

fizikai szemle

Exobolygók plazmafizikája

Szupernóvák Magyarországról

Csillagok modellezése

Bolygópálya-számítás



2025/5

nka

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

SZERKESZTŐSÉG:

Felelős szerkesztő: Iglói Ferenc főszerkesztő

Olvasószerkesztő: Bodrog Zoltán

Technikai szerkesztő: Hock Gábor

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG:

Asbóth János, Biró László Péter, Csengeri Kamilla, Czitrovsky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Járai-Szabó Ferenc, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Neda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Pásztor Gabriella, Sándor Bulcsú, Simon Ferenc, Simon Péter, Sódor Ádám, Sükösd Csaba, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

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

Kiadja és terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III.

Telefon/fax: (1) 201-8682

Felelős kiadó: Groma István főtítkár

A Társulat és a folyóirat honlapja:

<http://fizikaiszemle.elft.hu>,

e-postacíme: elft@elft.hu

A folyóirat szerkesztőségi e-mail címe:

fsz_szerkesztok@elft.hu. A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük. Kéziratokat nem őrünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.



Nyomdai előkészítés: Hock Gábor. *Nyomdai munkálatok:* OOK-PRESS Kft., *felelős vezető:*

Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Előfizethető a Társulattól vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.

Az egyes számok ára: 1800,- Ft (a dupla számoké 3600,- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott)

HU ISSN 1588-0540 (online)

A lapot az MTA Magyar Tudományos Művek Tára (MTMT) archiválja



A címlapon:

A V838 Monocerotis csillag képe

[NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team
(AURA/STScI)]

TARTALOM

CSILLAGÁSZATI SZÁM

Vendégszerkesztő: Sódor Ádám

Sódor Ádám: Mindig napirenden: a csillagászat 145

Bebesi Zsófia, Gabányi Krisztina, Gálik Barbara, Juhász Antal, Forgácsné Dajka

Emese: A plazmafizikai folyamatokra visszavezethető rádiósugárzás észlelhetősége az exobolygók környezetében I. 146

Az exobolygók fizikájának alaposabb megismeréséhez felhasználhatjuk a Naprendszerünkben megszerzett tudást is, feltételezve, hogy az exobolygók és gazdacsillagaik, illetve holdjaik közötti kölcsönhatások esetében Naprendszerünkkel valódi párhuzamok vonhatók.

Könyves-Tóth Réka: Szupernóva-észlelések a Piskésetetői Observatórium 80 cm-es robottávcsövével 153

A Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Intézet Piskésetetői Observatóriumában működnek az ország legnagyobb távcsövei. Ezek közül a legújabb a 80 cm-es tükrórátérő RC-80 távcső, aminek fő profilja szupernóvák megfigyelése.

Szécsi Dorottya: Nagy tömegű csillagok 1D szimulálása: mi okozza a különbségeket a modellekben? 160

A Napnál legalább 40-szer nagyobb tömegű csillagok modellezése jelenleg még komoly nehézséget jelent. Az egyik fontos kérdés, hogy mi történik ezekkel a csillagokkal, ha a sugárzási nyomás meghaladja a gravitáció összetartó erejét.

Ujfaludi László: Az egri Főegyházmegyei Könyvtár csillagászati könyvei 164

Eszterházy Károly egri püspök a 18. század második felében a frissen alapított egri egyetem épületében, a Liceumban könyvtárat és csillagásztornyot is kialakított. Ez a cikk a könyvtár történelmi csillagászati könyveiből válogat.

A FIZIKA TANÍTÁSA

Ollé Hajnalka, Kovács Tamás: Numerikus módszerek a középiskolában?

Igen, lehetséges! Exobolygók mozgásának modellezése 171

Ennek a tananyagnak a célja, hogy a diákok megismerjék a numerikus módszerek alkalmazását, és felismerjék a tényt, hogy ezek ugyan közelítő jellegűek, de mindenképpen eredményesen alkalmazhatók a kutatások, modellezések során.

MEGEMLÉKEZÉS

Szalai Tamás, Szabó M. Gyula, Székely Péter: Dr. Szatmáry Károly (1956–2024) –

Emlékezés az SZTE csillagászprofesszorára 177

Kiss László: Emlékszilánkok Szatmáry Károlyról és az 1990-es évekről 179

ASTRONOMY ISSUE

Á. Sódor: Always on the agenda: Astronomy

Zs. Bebesi, K. Gabányi, B. Gálik, A. Juhász, E. Forgácsné Dajka: Detectability of radio emissions due to plasma physics processes in the environments of exoplanets I.

R. Könyves-Tóth: Supernova observations using the 80 cm robotic telescope at the Piskésető Observatory

D. Szécsi: Massive stars from various simulations: why so different?

L. Ujfaludi: Astronomy books from the Archdiocese of Eger Library

TEACHING PHYSICS

H. Ollé, T. Kovács: Numerical methods in high school? Yes, it is possible!

Modeling the motion of exoplanets

COMMEMORATION

T. Szalai, Gy. Szabó M., P. Székely: Dr. Károly Szatmáry (1956–2024) –

Remembering the professor of astronomy at the University of Szeged

L. Kiss: Fragments of memories about Károly Szatmáry and the 1990s

A jelen szám színes nyomtatását a HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont támogatta.

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS
INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM

nka
Nemzeti Kulturális Alap



MINDIG NAPIRENDEN: A CSILLAGÁSZAT

Sódor Ádám

HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

E-mail: sodor.adam@csfk.org



A csillagászat talán az egyik legősibb tudomány, hiszen az éjszakai égbolt lenyűgöző látványa mindig is hozzáférhető volt ősaink számára, és mindig is legalább annyi új kérdést vetett fel, mint amennyit megválaszolt. Emberi intellektusunk alapvető igénye, hogy megismerjük az életünknek helyet

adó Világegyetemet, benne a saját szerepünket, helyünket, célunkat, feladatunkat. Emiatt a csillagászat a tudomány népszerűsítés fontos eszköze is, hiszen mindenki képzelőerejét megragadja, és általa sokakkal megismertethető a tudomány működése, a tudományos gondolkodás logikája, a világ megismerésének módszertana, és a kritikus gondolkodás fontossága. Ennek jegyében a *Fizikai Szemle* 2025. májusi tematikus számának fókuszában a csillagászat áll.

Friss, új és érdekes témák pedig mindig vannak. Az érdeklődő nagyközönség számára is látványos átalakuláson, fejlődésen ment keresztül például a Naprendszeren túli bolygókról, az exobolygókról, távoli bolygórendszerekről alkotott képünk. Ez az exobolygó-forradalom az utóbbi 1–3 évtized jelensége. Alapvető fontosságú kérdés, hogy létezik-e, létezhet-e élet a Földön kívül másutt a Világegyetemben. Ennek megválaszolásához pedig a távoli bolygók és bolygórendszerek minél alaposabb megismerésén át vezet az út. Az ezirányú kutatásokban számos magyar szakember is részt vesz. *Bebesi Zsófia és munkatársai* az exobolygók légkörében végbemenő plazmafizikai folyamatok rádiócsillagászati megfigyelhetőségével kapcsolatos eredményeikről számolnak be két részes cikksorozatukban, melynek első része jelen számunkban olvasható.

Az exobolygókkal szemben a vendégcsillagok, avagy novák és szupernovák évezredek óta ismert égi jelenségek, de kutatásuk ettől még nem kevésbé izgalmas szakterület. Szupernovákká a rövid életű, legnagyobb tömegű csillagok, valamint a kettősökben tömeget nyerő fehér törpecsillagok válnak életük végén. Ekkor látványos, kozmikus skálán is rendkívül fényes, emiatt nagy távolságból is észlelhető, néhány héten–hónapon át megfigyelhető felvilágosítást produkálnak. A szupernovák a héliumnál nehezebb elemek egyik legfontosabb forrásai a kozmoszban, míg roppant fényességük révén a kozmológiai távolságskála fontos lépcsőfokát képviselik. Magyarországon a Piszkestetői Obszervatórium és a Bajai Obszervatórium két egyforma, 80 cm-es főtükörátmérőjű robottávcsővel folynak szupernovákra irányuló megfigyelő vizsgálatok. Ezek új eredményeiről számol be *Könyves-Tóth Réka*.

A legnagyobb, születésükkor a Napnál több mint nyolcszor nagyobb tömegű, életük végén szupernovaként felrobbanó csillagok között is külön kategóriát képvisel-

nek a legeslegnagyobb, 40 naptömeget meghaladó csillagok. Ezek az égitestek olyan intenzitással fogyasztják nukleáris üzemanyagukat, hogy a magjukban megtermelt, a burokból kifelé áramló energia destabilizálja a csillag külső rétegeit. Eddington-instabilitásnak nevezzük, ha a csillag külső héjában a kifelé irányuló sugárnyomás megközelíti, illetve meghaladhatja a gravitációs vonzás befelé irányuló hatását. Ennek a következményei nehezen modellezhetők, illetve a modellek nehezen hangolhatók össze a megfigyelésekkel; és mivel nagyon kevés ilyen csillagot ismerünk, kicsi a használható mintaelemszám. Erről a problémáról, a legnagyobb csillagtömegeknél a különböző egydimenziós, azaz gömbszimmetrikus csillagmodellek előrejelzései között mutatkozó diszkrépanciáról számol be *Szécsi Dorottya*.

A csillagászatnak nemcsak a legfrissebb fejleményei, de az azokhoz vezető, hol egyenesebb, hol kacskaringósabb út, a csillagászat fejlődésének története is érdekes, izgalmas kutatási terület. *Ujjfaludi László* az egri Főegyházmegyei Könyvtár csillagászati könyveit áttekintve kínál az olvasónak szemelvényeket a csillagászat nemzetközi történetéből.

Milyen pályákon keringenek a bolygók? Hát, ellipszispályákon! – vágjuk rá nyomban a választ, ám természetesen a valóság általában jóval komplikáltabb ennél. Ha kettőnél több gravitáló égitest hat egymással kölcsön, a kepleri ellipszispályáknál jóval bonyolultabb, jellemzően zárt alakban nem is leírható, csupán numerikusan közelíthető bolygómozgások adódnak. Ezek a numerikus integrálási módszerek akár már középiskolában megismertethetők a diákokkal, akik így az igen hasznos programozási, matematikai tudás mellett izgalmas tapasztalatokra, élményekre is szert tehetnek, és betekintést kaphatnak az elméleti kutatómunka folyamataiba is. Ezzel kapcsolatos módszereikről és tapasztalataikról számol be *Ollé Hajnalka és Kovács Tamás* e számunknak a fizika tanítása rovatában.

Kevesen élvezhették a magyar csillagászközösség anynyira egyöntetű tiszteletét, szeretetét, elismerését és megbecsülését, mint dr. Szatmáry Károly, a Szegedi Tudományegyetem TTIK Fizikai Intézet Kísérleti Fizikai Tanszékének nyugalmazott egyetemi tanára, akinek 2024. szeptemberi halálhíre mindannyiunkat megrendített. Szatmáry Károly egész pályája során a szegedi Kísérleti Fizikai Tanszék munkatársa volt, nevéhez fűződik a szegedi csillagászképzés elindítása és a Szegedi Csillagvizsgáló megalapítása. Egyetemi oktatóként több ezer fizikus-, fizikatanár- és csillagászhallgató képzésében vett részt, volt tanítványai szerte az országban és a világban ápolnak szép emlékeket vele kapcsolatban. E számunkban közülük négyen, *Szalai Tamás, Szabó M. Gyula, Székely Péter* és *Kiss László* két írásban búcsúznak tanárunktól és mentorunktól, Szatmáry Károlytól.

A PLAZMAFIZIKAI FOLYAMATOKRA VISSZAVEZETHETŐ RÁDIÓSUGÁRZÁS ÉSZLELHETŐSÉGE AZ EXOBOLYGÓK KÖRNYEZETÉBEN I.

Bebesi Zsófia^{1,*}, Gabányi Krisztina^{2,3,4}, Gálik Barbara², Juhász Antal¹, Forgácsné Dajka Emese²

¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest; ²ELTE Fizikai és Csillagászati Intézet, Csillagászat Tanszék, Budapest,

³HUN-REN-ELTE Extragalaktikus Asztrofizika Kutatócsoport, Budapest

⁴HUN-REN CSFK, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

*E-mail: bebesi.zsofia@wigner.hu

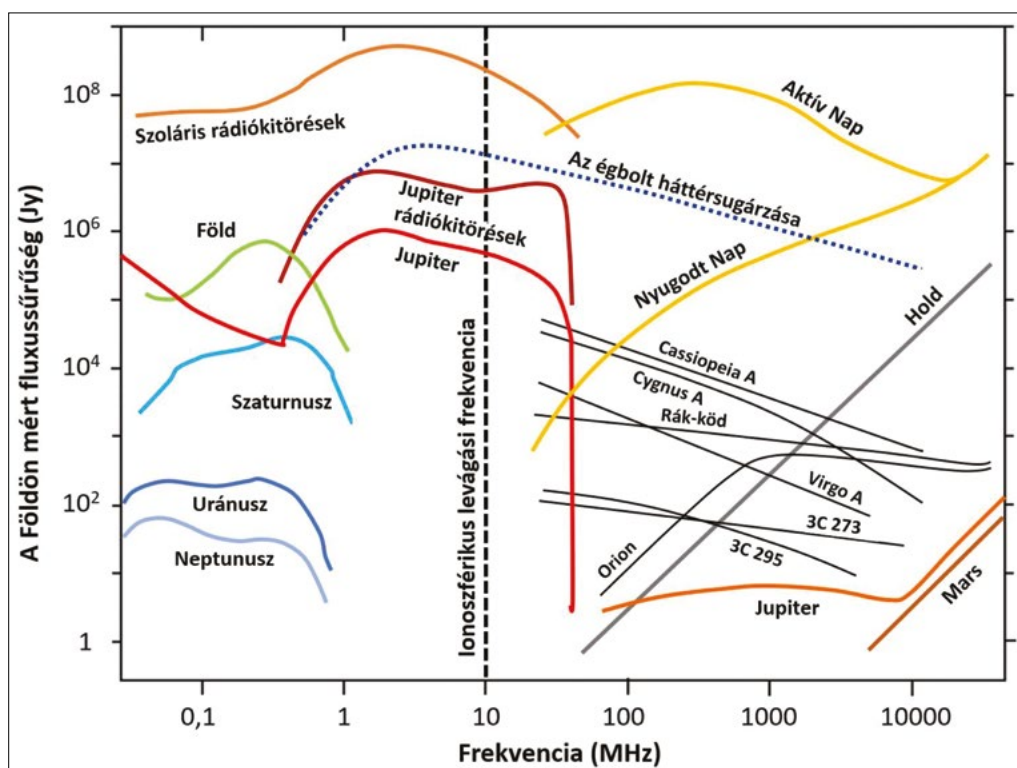
1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedek űrszondás küldetéseinek köszönhetően napjainkra jelentős mennyiségű tudományos ismeretet gyűjtöttünk Naprendszerünk óriásbolygóinak fizikájáról. A kilencvenes évektől pedig kezdetét vette az exobolygók felfedezése; ennek eredményeként jelenleg már több ezer ilyen égitest létezését sikerült különféle tudományos módszerekkel igazolni. Az exobolygók fizikájának alaposabb megismeréséhez felhasználhatjuk a Naprendszerünkben megszerzett tudást is, feltételezve, hogy az exobolygók és gazdacsillagaik, illetve holdjaik közötti kölcsönhatások esetében Naprendszerünkkel valódi párhuzamok vonhatók. Természetesen ehhez bizonyos kritériumoknak teljesülniük kell. A Naprendszer bolygói közül a Jupiter a legerősebb rádióforrás, ezért ebben a tanulmányban elsőként a Jupiternek – mint referencia-égitestnek – azokat a rádióemissziót generáló fi-

zikai folyamatait és kölcsönhatásait tekintjük át, amelyek detektálására akár több fényévnnyi távolságból is reális esélyünk lenne. Majd számba vesszük az észlelési lehetőségeket, főként a jelenlegi nagy rádióteleszkóp-rendszerek működésére és felbontására vonatkozóan. Alapkérdéseink a következők: milyen folyamatok generálnak az óriásbolygók környezetében olyan intenzitású rádióemissziót, amelyet extraszoláris rendszerekből is észlelhetnénk, azaz van jelenleg esélyünk az exobolygók környezetében zajló plazmafizikai jelenségekből eredő rádiósugárzás detektálására? Milyen konkrét eredmények születtek mostanáig ezzel kapcsolatban?

2. Csillagászati rádióforrások

Elsőként Karl Jansky amerikai mérnök-fizikus észlelt kozmikus rádiósugárzást 1932-ben, amely addig ismeretlen forrásból, Galaxisunk centrumából eredt. Az első



1. ábra. A legjelentősebb rádióforrások frekvenciatartományai a Földről mért rádiósugárzás fluxussűrűségének függvényében (Forrás: [1])

átfogó rádiócsillagászati felmérésre – Grote Reber amerikai amatőr csillagász által – 1941-ben került sor, majd később egyre több konkrét rádiósugárzó objektumot azonosítottak. Ezek közé tartozik Galaxisunk magja (és az azt körülvevő tartomány), a pulzárok, szupernóvamaradványok, rádiósugárzó aktív galaxismagok, a gyors rádiókitörések, a csillagkeletkezési tartományok, semleges hidrogénfelhők, mézerek, aktív csillagok, fiatal csillagok, bizonyos nóvák és kompakt objektumokat tartalmazó más szoros csillagrendszerek. Azonban Naprendszerünkben is számos erős rádióforrás található, amelyek fluxusa – a Földről észlelve – esetenként a távoli rádiósugárzó égitestekével azonos nagyságrendbe esik. A legjelentősebb rádiósugárzó objektumok frekvenciáját a fluxussűrűség függvényében az 1. ábra mutatja.

A Föld felszínéről végzett észleléseket nagymértékben befolyásolja az ionoszféra, amely csak a ~ 10 MHz feletti frekvenciájú rádiósugárzást engedi át, emiatt a földi rádióteleszkópokkal például a Jupiterről származó rádióemisszióknak csak az ennél magasabb frekvenciájú komponensét detektálhatjuk. A Szaturnusz, az Uránusz és a Neptunusz felhőtakarója felett (a legintenzívebb) mérhető mágneses térerősség 10^{-5} – 10^{-4} T körüli, ezért az auroraeredetű rádióhullámaik frekvenciája 1–2 MHz-nél kisebb lesz – ez a Föld felszínéről nem detektálható. A Jupiter esetében azonban a felhőrendszer feletti mágneses térerősség elérheti akár a 0,014 T értéket is, amely 40 MHz-es frekvenciájú rádióemissziót is eredményezhet – ezt már a földfelszínről is észlelhetjük.

A földi aurora kilométeres hullámhosszú rádiósugárzását először 1972-ben észlelték az IMP-6 és -8 űrszondák rádióhullám-mérő berendezései [2], majd a 80-as évek során a Voyager-1 és -2 szintén kilométeres hullámhosszú sugárzást detektált az óriásbolygók környezetében. Az emissziót nagy intenzitás jellemezte, a kibocsátott teljesítmény a Neptunusznál $\sim 10^6$ W, a Jupi-

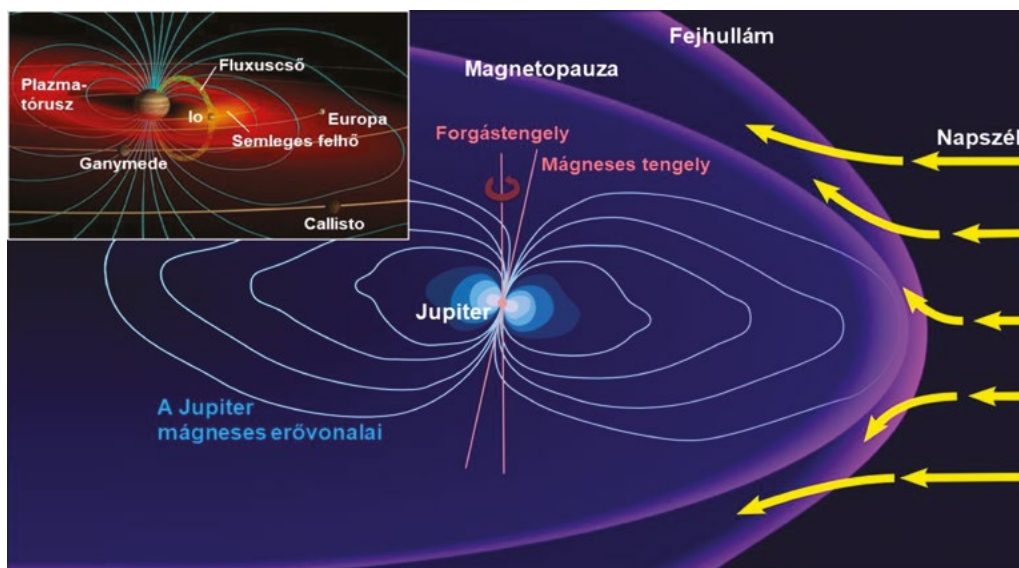
ternél $\sim 10^{11}$ W volt, továbbá a sugárzás nagy sávszélességgel, a lokális elektronciklotron-frekvencián történt.

A Földről nézve ~ 300 MHz-ig (1 m-es hullámhossz) majdnem minden rádiófrekvencia-tartományban a Nap a legerősebb rádióforrás – közelsége miatt (1. ábra). A napciklus nyugodt fázisában nagyobb hullámhosszokon a galaktikus háttérsugárzás, a napciklus intenzívebb időszakaiban pedig mind a magas, mind az alacsonyabb frekvenciákon a Nap a domináns rádiósugárzó. Intenzitás tekintetében Naprendszerünk bolygói közül a Jupiter rádiósugárzása a legerősebb a több kHz-től több tíz MHz-ig terjedő spektrális tartományban; és különösen erőteljes a deciméteres (rövidítve DIM) tartományban.

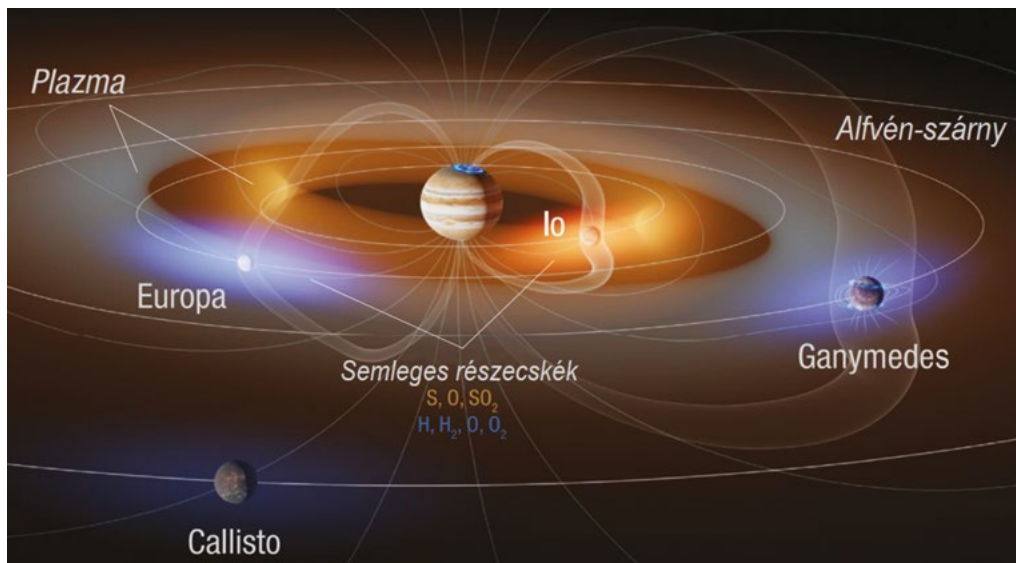
3. A Jupiter rádiósugárzása és az azt kiváltó fizikai folyamatok

A Jupiter rendkívül erős mágneses tere – amelynek dipólusmomentuma a földi érték mintegy 19000-szerese – magnetoszférát hoz létre a bolygó körül (2. ábra). A mágneses dipólustengely a bolygó forgástengelyével 9,6 fokok szöget zár be, és a mágneses tér a Jupiterrel együtt 9 óra 55 perc 29,71 másodperces periódusú forgásban van. Ennek következtében a magnetoszféra belsejében lévő töltött részecskék keV–MeV-os energiákra gyorsulnak fel, és ún. korotáló (a bolygóval együtt forgó) részecskepopulációt alkotnak – ugyanez a Szaturnusznál és feltehetőleg az Uránusz és a Neptunusz esetében is megfigyelhető, bár e két utóbbi esetben a mágneses tér különleges konfigurációja miatt valószínűleg az áramló napszél erősebb kontrollt gyakorol a magnetoszférikus részecskék dinamikája felett [3].

Mivel a bolygók magnetoszférái akadályt képeznek a Nap felől folyamatosan áramló, szuperszonikus sebességű napszél számára, a kölcsönhatás eredményeként a bolygó áramlás felőli oldalán egy lökeshullám (fejhullám)



2. ábra. A Jupiter magnetoszférájának szerkezete, valamint a belső magnetoszféra tartománya (a bal felső fehér keretben) a Galilei-holdakkal

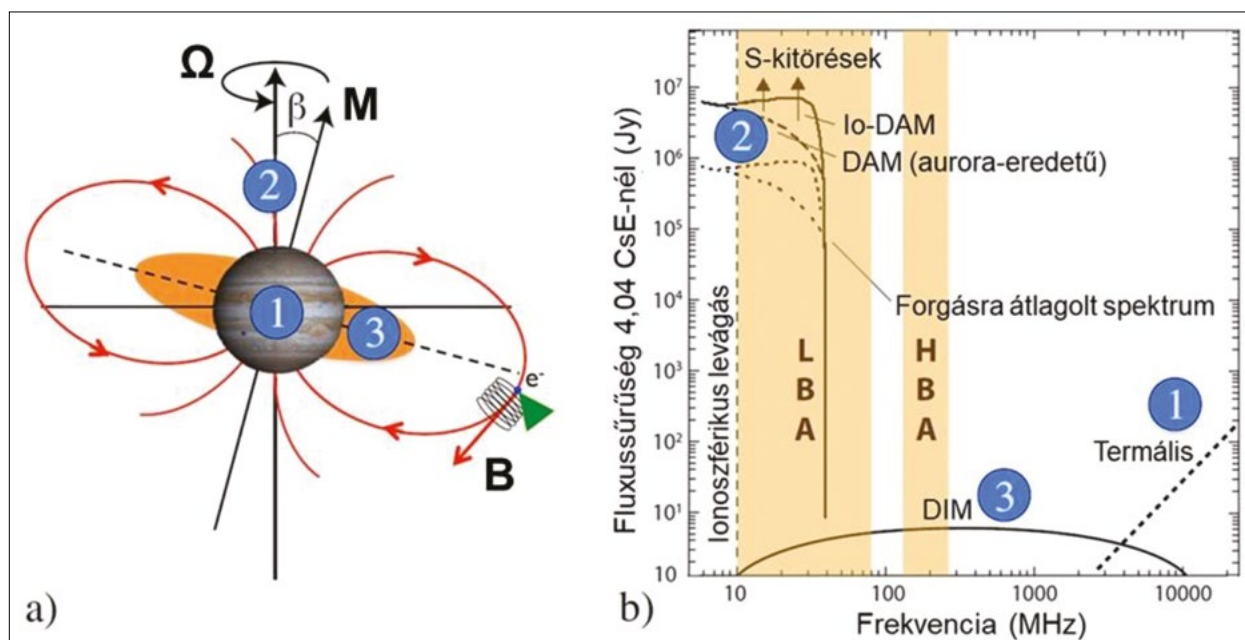


3. ábra. Jupiter magnetoszférájának legbelső tartománya a Galilei-holdak környezetében. Az észlelt H_2^+ ionok (kék) az Europa semleges felhőjéből származnak (halványkék), a pirossal jelölt kéntartalmú vegyületek pedig az Io plazmatóruszából (narancssárga). A holdakhoz kapcsolódó Alfvén-szárnyak (szürke) kölcsönhatásba lépnek a Jupiterrel együtt forgó (korotáló) plazmával

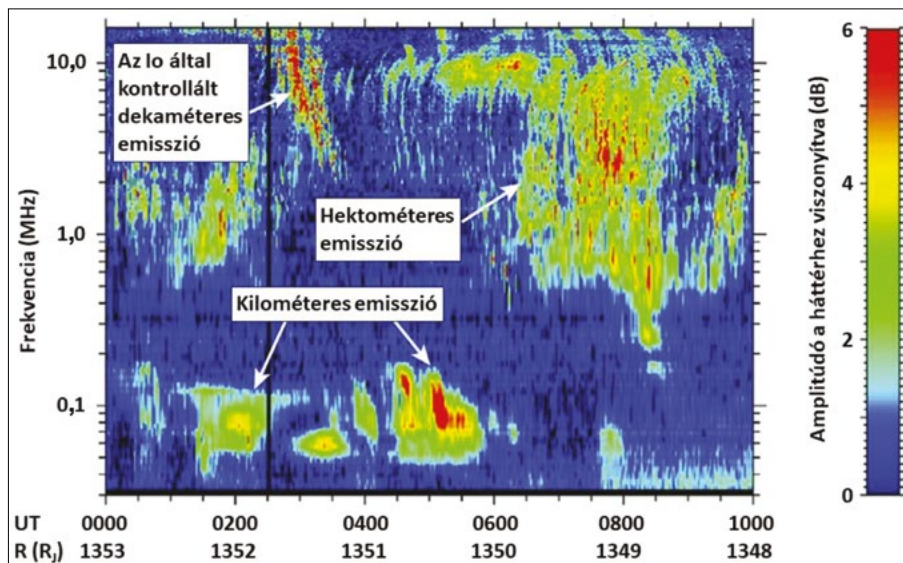
jön létre (2. ábra). A fejhullám mögötti tartományban, a fejhullám és a magnetopauza között húzódó ún. magnetoszférburokban a napszél szubszonikus sebességre lassul, és megkerüli a magnetoszférát. Magnetopauzának azt a nyomásegyensúlyi felületet nevezzük, amelynek mentén a bolygó mágneses teréből eredő mágneses nyomás és a napszél dinamikus nyomása kiegyenlíti egymást. Ezek a határfelületek a Föld esetében is hasonló módon jönnek létre, azonban a földihez képest a Jupiter magnetoszférájának belsejében már lényeges eltérésekkel találkozhatunk. Naprendszerünk óriásbolygói körül ugyan-

is számos kisebb-nagyobb hold kering, ezek többsége a mágneses tér belső tartományjaiban mozog, és különféle ionizációs mechanizmusok révén jelentős belső plazmaforrásoknak tekinthetők. Ezek jelenléte lényegesen befolyásolja az óriásbolygók magnetoszféráiban lejátszódó fizikai folyamatok természetét és dinamikáját.

