a monoteizmussal hangsúlyozta, amelynek fontosságát a *Szókratész* előtti filozófusok is megerősítették. Azonban *Platonnál* az ideák a tárgyaknál nagyobb fontosságra tettek szert, amely sorrend már tanítványánál, *Arisztotelésznél* visszafordult. A keresztény teológia ideák helyett a hitet helyezte a tárgyak elé. Ez a sorrend megint fordul a felvilágosodás és az azt követő ipari forradalom idején. Eközben *Immanuel Kant* szerint az a priori fogalmaink már a tapasztalat előtt kialakulnak. Az érzékeinkkel elérhető és elérhetetlen világ versengése a technológiára alapuló fogyasztói társadalmat már nem nagyon érinti, helyébe a tudomány pragmatizmusa lépett.

Ez az eldönthetetlennek látszó probléma nagyon leegyszerűsödik a *2. ábra* (lásd az első részben) alapján, hiszen a materializmus a skálatartomány közepe táján fellépő jelenségekre alapult. Azonban érzékeink a fizikai világ csak egy kis részét fedik le, naivitás azt képzelni hogy azon túl nincs semmi. Az, amit a fizika anyagnak hív és minden kétséget kizáró kutatása tárgyává tett, az utóbbi száz évben már nem szorítkozik az érzékeink tartományára. Itt érdemes visszaemlékezni a fizika céljáról a mindenség elméletével kapcsolatban mondottakra – a sohasem elérhető mindent átfogó elmélet helyett érdemesebb célul kitűzni a már megismert jelenségek közti rendet, és abban érzékeink szerepét tisztázni. A mikroszkopikus szint csak annyiban alapvetőbb a makroszkopikusnál, hogy az összetett rendszereket az alkotóelemeik egymáshoz való viszonya alapján értjük meg. Mindkét szint egyforma fontosságú a létezés szintjén, elképzelt viszonyuk csupán gondolkodásunk struktúráját tükrözi. Ennek filozófiai megfelelője a külvilág és gondolkodásunk között fennálló viszony kiegyensúlyozása, a közös létezésbe való beágyazódásuk észrevétele anélkül, hogy létezők spektrumát széthasítanánk gondolatokra és tárgyakra.

Még egy utolsó gondolat, a távol-keleti filozófia és az európai fizika furcsa párhuzamáról. A fizika különböző szintjei és a kvantummechanika törvényszerűségei a több ezer éves távol-keleti világképre emlékeztetnek. Az indiai védák szerint a világ a megnyilvánult (makro) és a nem megnyilvánult (mikro) szintre oszlik, érzékeink a megnyilvánultat fedik le, pedig a „lényeg" a nem megnyilvánult. Az utóbbit nem lehet szavakkal leírni (gondoljunk a virtuális valóságok komplikált leírására). A védanta filozófia szerint az univerzális létező (Univerzum) és a személyes létezés (az agytudomány szerint tudatállapotunk a központi idegrendszer neuronjainak eredménye, amelyeket kémiai folyamatok formálnak) megegyezik (mindkettő a kvantummechanika tárgya). Az univerzális létező nem osztható részekre (egy kétfotonállapot nem két egyfotonállapot), és nem tudjuk tulajdonságait megfogalmazni (a megfigyelt részecskének, ha összefonódott, nincs egyedi tulajdonsága).

Nehéz elképzelni bármilyen elfogadható választ arra kérdésre, hogy ezek a párhuzamok a véletlen eredményei-e. Azt azonban tudjuk, hogy az antik görög gondolkodók kíváncsisága és lelkesedése az érzékeinkkel elérhető jelenségek iránt Európában olyan lavinát indított el, amelynek nincs keleti párja. Az ennek eredményeképp kifejlődő természettudományok pedig a megfigyelések, tapasztalatok olyan tárházát fedték fel, amely életünket sok-sok szempontból gazdagította. Ugyanakkor a Szókratész előtti képet megtörte, és egy színes, a részletekben gazdag leírásmozaikkal helyettesítette. Azonban a mikroszkopikus szint megdöbbentő tulajdonságainak felfedezése megingatta az addigi naiv bizalmunkat az érzékeink által közvetített világban, és egy olyan új világkép kialakítását sürgeti, amely – meglepő módon – a fenntartásosabban haladó keleti gondolkodók intuíciójára emlékeztet. Ezen a ponton fontos annak elismerése, hogy „egzakt" tudományaink nem csak a fizikai világról szólnak, ugyanúgy az emberi gondolkodást is tükrözik [9], mint ahogy egy másik civilizáció világképe.

