

MAGYAR RÉSZVÉTEL AZ EURÓPAI GRAVITÁCIÓSHULLÁM-KÍSÉRLETEKBEN – I. RÉSZ

Rácz István
Wigner Virgo csoport, Wigner FK, Budapest

Jelen írás – az európai gravitációshullám-kísérletek rövid bemutatása mellett – betekintést kíván nyújtani az ezekben való magyar részvétel néhány részletéről, kutatócsoportunk, a Wigner Virgo csoport tudományos tevékenységéről, és nem utolsósorban ezen új tudományterület jövőbeni hazai vonatkozású lehetőségeiről.

Európa legnagyobb gravitációshullám-detektorát, az 1. ábrán látható Virgo gravitációshullám-antennát a francia és olasz kormány által erre a célra létrehozott Európai Gravitációs Observatórium (az EGO konzorcium) építette meg 1994 és 2001 között a Pisa közelében található Cascinában [1, 2]. Az eredetileg kizárólag francia és olasz kísérlet napjainkra már egy több mint kétszáz kutató és mérnök munkáját integráló nemzetközi együttműködéssé vált, amelynek holland, angol és lengyel kutatók mellett a mi magyar csoportunk is tevékeny részese. Csoportunk 2008-ban csatlakozott a Virgo Tudományos Együttműködéshez.

Mielőtt a kísérletekkel és az azok kapcsán végzett kutatómunka részleteivel ismerkednénk, tekintsük át röviden azokat az alapismereteket, amelyek a gravitációs hullámok mibenlétét és így a mérések kapcsán felmerülő technikai problémákat is érthetőbbé teszik.

A gravitációs hullámok és az általános relativitáselmélet

Einstein már 1916-ban, közvetlenül az általános relativitáselmélet megalkotása után felismerte, hogy elmélete alkalmas a gravitációs hullámok leírására, majd vizsgálta azok tulajdonságait. *Einstein* elmélete segítségével azt is megjósolta, hogy a gravitációs tér csillagászati léptékű és erősen aszimmetrikus dinamikus folyamatainak során rengeteg energia szabadulhat fel gravitációs hullámok formájában, ugyanakkor ezek a távoli megfigyelők számára nagyon gyenge változásokként jelennek meg.

A 2013. évi Magyar Fizikus Vándorgyűlésen elhangzott előadás írott változata.

Hálával tartozom *Frenkel Andornak* a kézirat gondos átolvasásáért és számos hasznos észrevételéért.

A kutatás a TÁMOP-4.2.4.A/2-11/1-2012-0001 Nemzeti Kiválóság Program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A gravitációs hullámok természetének megértéséhez érdemes azt is felidézni, hogy az *Einstein*-elmélet a gravitáció egy olyan geometrizált elmélete, amelyben nincs gravitációs erő, helyette a gravitációs hatások a téridő geometriájának görbültségén keresztül jeleníthetők meg. Az elmélet alapján a Világmindenségben található anyag elhelyezkedése és mozgása határozza meg annak geometriáját, ugyanakkor az Univerzumot felépítő anyag fejlődése csak ezen az időben és térben is változó geometria fejlődésével együtt írható le.

Fontos kiemelni, hogy az anyagmezőkre vonatkozó teregyenletekkel kibővített *Einstein*-egyenletekhez általános esetben is mindig találhatók olyan mértékváltozások (lásd például [3]-at), amelyek esetén az alapváltozók egy csatolt, bár nemlineáris hullámegyenlet-rendszernek tesznek eleget. Mivel azonban már maguk az *Einstein*-elmélet alapegyenletei sem lineárisak, az analitikus módszerek nem, vagy csak nagyon korlátozott mértékben adhatnak segítséget az olyan dinamikai folyamatok tanulmányozásában, mint például a gravitációs hullámok keltése, vagy azok terjedése. Ezért kutatócsoportunk az elmúlt évek során kifejlesztette a *Grid-Ripper* programcsomagot [4–7], amely az általános relativitáselmélet keretein belül lehetővé teszi különféle asztrofizikai rendszerek dinamikai vizsgálatát, valamint a gravitációshullám-keltési folyamatok és a kialakuló hullámok terjedésének leírását.

