

vencia határozatlansági reláció miatt minél jobb a rezonátor, vagyis minél élesebb a rezonancia, annál hosszabb idő kell a sokszorosan oda-vissza pattogó fényt rezonáltató állapot felépüléséhez. A tükör mozgására késve felépülő koherens fénypárna nyomása emiatt a mozgó tükör *sebességétől* függ, ami súrlódási erőnek felel meg.

A fékező impulzusátadással, persze, most is jár energiaátadás, de most az energiát a fény veszi fel, ami később a rezonátorból kiszökve segíti az energia kipumpálását. A rezonátor fénypárnája tehát egy hűtőgép hűtőközegének felel meg; a rezgő tükör mindig *hideg fénnel* találkozik. Ezt a mechanizmust több kutatócsoport is használta hűtésre (1. ábra), elméletével is több csoport foglalkozik.

Ezzel párhuzamosan kialakult azonban a rezgő tükrök hűtésének egy másik, lényegesen különböző elven alapuló módszere is. Ez a módszer, amit általában *aktív hűtésnek* neveznek, *Maxwell* démonára emlékeztet. A rezonátorból kiszökő fény gyors információt ad a tükör lassan fluktuáló rezgésének pillanatnyi helyzetéről–sebességéről. Ezt az információt egy elektronikus jelfeldolgozó áramkör arra használja, hogy egy másik lézerek az oszcillátorra irányított fénynyomását mindig éppen a fékezés irányába szabályozza (2. ábra).

Az ízlések különbözők. Az elektronikus szabályozás szakembereit elbűvölő megoldást a fizikusok talán kevésbé érzik elegánsnak, mint a késleltetett fény-

nyomás hideg súrlódását. A verseny pillanatnyi állása azonban az, hogy a rezgő tükrök világrekordját 3 mK hőmérséklettel éppen egy elektronikus szabályozást használó aktív hűtési séma tartja.

A rezgő tükör és a foton összefonódását először felvető cikk [3] konkrét elképzeléseiben hibásnak bizonyult [6], de az elmúlt év során sokat ígérő újabb változatai jelentek meg, amelyek talán több eséllyel foghatnak hozzá a kvantum–klasszikus határ bontogatásához.

A nanomechanikai oszcillátorok és a fotonokat–elektronokat hozzájuk csatoló tükrök, félvezető vagy szupravezető egy-elektron tranzisztorok világa napról-napra új felfedezésekkel kápráztatja el a témára figyelő fizikusokat. A szokatlan pezsgés azt jelzi, sokan komolyan hiszik, hogy ezen a viharosan táguló jelenségkörön keresztül néhány éven belül jobban megismerhetjük a klasszikus–kvantum határ egzotikus vidékét.

Irodalom

1. K.C. Schwab, M.L. Roukes, *Physics Today* 58/7(2005) 36; (letölthető a nano.caltech.edu/publicat.html weboldaltól)
2. D. Rugar, R. Budakian, H.J. Mamin, B.W. Chui, *Nature* 430 (2004) 329.
3. W. Marshall, C. Simon, R. Penrose, D. Bouwmeester, *Phys. Rev. Lett.* 91 (2003) 130401.
4. C. Höhberger-Metzger, K. Karrai, *Nature* 432(2004) 1002.
5. D. Kleckner, D. Bouwmeester, *Nature* 444(2006) 75.
6. J.Zs. Bernád, L. Diósi, T. Geszti, *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 250404.

A DEFORMÁCIÓS ANIZOTRÓPIA DISZLOKÁCIÓS MODELLJE

Ungár Tamás

ELTE Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék

A minket körülvevő világot ezernyi különböző anyag alkotja. Ezeket a legkülönbözőbb módokon próbáljuk azonosítani, jellemezni, rendszerezni. Azt mondjuk, hogy vannak szerves vagy szervesetlen, lágy vagy szilárd, élő vagy élettelen, vagy éppen kristályos vagy üvegszerű anyagok. Az anyagok besorolásának talán legnagyobb mesterei a krisztallográfusok. Ők valamikor 18. században jelentek meg, amikor a felvilágosodás korában a természettudományok is lendületet kaptak. Először csak azt vették észre, hogy a különböző, a természetben található anyagokat, amelyeket ásványoknak nevezünk, legtöbbször jól meghatározott és mindig jellemző módon ismétlődő sík lapok határolják. Ebből már akkor arra következtettek, hogy ezeknek az anyagoknak feltehetően nagyon szabályos, a természet által meghatározott szerkezete kell, hogy legyen. Az ilyen szerkezetet kristályszerke-

