

fizikai szemle



2017/6

MARX GYÖRGY EMLÉKTÁBLÁJÁNAK AVATÁSA



Május 25-én, az Eötvös Társulat egykori elnöke születésének 90. évfordulóján közel fél órára leállt a forgalom a Lágymányosi utcában, Marx György egykori lakóháza előtt. Majd száz egykori kolléga, barát, családjának tagjai vett részt a Társulat kezdeményezésére, kizárólag magánszemélyek adományaiból született emléktábla avatásán. A résztvevők között, többek mellett, ott volt *Kunszt Zoltán*, a zürichi ETH emeritus professzora, *Pázsit Imre*, a lundi egyetem professzora, *Fái György*, az USA DOE vezető munkatársa, *Szalay Sándor*, a baltimore-i Johns Hopkins Egyetem professzora és *Trócsányi Zoltán*, a Debreceni Egyetem Fizikai Intézetének igazgató professzora. Megtisztelte ünnepségünket *Vékás Lajos*, az MTA alelnöke, *Simoné Sarkadi Livia*, a Magyar Kémikusok Egyesületének elnöke, *Magyar Balázs*, a Magyar Geofizikusok Egyesületének alelnöke és *Cserháti András*, a Magyar Nukleáris Társaság alelnöke is. A megjelentek között felfedeztük a Társulat egykori ügyvezető titkárát, *Láng Klárát*, *Holics László* tanár urat és *Bojár Gábort*, a Graphisoft és az Aquincum Institute of Technology alapítóját. A XI. kerületi (újbudai) Önkormányzatot a Kulturális és Köznevelési Bizottság elnöke, *Jankó István* és *Fülöp Krisztina* referens képviselték.

Marx Györgyre elsőként *Kroó Norbert* akadémikus, az MTA Fizikai Osztálya nevében emlékezett. Az ELTE nagyhatású fizikaprofesszorának személyét *Jánosi Imre* egyetemi tanár, az ELTE TTK dékánhelyettese idézte fel. Végül *Sükösd Csaba*, a Magyar Nukleáris Társaság alelnöke, a szakmai testvérszervezeteket is képviselve, emlékeztetett Marx Györgynek a fizika tudományán messze túlnyúló hatású munkásságára.

Patkós András, az ELFT leköszönt elnöke világította meg azt a három szempontot, amelyek az emléktábla szövegének megválasztását vezették. Először, Marx György, a természet egységes alaptörvényeinek feltárására „felesküdt” kutatóként a fermionszám megmaradásától az ötödik kölcsönhatási erő kereséséig számos kutatási irányzat elindításában vállalt szerepet. Ám a 21. század fizikája, csillagászata és várhatóan geofizikája szempontjából igazán hosszútávú jelentősége a neutrínók asztrofizikai és földszerkezeti szerepére rámutató tanulmányainak van. Másodszor, az élére állt annak a hazai és nemzetközi mozgalomnak, amely át kívánta itatni a 20. századi modern tudomány eredményeivel a felső- és középfokú oktatás teljes rendszerét. Tankönyvei a híres *Kvantummechanikától az Életrevaló atomokig* fiatal kutatói és tanári generációk sokaságát készítették fel a nemzetközi kutatás és az oktatási innováció élyonalához való csatlakozásra. Harmadszor, személyiségének varázsa legjobban tudományszerűsítő előadásaiiban mutatkozott meg, akár zsúfolt közönség előtti szabadegyetemi, akár százezreket lenyűgöző televíziós előadásaira gondolunk. Pályája elejétől írott tudományszerűsítő munkáinak csúcstát a „marslakókról” írott bestsellere jelentette, amellyel párhuzamosan emelte be *Szent-Györgyit*, *Wignert*, *Hevesyt*, *Harsányit*, *Szilárdot*, majd *Tellert* a magyar fiatalság nemzeti tudatába.

Az emléktáblát borító leplet az ELTE Atomfizikai Tanszékének Marx Györgyöt követő vezetői, *Vicsék Tamás*, *Kiss Ádám*, *Patkós András* és a jelenlegi tanszékvezető, *Frei Zsolt* vetették le. Ezzel egy kis hozzájárulást tettünk a 20. század második fele magyar tudománytörténetének megalkotásához, amelynek Marx György tevékenysége vitathatatlanul központi fontosságú témája lesz.

Az ünnepséget követően a Marx-család az ELTE TTK Kari Tanácstermébe invitálta a megjelenteket, majd *Szalay Sándor* tartotta meg *The New Astronomy – The Era of Surveys* címmel a 15. Marx György Emlékelőadást.

Patkós András



BEKÖSZÖNTŐ ÉS A 750. SZÁM

A *Fizikai Szemle* mindenre figyelő Olvasói bizonyára meglepődnek, hogy ezen az oldalon most nem a megszokott impresszumot és tartalomjegyzéket találják. Ennek indokait az alábbiakban szeretnénk megadni. Kezdjük száraz, hivatalos stílusban: 2017. május 13-án lezajlott az Eötvös Loránd Fizikai Társulat tisztújító küldöttközgyűlése, amelyről részletesen beszámolunk a *Hírek – Események* között. A közgyűlés – egyebek között – új elnökséget választott, valamint tudomásul vette *Szatmáry Zoltán* professzor lemondását a *Fizikai Szemle* főszerkesztői posztjáról. A közgyűlés, az elnökség javaslatát elfogadva, *Lendvai János* professzornak adta a főszerkesztői megbízást, aki 2016 januárja óta a szerkesztői feladatokat is ellátja. *Szatmáry Zoltán*nak, aki 2008 januárjától látta el a főszerkesztői teendőket, eredményes munkájának elismeréseként az elnökség Eötvös Plakettet adományozott.


Az új főszerkesztőnek természetes kötelessége megköszönni elődje munkáját, valamint a Társulat vezetésének és a küldöttközgyűlésnek a megtisztelő bizalmat. Szeretnénk megfelelni e bizalomnak, fenntartva a *Szemle* színvonalát, abban a meggyőződésben, hogy a fizikusok és fizikatanárok közösségének szüksége van erre a nagy múltú orgánusra, az egyetlen magyar nyelven megjelenő fizikai folyóíratra. Ehhez persze szükséges a közösség támogató érdeklődése: mint a szakmai folyóiratokat általában, a mi lapunkat is az olvasók írják. Így várjuk a *Szemle* szokásos stílusának, a színvonalas szakmai ismeretterjesztésnek megfelelő írásokat és természetesen örömmel veszünk mindenféle jobbító ötletet, javaslatot és bírálatot.

A lap történetében fontos változás indult meg ez év januárjától: a nyomtatott példány mellett megjelent az elektronikus, pdf-változat is, amelyben színes ábrák, beágyazott videók és animációk közzlése is lehetséges. Ebben jelentős érdemei vannak alkotó műszaki szerkesztőnknek, *Kármán Tamás*nak, aki ugyancsak a küldöttközgyűlésen vehette át az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Prométheusz-érmét negyedszázadnál hosszabb, egyenletesen magas színvonalú munkája elismeréseként.

Dolgozunk a *Fizikai Szemle* valamennyi korábbi számának digitalizálásán, és majdan a teljes anyag hozzáférhetővé tételén. Mindezekért köszönet illeti a társulat most leköszönt vezetését, de van még bőven javítani való a *Szemle* honlapján és archívumán. Ezzel kapcsolatban is szívesen veszünk javaslatokat, akár segítő együttműködést is.

A véletlen úgy hozta, hogy a *Fizikai Szemle* 2017/6-os, az új főszerkesztő által jegyzett első száma, egyben a lap fennállása óta megjelenő 750. szám. E jelentős jubileum tiszteletére címlapunkon *Stonawski Tamás* sokoldalú, festőművész fizikatanár-kollégánk (www.stonawski.freewb.hu) erre az alkalomra készített csendélete szerepel, amely csatlakozik *A Fizika Tanítása* rovatban megjelenő, kísérleti cikkeihez is.

A 750. számhoz a lap életének 67. évében érkeztünk el, és megindulunk az 1000-es jubileumhoz vezető, várhatóan 21 éves útra.


Lendvai János
főszerkesztő

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, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:
Lendvai János

Szerkesztőbizottság:
Bencze Gyula, Czitrovszky Aladár, Faigel Gyula, Füstöss László, Gyulai József, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Németh Judit, Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Szatmáry Zoltán, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:
szerkesztok@fizikaiszemle.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://www.fizikaiszemle.hu>



A borítón:
Stonawski Tamás festőművész fizikatanár-kollégánk Gyümlöcselemes csendélete, amelyet folyóiratunk 750. lapszámának alkotott.

TARTALOM

- Beköszöntő és a 750. szám (*Lendvai János* főszerkesztő) 181
- Dencs Zoltán*: Lakhatók-e a TRAPPIST-1 Föld-szerű bolygói? 183
A TRAPPIST-1 rendszerben három bolygó kering a csillag körüli lakható zónában, így ezeken a bolygókon elvben kialakulhattak az élet bizonyos formái
- Gyenis Balázs*: Ki magyarázta először az egyensúly felé törekvést? 190
Egy tudománytörténetileg fontos és a statisztikus fizika megértését támogató téma feldolgozása precíz és élvezetes stílusban

A FIZIKA TANÍTÁSA

- Stonawski Tamás, Gálik Tamás*: Hőmérsékletmérés termisztorral 193
– egyszerű digitális kísérletek a „semmiből”
A termisztoros hőmérsékletmérés elektrotechnikai ismertetése középiskolai oktatásra alkalmazhatóan
- Csernovszky Zoltán*: Az iránytű harmonikus rezgésétől 198
kaotikus mozgásáig
Az iránytű különböző mágneses terek alkalmazásakor megfigyelt viselkedésének elemzése

- Radnóti Katalin*: Milyen ma egy fizikaóra? 204
A fizika tanítása során megvalósítható képességfejlesztési lehetőségek, konkrét esettelírásokkal alátámasztva

HÍREK – ESEMÉNYEK

- Marx György emléktáblájának avatása (*Patkós András*) 181
- Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Tisztújító Küldöttközgyűlése 211
- Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2017. évi kitüntetései és tudományos díjai 215

J. Lendvai: Greetings of the new editor in chief and the 750th issue
Z. Dencs: Are the earth-like planets of TRAPPIST-1 habitable?
B. Gyenis: Who explained tendency towards equilibrium first?

TEACHING PHYSICS

T. Stonawski, T. Gálik: Temperature measurement with thermistors
– simple digital experiments
Z. Csernovszky: From harmonic oscillation to chaotic motion of the compass pointer
K. Radnóti: How is a physics lesson today?

EVENTS

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT
megjelenését támogatják:



LAKHATÓK-E A TRAPPIST-1 FÖLD-SZERŰ BOLYGÓI?

Dencs Zoltán

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont

Az amerikai Űrhajózási Hivatal bejelentése szerint hét Föld típusú bolygót találtak a TRAPPIST-1 rendszerben. A nagy jelentőségű felfedezés vezető kutatói február 22-én a NASA TV élő közvetítésében foglalták össze eredményeiket, másnap pedig a *Nature* folyóiratban jelent meg *Michaël Gillon* és munkatársainak publikációja a bolygók felfedezéséről. A TRAPPIST-1 rendszert már az a tény is különlegessé teszi, hogy hét bolygó kering a központi csillag körül. A felfedezés valódi jelentőségét azonban az adja, hogy a rendszer bolygóinak mérete és tömege egytől-egyig a Földéhez hasonló.

A bolygórendszerek kialakulásának vizsgálatában, illetve a Földön kívüli élet kutatásában jelentős szerepet játszanak a Föld-szerű bolygók. A TRAPPIST-1 rendszerben három bolygó kering a csillag körüli lakható zónában, így ezeken kialakulhattak az élet bizonyos formái. Jelen cikkben a felfedezett bolygórendszer tulajdonságait mutatom be, majd ezek alapján megvizsgáljuk, milyen körülmények szükségesek az exobolygókon az élet megjelenéséhez, fennmaradásához és fejlődéséhez.

A TRAPPIST-1 bolygórendszer felfedezése

A bolygórendszer központjában található TRAPPIST-1, egy 2000-ben felfedezett M8 színképosztályú, hideg törpecsillag, amely a Naprendszerőtől 39 fényév távolságra található a Vízöntő csillagkép irányában. A 19 magnitúdós csillag 150 milliószor halványabb, mint az éjszakai égbolt legfényesebb csillaga, a Sirius, ezért szabad szemmel nem látható. Fotometriai és spektroszkópiai mérések alapján ismert a csillag tömege (0,08 naptömeg), sugara (0,117 napsugár) és a fotoszféra effektív hőmérséklete ($T = 2555$ K). A csillagot 2008-ban kezdték vizsgálni az Université de Liège kutatói a TRAnsiting Planets and Planetesimals Small Telescope (TRAPPIST) program keretében, amelynek

A szerző köszönetet mond *Regály Zsolt*nak a gondolatok megformálásában nyújtott segítségével, *Szabados László*nak a szöveg gondozásáért és *Maglóczy Zsófi*ának a biológiai részekkel kapcsolatos hasznos tanácsaiért.



Dencs Zoltán földtudományi kutatóként végzett 2014-ben az ELTE TTK-n, majd 2016-ban csillagász oklevelet szerzett szintén a TTK-n. Jelenleg az MTA CSFK Csillagászati Intézeténél dolgozik fiatal kutatóként, emellett az ELTE Fizika Doktori Iskola hallgatója. Fő kutatási területe a csillagkörüli törmeléköröngök modellezése. Érdeklődési körébe tartozik még a bolygókeletkezés és a lakhatóság vizsgálata. Továbbá 3D képkalkotási technikákkal is foglalkozik.

során fotometriai módszerekkel kutattak törpecsillagok körül keringő exobolygók után. A TRAPPIST-1 fényességében periodikus csökkenést mutattak ki. A fényességváltozást a csillag korongja előtt a látóirányra merőlegesen áthaladó bolygók okozzák, ezt az észlelt fénygörbe jellegzetes alakja is alátámasztotta. Gillon és munkatársai három bolygót detektáltak ezzel a módszerrel, és felfedezésüket 2016-ban publikálták a *Nature* folyóiratban. A felfedezett bolygók az exobolygók nevezéktana alapján a TRAPPIST-1*b*, *c*, valamint *d* nevet kapták.

A tranzitmódszer egyik előnye, hogy nincs szükség hatalmas távcsövekre, csupán hosszú expozíciós időre és hatékony fénygyűjtő képességre ahhoz, hogy detektálni tudják a csillag fényességváltozásait. Így lehetséges, hogy a csupán 60 cm-es főtükörátmérőjű TRAPPIST műszerekkel sikerült exobolygókat detektálni. A belga Université de Liège-ben található a két Ritchey–Chrétien-típusú teleszkópból álló rendszer vezérlőközpontja, a déli távcsövet Chilében, míg az északit Marokkóban szerelték fel. A tranzitmódszernek azonban van egy hátránya, a kiválasztási effektus, amely miatt a régebb óta zajló kutatások főleg a Jupiterhez hasonló méretű, de a csillagukhoz nagyon közel (néhány napos periódussal) keringő bolygókat (úgynevezett forró jupitereket) fedeztek fel. A kiválasztási effektust az okozza, hogy annál nagyobb valószínűséggel lehet detektálni egy bolygót, minél nagyobb az átmérője és minél közelebb kering csillagához.

Fotometriai méréseket nemcsak látható, hanem infravörös-tartományban is végeztek. A TRAPPIST-1 energiakisugárzási maximuma infravörös-tartományba esik, ugyanis a fotoszférája alacsonyabb hőmérsékletű, mint a Napé. Az infravörös tartományú méréseket a Spitzer-űrtávcsővel, valamint a United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT) és a Very Large Telescope (VLT) földfelszíni távcsövekkel végezték el. A mérések alapján vált világossá, hogy a rendszer legkülső tagjának vélt, *d* jelű bolygón túl további bolygók keringhetnek a csillag körül. A fénygörbék alapos analízise során később még négy bolygót azonosítottak Gillon és munkatársai: a TRAPPIST-1*e*, *f*, *g* és *h* jelű kísérőket.

A bolygók tulajdonságai

A fénygörbék elemzésével az exobolygók és keringési pályáik számos tulajdonsága meghatározható: a bolygópálya fél nagytengelye, excentricitása, a bolygó keringési periódusa, átmérője, valamint – bizonyos esetekben – tömege is. A csillag körüli keringés periódusa a bolygóátvonulások közt eltelt idő alapján számítható. A periódus ismeretében, Kepler III. törvényét

1. táblázat

A TRAPPIST-1 hét bolygójának fontosabb tulajdonságai

bolygó	N_{tr}	P (nap)	a_{pl} (CSE)	R_{pl} (R_{\oplus})	M_{pl} (M_{\oplus})	ρ_{pl} (ρ_{\oplus})
<i>b</i>	37	1,51	0,0111	1,086	0,85	0,66
<i>c</i>	29	2,42	0,0152	1,056	1,38	1,17
<i>d</i>	9	4,05	0,0214	0,772	0,41	0,89
<i>e</i>	7	6,1	0,028	0,9188	0,62	0,8
<i>f</i>	4	9,21	0,037	1,045	0,68	0,6
<i>g</i>	5	12,35	0,045	1,127	1,34	0,94
<i>b</i>	1	~20	0,063	0,755	–	–

Jelmagyarázat: N_{tr} az észlelt tranzitok száma, P a periódusidő, a_{pl} a bolygópálya fél nagytengelye csillagászati egységben, R_{pl} a bolygó sugara földszugáregységekben, M_{pl} a bolygótömeg földtömegben kifejezve, valamint az utóbbi két paraméter alapján számított ρ_{pl} átlagos sűrűség a Föld sűrűségének hányadában [1].

felhasználva megadható a bolygópálya fél nagytengelye. A csillag korongja előtt átvonuló bolygó sugara a fedés időtartamából és a fényességcsökkenés mértékéből becsülhető. Általános esetben a kísérők tömege a csillag látóirány menti (radiális) sebességváltozásának mértéke alapján határozható meg, de ez spektroszkópiai vizsgálatokat igényel. A TRAPPIST-1 esetén azonban nem álltak rendelkezésre csillagspektrumok, így a tömegeket a fénygörbék alapos analizisével a Transit Time Variations (TTV) nevű jelenség vizsgálatával határozták meg.

Azon bolygók, amelyek magányosan keringenek egy csillag körül, periódusideje változatlan. Ezzel szemben azon rendszerekben, amelyekben több bolygó található, a keringési periódusok hossza változó, a bolygók ugyanis perturbálják egymás mozgását. Az egymással gravitációs kölcsönhatásban lévő bolygók között folyamatos impulzusmomentum-átadás zajlik, míg a rendszer teljes impulzusmomentuma állandó. Ez a bolygók mozgásának gyorsulását vagy lassulását okozza, így a fedések – a közepes keringési periódushoz képest – néha korábban, máskor később következnek be. Az egymással rezonanciában keringő bolygópárok (keringési periódusuk aránya egész szám) szignifikáns TTV-jeleket keltenek. A TTV-módszer további előnye, hogy vele a bolygópálya excentricitása is meghatározható.

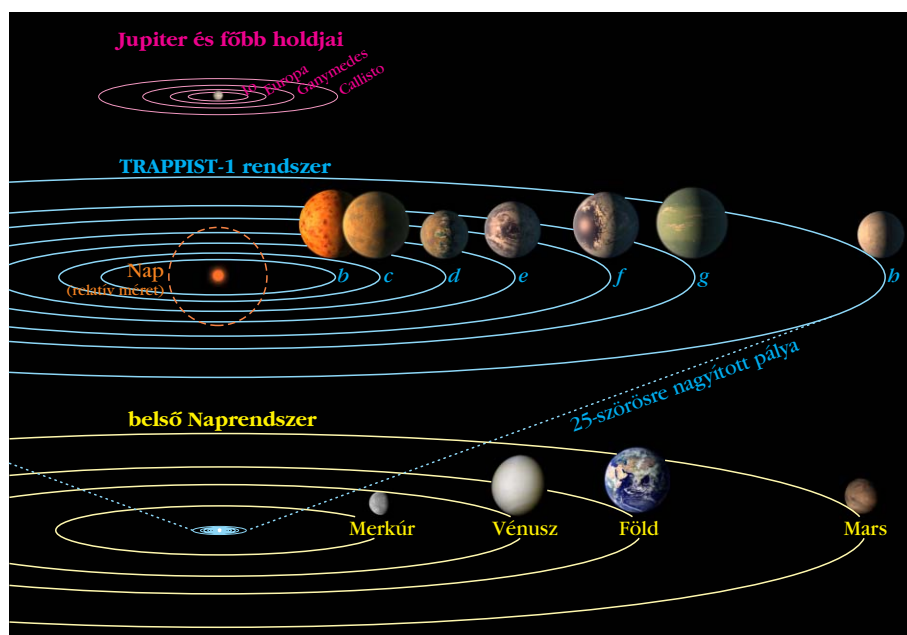
A hat belső bolygó átvonulását a központi csillag előtt többször is detektálták. Ezzel szemben a rendszer legkülső bolygója, a TRAPPIST-1*b* ese-

tén eddig csupán egy tranzitot sikerült megfigyelni. Így a *b* bolygó tömegét – periódusváltozás hiányában – nem lehetett meghatározni.

Gillon és munkatársai által a TRAPPIST-1 bolygónak a fentiek alapján kapott jellemzőit az 1. táblázatban mutatjuk be. Az adatokból jól látszik, hogy a TRAPPIST-1 bolygói méretük, tömegük és sűrűségük tekintetében a Földhöz hasonlítanak. Ebből arra következtethetünk, hogy a felfedezett égitestek lényegében vasból és szilikátokból felépülő kőzetbolygók, akár csak a Föld. Különlegesnek számít a Földnél is nagyobb sűrűségű TRAPPIST-1*c*, amelynek anomális sűrűsége azzal magyarázható, hogy a vasmagja nagyobb, mint a Földé. Az átlagos kőzetbolygók vasmagjának kialakulásához az olvadt bolygóbelső sűrűség szerinti kémiai osztályozódása vezet. *Nuth* elmélete szerint az anomálishan nagy vasmagú égitestek kialakulásakor az úgynevezett mágneses erózió jelensége megnöveli a vasmag méretét [2]. A protoplanetáris korongban (bolygókeletkezés helye) a gázfázisból kiváló vas és szilikát porszemcsék ütközése során mágneses kölcsönhatás lép fel a protocsillag mágneses tere és a ferromágneses vas között. Ez annyira megnöveli az ütközési sebességet, hogy a szilikátos részek leszakadnak a szemcsékről, és vasból álló tömbök jönnek létre. Ennek következtében a még nem differenciálódott kőzetbolygó az átlagosnál magasabb vastartalmú. *Hubbard* az anomálishan nagy vasmagú Merkúr keletkezését is ezzel az elmélettel próbálta magyarázni [3].

A TRAPPIST-1 rendszerben nem találtak óriásbolygót, mivel ki sem alakulhattak, ugyanis hideg törpecsillagok körül legfeljebb a Földéhez hasonló méretű és tömegű bolygók keletkezhetnek (1. ábra). Ennek több oka is van: 1) kis tömegű csillagok körül kis tömegű protoplanetáris korong alakul ki, amelyben nincs elég anyag az óriásbolygók létrejöttéhez; 2) ilyen csillagok körül egy

1. ábra. A TRAPPIST-1 rendszer bolygópályaméretei összehasonlítva Jupiter-holdak pályáival és a belső Naprendszerben található bolygópályákkal, valamint a bolygók méretarányos illusztrációja.



Föld tömegű bolygó gravitációs hatása is elegendő a bolygók építőköveinek (kis méretű planetezimálok) protoplanetáris korongból történő kiszórásához [4].

A galaxisunkban található csillagok nagy része legfeljebb negyed akkora tömegű, mint a Nap. Ez azt jelenti, hogy a törpecsillagok képviselik a legáltalánosabb csillagtípust. Mivel a törpecsillagok körül nagy valószínűséggel Föld tömegű bolygók keletkeznek, a Tejútrendszer leggyakoribb bolygótípusa a Földhöz hasonló. A Naphoz hasonló színképtípusú és tömegű csillagok körül azonban leginkább a Neptunuszéhoz hasonló tömegű óriások fordulnak elő. Tehát a Földhöz hasonló bolygók felfedezéséhez hideg törpecsillagokat érdemes vizsgálni.

Az élet kialakulásának feltételei

A Földön kívüli élet utáni kutatás számára kiváló lehetőséget nyújt a TRAPPIST-1 rendszer, amely nincs messze a Naprendszertől, így jól tanulmányozható. Ma azt gondoljuk, hogy leginkább a Földhöz hasonló bolygók kedveznek az élet kialakulásának. A Földön kívüli élet nyomainak detektálásához tisztában kell lennünk azzal, hogy a távoli bolygókon pontosan milyen jeleket keresünk, illetve mit tekintünk egyáltalán életformának.

Az „élet” meghatározása

Az élőlények élettelen környezettől való elkülönítésének egyik legáltalánosabb definícióját, a chemotonelméletet *Gánti Tibor* fogalmazta meg 1971-ben [5]. Gánti modellje szerint az élet egy különleges szerveződésű kémiai rendszer, amelynek alapegysége a chemoton. A modell földi környezetben, más bolygókon, de akár aszteroidákon is kielégítően definiálja az életet.

Az élet meghatározásához kiindulásként vizsgáljuk meg a földi élő rendszereket. Az élő rendszerekben az életfolyamatok többnyire oldatokban végbemenő kémiai reakciók. Ezen életfolyamatok olyan rendszerekben zajlanak, amelyekre teljesülnek az élet két fő csoportba sorolható kritériumai: I) az abszolút életkritériumok, amelyek szükségesek az egyedek életben maradásához, ezért minden élőlényben jelen vannak; II) a potenciális életkritériumok, amelyek nem az egyes egyedek, hanem az élővilág fenntartásáért felelősek. Az abszolút életkritériumok a következők:

1) Egy élő rendszernek egységesnek kell lennie, ha megbontanánk a rendszert, a részek alapján nem kapnánk képet az egész rendszerről.

2) Az élő rendszer a külvilágból anyagot és energiát vesz fel, ezeket a saját céljaira hasznosítja, a feleslegessé vált anyagoktól megszabadul (metabolizmus).

3) Az élő rendszer úgy szabályozza belső folyamatait, hogy belső állapota a külvilág változásainak ellenére is állandó maradjon.

4) Léteznek olyan alrendszerek, amelyek információval bírnak a teljes rendszerről, és ezt az információt más rendszerek képesek leolvasni, hasznosítani vagy lemásolni (RNS, DNS).

5) Az élő rendszerben végbemenő folyamatok szabályozottak.

A potenciális életkritériumok közé soroljuk 1) a növekedést, 2) a szaporodást, 3) az evolúció képességét, valamint 4) a halandóságot, amely lehetővé teszi a szerves anyag körforgását. Amikor csak az abszolút életkritériumok teljesülnek egy biológiai rendszerben, azt látens életnek nevezzük (például hibernáció alacsony hőmérsékleten). Az egyik leg egyszerűbb biológiai rendszer a sejt, amelyben kémiai úton mennek végbe a fenti folyamatok, ezáltal az biológiai aktivitást mutat. Ezt a rendszert nevezzük chemotonnak, amely egy anyagcsere-, egy határoló és egy vezérlő alrendszerből áll.

