

fizikai szemle

Gravitációs fizika

Gravitációs hullámok

Einstein teleszkóp

2026/3

nka

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

SZERKESZTŐSÉG

Felelős szerkesztő: Iglói Ferenc főszerkesztő
Olvasószerkesztő: Bodrog Zoltán
Technikai szerkesztő: Hock Gábor

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

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

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

Kiadja és terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat,
1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III.
Telefon/fax: (1) 201-8682
Felelős kiadó: Újfalussy Balázs főtktár

A Társulat és a folyóirat honlapja:

<http://fizikaizemle.elft.hu>,
e-postacíme: elft@elft.hu

A folyóirat szerkesztőségi e-mail címe:

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



Nyomdai előkészítés: Hock Gábor. *Nyomdai munkálatok:* OOK-PRESS Kft., *felelős vezető:* Szathmáry Attila ügyvezető igazgató. Előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán. Az egyes számok ára: 2000,- Ft (a dupla számoké 4000,- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott)
HU ISSN 1588-0540 (online)

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



A címlapon:

LIGO, Caltech: neutroncsillagok ütközése
Forrás: NASA/Swift/Dana Berry

TARTALOM

GRAVITÁCIÓS FIZIKA – TEMATIKUS BLOKK

Vendégszerkesztő: Gergely Árpád László

Gergely Árpád László: Gravitációs fizika – Bevezető 73
Frei Zsolt: A gravitációshullám-detektálások első tíz éve 74

A cikk átfogó áttekintést nyújt az eddigi gravitációshullám-detektálásokról, kiemelve a legérdekesebb eddig észlelt gravitációs hullámok jelentőségét és az ELTE LIGO-kutatócsoport által fejlesztett GLADE galaxiskatalógus fontos szerepét a gravitációshullám-megfigyelések kozmológiai felhasználásában.

Barta Dániel: Új korszak a gravitációshullám-fizikában: az Einstein teleszkóp 81
Az írás a jövő évtizedre tervezett európai gravitációshullám-detektor, az Einstein teleszkóp (ET) koncepcióját és várható tudományos hozadékait ismerteti, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóintézet ET-csoport vezetőjének tolmácsolásában.

Szabó Róbert, Kovács András: A Vera Rubin Observatórium égboltfelmérése 85
a gravitációs kutatások szolgálatában
A Vera Rubin Observatórium adatait elemző, magyar csillagászok részvételével alakult nemzetközi kollaboráció fontos feladata lesz a gravitációshullám-források környezetének jobb megismerése, a sötét anyag eloszlásának felderítése a gravitációs lencsézési statisztikák pontosításán keresztül, valamint a sötét energia időfejlődését jellemző paramétereinek pontos behatárolása.

Csukás Károly: Fekete lyukak a számítógépen 89
Hiánypótló magyar nyelvű összefoglalója a numerikus relativitáselméletnek, melynek nagy sikere a kritikus gravitációs összeomlás, vagyis a feketelyuk-kialakulás határának felfedezése volt, szerepe pedig megkerülhetetlen a kompakt kettősrendszer-összeolvadások végső szakaszának vizsgálatában.

Karácsonyi Kata, Cirok Balázs, Keresztes Zoltán, Gergely Árpád László: 95
Gravitációelméletek tesztelése gravitációs hullámokkal
Az einsteini gravitációelmélet kiegészítése a sötét anyag, a sötét energia, a kozmikus infláció, valamint a gravitáció geometriai és a térelméletek kvantumos leírásának összeférhetetlensége kapcsán merül fel. Az SZTE LIGO-csoportja új polarizációs módusokat és diszperzió jeleit keresi a megfigyelt gravitációs hullámok elemzésével, az általános relativitáselmélet tesztelése érdekében.

Patkós András: Kvantumtér-e a gravitációs erőter? 101
A gravitációs hullám kvantumos jellegének kimutatásához mind a kvantált emisszió (vagy abszorpció), mind a Poisson-alatti graviton-számlálási statisztika megfigyelése szükséges. A kvantumoptikai analógia által sugallt gravitofotonos hatás a Weber-típusú detektorok mérési pontosságának mintegy két nagyságrendű javulásával kimutathatóvá válna.

A FIZIKA TANÍTÁSA

Kovács József, Szalai Tamás: Tizenöt éves a magyar csillagászati diákolimpiai 105
mozgalom

MEGEMLÉKEZÉS

Vincze Imre: Kemény Tamás (1946–2025) 108

HÍREK, ESEMÉNYEK

Fejős Gergely, Patkós András: Austria–Croatia–Hungary Triangle (ACHT) 109
Műhelykonferencia, 2025. május 5–7., Budapest

~ ~ ~ ~ ~

GRAVITATIONAL PHYSICS – THEMATIC BLOCK

Á. L. Gergely: Gravitational physics – Introduction
Zs. Frei: The first ten years of gravitational wave detections
D. Barta: A new era in gravitational wave physics: the Einstein telescope
R. Szabó, A. Kovács: The Vera Rubin Observatory's sky survey in the service of gravitational research
K. Csukás: Black holes on the computer
K. Karácsonyi, B. Cirok, Z. Keresztes, Á. L. Gergely: Testing gravitational theories with gravitational waves
A. Patkós: Is the gravitational field a quantum field?

TEACHING PHYSICS

COMMEMORATION

NEWS, EVENTS

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT
megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS
INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM

nka
Nemzeti Kulturális Alap



GRAVITÁCIÓS FIZIKA – BEVEZETŐ

Gergely Árpád László^{1,2}

¹Szegedi Tudományegyetem, Fizikai Intézet, Elméleti Fizikai Tanszék, Szeged

²HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Részecske- és Magfizikai Intézet, Elméleti Fizika Osztál, Budapest

E-mail: laszlo.arpad.gergely@gmail.com

A négy alapvető kölcsönhatás közül a leggyengébb a gravitáció. Hosszú hatótávolsága és a tömeg pozitivitása miatt mégis ez uralja az Univerzum fejlődését. Einstein általános relativitáselméletében a gravitáció geometriai tulajdonság, így az geometrodinamikának is nevezhető. Az einsteini gravitációelmélet kiállta az összes eddigi megfigyelés próbáját. Megjósolta a fekete lyukak létezését, bár első „fényképeire”, melyeket az Event Horizon Teleszkóp készített, több mint száz évet kellett várni. Azt is megjósolta, hogy a fekete lyukak ütközését és összeolvadását gravitációs hullámok kialakulása kíséri. Közvetlen kimutatásukra, a LIGO-detektor Nobel-díjat érő felfedezésére szintén száz évet kellett várni. Az ütköző gravitációs síkhullámok szintén létrehozhatnak szingularitásokat – az ütközi felületen szóródó hullámok fókuszálódása miatt.

Frei Zsolt bevezető cikkében átfogó áttekintést olvashatunk a gravitációshullám-detektálások első tíz évéről, a detektálás elvi nehézségeiről, a legérdekesebb eddig észlelt gravitációs hullámokról és az észlelések értelmezéséről. Megtudjuk, hogy még bizonyos típusú észlelések hiányából is értékes információk bontakoznak ki az egzotikus források gyakoriságáról. A GLADE galaxiskatalógus megteremtésén keresztül kitér az ELTE LIGO-kutatócsoport fontos szerepére a gravitációshullám-megfigyelések kozmológiai felhasználásában.

Barta Dániel írása a jövő évtizedre tervezett európai gravitációshullám-detektor, az Einstein teleszkóp (ET) technológiai újdonságait veszi számba, összehasonlítva a jelenleg még versenyben álló kétféle detektorkonceptió előnyeit és hátrányait. Az ET-től új típusú gravitációshullám-források felfedezését várjuk, pontosabb képet kapunk a csillagfejlődésről, a kompakt csillagszerkezetekről, távolabbra látunk el térben és időben, fejlesztjük kozmológiai ismereteinket, és pontosabban teszteljük a gravitációt. Az ET tudományos kollaborációban a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóintézet ET-csoportja vesz részt.

Szabó Róbert és *Kovács András* a 2026-ban indult Vera Rubin Observatórium égboltfelméréséről ír, mely a Naprendszer, a Tejútrendszer, a tranzien csillagászati

jelenségek, a gravitációshullám-források környezetének jobb megismerése és kozmológiai megfigyelések mellett a sötét anyag eloszlásának felderítését is célul tűzte ki, gravitációs lencsézési statisztikák pontosítása révén. Fontos célja a sötét energia időfejlődésének, a dinamikus sötét energia paramétereinek pontos behatárolása, melynek következtében a kozmológiai állandó hipotézise megdőlhethet, a standard kozmológiai modell revízióra szorulhat. A HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetének, az ELTE Fizikai és Csillagászati Intézetének, valamint az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatóriumának munkatársai az adatokat elemző nemzetközi kollaboráció tagjai.

Csukás Károly cikke a numerikus relativitáselmélet hiánypótló magyar nyelvű összefoglalója, melynek nagy sikere a kritikus összeomlás felfedezése, azaz a perturbációk szétszóródása és a feketelyuk-kialakulás közötti határ azonosítása volt a gömbszimmetrikus összeomlásban. A kompakt kettős rendszerek összeolvadásának analitikus sorfejtésekkel nem jellemezhető végső szakaszát is numerikus módszerekkel szükséges tárgyalni. Ehhez meg kell törni a téridő egységes leírását, térre és időre választva azt szét. Tárgyalja a kezdeti értékek és peremértékek választásának lehetőségeit, hangsúlyozza a kényszerezgényletek szerepét.

Karácsonyi Kata, *Cirok Balázs*, *Keresztes Zoltán* és *Gergely Árpád László* cikke a gravitációelméletek gravitációs hullámokkal történő tesztelésének jelen állását ismerteti. Az einsteini gravitációelmélet kiegészítését a sötét anyag, a sötét energia, a kozmikus infláció indokolja, nemkülönben a gravitáció geometriai és a térelméletek kvantumos leírásának összeférhetetlensége. A módosított gravitációelméletekben a gravitációshullám-terjedésben diszperzió léphet fel. A két tenzori polarizáció két vektori és két skaláris polarizációval egészülhet ki. A LIGO megfigyeléseinek felhasználásával a gravitációs hullámok diszperziós és polarizációs tulajdonságait az SZTE LIGO-csoportja vizsgálja.

Patkós András írása a gravitáció kvantumos jellegét firtatja, kvantumoptikai analógiára támaszkodva. Áttekinti a foton létezését igazoló, a speciális intenzitás-fluktuációkat mutató nyalábok fénystatisztikáján alapuló, modern megfigyelések elméleti hátterét. Az analógia értelmében a gravitációs hullám kvantumos jellegének kimutatásához kvantált emissziójának (vagy abszorpciójának) megfigyelése mellett a Poisson alatti graviton-számlálási statisztika kimutatása is elengedhetetlen. A feltelezett gravitofotonos hatás szerint a makroszkopikus számú gravitont hordozó, így klasszikusnak tekinthető metrikus perturbáció koherens állapotba gerjeszti a kvan-



Gergely Árpád László a Szegedi Tudományegyetem Elméleti Fizikai Tanszékének egyetemi tanára, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Gravitációfizikai Kutatócsoportjának vezetője. Kutatásait Magyarországon, az Amerikai Egyesült Államokban, Franciaországban, az Egyesült Királyságban és Japánban végezte. Kutatási területe az általános relativitáselmélet és módosításai, a kozmológia, a fekete lyukak, a gravitációs hullámok, valamint a gravitáció kvantálása.

tumos rendszernek tekintett detektort, melynek kvantumállapotai közötti átmenetek a jelenlegi Weber-típusú detektorok mérési pontosságának mintegy két nagyságrendű javulásával kimutathatókká válnának.

A gravitáció és a gravitációs hullámok kutatásától az elkövetkező évtizedekben fizikai világképünket és az

Univerzumról alkotott fogalmainkat jelentősen befolyásoló felfedezések sokasága várható. A Fizikai Szemle ezzel a számmal érdekes gyűjteményt nyújt át az olvasó számára a tudásunk határait feszegető gravitációs kutatások berkeiből.

A GRAVITÁCIÓSHULLÁM-DETEKTÁLÁSOK ELSŐ TÍZ ÉVE

Frei Zsolt

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizikai Intézet, Atomfizikai Tanszék, Budapest

E-mail: frei@ttk.elte.hu

Tíz év telt el azóta, hogy az első gravitációshullám-jel át-söpört a Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) detektorain, a téridőt a proton átmérőjénél is jóval kisebb mértékben megnyújtva és összenyomva, ezzel pedig egy teljesen új megfigyelési ablakot nyitva a Világegyetemre. 2015. szeptember 14-én, a hajnali órákban az amerikai Washington államban, Hanfordban és Louisianában, Livingstonban működő műszerek rögzítették azt, amit később GW150914 néven ismertünk meg: egy rövid, de félreérthetetlen „csiripelő” jelet, amely két összeolvadó fekete lyuk utolsó pillanataiból származott. Ezzel az eseménnyel a gravitációs hullámok – amelyek létezését Einstein általános relativitáselmélete régóta megjósolta – azonnal kiléptek a pusztán elméleti absztrakció szintjéről, és kísérleti tapasztalattá váltak.

A gravitációs hullámok „vadászatáról” még 2016-ban háromrészes cikksorozatot közöltem a *Fizikai Szemle* hasábjain [1–3]. A másodikban számoltam be a tényleges felfedezésről, ebben a cikkben pedig az azóta eltelt egy évtized eredményeit, fejlődését szeretném összefoglalni. A fontos fizikai háttérrel nagyon röviden áttekintem a jelen cikkem következő fejezetében, de ha szükséges, a teljes megértéséhez ajánlom a korábbi cikkeket. Az azóta eltelt évtizedben a terület lenyűgöző gyorsasággal fejlődött: egyetlen detektálástól eljutottunk több száz összeolvadási eseményig; az első megerősített fekete lyuk-kettőtől a fekete lyukak és neutroncsillagok sokféle családjáig; attól, hogy 2015-ben „csak” igazoltuk, hogy a detektorok működnek, illetve, hogy az einsteini jóslat helyes volt, odáig, hogy a kozmológia, a magfizika, az asztrofizikai populációk felmérése és az általános

relativitáselmélet újabb területein használjuk őket megfigyelési eszközként.

Ez az első évtized a Világegyetemről alkotott átfogó képünket is megváltoztatta. 2015 előtt a „csillagtömegű” fekete lyukakat szinte kizárólag akkréciós röntgenkettősök elektromágneses megfigyeléseiből ismertük – olyan rendszerekből, amelyekben egy fekete lyuk anyagot szív el kísérőcsillagáról –, és még ezek száma sem volt túl nagy. A neutroncsillag-összeolvadásokat régóta gyanították a rövid gammakitörések és a nehézelemek szintézisének forrásaként, de ez a kapcsolat csak közvetett bizonyítékokon alapult. Az általános relativitáselmélet erős térben, gyorsan változó, dinamikus rezsimje – az a tartomány, ahol Einstein elmélete a legélesebben tér el a newtoni gravitációtól – pedig teljesen elérhetetlen volt a megfigyelések számára. Ma mindezen határokat átléptük, és a gravitációshullám-obszervatóriumok a csillagászat, a kozmológia és az alapvető fizika megfigyelési eszközeivé váltak. A változás ahhoz a lépéshez hasonlítható, ahogy a legelső optikai távcsövektől eljutottunk a kiforrott megfigyelő csillagászatig: először egy áttörés, majd a horizont kitágulása, végül egy teljes tudományág megszületése.

Hogyan működik a LIGO?

A gravitációs hullámok fogalma Einstein általános relativitáselméletéből következik: gyorsan változó tömegeloszlások a téridőben hullámszerű perturbációkat keltenek, amelyek fénysebességgel terjednek a távolba. Noha analógiát vonhatunk az elektromágneses hullámokkal, fontos különbségek is vannak. Az energiamegmaradás következtében a gravitációs hullámoknak nem lehet monopólusforrása, sőt, mivel a gravitációs „töltésnek” nincs előjele, azaz a gravitációs „töltés” – a tömeg – mindig pozitív, sem monopólus-, sem dipólus-sugárzás nem jöhet létre. Az első nem eltűnő tag a kvadrupólustag. Ezért minden gravitációshullám-forrás olyan rendszerekhez köthető, amelyekben a tömegeloszlás időben és térben erősen aszimmetrikusan változik.

A relativitáselméletben a téridő metrikáját a Minkowski-tér egy kis perturbációval való kiegészítéseként

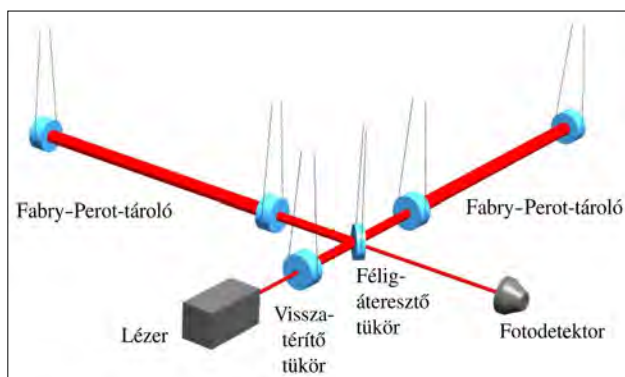


Frei Zsolt Széchenyi- és Prima-díjas fizikus, az MTA doktora, az ELTE egyetemi tanára. Tizenöt évig vezette az ELTE Atomfizikai Tanszékét, három éven keresztül igazgatója volt az ELTE Fizikai és Csillagászati Intézetnek. Jelenleg az ELTE Asztrofizikai és Űrtudományi Centrum igazgatója, a HUN-REN-ELTE Extragalaktikus Asztrofizikai Kutatócsoport vezetője, valamint a HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet részállású kutatóprofesszora.

írhatjuk fel, ha a gravitációs tér gyenge, és nincs számottevő anyag a térben: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, ahol $\eta_{\mu\nu}$ a Minkowski-téridő és $h_{\mu\nu}$ írja le a kis perturbációkat, azaz a gravitációs hullámot. A magasabb rendű tagokat elhagyva az Einstein-egyenletek megmutatják, hogy a hullám amplitúdója nagy távolságokon $1/d$ -vel csökken, és a forrás kvadrupólusmomentumának második időderiváltjával arányos. Nagyságrendi becslések alapján egy távoli, csillagtömegű kompaktojektum-összeolvadás által keltett tértorzulás mindössze 10^{-21} nagyságrendű. Ez olyan kicsiny relatív távolságváltozás, mintha a Nap és a legközelebbi csillag közötti négy fényéves távolságot egy hajszál vastagságának pontosságával kellene megmérni.

A gravitációs hullámok frekvenciáját a forrás mérete korlátozza: az esemény karakterisztikus periódusideje nem lehet kisebb annál, amennyi idő alatt a fény keresztülhalad a rendszeren. Csillagtömegű fekete lyukak esetén így a kibocsátott hullámok felső frekvenciahatára néhány kHz.

A LIGO műszaki megoldásait a rendkívüli érzékenység igénye határozza meg. A detektorok lényegében hatalmas, földre telepített *Michelson-interferométerek*, amelyek két, egymásra merőleges, 4 km-es kar mentén mérik a fény fázisának változását. A gravitációs hullám a két kar hosszát eltérő módon nyújtja meg és nyomja össze, így a visszaverődő fénynyalábok interferenciaképe megváltozik. A jel azonban olyan kicsiny, hogy a karokat *Fabry-Perot-rezonátorokkal* egészítjük ki: a fény többször oda-vissza verődik a karok végtükrei között, így az effektív úthossz nagyságrendekkel nő. További optikai elemek – például a teljesítménynövelő bemeneti (*viszszatérítő*) tükör – biztosítják, hogy a lehető legtöbb fény jusson vissza az interferométerbe, növelve a jel-zaj arányt (1. ábra).



1. ábra. A LIGO vázlatos rajza. A lézer fényét a féligáteresztő tükör kettéosztja és a Michelson-interferométer két karjába juttatja. Azokba egy-egy Fabry-Perot-interferométer van építve, amelyek megnövelik a karokon belül a lézerfény effektív teljesítményét, és jelentősen megnövelik a karokban a lézerfény úthosszát. A Fabry-Perot-interferométerek két végén lévő tükrök maguk a próbatestek. Ezek vannak páronként egymástól 4 km-re, és e szakasz hossza változik a gravitációs hullám áthaladásakor. A két karból kilépő fény a féligáteresztő tükrön keresztül a fotodetektorra kerül. Az azon leolvasott idősor a tényleges mérési eredmény. Mivel ebben a folyamatban a féligáteresztő tükör nemcsak a fotodetektor felé tereli a fénynyalábokat, hanem a forrás, a lézer felé is jut azokból, a teljesítményt újrahasznosító visszatérítő tükör szükséges a lézer előtt

Mindenhez rendkívüli fizikusi és mérnöki megoldások szükségesek: több kilométeres, ultravákuumban tartott csőpárok; tükrök, amelyek termikus- és szeizmikus rezgéseit (itt igazából zajait) többfokozatú felfüggesztések csillapítják; stabil, nagy teljesítményű lézerek; továbbá kifinomult zajmodellek és adatfeldolgozó algoritmusok. A detektorok szögérzékenysége és polarizációfüggése is ismert: csak több detektor együttes működésével lehet a hullámforrás pontos égi helyzetét és a gravitációs hullám polarizációs állapotát meghatározni. Emiatt épült ki a LIGO-Virgo-KAGRA nemzetközi hálózat, amelyben a jel érkezési idejének különbségei alapján lehet a források pozícióját „háromszögeléssel” meghatározni, és amely a jövőben a lehetséges alternatív gravitációelméletek által jósolt polarizációs módusokat is kizárhatja.

Az első detektálás és a feketelyukkettős csillagászat születése

A LIGO első detektálása tisztaságában és következményeiben egyaránt lenyűgöző volt. A jel csak a másodperc töredékéig tartott: két, körülbelül 36 és 29 Naptömegű fekete lyuk spirálozott egymás felé a fénysebesség mintegy felével, a gravitációs hullámok formájában nagyjából három naptömegnek megfelelő energiát sugároztak ki, és egy végső, mintegy 62 naptömegű fekete lyuk maradt utánuk. Ezt megelőzően a csillagfejlődési modellek egyszerűbb képet adtak: a röntgenkettősökben jellemzően 5–15 naptömegű fekete lyukakat vártak, és sok elméleti (asztro-) fizikus azt gondolta, hogy a nagytömegű csillagok erős csillagszele megakadályozza a ~30 naptömegű fekete lyukak tömeges kialakulását. A GW150914 azonban éppen egy ilyen nehéz kettőst talált, és ezzel azt sejtette, hogy a Világegyetem az ilyen rendszereket jóval gyakrabban és hatékonyabban hozza létre, mint azt a korábbi elméletek sugallták.

Az első megfigyelési időszak (O1) további detektálásai gyorsan megerősítették ezt a kialakuló képet. A gravitációs hullámokkal látott fekete lyukak általában nehezebbnek bizonyultak, mint az elektromágneses (EM) módszerekkel katalogizált társaik. Az észlelt feketelyuk-tömegek széles tartományt fedtek le, és az események száma is nagyobb volt a vártnál, ami arra utalt, hogy bizonyos környezetekben a feketelyuk-kettősök a csillagfejlődés természetes végállapotát jelentik.

A következő két év tovább szilárdította ezt az átalakulást. Ahogyan a LIGO érzékenysége javult, és az olaszországi Virgo detektor is csatlakozott a hálózathoz, a gravitációs hullám-események katalógusa folyamatosan bővült. A harmadik megfigyelési időszak (O3) idejére már tucatnyi feketelyuk-összeolvadást detektáltak, így létrejött az első olyan minta, amelyből nemcsak egyedi példák, hanem egy teljes populáció tulajdonságai is kiolvashatók voltak. Ez a populáció meglepően összetettnek mutatkozott: a fekete lyukak nem követték sem tömegben, sem spinben az egyszerű eloszlásokat; inkább

olyan családokat alkottak, amelyeket a csillagfejlődés, a kettős rendszerek kölcsönhatásai, a szupernóvafizika, sőt a sűrű csillaghalmazokban kialakuló dinamikai folyamatok együttesen formálnak.

Néhány esemény kifejezetten azért emelkedett ki, mert új típusú érvelésre kényszerítette a kutatókat. A GW170729 például különösen nagy tömeget és luminozitást mutatott, míg a GW190412 feltűnően aszimmetrikus tömegarányt jelzett – szemben az elsőként detektált, inkább szimmetrikus párokkal. Az egyik leglátványosabb esemény, a GW190521 olyan nagy tömegű fekete lyukak összeolvadásából eredt (a nehezebb komponens mintegy 85 nap-tömegű), hogy azok a páros instabilitás által meghatározott „felső tömegrészben” helyezkednek el. Ez arra utal, hogy legalább az egyik objektum nem közvetlen csillagösszeomlásból, hanem korábbi feketelyuk-összeolvadás termékeként, azaz második generációs fekete lyukként jöhetett létre. Az így kirajzolódó képen tehát egyszerre vannak jelen az első generációs, közvetlenül összeomló csillagokból született fekete lyukak, és a már meglévő fekete lyukak összeolvadásából létrejövő második generációs objektumok, amelyek létrejötté leginkább sűrű rendszerekben – gömbhalmazokban, és spirálgalaxisok magjaiban – várható.

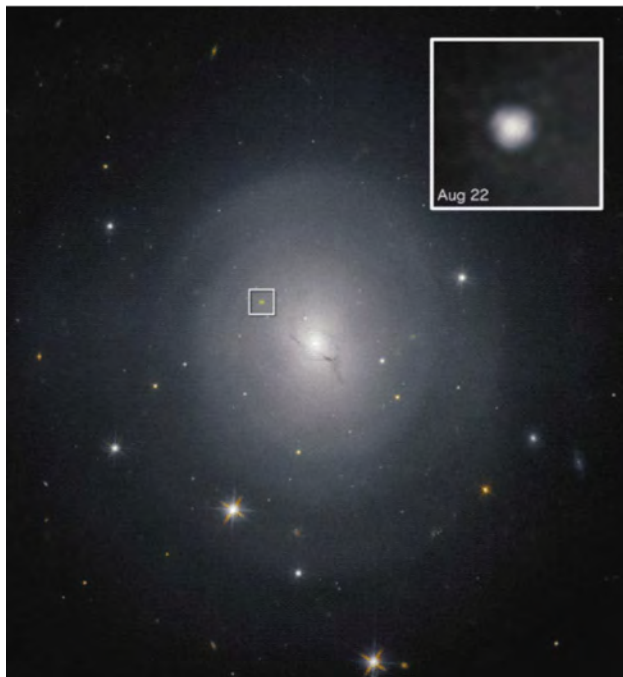
Az elmúlt évtized során a fekete lyukak fizikája néhány röntgen- és rádióforrás vizsgálatától elmozdult egy statisztikai jellegű tudomány felé. A gravitációshullám-katalógusok nemcsak a tömegeket és a pedületeket dokumentálják, hanem az összeolvadások gyakoriságát, kozmikus térbeli és időbeli eloszlását, valamint a kialakulási csatornákat is. Az első tíz év egyértelmű üzenete: a csillagtömegű fekete lyukak sokkal változatosabbak, gyakoribbak és asztrofizikailag aktívabbak, mint azt korábban sejtettük, és a galaxisok életét olyan módon befolyásolják, amelynek teljes megértése további évtizedeket igényel majd [4].

A sokcsatornás csillagászat hajnala: neutroncsillagok és nehézelemek

A neutroncsillag-összeolvadások a gravitációs és elektromágneses megfigyelések összehangolt korszakát nyitották meg. Az áttörést a GW170817 hozta el, amelyet 2017. augusztus 17-én detektáltak. Ellentétben a tipikus feketelyuk-összeolvadásokkal – amelyek nem termelnek számottevő elektromágneses sugárzást –, két neutroncsillag ütközése a teljes elektromágneses spektrumon várható jeleket ígért: rövid gammakitörést, a nehéz atommagok radioaktív bomlása által hajtott kilonóvát, széles sávú utófénylést és más lehetséges jelenségeket [5].

A GW170817 valóban egy ilyen „kincsesbányát” szolgáltatott. Mindössze 1,7 másodperccel a gravitációshullám-jel befejeződése után a Fermi és az Integral műholdak rövid gammakitörést (GRB 170817A) detektáltak, épp abból az irányból, ahonnan a gravitációs hullám érkezett. Ez a szoros időbeli egybeesés kulcsfontosságú

bizonyíték volt: véglegesen megerősítette a régóta gyanított kapcsolatot a neutroncsillag-összeolvadások és a rövid gammakitörések között, és megerősítette, hogy a gravitációs hullámok fénysebességgel terjednek. Néhány órán belül a földi távcsövek is az esemény várható helyét pásztázták, és sikerült azonosítaniuk egy fényes optikai forrást az NGC 4993 galaxisban (2. ábra).



2. ábra. Az első többhírnökös gravitációshullám-esemény forrásgalaxisa. A képen az NGC 4993 lencsegalaxis látható, amelyben a GW170817 neutroncsillag-összeolvadás bekövetkezett – ugyanaz az esemény, amely a GRB 170817A rövid gammafelvillanást is létrehozta. A galaxismag közelében (négyzettel kiemelve a képen) megjelenő optikai fénylő folt a kilonova, amelyet az összeolvadás során kibombolt anyag r-folyamatú nukleoszintézise táplált. A GW170817 volt az első forrás, amelyet egyszerre detektáltunk gravitációs hullámokkal és az elektromágneses spektrum teljes tartományában is, megerősítve a kapcsolatot a neutroncsillag-összeolvadások, a gammakitörések és a nehéz elemek szintézise között. Forrás: NASA/ESA

A következő napokban és hetekben végzett megfigyelések a kilonóvára jellemző jeleket mutatták: a kezdeti, kékes sugárzást a könnyebb r-folyamatbeli elemekből származó emisszió okozta, majd ezt vörösebb, tartósabb fénylés követte, amely a lantanoidákhoz és még nehezebb elemekhez köthető szintézis eredménye.

Először fordult elő, hogy a csillagászok egyszerre figyelhettek meg gravitációs hullámokat és fényt ugyanarról az asztrofizikai eseményről. A neutroncsillag-összeolvadásokhoz kötve sikerült azonosítani a nehézelemek – az arany, a platina és sok más elem – keletkezésének egyik alapvető csatornáját az r-folyamatú nukleoszintézis révén, így megerősítve a kozmikus kémiai fejlődés egy fontos útját. A jel alapján korlátokat lehetett felállítani a neutroncsillag állapotegyenletére vonatkozóan az árapály-deformáció mérésével. Ami pedig különösen egyedülálló: lehetővé vált a Hubble-állandó első gravitációshullám-alapú „standardszirena-mérése”. A gravitációs

hullámokból kapott távolságot a gazdagalaxis vöröseltolódásával kombinálva a kozmikus távulás új, független becslését kaptuk, egy erős „harmadik módszer” a távolságlétra és a kozmikus mikrohullámú háttér mérései mellé.

