

# fizikai szemle

2022/6

**Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.**

**Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, Nemzeti Kulturális Alap**

Főszerkesztő:  
**Lendvai János**

Szerkesztőbizottság:  
**Bíró László Péter, Bokor Nándor, Czitrovsky Aladár, Füstöss László, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Ormos Pál, Pálfalvi László, Papp Katalin, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Takács Gábor, 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 címlapon:

**Az épülő FAST (500 m nyílásszögű szférikus teleszkóp), Guizhou, Kína. Lásd Horváth Dezső írását a 169. oldalon.**

*Kurt Binder, Iglói Ferenc: Az üvegátalakulás 2022 az üveg éve, így különösen aktuális a túlbűtött olvadékból az üvegállapotba történő átmenet vizsgálata különböző rendszereken. Az Europhysics News 53/1 11. oldalán megjelent cikk bővített változata.* 161

*Illy József: Einstein, a repülőmérnök 167*  
*Einstein kirándulásából az aerodinamika területére azt is megtudhatjuk, hogy jár az, aki sokat gondolkodik, de keveset olvas.*

*Horváth Dezső: Részecskefizikai kísérletek elnevezése és szerzői 169*  
*A részecskefizika nagyberendezéseinek és gigaprojektjeinek érdekességei és furcsaságai*

### A FIZIKA TANÍTÁSA

*Kis Tamás: Kézzelfoghatóvá vált az energiavölgy 176*  
*A szerző és tanítványai 3 dimenziós grafikai programokkal elkészítették az energiavölgy modelljét.*

*Schnider Dorottya, Hömöstre Mibály: Exobolygók: egy tanulói kísérlet 178*  
*Az írás bemutat egy basznos eszközt, valamint segítséget kínál annak órai alkalmazásához.*

*Ujfaludi László: Andrea Palladio nyomában 185*  
*– optikai illúzió az építészetben*  
*A torzított perspektíváról és alkalmazásainak építészeti példáiról szól az írás.*

*Varga János: Mikor látjuk egy alagút végét? 191*  
*Az ismert szófordulatot nem átvitt értelemben, hanem geometriai alapon vizsgálja az írás.*

### HÍREK – ESEMÉNYEK

Kitüntetett fizikatanárok 195

*K. Binder, F. Iglói: Glass transition*  
*J. Illy: Einstein, the aviation engineer*  
*D. Horváth: Naming and authors of particle physics experiments*

### TEACHING PHYSICS

*T. Kis: The tangible energy valley*  
*D. Schnider, M. Hömöstre: Exoplanets: a student experiment*  
*L. Ujfaludi: Following Andrea Palladio – optical illusion in architecture*  
*J. Varga: Do we see the end of a tunnel?*

### EVENTS

Distinguished physics teachers

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: [elft@elft.hu](mailto:elft@elft.hu)

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtiszt, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrizzük meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyzámlán.

Megjelenik havonta (évente egyszer duplaszámmal), egyes szám ára: 1100.- Ft (duplaszámé 2200.- Ft) + postaköltség.

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

# AZ ÜVEGÁTALAKULÁS

## Hogyan jelennek meg hegyek és völgyek a szabadenergia felszínén

Kurt Binder – Institut für Physik, Johannes-Gutenberg Universität Mainz, Németország  
Iglói Ferenc – Wigner FK SZFI; Szegedi Tudományegyetem Elméleti Fizikai Tanszék

Az üveget, mint anyagot már az ókori Egyiptomban is ismerték, de akkor és a Római Birodalom idején is az üveg birtoklása csak a különösen gazdag emberek kiváltsága volt. Használata jelenleg nagyon elterjedt az ablakok, palackok, ivópoharak, optikai műszerek stb. területén, így meglepően hangozhat, hogy az anyag üvegállapota és a túlhűtött olvadékból ezen állapotba való átmenet megértését a kondenzált anyagok fizikája nagy kihívásának tekintjük. E cikkben röviden összefoglaljuk az ezen problémákkal kapcsolatos fontosabb tényeket és ismertetjük azokat az elgondolásokat, amelyek évtizedek óta viták tárgyát képezik. Továbbá rámutatunk arra, hogy a „spinüveg” anyagok felfedezése, valamint *Giorgio Parisi* és munkatársai ezen rendszerekre kidolgozott elmélete hogyan adott új lökést a téma iránti érdeklődésnek. Megvitatjuk, hogy mennyire tekinthető sikeresnek az üvegátmenet elméletének kidolgozása.

### Kísérleti háttér

Termikus egyensúlyban lévő szilárd anyagok általában kristályos szerkezetűek [1]. Ezért, ha egy folyadékot kellően lassan hűtünk le, akkor kristályosodás következik be: jellemzően a csíráképződés és -növe-

Az *Europhysics News* 53/1 11. oldalán megjelent cikk bővített változata.

Ezt a munkát a Nemzeti Kutatási Alap K128989 és KKP-126749 számú projekttel támogatta. Köszönet illeti *Pető Tamást* néhány ábra elkészítéséért és *Gránásy Lászlót* hasznos diszkuszióért.



*Kurt Binder* 1969-ben doktorált a Bécsi Műszaki Egyetemen, majd a Müncheni Műszaki Egyetem Fizika Intézetében dolgozott, ahol 1973-ban habilitált. A saarbrückeni, kölni és (1983-tól) mainzi egyetemen professzorként dolgozott, ahonnan 2012-ben vonult nyugdíjba. Számos kitüntetést kapott, mint a Max-Planck- és a Boltzmann-érem.



*Iglói Ferenc* Széchenyi-díjas fizikus, az MTA Wigner FK SZFI tudományos tanácsadója, az SZTE Elméleti Fizikai Tanszék egyetemi tanára. Kutatási területe a statisztikus fizika és az elméleti szilárdtest-fizika, különös tekintettel a fázisátalakulások és kritikus jelenségek, rendezetlen klasszikus és kvantum rendszerek, nemegyensúlyi folyamatok vizsgálatára.

kedés polikristályos anyagok képződéséhez vezet. Ezekben a polikristályokon röntgensugárzással vagy neutronokkal végzett szórás kísérletek Bragg-csúcsokat mutatnak, amelyek az atomok vagy molekulák periodikus elrendezését tükrözik egy szabályos rács pontjain. Az üveg szórásképe azonban alapvetően eltér ettől, feltűnően hasonlít a folyadékból származó mintázatokhoz [2]. Ugyanakkor a dinamika élesen különbözik a folyadékoktól, mivel üvegekben a diffúziós mozgások és a szerkezeti relaxáció „leáll” [3]. Az említett kísérleti technikák csak a részecskék (atomok vagy molekulák) közötti párkorrelációs függvények szintjén vizsgálják a szerkezetet. Ezért a „rend” finomabb formái – amelyek párkapcsolatok szintjén nem mutatkoznak meg – nem kizártak! Arra is magyarázatot kell találnunk, hogy mely mechanizmusok lassítják le annyira a részecskéket, hogy miközben a folyadékot a  $T_g$  üvegesedési hőmérséklet közelébe hűtjük, nem következik be kristályosodás.

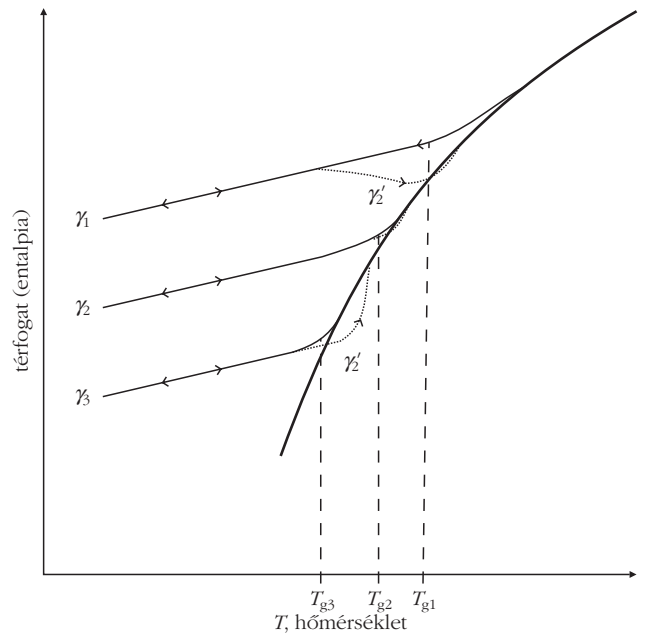
Ez utóbbi kérdés megválaszolása kevésbé jelent problémát a polimerolvadékok lehűtésével keletkező műanyagok esetén: ott a hosszú, rugalmas makromolekulák véletlenszerű, bolyongási trajektóriákra emlékeztető, egymással szorosan összefonódó tekercek formájában jelennek meg. A polimerláncok szétválasztásához és egymáshoz igazításához hatalmas szabadenergia-gátakat kell leküzdeni, ezért a kristályosodás folyamata korántsem egyszerű. Mindazonáltal, egy ilyen üvegszerű polimeranyag befagyott szerkezetének részletei bizonyos mértékig függnek a hűtési sebességtől. Valójában minden fizikai tulajdonság függ a figyelembe vett termodinamikai állapottól ( $T$  hőmérséklet,  $p$  nyomás), valamint az „előkészítési előzményektől”, és ez a tény más üveges anyagokra is igaz. Ez látható azon kísérletekben, ahol a folyadékot gyorsan valamivel a  $T_g$  alatti hőmérsékletre hűtik, majd a  $t_w$  (makroszkopikus) várakozási idő letelte utáni relaxációt tanulmányozzák. A relaxáció a  $t$  és a  $t_w$  időktől is függ. *Érdekes módon nem csak az embe- rek öregednek, hanem az öregedés az üvegekre is jellemző!*

Speciális esetet képez a „kolloid üveg”, amely egy olyan modellrendszer, ami mikrométer méretű kolloidrészecskéket tartalmaz koncentrált szuszpenzióban. Itt nem a hőmérséklet, hanem a szuszpenzióban lévő gömb alakú kolloidok térfogatkitöltése (a pakolási hányad) jelenti a kontrollparamétert, amelynek függvényében az üvegátalakulás lezajlik. A kolloidok közötti erők a kemény gömbök közötti egyszerű, a kizárt térfogaton alapuló taszításhoz hasonlítanak. Ezen részecskék diffúziója sok nagyságrenddel lassabb, mint a kis molekulák diffúziós mozgása stan-

dard olvadékokban. A részecskék nagy mérete és lassúsága miatt e szuszpenziókban a lokális szerkezet és annak változása kísérletileg megjeleníthető: így e rendszerekben az üvegszerű relaxáció kezdete hasonló részletességgel vizsgálható, mint ahogy megfelelő modellek esetén számítógépes szimulációval. Ugyanakkor problémák léphetnek fel – mint például a részecskeméret-eloszlás enyhe polidiszperzitása –, amelyek akadályozzák az elemzést. Ezenkívül sokkal kevesebb nagyságrendi változás érhető el a gyakorlatban (legfeljebb 5), mint a kis molekulájú üvegeképző rendszerek esetében, ahol 12 vagy magasabb nagyságrendi változás is elérhető.

Természetesen fontos figyelembe venni, hogy hűtésekor nem minden folyadék képez üveget. A nemesgázatomokból, például Ne, Ar, Kr stb. álló folyadékok üvegállapotai nem ismertek. Még az egyszerű fémek sem fagnak üvegekké; „fémüvegek” csak nagyon speciális, nem fémes összetevőket is tartalmazó olvadékok gyors hűtésével állíthatók elő. Ugyancsak nem léteznek üveges állapotban az egyszerű molekuláris folyadékok, mint az  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$  stb.

Ahhoz, hogy a folyadék hűtésekor üveg képződjön, a sűrű folyadékban lévő atomok vagy molekulák lokális elrendezésében energetikai „frusztrációs hatások” kell érvényesülnie. Egy tipikus példa a  $SiO_2$ , az ablaküveg fő összetevője. A  $SiO_2$  jó üvegeképző anyag, de számos kristályos módosulata is létezik, amelyek szabadenergiájukban kis mértékben különböznek egymástól, és ezért termodinamikai szempontból versenyeznek egymással. A szerkezetek alapeleme egy szabályos tetraéder középpontjában egy Si-atommal és négy sarkában O-atomokkal, minden O-atomon két szomszédos tetraéder osztozik. Ezek a tetraéderek a kristályszerkezetekben tökéletes hálózatokat alkotnak, különböző elrendezésű 6 tagú gyűrűkkel. A  $SiO_2$  üveges módosulatában azonban ezek a tetraéderek nem szabályosak, hanem torzultak, és 5, valamint 7 tagú gyűrűk is befognak. Az üvegátmenet közelébe lehűtött folyékony  $SiO_2$ -ban már nagyon hasonló a szerkezet, a kovalens Si-O kötések elég gyakran felszakadnak és átalakulnak, hogy lehetővé tegyék a szerkezeti ellazulást. Ez a kép nemcsak a találmányos képzelőerőnek köszönhető, hanem számítógépes szimulációkból is kirajzolódik [3, 4], amelyek azt is megmutatják, hogy a fizikai tulajdonságok (például az a  $P(n)$  valószínűség, hogy  $n$  tagú gyűrűket találnak a szerkezetben) egyértelműen a hűtési sebességtől függenek [5]. Figyelmeztetésként megemlíjtjük, hogy a hűtési sebesség a szimulációkban sok nagyságrenddel nagyobb, mint a kísérletekben; de ha valós üvegekben empirikusan meghatározunk egy üvegesedési átmeneti hőmérsékletet, amely a (fajlagos) térfogat/hőmérséklet görbén lévő (a valóságban kissé lekerekített) törésből lehetséges, akkor a  $T_g$  üvegesedési hőmérsékletnek is létezik hűtési sebesség-függése (1. ábra)! A  $T_g$  heurisztikus meghatározására alternatív megoldásként gyakran használatos a nyírési viszkozitás, amikor annak értéke eléri a  $10^{12}$  Pa·s értéket (ami körülbelül egyperces relaxációs időnek felel meg). Természetesen ez a vá-



1. ábra. A térfogat vagy az entalpia hőmérsékletfüggésének sematikus diagramja üvegeképző folyadékokon végzett hűtési és melegítési kísérletekben. A vastag folytonos görbe az egyensúlyi viselkedést mutatja. A vékony folytonos vonalak három különböző  $\gamma$  hűtési sebességű kísérleteknek felelnek meg, ahol  $\gamma_1 > \gamma_2 > \gamma_3$ . A görbék „lekerekített” töréspontjai definiálják a  $\gamma$ -függő üvegátalakulási hőmérsékleteket. A pontozott vonalak olyan melegítési kísérletek eredményeit mutatják, ahol a  $\gamma'_2 = \gamma_2$  fűtési sebességet választottuk, ezzel illusztrálva, hogy hiszterézis léphet fel.

lasztás teljesen önkényes – a módszer azonban széles körben elfogadott, mivel sokkal nagyobb viszkozitást aligha lehet megbízhatóan mérni.

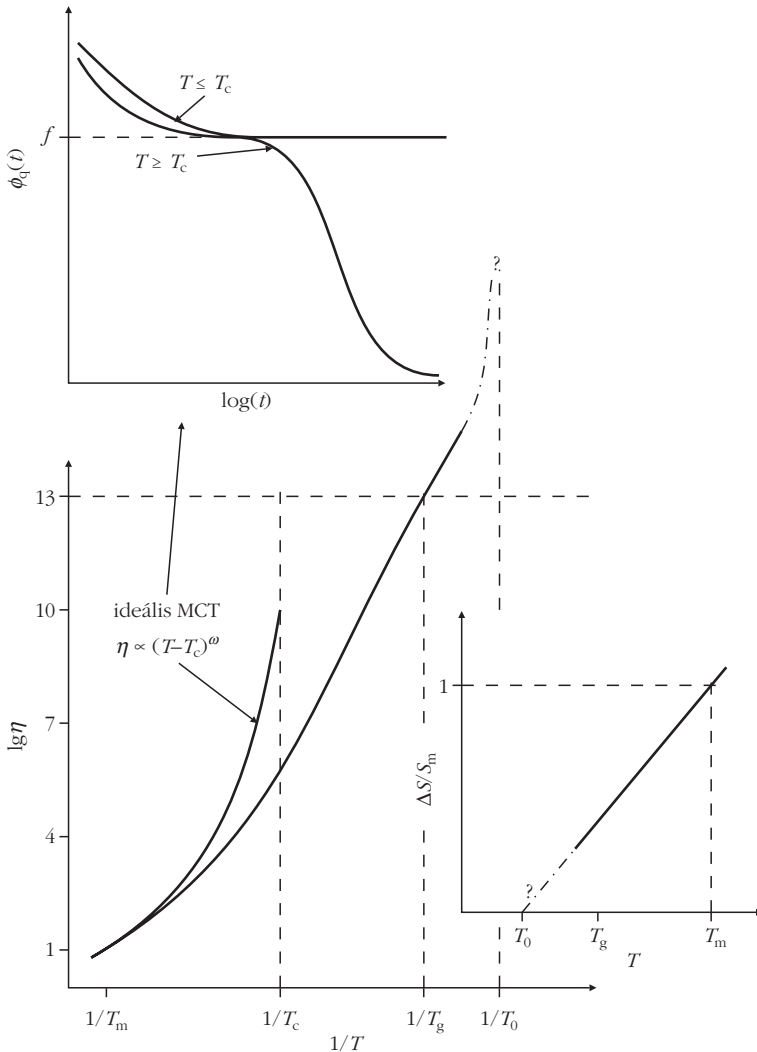
A különböző üvegeképzők összehasonlítására az  $\eta$  viszkozitás logaritmusát szokás a  $T_g/T$  függvényében ábrázolni (Angell-diagram [6]), amely az  $SiO_2$ -ra egyenes vonalat eredményez, és megfelel az

$$\eta \propto \exp\left(\frac{E_{act}}{k_B T}\right)$$

Arrhenius-viselkedésnek, ahol  $E_{act}$  az aktiválási energia és  $k_B$  a Boltzmann-állandó. Sok más üvegeképző, például a molekuláris folyadékok, mint például a glicerin, orto-terfenil, toluol stb., határozott görbületet mutatnak ezen az ábrán, összhangban a Vogel–Fulcher–Tammann (VFT) [3] összefüggéssel,

$$\eta(T) \propto \exp\left(\frac{B}{T - T_0}\right). \quad (1)$$

Itt  $B$  egy állandó, és az a  $T_0$  hőmérséklet, ahol  $\eta(T)$  divergenciát mutat, jellemzően körülbelül 30 K-nel  $T_g$  alatt van. Általánossá vált szóhasználat szerint az Arrhenius-viselkedésű üvegeképzőket „erősnek”, míg az (1) egyenletet követőket „törekenynek” hivatkozzák [3]. Megjegyezzük, hogy a szimulációk [4] az Angell-diagram erős görbületét sugallják  $SiO_2$  esetében is olyan magas  $T$  értéknél, ahol a kísérletek már nem végezhetőek el: így nem világos, hogy az üvegek ezen osztályozása milyen értelemmel bír.



2. ábra. Egy folyadék  $\eta(T)$  viszkozitásának sematikus diagramja az  $1/T$  inverz hőmérséklet függvényében. A vízszintes tengelyen jelölve van az  $1/T_m$  inverz olvadási hőmérséklet, az  $1/T_g$  üvegesedési hőmérséklet és az MCT által jósolt  $1/T_c$  inverz kritikus hőmérséklet. Az a  $T_0$  hőmérséklet, ahol  $\eta(T)$  divergálna, gyakran spekulatív módon azzal a hőmérséklettel van társítva, ahol a folyadék és kristály közötti extrapolált  $\Delta S(T)$  entrópiakülönbség eltűnik („Kauzmann-hőmérséklet” [3]); erről a viselkedésről lásd a jobb oldali betétet, ahol  $S_m = \Delta S(T_m)$ . Felső betét: a sűrűségkorrelációs függvény Fourier-transzformáltjának időfüggése. Az idealizált MCT az aszimptotikus viselkedést a  $\phi_q(t \rightarrow \infty) = f$  alakban jósolja, amely nem felel meg a kísérleteknek. Az ismert érvek szerint a további csökkenés termikusan aktivált folyamatokat igényel, amelyek nem írhatók le az idealizált MCT keretein belül.

Az üvegeképző folyadékok még sok más érdekes tulajdonságot mutatnak; ezek közül néhányat a 2. ábrán sematikus módon mutatunk, ahol a móduscsoport elmélet (mode coupling theory – MCT) [7] által szolgáltatott leírás is szerepel. Különösen érdekes a túlhűtött folyadék entrópiájának erős csökkenése. Amikor a folyadék kiesik az egyensúlyból, entrópiája is befagy, így az üveg nem felel meg a termodinamika 3. főtételének. Ha feltételezzük, hogy a folyadékban és a kristályban a kis amplitúdójú, rezgészerű mozgások entrópiája hasonló, akkor a folyadék és a kristály entrópiájának  $\Delta S$  különbsége a kísérleti eredmények extrapolációja szerint a  $T_0$  Kauzmann-hőmérsékletnél előjelet vált, lásd a 2. ábrát. Ez azt jelentheti, hogy  $T_0$ -nál fázisátmenetre van szükség az „entró-

piakatasztrófa elkerülése érdekében” (hogy az entrópia ne legyen negatív); de ez a következtetés nyilvánvalóan pusztán spekuláció. Ami az MCT előrejelzéseket illeti, azok csak a mérsékelt túlhűtött folyadék szerkezeti relaxációja kezdeti szakaszainak megértéséhez hasznosak. A  $\phi_q(t)$  sűrűségkorrelációs függvény, valamint más relaxációs függvények gyakran jól közelíthetők egy nyújtott exponenciális lecsengéssel:

$$\phi_q(t) \propto \frac{1}{\exp\left(\frac{t}{\tau_q}\right)^\beta},$$

ahol  $\tau_q$  a szerkezeti relaxációs idő, és a  $\beta$  kitevő értéke gyakran közel van a 3/5-höz [8]. Az üvegeképző folyadékok másik nagyon fontos tulajdonsága a „dinamikus heterogenitás” [9]: megfigyelték, hogy az üveges átmenet közelében a diffúzió és a viszkozitás közötti Stokes–Einstein-összefüggés, valamint a molekulák translációs és rotációs diffúziója közötti Stokes–Einstein–Debye-összefüggés nem érvényes. Ezek az eredmények szimulációkon alapulnak, amelyek azt mutatják, hogy a részecskéket mobilitásuk alapján meg lehet különböztetni: a lassú részecskék a szerkezeti relaxációs idő skáláján lényegében mozdulatlanok maradnak; ugyanakkor viszonylag sokkal gyorsabb részecskék is előfordulnak, amelyek ráadásul térben hűrszerű objektumokként egymással korreláltan viselkednek.

Az üvegátmenettel kapcsolatos gazdag jelenségeket itt csak nagy vonalakban tudtuk áttekinteni; vannak olyan esetek is, amikor üvegek keletkeznek, de gyors kristályosodás miatt nem érhető el az üvegátalakulás környéke. Ilyen viselkedésre a víz szolgáltat példát: gyors hűtéssel amorf jeget lehet előállítani (két változatban, az alkalmazott nyomástól függően, kis sűrűségű és nagy sűrűségű amorf jeget). Amikor azonban a jég felmelegszik, inkább kikristályosodik, mint olvad: a magas hőmérsékletéről extrapolálva talált  $T_g$  a „senki-földjére” is esik. Valójában ez a „poliamorfizmus” (amikor egy anyag többféle, minőségileg eltérő üveges szerkezetben létezhet) más anyagoknál is ismert, de ezt a kérdést itt nem tárgyaljuk tovább.

## Korai elméleti magyarázatok

Az üvegátalakulás magyarázatával kapcsolatban soha nem volt konszenzus a kutatók között; nagyon különböző ötletek születtek, amelyeket itt csak vázlatosan tudunk ismertetni.

Az entrópia csökkenésével szorosan összefüggő elméletben (2. ábra)  $\xi$  lineáris méretű alrendszereket vezetnek be, amely alrendszerekben a részecskék konfigurációjának kooperatív átrendeződése megy végbe, a többi alrendszerrel függetlenül. Mindegyik alrendszernek néhány energetikailag előnyös állapota van, és így konfigurációs entrópiája egy nagyságrendű. Az  $S_{\text{conf}}$  teljes konfigurációs entrópia tehát arányos a kooperatíván átrendeződő régiók számával, azaz térfogatukkal fordítottan arányos. Egy ilyen régió átrendeződési folyamatának kinetikájára vonatkozó feltevések szerint a tipikus relaxációs idő:

$$\tau(T) \propto \exp\left(\frac{C}{TS_{\text{conf}}}\right),$$

ahol  $C$  egy állandó. Feltételezve, hogy a  $S_{\text{conf}}$  lényegében arányos az entrópiakülönbséggel:

$$\Delta S(T) \propto T - T_0,$$

az (1) egyenletben szereplő eredmény adódik, mivel  $\eta(T) \propto \tau(T)$ . Sajnos nem világos, hogyan lehet pontosan meghatározni ezeket a kooperatíván átrendeződő régiókat; a  $\xi$  meghatározását célzó becslések különböző kísérletekben nem igazán vezetnek biztató eredményre (értékük tipikusan  $\xi = 2-3$  nm), és a kinetikai feltételezések is kétségesek [3]. A szimulációk [3]  $\xi$  fokozatos növekedését találják csökkenő  $T$  mellett, de nem jutnak el a  $T_g$  közeli hőmérséklethez.

A szabadterfogat-elmélet a kollektív átrendeződések hangsúlyozásával szemben az egyes részecskék mozgására összpontosít. Az elmélet szerint minden részecskének meg kell találnia a szomszédságában a „szabad térfogatot”, amelybe be tud lépni. Nagy távolságra történő diffúzió akkor lehetséges, ha a szabad térfogatú régiók perkolációja következik be. Az elméletet néhány feltételezéssel kiegészítve eljuthatunk az (1) egyenlethez; de nyilvánvalóan a szabad térfogat fogalma kissé homályos, és a tényleges levezetés sok olyan feltevést igényel, amelyeket nem lehet könnyen tesztelni.