Csillag körüli lakható környezetek

Az élő rendszerek kialakulásához számos környezeti feltételnek kell teljesülnie. Vizsgáljuk meg, hogy melyek ezek a feltételek, és közülük melyek adóttak a TRAPPIST-1 rendszerben.

Az élő szervezetek számára nélkülözhetetlen a cseppfolyós H_2O , azaz a víz. Egy kőzetbolygó felszínén víz akkor lehet jelen, ha a bolygó felszíni hőmérséklete ezt lehetővé teszi. A felszín hőmérsékletét elsősorban a központi csillagból származó energia befolyásolja. A csillag által időegység alatt kibocsátott összes energiát luminozitásnak nevezzük, amely mennyiség a csillagok egyik állapothatározója. A luminozitás ismeretében – a csillagtól adott távolságra – megadhatjuk egy bolygó felszíni hőmérsékletét. Ebből kiindulva kijelölhető egy csillag körüli, gyűrű alakú tartomány, amelynek határai között keringő bolygó felszínén cseppfolyós halmazállapotú lehet a víz, ha a bolygón egyáltalán van H_2O . A fenti meghatározás írja le a besugárzási, vagyis irradiációs lakható zónát (Irradiational Habitable Zone, IHZ), amelyet a hagyományos értelemben vett lakható zónának tekintünk. Az IHZ belső határánál közelebb a csillaghoz a bolygófelszín hőmérséklete olyan magas, hogy a H_2O gáz halmazállapotú, míg a külső határon túl nem elég magas a hőmérséklet a vízjég megolvastásához. Az IHZ méretének meghatározásához a Naprendszert szokás referenciaként használni (2. *ábra*). Az *ábra* függőleges tengelyén a csillagok M tömege szerepel az L luminozitás helyett, ugyanis ezen két mennyiség között – fősorozati törpe- és szubtörpecsillagok esetén – felírható az $L \propto M^{3.5}$ arányosság.

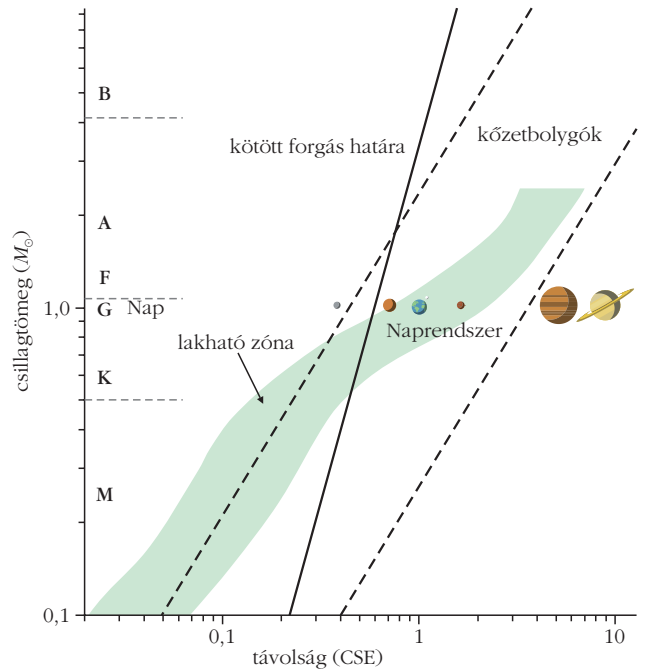
A TRAPPIST-1 luminozitása $5,24 \cdot 10^{-4} L_{\odot}$ (napluminozitás-egység), ez alapján meghatározható, hogy egy 0,024 CSE sugarú kör alkotja az IHZ belső és egy 0,049 CSE sugarú a külső határát. A rendszer három bolygójának keringési távolsága az IHZ határai közé esik. Azonban a bolygópályák excentricitását is figyelembe kell venni, ugyanis elegendően ellapult pálya esetén a pálya egyes szakaszai túlnyúlhatnak a zóna peremén. Ez esetben időszakosan megszűnhetnek a folyékony víz számára kedvező feltételek. Mivel a TTV-elemzés alapján a TRAPPIST-1 bolygóinak pályaeccentricitása nem haladja meg a 0,085 értéket, a há-

rom bolygó pályája teljes egészében az IZH-gyűrűben helyezkedik el. Tehát a TRAPPIST-1e, f és g bolygók potenciálisan lakhatók. Az IZH belső határán belül keringő b, c és d bolygók felszíne azonban olyan forró lehet, hogy valószínűsíthető légkörükben a H_2O csak gáz halmazállapotú lehet. A b bolygó pályája a külső határon kívül található, ahol a felszínen a H_2O csak jég formájában fordulhat elő.

Egy bolygó felszínén található H_2O halmazállapota adott hőmérsékleten nem csupán a hőmérséklet, hanem a bolygó légköri nyomásának függvénye is. Optimális nyomás esetén széles hőmérséklet-tartományban lehet cseppfolyós halmazállapotú a víz. A Földön a tengerszinten uralkodó légnyomás akkora, hogy $100\text{ }^\circ\text{C}$ -ot átfogó tartományon lesz jelen folyékony víz. Ezzel szemben alacsonyabb légköri nyomás mellett (például az Andok csúcsain) a víz már $\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ -on felforr, így a cseppfolyós halmazállapot lehetősége hozzávetőlegesen $80\text{ }^\circ\text{C}$ hőmérséklet-tartományra terjed ki.

Az élő rendszerek számára kedvező környezetekben a folyékony víz széles hőmérsékleti skálán kell, hogy jelen legyen. Magas nyomású légkör, kémiai összetételtől függően, megszabadó üvegházhatáshoz vezethet, aminek következtében a bolygó teljes vízkészlete elpárologhat. Annak ellenére, hogy a Vénusz a Naprendszer IZH-jának belső peremén kering, a felszínén nincs folyékony víz. Ennek oka az, hogy bár a légköri nyomás 60-szorosa a földinek, a bolygó légkörét 96%-ban CO_2 alkotja, amely felelős a felszín magas ($\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$) hőmérsékletéért. A Naprendszer lakható zónájának külső pereme közelében keringő Mars esetén a légköri nyomás 170-ed része a földinek, ezért folyékony víz csak $0\text{ }^\circ\text{C}$ és $\sim 2\text{ }^\circ\text{C}$ közötti hőmérsékleten fordulhat elő. A Mars felszínén ma is látszanak vízmosságokra, folyóvölgyekre emlékeztető nyomok és üledékes kőzetek, amelyek kialakulásához folyékony vízre van szükség. Tehát a Marson egykor jelentős vízkészlet lehetett, azonban később – valószínűleg az erős mágneses védőpajzs hiányában – a légkör elvékonyodott, így a víz nagy része elpárologott. A kezdeti vízmennyiség töredéke jég formájában ma is megtalálható a poláris sapkákban, illetve a felszín borító porréteg alatt.

A Földön a H_2O háromféle halmazállapotban is előfordul, mivel a felszíni nyomás- és hőmérséklet-viszonyok a víz hármaspontja közelében találhatók. Az átlagos hőmérséklet pedig $15\text{ }^\circ\text{C}$ -kal magasabb a vízjég olvadáspontjánál. A Föld három fő víztározója (óceán, légkör, jégsapkák) között állandó a körforgás. A sarki jégsapkák folyamatosan szublimálódnak, és az óceánok is állandóan párolognak, így biztosítva a légkör vízgőztartalmát, amely telítődés esetén visszahull a felszínre. A Szaturnusz egyik holdján, a Titanon a légköri nyomás a földi másfélszerese. Azonban a Titan, amelynek légkörét túlnyomórészt szintén nitrogén alkotja, a Földnél tízszer távolabb van a Naptól, emiatt a hőmérséklete sokkal alacsonyabb ($\sim -180\text{ }^\circ\text{C}$), épp a metán olvadáspontja közelében található. A Titanon a metán háromféle hal-



2. ábra. A lakható zóna (HZ) elhelyezkedését a különböző tömegű csillagok körül sáv jelöli. Folytonos vonallal van feltüntetve, hogy adott csillagtömeg mellett milyen távolságon belül válik kötötté egy kísérő keringése (a vonaltól balra lévők kötöttek). A szaggatott vonalak a kőzetbolygók keletkezésének tartományát fogják közre. Az ábrán a Naprendszer bolygóinak helyzete is fel van tüntetve [6].

mazállapotban fordul elő. A vízjég alkotta felszínt szilárd metánjégtömbök borítják, a lehetséges felszín alatti folyékony víz olyan, mint a földkéreg alatti magma. A Huygens leszálló szonda mérései alapján a mélyedésekben metántavak verik vissza a polarizált fényt. A légkör 1,5%-át pedig metángáz alkotja. Elméletben elképzelhetők olyan biológiai rendszerek, amelyek kémiai reakciói vizes oldatok helyett metánoldatokban mennek végbe, csak hogy ilyen életformákra jelenleg nem ismerünk példát.

A víz eredete és az élet keletkezése

Annak dacára, hogy a bolygófelszíni körülmények kedveznek a víz cseppfolyós halmazállapotú megjelenésének, még nem biztos, hogy a bolygón van vízkészlet. Honnan származhat a kőzetbolygók felszíni vízkészlete?

A bolygókeletkezés kezdeti szakaszában a gázfázisban lévő elemek és vegyületek olvadáspontjuk hőmérsékletének függvényében a központi csillagtól egyre távolabb alkotnak szilárd fázist. A csillaghoz legközelebb kondenzálódnak a vas- és szilikátszemcsék, amelyek a kőzetbolygók alkotói, míg az illóanyagok – mint a víz – a hóhatáron túl alkotnak szilárd fázist. Ennek megfelelően a Föld száraz bolygóként jött létre. A Föld legősibb ásványai közé tartozik a cirkon, amelyből az eddig talált legkorábbi példány 4,375 milliárd éves. Mivel a cirkon kristályosodásához folyékony vizes környezetre van szükség, a Földön léteznie kellett egy elsődleges vízkészletnek, amelynek mennyisége és eredete ismeretlen.

3,8 milliárd évvel ezelőtt a naprendszerbeli óriásbolygók migrációjának hatására a messze keringő üstökösök és kisbolygók egy része beszóródott a belső Naprendszerbe (Late Heavy Bombardment, LHB). Az LHB-esemény során a magas vízjégtartalmú égitestek nagy számban hullottak a Föld felszínére, hozzájárulva a mai óceánok létrejöttéhez. Azonban a Tempel 1 és a Churyumov–Gerasimenko üstökösök elemzéséből kiderült, hogy azok jegének deutérium/hidrogén (D/H) aránya hozzávetőlegesen négyszerese a földi óceánokban mérhető D/H arálynak. Viszont léteznek olyan kis égitestek, például a Jupiter-család kisbolygói és üstökösei, amelyeken a D/H arány megegyezik a földi értékkel, és ezek szintén szállíthattak vizet a belső Naprendszer bolygóira.

A bolygók atmoszférája fontos szerepet játszik a felszíni élet védelmében a központi csillagtól vagy kozmikus forrásokból származó nagy energiájú sugárzásokkal szemben. Az UV-, röntgen- és gamma-sugárzás károsítja az élő szervezetekben található fehérjék molekulaszervezetét, ezenkívül megbontja az örökítőanyag szekvenciáját.

A TRAPPIST-1 bolygóinak légköréről jelenleg nagyon keveset tudunk, de hamarosan spektroszkópiai módszerek segítségével megvizsgálják atmoszféráik összetételét. A méréseket bolygóátvonuláskor végzik el, ekkor ugyanis a csillag fénye a bolygókorong pereme mentén a bolygólégkörön át érkezik hozzánk. E fény spektroszkópiai elemzéséből képet kaphatunk a légkört alkotó gázok összetételéről.

Mindazok ellenére, hogy egy bolygó a lakható zónában kering és folyékony víz van rajta, még nem biztos, hogy van rajta élet. Az élet kialakulásához az eddig felsorolt feltételeken kívül elengedhetetlenek a biogén elemek, az élet „építőkövei” is. Az elsődleges biogén elemek – a szén, a hidrogén, az oxigén és a nitrogén – minden földi élő szervezetben megtalálható. Ezek az elemek jelen vannak a Naprendszer kőzetbolygóinak szilikátos felszínén vagy vízóceánjaiban. A biogén elemekből felépülő egyszerűbb molekulákból komplex szerves vegyületek, a sejtek alkotóelemei jöhetnek létre, ha a fenti lehetőségek egyszerre adottak egy bolygón. A folyamat első lépcsőfokát a Miller–Urey-kísérlettel sikerült reprodukálni. A TRAPPIST-1 három, IZH-ben keringő bolygóján szintén adottak lehetnek a körülmények az egyszerű vegyületekből építkező élet kialakulásához. Ugyanis ezek Földhöz hasonló sűrűsége arra enged következtetni, hogy összetételük is hasonló.

Az is elképzelhető azonban, hogy a legegyszerűbb életformák eredetileg nem azon a bolygón keletkeztek, ahol fejlődésnek indultak. A litospermia-elmélet szerint az élő szervezetek meteoritok, aszteroidák felszínén utazhatnak a világtűrben, miközben csak az abszolút életkritériumok teljesülnek rájuk. Az életformák keletkezési helyén egy becsapódás a felszíni kőzetekkel együtt kirepítheti az élőlényeket a világtűrbe, majd később egy másik bolygó felszínére érkezve elterjedhetnek az új környezetben is. Ehhez arra van szükség, hogy az új környezetben is kedvező létfelté-

telek legyenek, és a kezdetleges létformák túléljék a becsapódási eseményeket, valamint a világtűrbeli utazást. Hasonló esemény történhetett az 1984-ben az Antarktiszon talált ALH84001 marsi eredetű meteorittal. A meteorit felületén baktériumokra emlékeztető szálas szerkezetű alakzatokat találtak, de nehéz bizonyítani, hogy ezek élő szervezetek nyomai lennének. Ha egy bolygórendszerben litospermia révén a bolygók „megfertőzhetik” egymást étellel, akkor annak lakható bolygóit közös bioszférába tartozó élőhelyeknek tekinthetjük.

Az IZH külső határán kívül is találhatunk az élet számára kedvező környezeteket, például a Jupiter Europa nevű holdján, ahol vízóceán lehet a több 10 km vastag jégkéreg alatt. Pályája alapján a TRAPPIST-1*b* is ilyen jeges felszínű bolygó lehet. Ha az Európán feltételezett folyékony vízréteghez hasonló felszín alatti óceán feneké közvetlenül érintkezik egy belső szilikátburokkal, az élet kialakulásához nélkülözhetetlen biogén elemek és az élőlények fejlődéséhez szükséges ásványi anyagok – hidrotermális nyílásokon, úgynevezett fekete füstölőkön (black smoker) keresztül – az óceánba kerülhetnek. A fekete füstölők működéséhez szükséges hő a központi csillag vagy a többi bolygó közelsége miatt fellépő árapályfűtés biztosíthatja. Egy ilyen bolygó esetén, légkör hiányában, a felszíni vastag jégburok biztosíthatja az élő rendszerek védelmét a roncsoló sugárzásokkal szemben. A felszín alatti óceánok meleg vizes kürtői környékén megjelenhetnek termofil életformák, amelyek metabolizmusuk során a kürtőkből kiáramló vegyületeket hasznosítják. Ilyenek a kemoszintetizáló baktériumok, amelyekről azt feltételezzük, hogy a földi élet legősibb formái. Amennyiben a TRAPPIST-1*b* bolygón ilyen környezetet találnánk, ott csupán egyszerű, fejletlen organizmusok jelenlétére számíthatunk.

Bolygópályák elhelyezkedésének szerepe

Tegyük fel, hogy olyan bolygót fedezünk fel, amelyen sikerül detektálni az általunk ismert élet számára fontos összes környezeti feltételt: a bolygón van megfelelő vízkészlet, ideálisak a hőmérséklet- és nyomásviszonyok a folyékony víz jelenlétéhez, a sűrű légkör, ami megakadályozza a nagy energiájú sugárzás eljutását a felszínre, valamint az élő szervezetekbe beépíthető biogén elemek és ásványi anyagok megtalálhatóak az óceánokban és a szárazföldeken. Ha képesek vagyunk mindezeket kimutatni, akkor sem biztos, hogy életet találhatunk a vizsgált exobolygón, ugyanis a fenti környezeti feltételek csak a megfigyelés pillanatában érvényesek. Az élet kialakulása és fejlődése több milliárd évet is igénybe vehet, mialatt a környezeti körülmények csak szűk határok között változhatnak. Ezért arra vonatkozó becslést is kell végezni, hogy az élet számára kedvező környezeti állapot mióta áll fenn, és meddig maradhat meg változatlanul.

A központi csillag által biztosított luminositásnak évmilliárdokig közel állandónak kell lennie ahhoz, hogy az IZH határai ne módosuljanak. A nagy tömegű

O, B, A színek típusú fősorozati csillagok néhány millió év alatt elhasználják hidrogénkészletüket, ezt követően energiatermelésük csökken. Az IZH ezalatt egyre közelebb kerül a csillaghoz. A kisebb tömegű fősorozati F, G, K színek típusú csillagok (amelyek közé a Nap is tartozik) azonban energiatermelésük kezdetén aktívabbak, nagyobb a luminozitásuk, és nagy mennyiségű UV-, illetve röntgenfotonnal bombázzák környezetüket. Néhány százmillió év alatt ez az aktivitás lecsökken, majd egy ~10 milliárd éves állandó luminozitású periódus következik, amelynek során az IZH kiterjedése lényegesen nem változik. A legkisebb tömegű csillagok, az M színek típusú törpék sugárzási környezete még ennél is hosszabb ideig marad állandó. Emiatt is érdemes a TRAPPIST-1-hez hasonló törpecsillagok körül keresni lakható exobolygókat.

A TRAPPIST-1 kora becslések szerint 0,5–1 milliárd év. Még kedvező körülmények esetén is nehéz megmondani, hogy mennyi idő telik el egy bolygó keletkezése és az élet meglepedése között. A Földön a legősibb biomarker (*Pilbara kraton*, Ausztrália, 2013) korát 3,475 milliárd évesre becsülik. Mivel a Föld kora körülbelül 4,5 milliárd év, így ebben az esetben az élet megjelenéséig csaknem egymilliárd év telt el. Az egyszerűbb kékbaktériumokból a sejtmaggal bíró eukarióták kialakulásához hozzávetőlegesen további másfél milliárd évnek kellett eltelnie. A szárazföldi élet első nyomai ~530 millió évesek, míg az első gerincesek csupán ~340 millió éve tették lábukat a szárazföldre. Ebből kiindulva a TRAPPIST-1 rendszerben még nem alakulhattak ki élő szervezetek, ha mégis, akkor azok nagyon fiatalok és kezdetlegesek. Azonban a földtörténet korai szakaszából származó ismereteink igen hiányosak. Az elmúlt évtizedek új felfedezései alapján egyre korábbi időpontokra datálták az élet megjelenését. A legfrissebb kutatások szerint egy Kanadában talált fosszília (hidrotermális kürtök közelében élt termofil) akár 3,77 milliárd éves is lehet [7], emiatt újra kell gondolnunk az élet keletkezésének számos aspektusát.

A csillag állandó sugárzásán kívül a bolygópálya stabilitása is fontos az élet szempontjából. Az élet egy kedvező időszakban megjelenhet, de ahhoz, hogy fenn is maradjon és továbbfejlődjön, a bolygópálynak évmilliárdokig az IZH-ben kell tartózkodnia. A pályastabilitást elsősorban a bolygók egymásra gyakorolt gravitációs hatása veszélyezteti. Impulzusmomentum-átadás révén megváltozik a bolygópályák fél nagytengelye, a szekuláris perturbáció miatt a pályasík és a pályaeállítás körbeforoghat, ezenkívül a bolygók forgástengelyének dőlésszöge is megváltozhat. Egy nagyobb tömegű bolygó pedig a kisebb tömegű bolygó pályájának excentricitását és inklinációját is megnövelheti. Ezek mind jelentősen befolyásolhatják egy bolygó éghajlatát. A stabil éghajlati viszonyok különösen a fejlett, esetleg intelligens életformák számára fontosak. A földkéreg mélyebb rétegeiben felfedezett primitív vasevő, illetve kénoxidáló baktériumok túlélése, fejlődése nem igényel oxigént és folyékony vizet.

A TRAPPIST-1 esetén a bolygópályák egymáshoz nagyon közel találhatók, így a bolygók erősen perturbálhatják egymás mozgását. Ennek ellenére egyetlen bolygó sem hagyja el a rendszert, és excentricitásuk sem növekszik. Ennek az a magyarázata, hogy a bolygók keringési periódusai kis egész számok hányadosával leírhatók, vagyis középmozgás-rezonanciában vannak egymással, ami stabilizálja keringésüket.

Az élet szempontjából további korlátozó tényező lehet a csillag által kifejtett árapályerő. Egy alacsony luminozitású, azaz kis tömegű csillag esetén a lakható zóna olyan közel lehet a csillaghoz, hogy az IZH a csillag úgynevezett Roche-sugarán belülré kerülhet. Viszont a Roche-határt átlépő bolygót az árapályerők szétszakíthatják, így ebben az esetben az IZH-ben nem keringhet más, csupán törmelék. A TRAPPIST-1 lakható zónája és a bolygópályák is a Roche-határon túl helyezkednek el, így azokat nem fenyegeti a szét hullás veszélye.

A TRAPPIST-1 bolygói nem csupán a csillagukhoz, de egymáshoz is közel keringenek, ezért az egymásra gyakorolt árapályhatásuk is jelentős lehet. Ez azonban nem elég erős ahhoz, hogy a kőzetfelszín szerkezeti integritását veszélyeztesse, de az árapálysúrlódás révén a bolygók belsejének felfűtéséhez elegendő lehet. Az árapályfűtésből származó hőtöbblet hatására pedig az IZH külső határára túl is lehetnének lakható bolygók. Ezért, bár a TRAPPIST-1b az IZH-n kívül kering, a feltételek talán mégis kedvezőek az élet számára.

Az árapályerők nem csupán a kőzetrétegekre vannak hatással: jelentős felszíni vízkészlettel bíró bolygón dagályhullámokat keltenek az óceánokban. A bolygók konfigurációjától függően változó amplitúdójú hullámok szaladhatnak körbe egy adott bolygón. A szárazföldi, illetve a sekélytengeri élet kialakulását lehetetlenné tehetik az óriási szökőárhullámok (lásd: az *Interstellar* című tudományos-fantasztikus filmet, amelyben egy közeli fekete lyuk keltett gigantikus szökőárakat egy lakhatónak titulált, de halott bolygó óceánjában).

A központi csillag árapályereje által kifejtett forgatónyomaték lelassítja a bolygó forgását, amíg annak forgási és keringési periódusa meg fog egyezni (lásd a 2. ábrán a kötött keringés csillagtól mért távolságát a csillagtömeg függvényében). A lakható bolygó kötött keringése erősen korlátozza a komplex életformák kialakulását. Ebben az esetben ugyanis a bolygónak mindig ugyanaz a féltekéje fordul a csillag felé, amit állandóan ér a csillag sugárzása, míg az éjszakai félgömbön állandó sötétség van. A két félteke felszíni hőmérséklete jelentősen eltérhet (a Merkúron akár 320 °C is lehet a hőmérséklet-különbség a két félteke között). A nappali hemiszférán az intenzív párolgás miatt, az éjszakai a fagyás miatt nem találunk folyékony vizet. Csupán a két félteke közötti terminátor mentén, egy keskeny gyűrűben lehet cseppfolyós halmazállapotú a H₂O. Így a kötött keringésű bolygón csak egy vékony sávban valószínűsíthető az élet kezdetleges formáinak megjelenése. Bár egy kellően

vastag légkör segíthet a hőmérséklet kiegyenlítésében, viszont ez könnyen okozhat megszabadó üveg-házhatást is, mint például a Vénusz esetén. A $0,08 M_{\odot}$ tömegű TRAPPIST-1 csillagtól hozzávetőleg $0,2$ CSE távolságon belül válik kötötté a keringés. Mivel a csillag mind a hét bolygója e tartományon belül található, ezért az összes kötött keringésű. Emiatt, ha az élet meg is vetette lábát a TRAPPIST-1 valamely lakható bolygóján, az legfeljebb csak egyszerűbb, extrémofil élőlények formájában mutatkozik meg.

Van-e élet a rendszerben?

Azonos csillag körül keringő hét Föld típusú bolygó felfedezése szenzációs tudományos eredmény. Az elmúlt napokban Gillon csapata további két, Földhöz hasonló bolygót detektált a tőlünk mindössze $6,5$ parsekre található HD 219134 jelű törpecsillag körül. Minek köszönhetőek ezek a felfedezések, és miért érdemes a továbbiakban is a TRAPPIST-1-hez hasonló csillagok körül exobolygók után kutatni?

1) A kis luminozitású csillagok körül könnyebb kis méretű bolygókat találni, mint nagy luminozitású társaiknál, ugyanis egy Föld méretű bolygó átvonulása egy M törpecsillag előtt nagyobb fényességváltozást okoz, mint egy F, G vagy K csillag esetében.

2) A hideg M törpecsillagok a legáltalánosabb, legnagyobb számban előforduló csillagok galaxisunkban.

3) Egy M törpecsillag korongja előtti bolygóátvonulási esemény során egy kőzetbolygó légköre könnyebben megfigyelhető, mint nagyobb tömegű főszorozati csillagoknál. Az IHZ-ben keringő bolygók esetén a lehetséges biomarkerek detektálása egyszerűbb.

4) A kis luminozitású M törpékhez közel található az IHZ, így egy ebben keringő bolygó periódusideje olyan rövid lesz, hogy akár hetente figyelhetünk meg bolygóátvonulást.

Miután összegeztük az M színeképtípusú hideg törpecsillagok bolygó kutatás szempontjából előnyös tulajdonságait, most foglaljuk össze, hogy melyek a kedvező, illetve a kedvezőtlen körülmények az élet szempontjából. Elsőként tegyük fel, hogy a TRAPPIST-1e, f és g kőzetbolygókon megfelelő vízkészlet és légkör van. Ebben az esetben az élet kialakulása mellett szülő érvek a következők:

1) Lehet folyékony víz a bolygók felszínén.

2) Rendelkezésre állnak biogén elemek és ásványi anyagok az élet kialakulásához.

3) A csillag lassú fejlődése miatt a sugárzási környezet hosszú időn keresztül változatlan.

4) Stabil bolygópályák az erős középmozgás-rezonanciák miatt.

Ezzel szembeállíthatók az élet szempontjából kedvezőtlen körülmények:

1) A központi csillag és így a bolygórendszer túl fiatal.

2) Erős szökőárhullámok söpörhetnek végig a bolygók felszínén.



3. ábra. A James Webb űrtávcső szerelése a Johnson űrközpontban, 2017. május (NASA/Desiree Stover).

3) A bolygók keringési és forgási periódusa megegyezik.

