



Gergely Árpád László

Fizikai Nobel-díj a gravitációs hullámok első közvetlen megfigyeléséért

A 20. század hajnalán a klasszikus fizika tökéletesnek hitt felépítménye recsegni-ropogni kezdett. A Michelson–Morley-kísérlet kapcsán tarthatatlanná vált továbbra is feltenni, hogy van éter, melyen az elektromágneses hullámok terjednek. A fekete-test elektromágneses sugárzását pedig csak az energiakvantum bevezetése árán lehetett a megfigyelésekkel összhangba hozni. Mindkettőnek komoly következménye lett: előbbi a speciális relativitáselmélethez, utóbbi a kvantumelméletekhez vezetett.

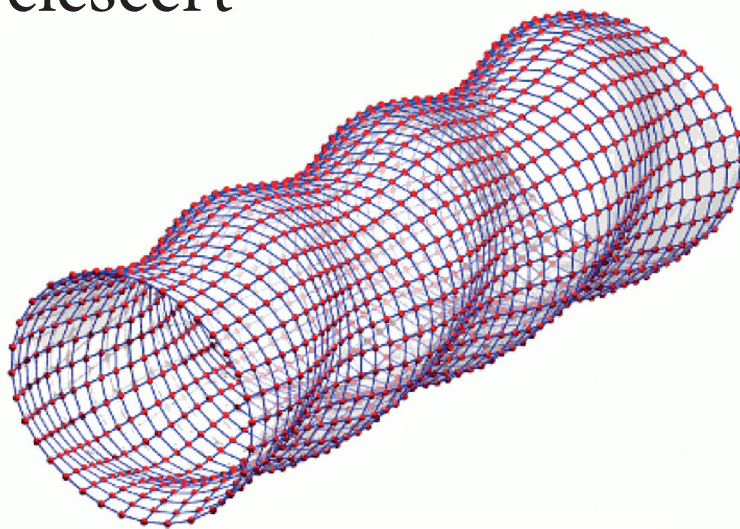
Az Einstein, Lorentz és Minkowski munkássága által fémjelzett speciális relativitáselméletet egy nagy egyesítésnek foghatjuk fel: kiderült, hogy a mechanikai és elektromágneses jelenségek nem csupán ugyanúgy írhatók le minden inerciarendszerben, hanem a rendszerek között is azonos a kapcsolat. Ennek azonban ára volt: a tér és az idő elvesztette abszolút jellegét, vonatkoztatási rendszer függővé vált. Ami abszolút maradt, az az események téridőben mért négyes-távolsága, illetve időrendi sorrendje. Az új elmélet fontos következménye volt, hogy fénynél gyorsabban nem terjedhet információ.

Ennek viszont ellentmondott a newtoni gravitáció, hiszen alapegyenletében, a Poisson-egyenletben csak Laplace-operátor szerepel, időderivált nem, a gravitáció terjedési sebességét tehát végtelennek jósolta. A hiba kijavításán Einstein egy kerek évtizedig dolgozott. Sokadik próbálkozása a végül helyesnek bizonyult általános relativitáselmélet, melyben a gravitáció fénysebességgel terjed, a d'Alembert-operátort tartalmazó hullámegyenlet szerint. Ez a gravitációs hullám.

Ehhez azonban az általános relativitáselméletnek szakítani kellett újabb dogmákkal – például a Pitagorasz-tétellel, amit a gravitáció megváltoztat. A tér és az idő görbültté válik, a téridő görbülete pedig maga a gravitáció. Vagy az inerciarendszerek kiválasztott szerepével. Helyette lokális inerciarendszerek léteznek, melyekben a tehetetlenségi és gravitációs hatások lokálisan kioltják egymást. Az általános relativitáselmélet tetszőleges vonatkoztatási rendszerben érvényes, azonban az események közötti négyes-távolság, illetve időrendi sorrendjük továbbra is független a vonatkoztatási rendszertől.