zetnek nevezték. Figyelemre méltó, hogy pusztán az ásványi anyagok külső határoló lapjainak megfigyelése alapján, elméleti geometriai és matematikai módszerek segítségével, már az első időkben megteremtették a krisztallográfia alapjait. Ez a tudományág a mai napig is azzal foglalkozik, hogy leírja és meghatározza az anyagok építőköveiben rejlő ismétlődő szabályosságokat, a rácperiodicitást. Itt rácson az anyag építőköveinek rácsát kell értenünk. A 18. századtól mintegy 200 évnek kellett eltelnie, amíg a 20. század első éveiben, több felfedezés szerencsés összjátékának köszönhetően, egyértelműen bizonyítottá vált, hogy

(1) a minket körülvevő anyagok építőkövei atomok és molekulák,

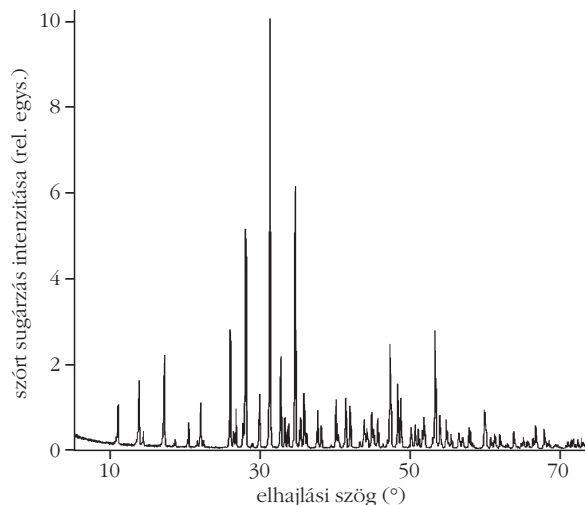
(2) ezeknek az anyagoknak igen jelentős hányada kristályos szerkezetű,

(3) valamint, hogy ezek az anyagok olyan háromdimenziós rácsot alkothatnak, amelyen bizonyos sugárzások ugyanúgy elhajlanak, mint a látható fény az optikai rácson.

A Philadelphiában működő ICDD (International Committee for Diffraction Data, Diffrakciós Adatok Nemzetközi Szervezete) 2007-ben a szerzőnek ítélte a Hanawalt-díjat.

Itt a „bizonyos sugárzások” azt jelenti, hogy a sugárzás hullámhosszának az atomi méretek nagyságrendjébe, vagyis a 0,1 nm-es tartományba vagy attól nem túlságosan távoli tartományba kell esnie. Ettől eltekintve a sugárzás lehet akár elektromágneses vagy részecskesugár, nevezetesen például röntgen-, elektron- vagy neutronsugár. Ezt a felfedezést követően, amiért *Max von Laue* és két munkatársa 1911-ben Nobel-díjat kaptak, megindult az anyagok atomi szerkezetének szisztematikus és átfogó felderítése. Ezt a tudományágat ma is krisztallográfiának nevezzük. A tudományág, természeténél fogva magán hordozza a rendszerezés jellegét, ezért már kezdetben, az 1930-as években kialakult az egyes kutatók közötti nagyfokú szervezetszervezésre való törekvés. Fontossá vált, hogy minden új kristályszerkezet felfedezése vagy meghatározása lehetőleg minél gyorsabban közismertté váljon, egyrészt az ismétlések elkerülése, másrészt a kristályszerkezetek rendszereinek felépítése érdekében. Megalakult a krisztallográfusok nemzetközi szervezete, az *International Union of Crystallographers* (IUCr), valamint létrejött a világ talán első adatbankja, az *International Centre for Diffraction Data* (ICDD), a diffrakciós adatok nemzetközi központja. A philadelphiai (Pennsylvania, USA) központú ICDD ma már több mint 200 000 szerves és szervetlen anyag kristályszerkezetének adatait tartja nyilván, és ezzel a vegyipar, a gyógyszergyártás, az élelmiszeripar, az építőipar, az elektronikaianyag-gyártás és általában az anyagokkal kapcsolatos bármely iparág egyik legnagyobb szolgáltató adatbázisa. Az adatbázisban egy-egy anyag diffrakciós spektrumának összes fontos paraméterét megtaláljuk. A diffrakciós spektrum az anyagmintára ejtett sugárzás (röntgen-, elektron- vagy neutronsugárzás) elhajlási képe. Az 1. és 2. ábra néhány tipikus elhajlási képet (diffrakciós spektrumot, illetve képet) mutat. Ez a két ábra jól szemlélteti, hogy az anyagok röntgendiffrakciós képe milyen kiválóan alkalmas a különböző anyagok azonosítására, hiszen még az amúgy rokon anyagoknak tekinthető két cukor, a tejcukor és a szőlőcukor röntgendiffrakciós képei is gyökeresen különböznek egymástól, nem is beszélve a trikálciumfoszfátról. Azt mondhatjuk, hogy a röntgendiffrakciós kép az anyagok *ujjlenyomata*. Itt jegyezzük meg, hogy a trikálciumfoszfátot a hétköznapi életben úgy ismerjük, mint: E 341, amelyet az élelmiszeripar töltőanyagként, lisztkezelőként, savasság szabályozóként és emulgátorként használ.

