

Az űrcsillagászat európai útiterve

Balázs Lajos

MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete

Mi az ASTRONET ?

Az ASTRONET-et európai kutatási ügynökségek hozták létre abból a célból, hogy az európai csillagászat fejlesztésére jól megalapozott, hosszú távú útitervet készítsenek. Az volt a cél, hogy megőrizték és továbbfejlesszék az európai csillagászatnak azt a vezető szerepét, amelyet a 21. század elejére elért.

2006. szeptember 1-jével kezdve az Európai Bizottság 2,5 M€ összeggel indította útjára az ASTRONET-et, míg a teljes összeg a 4 év futamidőre 3,6 M€-t tett ki. Az ASTRONET egy ún. ERA-Net, amelyet az Európai Bizottság 6. keretprogramja (FP6) támogatott Az Európai Kutatási Térség (ERA) integrálása és erősítése témában.

Az ASTRONET négy szakértői bizottságot kért fel, és ezeknek a munkája során jött létre a *Science Vision* dokumentum. A munkának az volt a célja, hogy

- áttekintse az európai csillagászat erőforrásait, valamint a már meglévő tudományos stratégiákat;
- az európai csillagászat számára tudományos jövőképet (Science Vision) hozzon létre, beleágyazva azt a világ egészének a kontextusába.

Az A) szakértői bizottság (Panel A) által vizsgált kérdéskör: Értjük-e az Univerzumban található szélsőséges állapotokat?

Napjainkban az asztrofizika azoknak a területeknek az egyike, ahol a fizika frontvonalai húzódnak. Ezt a területet nem lehet egyszerűen „alap” és „alkalmazott” területre bontani, minthogy bármely alapvető kutatási cél elérése teljesen gyakorlati problémák megoldását is igényli. Az asztrofizika nagyléptékű és egészen általános kérdésekkel is foglalkozik, mint például az Univerzum és a benne található struktúrák létrejöttével. Ezen a területen érte el az asztrofizika egyik legnagyobb eredményét, nevezetesen a nem zéró vákuumenergia létének a felfedezését.

A munkacsoport által vizsgált legfontosabb kérdések:

- Mi volt az Univerzum kezdeti állapota?
- Mi a sötét energia és sötét anyag?
- Megfigyelhető-e az erős gravitáció „működés” közben?
- Hogyan működnek a szupernóvák és gammakitörések?
- Hogyan halmozódik fel az anyag a fekete lyukak körül, és utána hogyan lökődik ki nyaláb formájában a környező térbe?
- Mit tanulhatunk a nagyenergiájú sugárzás és részecskék megfigyeléséből?

A B) szakértői bizottság (Panel B) által vizsgált kérdéskör: Hogyan alakulnak ki és fejlődnek a galaxisok?

Nagyon keveset tudunk a sötét anyag és energia természetéről, és persze sokkal otthonosabban mozgunk a „hagyományos” anyag területén, amely protonokból, neutronokból, elektronokból stb. áll. Mégis, igen sok tennivaló van még, hogy teljesen feltérképezzük ennek a barionos komponensnek a fejlődését. Azt a térfogatot, amelyet a csillagászati megfigyelések elérnek, a $z=1000$ vöröseltolódásnak megfelelő felület határolja. Ezen túl a Világegyetem nem átlátszó.

Úgy tűnik, hogy $z=7$ vöröseltolódásnál a Világegyetem újra teljesen ionizált, miközben csillagok, galaxisok és kvazárok kezdenek kialakulni, amelyek színképében már az előző generációk csillagai által létrehozott fényvonalai is látszanak. Igen nagy kihívás megérteni, hogyan alakultak ki ilyen gyorsan a csillagok, épültek fel a bórnál nehezebb elemek, galaxisok és szupernagy tömegű fekete lyukak, valamint azt, hogy mi történt ezután a galaxisok jelenleg is megfigyelhető Hubble-osztályainak a létrejöttéig.