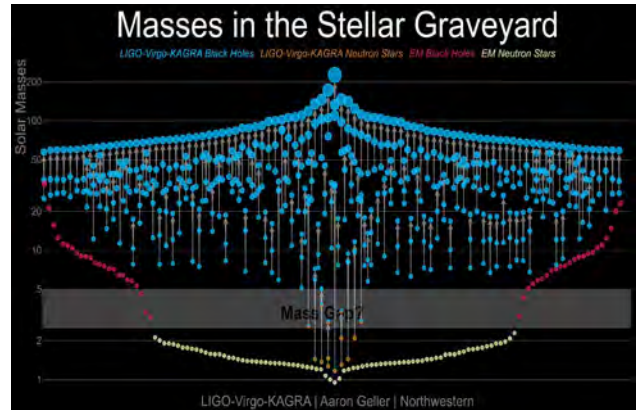
Az esemény egyúttal látványosan demonstrálta egy globális detektorhálózat előnyeit is. Csak a két LIGO-detektor adatai alapján a forrás égi lokalizációja viszonylag pontatlan lett volna, de a Virgo csatlakozása lehetővé tette a gyors háromszögelést, és az égbolton lefedett területet néhány tíz négyzetfokra szűkítette, ami realizisztikussá tette a gyors elektromágneses megfigyeléseket. Az űrtávcsöveket, földi optikai és rádiótávcsöveket, infravörös műszereket egyesítő kampányok olyan sablont adtak, amelyet a későbbi sokcsatornás megfigyelések is követhetnek.

A GW170817-et követő években a neutroncsillag-összeolvadások képe tovább gazdagodott. Bár egyetlen későbbi esemény sem szolgáltat még olyan bőséges elektromágneses adattal, mint ez az ikonikus eset, a gravitációshullám-detektálások új rendszerosztályokat tártak fel. A GW190425 például az eddig ismert Tejútrendszer-beli neutroncsillag-kettősöknél jóval nagyobb tömegű rendszert jelzett, ami arra utal, hogy a Galaxisban megfigyelt mintánk nem feltétlenül reprezentatív. Az első megerősített neutroncsillag-fekete lyuk (NS-BH) összeolvadásokat 2020-ban találtuk; ezek rámutattak arra, hogy milyen széles paramétertartományban hozhat létre a csillagfejlődés ilyen vegyes párokat. Még ha ezen események elektromágneses jelei nehezen azonosíthatók is – hiszen az árapály-szétszakadás és az anyagkidobódás erősen függ a komponensek tömegétől és prdületétől –, a gravitációshullám-adatok maguk is kulcsfontosságú korlátokat adnak.

Az általános relativitáselmélet tesztelése erős, dinamikus terekben

Az általános relativitáselméletet több mint egy évszázada tesztelik, de a gravitációs hullámok megjelenéséig soha nem szembesültünk az összeolvadó kompakt objektumok teljesen dinamikus, erős gravitációs környezetével, ahol a téridő görbülete gyorsan változik, és a nemlineáris hatások uralkodnak. A gravitációs hullámok pontosan kódolják ezeknek a folyamatoknak a részleteit az amplitúdó, a frekvencia és a fázis időbeli változásában, így olyan tesztek tesznek lehetővé, amelyekre a hagyományos, tisztán elektromágneses csillagászat nem képes.

A LIGO első évtizedében végzett vizsgálatok következetesen megerősítették az általános relativitáselmélet érvényességét, miközben a tesztek jellege egyre kifinomultabbá vált a növekvő eseményszámnak köszönhetően (3. ábra). Kezdetben azt vizsgáltuk, hogy a „bespirálózási”, az összeolvadási és a ringdown (a „végső lenyugvási”) fázis hullámformája mennyire illeszkedik a numerikus relativitáselméleti számításokhoz. A GW150914 esetében – csakúgy, mint a későbbi jelentős jel-zaj arányú eseményeknél – az egyezés nagyon jó volt: Einstein egyenletei



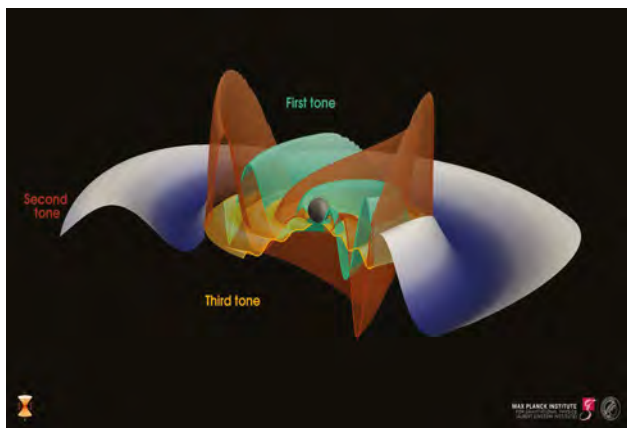
3. ábra. Tömegek a kozmikus temetőben. Ez az ábra a gravitációshullám-megfigyelésekből származó kompakt objektumtömegeket mutatja összevetve a korábban elektromágneses észlelések alapján meghatározott feketelyuk- és neutroncsillag-tömegekkel. A tömegek a függőleges tengelyen (naptömegekben) szerepelnek; a vízszintes elrendezés csupán esztétikai jellegű. A kék pontok gravitációs hullámokkal detektált bináris feketelyuk-összeolvadások tömegeit jelölik, míg a narancssárga a GW170817 neutroncsillag-összeolvadás komponenseit. A sárga és lila pontok elektromágneses úton meghatározott neutroncsillag- és feketelyuk-tömegeket mutatnak. Az ábra több iteráción ment keresztül a GW-események számának növekedésével. Az interaktív változat elérhető itt: <https://media.ligo.northwestern.edu/gallery/mass-plot>. Forrás: LIGO

a megfelelő peremfeltételekkel megoldva olyan hullámformákat adtak, amelyek az észlelt jelekkel lenyűgöző pontossággal estek egybe [6].

Ahogy az események száma nőtt, olyan, az általános relativitástól való eltérések jeleit kezdtük keresni, mint a diszperziós hatások, extra polarizációs módusok, vagy a bespirálózás és a ringdown fázisokból származó tömeg- és spininformációk közötti eltérések. Eddig semmiféle szignifikáns anomália nem mutatkozott. A gravitációs hullámok terjedési sebességét, amelyet a GW170817 és a vele csaknem egyidejű gammakitörés vizsgálatával rendkívüli pontossággal mértünk, a fénysebességgel egyezőnek találták, 10^{-15} -ös relatív pontossággal – ez az eredmény lehetséges elméleti modellek sorát zárja ki, amelyek módosított gravitációt, frekvenciafüggő terjedési sebességet vagy diszperziót jósoltak.

A legutóbbi, O4-es mérési időszak néhány kiváló minőségű eseménye tovább mélyítette ezt a kutatási frontot. A GW250114 jelben már több kvázinormál módust is sikerült azonosítani a ringdown fázisban – ez a „hangzás” egy újonnan kialakult fekete lyukból jön, amint az beáll a végső Kerr-állapotába. A több kvázinormál módus detektálása kulcsfontosságú, mert lehetővé teszi a fekete lyukak „no-hair” tételének valódi tesztelését: ha a fekete lyuk csupán a tömegével, elektromos töltésével és a spinjével írható le, akkor a kvázinormál módusok frekvenciái és csillapodási ideje szigorú kapcsolatban állnak egymással. A korai eredmények összhangban állnak a Kerr-megoldás előrejelzéseivel, és egyúttal empirikusan is alátámasztják Hawking „feketelyuk-területi” tételét, amely szerint a teljes eseményhorizont-terület nem csökkenhet. Bár a tételt már régóta elméleti érvek támogatták, a gravitá-

cióshullám-csillagászat első évtizede szolgáltatta az első közvetlen, erős gravitációstér-beli bizonyítékokat (4. ábra).



4. ábra. A GW250114 jelhez tartozó ringdown fázis szimulációja. A mért gravitációshullám-jelét a az összeolvadás utáni ringdown fázisban gerjesztett kvázinormál módusokra bontjuk. Két hangot azonosítunk: a domináns kvadrupólusos fundamentális módust („első hang”) és annak első felhangját („második hang”), amelyek frekvenciái és csillapodási idői összhangban vannak az általános relativitáselmélet Kerr-féle fekete lyukakra vonatkozó előrejelzéseivel. Az ábra egy magasabb frekvenciájú harmadik hangot is mutat, amelyet ugyan nem detektáltunk, de amelynek amplitúdójára a GW250114 szolgáltatja az első megfigyelési korlátokat. Több ringdown-mód együttes korlátozása révén ez az esemény a „no-hair” tétel eddigi legszigorúbb tesztjét tette lehetővé „feketelyuk-spektroszkópia” segítségével. Forrás: H. Pfeiffer, A. Buonanno (Max Planck Institute for Gravitational Physics), K. Mitman (Cornell University)

Populációk, ráták és a kompakt objektumok „népességföldrajza”

Amint a gravitációshullám-események száma néhány detektáláson túlra nőtt, a terület új fázisba lépett – abba, ahol az egyedi események részletes értelmezését fokozatosan felváltják a statisztikai jellegű kérdések. A fekete lyukak és neutroncsillagok tömeg-, spin- és vöröseltolódás-eloszlásának, valamint e tulajdonságok kozmikus időbeli fejlődésének megértése ma már a gravitációshullám-asztrofizika egyik fontos témája.

Minden új megfigyelési időszak után finomodnak azok a becslések, amelyek a kettős fekete lyukak, kettős neutroncsillagok és neutroncsillag–feketelyuk-rendszerek lokális összeolvadási rátáit adják meg. A jelenlegi kép szerint a kettős fekete lyukak összeolvadási rátája kis vöröseltolódásnál nagyjából 20–40 esemény köb-gigaparszekenként és évenként, és arra utaló jelek is vannak, hogy a ráta a vöröseltolódással nő, követve a csillagkeletkezés korai Világegyetemben vélt magasabb fokát. Az első adatok arra utalnak, hogy a neutroncsillag-összeolvadások ma, közvetlen környezetünkben ritkábbak, de még így is elegendőek ahhoz, hogy a galaxisok nehézelem-gazdagodásának jelentős részét magyarázzák.

Még izgalmasabbak a tömeg- és spineloszlások részletei. A fekete lyukak tömegeloszlásában csúcsok raj-

zolódnak ki, látszólagos alsó tömegréssel elválasztva őket a legnehezebb neutroncsillagoktól, és utalásokkal arra, hogy bizonyos tartományokban – például a párintabilitáshoz köthető régióban – hiányoznak az objektumok. A spinmérések egyszerre mutatnak tengelymentén rendezett és rendezetlen konfigurációkat, ami arra utal, hogy az izolált kettőscsillag-fejlődés (amely hajlamos a forgási tengelyek közel párhuzamos beállítására) és a dinamikus kialakulás (amely véletlen orientációkat eredményez) is egyaránt fontos szerepet játszhat. Egyes események kis tömegaránya, mások rendkívül nagy komponens tömege pedig egyértelműen jelzi, hogy többféle kialakulási csatorna járul hozzá az összesített populációhoz.

Ez az első évtized a gravitációshullám-csillagászatot olyan területté alakította, ahol a kollektív viselkedés – nem pedig az elszigetelt események megfigyelése – hordozza a legmélyebb asztrofizikai információt. Ahogy a katalógusok a több százról az ezres nagyságrend felé tartanak, a kompakt objektumok „népességföldrajza” drámaian ki fog élesedni, és egyre pontosabb képet ad majd arról, hogyan élnek és halnak a csillagok a Világegyetem teljes története során [7].

Kozmológia gravitációs hullámokkal

A gravitációs hullámok az asztrofizikai és az alapvető fizikai alkalmazásokon túl független kozmológiai megfigyelő eszközként is szolgálnak. Minden kompaktobjektum-összeolvadás egyfajta „standard sziréna” (ez az elektromágneses csillagászat „standard gyertyáihoz” hasonló fogalom). A gravitációshullám-forrás távolsága közvetlenül kódolva van a hullámforma amplitúdójában; a hagyományos gyertyákkal ellentétben itt nincs szükség külső kalibrációra. Ha sikerül azonosítani az összeolvadás forrásgalaxisát (ehhez persze legjobb, ha neutroncsillag-párosból származik a jel), és megmérni annak a vöröseltolódását, az adott esemény egy pontot rögzít azon a távolság-vöröseltolódás diagramon, amelyből a Hubble-állandó meghatározható.

A GW170817 avatta fel ezt a módszert, de még közvetlen forrásgalaxis-azonosítás nélkül is lehetséges kozmológiai információt kinyerni statisztikai galaxiskatalógus-korrelációk révén. Bár az így kapott első korlátok a Hubble-állandóra nézve még lényegesen bizonytalanabbak a kiforrott elektromágneses technikákhoz képest, a következő évtized jelentős javulást ígér. Több száz, egyre nagyobb jel-zaj arányú detektálással a gravitációshullámok standard szirénái központi szereplőkké válhatnak a „Hubble-feszültség” körüli vitában, és segíthetnek eldönteni, hogy a korai és kései Világegyetem megfigyelései közötti eltérés új fizika jele-e, vagy inkább rejtett szisztematikus hibáké.

Nem kerülhetem meg, hogy ezen a ponton igen röviden ne számoljak be arról, hogy az ELTE általam vezetett LIGO-csoportja hogyan járult hozzá ehhez a munkához az elmúlt években. Az ELTE kezdettől fogva

meghatározó szerepet játszott – és játszik ma is – a galaxiskatalógusok fejlesztésében és tudatos felhasználásában. Az első gravitációs hullám-észlelések idején kezdtük el kialakítani a GLADE galaxiskatalógust, mivel akkoriban nem létezett olyan publikus, teljes égboltot lefedő adatbázis, amely a LIGO detektorai által elérhető távolságokban kellően teljes lett volna. A GW170817 észlelésekor mi tettük közzé elsőként a lehetséges forrás-galaxisok listáját. A GLADE katalógusra támaszkodva több független kutatócsoport is sikeresen azonosította az esemény elektromágneses utófényét, így a katalógus kulcsszerepet játszott ennek a kivételes jelentőségű észlelésnek a sikerében.

Miután ez a detektálás egyértelműen bizonyította, hogy a GLADE kiválóan alkalmas az elektromágneses utófények célzott keresésére, maga a katalógus és továbbfejlesztett változata, a GLADE+ széles körben használt eszközzé vált. A későbbi megfigyelési időszakok során a legtöbb kutatócsoport ezeket az adatbázisokat használta kiindulópontként az utófénykeresésekhez. Mint fent leírtam, a gravitációs hullám-jelből közvetlenül meghatározható a forrás távolsága, és ezt a forrás-galaxis vöröseltolódásával összevetve megkaphatjuk az Univerzum tágulási ütemét leíró Hubble-állandót. Ha egy adott jel esetében nem sikerül egyértelműen azono-

sítani a forrásgalaxist, akkor ugyanazon égterületen található valamennyi galaxist felhasználhatjuk egy statisztikai eljárásban, és így mégis becslést adhatunk ennek a kulcsfontosságú kozmológiai paraméternek az értékére (5. ábra).

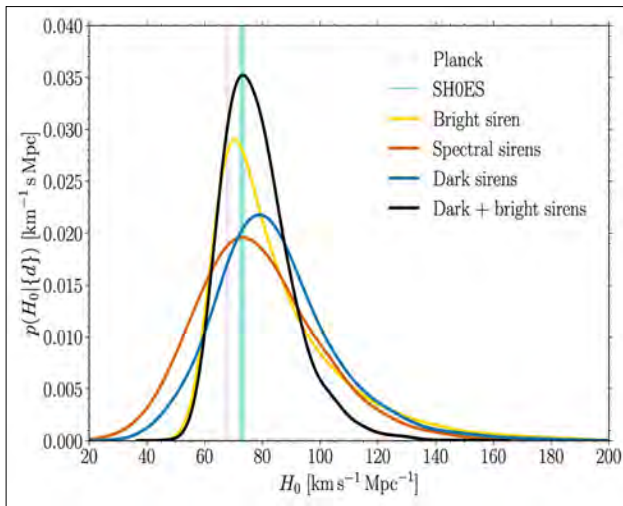
Az első ilyen jellegű analízisek óta a kollaboráció rendszeresen elvégzi ezeket a számításokat, amelyekben az ELTE LIGO-csoportjának kutatói kiemelt szerepet töltenek be, a szükséges asztrofizikai bemenetet pedig a GLADE+ katalógus szolgáltatja. Az elmúlt négy évben a katalógus vezető fejlesztője, *Dálya Gergely* irányítja a LIGO galaxiskatalógusokkal foglalkozó munkacsoportját, és a legújabb generációs katalógus továbbfejlesztésére jelentős támogatást nyert az Európai Uniótól is. Mindez azt vetíti előre, hogy a galaxiskatalógusok fejlesztése és kozmológiai célú felhasználása a gravitációs hullám-kutatás egyik központi területe marad, amelyben magyar kutatók várhatóan továbbra is vezető szerepet fognak betölteni.

Hosszabb távon a következő generációs detektorok – például a Cosmic Explorer és az Einstein teleszkóp – a neutroncsillag-összeolvadásokat akár a $z \approx 10$ fölötti vöröseltolódásokig is észlelni fogják, így a Világegyetem tágulástörténetét olyan korszakokon át lehet majd követni, amelyeket ma semmilyen más módszerrel nem érünk el. A gravitációs hullám-csillagászat első évtizede tehát egy olyan kozmológiai eszköztár alapjait rakta le, amelynek pontossága az elkövetkező években és évtizedekben látványosan nőni fog.

„Nem detektálások” mint tudomány: felső korlátok az egzotikus jelenségekre

Bár a terület legtöbbször a detektálásokat ünnepli, bizonyos jelek hiánya legalább ennyire informatívnak bizonyult. A sztochasztikus gravitációs hullám-háttér – amely számtalan fel nem oldott forrás, illetve a korai Világegyetem egzotikus folyamatai szuperpozíciójából származna – után indított keresések mindeddig csak felső korlátokat hoztak. Ezek a korlátok azonban már most is szűkítik egyes kozmikus hurokra, elsődleges feketelyuk-populációkra vagy korai fázisátalakulásokra vonatkozó modellek paraméterterét.

Hasonlóképpen, a gyorsan forgó neutroncsillagok által kibocsátott folytonos gravitációs hullámok után végzett nagyszabású keresések sem hoztak még detektálást, de az általuk adott felső korlátok fontos információt szolgáltatnak a neutroncsillag-kéreg lehetséges deformációiról, belső mágneses tereiről és az ún. „hegyecskek” maximális nagyságáról. A magösszeomlások szupernóvákból származó gravitációs hullámkitörésekre irányuló keresések sem jártak még sikerrel – részben azért, mert a megfigyelési időszakok alatt nem robbant fel elég közeli szupernóva –, de az emisszióra vonatkozó korlátok finomítják a csillagösszeomlás numerikus modelljeit.



5. ábra. A Hubble-állandó meghatározása gravitációs hullámokkal mint standard szirénákkal. A görbék a Hubble-állandó (H_0) poszterior valószínűségi eloszlásait mutatják különböző gravitációs hullám-alapú módszerekkel. A sárga görbe a GW170817 „fényessziréna-mérésének” felel meg, ahol a gravitációs hullámjelből meghatározott távolságot az azonosított forrásgalaxis elektromágneses vöröseltolódásával kombinálták. A narancssárga görbe az ún. spektrálsziréna-módszer eredményét mutatja, amely a kompakt kettősök tömegeloszlására támaszkodik a FULL-POP-4.0 populációs modell felhasználásával. A kék görbe több „sötét sziréna”, azaz elektromágneses társjel nélküli gravitációs hullám-esemény együttes kozmológiai korlátját ábrázolja, amelyet a GLADE+ galaxiskatalógus alapján, luminozitás-súlyozással határoztak meg. A fekete görbe a fényes és sötét szirénák eredményeinek kombinációját mutatja. Összehasonlításként a színezett tartományok a kozmikus mikrohullámú háttér anizotrópiáiból (rózsaszín) és a lokális távolságletréből (zöld) származó, 68%-os konfidenciaintervallumokat jelölik, szemléltetve, hogy a gravitációs hullámok a kozmológia egy független vizsgálati eszközét jelentik. *Forrás:* LIGO [14]

Egy globális detektorhálózat növekedése és a jövő kilátásai

Az első évtized tudományos eredményei elválaszthatatlanok a detektorokon végrehajtott számottevő műszeres fejlesztésektől. Az Advanced LIGO program kezdeti időszaka óta az érzékenység folyamatosan nőtt: javult a szeizmikus izoláció, korszerűbb tükröző rétegeket fejlesztettünk ki, tökéletesítettük az aktív visszacsatolt stabilizálást, és bevezettük az „összepréselt fény” alkalmazását – ez a kvantumoptika kifinomult technikája, amely a kvantumzajt csökkenti magas frekvenciákon. A Virgo detektor saját fejlesztéseken ment keresztül, és a japán KAGRA – amely föld alatt helyezkedik el, és hűtött tükröket használ – 2020-ban csatlakozott a hálózathoz, jelezve, hogy valóban globális infrastruktúra alakult ki.

A jövőre tekintve a terület egy újabb átalakulás küszöbén áll. A tervezett következő generációs detektorok, mint az Einstein teleszkóp Európában és a Cosmic Explorer az Egyesült Államokban, nagyságrendekkel jobb érzékenységet ígérnek. Ezek az eszközök a legrégebbi csillagkeletkezési korszakokból származó kompaktobjektum-összeolvadásokat is detektálni fogják, sokkal rutinszerűbben látnak majd közepes tömegű fekete lyukakat, és talán egészen új objektumosztályokat vagy gravitációs sugárzásfajtákat is felfedezhetnek. Vizsgálhatják a fekete lyukak kialakulását a teljes kozmikus időskálán, több ezer standardsziréna-mérést tehetnek lehetővé, és minden eddiginél pontosabb tesztnek vethetik alá az általános relativitáselméletet.

Még tovább tekintve, a LISA-hoz (Laser Interferometer Space Antenna) hasonló űrbeli interferométerek a millihertzes gravitációs hullám-frekvenciákhoz férnek majd hozzá, teljesen új tartományt nyitva, amely a földi detektorokat kiegészíti. A LISA a szupernagy tömegű fekete lyukak összeolvadásait, az extrém tömegarányú kettős rendszerek bespiralizálását és talán a Világegyetem hajnalán keletkezett kozmológiai relikviákat is megfigyelheti.

Új csillagászat, még gyerekcipőben

Az első tíz év a gravitációs hullám-detektálás óta alapjaiban formálta át a Világegyetemről alkotott képünket. Ami kezdetben a kísérleti fizika diadala volt – parányi téridő-deformációk kimérése –, mára gazdag asztrofizikai diszciplínává fejlődött. A fekete lyukak, amelyeket egykor a csillagfejlődés rejtélyes végpontjainak tartottunk, ma részletes életpályákat tárnak fel összeolvadásaik és populációs tulajdonságaik révén. A neutroncsillagok, amelyeket évtizedekig elsősorban rádió- és röntgéntávcsövekkel vizsgáltunk, most a gravitációs hullámokban és látható fényben egyaránt megmutatják végső, kataklizmikus pillanataikat. Az általános relativitáselmélet, amelyet

egy évszázada tesznek próbára, most a létező legszigorúbb és legdinamikusabb tesztekkel néz szembe. A kozmológia, amely hosszú időn át szinte kizárólag a fotonokra támaszkodott, immár egy azoktól teljesen független megfigyelési eszközhöz jutott [8–13].

Talán a legfontosabb, hogy a gravitációs hullám-csillagászat már most megmutatta: akkor virágzik igazán, ha több tudományterület együttműködésére épül. Asztrofizika, magfizika, kozmológia, relativitáselmélet, műszerfejlesztés, adat- és jelfeldolgozás, kvantumoptika – mind összefonódik ebben a kutatási irányban. A következő évtizedek várhatóan tovább szaporítják ezeket a kapcsolódási pontokat.

Tíz év nem hosszú idő a csillagászatban; kozmikus időskálán alig egyetlen szívdobbanás. Tudományos szempontból azonban ennek az évtizednek az eredményei forradalmiak. Hogy a következő tíz év mit hoz – fejlettebb detektorokat, gazdagabb populációkat, új forrástípusokat, még szigorúbb elméleti tesztek és még szorosabb sokcsatornás összjátékot –, az talán még a mostaninál is lenyűgözőbb lesz. A gravitációs hullámok Világegyeteme csak most kezdett el „beszélni”, és mi egyre élesebben, egyre tisztábban tanulunk meg odafigyelni rá.

Irodalom

1. Frei Zsolt (2016): Vadászat a gravitációs hullámokra – 1. rész – Mindenki várja a felfedezésüket. *Fizikai Szemle*, 2016/2, 38–41.
2. Frei Zsolt (2016): Vadászat a gravitációs hullámokra – 2. rész – A detektorok működése. *Fizikai Szemle*, 2016/3, 74–79.
3. Frei Zsolt (2016): Vadászat a gravitációs hullámokra – 3. rész – A gravitációs hullámok lehetséges asztrofizikai forrásai. *Fizikai Szemle*, 2016/4, 110–115.
4. Abbott R., et al. (LIGO–Virgo–KAGRA Collaboration) (2023): GWTC-3: Compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the second part of the third observing run. *Phys. Rev. X* 13, 011048.
5. Abbott R. et al. (2017): Multi-messenger observations of a binary neutron star merger. *ApJL* 848, L12.
6. The LIGO Scientific Collaboration (2016): Tests of general relativity with GW150914. *Phys. Rev. Lett.*, 116, 221101.
7. The LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, KAGRA Collaboration (2021): The population of merging compact binaries inferred using gravitational waves through GWTC-3. <https://arxiv.org/abs/2111.03634>
8. Berti E. (2025): Ten years of gravitational-wave astronomy. <https://arxiv.org/abs/2509.10395>
9. Space.com Staff Writers (2025): LIGO Legacy: 10 incredible gravitational wave breakthroughs. <https://www.space.com/astronomy/ligo-legacy-10-incredible-gravitational-wave-breakthroughs-to-celebrate-observatorys-landmark-2015-find>.
10. LIGO Magazine Issue 27 (2025): Ten years of gravitational-wave astronomy. <https://ligo.org/wp-content/uploads/2025/09/LIGO-magazine-issue27.pdf>.
11. Max Planck Institute for Gravitational Physics (AEI) (2025): Ten Years of Gravitational-Wave Discoveries. AEI News
12. Scientific American (2025): Ten years after the first gravitational-wave detection.
13. UK Research and Innovation (UKRI) (2025): A decade of gravitational-wave discoveries.
14. Abac A. G. et al., The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, and The KAGRA Collaboration: GWTC-4.0: Constraints on the cosmic expansion rate and modified gravitational-wave propagation. <https://arxiv.org/pdf/2509.04348>

ÚJ KORSZAK A GRAVITÁCIÓSHULLÁM-FIZIKÁBAN: AZ EINSTEIN TELESZKÓP

Barta Dániel

HUN-REN Wigner FK, Részecske- és Magfizikai Intézet, Elméleti Fizika Osztál , Gravitációfizikai Kutatócsoport, Budapest
E-mail: barta.daniel@wigner.hun-ren.hu

1. Bevezetés

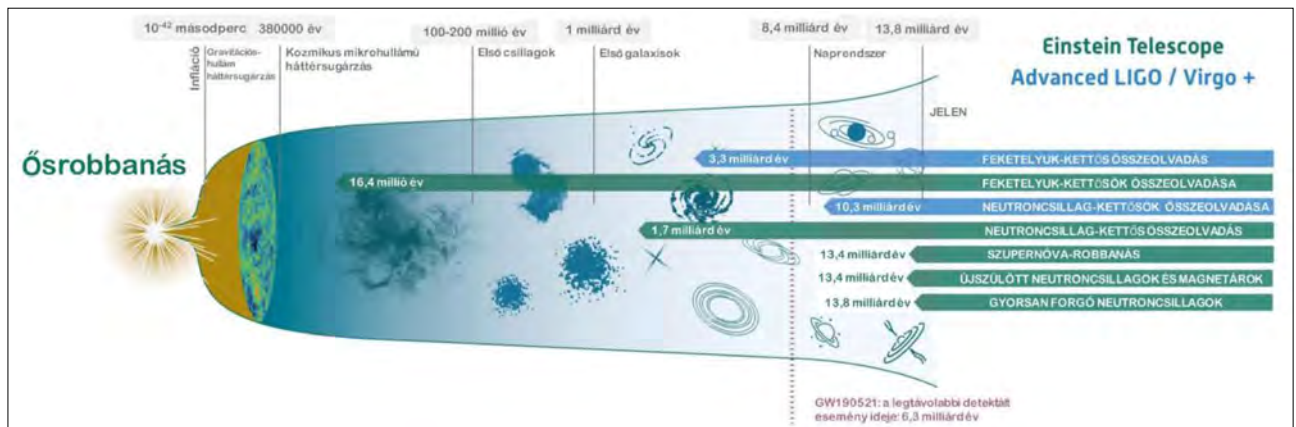
A harmadik generációs (3G) gravitációshullám-detektorok közül a két legfontosabb projekt az európai Einstein teleszkóp (ET) és az amerikai Cosmic Explorer (CE). Céljuk, hogy a LIGO–Virgo–KAGRA (LVK) Kollaboráció második generációs detektorainál nagyobb érzékenységgel, szélesebb frekvenciatartományban és nagyobb távolságból tudjanak gravitációs hullámokat észlelni, beleértve újfajta forrásokat és a korábbiakban nem megfigyelhető fizikai folyamatok megfigyelését is. Ezt az elképzelést testesíti meg az ET, mellyel az LVK Kollaboráció detektorainál egy nagyságrenddel jobb érzékenységet kívánnak elérni, különösen az alacsony frekvenciák (1–10 Hz) tartományában [1], ezáltal feltárva a gravitációs hullámok kozmológiájának és a kompakt objektumok populációinak eddig ismeretlen aspektusait.

