ciójának köszönhetően a cézium-atomóra esetében jelenleg 10^{-15} az időmérés relatív pontossága [10]. Ez kisebb bizonytalanságot jelent, mint 1 másodperc az univerzum teljes élettartama alatt. A pontosság növelésére már megvannak a kollektív atomi gerjesztéseken alapuló módszerek, amelyekkel a 10^{-18} relatív pontosság is elérhető. Ilyen pontos órával választ kaphatunk a fizika egyes alapvető kérdésére, mint például az univerzális állandók időbeli állandósága. Emellett olyan praktikus következménye is van, hogy néhány centiméteres felbontással mérhetjük az általános relativitáselmélet szerinti gravitációs potenciált.

Végül térjünk rá a negyedik alkalmazási területre, az 1990-es évek óta emlegetett kvantumszámítógépre. Ez a mai elképzeléseink szerint nem egy általános célú, a mi világunkban megszokott személyi számítógéphez hasonló konstrukció lesz. Ehelyett reális esély látszik célzott kvantumos hardverek elkészítésére, amelyek egyes matematikai problémákat tudnak megoldani. Ebben az irányban mozdult el a D-Wave és az IBM kvantumszámítógépe is [11], amelyek optimalizációs feladatok megoldására vannak megépítve. Ezekben az években vagyunk a remélhető áttörés küszöbén, hogy a prototípusok demonstrálják egy klasszikus számítógéppel már nem megoldható probléma megoldása révén a kvantumszámítás hatékonyságát. A versenyfutás a területen aktív kutatókat is élénken foglalkoztatja, és heves viták kísérik az eredmények értelmezését. Abban közmegegyezés van, hogy a közeljövőben a fent említett példákat követve, széles palettán jelennek meg új, már a kvantumtechnológián alapuló eszközök és alkalmazások, amelyek a mindennapi életünk részévé válnak. Wigner és társainak forradalmi elmélete mintegy 100 év lefolyása alatt technológiává érett.

Irodalom

[1] Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. 47, 777 (1935); https://en.wikipedia.org/wiki/EPR_paradox

[2] Bell, John. On the Einstein–Poldolsky–Rosen paradox, Physics 1 3, 195–200, Nov. 1964

[3] Alain Aspect; Philippe Grangier; Gérard Roger (1982). „Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities". Phys. Rev. Lett. 49 (2): 91

[4] https://www.scienceathome.org/games/quantum-moves/science-behind/

[5] Magyarország szintén elindított egy Nemzeti Kvantumtechnológia Alprogramot a Nemzeti Kiválósági Program keretében.

[6] Feynman, Richard (1982). „Simulating Physics with Computers". *International Journal of Theoretical Physics*. **21** (6–7): 467–488.

[7] X.-S. Ma, T. Herbst, T. Scheidl, D. Wang, S. Kropatschek, W. Naylor, B. Wittmann, A. Mech, J. Kofler, E. Anisimova, V. Makarov, T. Jennewein, R. Ursin & A. Zeilinger, *Quantum teleportation over 143kilometres using active feed-forward*, Nature **489**, 269-273 (2012)

[8] Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers, Juan Yin et al, Science Vol. 356 pp. 1140-1144 (2017); ismertetőt ld. http://index.hu/tech/2017/06/19/oriasi_tudomanyos_rekordot_ert_el_kina_kvantummuholdja/

[9] Kereskedelmi forgalomban kapható kvantumkommunikációs eszközöket ld. pl. http://www.idquantique.com

[10] Max-Planck Institute for Quantum Optics, Prof. G. Rempe, http://www.mpq.mpg.de/4996520/details

[11] https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/primary-standard-nist-f1

[12] ld. IBM sajtóközlemény; http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/52403.wss

---

CSEH JÓZSEF

Wigner és a csoportvész a magfizikában

80 éves a szupermultiplett-elmélet

Wigner Jenő az 1963. évi Nobel-díjat az atommagok és elemi részecskék elméletéhez való hozzájárulásáért kapta, főként az alapvető szimmetriaelvek felfedezéséért és alkalmazásáért. A Nobel-előadásában [1] a szimmetriák szerepét úgy fogalmazta meg, hogy azok oly módon kormányozzák a természettörvényeket, ahogyan az utóbbiak az eseményeket. Vagyis a legátfogóbb kerettörvények szerepét töltik be. Ezt a meglátását azóta nagyon sokszor idézik, méltán.

Időközben a részecske- és magfizika kicsit terebélyesedett és kicsit jobban szétvált egymástól. Ám a szimmetriák szerepe mit sem veszített jelentőségéből, éppen ellenkezőleg: úgy tűnik, ma gyakrabban emlegetik őket mindkét diszciplínában, mint korábban bármikor. Számos elméletnek a gerincét alkotják, rendszerező erejük pedig mindkét tudományág csontvázát adja.

Ebben az írásban elsősorban egy olyan szimmetriát veszünk szemügyre, melyet Wigner 1937-ben vezetett be, az SU(4)-et, vagy más néven szupermultiplett-elméletet. Ez a szimmetria az elmúlt 80 év alatt sok jó szolgálatot tett a magfizikában és nem elhanyagolható következményekkel járt a részecskefizikában is. Tekintélyes kora ellenére azonban ma sem vonult nyugdíjba, hanem közvetlenül, vagy közvetve utat mutat az új modellek és elméletek fejlesztéséhez.

Szimmetriák

1931-ben jelent meg Wigner alapvető könyve a csoportelmélet kvantummechanikai alkalmazásáról [2]. Ez a könyv generációk számára szolgált alapvető tankönyvként. Sokan innentől számítják a „csoportvész" kitörését. Német nyelven írta, akkoriban Németországban dolgozott, de a könyv lényegében Magyarországon készült, amikor hazajött vakációra. Később természetesen több nyelvre lefordították.

