

(1) A képlékenységi tulajdonságokra, megmondhatjuk, hogy a képlékeny alakváltozás milyen módon, milyen diszlokációk és csúszási rendszerek aktiválása révén megy végbe. Ez új lehetőségeket teremt bonyolult szerkezeti anyagok, például a reaktoroknál alkalmazott Zr-alapú ötvözetek, a repülőgép-turbinákban használt Ti-alapú ötvözetek, vagy az autóiparban egyre divatosabb Mg-alapú ötvözetek kutatásában és fejlesztésében.

(2) A geológiában fontos tudni, hogy milyen diszlokációk és csúszási rendszerek aktiválódnak a különböző kőzetek deformációja során. Az elektronmikroszkópia mellett az itt leírt módszer hasznos kiegészítéseket nyújthat, különösen olyan esetekben, amikor atmoszférikus körülmények között a vizsgált ásvány- vagy kőzetanyag nem stabil [4].

(3) Következtethetünk arra is, hogy a vizsgált anyagminta milyen képlékeny deformáció révén került abba az állapotba, amelyben a vizsgálatokat éppen végezzük. Például régészeti leletek esetében következtethetünk arra, hogy elődeink milyen mecha-

nikai vagy hőkezelési eljárást alkalmaztak, fémes vagy akár kerámia alapú tárgyaik előállításához. Az egyiptomi szemfestékek vizsgálata például azt mutatta, hogy az ókori kozmetikumok készítői szelíden, csak éppen annyira őrlték meg az alapanyagait, hogy a durva szemcsék eltűnjenek és csak ritkán alkalmaztak hevítést, azt is csak legfeljebb 300 °C-nál nem magasabb hőmérsékleteken [3].

Irodalom

1. T. Ungár, A. Borbély: The effect of dislocation contrast on X-ray line broadening: a new approach to line profile analysis. *Applied Physics Letters* 69 (1996) 3173–3175.
2. T. Ungár, G. Tichy: The effect of dislocation contrast on X-ray line profiles in untextured polycrystals. *Physica Status Solidi A* 147 (1999) 425–434.
3. T. Ungár, P. Martinetto, G. Ribárik, E. Dooryhée, Ph. Walter, M. Anne: Revealing the powdering methods of black makeup in Ancient Egypt by fitting microstructure based Fourier coefficients to whole X-ray diffraction profiles of galena. *Journal of Applied Physics* 91 (2002) 2455–2465.
4. P. Cordier, T. Ungár, L. Zsoldos, G. Tichy: Dislocations creep in MgSiO₃ perovskite at conditions of the Earth's uppermost lower mantle. *Nature* 428 (2004) 837–840.

TISZA LÁSZLÓ ÉS A SZUPERFOLYÉKONYSÁG ELMÉLETE

Geszi Tamás

ELTE, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

Ez az előadás¹ történeti áttekintést kíván adni a százéves *Tisza László* munkásságának legismertebb részéről: a híres kétfolyadékos modell létrehozásáról, amely azóta a folyékony hélium fizikájának maradó és megkerülhetetlen keretét jelenti. Az áttekintésben Tisza Lászlóval öt évvel ezelőtt a Gellért-szállóban készített és a *Természet Világában* megjelent riportom, valamint *Frenkel Andornak* az idén, ugyanott megjelent, sokkal részletesebb riportorozata jelentette a kiindulást. A részletek kibogozásában három nem régen megjelent összefoglaló cikkre [1–3] támaszkodhattam.

Az előzmények

A héliumot először *Heike Kamerlingh Onnes* cseppfolyósította 1908-ban, Leiden egyetemén, a Joule–Thomson-effektus felhasználásával. Ettől kezdve a cseppfolyós hélium több mint húsz évig csak a nagyon alacsony hőmérsékletek előállításának eszközeként szerepelt. Segítségével fedezte fel 1911-ben Kamerlingh Onnes a fémek szupravezetését is. (Az „anyag alacsony hőmérsékleten mutatott tulajdonságainak tanulmányozásáért” 1913-ban Nobel-díjat kapott.)