A gravitációs hullámok tanulmányozását lényegesen leegyszerűsíti az a feltevés, hogy azok a források

1. ábra. A Pisa melletti Cascinában található Virgo gravitációshullám-detektor madártávlatból.



tól távol már gyengék, így a sugárzási zónában a lineáris közelítés alkalmazható. Ennek, valamint az úgynevezett sugárzási mértéknek a felhasználásával a vákuum Einstein-egyenletekből azt kapjuk, hogy a téridő $g_{\alpha\beta}$ metrikájának az $\eta_{\alpha\beta}$ Minkowski-féle sík metrikától való, a $g_{\alpha\beta} = \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta}$ reláció által meghatározott kicsiny $|h_{\alpha\beta}| \ll 1$ eltérése a

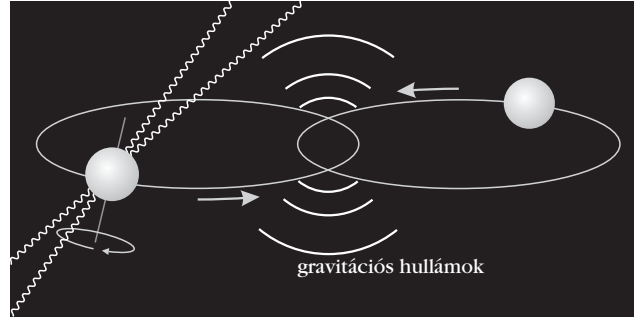
$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) h_{\alpha\beta} = 0$$

homogén hullámegyenletnek tesz eleget. Így az Einstein-elméletben a gravitációs hullámokra a gömb-szimmetriát nem tisztelő módon gyorsuló testek, mint források környezetében fellépő geometriai változásoknak a téridőben fénysebességgel tovaterjedő hatására gondolhatunk.

A gravitációs hullámok kapcsán érdemes azt is megemlíteni, hogy azok, mint a geometria hullámzásai jelennek meg, és mindig csak a relatív gyorsulásokon, azaz a próbatestek egymáshoz viszonyított úgynevezett árapálygyorsulásain keresztül hatnak környezetükre. Ez annak a következménye, hogy Einstein elméletében nincs abszolút tér, így nincs mihez képest abszolút gyorsulni. Az említett relatív gyorsulások egy kiterjedt test esetében úgy jelennek meg, hogy a testet egy időpillanatban valamely irányban összenyomó, ugyanakkor a rá merőleges irányban széthúzó, továbbá ezen irányok folyamatos változása miatt nyíró erőhatások is érik.

Mindezeknek megfelelően a detektorok tervezése során a karokban váltakozva fellépő nyújtásokat, illetve összehúzódásokat tükröző $\delta L(t)/L$ relatív hosszváltozást – itt $\delta L(t)$ az eredetileg egymástól L távolságra lévő (tömeg)pontok távolságának időbeni megváltozását jelöli – választották a legfontosabb megfigyelhető mennyiségnek. A relatív hosszváltozást a $\delta L(t)/L = b(t)$ reláció kapcsolja a $h_{\alpha\beta}$ -kból származtatott $b(t)$ hullámamplitúdóhoz. A fizikai folyamatok által keltett gravitációs hullámok esetén a $b(t)$ hullámamplitúdót a görbült téridőben szabadon eső testek mozgását leíró geodetikusok eltérési egyenlete alapján határozhatjuk meg. Így a $b(t)$ függvény detektor által mért értéke többek között függ az érkező gravitációs hullámot kibocsátó forrás távolságától, valamint a hullámot és a detektort jellemző fő irányok egymáshoz viszonyított elrendezésétől.

A gravitációs hullámok által okozott hatás azonban elképesztően kicsiny. Még a csillagászati értelemben is extrém relativisztikus mozgást végző, körülbelül 15 Mpc távolságra lévő források, mint a bespirálózó, majd összeolvadó kettős neutroncsillagok esetében is csak $b \sim 10^{-18}$ nagyságú relatív hosszváltozás jelenik meg a környezetünkben. Éppen ezért a gravitációs hullámok közvetlen detektálására kifejlesztett gravitációshullám-detektoroknál fellépő technikai követelmények olyan kiugróak, hogy éppen csak napjainkra értük el azt a szintet, hogy a sikeres detektálásnak két-három éven belül valódi esélye lehessen.



2. ábra. A Hulse–Taylor-kettős sematikus ábrázolása.

