

BÉCSY BENCE–DÁLYA GERGELY–RAFFAI PÉTER

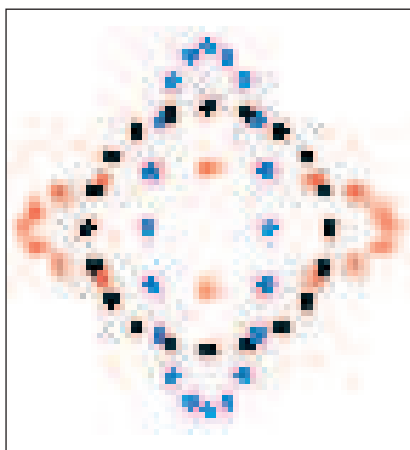
# Interferométerekkel a gravitációs hullámok nyomában

*Einstein 1915-ben közölte korszakalkotó elméletét, az általános relativitáselméletet. Ezt a gravitáció újszerű leírását adó elméletet az elmúlt egy évszázad alatt számtalan alkalommal tesztelték különböző kísérletekkel, és mindmáig helyesnek bizonyult. Az elmélet utolsónak bizonyított olyan jóslata, amit maga Einstein tett, az a gravitációs hullámok létezése. A gravitációs hullámok első közvetlen detektálása éppen száz évvel az általános relativitáselmélet megszületése után, 2015 szeptemberében történt, amelyet 2016. február 11-én jelentett be sajtótájékoztatóján a felfedezést jegyző LIGO és VIRGO kollaboráció. Jelen cikkben betekintést nyújtunk a gravitációs hullámok világába. (A cikk még a felfedezés bejelentése előtt érkezett a szerkesztőségünkbe. – A szerk. –)*

Az általános relativitáselmélet a gravitációt a tér és idő összefonódásából alkotott téridő görbületeként írja le. A testek meggörbítik maguk körül a téridőt, és ebben a görbült téridőben a görbületet követve haladnak. Képzeljünk el egy vízszintesen kifeszített gumilepedőt! Ha ennek a közepére egy acélgolyót helyezünk, az lehúzza a lepedőt, és maga körül meggörbíti azt. Dobjunk be a nagy golyó mellé egy kisebbet! Azt tapasztaljuk, hogy ez a nagyobb golyó közelébe érve eltérül, mivel a lepedő görbületét követi. A gravitáció einsteini leírása is így működik, csak kettő helyett három dimenzióban. A kísérletbeli lepedő szerepét a valóságban a téridő tölti be, amelyet hasonlóan görbítenek a benne található testek, mint a lepedőt az acélgolyó, a téridő görbületét pedig más testek mozgásai a kis golyóéhoz hasonlóan követik. Míg azonban a kísérletünkben a lepedő egy kétdimenziós felület, addig a gravitáció esetén a szemléltetett jelenségek a háromdimenziós térünkben (illetve a négydimenziós téridőben) figyelhetők meg.

A gravitáció e geometriai leírásából azonnal következik a gravitációs hullámok létezése. Képzeljünk el, hogy két csillag egymás körül kering! Egy ilyen rendszer által okozott térgörbület időben a keringéssel együtt változik. A térgörbület változását azonban nem érzékelhetjük mi, megfigyelők azonnal, hiszen ez megsértene azt az elvet, hogy semmilyen információ nem terjedhet gyorsabban a vákuumbeli fénysebességnél. A tér görbületének megváltozásai fénysebességgel fognak távolodni a rendszertől, és ezeket nevezük gravitációs hullámoknak.

