

AZ OPTIKAI INTERFEROMETRIA 100 ÉVE A CSILLAGÁSZATBAN

100 YEARS OF OPTICAL INTERFEROMETRY IN ASTRONOMY

Kóspál Ágnes

az MTA doktora

Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest
kospal@konkoly.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Idén ünnepeljük a 100. évfordulóját annak, hogy először sikerült megmérni egy olyan csillag látszó átmérőjét, amely nem a mi Napunk. A méréshez az interferometria módszerét használták, amelynek csillagászati alkalmazása a 19. század végére nyúlik vissza, de a mai napig töretlenül népszerű, és számos alapvető fontosságú csillagászati felfedezést ért el ezzel a technikával. Ebben a cikkben bemutatom Michelson és kollégái híres kísérletét, amellyel meghatározták a Betelgeuze nevű vörös szuperóriás csillag látszó átmérőjét. Azt is áttekintem, hogyan fejlődött azóta a csillagászati interferometria, és mit tanultunk erről a csillagról az új műszereknek köszönhetően. Végül röviden összefoglalom az interferometriai kutatásokhoz és műszerfejlesztésekhez való magyar hozzájárulást.

ABSTRACT

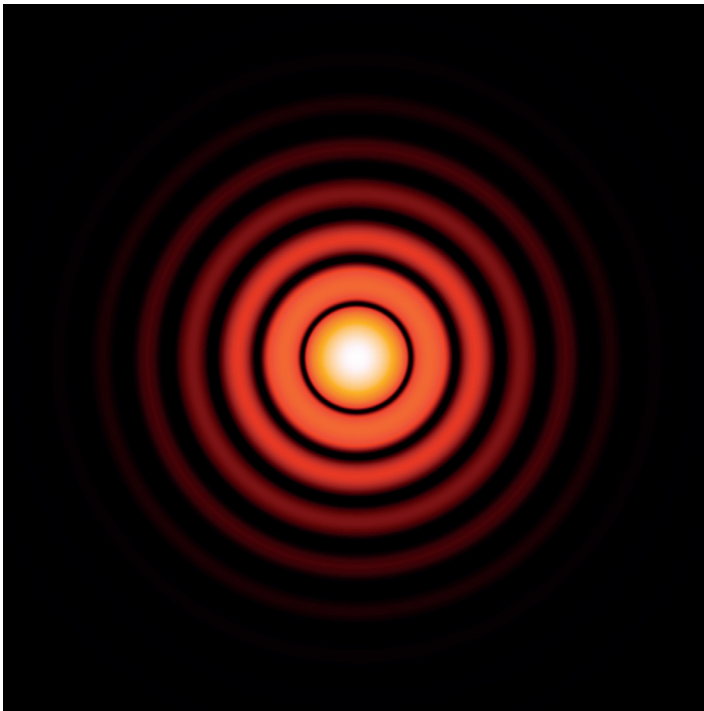
This year we celebrate the 100th anniversary of the first measurement of the apparent size of a star other than our Sun. The employed method, interferometry, and its astronomical applications date back to the end of the 19th century, but it is still popular today and has been providing many fundamentally important astronomical discoveries. In this article I describe the famous experiment carried out by Michelson and collaborators where they determined the apparent diameter of the red supergiant star Betelgeuse. I also review how astronomical interferometry has developed, and what we have learnt about this star since thanks to the new instruments. Finally, I briefly summarize the Hungarian contribution to interferometric research and instrument development.

