

Összefoglalás

Kutatásunk során atomi szintű számítógépes szimulációkkal vizsgáltuk gyémánt és szilíciumkarbid nanokristályok tulajdonságait *in vivo* biomarker alkalmazások szempontjából. Megállapítottuk, hogy megfelelő ponthibák létrehozásával a szilíciumkarbid nanokristályok optikai tulajdonságai nagy mértékben hangolhatók, az eredményeinket a [3] cikkben publikáltuk. Megmutattuk, hogy a legkisebb gyémánt nanokristályok abszorpciók éle is a közeli infravörös tartományba kerül bizonyos, a felületen lévő kémiai kötések hatására. A részletes eredményekről az [5] hivatkozásban lehet olvasni. Az általunk vizsgált nanokristályok nem mérgezőek, fotostabilak, elegendően kis méretűek, és számításaink alapján fluoreszcens hullámhosszuk a közeli infravörös tartományba esik. A manapság elterjedt szerves és félvezető nanokristály biomarkerekhez képest előnyös tulajdonságokkal rendel-

keznek, így jó alternatívát jelenthetnek a biológiai molekulák képalkotásában.

Irodalom

1. M. A. L. Marques, N. T. Maitra, F. M. S. Nogueira, E. K. U. Gross, A. Rubio (szerk.): *Fundamentals of Time-Dependent Density Functional Theory*. Springer, 2012.
2. X. Michalet, F. F. Pinaud, L. A. Bentolila, J. M. Tsay, S. Doose, J. J. Li, G. Sundaresan, A. M. Wu, S. S. Gambhir, S. Weiss: Quantum dots for live cells, in vivo imaging, and diagnostics. *Science* 307/5709 (2005) 538–544.
3. B. Somogyi, V. Zólyomi, A. Gali: Near-infrared luminescent cubic silicon carbide nanocrystals for in vivo biomarker applications: an ab initio study. *Nanoscale* 4 (2012) 7720–7726.
4. M. Vörös, P. Deák, T. Frauenheim, A. Gali: The absorption of oxygenated silicon carbide nanoparticles. *The Journal of Chemical Physics* 133/6 (2010) 064705.
5. M. Vörös, T. Demjén, T. Szilvási, A. Gali: Tuning the optical gap of nanometer-size diamond cages by sulfurization: A time-dependent density functional study. *Phys. Rev. Lett.* 108 (2012) 267401.
6. M. Vörös, A. Gali: Optical absorption of diamond nanocrystals from *ab initio* density-functional calculations. *Phys. Rev. B* 80 (2009) 161411.

MAGYAR RÉSZVÉTEL AZ EURÓPAI GRAVITÁCIÓSHULLÁM-KÍSÉRLETEKBEN – II. RÉSZ

Rácz István

Wigner Virgo csoport, Wigner FK, Budapest

Csoportunk tudományos vállalásai

A felújítás alatt lévő és várhatóan 2015-ben újrainduló detektorok érzékenysége nemcsak az alkalmazott optikai és vákuumfizikai csúcstechnológiától, hanem a detektorok által felvett mérési eredmények (ezek különféle érzékelők által rögzített idősorokból állnak) feldolgozásának hatékonyságától is függ. Tudományos hozzájárulásaink mindegyike a detektorok érzékenységének minél jelentősebb növelését célozza meg. Ezek a korábban említett numerikus relativitáselméleti GridRipper programcsomag kifejlesztését, a Virgo Tudományos együttműködés számítástechnikai háttérének lényeges kibővítését, valamint az elméleti módszerek felhasználásával kialakított új jelkereső és zajcsökkentő eljárások kidolgozását, illetve azok adatanalízisben történő alkalmazását foglalják magukba.

