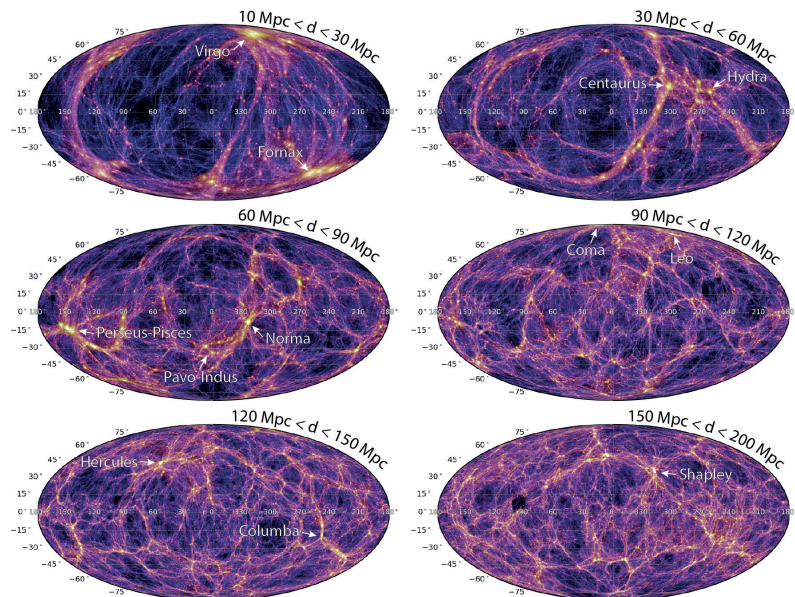


KOVÁCS ANDRÁS*

A SÖTÉT UNIVERZUM FELFEDEZÉSE AZ EUCLID ŪRTÁVCSŐVEL

1. ÁBRA. Az Euclid ūrtávcső küldetése, hogy a körülöttünk lévő anyag eloszlását „hagymahéjakként” elképzelve, egyre távolabbi héjakról készítsen minél pontosabb térképeket [5]



KOZMOLÓGIA ÉS AZ UNIVERZUM NAGYSKÁLÁS SZERKEZETE

Milyen sebességgel tágul az univerzum? Hogyan oszlanak el a szomszédos galaxisok a Tejútrendszeren? Mi a galaxisokat körülvevő sötét anyag eredete? Hogyan kell elképzelni a világegyetemet napjainkban gyorsítva tágító sötét energiát? Ezek azok a kozmológiai kérdések, amelyekre választ keres az Európai Ūrügynökség (European Space Agency – ESA) Euclid ūrtávcsőve két, egyenként is ambiciózus, de alapvetően különálló

kutatási módszer kombinálásával [1]. A küldetés célja, hogy az eszköz egy minden eddiginél részletesebb térképet készítsen az univerzumból, és ezáltal a galaxisok térbeli eloszlásából következtetni lehessen egyebek között a sötét energia tulajdonságaira is. Utóbbit a galaxisok közti űres térben lakozó taszítóerőként szokás értelmezni, amely a sötét és a világító anyag gravitációs hatásának ellen tartva, szétfeszíti a téridőt. [2] A probléma azért is kap kiemelt figyelmet az asztrofizikában, mert a modern

mérések alapján az univerzum teljes anyag-energia sűrűségét ez az ismeretlen sötét energia dominálja, így a világegyetem jövőbeni fejlődését is meghatározhatja majd milliárd éves skálákon. [3]

A fenti tudományos kérdések természetesen nem újkeletűek, hiszen az emberiség már a kezdetektől fogva igyekszik minél jobban feltérképezni környezetét és a világot alkotó elemeket. A bolygónkon kívüli világról – beleértve a Naprendszert, a Tejútrendszert, illetve az akár milliárd fényévi távolságra lévő szomszédos galaxisokat, amelyek egy komplex kozmikus hálózatba rendeződnek – egyre pontosabb 3D-s térképek készülnek. Azt is sikerült meghatározni az elmúlt évtizedben, hogy ebben a hatalmas hálózatban a mi galaxisunk a több ezer csillagvárost számláló Laniakea szuperhalmaz részét képezi. [4] Tudjuk azt is, hogy annak egy viszonylag jelentéktelen külső régiójában, a Virgo-halmaz felé halad a térben a Lokális Csoportot alkotó többi szomszédos galaxissal együtt.

A modern kozmológiai jellegű megfigyelési programok fő motivációja, hogy a körülöttünk lévő anyag eloszlását „hagymahéjakként” elképzelve, egyre távolabbi héjakról készüljenek lehetőleg minél pontosabb, 3D-s tér-

ÖSSZEFOGLALÁS: A világegyetemet, mint egészet vizsgáló kozmológia tudományának alapvető kérdései közé tartozik az univerzumban lévő anyag- és energiafajták azonosítása és megértése, valamint a megfigyelt kozmikus tágulás sebességének minél pontosabb nyomon követése. Azonban a helyzetet nagyban bonyolítja olyan ismeretlen komponensek egyértelműsíthető jelenléte is, amelyek nem világítanak, és csupán gravitációs kölcsönhatások alapján ismerhetők meg. Ezt a sötét anyagot és a még rejtélyesebb sötét energiát vizsgálja majd az Euclid ūrtávcső, amely 2023 nyarán kezdte meg tudományos programját.

KULCSSZAVAK: kozmológia, ūrtávcső, galaxisok, univerzum

ABSTRACT: The fundamental questions of cosmology, which examines the universe as a whole, include the identification and understanding of the types of matter and energy present within it, as well as the tracking of the observed cosmic expansion's velocity as accurately as possible. However, the situation is greatly complicated by the clear presence of unknown components that do not emit light and only interact through gravity. The Euclid space telescope, which began its scientific program this summer, will investigate this dark matter and even more mysterious dark energy.

