

# MIT TANULTUNK AZ UNIVERZUMRÓL A GRAVITÁCIÓS HULLÁMOK LEGÚJABB MEGFIGYELÉSI IDŐSZAKÁBAN?

Dálya Gergely  
ELTE

Albert Einstein általános relativitáselméletének egyik érdekes elméleti jóslata volt, hogy a téridő nem csak görbülni tud, hanem hullámok is terjedhetnek rajta, amelyeket gravitációs hullámoknak nevezünk. A gravitációs hullámok létezése évtizedeken át pusztán elméleti kérdés volt, mígnem 1974-ben Russell Alan Hulse és Hooton Taylor felfedeztek egy érdekes pulzárt, amelynek rádióimpulzusai a várhoz képest hol egy kicsit előbb, hol egy kicsit később érkeztek. Ezek az időbeli változások szabályos ütemben történtek, amiből a két fizikus arra következtetett, hogy a pulzár egy másik neutroncsillag körül kering. Egy ilyen kettős rendszer pedig remek lehetőséget kínált az einsteini elmélet tesztelésére, ugyanis a gravitációs hullámok kisugárzása révén energiát veszít a rendszer tagjai egyre közelebb kell kerüljenek egymáshoz, és így keringésük fel kell gyorsuljon. A kettős rendszer évtizedeken át történő megfigyelése révén sikerült bizonyítani az elméletet, amiért 1993-ban Nobel-díjban részesült a két kutató.

A gravitációs hullámok első közvetlen detektálására pedig az általános relativitáselmélet publikálása után majdnem 100 évet kellett várni. 2015. szeptember 14-én a két amerikai LIGO gravitációshullám-detektor először észlelte két fekete lyuk egymás körüli keringését és összeolvadását. A LIGO detektorok 4 km-es karhosszúságú, L-alakú, Fabry–Perot-üregekkel felszerelt Michelson-interferométerek, amelyeket az



1. ábra. A LIGO livingstoni detektorjának képe madártávlatból (forrás: LIGO Laboratory).

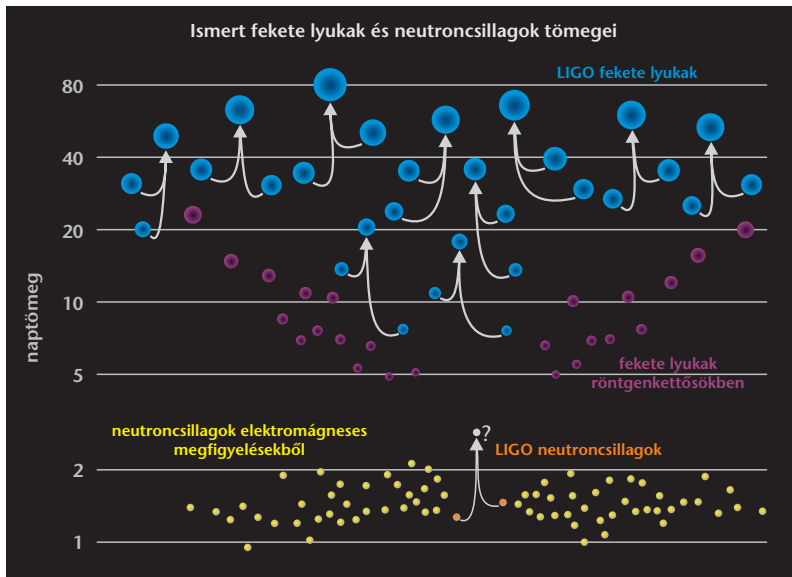
1990-es évek végén kezdtek építeni, majd a tervezett érzékenységgel 2005-ben üzemeltetett először hosszabb ideig. A műszerek a Louisiana állambeli Livingstonban (1. ábra), illetve a Washington állambeli Hanfordban üzemelnek. 2008 áprilisában vette kezdetét a LIGO detektorok nagyszabású fejlesztése; az új detektorok, amelyek az Advanced LIGO (aLIGO) nevet kapták, 2014 végére készültek el, majd az ellenőrzések és tesztelések után 2015 szeptemberében indult az aLIGO első megfigyelési időszaka (O1), amely 2016 januárjáig tartott. Az első megfigyelési időszak alatt három gravitációs hullámot sikerült detektálni: az első, a felfedezés dátuma után GW150914-nek keresztelt hullám két, 29 és 36 naptömegű fekete lyuk egymás körüli keringéséből és összeolvadásából származott, 1 milliárd fényév távolságból.