Az előzőekben említett elméletekkel szemben az MCT [7] a folyadékok dinamikájának elméletében jól megalapozott kiindulóponttal rendelkezik. A  $\phi_q(t)$  időfüggésének pontos egyenletéből indul ki, és speciális intuícióval az úgynevezett „memóriafüggvények” faktorizálását vezeti be (amelyek egyébként magasabbrendű korrelációs függvényeket tartalmaznának). Itt a szükséges bemeneti paraméter a folyadék statikus szerkezeti tényezője. Az MCT a relaxációs folyamat lassú kezdetét jósolja, amely többé-kevésbé kompatibilis a nyújtott exponenciális relaxációval, amint azt a kísérleti részben említettük.  $T \rightarrow T_c$  esetén  $\phi_q(t)$ -n egy plató alakul ki (amely leírja a bezárási „ketreceffektust”). E plató „élettartama” hatványfüggvényként divergál ezen  $T_c$  hőmérsékleten (2. ábra). Míg a kétlépéses relaxáció kompatibilis a kísérletekkel (különösen a kolloid szuszpenziók esetén) és a szimulációkkal, a kritikus hatványtörvényalak viszont nem: a megjósolt  $T_c$  egyértelműen magasabb, mint a

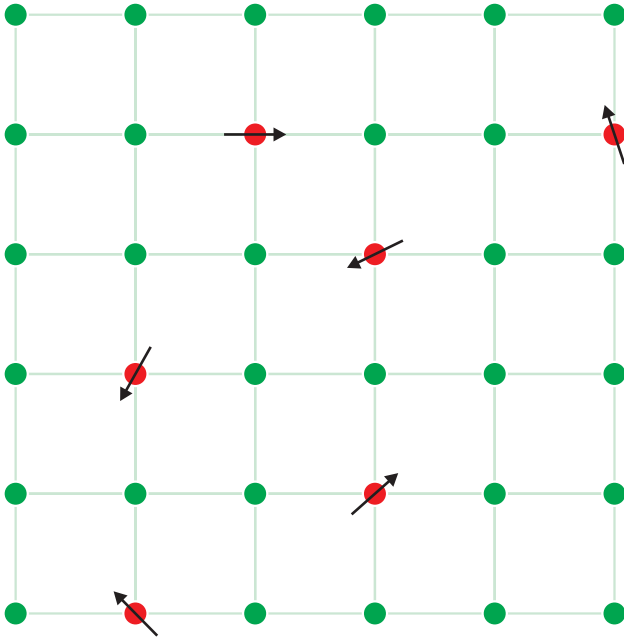
$T_g$ . Ezzel kapcsolatban azt az elképzelést szokás felhozni, hogy ha az MCT ezen „idealizált” változatán túllépünk, akkor a  $T_c$ -nél látott kritikus divergencia elsimul és helyette a  $T_g < T < T_c$  tartományon egy a termikusan aktivált viselkedésre utaló átmenet valósul meg (amelyre ezért van szükség, hogy a részecskék a „ketreceből” kijussanak) [7]. E termikusan aktivált relaxáció MCT keretében történő meggyőző leírása azonban még várat magára.

Az eddig leírtak alapján az üvegesedési relaxáció korai elméletei termodinamikai tulajdonságokat használnak bemeneti paraméterként, mint például az entrópia hőmérsékletfüggését, a szabad térfogatot szabályozó helyi struktúrát, vagy a statikus szerkezeti tényezőt (az amorf diffrakciós kép vastagsága a  $T$  csökkenésével nő). Van azonban olyan nézet is, amely azt vallja, hogy mindezen statikus tulajdonságok lényegtelen részletek és ami számít, az a kinetikai kényszer. Ezt a nézetet a statikus korreláció nélküli kinetikussal szembeállítva az Ising-modellel szokás szemléltetni. Az Ising-spinnek átfordulási sebességének korlátai miatt nem triviális dinamika keletkezik, ami az üveges viselkedéshez hasonló lassú relaxációt eredményez. E modellek azokat a megfontolásokat is támogatják, amelyek az üvegátmenetet nem a fázistérben lévő állapotok sokaságain, hanem a rendszer időbeli trajektóriái terében fellépő szimmetriasértésként írják le: így „történet definiálta sokaságokkal” és az azokkal kapcsolatba hozható dinamikus átmenetekkel van dolgunk [10]. Azonban a pontos kapcsolat e megközelítés és a hagyományos elméletek között kissé homályos.

## Spinüvegek: megoldást nyújtanak-e a rejtvényre?

Ötven évvel ezelőtt fedezték fel, hogy nemmágneses fémekben (például réz, ezüst, arany) feloldott néhány százalékos, véletlenszerű eloszlású, mágneses ionok (például vas, mangán, kobalt) (3. ábra) új típusú fázisátalakuláson mennek keresztül: a  $\chi$  mágneses szuszceptibilitás, a  $T_f$  hőmérsékleten csúcspontot mutat, de  $T < T_f$  esetén semmilyen ferro- vagy antiferromágneses rendeződést nem lehet neutronszórással kimutatni. A dinamikus spinkorrelációk ezzel szemben drámaian lelassulnak, ahogy a hőmérséklet a  $T_f$ -et felülről közelíti: a relaxációs idők pikoszekundumról fokozatosan makroszkopikus időkre nőnek! Mivel a mágneses momentumok közötti kicserélődési kölcsönhatás előjele a távolságuk függvényében oszcillál, és a távolságok véletlenszerűek, várható, hogy  $T < T_f$  esetén a mágneses momentumok (spinek) véletlenszerű irányokban fagynak be: így létezik a szerkezeti üveg mágneses analógja, a *spinüveg*!

Ez a felfedezés nagy érdeklődést váltott ki: azzal a reménnyel kecsegtetett, hogy a viszonylag egyszerűbb spinüvegek vizsgálatánál nyerhető eredmények hozzásegítenek az üvegátalakulás általános megértéséhez is. Hamarosan konszenzus alakult ki a modell egyszerűsítéséről, a  $J$  kicserélődési kölcsönhatást

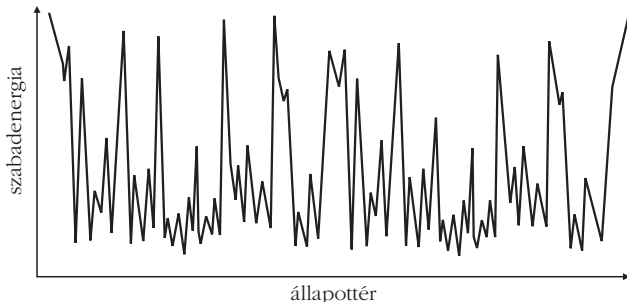


3. ábra. Kétdimenziós spinűveg vázlatos képe, ahol a nem mágneses atomok (zöld színű) kristályrácsába véletlenszerűen néhány százalék koncentrációjú mágneses iont (piros színű) oldunk fel.

Gauss-eloszlású véletlen változókkal azonosították, amely az átlagtérváltozatban minden spinpár között a távolságtól függetlenül hat; míg a rövid hatótávolságú változatnál a legegyszerűbb modell Ising-spineket ( $S_i = \pm 1$ ) tartalmaz egy egyszerű köbös rács helyein.

Noha e modellek egyszerűnek tűnnek, még mindig nagyon nehéz kezelni őket; a mintába befagyott véletlenszerű rendezetlenségre történő átlagolás komoly akadályt jelent a statisztikus mechanika számára. *Giorgio Parisi* [11, 12] zseniális megközelítése, amelyet a 2021. évi Nobel-díjjal jutalmaztak [13], tisztázta a „rend” jellegét az üvegszerű fázisban: a rendparaméter nem egy szám, mint a mágnesszettség a ferromágneses fázisban, hanem egy függvény,  $q(x)$ . Ez a függvény azt a tényt tükrözi, hogy  $T < T_f$  esetén a szabadenergiát reprezentáló „felszín” sok „völgyre” oszlik, amelyeket korlátok választanak el egymástól (ezek végtelenül magasak az átlagtér-határesetben) (4. ábra). A völgyek által reprezentált minimumok felelnek meg a spinűveg lehetséges állapotainak (azaz „ergo-

4. ábra. A szabadenergia-felszín tipikus alakja az üvegfázisban. A völgyek reprezentálják a lehetséges (meta)stabil állapotokat, amelyeket elválasztó korlátok végtelenül magasak az átlagtér-határesetben, de valós rendszerek esetén végesek.



dikus komponenseknek”). De ezen állapotok nem merőlegesek egymásra, annak  $P(q)$  valószínűsége, hogy két állapot között  $q$  mértékű átfedés legyen, az  $x(q)$  inverz függvény deriváltja,

$$P(q) = \frac{dx}{dq}.$$

A Parisi-elmélet rendkívül gyümölcsöző volt sok más, ingadozásokkal és rendezetlenséggel foglalkozó probléma esetében is, amelyek meglehetősen eltérő területekről származnak (például neurális hálózati modellek, optimalizálási problémák stb.). Az elmélet útmutatást adott a  $\pm J$  spinűveg esetén végzett numerikus szimulációk értelmezéséhez is, amely modellt feltehetően jól leírja a valós rendszereket is. Összehasonlítva az univerzális tulajdonságokra vonatkozó kísérleti és elméleti eredményeket valóban lenyűgöző egyezést találunk [14].

*Ugyanakkor a spinűvegre nyert eredmények szerkezeti üvegekre történő közvetlen alkalmazását megnehezíti az a tény, hogy a szerkezeti üvegek nem rendelkeznek spinforgatási szimmetriával, mint a spinűveg (ami akkor áll fenn, ha a mágneses tér,  $H = 0$ ). A spinűveg és a szerkezeti üveg fizikai tulajdonságai között fontos különbség, hogy a  $T_f$  hőmérsékletet felülről közelítve a spinűveg standard kritikus viselkedést mutat [15]: a „spinűveg nemlineáris szuszeptibilitása” (amely a*

$$\chi(H) = \chi_0 + \chi_{nl}H^2 + \dots$$

sorfejtésben szereplő  $\chi_{nl}$  együttthatóhoz kapcsolódik) divergál,

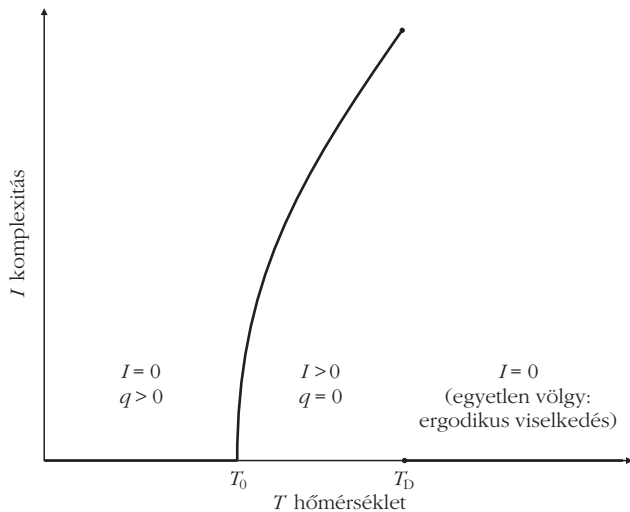
$$\chi_{nl} \propto (T - T_f)^{-\gamma_{sg}},$$

és hasonló igaz a relaxációs idő esetén is,

$$\tau \propto (T - T_f)^{-\Delta};$$

csak a  $\gamma_{sg}$  és  $\Delta$  kritikus kitevők értékei szokatlanul nagyok [15]. Ezért, ha a spinűvegelmélet egyáltalán hasznos lehet szerkezeti üvegeknél, akkor nyilvánvalóan olyan általánosításra van szükség, amely ezt a speciális szimmetriát nem tartalmazza.

Ilyen általánosítások valóban léteznek, például a  $p$ -állapotú Potts-üveg, a  $p > 4$  érték esetén. Ezen modellnél minden spinváltozó különböző  $p$  állapotú lehet;  $p = 2$  felel meg az Ising-spinűvegnek. A „Potts-spinék” közötti párkölcsönhatás energiája  $J$  és véletlenszerű, ha azok azonos állapotban vannak; míg különböző állapotok esetén a kölcsönhatás energiája nulla. Ez a modell és a hasonló általánosítások elsőrendű fázisátalakulást mutatnak egy  $T_0$  hőmérsékletnél, ahol az üvegállapotra jellemző rend ugrás formájában jelenik meg [16]. Érdekes módon e modell dinamikus változatai (az átlagtér-határesetben) a relaxációs idő divergenciáját mutatják  $T_D > T_0$  hőmérsékleten, és  $T < T_D$  hőmérséklet esetén a rendszer nem ergodikus. Egy  $l$  állapot bekövetkezésének valószínű-



5. ábra. Az  $I$  komplexitás hőmérsékletfüggése olyan rendszerek esetében, amelyek ergodikus-nemergodikus átalakuláson mennek keresztül  $T_D$ -nél és elsőrendű üvegátalakuláson  $T_0$ -nál. Az üvegfázisban  $T < T_0$ -nál a  $q$  üvegesedési rendparaméter véges értékű (vázlatos ábra).

ségét  $P_I$ -vel jelölve meghatározhatjuk e nemergodikus rendszer egyfajta konfigurációs entrópiáját (más néven „komplexitást”) az

$$I = -k_B \sum_i P_i \ln P_i$$

definícióval. A  $T > T_D$  rendezetlen fázis számára egyetlen „völgy” van a szabadenergia-felszínen; de  $T_0 < T < T_D$  esetén végtelenül sok ilyen „völgy” alakul ki, amikor  $I$  egy extenzív termodinamikai mennyiség lesz. Ezen a hőmérséklet-tartományon nem valósul meg üveges rend, de  $T_0$ -nál az  $I$  komplexitás eltűnik, és ott az üvegre jellemző rendparaméter ugrásos módon jelenik meg (5. ábra).

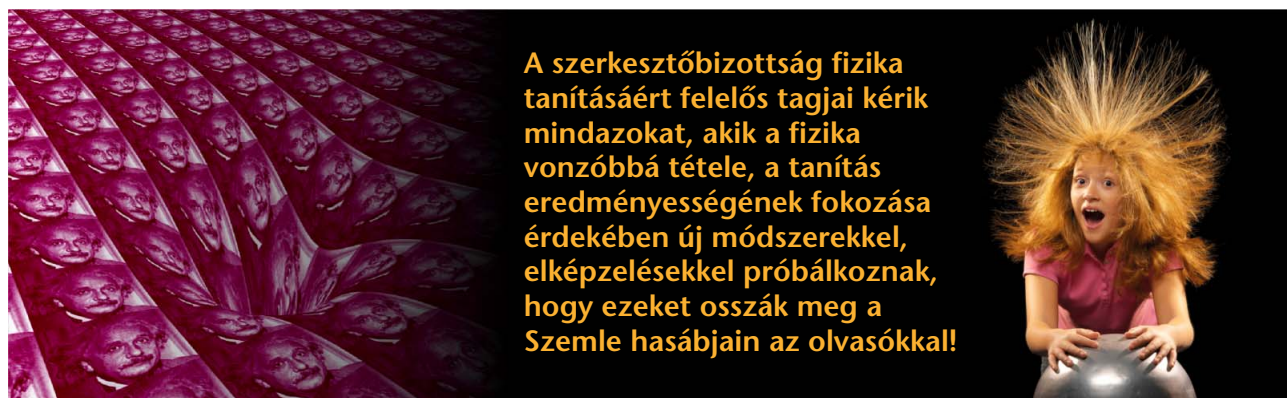
A szerkezeti üvegekhez analógiát jelentő rendszerek leírásához a végtelen hatótávolságú spin-spin kölcsönhatást tartalmazó modell a véges hatótávolság esetére kell általánosítani. Ez esetben a szabadenergia-felszínen szereplő völgyeket  $T_0 < T < T_D$  esetén csak véges kiterjedésű korlátok választják el egymástól, ezért  $T_D$ -nél nem lesz éles átmenet a dinamikában, a rendszer állapotát  $T < T_D$ -re független és jellemzően  $\xi$  lineáris méretű alrégiók „mozaikszerű”

összessége alkotja. Az alrégiók a lehetséges metastabil állapotok egyikében tartózkodnak (amely különbözik a szomszédos régiók állapotától). Termikusan aktivált fluktuációk következtében az alrégiók ezen „mozaikállapotában” átmenetek lépnek fel a különböző állapotok között [17, 18]. Ebben a „véletlenszerű elsőrendű átalakuláselméletben” néhány elfogadható feltételezéssel megkaphatjuk az (1) egyenlet szerinti VFT-összefüggést a relaxációs idő  $T_0$ -nál mutatott divergenciájára.

Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy sajnos ez a leírás kevés pontosan megfogalmazott és tesztelhető jóságot szolgáltat, és ellentétben a spinüvegekkel, a numerikus szimulációk [3] (eddig még?) nem nyújtottak egyértelmű bizonyítékot a fenti leírás mellett vagy ellene, bár az utóbbi időben az elérhető időskálákat figyelemre méltóan sikerült növelni [19]. *Ezért az üvegátalakulás továbbra is kihívás marad...*

## Irodalom

1. N. W. Ashcroft, N. D. Mermin: *Solid State Physics*. Holt-Saunders International Editors, Philadelphia (1976).
2. J.-L. Barrat, J.-P. Hansen: *Basic Concepts for Simple and Complex Liquids*. Cambridge University Press, Cambridge (2003).
3. K. Binder, W. Kob: *Glassy Materials and Disordered Solids: An Introduction to Their Statistical Mechanics*. World Scientific, Singapore (2011).
4. J. Horbach, W. Kob, *Phys. Rev. B* 60 (1999) 3169.
5. K. Vollmayr, W. Kob, K. Binder, *Phys. Rev. B* 54 (1996) 15808.
6. C. A. Angell, in *Relaxation in Complex Systems*. (K. L. Ngai, G. B. Wright, eds.) US Dept. Commerce, Springfield (1985) 1.
7. W. Götze: *Complex Dynamics of Glass-Forming Liquids*. Oxford University Press, Oxford (2009).
8. J. C. Phillips, *Rep. Progr. Phys.* 59 (1996) 1133.
9. L. Berthier, G. Biroli, J.-P. Bouchaud, L. Cipeletti, W. van Saarloos (eds.): *Dynamical Heterogeneities in Glasses, Colloids and Granular Media*. Oxford University Press, Oxford (2011).
10. J. P. Garrahan, R. L. Jack, V. Leconte, E. Pitard, K. von Duijvendijk, F. van Wijland, *J. Phys. A.: Math. Theor.* 42 (2009) 075007.
11. G. Parisi, *Phys. Rev. Lett.* 43 (1979) 1754.
12. M. Mezard, G. Parisi, M. A. Virasoro: *Spin Glasses Theory and Beyond*. World Scientific, Singapore (1987).
13. Kondor Imre: Giorgio Parisi Nobel-díja. *Fizikai Szemle* 71 (2021) 365.
14. Q. Zhai et al., *Phys. Rev. Lett.* 125 (2020) 237202.
15. K. Binder, A. P. Young, *Rev. Mod. Phys.* 58 (1986) 801.
16. T. R. Kirkpatrick, D. Thirumalai, P. G. Wolynes, *Phys. Rev. A* 40 (1989) 1045.
17. X. Xia, P. G. Wolynes, *Phys. Rev. Lett.* 80 (2001) 5526.
18. J.-P. Bouchaud, G. Biroli, *J. Chem. Phys.* 121 (2004) 7347.
19. L. Berthier, *Phys. Rev. Lett.* 127 (2021) 088002.



**A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kéri mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tétele, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Szemle hasábjain az olvasókkal!**



1917 tavaszán *Paul Erhardt*, a német Légiközlekedési Társaság johannisthali vizsgáló állomásának vezetője és berepülő pilótája, kéziratköteget talált az íróasztalán, tele számítással. Mivel komoly dolognak tűnt, rögtön továbbadta matematikusuknak, *Arno Schleusnernek*. A szerzőről fogalma sem volt, mert a kísérő levél nem neki, hanem a társaság kereskedelmi igazgatójának, *Otto Marxnak* volt címezve.

Két nappal később ebédelni akarta hívni Schleusnert. Munkaasztala fölé görnyedve találta, olyan elmélyült tárgyalásban egy idegennel, hogy észre sem vették. Az asztalt számításokkal teli ívek borították. Az idegenből csak egy „acélszürke sörényt” látott, amelyet az asztalnak támasztott bal kezével sodorgatott. Az idegen akkor nézett csak föl, amikor Erhardt megkérdezte, nem jönne-e Schleusner ebédelni. Valahonnan ismerősnek tűnt az arca, de csak akkor jött rá, honnét, amikor Schleusner odasúgta neki: „De hát ez Einstein!”

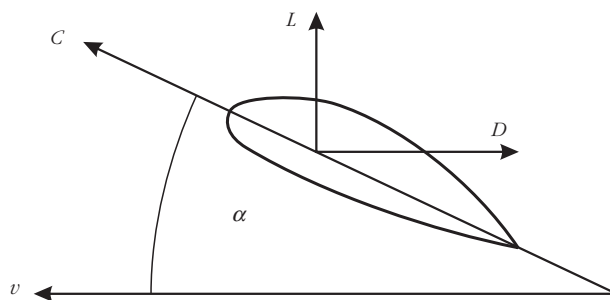
Erre ő is asztalhoz ült, de a rá záporzó matematikai formulákból semmit sem értett. Megkérte hát őket, mondanák el normális, érthető nyelven, miről is van szó. Egy olyan szárnyszelvény görbületének egyenletéről, felelték, amelynek maximális a felhajtóereje zérus állásszög és nagyon kicsi közegellenállás mellett.

Ezzel érdemes foglalkozni, vélte, és teljes lelkesedéssel nekilátott, hogy a gyakorlatban kipróbálják ezt az Einstein-szelvényt, amely azután a műhelyben a „macskahátszelvény” becenevet kapta (2. ábra.) [1].

Amint a 3. ábrán látható, a macskahátnál az  $L$  felhajtóerő korábban vált át csökkenésbe („átbillenés”), mint a többi szelvénynél, és ez bizony kellemetlen meglepetés a pilótának. A zérus állásszög pedig azt jelentette, hogy a szárny vízszintesen van a törzsre szerelve, és ilyen helyzetben kell, hogy szolgáltassa a felső felület a szívást, az alsó pedig a nyomást. Így hát a pilótának kellett a gép farát lenyomva repülnie ahhoz, hogy elérje a szárny optimális állásszögét. Erhardt, mint berepülő pilóta, ki is próbálta. „Felszállás után úgy lógtam a levegőben, mint egy terhes kacs – írta –, és úgy örültem, amikor keserves egyenes vonalú repülés után ismét talajt éreztem kerekeim alatt, röviddel a reptér vége előtt” [4].



*Illy József* 1956-ban szerzett fizika–matematika tanári oklevelet a József Attila Tudományegyetemen (JATE) Szegeden. 1982-től a fizikai (tudománytörténet) tudományok kandidátusa, 1983-tól egyetemi doktor, JATE. 1991 óta az Einstein Papers Project egyik szerkesztője a Boston Universityn, majd a California Institute of Technology.



1. ábra. A szárnyra ható erők:  $v$  a repülési irány;  $C$  a szelvény belépő és kilépő élét összekötő, úgynevezett húr;  $\alpha$  az állásszög;  $L$  a felhajtóerő;  $D$  a közegellenállás.

Az állásszög megváltoztatása után egy második pilóta is megkísértette a szerencsét, és sikerült is egy kört leírnia, de Erhardt szerint „a terhes kacsából csupán sánta kacsá lett”.

Mit keresett Einstein egy légiközlekedési vállalatnál?

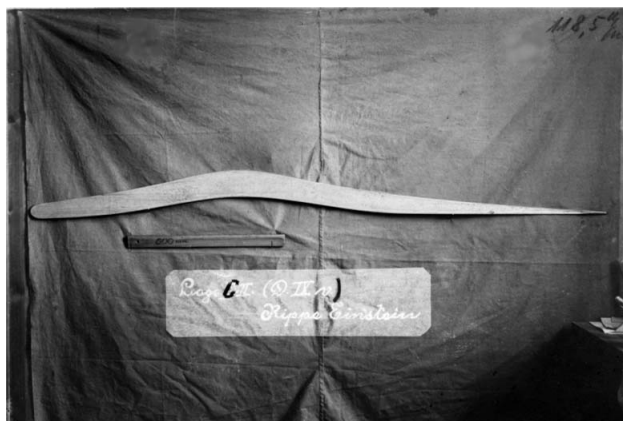
Az idők folyamán erre több választ adtak. Volt, aki szerint a légiközlekedési társaság a kutatókhoz fordult, hogy segítségükkel a német légierő versenyképessé váljék az antantéval. Néhányan vállalkoztak is erre, köztük Einstein. Ez az indok, Einstein elkötelezett háborúellenessége fényében, elfogadhatatlan.

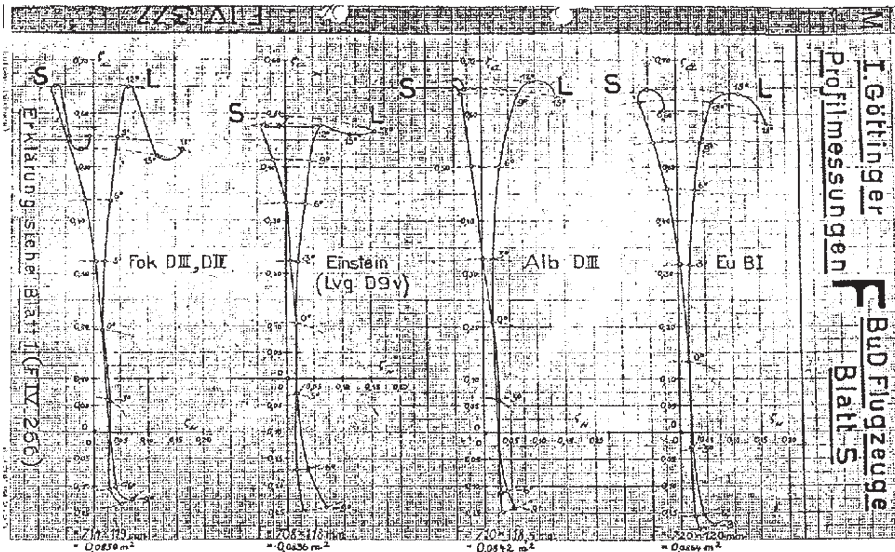
Egy másik forrás úgy tudja, hogy a légiközlekedési társaság tulajdonosa, *Arthur Müller* fordult Einsteinhez, és reklámcéllal tanácsadónak alkalmazta. Mivel Einstein úgy érezte, tennie kell valamit a pénzért, tervezett hát egy szárnyszelvényt.

Végül olyan ötlet is felmerült, hogy bizonyára Einstein volt zürichi munkatársa, *Ludwig Hopf* keltette föl Einstein érdeklődését az aerodinamika iránt. Hopf a német légierő repülőműhelyében dolgozott.

A biztos választ talán az az iratsomó tudná megadni, amelyet Marx kapott Einsteinól. Ez Erhardthoz került, és a 2. világháborúig dédelgetett kincse volt repüléstörténeti irodalmi gyűjteményének. A háború során azonban házat lefoglalták, és a gyűjtemény szétszóródott [5].

2. ábra. A „macskahátszelvény” [2].






3. ábra. Poláris diagram,  $S$  az alsó,  $L$  a felső szárnyfelületen légcatornában mért felhajtóerőre jellemző két mennyiség az  $\alpha$  állásszög, mint paraméter függvényében [3].

Az előzmények azonban megvilágítják Einstein útját.

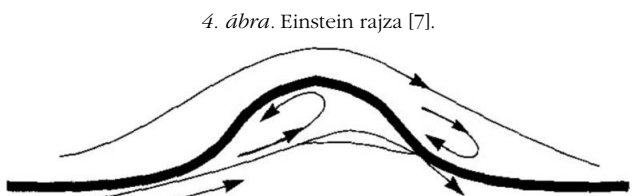
A berlini Tudományos Akadémia irattárának tanulmányozása során Hans-Jürgen Treder arra a következtetésre jutott, hogy amikor Einsteint meghívták az Akadémiára, 1914. áprilisi átköltözése után eleinte nem elméleti fizikusként alkalmazták, hanem repüléstechnikai szakértőként, azzal a feladattal, hogy az Akadémiára beérkező javaslatokat elbírálja [6]. Ez ugyan furcsán hangzik, de nem lehetetlen, mivel Einstein Berlinbe a svájci találmányi hivatalból érkezett.

