

# fizikai szemle

**Az Év Ásványa**  
**Fluidzárványok**  
**Mágnesek meteoritokban**  
**Fogzománc**  
**Gyémánt**

2024/2

nka

# Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította  
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, a Kulturális és Innovációs Minisztérium, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:  
Iglói Ferenc

Szerkesztőbizottság:  
Asbóth János, Bíró László Péter, Czitrovszky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Néda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Rábóczki Bence, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

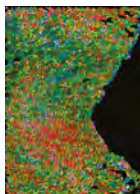
Olvasószerkesztő:  
Bodrog Zoltán

Technikai szerkesztő:  
Hock Gábor

A folyóirat e-mail címe:  
fsz\_szerkesztok@elft.hu  
A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg.

A folyóirat honlapja:  
<http://fizikaiszemle.elft.hu>



A címlapon:

Fogzománc prizmaorientációs térképe elektronmikroszkópos felvétel alapján. Színkód, ld. Hegedűs Máté és mtsai cikkét

## TARTALOM

### ÁSVÁNYTANI TEMATIKUS BLOKK

**Vendégszerkesztők:** Pósfai Mihály és Kis Viktória

*Pósfai Mihály:* Bevezetés a tematikus blokkhoz 38

*Bali Enikő:* Az ásványtársulások és fluidumzárványok szerepe a geotermális kutatásokban 39

*A geotermális energia hasznosításához – geotermális erőmű tervezéséhez – szükséges mélybeli környezeti paraméterek az egyensúlyi ásványegyütesek és az ásványokban csapdázódott fluidumzárványok vizsgálatával ismerhetők meg.*

*Kovács András:* Mágnesek meteoritokban 45

*A vas-nikkel meteoritásványok nanoszerkezetének és mágneses tulajdonságainak megismerése betekintést enged a Naprendszer korai fejlődési szakaszába, és új technológiai anyagok kifejlesztéséhez is hozzájárul.*

*Németh Péter:* Aszteroidabecsapódások során keletkező összetett gyémántszerkezetek 50

*Meteoritbecsapódások extrém nyomás- és hőmérsékletviszonyai között különleges elemi szén nanoszerkezetek képződnek, a gyémánt és a grafit eddig ismeretlen szerkezeti kapcsolatai tárulnak fel, köztük a diafitnak keresztelt új nanoanyagcsalád.*

*Hegedűs Máté, Kis Viktória, Kovács Zsolt:* A fogzománc szerkezeti és mechanikai tulajdonságai 56

*A fogzománcot felépítő bioapatit nanokristályokat szerkezeti és morfológiai anizotrópia jellemzi, amely a nanokristályok több méretskálán, hierarchikusan szervezett rendszere által meghatározza a tömbi fogzománc fokozatosan változó, irányfüggő mechanikai viselkedését.*

### REFLEKTORFÉNYBEN

*Ferencz Kárpát:* Emlékeim Krausz Ferenc útjáról a Nobel-díjig – I. rész 62

### A FIZIKA TANÍTÁSA

*Sükösd Csaba, Bokor Nándor:* Relativisztikusan mozgó állóhullám 66

### KÖNYVESPOLC

*Radnóti Katalin:* Az élet titkai és a kvantummechanika 70

### MEGEMLÉKEZÉS

*Ujvári Sándor:* Mester András (1952–2023) 71

*M. Pósfai:* Introduction to the thematic collection

*E. Bali:* Role of mineral associations and fluid inclusions in geothermal research

*A. Kovács:* Magnets in meteorites

*P. Németh:* Complex diamond structures formed during asteroid impacts

*M. Hegedűs, V. Kis, Zs. Kovács:* Structural and mechanical properties of the dental enamel

### IN SPOTLIGHT

*K. Ferencz:* My memories of Ferenc Krausz's path to the Nobel Prize – Part I

### TEACHING PHYSICS

*Cs. Sükösd, N. Bokor:* Relativistically moving standing wave

### BOOKREVIEW

*K. Radnóti:* Secrets of life and quantum mechanics

### COMMEMORATION

*S. Ujvári:* András Mester (1952–2023)

Fizikai Szemle  
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS  
INNOVÁCIÓS  
MINISZTERIUM



# Tájékoztató az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2024. évi tagdíjairól

Tisztelt Társulati Tagjaink!

Mindenekelőtt szeretném tolmácsolni a Társulat Elnökségének üdvözlését és újévi jókívánságait a Társulat tagjainak és a *Fizikai Szemle* valamennyi olvasójának. A Társulat és a *Fizikai Szemle* idén is változatlan erővel kívánja megvalósítani mindazokat a feladatokat, amelyek betöltésére Alapszabályában vállalkozott.

Kérem, hogy a **2024. évre vonatkozó tagdíjukat**, amelynek összege **2023. évhez képest változott<sup>1</sup>**, az alábbiak figyelembevételével szíveskedjenek befizetni.

Ha Ön **Társulatunk rendes tagja és**

- a *Fizikai Szemle* számaint **elektronikus formában** kéri, akkor a 2024. évi tagdíja **12 000 Ft.**
- a *Fizikai Szemle* számaint **papíralapú terjesztéssel** kéri, akkor a 2023. évi tagdíja **14 000 Ft.**

Ha Ön a Társulat tagjaként **általános- vagy középiskolai tanár és**

- a *Fizikai Szemle* számaint **elektronikus formában** kéri, akkor 2024. évi tagdíja **1000 Ft** alaptagdíj + **6500 Ft** kiegészítő tagdíj, azaz összesen **7500 Ft.**
- a *Fizikai Szemle* számaint **papíralapú terjesztéssel** kéri, akkor 2023. évi tagdíja **1000 Ft** alaptagdíj + **8500 Ft** kiegészítő tagdíj, azaz összesen **9500 Ft.**

Az alap- és kiegészítő tagdíjat együtt kérjük befizetni.

Ha Ön **nyugdíjasként** tagja a Társulatnak és

- a *Fizikai Szemle* számaint **elektronikus formában** kéri, akkor 2024. évi tagdíja **5500 Ft.**
- a *Fizikai Szemle* számaint **papíralapú terjesztéssel** kéri, akkor 2024. évi tagdíja **7500 Ft.**

Ezúttal is tisztelettel kérem azokat a nyugdíjas korú tagjainkat, akik nyugdíjuk mellett teljes munkaviszonnyal vagy közalkalmazotti jogviszonnyal rendelkeznek, hogy a tagdíjfizetés szempontjából ne tekintsek magukat nyugdíjasnak.

Ha Ön **tanulmányait végzi és a Társulat ifjúsági tagja** (felsőoktatási intézmény BSc- vagy MSc-hallgatója, aki munkaviszonnyal nem rendelkezik vagy középiskolai tanuló), akkor **nem kell tagdíjat fizetnie**, és a *Fizikai Szemle* számaint elektronikus formában fogja megkapni. A kedvezmény érvényesítéséhez évente hallgatói jogviszony igazolása szükséges az [elft@elft.hu](mailto:elft@elft.hu) e-mail címre.

Ha **Ön még nem töltötte be 30. életévét és már nem tanul**, akkor tagdíja az alábbi:

- a *Fizikai Szemle* számaint **elektronikus formában** kéri, akkor kedvezményes 2024. évi tagdíja **5500 Ft.**
- a *Fizikai Szemle* számaint **papíralapú terjesztéssel** kéri, akkor kedvezményes 2024. évi tagdíja **7500 Ft.**

Kérem, hogy bármilyen adatváltoztatást (például e-mail-cím, postacím, munkahely megváltozása) e-mailben legyenek szívesek megírni az [elft@elft.hu](mailto:elft@elft.hu) címre.

Kérem, hogy tagdíjukat mielőbb szíveskedjenek rendezni. A tagjainknak tagsági jogon járó *Fizikai Szemle* folyamatos küldését csak azok számára tudjuk biztosítani, akik 2024. évi tagdíjukat rendezték. Tájékoztatni szeretném Önöket, hogy **tagdíjuk megfizetését esetleg munkahelyük is át-vállalhatja.** Továbbá felhívom szíves figyelmüket az **ön-kéntes többletfizetés lehetőségére.** Kérem, hogy a leírtakra – különösen az utóbbira – külföldön élő ismerőseiknek is hívják fel a figyelmét. Nekik a *Fizikai Szemlét* elektronikus formában, e-mailen küldjük el; ha nyomtatott Szemlét kérnének, akkor kérjük, a lényegesen magasabb postázási költséget vegyék figyelembe.

Az újonnan belépni kívánók a Társulat honlapján – <http://elft.hu/jelentkezes-a-tarsulatba> – jelentkezhetnek társulati tagnak.

Amennyiben lehetőségük van rá, kérem, hogy a **tagdíj befizetését átutalással** szíveskedjenek rendezni a **K&H Banknál vezetett 10200830-32310274-00000000** számmű folyószámlánkra. A közlemény rovatba a befizető nevét, városát és a „2024. évi tagdíj” szavakat kérjük feltüntetni. A Titkárságon (1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint 3.) időpont-egyeztetéssel lehetőség van készpénzes befizetésre is, illetve csekk is kérhető.

Az Európai Fizikai Társulatba (EPS) a továbbiakban csak egyéni tagként lehet belépni. **Kérem a kollégákat, hogy a hazai fizika megfelelő képviselője érdekében az EPS-be minél nagyobb számban lépjenek be.** Az EPS-be annak weblapján, a [www.eps.org](http://www.eps.org) címen lehet belépni; ugyanott fizetheti be az EPS-tagdíjat is.

Felhívás tagjainkhoz és a fizika minden barátjához

Tájékoztatom a Társulat tagjait és a *Fizikai Szemle* olvasóit, hogy a 2022. évről szóló **személyi jövedelemadó-bevalláshoz** kapcsolódó **felajánlások** révén a Társulat 2023-ben **1.373.233 Ft** bevételhez jutott, amit a korábbi évekhez hasonlóan a működési költségek és a *Fizikai Szemle* megjelentetési költségeinek részbeni fedezeteként használtunk fel. Ezért köszönetünket fejezzük ki a Társulat javára rendelkezőknek. Kérem a fizika minden barátját, hogy ha teheti, az **idén is rendelkezzen személyi jövedelemadója 1%-ának** a Társulat céljaira való felajánlásáról és buzdítsa erre barátait, ismerőseit is. Az **Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak** a nyilatkozaton feltüntetendő **adószáma 19815644-2-43.**

Tisztelettel:  
Groma István  
az ELFT főtitkára

<sup>1</sup>A *Fizikai Szemle* egyes példányainak ára 2024-től 1500 Ft, a duplaszámé 3000 Ft.

# BEVEZETÉS A TEMATIKUS BLOKKHOZ



Az ásványtan a felsőoktatásban a földtudományokon belül jelenik meg (nemcsak Magyarországon), ezért általában a geológia egyik ágának tekintik. Mivel azonban az ásványtan kémiailag definiált, általában kristályszerkezettel rendelkező anyagok képződésével és tulajdonságaival foglalkozik, nemcsak a földtudományok különböző ágaira van hatással, hanem az anyagtudományra és ezen keresztül a fizika egyes területeire is. Az évente megrendezett Téli Ásványtudományi Iskola (<http://mposfai.hu/TAI/tai.htm>) programjában rendszeresen szerepelnek fizikus előadók, és ez a tény (is) motiválta a jelen tematikus blokk szerkesztését.

Érdeemes kicsit visszatekinteni az ásványtan történetére és a fizikával kialakult kapcsolataira. A kristálytan és ásványtan jó ideig elválaszthatatlan volt. Az első kristálytani törvénynek a dán Niels Stensen (latin nevén Steno) kvarckristályokon megfigyelt, bizonyos lapok által bezárt szögek állandóságára vonatkozó, 1669-ben publikált megfigyelését tekintjük. A következő mérőföldkő René Just Haüy munkája volt (1784), akitől a mai „elemi cella” fogalma ered, amelyet a kalcit romboéder alakú hasadási morfológiájából vezetett le. William Lawrence Bragg az addigi kristályszerkezet-meghatározó munkásságát összegző könyvének előszavában írja, 1937-ben<sup>1</sup>: „Az ásványtan és a kristálytan között mindig szoros kapcsolat volt. Valójában egészen a közelmúltig a kristálytan tudományával szinte csak a mineralógusok foglalkoztak. Minket, fizikusokat, a mineralógusok tanítottak kristálytanra. Az első, jól fejlett kristályok, melyeket meghatároztunk, a kősó, gyémánt, fluorit, pirit és kalcit voltak, melyeket az ásványtani gyűjteményekből szereztünk be. Később a szilikátásványok adtak lehetőséget arra, hogy bonyolultabb szerkezetekre is kiterjesszük a röntgensugaras szerkezetanalízist.” A nagy áttörést, a kristályszerkezetek meghatározását követően a 20–21. század egyes kristálytani újításai – például a kristályhibák elektronmikroszkópos és spektroszkópos analízise vagy az élőlények kristályképzésével kapcsolatos kutatások – szintén ásványtani gyökerekkel rendelkeznek.

A kristályok speciális fizikai tulajdonságainak köszönhetően az ásványtan és az anyagtudomány közötti kapcsolat szintén hosszú múltra tekint vissza. Sok fizikai jelenséget először ásványokon figyeltek meg: a magnetit mágnességét már az ókorban észlelték, a piezoelektromosságot Pierre és Jacques Curie a kvarc (1880), a radioaktivitást Henri Becquerel egy uránsó vizsgálatával fedezte fel (1896), az első lézerforrás (szintetikus) rubin volt (1960), az első „magas” hőmérsékletű szupravezető szerkezete a perovszkit ásványéval analóg (1986), a grafént a grafitból sikerült előállítani (2004), és máig az ásványok adnak ötleteket új, különleges elektromos tulajdonságokkal rendelkező, réteges szerkezetek előállításához. Számptalan példát lehetne még sorolni, melyekben a mai anyagtudományi kutatás ásványtani előzményekre támaszkodik.

A fentiek mellett az ásványtan mindig is fontos részét alkotta és alkotja a földtudományoknak, hiszen a Földet és a Naprendszer egyes bolygóit alkotó kőzetek ásványokból állnak. Megjegyezzük, hogy a „mineral physics” kifejezést ma nem az egyes ásványok, hanem a kőzetekre jellemző ásványegyüttesek fizikai tulajdonságaiból eredő geofizikai sajátságokkal (gravitációs anomáliák, földmágnesség, szeizmikus hullámok terjedése) foglalkozó kutatásra használják, amelynek tárgya általában a Föld belső, más módszerekkel hozzáférhetetlen régióinak vizsgálata. Bár a *Fizikai Szemle* olvasói számára bizonyára ezek a témák is érdekesek, a jelen válogatásban inkább a kimondottan ásványtani (kristálytani-anyagtudományi) vonatkozású kutatásokat kívántuk bemutatni. A négy tanulmány tükrözi egyrészt a jelenleg művelt ásványtani-anyagtudományi témák változatosságát, másrészt az ásványtannal kapcsolatos hazai hangsúlyokat. Az utóbbiakban meghatározók a tudományos műhelyek, amelyek közül érdemes kiemelni a Dódy István és Szabó Csaba nevével fémjelzett ásványtani-elektronmikroszkópos, illetve geokémiai iskolát, valamint a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet és a földtudományi műhelyek közötti kapcsolatokat.

A jelen számból tehát az Olvasó egy ízelítőt kap a fizikai vonatkozású ásványtani témák változatosságából. *Bali Enikő* cikke ismerteti az izlandi geotermikus energiaforrások hasznosítását segítő alkalmazott ásványtani kutatást. *Kovács András* egy különleges elektronmikroszkópos módszer, az elektronholográfia alkalmazását mutatja be földön kívüli anyagok (meteoritok ásványai) mágneses tulajdonságainak vizsgálatában. *Németh Péter* tanulmánya a meteoritok becsapódásakor nagy nyomáson képződő különleges gyémánt nanoszerkezetek világába kalauzolja az Olvasót. *Hegedűs Máté*, *Kis Viktória* és *Kovács Zsolt* pedig a fogzománcot alkotó ásványok szerveződése, tulajdonságai és a fog funkciója közötti kapcsolatokról szerzett új eredményeket mutatja be. Reméljük, a válogatás felkelti a tisztelt Olvasók érdeklődését egyéb ásványtani kutatások iránt is.

Pósfai Mihály, vendégszerkesztő

Pannon Egyetem, HUN-REN-PE Környezeti Ásványtan Kutatócsoport, Veszprém

<sup>1</sup> „The connection between mineralogy and crystallography has always been very close. Indeed, until recently the science of crystallography received scant attention from any but mineralogists, to whom we owe the greater part of its development in the past. As physicists, we had to turn to the mineralogists to teach us our crystallography, and they have supplied us with much of the crystalline material which we have studied. The first crystals to be analysed were rock-salt, diamond, fluorspar, pyrites and calcite, and other well-developed natural crystals which we could obtain from mineralogical collections. At a later stage, the silicates provided material for extending X-ray analysis to more complex structures.” W. L. Bragg: Atomic Structure of Minerals. Cornell University Press, 1937

# AZ ÁSVÁNYTÁRSULÁSOK ÉS FLUIDUMZÁRVÁNYOK SZEREPE A GEOTERMÁLIS KUTATÁSOKBAN

Bali Enikő

Izlandi Egyetem, Reykjavík

Az ásványtan klasszikus célja a geológiában a nyersanyagkutatás hatékonyabbá tétele. Ebben a cikkben azt mutatom be, milyen módon alkalmazható különböző ásványtársulások, illetve a bennük zárványként előforduló fluidumok jelenléte a geotermális mezők hőmérsékletének, valamint a bennük vándorló fluidum összetételének meghatározására. Ezek a vizsgálatok nélkülözhetetlenek egy geotermális erőmű költségének és fenntarthatóságának meghatározásában. Röviden bemutatom ennek a megújuló energiahordozónak a geológiai hátterét és hasznosításának lehetőségeit is, majd hogy előkészítéskor milyen módon vizsgáljuk a geotermális mezőkön gyűjtött kőzetmintákat. Végül izlandi és kenyai példákon keresztül szemléltetem, milyen információt szolgáltatnak az ásványtársulások és zárványaik egy adott geotermális mező állapotáról, és miképpen értelmezhetjük az egybehangzó vagy éppen eltérő hőmérsékleti tartományokra vonatkozó információkat.

## I. Mi a geotermális energia, és hogyan hasznosítható?

A geotermális energia a Föld belsejében termelődő energia, amely nagyrészt radioaktív bomlásnak köszönhetően jön létre. E folyamat hatására a Föld belseje felé haladva a hőmérséklet átlagosan 20–30 °C-kal emelkedik kilométerenként [1]. Bizonyos területeken ez az érték (a geotermikus gradiens) lényegesen nagyobb is lehet, például a vulkanikusan aktív zónákban, mint Izland, Indonézia, Japán vagy Olaszország egyes részei. Emellett a geotermikus gradiens értéke azokon a medenceterületeken is magasabb az átlagosnál, amelyek alatt a Föld köpenye felboltozódik, így a forró, részben olvadt köpeny feletti litoszféra (a kéreg és a köpeny legfelső, merev rétege) vékonyabb lesz. Magyarország ilyen terület. A geotermális energia tehát egy időjárástól független

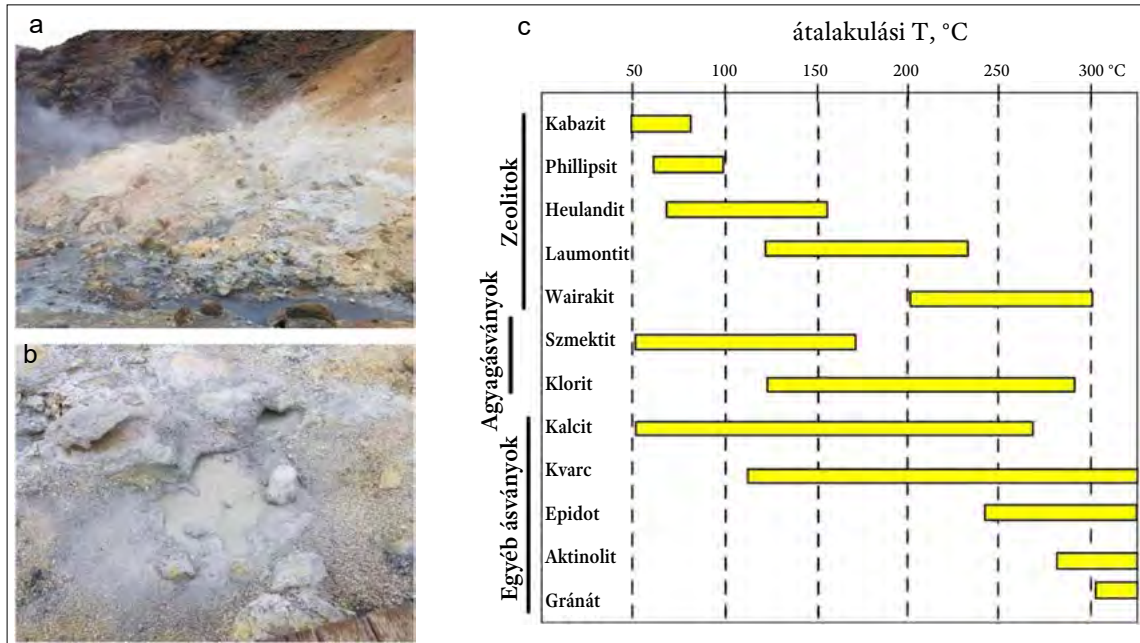


Bali Enikő geológus. Geológus diplomáját az ELTE-n (1999), doktori fokozatát a Szegeci Egyetemen (2004) szerezte. A doktori fokozat megszerzése után többek között a clermont-ferrand-i Laboratoire de Magmas et Volcansban és a bayreuthi Bayerisches Geoinstitutban volt posztdoktori ösztöndíjas. 2013 óta az Izlandi Egyetem munkatársa, ahol 2023-ban egyetemi tanárnak nevezték ki. Szakterülete magmás és metamorf kőzettan és geokémia, amely magában foglalja a geotermális kutatásokat is.

megújuló energia, amely gyakorlatilag mindenhol jelen van. Kinyeréséhez egyedi háztartásokban leggyakrabban valamilyen típusú hőszivattyút alkalmaznak. Ezzel szemben a „geotermálisan aktív” területeken az energia hatékony kinyerése geotermális erőművekkel történik. A kitermelés során a nagy hőmérséklet mellett szükség van egy olyan anyagra, amely az energiát hordozza. Ez az anyag a Föld felszíne alatt, a kőzetek pórusaiban vándorló vizes fluidum. A következőkben bemutatom, miként termelik ki és használják fel a geotermális energiát Izlandon, és ehhez a folyamathoz mi köze van az ásványoknak, valamint azok zárványainak.

A Föld felszíne alatt vándorló vizes fluidum vulkanikusan aktív területeken a kéregbe nyomuló magmás testeknek (intrúzióknak) köszönhetően melegszik fel. A felmelegedett víz, amely főleg felszíni eredetű, de részben magmás eredetű fluidumot is tartalmazhat, feláramlási zónákban elérheti a felszínt. Ilyen esetekben kigőzölgéseket, illetve a felszínen a magas hőmérséklet hatására kőzetátalakulásokat fedezhetünk fel (1a. és 1b. ábra). Ezen területek részletes térképezése jelöli ki a későbbi geotermális mélyfúrások helyét, amelyek segítségével a nagy energiájú fluidumot kitermelik. A fenntarthatóság érdekében a fluidum felhasználását követően a lehűlt vizet a meleg rétegekbe visszajuttatják, biztosítva a fluidum folyamatos körforgását. A kitermelés során gyakran 200–300 °C-os vizes fluidumot nyernek ki, amelyet Izlandon 2–3 km mélységben érnek el [2]. Amikor ezek a fluidumok elérik a felszínt, dominánsan gőz halmazállapotúak, viszont kis mennyiségben tartalmazhatnak folyékony kondenzátumot is. Ezt a kondenzátumot egy páraszeparátor segítségével leválasztják, és az így nyert száraz gőz energiáját a geotermális hőerőmű turbinái elektromos árammá alakítják. Magát a kondenzátumot, illetve a magas hőmérsékletű vizet közvetlenül fűtésre nem használják. Ezek ugyanis nagy mennyiségű oldott anyagot tartalmaznak, amely a hűlés során a fűtőcsövekben kicsapódik. Ehelyett az erőművek területén sekély fúrásokkal hideg édesvizet is kitermelnek, amelyet hőcserélők segítségével melegítenek fel a kitermelt meleg vízzel és a turbinákból származó, lehűlt gőzzel. A hőcserélőkkel felmelegített édesvizet csővezetékek segítségével juttatják el a felhasználókhoz, akik ezt fűtésre, valamint egyéb használati melegvízként alkalmazzák.

Izlandon a geotermális energiát nagyon sokrétűen használják fel. 2019-ben az ország energiafelhasználásának 62%-a volt geotermális energiához köthető, a háztartások 90%-át geotermális erőművekben felmelegített vízzel fűtötték. Emellett uszodák, termálfürdők, üveg-



1. ábra. Geotermális aktivitás hatására átalakult felszín és gyakori átalakulási ásványok. Az a) és b) ábrán a Krýsuvík geotermális mező felszíni képződményei láthatók. Az a) ábrán összehasonlítható az erősen átalakult felszín (fehér-szürke-narancssárga kőzet, dominánsan agyagásványokból áll) és a kevésbé átalakult bazalt (sötétbarna kőzet). A b) ábrán forrásban lévő agyagos tócsát figyelhetünk meg. A c) ábra különböző hőmérsékleten stabil ásványok stabilitási tartományait mutatja, amelyek gyakran képződnek bazaltos kőzetek átalakulásával. (Az a) és b) ábra a szerző felvételei, a c) ábra a [4] alapján készült)

házak, halastavak fűtésére is használják a geotermális melegvizet, valamint Reykjavík belvárosában a téli hónapokban a járdák jegének olvasztására is. A geotermális vízből kinyert oldott anyagok egy részét pedig kozmetikai célra használják [3]. A sziget energiaigényének fennmaradó részét elsősorban vízierőművek biztosítják. A fosszilis tüzelőanyagok Izland energiafelhasználásának mindössze 0,1%-át adják – a közlekedést nem számítva.

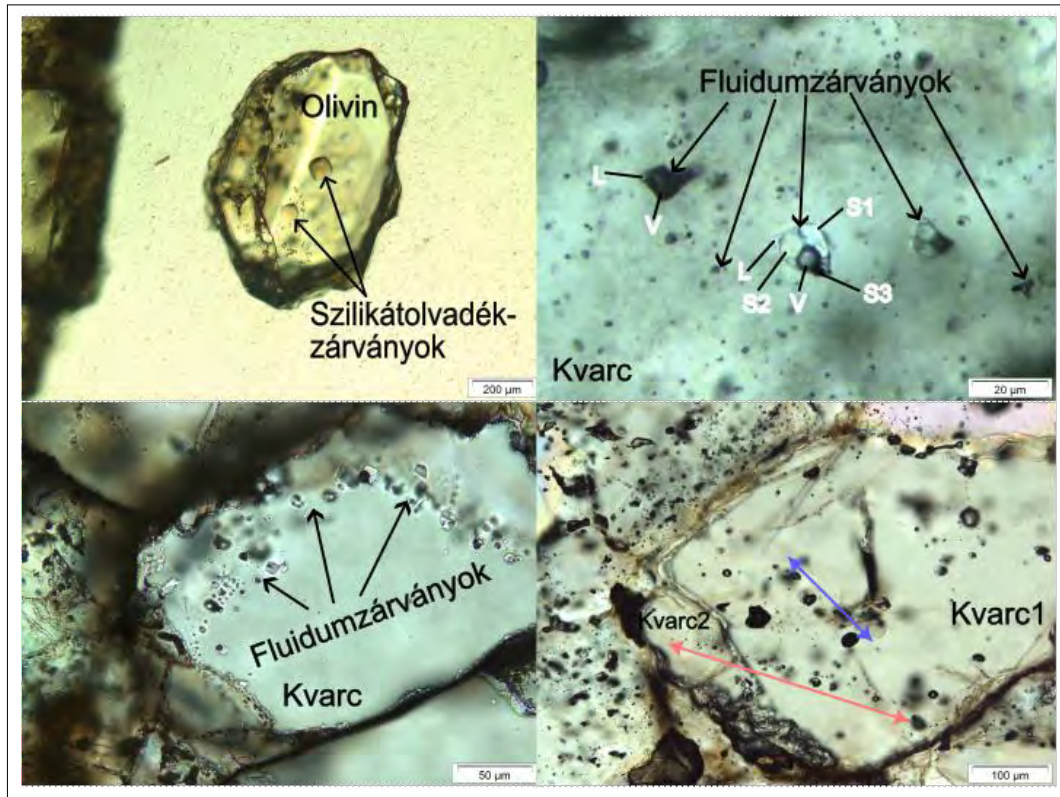
## II. A geotermális fúrás

Egy geotermális erőmű működtetéséhez számos sikeres mélyfúrásra van szükség, amelyeket termelőként hasznosíthatunk. Például az észak-izlandi 90 MWe (elektromos megawatt) teljesítményű Þeistareykir erőmű 18 aktív termelőköttal működik [5]. Ez azt jelenti, hogy ezeknek a fúrásoknak el kell érniük azt a mélységet, ahonnan a magas hőmérsékletű fluidum a környezetből a fúrólukba szívárog, majd felfelé áramolva eléri a felszínt. A fluidum felhasználási módját meghatározza annak hőmérséklete és kémiai összetétele. Abban az esetben, ha a fluidumnak túlságosan nagy az oldottanyag-tartalma, vagy – pl. a magmás fluidumok hozzáadódása miatt – nagyon alacsony a pH-ja, a felhasználhatóság korlátozott lehet. Például a 2008-ban a Krafla mezőn mélyített IDDP-1-es fúrás 2096 m mélységben egy 900 °C-os magmás testet harántolt. A tesztek során 452 °C hőmérsékletű fluidumot nyertek ki, azonban a jelenlegi technológiák mellett sajnos a kút rövid életű volt. A felszínen használt szelepek nem bírták a terhelést, valamint a nagy mélység-

ben, a fúróluk stabilizálására használt burkolat (béléscső) nem tudott ellenállni a fluidum korrozív hatásának [6].

