

# JEGYZET A LIGO ELSŐ GRAVITÁCIÓSHULLÁM-ÉSZLELÉSÉHEZ

RAFFAI PÉTER PhD

asztrofizikus, egyetemi adjunktus

Eötvös Gravity Research Group (EGRG, <http://egrg.elte.hu>)

ELTE Atomfizikai Tanszék (<https://fizika.elte.hu/hu/index.php?page=munkatars&tid=1&id=16>)

Email: [praffai@bolyai.elte.hu](mailto:praffai@bolyai.elte.hu)

2016. FEBRUÁR 11.

- 2015. szeptember 14-én, magyar idő szerint de. 11:50:45-kor mindkét LIGO detektor jelet rögzített, mindössze 7 ezredmásodperc (7 ms) időkülönbséggel. A jel a GW150914 nevet kapta.
- A detektorok mérnöki tesztüzemben (engineering run), de ugyanolyan állapotban és érzékenységgel működtek, mint szeptember 18-ától, ami az Advanced LIGO (aLIGO) O1 (observing run 1) hivatalos kezdődátuma. A késői kezdődátum oka, hogy folyt még a detektorok kalibrálása, és az első mesterséges próbajelek kiértékelése.
- A jelet mindkét detektor adatsorában a gravitációshullám-kitörésekre szakosodott (Burst) munkacsoport keresőprogramja, a coherent WaveBurst (cWB) találta meg, a jel rögzítését követő 3 percen belül.
- Az összegyűlt adatokat később az összeolvadó kettősrendszerekre szakosodott (compact binary coalescence, CBC) munkacsoport keresőprogramja is feldolgozta, ami során megerősítette az észlelést.
- A független keresőprogramok egybehangzóan egy bespirálózó, majd összeolvadó feketelyuk-kettős gravitációshullám-jelének észlelését jelezték.
- Az utólagos CBC adatfeldolgozás során egy 2015. szeptember 12-e és október 20-a közötti 39 napos időszak adatainak kiértékelése történt, ez kb. 16 napnyi egyidejű, hasznos adatot jelent mindkét detektorból. Ebből 33 nap már a 2016. január 12-éig tartott, 117 napos O1 időszakba esett. Szeptember 12-e és január 12-e között ez 123 nap.  $33:117 = 28\%$ ,  $39:123 \approx 1:3$ , tehát az O1 adatainak 2/3-a még mindig kiértékelés alatt van!
- A GW150914 a kiértékelt adatszakasz legkiugróbb (precízen: legnagyobb jel-zaj arányú) eseménye. A CBC keresésből a jel-zaj arány  $SNR \approx 24$ , ami  $5,1\sigma$ -ás FELFEDEZÉS-t jelent (az  $5,1\sigma$  azt jelenti, hogy annak esélye, hogy a kutatók tévesen – egy zajeseményről – állítják azt, hogy gravitációshullám-jelet talált, kevesebb, mint 1 a 3,5 millióhoz). Mivel a feldolgozott háttérzajban nincs kiugróbb esemény, csak annyi mondható, hogy ilyen észlelést a CBC keresőprogram pusztán zajból ritkábban jelez, mint 200 000 évente 1.

- A megfigyelési időszakok alatt (pl. 01, szeptember 18. és január 12. között) a több mint 1000 tagot számláló LIGO Scientific Collaboration (röviden: LIGO Kollaboráció) egy néhányfős bizottsága ismeretlen időkből, ismeretlen tulajdonságú mesterséges jeleket juttathat a detektorok adatsorába a kalibráláshoz is használt segédlézerrel. A megtalálásuk és kezelésük próbáját jelenti a keresőprogramoknak és a Kollaborációnak, valamint védenek az észlelés idő előtti kiszivárogtatásával szemben. Mérnöki tesztüzem lévén ilyen próba elismerten nem történt, a Kollaboráció a próbajelek bejuttatásához használt adatcsatornát átnézve ellenőrizhette. Emiatt már szeptember-októbertől tudtuk, hogy nagy eséllyel valós felfedezésről van szó, további elemzést a jel és forrás tulajdonságainak pontos megállapítása és összevetése az elméleti várakozásokkal igényelt.
- A végponttükrök legnagyobb kitérése is, amit a gravitációshullám-jel okozott, mindössze a proton méretének 400-ad része ( $h = 10^{-21}$ )! Ilyen kis távolságváltozást  $\sim 10^{23}$ /sec (ez 100 kW egy nyalábkeresztmetszetre jutó teljesítmény a Fabry-Perot karokban a 1064 nm hullámhosszú lézerrel) foton visszaverődésének kiátlagolásával mér az aLIGO. Ugyanez  $\sim 10^{21}$ /sec (700 W) a nyalábosztónál, és 20 W betáplált teljesítmény a lézerforrásnál.
- A jel két összeolvadó fekete lyuké, a bespirálózást, összeolvadást, és a keletkező fekete lyuk utócsengését is jól elkülöníthetően észlelték az aLIGO detektorok. Mindhárom jelszakasz összhangban van egymással és az einsteini elmélet jóslatával.
- A kettősrendszer becsült távolsága kb. 1 milliárd fényév ( $410^{+160}_{-180}$  Mpc = [230; 410; 570] Mpc = [750 millió; 1,34 milliárd; 1,86 milliárd] fényév). A kettősrendszert a mostani aLIGO akár kétszer ilyen távrolól is megtalálta volna.
- A két fekete lyuk becsült tömege  $29^{+4}_{-4}$  és  $36^{+5}_{-4}$  Naptömeg. Az átmérőjük kb. 200 km (174 és 216 km). Az összeolvadásukból keletkezett fekete lyuk  $62^{+4}_{-4}$  Naptömegű. A két fekete lyuk a  $\sim 0,2$  másodpercig észlelt bespirálózás és összeolvadás alatt 3 Naptömegnek megfelelő energiát sugárzott szét. Ez a legnagyobb sugárzási teljesítmény, amit az emberiség valaha is észlelt! Ez 3000 szupernóva-robbanás energiája, vagy 4500-szorosa annak az energiának, amit a Nap a teljes élete során kibocsájt.
- A két fekete lyuk tömege nagyobb az előzetes várakozásoknál; ez mérsékelten meglepő. Ilyen nagy tömegű fekete lyukak csak még nagyobb tömegű és nagyon „tisztá” (precízen: alacsony fémtartalmú; a csillagászatban minden „fém”, ami nem hidrogén vagy hélium) csillagokból jöhetnek létre. Ezek ritkábbak a kisebb tömegű, nagyobb fémtartalmú csillagoknál. Pl. 5-10 Naptömegű fekete lyukakból, a feltételezett nagyobb gyakoriságuk miatt, valószínűbbnek gondolták az első észlelést.