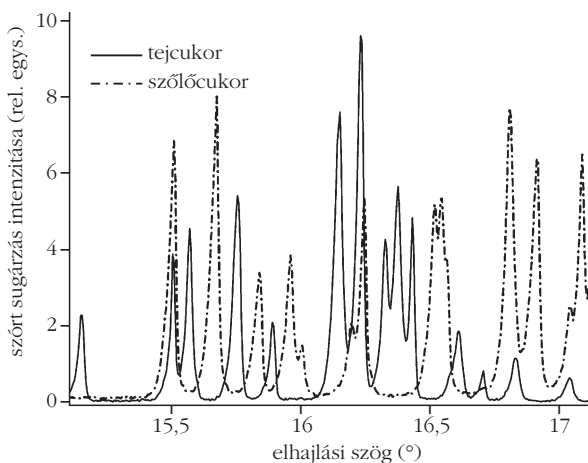
Vegyük most pontosabban szemügyre a röntgendiffrakciós képet. Vizsgáljuk meg a következő konkrét példát. Az ókori egyiptomi sírok számtalan korabeli személyes használati tárgyat tartalmaznak, amelyeket annak idején a halottakkal együtt temettek el. A női sírokból például százával kerültek elő különböző kozmetikumok, többek között mindenféle fiolákban, dobozocskákban, kerámiából vagy nádból készült tartályokban elhelyezett arcfestékek. A párizsi Louvre régészei elhatározták, hogy megpróbálnak utánajárni az ókori egyiptomiak által használt arc- és szemfestékek kémiai összetételének, sőt, ha ez lehetséges, akkor

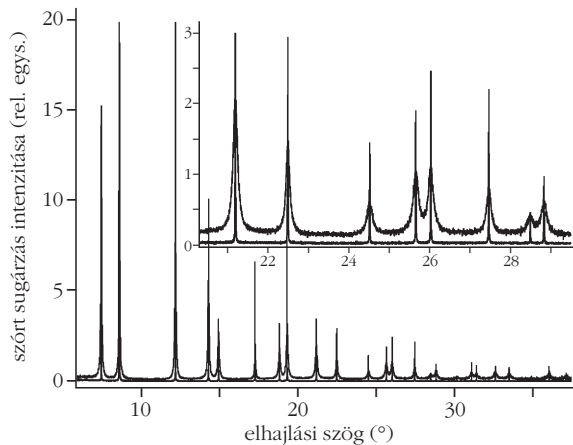


1. ábra. Szintetikusan előállított trikálciumfoszfát, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ röntgendiffrakciós képe. (M. Ermrich, F. Peters, *Z. Kristallogr. Suppl.* 23 (2006) 523–528, engedélyével.)

annak is, hogy a különböző árnyalatú szemfestékeket milyen technológiai eljárásokkal állították elő. Rögtön kiderült, hogy az arcfestékek majd mindegyike két alapvető összetevőt tartalmaz. Az egyik az ólomszulfid, PbS_2 , köznapi nevén galenit, míg a másik az ólomkarbonát, $\text{Pb}(\text{CO}_3)$, másnéven cerruzit. Mindkettő viszonylag stabil, ásványi eredetű vegyület, így a bennük lévő ólom nem jelent közvetlenül mérgező hatást. Míg a galenit fénylő, koromfekete kristályokból áll, addig a cerruzit fehér. A két ásvány megfelelő porítással és keverésével előállítható a teljes fekete-fehér színskála bármely árnyalata. Valószínűleg ez tette ezt a két vegyületet az egyiptomi kozmetikusok számára oly vonzóvá. Itt jegyezzük meg, hogy a galenit számos ázsiai országban, például Indiában ma is kurrens kozmetikai alapanyag. A kozmetikumokban a festékek, jelen esetben a galenit vagy a cerruzit, finom por alakjában vannak jelen úgy, hogy valamilyen olajos hordozóban szuszpenziót alkotnak. A kémiai összetétel meghatározása után a Louvre régészei azt a kérdést tették fel, hogy vajon az ókori egyiptomiak milyen

