

A pályázat elsősorban a kutatócsoportunk részvételét támogatta a LIGO Scientific Collaboration (LSC) fejlesztő és a gravitációs hullámok jövőbeli észleléseit előkészítő munkájában. Mindhárom munkaévben a LIGO kísérlethez való hozzájárulásainkat előzetesen az LSC egy erre a feladatra kijelölt nemzetközi bírálóbizottsága hagyta jóvá, majd a feladatok teljesülését egy hasonló bizottság egy évvel később értékelte is. A LIGO kísérletben való folytatólagos részvételünk minden évben ennek az értékelésnek és a vállalások jóváhagyásának volt a függvénye. A vállalásaink és teljesítéseink feltétele minden esetben az volt, hogy a kutatócsoportunk a munkájával hathatósan járjon hozzá a LIGO kísérlet sikeréhez, vagyis a gravitációs hullámok jövőbeli észleléseihez, az észlelések kiértékeléséhez, és gravitációshullám-források megértéséhez.

A három munkaévben a LIGO tagságunkhoz köthetően a következő témákra összpontosítottunk:

- (a) Gravitációshullám- és röntgenmegfigyelések a LIGO és a Swift detektorokkal;
- (b) Hosszú gravitációshullám-tranziensek keresése;
- (c) Excentrikus pályán bespiráló fekete lyuk-kettősök vizsgálata;
- (d) Galaxiskatalógus fejlesztése a jövőbeli gravitációshullám- és utófény megfigyelések számára;
- (e) Alacsonyfrekvenciás akusztikus detektorok fejlesztése az Advanced LIGO környezetmonitorozó rendszere számára;
- (f) Gravitációshullám-detektorok jövőbeli hálózatainak optimalizációja.

A fentiek közül az (a) és (b) feladatokkal az első két munkaévben, a (c)-(e) feladatokkal mindhárom munkaévben, az (f) feladattal pedig az utolsó két munkaévben foglalkoztunk. Az első munkaévben a csoportunk néhány tagja a kozmológiai struktúrafejlődéssel és egy szintén kozmológiai jelenséggel, az ún. integrált Sachs-Wolfe effektussal is foglalkozott, a LIGO kísérlettől függetlenül.

A kevés szerzős publikációink mellett a csoporttagjaink a LIGO projekthez való hozzájárulásainak köszönhetően több, mint 70 sokszerzős, kollaborációs közleménynek lehettek társszerzői.

Gravitációshullám- és röntgenmegfigyelések a LIGO és a Swift detektorokkal

Ebben a projektben az első munkaévben egy sokszerzős, kollaborációs cikk elkészüléséhez nyújtottunk jelentős hozzájárulásokat egy röntgenforrás-katalógus és egy hozzá tartozó keresőprogram elkészítésével, amelyek a Swift megfigyelések röntgenhátér-elemzésében voltak nélkülözhetetlenek. A katalógus összeállítását és a keresőprogram működését egy LIGO technikai dokumentumban írtuk le, valamint részletesebben a témában diplomamunkát végző fizika BSc-s hallgató, Kovács Orsolya szakdolgozatában mutattuk be. Mind a katalógust, mind annak keresőszoftverét online módon publikusan használhatóvá tettük. A témában nemzetközi konferenciákon és telefonos konferenciákon is többször tartottunk előadásokat.

A második munkaévben a Swift űrteleszkóp által a LIGO detektorok 5. (S5) adatgyűjtő időszakában észlelt hosszú gammafelvillanásokhoz (GRB-k) kerestünk olyan esetleges hosszú (10-1000 másodperc időhosszúságú) gravitációshullám-jeleket, amelyek e felvillanások idő- és égi lokalizációs adataival konzisztensek. A LIGO Kollaboráció a jelkeresés eredményeit 2013-ban publikálta, a publikáció elkészítésében a csoportunk tagjai is résztvettek. A tudományos eredmények publikálását egy, a jelentős hozzájárulásunkkal kifejlesztett jelkereső programcsomag tette lehetővé. Csoportunk tagjai közvetlenül résztvettek a programcsomag alkalmazásával elvégzett jelkereső munkában is. A gammafelvillanások forrásait célzó jelkeresés a LIGO detektorok S5 adatait használta, míg a GRB-k idő- és pozícióadatait a Swift űrteleszkóp szolgáltatta. A keresés ~33 Mpc távolságon belül kizárta a leoptimistább modellek által javasolt asztrofizikai forrásokat, valamint felső korlátot adott az egyes modellek alapján várható sugárzási energiákra. A keresési projekt főpróbát és előkészületet jelentett a LIGO és Virgo detektorok második generációs, azaz nagyobb érzékenységű működési időszakára.

