Galaxiskatalógus fejlesztése és felhasználása elektromágneses és gravitációshullám-tranziensek forrásgalaxisainak azonosításában

MSc diplomamunka

Dálya Gergely

Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizikus MSc



Témavezető:

Dr. Raffai Péter

Adjunktus ELTE Atomfizikai Tanszék

2017

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés						
	1.1. A gravitációs hullámok elmélete						
	1.2.	A gravitációs hullámok forrásai		2			
	1.3. A LIGO						
2.	Katalógusfejlesztés						
	2.1.	GLADE v1.0		11			
		2.1.1. Felhasznált katalógusok	• • • • •	11			
		2.1.2. Paraméterek asszociálása Random Forest algoritm	ussal	13			
		2.1.3. Teljességvizsgálat B luminozitásokkal	• • • • •	17			
	2.2.	GLADE v2.0	• • • • •	19			
		2.2.1. Felhasznált katalógusok		19			
		2.2.2. Továbbfejlesztett cross match algoritmus	• • • • •	20			
		2.2.3. Teljességvizsgálat B luminozitásokkal		21			
		2.2.4. Teljességvizsgálat Schechter-függvényekkel		23			
3.	A GLADE felhasználása 24						
	3.1. Automatizált GRB forráslokalizáció						
	3.2.	Skymap Viewer		32			
	3.3.	GWsky		33			
Ös	szefe	oglalás és kitekintés		35			
Kä	Köszönetnyilvánítás						
Hi	Hivatkozások						
Fï	Függelék						

Kivonat

A gravitációs hullámok 2015. szeptember 14-i első közvetlen megfigyelése az amerikai LIGO detektorok által egy új ablakot nyitott az Univerzumra. Egy forrás gravitációs és elektromágneses hullámainak együttes megfigyelésével, vagyis az ún. többcsatornás csillagászat révén olyan információkat tudhatunk meg az égitestről, amelyre más módszerekkel képtelenek lennénk. Mivel azonban a jelenlegi gravitációshullám-detektorok forráslokalizációja néhány 10 négyzetfok pontosságú, igen komoly kihívás az egész égterület átvizsgálása az elektromágneses jel után kutatva. Galaxiskatalógusok használatával azonban jelentősen növelhető a felfedezés valószínűsége, egyrészt a megfigyelendő égterület csökkentésével, másrészt súlyozva a galaxisokat a neutroncsillag-keletezési rátájuk segítségével. Emiatt a LIGO kollaboráció számára kiemelten fontos, hogy rendelkezzen egy minél teljesebb galaxiskatalógussal.

Dolgozatomban bemutatom az általam készített GLADE (Galaxy List for the Advanced Detector Era) galaxiskatalógust, amelyet a LIGO kollaboráció már a 2015. őszén kezdődött első megfigyelési időszak (O1) alatt is használt. A katalógus közel 2 millió galaxist tartamazó első verzióját 4 galaxiskatalógusból hoztam létre (GWGC, 2MPZ, 2MASS XSC, HyperLEDA), majd random forest gépi tanuló algoritmus segítségével asszociáltam hozzá a legfontosabb paramétereket azon galaxisokhoz, amelyekre közvetlen mérések nem voltak elérhetők. A katalógus legfrissebb verziójához ezen felül a kollaboráció tagjainak igényeit figyelembe véve az SDSS DR12 kvazár katalógusát is felhasználtuk.

Az elektromágneses utófény keresése mellett számos más asztrofizikai projektben is sikeresen használható a katalógus. Dolgozatomban bemutatom az általam fejlesztett rendszert is, amely gamma-felvillanások forráslokalizációját végzi el automatikusan a katalógus adatai alapján, valamint felvázolok néhány további projektet, amelyben külföldi kollégáim használják a katalógust.

1. Bevezetés

1.1. A gravitációs hullámok elmélete

Ebben a szekcióban a gravitációs hullámok (GH-k) általános relativitáselméleti hátterét mutatom be. A szekció nagyban épít Frei Zsolt MTA doktori értekezésére [29] valamint Raffai Péter PhD disszertációjára [66]. A tárgyalás során a c = 1 egységrendszert használom.

A négydimenziós téridőben az invariáns ívelemnégyzetet a következőképpen számíthatjuk ki:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \tag{1}$$

ahol a megszokott konvenció szerint a görög betűkkel jelzett indexek 0-tól 3-ig futnak, $g_{\mu\nu}$ pedig a metrikus tenzor.

A részecskék a téridő geodetikusain mozognak, amelyeket λ affin paraméter segítségével parametrizálva a tömeggel rendelkező részecskék geodetikus egyenletét a következő formában írhatjuk:

$$\frac{d^2x^{\alpha}}{d\lambda^2} + \Gamma^{\alpha}_{\mu\nu}\frac{dx^{\mu}}{d\lambda}\frac{dx^{\nu}}{d\lambda} = 0, \qquad (2)$$

ahol a Christoffel-szimbólumot a következőképpen definiálhatjuk a metrikus tenzor segítségével:

$$\Gamma^{\alpha}_{\mu\nu} = \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} \left(\frac{\partial g_{\beta\nu}}{\partial x^{\mu}} + \frac{\partial g_{\beta\mu}}{\partial x^{\nu}} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^{\beta}} \right).$$
(3)

A Riemann-féle görbületi tenzor értékét a Christoffel-szimbólum felhasználásával a következő alakban írhatjuk:

$$R^{\lambda}_{\mu\sigma\nu} = \frac{\partial\Gamma^{\lambda}_{\mu\nu}}{\partial x^{\sigma}} - \frac{\partial\Gamma^{\lambda}_{\mu\sigma}}{\partial x^{\nu}} + \Gamma^{\lambda}_{\sigma\alpha}\Gamma^{\alpha}_{\mu\nu} - \Gamma^{\lambda}_{\nu\alpha}\Gamma^{\alpha}_{\mu\sigma}, \tag{4}$$

amelyből kontrakcióval kaphatjuk meg a Ricci-tenzort:

$$R_{\mu\nu} = R^{\lambda}_{\mu\lambda\nu},\tag{5}$$

majd a metrikus tenzor segítségével képezhetjük a Ricci-skalárt:

$$R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}.$$
 (6)

A téridő görbülete és annak anyagi tartalma között az Einstein-egyenlet teremt kapcsolatot:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}, \qquad (7)$$

ahol $G_{\mu\nu}$ az Einstein-tenzor, $T_{\mu\nu}$ az energia-impulzus tenzor, G pedig a newtoni gravitációs állandó.

Keressük az Einstein-egyenlet egy vákuummegoldását, vagyis legyen $T_{\mu\nu} = 0!$ Ezen felül hasznájuk az ún. gyenge tér közelítést, amelynek értelmében a metrikus tenzor a következő alakban írható:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu},\tag{8}$$

ahol $\eta_{\mu\nu}$ a speciális relativitáselmélet Minkowski-téridejének metrikus tenzora, $h_{\mu\nu}$ pedig valamilyen perturbáció, amely mátrixának elemei sokkal kisebbek, mint egy. Oldjuk meg úgy az Einstein-egyenletet, hogy $h_{\mu\nu}$ magasabb rendű tagjait elhanyagoljuk! Lorentz-mértéket használva az egyenlet egy hullámegyenletre egyszerűsödik:

$$\Box h_{\mu\nu} = 0, \tag{9}$$

ahol $\bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} h$. A hullámegyenlet megoldása monokromatikus síkhullámot feltételezve:

$$\bar{h}_{\mu\nu} = A_{\mu\nu} \, e^{ik_{\alpha}x^{\alpha}},\tag{10}$$

ahol $A_{\mu\nu}$ a hullám amplitúdója, k_{α} pedig a hullámszámvektora.

Az Einstein-egyenlet gyenge tér közelítésben kapott, hullámegyenletet kielégítő vákuummegoldásait nevezzük gravitációs hullámoknak. A Lorentzmértékfeltételből adódik, hogy

$$A^{\mu\alpha}k_{\alpha} = 0, \tag{11}$$

vagyis a GH-k transzverzálisak. Az egyenletekből az is következik, hogy $k_{\alpha}k^{\alpha} = 0$, vagyis a hullámok fénysebességgel terjednek.

Az ún. transzverzális spurtalan mérték (TT gauge) használatával a $h_{\mu\nu}$ mátrixában mindössze két független komponens marad:

$$\bar{h}_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{h}_{+} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{h}_{+} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{h}_{x} & 0 \\ 0 & \bar{h}_{x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$
(12)

 \bar{h}_+ és \bar{h}_x a GH kétféle polarizációjú komponenseként értelmezhető, a valódi hullám ezek lineárkombinációjaként áll elő.

1.2. A gravitációs hullámok forrásai

Hasonlóan az elektromágneses hullámokhoz, amelyek nem származhatnak monopól sugárzásból a töltésmegmaradás miatt, a GH-k sem lehetnek monópólak az anyagmegmaradás következtében. Azonban mivel tömegből csak egyfélét ismerünk a kétféle elektromos töltéssel szemben, a GH-k dipólok sem lehetnek. Elvégezve a multipól sorfejtést, azt kapjuk, hogy az első, GH-k keltésére alkalmas tag a kvadrupól, amely a következőképpen felírható kvadrupólmomentumot tartalmazza [66]:

$$I_{\mu\nu} = \int \left(x_{\mu\nu} - \frac{1}{3} \delta_{\mu\nu} r^2 \right) \varrho(r) \mathrm{d}^3 r \tag{13}$$

Az előző szekcióban ismertetett $h_{\mu\nu}$ tenzort a kvadrupólmomentum-tenzornak és a forrás d távolságának a segítségével a következő alakban írhatjuk:

$$h_{\mu\nu} = \frac{2G}{dc^4} \ddot{I}_{\mu\nu},\tag{14}$$

vagyis a GH-k forrása a tömegeloszlás gyorsuló kvadrupólmomentuma. Igy GH-k forrásai lehetnek például a kompakt kettősök, nem forgásszimmetrikus tömegeloszlású forgó neutroncsillagok, nagyenergiájú összeütközések, szupernóva-robbanások, gamma-kitörések, stb. Várunk továbbá ezek mellett egy sztochasztikus GH-hátteret is, vagyis sok távoli, független, külön-külön nem észlelhető GH összegét. Ilyen lehet pl. egy, a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzáshoz hasonló, kozmológiai eredetű GH-háttér.

Ezidáig csak kompakt kettősök gravitációshullám-jeleit sikerül detektálni, valamint a kutatásom szempontjából is ezek a leginkább relevánsak; ennek megfelelően a következőkben röviden ezeket ismertetem.

Kompakt kettős rendszert alkothat két fekete lyuk (binary black hole, BBH), két neutroncsillag (binary neutron star, BNS) vagy egy neutroncsillag és egy fekete lyuk (NSBH). Ilyen BNS pl. az a kettős rendszerben található pulzár is, amelynek az évtizedeken át történő megfigyelésével Hulse és Taylor először mutatta ki közvetett módon a GH-k létezését [36], amiért 1993-ban Nobel-díjban részesültek.

Egy ilyen kettős rendszer tagjai a közös tömegközéppont körüli keringésük során GH-kat sugároznak ki, így energiát és impulzusmomentumot veszítenek, aminek következtében pályájuk fél nagytengelye és excentricitása folyamatosan csökken. Minél közelebb kerülnek egymáshoz, annál intenzívebb a GH-kibocsátás, és a kibocsátott hullámok frekvenciája folyamatosan nő, körpályán keringő kettős esetén az alábbi összefüggés szerint [56]:

$$f_{\rm GW}(\tau) \simeq 134 \; {\rm Hz} \; \left(\frac{1.21 \, M_{\odot}}{M_c}\right)^{5/8} \left(\frac{1 \; {\rm s}}{\tau}\right)^{3/8},$$
 (15)

ahol τ azt jelenti, hogy mennyi idő van még az összeolvadásig, M_c pedig az ún. chirp-tömeg: $M_c = (m_1 m_2)^{3/5} (m_1 + m_2)^{-1/5}$. A folyamatosan növekvő frekvencia egy idő után belép a detektoraink érzékeny tartományába, így ekkortól válik érzékelhetővé egy megfelelően nagy amplitúdójú jel. A bespirálozás (*inspiral*) fázisát az összeolvadás (*merger*) követi, ekkor a legintenzívebb a GH-kisugárzás. Végül a keletkező aszimmetrikus, forgó kompakt objektum is bocsát ki GH-kat, ezt nevezzük az utócsengés fázisának (*ringdown*).