2. ábra. A tejcukor (glukóz, kihúzott vonal), valamint a szőlőcukor (fruktóz, pont-vonal görbe) röntgendiffrakciós képeinek egy-egy kis részlete.



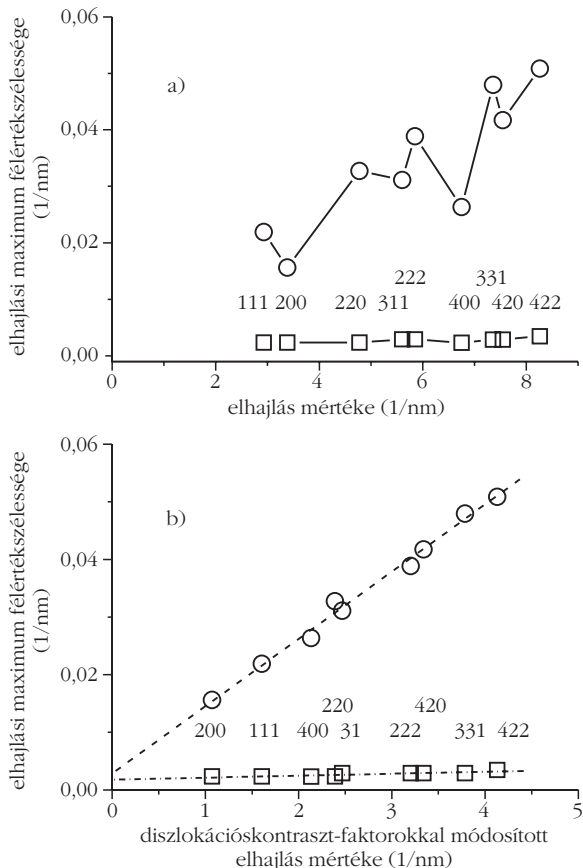


3. ábra. Egy-egy 12 órán át golyós malomban őrölt, illetve ezt követően 800 °C-on 2 órán keresztül hevített galenitminta röntgendiffrakciós képei [3]. Az ábra jobb felső részében a röntgendiffrakciós képek egy-egy részlete nagyítva látható.

módszerekkel állították elő a festékekben használt porokat. Sok forrásmunka utalt arra, hogy a nyers ásványi kristályokat különböző ideig tartó és különböző intenzitású őrléssel porították, majd a szuszpenziókat esetenként hevítették is.

Lássuk, hogy mi történik a galenit röntgendiffrakciós képével, ha őröljük, illetve hevítjük. Ezt mutatja a

4. ábra. A 3. ábrán feltüntetett elhajlási képek maximumainak félértékszélességei az elhajlás mértékének függvényében (a), ugyanezek a félértékszélesség-értékek a diszlokációs kontrasztfaktorokkal módosított elhajlás mértékének (a diffrakciós vektor C faktorokkal módosított abszolút értékének) függvényében (b).



3. ábra, amelyen egy 12 órán át nem túlságosan intenzív őrléssel, illetve az őrlést követően 800 °C-on 2 órán keresztül hevített galenitminta röntgendiffrakciós képei láthatók [3]. A hevített, illetve a csak őrölt minták elhajlási maximumai rendre igen keskenyek, illetve jelentősen kiszélesedettek. Figyelemre méltó, hogy az elhajlási maximumok pozíciói a mérési pontosság határain belül nem változtak meg. Az ábra jobb felső sarkában az egész elhajlási képnek egy részlete azt mutatja, hogy milyen jelentős különbség van a két elhajlási kép között. Az őrlésnek két alapvető hatása van a galenit kristályokra:

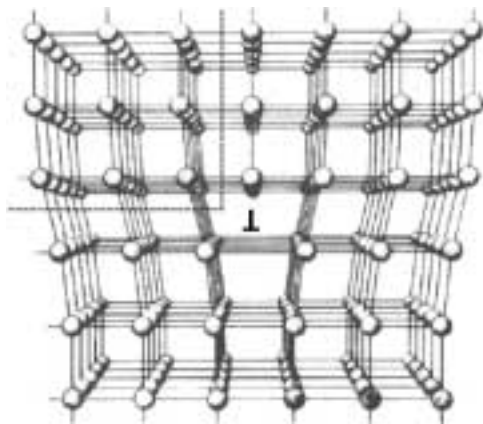
(1) egyrészt a kezdetben nagyméretű, nagyjából tökéletes kristályok elaprózódnak,

(2) másrészt az őrlés okozta mechanikai behatások és az így végbemenő képlékeny alakváltozások nagyszámú kristályhibát, elsősorban diszlokációkat hoznak létre a kristályokban.

Elsősorban ez a két hatás okozza az elhajlási maximumok kiszélesedését. A jelenség, amit a szakzsargon *vonalszélesedésnek* nevez, már nagyon régen ismert, ennek ellenére a mai napig van kutatni való annak felderítésére, hogy milyen kapcsolat van az elhajlási maximumok pontos alakja és az anyag mikroszerkezete között.

Nem könnyű röviden definiálni azt, hogy mi a mikroszerkezet. Legyen itt annyi elég, hogy olyan fizikai tulajdonságok összessége, amelyek lényegesen befolyásolják a konkrét anyagminta vagy anyagdarab felhasználhatóságát. Az itt taglalt galenit esetében mind a milliméter méretű tökéletes kristályok, mind a finomra őrölt mikron méretű porszemcsék anyaga galenit, de mégis, az egyik csak egy ásványdarab, a másik viszont egy kozmetikai alapanyag. A két anyagdarab kémiai azonos, sőt, a kristályszerkezetük is megegyezik, mégis a mikroszerkezetük alapvetően különbözik.

Most térjünk vissza a 3. ábrán látható elhajlási képekhez. A két elhajlási kép közötti minőségi különbséget számszerűen is ki lehet fejezni. Az egyik szokásos eljárás az, hogy meghatározzuk az elhajlási maximumok szélességét a félmaximum magasságában. Ezt nevezzük *félértékszélességnek*. A 4. ábra a két elhajlási kép maximumainak félértékszélességeit mutatja az elhajlás függvényében. Itt röviden meg kell állnunk, mert, bár a mérőberendezés az elhajlást az elhajlási szög függvényében adja meg, mind az elhajlást, mind a maximumok félértékszélességeit a jelenség lényege szempontjából sokkal megfelelőbb mennyiség függvényében írjuk le. Röviden gondoljuk végig, hogy mi is lehet ez a mennyiség. El tudjuk képzelni, hogy egy kristályban minél kisebb az atomok közötti távolság, az elhajlási maximumokhoz annál nagyobb szögű elhajlás tartozik, és megfordítva, minél nagyobb az atomok közötti távolság, az elhajlási maximumok annál közelebb lesznek az egyenes irányhoz. Ráadásul, az elhajlás mértéke fordítottan arányos a röntgensugárzás hullámhosszával. Az elhajlás lényeges tulajdonságait tehát akkor kapjuk meg helyesen, ha az elhajlás szöge helyett a hullámhosszal

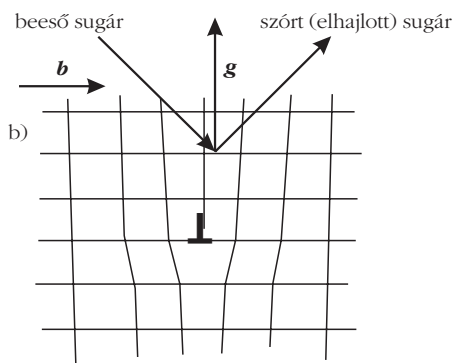
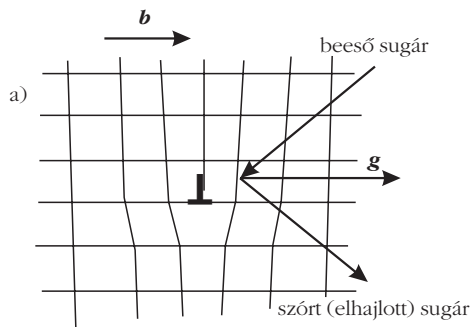