Hosszú gravitációshullám-tranziensek keresése

E projekt fő elemeként megalkottunk egy, a hosszú gravitációshullám-tranziensek keresésére specializált programcsomagot, STAMP munkanéven. E tranziensek forrásait és a keresőtechnika módszereit egy referált publikációban, az első munkaévben közöltük. Szintén az első munkaévben felkészülve a keresőprogram alkalmazására hosszú GRB-kkel egyidejű tranziens gravitációshullám-jelek keresésében, egy további referált publikációban áttekintettük a GRB-k emissziós folyamatait és időbeli lefolyásukat. Utóbbi publikációban a GRB-k neutrínó-emissziójával is foglalkoztunk, eredményeinkkel pedig hozzájárultunk egy GH+neutrínó kereséseket végző technikai kidolgozásához - a technika leírását adó publikációban csoporttagjaink így társszerzőkként szerepelhettek. A GRB-emisszió jellemzését az első munkaévben külön konferencián ismertettük, amelyből egy konferenciakiadványunk is született. Mindezen munkák jelentős részét képezték Raffai Péter PhD hallgató 2012-ben sikeresen megvédett doktori értekezésének. A STAMP algoritmus a második munkaévben ténylegesen használatra került a Swift űrteleszkóp által észlelt GRB-kkel egyidejű hosszú gravitációshullám-tranziensek keresésében (erről részletesebben a beszámoló előző pontjában írtunk).

Szintén hosszú gravitációshullám-tranziensek keresését célozva foglalkoztunk az ún. lágymagmásmérlők (SGR-ok) kváziperiodikus oszcillációival egyidejű gravitációshullám-jelek keresésével. Az SGR-ok kváziperiodikus oszcillációi röntgenmegfigyelésekkel igazoltan ismétlődő jelenségek, amelyek a forrásaik ismétlődő gamma-kitöréseit követik. A velük egyidejű hosszú gravitációshullám-tranzienseket ezért érdemesnek láttuk nem egyesével, hanem adatszakaszonként összegezve keresni. Erre a feladatra a korábban kifejlesztett STAMP algoritmus önmagában alkalmatlannak bizonyult, a célra ezért egy külön keresőalgoritmust fejlesztettünk ki. Az algoritmust ismétlődő, kvázimonokromatikus jelek sorozatának

keresésére optimalizáltuk. Az eljárás ezzel olyan jelsorozatok keresésére lett alkalmas, amelyek teljes időhossza alatt a forrás és a detektor egymáshoz képesti orientációja, valamint a zaj statisztikai tulajdonságai megváltozhatnak. A módszer előnyét jelentette, hogy más algoritmusokkal ellentétben nem teszi szükségessé, hogy a zaj Gauss-eloszlású legyen. A LIGO detektorok S5 adatgyűjtési időszakából vett tesztadatokat használva rámutattunk, hogy a keresőalgoritmusba épített zajszűrő képes a detektor átmeneti zavarait kizárni a jelkeresésből. Az eljárást és annak teszteredményeit az LVC belső bírálati eljárását követően a Physical Review D folyóiratban publikáltuk, a második munkévben.

