

# ZÁRÓ BESZÁMOLÓ

## OTKA K67942, IN77395

### A kutatási időszak: 2007-07-01 – 2012-06-30

Mindenekelőtt fontosnak tartjuk annak kiemelését, hogy az **OTKA K67942** téma-számú pályázat, az RMKI Virgo csoportjának a Virgo Tudományos Együtműködéshez 2008 végén történő hivatalos csatlakozását követően a 2009-01-01 – 2011-06-30 időszakra kiegészült, illetve összevonásra került az **IN77395** azonosítójú „Részvétel az EGO-VIRGO tudományos együttműködésben” című pályázattal. A Virgo együttműködéshez történő csatlakozásunk részben új kutatók bevonását, valamint a kiegészítő támogatás szűkössége miatt a támogatások és a kitűzött feladatok egy részének időbeli átcsoportosítását tette szükségessé.

Egy további szomorú tény is hozzátartozik a szakmai beszámolónk bevezetőjéhez. Csizmadia Péter, az OTKA pályázatok egyik fontos résztvevője 2009 októberében Kínában hegymászás közben eltűnt. Ezt követően természetesen nem vehetett részt kutatásainkban. Kimagasló szakmai tudásának hiányát új kutatók bevonásával igyekeztünk mérsékelni.

A kutatási időszak során egy-egy MTA Doktora és PhD értekezés, valamint két MSc diplomadolgozat készült el az OTKA pályázatban megjelölt feladatok elvégzésének köszönhetően. Emellett az alábbi, az OTKA támogatás feltüntetésével publikált két dolgozatot

- I. Rácz: A Simple proof of the recent generalisations of Hawking's black hole topology theorem, *Class. Quant. Grav.* **25**, 162001 (2008) Has been selected by the Editorial Board of Classical and Quantum Gravity (CQG) as part of the journal's Highlights of 2008 and 2009.
- I. Rácz: Space-time extensions II, *Class. Quant. Grav.* **27**, 155007 (2010) Has been selected by the Editorial Board of Classical and Quantum Gravity (CQG) as part of the journal's Highlights of 2010 and 2011.

a „*Classical and Quantum Gravity*” nevű tudományos folyóirat szerkesztőbizottsága a 2008-2009, illetve a 2010-2011 időszak „*Research Highlights*” kategóriájába emelte. Összesen 14 elméleti témájú publikált dolgozat, valamint 23 kísérleti témájú kollaborációs folyóiratcikk kapcsolódik a kutatásainkhoz, melyek a szerződésben megjelölt vállalásaink többszörösei.

A két összevont OTKA pályázat kutatási terveiben megfogalmazottaknak megfelelően az alábbi nyolc területen értünk el fontos eredményeket:

- I. A nemlineáris gömbszimmetrikus dinamikai rendszerek időfejlődését hűen leíró numerikus eljárásunkat továbbfejlesztettük úgy, hogy mind az szimmetriafeltételektől mentes rendszerek leírására, mind pedig az „adaptív rácsfinomításos” (ARF-es) technikai elemek alkalmazására képes legyen. [P. Csizmadia, A. László and I. Rácz]
- A. Einstein-Yang-Mills-Higgs rendszerek evolúciójának vizsgálata.[G. Fodor, and I. Rácz] [P.

Csizmadia, G. Kovács és I. Rácz]

