

CSILLAGÁSZAT ÉS KOZMIKUS FÉNY

ASTRONOMY AND COSMIC LIGHT

Szabó Róbert

az MTA doktora, tudományos főmunkatárs, igazgatóhelyettes,
MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet
szabo.robert@csfk.mta.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Röviden és közérthetőségre törekedve áttekintem, hogy milyen információhordozók által szerezzük ismereteinket az Univerzumból, különös tekintettel a fényre, hiszen ez az írás a *Fény napja* című rendezvényen elhangzott előadás összefoglalója, ahol elsősorban középiskolás diákok vettek részt.

A szubjektív áttekintés kitér a napfogyatkozások jelentőségére, az elektromágneses spektrum különböző tartományainak hozzájárulására csillagászati ismereteinkhez, a fényességmérés pontosságának jó egy évtizede kezdődött forradalmára, és ennek köszönhetően olyan tudományos eredményekre, mint például az exobolygók gyakoriságának megállapítása. Végül a fény hullámhossz szerinti felbontásáról, azaz a csillagászati spektroszkópiáról is szót ejtek.

ABSTRACT

I briefly review the range of cosmic messengers carrying information about the Universe. I mainly focus on light, since this paper is the summary of a talk I gave at the 'Day of Light' event attended by high-school students. My subjective overview covers the significance of solar eclipses, the contribution of different parts of the electromagnetic spectrum to our astronomical knowledge, the revolution of the precision of measuring brightness that started about a decade ago, as well as related scientific results, like the occurrence rate of exoplanets. I finish with discussing breaking the light into its constituents, i.e. astronomical spectroscopy.

Kulcsszavak: spektroszkópia, csillagászat, fotometria, exobolygók, elektromágneses sugárzás, Európai Déli Observatórium

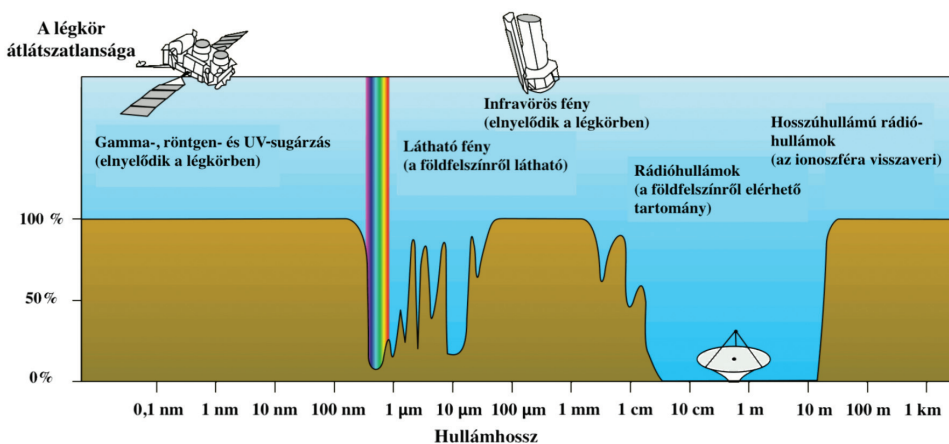
Keywords: spectroscopy, astronomy, photometry, exoplanets, electromagnetic radiation, European Southern Observatory

INFORMÁCIÓHORDOZÓK A KOZMOSZBÓL

Milyen módon szerzünk információt a körülöttünk található világról, ezen belül is az Univerzumból? Ha közvetlen kozmikus környezetünktől eltekintünk – hiszen a Naprendszer közvetlenül is vizsgálhatjuk, akár geológiai módszerekkel, például meteoritok vagy a helyszínre küldött bolygószondák segítségével –, kiderül, hogy megszerzett tudásunk túlnyomó része az elektromágneses sugárzás tanulmányozása által született. Elég, ha csak Galilei történelmi mozdulatára gondolunk, amellyel először emelte az égbolt felé kezdetleges távcsövet, vagy a Földön található 8-10 m átmérőjű csillagászati teleszkópokra, vagy akár a mindenki által ismert Hubble-űrtávcső gyönyörű felvételeire.

