

A FÉMKRISTÁLYOK MODELLEZÉSÉRE SZOLGÁLÓ BRAGG–NYE–LOMER-FÉLE BUBORÉKMODELL

Márki-Zay János
Hódmezővásárhely

Akik kiderítették hogyan történik a fémek képlékeny alakváltozása címmel a *Fizikai Szemle* januári számában ismertettük azt a küzdelmes és hosszú utat, amit a tudósok végigjártak a laikusok által ma is nehezen követhető folyamat titkainak feltárásáig. A tudományos kutatómunka nehézségét többnyire az okozza, hogy az okok feltárásához érzékszerveink, sőt gyakran műszereink által sem észlelhető mélységekbe kell kutakodnunk valamely folyamat megértéséhez. Miután sikerült feltárni az okokat, kezdetét veszi egy másik folyamat, amely során igyekszünk szélesebb körben is hozzáférést biztosítani az elért eredményekhez. Ez a folyamat egyben azt is jelenti, hogy a következő nemzedék már új, szilárdabb alapokról elindulva folytathatja a kutatást és a korábbi eredmények hasznosítását.

A buborékmodell kidolgozói

A Bragg–Nye–Lomer-féle buborékmodell ismertetése előtt ismerkedjünk meg röviden a három névadó tudóssal!

William Lawrence Bragg (1890–1971), Nobel-díjjal kitüntetett tudós (1915-ben édesapjával, W. H. Bragg-gel megosztva kapott Nobel-díjat a kristályszerkezet röntgensugármódszerrel való analízisének felfedezéséért) mindig fontos feladatának tartotta a tanítást is. Az Ausztráliában született tudós 1939-ben a magyar *Orowan Egon* kérésére jött Cambridge-be. A diszlokációk szerepének feltárását követően az oktatás számára is fontossá vált a folyamat modellezése. 1940 januárjában megjelentetett tanulmányában – amelyhez

1. ábra. William Lawrence Bragg, valamint tanítványai: John Frederick Nye és William Michael Lomer.



beosztottja, Orowan is hozzájárult – a hidegen megmunkált fémeket egy hab szerkezetéhez hasonlította. Majd észrevette, hogy a motorok az üzemanyag keverése közben apró buborékokat állítottak elő, amelyek egy olyan szabályos mintájú felület alkottak, mint egy kristály építőkövei. Egy évvel később Bragg a fém kristályszerkezetének modellezésére kifejlesztette a buborékmodellt és 1942-ben leírta a buborékmodell összes lényeges tulajdonságát. A buborékgyártó készülék lehetővé tette akár 100 000 darab 0,1 és 2 mm átmérőjű buborék készítését.

Két beosztottja, *Nye* és *Lomer* egy évet dolgoztak a buborékmodellen (1. ábra).

John Frederick Nye (szül. 1923) fizikaprofesszor. Tudományos munkásságának kezdetén a képlékeny alakváltozásokkal foglalkozott. Nye leírta a struktúrákat, amelyeket a buborékmodell előállít. Később az alakváltozások terén megszerzett ismereteit a gleccserek áramlásának megértésére fordította és a jéggel kapcsolatos ismeretek szakértője lett. 1966–1969 között a Nemzetközi Glaciológiai Társaság elnöke is volt. A glaciológián kívül foglalkozott még a maró hatású anyagokkal és a mikrohullámú érzékelőkkel.

William Michael Lomer (1926–2013) fizikusnak több szilárdtestfizikával foglalkozó publikációja is megjelent és csodálatos kvantitatív kísérleteket végzett a modellel. Lomer később a britanniai termonukleáris fúziós laboratórium vezetőjeként is dolgozott.

A modell újszerű megvalósítása

1970-ben *Mai fizika* címmel megjelent *R. P. Feynman*, *R. B. Leighton* és *M. Sands* könyve, amelynek hetedik kötetében először szerepel a buborékmodell magyar nyelvű leírása „Bragg–Nye-féle kristálymodell” néven. A könyvben szereplő, fényképekkel illusztrált leírás tökéletesen alkalmas volt arra, hogy felkeltse a téma iránti érdeklődést. Azonnal megfogalmazódott bennünk az igény, hogy ezt a modellt hozzáférhetővé tegyük iskoláink számára is. De hogyan hozzuk létre a modellt a szükséges egyforma méretű, apró légbuborékok sokaságát? Hiszen az az út, amit a könyv kínált, a mi lehetőségeinknek nem felelt meg.

Megpróbáltuk gyökeresen más úton haladva előállítani a megfelelő buborékokat. Eltelt néhány hónap, amíg fáradozásunk sikerrel járt. A Winchester-palackot felfűjt léggömbbel helyettesítettük, amelyet egy műanyag cső végéhez erősített fecskendőűn keresztül csatlakoztattunk a mosószeres oldatot tartalmazó edényhez.