Mindezek azt mutatják, hogy egy sikeres geotermális mélyfúrás előtt szükség van arra, hogy viszonylag pontosan tudjuk jelezni, milyen körülmények lehetnek jellemzőek egy aktív geotermális mező adott mélységében. Ebbe beletartozik a nyomás és hőmérséklet, valamint a vizes fluidum összetétele is. Termodinamikai modellek segíthetnek ebben, azonban a természet általában komplexebb a jelenlegi tudásunkkal modellezhetőnél. Ezért nagyon fontos, hogy a korábban mélyített fúrások anyagát részletesen tanulmányozzuk, és azokat összevegyük a fúrólukban, kútban történő mérések eredményeivel. A kúthőmérséklet meghatározására több lehetőség adódik.

- 1) A kút hőmérsékletét a fúrás során vagy azt követően a kútba süllyesztett hőmérőkkel mérik. Azonban a fúrás során a fúrófejet hűtőfolyadékkal (víz és iszap) folyamatosan hűtik, és ez ideiglenesen lehűti magát a fúrólukat is. A kút termális egyensúlyba kerülése hónapokat vehet igénybe, de a további tervezéshez a hőmérsékletadatokra ennél korábban van szükség.
- 2) A fúrás során folyamatosan ellenőrzik a fúrólukból vett szilárd furadékminta ásványos összetételét. Ennek azért van jelentősége, mert bizonyos ásványtársulások kiváló hőmérséklet- és nyomásjelzők. Például a bazaltos kőzetek átalakulása esetén a zeolitok gyakori alacsony hőmérsékletű átalakulási ásványok. Ezek olyan térhálós szerkezetű szilikátok, amelyek molekuláris vizet tartalmaznak, emellett szerkezetükre jellemzők a nagy méretű (akár 15 Å átmérőjű)



2. ábra. Különböző típusú fluidumzárványok olivinben a) és kvarcban b)–d). Az olivinben található egyfázisú fluidumzárványok bazalt összetételű kőzetüveget tartalmaznak, és szilikátolvadék-zárványként különítjük el azokat. A b) ábrán a sötét zárványok gőzben gazdag zárványok, amelyekben a sötét buborékfázis (V) a szobahőmérsékleten gőz halmazállapotú fázisok elegyét tartalmazza, míg a vékony film a zárvány szegélyén (L) víz. A b) ábrán látható kvarc egy másik típusú, többfázisú zárványt is tartalmaz, amely a folyadék és gőz fázis mellett legalább három, optikai sajátosságok alapján könnyen elkülöníthető szilárd fázist is tartalmaz (S1–2–3) szobahőmérsékleten. A c) ábra növekedési zóna mentén befogódott korai zárványokat mutat be, míg a d) ábrán álmásodlagos (a kék nyíl mentén) és másodlagos (a rózsaszín nyíl mentén) zárványokat láthatunk. A képek polarizációs mikroszkóppal készültek, síkban polarizált fényt használva. (A szerző saját felvételei)

üreges és csatornák. Ezek miatt a hőmérséklet vagy a nyomás emelkedésével viszonylag hamar elbomlanak. A zeolitcsoporton belül a stabilitást elsősorban a molekuláris víztartalom határozza meg. Például a kabazit nevű zeolitásvány Ca-iononként 6, míg a wairakit 2 H<sub>2</sub>O-t tartalmaz szerkezetében. Ezért a kabazit 80 °C fölött már nem stabil, míg a wairakit 200 °C fölötti átalakulási hőmérsékletet jelez (1c. ábra). A zeolitok stabilitási hőmérséklet-tartománya fölött más szilikátásványok, pl. az aktinolit vagy a gránát megjelenése szolgáltat hőmérsékletadatot. Bizonyos ásványok együttes megjelenése különösen alkalmas a hőmérséklet pontos becslésére, például a kalcit (CaCO<sub>3</sub>) és az epidot (Ca-Fe-Al-szilikát) csak 250 °C-hoz közeli hőmérsékleten stabil egymás jelenlétében (1c. ábra). Ezek az ásványok nagyon egyszerűen elkülöníthetők sztereomikroszkópos vizsgálatok segítségével jellegzetes alakjuk (pl. zeolitok), színük (pl. epidot vagy aktinolit) vagy híg (10 tömeg%-os) sósavval történő reakciójuk alapján (kalcit).

- 3) Vannak olyan ásványok, amelyek viszonylag széles hőmérsékleti tartományban stabilak. Ilyen például a kalcit (csak 260 °C alatt) vagy a kvarc (csak 110 °C felett). Ez a két ásvány növekedése során gyakran

befogja a geotermális fluidumot ún. fluidumzárványokként (2b–d. ábra). Mivel ezek az ásványok színtelenek és átlátszóak, a bennük előforduló zárványok polarizációs mikroszkóp segítségével könnyen tanulmányozhatók. A zárványok egyedi lehetőséget biztosítanak a fluidum fizikai állapotának (nyomás, hőmérséklet, halmazállapot) és összetételének közvetlen vizsgálatára.

A következő fejezetben bemutatom a fluidumzárványok keletkezésének általános körülményeit, valamint a rajtuk végzett mikrotermometriai kísérleteket. Néhány példán keresztül bemutatom azokat az eredményeket, amelyeket a zárványok alapos tanulmányozása nélkül legfeljebb közvetett módon nyerhetnénk a geotermális mezők állapotával kapcsolatban.

### III. Hogyan keletkeznek a fluidumzárványok és miképp osztályozhatjuk azokat?

A fluidumzárványok legtöbbször mikroszkopikus méretű fluidumcseppek, amelyek a növekedő ásványok felszí-

nén csapdázódnak (2., 3. ábra). Ezek a cseppek gyakran az ásványok rácshibáinak köszönhetően tapadnak meg a felszínen, majd az ásványok körbenövik a zárványokat. Bármilyen környezetben keletkezhetnek, ahol az ásványok valamilyen fluidum jelenlétében növekednek. A gyors ásványnövekedés kedvez a zárványok befogódásának, míg lassan növekedő ásványok ritkábban tartalmaznak fluidum- (vagy bármilyen egyéb) zárványokat. Emellett az ásvány felszínét nedvesítő fluidumok nagyobb eséllyel tapadnak meg a felületen és fogódnak be.

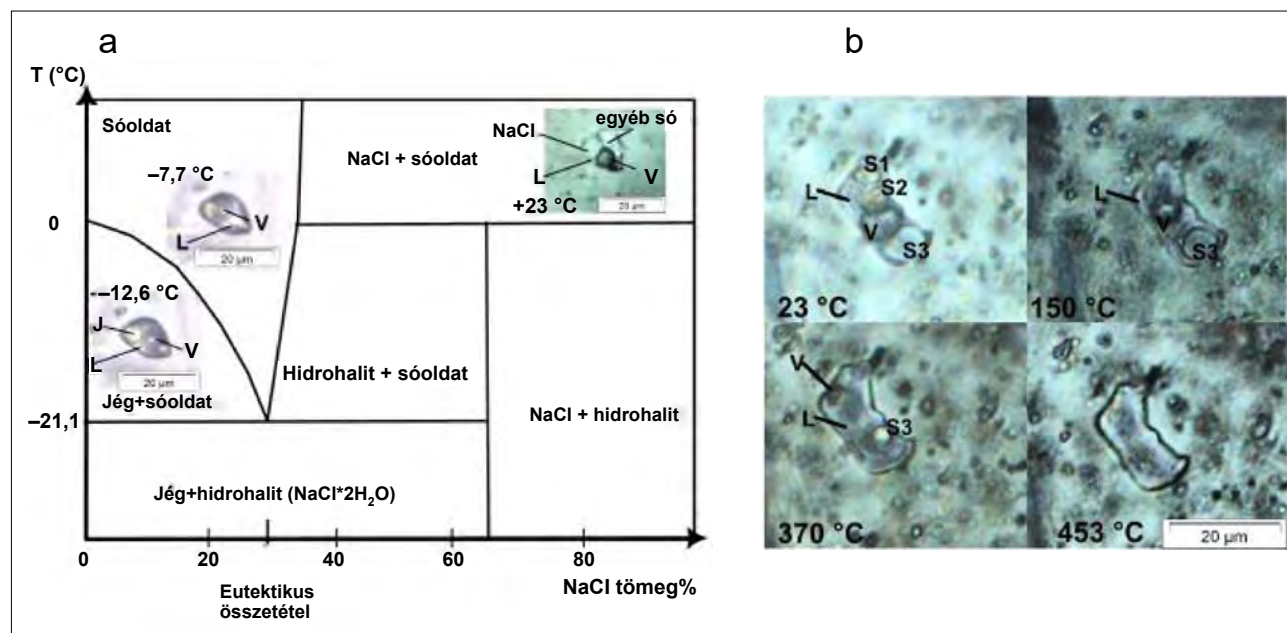
Fluidumzárványnak tekintünk minden olyan zárványt, amely befogódásakor fluid (tehát nem szilárd) halmazállapotú volt. Így fluidumzárványok az egykori olvadékok is, amelyek szobahőmérsékleten szilárd halmazállapotúak. Ezek a zárványok kőzetüveggént (2a. ábra) vagy mikrokristályos aggregátumokként jelennek meg a gazdaásványokban, és olvadékszárványként hivatkozunk rájuk. De a fluidumzárványok többsége szobahőmérsékleten legalább részben folyadék vagy gáz halmazállapotú, és amikor fluidumzárványokról van szó, általában ezekre asszociálunk.

A fluidumzárványok a bennük megjelenő fázisok alapján lehetnek egyfázisúak vagy többfázisúak (2. ábra). A 2a. ábra két, olivin gazdaásványban csapdázódott egyfázisú szilikátolvadék-zárványt mutat be. Ezzel szemben a 2b. ábrán különböző, többfázisú fluidumzárványokat láthatunk. A 2. ábrán az is jól látható, hogy ezek a zárványok legtöbbször nem egyedi zárványokként, hanem fluidumzárvány-együttesekként jelennek meg. Fluidumzárvány-együttesnek nevezzük azon zárványok összességét, amelyek szöveti megjelenésük alapján feltehetően ugyanazon folyamat eredményeként fogódtak

be. Amennyiben a zárványokban előforduló fázisok térfogataránya szobahőmérsékleten állandó (pl. 2a. ábra), feltételezhető, hogy a zárványok egy homogén fluidum jelenlétében záródtak be. Ezzel szemben, ha a zárvány-együttes egyes zárványaiban szobahőmérsékleten a fázisok térfogataránya változatos (2b–c. ábra), akkor keletkezésük során a fluidum nem volt homogén. Ilyen lehet pl. egy forrásban lévő fluidum, amelyben gőz és folyadék fázis is jelen van, és ezek különböző arányban csapdázódnak az egyes zárványokban.

A fluidumzárványokat bezáródásuk egymáshoz viszonyított kronológiai kapcsolata alapján korai és késői zárványokra oszthatjuk. A korai zárványok gyakran az ásványok magjában (2a. ábra) vagy növekedési zónájában (2c. ábra) fogódtak be. Korai zárványok közé tartoznak az ún. álmásodlagos zárványok is, amelyek az ásvány növekedése során kialakult repedés mentén fogódtak be, a repedés beforrásának köszönhetően. Ezzel szemben a másodlagos zárványok az ásványok növekedésének befejeződése után kialakult kőzetrepedésekben csapdázódtak. A késői, másodlagos zárványok azonosítását segíti, hogy a zárványsíkok (2 dimenzióban zárványsorok) a szemcsehatárokat átszelik. Az álmásodlagos és másodlagos zárványok közötti különbséget illusztrálja a 2d. ábra. A másodlagos zárványsíkok gyakran egymást is átszelik, és ezeket a síkokat időbeli sorrendbe lehet rendezni, azonban a 2d. ábra azt is jól szemlélteti, hogy ez az elkülönítés nem minden esetben egyszerű.

Abban az esetben, ha egy kőzettestet ért utolsó eseményt szeretnénk tanulmányozni, ami akár a jelenben is játszódhat, a legutolsó másodlagos zárványokat kell részletesen vizsgálnunk. Amennyiben a kőzettestet ért



3. ábra. a) Fázisátalakulások a NaCl-H<sub>2</sub>O rendszerben légköri nyomáson. A polarizációs mikroszkóppal készített képek különböző összetételű zárványokat mutatnak különböző hőmérsékleteken. J: jég, L: sóoldat, V: gőzfázis. b) Egy ötfázisú fluidumzárvány fázisátalakulásai a fűtési kísérlet során. Szobahőmérsékleten három szilárd fázis (S1-3), gőz (V) és sóoldat (L) van jelen a zárványban. 150 °C-on az S1 és S2 már feloldódott, 370 °C-on a gőz fázis térfogata nagyon kicsi, 453 °C-on a zárvány egyfázisú, csak folyadék halmazállapotú sóoldatot tartalmaz. (A képek a szerző saját felvételei)

időbeli változások tanulmányozása a fő cél, a mintában a kémiai vizsgálatokat megelőzően a lehető legtöbb fluidumgenerációt el kell különítenünk kronológiailag. Ezt alapos polarizációs mikroszkópiai vizsgálattal végezzük.

## IV. A fluidumzárványokon leggyakrabban alkalmazott mikrotermometriai kísérletek jelentősége

A fluidumzárvány vizsgálataiban az egyik leggyakrabban alkalmazott módszer a hűthető-fűthető tárgyasztal segítségével végzett kísérletek módszere, amelyet röviden mikrotermometriának nevezünk. A tárgyasztal, amelynek mintakamrájában egy néhány ásványszemcséből álló, polírozott kőzetdarabka elfér, a polarizációs mikroszkópra rögzítjük, így a minta hűtése és fűtése során a mikroszkóp segítségével megfigyelhetjük a zárványokban történő fázisátalakulásokat. A fluidumzárványokat leggyakrabban a  $-196$  és  $+600$  °C-közötti hőmérséklet-tartományban vizsgáljuk.

A kísérletek során a következő fázisátalakulásokat szoktuk megfigyelni.

*Kezdeti olvadási hőmérséklet:* A rendszer gyors fűtését követően lassú fűtés során megfigyeljük azt a hőmérsékletet, amelynél az első olvadéknem jelennek meg. Ez a hőmérséklet a fluidum összetételéről ad számunkra információt. Például, amennyiben a fluidumzárványaink tiszta  $\text{CO}_2$ -t tartalmaznak, ez a hőmérséklet légköri nyomáson  $-56,6$  °C, de ha egy NaCl-tartalmú vizet oldatot, akkor a hőmérséklet  $-21,2$  °C (3. ábra). Ha sóoldatok esetén a megfigyelt kezdeti olvadáspont nem egyeztethető össze egyetlen rendszer eutektikus hőmérsékletével sem, akkor az oldatunk több különböző sót is tartalmaz. A 3. ábrán látható, szobahőmérsékleten kétfázisú fluidumzárvány  $-21$  és  $-20$  °C között kezdett megolvadni. Ez arra utal, hogy dominánsan NaCl-ot tartalmaz.

A kezdeti olvadási hőmérséklet mellett a *végző olvadási hőmérsékletet* is feljegyezzük. Ez a hőmérséklet pl. sóoldatok esetén az oldat koncentrációjáról ad információt. A 3a. ábrán látható, kétfázisú fluidumzárványban a fűtés során a szilárd fázis  $-7,7$  °C-on tűnt el, ami 11 tömeg%-os NaCl-koncentrációnak felel meg. Ezzel szemben ezt a szobahőmérsékleten még legalább öt fázist tartalmazó zárványt a sókoncentráció meghatározásához addig szükséges fűteni, amíg a zárványban található kocka alakú NaCl-kristály feloldódik. Ebben a zárványban ez  $450$  °C közelében történt meg, ami közel 50 tömeg%-os NaCl-oldatnak felel meg.

A *homogenizációs hőmérsékleten* a fluidumzárvány már csak egy fázist tartalmaz (3b. ábra). A homogenizáció több formában játszódhat le, tehát a hőmérséklet mellett a homogenizáció formáját is fel kell jegyezni. Azok a fluidumzárványok, amelyek a buborékfázis fűtés során történő növekedésével a gőzfázisba homogenizálódnak, gőz halmazállapotban fogódtak be, míg azok a

zárványok, amelyek a buborékfázis fűtés során történő zsugorodásának köszönhetően a folyadékfázisba homogenizálódnak, folyadékként záródtak be. Azokban az esetekben, amikor heterogén fluidum záródott be (2b. és 2c. ábra), a fluidumzárvány-együttes vizsgálata során megfigyelt legalacsonyabb homogenizációs hőmérséklet reprezentálja az egykori fluidum hőmérsékletét, mivel a zárványok többsége a rendszerben előforduló fluidumkomponenseket változó arányban zárja be. Fontos megjegyezni, hogy a homogenizációs hőmérséklet nem feltétlenül egyezik meg a zárványok bezáródási hőmérsékletével, sok esetben nyomáskorrekciót kell alkalmazni, aminek részleteit itt nem tárgyaljuk.

A következő fejezetben néhány példával illusztrálom, hogy az előbbieken bemutatott vizsgálatok hogyan nyújtanak egyedi információt az egyes aktív geotermális mezők működésének pontosabb megismeréséhez.

## V. A fluidumzárványok jelentősége geotermális kutatásokban

Paka geotermális mező, Kenya, Kelet-Afrikai-árok

A Kelet-Afrikai-árokrendszer vulkanikusan aktív terület, ahol a vulkáni aktivitást a kontinentális litoszféra meghasadása (riftesedése) váltja ki, a hasadék mentén Afrika kontinensét lassan kettéválasztva. A kenyai Paka geotermális mezőt 1993-ban azonosították, és az elmúlt évtizedben kezdték el részletes tanulmányozását. A kutatás célja, hogy megállapítsa, alkalmas-e a terület geotermális erőmű létesítésére. Az első kutató mélyfúrás 2018-ban mélyítették, amelyet azóta tíz újabb követett, és két fúrás most is folyamatban van. Az első kutatófúrás anyagának részletes vizsgálata alapján [7] kimutatták, hogy a hőmérséklet már  $400$  m mélységben eléri a  $180$  °C-ot, és  $1450$  m mélység alatt a rendszer hőmérséklete  $280$  °C fölött lehet a jelen lévő átalakulási ásványegyüttesek alapján. A kvarcban befogódott fluidumzárványokat két szintben,  $1390$  és  $2550$  m mélységben tanulmányozták. Ezekben a zónákban ugyanis a fúrás során nagy mennyiségű fluidum beáramlását tapasztalták, tehát a kitermelés szempontjából ez a mélységtartomány a legérdekesebb. Az  $1390$  m mélységben megjelenő klorit és illit rétegszilikát-ásványok kb.  $220$  °C-os hőmérsékletet jeleznek, míg a kvarcban előforduló fluidumzárványok  $211$ – $267$  °C-ot rögzítenek, ami kiváló egyezésnek tekinthető. A  $2550$  m mélységben előforduló epidot-aktinolit ásványtársulás alapján a hőmérsékletet  $\sim 250$  °C-nak becsülték, míg a fluidumzárványok  $200$ – $271$  °C közötti hőmérsékletet mutattak. Az ásványegyüttes és a fluidumzárványok által meghatározott hőmérséklet a kút alján ( $2550$  m) megegyezik a 2020-ban mért hőmérséklettel ( $244$  °C). Ezzel szemben sekélyebb mélységben ( $700$ – $1450$  m) a mért hőmérséklet közel  $30$  °C-kal alacsonyabb volt 2020-ban, mint a zárványok és az ásványegyüttes alapján becsült érték. Az eltérés jelezheti, hogy két év-

vel a fúrás mélyítése után a kút bizonyos részei még nem kerültek teljesen termális egyensúlyba. A fluidumzárványok vizsgálata arra is rámutatott, hogy a geotermális rendszer nagy mélységben homogén, folyadék halmazállapotú, és kis oldottanyag-tartalmú fluidumot tartalmaz. Az átalakulási ásványegyüttes, a felszínen gyűjtött fluidumminta, valamint a fluidumzárványok összetétele arra utal, hogy a geotermális mező fluidumának összetétele stabil, bár a hőmérséklet enyhén ingadozhatott a közeli geológiai múltban.

## Reykjanes geotermális mező, Izland, Közép-Atlanti-hátság

A Reykjanes geotermális mező Délnyugat-Izlandon található, ahol a Közép-Atlanti-hátság a szárazföldre lép. Lemeztektonikai szempontból ez a terület is riftesedéshez köthető. A geotermális mező a vulkanikusan aktív Reykjanes vulkáni terület része, ahol az utolsó vulkánkitörés i. sz. 1240-ben történt. Maga a geotermális mező a felszínen kb. 1,5 km<sup>2</sup> kiterjedésű, területén 12 termelőkút biztosítja a fluidumot a jelenleg 100 MWe kapacitású geotermális erőmű számára. Az Atlanti-óceán közelségének köszönhetően a geotermális mezőt tengervíz táplálja. A geotermális rendszerek potenciáljának minél teljesebb kihasználása érdekében az utóbbi évtizedekben Izlandon a szokásosnál nagyobb mélységű (>3000 m) geotermális mélyfúrásokkal kísérleteztek (IDDP program). Ezek közül az egyik mélyfúrást a Reykjanes geotermális mezőn mélyítették. A fúrás során több mélységből is sikerült fúrómagmintát venni, ami lehetőséget nyújtott a fluidumzárványok vizsgálatára is. Ez azért volt fontos, mert 3–5 km mélységben gyakorlatilag lehetetlen közvetlenül mintát venni a fluidumból, amelynek összetétele a felszínre érve a hűlésének köszönhetően jelentősen megváltozik. A zárványvizsgálatokat megelőzően semmilyen fluidum-összetételre vonatkozó információ nem volt a területről ebből a mélységből, és a hőmérséklet becslése is problémát okozott. A kvarcban tanulmányozott fluidumzárványok alapján a kút legmélyén a fluidum hőmérséklete 600 °C körüli, ami kisebb, mint a legtöbb geotermometriára alkalmas ásványegyüttes által jelzett érték (>700 °C) [8, 9]. Ennek oka abban keresendő, hogy a különböző ásványegyüttesek változó gyorsasággal kerülnek újra termális egyensúlyba egy közettest hűlése során. A szilikátásványok által jelzett 700 °C fölötti hőmérséklet egy benyomuló magmás test által kialakított magas hőmérsékletű, ún. kontakt metamorf eseményt rögzít. Ezekben az ásványokban ennél alacsonyabb hőmérsékleten a kationdiffúzió erősen lelassul, tehát viszonylag lassan kerül az ásványegyüttes újra termális egyensúlyba. Ezzel szemben az oxidásványokban, mint amilyen az ilmenit (FeTiO<sub>3</sub>) és a magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), a Fe és Ti diffúziója több nagyságrenddel gyorsabb alacsony hőmérsékleteken is. Ez ad magyarázatot arra, hogy az oxidásványok által mutatott hőmérséklet (623 ± 19 °C) [9] ebben a fúrási mélységben megegyezik a fluidumzárványok által rögzített hőmérséklettel (600 ± 10 °C) [8].

A fluidumzárványok vizsgálata rávilágított arra is, hogy a terület alatti, kitermelésre alkalmas konvektív zóna a jelenleg hasznosítotthoz képest akár 1 km-rel nagyobb mélységig kiterjedhet [10]. Emellett a fluidumzárványok arra is rávilágítottak, hogy 4300 m alatti mélységben egy nagy sótartalmú (~50 tömeg%-os) oldat mellett gőzfázis is jelen van [8, 10]; 4300 m fölött a sóoldat koncentrációja lényegesen kisebb, de összetétele változatos (a NaCl-KCl-FeCl<sub>2</sub>-tartalmat tekintve), ami a leszivárgó tengervíz és a bazaltos kőzet közötti kölcsönhatásnak köszönhető [10]. A minden mélységben megfigyelt fázis-szeeparációért (forrásért) a fluidumban jelenlévő H<sub>2</sub>S és CO<sub>2</sub> gázok felelősek, amelyek valószínűleg magmás eredetűek, és a nagyobb mélységben előforduló intruzív testek kigázosodása révén jöttek létre [7, 10]. A fenti adatok azért fontosak, mert lehetőséget nyújtanak arra, hogy meghatározzuk, milyen és mennyi ásvány csapódik ki a fluidumból a kútban különböző mélységekben a termelés során. Erre támaszkodva becslést adhatunk arra, hogy milyen gyakran és milyen módon szükséges egy kút tisztítása. Emellett laboratóriumi körülmények között is lehet tesztelni, hogy a kútban alkalmazott béléscsővek, illetve egyéb berendezések milyen módon és mennyi idő alatt korrodálódnak, amennyiben a meghatározott oldottanyag-tartalmú fluidumokkal érintkeznek.

A két esettanulmány jól mutatja, hogy milyen módon egészíti ki az ásványtársulások tanulmányozását a bennük előforduló fluidumzárványok vizsgálata, és miképp értelmezzük a geotermális fúrások során kapott hőmérsékleti adatokat. Mindez segítséget nyújt egy az adott területen létrehozandó geotermális erőmű költségének és fenntarthatóságának tervezésében.

## Irodalom

1. <https://mgte.hu/geotermikus-energia-magyarorszagon/>
2. <https://www.power-technology.com/projects/hellisheidi-geothermal-power-plant/>
3. Ragnarsson Á., Steingrímsson B., Thorhallson S. (2021): Geothermal Development in Iceland 2015–2019. In: Proceedings World Geothermal Congress 2020+1
4. Gunnlaugsson E., Eiríksson G., Sæmundsson K. (2014): Icelandic rocks and minerals. *Mál og Menning*, pp. 232
5. <https://www.mannvit.com/projects/theistareykir-geothermal-power-plant/>
6. Friðleifsson G. Ó., et al. (2021): The IDDP success story – Highlights. In: Proceedings World Geothermal Congress 2020+1
7. Míbei G., Harðarson B. S., Franzson H., Bali E., Geirsson H., Guðfinnsson G. H., Lichoro C., Lagat J. (2022): Reservoir characterization of the Paka geothermal system in Kenya: Insights from borehole PK-01. *Geothermics*, 98, January 2022, 102293.
8. Bali E., Aradi L. E., Zierenberg R., Diamond L. W., Pettke T., Szabó Á., Guðfinnsson G. H., Friðleifsson G. Ó., Szabó Cs. (2020): Geothermal energy and ore-forming potential of 600 °C mid-ocean-ridge hydrothermal fluids. *Geology*, 48 (12), 1221–1225.
9. Zierenberg R., Friðleifsson G. Ó., Elders W., Schiffman P., Fowler A., Reed M., Zakharov D., Bindeman I. (2021): Active basalt alteration at supercritical conditions in IDDP-2 drill core, Reykjanes, Iceland. In: Proceedings World Geothermal Congress 2020+1
10. Hune L. (2023): Temperature and salinity of the deep geothermal fluid in the Reykjanes geothermal field based on fluid inclusions. MSc thesis, University of Iceland, pp. 110

# MÁGNESEK METEORITOKBAN

Kovács András

Ernst Ruska Centre for Microscopy and Spectroscopy with Electrons,  
Forschungszentrum Jülich, Németország

A bolygónkra érkező meteoritok és az azokban megtalálható ásványok tanulmányozása izgalmas lehetőséget biztosít a Naprendszerünk keletkezése során lejátszódó folyamatok megismerésére, mivel a meteoritok többsége ebből az időből származik. A légkörön áthaladva a meteoroid felülete felforrósodik és elpárolog (ezt látjuk meteorként), a kisebb kőzetdarabok teljesen megsemmisülnek, azonban a nagyobbak meteoritként eléri a Föld felszínét. A meteoritok belsejében lévő ásványok megmaradhatnak eredeti állapotukban, és tükrözik a több milliárd évvel ezelőtti keletkezésük körülményeit, a laboratóriumi körülményeinkhez viszonyítva nagyon lassú folyamatok lenyomatát. A meteoritok révén lehetőségünk nyílik közel ideális termodinamikai körülmények között kialakuló anyagszerkezetek vizsgálatára, és az így szerzett ismeretek technológiai alkalmazásokhoz is vezethetnek.

## Bevezetés

A meteoritokat a fejlődéstörténetük alapján differenciálatlan (nem vagy részlegesen megolvadt) és differenciált (teljesen megolvadt) csoportba osztjuk. A Naprendszer keletkezése során (kb. 4,6 milliárd évvel ezelőtt) ugyanis egy zónás rendszer alakulhatott ki a hőmérséklettől és nyomástól függően. A Nap egy nagy tömegű és sűrűségű molekulafelhőből alakult ki, amelynek zsugorodása során a növekvő sűrűségű anyag folyamatos ütközések mellett felmelegedett, kialakítva a központi, ún. protocsillagot. A protoplanetáris korongban, a bolygóközi anyagból ütközések és olvadás következtében keletkezett, lehűléssel megszilárdult képződmények a kondritumok, amikből az első égitestek is keletkeztek. Ebből a szakaszból származnak a kondritmeteoritok, amelyek a legnépesebb meteoritcsoportot alkotják. Míg a kondritok keletkezésük óta alig változtak, a nagyobb kőzettestek a gravitációs összehúzódás révén megolvadtak, anyaguk olvadt állapotban differenciálódott, és ennek során kialakult a bolygócsírák magja, köpenye és kérge.



Kovács András fizikus, a Forschungszentrum Jülich Ernst Ruska Centre (Németország) intézetének tudományos munkatársa. 2005-ben doktorált az Eötvös Loránd Tudományegyetemen. Kutatási területe a mágnesség, a mágneses anyagok vizsgálata transzmissziós elektronmikroszkópos módszerekkel és elektromágneses terek elektronholográfiás vizsgálata.

A meteoritokat anyaguk alapján három csoportba, kő-, kő-vas- és vasmeteoritokra oszthatjuk – ezek közül az utóbbi kettő igen ritka [1]. A vasmeteoritok ugyanis nagy valószínűséggel a bolygócsírák magjából, míg a kő-vas-meteoritok a mag és köpeny átmeneti tartományából származnak. A tudomány több száz különféle ásványt azonosított a meteoritokban – azok nagyobb része a Földön is megtalálható, kisebb részük azonban nem.

A vasmeteoritok főként egy vasban gazdag vas-nikkel ötvözetből állnak (kb. 90% vas). Emellett kisebb mennyiségben jelen lehetnek egyéb elemek, amelyek könnyen lépnek kémiai reakcióba a vassal, pl. a nikkellel és kobalttal, illetve a kénnel, pl. a rézzel és ezüsttel. A vasmeteoritok igen ritkák, hozzávetőleg 4–5%-át teszik ki a bolygónkra érkező meteoritoknak. Leírásuk és osztályozásuk megtalálható részletes összefoglalókban [1, 2]. Érdekes módon a vas-nikkellel rendszer kétkomponensű fázisdiagramjának két változata van: egy a laboratóriumban előállítható fázisokkal és egy másik, amely tartalmazza a meteoritokban előforduló fázisokat is [3]. Erre az a magyarázat, hogy a meteoritok a Naprendszer korai szakaszában keletkeztek, és az anyaguk az űrben utazva több milliárd év alatt, erős gravitáció hiányában hűlt ki. A becslések alapján a meteoritok egymillió év alatt közel egy Celsius-fokot hűlnek, és ezalatt egy rendkívül lassú diffúziós átrendeződés történik, amely lehetőséget ad termodinamikailag stabil és laboratóriumi körülmények között nehezen előállítható szerkezeti fázisok kialakulására.

