

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

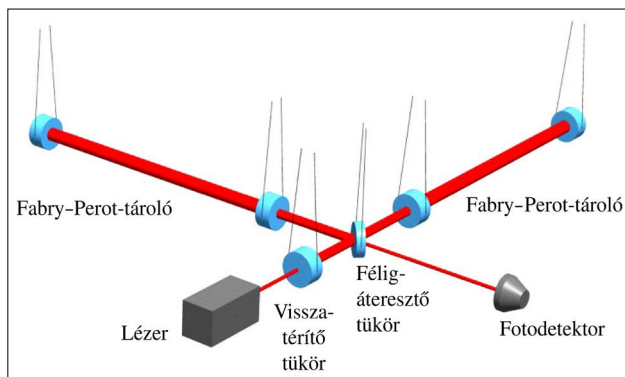


Frei Zsolt Széchenyi- és Prima-díjas fizikus, az MTA doktora, az ELTE egyetemi tanára. Tizenöt évig vezette az ELTE Atomfizikai Tanszékét, három éven keresztül igazgatója volt az ELTE Fizikai és Csillagászati Intézetnek. Jelenleg az ELTE Asztrofizikai és Űrtudományi Centrum igazgatója, a HUN-REN-ELTE 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 naptömegű), 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.

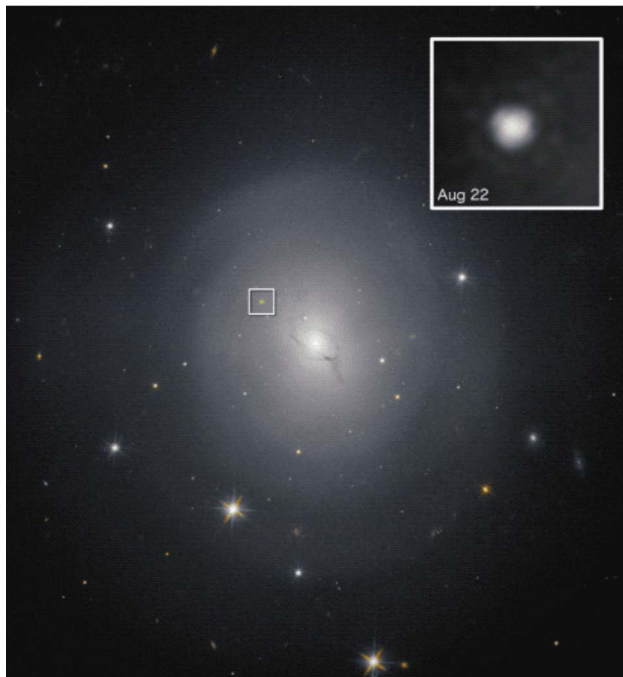
Az elmúlt évtized során a fekete lyukak fizikája néhány röntgen- és rádióforrás vizsgálatától elmozdult egy statisztikai jellegű tudomány felé. A gravitációshullám-katalógusok nemcsak a tömegeket és a pedületeket dokumentálják, hanem az összeolvadások gyakoriságát, kozmikus térbeli és időbeli eloszlását, 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 kilonóva, 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 „standardsziréna-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.

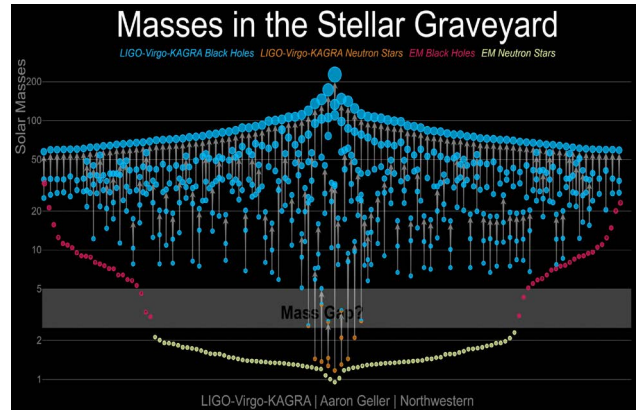
Az esemény egyúttal látványosan demonstrálta egy globális detektorhálózat előnyeit is. Csak a két LIGO-detektor adatai alapján a forrás égi lokalizációja viszonylag pontatlan lett volna, de a Virgo csatlakozása lehetővé tette a gyors háromszögelést, és az égbolton lefedett területet néhány tíz négyzetfokra 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



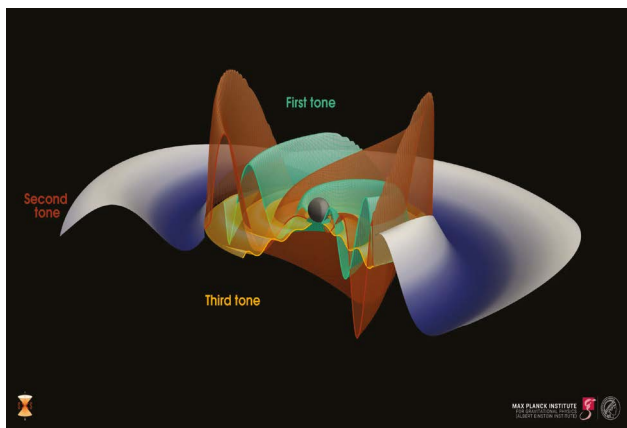
3. ábra. Tömegek a kozmikus temetőben. Ez az ábra a gravitációshullám-megfigyelésekből származó kompakt objektumtömegeket mutatja összevetve a korábban elektromágneses észlelések alapján meghatározott feketelyuk- és neutroncsillag-tömegekkel. A tömegek a függőleges tengelyen (napötömegekben) szerepelnek; 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-asztrfizika 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).

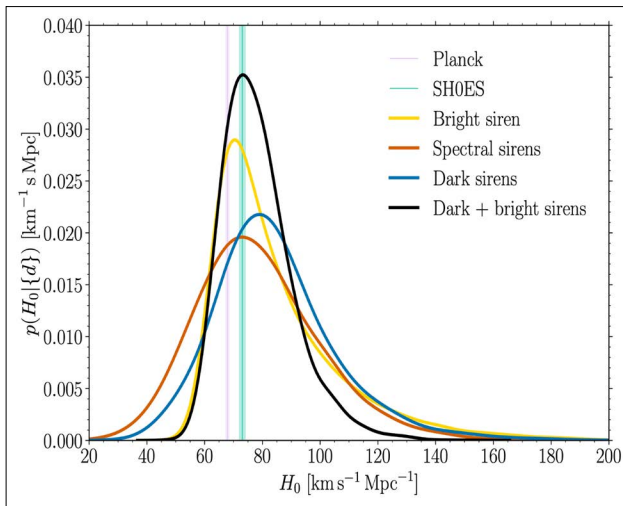
Az első ilyen jellegű analízisek óta a kollaboráció rendszeresen elvégzi ezeket a számításokat, amelyekben az ELTE LIGO-csoportjának kutatói kiemelt szerepet töltenek be, a szükséges asztrofizikai bemenetet pedig a GLADE+ katalógus szolgáltatja. Az elmúlt négy évben a katalógus vezető fejlesztője, *Dálya 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 bespirálózását 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 virágozik 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>