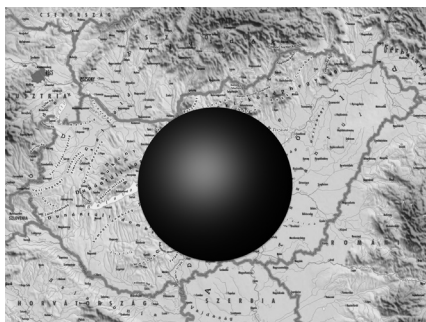


GW150914: először hallottuk az Univerzum zenéjét

A LIGO-Virgo nemzetközi kollaboráció 2015. február 11-én tartott sajtótájékoztatóján bejelentette, hogy sikerült gravitációs hullámokat detektálniuk. Ebben a cikkben áttekintjük, hogy hogyan történt a felfedezés, mit is detektáltak pontosan, és hogy mi ennek a jelentősége.

A gravitációs hullámokat 2015. szeptember 14-én, magyar idő szerint délelőtt 10:51 perckor (9:51 UTC) észlelte a Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) mindkét detektora, azonban hónapokba tellett a kutatóknak, hogy az adatokat kielemezzék, mindent újra ellenőrizzenek, és megírják a tudományos publikációt a felfedezésről. Csak miután ezt a Physical Review Letters szakfolyóirat bíráló is átnézték és elfogadták publikálásra, történhetett meg a felfedezés nyilvánosságra hozatala.

A fizikusok arra a következtetésre jutottak, hogy az észlelt gravitációs hullámok két, a Napnál 29-szer és 36-szor nagyobb tömegű fekete lyuk összeolvadásának utolsó tizedmásodperceiben keletkeztek, amikor azok egy még nagyobb tömegű, forgó fekete lyukká egyesültek.



Egy kb. 30 naptömegű fekete lyuk Magyarországhoz viszonyított mérete

Két fekete lyuk ilyen ütközését már korábban lehetségesnek tartották, mostanáig azonban még sohasem figyelték meg. A kettős a

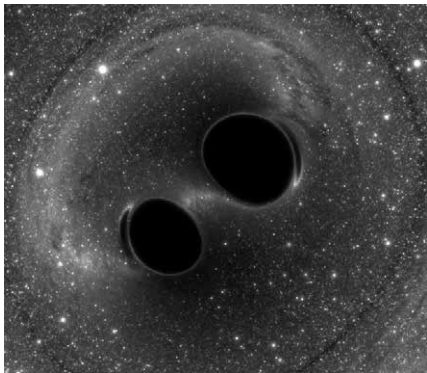
másodperc törtrésze alatt három naptömegnyinek megfelelő energiát alakított gravitációs hullámokká – ez a jel csúcscsánál mintegy 50-szerese annak a sugárzási teljesítménynek, amit a teljes belátható világegyetem fényhullámok formájában kibocsát.

A jelek 7 ezredmásodperccel eltérő időpontban érkeztek a LIGO két egymástól 3000 km-re lévő detektorába, így háromszögelés módszerrel a kutatók a forrás lehetséges égi pozícióját egy nagyjából 3000 négyzetfokos területre szűkítették le a déli féltekén.

A felfedezés jelentőségének megértéséhez érdemes összegyűjtenünk, hogy mit is igazol ez az eredmény. Először is, ez Einstein általános relativitáselméletének újabb bizonyítéka és a gravitációs hullámok első közvetlen észlelése. Éppen 100 évvel Einsteinnek a gravitációs hullámok létezését és tulajdonságait megjósoló első cikkének megjelenése után ez Einstein utolsóként igazolt jóvendőlése. Az észlelt hullámforma teljesen az általános relativitáselméletből vártaknak megfelelő, vagyis az elmélet az összeolvadó fekete lyukak erős gravitációs mezejében ugyanolyan jól működik, mint gyenge mezőkben (ez utóbbi tény már több korábbi kísérlettel is sikerült igazolni). Fontos megjegyezni, hogy az is új eredmény, hogy léteznek ilyen nagy tömegű sztelláris (csillag összeomlásából keletkező) fekete lyukak, illetve, hogy feketelyuk-kettősök is léteznek, és ezek egymás felé spirálozása még az univerzum korán belül eljuthat az összeolvadásig.