A LIGO GH-detektorok eddig két alkalommal észleltek GH-kat:

2015. szeptember 14-én történt meg a GH-k első közvetlen detektálása [5], amikor is a két detektor 7 ms időkülönbséggel észlelte ugyanazt a jelet. A független jelkereső algoritmusok mindegyike megerősítette, hogy a GH-kat bespirálozó és összeolvadó fekete lyukak bocsátották ki; az észlelt jel mindhárom szakasza jó egyezésben volt az általános relativitáselmélet jóslataival. A két fekete lyuk tömege $m_1 = 29^{+4}_{-4} M_{\odot}$ valamint $m_2 = 36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ volt, az összeolvadásukból keletkezett fekete lyuk tömege pedig $M = 62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, vagyis a két fekete lyuk a kb. 0,2 másodpercig észlelt bespirálozás és összeolvadás során 3 Naptömegnyi energiát sugárzott szét. A rendszer becsült távolsága 410^{+160}_{-180} Mpc. Az észlelt és a rekonstruált hullámforma látható az 1. ábrán.



1. ábra. A 2015. 09. 14-i felfedezés során észlelt, zajjal terhelt jel (szürkével), valamint a BayesWave algoritmus által rekonstruált jel (fekete, színes hibahatárokkal).

A második detektálás 2015. december 26-án történt [6]. Az észlelt hullámforma ebben az esetben is teljesen megfelelt az elméleti jóslatoknak. A fekete lyukak tömegei $m_1 = 14^{+8}_{-4} M_{\odot}$ és $m_2 = 8^{+2}_{-2} M_{\odot}$, a szétsugárzott energia nagysága pedig $M = 1^{+0,1}_{-0,2} M_{\odot}$ -nek felel meg. A forrás becsült távolsága 440^{+180}_{-190} Mpc.

A LIGO detektorok emellett az első észlelési időszak során (*O1 observing run*), amely 2015 szeptember 12-től 2016. január 19-ig tartott, még egy alkalommal észleltek GH-jelet, mégpedig 2015. október 12-én [53]. Ez azonban a másik két eseményhez képest, amelyek több, mint 5 σ szignifikanciájúak voltak, mindössze 1,7 σ -s, így a LIGO kollaboráció nem tekinti felfedezésnek, mindössze jelöltnek. Az O1 megfigyelési időszak összefoglalását a 2. ábrán láthatjuk.



2. ábra. A LIGO O1 megfigyelési időszakának összefoglaló grafikája.

1.3. A LIGO

A LIGO (Laser Interferometer Gravitaional-Wave Observatory) GHobszervatóriumok a jelenlegi legmodernebb és legérzékenyebb műszerek, amelyek célja az asztrofizikai eredetű GH-k detektálása és tanulmányozása [8]. A LIGO kollaboráció két ugyanolyan, Fabry–Pérot-üregekkel felszerelt L-alakú Michelsoninterferométert üzemeltet az Egyesült Államokban; az egyik Hanfordban, Washington államban (H1), a másik pedig Livingstonban, Louisiana államban (L1) található. A két detektort a 3. ábrán láthatjuk. A detektorokat az 1990-es évek végén építették a Caltech és az MIT szakemberei a National Science Foundation támogatásával. 2005 és 2007 között üzemeltek először a tervezett érzékenységgel, folyamatosan, hosszú ideig; ez az időszak az S5 Science Run nevet kapta. Az eredeti LIGO detektorok 40-7000 Hz frekvenciatartományon voltak érzékenyek, itt akár $h \simeq 10^{-21}$ strain amplitúdójú jelek kimutatására is képesek.

A két LIGO detektor 4 km hosszú karjaiban egy 10^{-21} amplitúdójú jel 10^{-18} nagyságrendű relatív megnyúlást okoz, ami a proton átérőjének ezredrésze. Ilyen csekély megnyúlás kimutatásához speciális interferométerre, a legmodernebb optikai eszközökre, rendkívül stabil lézerre, rendkívül alacsony nyomású vákuumra



3. ábra. A LIGO két detektora

és nagyon jó szeizmikus izolációra van szükség.

A LIGO interferométerében egy féligáteresztő tükör juttatja a lézert a két, egymásra merőlegesen álló, egyforma hosszú karba, ahol azok a végponttükrökön visszaverődnek, majd a féligáteresztő tükörhöz érve ellentétes fázisban találkoznak, így kioltják egymást. Egy, a rendszeren áthaladó GH periodikusan hol az egyik, hol a másik kart nyújtja meg, ezáltal megváltoztatja a két karban terjedő fény relatív fázisát, így azok nem fogják kioltani egymást, hanem egy fotodetektorra érve jelet adnak.

Két módosítás segítségével a fent vázolt Michelson-interferométereket még hatékonyabbá tették. Mindkét karba beépítettek egy-egy Fabry–Pérot-üreget, amelyek révén a karból való kijutás előtt többször oda-vissza pattog a fény, így az effektív úthossza jóval nagyobb lesz, mint a kar 4 km-es hossza, ezzel pedig a GH okozta fázistolás valamint a teljesítmény is megnövekszik. Pl. egy 100 Hz-es GH jel esetén ez százszorosára növeli a jel nagyságát. Ezen kívül pedig a lézer és a nyalábosztó közé helyezett, megfelelő áteresztési függvényű tükörrel a Michelsoninterferométer optikai veszteségeit is korrigálni lehet. A két eljárás együttes alkalmazásával a LIGO interferométereinek karjaiban a lézer teljesítménye közel 8000-szer akkora, mintha a hagyományos Michelson-interferométert használnák. Az interferométerek felépítését a 4. ábrán láthatjuk.

2008 áprilisában kezdetét vette a LIGO detektorok nagyszabású fejlesztése; az új detektorok, amelyek az Advanced LIGO (aLIGO) nevet kapták, 2014 végére készültek el [52]. A tervek szerint az Advanced LIGO detektorok elődeikhez képest tízszer olyan érzékenyek lesznek egy széles frekvenciatartományban, ami a potenciálisan érzékelhető források tekintetében ezerszeres növekedést jelent. Emellett a műszerek alacsony frekvenciás határa is kitolódik, 40 Hz-ről 10 Hz-re. A detektorokat folyamatosan fejlesztik, a tervezett érzékenység elérését 2019-re tervezik. Jelenleg kb. háromszor olyan érzékenyek, mint az átépítés előtt.



4. ábra. A LIGO interferométerének vázlatrajza. Láthatjuk a Fabry–Pérot-üregeket (ITM és ETM közötti rész) illetve az optikai veszteségek korrigálását végző tükröt (PRM) is.

Az Advanced LIGO detektorok első megfigyelési időszaka (O1) 2015. szeptemberétől 2016. januárjáig tartott, a második megfigyelési időszak (O2) pedig 2016. november 30-án kezdődött meg.



5. ábra. A jelenleg üzemképes (sárga), építés alatt álló (zöld) illetve tervezett (narancssárga) GH-detektorok.

A LIGO mellett számos további GH-detektor működik, ezek elhelyezkedését láthatjuk az 5. ábrán. Ilyen detektor például a brit-német GEO 600 lézer inter-

ferométer, amely 600 m-es karokkal rendelkezik [78]. A Németországban, Hannover közelében működő detektor két fontos szerepet tölt be: itt tesztelik az új technológiákat, mielőtt beépítenék azokat a LIGO detektorokba, valamint ha a nagyobb műszerek éppen átépítés alatt állnak, egy esetleges kiemelkedően erős GH-jelet a GEO 600 detektor is képes lenne érzékelni.

A KAGRA detektor Japánban, a Kamioka bányarendszerben található [12]. A 3000 m-es karhosszúságú interferométer különlegessége, hogy ez az első hűtött detektor, amivel a végponttükrök részecskéinek rezgéséből adódó zajok jelentősen csökkenthetők. A KAGRA jelenleg tesztfázisban üzemel.

Az Olaszországban, Pisa mellett épített Virgo detektor 3000 m-es karhosszúságú [9]. 2000-ben kezdte meg a működését, majd 2011-ben kezdetét vette egy nagyszabású fejlesztés, amelynek a célja, hogy az Advanced Virgo (AdV) detektor az elődjénél egy nagyságrenddel érzékenyebb legyen [10]. A LIGO és a Virgo kollaborációk szorosan együttműködnek egymással. A 6. ábrán láthatjuk az aLIGO és AdV detektorok tervezett érzékenységét az elkövetkező években.



6. ábra. Az aLIGO és AdV detektorok érzékenységének tervezett változása az évek során. A görbék a projektek különböző fázisaiban várt strain zaj mértékét mutatják a detektorok érzékeny frekvenciatartományán. Minden esetben a görbe feletti strain amplitúdójú GH-jelek lesznek érzékelhetők. A BNS-optimized feliratú lila vonal azt az érzékenységet mutatja, amikor speciálisan BNS-ek keresésére hangolják a detektorokat. Az ábrák forrása: [7]

1.4. Többcsatornás csillagászat

A többcsatornás csillagászat (*multi-messenger astronomy*) azt jelenti, hogy ugyanarról az objektumról több különböző, független információhordozó segítségével szerzünk információkat, pl. elektromágneses (EM) sugárzás, gravitációs hullámok, neutrínók vagy nagyenergiás kozmikus sugárzás együttes detektálásával. Bizonyos tranziens GH-források esetében várunk a GH-k mellett a fentiek közül egy vagy több másik információhordozót is.

A BNS ütközések során ún. kilonóva jön létre (ld. pl. [49], [60], [74]), amely kb. egy héten keresztül sugároz EM-jeleket (főleg az infravörös tartományban). Egy kilonóva legnagyobb luminozitása akár $\geq 10^{41}$ erg s⁻¹ is lehet [41]. A kilonóvák EM jeleit úgy lehetne észlelni, ha a GH jelet érzékelve abból meghatároznánk, melyik égterületről érkezett a jel, majd ezt a rekonstruált égterületet nagy látómezejű teleszkópokkal végigpásztáznánk [13].

Két GH-detektorral azonban a forrás lokalizációja meglehetősen pontatlan, tekintve, hogy a GH-detektorok felbontása jóval kisebb az EM teleszkópokéhoz képest. Jelenleg a rekonstruált égterületek nagysága ~ 10 – 100 négyzetfok [34], amely függ a forrás pozíciójától az égbolton valamint a GH-jel jel per zaj arányától (SNR). Emiatt az EM jelek detektálása (*EM Follow-up*) igen komoly kihívást jelent még a nagy látómezejű teleszkópok számára is. Az EM Follow-up eljárások és stratégiák optimalizálása így egy rendkívül jelentős kérdés és egyben élénken kutatott terület; a korábbi és jelenlegi stratégiákat és terveket a következő cikkek foglalják össze: [3], [1], [70], [30].