Az ET projekt az Európai Unió egyik kulcsfontosságú tudományos projektje, amely felvételt nyert az Európai Kutatási Infrastruktúrák Stratégiai Fórumának (ESFRI) 2021-es stratégiai útitervébe. A projekt tudományos hátterét és irányítását az Einstein Telescope Scientific Collaboration (ET Kollaboráció) biztosítja, és a finanszírozó ügynökségekből álló Einstein Telescope Organization (ETO) szolgál a projekt operatív, irányító testületként. A kollaboráció hivatalosan a 2022 júniusában Budapesten megrendezett „12. Einstein Teleszkóp Szimpózium” alkalmával alakult meg. A kollaborációban jelenleg közel kétezer kutató és mérnök dolgozik 31 ország több mint 250 intézményében. A kollaborációhoz eredetileg több magyar kutatócsoport is csatlakozott a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontból (Wigner FK), a debreceni

Atommagkutató Intézetből (ATOMKI), a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontból (CSFK), továbbá a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemről (BME). Jelenleg három potenciális európai helyszínen folynak részletes megvalósíthatósági és geológiai tanulmányok: a Belgium, Hollandia és Németország határán fekvő Maas-Rajna Eurorégióban (EMR); az Olaszországban, Szardínián található, használaton kívüli Sos Enattos bányában, valamint a Németországban, Szászországban található Lausitzi-hegységben.¹ A helyszín végleges kiválasztása 2027-re várható, miután befejeződnek a részletes geológiai és környezeti vizsgálatok. Az építkezés 2028 körül indulhat, végül pedig az obszervatórium 2035 körül kezdheti meg működését [2, 3].

Az ET Kollaboráció fontos mérföldköve a „The Science of the Einstein Telescope” (azaz „Az Einstein teleszkóp természettudományos háttere”) című, több mint ötszáz oldalas tanulmány [4], amely 2025. március 15. óta nyilvánosan hozzáférhető az arXiv.org repozitóriumban és 2026 folyamán jelenik meg a *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* szakfolyóiratban. Ez a monográfia hivatott a tudományos közösség számára átfogó referenciaanyagként szolgálni, és felvázolni az ET tudományos céljait. A tanulmány elkészítésében a HUN-REN Wigner FK kutatói is aktívan részt vettek: *Gergely Árpád László*, *Kacs Kovács Balázs* és *Barta Dániel* a hullámformamodelleket tárgyaló 8.3.2 és 8.4.1 alfejezetek megírásához járultak hozzá, illetve *Barta Dániel*

¹ Az alacsony szeizmikus zajszintnek köszönhetően a Mátrában található Gyöngyösorsoszi ércbánya térsége is felmerült lehetséges helyszíneként a projekt korábbi fázisában [14], ám végül a fent említett három helyszín maradt versenyben.



1. ábra. A jelenleg működő gravitációshullám-detektorok, az Advanced LIGO és a Virgo+ által érzékelhető források (kék sávok), valamint jövőbeli ET által megfigyelhető események és tipikus távolságuk (zöld sávok) (Forrás: [5])

társkoordinátorként vállalt szerepet az ET-adatokkal kapcsolatos mikrofizikai korlátok alkalmazását tárgyaló 6.3.1 és 6.3.2 alfejezetek összeállításában. A jelen cikk további részében röviden áttekintjük az ET technológiai fejlesztéseit, és rámutatunk a pontosabban mérhető gravitációs hullámoknak a tudományágak széles körére kifejtett várható hatására.

2. Az Einstein teleszkóp technológiai újdonságai

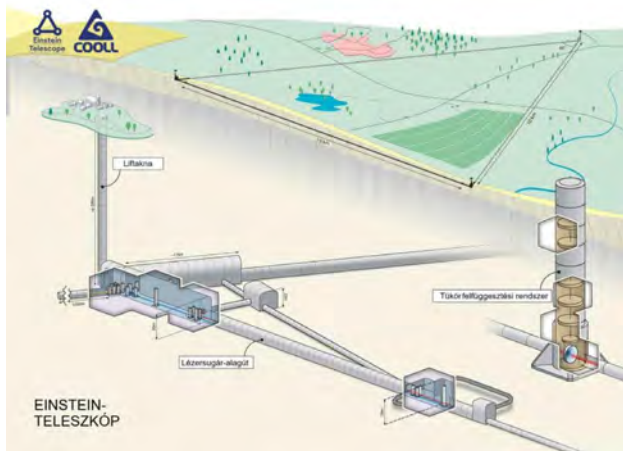
Az Einstein teleszkóp a 3G gravitációshullám-detektorok prototípusa, és számos alapvető műszaki újdonságot hordoz magában [2]. Az ET tervezése során két lehetséges elrendezés merült fel.

Az eredetileg benyújtott, háromszög alakban elrendezett „ Δ ” konfiguráció szerint a műszer három, páronként összefonódott detektorból állna, egyenlő oldalú háromszög alakban elrendezve, 10 km-es karhosszúsággal. Ez az elrendezés lehetővé tenné a polarizációk egyidejű mérését, a források égi pozíciójának pontosabb meghatározását és az adatok ellenőrzését. Az 1 és 100 Hz közötti alacsony frekvenciára optimalizált kriogenikus hűtésű interferométer (ET-LF) szilíciumtükörökkel és 1550 nm-es lézerrel lenne ellátva [1]. A 100 Hz és 10 kHz közötti magas frekvenciára optimalizált interferométer (ET-HF) szobahőmérsékleten működne, és főként a kompakt objektumok összeolvadásainak magasabb frekvenciás komponenseire lenne érzékeny.

Az újabb javaslat szerint az ET egymástól 15 km távolságra, megfelelő tájolással elhelyezett két darab „L” alakú detektorból állna, és a 2G detektorokhoz hasonló elven működne, de nagyobb karhosszúsággal és fejlettebb technológiával. Továbbra is vizsgálják a két konfigurációt a várható tudományos haszon és a megvalósíthatósági kockázatok szempontjából. Az ET sematikus ábrája a 2. ábrán látható, a két lehetséges konfigurációjának összehasonlítása a műszert jellemző fontosabb adatok alapján pedig a 1. táblázatban található [6].

A mérőrendszer földfelszín alatti telepítésével jelentősen csökkenthetők mind a szeizmikus, mind pedig az emberi tevékenységből származó zajok, amelyek különösen az alacsony frekvenciatartományban jelentenek korlátot a jelenlegi detektorok számára [2]. A szeizmikus zaj csökkentésén felül a zaj csökkentésére alkalmazott legmodernebb optikai és kvantumtechnológiában

elért fejlesztések ugyancsak jelentősen hozzájárulnak az ET kiemelkedő érzékenységehez. Az egyik legfontosabb fejlesztés az ún. „préselt fény” technológia frekvenciafüggő préseléssel történő alkalmazása a teljes frekvenciaspektrumban, beleértve az alacsony frekvenciájú sugárnyomás zaját is.² Ez az eljárás csökkenti a kvantumfluktuációkat, azaz a fotonok véletlenszerű zaját az interferométerben, ezáltal nagyobb pontosságot tesz lehetővé a tükörmozgások mérésében [7]. Emellett az ET-ben a tükröket és felfüggesztéseiket kriogenikus (néhányszor 10 K) hőmérsékleten működtetik, így jelentősen mérséklik a termikus zajt, amely a tükör anyagának és tartószálainak termikus rezgéséből ered. A felfüggesztési rendszert több fokozatú aktív rezgéscsillapítással és monolitikus szálakkal tervezik, hogy még a legkisebb földi vagy akusztikus rezgéseket is elnyomják [2, 3]. A kriogenikus hűtésű szilíciumtüköröknek és zajcsökkentő eljárásoknak köszönhetően az ET kiemelkedő érzékenységet ér el az alacsony frekvenciás (1–10 Hz) tartományban [1], ahol a CE kevésbé hatékony.



2. ábra. Az Einstein teleszkópot három, egyenként 10 km hosszú alagútból álló háromszögeként tervezik. A létesítmény 200–300 méter mélyen a föld alatt foglal majd helyet (Forrás: Thijs Balder, Nikhef)

Összefoglalva tehát az ET fő előnye a föld alatti elhelyezés miatti stabilitás és a szélesebb frekvenciatartomány, amely lehetővé teszi a korai Univerzum vizsgálatát. Hátránya ugyanakkor a bonyolult, költséges föld alatti infrastruktúra és a hosszabb fejlesztési idő, ezek miatt csak a 2030–2040-es években várható a működésének megkezdése. A CE az ET-vel szemben a felszínen épülne, de óriási, 40 km-es karjaival rendkívül távoli³ forrásokat



Barta Dániel a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos munkatársa, illetve a Virgo Kollaboráció és Einstein Teleszkóp Kollaboráció magyar kutatócsoportjának vezetője. Kutatási területe a gravitációfizika, amelynek keretében az excentrikus pályán mozgó kompakt kettős rendszerek dinamikájának és gravitációs sugárzásának tanulmányozásával, valamint a gyorsan forgó és rezgő kompakt csillagok modellezésével foglalkozik.

² A jelenlegi Advanced LIGO és Virgo detektorok 2019 óta használnak préselt fényt a kvantumzaj csökkentésére, különösen a magasabb frekvenciákon domináns „sörétzajra”. Ez a fejlesztés önmagában 40–50%-kal növelte az észlelési események arányát. Az O4 megfigyelési időszakot megelőző fejlesztések során már frekvenciafüggő préselést is alkalmaztak, ami ugyan csökkentette a sugárnyomás zaját az alacsonyabb frekvenciákon, de csak korlátozott mértékben.

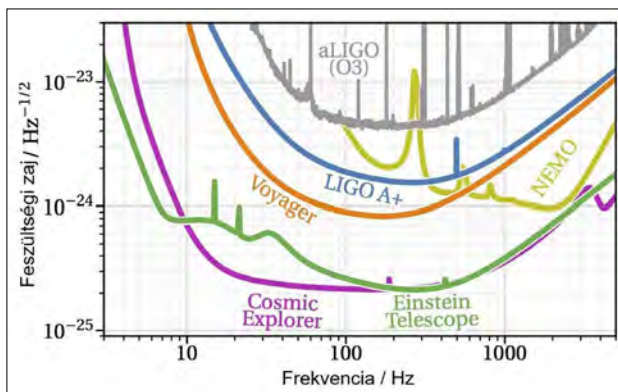
³ A kettős neutroncsillagok összeolvadásának esetében az ET eléri a $z \sim 1$ -nél nagyobb vöröseltolódást, míg a kettős fekete lyukak összeolvadásának esetében képes lesz észlelni az eseményeket egészen a $z \sim 20$ -as (III. populációs csillagok) vagy még nagyobb, akár $z \sim 100$ -as (primordiális fekete lyukak) vöröseltolódásig.

	Háromszög alakú detektor (Δ)	Két L alakú detektor (2L)
Elrendezés	Három, páronként összefonódott interferométer az egyenlő oldalú háromszögben.	Két szabványos L alakú interferométer, különálló telephelyeken elhelyezve.
Interferométer-karhossz	Várhatóan 10 km	Várhatóan 15 km
Elhelyezkedés	Egyetlen helyszínen	Két távoli helyszínen
Írányérzékenység	Adott az egy helyszínen belüli geometria miatt.	A két különálló detektor hálózati működtetésével érhető el.
Paraméterbecslés	A maximálisan elérhető vöröseltolódás magasabb a háromszög alakú detektor esetében, figyelembe véve az összes égi irányt.	Egyes esetekben (pl. luminozitási távolság bináris fekete lyukak esetén) néhány faktorral jobb.
Zajérzékenység	Potenciális sebezhetőség a korrelált környezeti zajokkal (pl. szeizmikus, mágneses, villámlás) szemben.	Kevésbé érzékeny bizonyos helyszínspecifikus korrelált zajforrásokra (pl. villámlás) a két helyszín távolsága miatt.
Föld alatti infrastruktúra	Nagyobb átmérőjű alagutakat (~8 m kontra 6,5 m) és több kamrát igényel.	Kicsit eltérő ásási volumen szükséges detektoronként, a karhosszúságtól függően.
Technológiai kockázat	Újszerűbb működési módokat igényel, magasabb kockázatu lehet.	A jelenlegi 2G detektorok elvén alapul, potenciálisan kevésbé kockázatos technológiailag.

is képes lenne detektálni, különösen magasabb frekvenciákon, ahogy az az 1. ábrán látható. A LIGO Voyager a meglévő LIGO-rendszerek technológiai továbbfejlesztése, így korlátozottabb előrelépést jelent a ET és CE projekttel összehasonlítva (3. ábra). Érdemes továbbá megemlíteni a Neutron Star Extreme Matter Observatory (NEMO) elnevezésű 4 km-es karhosszúságú gravitációshullám-obszervatóriumot is, amit az Ausztrál Nemzeti Egyetem és az ausztrál OzGrav Collaboration kutatói kezdeményezésére kívánnak 2033-ra létrehozni, kifejezetten a neutroncsillagok rendkívül sűrű anyagának tanulmányozására. Míg az ET és a CE széles frekvenciatartományban működő, általános célú detektorok, a NEMO egy olyan speciális kiegészítő műszer, amely a neutroncsillag-kettősök összeolvadása után keletkező, rendkívül forró és gyorsan forgó maradványokból származó, magas frekvenciájú (2–4 kHz) gravitációs hullámok megfigyelésére terveznek [16]. A NEMO oly módon egészítené ki 3G-s detektorok globális hálózatát, hogy nyomon követné a kompakt kettős rendszerek összeolvadását megelőző, az ET és CE által már alacsony frekvencián érzékelt és lokalizált forrásait. Az ET és CE által kiadott korai riasztások alapján, magasabb frekvenciákra optimalizálva folytatná az összeolvadást követően kibocsátott jelek megfigyelését (a 3. ábra sárga görbéje).

3. A gravitációshullám-források új tartománya és a kompakt kettősök populációinak vizsgálata

A 3G detektorok jelentősen hozzá fognak járulni a tudományterület fejlődéséhez azzal, hogy számottevően megnő a megfigyelhető források száma, valamint az új forrástípusoké is [3]. A jelenlegi detektorok $z \approx 1$ -2 vörös-



3. ábra. Az Einstein teleszkóp, a Cosmic Explorer (CE), a jelenlegi (O3) és továbbfejlesztett (A+) Advanced LIGO, a LIGO Voyager és a NEMO detektorok amplitúdóspektruma a frekvencia függvényében (Forrás: [4])

eltolódásig alkalmasak kettős fekete lyukak észlelésére, ezzel szemben az Einstein teleszkóp több mint tízszer nagyobb térfogatot lesz képes megfigyelni. Az ET várhatóan évente több százezer gravitációshullám-eseményt fog detektálni, a korai univerzum feketelyuk-kettősei (BBH) összeolvadásainak jeleit, a sztochasztikus gravitációshullám-háttérrel, a kettős neutroncsillagok (BNS) és a fekete lyuk-neutroncsillag kettősök (BHNS) összeolvadásait, esetleg ezeknek a kettősöknek komponensei olyan egzotikus források is lehetnek, mint a bozonszillagok, a kvarkcsillagok, vagy a gravacsillagok [8–10]. Ez a hatalmas adatmennyiség lehetőséget biztosít a kompaktcsillagpopulációk statisztikai elemzésére, valamint az ilyen populációk fejlődésének vizsgálatára [10, 11].

Az Einstein teleszkóp kulcsszerepet játszik majd a kompakt kettős populációk vizsgálatában [10]. Az ET érzékenysége lehetővé teszi, hogy a kettős fekete lyukak széles tömegtartományát feltérképezze, a néhány nap-

tömegű rendszerektől kezdve egészen a közepes tömegű (10^2 – $10^4 M_\odot$) fekete lyukakig. Ezek az észlelések választ adhatnak a fekete lyukak eredetével kapcsolatos alapvető kérdésekre: vajon a II. populációs csillagok végállapotai dominálnak-e, vagy létezik-e olyan egyedi populáció, amely a korai, alacsony fémességű csillagok összeomlásaiból származik [10, 12]. Az ET képes lesz detektálni a legkorábbi csillagképződés korszakából származó feketelyuk-kettősöket is (1. ábra), így közvetlen betekintést nyújthat a korai univerzum időszakában jellemző csillagkeletkezésbe és a fémtartalom fejlődésébe.

Az ET képes lesz pontosan meghatározni a neutroncsillag-kettősök összeolvadásából származó hullámformákat, amelyek érzékenyen függenek a komponensek belső szerkezetétől és a komponensek anyagát jellemző állapotegyenletről [12]. A torzulások és az árapály-deformációs paraméterek pontos mérésével a gravitációs hullámok adatai közvetlen információt szolgáltatnak a hadronikus-, hibrid vagy kvarkcsillag-modellek elkülönítéséhez [13]. Az összeolvadás előtti és utáni (pre-merger és post-merger) hullámformák elemzésével pedig az ET közvetlen megfigyelési információt nyújt a neutroncsillagok olyan fizikai tulajdonságairól, mint a belső sűrűségprofiljuk, hőmérséklet-eloszlásuk és a kompakt csillagokat alkotó extrém anyag olyan tulajdonságai, amelyek földi laboratóriumi körülmények között nem állíthatóak elő [12].

4. Kozmológiai alkalmazások és az általános relativitáselmélet tesztelése

Az ET nemcsak asztrofizikai, hanem kozmológiai és fundamentális fizikai kérdések vizsgálatának is kiemelt eszköze lesz [11, 15]. A gravitációs hullámok szabadon terjednek az Univerzumban, torzítatlanul hordozva információt a forrás és a kozmikus tágulás paramétereiről. Az ún. „standardsziréna-módszer” révén, amely analóg a szupernóva-távolságméréssel, az ET képes lesz meghatározni a források luminozitástávolságát [15]. Ha az eseményhez elektromágneses kísérőjel is társul, akkor a vöröseltolódás is ismertté válik, lehetővé téve a Hubble-állandó (H_0) és más kozmológiai paraméterek precíz mérését. Ezzel a módszerrel a gravitációshullám-asztrofizika közvetlenül hozzájárulhat a H_0 -feszültség feloldásához, amely két különböző módon, a közeli, illetve a távoli univerzumon végzett mérésekkel⁴ jelentősen eltérő eredményt ad.

Az ET képes lesz detektálni magas vöröseltolódású ($z > 10$) eseményeket, amelyek feltárják a korai univerzum szerkezetének kialakulását és a sötét energia dinamikáját [15, 3]. Ez új, a hagyományos kozmológiai mérés-

⁴ A közeli objektumok, például a cefeida változócsillagok és az Ia típusú szupernóvák segítségével történő közvetlen távolságmérések alapján a Hubble-állandó 73 km/s/Mpc-nek becsülhető. Ezzel szemben a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás adatainak elemzése és a standard kozmológiai modell (ACDM) alkalmazása alapján a Hubble-állandó értéke mindössze 67, 4 km/s/Mpc-nek adódik.

sektől teljesen független ablakot nyit a korai univerzum megismerésére.

Az ET kitűnő eszközként szolgál majd az általános relativitáselmélet érvényességének vizsgálatára [11]. A feketelyuk-kettősök összeolvadása során lejátszódó lecsengési fázis kvázinormál módusainak spektroszkópiai vizsgálata lehetővé teszi a keletkező kompakt objektum vizsgálatát. Az általános relativitáselmélet által előre jelzett hullámformától való bármilyen eltérés új fizikai jelenségekre, esetleg az általános relativitáselmélet módosításaira vagy az alacsonyenergiás kvantumgravitációra enged következtetni.

5. Összefoglalás

Az Einstein teleszkóp új korszakot fog nyitni a gravitációshullám-asztrofizikában [2, 3]. Lehetővé teszi a kompakt objektumok populációjának részletes statisztikai vizsgálatát, a kozmológiai paraméterek független mérését és a neutroncsillag-fizika eddig elérhetetlen tartományainak feltárását. A várható több tízezer észlelés révén az ET képes lesz rekonstruálni a fekete lyukak és neutroncsillagok tömeg-, spin- és excentricitáseloszlását, valamint megvizsgálni a korai univerzum csillagképződését és a sötét energia tulajdonságait [3, 10, 15]. Az ET a precíziós gravitációshullám-kozmológia révén új módszereket kínál a Hubble-állandó és más kozmológiai paraméterek meghatározására, valamint a neutroncsillagokban található extrém sűrű anyag állapotegyenletének meghatározására [12, 15]. Ezen túlmenően az ET az általános relativitáselmélet érvényességének megerősítésére is lehetőséget ad a lecsengési fázis és a hullámforma részletes elemzésével [11]. Az Einstein teleszkóp új érzékszervként képes lesz „meghallani” a téridő legfinomabb rezdüléseit is [3, 8, 11, 12].

Irodalom

1. Hild S., Abernathy M., Acernese F. (2011): Sensitivity studies for third-generation gravitational wave observatories. *Class. Quantum Grav.*, 28, 094013.
2. Punturo M., Abernathy M., Acernese F., et al. (2010): The Einstein Telescope: A third-generation gravitational wave observatory. *Classical and Quantum Gravity*, 27(19), 194002.
3. Maggiore M., et al. (2020): Science case for the Einstein Telescope. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2020(03), 050.
4. Abac A., et al. (ET Collaboration) (2025): The science of the Einstein Telescope. arXiv:2503.12263.
5. ET, a journey back in time. ©INFN. *Forrás*: The Science of ET, Einstein Telescope website (<https://www.einstein-telescope.it/en/the-science-of-et/>).
6. Branchesi M., et al. (2023): Science with the Einstein Telescope: A comparison of different designs. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 07, 68.
7. Oelker E., et al. (2022): Squeezing in gravitational wave detectors. *Applied Sciences*, 10(2), 46.
8. Abbott B. P., et al. (2016): Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical Review Letters*, 116(6), 061102.
9. Abbott B. P., et al. (2017): GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Physical Review Letters*, 119(16), 161101.

10. Abbott B. P., et al. (2021): GWTC-3: Compact binary coalescences observed by ligo and virgo during the second part of the third observing run. *Physical Review X*, 13(4), 041039.
11. Sathyaprakash B. S., Schutz B. F. (2009): Physics, astrophysics and cosmology with gravitational waves. *Living Reviews in Relativity*, 12, 2.
12. Chatzioannou K., et al. (2021): Neutron star equation of state constraints from gravitational waves. *Reviews of Modern Physics*, 93(4), 045003.
13. Barta D. (2021): Fundamental and higher-order excited modes of radial oscillation of neutron stars for various types of cold nucleonic and hyperonic matter. *Class. Quantum Grav.* 38(18), 185002–185036.
14. Ván P., et al. (2019): Long-term measurements from the Mátra Gravitational and Geophysical Laboratory. *The European Physical Journal, Special Topics* 228, 1693–1743.
15. Holz D. E., Hughes S. A. (2005): Using gravitational-wave standard sirens. *Astrophysical Journal*, 629, 15–22. arXiv:astro-ph/0504616
16. Ackley K., Adya V. B., Agrawal P., et al. (2020): Neutron Star Extreme Matter Observatory: A kilohertz-band gravitational-wave detector in the global network. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 37, e047. <https://doi.org/10.1017/pas.2020.39>

A VERA RUBIN OBSZERVATÓRIUM ÉGBOLTFELMÉRÉSE A GRAVITÁCIÓS KUTATÁSOK SZOLGÁLATÁBAN

Szabó Róbert[@], Kovács András[#]

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

[@]E-mail: szabo.robert@csfk.org; [#]E-mail: kovacs.andras@csfk.org

Minden idők egyik legnagyobb földfelszíni égboltfelmérő programja indul az optikai hullámhossztartományban 2026 elején. Chilében, a Cerro Pachón 2680 méter magas csúcsán épült Vera C. Rubin Observatórium (1. ábra) 8,4 méter átmérőjű távcsöve tíz évig fogja monitorozni a Chiléből látható teljes égboltot, három naponta körbefényképezve azt. Eközben 17 milliárd csillagot, 20 milliárd galaxist lát majd, és mindent érzékel, ami mozog vagy változtatja a fényességét, a változásokról pedig 60 másodpercen belül publikus riasztást küld. Ilyenből éjszakánként több milliót várunk... A program során sok-sok petabájtnyi adat keletkezik, ami a csillagászok kincsésbányája lesz, és elősegíti a gravitációval kapcsolatos kutatásokat is. A programot 2010-ben az évtized legfontosabb földfelszíni csillagászati projektjének minősítette az amerikai csillagászati szakma.

Érdemes megjegyezni, hogy magyar vonatkozása is van a projektnek: maga a távcső a Simonyi Survey Telescope nevet kapta, a magánadományozók, Charles és Lisa Simonyi tiszteletére. Charles Simonyi (ifj. Simonyi Károly) kb. 10 millió dollárt adott még a projekt hivatalos kezdete előtt, hogy a főtükör elkészítéséhez szükséges hosszú várakozási periódus (több évről beszélünk) minél korábban kezdődhessen.

Maga a teleszkóp egyébként több szempontból is rendkívül különleges: mintegy 40 teleholdnyi területet



1. ábra. A Vera Rubin Observatórium a chilei Cerro Pachón csúcs tetején 2680 m magasan. 2025. májusában. Forrás: RubinObs/NOIRLab/SLAC/NSF/DOE/AURA

(9,6 négyzetfok) fed le az égen egyetlen expozícióval. Az optimális működéshez robusztus és agilis mozgatómechanika és különleges optikai elrendezés szükséges. Ez utóbbi három tükörből és egy lencserendszerből áll. A főtükör által összegyűjtött fényt a másodlagos (segéd-) tükör veri vissza a főtükör felé, és a főtükörbe mélyesztett, attól eltérő görbületű harmadlagos tükör irányítja a fókuszszíkra. A három lencséből álló korrekciós optikai elem meghatározó darabja 1,55 méter átmérőjű – ez a



Szabó Róbert csillagász, a HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetének igazgatója, a magyar LSST in-kind hozzájárulás vezetője. Fő kutatási területei a pulzáló változócsillagok megfigyelése és elméleti modellezése, az exobolygók vizsgálata. Részt vesz az LSST-hez hasonló nagy égboltfelmérő programokban, valamint a NASA és ESA űrtávcsöves misszióiban is. Kétszeres „Lendület”-nyertes.



Kovács András kozmológus, a Világegyetem nagyskálás szerkezetének és a sötét energia természetének kutatója. „Lendület” kutatócsoportot vezet, valamint Marie Skłodowska-Curie-ösztöndíj keretében is dolgozik a galaxisok kozmikus hálójának feltérképezésén. Az ESA Euclid Kollaboráció magyar csapatának vezetőjeként és az LSST-hez kapcsolódó kutatások aktív résztvevőjeként az elméleti és megfigyelési kozmológia határán mozogva keresi a választ a sötét Univerzum nyitott kérdéseire.



2. ábra. A Vera C. Rubin Observatórium munkatársai az LSST-kamera beszerelése közben 2015 márciusában. A kamera a sötét, autó méretű henger a kép közepén. *Forrás:* RubinObs/NOIRLab/SLAC/NSF/DOE/AURA/B. Quint

valaha készült legnagyobb optikai lencse. Mindezt pedig a létező legnagyobb, városi terepjáró méretű és tömegű, 189 darab CCD-ből álló, összesen 3,2 gigapixeles kamera, valamint hat színszűrő egészíti ki (2. ábra).

Az égboltfelmérő program a Legacy Survey of Space and Time (szabad fordításban: „A tér és idő időtálló felmérése”) nevet kapta. Programja négy fő tudományos pilléren nyugszik:

1. A kozmológia, a sötét anyag és a sötét energia vizsgálata többféle módszer bevetésével.
2. A Naprendszer vizsgálata: a terv ötmillió kisbolygó felfedezése a főövben, még hozzá az első 2-3 évben, ezenkívül 90 ezer földszűrő kisbolygó, 40 ezer Neptunuszon túli égitest, valamint akár több tucat intersztelláris objektum (kisbolygók, üstökösök) felfedezése. Mindegyik kategóriában megközelítően (5×–10×) majd a korábban ismert égitestek számát. Emellett számos más naprendszerbeli égitestet is rendszeresen fog monitorozni.
3. A statikus égi események mellett a ma divatos szóval a „time-domain astronomy” reneszánsza is eljön az LSST-vel: hirtelen fellobbanó (és legtöbbször rövid időn belül ki is húnyó) asztrofizikai tranziensek (nóvák, szupernóvák, kilonóvák – összeolvadó neutroncsillagok, gammakitörések, szupernagy tömegű fekete lyukak körül megsemmisülő csillagok, ún. ará-pály-katasztrófák) felfedezése és vizsgálata is a program része. Becslések szerint az LSST akár 10 millió szupernóvát is felfedezhet, jóval többet, mint amennyit korábban a teljes emberi történelem alatt láttunk. Emellett fényüket a tranzienseknél szabályosabban változtató, pulzációt vagy fedéseket mutató csillagokból is sok milliót fog detektálni.
4. A Tejútrendszer (és más galaxisok) szerkezetének feltérképezése, csillagpopulációk vizsgálata. A korábbi égboltfelméréseknél (pl. az Európai Űrügynökség Gaia űrtávcsövének 2 milliárd csillag pozícióját, mozgását és részben fizikai tulajdonságait felmérő égboltfelmérő programja katalógusánál) legalább egy nagyságrenddel több objektum fog szerepelni ezekben a kutatásokban is.

Ennyi bevezetés után ideje rátérnünk a gravitációval kapcsolatos kutatásokra.

A megfoghatatlan sötét anyag kutatása

Mai ismereteink szerint az Univerzum anyagának mindössze körülbelül 5%-a van jelen „látható” formában, ide tartoznak a csillagok, csillagközi felhők, galaxisok, az atomos (barionos) anyag. Jó egynegyede sötét anyag, 70%-a pedig sötét energia formájában található.

Vera Cooper Rubin (1928–2016) amerikai csillagász úttörő szerepet játszott a galaxisok forgási sebességével kapcsolatos munkákban. Gyakorlatilag az ő kutatásai szolgáltatották az első széles körben elfogadott bizonyítékot a sötét anyag létezésére. Így az obszervatórium 2019 végén történt átnevezése nagyon találó és időszerű volt.

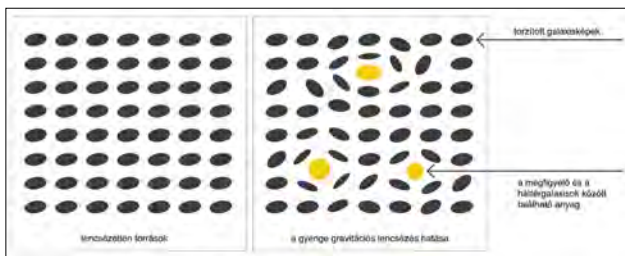
A sötét anyagról a mai napig nem tudjuk, hogy micso-da, de gravitációsan kölcsönhat, befolyásolja a galaxisok és azok alrendszeireinek a kinematikáját, és nagy léptékű kozmológiai szimulációkból tudjuk, hogy elengedhetetlen a galaxishalmazok, az Univerzum legnagyobb struktúráinak képződéséhez is. Ha a szimulációinkba nem teszünk elegendő mennyiségű gravitáló sötét anyagot, egyszerűen nem kapjuk vissza a ma megfigyelhető hatalmas kozmikus struktúrákat. Mint ahogyan a galaxisok legtöbbször forgása (a körsebesség a galaxis centrumától mért távolság függvényében) is a ténylegestől teljesen eltérő (a galaxisok külső részein mintegy harmada) lenne a sötét anyag hiányában.