5. ábra. Egyszerű kristályos anyag atomjainak sematikus képe egy többlet betolt atomsíkkal. A betolt atomsík határoló éle, amit a fordított T jelez, egy éldiszlókáció. A szaggatott vonallal jelölt bal felső rész hibátlan, tökéletes kristály.

normált mennyiség függvényében írjuk le az elhajlást. Ennek a mennyiségnek nyilvánvalóan $1/\text{hosszúság}$ dimenziójúnak kell lennie. A 4.a ábrán mind a félértékszélességeket, mind az elhajlás mértékét ilyen mennyiség függvényében ábrázoltuk, $1/\text{nm}$ egységekben. Az ilyen típusú ábrázolást, első alkalmazói után, Williamson–Hall-ábrának nevezzük.

A mikroszerkezet legegyszerűbb modellje alapján, ha az anyagmintában a kristályok mérete nagyon kicsinnyé válik, akkor az elhajlási maximumok kiszélesednek. Viszont a 4.a ábrán látható Williamson–Hall-típusú ábrázolásban a kiszélesedés mértéke ilyenkor konstans, mindegyik maximum kiszélesedése azonos nagyságú. Vagyis, a félértékszélességeknek ebben az ábrázolásban egy vízszintes mentén kellene elhelyezkedniük. Abban az esetben viszont, ha a kristályrács el is torzul, például azért, mert diszlókációk vannak benne, a kiszélesedés mértéke növekszik az elhajlással. Vagyis, a félértékszélességek növekednek az elhajlással. Azt gondolhatnánk, hogy torzult kristály esetében ez a növekedés monoton, sőt, hogy a növekedés mértékéből meghatározhatnánk a torzultság mértékét, vagy akár a kristályban található diszlókációk mennyiségét, illetve sűrűségét is.

Szemügyre véve a 4.a ábrát azt látjuk, hogy a finomra őrölt galenitnak megfelelő félértékszélességek növekednek ugyan az elhajlás mértékével, de ez a növekedés korántsem monoton. A krisztallográfiában ez a *nem-monoton* viselkedés a hatvanas évek óta ismert, és a jelenség *deformációs anizotrópia* néven vonult be a szakirodalomba. A „deformációs” jelző arra utal, hogy a félértékszélességek növekednek az elhajlás mértékével, az „anizotrópia” pedig az elhajlás rendjében való anizotrópiát jelent. Meg lehet mutatni, hogy a kristályrácsnak a képlékeny alakváltozással létrehozott rácsorzulását a képlékeny alakítással létrehozott diszlókációk okozzák. Egy korábbi cikkünkben már foglalkoztunk a diszlókációk és a röntgen elhajlási maximumok kiszélesedésének a kapcsolatával, mégis, a jobb követhetőség kedvéért itt megegyezően összefoglaljuk azokat a dolgokat, amelyek a további megfontolások szempontjából lényegesek.



6. ábra. Diszlókációk és kristályon elhajló sugárzás kapcsolatának sematikus ábrázolása. Az a) ábrán a sugárzás a diszlókáció által erőteljesen deformált atomsíkon, a b) ábrán a diszlókáció által csak gyengén vagy alig deformált atomsíkon hajlik el. Az a) esetben erőteljes, a b) esetben gyenge vagy észrevehetetlen a megfelelő elhajlási maximum kiszélesedése.

A diszlókációk egyik legegyszerűbb típusát, az éldiszlókációt úgy képzelhetjük el, hogy az anyagot bevágjuk az atomsíkokkal párhuzamosan egy él mentén, majd a bevágásba, a bevágás végéig egy további atomsíkot tolunk be. Ezt szemlélteti az 5. ábra, amelyen a bevágás a fordított T-ig terjed. Az ábra szaggatott vonalakkal határolt bal felső részén hibátlan kristály látható. Az is jól látszik, hogy a diszlókáció egy vonal mentén, a betolt többletatomsík határvonala mentén húzódik. Ha az anyag felső és alsó részét, nyíró erők alkalmazásával, egymáson elcsúsztatjuk, elegendő, hogy a fordított T-vel jelölt atomsík fokozatosan úgy mozduljon el, hogy közben mindig csak egyetlen atomsíknyi nyírás következzen be. Ez a mechanizmus teszi lehetővé, hogy a nyírási deformáció $300\text{--}400\text{ GPa}$ helyett csupán $300\text{--}400\text{ MPa}$ feszültséget igényel. Az 5. ábrán jól látható, hogy a diszlókáció környezetében különösen a függőleges atomsíkok görbültek erőteljesen. A továbbiak szempontjából ugyanakkor lényeges észrevennünk, hogy jelen esetben a vízszintes atomsíkokat ez a diszlókáció szinte érintetlenül hagyja. Azt mondhatjuk, hogy a diszlókáció egy extrém módon anizotróp kristályhiba.