Hogy megértsük a gravitációs hullámok kölcsönhatását az anyaggal, képzeljünk el egy golyókból álló körgyűrűt (1. ábra). Ha egy gravitációs hullám halad át ezen a gyűrűn, annak síkjára merőlegesen, az azt fogja okozni, hogy a körgyűrű egyik irány-



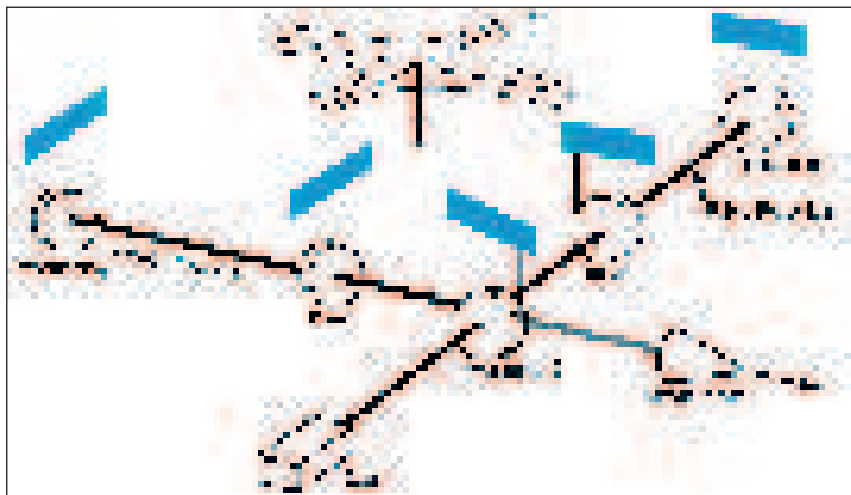
**1. ábra. Gravitációs hullám hatása egy kör alakú gyűrűre (lásd a fekete pontokat). A gravitációs hullám jelen esetben az ábra síkjára merőlegesen halad. A piros és kék pontokból álló alakzatok a gyűrű alakját mutatják különböző időpontokban, ahogy a körgyűrű a gravitációs hullám áthaladása következtében megnyúlik az egyik irányban, és összehúzóódik a másikban**

ban megnyúlik, a másikban pedig összehúzóódik. Ahogy a hullám áthalad a gyűrűn, periodikusan hol az egyik, hol a másik, rá merőleges irányba nyújtja meg a gyűrűt, ahogy az 1. ábrán is látható.

Bár gravitációs hullámokat közvetlen módon még nem sikerült észlelni, létezésük közvetett bizonyítéka már régóta rendelkezésre áll. 1974-ben *Russell Hulse* és *Joseph Taylor* felfedeztek egy két neutroncsillagból álló rendszert, amelynek egyik tagja pulzárként figyelhető meg. A pulzárak olyan gyorsan forgó neutroncsillagok, amelyek mágneses tengelyük irányába nyalábszerűen sugároznak rádióhullámokat, így ha

megfelelő irányban vagyunk, akkor minden periódusban egyszer, amikor a mágneses tengelyük felénk mutat, rádióimpulzust érzékelhetünk (innen származik a nevük is). Ezen impulzusok megfigyelése lehetővé tette a kettős rendszer periódusidejének nagy pontosságú mérését. Ezt a mérést több évtizeden keresztül folytatták, és azt tapasztalták, hogy a két neutroncsillag egymás körüli keringési ideje nagyon kis mértékben, de csökken. Ez éppen megfelel annak a várakozásnak, hogy a rendszer gravitációs hullámok kisugárzásával energiát veszít, csökken a komponensek közötti távolság, és így csökken a periódusidő. Utóbbi a peridületmegmaradás következménye: gondoljunk csak a jég táncosnőre, aki karjait behúzza gyorsabban kezd pörögni. Ráadásul a mérési eredmények nagyon pontosan megegyeznek az elméleti úton kapott értékekkel, tehát nemcsak jellegét tekintve kapunk az általános relativitáselmélettel megegyező eredményt, hanem igen nagy pontosságú számszerű egyezést is tapasztalunk (kevesebb mint fél százalék eltérés). Ezen úttörő felfedezéseik elismeréseképpen a két kutató 1993-ban fizikai Nobel-díjat kapott. Az utóbbi évek során a kutatók további 5 hasonló rendszert is megfigyeltek, köztük olyat is, ahol egy fehér törpe csillag kering a pulzár körül. E rendszerek segítségével a gravitáció különböző elméletei nagyon jól tesztelhetők, az eddigi eredmények pedig kivétel nélkül megerősítették az általános relativitáselmélet jóslatát, a gravitációs hullámok létezését.