A munkacsoport által vizsgált legfontosabb kérdések:

- Hogyan tudunk visszaillesztani a „sötét korszakba” és feltérképezni az anyag egészen kismértékű sűrűsödéseit $z=1000$ körül, amelyekből az első csillagok, illetve galaxisok kifejlődtek?
- Melyek a Világegyetem újbóli ionizációjának legfontosabb forrásai: csillagok fénye, fekete lyukak által működtetett aktív galaxismagok, vagy éppenséggel a szuperszimmetria tulajdonságát mutató, elbomlott részecskék? Milyen hosszú ideig tartott ez a folyamat?
- Hogyan fejlődött ki a galaxisok kozmikus hálójá, valamint az intergalaktikus gáz?
- Hogyan történt a Világegyetem galaxisaiban, illetve a közöttük levő térben a fémek kialakulása és szétszóródása?
- Hogyan jöttek létre a galaxisok jelenleg megfigyelhető Hubble-osztályai, ahogyan azt ma látjuk tömegük, gáz-, csillag-, valamint fémtartalmuk eloszlásában?
- Hogyan alakult ki és fejlődött a mi Galaxisunk, és milyen általános tanulságokat vonhatunk le abból a galaxisok kialakulására és fejlődésére vonatkozóan?

A C) szakértői bizottság (Panel C) által vizsgált kérdéskör: Hogyan keletkeztek és fejlődnek a csillagok és bolygók?

A csillagok életútjának a vizsgálata az asztrofizika alapvető, a következő évtizedekben is egyik legaktívabban kutatott területe. Az anyag körforgása a csillagközi anyagból a csillagokba, majd vissza az az alapvető gépezet, amely a Világegyetem élete során a barionok fejlődését hozza létre. A bolygórendszerek, köztük a miénk is, a csillagok fejlődésének korai szakaszában jönnek létre, és az újonnan keletkezett csillagok körül levő sűrű interstelláris anyag bonyolult kémiai fejlődése szükséges ahhoz, hogy létrejussanak azok az óriásmolekulák, amelyek az élet építőköveiként szolgálnak. Ennélfogva a csillagok életútjának a megértése alapvetően fontos ahhoz, hogy választ találjunk a mi Naprendszerünk és a földi élet, illetve más lakható bolygók és a Világegyetem más helyein levő élet keletkezésére.

A munkacsoport által vizsgált legfontosabb kérdések:

- Hogyan születtek a csillagok?
- Értjük-e a csillagok szerkezetét és fejlődését?
- Mi a csillagközi anyag és a csillagok „életútja”?
- Hogyan keletkeznek és fejlődnek a bolygórendszerek?
- Mennyire sokfélék Galaxisunkban a bolygórendszerek?
- Vannak-e az életre utaló jelek idegen bolygókon?

A D) szakértői bizottság (Panel D) által vizsgált kérdéskör: Hogyan kapcsolódunk mindehhez?

A Naprendszer igen előnyös hely a Világegyetem vizsgálatára. A Nap, a helioszféra és a Naprendszerben levő égitestek, bolygók, holdak, kisbolygók és üstökösök igen fontos szerepet játszanak a csillagok fizikájának, a bolygórendszerek kialakulásának, valamint az alapvető asztrofizikai folyamatoknak a megértésében. Központi csillagunkat és bolygórendszerét példátlan részletességgel tudjuk tanulmányozni, de sajnos csak egy pillanatfelvétel áll rendelkezésünkre, minthogy a Nap élete milliárd éveket ölel fel. Abból a célból, hogy megértsük Naprendszerünk múltját és jövőjét, össze kell hasonlítanunk azt más csillagokkal és bolygórendszerekkel.

A munkacsoport által vizsgált legfontosabb kérdések:

- Mire tanít bennünket a Nap az asztrofizikai folyamatokról?
- Mi hajtja a Nap legkülönbözőbb skálákon megnyilvánuló változásait?
- Milyen hatással van a naptevékenység a földi életre?
- Mi a Naprendszer dinamikus története?
- Mit tanulhatunk a Naprendszer vizsgálatából?
- Hol keressük az életet a Naprendszerben?

Az infrastrukturális útiterv

Az útitervnek az volt az alapvető célja, hogy az európai csillagászatnak 20 év távlatában átfogó és megbízható tervet adjon a hatékony infrastruktúra kialakítására. A terv a *Science Vision* dokumentumban megfogalmazott tudományos célokat vette alapul. A terv, a *the Roadmap* elkészítésekor a *Scientific Vision*-ből indult ki azzal a céllal, hogy kielégítse az európai csillagászat infrastrukturális igényeit az elkövetkezendő 10-20 évben. Az útiterv kimunkálása komolyan 2006 szeptemberében kezdődött, nagyjából akkor, amikor a *Science Vision* már félig készen volt.