Több szakcikkben is rámutattak (pl. [50], [34]), hogy nagyban növelhető a sikeres EM Follow-up esélye, ha egy galaxiskatalógus használatával irányítjuk a távcsöves megfigyeléseket, még akkor is, hogyha a használt galaxiskatalógus nem 100%-ig teljes, vagyis nem tartalmazza az adott távolságig az összes galaxist az adott égterületen. Galaxiskatalógus használatával a megfigyelendő égterület mérete jelentősen lecsökkenthető, tekintve, hogy a BNS összeolvadásból származó GH-jelet valamelyik galaxisból vagy annak közvetlen közeléből várjuk. Emellett a galaxisokat sorba rendezhetjük aszerint, hogy melyikben történt meg legnagyobb valószínűséggel az összeolvadás. A valószínűség meghatározására különböző modellek léteznek, vagy a B színszűrőben vett magnitúdóval, vagy a galaxis sztelláris tömegével szokták arányosak venni a BNS-keletkezési rátát, amely közvetlen kapcsolata állítható a valószínűséggel [34]. Ha elsőnek a legnagyobb valószínűségű galaxisokat figyeljük meg, sokkal nagyobb esélyünk lesz az EM jel detektálására.

A LIGO-Virgo Kollaboráció EM Follow-uppal foglalkozó partnerei az Advanced LIGO első megfigyelési időszaka (O1) előtt a Gravitational Wave Galaxy Catalogue (GWGC, [77]) nevű galaxiskatalógust használták, amely teljesnek mondható 30 Mpc távolságon belül, viszont 100 Mpc távolságon túl nem tartalmaz galaxisokat. Az Initial LIGO időszakban az egy detektorra számolt BNS bespirálozási távolság (*inspiral range*, az az égi pozíciókra és pályainklinációkra kiátlagolt távolság, ahonnan az interferométer képes lenne detektálni két, 1,4 M_{\odot} tömegű neutroncsillag összeolvadását 8-as SNR-rel) nem lépte túl a 30 Mpc távolságot [51], így a GWGC megfelelő katalógus volt az EM Follow-upot végző partnerek számára. Az Advanced LIGO detektoroknak azonban nagyobb a BNS inspiral rangee, amely még tovább növelhető, ha hálózatba kapcsolva használjuk a GHdetektorainkat. N darab, azonos érzékenységgel és orientációval rendelkező detektor jelét kombinálva, feltéve, hogy az egyes detektorok zajai korrelálatlanok, az inspiral range \sqrt{N} -nel skálázódik, figyelmen kívül hagyva a jelnek az egyes detektorokhoz való beérkezési idejében lévő különbséget [26]. Emiatt jóval távolabbi, akár ~ 300 Mpc-re lévő galaxisokban lévő neutroncsillag-kettősök is potenciális forrásai lehetnek az észlelt GH-jelnek, így az ilyen távoli galaxisoknak is szerepelniük kell egy olyan galaxiskatalógusban, amelynek célja az Advanced LIGO detektorok EM Follow-up projektjében való hatékony alkalmazhatóság.

2. Katalógusfejlesztés

Ebben a fejezetben bemutatom az általam készített Galaxy List for the Advanced Detector Era (GLADE) galaxiskatalógust. A 2.1. alfejezetben lesz szó a GLADE 1.0 verziójáról, amelyet a LIGO kollaboráció már az O1 megfigyelési időszak alatt is használt különböző célokra. A katalógus fejlesztése természetesen nem állt le, a Kollaboráció és az EM megfigyeléseket végző partnerek igényeit figyelembe véve folyamatosan dolgozok, hogy még jobban hasznosítható legyen mind az EM Follow-up programban, mind más asztrofizikai és kozmológiai projektekben. Az így elkészült 2.0 verziót a 2.2. alfejezetben prezentálom.

2.1. GLADE v1.0

2.1.1. Felhasznált katalógusok

A GLADE katalógus¹ [20] 1.0 verzióját a következő négy galaxiskatalógus összepárosításával (cross match) hoztam létre:

- Gravitational Wave Galaxy Catalogue (GWGC)
- 2 Micron All-Sky Survey Extended Source Catalog (2MASS XSC)
- 2 Micron All-Sky Survey Photometric Redshift Catalog (2MPZ)
- HyperLEDA

A GWGC² [77] négy korábbi katalógus felhasználásával készült, amelyek a következők: Tully Nearby Galaxy Catalog [75], Catalog of Neighboring Galaxies [40], V8k katalógus [76], HyperLEDA. A készítés során kidobták a 100 Mpc-nél távolabbi objektumokat. A GWGC tartalmaz a galaxisok mellett 150 gömbhalmazt is.

A 2MASS XSC³ [72] több, mint 1,6 millió objektumra tartalmaz égi pozícióadatokat valamint J, H és K színszűrőkkel mért magnitúdókat. Ezen objektumok kb. 97%-a galaxis. Az EM Follow-uphoz nagyon hasznos B magnitúdó és vöröseltolódás azonban nem szerepel a katalógusban.

A 2MPZ-t⁴ [15] a 2MASS XSC, a WISE és a SuperCOSMOS crossmatchelésével hozták létre. Mind B magnitúdókat, mind (általában fotometrikus) vöröseltolódásokat tartalmaz közel 900 000 galaxisra. A fotometrikus vöröseltolódásokat neurális háló algoritmussal asszociálták hozzá a galaxisokhoz.

¹aquarius.elte.hu/glade

²vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=GWGC

³ipac.caltech.edu/2mass/

⁴ssa.roe.ac.uk/TWOMPZ.html

A HyperLEDA⁵ [57] a LEDA és Hypercat katalógusok használatával jött létre, és több, mint 3 millió objektumot tartalmaz. A GLADE katalógus készítésekor fontos szempont volt, hogy csak olyan objektumokat tartsunk meg, amelyek nagy valószínűséggel galaxisok. A HyperLEDA katalógus tartalmaz egy megjelölést (flag) az egyes objektumokra (galaxis, kvazár, stb.), azonban ezt néhány eredeti felvétel megnézése után úgy ítéltem meg, hogy nem eléggé megbízható, sok volt ugyanis a tévesen kategorizált objektum. Kidolgoztam egy eljárást, amivel nagyobb bizonyossággal válogathattam ki a galaxisokat. Csak akkor tartottam meg egy objektumot, ha az teljesítette a következő 3 feltételt:

- 1. Az objektum típusa legyen G. A HyperLEDA katalógusban így vannak jelölve azok az objektumok, amik az eredeti kategorizálás szerint vagy galaxisok vagy kvazárok.
- Az objektumnak legyen izofotális átmérő értéke (logd25), ami azt jelenti, hogy egy kiterjedt forrásról van szó. Ezzel kizárjuk a kvazárokat.
- 3. Az objektumnak legyen távolságmodulus (modz) és B színszűrővel mért magnitúdó (bt) értéke. Ezt a kritériumot azért határoztam meg, mert fontosnak tartottam, hogy az EM Follow-up szempontjából nagyon hasznos két paraméter a GLADE összes objektumára rendelkezésre álljon.

Egy galaxiskatalógus létrehozásánál az is nagyon fontos szempont, hogy minél pontosabban be tudjuk azonosítani két katalógusban azokat a galaxisokat, amelyek valójában ugyanazok, így a két katalógus cross matchelése után létrejövő nagyobb katalógusban ne legyenek duplikátumok, egy galaxis csak egyszer szerepeljen.

A cross matchelés elvégzéséhez a k-dimenziós fa (k-d tree) algoritmust használtam. A k-d tree egy bináris térparticionáló fa, amely egy k-dimenziós térben elhelyezi az adatpontokat, majd ezt követően rendkívül gyorsan és megbízhatóan lehet különböző feladatokat elvégezni azokon, mint például a legközelebbi szomszéd megkeresése vagy intervallumkeresés. A legközelebbi szomszéd megkeresésének időkomplexitása $\mathcal{O}(\log n)$, így még a sok galaxist tartalmazó katalógusok cross matchelése is percek alatt elvégezhető, szemben azzal az esettel, amikor egyszerű for-ciklusokat használnánk, és a művelet napokat venne igénybe.

Két galaxist akkor ítéltem azonosnak, ha azok szögtávolsága kisebb volt 10^{-3} foknál (3,6 ívmásodperc). A szakirodalomban nincs erre egyértelműen meghatározott optimális határ. Az általam választott érték közel van több korábbi galaxiskatalógus elkészítésénél alkalmazott értékhez, ezen felül konkrét

⁵leda.univ-lyon1.fr/



7. ábra. A GLADE katalógus galaxisainak sűrűségeloszlása galaktikus koordinátákban, azimutális projekciót használva. A bal oldali ábra a galaktikus északi félgömböt, a jobb oldali a déli félgömböt ábrázolja. A két ábra szélénél nagyon lecsökken a galaxisok száma. Ennek oka az, hogy a Tejút kitakarja a mögötte lévő galaxisokat. A vörös sávokként jelölt kiemelkedően sűrű területek a HyperLEDA katalógusbeli anizotrop galaxiseloszlás következményei.

felvételeket is megnéztem az ideális határ kiválasztásához.

Miután a fent leírt eljárással kiszűrtem a duplikátumokat a katalógusból, 1918 147 galaxis maradt a GLADE katalógusban, amely kb. 40-szer annyi, mint a korábban használt GWGC galaxiskatalógus objektumainak száma. A GLADE galaxisainak eloszlását az égbolton a 7. ábrán láthatjuk. Jól észrevehető az ábrán a Tejút sávja, ahogy kitakarja a mögötte található galaxisokat, így jelentősen csökken a katalógus sűrűsége. Emellett megfigyelhetünk különösen sűrű területeket is, amelyek a HyperLEDA katalógus anizotrop galaxiseloszlásának következményei.

2.1.2. Paraméterek asszociálása Random Forest algoritmussal

A legújabb, EM Follow-up stratégiával foglalkozó cikkek azt javasolják, hogy a beérkező GH-jel alapján 3 dimenzióban rekonstruálják az égterületet, ahonnan a jel származhatott [71]. Emiatt különösen fontos, hogy a katalógus galaxisaira rendelkezésre álljon vöröseltolódás. A B-magnitúdó megléte is nagyon lényeges, bizonyos modellek szerint ugyanis ez korrelál a BNS-formálódási rátával, amivel súlyozhatjuk a galaxisokat, és így lehetőségünk lesz először a legvalószínűbb forrásgalaxisokat észlelni az EM Follow-up megfigyeléseket végző távcsövekkel. Ennek a két paraméternek a megléte továbbá a katalógus teljességének a meghatározásában is lényeges.

Ezek az adatok azonban a 2MASS XSC katalógusban nem szerepeltek. A

2MPZ katalógus galaxisai egy részhalmazát alkotják a 2MASS XSC galaxisoknak, azonban ebben a katalógusban mind vöröseltolódás, mint B magnitúdó szerepel. Ezt kihasználva egy *Random Forest* (RF) gépi tanuló algoritmust alkalmaztam, hogy a többi 2MASS XSC galaxis vöröseltolódását és B magnitúdóját megbecsülhessem.

Az RF [16] a döntési fák [65] egy speciális továbbfejlesztése. Egy döntési fát elképzelhetünk egy gráfként, ahol a csomópontok reprezentálják az egyes változókat (pl. különböző magnitúdók vagy színek), az élek pedig ezen változók különböző lehetséges értékeit (pl. J - H > 0.5 vagy J - H < 0.5).

Minden egyes objektum a változói konkrét értékétől függően egy adott utat fog követni a gráfon, amíg egy levélhez nem érkezik. Egy levél jelenthet valamilyen objektumtípust (pl. Ia vagy II-típusú szupernóva) vagy ha regresszióra használjuk, valamilyen konkrét értéket (pl. a fotometrikus vöröseltolódás értéke). Egy tanulóminta alkalmazásával, amelyre mind a csomópontokban lévő változók, mind a megbecsülendő paraméter (levél) értéke ismert, az RF felépít egy vázat, amellyel új objektumokra a csomóponti változók ismeretében képes megbecsülni a keresett paraméter értékét.