Az előbb említett eszközök azonban csak egy szűk szeletét használják az elektromágneses sugárzásnak – a közeli-ultraibolyától kezdve a látható fényen keresztül a közeli-infravörös tartományig. A csillagászat azonban az utóbbi évtizedekben fokozatosan meghódította a teljes elektromágneses spektrumot, bár a földi légkör csak két „ablakban” enged többé-kevésbé zavartalan kitekintést: ezek a látható fény hullámhossztartománya és az ún. rádióablak (1. ábra). Nem véletlen, hogy a csillagászati obszervatóriumokat magas hegytetőkre, száraz fennsíkokra, sivatagokba telepítik. A kevesebb lég- és fényszennyezés és gyakori tiszta égbolt mellett így igyekszünk kitágítani az Univerzumra nyíló ablakot: az alacsony vízgőztartalom kedvez az infravörös és mm-es hullámhosszú megfigyeléseknek is. De mire használhatók a nem látható hullámhossztartományt lefedő megfigyelések? Részletes felsorolás helyett itt csak tömören vázoljuk a perspektívákat.

A röntgen- és gammafotonok a nagy energiájú folyamatok (szupernóva-robbanás, gammakitörés, fekete lyuk körüli anyagbefogás) nyomjelzői. Az ultraibolya-



1. ábra. A légkör átteresztőképessége az elektromágneses sugárzásra nézve (NASA)

lya tartományban a forró csillagok, valamint a Nap- és csillagkitörések látszanak legjobban. Infravörös és mm-es hullámhossztartományban a csillagközi por és a gázfelhők is átlátszóvá válnak, tanulmányozható a csillag- és bolygókeletkezés folyamata, maga a csillagközi anyag, a hideg csillagok, a Naprendszeren kívüli bolygók, és a sor hosszan folytatható lenne. A rádiótávcsövek a legtávolabbi objektumokat (galaxisokat, galaxishalmazokat) fürkészik, nagy térbeli felbontással, illetve a szinkrotronsugárzást is detektálják, amelyeket egyes szupernóva-maradványok bocsátanak ki. Ezenkívül a csillagközi anyag eloszlását, tulajdonságait, összetevőit (például a szerves molekulákat) is analizálják. A naprendszerbeli, Földet megközelítő kisbolygókat pedig akár aktív radarmérésekkel is követik pályájuk és alakjuk pontosítása érdekében.

Nem lenne teljes a felsorolás, ha kihagynánk az információhordozók sorából a kozmikus sugárzást, amely nagy energiájú részecskéket, például protonokat, elektronokat, neutrínókat, atommagokat is magába foglal, és amely az Univerzum legnagyobb energiájú boszorkánykonyhájáról hoz hírt, így a szupernóva-robbanásokról és -maradványokról, összeroppanó csillagokról, a galaxisok középpontjában található gigantikus tömegű fekete lyukak közvetlen környezetéről.

Az utóbbi években azonban egy újabb lehetőség jelent meg az asztrofizikusok eszköztárában, ez pedig a gravitációs hullámok használata. Ezek a proton méretével összemérhető mértékű zavarok a téridő szövetének parányi fodrozódásai, és a téridőben akkor keletkeznek, amikor nagy tömegű testek mozognak erős gravitációs térben. Ilyen például a kettős fekete lyukak mozgása és összeolvadása. A hatást Albert Einstein és az általános relativitáselmélet jósolta meg, és 2015-ben sikerült először kimutatni (Abbott et al., 2016). Az eszköz új horizontot nyit az asztrofizikában: most már nemcsak „látjuk”, de „halljuk” is az Univerzum kataklizmáit.

A következőkben a „fényel” – azaz az elektromágneses spektrum 400–700 nanométer hullámhossztartományába eső sugárzással – és a csillagászat számára abból nyerhető hasznos információkkal foglalkozunk.