A gravitációs hullám tehát hepehupa a téridő görbületében. De hogyan választjuk szét a háttérgörbületet a rajta terjedő görbületi perturbációtól? Ezt úgy lehet pontosan megfogalmazni, ha a geometriai optikai közelítést alkalmazzuk: gravitációs hullámról akkor beszélünk, ha egy periodikus görbületi perturbáció hullámhossza sokkal kisebb a háttér görbületénél. Kis gravitációjú helyeken, mint a Föld is, ez automatikusan teljesül, hiszen a görbületi sugár igen nagy (Minkowski-téridőben végtelen). Azonban a fekete lyukak környezetében, vagy az Ősrobbanás után ezek a mennyiségek könnyen lehetnek összemérhetők is.

A gravitációs hullám hasonló az elektromágneses hullámhoz abban, hogy a terjedési irányára merőleges változásokat okoz, azaz transzverzális hullám. A gravitációs hullám azonban tenzori, nem pedig vektori deformáció, azaz elhaladása esetén egyik merőleges irány rövidül, miközben a másik tágul, majd ez megfordul és sokszor ismétlődik. Szintén közös tulajdonság, hogy mind-



A gravitációs hullám terjedésének modellje

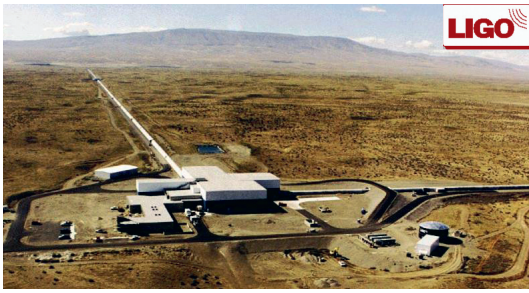
(animáció: <https://www.universetoday.com/127255/gravitational-waves-101/>)

kettő fénysebességgel terjed. Ezzel a hasonlóságoknak vége is szakad.

A gravitációs hullám az elektromágneses hullámtól eltérően nem nyelődik el, miközben áthalad az Univerzumon. Jólalonyolultabb létrehozni (nem elég a forrás gyorsuló mozgása, az ún. tömeg-kvadrupólmomentum második és harmadik deriváltjainak kell nullától különböznie lenniük). A gravitációs hullám önmaga forrása, olyan, mintha az elektromágneses hullámnak elektromos töltése is lenne. Így két gravitációs hullám ütközése akár fekete lyukak is létrehozhat! Végül, mivel a gravitáció a leggyengébb ismert kölcsönhatás, hullámainak kimutatása igen nagy kihívás.

A gravitációs hullámok energiát, impulzust és impulzusnyomatékokat visznek el az őket létrehozó forrásokból. Ilyen rendszer az ún. Hulse–Taylor kettős pulzár is. A pulzárról észlelt elektromágneses jelek periodicitásában pontosan olyan változások történtek, amiket a gravitációs hullámok által elvitt energia okoz. Ez volt a létező fizikai elméletek egyik legpontosabb igazolása: 40 másodperces változást mutattak ki 30 év alatt. A gravitációs hullámok létezésének indirekt bizonyítását 1993-ban Nobel-díjjal jutalmazták.