Az általunk gyártott buborékok egyforma méretének biztosítására a következő feltételeket kellett biztosítani:

1. A fecskendőűt adott mélységben és adott helyzetben kell a felszín alatt tartanunk.

2. A levegő beáramlásának sebességét a műanyag csőre helyezett szorító segítségével tartottuk állandó értéken.

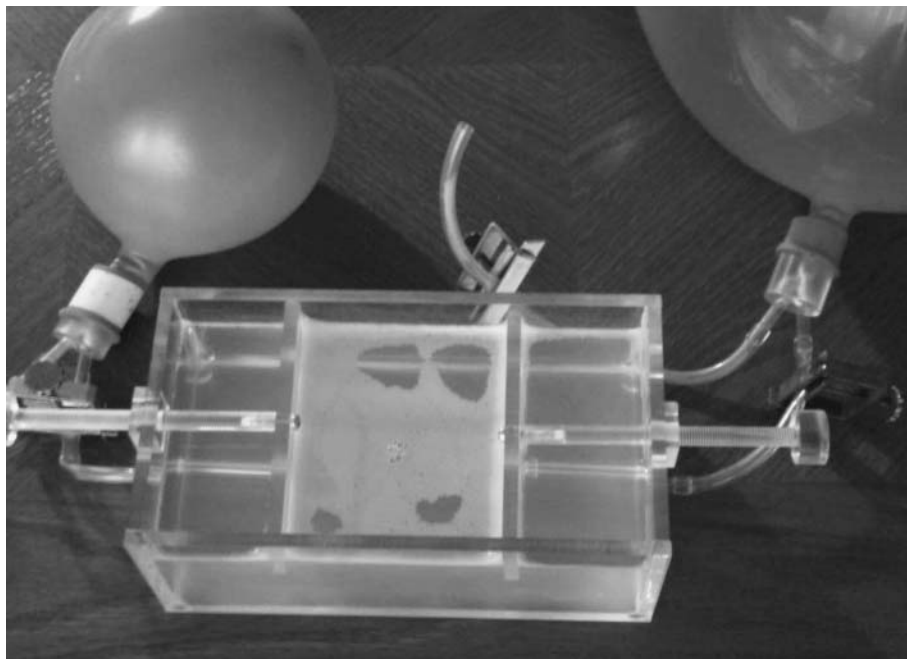
Kísérleteink azzal a tapasztalattal jártak, hogy a módszerrel a kellő keménységűre fűjt léggömb hosszú ideig alkalmas egyforma méretű buborékok gyártására. A kereskedelemben számos megfelelő mosószert találhatunk tartós buborékok létrehozására. Jó tanácsként mondhatjuk, hogy a mosószert célszerű jóval a buborékgyártást megelőzően a vízbe juttatni, mert hatására a vízben oldott levegő hab formájában kiválik, amit a zavartalan kísérletezés biztosítására el kell távolítanunk.

A buborékgyártás problémájának megoldását követően üvegtechnikus segítségét kértük az eszköz elkészítéséhez. A későbbiekben célszerűbbnek látszott a törekeny üveget plexivel helyettesíteni. Már az első eszközt is úgy készítettük, hogy a téglalap alakú folyadékfelületen képződő buborékokat a téglalap rövidebb oldalával párhuzamosan két csavarral finoman egymás felé mozgatható alumínium lapáttal össze tudjuk nyomni, illetve szét tudjuk húzni.

Miután az aktív felület beborításához elegendő mennyiségű buborékot gyártottunk, a buborékok fűjására szolgáló csapokat leállítottuk és a buborékokat úgy osztottuk szét, hogy azok egyenletesen befedjék a felszínt. A beáramló levegő elzárásának folyamata alkalmával mindig számítani kellett arra is, hogy képződik néhány eltérő méretű buborék, amelyeket például egy kávéskanál segítségével el kellett távolítanunk. Ezt követően már kezdődhetett a kísérletezés.

Ha egy buborék a víz felszínére emelkedik, akkor a víz felszíni hártája nem engedi a légtérbe, hanem tartósan a felszíni hártá alá szorítja. A buborék, ha nem is képes azonnal a légtérbe távozni, a víz felszíni hártáját némiképpen megemeli és így egy kiemelkedést képez a víz felszínén. A következő buborék úgyszintén. Energetikailag a felszín kiemelkedése akkor lesz minimális, ha a két buborék a kiemelkedések által létrehozott lejtőn felfelé – azaz egymás felé – mozdul el. Ezért a buborékok nem egyenként, hanem csoportosan, szigeteket alkotva fedik be a folyadék felszínét, majd hasonló okokból a szigetek nagyobb szigetekkel egyesülnek, végül a folyadék teljes szabad felszínét beborítva összefüggő fedést hoznak létre.

A kísérletezéshez használható eszközt házilag is összeállíthatjuk (2. ábra). Célszerű átlátszó műanyagból (plexiből) egy körülbelül 1,5 dm² felületű műanyag kádat készíteni. A kádat saját anyagával is összeragaszthatjuk, ha a kád lapjainak kifűrészelésekor kapott plexireszeléket kloroformban feloldjuk és ragasztóanyagként hasznosítjuk. A buborékképzést úgy oldhatjuk meg, hogy egy keményre fűjt léggömb levegőjét vezetjük a kádba a kád oldalfalát a lufihoz kapcsolódó plexicsővel áttörve. A plexicső kádba nyúló végéhez pedig egy fecskendőűt illesztünk, amelynek belső átmérőjét célszerű minél kisebbre szűkíteni, például a fecskendőűbe helyezett vékony drót, vagy hajszál segítségével. A víz felszínétől néhány centiméternyire elhelyezett fecskendőű segítségével megfelelően egyforma méretű buborékok sokaságát állíthatjuk elő.



2. ábra. A Bragg–Nye–Lomer-féle buborékmodell előállítására szolgáló eszközünk.

vagy nyomtatványt a falra. A szemléltetés minősége ennél az eszköznél, de a mainál jóval gyengébb fényű diavetítők alkalmazásánál is nagymértékben függött a sötétítés milyenségétől. Ahhoz, hogy érdekes jelenségeket mutathassunk diákjainknak, több ezer diát készítettünk, ezek levételese alkalmával is jó szolgálatot tett a sötétíthető tanterem. Ezek az eszközök ma már inkább múzeumi tárgyak, a mai projektorokhoz és képernyőkhöz szokott diákok számára alig ismertek.