Excentrikus pályán bespirálózó feketelyuk-kettősök vizsgálata

Ennek a projektnek az első munkaévben csak az előkészületi szakaszáig jutottunk, amiben szisztematikusan megvizsgáltuk az excentrikus kettősök forrás- és hullámforma modelljeit, azonosítottuk az e források jeleinek keresésében megoldandó technikai kihívásokat és előzetesen ezekre megoldásokat javasoltunk. A csoportunk ezután elméleti modellek és numerikus módszerek segítségével feltérképezte e kettősrendszerek formálódási tartományát, megkonstruálta a létrejövő kettősrendszerek paraméterértékeinek eloszlásfüggvényeit, és megvizsgálta az eloszlásfüggvények időfejlődését. Az eredmények asztrofizikai alkalmazhatósága szempontjából fontos tudni, hogy a formálódási környezetek (gömbhalmaz, galaxismag) paramétereinek egy adott konfigurációjára nézve az eloszlásfüggvények mennyire egyediek. Ezért munkánk folytatásaként megvizsgáltuk, hogy a kettősrendszerek eloszlásfüggvényeit milyen mértékben és hogyan befolyásolják a formálódási környezetek paraméterei, és beazonosítottuk azon környezeti paramétereket, amelyek szignifikánsan, és amelyek elhanyagolható mértékben változtatják az eloszlásfüggvényeket. Munkánk befejezéseként megvizsgáltuk, hogy a jelenleg elérhető keresési eljárásokkal milyen hatékonyan lehet ezen kettős típusú beazonosítani a második generációs gravitációshullám-detektorok várható érzékenysége mellett. A projekt eredményeit egy kevésszerzős publikációban foglaltuk össze.

Egy további kapcsolódó munkánk eredményeként Fisher-mátrix módszerrel becslést végeztünk az elnyúlt pályájú feketelyuk-kettősök gravitációs hullámainak észlelése nyomán e források paraméterértékeinek rekonstrukciójában. A csoportunk az elméleti számolások elvégzése után megírt egy szoftvercsomagot, amelynek segítségével tetszőleges interferometrikus detektorhálózatra rekonstruálhatók ezen kettősrendszerek paraméterei.

Az excentrikus pályán mozgó feketelyuk-kettősökkel foglalkozó kevésszerzős publikációink első kéziratát a harmadik munkaév végére megírásra került, publikálni őket azonban a kéziratok átnézéséig és átdolgozásáig (és így a pályázati munka végéig) nem tudtuk. E cikkek publikálása így a munkáink folytatásaként, már a pályázati időszakon túl várható.

Galaxiskatalógus fejlesztése a jövőbeli gravitációshullám- és utófény megfigyelések számára

Ebben a projektben az első munkaévben előkészületi munka folyt a Hawaii Egyetemen Szapudi István és az ELTE doktorandusza, Kovács András részvételével, amelynek célja egy több galaxiskatalógus összekombinálásából nyerhető átfogó galaxis adatbázis megalkotása volt. A cél elérése érdekében kifejlesztettünk egy algoritmust, ami az objektumokat osztályozatlanul tartalmazó katalógusokban elvégzi a galaxisok és csillagok hatékony elkülönítését. A második munkaévben ezt az elkülönítő eljárást tanuló algoritmusokat fejlesztettük tovább. Első eredményünk egy az irodalomban fellelhető katalógusoknál kisebb kontaminációval bíró, ám ugyanakkor nagyobb térfogatot kitöltő infravörös galaxiskatalógus létrehozása volt. Az eredményt közlő cikkünkben megmutattuk, hogy a fotometriai alapú klasszifikáció terén áttörő jelentőségű javulás érhető el mesterséges intelligencia felhasználásával. Ugyanebben a munkaévben kidolgoztuk a galaxiskatalógusok eddigi leghatékonyabb súlyozási módszerét is a LIGO ún. elektromágneses follow-up megfigyeléseihez. A módszer a galaxisokat a belőlük várhatóan észlelhető kettősrendszer-összeolvadások éves becsült gyakoriságával súlyozza.

A harmadik munkaévben megkezdtük egy minden korábbinál bővebb és több adatot tartalmazó galaxiskatalógus összeállítását a gravitációshullám-észlelések nyomán végzett elektromágneses follow-up megfigyelések számára. A katalógust végülis a WISE, a 2MASS, a 2MPZ, és a GWGC katalógusok duplumoktól megszabadított összeolvasztásából nyertük, a hiányzó adatokat pedig a katalógusok kereszt-ellenőrzésével, számítógépes tanulóalgoritmus segítségével pótoltuk. A katalógust, befejezése után, nyilvánosan elérhetővé tettük az asztrofizikai kutatóközösség számára. A katalógus fejlesztését tárgyaló kevésszerző publikáció megírását megkezdtük, annak elkészülte után azt egy nemzetközi folyóiratban kívánjuk majd közzé tenni.