Kulcsszavak: csillagászat, interferometria, Betelgeuze, Michelson

Keywords: astronomy, interferometry, Betelgeuse, Michelson

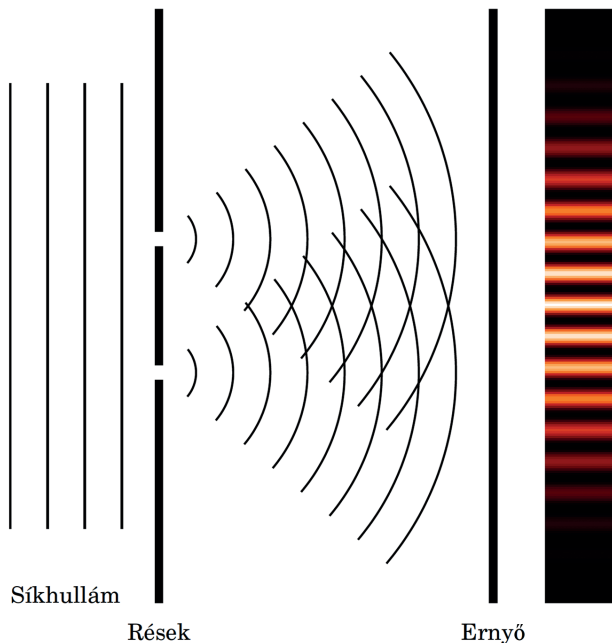
A CSILLAGÁSZATI INTERFEROMETRIA ALAPJAI ÉS EREDETE

Sokáig a Nap volt az egyetlen olyan csillag, amelynek felszínéről részletes megfigyeléseink voltak, hiszen a csillagok olyan távoliak, hogy még távcsövekkel is pontszerűnek tűntek. Egy távcső elméleti felbontását, vagyis, hogy milyen apró részletek figyelhetők meg vele az égen, a távcsőtükör átmérője és a vizsgált fény hullámhossza szabja meg. Ennek oka alapvetően a fény hullámtermészete. Egy optikai rendszerben a fénytörés miatt egy pontforrás képe nem tökéletes pont a fókuszsíkban. A távcsőnyíláson belépő fényhullámok néhol erősítik, néhol kioltják körülvéve. Ezt a mintázatot George Airy angol csillagász után Airy-mintázatnak hívjuk (1. ábra). A mintázat közepétől az első sötét gyűrűig a távolság $1,22 \lambda/D$ radián vagy $70 \lambda/D$ fok, ahol λ a vizsgált fény hullámhossza, D pedig a távcsőtükör átmérője. Minél nagyobb tehát a távcsőtükör, elméletileg annál kisebb az Airy-mintázat központi foltja, és annál könnyebb egymáshoz közeli kettőscsillagokat megkülönböztetni, vagy egy kiterjedt objektum méretét megállapítani. Ezt hívjuk Rayleigh-kritériumnak. Az optikai interferometriáról jó összefoglaló olvasható John Monnier és Slobodan Jankov cikkeiben (Monnier, 2003; Jankov, 2010).



1. ábra. Airy-mintázat számítógépes szimulációja a szerző által

Azt, hogy az interferometria jelenségét fel lehet használni a csillagok méretének meghatározására, először Hippolyte Fizeau francia fizikus vetette fel 1868-ban. A jelenség fizikai háttere 1801 óta ismert, ekkor publikálta Thomas Young angol fizikus és polihistor a híres kétrés-kísérletét. Amikor egy monokromatikus (egyetlen hullámhosszal jellemezhető) sík hullámfront (vagyis egy nagy távolságban elhelyezkedő pontszerű fényforrás sugárzása) áthalad az egymástól D távolságra levő két résen, az ernyőn sötét és világos sávokat látunk (2. ábra). Ha a fényforrás nem pontszerű, hanem kiterjedt, akkor a különböző szögben érkező fénysugarak kicsit másutt hozzák létre ezt a mintázatot, amelynek így a sötét és világos sávjai közti kontraszt lecsökken. Kimutatható, hogy az interferenciamintázat teljesen eltűnik, ha a fényforrás mérete $1,22 \lambda/D$. Nincs tehát más feladatunk, mint egy fényrekeszt tenni a távcsőtükör elé két réssel, előállítani az interferometria-mintázatot, majd addig távolítani a réseket egymástól, amíg a mintázat eltűnik. Ezzel a kísérlettel először Édouard Stephan, a Marseille-i Observatórium igazgatója próbálkozott meg 1872–73-ban a világ akkor legnagyobb tükrös távcsövével, egy 80 cm-es műszerrel, amelyet Léon Foucault épített (URL1). Stephan a Szíriuszra és más fényes csillagokra végzett méréseket, de csak annyit tudott megállapítani, hogy a csillagok látszó átmérője kisebb mint $1/6$ ívmásodperc (ma már tudjuk, hogy a Szíriusz szögátmérője mindössze $0,006$ ívmásodperc).



