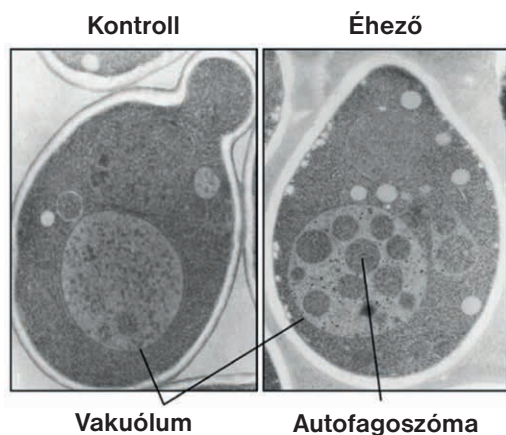




a vad típusú (normál) sejtekhez képest. További vizsgálatok során leírta azt a 15 gént, amely szükséges az autofágia aktivációjáért eukarióta sejten.



Az éheztetett sejtek vakuólumaiban megnőtt az autofagoszóma száma

Az Oszumi professzor által elindított vizsgálatokra alapozva jelenleg a genetikai nevezéktanban az autofágiai géneire az ATG1 stb. rövidítéseket használják. Az autofágiáért felelős gének és a kódolt fehérjék ismerete lehetővé teszi, hogy csillapításukkal funkcionális vizsgálatok készülhessenek. Az egyes géncsoportok az autofágia más-más lépését szabályozzák, ezért károsodásuk vagy kiesésük ennek megfelelően manifesztálódik. Ezeknek a molekuláris mechanizmusoknak a tisztázása segít az autofágia szerepét és jelentőségét felfedni a sejtek élettani és a patofiziológiai állapotaiban. Az autofágia alapvető szerepet játszik az embrionális fejlődés egyes szakaszaiban, többek között a sejtek differenciálódásában. Ezt a folyamatot fejlődési autofágiának nevezik, melynek működési zavarai szoros összefüggésben vannak egyes fejlődési rendellenességek kialakulásával. Mivel az autofágia mechanizmusának és/vagy szabályozásának megbomlása közvetlen vagy közvetett módon több betegség kialakulásában részt vesz, ezért a benne részt vevő gének érdekes és értékes terápiás célpontok lehetnek. Az autofágia rendkívül fontos a sejtek életében: a már differenciálódott sejtek általa maradhatnak vi-

szonylag sokáig életképesek. Ha az autofág rendszer jól működik, egy sejt hónapokig vagy évekig is fiziológiásan funkcionál – ismeretes, hogy az idegsejtek akár évtizedekig is élhetnek. Tehát a sejtek „önmésző” képessége és a lebontott molekulák újrahasznosítása kulcsfontosságú a szervezet működőképessége szempontjából. A sejteket felépítő (szintetikus) és lebontó (katabolikus) folyamatainak egyensúlyát fenntartó, alapszinten zajló folyamat a háztartási autofágia elnevezést kapta.

Az autofágia aktiválható számos fizikai és kémiai behatással (pl. hőstressz vagy növényi alkaloidok). Az indukálható autofágia során a sejt elsősorban a sejtet károsító hatásokra (stresszorokra) reagál. A különböző stressz-szituációkra történő gyors autofágiás válaszreakció alátámasztja a mechanizmus sejtvédő (citoprotektív) hatását. Egyes neurodegeneratív betegségekben megfigyelték a kóros fehérjék felhalmozódását a központi idegrendszerben. Ennek oka, hogy a kóros szerkezetű fehérjeaggregátumokat a sejt nem képes lebontani, valószínűleg a nem megfelelően működő autofágia miatt. A károsodott autofágiás képesség ezenkívül összefüggésbe hozható egyéb malignus kórképek kialakulásával, diabétesz mellitusszal, az anémia bizonyos formáival, kardiomiopátiával, valamint az öregedéssel is.