KEYWORDS: cosmology, space telescope, galaxies, universe

* PhD, a HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont munkatársa, az MTA-CSFK Lendület Nagyskálás Szerkezet Kutatócsoport vezetője. ORCID: 0000-0002-5825-579X



képek (ezáltal a kozmikus múltba is egyre inkább visszatekintve). Az égbolt minél nagyobb tartományról gyűjtve az adatokat (1. ábra), a végső cél az univerzum nagyskálás szerkezetének tanulmányozása a galaxisok statisztikai elemzésének nyomán. Ennek eléréséhez a kozmológusoknak először a látható, avagy atomos anyagon kívül „egzotikusabb” jellegű, sötét komponensekről is további információt kell gyűjtenie, és ebben a folyamatban az Euclidnek is kiemelt szerep juthat a jövőben. Kifelé nézve a Tejútrendszerből, a saját galaxisunk kozmikus léptékben közeli szomszédságában, a 10 és 30 megaparszek (1 Mpc = 3,26 millió fényév) közti távolságtartományban található galaxisok térbeli elrendeződése meglehetősen egyenetlen eloszlást mutat a kozmikus hálóban, ahogy az az 1. ábrán is látható. Az éggömböt Mollweide-vetületben kiterítve mutató ábrákon az egyenlítőnek a Tejút síkja felel meg, a felső félkör a galaktikus északi félteke, míg az alsó a déli. A domináns közeli struktúrák a Virgo-halmaz, illetve a Fornax-halmaz, míg az égbolt másik felén egy kozmikus void, azaz egy nagy méretű, alacsony sűrűségű régió található. Tovább haladva a ga-

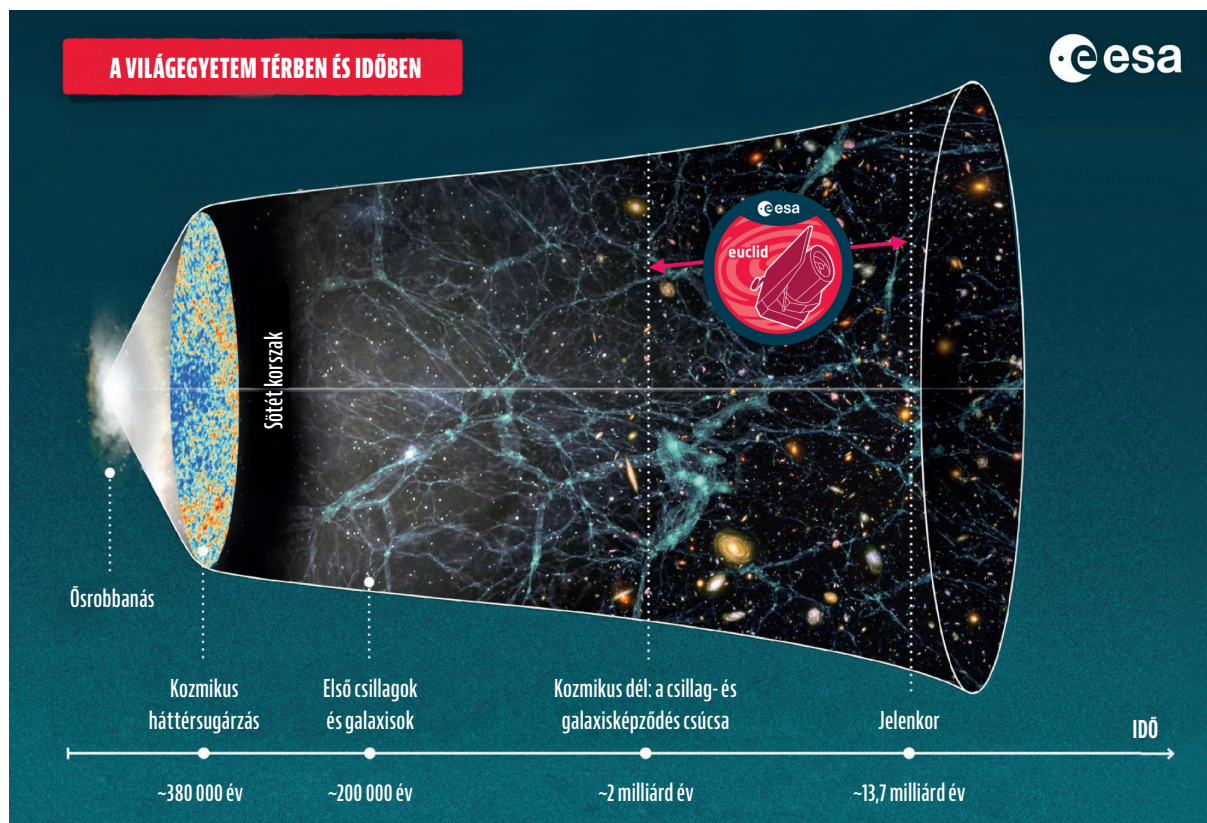
laxisunktól egyre távolabbi „hagymahéjakba”, további markáns csoportosulásokat figyelhetünk meg a galaxisok kozmikus hálójának tomografikus térképein, például a Centaurus (30 Mpc < d < 60 Mpc), a Perseus-Pisces (60 Mpc < d < 90 Mpc), Hercules (120 Mpc < d < 150 Mpc), illetve Shapley-szuperhalmazokat (150 Mpc < d < 200 Mpc). Az 1. ábra jobb alsó részén már jól látható, hogy a klasztereződésnek létezik egy felső határa, mert a filamentumok, szuperhalmazok, és a közöttük lévő üregek elrendeződése – nagyobb térfogatot vizsgálva – már az egyenetlen eloszláshoz közelít. Lényeges információ, hogy a kozmikus hálót ezen a 200 Mpc méretű tartományon túl lényegesen kevésbé térképeztük fel, és a kozmológusok és a csillagászok közös célja, hogy földi távcsövek és műholdak segítségével a látható világegyetem minél nagyobb szeletéről készüljön minél részletesebb térkép. [5]