Az egyik ilyen plazmaforrás a Jupiter magnetoszférájának legbelső tartományában keringő, vulkanikusan aktív Io hold és – ami a számunkra most a legfontosabb – az e holdról származó plazma, valamint a bolygó mágneses tere és atmoszférája között zajló komplex



4. ábra. a) A Jupiter rádióemissziójának forrásai: (1) termális, (2) aurora (3) sugárzási övek, ahol Ω a szögsebességet, B a mágneses térerősség vektorát, M a mágneses momentumot jelöli, β pedig a forgástengely és a mágneses nyomaték által bezárt szög. b) A Jupiter rádiósugárzásának eltérő mechanizmusaihoz kapcsolódó tipikus spektrumok (4,04 CSE-re normalizálva) [7]



5. ábra. A Jupiter rádióemissziójának a Cassini űrszonda rádió- és plazmahullámmérő berendezése (RPWS) által detektált idő-frekvencia spektrogramja [8]

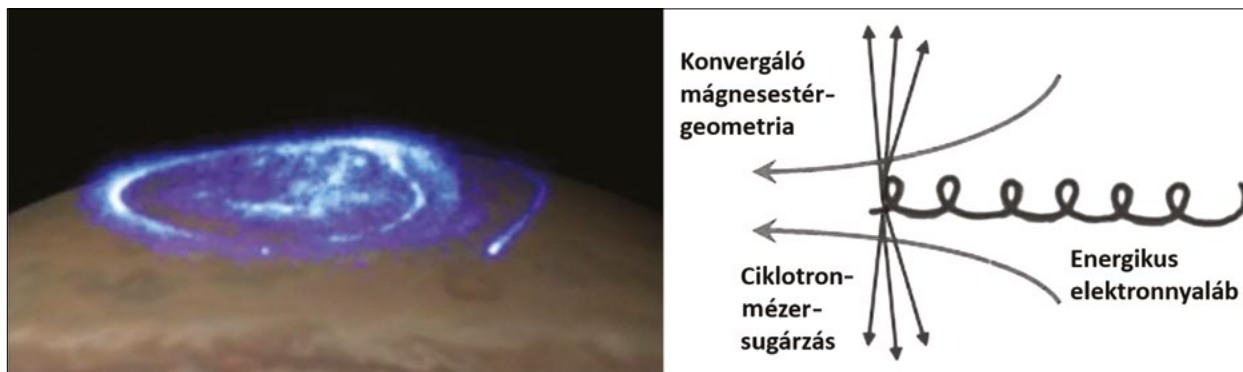
kölcsönhatás, ami jelentős rádiósugárzással jár. A hold belsejéből kiáramló semleges, kénben gazdag vegyületek (elsősorban kén-dioxid, SO_2) a magnetoszférába kikerülve – főként az ott található nagy energiájú korotáló töltött részecskék populációja, valamint a szoláris extrém ultraibolya (EUV) sugárzás által – azonnal ionizálódnak, majd a frissen keletkezett ionokat a Jupiter mágneses tere elszállítja, korotációra kényszeríti. Ennek eredményeként az Io-eredetű ionok a hold pályája mentén szétterülve plazmatóruszt alkotnak. A plazmatórusz és az Io kölcsönhatása során a hold a Jupiter mágneses erővonala mentén mindkét irányban Alfven-hullámokat bocsát ki. Ezek olyan transzverzális magnetohidrodinamikai hullámok, amelyekben az ionok egy visszatérítő mágneses erő hatására (egy megrezgetett húrhoz hasonlóan) oszcilláló mozgást végeznek. A holdak esetében a keringés hatására egy ún. Alfven-szárny (3. ábra) jön létre, és megfigyelték, hogy az Iót a Jupiter atmoszférájával összekötő szárny talpontiában (ld. később, 6. ábra bal oldala) erőteljes auroraemisszió észlelhető [4–6].

A Jupiterről eredő rádiójeleket elsőként 1955-ben észlelték a 22,2 MHz-es frekvencián. A későbbiekben megfigyelt emisszió szórványos volt, és ~10 órás periodicitása vezette rá a kutatókat arra, hogy a sugárzás valójában a Jupitertől származik. A 4 GHz feletti tartományban a bolygó atmoszférájának termális emissziója dominál (4a. és 4b. ábra, 1-gyel jelölve), a ~30 MHz és 30 GHz közötti frekvenciatartományban pedig a termálisnál intenzívebb szinkrotronsugárzás figyelhető meg, amelyet az intenzív mágneses térben csapdába esett MeV-os elektronok bocsátanak ki. A belső magnetoszférában a felszíntől pár bolygósugárnyi távolságra, alacsony szélességeken ezek alkotják a bolygó sugárzási öveit (4a. és 4b. ábra, 3-mal jelölve). A 40 MHz alatti frekvenciákon a spektrális intenzitás kb. öt nagyságrendet ugrik, ennek hátterében nagyon hatékony, nem termális eredetű fo-

lyamatok állnak. A Jupiter aurorájához kapcsolódó rádiósugárzás is ezeken a frekvenciákon észlelhető.

A Jupiter rádiósugárzását szokás a hullámhosszokra alapozott csoportosítás szerint említeni, mivel ezek spektrális értelemben és a kiváltó fizikai folyamatok terén is elkülönülnek. A ~0,3 MHz-nél alacsonyabb frekvenciájú (1 km-t meghaladó hullámhosszú) rádióhullámokat Jupiter-féle kilométeres sugárzásnak vagy KOM-nak, a 0,3–3 MHz frekvenciájú (100–1000 m-es hullámhosszú) hullámokat hektométeres sugárzásnak vagy HOM-nak, a 3–40 MHz-es frekvenciatartományba (10–100 m hullámhossz) eső sugárzást pedig dekaméteres emisszióknak vagy DAM-nak nevezzük. A DAM legintenzívebb része az Ióhoz és az Io–Jupiter-kölcsönhatáshoz kapcsolódik, ezt Io-DAM-nek nevezzük (4a. és 4b. ábra, 2-vel jelölve). A Jupiter teljes mért rádióspektrumát [8] az 5. ábra mutatja.

A 4a. és 4b. ábrán bemutatott folyamatok közül a leg-erősebb rádiósugárzást a sarki fény (a 6. ábra bal oldala) és a hozzá társuló kölcsönhatások bocsátják ki. Ennek domináns komponense az aurora tartományának közelében létrejövő ciklotronmézer-instabilitáshoz (CMI) köthető (a 6. ábra jobb oldala). A kiváltó elektronok a magnetoszféra belsejében keV-os energiákra gyorsulnak fel, majd a mágneses erővonallal párhuzamosan mozgó elektronpopulációk magasabb szélességeken becsapódnak a Jupiter felső atmoszférájába, míg a mágneses tér irányára vonatkozóan nagy merőleges sebességkomponensű elektronok visszaverődnek. Ez instabil sebességeloszlást eredményez, és a lokális elektronciklotron-frekvencián ($f_{ce} = eB/2\pi m_e$, ahol e az elektron töltése, B a mágneses tér nagysága, m_e pedig az elektron tömege) spontán módon kelt rádióhullámokat. A folyamatban nagy valószínűséggel elsősorban a bolygó pólusai felől az egyenlítő síkjában elhelyezkedő, a Jupiter két mágneses féltekéjét elválasztó, vékony plazmalepelre áramló elektronok vesznek részt.

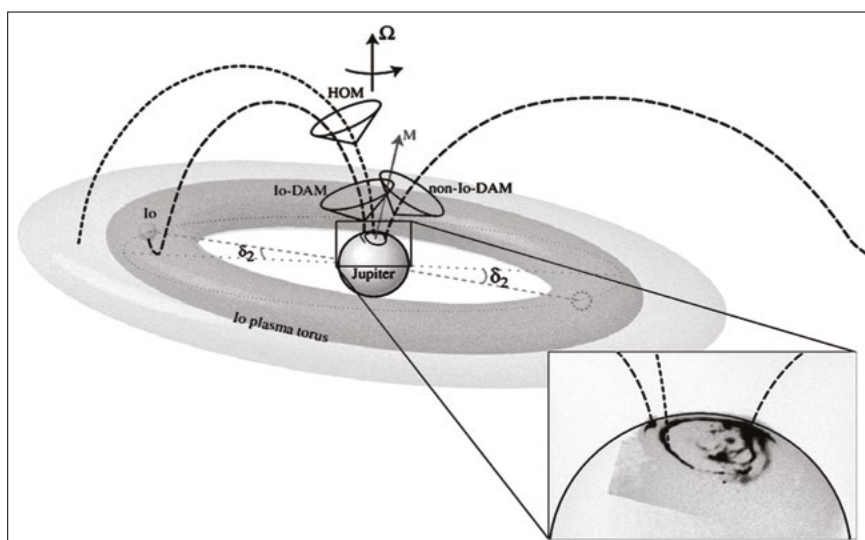


6. ábra. Balra: Aurora ovális és az Io „lábnyoma” (különálló kis fényes folt) a Jupiter északi pólusának környezetében. Jobbra: A sarki fényhez köthető ciklotronmézer-emisszió mechanizmusának sematikus ábrázolása

Egy keV-os energiájú elektronpopulációban CMI akkor jön létre, ha az adott tartományban a plazmafrekvencia (f_{pe}) sokkal kisebb a ciklotronfrekvenciánál (f_{ce}). A mechanizmus a teljes elektronpopuláció energiájának $\geq 1\%$ -át X módusú (extraordinary) koherens ciklotronhullámokká konvertálhatja, amelyeket 100%-os mértékben cirkuláris vagy elliptikus polarizáció jellemez. A bolygók környezetében általánosan a CMI kritériumainak eleget tevő tartományok azok a magas szélességeken elhelyezkedő erővonalak, amelyek összeköttetésben állnak az elektromágneses gyorsítást eredményező folyamatokkal. Ezek közé tartozik például a magnetoszféra orrpontjánál (ahonnan a Nap zenitben látszik, lásd 2. ábra) és a csóvában bekövetkező mágneses átkötődés (rekonnektió), azaz az ellentétes irányú, nyitott vagy megnyíló mágneses erővonalak összekapcsolódása, a korotáló plazmapopuláció által kitöltött régió külső határterületeinek környezete, a magnetopauza felszínén terjedő hullámok tartománya, valamint a holdak és a bolygó mágneses tere között lezajló kölcsönhatások helyszínei. Ez utóbbiakban a Jupiter belső magnetoszférájában elsősorban a Galilei-holdak vesznek részt, ezek közül is a legjelentősebb a Jupiterhez legközelebb keringő Io [9].

Magasabb szélességeken (az aurora tartományában) a rádiósugárzást a mágneses erővonalak mentén az atmoszférába becsapódó elektronok mellett a mágneses pólusok között gyorsan oda-vissza mozgó („pattogó”, bouncing) relativisztikus elektronok bocsátják ki. Ez az elektronpopuláció a mágneses apex (ahol az erővonalak görbülete a legnagyobb) közelében gyorsul fel. Az Io-DAM sugárzáshoz kapcsolódó elektronok az Io plazmacsóvájában, az ún. non-Io-DAM emisszióhoz és HOM-hoz kapcsolódó elektronok pedig a Jupiter egyenlítői síkjában elhelyezkedő plazmakorongban gyorsulnak fel nagyobb energiákra [10]. Ezek a rádióemisszió-összetevők erősen irányfüggők (7. ábra), a keletkező rádióhullámok egy vékony kúp mentén terjednek. A kölcsönhatásért felelős elektronok ezekben a tartományokban csak akkor észlelhetők, ha a látóirány metszi a kúpot.

A jelenleg is zajló rádiócsillagászati kutatások során olyan ígéretes rendszerekből származó jeleket keresnek, amelyek esetében még hasonló nagyságrendbe eső sugárzási intenzitás mellett is el lehet különíteni a csillag és a bolygó rádióemisszióját. A bolygóról származó emisszió azonosításakor a sugárzás cirkuláris vagy elliptikus polarizációját veszik alapul, mivel a csillagtól származó



7. ábra. A Jupiter magnetoszférájában, magasabb szélességeken megfigyelhető rádiósugárzás irányfüggése és forrásai [10]

rádiósugárzás általában nem polarizált. Ezenkívül az emisszióban megmutatkozó periodicitás is támpontul szolgálhat, amely – mint a Jupiter esetében – utalhat a bolygó forgási periódusára vagy akár a csillag körüli keringési periódusára is. A közelmúltban számos esetben vizsgáltak reményre okot adó rendszereket, és néhány meggyőzőbb eredmény ismeretében már joggal bízhatunk abban, hogy az ilyen irányú kutatások idővel egyre sikeresebbek lesznek. A legfrissebb eredmények ismertetése előtt röviden áttekintjük, hogy egy tetszőleges magnetoszféra-csillagszél kölcsönhatás esetében a bolygó plazmakörnyezetéből beáramló összteljesítmény milyen mértékben és mely feltételek teljesülése esetén alakulhat a rendszeren belül (azaz a magnetoszféra belsőjében) rádióemisszióvá.

4. A beeső teljesítmény és a kimenő rádiósugárzás közötti összefüggés

A megfigyelések szerint a napszél fluktuációi (sűrűség, sebesség, dinamikus nyomás) és az aurora rádiósugárzása között erős korreláció mutatható ki, amelynek lehetséges okozója a bolygó magnetoszférájának orrpontjánál vagy a csóvában lejátszódó mágneses rekonstrukció, valamint a magnetoszférának a napszél dinamikus nyomásváltozásaira adott reakciója. Ugyanis a saját mágneses térrel bíró bolygók folyamatosan a változó napszél hatása alatt állnak, és a körülöttük lévő határfelületek a külső változásokra rendkívül dinamikus módon reagálnak (növekvő napszélnyomás esetén összenyomódással, csökkenés esetén tágulással). Érdekes megvizsgálni, hogy ezen dinamikus folyamatok hatására a napszél által a bolygó magnetoszférájába becsatolt teljesítmény milyen mértékben fordítható a korábbiakban tárgyalt folyamatokból származó kibocsátott rádióteljesítményre.

A napszél-magnetoszféra kölcsönhatás felbontható egyrészt a magnetoszféra keresztmetszetén disszipálódó, napszélből eredő

$$P_{\text{áramlási}} = (1/2) N m V^2 \pi f^2 R_{\text{MP}}^2$$

kinetikus áramlási teljesítményre, ahol $N = N_0/d^2$ a napszél számsűrűsége (N_0 a Föld környezetében mért sűrűség, d pedig a vizsgált bolygó Naptól mért távolsága

csillagászati egységben, CSE), $m \sim 1,1 \cdot m_p$, ahol m_p a protontömeg (a protonok a napszél domináns összetevői), V a napszél áramlási sebessége, R_{MP} pedig a szubszoláris magnetopauza sugara. Szintén a képletben szerepel az f változó, egy speciális, a magnetoszférára jellemző tágu-lási faktor [11], ez esetben feltételezzük, hogy $f^2/2 \sim 1$.

A napszél-magnetoszféra kölcsönhatás másik összetevője az interplanetáris mágneses térnek (interplanetary magnetic field, IMF) a magnetoszféra keresztmetszetére eső

$$P_{\text{IMF}} = \int_{\text{MP}} (\mathbf{E} \times \mathbf{B} / \mu_0) dS = \left(\frac{V B_{\perp}^2}{\mu_0} \right) \pi R_{\text{MP}}^2$$

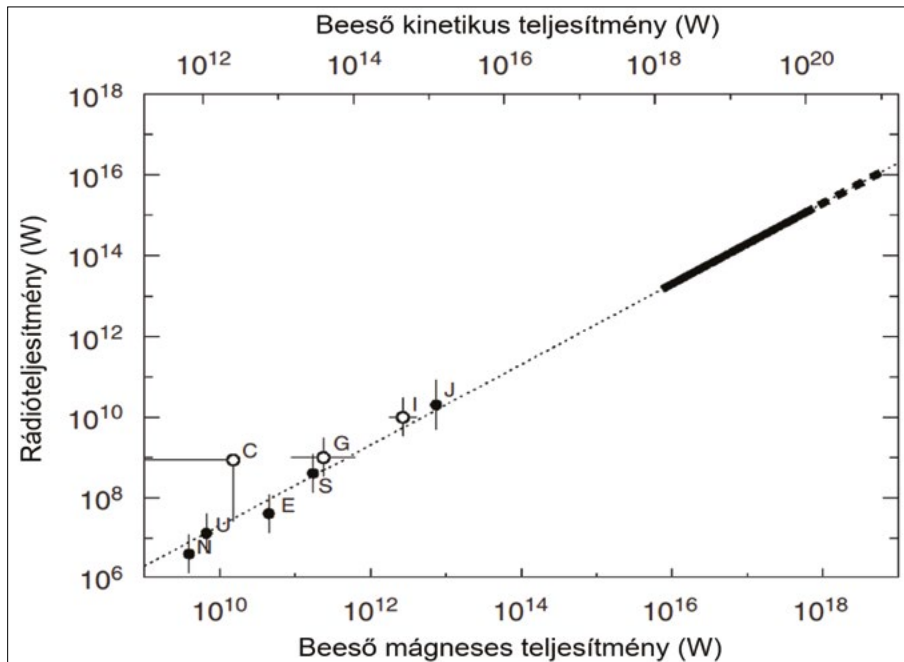
Poynting-fluxusa, ahol (mivel $\mathbf{E} = \mathbf{V} \times \mathbf{B}$), $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ radiális komponense $V B_{\perp}^2$. A disszipálódott energia egy része a CMI mechanizmusban részt vevő elektronok keV-os energiákra való felgyorsítására fordítódik. A napszélben a Föld pályáján (~ 1 CSE távolságon) túl a napszél kinetikus áramlási teljesítménye ~ 170 -szer akkora, mint az IMF Poynting-fluxusa.

A különféle áramlás-akadály konfigurációk intenzív rádiósugárzáshoz vezethetnek erős mágneses terek esetén. A különféle kölcsönhatási konfigurációkat az 1. táblázat tartalmazza.

A teljes energiadisszipációra vonatkozó egyenletekből azonban nem tudjuk meghatározni a felgyorsított elektronok energiáját és eloszlását. Szerencsére több rendszer tanulmányozása révén megalkották a kibocsátott rádióteljesítményre vonatkozó skálátörvényeket, amelyek lehetővé teszik egy makroszkopikus empirikus hatékonysági tényező meghatározását. A „radiometrikus Bode-törvény” (8. ábra) [12] a Jupiter, a Szaturnusz és a Föld esetében teremt kapcsolatot a beeső kinetikus áramlási teljesítmény és az aurorajelenség során kibocsátott rádióteljesítmény között. Zarka [13, 14] ezt később az Uránusz és a Neptunusz auroraeredetű rádióemissziójára is kiterjesztette, valamint a Jupiternél észlelhető, az Iótól független dekaméteres sugárzásra is. Ezt a 8. ábrán látható, a mágnesezett napszél beeső teljesítménye és a Naprendszer saját mágneses térrel bíró bolygói által kibocsátott teljes rádióteljesítmény között fennálló, empirikus, lineáris relációt (azaz a radiometrikus Bode-törvényt) gyakran extrapolálják exobolygók esetére is.

1. táblázat. A különféle áramlás-akadály kölcsönhatások típusai. Vastagon szedve: CMI [7]

Akadály	Áramlás	
	Gyengén / nem mágnesezett (napszél)	Erősen mágnesezett (a Jupiter magnetoszférája, vagy egy erősen mágneses csillag szele)
Gyengén / nem mágnesezett (<i>Vénusz, Mars, Io, nem mágneses forró jupiterek?</i>)	Nincs intenzív ciklotron-rádióemisszió	Unipoláris kölcsönhatás (pl. az Io által indukált rádiósugárzás, nem mágneses forró jupiterek?)
Erősen mágnesezett (<i>Föld, Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz, mágneses forró jupiterek?</i>)	Magnetoszférikus kölcsönhatás (auroraeredetű rádiósugárzás, Föld, Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz, mágneses forró jupiterek?)	Dipoláris kölcsönhatás (pl. a Ganymedes által indukált rádiósugárzás, csillag-bolygó mágneses átkötődés?)



8. ábra. Általánosított radiometrikus Bode-törvény: a kimenő planetáris rádióteljesítmények és a magnetopauzára eső napszél teljesítménye közötti kapcsolat a Naprendszer mágneses bolygói (E: Föld; J: Jupiter; S: Szaturnusz; U: Uránusz; N: Neptunusz) esetében. Vastag vonal: extrapoláció forró jupiterekre [7]

A korábbi összefüggések alapján azonban még mindig nem lehet meghatározni, hogy a beeső teljesítménynek melyik komponense vesz részt az aurora rádió-emissziójának létrehozásában. Még ha a beeső kinetikus teljesítmény jóval felülmúlja is a mágneses teljesítményt, a két tényező szerepe attól függ, hogy a részt vevő fizikai folyamatok milyen hatékonysággal képesek az energiát az elektronok gyorsítására fordítani. Az általánosított radiometrikus Bode-törvény [7] kapcsolatba hozza egy mágneses áramlás-akadály rendszer kimenő rádióteljesítményét az akadályra beeső $P_{\text{rádió}} \eta P_d$ elektromágneses Poynting-fluxussal (amely egyenlő a mágneses energiafluxussal), ahol $P_d \varepsilon (VB_x^2 / \mu_0) \pi R_{\text{megfigyelt}}^2$ az akadályt jelentő bolygó planetáris magnetoszférájára eső mágneses energiafluxus, $\eta \sim 2 \cdot 10^{-3}$ a hatékonysági tényező, és $\varepsilon = 1$. Ez a két összefüggés skálátörvénynek tekinthető, és már megfelelően leírja az áramlás-akadály rendszerekben fellépő energiadiSSIPáció alapvető sajátosságait.

Az akadályra áramló mágneses energiafluxus tehát meghatározó tényezőnek tekinthető az áramlás-akadály jellegű plazmafizikai kölcsönhatásokban. A fenti skálátörvénynek a forró jupiterekre való extrapolációja alapján feltételezzük, hogy ezek az égitestek képesek nagyon intenzív ciklotron-rádióemisszió kibocsátására, amelynek hátterében egyaránt állhat a magnetoszféra és az erős csillagszél közötti kölcsönhatás vagy a bolygó és erős mágnesezett csillaga között fennálló dipoláris vagy unipoláris interakció.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton fejezik ki köszönetüket dr. Szabados Lászlónak, a HUN-REN Csillagászati és Földtudományi

Kutatóközpont kutató professor emeritusának, az MTA doktorának a cikk elkészítéséhez nyújtott szakmai támogatásáért és lelkiismeretes lektori tevékenységéért.

Irodalom

1. Zarka P. (2004): Non-thermal radio emissions from extrasolar planets, extrasolar planets: Today and tomorrow. *ASP Conference Series*, Vol. 321.
2. Gurnett D. A. (1974): The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation. *Journal of Geophysical Research* 79, 4227–4238.
3. Khurana K. K., Kivelson M. G., Vasylunas V. M., Woch J., Lagg A., Mauk B. H., Kurth W. S. (2004): The Configuration of Jupiter's Magnetosphere, Jupiter. The planet, satellites and magnetosphere, Cambridge Planetary Science, Vol. 1, ISBN 0-521-81808-7, 593–616.
4. Connerney J. E. P., Baron R., Satoh T., Owen T. (1993): Images of excited H_3^+ at the foot of the Io flux tube in Jupiter's atmosphere. *Science* 262, 1035–1038.
5. Clarke J. T., Ballester G. E., Trauger J., Evans R., Connerney J. E. P., Stapelfeldt K., Crisp D., Feldman P. D., Burrows C. J., Casertano S., Gallagher III. J. S., Griffiths R. E., Hester J. J., Hoessel J. G., Holtzman J. A., Krist J. E., Meadows V., Mould J. R., Scowen P. A., Watson A. M., Westphal J. A. (1996): Far-ultraviolet imaging of Jupiter's aurora and the Io "footprint" with the Hubble Space Telescope Wide Field Planetary Camera 2. *Science* 274, 404–409.
6. Prange R., Rego D., Southwood D. J., Zarka P., Miller S., Ip W. (1996): Rapid energy dissipation and variability of the Io Jupiter electrodynamic circuit. *Nature* 379, 232–235.
7. Zarka P. (2007): Plasma interactions of exoplanets with their parent star and associated radio emissions. *Planet. Space Sci.* 55, 598–617.
8. Gurnett D., Kurth W., Hospodarsky G., Persoon A., Zarka P., Leconteux A., Bolton S., Desch M., Farrell W., Kaiser M., Ladreiter H., Rucker H., Galopeau P., Louarn P., Young D., Pryor W., Dougherty M. (2002): Control of Jupiter's radio emission and aurorae by the solar wind. *Nature* 415(6875), 985–987.
9. Saur J., Neubauer F. M., Connerney J. E. P., Zarka P., Kivelson M. G. (2004): Plasma Interaction Of Io With Its Plasma Torus, Jupiter. The Planet, Satellites And Magnetosphere. Cambridge Planetary Science, Vol. 1, ISBN 0-521-81808-7, 537–560.
10. Cecconi B., Hess S., Hérique A., Santovito M. R., Santos-Costa D., Zarka P., Alberti G., Blankenship D., Bougeret J.-L., Bruzzone L., Kofman W. (2012): Natural radio emission of Jupiter as interference for radar investigations of the icy satellites of Jupiter. *Planetary and Space Science* 61, 32–45.
11. Belenkaya E. S., Bobrovnikov S. Y., Alexeev I. I., Kalegaev V. V., Cowley S. W. H. (2005): A model of Jupiter's magnetospheric magnetic field with variable magnetopause flaring. *Planetary and Space Science* 53, 863–872.
12. Desch M. D., Kaiser M. L. (1984): Predictions for Uranus from a radiometric Bode's law. *Nature* 310, 755–757.
13. Zarka P. (1992): The auroral radio emissions from planetary magnetospheres: What do we know, what don't we know, what do we learn from them? *Advances in Space Research*, 12, 99–115.
14. Zarka P. (1998): Auroral radio emissions at the outer planets: Observations and theories. *Journal of Geophysical Research* 103, No. E9, 20159–20194.

SZUPERNÓVA-ÉSZLELÉSEK A PISZKÉSTETŐI OBSZERVATÓRIUM 80 CM-ES ROBOTTÁVCSÖVÉVEL

Könyves-Tóth Réka

HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

E-mail: konyvestoth.reka@csfk.org

Bevezetés

Aki érdeklődik a csillagászat iránt, avagy ismerős a csillagászati berkekben, talán hallott már a Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Intézet Piskéstetői Obszervatóriumáról, amely hazánk legjobban felszerelt csillagászati mérőállomása. Itt működnek ugyanis az ország legnagyobb tükrőátmérőjű távcsövei, amelyeket a magyar csillagászok napjainkban is használnak észlelési, illetve kutatási célokra. Ezek közül az egyik a 2018–19-ben telepített, 80 cm-es, Ritchey–Chrétien- (RC80) típusú távcső, amely a GINOP-2-3-2-15-2016-00033 számmal fémjelzett, Tranzien Asztrofizikai Objektumok (TAO) nevű projekt részeként épült meg Vinkó József vezetésével, ezzel gyarapítva a piskéstetői „nagy távcsövek” számát.