Az útiterv megalkotására öt szakértői bizottságot kértek fel, amelyeknek egyenként 7–12 tagja volt. A bizottságok tagjait úgy válogatták össze, hogy rendelkezzenek a szükséges szaktudással, ugyanakkor megfelelő egyensúly legyen az egyes országok, illetve a nemek között.

Az öt bizottság az alábbi tudományos témák infrastrukturális igényét vizsgálta:

- Nagyenergiájú asztrofizika; asztro-részecskefizika, valamint gravitációs hullámok;
- Ultraibolya, optikai, infravörös és rádiócsillagászat;
- Napteleszkópok, a Naprendszerbe küldendő űrszondák, illetve laboratóriumi vizsgálatok;
- Elméleti munkák, számítástechnikai létesítmények és hálózatok, virtuális obszervatórium;
- Képzés, új szakemberek toborzása és betanítása, valamint kapcsolat a környező társadalommal.

A továbbiakban az útitervnek csak az űreszközökön alapuló infrastruktúra fejlesztésével kapcsolatos részével foglalkozunk.

Nagyenergiájú asztrofizika

A nagyenergiájú asztrofizika igen nagy ütemben fedez fel új dolgokat, köszönhetően az igen sikeres űrkísérleteknek, illetve földi bázisú eszközöknek, amelyek lehetővé tették, hogy a kutatók tanulmányozhassák a Világegyetemben végbemenő legnagyobb energiájú folyamatokat is. A nagyenergiájú űrasztrofizikában Európa részvétele a közeljövőben is folytatódni fog.

Jelenleg is működő űreszközök

XMM-Newton: Az XMM-Newton obszervatórium az Európai Űrügynökség (ESA) *Horizon 2000* programjának egyik sarokköve, különös tekintettel a nagy érzékenységű asztrofizikai röntgenspektroszkópiára, illetve képalkotásra. 1999 decemberében történt felbocsátása óta az XMM-Newton, a NASA *Chandra* obszervatóriumával együtt alapvető, nemzetközi eszköze a jelenleg ismert legkülönösebb asztrofizikai források vizsgálatának. Ezek közé tartoznak a nagy tömegű fekete lyukak a galaxisok központjában, forró gáz, amely kitölti a halmazokban levő galaxisok közötti teret, forró koronával burkolt aktív csillagok, bolygók körüli forró plazma, kettős rendszerekben levő neutroncsillagok, illetve fekete lyukak, valamint a szupernóva-robbanások után visszamaradt, lökéshullám fűtötte gázfelhő.

INTEGRAL: Hat év üzemidő után az INTEGRAL jelenleg a nemzetközi nagyenergiájú asztrofizikával foglalkozó kutatóközösség igen hatékony eszköze, amelynek segítségével több száz forrás nagyenergiájú sugárzását figyelték meg mind a Galaxisban, mind a távoli Világegyetemben. Jóllehet a pályára kerülés utáni első néhány évben többnyire galaktikus forrásokat figyeltek meg, az extragalaktikus források aránya egyre nő, és ennek eredményeképpen több távoli, aktív magú galaxist (AGN) fedeztek fel, egészen $z=3,7$ vöröseltolódásig. Az INTEGRAL rendkívül eredményes űrteleszkóp a nagy kihívást jelentő keményröntgen- és gammatartományban.

Űrbázisú, rövid távú kísérletek (–2015)

Simbol-X: a Simbol-X a keményröntgen-tartományban dolgozó képalkotó mesterséges hold, Franciaország és Olaszország vezetésével, illetve Németország részvételével, és 2014-ben tervezik a felbocsátását. A működés tervezett időtartama rövid, és a közepes méretű űreszköz az első lesz a

kötélékrepülés megvalósításában. A nagy (20 m-es) fókusztávolság, amelyet a tükör és az észlelő berendezés külön űrszondára telepítése valósít meg, egyedülálló lehetőséget ad a nagyenergiájú asztrofizikának arra, hogy képalkotó távcsöve legyen a keményröntgen-tartományban (10–80 keV).