Irodalom

4. E. P. Wigner: The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in Natural Sciences. *Communication on Pure and Applied Mathematics XIII* (1960) 1.
5. J. A. Wheeler: Law without law. In *Quantum Theory and Measurement*. Princeton Univ. Press, Princeton, NJ (1983).
6. V. Jacques et al.: Experimental Realization of Wheeler's Delayed Choice Experiment. *Science 315* (2007) 966.
7. S. S. Schweber: Feynman's visulation of space-time processes. *Rev. Mod. Phys. 58* (1986) 449.
8. N. David Mermin: Hidden variables and the two theorems of John Bell. *Rev. Mod. Phys. 65* (1993) 803.
9. E. Schrödinger: *Mind and Matter*. Cambridge Univerity Press (1958).

A FIZIKA TANÍTÁSA

A HŐSZIVATTYÚ

Tasnádi Anikó Márta
Karinthy Frigyes Gimnázium, Budapest

A 21. század legnagyobb problémái közé tartozik a fenntartható fejlődés megoldása, az egyre növekvő energiaigények kielégítése, miközben a földtörténeti korok alatt fölhalmozódott fosszilis energiaforrásaink kiapadóban vannak. Egyre sürgetőbbé válik, hogy a fosszilis tüzelőanyagok égetését mérsékeljük, és más alternatívákat találjunk mind az épületek fűtésére, mind az energiaszükséglet fedezésére.

William Thomson (*Lord Kelvin*) már a 19. században felismerte, hogy az épületek fűtésére gazdaságosabb megoldás lenne – a fosszilis energiahordozók direkt égetése helyett – a hőszivattyú, vagy ahogyan ő nevezte a „hősokszorozó" alkalmazása. (Tervei alapján, állítólag, Svájcban meg is építettek egy működő hőszivattyút [1].)

A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantárgy-pedagógiai Kutatási Programja támogatta.

Tasnádi Anikó az ELTE-n matematika–fizika, a Közgazdaságtudományi Egyetemen angol szakos tanári diplomát szerzett. Az egyetem elvégzése után egy évig Angliában oktatott. Jelenleg a Karinthy Frigyes Kéttannyelvű gimnáziumban matematikát és fizikát tanít. Kutatómunkát az MTA ELTE Fizikatanítása Kutatócsoportban végez. Témája a termodinamika gyakorlati és légkörfizikai (klímaváltozás) alkalmazásainak tanítása. Eredményeit nemzetközi konferenciákon és szakfolyóiratokban ismertette.

Mint tudjuk, a hőszivattyú vagy hőpumpa, „fordítva" járatott hőerőgép, amely munka befektetése árán, hőt szállít a hidegebb helyről a melegebb helyre. Ebben az értelemben a mára már minden otthonban megtalálható hűtőszekrény, illetve fagyasztó és az egyre gyakoribb klímaberendezés is hőszivattyú, hiszen a hűtendő térből hőt von el, azonban a köznapi értelemben a hőszivattyú kifejezés inkább a csak fűtésre használt berendezésekre használatos.

A hűtés igénye már századokkal ezelőtt megfogalmazódott, s a hűtőszekrény történetének kezdete az 1800-as évekre vezethető vissza. Elterjedésében az igazi áttörés a 20. századra tehető, a du-Pont cég által kifejlesztett (és azóta már betiltott) freongázzal üzemeltetett hűtőszekrények elterjedésével.

Már a 20. század első felétől is építettek egész épületeket fűtő hőpumpákat, a nagy beruházási költség – és az alacsony energiaárak – miatt azonban azt nem mindenütt tekintették gazdaságos megoldásnak. Az energiahordozók drágulása, a szén-dioxid-kibocsátás mérséklésének igénye fellendítette a hőpumpák iránti keresletet és egyre több helyen alkalmazzák. (Ma Magyarországon az új építésű épületekbe kötelező valamilyen korszerű vagy megújuló energiaforrás használatán alapuló fűtési megoldást is beszerelni. Ebbe a kategóriába a napkollektorok és napelemek mellett beletartoznak a hőszivattyúk is. Ez utóbbiról szinte semmit nem tanítunk a diákoknak, s valószínűleg az idősebb korosztály sem tudja mi is az és milyen fajtái léteznek.)