Az advanced Virgo Tier-0 rendszere

A számítástechnikai rendszerek hatékony működtetésének, valamint a LIGO és Virgo tudományos együttműködések közötti adatmegosztás létrehozásában

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

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

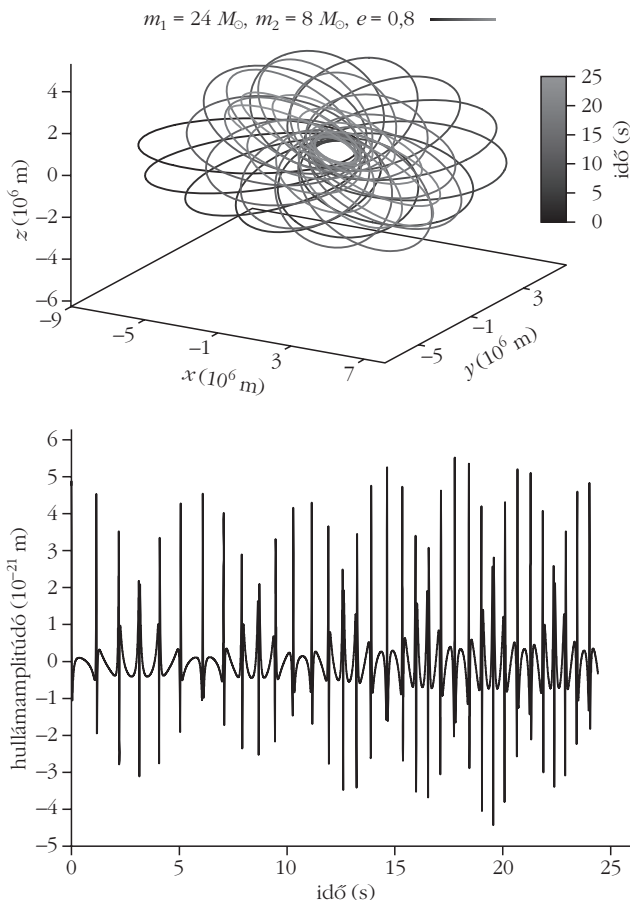
A kutatás a TÁMOP-4.2.4.A/2-11/1-2012-0001 Nemzeti Kiválóság Program című projekt keretében zajlott, amely az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

kifejtett tevékenységünknek köszönhetően reálissá vált az is, hogy az advanced Virgo legfontosabb, Tier-0 szintű rendszere a Wigner RCP Adatcentrumába [8] települjön. A nyár végén az EGO Council megbízta az EGO igazgatóját, a Virgo Tudományos együttműködés szóvivőjét és a Virgo adatanalíziséért felelős munkacsoportjának vezetőjét, hogy kezdjék meg a számítástechnikai kapacitások kialakítására irányuló egyeztetéseket a Wigner RCP vezetőségével.

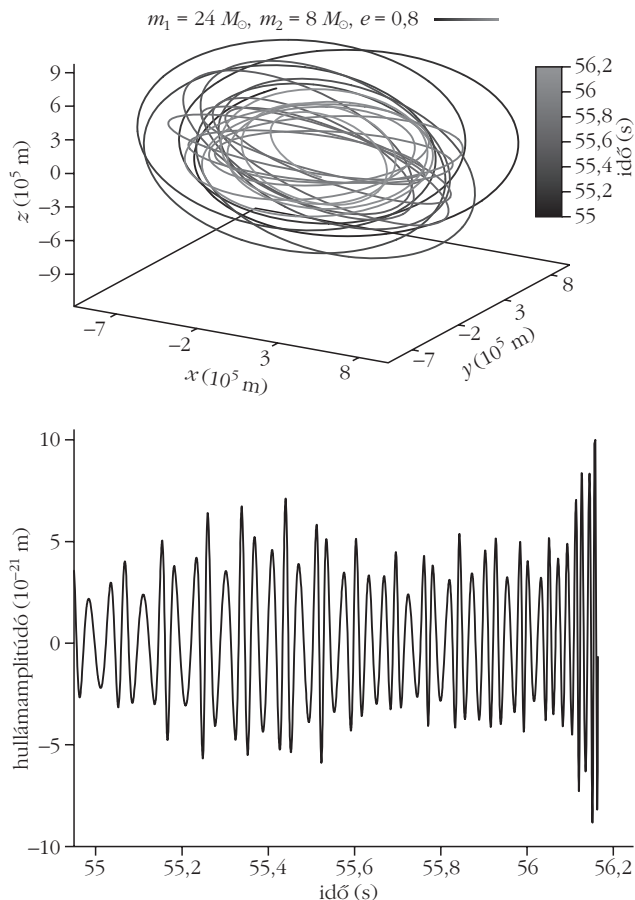
Emtényben mindez megtörténik, mindkét európai kísérlet – az advanced Virgo és az Einstein Teleszkóp Projekt – adatait a Wigner Adatcentrumában tároljuk, illetve dolgozzuk majd fel. Emellett a gridtechnológia eredményeinek felhasználásával a világ összes többi detektorának legfontosabb adatai is elérhetőek lesznek itt a kollaborációhoz tartozó bármely felhasználó számára. Ez egyedülálló lehetőséget teremt majd arra, hogy a magyar gravitációshullám-fizikában érdekelt közösség tagjai kényelmesen elérjék és alkalmazzák a tudományos adatok forrását, ami – remélhetően – a közösség lényeges bővüléséhez vezet.