A legfontosabb ötlet az RF mögött az, hogy sok dekorrelált döntési fát építünk fel, amelyeket a tanulómintából véletlenszerű, visszatevéses mintavételezéssel készített részhalmazokra alkalmazunk, majd az eredményeket kiátlagoljuk, hogy megkapjuk a végső vázat, amivel becsülni tudjuk majd az új objektumok paramétereit. Az átlagolás lehetővé teszi, hogy a szisztematikus hibáktól minél inkább mentes legyen az eljárásunk, emellett a becslés varianciáját is csökkenti. A csillagászati szakirodalomban a módszert sikeresen alkalmazták különböző kutatások során klasszifikációra és regresszióra is, ld. pl. [23], [67], [18], [17].

Az RF felépítéséhez a QUANTREG R programcsomagot használtam [42], amely az RF egy speciális változatát, az ún. *quantile regression forest*-et (QRF) alkalmazza. Ennek a módszernek az az előnye, hogy egy paraméterfüggetlen módszert biztosít ahhoz, hogy ne csak az átlagot kapjuk meg, hanem a kvantiliseket is. A módszer részletes leírását ld. [59].

Az RF algoritmus pontossága nagyban függ a használt csomóponti változók számától. Azt tapasztaltam, hogy a becslések nem voltak kellőképpen pontosak, ha csomóponti változóként két vagy kevesebb magnitúdóértéket használtam, így csak azokra a galaxisokra alkalmaztam az eljárást, amelyekre a 2MASS XSC katalógusból elérhető volt a J, H és K magnitúdók mindegyike. Ezen kívül azokra a 2MASS XSC galaxisokra sem használtam az RF-et, amelyekre valamely más katalógusból már volt B magnitúdó és vöröseltolódás, így végül a 2MASS XSC katalógus objektumainak $\sim 26\%$ -ára, vagyis kb. 550000 galaxisra becsültem paramétereket a módszerrel.

14

A használt QRF algoritmus minden galaxisra egy olyan valószínűség-eloszlást adott mind a B magnitúdók, mind a vöröseltolódások esetében, amely nem normáleloszlás volt. Ebből az eloszlásból a mediánt valamint a 2,5%-hoz és 97,5%-hoz tartozó kvantiliseket számítottam ki és tüntettem fel a GLADEben. Készítettem egy ellenőrző mintát, amely 1000 db olyan, véletlenszerűen kiválasztott galaxisból állt, amelyre ismert volt a J, H, K, B magnitúdók mindegyike és a spektroszkópiai vöröseltolódás is. Ezekre is lefuttattam az algoritmust, mintha ismeretlen lenne a B magnitúdó és a vöröseltolódás, majd megnéztem, hogy mekkora hibákat ad a módszer, és hogy a kvantilisek között tényleg az adatpontok 95%-a helyezkedett-e el, vagyis nincs-e szisztematikus hiba a módszerben. A 8. és 9. ábrákon láthatjuk, hogy hogyan viszonyulnak egymáshoz a mért és a becsült értékek, és megállapíthatjuk, hogy szisztematikus hibáktól mentes az eljárás.

Megvizsgáltam továbbá azt is, hogy hogyan változik a QRF pontossága a tanulóminta galaxisainak számának függvényében. Arra a következtetésre jutottam, hogy 10 000 objektum felett már igen lassan növekszik a pontosság, azonban ezzel párhuzamosan kezd számításilag egyre költségesebb lenni a módszer alkalmazása, így végül 10 000 2MPZ galaxisból álló tanulómintát alkalmaztam.

Azok a galaxisok, amelyekre így becsültem a paramétereket, tipikusan a távolabbiak közé tartoztak: átlagos távolságuk ~ 340 Mpc. Figyelembe vettem azt is, hogy lehet, hogy lesznek olyanok, akik csak azokkal a galaxisokkal szeretnének dolgozni, amelyekre mért adatok állnak rendelkezésre, így a GLADEben külön megjelöltem az RF algoritmusos galaxisokat.



8. ábra. A Random Forest algoritmussal becsült medián B magnitúdók és a mérésekből származó valódi B magnitúdók egy 1000 db véletlenszerűen választott galaxisból álló ellenőrző mintára. A függőleges vonalak jelölik a 2,5%-os és 97,5%-os kvantilis közé eső tartományt. Amennyiben a valódi B magnitúdó ebben benne van, zölddel jelöltük, ha pedig kívül, akkor pirossal.



9. ábra. A Random Forest algoritmussal becsült medián vöröseltolódások és a mérésekből származó valódi spektroszkópiai vöröseltolódások egy 1000 db véletlenszerűen választott galaxisból álló ellenőrző mintára. A függőleges vonalak jelölik a 2,5%-os és 97,5%-os kvantilis közé eső tartományt. Amennyiben a valódi vöröseltolódás ebben benne van, zölddel jelöltük, ha pedig kívül, akkor pirossal.

2.1.3. Teljességvizsgálat B luminozitásokkal

Egy galaxiskatalógus egyik legfontosabb paramétere a teljessége, vagyis hogy adott távolságig az összes létező galaxis mekkora hányadát tartalmazza. A teljességet többféleképpen is mérhetjük, ebben a szekcióban egy, a B színszűrőben mért luminozitások segítségével történő meghatározást mutatok be.

Fontosnak tartottam, hogy eredményeim összehasonlíthatóak legyenek a GWGC katalógus eredményeivel, így ugyanazt az eljárást alkalmaztam, mint a GWGC katalógus készítői [77]. Adott távolságig összehasonlítottam az azon a térfogaton belül található GLADE galaxisokból származó összes B színszűrőben vett luminozitást azzal az értékkel, amennyit átlagosan az Univerzumban várnánk. Ehhez a szakirodalomból vett átlagos B luminozitás sűrűség [43]:

$$\varrho_B = (1,98 \pm 0,16) \cdot 10^{-2} L_{10} \text{ Mpc}^{-3}, \qquad (16)$$

ahol $L_{10} = 10^{10} L_{B,\odot}$, és $L_{B,\odot}$ a Nap luminozitása B szűrőben, vagyis $L_{B,\odot} = 2,16 \cdot 10^{33}$ erg/s. Ez az átlagos B luminozitás sűrűség z = 0,1-es vöröseltolódásra van kiszámítva, ami kb. 420 Mpc-nek felel meg. Azonban z = 0,3-as vöröseltolódásnál, vagyis 1,2 Gpc távolságon ez az érték a következő [24]:

$$\varrho_B = (1,92 \pm 0,23) \cdot 10^{-2} L_{10} \text{ Mpc}^{-3}, \qquad (17)$$

vagyis az értéke nem változik szignifikánsan z = 0,1 és z = 0,3 között. Tekintve, hogy a GLADE galaxisok > 95%-a 1,2 Gpc-nél közelebb fekszik, az egyszerűség kedvéért a 16. egyenletben szereplő értékkel számoltam a teljesség meghatározásához.

A 10. ábrán láthatjuk a GLADE illetve a GWGC katalógusok galaxisainak kumulatív B luminozitását a távolság függvényében, összehasonlítva az elméleti érték alapján várttal. Az ábráról láthatjuk, hogy a GLADE katalógus 73 Mpc távolságig teljes, amely igen közel esik az Advanced LIGO O1 megfigyelési időszakában a H1 detektor átlagos inspiral range-éhez, valamint meghaladja az L1 detektor inspiral range-ét ugyanebben az időszakban. A GLADE katalógus teljessége 71% az O2 megfigyelési időszakra tervezett egy detektoros inspiral rangeen belül, valamint 64% egy, a végső tervezett érzékenységen üzemelő aLIGO detektor inspiral range-én belül. Láthatjuk tehát ezek alapján, hogy a GLADE sokkal jobban használható az EM Follow-up projektben, mint a GWGC, és az elkövetkező fejlesztési fázisok után is jól alkalmazható marad.



10. ábra. Kumulatív B luminozitás a GLADE illetve a GWGC katalógusokból a távolság függvényében, összehasonlítva a kék fény várt eloszlásával. Az elhalványított részek jelzik a nem fizikai értékeket: A GWGC-re 30 Mpc alatt, a GLADE-re 73 Mpc alatt azt kapjuk, hogy a katalógusban több kék luminozitás van, mint amennyit várnánk az $(1,98 \pm 0,16) \cdot 10^{-2} L_{10}$ Mpc⁻³ átlagos kék luminozitás sűrűséget feltételezve, ami 100%-nál nagyobb teljességet eredményez. A GWGC katalógus görbéje 100 Mpc alatt is el van halványítva, mert a katalógus csak eddig a távolságig tartalmaz galaxisokat. A függőleges vonalak mutatják a LIGO detektorok különböző fejlesztési fázisaihoz tartozó inspiral range-eket. Az S6-tal jelölt vonal a H1 detektor maximális inspiral range-ét mutatja az Initial LIGO S6 adatgyűjtési időszaka alatt [51]. Az O1-gyel jelölt vonal mutatja a H1 detektor átlagos inspiral range-ét az Advanced LIGO O1 megfigyelési időszaka alatt. Az O2-vel és aLIGO-val jelölt szaggatott vonalak pedig egyetlen LIGO detektor tervezett inspiral range-ei az O2 megfigyelési időszak alatt [4] és a fejlesztés utolsó szakaszát követően [2]. A világoszöld és kék sávok szélessége jelöli a hibát, ami a kék luminozitás sűrűség értékének hibájából származik.

2.2. GLADE v2.0

2.2.1. Felhasznált katalógusok

Az GW150914 detektálásának februári nyilvános bejelentését követően a Fermi-űrtávcső Gamma-ray Burst Monitor (GBM) műszerének adatait átnézve kiderült, hogy az érzékelt egy gyenge jelet a gravitációs hullám detektálása után 0,4 másodperccel [19]. A 2,9 σ -s jel mindössze 1 másodpercig tartó tranziens volt, amelyet semmilyen más műszer nem észlelt, és semmilyen korábban ismert asztrofizikai, napfizikai, földi vagy magnetoszférabeli aktivitással nem köthető össze egyértelműen. Mind a LIGO detektorok, mint a GBM forráslokalizációja igen pontatlan, mindazonáltal a lokalizált égterületek között van átfedés. A tranziens spektruma és hossza konzisztens egy rövid gamma-kitörésével (short GRB). Sztelláris fekete lyukak összeütközéséből nem várnánk semmilyen EM jelet, így ha valóban egy forrásból származik a GH és a GRB jel, az igen érdekes felfedezés lenne.

Ez az észlelés a LIGO kollaboráció és annak EM Follow-up partnereinek a figyelmét jobban a kettős fekete lyukak (BBH-k) felé fordította, így a GLADE katalógus továbbfejlesztett verziójának megalkotásakor figyelembe kellett vennem ezeket a hirtelen felmerülő igényeket is. A katalógus első verziójának elkészítése óta számos megkeresést kaptam, amelyekben LIGO-tagok és a LIGO-tól teljesen független csillagászok felvázolták, hogy milyen projektekben tudnák használni a katalógust, és ehhez hogyan tudnánk még optimálisabbá tenni azt. Ezeknek megfelelően a következő változtatásokat hajtottam végre a 2.0 verzió elkészítése során:

- A távolsággal vagy B magnitúdóval nem rendelkező galaxisokat is megtartottam.
- Nem zártam ki a kvazárokat sem a katalógusból, sőt, az SDSS DR12 kvazár katalógusát is felhasználtuk. Ezeket az objektumokat azonban egyértelműen megjelöltem.
- Új cross matchelő algoritmust fejlesztettem ki és alkalmaztam.

A GLADE első verziójának elkészítése óta mind a HyperLEDA, mind a 2MPZ katalógus frissítve lett, valamint a következő fejezetben vázolt új cross matchelő algoritmust akartam használni, így újra matcheltem a 4 katalógust, majd ehhez hozzáadtuk az SDSS DR12 kvazár katalógusát⁶ [64] is, amely 297 301 kvazárt tartalmaz. A kvazár katalógus cross matchelését Erdei Dániel végezte el.