Az 1990-es évektől kezdődő megfigyeléssorozattal az asztrofizikusok kizárták a csillagászati méretű objektumokat (neutroncsillagok, primordiális fekete lyukak stb.) mint a sötét anyag forrásait; pontosabban egy erős felső korlátot adtak hozzájárulásukra a gravitációs mikrolencsehatás felhasználásával, amihez szintén nagy égboltnmonitorozó programok kellenek. A gravitációs mikrolencse-jelenség esetén egy csillag- (vagy bolygó-) tömegű égitest gravitációs hatása meggörbíti a téridőt, és egy, a háttérben levő forrás (tipikusan csillag) fényét időlegesen felerősíti hullámhossztól függetlenül, miközben képét deformálja és megközelítően szétválasztja. Ehhez a megfigyelőnek, a lencséző és a lencsézett objektumnak nagy pontossággal egy egyenesbe kell esnie. Az eredmények szerint széles tömegtartományban 10% alatti a csillagtömegű égitestek hozzájárulása a sötét anyaghoz. Éppen ezért már egy jó ideje keresik a részecskefizikusok a sötét anyag forrását az elemi részecskék között, sőt, létrejött egy új határterület a részecske- és az asztrofizika határán, az ún. „astroparticle physics”, magyarul asztro-részecskefizika.

Bár a sötét anyag eredetéről és mibenlétéről fogalmunk sincs, eloszlását tudjuk mérni a hatása révén. A sötét anyag csomósodik! Úgy tűnik, hogy a sötét anyag már a korai univerzumban is jelen volt, és formálta azt a kozmikus hálót, amihez aztán a később létrejövő galaxisok is kapcsolódtak. Az LSST szempontjából is fontos, hogy a galaxisok méreteloszlása szoros kapcsolatban van

a sötét anyag mennyiségével. Hogy mekkora az a gázfelhő, ami galaxissá tud alakulni, az függ a sötét anyag tulajdonságaitól. Jelenlegi modelljeinkből sok relatíve kicsi méretű galaxist várunk. Meglátjuk, hogy az LSST által megfigyelt 20 milliárdnyi galaxis ezt a várakozást alátámasztja-e.

A galaxisok és galaxishalmazok hosszú, elnyúlt struktúrákba, ún. filamentumokba rendeződnek (ezt szokás kozmikus hálónak is hívni). E szerkezetek és a köztük levő lyukak (szakszóval voidok) mérete is függ a sötét anyag tulajdonságaitól. A galaxisok halmazokba rendeződése és maguk a galaxishalmazok is érzékenyek a sötét anyag struktúráira a legnagyobb skálákon, és arra is, hogy ezek a struktúrák hogyan nőttek. Itt említendő a gyenge gravitációs lencsézés (angolul *weak lensing*) jelensége, ahol a közbenső (sötét és barionos) anyag hatására a távoli lencsézett galaxisok alakja és orientációja eltorzul. Sok galaxis orientációjának és alakjának mérésével fény derülhet a sötét anyag mennyiségére és eloszlására (3. ábra). Ezen nagy struktúrák és a sötét anyag eloszlásának feltérképezéséhez hatalmas területeket kell az égen homogén módon megfigyelni, valamint halvány és távoli galaxisokat is be kell vonni a vizsgálatba – az LSST pontosan ennek a lehetőségét nyújtja.



3. ábra. A gyenge gravitációs lencsézés hatása: a közbenső (sötét és barionos) anyag hatására a távoli lencsézett galaxisok alakja és orientációja eltorzul. Sok galaxis orientációjának és alakjának mérésével fény derülhet a sötét anyag mennyiségére és eloszlására. Forrás: NOIRLab/NSF/AURA

A még rejtélyesebb sötét energia

2011-ben Brian Schmidt, Adam Riess és Saul Perlmutter megosztott fizikai Nobel-díjat kaptak azért a felfedezésükért, miszerint az Univerzum gyorsulva tágul. A méréseket szupernóvákra alapozva végezték a 90-es években. Az Ia típusú szupernóva-robbanások (a kritikus tömeget meghaladó fehér törpe csillagok, melyekben a kritikus tömeg elérése előtt a degenerált elektronok nyomása tart egyensúlyt a gravitációval) fényessége jól ismert, ezért távolságmérésre használva őket feltérképezhető az Univerzum szerkezete és a tágulás sebességének időbeli változása.

Ma a közmegegyezés szerint a tágulás gyorsulását a sötét energia okozza. Ez egy olyan általános „kozmosz taszítóerő”, ami a gravitáció ellen hat, ezáltal a galaxishalmazok fejlődését is lassítja. A sötét energiára hasonlító mennyiség felbukkant már Einstein gravitációt leíró, általános relativitáselméletre alapuló egyenleteiben mint kozmológiai állandó. Ez egy konstans energiasűrű-

ség lenne, amely egyenletesen tölti ki a teret. Egy másik lehetőség egy dinamikus erőter, melynek az energiája térben és időben változhat. A kettő közötti különbségtételhez nagyon pontosan kell mérni a világegyetem tágulását, hogy megértsük, hogyan változott a tágulás sebessége időben. A sötét energia szerepének, erősségének, hatásának vizsgálata az ősrobbanástól napjainkig az egyik legintenzívebben kutatott tudományos kérdés az asztrofizikában. Nem véletlen, hogy az LSST-vel felfedezendő több millió szupernóva – köztük várhatóan évi 250 ezer lesz Ia típusú, kozmológiai vizsgálatokra is alkalmas objektum – vizsgálata központi szerepet játszik a Vera Rubin Observatórium tudományos programjában. Ezt jól demonstrálja, hogy a „Dark Energy” tudományos kollaboráció az egyik legnagyobb, s legjobban szervezett együttműködés az LSST konzorciumon belül, ezernél is több taggal világszerte.

A szupernóváknál egzotikusabb dolgok is történhetnek. Például két fekete lyuk összeolvad, vagy két neutroncsillag ütközik. Ilyen volt a GW170817 kilonóva néhány évvel ezelőtt, ami egyrészt detektálható gravitációs hullámot keltett, másrészt a forrás elektromágneses utófénylését is sikerült megtalálni a rádiósugárzástól a gamma- és röntgentartományon keresztül szinte minden hullámhosszon. A gravitációs hullámforrások standard távolság- és időmérést (gyertyákat, órákat, vonalzókat) szolgáltatnak az Univerzum tágulási ütemének meghatározására, ami ráadásul jórészt független a többi módszerrel (pl. a struktúra növekedésből) meghatározottól.

A sötét energia természetének jobb megértését ma a kozmológiában többféle, egymást kiegészítő mérés kombinálásától remélik. Ezek közül az LSST ötben nagyszámú javulást, de legalábbis releváns hozzájárulást fog tenni. Az Ia típusú szupernóvák tehát csak az egyik irány. Ezenkívül a már említett gyenge gravitációs lencsézés, a galaxishalmazok száma és térbeli eloszlása, a legnagyobb kozmikus struktúrák és az ún. erős lencsézés is szerepel az étlapon, mindegyik kísérlet komoly megszorításokat tud adni mind a sötét anyag, mind a sötét energia természetére nézve.

Erős gravitációs lencsézésről akkor beszélünk, ha a gravitációs lencsehatás elég erős ahhoz, hogy egyes objektumokról többszörös képeket, íveket, gyűrűket (ún. Einstein-gyűrű) alkosson.

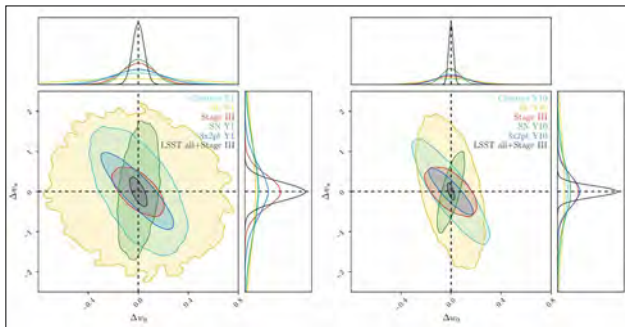
Ehhez tipikusan nagy tömegű galaxisok, sőt galaxishalmazok szükségesek (ellentétben a mikrolencsézésben részt vevő csillagtömegű objektumokkal), melyek képesek megtöbbszörözni egy háttérben levő csillagászati objektum (galaxis, galaxishalmaz, szupernóva) képét. A távoli kvazárok (központi fekete lyukat tartalmazó és fényváltozást mutató aktív galaxismagok) erős lencsézése esetén – a változások mért időkülönbségeiből – származtathatóak a kozmológiai paraméterek.

A galaxishalmazok megfigyelésében a halmazok száma egy adott térfogatrészben, illetve a halmazok gravitációs lencsézésének kvantitatív analízise fogja a főszerepet játszani. A legnagyobb kozmikus struktúrák esetében a

galaxisok halmazokba rendeződését figyeljük meg, és ezt jellemezzük matematikai módszerekkel a távolság (azaz az ősrobbanástól eltelt idő függvényében). Ebben a sötét anyagon és sötét energián kívül a barionikus akusztikus oszcilláció, azaz az Univerzum korai szakaszában kialakult nyomáshullámok lenyomata is kódolva van.

Végül a sötét anyag felderítésénél már említett gyenge gravitációs lencsézés a sötét energia kutatásában is szerephez jut, méghozzá az ún. 3×2 pt analízis formájában. Ez három különféle kétpont-korrelációt jelent: 1) a galaxisok alakja (ellipticitása) és 2) a galaxisok számsűrűsége önmagával vett, illetve 3) e két mennyiség között tekintve. Itt azt is figyelembe kell venni, hogy ezek a mérések természetesen nem teljesen függetlenek a galaxisok csomósodásától, vagyis a legnagyobb kozmikus struktúrákkal kapcsolatos mérésektől.

A sötét energia állapotegyenletét legegyszerűbben a $w = p/\rho = -1$ formulával írhatjuk le, ami mutatja, hogy negatív nyomású „ideális folyadékkal” van dolgunk. Ha a sötét energia időben változik, akkor valamelyik dinamikus sötétenergia-modellt kell elővennünk. Az időbeli változást például a $w_0 + (1 - a)w_a$ egyenlettel írhatjuk le, ahol a a skálafaktor, vagyis a második tag változik az idő előrehaladtával. A fentieket összefoglalva a 4. ábrán láthatjuk, hogy az említett LSST-megfigyelések elég jó megszorítást fognak adni a dinamikus sötét energia két paraméterére az égboltfelmérés tizedik évének végére.



4. ábra. A sötét anyag paramétereire (w_0 és w_a) tett előrejelzett megszorítások az LSST első (Y1, balra) és 10 éves (Y10 jobbra) adataira alapozva, külön-külön és a többféle mérés együtt (legbelső szürke ellipszis). Az ellipszisek a 68%-os konfidenciaintervallumokat jelölik, a tengelyek beosztása azonos a két panelen, mindkettőn a $w_0 = -1$ és $w_a = 0$ bázisértékektől való eltérést ábrázoltuk. A feliratok magyarázata: Stage III: korábbi mérésekből származó korlátok, SL: erős gravitációs lencsézés, CL: galaxishalmazok, SN: szupernóvák, 3×2 pt: kétpontkorrelációk a gyenge gravitációs lencsézés esetében. Forrás: LSST DESC SRD v1 [1]

Végül meg kell említeni az LSST kozmológiai méréseinek szinergiáit az Európai Űrügynökség már folyó Euclid és a NASA 2027-ben induló Nancy Grace Roman infravörös űrtávcsöveivel, hiszen az előbbinek szinte kizárólagos, az utóbbinak pedig rendkívül hangsúlyos célja a galaxisok és galaxishalmazok infravörösben történő leképezése és az LSST-nél említett galaxishalmazok, az erős és gyenge gravitációs lencsézés és a szupernóvákon alapuló, sötét anyagot és sötét energiát kutató módszerek alkalmazása. A kozmikus háttérsugárzás mikrohullámú sávjában mért anizotrópiáival való tervezett ke-

resztkorrelációs mérések pedig még tovább pontosítják majd a kozmológiai paraméterek megszorításait.

Gravitációval kapcsolatos egyéb kutatások az LSST-vel

A gravitáció kutatása (és hatása) természetesen nem áll meg a sötét anyag és a sötét energia kutatásánál és a kozmológiai vizsgálatoknál, hiszen a gravitációnak szinte minden csillagászati objektumnál van szerepe. Elég, ha csak az égi mechanikára, azaz a bolygók mozgására gondolunk, vagy a gravitáció kettős és többszörös csillagok mozgásában és fejlődésében betöltött szerepére, a csillagokban a gáznyomást egyensúlyozó hatására, a galaxisok gravitációs kölcsönhatásaira, esetleg kisebb, beolvadó galaxisok maradványaiként csillagáramok felfedezésére galaxisok körül – ezen halvány struktúrák felfedezésében az LSST szó szerint új ablakot fog nyitni az Univerzum kutatásában. És akkor még nem is szóltunk a fekete lyukakról, közvetlen környezetükről, a gravitációshullám-források, azaz az összeolvadó fekete lyukak és neutroncsillagok, szupernagy tömegű fekete lyukak, aktív galaxismagok modern asztrofizikában játszott szerepéről – ezen jelenségek közvetve vagy közvetlenül mind a gravitációhoz és annak szélsőséges megnyilvánulásához kötődnek. Már szóltunk a gravitációs mikrolencse-jelenségről, amiből legalább százazret fog megfigyelni a Vera C. Rubin Observatórium.

Bár ezeket a hatásokat ebben az írásban nincs mód részletesen kifejteni, az LSST ezen objektumok kutatásában is fog újdonságot hozni, habár magát a gravitációt tekintve talán nem olyan mértékben, mint az előző két fejezetben leírtak esetében.

Kitekintés és magyar vonatkozások

A Vera C. Rubin Observatórium az Amerikai Egyesült Államok égboltfelmérő programja, amit az NSF (National Science Foundation) és a DOE (Energiaügyi Minisztérium) támogat. A helyet Chile biztosítja. Ennek fejében az amerikai és chilei kutatók alanyi jogon férnek hozzá az adatokhoz és az azok felhasználását segítő számítógépes infrastruktúrához (Rubin Science Platform, RSP). Talán először történik az a történelemben, hogy az adott program vagy távcső adatait – azok mennyisége miatt – nem lehet letölteni saját számítógépünkre vagy helyi adattárolóinkra. Az LSST-adatok eléréséhez az RSP-re lehet jelentkezni és ott kell futtatni a kereséseket, kódokat, algoritmusokat. Az LSST ilyen értelemben is forradalmasítani fogja a csillagászok és asztrofizikusok munkáját.

Az adatokhoz és egyéb produktumokhoz két évig csak a konzorcium tagjai férhetnek hozzá. Ezzel szemben a riasztások azonnal publikusak lesznek. A külföldi partnerek ún. in-kind kontribúcióval (természetbeni hozzájárulással) járulhatnak hozzá az LSST-hez, és ennek fejében férünk hozzá az adatokhoz. Ez lehet szoftverfejlesztés, mérnöki munka, távcsövidő vagy más kritikus, de

a konzorciumban nem meglévő tudás, adatbázis, eljárás, infrastruktúra biztosítása az LSST konzorcium részére.

A szerzők „Lendület”-pályázatainak támogatása nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a magyar kutatók is részt vehessenek ebben a nagy nemzetközi projektben. A korábbi két kisebb csoport helyett ma – a jelentősen megnövelt in-kind kontribúciónak köszönhetően – összesen 25 kutató (5 vezető kutató és 4-4 junior) vesz részt az LSST-ben Magyarországról három intézményből. Ezek a HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézete, az ELTE Fizikai és Csillagászati Intézete (Budapest) és az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatóriuma (Szombathely). Szintén a hazai kutatók sikere, hogy sikerült elnyerni az európai LSST konferencia (LSST@EU8) rendezési jogát 2026 őszére.

Az obszervatórium első, nagyközönség számára készült képei 2025 júniusában érkeztek meg. Ezenkívül ún. science verification adatokat is láttunk már. Ezek még nem tudományos felhasználásra készült mérések, de sokat elárulnak az LSST-adatok várható minőségéről, és lehetővé teszik a távcső alrendszeinek (adaptív optika, kiolvasási elektronika, termális kontroll, kupolaszellőztetés stb.) finomhangolását. Ezek alapján a hazai közösség is nagyon várja a tíz évre tervezett LSST-égboltfelmérés startját és első eredményeit. Az már korábban is látszott, hogy a Rubin-adatok teljes körű kiaknázásához elengedhetetlen lesz a mesterséges intelligencia fel-

használása. Nemcsak a hatalmas adatmennyiség miatt, hanem azért is, mert a fent részletezett, „kiszámítható” felfedezésdömping mellett az „ismeretlen ismeretlenek” felfedezése szolgáltathatja talán a legizgalmasabb tudományos szenzációkat. A Vera Rubin Observatórium LSST-égboltfelmérésére használt Simonyi-teleszkópja tehát hamarosan készen áll a megfigyelési program megkezdésére, és a felfedezések várhatóan ipari mennyiségben történő szállítására. A csillagászok, asztrofizikusok és adattudósok pedig felkészültek az égbolt – és akár az alapvető fizika, így a gravitáció – megismerésének egy újabb, az eddigieket sok tekintetben túlszárnyaló korszakára.

Irodalom

1. The LSST DESC Science Requirements Document v1 (LSST DESC SRD v1, 2018): arXiv:1809.01669
2. Kurlander és mtsai (2025): Predictions of the LSST solar system yield: Near-Earth objects, main belt asteroids, Jupiter Trojans, and Trans-Neptunian objects. *Astronomical Journal*, 170, 99.

Linkek

- További információ a Vera C. Rubin Observatóriumról: <https://rubinobservatory.org/>
- A Simonyi-teleszkóp optikai rendszere: https://www.lsst.org/about/tel-site/optical_design
- A Rubin Observatórium első képeinek galériája: <https://rubinobservatory.org/gallery/collections/first-look-gallery>
- A Rubin Observatórium első képeinek bemutatójára szervezett online közvetítés: <https://www.youtube.com/watch?v=c4VCaLR4igE&t=404s>

FEKETE LYUKAK A SZÁMÍTÓGÉPEN

Csukás Károly 

HUN-REN Wigner FK, Részecske- és Magfizikai Intézet, Elméleti Fizika Osztál, Gravitációfizikai Kutatócsoport, Budapest
E-mail: csukas.karoly@wigner.hun-ren.hu

A gravitáció nemlineáris jelenség. Ennek köszönhetjük, hogy két fekete lyuk a köztük lezajló kölcsönhatások révén gravitációs hullámokat bocsát ki, és már vákuumban is igen gazdag dinamikát figyelhetünk meg. Azonban a nemlinearitás egyúttal azt is jelenti, hogy az alap-egyenletek megoldása rendkívül bonyolult probléma. Az ismert analitikus megoldások mind különböző fokú szimmetriák jelenlétében oldják meg az egyenleteket. Ezek közül talán a legfontosabbak a fekete lyukakat leíró

Kerr–Newman-megoldások, illetve a kozmológiai ismereteink alapjául szolgáló Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker-megoldás. Egy másik fontos megoldási módszer különböző közelítések alkalmazása. A poszt-newtoni közelítés gyenge térben írja le a lassan mozgó testek dinamikáját, vagy a feketelyuk-perturbációszámítás rögzített feketelyuk-háttérrel vizsgálja a gyenge sugárzás szóródását vagy egy tömegpont mozgását. Azonban amikor ilyen egyszerűsítéseket lehetővé tevő körülmények nem állnak rendelkezésünkre, az egyetlen ismert eljárás, hogy a teljes, nemlineáris Einstein-egyenletet numerikus módszerekkel közelítve, számítógépen oldjuk meg. A numerikus módszerek rendkívül hasznosak például a közelítő megoldások tanulmányozásában is, azonban szigorúan véve numerikus relativitáselméletnek azt a területet nevezzük, amelyik a teljes, nemlineáris Einstein-egyenlet megoldását tűzte ki célul. A jelen írásban felvázolunk néhány problémát a numerikus relativitáselmélet területéről, amelyek megoldása elengedhetetlen a megbízható, hosszú távú numerikus szimulációk elvégzéséhez. Látni



Csukás Károly a doktori kutatását a Wigner FK-ban végezte Rácz István témavezetése mellett, majd 2021-ben az ELTE Fizika Doktori Iskolájában védte meg a dolgozatát. A University of Mississippi posztdoktori kutatójaként csatlakozott a Simulating eXtreme Spacetimes Kollaborációhoz a SpEC-kód fejlesztésében. Jelenleg a HUN-REN Wigner FK Gravitációfizika Csoportjának munkatársa.

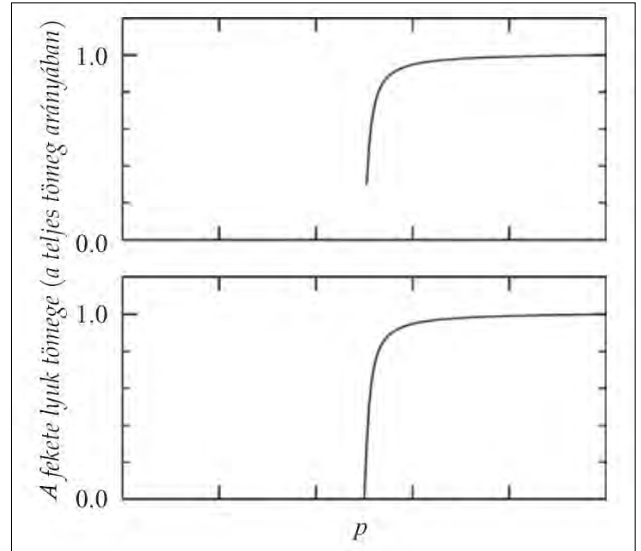
fogjuk, hogy ezek egy része az általános relativitáselmélet matematikai alapjait érinti, és az eredmények hatásával vannak nem csupán a numerikus, de a matematikai relativitáselméletre, és a parciális differenciálegyenletek elméletére is.

1. Alkalmazási területek

A kísérleti relevancia miatt talán legkézenfekvőbb alkalmazás a *kompakt kettősök* összeolvadásának vizsgálata. A kettős korai dinamikáját, amikor a pályasugár nagy, és a sebességek kicsik, jól leírhatjuk a poszt-newtoni közelítés módszereivel. Az összeolvadás után hátramaradt deformált, gerjesztett fekete lyuk egyensúlyi helyzetbe való relaxációját pedig jól leírhatjuk a feketelyuk-perturbációszámítás eszközeivel. A kettő között egyedül a numerikus relativitáselmélet képes megoldani a problémát. Larry Smarr és Bryce DeWitt már a hetvenes években mutatott be szimulációkat tengelyszimmetria esetén, ahol a fekete lyukak egy egyenes mentén ütköztek. A körpályán keringő kettősök háromdimenziós szimulációja azonban csak Frans Pretorius 2005-ös áttörésével valósult meg. Néhány hónappal később teljesen eltérő módszereket használva a NASA Goddard csoport, valamint a Brownsville/Rochester csoport is megismételte ezt a bravúrt.

A kozmológiai n -test-szimulációk erősen építenek arra, hogy a skálák szétcsatolódnak, így a galaxisok mozgását leírhatjuk newtoni dinamikával, majd az így kapott anyageloszlást átlagolva fejleszthetjük a homogén és izotrop háttérmetrikát. A numerikus relativitáselmélet egyik alkalmazása ezen közelítések helyességének vizsgálata. Egy másik alkalmazási terület a kozmológiai szingularitás természetének, illetve az infláció homogenizáló hatásának tanulmányozása, ahol a korábbi egyszerűsítések érvényüket veszítik. A témában jó összefoglalót ad az [1] közlemény.

A numerikus relativitáselmélet legnagyobb sikerének tartjuk a kritikus összeomlás felfedezését. A Minkowski-tér idő stabilitásának vizsgálatából tudjuk, hogy a kis perturbációk szétszóródnak. Ugyanakkor azt is tudjuk, hogy a nagy tömegű perturbációk összeomlanak, és fekete lyuk alakul ki. Choptuik a két eshetőség közötti átmenetet tanulmányozta egy tömegtelen skalármező gömbszimmetrikus összeomlása során [2]. A felfedezés óta anyagmezők széles választékát tanulmányozták gömbszimmetriában, minden esetben megfigyelve a kritikus jelenség általános jellemzőit. A fázisátalakulásokhoz hasonlóan két csoportot különböztetünk meg. 2. típusú összeomlásnál a kialakuló fekete lyuk tömege folytonosan függ a kezdeti feltételtől, tetszőlegesen kis tömegű fekete lyuk előállítható. Azonban, ha a dinamikában van egy skála, például a skalármezőnek tömege van, akkor 1. típusú összeomlást figyelünk meg, ahol a fekete lyuk tömege nem lehet tetszőlegesen kicsi. Ekkor van egy rés a minimális tömeg és a szétszóródást jelző 0 tömeg között (1. ábra).



1. ábra. A kritikus összeomlás során keletkező fekete lyuk tömege a kezdeti feltételek egy paraméterének függvényében. Fent: 1. típusú összeomlásnál létezik egy minimális tömeg, aminél könnyebb fekete lyuk nem keletkezik. Lent: 2. típusú összeomlásnál a fekete lyuk tömege tetszőlegesen kicsi lehet ([4] nyomán)

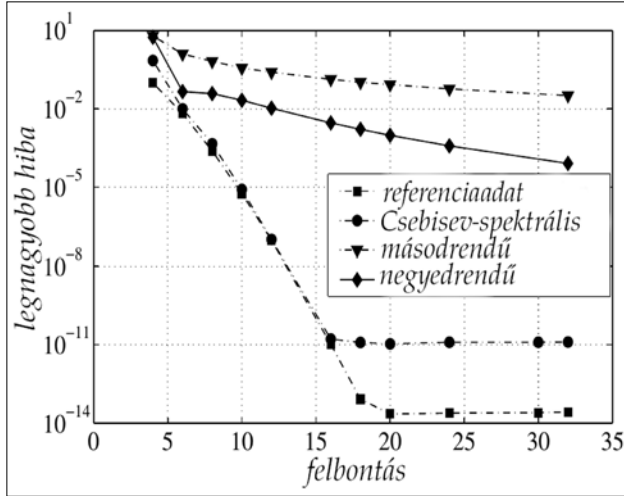
A jelenségnek sok további érdekes tulajdonsága megfigyelhető, melyek értelmezéséhez a statisztikus fizika eszköztárára kell támaszkodnunk. A téma iránti érdeklődés új lendületet kapott, a gravitációs hullámok tengelyszimmetrikus összeomlását szimulálva nemrégiben több csoport is megfigyelte a jelenséget [3, 4].

2. Numerikus módszerek

A numerikus eljárások alapvetően a folytonos problémák diszkretizációjával foglalkoznak. A kódokat két nagy csoportba sorolhatjuk aszerint, hogy milyen stratégiát követnek a diszkretizáció során.

A végesdifferencia-módszerek a folytonos teret rácspontokra szűkítik, és az adott problémát a rácsfüggvények véges dimenziós terén oldják meg. Megfelelően megkonstruált módszerek esetén a rács finomításával a numerikus megoldás egyre jobban közelíti az ideális, folytonos megoldást. A rácsponthoz általában egyenletesen oszlanak el, és a közelítés hibája a rácsponthoz közti távolság valamely hatványával arányos, ahol a kitevőt az alkalmazott közelítések határozzák meg. A spektrális módszerek ezzel szemben a megoldásokat egy függvénybázison fejtik ki mint végtelen összeget. Ezt a kifejtést egy véges ℓ rendben levágva jutunk el egy diszkrét problémához, ahol a véges sok kifejtési együtthatóra oldjuk meg a feladatot. Vannak függvénybázisok, amelyekről tudjuk, hogy a közelítés hibájának csökkenési üteme csak a megoldás simaságától függ, sima megoldás esetén a hiba $C^{-\ell}$ módon exponenciálisan csökken. Hasonló viselkedésük okán a spektrális módszerek alcsoportjaként fogjuk kezelni a pszeudospektrális eljárásokat. Ezek alapja a Gauss-féle integrálási módszer: amennyiben

a rácspontok eloszlását a bázisfüggvényekhez igazítjuk, akkor további hiba bevezetése nélkül válhatunk a megoldás rácspontokon, illetve bázisfüggvényeken való megjelenítése között. A pszeudospektrális módszerek különösen hatékonyak olyankor, amikor bizonyos műveletek rendkívül számításigényesek a spektrális térben, de közel triviálisak rácspontonként elvégezve. Az eltérő módszerek konvergenciárátája közti különbséget a 2. ábrán szemléltetjük.



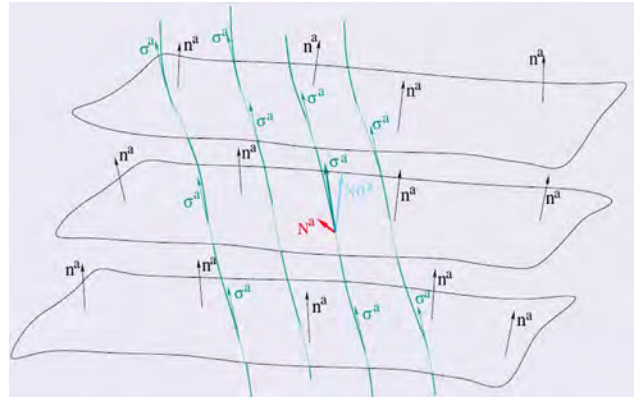
2. ábra. Numerikus hiba a hővezetési egyenlet megoldása során a felbontás függvényében. A Csebisev-polinomokon alapuló spektrális megoldás hibái jelentősen gyorsabban csökkennek, mint a másod-, vagy akár a negyedrendű végesdifferencia-módszerek hibái ([5] nyomán)

A módszerek konvergenciárátája nagyban megszabja az alkalmazhatóságukat. Egy neutroncsillag felszínén szakadás figyelhető meg az anyagmezőben, ezért ott a spektrális és végesdifferencia-módszerek egyformán viselkednek, de a spektrális módszer drágább. Vákuumban azonban, szingularitásoktól és szakadásoktól távol a spektrális módszerek rendkívül hatékonyak bizonyultak. A nagy kódok közül az Einstein Toolkit [6] és a rá épülő kódok, valamint GR-Athena++ [7] végesdifferencia-módszereket alkalmaz, a BAMPS [3, 8] pszeudospektrális, míg a SpEC [9] és SpECTRE [10] kódok hibrid megközelítést alkalmaznak: véges differenciák a szakadások közelében és pszeudospektrális azoktól távol.