A korábban megfigyeltéknél távolabbi galaxisokra fókuszálva, az Euclid hozzávetőlegesen 10 milliárd évnnyire is képes lesz visszatekinteni az időben (2. ábra), ezáltal új tartományban tesztelve Einstein általános relativitáselméletét. Ahogy az ábra bal oldalán látható kezdeti, apró sűrűség fluk-

tuációkat mutató állapotból haladunk a napjainkban megfigyelt, sokkal bonyolultabb kozmikus hálóig, közben az univerzum tágul, és a kozmikus anyageloszlás egyre egyenetlenebb lesz. A különféle égbolttérképezési projektek ennek a 13,7 milliárd éves kozmikus történetnek különböző epizódjaira fókuszálnak, amelyek természetesen többet tudnak az anyageloszlás hozzánk közelebb eső (azaz későbbi) állapotáról. Az Euclid-misszió fő célja olyan új kozmikus térképek készítése, amelyek nemcsak a világító, hanem a sötét anyagról is készülnek majd, és mindezt egy olyan távolságtartományban vizsgálódva, ahonnan a fény több mint 10 milliárd évvel ezelőtt indult útjára a teleszkópjaink felé. [6]

TAPOGATÓZÁS A SÖTÉT UNIVERZUMBAN

A kozmológiai mérések és elméleti modellek kiemelt céljai között szerepel a megfigyelt kozmikus tágulás és az azzal párhuzamosan történő gravitációs struktúraképződés együttes leírása. Ez a két jelenség oly módon is összekapcsolódik, hogy az univerzumban jelen lévő anyag okozta gravitáció – legyen az atomos vagy sötét –, minden várakozás szerint fokozatosan



2. ÁBRA.
Az Euclid-misszió vizsgálati tartománya térben és időben (A szerző szerkesztése [6] alapján)

lassítja a tágulás sebességét. Mégis, az ezredforduló környékén az a váratlan mérési eredmény adódott, hogy az univerzum tágulása jelenleg nem lassul, hanem egyre inkább gyorsul, amire (egyebek közt) távoli Ia típusú¹ szupernóvák halványodásából következtettek a kozmológusok. A kialakult helyzetet tovább bonyolította, hogy a galaxishalmazok számlálásából, és a halmazokon áthaladó fény gravitációs lencsehatásának méréseiből kapott összes kozmikus anyagmennyiség csupán a tágulás fenntartásához szükséges, a modellek részét képező kritikus anyagsűrűség kb. 30%-át fedezte. Mindez már a galaxisokat látólag körülvevő sötét anyag figyelembevételével értendő, amelyet csupán gravitációs hatásai nyomán érzékelünk eddig, és nem ismerjük a természetét.

Ma úgy gondoljuk, hogy a kozmikus energia-háztartás fennmaradó 70%-át a titokzatos sötét energia alkotja (3.a ábra). Erről az egzotikus és láthatatlan komponensről a kozmológusoknak azonban eddig nem sokat sikerült kideríteniük azon a szemléletes képen kívül, hogy az üres tér egy furcsa antigravitációs tulajdonsága lehet, és talán egyfajta általános kozmikus tasztítóerőnek tekinthető. [7] Felmerül-

het természetesen az is, hogy a relativitáselmélettel van a probléma, amely ekkora skálákon talán már nem írja le pontosan a valóságot. Ám minden egyéb területén mutatott jelentős sikere miatt az elvetéséhez ennél több bizonyítékot követel a tudományos közösség.

Fontos körülmény, hogy az általános relativitáselmélet keretrendszerében az univerzum összetétele nem csupán a kozmikus tágulás sebességét határozza meg, hanem a tér-idő átlagos geometriai tulajdonságait is. Ha éppen a tágulás fenntartásához szükséges kritikus sűrűséggel megegyező mennyiségű anyag plusz energia található az univerzumban, akkor ennek további folyománya, hogy a geometria jó közelítéssel síknak tekinthető. Ez az egyszerű eset pedig az euklideszi geometriának felel meg, ahol a háromszögek belső szögeinek összege éppen 180°-nak adódik, szemben a pozitív vagy negatív görbületű alternatívákkal (3.b ábra), amelyek akkor állhatnak elő, ha az univerzum sűrűsége a kritikusnál nagyobb vagy kisebb.

A sík világegyetem modelljét a korai univerzumban létrejött, és azóta gyakorlatilag változatlanul terjedő kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás

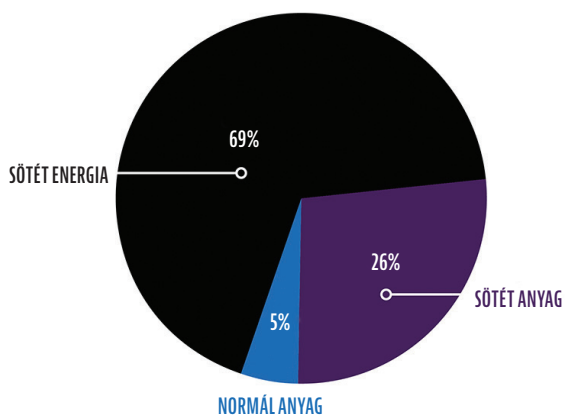
(2. ábra) hőmérsékleti fluktuációinak mérései is megerősítették. Apró hideg és meleg foltjainak a karakterisztikus méretére az egyszerű euklideszi modellszámításokkal megegyező méret adódott, nagy szignifikanciával. Ez konzisztensnek tűnik a szupernóva-mérések és a galaxisszámlálások eredményével, hiszen a csillagászok észleltek már a kritikus sűrűség hányadában kifejezve 5% atomos anyagot, 25% sötét anyagot, és mintha jelen lenne még 70% sötét energia is, és ezek összege éppen a kritikus sűrűséget adja eredményként.