- A forrást a déli égbolton lokalizálták, ezért a meghatározott égterület Magyarországról nem látható. Két detektorral pontatlan a forráspozíció meghatározása, ehhez csak egy kb. 600 négyzetfok nagyságú égterületet sikerült rendelni (ez a telihold által lefedett égterület kb. 3000-szerese). Az ELTE LIGO tagcsoportja<sup>1</sup> fejlesztette a LIGO Kollaboráció által használt galaxiskatalógust<sup>2</sup>, amivel (1) a forráspozíció meghatározását pontosítjuk (források galaxisokban vannak, a rekonstruált égterületeken belül a galaxisok akár 1000-szer kisebb égterületet foglalnak el), (2) lehetséges forrásgalaxisokat azonosítunk (sorba rendezve őket annak valószínűsége szerint, hogy ők a forrásgalaxisok), amiket (3) az észlelés után elektromágneses teleszkópok irányítottan megfigyelnek, utófényt keresve. A kb. 600 négyzetfoknyi égterület mindhárom célra használhatatlanul nagy, benne túl sok (több tízezer) galaxissal, ráadásul két fekete lyuk összeolvadásából utófényt se várható. Az égterület ~100-szor kisebb (10 négyzetfok körüli vagy alatti) lehetne, ha a két LIGO detektor mellett az olaszországi Virgo detektor is működött volna.
- A LIGO észlelés alapján a hasonló események várható gyakorisága az optimista becsléseknek megfelelő. A GW150914 észlelése alapján évente néhány vagy néhány tíz hasonló eseményt várunk az univerzum 1 Gpc<sup>3</sup>-nyi (1 Gpc = 1 milliárd pc; 1 pc = 3,26 fényév) térfogatából. Ekkora térfogatot erre a jeltípusra az aLIGO le is fed majd pl. már az O2 (2016 nyarán induló, és fél évesre tervezett) megfigyelési időszak alatt, tehát reális az esély a további észlelésekre!
- A második legnagyobb jel-zaj arányú esemény a 33 nap alatt túl gyenge, hogy belőle észlelést állítsunk ( $2,1\sigma$ ), de a hullámformája szintén megfelel két fekete lyuk összeolvadásának. A gyenge jel miatt pontatlanabb a tulajdonságok meghatározása, de ha valódi jel, úgy a forrás egy kb. 24 és egy kb. 13 Naptömegnyi fekete lyuk összeolvadása kb. 1 Gpc távolságra. Ha ez is valódi észlelés, akkor az ilyen összeolvadások gyakoriságsűrűsége akár 400/Gpc<sup>3</sup>/év is lehet.
- A becsült észlelési gyakoriságok alapján az aLIGO a tervezett (2018. évi vagy későbbi, a mostaninál kb. 3-szor jobb) érzékenysége mellett néhány tíz hónapnyi működés után kimutathatja a túl távoli, ezért egyedileg nem megkülönböztethető feketelyuk-összeolvadások együttes gravitációshullám-háttérét.
- A gravitációs hullámok fénysebességgel terjednek Einstein elmélete szerint, ami egyet jelent azzal, hogy a gravitonok nyugalmi tömege nulla (a graviton a gravitációs hullámok elemi részecskéje, éppúgy, ahogy a foton az elektromágneses hullámoké). Ha Einstein feltételezése nem igaz, a különböző frekvenciájú gravitációs hullámok terjedési sebessége más és más, ami szétzilálja egy összetett hullám várt jelalakját. Ilyet nem tapasztaltunk, ebből következően a graviton tömege  $10^{-58}$  kg-nál ( $\sim 10^{22}$