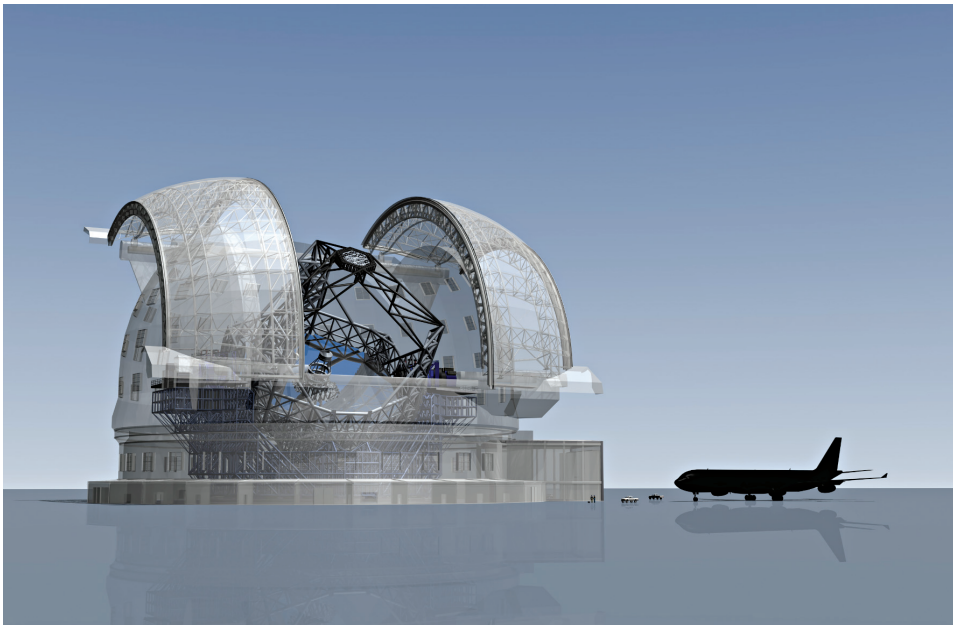
AMIKOR KEVÉS A FÉNY

A csillagászok az esetek túlnyomó részében halvány objektumokat örökítenek meg, vagy spektroszkópiai megfigyelések céljából szétbontják az égitestekről jövő fényt hullámhossz szerint, ami tovább csökkenti a rendelkezésre álló fotonok számát az adott hullámsávban. Ennek meggondolása alapján érthetjük meg, hogy a távcsövek tulajdonképpen hatalmas „fénygyűjtő vödörként” foghatók fel. Az emberi szemben található pupilla átmérője 5 mm, a legnagyobb távcsövek pedig 8–10 méter átmérőjűek (a hazai teleszkópok átmérője legfeljebb egy méter). Ezek a monstrok már pusztán a fénygyűjtő terület különbsége folytán több

milliószor halványabb égitesteket engednek láttatni, mint az egyik legfontosabb érzékszervünk, a szemünk. Ennek fényében még megdöbbentőbb az épülő óriástávcsövek mérete: 30–40 méter átmérőjű távcsőmonstrumok tervezése zajlik, az európai összefogással épülő 39 méteres E-ELT (European Extremely Large Telescope) építése pedig már el is kezdődött (2. ábra) (URL1).

Ez a teleszkóp Chilében épül, és az Európai Déli Observatórium (European Southern Observatory, ESO) elnevezésű kormányközi szervezet vállalkozása. Az ESO korábban épült optikai és rádiótávcsöveit magyar kutatók is rendszeresen használják, holott a szervezetnek Magyarország még nem tagja. A hatalmas fénygyűjtő felület és a hozzá tartozó legkorszerűbb műszerek a kozmológia és az exobolygók vizsgálatának egyik legfontosabb műszerévé fogják avatni az E-ELT-t, amelynek átadását 2024-re tervezik. Az Atacama-sivatag Cerro Armazones nevű hegycsúcsán létesítendő egyedülálló építmény az Univerzum kezdetén létrejött galaxiskezdemények és struktúrák kialakulását fogja kutatni, valamint alkalmas lesz az exobolygók, vagyis a Naprendszeren kívül (más csillagok körül) található planéták alapos vizsgálatára is. Ebben a minőségében valószínűleg új érat fog nyitni a csillagászatban.

Ha már a nagy távcsöveket említettük, a fénygyűjtő képesség mellett a felbontóképesség is fontos tényező, ami szintén a fény hullámtermészetéből adódó