2. ábra. A kétrészes kísérlet során létrejövő interferenciamintázat

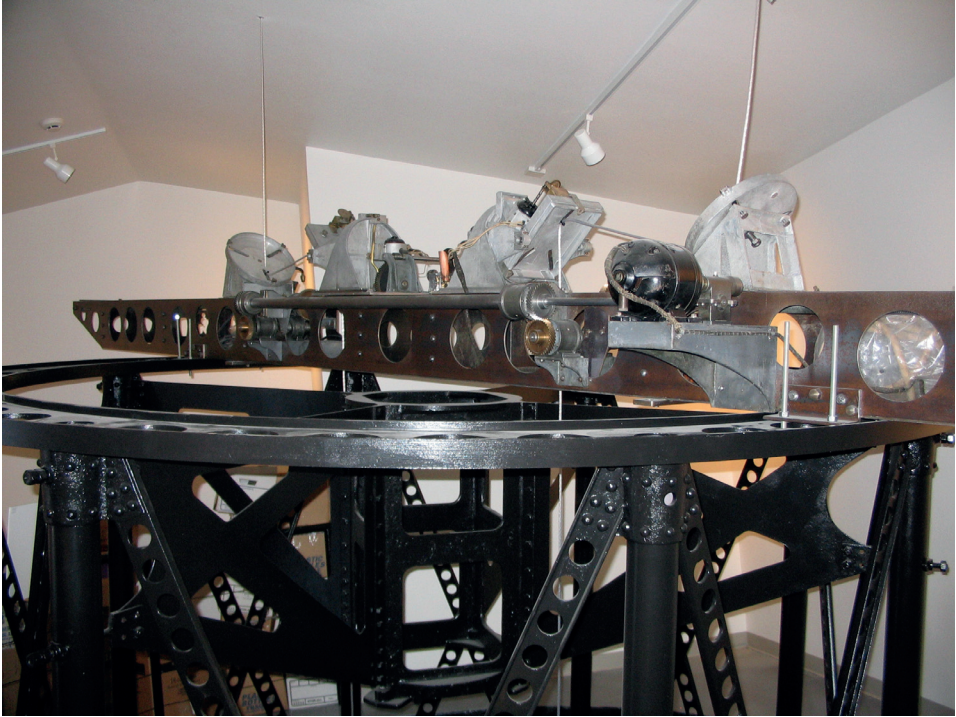
Ezzel egy időben az Egyesült Államokban Albert Michelson is ugyanez a probléma foglalkoztatta. Kidolgozta az interferometria matematikai alapjait, és 1890-ben Fizeau-tól és Stephantól függetlenül publikálta, hogyan lehet a csillagok átmérőjét megmérni a távcsőtükör elé helyezett két réssel (Michelson, 1890). Definiálta az interferometrikus vizibilitás fogalmát, ami tulajdonképpen az interferenciamintázat kontrasztja, az amplitúdója osztva az átlagával, azaz $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$. Megmutatható, hogy a vizibilitás nem más, mint az égi objektum fényességeloszlásának Fourier-transzformáltja (van Cittert–Zernike-tétel). A Lick Observatórium 30 cm-es refraktorával Michelson 1891-ben megmérte a Jupiter holdjainak átmérőjét, Karl Schwarzschild pedig 1896-ban a Müncheneri Observatórium 25 cm-es teleszkópjával több kettőscsillag szeparációját, vagyis a komponensek egymástól mért látszó távolságát (Michelson, 1891; Schwarzschild, 1896).

ZSENIÁLIS KÍSÉRLET A BETELGEUZE MÉRETÉNEK MEGMÉRÉSÉRE

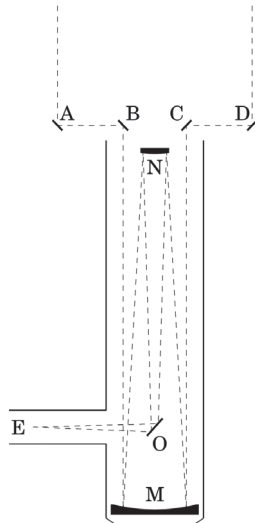
Ebben az időben már több csillag méretére voltak becslések. Ha egy csillagnak ismert a távolsága (például parallaxismérésből), akkor a látszó fényességéből ki lehet számolni a fényteljesítményét (L). Ha pedig ugyanennek a csillagnak megmérjük a színekét, abból megállapítható az effektív hőmérséklete (T). Feltételezve, hogy a csillag fekete testként sugároz, a csillag sugara és fényteljesítménye közötti összefüggés $R = \sqrt{L / (4\pi\sigma T^4)}$, ahol a σ a Stefan–Boltzmann-állandó. Ez alapján lehetett sejteni, hogy a legtöbb csillag látszó mérete nagyon kicsi, mindössze néhány század- vagy ezredívmásodperc. Félő volt, hogy a légkör zavaró hatása és az interferometrikus mérések nehézsége miatt a csillagok átmérőjének megmérése lehetetlen feladat.

Michelson és kollégái, Francis Pease és John Anderson 1920-ban a kaliforniai Mount Wilson Observatórium igazgatójának kérésére mégis megpróbálkoztak a méréssel, mégpedig a három évvel korábban elkészült 100 hüvelyk (2,5 méter) tükrőátmérőjű Hooker-távcsővel, a világ akkor legnagyobb távcsővével. Ennek tubusára építettek egy szerkezetet, amely négy tükröt tartalmazott (3–4. ábra). Ebben az összeállításban az A és D jelű tükrök felel meg a két résznek. Innen a fénysugarak a B és C síktükrökre, majd az M főtükörre, az N segédtükrökre, onnan pedig az O síktükrök segítségével a távcsőtubuson kívülre jutottak, és az E pontban egyesültek, ahol megtörtént az interferencia (Chant, 1921).

