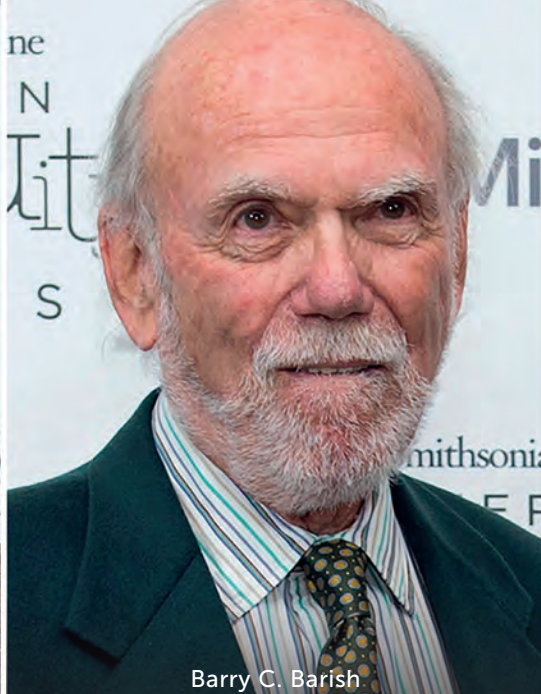
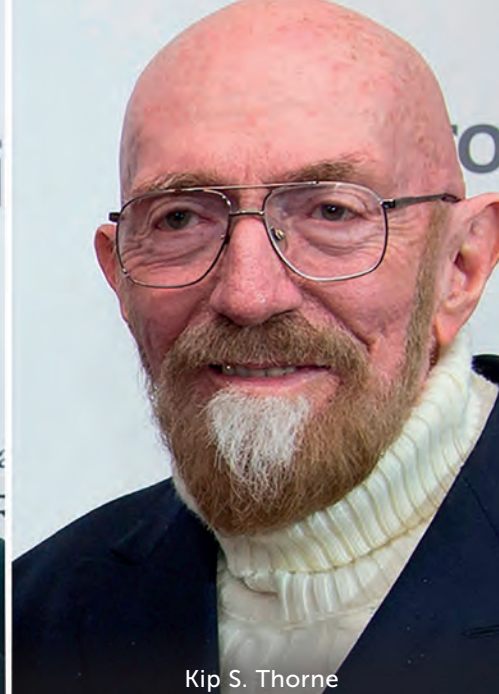


Rainer Weiss



Barry C. Barish



Kip S. Thorne

AZ EMBERISÉG ÚJ ÉRZÉKSZERVEI

A gravitációshullám-detektorok

„[A]kik az előző évben a legnagyobb jótéteményt adták az emberiség számára.” Így fordíthatnánk magyarra az 1896-ban elhunyt svéd kémikus feltaláló és üzletember, Alfred Nobel végakarátát, ami alapján 1901 óta évről évre kiosztják a hagyatékából alapított és a nevét viselő díjat. 2017-ben a díjátadóra december 10-én, magyar idő szerint délután fél 5 órai kezdettel került sor a svéd főváros koncertcsarnokában.

A 2017-es év azok egyike volt, amelyben a fizikai Nobel-díjjal elismertek névsora nem jelentett nagy meglepetést. A díj hivatalos indoklása így szólt: „*döntő hozzájárulásokért a LIGO detektor(ok)hoz és a gravitációs hullámok megfigyeléséhez*”. Jóllehet a gravitációs hullámok 2015-ben történt első megfigyelését az akkor 18 ország több mint 1200 kutatójából és mérnökéből álló *LIGO-Virgo Collaboration* (LVC) érte el az amerikai LIGO detektorokkal, a díjat (a szabályai által limitáltan) a Kollaboráció három prominens képviselője kaphatta meg: *Barry C. Barish*, *Kip S. Thorne* és *Rainer Weiss*. Mindhárman a LIGO projekt „alapító atyáinak” számítanak, nem véletlen tehát, hogy az LVC korábban a sajtóközleményeiben is nevesítette őket, mint a Kollaboráció kiemelkedő alakjait.