2. ábra. Az épülő 39 méter átmérőjű European Extremely Large Telescope terve egy Airbus A340-es repülőgéphez viszonyítva (ESO)

természetes korlát. Az elméleti szögfelbontás elérését földi távcsövek esetén a légköri hullámzás, turbulencia meggátolja. Ezen segít az ún. adaptív optika elvének alkalmazása. Ebben az esetben hullámfront-korrektíót végzünk, másodpercenként akár több százszor, ami lehetővé teszi az elméleti felbontóképesség megközelítését. Az eljáráshoz célpontunkhoz közeli, fényes csillag szükséges, és a módszer így is csak annak viszonylag kis környezetében működik. A fényes csillagot sokszor nagy teljesítményű lézerrel helyettesítik, ez a 90 km magasban levő nátriumréteget gerjeszti a légkörben, ami fényleni kezd. Ennek a mesterséges csillagnak a torzulásai alapján deformálják az optikai elemeket úgy, hogy a látómezőbeli objektum fénye éles maradjon. (Tehát a szemmel is látható lézerefény egy irányba mutat a teleszkóppal, de mégsem a célzást segíti elő, mint ahogy a cikk szerzője hallotta olykor laikusoktól.)

Még egy szempontot kell szem előtt tartanunk, ha a begyűjthető fotonok számát tekintjük: nem elég annak ismerete, hogy mekkora területet metsz ki teleszkópunk a távoli égitestről jövő hullámfrontból, az is fontos, hogy ennek mekkora részét tudja hasznosítani, és mennyi ideig tudja integrálni. A szem ugyanis nem képes összegyűjteni, majd utána kiolvasni a bejövő jelet, hanem rövid ideig gyűjti a fényt, és a látott képet az agy azonnal feldolgozza. Ezzel szemben a csillagászatban hagyományosan hosszú expozíciós időkkel dolgoznak: ez lehet több óra, de akár néhány nap is. Ennek oka a már említett hatékonyságban keresendő: míg a múlt században a hosszú ideig általánosan használt csillagászati detektorok, a fotólemezek a fénynek mintegy ezrelékét tudták hasznosítani, addig a ma egyeduralkodó CCD-kamerák (digitális fényképezőgépekben és mobiltelefonokban univerzálisan megtalálható töltéscsatolt eszközök) akár 90% feletti hatékonysággal rögzítik a beeső fotonokat (bizonyos hullámhossztartományban).

AMIKOR SOK A FÉNY

Ritkán ugyan, de még a csillagászatban is előfordul, hogy túl sok fénnel dolgozunk. Ez jellemzően központi csillagunk, a Nap megfigyelésénél történik. Ebben az esetben a távcsőtükrök és egyéb optikai elemek fényvisszaverő (vagy éppen -áteresztő) képessége korántsem olyan fundamentális jelentőségű, mint az éjszakai üzemmódban használt társaiknál. Sőt a naptávcsöveknél sok esetben nem is kap visszaverő réteget a távcsőtükör, hogy csökkenjen a beeső fény mennyisége. A felbontás és a kép mozdulatlansága (szaknyelven *seeing*) azonban itt is kiemelt fontosságú.

Az égbolt leglátványosabb jelenségei közé tartozik a teljes napfogyatkozás, ami egy adott helyszínről sajnos nagyon ritkán látszik, de szerencsére Magyarországon 1999-ben volt benne részünk. Itt a sok fény-kevés fény kettősség órák-percek alatt varázsol égi színjátékot egy adott földrajzi helyen. A felemelő és magasztos

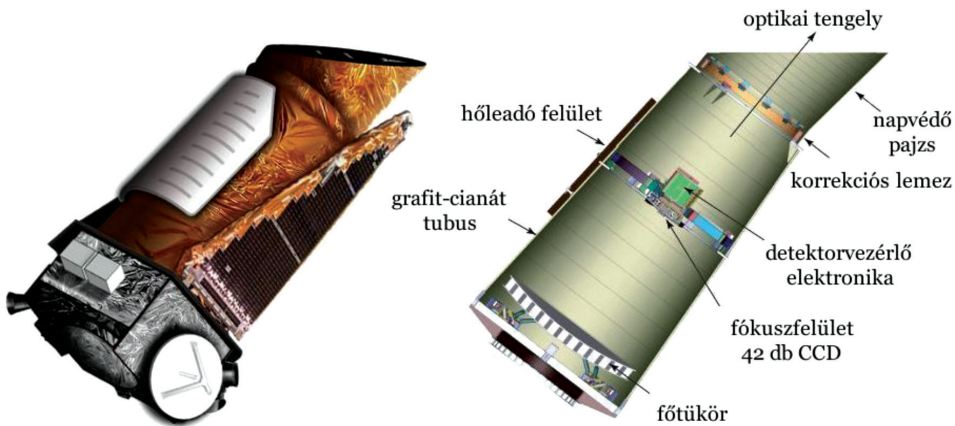
jelenség nem véletlenül játszott kulcsfontosságú szerepet szinte minden történelmi kultúrkör hiedelemvilágában. Aki egyszer látta, soha sem felejt el a totalitás körüli néhány káprázatos perc látványát! Ha valaki elszalasztotta volna a 2017 augusztusában és elmulasztaná 2024 áprilisában az Amerikai Egyesült Államok szárazföldi területeit átszelő árnyéksávot, az már most készülhet a 2026 augusztusában Izlandtól Spanyolországig látható vagy 2027. augusztus elején a Gibraltárt és Észak-Afrika vidékeit érintő jelenség megfigyelésére. Az utóbbi esemény ráadásul 6 perc 23 másodperc hosszúságú lesz, ami nem sokkal marad el a totalitás elméletileg lehetséges leghosszabb időtartamától (7 perc 32 másodperc).