Alacsonyfrekvenciás akusztikus detektorok fejlesztése az Advanced LIGO környezetmonitorozó rendszere számára

A LIGO detektorok létfontosságú eleméhez, az őket érő környezeti hatásokat regisztráló úgynevezett környezetmonitorozó rendszerhez (PEM) fejlesztettünk ki korábban egy a detektorokat potenciálisan megzavarni képes alacsonyfrekvenciás nyomáshullámok érzékelésére képes infrahang mikrofont. Az első munkaévben Dél-Dakotában, a Homestake bányában kísérleteket végző kutatócsoporthoz csatlakoztunk a műszereinkkel, ahol a jövőben megépítendő gravitációshullám-detektorokat befolyásoló körülményeket vizsgáltuk. A bánya járataiba 5 infrahang mikrofont telepítettünk, ezzel egy új és fontos „érezkszervet” adtunk a kísérletben korábban részt vevő műszerekhez, kibővítve ezzel a vizsgálatok lehetőségeit. Ugyanitt résztvettünk egy új mérőállomás megépítésében is, lehetővé téve még több műszer

elhelyezését. Az infrahang mikrofon a LIGO Kollaboráció belső ellenőrzési folyamaton sikeresen átesett, és az Advanced LIGO-ba történő beépítését engedélyezték. A folyamat során az MIT és Caltech szakértői vizsgálták a saját tervezésű és építésű műszerünket, hogy megfelel-e a LIGO rendkívül szigorú elektronikai, mechanikai és biztonságtechnikai előírásainak.

A harmadik munkaév elejére az elkészült infrahang mikrofonjaink közül 3-3 műszert beépítettünk az Advanced LIGO hanfordi és livingstoni állomásainak környezetmonitorozó rendszerébe. A beszerelő „túrát” 2014 év elején Frei Zsolt vezette. A mikrofonok a harmadik munkaév végére is működnek és szolgáltatnak adatot, amelyek hozzáférése az interneten keresztül megoldott. A gyűjtött adatok kiértékelésén, valamint a mikrofonok és más környezeti szenzorok adatai koherenciájának vizsgálatán jelenleg is dolgozunk.

Szintén a harmadik munkaévben a mikrofonjaink továbbfejlesztésében hasznosítottuk a Homestake bánya DUGL laboratóriumában végzett adatgyűjtésünk tanulságait. 2014-ben a műszereink számára kifejlesztettünk egy automata munkapont-beállító szoftvert, ami a mikrofonok hosszúidejű, stabilabb működését tette lehetővé. Emellett kidolgoztuk a mikrofonok széles frekvenciasávon működő kalibrációs eljárását, amivel a méréseink kívánt pontosságát elértük. Elvégeztük 8 darab mikrofon legyártását, és azok elektronikus zajhátterének mérését. A mikrofonrendszer használatát elősegítő szakmai dokumentációt a LIGO dokumentumtárában a Kollaboráció tagjai számára elérhetővé tettük. Munkánkat a LIGO-Virgo Collaboration a munkaévben tartott találkozásán szakmai poszter formájában is prezentáltuk.