Célpontnak az Orion csillagkép egy fényes csillagát, a Betelgeuzét választották, bár akkor ennek a méretére még nem volt becslés, mert alacsony felszíni hőmérsékletű csillag lévén sugárzásának maximuma a színek infravörös tartományába esett, effektív hőmérséklete nem volt ismert, így a fent említett Stefan–Boltzmann-törvényt sem lehetett rá alkalmazni (URL1). A mérés során a távcsövet a Betelgeuzéra irányították, és megfigyelték a létrejött interferen-



3. ábra. A Michelson és munkatársai által a 2,5 méter tükörrátmérőjű Hooker-teleszkóp vázára szerelt interferométer (Fotó: Sonali Shukla)



4. ábra. Michelsonék mérési összeállításának vázlata

ciamintázatot. Kezdetben az A és D tükör 1,2 méterre volt egymástól. Ahogy távolították a két tükröt, a mintázat megváltozott, majd amikor a két tükör 3,065 méterre került egymástól, a mintázat eltűnt. A fényforrás mérete tehát $1,22 \lambda / D = 1,22 \times 0,000575 \text{ mm} / 3065 \text{ mm}$ radián = 0,047 ívmásodperc (Michelson–Pease, 1921).

EGY BUGYBORÉKOLÓ SZUPERÓRIÁS CSILLAG

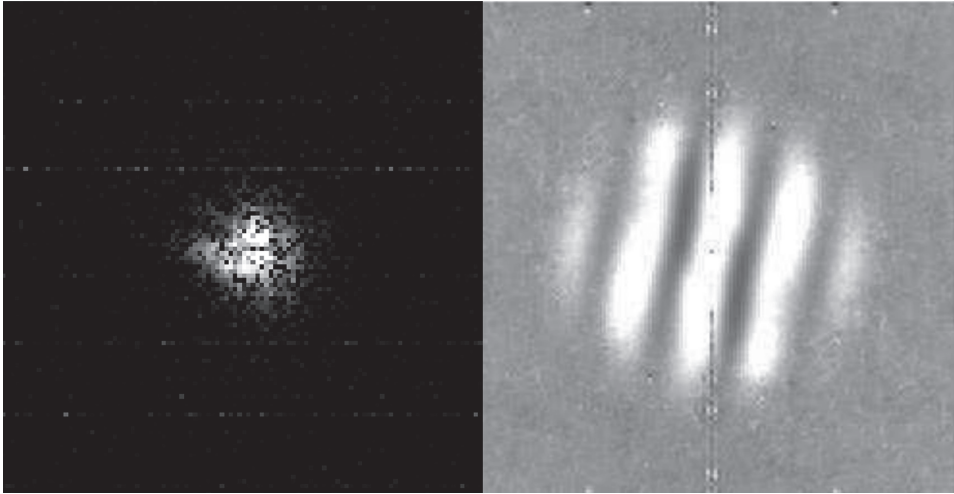
Az akkori mérések szerint úgy gondolták, a Betelgeuze távolsága 181 fényév, ebből pedig kiszámítható, hogy a csillag átmérője 2,6 CSE (a csillagászati egység a Nap és a Föld közötti átlagos távolság, 150 millió km). Többek között magyar hozzájárulásnak (Molnár László) is köszönhetően ma már tudjuk, hogy a csillag háromszor messzebb van, mint Michelsonék hitték (Joyce et al., 2020). A látszó méretére kapott érték viszont ma is pontosnak számít, az új távolsággal tehát a csillag átmérője mintegy 7 CSE. Ez azt jelenti, hogy ha a Betelgeuze a Nap helyén lenne, elnyelné a Merkúrt, a Vénuszt, a Földet, a Marsot és a kisbolygóöv nagy részét is. Mérete majdnem ezerszerese a Napénak, vörös szuperóriás csillagként magjában a hidrogén már elfogyott, így a hidrogénfúzió a mag körüli héjban zajlik.

A Michelson és kollégái felfedezését követő hetvenöt év során a Betelgeuze a legnagyobb látszó átmérőjű csillagnak számított (ma már csak második legnagyobb az R Doradus után). Így nem csoda, hogy számos megfigyelés vette célba, először, hogy minél több különböző hullámhosszon megmérjék a méretét, később pedig, hogy közvetlen képet alkossanak a felszínéről.

Az 1970-es évek elején Antoine Labeyrie kidolgozta a folt-interferometria technikáját (Labeyrie et al., 1970; Bonneau–Labeyrie, 1973). Ez eltér a korábbi klasszikus rés-interferometriától, ugyanis egy távcső teljes apertúráját használja. A földi légkör zavaró hatása miatt kellően nagy távcsőtükör esetén sem lesz tetszőlegesen keskeny az Airy-mintázat központi csúcsa. A véletlenszerű légköri turbulencia hatására az égi objektumból érkező síkhullám amplitúdója és fázisa torzul, interferencia alakul ki, és a mintázat felbomlik apró foltokra, amelyek időben gyorsan változnak. Nagy nagyítással és a légkör turbulenciájához képest rövid expozíciós idővel ez a foltmintázat rögzíthető, és Fourier-analízis segítségével kinyerhető belőle az a nagy térbeli felbontású információ, amely hosszabb exponálású képeken összemosódik, elvész. Folt-interferometriával egyébként Magyarországon is folytak sikeres kísérletek (5. ábra).