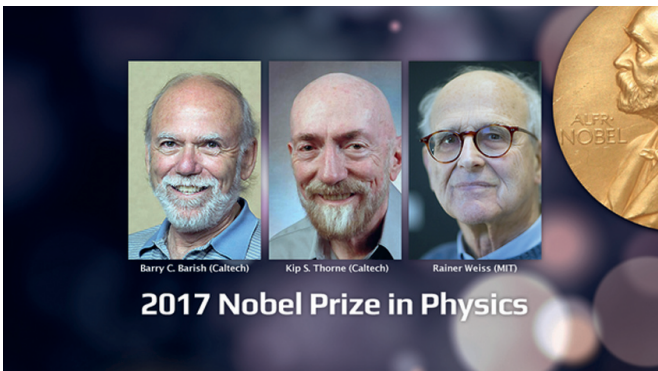
A közvetlen kimutatásra azonban 2015. szeptember 15-éig kellett várni [1]. Ezt követően eddig újabb öt alkalommal sikerült kimutatni őket. Az észleléseket a Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) két interferométere végezte. Ezek az Amerikai Egyesült Államokban működő, lézer-interferometrián alapuló detektorok egyenként két 4 km-es karhosszúságú vákuumozott csőből állnak, amelyekben az igen stabil infravörös lézersugár ún. Fabry–Perot-kavitásokban verődik oda-vissza, mielőtt az interferenciaképet kialakítaná. A berendezések a 10–2000 Hz-es tartományban 10^{-23} nagyságrendű relatív érzékenységet mutatnak fel, ami azt jelenti, hogy a protonméret ezredrészi elmozdulásának kimutatására képesek! A gravitációs hullám



A hanfordi (felül) és a livingstoni (alul) interferométerkarok

azonban csak forrásának nagy távolsága miatt ilyen gyenge. Az első észlelt gravitációs hullám keletkezése helyén a Paksi Atomerőmű éves energiatermelésének 10^{31} -szeresét hordozta!

A 2017. évi fizikai Nobel-díj felét a LIGO-detektorral kapcsolatos meghatározó munkásságért és a gravitációs hullámok közvetlen kimutatásáért Rainer Weiss, az MIT emeritus professzora kapta, a díj másik felén Kip Thorne és Barry Barish, a Caltech emeritus professzora osztozott.



Barry Barish, Kip Thorne és Rainer Weiss

Rainer Weiss 1932-ben Németországban született, majd 1962-ben az MIT-n szerzett PhD-fokozatot. Kétéves princetoni poszt-doktori korszaka után, 1964-ben az MIT professzora lett. Ő volt a lézer-interferometrián alapuló gravitációshullám-detektor megalkotója (1967), és a berendezés sikeres működését korlátozó zajforrások precíz feltárása is az ő nevéhez fűződik (1972). Túlzás nélkül állítható, hogy az ő víziója nélkülözhetetlen volt a sikeres gravitációshullám-észlelésekhez. 1984-ben a LIGO egyik alapító tagja volt, azóta is aktív résztvevője a gravitációshullám-keresésre irányuló kutatásoknak. Tudományos munkássága egyébre is kiterjedt: a NASA mikrohullámú háttérsugárzást feltérképező Cosmic Background Explorer (COBE) űrszondájának tudomá-

nyos tanácsadójaként 2006-ban a Gruber Cosmology Prize egyik kitüntetettje volt.

Kip Thorne 1940-ben Utah-ban született, a PhD-címet 1965-ben Princetonban szerezte általános relativitáselméleti témájú értekezéssel, témavezetője az a John Archibald Wheeler, akitől a fekete lyuk elnevezés is származik. 27 évesen lett a Caltech legfiatalabban kinevezett professzora, ahol 1968-ban gravitációs hullámokkal foglalkozó kutatócsoportot alakíthatott. Figyelemre méltó, hogy akkoriban történt ez, amikor még igen kevés egyetemen ismerték fel az általános relativitáselmélet jelentőségét a modern fizikában. Kip Thorne a tudományterület egyik legalapvetőbb tankönyvének társszerzője [2], ő dolgozta ki a gravitációs hullámok multipólus-sorfejtésének elméletét. Ismert még a féreglyukakkal kapcsolatos munkássága, és ismertek az ennek kapcsán írt tudománynépszerűsítő könyvei is. Ő volt az Interstellar (Csillagok között) nagy sikerű science-fiction film tudományos tanácsadója; ennek köszönhető, hogy a filmben csak tudományosan igazolt vagy a jelenlegi tudásunknak nem ellentmondó történeteket mutattak be. Pályája során mintegy 50 PhD-munka témavezetője volt. Rainer Weiss győzte őt meg arról, hogy a lézer-interferometrikus interferométer gravitációshullám-detektorként működhet, így 1984-ben ő volt a LIGO másik alapító tagja. Jelenleg emeritus Feynman-professzor.

