

számításaink szerint akár heti rendszerességgel detektálhat majd jeleket. Az aLIGO jelenlegi érzékenysége mellett a felfedezés során észlelt nehezebb, körülbelül 30 naptömegű feketelyukpáros jelét, amely nagyságrendileg 100 Hz-es frekvenciájú, még jóval távolabbról is látta volna, mint azok tényleges, körülbelül 400 Mpc-es távolsága. Ezért volt a jel „erős”, azaz jel/zaj hányadosa 24 körüli.

Természetesen szükséges az űrbeli detektorok fejlesztése és telepítése is. Nem azért, mert ott jobb körülmények között, kisebb háttérzajjal lehet majd mérni, hanem azért, mert az ott elhelyezhető sokkal nagyobb detektorok méretükből következően teljesen más fizikai jelenségekhez tartozó hullámokat lesznek

képesek érzékelni. Asztrofizikai, kozmológiai szempontból nagyon fontos az Univerzum fejlődése során tapasztalható galaxis-összeolvadásokkal együtt járó szupernehéz fekete lyukak összeolvadásának gravitációshullám-nyomát detektálni. Ismét utalunk rá, az (5) képlet azt sugallja, hogy egy 10^6 – $10^8 M_{\odot}$ tömegű feketelyukpáros összeolvadásakor olyan alacsony frekvenciájú, hatalmas hullámhosszú jel keletkezik, amely csak több millió km hosszúságú detektorkarokkal lesz észlelhető. A szerző bízik abban, hogy a most történt felfedezés lökést ad az űrbeli eszközök fejlesztésének, és – elsősorban – a LISA rendszer finanszírozásában az ESA mellett a NASA is részt vesz majd, így az talán már a jövő évtized vége előtt repülhet.

A LÉZERSZEMCSE ÉS MÉRÉSTECHNIKAI ALKALMAZÁSAI

Gombkötő Balázs, Kornis János
BME Fizika Tanszék

Mi a lézerszemcse?

Amikor az 1960-as évek elején megszületett az első folytonos üzemű lézer, rögtön nyilvánvalóvá vált, hogy alkalmazása során számolni kell egy addig kevésbé fontosnak gondolt jelenséggel, az úgynevezett lézerszemcsével (angolul speckle pattern). Ha ugyanis a kitágított lézernyaláb érdes felületről szóródik vissza (például papírlap, diszperz vagy matt festék, *1.a ábra*), vagy ködön, füstön, illetve opálüvegszerű anyagon halad át, akkor az ernyőn felfogott nyaláb intenzitása a *2.a ábrán* láthatóhoz hasonló „szemcsézettséget”, véletlenszerű ingadozásokat mutat. Ha szabad szemmel nézünk egy kitágított lézernyalábbal megvi-

lágított érdes felületet (*1.b ábra*), akkor az a *2.b ábrához* hasonlóan szintén szemcsés lesz. Ha a megfigyelő/ernyő, a fényszóró objektum vagy a megvilágítása picit elmozdul (vagy elfordul, deformálódik stb.), a szemcsékép megváltozik: a sötét szemcsék világos-