Ezen új eredmények mellett érdemes még néhány ténybe belegondolni, amik tovább növelik az eredmény jelentőségét. Például, hogy ez a legnagyobb sugárzási teljesítmény, amit az emberiség valaha is észlelt. Emellett azt is tudjuk, hogy az emberiség minden eddigi tudása a Naprendszeren túli világról fény (elektromágneses hullámok) észleléséből származott. A gravitációs hullámok az elektromágneses hullámoktól teljesen független

üzennethordozók. Megfigyelésük új ablakot nyit a világegyetemre, amivel a csillagászatnak egy teljesen új ága, a gravitációshullám-csillagászat indul el. A terület most lendületet kap, várhatóan további gravitációshullámdetektorok épülnek. Nem túlzás azt mondani, hogy ennek akkora a jelentősége, mint 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. Az már csak egy plusz előny, hogy hogy amíg az égitestekről érkező fény útközben elnyelődhet vagy szóródhat, addig a gravitációs hullámoknál ilyen hatások nem lépnek fel.



Az észlelt feketetelyuk-pár, ahogyan egy közelében lévő megfigyelő látta volna (SXS)

Így bármi mögé rejtőzik is a forrás, közvetlen információt nyerünk róla a gravitációshullám-jeléből.

De mik is azok a gravitációs hullámok és hogyan keletkeznek?

Az általános relativitáselmélet a gravitációt a tér és idő összefonódásából alkotott téridő görbületeként írja le. A testek meggörbítik maguk körül a téridőt; minél nagyobb a tömegük, annál jobban. A gravitáció nem más, mint a görbület hatása a testekre, ami által azok nem egyenesen, hanem görbült pályán haladnak.

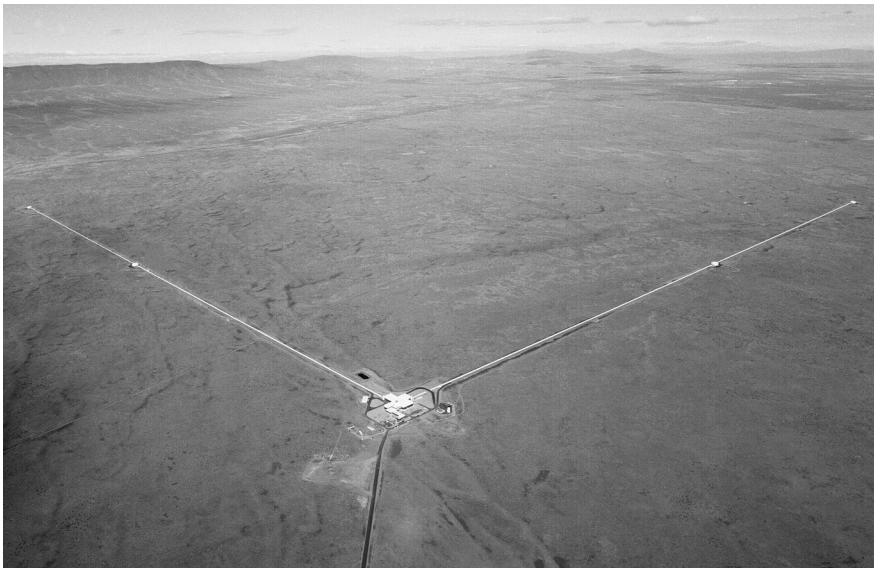
A gravitáció e geometriai leírásából azonnal következik a gravitációs hullámok létezése. Képzeljünk el, hogy két csillag egymás

körül kering! Egy ilyen rendszer által okozott térgörbület időben a keringéssel együtt változik. A térgörbület változását azonban nem érezkelhetjük mi, megfigyelők azonnal, hiszen ez megsértené azt az elvet, hogy semmilyen információ nem terjedhet gyorsabban a vákuumbeli fénysebességnél. A tér görbületének megváltozásai fénysebességgel fognak távolodni a rendszertől, és ezeket nevezzük gravitációs hullámoknak.

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

A gravitációs hullámok detektálása az úgynevezett lézinterferométerekkel lehetséges. Ezek két, egymásra merőleges karból állnak, amelyekben ultraalacsony nyomású vákuum van (a földi légnyomás egybilliomod része). Ezekben lézernyomók verődik oda-vissza a karok végein elhelyezett tükrök között, és ha a két kar hossza azonos, akkor a lézernyalábok pont közepén találkoznak. Ekkor interferencia lép fel, és éppen kioltja egymást a két fénysugár. Azonban ha a detektoron áthalad egy gravitációs hullám, az az egyik irányban „összenyomja”, a másik irányban pedig „széthúzza” a téridőt, ezzel az egyik kar rövidülését és a másik megnyúlását okozva. A folyamatban a fénysebesség nem változik, emiatt a megnyúlt karban mozgó nyaláb kissé késve érkezik az összenyomott karban mozgóhoz képest, és megszűnik ezáltal a kioltás. Ilyen módon a fotodetektor által érzékelt fényintenzitásból tudunk következtetni a karok hosszának megváltozására, és így egy áthaladó gravitációs hullámra is.