1916. április végén ellátogatott Zürichbe, hogy régi barátjával, Michele Bessóval találkozzék. Bessónak később ezt írja: „A  görbénél nincs szélsőérték-probléma. A megengedhető görbületet a folyadékáramlás stabilitási viszonyai szabják meg; nagy görbületnél a légmozgás nem tud a felülethez simulni, úgyhogy örvény keletkezik” (4. ábra) [7].

Ez úgy hangzik, mintha a találkozásokon megkezdett gondolatmenetet folytatná. Még az sincs kizárva, hogy az Akadémiához benyújtott egyik találmány volt a témájuk.

Két hónap múlva, 1916. június 2-án érdekesnek ígérkező előadásra gyűltek a Német Fizikai Társulat tagjai. Einstein hirdette meg *A vízbullámok és a repülés elemi elmélete* címmel. Az előadást később folyóiratban is közzétette, ebből idézek [8].

„Min alapul repülőgépeink és a levegőben vitorlázó madarak szárnyának hordképessége?” – kezdte. „E kérdés körül sok a homály, sőt, be kell vallanom,



4. ábra. Einstein rajza [7].

hogy a szakirodalomban nem találtam rá a legegyszerűbb választ sem. Remélem, lesznek olvasóim, akik megelégedéssel olvassák a folyadékmozgásról szóló következő kis tanulmányt, amellyel ezt a hiányosságot kísérlem meg kiküszöbölni.”

Ezek szerint nem találta meg Martin Kutta és Nikolaj Zsukovszkij a szárny és a felhajtóerő összefüggéséről írt cikkeit, pedig ezek német repüléstechnikai folyóiratban jelentek meg még 1911-ben.

Áramló közegben a sebesség növelése a nyomás csökkenésével jár, folytatta. A domborulat fölött áramló levegő sebessége nagyobb, mint az alatta áramlóé, így fölül csökken a nyomása; az alatta áramló sebessége pedig csökken, így nyomása nő. A felső felületen szívás, az alsón nyomás lép föl (5. ábra).

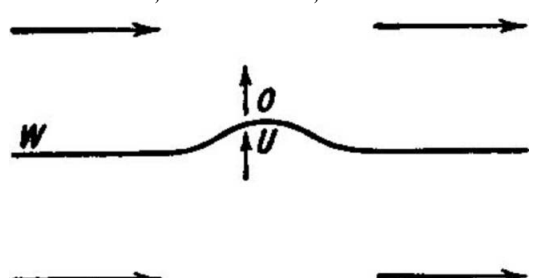
Ez a Bernoulli-elv. Meglepő, hogy Einstein nem említi ezen a néven. Lehetetlen hogy ne tudott volna róla, inkább annyira közismertnek vélte.

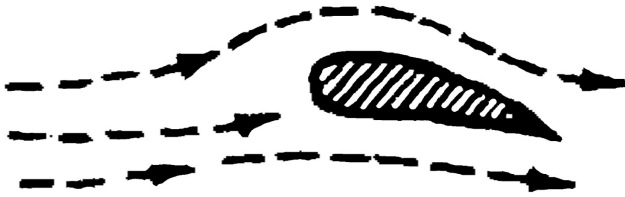
1954-ben Erhardt megírta Einsteinnek azt a levelet, amelyben elmondja, mi történt a repülővállalatnál Einstein szelvényjavaslatával. Erre adott válaszában Einstein leírja, hogy annak idején, 1916-ban, tudatában volt annak, hogy a repülés elméleti alapjait már Euler idejében ismerték, és idézi Bernoulli egyenletét, amely kimondja, hogy az áramló közeg nyomásának és sebessége négyzetének összege állandó, azaz, az áramlás sebességének növekedésével a közeg nyomása csökken. Az a gondolata támadt, hogy nyomást (felhajtóerőt) lehetne létrehozni egy felületen, ha alakját úgy változtatnánk meg, hogy a két oldalán egymástól eltérő sebességgel áramoljon a közeg [9].

Hozzátehetjük: kiegészítette ezt az ötletet egy olyan szelvényvel, amelynek éle van, így kicsi légel-lenállása.

Belátja, hogy a 6. ábra szelvényalakja (tegyük hozzá, amiről Kutta és Zsukovszkij írt) jobb, mint a „macskahát”, és a domborulatot a légáramban a szárny éles vége okozza.

5. ábra. A felhajtóerő illusztrációja Einstein cikkéből [8].





6. ábra. Einstein rajza [9].

Mindezt 1916-ban nem gondolta át, folytatta, és megmaradt az első ötletnél. Azt sem tudta, hogy az örvényképződéssel és sűrűlódással járó veszteséget úgy lehet elkerülni, ha a levegővel érintkező felületek nem nagyobbak, mint amekkora szükséges a domborulat létrehozásához.

Úgy vélem tehát, hogy Einsteint nem fölkérés csábította erre az „aerodinamikai kirándulásra”, hanem az a kihívás, hogy ő nemcsak meg tudja magyarázni a repülést, hanem a szakirodalomban elsőként tudományos alapon meg is tud tervezni egy szárnyszelvényt.

„Habár valószínűleg igaz, hogy a repülés elvét a legegyszerűbben így lehet megmagyarázni – folytatta Erhardtnak írt levelét –, ebből azonban egyáltalán nem következik, hogy okos dolog ily módon szer-

keszteni egy szárnyat. ... A természet nagyon jól tudja, miért kerekítette le a madarak szárnyát elöl, és tette éles szélűvé hátul. Így jár az, aki ugyan sokat gondolkodik, de keveset olvas ... Be kell vallanom, hogy még most is gyakran elszégyellem magam akkori könnyelműségemért.”

#### Irodalom

1. Paul Erhardt Einsteinnek, 1954. augusztus 26; Albert Einstein Archives (AEA) [59 556].
2. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Göttingen, Zentrales Archiv PS 17-5.
3. Grosz, P.: Herr Dr. Prof. Albert Who? Einstein the Aerodynamicist. That's Who! Or Albert Einstein and His Role in German Aviation in World War I. *W. W. I. Aero 118* (1988. február) 43.
4. Paul Erhardt Einsteinnek, 1954. augusztus 26; AEA [59 556].
5. Paul Erhardt Einsteinnek, 1954. szeptember 26; AEA [59 557].
6. Treder, Hans-Jürgen: Albert Einstein an der Berliner Akademie der Wissenschaften. *Albert Einstein in Berlin, 1913–1933, 1* (1979) Akademie-Verlag, Berlin, 7–78.
7. Einstein Michele Bessonak, 1916. május 14. *Collected Papers of Albert Einstein*. Princeton, University Press (CPAE) Vol. 8A, Document 219. A kiadvány 1–16. kötete elérhető a Digital Einstein Papers Home webhelyen.
8. Elementare Theorie der Wasserwellen und des Fluges. *Die Naturwissenschaften 25* (1916) 509–510; CPAE Vol. 6, Document 39.
9. Einstein Paul Erhardtnak, 1954. szeptember 7; AEA [76 235].

## RÉSZECSKEFIZIKAI KÍSÉRLETEK ELNEVEZÉSE ÉS SZERZŐI

Horváth Dezső  
Wigner Fizikai Kutatóközpont

### A mérőberendezések

A modern kísérleti részecskefizika óriási mérőberendezéseit valóságos embertömegek építik és üzemeltetik. Amikor 25 éve megalakítottuk Budapest–Debrecen csoportunkat a CERN OPAL-kísérleténél, a kísérlet vezetője, a CERN későbbi főigazgatója, *Rolf Heuer* panaszkodott, hogy az együttműködés 330 résztvevője túl kevés az üzemeltetéshez, a másik három hasonló LEP-kísérletben sokkal többen dolgoznak. Nekem akkor ez abszurditásnak tűnt fel. Később azonban tanúja voltam egy áramkimaradásnak vasárnap hajnali három óra körül, amikor csaknem 40 fizikusnak kellett odautaznia, hogy ellenőrzés után újraindítsa a felügyelet alatt álló részberendezést. Hárman telefonálgattunk, de mire az utolsókat ébresztettük, az

elsők már be is futottak; halkan nevetgélve vártuk az akkus vészlámpák félhomályában, hogy feléledjen az elektromos hálózat, és amikor az bekövetkezett, másfél óra múlva már minden megint működött, pedig néhány elektronikus egységet cserélni kellett. A mérőrendszer harmincvalahány részegységéhez 3-3 személy állt három műszakban készenlétben, hogy a gyorsítórendszer évi nyolc hónapos üzeme alatt bár-

A Brookhaven Nemzeti Laboratórium légifelvétele: elől az NSLS (Nemzeti Szinkrotron Sugárforrás), hátul az RHIC (Relativisztikus Nehézion-ütköztető) gyűrűje, az utóbbi természetesen a föld alatt.



*Horváth Dezső* Széchenyi-díjas kísérleti részecskefizikus. 1970-ben végzett az ELTE-n, kutatásait Dubnában és Leningrádban kezdte, a kanadai TRIUMF, az amerikai BNL, a svájci Paul-Scherrer Intézet, az olasz INFN, majd a CERN következett. Budapest–Debrecen kutatócsoportokat szervezett CERN-kísérletekre. 2006 óta koordinálja a magyar fizikatanárok részecskefizikai oktatását a CERN-ben. Emeritus professzor, magántanárként részecskefizikát oktat a Debreceni és a kolozsvári Babeş-Bolyai Egyetemen.





A CMS-kísérlet vezérlőterme adatgyűjtés közben, webkamerás felvételen. A műszaki felügyeletet spanyol lány vezette, a detektor működését holland hölgy, a számítógépes adatválogatást kínai lány, az adatgyűjtést francia férfi és az adatellenőrzést a szerző (középen hátul, fehér ingben és hajjal) végezte. Háttal, ellenőrző mérőműszerrel a hóna alatt áll *Szillási Zoltán* Debrecenből.

egység és nem találták a fő személyt. Odaképzelttem magam az aldetektort vezérlő ősrégi (10 éves Apple Macintosh) számítógép elé, és végig tudtam vezetni az ügyeletet a rendszer újraindításán.

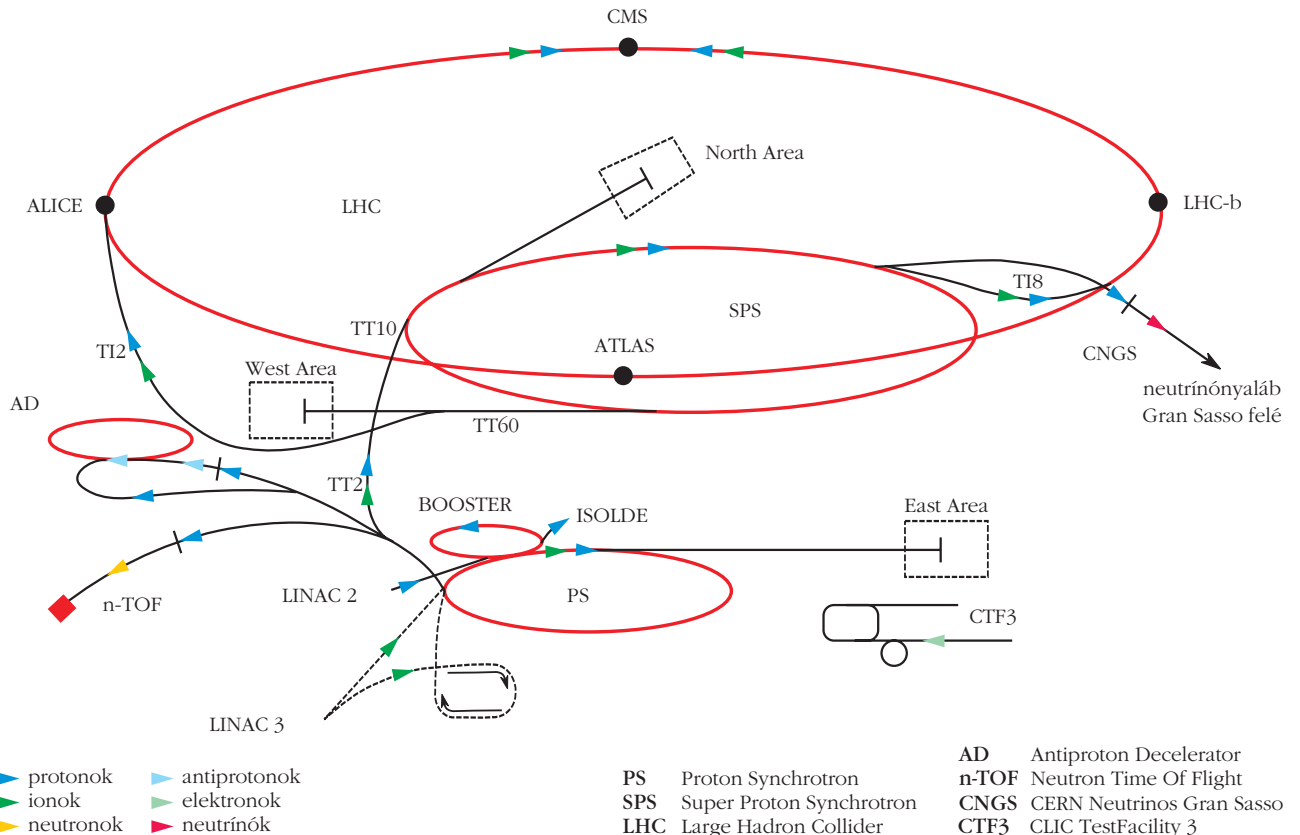
## Berendezések, kísérletek neve: pihent agyú fizikusok elmeszüléménye

Az együttműködéseknek azonosítójuk van. Arra régebben kód szolgált, általában valamilyen betű és utána az elfogadás sorszáma. A kísérleteket ugyanis először rövid tervben (azt szándéknyilatkozatnak hívjuk) benyújtják az illetékes laboratórium bíráló bizottságához, majd annak előzetes elfogadása után

mikor be tudjon avatkozni, és ez csak a detektor elemeire vonatkozott, ott volt még a szoftver is. A múlt század végén egyszer kirándulás közben, a Jura hegyében szólalt meg tartalék személyként a felügyeletre bízott részegység mobiltelefonja, mert leállt az

részletes (néha többszáz oldalas) tervben. Ha jóváhagyják, azonosítót kap. Kezdetben sorszámok voltak. A szerző például többek között a kanadai TRIUMF laboratórium Exp219 jelű, a New York melletti Brookhaven Nemzeti Laboratórium E811 kódú

A CERN részecskegyorsítói. A cikkben 4 tárológyűrű szerepel, az LHC, SPS, PS és AD.





Az olaszországi LNGS (Gran Sasso Nemzeti Laboratórium) sematikus elhelyezkedése a Gran Sasso hegy gyomrában.

és a CERN alacsonyenergiás antiprotongyűrűje melletti PS205-ös együttműködésében vett részt. Ugyanakkor más laboratóriumok (vicces egy sokezer fős intézetet laboratóriumnak hívni, de soknak az a neve) már 30 éve rövidítéseknek álcázott, érdekes neveket kezdtek adni. A dubnai Egyesített Atommagkutató Intézet egy komoly magyar részvételű nagyenergiás kísérletét a hetvenes években például RISK-nek hívták, amely oroszul kockázat, de ott a Relativisztikus Szikrás Sztrimer Kamra (a szikra oroszul iszkra) rövidítése volt.

Kifejlődött tehát a szellemes nevek sokasága, amikor az együttműködés kieszel egy jó angol főnevet, vagy sokkal gyakrabban valamilyen ismert mitológiai

Az IceCube köbkilométeres detektor felszíni laboratóriuma a Déli sark jégén.



nevet vagy fogalmat, és megálmod hozzá egy megfelelő rövidítést. Az alábbiakban felsorolunk néhányat közülük, jórészt a CERN-ből, a genfi Európai Részecskefizikai Laboratóriumból: név, minek a rövidítése, hol és mikor működött vagy mióta működik. Vannak olyan nevek, amelyekhez nem sikerült rövidítést kiészíteni (egyet azért bevettem, mert vicces, a ZEUS-t), és vannak fantáziatlan rövidítések, mint a jelenlegi kísérletem, a CMS (Compact Muon Solenoid). Nem volt fantáziatlan a TEVATRON D0 (D-nulla) kísérletének neve sem, hiszen eredetileg az egyetlen mágnes nélküli, nulla mágneses térrel működő nagyenergiás detektor volt, de később azt is mágneses térbe helyezték, csak a név maradt.

## Berendezések

A felsorolt, érdekes nevű kísérletek a következő nagyberendezéseknél működnek/működtek:

- AD: Antiproton Decelerator (Antiproton-lassító), új neve Antimatter Factory (Antianyaggyár), CERN, 1999 óta.
- BNL: Brookhaven National Laboratory (Brookhaveni Nemzeti Laboratórium), Upton, New York, USA, 1947 óta.
- CERN: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Európai Nukleáris Kutatási Szervezet), Genf, Svájc, 1954 óta.
- LNGS: Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Gran Sasso Nemzeti Laboratóriumok), Gran Sasso, Olaszország, 1989 óta.
- HERA: Hadron-Elektron-Ring-Anlage (Hadron-elektron Gyűrűs Létesítmény), DESY, Hamburg, Németország, 1990–2007.
- LEP: Large Electron-Positron collider (Nagy Elektron-pozitron Ütköztető), CERN, 1989–2000.
- LHC: Large Hadron Collider (Nagy Hadronütköztető), CERN, 2009 óta.

- PS: Proton Synchrotron (Protonszinkrotron), CERN, 1959 óta.
- RHIC: Relativistic Heavy Ion Collider (Relativisztikus Nehézion-ütköztető), BNL, Upton, USA, 2000 óta.
- SLAC: Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, USA, 1966–2000.
- SPS: Super Proton Synchrotron (Szuper-protonszinkrotron), CERN, 1976 óta.
- SURF: Sanford Underground Research Facility (Sanford Föld alatti Kutató Létesítmény), Lead, Dél-Dakota, USA, 2006 óta.
- TEVATRON: TeV-energy synchroTRON (TeV energiájú szinkrotron), FERMILAB, USA, 1983–2011.

## Kísérletek

Az alábbi felsorolásban a kísérletek neve csupa nagy betűvel szerepel, annak jelentése zárójelben, a kísérlet részletes neve, amelynek a rövidítése, utána pedig hogy hol, mikor működött.

- ACE (ász angolul): Anti-proton Cell Experiment (Anti-protonos sejt-kísérlet), CERN, AD, 2003–2013.

- AEGIS (Zeusz görög főisten pajzsa): Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy (Antihidrogén-kísérlet: gravitáció, interferometria, spektroszkópia), CERN, AD, 2014 óta.

- ALEPH (héber ABC): Apparatus for LEP PHysics (Berendezés LEP-fizikára), CERN, LEP, 1989–2000.

- ALICE (mesehős): A Large Ion Collider Experiment (Egy nagy ionütköztető kísérlet), CERN, LHC, 2009 óta.

- ALPHA (görög ABC): Antimatter Laser PHysics Apparatus (Antianyag lézerfizikai berendezése), CERN, AD, 2005–.

- AMANDA (női név): Antarctic Muon And Neutrino Detector Array (Antarktiszi müon- és neutrínódetektor-együttes), Déli sark, 1996–2005.

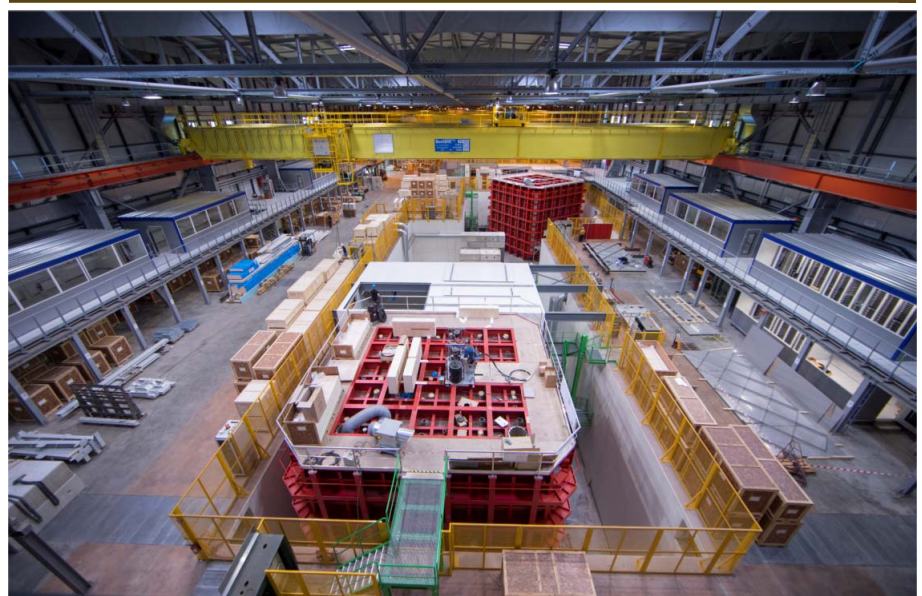
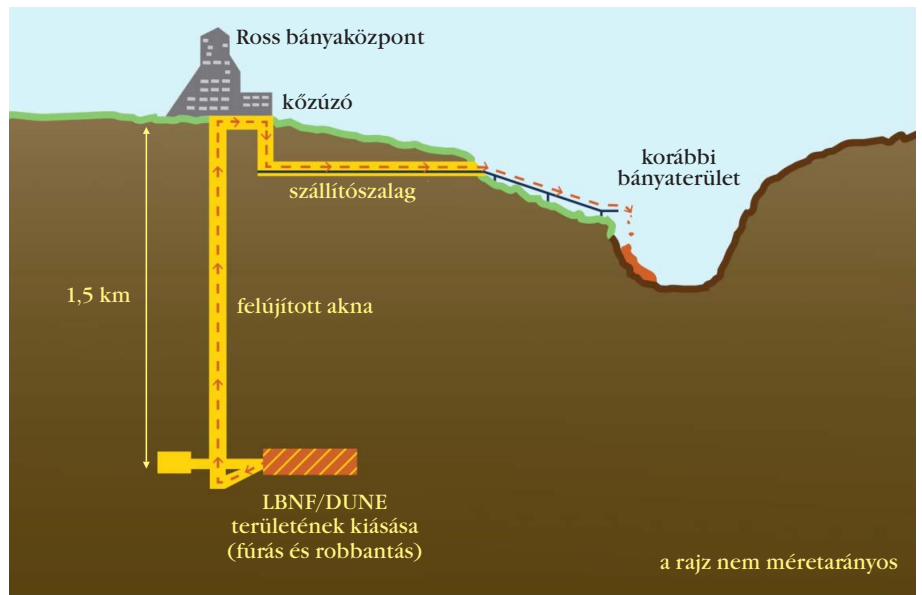
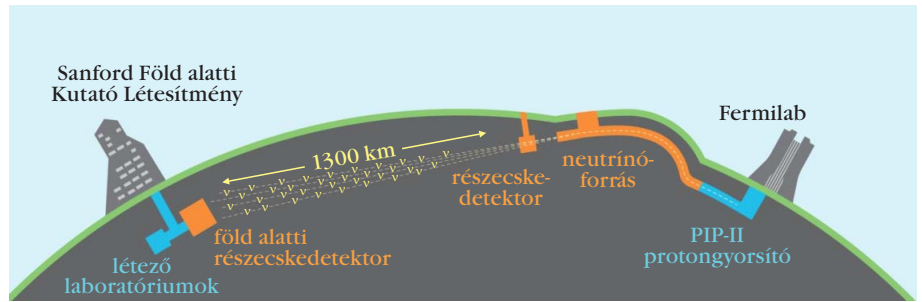
- AMBER (borostyán angolul): Apparatus for Meson and Baryon Experimental Research (Berendezés mezon és barion kísérleti kutatására), CERN, SPS, 2023 óta.

- ASACUSA (tokiói városrész): Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons (Atomi spektroszkópia és ütközések lassú anti-protonokkal), CERN, AD, 1999 óta.

- ATHENA (görög istennő): AnTiHydroGEN Apparatus (Antihidrogén-berendezés), CERN, AD, 1999–2005.

- ATLAS (görög titán): A Toroidal LHC Apparatus (Egy toroidális LHC-berendezés), CERN, LHC, 2009 óta.

- BABAR (mesebeli elefánt): B And b-BAR (B és B-felülvonás; az antirészecskét felülvonással jelölik), SLAC, USA, 1999–2008.



A Fermilab épülő DUNE-kísérlete. Fent: a Fermilabból induló neutrínónyaláb 1300 km-es pályája a földkérgén keresztül a SURF-ben épülő detektorig. Középen: a DUNE barlangjának ásása másfél km mélyen. A barlangot fúrással és robbantással készítik, a kitermelt kőeket felviszik, aprítják és egy elhagyott bányába töltik. Lent: A DUNE detektor prototípusának készítése a CERN-ben.

- BASE (alap angolul): Baryon Antibaryon Symmetry Experiment (Barion-antibarion szimmetriakísérlet), CERN, AD, 2013 óta.

- BRAHMS (zeneszerző): Broad RANGE Hadron Magnetic Spectrometers (Széles alkalmazású, mágneses hadronspektrométer), RHIC, BNL, 2000–2006.

- CLOUD (köd angolul): Cosmics Leaving Outdoor Droplets (Szabadtéri cseppeket keltő kozmikusok), CERN, PS, 2000 óta.
- COMPASS (iránytű) angolul: COmmon Muon Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy (Közös müon-proton berendezés szerkezetre és spektroszkópiára), CERN, SPS, 2001 óta.
- DELPHI (görög jósa): DEtector with Lepton, Photon and Hadron Identification (Detektor lepton-, foton- és hadronazonosításra), CERN, LEP, 1989–2000.
- DIRAC (angol fizikus): DIMeson Relativistic Atom Complex (Kétmezonos, relativisztikus atomkomplexum), CERN, PS, 1996 óta.
- DUNE (dűne, homokdomb): Deep Underground Neutrino Experiment (Neutrínókísérlet mélyen a föld alatt), SURF, USA, épülőben.
- ELENA (női név): Extreme Low ENergy Antiprotons (Extrém alacsony energiájú antiprotonok), CERN, AD, 2018 óta.
- FAST (gyors angolul): Five hundred meter Aperture Spherical Telescope (500 m nyílásszögű szférikus teleszkóp), Guizhou, Kína, 2016 óta (lásd a címlapon).
- FLAT (lapos angolul): Fermi Large Area Telescope (Fermi nagy területű teleszkóp), űreszköz, 2008 óta.
- HERA (görög istennő): Hadron-Elektron-Ring-Anlage (Hadron-elektron gyűrűs létesítmény), Hamburg, 1990–2007.
- ICARUS (szárnyas görög): Imaging Cosmic And Rare Underground Signals (Képalkotás kozmikus és ritka föld alatti jelekkel), LNGS, Olaszország, 2010–2015 és Fermilab, USA, 2017 óta.
- IceCube (jégkocka angolul): Köbkilométeres neutrínódetektor az Antarktisz jegébe süllyesztve, az AMANDA utódja, Déli sark, 2010 óta.
- JUNO (római főistennő): Jiangmen Underground Neutrino Observatory (Jiangmen föld alatti neutrínó-observatórium), Jiangmen, Kína, épülőben.
- LISA (Liza, női név): Laser Interferometer Space Antenna (Lézer-interferométeres űrantenna), tervben.
- LUNA (Hold): Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics (Föld alatti nukleáris asztrofizikai laboratórium), LNGS, Olaszország, 1993 óta.
- MINOS (krétai király): Main Injector Neutrino Oscillation Search (Főelőgyorsító neutrínóíz-rezgési keresés), Fermilab, 2002 óta.
- MUSASHI (japán szamuráj): Mono-energetic Ultra Slow Antiproton Source for High-precision investigations (Monoenergiás ultralassú antiprotonforrás nagy pontosságú vizsgálatokhoz), CERN, AD, 2000 óta.
- OPAL (féldrágakő): Omni-Purpose Apparatus at LEP (Sokcélú berendezés a LEP-nél), CERN, LEP, 1989–2000.
- OPERA (opera): Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus (ízregzési projekt emulziós nyomkereső felszereléssel), LNGS, Olaszország, 2008–2018.
- PHENIX (főnix, tűzmadár, a H és E között, az O helyén Napképpel): Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment (Úttörő nagyenergiás nukleáris kölcsönhatási kísérlet), BNL, USA, 2000 óta.