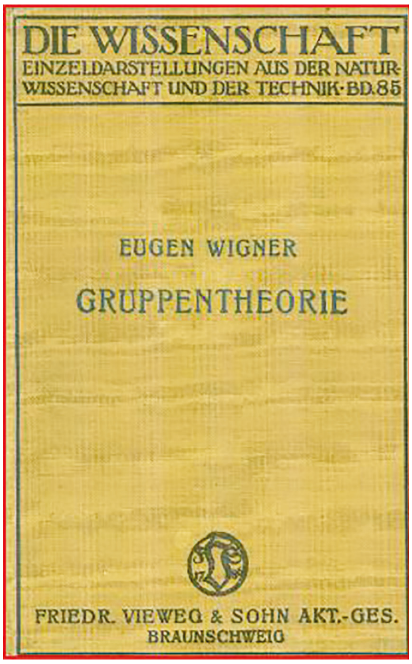
A csoportvész azoknak a fizikusoknak a megjelölése a csoportelmélet fizikai szerepére vonatkozóan, akik kevésbé szeretik a matematikának ezt az ágát. Egyesek még azt is hirdették, hogy minden elméletet meg lehetne fogalmazni nélküle is. Ma már ismerjük a történelem ítéletét: még ha lehetne is, nem érdemes. A csoportelmélet a szimmetriák matematikai nyelve, és ha elkerülnénk a használatát, az csak önkínzó elbonyolítását jelentené valaminek, aminek létezik szép és elegáns megfogalmazása.

Miért éppen csoportok? A csoport egy egyszerű matematikai struktúra, ami egyetlen műveletet tartalmaz, amit rendszerint szorzásnak nevezünk, de ennek nincs jelentősége. Jelentősége annak van, hogy erre a műveletre nézve a struktúra zárt, vagyis a művelet nem vezet ki belőle. Ilyen a szimmetria is. A szimmetria azt jelenti, hogy valamilyen transzformációt végrehajtunk a vizsgált objektumon, és az eredmény azt nem változtatja meg, azonos marad az eredetivel. Ha egy gömböt elforgatunk, az ugyanúgy gömb marad. És ha az egyik transzformáció önmagába vitte át (ezt hívjuk szimmetriatranszformációnak), és van neki egy másik szimmetriatranszformációja is, ami önmagába viszi át, akkor a kettőt egymás után végrehajtva ismét csak az eredeti objektumot kapjuk. Vagyis: a transzformációk egymás utáni végrehajtására, mint műveletre nézve, zárt a struktúránk. A csoport a legegyszerűbb ilyen matematikai struktúra, ezért adja a szimmetriák nyelvét a csoportelmélet.

Egy csoportnak több ábrázolása is létezhet. A természetes számok felcserélése, egy szabályos háromszög forgatásai, vagy mátrixok szorzása három különböző dolog. De, ha az elemek közötti kapcsolat, amit a művelet teremt meg ugyanazt a szerkezetet mutatja, akkor matematikai szempontból azonosnak tekintjük őket. Azt mondjuk, hogy egy csoport három ábrázolásával van dolgunk. Legáltalánosabban a csoportábrázolást úgy szokás megfogalmazni, hogy az valamely vektortéren ható műveletekben ölt testet. A fizikában – érthető módon – a csoportok ábrázolása lényeges szerepet játszik, hiszen konkrét objektumokat konkrét módon kell leírnunk.

Miért volt az idegenkedés, a csúfondáros csoportvész elnevezés? Mert valami új jelent meg. A fizika nyelve a matematika, és Newton óta az uralkodó nyelvjárás a differenciálegyenleteké volt. Ehhez képest a csoportok ábrázoláselmélete valami szokatlan, új dolog, érthető a húzódozás.

De hát a kvantummechanika is új és nem kevésbe idegen! Egyik megteremtője, Niels Bohr mondta: ha nem találod elképesztőnek, semmit nem fogtál fel belőle. Milyen is pontosan a kvantummechanika matematikai apparátusa? A fizikai állapotot egy vektortér egy elemével írjuk le, a fizikai mennyiségek pedig ezen a téren ható operátorok, vagyis műveletek. Ez szó szerint ugyanaz, mint amit a csoportábrázolásokról mondtunk! Elfogulatlan szemmel nézve tehát a csoportábrázolások éppen annyira természetes szövetségesei az új fizikának, mint a differenciálegyenletek voltak a newtoni mechanikának. Csak hát



a nyilvánvaló dolgok felismerése is időbe telik, az ember pedig hajlamos elutasítani a szokatlant.

Egy másik mérföldkő Wigner életművében, és egyúttal a szimmetria szerepének felismerésében, éppen a csoportábrázolás, jelesen a Lorentz-csoport, ábrázolásának kérdésével foglalkozik [3]. A Lorentz-csoport azokat a transzformációkat tartalmazza, amelyeket a relativitáselmélet alapvetőnek tekint. Vagyis a relativitáselmélettel összhangban lévő elméletnek ez a csoport szimmetriacsoportja.