A válasz másik része azonban ma is időszerű. Az erős fény nemcsak segíti látásunkat, hanem zavarja is. A csillagászok számára az egyik legnagyobb nehézséget a növekvő fényszennyezés jelenti. A

A Bragg–Nye–Lomer-féle buborékmodellrel végzett modellkísérletek írásvetítővel is kivetíthetők, és jól látható módon szemléltetik a valódi fémkristályok esetében bekövetkező jelenségeket.

Ha a kísérletekről fényképet kívánunk készíteni, akkor a modell felületét kell megvilágítanunk. A kontúr fokozza, ha a plexiedény alá fekete papírt helyezünk.

Demonstráció elsötétíthető tanteremben

Ünnepi eseménynek számított magunk és a diákjaink számára is, amikor tanári demonstrációs kísérletként egy-egy osztálynak mutattuk be a modellt. Ahhoz, hogy ez megvalósulhasson, először is a megfelelő szaktantermi körülményeket kellett megteremteni. Sajnos azok az épületek, ahol „szerencsénk” volt tanítani, vagy eleve nem iskola céljára épültek, vagy ha igen, akkor sem építettek hozzá sötétíthető tantermet, ami számunkra mindig a szemléltetés alapvető követelményének számított. Így egyik első feladatként meg kellett oldani a rendelkezésre álló nagy ablakokkal rendelkező tanterem teljes elsötétítését. Előgyakorlatként a hódmezővásárhelyi vendéglátó szakközépiskola fizika szertárában lévő szekrények segítségével a szertár egy sarkát leválasztva sötétkamrát alakítottunk ki. Hasonló gondossággal sikerült a szaktanterem elsötétítését is megoldani. Ebben kiemelkedő szerepe volt a háromrétegű függönynek, amelynek középső részét sűrű szövésű fekete vászon képezte. Felmerülhet a kérdés, miért volt erre szükség?

A válasz egyrészt technikatörténeti vonatkozású. Nem is olyan régen még az iskola egyik fontos szemléltető eszköze volt az epidiaszkóp, amely egy megvilágított fényképről vagy nyomtatványról visszaverődött fény felhasználásával vetítette kinagyítva a fényképet

bemutató planetáriumokban is szükség van a teljes sötétítésre és arra is, hogy szemünket hozzászoktassuk a sötéthez. Számos olyan csodálatos jelenség van, aminek élvezése csak a zavaró fényhatások kiiktatása révén lehetséges. A természetben ilyen jelenségek: az ezernyi csillaggal borított égbolt pazar látványa, a nálunk ritkán látható sarki fény, az elektromos kisülések és villámok stb. Sohasem felejthetjük el azokat az órákat, amikor diákjainkkal együtt élveztük az elsötétített teremben létrehozott 60-70 cm-es méreteket is meghaladó felületi kisüléseket. Ezek fényképezését úgy sikerült megoldani, hogy a régi típusú fényképezőgépet „B”-re¹ állíthattuk, ami azt jelentette, hogy amíg az exponáló gombot lenyomva tartottuk, addig a fényt a lencserendszer begyűjtötte. Ezzel a módszerrel megvárhattuk a kisülés létrejöttét és csak utána zártuk el a fény útját. Ehhez is szükség volt a teljes elsötétítésre. A film előhívása után csodálatos, részletekben dús képet nyertünk.

Gyermekkorunk egyik nagy élménye volt, amikor egy világító számlappal és mutatóval rendelkező órát kaptunk. Sötétben a szemünkhöz illesztve gyönyörködtünk az egyes fényfelvillanásokban, szcintillációkban.

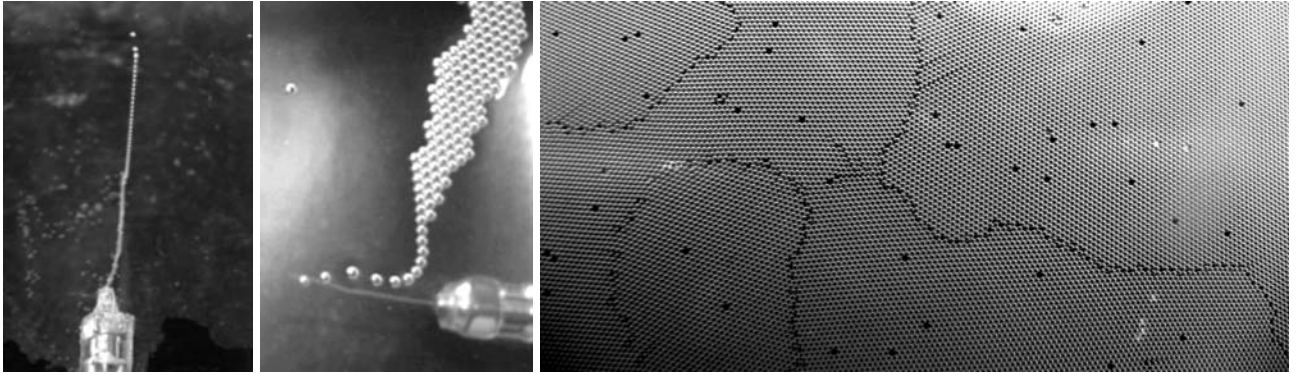
Példaként megemlítek még néhány olyan jelenséget, amit a fizikatanárnak illene bemutatni, de nem biztos, hogy lehetősége van rá.

Az úgynevezett Szent Elmo tűz bemutatásához sötétíthető teremben elegendő egy elektromosan jól töltődő bergmanncső és egy varrótű.

Jó szolgálatot tesz a sötétíthető terem a fluoreszcencia és a foszforeszkálás szemléltetésénél.

Hasonló a helyzet a kristályok poláros fényvel való vizsgálatában is.