A modell szépséghibája természetesen az, hogy magukról a sötét komponensekről nagyon keveset tudunk azon kívül, hogy a segítségükkel felépített Lambda-CDM modell (Lambda = kozmológiai állandó, Cold Dark Matter – hideg sötét anyag) képes matematikailag kielégítően leírni a megfigyelések többségét az általános relativitáselmélet keretében értelmezve. Az Euclid küldetés egyik kiemelt feladata annak eldöntése lesz, hogy mennyire pontosan tekinthető síknak a tér-idő (azaz mennyire jó közelítéssel mondható euklideszinek), amelynek módja mind a sötét anyag, mind a sötét energia részletes, új módszerekre épülő tanulmányozása.

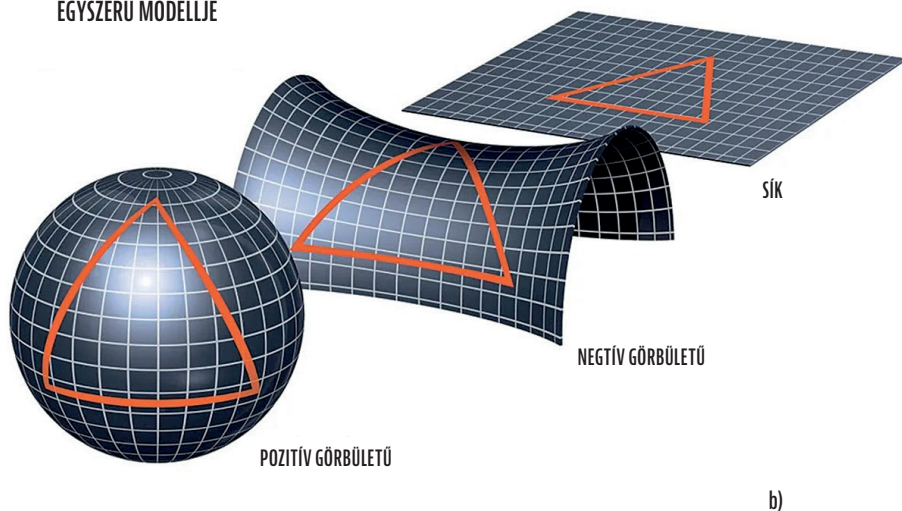
3.a ÁBRA.
Bal oldal: jelenlegi tudásunk alapján a belátható világegyetemet alkotó anyag- és energiafajták döntő többsége láthatatlan (A szerző szerkesztése a Chandra Chronicles ábrája alapján, <https://chandra.harvard.edu/chronicle/>)

3.b ÁBRA.
Az univerzumot alkotó tér-idő rendelkezik bizonyos általános geometriai tulajdonságokkal, amelyeket mérések útján meg is tudnak határozni a kozmológusok. A legelfogadottabb nézetek szerint jó közelítésnek adódik az euklideszi sík geometria, a pozitív vagy negatív görbületű alternatívákkal szemben (A szerző szerkesztése [9] alapján)

AZ UNIVERZUM ÖSSZETÉTELE



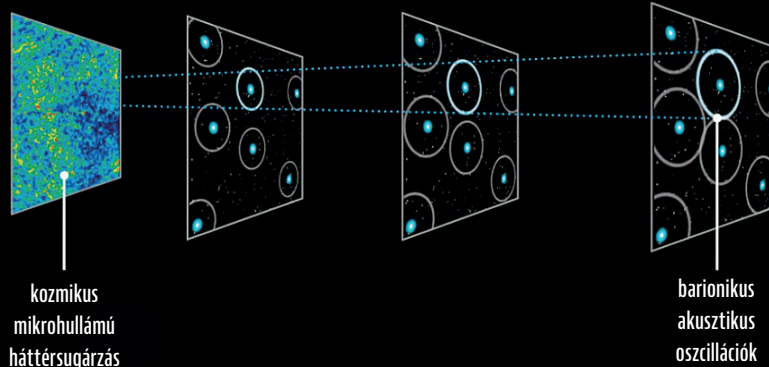
A VILÁGEGYETEM GEOMETRIÁJÁNAK EGYSZERŰ MODELLJE



¹ A szupernóvák két típusba sorolhatók: az I. típusú szupernóvák olyan objektumokból jönnek létre, amelyek nem tartalmaznak megfigyelhető mennyiségű hidrogént (pl. fehér törpe), így színképükben nincsenek hidrogén jelenlétére utaló vonalak. Az I. típusú szupernóvák között léteznek Ia típusúak, amelyek spektrumában látható erős vonal ionizált szilíciumtól származik, míg az Ib típusúak héliumot tartalmaznak, illetve az Ic típusúak, amelyek sem szilíciumot, sem héliumot nem mutat. A jelenlegi elképzelések szerint az Ib/Ic-típusok szintén nagy tömegű csillagokból keletkeznek, ezeknél azonban a csillag a külső, hidrogénben gazdag burkát a robbanás előtt szinte teljesen elveszítette. Ezzel ellentétben II. típusú szupernóvák nagy tömegű csillagok magjának összeomlásából jönnek létre, a hidrogén vonalai a színképben erőteljesek. Vinkó J., Kiss L., Sárnecczy K., Fűrész G., Csák B., Szatmáry K. Szupernóvák Meteor csillagászati évkönyv 2001. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 2000, 218–236. o. [8]

Galaxisoszillációk

A galaxisok kezdeményei fodorzódásokat okoztak a korai univerzumot kitöltő gázban. A kozmikus tágulás következtében a hullámok is növekedtek, „méterrudat” szolgáltatva így a tágulás ütemének méréséhez.



Gravitációs lencészés

Annak mérésével, hogy a sötét anyag miként torzítja a távoli galaxisok képét, feltérképezhető az anyag csomósodása és fejlődése. A sötét energia fékezi az anyag csomósodási ütemét.