Az autofágia kutatása az elmúlt három évtizedben különleges figyelmet kapott az élettudományok területén. A magyar tudósok is jelentős szerepet játszottak és játszanak új mechanizmusok tisztázásában. Több évtizedes a tudományterületen az ELTE Állatszervezettani Tanszékén Sass Miklós professzor munkássága. Magyar kutatók mutatták ki például azt, hogy az öregedési folyamatban központi szerepet tölt be az autofágia. Az élettartam növelésében szerepet játszó szinte mindegyik gén az autofág rendszeren keresztül fejti ki hatását. Vellai Tibor, az ELTE Genetikai Tanszékének vezetője két közös tanulmányt jegyez Josinori Oszumival. Szegeden az MTA Biológiai Kutatóközpontjában, az MTA Lendület-program keretében, Juhász Gábor kutatócsoportja végez nemzetközi mércével mérve is magas színvonalú kutatásokat.

IRODALOM

www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2016/advanced-medicineprize2016.pdf
www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2016/press.pdf
www.szbk.u-szeged.hu/gen_drosophila_autophagy.php

Iglói Ferenc

■ MTA Wigner FK SZFI és SZTE Elméleti Fizika Tanszék

A 2016. évi fizikai Nobel-díj

A topológia szerepe a szilárdtestfizikában

A Svéd Királyi Tudományos Akadémia a 2016. évi fizikai Nobel-díjat David J. Thoulessnek (Washingtoni Egyetem, Seattle), F. Duncan M. Haldane-nek (Princetoni Egyetem) és J. Michael Kosterlitznek (Brown Egyetem, Providence) ítélte oda „A topológiai fázisátalakulással és az anyag topológiai fázisaival kapcsolatos elméleti felfedezéseirért”. A díjazott eredmények a múlt század 70-es, 80-as éveiben születtek, és közvetve az anyag szerkezetével kapcsolatos alapvető elképzeléseinket tágtították ki, ami paradigmaváltáshoz vezetett a szilárdtestfizikában és az anyagtudományban. Az utóbbi évtizedben robbanásszerűen az érdeklő-

dés homlokterébe kerültek a topológia szerepével kapcsolatos kísérleti és elméleti vizsgálatok, melyek reményeink szerint közelebb visznek a kvantumszámítógépek megvalósításához is.

A Nobel-bizottság méltatása szerint Kosterlitz és Thouless a 70-es évek elején kétdimenziós, planáris spinrendszerekben és szupravezetőkben új típusú vortex (örvényszerű) gerjesztéseket fedezett fel. Ezek a vortexek a valós térben csavarodási számmal (angolul: winding number) jellemezhetőek. Kvantumos rendszerek alacsony hőmérsékleti viselkedésében a topologikus fázisok jellemzésénél hasonló csavarodási számok jelennek meg, de ez-



A 2016. évi fizikai Nobel-díjasok: David J. Thouless, F. Duncan M. Haldane és J. Michael Kosterlitz

úttal az állapotok kvázi-impulzussal leírt terében. A Nobel-bizottság méltatta Thoulessnek és munkatársainak 1982-ben publikált úttörő eredményeit, melyek a szilárdtestek sávszerkezetében az impulzustérben fellépő csavaradási számokat más fizikai jellemzők kvantált, azaz diszkrét viselkedésével kötötte össze. Először alkalmazták az elméletet a kvantum Hall-effektus magyarázatára használták, ahol a kétdimenziós elektrongázban erős merőleges mágneses tér jelenlétében a Hall-vezetőképesség nagy pontossággal mérhető diszkrét értéket vesz fel. Haldane egy 1988-ban írt munkájában rámutatott arra, hogy hasonló viselkedés jóval általánosabb körülmények között, mágneses tér nélkül is megvalósulhat; ezeket a rendszereket Chern-féle szigetelőknak hívjuk. A Nobel-bizottság méltatta Haldane 1983-as kvantum spinlancokra vonatkozó úttörő eredményeit is, melyek szerint egész értékű spinváltozók és antiferromágneses csatolás esetén ezen rendszerek az anyag szimmetria által védett topologikus fázisát valósítják meg.