Hogy a folyékony hélium maga is varázslatos és meglepő jelenségekben gazdag tárgya a fizikának, az jóval később kezdett kiderülni. 1926-ban közölte Kamerlingh Onnes tanítványa, az ugyancsak Leidenben („a világ leghidegebb helyén”) dolgozó *Willem Hendrik Keesom* az első fázisdiagramot, amely azt mutatta, hogy a hélium a legalacsonyabb hőmérsékleteken sem fagy meg, csak igen nagy nyomás alatt. Ugyancsak ő tette 1930-ban azt a korszakos felfedezést, hogy a folyékony halmazállapoton belül, 2,17 K hőmérsékleten fázisátalakulás történik, amit a fajhőnek a görög λ betűre emlékeztető éles csúcsa jelez. Keesom nevezte el az átalakulás helyét λ -pontnak, a melegebb oldalon levő folyadékot hélium-I-nek, a hidegebb oldalon levőt hélium-II-nek. Ez utóbbinak különleges tulajdonságairól szól történetünk.

1935 körül irányult a figyelem a hélium-II furcsa viselkedésére, amely egyrészt a hőmérséklettel meredeken csökkent, másrészt függni látszott a mérőberendezés geometriájától. Addigra Leiden mellett még két laboratóriumban indultak meg a vizsgálatok: a kanadai Torontóban, valamint Cambridge-ben is, ahol a zseniális fiatal orosz fizikus, *Pjotr Kapica* 1929 óta vendégkutatóként működött. Atyái támogatója, *Rutherford* közvetítésével felépítette a Mond-laboratóriumot (*Mond* a szponzor neve), ahol Kapica nagy mérnöki fantáziával új alapokra helyezte és ipari méretekig fokozta a hélium cseppfolyósítását. 1934-ben Kapicát hazahívták a Szovjetunióba, és onnan már nem engedték vissza cambridge-i labora-

¹ Elhangzott a Magyar Tudományos Akadémián 2007. október 16-án, a Tisza László századik születésnapja alkalmából tartott ünnepi ülésen.

tóriumába. Volt azért egy megoldás – másnak egy sem lett volna, de neki sikerült: személyes kapcsolatot talált *Sztálin*nal, és ezen keresztül elérte, hogy Moszkvában újra felépíthesse az elveszett laboratóriumot, benne új munkatársakkal – köztük volt *Landau* is. Ettől kezdve Kapica, valamint a cambridge-i Mond-laboratóriumba az ő helyére Torontóból meghívott kutatók, *Allen* és *Misener* egymással versenyezve, lényegében függetlenül, 1937-ben ismerték fel és 1938 elején publikálták a hélium-II legfontosabb tulajdonságát: azt, hogy a folyadék vékony kapillárison vagy összepréselt felületek közötti szűk résen sűrűlőds nélkül áramlik át (ezt Kapica nevezte el *szuperfolyékonyságnak*, a szupravezetés mintájára). Csak később lett világossá, hogy ez nemcsak a viszkozitás eltűnését, hanem a fallal való sűrűlőds teljes hiányát is jelenti. Ugyanez a folyadék viszont a belemerített lengő-forgó tárgyak (hengerek, korongok, lapátok) mozgását véges, jól mérhető viszkozitással csillapítja!

Ha a felfedezést a két csoport függetlenül tette is, a publikációba egy kis szépséghiba csúszott: Allen és Misener tudomást szerzett Kapica beküldött cikkéről, és ezután küldte be a magáét. Ez lehet az oka, hogy csak negyven évvel később adtak a felfedezésért Nobel-díjat, akkor is csak Kapicának.

A szuperfolyékonyság és a kétféle viszkozitás mellett más érdekes tulajdonságai is kiderültek a hélium-II-nek: ezek legtöbbször a „termomechanikai effektus” gyűjtőnév alá lehet besorolni, és a melegítéskor fellépő nyomásváltozásra vezethetők vissza.