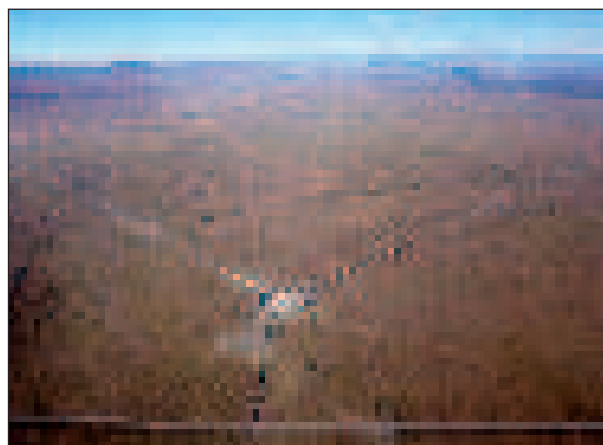
A közvetlen észlelést célzó legígéretesebb berendezések az úgynevezett lézer interferométerek. Ezek két, egymásra merőleges karból állnak, amelyekben ultraalacsony nyomású vákuum van (a földi légnyomás egybilliomod része). A 2. ábrán egy ilyen berendezés egyszerűsített rajza látható. Indítsunk egy lézernyalá-



**2. ábra.** Egy interferometrikus gravitációshullám-detektor egyszerűsített rajza. A lézerforrás egy fénysugarat bocsát ki, ami a nyalábosztóhoz érve ketté válik. A lézertény fele az egyik, másik fele a másik karban halad, majd a két nyaláb visszatér a nyalábosztóra. Ha egy gravitációs hullám halad át a detektoron, akkor az itt egyesülő fényhullámok interferenciája jelet ad a fotodetektorban, amit észlelni tudunk

bot úgy, hogy az egy nyalábosztóra essen. A nyalábosztó egy, a lézertű irányával  $45^\circ$ -os szöveget bezáró féligáteresztő tükör, vagyis olyan tükör, ami a rá eső fényt felét átterszi, másik felét pedig visszaveri. Így a lézernyaláb ketté oszlik, és a fény egyik fele továbbhalad egyenesen, másik fele pedig merőlegesen eltérül. Ezután a két irányba eltérült nyalábok bekerülnek egy-egy ún. Fabry–Pérot-karba. Ez két részlegesen áttersztő tükörből áll, amelyek belső oldala nagyon jó visszaverő, külső oldaluk pedig jó áttersztő, így ha egy foton bekerül a karba, akkor többször oda-vissza pattog a két tükör között, mielőtt visszatérne a nyalábosztó felé. Itt aztán a két irányból érkező fény újra egyesül, és a fotodetektor ezek interferenciaképét rögzíti. Ha a két kar hossza azonos, akkor a két irányból érkező fény teljesen kioltja egymást (ennek oka, hogy a nyalábosztó egyik oldaláról azonos, másik oldaláról pedig ellentétes fázisban verődik vissza a fény, mint ahogy beérkezett). Ha a detektoron áthalad egy gravitációs hullám, az az egyik irányban „összenyomja”, a másik irányban pedig „széthúzza” a tér-időt, ezzel az egyik kar rövidülését és a másik megnyúlását okozva. Emiatt az egyik nyaláb kicsit késve érkezik a másikhoz képest, és már nem lesz teljes kioltás. Ilyen módon a fotodetektor által érzékelt fény mennyiségéből tudunk következtetni a karok hosszának megváltozására, és így egy áthaladó gravitációs hullámra is. A Fabry–Pérot-karoknak lényegében az a szerepük, hogy a fény több időt töltsön a karokban, és ezzel a kapott jelet felerősítse. Természetesen nem csak ilyen L alakú elrendezésben lehet interferometrikus gravitációshullám-detektorokat építeni, tervben vannak például háromszög alakú detektorok is.