A kétkomponensű vas-nikkellel-fázisok közül alacsony nikkeltartalmú (5–10 atom%) a kamacit, amely tércentrált köbös elemi cellájú (*body-centered cubic – bcc*), hasonlóan a vashoz (lásd 1. táblázat). A következő sűrűn előforduló ásványi szerkezet a ténit, amely lapcentrált köbös (*face-centered cubic – fcc*) szerkezetű, és nagyobb nikkeltartalom jellemzi. Ezen két fázis szétválása hozza létre a vasmeteoritokban gyakran előforduló keresztmintázatot (Widmanstätten–Thomson-mintázat), amelyet egymástól függetlenül W. Thompson és A. von Widmanstätten figyelt meg meteoritok polírozott és savval kezelt felületén, még a 19. század elején. A rendezett és egymást követő vas- és nikkelletegekből felépülő ásvány a tetraténit, amely lapcentrált tetragonális (*face-centered tetragonal – fct*) elemi cellájú. Említésre méltó még az awaruit, az egyetlen olyan ásvány, amelyben több a nikkellel, mint a vas. Ez az ásvány szintén lapcentrált elemi cellájú, és előfordul a Földön is.

A meteoritok nagy felbontású szerkezeti vizsgálatára (is) alkalmas a transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM), amely nagy gyorsítófeszültséggel (50–300 kV) létrehozott elektronsugarat használ, amely a mintán át-

Meteoritokban előforduló kétkomponensű vas-nikkel ásványok alapvető szerkezeti és összetételei jellemzői. Az utolsó sorban található szerkezet nem kapott ásványnevet, az elemi cella paraméterei becslési értékek

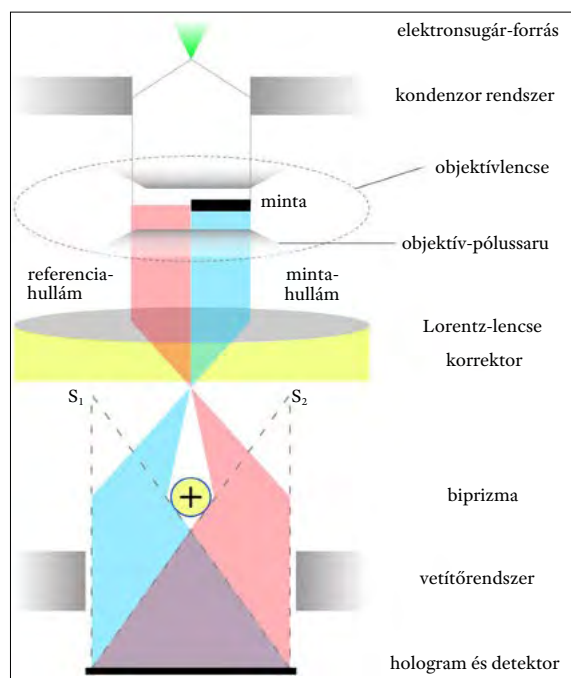
Ásvány	Elemi cella	Szerkezet	Szimmetriacsoport	Strukturbericht jelölés	Összetétel, atom%
Kamacit	$a = b = c = 0,345 \text{ nm}$	bcc	Im-3m	A2	Fe ~ 95 Ni ~ 5
Ténit	$a = b = c = 0,357 \text{ nm}$	fcc	Fm-3m	A1	Fe 80–35 Ni 20–65
Tetraténit	$a = 0,253 \text{ nm}$ $c = 0,358 \text{ nm}$	fct	P4/mmm	L1 <sub>0</sub>	Fe ~ 65 Ni ~ 35
Awaruit	$a = b = c = 0,354 \text{ nm}$	fcc	Pm-3m	L1 <sub>2</sub>	Fe ~ 40 Ni ~ 60
-	$a = 0,253 \text{ nm}$ $c = 0,358 \text{ nm}$	fct	P4	A6	Fe ~ 90 Ni ~ 10

haladva és azzal kölcsönhatásba lépve használható képalkotásra és különböző spektroszkópiai információk rögzítésére. A módszert az anyagtudományban, a szerkezeti biológiában és a félvezetőiparban is széles körben alkalmazzák. Az elmúlt években kidolgozott új technológiai vívmányoknak (nagy érzékenységű detektorok, lencsehiba-korrektorok, mintatartók) köszönhetően a modern berendezések esetében a pontfeloldás  $1 \text{ \AA}$  ( $0,1 \text{ nm}$ ) alatt van, így velük ehhez közelítő, atomi felbontású spektroszkópia és háromdimenziós morfológiai vagy összetételei rekonstrukció is végezhető. A gazdag lehetőségek az utóbbi két-három évtizedben sok új TEM-es módszer kifejlesztését eredményezték [4]. Ezek egyike az elektronholográfia, amelyet a meteoritok vizsgálatára alkalmaztunk.

## Elektronholográfia

A holográfia módszerét Gábor Dénes (Nobel-díj, 1971) a TEM optikai feloldáskorlát-problémájának megoldásaként javasolta, már 1946-ban [5]. Alkalmos koherens elektronforrás hiányában a módszer évtizedekig nem terjedt el az elektronmikroszkópiában, csak az 1990-es évektől alkalmazható – a téremissziós elektronforrások elterjedésének köszönhetően. A módszer lényege, hogy két vagy több elektronsugár interferenciájából hologramot rögzítünk, amely digitális feldolgozás után az elektronhullám fázisát is mérhetővé teszi, nem csak az intenzitását. Napjainkban az elektronmikroszkópos anyagtudományban leginkább a holográfia ún. „off-axis” változata (*off-axis electron holography*) terjedt el (1. ábra). A módszer lényege, hogy egy pozitív töltésű biprizma segítségével a mintán áthaladó mintahullám és a vákuumon áthaladó referenciahullám – amelyekhez két virtuális forrás ( $S_1, S_2$ ) rendelhető – interferenciáját hozzuk létre. A keletkező hologramot nagy érzékenységű detektorral rögzítjük, majd digitálisan dolgozzuk fel. Az elektronsugár a mintán áthaladva karakterisztikus fáziseltolódásra tesz szert, amely az ún. mintapotenenciával és a minta síkjával párhuzamos mágneses induk-

cióvektorral arányos. A kétféle, elektromos és mágneses potenciál rögzítése lehetőséget nyújt többek között a minta vastagságának, elektromos tereinek és mágneses tulajdonságainak (doménszerkezet, doménfalátmérő, mágneses kölcsönhatások) nagy érzékenységű és nagy pontosságú mérésére. Mágneses minták esetében a mikroszkóp objektívlencséje kikapcsolt állapotban van, ezáltal létrehozva egy mágneses tétől mentes környezetet (Lorentz-mód). A képalkotás a mintától távol eső Lorentz-lencsével vagy a lencsehiba-korrektor segítségével történik. A digitális feldolgozással kapott mágneses fáziseltolódást kontúrvonalak és színspektrum segítségével jelenítjük meg, amelyek vizuálisan segítik a mágneses tér



1. ábra. Az elektronholográfiás mérésnél alkalmazott sugármenet a transzmissziós elektronmikroszkópban. A mintán és a vákuumon áthaladó két koherens elektronsugár interferáltható egy pozitív töltéssel ellátott biprizma segítségével. A mágneses minták esetében az objektívlencse nem aktív, szerepét egy ún. Lorentz-lencse vagy a lencsehiba-korrektor veszi át

nagyságának és irányának tanulmányozását. Az elektronholográfia módszerének leírása és alkalmazása mágneses mérésekre megtalálható az összefoglalóban [6].

Az elektronholográfiás módszer sikeresen alkalmazható bármilyen módszerrel készült – hagyományos vagy fókuszált ionsugárral (*focused ion beam* – FIB) vékonyított – elektronmikroszkópos mintákon. Kizárólag annak a feltételnek kell teljesülnie, hogy a vizsgált terület közelében vákuum legyen, amelyen a referenciahullám zavartalanul áthaladhat. A FIB-bel készült minta előnye, hogy az érdekes terület a mintán belül jól kiválasztható, és a kívánt geometriában elkészíthető az elektronmikroszkópos vizsgálatokhoz.

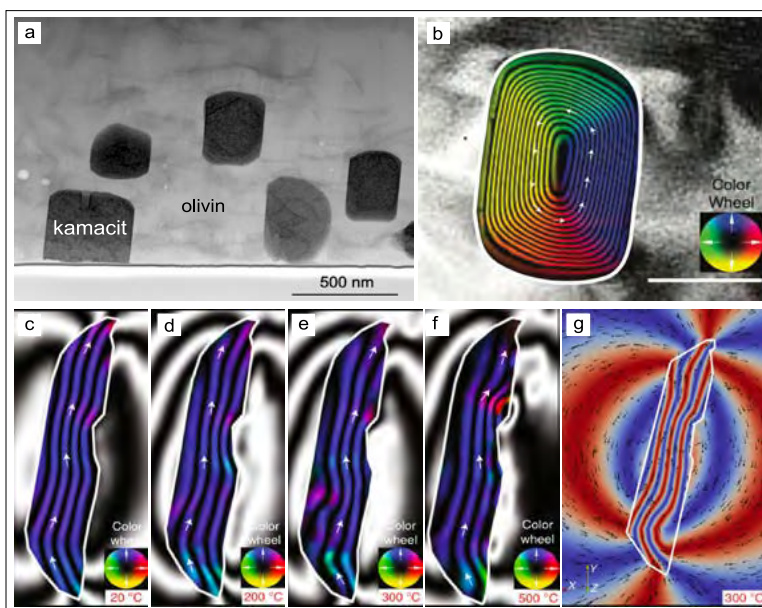
## A kamacit mint mágneses adattörzítő

A paleomágneses kutatások egyik alapfelvetése az, hogy a kőzetek remanens mágnesezettsége megőrzi az anyag keletkezése során ható földi mágneses tér irányát, s ezáltal – bolygónk mágneses pólusváltásainak jellegzetes időbeli eloszlása alapján – kormeghatározásra, illetve a kőzetlemezek egykori térbeli pozíciójának vizsgálatára használható. A termoremanens mágnesezettség vizsgálatát alkalmazhatjuk meteoritok esetében is, s mivel a keletkezésük időpontját a Naprendszer korai szakaszára tehetjük, ezáltal az akkoriban fennálló körülményekről szerezhetünk tudomást. A Semarkona kondritmeteorit körültekintő tanulmányozásával a mágneses teret  $54 \pm 21 \mu\text{T}$  nagyságúnak sikerült becsülni a protoplanetáris korong helyén, a Nap születése idején, de még a bolygók és más égitestek kialakulása előtt [7].

A mágneses információhordozók ezekben a meteoritokban jellemzően a nagy vastartalmú kamacitkristályok, amelyek egyenletes indukált mágnesezettség esetében megbízható stabilitásúak. Azonban néhány évvel ezelőtig kérdéses maradt a nem egyenletes, bár egydomén-szerkezetű kamacitkristályok stabilitása. A Bishunpur kondritmeteorit (Natural History Museum, London) elektronmikroszkópos vizsgálatával [8] sikerült erre a kérdésre választ kapni.

A 2a. ábra mutatja a kamacitkristályok beágyazódását olivinmátrixban (az olivin egy rombos szerkezetű,  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$  összetételű szilikátásvány). A kamacitkristályok átlagosan  $353 \times 250 \text{ nm}$  méretűek, és szinte kizárólag vasat tartalmaznak ( $\sim 1\%$  Ni). Az elektronholográfiás mérésekből a mágneses állapot (2b. ábra) meghatározható, amely jelen esetben egy egydoménes örvényszerkezet, ún. vortex állapot. A kristálylapok mentén a mágneses indukcióvonalak folytonosak, és szorosan követik a kristályalakot, egy zárt rendszert képezve, külső szórt mágneses tér nélkül. Ennek következtében a kristályok között mágneses kölcsönhatás nem lép fel.

A Bishunpur meteorit belső tartományát a légkörön keresztülhaladva körülbelül  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ -os hőterhelés érte [9]. Ennek ismeretében felmerül a kérdés, hogy mennyire megbízhatóan alapozhatunk a kamacitkristályokra mint mágneses információhordozókra. A 2c.–f. ábra mutatja egy kamacitkristály mágneses indukció-térképeit a hőmérséklet függvényében, amelyeket *in situ* elektronholográfiás kísérletekből származtattunk. A kiinduló állapot szobahőmérsékleten egy rúd-mágnes téreloszláshoz hasonlít, amelyben meghatározható a két pólus és a külső, szórt mágneses erővonalak. A kristály belsejében a kontúrvonalak párhuzamosan futnak, követve a kristály alakját, mágneses egydomént alkotva. Az indukcióvonalak a hőmérséklet emelkedésével jelentősen nem változnak, ellenben a sűrűségük fokozatosan csökken, ahogy a hőmérséklet  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra emelkedik. A mágnesezettség csökkenése várható jelenség, mivel közelítünk a kamacit Curie-hőmérsékletéhez ( $\sim 760 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ahol a ferromágneses állapot megszűnik. A 2g. ábra a kísérletben szereplő kamacitkristály mikromágneses modellezésből származtatott mágneses téreloszlását mutatja  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ -on. A modellezett és a kísérletileg megfigyelt mágneses állapot szinte tökéletesen megegyezik, igazolva a remanens mágneses állapot nagyfokú stabilitását egy nem izotrop kamacitkristályban, amennyiben a hőmérséklet nem haladja meg a Curie-hőmérsékletet. További elméleti számításokkal [8] sikerült igazolni, hogy a kamacitkristályok mágnesezettsége stabil marad a közel 4,6 milliárd éves időintervallumban, és ezen a kb.  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ -os hőkezelés nem változtat. Ezen eredmények azt bizonyítják, hogy a kondritmeteoritokban megtalálható ásványok megbízható forrásai a Naprendszer korai szakaszából származtatható, mágnességre vonatkozó információknak.



2. ábra. (a) Kamacitkristályok olivinba ágyazódva, világos látóterű TEM-felvételen. (b) Egy kamacitkristály mágneses indukciós térképe. A színek és a kontúrvonalak a mágneses tér erősségét és síkbeli eloszlását reprezentálják. (c–f) Mágneses indukciótérkép a hőmérséklet függvényében  $20$ ,  $200$ ,  $300$  és  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ -on. A mágneses kontúrvonalak távolsága (b)  $\pi$ , illetve (c–f)  $\pi/2$  radián. (g) Mikromágneses modellből számolt téreloszlás. (A [8] alapján)

## Milliárd éves anyagtudomány

A meteoritokban kialakuló fázisok nemcsak anyagtudományi szempontból, hanem a technológiai alkalmazás oldaláról is érdekesek. Ilyen figyelem irányul a tetraténit, amelyben a vas- és nikkelatomrétegek váltakozva, rendezetten követik egymást egy tetragonális elemi cellában (1. táblázat). Ezen rendeződésnek köszönhetően a rétegek között egy erős mágneses kölcsönhatás lép fel, amelynek nagysága az olyan permanens mágnesekéhez közelít, mint például a Nd-Fe-B és Sm-Co alapú anyagok. Ezekkel szemben a tetraténit nem tartalmaz ritkaföldfémeket (pl. Nd, Sm, Dy, Tb), amelyek bányászata és nagy mennyiségű előállítása összetett, költséges és a természetre káros folyamat. A tetraténit előállítása azonban még laboratóriumi körülmények között is csak nagyon kis mennyiségekben sikerült eddig. A nagy nikkel-tartalmú vasmeteoritok (ataxitok) nagy mennyiségben tartalmaznak tetraténitet, és ezek vizsgálata bepillantást ad egy termodinamikailag ideális állapot kialakulásába, amelyben a tetraténit fázis képződhet.

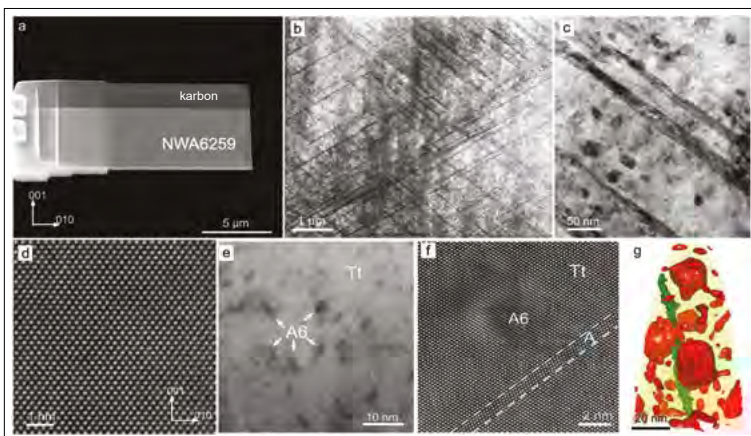
Az NWA6259 vasmeteorit közel két kilogrammos tömeggel érkezett az afrikai kontinens északnyugati részére. Mintegy 43 atom%-ban tartalmaz nikkelt, amely közel ideális összetétel a tetraténit kialakulásához. Az első vizsgálatok a rendezett vas–nikkel fázis jelenlétét igazolták, azonban a mágneses tulajdonságok elmaradtak a tetraténit esetén várt szinttől (pl. a mért mágneses koercitivitás mintegy a harmada a várt értéknek). Az eltérés okának felderítésére modern szerkezetvizsgálati és szimulációs módszereket alkalmaztunk [10].

A 3a. ábra mutatja az elektronmikroszkópos vizsgálatokra elkészített kb. 100 nm vastagságú szeletet, amely fókuszált ionsugaras (FIB) és pásztázó elektronsugaras mikroszkóp együttes alkalmazásával készült. E módszerrel az előzetes krisztallográfiai ismeretek alapján a kívánt

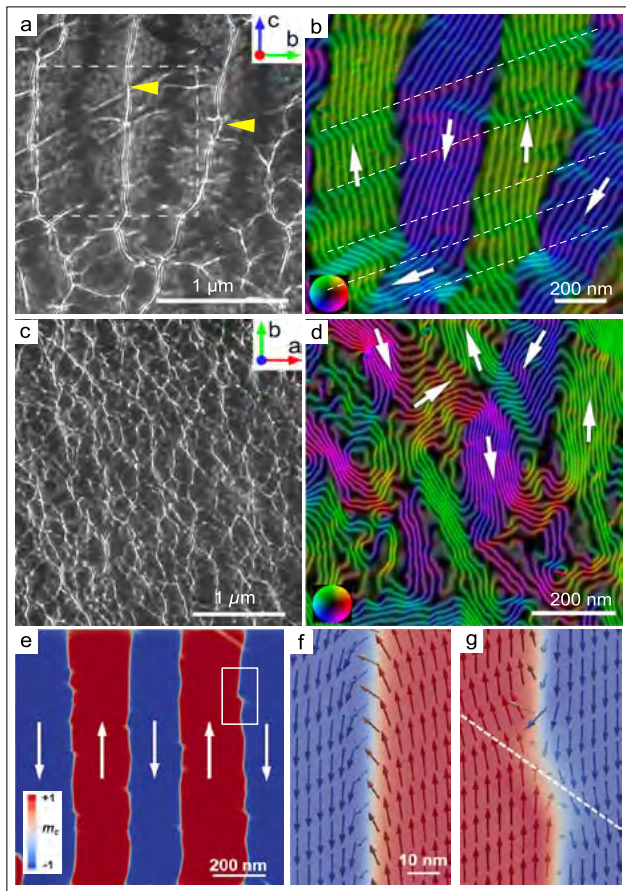
orientációban tudjuk elkészíteni a mintát; jelen esetben úgy, hogy a krisztallográfiai  $\langle 001 \rangle$  irány – amely a tetraténit könnyű mágnesezhetőségi iránya is egyben – a minta síkjában helyezkedjen el. Az erre merőleges irányból az elektrondiffrakciós felvételek igazolták a tetraténit fázis jelenlétét. A világos látóterű elektronmikroszkópos felvételek (3a., b. ábra) azonban egyéb fázisok jelenlétét is megmutatták, amelyek közül a vetületben tűszerű, de valójában lap alakú kiválásokat a nikkelben gazdag awaruiként, és a kb. 30 nm átmérőjű szemcséket vasban gazdag kamacitként sikerült azonosítani. Ezen fázisok a tetraténit mátrixban alakultak ki, aminek atomi feloldású szerkezetét a 3d. ábra mutatja az összetételre is érzékeny nagy látószögű, gyűrűs, sötét látóterű (*high-angle annular dark-field – HAADF*) pásztázó TEM (*scanning transmission electron microscopy – STEM*) felvételen.

Megfelelő mikroszkópbeállítás mellett a pásztázó TEM-es leképezés érzékeny a minta összetétele mellett a diffrakciós állapotra is, így a felvétel kimutatta egy 2–4 nanométeres mérettartományú szemcséket alkotó fázis jelenlétét a tetraténit mátrixban (3e. ábra, A6). A háromdimenziós (3D) atomtomográfia (*atom probe tomography – APT*, azaz atomi felbontású, 3D tömegspektrometria) módszerével sikerült ezen apró kiválások összetételét meghatározni: közel 90 atom%-ban vasat és a maradékban nikkelt tartalmaznak. Mivel a kiválások szerkezeti-leg közel tökéletesen illeszkednek a tetraténit mátrixba, és csak alkalmanként figyelhető meg egy-egy diszlokáció a kiválás és a tetraténit határfelületén, az ismeretlen fázis lapcentrált köbös vagy tetragonális elemi cellájú lehet. Vasban gazdag összetétellel az eddig leírtak között nem ismert ilyen anyag. A kristályrend (*Strukturbericht* jelölés) szerinti besorolása ennek a fázisnak A6-ként határozható meg (1. táblázat). A tetraténit mátrixban tehát awaruit, kamacit és egy új, vasban gazdag A6 kristályrendű fázis jelenlétét sikerült igazolni.

A szerkezet ismeretében a mágneses tulajdonságokat Lorentz-TEM-mel és elektronholográfias módszerek alkalmazásával vizsgáltuk. A Lorentz-TEM-vizsgálat során a mintáról Lorentz-módban nagy defókusszal rögzítünk felvételeket. A Lorentz-erő által eltérített elektronok a világos látóterű TEM-felvételeken a mágneses doménfalakat világos vagy sötét kontraszttal jelenítik meg. A 4a., c. ábra mutatja a NWA6259 meteorit TEM-mintájában kialakuló mágneses doménfalakat és a minta indukciótérképét a tetraténit könnyű mágneses tengelyére merőlegesen (4a., b. ábra), valamint azzal párhuzamosan (4c., d. ábra). Az előbbi esetében részben egyenes vonalú doménfalak figyelhetőek meg, amelyek két,  $180^\circ$ -ban ellentétesen mágnesezett domént választanak el, és vonaluk megtörik, ahol az awaruit található. A nagy sűrűségű doménfalak és a mágnesesindukció-térképek



3. ábra. Az NWA6259 vasmeteorit szerkezeti vizsgálata. (a) Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel a TEM-vizsgálatok számára készült vékony lamelláról. (b, c) Világos látóterű TEM-felvételek, amelyeken a különböző összetételű és szerkezetű fázisok eltérő kontraszttal jelennek meg (tetraténit mátrixban awaruitalamellák és kamacitszemcsék). (d) A tetraténit hibátlan szerkezete atomi felbontású HAADF STEM felvételen. (e, f) Nanométeres vasgazdag kiválások (A6) és awaruitalamella (A) a tetraténit (Tt) mátrixban. (g) 3D-s APT összetétel-elemzés tetraténit (sárga), awaruit (zöld), kamacit (piros) és vasban szintén gazdag A6 (piros) fázisokról. (A [10] alapján)



4. ábra. Az NWA6259 meteorit mágneses állapota. Doménfalak Lorentz-TEM-felvételeken (a, c) és ugyanazon területek mágnesesindukció-térképei (b, d) a tetrahémit könnyű mágneses tengelyére merőleges (a, b), illetve azzal párhuzamos vetületben (c, d). A szaggatott vonalak az awaruitlamellák pozícióit jelölik. (e) A doménszerkezet mikromágneses modellje. A doménfal folytonos (f) a tetrahémitben és megtörik (g) az awaruit helyén. (A [10] nyomán)

(4b., d. ábra) összetett rendszert mutatnak, amelyben különböző tulajdonságú fázisok vannak jelen. Ismereteink szerint a tetrahémitet nagy mágneses anizotrópia jellemzi és erős mágnes, míg a kamacit és awaruit lágymágneses anyag. Ezeken kívül az újonnan megfigyelt A6 fázis is jelen van, amelynek mágneses tulajdonságai nem ismertek.

Atomi spindinamikai számolások az A6 fázist antiferromágnesesnek találták (hasonlóan a lapcentrált köbös szerkezetű vashoz). Ezen ismeretek és a TEM-es felvételek alapján a vizsgált mintára mikromágneses modell építhető fel, melyben az antiferromágneses A6 fázis mágneses tulajdonságok nélküli nanométeres térfogatként jelenik meg a modellben. A mágneses indukció modellből származtatott eloszlása (4e. ábra) hosszúkás doméneket mutat, hasonlóan a kísérletileg megfigyelthez (4a., b. ábra). A modellezett eredmények tökéletesen visszaadják a doménfal törését azokon a pontokon, ahol a lágymágneses awaruit keresztezi a 180°-os doménfalakat (4g. ábra).

A tetrahémitet tartalmazó meteorit részletes tömbi és korszerű analitikai elektronmikroszkópos vizsgálati eredményei és elméleti modellje sok érdekes új információt

ad a különböző vas–nikkel fázisok kialakulásáról és mágneses tulajdonságairól. Mindezen ismeretek egy lépéssel közelebb visznek bennünket a tetrahémit nagy mennyiségben való előállításához. Hiába a vas és a nikkel szinte tökéletes aránya és a termodinamikailag ideális körülmények, a tetrahémit erősen hajlamos arra, hogy különböző összetételű és mágneses tulajdonságú fázisok váljanak ki belőle, amelyek erősen befolyásolják az anyag mágneses tulajdonságait is.

## Összefoglalás

A meteoritok ásványainak vizsgálata betekintést enged több milliárd évvel ezelőtti folyamatokba, amelyek a Naprendszer korai szakaszában zajlottak, és a bolygók, köztük a Föld kialakulásához vezettek. Azonban a részletek felderítéséhez – különösen a mágneses tulajdonságokkal jellemezhető ásványok esetében – elengedhetetlen a modern és egymással összekapcsolható kísérleti és elméleti vizsgálati módszerek együttes alkalmazása. Ezek közül a transzmissziós elektronmikroszkóp fontos szerepet tölt be, mivel egyidejűleg szerkezeti és összetételi információt nyújt akár atomi felbontásban, és emellett az elektronholográfia révén alkalmazhatjuk a mágneses tér eloszlásának és erősségének mérésére is. A mágneses ásványok lehetőséget nyújtanak alapvető anyagtudományi és szilárdtest-fizikai ismereteink bővítésére, amelyek hasznosak új, technológiaiailag fontos anyagok kifejlesztéséhez.

## Köszönetnyilvánítás

Az elektronmikroszkópos vizsgálatok a Jülichi Kutatóközpont, Ernst Ruska elektronmikroszkópos intézetében készültek ([www.fz-juelich.de/er-c](http://www.fz-juelich.de/er-c)). Köszönet illeti a társszerzőket a [8, 10] publikációkból.

## Irodalom

1. Weisberg M. K., McCoy T. J., Krot A. N.: Systematics and evaluation of meteorite classification. In: Meteorites and the Early Solar System II (szerk. Lauretta D. S., Sween H. Y.), Univ. Arizona Press, (2006) 19–52.
2. Scott E. R. D.: Iron meteorites: Composition, age and origin. Oxford Research Encyclopedias, *Planetary Science* 1 (2020) 1–75.
3. Yang C. W., Williams D. B., Goldstein J. I.: A revision of the Fe-Ni phase diagram at low temperatures (<400 °C). *Journal of Phase Equilibria* 17 (1996) 522.
4. Springer Handbook of Microscopy (szerk. Hawkes P. W., Spence J. C. H.), Springer Nature (2019).
5. Gabor D.: A new microscopic principle. *Nature* 161 (1948) 563.
6. Kovács A., Dunin-Borkowski R. E.: Handbook of Magnetic Materials, Chapter 2 (szerk. Brück E.), *Elsevier* 27 (2018) 59–153.
7. Fu R. R., et al.: Solar nebula magnetic field recorded in the Semarkona meteorite. *Science* 346 (2014) 1089.
8. Shah J., et al.: The oldest magnetic record in our solar system identified using nanometric imaging and numerical modeling. *Nature Communications* 9 (2018) 1173.
9. Rambaldi E. R., Wasson J. T.: Metal and associated phases in Bishunpur, a highly unequilibrated ordinary chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45 (1981) 1001.
10. Kovács A., et al.: Discovery and implications of hidden atomic-scale structure in a metallic meteorite. *Nano Letters* 21 (2021) 8135.