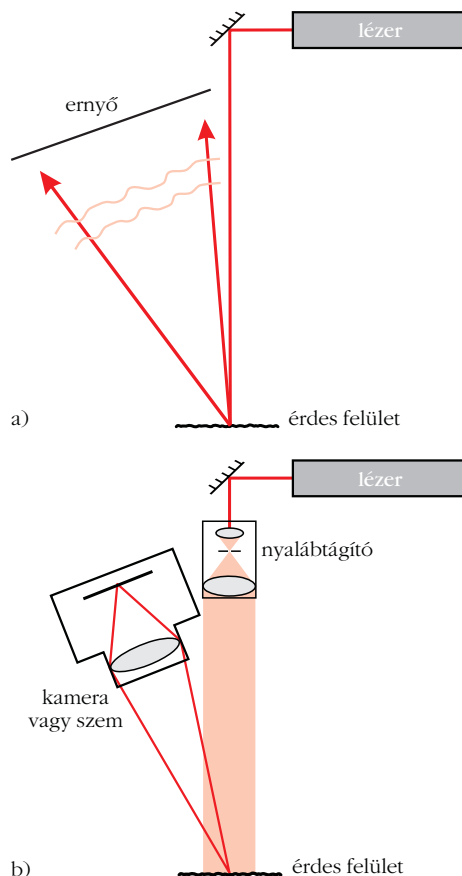


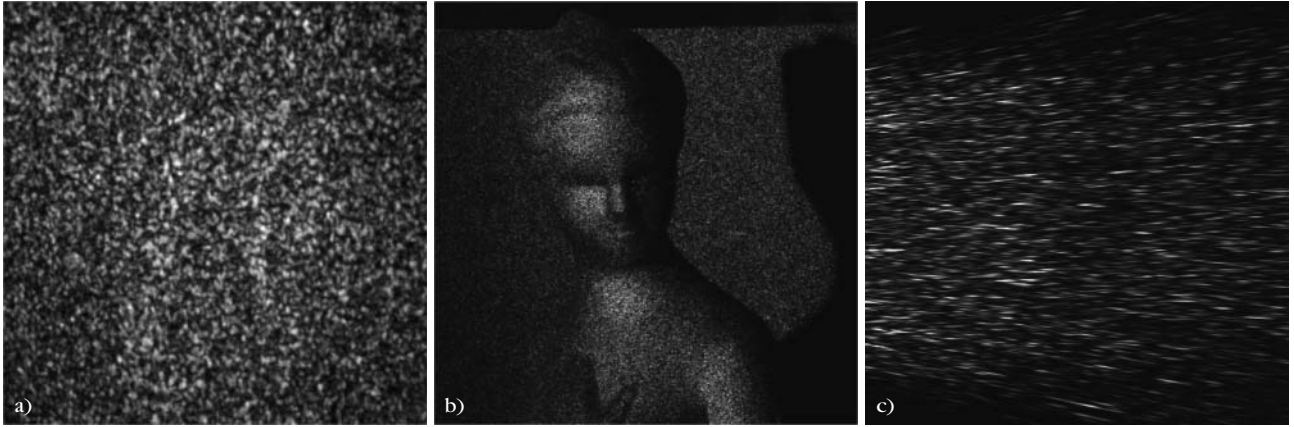
Gombkötő Balázs 2001-ben végzett a BME mérnök-fizikus szakán optika szakirányon, majd 2004-ben PhD fokozatot szerzett fizikából. Kutatási területei a koherens optikai mérés technika, azon belül a fázisvisszaállítás, digitális holográfia, szemcsékép-mérés technikák, holografikus adattárolás. További érdeklődési körei a holográfia, optikai örvények és az ultrahangos távolságmérés.



Kornis János villamosmérnökként végzett a Budapesti Műszaki Egyetemen 1984-ben. Jelenleg docensként dolgozik a BME Fizika Tanszékén, az Optikai Mérés Technikai Csoport vezetője. Kutatási területei: holografikus és szemcsékép-mérés technika, számítógépes képfeldolgozás, digitális jelfeldolgozás.

1. ábra. Objektív és szubjektív szemcsékép létrejötte.





2. ábra. a) Ernyőn felfogott objektív szemcsékép b) lézerszemcsés fénykép c) szemcsék terjedési irányú metszeti képe.

sá válhatnak és viszont, illetve a szemcsék elmozdulhatnak, azonban ezek a változások sokszor teljesen szabálytalanok tűnnek. Megfigyelhető továbbá, hogy a sötét és világos szemcsék alakja szabálytalan, vannak köztük kisebbek és nagyobbak, azonban mégis van egy átlagos méretük, amely változtatható.

Ha például szemünk elé kisebb kerek nyílást helyezünk – vagy hunyorítunk – az átlagos szemcseméret nagyobb lesz. Az 1. b ábra szerinti esetben is úgy gondolhatnánk, hogy ha nem az érdes felületre fókuszálunk szemünkkel, akkor a szemcsékép is elmosódik, azonban ez nem így van: a lézerszemcsék minden esetben ugyanolyan kontrasztosak maradnak! További megfigyelések szerint egyrészt a szemcsék kontrasztja inkább attól függ, hogy mennyire érdes egy felület: minél simább annál kisebb a kontraszt. Tükörsima felület esetén a szemcsézettség el is tűnhet. Másrészt hasonlót tapasztalunk részlegesen koherens fényben (például a csillagászatban, vagy egyetlen színekvonalú fényben), míg fehér fényben már egyáltalán nem is látható szemcsékép; ez felel meg a nulla szemcsékontrasztnak.