A detektálást végző műszerek az Amerikai Egyesült Államokban található LIGO interferométerek (a név az angol Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory kifejezés rövidítése), amelyek 2002 óta üzemelnek. Egy

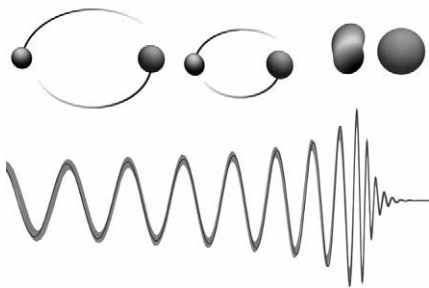


A LIGO Hanford detektor felülnézeti látképe (LIGO Lab)

detektor található Hanfordban, Washington államban, egy másik pedig Livingstonban, Louisiana államban. 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 lesz az első két hetes tesztüzeme.

Ezen detektorok rendkívüli pontossággal üzemelnek. A LIGO 4 km-es karjának a másikhoz képesti 10^{-19} m-es hosszváltozását is képes 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 azok átlagos fáziseltolódása már ekkora pontossággal kimutatható.

Több 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 gravitációshullámdetektorok antenyszerűen működve képesek a teljes égboltról 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, háromszögletesen alapul, hasonlóan ahhoz, ahogyan a GPS műholdak végeznek pozíciómeghatározást. Ha ugyanis több detektorral is észlelünk egy gravitációs hullámot, akkor az észlelések időkülönbségeiből (tudva, hogy a gravitációs hullámok fénysebességgel terjednek) megbecsülhetjük a forrás égi pozícióját. Egy több detektorral történt észlelés emellett meg is erősíti a felfedezés tényét: ha csupán egyetlen detektort használva kapnánk valami



Összeolvadó fekete lyukakból származó gravitációs hullámok jelalakja az összeolvadás különböző fázisaiban (LVC)



Fantáziarajz az észlelt feketelyuk-párról (Aurore Simmonet)

kiugró jelet, kevésbé lennének benne biztosak, hogy az valóban gravitációshullám-jel.

2015. szeptember 18-án, 5 évnyi tervezést, újjáépítést és tesztelést követően indult el a LIGO továbbfejlesztett detektorokkal működő üzemmódjának, az úgynevezett Advanced LIGO-nak az első észlelési időszaka (first observing run, vagy röviden O1). Több zajszintcsökkentő technikai fejlesztés között a detektorok talajmozgásoktól történő elszigetelése is 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. 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 így ezerszer

akkora térfogatból lesznek képesek kimutatni a gravitációs hullámokat, mint a korábban működő LIGO detektorok, vagyis gravitációs hullámok észlelése a gravitációshullám-források egyenletes 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 egyenletes mozgást végző, vagy egy radiálisan pulzáló objektum.

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. A folyamat önmagát erősíti: minél közelebb kerül a két objektum, annál hevesebb lesz a kibocsátás, így annál gyorsabban spiráloznak be a közös tömegközépponthoz. A legintenzívebb sugárzást az összeolvadás pillanatában tapasztalhatjuk. Ha az összeolvadó kettős legalább egyik tagja neutroncsillag, akkor elektromágneses hullámok formájában is rengeteg energia szabadul fel, amely rövid ideig tartó gamma-felvillanásként, vagy sokáig tartó, lassan halványodó utófény formájában vehető észre teleszkópjainkkal.

A gravitációs hullámokról, a LIGO kollaborációról és magáról a felfedezésről az érdeklődők további információkat olvashatnak a LIGO magyar nyelvű honlapján: ligo.elte.hu valamint a magyar LIGO-csoportnak, az EGRG-nek (Eötvös Gravity Research Group) az oldalán: egr.elte.hu. Emellett ajánljuk a felfedezéshez kapcsolódó kérdés-válasz videót a gravitacioshullam.hu oldalt.

Dálya Gergely, Bécsy Bence, Raffai Péter

Évkönyveinkből



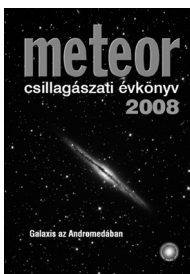
Meteor csillagászati évkönyv 2006. A csillagászat legújabb eredményeiből ezúttal is bőséges válogatás található a kötetben. A Vörös óriás változócsillagok című cikk a változócsillagászat egy érdekes területét tekintí át, mely az amatőrök számára is érdekes. A 2006. március 29-i napfogyatkozás megfigyelésére készülők a Napfogyatkozás a szomszédban című írásból szerezhetnek hasznos tudnivalókat. Detre László születésének 100. évfordulójához pedig egy személyes hangvételi megemlékezés kapcsolódik.