# ASZTEROIDABECsapÓDÁSOK SORÁN KELETKEZŐ ÖSSZETETT GyÉMÁNTSZERKEZETEK

Németh Péter<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézet, Budapest,

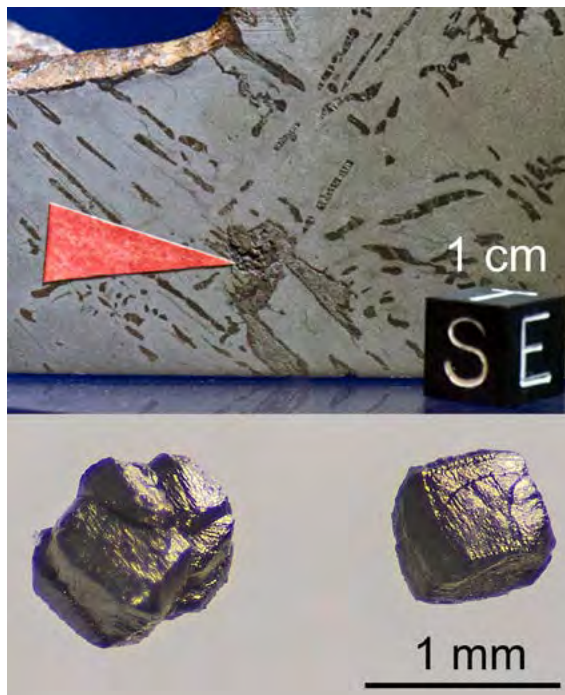
<sup>2</sup>Pannon Egyetem, Bio-nanotechnológiai és Műszaki Kémiai Kutatóintézet, Nanolab, Veszprém

E-mail: nemeth.peter@csfk.org

Az aszteroidabecsapódások eredményeként létrejövő átalakulások Naprendszerünk alapvető bolygóformáló folyamatai. A becsapódáskor keletkező hatalmas – több km/s – sebességű lökeshullám rövid ideig (nano- vagy mikromásodpercekig) tartó nyomás- és hőmérsékletváltozásokat gerjeszt. Az esetenként akár több 10 GPa (100 kbar) értéket elérő nyomás és 1000 °C feletti hőmérséklet új, különleges anyagszerkezetek képződéséhez vezethet, amelyek vizsgálatával betekintést nyerhetünk a lökeshullám átalakító folyamatába [1]. A szélsőséges termodinamikai viszonyok egyedi mechanikai és elektromos jellemzőkkel bíró szerkezeteket alakíthatnak ki, amelyek megismerésével új távlatok nyílnak a kivételes tulajdonságú anyagok tervezésében.

Körülbelül 50000 évvel ezelőtt egy feltehetőleg 11 km/s sebességgel száguldó, megközelítőleg 60 méteres – főként vas és nikkel ötvözetéből álló – aszteroida csapódott be Észak-Arizona (USA) felföldi területére, a mai Flagstaff településtől keletre, létrehozva a mintegy 200 méter mély és 1,2 km átmérőjű Barringer-krátert [1]. A becsapódás, amely becslések szerint 10 megatonna TNT-nek vagy több mint 600 hirosimai atombomba együttes erejének felelt meg, intenzív lökeshullámot generált, amely egyaránt érintette a becsapódás területén lévő kőzeteket, valamint az aszteroidából fennmaradt, Canyon Diablo elnevezésű vasmeteorit darabjait [1].

A kutatók már 1891-ben a Canyon Diablo meteorit fém szerkezetébe ágyazott, erős savaknak ellenálló, nagy keménységű és kocka alakú szemcséket alkotó, elemi szénből álló – a közleményekben gyakran gyémántnak nevezett – anyagról (1. ábra) számoltak be [2]. Ez a „gyémánt” hamarosan a kutatások középpontjába került. 1967-ben Frondel és Marvin a vasmeteorit darabjaiból egy új – a jól ismert köbös szimmetriájú gyémánttól eltérő – hexagonális szerkezetű gyémántmódosulatot írtak le [3]. Feltételezték, hogy az új anyag kialakulása az extrém



1. ábra. Aszteroidabecsapódás-eredetű gyémántok az ASU meteoritgyűjteményében lévő Canyon Diablo meteoritból. A piros nyíl a kamacit (Ni-tartalmú termésvas) ásványban lévő fekete színű gyémántszemcsék helyére mutat

becsapódási körülményekhez köthető, és a módosulatot a híres kristallográfus, Kathleen Lonsdale tiszteletére lonsdaleitnek nevezték el [3]. Azonosításhoz a kutatók az anyag elektronjain rugalmasan szóródó röntgensugárzás diffrakciós adatait használták, és az adatokat egy hexagonális cellával értelmezték (lásd a keretes szöveget).

A kristály periodikusan ismétlődő legkisebb egysége a háromdimenziós elemi cella, amelynek leírásához a cella éleinek hosszát meghatározó  $a$ ,  $b$ ,  $c$  rácsparamétereket, valamint a  $b$  és  $c$  rácsparaméterek közötti  $\alpha$ , az  $a$  és  $c$  rácsparaméterek közötti  $\beta$  és az  $a$  és  $b$  rácsparaméterek közötti  $\gamma$  szögértékeket használjuk. Köbös rendszerbe tartozó kristályok esetében az  $a$ ,  $b$ ,  $c$  rácsparaméterek egyenlők és az  $\alpha$ ,  $\beta$  és  $\gamma$  szögek értéke 90°, ezért a köbös elemi cella leírásához elegendő az  $a$  rácsparaméter megadása. Hexagonális rendszerbe tartozó kristályok esetében az  $a$  és  $b$  rácsparaméterek egyenlők, a  $c$  rácsparaméter ezekről eltérő, az  $\alpha$  és  $\beta$  szögek értéke 90°, míg a  $\gamma$  szög értéke



Németh Péter a HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézetének tudományos főmunkatársa, az intézet pásztázó elektronmikroszkópos laboratóriumának vezetője. Főbb kutatási témái az összetett gyémánt szerkezetek és azok lehetséges alkalmazási lehetőségei, valamint a karbonátképződés és a biológiai ásványosodás.

120°, ezért a hexagonális elemi cellát az  $a$  és  $c$  rácsparaméterrel adjuk meg. Az elemi cellában az irányok jelöléséhez a szögletes  $[uvw]$  zárójelot használjuk, amely meghatározza az origónak kijelölt rácspontból egy adott  $u, v, w$  koordinátájú pontba mutató vektor irányát, mégpedig a rácsvektorokkal koordinátázva (a vektor az  $ua + vb + wc$  lineáris kombinációval adható meg, ahol  $\mathbf{a}, \mathbf{b}$  és  $\mathbf{c}$  az egyes rácsállandókat definiáló bázisvektorok – ezek természetesen akkor is különbözőek, ha maguk a rácsparaméterek egyenlők). A kristálytani síkok definiálása Miller-indexekkel, jelölésük pedig kerek (hkl) zárójellel történik. A (hkl) indexek megadják, hogy egy adott sík az origóba helyezett  $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$  rácsvektorok által megadott tengelyeket a rácsállandók hányad részében metszik. Ha egy sík párhuzamos az egyik tengellyel akkor az adott (hkl) index értéke 0 (például az  $\mathbf{a}$  rácsvektort 1  $a$  rácsállandó távolságban metsző, a  $\mathbf{b}$  és  $\mathbf{c}$  rácsvektorral párhuzamos sík Miller-indexe (100)). Negatív tengelymetszet esetében a Miller-indexet, az adott (hkl) felett húzott vonal jelöli, pl. ( $\bar{1}00$ ).

Az egymással párhuzamos (hkl) Miller-indexű kristálysíkok legkisebb távolsága  $d(\text{hkl})$ . Amikor rövid hullámhosszú sugárzás ( $\lambda \sim 0,04\text{--}0,01$  nm) rugalmasan hat kölcsön az anyag tömegpontjaival, a létrejövő diffrakciós felvételeken az egymással párhuzamos (hkl) síkok egyedi pontokként (reflexió) jelennek meg, amelyek  $1/d(\text{hkl})$  távolságra vannak a diffrakciós alakzat kezdőpontjától (legfényesebb pontjától), és az egyes pontokba mutató vektor iránya párhuzamos a (hkl) sík normálvektorával. Mivel a reflexiók helyzete és intenzitása függ az elemi cella méretétől, szimmetriaviszonyaitól és az elemi cellában lévő atomoktól, a diffrakciós felvételek és a nagyfelbontású TEM-képek (Fourier-transzformáltjainak) elemzése lehetővé teszi a kristályszerkezet meghatározását. A reflexiók alakjának tanulmányozása információt nyújt a kristály méretéről és a kristályban lévő változatos hibákról.

1967 óta a kutatók számos olyan természetes és mesterségesen előállított anyagról számoltak be, amelyek röntgendiffrakciós adatai megegyeztek a lonsdaleitével. A hexagonális szerkezet komoly anyagtudományi érdeklődést stimulált, mivel elméleti számítások arra utaltak, hogy keménysége felülmúlja a köbös gyémántét [4]. Azonban önálló, egyfázisú hexagonális gyémántkristályokat nem találtak, illetve nem sikerült ilyet előállítani.

A legújabb nagyműszeres vizsgálati eredmények arra utalnak, hogy a Canyon Diablo meteoritból származó lonsdaleitnek, illetve a becsapódásos eredetű gyémántoknak rendkívül összetett a szerkezete. Elméleti megfontolások szerint ehhez a szerkezethez izgalmas anyagi (mechanikai és elektromos) tulajdonságok társulnak. A minták tanulmányozásával az elemi szén extrém nyomás és hőmérsékleti viszonyok hatására kialakuló nanoszer-

kezetéről kaphatunk információt, valamint közelebb kerülhetünk az aszteroidabecsapódások során fellépő fázisátalakulási folyamatok megértéséhez, az összetett szerkezet tulajdonságainak és anyagtudományi alkalmazhatósági lehetőségeinek megismeréséhez.

## A gyémántszerkezet ultranagy felbontású elektronmikroszkópos képeken

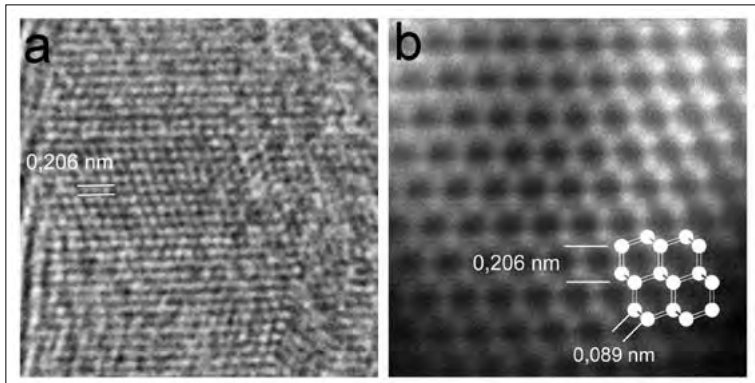
A becsapódásos eredetű gyémántok szerkezeti vizsgálatának legkorszerűbb módja a transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM). A mérés során egy nagyon vékony (<20 nm) mintát tanulmányozunk szubnanométeres területre fókuszált rövid hullámhosszú ( $\lambda \sim 0,04\text{--}0,01$  nm) elektronsugárral. A vizsgálattal a kristály rácssíkjai mellett akár a mintát alkotó egyedi szénatomok is megjeleníthetők. A TEM esetében a felbontóképességet ( $d$ ) – az anyag azon két pontja közötti legkisebb távolságot, amelyet a mikroszkóp két különálló képpontként képez le – az alábbi képlet adja meg [5]:

$$d = A \cdot C_s^{1/4} \cdot \lambda^{3/4},$$

ahol  $A$  a megvilágítástól (koherens, részben koherens vagy inkoherens) függő állandó,  $C_s$  a szférikus aberráció (gömbi hiba, a lencse közpéről és széléről érkező sugarak gyújtópontjának eltérése) és  $\lambda$  az alkalmazott elektromágneses sugárzás hullámhossza. Ideális, koherens megvilágításkor, minimális gömbi hiba esetében (1–1,5 mm) egy konvencionális, 200–400 keV gyorsítófeszültségű elektronmikroszkóp felbontóképessége 0,2–0,15 nm. Az egyedi atomok vizsgálatához, vagyis az ultranagy felbontás eléréséhez vagy a gyorsítófeszültséget kell növelni, vagy a gömbi hibát csökkenteni. A nagy (1–1,25 MeV) gyorsítófeszültségű mikroszkópok lehetővé teszik a 0,1 nm-es felbontást, azonban nagy stabilitásigényük (nagyfeszültségű tartályok) miatt kiépítésük bonyolult, költséges. További hátrányuk, hogy a nagy dózisu elektronsugárzás hatására a legtöbb anyag erősen károsodik, ezért ezek a mikroszkópok csak néhány minta esetében alkalmazhatók.

Az ultranagy felbontás elérésének leghatásosabb módszere a gömbi hiba csökkentése [5, 6]. Tradicionális, hengerszimmetrikus lencsék esetében a pozitív gömbi hiba mm-es nagyságrendű, és lényegesen tovább nem javítható [5]. A mai modern, ultranagy felbontású mikroszkópok a gömbi hibát többpólusú lencserendszerük révén korrigálják, ezért ezeket a mikroszkópokat gömbhibakorrigált mikroszkópoknak nevezik. Alkalmazásukkal rutinszerűen elérhető az atomi felbontás számos anyagra, illetve lehetővé válik egyedi atomok azonosítása és az anyagok (mechanikai, elektromos) tulajdonságainak jobb megértése.

Gyémánt esetén konvencionális (nem gömbhibakorrigált) TEM-mel kizárólag egyetlen rácssíkcsereget – a 0,206 nm periódusú (111) Miller-indexűt – tudjuk feloldani. Ezzel szemben az ultranagy felbontású TEM



2. ábra. Aszteroidabecsapódás-eredetű gyémántok rácsa és atomi felbontású TEM-képei. (a) TEM-felvétel a Gujba meteoritból származó gyémánt 0,206 nm periódusú (111) rácssíksegeiről. (b) ultranagy felbontású TEM-felvétel a Popigai-kráterből (Oroszország) származó gyémántból. A fehér pontok hozzárendelhetők a képre helyezett gyémántszerkezetben lévő szénatomok oszlopaihoz

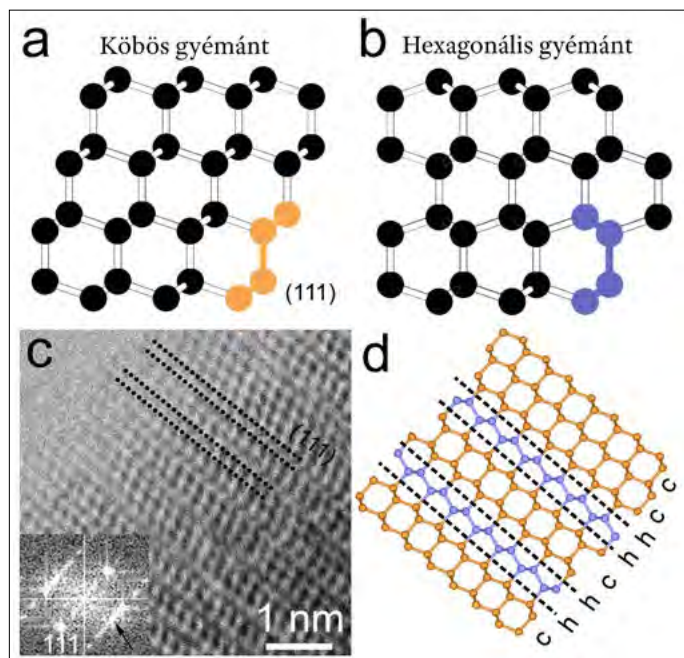
lehetővé teszi, hogy leképezzük a gyémánt 0,126 nm és 0,107 nm periódusú – (220) és (113) Miller-indexű – rácssíksegeit, valamint egyedi szénatomjait is azonosítsuk (2. ábra). Ezeknek a rácssíksegeknek a felbontásával lehetőség nyílik a becsapódásos eredetű gyémántok nanoszerkezetének feltárására.

## A szén allotrópiája, szerkezeti módosulatai

A hibridizációnak – a vegyértékkötés-elméletben a meglévő atompályák kombinációjából az elektronok párosítá-

sára és kémiai kötés kialakítására alkalmas új atomi pályák létrejöttének – köszönhető, hogy az elemi szén változatos szerkezeteket (allotrópok) alkotva fordulhat elő, és hogy ezeknek a szerkezeteknek jelentősen eltérő anyagi tulajdonságaik vannak. A grafit és a gyémánt már az ókor óta ismert ásványok, amelyeket az atomközi kötések jellege által meghatározott sajátos tulajdonságaiknak megfelelően különböző célokra alkalmaztak. Az  $sp^2$ -es hibridizációjú, elektromosan vezető és réteges szerkezetű grafitot széles körben használják kenőanyagként és nagy nedvszívó képességű anyagként, köszönhetően a szerkezetet jellemző gyenge rétegközi kötéseknek. Földfelszíni környezeti körülmények között ez a legstabilabb ele-

mi szénmódosulat. Ezzel szemben a gyémánt egy nagy keménységű, nagy sávszélességű szigetelő, amely az elektromágneses spektrum nagy részében átlátszó, és a tetraéderesen összekapcsolt  $sp^3$ -as hibridizációjú – kovalens kötésű – hálózatának köszönhetően kiváló hővezető. A 20. században az elemi szénmódosulatok listája tovább bővült az egyetlen  $sp^2$ -es hibridizációjú szénréteget tartalmazó és a kiváló elektromos és mechanikai tulajdonságokkal jellemezhető (kétdimenziós) anyaggal, a grafénnel [7]. A grafénréteg(ek) hengerpalástmenti és koncentrikus feltekeredésével nanocsövek és nanohagymák, az ötös és hatos széngyűrűk háromdimenziós szerkezetbe építésével fullerének, illetve változatos, ketrecbe zárt szerkezetek jönnek létre [8]. Az elemi szén módosulatainak száma folyamatosan bővül a természetes eredetű és mesterségesen előállított minták vizsgálatával és az elméleti számításokból jósolt szerkezetekkel [9].



3. ábra. A kovalens kötésű gyémántszerkezet kétféle rendezett térbeli elrendeződése és a rétegződési hibákban bővelkedő Canyon Diablo lonsdaleit. (a) Szénatomokból (fekete színű golyók) álló (111) rétegek egymásra épülése „szék” típusú (barna egység) konformációban. (b) (111) rétegek egymásra épülése „csónak” típusú (kék egység) konformációban. (c) Rétegződési hibák ultranagy felbontású TEM-képe. A fekete nyíl a kép Fourier-transzformáltján (bal alsó sarok) megnyílt reflexióra mutat. (d) Köbös (c) és hexagonális (h) rétegeket rendezetlenül tartalmazó gyémánt szerkezeti modellje

## Köbös és hexagonális gyémánt, rétegződési hibák

Az  $sp^3$ -as hibridizációjú, tetraéderesen koordinált, kovalens kötésű, egymástól 0,154 nm távolságra lévő szénatomokból álló gyémántszerkezetnek kétféle rendezett térbeli elrendeződése valósulhat meg. A köbös (szimmetriájú) gyémánt esetében a szerkezet leírható hattagú gyűrűk rétegeivel, amelyek a köbös [111] tengelyre merőlegesen helyezkednek el, „szék” típusú konformációban (3. ábra). Az egymást követő rétegeket a hattagú gyűrűk feles eltolódása kíséri az [111] átló mentén, ami ún. háromrétegű köbös (3C) rétegződést eredményez. Ezzel szemben hexagonális (szimmetriájú) gyémánt esetében a hattagú gyűrűk „csónak” konformációban vannak egymásra pakolva, így jön létre a kétrétegű hexagonális (2H) rétegződés (3. ábra). Ideális köbös és hexagonális gyémánt esetében a 3C és 2H rétegződési sorrend ismétlődik, és a periodikus szerkezetek

eredményként diszkrét, jól körülhatárolható reflexiók és éles csúcsok jelennek meg diffrakciós felvételeken és a nagy felbontású TEM-képek Fourier-transzformáltjain. Az egymásra pakolt rétegek sorrendjének változásával rétegződési hibák jönnek létre, amelyek a diszkrét reflexiók megnyúlását, csóvák megjelenését és diffúz szórászt eredményeznek (3. ábra).

A Canyon Diablo meteoritban a – lonsdaleitnek nevezett – nagy keménységű gyémántszemcsék az aszteroidabecsapódás hatására átalakult kamacit (Ni-tartalmú termésvas) és grafit összenövésénél fordulnak elő (1. ábra). Jelenlétük a meteoritok vágása során szembeűnő, mivel a gyémánt fűrészlapok csak rendkívül nehezen hatolnak át a nagy keménységű szemcséket tartalmazó területeken. Az atomi felbontású TEM-vizsgálat szerint a Canyon Diablo lonsdaleit nagyszámú rétegződési hibát tartalmaz (3. ábra). A köbös gyémántrétegek és a mindössze 1–3 rétegvastagságú hexagonális beékelődések szabálytalan ismétlődésének eredményeként rendezetlen köbös-hexagonális rétegzottségű gyémánt jön létre [10–12]. Erre a rendezetlenül rétegzett anyagra jellemző, hogy a kristályos anyagoknál megjelenő szimmetria csak a rétegek irányában van meg, de arra merőlegesen sérül.

## A diafit anyagcsalád

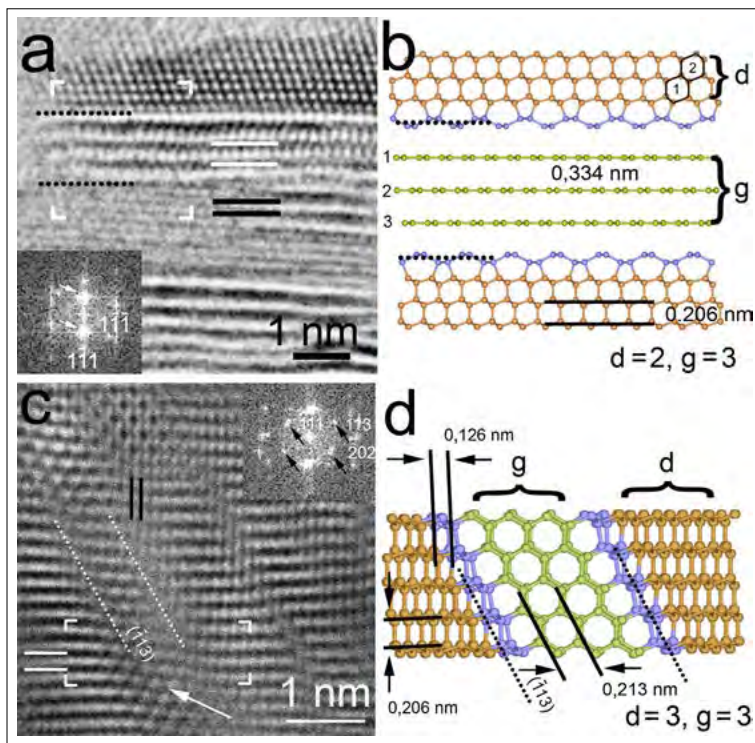
2009-ben kutatók megfigyelték, hogy a grafit lézeres besugárzása során egy különleges kétdimenziós gyémánt-grafén kristályos nanoszerkezet alakul ki a grafitrétegek felszínén [13]. Mivel ez a szerkezet hasonlít az alább bemutatandó összenövésekhez, a továbbiakban a kétdimenziós anyagokra javasolt diafit anyagnevet terjesztjük ki a háromdimenziós gyémánt-grafén nanokompozitok leírására [14, 15]. A diafit (*diaphite*) név a gyémánt (*diamond*) és a grafit típusú (*graphite*) egységek szoros kristálytani kapcsolatára utal.

A becsapódásos eredetű gyémántok ultranagy felbontású TEM-felvételei felfedik a mintákat alkotó összetett szerkezeteket. Különösen érdekesek azok a nanoszerkezetek, amelyek mind a grafit rétegek közötti távolságának megfelelő 0,334 nm, mind a köbös gyémánt (111) síkja közötti távolságnak megfelelő 0,206 nm rácstávolságot mutatják. A 0,334 nm rácstávolságú síkok megtörik az (111) gyémántrétegek szabályos egymásra épülési rendjét, és azokkal párhuzamosan – a köbös gyémánt [111] kristálytani iránya mentén – mint grafénzárványok helyezkednek el. A zárványok rétegnormálisra merőleges

kiterjedése néhány nanométer, oldalirányban pedig kovalens kötésű gyémántrácsban végződnek (4a. ábra). Ezt a fajta kristálytani összenövést diafit 1 szerkezetnek nevezzük. Az összenövést változó mennyiségű (111) gyémánt- és grafénrétegek, valamint a határfelületi régiók egymásra épülése jellemzi (4b. ábra). A diafit szerkezet nem keverendő össze a grafén és gyémánt egységek fizikai keverékével, amelyek között nincs kristálytani kapcsolat.

A becsapódásos gyémántok ultranagy felbontású TEM-vizsgálata egy másik – diafit 2 típusú összenövésnek nevezett – szerkezetet is feltárt (4c. ábra). Hasonlóan a diafit 1 anyagokhoz, ezek a szerkezetek is a gyémánt, grafén és a kettő közötti határfelület egységeiből állnak (4d. ábra). A diafit 2 szerkezetmodellje arra utal, hogy a grafén síkok a gyémánt (111) síkjához való kötődés miatt „össze vannak préselve”, és a rétegtávolságuk 0,31 nm [11, 12]. A grafén síkokra merőleges irányból a szerkezetet a hatszöges elrendezésű grafén síkoknak a köbös gyémánt (111) rácssík seregeivel való összenövése jellemzi a gyémánt (113) rácssíkja mentén (4d. ábra). A szerkezet felismeréséhez alapvető fontosságú a köbös gyémánt 0,126 nm és 0,107 nm-es  $d$  értékű (220) és (113) rácssík seregeinek felbontása.

Mind a diafit 1, mind a diafit 2 típusú szerkezeti modellek a különböző gyémánt-, grafén- és határfelületi régiók változó mennyiségű egységeiből – a modellcella mére-



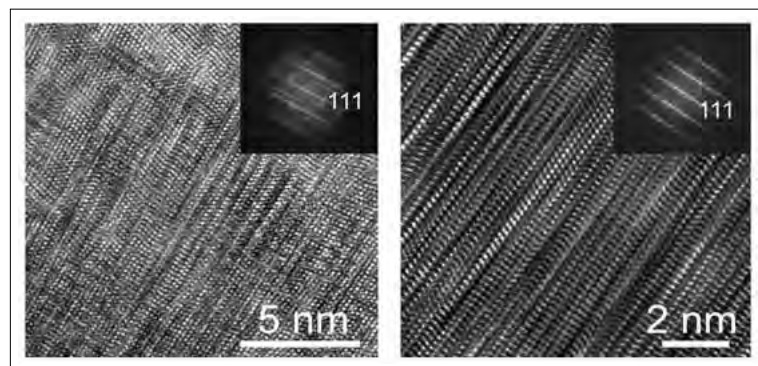
4. ábra. Aszteroidabecsapódás eredményeként létrejött diafiterkezetek. (a) Diafit 1 típusú összenövés a Gujba meteoritból. Rendre fehér és fekete vonalak jelzik a 0,334 nm-es periódusú grafén- és 0,206 nm-es periódusú gyémántrétegek távolságát. A kép Fourier-transzformáltján (bal alsó sarok) megjelennek a gyémántra és grafénre (fehér körök) jellemző reflexiók is. (b) Az a kép fehér vágóvonallal határolt területének megfelelő diafit 1 szerkezeti modellje. A  $d$  és  $g$  betűk jelölik a gyémánt- és grafénrétegeket. A határfelületi rész kék színű. (c) Diafit 2 típusú összenövés a Canyon Diablo meteoritból, egymásra merőleges 0,206 nm (fehér vonalpár) és 0,126 nm (fekete vonalpár), illetve hatszöges elrendezésű ~0,21 nm rácstávolságú egységekkel (fehér nyíl). A kép Fourier-transzformáltján (jobb felső sarok) a hexagonális elrendezésű reflexiókat fekete nyilak jelzik. (d) A c kép fehér vágóvonallal határolt területének megfelelő diafit 2 szerkezeti modellje

tének és összetételének szisztematikus változtatásával – építhetők fel (4b. és 4d. ábra). Elméletileg mind a diafit 1, mind a diafit 2 típusú szerkezeteknek végtelen számú tagja van, azonban fontos megjegyezni, hogy a grafén- és gyémántegységek szisztematikus ismétlődését és két azonos diafit szerkezetű, nanométeres vagy afeletti méretű területet még soha nem találtak, vagyis a diafitváltozatok nem tekinthetők önálló fázisoknak, termodinamikai rendszerben azonos fizikai és kémiai paraméterekkel jellemezhető anyagoknak. A diafit 1 és diafit 2 szerkezetek, valamint az egyes szerkezetek egymásra merőleges vetületei a nanométeres skálán kristálytanilag egymással szorosan összenőnek [11]. Az elméleti számítások arra utalnak, hogy a diafit szerkezetek a grafíthoz és a gyémánthoz hasonlóan alacsony energiaállapotúak, laboratóriumi körülmények között előállíthatók, és földfelszíni környezeti körülmények között kinetikailag stabilak [14, 15].

## Különleges mintázatok

A Canyon Diablóból származó lonsdaleitmintákban, a rendezetlen rétegzettségű gyémántban feltűnő diafit 1 és diafit 2 nanokompozitok egy kivételesen összetett szerkezetet eredményeznek. TEM-képeken az egymáson elhelyezkedő nanodomének kétdimenziós vetülete látható. Ezért minél vastagabb a minta, annál összetettebb a nagy felbontású TEM-képen megjelenő mintázat. Az 5. ábrán a vertikálisan egymás felett lévő diafit nanokompozitok és a rendezetlen köbös és hexagonális rétegeket tartalmazó gyémánt összenövése eredményeként létrejött komplex szerkezet érdekes mintázatai tanulmányozhatók.

A vizsgálatok arra utalnak, hogy a lonsdaleit nem egy diszkrét fázis, és nincs egy meghatározott kristályszerkezete [11, 12]. A rendezetlen köbös és hexagonális rétegződés a kristálytanilag egymáshoz nőtt diafitszerkezetekkel kombinálva bonyolult kontrasztú TEM-képeket és azok Fourier-transzformáltjain a reflexiók kiszélesedését (csóvákat, folytonos szórást) eredményez (5. ábra). Ez arra utal, hogy az összetett szerkezetű anyag a szubnanométeres skálán sem mutat háromdimenziós ismétlődést. Hasonlóan összetett szerkezetű



5. ábra. A diafit szerkezetek és a gyémánt rétegződési hibáinak eredményeként létrejött különleges mintázatú struktúrák ultranagy felbontású TEM-felvételei a Canyon Diablo lonsdaleitből (a jobb felső sarokban a megfelelő Fourier-transzformáltak láthatóak)

anyagot írtak le az aszteroidabecsapódáshoz köthető Gujba meteoritból és a Popigai kráterből származó mintákban [14].