A folt-interferometria technikájával Daniel Gezari és munkatársai 1972-ben a Hale Observatórium 5,1 méter tükörátmérőjű távcsövével több különböző színű szűrővel is megmérték a Betelgeuzét. Azt találták, hogy a mérete függ a megfigyelt fény hullámhosszától: kékben nagyobb, mint vörösben a csillag fotoszférá-

ja felett elhelyezkedő kromoszférában történő fényszóródás miatt (Gezari et al., 1972). Azt is észrevették, hogy a Betelgeuze nem egyenletesen fényes korong, hanem a széle sötétebb, ugyanúgy, mint a Nap esetében. A szélsötétedés oka az, hogy a csillag fotoszférájában felfelé csökken a hőmérséklet.



5. ábra. A HD 50522 jelű kettőscsillag közvetlen képalkotással (balra) és folt-interferometriával készített interferogramja (jobbra).

A képeket Detre Örs Hunor, Regály Zsolt és Mező György 2007-ben készítette a Piszkéstetői Observatórium 50 cm tükörátmérőjű távcsövével

A folt-interferometria technikája mellett foglalkoztak azzal a módszerrel is, hogy a távcsőtükört letakarták, és csak a tükör bizonyos pontjaira engedtek fényt, kicsit hasonlóan a kétrés-kísérlethez. Ezt hívják apertúramaszkolásnak. Az így kapott képekből az interferometrikus vizibilitások modellezésével, Fourier-analízissel lehet megkapni a megfigyelt csillag fényességeloszlásának nagy felbontású képét. A Betelgeuzéra több ilyen mérés is született az 1980-as években, míg végül 1989-ben David Buscher és munkatársainak először sikerült kimutatniuk a 4,2 méter tükörátmérőjű William Herschel-teleszkóppal, hogy a Betelgeuze felszínén egy fényes folt van, amely a csillag teljes fényességének 10–15%-át adja (Buscher et al., 1990). Az ezt követő évek során a mérést többször megismételték, és esetenként két vagy három foltot is találtak a csillagon (Wilson et al., 1997). A foltok fényessége és elhelyezkedése már néhány hét alatt megváltozott, méretük és fényességük pedig konvekciós eredetre utalt, vagyis olyan buborékokra, ahol a környezeténél forróbb gáz emelkedik fel a csillag felszínére. A konvekciónak fontos szerepe van abban, hogy a magfúzió által felszabadult energia kijusson a csillagok belsejéből.

1997-ben David Burns és munkatársai először publikáltak egy csillagról olyan térbelileg felbontott képet, amely nem egyetlen távcsővel készült, hanem több különálló teleszkóp fényét kombinálta (Burns et al., 1997). A mérés az angliai Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope (COAST) műszerrel készült, amely négy 40 cm-es távcsőből állt, a célpont pedig – természetesen – a Betelgeuze volt. Érdekes módon ekkor nem találtak foltokat a csillagon, bár fél évvel korábban, amikor a Hubble-űrtávcsővel először készítettek közvetlen (nem interferometrikus) képet a csillagról, még volt rajta folt (Gilliland–Dupree, 1996). Ahhoz, hogy a Hubble-űrtávcsővel fel lehessen bontani a Betelgeuze képét, nemcsak az kellett, hogy kijavítsák a teleszkóp főtükreinek leképezési hibáját, hanem az is hozzájárult, hogy a mérések ultraibolya hullámhosszon történtek, ahol a Betelgeuze több mint kétszer akkorának látszik, mint optikai hullámhosszakon. Földi telepítésű interferométerekkel még mindig jobb térbeli felbontás érhető el, mint bármelyik űrtávcsővel. 2009-ben Xavier Haubois és kollégái már egészen látványos képet készítettek a Betelgeuzéről infravörös hullámhosszon a három 45 cm-es távcsőből álló arizonai IOTA-interferométerrel. A csillagon ezúttal két fényes foltot láttak (Haubois et al., 2009).