- B. A feketelyukak kialakulásának vizsgálata különféle gravitációs összeomlási folyamatokban. [P. Csizmadia és I. Rácz]
- C. Gömbszimmetrikus csillagmodellek nemlineáris stabilitásának vizsgálata [[P. Csizmadia], L. Gondán és I. Rácz]
- D. Einstein-Yang-Mills-Higgs rendszerek evolúciójának vizsgálata
- E. Általános kezdőfeltételek feketelyuk-háttéren történő időfejlődésének vizsgálata [[P. Csizmadia], A. László és I. Rácz]
- F. Az egyes gömbharmonikusok hosszú távú időfejlődésének forgó feketelyuk-háttéren történő vizsgálata, különös tekintettel a tisztán gömbharmonikus kezdőadatok hosszú távú időfejlődését jellemző hatványkitevő meghatározására [I. Rácz és G.Zs. Tóth]
- G. A szuperradiancia jelenségének vizsgálata. [A. László, I. Rácz]
- II. A gravitációs összeomlási folyamatok során kialakuló dinamikai feketelyuk-téridők topológiai tulajdonságainak feltárása. Az Einstein-elméletben az általános dinamikai rendszerek jellemzésében központi szerepet játszó felületeinek topológiai jellemzése. [I. Rácz]
- III. A gravitáció geometrizált elméleteiben kialakuló téridő-szingularitások megjelenése kapcsán a szinguláris téridők globális kiterjeszhetőségének vizsgálata. [I. Rácz ]
- IV. Fizikailag reális állapotegyenletnek eleget tevő forgó neutroncsillag-modellek megkonstruálása. [M. Bradley, D. Eriksson, Gy. Fodor, I. Rácz]
- V. Gömbszimmetrikus csillagmodellek tulajdonságainak vizsgálata a ma széles körben alkalmazott nem zérus kozmológiai állandóval jellemzett univerzummodellek esetén. [C.G. Boehmer and G.Fodor]
- VI. Gömbszimmetrikus dinamikai rendszerek időfejlődésének vizsgálata kapcsán elért analitikus eredmények:
  - A. Neutroncsillag-modellek lineáris és nemlineáris stabilitásvizsgálata [L. Gondán, G. Kovács, I. Rácz]
  - B. Gömbhéjakba tömörülő anyageloszlások általános dinamikájának leírása, illetve a "gravastar" modell stabilitásának vizsgálata [M.E. Gáspár és I. Rácz]
- VII. Stacionáriusan forgó feketelyuk, illetve csillagszerű megoldások létezésnek tisztázására új matematikai formalizmust vezettünk be. [I. Rácz]
- VIII. Részvétel a Virgo tudományos együttműködés munkájában.
  - A. A CBwaves nevű programcsomag kidolgozása és különféle a LIGO-Virgo együttműködés által alkalmazott keresőalgoritmusokba történő integrálása. [[P. Csizmadia ], G. Debreczeni, I. Rácz, M. Vasúth]

## **Az elvégzett kutatómunka általunk legfontosabb tartott eredményeinek részletes ismertetése:**

**I.)** Kifejlesztettük a GridRipper nevű programcsomagot: A GridRippert elsőként 1+1 dimenziós problémák (szimmetriaredukció után ilyenek például a négydimenziós gömbszimmetrikus dinamikai rendszerek is) megoldására tettük alkalmassá. A GridRipper egy negyedrendű pontosságú adaptív rácsfinomító kód (Adaptive Mesh Refinement, AMR) és osztály könyvtár, C++ és Java nyelveken. A kód alkalmas hiperbolikus parciális differenciálegyenlet-rendszerek numerikus megoldására az irodalomban ismert – másod vagy negyedrendű Runge-Kutta vagy iterált Crank-Nicholson integrálási séma alkalmazásával. A kezdőfeltétel megadható képletek formájában, generálhatja programkód vagy lehet egy közönséges differenciálegyenlet numerikus megoldása.

A GridRipper nevű programcsomag gömbszimmetrikus esetre vonatkozó fejlesztéseivel párhuzamosan, a kitűzött terveinknek megfelelően kialakítottuk a szimmetria-feltételektől mentes, általános rendszerek leírására alkalmas változatot is. Ez a korábban csak 1+1 dimenzióban alkalmazható GridRipper kód olyan kiterjesztése az 1+N dimenziós rendszerekre, amelyekben a polárirányokban spektrális technikát alkalmaztuk. A módszer hatékonyságát jól mutatja az, hogy segítségével szuperszámítógépes háttérrel feltételező szimulációk egyszerű asztali számítógépeken válnak megvalósíthatóvá. [P. Csizmadia, A. László and I. Rácz: GridRipper, <http://www.kfki.hu/~cspeter/gridripper/index.html>, P. Csizmadia: Fourth order AMR and nonlinear dynamical systems in compactified space, Class. Quant. Grav. 24, S369, 2007]

Ez a programcsomag, valamint ennek különféle fejlesztései biztosították, illetve biztosítják a különféle, általunk kiválasztott fizikai probléma numerikus vizsgálatát, melyeket az alábbi felsorolásban ismertetünk.