## Az összetett gyémántszerkezet lehetséges képződési körülményei

Az aszteroidabecsapódás során létrejövő lökeshullám hirtelen nyomás- és hőmérséklet-változásai hozzák létre a becsapódásos gyémántok egyedülálló szerkezetét. A Canyon Diablo meteoritban a rendezetlen köbös és hexagonális rétegződésű gyémánt- és diafitszerkezetek szorosan összenőttek grafittal, ami feltehetőleg a nagy keménységű szénszemcsék kiindulási anyaga volt. A szerkezetek szoros társulása arra utal, hogy a gyémánt a grafit-gyémánt-átalakulás feltehetőleg korai szakaszában képződhetett [11], és kialakulása a minta több pontján egyszerre és spontán módon kezdődhetett. Ez a képződési mechanizmus összhangban van azzal, hogy a rendszer az összenyomódás során az egyensúlyi grafit-gyémánt-átalakulás határát átlépve mechanikailag instabillá vált, és a megfigyelt nanoszerkezet a diafitszerkezet képződésével minimalizálta a felhalmozódott feszültséget.

A változatos grafénstruktúrák és a rendezetlen rétegzettségű gyémántok analízise jelentős lépés az aszteroidabecsapódások során fellépő nyomás- és hőmérsékletviszonyok megértéséhez. A grafit-gyémánt-fázisátalakulás energetikai viszonyainak megismeréséhez fontos lenne, hogy számoljunk a diafitszerkezetek megjelenésével is. Azonban meg kell jegyezni, hogy az eddigi adatok szerint a becsapódásos gyémántokat inkább a rendezetlen rétegződésű gyémánt- és diafitszerkezetek változatos – semmint egy adott – típusainak megjelenése jellemzi, ami komoly kihívást jelent a lökeshullám nyomás- és hőmérsékletviszonyainak megértésében és előrejelzésében. További érdekesség, hogy az összetett szerkezetek létrejöhetnek kémiai gőzfázisú leválasztás során is [15], amelyet a magas (több 10 GPa) nyomással szemben alacsony nyomású (néhány tized Pa) képződés jellemez. Ezért feltehetőleg a kinetikai viszonyok – a folyamat végbemenetelének sebessége és az útvonal, amelyen keresztül a folyamat végbemegy – játszanak kulcsfontosságú szerepet az összetett gyémántszerkezetek kialakulásában. Ezek megismerése a jövő feladata.

## Az összetett gyémántszerkezetben rejlő anyagtudományi lehetőségek

Feltételezések szerint a hexagonális gyémántszerkezet mechanikai tulajdonságai (keménység, szilárdság) felülmúlják a köbös gyémántét [4]. Ezeket a kivételes tulajdonságokat kísérletileg nem sikerült bizonyítani, mivel tisztán hexagonális gyémántból – periodiku-

san ismétlődő hexagonális rétegződésből – álló anyagot eddig még nem állítottak elő. A Canyon Diablo lonsdaleitet a rétegződési hibák kivételosen nagy száma jellemzi, amelyek a szemcséket szubnanométeres egységekre osztják fel. A szemcseméret csökkentése számos anyag, köztük a gyémánt mechanikai keménységének javítására szolgáló hatékony mechanizmus [10, 16]. A krisztallit-méret csökkentése rétegződési hibákkal hasonlóképpen hozzájárul a gyémántos anyag mechanikai szilárdságának erősítéséhez [16], és ezért a Canyon Diablo mintában lévő rendezetlen köbös és hexagonális rétegződésű gyémántszerkezethez hasonló szintetikus és ásványi anyagok alkalmasak lehetnek új technológiai alkalmazásokra.

A diafit nanoszerkezetek várhatóan kivételes mechanikai tulajdonságokat eredményeznek, mivel a gyémánt extrém keménysége ötvöződik a grafén kiváló flexibilitásával és törési szívósságával. A diafit nanokompozitok tudatos beépítésével megvalósítható, hogy a nagyon kemény gyémánt húzófeszültség hatására képlékenyen viselkedjen, vagyis ne törjön el, és felhasználható legyen akár nagy erejű ütést elnyelő anyagként. A figyelemre méltó mechanikai jellemzők mellett a diafit nanokompozitoknak kivételes elektromos tulajdonságaik lehetnek [15]. Grafén- és gyémántretegeket tartalmazó diafitszerkezetek célzott tervezésével esetleg nanoméretű elektromosan vezető csatornák is előállíthatók az egyébként szigetelő anyagban. A diafitok szabályozott előállításával nemcsak ultrakemény, hanem képlékeny, valamint a vezetőtől a szigetelőig hangolható elektromos tulajdonságokkal bíró anyagokat (áramköröket) is tervezhetünk. A felfedezés megnyitja az utat az izgalmas mechanikai és elektromos tulajdonságú, új típusú, gyémántszerű anyagok tervezése előtt; új alkalmazások jöhetnek létre a csiszolóanyagoktól az elektronikán át a nanomedicináig és a lézertechnológiáig.

## Összefoglalás

Frondel és Marvin több mint fél évszázada egy új, hexagonális szerkezetű gyémántmódosulatot írtak le a Canyon Diablo (Arizona, USA) vasmeteoritból. A jól ismert köbös kristályrácsú gyémánttól különböző módo-sulatot a híres krisztallográfus, Dame Kathleen Lonsdale tiszteletére lonsdaleitnek nevezték el. Képződését az aszteroidabecsapódás eredményeként létrejött lökeshullám átalakító folyamatának tulajdonították. Atomi felbontású transzmissziós elektronmikroszkópos képek elemzésével bemutatjuk, hogy az aszteroidaütközés rendkívül összetett gyémántszerkezeteket és nem hexagonális gyémántból álló anyagot hozott létre. A lonsdaleitet valójában az atomrétegek ismétlődő mintázataiban előforduló számos rétegződési hiba mellett gyémánt–grafén-nanoszerkezetek változatos összenövéséből álló, úgynevezett diafit alkotja. A grafén- és gyémántszerkezetek közötti különböző összenövési típusok felismerése hozzájárul az aszteroidabecsapódások során fellépő nyomás- és hőmérsékletviszonyok jobb megértéséhez. Az összetett

szerkezetek szabályozott előállítása utat nyithat nemcsak ultrakemény, hanem képlékeny, valamint a vezetőtől a szigetelőig hangolható elektromos tulajdonságokkal bíró anyagok tervezése felé.

## Köszönetnyilvánítás

A mintákat Laurence A. J. Garvie, az Arizonai Állami Egyetem (ASU) meteoritgyűjteményének kurátora választotta ki nagyműszeres vizsgálatokhoz. A TEM-felvételek az ASU John M. Cowley nagy felbontású elektronmikroszkópos központjában készültek Toshihiro Aoki, valamint az Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetében Fogarassy Zsolt és Pécz Béla közreműködésével.

## Irodalom

1. Nininger H. H.: Arizona's Meteorite Crater. World Press, Denver, Colorado, 232 p, 1956.
2. Foote A. E.: A new locality for meteoritic iron with a preliminary notice of the discovery of diamonds in iron. *American Journal of Science* S3-42 (251) (1891) 413–417.
3. Frondel C., Marvin U. B.: Lonsdaleite, a hexagonal polymorph of diamond. *Nature* 214 (1967) 587–589.
4. Pan Z., Sun H., Zhang Y., Chen C.: Harder than diamond: superior indentation strength of wurtzite BN and lonsdaleite. *Physical Review Letters* 102 (2009) 055503.
5. Hetherington C.: Aberration correction for TEM. *Materials Today* 7(12) (2004) 50–55.
6. Paulik K.: A nanovilág felderítése. Innotéka (2018) [https://www.innoteka.hu/cikk/a\\_nanovilag\\_felderitese.1759.html](https://www.innoteka.hu/cikk/a_nanovilag_felderitese.1759.html)
7. Márk G., Vancsó P., Bíró P. L.: Lehet-e tökéletes nanoelektronikai eszközöket készíteni tökéletlen grafénből? *Fizikai Szemle* 2013/11.
8. Németh P., Garvie L. A. J.: Extraterrestrial, shock-formed, cage-like nanostructured carbonaceous materials. *American Mineralogist* 105(2) (2020) 276–281.
9. Hoffmann R., Kabanov A. A., Golov A. A., Proserpio D. M.: Homocitans and carbon allotropes: For an ethics of citation. *Angewandte Chemie International Edition* 55(37) (2016) 10962–10976.
10. Németh P., Garvie L. A. J., Aoki T., Dubrovinskaia N., Dubrovinsky L., Buseck P. R.: Lonsdaleite is faulted and twinned cubic diamond and does not exist as a discrete material. *Nature Communications* 5 (2014) 5447.
11. Németh P., Lancaster H. J., Salzmann C. G., McColl K., Fogarassy Zs., Garvie L. A. J., Illés L., Pécz B., Murri M., Corà F., Smith R. L., Mezouar M., Howard C. A., McMillan P. F.: Shock-formed carbon materials with intergrown sp<sup>3</sup>- and sp<sup>2</sup>-bonded nanostructured units. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 119 (30) (2022) e2203672119.
12. Németh P., Garvie L. A. J., Salzmann C. G.: Canyon Diablo lonsdaleite is a nanocomposite containing c/h stacking disordered diamond and diaphite. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 381 (2023) 20220344.
13. Ohnishi H., Nasu K.: Generation and growth of sp<sup>3</sup>-bonded domains by visible photon irradiation of graphite. *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics* 80 (2009) 014112.
14. Németh P., McColl K., Smith R. L., Murri M., Garvie L. A. J., Alvaro M., Pécz B., Jones A. P., Corà F., Salzmann C. G., McMillan P. F.: Diamond-graphene composite nanostructures. *Nano Letters* 5 (2020) 3611–3619.
15. Németh P., McColl K., Garvie L. A. J., Salzmann C. G., Murri M., McMillan P. F.: Complex nanostructures in diamond. *Nature Materials* 19 (11) (2020) 1126–1131.
16. Yue Y., Gao Y., Hu W., Xu B., Wang J., Zhang X., Zhang Q., Wang Y., Ge B., Yang Z., Li Z., Ying P., Liu X., Yu D., Wei B., Wang Z., Zou X. F., Guo L., Tian Y.: Hierarchically structured diamond composite with exceptional toughness. *Nature* 582 (2020) 370–374.

# A FOGZOMÁNC SZERKEZETI ÉS MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI

Hegedűs Máté<sup>1</sup>, Kis Viktória<sup>2,3,@</sup>, Kovács Zsolt<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ELTE Anyagfizika Tanszék, H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

<sup>2</sup>MKH HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, H-1112 Budapest, Konkoly-Thege Miklós u. 29–33.

<sup>3</sup>ELTE Ásványtani Tanszék, H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

@E-mail: kis.viktoria@ek.hun-ren.hu

## Bevezetés

A fogzománc biológiai ásványképződés során kialakuló keményszövet, ami kivételes mechanikai tulajdonságait szélsőséges hőmérséklet- és pH-ingadozás között is képes évtizedes időskálán megőrizni. Ennek a rendkívüli stabilitásnak a kulcsa a zománc hierarchikus szerkezete. A fogzománc alapegységei az apatit (Ca-foszfát) nanokristályok, amelyek helyről helyre változó, több méretskálán átívelő rend szerint szerveződnek makroszkopikus szerkezeti anyaggá. Ennek egyik legjelentősebb szerveződési egységei az ún. zománcprizmák, amelyek nagyszámú, orientációjukban részben korrelált nanokristályt fognak össze több száz mikrométer hosszú és néhány mikrométer átmérőjű, kulcslyuk keresztmetszetű kötegekbe (1c. ábra).

A nanoméretű építőkövek szerveződése lehetővé teszi, hogy a fogzománcban mind az orientáció, mind az összetétel a hely függvényében fokozatosan változzék, ami a mechanikai tulajdonságok komplex viselkedését eredményezi. A kialakuló szerkezetnek köszönhető, hogy míg az apatitkristály makroszkopikus méretben kerámiaszerű rideg viselkedést mutat, fogzománcként egyszerre lesz ellenálló a nagy axiális terheléseknek (rágás), és képes az oldalirányú repedések terjedésének hatékony csökkentésére is.

Cikkünkben bemutatunk egy módszert, amellyel a zománcprizmák térbeli orientációja kvantitatívan térképezhető. Ennek segítségével, elméleti megfontolásokra alapozva, a szerkezeti anizotrópia és az összetétel rugalmassági moduluszra gyakorolt hatását szétválasztjuk. Megmutatjuk, hogy a rugalmassági modulusz fokozatos változása irányfüggő anizotrópiát mutat. A rágófelületről távolodva, axiális irányban az összetétel-gradiens hatására fokozatosan csökken; ezzel szemben erre merőleges irányban a nanokristály-, illetve prizmaorientáció által

szabályozva a rugalmassági modulusz a teljes zománc-térfogatra nézve közel állandó.

## Biominalizáció

A biomineralizáció, azaz a biológiai ásványképződés egyik speciális esete az, amikor a kristályosodás élő szervezetben történik, élettani, esetleg kóros folyamatok eredményeképpen. Az élettani bioásványok a szervezet egészséges működése során alakulnak ki, kiválásukat fehérvérjék és más szerves molekulák egyensúlyi működése szabályozza. A bioásványok élő szervezetben betöltött szerepe változatos. Lehet ez védelmi funkció, mint a puhatestűek vagy korallak esetében a külső váz, vagy a szilárdító belső váz biztosítása, mint a gerincesek csontozata esetében, és kapcsolódhat az érzékeléshez (pl. kalcitkristályok alkotta optikai lencse a szemben), illetve létfontosságú folyamatokhoz, mint pl. szaporodás (tojás-héj), táplálkozás (fogazat) vagy tájékozódás (mágneses kristályok).

A bioásványok tipikusan kevés kémiai elemről épülnek fel – ezek szükségszerűen biokompatibilisek és az élő szervezet számára könnyen hozzáférhetőek, mint pl. a kalcium, a foszfor és a szén. Leggyakrabban nanométeres mérettartományban kristályosodnak. A tartó- vagy erő-kifejtő funkciót betöltő Ca-karbonát (kalcit, aragonit), illetve Ca-foszfát (apatit) bioásványok jellemzően egy



Kis Viktória geológus, az Energiatudományi Kutatóközpont tudományos főmunkatársa. 2005-ben szerezte PhD-fokozatát az Eötvös Loránd Tudományegyetemen. Kutatási területe a nanoásványok vizsgálata transzmissziós elektronmikroszkópos módszerekkel. Szakmai érdeklődése az utóbbi években a biomineralizáció és a bioanyagok felé fordult.



Hegedűs Máté okleveles környezetkutató, jelenleg az ELTE Környezettudományi Doktori Iskola Környezeti Földtan programjának hallgatója. Az ELTE TTK Raman-spektroszkópiai laborjában operátori feladatokat lát el. Érdeklődési körébe tartozik a bioásványok és biokompozit anyagok kémiai és mechanikai vizsgálata.



Kovács Zsolt fizikus, PhD (2002). Jelenleg az ELTE Anyagfizikai Tanszékének habilitált docense. Fő kutatási területe az amorf és nanokristályos anyagok képlékeny tulajdonságainak vizsgálata.

szerves komponenssel több méretskálán át, a nanométerestől a makroszkopikus tartományig, hierarchikusan szervezett háromdimenziós kompozit struktúrákat alkotnak. Ezekben a struktúrákban az ásványi komponens rigid, míg a szerves komponens könnyen alakítható, ami mechanikai, szilárdságtani tulajdonságok egyedi kombinációját eredményezi makroszkopikus szinten.

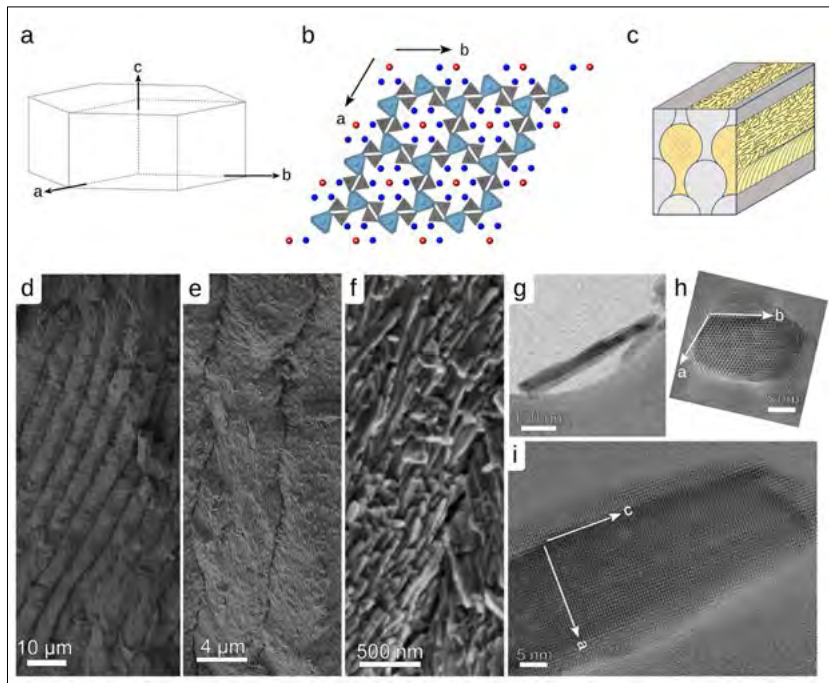
Az egyes szerepkörökre specializált bioásványok, illetve struktúrák képződése több százmillió éve fejlődik és zajlik, így joggal feltételezhetjük, hogy a betöltött funkcióra optimalizáltak, előállításuk standardizált, reprodukálható. A hierarchikus szerkezetet feltárva a kristályosodást modellezni tudjuk [1], így hasonló elven felépülő, a biológiai kompozit struktúrákat utánzó (biomimetikus) funkcionális nanoanyagokat tudunk tervezni és létrehozni [2].

## Az építőkö apatit – a sokarcú bioásvány

A csont és a fogzománc ásványi komponense egyaránt egy Ca-foszfát, a bioapatit.<sup>1</sup> Ez a két keményszövet alapjaiban különböző természetű: a csont viselkedése dinamikus (öngyógyítás, nyomelemraktározás, a Ca-háztartás szabályozása), míg a fogzománc legfőbb ismérve az évtizedes időskálán való tartósság és a mechanikai és kémiai hatásokkal szembeni ellenállás. Az élettani funkcióhoz való alkalmazkodáshoz a bioapatit nanokristályok szerkezeti változékonysága is hozzájárul.

A szeretlen apatit hexagonális (1a. ábra), tércsoportja  $P6_3/m$ , kristályszerkezetét  $PO_4$  foszfátetraéderek építik föl, amelyek egymáshoz O–Ca–O kötésekön keresztül kapcsolódnak. A Ca-oxid poliéderek a kristálytani c tengellyel párhuzamosan láncokat alkotnak (1b. ábra). A láncok között csatornák húzódnak, amelyekben a nagyobb méretű  $F^-$ ,  $Cl^-$  és  $OH^-$  anionok helyezkednek el. Az apatitszerkezetre jellemző az elemhelyettesítés, a bioapatit sajátos tulajdonsága is ehhez kapcsolódik. A  $Ca^{2+}$  kristálytani pozíciójába ( $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Sr^{2+}$ ) épül be, ami az élettani szempontból fontos nyomelemek raktározását

<sup>1</sup> A geológiai eredetű apatit általános képlete  $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$ , a domináns anion alapján megkülönböztetünk fluor-, klór- és hidroxilapatitot. Járulékos, kis mennyiségben szinte bármilyen geológiai környezetben megtalálható, és előfordul nem földi eredetű kőzetben is. Gyakran tartalmaz nyomelemként ritkaföldfémeket, illetve uránt, ez utóbbi adja gyakorlati jelentőségét a geológiai kormeghatározásban (U-Th-Pb módszer).

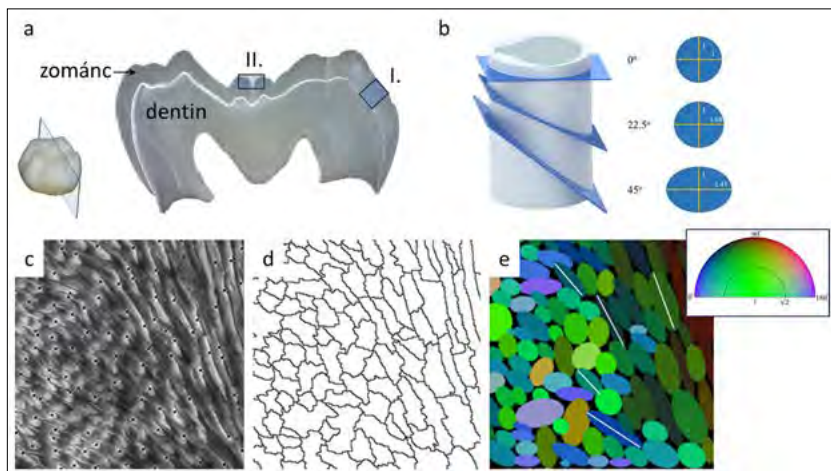


1. ábra. (a) Az apatitkristályra jellemző hexagonális prizma morfológia, a kristálytani tengelyek és az elemi cella jelölésével. (b) Hidroxilapatit kristályszerkezete a kristálytani c tengely felőli nézetben. A kék színnel két különböző kristálytani pozícióban lévő Ca-ot jelöltünk. A világoskék poliéderek alkotják a c tengellyel párhuzamos láncokat. Szürkével a  $PO_4$  tetraédereket, piros + rózsaszín színnel az OH csoportokat jelöltük. A tetraédercsúcsokon lévő  $O^{2-}$  ionokat az ábra átláthatóságának könnyítése céljából nem jelenítettük meg. (c) Fogzománcprizma sematikus képe: „kulcslyuk-keresztmetszet” a jellemző nanokristály-orientációkkal. (d–f) A fogzománc keresztmetszeti pásztázó elektronmikroszkópos felvétele különböző nagyításokban. A SEM-felvételek eredetije a [4] publikációban található. (g–i) A fogzománc bioapatit nanokristályainak TEM- (transzmissziós elektronmikroszkópos) felvételei, (g) egy nanokristály a c tengelyre merőleges nézetben, világos látóterű felvételen, (h) egy nanokristály a c tengellyel párhuzamos nézetben, atomi felbontású felvételen és (i) egy nanokristály a c tengelyre merőleges nézetben, atomi felbontású felvételen

teszi lehetővé. A csatornapozícióban a legfontosabb helyettesítő a  $(CO_3)^{2-}$ , amelynek a krisztallitméret szabályozásában, így a felületi reaktivitás alakulásában van szerepe.

## A fogzománc összetétele

A fogzománc a leginkább mineralizált keményszövet, tömegének 96%-át a bioapatit adja. Emellett kis mennyiségben szerves anyagot és vizet is tartalmaz – ezek a prizmaközi térben, a prizmák kapcsolódási területein, a nanokristályok közötti pórusokban vannak jelen [3]. A fogzománc bioapatitjának összetétele leginkább a szeretlen hidroxilapatithoz áll közel, a nyomelemek mennyiségének változása elsősorban a növekedési irányhoz kapcsolódik. A Na- és Mg-tartalom, illetve a  $(CO_3)^{2-}$ -helyettesítés a rágófelülettől a dentin–zománc-határig monoton növekszik. Hasonló trendet mutat a pórusok térbeli eloszlása is, illetve a szervesanyag-tartalom. Mind az elemhelyettesítést, mind a pórusok eloszlását szokás a mechanikai tulajdonságok trendjellegű változásával összekapcsolni. Ismert ugyanakkor, hogy kísérletileg Mg-ioncserével is előidézhető a zománc felületi keménységének növekedése, amit az atomi környezet megvál-



2. ábra. (a) A fog keresztmetszetének fénymikroszkópos felvétele. A metszet helyzetét a fogban az alábra mutatja. A részletesen vizsgált keresztmetszeti területeket kék téglalapok (I. és II.) jelölik. (b) A virtuális prizmamodell: a síkon kívüli dőlésszög és az ellipszisparaméterek kapcsolata. (c–e) Orientációs térkép szerkesztésének bemutatása egy változatos prizmaorientációt tartalmazó területen: (c) az intenzitásmaximumok kijelölése a SEM-felvételen; (d) intenzitásmaximumok alapján szegmentált kép; (e) ellipszisillesztés és az ellipszisparaméterek alapján történő színekódolás. A prizma síkon belüli, vízszintessel bezárt szöge (fehér vonalak) alapján kék-piros, valamint a síkon kívüli dőlése alapján zöld színnel ábrázolva. Az így kapott színekombináció megjeleníti a zománcprizma térbeli orientációját. (Az (a) és (b) ábra eredetije a [9] publikációban található)

tozásával [4], és a kialakuló kisebb szemcsemérettel [5] magyaráznak.

## A fogzománc hierarchikus szerkezeti anizotrópiája

A fogzománcot alkotó bioapatit nanokristályok erősen anizotróp morfológiájúak: a kristálytani *c*-tengely irányában megnyúltak (1f–g. ábra), hosszúságuk több mikrométert ér el, míg keresztmetszetben néhányszor tíz nanométeresek (1h–i. ábra). A szomszédos kristályok közel párhuzamosan futnak, és először mintegy 80–130 nm-es rostokat, majd 7–800 nm átmérőjű kötegeket, ezek pedig néhány mikrométeres prizmakat alkotnak (1c–e. ábra). A prizmak és a prizmaközi tér alkotja a tömbi fogzománcot (1c. ábra). A zománcépződés során egy-egy zománcprizmát egy-egy zománcépző sejt hoz létre. Így egy prizma a zománc-dentin határtól a rágófelületig fut, mintegy milliméter hosszan, hozzájárulva a zománcszerkezet anizotrópiájához. A prizmak lefutása azonban nem egyenes, a belső zománcban kanyarulataikkal jellegzetes sávozottságot alakítanak ki, amit Hunter-Schreger-sávoknak nevez a szakirodalom. A nanokristályok és a mikrométeres szerkezeti elemek kapcsolatának vizsgálata csupán az utóbbi években vált lehetővé, mert nagy kihívást jelent a nanométeres és mikrométeres szerkezeti elemek milliméteres skálán történő, korrelált kvantitatív vizsgálata. Megállapították, hogy a nanokristályok kristálytani mérete, rácsállandója<sup>2</sup> [6] és orientációja fokozatosan változik a prizma és prizmaközi tér

<sup>2</sup> A magyarázathoz lásd Németh Péter cikkét ugyanebben a számban.

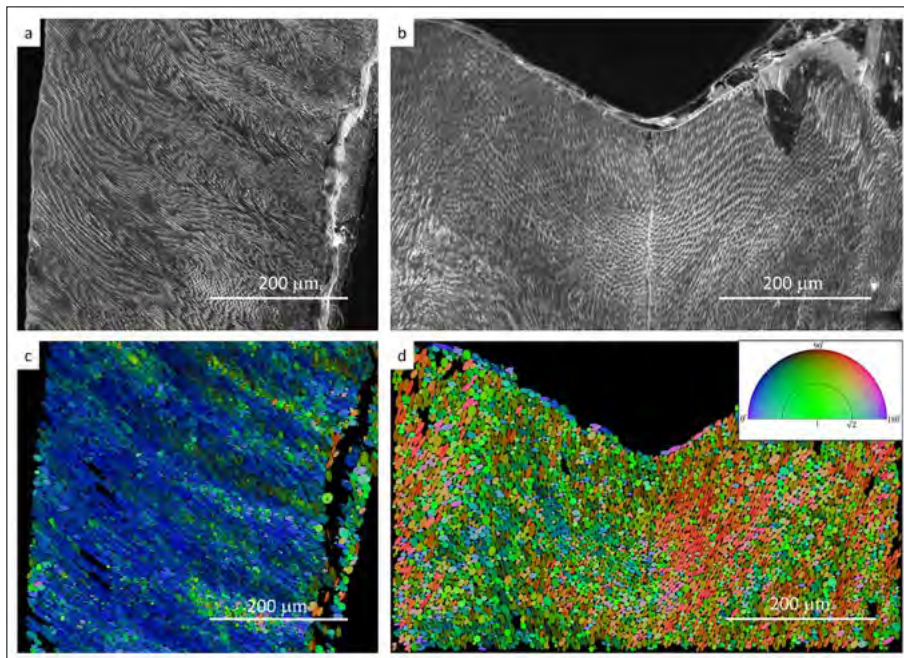
között [7]. Míg a prizmákban a nanokristályok orientációjának fokozatos változása a prizmak lefutását, így a Hunter-Schreger-sávok kanyarulatait is követi, a prizmaközi térben orientációjuk több tíz  $\mu\text{m}^2$ -en keresztül közel állandó [7].

## A prizmaszerkezet vizsgálata

A zománc prizmaszerkezetét tejfogak különböző metszetein vizsgáltuk. Egy ilyen metszet optikai mikroszkópos képe látható a 2a. ábrán. A zománcprizmak leképezéséhez nagy felbontású pásztázó elektronmikroszkópos (scanning electron microscope – SEM) felvételeket készítettünk a 2a. ábrán jelölt területekről, valamint a zománc külső rágófelületére merőleges irányból. A zománc rágófelületén a prizmak a felületre merőlegesek, míg ennek megfelelően a keresztmet-

szet rágófelülethez közeli zónájában hossz tengelyük a felvétel síkjában van.

A zománcprizmak orientációjának kvantitatív meghatározásához a zománcfelszín marattuk, majd a marattott felszínről SEM-felvételeket készítettünk, amelyeket képfeldolgozó módszerrel elemeztünk. A maratás közben az oldódás sebessége az eltérő kristályorientáció miatt a prizmaközi térben és a prizma belsejében nagyobb, mint a prizmak szélein, ezáltal a maratás hatására a prizmaszélek kiemelkednek környezetükből. A maratott felszín kiemelkedő egységei – a prizmacsúcsok, illetve -élek – a SEM szekunderelektron-detektorával leképezve lokális intenzitásmaximumokat mutatnak. Ez a mintázat jól közelíti a prizmak valós elrendeződését. Az intenzitásmaximumok alapján szegmentáltuk a képet (2c. és 2d. ábrák), majd a szegmentált területekre ellipsziseket illesztettünk. Az ellipsziseket virtuális prizmakeresztmetszeteknek tekintettük, és nagytengelyük síkon belüli, vízszintessel bezárt szögéből, illetve a nagy- és kistengelyek arányából számolt síkon kívüli dőlésszögből a prizma térbeli helyzetét rekonstruáltuk. A dőlésszög szerint változó virtuális prizmakeresztmetszeteket a 2b. ábrán mutatjuk. Az ellipszisek szögparaméterei alapján megfelelő színekódolással orientációs térképet készítettünk (2e. ábra), amely már helyfüggő kvantitatív információt tartalmaz az egyes prizmak síkbeli és síkon kívüli dőléséről. A 3. ábrán két területen a zománc teljes vastagságában készített prizmaorientációs térképet mutatunk be. Az analízis nagy felbontású SEM-képek esetében a zománc teljes keresztmetszetére kiterjeszhető, és lehetővé teszi a vonal vagy sáv menti összehasonlítást és *x*-*y* diagramon való ábrázolást – ami könnyen értelmezhető, kvantitatív információt nyújt a zománc prizmaszerkezetéről.