Ezek alapján nem zárható ki, hogy élet keletkezhetett és fennmaradhatott a TRAPPIST-1 rendszerben, azonban a korlátozó tényezőket sem szabad figyelmen kívül hagyni. Ahhoz, hogy megbizonyosodjunk róla, van-e bármilyen életforma a rendszerben, újabb vizsgálatokra van szükség. Az M törpecsillagok fénygörbéinek méréséhez – Gillon vezetése alatt – már elkezdték építeni a négy teleszkópból álló Search for habitable Planets Eclipsing Ultra-cool Stars (SPECULOOS) nevű műszert. A tervek szerint 2017 decemberében helyezik üzembe az egyenként 1 m-es teleszkópokat. Amennyiben sikerül új exobolygót detektálni, annak megerősítéséhez és a légkörök összetételének vizsgálatához a James Webb űrtávcső (3. ábra) segítségét is igénybe fogják venni, amit várhatóan 2018-ban állítanak pályára.

Irodalom

- Gillon, M. és mtsai.: Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature* 542 (2017) 456.
- Nath, J., A., III. és mtsai.: Magnetically enhanced coagulation of very small iron grains. *Icarus* 107 (1994) 155.
- Hubbard, A.: Explaining Mercury's density through magnetic erosion. *Icarus* 241 (2014) 329.
- Wyatt, M. és mtsai.: How to design a planetary system for different scattering outcomes. *MNRAS* 464 (2017) 3385.
- Gánti Tibor: *Az élet általános elmélete*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2000.
- Cockell, C., S. és mtsai.: Planetary targets in the search for extraterrestrial oxygenic photosynthesis. *Plant Ecology & Diversity* 2 (2009) 207.
- Dodd, M., S. és mtsai.: Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates. *Nature* 543 (2017) 60.

Ajánlott irodalom

- Dobos, V. és mtsai.: The Effect of Multiple Heat Sources on Exomoon Habitable Zones. *Astron. & Astroph.* (2017) megjelenőben
- Kasting, J. F. és Calting, D.: Evolution of a habitable planet. *Annu. Rev. Astron. Astroph.* 41 (2003) 429.
- Lammer, H. és mtsai.: What makes a planet habitable? *Astron. & Astroph.* 17 (2009) 181.
- Regály, Zs.: Több, mint égen a csillag – I. Exobolygók felfedezése. *Fizikai Szemle* 65/7-8 (2015) 233.
- Regály, Zs.: Több, mint égen a csillag – II. Bolygók keletkezése. *Fizikai Szemle* 65/9 (2015/9) 306.

KI MAGYARÁZTA ELŐSZÖR AZ EGYENSÚLY FELÉ TÖREKVÉST?

Gyenis Balázs
MTA BTK Filozófiai Intézet

Két gázt összekeverve hőmérsékletük kiegyenlítődik. A fizika tankönyvek ugyan meglehetősen szűkszavúak szoktak lenni tudományuk történetét illetően, ám nem ismerek olyan statisztikus mechanika tankönyvet, amely ne említene *Ludwig Boltzmann* H-tételét, mint az első mechanikai magyarázatot az egyensúly felé törekvés ezen jelenségére, „megnyitva a kaput a makroszkopikus világ molekuláris dinamikai alapokon nyugvó megértése felé”.¹ A fizikusokon túl a fizikatörténész szakma is egyetért abban, hogy Boltzmann volt az első, aki „molekuláris alapokat nyújtott a fizikai rendszerek egyensúly felé való természetes törekvésének és egyensúlyban maradásának”² magyarázatához. Boltzmann prioritása több, mint esetleges történeti állítás: a fizikán túlnyúló tudománytörténeti folklór része.

A folklór azonban gyakran téved; e rövid cikk arra hívja fel a figyelmet, hogy Boltzmann helyett *James Clerk Maxwell* illeti az elsőbbség. Maxwell 1860-os *Illustrations of the Dynamical Theory of Gases* című cikkében [4] kezdett el foglalkozni a kinetikus gázok elméletével, és cikkének VI. állítása (1. ábra) bizonyítást ad a keveredő gázok hőmérsékletének kiegyenlítésére, legalább hat évvel megelőzve Boltzmann első próbálkozásait. Maxwell jóindulatúan rekonstruált bizonyítása ráadásul elegánsabb és egyszerűsége folytán beemelhető lenne akár a középiskolai szintű fizikaoktatásba is, ezért tudománytörténeti jelentőségétől függetlenül is érdemes megismerkedni vele.

Az *Illustrations* egy gáz részecskéit kiterjedéssel és tömeggel rendelkező, egymással tökéletesen rugalmas módon ütköző gömbökként modellezi, és amellett érvel, hogy az ilyen módon felfogott gáz hőmérséklete arányos részecskéi átlagos mozgási energiájával. Az *Illustrations* VI. állításának célja annak megmutatása, hogy két gáz összekeverése után a részecskéik közötti ütközések a gázok átlagos mozgási energiája közötti kezdeti különbség csökkenéséhez, illetve eltűnéséhez, vagyis az összekevert gázok hőmérsékletének kiegyenlítéséhez vezetnek.

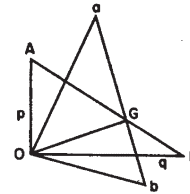
A szerző munkáját az NKFI K 115593 programja támogatta. A cikk tartalmi átfedésben van a szerző *Maxwell's „H-theorem”* című, angol nyelvű, jelenleg bírálat alatt álló cikkével.



Gyenis Balázs tudományfilozófus, az MTA BTK Filozófiai Intézetének tudományos munkatársa. Tudománytörténet és tudományfilozófia Ph.D. fokozatát, valamint fizikus és filozófus mesterfokozatait a Pittsburgi Egyetemen szerezte. Fő kutatási területei: a fizika filozófiája, formális episztemológia és általános tudományfilozófia.

Prop. VI. Two systems of particles move in the same vessel; to prove that the mean *vis viva* of each particle will become the same in the two systems.

Let P be the mass of each particle of the first system, Q that of each particle of the second. Let p, q be the mean velocities in the two systems before impact, and let p', q' be the mean velocities after one impact. Let $OA = p$ and $OB = q$, and let AOB be a right angle; then, by Prop. V., AB will be the mean relative velocity, OG will be



the mean velocity of the centre of gravity; and drawing aGb at right angles to OG , and making $aG = AG$ and $bG = BG$, then Oa will be the mean velocity of P after impact, compounded of OG and Ga , and Ob will be that of Q after impact.

$$\text{Now } AB = \sqrt{p^2 + q^2}, \quad AG = \frac{Q}{P+Q} \sqrt{p^2 + q^2},$$

$$BG = \frac{P}{P+Q} \sqrt{p^2 + q^2}, \quad OG = \frac{\sqrt{P^2 p^2 + Q^2 q^2}}{P+Q},$$

$$\text{therefore } p' = Oa = \frac{\sqrt{Q^2(p^2 + q^2) + P^2 p^2 + Q^2 q^2}}{P+Q},$$

$$\text{and } p' = Ob = \frac{\sqrt{P^2(p^2 + q^2) + P^2 p^2 + Q^2 q^2}}{P+Q},$$

$$\text{and } Pp'^2 - Qq'^2 = \left(\frac{P-Q}{P+Q}\right)^2 (Pp^2 - Qq^2). \quad (6)$$

It appears therefore that the quantity $Pp^2 - Qq^2$ is diminished at every impact in the same ratio, so that after many impacts it will vanish, and then

$$Pp^2 = Qq^2.$$

Now the mean *vis viva* is $\frac{3}{2}Pa^2 = (3\pi/8)Pp^2$ for P , and $(3\pi/8)Qq^2$ for Q ; and it is manifest that these quantities will be equal when $Pp^2 = Qq^2$.

If any number of different kinds of particles, having masses P, Q, R and velocities p, q, r respectively, move in the same vessel, then after many impacts

$$Pp^2 = Qq^2 = Rr^2, \text{ \&c.} \quad (7)$$

1. ábra. A VI. állítás Maxwell 1860-as cikkében.

Először a VI. állítás bizonyításának jóindulatú és kortárs jelölésrendszert alkalmazó rekonstrukcióját adjuk

¹ A széles körben használt [1] nyitó Boltzmann portréja alatt található mondata talán a könyv *egyetlen* tudománytörténeti állítása.

² Az idézet forrása egy másik klasszikus, [2] (3. o.). A téma egy kiváló tudománytörténeti áttekintéshez és referenciákhoz lásd: [3].

meg, majd történeti megjegyzéseket teszünk a rekonstrukció és a Maxwell által ténylegesen leírtak közötti kapcsolatra. A rekonstruált bizonyításhoz először kiszámoljuk két részecske ütközés utáni mozgási energiájának különbségét, majd az összes ütköző részecskepárra összegzünk. Az ütközés előtti mennyiségeket vesszőtlen, az ütközés utáni mennyiségeket vesszős változókkal jelöljük, és – az egyszerűség kedvéért – először tegyük fel, hogy a két gáz minden részecskéje azonos, m tömeggel rendelkezik. Két részecske ütközés utáni mozgási energiájának különbségét rövid számolás után

$$\left(\frac{m v_f'^2}{2} - \frac{m V_b'^2}{2} \right) = 2 m r_f v_{CM} \mathbf{r}_f' \quad (1)$$

alakban írhatjuk fel. A jobb oldalon található \mathbf{v}_{CM} az f és b részecske tömegközéppontjának sebessége, és

$$\mathbf{r}_f' = \frac{1}{r_f'} \mathbf{r}_f' \quad (2)$$

az f részecske ütközés utáni, a tömegközépponttól vett relatív, $\mathbf{r}_f' = \mathbf{v}_f' - \mathbf{v}_{CM}$ sebességének iránya.

A bizonyítás második lépésének kulcsa az a feltetelezés, hogy sok hasonló részecskepár ütközése esetén az ütközés utáni relatív sebesség minden iránya nagyjából azonos gyakorisággal fordul elő, ekkor ugyanis az összegzéskor az ellentétes ütközés utáni irányokra az egyenletek jobb oldalai kiejtik egymást, és így az átlagos mozgási energiák különbsége az ütközések után eltűnik. Egy kicsit formálisabban: írjunk $(f, b) \in I_{\mathbf{v}, \mathbf{V}}^{\Delta t}$ -t pontosan akkor, ha f az összekevert „forró”, b a „hideg” gáz egy-egy részecskéje amelyek Δt időtartam alatt ütköznek egymással úgy, hogy f ütközés előtti sebessége \mathbf{v} és b ütközés előtti sebessége \mathbf{V} . Tegyük fel, hogy csak páronkénti ütközések lehetségesek, és hogy Δt elég rövid ahhoz, hogy alatta a részecskék legfeljebb egy ütközésben vegyenek részt, ám elég hosszú ahhoz, hogy alatta az ütköző, $I_{\mathbf{v}, \mathbf{V}}^{\Delta t}$ -ben lévő részecskepárokra minden lehetséges ütközés utáni \mathbf{r}_f' irány nagyjából azonos gyakorisággal forduljon elő. Ekkor

$$\sum_{(f, b) \in I_{\mathbf{v}, \mathbf{V}}^{\Delta t}} \frac{m v_f'^2}{2} - \frac{m V_b'^2}{2} \approx 0, \quad (3)$$

hiszen rögzített \mathbf{v} , \mathbf{V} -re (és ezáltal rögzített r_f -re és \mathbf{v}_{CM} -re) az összeadott (1) egyenletek jobb oldali tagjai kiejtik egymást, amikor ellentétes \mathbf{r}_f' iránnyal rendelkező ütközések hatását adjuk össze! Tovább összegezve minden lehetséges ütközés előtti (\mathbf{v}, \mathbf{V}) sebességpárra számot adunk minden Δt alatti ütközésről, így az ütközések számával osztva

$$\frac{\overline{m v'^2}}{2} - \frac{\overline{m V'^2}}{2} \approx 0 \quad (4)$$

eredményt kapjuk, amely szerint a „forró” és „hideg” gáz egymással ütköző részecskéi közötti kezdeti átlagos mozgásienergia-különbség eltűnik!

Ha a „forró” és a „hideg” gáz részecskéi különböző tömeggel rendelkeznek, akkor (1) helyett

$$\begin{aligned} \frac{m v_f'^2}{2} - \frac{M V_b'^2}{2} &= \left(\frac{m-M}{m+M} \right)^2 \left(\frac{m v_f^2}{2} - \frac{M V_b^2}{2} \right) + \\ &+ 2 \frac{m M (m-M)}{(m+M)^2} \mathbf{v}_f \mathbf{V}_b + \\ &+ 2 m r_f v_{CM} \mathbf{r}_f' \end{aligned} \quad (5)$$

egyenlethez jutunk.³ Innen első lépésben \mathbf{v} , \mathbf{V} rögzítésével megismételjük a korábbi összegzést az egyenlet jobb oldali harmadik tagjainak kiejtéséhez, majd – azzal a további feltevéssel élve, hogy sok részecske ütközésénél az ütközés előtti sebességek irányainak eloszlása is nagyjából egyenletes – második lépésben a v , V magnitúdók rögzítésével tovább összegzünk minden lehetséges ütközés előtti sebességirányra, ezáltal kiejtve az egyenlet jobb oldali második tagjait. Harmadik lépés-ként minden lehetséges v , V magnitúdóra összegezve és az ütközések számával osztva (4) helyett

$$\frac{\overline{m v'^2}}{2} - \frac{\overline{M V'^2}}{2} \approx \left(\frac{m-M}{m+M} \right)^2 \left(\frac{\overline{m v^2}}{2} - \frac{\overline{M V^2}}{2} \right) \quad (6)$$

eredményre jutunk, amely szerint a „forró” és „hideg” gáz egymással ütköző részecskéi közötti kezdeti átlagos mozgásienergia-különbség csökken. Mivel a két – forró és hideg – gáz saját részecskéi közötti ütközések, illetve az edény falával történő ütközések nem befolyásolják a két gáz átlagos mozgási energiája közötti különbséget, ha az összes részecskére számolt

$$\frac{\overline{m v^2}}{2} - \frac{\overline{M V^2}}{2} \quad (7)$$

előjele megegyezik az ütköző részecskepárokra számolt (6) előjelével, akkor a két gáz kezdeti hőmérséklet-különbsége az ütközések után csökken.⁴

Az *Illustrations* VI. állításában a (6) eredményként értelmezett egyenlet levezetése után Maxwell arra a következtetésre jut, hogy ha az ütközések sokáig folytatódnak, akkor a két gáz hőmérséklete kiegyenlítődik. Maxwell érvelése egyszerű, elegáns, és több szempontból is vonzó – azon túl, hogy statisztikus jellegű, nincs hozzá szükség a statisztikus fizika későbbi fejlődése során gyakran felbukkanó, a fázistéren értelmezett absztrakt és gyanús eredetű, *a priori* valószínűség-eloszlás feltételezésére sem. A bizonyítás fő feltevését – tudniillik, hogy minden

³ Megjegyzések: $\mathbf{v}'_{CM} = \mathbf{v}_{CM}$ a lendületmegmaradás miatt; $r_f' = |\mathbf{r}_f'| = |\mathbf{r}_f| = r_f$, mert az ütközések tökéletesen rugalmasak; $2 m r_f v_{CM} \mathbf{r}_f' = -2 M R_b v_{CM} \mathbf{R}_b' = (m r_f + M R_b) v_{CM} \cos \gamma$, ahol $\gamma = \angle(\mathbf{v}_{CM}, \mathbf{r}_f)$. A számoláshoz lásd [5] függelékét.

⁴ Minél nagyobb a „forró” és a „hideg” gáz közötti kezdeti hőmérséklet-különbség, annál nagyobb az esély arra, hogy a két előjel megegyezik, ha Δt alatt ütköző részecskepárok halmaza véletlen mintának tekinthető. Ha az ütközések előtti hőmérséklet-különbség elenyésző, akkor a két mennyiség előjele az esetek közel felében egyezik csak meg és így az ütközések kicsi hőmérséklet-ingadozáshoz vezetnek. Ez jól mutatja a bizonyítás statisztikus jellegét.

ütközés utáni relatív sebesség irány nagyjából azonos gyakorisággal fordul elő – Maxwell II. állításában (2. ábra) megpróbálta alátámasztani annak megmutatásával, hogy ez következménye azon természetesnek tűnő feltevésnek, hogy az ütközés utáni relatívsebesség-irányt meghatározó ütközési paraméter nagyjából egyenletesen oszlik el az ütközési körlemezen.

A fent rekonstruált érvelés – természetesen – a legjobb esetben is hiányos, hiszen ahogyan erre *Johann Josef Loschmidt* jól ismert megfordíthatósági ellenvetése rögtön rámutat, az érvelés implicit valószínűségi függetlenségi feltevéseit nehéz összeegyeztetni a mozgásegyenletek által meghatározott dinamikával, akármennyire is természetesnek tűnnek. Ebből a szemszögből nézve azonban az érvelés nem rosszabb, mint Boltzmann H-tétele, amely szintén hasonló implicit valószínűségi függetlenségi feltevésekkel él, és szintén elvárzik a megfordíthatósági ellenvetésen.⁵ Hogyan lehetséges akkor, hogy a fizikatörténészek eddig figyelmen kívül hagyták Maxwell VI. állítását, és nem ismerték el Maxwell prioritását az egyensúly felé törekvés első mechanikai magyarázatának megadásában?

A válasz abban rejlik, hogy Maxwell első olvasatra meglehetősen obskúrus módon jut el a (6)-ként értelmezett egyenletéhez. A tömör bizonyítás azt a látszatot kelti, mintha Maxwell nagyon speciálisan ütköző részecskepárok mozgási energiái közötti különbséget számolná ki: úgy tűnik, hogy egyrészt feltételezi, hogy a visszaütközési $\angle(\mathbf{v}_{CM}, \mathbf{r}_P)$ szög derékszög, másrészt feltételezi, hogy az ütközés előtti sebességek $\angle(\mathbf{v}_f, \mathbf{V}_b)$ szöge derékszög. Nyilvánvaló, hogy ilyen speciális ütközésekből levezetett eredmény alapján nem lehet következtetni az összes ütközés nyomán kialakuló átlagos mozgásienergia-különbség változásra. Emiatt még azon tudománytörténészek is, akik futtában megemlítik Maxwell VI. állítását, „elképesztőnek” találják, hogy a máskülönben zseniális Maxwell, vagy „bármely kortársa, aki vette a fáradságot az érv vizsgálatára, az érvet elfogadta volna” [6] (344. o.).

Az (5)-ös egyenletre pillantva azonban nyilvánvaló, hogy az első összegzés, amelynek során kiejtettük az egyenlet jobb oldalának harmadik tagjait, matematikailag ugyanazt az eredményt adja, mintha a visszaütközési $\angle(\mathbf{v}_{CM}, \mathbf{r}_P)$ szöveget derékszögnek választanánk, és a második összegzés, amelynek során kiejtettük az egyenlet jobb oldalának második tagjait, matematikailag

⁵ Ahhoz, hogy az idő irányának megfordítására invariáns mikroszkopikus dinamikából valamilyen makroszkopikus szintű irreverzibilitást le lehessen vezetni vagy Maxwell, illetve Boltzmann feltevéseivel analóg valószínűségi függetlenségi feltevésekre, vagy más, a kezdeti értékek eloszlására vonatkozó feltevésre van szükség; a lehetőségek tárgyaláshoz lásd [3].

Prop. II. To find the probability of the direction of the velocity after impact lying between given limits.

In order that a collision may take place, the line of motion of one of the balls must pass the centre of the other at a distance less than the sum of their radii; that is, it must pass through a circle whose centre is that of the other ball, and radius (s) the sum of the radii of the balls. Within this circle every position is equally probable, and therefore the probability of the distance from the centre being between r and $r + dr$ is

$$\frac{2rdr}{s^2}.$$

Now let ϕ be the angle APa between the original direction and the direction after impact, then $APN = \frac{1}{2}\phi$, and $r = s \sin \frac{1}{2}\phi$, and the probability becomes

$$\frac{1}{2} \sin \phi d\phi.$$

The area of a spherical zone between the angles of polar distance ϕ and $\phi + d\phi$ is

$$2\pi \sin \phi d\phi;$$

therefore if ω be any small area on the surface of a sphere, radius unity, the probability of the direction of rebound passing through this area is

$$\frac{\omega}{4\pi};$$

so that the probability is independent of ϕ , that is, all directions of rebound are equally likely.

2. ábra. A II. állítás Maxwell 1860-as cikkében.

lag ugyanazt az eredményt adja, mintha az ütközés előtti sebességek $\angle(\mathbf{v}_f, \mathbf{V}_b)$ szögét derékszögnek választanánk. Ha jóindulatúan feltételezzük, hogy Maxwell speciálisan elrendezett ütközései csak geometriailag intuitív helyettesítői a fent rekonstruált érvelés kiejtési lépéseinek (amelyekhez az *Illustrations* korábbi részeiben Maxwell alapos előkészületeket tesz), akkor Maxwell így rekonstruált VI. állítása rövid, ám a kor bizonyítási sztenderdjeinek megfelelő, meggyőző bizonyításává válik az egyensúly felé törekvésnek.⁶

Irodalom

- Huang, K.: *Statistical Mechanics*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 1987.
- Pathria, R. K.: *Statistical Mechanics*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1996.
- Uffink, J.: Compendium of the foundations of classical statistical physics. In J. E. J. Butterfield, J. Earman (eds.): *Philosophy of Physics, Part B of the Handbook of the Philosophy of Science*. Elsevier, The Netherlands, 2007.
- Maxwell, J. C.: Illustrations of the dynamical theory of gases. *Philosophical Magazine* 19, 20 (1860) 19–32, 21–37.
- Gyenis, B.: Maxwell and the normal distribution: A colored story of probability, independence, and tendency toward equilibrium. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 57 (2017) 53–65.
- Brush, S. G.: *The Kind of Motion we call Heat*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1976.

⁶ További tudománytörténeti részletekért lásd [5].

HŐMÉRSÉKLETMÉRÉS TERMISZTORRAL

– Egyszerű digitális kísérletek a „semmiből”

Stonawski Tamás, Gálik Tamás

Nyíregyházi Egyetem

Az „e-bögre” a *Fizikai Szemle* egy korábbi számában volt bemutatva [1]. Az e-bögre egy hétszegmenses kijelzőn megjelenítve méri a beletöltött folyadék hőmérsékletét. A bögre nagy sikert aratott a gimnazista diákok körében, de többen a „fekete doboz” belsejére, azaz a működésére is kíváncsiak voltak. Ekkor fogalmazódott meg bennünk, hogy bevihető-e középiskolai oktatásba a termisztoros hőmérsékletmérés elektrotechnikai ismertetése, el tudják-e készíteni a diákok a mérőeszközt tanári segítséggel? Hiszen a mikrokontrollerrel megvalósított szerkezet megépítése bizonyos informatikai jártasságot feltételez, az áramkör összeállítása elektrotechnikai szaktudást, a kalibrálás megfelelő elméleti fizikai háttérrel követel meg a tanulóktól. Beláttuk, ez a feladat a hagyományos tanóra keretein belül nem valósítható meg, de 10-12. osztályos gimnazisták szakköri tevékenységének érdekes színfoltja lehet.

Szakköri sillabusz készítésére szántuk el magunkat, hogy a témában esetleg kevésbé jártas tanárkolégák is kedvet kapjanak egy praktikus „mérőeszköz” elkészítésére, ami a heti zsebpénzből megvásárolható alkatrészekből álló, hazavihető „használati tárgy”. A kísérletek kidolgozása közben felmerülő ötletek alapján elhatároztuk, hogy a későbbiekben esetleg kilépünk a termodinamika témaköréből és a fizika

más területeit is célba vesszük az olcsó mikrokontrollerekkel könnyen megvalósítható mérésekkel, kísérletekkel. Megállapodtunk abban is, hogy a megírt szoftvereket és mérési eljárásokat is letölthetővé tesszük az érdeklődők számára, hiszen fő célunk az, hogy a középiskolások kis költségvetésből érdekes, számítógépes, digitális méréseket végezhesenek. Így az adatok lejegyzése és ábrázolása nem leterhelő a szakkör alatt, ezáltal – remélhetőleg – jobban tudnak fókuszálni a kísérletek háttérében húzódó fizikai jelenségekre.

A leírt kísérleteket – természetesen – iránymutatónak szántuk, az olvasó lehetőségeire és kreativitására bízunk a további vizsgálódásokat, fejlesztéseket.

Hőmérsékletmérés termisztorral

Elméleti áttekintés [2]

Az NTK-termisztorok¹ ellenállása a hőmérséklet emelkedésével exponenciálisan csökken (A és B a félvezetőre jellemző állandók):

$$R_T = A e^{\frac{B}{T}}. \quad (1)$$

Az egyenlet mindkét oldalának logaritmusát véve az alábbi összefüggést kapjuk:

$$\ln R_T = B \frac{1}{T} + \ln A. \quad (2)$$

A termisztorok 25 °C-os hőmérséklethez tartozó ellenállását a gyártók fel szokták tüntetni, ezt az értéket az előző (2) egyenletbe behelyettesítve kapjuk:

$$\ln R_{25} = B \frac{1}{298,15 \text{ K}} + \ln A. \quad (3)$$

Ha a (3) egyenletből kifejezzük $\ln A$ -t beírjuk a (2) egyenletbe, a (4) összefüggéshez jutunk:

$$\ln R_T = B \frac{1}{T} + \ln R_{25} - B \frac{1}{298,15 \text{ K}}. \quad (4)$$

Ezáltal az A paramétert kiküszöböltük, és az abszolút hőmérséklet reciproka az $\ln R_T$ kifejezés elsőfokú függvényeként szerepel. Tehát az összetartozó hőmérséklet- és ellenállásértékek mérésével, majd azok

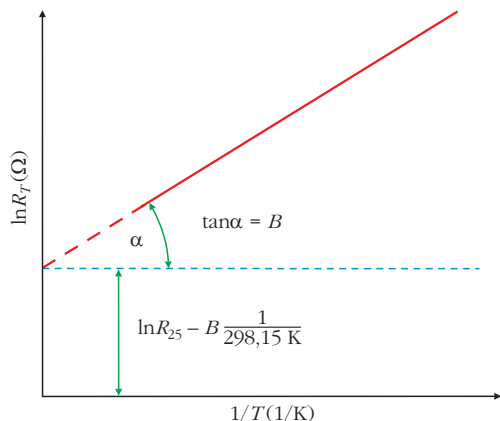
¹ Negatív karakterisztikájú termisztorok, ellenállásuk a hőmérséklet növekedésével csökken.



Stonawski Tamás a Nyíregyházi Egyetemen főiskolai adjunktus. Doktori címét 2016-ban az ELTE Fizika Tanítása doktori program keretében szerezte. Kutatási területe a digitális média alkalmazása a tanulói kreativitás, problémamegoldás és önálló kísérletezés fejlesztésére általános és középiskolában.



Gálik Tamás a Nyíregyházi Főiskolán fizikusként végzett, jelenleg a Nyíregyházi Egyetem II. éves fizika-kémia mesterszakos hallgatója. Kísérleti és demonstrációs eszközök tervezésével és készítésével foglalkozik. Rendszeresen tart tudománynépszerűsítő előadásokat korosztálytól függetlenül az ország számos pontján.