3. Numerikus módszerekkel kezelhető egyenletek

A numerikus módszereink nem függetleníthetők a megoldandó egyenletek tulajdonságaitól, de a problémát jelentősen bonyolítja, hogy az Einstein-egyenlet tenzor-egyenlet, ami ráadásul a téridőre vonatkozik, tehát sem az nem világos, hogy hogyan jelenik meg benne az idő, sem az, hogy hogyan tudjuk parciális differenciálegyenletek rendszerére visszavezetni. A potenciális egyenletrendszereknek ráadásul stabilan kell viselkedniük a numerikus közelítések hibáival szemben is.

A napjainkban legsikeresebb eljárás az Einstein-egyenlet Arnowitt, Deser, és Misner (ADM) nevéhez köthető 3+1 felbontásához kapcsolódik. Ekkor a négydimenziós téridőre mint háromdimenziós hiperfelületek egy seregére gondolunk. Felmerülhet a kérdés, hogy ez a felbontás mennyire jelent erős megszorításokat a megoldások topológiájára nézve. Amennyiben a fizikai modellektől elvárjuk, hogy tiszteletben tartsák a kauzalitást, és legyenek prediktívek, akkor a 3+1-es felbontás nem jelent túl erős megszorításokat. A hiperfelületeken kívül szükségünk van még egy evolúciós vektormezőre, amely „összefűzi” ezeket a hiperfelületeket. Ezt a képet a 3. ábrán szemléltetjük.



3. ábra. A téridőt 3 dimenziós hiperfelületek egyparaméteres családjaként értelmezzük. Az n^a vektormező jeleníti meg a hiperfelületekre normális egységvektort. A σ^a evolúciós vektormező integrálgörbéi pontosan egyszer metszenek minden hiperfelületet, ilyen módon összefűzve őket 4 dimenziós téridővé (Az ábráért köszönet Rácz Istvánnak)

A következő lépésben vesszük az Einstein-egyenlet merőleges és érintőirányú vetületeit ezekre a hiperfelületekre, és kifejezzük őket a hiperfelületet jellemző mennyiségekkel. Az így kapott ADM-egyenletek közül a tenzorvetületből származó egyenletek írják le az időfejlődést, míg a skalár- és vektorvetületekből származó egyenletek időderiváltat nem tartalmazó kényszeregényleteket adnak. Megmutatható, hogy amennyiben a kényszeregényletek teljesülnek legalább egy hiperfelületen, akkor az evolúciós egyenletek megőrzik ezt a tulajdonságot. Tehát ha olyan kezdeti feltételt használunk, amely megoldása a kényszeregényleteknek, akkor az evolúciós egyenletek megoldásai megoldják a teljes Einstein-egyenletet.

A fenti módszerrel származtatott ADM-egyenletek azonban rendkívül instabil módon viselkednek numerikus vizsgálatokban. A napjainkban használt, stabilan viselkedő formalizmusok eredetük alapján két csoportba sorolhatóak. Pretorius az Einstein-egyenlet $\square x^a = 0$ harmonikus koordinátákban felírt alakját oldotta meg. Először DeDonder és Lánczos vette észre, hogy a Christoffel-szimbólumra ekkor $\Gamma^a = g^{\beta\gamma} \Gamma^a_{\beta\gamma} = 0$ teljesül, és az Einstein-egyenlet jelentősen egyszerűsödik. A matematikai relativitáselmélet rengeteg fontos eredménye köti ehhez a koordinátaválasztáshoz. Mind a $\square x^a = 0$,

mind az általánosabb $\square x^a = H^a(x^\beta)$ koordinátaválasztás mellett olyan egyenleteket kapunk, melyek kellően stabilan viselkednek. A NASA Goddard és Brownsville/Rochester csoportok ezzel szemben a sugárzó és nem sugárzó szabadsági fokok szétválasztását célzó Baumgarte–Shapiro–Shibata–Nakamura–Oohara–Kojima (BSSNOK) formalizmust használták. Ennek a formalizmusnak a stabilitását Γ^a önálló változóként való kezelésével és a rá vonatkozó differenciálegyenlet megfelelő megválasztásával szavatolhatjuk.

Korábban megállapítottuk, hogy amennyiben a kényszeregyenletek teljesülnek a kezdőadatra, akkor ezt a tulajdonságot az evolúció megőrzi. Viszont ha numerikusan oldjuk meg az egyenleteket, akkor mindig van valamennyi kényszersértés csupán a numerikus eljárások közelítő jellege miatt is. Ezt a kényszersértést természetesen tetszőlegesen le tudjuk szorítani, de akármilyen kicsi lesz is, ha az evolúciós egyenletek nem tudják ezt kezelni, akkor a kényszersértéshez tartozó nem fizikai jelenségek hamar elmosásáig a szimulációt. Pretorius át-törést bejelentő cikke is ilyen kényszersértés-csökkentő tagok bevezetését emeli ki mint a sikerhez vezető legutolsó összetevőt. Ezek a tagok eltűnnek, ha a kényszerek egyenként teljesülnek, ellenkező esetben azonban sebességgel ruházzák fel a kényszersértéseket, amelyek így el tudják hagyni a számítási tartományt. A BSSNOK-egyenleteket és a harmonikus koordinátákban használt kényszersértéscsökkentő eljárások előnyeit próbálják ötvözni a Z4 formalizmus különböző változatai.

A nagy kódok közül a BAMPS, a SpEC és a SpECTRE az általánosított harmonikus formalizmus egy elsőrendű változatát használják időfejlődésre. Az Einstein Toolkit a BSSNOK-formalizmust használja, míg a GR-Athena++ a Z4 formalizmus egyik változatát.

4. Kezdeti feltételek és szingularitások

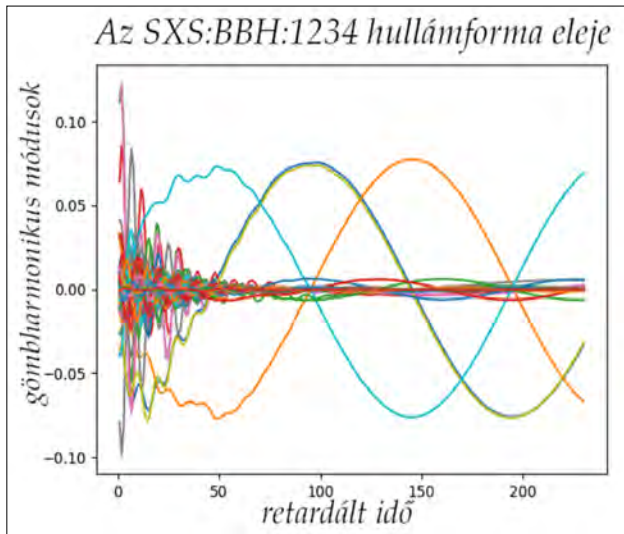
A megfelelő evolúciós egyenletek ismeretében a szimulációknak olyan kezdőadatra van szükségük, amelyek megadják a kényszeregyenleteket. Az alapváltozóink a $t = 0$ felület háromdimenziós metrikája, h_{ij} , valamint a külső görbülete, K_{ij} , amely az evolúciós vektormező felhasználásával az indukált metrika időderiváltjához kapcsolható. Anyagmezők jelenlétében ezekhez hozzá kell vennünk az anyagmezők változóit. A kényszeregyenletek egy fontos tulajdonsága, hogy alulhatározott rendszert alkotnak. A két szimmetrikus, háromdimenziós tenzormezőben, h_{ij} -ben és K_{ij} -ben összesen 12 szabadsági fokunk van, míg a kényszeregyenletek a szimmetrikus, négydimenziós Einstein-tenzor skalár- és vektorvetületei, melyek összesen 4 egyenletet adnak. Ez azt eredményezi, hogy a 12 szabadsági fokból ki kell választanunk 8-at, amelyet teljes egészében megadunk, majd a kényszeregyenleteket megoldjuk a maradék 4 szabadsági fokra.

A kényszerek általánosan használt alakja a Lichnerowicz és York nevéhez fűződő konformis módszeren

alapul. Ekkor a h_{ij} metrikáról leválasztunk egy pozitív skálafaktort (ezt konformis transzformációnak hívjuk, $h_{ij} = \phi \bar{h}_{ij}$), a K_{ij} külső görbületet pedig szétválasztjuk a $K = h^{ij}K_{ij}$ nyomra, illetve az $A_{ij} = K_{ij} - Kh_{ij}/3$ nyomtalan részre. A_{ij} -t továbbá felbontjuk egy A_{ij}^{TT} transzverzális részre, mely divergenciamentes, és egy A_{ij}^L longitudinális részre, mely leírható egy W^i vektormező deriváltjaival. A kényszeregyenletek konformis transzverz nyomtalan formalizmusában a kényszereket a ϕ skálafaktorra és a W^i vektormezőre oldjuk meg. Kompakt kettős rendszerek esetén egy másik népszerű módszer a konformis vékonyrendvics-eljárás. Ez azon az észrevételen alapul, hogy az evolúciós egyenletek kapcsolatot létesítenek az evolúciós vektormező és a külső görbület között. Ekkor a W^i vektormező helyett az evolúciós vektormezőre oldjuk meg az egyenleteket, és a $t = 0$ hiperfelületen $\partial_t h_{ij}$ és $\partial_t K$ szabadon meghatározható változóként megjelenik. Ez utóbbi adja a konformis vékonyrendvics-formalizmus népszerűségét: a kompakt kettősök fejlődésének kezdeti szakaszán a sebességek kicsik, és a rendszer közel stacionárius. Ezt meg tudjuk jeleníteni a kényszeregyenletekben szabad változóként felbukkanó időderiváltak eltűnésével. Mindkét módszer elliptikus egyenleteket eredményez, ami azt jelenti, hogy a megoldandó változók számára peremfeltételeket kell megadnunk a számítási tartomány szélein. Nemrégiben Rácz István egy újabb formalizmust fedezett fel [11], ahol konformis átskalázás helyett a háromdimenziós hiperfelület $2+1$ -es felbontásából indulunk ki. Meghökkenő módon ekkor a kezdőadatokat egy kétdimenziós felületen adott változók evolúciójával állíthatjuk elő. A kényszeregyenletek evolúciós alakban való felírása új lehetőségeket nyit meg mind a megoldások előállítására, mind azok általános tulajdonságainak megismerésére. Ezen új eszközök megalkotása és kiaknázása folyamatban lévő kutatás tárgya.

A kényszerek megoldása során szabadon megadható 8 változó előírása sem magától értetődő. Feketelyuk-kettősök esetén általános eljárás két feketelyuk-megoldás összegeként megadni őket. Minden feketelyuk-megoldás felírható a $g_{ab} = \eta_{ab} + 2H\ell_a\ell_b$ Kerr–Schild-alakban, ahol η_{ab} a sík Minkowski-metrika valamilyen koordinátákban, H egy skalárfüggvény, ℓ_a pedig egy fényszerű vektormező. A Kerr–Schild-alak egyik előnyös tulajdonsága, hogy a sík η_{ab} metrika használható háttérként, amihez képest alkalmazhatunk eltolásokat és boostokat, valamint ezen a háttéren elhelyezhetünk több, eltérő pozíciójú és sebességű fekete lyukat. Az eljárás egyik korlátja, hogy a szabad változókban nem jelenik meg a fekete lyukak közötti kölcsönhatás, míg a kényszerek által megszorított változók már tudnak ezekről. Ennek a diszkrepanciának tulajdonítjuk a szimulációk elején megjelenő nem fizikai sugárzást, melyet a 4. ábra mutat.

A $\bar{h}_{ij}$ konformis metrikát Minkowski-metrikának választva az egyenletek jelentősen egyszerűsödnek, ezért sokáig elterjedt volt konformisan sík fekete-



4. ábra. A hullámformák kezdeti szakaszán nagyfrekvenciás nem fizikai zaj jelenik meg, melynek forrása a kezdőadat szabad változóinak nem elégtő meghatározása. A bemutatott hullámforma az SXS katalógusból származik [12]

lyuk-megoldások összegét használni. A konformis síkság hátránya, hogy nem tud gyorsan forgó megoldásokat leírni. Ezt a korlátot először Kerr–Schild-koordinátákban megadott Kerr-megoldások összegével sikerült meghaladni [13]. Habár később megmutatták, hogy harmonikus koordinátákban felírt feketelyukak összege jobban kezeli az időfejlődés elején fellépő nem fizikai sugárzást (de kevésbé alkalmas gyors forgások leírására) [14], illetve módosították [15] a Kerr–Schild-koordinátákat a gyors forgások hatékonyabb leírása érdekében, továbbra is a hagyományos Kerr–Schild-koordinátákkal felírt összeg a legelterjedtebb.

Egy újabb kérdés, amely már a kezdő adatok megalkotása során felmerül, hogy hogyan kezeljük a szingularitásokat. Az egyik megoldás, hogy kivágjuk a számítási tartományból a fekete lyuk horizontján belüli térrészt, és a fekete lyukak fizikájának megfelelő peremfeltételeket írunk elő a határon. Mivel a horizonton belülről nem jöhet ki információ, pontosságot nem veszítünk, továbbá a kivágott tartományon nem szükséges számolásokat végeznünk. A módszer hátulütője, hogy az evolúció során kellő időközönként ellenőriznünk kell a horizont helyzetét, nehogy a kivágás a horizonton kívülre kerüljön, valamint bonyolult eljárásokkal kell meghatároznunk, hol van a fekete lyuk közepe. A másik megoldás a mozgó pontok módszere, ahol csupán azt garantálják, hogy a szingularitás sosem lehet rácsponton, így annak a hatásait a végesdifferencia-módszerek enyhítik. Ugyan a fekete lyukak belsejét is fejleszteni kell ezzel a módszerrel, de az időfejlődés során végig követjük a szingularitást jelölő pontok helyzetét, így a fekete lyukak pozíciója mindig a rendelkezésünkre áll. A NASA Goddard és a Brownsville/Rochester csoportok áttörései éppen a mozgó pontok módszerének kidolgozásának volt tulajdonítható.

5. A végtelen és a hullámformák

Mivel a számítógépeink véges kapacitásúak, a számítási tartományt egy véges helyen le kell vágnunk, és peremfeltételeket kell kirónunk. A kényszerek megoldásakor kompakt kettős rendszerek esetén ezek a peremfeltételek a végtelenben elvárt viselkedést írják elő; tehát azt, hogy a forrásoktól kellően messze a téridő a megfelelő ütemben tart a Minkowski-megoldáshoz. A számítási tartomány szélének kellően messze kell elhelyezkednie, hogy az jól közelítse a végtelent. Az időfejlődés során azonban ez túl költséges lenne. A túl egyszerű közeli peremfeltételek veszélye viszont abban rejlik, hogy a külső határon visszaverődik a szimuláció elején tapasztalható nem fizikai sugárzás. Ezt elkerülendő szükséges az egyenletrendszer alapos vizsgálatával különválasztani a mértékváltozókat, a befelé érkező információkat megjelenítő karakterisztikus változókat és a kifelé tartó karakterisztikus változókat. Ekkor a kifelé tartó karakterisztikus változókat szabadon hagyva a nem fizikai sugárzás elhagyja a számítási tartományt, a befelé haladó karakterisztikus változókat pedig lenullázhatjuk (a végtelenből nem jön be információ). Ez azonban nem veszi figyelembe a téridő görbületén visszaverődő sugárzást. Egy változó $f = f_0 + f_1 r^{-1} + \dots$ aszimptotikus kifejtésére gondolva, a karakterisztikus változó végtelenbeli nulla értéke a vezető rendű járulékokra vonatkozó peremfeltétel. A Buchman és társai [16] által kidolgozott peremfeltétel-rendszer azonban a magasabb rendű kifejtési együtthatókra is olyan peremfeltételeket ad, melyek megfeleltethetők egy Schwarzschild-féle fekete lyukon szóródó sugárzásnak. Ez a módszer a pontosság megőrzése mellett jelentősen tudta csökkenteni a számítási tartomány méretét.

A végtelen megjelenítése a számítási tartományon nem csupán a megfelelő peremfeltétel megállapítása miatt fontos kérdés. Mivel ideális esetben a hullámformákat leolvasó megfigyelő a végtelenben helyezkedik el, a szimulációk talán legfontosabb termékének, a hullámformák leolvasásának szempontjából is fontos kérdés, hogy hogyan tudjuk megjeleníteni a végtelent a számítási tartományon. A végtelen hiányában vehetjük a forrástól messze elhelyezett gömbök egy sorozatát, és az ezeken leolvasott hullámformákat extrapolálhatjuk a végtelenbe.

Ennél nagyobb pontosságot céloznak azok a módszerek, amelyek valamilyen módon a végtelent ténylegesen meg kívánják jeleníteni a rácson. A ma működő egyetlen ilyen megoldás az Einstein-egyenlet karakterisztikus értelmezését hívja segítségül. Ekkor a 3+1 felbontással ellentétben a felbontás alapját nem egy időkoordináta, hanem a retardált és avanszált fényszerű koordináták adják. A karakterisztikus problémának egy fényszerű felületen szükséges kezdőadatot megadni, majd peremfeltételre van szükségünk egy másik fényszerű felületen (5. ábra). A cél a Cauchy- és a karakterisztikus problémák peremfeltételeinek összehangolása. Jelenleg a SpECTRE kódban [17] és az Einstein Toolkitben [18]



5. ábra. A hullámformák minél pontosabb leolvasása érdekében kombináljuk az általános relativitáselmélet Cauchy-problémáját és karakterisztikus problémáját. A jelenleg elérhető kódok megvalósítják az információáramlást a Cauchy-problémától a karakterisztikus irányába. A kétirányú információáramlás megvalósítása aktív kutatás tárgya

elérhető ennek az eljárásnak egy olyan egyirányú alkalmazása, ahol a Cauchy-probléma szélén leolvasott adat szolgál a karakterisztikus probléma peremfeltételeként, ilyen módon a gravitációs hullámokat a karakterisztikus probléma eljuttatja a végtelenig. A kétirányú eljárás, amikor a két problémát szimultán oldjuk meg, és a karakterisztikus probléma megoldását a Cauchy-probléma peremfeltételeként alkalmazzuk, egyelőre csak egyszerűbb problémákon működik megbízhatóan [19].

6. Kitekintés

A numerikus relativitáselmélet Pretorius 2005-ös áttörése óta is sokat fejlődött. Az eltelt tíz évben több csoport is kifejlesztette a maga kódját kompakt kettősök szimulációjára, és ezek közül többnek saját hullámforma-katalógusa van (például BAM [20], GR-Athena++ [21], RIT [22], SXS [12]).

Ugyanakkor bőven maradtak kihívások is előttünk. A neutroncsillagokat tartalmazó szimulációk pontosságát jelenleg a hidrodinamika pontatlansága korlátozza, ahol a véges differenciák lassan konvergálnak [23]. A kettős feketelyuk-rendszerek paraméterterének lefedettségéről elmondhatjuk, hogy közel körpályák esetén 1:8 tömegarányig elegendő mennyiségű szimuláció áll rendelkezésünkre. Az excentrikus dinamikák vizsgálata mostanában került az érdeklődés középpontjába. A jelenleg rendelkezésünkre álló eljárások nehezen boldogulnak nagy tömegarányok esetén, ahol a skálák különbözősége miatt rendkívül költségesek a szimulációk. Szintén költséges hosszabb hullámformák előállítása. Jelenleg a szimulációk tipikus hossza nagyjából 20 keringés az összeolvadás előtt. A következő generációs detektorok várhatóan jóval érzékenyebbek lesznek a bespirálózás szakaszára, ezért hosszabb hullámformákra lesz szükségünk. Ehhez kapcsolódik, hogy a jelenlegi kódok néhány tíz, esetleg száz processzormaggal működ-

nek optimálisan. A következő generációs kódok fejlesztésekor alapvető célkitűzés, hogy azok akár néhány tízezer magon is hatékonyan működjenek, illetve grafikus processzorok használata is mérlegelés tárgyát képezi.

A probléma és az előttünk álló kihívások bonyolultságára tekintettel a területen dolgozó csoportok minden korábbinál nyitottabbak az együttműködésre. Az Einstein Toolkit, a SpECTRE, és a GR-Athena++ kódok is szabad licenszeket használnak, így bárki tanulmányozhatja és fejlesztheti őket. Ezen túl a dokumentáció is kellően részletes, így kezdők is könnyen becsatlakozhatnak a munkába.

Irodalom

1. Aurrekoetxea J. C., Clough K., Lim E. A. (2025): Cosmology using numerical relativity. *Liv. Rev. Rel.*, 28/1.
2. Choptuik M. W. (1993): Universality and scaling in gravitational collapse of a massless scalar field. *Phys. Rev. Lett.*, 70/1.
3. Marouda K., Cors D., Rüter H. R., Atteneder F., Hilditch D. (2024): Twist-free axisymmetric critical collapse of a complex scalar field. *Phys. Rev. D*, 109/12.
4. Gundlach C., Martín-García J. M. (2007): Critical phenomena in gravitational collapse. *Liv. Rev. Rel.*, 10/1.
5. Canuto C., Hussaini M., Quarteroni A., Zang T. J. (2006): Spectral methods. Fundamentals in single domains. Springer.
6. Rizzo M. és tsai (2025): The Einstein Toolkit, The “Martin D. Kruskal” release, ET_2025_05 verzió. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15520463>
7. Cook W. és tsai (2025): GR-Athena++: General-relativistic magnetohydrodynamics simulations of neutron star spacetimes. *Astrophys. J. Suppl.*, 277/1.
8. Patiño J. E., Rüter H. R., Hilditch D. (2025): Pseudospectral implementation of the Einstein–Maxwell system. *SciPost. Phys.*, 19/4.
9. SpEC: <https://www.black-holes.org/for-researchers/spec>.
10. Deppe N. és tsai. (2025): SpECTRE v2025.08.19. <https://spectre-code.org>.
11. Rácz I. (2016): Constraints as evolutionary systems. *Class. Quant. Grav.*, 33/1.
12. Scheel M. A. és tsai. (2025): The SXS Collaboration’s Third Catalog of binary black hole simulations. *Class.Quant. Grav.*, 42./19.
13. Lovelace G., Owen R., Pfeiffer H. P., Chu T. (2008): Binary-black-hole initial data with nearly-extremal spins. *Phys. Rev. D*, 78/8.
14. Varma V., Scheel M. A., Pfeiffer H. P. (2018): Comparison of binary black hole initial data sets. *Phys. Rev. D*, 98/10.
15. Chen Y., Deppe N., Kidder L. E., Teukolsky S. A. (2021): Efficient simulations of high-spin black holes with a new gauge. *Phys. Rev. D*, 104/8.
16. Buchman L. T., Duez M. D., Morales M., Scheel M. A., Kestersitz T. M., Evans A. M. (2024): Numerical relativity multimodal waveforms using absorbing boundary conditions. *Class. Quant. Grav.*, 41/17.
17. Moxon J. és tsai (2023): The SpECTRE Cauchy-characteristic evolution system for rapid, precise waveform extraction. *Phys. Rev. D*, 107/6.
18. Babiuc M., Szilagyi B., Winicour J., Zlochower Y. (2011): A characteristic extraction tool for gravitational waveforms. *Phys. Rev. D*, 84.044057
19. Ma S. és tsai (2024): Fully relativistic three-dimensional Cauchy-characteristic matching. *Phys. Rev. D*, 109/12.
20. Hamilton E. és tsai (2024): A catalogue of precessing black-hole-binary numerical-relativity simulations. *Phys. Rev. D*, 109/4.
21. Rashti A. és tsai (2025): Binary black hole waveforms from high-resolution GR-Athena++ simulations. *Phys. Rev. D*, 111/10.
22. Healy J., Lousto C. O. (2022): The fourth RIT binary black hole simulations catalog: Extension to eccentric orbits. *Phys. Rev. D*, 105/12.
23. Habib S. és tsai (2025): Error quantification and comparison of binary neutron star gravitational waveforms from numerical relativity codes. arXiv: 2509.23028 [gr-qc].

GRAVITÁCIÓELMÉLETEK TESZTELÉSE GRAVITÁCIÓS HULLÁMOKKAL

Karácsonyi Kata¹, Cirok Balázs¹, Keresztes Zoltán¹, Gergely Árpád László^{1,2,*}

¹Szegedi Tudományegyetem, Fizikai Intézet, Elméleti Fizikai Tanszék, Szeged

²HUN-REN Wigner FK, Részecske- és Magfizikai Intézet, Elméleti Fizika Osztály, Budapest

*E-mail: laszlo.arpad.gergely@gmail.com

Az emberiség egyik legősbibb törekvése az Univerzum megértése. A természeti jelenségeket modellezzük, matematikailag pontos logikai rendszerbe foglaljuk, és posztulátumokon nyugvó elméleteket alkotunk. Ha jóslataink egyeznek a tapasztalatokkal, az növeli a beléjük vetett bizalmat, ha pedig eltérést tapasztalunk, akkor az új, általánosabb fizikai elmélet megalkotására ösztönöz. Ennek határesetként természetesen tartalmaznia kell a korábban sikeresen bevált elméletet, így jutunk a természet egyre pontosabb leírásához.

Az egyik legsikeresebb elmélet Albert Einstein 111 éve publikált általános relativitáselmélete, mely gyökeresen új módon tárgyalja a gravitációt: a newtoni elképzeléssel szemben nem erőhatásként, hanem a téridő görbületeként értelmezi azt. A téridő fogalma egyesíti a három térbeli és az egy időbeli koordinátát, így az anyag és a téridő kölcsönhatását új perspektívába helyezi. Matematikailag az

$$G_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ab} \quad (1)$$

Einstein-egyenletek mondják meg a téridőnek, hogy az energia-impulzus hatására hogyan görbüljön. Az adott téridőgörbületen a

$$\frac{d^2 x^a}{d\tau^2} + \Gamma_{bc}^a \frac{dx^b}{d\tau} \frac{dx^c}{d\tau} = 0 \quad (2)$$

geodetikus egyenlet határozza meg az anyag mozgását. Az egyenletekben a latin indexek téridő-koordinátákat jelölnek, c a fénysebesség, Γ_{bc}^a a Christoffel-szimbólumok, G a gravitációs állandó, T_{ab} az energia-impulzus tenzor, G_{ab} pedig az Einstein-tenzor, amely

$$G_{ab} = R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R, \quad (3)$$

ahol R_{ab} a Ricci-tenzor, g_{ab} a metrikus tenzor, R pedig a görbületi skalár.

Az általános relativitáselmélet megszületése óta eltelt évszázadban számos bizonyíték igazolta annak helyességét. Ilyen a Merkúr perihéliumának (napközelségének) vándorlása, amelynek pontos értékét a Newton-féle gravitáció nem, de az általános relativitáselmélet teljes pontossággal megadta; a gravitációs vöröseltolódás, a Nap közelében haladó fény elhajlása vagy a radarviszhang Shapiro-késése.

Az általános relativitáselmélet egyik legérdekesebb jóslata a gravitációs hullámok létezése, amelyek a fény vákuumbeli sebességével terjednek. Az univerzum energetikailag leghevesebb asztrofizikai eseményei, például fekete lyukak, neutroncsillagok vagy egyéb kompakt égitestek összeolvadásai keltik őket. A Hulse–Taylor-féle kettőspulzár megfigyelése rendkívül pontosan igazolta, hogy a rendszer energiát veszít az eltávozó gravitációs



Karácsonyi Kata fizikusi tanulmányait a Szegedi Tudományegyetemen végezte. Tudományos érdeklődése az égi mechanika, kozmológia és a gravitációelmélet. A LIGO Tudományos Kollaboráció tagja 2025 óta. Jelenlegi kutatási területe a skalár-tenzor gravitációelméletek által jósolt új polarizációs módusok vizsgálata gravitációs hullámformákban, valamint detektálhatóságuk elemzése a LIGO–Virgo észlelésekben.



Keresztes Zoltán a Szegedi Tudományegyetem Elméleti Fizika Tanszékének docense. Kutatási területe a mezőelmélet, valamint az einsteini és alternatív gravitációelméletek. Jelentős eredményeket ért el a sötétenergia-modellek, a bránvilágok, skalár-tenzor elméletek, valamint a kompakt kettős rendszerek pálya- és spindinamikájának, valamint gravitációs sugárzásának elméleti tanulmányozásában.



Cirok Balázs fizikusi tanulmányait a Szegedi Tudományegyetemen végezte. Tudományos érdeklődése a gravitációshullám-észlelések elemzése. A LIGO Tudományos Kollaborációnak 2022 óta tagja. Jelenlegi kutatási területe a módosított gravitációelméletek által jósolt diszperzió, valamint a nem tenzori polarizációs módusok detektálhatóságának vizsgálata a LIGO–Virgo észlelésekben.



Gergely Árpád László a Szegedi Tudományegyetem Elméleti Fizikai Tanszékének egyetemi tanára, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Gravitációfizikai Kutatócsoportjának vezetője. Kutatásait Magyarországon, az Amerikai Egyesült Államokban, Franciaországban, az Egyesült Királyságban és Japánban végezte. Kutatási területe az általános relativitáselmélet és módosításai, a kozmológia, fekete lyukak, gravitációs hullámok, valamint a gravitáció kvantálása.

hullámokon keresztül. A gravitációs hullámok első közvetlen megfigyelése 2015. szeptember 14-én történt [1], a két LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) detektorban. Az esemény forrása két fekete lyuk összeolvadása volt.

Tíz évvel később az eddig észlelt 218 gravitációs hullám-jelenséget a GWTC-4 katalógus tartalmazza [2]. Ezzel a gravitációs hullámok kutatása a modern fizika és csillagászat legizgalmasabb kutatási területei közé lépett. Nemcsak az asztrofizikai források felfedezését és megismerését segíti, hanem lehetőséget ad az általános relativitáselmélet helyességének további tesztelésére is. Erre több okból is szükség van: a kozmológiai megfigyelések alapján a világegyetem összetételének 94%-a csak gravitációsan megnyilvánuló sötét energia és sötét anyag formájában jelenik meg [3]. Ezek a sötét komponensek sem az elektromágneses, sem az erős kölcsönhatásban nem vesznek részt. A gyenge kölcsönhatásban való esetleges részvételükre alapozott megfigyelési kísérletek eddig eredménytelenek voltak. A megoldás az einsteini gravitáció kiegészítése, módosítása lehet. A gravitáció és a természet kvantumos leírásának összeegyeztethetlensége szintén arra utal, hogy egyiket vagy mindkettőt meg kell változtatni egy majdani kvantumgravitációt is magába foglaló mindenségelmélet megalkotásához.