**I.1)** A gömbszimmetrikus dinamikai folyamatok vizsgálatára olyan új analitikus és numerikus leírást fejlesztettünk ki, mely tetszőleges négydimenziós görbült téridőben alkalmazható. A fejlődési egyenleteket sikerült elsőrendű erősen hiperbolikus formára hoznunk, mely lehetővé teszi az adaptív rácsfinomítási eljárás alkalmazását is. Módszerünk egyedülálló abban az értelemben, hogy képes az időfejlődést a feketelyuk tartományon belül is egészen a kialakuló téridő-szingularitás eléréséig hűen nyomon követni. Numerikus eljárásunkat a gravitáció és anyag különféle csatolt rendszereire alkalmaztuk. Megmutattuk, hogy a görbületi szingularitások megjelenését minden esetben megelőzi az úgynevezett „csapdafelületek” kialakulása. Ez az eredmény összhangban áll Penrose kozmikus cenzor hipotézisével. Részletesen megvizsgáltuk a Ricci- Kretschmann-skalárgörbület, valamint a Misner-Sharp-tömeg szingularitások közelében tapasztalt divergenciájához tartozó kritikus viselkedést. Számos esetet megvizsgálva azt tapasztaltuk, hogy a Ricci-skalár divergenciája ellenére az Einstein-Hilbert-hatás véges marad. Ez az eredmény, a topológiaváltással kapcsolatos koncepcionális kérdések vonatkozásában elért eredménnyel együtt, fontos jelentőséggel bírhat a gravitáció kvantumelméletét vizsgáló kutatók számára is. [P. Csizmadia and I. Rácz: Gravitational collapse and topology change in spherically symmetric dynamical systems, Class. Quant. Grav. 27, 015001, 2010]

**I.2)** Gravitáció és anyag különféle csatolt nemlineáris rendszereinek, így például Einstein-Yang-Mills-Higgs rendszerek evolúciójának vizsgálata. A YMH rendszer tulajdonságainak feltárására irányuló konkrét vizsgálataink eredménye az alábbiak szerint foglalható össze: Egy kezdetben sztatikus SU(2) Bogomolny-Prasad-Sommerfield (BPS) mágneses monopólust egy hozzáadott nagy energiájú impulzus által gerjesztettünk. Azt tapasztaltuk, hogy az így kialakuló rendszer nem sugározza le teljesen a gerjesztő impulzus által közvetített energiát. Ehelyett a monopólus a dinamikai folyamat kezdetén a kapott energia közel felétől gyorsan megszabadul, majd egy nagyon hosszú élettartamú, kvázi-stabil "lélegző állapot" alakul ki a központi régióban, míg a távolabbi tartományokban nagyfrekvenciás rezgésekből felépülő, önhasonló módon táguló stabil héjak rendszere alakul ki. A vizsgált mennyiségek időbeni viselkedésére vonatkozóan az alábbi univerzális jellegű törvényszerűségeket kaptuk: A hiperboloidális felületekhez rendelhető összes energia, amely a "fényszerű végtelenbe" lesugárzott energia mértéke szerint csökken,  $t^{-2/3}$ -os, míg a rezgések amplitúdója  $t^{-5/6}$ -os időbeni lecsengést mutat. [G. Fodor, and I. Rácz: Numerical investigation of highly excited magnetic monopoles in SU(2) Yang-Mills-Higgs theory, Phys. Rev. D 77, 025019, 2008]