Barry Barish 1936-ban született Nebraskában, a PhD-t 1962-ben szerezte Berkeley-ben, kísérleti nagyenergiás részecskefizika témában. 1963 óta a Caltech professzora, jelenleg emeritus. Az 1980-as években a MACRO (Monopoles, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory) igazgatója – ez a nagykollaboráció mágneses monopólust szeretett volna találni, ami nem sikerült. Azonban találtak a később mások által igazolt neutrínóoszillációkra utaló jeleket. Tudományos nagykollaboráció vezetésében szerzett tapasztalatai miatt hívták meg a LIGO Laboratórium igazgatói tisztségébe, amit 1994 és 2005 között töltött be. Amikor a tisztséget átvette, a LIGO dolgai nem álltak fényesen. Az Amerikai Egyesült Államok tudományfinanszírozó szervezete, a National Science Foundation (NSF) sokadjára utasította vissza kérelmüket a detektorok megépítésének finanszírozására, mitöbb, értésükre adta, hogy utolsó pályázati lehetőségük maradt. Barry Barish ekkor kezdeményezte a kétfázisú LIGO-elképzelést, ami végül támogatást nyert. Ennek értelmében 1999 és 2002 között megépült a két korai LIGO-berendezés, majd 2010-ig zajlottak az első gravitációshullám-keresések. Bár gravitációs hullámot ebben az első fázisban észlelni nem sikerült, a berendezések bizonyították, hogy képesek a tervezett érzékenységgel működni. Így megérkezett a támogatás második fele, és 2015-re megépülhetett az Advanced LIGO, mely a gravitációs hullámokat végül megtalálta. A LIGO projektben betöltött működését követően egy másik nagy projekt, a tervezett ILC (International Linear Collider) igazgatói tisztségét töltötte be, 2013-ig. Az ILC megépítése azonban veszélybe került, mivel eddig a CERN-ben működő LHC (Large Hadron Collider) a Higgs-részecskén kívül mást nem talált.

Barry Barish nevéhez fűződik a LIGO berendezést üzemeltető laboratórium és az adatokat elemző kutatói tevékenység szétválasztása is. 1997-ben megalakította a LIGO Tudományos Kollaborációt, mely nyitott, lehetőséget biztosítva más országok kutatóinak is a bekapcsolódásra. Jelenleg a LIGO-t az NSF támogatja, a Caltech és az MIT működteti, amelyek egyben a projekt ötletgazdái és megépítői. Az Advanced LIGO projekt vezető pénzügyi támogatója az NSF volt, Németország (Max Planck Társaság), az Egyesült Királyság (Tudomány és Technológiai Testület) és Ausztrália (Ausztrál Kutatási Tanács) szintén jelentős kötelezettségváll-



lalást és hozzájárulást adott a projekthez. A programban több mint 1200 tudós, több mint 100 intézményből vesz részt a világ minden tájáról a LIGO Scientific Collaboration együttműködésén keresztül, amely a GEO Kollaborációt is magában foglalja. A további partnerek listája itt található: ligo.org/partners.php. A kollaborációnak a Szegedi Tudományegyetem Fizika Intézetének kutatói (Gergely Árpád László professzor, Tápai Márton tudományos segédmunkatárs és tanítványai), valamint az Eötvös Loránd Tudományegyetem Eötvös Gravity Research Group kutatói (Frei Zsolt professzor, Raffai Péter egyetemi adjunktus és tanítványai) is tagjai. Szintén magyar tagjai a Columbia Egyetem kutatói (Márka Szabolcs és Márka Zsuzsa professzorok, korábban Bartos Imre is).