Az ideji Nobel-díj nem előzmény nélküli: két amerikai rádiócsillagász, *Russell A. Hulse* és *Joseph H. Taylor* a gravitációs hullámok létezésének már a közvetett igazolásáért is Nobel-díjat vehetett át 1993-ban. Ahhoz, hogy megértsük, miért is akkora a jelentősége a fizikában a gravitációs hullámoknak, mindenekelett a mibenlétüket kell tisztáznunk.

A gravitációs hullámok természete

A megdöbbentő kísérleti tapasztalatból, hogy a fényhullámok sebességét tetszőleges mozgásunk mellett is mindig ugyanakkorának mérjük, *Albert Einstein* arra következtetett az 1905-ben közölt (speciális) relativitáselméletében, hogy a térbeli távolságok és az időtartamok mért értékei a megfigyelő mozgásától függenek. Ez a függés általánosan csak a megfigyelő fénysebességhez közeli mozgásainál válik szembetűnővé. A tény, hogy egy megfigyelő térbeli mozgása befolyásolja az általa mért időtartamokat, vagyis a megfigyelő térbeli és időbeli „haladása” egymástól nem független, kézenfekvővé tette Einstein elméletében az egységként kezelt *téridő* koncepcióját is.

Egy másik kísérleti tapasztalat, hogy egy gyorsuló és egy ugyanakkora gravitációs gyorsulással jellemezhető helyen álló megfigyelő minden ismert fizikai jelenséget azonosnak lát. Ez arra vezette Einsteint, hogy a hossz- és időtartam-változásokat, amelyek a speciális relativitáselmélete *gyorsulva* mozgó megfigyelőire jellemzők, „gravitációs mezőben” elhelyezkedő

megfigyelőkre is általánosítsa – megalkotva ezzel az 1916-ban közölt általános relativitáselméletét. A helyről helyre változó gravitációs gyorsulás a megfigyelők számára helyről helyre megnyúlt vagy összehúzóított távolságokat és időtartamokat jelent, amely matematikailag a rugalmas közegek (itt a helyi gravitációs gyorsulástól függő) görbültségeihez hasonlóan leírható. A gravitációs gyorsulásokat, és így a *téridő helyi görbültségét* a térben elhelyezkedő *tömegek* határozzák meg, amelyek a mozgásukkal maguk is követik a téridő görbületét, elmozdulásaikkal meg is változtatva azt. A tömegek ilyen módon görbítik tehát a téridőt: a nagyobb tömegek maguk körül a távolságokat és időtartamokat jobban, a kisebb tömegek kevésbé torzítják.

ciós hullámok az üres téridő görbületi formái, csak tömeggel rendelkező anyag hozhatja létre őket: (ún. „sztelláris”) fekete lyukak a Napunknál sokkal nehezebb, nagytömegű csillagok teljes magukba roszadásából keletkeznek, gravitációs hullámokat pedig tömegek (anyag vagy akár fekete lyukak) mozgásai keltenek.