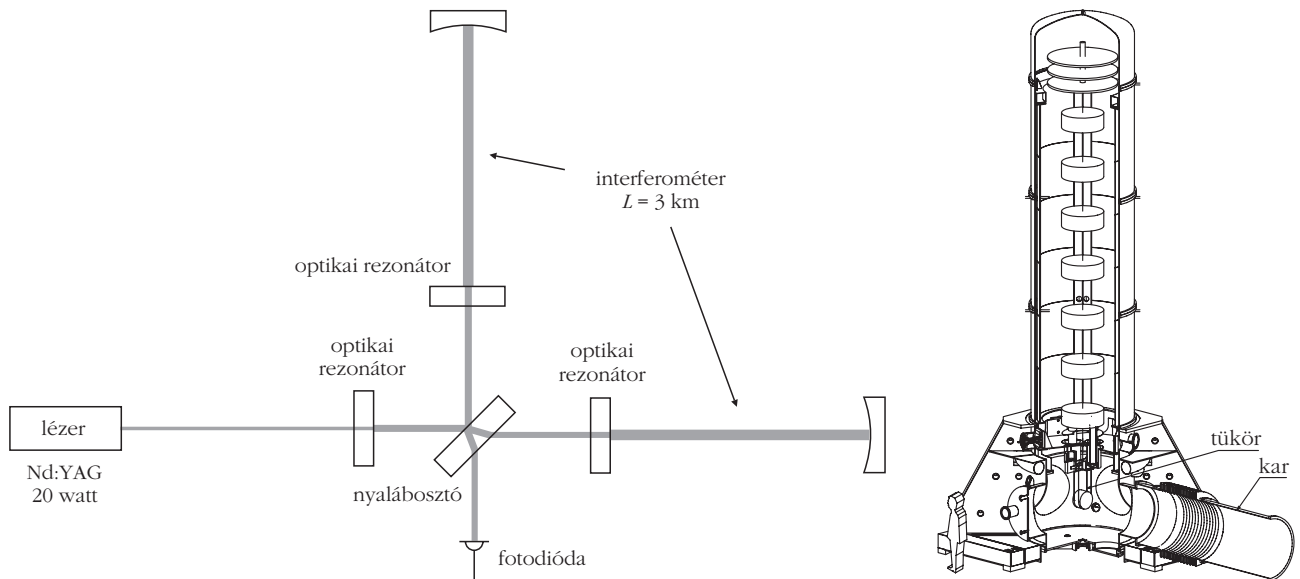
Léteznek-e a gravitációs hullámok?

Mielőtt a detektálásra irányuló erőfeszítésekről beszélnénk, érdemes meggondolni, vajon mi a garancia arra, hogy egyáltalán léteznek a kérdéses hullámok. Fontos hangsúlyozni, hogy a gravitációs hullámok létezésére jelenleg csak közvetett bizonyítékok állnak rendelkezésünkre. Az első ilyen, standard csillagászati megfigyelésekkel alátámasztott közvetett bizonyítékot a *Hulse* és *Taylor* által 1975-ben felfedezett PSR 1913+16 jelű, kettős pulzár viselkedésének hosszú távú megfigyelése szolgáltatta (2. ábra). Az Einstein-elmélet értelmében, amikor két csillag egymás körül kering, a gravitációs hullámok által elvitt energia egyrészt a keringési sugarak csökkenését, másrészt a keringési frekvencia növekedését kell, hogy eredményezze.

A Hulse–Taylor-rendszer egyik résztvevője egy pulzár, amely természetes segítséget kínál fel a megfigyelésekhez, hiszen a pulzár által kibocsátott órajel időbeni változásából következtetni lehet a pulzár helyzetében és sebességében beálló változásokra. Mivel a két neutroncsillag távolsága a Nap átmérőjével összevethető, már viszonylag rövid (néhány évtizedes) megfigyelési idő alatt is mérhető, a sugárzási energiaveszteségeknek megfelelő változásokat találtak a mozgások geometriai méretében és a keringési frekvenciában egyaránt. A gravitációshullám-keltés által előidézett energiaveszteség mértéke éppen az általános relativitáselmélet formulái alapján elvárt nagyságúnak adódott, hiszen a jóslatokat 0,2% pontossággal igazolták a megfigyelések. Ezek a következtetések nem válhattak volna lehetővé Hulse és Taylor 1975-ös felfedezése és évtizedekig tartó kitaró megfigyelései nélkül. Mindezek elismeréseként 1993-ban Hulse és Taylor fizikai Nobel-díjat kaptak.

A gravitációshullám-kísérletekről

Az árapályerők által okozott relatív hosszváltozások elvileg hatékonyan észlelhetők a 3. ábrán mutatott, egymásra merőleges karokkal rendelkező Michelson–Morley-féle interferométerrel. Az interferométer karjaiba több egymásba ágyazott optikai rezonátort építettek, amelyek segítségével lenyeges effektív karhosszúság-növekedés érhető el.