- SHINE (csillogás angolul): SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment (Nehézion- és neutrínókísérlet az SPS-nél), CERN, SPS, 2006 óta.

- STAR (csillag angolul): Solenoidal Tracker At RHIC (Szolenoidos nyomkövető az RHIC-nél), BNL, USA, 2000 óta.

- ZEUS (görög főisten): A detector for HERA (Detektor a HERA-nál; Hera istennő férje volt Zeus!), Hamburg, DESY, 1990–2007.

Mint látjuk, a fizikusok kedvenc névbányája az ókori görög–római mitológia, de vannak mesehősök, híres emberek és angol szavak is a nyertes nevek között. A fentiekén kívül rengeteg még a fantáziánév, sokból nem is sikerült igazi betűszót készíteni. Jómagam a fenti táblázat két nevével bábáskodtam, mindkettő japán. Az ASACUSA nevet az együttműködés nem japán résztvevői találták ki, honorálva a domináns japán hozzájárulást. A MUSASHI nevet a kísérlet japán vezetőjével együtt találtuk ki, én egészítettem ki a leghíresebb szamuráj nevére a rövidítést.

## Az óriási kísérletek cikkeinek szerzői

Köztudott, hogy az óriási kísérletek nagyon drágák, és nem is annyira maguk az eszközök, hanem a felépítésükhöz és üzemben tartásukhoz szükséges munkaerő. Példának a CMS-kísérletet fogom emlegetni, mert abban veszek részt, és abban van a CERN-együttműködések közül a legnagyobb magyar részvétel. 2021-ben az együttműködésnek 56 ország 246 intézményéből 5604 résztvevője volt, csaknem 2000 közülük doktorátussal (PhD) rendelkező fizikus, másik 2200 PhD- vagy MSc-hallgató, a többi mérnök és technikus. A legtöbben, a résztvevők több, mint harmada amerikai egyetemek és kutatóintézetek képviselésében, utána Olaszország, Svájc, Németország, Oroszország, Kína, India következik és csak utánuk Franciaország, pedig a kísérlet francia területen található. A tényleges munka persze kisebb csoportokban történik. Magyarországról a Wigner Fizikai Kutatóközpont, az Eötvös Loránd Tudományegyetem, a debreceni Atommagkutató Intézet, a Debreceni Egyetem és a gyöngyösi Eszterházy Károly Egyetem vesz részt egy-egy csoporttal. Mindegyik csoportnak van valamilyen vállalt feladata az észlelőrendszer körül, anyagilag és munkával járul hozzá az üzemben tartásához és fejlesztéséhez. Mint látjuk, Amerika nagyon nagy részt vállal a CMS-ből, de az amerikai csoportok résztvevőinek csak alig több mint fele amerikai állampolgár, az amerikai egyetemek rengeteg külföldit tartanak a CMS-nél a berendezéseik üzemeltetéséhez. A CERN nagyon szeretné, ha a kísérletekben a női részvétel megközelítené az 50%-ot, de attól még sajnos messze vagyunk: a CMS fizikusai közül csak mintegy 20% nő. Az ATLAS-kísérlet nagyobb a CMS-nél: detektora térfogatra a CMS nyolcszorosa, súlya a fele, résztvevőszáma pedig 20%-kal több.

Háromféle támogatásra van szükség egy kísérletben való részvételhez: (1) készpénz arra, hogy meg-

vásárolják az alkatrészeket, anyagokat, számítástechnikát és bérelhessenek professzionális segítséget külső cégektől, mint például a 2000 tonnás darabok leeresztése a 100 m mély mérőbarlangba; (2) fedezni a sokszáz, néha többezer CERN-ben szolgáló résztvevő kinti munkáját, utazását, szállását és napidíját; és (3) biztosítani a kutatás otthoni és kinti hátországát: iroda, laboratórium, műszerek, dolgozók fizetése. Ezekre a kutatók pályázatokból szereznek pénzt, és ezért a finanszírozó természetesen eredményeket követel. Egy részecskefizikai kutatás legfőbb és leggyakoribb eredménye (természetesen innováció, előadások és tankönyvek mellett) a tudományos publikáció. Ha tehát egy csoport pénzt kap a kutatásra, azért publikációkat kell felmutatni. Ennek az az elképesztő következménye, hogy az LHC indulása óta eltelt 12 év alatt a CMS-együttműködés évi 100 publikációjának egyenként 2000-nél több a szerzője (és a résztvevők kevesebb, mint fele szerző!). A cikkek felének hosszabb a szerzői listája, mint a szövege. Mivel a legtöbb más tudományterületen egy publikáció szerzőszáma 1 és 10 közötti, ezek az ezres szerzőszámok igencsak idegenül hangzanak még a fizikus kollégáknak is. Az Akadémia publikációs nyilvántartása például alig hajlandó befogadni ezeket a közleményeket. Mi erre azt mondjuk, hogy más játszótér, de ez persze nem oldja meg a problémát, szüntelen vitatéma a kutatók között.

Komoly probléma a szerzők sorrendje a publikációkon. Kis csoportok cikkein előre veszik azt, akinek a legkomolyabb a hozzájárulása, de tíznél több szerzőt már inkább ABC-sorrendben írnak fel. Dubnai cikkeimben jó hátul vagyok a listán, mert a H betű az orosz ABC végén van, de volt mögöttem egy Ju-betűs kolléga, az ugyanis az utolsó előtti betűjük. Amint majd látszik, a CMS kivételével valamennyi behemót kísérlet szerzői listája A betűs vezetéknevvvel kezdődik, a CMS-é viszont egy változó örménnyel Jerevánból. Az utóbbi magyarázata az, hogy a CMS-együttműködés a vezetéknev helyett országnév, majd azon belül intézménynév szerinti ABC-ben sorolja fel a cikkek szerzőit, amíg tehát albán, algériai, andorrai vagy argentin intézmény nem csatlakozik, marad a szerzői lista elején Armeniaként Örményország, ők viszont csereberélik a szerzőiket. Az A betűvel kezdődő név nemcsak a részecskefizikában előnyös: Novák Vilmosból ezért lett Aba-Novák Vilmos, nagy magyar festőművész.

Alant felsorolok néhány nagyobb együttműködést az első szerzőjével, annak munkahelyével és a cikkek aktuális szerzőszámával. A kísérletek szerzői névsora természetesen cikkről cikkre változik, de a névsor hossza jól tükrözi a kísérletek méretét annak ellenére, hogy a résztvevőknek talán a fele szerző.

- AEGIS, CERN: *Aghion, S.* (Milánó, Olaszország) + 64 társszerző;
- ALICE, CERN: *Acharya, Shreyasi* (Calcutta, India) + 1023;
- ATLAS, CERN: *Aaboud, Morad* (Oujda, Marokkó) + 2892;

- CDF, Fermilab, USA: *Aaltonen, Timo A.* (Helsinki, Finnország) + 397;
- CMS, CERN: *Tumasyan Armen* (Jereván, Örményország) + 2287;
- COMPASS, CERN: *Aghasyan, Mebr* (Trieszt, Olaszország) + 225;
- D0, Fermilab, USA: *Abazov, Victor M.* (Dubna, Oroszország) + 371;
- H1, DESY, Hamburg: *Andreev, V.* (Moszkva, Oroszország) + 134;
- IceCube, Antarktisz: *Aartsen, Mark G.* (Canterbury, Új-Zéland) + 333;
- LHCb, CERN: *Aaij, Roel* (Amsterdam, Hollandia) + 846;
- LIGO (2 helyen, USA) + VIRGO (Pisa, Olaszország): *Abbott Benjamin P.* (Pasadena, USA) + 1129;
- PHENIX, Brookhaven, USA: *Aidala, Christine A.* (Michigan, USA) + 297;
- PLANCK, műhold, világűr: *Aghanim, Nabila* (Orsay, Franciaország) + 158;
- STAR, Brookhaven, USA: *Adam, Jaroslav* (Omaha, USA) + 342;
- ZEUS, DESY, Hamburg: *Abramowicz, Halina* (Tel Aviv, Izrael) + 113;

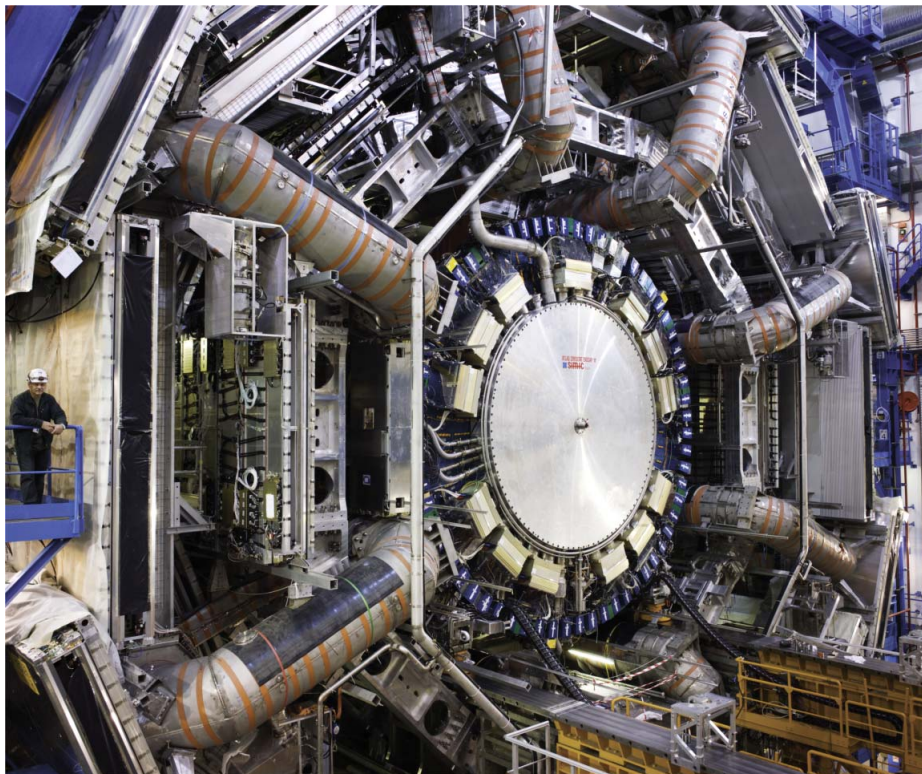
Az LHC-kísérletek cikkein jelenleg a következő magyar szerzőszám látható: ALICE: 12, ATLAS: 2, CMS: 29, LHCb: 1, TOTEM: 5.

## Publikációs gyötrelmek

Mint említettem, pénzt pályázaton nyerünk a kísérletre, azért pedig publikációkat kell szállítanunk. Tekintettel az LHC-detektorok sokszázmillió dolláros árára, a résztvevő intézményeknek egyenként is rengeteg pénzzel kell beszállniuk. Ez Magyarország részéről a CMS-hez egymillió, az ALICE-hoz félmillió svájci frank közvetlen pénzbeli átutalást jelentett, és ehhez még hozzáadódik az utána pályázaton elnyert otthoni és külföldi támogatás, valamint a résztvevő kutatók bére és infrastrukturális környezete. A publikációkon tehát valamennyi résztvevő intézménynek szerepelnie kell valahány szerzővel.

Ráadásul, ha a publikáción többezer a szerző, meg kell tudnunk mutatni, mit csináltunk benne, ami nem mindig egyszerű. Ha a 2200 szerzőből olyan csoporthoz tartozom, aki egy részegységet üzemben tart a százból, minden cikken rajta lesz a nevem, még ha rá sem pillantottam, mert a munkánk nélkül nem született volna meg. Mások megcsinálták volna, persze, és ők lennének szerzők. Ahhoz viszont, hogy valaki megszerezze a PhD-fokozatot, a vizsgákon és dolgozaton kívül, valódi saját cikkeket is szállítania kell a dolgozat témájában. Erre valók a konferenciaelőadások cikkei, amelyek ugyan kevésbé komolyak, mert nincs bennük új, még publikálatlan eredmény, viszont csak egy-két szerzője van, és megmutatja, hogy az együttműködés megbízta az adott téma előadásával, tehát biztosan komoly szerepe volt benne. Ugyanakkor az is fontos, hányan hivatkoznak egy cikkre, és az





Az LHC ATLAS-kísérlete a CERN-ben. A detektort kinyitották a gyorsító hosszabb szünete alatt, jól látszik az óriási toroidmágnes nyolc tekerése és a belehelyezett hengeres szolenoidhoz csatlakozó érzékelőrendszer.

ilyen konferenciacikkre kevesen hivatkoznak, hiszen nincs bennük új eredmény. PhD-védéseken hivatkozni szoktunk a cikkeket megelőző belső, esetenként többszáz oldalas tanulmányokra, amelyeken a kis munkacsoportok leírják az adatgyűjtés vagy adatelemzés alkalmazott módszerét: ezek ugyan nem nyilvánosak, viszont kevés szerzősek.

Az új eredmények csak olyan cikkekben jelenhetnek meg, amelyekkel egyetért az összes szerző, a CMS esetében több, mint kétezer. Ezt elérni hosszú és gyötrelmes folyamat, amelynek során a fő szerzők előadásokat kénytelenek tartani a cikkről az együttműködésnek, megvédeni az eredményt a versenytársak előtt. Ha ez sikerül (nem mindig!), megírni az első változatot, amelyet egy erre kijelölt bizottság addig gyúr, amíg elfogadhatónak nem ítéli. Ezután angol nyelvi lektorálás jön, majd körözés a teljes együttműködés előtt, ahonnan beérkezik, majd több száz, időnként egymásnak ellentmondó jobbító javaslat. Ezekre a szerzőknek írásban válaszolniuk kell. Utána egy publikációs bizottság elé kerül a cikk (általában olyankor az már túl van a tizedik változaton, ha egyáltalán eljut odáig), akik megint végigrágják mondatról mondatra (én is havonta részt veszek ilyesmi), és végül megállapodnak egy változatban, amely mehet a folyóirathoz. Az kiadja bírálóknak, általában egy témabeli elméleti fizikusnak és valakinek egy konkurens kísérletből, akik jól megbírálják, de a fenti folyamat eredményeképpen a cikk már elég jó ahhoz, hogy csak kérdezzenek vagy helyesbítést kérjenek, de ne utasítsák el.

A publikációk gyötrelmes születésének van egy érdekes következménye: az eredményeket nem lehet titokban tartani. Amikor 2012 nyarán az ATLAS és a CMS nagy előadást hirdetett a Higgs-bozon keresésével kapcsolatban, már egy héttel előtte köztudott volt a felfedezés. A *Nature* folyóirat internetes kiadása három nappal korábban, számszerűen ismertette a bejelentendő eredményt, pedig elvileg titokban kellett tartanunk. Újságírók engem is próbáltak faggatni, de nem beszélhettem róla a bejelentés előtt. *Benjamin Franklin*nak tulajdonítják a mondást, hogy „három ember akkor tud titkot tartani, ha közülük kettő halott”, és ezt sokezer fizikus ismerte. Az előadást internetesen több millió ember nézte végig, Magyarországon is három helyszínen, előadótérmekekben közvetítettük.

Az eredmények széles körözésének van még egy, időnként kínos következménye: néha az is kijut, amit nem fogadunk el. Az LHC-nál többen eldicsekedtek újságíróknak különféle, nem kellőképpen alátámasztott felfedezésekkel, amiktől frászt kaptak az érintett együttműködések, a Higgs-bozont is többen látni vélték a felfedezés előtt. A LEP-nél például elterjedt annak idején, hogy az ALEPH-kísérlet látott egy leptokvark nevű egzotikus részecskét; mi is ellenőriztük az OPAL-nál, de nem láttuk. Tanúja voltam egy akkori nagy konferencián, ahol az OPAL-együttműködést képviselő előadónak kiadták, hogy csak akkor beszélhet róla, ha valaki rákérdez, az ALEPH ugyanis nem jelentett be ilyen előadást. Mit tesz isten, az OPAL-ostól valaki megkérdezte, mire az boldogan előhúzott egy diát arról, hogy nem látjuk. A legnagyobb port felvert ilyen eset sokkal komolyabb volt, ahogyan le is írtuk a *Fizikai Szemlében*. A CERN felállította az OPERA-kísérletet a Gran Sasso laboratóriumban és a földkérgen keresztül küldött neutrínónyalábot oda. A kísérlet (időzítési hiba miatt) kezdetben úgy észlelte, hogy a neutrínók a 730 km távolságot a fénysebességnél gyorsabban tették meg, és ezt közzé is tették, bár folyóiratban nem publikálták, de az együttműködők jelentős része nem volt hajlandó a nevét adni hozzá.

A fent emlegetett kísérleteknek bőséges irodalma van, az érdeklődők mindent megtalálnak róluk a világhálón, ez a cikk csak az érdekességekkel és furcsaságokkal foglalkozik, ezért nem is mellékelek hozzá irodalomjegyzéket.

## KÉZZELFOGHATÓVÁ VÁLT AZ ENERGIAVÖLGY

– avagy a nukleáris átalakulások bemutatásának új dimenziója

Kis Tamás

Eötvös József Református Oktatási Központ, Heves

Az atommagfizika tanítása igazi kihívás. Ennek csak egyik oka a módszeresen lecsökkentett óraszám. Ha a témakörre marad idő (immár a 10. évfolyamon, a tanév vége felé), akkor sem lehet – a többi anyagrészhez hasonló – kísérletalapú tárgyalásmódot alkalmazni. Sajnos csak kevés iskolában van Geiger–Müller-számláló és megfelelő sugárforrás. Még kivételetesebbek azok a szertárak, ahol (esetleg saját fejlesztésű) ködkamra is megtalálható. Általában csak videókkal és különféle ábrákkal lehet támogatni a tananyag megértését.

A magátalakulások magyarázatánál leginkább az egy nukleonra jutó átlagos energiára (illetve a kötési energiára) szokás hivatkozni. Mivel ezt a mennyiséget a rendszám és a tömegszám függvényében érdemes ábrázolni, ezért itt egy térbeli oszlopdiaagramot kellene bemutatni. Az energiavölgynek nevezett képződmény megjelenítése komoly feladat, többnyire metszetábrákkal oldható meg.

A hevesi Eötvös József Református Oktatási Központban két tanítványommal, Szabó Dáviddal és Veres Viktóriával arra vállalkoztunk, hogy 3 dimenziós grafikai programokkal elkészítjük az energiavölgy modelljét. A két diák kiválóan ismerte az informatikai lehetőségeket, én a fizikai háttérrel biztosítottam számukra. Munkánk alapfeltétele volt egymás ötleteinek, szakmai nyelvének kölcsönös megértése, a két tudományterület hatékony „egybegyúrása”.

### Első lépések

Nélkülözhetetlen volt egy adatbázis létrehozása, amely a rendszám és a tömegszám mellett az ábrázoláshoz szükséges energiaértékeket tartalmazta. A Wikipédiáról egy Excel-táblázatba gyűjtöttük a periódus-

Köszönet illeti Sükösd Csabát a sok-sok nagyszerű tanácsért.



Kis Tamás matematika–fizika szakos tanár, fejlesztő-innovátor mesterpedagógus. A kísérletezés, a megfigyeléseken alapuló fizikaoktatás elkötelezettje. A Földi János természettudományi verseny szervezője, a Mikola Sándor fizikaverseny bizottságának tagja. Pro Progressio és MOL MesterM díjas.

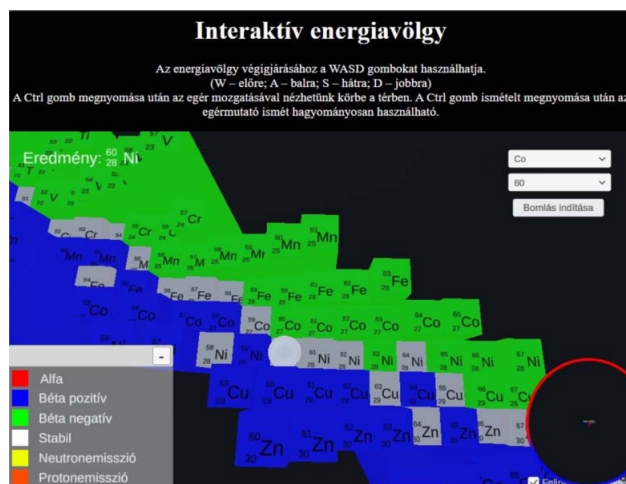
rendszer első 94 eleme 1416 izotópjának relatív atomtömegét. A tömeghiány, a tömeg-energia ekvivalencia és néhány fizikai állandó felhasználásával kiszámítottuk a nukleonok átlagos energiáját az egyes magokban. Mivel a proton és a neutron kötött állapotban van az atom belsejében, ezért ez egy negatív szám (az átlagos kötési energia ellentettje). A nullszintet a  $^1\text{H}$  szabadnak tekinthető protonja adja. Végül az adatbázist az izotópokra jellemző bomlástípussal és a felezési idővel is kiegészítettük.

Sarkalatos kérdés volt a modell megalkotására legalkalmasabb szoftver kiválasztása. Úgy döntöttünk, hogy az energiavölgy virtuális modelljét – a program sokoldalúsága miatt – Unityben C# nyelven fogjuk elkészíteni. Ehhez Blenderben csináltunk egy „kezdetleges” diagramot. Elhatároztuk azt is, hogy AutoCad segítségével készítünk egy 3D-s nyomtatásra alkalmas verziót is.

### Bejárható az energiavölgy

A virtuális modell oszlopait a bomlási módok szerint színekkel láttuk el. A térhatású képződmény körüljárható, tetszőleges irányból megfigyelhető. A felhasználó egy almenüből választhat az 1416 feldolgozott izotóp közül, s ennek energiavölgyben elfoglalt helyét megmutatja a program (1. kép). Ha a mag  $\alpha$ - vagy  $\beta$ -bomló, akkor az átalakulás végterméke is megjelenik a monitoron. A folyamatot az energiavölgyben az

1. kép. Az interaktív energiavölgy program képernyőfotója.





# EXOBOLYGÓK: EGY TANULÓI KÍSÉRLET

Schnider Dorottya – Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium, ELTE TTK Anyagfizikai Tanszék  
Hömöstre Mihály – Budapesti Német Iskola, ELTE TTK Anyagfizikai Tanszék

Exobolygók és exobolygó-kutatás? A Naprendszeren kívüli bolygókkal a legtöbb tanterv nem foglalkozik, ugyanakkor az exobolygó-kutatás módszerei néhány fizikaérettségi feladat kapcsán a középiskolai fizika-oktatásban is előkerültek már. Nem csoda, hiszen az exobolygó-kutatás napjaink csillagászatának egyik sikeres, modern és fejlődő területe, amivel bátran foglalkozhatunk akár fizikaórán is.

## Bevezetés, célkitűzések

A fizikaoktatás terén szükséges a módszertani paletta szélesítése annak érdekében, hogy a megváltozott feltételek mellett – változó tudáskonceptió, új kerettantervi követelmények, Z generációs diákjaink igényei – is eredményesek lehessünk, és megfelelő módszerek alkalmazásával biztosítsuk diákjaink számára az eddigiekhez hasonlóan színvonalas munkavégzést, a megfelelő mélységű tudás megszerzését, a fejlődés lehetőségét és a sikerélményt. Mindehhez a korábban alkalmazott módszerek fejlesztése, új módszerek kidolgozása és tesztelése szükséges. Az általunk kidolgozott, Arduinóval támogatott tanulói kísérletezés lehetőséget ad arra, hogy a tanulóktól elvárt tudást meghatározott követelmények mentén fogalmazzuk meg, teljesítményüket adott fizikai kompetenciaele-

---

A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium Kooperatív Doktori Program Doktori Hallgatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



*Schnider Dorottya* 2020-ban végzett az ELTE-n angol nyelv és kultúra – fizika szakos tanárként. 2019 szeptembere óta a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium fizikatanára. A diploma megszerzését követően felvételt nyert az ELTE Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítási Programba, ahol a mechanika interdiszciplináris tanításának és a tanulói kísérletek fejlesztési lehetőségeit vizsgálja.



*Hömöstre Mihály* 2006-ban végzett az ELTE fizikatanári szakán. 2014 óta a magyar IYPT csapat felkészítő csapatának tagja, 2016 óta az ELTE Anyagfizikai Tanszékén tanít szakdidaktikai tantárgyakat, 2018 óta a Budapesti Német Iskola fizikatanára. MOL Mester-M (2010) és Ericsson-díj (2020) birtokosa.

mek – például: jelenségek önálló leírása, értelmezése, illetve magyarázata, becslés, tervezés, számítások elvégzése, hipotézisállítás, grafikonok készítése és értelmezése – alapján értékeljük, és ezen fejlesztendő készségek – különböző operátorok – figyelembevétel mellett tervezzük óráinkat [1, 2].

Célunk, hogy egy olyan általunk készített és tesztelt órai anyagokat mutassunk be, amely kiemeli a kísérletezés fontosságát. Az általunk használt módszer lényege, hogy gyakorlatorientált módon, a diákok önálló tevékenységeik – csoportmunkában szervezett tanulói kísérletek és mérések – során mélyítik el a korábban megszerzett ismereteiket.

Írásunkban bemutatunk egy általunk hasznosnak tartott eszközt, valamint annak órai alkalmazásához módszertani segítséget kínálunk – egy projekt leírásával – a gyakorló fizikatanár-kollégák számára.

Az általunk véghez vitt, Arduinóval [3] támogatott fizikaórai projekt a diákok frontális tanórákon megszerzett ismereteit segíti elmélyíteni, miközben a szociális és digitális kompetenciák mellett tudatosan hangsúlyt fektet olyan szakmai készségek fejlesztésére, mint a *becslés, kiértékelés, elemzés, tervezés*.

## A projekt bemutatása

### Részvevők

A projektet a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium 9. évfolyamán végeztük a 2020/2021-es tanévben. Annak érdekében, hogy az általunk alkalmazott gyakorlatorientált, cselekvésközpontú módszer – csoportmunkában szervezett, Arduinóval történő modellezés – egyes kompetenciaelemek fejlődésére gyakorolt hatását vizsgálni tudjunk, teszt- és kontrollcsoport mellett végeztünk kutatást. A tesztcsoportot (16 fő) a gimnázium természettudományos tagozatának (9.B) emelt szintű csoportját alkotó diákok, a kontrollcsoportot a speciális matematika tagozatos 9.C-sek adták 35 fővel. Mindkét csoport fizikatanára *Schnider Dorottya*.