**I.3)** A Gridripper általános 3+1 dimenziós változatát komplex skalármező fix forgó feketelyuk-háttéren történő evolúciójának vizsgálatára alkalmaztuk. A numerikus eljárás pontosítása érdekében a konformis kompaktifikáció technikáját is alkalmaztuk, melynek segítségével a fényszerű végtelenhez kisugárzott rész is vizsgálhatóvá vált. A tiszta gömbharmonikusokból felépített kezdőadatok hosszú távú időfejlődését jellemző hatványkitevőjének pontos értékét meghatároztuk különféle, eddig mások által még egyáltalán nem vizsgált típusú kezdőadat-választások esetén. Elsőként meghatároztuk, hogy a lineáris mező által szállított energia, illetve impulzusmomentum milyen részben kerül a feketelyuk tartományba, illetve sugárzódik le a fényszerű végtelenbe. [Rácz I. és Tóth G.Zs.: *Numerical investigation of the late-time Kerr tails*, Class. Quantum Grav. 28, 195003, 2011]

**I.4)** A gridripper általános 3+1 dimenziós változatának egy további alkalmazásával megvizsgáltuk az úgynevezett szuperradiancia jelenség kialakulását, egy komplex skalármező forgó Kerr-feketelyuk háttéren történő evolúciója esetén. Megmutattuk, hogy a kezdőadatok alkalmas megválasztásával ideálisan szuperradiánssá hangolt megoldások – az általános várakozásokkal ellenére – nem mutatnak semmiféle koncentrátságot a feketelyuk forgástengelye mentén, így nem várható tőlük az úgynevezett „JET” jelenség megmagyarázása sem. Ezen felül azt is megmutattuk, hogy a vizsgált esetben a szuperradiancia során fellépő energiatermelés a korábbi várakozásoknál sokkal kisebb mértékű. Az eredményeink azt mutatják, hogy energiatermelés helyett egy majdnem tökéletes visszaverődés történik a szuperradiáns állapotra hangolt rendszerek időfejlődése során. Ez önmagában is meglepő, hiszen egy klasszikus feketelyukra általában úgy gondolunk, mint egy olyan objektumra, amely nagyon effektív módon képes elnyelni a felé küldött anyag nagy részét. [[P. Czismadia], A. László, I. Rácz : *On the Use of Multipole Expansion in Time Evolution of Non-linear Dynamical Systems and Some Surprises Related to Superradiance*, arXiv:1207.5837, submitted to Class. Quant. Grav., 2012]

**II.)** A múlt század '70-es éveitől kezdve a feketelyukak négydimenziós Einstein-féle gravitációelméletben történő leírásában kulcsfontosságú szerepet játszik Hawking azon tétele, mely értelmében a feketelyukak topológiája szükségképpen a kétdimenziós gömbével megegyező. Később – Hawking érvelésének általánosítása révén – az 1990-es évek végén felfedezett, ún. topológiai feketelyukak entrópiájára Gibbons és Woolgar egy a topológiát jellemző számtól, a „genus”-tól függő alsó korlátot származtatott. Az elmúlt években jelentős sikereket értek el azok a próbálkozások, amelyek révén Hawking, Gibbons és Woolgar eredményeit a négynél magasabb dimenziós Einstein-elméletre általánosították. Egy új megközelítést alkalmazva sikerült ezen általánosításoknak egy olyan egyszerű bizonyítását származtatnunk, mely tetszőleges dimenzióban és nemcsak az Einstein-féle elmélet korábban tekintett általánosítása esetén, hanem lényegében a gravitáció tetszőleges geometrizált elméleteiben is lehetővé teszi a feketelyukak topológiai jellemzésének lehetőségét. [I. Rác: A Simple proof of the recent generalisations of Hawking's black hole topology theorem, Class. Quant. Grav. 25, 162001, 2008]

Ennek az új módszernek a további általánosítása révén sikerült a feketelyukak felületének topológiai jellemzésén túlmenően az úgynevezett nemcsapdázott felületeinek topológiai jellemzését is megadnunk. Az eredmény fontosságát jól érzékelteti, hogy nemcsapdázott felületek sokkal többen vannak, mint a csapdázottak, hiszen például azokban a téridőkben is kontinuum sok ilyen létezik, amelyekben esetleg nincs is feketelyuk-tartomány. [I. Rác: On the topology of untrapped surfaces, Class. Quant. Grav. 26, 055017, 2009]

Ami talán még ennél az utóbbi eredménynél is meglepőbb, minden kettő kodimenziójú erősen stabil, azaz nem szükségképpen nemcsapdázott felületekre is érvényesnek találtuk az általunk bevezetett új eljárást.