A projekt során kiemelt szerepet kapott az úgynevezett tranziens események követése egy kifejezetten erre a célra készített távcsőhálózattal. A tranziensek olyan nagy energiájú, általában robbanással járó égi jelenségek, amelyek hirtelen feltűnnek az égbolton, felfényesednek, majd ezután elhalványulva örökre eltűnnek a megfigyelők szeme elől. Ide tartoznak például a bizonyos csillagok élete végén bekövetkező szupernóva-robbanások, a két neutroncsillag összeolvadásakor létrejövő kilonóvák, a gammavillanások látható tartománybeli utófénylései, a fekete lyukak környezetében lezajló árapálykatasztrófák és más egzotikus csillagászati események. Mivel ezek egyszeri, megismételhetetlen jelenségek, a velük kapcsolatos számtalan nyitott kérdés megválaszolásában sokat segíthet a műszertechnika fejlesztése, és a gyors, automatizált mintavételezés.

A világ különböző pontjain, például Afrikában, Ázsiában, Ausztráliában és Amerikában már régebb óta működnek kifejezetten az ilyen események észlelésére specializált távcsövek, illetve hálózatok, a Piskéstetői Obszervatóriumban és a Szegedi Tudományegyetem Bajai Obszervatóriumában elhelyezett, két tökéletesen

egyforma RC80 távcső telepítése elsőként teremtette meg a lehetőséget a tranziensek európai követésére. Ezek a távcsövek robottávcsövek, amelyekkel lehetőség nyílik a gyors, automatizált mintavételezésre, így kifejezetten alkalmasak a rövid időskálájú csillagászati folyamatok vizsgálatára. A mérések elvégzése mellett a piskéstetői RC80 távcső működtetése új távlatokat nyitott az adatok feldolgozását tekintve is, amely nemzetközi szinten is nagy előrelépésnek számít.

Ez a cikk az említett 80 cm-es főtükrőátmérőjű távcső bemutatásán túl annak a szupernóva-robbanásokkal kapcsolatos eredményeire fókuszál. A következő fejezetekben részletesebben bemutatjuk a Piskéstetői Obszervatóriumot, illetve a 80 cm-es távcső működését, a szupernóva-robbanások asztrofizikáját és a távcsővel gyűjtött adatokat felhasználó, nemzetközi szaklapokban megjelent publikációk legfontosabb eredményeit – a teljesség igénye nélkül.

A Piskéstetői Obszervatórium és a 80 cm-es távcső

A Piskéstetői Obszervatórium a Nyugati-Mátra egyik legmagasabb pontja, a 944 m-es Piskés-csúcs közelében épült fel az 1950-es évek végén, Detre László igazgatósága alatt, a turisztikai célpontként jól ismert Galya-tetőtől körülbelül 2,5 km távolságban. A csillagvizsgáló helyszínének megválasztásakor a legfőbb cél a fényszennyezés elkerülése volt, így a nagyvárosoktól messze, az ország egyik legmagasabb pontján található Piskés-tető remek választásnak bizonyult. A fényszennyezés elkerülése régebben, a fotolemezes észlelések korszakában is rendkívül fontos volt, hiszen ezek a fényre igencsak érzékeny lemezek hamar megfeketednek egy olyan észlelőhelyen, ahol nincs teljesen sötét. Bár ma már leginkább CCD-kamerával működnek a távcsöveink, a jó minőségű észlelések elvégzéséhez ugyancsak fontos a fényszennyezéstől minél kevésbé terhelt égbolt.

Az obszervatórium területén először az Oroszlán csillagkép alakját mintázó főépület épült fel, ahol a gondnok, az észlelő csillagászok, a heti váltásban, csütörtökönként érkező ügyeletes csillagászok, valamint a vendégek kapnak szállást. A főépület mellett jelenleg három távcsőkupola és két kisebb műszerépület található.

A legnagyobb távcső az 1974-ben telepített, Ritchey–Chrétien–Coudé- (RCC) szerelésű teleszkóp, amelynek főtükrőátmérője 102 cm, effektív fókusztávolsága pedig 13,5 méter. Ezt a műszert a csillagászok leginkább csak „méteres” vagy RCC néven emlegetik. A főként a



Könyves-Tóth Réka 2020-ban végezte el a csillagász mesterszakot az ELTE TTK-n, majd az SZTE TTK Fizika Doktori Iskolájának asztrofizika szakirányán 2022-ben megszerezte a doktori fokozatot Vinkó József témavezetésével. Jelenleg a Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Intézet fiatal kutatója, kutatási témája a szupernóva-robbanások asztrofizikája.



1. ábra. A Piszkéstetői Observatórium méteres távcsövének épülete

változócsillagok fényességmérésére specializált távcsőhöz optikai kábellel csatlakozik egy közepes felbontású echelle-spektrográf is, ami a környezetére való érzékenysége miatt egy külön szobában kapott helyet. A távcső képalkotó CCD-kameráinak látómezeje a hosszú fókuszs miatt mindössze néhány ívperc átmérőjű. A távcsőhöz továbbá külön észlelőépület is járul, ami az észlelőszoba mellett külön műhellyel, konyhával, fürdőszobával és hálószobával is fel van szerelve (1. ábra).

Szintén megemlítendő a 60/90 cm-es Schmidt-távcső, az obszervatórium elsőként megépült mérőműszere, amelynek lencséje 60 cm-es, főtükre pedig 90 cm-es átmérőjű. A távcsőtubus belsejében, az elsődleges fókuszbán egy 10560×10560 pixeles CCD kamera működik. A távcső különlegessége a rendkívül nagy (3×3 fokok, tehát 6×6 teliholdátmérejtű) látómező, amely tökéletesen alkalmassá teszi az eszközt az égboltfelmérés-jellegű programokra, így például a szupernóvák, üstökösök, illetve kisbolygók felfedezésére. Napjainkban a távcső kijelölt célja az újabb napközeli kisbolygók felfedezése, amelyben világszinten is az élvonalban jár.

Az obszervatóriumot ékesíti ezek mellett a 19 kamerával felszerelt Légyszem-kamera. Utóbbi műszer a légy szeméhez hasonlatos módon képes egyszerre az egész belátható égterületet pásztázni, és így segítségével hamar észrevehetjük a hirtelen megjelenő, tranziens eseményeket.

Végül, de nem utolsósorban megemlítendő az 50 cm-es Cassegrain-távcső kupolája is, amely a Piszkéscsúcsot jelző kőtől pár méterre helyezkedik el. Az 50 cm-es távcső azonban elég sokáig üzemben kívül volt, így a TAO-projekt vezetősége úgy döntött, hogy a távcső egyébként igen költséges korszerűsítése helyett a

kupolájába érdemes beszerezni a tranziensek követésére specializált új, 80 cm-es távcsövet. Megjegyzendő, hogy az új távcső beszerelése előtt a neki helyet adó épület belsejét teljesen át kellett alakítani, és az előregegyezett kupola részleges felújítására is szükség volt. Végül az



2. ábra. A Piszkéstetői Observatórium 80 cm-es távcsöve

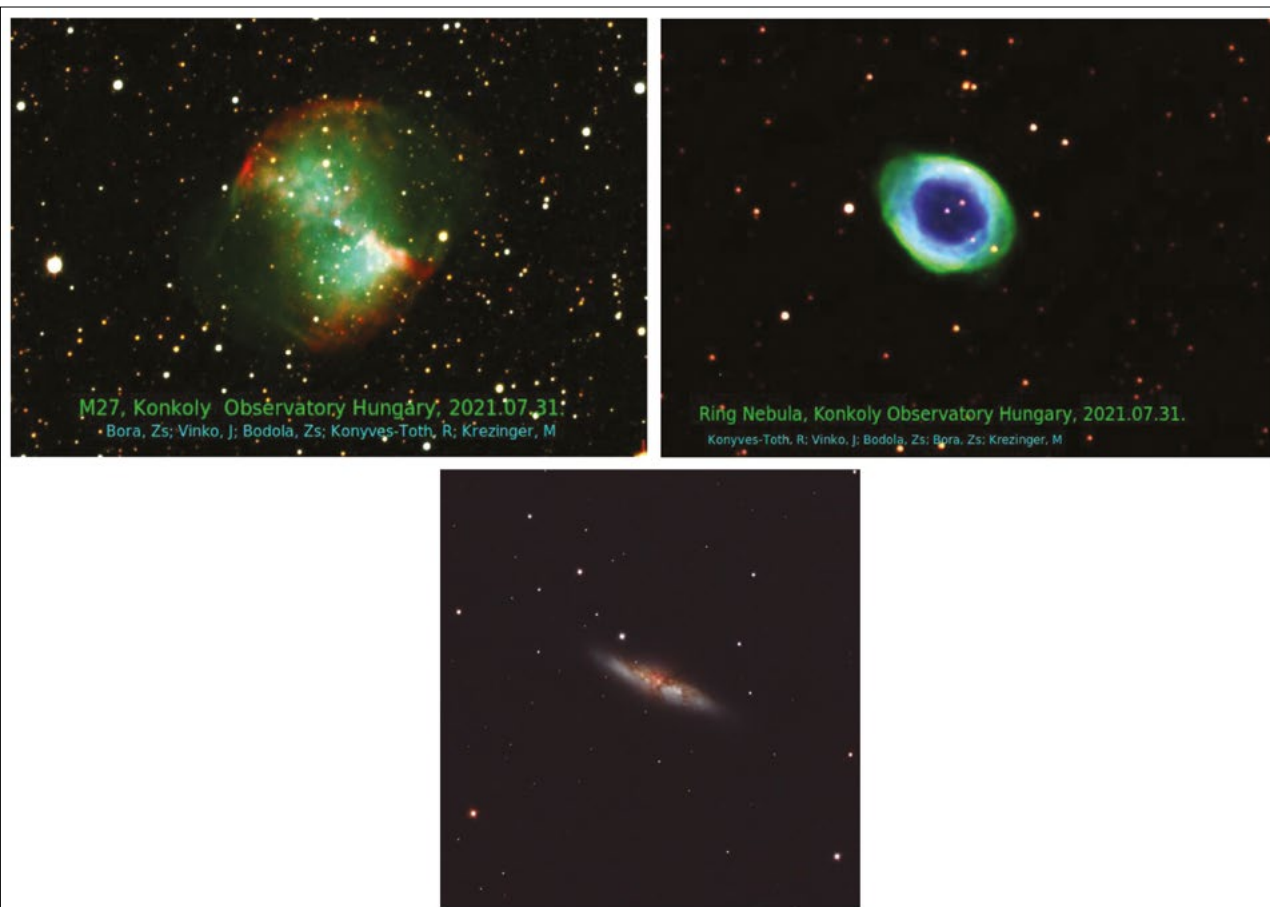
ASA Astrosysteme GmbH nevű cég segítségével 2018-ban készült el a 80 cm-es tükörátmérőjű, Ritchey-Chrétien-Nasmyth-szerelésű távcső (2. ábra). Ez az optikai elrendezés két hiperboloid alakú tükörből áll, amelynek előnye a nagy látómező mellett a jó minőségű képalkotás. Kihívást jelentett, hogy mivel a távcső azimutális, és nem ekvatoriális szerelésű, a képmező elfordul az egyes objektumok követésekor, amelyet egy elektronikus vezérlésű derotátor beszerelésével lehet korrigálni.

Ennek az elrendezésnek az egyik érdekessége a távcsőtükör tartóvillájának két oldalára kivezetett Nasmyth-fókuszok, amelyek a távcső mozgatasakor sem változtatják meg a pozíciójukat. Ilyen módon tehát a Nasmyth-fókusz kiválóan alkalmas volt a távcsőhöz tartozó CCD-kamera, illetve szűrőváltó berendezés elhelyezésére. A kamera egy hátsó megvilágítású, 2048×2048 pixel felbontású CCD-detektorral működik, amelynek látómezeje 19×19 ívperces. Ez a látómező tehát jóval kisebb, mint a Schmidt-távcsőé, azonban még így is befér a telihold látszó átmérőjének kb. kétharmada. A sötétzaj csökkentése és így a felvételek minőségének javítása érdekében fontos tényező a kame-

ra hűtése, amelyhez sokszor alkalmaznak Peltier-elemet, illetve akár -100°C -osra is hűthető folyékony nitrogént. A piszkéstetői RC80 esetén a hűtéshez az autókban is használatos, feltűnően rózsaszínű fagyálló folyadékot keringet a rendszer, aminek a segítségével a detektor az évszaktól, illetve az időjárástól függetlenül stabilan lehűthető -40°C -ra, miáltal lényegesen csökken a sötétzaj szintje.

Szintén említésre méltó a távcsőhöz tartozó szűrőrendszer, amelyben megtalálható a Johnsons-rendszer B, illetve V szűrője, illetve a Sloan-féle u, g, r, i, illetve z szűrő. Ezzel a kombinációval szinte tökéletesen lefedhető az egész látható tartomány, pontosabban a $4000\text{--}10000\text{ \AA}$ közötti hullámhosszak. Ezeknek a szűrőknek a kiválasztását, illetve a beállítását egy kifejezetten erre a célra kifejlesztett, programozott vezérlésű szűrőváltó berendezés teszi lehetővé.

A távcső különlegessége, amely által kiemelkedik a többi hazai távcső, illetve általánosságban véve az európai távcsövek közül is, a robotizált működés. Ez azt jelenti, hogy nem szükséges az észlelő csillagásznak egész éjszaka figyelemmel kísérnie a távcső működését, kézzel ráállva a mérendő objektumok pozíciójára, hanem az



3. ábra. A 80 cm-es távcső felvételeiből készített színes képek. Bal oldalt fenn: az M27-es katalógusszámú Messier-objektum, más néven Súlyzó-köd, egy planetáris köd látható, jobb oldalt fenn: az M51-es jelölésű Gyűrűs-köd, alul pedig az M82, avagy Szivar-galaxis. A bal oldali és a középső kép a Piszkéstetői Optikai Fotometriai Nyári Iskola (POFON) keretein belül készült 2021-ben, a jobb oldali kép esetén pedig a képfeldolgozás, illetve a színes kép előállítása Horti-Dávid Ágoston érdeme

eszköz egy előre megírt program alapján képes magától ráállni a kiválasztott célpontokra, elvégezni a méréseket, majd ezután továbbmenni a következő égtérületre. Az adott éjszakán elvégzendő mérésekhez tartozik egy észlelőszkript, amelyet szintén automatikusan állít elő a kód egy olyan adatbázis alapján, amelyben prioritássorrenddel ellátva szerepelnek azok az érdekes objektumok, amelyek Piszkestetőről is látszanak az égen. A prioritást jellemző számot többféle szempont alapján hozza létre a rendszer: figyelembe veszi például a láthatóságot, az éjszaka hosszát és az újonnan történő felfedezést, majd mindezek alapján kialakít egy optimalizált észlelési tervet az adott éjszakára. A mérést minden este az aktuálisan az obszervatóriumban tartózkodó ügyeletes csillagász felügyeli, aki szükség szerint plusz kalibrációs képeket is készít a távcsővel, illetve igyekszik megoldani az észlelés közben esetlegesen felmerülő problémákat.

A távcső vezérlése, illetve pozicionálása a méteres és a Schmidt-távcsőhöz hasonlóan a ccdsh nevű szoftver [1] segítségével történik; a mért, nyers adatok pedig két helyre, egy központi adatszerverre, és egy archívumba is bekerülnek. Ezeknek az adatoknak a feldolgozása, tehát a redukálása, illetve fotometriai elemzése részben automatikusan történik egy, a fitsh-környezetben [2] megírt program segítségével. Az adatok redukálásának elindítását hetente, a csütörtöki műszakváltással párhuzamosan a jelen cikk írója végzi.

Megemlítendő, hogy a 80 cm-es távcső nemcsak szupernóvákat, illetve tranzienseket vizsgál, hanem minden évben háromszor bárkinek lehetősége nyílik távcsőidőre pályázni. Ilyen módon a robottávcső gyakran észlel fiatal csillagokat is, illetve a szürkületi égen látványos asztrofotók is készülnek vele (3. ábra).

A távcső sikerességét mutatja, hogy 2019-től, tehát működésének kezdete óta az adatait 33 publikációban használták fel, amelyek közül 13 referált szaklapban jelent meg, ezek közül pedig 8 kapcsolódik szupernóvákhöz. A későbbiekben röviden bemutatjuk a szupernóvák tulajdonságait, és a 80 cm-es távcső velük kapcsolatos legfontosabb eredményeit.

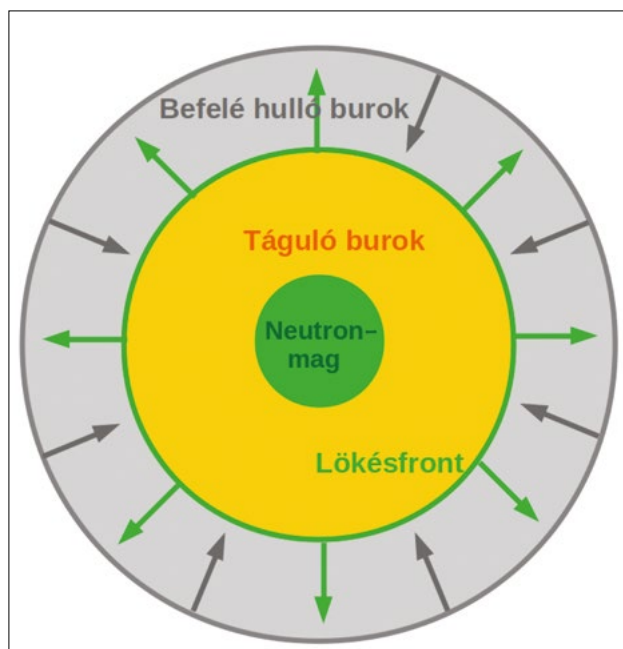
Szupernóvák, a távolról is látszó, hatalmas csillagrobbanások

Vannak olyan csillagok, amelyek az életüket egy rendkívüli energiát felszabadító, hatalmas szupernóva-robbanás formájában fejezik be. Ezeket az eseményeket akár nagyon távoli galaxisokban is észrevehetjük, ugyanis ekkor a felrobbanó csillag fényessége időlegesen túlragyoghatja gazdagalaxisát is. A szupernóvák vizsgálata tehát segítséget nyújthat többek között az extragalaktikus távolságmérésben, így az Univerzum tágulásának ütemét kifejező Hubble-állandó értékének pontosításában. Emellett a szupernóvák vizsgálatával új információt nyerhetünk a csillagfejlődés folyamatáról, illetve a csillagközi anyag fizikájáról is. Általánosságban véve a szupernóvákat a robbanási mechanizmusuk alapján két

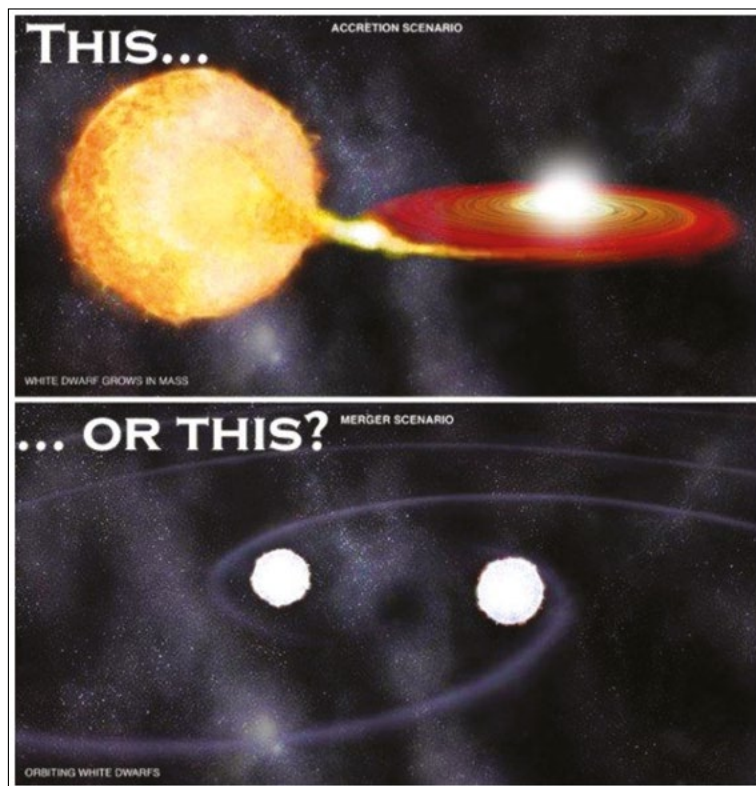
nagy csoportba sorolhatjuk: a magkollapszusos, illetve termionukleáris típusba.

A *magkollapszusos szupernóvák* a kezdetben 8 nap-tömegnél nagyobb tömegű csillagok végállapotakor következnek be. Ezekben a csillagokban a fúziós folyamatok egészen a vasig folytatódnak. Ebben a végső állapotban a csillag belső szerkezete egy hagyma héjaira emlékeztet: a magja vasból, az egyre kijebb található héjak pedig egyre könnyebb elemekből állnak, egészen a legkülső, jórészt hidrogénből álló burokgig. Amikor a csillag magja a csillagfejlődés folyamata során elér egy bizonyos tömeghatárt, felborul benne az egyensúly, és gravitációsan összeomlik. Ennek során a közepében kialakul egy majdhogynem pusztán neutronokból álló, kompakt neutroncsillag-mag, amelyre a csillag „támaszték” nélkül maradt, külső héjai ráhullanak, majd onnan egy kifelé terjedő lökéshullám formájában visszapattannak (4. ábra). Ekkor történik meg tehát az erős fényjelenséggel járó szupernóva-robbanás, amely lehetővé teszi a vas fúziójának beindulását, és így a vasnál nehezebb elemek létrejöttét. A robbanáskor kapott fényesség a szénnél nehezebb atommagok fúziójából kialakult radioaktív nikkell, illetve kobalt bomlásának időskáláján, néhány hónap alatt lecsökken, a haldokló csillag külső burkaiból kialakult gázfelhő pedig idővel láthatatlanná halványul. A hajdani csillag helyén egy neutroncsillag marad vissza, avagy amennyiben a csillag kezdeti tömege meghaladta a 30 naptömeget, a mag fekete lyukká omlik össze.

A másik nagy csoportot a *termionukleáris, vagy más néven Ia típusú szupernóvák* alkotják. Itt a robbanás az előbbiektől teljesen eltérő mechanizmussal zajlik le. Az Ia típusú szupernóvák szülőobjektumai ugyanis a 8 nappal kisebb kezdeti tömegű csillagok életének végén ki-



4. ábra. Sematikus ábra a magkollapszusos szupernóvák robbanási mechanizmusáról



5. ábra. Az Ia típusú szupernóvák lehetséges robbanási forgatókönyvei (Forrás: universetoday.com)

alakult fehér törpék. Ezekben a jórészt szénből és oxigénből álló csillagokban az elfajult elektrongáz nyomása egyensúlyban van a gravitációval, legalábbis egészen addig, amíg a csillag külső hatás következtében el nem éri a körülbelül 1,44 naptömeges Chandrasekhar-határtömeget. Ezt az értéket átlépve a csillagban felborul az egyensúly, és beindul a szén és az oxigén nikkellé történő fúziója. Mivel azonban a csillag anyaga elfajult állapotban van, tehát a nyomás független a hőmérséklettől, a fúzió nem áll meg, hanem megszaladva robbanásszerűen folytatódik egészen addig, amíg meg nem semmisíti a csillagot. Ezek a szupernóvák az időskáláikat tekintve nagy általánosságban rövidebb lecsengésűnek, ámde fényesebbnek mondhatóak a kollapszároknál: a néhány hetes felfényesedést egy ennél valamivel lassabb elhalványulás követi. A velük kapcsolatos megválaszolatlan kérdések közül az egyik legfontosabb a Chandrasekhar-tömeg elérésének módja, illetve maga a robbanási mechanizmus. A legelfogadottabb forgatókönyvek értelmében a határtömeget kétféleképpen érheti el egy fehér törpe: az egyik szerint a fehér törpe anyagot von el vörös óriás társzcillagától, a másik alapján pedig többes rendszeren belül fejlődve összeütközik egy másik fehér törpecsillaggal (5. ábra).

A kétezres évek eleje óta ismert a szupernóvarobbanásoknak egy harmadik típusa is, amely a *superfényes szupernóva* nevet kapta. Bár maguk a hagyományos értelemben vett szupernóvák is igen fényesek, a superfényes szupernóvák nagyságrendekkel meghaladják a

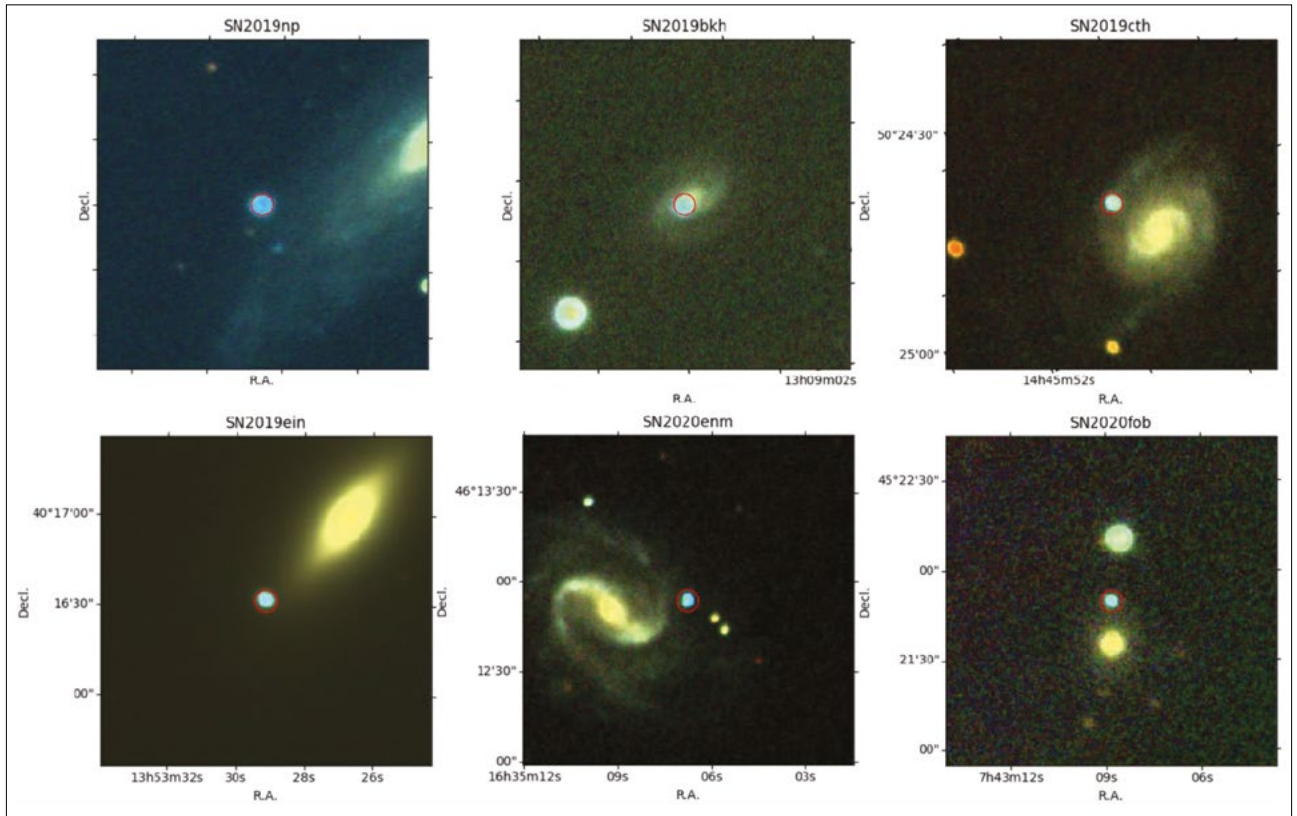
felrobbanó csillagoktól általában megszokott fényességet. A csillagászok szerint ezek a robbanások csak a legnagyobb kezdeti tömegű csillagoktól származhatnak, a kiemelkedő fényesség elérésének pedig több forgatókönyve is létezik, de napjainkig vitatott, hogy pontosan melyik eset valósulhat meg. Ezek a forgatókönyvek magukban foglalják a nagy tömegű csillagok magösszeomlásakor kialakult, erős mágneses terű neutroncsillag (magnetár) fékeződéséből felszabaduló energia, az újonnan kialakult fekete lyuk felszínére történő anyagbehullás, a 100 naptömegnél nagyobb csillagok esetén lehetséges pár-instabilitásos robbanás, illetve a csillag körüli anyaggal történő, heves kölcsönhatás lehetőségét is.

Látszik tehát, hogy a csillagrobbanások kutatása továbbra is a modern asztrofizika izgalmas területe, ahol számos kérdés vár megválaszolásra az elkövetkező évtizedekben is. Ezeket a válaszokat pedig elhozhatja akár a big data-korszak, a rohamosan növekvő mennyiségű mérési adat feldolgozása és az új szupernóvák mind nagyobb számban történő felfedezése, és követése is. Ez utóbbihoz járul hozzá a piszkéstetői 80 cm-es távcső is.