1. ábra. A (4) összefüggés grafikonja. Az egyenes meredeksége maga a B paraméter.

ábrázolásával, a grafikon egyenesének meredekségéből a B értékét kiszámíthatjuk, így a (4) összefüggés B -től független, egyértelmű függvénykapcsolatot ír le a termisztor ellenállása és hőmérséklete között (1. ábra).

Az alábbiakban tárgyalt digitális hőmérsékletmérés az ellenállás hőmérsékletfüggésén alapszik.

Szükséges anyagok, eszközök²

Arduino mini mikrokontroller (2. ábra), műanyag próbapanel, 10 k Ω -os termisztor (NTC MF52-103 3435 10K ohm 5% Thermistor Temperature Sensor), 10 k Ω -os ellenállás, soros USB-konverter (ami lehetővé teszi az oda-vissza kommunikációt a számítógéppel), számítógép, szoftver.

Az áramkörépítés elméleti alapjai

A termisztorral kössünk sorosan egy ($R = 10\text{ k}\Omega$) ellenállást: ezáltal feszültségosztót képezünk (3. ábra). Fejezzük ki az R_T ellenállást ezen U_T feszültséggel:

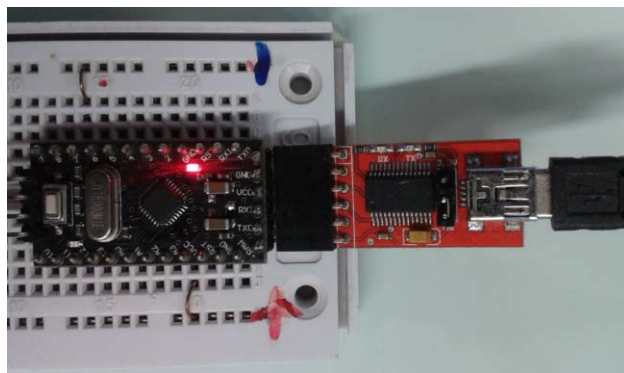
$$R_T = \frac{U_T}{I_T} = \frac{U_T}{\frac{U_0}{R_0 + R_T}} = \frac{U_T}{U_0 - U_T} R. \quad (5)$$

A termisztor által küldött jelek az A0 analóg bemeneten (4. ábra) az U_T feszültséggel (0–5 V) arányosak; 0 és 1023 közötti egész értéket vehetnek fel (jelöljük U'_T -vel), az R ellenállás értéke állandó hőmérsékleten nem változik (ennek teljesüléséhez az R ellenállást távol kell elhelyezni a termiszortól).

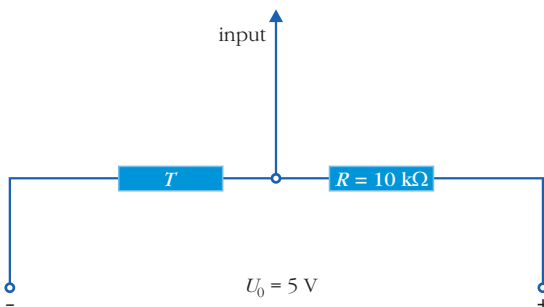
U_0 -nak feleltessük meg a maximális 1023 értéket és írjuk (5)-be! Ekkor R_T -vel egyenesen arányos R'_T mennyiséget kapunk:

$$R'_T = \frac{U'_T}{1023 - U'_T} \cdot \text{állandó}. \quad (6)$$

² Beszerzés: Budapesten a LOMEX-nél, olcsón az interneten, például ebay-en.



2. ábra. Az Arduino mini mikrokontroller munka közben.



3. ábra. A feszültségosztó kapcsolási rajza.

Az áramkör elkészítése

Készítsük el a mikrokontrollerrel a fentebb tárgyalt kapcsolást, rajzát a 4. ábra mutatja.

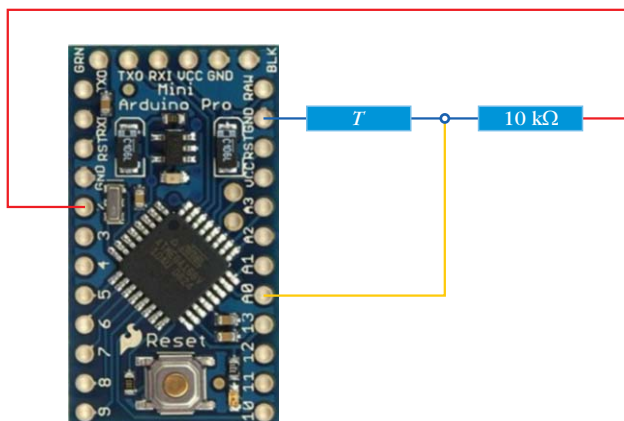
Ezt követően a mikrokontroller szoftverének telepítése és programozása következik [3]. A program futtatása során a megadott késleltetési időnek megfelelően jelennek meg U'_T felvett értékei.

Hőmérsékletmérés kalibrálása

Ahhoz, hogy a számítógép kijelzőjén az U'_T értékek helyett $^{\circ}\text{C}$ -ban kifejezett hőmérsékletértékek jelenjenek meg, egy hitelesített hőmérő segítségével kalibrálást kell végeznünk.

Forraljunk vizet lombikban, olvassuk le a forráspontot a lombikba helyezett hőmérő segítségével, és jegyezzük le a lombikba helyezett termisztor U'_T érté-

4. ábra. A mikrokontrollerre kötött feszültségosztó kapcsolási rajza.





5. ábra. A termisztor kalibrálása hitelesített hőmérővel.

két is (5. ábra)! Ezután – folyamatos kevergetés mellett – hagyjuk hűlni a vizet, és 10 fokonként jegyezzük le az összetartozó értékeket! Ezt követően a (6) összefüggés alapján számoljuk ki az R_T' értékeket (az állandót vegyük egységnyinek), majd azokat a hőmérséklet függvényében grafikonon ábrázoljuk (6. ábra felső része)! A (3) összefüggés ismeretében, $1/T$ függvényében ábrázoljuk $\ln R_T'$ -t (6. ábra alsó fele)!

A 6. ábra alsó grafikonjára egyenest illesztve A és B értékek meghatározhatók:

$$A = e^{-11,328} = 1,20313 \cdot 10^{-5}, B = 3360,6.$$

Ezeket a (2) egyenlettel egybevetve a hőmérsékletre kapott összefüggés:

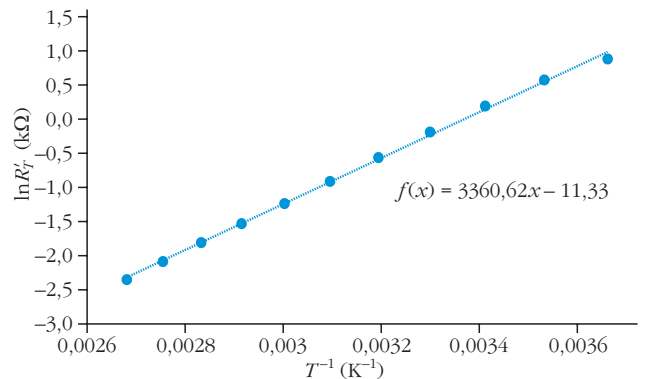
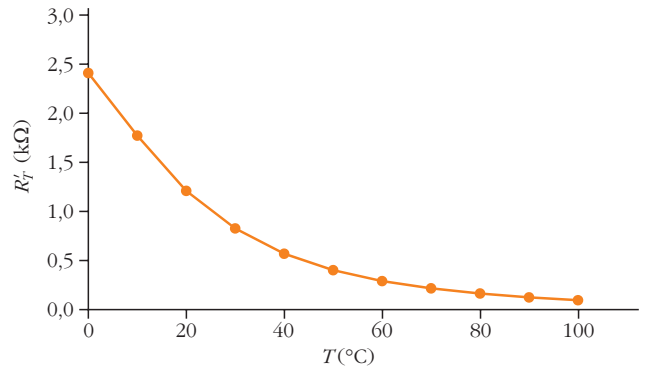
$$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{B}{\ln\left(\frac{R_T}{A}\right)} - 273,15. \quad (7)$$

Ha az összefüggéssel kiegészítjük a mikrokontroller programját [4], akkor a hőmérséklet fog megjeleníteni a kijelzőn.

A kalibrálás ellenőrzése

Az elektrotechnikában a termisztorok hőmérsékletfüggésének meghatározásához újabban az alábbi összefüggéseket használják:

$$R_T = R_{25} \exp\left(B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15}\right)\right), \quad (8)$$



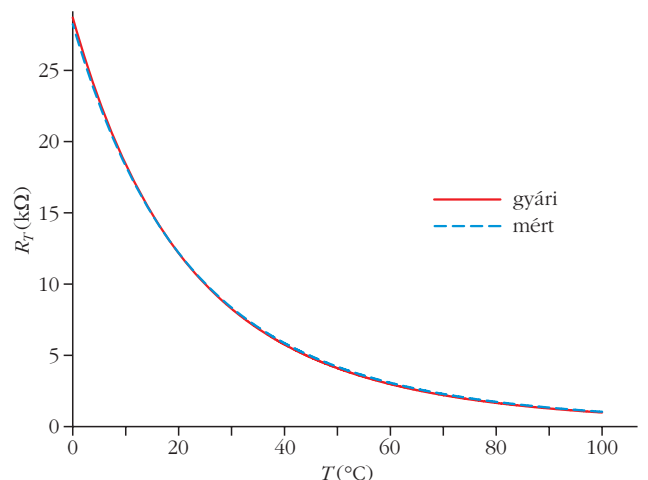
6. ábra. Bal oldalon: az összetartozó R_T' és T értékekből készített grafikon. Jobb oldalon: az összetartozó $\ln R_T'$ és $1/T$ értékekből készített grafikon (Excellel).

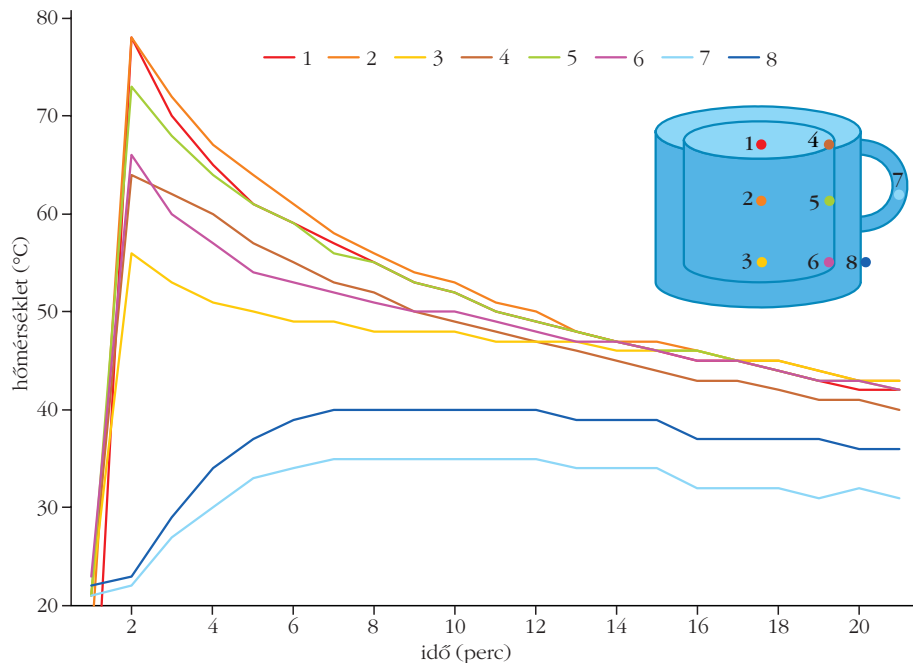
illetve

$$R_T = 10 \text{ k}\Omega \exp\left(B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15}\right)\right). \quad (9)$$

A (9) összefüggés praktikussága, hogy csak egy állandót tartalmaz. Ráadásul a B értéket fel is tüntetik a termisztor elnevezésében, jelen esetünkben: NTC MF52-103 3435 10K ohm 5% Thermistor Temperature Sensor, azaz $B_{gyári} = 3435$. Grafikon segítségével (7.

7. ábra. A gyári (folytonos) és a mért B értékekkel (szaggatott) ábrázolt R_T-T grafikon. A két grafikon 25 °C-hoz tartozó ellenállásértékei a (3) összefüggés miatt pontosan megegyeznek. Ettől a ponttól távolodva, a mérési pontatlanságból adódóan kisebb-nagyobb eltérésekre számíthatunk.





8. ábra. Nyolc termisztorral egyidejűleg végzett hőmérsékletmérés adatai. A grafikonon a forró tea víz és a teáscsésze különböző helyeinek hőmérsékletei vannak feltüntetve az idő függvényében.

ábra) hasonlítsuk össze az általunk mért ($B_{mért} = 3360,6$) és a $B_{gyári}$ értékekkel a termisztor ellenállásának hőmérsékletfüggését!

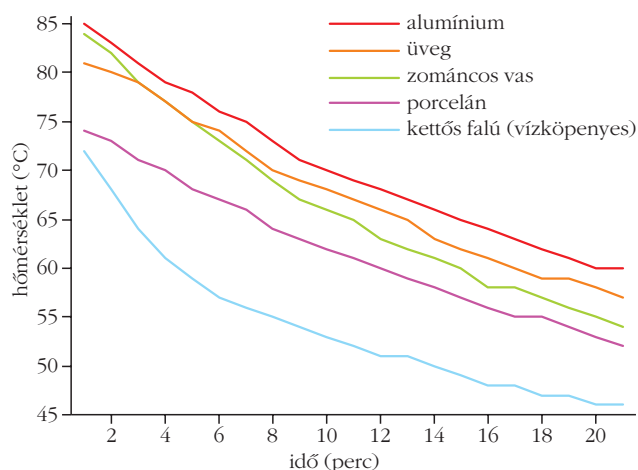
A fentebb tárgyalt összeszerelést és kalibrálást szakköri tevékenység keretein belül érdemes elvégezni. A mérés pontosságát pedig könnyűszerrel ellenőrizhetjük a gyári érték ismeretében.

Egyszerű példák termisztoros hőmérsékletmérésre

A teavíz és teáscsésze hőmérsékletének mérése több termisztor segítségével

A felhasznált mikrokontroller több bemenettel is rendelkezik, ezért egy időben akár 8 termisztor adatait is beolvastathatjuk a számítógép memóriájába. A teázás

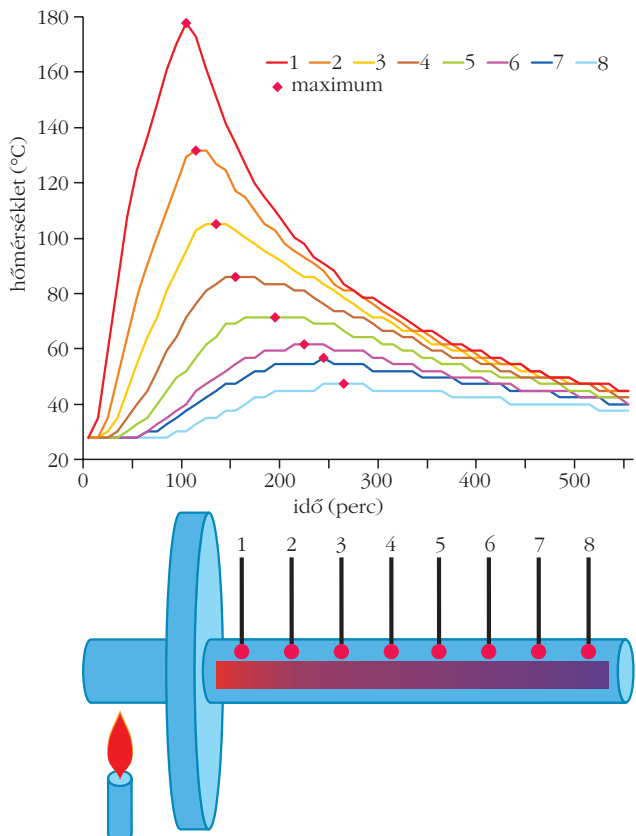
9. ábra. Különböző anyagú csészékbe öntött teavíz hőmérsékletének időbeli változása. A hőmérsékletmérés egyidejűleg történt.

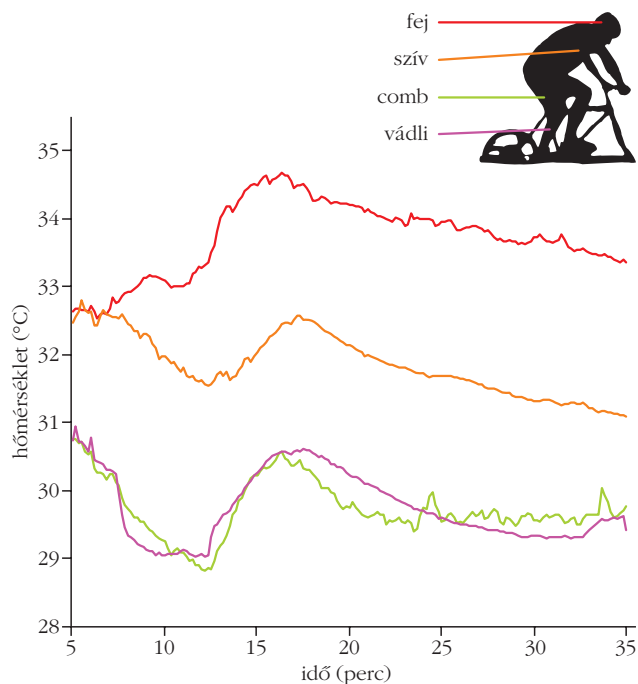


termodinamikája című cikkben [1] közölt adatokat gazdagíthatjuk oly módon, hogy az egyidejű hőmérsékletmérést a teáscsésze különböző pontjaira is kiterjesztjük (8. ábra). A grafikonok szakköri elemzése során a tanulók alkotó módon alkalmazhatják fizikai tudásukat. A különböző pontok eltérő hőmérséklet-változására érdemes magyarázatot kérni. Jó kiindulás lehet, ha felvetjük a kérdést, miért térnek el a más pozícióban lévő mérési pontok hőmérsékletei például a 2. maghőmérséklettől (a párolgás és légmozgás szerepe, lásd 1. és 2. mérési pontok adatai közötti különbségeket, de a hőtartály hatását is felfedezhetjük a 8. mérési pont adatainak a 7.-hez viszonyított eltéréséből stb.)

Másik érdekes feladat a teavíz hűlési görbéjének meghatározása egyidejűleg, de más-más anyagú poharakban. Mérésünknel 5 darab 2 dl-es poharat hasz-

10. ábra. Az alumínium rúd furataiba helyezett termisztorok adatai alapján készült hőmérséklet-eloszlás grafikon. A rúdon látható színskála a mért adatok felhasználásával készült animáció egy időpillanatában szemlélteti a rúd hőmérséklet-eloszlását.





11. ábra. A szobakerékpáros testrészeire (fej, szív, comb, vádli) illesztett termisztorok az alany lokális hőmérsékletét mérték terhelés és pihenés alatt.

náltunk fel (porcelán, üveg, zománcos vas, alumínium, vízköpenyes). A poharak belső falának középső részéhez rögzítettük a termisztorokat, majd az 1 literes kancsóban megízestett teát szétosztottuk a csészékbe. Az adatokat körülbelül 20 percig gyűjtöttük, majd a hőmérsékletet az idő függvényében grafikonon ábrázoltuk (9. ábra). A grafikon elemzése rávilágít a fajhő, hőkapacitás, hőtartály befolyásoló hatásaira.

A hővezetés értelmezése 8 termisztor adatai alapján

A hővezetés vizsgálatához egy alumínium rúdba egyenlő távolságokra lyukakat fúrtunk, és ezekbe helyeztük a termisztorokat. A rúd egyik végét gázlánggal melegítettük körülbelül 2 percig, majd a melegítést megszüntetve megvártuk, amíg a rúd kihűl. A kinyert hőmérsékletadatokból készített $T-t$ ($^{\circ}\text{C}-\text{s}$) grafikonon a hőmérsékleti maximumhelyek „időbeli vándorlása” jól szemlélteti a hőáramlást (10. ábra). Lehetőség szerint érdemes azonos méretű, de más anyagból (például rézből) készült rúddal is elvégezni a kísérletet, és összehasonlítani a két különböző rúd maximumainak „vándorlási sebességét”.

A hővezetés vizuális szemléltetéséhez animációt is készítettünk. Az animáció érdekessége, hogy a mért adatok alapján működik: egy-egy hőmérsékleti tartományhoz egy-egy megfelelő színt rendeltünk, figyelembe véve a színek hideg-meleg érzetét is [5].

Testhőmérséklet mérése

Hatásos „biofizikai” kísérletet végezhetünk el az osztályteremben az empirikus hőmérsékletskála tárgyalásával kapcsolatban. Megvizsgálhatjuk a Fahrenheit-

skála felső alappontját – a normál emberi testhőmérsékletet –, annak reprodukálhatóságát. Vajon melyik testtájékon és milyen terhelésnél mérjük meg a testhőmérsékletet?

Kísérletünkben egy szobakerékpározó bőrfelületére ragtapasszal rögzítettünk 4 termisztor: a homlokára, combjára, vádlijára és a szív tájékára. Az alany a bemelegítő normál tempó után néhány percig (6-12. perc) mindent beleadva hajtotta a biciklit, majd megpihent. Az alany hőmérsékletadataiból grafikont készítettünk (11. ábra)

A grafikont figyelve azonnal feltűnik, hogy a különböző testrészek hőmérsékletei között akár több fok eltérés is tapasztalható, ráadásul azok jóval alacsonyabbak a várt $36,5^{\circ}\text{C}$ -nál. A vártnál alacsonyabb hőmérsékletértékek a ragtapasz gyenge hőszigeteléséből és az izzadság párolgásából adódhattak. Az alsó végtagok jóval alacsonyabb hőmérséklete a lábak levegőhöz viszonyított nagy relatív sebességének következménye lehetett (ez ugyanis növelte a párolgási sebességet). Jól kivehető viszont, hogy a terhelés befejeztével (amikor kimelegszünk) mind a négy termisztor intenzív hőmérsékletemelkedést detektált.

A kísérlet jól mutatja, hogy az emberi test hőmérséklete nem állandó, így nem alkalmas jól reprodukálható hőmérsékleti alappont megválasztásának.

Konklúziók

Ha saját készítésű műszerekkel végzünk méréseket, sokkal izgalmasabb a munka, hiszen nemcsak mérünk, hanem egyben teszteljük is új eszközeinket. A szakkörön elkészített hőmérők másik előnye, hogy azokat a diákok haza is vihetik, és újabb érdekes kísérleteket végezhetnek lakókörnyezetükben (például szoba különböző pontjain – beleértve a radiátort is – a hőmérséklet-változás detektálása hosszabb időn keresztül – 1 naptól akár hónapokig –, de külső hőmérsékletet is mérhetnek, ha a termisztor ki tudja juttatni a lakásból). Természetesen megannyi szórakoztató és hasznos kísérletet lehetne még felsorolni és elvégezni, aminek a diákok fantáziája szabhat csak határt.

A bemutatott kísérletekkel kapcsolatos hiányzó részleteket az irodalomban feltüntetett linkeken keresztül lehet elérni.

Irodalom

1. Stonawski T.: A teázás termodinamikája. *Fizikai Szemle* 66/10 (2016) 347–351.
2. Juhász A.: *Fizikai kísérletek gyűjteménye 1*. Arkhimédész Bt. – Typotex Kiadó, Budapest, 1996; <http://metal.elte.hu/~phexp/doc/hot/j2s6.htm>
3. <https://www.arduino.cc/en/Main/Software> – innen tölthető le a kontrollert programozó ingyenes szoftver, és a megírt program: http://fizikaiszemle.hu/attachments/201706/animacio_telepitese_es_futtatasa.txt
4. http://fizikaiszemle.hu/attachments/201706/termisztor_alapszoftver.txt
5. A program és a leírása innen tölthető le: http://fizikaiszemle.hu/attachments/201706/termisztor_homersekletre_kalibralt_szoftver.txt és <http://fizikaiszemle.hu/attachments/201706/temp.rar>

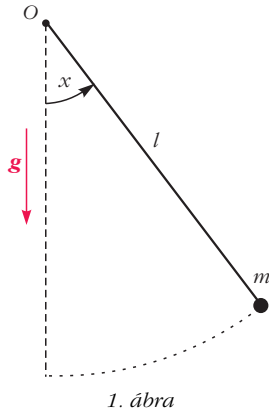
AZ IRÁNYTŰ HARMONIKUS REZGÉSÉTŐL KAOTIKUS MOZGÁSÁIG

Csernovszky Zoltán
Kölcsey Ferenc Gimnázium, Budapest

Inga harmonikus rezgésétől az iránytű kaotikus mozgásáig terjedő vizsgálati módszereket, analógiákat és ábrázolási módokat mutat be a cikk. Az írás alapját az ELTE Fizika Doktori Iskola, Fizika Tanítása Program, Kaotikus Mechanika tantárgyának vizsgája képezi.

Inga és iránytű csillapítatlan mozgásai homogén térben

Az ingák mozgásának leírása és a velük megfigyelhető jelenségek, a harmonikus, csillapított, gerjesztett rezgések, kaotikus mozgások alapvető szerepet játszanak a mechanikában [1, 2]. Legyen az inga egy l hosszúságú, egyik végénél, az O pontban felfüggesztett súlytalan rúd, amelynek másik végére m tömegű, pontszerű testet rögzítünk. Helyezzük ezt egy homogén, függőleges g nehézségi gyorsulású gravitációs térbe, a végére rögzített testet x szöggel térítsük ki függőleges, egyensúlyi helyzetéből, és hagyjuk magára (1. ábra)! A forgómozgás alapegyenletét az O pont körül felírva kapjuk:



1. ábra

$$-m l g \sin x = \Theta_i \beta. \quad (1)$$

Az egyenlet bal oldalán található kifejezés az O -ra vonatkoztatott forgatónyomaték, amelynek negatív előjele azt mutatja, hogy a nyomaték az ingát mindig az egyensúlyi helyzet felé forgatja. A jobb oldalon β az inga szöggyorsulása és $\Theta_i = m l^2$ az O felfüggesztési pontra vonatkoztatott tehetetlenségi nyomatéka.

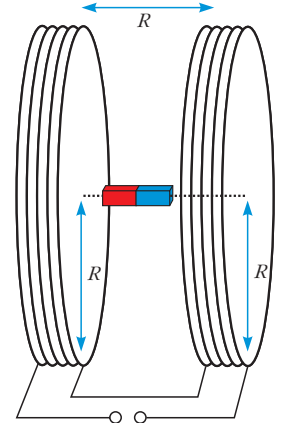
Ehhez hasonló jelenségek iránytűvel is megfigyelhetők, ha azt homogén mágneses térbe helyezzük.

A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantárgy-pedagógiai Kutatási Programja támogatta.



Csernovszky Zoltán 1990-ben végzett matematika-fizika szakos tanárként az ELTE-n. A budapesti Kölcsey Ferenc Gimnázium tanára, ahol szakjait magyarul és franciául tanítja. 2014-től az ELTE Fizika Tanítása Doktori Iskola hallgatója, témája az energiafogalom interdiszciplináris megközelítése. Az ELTE-MTA Fizika Tanítása Kutatócsoport tagja.