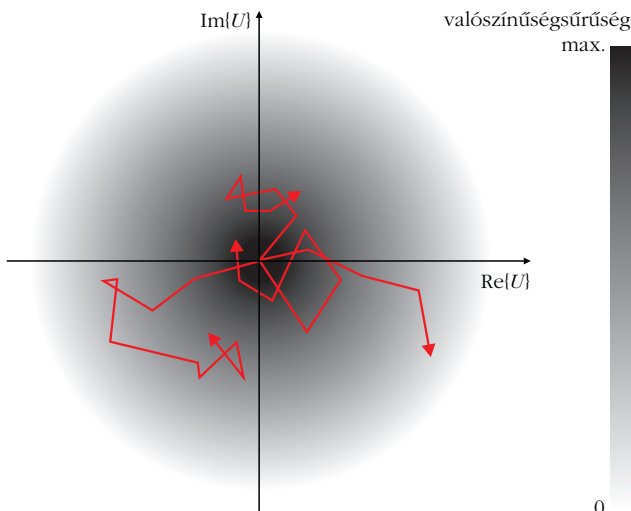
A fentiek alapján látható, hogy a szemcsékép létrejöttéhez sok tényező járul hozzá, így a fény koheren-

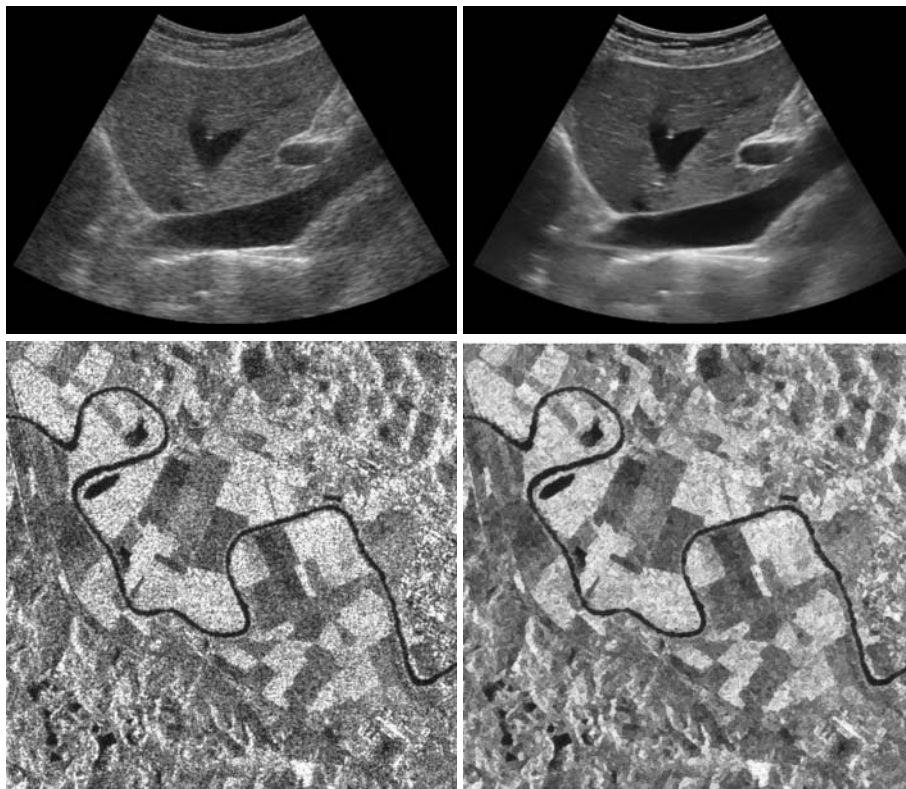
ciájának mértéke, a szóró objektumhoz tartozó véletlenszerűségek mértéke, a résztvevők geometriai elhelyezkedése és akár a megfigyelő leképező rendszerének apertúrája. A leginkább szabályos, matematikailag legegyszerűbben jellemezhető szemcsékép akkor jön létre, ha a fény tökéletesen koherens, és a szóró objektum minden pontja egymástól függetlenül a 0 és 2π között egyenletes fázistolást ad járulékul az interferenciához. Reflexiók esetén ehhez elég, ha a felület érdessége eléri vagy meghaladja a fény hullámhosszát, transzmissziós esetben pedig elegendő mértékű inhomogenitásra, esetleg szintén érdes be- és kilépő felületre van szükség. Ilyenkor a szemcséképet teljesen, a többi esetben pedig részlegesen kifejletnek nevezzük.