A Lovelock-tétel a négydimenziós téridőben az (1) Einstein-egyenletek unicitását mondja ki, amennyiben a gravitáció olyan divergenciamentes dinamikai egyenletek szerint fejlődik, melyek a metrikában legfeljebb másodrendű, lokális hatásból vezethetők le, és szabadsági fokait kizárólag a metrikus tenzor hordozza [4]. Így a módosított gravitációelmélet hatása vagy négytől különböző dimenziószámában értelmezett, vagy új mezőket (skalár, vektor vagy új tenzor, vagy nemlokális operátorokat, például a d'Alembert-operátor inverzét) tartalmazza, vagy sértik a diffeomorfizmus-invarianciát. A módosított gravitációelméletek közös vonása, hogy legalább egy új szabadsági fokot tartalmaznak az általános relativitáselmülethez képest.

A kvantumgravitáció alacsony energiás határeseteként is felfogható módosított gravitációelméletek napjainkban már nemcsak elméleti megfontolások alapján vizsgálhatók, hanem többek között a gravitációs hullámok megfigyelésével tesztelhetőkké is váltak [5]. A gravitációs hullámokat jelenleg a földfelszínre telepített lézerinterferométerek hálózata detektálja. A hálózatot a LIGO (Hanford és Livingston, Amerikai Egyesült Államok), a Virgo (Pisa, Olaszország) és a KAGRA (Kamioka, Japán) detektorok alkotják, megfigyeléseik feldolgozását pedig a LIGO–Virgo–KAGRA (LVK) Kollaboráció végzi. A szegedi LIGO-csoport több mint egy évtizede tagja a LIGO Tudományos Kollaborációnak. Kutatásainak központjában a kompakt kettősök spinjének és tömegmultipólusainak a pályafejlődésükre és a gravitációs sugárzásukra gyakorolt hatása, valamint a szóba jöhető gravitációs elméletek gravitációshullám-megfigyelésekkel történő tesztelése áll.

A gravitációs hullámok diszperziója

A gravitációs hullámok detektálásul szolgáló, földfelszínen megépített interferométerek az emberi fül érzékenységi tartományába eső frekvenciájú hullámokat képesek detektálni. Az optikai vagy más frekvenciájú elektromágneses hullámok detektálására alkalmas távcsövekkel ellentétben szinte minden irányból érkező gravitációs sugárzásra érzékenyek, néhány vakfolt kivételével. Amikor 2017-ben mindkét LIGO-detektor egy két neutroncsillag összeolvadásából keletkezett gravitációs hullámot mutatott ki [6], a Virgo detektor nem jelzett hasonlót, így – működési hibára utaló ok hiányában – joggal tették fel, hogy a GW170817 gravitációs hullámjel érkezési iránya épp annak a vakfoltján belül helyezkedett el, drasztikusan javítva a forrás égi helyzetének behatárolását. A Fermi és az INTEGRAL gammadetektorok ugyanabból az irányból mindössze 1,7 másodperccel később észlelték a GRB170817A gammakitörést. A térbeli és időbeli egybeesés alapján ez ugyanazon forrásból származik, mint a gravitációs hullám, és egy kilonóvát eredményező összeolvadást kísért. E felfedezés tudománytörténelmi jelentőségét az elkövetkezendő órák, napok, hetek alatt lefolytatott, az elektromágneses spektrum egészét lefedő, pozitív eredményekkel záruló megfigyelések sorra támasztották alá [7].

A GW170817/GRB170817A esemény tizenöt tizedesnyi pontossággal igazolta, hogy a gravitációs hullámok a fénysebességgel megegyező sebességgel terjednek, ahogy az általános relativitáselmélet jóslta [8]. Egy $m_g > 0$ tömegű graviton diszperzióját az $E^2 = (pc)^2 + m_g^2 c^4$ adná meg, ahol E és p rendre annak energiája és hármassimpulzusának nagysága, így a tömeges graviton lassabban terjedne, nevezetesen $v_g = c[1 - m_g^2 c^4/E^2]^{1/2}$ csoportsebességgel. Az esemény a graviton tömegére a szigorú $m_g \leq 1,68 \times 10^{-21}$ eV/ c^2 korlátot adta [9]. Az elektromágneses kísérősugárzással rendelkező gravitációs hullámjelek azonban rendkívül ritkának bizonyultak: az eddigi 218 detektálás között nem volt rá más példa. A gravitációs sugárzás terjedési sebességének (illetve a graviton tömegének) további pontosítását a források asztrofizikai modellezése is bonyolítja.

Felmerül a kérdés, hogy a gravitációs hullámok diszperziójának tanulmányozásából lehet-e következtetni a gravitáció helyes elméletére. A válaszhoz tekintsük a gravitációs hullám módosított diszperziós relációjának (MDR) elméletfüggetlen, általánosabb alakját, mely a standard kozmológiai modellben

$$E^2 = (pc)^2 + A_\alpha (pc)^\alpha \quad (4)$$

alakú [10], ahol α és A_α fenomenológiai paraméterek (az α szerint nincs összegzés). A tömeges graviton esetét $\alpha = 0$ és $A_0 = m_g^2 c^4$ adja (ahol $m_g = 0$ az általános relati-

¹ Az irodalomban az MDR anizotrop, azaz irányfüggő alakja is fellelhető [11]. Az MDR-analízis nem csak kompakt kettősök esetében alkalmazható; megfelelő modell alkalmazásával érvényes marad tetszőleges tranzienst (pl. szupernóva-robbanások okozta) jeleknél is.

tásmélet), a többi hatvány egyéb módosított gravitációelméletek vezető rendű korrekcióinak felel meg, az 1. táblázat szerint. A gravitációs hullám $v_g \equiv dE/dp$ csoportsebességére tehát a vákuumbeli fénysebességtől való kis eltérés vezető rendjében felírható a

$$\left(\frac{v_g}{c}\right)^2 = 1 - \frac{1}{2}(1 - \alpha)A_\alpha(hf)^{\alpha-2} \quad (5)$$

összefüggés, ahol h a Planck-állandót, f pedig a hullám frekvenciáját jelöli (az energia $E = hf$, a de Broglie-reláció értelmében).

1. táblázat. Módosított gravitációelméletek és a megfelelő α paraméterek

α	Gravitációelmélet
4	extradimenziós elméletek [12], Hořava–Lifshitz-gravitáció [13, 14], nem kommutatív téridő-geometriák [15]
3	deformált speciális relativitáselmélet [16]
2,5	multifraktál téridő [17]
0	tömeges graviton
< 0	dinamikus sötét energia [18]

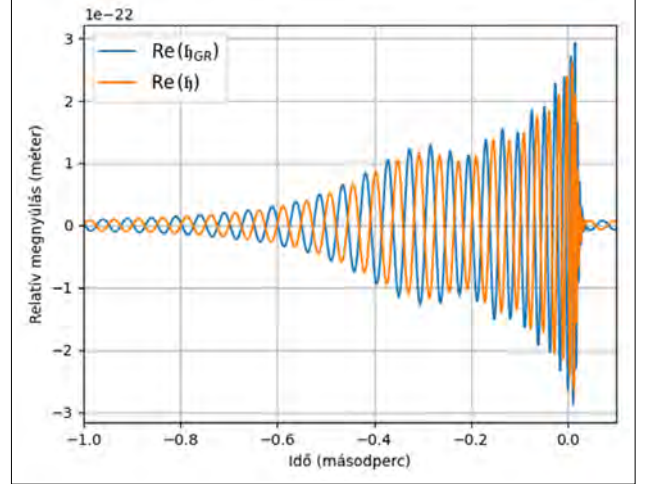
A gravitációs hullám terjedési sebessége az (5) eredmény szerint frekvenciafüggő. Egy kvázikörpályán mozgó kompakt kettős rendszer tagjainak összeolvadása során a (poszt-newtoni sorfejtésben) vezető rendű gravitációs sugárzás frekvenciája a keringési frekvencia kétszerese, az utóbbi viszont növekszik a gravitációs hullámok által elvitt energia miatt. Így a változó frekvenciájú vezető rendű sugárzás terjedési sebessége időfüggő. Másrészt a korrekcióként megjelenő magasabb frekvenciájú felharmonikusok sebessége is eltér a vezető rendű sugárzásétól. Már a legelső, GW150914 gravitációs hullám diszperziójának fenti módszerrel történt elemzéséből is az igen szigorú $m_g \leq 1,2 \times 10^{-22}$ eV/c² felső korlátot sikerült kiróni a graviton tömegére [19]. Az első 90 gravitációs hullám-észlelést tartalmazó GWTC-3 katalógus alapján pedig az LVK Kollaboráció ezt $m_g \leq 2,42 \times 10^{-23}$ eV/c² értékre pontosította [5].

Elvben a $h(f; \theta; \alpha, A_\alpha)$ gravitációs hullámforma eltérhet az általános relativitáselméletben érvényes $h_{GR}(f; \theta)$ hullámformától. Itt θ a forrást jellemző paraméterek halmazát jelöli, mint például a tömegek, spinek, pályaelemek, detektortól számított távolság, relatív orientáció. A módosult hullámformát az (Ω kozmológiai paraméterektől és z vöröseltolódástól is függő) $\delta\Psi_\alpha \sim A_\alpha f^{1-\alpha}$ fáziseltolás jellemzi [20], azaz

$$h(f; \theta; \alpha, A_\alpha) = h_{GR}(f; \theta) e^{i\delta\Psi_\alpha(f; \Omega, z; \alpha, A_\alpha)}. \quad (6)$$

A módosított gravitációelméletekben a jel keletkezésében is eltérések lehetnek az általános relativitáselmélet-hez képest, a terjedési sebességben megjelenő kis eltérések viszont, mivel összeadódnak, az igen távolról érkező hullámok esetén sokkal jelentősebbek. Ez az oka annak,

hogy a (6) egyenletben a módosulás csak a fázisban jelenik meg. Az itt leírtakat az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. Az ábrán h_{GR} jelöli azt az általános relativitáselméleti IMR-PhenomXPHM hullámformát, amelyet a LIGO–Livingston-detektor mérne zajmentes esetben a GWTC-4 katalógusbeli GW230811_032116 esemény forrásának medián paramétereit feltételezve. A módosított diszperziós reláció miatt frekvenciafüggő fáziseltolást tartalmazó h hullámforma $\alpha = 4$ és $A_4 = 10^{-21}$ peV⁻² paraméterekre készült (Az esemény MDR-analízisét és az ábra előállítását Cirok Balázs végezte)

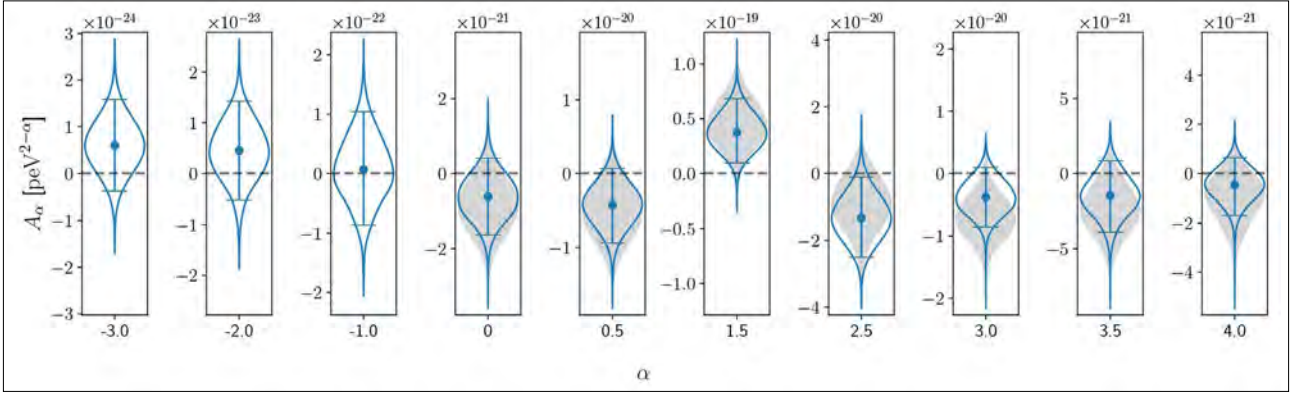
A szegedi LIGO csoport részvételével újabb MDR-analízis készült, a GWTC-3 katalógus feketelyuk-kettősök által keltett gravitációs hullám-jelei közül a 43 leghangosabb elemzésével [21]. Ez az IMRPhenomXPHM hullámforma-modellt [22] veszi alapul, amely kompakt kettősök által keltett gravitációs hullámjeleket modellez az általános relativitáselmélet szerint. Figyelembe veszi a komponens égitestek spinjei okozta pályaprecessziót, valamint a magasabb rendű módusokat is. A bespiralizálás és lecsengés fázisának analitikus modellezése mellett a köztes összeolvadási fázist numerikusan kezeli, a különböző tartományokat pedig illeszti egymással.

A módosított (6) hullámforma alkalmazásakor az α paramétert rögzítjük, különböző értékeire keressük azon paraméterhalmazt, amelyekkel a mért jelet legjobban közelíteni tudjuk. Ehhez a Bayes-tételre alapuló becslést alkalmazunk, miszerint

$$\mathcal{P}(\theta, A_\alpha | d_i) \sim \pi(\theta, A_\alpha) \mathcal{L}(d_i | \theta, A_\alpha). \quad (7)$$

Itt $\pi(\theta, A_\alpha)$ és $\mathcal{P}(\theta, A_\alpha | d_i)$ rendre az i -edik kettős paramétereiről alkotott *a priori* és *a posteriori* (azaz *tapasztalatot megelőző*, illetve *abból származó*) tudásunkat jellemző valószínűségi sűrűségfüggvények. Előbbi megválasztása szimmetriaelvek (pl. nincs okunk feltételezni, hogy az ég adott pontjából nagyobb valószínűséggel várunk jelet, mint egy másiktól) és fizikai érvelések (pl. nincs negatív tömeg) alapján történik.

A $\mathcal{P}(\theta, A_\alpha | d_i)$ annak a valószínűségét jelenti, hogy a mért d_i adatsorban lévő hullámforma a θ, A_α paraméterekkel rendelkezik. Az $\mathcal{L}(d_i | \theta, A_\alpha)$ likelihood pedig annak a valószínűségét adja meg, hogy ha a forrásból jövő hullámformát a θ, A_α paraméterek jellemzik, akkor a d_i



2. ábra. Az általános relativitáselméleti jóslat, vagyis $A_\alpha = 0$ az $\alpha \in \{1,5; 2,5\}$ esetek kivételével a vízszintes kék szakaszokkal jelzett 90%-os kredibilitási intervallumon belül esik [21]. A két kivételes α értéknél az $A_\alpha = 0$ rendre a 0,009 és 0,971 kvantilisoknak felelnek meg. Bár ezekben az esetekben a módosított diszperziót adó elmélet jóslata jobban illeszkedik az adatokra, mint az einsteini gravitációé, ez statisztikailag nem szignifikáns. Az eddigi adatok alapján mind az általános relativitáselmélet, mind annak kis módosulásai megengedettek

adatsort mérjük. Az $\mathcal{L}(d_i|\theta, A_\alpha)$ kifejezi azt is, hogy ha a d_i adatsorból levonjuk a modellezett jelet, az így kapott reziduum mennyire konzisztens a zajjal. Az említett zaj korrelálatlan a különböző interferométerek között, továbbá stacionárius, Gauss-eloszlást követő valószínűségi vektorváltozó. A mérési ciklusok során ez természetesen nem mindig teljesül: ezeket az eseteket szokás glitcheknek nevezni. Számos módszer létezik felismerésükre, kategorizálásukra, illetve az érintett adatsorokból való eltávolításukra, melyet követően a zaj modellezésére felsorolt hipotézisek újra érvényessé válnak. (Így történt például a már említett GW170817 esetén is, amikor ugyanis a LIGO–Livingston-detektor által mért adatsorból kellett egy glitchet eltávolítani [6].) Amennyiben az A_α paraméter értékét szeretnénk becsülni az egymástól kauzális értelemben független N darab esemény alapján, megmutatható, hogy a (7) által adott $\mathcal{P}(\theta, A_\alpha | d_i)$ értékek a következőképpen adják meg annak a valószínűségét, hogy a gravitációs hullám diszperziója A_α az összes mérési adatsorban [21]:

$$\mathcal{P}(A_\alpha | \{d_i\}_{i=1}^N) \sim \pi(A_\alpha)^{1-N} \prod_{i=1}^N \int \mathcal{P}(\theta, A_\alpha | d_i) d\theta. \quad (8)$$

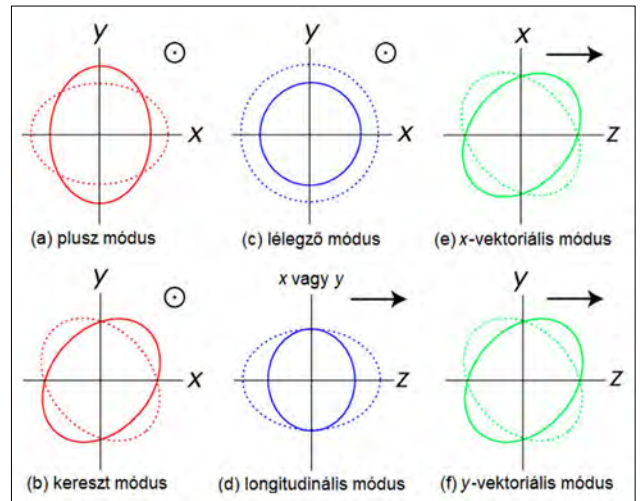
A 2. ábra a GWTC-3 katalógus kiválasztott gravitációshullám-jeleiből származtatott (8) sűrűségfüggvényeket kék görbeként, míg a korábbi elemzés [5] megfelelő eredményeit szürke kontúrokként mutatja be. Az $\alpha \in \{1; 2\}$ exponensek elemzése azért maradt ki, mert az előbbi esetén a hullámforma csak frekvenciafüggetlen fáziseltolódást szenved (6) alapján; míg az utóbbi esetben a gravitációs hullámok csoportsebessége frekvenciafüggetlen (de a vákuumbeli fénysebességtől első rendben eltér). Az exponensek elegendően sűrűn változnak ahhoz, hogy az általános relativitáselmélet által implikált $A_\alpha = 0$ értéktől való szignifikáns eltérés akkor is szembe szökjön, ha valamely köztes α esetén jelenne meg. Az általános relativitáselmélet az összes exponens esetén konzisztens az adatsorokkal, azonban az exponensek által lefedett módosított gravitációelméletek is azok.

Az elemzés a graviton tömegének felső korlátját tovább csökkentette az $m_g \leq 2,24 \times 10^{-23}$ eV/c² értékre [21].

A gravitációs hullámok polarizációi

A gravitációs hullámok polarizációi a gravitációs elméletek másféle tesztelését teszik lehetővé. Az elektromágneses sugárzáshoz hasonlóan a gravitációs sugárzás is polarizált, azonban amíg az előbbi polarizációs vektorral, addig utóbbi polarizációs tenzorral jellemezhető. A $\square x^a = 0$ hullámegyenletet teljesítő harmonikus koordináták a $g^{cd}\Gamma_{cd}^b = 0$ feltételhez vezetnek, melynek alkalmazásával az (1) Einstein-egyenlet hullámegyenletté válik. Az anyagmentes régiókban ennek megoldásai a

$$h_{ab} = \epsilon_{ab} e^{ik_c x^c} + \epsilon_{ab}^* e^{-ik_c x^c} \quad (9)$$



3. ábra. A gravitációs hullámok hat lehetséges polarizációja, a [23] forrás alapján. Piros jelöli az összes gravitációelméletben megjelenő módusokat. Kék és zöld jelöli a skalár-tenzor, illetve a vektor-tenzor elméletekben szereplő módusokat. A síkhullám z irányban terjed. A folytonos és szaggatott kontúrok időben egymást követik. Például a plusz módus esetén, míg a sajtáthossz az egyik tengely mentén periodikusan növekszik, addig a másik mentén csökken, majd ugyanígy fordítva

síkhullámok, ahol k_c a négyes hullámvektor, x_c a téridő-koordináták, ϵ_{ab} a polarizációs tenzor, ϵ_{ab}^* pedig annak komplex konjugáltja. Ezek az elektromágneses síkhullámok analógiái. A polarizációs tenzor eredetileg tíz független komponenséből a harmonikus koordináták választása az $\epsilon_{ab}k^b = 0$ feltétel miatt csak hat független komponenset hagy meg. Mivel a harmonikus koordináták nem egyértelműek, megfelelő mértékválasztással (terjedési irányra transzverzális, spúrmentes) a polarizációs tenzor független komponenseinek száma kettőre csökken, vagyis a síkhullám polarizációs tenzora csak két polarizációs módust tartalmaz. Ha egy terjedési irányra merőleges síkban elhelyezkedő részecskegyűrűn haladna át a hullám, az periodikusan oszcillálna a polarizációs módusnak megfelelően. Bár az általános relativitáselmélet szerint csak kétféle módus létezhet, a módosított gravitációelméletekben hat módus is megjelenhet, amelyeket a 3. ábra mutat be.

Egy z irányban terjedő gravitációs hullám esetén a hat önálló polarizációs módus: plusz (+), kereszt (×), x -vektoriális (x), y -vektoriális (y), lélegző (b) és a longitudinális (l) skalár. A módusok térbeli polarizációs mátrixai [24]:

$$\epsilon_{ab}^{(+)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \epsilon_{ab}^{(\times)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \epsilon_{ab}^{(x)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

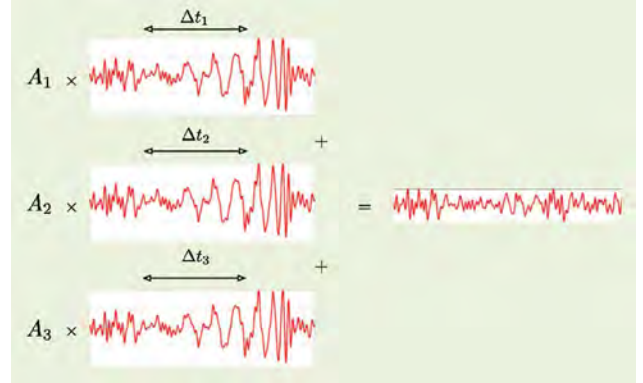
$$\epsilon_{ab}^{(y)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \epsilon_{ab}^{(b)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \epsilon_{ab}^{(l)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Skalár-tenzor elméletekben (pl. Horndeski-elmélet-család) a skalármező skalár módust gerjeszt a + és × tenzoriális módusok mellett. A skalármódus szétválasztható lélegző és longitudinális módusokra. Az előbbi az x és y tengely mentén egyszerre okoz ugyanakkora megváltozást, míg az utóbbi a z irányban terjedve a z tengely mentén okoz longitudinális deformációkat. A vektor-tenzor elméletekben a gravitáció közvetítője a metrikus tenzor és egy vektormező, ezekben x -vektoriális vagy y -vektoriális módusok gerjesztődhetnek. A vektormódusok az x és az y irányban okoznak transzverzális deformációkat.

A gravitációs hullám a felsorolt polarizációk lineáris kombinációit tartalmazhatja. Az LVK interferométerhálózat egymástól különböző detektorkonfigurációi és elhelyezkedései a polarizációs módusok észlelhetőségét teszik lehetővé. A nem tenzoriális polarizációk kimutatása vagy kizárása kulcsfontosságú tesztje az általános relativitáselméletnek, bár megemlítendő, hogy észleléskor esetenként a detektor karjai pont úgy állhatnak a beérkező gravitációs hullámhoz képest, hogy bizonyos polarizációs módusok nem észlelhetők [25].

A gravitációs hullámok polarizációjának vizsgálatához a szegedi LIGO-csoport a modellfüggetlen null adatfolyam („null stream”) módszerének alkalmazásával

járul hozzá. A null adatfolyamot – egyféle értelmezés szerint – úgy foghatjuk fel, mint a detektorhálózat jeleiből képzett olyan lineáris kombinációt, amellyel a tenzoriális módusok kioltják egymást (4. ábra). Ez esetben a maradék jel csupán zajból és nem tenzoriális polarizációból állhat.



4. ábra. A null adatfolyam szemléltetése. A Δt_i , A_i paraméterek időkétségek, illetve kombinációs együtthatók (Az ábra szerzője: Peter T. H. Pang)

A null adatfolyamot két statisztikai eljárás, a frekventista és a Bayes-módszer is felhasználja. A polarizációk kutatásának szempontjából máig a Bayes-módszer bizonyult előnyösebbnek, mivel ezen statisztikai következtetésnek nem előfeltétele a gravitációshullámforrás pontos égi koordinátáinak ismerete. A frekventista módszer, amely esetén szükséges a forrás pontos lokalizációja, csak az említett GW170817 eseményre alkalmazható. Ez az esemény egymagában nem szolgáltat elegendő információt a módosított gravitációelméletekben megjelenő polarizációk létezéséről. Amikor több olyan észlelésünk lesz, ahol elektromágneses sugárzás kíséri a gravitációs hullámot, a frekventista módszer eredményesebbé válik [26].

Mind a frekventista, mind a Bayes-módszerben feltételezhetjük, hogy csak tenzoriális polarizációval rendelkező gravitációs hullámot észlelünk, majd az attól való eltérést kereshetjük a módszernek megfelelően. A frekventista esetben az eltérést a

$$p = \int_{E_{\text{null}}}^{\infty} \chi_k^2(x) dx \quad (11)$$

p értékkel jellemezzük, ahol x integrálási változó (annak a valószínűségi változónak a lehetséges értékeit jelöli, amely χ^2 eloszlású), χ_k^2 pedig a χ^2 -eloszlás sűrűségfüggvénye k szabadsági fokkal, amely k darab egymástól független standard normális valószínűségi változó négyzetösszegének eloszlása. Az

$$E_{\text{null}} = \sum |z|^2 \quad (12)$$

menyiség a nullenergia, amely a z null adatfolyamból számolt mennyiség. A null adatfolyam meghatározott diszkrét idő-frekvencia pixelek² felett van összegezve.

² A gravitációshullám-jeleket spektrogramokon detektálják. Az idő- és frekvenciatengelyek mentén az adatok diszkrétizáltak.

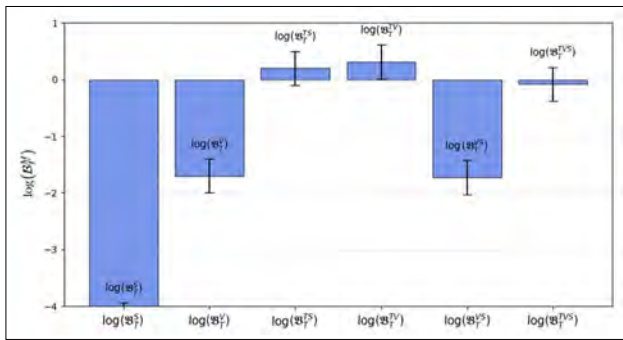
Abban az esetben, amikor a nullenergia értéke nagy, kis p értékhez jutunk. Ha a p érték egy adott határon aluli, a null adatfolyam a zajon kívül tartalmazhat olyan gravitációs hullám-járulékokat, amelyek nem tenzoriális polarizációkhoz tartoznak. A Bayes-módszer másféle megközelítést használ. A tiszta és kevert módusú eseteket az $M = T, S, V, TS, TV, VS, TSV$ betűkombinációkkal jelöljük, ahol T, S, V a tisztán tenzoriális, skaláris és vektoriális polarizáció, TS, TV, VS, TSV pedig az ezekből kevert polarizációk. A Bayes-módszerben összehasonlítjuk az alap $\mathcal{H}_T$ hipotézist (csak tenzoriális módus szerepel) a $\mathcal{H}_M$ tetszőleges polarizációjú hipotézissel. A módszerben a likelihood χ^2_k eloszlást követ. A forrás égi koordinátái ismeretének hiányában az esemény θ_M paraméterei felett marginalizálást végzünk, amelynek lényege, hogy teszünk egy *a priori* feltételezést azokra a paraméterekre, amelyeket nem ismerünk³, majd integrálást végzünk a feltételezett tartományon. Ezáltal egy becslést kapunk a korábban ismeretlen paraméterértékekre, és akkor is vizsgálhatjuk a gravitációs hullámok polarizációját, amikor nincs elektromágneses megfelelő [27].

A Bayes-módszer kulcsfontosságú paramétere a Bayes-faktor, amely adott hipotézis alatt számolt valószínűség arányát adja meg:

$$\mathcal{B}_T^M = \frac{p(d_i | \mathcal{H}_M)}{p(d_i | \mathcal{H}_T)}. \quad (13)$$

Mivel a Bayes-faktor értéke széles intervallumon változhat, az adatelemzés során szokás a logaritmusát venni. A (13) képlet alapján $\log(\mathcal{B}_T^M)$ pozitív értéke a nem tenzoriális polarizációkat tartalmazó, kevert állapotok preferenciáját sugallja.

A GWTC-3 katalógus az O1, O2, O3 észlelési szakaszokban talált összes gravitációs hullám-észlelést tartalmazza, összesen kilencvenet [5]. Valamennyi gravitációs hullám kompakt kettősök összeolvadásából született.



5. ábra. A GWTC-3 katalógus eseményeiből számolt Bayes-faktorértékek [5] a különböző polarizációs esetekre, 90% kredibilis intervallumokkal. Ahol a $\log(\mathcal{B}_T^M)$ érték közel nulla vagy negatív, az általános relativitáselmélet a preferált gravitációelmélet (az ábra szerzője: Karácsonyi Kata)

Ezek túlnyomó része feketelyuk-kettős, de köztük van az egyetlen neutroncsillag-kettős, valamint néhány feketelyuk-neutroncsillag-kettős is.

³ Például a forrás égi koordinátáit az égbolton egyenletes eloszlásúnak feltételezzük.

A GWTC-3 katalóguson végzett elemzés eredményeit az 5. ábra mutatja be. Ezen észlelésekből számolt Bayes-faktor logaritmusértékek szerepelnek tiszta, illetve kevert polarizációk esetén. A $\log(\mathcal{B}_T^M)$ értékek alapján az O4 előtti adatok szerint vagy az általános relativitáselmélet a preferált, vagy egyelőre nem mutathatók ki a nem tenzoriális módusok. Habár $\log(\mathcal{B}_T^{TS})$ és $\log(\mathcal{B}_T^{TV})$ esetén pozitív értékek jelentek meg, ezek nullához igen közeliek, így nem szolgáltatnak egyértelmű bizonyítékot a kevert módusok létezésére.