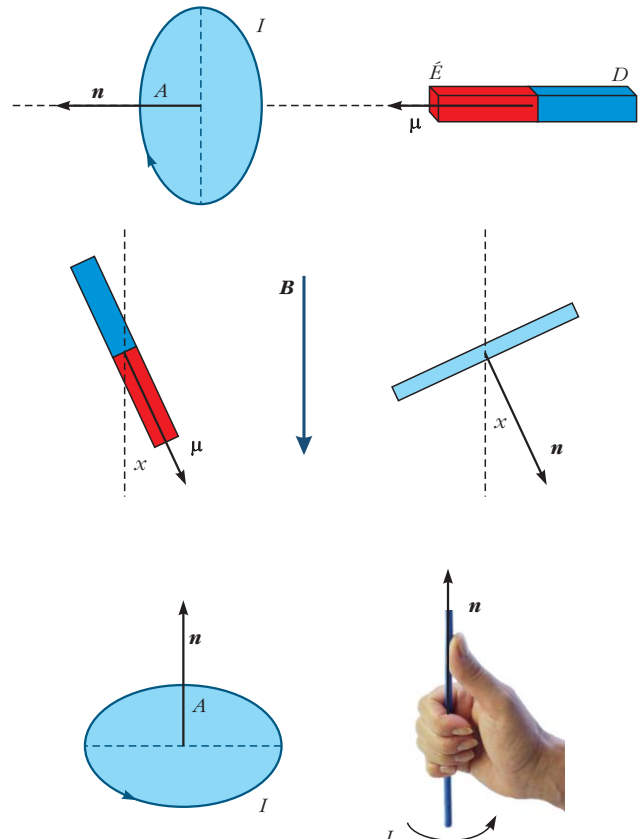
Ehhez Helmholtz-tekercsbe – azaz két közös tengelyű, azonos menetszámú, sorba kötött rövid tekerespárba – vezessünk egyenáramot! A tekercs mágneses terei összeadódnak, a közöttük lévő térrészben közel homogén mágneses tér alakul ki. A tér erőssége könnyen szabályozható a tekercs paramétereivel, illetve a körben folyó áram erősségével (2. ábra).

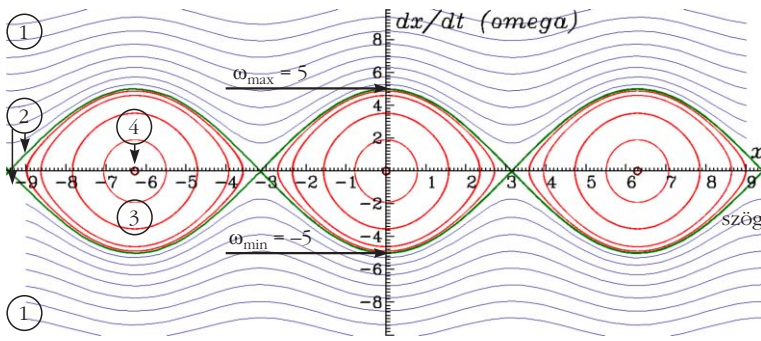


2. ábra

Az ezen mágneses térbe helyezett iránytű mozgás-egyenletének felírásához vegyük figyelembe, hogy egyrészt egy iránytű mágneses tere messziről nézve egyenértékű egy köráram mágneses terével. Másrészt egy köráramra ható forgatónyomaték M_{\max} maximuma a – középiskolában megszokott – mágnesesin-

3. ábra. Felül: a köráram és az iránytű mágneses tere messziről szemlélve egyenértékű. Középen: az iránytű és a köráram felülnézetben, homogén mágneses térben. Alul: jobbkézes normál egységvektor.





4. ábra. Homogén mágneses térben mozgó, különböző kezdeti feltételekkel indított iránytű görbéi a fázissíkon, ahol $b = 6,25$. Lásd a módosított

$$-6,25 \cdot \sin x = \frac{d^2 x}{dt^2} \quad \text{és} \quad \frac{E}{\Theta} = \frac{1}{2} \omega^2 + 6,25 \cdot (1 - \cos x)$$

(4) és (3) egyenletet.

dukció-mérés alapja: $M_{\max} = -BAI$, ahol köráram területe A és benne I erősségű áram folyik.

A messziről azonos mágneses térű, megegyező tehetetlenségi nyomatékú, azonos kezdeti feltételekkel indított iránytű és köráram akkor mozog együtt, ha forgástengelyeikre vonatkoztatva ugyanakkora forgatónyomatékok hatnak rájuk. Emiatt érdemes bevezetni a mágneses dipólmomentumnak nevezett $\boldsymbol{\mu} = IA\mathbf{n}$ vektort, ahol \mathbf{n} az A felületre merőleges, jobbkezes, normál egységvektor és A az iránytűvel mágneses szempontból is azonos köráram határolta felület (3. ábra).

A dipólmomentummal az iránytűre ható forgatónyomaték maximális értéke $M_{\max} = -\boldsymbol{\mu}B$, általános esetben $M_x = -\boldsymbol{\mu}B \sin x$, ahol x a $\boldsymbol{\mu}$ és B által bezárt szög. Így az iránytű mozgásegyenlete:

$$-\boldsymbol{\mu} B \sin x = \Theta_d \beta. \quad (2)$$

Itt Θ_d az iránytű – a közepén átmenő függőleges forgástengelyre vonatkoztatott – tehetetlenségi nyomatéka. Ezt a fonálinga (1) egyenletével összehasonlítva, a g és B , az ml és $\boldsymbol{\mu}$, a Θ_i és Θ_d analóg mennyiségeket megtalálva látjuk, hogy mozgásuk dinamikai szempontból egyenértékű.

Az x szög függvényében írjuk fel a fonálinga E_i és az iránytű E_d energiáját! Mindkét esetben a helyzeti energia viszonyítási szintje legyen a stabil nyugalmi helyzetnek megfelelő energia [3]!

$$E_i = \frac{1}{2} \Theta_i \omega^2 + m l g (1 - \cos x), \quad (3)$$

$$E_d = \frac{1}{2} \Theta_d \omega^2 + \boldsymbol{\mu} B (1 - \cos x).$$

A fenti, analóg mennyiségeket használva látjuk, hogy a két rendszer energetikai szempontból is egyenértékű. A középiskolai oktatásban az analóg gondolkodás kiemelt jelentőségű, hiszen segíti az új szituáció megértését, egy-egy magyarázat és problémamegoldás ismert fogalmakra épülhet [4, 5].

A fenti analógiákat használjuk az x_0 kezdeti szögkitéréssel és ω_0 kezdeti szögsebességgel meghatározott energiájú mozgások elemzésére a szög-szögsebesség fázissíkon! Az (1) és (2) mozgásegyenletekkel leírt, az előbbi analóg mennyiségekkel egymásnak megfeleltetett rendszerek az alábbi egyenlettel modellezhetők:

$$-b \sin x = \frac{d^2 x}{dt^2}. \quad (4)$$

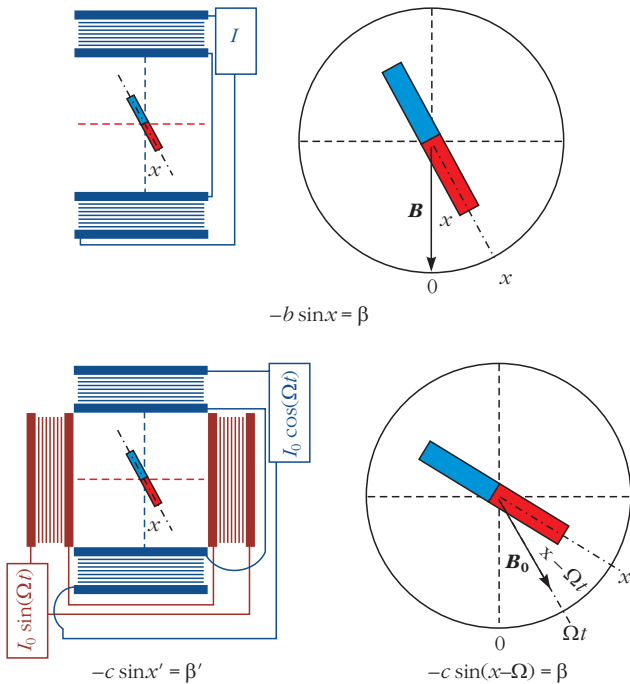
Ezt az egyenletet a *Dynamic Solver* program oldja meg, amely az x_0 , ω_0 kezdeti feltételek és a b paraméterérték megadása után Δt (dimenziótlan) időközönként kiszámítja az $x_i = x(t_0 + i\Delta t)$ és az ω_i sorozat tagjait. Itt $i = 1, 2, 3, \dots$ [6, 7]. Az $dx/dt = \omega$ a szögsebesség és $d^2x/dt^2 = \beta$ pedig a szöggyorsulás. A gondolatmenetet – az egyszerűség kedvéért – iránytűvel folytatjuk. Ez esetben (2) és (4) összehasonlításával a b paraméter $\boldsymbol{\mu} B / \Theta_d$ -vel egyenlő. A 4. ábrán b értéke 6,25.

A 4. ábra ② görbéje két tartományra osztja a fázissíkot. Ez esetben az iránytű energiája az instabil egyensúlyi helyzet helyzeti energiájával egyezik meg. A stabil egyensúlyi helyzet $2b^{1/2} = 5$ maximális szögsebességgel halad át, az E/Θ dimenziótlanított hányados értéke 12,5 lesz. Itt $b^{1/2}$ az iránytű saját körfrekvenciája. Az ennél abszolút értékben nagyobb energiájú kezdeti feltételekkel indítva az iránytű átforduló mozgást végez. Ilyenek az ① tartomány görbéi, amelyek 2π periodikusak, nem zártak.

1. táblázat

A 4. ábra görbéinek osztályozása a mozgástípusok alapján, a görbék energiája és kezdeti feltételei

tartomány/görbe	mozgás	E/Θ	kezdeti feltételek	
			x_0	ω_0
① periodikus	átfordulás	$2\sqrt{b}$ fölött $-2\sqrt{b}$ alatt	9 -9	9; 8; 7; 6; 5; 4; 3; 2 -9; -8; -7; -6; -5; -4; -3; -2
② zárt periodikus	átfordulás/rezgés	$\pm 2\sqrt{b}$	$-3\pi; 3\pi$	0
③ zárt periodikus	anharmonikus rezgés	$2\sqrt{b}$ és $-2\sqrt{b}$ között	$\pm 9; 9 - 2\pi; \frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{4} \pm 2\pi; \frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \pm 2\pi; 3\frac{\pi}{4}; 3\frac{\pi}{4} \pm 2\pi$	0
④ kör	harmonikus		$5 \cdot 2\pi/360; (5 \cdot 2\pi/360) \pm 2\pi$	0



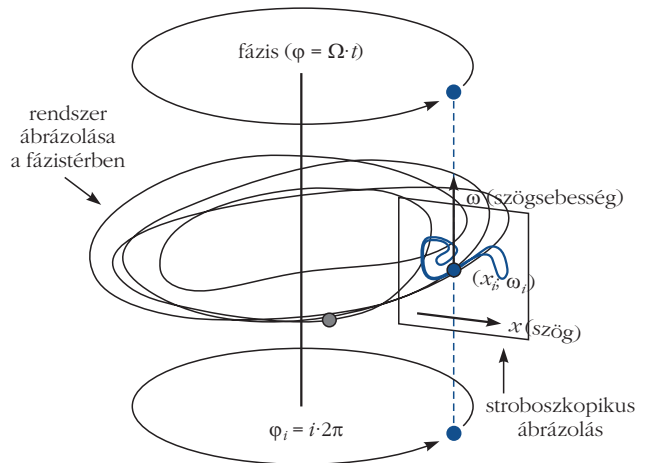
5. ábra. Iránytű felülnézeti képe homogén (föül) és forgó mágneses térben (alul).

Az iránytű rezgőmozgást végez a homogén tér körül, ha energiája kisebb, mint az instabil állapot energiája. Az ezt leíró ③ tartomány a fázissík $0, \pm 2\pi, \pm 4, \dots$ abszcisszájú és 0 ordinátájú pontjai körüli zárt görbék halmaza. A tartománybeli anharmonikus rezgőmozgásokat ellipszisek ábrázolják. Esetükben a periódusidő nő az amplitúdóval. A ④ tartományban maximum 5 fokkal, kezdeti szögsebesség nélkül indítva közelítőleg köröket kapunk. Ez a harmonikus rezgőmozgások tartománya.

Az ábrával és a hozzá tartozó 1. táblázattal a középiskolában megszokott harmonikus rezgések tartományánál jóval több mozgástípust lehet bemutatni a diákoknak és a harmonikus rezgések kivételes jellege is szemléltethető.

Íránytű csillapítatlan mozgásai forgó mágneses térben

Helyezzünk el két Helmholtz-tekercest egymásra merőlegesen (5. ábra alsó rajza)! Tápláljuk a tekercseket egymáshoz képest $\pi/2$ fázissal eltolt, ω körfrekvenciájú áramokkal: $I_0 \cos(\Omega t)$, illetve $I_0 \sin(\Omega t)$ -vel. Ezzel Ω körfrekvenciájú, forgó mágneses teret hozunk létre. Az 5. ábrán a jelölt mennyiségek (B és x a felső, míg B_0 és $x - \omega t$ az alsó ábrán) segítenek megérteni, miért lesz a tekercsek tengelyének metszéspontjába helyezett iránytű mozgásegyenlete hasonló alakú, mint amikor egyetlen Helmholtz-tekerics homogén terébe helyezzük! A rendszer dimenziótlan mozgásegyenlete:



7. ábra. A stroboszkopikus leképezés alap gondolata.

$$-c \sin(x - \Omega t) = \beta. \quad (5)$$

Az $x' = x - \Omega t$ helyettesítéssel a forgó mágneses térben mozgó iránytű mozgásegyenlete analóg lesz a homogén mágneses térben mozgó iránytű (2) mozgásegyenletével: $-c \sin x' = \beta'$. Itt $\omega' = \omega - \Omega$, $\beta' = \beta$ és $c = \mu B_0 / \Theta_d$. A tehetetlenségi erők ez esetben sugárirányúak, emiatt az Ω -val forgó koordináta-rendszerből leírt, az $(x'; \omega)$ fázistéren ábrázolt iránytű mozgásának elemzése megegyezik a nyugvó rendszerből leírt, homogén mágneses térben mozgó iránytű mozgásának elemzésével az $(x; \omega)$ fázistéren. Az egyetlen különbséget – ahogy azt a 6. ábra mutatja – az $\omega = \omega' + \Omega$ összefüggés miatti függőleges, Ω -val való eltolás jelenti.

Íránytű csillapítatlan mozgásai összetett mágneses térben

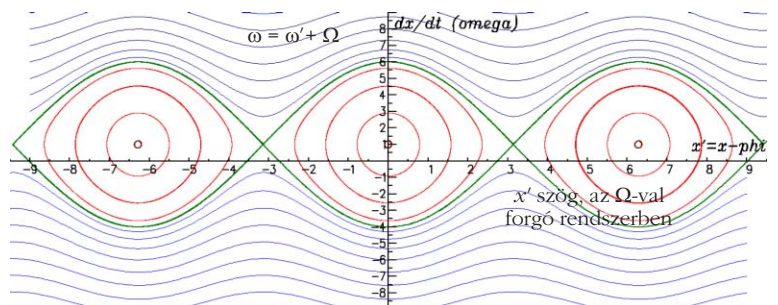
Ha a forgó mágneses teret létrehozó első Helmholtz-tekercsbe állandó áramot is vezetünk, akkor egy forgó és egy homogén mágneses teret is kapunk. Az e térben mozgó iránytű dimenziótlanított mozgásegyenlete:

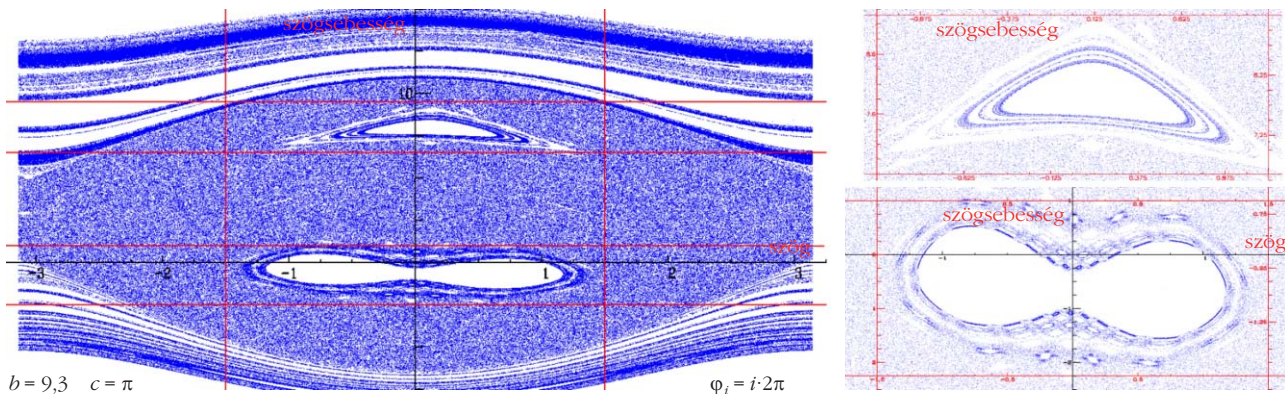
$$-b \sin x - c \sin(x - \Omega t) = \frac{d^2 x}{dt^2}. \quad (6)$$

6. ábra. Forgó mágneses térben mozgó, az 1. táblázat kezdeti feltételeivel indított iránytű görbéi a fázissíkon. A (4) és (3) egyenleteknek

$$-6,25 \cdot \sin x' = \frac{d^2 x'}{dt^2} \quad \text{és} \quad \frac{E_d'}{\Theta_d} = \frac{1}{2} \omega'^2 + 6,25 \cdot (1 - \cos x')$$

összefüggések felelnek meg a forgó térben.





8. ábra. Iránytű összetett mágneses térbeli mozgásának stroboskopikus ábrázolása ($b = 9,3$; $c = \pi$; $\varphi_i = i2\pi$).

Az iránytű mozgásainak $(x; \omega)$, $(x'; \omega)$ fázissíkbeli ábrázolásai oly nagyon bonyolult képet eredményeznek, hogy a mozgások követésére érdemes kihasználni a mágneses tér periodicitását és bevezetni a forgó mágneses tér $\varphi = \Omega t$ fázisát. Ebben az esetben az ugyanolyan fázisú pontok ábrázolásával, azaz az $(x(0); \omega(0))$, $(x(2\pi); \omega(2\pi))$, ... $(x(i2\pi); \omega(i2\pi))$ pontsorozattal írható le a mozgás, ahol i egész szám. A leképezés neve stroboskopikus, mert $2\pi/\Omega$ időközönként vesz mintát a mozgásról, amint a 7. ábrán látható.

A pontsorozat véges méretű ábrázolásához az x változó helyett a 2π szerinti maradéka mínusz π -t tüntetjük fel az x tengelyen, így a $[-\pi, +\pi]$ szögintervallumra tömöríthető a mozgás képe [7]. A 8. ábra egy összetett mágneses térbe helyezett iránytű mozgásának stroboskopikus leképezése. A megadott paraméterértékek mellett az iránytű mozgása kiszámíthatatlanná válik. Ez azt jelenti, hogy az iránytű hol a homogén tér, hol a forgó tér hatását követi [8]. A felső kinagyított tartomány a forgó, az alsó kinagyított tartomány a homogén mágneses tér körüli rezgéseket mutatja. A szögsebesség tengelyen az ábrázolt értékek $-7,5$ és 15 közöttiek. A kezdőfeltételek $x_0 = -1$ és $\omega_0 = 0$.

Iránytű csillapított rezgései összetett mágneses térben

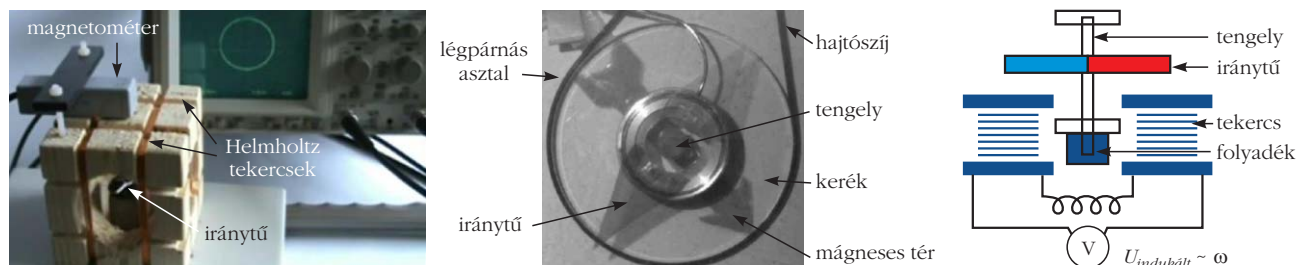
Az iránytű tengely körüli forgásból származó energia-vesztése általában nem elhanyagolható. Ennek mértéke szabályozható, ha az iránytű tengelye γ viszkozitását folyadékba merül. A folyadék fékező hatása az iránytű pillanatnyi szögsebességével arányos nyomatékkal vehető figyelembe ($a = \gamma/\Theta$), amellyel a dimenziótlan mozgásegyenlet:

$$-a \frac{dx}{dt} - b \sin x - c \sin(x - \varphi) = \frac{d^2x}{dt^2}. \quad (7)$$

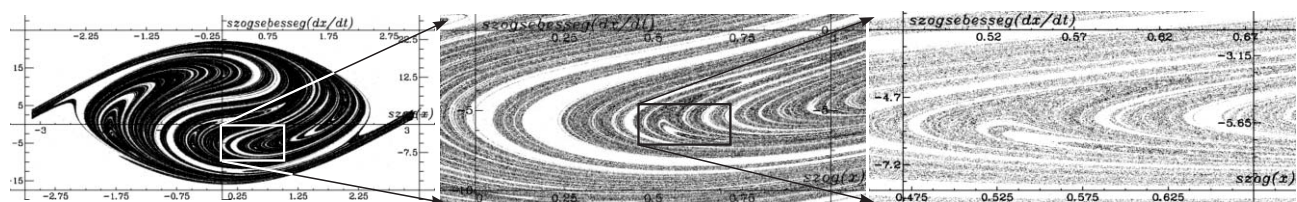
A megvalósított kísérleti elrendezések a mágneses indukció közvetlen mérésén (9. ábra, bal oldali kép), vagy nagyfelbontású kamera képanalízisen (9. ábra, középső kép), illetve az iránytű szögsebességével arányos indukált feszültség mérésén (9. ábra, jobb oldali kép) alapszanak [9–11].

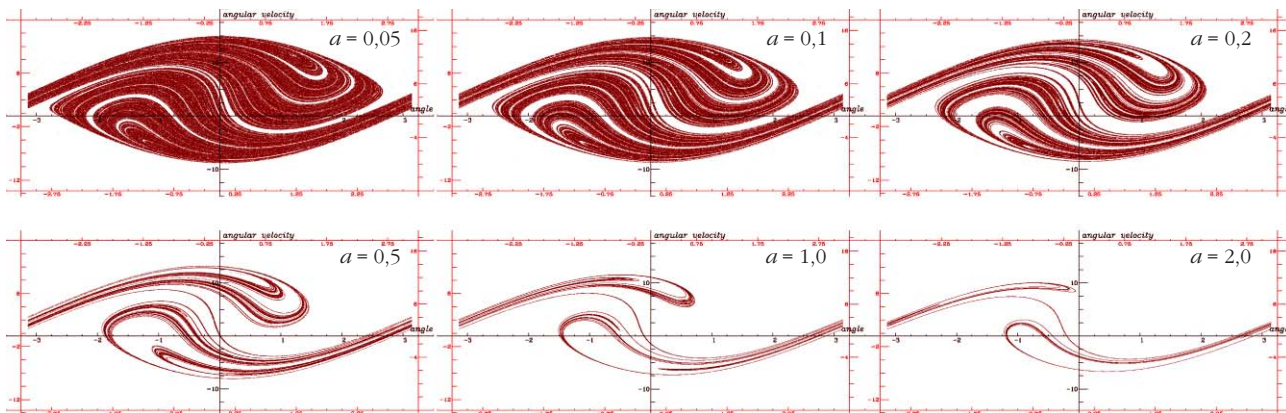
Az olyan háromdimenziós fázisterű, csillapított dinamikai rendszer mozgása, mint az összetett mágneses térrel gerjesztett iránytű, kaotikussá válhat. A kaotikus mozgásokat a kezdőfeltételekre érzékeny fá-

9. ábra. Iránytű mozgásának vizsgálata különböző kísérleti elrendezésekkel.

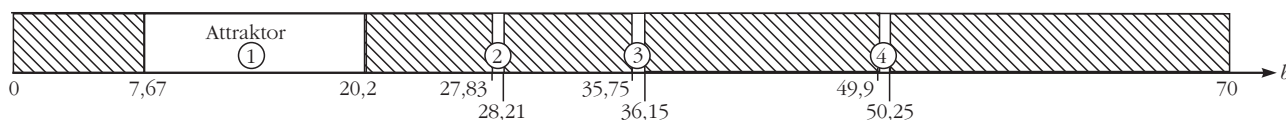


10. ábra. Kaotikus attaktor stroboskopikus leképezésén (vesztéses iránytű összetett mágneses térben).





11. ábra. A viszkozitás változtatásának hatása a strobszkopikus leképezésre ($b = 15$, $c = 15$).



12. ábra. Az álló mágneses teret jellemző b paraméter változásának hatása a kaotikus attraktor megjelenésére.

zistérbeli pályák mellett, a strobszkopikus leképezésen megjelenő kaotikus attraktornak nevezett, fraktálszerkezetű fázistérbeli halmaz is jellemzi. A kaotikus attraktor a fázistér bármely tartományából indított mozgások strobszkopikus képét magához vonzza. Ezért a mozgást tetszőleges kezdőfeltételekkel indítva, elegendően hosszú ideig követve azokat, a kaotikus attraktorhoz érünk.

Az következő ábrákon a leképezéseket az a , b , c dimenziótlan paraméterek és az $x_0 = 0,1$; $\omega_0 = 1$ dimenziótlan kezdőfeltételek megadásával kaptuk. Az abszcisszákon a szög értékei $-\pi$ és π között, az ordinátákon a szögsebességértékek a 11., 13. és 15. ábrákon -15 és 20 között változhatnak.