Az első, említésre méltó ilyen detektor az 1995 óta működő, Hannover közelében található, német-brit együttműködéssel megvalósított GEO600. Mint neve is utal rá, ennek a berendezésnek 600 méter hosszú karjai vannak. Igaz, ma már nagyobb műszerek is léteznek, a GEO600-nak az a jelentősége, hogy a nagy testvérei üzem-



**3. ábra.** A LIGO Hanford detektor felülnézeti látképe  
(Fotó: Caltech/MIT/LIGO Lab.)

szünetei alatt is működtetni tudják, így biztosítva, hogy ne maradjunk le egy esetleges kiugró erősségű gravitációs hullámról, például egy Tejútrendszerben történő szupernóva-robbanás jeléről. A technológiai újítások próbái is ebben a detektorban zajlanak, és csak sikeres kipróbálásuk után kerülnek beépítésre a nagyobb detektorokba.

A jelenleg üzemelő legfejlettebb detektorok az Amerikai Egyesült Államokban található LIGO interferométerek (a név rövidítése az angol *Laser Interferometer*

*Gravitational-Wave Observatory* kifejezésnek), amelyek 2002 óta üzemelnek. Egy detektor található Hanfordban, Washington államban, egy másik pedig Livingstonban, Louisiana államban (3. ábra). Ezek az interferométerek 4 kilométeres karhosszúsággal épültek. A LIGO detektorok mellett található még egy detektor Olaszországban is, ez a VIRGO, amelynek karhosszúsága 3 kilométer. A VIRGO jelenleg továbbfejlesztés alatt áll, várhatóan 2016 őszétől folytatja a gravitációs hullámok keresését. Japánban pedig építik a KAGRA detektort, amelynek januárban volt az első két hetes tesztüzeme.

Ezek a detektorok rendkívüli pontossággal üzemelnek. A LIGO 4 km-es karjának a másikkhoz képesti  $10^{-19}$  m-es hosszváltozását is tudja észlelni, ami a proton méretének tízezred része. Gondoljunk bele, hogy ez olyan, mintha a hozzánk legközelebbi csillag, a Proxima Centauri 4,2 fényéves távolságának egy emberi hajszál vastagságával történő megváltozását ki tudnánk mutatni. Ezt a kiemelkedő pontosságot az teszi lehetővé, hogy sok foton fáziseltolódásának átlagolására épül a mérés; bizonyos számú foton felett az átlagos fáziseltolódása már ekkora pontossággal kimutatható.

Sok szempontból is hasznos világszerte több detektort üzemeltetni. Egyrészt a gravitációs hullámokat nehéz elkülöníteni a zajtól, azonban ha több, egymástól távoli detektorban is ugyanaz a jelalak jelenik meg, gyakorlatilag kizárható, hogy ezt pusztán valamilyen zaj okozza. Másrészt a források égi pozíciójának meghatározásához is szükségünk van több detektorra, ugyanis a gravitációshullám-detektorok antenaszerűen működve képesek a teljes égboltból jeleket fogadni – igaz, nem minden irányban azonos érzékenységgel –, így nem lehet a detektált jel forrásának pozícióját csupán egy detektorral meghatározni. A módszer, amivel meg tudjuk becsülni egy gravitációs hullám forrásának égi pozícióját, háromszögelésen alapul, hasonlóan ahhoz, ahogyan a GPS műholdakkal végezzük pozíciómeghatározást. Ha ugyanis több detektorral is észlelünk egy gravitációs hullámot, akkor az észlelések időkülönbségéből (tudva, hogy a gravitációs hullámok fénysebességgel terjednek) megbecsülhetjük a forrás égi pozícióját. Több detektorral történt észlelés emel-

lett meg is erősíti a felfedezés tényét: ha csupán egyetlen detektort használva kapnánk valami kiugró jelet, kevésbé lennénk benne biztosak, hogy az valóban gravitációs hullám-jel.