3. ábra. A 2a. ábrán jelölt keresztmetszeti területek pásztázó elektronmikroszkópos felvételei és a hozzájuk tartozó a prizmaorientációs térképek. (a, c) I. keresztmetszeti terület, (b, d) II. keresztmetszeti terület. A prizmaorientációs térképek színekódját a (d) ábrában mutatjuk. (Az ábra eredetije a [9] publikációban található)

## Nanoindentációs vizsgálatok

A fogzománc mechanikai paramétereinek térbeli változását nanoindentációval vizsgáltuk. A nanoindentáció széles körben használt, különböző anyagok képlékeny és rugalmas tulajdonságainak meghatározására szolgáló módszer. Lényege, hogy a vizsgálni kívánt anyag polírozott felületét egy gyémántpiramis hegyével külső mechanikai erőhatásnak tesszük ki, ennek következtében a minta felületén egy piramis alakú lenyomat keletkezik (Vickers-keménységmérés). A benyomódás mélysége és a terhelés közbeni visszarugózás alapján (szub-) mikrométeres térbeli felbontással meghatározható a vizsgált anyag keménysége és rugalmassági modulusza. A mérések csak a minta legfelső, legfeljebb néhány mikrométeres rétegét érintik, emiatt a nanoindentáció roncsolásmentes módszernek tekinthető.

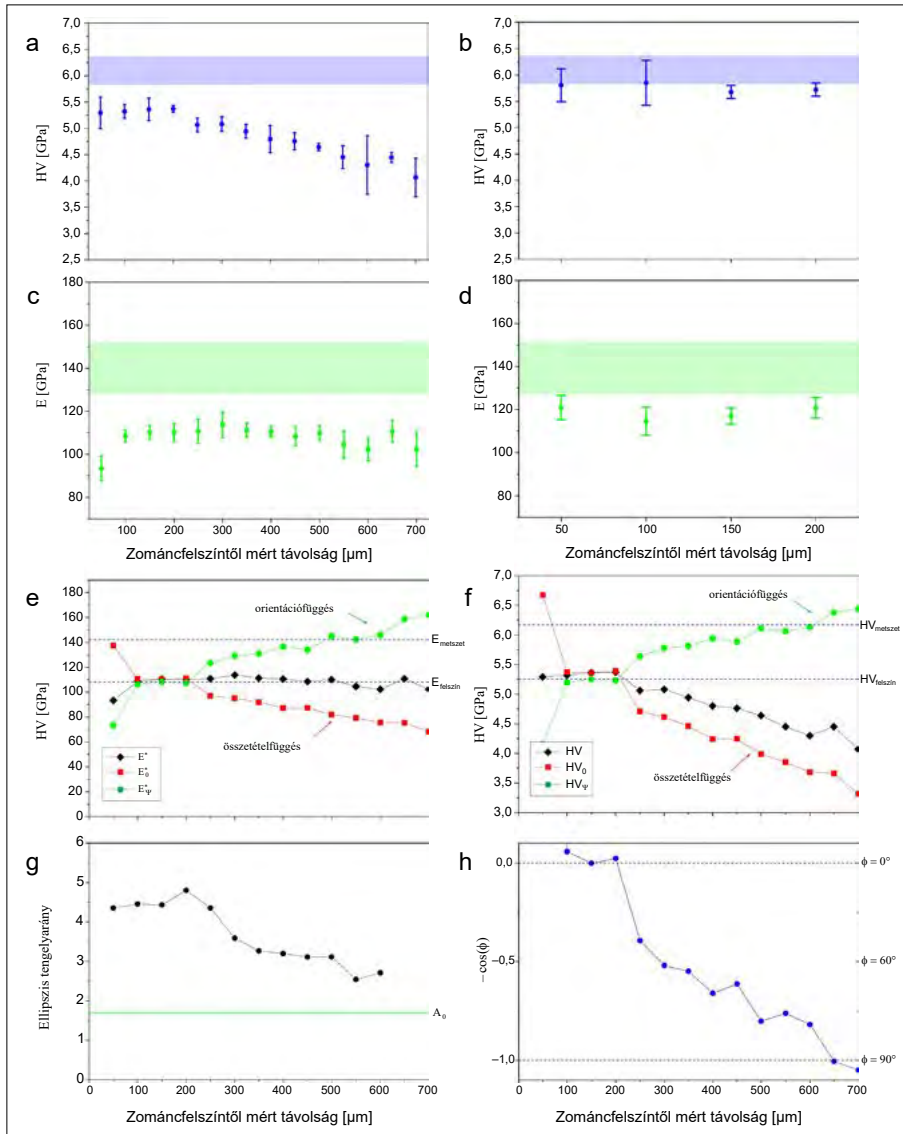
A nanoindentációs méréseket a 2a. ábrán jelölt két zománckeresztmetszeti területen, illetve a zománc rágófelületén végeztük el. A keresztmetszeti területeken a prizmaorientációs térképezését is elvégeztük (3. ábra). A mérési területek közötti döntő különbség, hogy míg az I. keresztmetszeti területen a prizmaorientáció része párhuzamos a polírozott felszínnel (3a., 3c. ábra) és így a rágófelületre merőleges, a II. keresztmetszeti területen (3b., 3d. ábra) a zománcprizmák közel merőlegesek a polírozott felületre.

A Vickers-keménység (HV) és a rugalmassági modulusz (E) mért értékei a felszíntől való távolság függvényében ábrázolva a 4a–d. ábrákon találhatóak. Keresztmetszetben a HV a felszínhez közel a legnagyobb,

és a dentin felé csökken, a rugalmassági modulusz azonban közel konstans értékű a zománc egész vastagságában. A különbség oka, hogy míg a rugalmassági modulusz a benyomófej alatti szerkezeti elemek rugalmas tulajdonságának átlagáról szolgáltat információt, addig a keménységérték felülbecsüli a puhább, illetve a szerkezeti hibákat tartalmazó egységeket. Így a szerkezeti hibák sűrűségét tükröző HV/E hányados csökkenő tendenciát mutat a dentin irányában. A rágófelületet átlagosan magasabb HV és E érték jellemzi (kék és zöld sávok a 4a–d. ábrákon), mint a keresztmetszetet. A rágófelületen végzett mérések során a benyomás iránya közel párhuzamos a zománcprizmák hossztengeleyével.

## A prizmaorientáció és a rugalmas tulajdonságok kapcsolata

A kvalitatív tapasztalati összefüggéseken túl a prizmaorientáció és a rugalmas tulajdonságok között mélyebb, kvantitatív kapcsolat is feltárható. A hexagonális hidroxilapatit-egy kristály rugalmas állandói irányfüggőek, de a HV/E arány gyakorlatilag nem függ a kristályorientációjától [8, 9]. Ebből kiindulva állítjuk, hogy a zománc két merőleges irányból – a rágófelület felől, illetve a keresztmetszet normálisa felől – származó  $E_1$ ,  $HV_1$ , illetve  $E_2$ ,  $HV_2$  értékek  $\beta_E = (E_1/E_2) - 1$ , illetve  $\beta_{HV} = (HV_1/HV_2) - 1$  hányadosainak különbsége alapján a kristályorientáció rugalmas tulajdonságokra gyakorolt hatása meghatározható [9]. Azaz a szerkezeti anizotrópiának a zománc rugalmas tulajdonságaira gyakorolt hatása az összetétel hatásától elkülöníthető. A 4e. és 4f. ábra a két hatást mutatja a rágófelület felől való távolság függvényében. Látható, hogy a koncentrációfüggés a vázalkozásoknak megfelelően monoton csökkenést mutat a dentin–zománc-határfelület felé, hiszen a nyomelem-összetétel, illetve a szervesanyag-tartalom lineárisan növekszik ebbe az irányba. Az orientáció szöge ugyancsak monoton változik, de a dentin felé növekvő tendenciát mutat. Növekedése a prizmaorientáció változásához kapcsolódik, ami a SEM-felvételen is látszik, ugyanis a dentinhez közelebbi régióban megnő a síkhoz képest nagy dőlésszögű prizmaorientáció aránya, azaz megjelennek a prizmakanyarulatok, a Hunter–Schreger-sávok. Ez azt jelenti, hogy a nanokristályok nagyobb arányban állnak a „terhelhetőbb irányukkal”, a kristálytani c ten-



4. ábra. A 2a. ábrán jelölt I. és II. zománckeresztmetszeti terület (a, b) Vickers-keménységi (HV) és (c, d) rugalmasságmodulusz- (E) profiljai a rágófelületről való távolság függvényében. (a, c) Az I. keresztmetszeti terület, ahol a prizmak hossz tengelye közel a metszet síkjában van. (b, d) A II. keresztmetszeti terület, ahol a prizmak hossz tengelye közel merőleges a metszet síkjára. A színezett sávok mindkét esetben a rágófelület normálisa irányából mért értékek szórási sávját mutatják. (e, f) A kísérleti úton meghatározott HV és E alapján az összetétel és a prizmaorientáció mechanikai paraméterekre gyakorolt hatása szétválasztható. (g) A prizmak nagy- és kistengelye arányának súlyozott átlaga a rágófelületről való távolság függvényében. (h) A prizmak elméleti megfontolások alapján várható síkon kívüli dőlésszöge a rágófelületről való távolság függvényében. (Az ábrák eredetije a [9] publikációban található)

gellyel merőlegesen a keresztmetszeti síkra. A prizmak nagy- és kistengelye arányának súlyozott átlagát<sup>3</sup> mutatja a rágófelületről való távolság függvényében a 4g. ábra. Elméleti megfontolásainkra alapozva [9], a rágófelületről való távolság függvényében változó HV- és moduluszgörbékből (4c. és 4d. ábra) kiszámoltuk a prizmak dőlésszögének várható változását (4h. ábra). Szemmel látható a hasonlóság a 4g. és 4h. diagram görbéinek lefutásában, ami azt mutatja, hogy a kísérletileg közvetlen módszerrel kvantitatíve meghatározott prizmaorien-

<sup>3</sup> A súlyozást a prizmakeresztmetszet területével végeztük, és a rágófelülettel párhuzamos 50 μm széles sávban átlagoltunk.

táció-eloszlást jó közelítéssel visszaadja a mechanikus paraméterek térbeli változásából, elméleti megfontolásainkra alapozva számolt várható orientációeloszlás. Ezzel a lépéssel egyrészt sikerült gondolatmenetünk helytállóságát igazolni, másrészt mennyiségi kapcsolatot teremtettünk egy geometriai paraméterekkel jellemzett, mezoskálájú morfológiai elem és egy kristályszerkezettől függő anyagi jellemző, a rugalmassági modulusz között egy komplex hierarchikus architektúra esetében.

Nézzük meg egy kicsit tüzetesebben a 4e-f. diagramokat! A rágófelületre merőleges keresztmetszetben a rágófelülethez közeli felső 200 mikrométeres sávban az összetétel és a prizmaorientáció közel állandó. A dentinhez tovább közeledve mindkét paraméter monoton változik, de ellentétes előjellel hat a mechanikai tulajdonságokra. Az orientációváltozás – a Hunter-Schreger-sávok – hatására a keménység és a rugalmassági modulusz növekedése várható, ahogyan ez következik a hidroxilapatit-kristály anizotrópiájából. Ezzel szemben az összetételváltozás csökkentő hatású, ami összhangban van a dentin felé növekvő porozitással és ehhez kapcsolódó szervesanyag-tartalommal. Így a nanoindentációs mérési adatokkal összhangban (4a-d. ábra) a rugalmassági modulusz

görbéje közel konstans lesz a zománc teljes vastagságában, míg a HV-görbe – a szerkezeti hibák felülbecsléséből adódóan – meredeken csökkenni fog.

Tekintsük most a fogzománcot a rágófelület normálisa felől! A prizmaorientáció – azaz az átlagos nanokristály-orientáció – egyértelműen a rugalmassági modulusz dentin felé történő csökkenésére utal ebben az irányban. A prizmakanyarulatok, a Hunter-Schreger-sávok egyre markánsabb jelenlétével ugyanis a nanokristályok egyre nagyobb arányban fordulnak a gyengébb kristálytani irányukkal – az [100] tengellyel, azaz a kristály növekedési irányára, vagy hossz tengelyére merőleges tengellyel

– a rágófelület rugalmas normálisának irányába. Mivel azonban a szervesanyag-tartalom tetszőleges irányból nézve monoton nő a dentin felé, az összetételhatás minden irányban csökkenteni fogja a rugalmassági moduluszt. A két hatás együttes működése a fogzománcban mint tömbi anyagban a rugalmas tulajdonságok térbeli változásának irányfüggő finomhangolása révén egy különleges anizotrop szerkezetet eredményez. A rágófelület normálisa felőli irányból a dentin felé monoton csökkenő rugalmassági modulusz a merőleges keresztmetszeti irányban a teljes térfogatra nézve közel állandó.

Mit is jelent nekünk mindez a fogzománc élettani szerepével kapcsolatban? Hogyan kapcsolódik a tartóssághoz, az évtizedes időskálán történő hatékony működéshez? A rágófelület felőli irányban kialakuló anizotrop gradiens biztosítja a fogzománc szívósságát a felületnormális irányából érkező erőhatásokkal szemben. Tipikusan ilyen erőhatások érik a fogzománcot rágás közben. Ugyanakkor a rugalmassági modulusz merőleges irányú minimális változása hatékonyan csökkenti a repedések kialakulásának valószínűségét.

## Összefoglalás

A kivételes mechanikai tulajdonságokkal rendelkező fogzománc térbeli gradiensjellegű anizotrópiáját a bioapatit nanokristályok összetétel- és orientációváltozása hangolja. A fogzománc mezoszkálájú szerkezeti eleme, a zománcprizma orientációját kvantitatívan térképeztük, és a szerkezeti anizotrópia rugalmassági moduluszra gyakorolt hatását az összetételhatástól elkülönítve vizsgáltuk. Megfontolásainkat a prizmaorientáció nanoindentációs mérésekből való kinyerésével igazoltuk, ami által kapcsolatot teremtettünk egy geometriai paraméterekkel jellemzett morfológiai elem és egy kristályszerkezettől függő anyagi jellemző, a rugalmassági modulusz között egy komplex hierarchikus architektúra esetében.

Megmutattuk, hogy a rugalmassági modulusz fokozatos változása a fogzománcban irányfüggő anizotrópiát mutat, ami a rágás során kialakuló erőhatásokkal szemben hozzájárul a fog kedvező viselkedéséhez.

## Köszönetnyilvánítás

A kutatás pénzügyi háttérét a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal biztosította a K-125100 számú pályázat keretében. Köszönettel tartozuk a [4, 9] publikációk társszerzőinek.

## Irodalom

1. Gránásy L., Rátkai L., Tóth Gy. I., Gilbert P. U. P. A., Zlotnikov I., Pusztai T.: Phase-fí 1d modeling of biomineralization in mollusks and corals: microstructure vs formation mechanism. *JACS Au* 1 (2021) 1014–1033.
2. Meyers M. A., McKittrick J., Chen Po-Yu: Structural biological materials: critical mechanics-materials connections. *Science* 339 (2013) DOI: 10.1126/science.1220854
3. Nanci A.: Ten Cate's Oral Histology. 9th ed., Elsevier 2018, ISBN: 9780-323-48524-1
4. Kis V. K., Sulyok A., Hegedűs M., Kovács I., Rózsa N., Kovács Zs.: Magnesium incorporation into primary dental enamel and its effect on mechanical properties. *Acta Biomater.* 120 (2021) 104–115. DOI: 10.1016/j.actbio.2020.08.035
5. Abdallah M. N., Eimar H., Bassett D. C., Schnabel M., Ciobanu O., Nelea V., McKee M. D., Cerruti M., Tamimi F.: Diagenesis-inspired reaction of magnesium ions with surface enamel mineral modifies properties of human teeth. *Acta Biomater.* 37 (2016) 174–183. DOI: 10.1016/j.actbio.2016.04.005
6. Beniash E., Stiffler C. A., Sun Ch-Y., Jung G. S., Buehler M. J., Gilbert P. U. P. A.: The hidden structure of human enamel. *Nat. Commun.* 10 (2019) 4383. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12185-7>
7. Free R., DeRocher K., Cooley V., Xu R., Stock S.R., Joester D.: Mesoscale structural gradients in human tooth enamel. *PNAS* 119 (2022) <https://doi.org/10.1073/pnas.2211285119>
8. Saber-Samandari S., Gross K. A.: Micromechanical properties of single crystal hydroxyapatite by nanoindentation. *Acta Biomater.* 56 (2009) 2206–2212. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.02.009>
9. Hegedűs M., Kis V. K., Szabó Á., Kovács I., Rózsa N., Kovács Zs.: Gradient structural anisotropy of dental enamel is optimized for enhanced mechanical behaviour. *Materials & Design* 234 (2023) 112369. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112369>

# fizikaiszemle.elft.hu

A honlapon megtalálhatja régebbi és új lapszámainkat, valamint számos mellékletet!

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682  
A Társulat Internet honlapja <http://fizikaiszemle.elft.hu>, e-postacím: [elft@elft.hu](mailto:elft@elft.hu)

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtítká, felelős szerkesztő Iglió Ferenc főszerkesztő.  
Kéziratokat nem őrünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Hock Gábor. Nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.  
Ferjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámán.  
Megjelenik havonta (nyáron dupla számmal), egyes szám ára: 1500,- Ft (dupla számé 3000,- Ft) + postaköltség.

**HU ISSN 0015-3257** (nyomtatott) és **HU ISSN 1588-0540** (online)



# EMLÉKEIM KRAUSZ FERENC ÚTJÁRÓL A NOBEL-DÍJIG – I. RÉSZ

Ferencz Kárpát  
Optilab Kft., Budapest

## Prológus

Minden Bakos Józseftől ered: ha ő nincs, nem akkor és nem úgy születik meg az első magyar lézer, ahogy megszületett – ebben Csillag László és Varga Péter is társai voltak – és ha ő nincs, talán soha nem találkozom Krausz Ferencsel (a továbbiakban sokszor csak Feri). Bakos Jóska építette meg munkatársaival a KFKI-ban azt a vákuumpárolgató berendezést a hatvanas években, amiben az első hazai lézertükröket állították elő, és amit pályám kezdetén én is használtam 1976-ban. Ebben két kis ellenállásfűtéses csónakból lehetett kétféle anyagot elpárolgatótni fűtött, álló üveghordozókra, amiket házon belül készítettek. Először  $\text{CeO}_2\text{-MgF}_2$  sokréteges tükröket növesztettek, majd a reaktív párolgató technológia megvalósításával az akkori témavezetőm, Lutter András  $\text{TiO}$ -ból és  $\text{SiO}$ -ból kis nyomású oxigéngázban először készített kemény  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  sokréteges tükröket.

A Tungstam Rt. alkalmazottjaként, ipari doktórandszikként kerültem a KFKI 4. épületének földszinti folyosójára, ahol a szomszédos laboratórium Bakos Jóska csoportjéé volt. Egyetemi doktori értekezésem témája az optikai vékonyrétegek fényszórása volt, különös tekintettel a különböző lézertükrök használhatóságát korlátozó veszteségekre. Megvizsgáltam a különböző réteganyagokat,  $\text{He-Cd}^+$ -lézerrel megmértem a fényszórásuk szögeloszlásait, és számítógépes programot írtam a fényszórás elméleti modellezésére. Az intézeti házi védésen az opponens Bakos Jóska volt, majd sikeresen ledoktoráltam az Eötvös Loránd Tudományegyetemen 1980-ban. A Tungstam Kutatóintézetében eltöltött közel öt év alatt gyakorlatot szereztem a modern elektronsugaras forrással történő vákuumpárolgató technológiában – egy Leybold-Heraeus gyártmányú A700Q párolgató berendezés segítségével – különféle interferenciabevonatokat fejlesztve fényforrásipari célokra, de Bakos Jóskaival is kapcsolatban maradtam a tokamakprogramhoz szükséges lézeres mérőrendszerek tükreinek elkészítése



Ferencz Kárpát okleveles fizikus, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai Intézetének nyugdíjasa, ahol 38 éven keresztül vezette az Optikai Vékonyréteglabort. Jelenleg az Optilab Kft. ügyvezetőjeként, a vállalkozás és az intézet közötti szerződés alapján dolgozik ugyanott. Kutatja, fejleszti és gyártja az ultrarövid impulzusú lézerek optikáit.

kapcsán. Minden szerda délutánt a KFKI könyvtárában töltöttem az aktuális szakirodalom olvasásával, amivel sikerült naprakésszé képeznem magam az optikai bevonatok tudományában.

1982-ben a Labor Műszeripari Művek Vállalat segítségével sikerült egy korszerű, Balzers AG gyártmányú vákuumpárolgató berendezést (BAK560) beszerezni a KFKI optikai vékonyréteg-laboratóriuma számára, ahova 1983 áprilisában Kroó Norbert igazgató segítségével felvettek munkatárssnak, és aminek vezetésére 1984 februárjában megbízást kaptam néhai Cser Lászlótól. Ezt a munkát 2022. január 1-én történt nyugdíjba vonulásomig 38 éven át végeztem. Sajnos az új párolgató berendezés csak „félkarú” lett, rengeteg fontos dolgot nem vásároltak meg hozzá. Kroó Norbert segítségével az első dolgom ezek pótlólagos beszerzése volt, ami az utolsó öt éves terv végén az OMFb-nél megmaradt pénzösszeg felhasználásával sikerült. Ekkor építettünk be egy precíziós gázbeeresztő rendszert a reaktív párolgatóhoz, egy ködfénykiszűréses rendszert az *in situ* hordozótisztításhoz, egy 15 kW-os teljesítményű, 270°-os nyalábelterítésű, ESQ110 típusú elektronsugaras párolgató forrást, gyári szubsztrátumfűtő egységet és a végvákuum javítását lehetővé tevő, cseppfolyós nitrogént használó hidegcsapdát. Mindezeket a szivattyúrendszerrel és a korábban telepített ellenállásfűtéses forrásokkal összekapcsolva két mikroszámítógép biztosította a folyamat szabályozását, a párolgató folyamat automatikus végrehajtását.

Ezzel a fejlesztéssel az 1986. év végére a gépünk teljes mértékben alkalmassá vált a kor színvonalának megfelelő minőségű lézeroptikai bevonatok kísérleti példányainak elkészítésére és kis sorozatú gyártására. Első dolgom volt beállítani azoknak az anyagoknak az optimális párolgató körülményeit, amelyekre irodalmi ismereteim szerint szükségünk lehetett:  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  és  $\text{MgF}_2$ . Ezek kombinációból a spektrum ultraibolya, látható és közeli infravörös tartományában a legtöbb optikai bevonat (sávtükrök, nyalábosztó tükrök, dikroikus tükrök, polarizátorok és antireflexiós bevonatok) elkészíthetők. Technológiai oldalról minden megvolt, amire a pályáját ekkor kezdő Krausz Ferinek szüksége lehetett.

Csak egy jó szoftver hiányzott a szükséges optikai bevonatok megtervezéséhez, mert akkor ilyet nem lehetett a boltban kapni. Ekkor csengetett be a laborba Szipőcs Róbert utolsó éves villamosmérnök-hallgató – a továbbiakban Szipőcs Robi vagy csak Robi. Én nem emlékeztem rá, de korábban a tankörükkel járt nálam laborlátogatá-

son, aminek a végén mindig el szoktam mondani, hogy a telefonközpontban a 12-86-os melléklet kérje az, akit érdekel ez a téma, és szeretne visszajönni. Robi visszajött, és elintézttem, hogy a törvény által megengedett heti 18 órás munkaviszonyt létesíthessen hallgatóként az intézettel, azaz fizetése is legyen. Feladata az optikai bevonatok modellezéséhez szükséges és az elektromágneses hullámok Maxwell-elméletén alapuló számítógépi program írása lett, ami nem volt teljesen idegen neki, mivel sok mindent tanultak a mikrohullámokról. Segédanyagként a kezébe adtam néhai Angus Macleod barátom „Thin Film Optical Filters” című alapkönyvét. A munkát egy Commodore-64 számítógéppel kezdte el, amit a perifériáival együtt néhai Rózsa Károly, az üreges katódú gázlézerek világhírű kutatója hozott haza Amerikából és adott el sok pénzért – és elsősorban játékokra használtuk. Ezt a első adandó alkalommal lecseréltük egy igazi személyi számítógépre, a Műszertechnika cég DOS-os IBM PC-kompatibilis gépére.

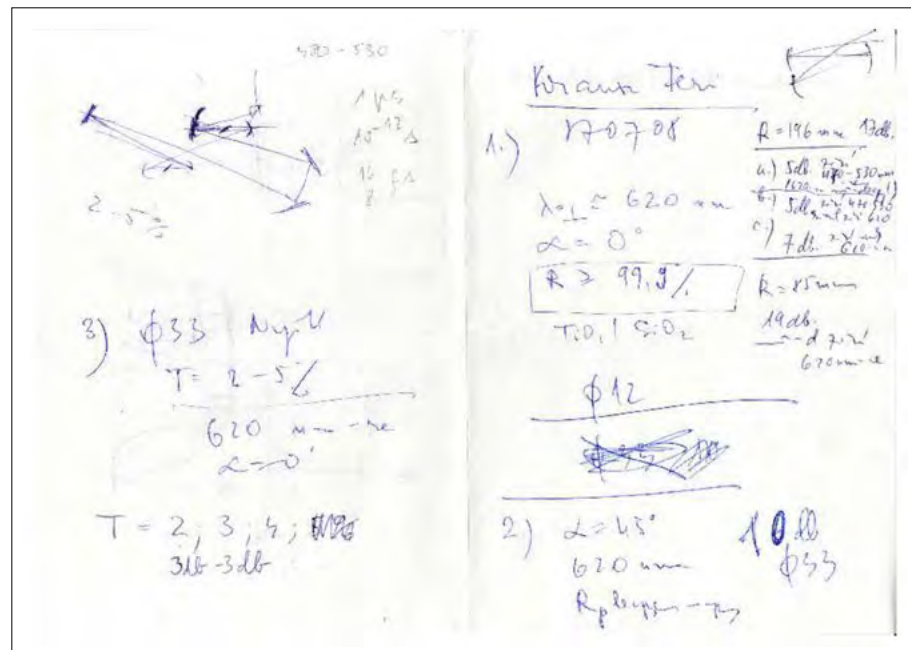
Robi 1987-ben befejezte az egyetemet, és felvettük a KFKI-ba dolgozni, ami fizikusként akkor nehéz volt, de mérnökdiplomával meg lehetett oldani – azzal az indokkal, hogy kell egy ember, aki szükség esetén ért a párologtató mikroprocesszoros vezérlőrendszeréhez. Azért kapott egy doktori témát is tőlem – az optikai interferenciaszűrők nemlineáris tulajdonságainak és binstabilitásának vizsgálatát – amiből 1990-ben sikeresen ledoktorált. Természetesen folyamatosan fejlesztettük a szoftvert, amire a doktorihoz is szüksége volt, illetve minden egyéb párologtatási munkában nagyon hasznos volt. Fontos lépés volt egy szimplexalgoritmuson alapuló optimálási eljárás megírása, amit később egy szimulált hőkezelés elnevezésű optimálással egészített ki. A kalkulust kiterjesztettük a fázistulajdonságok és azok deriváltfüggvényeinek kiszámítására is, a törésmutatók

komplex számok is lehettek, és a törésmutatók hullámhosszfüggését egy egyszerű Sellmeier-típusú formulával vettük figyelembe, aminek állandóit kísérletileg állapítottam meg párologtatott vékonyrétegeink spektrális tulajdonságaiból.

Robi munkája eredményeként a kilencvenes évek elejére rendelkezünk azzal a szoftveres eszközzel, amire szükségünk volt a Krausz Feritől nemsokára kapott feladatok megoldásához, és ami ebben a formában csak nekünk volt a kezünkben akkor. Macleod barátom azonnal elkezdte az arizonai Thin Film Center Inc. keretében általa fejlesztett „Essential Macleod” szoftver kibővítését a diszperziós tulajdonságok tervezésével, amint a csörpölt tükrökkel kapcsolatos eredményeinket publikáltuk (Szipőcs, R., Ferencz, K., Spielmann, C., Krausz, F.: Chirped multilayer coatings for broad-band dispersion control in femtosecond lasers. *Optics Letters*, Vol. 19., (1994) 201–203., független idézettség: 509). Ma a Windows alatt futó „Essential Macleod” program az egyik legsokoldalúbb ilyen eszköz a világon, jogtisztán én is ezt használom (az Optilab Kft. 45000 dollárt költött rá a kétezres évek elején). Mellékesen kiderült, hogy Robi a műegyetemi angoltanfolyamról látásból ismerte Ferit.

## Krausz Feri színre lép

Az egyetemi diploma megszerzése után Feri a BME Fizikai Intézete Kísérleti Fizika Tanszékére került Juhász Tibor mellé. Nem véletlenül: mind a ketten Bakos Jóska tanítványai voltak, aki a KFKI mellett félállásban professzor is volt ezen a tanszéken, és emlékeim szerint Feri szakdolgozati témavezetője is. Bekapcsolódott egy OTKA-pályázat teljesítésébe, aminek célja egy femtoszekundumos festéklézer megépítése volt. Ebben az időben a világon a legrövidebb lézerimpulzust festéklézerrel



1. ábra.

állították elő, amivel sikerült 6 fs hosszú, piros színű impulzusokat demonstrálni az USA-ban. Viszont ez a lézer nagyon messze volt attól, hogy „készülék” legyen, mert az alkalmazott festéksugaras megoldás nagyon megbízhatatlan volt. Ezért ez a feladat nem volt egyszerű, ráadásul tovább nehezítette Feri helyzetét, hogy Juhász Tibor állást talált az USA-ban, ahová útlevelemmel legálisan kiköltözött, és Feri magára maradt. Búcsúzáskor Tibor adott neki egy jó tanácsot: „Fordulj Ferencz Kárpáthoz a KFKI-ban, ha lézertükörre lesz szükséged!”.