Amint Barry Barish elmondta a Nobel-díjról szóló értesítés után készült első interjújában [3], Einstein nem hitt abban, hogy a gravitációs hullámok kimutatására valaha is sor kerülhet. Einstein korában azonban még nem ismerték az Advanced LIGO berendezések három kulcsfontosságú elemét: a lézereket, a digitális vezérlést és az aktív szeizmikus szigetelést. Utóbbi olyan, mint az aktív zajszűrő fülhallgató: levonja az állandónak tekinthető zajszintet a közvetített hangból, így az időszakos hangokat, például amikor valaki hozzánk szól, tisztábban halljuk. A különbség annyi, hogy a gravitációs hullám esetében ezt minden irányban másképpen kell megtenni. Az Advanced LIGO éppen az aktív szeizmikus szigetelés beépítésével érte el a legnagyobb javulást az eredeti LIGO-hoz képest. Átlagosan egy hármas faktorial, de a legérdekesebb, alacsony frekvenciákon 100-szorosan. Mivel minden irányból érkezhet gravitációs hullám, a számok köbével kell számolni, így alacsony frekvenciákon a javulás milliószoros [4]. Nem csoda, hogy bekapcsolás után gyakorlatilag rögtön sikerült az Advanced LIGO-nak gravitációs hullámot mérni.

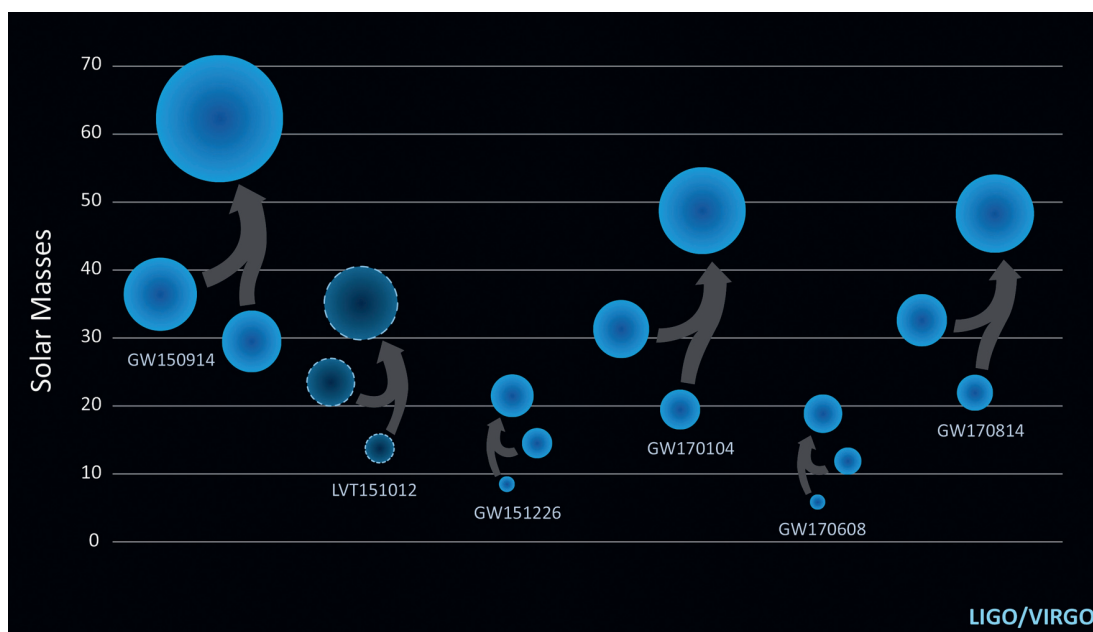
A teljes LIGO Tudományos Kollaboráció, kiemelt vezetőivel együtt számos egyéb kitüntetést is kapott az elmúlt két évben, így 2016-ban a Special Breakthrough Prize in Fundamental Physics [5] és a Gruber Cosmology Prize [6], 2017-ben pedig a Royal Astronomical Society RAS Group Achievement Award „A” [7], a Rossi Prize of the American Astronomical Society [8] és a Princess of Asturias Award for Technical and Scientific Research [9] díjakat.