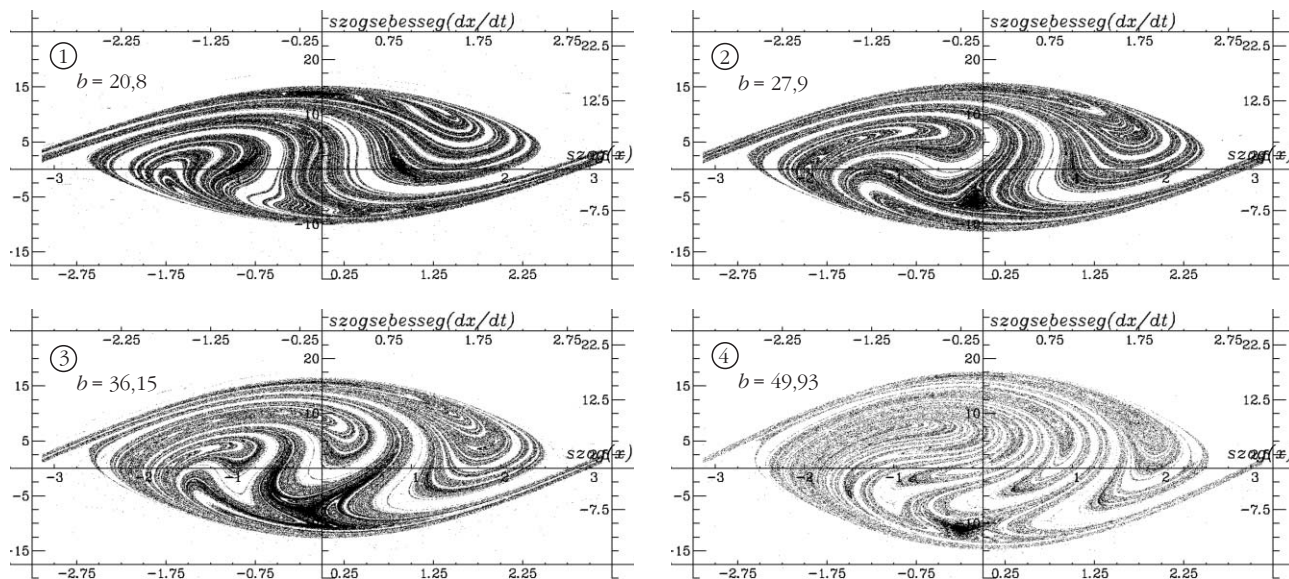
A 10. ábra kaotikus attraktort mutat az $a = 0,1$, $b = 39$ és $c = 49$ paraméterértékek mellett. A bal oldali ábra szögsebességértékei $-17,5$ és $22,5$ között vál-

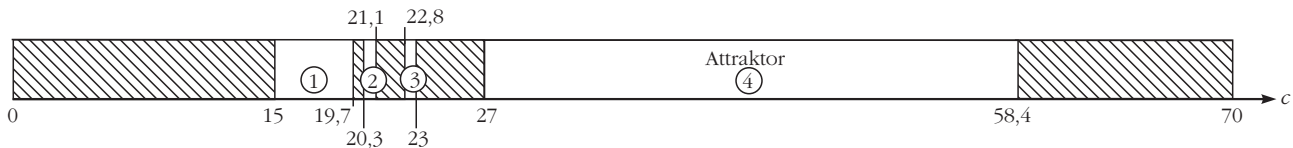
toznak. Jobbra haladva a megelőző ábra téglalapjának kinagyítása látható, jobban kiemelve az attraktor szerkezetének önhasonlóságát, azaz fraktálszerkezetét.

A 11. ábrán a viszkozitás növelésének hatását az a dimenziótlan paraméter növelése szimulálja, a b és a c paraméterértékek rögzítése mellett. Látható, hogy megjelenik az önhasonló fraktálstruktúra, majd a veszteség növelésével a kaotikus attraktor a fázissík egyre kisebb részére húzódik vissza. A veszteség növelésének hatására az attraktorhoz tartozó maximális szögsebesség értéke és a belső tartomány maximális szögének értéke is lecsökken.

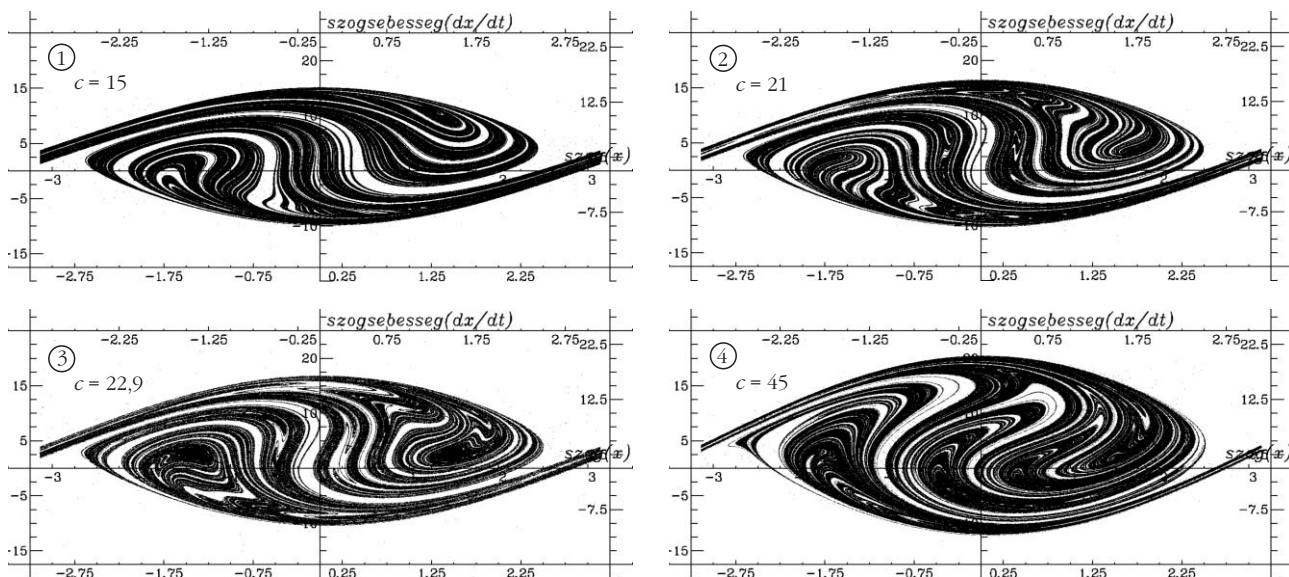
Rögzítsük a veszteség mértékét jelző a paraméter értékét $0,1$ -re és a forgó mágneses teret jellemző c paraméter értékét 15 -re! Növeljük az álló mágneses tér erősségét jellemző b paraméter értékét 0 -tól 70 -ig!

13. ábra. Kaotikus attraktorok különböző b paraméterértékeknél ($a = 0,1$ és $c = 15$).





14. ábra. A forgó mágneses teret jellemző c paraméter változásának hatása a kaotikus attraktor megjelenésére.



15. ábra. Kaotikus attraktorok különböző c paraméterértékeknél ($a = 0,1$ és $b = 20$).

Ezen mozgások stroboszkopikus képe az attraktor megjelenése alapján két csoportba osztható. A 12. ábra satírozott intervallumainak b paraméterértékei mellett nem jelenik meg kaotikus attraktor, míg az ① ② ③ ④ intervallumok b paraméterértékei mellett megjelenik az attraktor.

A $b = 0$ -tól $7,67$ -ig terjedő intervallumban, ahol a forgó mágneses tér domináns az állóhoz képest, a stroboszkopikus képen nem alakul ki attraktor. Az $7,67 \leq b \leq 50,25$ intervallumban négyszer is felbukkan a kaotikus attraktor. A 13. ábra képein e négy intervallumból választott $b = 20,8$, $b = 27,9$, $b = 36,15$ és $b = 49,93$ -nál létrejövő kaotikus attraktorok láthatók a stroboszkopikus leképezéseken. Az $50,25$ -nél nagyobb b értékekre az álló mágneses tér dominanciáját kifejező intervallum található, ahol újra eltűnik az attraktor.

A 13. ábrán látható attraktorok esetében az álló mágneses tér paraméterének $b = 20,8$ -ról $b = 49,93$ -ra növelése a $(-9; 15)$ szögsebesség-tartomány $(-15; 17,5)$ -re szélesedését eredményezi.

A 14. ábrán az $a = 0,1$, $b = 20$ paraméterértékeket rögzítve, a forgó mágneses teret jellemző c paraméterérték változásának hatása figyelhető meg $c = 0$ -tól 70 -ig. A satírozott intervallumok c paraméterértékei mellett, ahol az álló mágneses tér domináns a forgóhoz képest, nem jelenik meg kaotikus attraktor. Az ① ② ③ ④ intervallumok c paraméterértékei mellett megjelenik attraktor, majd $58,4$ -nél nagyobb c értékekre eltűnik, ahol a forgó tér dominanciája érvényesül már.

A 15. ábra képein e négy intervallumból választott $c = 15$, $c = 21$, $c = 22,9$ és $c = 58,4$ -nél létrejövő kaoti-

kus attraktorok láthatók a stroboszkopikus leképezéseken. Ez esetben a forgó mágneses tér $c = 15$ -ről $c = 45$ -re növelése a $(-9; 15)$ szögsebesség-tartomány $(-12,5; 20)$ -ra szélesedését eredményezi.

Lehetséges alkalmazások a fizika tanításában

Az iránytű mozgásának leírása mind a homogén, mind a forgó, mind az összetett mágneses térben több, pedagógiai szempontból érdekes alkalmazást tesz lehetővé, amelyet a 2. táblázat foglal össze.

A homogén mágneses térbe helyezett köráramra ható forgatónyomaték, illetve a köráram és rúd-mágnes mágneses térének azonossága a középiskolai fizikatanítás része. Ezekre alapszik a mágneses dipólmomentum bevezetése majd az inga-iránytű analógia is. Az energiamegmaradás tételén alapszik a mozgástípus és az energia összefüggésének szög-szögsebesség fázissíkbeli ábrázolása. Ez az ábrázolási mód – az absztrakt gondolkodás fejlesztése mellett – jó alkalmat nyújt a harmonikus rezgőmozgás kivételes voltának szemléltetésére és a fizika más területeinek bevonására [12]. A Helmholtz-tekercs alkalmazása lehetővé teszi e mozgások megfigyelését [9–11].

Az iránytű súrlódásmentes mozgásának leírása forgó mágneses térben elegáns példáját adja a koordináta-rendszerek közötti áttérésre. Ez jó alkalmat nyújt forgó koordináta-rendszer használatára.

Az összetett mágneses tér alkalmazása egyrészt a stroboszkopikus leképezés bevezetésére nyújt lehetőséget, másrészt a véletlenszerű iránytűmozgás feltéte-

Írányítú különböző mágneses terekben: lehetséges pedagógiai alkalmazások

CSILLAPÍTATLAN MOZGÁS HOMOGÉN TÉRBEN		CSILLAPÍTATLAN MOZGÁS FORGÓ TÉRBEN
köráram mágneses dipólmomentum Helmholtz-tekerics építése	inga-írányítú analógia mozgástípus energiafüggése szög-szögsebesség fázissík	forgó koordináta-rendszer két Helmholtz-tekerics építése
CSILLAPÍTATLAN MOZGÁS ÖSSZETETT TÉRBEN	Dynamic Solver	CSILLAPÍTOTT MOZGÁS ÖSSZETETT TÉRBEN
Véletlenszerűség	stoboszkopikus leképezés két Helmholtz-tekerics építése	determinisztikus káosz kaotikus attraktor fraktálszerkezet

leinek megkeresésével izgalmas szakköri feldolgozásra nyújt lehetőséget [8].

A kaotikus mozgások pedagógiai alkalmazásai nem előzmény nélküliek. A determinisztikus káosz, a kaotikus attraktor vagy a fraktálok vizsgálata igen kedvelt terület nem csak a fizikát kedvelők körében [13, 14]. A kaotikus attraktorok jellemzése, a káoszhoz vezető út elemzése és leírása a determinisztikus káosz kutatásának gyümölcsöző fejezetei. Az összetett mágneses térben csillapítás hatására létrejövő kaotikus attraktorok kontrollparamétereinek megtalálása – megfelelő előkészítés után, és projektmunka keretében – igazi felfedezés lehet tanár és diák számára egyaránt.

Irodalom

1. Nagy K.: *Elméleti mechanika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.
2. Tél T., Gruiz M.: *Kaotikus dinamika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.
3. R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands: *Mai fizika 5*. Műszaki Kiadó, Budapest, 1985.

4. B. France, I. Taylor: The role of models/and analogies in science education: implications from research. *International Journal of Science Education* 27/2 (2005).
5. Radnóti K.: Analógiák a fizikában és szerepük a fizika oktatásában. *Fizikai Szemle* 60/4 (2010) 131.
6. J. M. Aguirregabiria: Dynamic Solver (<http://tp.lc.ehu.es/jma/ds/ds.html>)
7. Nagy P.: *Kaotikus rendszerek szimulációja Dynamics Solver programmal*. (2014).
8. V. Croquette: *Systemes Non Linéaires et Introductions au Chaos, ESPCI Signaux et Images*. 2009.
9. F. Dijoux: *Mouvement chaotique de la boussole*. <https://www.youtube.com/watch?v=k6XdCFIPZQM>
10. A. Morvan: *Mouvement chaotique d'une boussole soumise à un champ magnétique fixe et à un champ magnétique tournant*. TIPE MP* 2010–2011.
11. P. Bergé, Y. Pomeau, C. Vidal: *L'ordre dans le chaos*. InterEditions Herman, 1984.
12. Érdi B.: Bolygórendszerek kaotikus dinamikája, *Természet Világa* (2003) 5–6. szám
13. Tél T., Gruiz M.: Káoszról kicsit bővebben, *Fizikai Szemle* 55/6 (2005) 218.
14. J. Gleick: *Káosz – egy új tudomány születése*. Göncöl, 1999. (*Chaos – Making a new science*. Viking, 1987.)

MILYEN MA EGY FIZIKAÓRA?

Radnóti Katalin
ELTE TTK Fizikai Intézet

Pályafutásom során nagyon sok *fizikaórát* látogattam meg, előbb mint főiskolai és később mint egyetemi oktató tanárjelöltek vizsgaóráit, illetve a már pályán lévő tanárkollégák bemutató óráit. Írásomban az elmúlt évek során látogatott tanórákon szerzett tapasztalataimat, azokból leszűrt megállapításaimat adom közre. Ezeket különböző felmérések adataival is kiegészítem, így együttesen a fizikaoktatás további fejlesztésének alapjait jelenthetik, illetve magam is teszek ilyen javaslatokat.¹

Becslésem szerint a tanári munka közelítőleg 70-80%-ban a tanórákból, azok megtartásából, illetve az azokra való felkészülésekből áll. Szerintem szinte minden tanóra egy kisebb *műalkotásnak* is tekinthető, így a tanári munka igazi alkotómunka! A tanárnak meg kell terveznie, hogy melyik gondolattal mennyit és milyen mélységben foglalkozzanak a diákok, hogyan induljon az óra és miként záruljon, honnan hová

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 25-én elhangzott előadás alapján készült.



*Radnóti Katalin az ELTE-n végzett kémia-fizika szakos tanárként. A budapesti Kölcsey Ferenc Gimnáziumban nyolc éven keresztül tanított. Jelenleg az ELTE Fizikai Intézetében főiskolai tanár. Kutatási területe a fizika és a természettudományok tanításának módszertana. Publikációs tevékenysége is e témához kapcsolódik, tanári segédletek, tanulmányok, könyvek, könyvfejezetek. A *Nukleon*, a Magyar Nukleáris Társaság internetes folyóirata főszerkesztője.*

Előzőleg az *Óráról órára – Fizikaórák megjegyzésekkel ellátva* című kiadvány, amely a 2017-es Fizikatanári Ankétion kiosztásra került, továbbá az alábbi webhelyeken érhető el: <http://edu.u-szeged.hu/ttkcs/publikaciok/konyvek> és <http://edu.u-szeged.hu/ttkcs/sites/default/files/Orarol-orara-r.pdf>

¹ Az MTA Szakmódszertani pályázat támogatásával azóta megjelent az *Óráról órára – Fizikaórák megjegyzésekkel ellátva* című kiadvány, amely a 2017-es Fizikatanári Ankétion kiosztásra került, továbbá az alábbi webhelyeken érhető el: <http://edu.u-szeged.hu/ttkcs/publikaciok/konyvek> és <http://edu.u-szeged.hu/ttkcs/sites/default/files/Orarol-orara-r.pdf>

jussunk el, mi legyen a sorrend, vagy esetleg párhuzamos történéseket iktatunk be (differenciált csoportmunka), és azokból áll össze az egész, mi az üzenete, honnan hová jutottunk, milyen új ismeretet szerezünk, és az mire is lesz jó nekünk stb.

A fentiekben leírtak miatt nagyon fontos ebben az *egységben* gondolkodni, és ezekhez minél több segítséget, ötletet adni a tanároknak. Ennek egyik eszköze mintegy *kiállítani* az alkotásokat, reflexiókkal, értelmezésekkel együtt, ahogy azt egy képzőművészeti kiállításon, például a megnyitón szokás.

Kiemelten fontosnak tartom az általános iskolai oktatásra való odafigyelést, mert az alapozza meg a tanulók későbbi érdeklődését, majd pedig sikerességét! Mégpedig az *alapórán*, mert ott kell a diákok érdeklődését felkelteni és utána a szakkörön. Több példa ezért általános iskolai szintű lesz. A tanórán, a kötelező tananyag érdekes feldolgozása alapozza meg az érdeklődést. A gyerek csak ezután megy délutáni foglalkozásra! Hogyan éri el tanórán a tanár, hogy a diákok részt vegyenek a szakkörökön és/vagy a versenyeken?

Óralátogatásaim során két fő megfigyelési szempontom szokott lenni:

1. Milyen mértékben képes a tanár(jelölt) *fejleszteni a tanulók gondolkodását*? Mennyire jut ez szerephez, milyen mértékben uralja a tanórát a minél több ismeret átadása, az új fogalmak, törvények memorizálása, gyakorlása?

2. Mivel a tanórákon alapvetően új információk kerülnek feldolgozásra, ezért fontos szempont az, hogy a tanár(jelölt) milyen mértékben érvényesíti a *természettudományos megismerés* alapvetéseit?

- Miként volt képes a tanár érvényesíteni a tananyaghoz tartozó *szemléletet*?
- Hogyan vezette be a tananyaghoz kapcsolódó fogalmi rendszert, miként történt a *fogalmak kialakítása*?
- Miként sikerült a fizika tantárgy *sajátos logikáját* bemutatni a tananyag feldolgozása során?
- A tanulók a tanulási folyamatban honnan indultak és hová jutottak el az adott tanórán?
- Milyen volt a *tudományos megismerési módszerek* alkalmazásának módja és eredményessége a diákok életkori sajátosságainak figyelembe vételével?
- Miként jelent meg a tanórán a tipikus természettudományos gondolkodási folyamat, mint: problémafelvetés, kérdés megfogalmazása, hipotézisek generálása és ellenőrzése, kísérletek tervezése és kimenetelük ellenőrzése, következtetések levonása és azok megfogalmazása? Különös tekintettel a *tanulói hipotézisekre* és azok felhasználására a tanítási folyamatban!

A mai pszichológiai megismerési modellek közül, pár gondolat erejéig érdemes megemlíteni az *evolúciós pszichológiát*. Ennek alapja a szelekciós tanulásfelfogás, amely szerint az emberi elmében hipotézisek vannak, és a próbálkozások eredményeiből tanulunk. Amelyik hipotézis beválik, annak kapcsolatrendszere az agyban megerősödik. A konstrukciós folyamatok során a hipotézisek már meglévő rendszere alapján építjük fel tudásunkat (Pléh, 2015).

Jelen írásban kitérek a fizika tanítása során megvalósítható képességfejlesztési lehetőségekre, elsősorban a gondolkodási képesség fejlesztésére, az alkalmazott tanulászervezési eljárásokra, a tanári szaktudás minőségére és mennyiségére, továbbá az IKT eszközök alkalmazásának gyakoriságára és módjára. Az egyes lényeges momentumokat, megfigyeléseimet konkrét esetleírásokkal támasztom alá.

A látogatott tanórákról elmondható, hogy azok határozott szerkezetet követtek. A továbbiakban ennek megfelelően emelem ki a legfontosabb gondolatokat.

A tanórák bevezető része

Az látogatott órák szinte mindegyike ismétlő kérdésekkel kezdődött. Máskor – minden bizonnyal – szóbeli felletteléssel indult volna, amelyet a látogató kedvéért mellőztek a kollégák, hogy egyik diájkukat sem kelljen (esetleg) kellemetlen helyzetbe hozni. A kérdések célja a témára való ráhangolódás volt. Az óra bevezető szakaszában alig jelentek meg gondolkodtató kérdések, feladatok, inkább csak tényszerű ismereteket vártak el a kollégák a tanulóktól. Sok esetben hangzottak el hasonló kérdések, mint például: mit tanultunk a múlt órán?

A házi feladat volt – esetleg – gondolkodtató jellegű, bár az sem minden esetben, inkább egyszerű alkalmazás, képletbe való behelyettesítést igénylő számítási feladat megoldása.

Az óra bevezető részének másik feladata a téma szempontjából fontos *előismeretek és az esetleges tévképzetek* feltárása.

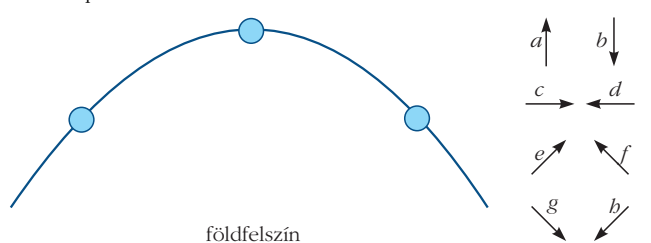
Tévképzet: a sebesség–gyorsulás keveredése

Az egyik leggyakoribb tévképzet a *sebesség–gyorsulás* fogalmak differenciálatlan volta, amely még a közoktatás évei után is gyakran megmarad. Ennek illusztrálására egy 2015 szeptemberében írt felmérés egyik, a hajítási feladat (*1. ábra*) eredményeit mutatom be.

Az adatfelvételben a felsőoktatási tanulmányaikat kezdő, az évben érettségizett, 1457 fő első évfolyamos hallgató vett részt. A teszt megoldása online módon történt. Az adatfelvétel szakoktól függetlenül minden hallgató számára egységes volt. A természettudományos teszteket 1320 fő töltötte ki.

Az *1. ábrán* megjelölt, mindhárom esetben a lefelé mutató nyíl, a *b* a jó válasz. A feladat egyes kérdéseit átlagosan 14,4%-ban oldották meg. Ezen belül az

1. ábra. Hajítási feladat, milyen irányú erő hat a testre a három kiemelt pontban?



egy esetek megoldottsága elég nagy szórást mutat, amint a 2. ábrából látható. Érdekes módon a legtöbben a legfelső pont esetében adtak jó választ.

Ebben a felmérésben a kiértékelés során nem csak azt vizsgáltuk, hogy hányan, mekkora százalékban adtak jó választ a hallgatók, hanem azt is, hogy milyen rossz válaszokat adtak. Ez azért fontos, mert így nem csak azt állapíthatjuk meg, hogy mennyien nem tudják a helyes választ, hanem azt is vizsgálhatjuk, hogy milyen típusú *tévképzetek* jelennek meg a hallgatók válaszaiban. Felismerhető-e a valamilyen konzekvens jellegű helytelen gondolkodás, amely feltárásával segíthetünk a téma oktatási folyamatának jobb megtervezéséhez a közoktatás éveit alatt.

A hallgatói válaszokból az volt látható, hogy sok hallgató *érintő irányú* erőt gondol a ferdén elhajított test parabola pályájának különböző, vagy mindhárom pontjában, amely teljes mértékben az *arisztotelészi* szemlélet. E szemlélet szerint az erő arányos a sebességgel, és a mozgáshoz, annak fenntartásához erő szükséges. Tehát az erőt a sebességgel azonos irányúnak gondolják a hallgatók. Tanulmányiak során nem jutottak el a newtoni fizika alapjait képező legfontosabb gondolathoz, hogy az erő a sebesség megváltozását okozza, iránya a gyorsulás irányával egyezik meg. Tehát, mint azt fentebb említettem, a tanulmányok során a sebesség és a gyorsulás fogalma nem differenciálódott. Ezért a gyorsulást sem tudják összekapcsolni az erő fogalmával.

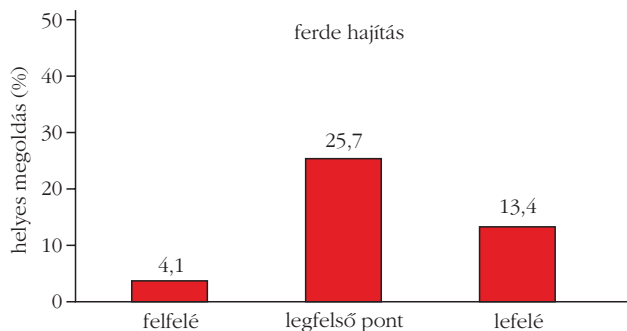
Megnéztük, hogy hány fő választotta *szisztematikusan a 3 érintő irányú vektort*, tehát az *e* (felfelé), *c* (legfelül), *g* (lefelé) nyilakat, az *ecg* válaszármasok darabszámát kerestük. Erre 303, a felmérésben résztvevők közel negyede adódott.

Megnéztük azt is, hogy hány hallgató adott jó választ egy, két, vagy mindhárom alkérdésre. Mindhárom válasz jó (mindhárom *b*), tehát tökéletes megoldása mindössze 33 hallgatónak volt, ami csupán 2,75%.

Példák az előismeretek feltérképezésére

A tanórai folyamatokra visszatérve, a 9. évfolyam mechanika tananyagának feldolgozása után a 11. évfolyamon, a rezgőmozgás tanulmányozása során is megmutatkozik a sebesség és a gyorsulás fogalmak differenciálatlan volta.

Egyik tanár elmondása szerint a kitérés-idő, sebesség-idő és gyorsulás-idő függvény elemzése során a diákok nehezen értik meg közöttük a különbséget. Különösen az utóbbi kettő okozott gondot, a kitérés ugyanis közvetlenül érzékelhető számukra, például egy rugóra akasztott test mozgásának megfigyelése során. Egy forgó lemezjátszóra helyezett papírhenger és egy hipermangánnal megfestett vízzel teli fecskendő segítségével, magával a rezgő testtel szokták kirajzoltatni a kitérés-idő függvényt. A sebesség és a gyorsulás nagyságának és irányának meghatározása azonban már gondot okoz. Az egyik tanuló egyszer rá is kérdezett, hogy a sebesség és a gyorsulás nem ugyanaz-e. A függvények részletes vizsgálata, a sebesség és



2. ábra. A hajításos feladat egyes alkérdéseinek megoldottsága, az átlag 14,4%.

a gyorsulás maximális, illetve zérus értékének megbeszélése viszont sokat segít abban, hogy a diákok többsége megértse a különbséget.

Egy másik tanár gyakorlatában – a tanulók előzetes ismereteik feltérzésére – sokszor szerepel a következő megoldás: az új téma kezdetekor minden tanuló egy kis lapocskát kap, amelyre név nélkül felírja a feltett kérdéssel kapcsolatos ismereteit, asszociációit. A lapocskák összegyűjtését követően a tanár felolvassa az osztály számára az érdekes, humoros, vagy számunkra valamilyen okból fontos gondolatokat. Majd ezt követi az adott témakör feldolgozása.