PRECÍZIÓS FÉNYESSÉGMÉRÉS – A MIKROMAGNITÚDÓS FORRADALOM

Minél pontosabban mérjük egy csillag fényességét, annál részletesebb képet kapunk a csillag és a körülötte található térrész viselkedéséről, összetételéről. Ahogy növeljük a pontosságot, láthatóvá válnak a csillag körül keringő bolygók fedései, a csillagon megjelenő, mágneses aktivitást jelző csillagfoltok, és kimutathatók lesznek a csillagokat átjáró, belsejükről információt hordozó nagyon kis amplitúdójú csillagrezgések. Éppen ezt használják ki az ún. úrfotometriai miszsiók, vagyis az űrbe helyezett, kizárólag fényességmérésre használt távcsövek, amelyek a csillagok fényességét monitorozzák lehetőleg megszakítás nélkül.

Az egyik ilyen a NASA Kepler-missziója (3. ábra), amely 2009 és 2013 között működött, és mintegy 200 000 csillag fényességét mérte 1, illetve 30 perces időfelbontással. (A Keplernek az iránytartást lehetetlenné tévő technikai probléma miatt fel kellett függesztenie a megfigyeléseket, a küldetés azonban folytatódik, egy-egy, a Föld keringési síkjában fekvő égterület kb. 80 napig tartó monitorozásával.) A Kepler pontossága lenyűgöző: 10^{-5} – 10^{-6} relatív pontosságra képes (mikromagnitúdó), ami mintegy három nagyságrenddel pontosabb, mint az addig megszokott, földi teleszkópokkal elérhető fotometriai pontosság. Feladata Föld-méretű bolygók keresése Nap-típusú csillagok körül fedési módszerrel, vagyis olyan parányi elhalványodásokra vadászik, amelyeket egy távoli csillag körül keringő bolygó elhaladása okoz a csillag fénylő korongja előtt. A Kepler ebben rendkívül sikeres volt: több mint 4000 bolygójelöltet fedezett fel, ezek közül további mérésekkel e sorok írásáig 2335 planéta létét sikerült megerősíteni. Ez az összes felfedezett exobolygó majdnem pontosan kétharmadát teszi ki!

A fedési módszer a bolygó méretét szolgáltatja a gazdacsillag méretéhez viszonyítva. A távoli csillagok méretének, tömegének és korának meghatározása azonban nem mindig egyszerű feladat. Itt jön képbe a Kepler pontos fényességmérésének másik felhasználása, a csillagok rezgéseinek vizsgálata. A rezgések érzékenyek a csillag belsejében érvényes fizikai kondíciókra – csakúgy, mint a földrengéshullámok a Föld szerkezetére. Ezáltal a Napra kidolgozott szeizmoló-



3. ábra. A Kepler-űrtávcső felépítése (NASA)

giai módszerek távoli csillagokra történő alkalmazásával a Kepler egy új tudományág, a csillagszeizmológia születéséhez járult hozzá.