6. ábra. Fantáziakép a Betelgeuze csillagról, felszínén a forró buborékokkal, körülötte pedig az alacsonyabb hőmérsékletű kiáramló anyaggal (ESO, L. Calçada)

A Betelgeuze 2020 elején azzal került a hírekbe, hogy szokatlanul elhalványult, minimumban korábbi fényességének mindössze 25%-ával világított. Több mint száz évre visszanyúló fényességmérések alapján tudjuk, hogy a csillag gyakran mutat fényváltozásokat, amelyek egy része nem a korábban említett fényes foltok el- és feltűnésével kapcsolatos, hanem azzal, hogy a szuperóriás csillag folyamatosan veszít az anyagából. A kiáramló anyag óriás gáznyúlványokat alkot (6. ábra). Amint a kiáramló gáz eléggé lehűl, benne szilárd szemcsék kondenzálódnak ki, amelyek porfelhőt alkotnak a csillag körül. Ez a por időnként eltakarja a csillagot, annak időszakos elhalványulását okozva (Kervella et al., 2009; Ohnaka et al., 2009; Levesque–Massey, 2020).

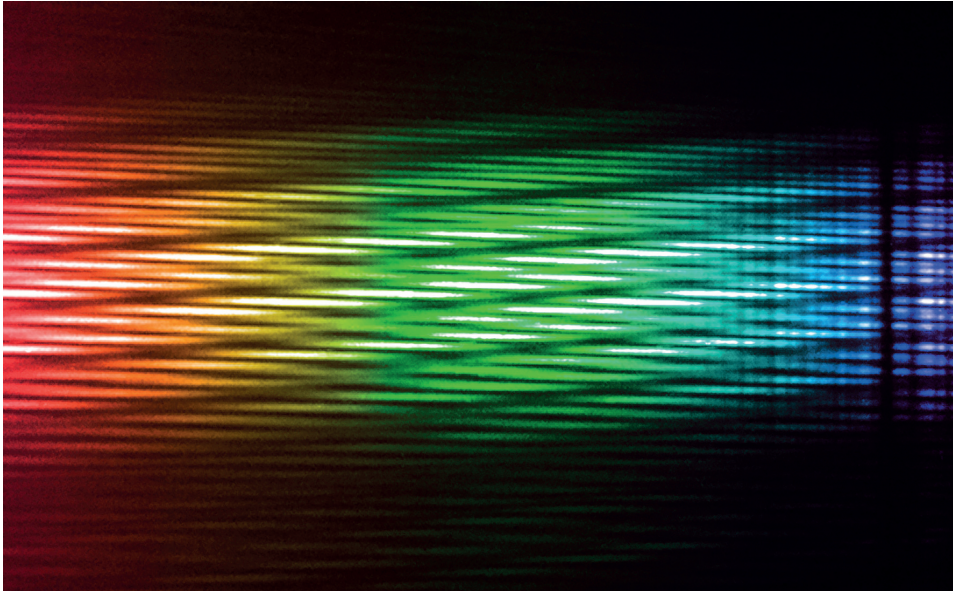
MAGYAR HOZZÁJÁRULÁS INTERFEROMETRIAI KUTATÁSOKHOZ ÉS MŰSZERFEJLESZTÉSEKHEZ

Optikai és infravörös hullámhosszakon a legnagyobb interferométer az Európai Déli Obszervatórium (ESO) chilei Nagyon Nagy Távcsövén (Very Large Telescope, VLT) működik a chilei Paranal Obszervatóriumban, a Föld egyik legszárabb, legjobb asztroklimájú vidékén. A 2001 óta működő VLT Interferométer (VLTI) négy 8,2 méter tükörátmérőjű fix távcsöből és négy 1,8 méteres mozgatható távcsöből áll (Glindemann et al., 2001). A távcsövek kettesével, hármasával vagy négyesével használhatók interferometriára. Ezzel a valaha készült legelősebb kép felbontása 0,004 ívmásodperc.

Az 1962-es alapítású ESO Európa első számú kormányközi csillagászati szervezete, amelynek jelenleg tizenhat európai tagállam és Chile a tagja. Bár Magyarország nem tagja az ESO-nak, nemzetközi együttműködések keretében a magyar kutatók rendszeresen használják az ESO távcsöveit, többek között annak interferométerét is. A Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Csillagászati Intézetében 2003 óta folynak infravörös-interferometriai kutatások. Mosoni László a VLTI MIDI műszerének csapatában dolgozott a heidelbergi Max Planck Intézetben, ahonnan fontos szaktudást hozott haza. Magyar csillagászok rendszeresen részt vesznek az ESO által tartott VLTI nyári iskolák szervezésében is, melyeken a fiatal kutatók tanulhatják meg a bonyolult műszerek használatát, az interferometrikus mérések tervezését és az adatok feldolgozását. 2008-ban például Keszthelyen rendezték meg a VLTI nyári iskolát, és tervben van, hogy 2022-ben vagy 2024-ben újra Magyarországra hozzuk ezt a rendezvényt.