¹ A mai tükörreflexes digitális fényképezőgépeken is van B záradó, minél alacsonyabb érzékenységgel és szűk blendével fotózzunk!



3. ábra. A buborékok térfogata a felszín felé haladva növekszik. A gyorsan szaporodó buboréktutajok hamarosan összefüggő felületet alkotnak. Az összefüggő buborékalmazt jól látható szemcsehatárok tagolják. Ha a buborékalmaz felett tapsolunk, akkor a nyomáshullám néhány buborékot kipukkanaszt és ott „vakanciának” nevezett ponthiány alakul ki. A kép felső felének közepén láthatók egymással párhuzamos „éldiszlókációk” is, amelyek a szemcsehatáron végződnek.

A buborékmodell bemutatása osztályteremben

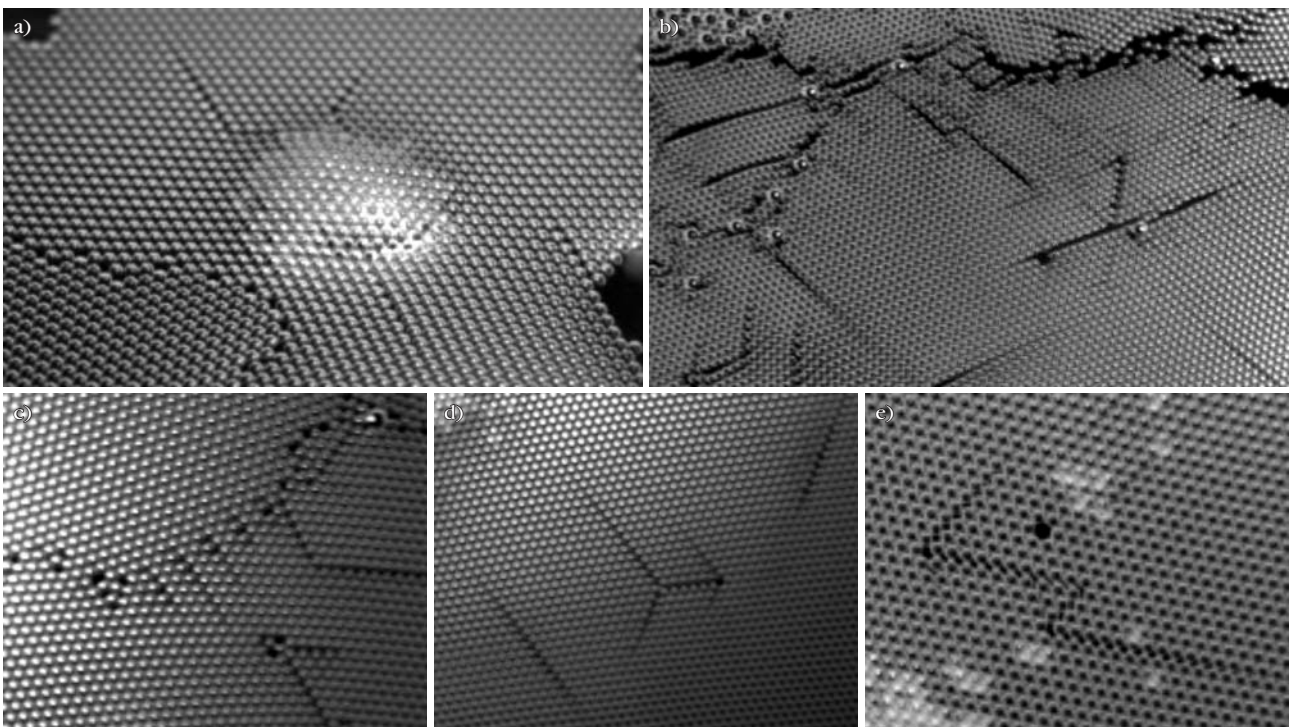
A modelleszközt írásvetítőre helyeztük úgy, hogy a zavaró fények kiszűrése érdekében az írásvetítő azon részét, amelyet az eszköz nem fedett, fekete fotópáppírral borítottuk le. A körülbelül tizenegy méter hosszú tanterem egyik végén állt az írásvetítő, a szemközti oldalon pedig a fehérre meszelt, a vetítés céljára szabadon hagyott falfelület. A modell előkészítése után a termet lesötétítettük és indulhatott a csoda. Igen a csoda, mert a tanulók, mint egy szélesvásznú mozifilm vetítésén tapasztalhatták, hogy még a hat méter széles falfelület is kevés a látvány befogadásához. Az öklömnyi nagyságúra nagyított buborékok elmosódva, alig követhető sebességgel jelentek meg a falon, és bámulatos gyorsasággal rendeződnek bubo-