Topológia a fázisátalakulásokban

A topológia fontosságát Kosterlitz és Thouless a kétdimenziós XY-modell statisztikai mechanikai vizsgálatok ismerte fel [1, 2]. Ez a modell a d dimenziós, n komponensű (spin)változós és teljes forgási szimmetriát mutató kölcsönhatású rendszerek speciális esetét képviseli, ahol $d = 2$ és $n = 2$. Ezen rendszerek esetén egy magas hőmérsékleti, forgási szimmetrikus fázis és egy alacsony hőmérsékleti fázis található, ahol a spinek közös irányba mutatnak, és így itt a forgási szimmetria sérül. A rendszerbeli fázisátalakulás, a renormálási csoport- (RCS) elmélet szerint csak a releváns változóktól, így d -től és n -től függhet (rövid hatótávolságú kölcsönhatás esetén), de a mikroszkopikus paraméterek irrelevánsak a jellemző univerzális viselkedés meghatározásában. Így a kétdimenziós XY-modell a vékony rétegekben megvalósuló szupravezetők vagy szuperfolyadékok fázisátalakulásának leírására is használható, ahol a spinváltozó szerepét a hullámfüggvény (komplex számmal leírt) fázisa játssza.

Kosterlitz és Thouless az XY-modellben új típusú, topologikus jellegű gerjesztést fedezett fel, melyet a szuperfolyékonyság példájából véve vortexnek nevezett el. A vortex térben lokalizált gerjesztés, mely a csavardiszlókációra emlékeztet. Ha a vortex magja körül egy zárt görbén a spinek elfordulásait felösszegezzük, akkor egy vagy több teljes fordulatot kapunk, melyet a megfelelő előjellel együtt csavaradási számnak hívunk. A gerjesztés topologikus jellegét az mutatja, hogy nem lehet a rendszerből a vortexet úgy eltávolítani, hogy a spinek értékét a térben folytonosan változtatjuk.

Néhány évvel korábban, 1966-ban Mermin és Wagner egzakt számolással megmutatta, hogy két dimenzióban folytonos szim-

metriacsoporttal jellemzett modell esetén, ilyen az XY-modell is, nem történhet spontán szimmetriasértés, azaz nincs a rendszerben rendezett fázis. Ez azt jelenti, hogy véges hőmérsékleten a rendszerben fellépő hőmérsékleti fluktuációkkal szemben a ferromágneses fázis instabil. Ennek ellenére numerikus eredmények az XY-modellben fázisátalakulásra jellemző kritikus szingularitások jelenlétét mutatták. Kosterlitz és Thouless a fázisátalakulást a vortexek segítségével magyarázta meg. Az alacsony hőmérsékleti fázist vortex-antivortex párok kötött állapotai valósítják meg, ahol az antivortexek ellentétes előjelű csavaradási számmal rendelkeznek. A fázisátalakulás során a párok felszakadnak, és a vortexek a magas hőmérsékleti fázisban szabad gázként mozognak. A manapság KT-átalakulásként ismert fázisátalakulás különleges jellemzőkkel bír: a szabadenergia nagyon gyenge, ún. lényeges szingularitást mutat, míg a szuszceptibilitás minden hatványfüggvénynél gyorsabban divergál.

Az átalakulás tulajdonságait a Kosterlitz által felírt RCS-elmélet keretében lehetett jobban megérteni [3]. Az RCS-transzformáció során a hosszúságskálát változtatjuk, és vizsgáljuk, hogy az milyen hatással van a rendszert leíró paraméterek (pl. a kölcsönhatás és a külső mágneses tér erőssége) értékére. A transzformáció fix pontjaiban az RCS skálainvariáns viselkedésű, és ezek a fix pontok folytonos fázisátalakulásoknak felelnek meg. Ezzel szemben a KT-átalakulás esetén a teljes alacsony hőmérsékleti fázis skálainvariáns viselkedésű, azaz azt egy fix pontokból álló vonallal lehet jellemezni. Így a rendszer a teljes alacsony hőmérsékleti fázisban kritikus viselkedésű, és nem rendelkezik ferromágneses renddel, mely összhangban áll a Mermin–Wagner-tétellel. Kísérletekben KT-átalakulást vékony szuperfolyékony filmekben és vékony szupravezető rétegekben találtak. Ugyancsak KT-átalakulást lehet látni a kristályok egyensúlyi alakjában, amikor a hőmérsékleti fluktuációk hatására az éles felületek eltűnnek.

Az anyag topologikus fázisai

Thouless következő fontos hozzájárulása a topológia szerepének tisztázásában a kvantum Hall-effektus értelmezése volt: azt mutatta meg, hogy a KT-átalakuláshoz hasonlóan a kvantum Hall-effektusnál is olyan újfajta fázisátalakulásról (átalakulások sorozatáról) van szó, amelyek megértéséhez a Landau-paradigma nem elég: szimmetriasértés nincsen, hanem a topológiára van szükség.