Szemelvények a 80 cm-es távcsővel észlelt szupernóvákkal kapcsolatos eredményekből

1. Az Ia típusú szupernóvák újabb meglepetése

Talán kijelenthetjük, hogy a 80 cm-es távcső adatainak legátfogóbb elemzése hozzájárult ahhoz, hogy mélyebben megismerjük a termonukleáris szupernóvák fizikai tulajdonságait, és lehetséges robbanási mechanizmusait. Mint ahogy fentebb, az elméleti áttekintőben is szerepel, viszonylag régóta ismert, így széles körben elfogadott nézet, hogy az Ia-típusú szupernóvák fehér törpék robbanásából származnak. Régebben úgy gondolták, hogy mivel minden esetben ugyanolyan tömegű csillag robban fel hasonló mechanizmussal, ezeknek a szupernóváknak ugyanakkora kell legyen az abszolút fényessége, és így standard gyertyáknak minősülnek, amelyek segítségével pontosan megmérhetjük a kozmológiai távolságokat. Később azonban kiderült, hogy a fénygörbéjük és a színekük alapján sem teljesen ugyanolyan az összes termonukleáris szupernóva: vannak fényesebb és kevésbé fényes események, melyek között színekük, illetve lecsengésük alapján különbséget tudunk tenni. Ezek a robbanások azonban továbbra is standardizálható gyertyák maradtak, mégpedig Phillips 1993-ban észrevett összefüggésének megfelelően [3], amely szerint a B szűrőben mért abszolút fényesség összefügg a halványulás ütemével:



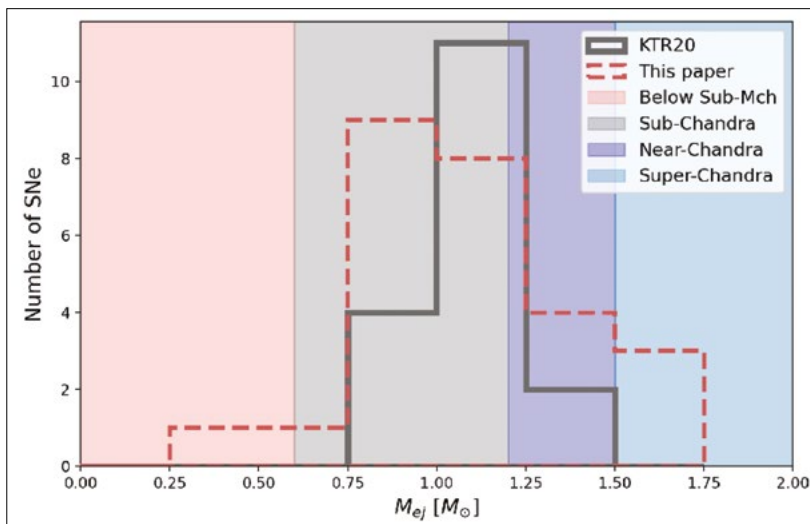
6. ábra. Hat objektum színes képe a vizsgált Ia típusú szupernóvák mintájából [5]

a fényesebb szupernóvák lassabban fejlődnek a kevésbé fényes szupernóváknál. Ezt az azóta Phillips-reláció néven ismert összefüggést használjuk tehát az abszolút fényesség standardizálására.

Ekkor azonban felvetődik a következő kérdés: miért nem ugyanolyan az Ia típusú szupernóvák fénygörbéje és színe? Erre viszonylag kézenfekvő válasz adódik, amely a robbanási forgatókönyvekben gyökeredzik: nem minden fehér törpe ugyanúgy robban fel. Vannak

olyanok, amelyek a fent említett mechanizmusok közül két fehér törpe ütközésével, míg mások kettős rendszeren belüli anyagátadás révén érik el a robbanáshoz szükséges tömeget. Természetesen ezen forgatókönyvekben belül léteznek további altípusok is, amelyek különféle fizikai folyamatokat írnak le. Az egyes szupernóvák fénygörbéjének modellezésével becslést adhatunk az egyik legfontosabb fizikai paraméterre, a robbanás során ledobódott tömegre, amely számot adhat tehát a szülőobjektumról, és a robbanás módjáról is. Ezeknek a tömegeknek a meghatározása kulcsfontosságú.

A Piskéstetői Observatóriumban eleinte a Schmidt-távcsövet használták szupernóvaészlelésekre, majd később, 2019-től ezt a szerepet átvette az újonnan épített, 80 cm-es távcső. Ennek megfelelően az évek során sok Ia típusú szupernóva fénygörbéjét sikerült mintavételezni. Egy 2020-ban megjelent tanulmány [4] a 2016 és 2018 között felrobbant, a Schmidt-távcsővel észlelt Ia típusú szupernóvákat vizsgálja, majd egy következő szakcikk [5] a 2019-től 2023-ig terjedő adatsorok elemzésével folytatja az elkezdett munkát. Ilyen módon összesen 17 + 28 szupernóva fénygörbéjét sikerült vizsgálni az elmúlt évek során.



7. ábra. A 80 cm-es távcsővel (piros, szaggatott vonal), és a Schmidt-távcsővel (szürke vonal) vizsgált, Ia típusú szupernóvák tömegeloszlásának hisztogramos ábrázolása, amelyből kiviláglik, hogy a minta legtöbb szupernóvája a Chandrasekhar-határtömeg alatt robban [5]

Az analízis pedig mindkét ízben érdekes eredményre vezetett: a részletes fénygörbeelemzés felfedte ugyanis, hogy a ledobott tömeg a legtöbb szupernóva-robbanás során nem éri el a Chandrasekhar-tömeghatárt (lásd a 7. ábrát)! Bár eddig is ismert ténynek számított, hogy léteznek úgynevezett szub-Chandra, vagyis Chandrasekhar-tömeg alatti robbanások, a tudományos közösség úgy vélte, hogy ezeknél jóval gyakoribbak a Chandrasekhar-határtömeg közelében robbant szupernóvák. Természetesen mindemellett léteznek szuper-Chandra objektumok is, ahol a ledobott tömeg meghaladja a tömeghatárt, valószínűleg azért, mert a robbanás két fehér törpe összeolvadásából származik, amelyek együttes tömege könnyedén lehet nagyobb az 1,44 naptömeges határértéknél.

A piszkéstartói adatsorok vizsgálata rávilágított tehát arra, hogy jóval gyakoribbak a határtömeg alatti ledobott tömeget mutató Ia típusú szupernóvák, mint azt korábban gondoltuk, sőt, valójában többségben vannak a közel Chandrasekhar-tömeget ledobó eseményekhez képest. Ez pedig érdekes tényeket fedhet fel a robbanás forgatókönyvével kapcsolatban. A jövőben tehát fontos lenne minél több Ia típusú szupernóva részletes elemzése, és így a Piszkéstartón elvégzett mérések folytatása is.

2. Testvérszupernóvák vizsgálata az NGC 3147 galaxisban
Számtalan piszkéstartói RC80, illetve az SZTE Bajai Obszervatóriumában működő BRC80 távcső által készített mérések segítségével születhetett meg az a tanulmány, amely az NGC 3147-es katalógusszámmal jelölt galaxisban robbant szupernóvatestvérek vizsgálatával igyekszik pontosítani a galaxis becsült távolságát, és ezzel együtt tesztelni a távolságmeghatározáshoz használt különféle módszereket [6]. Ez a tanulmány rendkívül fontos szerepet játszik a Hubble-állandó meghatározását szolgáló mérések kalibrálásában, és így segíthet többek között a kozmológiában napjainkig jelenlévő Hubble-feszültség feloldásában is. A Hubble-feszültség az egyik legnagyobb kozmológiai rejtély, amely magában foglalja, hogy az Univerzum tágulását jellemző Hubble-

állandó értéke különféle mérésekkel eltérőnek adódik. A feszültség feloldásához mindenképpen lényeges a távolságmérési módszerek megbízhatóságának tesztelése, és az ismert távolságú objektumok távolságának, illetve az ezt kiszámító modelleknek és kódoknak a további pontosítása.

Ezt a célt szolgálta az NCG 3147-ben az elmúlt évtizedekben felvillant három szupernóva, az SN1997bq, az SN2008fv és az SN2021hpr fénygörbéinek és spektrumainak részletes elemzése. Előbbi két objektumról korábbi, űrtávcsöves mérések készültek, míg az SN2021hpr-t nagy mintavételezettséggel követte a piszkéstartói, illetve a bajai 80 cm-es távcső. Az objektumok fénygörbéit többféle modellel is illesztve sikerült pontosítani a galaxis korábbi távolságbecsléseit, amelynek eredményeként $42,5 \pm 1,0$ Mpc adódott. Ez az érték összhangban van a legújabb fénygörbeillesztő kódok eredményeivel.

Ezeknek az érdekes eredményeknek a felvillantásából láthatjuk, hogy a piszkéstartói 80 cm-es távcső adataiból a magyar kutatók képesek nemzetközi szinten is elismerésre méltó eredmények elérésére. Ez motivációt kölcsönöz a mérések folytatásához, és a Piszkéstartói Obszervatórium műszereinek továbbfejlesztéséhez.

Irodalom

1. Pál András: *CCDSH – távcsőmozgatás, kupolavezérlés és fókuszálás*, <https://ccdsh.konkoly.hu/>
2. Pál András (2012): FITSH – a software package for image processing. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 421.3, 1825–1837.
3. Phillips Mark M. (1993): The absolute magnitudes of Type Ia supernovae. *Astrophysical Journal, Part 2-Letters*, 413/2, L105–L108., 413, L105–L108.
4. Könyves-Tóth R., et al. (2020): Constraints on the physical properties of SNe Ia from photometry. *The Astrophysical Journal*, 892.2, 121.
5. Bora Zsófia, et al. (2024): Ejecta masses in type Ia supernovae – Implications for the progenitor and the explosion scenario. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 136.9, 094201.
6. Barna Barnabas, et al. (2023): Three is the magic number: Distance measurement of NGC 3147 using SN 2021hpr and its siblings. *Astronomy & Astrophysics*, 677, A183.

Hirdetmény

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2025. május 10-én szombaton 10:00-kor tartja éves küldöttgyűlését az

Eötvös Loránd Tudományegyetem Északi Tömb 083-as Eötvös termében (1117 Budapest XI. Pázmány Péter sétány 1/A.)

A küldöttgyűlés hagyományosan napirend előtti szakmai előadással kezdődik. Az előadást

dr. Csabai István Ervin (ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék) tartja „Fizika és mesterséges intelligencia” címmel.

NAGY TÖMEGŰ CSILLAGOK 1D SZIMULÁLÁSA: MI OKOZZA A KÜLÖNBSÉGEKET A MODELLEKBEN?

Szécsi Dorottya

Nicolaus Copernicus Egyetem, Fizikai, Csillagászati és Informatikai Kar, Csillagászati Intézet, Toruń, Lengyelország
E-mail: dorottya.szecs@gmail.com

A nagy tömegű csillagok elméleti kutatásában sok lezáratlan kérdés van. Az egyik, hogy mi történik ezekkel a csillagokkal akkor, amikor a sugárzási nyomás megközelíti vagy eléri a gravitációból származó összetartóerőt. Az ilyen, 40 naptömeg fölötti csillagok stabilitása meginog, de a modellek nem mindig tudják ezt az életszakaszt végigkövetni. Cikkemben bemutatom, milyen megoldásokat adnak a különböző kutatói csoportok a problémára. Ezek a módszerek nagy mértékben befolyásolják a publikált modell-előrejelzéseket – és ezáltal a rájuk alapuló további kutatások következtetéseit 40 naptömeg fölött.

1. A nagy tömegű csillagok és jelenkori kutatásuk

A csillagfejlődési modellszekvenciák (röviden: csillagmodellek) az asztrofizikai alkalmazások széles körének szolgálnak bemenetül. A csillagkeletkezéstől (Gatto et al. 2017) a galaxisfejlődésig (Weinberger et al. 2020), a halmazok dinamikájától (Heggie & Hut 2003) a gravitációs hullámok vizsgálatáig (Vigna-Gómez et al. 2018) rengeteg területen alkalmazhatók, mivel egyszerű és hatékony módszert kínálnak az egyes csillagok (Schneider et al. 2014) és a csillagpopulációk (Brott et al. 2011b) figyelembevételére adott asztrofizikai környezetben.

Az egydimenziós (1D) csillagmodellek a fizika alaptörvényeiből számíthatók ki úgy, hogy gömbszimmetriát és a környezettől való tökéletes elszigeteltséget feltételezünk (Kippenhahn & Weigert 1990). Ezek a feltételezések a csillagok túlnyomó többségére igazak, és ez magyarázza a csillagfejlődés mint módszer sikerességét az asztrofizikai kutatásokban. Ha azonban olyan csillagokkal akarunk dolgozni, amelyek nagyobb tömegűek, mint $\sim 9 M_{\odot}$ (azaz 9 naptömeg) – ezek az ún. nagy tömegű csillagok, melyek a Világegyetemben a nagyenergiás su-

gárzás, a kémiai anyagkidobás és a legegztikusabb robbanások jelentős részéért felelősek (Langer 2012) – az evolúciós modellek előrejelzései komoly bizonytalanságokkal terheltek.

Nagy tömegű csillagok ritkábban születnek, mint kis tömegű társaik (Salpeter 1955), és sokkal rövidebb ideig is élnek (Langer 2012). Következésképpen nehezebb rájuk vonatkozóan elegendő megfigyelési adatot összegyűjteni. A helyzetet tovább bonyolítja, hogy sok nagy tömegű csillag esetén figyeltek meg gyors tengelyforgást (Ramírez-Agudelo et al. 2013), amely nyilvánvalóan megtöri a tökéletes szimmetria feltételét; továbbá sok esetben előfordul, hogy található a közvetlen közelben egy kísérőcsillag (értsd: kettős csillagrendszerrel van szó, Sana et al. 2012), amely pedig megtöri a tökéletes elszigeteltségről szóló feltételezést. De még az elszigetelt, nem forgó, magányos nagy tömegű csillagok esetében is igaz, hogy a fizikai körülmények mind a csillag belsejében (Heger et al. 2000), mind a közvetlen felszínén (Lamers & Cassinelli 1999) annyira bonyolultak, hogy teljes pontosságú szimulációt készíteni róluk meghaladja jelenlegi képességeinket.

Az elmúlt évtizedekben sok jelentős előrelépés történt a nagy tömegű csillagok kutatásában mind a belső, mind a külső fizikai folyamatok tekintetében. Intenzíven tanulmányozzák például a tömegledobást, mely nagy sebességű csillagszél formájában történik (Puls et al. 2008; Šurlan et al. 2013; Smith 2014). A csillagszél hatását az evolúciós modellekben gyakran már intergáltan is figyelembe veszik (Björklund et al. 2021; Sander & Vink 2020). Másrésről, a csillagbelsőben lejátszó anyagkeveredési folyamatok hatékonyságának kalibrálására és figyelembevételére a Nagy Magellán-felhőben található nagy tömegű csillagok megfigyeléseit használják (Brott et al. 2011a). Számos tanulmány igyekszik valamilyen módon az egydimenziós csillagmodellekbe is beleépíteni a forgás hatását (Maeder & Meynet 2000; Heger et al. 2000; Paxton et al. 2013; Costa et al. 2019), valamint a mágneses mezőket (Maeder & Meynet 2005; Takahashi & Langer 2021), amelyek komolyan meg tudják változtatni a csillag által bejárt fejlődési utat (Walder et al. 2012; Petit et al. 2017; Groh et al. 2020).

Ezen előrelépések ellenére még mindig sok a nyitott kérdés a nagy tömegű ($\geq 9 M_{\odot}$) és az ún. „nagyon nagy tömegű” (itt: $\geq 40 M_{\odot}$) csillagok életével kapcsolatban, és biztos válaszok hiányában a csillagfejlődési szimulációk különböző fizikai feltételezéseket alkalmaznak. Korábbi tanulmányok, amelyek a különböző szimulációkból származó nagy tömegű csillagmodelleket ha-



Szécsi Dorottya csillagász az ELTE TTK-n végzett fizikusként, a németországi Bonni Egyetemen doktorált asztrofizikából. Kutatott a csehországi Ondřejovi Csillagvizsgálóban Prága mellett, az angliai Birminghami Egyetemen, valamint a németországi Kölni Egyetemen. Jelenleg docens és OPUS-pályázat nyertes kutatócsoport-vezető a lengyelországi Kopernikusz Egyetemen, Toruńban. Szakterülete a nagy tömegű, alacsony fémtartalmú csillagok, melyek megváltoztatják az Univerzum kémiai összetételét, és szupernóvarobbanásban fekete lyukká esnek össze. Időnként gammakitöréseket is létrehozhatnak, a fekete lyukak pedig összeolvadhatnak gravitációshullám-kibocsátással.

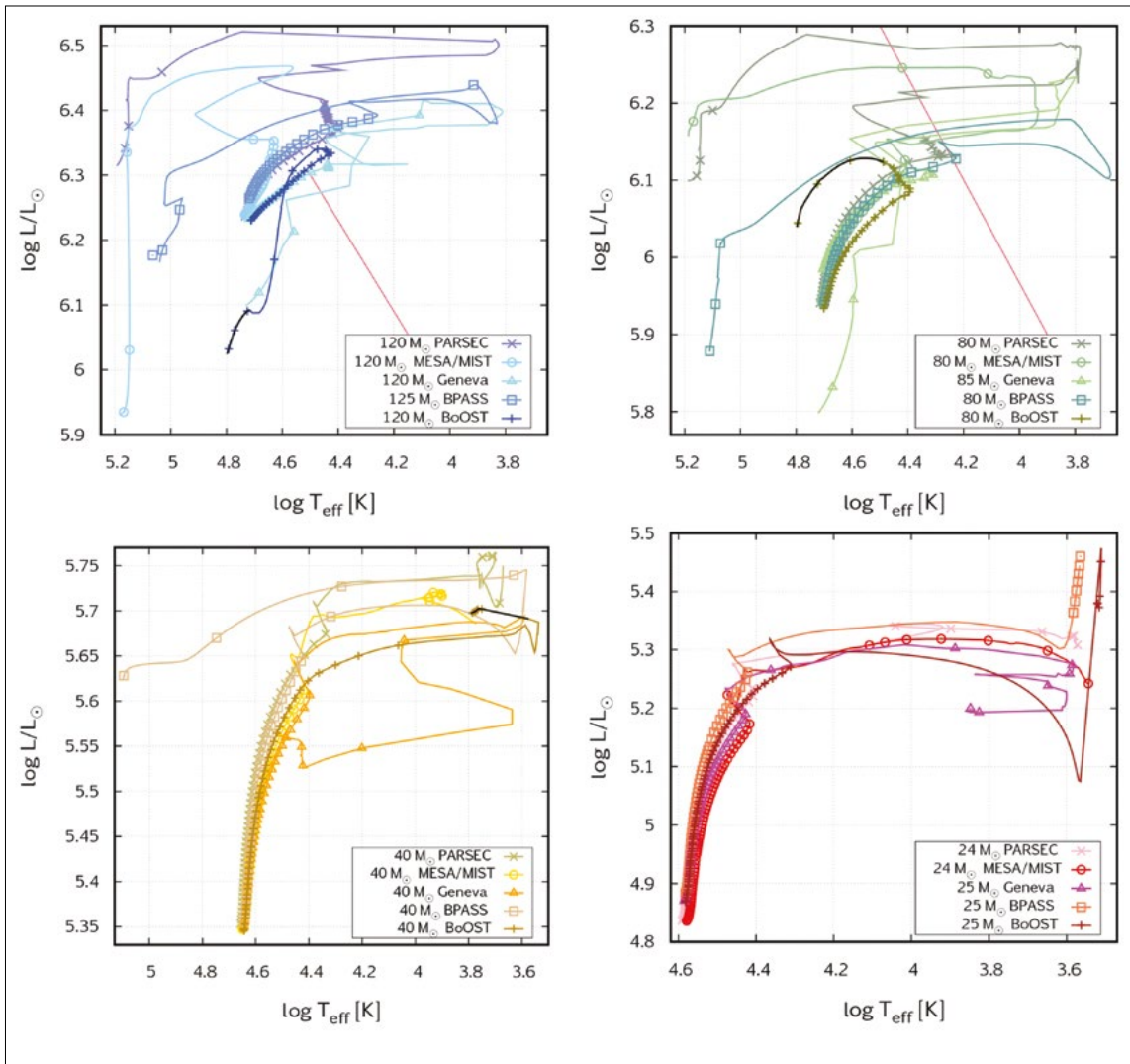
sonlítottak össze (Martins & Palacios 2013; Jones et al. 2015), azt állapították meg, hogy az egyes szimulációk által használt fizikai paraméterek – például a keveredésre és a tömegvesztésre jellemző értékek – közötti különbségek igen komolyan befolyásolhatják a csillagok fejlődését.

2. Mennyire különböznek a modellek előrejelzései?

Ebben a tanulmányban öt publikált és széles körben használt modelleszaládot hasonlítok össze (lásd még Agrawal et al. 2022). Ezek a következő öt evolúciós szimulációból származnak: i) a PAdova and TRieste Stellar Evolution Code (PARSEC; Bressan et al. 2012;

Chen et al. 2015) modelljei; ii) a Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA; Paxton et al. 2011) kód által készült MESA Isochrones and Stellar Tracks (MIST; Choi et al. 2016) modelljei; iii) a „Geneva” kód (Ekström et al. 2012) modelljei (Eggenberger et al. 2008); iv) a Binary Population and Spectral Synthesis (BPASS; Eldridge et al. 2017) projekt modelljei; valamint v) a Bonn Optimized Stellar Tracks (BoOST; Szécsi et al. 2022) nevű modellek, melyek a „Bonn” kóddal készültek. Minden modelleszaládból a nem forgó csillagmodelleket és a Napra jellemző fémességi értékeket ($Z = 0,014$), kivéve a BoOST esetén, ahol lassan forgó modelleket (100 km s^{-1}) használunk, és a Napéhoz közeli (pontosabban galaktikus, $Z = 0,0083$) összetételt.

Az 1. ábra mutatja azokat a Hertzsprung–Russell-diagramokat, amelyeken az öt szimulációból származó,



1. ábra. Hertzsprung–Russell-diagramok az elemzett nagy tömegű csillagmodellekről (vízszintes tengelyen a felszíni hőmérséklet, függőlegesen a bolometrikus luminozitás). A modellek összetétele lényegében a Napénak felel meg. A vonalakra rajzolt szimbólumok az evolúciónak minden századik évét jelzik. Csak a hidrogén és hélium magban történő égési fázisait ábrázoljuk; a BoOST (Bonn) modelleknél az utófeldolgozás fázisa (vö. Szécsi et al. 2022) feketével van jelölve. Vékony szürke vonalak jelzik a megfigyelési Humphreys–Davidson-határ hozzávetőleges helyzetét (Humphreys & Davidson 1979; Gilkis et al. 2021). Minél nagyobb a tömeg, annál jobban eltérnek egymástól a különböző szimulációkból származó modellek. Ez azért van, mert a szimulációk különböző módszereket alkalmaznak az Eddington-határhoz kapcsolódó instabilitások kezelésére, amint azt a 3. fejezet elmagyarázza

különböző tömegű csillagokat hasonlítjuk össze. A modellek leginkább $\sim 25 M_{\odot}$ esetén hasonlítanak egymásra, bár a szimulációk még itt sem értenek egyet bizonyos kulcsfontosságú pontok helyzetében, például a fősorozat végének pozíciójában, vagy abban, milyen felszíni hőmérséklet- és luminozitásértékeknél történik héliumégés a magban. Ezen fázisok pontos tulajdonságai a szimulációkban alkalmazott különböző belső keveredési paraméterektől függenek (konvekciós túllövés, avagy *overshooting*, Castro et al. 2014, 2018, valamint szemi-konvekció, Schootemeijer et al. 2019).

Nagyobb tömegek esetén az evolúciót befolyásoló domináns tényező a tömegvesztés feltételezett mértéke. A forró nagy tömegű csillagok (O típusú csillagok és Wolf-Rayet-csillagok) tömegvesztése azáltal valósul meg, hogy a sokszázezer – akár millió – napluminozitásnyi sugárzás gerjeszti a felszínen előforduló magas tömegszámú atomokat, amik a kölcsönhatás során mozgási energiára tesznek szert és ezért elvándorolnak a csillagtól, magukkal vonva a velük termikus egyensúlyban lévő hidrogén-hélium gázt is (ún. spektrális vonalátmenetek által hajtott csillagszél, „line driven winds”, Lamers & Cassinelli 1999). A hűvös nagy tömegű csillagok esetén (vörös szuperóriások, Levesque 2017) hasonló folyamat zajlik le, csak ezúttal a felszínközeli anyaggal történik a kölcsönhatás (molekuláris átmenetek gerjesztődnek atomi átmenetek helyett), ez hajtja a csillagszelet. Mindkét típusú tömegvesztés intenzíven tanulmányozott téma. Azonban a szélben az atomi és molekuláris átmenetek problémájának összetettsége, valamint a nagy tömegű csillagok ritka volta oda vezet, hogy a modellek feltételezései általában csekély számú megfigyelésen (túl kicsi elemszámú mintán) alapulnak.

Az 1. ábrán a $40\text{--}120 M_{\odot}$ tömegek esetén a szimulációk nagyon jelentős eltéréseket mutatnak. Annak ellenére, hogy a modellek hasonló előírásokat követnek a tömegvesztés mértékére vonatkozóan¹, ezeket az arányokat erősen befolyásolhatják bizonyos gyakorlati megoldások, amelyeket az 1D szimulációkban fellépő numerikus kihívások leküzdésére használnak. A továbbiakban ezeket tárgyaljuk meg részletesebben.

3. Az Eddington-határ: mi is ez, és mi a szerepe?

A nagy tömegű csillagok sugárzásdominálta külső rétegeiben a csillag élete során néha előfordulhat, hogy a befelé irányuló gravitációs erőt le tudja győzni a neki ellentartó sugárzási nyomás. Amikor ez megtörténik,

a csillag eléri az úgynevezett Eddington-határt (Langer 1997), ami ahhoz vezet, hogy a csillagburok belsejében sűrűség- és nyomásinverziós régiók alakulhatnak ki. Hatékony konvekció hiányában (ami ezekre a csillagburokokra amúgy is jellemző (Cantiello et al. 2009; Grassitelli et al. 2016), ez numerikus nehézségeket okozhat az egydimenziós csillagfejlődési szimulációkban (Paxton et al. 2013). Míg a kevésbé nagy tömegű csillagokat ez a folyamat csak a késői evolúciós fázisokban érinti, a nagyon nagy tömegű csillagok már a hidrogénégési fázisban meghaladhatják az Eddington-határt (Gräfener & Hamann 2008; Gräfener et al. 2012; Sanyal et al. 2015, 2017). A következőkben röviden összefoglalom, melyik modellcsalád milyen megoldást alkalmaz a probléma kiküszöbölésére.

A PARSEC-modellekben azáltal kerülnek el a sűrűséginverziót és az ebből adódó numerikus nehézségeket, hogy úgy korlátozzák a hőmérsékletgradienst, hogy a sűrűséggradiens soha ne váljon negatívvá (Chen et al. 2015, 2.4. fejezet, valamint Alongi et al. 1993). Továbbá a modellek tömegvesztését is megnövelik Vink et al. (2011) nyomán. A MIST modellek is elkerülik a sűrűséginverziót, de ezekben az izotermikus és az adiabatikus hőmérsékletgradiensek közötti különbséget csökkentik mesterségesen (ún. MLT++ formalizmus, Paxton et al. 2013). A Geneva-modellek (Ekström et al. 2012, 2.3. fejezet) a konvekció hatékonyságát növelik, továbbá a tömegvesztést is megnövelik egy adott faktorrall. A BPASS modellekben nem Langrange-i koordináta-kezelést alkalmaznak (erről részletesebb információért lásd Eggleton 1973; Stancliffe 2006; McClelland & Eldridge 2016), míg a BoOST és a Bonn modelleket utófeldolgozásban kezelik tovább úgy, hogy rétegeket hántanak le róluk, miközben korrigálnak a felszíni paraméterek értékeire (Szécsi et al. 2022).

E megoldások közös jellemzője, hogy módosítják a csillag sugarát és hőmérsékletét, és ezért befolyásolják a tömegvesztés mértékét. A tömegvesztés megnövelésének fenomenológiai indoklása az, hogy vannak olyan csillagok, amelyeknél rendkívül magas rátájú, epizód-szerűen bekövetkező tömegvesztést figyeltek meg (ún. nagy fényességű kék változócsillagok, *luminous blue variables*, Sarkisyan et al. 2020). Bár több kutató is javasolt frissített tömegvesztési arányokat az Eddington-határ közelében lévő csillagokra (pl. Vink et al. 2011; Gräfener et al. 2012), a nagy tömegű csillagok szelének és tömegvesztésének pontos jellege továbbra is vitatott (Smith & Tombleson 2015). Ezenkívül a nagy tömegű csillagok első 3D szimulációi azt sugallják, hogy a csillagburok bonyolultabbak és turbulensebbek lehetnek, mint ahogy azt az 1D csillagfejlődési modellek feltételezik (Jiang et al. 2015).