A Kepler-űrtávcsővön mindent a pontos fényességmérésnek rendeltek alá. Már az ún. Föld-követő, Nap körüli pálya is a minél zavartalanabb megfigyeléseket szolgálja, hiszen a Föld sugárzási övezetei, a Föld megvilágított része feletti elhaladás, az abból adódó hőingadozás mind-mind befolyásolják a méréseket. Leegyszerűsítve: minél több fotont gyűjtünk, annál jobb, hiszen a jel/zaj viszony a begyűjtött fotonok számának négyzetgyökével javul. Ehhez nagyméretű pixeleket alkalmaztak, így a távcső térbeli felbontása rossz, össze sem hasonlítható mondjuk a Hubble-űrtávcsőével. Gyönyörű képek helyett itt gyakorlatilag csak számoszlopokat kapunk. De milyen fontos számoszlopokat! Ezek vizsgálatával derült fény arra, hogy az exobolygók rendkívül gyakoriak: szinte minden csillaghoz tartozik bolygó vagy bolygórendszer! Ez forradalmi áttörés kozmikus környezetünk és az Univerzumban elfoglalt helyünk megértésében.

KÜLÖNLEGES BOLYGÓK ÉS BOLYGÓRENDSZEREK

Érdekes megemlíteni néhányat a legkülönösebb bolygórendszerek közül, amelyeket a Kepler a fedési módszer segítségével fedezett fel. Ne feledjük, hogy a műszer nem tudja felbontani a csillag korongját, pláne nem látja a körülötte keringő bolygókat, „mindössze” egy fénypontról jövő látható fény fluxusát méri.

Az egyik ilyen érdekes planéta a Kepler-1843b jelet kapta (Rappaport et al., 2013). Ez egy forró Jupiter (azaz olyan óriásbolygó, amely nagyon közel kering gazdacsillagához). Még hozzá olyan közel, hogy keringési ideje mindössze 4,24

óra! Vagyis egy év azon a bolygón alig több mint 4 földi óráig tart! A Kepler-444 pedig egy ősi bolygórendszer: kora $11,2 \pm 1,0$ milliárd év, vagyis a Tejútrendszer kialakulása után nem sokkal keletkezett (Campante et al., 2015). Életkora tehát mintegy kétszerese a Naprendszerének, ami kerekítve kb. 4,57 milliárd év. A csillag (és ezzel a bolygórendszer) korát csillagszeizmológiai mérésekből sikerült ilyen pontosan megmérni. A központi égitest kisméretű, vörös törpecsillag, körülötte öt közetbolygó található tíznapos és rövidebb keringési időekkel. A rendszer két fontos dologra világít rá:

- Bolygók már az elsőgenerációs csillagokkal együtt is születtek, holott Napunk az elsőgenerációs csillagok által termelt nehéz elemek által beszenyvezett gázból jött létre, és főként ilyenek körül várnánk bolygórendszereket.
- Létezhetnek olyan helyek az Univerzumban, ahol nagyon hosszú idő áll rendelkezésre a bolygórendszerek háborítatlan fejlődéséhez.

Végül egy kultúrtörténeti jóslat valóra válásának lehetünk tanúi, hiszen az űrtávcső a Kepler-16b esetében megtalálta a *Csillagok háborújában* elhíresült Taotoine bolygó szakasztott mását (Doyle et al., 2011). Ez egy kettőscsillag körül keringő bolygó. A Napunknál valamivel kisebb méretű két csillag 41,08 nap alatt kerüli meg egymást, és közel ugyanebben a síkban mindkét csillagot megkerülve kering egy Szaturnusz méretű planéta 228 napos keringési idővel. Az 1977-es sci-fi jóslat harmincnégy évvel később szinte vernei pontossággal vált valóra, még a filmvászonra vitt csillagszínek is tökéletesen egyeznek a valódiakkal. Korábban nem volt tudomásunk kettőscsillagok körül keringő bolygóról, azóta viszont kiderült, hogy az ilyen rendszerek viszonylag gyakoriak a Tejútrendszerben.

BONTSUK FEL A FÉNYT! – CSILLAGÁSZATI SPEKTROSKÓPIA

Nemcsak a pontos fényességmérés, de a csillagokról jövő fény „kivesézése” is fontos stratégia a csillagászok fegyvertárában. A csillagspektrum ugyanis elárulja a csillag felszínén uralkodó hőmérsékletet, a kémiai összetételt, a mágneses tér nagyságát, de információt hordoz a csillag forgásáról, a felszínén megjelenő foltokról és még egy sor más folyamatról. Így a felszíni gravitációs gyorsulás révén fejlődési állapotukról, a csillag környezetéről, sőt a csillag és köztünk a csillagközi térben található atomok jelenlétéről, és nem utolsósorban bolygókísérő(k) jelenlétéről is tudomást szerezhetünk.