Az első megfigyelési időszak után egy több, mint egy éven át tartó fejlesztési és tesztelési időszak következett, majd 2016 novemberében megnövelt érzékenységgel kezdődött meg a második megfigyelési időszak (O2), amely 2017 augusztusában ért véget. Ez az időszak több igazi áttörést is hozott a gravitációs-hullám-csillagászatban (2. ábra). Hét további fekete-lyukkettősből származó hullámot fedeztek fel, és a LIGO műszereihez 2017 augusztusában csatlakozott az olaszországi Virgo detektor is, amely 3 km hosszúságú karjaival ugyan kissé kevésbé érzékeny, mint a LIGO detektorok, azonban segítségével – ha mindhárom detektor érzékeli ugyanazt a jelet – sokkal pontosabban lehet meghatározni a forrás helyzetét az ég-

Készült a 30. Magyar Fizikus Vándorgyűlésen (Sopron, 2019. augusztus 21–24.) elhangzott előadás alapján.



Dálya Gergely az ELTE asztrofizikus PhD hallgatója. 2014 óta dolgozik a LIGO kollaboráció tagjaként a gravitációs hullámok forráslokalizációján és kozmológiai alkalmazásain. Emellett 2013 óta a magyar csillagászati és asztrofizikai diákolimpiai csapat felkészítésével foglalkozik.



2. ábra. A LIGO O2 megfigyelési időszakának végéig ismert neutroncsillagok és szteláris fekete lyukak (forrás: LIGO-Virgo / Northwestern / Frank Elavsky).

bolton. Ez a pontosság kulcsfontosságú volt 2017. augusztus 17-én, amikor először észleltek a műszerek két neutroncsillag keringéséből és összeütközéséből származó hullámokat.

A neutroncsillagok összeütközéséből a gravitációs-hullám-jelen túl elektromágneses sugárzást is várunk a színekp szinte egészében. Ennek megfelelően, a LIGO detektorok megfigyelésével szinte egyidőben a NASA Fermi űrteleszkópja is észlelt egy gamma-felvilanást. Feltéve, hogy a két esemény nem független egymástól, egy viszonylag kis égtérületet lehetett kijelölni a hullámok forrásaként. A forráshoz képesti elhelyezkedése miatt a Virgo csak kicsiny jelet rögzített, azonban még ezzel is tovább lehetett pontosítani a forrás helyét. Ezt az égtartományt ezután közel 70 földi és űrteleszkóp kezdte vizsgálni, és sikerült megtalálniuk az összeolvadás utófényét a rádió-, az infravörös, az optikai, az UV- és a röntgentartományban is. Az azonosítást segítette az ELTE-n általunk készített GLADE galaxiskatalógus is, amelyet több független felfedező is használt a lehetséges forrásgalaxisok kiválasztásához (3. ábra).

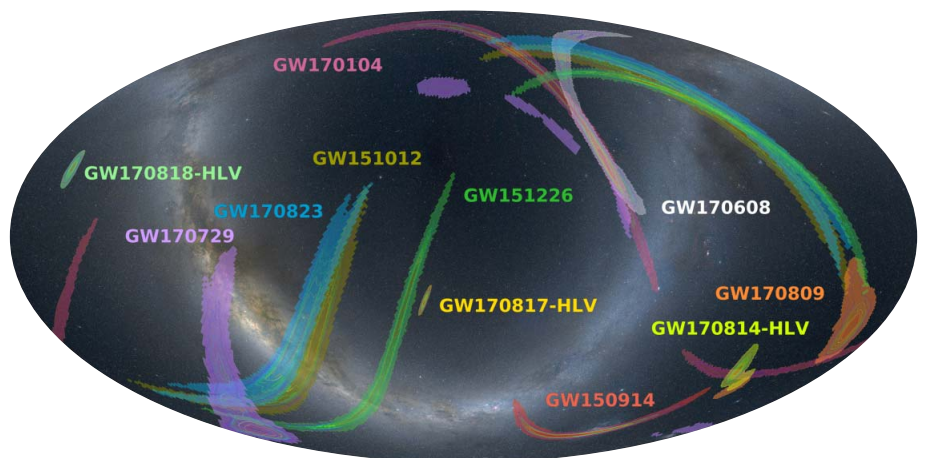
A sikeres második megfigyelési időszak után ismét egy hosszabb szünet következett, amelynek során megduplázták a lézerek teljesítményét, és lecserélték a használt tükrök nagy részét is. A fejlesztés eredményeként a LIGO detektorok érzékenysége az előző időszakhoz képest 40%-kal nőtt, míg a Virgo detektoré közel kétszerese lett. Így a 2019. április 1-jén indult harmadik megfigyelési