4. ÁBRA. Az Euclid az infravörös tartományban és a látható fény tartományában, az univerzumban jelen lévő sötét energiáról árulkodó fényképeket fog készíteni (Grafika: Kovács József szerkesztése C. Bickel/Science ábrája és [13] alapján)

AZ EUCLID ŪRTÁVCSŐ

Az elmúlt évtizedekben a Naprendszer és a távolabbi univerzum tanulmányozásában egyaránt kiemelt szerep jutott a műholdas projekteknek. [10] [11] [12] Az Európai Ūrügynökség éppen a sötét energia felfedezéséért odaítélt fizikai Nobel-díj évében, 2011-ben döntött a sötét univerzumot kutatni kívánó Euclid projekt támogatásáról, két, egyenként is ambiciózus kutatási projektjavaslat egyesítésének eredményeként. A DUNE (Dark Universe Explorer – Sötét univerzum-felderítő) részprojekt a gyenge gravitációs lencsehatás mérését tűzte ki célul, amelynek lényege, hogy egy megfigyelt távoli galaxis és a megfigyelő közötti anyag gravitációs hatása elhajlítja a távoli galaxisok fényét, amely a fényképeiken apró torzulásként jelenik meg. Ellentétben az erős gravitációs lencsehatással, amely óriási tömegek mellett elhaladva alakul ki, és egyes galaxisok esetén is könnyebben detektálható. A gyenge lencsehatás csak milliárdnyi galaxis képének a statisztikai elemzésével mérhető meg, mivel csupán néhány százaléknak megfelelő torzító hatás várható az egyes galaxisok alakjában. Az Euclid infravörös tartományban működő NISP (Near Infrared Spectro-Photometer instrument – közeli infravörös spektro-fotométer)

berendezésének segítségével a galaxisok 3D-s térképe a korábbiaknál nagyobb térfogatban készülhet el, és ebből a barionikus akusztikus oszcillációk segítségével a sötét energiát lehet majd vizsgálni. (4. ábra, fent) Emellett a látható tartományban érzékeny VIS-berendezés kivételesen mély és éles fényképeket készít az égbolt harmadáról a projekt 6 éves futamideje alatt, és összesen 1 milliárd galaxissról szolgáltat majd gravitációs lencsehatásméréseket (4. ábra, lent). Ezek a térképek a bennük látott kozmikus struktúrák tulajdonságai alapján azt is elárulják majd, hogy mennyi sötét energia van az univerzumban, mivel az anyag csomósodásának részleteit az univerzumot szétfeszítő kozmikus tágítóerő részletei is jelentősen befolyásolják.

Az Euclid különlegessége, hogy a látható fény tartományában (550–900 nm) érzékeny VIS (visible instrument) műszerének segítségével akár 1 milliárd galaxissról képes nagy felbontású, és a földi légkör zavaró hatásait kiküszöbölve, kivételesen mély képeket készíteni. Ebből a világító anyag, azaz a galaxisok korábbinál pontosabb és nagyobb kiterjedésű kozmikus térképei mellett a sötét anyag minden eddiginél kiterjedtebb és részletesebb, kétdimenziós térképe

is rekonstruálhatóvá válik a galaxisok alakjában látható apró torzulások méréseiből. Ezek a torzulások elárulják, hogy összesen mennyi sötét anyagnak kell még a látható anyag környékén lennie a látóirány mentén, hogy a megfigyelt mértékű galaxis-alakváltozást megmagyarázhassuk (4. ábra).

A tervek szerint különböző távolságú kozmikus „hagymahéjakban” detektált galaxisokra vonatkozó mérésekből az anyageloszlás csomósodásának mértékét tomografikusan is meg lehet majd határozni (hasonlóan az 1. ábrán látható lokális anyageloszlás héjakban mutatott térképeihez). Ebből az is kideríthető lesz, hogy az évmilliárdok során hogyan alakult a sötét anyag és a sötét energia küzdelme a kozmikus tágulás dominálása kapcsán. A térképekben lévő információ kinyeréséhez a sztenderd statisztikai módszerek mellett napjainkban a csillagászok már rutinszerűen használnak mesterséges intelligenciára alapuló modern algoritmusokat is, amelyek képesek lehetnek maximalizálni a kinyerhető tudásanyagot, és később számos új felfedezéshez vezethetik az Euclid tudósait. [14]

Az ESA-hoz eredetileg beadott másik kutatási terv a SPACE (Spectroscopic All-Sky Cosmic Explorer – spektroszkópiai teljes-égbolt kozmikus fel-

derítő) elnevezést viselte, és az univerzum korai állapotából származó barionikus akusztikus oszcillációk² (baryonic acoustic oscillations – BAO) mérését tűzte ki célként. Ezek a formációk 380 000 évvel az ősrobbanás után keletkeztek, és a kozmikus háttérsugárzás adataiból is detektálhatók. Lenyomatuk ezenkívül még a kozmikus hálóban lévő galaxisok egymástól mért távolságának eloszlásában egy kb. 500 millió fényévnél megjelenő csúcsként is észrevehető. Az Euclid NISP berendezését arra tervezték, hogy a látható tartománynál nagyobb hullámhosszon, a közeli infravörös tartományban (900–2000 nm) készítsen fényképeket, illetve spektrumokat hidrogén-alfa emissziós vonalakat tartalmazó, és emiatt könnyen felismerhető távoli galaxis populációkról.

Kiemelt cél lesz még 35 millió kiválasztott távoli galaxis távolságának pontos megmérése egy 3D-s térkép megalkotásához. Ebből a BAO-mérések és egyéb galaxis-statisztikák alapján az elfogadott Lambda-CDM modellben állandó sűrűségűnek, és időben is változatlan erősségűnek tekintett sötét energia esetleges időbeli változására lehet majd következtetni. Továbbá, pontosan meg lehet majd határozni a sötét energia állapot-egyenletét is (w), azaz a nyomásának és sűrűségének arányát. Utóbbi az Einstein által korábban már egyszer elvetett, majd a sötét energia felfe-

dezése után a köztudatba visszakerült kozmológiai állandót tartalmazó sztenderd Lambda-CDM modellben $w = -1$ értéket vesz fel, és minden ettől való eltérés rendkívül izgalmas felfedezés lenne, ami új területeket nyithat a kozmológiai kutatásokban. Legfőképpen azért, mert bármi is legyen a sötét energia, jelenleg dominálja a világegyetem anyag-energia háztartását, így annak jövőjét is vélhetően meg fogja határozni milliárd éves skálákon, és ezt a várható jövőt az emberiség is ismerni szeretné.