A CBwaves szoftver kifejlesztése

A földi telepítésű detektorok 1000 Hz körül a legérzékenyebbek, így számukra az összeolvadó neutroncsillagok, illetve a csak kicsit nagyobb tömegű fekete lyuk-kettősök a legígéretesebb források. Ezek leírására a fejlődés nagy részében kiválóan alkalmas a poszt-newtoni (PN) közelítés, aminek az adatanalízisben



5. ábra. Spinnel és excentricitással jellemezhető kettős pályája az időfejlődés kezdetén (felül) és ugyanezen fázisban a keltett gravitációs hullám amplitúdójának időfüggése (alul).



6. ábra. Spinnel és excentricitással jellemezhető kettős pályája az összeolvadási fázis előtt (felül) és ugyanezen fázisban a keltett gravitációs hullám amplitúdójának időfüggése (alul).

történő hatékony alkalmazására az elmúlt évek során kidolgoztuk a CBwaves programcsomagot [9].

A CBwaves a legáltalánosabb – spinnel és/vagy akár nagy excentricitással is jellemezhető – kompakt kettősök által kisugárzott gravitációs hullámok pontos meghatározását teszi lehetővé. A kód segítségével, az ismert legjobb pontosságot alkalmazva egyidejűleg határozzuk meg a forrást alkotó kettős mozgását és a kibocsátott gravitációs hullámformát.

A program segítségével olyan hullámformabankokat kívánunk kialakítani, amelyek képessé teszik a kereső algoritmusokat az excentrikus, valamint spinnel is jellemezhető kettősök által kibocsátott hullámok hatékony felismerésére.

A CBwaves programcsomag már eddig is számos alkalmazásra lelt. Jelenleg a LAL/LALsimulations kollaborációs programcsomagba történő beépítése történik, amely a bespirálózó kettősökre kidolgozott keresőalgoritmusokban a fizikailag adekvát hullámformák alkalmazását teszi lehetővé.

Az 5. és 6. ábrán ábrán egy spinnel és excentricitással jellemezhető kettős pályájának időfejlődése (ábrák felső része), valamint a detektor számára, a forrás ideális elhelyezkedése esetén megjelenő hullámformái (az ábrák alsó része) láthatók – az 5. ábrán a fejlődés elején, míg a 6. ábrán az összeolvadási megelőző időszakban.

Az adatok jel-zaj arányának javítása

A mérni kívánt kicsiny jelnek a zajos háttérhez viszonyított arányában (SNR) elért bármilyen javulása lényegesen megnövelheti a detektálás valószínűségét, valamint a jelhez tartozó forrás azonosíthatóságát. Ebből a célból a továbbfejlesztett LIGO és Virgo detektorok által rögzített idősorokban megjelenő zajok elnyomására két új SNR javító eljárást tervezünk alkalmazni, egyrészt mértékfüggetlen mennyiségek használata, valamint új zajszűrő eljárások kidolgozása révén.

1. Az egyik legtermészetesebb kérdés az, miért nem használunk mértékfüggetlen mennyiségeket a gravitációs hullámok detektálása során. Látszólag könnyű kezelhetősége miatt majdnem minden érvelés az úgynevezett TT (Transverse Traceless) mérték használatára épül. A közhiedelemmel szemben megmutatható [10–12], hogy a TT rész meghatározása csak a mindenütt vákuum esetben egyszerű és még ott is meglehetősen nagy hibával működik az ezt előállító közelítő eljárás. A legfontosabb érv a fizikai mennyiségek TT mértékbeli értékének használatával szemben az, hogy a meghatározásukhoz nem-lokális, azaz elliptikus módszereket kell használni. Éppen ezért félrevezető az, amikor érveléseinkből kihagyjuk ezeket a nem-lokális járulékokat, hiszen a források a földi megfigyelőtől csillagászati távolságokban vannak. Ahogyan azt a nemrégiben vég-