Ennek a dolgozatnak érdekes a története. Amikor elkészült és a szerző elküldte egy szakfolyóiratnak, a szerkesztők úgy döntöttek, hogy nem közlik. Nyilván nem találták helyénvalónak. Végül mégis napvilágot látott egy másik folyóiratban; melynek Neumann János, Wigner gyerekkori barátja, akkor már a szerkesztője volt. És amikor évtizedekkel később a szerzőnek odaítélték a Nobel-díjat, akkor abban a döntésben ennek a cikknek jelentős szerepe jutott. Azt persze nem lehet tudni, hogy pontosan mekkora, de tartja magát az a vélekedés, hogy ezé volt a legnagyobb. Ez a cikk fogalmazza meg a matematika nyelvén azt, amit közérthetően a Nobel-előadásában mondott Wigner: a szimmetriaelvek a természettörvények kerettörvényei. A Lorentz-csoport segítségével osztályozta a kvantumelmélet alapegyenleteit (a Klein-Gordon-, Dirac-, Weil-, és Maxwell-egyenleteket), és keretet szabott annak, hogy új alapegyenletek milyen formájúak lehetnek. Később a cikk megjelenését ünneplendő indult el a nemzetközi Wigner-szimpózium sorozata, ami máig folytatódik. Egyike a kevés konferenciasorozatnak, amit egy szerző életművének szenteltek. Ez egy olyan cikk volt tehát, amit először nem akartak kiadni a 30-as években, azután döntő szerepe volt a Nobel-díj odaítélésében a 60-as években, végül egy máig folyó nemzetközi konferenciasorozat kelt életre szellemi örökségének ápolására. Érdekes tanulság a tudomány és emberi aspektusainak viszonyáról. (Ha egy szakfolyóirat visszautasít egy kéziratot, az még bízvást lehet Nobel-díjas, de a visszautasítás önmagában persze még nem garancia arra, hogy tényleg ilyen kvalitású.)

Tudománytörténeti érdekesség, hogy Wigner munkásságának magyar fordítója Györgyi Géza egy olyan csoport fizikai alkalmazásával ért el kiemelkedő eredményt, ami a Lorentz-csoport ikertestvére. (Mindkettő a négydimenziós tér [ortogonális] forgatásait tartalmazza.) Györgyi a Kepler-probléma rejtett szimmetriáját tárta föl [4]. Eredményét annak megszületésekor (a későbbi Wigner-díjas) Yuval Ne'eman, aki szintén jelen volt a Triesti Nemzetközi Fizikai Központban, tankönyvekbe valónak ítélte [5].

SU(4), szupermultiplettek

Kevéssel azután, hogy kiderült: az atommag protonokból és neutronokból áll, vagyis a neutronok felfedezése után, Heisenberg azt javasolta, hogy tekintsük a protont és a neutront egyetlen részecske, a nukleon, két állapotának [6]. Megmutatta, hogy akkor a tulajdonságaik leírására haszonnal alkalmazható az az SU(2) formalizmus, amit a spin leírására már használtak. A spin a részecskék saját-impulzusmomentuma, melynek nagysága, és vetülete valamely tengelyre, a kvantummechanika szerint csak diszkrét értékeket vehet fel, vagyis nem változhat folytonosan (szemben a klasszikus mechanikában megszokottakkal).

A protonnak, a neutronnak, az elektronnak (és még sok más részecskének) a spinje s =1/2, alkalmas mértékegységekben mérve. A lehetséges vetületek száma 2s+1=2. Ezt jelenti az SU(2)-ben a szám: kétállapotú rendszerrel van dolgunk. (Az SU jelentését pedig a fizikai tartalma felől a legegyszerűbb megvilágítani: a részecskeszám megmaradására utal.) Heisenberg nyomán azt mondjuk, hogy a nukleonnak van egy t=1/2 izospinje, ami fölfelé vagy lefelé állhat. Az SU(2) valójában egy csoportot jelöl, azoknak a forgatásoknak a csoportját, amelyek egy absztrakt térben, a spin- vagy izospintérben forgatnak.

Egy kvantummechanikai rendszer viselkedését a Hamilton-operátora (az energia operátora) kormányozza. Ezért azt nevezzük a rendszer szimmetriatranszformációjának, ami ezt az operátort önmagába viszi át. Heisenberg javaslata tehát más szavakkal kifejezve úgy hangzik, hogy az atommag Hamilton-operátora szimmetrikus az izospintér $SU^t(2)$ elforgatásaival szemben. Hasonlóképpen feltételezzük, hogy szimmetrikus a spintérbeli $SU^s(2)$ elforgatásokkal szemben is. Amikor részletesen megvizsgálták ezeknek a feltételezett szimmetriáknak a következményeit, és összevetették a kísérletileg megfigyelt tényekkel, akkor az derült ki, hogy ezek a szimmetriák pontosan nem, de közelítőleg érvényesek.

1937-ben Wigner egyesítette ezt a két szimmetriát [7], és kidolgozott egy olyan elméletet, amelyben a mag Hamilton-operátora változatlan marad annak a négydimenziós absztrakt térnek a forgatásaival szemben, aminek irányait a spin és izospin négy lehetséges beállása adja: (fel, fel), (fel, le), (le, fel), (le, le). Ennek szimmetriacsoportja az $SU^{st}(4)$, melynek részcsoportjai (műveletet megőrző részhalmazai) a korábban megismert kétdimenziós csoportok: $SU^{st}(4) > SU^s(2) \times SU^t(2)$. Elméletét szupermultiplett-elméletnek is nevezik, mert egyesíti a spin- és izospin multipletteket. A multiplett az állapotok egy családját jelenti, melyeket az azonos szimmetria rendel egymáshoz.

Az SU(4) szimmetria természetesen nem érvényes egzaktul a természetben, hiszen az alkotó SU(2) részszimmetriái is csak közelítőleg érvényesek. Dinamikailag sérült szimmetriának nevezzük. (A név arra utal, hogy egy speciális szimmetriasértő kölcsönhatás felhasítja az állapotok energiáját, melyek egzakt szimmetria esetén azonosak volnának, de nem keveri az állapotokat.) A sérülés mértékét lehet mennyiségileg jellemezni, az különbözik aszerint, hogy könnyű, vagy nehéz magokról van-e szó.

Az SU(4) szimmetria ebben az évben volt 80 éves. Megítélése immár történelmi távlatból lehetséges. Azt mondhatjuk, hogy fontossága kettős. Egyfelől az alkalmazása lényeges következményekre vezetett. Erre az alábbiakban említünk néhány példát röviden, egyet pedig kicsit részletesebben. Másrészt mintaként szolgált számos más, közelítő szimmetrián alapuló elmélet vagy modell megalkotásához. Ezekre is fogunk példákat látni.