A lézerszemcsék tulajdonságai

Az itt nem részletezett levezetések alapján az alábbi tulajdonságok jellemzik a kifejlett lézerszemcséket. A különböző világosságú pontok előfordulásának gyakorisága nem azonos, hanem jól meghatározott (negatív exponenciális eloszlás): a leggyakoribb a sötét pont, a legritkább pedig a világos pont. A fényhullám fázisa pedig tetszőleges pontban teljesen véletlenszerű, egyenletesen vesz fel minden értéket. Ezek a tulajdonságok egyszerűen beláthatók az [1] irodalomban található módon (a központi határeloszlás tétel segítségével). Ennél sokkal szemléletesebb leírást ad a 3. ábrán is látható „ténfergő részeg” modellje, aki, ha korlátos, de véletlen hosszú és véletlenszerű irányú lépésekből sokat megtesz, bármelyik irányba egyenlő eséllyel juthat el, de messzebbre csak exponenciálisan csökkenő valószínűséggel, így szinte kár is elindulnia. Ha minden egyes pontforrást a szóró objektumon/-ban egy lépéssel azonosítunk, akkor a részeg eredő elmozdulása az eredő hullámtérnek felel meg. A valóságban létrejövő és detektálható szemcséképek eloszlása néha eltér ettől az ideálistól, akár már önmagában egy kamera véges pixelmérete miatt is. Részlegesen kifejlett szemcsék esetén az tapasztalható, hogy amiképp a kontraszt csökken, úgy csökken a sötét pontok gyakorisága is.

3. ábra. A fény eredő U amplitúdójának eloszlása a komplex számsíkon a ténfergő részeg modellje szerint.





4. ábra. Ultrahang és SAR radar képek szemcsézajjal és megszürvé (forrás: Google képkereső).

szaoosztva akár a tárgysíkon is értelmezhetjük, és ott is tekinthetünk egy látszólagos szemcseméretet.

Történet és hasonló jelenségek

Amint az eddigiekből látható, részlegesen kifejlett szemcséket vagy hasonló diffrakciókorlátos képzajokat már a lézer feltalálása előtt is észlelhettek, és észleltek is. Az első, csillagászathoz köthető észlelés már *Isaac Newton* idejéből való. Ez annak köszönhető, hogy a távoli csillagok fénye térben eléggé koherens, így a pislákoláson kívül a légkörön szóródva képe szemcséssé válhat. Úgynevezett *Quêtelet*-sávok láthatók, ha kissé poros tükörben olyan fényforrást nézünk, amely közel van a szemünkhöz. Ha a fényforrás egy színű LED, akkor a világos

A szemcsék átlagos méretét több szempontból is meg kell különböztetni. Amikor a lézerfény a szóró objektumtól az ernyőig akadálytalanul terjed az *1.a ábra* szerint, vagy az ernyőt egy csupas, objektív nélküli kamerával helyettesítjük, akkor a rajta létrejött mintázatot objektív szemcséképeknek nevezzük. Ekkor az ernyőn vagy a kamerán látott szemcseméret jó közelítéssel $\lambda z/L$, ahol λ a hullámhossz, L a szóró térfogat vagy felület keresztirányú mérete az ernyő felől nézve, z pedig az attól vett távolság az ernyőig. Látható tehát, hogy ha adott méretű lézerfényfolttal világítunk meg egy érdes felületet, akkor annak közelében kicsi, attól távolabb nagyobb átlagos szemcseméretet figyelhetünk meg. Kör alakú folt esetén egy 1,22-es szorzó is megjelenik, ekkor ez a méret megegyezik az azonos geometriához tartozó *Airy*-korong méretével, így a szemcséképet egy diffrakciókorlátos zajnak is felfoghatjuk. Az ernyőt előre hátra mozgatva az is megfigyelhető, hogy a szemcsék egy átlagos hosszirányú mérettel is rendelkeznek (lásd a *2.c ábrán*), ami után például egy világos szemcse elsötétül. Ez az átlaghossz körülbelül $15\lambda(z/L)^2$, így nagyobb távolságban egy átlagos szemcse térbeli alakja elnyújtott, „szivarszerű”.