A szuperfolyékonyság és a kétfolyadék-modell

A λ -pont alá hűtött hélium különös tulajdonságainak magyarázata felé az első jelentékeny lépést a Párizsban élő *Fritz London* tette meg. Ő azt ismerte fel, hogy a folyékony hélium könnyű atomjait a kvantummechanika által kikényszerített kinetikus energia akadályozza meg a kristályosodással járó lokalizációban. A delokalizált atomok sokaságán viszont a megfigyelt rejtélyes fázisátmenet kapcsolódhat a Bose–Einstein-kondenzációhoz: ahhoz az elképzeléshez, hogy egész spinű atomok (ilyen a hélium leggyakoribb, 4-es izotópja is) sokaságából egy adott hőmérsékleten kiválik egy 0 impulzusú „kondenzátum”, miközben az atomoknak egy – a további hűtéssel csökkenő – hányada továbbra is gerjesztett, véges sebességgel mozgó állapotban marad. Ez a kondenzáció azonban – a vízgőz kicsapódásától eltérően – az *impulzustérben* történik; a közönséges térben nézve a kondenzátum és a gerjesztett atomok ugyanazt a helyet töltik ki.

London felfrissítette *Einstein* vázlatos számításait, kiszámította az átalakulás hőmérsékletét a héliumatomok tömegére és a folyékony hélium sűrűségére, és azt kapta, hogy ez a hőmérséklet 3 K körül van: olyan közel a hélium 2,17 K-es átalakulásához, hogy az ember hinni kezd: ez nem lehet véletlen.

1937-ben a Landau harkovi iskoláját megjárta, tehetséges kezdő fizikus Tisza László Párizsba került, és a már sikeres, elismert *Fritz London*nal rendszeres,

nagy beszélgetésekben tervezték jövőbeli közös munkájukat. 1938 elején megjelent Kapica cikke a szuperfolyékonyság felfedezéséről, és a beszélgető partnerek aznap este megéreztek, hogy rajtuk a lépés sora. *Fritz London* számára az új jelenségek új kihívást jelentettek, hogy egy lelkes fiatal segítővel megerősítve, alapos kutatómunkával derítse fel a kapcsolatot az általa felismert Bose–Einstein-kondenzációs vonallal.

Tisza számára az estét követő álmatlan éjszaka a felismerés ideje volt. A kulcs a kétféle viszkozitás, és *London* elképzeléseiben adott ennek hordozója is: a Bose–Einstein-kondenzátum az, ami résen-kapillárison akadálytalanul átsiklik, és a gerjesztett atomokból álló gáz az, ami a forgó-lengő korongok mozgását viszkozitásával csillapítja. A kettő, mint *két folyadék*, ugyanazon a helyen van, de nem mint egy keverék, hanem függetlenül mozognak, kétféle sebességgel, kétféle viszkozitással. Másnap reggel Tisza boldogan kereste *London*t, hogy elmondja, mire jutott az éjszaka, és várta az örömteli elismerést.

Fritz London tajtékzott a haragtól. Ilyet nem lehet csinálni, ez megcsúfolása az ő komoly programjának, az egy helyen kétféle mozgó két folyadék képe abszurd. Az együttműködés terve ködbe foszlott, Tisza László magára maradt gondolataival jó két évre; ezalatt kidolgozta és publikálta azt, amit máig is a *Tisza-féle kétfolyadékos modellnek* nevezünk, és azt is, ami ennek melléktermékeként gyorsan kihullt az idő rostáján [4]. Ami kihullott, az az ő nagy fájdalma volt, ami fennmaradt, az a fizika nagy szerencséje.