2015. szeptember 18-án, öt évnyi tervezést, újjáépítést és tesztelést követően indult el a LIGO továbbfejlesztett detektorokkal működő üzemmódjának, az úgy-



**4. ábra.** Egy összeolvadó neutroncsillag-kettős fejlődése. Ahogy bespiráloznak a neutroncsillagok, egyre nagyobb amplitúdójú gravitációs hullámokat bocsátanak ki. Amikor egy bizonyos távolságnál közelebb kerülnek egymáshoz, megtörténik az összeolvadás. Ezt az úgynevezett lecsengési fázis követi, amely során egyre halványodó utófény figyelhető meg. A fekete lyuk-kettősök fejlődése is hasonlóan zajlik, azonban ott nem figyelhető meg elektromágneses utófény (Forrás: NASA/CXC/GSFC/T. Strohmayer)

nevezett Advanced LIGO-nak az első észlelési időszaka (first observing run, vagy röviden O1). A detektorok talajmozgásoktól történő elszigetelése jelentősen javult, vagyis a külső forrásokból származó rezgéseket sokkal hatékonyabban ki lehet szűrni, ezáltal pedig sikerült megnövelni azt a frekvenciatartományt is, amelyben a műszer képes gravitációs hullámokat érzékelni. A kvantummechanikai eredetű zajok kiszűrésének érdekében a lézer teljesítményét hússzorosára növelték, és alkalmazták az ún. összenyomott fény technikát; a sugárnyomásból és hőmozgásból eredő zajok csökkentése érdekében pedig 10 kg-osról 40 kg-osra cserélték a tükröket. Mindezen fejlesztések következtében az Advanced LIGO jelenleg kb. 3–4-szer olyan érzékeny, mint az eredeti detektorok voltak, és 2019-re, több lépésben egyre lejjebb nyomva a zajszintet a tízszeres érzékenység elérése a cél. A tervezett érzékenység elérésekor a detektorok ezerszer akkora térfogatból lesznek képesek kimutatni a gravitációs hullámokat, mint a korábban működő LIGO detektorok, vagyis gravitációs hullámok észlelése a gravitációs hullám-források egyenes térbeli elhelyezkedését feltételezve ezerszer olyan valószínű lesz, mint az eredeti projekt keretében.

Gravitációs hullámokat a nem forgásszimmetrikusan gyorsuló testek bocsátanak ki. Minél nagyobb tömegű testek, minél kisebb térfogatba sűrűsödve, minél nagyobb gyorsulással mozognak, annál nagyobb amplitúdójúak lesznek az általuk kibocsátott gravitációs hullámok. Ilyen testek például az egymás körül keringő, vagy a nem forgásszimmetrikus forgó égitestek. Nem fog viszont sugározni egy

egyenes vonalú egyenes mozgást végző, vagy egy radiálisan pulzáló objektum.

Az asztrofizikusok többféle forrásból is várják a LIGO által észlelhető gravitációs hullámokat. A gyorsan forgó, aszimmetrikus pulzárak hosszú ideig adott frekvencián, folytonosan sugároznak. Ezzel szemben a szupernóva-robbanások vagy a gamma-kitörések csak rövid ideig tartó, ismeretlen hul-

lámformájú gravitációs hullámokat bocsátanak ki. Feltételezzük, hogy a Nagy Bumm a kozmikus mikrohullámú mellett egy gravitációs hullámokból álló háttérsugárzást is hagyott maga után, ennek hullámhossza azonban az Univerzum tágulásának következtében valószínűleg mára nagyon nagyra nőtt. Hasonló háttérsugárzást kapunk a távoli, sok-sok egyedi gravitációs hullám-forrás sugárzásának összegeként is. Olyan ez, mint amikor egy teremben sokan beszélgetnek. A mellettünk álló szavait tisztán értjük, azonban a távolabbi emberek hangja összeolvad egy általános háttérzajjal.