Egyébként Feri nevével először 1986 tavaszán találkoztam Juhász Tibor révén, akinek speciális bevonatokkal (antirefle-

xiós rétegek és 1064 nm-re hangolt osztótükör) ellátott borkoronaüveg prizmákat készítettem egy nemkollinearis felharmonikuseltő eszközhöz – legalábbis a laborjegyzőkönyvemben ekkor lett először beírva Krausz Ferenc neve március 30-án. 1984 óta vezetem a laborjegyzőkönyveimet, amibe naplószerűen rögzíték minden egyes párologtatási ciklust: kiknek, milyen célból, milyen hordozókon történt, a hordozók előkészítési, tisztítási módját és az adott párologtatás megismétléséhez szükséges összes technológiai információt, továbbá az elkészített optikai elemek spektrális tulajdonságait. Ezek a naplók A4-es méretű füzetek, amikbe a lapok közé be vannak rakva esetlegesen további előzmények, a számítógépes tervezés eredményei és a mérési dokumentumok is. A sok betétlap miatt elég vaskosak, ezért óvatosan kell forgatni őket, nehogy kihulljanak a lapok. Az elmúlt 40 év alatt minimum 30 ezer párologtatási ciklust végeztem és dokumentáltam ilyen módon, a rögzített technológiák mind a saját termékeim.

Az 1. ábrán egy ilyen „előzménylap” látható, ami a ráírt dátum szerint 1987. július 8-án keletkezett a Krausz Ferivel történt első személyes találkozás során. Délelőtt felhívott telefonon, és a kapott tanács szerint Juhász Tiborra hivatkozva érdeklődött, hogy mikor kereshetne fel a tükrigényeivel kapcsolatban. Azt válaszoltam, hogy ha ráér, akkor akár most is, és elmagyaráztam neki, milyen módon tud a BME-ről BKV-val eljutni Csillebérc-re (vidéki gyerek). A nyár közepe miatt ráértem, a munkatársaim is szabadságon voltak, megfelelő volt az alkalom a beszélgetésre. Talán 11 óra lehetett, amikor egy alacsony, világosbarna hajjú, tiszta tekintetű fiatalember csengetett be a laboromba, és bemutatkozott. A beszélgetés délután 4 óráig tartott, és a K buszon együtt mentünk le a városba – egész úton tervezgetve.

Ez a firkapapír-dokumentum mindazt tartalmazza, amire Ferinek szüksége volt tőlem az OTKA-pályázat teljesítéséhez. A bal felső sarokban Feri „mórickarajza” van a lézerezonátorról; a szükséges tükrök specifikációit én írtam le. Az elképzelés szerint a festéket (emlékeim szerint rodamin 6g) argonionlézerral fogja pumpálni, ezért a pumpáló tükröknek 470 és 530 nm között kell nagy visszaverő-képességűeknek lenni. Az 1. pontnál látható, hogy az alábbi homorú tükrökre volt szüksége ( $ROC_1 = -196$  mm görbületű sugárral) merőleges beesés estére: 5 db olyanra, ami csak 470 és 530 nm között nagy reflexióképességű (620 nm-en mindegy), 5 db kombinált tükrökre, ami 470 és 530 nm között és 620 nm-en is nagy reflexióképességű, és a két multiréteg közül kívül a 620 nm-re hangolt bevonat van, továbbá 7 db olyanra, ami csak 620 nm-en nagy reflexióképességű, és a hasznos reflexióképesség 99,9%-nál nem kisebb. Szükség volt továbbá 19 db  $ROC_1 = -85$  mm görbületű sugarú, 620 nm-re hangolt nagy reflexióképességű tükrökre, ugyancsak merőleges beesésre. A 2. pont 10 db terelőtükröt ír le, amelyek p-polarizált reflexióképessége 620 nm-en nagy, ha a beesési szög  $45^\circ$ . A „mórickarajz” alatt írtam le a 3. pontban a nyitótükröket, amelyekből háromféle

nyitására (620 nm-en 2%, 3% és 4% áteresztőképességűekre) volt szüksége ugyancsak merőleges beesésre. Mindezeket a tükröket  $TiO_2-SiO_2$  anyagpárokból javasoltam elkészíteni.

Véletlenül nálam volt két milánói kutató e témához kapcsolódó cikkének különnyomata (Paolo Laporta, Vittorio Magni: Dispersive effects in the reflection of femtosecond optical pulses from broadband dielectric mirrors. *Applied Optics*, Vol. 24., (1985) 2014–2020.), amit együtt olvastunk el. A tervezett munka szempontjából nagyon lényeges dolgot állapítottak meg. Három különböző multiréteg-szerkezetben elemezték fs-os impulzusok diszperziós effektusait szélessávú nagy reflexiójú tükrökben. Minden esetben a nagy reflexiójú tartomány a centrális frekvencia körül szimmetrikusan elhelyezkedő két részre volt bontható: nagy diszperziójú és kis diszperziójú tartományokra. A visszavert impulzusok profiljának erős torzulását, frekvenciacsörpőt és 5,6-szeres kiszélesedést mutattak ki a nagy diszperziójú tartományban. Ezért az ilyen tükrök alkalmazását a kis diszperziójú tartományra kell korlátozni! Ennek az eredménynek a figyelembevételével terveztük meg a mi femtoszekundumos lézerezünk duplasávú tükröit. Továbbá a pumpáló tükrök tetejére kellett párologtatnom a festékben gerjesztett fényt visszaverő tükröt.

A megbeszélt tükröket a szükséges üveghordozók legyártása után ősszel készítettem el. A párologtatási napló szerint 12 db HR 620 nm/ $45^\circ$  terelőtükröt 870930/1 kóddal, 10 db  $-196$  mm görbületű HR 500 nm/ $0^\circ$  pumpáló tükröt 871001/1 kóddal, 871001/2 kóddal 12 db  $-196$  mm görbületű HR 620 nm/ $0^\circ$  tükröt, amiből 5 db előzetesen be lett már párologtatva pumpáló tükrövel, és 20 db  $-85$  mm görbületű. A háromféle 620 nm-es nyitótükör az alábbi kódokkal készült el 3 példányban minden típusból: a 2%-os 871002/1 kóddal, a 3%-os 871005/2 kóddal és a 4%-os 871005/1 kóddal. Csináltam neki még pluszban 10 db HR 620 nm/ $0^\circ$  sík-sík tükröt is 871006/1 kóddal. Ez a sok tükrő teljesen megtöltött két nagy Petri-csészét, és mivel a látható tartományban működtek, nagyon szép színesek voltak. Csomagolásra voltak előkészítve, amikor valamilyen megbeszéltnivaló okán Kroó Norbert igazgatónk betért a laborba. Nagyon elcsodálkozott, mert ennyi lézertükröt még nem látott egyszerre. Természetesen megkérdezte, hogy mi ez az egész. Fusi?!

Ő ekkor hallott először Krausz Ferencről, mert én őszintén megmondtam, hogy min dolgozunk Ferivel. Megértette és támogatta. Azért írtam le ezt ilyen részletesen, mert ez egy fordulópont volt mind a kettőnk életében Ferivel. Rájöttem, hogy Feri a fizikusi hozzáállás mellett mérnöki szemmel is nézi a dolgokat. Ez a későbbiekben nagyon hatékonyá tette a kutatómunkáját a bécsi évek alatt is: sok optikát több változatban (többféle görbületű sugárral vagy reflexióképességgel stb.) megcsináltatott, és kipróbálgatva azokat kereste meg az optimumot. Körülbelül tíz évvel később, a legrovidebb mérnöki úton előállított fényimpulzusokat (kb.

4 fs) kisugárzó Ti:zafir-lézer megvalósítása után szervezetem Feri bécsi laborjába egy brigádkirándulást azoknak, akiknek ebben valamilyen feladatuk volt. Miután megnéztük a lézert és az oszcilloszkóp képernyőjén a jelet, Feri kitarta két nagy, optikákkal telepakolt szekrény ajtaját és azt mondta: „Ezt mind ti csináltátok!”

A neki készített első tükörsorozattal sikeresen megépítette az első femtoszekundumos magyar lézert és ket-tőnk között elkezdődött egy 16 éves szoros tudományos együttműködés, ami bécsi működése végéig tartott és 2023-ban elvezetett a Nobel-díjhoz.

## Kellett egy jó optikus is

Feri Juhász Tibortól egy másik jó tanácsot is kapott: „A tükrökhöz szükséges üveghordozók elkészítéséhez fordulj Kovács Istvánhoz!” Kovács István (a továbbiakban Pista) középvezető volt technikus oklevéllel a MOM budapesti síkoptikai üzemében, és másodállásban a Kísérleti Fizika Tanszéken is dolgozott. Itt elsősorban a tanszéken növesztett különböző kristályok megmunkálása volt a feladata, de adott esetben a kísérletekhez szükséges lézertükrök üveghordozóinak előállítását is meg tudta oldani. Az 1. ábrán látható volt, hogy a magyar femtoszekundumos festéklézerhez többféle üveghordozó kellett, ezért Feri megismerkedett Pistával is, és hamar összebarátkoztak a korkülönbség ellenére (Pista ma 82 éves). Nemsokára Feri révén én is megismerkedtem Pistával, akivel a mai napig együtt dolgozom az Optilab Kft.-ben. Annak a sok optikának, amit a bécsi labor szekrényeiben láttunk, az üvegteszteit mind Pista készítette el – eleinte egyedül, később a csapatával.

Jelenleg öt munkatársunk munkáját irányítja az optikai műhelyünkben; nem technikus, hanem mérnöki szinten hasznosítva azt a sok tudást, amit sok évtized alatt a MOM-ban felhalmoztak. Kreativitása megmutatkozott, amikor igen vékony optikailag nemlineáris kristálylapkákat kellett BBO (béta-bárium-borát) anyagból készíteni az ultrarövid fényimpulzusok időbeli szélességének autokorrelációs méréséhez a kilencvenes évek közepén. Az autokorrelátor egy Michelson-interferométer, amiben az egyik kar hosszúsága egy piezoaktivátor segítségével nagy pontossággal változtatható. Az osztótükörrel kettéosztott lézerimpulzus két fele az ernyőn újra találkozik a mozgatott kar pillanatnyi helyzetétől függő módon. Az ernyő maga a megfelelő orientációval kivágott vékony BBO lapka, amiben a nemlinearitás miatt másodfelharmonikus fény keletkezik. Ennek a kékesibolya színű fénynek az intenzitása a mozgatott kar helyzetének függvénye, miközben a lézer eredeti hullámhosszát BG12 és BG23 üvegszűrőkkel kiszűrjük, és fotoelektron-sokszorozóval mérjük az autokorrelációs jelet, amiből az eredeti lézerimpulzus időbeli szélessége kiszámítható.

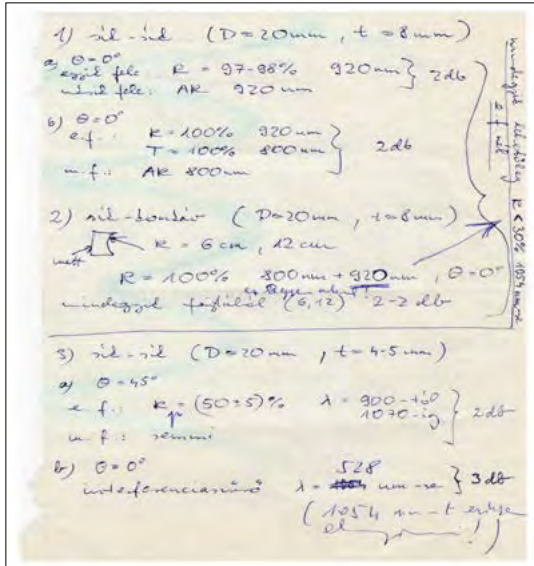
A néhány fs hosszú jelek 0,1 fs pontosságú méréséhez kb. 0,01 mm vastag, 5 × 5 mm méretű BBO lapkák kellek. A BBO puha, higroszkópos anyag, a levegőben befa-

kul és el is folyik. A 0,5 mm vastag, vágott, orientált BBO nyersanyagot az MTA Kristályfizikai Laboratóriumában dolgozó Péter Ágnestől kaptam. Az extrém vékony lapkákat Pista készítette el oly módon, hogy az első felület kipolírozása után kis viszkozitású, UV fényre keményedő ragasztóval felragasztotta egy 12,7 mm átmérőjű, 1 mm vastag, sík-sík kvarcüveg (Suprasil 1) hordozó közepére, aminek a vastagsága ezredmilliméter pontossággal volt beállítva. Négy így kialakított darabot felillesztett egy nagyon sík üvegtárcsára, csiszolással néhány mikrométerre megközelítette a célzott vastagságot, majd a végvastagságra polírozta a BBO-kat. Az aktuális vastagság mérésére 0,001 mm mérési pontosságú Mitutoyo mikrométert használt, és végül sikeresen állította elő a szükséges 12 mikrométer vastag BBO lapkákat. Ehhez arra volt szükség, hogy a ragasztóréteg vastagsága kb. 1 mikrométerre kinyomható legyen. Az illesztőtárcsáról leszedett és szilikagél mellett tárolt munkadarabokat 24 órán belül bevontam egy olyan kétréteges optikai bevonattal, aminek nulla a csoportképletelés-diszperziója, antireflexiós hatású és meggátolja a nedvesség okozta korróziót. Én készítettem el a Michelson-interferométer nulla diszperziójú osztótükrét is. Ezekből az eszközökből Krausz Feri meg tudta építeni a szükséges mérési pontosságú autokorrelátort, újabb lépést téve a siker és Nobel-díj irányába. Nem mellékes, hogy a későbbiekben az Optilab Kft. számos, a fenti technológiával kialakított, 12, 25, 50 és 100 mikrométer vastag BBO-t értékesített a nagyvilágban. Fontos tanulsága ennek a történetnek, hogy felkészült technikusok és laboránsok nélkül nincs kellően hatékony kísérleti tudományos kutatás. Ezen a területen a jövőben az elmúlt évtizedek sok lemaradását kellene bepótolni.

## Bécsi évek

1987 karácsonya előtt Feri újra meglátogatott a KFKI-ban: elbúcsúzni jött. Az új évtől Bécsben fog dolgozni a Műszaki Egyetemen (Technische Universität Wien, röviden TUW), ahol sikeresen pályázott meg egy állást az Elektronikai és Elektrotechnikai Intézetben. Feladata az oktatás mellett egy nem túl sikeres nemlineáris optikai lézert labor felvirágoztatása volt. Később néhai Gyulai Józseftől tudtam meg, hogy ezt a lehetőséget ő ajánlotta Ferinek – ismerve jó német nyelvtudását. Az eddigi femtoszekundumos lézerkutatást kívánta folytatni, végcélként olyan szilárdtestlézert készült megépíteni, amivel meg tudja majd dönteni az eddigi 6 fs-os világsúcsot, és ami készülékként is használható lesz. Előzetes tájékozódás alapján tudta, hogy a TUW környezetében nincs olyan optikai vékonyréteges csoport, mint az enyém volt, ezért megkérdezte, hogy a jövőben is számíthat-e rá. Természetesen igent mondtam.

Az első feladatokat nagyon hamar megkaptam: 1988. január 19-én 0,5°-os BK7 ékeket antireflexióztam 1055 nm hullámhosszra (880119/1). Két nap múlva 1055 nm-re készítettem 2,3% áteresztőképességű nyitótükrö-



2. ábra.

Feri először  $\text{Nd}^{3+}$  ionokkal adalékolt foszfátüvegek-ből akart femtoszekundumos lézert csinálni, ami lehetséges, de a világcsúcs nem dönthető meg vele. Ezt később Amerikában Juhász Tibor megcsinálta az én tükrimmel, ami 100 fs nagyságrendű impulzusokat szolgáltatott, és ezek kiválóan használhatók is voltak hőhatás nélküli sebészkedésre a szemben, de ez egy másik történet (IntraLase Corporation). Feri a brit postától neodímiummal adalékolt magú optikai szálakat is szerzett, amiket alkalmas befogó szerszámba téve a véglapokra mindenféle bevonatokat párologtattam. Ezekkel is próbálkozott. A neodímiumlézeres kísérleteit akkor fejezte be, amikor nemzetközileg beindultak a  $\text{Ti}^{3+}$ -zafir-lézeres kutatások, mert kereskedelmileg beszerezhetőek lettek megfelelő minőségű zafir-kristályok, és Skóciában, a Szent András Egyetemen Wilson Sibbett professzor és csapata publikált egy gyakorlatban használható eljárást a Kerr-lencsés módusszinkronizálást az ultrarövid impulzusú lézerműködés megvalósítására (addig ezek a lézerek inkább csak folytonosak voltak).

ket az előzőleg antireflexiózott ékekből (880122/1). És ez így folytatódott tovább napról-napra, hétről-hétre. Pista produkálta a hordozókat, én megcsináltam a tükröket, Feri péntek délután bejött a KFKI-ba, magával vitte az elkészült dolgokat, és megbeszéltük az újabb tennivalókat. Bécsben gyártotta a pályázatokat, és sorra nyerte a támogatásokat. Ausztriában az volt a rendszer, hogy a nyertes nevére nyitottak egy bankszámlát, ráutalták a pénzt, ő fizette a kutatáshoz szükséges költségeket, és a projekt végén el kellett számolni. Lopni, csalni csak egyszer lehetett! Azt hiszem, mi ebben is el vagyunk maradva.

A 2. ábra Feri saját kezűleg írt listája az 1988. év végéről azokról a lézertükrökről, amiket 1989 elejére kért elkészíteni (ez a papír is a párologtatási naplóban maradt meg). A hordozókat január közepén megkaptam, és január 26-ától február 3-áig Ferinek dolgoztam. Itt kiemelek egy 23 réteges HT 785 nm & HR 920 nm/ $0^\circ$  tükröt (a reflexió  $R < 1\%$  800 nm-en,  $R > 99,8\%$  920 nm-en), amit Szipőcs Robi tervezett az akkortájt megírt optimális programmal (a laborjegyzőkönyv szerint ez volt az első ilyen).

Az irodalmi adatokból Feri hamar kiszámolta, hogy ez a kristály elvileg alkalmas 4 fs hosszú és kb. 785 nm centrális hullámhosszú lézerpulzusok keltésére módusszinkronizált üzemben. Ezt a lézerműködésre alkalmas anyag spontán emissziós fluoreszcenciaspektrumának sávzélességéből lehetett kikövetkeztetni. Csak egy feladat maradt: megépíteni ezt a lézert! Ez Krausz Ferencnek több év kemény munkájával sikerült, és ezzel tette meg a legfontosabb lépést a Nobel-díj felé. Viszont ezen az úton le kellett győznie a diszperziók hétfejű sárkányát, akinek időnként egy levágott fej helyett magasabb rendben újabb fejei nőttek. Ez volt az a küzdelem, amiben Feri, Robi és Kárpát (a szerző) válllvetve együtt dolgoztunk. Ezért lettem Szipőcs Robival együtt név szerint említve Krausz Ferenc 2023. december 8-ai Nobel-előadásában. Nem mellékesen szert tettünk egy olyan lézerepítési know-how-ra, amit közösen 1995-től azonnal elkezdtünk gazdaságilag hasznosítani – erről egy következő fejezetben fogok írni.

Budapest, 2023. december 31.

## A FIZIKA TANÍTÁSA

# RELATIVISZTIKUSAN MOZGÓ ÁLLÓHULLÁM

Sükösd Csaba<sup>1</sup>, Bokor Nándor<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BME Nukleáris Technikai Intézet

<sup>2</sup>BME Fizikai Intézet

## Bevezető keretjáték

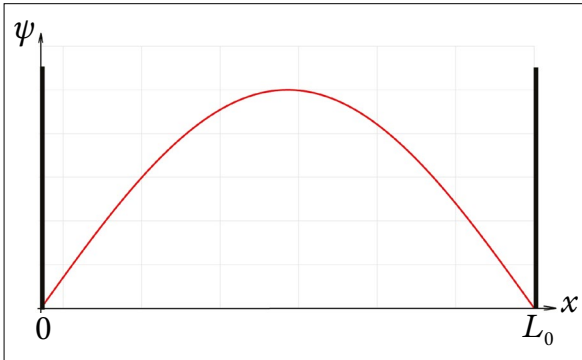
Miután Pistikéék az előző fizikaórán a relativitáselmélet néhány alapösszefüggéséről tanultak, Pistike jelentkezik, hogy ő végiggondolt egy egyszerű esetet, és levezette, hogy

milyen szépen minden összevág. A tanár úr engedélyével Pistike a következő egyszerű példát mutatja be:

Tekintsünk egy dobozba zárt részecskét! Ahogy tanultuk, a részecske hullámfüggvénye alapállapotban olyan, hogy a dobozba (minden irányban) egy fél hul-

lám fér csak be. Az egyszerűség kedvéért vizsgáljuk most csak az egydimenziós esetet (1. ábra). A részecske hullámhossza tehát:  $\lambda = 2L_0$ , ahol  $L_0$  az egydimenziós doboz mérete. A részecske lendületének abszolút értéke a de Broglie-összefüggés alapján pedig

$$p_0 = \frac{h}{\lambda_0} \left( = \frac{h}{2L_0} \right).$$



1. ábra.

Az egyszerűség kedvéért tegyük fel, hogy a részecske nyugalmi tömege nulla, azaz a részecske energiája

$$E_0 = h \cdot f_0 = p_0 \cdot c = \frac{h}{\lambda_0} c.$$

Vizsgáljuk ezt az egyszerű rendszert most egy olyan koordináta-rendszerből, amelyben a doboz  $v$  sebességgel mozog a doboz hossz tengelyével párhuzamosan. Számoljuk ki, hogy mekkora lesz ebben a rendszerben a dobozba zárt részecske energiája!

A múlt órán tanultak értelmében a mozgó rendszerből nézve a doboz Lorentz-kontrakciót szenved, ezért a hossza  $L' = L_0 \sqrt{1 - \beta^2}$  lesz (ahol  $\beta = v/c$ ). Emiatt az állóhullám hullámhossza is meg kell rövidüdjön, hiszen az állóhullámnak továbbra is csomópontjai kell legyenek a doboz oldalainál:  $\lambda' = 2L' = \lambda_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ .

Ebből következően ebből a rendszerből a megfigyelő úgy látja, hogy a részecske lendületének abszolút értéke:

$$p' = \frac{h}{\lambda'} = \frac{h}{\lambda_0 \sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{p_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

A részecske nyugalmi tömege invariáns, ezért az ebben a rendszerben is nulla, vagyis a részecske energiája:

$$E' = p' \cdot c = \frac{h}{\lambda_0} c \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = h \cdot f'.$$



Sükösd Csaba (1947) a BME címzetes egyetemi tanára, az ELFT elnökségi tagja. Kísérleti magfizikus, aki kísérleti munkáját nagyrészt külföldi kutatóintézetekben végezte. Kutatási területe a magreakciók, óriásrezonanciák és némely asztrofizikailag releváns magreakció vizsgálata radioaktív ionnyalábokkal. Marx György tanítványaként részt vett az MTA oktatási kísérletében a 70-es években. Azóta is szoros kapcsolata van a fizikatanárok közösségével, több tanár- és oktatással kapcsolatos program vezetője.

azaz  $E' = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ .

Vagyis, visszakaptuk az energia transzformációs képletét, amit ugyancsak a múlt órán tanultunk – mondja Pistike büszkén.

A tanár úr már éppen megdicsérné Pistikét, amikor az első padból Steinmann (lásd Karinthynál) jelentkezik. Hibás az érvelésed Pistike – mondja Steinmann. Az állóhullám egy oda- és egy visszafelé haladó hullám összege. Márpedig a mozgó koordináta-rendszerből nézve az egyik hullámmal szembe megyünk, a másikkal pedig egy irányba! Ezért az egyiket kékeltołodottnak, a másikat pedig vöröseltołodottnak kell látni (Doppler-hatás)! Emiatt a mozgó rendszerből nézve az állóhullámnak nem lehet egyetlen – megrövidült – hullámhossz, következésképpen egyetlen lendületet, sőt energiát sem tulajdonítani! A levezetésed hibás – még ha látszólag helyes eredmény jött is ki! Steinmann szövege után csend lett az osztályban, a tanulóok tanácstalanul néztek egymásra...

Nézzük meg kissé részletesebben, hogy is van ez! A vizsgálatot három lépésben tesszük meg:

- A nyugalmi koordináta-rendszerben vizsgáljuk az állóhullám függvényének alakját, és ezeket felbontjuk két haladó hullám összegére.
- Ezeket a komponenseket vetjük alá Lorentz-transzformációnak, majd összegezzük őket.
- Dobozba zárt részecske-állóhullám komponenseinek tér-idődiagramjait vizsgáljuk.

### a) Nyugalmi koordináta-rendszer, állóhullám függvényalakban

A doboz saját (nyugalmi) koordináta-rendszerében könnyen fel tudjuk írni az állóhullám kitérésének függvényét<sup>1</sup>:

$$\psi(x, t) = A \cdot \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cdot \exp(i\omega t).$$

Bevezetve a  $k = 2\pi/\lambda$  hullámszámot, kapjuk:

$$\psi(x, t) = A \cdot \sin(kx) \cdot \exp(i\omega t).$$

Tudva, hogy  $\sin \alpha = (e^{i\alpha} - e^{-i\alpha})/(2i)$ , a fenti állóhullám átírható:

<sup>1</sup> Itt most a kvantummechanikai komplex formalizmust használjuk, de a levezetéseket ugyanúgy meg lehet tenni akkor is, ha a középiskolában szokásos, komplex számokat „elkerülő”  $\psi(x, t) = A \cdot \sin(2\pi x/\lambda) \cdot \cos(\omega t)$  képletből indulunk ki.



Bokor Nándor egyetemi docens a BME-n szerzett villamosmérnök-diplomát 1993-ban, majd ugyanott fizikából PhD-fokozatot 1999-ben. Munkájában – az optika számos területén végzett kutatásai mellett – legszívesebben a fizika, azon belül kiemelten a relativitáselmélet oktatásának pedagógiai kérdéseivel foglalkozik. Ez utóbbi témában számos publikációja jelent meg a *Fizikai Szemlében*, valamint a *Physics Education* és a *European Journal of Physics* folyóiratokban.

$$\begin{aligned}\psi(x, t) &= A \frac{e^{ikx} - e^{-ikx}}{2i} \cdot e^{i\omega t} \\ &= \frac{A}{2i} \{ \exp[i(kx + \omega t)] - \exp[-i(kx - \omega t)] \}.\end{aligned}$$

Ez még persze egy végtelen kiterjedésű állóhullám; ahhoz hogy a feladatnak megfelelő legyen, ki kell kötnünk, hogy az állóhullám csak a doboz tartományán belül maradjon:  $0 \leq x \leq L_0$ . Ennek figyelembe vételével kell normálni az állapotfüggvényt, azaz meghatározni az  $A$  értékét úgy, hogy

$$\int_0^{L_0} |\psi(x, t)|^2 dx = 1$$

legyen.

Kihasználva azt, hogy a részecske teljesen relativisztikus, azaz

$$E = p \cdot c \Rightarrow \frac{h}{2\pi} \omega = \frac{h}{\lambda} \cdot c \Rightarrow \omega = k \cdot c,$$

és behelyettesítve a  $k = \omega/c$  összefüggést a fenti egyenletbe kapjuk

$$\begin{aligned}\psi(x, t) &= \frac{A}{2i} \{ \exp[i(\frac{\omega}{c}x + \omega t)] - \exp[-i(\frac{\omega}{c}x - \omega t)] \} \\ &= \frac{A}{2i} \{ \exp[i\omega(\frac{x}{c} + t)] - \exp[-i\omega(\frac{x}{c} - t)] \}.\end{aligned}$$

Ebből a felírásból azonnal látszik, hogy az állóhullám két, egymással szemben,  $c$  sebességgel haladó,  $\omega$  körfrekvenciájú hullámból tehető össze. Jelölje  $\bar{\psi}(x, t)$  a jobbra haladó (normált) hullámot,  $\bar{\psi}(x, t)$  pedig a balra haladót, ekkor az állóhullámot a következőképpen kapjuk:

$$\psi(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{\psi}(x, t) + \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{\psi}(x, t).$$

Az állóhullám „komponensei” mindkettő  $\omega$  frekvenciájúak, ezért az állóhullám energiája:

$$E = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 \cdot \bar{E} + \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 \cdot \bar{E} = \frac{1}{2} \hbar \omega + \frac{1}{2} \hbar \omega = \hbar \omega.$$

## b) Állóhullám Lorentz-transzformáltja, mozgó koordináta-rendszer

Ha áttérünk a mozgó koordináta-rendszerre, akkor az  $x$  térbeli és a  $t$  időbeli koordinátára is végre kell hajtani egy Lorentz-transzformációt! Kifejezve az eredeti  $x$ , illetve  $t$  koordinátát az új koordinátákkal kapjuk:

$$x = \frac{x' - \beta c \cdot t'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \text{illetve} \quad t = \frac{t' - \beta \cdot (x'/c)}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Először hajtsuk végre a legegyszerűbb összefüggésen a transzformációt, a doboz tartományán! Ez csak a helykoordinátától függ, így a  $0 \leq x \leq L_0$  összefüggésből kapjuk:

$$0 \leq \frac{x' - vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \leq L_0.$$

Az egyenlőtlenséget kicsit átrendezve adódik:

$$vt' \leq x' \leq vt' + L_0 \sqrt{1 - \beta^2}.$$

Ez nyilvánvalóan kifejezi, hogy az állóhullám térrésze Lorentz-kontrakciót ( $L' = L_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ ) szenved, valamint azt is, hogy az új koordináta-rendszerben ez a térrész  $v$  sebességgel halad. Ez teljesen megfelel a fizikai várakozásunknak.

Térjünk most át a hullámfüggvény Lorentz-transzformáltjára:

$$\begin{aligned}\psi(x', t') &= \frac{A'}{2i} \left\{ \exp \left[ i\omega \left( \frac{x'/c - \beta t'}{\sqrt{1 - \beta^2}} + \frac{t' - (\beta/c)x'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. - \exp \left[ -i\omega \left( \frac{x'/c - \beta t'}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \frac{t' - (\beta/c)x'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \right] \right\}.\end{aligned}$$

Mind a két exponenst rendezzük át úgy, hogy külön gyűjtsük az új koordinátákat tartalmazó tagokat:

$$\begin{aligned}\psi(x', t') &= \frac{A'}{2i} \left\{ \exp \left[ i\omega \left( \frac{x'}{c} \frac{1 - \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} + t' \frac{1 - \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. - \exp \left[ -i\omega \left( \frac{x'}{c} \frac{1 + \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} - t' \frac{1 + \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \right] \right\}.\end{aligned}$$

Ezt tovább lehet egy kicsit alakítani:

$$\begin{aligned}\psi(x', t') &= \frac{A'}{2i} \left\{ \exp \left[ i\omega \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} \left( \frac{x'}{c} + t' \right) \right] \right. \\ &\quad \left. - \exp \left[ -i\omega \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \left( \frac{x'}{c} - t' \right) \right] \right\} \\ &= \frac{A'}{2i} \left\{ \exp \left[ i\omega_1 \left( \frac{x'}{c} + t' \right) \right] - \exp \left[ -i\omega_2 \left( \frac{x'}{c} - t' \right) \right] \right\}.\end{aligned}$$

(Az  $A'$  amplitúdót most is a normálási feltételből kell meghatározni.)