Az öt modellcsalád előállításakor alkalmazott megoldások egyikéről sem jelenthető ki, hogy jobb lenne, mint a többi. Arra fejlesztették ki ezeket a módszereket, hogy megoldják az 1D modellekben fellépő numerikus problémákat. Mivel nagy tömegű csillagokat ritkán ta-

¹ Minden modell a Vink et al. (2000, 2001) leírást követi a forró szél okozta tömegvesztéssel kapcsolatosan (fősorozat), és a de Jager et al. (1988) vagy Nieuwenhuijzen & de Jager (1990) leírást a hideg por kiáramlása által okozott tömegvesztéssel kapcsolatosan (vörös szuperóriás fázis). Ami a buroktalan héliumcsillag-fázist illeti, az összes modellcsalád egy kivételével a Nugis & Lamers (2000) leírást követi; a BoOST modellek pedig a Hamann et al. (1995) leírást 0,1-szeresre csökkentve, ami hasonló tömegvesztésértékeket eredményez (Yoon et al. 2006).

lálunk a Világegyetemben, nehéz a viselkedésükre (ideértve a tömegvesztés mértékét) megfigyelési adatokat szerezni, különösen statisztikailag szignifikáns számban. Ezért jelenleg lehetetlen eldönteni, hogy melyik modell-család jóslata áll közelebb a valósághoz.

A fentiekben kizárólag elszigetelt, magányos csillagokat vizsgáltunk. Mindazonáltal egyre több bizonyíték van arra, hogy a nagy tömegű csillagok kettős vagy hármas rendszerben születnek, így magányos csillagként való kezelésük nem feltétlenül helyes (pl. Moe & Di Stefano 2017; Klencki et al. 2020; Laplace et al. 2021). Amint azt több szerző is kimutatta, a kettősség nagymértékben befolyásolhatja a nagy tömegű csillagok életét tömeg- és perdületátadás révén (de Mink et al. 2009; Sana et al. 2012; Marchant et al. 2016; Menon et al. 2021), ami potenciálisan segíthet elkerülni a sűrűség- és nyomás-inverziós régiók kialakulását eme csillagok burkában (Shenar et al. 2020).

4. Összegzés

Nagy tömegű és nagyon nagy tömegű csillagok 1D evolúciós modelljeit hasonlítottam össze öt független szimulációból. Azt tapasztaltam, hogy a $40 M_{\odot}$ feletti csillagok nagyobb eltérést mutatnak az evolúciós tulajdonságokban, mint az ennél alacsonyabb tömegű csillagok. Ezek a különbségek nagyrészt azoknak a numerikus megoldásoknak tulajdoníthatók, amiket a kutatók azért vezetnek be, hogy kezeljék a csillagok burkában az Eddington-határ elérésének környékén fellépő instabilitásokat. Ezek a numerikus megoldások különböző tömegvesztési rátákat eredményeznek, és ez magyarázza a modellek között látható különbségeket. További fizikai feltételezések (konvekció, szemikonvekció stb.) is játszhatnak némi szerepet, bár szerepük valószínűleg csekély; ezek feltérképezésére a jövőben egy szisztematikus tanulmány lenne indokolt.

Az Eddington-határ szerepe a nagy tömegű csillagokban jól ismert probléma a csillagfejlődéssel foglalkozó kutatók közösségében, azonban a közvetlenül ezzel foglalkozó szakemberek szűk körén kívül viszonylag ismeretlen. A nagy tömegű csillagmodellek használatának elterjedésével azonban (pl. a gravitációs hullámok eseménygyakorosságának előrejelzéseiben és sok más alkalmazásban) fontos tisztában lenni ezzel a problémával.

Míg jelen tárgyalásunkat a Napra jellemző fémtartalmú nagy tömegű csillagokra korlátoztuk, a manapság észlelt gravitációs hullámokért felelős csillagmaradványok szülőobjektumai a korai Világegyetemben születtek, ahol a fémtartalom még jóval a Napé alatt volt (vö. Santoliquido et al. 2021). Az alacsonyabb fémességű csillagok is elérhetik az Eddington-határt, bár nagyobb tömegeknél (Sanyal et al. 2015, 2017). Azonban mivel a nagy tömegű csillagok fejlődéséről alacsonyabb fémtartalomnál még kevesebb ismeretünk van (a Tejútrendszeren kívüli nagy tömegű csillagok statisztikailag használható mintáinak

megszerzése hatalmas kihívás, vö. Garcia et al. 2021), a viselkedésüket modellezni csak még nagyobb pontatlanságok árán lehetséges (Szécsi et al. 2015; Szécsi 2016; Kubátová et al. 2019; Sander & Vink 2020).

A közeljövőben építendő megfigyelő létesítmények, valamint a 3D és a hidrodinamikai szimulációk továbbfejlesztései segíthetnek abban, hogy a jövőben még többet tudjunk meg a nagy tömegű csillagokról és modellezésükről. Addig is azonban arra buzdítjuk a szélesebb kutatói közösséget, hogy bánjon óvatosan az 1D csillagmodellekkel, főleg 40 naptömeg fölött. Az lenne az ideális, ha minden ilyen modellt bemenetként felhasználó kutatás nemcsak egyetlen egy modellcsaládot választana ki használatra, hanem többet is kipróbálna, és összehasonlítaná őket. Az eredményeket pedig a csillagfejlődéssel kapcsolatos bizonytalanságok szempontjából is érdemes lehet tesztelni. Manapság már rendelkezésre állnak olyan gyors és hatékony munkára kifejlesztett programok, mint a METISSE (Agrawal et al. 2020) vagy a SEVN (Spera et al. 2019), melyekkel ez a feladat megvalósíthatóvá válhat.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást részben a lengyel Nemzeti Tudományos Központ (NCN) finanszírozta az OPUS 2021/41/B/ST9/00757 pályázati számon. A nyílt hozzáférés céljából a szerző CC-BY nyilvános szerzői jogi licencet alkalmazott bármely szerző által elfogatott kézirat (AAM) verzióra. A szerzőt az Alexander von Humboldt Alapítvány támogatta, és köszönetet mond Poojan Agrawalnak, Stefanie Walch-Gassnernek és Simon Stevensonnak a kutatással kapcsolatos hasznos információkért.

Irodalom

- Agrawal, P., Hurley, J., Stevenson, S., Szécsi, D., & Flynn, C. (2020): MNRAS, 497, 4549.
- Agrawal, P., Szécsi, D., Stevenson, S., Eldridge, J. J., & Hurley, J. (2022): MNRAS, 512, 5717.
- Alongi, M., Bertelli, G., Bressan, A., et al. (1993): A&AS, 97, 851.
- Björklund, R., Sundqvist, J. O., Puls, J., & Najarro, F. (2021): A&A, 648, A36.
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., et al. (2012): MNRAS, 427, 127.
- Brott, I., de Mink, S. E., Cantiello, M., et al. (2011a): A&A, 530, A115.
- Brott, I., Evans, C. J., Hunter, I., et al. 2011b, A&A, 530, A116.
- Cantiello, M., Langer, N., Brott, I., et al. (2009): A&A, 499, 279.
- Castro, N., Fossati, L., Langer, N., et al. (2014): A&A, 570, L13.
- Castro, N., Oey, M. S., Fossati, L., & Langer, N. (2018): ApJ, 868, 57.
- Chen, Y., Bressan, A., Girardi, L., et al. (2015): MNRAS, 452, 1068.
- Choi, J., Dotter, A., Conroy, C., et al. (2016): ApJ, 823, 102.
- Costa, G., Girardi, L., Bressan, A., et al. (2019): MNRAS, 485, 4641.
- de Jager, C., Nieuwenhuijzen, H., & van der Hucht, K. A. (1988): A&AS, 72, 259.
- de Mink, S. E., Cantiello, M., Langer, N., et al. (2009): A&A, 497, 243.
- Eggenberger, P., Meynet, G., Maeder, A., et al. (2008): Ap&SS, 316, 43.
- Eggleton, P. P. (1973): MNRAS, 163, 279.
- Ekström, S., Georgy, C., Eggenberger, P., et al. (2012): A&A, 537, A146.
- Eldridge, J. J., Stanway, E. R., Xiao, L., et al. (2017): PASA, 34, e058.

- Garcia, M., Evans, C. J., Bestenlehner, J. M., et al. (2021): *Experimental Astronomy*.
- Gatto, A., Walch, S., Naab, T., et al. (2017): *MNRAS*, 466, 1903.
- Gilkis, A., Shenar, T., Ramachandran, V., et al. (2021): *MNRAS*.
- Grafener, G. & Hamann, W.-R. (2008): *A&A*, 482, 945.
- Grafener, G., Owocki, S. P., & Vink, J. S. (2012): *A&A*, 538, A40.
- Grassitelli, L., Fossati, L., Langer, N., et al. (2016): *A&A*, 593, A14.
- Groh, J. H., Farrell, E. J., Meynet, G., et al. (2020): *ApJ*, 900, 98.
- Hamann, W.-R., Koesterke, L., & Wessolowski, U. (1995): *A&A*, 299, 151.
- Heger, A., Langer, N., & Woosley, S. E. (2000): *ApJ*, 528, 368.
- Heggie, D. & Hut, P. (2003): *The Gravitational Million-Body Problem: A Multidisciplinary Approach to Star Cluster Dynamics* (Cambridge University Press).
- Humphreys, R. M. & Davidson, K. (1979): *ApJ*, 232, 409.
- Jiang, Y.-F., Cantiello, M., Bildsten, L., Quataert, E., & Blaes, O. (2015): *ApJ*, 813, 74.
- Jones, S., Hirschi, R., Pignatari, M., et al. (2015): *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 447, 3115.
- Kippenhahn, R. & Weigert, A. (1990): *Stellar Structure and Evolution* (Springer).
- Klencki, J., Nelemans, G., Istrate, A. G., & Pols, O. (2020): *A&A*, 638, A55.
- Kubátová, B., Szécsi, D., Sander, A. A. C., et al. (2019): *A&A*, 623, A8.
- Lamers, H. & Cassinelli, J. (1999): *Introduction to Stellar Winds* (Cambridge University Press).
- Langer, N. (1997): *Luminous Blue Variables: Massive Stars in Transition*. ASP Conference Series. A. Nota, H. Lamers (eds.), 120, 83.
- Langer, N. (2012): *ARA&A*, 50, 107.
- Laplace, E., Justham, S., Renzo, M., et al. (2021): *A&A*, 656, A58.
- Levesque, E. M. (2017): *Astrophysics of Red Supergiants*, 2514–3433. (IOP Publishing).
- Maeder, A. & Meynet, G. (2000): *ARA&A*, 38, 143.
- Maeder, A. & Meynet, G. (2005): *A&A*, 440, 1041.
- Marchant, P., Langer, N., Podsiadlowski, P., Tauris, T. M., & Moriya, T. J. (2016): *Astronomy & Astrophysics*, 588, A50.
- Martins, F. & Palacios, A. (2013): *A&A*, 560, A16.
- McClelland, L. A. S. & Eldridge, J. J. (2016): *MNRAS*, 459, 1505.
- Menon, A., Langer, N., de Mink, S. E., et al. (2021): *MNRAS*.
- Moe, M. & Di Stefano, R. (2017): *ApJS*, (230): 15.
- Nieuwenhuijzen, H. & de Jager, C. (1990): *A&A*, 231, 134.
- Nugis, T. & Lamers, H. (2000): *A&A*, 360, 227.
- Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., et al. (2011): *ApJS*, 192, 3.
- Paxton, B., Cantiello, M., Arras, P., et al. (2013): *ApJS*, 208, 4.
- Petit, V., Keszthelyi, Z., MacInnis, R., et al. (2017): *MNRAS*, 466, 1052.
- Puls, J., Vink, J., & Najarro, F. (2008): *A&A Rev.*, 16, 209.
- Ramírez-Agudelo, O. H., Simón-Díaz, S., Sana, H., et al. (2013): *A&A*, 560, A29.
- Salpeter, E. (1955): *ApJ*, 121, 161.
- Sana, H., de Mink, S. E., de Koter, A., et al. (2012): *Science*, 337, 444.
- Sander, A. A. C. & Vink, J. S. (2020): *MNRAS*, 499, 873.
- Santoliquido, F., Mapelli, M., Giacobbo, N., Bouffanais, Y., & Artale, M. C. (2021): *MNRAS*.
- Sanyal, D., Grassitelli, L., Langer, N., & Bestenlehner, J. M. (2015): *A&A*, 580, A20.
- Sanyal, D., Langer, N., Szécsi, D., Yoon, S.-C., & Grassitelli, L. (2017): *A&A*, 597, A71.
- Sarkisyan, A., Sholukhova, O., Fabrika, S., et al. (2020): *MNRAS*, 497, 687.
- Schneider, F. R. N., Langer, N., de Koter, A., et al. (2014): *A&A*, 570, A66.
- Schootemeijer, A., Langer, N., Grin, N. J., & Wang, C. (2019): *A&A*, 625, A132.
- Shenar, T., Gilkis, A., Vink, J. S., Sana, H., & Sander, A. A. C. (2020): *A&A*, 634, A79.
- Smith, N. (2014): *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 52, 487.
- Smith, N. & Tombleson, R. (2015): *MNRAS*, 447, 598.
- Spera, M., Mapelli, M., Giacobbo, N., et al. (2019): *MNRAS*, 485, 889.
- Stancliffe, R. J. (2006): *MNRAS*, 370, 1817.
- Szécsi, D. (2016): PhD thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bonn.
- Szécsi, D., Agrawal, P., Wünsch, R., & Langer, N. (2022): *A&A*, 658, A125.
- Szécsi, D., Langer, N., Yoon, S.-C., et al. (2015): *A&A*, 581, A15.
- Takahashi, K. & Langer, N. (2021): *A&A*, 646, A19.
- Surlan, B., Hamann, W.-R., Aret, A., et al. (2013): *A&A*, 559, A130.
- Vigna-Gómez, A., Neijssel, C. J., Stevenson, S., et al. (2018): *MNRAS*, 481, 4009.
- Vink, J., de Koter, A., & Lamers, H. (2000): *A&A*, 362, 295.
- Vink, J., de Koter, A., & Lamers, H. (2001): *A&A*, 369, 574.
- Vink, J., Muijres, L. E., Anthonisse, B., et al. (2011): *A&A*, 531, A132.
- Walder, R., Folini, D., & Meynet, G. (2012): *Space Sci. Rev.*, 166, 145.
- Weinberger, R., Springel, V., & Pakmor, R. (2020): *ApJS*, 248, 32.
- Yoon, S.-C., Langer, N., & Norman, C. (2006): *A&A*, 460, 199.

AZ EGRÍ FŐEGYHÁZMEGYEI KÖNYVTÁR CSILLAGÁSZATI KÖNYVEI

Ujfaludi László

Eszterházy Károly Katolikus Egyetem, Eger

E-mail: ujfaludi.laszlo@gmail.com

Kulturális háttér

A 18. század a francia felvilágosodás kora – pontosabban az 1740–1789 közötti időszakot szokás így nevezni. A kor szellemiségének legfőbb jellemvonása, hogy a középkori gondolkodást felváltja a „modern”, ami erősen leegyszerűsítve annyit jelent, hogy a természeti és társadalmi folyamatok értelmezésekor elutasít minden természetfölötti magyarázatot. Az *Enciklopédia* bevezetőjében d’Alembert a tapasztalati tudomány kizárólagos jogát hirdeti. Holbach pedig *A természet rendszere* című nagy

hatású művében lényegében a modern materializmus alapelveit rakja le; a természet minden folyamatát (az élet folyamatait is) a mechanika törvényei alapján magyarázza.

A gondolkodásnak ez a forradalmi fordulata a gyakorlati tudományra (pl. a megfigyelő csillagászatra) nem gyakorolt észrevehető hatást, az elméletekre viszont annál inkább. Newton még mélyen vallásos meggyőződéssel alkotta műveit, Kant és különösen Laplace kozmogóniai elmélete már egyértelműen materialista meggyőződést tükröz.

A korábbi, „forradalmi” korszak után, amelyet Koper-nikusz, Galilei, Kepler és Newton életműve fémjelez, a 18. század nyugodtabb időszak: az adatgyűjtés, a felhalmozás kora, ami egyúttal a korábbi jelentős felismerések gyakorlati alkalmazását is jelentette. Nyilvánvaló azonban, hogy a kétféle időszak szorosan összefügg egymással. A „forradalom” az előző időszak tudásanyagára épül. Newton mondja egy helyen: „azért láttam messzebbre másoknál, mert óriások vállán álltam”.

(Hasonló korszakváltás történt a modern kori természettudományban is. A 20. század első felének modern fizikai forradalmát, a kvantumfizika és a relativitáselmélet korszakalkotó, új felfedezéseit az adatgyűjtés és az alkalmazások széles körű kiterjesztésének napjainkig tartó időszaka követte.)

A megfigyelő csillagászat eredményei

A 18. sz. egyik legjelentősebb csillagásza, Edmund Halley (1656–1742) egyik nagylelkű gesztusa volt Newton *Principiájának* kiadása; a mű 1687-ben az ő anyagi támogatásával jelent meg. Halley csillagászati obszervatóriumot alapított Szt. Ilona szigetén (Napóleon későbbi száműzetésének helyszínén), ahol a déli félteke csillagait foglalta katalógusba, és térképet is készített a déli csillagképekről. Ugyanitt elsőként megfigyelte a csillagok ún. sajátmozgását. Már ekkor felvetette, hogy a Vénusz-átvonulást fel lehetne használni a Naprendszer méreteinek meghatározására. Newton mozgástörvényeit Halley az égitestek mozgásának elemzésére alkalmazta. Ennek alapján számította ki az 1682. évi üstökös pályáját, és megjósolta annak 1758. évi visszatérését. Az üstökös valóban visszatért 1758-ban; Halley akkor már nem élt, de az üstököst az ő emlékére Halley-üstökösnek nevezik. (Legutóbbi visszatérése 1986-ban volt.)

A csillagászat-történet egyik legnagyobb adatgyűjtőjének nevezett Nicolas de Lacaille abbé (1713–1762) hosszú ideig a Jóreménység-fokán végzett megfigyeléseket, ahol több mint 10 ezer csillag katalógusát állította össze (ez volt az addigi legnagyobb csillagkatalógus). Hajóútjain a tengeren történő helymeghatározással foglalkozott. Napfogyatkozás-táblázatot is készített, ebben évszázadokra előre jelezte a várható napfogyatkozásokat.

A század nagy vállalkozása a Vénusz-átvonulás megfigyelése volt. A Vénusz bolygó napkorong előtti átvonulásának pontos észlelése lehetővé teszi a Nap–Föld-távolság meghatározását. Kepler 3. törvénye összefüggést ad a bolygók keringési ideje és a Naptól mért közepes távolságuk között, de ez csak arányszámokat jelent, a pontos távolságokat nem adja meg. A Nap–Föld-távolság ismerete és a Kepler-törvény alapján viszont már valamennyi bolygó távolságát ki lehetett számítani, vagyis ismertté váltak a Naprendszer valódi méretei. A Vénusz átvonulása a napkorong előtt azonban ritka esemény: évszázadonként kétszer következik be, amikor is az egymást követő két alkalom között 8 év telik el.

Szt. Ilona-szigeti obszervatóriumából Halley már 1677-ben megfigyelte a Vénusz-átvonulást, de nem volt elégedett a megfigyelés és a mérés pontosságával, ezért már akkor javasolta, hogy a következő átvonulást 1761-ben nagyobb felkészültséggel, pontosabb mérésekkel végezzék el.

1761-ben ennek érdekében jött létre az első nagy nemzetközi tudományos együttműködés. Számos kutatócsoport indult a világ különböző tájaira, hogy a pontos mérést elvégezzék. A nemzetközi összefogás sem hozott azonban kielégítő eredményt. Ezért már ekkor elkezdték a felkészülést a következő, 1769. évi Vénusz-átvonulás megfigyelésére.

Jerome Lalande (1732–1807), korának egyik legjelentősebb csillagásza 1764-ben nagy érdeklődést keltő tanulmányt írt a következő, 1769. évi Vénusz-átvonulás megfigyelésének lehetőségeiről. Nem kis mértékben ennek köszönhető, hogy 1769-ben újabb nagy nemzetközi együttműködés jött létre a cél érdekében.

Hell Miksa (1720–1792) és Sajnovics János (1738–1795) magyar csillagászok szintén részt vettek a nemzetközi együttműködésben. VII. Keresztély (Christian) dán király támogatásával Lappföldről, Vardø (Vardö) szigetről figyelték meg a Vénusz-átvonulást és végeztek igen pontos méréseket 1769. június 3-án. Más kutatócsoportok Kanadából, Szentpétervárról, New England-ből (jelenleg: USA) figyelték meg a nevezetes eseményt. Cook kapitány Tahiti szigetéről végzett megfigyelést, majd onnan továbbhajózva első európaiként ismerte meg (fedezte fel) Ausztráliát és Új-Zélandot. Hell Miksa mérései igen pontos értéket adtak a Nap–Föld-távolságra (150 millió km), és ennek nyomán nemzetközileg elismert csillagász lett.

Hell a következő években számos magyar csillagászati obszervatóriumot alapított, és ezzel úttörő jelentőségű lépést tett a magyarországi csillagászat fejlesztésében. Az egri Líceum tornyában lévő Specula csillagászati obszervatórium Eszterházy Károly püspök támogatásával szintén Hell Miksa tervei alapján létesült.

William Herschel (1738–1822) szász udvari muzsikusként költözött át Angliába, és ott vált nemzetközi híré csillagásszá. Londonban óriástávcsöveket épített, ezekkel végezte megfigyeléseit. Nem pontszerű fényforrásokat („ködöket”) keresett az égen, és katalógusba is foglalta az általa talált ködöket. Ugyancsak katalogizálta a saját felfedezésű kettőscsillagokat is. 1781-ben felfedezte az Uránusz bolygót (az első olyan bolygó, amely szabad szemmel nem látható). Később felfedezte az Uránusz és a Szaturnusz több holdját. Felfedezte a láthatatlan infravörös (hő-) sugárzást, és ezzel megtette az első lépést a teljes elektromágneses spektrum megismerése felé.

Charles Messier (1730–1817) híres katalógusának utolsó kiadása 1784-ben jelent meg, benne a mai terminológia szerint 103 mélyégobjektum leírásával és rajzával. Ezek között vannak nyílthalmazok, gömbthalmazok, diffúz ködök, planetáris ködök, galaxisok, szupernóva-

maradványok. A Messier-katalógus máig a referenciaművek közé tartozik.

A 19. század hajnalán, 1801. január 1-jén Giuseppe Piazzi (1746–1826) felfedezte a Ceres kisbolygót. A Ceres a legelső felfedezett égitest a Mars és a Jupiter közötti tartományban. A bolygók Naptól való távolságát leíró, korábban felfedezett empirikus összefüggés, az ún. Titius–Bode-szabály alapján már korábban úgy vélték, hogy a Mars és a Jupiter között léteznie kell egy bolygónak. Piazzi felfedezése nyomán intenzív kutatás indult a hiányzó bolygó felkutatására. Ma már tudjuk, hogy nagybolygó nincs azon a területen, de nagyszámú kisbolygó és más, kisebb égitest kering a Mars és a Jupiter közötti ún. aszteroidaövezetben.

Newton művének utóélete, elméletek a világegyetem keletkezéséről

François Voltaire (1694–1778) 1726-ban egy évet kényszerű száműzetésben Londonban töltött, ezalatt megismerkedett Newton eszméivel. Amikor hazatért Franciaországba, átírta Newton fő művét a *Principiát* franciára, sokkal olvashatósabb formába, mint az eredeti (Newton latinul írta művét, és stílusa igen nehézkes volt). Franciaországban és a kontinensen ez a Voltaire-féle (1738-as kiadású) változat terjedt el.

Immanuel Kant (1724–1804) 1755-ben kiadta kozmogóniai (a világegyetem keletkezéséről szóló) tanulmányát, amely a Newton-féle gravitációs elmélet alapján írja le az univerzum fejlődését. Az anyag ősi, kaotikus eloszlásából kiindulva feltételezi, hogy a gravitációs vonzóerő hatására égitestek álltak össze, az egymással történő ütközések az anyag szétszóródását eredményezték, ezzel új centrumok jöttek létre, amelyek a gravitáció hatására tovább növekedtek, végül így jött létre az univerzum egésze, amely a fenti két hatás folytán állandó változásoknak van kitéve.

Pierre Simon Laplace (1749–1827) – aki kiváló matematikus volt – 1796-ban megjelent művében a Newton-elmélet alapján pontos matematikai módszerek alkalmazásával alátámasztva ismerteti kozmogóniai elméletét. Kanttól eltérően Laplace a Naprendszerre szorítkozik: egy ős-Napból indul ki, amely gyors forgása következtében egyenlítői síkjában anyagot vet ki a környező térbe, és ebből keletkeztek a bolygók. A kiindulási pont különbözősége ellenére mindketten természetes folyamatként értelmezték az égitestek képződését. Kant még óvatos volt ebben a tekintetben, Laplace azonban nyíltan materialista elveket vallott.

Kant és Laplace elméletét a modern kori tudomány több szempontból módosította, mégis ezt tekintik a kozmológiai elméletek első sikeres megnyilvánulásának. Laplace életművében bukkannak fel először a fekete lyukak. Egy 1789-ben megjelent tanulmányában megjósolta a fekete lyukak, azaz olyan égitestek létezését, amelyeknek akkora a gravitációs vonzása, hogy már a fény sem tud belőlük kilépni.

Az Egri Főegyházmegyei Könyvtár keletkezése, rövid története

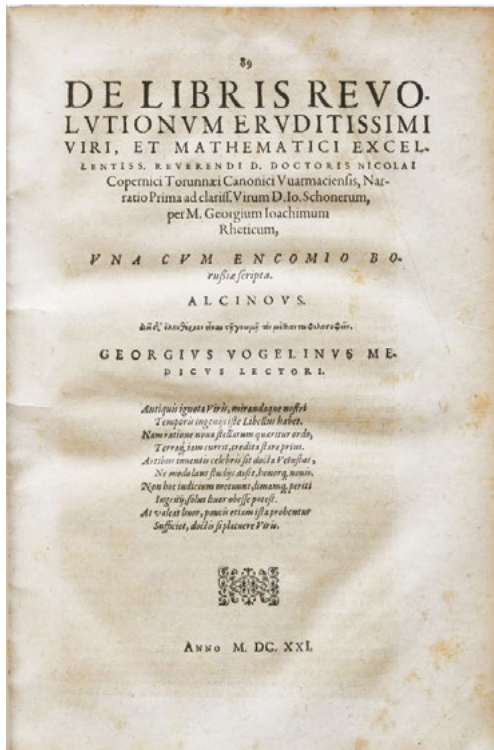
Eszterházy Károly (1725–1799) püspöki székét 1762. június 29-én foglalta el Egerben. A Rómában tanult, széles látókörű főpap ekkor fejlesztette tovább elődje, Barkóczy Ferenc egri egyetem alapítására vonatkozó elképzelését oly módon, hogy az egyetem épületében (jelenleg Líceum) helyet kaphasson – egyebek mellett – egy könyvtár és egy csillagásztorony is. A püspök négy fakultásos egyetem alapítását tervezte: teológiai, jogtudományi, bölcséleti és orvostudományi karokkal. A könyvtár elsősorban e tudományok oktatóit és hallgatóit volt hivatott kiszolgálni. Az egri universitas nem kapta meg a bécsi udvar jóváhagyását, ettől függetlenül azonban a püspök élete végéig feltétel nélküli támogatásban részesítette a Líceumot és a hozzá tartozó bibliotékát.

Eszterházy tudatos terv alapján alakította ki a könyvtár állományát, a gyűjtést a tervezett egyetemi karoknak megfelelő tudományokra irányítva. Könyvgyűjteményét részben külföldről beszerezett, részben Magyarországon gyűjtött művek teszik ki. A hazai gyűjtés egyik csoportja a korábban létrejött, később pedig a püspökivel „egyebeolvasztott” könyvtárak anyagai, a másik az egyházmegye plébánosainak adományai és hagyatékaik voltak. Megemlíthető Batthyány Ignác egri prépost-kanonok szerepe a gyűjtésben, aki lelkesen segítette püspökét és barátját a könyvek felkutatásában az egyházmegye területén. Számos felbecsülhetetlen értékű kéziratot, ősnymtatványt, középkori magyar művet vásárolt. A magyarországi gyűjtés harmadik csoportjába azok a könyvek tartoznak, amelyeket Büky József könyvtáros az 1780-as években pesti és pozsonyi könyvkereskedőtől vásárolt, akik a külföldiekhez képest olcsóbban, akár cserekönyvekért is odaadták könyveiket.