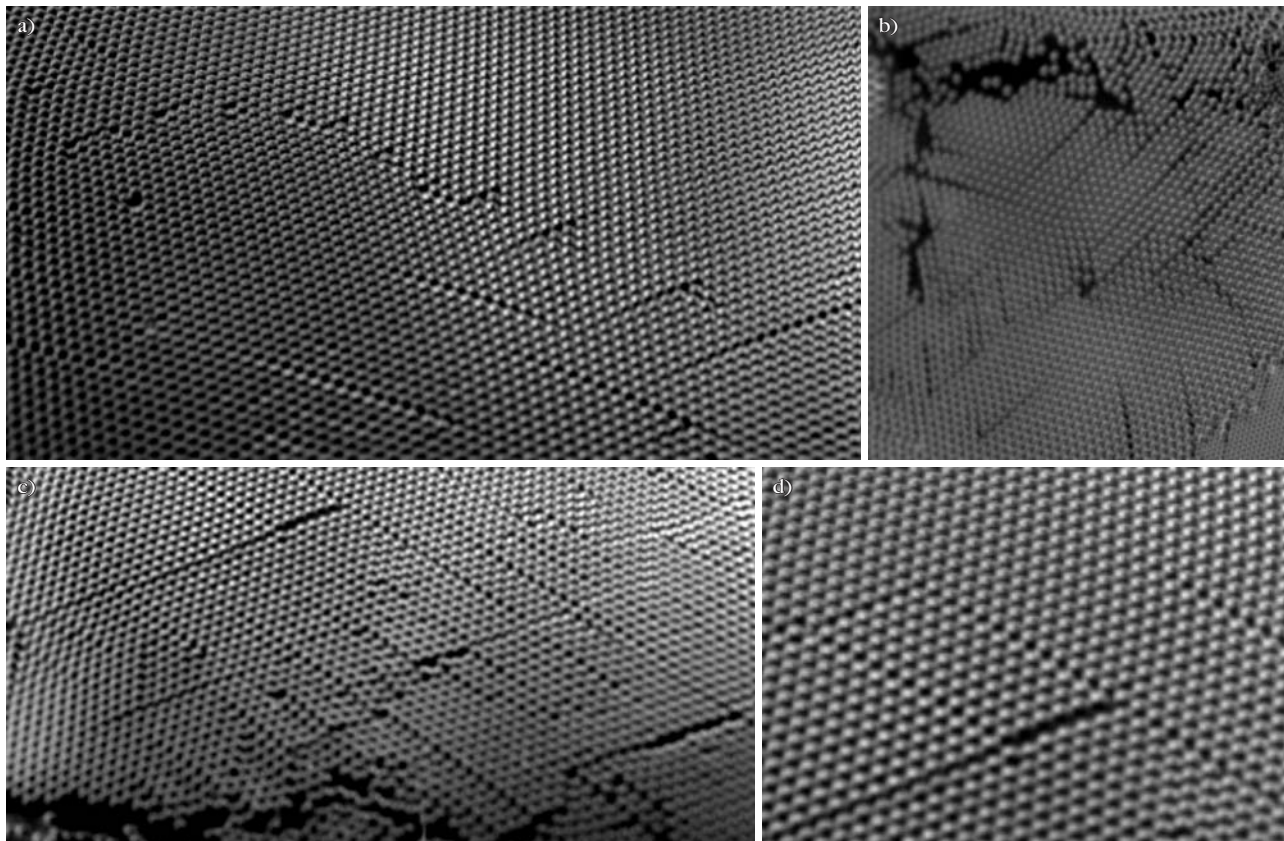
réktutajokká. Majd láthatták azt is, amint az állandó mozgásban lévő és más-más rendezettséget mutató buboréktutajok között szemcsehatárok alakulnak ki (3. ábra).

A továbbiakban a felszín bizonyos mértékű befedettsége után alkalmuk volt megfigyelni azt is, amint a feltörekvő újabb és újabb buborékok alulról nyomást gyakorolva a felettük lévő buborékrétegre egyre-másra diszlokációs mozgásokat váltanak ki a buborékalmazon, és ezért a modell folyton-folyvást újra-rendeződik (4. és 5. ábra).

Megmutathattuk, amint a buborékokkal fedett felszín felett egy-két taps hatására néhány buborék kipukkadt és így ponthibák: egyes és többes vakanciák keletkeztek (6. ábra). A buborékok képződését leállítva létrejöttek eltérő méretű, és ezért ugyancsak hibák forrásául szolgáló buborékok is.

4. ábra. a) A felszínre érkező buborékok nyomása diszlokációs mozgásokat vált ki. b) Erős rezgések hatására a diszlokációk és szemcsehatárok is megnyílnak. c–e) Szemcsehatáron végződő diszlokációk és a diszlokációk összekapcsolódása.





5. ábra. a) Diszlokációsorok, mint kisszögű szemcsehatárok. b) Sűrűn előforduló diszlokációk. c) Egymással párhuzamos és egymást metsző diszlokációk. d) Az előző, c) kép kinagyított részlete.

Külön felvonást jelentett, amikor az alumínium-lapátok elmozdításával a modellt nyomó vagy húzó igénybevételnek vetettük alá. Észlelhettük, hogy a buborékréteg miként reagál ezekre a deformációs hatásokra. Láthattuk a rend átalakulását a külső behatások következtében (diszlokációs mozgások, átkristályosodás stb.).

A modell érzékenysége környezetének változásaira elsősorban diszlokációs elmozdulásokban mutatkozik meg. Sejthetjük, hogy a modellezett fémkristályok még érzékenyebben reagálnak környezetük változásaira.

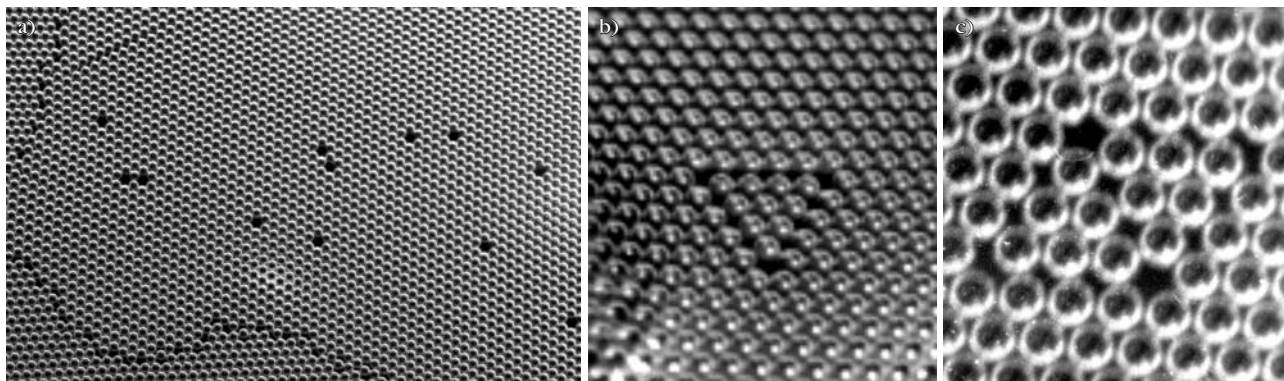
Ha érzékszerveinkkel nem is észleljük, de levonhatjuk a következtetést: semmi nem történhet követ-