A kvantum Hall-effektust kísérletileg Klaus von Klitzing fedezte fel 1980-ban, amikor egy félvezető felületén kialakított kétdimenziós elektrongáz vezetési tulajdonságait erős merőleges mágneses térben vizsgálta. Eredményei szerint a Hall-vezetőképesség az elemi töltéssel és a Planck-állandóval leírható, élesen meghatározott értékeket vesz fel és az egyes platókon mért értékek relatív hibája rendkívül kicsi $1:10^9$. Thouless és munkatársai értelmezése szerint [4] a kvantum Hall-effektus kulcsa, hogy a mágneses tér az anyag tömbi részének topológiáját módosítja. Ha a mágneses tér olyan nagy, hogy minden elemi cellára az elemi fluxuskvantum racionális hányada esik, a teret és a kristályrács potenciálját egyszerre kell figyelembe venni egy nagyobb mágneses elemi cella bevezetésével. A nagyobb elemi cella miatt az eredeti energiasávok alsávokra esnek szét, melyeket alenergia-rek választanak el egymástól. A lineáris válaszelmélet formalizmusában végrehajtott számolásai szerint a kvantum Hall-vezetőképesség a külső tér változtatásakor valóban diszkrét platóhoz rendelhető, és ezek értékei a szilárdtestek sávszerkezeté-



ben az impulzustérben fellépő csavarodási számokkal kapcsolatosak.

Haldane esetén a Nobel-bizottság indoklása a díjazott két 1983-ban írt munkáját emeli ki, melyek az antiferromágneses Heisenberg- (AFH) spinlánc alacsony energiás gerjesztéseinek vizsgálatával foglalkoznak [5, 6]. Egzakt eredmények szerint az $S = 1/2$ -es modellben a gerjesztésekben az energiárés eltűnik, és hasonló igaz a klasszikus határesetet jelentő $S \rightarrow \infty$ modellre is. Tetszőleges S értékre ugyan eredmények nem voltak, mégis a nyolcvanas évek elejéig általánosan elfogadott nézet volt, hogy az energiárés nélküli viselkedés S -től függetlenül teljesül.

Haldane korszakos, új eredményeket hozó munkáiban a fenti problémát nagy S értékekre térelméleti módszerekkel vizsgálta [5, 6]. Először megmutatta, hogy a modell alacsony energiás gerjesztéseit egy, a térelméletben ismert rendszerrel, az ún. nemlineáris szigma-modellel lehet leírni, melyet egy új topologikus taggal egészített ki. Ez a tag a rendszer kvantumos állapotának a két-dimenziós téridőben mutatott topológiájától függ, és csavarodási számmal jellemezhető. Végeredményben egész értékű S -re véges energiárés, félegész spinek esetén eltűnő energiárés adódott.

A maga idejében ez váratlan és meglepő jóslat volt, de a későbbiekben végzett elméleti vizsgálatok és kísérleti mérések is teljes mértékben igazolták. Az $S = 1$ spinű AFH-lánokban megfigyelt Haldane-fázis az anyag szimmetria által védett topologikus fázisainak prototípusát jelenti. Szemléletes közelítésként az $S = 1$ -es spineket két $S = 1/2$ -es kompozit spinrel fejezhetjük ki, mely rendszerben az energiárés valóban véges értékű. Továbbá nyitott határfeltétel esetén a lánc két végén $S = 1/2$ -es spin szabadsági fokok maradnak, melyek között a láncmérettel exponenciálisan csökkenő kölcsönhatás ébred. Ez a topologikus gerjesztések iskolapéldája.

Újabb fejlemények

Az utóbbi évtizedben az anyag számos lehetséges topologikus fázisát sikerült azonosítani, melyek a rendszerek dimenziójában és a fellépő szimmetria típusában (részecske-lyuk vagy időtükrözési) különböznek egymástól. Az időtükrözési szimmetria megmaradása bizonyos topologikus fázisok védelmét eredményezi szigetelőanyagok esetén. Két dimenzióban az ilyen körülmények között létrejövő jelenséget kvantum spin Hall-effektusnak hívjuk. Három dimenzióban a topologikus szigetelők létét először elméletileg jóslták meg, majd kísérletekben is megfigyelték. Ezen rendszerekben az élállapotok energiárés nélküli felületi állapo-

toknak felelnek meg, melyek transzporttulajdonságai sok szempontból a valódi kétdimenziós vezetőkre (pl. grafén) emlékeztetnek, ugyanakkor a részletekben számos fontos különbséget is mutatnak.