3. ábra. A Virgo-detektor optikai rendszerének sematikus ábrázolása.

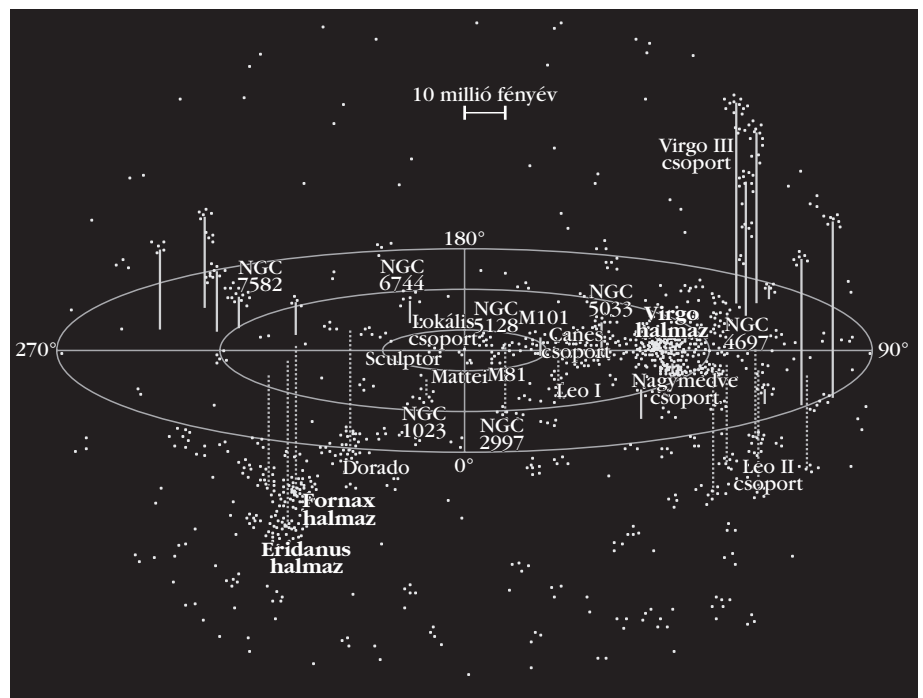
Mára a földfelszínre telepített, a lézer-interferometria elvén működő gravitációshullám-detektorok világhálózata épült ki, amely magába foglalja a két amerikai LIGO, az európai Virgo és GEO600, valamint a TAMA300 detektorokat. Az első-generációs detektorok érzékenységét úgy határozták meg, hogy például a neutroncsillag-kettősök összeolvadását akkor is képesek legyenek megfigyelni, ha az a tőlünk 15 Mpc távolságba eső Virgo-halmazban történik (4. ábra). Az első-generációs interferometrikus detektorok a korábbi tudományos adatgyűjtési tevékenységük során elérték ezt a tervezett érzékenységet és így közvetve igazolták a kidolgozott mérési eljárás megvalósíthatóságát.

Éppen ezért jogosan merülhet fel a kérdés, miért nem sikerült még egyetlen ilyen összeolvadási folyamatot sem megfigyelnünk. Ezzel kapcsolatban fontos megemlíteni, hogy csillagászati megfigyelések alapján a neutroncsillag-kettősök összeolvadására vonatkozó várható eseményráta értéke nagyon alacsony, évente mintegy 0,01–0,1 esemény. Ezekből az kicsiny értékekből az is következik, hogy a biztos detektálás érdekében az eseményrátát körülbelül ezerszeresére kellene növelni, amihez legalább tízszer érzékenyebb detektorokra lenne szükség.

Ennek érdekében jelenleg a Virgo-antenna – a többi detektorral együtt – olyan technológiai fejlesztésen esik át, amitől érzékenysége a koráb-

binál tízszer jobb lesz, és ez a detektálás valószínűségét ezerszeresére növeli. Az így nyert, továbbfejlesztett detektorok részvételével 2015-től olyan felfedező mérésorozatot kezdődik, amelynek elsődleges célja a gravitációs hullámok közvetlen detektálása. A technikai követelmények olyan kiugróak, hogy önmagában semelyik intézmény nem képes a szükséges szakmai és technológiai tudásbázist biztosítani. Ezért alakult ki napjainkra az érdekelt intézményhálózatok szoros nemzetközi együttműködése, amely a világ több pontján felépített szuperérzékeny gravitációshullám-antenna összehangolt tevékenysége révén tesz kísérletet az első közvetlen detektálásra.