### Módszerek

A vizsgálat első lépéseként a diákokkal előzetes tudásfelmérőt írtunk, amelybe a korábbi évek grafikus és elemző típusú érettségi feladatai közül válogattunk. A feladatok minden előzetes elméleti ismeret nélkül, logikus gondolkodás, táblázat- és grafikon-elemzés segítségével megoldhatók voltak. Az *1. ábra* a tudásfelmérő egyik feladatát mutatja be, amely az exobolygó-detektálás tranzitmódszerére [5] épül. A feladat leírása segíti a lényegi megértést, emellett a

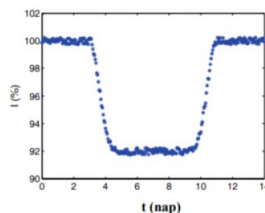
Az exobolygók (azaz a mi Naprendszerünkön kívüli bolygók) egy része olyan pályán kering a csillagja körül, hogy a Földről nézve áthalad a csillag előtt. Egy exobolygó kutatási módszer a tranzit (fotometriai) módszer, amelynek alapja a csillag fényintenzitásának mérése. Az alábbi grafikonon egy tipikus mérési görbét mutat, amelyen a csillag fényintenzitásának százalékos csökkenése van feltüntetve.

a) Miért csökken a csillag fényintenzitása?

b) Körülbelül mennyi idő alatt haladt át a bolygó a csillag előtt? Válaszodat indokold!

b) Mit mondhatunk a görbe alapján a csillag és a körülötte keringő bolygó átmérőjének viszonyáról (arányáról)? (A fényintenzitás területtel arányos.)

1. ábra. A tudásfelmérő egyik elemző feladata – 2011. május, középszintű érettségi [4].



A teszt- és a kontrollcsoport diákjai ugyanazt, a következőkben bemutatott elméleti alapoást kapták, frontális szervezési módban, tanári előadás-magyarázat során.

A Kepler-törvények és a Newton-féle gravitációs erő törvény

A Kepler-törvények és a Newton-féle gravitációs erő törvény összekapcsolása fizika-történeti szempontból is je-

mellékelt grafikon alapján egyszerűen megválaszolható a kérdések. A grafikus feladat megfelelően előkészíti a felmérő utolsó feladatát, amely egy mérés megtervezését kéri a tanulóktól. „Tervezz meg egy fizikaórai kísérletet, amely az exobolygók kutatásához használt módszert modellezi!

A tesztet követően a 2020/2021-es tanév nyári szünet előtti utolsó néhány óráján a diákok frontális osztálymunka keretei között ismerhették meg a Kepler-törvényeket, a Newton-féle gravitációs erő törvényt, a törvények közötti kapcsolatokat, valamint az exobolygó-kutatás módszereit [5]. A gyakorló fázis során következett az ismeretek rögzítése és elmélyítése. A tesztcsoport diákjai Arduinoval támogatott méréseket végeztek, megfelelő tanári koordinálás mellett tanórai keretek között modellezték az exobolygó-kutatás fotometriai (tranzit-) módszerét. A matematikagazdátos osztály – kontrollcsoport – számára a gyakorlást a számolási feladatok megoldása jelentette. Esetükben az érettségiken megjelenő feladatok megoldása nem jelent kihívást. Érezhetően az exobolygókkal kapcsolatos, gravitációs erő törvényre és Kepler-törvényekre alapozó érettségi feladatok nem hozták lázba a kontrollcsoport tagjait, őket inkább a nehezebb, problémaközpontú feladatok motiválják.

A témakör végén a diákok témazáró dolgozatot – utótesztet – írtak. Az eredményeket statisztikai hipotézisvizsgálati módszerek segítségével elemeztük ki (lásd *Eredmények*).

## Elméleti alapok

Mikor érdemes exobolygó-kutatással foglalkozni egy középiskolai fizikaórán? A 2020-as kerettanterv [6] 14 órában javasolja feldolgozni a *Világegyetem megismerése* című témakört. Tanulási eredményként megjelöli – többek között – az általános tömegvonzás törvényét, a Kepler-törvényeket, a mesterséges égitestek vizsgálatát, a kozmikus sebességek jelentésének megértését stb. Javasolt tevékenységek között szerepel az exobolygók adatainak áttekintése is. Mi mindezt összekapcsoltuk, és egy kéthetes – 4-5 fizikaórát felölelő – projekt keretein belül tanítottuk meg diákjainknak az elvárt ismereteket.

lentős. *Johannes Kepler*, aki a kopernikuszi elmélet híve volt, törvényeit *Tycho de Brahe* mérései alapján dolgozta ki. Kepler 1600-ban lett II. Rudolf udvari csillagásza, Brahe segédje. Brahe jó megfigyelő volt, Kepler viszont nagyszerű matematikus, akit rövidlátása gátolt a pontos megfigyelésekben. Brahe halála után Kepler – felhasználva a megfigyelési adatokat – kimutatta, hogy a Mars pályája ellipszis, amelynek egyik gyújtópontjában a Nap áll. Tycho de Brahe mérései sorozata alkalmas arra, hogy megadja a bolygók pályamenti sebességeit. A bolygók a Nap közelében gyorsabban mozognak, mint naptávolban. Kepler kereste a bolygók mozgásának okát, rájött, hogy a bolygómozgás a Nappal kapcsolatos, a sebesség a Naptól való távolság növekedésével csökken. 1619-ben Kepler leírja a bolygók keringési időinek és a Naptól való közép távolságuk kapcsolatát [7].

A Kepler-törvények [8]:

1. A bolygók ellipszispályán<sup>1</sup> keringenek a Nap körül, amelynek egyik fókuszpontjában a Nap áll.

2. A Naptól a bolygóhoz húzott vezérsugár egyenlő idő alatt egyenlő területeket sűrol. A területi sebesség állandó. A bolygók napközben gyorsabban, naptávolban lassabban haladnak.

3. A Nap körül keringő bolygók keringési idejének négyzete úgy aránylik egymáshoz, mint a Naptól mért közép távolságuk köbe.

A bolygómozgás dinamikai leírása *Isaac Newton* nevéhez fűződik. Közvetlen erő mérésre nem volt lehetősége, így megfigyelésekre és korábbi ismeretekre épített.

*Hogyan vezessük be e törvényeket középiskolában?* [8]

Tekintsük azt az egyszerű esetet, amelyben a Nap körül keringő bolygó pályáját  $r$  sugarú körrel közelítjük. Felhasználva Kepler II. törvényét, ebben az esetben állandó kerületi sebesség jellemzi a bolygót. A körmozgás dinamikája kapcsán a diákok megtanulták, hogy a testet a centripetális irányú eredő erő tartja körpályán, továbbá ismerik a szögsebesség és a

<sup>1</sup>Megjegyzés: tapasztalataink alapján a diákok nem ismerik az ellipszist, így a fókuszpont, tengelyek magyarázatra szorulnak. A területi sebesség fogalmának magyarázatához *A fizika tanítása középiskolában* című jegyzet 252. [8] oldalát javasoljuk.

**A bolygó felszíni hőmérséklete kelvinben a csillag fényességének ( $L$ , luminozítás) és a bolygó csillagtól mért  $d$  távolságának függvényében.**

$L \setminus d$	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,2
0,1	361	255	209	181	162	147	136	126	120	114	109	104	100	97	93	90
0,5	540	382	312	270	242	220	204	191	180	171	163	156	150	144	139	135
1	642	454	371	321	287	262	243	227	214	203	194	185	178	172	166	161
1,5	711	503	410	355	318	290	269	251	237	225	214	205	197	190	184	178
2	764	540	441	382	342	312	289	270	255	242	230	220	212	204	197	191
2,5	808	571	466	404	361	330	305	286	269	255	243	233	224	216	209	202
3	845	598	488	423	378	345	319	299	282	267	255	244	234	226	218	211
3,5	878	621	507	439	393	359	332	311	293	278	265	254	244	235	227	220
4	908	642	524	454	406	371	343	321	303	287	274	262	252	243	235	227
4,5	935	661	540	468	418	382	354	331	312	296	282	270	259	250	242	234
5	960	679	554	480	429	392	363	340	320	304	290	277	266	257	248	240
5,5	983	695	568	492	440	402	372	348	328	311	297	284	273	263	254	246
6	1005	711	580	503	450	410	380	355	335	318	303	290	279	269	260	251
6,5	1025	725	592	513	459	419	388	363	342	324	309	296	284	274	265	256
7	1045	739	603	522	467	426	395	369	348	330	315	302	290	279	270	261

A csillag fényessége a Nap fényességéhez viszonyítva, a távolság csillagászati egységben megadva. A hőmérséklet-számítás alapjául szolgáló modell feltételezi, hogy az exobolygó fényvisszaverő képessége és szén-dioxid-koncentrációja a Földével egyező [9].

periódusidő közötti összefüggést. Így a Nap körül állandó pálya menti sebességgel körmozgást végző bolygóra ható erők eredője:

$$\sum F = m a_{cp} = m \omega^2 r = m \frac{(2\pi)^2}{T^2} r. \quad (1)$$

A bolygóra a Nap és a bolygó között fellépő gravitációs erő hat:

$$\sum F = F_{gr}. \quad (2)$$

(2)-t felhasználva, majd az (1) egyenlet mindkét oldalát  $r^2$ -tel megszorozva a következőkre jutunk:

$$F_{gr} r^2 = m 4 \pi^2 \frac{r^3}{T^2}.$$

Kepler III. törvénye szerint  $T^2/r^3$  állandó, ebből következik, hogy adott bolygó esetén a gravitációs erő fordítottan arányos a bolygó Naptól mért távolságának négyzetével.

$$F_{gr} \sim \frac{1}{r^2}.$$

Newton III. törvénye értelmében a gravitációs erőre vonatkozó összefüggésben a bolygó ( $m$ ) és a Nap ( $M$ ) tömegének szimmetrikusan kell szerepelnie.

$$F_{gr} \sim \frac{M m}{r^2}. \quad (3)$$

## Exobolygók és detektálási módszereik tanítása a középiskolában

Exobolygóknak nevezzük a Naprendszerünkön kívüli bolygókat. Kutatásuk sok szempontból lehet érdekes, többek között választ adhat arra, hogy van-e élet más bolygókon. Az életre utaló jelek akár a csillagközi utazásra is okot adhatnak. Érdekes foglalkoznunk a bolygók lakhatóságának kérdésével. *Lakhatósági zónának* nevezzük a csillag körül azt a tartományt, amelybe eső kőzetbolygó felszínén a víz tartósan megmaradhat cseppfolyós halmazállapotban. Földi körülményekhez hasonló esetben ez alapján egy hőmérséklet-intervallumra következtethetünk. A hőmérséklet 273 K és 373 K között van [9].

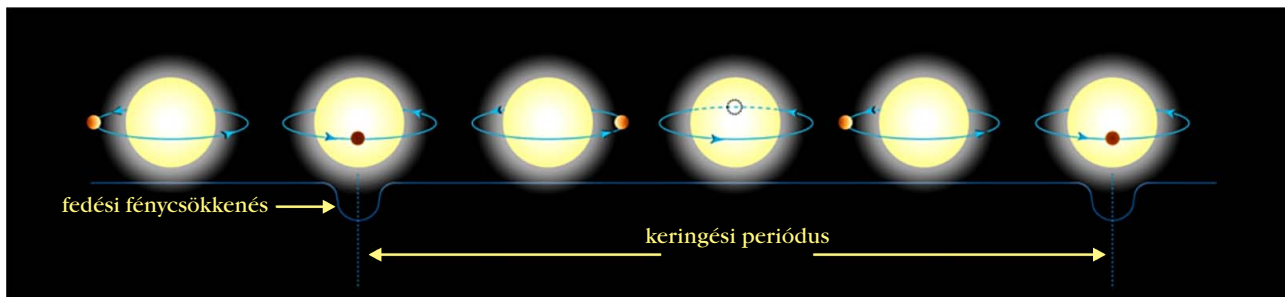
A lakhatóság kapcsán az 1. táblázat diákokkal közösen való elemzését javasoljuk a következő kérdések alapján. A feladat *Gróf Andrea* és *Horváth Zsuzsa* jegyzetéből [9] származik.

1. Melyek azok a hőmérsékletértékek, amelyek esetén lehet lakható a bolygó?

2. Hogyan változik a lakhatósági zóna a csillag energiakibocsátásának növekedésével?

3. Számítsuk ki a Nap ( $L = 1$ ) lakhatósági zónájának területét e modell szerint!

A rövid bevezetés után rátérhetünk az exobolygó-detektálás módszereinek megtárgyalására. Megkülönböztetünk közvetlen és közvetett módszereket. Közvetlen módszer esetén a direkt képalkotás lehetőségét említjük meg, amely a bolygóról érkező fényt – elkülönítve a csillag fényétől – közvetlenül detektálja. A módszer alkalmazása nehéz, a csillag erős fénye miatt



2. ábra. A csillag fényességének periodikus csökkenése a bolygó csillag előtt való elhaladásának következménye [10].

a bolygóról gyenge jelet kapunk. Közvetett módszerek segítségével a bolygó valamilyen hatását tudjuk detektálni úgy, hogy közben a csillagot vizsgáljuk. A közvetett módszerek közé tartozik többek között a radiálissebesség-módszere, a gravitációs-lencse-hatás és a fotometriai (tranzit-) módszer [5]. A továbbiakban az utóbbival foglalkozunk részletesen.

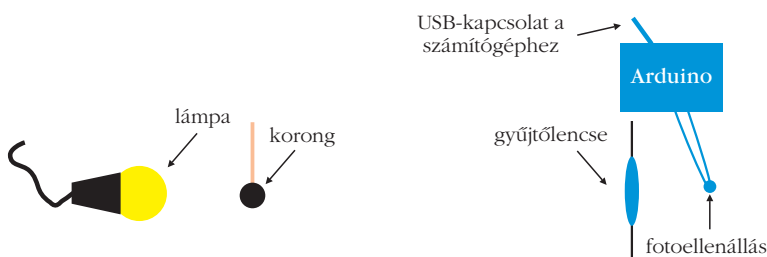
A tranzitmódszer segítségével vizsgálható a csillag előtt áthaladó bolygó keringési ideje, pálya menti sebessége, illetve a bolygó és a csillag méretének arányára is következtethetünk a felvett fénygörbe (a fényesség időbeli változása) alapján. A csillag fényessége csökken abban az esetben, amikor a bolygó áthalad előtte, így a fényességben történő változás periodikus (2. ábra).

Ha egy mérési görbe a csillagfény intenzitását ábrázolja az idő függvényében, könnyen leolvasható a fényintenzitás mértékének csökkenése, a csillag  $I_{\max}$  maximális fényintenzitása, valamint a kitakaráskor mérhető  $I_{\min}$  intenzitás. A két intenzitásérték arányából következtethetünk az exobolygó méretére [5].

$$\frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{R_{\text{csillag}}^2 - R_{\text{bolygó}}^2}{R_{\text{csillag}}^2} \quad (4)$$

A felvett görbe alapján meghatározható a bolygó  $T$  keringési ideje, valamint az is, hogy mennyi  $t$  ideig

3. ábra. Fotó és sematikus ábra a mérési összeállításról.



tartózkodik teljes egészében a csillag előtt. A csillag  $d$  átmérőjének és a grafikonról leolvasott megfelelő időadatok ismeretében számítással becsülhető a bolygó pálya menti sebessége is:

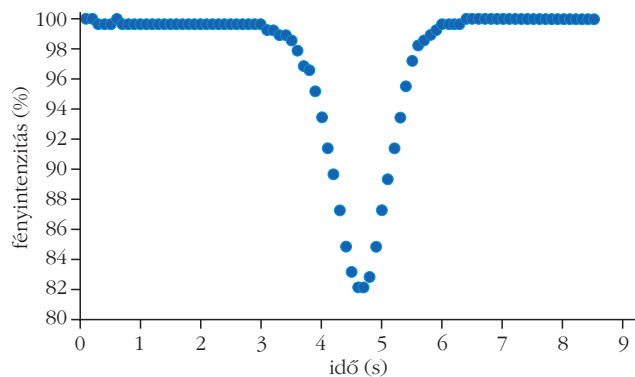
$$v = \frac{d}{t} \quad (5)$$

Mindez a tanórai mérés során felvett grafikonok kiértékelésével is gyakorolható, nem szólva arról, hogy eközben a diákok izgalmas és hatékony órai munkában vehetnek részt.

## Gyakorló órák – mérési feladatok

A teszt- és a kontrollcsoport tanulói különböző típusú gyakorlóórákon mélyíthették el a megszerzett ismereteiket. A tesztcsoport esetén a gyakorló fázis elsődleges célja az volt, hogy a diákok a projekt végére képesek legyenek arra, hogy tanórai keretek között modellezzék és alkalmazzák az exobolygó-kutatás tranzitmódszerét. A tanórai kivitelezéshez Arduino-vezérelt fotoellenállást, laptopot, valamint hétköznapi eszközöket alkalmaztunk: LED izzó, kupakok (korongok), gyűjtőlencse (3. ábra).

Ehhez a tanórákra a kimeneti követelmények figyelembevételével állítottuk össze a diákok munkáját vezető és támogató feladatlapot, amely az alapoktól a megfelelő logikai úton keresztül, gyakorló feladatokon át, egészen egy komplex Arduino-mérés kivitelezéséig és kiértékeléséig irányította őket. A feladatlapot a <http://fizika.fazekas.hu> [11] weboldalon közöljük. Célunk az volt, hogy megfelelő tanári koordinálás mellett lehetőséget adjunk a diákoknak az önálló – kiscsoportos – gyakorlásra. A feladatlap lehetővé tette, hogy a csoportok a korábban megszerzett elméleti tudás birtokában az első feladattól a feladatok sorrendjében haladva, építve a korábban rögzített ismeretekre, vagy éppen az előző feladat során elvégzett alap mérési feladatra, sikeresen megalkossák a fő mérést, és válaszoljanak az összes kérdésre. Olyan feladatokat írtunk, amelyek egyaránt hozzájárulhatnak a következő szakmai készségek fejlődéséhez: *problémamegoldás, értelmezés, becs-*



4. ábra. Grafikus kiértékelés.

lés, kiértékelés, tervezés. A tesztcsoport tanulói a tanév során korábban már dolgoztak Arduinóval. A kiértékelés során a tesztcsoport tanulói a 4. ábrán bemutatott grafikont vették fel, majd azt elemezve meghatározták a bolygó csillag előtt történő áthaladásának idejét, és következtettek a csillag-bolygó átmérők arányára is. Több keringést vizsgálva meghatározható akár a periódusidő is.

A kontrollcsoport tagjai főként érettségi szintű számolási feladatok megoldásával gyakoroltak, Arduino-alapú méréseket korábban sem végeztek.

## Eredmények

A kiértékelés során alkalmazott módszerek

Kutatásunk elsődleges célja az Arduinóval támogatott tanulói mérés bizonyos szakmai kompetenciaelemek fejlődésére és a diákok fizikatudására gyakorolt hatásának vizsgálata volt. A diákok tudásfelmérőn (pre-teszt) és témazárón (post-teszt/utóteszt) elért eredményeit vizsgáltuk, és a JASP<sup>2</sup> statisztikai elemző program segítségével értékeltük ki. Vizsgálatunk első fázisában a teszt- és kontrollcsoport tudásfelmérőn elért eredményeit hasonlítottuk össze egymással, majd vizsgáltuk az esetleges eltéréseket a témazáró dolgozat egyes feladattípusainak esetén is. Megnéztük, hogy önmagukhoz képest mennyiben fejlődtek a diákok – a számolási feladatok megoldása, magyarázat és értelmezés, valamint tervezés és becslés terén. Az elemzést statisztikai módszerekkel végeztük.<sup>3</sup>

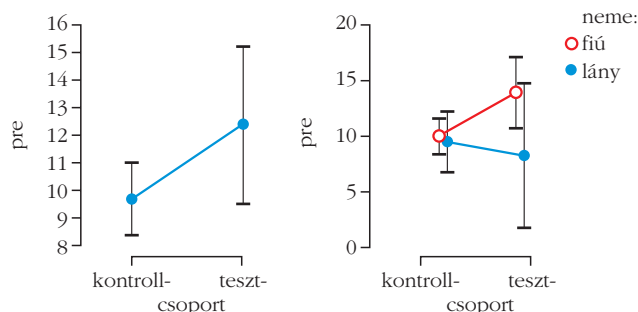
Az előzetes tudásfelmérő eredményei

A diákok előzetes tudásfelmérőn elért eredményei között szignifikáns különbséget észleltünk a tesztcsoport javára. A független mintás  $t$ -próba eredménye:  $p = 0,042$ , a tesztcsoport diákjainak átlagos összpontszáma 12,39 pont – az elérhető összesen 19 pontból – (szórás: 4,74 pont), a kontrollcsoport átlagos pontszáma 9,67 pont (szórás: 3,5 pont). A jelentős különbséget a kísérlettervezést igénylő feladaton megszerzett pontszámok adják, ahol erős szignifikáns különbséget mértünk.<sup>4</sup> A tesztcsoport a 4 pontot érő feladaton átlagosan 2,69 pontot ért el (szórás: 1,89). A kontrollcsoport ezzel szemben átlagban 0,8 pontot kapott

2. táblázat

**A tudásfelmérő (pre-teszt) kimenetelét befolyásoló hatások szerepe – az ANCOVA-teszt eredménye.**

paraméter	df	$F$	$p$	$\eta_p^2$
csoport	1	0,796	0,378	0,020
nem	1	4,415	0,042	0,102



5. ábra. A tudásfelmérő (pre-teszt) eredményei csoport és nem szerinti bontásban.

(szórás: 0,99). A különbségek arra engednek következtetni, hogy csoportmunkában végzett, irányított tanulói mérések segítségével hosszútávon kompetenciafejlődés következik be – a tesztcsoport tanulói a tanév során többször végeztek kis csoportokban digitális eszközökkel támogatott, tanár által koordinált tanulói méréseket. Azaz a két csoport pre-tesztje közötti szignifikáns különbség a tervezési feladaton elért eredmények miatt mutatkozik meg.

Az ANCOVA-teszt eredménye alapján az teszteredmények alakulására elsősorban a nemnek van szerepe, amelyet a parciális éta-négyzet,  $\eta_p^2 = 0,102$  értéke is mutat. Ez azért van, mert a tesztcsoportban 10 fiú és 3 lány van (a 16 főből a tesztek megírásakor 3 diák hiányzott), akik közül a fiúk magasabb pontszámot értek el (2. táblázat).

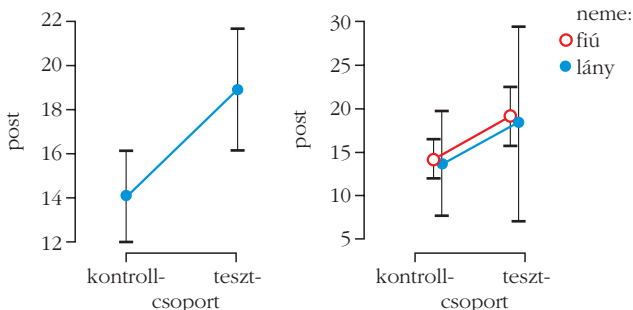
<sup>2</sup><https://jasp-stats.org>

<sup>3</sup>A Shapiro–Wilk-teszt célja az eloszlás vizsgálata.  $p > 0,05$  mellett az eloszlás normálisnak tekinthető [12, 13]. Normális eloszlás esetén Student-féle független mintás  $t$ -próba [14] alkalmazható két csoport összehasonlításakor, saját fejlődés vizsgálatokor páros mintás  $t$ -próbbal [15] dolgozhatunk. Normáloszlású adatok kiértékelése során  $f$ -próbbal [14] vizsgáljuk, hogy jelentkezik-e különbség a vizsgált adatok szórásában. Normális eloszlású, de különböző szórású minták összehasonlítása esetében a statisztikai elemzést – a különböző csoportok összehasonlítását – Welch-próbbal [14] folytatjuk. Nem normális eloszlású minták esetén Mann–Whitney-féle U-tesztet [16] végzünk.  $p < 0,05$  esetén szignifikáns különbséget feltételezünk. Adott csoporton belül jelentkező különbségek vizsgálata során Wilcoxon-rangpróbát [16] alkalmazunk a nem normális eloszlású adatok kiértékelésekor. ANCOVA-teszt [17–19] segítségével vizsgáljuk továbbá, hogy az alkalmazott módszeren túl milyen egyéb hatások befolyásolhatták a diákok eredményeit. Számolnunk kell a mérésből származó hibákkal és olyan faktorokkal, amelyek eredetileg nem képezik a kutatásunk célját, azonban van hatásuk az eredmények alakulására. A különböző faktorok hatásait a parciális éta-négyzet – hatásnagyság-mutató – megadásával vizsgáltuk. A parciális éta-négyzetre kapott értékek alapján következtetünk az adott faktor hatásának nagyságára. 0,01: kis hatásnagyság, 0,06: közepes hatásnagyság, 0,14 vagy magasabb: nagy hatásnagyság.

<sup>4</sup>A Welch-próba  $p$  értéke 0,004.



paraméter	df	F	p	$\eta_p^2$
csoport	1	4,125	0,049	0,098
nem	1	0,162	0,689	0,004
pre-teszt	1	4,855	0,034	0,113



6. ábra. Az utóteszt (témazáró, post-teszt) eredményei csoport és nemek szerinti bontásban.

A teszt- és kontrollcsoport közötti különbséget tehát a tesztcsoportot alkotó fiúk kiemelkedő pontszáma biztosítja (5. ábra).

### A témazáró (utóteszt) eredményei

#### A két csoport témazáró eredményeinek összehasonlítása

A továbbiakban a diákok témazáró dolgozatán elért eredményeinek kiértékelését közöljük. Független mintás *t*-próba alkalmazásával összehasonlítottuk a teszt- és a kontrollcsoport témazáró dolgozatán elért eredményeit. Az adatok normális eloszlást követnek.<sup>5</sup> A *t*-próba eredménye ( $p = 0,008$ ) alapján a tesztcsoport szignifikánsan jobban teljesített az utóteszten (a tesztcsoport átlagos pontszáma: 18,92, szórás: 4,58 – a kontrollcsoport átlagos pontszáma: 14,1, szórás: 5,47).

A 3. táblázat bemutatja, hogy a csoport hatása (parciális éta-négyzet értéke 0,098: közepes) mellett figyelembe kell vennünk a tudásfelmérő szerepét is, amelynek esetén a parciális éta-négyzet értéke 0,113, közepes. Eszerint a pre-teszten jól teljesítők az utóteszten is eredményesen szerepeltek. Az ANCOVA-teszt továbbá a lányok esetében jelez fejlődést, hiszen a nem hatása az utóteszt eredményében már nem szignifikáns, illetve gyenge (6. ábra).

Ezek alapján arra következtethetünk, hogy ugyan a fiúk rendelkeztek előzetes tudással a témában – feltehetően a csillagászat jobban vonzza a fiúkat, szabadidejükben is foglalkoznak a témával –, a lányok esetében az órán alkalmazott módszer különösen hatékony volt.