A VLTI legújabb műszere a 3–13 mikrométeres hullámhosszon, az infravörös tartományban működő MATISSE, amely 2018-ban állt a csillagászok szolgálatába. Ez az első olyan közép-infravörösben működő interferométer, amely négy távcső jelét kombinálja, és alkalmas a képalkotásra (Lopez et al., 2014). A műszerrel elsőként a Betelgeuze, Rigel és Szíriusz csillagokat vizsgálták (7. ábra). A MATISSE sikeréhez magyar kutatók munkája is hozzájárult. Ilyen volt a mű-

szerben az abszolút nulla fok közelében működő motorok által okozott hőterhelés hőtani szimulációja, egy műszeregység kalibrációs kamerájának megtervezése és legyártása, modellezés a műszer biztonságos mozgatásához szükséges szállítóelemekre, a szállítási műveletek során várható mechanikai igénybevételre, valamint a műszer felhasználói szoftverének kialakításában és fejlesztésében való részvétel is. 2018 márciusában magyar csillagászok is részt vettek Chilében a MATISSE üzembe helyezésében.



7. ábra. A Szíriusz csillagról a MATISSE-műszerrel kapott interferenciamintázat.
(Forrás: ESO/MATISSE-konzorcium)

Magyarországon az infravörösben végzett interferometrikus mérésekkel kapcsolatos kutatások elsősorban a fiatal, fősorozat előtti csillagok körüli anyagkorongok vizsgálatára koncentrálnak, többek között az MTA (Kóspál Ágnes, Lendület pályázat, 2014), az Európai Kutatási Tanács (Kóspál Ágnes, ERC Starting Grant pályázat, 2017) és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (Ábrahám Péter, kutatási témapályázat, 2019) támogatásával. Ezeknek a korongoknak fontos szerepük van a csillagok felépülésében, és ezek a szülőhelyei az exobolygórendszereknek is. Varga József és munkatársai 2018-ban átfogó vizsgálatot publikáltak, amelyben a VLTI MIDI-műszerével nyolcvankét fiatal csillag körüli korongról 8–13 mikrométer tartományban készült interferometrikus méréseket elemeztek (Varga et al., 2018). Az ugyancsak a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Csillagászati Intézetben dolgozó Lei Chen és kollégái a HD 169142

jelű közepes tömegű fiatal csillagról készítettek több alkalommal 1,65 mikrométeren interferometrikus méréseket (Chen et al., 2019). Az adatok vizsgálatából kiderült, hogy a csillag körül valószínűleg korábban létrejött planetézimálok, bolygókezdemények összeütközése nyomán egy törmelékből álló gyűrű jött létre a csillagtól kb. 0,3 CSE távolságban (a Naprendszerben nagyjából ilyen távolságban kering a Nap körül a Merkúr). Csillagok környezetét kizárólag interferometrikus mérésekkel lehet ilyen térbeli skálán vizsgálni. Ezek az eredmények is tanúsítják, hogy Michelson száz évvel ezelőtti úttörő kísérlete óta az interferometria beépült a csillagászok eszköztárába az egész világon, így Magyarországon is.

A szerző kutatásait az Európai Unió Horizon 2020 kutatási és innovációs programjának keretében az Európai Kutatási Tanács (ERC) 716155 számú (SACC-RED) pályázata, valamint a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal 132406 számú kutatási témapályázata támogatja.

IRODALOM

- Bonneau, D. – Labeyrie, A. (1973): Speckle Interferometry: Color-dependent Limb Darkening Evidenced on Alpha Orionis and Omicron Ceti. *The Astrophysical Journal*, 181, L1–L4. ADS¹: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1973ApJ...181L...1B>
- Burns, D. – Baldwin, J. E. – Boysen, R. C. et al. (1997): The Surface Structure and Limb-darkening Profile of Betelgeuse. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 290, L11–L16. DOI: 10.1093/mnras/290.1.L11
- Buscher, D. F. – Haniff, C. A. – Baldwin, J. E. et al. (1990): Detection of a Bright Feature on the Surface of Betelgeuse. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 245, 7–11. ADS: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1990MNRAS.245P...7B>
- Chant, C. A. (1921): Betelgeuse: How Its Diameter Was Measured. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 15, 133–136. ADS: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1921JRASC..15..133C>
- Chen, L. – Moór A. – Kreplin, A. et al. (2019): Variable Warm Dust around the Herbig Ae Star HD 169142: Birth of a Ring? *The Astrophysical Journal Letters*, 887, L32. DOI: 10.3847/2041-8213/ab59dd, arXiv, <https://arxiv.org/pdf/1911.10253.pdf>
- Gezari, D. Y. – Labeyrie, A. – Stachnik, R. V. (1972): Speckle Interferometry: Diffraction-Limited Measurements of Nine Stars with the 200-inch Telescope. *The Astrophysical Journal*, 173:L1–L5. ADS: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1972ApJ...173L...1G>
- Gilliland, R. L. – Dupree, A. K. (1996): HST imaging of Betelgeuse. In: Strassmeier, K. G. – Linsky, J. L. (eds.): *Stellar Surface Structure: Proceedings of the 176th Symposium of the International Astronomical Union*, held in Vienna, Austria, October 9–13, 1995. International Astronomical Union. Symposium no. 176, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers ADS: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1996IAUS..176..165G>