Űrbázisú, középtávú kísérletek (2016–2020)

X-ray Evolving Universe Spectroscopy (XEUS) / International X-ray Observatory (IXO): a XEUS a három nagy űrkíséret egyike, amelyet az ESA választott ki a Cosmic Vision program keretében, további részletesebb tanulmányozásra. Az űrtávcső az ESA új generációs röntgenobszervatóriuma, és a nagyenergiájú asztrofizika számára teljesen egyenértékű az elektromágneses színek más tartományait vizsgáló tervezett obszervatóriumokkal (SKA, ALMA, JWST, E-ELT, CTA). 2008 májusában az ESA, a NASA, valamint a japán JAXA egyeztető bizottságot hozott létre azzal a céllal, hogy vizsgálja meg egy együttes űrkíséret lehetőségét, amely egyesíti a jelenleg fejlesztés alatt álló XEUS-t és Constellation-X-et, kifejlesztve belőlük az International X-ray Observatory-t. A jelenlegi kutatási élvonalnak megfelelő tudományos célokból egy listát állítottak össze, és megfogalmazták a hozzá tartozó mérési igényeket. A kezdeti elképzelések szerint az IXO olyan űrtávcső lesz, amely egy röntgentartományban működő nagy tükrökből, 20–25 m fókuszu, bővíthető optikai padból áll majd, aminek változtatni lehet a fókuszsíkját.

Laser Interferometer Space Antenna (LISA): A LISA űrbe telepítendő, gravitációs hullámokat észlelni képes csillagászati obszervatórium, és a 0,1 mHz–0,1 Hz alacsony frekvenciájú tartomány mérését teszi lehetővé, amely nem érhető el földi bázisú eszközökkel. Ebben a tartományban egy sor asztrofizikai forrás található a Tejútrendszerben, mégpedig a kompakt csillagokból (fehér törpék, neutroncsillagok, fekete lyukak) álló objektumok. Ezek közül a legismertebbek „garantáltan” megfigyelhetők, és nagy jel/zaj arányú kalibrációs forrásként szolgálnak. A LISA segítségével elkészíthető a Galaxisban levő kompakt kettős rendszerek legteljesebb leltára, megfigyelve több ezer ilyen objektumot, beleértve olyanokat is, amelyek optikailag nem láthatók. A LISA néhány tíz, esetleg száz feketelyuk-kettőst is felfedezhet, amelynek a tömege 10^4 , vagy akár 10^7 naptömeg is lehet, és nagy jel/zaj aránnyal egészen $z=30$ vöröseltolódásig is észlelhető.

Ultraibolya, optikai és infravörös csillagászat

A fenti hullámhossztartomány igen nagy jelentőségű a *Science Vision* dokumentumban megfogalmazott számos kérdés megválaszolására, a kozmológiától kezdve a Naprendszerig bezárólag. Az optikai/közeli-infravörös, illetve a rádió tartomány a földi megfigyelő állomásokról is észlelhető. Az optikai/közeli-infravörös tartományban Európa vezető szerephez jutott a világban a négy igen nagy távcsővel (VL7), illetve a belőlük létrehozható optikai interferométerrel. A (szub)milliméteres tartományban Európa világszínvonalú földi bázisú távcsöveket hozott létre és működtet nagy tengerszint feletti magasságban telepített obszervatóriumokban.

Az ESA *Horizon 2000* és a *2000 Plus* programjának köszönhetően Európának vezető szerepe van az űrtudományokban, de nem minden hullámhossztartományban. Az ultraibolyában csak igen kis hozzáféréssel rendelkezik a Hubble-űrtávcsőben történő ESA-részvételnek köszönhetően, de nincs olyan európai részvétellel futó űrkíséret, amely lehetővé tenné a távoli-UV, illetve az extrém-UV tartomány vizsgálatát.

Az asztrometriában a *Hipparcos* űrtávcsőnek köszönhetően Európa vezető szerepre tett szert, amelyet 2012-ben a sokkal nagyobb teljesítményű *Gaia* követ majd.