#### A két csoport kompetenciáinak összehasonlítása

Ahogy korábban bemutattuk, mind a pre-teszten, mind pedig az utóteszten szignifikánsan jobban teljesítettek a tesztcsoport tanulói. Felmerül a kérdés, hogy az utóteszten való pozitív irányú eltérést az alkalmazott

paraméter	df	F	p	$\eta_p^2$
csoport	1	6,220	0,017	0,135
pre-teszt	1	0,098	0,756	0,020

módszer hatása eredményezi-e, vagy egyszerűen a tesztcsoport diákjai szignifikánsan tájékozottabbak a vizsgált témában. A kérdés megválaszolásában a különböző faktorok hatásának figyelembevétele, azaz az ANCOVA-teszt használata volt segítségünkre. A témazáró dolgozatot feladattípusonként elemeztük, az egyes feladatokhoz kompetenciaelemeket – számolási feladat megoldása, elemzés és értelmezés, magyarázat és indoklás, becslés és tervezés – rendeltünk, majd ezekre végeztünk összehasonlítást a két csoport között.

A 4. táblázat mutatja, hogy a két csoport magyarázó-indokló kompetenciájának szignifikáns különbsége az adott csoporthoz való tartozáson múlik, és a pre-teszt eredményeitől nem függ. A többi kompetencia esetén hasonló nem tapasztaltunk, a tesztcsoport diákjai eleve jobbnak bizonyultak a kontrollcsoport tanulóinál. A módszer tehát hozzájárul a jelenségek megértéséhez, szerepet játszik a tudás elmélyítésében, ezzel hozzájárul a jelenségek pontos és szakszerű leírásához.

### Saját fejlődés adott csoporton belül

Megvizsgáltuk, hogy a diákok önmagukhoz képest mennyiben fejlődtek a projekt során. A pre- és post-teszt összeredményét adott csoporton belül összehasonlítva nem tapasztaltunk szignifikáns különbséget,<sup>6</sup> így megvizsgáltuk kompetenciaelemekre való bontásban is. A tudásfelmérő és a témazáró egyes feladattípusaihoz kompetenciákat – magyarázat-értelmezés-indoklás, számolási feladatok megoldása és becslés-tervezés – rendeltünk, majd vizsgáltuk, hogy a másodszori mérés jelez-e szignifikáns különbséget. Az egyes felmérők különböző számú és szövegű feladatokat tartalmaztak, így emiatt volt szükség az újabb kompetenciabesorolásra. Az eredményeket a 5. táblázatban közöljük. A tesztcsoport esetében szignifikáns romlást tapasztaltunk a számolási feladatok megoldásában. Ők a gyakorló fázis során főként elemző-értelmező feladatokkal és mérési problémákkal találkoztak, direkt jellegű számolási példák nem kerültek elő. Ezzel szemben a kontrollcsoportot alkotó diákok bőven megoldhattak számolási feladatokat, míg elemző-értelmező, indoklás és magyarázatot igénylő példákat jóval kisebb számban gyakoroltak. Ahogy az eredményeik is mutatják, náluk e kompetenciaterületen romlás következett be. Fejlődés mutatkozott azonban a kontrollcsoport becslési-

<sup>5</sup>Shapiro-Wilk-teszt eredményei – tesztcsoport:  $p = 0,769$  és kontrollcsoport:  $p = 0,437$ .

<sup>6</sup>Páros *t*-próba eredménye – tesztcsoport:  $p = 0,054$  és kontrollcsoport:  $p = 0,171$ .

**A diákok önmagukhoz mért fejlődése kompetenciaelemek szerinti bontásban.**

csoporthoz	szakmai kompetencia	próba	$p$ érték	Van szignifikáns eltérés?	pre-teszt átlaga (szórása) %	utóteszt átlaga (szórása) %
teszt	magyarázat–értelmezés–indoklás	páros $t$ -próba	0,563	nincs	60,77 (26,91)	65,59 (13,00)
	számolási feladatok megoldása	Wilcoxon-próba	0,039	van – romlás	70,77 (23,97)	46,15 (30,97)
	becslés–tervezés	Wilcoxon-próba	0,759	nincs	67,31 (47,2)	64,83 (31,74)
kontroll	magyarázat–elemzés–indoklás	páros $t$ -próba	0,027	van – romlás	58,67 (26,62)	40,67 (31,29)
	számolási feladatok megoldása	páros $t$ -próba	0,059	nincs	60,00 (21,01)	51,75 (18,70)
	becslés–tervezés	Wilcoxon-próba	0,003	van – fejlődés	16,00 (19,93)	31,91 (25,63)

tervezési készségeiben. A megszerzett ismeretek – lexikális tudás – alapján a kontrollcsoport tanulóinak jelentős része képes volt az exobolygó-kutatás fotometriai módszeréhez kapcsolódó mérési elrendezés megtervezésére. A tesztcsoport tanulói magyarázat–értelmezés–indoklás, illetve becslés–tervezés téren már a pre-teszten fejlettnak bizonyultak, a néhány alkalmas projekt ezen nem változtatott.

## Következtetések, összegzés

Tanulmányunkban egy modern felfogásban megvalósult fizikaórai projektet mutattunk be, és vizsgáltuk az Arduinóval támogatott tanulói mérés kompetenciafejlesztő hatását. A mérés időtartama a hagyományoshoz képest jóval lerövidül, az adatokat pillanatok alatt megjeleníthetjük és elemezhetjük. Az így felszabadult időben mindenképpen fontos a megfelelő alapok átadása, a mérés előkészítése. A projekt során diákjainknak egy feladatlapot állítottunk össze, amely irányított kérdéseken keresztül vezette a tanulókat a munkafolyamaton keresztül, az alapoktól, a gyakorló és értelmező (indoklást és magyarázatot igénylő) feladatokon át egészen az összetett exobolygó-kutatás-modellzési feladat megvalósításáig. A feladatok és kérdések sorrendjét oly módon választottuk meg, hogy azok logikus módon segítsék a tudás épülését és elmélyítését, a sikeres tudásszerveződést. Sok elemző és magyarázatot-indoklást igénylő feladatot adtunk fel, így a folyamatos teszteléssel igyekeztünk elérni azt, hogy a diákok megfelelő minőségben sajátítsák el a szükséges ismereteket. Kontrollcsoportunk diákjai frontális szervezési módban megvalósult órákon ismerkedhettek meg az exobolygókkal, és elsősorban számolási feladatok gyakorlásával mélyíthették el tudásukat. Projektünk lezárásaként a diákokkal íratott témazáró dolgozat (utóteszt) eredményei azt mutatják, hogy a tesztcsoport diákjainak egyes szakmai készségei magasak, emellett a projektben a lányok fejlődésének mértéke jelentős. Azok a tanulók, akik a tanév során többször vettek részt Arduino-alapú

fizikaórákon, és az eszköz segítségével gyakran végeztek tanulói méréseket, már a tudásfelmérőn jobban teljesítettek a becslést és tervezést igénylő feladatokon. A tevékenység alapú módszer tehát hozzájárulhat a sikerélmény megéléséhez, továbbá kompetenciafejlesztő szerepe is jelentős.

Láthatjuk, hogy megfelelő módszerek megválasztásával még az exobolygók detektálásának tanítása is belefér az órakeretbe. Megéri a hagyományos módszerek mellett modern technikákat és ötleteket alkalmaznunk.

## Irodalom

- [https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/Bildung/Auslandsschulwesen/Kerncurriculum/Auslandsschulwesen-Operatoren-Naturwissenschaften-02-2013.pdf?fbclid=IwARlivEjaSQjo-fVjmORl0qVswNYBvskFEqODIDEL\\_V84ry9SOIoQoM2UI4](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/Bildung/Auslandsschulwesen/Kerncurriculum/Auslandsschulwesen-Operatoren-Naturwissenschaften-02-2013.pdf?fbclid=IwARlivEjaSQjo-fVjmORl0qVswNYBvskFEqODIDEL_V84ry9SOIoQoM2UI4) (utolsó letöltés: 2021. 12. 18.)
- [https://wayne.edu/assessment/files/bloom\\_s\\_handout\\_colored\\_pyramid.pdf](https://wayne.edu/assessment/files/bloom_s_handout_colored_pyramid.pdf) (utolsó letöltés: 2021. 12. 15.)
- <https://www.arduino.cc/> (utolsó letöltés dátuma: 2021. 11. 28.)
- Fizika közép szintű érettségi, 2011. május: [https://www.oktatas.hu/pub\\_bin/dload/kozoktatas/erettsegi/feladatok2011tavasz/k\\_fiz\\_11maj\\_fl.pdf](https://www.oktatas.hu/pub_bin/dload/kozoktatas/erettsegi/feladatok2011tavasz/k_fiz_11maj_fl.pdf) (utolsó letöltés: 2021. 11. 28.)
- Virág D.: *A Doppler-erősítés*. Szakdolgozat, Szegedi Tudományegyetem (2013) [http://astro.u-szeged.hu/szakdolgozat/viragdanieldszd/ViragDaniel\\_BSc\\_szd.pdf](http://astro.u-szeged.hu/szakdolgozat/viragdanieldszd/ViragDaniel_BSc_szd.pdf) (utolsó letöltés: 2021. 11. 28.)
- Fizika kerettanterv a gimnáziumok 9–10. évfolyamának számára [https://www.oktatas.hu/koznevelas/kerettantervek/2020\\_nat/kerettanterv\\_gimn\\_9\\_12\\_evf](https://www.oktatas.hu/koznevelas/kerettantervek/2020_nat/kerettanterv_gimn_9_12_evf) (utolsó letöltés: 2021. 11. 28.)
- Simonyi K.: *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat Kiadó, Budapest (1978).
- Juhász A. és mtsai.: *A fizika tanítása a középiskolában I.* (2021) [http://fiztan.phd.elte.hu/files/kiadvanyok/Fizika\\_tanitasa\\_I.pdf](http://fiztan.phd.elte.hu/files/kiadvanyok/Fizika_tanitasa_I.pdf) (utolsó letöltés: 2021. 11. 27.)
- Gróf A., Horváth Zs.: *Exobolygók és űreszközök. Válogatott középiskolás feladatok a csillagászat és űrkutatás modern eredményeiből.* (2021) [http://fiztan.phd.elte.hu/files/kiadvanyok/Exobolygok\\_es\\_ureskozok.pdf](http://fiztan.phd.elte.hu/files/kiadvanyok/Exobolygok_es_ureskozok.pdf) (utolsó letöltés: 2021. 11. 27.)
- [http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillogaszat/6\\_Naprendszer/0108exobolygok/exobolygok.html](http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillogaszat/6_Naprendszer/0108exobolygok/exobolygok.html) (utolsó letöltés: 2021. 11. 28.)
- <http://fizika.fazekas.hu/wp-content/uploads/pdf/Exobolyg%C3%B3.pdf?t=1638886745> (utolsó letöltés: 2021. 12. 15.)
- Pataki A.: *A többváltozós Shapiro–Wilk-tesztek vizsgálata*. Ph.D. doktori értekezés. Budapesti Corvinus Egyetem Közgazdaságtani Doktori Iskola, Budapest (2001).
- D. Graham: *Checking for Normality in JASP.* (2020). <https://www.youtube.com/watch?v=41eOkYHkRSQ> (utolsó letöltés: 2021. 11. 26.)

14. [https://backhauszagi.web.elte.hu/gyak/sst\\_st4ea\\_k/sst\\_st4je\\_k7.pdf](https://backhauszagi.web.elte.hu/gyak/sst_st4ea_k/sst_st4je_k7.pdf) (utolsó letöltés: 2021. 11. 28.)
15. <https://www.statokos.com/t-probak> (utolsó letöltés: 2021. 12. 21.)
16. [http://www.cogsci.bme.hu/~ktkuser/KURZUSOK/BMETE47MC38/2019\\_2020\\_1/Ea/11\\_nonparametric.pdf](http://www.cogsci.bme.hu/~ktkuser/KURZUSOK/BMETE47MC38/2019_2020_1/Ea/11_nonparametric.pdf) (utolsó letöltés: 2021. 11. 28.)
17. <https://www.statisticshowto.com/ancova/> (utolsó letöltés: 2021. 12. 15.)
18. [https://www.statology.org/partial-eta-squared/?fbclid=IwAR2H1zIGTwhRX65ZHh0Uos6XYwnq6ZDoI0uyUf3lxx\\_Xw2R1-yMV51YdvYg](https://www.statology.org/partial-eta-squared/?fbclid=IwAR2H1zIGTwhRX65ZHh0Uos6XYwnq6ZDoI0uyUf3lxx_Xw2R1-yMV51YdvYg) (utolsó letöltés: 2021. 12. 15.)
19. <https://www.statokos.com/varianciaanalizis> (utolsó letöltés dátuma: 2021.12.15.)

# ANDREA PALLADIO NYOMÁBAN

## – optikai illúzió az építészetben

Ujfaludi László  
Eszterházy Károly Katolikus Egyetem, Eger

A torzított perspektíva (gyakran hamis, vagy erőltetett perspektívának is nevezik) olyan eljárás, amely egyfajta optikai illúziót alkalmaz annak elérésére, hogy egy tárgy távolabbinak/közelebbinek, kisebbnek/nagyobbnak látszon, mint amekkora a valóságban. Az emberi vizuális érzékelést manipulálja a tárgyak méretének, valamint a tárgy és a megfigyelő távolságának korrelációjával [1].

A tárgyak méretének érzékelése a tárgy retinán kialakuló képének nagyságán alapul, ami kizárólag a tárgy legalsó és legfelső pontjáról érkező fénysugár közti szögétől (a látószögtől vagy parallaxistól) függ (1. ábra).

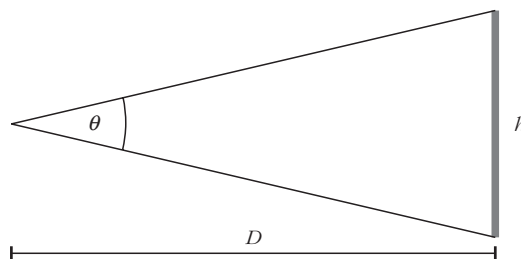
Minél nagyobb a parallaxis, annál nagyobb a tárgy látszólagos mérete. Két különböző méretű tárgy egyformának látszik, ha ugyanakkora a parallaxisuk. Egy  $D$  távolságban lévő,  $h$  magasságú tárgy látószöge  $\arctan(h/2D)$ , (1. ábra).

Egy épületet a torzított perspektíva alkalmazásával lehet látszólagosan nagyobbra, magasabbra, távolabb vagy közelebb lévőre tenni, a néző számára növelve vagy csökkentve az érzékelt mélységet. Ha például az a cél, hogy egy tárgyat távolabbinak ábrázoljunk, akkor a következő módszert alkalmazzuk: a tárgy méretét (parallaxisát) a valósághoz képest fokozatosan csökkentjük a megfigyelőtől legtávolabb eső pont felé. Ekkor a nézőnek az az illúziója, hogy az ábrázolt tárgy távolabb van.

A szerző köszönetét fejezi ki *Csonka Erzsébet* dizlettervezőnek és *Kaló Attila* díszletkészítőnek (mindketten az egeri Harlekin Bábszínház munkatársai) a modellek gondos kivitelezéséért és a fényképek elkészítésében nyújtott segítségükért.



Ujfaludi László fizikus, az Eszterházy Károly Egyetem (EKE) professzor emeritusa. Közel két és fél évtizedes kutató-fejlesztő tevékenység (VIDEOTON, TUNGSRAM, VITUKI) után 1990-től az EKE Fizika Tanszékének oktatója. Alapítása (2006) óta vezeti az egeri Varázstorony planetáriumát. Másfél évtizede foglalkozik a „két kultúra”, ezen belül elsősorban a fizika és a képzőművészet kapcsolatával. E témakörben számos tanulmányt publikált és több konferencia-előadást tartott.



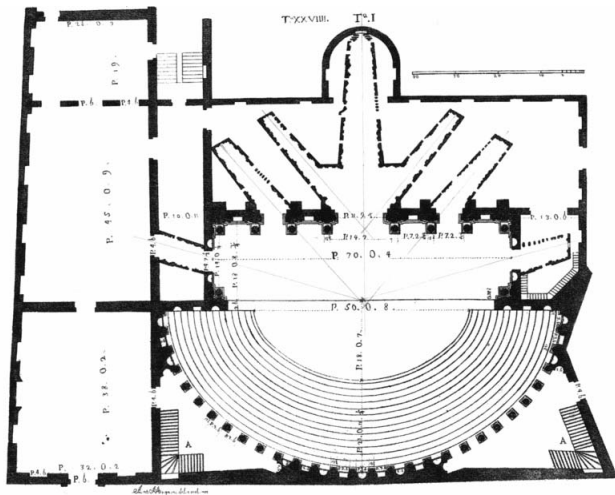
1. ábra. A látószög (parallaxis) szemléltetése.

## Építészeti példák a torzított perspektívára

### Teatro Olimpico

A Teatro Olimpico (magyarul: Olimpia Színház) *Andrea Palladio* (1508–1580) olasz építész utolsó terve alapján épült Vicenzában 1580-tól 1585-ig. Palladio halála után tanítványa, *Vincenzo Scamozzi* (1548–1616) fejezte be az építést. A színpadi háttér hét utcaképe is Scamozzi irányításával készült el. E háttér utcái, amelyek eredetileg Szophoklész *Oidipusz királyához* épültek, az ókori Théba hét utcáját ábrázolják, torzított perspektívával. A távolsággal rohamosan csökken az épületek mérete, így az utcák mentén távolabbra haladó színészek egyre inkább óriásoknak látszanak. A hét utca szögállása olyan, hogy a (klasszikus görög színházat idéző) nézőtér bármelyik üléséből legalább egy végig látható. A Teatro Olimpico jelenleg is színhelye számos színházi és zenei eseménynek; a nézőtér befogadóképessége azonban kicsi: mindössze 400 fő. Az előadásokat tavasszal és ősszel tartják, mivel a fából készült burkolatok megóvása érdekében nem szereltek be légkondicionáló berendezéseket. A belső tér különleges adottságait filmekben is kihasználták. A Mozart-operából készült *Don Giovanni* (1979) és a *Casanova* (2005) című filmek több jelenetét is itt forgatták. A 2. ábrán a színház alaprajza, a 3. ábrán a középső (leghosszabb) utcárezlet torzított perspektívájú képe látható. A 4. ábra pedig a nézőtér részletét mutatja.

A leírásokban és ismertetőkben sehol sem található adat a színház és a torzított perspektívájú folyosók méreteiről. Egy igen látványos videó [3] alapján azon-



2. ábra. A Teatro Olimpico alaprajza.

ban hozzávetőleges becslést lehet adni a méretekre. A középső, leghosszabb folyosó (2. ábra) hossza 10-12 m, magassága a nézőtér felőli oldalon 6-8 m, a távolabbi végén 2 m lehet (a folyosón végig sétáló színész feje csaknem eléri a boltív tetejét), tehát a torzítás, mértéke 3-4-szeres. A Teatro Olimpico, Vicenza városa és a közelében, Veneto tartományban épült Palladio-villák 1994 óta az UNESCO Világörökség részét képezik.

### A Palazzo Spada oszlopcsarnoka

1632-ben *Francesco Borromini* (1599–1667) tervén alapján épült Rómában a Palazzo Spada [4] látványos oszlopcsarnoka (5. ábra). A leírásokban pontos adatok találhatóak az építményről. Eszerint az oszlopcsor 8,6 m hosszú, de látványa egy 32 m hosszú oszlopcsor illúzióját adja; tehát a torzítás 3,7-szeres.

A bejáratnál a boltív magassága 6 m, a túlsó végén 1,6 m. A perspektíva tökéletes illúziója érdekében a padlózat emelkedik, a mennyezet pedig ugyanolyan mértékben lejt. *Daniela Bertol* könyvében [5] a torzított perspektíva további építészeti példái találhatóak.

### A torzított perspektíva terének méretezése

Sem a Teatro Olimpico, sem a Palazzo Spada méretezésével kapcsolatos leírások nem maradtak fenn, de a Világhálón található perspektíva és torzított perspektíva számítására kidolgozott módszer [6], valamint egy gyakorlati, interaktív módon használható, úgynevezett „forced pers-



3. ábra. A Teatro Olimpico színpadának középső (leghosszabb) utcája.

pective calculator” (torzítottperspektíva-kalkulátor) nevű alkalmazás [7].

A közelmúltban több színházi díszlettervező ismerősöm részéről felmerült az igény torzított perspektívájú díszletek tervezéséhez szükséges, egyszerűen

4. ábra. A Teatro Olimpico nézőterének egy részlete.

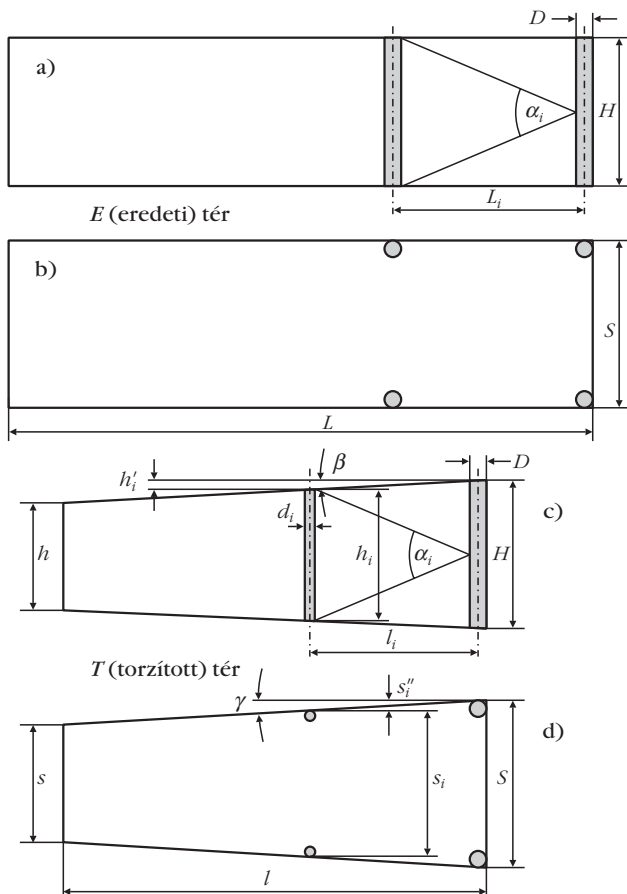




5. ábra. A Palazzo Spada oszlopcsarnoka.

használható módszerekre. Az említett [6] eljárás magas matematikai ismereteket igényel, a [7] pedig egyszerű kérdezz-felelek módon működik, nem érzékelhető semmi a működési módjáról és az építmények arányaival kapcsolatos általános útmutatás sem olvas-

6. ábra. Az eredeti ( $E$ ) és a torzított ( $T$ ) oszlopcsarnok vázlatja, a) és c) oldalnézetből, b) és d) felülnézetből.



ható ki belőle. Ezért egy olyan egyszerű, elemi módszerekkel működő eljárást kíséreltem meg kidolgozni, amely speciális matematikai ismeretek nélkül is használható, sőt esetleg egyszerű (méreterezésre is alkalmas) grafikonokkal szemléltethető.

Célkitűzésem egy egyszerű építményegyüttes: egy oszlopcsarnok (eredeti tér –  $E$  tér) torzított perspektívájú változatának (torzított tér –  $T$  tér) méretezése volt. Az oszlopcsarnok két párhuzamos, egyenként  $n$  számú, egyenlő magasságú és egyenlő átmérőjű oszlopot tartalmazó oszlopsorból áll. A 6. ábrán az  $E$  és a  $T$  tér egyszerűsített vázlatát mutatom be: mindkettőnél csak a legelső (a számítás során 0. sorszámú) és egy tetszőleges közbelső,  $i$ -edik sorszámú oszlopot rajzoltam be (az oszlopok számának megfelelően  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ; ahol  $n$  tetszőleges egész szám). A  $T$  tér méretezésének alapvető követelménye, hogy az  $E$  térnél jóval kisebb méretei ellenére azt az illúziót keltse, mintha az  $E$  teret látnánk. E követelmény akkor teljesül, ha a  $T$  tér minden egyes oszlopának parallaxisa (a legfelső és a legalsó pont közötti látószög) ugyanakkora, mint az  $E$  tér megfelelő oszlopának parallaxisa.

A számítás során választott nézőpontunk a legelső ( $n = 0$ ) oszloppár függőleges síkjának közepe. Legyen a kicsinyítési arány (a  $T$  tér  $l$  és az  $E$  tér  $L$  hosszának hányadosa):

$$k = \frac{l}{L}. \quad (1)$$

A tökéletes illúzió megvalósításához ugyanez az arány kell, hogy fennálljon a  $T$  tér  $s$  szélességére és legtávolabbi oszlop  $h$  magasságára is, vagyis:

$$k = \frac{h}{H} = \frac{s}{S}. \quad (2)$$

Az  $i$ -edik oszlop parallaxisszögére a következő összefüggés érvényes az  $E$  és a  $T$  térben:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_i}{2}\right) = \frac{H}{2L_i} = \frac{h_i}{2l_i}. \quad (3)$$

A 6.c ábra alapján:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{h'_i}{l_i}. \quad (4)$$

A teljes hossza, ugyancsak a 6.c ábra alapján:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{H-h}{2l}. \quad (5)$$

A (4) és (5) egyenletekből következik, hogy:

$$h'_i = (H-h) \frac{l_i}{2l}, \quad (6)$$

a 6.c ábrán az is látható, hogy:

$$h'_i = H - 2 h'_i. \quad (7)$$

(3)-ból adódik:

$$\frac{h_i}{l_i} = 2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_i}{2}\right). \quad (8)$$

(8)-at (7)-tel kombinálva, majd az egyenletet rendezve, kapjuk:

$$h'_i = \frac{1}{2} \left[ H - 2 l_i \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_i}{2}\right) \right]. \quad (9)$$

A (6)-ot egyenlővé téve (9)-cel, az  $i$ -edik oszlop helye:

$$l_i = \frac{Hl}{H-h+2l \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_i}{2}\right)}. \quad (10)$$

A számolás során a műveletek sorrendje a következő: a (10)-zel meghatározzuk  $l_i$  értékét, majd a (6)-tal  $h'_i$  értékét, végül a (7)-tel  $h_i$  értékét. A  $T$  tér szélességének számítása (6.d ábra) a teljes hosszra vonatkoztatva:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{S-s}{2l}, \quad (11)$$

az  $i$ -edik oszlop helyén ugyanez az érték:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{s''_i}{l_i}. \quad (12)$$

A 6.d ábrán  $s''_i$  megfelel a 6.c ábra  $h'_i$  értékének; (11) és (12) egyenlőségéből kapjuk:

$$s''_i = (S-s) \frac{l_i}{2l}. \quad (13)$$

A 6.d ábra alapján az  $i$ -edik oszlop távolságában a  $T$  tér szélessége:

$$s_i = S - 2 s''_i. \quad (14)$$

A (14) egyenlet alakilag azonos a (7) egyenlettel, ami a torzított tér oldal- és felülnézetének – a 6.c és 6.d ábra – geometriai hasonlóságából következik (a  $\beta$  és  $\gamma$  szög megegyezik).