Az SU(4) szimmetria megszabja, hogy az atommagok béta-bomlása mely állapotokat köthet össze [8] (az un. Gamow-Teller átmenet, melyben a kibocsátott részecskék elvisznek egy spin egységet is, csak egy szupermultiplett tagjai között lehetséges). Megmagyarázza a kötési energia kiemelkedő értékét azokban a magokban, melyekben a proton és neutronszám egyenlő és páros (ez az un. Wigner-energia) [9]. Megjósolja a proton és neutron mágneses momentumának arányát: -3/2 (a kísérleti érték -1,46) [10].

Amikor a szupermultiplett-elmélet 33 éves volt, akkor az addigi életútját szakértők úgy jellemezték, hogy a fizikus közösség lassan fogadta be. Ennek az volt a legfőbb oka, hogy túl korán született meg, amikor ismeretünk a magerőkről és a bétabomlásról még nem volt eléggé részletes. „Wigner profetikus módon előre megsejtette azokat” [11].

Dinamikailag sérült szimmetriák, magmodellek

Wigner SU(4) szimmetriája nem csupán a szupermultiplettek leírása miatt volt fontos a magfizika fejlődésében, hanem azért is, mert módszertani útmutatással szolgált más jelenségek szimmetriákra alapozott leírása számára. Itt most két példát említünk szemléltetésül. Az egyik a térbeli, a valódi, háromdimenziós térbeli szabadsági fokok leírása a héjmodellben az SU(3) szimmetria révén, a másik a kéttestprobléma spektrumának generálása az SU(4) algebra által.

Mielőtt a héjmodellről szólunk, ide kívánkozik egy bevezető megjegyzés az atommagok szerkezetmodelljeiről általában. A magot rendszerint sok nukleon építi fel. Vagyis a magszerkezet-probléma egy kvantummechanikai soktest-probléma. Ahhoz túl sok, hogy egzaktul meg tudjuk oldani az egyenleteit (hiszen már a négytest-problémába is beletörik a bicskánk, hát még a 14-nukleonéba, vagy a 114-testébe). Ahhoz viszont túl kevés az alkotóelemek száma, hogy a statisztikus módszerek önmagukban elegendőek legyenek a kezelésére. (A szilárdtest-fizika is soktest-problémával küzd, de az elektronok száma egy olyan mintában, amit az anyagtudományi laboratóriumokban vizsgálnak az Avogadro-számmal jellemezhető, vagyis kb. 22–23 nagyságrenddel nagyobb a magban lévő nukleonok számánál.) Emiatt a magszerkezet elméleti leírásában kulcsszerepet játszanak a modellek. A modellépítés során a problémát annyira redukáljuk, hogy az már megoldhatóvá váljon, miközben megpróbáljuk a fontos jellemvonásait nem meghamisítani. Bonyolult kihívás. (Ezért vélik úgy egyesek, hogy a modellalkotás a tudományé mellett a művészet vonásait is hordozza). Az sem meglepő, hogy nem létezik egyetlen olyan modell, ami a magszerkezet minden lényeges vonásáról számot ad, hanem csak többféle modell együttese képes azt megtenni. Ráadásul az alapvető szerkezetmodellek különböző fizikai képen alapulnak.

Talán a legsikeresebb a héjmodell, ami parányi naprendszernek, vagy miniatűr atomnak tekinti a magot, melyben néhány nukleon egy vonzó erőtérben kering. De a magban nincsen nap, vagy nincs neki nagyon nehéz magja, mint az atomnak, akkor hát mi hozza létre a vonzó erőt? Az összes többi nukleon hatása. Valójában a héjmodell úgy írja le a magot, hogy annak sok nukleonja egy olyan zárt törzset alkot, aminek egyetlen szerepe az átlagos vonzó erőtér kialakítása. Ebben mozognak a törzsön kívül rekedt un. valencianukleonok (természetesen egymással is kölcsönhatva). Vagyis a nukleonok nagy részét gyakorlatilag kivonjuk a forgalomból, ők csak az átlagtér kialakításához járulnak hozzá, és a mag viselkedéséért a kis számú valencianukleont tesszük felelőssé. Ha arra gondolunk, hogy a magerők rövid hatótávolságúak és nagyon intenzívek (mondjuk az elektromos erőkhöz képest), akkor meglepő, hogy egy ilyen modell, ami egy szelíd átlagtéren alapul sikeres lehet. Mégis az (annyira, hogy a megalkotóinak Nobel-díjat hozott). Számos érdekes magtulajdonság érthető e modell alapján, de nem mindegyik. A kép csak akkor lesz teljes, ha egészen más hátterű szerkezetmodelleket is tekintetbe veszünk. A (szintén Nobel-díjas) kollektív, vagy cseppmodell például úgy tekint a magra, mint egy parányi folyadékcseppre, ami képes rezegni és forogni. A fürtmodell (vagy klasztermodell) pedig, ami mind közül a legrégebbi, azt tételezi fel, hogy egy magot kisebb (és erősen kötött) atommagok alkotnak, úgy, mint egy molekulát az atomok.

A héjmodellben tehát a nukleonoknak van térbeli és természetesen spin- és izospin szabadsági fokuk. Ez utóbbi kettő leírására alkalmazható Wigner SU(4) szimmetriája. A három térbeli szabadsági fok jellemzésére pedig alkalmas az SU(3) szimmetria, amint ezt Elliott 1958-ban megmutatta [12]. (Majdnem egy évtizeddel korábban rámutatva e szimmetria fontos szerepére a magfizikában, mint ahogyan az megkezdte fényes karrierjét a részecskefizikában a hadronspektrumok osztályozása révén). A 3-as dimenziószám részben érthető abból, hogy háromdimenziós térben zajlik a mozgás, de természetesen még további részletek is fontosak. Nevezetesen: az átlagtér – mint kiderült – jól közelíthető egy oszcillátorpotenciállal (a klasszikus fizikából ismert rugóerőnek megfelelő potenciállal), és az SU(3) szimmetria az oszcillátorkvantumok térbeli eloszlását jellemzi. A héjmodell (közelítő) szimmetriája tehát $SU^{st}(4)xSU(3)$, melynek első része Wigner szimmetriája, a második pedig egy annak mintájára született hasonló jellegű szimmetria a térbeli mozgás leírására.