zett elméleti vizsgálataink megerősítették [10], az egyedi adekvát eljárás az, ha mértékinvariáns mennyiségeket használunk. Ilyen például a téridő görbületi tenzorának árapály-része, amely egyrészt a detektorokban alkalmazott próbatestek egymáshoz viszonyított, úgynevezett relatív gyorsulásainak mérését feltételezi, amely áttételeken keresztül a detektorok karjaiban futó fotonok relatív fázisváltozásának második idő szerinti deriváltjával fejezhető ki.

Mivel a jelenlegi jelkereső algoritmusok teljesen a TT mértékre alapozottan működnek, elsődleges feladatunk lesz annak tesztelése, hogy javít-e az adatanalízis hatékonyságán a mérhető mennyiségek alkalmazása. Ezt követően, az eljárás jóságának függvényében várható a módszer beemelése a LIGO–Virgo kollaboráció adatanalízisébe.

2. A másik SNR javító eljárás a Miskolci Egyetemen kifejlesztett, szeizmológiai adatsorok zajának elnyomására szolgáló analitikus szűrők [13] alkalmazását tűzi ki célul. Mivel a geofizikai és gravitációshullámjelek jellegzetességei eltérnek, ezek a szűrők feltehetően különféle módosításon kell, hogy átessenek. Ezt követően alkalmazhatóságuk tesztelése válik szükségessé. A kifejlesztetni kívánt új módszer hatékonyságát kezdetben a szimulált detektorzajba véletlenszerűen elhelyezett elméleti jelek felkutatásával teszteljük, majd kidolgozzuk a LIGO–Virgo kereső programcsomagokba illeszthető változatot.

A gravitációs hullámok detektálásának jelentősége

A gravitációs hullámok első közvetlen detektálása, majd ezt követően a gravitációshullám-csillagászat kialakulása korszakalkotó jelentőségű lesz. Elegendő arra gondolnunk, hogy a gravitációs hullámok által teljesen új ismeretekre tehetünk szert az Univerzummal kapcsolatban is, hiszen minden ez irányú ismeretünk forrása az elektromágneses sugárzások érzékelésére alapozott „hagyományos” csillagászat. Éppen ezért fontos annak hangsúlyozása, hogy az utóbbi időben végzett csillagászati megfigyelések és a jelenleg elfogadott kozmológiai modell alapján az Univerzum 96%-át sötét energia, illetve sötét anyag alkotja, amelyek egyike sem bocsát ki elektromágneses sugárzást. Mivel ugyanakkor ezek a sötét részek gravitációsan kölcsönhatnak a megfigyelhető résszel, azt várjuk, hogy a gravitációs hullámok megfigyelése által ezek természetéről és közvetve az Univerzum egészéről alapvetően új ismeretekre tehetünk szert.

A gravitációs hullámok egy másik, hasonlóan fontos tulajdonsága az, hogy alig hatnak kölcsön a megfigyelhető anyaggal. Ettől olyan irratlanul nehéz őket detektálni is. Ennek köszönhető, hogy a gravitációs hullámok segítségével az Univerzum más eszközökkel meg nem ismerhető, a rekombináció előtti korai állapotáról is nagyon fontos információkra tehetünk szert.

Einstein elméletében a gravitációs hullám a fény sebességével terjed és két polarizációs állapottal jelle-

mezhető. Vannak más alternatív gravitációelméletek is, amelyekben ezen tulajdonságok egyike, esetleg mindkettő sérül, például a tömeges gravitont tartalmazó, vagy egy skalármező hozzáadásával módosított elméletben. Az eddig elvégzett kísérletek – beleértve a Hulse–Taylor-pulzárra vonatkozó megfigyeléseket is – összhangban vannak mind az Einstein-elmélettel, mind pedig az egyik alternatíváját megjelenítő Brans–Dicke-elmélettel. A gravitációshullám-megfigyelések perdöntő jelentőséggel bírhatnak abból a szempontból, hogy melyik elmélet alkalmasabb az erős gravitációs terek, valamint az extrémén relativisztikus mozgások pontos leírására.