<sup>1</sup> Az ELTE LIGO tagcsoportjának honlapja: <http://egrg.elte.hu>

<sup>2</sup> A galaxiskatalógus projekt honlapja: <http://aquarius.elte.hu/glade/>

$eV/c^2$ ) kisebb kell, hogy legyen. Ez a modellfüggetlen teszteknel jobb határ, egyes modellfüggőeknél viszont nem.

- Mit igazol a mostani felfedezés?
  - Einstein általános relativitáselméletét: ez a gravitációs hullámok első közvetlen észlelése! Pont 100 évvel Einstein a gravitációs hullámok létezését és tulajdonságait megjósoló első cikkének megjelenése után ez Einstein utolsóként igazolt jóslata! Az észlelt hullámforma teljesen az Einstein elméletéből vártaknak megfelelő! Az általános relativitáselmélet összeolvadó fekete lyukak erős gravitációs mezejében ugyanolyan jól működik, mint gyenge mezőkben (ami utóbbit több korábbi kísérlet is már igazolt)!
  - A LIGO működik és képes ekkora pontosságra!
  - Ilyen nehéz sztelláris (csillag összeomlásából keletkező) fekete lyukak létének első bizonyítéka!
  - A feketelyuk-kettősök létét, és azt, hogy ezek egymás felé spirálozása még az univerzum korán belül eljuthat az összeolvadásig! (A bespirálozást is az okozza, hogy a rendszer energiát veszít a folyamatos gravitációshullám-kibocsátás miatt, emiatt a két fekete lyuk a keringés közben egymás felé is zuhan)
- Mi a jelentősége a mostani felfedezésnek?
  - Ez a legnagyobb sugárzási teljesítmény, amit az emberiség valaha is észlelt!
  - Az emberiség minden eddigi tudása a Naprendszeren túli világról fény (elektromágneses hullámok) észleléséből jött. A gravitációs hullámok az elektromágneses hullámoktól teljesen független üzenethordozók.
  - Ez új ablakot nyit a világegyetemre, amivel a csillagászatnak egy teljesen új ága, a gravitációshullám-csillagászat indul el. A terület most lendületet kap, várhatóan további gravitációshullám-detektorok épülnek, amik nemcsak egymást segítik majd azonos hullámhosszakon, de akár lefedhetik majd a gravitációs hullámok teljes hullámhossz-tartományát is, így teljesen más jelforrásokra lehetnek érzékenyek!
  - Akkora a jelentősége, mint annak, amikor elődeink az első távcsövet irányították az égre, és megláttak csillagokat, bolygókat, galaxisokat; mi gravitációs hullámokkal és -detektorokkal teljesen új objektumokat és folyamatokat fedezhetünk fel, érthetünk meg! Talán megértjük végre az univerzum keletkezését! Talán megértjük végre a gravitációt, ami Einstein elmélete alapján egyszer akár új energiaforrást, tér- vagy akár időutazáshoz is eszközt adhat!
  - Fényt sokminden kitakar, gravitációs hullámokat viszont nem képes kitakarni semmi. Így bármi mögé rejtőzik is a forrás, közvetlen információt nyerünk róla a gravitációshullám-jeléből.
  - Fényt mozgó elektromos töltések bocsátanak ki, ezért az eddigi csillagászattal ezeket láttuk. Gravitációs hullámokat mozgó tömegek bocsátanak ki, így gyakorlatilag aminek az űrben tömege van és mozog,

annak a gravitációs hullámait figyelhetjük. Ezek észlelhető nagyságához olyan nagy tömegeknek, olyan kicsi helyen, és olyan gyorsan kell mozogniuk, amire csak különleges űrbéli objektumok (pl. fekete lyukak, neutroncsillagok) képesek.

- A fényre épülő csillagászat képeket állít elő számunkra, ezért ez a látásunknak megfeleltethető. A gravitációshullám-jelek hangként lejátszhatók, így az észlelés a hallásunknak megfeleltethető! Eddig csak láttuk, mi zajlik a világűrben, mostantól olyan, mintha „fülünk” is lenne már a világűr folyamataira.

### **További információk magyarul:**

**Kérdés-válasz videók a felfedezéshez: <http://gravitacioshullam.hu>**

**A LIGO Kollaboráció magyar nyelvű honlapja: <http://ligo.elte.hu>**

**Információk az Eötvös Gravity Research Group magyar LIGO tagcsoportról: <http://egrg.elte.hu>**

**További információkért forduljanak az Eötvös Gravity Research Group szakembereihez! Elérhetőségek: <http://egrg.elte.hu/?page=contacts>**