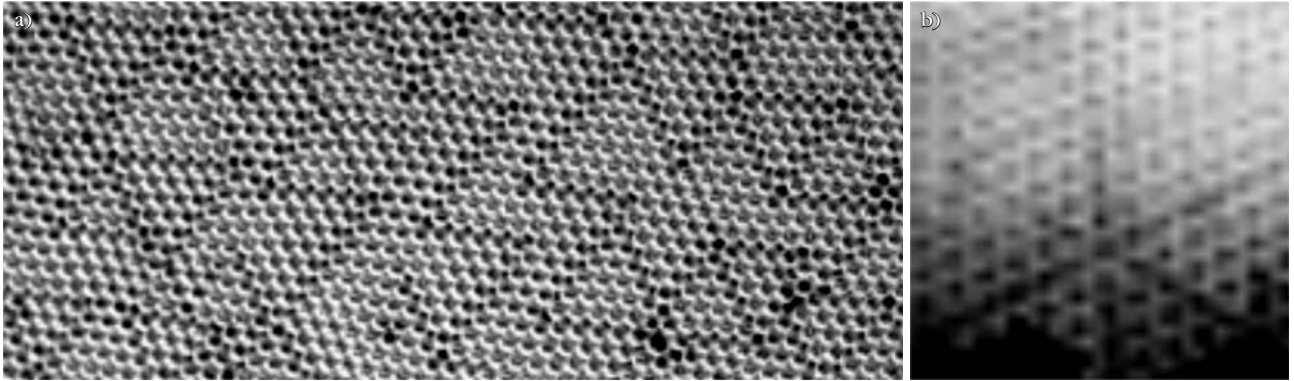
kezmények nélkül, a környezetünkben bekövetkező legkisebb változásnak is nyoma marad. A minket körülvevő anyagok állandó kölcsönhatásban állnak egymással.

Kísérletek többretegű buborékhalmozokkal

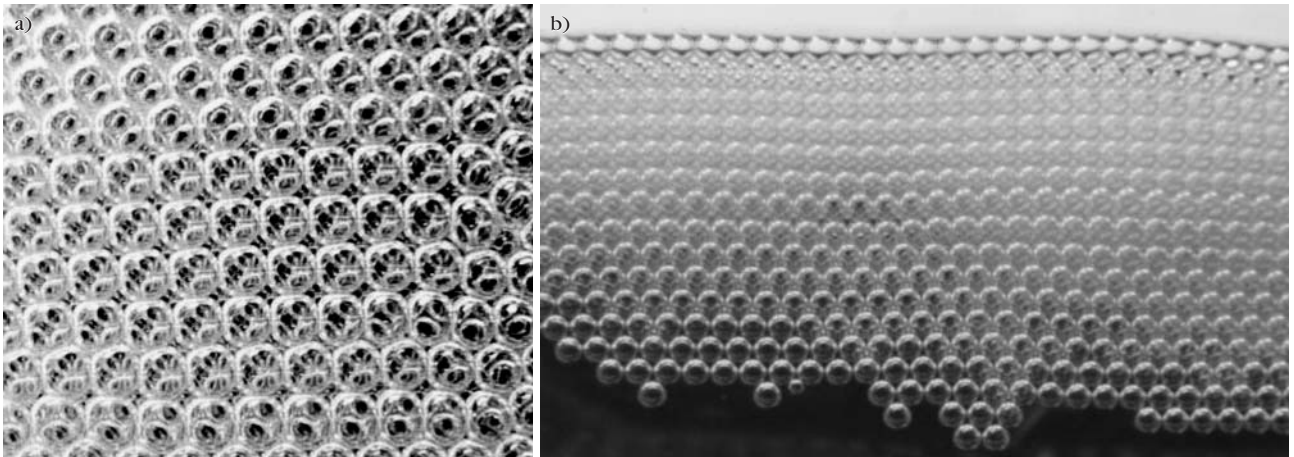
Megtehetjük azt is, hogy a buborékokat kettős rétegben helyezzük egymásra. Ekkor csökken a modell átlátszósága, és az egymás felett elhelyezkedő buborékok jobban akadályozzák egymást mozgásukban. Ez azt jelenti, hogy bizonyos helyzetek tartósabban megmaradnak.

6. ábra. Taps hatására kialakult ponthibák: a) egyes vakanciák, b) többes vakancia, c) „iker” vakancia.





7. ábra. a) Diszlokáció-hálózat, benne tört vonalak, szabályos háromszögek és paralelogrammák. b) Kettős rétegben szabályos hatszög átlói látszanak.