Kitekintés

A közeljövő gravitációs hullám-csillagászata jelentős előrelépéseket ígér a módosított gravitációelméletek tesztelésében. A jelenlegi földi detektorhálózat érzékenységeinek további növelése, valamint a detektorok számának bővítése lehetőséget teremt a gravitációs hullámok diszperziójának és polarizációjának sokkal pontosabb vizsgálatára, így szigorúbb korlátok állíthatók majd fel a lehetséges eltérésekre az általános relativitáselmélettől. A megfigyelésekre épülő statisztikai elemzések egyre nagyobb adathalmazokon lesznek elvégezhetőek, ami növeli a nem einsteini jellegű hatások kimutatásának esélyét. Emellett a jövőbeni űrdetektorok (például a tervezett LISA) a jelenleginél alacsonyabb frekvenciájú források megfigyelésével a gravitáció nagyobb időskálán való tesztelését teszik lehetővé, hozzájárulva a sötét energia, a sötét anyag, a módosított gravitációelméletek és egy esetleges kvantumgravitációs elmélet jobb megértéséhez. Mindezek együtt biztosítják, hogy a gravitációs hullámok a következő évtizedekben a fundamentális fizika egyik legfontosabb kutatási eszközévé váljanak.

Irodalom

1. The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration (2016): Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.*, 116, 061102.
2. The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, and the KAGRA Collaboration (2025): GWTC-4.0: Updating the gravitational-wave transient catalog with observations from the first part of the fourth LIGO-Virgo-KAGRA Observing Run, LIGO Document P2400386.
3. DESI Collaboration, DESI DR2 Results II (2025): Measurements of baryon acoustic oscillations and cosmological constraints. *Phys. Rev. D* 112, 083515.
4. D. Lovelock (1972): The four dimensionality of space and the Einstein tensor. *J. Math. Phys.*, 13, 874.
5. The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, and the KAGRA Collaboration (2025): Tests of general relativity with GWTC-3. *Phys. Rev. D* 112, 084080.
6. The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration (2017): GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys. Rev. Lett.*, 119, 161101.
7. The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, Fermi Gamma-Ray Burst Monitor, INTEGRAL, IceCube Collaboration, and other collaborations (2017): Multi-messenger observations of a binary neutron star merger. *Astrophys. J. Lett.*, 848, L12.
8. The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, Fermi Gamma-Ray Burst Monitor, and INTEGRAL (2017): Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A. *Astrophys. J. Lett.*, 848, L13.

9. Shoom A. A., Kumar S., Krishnendu N. V. (2022): Constraining mass of the graviton with GW170817. arXiv:2205.15432.
10. Mirshekari S., Yunes N., Will C. M. (2012): Constraining Lorentz-violating, modified dispersion relations with gravitational waves. *Phys. Rev. D* 85, 024041.
11. Kostecký V. A., Mewes M. (2016): Testing local Lorentz invariance with gravitational waves. *Phys. Lett. B* 757, 510.
12. Sefiedgar A. S., Nozari K., Sepangi H. R. (2011): Modified dispersion relations in extra dimensions. *Phys. Lett. B* 696, 119.
13. Hořava P. (2009): Membranes at quantum criticality. *J. High Energy Phys.* 03, 020.
14. Hořava P. (2009): Quantum gravity at a Lifshitz point. *Phys. Rev. D* 79, 084008.
15. Garattini R., Mandanici G. (2011): Modified dispersion relations lead to a finite zero point gravitational energy. *Phys. Rev. D* 83, 084021.
16. Amelino-Camelia G. (2010): Doubly-special relativity: Facts, myths and some key open issues. *Symmetry*, 2, 230.
17. Calcagni G. (2017): Lorentz violations in multifractal spacetimes. *Eur. Phys. J. C* 77, 291.
18. Baker T., Barausse E., Chen A., de Rham C., Pieroni M. (2023): Testing gravitational wave propagation with multiband detections. *JCAP*, 2023, 044.
19. The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration (2016): Tests of general relativity with GW150914. *Phys. Rev. Lett.*, 116.
20. Ezquiaga J. M., Hu W., Lagos M., Lin M. X., Xu F. (2022): Modified gravitational wave propagation with higher modes and its degeneracies with lensing. *JCAP*, 2022, 016.
21. Baka T., Cirok B., Haris K., Noller J., Krishnendu N. V. (2025): Testing general relativity with gravitational waves – improving and extending modified dispersion relation tests. arXiv:2511.00497.
22. Pratten G., García-Quirós C., Ramos-Buades A., Héctor E., Mateu-Lucena M. (2021): Computationally efficient models for the dominant and subdominant harmonic modes of precessing binary black holes. *Phys. Rev. D* 103, 104056.
23. Nishizawa A., Taruya A., Hayama K., Kawamura S., Sakagami M. (2009): Probing nontensorial polarizations of stochastic gravitational-wave backgrounds with ground-based laser interferometers. *Phys. Rev. D* 79, 082002.11
24. Capozziello S., Faraoni V. (2011): Beyond Einstein Gravity. Springer.
25. Dong Y.-Q., Liu Y.-Q., Liu Y.-X. (2024): Polarization modes of gravitational waves in general modified gravity: General metric theory and general scalar-tensor theory. *Phys. Rev. D* 189, 044013.
26. Pang P. T. H., Lo R. K. L., Wong I. C. F., Li T. G. F., Van Den Broeck C. (2020): Generic searches for alternative gravitational wave polarizations with networks of interferometric detectors. *Phys. Rev. D* 101, 104055.
27. Wong I. C. F., Pang P. T. H., Lo R. K. L., Li T. G. F., Van Den Broeck C. (2021): Null-stream-based Bayesian unmodeled framework to probe generic gravitational-wave polarizations. arXiv:2105.09485.

KVANTUMTÉR-E A GRAVITÁCIÓS ERŐTÉR?

Patkós András

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizikai Intézet, Atomfizikai Tanszék, Budapest

E-mail: bandisanyi.patkos@gmail.com

A négy alapvető kölcsönhatás közül hármat, azaz a magerőt kialakító *erős*, a béta-bomlásért felelős *gyenge* és az atomfizikaitól makroszkopikus léptékig ható *elektromágneses* kölcsönhatást erőterkvantumok közvetítik. Nagy pontosságú elméleti tárgyalásuk a források és erőkerek lokális közelhatásával történik. A tömeges testek által kialakított gravitációs mező forrásaitól elszakadva terjedő metrikus zavarok felfedezése előtt a két test közötti tömegvonzást a távolható newtoni erővel tárgyalták. Einstein gravitációelméletében az égitestek a többi által kialakított görbült téridőben végeznek tehetetlenségi mozgást. Ebben sincs helye a gravitáló testek között közvetített lokális kölcsönhatásnak.¹ Csak a gravitációs hullámok sikeres észlelését követően kaphatott aktualitást a kérdés: a téridő metrikus zavarainak önálló dinamikájú

terjedésében diszkrét alkotórészek (azaz *gravitonok*) haladnak-e?

1. A foton létezésének bizonyításából meríthető útmutatás

A kérdésre választ kereső kutatók a *fotonok* kimutatásával analóg módon igyekeznek eljárni [1]. Ugyan a fotoeffektusra Einstein által 1905-ben adott, az energiamérlegen alapuló magyarázat kihasználta a fémre beeső fényhullámot felépítő energiacsomagok fogalmát, a kilépő elektronáramnak a beeső intenzitással vett arányossága klasszikus hullám esetében is belátható. Küszöbfrekvencia pedig a fém elektronszerkezetének a kvantáltságát (a sáv-szerkezetből) feltételezve klasszikus fényhullám esetén is fellép. Bohrt és sok más kortársát csak egy ettől független jelenség, az elektronon történő fényszórás, azaz a Compton-effektus győzte meg 1924-ben a fényrészecskék létezéséről.

A gravitációs hatás azonban sokmilliószor gyengébb az elektromágnesesnél, ezért a graviton-anyag ütközésen alapuló gravitonbizonyíték megfigyelése reménytelen. A foton létének bizonyítása önmagában a sugárzási mező intenzitásának mérésére támaszkodva csak az 1970-es 1980-as évek fordulóján sikerült, mégpedig speciális intenzitásfluktuációkat mutató nyalábok fénystatisztikájával.



Patkós András akadémikus az ELTE emeritus egyetemi tanára. Elméleti fizikus, aki a kvantumtérelméletek megoldási módszereit fejleszti, az erős és az elektromágneses anyag fázisátalakulásait, azok kozmológiai szerepét kutatja. Számos tankönyv (társ-) szerzője. Rendszeresen ír tudományos-népszerűsítő cikkeket is.

A klasszikus esettel való összevetés szempontjából a legalkalmasabb a sugárzási tér valamely módusának állapotát jellemző sűrűségmátrix ún. koherensállapot-reprezentációjának használata:

$$\rho = \int d^2\alpha P(\alpha) |\alpha\rangle\langle\alpha|, \quad \int d^2\alpha P(\alpha) = 1. \quad (1)$$

Az α komplex paraméterrel jellemzett koherens állapotok halmaza túlteljes (nem kölcsönösen ortogonális) állapotrendszer alkot. Súlyfüggvényének normalizációja a sűrűségmátrix átlóösszegére (spúrája) vonatkozó megkötés következménye. Az egyszerűség kedvéért egyetlen $\mathbf{k}$ hullámvektorhoz és ϵ polarizációhoz tartozó módus jelenlétét tételezzük fel, az általánosítás sok gerjesztett hullámvektormódusra nyilvánvaló. Az $|\alpha\rangle$ koherens állapotra érvényes az

$$\epsilon_k \mathbf{E}^{(+)}(\mathbf{k}, \epsilon_k, \mathbf{x}) |\alpha\rangle = \alpha e^{i\mathbf{k}\mathbf{x}} |\alpha\rangle \quad (2)$$

összefüggés, ahol $\mathbf{E}^{(+)}$ az elektromos térerősség operátorának ún. pozitív frekvenciás része. Ezt és adjungáltját összeadva kapjuk meg a valós vektortér operátorát: $\mathbf{E} = \mathbf{E}^{(+)} e^{-i\omega t} + \mathbf{E}^{(-)} e^{+i\omega t}$. Ez biztosítja, hogy $t = 0$ -kor

$$\frac{\langle\alpha| \epsilon_k \mathbf{E}(\mathbf{k}, \epsilon, \mathbf{x}) |\alpha\rangle}{\langle\alpha|\alpha\rangle} = \alpha e^{i\mathbf{k}\mathbf{x}} + \alpha^* e^{-i\mathbf{k}\mathbf{x}}. \quad (3)$$

A nyaláb intenzitásába adott járulék szempontjából a koherens állapot a fény $\sim \alpha$ komplex amplitúdójú Fourier-komponenseként viselkedik. A koherens paraméterre integrálással adódik a módusteljesítmény intenzitása:

$$I = \int d^2\alpha P(\alpha) I_\alpha, \quad I_\alpha = |\alpha|^2. \quad (4)$$

A klasszikus esetben $P(\alpha) \geq 0$, azaz valószínűségi jelenség társítható hozzá (határozott α_0 paraméterű koherens fény esetében a valószínűsége sűrűség a szinguláris határ esetbe megy át). A sugárzás nem klasszikus jellegére vitathatatlan bizonyítékot a sugárzási mező állapotát jellemző $P(\alpha)$ mennyiség értelmezési tartományában $P(\bar{\alpha}) < 0$ tulajdonságot mutató $\{\bar{\alpha}\}$ részhalmaz megjelelése szolgáltat!

Szokásos termális fényforrások esetén a koherencia-időt jóval meghaladó detektálási T időtartam esetén a detektált fotonok száma Poisson-eloszlást követ. (Koherens állapotú fényre ugyanez a statisztika egzaktul megvalósul.) A beütések számának várható értéke arányos a fényáram intenzitásának Φ értékével és a T mérési idővel: $\bar{N} = \eta\Phi T$. Olyan klasszikus forrást tételezünk fel, amelynek árama valamilyen $P_{\text{klassz}}(b)$ eloszlás szerint véletlenszerűen változó b paramétertől függ. A beütések N számának $p(N)$ eloszlását úgy kapjuk meg, hogy az adott b -hez tartozó

$$\Pi(N|b) = \frac{1}{N!} (\eta\Phi(b)T)^N e^{-\eta\Phi(b)T} \quad (5)$$

Poisson-eloszlásokat még b -re átlagoljuk:

$$p(N) = \int db P_{\text{klassz}}(b) \Pi(N|b). \quad (6)$$

A beütések várható értéke a Poisson-eloszlás ismert $\bar{N}_b =$

$\eta T \Phi(b)$ tulajdonságát használva:

$$\begin{aligned} \bar{N} &= \int db P_{\text{klassz}}(b) \bar{N}_b = \eta T \int db P_{\text{klassz}}(b) \Phi(b) \\ &\equiv \eta T \langle \Phi \rangle_{\text{klassz}}. \end{aligned} \quad (7)$$

A beütésszám négyzetes ingadozására

$$\begin{aligned} \Delta^2(N) &= \sum_N p(N) (N - \bar{N})^2 \\ &= \int db P_{\text{klassz}}(b) \sum_N (N^2 - \bar{N}^2) \frac{1}{N!} (\eta\Phi(b)T)^N e^{-\eta\Phi(b)T} \\ &= \int db P_{\text{klassz}}(b) [(\eta\Phi(b)T)^2 + \eta\Phi(b)T - \bar{N}^2] \end{aligned} \quad (8)$$

adódik. Egyszerű átalakítással jutunk a Poisson-eloszlástól való eltérést megadó képlethez:

$$\Delta^2(N) = \bar{N} + \eta T \int db P_{\text{klassz}}(b) (\Phi(b) - \langle \Phi(b) \rangle_{\text{klassz}})^2. \quad (9)$$

Amennyiben a fluxus nem ingadozik, visszakapjuk a Poisson-eloszlás tulajdonságát. A klasszikus ingadozó intenzitású forrás esetében, amikor $P_{\text{klassz}}(b) \geq 0$, a mért ingadozás nagyobb a Poisson-esetben vártnál.

Ismételjük meg a számítást a kvantumelméletben, egyszerű modellt használva az emisszióra és abszorpcióra! Ehhez a koherens állapotokbeli fotonszámeloszlást használjuk:

$$\Pi_{\text{koh}}(N|\alpha) = \frac{1}{N!} e^{-|\alpha|^2} |\alpha|^{2N}, \quad (10)$$

ami

$$\begin{aligned} \Phi(b) &\rightarrow |\alpha|^2, \quad \int db \rightarrow \int d^2\alpha \\ \text{és } P_{\text{klassz}}(b) &\rightarrow P_{\text{kvantum}}(\alpha) \end{aligned}$$

helyettesítéssel a klasszikus forrásmodellel azonos képletekre vezet. Az egyetlen, de alapvető különbség az, hogy $P_{\text{kvantum}}(\alpha)$ speciális fényállapotokra negatív is lehet, azaz a kvantumos fényre az ingadozás mértéke a Poisson-esetnél kisebb, más szóval *Poisson-alatti* tulajdonságot mutathat! Kísérletileg az első Poisson-alatti beütéstatistikát Short és Mandel mérték ki 1983-ban [2].

A kísérletet Na-atomok igen gyenge sugarával végezték. Termikusan párologtatták el az atomokat, amelyeket egy csövön átáramoltatva párhuzamosítottak és alakítottak nyalábbá. A nyaláb gyenge intenzitását jellemző adat, hogy az atomok 10 μ s időtávolságban egyesével követték egymást (térbeli távolságuk 1 cm). A bejövő atomokat előzetesen optikai pumpálással a $3^2S_{1/2} F = 2$ szint $m_F = 2$ mágneses alszintjére gerjesztették. A gerjesztési ciklus $\approx \mu$ s hosszúságú. A mérési ciklusban a nyaláb haladására merőlegesen cirkulárisan polározott fénnyel sugározták be az épp áthaladó atomot. A gerjesztés hatására az atom kizárólag a $3^2S_{3/2} F = 3$ szint $m_F = 3$ alszintjére mehetett át. Ebből fotonkibocsátással a kiinduló állapotba kerülhetett vissza, majd többször újból gerjesztődhetett. Az áthaladás során kisugárzott fotonokat egy 200 ns hosszúságú számlálási szakaszban gyűjtötték össze. Az atomsugár áthaladása során összesen $\sim 10^7$ atom által kisugárzott fotont gyűjtöttek be. A számlálási szakaszban

n foton kisugárzásával megfigyelt események számából, $N(n)$ -ből képezték a statisztikát.

Miután az átmeneti valószínűség kicsi, magasabb foton-szám kisugárzása megfigyelhetetlen volt: $N(n > 3) = 0$. Valójában az $N(n = 2) < N_{\text{Poisson}}(n = 2)$ megfigyelés bizonyította, hogy Poisson-alatti statisztika alakult ki. A $[(\Delta n)^2] - \langle n \rangle / \langle n \rangle = -0,001833 \pm 0,00038$ nyers eredményt különböző hibaforrásokra korrigálták, de a Poisson-alatti jelleget bizonyító negatív előjel nem változott.

A megkülönböztetésre alkalmas másik jellegzetes tulajdonság az egymást követő beütések időbeli korrelációja. Klasszikus emisszió során nincs korlát a közel egyidejűleg kibocsátott fotonok számában, ezért a beütések korrelációja az időbeli távolság növekedtével csökken. Kvantumos forrásra, különösen gyenge atomsugár esetén, csak akkor gerjeszthető egy atom, ha előző gerjesztésétől már sugárzással „megszabadult”, azaz a foton-számlálás lefutásában ritkulást lehet észlelni. Mandel és munkatársai már 1977-ben kimutatták a fent vázolt elrendezésben koherensen gerjesztett Na-atomnyalábokkal a fotonkibocsátás anticsofosodási hatását [3]. Mindezekben a kísérletekben az egyes beütéseket egy teljes foton elnyelésével azonosítják. A foton oszthatatlanságának kérdését elsőként Jánossy és mtsai vizsgálták [4].

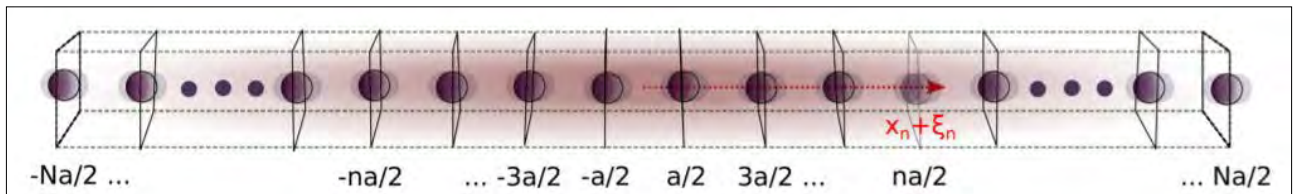
A fentieket összefoglalva a gravitációs hullám kvantum jellegének kimutatásához csak az első lépés a kvantált emisszió (vagy abszorpció) megfigyelése. A második, még nehezebb lépés is elengedhetetlen: a Poisson-alatti gravitonszámlálási statisztika kimutatása. Jelenleg első-sorban az első lépés megvalósíthatóságát diszkutálják.

2. Kvantált gravitációsenergia-abszorpció gravitációs hullámból

A graviton észleléséhez vezető útról optimista konklúziójú tanulmányt közölt 2024 augusztusában a *Nature Communications* vezető természettudományos folyóirat [5]. Az írás bevezetesként áttekintette a graviton kimutathatóságára vonatkozó megfontolások történetét.

Az anyag és a gravitációs tér közötti szélsőségesen gyenge intenzitású kölcsönhatás miatt jó közelítés a kvantálást megelőzően a metrikus térnek a $g_{\mu\nu}$ Lorentz-metrikától való $h_{\mu\nu}$ eltéréseben az egyébként nagyon bonyolult nemlineáris elmélet linearizálása. A linearizált kölcsönhatás

$$\hat{H}_{\text{int}} = -\frac{1}{2} \hat{h}_{\mu\nu} \hat{\Theta}^{\mu\nu} \quad (11)$$



1. ábra. A rezonáns rúd modellezése rugalmas erőkkel jellemzett atomsorral

Hamilton-függvényét elsőként a tragikus sorsú, a sztálini tisztogatások során kivégzett szovjet elméleti fizikus M. P. Bronstein (1906–1938) vizsgálta [6]. Ebben az egyszerű képletben $\hat{\Theta}_{\mu\nu}$ az anyag energia-impulzus tenzorának operátora. Fermi nevezetes aranyszabályát alkalmazva Steven Weinberg (1933–2021) 1972-es tankeönyvében közölt először a kvantummechanikai perturbációszámítás első rendjében becslést arra, hogy egy hidrogénatom $3d \rightarrow 1s$ átmenetével mekkora egy gravitonkvantum emissziójának időegységre jutó valószínűsége, röviden rátája. Az eredmény a megmérhetetlenséget sugalló $\sim 10^{-40}/s$ volt [7].

2013-ban a gravitációs hullám észlelésére készülődő LIGO detektorrendszerrel kapcsolatban tette fel Freeman Dyson (1923–2020) a kérdést: mennyire kellene megnövelni az interferométer érzékenységet annak érdekében, hogy egyetlen graviton észlelésére váljon képessé. A sikeres észlelés immár ismert adataiból következik, hogy az észlelt hullám 10^{36} – 10^{37} gravitont tartalmaz, ha elfogadjuk a hullám kvantált voltát. Ez azt jelenti, hogy a jelenlegi $\Delta L/L \sim 10^{-22}$ relatív hosszúságváltozás helyett $\Delta L/L \sim 10^{-58}$ változást kellene kimutatni. Ez a LIGO 4 km karhosszúságára vetítve a Planck-hossznál ($\sim 10^{-35}$ m) sokkal pontosabb hosszúságváltozás kimutatását követelné, aminek elvi értelme sincsen.² A két világnagyság szkeptikus konklúziója nyomán a graviton létezésének kérdését a legtöbb kutató az eldönthetetlen állítások kategóriájába sorolta.

I. Pikovski és munkatársainak optimizmusa a gravitációsenergia-kvantum abszorpciójának kimutathatóságára két észrevételen alapszik:

- hasznosítható, hogy a gravitációs hullámban feltételezetten terjedő igen nagyszámú graviton stimuláló (indukáló) hatást fejt ki mind a graviton elnyelésére, mind a kvantumozott tulajdonságú anyagból történő emissziójára;
- a Weinberg számításaiban használt hidrogénatom helyett immár lehetséges makroszkopikus méretű anyagminták kvantumozott állapotának huzamos ideig történő stabil fenntartása.

Javaslatukat egy henger keresztmetszetű rezonáns rúdra beeső gravitációs hullámból bekövetkező, a rudat

² Dyson intuitív érvét egy részletesen kidolgozott gravitációs hullám-interferométermodellen elvégzett számításokkal finomította M. Parikh, F. Wilczek és G. Zahariade [8], akik a gravitációs hullám speciális kvantumállapotaira a detektor karhosszúságában kimutatható (!) kvantumozott eredetű ingadozásokat jósolnak. Kár, hogy a gravitációs hullámforrások kvantumállapotát nem lehet célszerűen preparálni.

az alapállapotból az l -dik gerjesztett kvantumállapotba emelő energiaelnyelésre dolgozták ki. A rúd kvantumállapotait az 1. ábrán látható, az x_n egyensúlyi helyzetből ξ_n amplitúdóval kitérített, lineáris erővel kötött atomlánccal modellezték.

A tervezett kísérletben a rudat mikrokkelvin hőmérsékletre lehűtve alapállapotba hozzák, és erre esik be a véges ideig tartó metrikus perturbáció. Makroszkopikus gravitonszámot hordozó hullámot tételeztek fel, ezért a görbület $h_{\mu\nu}$ perturbációját klasszikusan kezelték. A kvantumoptikából jól ismert, hogy egy klasszikus forrás koherens állapotba gerjeszti a kvantumrendszert. Az M tömegű detektorrúd kvantumállapotai közötti átmenetek valószínűségét számították ki a (11) Hamilton-operátor segítségével. A folyamatot a fotoelektromos hatás mintájára *gravitofononos hatás*nak nevezték el.

A számítás eredménye:

$$\Gamma_{\text{stim}} \sim \frac{Mh^2}{l^2}. \quad (12)$$

A rúd M tömegével és h hullámamplitúdójának négyzetével való arányosság számszerűsíti a jelzett két erősítő hatás megnyilvánulását. A ráta maximuma a rezonáns rúd alapállapota és első gerjesztett állapota közötti átmenetre adódik ($l = 1$). Számpéldáikban meglepően magas, 1 Hz-es eseményrátát kaptak a gravitációs hullám amplitúdójára a $h \sim 10^{-22}$ megfigyelt értéket választva és 1800 kg-os(!) aluminium rezonátorrudat használva. Ezt az eredményt folyamatosan érkező jel esetén kapták, miután az átmeneti mátrixelem négyzetét az atomfizikához hasonlóan végtelen időintervallumra integrálták.

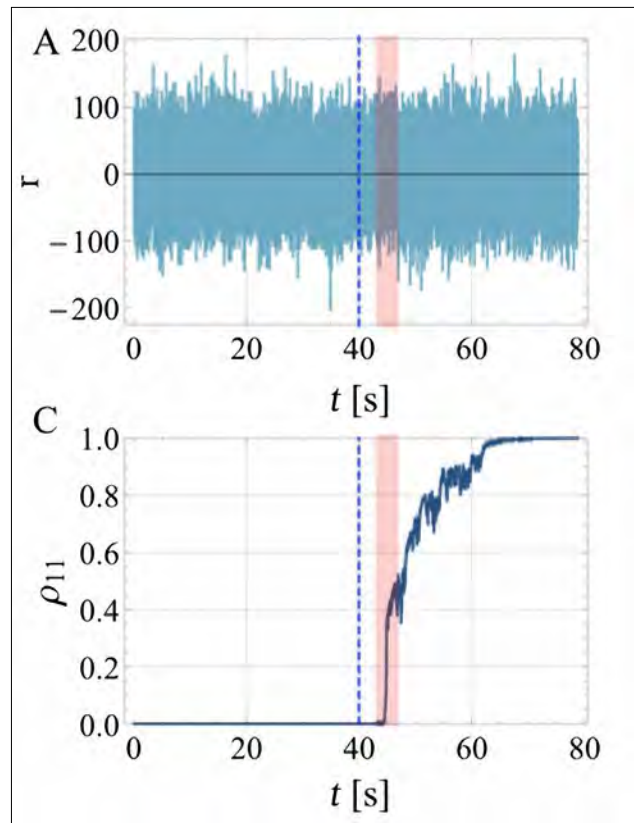
Igazán relevánsnak az anyagtömb kvantumátmenetének olyan megfigyelését tartanák, amely időben egybeesne egy gravitációs hullám észlelésével. Így példaként tekinthető a két neutroncsillag összeolvadásakor keletkező hullám frekvenciamenete és amplitúdója, amely mellett a detektortest besugárzásának időtartama is ismert lesz. Erre az intervallumra numerikus integrálással követhető a detektor kvantumfejlődését jellemző koherens paraméter időfüggése és számítható annak vetülete az abszorpcióval elért valamely nivóra. Egy adott ideig tartó gerjesztés (a hullám áthaladási ideje), rögzített hullámfrekvencia és relatív amplitúdó esetében az első gerjesztési állapotba való átmenet valószínűségét maximalizáló választás adódik a detektor tömegére. Például a neutroncsillagok összeolvadásából megfigyelt jel esetére ($\nu \sim 100$ Hz, $h \sim 10^{-22}$) detektorként berilliumtömböt használva $M \sim 15$ kg-ra a becsülték az optimális tömeget. A detektor energiája szerinti kvantumállapotot folyamatosan monitorozva behatárolható az energiaugrással bekövetkező átmenet időpontjának kis környezete. A hullámforrás folyamatosan változó frekvenciájának ezen intervallumhoz tartozó értéke alapján számolt $\hbar\omega$ energia összevethető az anyagi rendszer energiaváltozásával:

$$\hbar\omega_{\text{obs}} = \Delta E(\text{phonon}). \quad (13)$$

Einstein képletének a gravitofononos effektusra alkal-

mazásával eldönthető, hogy a megfigyelés egyetlen graviton abszorpciójaként értelmezhető-e.

A megvalósíthatóság szempontjából az első kihívás az, hogy elegendő ideig biztosítsuk a rezonáns rúd állapotának fennmaradását. A neutroncsillagok összeolvadásából származó perturbáció áthaladási idejénél tízszer hosszabb ideig fenntartott állapotot megkívánva a termikus fluktuációkkal szemben, $T = 1$ mK hőmérséklet esetén a rúdenergia állandóságát jellemző ún. jósaági tényezőre $Q = 10^{10}$ követelményt kaptak. Q megmondja, hogy egy rezgő rendszer energiája hányszorosa az egy rezgési periódusban bekövetkező energiaváltozásnak. Ebben a szituációban Q jelentése az alapállapot frekvenciájának és sávszélességének hányadosa. A gravitációs hullám Weber-típusú (azaz henger alakban hanghullámgerjesztést eredményező) észlelésére fejlesztett eszközök esetében eddig $T = 100$ mK és $Q = 10^8$ az elért csúcsteljesítmény. A szerzők optimista várakozása szerint a következő évtizedekben a szükséges két nagyságrendnyi javulás elérhető.



2. ábra. A segédrendszer kiolvasó jele (A) alig észrevehetően változik, de biztonságosan jelzi az első gerjesztett szint betöltésének megnövekedését (C) (további részletek a szövegben)

A másik érzékeny pont a gravitációs energiacsomag elnyelésének időbeli behatárolása. Ehhez az első gerjesztett szint betöltöttségének folyamatos monitorozása szükséges. A detektor vizsgált akusztikus módusát gyengén csatolják valamilyen segédrendszerhez, például egy hullámvezetőben haladó fotonok kvantumállapotához. A segédén bekövetkező állapotváltozásból következ-

tenek a kezdetben betöltetlen gerjesztett szint betöltöttségének megváltozására. A 2. ábra egy szimuláció eredményét mutatja, amelynek során egy 1,4 naptömegű összeolvadó rendszerben keletkező 4s hosszúságú gravitációs hullám esett be a rezonáns rúdra. A rúd tömege 21,74 kg, az észlelési frekvencia $\nu = 100$ Hz volt. A rudat a szaggatott vonallal jelzett időpontban inicializálták az alapállapotban, a gravitációs hullám a satírozott intervallumban haladt át. Hatására a segédrendszer a gyenge kölcsönhatás okán fokozatosan (kvantumugrásnak nem nevezhető fokozatossággal) jelezte a detektor első gerjesztési szintre történt átmenetét. Az energiaszintek elkülönítését lehetővé tevő *folyamatos gyenge kvantum-mérést* eddig mikrogramm tömegű testekkel sikerült elvégezni. Megvalósítása e projektben a szerzők szerint is óriási mérnöki teljesítmény lesz.