Az alábbi kérdések jól érzékeltetik a gravitációs hullámok megfigyelésének fizika alapjait érintő következményeit.

1. Olyanok-e a gravitációs hullámok, amilyeneknek az Einstein-elmélet alapján várjuk?

2. Milyen a gravitációs összeomlás konkrét lefolyása egy távoli megfigyelő számára?

3. Mekkoraik valójában a jelenleg csak a luminozitási skálák segítségével becsült távolságok?

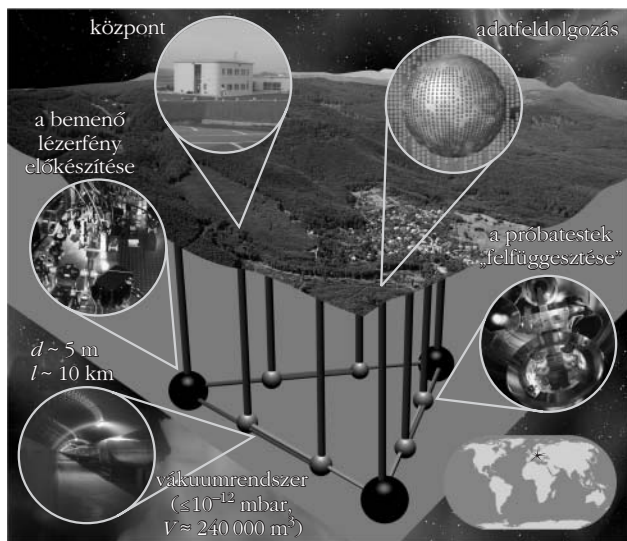
4. Hogyan alakultak ki és hogyan fejlődnek a galaxisok közepén található óriási tömegű feketelyukak?

5. Milyen volt az Univerzum kezdeti állapota és hogyan zajlott le a rekombinációs fázisátmenet?

6. Milyen fizikai folyamat során jönnek létre az Univerzum legenergetikusabb dinamikai folyamatai, a gamma-kitörések?

Az Einstein Teleszkóp Projekt

Az európai Einstein Teleszkóp Projekt a harmadik generációs gravitációs antennák közé sorolható. Ennek kialakítása során [14] lényegesen új technikai megoldásokat kell alkalmazni annak érdekében, hogy a mérési pontosságot tovább növelhessük, valamint az alacsonyabb frekvenciatartomány felé is nyithassunk. Utóbbi azt biztosítja, hogy az összeolvadási fázist megelőzően a potenciális forrásokat jóval hosszabb ideig megfigyelhessük, miáltal azok fizikai paraméterei sokkal pontosabban meghatározhatók lesznek. Az alacsony frekvenciás tartományban a próbatestek szerepét játszó tükrök-höz – minél tökéletesebb, szeizmológiai zavaroktól való izolálására többszintes, frekvenciájukban gondosan hangolt – ingafelfüggesztéseket kívánunk használni, míg a newtoni gravitációs gyorsulás felszínen tapasztalható irány- és nagyságfluktuációinak mérséklésére a detektort a földfelszín alatt kívánjuk elhelyezni. Mindezek mellett a magas frekvenciás hullámtartományban az érzékenység növelésére a „préselt fény” (squeezed light) technológiát alkalmazzuk. Végül a hőmozgások hatását hatékony hűtési eljárások felhasználásával, a tükrök néhány kelvinre történő hűtésével próbáljuk csökkenteni. Az Einstein-teleszkóp program elsődleges célja, hogy az európai tudományos közösség vezető szerepet játszhasson a gravitációs hullámok észlelésére alapozott új tudományág, a gravitációshullám-csillagászat létrehozásában.



7. ábra. A mátrai környezetbe képzelt harmadik generációs Einstein Teleszkóp a *Fizikai Szemle* 2011. januári címlapja alapján (Somogyi-Tóth Dániel légifelvétel felhasználásával). Az interferométerek (ezekből három látható az ábrán) karjai 60° -os szöget zárnak be egymással. A karok találkozási helyét a nagyobb sötétebb gömbök jelzik, míg a kisebb szürke gömbök az egyes karok (ezek részben átfednek) végén található próbatestek felfüggesztésének helyét jelölik.