**III.)** A gravitáció geometrizált elméleteiben a Hawking-Penrose-féle szingularitástételek által megjósolt nem-teljes kauzális geodetikusokat tartalmazó téridők globális kiterjeszhetőségét vizsgáltuk. Megmutattuk, hogy minden elegendően általános globálisan hiperbolikus kauzális geodetikus értelemben nem teljes téridő globálisan  $C^k$  módon kiterjeszhető feltéve, hogy a geodetikus értelemben nem teljes időszerű, vagy fényszerű kauzális geodetikus környezetében futó háromparaméteres geodetikus kongruencia elemei mentén a görbületi tenzor, valamint annak kovariáns deriváltjainak komponensei „k-ad” rendig bezárólag korlátosak maradnak. [I. Rác: Spacetime extensions II, Class. Quant. Grav. 27, 155007, 2010].

**IV.)** Az Einstein-féle gravitációelméletben forgó neutroncsillag modelleket vizsgáltunk svéd kutatókkal együttműködve. Petrov D típusú folyadékmegoldásokat tekintettünk, mert a legfontosabb forgó vákuum megoldás, a Kerr-metrika is ilyen típusú. Megmutattuk, hogy a görbület viselkedésére vonatkozó matematikai feltétel megadása a csillag állapotegyenletének megadásával egyenértékű. Numerikusan megkonstruáltuk a konfigurációs tér számos elemét. Beláttuk, hogy a gömbszimmetrikus alapmegoldás paraméterei és a forgás szögsebessége egyértelműen meghatározza a forgó megoldást. [M. Bradley, D. Eriksson, Gy. Fodor, I. Rác: Slowly rotating fluid balls of Petrov type D, Phys. Rev. D75 (2007) 024013]

**V.)** Olyan statikus gömbszimmetrikus tökéletes folyadékmegoldásokat konstruáltunk – analitikus és numerikus módszerek felhasználásával –, melyek az Einstein-féle statikus univerzum olyan általánosításainak tekinthetők, amelyekben sem az energiasűrűség, sem pedig a nyomás nem állandó. Az állapotegyenlet ismeretére hagyatkozva analitikus kifejezést származtattunk a csillagmodellek zérus nyomással jellemzett felületének megtalálására. [C.G. Boehmer and G.Fodor: Perfect fluid spheres with cosmological constant, Phys.Rev.D77:064008, 2008]

**VI.A)** A gömbszimmetrikus neutroncsillag-modellek stabilitásvizsgálatát végeztük el az Einstein-elmélet linearizált, és teljes nemlineáris változatát felhasználva. A nemlineáris vizsgálatokhoz a korábban kifejlesztett numerikus módszerünket használtuk fel, ugyanakkor a lineáris esetben a szokásos kombinált analitikus és numerikus módszereket alkalmaztunk. Meghatároztuk azon paramétertartományokat, ahol a linearizált értelemben instabil csillagmodellek a nemlinearitások figyelembe vétele mellett stabilak maradhatnak. Az eredményeket Gondán László: Neutron-csillagok radiális, lineáris és nemlineáris stabilitásának vizsgálata az általános relativitáselméletben című MSc. diplomadolgozatában 2011-ben kerültek publikálásra.

**VI.B)** A gravastar modell radiális stabilitásvizsgálatát végeztük el oly módon, hogy a meghatároztuk a távoból a "csillag" felületére ejtett gömbhéjakban koncentráldott anyag és a csillag ütközés következtében lezajló változásait. Megmutattuk, hogy a gravastar modell -- a hiedelmekkel ellentétben -- soha nem teszi lehetővé a csillag anyagának nagyobb koncentráldását, mint ahogyan az ismert extrém, de hagyományos modellek megengedik. [M.E. Gáspár and I. Rácz: Probing the stability of gravastars by dropping dust shells onto them, Class. Quant. Grav. 27, 185004, 2010]