Azt az érdekes eredményt kaptuk, hogy ez két, egymással szemben fénysebességgel haladó hullám a mozgó koordináta-rendszerben is, de az egyiknek a frekvenciája vörösen eltolódott, a másiké viszont kékeltolódást szenved:  $\omega_2 = \omega \sqrt{(1 + \beta)/(1 - \beta)}$ .

Nagy a kísértés arra, hogy az álló rendszerhez hasonlóan a mozgó rendszerből mért energiát a következővel azonosítsuk:

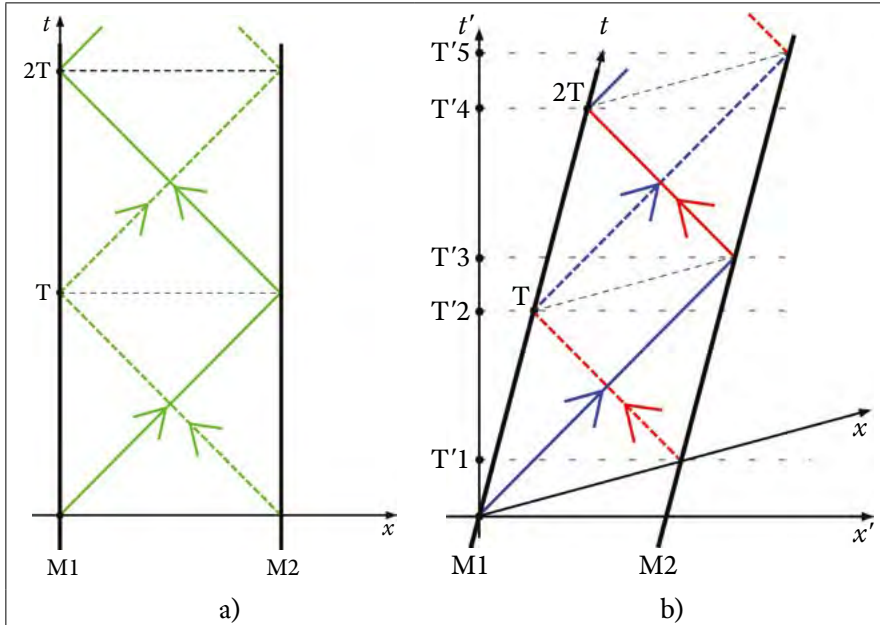
$$\begin{aligned}E' &= \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 \hbar \omega_1 + \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 \hbar \omega_2 \\ &= \frac{1}{2} \hbar \omega \left( \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} + \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \right).\end{aligned}$$

A zárójelben lévő kifejezést közös nevezőre hozva kapjuk:

$$\begin{aligned}E' &= \frac{1}{2} \hbar \omega \left( \frac{1 - \beta + 1 + \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \\ &= \hbar \omega \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},\end{aligned}$$

ahogy annak lennie is kell a speciális relativitáselmélet szerint.

Az ember azt gondolná, hogy hátradőlhet, hiszen minden milyen szépen „kijött”. Problémába ütközünk azonban, ha megpróbáljuk a részecskék világvonalát a téridősíkon ábrázolni.



2. ábra. a) Világvonalak és egyidejűségek a doboz saját koordináta-rendszerében (K rendszer). b) Világvonalak és egyidejűségek egy mozgó koordináta-rendszerből (K' rendszer)

### c) Vizsgáljuk a dobozba zárt állóhullám-komponensek tér-idődiagramjait

A tér-idődiagramok rajzolásához a kvantummechanikai részecskék részecskékéjét hívjuk segítségül. Ahogy eddig is tettük, az állóhullámot két, egymással szemben haladó, teljesen relativisztikus részecskekomponensből alkotottnak tekintjük, amelyek energiájára és lendületének abszolút értékére fennáll az  $E = p \cdot c$  összefüggés. Ám a két komponens lendületvektorának csak az abszolút értéke egyenlő, az irányuk éppen ellentétes:  $\mathbf{p}_2 = -\mathbf{p}_1$ . Legalábbis a doboz nyugvó koordináta-rendszerében.

Azaz az ide-oda pattogó részecské-komponensek világvonalait a nyugvó és a mozgó koordináta-rendszerben a következőképpen rajzolhatjuk fel (2. ábra). Mivel a részecskék mindig fénysebességgel mozognak, a világvonalak mindkét rendszerben 45 fokos egyenesek.

A 2a. ábrán (a K rendszerben, amelyben a doboz nyugszik) a két részecskét folytonos, illetve szaggatott vonalakkal különböztettük meg, a doboz falainak a világvonala a két függőleges vastag fekete vonal. Az egyidejűségi vonalak vízszintes szaggatott vonalak. A két részecskekomponens *egyidejűleg* indul el a doboz két falától, és egyidejűleg pattan vissza a másik oldalról. Így a merev doboznak átadott lendület (és energia) nulla. Azaz ebben a koordináta-rendszerben a megfigyelő bármely időpontban egy jobbra és egy balra haladó részecskekomponenst lát, és ezért a részecské-komponensekből alkotott rendszer energiáját a fentiek alapján mindig  $E_0 = \hbar\omega$ -nak méri.

Nézzük most ezt a folyamatot egy másik – az előzőhöz képest mozgó – inerciarendszerből (2b. ábra, K' rendszer)! Ebben a doboz falai jobbra mozognak (azaz maga a

koordináta-rendszer az előzőhöz képest balra). A korábbi K rendszer egyidejű pontjai a K rendszer  $x$  tengelyével párhuzamos ferde vonalak lesznek, azaz ezek szerint indulnak el egyidejűleg a részecskekomponensek. Az ábrán a vörösön, illetve kékén eltolódott komponenseket a megfelelő színekkel jelöltük. A K' rendszerben az egyidejű pontok az  $x'$  tengelyvel párhuzamos vonalak mentén helyezkednek el (ezáltal ezek lesznek vízszintesek). Az ábráról nyilvánvalóan látszik, hogy azok az események, amelyek a K rendszerben egyidejűek, nem lesznek egyidejű események a K' rendszerben!

Ebből következően, a K' rendszerből a megfigyelő nem mindig lát egy vörösön és egy kékén eltolódott komponenst. Például az ábrán lévő T'2 és T'3 idő-

pontok között két jobbra haladó, kékén eltolódott komponenst lát.<sup>2</sup> Ha a megfigyelő ekkor mérné meg az energiát,  $\hbar\omega_2$ -nek mérné, nem pedig  $(1/2)\hbar(\omega_1 + \omega_2)$ -nek! A részecskerendszer lendülete sem lenne nulla minden pillanatban (mint a K rendszerben), hanem „ingadozna”.

Hogyan lehet ezt fizikailag értelmezni?

A dobozban lévő állóhullám nem *zárt* rendszer, hiszen kölcsönhat a doboz falával. Az állóhullámot alkotó részecské-komponensek, amikor a doboz falának ütköznek, és a  $\mathbf{p}$  lendületből  $-\mathbf{p}$  lendületre váltanak,  $2\mathbf{p}$  lendületet átadnak a doboz falának (a K rendszerben). Ha a visszaverő falak nem alkotnának dobozt, hanem szabadon lebegnének, akkor az ütközések következtében a K rendszerben is elkezdenének távolodni egymástól; a kezdetben lokalizált állóhullám szétfolyna, és az állóhullám-komponensek frekvenciái egyre jobban a vörös felé tolnának el. Egy tökéletesen merev doboznál<sup>3</sup> azonban, ha a másik részecské-komponens a doboz

<sup>2</sup> Ez azt jelenti, hogy hibás az a feltételezés, miszerint a K' rendszerben az állapotfüggvény a következőképpen állítható elő:

$$\psi(x', t') = \frac{1}{\sqrt{2}} \psi^{\text{vörös}}(x', t') + \frac{1}{\sqrt{2}} \psi^{\text{kék}}(x', t') !$$

A helyes felírás a következő lenne:

$$\psi(x', t') = a^{\text{vörös}}(t') \cdot \psi^{\text{vörös}}(x', t') + a^{\text{kék}}(t') \psi^{\text{kék}}(x', t'),$$

ahol a normálás miatt természetesen  $|a^{\text{vörös}}(t')|^2 + |a^{\text{kék}}(t')|^2 = 1$  kell legyen, de a vörös és a kék komponensek aránya időfüggő.

<sup>3</sup> Szigorúan véve tökéletesen merev doboz nem létezik. Bármely valóságos dobozfal kicsit deformálódik, amikor egy részecské nekiütközik, és lendületet ad át. Ez a deformáció a fal anyaga által megszabott hangsebességgel tovaterjed, majd valamennyi idő múlva, valahol találkozik a doboz szemközti falából terjedő deformációval – amit az állóhullámot alkotó másik komponens ütközése hozott létre. Ezek a kis deformációs hullámok erősíthetik vagy kioltathatják egymást – az adott körülmények (geometria, hangsebesség, idő, hely stb.) függvényében.

szemközti falának  $-2p$  lendületet ad át *egyidejűleg*, akkor a doboz eredően 0 lendületet kap, így a K rendszerben a doboz nem vesz fel sem lendületet, sem mozgási energiát. Ezért – bár az állóhullám a K rendszerben sem alkot zárt rendszert –, a dobozzal való kölcsönhatás mégsem változtatja meg a rendszer eredő lendületét (amely nulla), és az energiát.

Más a helyzet a K' rendszerben: itt az *ütközések egyidejűsége megszűnik*, ezért a K' rendszerbeli megfigyelő úgy látja, hogy a részecske-komponensek hol jobbra, hol balra „lökődik” a dobozt (pl. a T'1 pontban jobbra, a T'2 pontban balra stb). Ezért a K' rendszerbeli megfigyelő szerint a doboznak nem állandó sem a lendülete, sem a mozgási energiája, hanem időről időre kap lendületet (és energiát) az „állóhullámtól” is. A doboz+állóhullám rendszer azonban már zárt rendszer lenne (hiszen semmi mással nem áll kölcsönhatásban), ezért az energiájára természetesen továbbra is érvényes kell legyen a speciális relativitáselmélet szerinti  $E' = E_0 [1 - \beta^2]^{-1/2}$  összefüggés.

Felvetődik a kérdés, hogy ha a doboznak ilyen fontos szerepe van a K' rendszerben, akkor vajon korábban miért jött ki a várt relativisztikus összefüggés az állóhullámra, azaz miért kaptuk azt, hogy

$$E' = \frac{1}{2} \hbar (\omega_1 + \omega_2) = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}?$$

A megoldás az, hogy az egyenlet két, egymással szemben haladó, *végtelen* hullámot ír le! (A dobozba szo-

rítottág csak az állapotfüggvény normálására – az A értékére – volt hatással). Az eredő is *végtelen* kiterjedésű állóhullám lesz, amelynek a K rendszerben csomópontjai vannak az  $x = \pm n \cdot L$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) helyeken. Ez a végtelen kiterjedésű állóhullám is *zárt* rendszer, hiszen nincsenek olyan események – mint például fallal történő kölcsönhatás – amelyek egyidejűsége fontos lenne, és amelyek változást idéznének elő a rendszer lendületében és energiájában. A világvonaluk két 45 fokos végtelen egyenes lenne. A K rendszerben mindkettőnek azonos a frekvenciája (és energiája), a K' rendszerben pedig az egyiké a vörös, a másiké a kék felé eltolódott a Doppler-jelenség miatt. Ezért ezek is egy zárt rendszert alkotnának (nem állnának kölcsönhatásban sem egymással sem semmi mással), és ezért a rendszer energiájának a speciális relativitáselmélet szerinti módon kell transzformálódnia. Ez így is van, ezt mutattuk meg fentebb.

A cikk arra próbált rávilágítani, hogy a relativitáselmélet még egy olyan egyszerű rendszer esetén is sok meglepetést tartogat, mint egy egydimenziós skaláris állóhullám (pl. egy relativisztikus részecske kvantummechanikai állapotfüggvénye).

Az érdeklődők a következő linken lévő szimuláción meg is nézhetik a „relativisztikus állóhullám” alakját, és kísérletezhetnek különböző sebességű koordináta-rendszerekkel: <https://sukjaro.hu/SCsaba/RelHullam/>

A szerzők köszönetet mondanak Hraskó Péternek a cikk eredeti verziójához tett értékes megjegyzéseiért.

## KÖNYVESPOLC

# AZ ÉLET TITKAI ÉS A KVANTUMMECHANIKA HOGYAN MŰKÖDIK A TUDOMÁNY?

Radnóti Katalin  
ELTE Fizikai Intézet, nyugdíjas,

Jelen írással szeretném a fizikát és a *komplex természettudományt tanító tanárok* figyelmébe ajánlani Jim Al-Khalili professzor úr biológus társszerzővel írt könyvét, melyben az ismeretterjesztő előadásaiiban is szereplő téma kiváló leírása olvasható [1]. Az érdekesítően leírt szakmai ismeretek mellett a könyv betekintést ad a *tudományos kutatás menetébe*, módszertanába, a tudomány működésébe. Miként bukkannak fel különböző feltevések és azok igazolásához, vagy éppen cáfolásához miként jut el a tudományos közösség? Ez fontos ismeret nemcsak a majdan szakirányban tanulók, hanem mindenki számára.

A könyv keretes szerkezetű, sőt, az egyes fejezetek is azok. Valamilyen érdekes történettel indítanak, aminek alapján felteszik azokat a kérdéseket, melyekre megpróbálnak válaszolni, és a végén visszatérnek a lehetséges válasszal, vagy azzal, hogy egyelőre még nem tudni a

választ, nem elég egyértelműek a bizonyítékok. Vagyis a szerzők bemutatják azt, hogy *a tudomány nem lezárt rendszer*. A vörösbegy vándorlása adja a könyv a kiinduló kérdését, majd ennek megválaszolása – legalábbis mai tudásunk szerint – zárja a könyvet.

A bevezetőben leírják, hogy többen azzal az ötlettel álltak elő a múlt század 70-es éveiben, hogy a vörösbegy rejtélyes iránytűje lehet, hogy a kvantum-összefonódás mechanizmusát használja. Továbbá napjainkban már létezik a tudományos közösségnek egy olyan csoportja, akik azt állítják, hogy a kvantummechanika fontos szerepet játszik az élet fenntartásában.

A második fejezetben többször hivatkoznak a szerzők a Schrödinger által 1944-ben írt hasonló című tanulmányra [2]. Élmény ezt az írást is elolvasni, hogy közel nyolcvan esztendővel ezelőtt a kvantummechanika atyja mennyire sok olyan dolgot világosan látott, melyek nap-

jainkban a biológia és a genetika alapjait jelentik. Kiindulásként leírják azt, hogy a klasszikus fizika és kémia törvényei ténylegesen csak nagyszámú részecske esetére igazak, valójában statisztikus törvények. Ezek alapján csak a nagyszámú részecske viselkedésének az átlaga határozható meg, de az egyedieké nem. Erre több szemléletes hasonlatot is leírnak. A klasszikus eszközök az élő anyag finoman szabályozott rendszerének leírására alkalmatlanok. Tehát minden bizonnyal a kvantummechanikához kell fordulni. Azonban több ellenvetés volt e gondolattal szemben, miszerint az élő szervezetek belsejében uralkodó *meleg, nedves és aktív* környezetet a kvantumállapotok nem élhetnék túl. A molekulamozgások megzavarják az ezek létrejöttéhez szükséges úgynevezett koherenciát, vagyis dekoherens a környezet.

Az első példaként az *enzimek* működését veszik célba a szerzők, és felteszik a kérdést: vajon az enzimek csupán biológiai katalizátorok lennének és ugyanazt a kémiát követik, mely például a kénsav előállításához szükséges? Majd rátérnek egy konkrét példára a fehérjékben az aminosavakat egymáshoz kapcsoló meglehetősen erős peptidkötés felbontásának mechanizmusára, bemutatják az átmeneti állapotot és a kollagenáz enzim szerepét. Majd felteszik a kérdést, hogy vajon az ehhez hasonló *szervezett mozgások* mögött a kvantummechanika rejtőzik-e. Ugyanis a folyamat *sokkal gyorsabban megy végbe* az élő szervezetben, mint ha csak egy egyszerű katalízisről lenne szó.

A második példa a *légzés* mechanizmusa. A szerzők leírják egy a kémiai reakciósebességek szokásos hőmérsékletfüggésétől (exponenciális) eltérő sebességfüggést, amely a várt rohamos csökkenés helyett állandó maradt. Majd bemutatják az alagúteffektust, kitérve arra, hogy minél nagyobb a részecske tömege, ennek annál kisebb ennek az esélye. És ez a tény nagyon jó *lehetőséget kínál egy empirikus vizsgálathoz*. Ugyanis, ha a kérdéses vegyületben a reakcióban részt vevő protont kicserélik a dupla akkora tömegű deutériumra, akkor az adott reakció sebessége a nagyobb tömegnek megfelelően kisebb lesz, mivel kisebb az alagutazás valószínűsége. És ez mérhető.

A következő példa a *fotoszintézis* vizsgálata, melynek alapja a klorofillmolekula aktív helyének fényelnyelése.

## MEGEMLÉKEZÉS

### MESTER ANDRÁS (1952–2023)

2023. november 26-án elhunyt Mester András, a Rátz Tanár Úr Életműdíjas mestertanár, a magyar fizikatanárok közösségének meghatározó alakja.

Mester András 1952-ben született Budapesten. Ibrányban érettségizett, és 1978-ban fejezte be tanulmányait a

Ebben az esetben az elnyelt energia útját követték nyomon, melyet először rendszertelen véletlen bolyongásként írtak le. Azonban úgy tűnik, hogy inkább a kvantum bolyongás írja le jobban a jelenséget.

A *szaglás* problémájának vizsgálata különösen érdekes. Ebben az esetben kétféle elmélet (kulcs-zár és a molekularezgés frekvenciája) versengésének lehet tanúja az olvasó. A tudományos kutatás módszereinek tanulmányozására kiválóan alkalmas ez a fejezet. Érdeemes odafigyelni arra, hogy miként merülnek fel újabb kérdések, hogyan gyűjtenek adatokat egy elképzelés alátámasztására, akár *régebbi kísérleti adatok újraértelmezésével*, vagy arra, amikor olyan adatra bukkannak, mely korábban elkerülte a figyelmet. Hogyan terveznek kísérletet? Ezekhez milyen jellegű tudásra van szükség? Ötletes az emberi szaglászerv helyett a muslicák felhasználása a deutériumos cserén átesett és az eredeti szagmolekulák által kiváltott hatás vizsgálatához is.

A hetedik fejezetben az *öröklődésért* felelős DNS-molekulát veszik célba a szerzők. Itt ismét Schrödinger írására utalnak, aki szerint ebben is szerepe lehet a kvantummechanikának. Az öröklődés hihetetlenül nagy pontossága nem magyarázható a klasszikus törvényekkel. Mindeddig azonban *nem sikerült* olyan folyamatot találni, melyet csak és kizárólag a kvantummechanikával lehet megmagyarázni.

A szerzők megpróbálkoznak még az *elme működésnek* magyarázatával is a kvantummechanika felhasználásával.

Az utolsó fejezetekben az élő anyag létrejöttének lehetőségeivel foglalkoznak a szerzők. Végül pedig olyan kísérleti elgondolásokról „fantáziálnak”, amelyek bizonyíthatják azt, hogy az *élő szervezetet alkotó alapvegyületek létrejöttében* is fontos szerepe lehetett a kvantummechanikának.

#### Irodalom

1. Jim Al-Khalili – Johnjow McFadden: *Az élet kódja*. Titokzatos kvantumok. Libri kiadás, 2016.
2. Erwin Schrödinger: *Mi az élet?* 1944. In.: *Válogatott tanulmányok*. Gondolat – Budapest, 1985.

debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem matematika-fizika szakán. Szakdolgozatát az MTA debreceni Atommagkutató Intézetében készítette.

Tanári attitűdjét saját szavaival jellemezhetjük: „Pályakezdő tanárként megfogadtam, hogy nem fogom a tan-

tárgyait a gyerekek megfélemlítésére használni. [...] Nekem nem volt problémám a gyerekekkel. Ha problémás a diák, akkor úgy próbálok hozzáállni, hogy felkeltsem az érdeklődését a természettudományok iránt. Szeretni kell a gyerekeket, ha pedagógusnak megy az ember. Nem is emlékszem arra, hogy bármelyik gyerek felbosszantott volna valamikor is. Mindig próbáltam türelmesen kezelni az adódó problémákat.”

Első munkahelye a miskolci Zrínyi Ilona Gimnázium volt, ahol fiatal tanárként komoly feladatot kapott, létrehozta az iskola zárt láncú televíziós rendszerét.

Munkáját a Bláthy Ottó Villamosipari Szakközépiskolában folytatta, ahol életre hívta a Bláthy Diákkört. Rövid tanügyiigazgatási kitérő után 1992-től a Diósgyőri Gimnázium következett, itt dolgozott 2015-ös nyugdíjba vonulásáig. 2000 és 2012 között szaktanácsadóként, tankönyvszerzőként, lektorként; 1995-től húsz éven át érettségi elnökként a tanári hivatás minden aspektusát megtapasztalhatta.

A munkát nyugdíjba vonulása után sem hagyta abba. Könyvet szerkesztett, honlapot vezetett, és természetesen az iskolában is számíthattak rá. Weboldalán rengeteg prezentáció segíti az érdeklődő diákokat, tanárkollégákat.

Egész pályafutása során nagyon komoly gondot fordított a tehetséggondozásra. Tagja volt az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny, a Borsod-Abaúj-Zemplén Megyei Szakközépiskolások Törő Gábor Fizikaversenye és a Borsod-Abaúj-Zemplén Megyei Gimnazisták Nagy László Fizikaversenye versenybizottságának. A Diósgyőri Gimnázium által 2002 óta gimnazistáknak rendezett fizikavetélkedő kezdeményezője és szervezője. 2007-ben kitalálta, majd tizenöt évig szervezte és vezette a Magyar Nukleáris Társaság atom- és magfizikával foglalkozó szaktáborát. (A középiskolások számára rendezett nukleáris fizikai verseny és tábor egyedi jelenség az egész világon.) A Fizikatanári Ankétek állandó résztvevője, esetenként előadója, illetve 2004 óta egyik fő szervezője.

Pályája során folyamatosan képezte magát, új dolgokat tanult és tanított. Harmadik tantárgyként technikatanári szakot végzett, nukleáris és részecskefizikai továbbképzéseken vett részt. A CERN által hirdetett HST (High School Teacher) programon az elsők között vett részt, és az ott tanult részecskefizikai ismereteit az itthoni tanárok és diákok között terjesztette tovább. Részecskefizika mindenkinek című CD-je féltett kincs a szertárakban. Rendszeresen publikált magyar és angol nyelven. Cikkei jelentek meg a *Fizikai Szemle*ben, a *Nukleonban*. Szerkesztette a Szilárd Leó Fizikaverseny

kiadványait, valamint az ELFT tanári szakcsoport honlapját.

A fizikatanári közösség életének meghatározó résztvevőjévé vált. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat (ELFT) Borsod-Abaúj-Zemplén megyei területi csoportjának titkára (1999–2004); az ELFT főtítkárhelyettese (2004–2008) és Középiskolai Oktatási Szakcsoportjának titkára (2004–2008 és 2011–2015); az ELFT alelnöke (2007–2011 és 2013–2015) volt. A Magyar Nukleáris Társaságban (MNT) elnökségi tag (2002 óta); az MNT Tanári Tagozatának pedig az elnöke (2007–2010) volt.

Andrással hosszú évtizedeken át dolgoztunk együtt. Vezetőként, elnökként meghatározta a tanári szakcsoport munkájának stílusát. Egy jó csapatot hozott létre maga körül. Nyugodt, a lényegre koncentráló szervezőmunka, a felmerült problémák hatékony megoldása jellemezte az elnökségét. Sokszor érkezett süteménnyel a megbeszélésekre, hogy vendégül lássa a vezetőség tagjait. Gyakran mondogatta, milyen szerencse, hogy veszekedés, konfrontáció nélkül tudunk együttműködni.

Ugyanezt az attitűdöt vitte a Nukleáris Társaság tanári szakcsoportjába is. Sok évig együtt vezettük a Nukleáris Szaktáborot, és jó volt nézni, milyen szeretettel kezelte a diákokat – ahogy mondta, a „a babákat”.

Nem az elismerésekért dolgozott, de azt a munkát, amit elvégzett, sok megérdemelt kitüntetés illette:

2003: Ericsson-díj a fizika népszerűsítéséért

2011: Marx György Vándorplakett

2013: A Magyar Nukleáris Társaság Szilárd Leó-díja

2014: Mesterpedagógusi minősítés

2015: Pedagógus Szolgálati Emlékérem

2017: Rátz Tanár Úr Életműdíj

2023: Miskolc Város Pedagógiai Díja

Utóda lehettem több funkciójában is, nagyon sokat tanulhattam tőle, és sokszor segített a nehezebb helyzetekben.

Nagyformátumú fizikatanár volt, nyomot hagyott a fizikatanári közösségen. Megtisztelő volt vele együtt dolgozni. Nagyon fog hiányozni a tapasztalata, a tudása és a segítőkészsége.

Ha valaki szeretne életéről, munkájáról, módszereiről többet megtudni, érdekes tananyagaiból tanulni, a [www.mesterandras.hu](http://www.mesterandras.hu) honlapon emlékezhetünk rá.

Zárásként egy, talán vigasztaló idézet a Rátz Tanár Úr Életműdíj után megjelent beszélgetésből: „A legfontosabb dolgokat sikerült megvalósítanom.”

*Ujvári Sándor*



**Mester András**  
(1952–2023)

A Magyarhoni Földtani Társulat évente meghirdeti az Év Ásványa versenyt. A nagyközönség szavazatai alapján 2024-ben a cirkon, a földpát és a korund közül a korund lett a győztes.

## Az Év Ásványa 2024-ben a korund



©Kupi László, F. Barlocher Collection

### Korund – $\text{Al}_2\text{O}_3$

A gyémánt után a legkeményebb ásvány. Bár a tiszta  $\text{Al}_2\text{O}_3$  színtelen, nyomelemek színezhetik (Cr – vörös, Fe, Ti – kék). Szintetikus korundból rubinlézerek, optikai eszközök készülnek.



©Kupi László, D. Lucas Collection

### Földpát – Na-K-Ca-aluminoszilikát

Térhálós szerkezetű szilikátásványok csoportja. A Föld kérgének leggyakoribb ásványai. A kőzetbolygók, a Hold alapvető alkotórészei tartoznak ezek közé (*jobbra*).



©Kupi László



©Kupi László

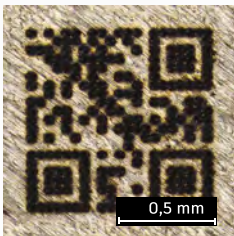
### Cirkon – $\text{ZrSiO}_4$

A cirkónium legfontosabb ásványa. Uránt és tóriumot is tartalmaz, ezért a geológiai korok radiometrikus kormeghatározására használják. A ma ismert legidősebb ásvány egy 4,4 milliárd éves cirkon (*balra*).

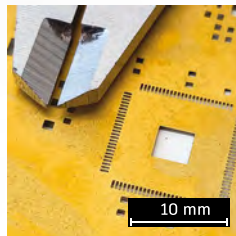
### FŐBB JELLEMZŐK

- Nagy teljesítmény (40-60W)
- 10  $\mu\text{m}$  lézer foltméret
- Ultra magas precizitású vágás és furat készítés
- A femtoszekundumos impulzusnak köszönhetően a lézervágás hideg
- Mikroalkatrészek gyártására
- Fém, üveg, kerámia, műanyag megmunkálása

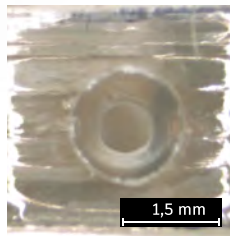
Hullámhossz:	1030 $\pm$ 5 nm
Teljesítmény:	40-60 W
Impulzus energia:	200 $\mu\text{J}$
Pulzus hossz:	400 fs
Sugár átmérő:	3 mm
Sugár divergencia:	1,0 mrad



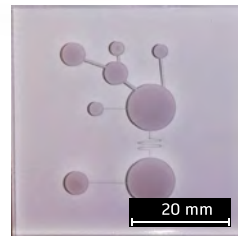
1 mm<sup>2</sup> QR-kód markírozás fémlemezre.



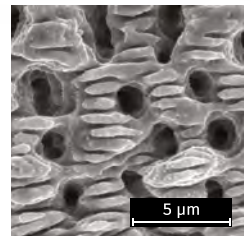
Mikro-lézervágás 0,2 mm vastag sárgaréz lemezben.



Precíziós lézer-fúrás üvegben: 1,5 mm átmérő.



PMMA műanyag precíziós megmunkálása.



Felületi struktúrák létrehozásával történő nedvesítés változtatása ausztenites acélokön.

## Ultra-High Precision Machining Station

Cégünk orvosi és ipari lézergépeket fejleszt és gyárt Magyarországon és Németországban. Termékeinket nemzetközi szabványoknak megfelelően fejlesztjük, teszteljük és gyártjuk. Vállalatunk EN ISO 9001:2015 és ISO 13485:2016 tanúsított, valamint EN ISO 14001:2015 környezetvédelmi tanúsítvánnyal rendelkezik.

H-1044 Budapest  
Ezred utca 2. B2/2  
Tel: +36 1 688 1910  
info@lasram.hu

H-2500 Esztergom  
Mátyás Király utca 44.  
Tel: +36 33 501 015

© 1991-2024 Minden jog fenntartva. Ez a marketing anyag védjegyeket tartalmaz. A Lasram és a Femtola márka és ezek logói a Lasram Engineering Kft. védjegyei. A termék paramétereinek változtatására a jogot fenntartjuk.

Az alkalmazások és a róluk készült fotók a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. által készültek.

[WWW.LASRAM.HU/IPARI-LEZEREK](http://WWW.LASRAM.HU/IPARI-LEZEREK)