¹ ADS – SAO/NASA Astrophysics Data System

- Glindemann, A. – Bauvir, B. – Delplancke, F. et al. (2001): Light at the End of the Tunnel – First Fringes with the VLTI. *The Messenger*, 104, 2–5. ADS: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2001Msngr.104....2G>
- Haubois, X. – Perrin, G. – Lacour, S. et al. (2009): Imaging the Spotty Surface of Betelgeuse in the H band. *Astronomy and Astrophysics*, 508, 923–932. DOI: 10.1051/0004-6361/200912927
- Jankov, S. (2010): Astronomical Optical Interferometry. I. Methods and Instrumentation. *Serbian Astronomical Journal*, 183, 1–17. DOI: 10.2298/SAJ1081001J
- Joyce, M. – Leung, S.-C. – Molnár L. et al. (2020): Standing on the Shoulders of Giants: New Mass and Distance Estimates for Betelgeuse through Combined Evolutionary, Asteroseismic, and Hydrodynamic Simulations with MESA. *The Astrophysical Journal*, 902, 63. DOI: 10.3847/1538-4357/abb8db, <https://arxiv.org/pdf/2006.09837.pdf>
- Kervella, P. – Verhoolst, T. – Ridgway, S. T. (2009): The Close Circumstellar Environment of Betelgeuse. Adaptive Optics Spectro-imaging in the Near-IR with VLT/NACO. *Astronomy & Astrophysics*, 504, 115–125. DOI: 10.1051/0004-6361/200912521
- Labeyrie, A. (1970): Attainment of Diffraction Limited Resolution in Large Telescopes by Fourier Analysing Speckle Patterns in Star Images. *Astronomy & Astrophysics*, 6, 85–87. ADS: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1970A%26A....6...85L>
- Levesque, E. M. – Massey, Ph. (2020): Betelgeuse Just Is Not That Cool: Effective Temperature Alone Cannot Explain the Recent Dimming of Betelgeuse. *The Astrophysical Journal Letters*, 891, L37. DOI: 10.3847/2041-8213/ab7935, <https://arxiv.org/pdf/2002.10463.pdf>
- Lopez, B. – Lagarde, S. – Jaffe, W. et al. (2014): An Overview of the MATISSE Instrument – Science, Concept and Current Status. *The Messenger*, 157, 5–12. <http://www.eso.org/sci/publications/messenger/archive/no.157-sep14/messenger-no157-5-12.pdf>
- Michelson, A. A. (1890): Note on the Definition, the Resolving Power and the Accuracy of Telescopes and Microscopes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2, 115–117. ADS: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1890PASP....2..115M>
- Michelson, A. A. (1891): Measurement of Jupiter’s Satellites by Interference. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 3, 274–278. ADS: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1891PASP....3..274M>
- Michelson, A. A. – Pease, F. G. (1921): Measurement of the Diameter of α Orionis with the Interferometer. *Astrophysical Journal*, 53, 249–259. DOI: 10.1086/142603
- Monnier, J. D. (2003): Optical Interferometry in Astronomy. *Reports on Progress in Physics*, 66, 789–857. DOI: 10.1088/0034-4885/66/5/203, ADS: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0307036.pdf>
- Ohnaka, K. – Hofmann, K.-H. – Benisty, M. et al. (2009): Spatially Resolving the Inhomogeneous Structure of the Dynamical Atmosphere of Betelgeuse with VLTI/AMBER. *Astronomy & Astrophysics*, 503, 183–195. DOI: 10.1051/0004-6361/200912247
- Schwarzschild, K. (1896): Über Messung von Doppelsternen durch Interferenzen. *Astronomische Nachrichten*, 139, 353. DOI: 10.1002/asna.18961392302, ADS: <http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1896AN....139..353S>
- Varga J. – Ábrahám P. – Chen, L. et al. (2018): VLTI/MIDI Atlas of Disks Around Low- and Intermediate-mass Young Stellar Objects. *Astronomy & Astrophysics*, 617, A83. DOI: 10.1051/0004-6361/201832599
- Wilson, R. W. – Dhillon, V. S. – Haniff, C. A. (1997): The Changing Face of Betelgeuse. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 291, 819–826. DOI: 10.1093/mnras/291.4.819
- URL1: Lequeux, J.: La mesure du diamètre des étoiles. *Bibnum* [En ligne], Physique, mis en ligne le 01 juillet 2014. <http://journals.openedition.org/bibnum/687>