 $^{^6 {\}tt sdss.org/dr12/algorithms/boss-dr12-quasar-catalog/C}$

2.2.2. Továbbfejlesztett cross match algoritmus

Annak érdekében, hogy még pontosabban kiszűrhessem a duplikátumokat, valamint eközben ne veszítsek el túl sok olyan galaxist, amely valójában nem is szerepel a másik katalógusban, csak éppen közel esik valamelyik objektumhoz, kifejlesztettem egy, a szokásosan használtaknál pontosabb cross matchelő algoritmust [21].

Az algoritmus mögötti alapgondolat az, hogy ha két objektum nagyon közel is van egymáshoz égi pozíciójukat tekintve, egy ennyire sok galaxist tartalmazó katalógus esetében már korántsem lehetünk benne biztosak, hogy nem csak véletlen egybeesésről van szó. Így valamilyen más paramétereket is figyelembe kellene venni. Mivel a GLADE 2.0 verzióban is szerepel B magnitúdó és vöröseltolódás annyi objektumra, amennyire csak elérhető volt, így ezeket a paramétereket választottam, hogy segítségükkel eldönthessem, mely galaxisok azonosak valójában.

Két katalógus cross matchelésénél először megkeressük azokat a galaxisokat, amelyeknek ugyanazt a nevet vagy számkódot adták a két katalógusban. Ezeket azonosnak tekintjük minden további vizsgálat nélkül. Ezt követően minden ilyen galaxispárra kiszámítjuk, mekkora a két katalógusban vett rektaszcenzió, deklináció, távolság és B magnitúdó adatok különbsége. Adott paraméter esetében a galaxispárokra vett különbségek normál eloszlást kell kövessenek, ha a két katalógushoz végzett égbolfelmérések adatai között nincsen valamilyen szisztematikus hiba, mondjuk a B magnitúdóhoz nem pontosan ugyanolyan áteresztési függvényű szűrőt használnak, vagy a koordinátákat nem ugyanazzal az epochával számították. A 11. ábrán láthatunk egy ilyen hisztogramot.

A kapott hisztogramokra normál eloszlást illesztve megkaphatjuk annak szórását, amit azoknak a duplikátumoknak az azonosításához használhatunk fel, amelyeket név alapján nem lehetett beazonosítani. Ezt az azonosítást egy χ^2 próba segítségével végezzük el. Minden potenciálisan duplikátum galaxispárra kiszámítjuk a χ^2 -értéket:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 / \sigma_i^2, \tag{18}$$

ahol n azon paraméterek száma, amennyi a rektaszcenzió, deklináció, távolság és B magnitúdó közül megvan mind a két galaxisra, σ_i az i paraméterre a normál eloszlás illesztéséből kiszámított hiba, Δ_i pedig az adott galaxispárra a két katalógusban szereplő i paraméter értékének különbsége.

Láthatjuk, hogy az eljárásban automatikusan figyelembe van véve, hogy adott galaxispárra mely paraméterek elérhetőek; ettől fog függni az adott pár χ^2 értékének kiszámításakor az eloszlás szabadsági fokainak száma.

Végül meghatározunk valamilyen küszöbértéket, és az ennél kisebb χ^2 értékkel



 11. ábra. Az összematchelt GWGC - HyperLEDA és az összematchelt 2MASS XSC -2MPZ katalógusok név alapján azonos galaxisainak a két katalógusban vett távolságai közötti különbségek hisztogramja.

rendelkező párokat ítéljük azonosnak, az ennél nagyobbakat pedig különbözőnek. Mi 99%-os konfidenciát választottunk, vagyis a beazonosított duplikátumok 99%ban valóban azok lesznek, csak 1%-ban nem. Az ehhez tartozó küszöbérték pl. a 4 szabadsági fokú χ^2 eloszlásra (vagyis amikor a fent felsorolt 4 paraméterből mindegyik megvan mindkét katalógusban az adott galaxispárra) 13,27.

Az új cross matchelő eljárás előnyét jól láthatjuk a 12. ábrán, ahol két, távolságban és színben igen eltérő galaxis összelóg az SDSS felvételén. Az egyik galaxist a GWGC, a másikat a HyperLEDA katalógus tartalmazta.

2.2.3. Teljességvizsgálat B luminozitásokkal

Mindezeknek a fejlesztéseknek köszönhetően az objektumok száma a GLADE 2.0 verziójában 3 632 300-re nőtt, amelyből 297 014 objektumról biztosan tudjuk, hogy kvazár. 1 983 323 galaxisra van B magnitúdó és vöröseltolódás adatunk, amely közel 70 000-rel több, mint a GLADE 1.0 verziójában volt. A GLADE 2.0 verzió galaxisainak sűrűségeloszlását a 13. ábrán láthatjuk.

A GLADE 2.0 verziójára is elvégeztük ugyanazt a B luminozitásokon alapuló teljességvizsgálatot, amelyet az 1.0 verziónál ismertettünk. Az eredmény a 14. ábrán látható. A GLADE v2.0 katalógus teljessége nem változott lényegileg az 1.0 verzióhoz képest. A pontosabb adatok következtében néhány galaxisnak



12. ábra. Két galaxis az SDSS felvételén, amelyeket a hagyományos cross matchelő algoritmusokkal nehéz lett volna elkülöníteni, de az új algoritmusnak a színük és az eltérő távolságuk alapján ez egyáltalán nem jelentett gondot. A kép az Aladin programmal készült.



13. ábra. A GLADE v2.0 katalógus galaxisainak sűrűségeloszlása 1/négyzetfok egységekben, galaktikus koordinátákban, azimutális projekciót használva. A bal oldali ábra a galaktikus északi félgömböt, a jobb oldali a déli félgömböt ábrázolja. A két ábra szélénél nagyon lecsökken a galaxisok száma. Ennek oka az, hogy a Tejút kitakarja a mögötte lévő galaxisokat. A vörös sávokként jelölt kiemelkedően sűrű területek a HyperLEDA katalógusbeli anizotrop galaxiseloszlás következményei.

megváltozott a távolsága és a B magnitúdója az 1.0 verzióhoz képest, ez okozza a katalógus teljességfüggvényének kissé másmilyen alakját.



14. ábra. Kumulatív B luminozitás a GLADE v2.0 illetve a GWGC katalógusokból a távolság függvényében, összehasonlítva a kék fény várt eloszlásával. A függőleges vonalak mutatják a LIGO detektorok különböző fejlesztési fázisaihoz tartozó inspiral range-eket. Az S6-tal jelölt vonal a H1 detektor maximális inspiral range-ét mutatja az Initial LIGO S6 adatgyűjtési időszaka alatt [51]. Az O1-gyel jelölt vonal mutatja a H1 detektor átlagos inspiral range-ét az Advanced LIGO O1 megfigyelési időszaka alatt. Az O2-vel és *aLIGO*-val jelölt szaggatott vonalak pedig egyetlen LIGO detektor tervezett inspiral range-ei az O2 megfigyelési időszak alatt [4] és a fejlesztés utolsó szakaszát követően [2]. A világoszöld és kék sávok szélessége jelöli a hibát, ami a kék luminozitás sűrűség értékének hibájából származik.

2.2.4. Teljességvizsgálat Schechter-függvényekkel

Egy galaxiskatalógus teljességét az integrált kék luminozitás segítségével egy másik módszerrel is meghatározhatjuk. A Census of the Local Universe (CLU, [30]) galaxiskatalógus készítői ezzel a módszerrel határozták meg a teljességüket, így hogy a GLADE a CLU-val is összehasonlítható legyen, Galgóczi Gáborral együtt dolgozva kiszámítottuk a GLADE teljességét a következő módszerrel is.

A szakirodalomból ismert, hogy nagy skálán a galaxisok luminozitását a Schechter-féle luminozitásfüggvénnyel [69] írhatjuk le:

$$\varrho_{\rm gal}(x)\mathrm{d}x = \phi^* \, x^a \, e^{-x},\tag{19}$$

ahol $x = L/L^*$. Ennek a függvénynek a kiintegrálásával megkapható, hogy az adott távolsághéjban összesen mennyi luminozitással rendelkeznek a galaxisok. A teljességbecsléshez a 200 Mpc-nél közelebbi galaxisokat választottuk, mert a katalógust elsősorban az aLIGO által detektált GH-k EM utófényének észlelésére készítettem. A galaxisok közül kiválasztottuk azokat, amelyek együttesen az összluminozitás fényesebbik felét adják. Ezeket az objektumokat 12 távolsághéjba soroltuk, amelyek vastagsága egyenként 16,6 Mpc volt. A 15. ábrán láthatjuk a szakirodalmi paraméterekkel ábrázolt Schechter-függvényeket és a GLADE-ből számított luminozitásfüggvényeket. Az első héjban a lokális sűrűségtöbbletnek köszönhetően nagyobb a teljessége a katalógusnak. Látható, hogy ahogy egyre távolabbi héjakat veszünk, úgy veszítünk el egyre több és több halvány galaxist.

A Schechter-függvény paraméterei a szakirodalom alapján a következőek voltak: [55, 11, 33, 63]:

- $\phi^* = (1,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-2} \text{ h}^3 \text{ Mpc}^{-3}$
- $a = -1.07 \pm 0.07$
- $L^* = (1, 2 \pm 0, 1) \cdot 10^{10} h^{-2} L_{\odot}$



15. ábra. A GLADE katalógus luminozitásfüggvényei különböző távolsághéjakban (kék görbe) és a hozzájuk tartozó elméleti Schechter-függvények (piros szaggatott vonal).

Ahhoz, hogy kiszámíthassuk az elméletileg várt teljes luminozitásértéket egy adott távolsághéjban, ki kell integrálnunk a Schechter-függvényt. Ezt a következőképpen tehetjük meg:

$$\int_{x_1}^{\infty} \phi^* L^* x^{a+1} e^{-x} dx = \phi^* L^* \Gamma(a+2, x_1) = \phi^* L^* \Gamma(0,93, x_1)$$
(20)

Az integrálás alsó határát 0,626-nak választottuk, mert az ennél fényesebb galaxisok tartalmazzák a luminozitás felét és az elektromágneses utófény keresése ezeket fogja főképp megcélozni. A GLADE katalógus egyes távolsághéjaiban felösszegeztük a luminozitást és a kapott értéket elosztottuk az integrálból számítottal. A 16. ábrán láthatjuk a GLADE katalógus ilyen módon kapott teljességet összehasonlítva a GWGC, 2MASS és CLU katalógusokéval.



16. ábra. A GLADE, a GWGC, a 2MASS és a CLU katalógusok teljessége a távolság függvényében a galaxisok azon felére, melyek a teljes luminozitás felét tartalmazzák.

Látható, hogy a másik három katalógushoz képest a GLADE jóval nagyobb teljességgel rendelkezik.

3. A GLADE felhasználása

Ebben a fejezetben bemutatok néhányat azok közül a projektek közül, amelyekben a LIGO EM Follow-up programjának támogatására vagy attól függetlenül már használják a GLADE katalógus valamelyik verzióját. A katalógus bárki számára szabadon hozzáférhető a honlapján⁷, illetve a VizieR-n⁸ is.



17. ábra. A GLADE katalógus a honlapján illetve a VizieR rendszerében.

3.1. Automatizált GRB forráslokalizáció

A GLADE katalógus segítségével készítettem egy programot, amely az Inter-Planetary Network (IPN) [37] által detektált gamma-kitörések (GRB) automatikus forráslokalizációját végzi el. A folyamat azonnal elindul, amikor egy GRB IPN 3σ lokalizációs területe (*error box*) publikálásra kerül a GCN Circular olda-

⁷aquarius.elte.hu/glade/

⁸vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=VII/275

lon⁹.