A 3,7 m átmérőjű talapzaton álló, 4,7 m magas Euclid űrtávcső különböző alkatrészeit több európai intézetben és NASA-ban készítették, amelyek közül a legtöbb munkát és a végső összeszerelést az olaszországi Torino közelében található Thales Alenia Space laborjában végezték. Az Euclid 1,2 m-es főtükréből a fény két különböző detektorba jut kisebb tükrök segítségével, majd a VIS-berendezés a látható tartományban készít képeket, míg a NISP-műszer a közeli infravörösben végez nem csupán fotometriai, hanem spektroszkópiai méréseket is a galaxisok távolságának pontosabb mérése érdekében. (5. ábra)

A FELBOCSÁTÁS ÉS AZ ELSŐ ADATFELVÉTEL

Az Euclid projekt megtervezéséhez és megvalósításához összesen több mint 2000 mérnök és kutató járult

hozzá. A 12 évig tartó felkészülésből több magyar szakember is kivette a részét, főként külföldi kutatóintézetekből, különböző Euclid-szimulációk és az égtérképezési program megtervezése kapcsán bekapcsolódva a kollaboráció munkájába. [17] Bár Magyarország az ESA tagországa, nem automatikusan tagja az Euclid kollaborációnak, amely a nyugat-európai ESA tagországok többségét, valamint a NASA és a Kanadai Űrügynökség kutatóit tömöríti. Jelenleg is folynak tárgyalások egy szélesebb magyar szerepvállalásról, aminek keretében a Magyar Tudományos Akadémia (MTA) Lendület programja által támogatott kutatócsoport a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontban (CSFK), kiegészülve a Svábhegyi Csillagvizsgáló ismeretterjesztésben jártas csapatával, a hamarosan érkező első Euclid adatok kiértékelésében végzett munkán túl, a tudománykommunikációs programhoz is hozzá kíván járulni.

Sajnálatos módon az Euclid projekt sem volt teljesen politikamentes, miután a háborús helyzetre reagálva az ESA megszakította együttműködést az orosz Roscosmos űripari vállalattal, amely az eredeti tervek szerint egy Szojuz rakétával vállalta a műhold felbocsátását a francia-guyanai Kourou indítóállomásról. A francia Ariane-space vállalat rakétái a korábban már elfogadott, ipari jellegű megrendelések hosszú sora miatt nem voltak megfelelő opciók a már csupán a startra váró, időközben elkészült Euclid számára, így nagy örömet okozott a megállapodás a 2023 nyári kilövésről a SpaceX vállalattal. A hozzávetőlegesen 2 t tömegű Euclid űrtávcsövet végül egy Falcon 9-es rakéta segítségével juttatták fel a világűrbe 2023. július 1-jén, magyar idő szerint 17 óra 12 perckor a floridai Kennedy Űrközpontból. (6. ábra) A sikeres start után az Euclid műhold előbb levált az újrahasznosítható hordozórakétáról, amely visszatért a Földre, majd megkezdte a közel 4 hétig tartó utazását a Naprendszer L2-es Lagrange pontja felé. Ez egyike azoknak a speciális pontok-



5. ÁBRA.
A fény a 4,7 m magas Euclid űrtávcső főtükréből két különböző detektorba jut, majd a berendezés fényképeket készít, továbbá fotometriai és spektroszkópiai méréseket végez [15]

² A barionok három kvarkból álló részecskék, amelyek mindegyik alapvető kölcsönhatásban részt vesznek. A barionikus akusztikus oszcillációk a korai univerzumban terjedő nyomáshullámok (hanghullámok) közvetlen következményei, abból a korszakból, amikor a sugárzás még nem csatolódott le a plazmáról. A BAO mérése tulajdonképpen a korai univerzumban uralkodó feltételeknek az anyag eloszlásában megőrzött lenyomatai.



6. ÁBRA.
Az ESA Euclid űrteleszkópot a floridai Cape Canaveral űrállomásról 2023. július 1-jén, közép-európai idő szerint 17 óra 12 perckor, egy SpaceX Falcon 9 rakétával indították a világűrbe [16]

nak a Nap–Föld rendszerben a térben (5 db ilyen pont létezik), ahol több test gravitációs hatása jó közelítéssel kiegyenlítődik, így az odaküldött testek minimális koordinációval ott tarthatók.

Kozmikus utazása végeztével az Euclid műhold 2023. július 29-én csatlakozott többek között a Gaia űrtávcsőhöz és a James Webb-űrteleszkóphoz a Földtől hozzávetőlegesen 1,5 millió km-re található L2 régióban. Az utazás során már lehetőség adódott – főként a műszerek üzemi hőmérsékletének elérésével kapcsolatos – az első tesztek elvégzésére. Az üzembe helyezés után elkészültek az első fényképek, amelyekről az ESA egy sajtóközlemény megjelentetésével is jelezte, hogy rendkívül jól sikerültek. (7. ábra) A bal oldalon a VIS-műszer felvétele látható, ami egy széles hullámhossz-tartományban érzékeny optikai szűrővel készült, míg a jobb oldalon a NISP-műszer infravörös tartományban készült első felvétele látható. Utóbbi is egyetlen szűrővel készült, így a vörös fénykálát a feldolgozás során adták csak hozzá a jobb elkülöníthetőség kedvéért. Mindkét ábrán remek felbontással észlelhető egy-egy nagyobb spirál galaxis, illetve számos fényes csillag, valamint a bal oldalon több kozmikus sugárzás okozta csík is látszik, amelyeket a későbbi adatfeldolgozás során képesek lesznek majd kiszűrni, mielőtt a kozmológiai analízis kezdetét veszi. [18]