Az SU(4) csoport, amit Wigner bevezetett a szupermultiplettek leírására egy egészen más szerepben is fontossá vált később. Kiderült, hogy a kéttest-problémának megalkotható egy olyan sikeres modellje, aminek SU(4) csoportszerkezete van. Itt azonban az SU(4) nem szimmetriacsoportot jelöl, mint a szupermultiplett-elméletben, vagy az SU(3) a héjmodellben, hanem egy dinamikai csoportot [13]. A különbség a következő. A szimmetriacsoport az azonos tulajdonságú állapotokat rendezi egy családba (multiplettbe). Például azonos az energiájuk egzakt szimmetria esetén, és közel azonos (vagy egyszerű szabályt követően különböző) a sérült szimmetria esetén. Ez jellemzi a szupermultiplett tagjait, vagy az SU(3)-multipletteket a héjmodellben. A dinamikai csoport egy nagyobb csoport. Tartalmazza a probléma (egzakt, vagy közelítő) szimmetriacsoportját is, tehát elvégzi azt a feladatot, amit a szimmetriacsoport, de tartalmaz egy spektrumgeneráló részt is. Tekintsük például a háromdimenziós oszcillátort! Annak, mint láttuk, az SU(3) szimmetriacsoportja, vagyis, az egy adott oszcillátorkvantumszámhoz tartozó állapotok osztályozhatók az SU(3) szerint. Az SU(4) dinamikai csoport ebből úgy áll elő, hogy hozzáveszünk még egy dimenziót, ami azonban nem térbeli dimenzió, hanem a különböző energiaszintek között léptet, vagyis generálja a spektrumot. Egyetlen SU(4)-multiplett ily módon soksok különböző energiájú állapotot foglal magában, egyúttal számot adva azok térbeli SU(3) szimmetriájáról is.

A magfizikában az SU(4) dinamikai csoport a fürtmodellben jut fontos szerephez. Mondjuk, a ^{20}Ne magot úgy képzeljük, hogy azt egy ^{16}O és egy ^{4}He alkotja. Ez utóbbiak különösen stabil, gömbölyű és erősen kötött magok. Egy ilyen molekulaszerű konfiguráció leírásában egyfelől számot kell adnunk a két összetevő klaszter belső szerkezetéről. Ezt rendszerint a héjmodell alkalmazásával tesszük. Amint ez már szóba került annak $SU^{st}(4)xSU(3)$ szimmetriája van. Másfelől pedig le kell írnunk a két alkotóelem relatív mozgását. Erre való az $SU_r(4)$ modell, amit vibron modellnek hívnak [13]. Tehát egy kétklaszter-konfiguráció szimmetriáját az $SU^{st}_{c1}(4)xSU_{c1}(3)xSU^{st}_{c2}(4)xSU_{c2}(3)xSU_r(4)$ csoport adja meg [14].

Kéttest-problémával természetesen másutt is találkozunk. Ennek megfelelően a vibron modellt alkalmazzák például a molekulafizikában kétatomos molekulák rezgési és forgási spektrumának leírására (innen a neve). Ez a legegyszerűbb felhasználása, amikor belső szabadsági fokokra nem kell figyelnünk [15]. Számot ad továbbá a kétkvark-rendszer állapotairól (a mezonspektrumról), ahol a térbelin kívül a spin és íz szabadsági fokok is szerepet játszanak. A legösszetettebb alkalmazása pedig a magfizikai fürtmodellé, ahol a klaszterek belső szabadsági fokai még gazdagabbak.

Kvartettek

A héjmodell a törzs- és valencianukleonok szétválasztásával erősen redukálja a leírandó szabadsági fokok számát. Az esetek többségében mégis nagyon nagy a számítási feladat, ezért számos további modell született az egyszerűsítés érdekében. Azoknak a magoknak a leírására, melyeknek páros a proton- és neutronszáma (röviden páros-páros magok) sikerrel alkalmazható a kölcsönhatóbozon-modell, amelynek az alapvető építőkövei nem nukleonok, hanem nukleonpárok. Ezeket a héjmodell valencianukleonjai alkotják, speciális módon párokba rendezve [16]. A 70-es években ez a modell a csoportelméleti leírás újabb nagysikerű hullámát hozta.

Hasonló alapeszméből sarjadtak ki a kvartettmodellek. Ezekben négy nukleon (két proton és két neutron) együttese az alapvető építőkő. Értelemszerűen az olyan páros-páros magok írhatók le vele, melyekben azonos a protonok és a neutronok száma. A kvartettmodelleknek régi és szerteágazó története van, melynek eredete Wigner szupermultiplett-elméletéhez nyúlik vissza. A nukleonok között ható erő vonzó, és rövid hatótávolságú, vagyis akkor tudja leginkább kifejteni hatását, ha a nukleonok nagyon közel vannak egymáshoz. Legkedvezőbb az, ha ugyanabban a (térbeli) állapotban vannak. Egy állapotban a Pauli-elv szerint, ami a természet alaptörvénye, azonos nukleonból csak egy foglalhat helyet. De a proton és neutron nem azonos, továbbá, mint az már szóba került, mindegyiknek kétféle spinállapota is van. Vagyis két proton és két neutron lehet ugyanazon a térbeli pályán. Ők négyen alkotnak egy kvartettet, melynek nukleonjai nagyon erősen vonzzák egymást, míg a kvartettek közötti kölcsönhatás gyengébb.