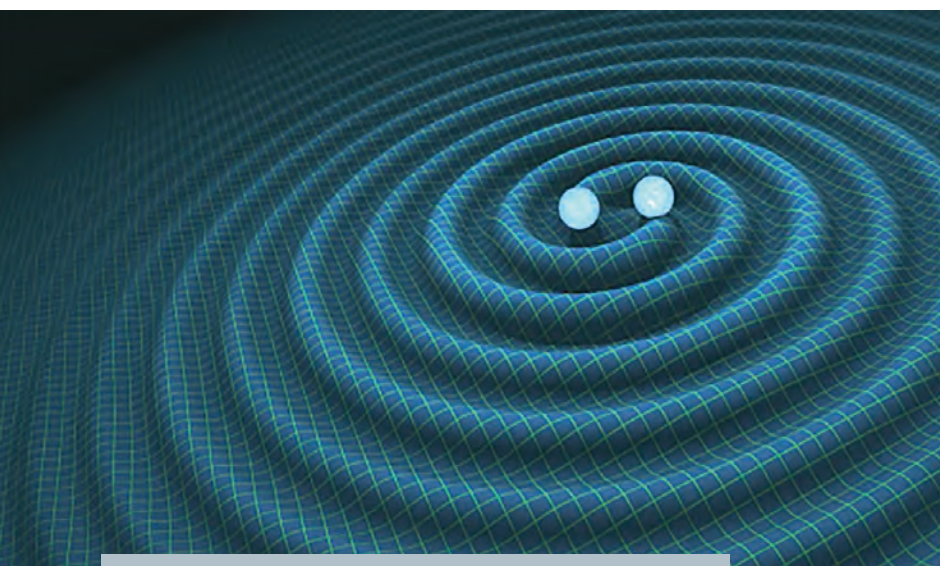
A gravitációs hullámok észlelése

A gravitációs hullámok energiát visznek el a forrásaikból: e kisugárzott energia pontos nyomait fedezte fel a '70-es években Hulse és Taylor két rádióforrás neutroncsillag („pulzár”) általuk megfigyelt egymás felé spirálózásában. Két térpont között áthaladva a gravitációs hullámok arányosan összehúzzák és megnyújtják a pontok közti távolságot, méghozzá a hullámok haladási irányára merőleges síkban, váltakozva egy adott irányban nyúlást és rá merőlegesen összehúzódadást okozva. E hatás az, amit a modern gravitációshullám-detektorokkal, köztük a *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory* (LIGO) két azonos detektorával érzékelhetünk.

A merőleges, váltakozó hosszváltozás a térben elhelyezett tükrök távolságváltozásainak megfigyelésével mérhető. A megfigyeléshez a LIGO detektorok infravörös lézernyalábokat

pattogatnak az ingaszerűen felfüggesztett tükrök között, a nyalábokat egy pontban egymás kioltására hangolva. Egy a berendezésen áthaladó gravitációs hullám a tükrök közötti fényutakat (az interferométer *karjait*) váltakozva nyújtja és összehúzza, ami a nyalábok kioltottságát megszünteti, és a hosszváltozástól függő felfénylést okoz egy fényérzékelő szenzor felületén. A felfénylés mértéke, és így a karok hosszváltozása is követhető az időben, ez a jel pedig az áthaladt gravitációs hullám hullámformájaként rögzíthető.

Adott nagyságú gravitációs hullám annál nagyobb hosszváltozást okoz az interferométer karjaiban, eleve minél hosszabbak azok. A LIGO esetén a karok hossza 4 km, amelyekben a nyalábok mintegy 280-szor oda-vissza is pattognak, arányosan megnövelve ezzel a nyúló és összehúzó hatások karhosszát. A műszer ezzel képes kimérni azt, ha a karok egymáshoz képesti hosszváltozása egy atommag méretének tízezred részével egyenértékű! Ilyen érzékenységre



Két egymás körül keringő neutroncsillag és gravitációs hullámaik ábrázolása

A téridő görbültsége egyes esetekben maga is (öfenntartó módon) önálló szereplővé válhat. Mint Einstein elméletéből kiderült, a mindenütt azonos görbületű, „egyszerű” téridők mellett szintén stabilan létezhetnek pl. végtelen görbülettel jellemezhető térpontok (körülöttük szükségszerűen ún. „eseményhorizonttal”, amelyen belülről még a fény sem juthat ki), vagy a téridő apró, hullámszerű fodrozódásai is. A téridő e két különleges görbületi formáját ma rendre *fekete lyukként* és *gravitációs hullámként* ismerjük; előbbieket tulajdonságait elsőként *Karl Schwarzschild* írta le 1916-ban, utóbbiakét maga Einstein egy 1916-ban és egy 1918-ban megjelent szakcikkében. Az einsteini elmélet alapján, míg a fekete lyukak akár „álló helyzetben” is stabilan megmaradhatnak, addig a gravitációs hullámoknak csakis fénysebességgel száguldó formája létezhet. Jóllehet a fekete lyukak és a gravitációs

szükség is van, hiszen a beérkező hullámok tértorzító hatása még a Napéhoz mérhető tömegű testek fénysebességhez közeli gyorsaságú mozgásánál is csak ilyen kicsiny mértékű, ha a forrásuk a saját galaxisunkban vagy valamely közeli (legfeljebb néhány tíz- vagy százmillió fényévnnyire lévő) galaxisban helyezkedik el.