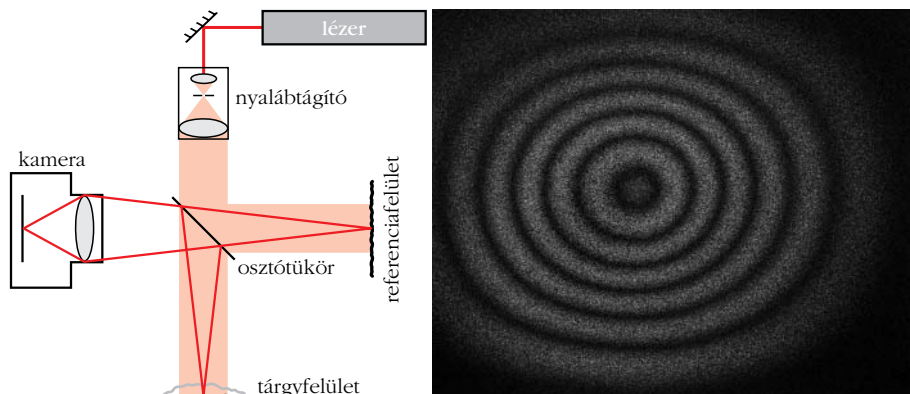
Az *1.b ábra* szerinti másik jellemző esetben, amikor egy megvilágított nagyobb felületet optikai rendszerrel képezünk le, szubjektív szemcséképet kapunk. Ekkor a rendszer apertúrája – amely tehát a megfigyelő saját paramétere, innen a szubjektív név – önmagában meghatározza a diffrakciós korlátot, így az érzékelően kialakuló szemcsék átlagos méretét. Azonban ezt a méretet a leképezés nagyításával visz-

sávokban részleges szemcséképek is felfedezhető. 1877-ben *Karl Exner* osztrák fizikus radiális szemcséképet észlelt egy diffrakciós kép középső világos területén, és hasonlókkal találkozott *Max von Laue* is 1914-ben időben részben koherens fényben.

Az optikán kívül is megfigyelhetők szemcséképek: mivel mind az orvosi diagnosztikában használt ultrahang vagy keményröntgen-sugárzás, mind a rádió- vagy mikrohullámok lehetnek nagyon koherensek, így ezek a képalkotó eljárások is érintettek ezzel a típusú képzajjal. A *4. ábrán* egy-egy példa látható ultrahang és műholdas szintetikus apertúrájú radarképek szemcsézajára zajsűrés előtt és után. A rádiócsillagászatban a turbulens csillagközi plazmán áthaladó jelekben észlelhetők szemcsézaj miatt fellépő ingadozások. Elektron szóródása amorf szénfilmen szintén szemcsézajt okoz a detektálásnál.

A szemcsézaj kiszűrése vagy létrejöttének elkerülése nem egyszerű feladat, az optikai csillagászatban ráadásul a hosszú expozíciós idők alatti légköri ingadozások miatt a zaj állandóan változik, így a végső képen több véletlenszerű szemcsézaj átlagolódik ki, és a kép élességét az optikai rendszer diffrakciós határához képest sokszorosán elrontja. Ez különösen a kettőscsillagok képének megfelelő felbontását nehezíti meg, azonban fényesebb kettőscsillagok esetén igen szellemes módon kiküszöbölhetők a szemcsék, és kihasználható az a tulajdonságuk, hogy diffrakciókorlátosak, azaz a teleszkóp felbontási határán vannak. Az amerikai *David L. Fried* 1966-os módszere szerint, ha sikerül megfelelő minőségben rövid expozíciós idejű felvételeket készíteni, akkor ezeken a légkör állapota

„befagy”, tehát a két csillag fényéből két kissé eltolt, de szinte azonos szemcskép összege áll elő minden képen. Egy-egy kép Fourier-transzformáltján éppen ezért interferenciacsíkok jelennek meg, még ha zajosan is. Ezeket a csíkokat intenzitásban összegezve (tehát innentől nemlineáris a képfeldolgozás, és az összegzés nem azonos a hosszú expozíciós idejű esettel) egy sokkal jobb minőségű csíkkendszer áll elő, amelyet inverz Fourier-transzformálva



5. ábra. ESPI elrendezés és egy vele nyerhető csíkkendszer közepén terhelt és szélein befogott négyzet alakú lemez esetén.

már előáll a kettőscsillag felbontott képe (mint az eredeti szemcsés képek átlagolt autokorrelációs függvénye). Ezt a képfeldolgozási módszert laboratóriumban is lehet demonstrálni lámpával, két közeli helyen kilyukasztott fekete kartonlappal, poros üveggel/plexivel és digitális fényképezőgéppel.