Az Euclid tehát készen áll a következő, két hónapon át tartó fázisra, amely a VIS- és NISP-műszerek valódi égboltfelmérő üzemmódban történő tudományos tesztelését foglalja magá-

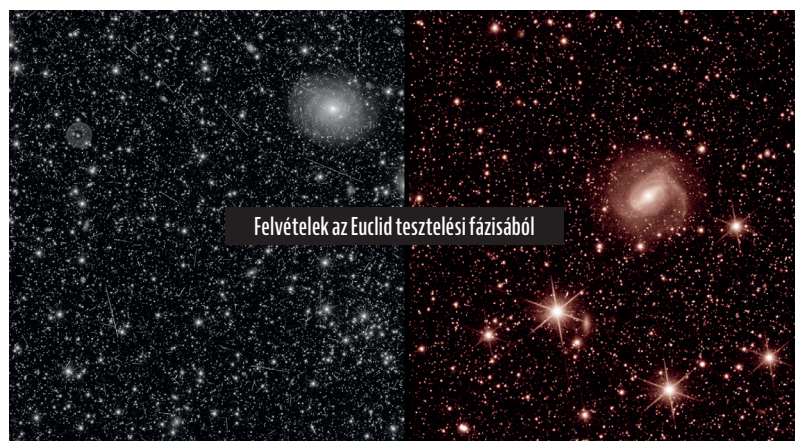
ba. Ennek során lehetőség nyílik majd arra is, hogy az Euclid űrteleszkóp elkészítse saját képeit és spektroszkópiai méréseit korábban már ismert galaxishalmazokról vagy akár szuperhalmazokról, amelyekről a korábbiaknál mélyebb és tisztább felvételek minden bizonnyal további részletekkel fognak szolgálni.

VÁRT EREDMÉNYEK

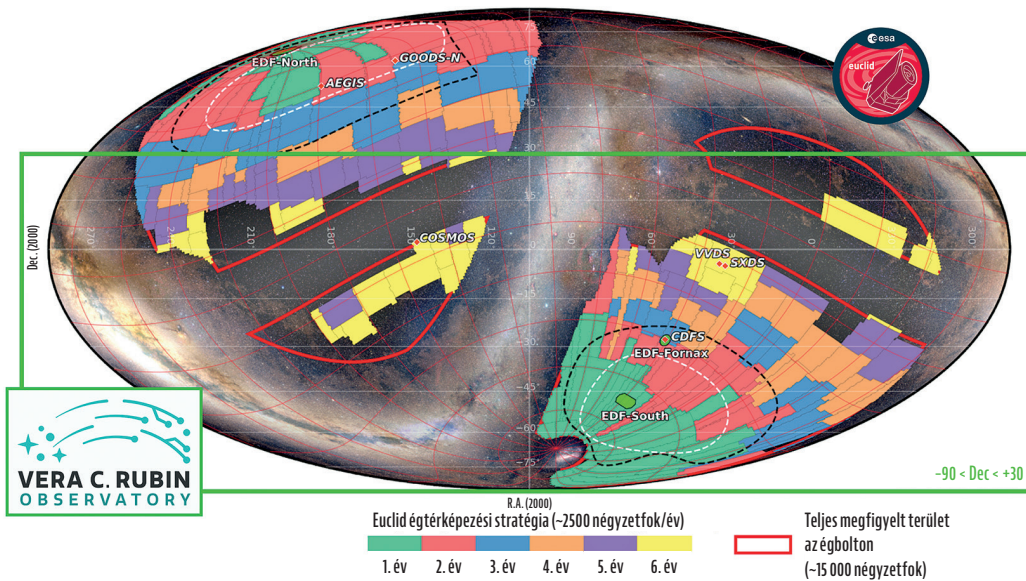
A szükséges kalibrációk és a tervezett tesztek elvégzése után az Euclid kollaboráció tagjai a 8. ábrán látható módon fognak majd hozzá az égbolt szisztematikus feltérképezéséhez, évente körülbelül 2500 négyzetfokot haladva egy 6 évesre tervezett perióduson át. Az égnek arra a legtisztább harmadára fókuszál majd az Euclid-felmérés, ahol minimalizálhatók a zavaró jellegű hatások, például a csillagok és a galaxisok összetévesztése, vagy a galaktikus por okozta fényesség-kalibrációs problémák. Ehhez a felmérés során az Euclid elkerüli majd mind a Tejútrendszer, mind a Naprendszer síkját, és azok környezetét. A fennmaradó rész-

ről jogosan várható, hogy remek minőségű adatokat tudnak majd ott felvenni az Euclid VIS- és a NISP-műszerek az optikai, illetve a közeli infravörös tartományokban. Ezeket a jövőbeli adatokat – a még jobb kalibráció érdekében – az Euclid-kollaboráció a tervek szerint összehasonlítja majd más égboltfelmérési projektek felvételeivel is.

A 8. ábrán látható, hogy a zölddel jelölt régiókban indul majd a térképezés. Fontos megjegyezni, hogy a világoszölddel jelölt EDF-South, EDF-North, és EDF-Fornax régiókban mélyebb méréseket végez majd az Euclid, így még több részlet válhat majd láthatóvá távolabbi galaxisokról. Ezek a mélyebb képek később – a fő kozmológiai jellegű méréseket kiegészítve – a galaxisfejlődés tanulmányozására lesznek felhasználhatók, és a fotók esetleg összevethetők a hamarosan szintén induló Vera C. Rubin Observatórium adataival is, amely Chiléből, a zöld téglalappal jelölt régióban végez majd fotometriai méréseket a déli égbolton. [19]



7. ÁBRA.
Az Euclid üzembe helyezése utáni első, előzetes tisztítás és szűrés nélküli felvételek kiválóan sikerültek [18]



8. ÁBRA.
Az egyes évekre megvizsgálni tervezett égiterrületeket a színek kódolják az ábrán (A szerző szerkesztése [19] alapján)