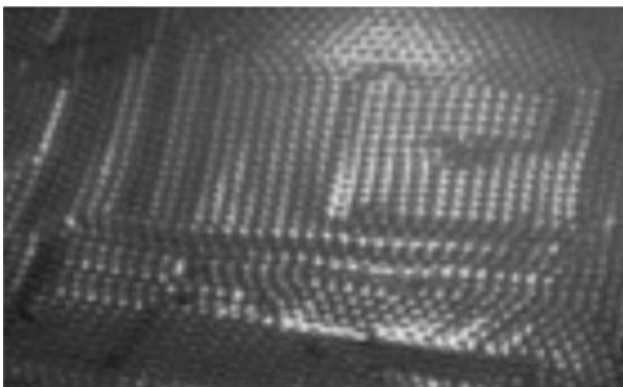


8. ábra. a) A buborékok köbös elrendeződése többes rétegnél. b) A nagyobb méretű buborékok kissé deformálódnak.

A 7.a ábrán többes vakanciák és diszlokáció összefüggő hálózatát láthatjuk, amelyek tört vonalakból, szabályos háromszögekből és paralelogrammákból tevődnek össze. Az elrendeződés kialakulásában jelentős szerepe volt a kettősrétegre ható ismétlődő igénybevételeknek. A 7.b ábrán egy szabályos hatszög átlói rajzolódnak ki. Egyrétegű buborékhalmozon ehhez hasonló elrendeződés nem jelenik meg.

Megjelenik a buborékok köbös elrendeződése elsősorban az edény szélén kialakuló többes rétegnél (8. ábra). A 8.b ábrán nagyobb méretű és ezért kissé deformálódó buborékok többes rétegen figyelhetjük meg a köbös elrendeződést.

9. ábra. Többes rétegben kialakult csavardiszlokáció.



Újabb szemléltetési lehetőséggel szolgál, amikor a keletkező buborékokat nem simítjuk szét, hanem tartósan hagyjuk átlátszatlan, fehér, többes réteggé növekedni. Ekkor már nincs lehetőségünk a buborékhalmoz átvilágítására, de tanulmányozhatjuk a buborékfelszínét. A 9. ábra felvételén egy csavardiszlokációt fedezhetünk fel. A 10. ábrán pedig az egymásra rakódó buborékok halmaza sokféle rácsot és rács hibát mutat.

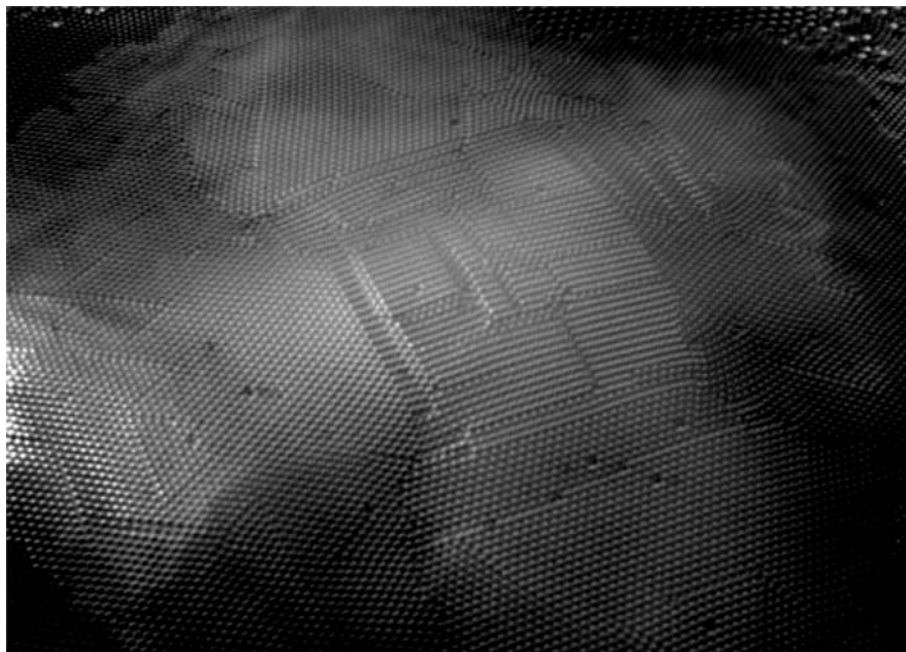
Ezen kísérletek bemutatásánál nem volt unatkozó diák. Megsejthették a rend és a rendetlenség közötti különbségből fakadó eltéréseket. A modell segítségével feltáruhatott előttük az az egyébként szemmel nem látható világ, ami parányi volta miatt korábban gondosan elfedte titkait. De megértették azt is, hogy ez csak egy modell, ami néha jelentős mértékben különbözik a valóságtól. Jó példa erre, hogy a Föld modelljeként elkészített földgömb milyen hitvány másolata a valóságos Földnek. A különbséget a buborékmodellrel kapcsolatban is érzékeltetnünk kellett.

A tanítás csúcса: a valóság csodáinak demonstrálása

A fizika nagyszerűségének bemutatása hasznosnak bizonyult a fizika iránt amúgy nem túlságosan érdeklődő, szakmát tanuló diákok számára is. Fontos, hogy

a modellezett világba bepillantást engedjünk. Ehhez az ugyancsak sötétített teremben végzett kristályosítási kísérlet bemutatása bizonyult a legjobbnak.