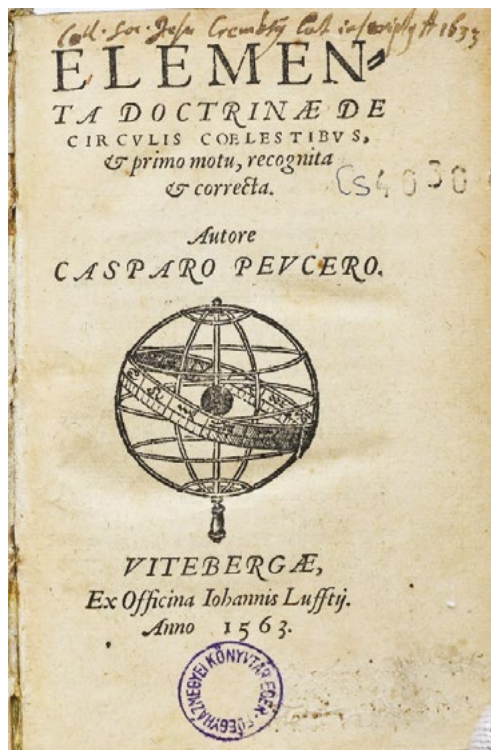
A könyvtárnak egy olyan külön gyűjteménye is van, amelyik Eszterházy püspök idejében, de már a könyvtár megnyitása előtt is létezett, ez az itt bemutatandó csillagászati gyűjtemény. 1777-ben, a könyvtár megnyitása előtt már 116 kötet volt található a csillagda különtermében, ez a szám 1799-ben (Eszterházy halála évében) elérte a 350 kötetet. Sajnos a csillagászati munka még a püspök életében megszűnt, pedig a feltételek adottak voltak hozzá.

Szemelvények a könyvtár jelentősebb csillagászati könyveiből

A könyvtárban nincs meg Kopernikusz főműve, a *Revolutionibus*, mivel az még Eszterházy püspöksége idején is a tiltott könyvek listáján volt. Megvan viszont Vogelinus könyve, a *De Libris Revolutionum Eruditissimi Viri...* című, 1621-ben kiadott mű, amelynek már a címdala büszkén hirdeti, hogy megtalálható benne a toruñi Kopernikusz rendszerének ismertetése (1. ábra).



1. ábra. Vogelinus könyvének címlapja



2. ábra. Peucero könyvének címlapja

A könyv ismerteti Kepler planetáriumtervét is, amely az akkori ismeretek szerinti 6 bolygót mutatja be. (A planetárium ugyanis a planéta = bolygó szóból származik, és eredetileg a bolygók mozgásának bemutatására szolgáló eszköz volt.)

Casparo Peucero Wittenbergben 1563-ban kiadott könyve számos gyakorlati-csillagászati magyarázatot

tartja a teljes és a részleges napfogyatkozás földi szemlélő számára érzékelhető látványát (4. ábra). A Föld gömb alakját bemutató ábra tanulságos lehetne a modern kori laposföld-hívők számára is (5. ábra).

Keplernek két könyve található a könyvtárban. A *Mysterium cosmographicum* pályája elején keletkezett, itt még nyoma sincs a későbbi jelentős eredményeknek,



3. ábra. A Nap és az állatövi csillagképek



4. ábra. A teljes és részleges napfogyatkozás



5. ábra. A Föld gömb alakját bemutató ábra Casparo Peucero könyvében

és ábrát tartalmaz. A címlapon (2. ábra) az égi koordináták és az állatövi csillagképek láthatók.

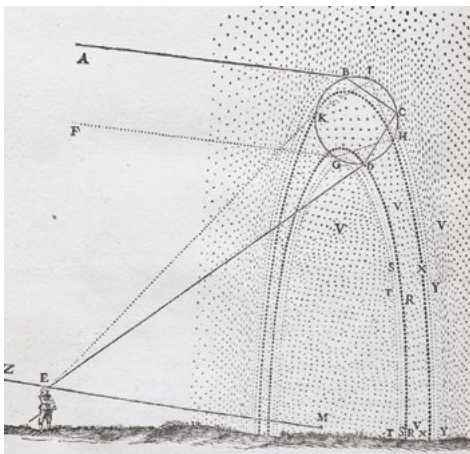
Az asztrológiában használatos ábra szemléletesen mutatja az állatövi csillagképek és a Nap kapcsolatát (3. ábra): itt éppen a Kos van „a Nap házában”. A Nap papírmutatója körbe forgatható, és tetszőleges csillagképpel kapcsolatba hozható.

A napfogyatkozást bemutató ábra is igen szemléletes Peucero könyvében: egyszerűen, de érthetően mu-

tatja a teljes és a részleges napfogyatkozás földi szemlélő számára érzékelhető látványát (4. ábra). A Föld gömb alakját bemutató ábra tanulságos lehetne a modern kori laposföld-hívők számára is (5. ábra).

Keplernek két könyve található a könyvtárban. A *Mysterium cosmographicum* pályája elején keletkezett, itt még nyoma sincs a későbbi jelentős eredményeknek, sok benne az asztrológiai magyarázat. (A csillagjósolás később is jelentős szerepet töltött be életében – főleg pénzszerzési célból, amit tudós létére szégyenletesnek tartott, amint ezt Madách Az ember tragédiájának prágai színében oly költői módon kifejezi.) Az *Astronomia nova*, amelyben az első két Kepler-törvény megjelent, sajnos nincs meg a könyvtárban, de megvan a *Harmonices Mundi...*, amelyben harmadik törvénye jelent meg. Az 1622-ben Frankfurtban megjelent könyv alap gondolata a bolygók pályájának harmonikus elrendeződése, amelynek analogonját részben Platón ideális geometriai alakzataiban, részben zenei harmóniákban vélte felfedezni.

Descartes *Principia Philosophiae* című, egyik legjelentősebb könyve a nagy filozófus természettudományos munkáinak összefoglalása. Belső címlapja munkájának

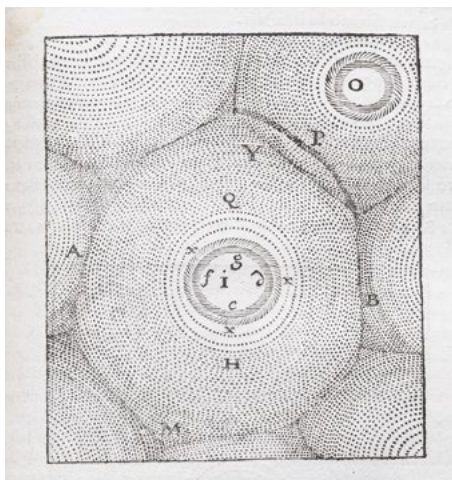


6. ábra. A szivárvány létrejötte Descartes könyvében

három fontos fejezetét jelzi: a Methodo (módszer) fő gondolata az analízis módszere, amelyet ő vezetett be az európai filozófiába; a Dioptrice (fénytörés) optikai munkásságát foglalja össze, a Meteora (meteorológia) pedig korai előfutára ennek a jóval később kiterelvényesedett tudományágnak.

A Dioptrice (fénytörés) című fejezet tartalmazza szinte az összes jelenlegi ismeretet a témával kapcsolatban: a ma Snellius–Descartes-törvényként ismert törvényt, a visszaverődés, a lencsék képalkotási törvényeit, sőt még a szivárvány és a kettős szivárvány (6. ábra) kialakulásának pontos magyarázatát is, amelyet egyébként legtöbbször Newton eredményének szoktak tekinteni.

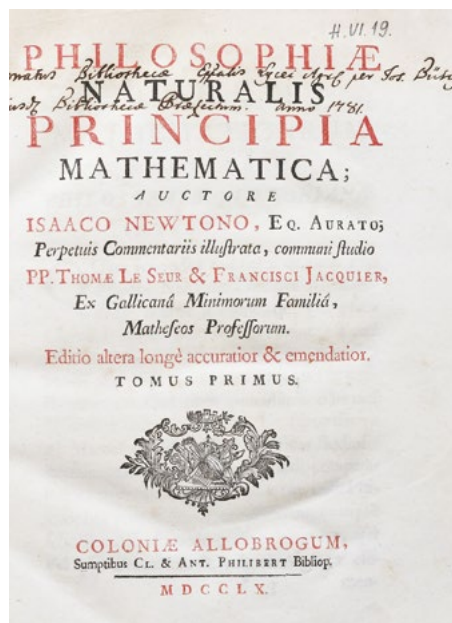
A Dioptrice című fejezetben tárgyalja a híressé vált örvényelméletet, amely hosszú ideig az egyetlen elképzelés volt az égitestek mozgásának értelmezésére. Descartes hipotézise szerint az égitesteket az egész teret betöltő finom, láthatatlan, súrlódásmentes anyagban, az éterben fellépő örvények tartják forgó, keringő mozgásban. A napok egy-egy nagyobb örvény centrumában állva tengelyforgást végezve kényszerítik bolygóikat a maguk körüli keringésre, a bolygók viszont (miközben saját tengelyük körül forognak) holdjaikat tartják kerítésben.



7. ábra. Az örvényelmélet egyik szemléltető ábrája

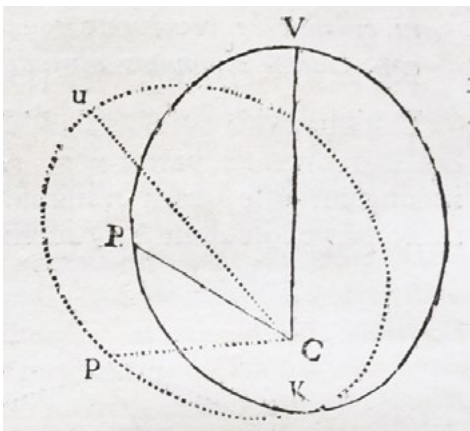
A könyv számos magyarázó ábrája közül egy bolygóegyüttes látható közepén a Nappal (7. ábra), ahol az égitestek örvényei az ábra síkjára merőleges tengely körül forognak. A gravitációs hatásokért – Descartes szerint – az örvény „szívóhatása” a felelős. Az örvényelmélet, ahogyan már Descartes is észrevette, nem egyeztethető össze a Kepler-törvényekkel. A bolygók ellipszispályáira vonatkozó törvény nem illeszkedik az örvényelmélet gondolatmenetébe, mivel eszerint az eredetileg henger alakúnak gondolt örvények és a bennük lévő égitestek körkörös mozgást végeznek. Az örvényelmélet – hiányosságai ellenére – hosszú ideig Newton gravitációs elméletének alternatívája maradt, mivel nehezen fogadták el Newton „távolba ható erő” fogalmát, ráadásul a gravitációelmélet nem tudott magyarázatot adni a bolygók forgására. Az „éter” fogalom pedig – mint ismeretes – csak a relativitáselmélet révén tűnt el a fizika fogalomtárából.

Newton főművének (*Philosophiae naturalis principia mathematica*, vagy ahogyan röviden hivatkoznak rá: *Principia*) egy 1760-as, kommentárokkal bővített, háromkötetes változata található a könyvtárban (az I. kötet címlapja a 8. ábrán látható).



8. ábra. A Principia 1760. évi kiadásának címlapja

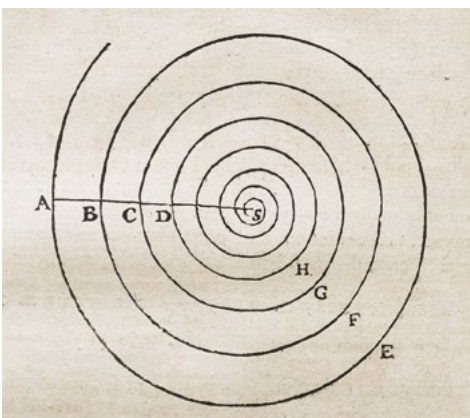
A kötetben a bevezető szövegek és Newton életrajza után az eredeti newtoni szöveg 4. oldalán tárgyalja a centripetális erő fogalmát. Ott található egy rövid magyarázat arról, hogy ha egy ágyúgolyót egy hegytetőről egyre nagyobb sebességgel lövünk ki, akkor egy bizonyos sebességnél (ma I. kozmikus sebességnek nevezzük, és a műholdakkal kapcsolatban tárgyaljuk a fizikórán) az ágyúgolyó már nem esik le, hanem kering a Föld körül. Newton nyilvánvalóan nem tulajdonított ennek a magyarázatnak különösebb jelentőséget, így ehhez a szakaszhoz nem közölt ábrát. Az ábrák későbbi kommentárokból jelentek meg.



9. ábra. A bolygópályák perihéliumpontja precessziójának ábrája a *Principiában*

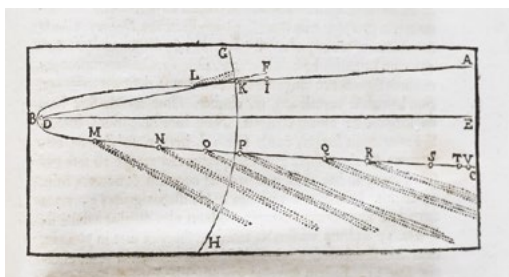
A bolygómozgások fejezetében az ellipszispályák precessziójának (9. ábra) magyarázata is megjelenik. (A Merkúr perihéliumprecessziója már a newtoni gravitációelmélettel is értelmezhető, a pontos értéket azonban csak a relativisztikus hatások figyelembevételével, a 20. században lehetett – elméleti alapon – meghatározni.)

Már Newtonnál megjelenik az égitestek erős gravitációs térben történő spirális pályájának képe, az egyik magyarázat és kép (10. ábra) „égitest keringése sűrűlő közegben” címszó alatt.



10. ábra. Égitest keringése sűrűlő közegben

Az üstökösök pályájáról szóló fejezetben található ábra a csóva helyzetét mutatja – mindig (közelítőleg) a Nappal ellentétes irányban (11. ábra).



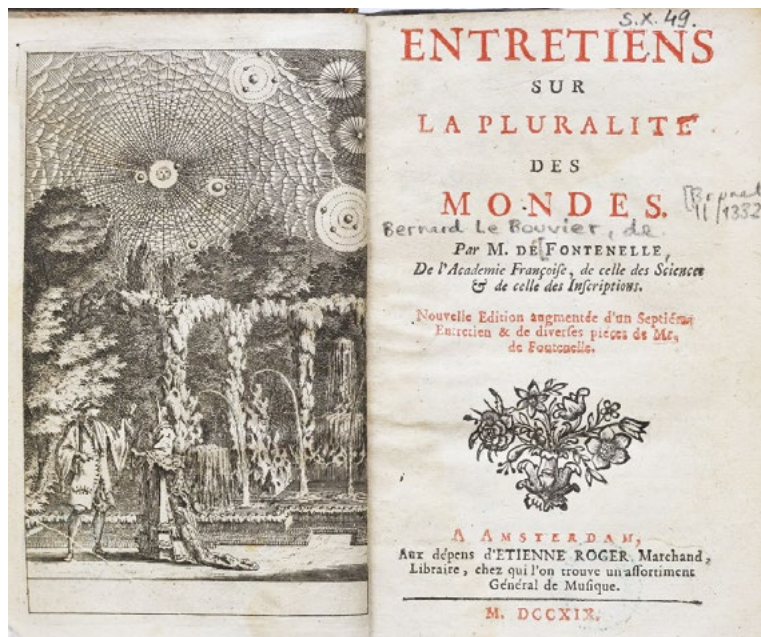
11. ábra. Az üstökös pályája és csóvája

Eszterházy gondot fordított arra, hogy tudomány-népszerűsítő könyvek is legyenek könyvtárában. Bernard Fontenelle *Entretiens sur la pluralité des mondes* című, könyve (magyarul *Beszélgetések a világok sokaságáról* címmel 1979-ben jelent meg), korának bestsellere volt, először 1686-ban jelent meg, majd szerzője hosszú élete alatt (1657–1757) 28 kiadást ért meg. A könyv a szerző és egy „márkinő” hat estén át folytatott beszélgetését írja le, az akkori hiedelemnek megfelelően, a Naprendszer hat bolygóján élő lények és azok életvitelének elképzelésével. A könyv 1719-es amszterdami kiadásának címlapján (12. ábra) a beszélgető partnerek és a Naprendszer stilizált képe látható, az akkori ismeretek szerinti hat bolygóval. Fontenelle, aki a francia akadémia főtitkára volt több mint 50 évig, jártas volt a természettudományokban is. A beszélgetések első estéjén a természettudomány módszereit így írja le a „márkiné” számára: „...a természet leginkább egy operai előadáshoz hasonlít. Arról a helyről, ahol az operában ül, nem egészen olyanok látja az előadást, mint amilyen valójában, ugyanis a díszleteket, a gépeket úgy helyezték el, hogy messziről kellemes hatást keltsenek, és elrejtik szeme elől mindazokat a kerekeket és ellensúlyokat, melyek a mozgást előidézik. [...] Valószínűleg csak a földszinten meghúzódó gépésznek tűnne fel egy furcsán sikerült repülés, és bizonyára csak ő tudná pontosan, hogyan is ment végbe. Nos, ez a gépész nagyon hasonlít a filozófusokra. De a filozófusoknak [mai szóhasználatban: természettudósoknak] nehezebb a dolguk, mert a természet gépezeteiben a kötelek teljesen láthatatlanok.”

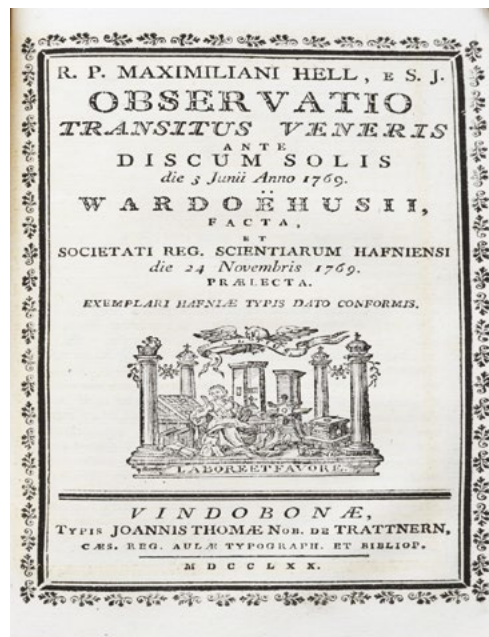
Meglepően modern felfogás ez a tudomány módszeréről. Még meglepőbb, ha összehasonlítjuk Hermann Ludwig Helmholtz 1853-ban tartott előadásának részletével, amelyben Goethe *Farbenlehre* (Színtan) című művét méltatja és egyben bírálja is. Goethe ebben a megfigyelés és a kísérletezés méltatása mellett elutasítja a mérés és a kvantitatív értékelés fontosságát (az előadás szövegét Eötvös Loránd fordította magyarra):

„A költészetben nincs másra gondja (ti. Goethének), mint hogy „a szép látszatot” keresse, mely az eszményt szemlélhetővé teszi; de nem törődik azzal, miként jó létre e látszat. Így a természetet is bizonyos szellemi tartalom érzékített kifejezésének tartja. A fizikus ellenben az emeltyűket, köteleket és csigákat keresi, melyek a színfalak mögött működnek. A gépezet látása, az igaz zavarja a szép látszatot. Ezért szeretné a költő a köteleket és csigákat eltagadni, pedáns elmék szüleményeinek nyilatkoztatni, s a dolgot úgy előtűntetni, mintha a színfalak maguktól változnának.”

A szövegrész közepe kísértetiesen hasonlít Fontenelle már idézett, több mint másfél századdal korábban megjelent szövegéhez. Mindkét idézet szemléletes jellemzése a fizika (és általában a természettudomány) módszerének, az utóbbi ráadásul a művész és a természetkutató gondolkodásmódjának különbségére is rávilágít.



12. ábra. A Beszélgetések a világok sokaságáról címoldala



13. ábra. Hell Miksa könyvének címoldala



14. ábra. A tridenti zsinat mennyezetfreskójának részlete

16000 kötetet kínálhatott olvasóinak. Az épület első emeletén, impozáns teremben, Johann Lucas Kracker (1719–1779) tridenti zsinatot ábrázoló monumentális mennyezetfreskója alatt, faragott tölgyfa állványokon sorakoznak a 16., 17. és 18. század legmodernebb tudományos művei (14. ábra).

Eszterházy nem volt bibliofil könyvgyűjtő, aki a könyveket különleges szépségük, művészi kivitelük, ritkaságuk miatt gyűjti. Az egri püspök célja egy enciklopédikus jellegű egyetemi könyvtár létrehozása volt, amely korának legkeresettebb szakkönyveit tartalmazza az egyetemi oktatás elősegítésére. A beérkező könyvek összeírására, rendezésére Eszterházy püspök már 1777-ben könyvtárost nevezett ki. A többi főpapi könyvtártól eltérően az egri bibliotékához az alapításakor nem társultak egyéb gyűjtemények (pl. numizmatikai gyűjtemény, képtár).

Eszterházy Károly püspök magánkönyvtárát is a Líceum könyvtárára hagyta, így alakult ki a 18. század végére az ország egyik legnagyobb könyvgyűjteménye, amely 13 879 művet tartalmazott 20 293 kötetben.

Irodalom

- Antalóczi L. (1993): A kétszáz éves Egri Főegyházmegyei Könyvtár története (1793–1993). In: Antalóczi (szerk.): Kétszáz éves az Egri Főegyházmegyei Könyvtár 1793–1993. Emlékkönyv. Líceum Kiadó, Eger.
- Aspaas P., Kontler L. (2020): Maximilian Hell and the end of Jesuit Science in Enlightenment Europe. Brill (Leyden, Boston).
- Herrmann D. (1981): Az égbolt felfedezői. Gondolat Kiadó, Budapest.
- Surányi I. (2009): Az egri Főegyházmegyei Könyvtár könyvritkaságai. Líceum Kiadó, Eger.
- Whitney Ch. A. (1978): A Tejútrendszer felfedezése. Gondolat Kiadó, Budapest.

Hell Miksa a korábban már említett lappföldi Vénusz-megfigyeléseiről Bécsben 1770-ben adott ki könyvet. Ennek címl oldaláról (13. ábra) az is kiderül, hogy az expedíció a Hafniumban (ma Koppenhága) lévő Királyi Tudományos Társaság (valójában személy szerint VII. Keresztély dán király) támogatásával jött létre.

Vele utazó rendtársa, Sajnovics János a lappföldi emberekkel való kapcsolata során felismerte a magyar és a lapp nyelv hasonlóságát. A tapasztalatai alapján 1770-ben Nagyszombat kiadott könyve, a *Demonstratio idioma ungarorum et lapponum idem esse* a finnugor nyelvészet egyik alapköve.

Eszterházy Károly püspök 1793. december 28-án nyitotta meg könyvtárát az egri Líceum épületében. Az ország harmadik nyilvános könyvtára ekkor mintegy

NUMERIKUS MÓDSZEREK A KÖZÉPISKOLÁBAN? IGEN, LEHETSÉGES! EXOBOLYGÓK MOZGÁSÁNAK MODELLEZÉSE

Ollé Hajnalka^{1,*}, Kovács Tamás²

¹Magyar Tanítási Nyelvű Magángimnázium, Dunaszerdahely, Szlovákia

²ELTE Atomfizikai Tanszék, Budapest

*E-mail: olle.hajnalka@gmail.com

Bevezetés

Az igényes, tudományos gondolkodás megalapozását már a középiskolai oktatás során el kell kezdeni. Ennek egyik megkerülhetetlen pontja azon problémák elemzése, melyeknek a mai napig nem létezik egzakt analitikus megoldása. Ezeket a kérdéseket mintha egy kis titok lengené körül, így izgalmasabbak a diákok számára is, akik igénylik, hogy megismertessük őket olyan módszerekkel, melyeket segítségül hívhatnak egy-egy megoldásban. Bizonyos természeti jelenségek megismerése során gyakran találjuk magunkat olyan helyzetben, amikor a zárt alakú megoldás helyett közelítő módszereket kell alkalmaznunk. Ebben a cikkben egy ilyen esetet dolgozunk fel középiskolai fizikaóra keretein belül. A megvalósítás során figyelembe vesszük, hogy szükség lesz a gravitációról szóló általános ismeretekre, tehát olyan korosztálynak, évfolyamnak ajánljuk, ahol a gravitáció témakört a standard fizikaóra keretein belül már átvették. Mi tizenegyedikeseket vontunk be, és szakköri foglalkozás formájában, heti 1×45 percet foglalkoztunk a témával. A téma feldolgozását mindenképpen kiscsoportos (3-4 fő csoportonként) munkaként javasoljuk, semmiképpen sem teljes létszámú osztályban. Valamint javasolt, hogy a csoport tagjai között legyen olyan diák, aki jártas a Python-programozás alapjaiban.

Diákjaimmal a síkbeli háromtest-problémát jártuk körbe [1]. Ez az égi mechanika egy klasszikus esete, mely közel három évszázada foglalkoztatja a kutatókat. Ismeretes, hogy néhány speciális geometriai elrendezést kivéve a problémának nincs zárt alakú megoldása, de különböző mértékű közelítésekkel, sorfejtés alakjában megtalálhatjuk a számunkra megfelelő pontosságú leírását. Ez a fajta analitikus közelítés azonban igen számításigényes, és a végtelen sorok nem is mindig konvergensek. A számítástechnika megjelenésével egyidejűleg a numerikus módszerek is egyre finomodtak. Elfogadott eljárássá vált a numerikus integrálás olyan differenciálegyenletek megoldása során, ahol az analitikus tárgyalás nem vezet eredményre. Ezzel a ténnyel megismertetni a diákokat azért is tanulságos, mert ezen technikák alkalmazása során ráeszmélnek arra, hogy a numerikus módszerek sok esetben az egyetlen használható eljárást adják a probléma megoldására. Hangsúlyozni szeretnénk, hogy nem differenciálegyenleteket és azok megoldását szeretnénk fizikaórán tanítani, hanem a numerikus módszerek alapjainak megismertetésével a diákok kritikus gondolkodását kívánjuk erősíteni. Továbbá a tudományos élet nyitott kérdéseinek szemléltetésével és az azok megoldására használt módszerek elemi változtatásával próbáljuk felkészíteni őket a tudományos jellegű problémamegoldásra. A továbbiakban bemutatott módszerek jó alkalmat teremtenek a számítástechnika tárgy bizonyos témaköreinek színesítésére és tehetséggondozó feladatok kidolgozására is.

A numerikus módszerek alapjainak középiskolában való tanítására több példát találhatunk az elmúlt években. Szakdolgozati feldolgozásokon kívül *Jaloveczki* tanár úr volt az első, aki az Excel-munkalapokon alapuló módszer alkalmazhatóságát mutatta be [2]. Illetve 2021-ben elkészült egy szabadon használható e-learning anyag [3], mely kész Excel-munkalapok bemutatásával vezet végig az ejtőernyős mozgásától kezdve a rezgéseken keresztül a Föld keringéséig (s eljut egy kaotikus példáig is). A je-

ban megtalálhatjuk a számunkra megfelelő pontosságú leírását. Ez a fajta analitikus közelítés azonban igen számításigényes, és a végtelen sorok nem is mindig konvergensek. A számítástechnika megjelenésével egyidejűleg a numerikus módszerek is egyre finomodtak. Elfogadott eljárássá vált a numerikus integrálás olyan differenciálegyenletek megoldása során, ahol az analitikus tárgyalás nem vezet eredményre. Ezzel a ténnyel megismertetni a diákokat azért is tanulságos, mert ezen technikák alkalmazása során ráeszmélnek arra, hogy a numerikus módszerek sok esetben az egyetlen használható eljárást adják a probléma megoldására. Hangsúlyozni szeretnénk, hogy nem differenciálegyenleteket és azok megoldását szeretnénk fizikaórán tanítani, hanem a numerikus módszerek alapjainak megismertetésével a diákok kritikus gondolkodását kívánjuk erősíteni. Továbbá a tudományos élet nyitott kérdéseinek szemléltetésével és az azok megoldására használt módszerek elemi változtatásával próbáljuk felkészíteni őket a tudományos jellegű problémamegoldásra. A továbbiakban bemutatott módszerek jó alkalmat teremtenek a számítástechnika tárgy bizonyos témaköreinek színesítésére és tehetséggondozó feladatok kidolgozására is.



Ollé Hajnalka csillagász, az ELTE Fizika Tanítása Doktori iskola PhD-hallgatója, valamint a dunaszerdahelyi Magyar Tanítási Nyelvű Magángimnázium fizikatanára. Fontosnak tartja, hogy diákjai megismerkedjenek a korszerű kutatási módszerekkel, és megmutassa szerzett tudásuk gyakorlati hasznát.

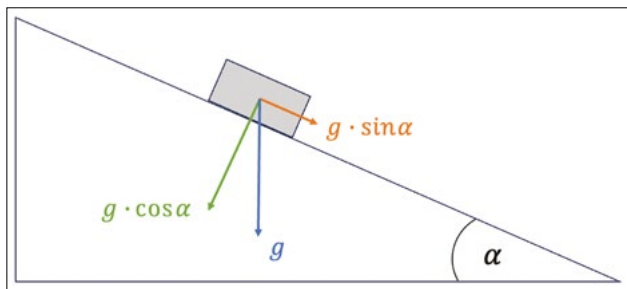


Kovács Tamás csillagász, az ELTE Atomfizikai Tanszékének adjunktusa. Doktori értekezését égi mechanikából írta. Jelenlegi érdeklődési területei a nemlineáris dinamikai rendszerek, az idősoranalízis, a komplex hálózatok, valamint a fázistérbeli transzport statisztikus fizikai leírása és ezek csillagászati alkalmazásai. Bolyai-ösztöndíjas. A Fizika Tanítása Doktori Iskola aktív témavezetője.

len cikk újszerűsége a fő témaválasztáson kívül, hogy az Excel-módszer mellett bemutatja az érdeklődő középiskolások között egyre népszerűbb Python használatát is.