4. ábra. A lokális galaxishalmazunkat körülvevő, körülbelül 50 millió fényév sugarú gömbön belül galaxisok ezrei találhatók. Ezek hozzávetőleges eloszlását mutatja az (Richard Powell nyomán).



Így a detektorok továbbfejlesztése a neutroncsillag-kettősök összeolvadására vonatkozó érzékenységi határ 20 Mpc-ről 200 Mpc-re történő növelését, illetve a forgás lassulásának több ismert pulzár esetében történő mérését teszi majd lehetővé. Az érzékenyebb detektorokkal évente néhány tucat, csillagászati jelentőséggel is bíró megfigyelés várható, ugyanakkor érdemes azt észben tartani, hogy a jel/zaj arány (az SNR) még viszonylag alacsony lesz ahhoz, hogy a források fizikai paraméterei teljes bizonyossággal meghatározhatók lehessenek.

Két további érdekesség a gravitációs hullámokkal kapcsolatban

A jelenleg alkalmazott csillagászati megfigyelési módszerek majdnem mindegyike az elektromágneses sugárzások észlelésén alapul. Ezeknek egy nagyon fontos közös jellemzője, hogy mindenkor csak a megfigyelt objektum felszínén kibocsátott, a forrás méreténél lényegesen kisebb hullámhosszú fotonok összességét figyelhetjük meg. Ezzel szemben a gravitációs hullámok a forrásukként szolgáló anyag összehangolt együttes mozgásáról hordoznak információt. Gondoljuk meg, hogy például egy olyan neutroncsillagokból álló kettős esetén, amely már éppen az összeolvadás fázisában van, a mozgás olyannyira relativisztikus, hogy a keltett gravitációs hullám frekvenciája akár 1000 Hz, ami még mindig sok nagyságrenddel kisebb a látható fény frekvenciájánál. Ekkor a keltett hullám hullámhossza 300 km, ami lényegesen nagyobb a forrás méreténél, hiszen a rendszer átmérője ennek körülbelül csak a tizede. A nagy hullámhossz magyarázza például azt, hogy a detektorokban több, egymásba skatulyázott Fabry–Pérot optikai rezonátort

kell alkalmazni, ami által lényeges effektív karhosszúság-növekedés érhető el. Lényegében ez teszi lehetővé az ilyen nagy hullámhosszú gravitációs hullámok detektálhatóságát.

Ennél talán fontosabb az, hogy csillagászati megfigyelésekben fellépő elektromágneses sugárzások tipikus hullámhossza sokkal kisebb, mint maga a megfigyelt csillagászati objektum mérete. Lényegében ez biztosítja, hogy az adott égitestekről optikai képet alkothassunk, és szokásos csillagászati eszközeinket az adott megfigyelési pontra irányíthassuk. Ezzel szemben, ahogy a fenti példa is mutatja, a gravitációs hullámok hullámhossza általában a forrás méreténél is jóval nagyobb és csak egyetlen hullámvonulat érkezik a forrásról. Ez kicsit ahhoz hasonlatos, mintha egyetlen és megismételhetetlen elektromágneses jelet kellene megtalálnunk a szokásos távcsöveinkkel. Így a gravitációs hullámok segítségével nem tudunk majd optikai értelemben vett képet előállítani a forrásokról, továbbá az egyes detektoroknak nem is lehet irányérzékenysége. Ezért a gravitációs hullám-források helyének meghatározásához mindig több detektor egyidejű érzékelésére lesz szükség.

Irodalom

1. <https://www.casina.virgo.infn.it>
2. https://pub3.ego-gw.it/itf/Members_DB/Private/Institut_List.php
3. I. Rácz: On the existence of Killing vector fields. *Class. Quant. Grav.* 16 (1999) 1695–1703.
4. I. Rácz, G. Z. Tóth: Numerical investigation of the late-time Kerr tails. *Class. Quant. Grav.* 28 (2011) 195003.
5. P. Csizmadia, A. László, I. Rácz: On the use of multipole expansion in time evolution of nonlinear dynamical systems and some surprises related to superradiance. *Class. Quant. Grav.* 30 (2013) 015010.
6. <http://www.kfki.hu/~cspeter/gridripper/index.html>
7. P. Csizmadia, I. Rácz: Gravitational collapse and topology change in spherically symmetric dynamical systems, *Class. Quant. Grav.* 27(2010) 015001.