A kétfolyadékos modell sajátosan csatolt hidrodinamikai egyenletrendszerként jelent a tudathasadásos hélium viselkedésében megmutatkozó „két folyadék” (mai nyelven: *normál* és *szuperfolyékony* komponens) sűrűségére és áramsűrűségére, valamint a csak a „normál” komponens által hordozott entrópiásűrűségre és entrópiaáram-sűrűségre. Ez utóbbit hőmérvél lehet mérni. Erre vonatkozik Tisza László leglátványosabb felfedezése is: az egyenletrendszer megoldásából rájött, hogy a közönséges hanghullámok mellett a folyékony héliumban terjedhet egy „termikus hang” is (mai nyelven: *második hang*), amelyben a hőmérséklet inhomogenitása terjed hullámszerűen, nem pedig diffúziószerűen, mint a közönséges anyagoknál megismert hővezetés.

Az első két év

A háború éveit következtek, Cambridge-ben lényegében leállt a tudományos kutatás, de Moszkvában folytatódott, amíg lehetett. Kapica egy fiatal tanítványa, *Peskov* kitalálta a módját, hogy megfigyelje a második hangot, és megmérte a sebességét is, egyelőre korlátozott hőmérsékleti tartományban. Tisza boldog volt, és *Fritz London* is megbékélt a látványos megerősítés nyomán.

Kapicához csatlakozott – rémálomszerű közjátékok után – *Landau* is, aki a közvetlen közelében zajló kí-

sérletek magyarázatát sok tekintetben másképpen látta. Átvette (vagy újra kitalálta: ezt már sohase fogjuk megtudni) a kétfolyadékos modellt, de a hozzá tartozó London–Tisza-féle mikroszkopikus magyarázatot nem fogadta el, mondván, hogy egy olyan erősen kölcsönható folyadékban, mint a hélium, nem létezhetnek a Bose–Einstein-kondenzátum mellett szabadon mozgó gerjesztett atomok. Az alacsony hőmérsékleten végzett fajhőmérések egyértelműen rámutattak, hogy a legalacsonyabb energiájú „elemi gerjesztések” (ez a kifejezés is Landautól származik) hanghullámok kvantumai, amelyeket a „foton” szó mintájára *fononnak* nevezett el.

Ez váratlan élességgel világította meg a kapillárisan átfolyó hélium szuperfolyékonyságának valódi okát. Üljünk bele az áramló folyadék koordinátarendszerébe: a kapilláris visszafelé mozgó fala csak úgy tud impulzust átadni a folyadéknak és ezáltal csillapítani az áramlását, ha a folyadékban terjedő fononokat sugároz ki az áramlással ellentétes irányba. Ehhez a kisugárzáshoz azonban az kell, hogy a fal és a folyadék egymáshoz képest legalább a hang sebességével mozogjon!² Hangsebességnél lassabb kapillárisáramlás a fal nem tud csillapítani: nincs viszkózitás.

Ebben a gondolatkörben a kétfolyadékos modell „normál” komponensét nem egyes gerjesztett atomok alkotják, hanem a fononokból álló gáz, amely impulzust szállít, és viszkózus erőt tud létrehozni.

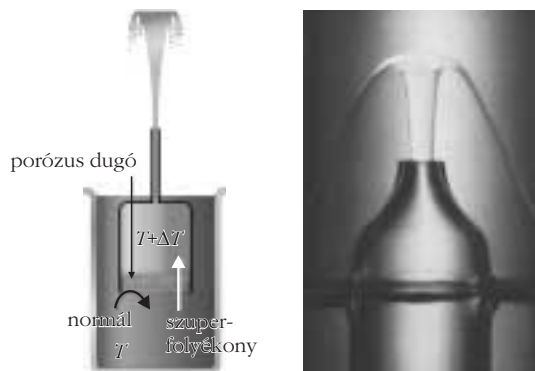
Annak, hogy az alacsony energiájú gerjesztések nem egyes atomok, hanem hangsebességgel mozgó fononok, közvetlen következménye, hogy a második vagy termikus hang sebességének hőmérséklet-függése eltér a Tisza által megjósolttól: a hőmérséklet csökkenésével nem nullához, hanem véges értékhez tart. A döntő kísérlethez mélyebbre kellett menni a hőmérséklettel. Ez Peskovnak már csak a háború elmúltával sikerült, és az eredmények Landau elméleti jóslatát erősítették meg.