időszak (O3) során a rendszer jóval messzebből képes gravitációs hullámokat észlelni. Az O3 időszakot egy októberi, egy hónapos szünet szakítja meg, jelen cikk az ez előtti, O3a időszak eredményeit foglalja össze.

A LIGO harmadik megfigyelési időszakának egyik fontos újítása, hogy a riasztások – szemben a korábbi évek gyakorlatával, amikor csak az elektromágneses utófény keresésében részt vevő hivatalos partnerek juthattak hozzá az adatokhoz – immár publikusak. Így még több kutató reagálhat a riasztásokra, és még hatékonyabbá válhat az utófény keresése.

Az O3a megfigyelési időszakban – a megnövelt érzékenységnek köszönhetően – szinte minden hétre jutott egy-egy újabb észlelés. Összesen húsz gravitációs hullámot érzékeltek a detektorok fekete lyukak, három neutroncsillagok, négyet pedig egy fekete lyuk és egy neutroncsillag összeolvadásából. A források mibenlétét a tömegek alapján határozzák meg, amelyekre a gravitációs hullám formájából lehet következtetni. A tömegük alapján jól elkülönültek a fekete lyukak és a neutroncsillagok: nem észleltünk körülbelül 2 naptömeg feletti tömegű neutroncsillagot, valamint körülbelül 5 naptömeg alatti fekete lyukat, így a tömeg alapján jól el lehetett dönteni, hogy milyen égitestről is van szó. A LIGO új felfedezései azonban kezdik megdönteni azt a képet, hogy egy jól meghatározott „tömegrés” választja el a neutroncsillagokat a fekete lyukaktól. Már az O2 alatt észlelt neutroncsillag-összeolvadás (GW170817) is próbára tette ezt, ugyanis az összeolvadás után visszamaradt objektum tömege valahol 2,7 naptömeg környékén kell legyen. Az O3a időszak alatt pedig három olyan eseményt is sikerült észlelni, ahol legalább az egyik kompakt objektum tömege 3-5 naptömeg közötti volt.

3. ábra. A LIGO O1–O2 megfigyelési időszakai alatt észlelt gravitációs-hullám-jelek forrásaihoz meghatározott égtérületek, amelyeken belül történtek a kompakt objektumok összeolvadásai (forrás: LIGO-Virgo, Háttér: Axel Mellinger).



A neutroncsillag-összeolvadások elektromágneses utófényének keresésében nem volt akkora szerencsénk, mint az O2 megfigyelési időszakban, amikor egy mindössze 16 négyzetfok területű égrésze sikerült szűkíteni a forrás lehetséges helyét. A három új ilyen esemény során legalább körülbelül 500-szor ekkorák voltak a lehetséges égterületek, illetve legalább négyszer olyan messze történtek az összeolvadások, mint a GW170817 esetében, így jóval több lehetséges forrásgalaxis volt, és ezek közül egyik esetben sem sikerült egyértelműen meghatározni a forrást.

A gravitációs hullámok észlelésével a kozmológia egyik legfontosabb kérdésére is választ adhatunk. A 2000-es évek elején még viszonylag biztosak lehetünk az Univerzum tágulását meghatározó Hubble-állandó értékében, ugyanis a különböző elveken alapuló mérések hibahatáron belül ugyanazt az eredményt adták. Azonban az egyre pontosabb műszerek építésével ezek a hibahatárok lecsökkentek, és mára a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás alapján, valamint a távoli szupernóva-robbanások vizsgálatával kapott értékek között jelentős eltérést találunk. Jelenleg intenzíven kutatott kérdés, hogy a két érték közül melyik a helyes, és a másik analízis miért nem szolgáltatja ezt az eredményt?