A kvartettmodellt sokáig szinte kizárólag a magok alapállapoti tulajdonságainak leírására használták, leginkább a kötési energia értelmezésére. A 70-es években azonban felmerült az a gondolat, hogy a négy nukleon együttesen átugorhat egy másik, nagyobb energiájú állapotba, ily módon előállhat a kvartettek gerjesztési spektruma [17].

Fontos általánosítása volt a kvartettfogalomnak a szimmetrián alapuló definíció: a kvartett két protonnak és két neutronnak olyan állapota, ami egy speciális spin- izospin szimmetriához tartozik, nevezetesen: Wigner-féle $SU^{st}(4)$-skalár [18]. Ez azért jelent nagy előrelépést, mert ilyen szimmetriája akkor is lehet a négy nukleonnak, ha azok különböző héjmodellpályákon vannak. Ennélfogva az általánosított kvartettek gerjesztési spektruma akárhány oszcillátorkvantumot tartalmazhat, míg az eredeti meghatározás szerint, melyben a négy nukleon ugyanazon térbeli állapotban van, és együttesen ugrik másikba, sokkal kevesebb héjmodellállapot érhető el.

A kvartettek gerjesztési spektrumának tárgyalása a 70-es években kissé nehézkes empirikus modellek segítségével történt, miközben a héjmodellnek és a nukleonpárokat leíró bozonmodellnek elegáns és hatékony csoportelméleti megfogalmazásai léteztek. Arra csak a közelmúltban került sor [19], hogy a kvartettmodellt algebrai formalizmussal felruházzák. Kiderült, hogy a héjmodell SU(3) formalizmusa, melyet Elliott már 1958-ban kifejlesztett, sikerrel importálható a kvartettek kezelésére is. (Szinte érthetetlennek tűnik, hogy erre miért nem került sor már sokkal korábban.) Ha az egyszerűbb kvartettfogalmat vesszük alapul, mely szerint a kvartett egy oszthatatlan építőkő, amit azonos pályán lévő nukleonok alkotnak, akkor egy fenomenologikus algebrai kvartettmodellhez jutunk, míg a szimmetrián alapuló kvartettekre alapozva félmikroszkopikus modellt nyerhetünk [19]. Félmikroszkopikusnak az olyan leírást hívjuk, ami tekintetbe veszi a Pauli-féle kizárási elvet (más szóval: a modelltere mikroszkopikusan van megszerkesztve), de modellkölcsönhatásokat alkalmaz. A fenomenologikus leírás nem (feltétlenül) tud a Pauli-elvről. (A teljesen mikroszkopikus modellek pedig nemcsak a Pauli-elvet tartalmazzák, hanem a kölcsönhatásaik is mikroszkopikusak, vagyis nukleon-nukleon erők).

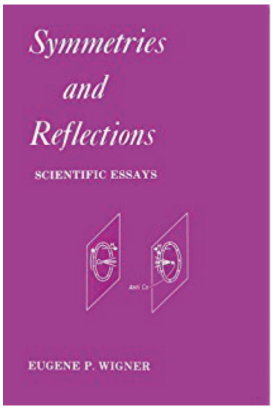
A kvartettmodell fontos kapcsolatot teremt a héjmodell és a fürtmodell között. Ez teljesen természetes, ha arra gondolunk, hogy a legismertebb klaszter, amit a fürtmodellben alkalmaznak az alfa-részecske, vagyis a ^{4}He mag, amit két proton és két neutron épít fel. Egy kvartettet pedig szintén két proton és két neutron alkot. Az lenne tehát a meglepő, ha nem lenne közük egymáshoz. Hogy pontosan mi a kapcsolatuk, azt ismét a szimmetriavizsgálatok derítették ki.

A magszerkezetmodellek összefüggése

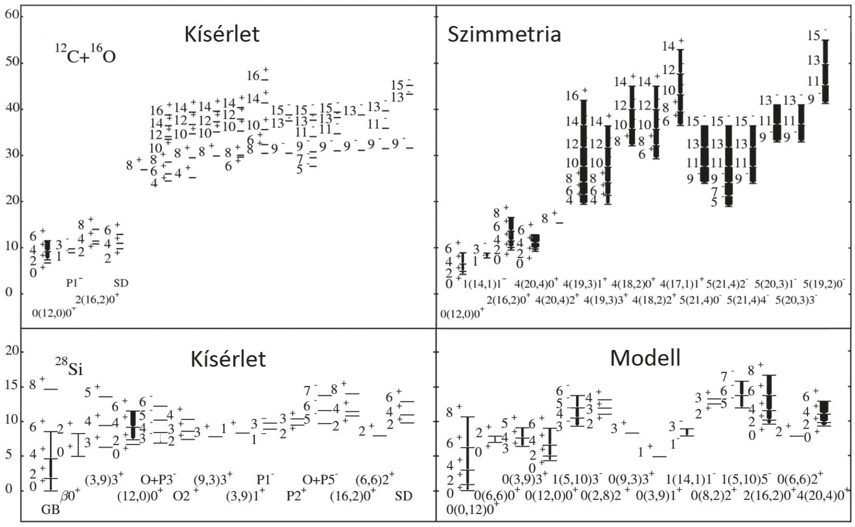
Mivel a magszerkezet leírása különböző (bolygórendszer, folyadékcsepp, fürt…) modelleken alapul, ezért elengedhetetlen, hogy feltárjuk azok egymáshoz való viszonyát, megkeressük közös részüket. Enélkül megértésünk több mint hiányos lenne. A feladat a szimmetriájuk tanulmányozásával oldható meg.