Alkalmazások

Az eddigi példákban a szemcsképet főleg zajnak tekintettük, azonban ha belegondolunk, egy szemcskép véletlenszerűsége egyediséget is jelent, ennek forrása pedig a szóró objektum, illetve annak konkrét mikrostruktúrája. Ennek köszönhetően a szemcsképre információhordozóként is tekinthetünk, és segítségével mérések is végezhetők. A legkézenfekvőbb lehetőség a hullámhossznál kisebb felületi érdesség mérése a szemcskép kontrasztja alapján, például fogzománc esetén. Sok más alkalmazás azon alapul, hogy szubjektív szemcsképnél az éles vagy kissé életlen leképezés a tárgy felületének pontjait összerendeli a kamera képének különböző részeivel, így a felület alakváltozása szabályos változásokat okoz a szemcsképen.

Az elektronikus szemcskép fényképezés – amely az 1. b ábra elrendezését követi – a szemcsék szabályos elmozdulását térképezi fel egy képpáron, amelyek a vizsgált tárgy két állapotában készültek, és ebből az elmozdulás-, elfordulás- vagy deformációértékek visszaszámolhatóak. Hasonló számítási módszert alkalmaznak az optikai, különösen a lézeres egerekben, de egy szemvizsgálati módszer is a szemcsék mozgásain alapul. Ha szabad szemmel nézünk egy lézerral megvilágított deformálható kerek membránt, akkor attól függően, hogy a szemlencse a felületre, illetve a felület mögé vagy elé fókuszál, a membrán

deformációjakor vagy nem látunk szemcsemozgást (legfeljebb helyben „zizegnek”), vagy a fókuszhiba előjelétől függő irányú radiális szemcsemozgást észlelünk. Ez a módszer nagyon érzékeny már a kisebb fénytörési látáshibákra is.

Az elektronikus szemcsekorrelációs interferometria (ESPI vagy TV holográfia) azt használja ki, hogy éles leképezés esetén a szubjektív szemcsék bár nem mozognak, de a fázisuk (sötét-világos szemcsé) változik a tárgy kis alakváltozásakor. Ehhez a módszerhez interferométert kell építeni (5. ábra), amelynek mind a tárgy-, mind a referenciaágában diffúz nyalábok haladnak és találkoznak a kamerán. Ennek köszönhetően ez a módszer interferometrikus érzékenységgel, így más interferometrikus módszerekhez hasonlóan roncsolás- és érintésmentes vizsgálatokat tesz lehetővé. Legfőbb vonzereje, hogy a mért mennyiséget jellemző csíkkendszer előállításához a vizsgált tárgy két állapotához tartozó interferenciakép abszolút értékben vett különbségét kell képezni. Így a 4. ábrán láthatóhoz hasonló szemcsés képet kapunk, amelynek további feldolgozása már azonos a más módon készült interferogramokéval.

Összességében tehát elmondható, hogy a szemcsézett képek az elektromágneses és más hullámokkal kapcsolatban számos alkalmazási területen megjelennek, akár mint káros, akár mint hasznosítható jelenségek. Mivel jelen írás csak rövid betekintést kívánt nyújtani a témába, a részletek iránt is érdeklődő olvasók számára két szakkönyvet is ajánlunk, valamint egy korábbi hallgatói mérési leírást [1–3].

Irodalom

1. J. C. Dainty (szerk.): *Laser speckle and related phenomena*. Springer-Verlag, 1975.
2. K. J. Gásvik: *Optical metrology*. 3. kiadás, Wiley, 2002.
3. <http://mf2002.uw.hu/anyagok/szemcskep.pdf>

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

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Szatmáry Zoltán főszerkesztő.

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

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

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

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 800.- Ft + postaköltség.

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