Epilógus

A folyékony héliumból és a hozzá szorosan kapcsolódó szupravezetésből nagy fizika nőtt ki. Egy-két önállóan kiemelt fordulópont:

- *Bogoljubov* megmutatta, hogy a gyengén kölcsönható Bose-gáz modelljében valóban a Landau által posztulálthoz hasonló, fonon-szerű elemi gerjesztések lépnek fel. Ez volt talán a legfontosabb gyökere annak az óriási fellendülésnek, amely a *soktest-elmélet* néven ismert elméleti fizikai kultúra kialakulásához vezetett, és mindenekelőtt a szilárdtestfizika tudományát teljesen új alapokra helyezte. Magyarországon két nagy iskolája alakult ki a soktest-elméletnek, *Szépfaussy Péter*, illetve *Zawadowski Alfréd* körül. Mindkettő jelentős eredményekkel járult hozzá a szuperfolyékony hélium fizikájához is.

² Ezzel kapcsolatban emlékezzen vissza a Cserenkov-sugárzásra, aki tudja, mi az.



A szökőkút-effektus

- *Oliver Penrose* és *Lars Onsager* rájött, hogy mi módon definiálható a kölcsönható Bose-kondenzátum hullámfüggvénye, amely a szuperfolyékony hélium egyfajta „nemdiagonális hosszútávú rendjét” írja le, és ezáltal a λ -pont fázisátmenetében a rendparaméter szerepét tölti be.

- Neutronszórással meg lehetett határozni a fonongerjesztések diszperziós függvényét, benne a Landau által felismert roton-minimummal.

- *Feynman* felismerte, hogy a kölcsönható Bose-kondenzátumban kvantált örvények (*vortexek*) keletkezhetnek; ezt később számos kísérlet igazolta. Hasonló kvantált örvények fontos szerephez jutnak a fémek szupravezetőkben is, amit *Abrikoszov* ismert fel, Feynmantól függetlenül.

- Jóval később, az 1990-es évek közepén sikerült megvalósítani csapdázott hideg gázok Bose–Einstein-kondenzációját. Ez – a sűrű folyékony héliumtól eltérően – gyengén kölcsönható rendszer, amelyen kiváltképpen működnek a soktest-elmélet évtizedekkel előbb kidolgozott módszerei.

Tisza László önkéntes elhatározással kimaradt ebből a fejlődésből. Kutatói energiáit a termodinamikában kamatoztatta. Ennek nyilvánvaló oka az a megrázkódtatás volt, amely a kétfolyadékos modellhez fűzött mikroszkopikus magyarázatának kudarcával érte. Visszatekintve, a kétfolyadékos modell az elméleti fizika ragyogó sikere és maradandó eredménye. A folyékony hélium tulajdonságait ma is ezen, a jelenségekhez tökéletesen igazodó nyelven írjuk le, és hogy ezt felismerni mekkora tett volt, arra máig érvényes bizonyíték Fritz London megdöbbenése azon a bizonyos reggelen.

A szuperfolyékonyság kutatásának korai évei után Tisza László csak egyszer szólalt meg a témában: ő volt az első, aki Landaut Nobel-díjra javasolta.

Jó egészséget kívánva nagyhírű hazánkfiának, ezzel zárom az ünnepi megemlékezést a százéves Tisza László történelmi súlyú felfedezéséről.

Irodalom

1. Griffin, in: *Bose–Einstein Condensation in Atomic Gases*. (eds. M. Inguscio, S. Stringari, C. Wieman) IOS Press, Amsterdam, 1999, 1.
2. K. Gavroglu, *Physics in Perspective* 3 (2001) 165.
3. S. Balibar, *Journal of Low Temperature Physics* 146 (2007) 441.
4. L. Tisza, *Nature* 141 (1938) 913; *C. R. Acad. Sci.* 207 (1938) 1035, 1186; *Journal de Physique et le Radium* 1 (1940) 164, 350.