A fő kihívás a műszer tükreit a lehető legjobban elszigetelni a földi környezettől, hogy azokat minél kevesebb olyan hatás érje, ami őket mozgatná. A LIGO ezért a tükreit és nyalábjait ultraerős vákuumban tartja, a tükröket pedig kifinomult lengéscsillapító rendszerrel szigeteli el a talaj rezgéseitől. A különféle gravitációshullám-jelek keresését a kiküszöbölhetetlenül megmaradó háttérzajban a célra fejlesztett keresőprogramok végzik, a velük észlelt jeleket pedig az LVC kutatói elemzik tovább. A mostani detektorok a kb. 10 és 1000 Hz közötti frekvenciájú hullámok észlelésére alkalmasak – részben a méretük miatt, részben mert csak ezen a tartományon kellően alacsony hozzá a háttérzajuk –, de szerencsére e tartományon sugároz több ismert asztrofizikai forrás is: bespiráló-

olasz-francia együttműködéssel, a CNRS és INFN intézetek valósították meg. E három detektort egészíti ki még a Hannover (Németország) melletti 600 méteres karú *GEO* detektor is – e négy detektor szabad adatcserével, közösen működik az LVC kereteiben. A több detektor nemcsak egymás eredményeit erősíti meg, hanem az adatsoraik együttes kiértékelésével gyengébb gravitációs hullámok is észlelhetők, továbbá velük egy észlelt úrbéli jelforrás égi pozíciója is behatárolható (hatékonyan csak három vagy több detektorral).

A LIGO és Virgo detektorok eddigi észlelései

Az áttörést a szakterületen a LIGO detektorok első észlelése jelentette 2015. szeptember 14-én, magyar idő szerint 11,51-kor. A dátumról GW150914-nek elnevezett jel forrása – a jel alakja alapján – két egymás körül keringő, majd összeolvadó fekete lyuk volt. Az egymáshoz egyre közelebb és egyre gyorsabban történő (valószínűleg évmilliárdokig tartott) keringésből, majd a tagok összeolvadásából, és a keletkezett nagyobb fekete lyuk utórezgéseiből a LIGO detektorok egy mindössze néhány tizedmásodpercnyi szakaszt láttak. Tulajdonságai alapján a jel mintegy 1 milliárd fényévnnyi távolságból érkezett, fénysebességgel ugyanennyi éven át haladva a világtűrőn át a Föld felé, hogy az észlelésével végül is tökéletesen megerősítse számunkra Einstein százéves elméletét, és először adva lehetőséget az emberiségnek egy fekete lyuk-pár megfigyelésére.

A LIGO detektorok azóta további 5 hasonló jelet észleltek fekete lyukak összeolvadásából (közülük egyet a Virgo detektor is észlelt), és 1 szintén hasonló jelet neutroncsillagok összeolvadásából. A neutroncsillagok összeolvadásából csillagászok fényjeleket is észleltek, amelyek megfigyelését épp a gravitációshullám-detektorok tették lehetővé a forrás égi pozíciójának meghatározásával, amelyek a távcsövek irányításához feltétlenül szükségesek voltak.