Mindezek mellett elkészítettük a gömbszimmetrikus héjrendszerek általános dinamikáját leíró numerikus eljárásunkat is, melynek segítségével különféle asztrofizikai folyamatok -- például szupernóva robbanások során kilöködő anyag mozgása -- vizsgálhatók. Megmutattuk, hogy a tömeginfláció jelensége fellép a feketelyuk tartományon belül ütköző héjrendszerek esetében is. Meghatároztuk tömeginfláció időfejlődését leíró általános összefüggéseket. [M.E. Gáspár and I. Rácz: On the dynamics of relativistic multi-layer spherical shell systems, Class. Quant. Grav. 28, 085005, 2011]

**VII.)** Az Einstein-Yang-Mills elmélet stacionáriusan forgó feketelyuk megoldásainak felkutatásának előkészítéseként olyan új matematikai formalizmust vezettünk be, amely lehetővé teszi az összes stacionárius feketelyukra jellemző horizonttal rendelkező téridőmodell egyidejű hatékony vizsgálatát. Az ilyen típusú megoldásokat deformált feketelyukaknak szokás nevezni. Vizsgálataink előtt ezeknek csak egy igen szűk, speciális osztálya volt ismert. Megmutattuk, hogy az összes lehetséges négydimenziós, nem degenerált, elektrovákuum és deformált feketelyuk egyértelműen meghatározott a feketelyuk horizontjának bármely kétdimenziós szelésén indukált metrika, valamint az egyik elektromos potenciál és egy komplex értékű függvény a szelésen történő megadása által. Érdemes kiemelni, hogy ennek értelmében egy általános deformált elektrovákuum feketelyuk horizontjának

szeléseire úgy is gondolhatunk, mint egy olyan kompakt adathordozóra, mely tárolja az elemi téridőkörnyezetben a teljes négydimenziós téridő-geometria, valamint az elektromágneses mező előképét, mely – mihelyt az adathordozó adott – a téregyenletek segítségével bontható ki. Ebben az értelemben a stacionárius, izolált feketelyukak fent említett kétdimenziós szelésére úgy is gondolhatunk, mint egy hologramra, amelyben a teljes stacionárius feketelyuk-téridő összesűrítve ábrázolható. [I. Rácz: Stationary black holes as holographs, Classical and Quantum Gravity 24 (2007) 5541-5571.]

**VIII.)** Az RMKI Virgo csoportjának a Virgo tudományos együttműködésben való részvételének létrehozása, illetve a kutatócsoportunknak a Virgo tudományos együttműködésbe történő integrálása a kellő mértékű anyagi erőforrások híján nagyon sok erőfeszítést és egyeztetést igényelt. Mivel az erőforrásokban máig nem bővelkedünk, szeretném a hazai kutatásfinanszírozó szervezeteket arra ösztönözni, hogy hathatós pénzügyi támogatások biztosítása révén segítsék elő azt, hogy a magyar kutatóközösség ezen európai tudományos együttműködésben sokkal hatékonyabban jelenhessen meg.

Minden nehézség ellenére kutatócsoportunknak a Virgo tudományos együttműködésbe történő integrálása sikeresen megtörtént és 2010 áprilisa óta a csoport aktív tagjai szerzőlistára kerültek és így 23 kísérleti témájú kollaborációs folyóiratcikk szerzőivé váltunk.

Az együttműködésben való részvételünk kézzelfogható kollaborációs publikációkban meg nem jelenő szinten is nagyon sok munkát igényelt. Ezen eredményeiről a hetente tartott internetes találkozók, illetve a munkalátogatások és tudományos találkozók során megtartott formális és informális szemináriumokon számoltunk be. Az együttműködésben való részvételünk velejárója, hogy a csoport tagjai, néhányan többször is a Virgo detektor adatgyűjtési és mérési folyamataiban vettünk részt.