A diszlókációk és a röntgensugarak elhajlása közötti kapcsolatok lényeges tulajdonságait a sematikus 6. ábra jól szemlélteti. Az atomsíkokat vékony vonalakkal, beeső és szórt (elhajlott) sugár irányát egy-egy nyíllal, a Burgers-vektort és a diffrakciós (vagy elhajlási) vektorokat vastag nyilakkal jelöltük. A \mathbf{b} Burgers-vektor a diszlókáció erősségét adja meg, a diffrakciós

vektor pedig a sugárzás elhajlását okozó atomsíkokra (vagy hálózati síkokra) merőleges vektor. Itt jegyezzük meg, hogy a **g**-vel jelölt diffrakciós vektor hossza egyben reciproka a szóbanforgó atomsíkok távolságának. A *6.a*, illetve *6.b ábrák* ugyanazt a diszlokációt és a körülötte lévő néhány atomsíkot mutatják sematikusan. A különbség csupán a ráeső és szórt sugárzás irányában van. Az első esetben, ez van a *6.a ábrán*, a szórás vagy elhajlás létrehozó atomsíkok, különösen a diszlokáció közvetlen közelében, erőteljesen torzultak, azt látjuk, hogy el vannak görbülve. Ezzel szemben a második esetben, ez van a *6.b ábrán*, a szórás létrehozó atomsíkok szinte teljesen érintetlenek, szép egyenes síkok. Ennek megfelelően az első esetben az elhajlási maximum jelentősen kiszélesedik, viszont a második esetben szép éles marad. Ezt a jelenséget látjuk számszerűsítve a *4.a ábrán*, ahol a kiszélesedés mértéke az egyik elhajlási maximum esetében nagyobb, a másiknál kisebb, de globálisan mégiscsak növekszik.

A *6. ábrán* feltüntettük a Burgers- és a diffrakciós vektorokat, **b**-t és **g**-t. Könnyen leolvasható az *6.a* és *6.b ábrákról*, hogy az első esetben $\mathbf{bg} \neq 0$, a másodikban $\mathbf{bg} = 0$. Ez a két vektor skaláris szorzatára vonatkozó feltétel egyszerű eligazítást ad arra nézve, hogy az elhajlási maximum mikor és milyen mértékben szélesedik ki. A *6. ábra* alapján kimondhatjuk azt a jól működő szabályt, hogy amikor $\mathbf{bg} = 0$, akkor az elhajlási maximum kiszélesedése zérus vagy közel zérus, amikor viszont $\mathbf{bg} \neq 0$, akkor az elhajlási maximum kiszélesedik, sőt, a kiszélesedés mértéke annál nagyobb, minél nagyobb ennek a szorzatnak a zérustól való eltérése. Az összefüggés ennél bonyolultabb, de a jelenség lényegének megértése szempontjából a további részletek nem fontosak. A jelenség lényeges része az, hogy a kiszélesedés mértéke a két vektor, **b** és **g** relatív orientációjától függ. A *4.a* és *4.b ábrákon* az elhajlási maximumokat hármassal indexekkel, a Miller-indexekkel, illetve azoknak egész számú többszöröseivel jelöltünk. Ezek az indexek közvetlen kapcsolatban állnak a **g** diffrakciós vektorral. Ezért van az, hogy az elhajlási maximumok hol szélesebbek, hol kevésbé szélesek, hiszen mindegyik maximum esetében más és más az éppen aktuális diffrakciós vektor és a vizsgált anyagmintában lévő diszlokációk **b** Burgers-vektorai közötti relatív orientáció. Elméleti és numerikus módszerekkel pontosan ki lehet számítani, hogy mekkora lesz a kiszélesedés mértéke, ehhez csak azt kell tudni, hogy az anyagmintában milyen típusú diszlokációk milyen mennyiségben vannak jelen [1, 2].