Az első öt észlelt gravitációs hullám forrása összeolvadó fekete lyuk páros volt. Ezek közül az utolsót az európai, hasonló el-

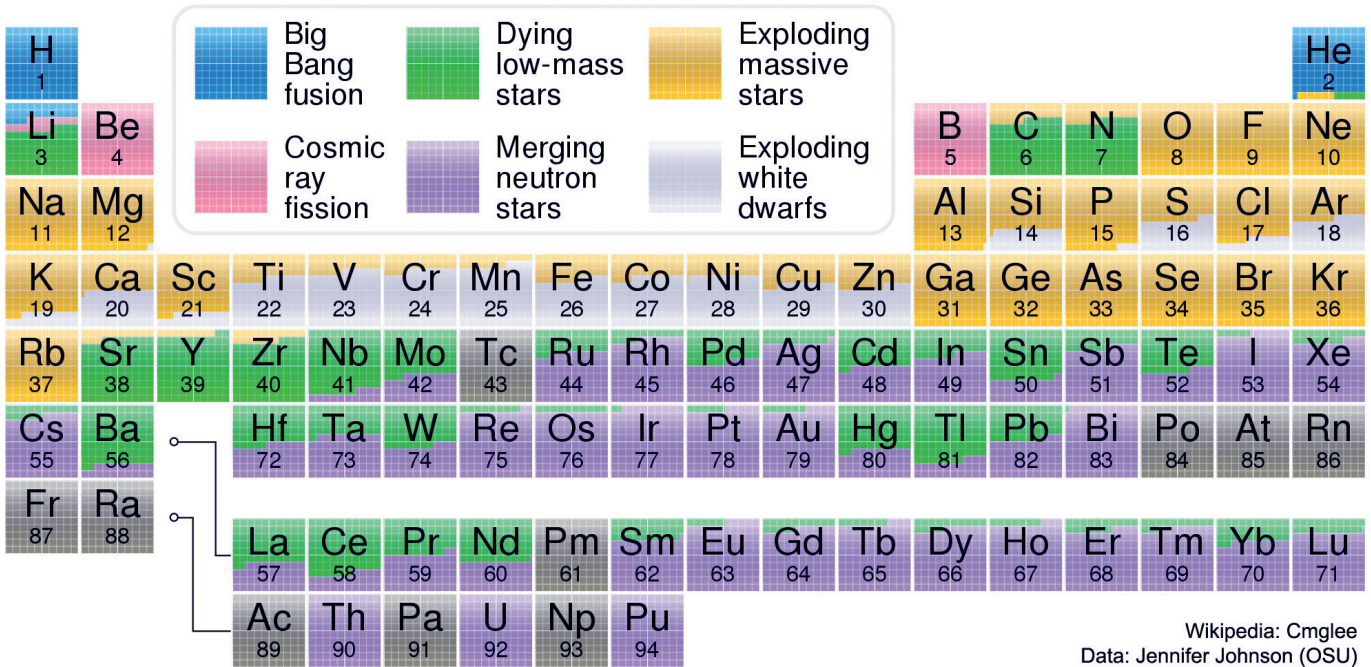
veken működő Virgo detektor is észlelte, lényegesen megjavítva a forrás helyzetének meghatározását. A Virgo Kollaborációnak is van magyar résztvevője, a Wigner Intézet kutatói (Vasúth Máttyás tudományos főmunkatárs és tanítványai).