Az első detektálásra legvalószínűbb jelölték kétségtelenül az összeolvadó kettős rendszerekből érkező jelek kínálkoztak (4. ábra). Amikor két kompakt objektum (neutroncsillag vagy fekete lyuk) egymás körül gravitációsan kötött pályán kering, mozgásuk közben folyamatosan bocsátanak ki gravitációs hullámokat. A hullámok kibocsátása energiavesztéssel jár, aminek következtében egyre közelebb kerülnek egymáshoz az égitestek, ahogy azt a Hulse és Taylor által felfedezett neutroncsillag-kettősnél is láttuk. A folyamat önmagát erősíti: minél közelebb kerül a két objektum, annál hevesebb lesz a kibocsátás, így annál gyorsabban spiráloznak be a közös tömegközéppontozhoz. A legintenzívebb sugárzást az összeolvadás pillanatában tapasztalhatjuk. Az Advanced LIGO detektorokkal egy ilyen fekete lyuk- vagy neutroncsillag-kettős életének utolsó néhány másodpercében kibocsátott hullámokat van esélyünk észlelni. Ha az összeolvadó kettős legalább egyik tagja neutroncsillag, akkor elektromágneses hullámok formájában is rengeteg energia szabadul fel, amely rövid ideig tartó gamma-felvil-

lanásként, vagy sokáig tartó, lassan halványodó utófény formájában vehető észre teleszkópjainkkal.

A modern gravitációs hullám-detektorok egy hullámforrás helyét az égen jelenleg 10–100 négyzetfok pontossággal képesek meghatározni. Ez a 40–400 teliholdnyi égitérület hatalmas, a csillagászoknak esélyük sem lenne arra, hogy a detektálást követően az egészet átfésüljék távcsöveikkel az elektromágneses utófény után kutatva. Tudjuk azonban, hogy az ilyen események galaxisokban, esetleg azok közvetlen közelében történhetnek, elég tehát ezeket végignézniük távcsöveikkel. A vizsgálandó galaxisok számát tovább csökkenthetjük, ha figyelembe vesszük a detektorok horizonttávolságát, vagyis azt, hogy milyen távoli objektumokat képesek megfigyelni. Jelenleg egy 1,4–1,4 naptömegű neutroncsillag-kettőt legjobb esetben 180 Mpc (átlagosan 80 Mpc) távolságig képes detektálni a LIGO, 2019-re pedig a 445 Mpc (átlagosan 200 Mpc) elérése a cél. Más hullámforrásokra ez a távolság lényegesen eltérő is lehet, fekete lyuk-kettősöket jóval távolabbról is lehet detektálni a nagyobb tömegük és kisebb méretük miatt, azonban ezek nem bocsátanak ki elektromágneses utófényt.

Az emberiség a legelső csillagászati megfigyeléseket szabad szemmel végezte, vagyis az elektromágneses hullámok látható tartományában figyelte meg az Univerzumot. Később a spektrum további tartományait is elkezdtek az Univerzum feltérképezésének szolgálatába állítani: így született meg a rádió-, az infravörös-, vagy éppen a röntgensugárzás, amelyek mindegyikén egészen új jelenségeket tártak fel előttünk. A gravitációs hullámok nem részei az elektromágneses spektrumnak, így egy teljesen új eszközt fognak adni az asztrofizikusok számára. Izgalmas objektumok válnak tanulmányozhatóvá velük, mint például a fekete lyukak, amelyek a hagyományos műszereink számára láthatatlanok, csupán környezetükre gyakorolt hatásukból következtethetünk a jelenlétükre. Megfigyelhetünk továbbá olyan égitesteket is, amelyek fényét por takarja ki, valamint jobban megismerhetjük a neutroncsillagok belső szerkezetét és a szupernóvarobbanásokat is. Az elektromágneses és gravitációs hullámok egyidejű megfigyeléséből, vagyis az úgynevezett többcsatornás (angolul *multi-messenger*) csillagászat révén pedig sokkal részletesebb ismereteket szerezhetünk a különböző égi objektumokról és az egész Világegyetemről.

A gravitációs hullámokról és a LIGO kollaborációról az érdeklődők további információkat olvashatnak a LIGO magyar nyelvű honlapján: <http://ligo.elte.hu/>, valamint a magyar LIGO-csoport, az EGRG-nek (Eötvös Gravity Research Group) oldalán: <http://egr.elte.hu/>.