Egy ismert példa numerikus megoldása: súrlódásmentes lejtőn csúszó test

Mielőtt ismertetnénk az exobolygó-rendszerek sajátosságait, illetve dinamikai leírását, didaktikai szempontból a numerikus módszer bevezetését egy, a tanulók által jól ismert mechanikai feladaton – a lejtőn lecsúszó test esetén – keresztül szemléltetjük, melynek során képet kaphatnak az eljárás alkalmazhatóságának határaitól és a módszer lényegéről. Mindezt azért tesszük, hogy a diákok maguk is belássák, hogy a számítógépes megoldás tényleg konzisztens az analitikussal, továbbá, hogy átérezzék a módszer pontossága bizonyos határokig szabályozható és jól alkalmazható. Az egyszerűség kedvéért tekintsünk el a súrlódástól és a közegellenállástól! Célunk az ismert analitikus megoldás összehasonlítása a numerikusan számolt eredményekkel.



1. ábra. A lejtőn mozgó test gyorsulásának komponensei. A feladat megoldása során a lejtőirányú összetevőkre vagyunk kíváncsiak

A feladat tehát a lejtőn mozgó test helyzetének és sebességének meghatározása a lejtővel párhuzamos irányban, ha a súrlódástól és a közegellenállástól eltekintünk. A 1. ábrán vázolt kép alapján kezdősebesség nélkül, egy adott helyről elengedjük a testet. Ekkor a lejtőn megtett út (s) és a pillanatnyi sebesség (v) a középiskolából jól ismert módon a következőképpen adható meg:

$$s(t) = \frac{a}{2} t^2 = \frac{g \sin \alpha}{2} t^2, \quad v(t) = at = g \sin \alpha t. \quad (1)$$

Most nézzük meg az egyik legalapvetőbb numerikus eljárás, az Euler-módszer felépítését, melynek segítségével mozgásegyenletek megoldása általánosan tanulmányozható, például a Microsoft Excel program segítségével.

Az Euler-módszerrel a lejtőn lecsúszó test mozgását diszkrét időpontokban közelíthetjük úgy, hogy a test kezdeti helyzete, kezdősebessége és a rá ható erő (gyorsulás) ismert. Az eljárás során a mozgást olyan függvényekkel írjuk le, amelyeknek az időtől függő értékei a test helyzetét és sebességét adják meg. Ezekkel az értékekkel egy Excel-táblázatban [3, 4] a program beépített

függvényei segítségével könnyedén tudunk dolgozni. Mivel a táblázatkezelés órai tananyag, ez sok diák számára sokkal barátságosabb környezet, mint valamely programozási nyelv használata. A folyamat, illetve a lépéseinek megértése szempontjából pedig ugyanúgy célravezető. Az algoritmikus gondolkodást, a probléma mélyreható átlátását az Excel használata is kiválóan kielégíti, teljesíti.

Az Euler-módszer

A numerikus eljárás során a gondolatmenetünk a következő. Ha ismert a test gyorsulása egy adott pillanatban, akkor könnyen kiszámolható a test sebességének megváltozása kis Δt idő múlva. Ez a következőképpen adható meg:

$$a_n = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_{n+1} - v_n}{\Delta t},$$

mely átrendezve

$$a_n \Delta t = v_{n+1} - v_n,$$

ahol v_n az n -edik lépés eleji, v_{n+1} a lépés végi sebesség, és az időt a Δt időegység többszöröseiben mérjük. Minket a későbbi sebesség érdekel, ezért tovább alakítva az összefüggést a következőt kapjuk:

$$v_{n+1} = v_n + a_n \Delta t. \quad (2)$$

Itt jegyezzük meg, hogy a fenti képletekben alkalmaztuk a numerikus eljárások során bevett jelölést a diszkrét időlépések szemléltetésére, miszerint a mozgás során számított két tetszőleges egymást követő függvényérték – az n -edik és az $(n+1)$ -edik – között mindig Δt idő telik el. Fontos még megjegyezni, hogy a (2) képletben azzal a feltételezéssel élünk, hogy Δt megfelelően kis megválasztása esetén a sebességváltozás lineáris. Tehát az a_n gyorsulás a sebesség adott pontbeli iránymeghatározása. Ezt az eljárást nevezzük Euler-módszernek.

Amennyiben a mozgó test pillanatnyi pozíciójára vagyunk kíváncsiak, a (2) képlethez hasonló összefüggést alkalmazhatjuk a kitérés és a sebesség között:

$$s_{n+1} = s_n + v_n \Delta t, \quad (3)$$

ahol most v_n a (2) képletben meghatározott sebesség. Így tehát a testre ható gyorsulás ismeretében (2) és (3) egymás utáni alkalmazásával tetszőleges időpontra megkaphatjuk a sebesség és pozíció értékeit. Mindezt a kinematika egyenes vonalú egyenletesen gyorsuló mozgásra megismert összefüggéseivel. Az Excel előnye itt mutatkozik meg, hiszen a fenti képletek ismeretében az egyes oszlopokban szereplő cellák megfelelő másolásával rekurzívan, egymásból következően, hamar megkapható az eredmény, és kirajzolható a megoldás.

A lépésköz megválasztása tanulságos feladat lehet a diákok számára, hiszen egyértelműen megmutatható, hogy minél kisebb Δt , annál jobban közelítjük az analitikus, általuk is jól ismert megoldást. Az internetről

letölthető táblázatunkban [4] a gyorsuló mozgásra vonatkozó összefüggésből (1) meghatározható a lejtő mentén megtett $s(t)$ távolság (E oszlop), illetve az Euler-módszerrel közelített s_n távolság (G oszlop). Ha e kettő különbségét az idő függvényében ábrázoljuk, a 2. ábrán látható egyeneseket kapjuk. Az útkülönbséget egyre rövidebb Δt lépésközökre kiszámolva (a táblázat különböző fülei) a meredekség csökken, azaz egyre kisebb az analitikus megoldástól való eltérés. Megjegyzendő azonban, hogy az iterációk számával a hiba egyenes arányban nő!

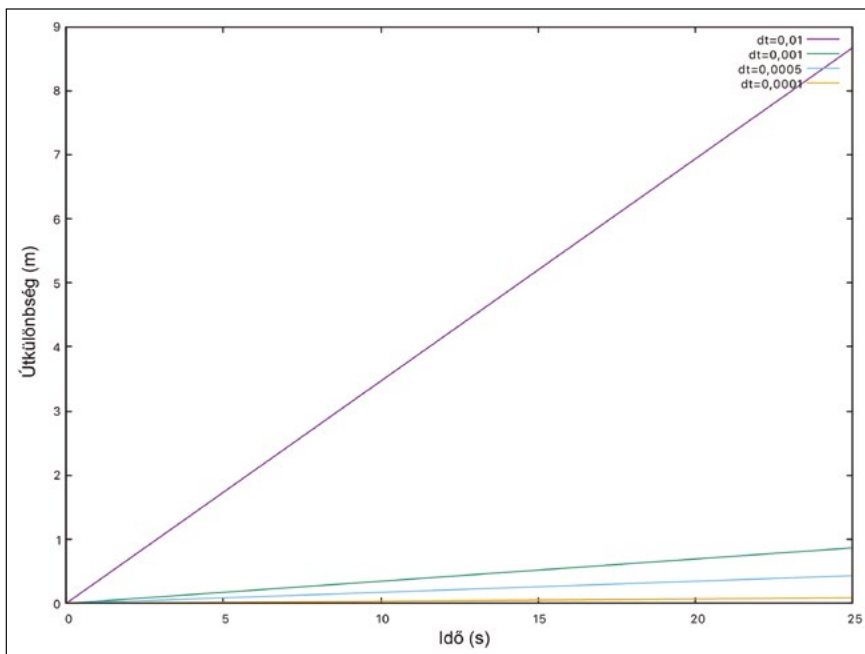
Ezzel a numerikus „kísérlettel” demonstrálhatjuk a diákok számára, hogy a számítógépes modellek bizonyos pontossággal visszaadják a fizikát, és hogy a pontosságot magunk is befolyásolhatjuk. A lejtőre helyezett test tetszés szerint lecserélhető más mechanikai rendszerre (inga, szabadesés, Kepler-mozgás stb.), melyre az ismert megoldás és adott esetben megmaradási tételek jól összehasonlíthatók az Euler-módszerrel kapott eredményekkel. A [3] honlap minden igényt kielégítően tárgyalja a témakört haladó szintre emelve az ismereteket.

A bevezetésben említett gravitációs háromtest-probléma esetében azonban nem tudunk analitikus megoldás felírni, csak a közelítő módszerek állnak rendelkezésünkre a feladat megoldásához. Így egy ilyen feladat megoldása során pusztán a numerikus eredményekre támaszkodhatunk, és azok alapján értelmezhetjük az eredményeket. Az, hogy ilyen esetben milyen fizikai mennyiség vizsgálata célravezető, és ennek változása mit eredményez a dinamikában, a következő fejezet témája.

Egy középiskolában kevésbé ismert példa numerikus megoldása: gravitációs háromtest-probléma

Eddigi tapasztalataink azt mutatják, hogy a diákok érdeklődése sokkal inkább felkelthető, ha a tudomány jelenlegi frontvonalából származó kérdésekre keressük a választ, mert ezekben az esetekben eltávolodhatunk a fizikai alapfeladatoktól, és izgalmas, „megoldás nélküli” problémákon tesztelhetik a már ismert fizikai fogalmakat. Egy ilyen fogalom az energiamegmaradás, melynek kombinálása modern dinamikai problémákkal ihlette a következő vizsgálatokat.

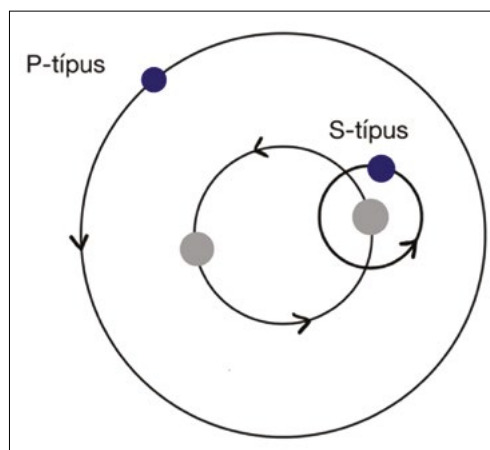
Az elmúlt évtizedekben több exobolygó-rendszert fedeztek fel, amelyek jelentősen különböznek a Naprendszerünkötől. Nemcsak a bolygók tömege, egymástól való távolságuk vagy pályájuk excentricitása, hanem a térbeli



2. ábra. A lejtőn lecsúszó test analitikus és numerikus útkülönbsége más-más Δt időlépésekre. A kisebb meredekségű egyenesek a nagyobb numerikus felbontáshoz tartoznak, és jobban közelítik az (1)-ből számítható $s(t)$ függvényt

elrendezésük is nagyon különbözhet az általunk megszokott képtől. A több mint ötezer jelenleg ismert exobolygó közül jó néhány többes csillagrendszer körül alakult ki, ezek dinamikája rendkívül érdekes kutatási terület [5, 6]. Az ilyen exobolygó-rendszerek tanulmányozása segíthet megérteni a bolygók kialakulásának és fejlődésének folyamatát más csillagok körül.

Kettőscsillagok körül háromféle bolygóelrendeződést különböztetünk meg. A 3. ábrán látható, hogy ha a bolygó csak az egyik csillag körül kering, akkor S-típusról, ha a két csillag tömegközéppontja körül, akkor P-típusról beszélünk. Ezenkívül előfordulhat olyan eset is, amikor a bolygó keringése során csillagot „vált”, ezek a C-típusú rendszerek (ez nincs jelölve az ábrán). Az órai feladat során egy S-típusú rendszert vizsgáltunk.



3. ábra. Kettőscsillag körül keringő bolygó különböző elrendeződésben (szürkével a csillagokat, a kék színnel pedig a körülöttük keringő bolygót jelöltük). A P a „planet”, az S jelölés pedig a „szatellit” típusú keringésre vonatkozik

Konkrétabban megfogalmazva, feladatul tűztük ki, hogy meghatározzuk három tömegpont mozgását, melyek között csak a Newton-féle gravitációs kölcsönhatás hat. A háromtest-probléma alapján a következő elrendeződést vizsgáltuk: a három tömegpont (a mi esetünkben egy-egy naptömegű csillag és egy földtömegű bolygó) egy síkban kering a közös tömegközéppontjuk körül. Érdekes megjegyezni, hogy a harmadik test kicsi (de nem elhanyagolható) tömegének következtében a gravitációs hatása nem számottevő, így a kettőscsillag Kepler-pályán látszik mozogni. A numerikus kódban a teljes Newton-féle gravitációs erőtvény szerepel, mely minden testet figyelembe vesz.

A numerikus eljárás és a program működési elve

Szakítva az eddigiekkel, a kettőscsillag körül keringő bolygó síkbeli mozgását egy Python programozási nyelven írt rövid program segítségével szemléltethetjük [7]. Természetesen az eddig bemutatott Excel-verzió kibővítése is alkalmas a probléma tárgyalására, azonban az olvasó némi kényelmetlenségbe ütközhet, ha hosszú idejű vizsgálatra kíváncsi. Ebben az esetben ugyanis az Excel-táblázat sorainak száma kezelhetetlenül nagy lesz.

A háromtest-probléma esetén is hasonló gondolatmenetre támaszkodunk, mint a lejtős feladat esetén. Annyi lesz a különbség, hogy gyorsulás helyett erővel, sebesség helyett lendülettel számolunk. Nézzük meg részletesen az Euler-módszert ebben az esetben is.

Feltesszük, hogy minden időpillanatban ismerjük a testek között ható erőt. Így a kezdőfeltételek (hely, sebesség) és paraméterek (tömeg) megadása után a programmal minden ciklusban, azaz minden egyes diszkrét időlépésben, hasonlóan az Excel-táblázat soraihoz, kiszámoltatjuk az egyes testekre ható erőket. Esetünkben az pusztán a kölcsönös gravitációs erő, mely általánosan adott időpillanatban

$$\mathbf{F}_{i,n} = -\gamma \frac{m_i m_j}{|\mathbf{R}_{ij,n}|^2} \cdot \frac{\mathbf{R}_{ij,n}}{|\mathbf{R}_{ij,n}|} - \gamma \frac{m_i m_k}{|\mathbf{R}_{ik,n}|^2} \cdot \frac{\mathbf{R}_{ik,n}}{|\mathbf{R}_{ik,n}|},$$

$i, j, k = 1, 2, 3 \quad \text{és} \quad i \neq j \neq k,$

ahol $\mathbf{F}_{i,n}$ az i -edik testre ható erő, γ a Newton-féle gravitációs állandó, m a testek tömege, $\mathbf{R}$ pedig a köztük lévő távolság. Az alsó indexben lévő n az n -edik iterációs lépésre utal – hasonlóan a módszer bevezetésénél tárgyalt jelöléshez.

Az impulzus időegység alatti megváltozásából kapjuk az Euler-módszer első összefüggését (itt elhagytuk az égitestek indexét (i), mert mindegyikre formailag azonos kifejezés érvényes) két egymást követő időpillanatra:

$$\mathbf{F}_n = \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{p}_{n+1} - \mathbf{p}_n}{\Delta t}.$$

Ezt (2)-höz hasonlóan átrendezve a lendületre kapjuk, hogy

$$\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_n + \mathbf{F}_n \cdot \Delta t,$$

ahol $\mathbf{p}_{n+1}$ az új, $\mathbf{p}_n$ pedig az előző ciklusban számolt (Δt idővel korábbi) impulzus. Ebből meghatározhatjuk az új helyvektort a következő módon:

$$\mathbf{R}_{n+1} = \mathbf{R}_n + \frac{\mathbf{p}_n}{m} \Delta t.$$

Hasonlóan itt is $\mathbf{R}_{n+1}$ az új, $\mathbf{R}_n$ pedig a régi helyvektor. Ez utóbbi két összefüggés az impulzusnak és a helyvektornak egy olyan alakja, mely a számítógépes ciklusokhoz és automatizáláshoz könnyen alkalmazható. A példa kedvéért kiemeljük a harmadik testre (bolygóra) érvényes egyenleteket az Euler-módszer formalizmusában:

$$\mathbf{F}_3 = -\gamma \frac{m_3 m_1}{|\mathbf{R}_{31}|^2} \cdot \frac{\mathbf{R}_{31}}{|\mathbf{R}_{31}|} - \gamma \frac{m_3 m_2}{|\mathbf{R}_{32}|^2} \cdot \frac{\mathbf{R}_{32}}{|\mathbf{R}_{32}|},$$

$$\mathbf{P}_3 = \mathbf{P}_3 + \mathbf{F}_3 dt,$$

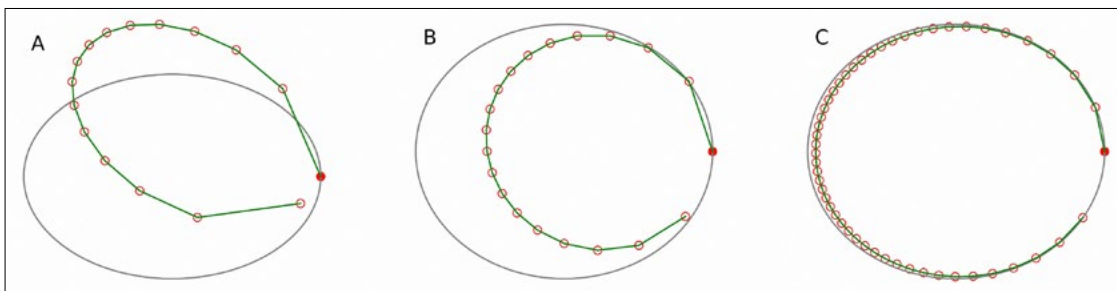
$$\mathbf{R}_3 = \mathbf{R}_3 + \frac{\mathbf{P}_3}{m_3} dt.$$

Ezek a forráskódban a következő formát öltik:

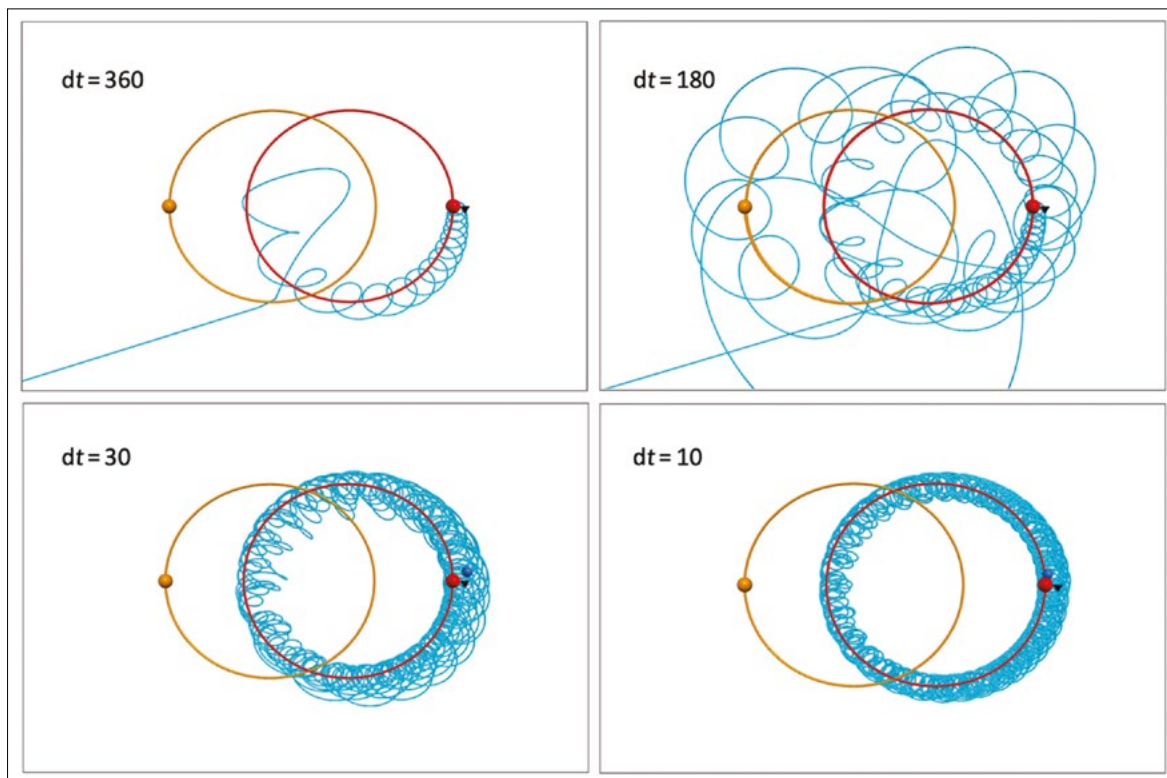
$$\mathbf{F3} = (\mathbf{G} * \mathbf{M3} * \mathbf{M1}) / (\text{mag}(\mathbf{R3} - \mathbf{R1}))^{**2} * \mathbf{R31} + (\mathbf{G} * \mathbf{M2} * \mathbf{M3}) / (\text{mag}(\mathbf{R3} - \mathbf{R2}))^{**2} * \mathbf{R32}$$

$$\mathbf{P3} = \mathbf{P3} + \mathbf{F3} * dt$$

$$\mathbf{R3} = \mathbf{O3.pos} = \mathbf{R3} + (\mathbf{P3} / \mathbf{M3}) * dt$$



4. ábra. Szemléletes bemutatása annak, hogy egy ismert bolygópálya esetén (szürke ellipszis) a numerikus közelítésnél mennyire fontos a Δt lépésköz megfelelő választása. A teli kör a bolygó kezdeti helyét jelöli, az üres körök pedig az egyes Δt lépések eredményéhez tartozó pozíciókat. Az A, B és C esetekben a lépésköz egyre kisebb. Vegyük figyelembe, hogy az Euler-módszert alkalmazva a bolygó a zöld szakaszok mentén mozog, és ezzel a közelítéssel a numerikus eredmény letér az analitikus pályáról. A tanulság úgy fogalmazható meg, hogy minél kisebb a lépésköz, annál jobban közelítjük a valódi megoldást. Megjegyezzük továbbá, hogy a szürke ellipszisek mindhárom esetben ugyanazok, az A eset ellipszise csak az ábrázolás miatt látszik lapultabbnak



5. ábra. Különböző Δt időintervallumokat alkalmazva egyértelműen látható, hogy teljesen más végkimenetele lesz a rendszer viselkedésének. Az ábrákon mindegyik esetben a kettőscsillag 5 keringése látható (piros és sárga ellipszisek). A fekete háromszög a bolygó kezdeti pozícióját jelöli, világoskékkel pedig a bolygópályát rajzoltuk. Megjegyezzük, hogy a letölthető program adataival a kettőscsillag keringési ideje $T = 402$ földi nap

Itt $R31 = -\text{norm}(R3 - R1)$ az „1-es” csillag és a bolygó között lévő egységvektort jelöli, melyről tudjuk, hogy a tömegközéppontból a bolygóhoz mutató $R3$ helyvektor és a csillaghoz mutató $R1$ helyvektor különbségéből adódik. A $\text{mag}()$ függvény pedig az argumentumában lévő vektor abszolút értékét (nagyságát) képezi. Az impulzus kiszámolásánál a program figyelembe veszi, hogy az előző sorban már meghatároztuk az $F3$ erőt, így azt megszorozva Δt lépésközzel hozzáadjuk az előző ciklusban számolt $P3$ impulzushoz. Ezen új impulzus ismeretében kapjuk a helyvektor ($R3$) frissített változatát.

Az eljárás fontos része a Δt lépésköz (a programkódban dt), melynek változtatása kiváló feladat a diákoknak, hiszen maguk tapasztalják meg, hogy minél kisebb időlépést választanak két pozíció meghatározása között, annál jobb felbontást kapnak, hiszen ebben az esetben sokkal több pont áll rendelkezésre, mely végül kirajzolja a pályát (4. ábra, szürke ellipszis). Hátránya viszont, hogy a program futási ideje érezhetően megnő a több számolás miatt, és egy bizonyos határ fölött élvezhetetlenné teszi az animációt.

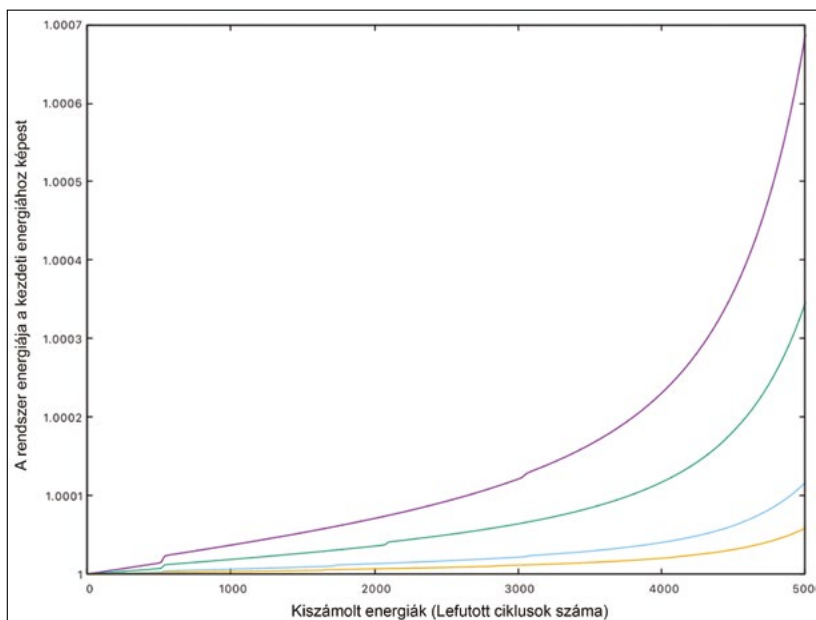
A rendszer energiájának vizsgálata

A csoportos foglalkozás során több diákban felmerült, hogy miként lehet ellenőrizni a numerikus eljárás hitelességét, hiszen azt már előzőleg megbeszéltük, hogy nem ismert a mozgás analitikus leírása. Végül egy irányított beszélgetés során megegyeztünk, hogy az energia meg-

maradásának teljesülnie kell a rendszerben, így ennek vizsgálata jó jelölt a szimuláció helyességének eldöntésére. Mivel azt már a lejtős feladtnál láttuk, hogy a megoldás közelítő jellegű, ez a választás teljes mértékben helytálló. Első lépésként megvizsgáltuk a pályák alakulását különböző Δt időkre (5. ábra).

Ezzel kapcsolatban merült fel a gondolat, hogy a négy ábra közül vajon melyik a feladat „hiteles” megoldása. Nézzük meg, hogy a különböző Δt lépésközökkel kapott megoldások esetében vajon mennyire pontosan marad meg az energia. Ennek érdekében meghatározzuk a rendszer összenergiáját a kezdeti időpillanatban, majd minden egyes ciklusban (időlépésben) újra az aktuális értékekkel. Végül a két energia hányadosát ábrázoljuk. A 6. ábráról kiderül tehát, hogy minél kisebb Δt időközöket választunk, annál kevésbé közelíti a görbe az 1-et, azaz kevésbé tér el a numerikusan meghatározott energia a kezdeti értéktől. Ezzel belátható, hogy a helyes megoldás elérése érdekében nagyon fontos az időlépést minél kisebbre választani. Megjegyezzük, hogy kaotikus esetben a numerikus pontosság ugyanúgy radikális befolyással van a megoldás alakjára, mint a rendszer kezdeti konfigurációja.

Ez egyértelműen és szemléletesen mutatja be a diákok számára a numerikus megoldási módszer technikai paramétereinek fontosságát, és felhívja a figyelmet annak közelítő jellegére. Gyorsan nyilvánvalóvá vált számukra, hogy a probléma alaposabb körtekintést igényel, valamint ösztönözte őket arra, hogy más, pontosabb eljárá-



6. ábra. A kezdeti és a futás során minden időlépésben kiszámolt energiák hányadosa különböző Δt időközökre (360 s – lila, 180 s – zöld, 30 s – kék, 10 s – sárga)

sok után kutassanak. Hiszen, amint az a 6. ábrán is látszik, még a legjobb, 10 másodperces időfelbontással sem teljesül pontosan az energia megmaradása.

Az Euler-módszer kiváló eszköze lehet a numerikus módszerek bevezetésének a középiskolai fizikaoktatásban, hiszen viszonylag könnyen megérthető és alkalmazható. Mindemellett nem elhanyagolható az sem, hogy összetett problémák tudományos igényű szemléletét és megoldásának menetét is elsajátíthatják a diákok. Másrészt teljesen általános jellegű, tehát bármilyen mechanikai jellegű problémára könnyedén alkalmazható. A részletes megismerése pedig egyértelműen rávilágít a hiányosságaira is, mely módszertani szempontból kiválóan használható, ezáltal a diákok maguk is igénylik a pontosabb (magasabb rendű) módszerek alkalmazását.