A program megkeresi az error boxon belüli GLADE galaxisokat, valamint azokat is, amelyek ugyan kívül esnek a területen, de még olyan közel hozzá, hogy egy neutroncsillag-kettős (BNS) kilökődhetett belőlük, és az összeolvadás előtt eljuthatott az error boxba. A galaxisokból kilökődött BNS-ek 95%-a a forrásgalaxisának 100 kpc-es környezetében össze fog olvadni [27], így ezt a határt vettük küszöbértéknek. A program egy táblázatba összegyűjti ezeket a galaxisokat, ahol feltünteti a megfigyelőtől vett távolságukat, az error box legközelebbi pontjától vett szögtávolságukat, az error boxtól vett projektált távolságukat, valamint annak a valószínűségét, hogy egy pont az error box legközelebbi pontjának irányába kilökődő BNS eléri ezt a pontot az összeolvadás előtt. A program automatikusan készít egy égtérképet is, amelyen az error box körüli $\pm 0,2^{\circ}$ -os terület látszik, benne a GLADE galaxisokkal, amelyeket különböző színek jeleznek annak megfelelően, hogy honnan származik, vagyis mennyire pontos a távolságadatuk.

Az egyes GRB-kre elvégzett analízisek eredményei automatikusan felkerülnek a GLADE projekt weboldalára¹⁰.

A GRB forráslokalizációs program igen hasznosnak bizonyult 2015. szeptember 6-án, amikor egy GRB-t detektált 08:42:25 UT-kor a Konus-Wind, az IN-TEGRAL (SPI-ACS) a Mars-Odyssey (HEND) és a Swift [38] [32]. A GRB 150906B-re az IPN háromszögeléssel egy 210 négyzetívperc méretű 3σ error boxot határozott meg [38]. Az eseményt eredetileg rövid GRB-ként kategorizálták [47], de a későbbi számítások alapján az sem zárható ki, hogy hosszú GRB-ről beszélünk [73].

A Nap mindössze 32° távolságra volt a lokalizált égterülettől, így nem volt lehetséges rögtön más hullámhossztartományokon megfigyeléseket végezni az eseményről. Rádiótartományban esetleg később, akár hónapok elteltével is lehetne utófényt detektálni, azonban a megfigyelt rövid GRB-k mindössze 7%-ára találtak eddig ilyen utófényt [28], így nem volt valószínű, hogy egy ilyen detektálással meg lehet majd határozni a GRB forrásgalaxisát. Mindezen okok miatt a forrásgalaxis megkeresésében csak galaxiskatalógusok használatára hagyatkozhatunk.

Az error boxhoz viszonylag közel esik galaxisok egy kisebb csoportja (az NGC 3313 és környezete), amelynek tagjait lehetséges forrásgalaxisként azonosították [47], azt feltételezve, hogy egy BNS kilökődött valamelyik galaxisból, majd az error box területén belül összeolvadt. Egy ilyen forgatókönyv szerint a GRB izotropikus energiája $E_{\rm iso} \simeq 10^{49}$ erg lenne, amely belül van a rövid GRB-k jellemző

 $^{^9 {\}tt gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html}$

¹⁰aquarius.elte.hu/glade/GRB.html

energiatartományán [14]. Mivel az NGC 3313 csoport galaxisainak távolságai $(D_{\rm L} \simeq 50 \text{ Mpc})$ az Advanced LIGO detektorok BNS horizonttávolságán (a maximális távolság, ahonnan egy optimális irányban lévő és optimális inklinációjú BNS GH-jelét képes detektálni a LIGO) belül esnek [52] [2], az esemény kiemelt jelentőségű volt a LIGO kollaboráció számára.

A GRB 150906B időátlagolt spektrumából mérhető csúcs energia (*peak energy*) értéke $E_{\rm p} \simeq 1$ MeV, amiből a GRB-k $E_{\rm p} - E_{\rm iso}$ és $E_{\rm p} - L_{\rm iso}$ relációi [80] alapján több csoport is arra jutott, hogy ha a GRB forrása valóban az NGC 3313 csoport valamely galaxisa volna, az szignifikánsan outlier lenne mindkét relációban [68] [81]. Ahhoz, hogy a mért értékekkel stimmeljen a reláció, a forrás távolsága $D_{\rm L} \simeq$ 500 Mpc kellene legyen. Megjegyezzük azonban, hogy ezeknek a korrelációknak az érvényessége erősen vitatott a szakirodalomban (ld. pl. [35] és hivatkozásai), így kétséges, hogy ezek alapján levonható-e bármilyen következtetés a forrásgalaxis távolságára vonatkozóan.

A GLADE katalóguson alapuló automatikus forráslokalizációs program talált egy galaxist az error boxon belül, egy másikat pedig annak közvetlen közelében. Mivel az esemény kiemelt fontosságú volt a LIGO számára, egy ennél mélyrehatóbb vizsgálatot is elvégeztem. A GLADE mellett az NVO Datascope Tool-t¹¹ is használtam, hogy az esetlegesen a GLADE-ben nem szereplő potenciális forrásgalaxisokat is megtaláljuk. Összesen 19 olyan galaxist találtam a 3 σ error box ±0,4°-os környezetében, amelyekre rendelkezésre állt távolságadat; az error box környezetét és a galaxisokat a 18. ábra mutatja. A 19 galaxis közül 17 a GLADE katalógusból származik. Ezek mellett találtam még egy érdekes galaxist a GLADE katalógusban, amely ugyan kívül esik az ábrázolt környezeten, azonban mivel a tőlünk vett távolsága mindössze $D_{\rm L} \simeq 7$ Mpc, így az error box hozzá legközelebbi pontjától mért projektált távolsága (a galaxisra mért vöröseltolódás hibáját is figyelembe véve) r = 62 - 92 kpc. Ennek a 20 potenciális forrásgalaxisnak a releváns paramétereit foglalja össze a 1. táblázat.

A 20 potenciális forrásgalaxist két csoportba oszthatjuk:

- 1. Olyan galaxisok, amelyek az IPN error boxon belül helyezkednek el.
- Olyan galaxisok, amelyek az error boxon kívülre esnek. Ezek csak úgy lehetnek forrásgalaxisok, ha a GRB egy BNS összeolvadásból származott, ahol a BNS ezen galaxisok egyikéből lökődött ki.

A 2. csoport minden galaxisára kiszámítottam azok projektált távolságát (r)az error box hozzájuk legközelebb eső pontjától, majd ezek alapján megbecsültem annak a valószínűségét $(P(\geq r))$, hogy egy, a galaxisból kilökődött BNS eléri ezt a projektált távolságot az összeolvadás előtt. Ennek a kiszámításához

¹¹heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/vo/datascope/init.pl

Név	Távolság	Vöröseltolódás	Referencia			
	[Mpc]	$[10^{-3}]$				
ESO501-023	7	$1{,}63\pm0{,}33$	$GWGC^*$			
PGC 776142	46	$10{,}70\pm2{,}31$	$GWGC^*$			
ESO 501-037	50	$11,\!47\pm2,\!41$	$GWGC^*$			
gJ103823.6-253128	51	$11{,}90\pm2{,}50$	$GWGC^*$			
ESO 501-044	53	$12{,}36\pm0{,}15$	$2 MPZ^{\dagger}$			
NGC 3313	54	$12{,}38\pm0{,}15$	$2 MPZ^{\dagger}$			
PGC 2793456	54	$12{,}44\pm2{,}72$	$GWGC^*$			
ESO 501-32	58	$13{,}38\pm0{,}15$	$2 MPZ^{\dagger}$			
gJ103655.9-254629	154	$35,\!06 \pm 0,\!15$	$2 MPZ^{\dagger}$			
CTS 1017	155	$35{,}16\pm0{,}31$	HII^{\ddagger}			
10363487 - 2520522	252	$56,46_{-16,49}^{+35,00}$	GLADE^{\S}			
10372917 - 2522214	296	$65{,}93 \pm 15{,}00$	$2 MPZ^{\dagger}$			
10363239 - 2557112	405	$88,66_{-27,43}^{+34,71}$	GLADE [§]			
10355791 - 2556199	454	$98{,}73 \pm 15{,}00$	$2 MPZ^{\dagger}$			
10361756 - 2554019	500	$108{,}14\pm15{,}00$	$2 MPZ^{\dagger}$			
10372724 - 2529034	536	$115{,}27 \pm 15{,}00$	$2 MPZ^{\dagger}$			
10364417 - 2542362	559	$119{,}76 \pm 15{,}00$	$2 MPZ^{\dagger}$			
gJ103630.3-255145	574	$122,\!79\pm 0,\!15$	$2 MPZ^{\dagger}$			
10354116 - 2524186	672	$141,\!98 \pm 15,\!00$	$2 MPZ^{\dagger}$			
MRC 1033-251	2432	$440{,}00\pm 50{,}00$	MRC¶			
*White et al. (20)	11) [77]	[†] Bilicki et al. (2014) [15]				
‡ Lagos et al. (200	(7) [45]	§Dálya et al. in	ı prep.			
¶ McCarthy et al. (1996) [58]						

1. táblázat. A GRB 150906B lehetséges beazonosított forrásgalaxisainak listája. Megjegyezzük, hogy az ESO501-023 kívül esik a 18. ábrán feltüntetett égterületen. A lista első nyolc galaxisa helyezkedik el az aLIGO BNS horizonttávolságán belül.



18. ábra. Égtérkép a GRB 150906B 3 σ error boxának (fekete négyszög) ±0,4°-os környezetéről. Az ábrán a számok a galaxisok Mpc-ben mért távolságait jelentik, amelyeket – ha az adott galaxisra csak vöröseltolódás adat volt elérhető – a következő kozmológiai paraméterek alkalmazásával számítottam ki: $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_m = 0,3$ és $\Omega_{\Lambda} = 0,7$. A különböző színű és formájú jelek azt mutatják, hogy az adott galaxisra milyen módszerrel lett kiszámítva a feltüntetett távolságérték: (1) spektroszkópiai mérésekből származó vöröseltolódás (kék +); (2) fotometrikus vöröseltolódás (zöld ×); (3) QRF gépi tanuló algoritmus (piros négyzet); (4) különféle egyéb módszerek, amelyeket a GWGC katalógus cikke ismertet [77] (narancssárga kör). További információkat az egyes galaxisokról a 1. táblázat tartalmaz.

felhasználtam a rövid GRB-k megfigyelt projektált távolságainak eloszlását [27]. A 2. táblázat mutatja az öt legnagyobb $P(\geq r)$ értékkel rendelkező galaxist. Láthatjuk, hogy még a legnagyobb érték is mindössze $P(\geq r) = 0.05 - 0.06$, valamint hogy az NGC 3313 csoport galaxisai csak a 3.-5. helyeken vannak. Emellett ahhoz, hogy a BNS összeolvadás az error boxon belül történjen, az is kell, hogy a kilökődés pontosan az error box megfelelő iránya felé történjen, vagyis a végső valószínűségek még a feltüntetetteknél is kisebbek kell legyenek. Ezek alapján kijelenthetjük, hogy annak a valószínűsége, hogy az NGC 3313 csoport valamelyik tagja a GRB 150906B forrásgalaxisa, elhanyagolhatóan kicsi.

Egyetlen galaxist találtam, amely kétségtelenül az error boxon belül helyezkedik el: az 10372724-2529034 (amelyet innentől C1-nek rövidítek) $D_{\rm L} \simeq 536 \pm 75$ Mpc távolságban. Emellett az 10364417-2542362 (innentől C2), amely $D_{\rm L} \simeq 559 \pm 75$ Mpc távolságra van tőlünk, mindössze 16,62″ (r = 40 - 52 kpc) távolságra van az error boxtól, így ezt a galaxist is potenciálisan (részben vagy egészben) az error boxon belül fekvő jelöltként kezeltem.