A teljes látható spektrumot lefedő, „kontinuum”-fotonok mellett a legfontosabb szerepet az egyes atomokra jellemző elnyelési (abszorpció) vagy kibocsátási (emisszió) vonalak játsszák. Ezek megfigyelhető hullámhossza, alakja, felhasadása, mind-mind fontos információt hordoz. A Doppler-effektus például nemcsak a galaxisok általános távolodásának megállapításában játszott szerepet

(vöröseltolódás), de egyfajta „ kozmikus traffipaxként” a csillagok körül keringő bolygók felfedezéséhez is vezetett. A bolygó gravitációs hatása miatt ugyanis a közös tömegközéppont körül keringő csillag periodikus sebességváltozása szabályosan ismétlődő kék- és vöröseltolódást okoz a központi csillag színképében. Ez a sebességváltozás hozzáadódik a csillagok Naprendszerünkhöz képest mérhető tipikusan 10–100 km/s relatív látóirányú (radiális) sebességéhez. A fedési módszer mellett a radiális sebesség módszere szolgáltatta szám szerint a második legtöbb exobolygót.

A radiálissebesség-módszerrel a bolygó tömegére tudunk következtetni (legalábbis egy $\sin i$ faktor erejéig, ahol i a látóirány és a bolygó keringési síkjának normálisa közötti szög. Ha a bolygó fed is, akkor a méret- és tömegadatokból kiszámolható a bolygó átlagsűrűsége, ami sokat elárul az égitest összetételéről (közet-, gáz-, netán óceánbolygó?), anélkül, hogy magát az égitestet „láttuk” volna. A sűrűségadatok nagy változatosságot mutatnak az 1 g/cm³-nél kisebb értékektől (ami gázbolygót jelez) a 10 g/cm³-ig (ez pedig jelentős fémmagot tartalmazó kőzetbolygó lehet). A radiálissebesség-mérések pontossága jelenleg a 10 cm/s értéket ostromolja (ekkor ingadozást okoz keringése során a Föld a Nap radiális sebességére). A nagy pontosságú lézerefűsük alkalmazásától várható, hogy ezt az álomhatárt sikerüljön áttörni.

A spektroszkópia azzal is kecsegtet, hogy a felfedezett exobolygók légköréről sikerül többet megtudnunk. Ehhez a *transzmissziós spektroszkópia* módszerét hívhatjuk segítségül, ami azon az elven alapul, hogy ha a bolygó éppen a csillag korongja előtt tartózkodik, akkor a csillagról jövő fény egy része áthalad a bolygó légkörén, az pedig lenyomatot hagy a spektrumon. A gyakorlatban spektrum készül akkor is, amikor a bolygó nincs fedésben, valamint fedéskor is, és a két spektrum különbségében tapasztalható apró változások lesznek a vizsgálat tárgyai. A parányi eltérésekből például a bolygó légkörben található atomok, molekulák jelenlétére lehet következtetni. Ily módon már több mint egy tucat kémiai összetevőt (például CO₂, CO, H, C, O, Na, H₂O, TiO, VO, CH₄) sikerült kimutatni, jórészt óriásbolygók légkörében a Hubble-űrtávcsővel. A Hubble utódjának szánt, 2020-ban indítandó James Webb-űrteleszkóp a kozmológiai kutatások mellett az exobolygók légkörének vizsgálatában is jeleskedni fog, és remélhetőleg a transzmissziós spektroszkópia a Föld-szerű bolygók légkörének titkaira is rávilágít majd.

NEM LÁTJUK A LÁTHATATLANT

Mielőtt a csillagászati spektroszkópia és fényérés diadalmenetétől megszédül-nénk, érdemes az érem másik oldalára is vetnünk egy pillantást: az Univerzumban létező dolgok nem mindegyike látható. A galaxisokban a csillagok mozgása és a Világegyetem nagy struktúráinak létrejötte ugyanis nem érthető meg jelentős