A gravitációs erőtörvény bemutatása előtt például a következő kérdést tette fel a tanár:

– Mi jut eszedbe a gravitációról?

A válaszok felolvasásakor a fizikai tartalommal kapcsolatos kulcsszavak felkerültek a táblára (vonzás, Newton, alma, bolygók között, bármilyen két dolog között). Az asszociációs feladat végére lényegében elkészült a gravitációs erő kvalitatív jellemzése.

Másik példa, a Kepler-törvények feldolgozása esetében az óra eleji kérdés a következő volt:

– Mit gondoltok, a Föld milyen alakú pályán kering a Nap körül? Kör, vagy ellipszis alakú a pálya? – majd megszavaztatta az osztályt a tanár.

Többen sejtették, hogy a pálya alakja ellipszis lehet, amelyben meg is állapodtak, és le is írták a füzetbe, de kihagytak egy kis helyet a mondat végén, mivel „oda még majd kerül valami”.

– Hol van a Nap? – hangzott el a tanári kérdés.

Erre már kevesebb jó válasz érkezett, mivel a legtöbben azt gondolták, hogy a Nap az ellipszispálya középpontjában található. És elkezdődött a Kepler-törvények feldolgozása.

Problémafelvetés, gondolkodtató kérdések, az ismeretszerzés menete, hipotézisek alkotása

Általában az ismétlődő kérdések megbeszélése után kerül sor az aznapi feldolgozandó témakörhöz tartozó problémafelvetésre, azzal kapcsolatos gondolkodtató kérdések feltevésére. Például a szabadesés tanulmányozása előtt a következő tanári kérdés hangzott el:

– Hogyan lehetne belátni, hogy a szabadesés egyenes vonalú egyenletesen változó mozgás?

Bevezető kérdés a termikus kölcsönhatás tanulmányozásához:

– Hogyan lehet a forró kávént minél gyorsabban lehűteni?

Az új ismeretek feldolgozása a legtöbb diáknak kifejezetten érdekes, ez aktivitásukban is megmutatkozik. Az általam látogatott tanárok nem egyszerűen közölték a diákokkal a „megtanulnivalókat”, hanem sok érdekes problémafelvető kérdéssel igyekeztek aktívan bevonni őket az ismeretszerzésbe, sok esetben a kutatás alapú tanulás/tanítás alapelveit követve, amelyről többször írtam e folyóirat hasábjain is. Az új anyag feldolgozása során a diákok is sokat kérdezhettek, hipotéziseket alkothattak, de nem csak a tanár által ajánlott kísérletek elvégzése előtt, hanem maguk is javasolhattak kísérleteket.

A kísérletek esetében nem a látványon volt a hangsúly – mondhatjuk, nem showelemek voltak –, hanem azok az éppen tanulmányozott fizikai elmélet alátámasztását, vagy felfedezését szolgálták. A szabadeséssel kapcsolatban a nehézségi gyorsulás értékének mérése mondható a leglátványosabbnak.

A leírt órákon a kísérletek jól elő voltak készítve: problémafelvetéssel, esetleg a mérés megtervezésével, hipotézisalkotással, majd nem maradt el a következtetések levonása sem!

A mérési adatok rendezése sok esetben a diákok által javasolt táblázatos formában történt. A következtetések levonása, a törvény megfogalmazása során a legtöbb esetben a matematikában tanult alkalmazása került előtérbe, mint egyenes, illetve fordított, vagy egyéb arányosság, grafikus ábrázolás. A grafikus ábrázoláshoz – sajnos – csak kevés esetben hívta segítségül a tanár az informatikában egyébként tananyagként szereplő Excel programot.

Az egyenes vonalú egyenletesen változó mozgás tárgyalásánál – tanulói javaslatra – az osztály a Galilei-lejtő hajlásszögének függvényében vizsgálta meg a golyók mozgását.

A tanár kifejezetten mérési eljárás megalkotását kérte a tanulóktól:

– Hogyan lehet kimérni, hogy mekkora a szabadon eső test gyorsulása?

A tanulók előzetes ismereteik alapján rájöttek, hogy a szabadon eső test útját és idejét kell megmérni és ezekből a gyorsulás már számolható.

Mágneses kölcsönhatás – egy problémafeladat

Egy 6. évfolyam számára tartott természetismeret-órán a mágneses kölcsönhatást vizsgálták a gyerekek. Megállapították, hogy a mágneses kölcsönhatás vonzásban és taszításban is megnyilvánulhat. Továbbá a tárgyaknak ehhez nem kell érintkezniük, tehát a mágnesnek sajátos környezete van. Ebből adódott már a következő kérdés:

– Hogyan lehet kimutatni a mágnes sajátos környezetet?

A gyerekek csoportmunkában dolgoztak. A tanárnő vasport osztott ki, azt egy átlátszó mappába szórva,

hogy ne ragadjon a mágnesre, és ne is szóródjon szét. A feladatot rúd-mágnesekkel kellett elvégezni, azonban a rudak közül az egyik – bár a többivel azonos módon, piros-kékre volt színezve – nem volt mágneses. A gyerekek mindkét csoportban felfedezték ezt a „kakukktortást”. És magától adódott a kérdés:

– Hogyan dönthető el egy piros-kékre festett rúdról, hogy az valóban mágnes-e?

A diákok hipotéziseket alkottak, amelyeket kísérletekkel is megvizsgáltak. Az egyik csoport gyerekei azt feltételezték, hogy a nem mágneses, de piros-kék színű rúd a mágnessel csak vonzó kölcsönhatásba tud kerülni, taszítás nem lép fel, hiszen nincsenek pólusai. Míg a másik csoportban a vasporos kimutatási lehetőség hiányára utaltak. Mindkét csoport elvégezte a saját maga által javasolt kísérletet.

Ez kiváló *problémafeladat* volt! És ebből az is látható, hogy 6. évfolyamra járó diákoktól is elvárható a hipotézisek alkotása, majd azokat kísérleti tesztelése, ily módon gyakorolhatják a természettudományos ismeretszerzés módszerét.

További példák

Matematikai jellegű hipotézist alkottak azok a 10. évfolyamos diákok, akik az Ohm-törvény tanulmányozása során azon gondolkodtak, hogy milyen kapcsolat lehet a fogyasztóra kapcsolt feszültség és a rajta átfolyó áramerősség között. A diákok – a tanárral közösen – többféle lehetőséget is felsoroltak, mint egyenes arányosság, fordított arányosság, négyzetes függés. Majd megállapodtak abban, hogy minden bizonnyal egyenes arányosság várható a két mennyiség között.

Érdekes volt, amint egy közgazdasági szakközépiskola 10. évfolyamos diákjai hangosan vitatkoztak a tanórán, amikor a tanár hipotézist kért arra, hogy a soros kapcsolás esetében az egyes ellenállásokon mekkora feszültség mérhető. Azok azonosak vagy különbözőek lesznek?

Általánosságban elmondhatom, hogy a tanulói hipotézisalkotás, mint módszer nagyon sikeresnek bizonyult mind nappali, mind pedig a levelezős hallgatók esetében, sőt és az őket fogadó mentortanároknál is. Közülük többen már akár 20-25 éve is tanítanak, bár e módszer új számukra, de saját bevallásuk szerint jól használható, hiszen aktivizálja a diákokat, akik szemmel láthatóan szívesen elgondolkoznak egy-egy fizikai jelenségről. Ez fontos mind a fizikatudásuk, mind a gondolkodásuk fejlesztése szempontjából is. Ez jelenleg csak egy megfigyelés, nincsenek mérhető, kvantitatív eredmények, így a közeljövő kutatási feladata lehet. Egy-egy módszer hatékonyságát nem könnyű mérni, hiszen az oktatás sokváltozós rendszer.

Több esetben – bár ténylegesen csak a magasabb évfolyamokon – előkerült az is, hogy a fizikai jelenségek leírásához modelleket alkotunk, sok esetben egyszerűsítő feltevéseket fogalmazunk meg. Ilyen volt például az ideális gázmodell alkalmazása a részecskék sebességének és energiájának vizsgálata során. A tanári kérdés:

– A részecskék hányad része mozog a fal felé? Milyen *feltevéssel* élünk?

Tegyük fel, hogy minden irányban (a kocka 6 határolólapjának irányában) egyidejűleg ugyanannyi részecske mozog a felületre merőleges és egyforma nagyságú sebességgel. Vagyis a részecskék 1/6-od része, amely egyben $m/6$ tömegű részecskecsomag, repül v sebességgel egy-egy fal irányába...

Több, általam látogatott, az optikai képalkotást bemutató óra jellegzetessége volt az a gondolatmenet, amelynek követésével a diákok korábbi ismereteik és a nevezetes sugármenetek felhasználásával a tanári kérdések segítségével mintegy rájöttek, hogy melyik eszköznek milyen képalkotási lehetőségei vannak. Ezeket – az elméleti fejtegetések után – mintegy igazolásképp meg is nézték tanári bemutató kísérlettel. A diákok szép analógiákat is felállítottak a megfelelő tükrök és lencsék képalkotásai között.

A természet tanulmányozásához és a természettudományok tanulásához alapvetően fontos az *analóg gondolkodás*, annak fejlesztése több esetben is előkeült. Például az időmérés lehetőségei a különböző mozgások tanulmányozása során, az elektromos és mágneses mező leírásához alkotandó fogalomkészlet esetében (vektoriális leírás, \mathbf{E} és \mathbf{B} vektorok, próbatestek), a különböző lencsék és tükrök képalkotása között...

A tudománytörténet megjelenése a tanórákon

A fizika az egyetlen olyan tantárgy, amelynek érettségi követelményei között tételelesen megjelenik a tudománytörténet. A fizika kialakulása és fejlődése szempontjából legfontosabb tudósok életéről és munkásságáról, annak időbeli elhelyezéséről a diákoknak tudniuk kell. Így ez kiemelt téma a fizika tanítása során, amelyet minden lehetséges helyen feldolgoznak.

A diákok több órán kisebb időutazásban vehetnek részt, például *Galilei* korában „járhattak” a 7. és a 9. évfolyamok diákjai, amikor az egyenletesen gyorsuló mozgásról és a szabadesésről tanultak. Az egyik órán a Galilei-lejtő alkalmazásával fedezték fel a diákok a négyzetes úttörvényt.

Egy fakultációs foglalkozáson az Univerzum mai alapjainak megértéséhez vezető utat járták végig a tanulók. Ebben egyik fontos szereplő (*Henrietta Leavitt*) eredeti mérési adatait is tanulmányozták a diákok.

Kepler 3. törvénye – tippelőlapos csoportfoglalkozás

Egy másik órán *Keplerhez* nyúltak vissza a róla elnevezett törvények tanulása során.

Az óra egy közel 15 perces részében *Kepler 3. törvényének* mintegy „felfedezése” történt meg a diákok csoportos tevékenysége segítségével Kepler nyomán.²

A diákok – az egymás mellett ülő tanulók – négy fős csoportokat alkottak. A tanár a Naprendszer 4

² A leírt kutatás alapú feldolgozás *Vitkóczy Fanni* órája alapján készült.

bolygójának relatív távolság- és keringési idő-adatait – csillagászati egységben és földi években – adta oda a különböző csoportoknak.

Ezt követően a tanár úgynevezett „tippelőlapokat” osztott ki, amelyen különböző, matematikai formában megfogalmazott, lehetséges kapcsolatot adott meg bolygók nagytengelyei és keringési ideje között. Ezzel utalt arra, hogy Kepler csak sejtette, hogy lehet valamilyen, matematikai formában megragadható összefüggés a bolygók fenti adatai között, hiszen ő azokat elméleti úton még nem tudta levezetni. Valószínűleg több lehetőséget próbált ki, míg ráakadt a harmadik törvényre.

A tanár által adott tippek a következők voltak:

a) $a^3 \cdot T^2$ b) $a^2 \cdot T^3$ c) a^3 / T^2 d) egyik sem.

A diákok először tippeltek. A legtöbben a c) lehetőségre szavaztak. Majd a tippelést követően, a megadott adatokkal el kellett végezni a számításokat. A tanár azt kérte, hogy a 4 fős csoporton belül a következő legyen a munkamegosztás:

- mindenki válasszon ki egy bolygót, és arra számítsa ki mindhárom felírt lehetséges matematikai kapcsolatot, az a), b) és c) lehetőséget,
- majd a csoporttagok nézzék meg a kapott értékeket, és vizsgálják meg, hogy melyik számított érték lesz közel azonos minden csoporttag, vagyis mind a 4 bolygó esetében.

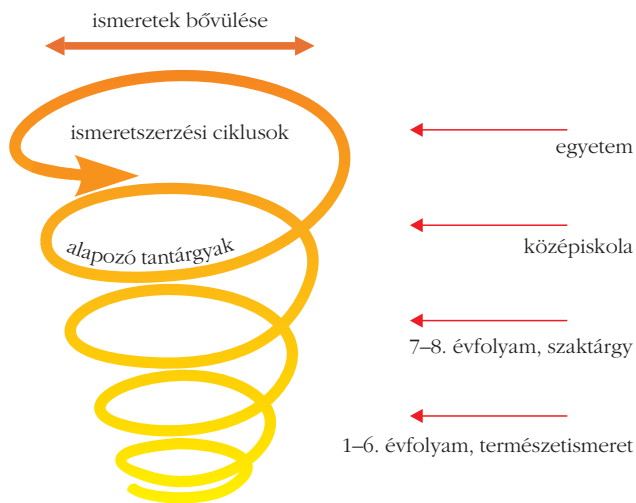
Ezt követően megnézték, hogy az egyes csoportok esetében kapott értékek ténylegesen közel azonosak lettek minden csoportnál. Így megállapították, hogy a jó matematikai kapcsolat a c). Majd a tanár lediktálta a törvényt.

Az órának ez a része a kutatás alapú tanulás/tanítás alapfogolatainak tanórai alkalmazására is példát mutat.

A fenti példák azért is érdekesek lehetnek, mert egy-egy tudóssal kapcsolatban nem csak azt lehet elmondani, hogy mettől meddig élt, és konkrétan mit is fedezett fel, hanem gondolatmenetébe is bele lehet helyezkedni, mintegy átérezni a tudományos problémát, végigcsinálni azokat a lépéseket, vagy legalább is egy részét, amelyeket az illető is megtett. Ezzel a diákok azt is látják, hogy a tudomány művelése emberi tevékenység, amely közelebb hozhatja számukra a tudomány eredményeit is. Nem csak egy megtanulandó tétel lesz számukra.

IKT eszközök használata

Az IKT eszközök, elsősorban a számítógép alkalmazása visszafogott volt, nem uralta egyik esetben sem a tanórákat, de amikor használta a tanár, akkor az ott fontos volt. Például érdekes képek, videók, animációk (Daniell-elem) bemutatása során. De szimuláció alkalmazására is sor került (Gay-Lussac II. törvénye). Volt, amikor a diákok saját mobiltelefonjukat is használhatták, elsősorban időmérés céljára. De volt, hogy fényképeket készítettek vele. Az Excel program alkalmazására sajnos csak fakultációs órák példa van.



3. ábra. A fogalmi fejlődés csigaházmodellje.

Több szintű feldolgozási lehetőség bemutatása

Fontos, hogy a különböző szinten tanító kollégák lássák, a fogalmak miként fejlődnek, alakulnak a közoktatás teljes időszakában. A fogalmi fejlődés menetét jelképezi a csigaházmodell, ami szerint az oktatás évei alatt a diákok ismeretei egy-egy témakörrel kapcsolatban folyamatosan bővülnek. A fizikában tanított legtöbb témakör több szinten is előkerül: a természetismeret tantárgy keretein belül, majd az általános iskolai évfolyamokon, majd a középiskolában, és végül – a műszaki-természettudományos pályán továbbtanulóknak – sokkal részletesebben a felsőoktatási éveik alatt. A fogalmi fejlődés nem csavarvonal mentén halad, hanem egy bővülő csigaházhoz hasonlítható (3. ábra).

A fogalmi bővülésre példaként a mágneses jelenségek tárgyalása szolgált. Egy 6. és egy 10. évfolyamos tanórai feldolgozást látogathattam meg.

Érdekes volt megfigyelni, hogy miként kerültek elő szinte ugyanazon kérdések, és azokra milyen válaszok születnek. Szépen látható volt, hogy a 6. évfolyamon a sok egyszerű megfigyelés és kísérlet dominált. A felvetődő kérdésekre kvalitatív válaszok születnek. A 10. évfolyam tanulóinak már sokkal több előismerete volt. Ennek ellenére a 6. évfolyamos tanulókhöz hasonló tévképzet jelent meg: minden fém mágneses tulajdonságokat mutat. A leírás már nem csak kvalitatív módon történt, hanem megjelent a fizika jellegzetes kvantitatív, matematikai segédesszközöket igénylő leírásmódja is. A mezők erősségének jellemzéséhez próbatesteket és vektorjellegű mennyiségeket konstruálunk.

Kapcsolódás más tantárgyak ismeretanyagához

A fizika leíró nyelve a matematika, így értelemszerűen a legtöbb kapcsolódás a matematikai ismeretek alkalmazásában nyilvánult meg, mint összefüggések, fizikai törvények matematikai megfogalmazása, grafiko-

nok készítése, egyenes, fordított, illetve egyéb arányosságok használata, egyenletek felállítása, egyenletrendezés. Ezen ismeretek készesszintű alkalmazása nem volt problémamentes, különösen az egyenletrendezés jelentett gondot.

Komoly probléma, hogy amíg a matematikában általában csak az x és y betűket használják a kiszámítandó, ismeretlen mennyiségek jelölésére, addig a fizikában az egyes fizikai mennyiség betűjele használatos. A kiszámított eredményeket össze kell vetni a tényleges tapasztalattal, annak realitását vizsgálni kell, hiszen nem biztos, hogy a matematikailag jó megoldás fizikai realitással is bír.

Néhány témakörben – például a folyadékok tanulmányozásakor – kémiai jellegű ismeretek is előkerültek. Az optika esetében, a lencsék és a szemüvegek témakörében adódik a kapcsolat a biológiával.

A tudománytörténeti részek a történelem tantárgyhoz jelentenek kapcsolódási lehetőséget.

Milyen volt az órák hangulata?

Az órák hangulata általában jó volt. Úgy látszik, a diákok szívesen vesznek részt olyan tanórákon, amelyeken „történik valami”, izgalmas szellemi kalandokban van részük. A legtöbb, általam látogatott óra olyan volt, ami megmozgatta a diákokat. Sok tanári és tanulói kérdés és válasz hangzott el, kísérleteztek, a diákok gondolkodtak, számoltak, beszélgettek a fizikai jellegű témákról. A tanárok változatos módszereket alkalmaztak. A legtöbb esetben ugyan frontális osztálymunka folyt, de az nem tanári előadást jelentett, hanem általában az osztály és a tanár beszélgetését az adott témáról. Az órák egy részében a diákok csoportos tevékenységére is sor került – főleg, de nem kizárólag kísérletezés kapcsán. Találkoztam csoportmunkás feladatmegoldó, gyakorló, ismételő órával is.

Felmerül a kérdés, hogy a jó tanórai hangulat és érdeklődés után később, a témakörből írt dolgozatok miként sikerültek? Az óralátogatásokat követően erről is tájékozódtam, és az eredmények változóan mondhatók. Vagyis az, hogy egy-egy tanóra, vagy akár a tanórák többsége jól sikerültnek nézett ki, még nem biztosította, hogy az abban résztvevő tanulók képesek voltak jól megtanulni, elsajátítani az adott tananyagot. Úgy látszik, ez egyáltalán nem egyszerű kérdés.

Miért nehéz a természettudomány tanulása?

Idézzük *Pléh Csaba* gondolatait, aki a következőket írja:

„A felidézést a séma irányítja, a sémák közül pedig a legkitüntetettebb az *elbeszélő séma*. Úgy tűnik, hogy *történeteket sokkal könnyebb felidézni*, mint például tájleírásokat.”

„Történeteket mindig könnyebb felidézni, mindig egyetemesebbek, mindig világosabb mintázatot ad-

nak. Egy tankönyvi történet, amikor visszaadjuk, sokkal kevésbé válik zavarossá, mint egy leírás, vagy magyarázat.” (Pléh, 2015, 88. oldal).

A leírt órák jó hangulatúak voltak, a diákok látszólag meg is értették a legfontosabb összefüggéseket. DE a dolgozatban is olyan jól tudták-e visszaadni a tananyagot, mint azt a tanórai aktivitás alapján várni lehetett? Hát! Sok éves tanári pályafutásom nem ezt igazolja. A dolgozatokban megjelenő sok tévképzet mintha inkább Pléh Csaba állítását igazolná! Sok dolgozatban keverednek a helyes és a helytelen elemek, amelyeket egyik régi szakdolgozóm „kavalkádmondat”-oknak nevezett el.

Pléh Csaba gondolatainak kiterjesztésével továbbfolytathatjuk a példák sorát. A levezetések, matematikai tételek, fizikai és kémiai ismeretrendszerek, amelyek leírásokból és matematikai formában megfogalmazott törvényekből, magyarázatokból állnak, a diákok számára sokkal nehezebben tanulhatók, mint például egy elbeszélés vagy regény cselekménye, vagy az abban leírt emberi történetek, sorsok.

Akkor egyáltalán miért vannak olyan emberek, akik az ilyen jellegű megfontolásokat szeretik? Hányan lehetnek ők, illetve a népesség hányad részét teszik ki? Lehet, hogy ezen emberek a megfelelő tulajdonságot jellemző Gauss-görbe egyik szélét képviselik?

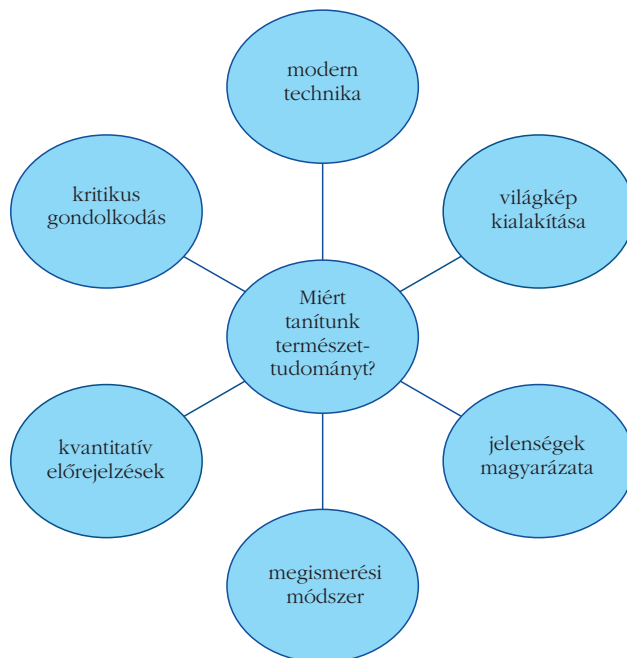
További kérdés, ha ez így van, akkor miért erőltetjük rá mindenkire az ilyen típusú gondolkodást? Lehet, hogy a tantervi változások során azért szorul egyre inkább háttérbe a természettudomány, különösen a kémia és a fizika, mert az emberek jelentős része gondolkodásának a természettudományos leírások és magyarázatok nagyon nehezek és idegnek? A fizika és a kémia a legkevésbé kedvelt tantárgyak, pedig technikai környezetünkben nem lehet elhagyni a természettudomány és azon belül a fizika minimális szintű ismeretét. Azért, hogy az elkövetkezendő években, évtizedekben is élvezhessük a technika vívmányait, sok és egyre több embernek kell foglalkozásszerűen művelnie e területeket. De honnan tudjuk, hogy kik lesznek alkalmasak? Ennek kiderítésére csak egyetlen lehetőség van: tanítani kell a természettudományt az iskolában. Meg kell mutatni a diákoknak, hogy a narratíván kívül másféle gondolkodásmód is létezik, és akiknek ez tetszik, jelentkezni fognak szakkörökre, versenyekre, továbbtanulásra.

Tehát a természettudomány tanulási/tanítási céljai a következők lehetnek (4. ábra):

- az emberiség történetének része, kultúrkinccs,
- mai technikai világunk alapja, melyről nem szeretnénk lemondani,
- ezért van szükség olyan emberekre, akik értenek hozzá.

És ennek tudatában hogyan tanítsuk a természettudományt?

Lehet, hogy jobban kellene hangsúlyozni a tudósok, a felfedezők élettörténetét? Miként is jutottak el a felfedezésig, mi történt velük akkor, hogyan élték



4. ábra. Miért tanítunk természettudományt?

meg, hogyan fogadták stb. A felfedezés miként hasznosult például a többi ember életére, milyen hatással volt akkor, illetve a későbbiekben?

Emberi történetekbe kellene mind jobban ágyazni a fizikai és a kémiai ismereteket! Mind a felfedezések, mind a mindennapi élet vonatkozásában. Ezért fontos és jó a szűken vett fizikatanítás szempontjából is, mivel egyedülként a fizika tantárgy érettségi követelményei között szerepel hangsúlyosan a legfontosabb tudósok élete és munkássága! Ezt lehetne még hangsúlyosabbá tenni.

A biológia talán azért kedveltebb tantárgy, mert jobban kötődik az emberhez? Például mit eszünk, növények, állatok, házi kedvencek, betegségek, gyógyítás stb.

Néhány gondolat a NAT-ról

A NAT, mint tudjuk, tíz műveltségi területet tartalmaz, amelyek közül csak egy a természettudomány, ami ténylegesen három nagy tudomány iskolai leképeződése, három tantárgyat jelöl, ezek a fizika, a kémia és a biológia. A többi esetben elmondható, hogy egy műveltségi területet szinte egy tantárgy fed le. Ez így teljesen *aránytalan!*

Javaslatom szerint kevesebb műveltségi területet kellene alkotni az egyébként is aktuális újragondolás során! A többit is össze kellene vonni! Például a következő nagy területek képzelhetők el, mint

- művészetek (rajz, ének-zene, irodalom),
- kommunikáció (nyelvek, benne a magyar nyelvtan is),
- technikai jelrendszer (matematika, informatika),
- ember és természet (fizika, kémia, biológia, természetföldrajz),

• ember és társadalom (történelem, állampolgári és jogi ismeretek, társadalomismeret, etika, filozófia stb.).

Természetesen más csoportosítás is lehet, egy műveltségi területbe kerülhetne az irodalom és a történelem, hiszen e két tantárgy szoros kapcsolatban van egymással.

Azt gondolom, hogy a *természettudományos nevelés újragondolására*, nem csak önmagában, hanem a *többi műveltségi területhez való viszonylatában* is feltétlenül szükség van, hiszen a magyar tanulók teljesítménye a különböző nemzetközi összehasonlításokban fokozatosan romlik.



Összefoglalóan: jelen írásban két fő megfigyelési szempont alapján mutattam be napjaink fizikaóráinak jellegzetességeit, ezek a gondolkodásfejlesztés és a természettudományos megismerés. Az elemzés kapcsán néhány jellegzetes tanulói tévképzetet vizsgáltam.

Végül a természettudomány tanulásának lehetséges nehézségei kerültek elő, befejezésül néhány javaslatot tettem.