Jelenleg is működő űreszközök

Az európai csillagászok 2009-ben helyezték üzembe az ESA távoli-infravörösben működő *Planck* és *Herschel* távcsöveit, amelyek az ESA igen sikeres Infravörös Űrobszervatóriumát (ISO) követték.

Űrbázisú, rövid távú kísérletek (~2015)

Gaia-adatok elemzése és feldolgozása. A Gaia nemcsak abból a szempontból egyedülálló, hogy nagyságrendekkel javítja a jelenleg elért asztrometriai pontosságot, hanem az űrkísérlet szerkezetét tekintve is. A kutatóközösség sokkal inkább a Gaia űrkísérlethez szükséges szoftver fejlesztésében, illetve adatelemzésben vesz részt, nem a hardverfejlesztésben, mint a korábbi ESA projektekben.

A Gaia a mérési folyamat során 6-dimenziós térképet készít majd Galaxisunkról, a Tejútrendszeréről, feltárva annak szerkezetét, összetételét és fejlődéstörténetét. Az űrkísérlet eddig nem látott pontosságú pozíciós és radiális sebesség-méréseket végez, amelyek szükségesek ahhoz, hogy sztereoszkopikus és kinematikai leltárt készítsünk Galaxisunk, illetve a Lokális csoport mintegy 1 milliárd csillagáról.

Űrbázisú, középtávú kísérletek (2016-20)

EUCLID (korábban DUNE, illetve SPACE): A sötét energiával kapcsolatos kutatások kétségkívül a korszerű asztrofizika legnagyobb kihívását jelentik. A sötét energia természetének és időbeli fejlődésének a megértése több megfigyelési mód együttes alkalmazását igényli, az elméleti és numerikus szimulációs munkákba fektetett jelentős erőfeszítésekkel együtt. A szakértői bizottság az ESA *Cosmic Vision Announcement of Opportunity* felhívására beérkezett középtávú javaslatok közül a *Dark UNiverse Explorer-t (DUNE)*, illetve *SPectroscopic All-sky Cosmic Explorer-t (SPACE)* igen nagyra értékelte. A két űrkísérlet a sötét energia és sötét anyag természetére vonatkozóan két egyedülálló pontosságú, de különböző úton történő megközelítést jelent, és az ESA úgy döntött, hogy EUCLID néven egy kísérletbe egyesíti őket.

Planetary Transits and Oscillations of Stars (PLATO): A PLATO a *CoRoT* és *Kepler* űrtávcsöveket követi majd, és a tervek szerint >100000 viszonylag fényes csillagon ($V \leq 12$ magnitúdó) nagy pontosságú fotometriát végez majd a vizuális tartományban, valamint további 400000 objektumot mér meg $V=14$ magnitúdóig. Igen szigorú feltételeknek kell eleget tennie: a látómező nagyobb, mint 300 négyzetfok, a működési idő legalább három, de inkább öt év legyen, a fotometriai zaj 8×10^{-5} (a cél $2,5 \times 10^{-5}$) legyen egy órai mérés alatt egy $V = 11-12$ magnitúdós csillagon. A kapott adatok lehetővé teszik Föld méretű, vagy ennél kisebb bolygók detektálását is jelentős számú fényes csillagon észlelt fedés segítségével, ugyanakkor az anyacsillagról is részletes információ gyűlik össze az asztroszeizmológiai méréseknek köszönhetően.

Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA): A SPICA alapvetően japán űrkísérlet, amelyhez Európa jelentősen hozzájárulhat. Ez egy űrbe telepített közepes, illetve távoli-infravörös obszervatórium, amelynek 3,5 m-es tükrét 5 K hőmérsékletre hűtik. Ez jelentősen növeli az érzékenységet a 30–210 μm tartományban (ahol a hideg por és gáz energiájának a java részét kisugározza), a jelenleg üzemelő holdakkal (*Herschel*, *Spitzer*) összehasonlítva. A SPICA alapvető működési hullámhossza az 5–210 μm tartomány, ahol nagy látómezőben folyamatos képalkotás és spektroszkópia lehetséges. Egy koronográf lehetővé teszi többek között Jupiter-szerű exobolygók és protoplanetáris korongok észlelését is.