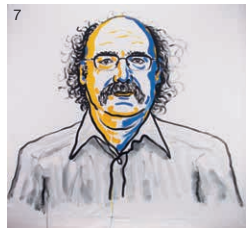
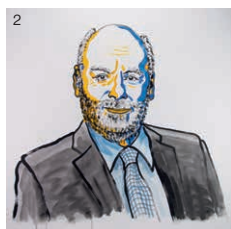
Az alacsony dimenziós kvantumrendszerekben fellépő topologikus rendeződéssel kapcsolatban talán a leglátványosabb jelenség a nem-ábéli statisztikájú topologikus gerjesztésekhez kapcsolódik. Ezen gerjesztések olyan kvázi-részecskének felelnek meg, melyek felcserélés esetén sem a bozonok, sem a fermionok esetén érvényes (szimmetrikus, ill. antiszimmetrikus) szabályt nem követik, hanem egy annál általánosabb, ún. anyon statisztika érvényes rájuk. A nem-ábéli anyonok legegyszerűbb formáját az ún. Majorana zéró módusok jelentik, de bonyolultabb nem-ábéli anyon-gerjesztéseket is leírtak és osztályoztak már. Talán a legegyszerűbb rendszerek, ahol Majorana zéró módusok felléptét várják, olyan kvantumdrótok, melyeket félvezetőkből (pl. InSb-ből) növesztettek, és erős mágneses térben szupravezetőkkel proximitizáltak. A témát övező felfokozott izgalom annak is köszönhető, hogy a nem-ábéli anyonok a topologikus számolás lehetséges perspektívikus eszközei, amelyek esetén a topológia védi meg a kvantum bitekét a dekoherencia nemkívánatos hatásaitól. Ezen érdekes terület kísérleti szempontból is gyorsan fejlődik. Számos jel mutat arra, hogy az $5/2$ -es értékű törtszámú kvantum Hall-effektusban Majorana zéró módusok találhatók. Speciálisan kialakított kvantumdrótok esetén már sikerült a Majorana zéró módusokra utaló jelzéseket találni. A nem-ábéli statisztikájukat vizsgáló további kísérletek gőzerővel folynak. ●●●

Köszönetnyilvánítás. A szerzőt munkájában az NKFIH és az OTKA a K109577 és a K115959 pályázatok keretében támogatta. Köszönetet mondok Asbóth Jánosnak a hasznos diskuszióikért.

IRODALOM

- [1] J. M. Kosterlitz and D. J. Thouless, Long range order and metastability in two dimensional solids and superfluids. (Application of dislocation theory). Journal of Physics C: Solid State Physics (1972) 5, L124.
- [2] J. M. Kosterlitz and D. J. Thouless, Ordering, metastability and phase transitions in two-dimensional systems. Journal of Physics C: Solid State Physics (1973) 6, 1181.
- [3] J. M. Kosterlitz, The critical properties of the two-dimensional xy model. Journal of Physics C: Solid State Physics (1974) 7, 1046.
- [4] D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale, and M. den Nijs, Quantized Hall conductance in a two-dimensional periodic potential. Physical Review Letters (1982) 49, 405.
- [5] F. D. M. Haldane, Continuum dynamics of the 1-D Heisenberg antiferromagnet: Identification with the $O(3)$ nonlinear sigma model. Physics Letters A (1983) 93, 464.
- [6] F. D. M. Haldane, Nonlinear Field Theory of Large-Spin Heisenberg Antiferromagnets: Semiclassically Quantized Solitons of the One-Dimensional Easy-Axis Néel State. Physical Review Letters (1983) 50, 1153.

Együtt a Nobel-díjasok



Jean-Pierre Sauvage (1), Sir J. Fraser Stoddart (2), Bernard L. Feringa (3), Josinori Ozumi (4), J. Michael Kosterlitz (5), David J. Thouless (6), F. Duncan M. Haldane (7) (illusztráció: Niklas Elmehed © Nobel Media AB 2016)