Ízelítő a tartalomból: A csillagászat legújabb eredményei, Illés Erzsébet: Holdak a Naprendszerben, Kiss László: Vörös óriás változócsillagok, Szabó Sándor: Napfogyatkozás a szomszédban, Barlai Katalin: 100 éve született Detre László. Ára 1950 Ft (tagoknak 1000 Ft)



Meteor csillagászati évkönyv 2007. Egy aktuális nemzetközi tudományos programot ismertet A Nemzetközi Héliofizikai Év című cikk. A színképelemzéshez használatos eszközöket mutatja be a modern csillagászati spektroszkópiáról szóló, gazdagon illusztrált összefoglaló. A harmadik nagy tanulmány a változócsillagoknak talán a legérdekesebb képviselőit, a „robbanó” változókat tekintí át. Ízelítő a tartalomból: A csillagászat legújabb eredményei, Kálmán Béla: A Nemzetközi Héliofizikai Év, Fűrész Gábor: A csillagászati spektroszkópia eszközei, Csák Balázs–Kiss László–Vinkó József: Katakizmusos változócsillagok, Farkas Gábor Farkas: Az 1572-es szupernóva és Magyarország.

Ára 2010 Ft (tagoknak 1000 Ft)



Meteor csillagászati évkönyv 2008. A 2008-as kötettel jelentősen megújítottuk csillagászati évkönyvünket. Lényeges és szembeszökő újdonság, hogy az adott hónap csillagászati érdekességeire hosszabb-rövidebb ismertetővel hívjuk fel a figyelmet (meteorojajok, kisbolygók, üstökösök, változócsillagok, alkégy-objektumok stb.). Ízelítő évkönyvünkéből: Kálmán Béla: A napkutatás újdonságai, Bebesi Zsófia: Titán – a Szaturnusz óriásholdja, Tóth Imre: Az üstökösök új világa, Petrovay Kristóf: A Naprendszer keletkezése, Barcza Szabolcs: Új eredmények az asztrofizika világából, Kun Mária: A galaktikus csillagászat újdonságaiból, Szabados László: A Lokális csoport, Szabó M. Gyula: Égbolygómérések kozmológiája, Éder Iván: Digitális mélyégyfotózás, intézményi beszámoló.

Ára 1950 Ft (tagoknak 1000 Ft)



Meteor csillagászati évkönyv 2009. A Csillagászat Nemzetközi Éve tiszteletére évkönyvünk minden korábnál nagyobb terjedelemben, közel 400 oldalon jelent meg. Ízelítő évkönyvünk tartalmából: Frey Sándor: Hogyan kezdődött a fény korszaka?, Kiss László: Válogatás a változócsillagászat új eredményeiből, Kereszturi Ákos: Újdonságok a Naprendszerben, Bartha Lajos: Négy száz éves a távcső, Galileo Galilei: Sidereus Nuncius, Szécsényi-Nagy Gábor: Mérőldkövek a csillagászat és a megfigyelőeszközök fejlődésében, Fűrész Gábor: ELTervezett távcsövek, Szatmáry Károly-Szabados László: Úrtávcsövek. A 2009-es év folyamán megfigyelhető jelenségekről és az jelentősebb évfordulókról a Kalendáriumban olvashatunk. A kötetet az intézményi beszámoló zárják. Ára 1950 Ft (tagoknak 1000 Ft)

Kiadványaink megvásárolhatók az óbudai Polaris Csillagvizsgálóban az esti bemutatók alkalmával, illetve megrendelhetők banki átutalással, a megjegyzés rovatban a kiadvány(ok) pontos megnevezésével és a megrendelő postacímének feltüntetésével. **Az MCSE bankszámla-száma: 62900177-16700448**



Asztrofotóiból saját könyvet szeretne?
 Miért ne?
 06-20-9759-232
www.PlanetPhotoBook.com

PlanetPhotoBook

METEORITOK

magyar meteoritok is!
 tektitek, könyvek
 meteorit szakértés, azonosítás



Minden mintánk hivatalos IMCA
 eredetiség igazolással érkezik!

www.hunmet.com
 tel: 06 30 7767817



EURODOME
CSILLAGÁSZATI KUPOLÁK
 Automatizált vezérlő elektronika
 Távcsőrendszerek, tervezés
 tanácsadás, eredeti meteoritok
www.eurodome.hu

Téged is várunk
 a Polaris
 önkéntes
 csapatába!



Polaris Csillagvizsgáló
 ÓBUDA