mennyiségű sötét anyag jelenléte nélkül. Ennek az ismeretlen anyagformának a gravitációs hatását érezzük, de más kölcsönhatását még nem sikerült kimutatni. Azt sem tudjuk, hogy pontosan milyen formában kellene keresnünk. A csillagászati mérések nyomán a nagy tömegű, csillagászati méretű sötét objektumokat (fekete lyukak, neutroncsillagok, barna törpék) kizárhatjuk a jelöltek közül. Minden arra mutat, hogy most már a részecskefizikusokon a sor, hogy megtalálják a gravitációs erőt kifejtő, de minden más kölcsönhatásra rendkívül gyengén reagáló részecskéket. Az Univerzum tömegének mindössze 5%-a látható, barionos anyag (csillagok, galaxisok, csillagközi atomok stb.), 22%-a pedig sötét anyag. A rejtélyt tovább fokozza, hogy úgy tűnik, az Univerzum tömegének 73%-a sötét energia. Ez még rejtélyesebb szubsztancia, hatását az Univerzum tágulásának gyorsulásában érhetjük tetten (már ha egyáltalán létezik, és nem csak látszólagos hatásról van szó, lásd például Rácz et al., 2017). Habár a sötét anyag és sötét energia közvetlenül nem látható, közvetett hatásaik kutatásában és megértésében a csillagászati teleszkópok mégis domináns szerepet játszanak.

ÖSSZEFOGLALÁS

A csillagászat tudományát nagyon sokáig az emberi szem mint detektor segítségével művelte az emberiség. Ez a tanulmány rámutatott, hogy összességében is az elektromágneses sugárzás szolgáltatta információ által tudunk meg legtöbbet az Univerzumból. Figyelembe kell azonban venni, hogy az emberi szem a spektrumnak csak egy szűk tartományában érzékel. A többi hullámhosszon való „látáshoz” speciális távcsöveket, érzékelőket kell fejleszteni, és ezeket gyakran a légkörön túlra érdemes elhelyezni. Ha valamit nem látunk, az attól még ott lehet, és megbizonyosodhatunk a jelenlétéről, sőt sokszor fizikai tulajdonságaira is következtethetünk. Ennek eklatáns példája az exobolygók kimutatása és az ismereteink robbanásszerű fejlődése ezen a területen, nem kis mértékben a csillagászati fényességmérés forradalmának köszönhetően. Ez az elképesztő haladás nemcsak a bolygók, hanem a csillagok fizikájának jobb megértésében is ugrásszerű előrelépést hozott. A fejlődés nem lankad, a már működő TESS (NASA, start: 2018. április, URL2), CHEOPS (Európai Űrügynökség, 2018, URL3) és az építés alatt levő PLATO (Európai Űrügynökség, 2026, URL4) űrfotometriai missziók ezen a téren is minden bizonnyal további érdekes felfedezésekkel fogják gazdagítani tudásunkat.

Köszönetet mondok a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K-115709 számú, valamint a GINOP-2.3.2-15-2016-00003 számú pályázatainak támogatásáért és a Magyar Tudományos Akadémia Lendület programjának (LP2014-17) a témakörben végzett kutatásaimhoz nyújtott segítségével.

IRODALOM

- Abbott, B. P. et al. (2016): Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, 116, 061102, DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102, <https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102>
- Campante, T. et al. (2015): An Ancient Extrasolar System with Five Sub-earth-size Planets. *The Astrophysical Journal*, 799, 2, DOI: 10.1088/0004-637X/799/2/170, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/799/2/170/meta>
- Doyle, L. et al. (2011): Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet. *Science*, 333, 6049, 1602–1606. DOI: 10.1126/science.1210923, <https://dspace.mit.edu/openaccess-disseminate/1721.1/88742>
- Rác G. et al. (2017): *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 469, 1, L1–L5. DOI: 10.1093/mnrasl/slx026, <https://academic.oup.com/mnrasl/article/469/1/L1/2982870>
- Rappaport, S. et al. (2013): The Roche Limit for Close-Orbiting Planets: Minimum Density, Composition Constraints, and Application to the 4.2 hr Planet Koi 1843.03. *The Astrophysical Journal Letters*, 773, 15 DOI: 10.1088/2041-8205/773/1/L15, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/2041-8205/773/1/L15/meta>

URL1: <https://www.eso.org/sci/facilities/elt/>; az ábra: https://www.eso.org/public/images/elt_plane/

URL2: TESS honlap: <https://tess.gsfc.nasa.gov/>

URL3: CHEOPS honlap: <http://cheops.unibe.ch/>

URL4: PLATO honlap: <http://www.oact.inaf.it/plato/PPLC/Home.html>