Megvalósítás

A program megírásakor olyan platformot, felületet kerestünk, mely nem túl bonyolult, könnyen alkalmazható, és viszonylag kevés programozási ismerettel is jól használható. A Python programozási nyelvnek van egy 3D programozásra alkalmas egyszerű modulja, a VPython [8], melynek letöltése sem szükségszerű, egyszerű böngészővel kiválóan alkalmazható [9]. Rengeteg példa-program [10] segíti a megismerést, melyek önmagukban is jól használhatók a fizika és az informatika oktatásában, illetve ezen két terület összekapcsolásában.

Összefoglalás

A célunk az volt, hogy a diákokat megismertessük a numerikus módszerek alkalmazásának fontosságával, valamint felismerjék a tényt, hogy ezek a módszerek közelítő

jellegűek, de mindenképpen eredményesen alkalmazhatók a kutatások, modellezések során. Kezdetben szándékosan olyan feladatok elé állítottuk őket, melyek analitikus megoldása középiskolai módszerekkel is lehetséges. A tanulási folyamat során bemutattunk egy olyan egyszerű mechanikai rendszert is, mint a lejtőn való súrlódásmentes mozgás, melynek megoldását ismerjük. Ezáltal remekül szemléltethető a közelítő módszerek gyakorlati haszna, hiszen könnyedén össze tudjuk hasonlítani a számítógépes megoldásokat az analitikussal. Majd a diákok készítettek egy Python programot, melyben két csillag körül kering egy bolygó, és ezek pályáját számolják ki. Ennek keretében a diákok megismerkedtek egy olyan alapvető égi mechanikai problémával is, mint a háromtest-probléma. Szembesültek azzal, hogy az Euler-módszer nem ad pontos megoldást, csak közelítést, így maguk is eljutottak arra a megállapításra, hogy a probléma komolyabb körütekintést igényel a numerikus megoldás során.

Irodalom

1. Érdi Bálint (2003): Égi mechanika, Nemzeti Tankönyvkiadó
2. Jaloveczki József (2015): Nemlineáris jelenségek vizsgálata diákköri-szakköri munkában
3. <http://theorphys.elte.hu/fiztan/numH>
4. <http://www.mgds.eu/exo/lejtOK.xlsx>
5. Ballantyne H. A., et al. (2021): Long-term stability of planets in and around binary stars. MNRAS 507, 4507.
6. Horváth Zsuzsa (2017): Exobolygók minden szinten. *Fizikai Szemle*, 2017/3, 93–99.
7. <https://glowscrip.org/#/user/Hajni/folder/MyPrograms/program/khttp/edit>
8. <https://www.glowscrip.org/docs/VPythonDocs/index.html>
9. <https://vpython.org>
10. <https://www.glowscrip.org/#/user/GlowScriptDemos/folder/Examples/>

DR. SZATMÁRY KÁROLY (1956–2024) – EMLÉKEZÉS AZ SZTE CSILLAGÁSZPROFESSZORÁRA

Szalai Tamás^{1,*}, Szabó M. Gyula², Székely Péter³

¹Szegedi Tudományegyetem, Szeged; ²ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium és Multidiszciplináris Kutatóközpont, Szombathely; ³Semilab Zrt., Szeged

*E-mail: szaszi@titan.physx.u-szeged.hu



Dr. Szatmáry Károly (1956–2024)

Elszorult szívvel értesültünk sokan szeptember elején a hírről Szegeden, valamint szerte az országban és a nagyvilágban, hogy dr. Szatmáry Károly, az SZTE TTIK Fizikai Intézet Kísérleti Fizikai Tanszékének nyugalmazott egyetemi tanára, a szegedi csillagászképzés és a Szegedi Csillagvizsgáló létrehozásának kezdeményezője életének 68. évében örökre szeretett csillagai közé kötözött. Tudtuk mindannyian, hogy egészsége terén régóta sokféle gondal küszködött, mégis bíztunk benne, hogy közelmúltbeli nyugdíjba vonulását követően még sok évnyi, pihenésben és örömeiben gazdag élet áll majd előtte családja körében...

Bár Karcsi – ahogyan kollégáiként hívhattuk – már nem lehet közöttünk, szakmai és emberi öröksége sokunkban és sokféleképpen él tovább. Életútja az SZTE Fizikai Intézet honlapján megjelent – a csillagaszat.hu hírportálra, valamint a Magyar Csillagászati Egyesület

2025-ös Csillagászati Évkönyvébe is átvett – megemlékezésben [1] részletesen olvasható; ezen a helyen leginkább az elkötelezett tanár és a világűr titkait rajongásig szerető és kutató ember jellemvonásaiból emelünk ki néhányat.

Szatmáry Károly szülővárosában, Szegeden ismerkedett meg a csillagászat alapjaival Márky-Zay Lajos szakkörére járva, majd az érettségi után – mivel ekkor ezt még csak ott lehetett megtenni – a budapesti Eötvös Loránd Tudományegyetemen szerzett csillagász diplomát, és egyúttal matematika-fizika szakos végzettséget is. Ezt követően hazatért, ahol 1981-ben lett a Szegedi Tudományegyetem jogelődje, a József Attila Tudományegyetem alkalmazottja. A szegedi egyetem Kísérleti Fizikai Tanszéke volt az első, és maradt csaknem négy évtizeden keresztül egyetlen munkahelye, ahol végigjárta a teljes egyetemi ranglétrát, egészen a 2015-ös egyetemi tanári kinevezéséig.

Kutatóként szakterülete a csillagok fényváltozásainak idő-frekvencia analízisen alapuló módszerek alkalmazása volt, amelyhez a 2000-es évektől az exobolygók vizsgálata is csatlakozott, Magyarországon az elsők között. Szakmai tevékenységének ugyanakkor ennél is nagyobb hatású részét képezte a csillagászati oktatás és ismeretterjesztés.

A Szegedi Csillagvizsgálóban indított csillagászati szakkörön keresztül a középiskolás korosztályt is bevonta a csillagászat művelésébe; a hálás egykori szakkörös gimnazisták számára a Hold felszínének vagy a Jupiter felhősávjainak első ízben való megpillantása egy egész életutat meghatározó eseménnyé tu-

dott válni. Karcsi a fiatalok ambícióit is kiváló érzékkel erősítette meg. A tapasztaltabb szakkörösök számára átengedte a kisebb műszereket, akik azokkal bemutatásokat vezethettek, de még a csillagvizsgáló csúcsműszereit – 1996-ban például egy ST-6 CCD-kamerával felszerelt Celestron-11 távcsövet – is elérhetővé tett középiskolás kutatási projektekhez. Ma már szinte elképzelhetetlen egy kutató középiskolás saját számítógép nélkül, de akkoriban sokszor létfontosságú volt a Karcsi szobájában hallgatói használatra rendszeresített számítógép is, ahová a fiatalok szabadon bejárhattak dolgozni.

Előadásából több ezer egyetemi hallgató sajátította el a csillagászat és az űrkutatás alapjait; száznál is több szakdolgozat, diplomamunka és TDK-dolgozat témavezetője volt, több hallgatója lett OTDK-díjazott. Különösen szívügye volt, hogy a tanárszakos hallgatókat a csillagászati és űrkutatási témák felé terelje, elősegítve ezzel azt is, hogy ők maguk később, már gyakorló tanárokként szintén elvezethessék diákjaikat az égbolt titkaira való rácsodálkozásra.

A rengeteg tanítvány rengeteg vizsgáztatást is jelentett – szigorúan szóban –, amiből pusztán a nagy számok törvénye alapján jó néhány „kritikusabb” vizsgaszituáció is kialakult, különösen a nem fizika szakosok esetében. Karcsi azonban ezekben a helyzetekben sem jött ki a béketűrésből – egy-egy kevésbé jól sikerült válasz hallatán elmorfondírozott kissé, és jellegzetes hümmögés kíséretében reflektált ezekre.

– *Mi a négy alapvető fizikai erőhatás?*
– *Gravitációs erő... öö... elektromos erő... ööö... öserő...*

– Őserő? Hmmm... hát, talán a sámnoknál.

Persze nem mondhatjuk, hogy ne kedvetlenítette volna el, ha a hallgatók nem az ő kíváncsiságai szerint szerepeltek a vizsgán – és ezeknek az elvárásoknak nem is feltétlenül volt könnyű megfelelni, különösen a legújabb csillagászati, űrkutatási hírek és eredmények nyomán köve-

a lehető legalaposabban végezte el. A 90-es évek elején ez nem egyszerű komoly fizikai munkát is jelentett. A Szegedi Csillagvizsgáló építési munkálataiból, illetve a néhány évvel korábban a testvérváros Odeszból érkezett, eredetileg, szegedi fogadóépület hiányában a Bajai Observatóriumba került 40 cm-s Cassegrain-távcső szállításából is kivette



Szatmár Károly 1992-ben a Szegedi Csillagvizsgáló avatóünnepségén. További, beazonosítható személyek a képen tőle jobbra: Kiss L. László, Vinkó József, Mizser Attila, Bán Lajosné tanszéki munkatárs

tése terén. Ő maga ennek fontosságáról így vallott 2022-ben, a Szeged című folyóirat riportjában, [2] amelyet szülővárosa egyik legrangosabb, a Szegedért Alapítvány Debreczeni Pál-díjának odaítélése alkalmából készítették vele:

„Az űrtávcsöves adatbázisok létezése óta annyi a beérkező adat, hogy nincs annyi csillagász a Földön, hogy valaha fel tudjuk az összeset dolgozni. Naponta 50–100 cikk születik a témában vadiúj kutatási eredményekkel. Egy egyetemi oktatónak talán ebből a szempontból még nehezebb is a feladata, mint egy kutatónak. Mert minden új eredménnyel, részterülettel tisztában kell lennie. Volt olyan, hogy reggel olvastam egy új kutatásról, a délutáni órák anyagába már be kellett építenem, mert annyiira lényeges eredményeket közölt.”

Fáradhatatlanul – és sajnos biztosan állítható: túl sokat – dolgozott; rengeteg szakmai, közéleti és szervezési feladatot is vállalva a napi oktató- és kutatómunka mellett. A munkát pedig, bármiről is volt szó, mindig

részét. Ezek az események más, közös emlékekkel együtt Karcsi egyik első tanítványa és kollégája, Hegedüs Tibor búcsúzó írásában olvashatóak első kézből [3].



Szatmár Károly legendás, „padlótól a mennyezetig” szakkönyvekkel, folyóiratokkal és egyetemi iratokkal telepakolt oktatói szobája (Tóth Imre felvétele, 2010)

De akármennyire elfoglalt volt is, Karcsi mindig ráért másokkal foglalkozni: legendás – „padlótól a mennyezetig” szakkönyvekkel, folyóiratokkal és egyetemi iratokkal telepakolt – oktatói szobájának ajtaja mindig nyitva állt a szakmai vagy épp személyes tanácsot, segítséget kérő hallgatók, kollégák előtt. 2016-ban, 60. születésnapja alkalmából egy meghitt ünnepség keretében köszönthettük őt kollégái, valamint akkori és korábbi hallgatói körében – többek között rengeteg üzenetet felolvasva az egykori, csillagászként, fizikatanárokként lett, vagy az élet más területére került tanítványoktól, Budapesttől a Vajdasáig, Bostontól Heidelbergig. Makai Zoltán – akkoriban a West Virginia University, jelenleg a darmstadti EUMETSAT munkatársa – így emlékezett:

„Ha találkoztam Önnel a folyosón, mindig megállt egy percre, és hozzám szólt: »Hogy van, Zoltán? Minden rendben?« Tette ezt úgy, hogy közben megszámlálhatatlanul sok dolga volt. ... De ez velejárója annak, ha valaki úgy gondolja, hogy megpróbálja egyben tartani a csillagász szakot, aki igyekszik minden pénzforrást előteremteni a szak működéséhez (beleértve a kisebb-nagyobb műszerfejlesztéseket is),



Szatmár Károly 2016-ban, a 60. születésnapja tiszteletére munkatársai és egykori hallgatói részvételével rendezett ünnepségen, az ajándékba kapott – tanítványai üzeneteit tartalmazó – kiadvánnyal és plüss Pluto-figurával

aki magára vállalja a bürokratikus tennivalók igen súlyos terhét, aki mindeközben tanít, próbál leendő csillagászokat a megfelelő úton tartani, amikor a szakmai és személyes

tanácsaival ellátja őket, és aki nem utolsósorban a családjával is törődik.”

Nekünk, utódoknak adott a feladat: vigyük tovább a tudomány, a ta-

nítás és az emberszeretet lángját, és gyűjtsuk meg másokban is – ahogyan tőle tanultuk.

Köszönünk mindent, Karcsi! Ég veled!

Hivatkozások

1. <https://www.physx.u-szeged.hu/hirek/szte-fi-2024-szeptember/gyaszhir-prof-dr-szatmary-karoly>
2. <http://szegedfolyoirat.sk-szeged.hu/2022/03/23/hegedus-reka-a-szegedi-csillagaszakinek-kisbolygo-orzi-a-nevet/>
3. Hegedüs Tibor: Baráti búcsú ... emlék ... képek; Szatmár Károly (1956–2024) emlékére (Meteor, 2024/11., 4-10. o.)

EMLÉKSZILÁNKOK SZATMÁRY KÁROLYRÓL ÉS AZ 1990-ES ÉVEKRŐL

Kiss László

HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Budapest
E-mail: kiss.laszlo@csfk.org

„A múlt század 90-es évei...” – ma már kezdjük megszokni, hogy a 21. század első negyedét lassan magunk mögött tudva az 1990-es évtized egyre több ember számára valóban a múlt kódébe vesző időszakká válik. A saját életemben egyértelműen az volt a legmeghatározóbb évtized, hiszen 1991-ben a jugoszláv polgárháború és a fizikusképzés közötti választással egyértelműen az akkori szegedi fizikusiskola mellett tettem le a voksot, 1991 őszétől pedig a József Attila Tudományegyetem (JATE) elsőéves fizikushallgatójaként meg is kezdtem a tudományos kutatóvá válás első lépéseit. Az alábbiakban Szatmár Károly (Karcsi) alakját felidézve szeretném előhozni az 1990-es évek teljesen szubjektív emlékképeit – főleg olyanokat, amelyek írásban még soha nem jelentek meg.

Szatmár Károly nevével először a Gondolat Kiadó által megjelentetett Csillagászati Évkönyv 1987-es kötetében találkoztam, ahol az ak-

kor a harmadik iksztét betöltő Karcsi a *Pulzáló változócsillagok periódusmeghatározása* című cikkében nemcsak tankönyvi szinten leírta a Fourier-analízis alapjait, hanem mellékelte egy BASIC programnyelven írt forráskódot is a fényességváltozások periódusának elemzésére. Mondanom sem kell, hogy az informatikával elsőként Commodore-64-es számítógépen és BASIC programnyelven találkozáskor aranybánya volt Karcsi cikke az akkori gimnazista fejemnek. Aztán a történelmi fordulatok azt eredményezték, hogy 1991 szeptemberétől azonnal témavezetőmmé is vált a JATE Kísérleti Fizikai Tanszékén (részletek: Kiss L.: „Háború helyett csillagászat”, *Magyar Tudomány*, 2011/7.). Nagyon korán kialakult közöttünk az a hallgatói-témavezetői módszertan, hogy igyekeztünk minél rendszeresebben, hacsak lehetséges volt, hetente találkozni, konzultálni, megbeszélni a nyitott

kérdéseket, és ha elakadtam, tanácsot kérni a hogyan továbbról. Eből a kezdeti korszakból (1991/1992) kristálytisztá emlékem, hogy órák után mindig benéztem a Rerrich Béla térre, kerestem a kis zöld Trabantot UL-91-37-es rendszámmal, mert ha ott volt, akkor Karcsihoz fel tudtam menni első emeleti irodájába beszélgetni.

Mert ő ilyen volt – ajtaja mindig nyitva állt az érdeklődő hallgatók, később kollégák előtt. Nem mindig tudott azonnal válaszolni a kérdéseinkre, de jellegzetes hümmögésével szinte mindig sikerült előkeresni valamilyen jó megoldást, vagy legalábbis irányt adott a nehézségeken való átjutáshoz.

Nagy év volt 1992: az év közepén megnyílt a Szegedi Csillagvizsgáló, a JATE alapítványa által működtetett csillagászati bemutató- és kutatóhely. Ennek munkájába annyira a kezdetektől bevont Karcsi, hogy társadalmi munkában még a nyitás

előtti betonozásokban és az épület csinosításában is közreműködtem hétvégenként. Ez egy másik fő emlékem, amikor felidéztem alakját: a munka nehezebbik végét bármikor megragadó vezető volt, aki ha kell, alapítványt gründol, ha kell, a város vezetésével tárgyal, ha pedig az szükséges, járdát betonoz, hogy a látogatók tiszta lábbal jussanak el a kaputól a csillagda bejáratáig.

A digitális képrögzítés alapeszköze a CCD-kamera, amivel Szegeden már 1992 decemberében volt alkalmam találkozni. Karcsi valahonnan forrást szerzett, és megvette a csillagvizsgáló első CCD-jét, egy ma már megmosolyogtató paraméterű SBIG ST-4-es kamerát, mindösszesen 256×256 pixel felbontást biztosító csippel és 8 bites (256 árnyalat) intenzitásdinamikával. Viszont a klasszikus fotós technikai tapasztalatokkal betyár érzékenységgű volt a kamera, egy 6,3 cm-es Zeiss kisrefraktorra felszerelve hihetetlen határfényességű képeket adott aprócska látómezőjében. Máig fel tudom idézni a beáramló hideg levegő csípését és a felharsanó kiáltásainkat, amikor Karcsi irányításával a legeslegeső alkalommal kipróbáltuk a CCD-t az Orion-köd felé irányítva a mini távcsövet.

Később a távcsövet és a kamerát Karcsi engedélyével hazavittem barátommal és fizikus-csoporttársammal, Kaszás Gáborral, és szegedi lakhelyünk udvaráról rendszeres CCD-s méréseket végeztünk. Mai intézményvezetői fejemmel csak elhűlni tudok, micsoda bizalmat kaptunk a témavezetőnkől, hogy az egyik legértékesebb műszeregyüttest csak úgy odaadta két egyetemi hallgatónak, hogy azok otthonról a lehető legkényelmesebben mélyülhessenek el a digitális képrögzítés technikáiban. Ebből lett aztán Gáborral írt második TDK-dolgozatunk, amivel az 1995-ös OTDK-n második díjat szereztünk.

1995 hozta el a Bokros-csomagként elhíresült gazdasági sokkterápiát, aminek hatásai az egyetemi szférában azonnal megjelentek,

súlyos következményekkel. Egyetemistaként nem fogtam fel sokat a költségvetési elvonásokból, azt viszont láttam, hogy Karcsi egyre kedvetlenebb és sokszor rossz hangulatú volt. Hiába jutott közben ő is egyre magasabbra az egyetemi hierarchiában, számomra döbbenetes volt, amikor egyszer kiszakadt belőle, hogy kétgyermekes apaként a család fenntartása érdekében kiskertben termelt krumplit árul hétvégenként a szegedi piacon. Mindeközben én a „szegedi 40-essel”, a csillagvizsgáló főműszerével elmerültem a fotoelektromos fotometria intenzív alkalmazásaiban, és jó három éven keresztül minden egyes derült éjszakán változócsillagok fénygörbéit vettem fel a kb. 1%-os mérési pontosságot lehetővé tevő fotométerrel. A méréseket másnap reggel, pár óra alvás után azonnal kiredukáltam. Ekkor alakult ki az a másik fontos módszertanunk a hallgatói-témavezetői viszony elmélyítésében, amit ma már a katedra túloldalán én is igyekszem fenntartani: amikor volt valami friss részeredményem – mondjuk egy rövid periódusú változócsillag teljes ciklusát kimértem –, azt azonnal vittem a témavezetőmhöz. Kissé tiszteletlen szakkifejezéssel „dobtam egy csontot”, amit aztán ketten együtt megrágtunk, értelmeztük, és próbáltuk kitalálni, hogy hogyan tovább. Emlékeim szerint ezeket Karcsi mindig nagyon hálásan fogadta, mert miközben küzdött a nehézségekkel, akár csak az egyre bürokratikusabb adminisztrációval, ezeket az alkalmakat nagyon értékelte, mert addig is tudományos kérdésekkel tudott foglalkozni.

Az 1990-es évek csillagászati közéletében két kérdés képes volt bármikor élénk érzelmi reakciókat kiváltani. Egyik a profi csillagászok és az amatőr csillagász-mozgalom viszonya, ahol a két epicentrum az MTA Csillagászati Kutatóintézet mint az ország legnagyobb csillagászati kutatóhelye és az 1989-ben újjáalakított Magyar Csillagászati Egyesület (MCSE), addigra kb. ezer tagjával az ország legnagyobb csillagászati civil szervezete volt. Hazudnánk, ha

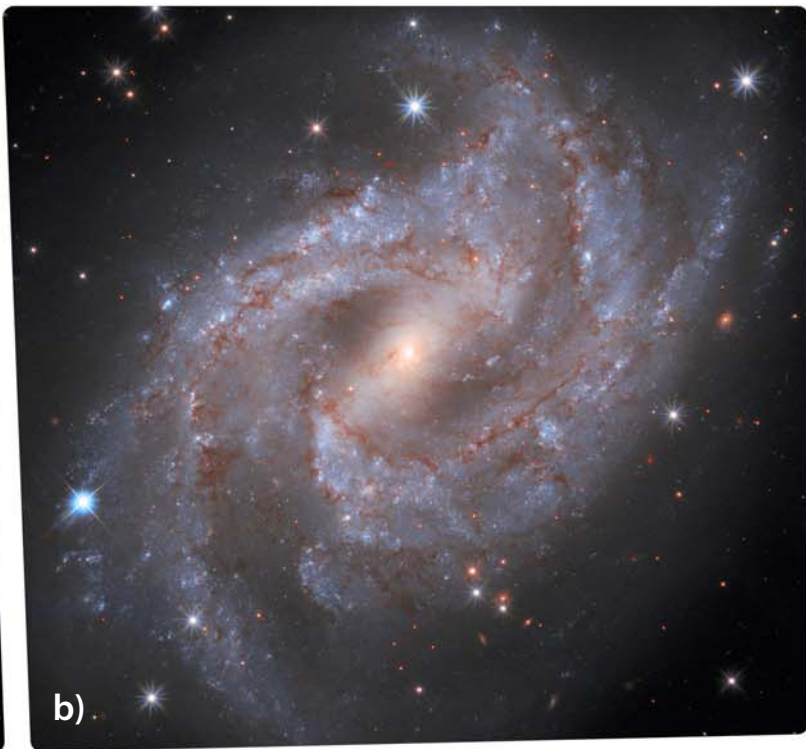
letagadnánk, hogy a két közösség között voltak súrlódások, amelyek oka, utólag visszanézve, szerintem egymás céljainak nem pontos megértése volt. Ezeket a félreértéseket Karcsi kezdettől fogva látta, és az ő munkássága mindig afelé hatott, hogy növelje a szakma és a műkedvelő közösség kölcsönös ismertségét és elismertségét. Saját kutatásaival egyértelműen úttörő munkát folytatott, hiszen kandidátusi értekezésének legfontosabb eredménye az amatőr csillagászok több évtizeden keresztül összegyűjtött vizuális fényességbecsléseinek felhasználása volt a pulzáló vörös óriáscsillagok kutatásában. Azzal, hogy Karcsi szerepet vállalt az MCSE vezetésében is, sokat tett azért, hogy a szakma és az amatőr közösség felismerje a kölcsönös tisztelet és elismerés előnyeit.

A másik érzékeny pont magán a szakmán belül merült fel. Mi ott, Szegeden az évtized második felében beindult folyamatos fejlődésnek köszönhetően kinőttük magunkat annyira, hogy az ötéves, osztatlan csillagászképzés akkreditációját az országban először mi kaptuk meg 1999-ben. Ez egyértelműen Karcsi oktatóként elért legfontosabb eredménye, aminek hatásait mindmáig látjuk. A szegedi csillagászkiskola ténylegesen iskolává vált, és a véges kutatásfinanszírozási forrásokért folytatott küzdelem kiváltott bizonyos ellenérzéseket a szakmán belül a centrum és a periféria viszonylatában gondolkodók között. Karcsi ezekbe a vitákba nem állt bele, viszont a tudományos kiválóság mindenek előtt elvét vallva ötvözte a benne élő diplomátát a gyakorló oktatóval és kutatóval. Hitem szerint az ő eredménye is, hogy ezek a viták a kétezres évek első évtizedének végére elcsitultak.

Végezetül egy személyes vallomás. 2024 szeptemberéig igazából nagymamám és szüleim halála rendített meg annyira, hogy a könnyek elfussák szememet, és percekig zokogva reagáljak egy családtag távozására. Karcsi erre is képes volt, és akkor értettem meg igazán, mennyire jelentős szerepet töltött be ő az életemben a szegedi éveim alatt – és későbbi pályámon.



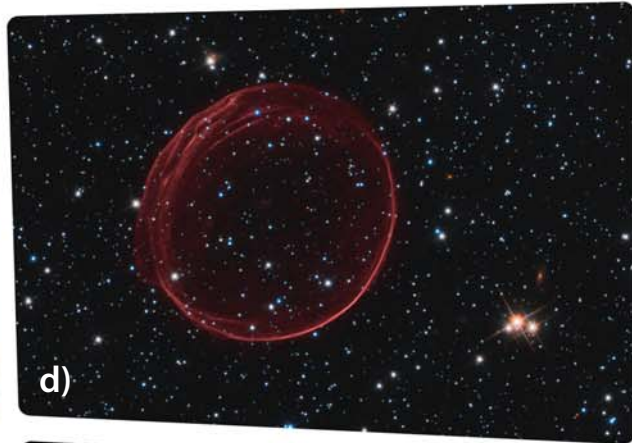
a)



b)



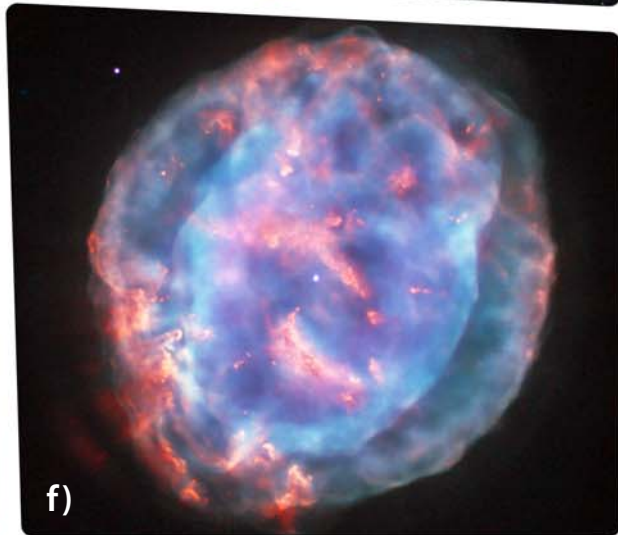
c)



d)



e)



f)

a) Az NGC 6302 jelű planetáris köd – anyagledobódás egy élete végén járó csillagról
Forrás: NASA, ESA and the Hubble SM4 ERO Team

c) A Piszkéstetői Observatórium a levegőből
2025. 04. 18-án (Sódor Ádám)

e) Az Orion-köd a Hubble-űrtávcső felvételén. A legnagyobb tömegű csillagok keletkezésének helye. Ezek a csillagok rövid életük során el sem hagyják szülőhelyüket
Forrás: NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team

b) Szupernóva az NGC 2525 jelű köllös spirálgalaxisban (a legfényesebb kék forrás balra lent)
Forrás: ESA/Hubble & NASA, A. Riess and the SH0ES Team
Acknowledgment: Mahdi Zamani

d) Szupernóva-maradvány a Nagy-Magellán-felhőben
Forrás: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA). Forrás: J. Hughes (Rutgers University)

f) Az NGC 6818 jelű planetáris köd – anyagledobódás egy élete végén járó csillagról
Forrás: ESA/Hubble & NASA; Acknowledgement: Judy Schmidt (geckzilla.com)

LEGYÉL TE A CSILLAGÁSZAT ÚJ BAJNOKA!



Athletica
Galactica

Kárpát-medencei Középiskolai
Csillagászati és Asztrofizikai
Verseny

*HA A KEDVENC TANTÁRGYAIK A MATEK ÉS FIZIKA...
HA ÉRDEKEL A CSILLAGÁSZAT ÉS AZ ŰRKUTATÁS...
HA SZERETNÉL A LEGJOBB EGYETEMEK KÖZÜL VÁLASZTANI...
EZ A TE VERSENYED, A TE LEHETŐSÉGED!*

I-III. forduló: az iskolában | ORSZÁGOS DÖNTŐ: Jászberényi Városi Könyvtár csillagdája

**A VERSENYEN INDULÓKNAK CSILLAGÁSZATI AG. NAP
A SVÁBHEGYI CSILLAGVIZSGÁLÓBAN**

**A LEGJOBBAK INDULHATNAK
A NEMZETKÖZI CSILLAGÁSZATI ÉS ASZTROFIZIKAI DIÁKOLIMPIÁN (IOAA)**

INDULJ TE IS!

Nevezés 2025 szeptembertől:

www.athleticagalactica.hu | info@athleticagalactica.hu