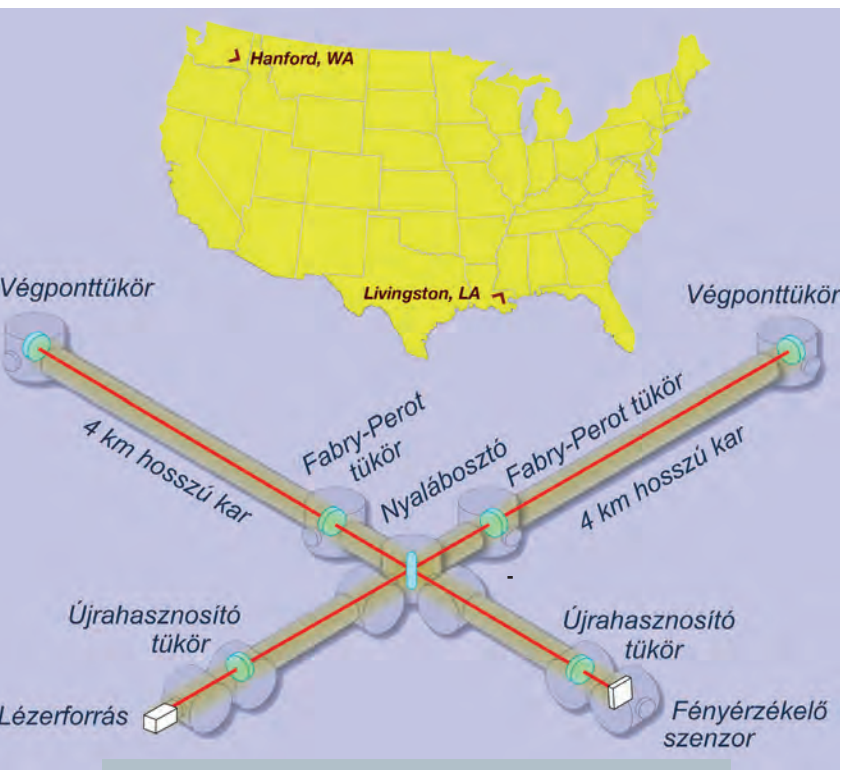
Az eredmények valóban forradalmiak, és hiszem, hogy (Nobel kívánságának megfelelően) valóban az emberiség javát szolgálják. Lényegében minden, amit a Földön kívüli világról eddig tudtunk, a hagyományos csillagászat megfigyeléseire épült, amely fény észlelésével a forrásokról és a világegyetemről látható képeket alkotott. A gravitációshullám-detektorok fénytől független információt gyűjtenek tömegek mozgásáról, az észlelt jeleket pedig egy számítógéppel hallható hangként is lejátszhatjuk. Az emberiség



A LIGO livingstoni detektorállomása
(FOTÓ: LIGO LABORATORY)

zó és összeolvadó fekete lyukak vagy neutroncsillagok, szupernóva-robbanások, forgó neutroncsillagok, és az egyedileg nem észlelhető források közös háttérre összeadó sugárzása is.

A LIGO Hanford (Washington állam, USA) és Livingston (Louisiana állam, USA) városok mellett működő detektoraihoz hasonló műszer, 3 km-es karokkal, létezik az olaszországi Cascina városában is, *Virgo* néven. Míg a LIGO detektorokat az amerikai National Science Foundation finanszírozásával a Caltech és MIT egyetem építették és működtetik, addig a Virgo detektort



A LIGO detektorok földrajzi elhelyezkedései és szerkezeti sémája

(FOTÓ: SHANE LARSON, NORTHWESTERN UNIVERSITY)

új érzékszerveket nyert velük, amelyek működése az emberi hallással analóg. A világegyetem körülöttünk immár gravitációs hullámokkal is megfigyelhető! A csillagászat új ága kezdődött el ezzel: a gravitációs-hullám-csillagászat, amely hasonló intellektuális fordulomat indíthat el a történelemben, mint amelyet a múltban a hagyományos csillagászatnak köszönhetünk. Az eddig észlelt összeolvadások ennek csupán első – az ismert jelek közül is csak a legkönnyebben észlelhető – hírnökei.

A 2017. évi fizikai Nobel-díjról

A fizikai Nobel-díj nyerteseinek nevét október 3-án tették közzé. A bejelentés szerint a díj felét az MIT egyetem fizikaprofesszora, *Rainer Weiss*, míg a másik felét megosztva a Caltech két professzora, *Barry C. Barish* és *Kip S. Thorne* kapták.