A hatodik észlelés azonban új típusú forrásból jött: neutroncsillagok összeolvadásából [10]. Az előző észlelésekhez viszonyítva ez a jel sokkal tovább tartott. Az a tény, hogy a hullámot a Virgo detektor nem észlelte, lehetővé tette a forrás irányának minden eddiginél pontosabb meghatározását. 1,7 másodperccel később a kijelölt égtartományból eredő gamma-kitörést mutatott ki mind a Fermi, mind az Integral űrtávcső; 10 óra 52 perccel később a Hydra csillagkép NGC 4993 galaxisában új, kilonóvának nevezett fényforrást fedeztek fel; újabb 11 óra 36 perccel később a forrást infravörös, majd újabb 15 órával később ultrabolya tartományban is azonosították számos földi obszervatóriumban. 9 nap elteltével a Chandra űrtávcső felfedezte röntgensugárzását, majd 16 nappal később a Jansky Very Large Array (J VLA) rádióantenna-hálózat a rádiósugárzását is. Ez volt az első „többszínű-észlelés”, melyet mind gravitációs hullámok formájában, mind az elektromágneses sugárzás valamennyi tartományában megfigyelhetett a nemzetközi kutatói közösség. Az összeolvadás „lágy gamma-kitörést” keltett, igazolva ezzel a keletkezésükre tett korábbi javaslat helyességét. A folyamat során az összeütközésben felszabaduló neutronok egy sor nehéz elemet hoztak létre, közöttük aranyat és platínát. Az újonnan formálódott nehéz elemek jelenlétét az amerikai Gemini Obszervatórium, az európai Very Large Telescope és a NASA Hubble Űrteleszkópjának mérései egyaránt igazolták. Kiderült, hogy a vasnál nehezebb elemek mintegy fele ilyen neutroncsillag-összeolvadások során keletkezik. A Földön található arany és platina túlnyomó része is így jött létre.

Az észlelés segítségével a kutatók új módszerrel adták meg az Univerzum tágulását jellemző Hubble-állandó értékét, a gravitációs hullámok vizsgálatából az ún. luminozitás-távolság, az elektromágneses észlelések alapján pedig a vöröseltolódás meghatározásával. Az előző detektálásokhoz hasonlóan a diszperziós relációk vizsgálata nyomán a gravitációs hullámok frekvenciáját nem találták sebességfüggőnek, amivel mind a Lorentz-invariancia-sértést, mind a gravitációs hullámok fénysebességtől különböző sebességgel való terjedését sikerült kizárni.