Űrbázisú hosszú távú kísérletek (2020+)

Darwin és a Távoli Infravörös Interferométer (FIRI): A Darwin célja elsősorban Földünkhöz hasonló exobolygók tanulmányozása, illetve a rajtuk levő esetleges élet vizsgálata. A FIRI a csillagkeletkezést és a fekete lyukakba történő akkréciót vizsgálja, illetve a Tejútrendszerhez hasonló galaxisok kialakulását és fejlődését. Valószínűleg a FIRI leginkább a bolygórendszerek kialakulásának állomásait vizsgálja majd, és Földhöz hasonló bolygókat fedez fel, amelyek életnek adnak otthont, annak a képességének

köszönhetően, hogy a bolygórendszerekben levő por-struktúrák megfigyelésére alkalmas képalkotó rendszerrel szerelik fel.

Űrkísérletek a Naprendszerben

Európa igen jelentős eszközökkel rendelkezik a Nap megfigyelésére. A világszínvonalú napteleszkópok közül négy európai tulajdonban van: a svéd 1 m-es napteleszkóp, a francia–olasz Themis, a német vákuum-toronyteleszkóp (VTT), valamint a holland Open Telescope (DOT), amelyek mindegyike a Kanári-szigeteken található. Ami az űrbázisú napészlelő műszereket illeti, az ESA Horizon 2000 programjának első sarokköve magában foglalta az 1995-ben felbocsátott *Solar and Helispheric Observatory*-t (SOHO). A nagy sikerű SOHO mind a mai napig kiváló tudományos eredményekkel szolgál. Az *Ulysses* a napszelet tanulmányozta minden irányból, és nemrég fejezte be a működését. A NASA vezetésével futó *STEREO* és a japán vezetésű *Hinode* 2006-ban indult jelentős európai részvétellel.

Jelenleg is működő űreszközök

Cluster: A Cluster űrkísérlet a magnetoszféra nagyfelbontású, háromdimenziós vizsgálatát tűzte ki célul. Ennek elérésére a Cluster négy azonos mesterséges holdból áll, amelyek tetraéder alakban elhelyezkedve repülnek. Az alapvető tudományos céloknak megfelelően a mesterséges holdak közötti távolság 20–10000 km között változik.

STEREO: A STEREO a NASA vezetésével futó űrkísérlet, amely két holdból áll, amelyek a Földéhez hasonló pályán keringenek a Nap körül, az egyik bolygónk előtt, a másik mögötte, és a távolság közöttük az idővel lassan nő. Az a cél, hogy sztereoszkopikus képeket kapjanak a Nap külső atmoszférájáról, illetve koronakitörésekről (CME), továbbá, hogy nyomon kövessék azokat a koronakitöréseket, amelyek a Földet is eléri. A műszerek 50%-át Európa szállította.

Hinode: A Hinode japán vezetéssel készült Nap-űrobszervatórium, 50 cm-es optikai teleszkóppal, extrém UV-tartományban működő képalkotó spektrométerrel, valamint röntgenteleszkóppal a fedélzetén. A Hinode-t 2006 szeptemberében indították útjára. Európa a kísérletet 2011-ig támogatja anyagilag. Igen magas prioritású az űrkísérlet futamidejének a meghosszabbítása újabb öt évvel azért, hogy egy teljes napciklust le lehessen fedni.

Űrbázisú, rövid távú kísérletek (–2015)

Solar Orbiter: A Solar Orbiter mesterséges bolygó megközelíti a Napot, és 30° heliografikus szélességet elérve lehetővé teszi a Nap poláris területeinek a vizsgálatát. A fő tudományos cél a Naphoz közeli helioszférában levő plazmák, mezők és részecskék tulajdonságainak a meghatározása, a napfelszín, a korona és a belső helioszféra kapcsolatának tanulmányozása, a Nap mágneses atmoszférájában az energetika, dinamika, valamint finomszerkezet vizsgálata, továbbá a Nap magas szélességű területeinek, áramlásainak és szeizmikus hullámainak megfigyelésével a mágneses tér keletkezésének a megértése.