Mind C1-et, mind C2-t tartalmazza a 2MASS XSC katalógus, amelynek a sztelláris kontaminációja $\leq 3\%$, azonban mindkét objektum megtalálható a

Név	r	$P(\geq r)$
	[kpc]	
10364417 - 2542362	40-52	$0,\!05\text{-}0,\!06$
ESO501-023	62-92	$0,\!02\text{-}0,\!04$
gJ103823.6-253128	69-107	$0,\!01\text{-}0,\!04$
PGC 776142	92-144	$0,\!01\text{-}0,\!02$
NGC 3313	137-140	$<\!0,\!01$

2. táblázat. Annak az öt galaxisnak a listája, amelyekből a legnagyobb az esélye egy, a megfelelő irányba kilökődött BNS-nek, hogy az error boxon belül olvadjon össze.

2MASS Point Source Catalog-ban (PSC) is [72].

Az SPM4 katalógus [31] és a GSC2.3 katalógus [46] mind C1-et, mind C2-t kiterjedt forrásként kategorizálja. C1-et tartalmazza a WISE Source Catalog [79] is, ahol szintén kiterjedt forrásként van kategorizálva, mindazonáltal azt találtam, hogy a WISE katalógus csillag és galaxispopulációjából is outlier adatpont a J magnitúdója ($J = 14,492 \pm 0,062$) és a $W1 - J = -1,355 \pm 0,067$ színindexe (ahol $W1 = 13,137 \pm 0,026$ a WISE W1 szűrőjével mért magnitúdó) alapján (ld. [44] 4. ábráját). A WISE objektumok klasszifikációjára alkalmazott szigorú vágás [44] alapján C1-et csillagnak kellene klasszifikálni (W1 - J > -1.7).

Mind C1, mind C2 szerepel a DENIS Survey Database-ben [22] és az USNO–A2.0 katalógusban [61] is, mindkét helyen csillagként. C1 az USNO–B katalógus [62] alapján is csillag. Ezek miatt az inkonzisztens klasszifikációk miatt megvizsgáltam részletesen, hogy vajon a két objektum csillag vagy galaxis, hogy eldönthessük, tényleg lehetnek-e a GRB forrásgalaxisai. Megjegyzem, hogy a 1. táblázatban megadott fotometrikus vöröseltolódásértékek kiszámításánál a 2MPZ katalógusban éltek azzal a feltételezéssel, hogy a két objektum galaxis, így ha valójában csillagok, akkor teljesen más távolságérték jönne ki rájuk, vagyis a katalógusban szereplő távolságérték nem zárja ki emiatt azt, hogy valójában csillagokról van szó.

A 2MASS XSC és PSC katalógusok a következő, radiálisan szimmetrikus formulát használják a forrás felületi fényességének, f-nek a leírására a szögtávolság, θ függvényében, amelyet a forrás legnagyobb intenzitású pixelétől számítják ívmásodpercekben [39]:

$$f(\theta) = f_0 \exp\left[\left(\frac{\theta}{\alpha}\right)^{1/\beta}\right],\tag{21}$$

ahol f_0 a középpont felületi fényessége, α és β pedig szabad paraméterek. A 2MASS források intenzitásprofiljaira illesztve ezt a formulát, a [39] cikkben megállapították, hogy a radiális alak paraméter, $SH = \alpha \cdot \beta$ (különböző 2MASS szűrőkre definiálva) segítségével hatékonyan meg lehet különböztetni a magányos csillagokat a galaxisoktól: a csillagok radiális alak paramétere $SH \simeq 0$, míg kiterjedt forrásokra SH > 2.

A cikkben bevezetnek egy másik paramétert is, amelyet R23-mal jelölnek, ez a kettős és többes csillagokat képes a galaxisoktól elkülöníteni (kettős és többes csillagokra az értéke tipikusan < 5, galaxisokra pedig > 5). Összehasonlítottam a C1 és C2 galaxisok J színszűrőben mért SH és R23 értékeit a magányos csillagok, többes rendszerben lévő csillagok illetve galaxisok értékeinek eloszlásával. Az SH értékek alapján ($SH_{C1} = 15,2$ valamint $SH_{C2} = 35,6$) a két objektum egyértelműen nem magányos csillag. Ezt támasztja alá az objektumok J magnitúdója és $J-K_S$ színindexe is, amelyek alapján outlierek lennének az SDSS által csillagnak kategorizált objektumok közül [25]. Az $R23_{C1} = 10,2$ és $R23_{C2} = 17,8$ értékek pedig alátámasztják, hogy nem is többes csillagokról van szó, hanem mind a két objektum galaxis.

C1 és C2 galaktikus szélessége $b \simeq 28^{\circ}$, ami alapján szintén valószínűbb, hogy galaxisokról van szó, tekintve, hogy a 2MASS XSC objektumoknak az SDSS-beli klasszifikációkkal való összevetése alapján a 2MASS XSC katalógusban a $b > 20^{\circ}$ - os objektumokra a sztelláris kontamináció < 1% [39].

Emellett a 3σ izofótákra illesztett ellipszisek fél kis- és nagytengelyei is konzekvensek azzal, hogy galaxisok $z \simeq 0,115$ illetve $z \simeq 0,120$ vöröseltolódásokkal. Mindezek alapján biztonsággal állíthatjuk, hogy mind C1, mind C2 galaxis, így a fotometrikus vöröseltolódásaik mentesek az esetleges hibás klasszifikáció okozta hibától.

Eredményeinket a LIGO O1 megfigyelési időszaka alatti GRB-kkel asszociált GH-k utáni kereséssel foglalkozó cikkben is felhasználták [54].

3.2. Skymap Viewer

A Skymap Viewer¹² [48] egy interaktív webes eszköz, amely GH-k lokalizációs égterületeit, valamint az ezek környezetében lévő galaxisokat képes ábrázolni, ami igen hasznos eszköz az EM Follow-upot végző partnerek számára. A 19. ábrán láthatjuk a Skymap Viewer égtérképét a GW150914 esemény rekonstruált égterületével, és a GLADE katalógus galaxisaival.

A Skymap Viewer legnagyobb haszna az, hogy felállítja adott galaxiskatalógusra és GH-eseményre a galaxisok megfigyelési prioritási listáját, vagyis azt, hogy melyik galaxisok a legvalószínűbb forrásai a jelnek. A megfigyelési prioritást a GH égtérkép és egy asztrofizikai prior szorzataként állítja elő. Ez az asztrofizikai prior különböző katalógusok esetén különböző paraméter lehet.

¹²losc.ligo.org/s/skymapViewer/aladin/index.html#GW150914:LALI

Skymap Viewer LIGO A sky atlas for understanding LIGO-Virgo skymaps. Help here, or watch a video about Skymap Viewer. Plenty simulated skymaps here. If you do not see the big dark sky map, look below and widen your browser. Zoom with the + and - at the right of the sky 104.356 - 57.71 This is OBSERVED (real) data GW150914:LALI 50% area = 149.0 sq deg 90% area = 616.4 sq deg Observation Targets @ GLADE (Galaxy List for the Advanced Detector Era) (Dalya 2016) Gravitational Wave Galaxy Catalogue (White+ 2011) MCXC Meta-Catalogue X-ray galaxy Clusters (Piffaretti-2011) Planck catalogue of Sunyaev-Zeldovich sources (Planck collab 2015)

19. ábra. A Skymap Viewer égtérképe a GW150914 eseményre. A türkiz színű négyzetek jelölik a GLADE katalógus galaxisait. Minél nagyobb a négyzet, annál valószínűbb, hogy az adott galaxis sztelláris tömege alapján a galaxisban volt a GH forrása.

A GLADE katalógus esetében a Skymap Viewer készítői bayesi spektrális energia eloszlás (*Bayesian SED*) módszerrel, a galaxisok B, J, H és K magnitúdóiból becsültek sztelláris tömegeket, mint asztrofizikai priort és metallicitásokat minden galaxisra.

3.3. GWsky

A GWsky¹³ egy python-alapú interaktív program, amelynek az a célja, hogy az EM Follow-up megfigyeléseket végző csillagászoknak segítséget nyújtson észleléseik minél hatékonyabbá tételéhez. A GH-jelből rekonstruált égterületet a program felosztja akkora részekre, amekkora látómezője van a használt távcsőnek. Ezt követően valós időben lekéri az adott látómezőre vonatkozó releváns statisztikai adatokat: hol és milyen GLADE galaxisok helyezkednek el benne, mekkora a látómezőn belüli, a rekonstruált égterület alapján számított integrált valószínűség, valamint mekkora a légtömeg, és észlelhető-e az adott égterület a megfigyelést végző csillagász földrajzi helyéről. A látómezőn belüli GLADE galaxisokról két hisztogramot is kiad, amelyek azok távolság valamint magnitúdó szerinti eloszlását ábrázolják. A 20. ábrán láthatjuk a programot működés közben.

A GWsky az International Virtual Observatory Alliance (IVOA) által kifejlesztett Simple Application Messaging Protolol-t (SAMP) használja, így hatékonyan képes kommunikálni más, ugyanezt a protokollt alkalmazó programokkal, úgy mint pl. az Aladin, a Topcat vagy a SAO DS.

¹³github.com/ggreco77/GWsky



20. ábra. A GWsky program alkalmazása adott rekonstruált égterületre a GLADE galaxisok segítségével.

A GWsky programot fejlesztő olasz csapat felvette velünk a kapcsolatot, hogy működjünk együtt a fejlesztés további menetében. Jelenleg közösen dolgozunk azon, hogy az adott látómezőre kiszámítsa a program azt is, hogy azon belül mennyire teljes a GLADE, vagyis várhatóan az ott lévő galaxisok hány százalékát ismerjük. Ezzel az EM Follow-up partnerek számára nagyon fontos paraméterrel még pontosabban lehetne rangsorolni, hogy adott teleszkóp az égterület mely részeivel kezdje a megfigyeléseket.

A GWsky programot már jelenlegi verziójában is olyan EM Follow-up partnerek használják, mint pl. az ESO Paranal Obszervatóriumának VLT Survey Telescope-ja.

Összefoglalás és kitekintés

Az általam fejlesztett GLADE galaxiskatalógus a jelenlegi legjobb, publikusan elérhető galaxiskatalógus a LIGO EM Follow-up programjához. A katalógust már az O1 megfigyelési időszak (amelyben a GH-k első detektálása történt) alatt is használta a LIGO kollaboráció és annak partnerei, valamint a november 30-án elindult O2 időszak alatt jelenleg is használatban van több különböző projektben is.

A GLADE első verziója közel 2 millió galaxist tartalmaz, és 4 különböző galaxiskatalógus felhasználásával készült. A katalógusok cross matchelésén túl egy random forest gépi tanuló algoritmussal asszociáltam B magnitúdókat és vöröseltolódásokat ~ 550 000 galaxishoz, hogy még nagyobb teljességet érhessek el.

A GLADE második verziójához egy teljesen új, az eddigieknél hatékonyabb cross matchelési eljárást dolgoztam ki, valamint az elkészítésnél az első verzió tanulságait és a LIGO, valamint EM megfigyeléseket végző partnereinek igényeit is figyelembe vettem. Ennek megfelelően az eddigieken túl egy kvazár katalógust is felhasználtunk. A GLADE 2.0 teljességét kétféleképpen becsültem meg. Az első módszer adott távolságig a GLADE galaxisokban lévő összes B luminozitás mennyiségét hasonlítja össze az abban a térfogatban várttal, feltételezve egy egyenletes B luminozitás sűrűséget az Univerzumban. A második módszer során pedig a Schechter-függvény segítségével állapítottuk meg a várt és a tényleges luminozitásokból a teljességet. A két módszer alapján egyértelműen megállapíthatjuk, hogy a GLADE jóval teljesebb a LIGO számára releváns távolságokig, mint a többi hasonló célra készült galaxiskatalógus.