Az alapvető felismerés még 1958-ból származik. Elliottnak sikerült a héjmodellben értelmeznie olyan kollektív tulajdonságokat, mint a (kvadrupólus) deformáció és a magok forgása [12]. Ez igazi frontáttörés volt! A gömbszimmetrikus potenciálban mozgó néhány nukleon nyelvén számot tudott adni olyasmiről, amit addig csak egy egészen eltérő képben, a cseppmodell keretében tudtunk elképzelni. Mint kiderült: az SU(3) szimmetria egyértelműen megszabja a mag alakját: lehet gömbölyű, megnyúlt, belapult, vagy olyan ellipszoid, aminek három tengelye más-más hosszúságú. A rotációs állapotokat (sávot) pedig az egy SU(3) szimmetriához tartozó állapotok adják.

Ugyanebben az évben fogalmazta meg Wildermuth és Kanellopoulos [20] a fürtmodellt egy olyan szemléletes módon, ami a praktikus számításoknak is kedvezett, és hamarosan kiderült, hogy a fürtmodell és a héjmodell közös részét szintén az SU(3) (dinamikailag sérült) szimmetria adja. Vagyis: a héjmodellállapotok közül e szimmetria segítségével tudjuk kiválasztani azokat, amelyek egyik vagy másik klaszterkonfigurációnak felelnek meg, és ezeknek az állapotoknak ismerjük a deformációját is, meg a rotációs családját is [21].



Időközben a magmodellek sokat fejlődtek, és a természet leírását ma már sokkal realisztikusabban tudjuk megadni. Általánosították Elliott SU(3) modelljét is, a következőképpen. A héjmodell onnan kapta a nevét, hogy az átlagpotenciálban kialakuló egyrészecske-állapotok héjakba tömörülnek. Vagyis néhányan egymáshoz energiában nagyon közel esnek, őróluk azt mondjuk, hogy egy főhéjat alkotnak, aztán következik egy nagy szünet, és a másik főhéj már lényegesen nagyobb energiához tartozik. Elliott modellje egyetlen főhéjat kezelt, a valenciahéjat, a legkisebb energiájú, részben betöltött héjat. Ma már ismeretes a sok főhéjat együttesen kezelő algebrai modell is [22]. A magállapotok realisztikus leírásához tekintetbe kell vennünk a főhéjgerjesztéseket is. Mi a kiterjesztett héjmodell viszonya a kollektív és fürtmodellhez? Az derült ki, hogy a három alapvető szerkezetmodell közös metszete a sokfőhéj-közelítésben is egy (dinamikailag sérült) szimmetria, $SU_s(3) \times SU_x(3)$ algebrai szerkezettel (ahol az s az alapállapotra utal, míg x a gerjesztést jelöli) [23]. Ugyanez a szimmetria, amit sokcsatornás dinamikai szimmetriának hívunk, teremt kapcsolatot a fürtösödés különböző konfigurációi között is [24], vagy egy klaszterkonfiguráció és egy héj- (vagy kvartett) konfiguráció között. Ezért aztán a jelentősége nem pusztán elvi jellegű, hanem praktikus szempontból is nagyon figyelemre méltó, ugyanis nagyon jelentős prediktív ereje van. Képes például arra, hogy egy mag kisenergiás spektrumát a héj- (vagy egyszerűbben a kvartett) modell nyelvén leírva, abból megjósoljon egy magasan fekvő klaszterspektrumot kellő részletességgel (az állapotok energiáit és a közöttük lezajló elektromágneses sugárzások intenzitását) [25]. Erre mutat példát az ábra.



A 28Si spektrumának leírása a sokcsatornás dinamikai szimmetriával. Az energiaskála MeV-ben értendő. Alsó rész: bal oldalt a kisenergiás kísérleti spektrum látható, jobb oldalon az algebrai kvartettmodell spektruma. Felső rész: a 12C+16O klaszterspektrum. A kisenergiás rész az alsó spektrumok részleteinek ismétlése. A jobb oldali modellspektrum a szimmetria jóslata, a kisenergiás spektrum extrapolációja (!). A bal oldal mutatja a 12C+16O reakcióban kísérletileg talált állapotokat. Az állapotok közötti nyilak az elektromágneses átmeneteket mutatják, vastagságuk az intenzitással arányos

Összegzés

Az elmondottakból úgy tűnhet, a szimmetriák a fizika csodafegyverei abban a békés de nagyszabású küzdelemben, amit a természet megismeréséért folytatunk. Ha ez a kis írás ilyen benyomást keltett, akkor az azért van, mert valóban ez a helyzet.

Szemléltetésül itt a magfizikai alkalmazások közül említettünk néhány példát annak kapcsán, hogy az idén 80 éves Wigner szupermultiplett-elmélete. Máig tartó hatását jól jellemzi egy önkéntelen megjegyzés a magyar magfizikai kutatás egyik úttörőjétől, a magsugár viselkedésének nemzetközileg kiemelkedő szaktekintélyétől. Angeli tanár úr így fogadta a magszerkezet legújabb áttekintő összefoglalását, ami nemrégiben jelent meg: „eddig nem is tudtam, hogy az egész magszerkezet csupa csoportelmélet” [26].

Az itt bemutatott szimmetriák mind egy családba tartoznak, Lie-csoportokkal írhatók le. Csábító volna megemlíteni néhány újabb szimmetriafajtát, ami szintén nagy jelentőségre tett szert (például szuperszimmetria, mértékszimmetria). Ezt azonban terjedelmi korlátok nem engedik meg, ezért pusztán a létük megemlítésére szorítkozunk.

Összegzésként megállapíthatjuk: furcsa betegsége a fizikának a sokat emlegetett csoportvész (a német és angol nyelvű szakirodalom egyenesen csoportpestisnek nevezte). Nem ártalmas, hanem ellenkezőleg: hasznára van. Ha már fertőzés, akkor leginkább talán a mitochondriumok történetére emlékeztet: az őssejtet (feltehetően) megtámadta egy baktérium, de a küzdelembe egyikük sem pusztult bele, hanem olyan szoros együttműködés alakult ki közöttük, hogy ma már nem tudnának egymás nélkül meglenni.