ExoMars: Az ExoMars az ESA első űrkísérlete az *Aurora* program keretében. A végső cél az, hogy megállapítsák, volt-e, illetve létezik-e jelenleg élet a Marson. A Marsot robotok segítségével kívánják vizsgálni, beleértve egy exobiológiai kutatásokat végző járművet (Pateur egység) és geofizikai, illetve környezetkutatásra szolgáló műszeregyüttest (GEP), amely a leszálló egységen foglal helyet, és meteorológiai, illetve talajszerkezeti *in situ* méréseket végez majd. A marsjáró több kilométert tesz majd meg, és keresi az egykori, illetve jelenlegi élet nyomait olyan módon, hogy mintát vesz az útközben található sziklákból, illetve a felszín alól, egészen 2 m mélységig.

Űrbázisú, középtávú kísérletek (2016–2020)

Cross-Scale: A Cross-Scale az asztrofizikai plazmák fizikájának alapvető jellegzetességeit vizsgálja, jelesül, a különféle skálákon együttesen ható plazmafolyamatok közötti kölcsönhatást. A Cross-Scale tovább növeli Európa vezető szerepét az űrplazmák vizsgálatában, amelyet a Cluster holdak alapoztak meg. A 12 mesterséges holdból álló alakzat lehetővé teszi olyan alapvető plazmafolyamatok vizsgálatát, amelyekre nem volt lehetőség az eddigi, illetve tervezett űrkísérletekben. Ennek köszönhetően a Cross-Scale jelentős érdeklődést keltett Japánban és az Egyesült Államokban is. Nem fér hozzá kétség, hogy Európának a Cross-Scale létrehozásában megnyilvánuló vezető szerepe jelentős technikai és anyagi forrásokat mozgósít majd Európán kívül is.

Marco Polo: a Marco Polo egy közös európai–japán űrkísérlet, amely a tervek szerint anyagmintát hoz vissza egy földközeli kisbolygóról (NEO). A célpont egy primitív NEO, amelynek összetétele nem hasonlít az ismert meteoritikus mintákhoz. A Marco Polo ennél fogva hozzájárul, hogy jobban megértsük a Naprendszer létrejöttét és fejlődését. A jelenlegi exobiológiai elképzelések lehetségesnek tartják, hogy a szerves anyag kívülről érkezett a Földre, esetleg egy primitív NEO segítségével. Sőt, a NEO-k Földdel történő ütközése ténylegesen kockázatot jelent az élet számára. Mindezen okok miatt ilyen égitestek vizsgálata rendkívül érdekes és sürgős.

Titan and Enceladus Mission (TandEM): A TandEM ambiciózus projekt, amely a Szaturnusz Titan és Enceladus holdjának *in situ* vizsgálatát tűzte ki célul. A TandEM-et a Cassini–Huygens űrkísérlet folytatásának szánják. A Cassini–Huygens jelenleg is működik a Szaturnusz térségében, és új felfedezések köszönhetőek neki, de új kérdések is vetődtek fel. Az eredeti elképzelés szerint a TandEM két közepes méretű mesterséges holdból áll, amelyeket egy vagy esetleg két rakéta állít a pályára, és magukkal visznek egy keringő egységet, *in situ* méréseket végző műszereket és egy egységet az Enceladuson történő leszállásra. A hasznos teher egy sor megfigyelőeszközt tartalmaz majd, beleértve kamerákat, spektrométereket, magnetométereket, radart, rádióeszközöket, szeizmométereket és néhány új elven működő műszert, amelyek alkalmasak az összes színtartomány tanulmányozására. A Huygens űrkísérlethez hasonlóan most is tervezik az űrhajó nyomon követését a VLBI segítségével.