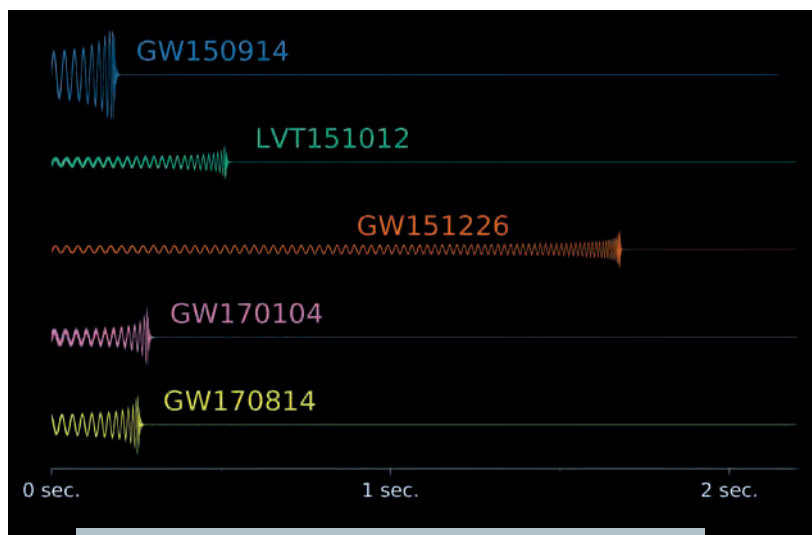
A kísérleti fizikus *Rainer (Rai) Weiss* 1932-ben született a németországi Berlinben. Weiss 6 éves korában került családjával az Amerikai Egyesült Államokba, ahol azután élete további részét töltötte. Doktori címét a Boston külvárosában található MIT egyetemen szerezte 1962-ben, majd később ugyanennek az egyetemnek professzora is lett. A gravitációs hullámok lézerezinterferometriás észlelési technikájának elvi kidolgozása, valamint a LIGO

detektorok első tervének megalkotása is Weiss nevéhez köthető. Az interferometrikus detektorok koncepcióját és várható főbb zajforrásait egy 1972-ben megjelent úttörő cikkében ismertette. Később, már az 1990-es években maga is a LIGO projekt egyik társalapítója lett. A LIGO projekt mellett Weiss a NASA *Cosmic Background Explorer* (COBE) projektjének társalapítójaként és tudományos tanácsadójaként is dolgozott, amely projekt két vezető kutatóját, *John C. Mather*-t és *George Smoot*-ot 2006-ban fizikai Nobel-díjjal jutalmazták a COBE kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás felmérésében elért eredményeiért.

Az 1936-os nebraskai születésű *Barry C. Barish* szintén 1962-ben szerezte meg a PhD-címét a Kaliforniai Egyetemen, Berkeleyben. Ő ma a Los Angeles külvárosában található Caltech fizikaprofesszora. Eredetileg részecskefizikai kísérletekben vett részt, majd az 1994-ben elindult LIGO projekt első vezető kutatója lett. 1997-től, a LIGO detektorok megépülésétől már projektigazgatóként dolgozott a kísérlet sikeréért. Elsőként látta be annak szükségességét, hogy a LIGO projektben való részvétel lehetőségét nemzetközi kutatócsoportoknak is meghirdessék, megalapítva ezzel a *LIGO Scientific Collaboration* (LSC) kutatói együttműködést. *Barry Barish* személyén keresztül így az LSC (majd 2007-től a Virgo Kollaborációval összefogva az IVC) nemzetközi közössége, valamint a közösség működési modellje is szimbolikus elismerést kapott.

A szintén Amerikában, 1940-ben született *Kip S. Thorne*, a három Nobel-díjas közül az egyetlen elméleti fizikus szakember. Ő 1965-ben doktorált a Princeton egyetemen, majd később (Barish-hez hasonlóan) ő is a Caltech fizikaprofesszora lett. Kutatásaival az einsteini általános relativitáselmélet továbbgondolásához és a gravitációshullám-asztrofizika elméleti megalapozásához járult hozzá. Kreatív munkái időnként a tudományos fantasztikum határait súrolták. Thorne szintén a LIGO projekt társalapítója volt. A társszerzőségével megjelent „*Gravitation*” máig a gravitációkutatás egyik alapkönyve, a „*Black Holes and Time Warps*” című könyvével pedig Thorne bestseller íróvá és ismeretterjesztővé is vált. Az emberi és kutatói sokoldalúságát jelzi, hogy Kip Thorne a 2014-es hollywoodi sikerfilm, a „*Csillagok között*” (*Interstellar*) tudományos tanácsadója és forgatókönyvírója is volt.