#### **A leglényegesebb hozzájárulásaink:**

- A LIGO és Virgo detektorok adatainak közös feldolgozását biztosító adatátviteli rendszer kiépítésében illetve fenntartásában való tevékeny részvétel. [G. Debreczeni, N. Fotopoulos and A. Mercer: Enabling GPU accelerated hierarchical gravitational wave search pipelines on the EGEE Grid, Poster at the 8th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, 2009]
- A CBwaves programcsomag létrehozása és annak alkalmazása az RMKI Virgo csoportjának a Virgo tudományos együttműködésben vállalt feladatainak teljesítésében [[Csizmadia P.], Debreczeni G., Rácz I. és Vasúth M.]
- Különböző feladatokat láttunk el a továbbfejlesztett Virgo detektor vákuumrendszerének modellezése és megvalósítása kapcsán.
- A GPU technológia adatanalízisben történő alkalmazása, illetve a LIGO és Virgo detektorok adatainak feldolgozása szükséges új keresőalgoritmusok kidolgozása.
- Az összeolvadó kompak kettősök (CBC) rendszerét vizsgáló munkacsoport részére olyan pilot csomagok kidolgozása, egyaránt képes a CPU és GPU alapú számítógép klasztereken

hullámformabankok szimulációjára, és az adatanalízis kivitelezésére.

**VIII.A)** kifejlesztettük a CBwaves szoftvert, mely olyan kompakt kettősök által kisugárzott gravitációs hullámok meghatározását teszi lehetővé, melyek spinnel és akár nagy excentricitással is rendelkeznek. Az elméleti háttér a poszt-newtoni formalizmus felhasználására épül és a kód segítségével numerikusan egyidejűleg határozzuk meg a forrást alkotó kettős mozgását (ezt 3.5PN rendig bezárólag), valamint az általuk kibocsátott gravitációs hullámformát (ezt 2PN rendig bezárólag). A program kialakításának legfőbb motivációját a Virgo együttműködésben vállalt feladataink adták. A kompakt kettősök felfedezésére szakosodott CBC csoport számára olyan hullámforma bankokat kívántunk kialakítani, melyek képessé teszik a LIGO-Virgo együttműködést az excentrikus, valamint spinnel is rendelkező kettősök által kibocsátott hullámok hatékony felismerésére. A program képességei és az általa kínált pontosság felkeltette különféle "Burst"-ös csoportok érdeklődését is, így felkérésre a LIGO-Virgo kollaboráció szemináriumain, illetve találkozóin számoltunk be a szoftver alkalmazásának lehetőségeiről. [<http://www.grid.kfki.hu/twiki/bin/view/RmkiVirgo/CBwavesPresentation>] Ennek köszönhetően több munkacsoport készül a kollaboráción belül a <http://www.grid.kfki.hu/afs/gdebrecz/web/virgo/cbwaves/cbwaves-1.0.0-5.tgz> címről szabadon letölthető program felhasználására, illetve felkértek minket a szoftver adatanalízisbe történő integrálására. A CBwaves programcsomag elméleti jellegű vizsgálatokban történő alkalmazása során kapott eredményeinket a [[Csizmadia P.], Debreczeni G., Rácz I. és Vasúth M.: Gravitational waves from spinning eccentric binaries, <http://arxiv.org/abs/1207.0001> (2012), accepted for publication in Class. Quant. Grav.] dolgozatban publikáltuk.

A CBwaves programcsomag – ennek rpm és deb változata is elkészült – már eddig is számos alkalmazásra lelt és folyamatosan további új lehetőségek merülnek fel a LIGO-Virgo tudományos közösségen belüli. Legutóbb például arról született döntés, hogy a LAL/LALsimulation kollaborációs programcsomagba – mely a bespiráló kettősökre kidolgozott keresőalgoritmusokban a fizikailag adekvát hullámformák alkalmazását teszi szükségessé – kerül beépítésre. Hasonló módon beépítésre kerül a GPU alkalmazásokra épülő jelenleg kifejlesztés alatt álló új, OpenCL/C++ alapú általános analizáló GWTools programcsomagba.

Végül szeretnénk kiemelni, hogy az elméletibb jellegű vizsgálataink során említett GridRipper programcsomag kifejlesztése, mely az általános relativitáselmélet keretein belül különféle asztrofizikai rendszerek dinamikai vizsgálatát teszi lehetővé, jelentős részben kapcsolódik az RMKI Virgo tudományos együttműködésben vállalt feladatainkhoz, melyben különféle gravitációshullám-keltési folyamatok, majd a kialakuló hullámok terjedésének vizsgálata játszik központi szerepet.