A  $T$  térben az oszlopok átmérőjét a tér szélességének arányában kell csökkenteni; az  $E$  térre vonatkoztatott arányossága a következő:

$$\frac{s_i}{S} = \frac{d_i}{D}, \quad (15)$$

ahonnan az  $i$ -edik oszlop átmérője a  $T$  térben:

$$d_i = \frac{s_i}{S} D. \quad (16)$$

## Áttérés dimenzió nélküli paraméterekre

Dimenzió nélküli paraméterekre áttérve az  $E$  tér és a  $T$  tér paraméterei között az előbbieknél általánosabb összefüggéseket határozhatunk meg. Figyelembe véve, hogy  $H-h = H(1-k)$  és  $l = kL$ , a (10) egyenlet így írható:

$$\frac{l_i}{l} = \frac{H}{H(1-k) + 2kL \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_i}{2}\right)}. \quad (17)$$

a jobb oldal számlálóját és nevezőjét  $L$ -vel osztva, és behelyettesítve (3)-at, kapjuk:

$$\frac{l_i}{l} = \frac{\frac{H}{L}}{\frac{H}{L}(1-k) + k \frac{H}{L_i}}. \quad (18)$$

Figyelembe véve a

$$\frac{H}{L} \equiv \frac{H}{L_i} \frac{L_i}{L} \quad (19)$$

azonosságot, majd az így kapott egyenlet jobb oldalának számlálóját és nevezőjét  $H/L_i$ -vel osztva,  $l_i/l$ -re a következő adódik:

$$\frac{l_i}{l} = \frac{\frac{L_i}{L}}{\frac{L_i}{L}(1-k) + k}. \quad (20)$$

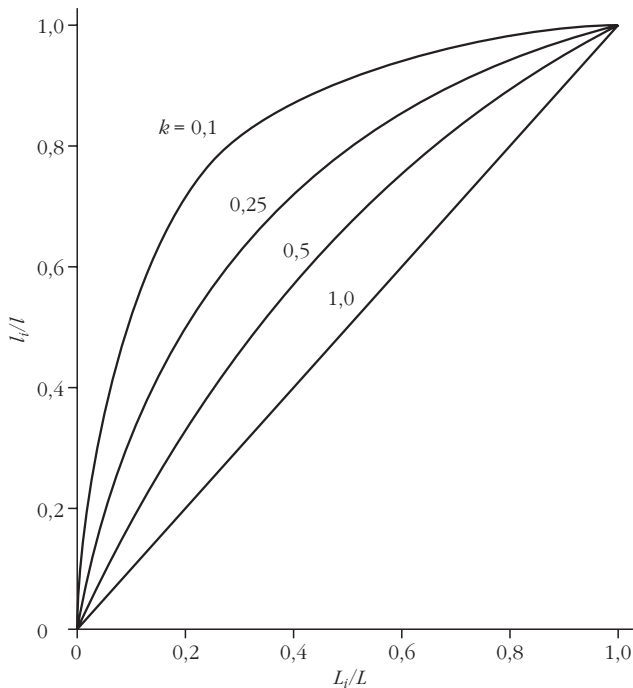
A dimenzió nélküli mennyiségekre vonatkoztatott (20) egyenlet általánosabb érvényű, mint a korábbi (10), mivel az  $E$  tér tetszőleges oszloptávolsága és tetszőleges kicsinyítési tényező esetén megadja a  $T$  tér megfelelő oszloptávolságait.

A (20) egyenlet alapján számolt  $l_i/l = f(L_i/L)$  függvényt különböző  $k$  paraméterek esetén a 7. ábra mutatja.

Az egyes  $l_i$  oszloptávolságokat a (20) egyenlet felhasználásával a következőképpen számolhatjuk:

$$l_i = \frac{\frac{L_i}{L}}{\frac{L_i}{L}(1-k) + k} l. \quad (21)$$

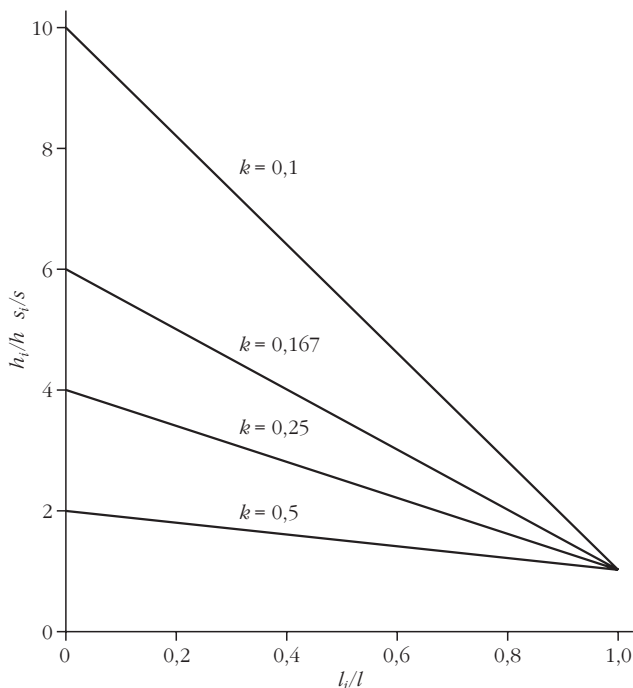
A 7. ábra görbéi azt mutatják, hogy a  $k$  kicsinyítési arány csökkenésével a torzított tér oszlopai a nézőponttól ( $L_i/L = 0$ ) távolodva egyre sűrűsödnek. Pél-



7. ábra. Az  $l_i/l$  értékek az  $L_i/L$  függvényében, különböző kicsinyítési tényezők esetén.

dául  $k = 0,25$  esetén (ami nagyjából megfelel a Teatro Olimpico és a Palazzo Spada oszlopcsarnoka torzítási arányának), ha  $L_i/L > 0,5$ , akkor  $l_i/l > 0,8$ ; vagyis az oszlopok vagy egyéb objektumok fele a torzított tér utolsó 20%-ában zsúfolódik össze;  $k = 0,5$  esetén a helyzet kedvezőbb:  $L_i/L > 0,5$  esetén  $l_i/l > 0,68$ , vagyis az oszlopok fele a torzított tér nagyjából hátsó harmadába kerül.

8. ábra. Az  $s_i/s$  és az  $h_i/h$  értékek az  $l_i/l$  függvényében, különböző kicsinyítési tényezők esetén.



A torzított tér  $h_i$  oszlop magasságaira is levezethető egy dimenzió nélküli hányados, az alábbi gondolatmenet szerint. A (6) és a (7) egyenlet felhasználásával:

$$h_i = H - \frac{l_i}{l} (H - h), \quad (22)$$

figyelembe véve, hogy:  $H = h/k$ , a (22) egyenlet a következő alakban írható:

$$h_i = \frac{h}{k} - \frac{l_i}{l} \left( \frac{h}{k} - h \right), \quad (23)$$

illetve az  $i$ -edik torzított oszlop  $h_i$  magassága a torzított oszlopsor végső  $h$  magasságához:

$$\frac{h_i}{h} = \frac{l_i}{l} \left( 1 - \frac{1}{k} \right) + \frac{1}{k}. \quad (24)$$

A  $T$  tér  $s_i$  szélességértékeinek számításánál az oldalnézet és a felülnézet geometriai hasonlóságánál fogva a fentivel analóg módon járunk el. A (13) és a (14) összehasonlításából a (22)-höz hasonló egyenlet adódik  $s_i$ -re:

$$s_i = S - \frac{l_i}{l} (S - s). \quad (25)$$

Figyelembe véve, hogy  $S = s/k$ , az előzővel azonos gondolatmenettel végül az  $s_i/s$  értékre a (24)-gyel azonos alakú egyenletet kapunk:

$$\frac{s_i}{s} = \frac{l_i}{l} \left( 1 - \frac{1}{k} \right) + \frac{1}{k}. \quad (26)$$

A konkrét  $s_i$  szélességeket a (26)-ból – az oszlop-magasságokhoz hasonló módon – számoljuk:

$$s_i = \frac{s}{k} - \frac{l_i}{l} \left( \frac{s}{k} - s \right). \quad (27)$$

A  $h_i/h = s_i/s = f(l_i/l)$  függvény különböző  $k$  értékekre a 8. ábrán látható.

A  $T$  tér méreteire egy közelítő becslés már a 7. és 8. ábra grafikonjai alapján is elvégezhető, a pontos méretezéshez a (20) ... (27) egyenletek használhatóak. Az oszlopok átmérője a torzított tér szélességével egyenes arányban, a (16) összefüggésnek megfelelően csökken.

## Távoli nézőpontok

Roger Shepard [8] a következő feltételek esetén tartja reálisnak a torzított (hamis) perspektíva megfelelő illúziókeltését:

1. A megfigyelő helyének és látóirányának egybe kell esnie a tervezésnél figyelembe vett helyel és látóiránnyal.

1. táblázat

## A 7×2 oszlopos tér méretei a 6. ábra jelöléseivel

sorszám	$L_i$ (m)	$l_i$ (m)	$h_i$ (m)	$s_i$ (m)	$d_i$ (m)
0.	0	0	4	4	0,4
1.	2	1,72	3,43	3,43	0,34
2.	4	3	3	3	0,3
3.	6	4	2,67	2,67	0,27
4.	8	4,8	2,4	2,4	0,24
5.	10	5,46	2,18	2,18	0,22
6.	12	6	2	2	0,2

2. A megfigyelőnek álló helyzetben kell lennie, hogy a mozgási parallaxis hatása ne érvényesüljön.

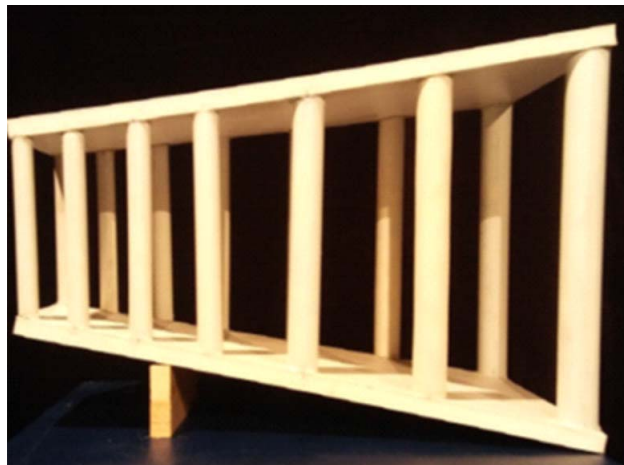
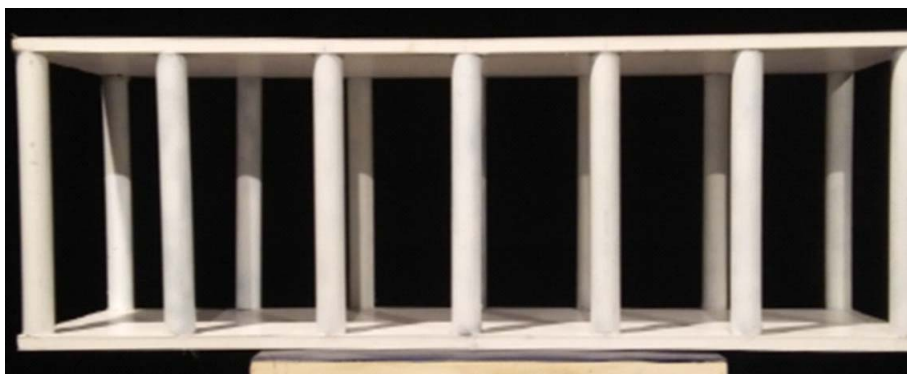
3. A látványnak egy nyílás (ablak, ajtó, boltív) mögül kell előtűnnie.

4. A fény- és árnyékhatásoknak összhangban kell lenniük az épített környezet megvilágítási viszonyaival.

A legszigorúbb feltétel az 1., amely nem mindig teljesíthető. A korábban idézett példák közül a Palazzo Spada oszloposoránál a néző bárhol állhat, a tervezésnél figyelembe vett első oszloppárnál is, tehát a feltétel teljesíthető. A Teatro Olimpico nézőterén ülő megfigyelő azonban messze van a színpadtér utcafülkéitől, így látványa különbözik a fülkék belépőélénél álló megfigyelőtől. A perspektíva látványa így is megőzőzhető lehet, de nem tökéletes.

Tegyük fel (6. ábra), hogy a megfigyelő az  $E$  térben és a  $T$  térben is a jobb szélső belépő éltől  $A$  távolságban áll. Ekkor a legelső oszlop parallaxisa azonos lesz a két esetben, a többi oszlopé viszont nem. Ha most a megfigyelő az  $E$  térben  $A$  távolságra, a  $T$  térben a kicsinyítési aránynak megfelelő  $a = kA$  távolságban áll, akkor számára mindkét tér legutolsó (bal szélső) oszlopának parallaxisa lesz ugyanakkora, a többié nem.

A nézőpont magasságára és távolságára vonatkozó fenti gondolatmenet igaz ugyan, de gyakorlati jelentősége nem nagy. Az esetek többségében ugyanis nem készül egy torzítatlan és egy torzított (hamis) perspektívájú tér, a megfigyelőnek így nem áll módjában összehasonlítást tenni közöttük.

10. ábra. Az  $E$  tér modelljének képe oldalról.9. ábra. A  $T$  tér modelljének képe oldalról.

## A módszer általánosításának lehetősége

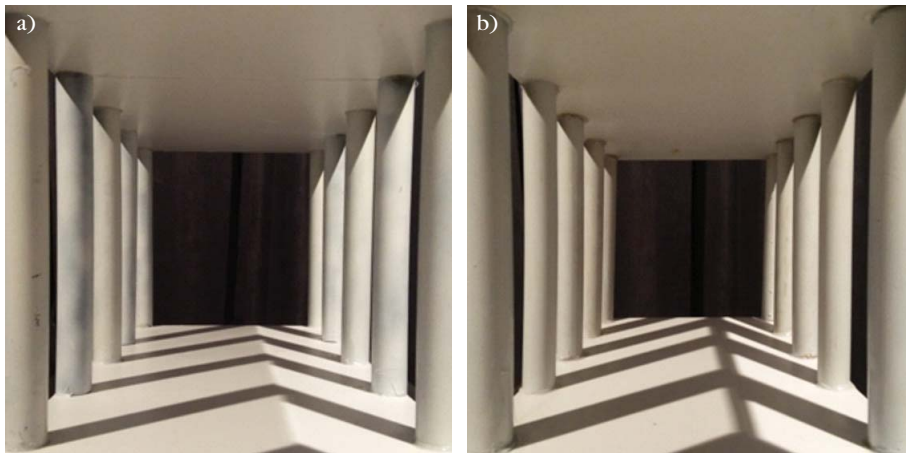
A fent részletezett számítási mód az oszlopcsarnoknál jóval bonyolultabb építmények esetén is alkalmazható. Ekkor (például egy házsor vagy utcárszlet esetén) az egyes építmények jellegzetes pontjait kell egy adott kiindulási ponttól kezdve sorszámozni ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ). Bármely közbenső építmény  $T$  térben érvényes paramétereit (az  $E$  tér paramétereit alapján) az (1) ... (16), vagy a (20) ... (27) egyenletek alapján számíthatjuk.

## Példa: oszlopcsarnok 7×2 oszloppal

Az alábbiakban konkrét példán – egy 2×7 oszlopos építményen – mutatom be a módszer alkalmazását. Az  $E$  tér és a  $T$  tér geometriai adatait az 1. táblázatban adtam meg a 7. ábra jelölései szerint, ahol az oszlopok számozása a 0. sorszámmal kezdődik, a méretezés egyenleteinek megfelelően. Az alapadatok a következők: a  $T$  tér kicsinyítési aránya  $k = 0,5$ ; a többi méret (a 6. ábra jelöléseivel):  $H = 4$  m;  $h = 2$  m;  $S = 4$  m;  $s = 2$  m;  $L = 12$  m;  $l = 6$  m;  $D = 0,4$  m.

Elkészítettem az  $E$  tér és a  $T$  tér 1:10 méretarányú modelljeit. A modellekről különböző nézetekből fényképeket készítettem. A 9. és a 10. ábra a 7 oszlopos tér modelljeit mutatja oldalnézetben. A 11. ábrán a jobb oldali belépési síkból készült képek láthatók, a 11.a ábra az  $E$  tér, a 11.b ábra a  $T$  tér képét mutatja. Megállapítható, hogy – a megvilágításból és a modellek kisebb pontatlanságaiból eredő különbségektől eltekintve – a  $T$  tér látványa az oszloposor belépő éléről nézve jól egyezik az  $E$  tér látványával. (A 11. ábrán azért látszik csak öt oszlop, mert a kép – a számí-





11. ábra. Az E tér (a) és a T tér (b) modellje a jobb oldali belépési síkból (lásd 9., 10. ábra) nézve.

## Irodalom

1. A torzított perspektíva magyarázata, példakkal: [https://en.wikipedia.org/wiki/Forced\\_perspective](https://en.wikipedia.org/wiki/Forced_perspective)
2. Részletes ismertetés a Teatro Olimpico-ról: [https://en.wikipedia.org/wiki/Teatro\\_Olimpico](https://en.wikipedia.org/wiki/Teatro_Olimpico)
3. *Empire of the eye: The magic illusion – Teatro Olimpico* (látványos videó, a szerkezet és a működés bemutatásával): <https://www.youtube.com/watch?v=VJZm-qAj9vY&feature=youtu.be>
4. A Palazzo Spada részletes ismertetése: [https://en.wikipedia.org/wiki/Palazzo\\_Spada](https://en.wikipedia.org/wiki/Palazzo_Spada)
5. Daniela Bertol, David Foell: *Designing Digital Space: An Architect's Guide to Virtual Reality*. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-14662-9 (1997).
6. A torzított perspektíva számítási módszeréhez: <https://laughing-squid.com/the-math-and-science-of-forced-perspective/>
7. Torzított perspektíva kalkulátor: <https://www.vcalc.com/wiki/cjlynch/Forced+Perspective>
8. Roger Shepard: *Mind Sights – Original Visual Illusions*. W. H. Freeman & Co. ISBN 0716721341, 9780716721345 (1990).

tási módszerrel összhangban – minden esetben az oszlopsor belépési síkjában álló szemlélő látványát mutatja és a közel 70°-os látószögéből, ami az emberi szem közvetlen látóterének szöge, a hétszlopos térnél az első két oszlop nem látható.)

6. A torzított perspektíva számítási módszeréhez: <https://laughing-squid.com/the-math-and-science-of-forced-perspective/>
7. Torzított perspektíva kalkulátor: <https://www.vcalc.com/wiki/cjlynch/Forced+Perspective>
8. Roger Shepard: *Mind Sights – Original Visual Illusions*. W. H. Freeman & Co. ISBN 0716721341, 9780716721345 (1990).

## MIKOR LÁTJUK EGY ALAGÚT VÉGÉT?

Varga János

Székesfehérvári Szc Széchenyi István Műszaki Technikum

A fizika- és a matematikatanítás fontos szempontja, hogy lehetőleg a való életben felvetődött problémákkal foglalkozzon. „Be kell vinni az életet a tudományba, hogy a tudományt kivihessük az életbe” – vallotta *Kossuth Lajos*. Ez a cikk ezen elvnek kíván megfelelni.

Közismert a „már látjuk az alagút végét” mondás, amely reménykedést, bizakodást fejez ki, hogy „a megoldás már körvonalazódik, láthatóvá válik”. Szó szerint értelmezve azonban ez egy fizikai feladat.

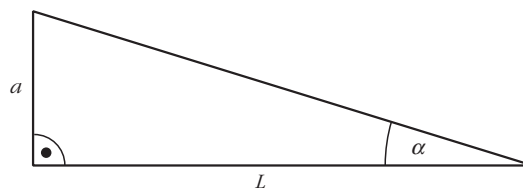
Legfeljebb milyen hosszú az  $a$  átmérőjű/szélességű egyenes alagút, aminek egyik végében állva még éppen látjuk a másik végét?

A fizika segítségével vizsgáljuk meg ezt a hétköznapi problémát néhány esetre!

### Egyenes alagút

Tekintsük az alagút – közúti, vasúti, metró- – végének két szélét két különálló pontnak. Azt a legkisebb látószöget, amelynél két különálló  $A$  és  $B$  pontot még éppen meg tudunk különböztetni egymástól, látószöghatárnak ( $\alpha$ ) nevezzük (1. ábra).

A normális, vagyis látáshibákban nem szenvedő szem esetén a látószöghatár értéke körülbelül 1 szögperc. A szem felbontóképesége vagy látásélessége (visus) ilyenkor 100%. A látásélesség a szögpercben



1. ábra. A látószöghatár geometriája, ahol  $a$  az alagút szélessége,  $L$  az alagút hossza és  $\alpha$  a látószöghatár.

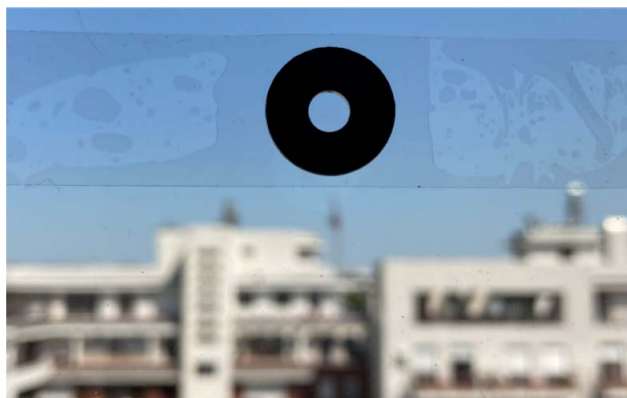
mért látószöghatár reciprokának százalékos értéke, azaz

$$\text{látásélesség (visus)} = \frac{1}{\alpha (\text{!})} \cdot 100\%.$$

Ha – például – egy ember látószöghatára 2 szögperc, akkor látásélessége csupán 50%.



Varga János mérnök-tanár, rendszerszervező gépészmérnök, diplomáját a Miskolci Nehézipari Műszaki Egyetemen szerezte 1974-ben. Kitüntetéses gépész mérnök-tanári képesítését a Budapesti Műszaki Egyetem Gazdaság- és Társadalomtudományi karán szerezte 1996-ban, majd közép- és főiskolai tanárként dolgozott. Rendszeresen publikál, tart előadásokat tudománytörténetről, saját matematikai-fizikai eredményeiről itthon és külföldön, és gyakran szerepel ismeretterjesztő tudományos rádióműsorokban.



2. ábra. Ablaküvegre ragasztott köralátét.

Az  $a$  szélességű, egyenes alagút még látható  $L$  hossza az  $\alpha$  látószöghatár segítségével, az 1. ábra alapján számítható ki.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{L},$$

miel  $\alpha$  nagyon kicsi – csupán  $1'$  –, ezért használható a  $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$  közelítés ( $\alpha$ -t radiánban kell mérni!), így

$$L = \frac{a}{\alpha}.$$

Mivel

$$1(\prime) = \frac{\pi}{180 \cdot 60} \text{ (rad)} \approx \frac{1}{3438} \text{ (rad)},$$

ezért (normális szemet feltételezve)

$$L = 3438 \cdot a, \quad (1)$$

azaz a látható végű egyenes alagút legnagyobb hossza az alagút szélességének 3438-szorosa.

Például a mintegy 8 m magas és széles<sup>1</sup> Budai Váralagút a valós mintegy a 350 m helyett  $3438 \cdot 8 \text{ m} \approx 27,5 \text{ km}$  hosszú is lehetne, és az egyik végéből még mindig látnánk a másikat. Persze a való életben a hosszabb alagutak általában ívesek és egy rendkívül kicsi eltérés az egyenestől már takartta, azaz láthatatlanná teszi a másik véget.

A fenti modellben a két szemünk és az alagút kiválasztott két pontja egyaránt egy vízszintes egyenes mentén helyezkedett el. Kérdés, vajon milyen szög alatt látjuk a szemünktől ugyanolyan távolságra lévő, de függőleges egyenes mentén elhelyezkedő két pontot, ha azok egymástól való távolsága nem változik? Másként fogalmazva, egy vízszintes egyenesen elhelyezkedő két pont látószöghatára változik-e, ha a két pontot függőleges síkban  $90^\circ$ -kal elforgatjuk. Ha a látószöghatár változna, akkor például egy fémalátét kör alakú lyukát vagy külső körének kontúrvonalát ellipszis alakúnak látnánk. Ennek eldöntéséhez végezzünk el egy egyszerű kísérletet. Egy fémalátétet –

<sup>1</sup>A Budai Váralagút valójában 9,5 m széles és belül 8 m magas. A számítást a kisebb értékre kell elvégezni, aminek okát később világitjuk meg.

a torzítás elkerülése érdekében szemmagasságban – ragasszunk egy ablaküvegre, és különböző távolságokból vizsgáljuk meg alakját (2. ábra).

A tapasztal szerint a kör távolról is körnek látszik, nem torzul el, tehát arra következtethetünk, hogy egy függőleges síkban levő két pont látószöghatára nem változik akkor sem, amikor a sík a pontokkal együtt elfordul.

Ezt törvényben is kimondhatjuk: *egy függőleges síkban szemmagasságban levő vízszintes egyenes mentén elhelyezkedő két pont látószöghatára nem változik, ha a sík a pontokkal együtt, azok felezőpontja körül önmagában tetszőleges mértékben elfordul.*

Ha a szem látószöghatára vízszintes, illetve függőleges irányban különbözne, akkor a kört ellipszisnek látnánk. Szerencsére a természet nem fosztott meg bennünket a kör látásától.

## Rövid, ívelt alagút

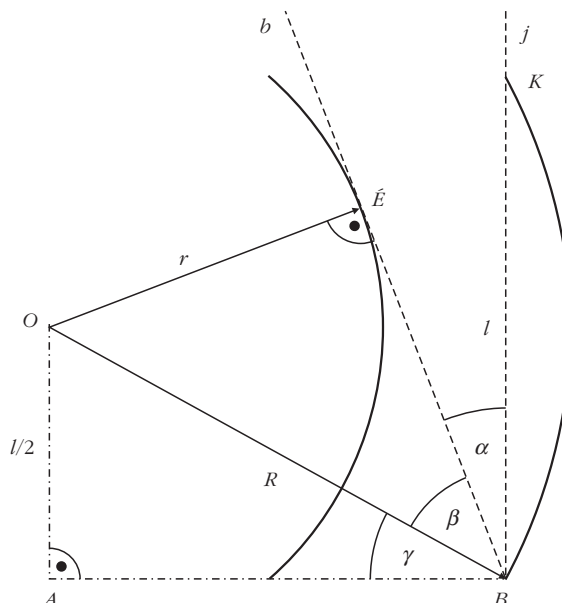
Vizsgáljuk meg egy rövid ívelt alagút esetét is (3. ábra). Az alagút bejáratának jobb szélénél ( $B$ ) állva csak akkor látjuk az alagút végét, ha a két pontozott egyenes – az alagút bal oldalát érintő ( $b$ ) és a végének jobb oldalán áthaladó ( $j$ ) – egymással bezárt szöge legalább  $1$  szögpercnyi, ami rövid alagutak esetén általában teljesül. („Alagút” helyett képzelhetünk más nyílást is, például egy csővezeték, vagy egy kis átmérőjű könyökcsövet.) A 3. ábra alapján határozzuk meg a kilátóhatóság feltételét. A keresett  $\alpha$  szög felírhatjuk:

$$\alpha = 90^\circ - \beta - \gamma. \quad (2)$$

Az  $O\acute{E}B$  derékszögű háromszög alapján

$$\sin \beta = \frac{r}{R},$$

3. ábra. Ívelt alagút, cső geometriája.