A Nobel-díj kapcsán a három díjazott mellett *Ronald W. P. Drever* neve is említést érdemel, mint akit sokáig emlegettek a gravitációshullám-fizika Nobel-díj



A LIGO-Virgo A október 3-áig bejelentett gravitációshullám-észleléseinek hullámformái és időskálái
(FOTÓ: LSC/UNIVERSITY OF CHICAGO/BEN FARR)

esélyeseként Thorne és Weiss mellett. Az 1932-ben Skóciában született Drever az University of Glasgow-n doktorált 1959-ben, később azonban az Egyesült Államokban a Caltech kísérleti fizikusa és professzora lett. Drevernek kritikus hozzájárulásai voltak a LIGO tervezési és megvalósítási folyamatához, amelyek elengedhetetlennek bizonyultak a detektoroknak a gravitációs hullámok észleléséhez szükséges alacsony zajszintjének eléréséhez. Drever még megérhette a munkája betetőződését a gravitációs hullámok első észleléseivel, és a hozzájárulásaiért több rangos díjat is átvehetett. A Nobel-díj azonban, a 2017. március 7-én bekövetkezett halála miatt, már nem lehetett ezek között.

A magyar részvétel és a folytatás

Az első magyarországi LIGO-tagcsoport az Eötvös Loránd Tudományegyetemen alakult meg *Eötvös Gravity Research Group (EGRG)* néven, *Frei Zsolt* vezetésével (és e cikk szerzőjének tagságával) 2007-ben. A csoport eleinte jelkereső módszerek fejlesztésével, forrásmodellező munkával, és egy, a LIGO detektorok körüli környezeti zajok monitorozására épített mikrofonrendszerrel támogatta a LIGO projekt sikerét. A csoporttagok műszak- és riasztási felügyeletet is elláttak a LIGO detektorállomásain és az interneten keresztül Magyarországról. Az első magyar Virgo-tagcsoport 2010-ben alakult meg a Wigner Fizikai Kutatóközpontban, előbb *Rácz István*, majd *Vasúth Máttyás*

vezetésével. 2014-ben a Szegedi Tudományegyetemen *Gergely Árpád László* is önálló LIGO-tagcsoportot alakított. A magyarországi csoportok elindulását és beilleszkedését a már LSC tagokként előbb a Caltech egyetemen, majd a Columbia University-n dolgozó *Márka Szabolcs* és *Márka Zsuzsa* segítették. Jelenleg (a University of Floridán kutató *Bartos Imrével* együtt) az LVC-nek mintegy húsz magyar tagja van.

Az ELTE LIGO-tagcsoportja jelenleg a LIGO és Virgo detektorok által észlelt gravitációshullám-jelek paramétereinek rekonstruálásában vesz részt az ehhez szükséges módszerek fejlesztésével. Az ELTE-n a LIGO-észlelések elektromágneses utómegfigyeléseivel fejlesztett galaxiskatalógus az augusztus 17-ei neutroncsillag-ütközés megfigyeléséhez különösen hasznosnak bizonyult. Ennek a felfedezésnek kapcsán a világegyetem tágulási ütemét jellemző Hubble-állandó gravitációshullám-megfigyelésekre alapozott első



Az ELTE LIGO tagcsoportja és a Nobel-díjas Rainer Weiss (Balról jobbra: Szölygény Ákos, Bécsy Bence, Rainer Weiss, Dálya Gergely, és Raffai Péter)
(FOTÓ: FREI ZSOLT)

becslésében is részt vehettünk. Figyelmünk eközben az elkövetkező időre is irányul: szimulációkkal jövőbeli detektorhálózatok optimalizációját is végezzük.

A LIGO és Virgo detektorok 2018 őszéig tervezett üzemszünet alatt vannak, ezalatt zajlik a detektorok műszeres továbbfejlesztése, finomhangolása és zajcsökkentése. 2018 őszén a detektorok várhatóan minden eddiginél nagyobb érzékenységgel kezdhetik majd meg a harmadik megfigyelő időszakukat.

RAFFAI PÉTER