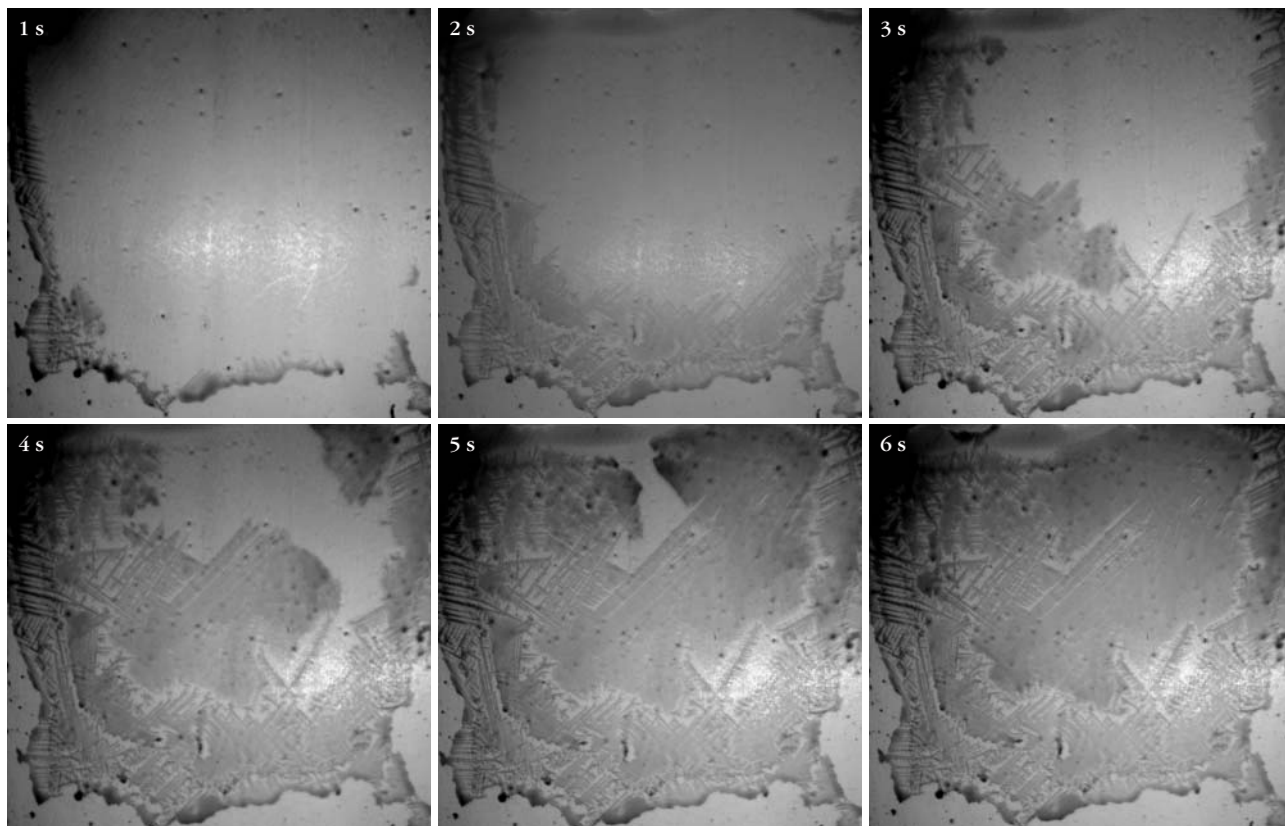
A demonstrációhoz szükségünk van diavetítőre és előzetesen gondosan megtisztított diaüvegre. Az üveget alkoholba mártott papírzsebkendővel tisztítottuk és zsírmentesítettük. Ezt követően különböző, vízben oldható kristályos anyagokat kerestünk. Jól bevált például a látványos dendrites kristályosodást mutató ammóniumklorid. Az oldatot vékony rétegben kell a diaüvegre felvinnünk. Ezt úgy értük el, hogy az oldathoz a filmek előhívásakor használt F 905 márkájú csepptelenítőt adtunk. A felületaktív anyag segítségével az oldatot vékony rétegben és egyenletesen szétkentük az üveglemezen. Miután a diaüveget diavetítőbe helyeztük már csak rövid ideig kellett várni az újabb csodára. A diavetítő hője hamar felmelegítette az üveglemezt, és megkezdődött az oldat beszáradása, gyors kikristályosodása



10. ábra. Egymásra púposodó buborékhalmozás felszíne. A képen feltűnik a buborékok egymás mellett elhelyezkedő hatszöges és köbös elrendeződésű halmaza. A halmaz felszínén látható néhány diszlokáció és vakancia is.

(11. ábra). (A kristályosodás sebessége jelentős mértékben függ a párolgást elősegítő hőtől és a légáramlattól.) A kísérlet hatását itt is fokozta, hogy jól sötétíthető és nagyméretű szaktanteremben tíz méter távolságból tudtuk a jelenséget diavetítővel falra vetíteni.

11. ábra. A vékony rétegben diaüvegre vitt ammóniumklorid kikristályosodása 6 másodperc alatt.



A fehérre meszelt falra vetítve, tanulóink szeme láttára hihetetlen sebességgel indult meg az ammóniumklorid rendkívül látványos, dendrites formában történő kristályosodása. Ez a gyors elrendeződés csak a kristályt felépítő parányi építőkövek világában lehetséges. A diákok megsejtették, hogy a kristályba rendeződés bámulatos sebessége a részecskék parányi méretéből (mozgékonyaságából) fakad. Kézenfekvő volt az összehasonlítás a testnevelési órán való tornasorba rendeződés, a buborékmodellnél tapasztalt elrendeződés és a valódi kristályok kialakulása során megvalósult rend létrejötte kö-

zött. A bemutató mindenki számára meggyőző volt: gyönyörű a világ és csodálatos feltárni titkait.

A folytatásban ismertetni fogjuk a modellel végzett további vizsgálatainkat.

Irodalom

1. R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands: *Mai fizika 7. Kristályszerkezetek. Dia-, para- és ferromágnesség. Folyadékok áramlása*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1970.
2. Márki-Zay J.: Kristálymodell, szemcsemodell és az amorf anyagok modellezése: a Bragg–Nye-féle buborékmodell továbbfejlesztése. Márki-Zay János, Hódmezővásárhely, 2013.