A GH-megfigyelések által indukált EM észlelések segítésére létrehozott két legfontosabb program, a Skymap Viewer és a GWsky készítőivel is együttműködünk. Mindkét program használja a GLADE katalógust, a GWsky fejlesztésében pedig én is részt veszek.

A GLADE katalógus emellett más asztrofizikai projektekben is nagyszerűen használható. Dolgozatomban bemutattam az általam készített, GRB-k automatikus forráslokalizációját elvégző programot is, valamint azt, hogy ezzel hogyan határoztam meg a LIGO számára kiemelten fontos GRB 150906B lehetséges forrásgalaxisait. Ezt az eredményemet a LIGO O1 GRB-kkel foglalkozó cikkében is felhasználták.

A katalógust továbbra is folyamatosan fejlesztem, hogy minél szélesebb körben segíthesse a különböző asztrofizikai kutatásokat; emellett mi magunk is tervezzük több projektben is használni, mint például void-ok keresése vagy barionakusztikus oszcillációkkal kapcsolatos kutatások. A GLADE fejlesztésének következő lépése a Pan-STARRS és WISE katalógusok cross matchelése lesz.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Raffai Péternek, aki a kezdetektől fogva segítette munkámat, és mind a kutatómunka, mind a dolgozat megírása során hasznos tanácsokkal látott el. Köszönöm továbbá az Eötvös Gravity Research Group tagjainak is a hasznos tanácsokat, ötleteket. Külön szeretném megköszönni Frei Zsolt segítségét a projekt megvalósításában és a folyamatos támogatásban. Köszönöm Galgóczi Gábornak a Schechter-függvényes teljességvizsgálatban nyújtott segítségét, Erdei Dánielnek az SDSS DR12 kvazár katalógusának cross matchelését, Rafael de Souzának a machine learning technikákkal kapcsolatos sok segítséget és Dobos Lászlónak a WISE katalógussal, a Sky Server használatával és egyéb, a tudományos adatbázisok használatával kapcsolatos segítséget. Köszönöm továbbá Roy Williams és Giuseppe Greco velünk való együttműködését a Skymap Viewer és GWsky programok fejlesztésében, Eric Chassande-Mottin segítségét pedig a GLADE VizieR-be való beintegrálásában. Köszönöm Ik Siong Heng, Christopher Messenger, Ronaldas Macas, és a University of Glasgow Institute of Gravitational Research minden további munkatársának a náluk eltöltött nyári diák programom alatti sok segítséget. Végül pedig szeretném megköszönni a családomnak, és a barátnőmnek, Kalup Csillának, hogy mindenben támogattak a kutatómunkám során.

Hivatkozások

- Aasi, J., Abadie, J., Abbott, B. P., et al. 2014, Astrophysical Journal Supplement Series, 211, 7
- [2] Abadie, J., Abbott, B. P., Abbott, R., et al. 2010, Classical and Quantum Gravity, 27, 173001
- [3] Abadie, J., Abbott, B. P., Abbott, R., et al. 2012, Astronomy & Astrophysics, 541, A155
- [4] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. 2013, arXiv:1304.0670
- [5] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. 2016, Physical Review Letters, 116, 061102
- [6] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. 2016, Physical Review Letters, 116, 241103
- [7] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. 2016, Living Reviews in Relativity, 19, 1
- [8] Abramovici, A., Althouse, W. E., Drever, R. W. P., et al. 1992, Science, 256, 325
- [9] Accadia, T., Acernese, F., Alshourbagy, M., et al. 2012, Journal of Instrumentation, 7, 3012
- [10] Acernese, F., Agathos, M., Agatsuma, K., et al. 2015, Classical and Quantum Gravity, 32, 024001
- [11] Ade, P. A. R., Aghanim, N., Armitage-Caplan, C., et al. 2014, Astronomy & Astrophysics, 571, A16
- [12] Aso, Y., Michimura, Y., Somiya, K., et al. 2013, Physical Review D, 88, 043007
- [13] Bartos, I., Crotts, A. P. S., & Márka, S. 2015, Astrophysical Journal Letters, 801, L1
- [14] Berger E., 2014, Astronomy & Astrophysics, 52, 43
- [15] Bilicki, M., Jarrett, T. H., Peacock, J. A., Cluver, M. E., & Steward, L. 2014, Astrophysical Journal Supplement Series, 210, 9
- [16] Breiman, L., 2001, Machine Learning, 45, 5
- [17] Carliles, S., Budavári, T., Heinis, S., Priebe, C., & Szalay, A. S. 2010, Astrophysical Journal, 712, 511

- [18] Carrasco, D., Barrientos, L. F., Pichara, K., et al. 2015, Astronomy & Astrophysics, 584, A44
- [19] Connaughton, V., Burns, E., Goldstein, A., et al. 2016, Astrophysical Journal Letters, 826, L6
- [20] Dálya G., Raffai P., Frei Zs., et al. GLADE: an extended list of galaxies for gravitational-wave searches in the advanced detector era, előadás az LVC konferencián, 2016, Pasadena
- [21] Dálya G., Frei Zs., Heng, I. S., et al. Improved matching for future galaxy catalogs, előadás az LVC konferencián, 2016, Glasgow
- [22] DENIS Consortium, 2005, CDS/ADC Collection of Electronic Catalogues, 2263, 0
- [23] Dubath, P., Rimoldini, L., Süveges, M., et al. 2011, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 414, 2602
- [24] Faber, S. M., Willmer, C. N. A., Wolf, C., et al. 2007, Astrophysical Journal, 665, 265
- [25] Finlator K. et al., 2000, Astronomical Journal, 120, 2615
- [26] Finn, L. S., & Chernoff, D. F. 1993, Physical Review D, 47, 2198
- [27] Fong W., & Berger E., 2013, Astrophysical Journal, 776, 18
- [28] Fong W., Berger E., Margutti R., & Zauderer B. A., 2015, arXiv:1509.02922
- [29] Frei Zs. 2009, MTA doktori értekezés, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest
- [30] Gehrels, N., Cannizzo, J. K., Kanner, J., et al. 2016, Astrophysical Journal, 820, 136
- [31] Girard T. M. et al., 2011, Astronomical Journal, 142, 15
- [32] Golenetskii S. et al., 2015, GCN Circular 18259
- [33] Gonzalez, R. E., Lares, M., Lambas, D. G., & Valotto, C. 2006, Astronomy & Astrophysics, 445
- [34] Hanna, C., Mandel, I., & Vousden, W. 2014, Astrophysical Journal, 784, 8
- [35] Heussaff V., Atteia J. L., & Zolnierowski Y., 2013, Astronomy & Astrophysics, 557, A100
- [36] Hulse, R. A., & Taylor, J. H. 1975, Astrophysical Journal Letters, 195, L51

- [37] Hurley K. et al., 2003, AIP Conf. Proc., 662, 473
- [38] Hurley K. et al., 2015, GCN Circular 18258
- [39] Jarrett T. H., Chester T., Cutri R., Schneider S., Skrutskie M., & Huchra J. P., 2000, Astronomical Journal, 119, 2498
- [40] Karachentsev, I. D., Karachentseva, V. E., Huchtmeier, W. K., & Makarov, D. I. 2004, Astronomical Journal, 127, 2031
- [41] Kasen, D., Badnell, N. R., & Barnes, J. 2013, Astrophysical Journal, 774, 25
- [42] Koenker R., 2015, quantreg: Quantile Regression. https://CRAN.R-project.org/package=quantreg
- [43] Kopparapu, R. K., Hanna, C., Kalogera, V., et al. 2008, Astrophysical Journal, 675, 1459
- [44] Kovács A., & Szapudi I., 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 448, 1305
- [45] Lagos P., Telles E., & Melnick J., 2007, Astronomy & Astrophysics, 476, 89
- [46] Lasker B. M. et al., 2008, Astronomical Journal, 136, 735
- [47] Levan A. J., Tanvir N. R., & Hjorth J., 2015, GCN Circular 18263
- [48] Li, K., & Williams, R. 2016, arXiv:1611.00790
- [49] Li, L.-X., & Paczyński, B. 1998, Astrophysical Journal Letters, 507, L59
- [50] LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, Abadie, J., et al. 2012, Astronomy & Astrophysics, 539, A124
- [51] LIGO Scientific Collaboration, & Virgo Collaboration 2012, arXiv:1203.2674
- [52] LIGO Scientific Collaboration, Aasi, J., Abbott, B. P., et al. 2015, Classical and Quantum Gravity, 32, 074001
- [53] LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, Abbott, B. P., et al. 2016, arXiv:1606.04856
- [54] LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, IPN Collaboration, et al. 2016, arXiv:1611.07947
- [55] Liske, J., Lemon, D. J., Driver, S. P., Cross, N. J. G., & Couch, W. J. 2003, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 344, 307
- [56] Maggiore, M.: Gravitational Waves, Volume 1: Theory and Experiments, Oxford University Press, 2013

- [57] Makarov, D., Prugniel, P., Terekhova, N., Courtois, H., & Vauglin, I. 2014, Astronomy & Astrophysics, 570, A13
- [58] McCarthy P. J., Kapahi V. K., van Breugel W., et al., 1996, Astrophysical Journal Supplement Series, 107, 19
- [59] Meinshausen, N., 2006, Journal of Machine Learning Research, 7, 983
- [60] Metzger, B. D., Martínez-Pinedo, G., Darbha, S., et al. 2010, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 406, 2650
- [61] Monet D. G. et al., 1998, USNO–A2.0, Flagstaff: US Nav. Obs.
- [62] Monet D. G. et al., 2003, Astronomical Journal, 125, 984
- [63] Norberg, P., Cole, S., Baugh, C. M., et al. 2002, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 336, 907
- [64] Pâris, I., Petitjean, P., Ross, N. P., et al. 2016, arXiv:1608.06483
- [65] Quinlan J. R., 1986, Mach. Learn., 1, 81
- [66] Raffai P. 2011, PhD disszertáció, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest
- [67] Richards, J. W., Homrighausen, D., Freeman, P. E., Schafer, C. M., & Poznanski, D. 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 419, 1121
- [68] Ruffini R. et al., 2015, GCN Circular 18296
- [69] Schechter, P. 1976, Astrophysical Journal, 203, 297
- [70] Singer, L. P., Price, L. R., Farr, B., et al. 2014, Astrophysical Journal, 795, 105
- [71] Singer, L. P., Chen, H.-Y., Holz, D. E., et al. 2016, Astrophysical Journal Letters, 829, L15
- [72] Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., et al. 2006, Astronomical Journal, 131, 1163
- [73] Svinkin D. et al., 2015, GCN Circular 18321
- [74] Tanvir, N. R., Levan, A. J., Fruchter, A. S., et al. 2013, Nature, 500, 547
- [75] Tully, R. B. 1987, Astrophysical Journal, 321, 280
- [76] Tully, R. B., Rizzi, L., Shaya, E. J., et al. 2009, Astronomical Journal, 138, 323

- [77] White, D. J., Daw, E. J., & Dhillon, V. S. 2011, Classical and Quantum Gravity, 28, 085016
- [78] Willke, B., Aufmuth, P., Aulbert, C., et al. 2002, Classical and Quantum Gravity, 19, 1377
- [79] Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K., et al. 2010, AJ, 140, 1868
- [80] Zhang F., Shao L., Yan J., & Wei D., 2012, Astrophysical Journal, 750, 88
- [81] Zhang F., Zhang B., & Zhang B., 2015, GCN Circular 18298

NYILATKOZAT

Név: Dálya Gergely

ELTE Természettudományi Kar, szak: Fizikus MSc

NEPTUN azonosító: IQPEEG

Szakdolgozat címe: Galaxiskatalógus fejlesztése és felhasználása elektromágneses és gravitációshullám-tranziensek forrásgalaxisainak azonosításában

A **diplomamunka** szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2017. május 30.

a hallgató aláírása