A Vera C. Rubin Observatóriummal tervezett tudományos együttműködés kiemelkedő jelentőségű. A Chilében 2024-ben induló projekt kozmológiai programja szintén a gyenge gravitációs lencsehatás mérése. Remekül kiegészítheti azonban az Euclid módszereit, mivel az égboltot többször lefényképezi majd és időbeni változásokat keres, és a két projekt

adatait 5-10 éves távlatban kombinálva, átfogó kozmológiai mérések végezhetőek majd kiváló minőségű adatok alapján. [20]

Összefoglalva, a 2023 júliusában felbocsátott Euclid űrtávcsövet elsősorban a sötét anyag és a sötét energia feltérképezésére tervezték, és jelenleg kijelenthetjük, hogy izgalmas korai eredményekkel halad előre a 6 évesre

tervezett kutatási program. Az Euclid két fő berendezése (VIS, NISP) évtizedes mérnöki tervezés eredményeként valósult meg, és az első tesztek eredményei megfelelnek a várakozásoknak. Mégis, talán joggal remélhetjük azt is, hogy váratlan tudományos felfedezések is születnek majd, és többet megtudhatunk a galaxisok közepén lévő óriási tömegű fekete lyukakról vagy épp a galaxisok részletes morfológiai elemzése nyomán azok születéséről és evolúciójáról is. Bár az Euclid abszolút alapvető projektnek tekinthető, amely ráadásul a csillagászat egy adott részterületére fókuszál csupán, rengeteg tapasztalat szerezhető egy ilyen nemzetközi projektben egy űrteleszkóp működtetéséről vagy akár modern adattudományi kihívásokra adott új megoldásokról. A 2023. november 7-én nyilvánosságra hozott első fényképek tanúsága szerint rendkívül izgalmas idők elé néz tehát a kozmológus és csillagász társadalom, amelyhez reményeink szerint egyre több fiatal magyar kutató is csatlakozik, és ebben az évtizedben általánosságban megerősödik hazánk szerepe a világűr kutatásában. ■

HIVATKOZÁSOK

- [1] Frey Sándor. Elindult az Euclid, Ūr Világ.hu. https://www.urvilag.hu/urcsillagaszat_europaban/20230702_elindult_az_euclid (Letöltve: 2023. 08. 14.)
- [2] Németh Judit. Mi az a sötét energia?, Fizikai Szemle, 2004/1., p. 1.
- [3] Pál Bernadett. A titokzatos sötét energia új fajtájára bukkanhattak, Csillagászat.hu. <https://www.csillagaszat.hu/hirek/a-titokzatos-sotet-energia-uj-fajtajara-bukkanhattak/> (Letöltve: 2023. 08. 14.)
- [4] Tully, B. R. et al. The Laniakea supercluster of galaxies Nature, Vol. 513, No. 7516, p. 71. (4 September 2014) <https://doi.org/10.1038/nature13674>
- [5] McAlpine, S. et al. SIBELIUS-DARK: a galaxy catalogue of the local volume from a constrained realization simulation, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 512, Issue 4, June 2022, pp. 5823–5847. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac295>
- [6] ESA: SCIENCE & EXPLORATION Euclid launch kit. <https://esamultimedia.esa.int/docs/science/Euclid-LaunchKit.pdf> (Letöltve: 2023. 08. 14.)
- [7] Brax, Ph. What makes the Universe accelerate? A review on what dark energy could be and how to test it. 2018 Rep. Prog. Phys. 81 016902. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aa8e64>
- [8] Vinkó J., Kiss L., Sárnecky K., Fűrész G., Csák B., Szatmáry K. Szupernóvák Meteor csillagászati évkönyv 2001. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 2000, pp. 218–236.
- [9] Casteel, K. Is the universe infinite or finite? Or is it so close to infinite that for all practical purposes it is?, Astronomy.com. (27 February 2012) <https://www.astronomy.com/science/is-the-universe-infinite-or-finite-or-is-it-so-close-to-infinite-that-for-all-practical-purposes-it-is/> (Letöltve: 2023. 08. 14.)
- [10] Gschwindt András. Kis műholdak forradalma, Haditechnika, 2020/2. szám, pp. 40–45. <https://doi.org/10.23713/HT.54.2.07>
- [11] Dr. Szabó Róbert. Ūrtávcsövek reneszánsza, Haditechnika, 2022/6. szám, pp. 47–54. <https://doi.org/10.23713/HT.56.6.08>
- [12] Horváth István. A gammakitérések irány szerinti eloszlása, Haditechnika, 2021/4. szám, pp. 43–46. <https://doi.org/10.23713/HT.56.2.07>
- [13] Kovács J. Sötét titkok nyomában – Felbocsátás előtt egy új európai űrtávcső. 2023. 06. 28. https://www.csillagaszat.hu/hirek/technikai_ujdonsagok/tu-foldi-tavcsövek/sotet-titkok-nyomaban-felbocsatas-elott-egy-uj-europai-urtavcsö/
- [14] Ribli, D. et al. Weak lensing cosmology with convolutional neural networks on noisy data, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 490, Issue 2, December 2019, pp. 1843–1860. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2610>
- [15] Euclid, unveiling the secrets of the Universe. <https://www.thalesaleniaspace.com/en> (Letöltve: 2023. 08. 14.)
- [16] Euclid Exploring the dark Universe. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Euclid/ (Letöltve: 2023. 08. 14.)
- [17] Contarini, S. et al. Euclid: Cosmological forecasts from the void size function. A&A 667, A162 (2022). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244095>
- [18] ESA: Euclid test images tease os reaches to come. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Euclid/Euclid_test_images_tease_of_riches_to_come (Letöltve: 2023. 08. 14.)
- [19] Cuillandre, J. C. Pointing and observation strategy. <https://euclid.cnes.fr/en/pointing-and-observation-strategy> (Letöltve: 2023. 08. 14.)
- [20] Rhodes, J. et al. Scientific Synergy between LSST and Euclid, The Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 233, Issue 2, article id. 21, 23. (2017) <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aa96b0>