LAPLACE: A LAPLACE ambiciózus, több platformot tartalmazó űrkísérlet, amely a Jupiterből és négy Galilei-holdjából álló rendszert vizsgálja majd. A LAPLACE űrkísérlet három keringő egységet helyez pályára a Jupiter-rendszerben abból a célból, hogy koordinált méréseket végezzen a Jupiter holdjain és légkörén, valamint magnetoszféráján. Az egyik űrszondát az Europa körül olyan poláris pályára állítják, ahol a keringési idő legalább néhány hónap lesz; vizsgálják még annak a lehetőségét is, hogy a hasznos teher tartalmazzon-e egy, az Europa holdra ejtendő kisebb tárgyat is. A második űrhajót olyan pályára állítják, hogy a keringési idő megegyezzen az Europa-éval, és átjátszó állomásként szolgáljon majd az adatok tárolásához és továbbításához. A harmadik, tengelye körül forgó szonda a Jupiter magnetoszféráját vizsgálja majd. A hasznos teher nagyszámú távérzékelő műszert (kamerákat, spektrométereket a gamma- és röntgenhullámhossztól egészen a rádiótartományig, illetve magasságmérő radart és lézert, magnetométert, mikro-gradiométert, poranalizátort, tömegspektrométert, valamint rádió- és plazmahullámok mérésére alkalmas műszereket) is tartalmaz. Tervezik az űrszonda VLBI-vel történő nyomon követését.

Űrbázisú hosszú távú kísérletek (2020+)

Probing Heliospheric Origins with an Inner Boundary Observing Spacecraft (PHOIBOS): A PHOIBOS olyan kutatásra és új felfedezésekre készülő űrkísérlet, amely a tervek szerint a helioszféra eddig még nem tanulmányozott, 0,3 csillagászati egységen belüli, a Nap felszínétől három napsugárig terjedő területén végez majd részletes vizsgálatokat. A PHOIBOS fő tudományos célja annak a vizsgálatára lesz, hogy a Nap

mágneses tere, illetve a plazma dinamikai sajátosságai hogyan hozzák létre a napkoronát, a napszelet, valamint a helioszférát. Ennek a célnak az elérése az egész asztrofizika számára a Rozetta-kőhöz hasonló felfedezés lenne, amely lehetővé tenné, hogy megértsük nemcsak a Nap által létrehozott plazmakörnyezetet, hanem a Világegyetemben bárhol található űrplazmakörnyezetet, ahol forró, híg mágneses plazma továbbít energiát, és gyorsít részecskéket a legkülönbözőbb skálákon. Továbbá, minthogy az egyedüli közvetlen *in situ* mérés abban a tartományban, ahol a Nap legpusztítóbb, nagyenergiájú részecskéinek egy része felgyorsul, a PHOIBOS egyedülállóan és alapvetően hozzájárul ahhoz, hogy jellemezni, illetve előre jelezni tudjuk azt a sugárzási környezetet, amelyben a jövőben a jövőbeni űrkíséreltek dolgoznak, illetve léteznek majd.

Záró megjegyzések

Az ASTRONET Infrastrukturális Útiterve megalkotása úttörő, nagy kihívást jelentő és összetett feladat, amely Európa legfelkészültebb tudósainak, oktatóinak és tudományos ügyintézőinek elkötelezettségét és szakmai felkészültségét igényelte.

A tervek ambiciózusak, megvalósításukhoz időnként a pénzügyi támogatást adó szervezetek részéről határozott döntések kellene az egyébként létező berendezések további üzemeltetéséről is. Továbbá, nincs kétség afelől, hogy az elkövetkező két évtizedben céljaink elérésére, elképzeléseink megvalósítására és ezen keresztül vezető szerepünk megőrzésére, illetve növelésére, további jelentős anyagi források bevonása szükséges, és a munka a társadalom egészére is hatással van.

Ennélfogva talán az egyik legfontosabb az, hogy az ASTRONET újult erővel folytassa munkáját, együttműködve az anyagi támogatást adó ügynökségekkel, illetve más szervezetekkel, hogy biztosítva legyen az *Útiterve* javaslatainak a megvalósulása, és segítséget nyújtson a jövőben a szükséges döntések meghozatalához és az Európán belüli együttműködéshez, valamint koordinációhoz.

Ezen túlmenően, az ASTRONET felhasználhatja az *Útitervet*, hogy kormányzati szinten is hangsúlyozza a csillagászat jelentőségét és társadalmi hatását, illetve nem utolsósorban példát mutat az együttműködésre Európán belül és azon túl. Ténylegesen, a legtöbb nagy projekt nemzetközi együttműködést igényel Európán túl is, és az ASTRONET ebben a globális együttműködésben is segítséget nyújthat.

(A *The ASTRONET Infrastructure Roadmap* a <http://www.astronet-eu.org/IMG/pdf/Astronet-Book.pdf> címen tölthető le.)