3. A vita folytatódik

Kétségtelen, hogy jelentős eredmény lenne, ha sikerülne kimutatni kvantált energiamennyiségek elnyelését a gravitációs hullámból. Az energiamérleg felállítása az elnyelt energia és a feltételezett gravitonkvantum energiája között párhuzamba állítható Einsteinnek a fotoeffektust értelmező egyenletével. Ám, mint Carney kritikája [9] hangsúlyozza, a beütési intenzitást a kvantum detektorrendszerrel kölcsönható alkalmas klasszikus gravitációshullám-moddal reprodukálni lehet. Reménykedni lehet a Poisson-statisztikától eltérést mutató fluktuációk észlelésében, bár a gravitációs hullámok profilja nem alakítható a lézerefényhez hasonlóan. Azonban Carney arra is rámutat, hogy a kölcsönhatás extrém gyengesége miatt a gravitációs perturbációk intenzitásfluktuációinak észlelésére eddig javasolt és használt eszközök esetében a Poisson-alatti viselkedés mértéke kimutathatatlanul kicsi.

Eltérő elemzést igényel a LIGO, mert az a beeső sugárzás amplitúdójára, nem pedig teljesítményére érzékeny. Létezhetnek források, amelyekre az amplitúdófluktuáció nagysága kisebb a klasszikus véletlen hullámforrásra számítottnál. Ilyen lenne a *préselt* (squeezed) fénnyel analóg tulajdonságú hullám [8]. Azonban Carney elemzése szerint a LIGO-ban a tükrök közötti távolság változásából észlelt elektromágneses jelbe átvitt hatás túlnyomóan klasszikus amplitúdóingadozással értelmezhető, bár vannak benne klasszikus véletlen jelforrással nem értelmezhető részek is. Ezek mértéke azonban észlelhetetlenül alárendelt súlyú. Összefoglaló konklúziója szerint sem a gravitofononos hatással, sem interferometrikusan nem lehet teljes bizonyítékot nyerni a graviton létezésére.

Pikovski és munkatársai legújabb közleményükben [10] elismerik, hogy az általuk javasolt kísérlet eredménye félklasszikusan is magyarázható. Ugyanakkor hangsúlyozzák, hogy a beeső sugárzásra a hullám amplitúdójának négyzetével arányos eredményt adó klasszikus energiaképletet alkalmazva az energiamérleget sértő következtetésre is lehet jutni, szemben az Einstein-egyenlet példáját követő (13) összefüggéssel.

A zárásul említhető legújabb fejlemény R. Schützhold 2025. októberi, technikailag még kidolgozatlan elvi javaslata fényimpulzus és gravitációs hullám közötti közvetlen energiacsere megvalósítására [11]. Az ötlet a (11) Bronstein-képletre épül, ami egy z tengely mentén haladó $h(t)$ amplitúdójú gravitációs hullámra merőleges síkban terjedő lézerimpulzus esetén a

$$\hat{H} = h(t) \int d^3x [(\partial_y \hat{A}_z)^2 - (\partial_x \hat{A}_z)^2] \quad (14)$$

alakot ölti. Látszik, hogy a $\hat{h}(t) < 0$ félperiódusban y irányban, a $\hat{h}(t) > 0$ félperiódusban x irányban haladó fényimpulzussal való kölcsönhatás vezet energiakinnyezésre a gravitációs hullámból. A fényimpulzus tükrökkel elérhető irányváltását összehangolva $h(t)$ előjelváltásával optimalizálható az energiaátadás. A bejövő lézerimpulzust féligáteresztő tükrökkel két egymásra merőleges haladású komponensre választva elérhető, hogy az egyik komponens energiát nyeljen el, a párja viszont energiát adjon át a gravitációs hullámnak. A javaslat megvalósítása esetén tanulmányozható, hogy összhangban van-e az (13) Einstein-képlettel.

Irodalom

1. Részletes elemzésként ajánlható: Carney D., Domcke V., Rodd N. L. (2024): Graviton detection and the quantization of gravity. *Phys. Rev. D* 109, 044009.
2. Short R., Mandel L. (1983): *Phys. Rev. Lett.*, 51, 384.
3. Kimble H. J., Dagennis M., Mandel L. (1977): *Phys. Rev. Lett.*, 39, 691.
4. Varga Péter (1998): *Fizikai Szemle*, 1998/7, 225.
5. Tobar G., Manikandan S. K., Beitel T., Pikovski I. (2024): Detecting single gravitons with quantum sensing. *Nature Communications*, 15, 7229.
6. Bronstein M. P. (2011): *Gen. Rel. and Gravitation*, 44, 267; az eredetileg 1936-ban orosz nyelven közölt cikk angol fordítása.
7. Részletes számítást közöl: Boughn S., Rothman T. (2006): Aspects of graviton detection: Graviton emission and absorption by atomic hydrogen. *Class. Quant. Gravity*, 23, 5839.
8. Parikh M., Wilczek F., Zahariade G. (2021): *Phys. Rev. D* 104, 046021.
9. Carney D. (2024): Comments on graviton detection. arXiv:2408.00094
10. Tobar G., Pikovski I., Tobar M. L. (2025): Detecting kHz gravitons from a neutron star merger with multimode resonant mass detector. *Class. Quant. Gravity*, 42, 055017.
11. Schützhold R. (2025): Stimulated emission or absorption of gravitons by light. *Phys. Rev. Lett.*, 135, 17.

fizikaiszemle.eft.hu

A honlapon megtalálhatja régebbi és új lapszámainkat, valamint számos mellékletet!

TIZENÖT ÉVES A MAGYAR CSILLAGÁSZATI DIÁKOLIMPIAI MOZGALOM

Kovács József^{1,*}, Szalai Tamás²

¹ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium, Szombathely

²Szegedi Tudományegyetem, TTK Fizikai Intézet, Kísérleti Fizikai Tanszék, Szeged

*E-mail: jkovacs@gothard.hu



88 távcső kémleli az eget – a 2019-ben Magyarország által rendezett 13. Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia észlelési fordulója

Magyarország 2011 óta vesz részt az először 2007-ben megrendezett Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpián (International Olympiad on Astronomy and Astrophysics, IOAA), 2019-ben pedig rendezőként adott helyszínt a sorban akkor már 13. eseménynek. A 15. évfor-

duló kapcsán rövid áttekintést adunk a mozgalomról, a kapcsolódó Athletica Galactica (AG) versenyről és az olimpiai felkészülésről, nem titkoltan azzal a szándékkal, hogy még több versenyzőt és tanárkollégát vonjunk be a folyamatba.



Kovács József, PhD, csillagász, az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium tudományos főmunkatársa. 2012 óta vesz részt aktívan a hazai csillagászati versenyek szervezésében, lebonyolításában. 2016 óta a magyar diákolimpiai csapat egyik vezetője, a 2019-es magyar rendezésű diákolimpián pedig a feladatkitűző bizottság titkári feladatait látta el.



Szalai Tamás, PhD, csillagász, az SZTE TTK Fizikai Intézet Kísérleti Fizikai Tanszékének egyetemi docense. 2009 óta vesz részt csillagászati versenyek szervezésében és lebonyolításában. A 2018-as pekingi és a 2019-es keszthelyi nemzetközi diákolimpián a magyar csapat egyik vezetője volt.

Az *Athletica Galactica* hazai és határon túli magyar ajkú középiskolásoknak szervezett több fordulós, döntővel záruló csillagászati verseny. A szükséges matematikai, fizikai (és csillagászati) ismeretanyag miatt a szervezők elsősorban 11. és 12. osztályos érdeklődő diákok jelentkezését várják, de több példa volt már arra, hogy 10. évfolyamos fiatalok is szép eredménnyel szerepeltek. A versenyre a diákok matematika- vagy fizikatanáruk segítségével jelentkezhetnek az erre szolgáló online felületen. Az AG három fordulóból áll, amelyeket a résztvevők iskoláikban, tanári felügyelet mellett teljesítenek, hasonlóan az OKTV-k első fordulóihoz. A novemberi és decemberi első két alkalmon „klasszikus” (elméleti) feladatok megoldása, míg a januári harmadik fordulóban adatelemzési feladatok várnak az indulókra. A verseny márciusban kétnapos jelenléti döntővel zárul, amelyre a fordulóiban legtöbb pontot szerzett 20–25 diák kap meghívást. A döntő résztvevőinek szintén elméleti és adatelemzési feladatsort kell megoldaniuk, jó idő esetén pedig éjszaka távcsöves észlelési, nappal pedig planetáriumi feladatokkal is meg kell birkóznuk. A korábbi évek gyakorlatától eltérően – logisztikai nehézségek miatt, illetve a nemzetközi versenyek lebonyolítási rendjéhez igazodva – a harmadik fordulóban és a döntőn az adatelemzés már nem számítógéppel, hanem papíron történik, ezért a diákoknak ez irányú képességekkel is rendelkezniük kell. Ilyenek az adatpontok milliméterpapíron történő megfelelő ábrázolása vagy illesztési paraméterek meghatározásához szükséges részletszámítások kézi számológéppel történő elvégzése.

Az AG-t a HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont és a Magyar Csillagászat Nonprofit Kft. szervezi az ország minden csillagászati kutatóhelyéről bevont szakcsillagászok, valamint ma már egyetemista, PhD-hallgató vagy éppen kutató státuszú korábbi versenyzők, diákolimpikonok, diákolimpiai érmesek aktív részvételével, támogatásával. A verseny és a 2019-ig a Bajai Observatórium Alapítvány által koordinált „jogelőd-jének” szervezése során az elmúlt tizenöt évben összegyűlt tapasztalatok, az erős szakmai háttér és a szervezők, felkészítők elkötelezettsége a biztosítéka annak, hogy az induló diákok minden támogatást megkapnak a sikeres szerepléshez, illetve az azt követő olimpiai felkészüléshez.

A középiskolai természettudományos tantárgyi versenyekkel szemben egy csillagászati verseny eleve hátrányból indul, hiszen csillagászati ismeretekkel hivatalos tantervi keretek között szinte egyáltalán nem találkozhatnak a diákok. Ahhoz, hogy a tehetséges tanulók a jó szereplés esélyével vághassanak bele egy ilyen versenybe, rengeteg önálló vagy szakköri munka szükséges, de elengedhetetlen a szaktanár kollégák aktív támogatása is. Sokáig hátráltató tényező volt a magyar nyelvű írott segédanyagok szűk köre. Ezen a területen fontos előrelépés történt 2021 végén, amikor megjelent *Dálya Gergely* (korábbi érmes olimpián) „Bevezetés a csillagászatba – Az atommagoktól a galaxis-szuperhalmazokig” c. könyve, amely közel hatszáz oldalon a középiskolai matematikai és fi-

zikai, valamint az egyetemi szakcsillagászati ismeretek közti nagyon széles és mély szakadék áthidalását tűzte ki célként. A középiskolások és tanáraik így immár kézbe vehetnek egy rendszerezett elméleti anyagot, amely jó alapként szolgálhat a versenyekre történő felkészülés során. 2022-ben pedig megjelent *Kovács József* „Bevezetés a csillagászatba – Feladatgyűjtemény” c. munkája, amely a Dálya-könyvhöz kapcsolódva többek között az országos verseny fordulóin, döntőin és a felkészítőtáborok döntőin 2012 és 2022 között kitűzött elméleti és adatelemzési feladatokból ad rendszerezett válogatást. A kezdő lépések megtételéhez nyújthatnak támogatást *Gróf Andrea* és *Horváth Zsuzsa* középiskolásoknak szóló csillagászati és űrfizikai feladatgyűjteményei, *Vári Gergely Péter* aranyérmes olimpiaként új képletgyűjteménye pedig az AG és az olimpiai felkészülés minden szakaszában hasznos segédeszköz (lásd az AG honlapját). A folyamatot a szervezők központi, illetve kihelyezett szakkörök tartásával is segítik. A Budapesten és néhány vidéki helyszínen (Baja, Győr, Hódmezővásárhely, Mosonmagyaróvár, Szeged, Vác) szervezett szakkörökről részletes tájékoztató olvasható a verseny honlapján.

Bár az AG önálló csillagászati verseny, a szervezők nem titkolt célja, hogy a legjobban szereplő diákok közül válogassák ki azokat a versenyzőket, akik az adott évben a magyar csapat tagjaként az országot képviselhetik az IOAA-n. Magyarország tizenöt éve indult először a diákolimpián, azóta pedig minden évben részt vesz a versenyen legalább egy csapattal – sőt, 2019-ben Keszthelyen közel ötven ország csapatainak nagy meglepetésére rendezőként is bemutatkozott –, 2021-ben pedig több ezüst- és bronzérem, valamint dicséret után az első aranyérmet is sikerült megszerezni.



A 2025-ös 18. Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Olimpián szerepelt csapat (b-j: Zádori Gellért, Bartucz Eszter Bianka, Elekes Dorottya, Elekes Panni, Dobák Bálint) az eddigi legjobb magyar eredményt érte el

A szervezők az AG-döntő első 10–12 helyezettjét hívják meg az olimpiára készülő bő keretbe. A meghívást elfogadókra március végétől július közepéig nagyon intenzív, célzott felkészítés vár. Ennek során a kerettagok több alkalommal összegyűlnek hétvégeken – amikor nemcsak elméleti, de gyakorlati felkészítést is kapnak, például a

piszkás-tetői obszervatóriumban –, miközben tíz héten keresztül hetente újabb feladatsorokat kell megoldaniuk és beküldeniük, de részt vesznek a környező országok által szervezett, és minden évben máshol megtartott úgynevezett miniolimpán (Közép-európai Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia, CEOAA) is, a sorozatot pedig július első felében egy tíznapos, szintén döntővel végződő tábor zárja. A négy hónap alatt elvégzett feladatokra, részdöntőkre kapott súlyozott pontszámok összegéből áll elő minden kerettag végső eredménye. Közülük az öt legjobb kerül be az olimpiára utazó csapatba.

2025-ben – immár második alkalommal – India rendezte a diákolimpiát Mumbaiban, ahol a magyar csapat eddigi legjobb eredményét érte el: fiataljaink két arany-, egy ezüst- és két bronzérmét szereztek a 63 ország 288 diákjának részvételével lebonyolított megmérettetésén. A sikerben a diákok kiemelkedő képességein és a befektetett munkájukon túl minden bizonnyal szerepet játszott az évek során folyamatosan fejlesztett, javított felkészítési folyamat is. 2026 októberében Vietnám, azon belül is Hanoi ad otthont a következő diákolimpiának, amelyre már javában zajlik a felkészülés.

Az AG és az IOAA kiváló lehetőség a csillagászat iránt érdeklődő és pályájukat kutatóként elképzelő fiatalok

számára. Ezt ékesen bizonyítja, hogy az elmúlt tizenöt évben az olimpián részt vett diákok túlnyomó része ma is csillagászattal foglalkozik, az első évek versenyzői közül többen már tudományos fokozattal is rendelkeznek, a későbbiek pedig PhD- vagy egyetemi hallgatóként szintén ebbe az irányba tartanak – sokan közülük külföldi egyetemeken, amelyekre remek ajánlólevél volt a sikeres diákolimpiai szereplés. A szervezők nevében ezúton is szeretnénk köszönetünket kifejezni mindazon tanár kolégák felé, akik évről-évre benevezik érdeklődő diákjaikat az AG versenyre, illetve szerepet vállalnak felkészítésükben és az iskolai fordulók lebonyolításában. Számukra mozgalmunk a szakmai segítségen túl (beleértve könyvek, feladatgyűjtemények, akár távcsövek biztosítását az iskoláik számára) többek között intézménylátogatási és továbbképzési lehetőségeket, vagy éppen pályázatok, illetve mester- és kutatótanári programokhoz szükséges szakmai együttműködések is biztosít.

Az AG versennyel és az IOAA-re történő felkészüléssel kapcsolatos minden információ elérhető az AG honlapján, az aktuális hírek pedig az AG Facebook-oldalán is:

- <https://athleticagalactica.hu>
- <https://facebook.com/athleticagalactica>

MEGEMLÉKEZÉS



Kemény Tamás
(1946 – 2025)

Kemény Tamás 1946. augusztus 8-án született Budapesten. 1969-ben fizikusként végzett az Eötvös Loránd Tudományegyetemen és a Közpon-ti Fizikai Kutató Intézetben, illetve annak jogutódaiban dolgozott nyugdíjba vonulásáig. Dolgozott a Kamerlingh Onnes laboratóriumban, a sheffieldi és a groningeri egyetemeken is, majd 1987-ben Humboldt-ösztöndíjat nyert, és egy évet Stuttgartban, a Max Planck Intézetben töltött.

1994 és 2016 között a Kísérleti Szilárdtestfizikai Osztály vezetője volt. Munkásságát Jánossy-díjjal (1983), az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Gyulai Zoltán-díjával (1984), Akadémiai Díjjal (1991) és MTA Fizikai Díjjal (2005) ismerték el. Közel 150 angol nyelvű tudományos cikk szerzője, társszerzője. 2001-ben a Magyar Tudományos Akadémia doktora lett, majd az MTA emeritus professzora.

Kutatásait kezdetben alacsony hőmérsékletű, majd 1973 után magas hőmérsékletű kalorimetrikus vizsgálatokkal végezte. 1976 után gyorsított amorf ötvözetek atomi és elektronszerkezetét, valamint mágneses tulajdonságait kutatta. Felderítette az amorf fém-metalloid ötvözetek kristályosodási folyamatát, felfedezett egy addig ismeretlen metastabil fémközi vegyületet, ami a fémüvegek szerkezetének új típusú, a korábbiakat cáfoló modelljét alapozta meg. Úttörő szerepet játszott a lézeres olvasztással történő felületi

amorfizáció, a szilárdtest-amorfizáció, valamint a mechanikai ötvözés és amorfizáció vizsgálata terén. Fontos szerepet játszott a nagy érzékenységű mágneses méréseket itthon is lehetővé tevő SQUID berendezés kiépítésében is.

Ez a rövid felsorolás mutatja, hogy Tamás számtalan területen széles körű tudással rendelkezett, ami világosan megmutatkozott a tudományos konferenciákon és szemináriumokon aktív szerepléseiben. Kérdései, észrevételei mindig a téma lényegét érintették. Osztályvezetése során villámhárítóként működött, lehetővé tette a zavartalan, nyugodt munkát. Aktív közszereplő, elkötelezett TDDSZ tag volt. Barátként, munkatársként mindig lehetett rá számítani.

Közvetlen munkatársai és az egykori Kísérleti Szilárdtestfizikai Osztály egésze őrzi emlékét, és tisztelettel adózik munkásságának.

Vincze Imre

AUSTRIA-CROATIA-HUNGARY TRIANGLE (ACHT) MŰHELYKONFERENCIA, 2025. MÁJUS 5-7., BUDAPEST

Fejős Gergely[@], Patkós András

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizikai és Csillagászati Intézet, Atomfizikai Tanszék, Budapest

@E-mail: gergely.fejos@ttk.elte.hu

A közös történelmi és kulturális múlt természetes módon kínált lehetőségeket közvetlen kapcsolatépítésére az elméleti részecskefizikában is. Az első kezdeményezést az 1960-as évtizedben *Marx György*, *Walter Thirring* (Bécs) és *Ján Pisút* (Pozsony) kezdeményezésére létrejött Bécs-Budapest-Pozsony Háromszög Együttműködés valósította meg. Elsődleges céljuk az volt, hogy első nemzetközi bemutatkozásra adjanak lehetőséget a három város egyetemén frissen diplomázott részecskefizikusok számára. A találkozónak a szakmai eszmecserét meghaladó vitathatatlan szerepe volt a „vasfüggöny” átjárhatóságának fokozatos megteremtésében. Az egykor évente változó helyszínen, rotációs szervezésben megvalósult együttműködés a rendszerváltással veszített jelentőségéből és az egyre inkább széttartó szakmai célok miatt a századfordulóra el is halt.

Az új, Budapest-Graz-Zágráb Háromszög Szemináriumsorozatot horvát kezdeményezésre, eredetileg Horvátország Európai Unió csatlakozásának szakmai támogatására 2008-ban hívták életre *Reinhard Alkofer* (Graz), *Bíró Tamás* (Wigner), *Ivan Dadić* (Rudjer Boskovic Inst.) és *Patkós András* (ELTE). A kooperáció fennmaradása immár kizárólag a résztvevőknek nyújtott szakmai többletérték függvénye. Új vonás tehát, hogy a szervezők a kvantumtérelméletek ún. funkcionális megoldási technikáinak fejlesztésében elért eredmények bemutatását ösztönzik (Dyson-Schwinger-, Bethe-Salpeter-egyenlet, egzakt renormalizálási csoportegyenletek), elsődlegesen részecskefizikai alkalmazásokkal, amelyhez természetesen csatlakoznak az ún. rácsérelméleti szimulációk is. A tematikus fókuszáltságtól függetlenül változatlan szándék a regionális együttműködés erősítésének és a fiatal (még diák státusú, illetve posztdoktor) kutatók bemutatkozásának támogatása.

A 2025. évben május 5. és 7. között Budapesten 17. alkalommal találkoztak a régióból érkezett kutatók. Az elméleti részecskefizikai kutatás nemzetköziesedését jól illusztrálja, hogy olasz, szlovén, japán, USA-beli, német, lengyel és portugál előadója is volt a programnak. A konferencia helyi szervezői *Bíró Gábor* (Wigner), *Csanád Máté* és *Fejős Gergely* (ELTE) voltak. A szokásoknak megfelelően a program rendkívül széles spektrumot ölelt fel a modern elméleti és kísérleti részecskefizika területén. A neutrínóoszillációktól és kaonfizikától a hadronstruktúra legújabb vizsgálatain át egészen a kvarkanyag extrém állapotainak kérdéséig számos témakör jelent meg a meghívott előadásokban. A programban helyet kaptak a



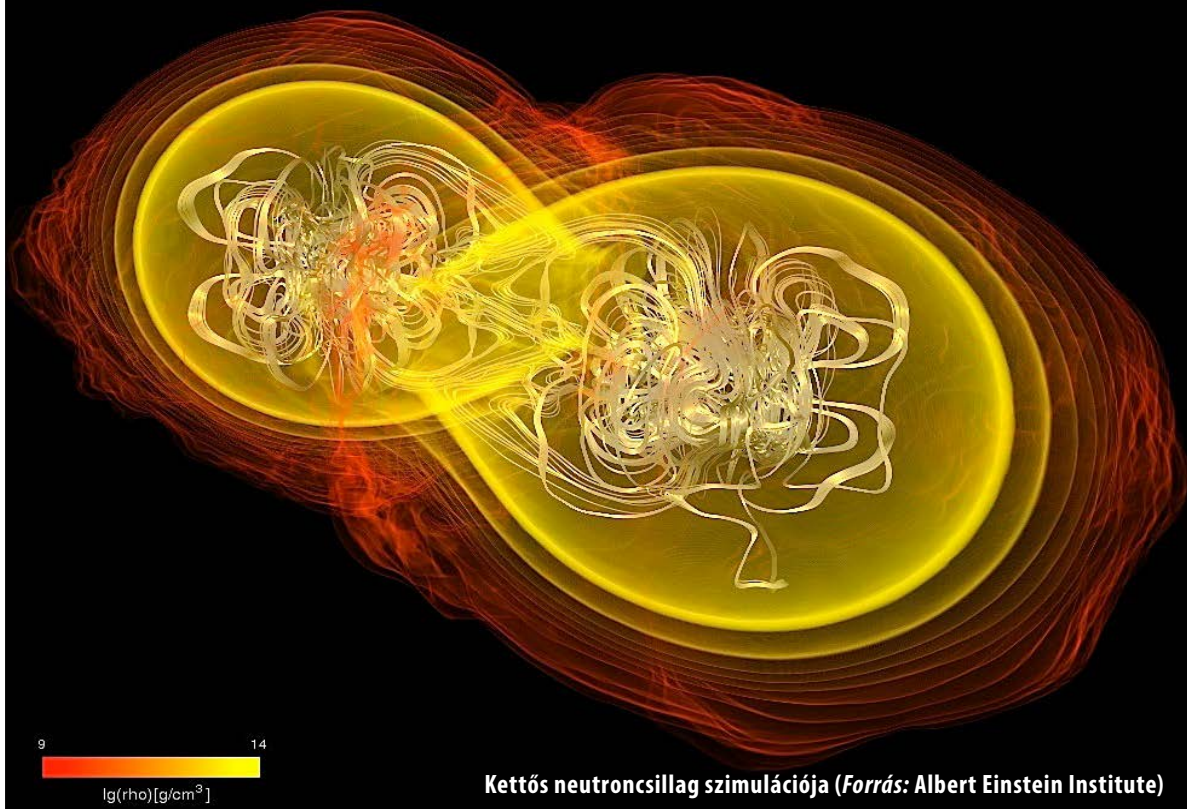
A 2025. évi ACHT konferencia az Eötvös Loránd Tudományegyetem Lágymányosi kampuszán

kompakt csillagok fizikájához kapcsolódó eredmények, az extradimenziók lehetséges hatásai, valamint a sötét hadronokkal foglalkozó új elméleti megközelítések is. Külön blokk foglalkozott a kvantumszindinamika topológikus tulajdonságaival, így az anomális $U_A(1)$ szimmetria kérdéseivel és annak véges hőmérsékletű fejlődésével. Emellett szokásosan erős hangsúlyt kaptak a funkcionális technikák, a multikvarkrendszerek, valamint a komplex Langevin-szimulációk új irányai, amelyekhez már a legmodernebb gépi tanulási módszerek is társultak. Az ELFT részecskefizikai szemináriummal összekapcsolódva a kvantumszindinamikai glueball-gerjesztésekről egy hosszabb, nagyobb közönség előtt meghirdetett nyilvános előadás is a program része volt.

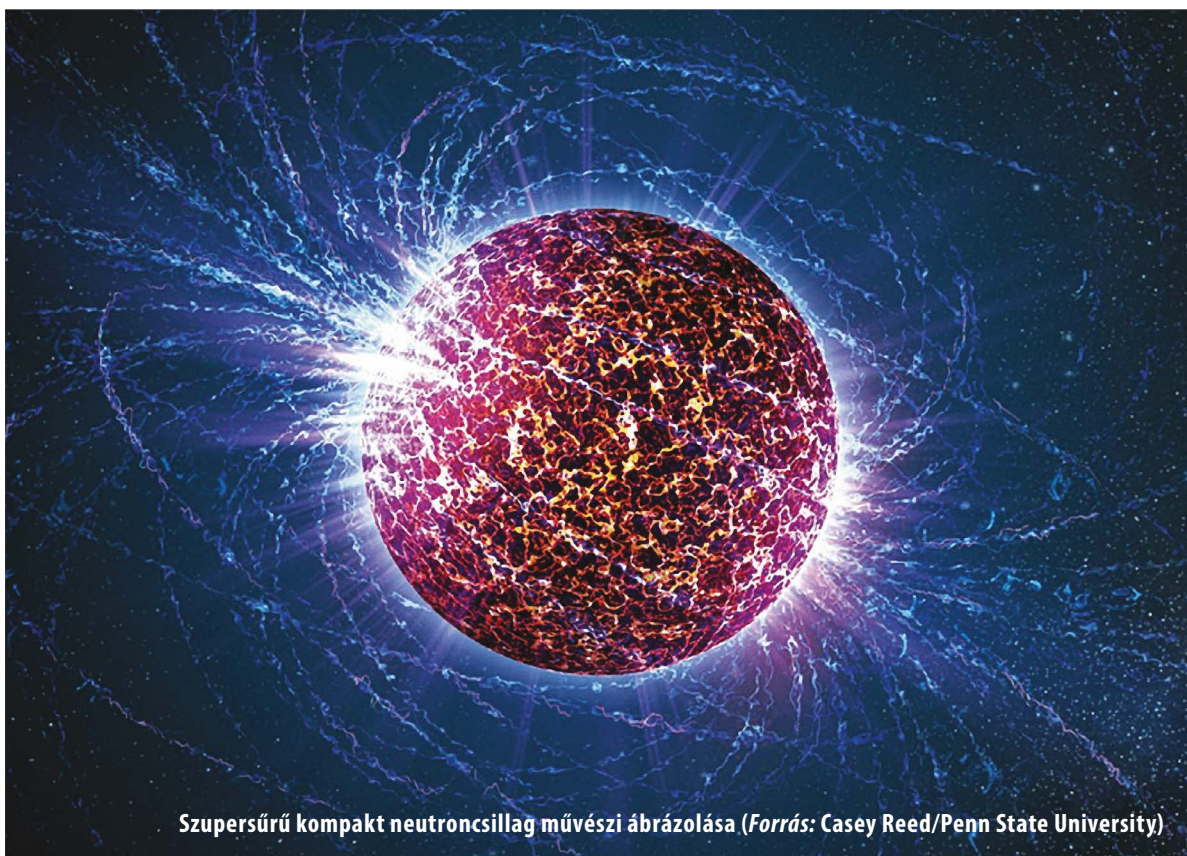
Bár a konferencia eredeti célkitűzése elméleti részecskefizikai kutatások bemutatása, a kísérleti oldal is szép számban képviseltette magát. A nehézion-ütközések femtoszkópiája úgy, mint az exotikus magok szerkezetének feltérképezése ugyancsak fontos részét képezték a tudományos programnak. A zárónapon pedig a partoneloszlások skálaviselkedésén és a Pomeron-Odderon-interferencián át egészen a királis mágneses hatás és a nanofúzió fizikai hátteréig tartó előadássorozat jelezte, hogy a konferencia valóban átfogó képet adott a kortárs részecske- és hadronfizika sokrétű kutatási irányairól.

Az ACHT konferenciasorozat a tervek szerint továbbra is töretlen lendülettel folytatódik, következő alkalommal Horvátországban, várhatóan 2026 őszén. A kb. másfél évente megtartott rendezvény folyamatosan bizonyítja, milyen fontos szerepet tölt be a közép-európai részecskefizikai kutatások összekapcsolásában. A három ország szakmai együttműködése nemcsak erősíti a régió tudományos hálózatait, hanem új lehetőségeket is teremt a kutatók számára nemzetközi párbeszédre és tapasztalatcserére.

$t = 7.4 \text{ ms}$



Kettős neutroncsillag szimulációja (Forrás: Albert Einstein Institute)



Szupersűrű kompakt neutroncsillag művészi ábrázolása (Forrás: Casey Reed/Penn State University)