A kérdés eldöntéséhez szükségünk van egy harmadik, az előzőktől független módszerre, amelyet a gravitációs hullámok észlelése szolgáltat. A hullám alakjából meghatározható a forrás távolsága, míg a forrásgalaxis azonosításával megmérhető annak vöröseltolódása – a két mennyiség között pedig a Hubble-állandó teremt kapcsolatot. Így a GW170817 észlelés egyedülálló lehetőséget biztosított egy független mé-

rés elvégzésére, azonban a távolság meghatározásában fellépő bizonytalanság miatt egyetlen ilyen méréssel még nem lehetett eldönteni, hogy a Hubble-állandó melyik értéke a helyes.

Azonban további forrásgalaxis-azonosítások hiányában is – egy galaxiskatalógus használatával – lehet még jobb megszorításokat adni. Ismerve a lehetséges forrásgalaxisokat és azok valószínűségét egy statisztikai módszert dolgozhatunk ki a Hubble-állandó megbecslésére akkor is, ha pusztán a gravitációshullámjelet figyeljük meg, de nem tudjuk, hogy pontosan melyik galaxisban történt az összeolvadás. Ahogy egyre több gravitációs hullámot észlelünk, néhány éven belül akár ez a módszer is feloldhatja a Hubble-állandó problémáját.

A 2020 áprilisáig tartó O3b megfigyelési időszakban számos további érdekes észlelést várhatunk, a jövőre nézve pedig nagyon biztató az is, hogy 2019. október 4-én a japán KAGRA gravitációshullám-detektort működtető kollaboráció együttműködési szerződést írt alá a LIGO-val és a Virgo-val. A KAGRA 2019 decemberében kezdi meg a méréseket, és érzékenysége ugyan eleinte jóval kisebb lesz, mint a többi detektoré, azonban a tervek szerint 2022-re eléri majd a Virgo érzékenységet, és négy detektorral jóval pontosabbá válik majd a források meghatározása. A KAGRA az eddigi detektoroktól eltérően a föld alatt épült meg, a végpontjait pedig lehűtötték, így több zajforrást is jelentősen le lehet majd csökkenteni. Várhatóan 2025-ben pedig még egy detektor csatlakozik majd a nemzetközi hálózathoz, a LIGO-India, így pedig tényleg mindennaposá válik majd a gravitációs hullámok megfigyelése.

# HANGOLHATÓ OPTIKAI ÖRVÉNYEK KELTÉSE ÖNSZERVEZŐDŐ TOPOLOGIAI DEFEKTRÁCSOKKAL NEMATIKUS FOLYADÉKKRISTÁLYBAN

Salamon Péter, Éber Nándor, Buka Ágnes  
Wigner Fizikai Kutatóközpont

A topológiai hibahelyek vagy defektek univerzális képződmények a természetben. Ezek olyan diszkontinuitások a térben (például egy rendparaméter-térben), amelyek folytonos transzformációk által nem távolíthatók el a rendszerből. Mivel a topológiai defektek általános elvek következményei, így különféle tudományterületeken is fontos szerepet játszanak, és aktuális kutatások tárgyát képezik, például a kozmológiában, kvantumtérelméletekben vagy a szilárdtest-fizikában. A topológiai hibahelyek optikában fellépő formái az optikai örvények [1]. Optikai örvényeket olyan fénynyalábok hordoznak, amelyekben a fény fázisában

szingularitás van. A legegyszerűbb esetet úgy képzelhetjük el, hogy a fény fázisának térbeli eloszlása egy spirált képez, ami a szilárdtestekben megfigyelhető csavardiszlokációra emlékeztet. A spirál tengelye a szingularitás, amelyben a fázis nincs értelmezve és az elektromos tér nulla. Következésképpen az optikai örvények jellemzően olyan fénynyalábok formájában mutatkoznak, amelyek közepén az intenzitás nulla, ezért ezeket fánknyaláboknak vagy lyukas nyaláboknak is szokták nevezni (1. ábra).

Hengerszimmetrikus lézernyalábok komplex amplitúdója megadható Laguerre–Gauss-módusok ( $u_{pb}$