1. táblázat

## Ívelt alagút végének láthatósága.

$r$	$R$	$l$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	alagút vége...
100	110	93	65,38	25,01	-23,21	nem látszik
100	106	70	70,63	19,28	5,39	látszik
1000	1010	282	81,93	8,02	2,66	látszik
1000	1010	283	81,93	8,05	0,94	nem látszik

$r$ ,  $R$ ,  $l$  mértékegysége tetszőleges hosszmérték lehet, azonban meg kell egyezniük egymással.

ahonnan

$$\beta = \arcsin\left(\frac{r}{R}\right). \quad (3)$$

A BAO derékszögű háromszög alapján

$$\sin\gamma = \frac{l}{2R},$$

így

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{l}{2R}\right). \quad (4)$$

A (3) és (4) egyenletek (2)-be helyettesítve, a keresett szög szögpercben kifejezett értéke:

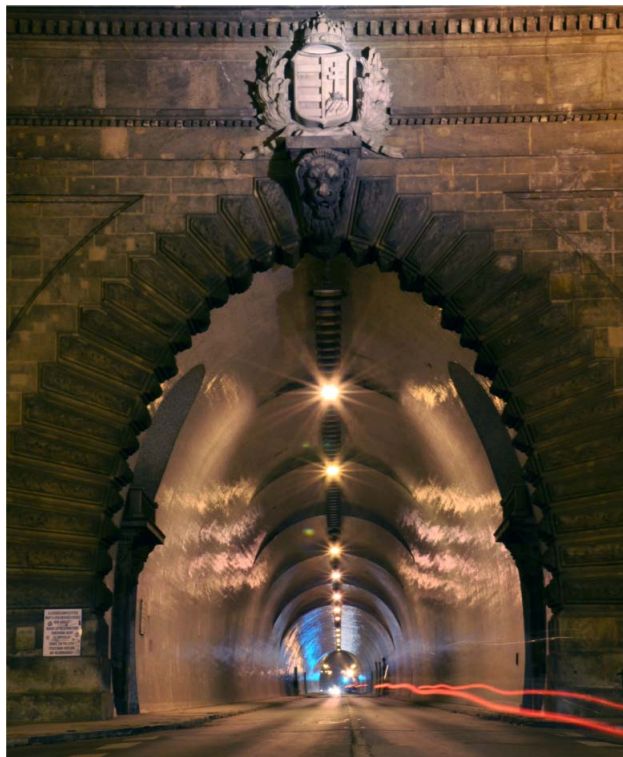
$$\alpha (^{\circ}) = \left[ 90^{\circ} - \arcsin\left(\frac{r}{R}\right) (^{\circ}) - \arcsin\left(\frac{l}{2R}\right) (^{\circ}) \right] \cdot 60, \quad (5)$$

feltéve, hogy  $l \leq 2R$ , ami teljesül, hiszen az  $R$  sugarú külső körívvel rendelkező alagút két vége közti távolság az átmérőt sohasem haladhatja meg.

Az ívelt alagút vége akkor látszik, ha az (5) egyenletből számított  $\alpha$  értéke legalább  $1'$ . Néhány esetet mutat az 1. táblázat.

## Négyszög formájú alagút

Érdekes továbbgondolni a feladatot más, például négyszög (téglalap, négyzet) formájú,  $a \times b$  keresztmetszetű alagútra, amelynél  $b > a$  (4. ábra). Habár az  $a$  távolságra lévő pontokat – vagyis az alagút két szélét – már éppen nem tudjuk megkülönböztetni egymástól, de a  $b$  távolságra levő pontokat – az alagút tetejét és alját – ekkor még két különálló pontnak láthatnánk, hiszen  $b > a$ . Tényleg látjuk vagy nem látjuk az alagút távoli tetejét és alját? Mivel szemünk felol-



5. ábra. Boltíves alagút, a Budai Váralagút.

dóképessége miatt az alagút két széle „összeolvad”, eltűnik az  $a$  szélességű rés, így a  $b$  magasságú, nagyobb rést sem fogjuk látni.

Más keresztmetszetű – például négyszög, boltíves (5. ábra), összetett – alagút esetén tehát a befoglaló téglalapjának helyzetétől (álló/fekvő) függetlenül mindig a kisebbik oldal hosszával – a  $\min(a; b)$ -vel – kell számolni, így a korábban levezetett (1) összefüggés az alábbi alakú lesz:

$$L_{\max} = 3438 \cdot \min(a; b). \quad (6)$$

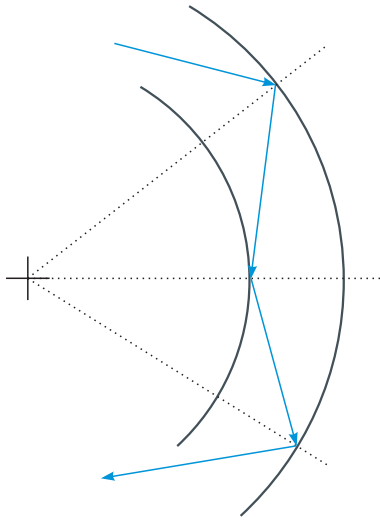
Ez a magyarázat, amiért a Váralagútra korábbi számítást a  $\min(8 \text{ m}; 9,5 \text{ m}) = 8 \text{ m}$ -rel végeztük el és kaptuk az  $L_{\max} = 3438 \cdot 8 \text{ m} = 27,5 \text{ km}$  távolságot.

## Tükröző belső felületű alagút

Különleges esetnek számít, amikor az „alagút” – például fémcső – belső felülete tükrös, ugyanis ilyenkor a végéről érkező fény a belső felületekről sorozato-

4. ábra. Négyszög formájú alagút.





6. ábra. A fény útja a tükröző belső felületű alagútban.

san visszaverődve, zig-zag alakban haladva mindig kiér az „alagútból” (6. ábra). Ezen az elven működik az optikai szál, ahol az átmérő sokkal-sokkal kisebb, mint a legyőzendő távolság, illetve az optikai szál görbületi sugara. A fény a szál határán nagyon sokszor teljes visszaverődést szenvedve végighalad.

## A Föld görbületének figyelembevétele

Hosszabb alagutak esetén nem hanyagolhatjuk el, hogy az alagút követi a Föld görbületét, vagyis a földgömbnek az alagút függőleges síkjával való metszetének megfelelő sugarú körön halad.

Ez esetben egy, a szemmagasságtól függő látótávolsággal is számolni kell, ami a látószöghatár alapján meghatározott látótávolságtól eltérő értékű lehet. Határozzuk meg, hogy egy adott  $h$  szemmagasságú személy adott  $\rho$  sugarú kör – a földgömb azon körének a sugara, amely mentén az alagút halad – esetén mekkora  $d$  távolságra lát.

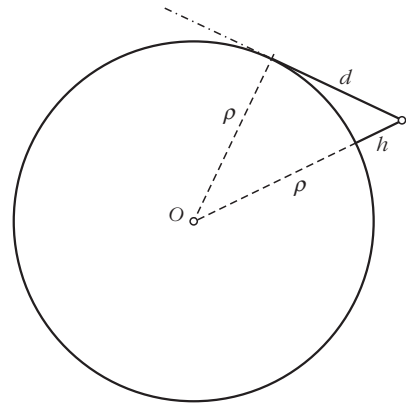
A 7. ábra alapján a  $d$  látótávolságra felírható a Pitagorasz-tétel:

$$d^2 = (\rho + h)^2 - \rho^2,$$

innen

$$\begin{aligned} d &= \sqrt{2\rho h + h^2} = \\ &= \sqrt{h(2\rho + h)}. \end{aligned}$$

Mivel az átlagos ember szemmagassága körülbelül 160 cm, így  $2\rho$  biztosan jóval nagyobb, mint  $h$ , egyszerű becslés esetén ez utóbbit az összegben elhanyagolhatjuk, így a látótávolságra – gyakor-



7. ábra. A görbült földfelszín hatása a látótávolságra.

lati szempontból teljesen megfelelő – az alábbi közelítést kapjuk:

$$d \approx \sqrt{2\rho h}. \quad (7)$$

*Példa:* Tekintsük egy, az északi szélesség  $47^\circ$ -án – itt található Budapest – kelet–nyugati irányban haladó alagutat, amelynek végében egy  $h = 160 \text{ cm} = 0,0016 \text{ km}$  szemmagasságú ember áll. Ekkor  $\rho = 6370 \text{ km} \cdot \cos 47^\circ = 4344 \text{ km}$ , ahol 6370 km a Föld egyenlítői körének sugara. Így látótávolsága a (7) alapján:

$$d = \sqrt{2\rho h} = \sqrt{2 \cdot 4344 \cdot 0,0016} = 3,728 \text{ km}.$$

Ez az érték jóval alacsonyabb, mint a látószöghatár alapján számolt (lásd a Váralagútra kapott 27,5 km-t), tehát a Föld görbületét követő alagút esetén – például a kis földalatti, mint kéregvasút, vagy a városi metró, de a hegyet átszelő, lézerrel kijelölt alagút már nem feltétlenül ilyen – a görbület hatását kell meghatározónak tekinteni, vagyis a két érték minimuma, a

$$L \leq \min[3438 \cdot \min(a, b); \sqrt{2\rho h}] \quad (8)$$

lesz a teljes végeredmény.

8. ábra. Egyenes autótút, az útpálya azonban nem teljesen vízszintes, így a látható útszakasz hossza a szélességből becsülhető.



Érdemes megjegyezni, hogy a levezetett (8) összefüggés más esetekben is jól használható becslési eszköz lehet. Hosszú, egyenes autópályán haladva ez alapján meg tudjuk becsülni az autót eltűnésének tőlünk való távolságát, amennyiben az út teljesen síma, vízszintes síkságon, fennsíkon vezet. Ilyenkor szemmagasságnak természetesen az autóban elhelyezkedő szemünk autópályától mért magasságát kell figyelembe venni és a (8) összefüggésből a (7)-re utalót kell használni. A korábbi szemmagasság-adattal az Egenlítő mentén, illetve észak–déli irányban ez körülbelül 4,5 km.

Másrészt, ha az autót ponttá zsugorodását látjuk, akkor az (1) összefüggés alapján, az autót szélességének ismeretében tehetünk becslést a látótávolságra (8. ábra).

## Egy speciális eset

Érdemes megvizsgálni azt a különleges esetet, amikor a látószöghatár alapján meghatározott  $L$  látótávolság megegyezik a szemmagasságtól függő, a Föld görbülete miatti  $d$  látótávolsággal. Ekkor az (1) és (7) összefüggések egyenlősége alapján

$$L = 3438 \cdot a = \sqrt{2 \rho h} = d,$$

ahol az alkalmazott jelölések már szerepeltek. Négyzetre emelve, 2-vel osztva és kerekítve:

$$5\,910\,000 \cdot a^2 = \rho h,$$

azaz

$$\frac{\rho h}{a^2} = 5\,910\,000. \quad (9)$$

A Váralagút elhelyezkedését, paramétereit, valamint az 1,6 m-es szemmagasságot használva:

$$a = \sqrt{\frac{\rho h}{5\,910\,000}} = \sqrt{\frac{4\,344\,000 \cdot 1,6}{5\,910\,000}} = 1,08 \text{ m}$$

lenne az alagút szélessége ahhoz, hogy a látószöghatár alapján meghatározott  $L$  látótávolság megegyezzen a szemmagasságtól függő, a Föld görbülete miatti  $d$  látótávolsággal, ami alagútnak irreálisan keskeny, csővezetéknek – abból is legalább 1,6 m magas téglalap vagy boltíves keresztmetszetűből – viszont már elképzelhető.

## HÍREK – ESEMÉNYEK

# KITÜNTETETT FIZIKATANÁROK

## Bonis Bona – A Nemzet Tehetségeiért életműdíj Rajkovits Zsuzsannának

Új típusú, csapatmunkában történő megmérettetésen alapuló tanulmányi versenyekre (IYPT, International Young Physicists' Tournament) szervezett középiskolás diákokat már az 1990-es évek elejétől. 22 éven keresztül vezette a diákok kiválasztását, azok több hónapon át történő felkészítését és koordinálta a nemzetközi versenyeken való részvételt is. Az IYPT nemzetközi bizottságának magyar tagjaként 1995 és 2012 között részt vett az új feladatok összeállításában is. 2000-ben ő rendezte Budapesten a 13. IYPT versenyt, segítői a korábbi versenyeken szerepelt diákjai közül kerültek ki.

Újabb lehetőséget nyújtva a középiskolások nemzetközi megmérettetésére International Conference of Young Scientists (ICYS) elnevezéssel nemzetközi versenyt alapított 1993-ban. Rajta a diákok négy szekcióban (matematika, informatika, fizika és környezettudomány), nemzetközi zsűri előtt mutatják be kutatási eredményeiket angol nyelven. A tanulók így megismerik a tudományos kutatómunka egyes fázisait, a témaválasztástól kezdődően az eredmények angol nyelvű előadásban történő bemutatásáig. Az évek során országszerte (például: Kisvárda, Gödöllő, Túr-

keve, Szolnok, Békéscsaba, Debrecen, Nagykanizsa, Dunaújváros, Budapest) lelkes kutató tanárok köré tudományos műhelyek jöttek létre középiskolákban, ahonnan évente kerültek ki az ICYS újabb versenyzői. 1994-től napjainkig a magyar középiskolások közül az ICYS nemzetközi versenyen 161 diák vett részt, akik 133 előadást tartottak, amelyekből 113-at valamilyen díjjal jutalmaztak. A diákok visszajelzései szerint életre szóló élményt jelent nekik egy ilyen versenyen való részvétel. Éppen e hatás motiválta a hazai versenyzőket, akik közül nem egy élethivatásul a kutatást választotta. Életútjukat követve megállapítható, hogy a diákoknak e szereplés meghatározó lépcsőfok volt tudományos sikereik elérésében. Ma már volt versenyző diákjai neves kutató csoportokban (például: *Falus Péter*, *Varga Dezső*, *Bényei Éva Bernadett*), hazai és külföldi egyetemeken (*Asbóth János*, *Bukovinszky Tibor*, Wageningen, Hollandia) professzorokként dolgoznak. Van közöttük olyan is, akinek tevékenységét sikeres kutatóként Junior Prima díjjal is elismerték, s van aki már az MTA doktora fokozat birtokosa (*Farkas Illés*) is.

Három alkalommal (1994, 1996, 1998) megrendezte Visegrádon az ICYS nemzetközi konferenciát, ahol a zsűriben a nemzetközi kollégákon kívül hazánk kiváló tudósai értékelték a diákok teljesítményét.

Az ICYS nemzetközi verseny elnökeként 26 éven keresztül (1994–2019) minden külföldön megrendezett verseny szervezésében tanácsadással részt vállalt, biztosítva a zökkenőmentes folyamatosságot. Pillanatnyilag az ICYS nemzetközi szervezőbizottságában mint tiszteletbeli elnök segíti a munkát.

Tehetséggondozó munkájának elismerésül megválasztották a Fizikaversenyek Világszövetsége (WFPhC) alakuláskor, 1999-ben a Végrahajtó Bizottság tagjának, s 2002-ben a Szövetség első kongresszusán alelnöknek. A tisztséget 10 éven keresztül, 2012-ig töltötte be. A tehetséggondozásban végzett munkája elismerésül 2010-ben megkapta a kétévente egy személynek megszavazott „World Federation of Physics Competitions Award” kitüntetést.

A nemzetközi versenyeken történő aktív szereplésének köszönhetően a European Physical Society elnökének javaslatára 2007-ben az angliai Institute of Physics, London tagjai közé választották, azóta az FInstP viselésére jogosult.

Az ELTE Természettudományi Karán javaslatára alakult meg a Tehetséggondozó Kari Munkacsoport, amelynek 1997–2005 között vezetője volt.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak 1991 óta tagja, a Társulat főtitkárhelyettese 1999–2003 között. Két nemzetközi fórumba is delegálták. A European Physical Society Education Forum, Pre-University Section magyar képviselője volt 2001–2004 között és ugyanekkor a fiatal kutatók nemzetközi konferenciákon való részvételének anyagi támogatására létrejött European Physical Society East-West Task Force Forum egyik tagjaként is közreműködött. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat munkáját Eötvös Loránd Emlékplakettel ismerte el 1996-ban.

## Példaképem a tanárom – Ujvári Sándor kitüntetése

A Richter Gedeon Nyrt. és a Kutató Diákokért Alapítvány közös pályázatát a természettudományos tantárgyakat tanító tanárok elismerésére hozták létre. A pályázatra diákok jelölhetik tanáraikat. Idén a Lánzos Kornél Gimnázium fizikatanára, *Ujvári Sándor* kapta ezt az elismerést.

Ezen alkalomból közöljük *Borsányi Bea* FEOL-ban, Fejér megyei hírportálban megjelent riportját a kitüntetéssel.

– *Ujvári tanár úr három éve nyugdíjas, de ez mit sem változtat a hétköznapjain, hiszen ugyanúgy bejár mindennap tanítani, mint az elmúlt évtizedekben. Miért?*

– Szeretem ezt csinálni. Fizikatanárból sincs túl sok, úgyhogy ez a másik ok, amiért maradtam. Szerencsére egészséges vagyok, így amíg tudok tanítani, szívesen teszem.

– *Hogyan indult a pályája?*

– 1979-ben végeztem a Kandó főiskolán mint villamosipari műszaki tanár, de akkor nem találtam ilyen állást. *Nagy Kálmánnal*, a József Attila fiúkollégium mostani igazgatójával jöttünk Fehérvárra és nevelőtanárként kezdtünk dolgozni a kollégiumban. Időnként tanítottunk is ott, ahol szükség volt matematika- vagy fizikatanárra. A fizikatanári képesítést néhány évvel később szereztem meg. A kollégium melletti egészségügyi szakközépiskolában abban az időben kötelező érettségi tárgy volt a fizika, és amikor a tanárnő elment szülni, hívtak óraadónak. Akkoriban már családos ember voltam. A kollégium egyik szobájában laktunk, és amíg a feleségem tanított délelőtt, én vigyáztam a kicsi lányunkra, hiszen az én munkaidőm csak délután kezdődött. Az iskolában azt mondták, nem probléma, amíg én órát tartok, mindig átküldenek két lányt az ápolónős osztályból a kislányhoz. Így kezdtem az „Eü”-ben tanítani.

– *Azért is különleges, hogy fizikatanárként kapta a díjat, mert ez az a tárgy – és vele együtt talán a tanár is –, amit vagy szeretnek, vagy utálnak a diákok.*

– A fizikát jóval többen utálják, mint szeretik! Nemzetközi tapasztalatok szerint három tantárgy váltja egymást a népszerűségi lista utolsó három helyén: a fizika, a kémia és a nyelvtan. Engem talán azért szeretnek, mert sajnos nem vagyok elég szigorú. Ez tény! Ám magam sem voltam mintadiák. Amikor a tanárim megtudták, hogy pedagógusnak készülök, azt mondták, majd jól visszkapok mindent! Ez így is lett. Szerencsére ma is jól emlékszem fiatalkori magamra, ezért nem veszem véresen komolyan a fegyelmezést és nem akarok mindenkinek mindent megtanítani. A Bugátban annak idején az volt a szerencsém, hogy mire elkezdődött fizikából az érettségire való felkészítés, addigra a kellően kemény kémia- és anatómiaszakos kollégák kiostályták az osztályokat, így nekem már azok maradtak, akik képesek voltak megtanulni az érettségire, amit kellett. A fizikaérettségi viszont a gimnáziumban nem kötelező, ez ad némi szabadságot is.

– *Azok közé tartozik, akik mindezek ellenére képesek megszerettetni a tantárgyat azokkal, akikben van egy kis érdeklődés.*

– Igen, de hangsúlyozzuk ki az érdeklődés szót! Nálunk 60 diák van egy évfolyamban és közöttük mindig találok 10-12 olyat, akiknek a pályája később ebbe az irányba megy, vagy akiket meg lehet fogni, mert nyitottak, érdeklődők. Nagy szerencse, hogy a Lánzosban számos kísérletre és olyan munkákra is van lehetőség, amit máshol nem tudnak megcsinálni iskolai keretek között. Ott van az asztalon például egy műondetektor, amit egy pályázat keretében építettünk. A műon az elektron egy „kövér testvére”, olyan elemi részecske, ami a felső légkörben keletkezik. A műondetektorral pedig középiskolás szinten

be lehet bizonyítani a relativitáselméletet. Ezt *Bordács Lajos* igazgató, *Galánta Endre* kollégánk, valamint az én segítségével diákok építették. A 25 év alatt azonban számtalan más is készült itt. Volt olyan, aki atomerő-mikroszkópot épített, de olyan is akadt, aki másodikos létre protongyorsítót készített. Ez a diák ma mérnök, precíziós mágneseket és alkatrészeket gyárt többek között nagy kutatóintézeteknek is. Több tanulónk is van, aki az érettségi után is fizikával, illetve annak valamilyen ágával foglalkozik. Fizikatanár is lett, bár manapság nem túl népszerű a pedagóguspálya.

– *Mit jelent önnek a beszélgetés apropóját adó díj?*

– Több elismerést is kaptam pályafutásom során, de ez köztük a legkomolyabb, amit egy tanár kaphat, hiszen a diákjaim terjesztettek fel. Nagyon jólesett és megható volt olvasni az általuk írt indoklásokat is. Ám biztos, hogy nem minden diák lát engem olyannak, amilyenek ezekben leírtak. És hát a rólam festett képben sincsenek benne a „bénázásaim” sem, pedig hajlamos vagyok elrontani dolgokat, sőt olyanokat is csinállok, amiket mások furcsának tartanak.

– *Ilyen például a 90-es években legendássá vált újságolvasás munkába menet...*

– Valóban! Abban az időben két olyan tanár volt, aki ezzel „látványosság” lett a városban – az egyik én voltam. Reggel megvettem az újságot, és amíg odaértem a Bugátba, a felét kiolvastam. Akkor szoktam le erről, amikor elkezdtem biciklivel munkába járni.

– *A „szórakozott professzor” iskolán kívül a tudományos életben is tevékenykedik, több társaságnak is a tagja.*

– Pályakezdeként *Marx György*, ismert és híres professzor figyelt fel rám egy rendezvényen, így lettem tagja az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak, amelynek később a vezetőségébe is bekerültem. Fiatalon, szerintem érdem nélkül kaptam a kinevezést. Lehet, hogy ez is úgy ment akkoriban, mint a KISZ-ben: „dolgozzon a legfiatalabb”. Tagja vagyok a Magyar Nukleáris Társaságnak is, aminek szintén dolgozom a vezetőségében, és benne vagyok a *Fizikai Szemle* szerkesztőbizottságában is. Korábban tagja voltam a Szkeptikus Társaságnak is, de mivel túl sok lett a feladatom, valamit fel kellett adnom.

## ERICSSON a fizika népszerűsítéséért és tehetségeinek gondozásáért díj, 2021

*Schramek Anikó*, a Fővárosi Fazekas Mihály Gimnázium tanára a *fizika tehetségeinek gondozásáért* vehette át a díjat. A tanárnő sokáig az általános iskolások *ABACUS* folyóirata fizikarovatának vezetője volt. Szakkörökön és egyénileg is évek óta készít fel diákokat versenyekre, aki kiemelkedően szerepelnek a Fizikai és Csillagászati Nemzetközi Diákolimpiákon, az OKTV-n és a Mikola Sándor versenyen is. A Wigner Fizikai Kutatóintézzel közös projektben az érdeklődő diákok a tanárok kíséretében és fizikusokkal együttműködve detektort fejlesztettek és építettek az intézet kutatólaboratóriumában. A Fazekasban mentorprogramot indított, amelynek keretében a kiemelkedően tehetséges diákok mentorok vezetésével kutatómunkát végeznek egyetemeken és fizikai intézetek kutatóival, amiből számos eredmény született már.

*Seres István*, a Premontrei Szent Norbert Gimnázium és Gödöllői Református Líceum fizikatanára és a gödöllői Szent István Egyetem oktatója a *fizika tehetségeinek gondozásáért* vehette át a díjat. A gimnázium diákjaival rendszeresen vesz részt különböző fizika programokban. Szakkör keretében 2006-ban kezdtek el a megújuló energiaforrásokkal foglalkozni, kutatási projekteket végezni. TUDOK regionális konferenciákon többször ért el első helyezést diákjaival. Tanítványai komoly helyezéseket értek el az OKTV-n és más versenyeken. A 2017-től bevezetésre került új érettségi követelményekhez készített, interneten is elérhető segédanyag társszerzője. A fizikai közéletben is aktív, szerepet vállal konferenciák, ankétok szervezésében. Kísérleti bemutatói, műhelyfoglalkozásai nagy érdeklődésre tartanak számot. Szakmai szervezetek tagja, jelentős sze-

repet vállal, többek között, a Magyar Napenergia Társaságban és az Eötvös Loránd Fizikai Társulatban.

*Poócza József*, a győri Kazinczy Ferenc Gimnázium és Kollégium matematika–fizika–számítástechnika tanára a *fizika népszerűsítéséért* kapta a díjat. Éveken át óraadó tanár volt a Széchenyi István Egyetemen, beleláthatott a felsőoktatásba, ottani tapasztalatait jól tudta hasznosítani tanítványai egyetemre, főiskolára történő felkészítésében is. Iskolájában Matematikai Élményműhelyt valósított meg. Aktív tagja az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak, amelynek szakcsoportja immár 32. éve szervezi a 8. osztályosok Öveges József Kárpát-medencei Fizikaversenyét. Az utóbbi két évtizedben a győri Kazinczy Gimnázium ad otthont e versenynek, a szakmai-technikai feltételeket tanár úr biztosítja.

*Stonawski Tamás*, a Képes Géza Általános Iskola tanára, a Nyíregyházi Egyetem adjunktusa és az MTA–ELTE Fizika Tanítása Kutatócsoport tagja a *fizika népszerűsítéséért* kapta a díjat. Széleskörű tevékenységet folytat a népszerűsítésben, rendszeresen fizikashow-t tart a *Fizika Mindenkié* programok keretében. *Fizikai segédletek* címen tankönyvkiegészítője jelent meg. Részt vesz a Mozaik tankönyvkiadó oktatási filmanyagának létrehozásában, bővítésében. *Trükkös Fizika* kísérletezős könyvet írt. A fizikatanári ankétokon műhelyfoglalkozásokat tart, eszközkiallító, a 10 perces kísérletek népszerű bemutatója. A *Képes Fizikatárlat* festménysorozata művészi szinten tárja a gyerekek elé az évezredek alatt elért tudományos eredményeket. *Öveges* professzor szellemiségét idéző könyvével és tudománytörténeti tablójával híveket szerez a fizika tudományának.

# Magyar Fizikus Vándorgyűlés 2022



2022. augusztus 21–24.

Pannon Egyetem, Veszprém

**Jelentkezési határidő: 2022. július 10.**

**A Fizikai Szemle szerkesztőbizottsága  
kéri az előadókat és a  
posztumokat bemutatókat, hogy  
eredményeiket osszák meg  
a folyóirat olvasóival is!**

**Részletek a**

**<http://elft.hu/magyar-fizikus-vandorgyules-2022>  
honlapon**