Ismert tömegű fekete lyukak



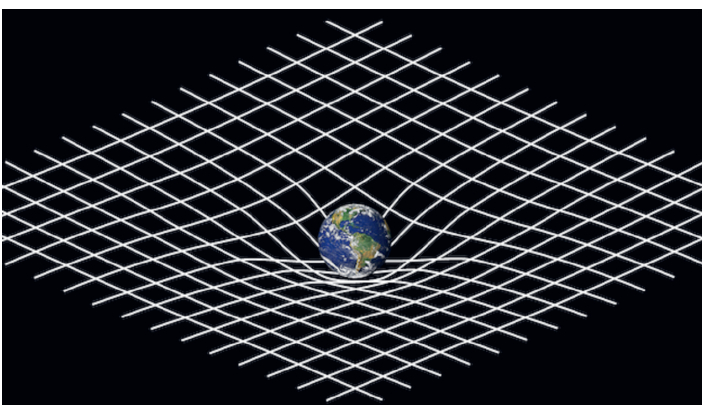
Az elemek eredete

Jelenleg újabb, hasonló elveken működő gravitációshullám-detektorok épülnek Japánban és Indiában. Fejlettebb változatukat Európában tervezik, Einstein-teleszkóp néven. Azonban a gravitációs hullámok egyéb frekvenciákon is előfordulhatnak. Mivel a kimutatható hullámhossz a detektor méretének függvénye, tervezik a LISA (Light Interferometer Space Antenna) felbocsátását a galaxisok központjában található, több millió naptömegű fekete lyukak ütközéséből keletkező gravitációs sugárzás kimutatására. A rádiópulzárak időkézésén alapuló mérések még ennél is kisebb frekvenciák észlelésére lesznek alkalmasak. Végül a legkisebb frekvenciájú gravitációs hullámok a mikrohullámú háttérsugárzás ún. B-polarizációjának méréséből határozhatók meg. Ezzel gyakorlatilag az Ősrobbanásig nézhetnénk vissza a múltba. Látnánk közvetlenül azt a korszakot, melyben mind a gravitáció, mind a kvantum jelenségek fontosak, amit egy jelenleg még nem létező kvantumgravitációs elmélet írna le. Mint azt Kip Thorne elmondta Nobel-díjas előadásának zárógondolataként [4], 2050 környékén egyrészt látni fogjuk a mikrohullámú kozmikus háttérsugárzásban a több százmillió éves periodicitású, Ősrobbanás-

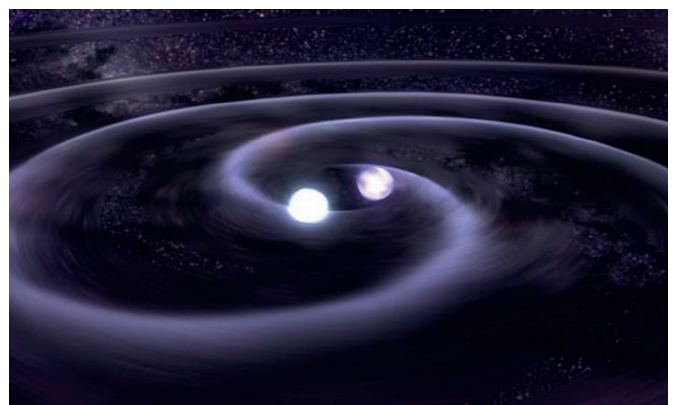
ból eredő gravitációs hullámokat; másrészt a tervezett Big Bang Explorer űrszonda-rendszer segítségével szintén az Ősrobbanásból származó néhány másodperces periódusú gravitációs hullámokat fogunk észlelni. Ő arra számít, hogy a kétféle gravitációs hullám nem lesz egymással összhangban, és az Ősrobbanásból nem a jelenleg gondolt vákuum-fluktuációk születtek meg [4]. Ez lesz a kvantumgravitáció Michelson–Morley-kísérlete. ●●●

IRODALOM

- [1] LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, Phys. Rev. Lett. (2016) 116, 061102.
- [2] C. Misner, K. Thorne, J. A. Wheeler, Gravitation. Freeman, 1973.
- [3] <https://www.symmetrymagazine.org/article/qa-with-nobel-laureate-barry-barish>
- [4] <https://www.youtube.com/watch?v=scVyxVnMYUc>
- [5] <https://breakthroughprize.org/News/32>
- [6] <http://gruber.yale.edu/cosmology/2016/ligo-discovery-team>
- [7] <https://www.ras.org.uk/images/stories/awards/winners/2017/LIGO%202017%20Group%20Achievement%20Award%20A.pdf>
- [8] <https://aas.org/posts/news/2017/01/head-rossi-prize-goes-gabriela-gonzalez-ligo-team>
- [9] <http://www.fpa.es/en/princess-of-asturias-awards/laureates/2017-rainer-weiss-kip-s-thorne-barry-c-barish-and-ligo-scientific-collaboration.html?especifica=0&idCategoria=0&anio=2017&especifica=0>
- [10] LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, Phys. Rev. Lett. (2017) 119, 161101.



A kép azt modellezi, hogyan görbül a téridő egy nagy tömegű objektum – ebben az esetben a Föld – jelenlétében (NASA's Imagine the Universe)



Gravitációs hullámok keletkezése neutroncsillagok összeolvadásából – művészi ábrázolásban (NASA/Goddard Space Flight Center)