A diszlokációk okozta rácsstorzulások tehát irányfüggők, azt mondjuk, hogy a rácsdeformáció *anizotrop*. Vagyis, bizonyos kristálytani irányokban nagyobb, más irányokban kisebb. Ugyanakkor, a szigorúan vett irányfüggés lényegében csak a diszlokációk típusától függ, és független az adott diszlokációk mennyiségétől vagy sűrűségétől. Ez más szóval azt jelenti, hogy ha megnöveljük egy bizonyos diszlokációtípus mennyiségét a kristályban, de a diszlokáció típusát változtatlanul hagyjuk, akkor az elhajlási maximumok kiszélesedése

ugyan megnövekszik, de a deformációs anizotrópia jellege nem változik meg. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a deformáció irányfüggését és a rácsdeformáció nagyságát szétválaszthatjuk. Ezt az irányfüggést összefoglalóan egy úgynevezett diszlokációs *kontrasztfaktor*ba foglalhatjuk bele, amit jelölünk *C*-vel. A *C* faktor bármilyen diszlokációtípusra és konfigurációra numerikus módszerekkel kiszámítható. Tudni kell hozzá az adott anyag rugalmassági tulajdonságait, és meg kell oldani a diszlokációk rugalmas deformációs egyenleteit. Nyilvánvaló, hogy az olyan kristálytani irányokban, amelyekben a diszlokációk okozta rugalmas deformációk nagyobbak, illetve kisebbek, a megfelelő diszlokációs kontrasztfaktorok is rendre nagyobbak, illetve kisebbek lesznek. A *4.a ábrán* az elhajlási maximumok szélességét az elhajlás mértékének reciprokhosszúság-egységeiben mértük fel, ez a változó éppen a **g** diffrakciós vektor hosszának megfelelő paraméter. Meg lehetett mutatni, hogy ha ezt a változót módosítjuk a *C* diszlokációs kontrasztfaktorokkal, akkor egy olyan új változót kapunk, amely éppen azokban a kristálytani irányokban nagyobb, illetve kisebb, amelyekben az elhajlási maximumok kiszélesedése is rendre nagyobb, illetve kisebb. Egy ilyen ábrázolásban, amelyet *módosított Williamson–Hall-ábrázolás*nak neveztünk el [1, 2], az elhajlási maximumok kiszélesedése monoton módon viselkedik. Ezt mutatja a *4.b ábra*, amelyen ugyanazok a szélességértékek szerepelnek, mint a *4.a ábrán*, csak a vízszintes tengelyen a diszlokációs kontrasztfaktorokkal módosított változót tüntettük fel. Ez az ábra azt mutatja, hogy a deformációs anizotrópiát jól írja le e jelenség diszlokációs modellje.

A deformációs anizotrópia diszlokációs modellje, azon túl, hogy helyesen adja meg a jelenség fizikai okát, számos új lehetőséget tár fel magának a jelenségnek a felhasználására. Ez a lehetőség abban rejlik, hogy a deformációs anizotrópiát felhasználhatjuk a diszlokációs kontrasztfaktorok kísérletes meghatározására. Az így kapott mért kontraszt faktorokat, a $C_{\text{mérés}}$ értékeket, összehasonlíthatjuk elméletileg számolt, $C_{\text{elméleti}}$ értékekkel, amelyeket különböző diszlokációtípusok, illetve úgynevezett csúszási rendszerek figyelembe vétele alapján tudunk numerikus módszerekkel meghatározni. Ez a módszer tehát lehetőséget nyújt arra, hogy képlekenyen alakított kristályos anyagokban meghatározzuk az éppen jelenlévő diszlokációtípusokat, illetve meghatározzuk, hogy a képlekeny alakváltozás milyen csúszási rendszerek aktiválása révén jött létre.

A kristályos anyagok mikroszerkezete – amelynek egyik legfontosabb része a diszlokációs szerkezet – a képlekenységi tulajdonságokon túl nagyon sok szempontból fontos információkat tartalmaz. A bevezetőben láttuk, hogy a kristályos anyagok diffrakciós képe az anyagok ujjenyomatának tekinthető. Ebben az értelemben a mikroszerkezet az anyagok *előéletének* vagy *történetének az ujjenyomata*. A diszlokációs szerkezet részletes vizsgálata alapján sok mindenre következtethetünk.

(1) A képlékenységi tulajdonságokra, megmondhatjuk, hogy a képlékeny alakváltozás milyen módon, milyen diszlokációk és csúsztási 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 csúsztási 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 riportsorozata 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. Atyai 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.