Gravitációshullám-detektorok jövőbeli hálózatainak optimalizációja

Ebben a projektben a jövőben építendő harmadik generációs (háromszög alakú) gravitációshullám-detektorok lehetséges hálózatainak optimális geometriai konfigurációit kerestük. A célunk az volt, hogy megtaláljuk az 1-3 darab detektorból álló hálózatok tagjainak optimális elhelyezését a Föld felszínén, a következő szempontok szerint: a detektorhálózat (i) polarizációrekonstrukciós képessége; (ii) forráslokalizációs pontossága; (iii) egy standard jelforrásra (bespirálózó feketelyukkettősre) vett paraméterrekonstrukciós pontosság. A három szempontot azonos súllyal figyelembe véve alkottuk meg az optimalizáció kombinált metrikáját, aminek a detektorhálózat geometriájától függő értékének maximalizálására törekedtünk. Az analízisünkkel beazonosítottuk azokat a földrajzi régiókat, ahol egy harmadik generációs detektorokból álló hálózat első, második, és harmadik tagja optimálisan elhelyezhető. Javaslatot tettünk továbbá a LIGO-India optimális orientációjára és elhelyezésére Indián belül. Az analíziseinket tárgyaló publikációt a második munkaévben a CQG folyóiratban közöltük, eredményeinket pedig egy további konferenciaközleményben is publikáltuk.

A harmadik munkaév végére a bírálatok megválaszolása utáni szakaszba került a témában egy, a CQG folyóiratnak benyújtott további munkánk, amelyet a University of Glasgow és a Columbia University kutatóival közösen jegyzünk. Ebben a 2013-as analízisünk általánosításaként Markov Chain Monte Carlo (MCMC) analízist használva állapítottuk meg jövőbeli gravitációshullám-detektorok lehetséges optimális hálózati konfigurációit. Az általánosítással a detektorok egyidejű elhelyezését feltételező optimális földrajzi pontokat kerestük 3 és 5 ilyen detektort feltételezve. Az új analízisünk megerősítette azt a 2013-ban kapott következtetésünket, hogy Ausztrália biztosítaná a legtöbb optimális lehetőséget a hálózat további detektorokkal való bővítésére. A munkánk melléktermékeként javaslatot tettünk egy esetlegesen megépülő L-topológiájú interferometrikus detektor optimális elhelyezésére az ausztrál kontinensen, valamint Kínában. Pontosítottuk és további adatokkal bővítettük a 2013-as munkánkban már prezentált földrajzi térképet, amely jövőben megépítendő csillagászati mérőműszerek optimális elhelyezésében nyújt segítséget. Térképünk egyedülálló termék a nagy beruházást igénylő, érzékeny földi mérőműszerek jövőbeli építését tervező kollaborációk számára.

A kozmológiai struktúrafejlődés és az integrált Sachs-Wolfe effektus vizsgálata

Szapudi István vezetésével az integrált Sachs-Wolfe effektus (ISW) kutatásában áttörő eredményeket sikerült elérni. Tomotsugu Goto-val, Ben Granett-tel és Kovács Andrással becsléseket adtunk a WISE felmérésből származó galaxis adatok és a hét éves Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) hőmérsékleti anizotrópia térkép közötti kereszt-teljesítményspektrumra. Az eredmények születését nagyban segítette, hogy Kovács András 4 hetes tanulmányúton vett részt Szapudi Istvánnál a Hawaii Egyetemen. A nemlineáris leképezések, illetve ezeknek a kozmológiai struktúrák kialakulása és a perturbációelmélet terén való alkalmazásával kapcsolatos kutatásait Szapudi tovább folytatta Xin Wang és társai segítségével. Megvizsgálták az anyagsűrűség-mezőt, amely a nemlineáris rezsimbe lépve lognormális valószínűség-sűrűség eloszlást mutat. Szapudi István és Czimmer Viktor kidolgoztak továbbá egy új, csoportelmélet alapú megközelítést az általános relativitáselmélet keretei közötti kozmológiai perturbációelmélethez. A kozmológiai perturbációknak egy a Lie-csoportokon és ábrázolásaik elméletén alapuló megközelítését mutatták be.

A második munkaévben Kovács András vezetésével megmutattuk, hogy a fotometriai alapú klasszifikáció terén áttörő jelentőségű javulás érhető el mesterséges intelligencia felhasználásával. A módszer első alkalmazásaként az égbolt egy speciális részét, az ún. "Cold Spot" régiót vizsgáltuk. A Pan-STARRS1 égtérkepezési projekt adatait a WISE infravörös megfigyeléseivel kombinálva bebizonyítottuk, hogy a kozmikus háttérsugárzás anomálishan alacsony átlaghőmérsékletét egy ritka supervoid okozza.