A jelen munka az (K112962 témaszámú) OTKA támogatásával készült.

Irodalom

[1] E.P.Wigner, Nobel Lecture 1963; Szimmetriák és reflexiók (ford: Györgyi G.) Gondolat Kiadó, Budapest,1972.
[2] E. P.Wigner, Gruppentheorie und Ihre Anwendung auf die Quantenmechanik der Atomspektren, Braunschweig, F. Vieweg und Sohn, 1931; Csoportelméleti módszer a kvantummechanikában (ford: Györgyi G, Sebestyén Á.) Akadémiai Kiadó, Budapest, 1979.
[3] E.P.Wigner, Ann. Math. 40, 149 (1939).
[4] Györgyi G, Fizikai Szemle 1968, 142; 1971, 205.
[5] Gyarmati B, magánközlés.
[6] W. Heisenberg, Z. Phys. 77, 1 (1932).
[7] E.P.Wigner, Phys. Rev. 51, 106 (1937).
[8] L. Eisenbud, G.T. Garvey, E.P. Wigner, Az atommag szerkezete (ford. Györgyi G.) Akadémiai Kiadó, Budapest, 1969.
[9 D.D. Warner, M.A. Bentley, P. van Isacker, Nature Phys. 2, 311 (2006).
[10] F. Gürsey, A. Pais, R.A. Radicati, Phys. Rev. Lett. 13, 299 (1964).
[11] L.A. Radicati, in Symmetry properties of nuclei, Proc 15th Solveay Conf. in Physiscs, 1970, Gordon and Beach Science Publisher, London, 113 (1971).
[12] J.P. Elliott, Proc. Roy. Soc. 245, 128; 562 (1958).
[13] F. Iachello, Phys. Rev. C 23, 2778 (1981).
[14] J. Cseh, Phys. Lett. B 281 (1992) 173; J. Cseh, G. Lévai, Ann. Phys. (NY) 230 (1994) 165.
[15] F. Iachello J. Cseh, G. Lévai, APH N.S. Heavy Ion Phys. 1, 91 (1995).
[16] Iachello F, Arima A, The Interacting Boson Model, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
[17] A. Arima, V. Gillet, J. Ginocchio, Phys. Rev. Lett. 25 1043 (1970).
[18] M. Harvey, Nucl. Phys. A 202, 191 (1973).
[19] J. Cseh, Phys. Lett. B 743, 213 (2015).
[20] K. Wildermuth, Th. Kanellopoulos, Nucl. Phys. 7, 150 (1958).
[21] B.F. Bayman, A. Bohr, Nucl. Phys. 9, 596 (1958/59).
[22] G. Rosensteel, D.J. Rowe, Phys. Rev. Lett. 38, 10 (1977).
[23] J. Cseh, J. Phys. Conf. Ser. 580, 012046 (2015).
[24] J. Cseh, Phys. Rev. C 50, 2240 (1994).
[25] J. Cseh, G. Riczu, Phys. Lett. B 757, 312 (2016).
[26] D.J. Rowe, J.L. Wood, Fundamentals of Nuclear Models, World Scientic Pub. Co., Singapore, 2010.

VARGA IMRE

A Wigner–Dyson-osztályozás és az Anderson-féle fém-szigetelő átmenet

Majdnem hatvan évvel ezelőtt jelent meg P.W. Anderson alapcikke, amiben azt állapította meg, hogy jól vezető anyagot létrehozó atomok rendezetlenség, szennyezettség jelenlétében, vagy amorf szerkezetben akár szigetelő tulajdonságot is mutathatnak. Vagyis egy olyan anyagban, ami ideális esetben, tehát tisztán és rácshibáktól mentesen nagyon jól vezeti az elektromos áramot és ennek megfelelően a hőt is, bizonyos mértékű szennyezettség, vagyis rendezetlenség esetén egyáltalán nem vezetik az áramot.

Sokáig az volt az elképzelés, hogy a rendezetlenség növelésével a vezetési képesség folyamatosan csökken. De ebben a dolgozatban Anderson éppen arra mutatott rá, hogy a rendezetlenség egy bizonyos értéke felett a vezetőképesség hirtelen tűnik el, vagyis ez a rendszer hirtelen válik szigetelővé. Egy ilyen átalakulás drámai változás, és egyszerű, az eredeti rendszer tulajdonságát csak zavartkeltő módon, úgy mondjuk, hogy perturbatív módon kezelni nem is lehet. Ilyen esetben egy valóságos fázisátalakulás következhet be a rendezetlenség növekedésével. Ráadásul nem a szokásos hőmérséklet az, ami a fázisátalakulást mozdítja elő, ugyanis P.W. Anderson művében teljesen koherens kvantummechanikai rendszert tételezett fel, vagyis a hőmérséklet zérusnak tekinthető. Ezt a fázisátalakulást egyúttal a rendszerbeli elektronikus állapotok drasztikus változása is kíséri: a fémszerű fázisban főként a vezetésben részt vevő, a Fermi-energia közeli állapotok az egész anyagra kiterjedtek, vagyis az elektromos áram közvetítésére alkalmasak, még akkor is, ha a rendezetlenség hatására erre már igen rossz hatékonysággal képesek. A szigetelő fázisban az elektronok olyan állapotokban vannak, amelyek az anyag belsejében, néhány tucat vagy csak néhány rácshely, atom környezetében találhatóak, úgy mondjuk, hogy lokalizáltak. Ez utóbbi állapot a kisebb tartományban konstruktív interferencia révén marad *bezárva*, míg távolabbra a destruktív interferencia