Irodalom

Pléh Csaba: *A tanulás és gondolkodás keretei*. Typotex, Budapest, 2015.

Érettségi követelmények http://www.oktatas.hu/koznevelés/erettségi/altalanos_tajekoztatás/vizsgatargyak_2017tol – utolsó letöltés 2016. május 25.

Radnóti Katalin, Adorjánné Farkas Magdolna: Mit tanítsunk fizikából az általános iskolában? *Fizikai Szemle* 60/3 (2010) 84–91. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1003/FizSzem-201003.pdf>

Radnóti Katalin, Adorjánné Farkas Magdolna: A fizika tanításához szükséges tanári tudás rendszere I. – II. *Fizikai Szemle* 62 (2012) 11. szám. 391–395. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1211/FizSzem-201211.pdf> és 12. szám. 422–425. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1212/FizSzem-201212.pdf>

Radnóti Katalin, Adorjánné Farkas Magdolna: A kutatás alapú tanulás lehetőségei a fizikaórán. *Fizikai Szemle* 65/6 (2015) 198–204. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1506/FizSzem-201506.pdf>

HÍREK – ESEMÉNYEK

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT TISZTÚJÍTÓ KÜLDÖTTKÖZGYŰLÉSE

2017. május 13-án az Eötvös Egyetem lágymányosi épületében tartotta az Eötvös Loránd Fizikai Társulat tisztújító küldöttközgyűlését. Az esemény hivatalos megkezdése előtti hagyományos előadást *Szabó Róbert*, az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont tudományos igazgatóhelyettese tartotta, *Nap-típusú oszcillációk: pillantás a Nap és a csillagok belsejébe* címmel.

Az előadást követően *Patkós András*, a Társulat elnöke nyitotta meg az ülést. Megállapította, hogy a

Szabó Róbert a csillagok belsejébe pillant.



küldöttközgyűlés határozatképes, a 72 szavazati joggal rendelkező küldöttből 61 megelelt.

Patkós András – elnökségének időszakára visszatekintve – elmondta, hogy a Társulat társadalmi tekintélye, hála tagjai koherens tevékenységének, növekedett. Az ELFT igyekszik a fizika képét bemutatni a társadalomnak. Nincs olyan, társadalmat körülvevő jelenség, amelyet fizika nélkül lehetne értelmezni; fizikára, fizikatanárokra, fizikusokra szükség van. A fizika, a fizikai törvények az emberiség kultúrájának is nélkülözhetetlen részei. A fizikatanárok és a fizikával foglalkozó kutatók egyetértenek abban, hogy csak közös erővel lehet előrébb jutni. Három évvel ezelőtt indították el *A Fizika Mindenkié* rendezvénysorozatot, és azóta is minden évben, növekedő érdeklődés mellett, az egész országra kiterjedően megszervezik. Idén 54 helyszínen kutatók, felsőoktatási intézményekben dolgozók, tanárok – a laboratóriumoktól a szabadtéri rendezvényekig – kapcsolatba léptek a programokon résztvevőkkel, szórakozást és ugyanakkor tanulságot nyújtottak számukra. A kezdeményezés az elnökség két tagja, *Fábián Margit* és *Cserti József* nevéhez fűződik, akik egyre meggyőzőbben tudnak bevonni ipari partnereket is.

Bevezették a Társulat elnökségének havonkénti üléseit, ezeken meghatározták azokat a problémákat, amelyekkel kapcsolatban a Társulat véleményt kívánt

nyilvánítani. Ilyenek voltak – egyebek között – az OTKA intézményének az állami innovációs mechanizmusba történő beolvasztása, ami a kutatás feltételeinek megváltoztatásával járt együtt; vagy a szakgimnáziumok természettudományi oktatási programjának radikális átalakítása. A kutatást és oktatást érintő alapvető tudománypolitikai kérdésekben, amelyekhez a Társulat ért igazán, a résztvevők számára lehetővé tették a véleménynyilvánítást. A legmagasabb szintű állami vezetéssel folytattak párbeszédet és az ELFT mindig közzétette az álláspontját.

A Magyar Fizikus Vándorgyűlésen a témák megválasztásával sikerült elérniük, hogy a közoktatásban gyakorló tanárok és kutatók zsúfolt termék előtt beszélhettek a fizika oktatásában és kutatásában elért eredményeikről. A Vándorgyűlésben megnyilvánult a fiatalok felé nyitás szándéka és az erre kapott pozitív válasz. Valamennyi Lendület- és ERC-pályázat nyertese képviseltette magát egy-egy előadással. A külföldön dolgozó kollégák közül is 18-an megtisztelték részvételükkel a rendezvényt. Ezen kutatók Társulathoz való vonzása a magyar tudomány létérdeke, és ennek elősegítésében a Vándorgyűlés példaértékű rendezvénynek mondható.

Patkós András felköszöntette *Mészáros Sándort*, az ELFT tagját 90. születésnapja alkalmából. Mészáros Sándor vegyész- és elektromérnök, az Egyesült Izzó (Tungstam) világhírű magyar gyárban dolgozott, továbbá tanárként, oktatóként is tevékenykedett. A Vákuumfizikai, -Technológiai és Alkalmazásai, valamint a Középszintű Oktatási Szakcsoport tagja. Az 1970-es évek végén az általa készített berendezést használták egyetemeken, kutatóintézetekben az elektron-diffrakció demonstrációjára.

Az elnök elmondta továbbá, hogy a Társulat kommunikációjában is sikerrel léptek előre, mint ahogyan ezt a *Fizikai Szemle* átalakulásának lépései is mutatják. A *Fizikai Szemle* folyamatos, stabil megjelenése a szerkesztést végző csapat felelőssége. 2008-ban *Németh Judittól Szatmáry Zoltán* vette át a főszerkesztői feladatokat, és majd 10 éven át, egészen mostanáig a *Fizikai Szemle* főszerkesztőjeként biztosította a stabilitást. Egyre magasabb színvonalon jelentek meg a cikkek, és

A közgyűlés a 90 éves Mészáros Sándor anekdotáját hallgatja.



Patkós András elnöksége időszakára emlékszik vissza.

az elektronikus megjelenésnek köszönhetően az írásokat kiegészítő videók. Szatmáry Zoltán azt kérte, hogy egy évtized után a főszerkesztői munkát abbahagyhasa. *Szatmáry Zoltán tevékenységét a Társulat elnöksége Eötvös Plakett adományozásával ismeri el.* A *Fizikai Szemle* júniusi számától kezdődően *Lendvai János* egyetemi tanár fogja ellátni (szerkesztői munkája mellett) a főszerkesztői feladatokat is.

Az ELFT-nek – a *Szemle* mellett – az egyik legnagyobb hatású kommunikációs csatornáját képezik *Moróné Tapody Éva* hírlevelei, amelyeknek legutóbb a 986. száma jelent meg. A hírlevelek működtetésének elismeréseként *Moróné Tapody Évának a Társulat elnöksége Eötvös Plakettet adományoz.*

A Társulat versenyei tanári, bírálói apparátust mozgatnak, jelentős költségekkel járnak együtt és emiatt időről-időre veszélybe kerülnek. *Zimányi Gergely*, a kaliforniai Davis Egyetem professzora, az Eötvös Loránd Tudományegyetem egykori diákja, aki korábban Ortway- és Eötvös-versenyt is nyert, tavaly októberben 2,1 millió forint összegű adományt ajánlott fel az Eötvös Loránd Fizikaverseny és az Ortway Rudolf Fizikai Feladatmegoldó Verseny támogatására. E támogatásnak köszönhetően a két versenyt a Társulat 3 évig anyagi gondok nélkül tudja működtetni. A Társulat Eötvös Plakettet adományozhat többek között annak

Az Eötvös Plakettel frissen kitüntetett Moróné Tapody Éva.





Szavaz a közgyűlés, Pónya Melinda írja a jegyzőkönyvet.



Pántyáné Kuzder Mária alelnök az új levezető elnök.

a személynek is, aki társadalmi munkában, vagy egyéb módon rendkívüli mértékben nyújt segítséget a Társulat célkitűzéseinek megvalósításához, így az *elnökség Zimányi Gergely adományát Eötvös Plakettel ismeri el.*

A Társulat kezdeményezte *Marx György* születésének 90. évfordulóján, 2017. május 25-én emléktábla elhelyezését egykori lakóhelyén, a XI. kerület Lágymányosi utca 20. szám alatti ház falán. Az elnök köszönetét fejezte ki, hogy az emléktábla elkészítési költségeinek fedezésére közel 100 személytől 1 millió forintot meghaladó adomány érkezett a Társulathoz. A fentiek is mutatják, hogy a Társulathoz függetlenednie kell a politikai szelekkel változó pályázati rendszerektől, a társulati tagok tarthatják fenn az ELFT működését.

Az Elnökség áttekintette a területi és a szakcsoportok működését. Kemény véleményt megfogalmazó leveleket küldtek egyes, nem az Alapszabálynak megfelelően működő területi csoportoknak, amelyekre általában pozitív válaszok érkeztek:

- A Vas Megyei Területi Csoport 2016 márciusában újjáalakult.

- A Komárom-Esztergom Megyei Csoportban is megtörtént a tisztújítás.

- A Pest Megyei Csoport, *Seres Istvánnak*, a Fizikatanári Ankét egyik fő szervezőjének visszajelzése szerint újjáalakulását tervezi.

- A Zala és a Jász-Nagykun-Szolnok Megyei Csoportoktól is pozitív választ kaptak.

A Társulat az UNESCO Magyar Nemzeti Bizottságánál kezdeményezte, hogy 2019-ben Eötvös Loránd halálának centenáriumi évéről az egész világ az UNESCO védnökségével emlékezzen meg és 2019-et Eötvös Loránd Évének nyilvánítsa. A Magyar Geofizikusok Egyesülete, a Magyar Turista Egyesület és egyéb társadalmi szervezetek csatlakoztak az ELFT kezdeményezéséhez. *Balog Zoltán* miniszter hivatalosan előterjesztette az UNESCO Végrehajtó Bizottságához a magyar javaslatot, amelyről az UNESCO általános közgyűlése novemberben hozza meg – minden valószínűség szerint pozitív – döntését. Így várhatóan jövő januárban megalakulhat az Eötvös Évet előkészítő bizottság. Eötvös Loránd személye a leginkább

méltó erre a felterjesztésre: kiemelkedő tudós, kiemelkedő pedagógus és kiemelkedő politikus.

Patkós András elnök végül megköszönte a küldöttközgyűlés elnökség iránt tanúsított bizalmát, az elnökség tagjainak eddigi munkáját. Örül annak, hogy közülük sokan folytatják a munkát, és a küldöttek támogatását kérte ehhez. Megköszönte a leköszönő *Kürti Jenő* és *Cserti József* alelnöki, *Heitler Krisztina* Felügyelő Bizottság vezetői és *Szabó István* Felügyelő Bizottság tagként végzett munkáját. Az elnöki beszámoló befejezésekként pozitív, élményekben gazdag elnökségi periódust kívánt a következő elnökségnek.

A küldöttközgyűlés napirendjének elfogadása után Patkós András felkérte *Pántyáné Kuzder Mária* alelnök asszonyt, hogy vegye át a levezető elnöki feladatot. A küldöttközgyűlés elfogadta Szatmáry Zoltán, a *Fizikai Szemle* főszerkesztője lemondását. A küldöttközgyűlés ugyancsak egyhangúlag fogadta el, hogy Lendvai János a *Fizikai Szemle* szerkesztői és főszerkesztői feladatkörét egy személyben lássa el.

Ezután a főtitkári beszámolóra és az ELFT 2016. évi költségvetésének, 2017. évi költségtervének és közhasznúsági jelentésének ismertetésére került sor *Újfalussy Balázs* főtitkár előadásában. A főtitkár elmondta, hogy a közhasznú tevékenység négy alapcél köré szerveződik.

A kivetítőn a főtitkári beszámoló, Újfalussy Balázs magyarázza.



A tudományos tevékenység és kutatás területén a tudományos eredmények közzétételének, azok megvitatásának színteret adó tudományos konferenciák, iskolák, előadóülések, valamint más tudományos rendezvények szervezése és lebonyolítása a Társulat feladata. Így került megrendezésre például a *Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam* (202 fő részvételével), a *Statisztikus Fizikai Nap*, a *Fizikus Doktoranduszok Országos Konferenciája* (DOFFI, 32 fő), a *Részecskefizikai Szeminárium*, a *STINT svéd–magyar együttműködési workshop* (38 fő). Ide sorolhatók a területi és szakcsoportok által szervezett előadások, bemutatók, kiállítások is, mint például: *Egy Kis Esti Fizika*, *Kutatók Éjszakája*, *Szkeptikus Konferencia*, *Fizikus Napok*. Kiemelkedő rendezvény volt a *Magyar Fizikus Vándorgyűlés*, amelyet Szegeden, 2016. augusztus 24–27-ig szervezett meg a Társulat 318 résztvevővel. Az eseményen 19 felsőoktatási és kutató intézet, 26 általános és középiskola, 13 külföldi intézmény képviseltette magát. 22 szekcióban 106 előadásra és 120 poszter bemutatására került sor.

A szakmai folyóiratok, kulturális örökség megővése területén: a Társulat havonta megjelenő hivatalos folyóirata, a *Fizikai Szemle* 2016-ban a 66. évfolyamába lépett. Főként modernizálás céljából, és nem anyagi okok miatt, egyúttal elindult az elektronikus kiadás és megújult a honlap. A *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok* társtulajdonosaként az ELFT részt vesz a folyóirat megjelenítésében. Kulturális örökségünk megővése érdekében az ELFT rendszeresen koszorúzza fizikus nagyjaink síremlékeit.

A tehetséggondozás, képességfejlesztés, ismeretterjesztés területén: a Társulat a képességfejlesztés szolgálatában versenyeken kínál felmérési lehetőséget. A 2016-ban szervezett és lebonyolított, egyes esetekben több száz főt is megmozgató versenyek száma változatlanul meghaladja a húszat. Ezek között számos olyan is van, amely hosszabb idő óta, évente rendszeresen kerül megrendezésre. Így a Társulat 2016-ban is megrendezte országos jellegű fizikaversenyeit: *Eötvös-verseny*, *Ortvay-verseny*, *Mikola-verseny*, *Öveges-verseny* és *Szilárd Leó fizikaverseny*. Ezekon kívül számos helyi fizikaversenyt is szervezett, illetve támogatott. A Társulat szervezte meg a résztvevők kiválasztását és felkészítését az évenkénti Nemzetközi Fizikai Diákolimpiára. A Társulat Tehetségpontja alkalomszerűen, önkéntes alapon újra működik. A Társulat 20 kárpátaljai diák látogatását támogatta a Leövey-laborban. Ismét nagy siker volt a *Fizika Mindenkié* rendezvény.

A köznevelés, tanártovábbképzés területén a továbbképzések a Társulat oktatási szakcsoportjai, valamint területi csoportjai szervezésében folytak. Az oktatási szakcsoport 2016-ban is megrendezte az akkreditált továbbképzésként elismert *Fizikatanári Ankét és Eszközbemutatót*, amelyet ezúttal Nyíregyházán tartottak meg. Az ELFT kiemelt fontosságú feladatának tekinti a fizika, és általában a természettudományok közoktatásban betöltött szerepével való foglalkozást. A Társulat megfogalmazta és nyilvánosságra hozta kritikáját a pályázati rendszerrel kapcsolatban. Álláspontot dolgozott



Theisz György a Felügyelő Bizottság jelentésével.

ki a szakirányú középfokú képzés rendszeréről, amelyet egy vitautas követett november 19-én. 2016-ban megszervezték a *Science on Stage* nemzetközi fesztivál előválogató versenyét, Debrecenben. A verseny, amelyen 40 tanár vehet részt, 2017-ben Debrecenben lesz. A tanároknak myDAQ pályázatot hirdettek. Az Ericsson-díjjal, valamint a Rátz Tanár Úr Életműdíjjal jutalmazott fizikatanárok kiválasztását a Társulat ezzel foglalkozó díjbizottsága végezte. A 10 év óta rendszeres CERN-látogatást 2016-ban anyagi problémák miatt nem tudták megszervezni, helyébe a Wigner Fizikai Kutatóközpont lépett.

A főtitkári beszámoló után *Theisz György* ismertette a Felügyelő Bizottság jelentését. Kiemelte, hogy az ELFT pozitív egyenleggel tudta zárni a tavalyi évet, és nőtt az SZJA 1%-os felajánlásokból származó bevétel. A Felügyelő Bizottság elfogadta mind az ügyvezetés pénzügyi, mind a könyvelő számviteli beszámolóját. A Felügyelő Bizottság a 2016. évről szóló főtitkári beszámoló és a 2017. évi költségvetés elfogadását javasolta a Küldöttközgyűlésnek.

A Felügyelő Bizottság jelentése után Pántyáné Kuzder Mária levezető elnök ismertette az Elnökség társulati kitüntetésekre vonatkozó javaslatát, majd hozzájárásokra került sor, amit követően a küldöttközgyűlés nyílt szavazásokkal egyhangúlag elfogadta az El-

Lévai Péter a Jelölőbizottság javaslatát ismerteti.



nökség pénzügyi és szakmai beszámolóját, a közhasznúsági jelentést, a 2017. évi költségtervet, valamint a Felügyelő Bizottság jelentését. A szavazás után a levezető elnök bejelentette, hogy az Elnökség visszaadta megbízatását a Közgyűlésnek, majd *Lévai Péter* ismertette a Jelölőbizottság előterjesztését a megválasztandó új tisztségviselőkre. Az ismertetés után hozzászólás és helyszíni jelölés nem volt, így a küldöttek titkos szavazása következett a Társulat díjairól és az új tisztségviselőkről.

A szavazási szünet után Patkós András elnök és Újfalussy Balázs főtítkár adta át a Társulati kitüntetéseket és tudományos díjakat. *(A díjazottakról lásd külön írásunkat!)*

A díjak átadása után, a Szavazatszámoló Bizottság nevében, *Csordás András* hirdette ki a tisztújító küldöttközgyűlésnek az elnökség tagjairól döntő titkos szavazásának eredményét. Eszerint az ELFT új vezetése a következő:

Elnök: *Sólyom Jenő*.

Főtítkár: *Groma István*.

Alelnök: *Pántyáné Kuzder Mária*.

Elnökségi tagok: *Fábián Margit, Fülöp Zsolt, Molnár László, Oláh Éva, Osvay Károly, Sükösd Csaba és Újfalussy Balázs*.

A Felügyelő Bizottság tagjai: *Deme Ilona, Fülöp Csilla, Heitler Krisztina, Lábár János és Theisz György*.

Ezután az újonnan megválasztott elnök, Sólyom Jenő megköszönte az előző elnökség, kiemelten Patkós András leköszönő elnök és Újfalussy Balázs leköszönő főtítkár munkáját, a küldöttközgyűlésnek pedig a bizal-



Sólyom Jenő, aki egy évtized után újra elnök.

mat. Emlékeztetett, hogy korábban már volt a Társulat elnöke, alelnöke. A Társulat sorsát szíven fogja viselni. A Társulatban a tanárok és a kutatók egyensúlyának megtalálására fog törekedni. Akadémiai osztályelnökként látta, hogy a fiatal kutatók inkább a Magyar Tudományos Akadémia felé orientálódnak. Korábban már volt egy kezdeményezés, hogy az MTA és az ELFT kössön egy, a viszonyukat szabályozó szerződést, amely tartalmazná az együttműködésük leírását. Új társulati elnökként az új akadémiai osztályelnök bevonásával szeretne a Társulat segítségére lenni – a jogi akadályokat leküzdve – e szerződés megkötésében.

Az elnök végül megköszönte a jelenlevők Közgyűlésen való megjelenését, a Bizottságok munkáját és bezárta az ülést.

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT 2017. ÉVI KITÜNTETÉSEI ÉS TUDOMÁNYOS DÍJAI

Az ELFT 2017. május 23-án megtartott küldöttközgyűlésén *Patkós András* elnök és *Újfalussy Balázs* főtítkár adta át a társulat 2017. évi kitüntetéseit.

ELFT Érem kitüntetést kapott *Benedict Mihály*, a Szegedi Tudományegyetem professzora. Az indoklás kiemeli, hogy Benedict Mihály nemzetközileg elismert eredményeket ért el a fény és atomi rendszerek kölcsönhatásának kutatásában, az atomi rendszerek Wigner-függvényeinek tulajdonságaira vonatkozóan és molekularezgések koherens állapotainak tárgyalásában. Az általa indított optikai és lézeres témakör sikerességét jelzi, hogy az irányításával felnőtt generáció több tagja ma az ELI lézereközpont elméleti stábjában dolgozik. A 2000-es évek második felétől kezdve jelentős szerepe volt a tanszékén a spintronikai kvantum eszközök lehetőségeit vizsgáló kutatásokban. Munkái közül kiemelendő a koherens reflexióra vo-

Benedict Mihály szerint legfőbb tette a társulati logó terveztetése. ©





Kármán Tamás és Benedict Mihály a díjukhoz tartozó éremmel.



Asbóth János Károly Gombás Pál-díjat vehetett át.

natkozó két fontos *Physical Review A* cikk (összesen körülbelül 175 független idézet). Hasonlóan nagy visszhangot kapott a spinmanipulációra vonatkozó, már a tanítványaival együtt közölt két *Physical Review B* közlemény (összesen körülbelül 200 független idézet). Társ szerzője az Institute of Physics (IOP) által kiadott *Superradiance* című könyvnek. 1999 óta tagja az MTA Fizikai Osztályához tartozó Lézerfizikai Tudományos Bizottságnak, amelynek titkára, illetve alelnöke is volt két cikluson át.

Prométheusz-díjban részesült *Kármán Tamás* a fizikai műveltség országos hatású terjesztésében a *Fizikai Szemle* alkotó műszaki szerkesztőjeként végzett, negyedszázadnál hosszabb, egyenesen magas színvonalú munkájáért. *Kármán Tamás* fizikust 1992-ben *Marx György* főszerkesztő vonta be a *Fizikai Szemle* technikai munkálataiba, előbb tördelőként, majd mindmáig alkotó műszaki szerkesztőként dolgozik. A *Fizikai Szemle* jelen, 750-ik számával bezáróan több, mint 300 *Kármán Tamás* „kezenyomat” hordja. A *Fizikai Szemle* színes változatának elkészítésével megteremtette az elektronikus újsággá alakulás feltételét.

Az ELFT tiszteletbeli tagjává választotta *Zejun Dinget*, a Kínai Tudomány és Technológiai Egyetem Fizikai Intézetének professzorát, korábbi igazgatóját, számos nemzetközi szakmai szervezet és bizottság

Balázi Katalin Gyulai Zoltán-díjához Kamarás Katalin gratulál.



tagját. *Zejun Ding* kimagasló eredményeket ért el a felületfizika több területén, továbbá a nanoszerkezetekben lejátszódó transzportfolyamatok tanulmányozásában. 210 publikációját 2000-nél többször idézték. Magyar kapcsolata az az MTA ATOMKI-val 1990-es évek óta vannak, amikor *Tőkési Károllyal* kezdtek együttműködést töltött részecskék és szilárd testek kölcsönhatásának vizsgálatára. Azóta sok magyar kutatócsoporttal alakított ki együttműködést, intézetében számos magyar diákot és kutatót fogadott. A megválasztott tiszteletbeli tag a Társulat valamelyik rendezvényén székfoglaló előadást tart majd, ekkor veszi át a tiszteletbeli tagságról szóló oklevelet és tiszteletbeli tagsága ekkor válik hatályossá.

Az ELFT Díjbizottsága a hozzájuk beérkezett 11 ajánlott személy közül 6 főnek ítélte oda a 2017. évi tudományos díjakat a „PhD fokozat után, MTA doktori cím előtt” kategóriában:

Asbóth János Károlynak, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézete tudományos főmunkatársának, a *Gombás Pál-díjat* adományozott. *Asbóth János* kiemelkedő eredményeket ért el a topologikus szigetelők elméletében, amelynek formalizmusát sikeresen terjesztette ki a periodikusan gerjesztett kvantummechanikai rácsrendszerekre.

Juhász Zoltán, a friss Szalay Sándor-díjas.





Maák Pál az ELFT Budó Ágoston-díját kapta.



Török János Jánossy Lajos-díjban részesült.

Balázsi Katalinnak, az MTA Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézete tudományos főmunkatársának új, kerámia alapú nanokompozit anyagok fejlesztéséért és vizsgálatáért a *Gyulai Zoltán-díjat* adományozott.

Juhász Zoltánnak, az MTA ATOMKI Atom- és Molekulafizikai Osztálya tudományos főmunkatársának, az Atomi Ütközések Laboratórium vezetőjének a *Szalay Sándor-díjat* adományozott. Juhász Zoltán több sikeres kutatási irányvonal hazai képviselője, amelyek közül kiemelkedik az „Ionok dinamikája mikroszkopikus szerkezetekben”, valamint az „Ion-molekula kölcsönhatások vizsgálata”. Legfrissebb egyszerűs, a *Physical Review A* folyóiratban megjelent munkájában statisztikus termodinamikai modell segítségével magyarázta meg a negatív- és pozitívion-képződést, valamint az elektronemissziót molekulaion-atom ütközésekben.

Maák Pálnak, a BME TTK Atomfizikai Tanszék egyetemi docensének az akusztó-optikai eszközök és alkalmazásaik kutatása terén elért nemzetközi szintű eredményeiért a *Budó Ágoston-díjat* adományozott. A Maák Pál által kifejlesztett akusztó-optikai pásztázó elrendezés az alapja annak a 3D kétfoton-fluoreszcencia mikroszkópnak, amely magyar ipari terméként (Femtonics Kft.) világviszonylatban sikeres, és több

A Fizikai Szemle nívódíjasa: Radnai Gyula.

változata világszerte hozzájárul az idegtudomány és más biotechnológiai ágazatok fejlődéséhez.

Oroszlány Lászlónak, az ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék egyetemi adjunktusának, a kétdimenziós mezoszkopikus és nanorendszerek, valamint a felületi mágnesség elméleti kutatása terén kifejtett tevékenységéért a *Novobátzky Károly-díjat* adományozott.

Török Jánosnak, a BME TTK Elméleti Fizika Tanszék egyetemi docensének, aki a számítógépes fizika különböző alkalmazásainak több témakörében (szemcsés anyagok nyírási mechanizmusa, szociális rendszerek modellezése) jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó eredményeket ért el, a *Jánossy Lajos-díjat* adományozott.

A tudományos díjakat *Kamarás Katalin*, a Díjbizottság elnöke, *Patkós András* elnök és *Újfalussy Balázs* főtitkár adta át.

A Fizikai Szemle Szerkesztőbizottsága a 2016. évi *Marx György Fizikai Szemle nívódíját Radnai Gyulának* ítélte a *Centenáriumai megemlékezések, 2016* című cikksorozat megírásáért. A díjat *Lendvai János* főszerkesztő, *Patkós András* elnök és *Újfalussy Balázs* főtitkár adta át.

Gratulálunk a díjazottaknak.

A díjátadók: *Kamarás Katalin*, a Díjbizottság elnöke, *Lendvai János* főszerkesztő, *Patkós András* elnök és *Újfalussy Balázs* főtitkár.