Érdekes kiemelni, hogy kutatócsoportunk az Einstein Teleszkóp Projektek előkészítő munkálataiban is aktívan vesz részt. Ezen túlmenően a magyar kutatóközösség érdekeit közelebbről és szélesebb körben is érinti az a lehetőség, hogy a Mátra-hegység szeizmológiai adottságai lehetővé tennék, hogy hazánkban épülhessen meg az Einstein Teleszkóp (7. ábra). Ennek jelentősége felbecsülhetetlen, hiszen az a CERN jelentőségével vetekedő majdani kutatóintézmény itthoni működtetését, valamint a világ vezető kutatói és a hazai intézményekben dolgozó kutatók együttműködését eredményezné. Mindezek mellett az öt évtizedre tervezett élettartam során felmérhetetlen értékű tudományos innovációs tevékenység itthoni megvalósulását, valamint a kapcsolódó technológiai fejlesztések a hazai műszaki, ipari és gazdasági fejlesztésekre kivethető hosszú távú stimulációját is jelentené.

Az Einstein Teleszkóp megépítését célzó európai döntés feltehetően 2018-ra, a gravitációs hullámok első közvetlen detektálását követő évre tehető. Az építkezés megkezdése 2019-re várható. Fontos annak kiemelése, hogy 2014-ben elkezdődik a kitüntetett helyszínek hosszú távú szeizmológiai monitorozása. A Mátra esetében ebben fontos szerepet játszanak majd az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontja, a Miskolci

Egyetem és a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet csoportunkhoz csatlakozott munkatársai. Fontos azt is hangsúlyozni, amit az Einstein Teleszkóp „design study document”-jében [14] is megfogalmaznak a szerzők: „A detektor helyszínének kiválasztása során a potenciális helyszín szeizmikus jellemzőinél sokkal fontosabb szerepet játszik majd a detektort befogadni kész állam kutatóinak, a tudományt finanszírozó szervezeteinek és kormányának támogatása.”

Epilógus

Einstein gravitációelmélete egyike a 20. század legsikeresebb fizikai elméleteinek, amely az összes eddigi kísérleti ellenőrzés próbáját kiállta. A gravitációs hullámok első közvetlen detektálása az elmélet egy újabb és alapvetően fontos igazolását adhatja. Ahogyan arra fentebb rámutattunk, az első közvetlen detektálás, illetve az annak nyomán kialakuló gravitációshullám-csillagászat a kozmológiai és relativisztikus csillagászati ismeretek minőségi bővülését is eredményezheti.

A húszas évek közepére az olyan földi telepítésű, harmadik generációs gravitációshullám-detektorok, mint az európai Einstein Teleszkóp feltehetően már csillagászati megfigyeléseket végeznek. A földi telepítésű detektorok érzékenységi tartományát az alacsony frekvenciás spektrummal szervesen egészíti majd ki a 2028-ban világűrbe telepítendő eLISA detektor.

Mindezeknek köszönhetően a soron következő évek várhatóan a gravitációshullám-fizika legizgalmasabb néhány évét jelentik majd. *Az európai kísérletekben való magyar részvétel támogatása, illetve kiszélesítése elengedhetetlenül fontos lenne annak érdekében, hogy a magyar kutatók részesei lehessenek az izgalmas felfedező megfigyeléseknek és tíz év múlva akár az Einstein Teleszkóp Projekt is Magyarországon valósulhasson meg.*

Irodalom

8. <http://wigner.mta.hu/wignerdc/>
9. P. Csihmadia, G. Debreczeni, I. Rác, M. Vasúth: Gravitational waves from spinning eccentric binaries, *Class. Quant. Grav.* 29 (2012) 245002.
10. I. Rác: Gravitational radiation and isotropic change of the spatial geometry, <http://xxx.lanl.gov/abs/0912.0128> (2009)
11. Xiang-Song Chen, Ben-Chao Zhu: The true radiation gauge for gravity, <http://xxx.lanl.gov/abs/1006.3927> (2010)
12. A. Frenkel, I. Rác: in preparation (2014)
13. H. Szegedi, M. Dobróka: Robusztus Fourier-transzformáció Steiner-súlyok alkalmazásával. *Magyar Geofizika* 53 (2012) 21–28.
14. <http://www.et-gw.eu/etdsdocument>



SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY A FIZIKA BARÁTJA!

Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!

Adószámunk: 19815644-2-41

