

WMAP pontforrások mint lehetséges űr-VLBI kalibrátorok

Geréb Katinka

Eötvös Loránd Tudományegyetem Csillagászati Tanszék, Budapest

Kivonat

A WMAP 5 év alatt gyűjtött adatait használtam egy olyan új – fényes és kompakt kvazárokat tartalmazó – katalógus összeállításához, mely a jövőben mm-VLBI megfigyelésekre lesz használható. A WMAP pontforrások közül összegyűjtöttem az ismert VLBI célpontokat, összevettem őket az eddigi VLBI katalógusokkal, majd almintákat hoztam létre aszerint, hogy az illető források szerepelnek-e vagy sem a WMAP pontforrásai között. A 41, 61 és 94 GHz frekvencián mért fluxussűrűségek alapján kiszámolt színképindexekből elkészítettem a teljes katalógus, valamint egyes alminták fluxussűrűség- és színképindex-hisztogramjait, majd a többi katalógussal való átfedés térképét.

A munka egyik célja olyan új források megjelölése, amelyeket VLBI technikával 86 GHz frekvencián meg lehetne figyelni. A WMAP listából kiválogattam azokat a forrásokat, amelyeket még nem vizsgáltak 86 GHz-en, és a fluxussűrűségük 1 Jy felett van, valamint a földi hálózatok lefedettsége miatt azokat, amelyek deklinációja -40° -nál magasabb (hasonló módszert használtak az eddigi legteljesebb 86 GHz-es VLBI felmérésben). Az új katalógus létrehozásához nyilvános adatbázisok segítségével elvégeztem az objektumok optikai azonosítását, majd a forrásokhoz szélesebb sávban készült rádióspektrumokat, valamint korábbi alacsonyabb frekvencián készített VLBI képeket kerestem. A jövőben a jobb felbontást és nagyobb érzékenységet lehetővé tevő űr-VLBI műholdak – mint pl. az ASTRO-G – az általam összegyűjtött fényes kvazárokat a halványabb objektumok megfigyeléséhez kalibrátorokként is használhatják majd.

Bevezetés

A *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) a NASA űrszondája, melynek feladata a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás (CMB) hőmérsékleti anizotrópiáinak mérése. A mért CMB adatokban zavaró tényezőként jelenik meg többek között az előtér emissziója – vagyis a diffúz galaktikus emisszió, valamint a galaktikus és extragalaktikus pontforrások. Ezek ugyanis „beszennyezik” a CMB térképeket. Kiszűrésük érdekében az űrszonda a teljes égboltot felméri 5 különböző mikrohullámú frekvenciasávban 23 és 94 GHz között. A CMB és az előtér komponensek szétválasztásakor így melléktermékként született pontforrás-katalógus (Chen & Wright 2009) lehetőséget nyújt a fényes rádióforrások milliméteres hullámhossztartományban való tanulmányozására, ugyanis a WMAP végezte az eddigi egyetlen, ebben a magas frekvenciatartományban készült, a teljes égboltot lefedő, egységes felmérést.

Korábbi mm-VLBI katalógusok

Rantakyrö et al. (1998) – a GMVA (*Global Millimeter VLBI Array*) 1990-ben készült 100 GHz-es, valamint az 1993-ban készült 86 GHz-es felméréseit használva – összeállított egy 16 forrást tartalmazó listát az aktív galaxismagok (AGN) és a rádiójetek kiindulópontjának tanulmányozása céljából. A katalógus alapján összesen 15 képet sikerült készíteniük 50 mikroívmásodperces (μ s) felbontással, a nagyon hosszú bázisvonalú interferometria (*Very Long Baseline Interferometry*, VLBI) technikájával. Két évvel később Lobanov et al. (2000) a CMVA (*Coordinated Millimeter VLBI Array*) adatait használva 28 rádióforrás 86 GHz-es VLBI megfigyelésének eredményeit mutatta be. Ezekből 26 forrás AGN, a másik kettő pedig a Galaxisunk középpontja (Sgr A*), valamint a Cygnus X-3 röntgenkettőscsillag.

A korábbi vizsgálatokhoz képest lényeges előrelépést jelentett, hogy Lee et al. (2008) megalkottak egy 127 kompakt rádióforrásból álló katalógust, mely 88 kvazárt, 25 BL Lac objektumot, 11 rádiógalaxist, 1 csillagot és 2 azonosítatlan forrást tartalmaz. A források kiválasztásának egyik kritériuma a 0,3 Jy fölötti teljes mért fluxussűrűség érték volt 86 GHz-en. Néhány, már 86 GHz-en

korábban is vizsgált nagyon fényes rádióforrást nem vettek bele a listába, azokra az objektumokra fókuszálva inkább, melyeket korábbi felmérések során még nem detektáltak. Gyakorlati okokból – a megfigyelésre alkalmas VLBI hálózat híján – a déli égbolton található alacsony deklinációjú ($\delta \leq -40^\circ$) forrásokat szintén kizárták.

Az USNO (*United States Naval Observatory*) is rendelkezik egy katalógussal¹, mely az égi vonatkoztatási rendszert kijelölő kvazárok egy részét tartalmazza. Ezekből a 24 és 43 GHz-es adatokat használtam fel.

Mindezek alapján látható, hogy viszonylag kis számban találhatunk milliméteres hullámhosszakon VLBI technikával feltérképezett rádióforrásokat tartalmazó katalógusokat, ezért nagyon fontos lenne az ilyen jellegű adatbázisok bővítése a jövőbeli felmérések számára.

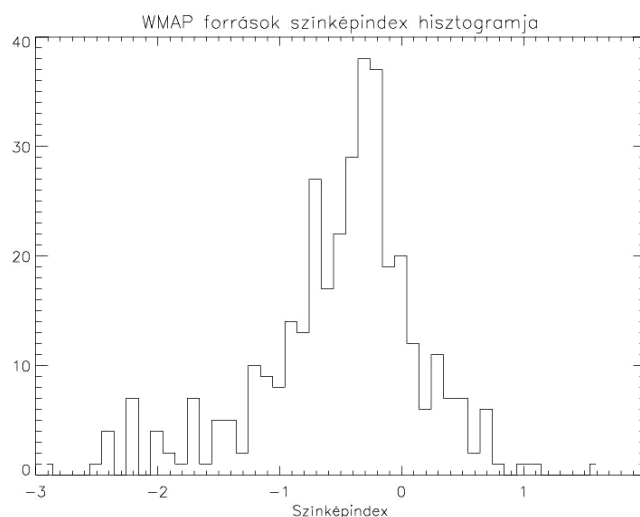
A WMAP pontforrás-katalógus használata új mm-VLBI célpontok kiválasztására

A WMAP katalógusában szereplő pontforrások elnevezését a 2000-es epochára vonatkozó egyenlítői koordinátákból származtatták, míg a régebbi VLBI katalógusok rádióforrásait az 1950-es koordinátáik alapján jelölték. Ezért a jelölésekben kisebb eltérést tapasztaltam. A legtöbb VLBI forráshoz azonban létezik egy koordinátalista², ahol mindkét szabványnak megfelelő nevek szerepelnek. A források azonosítását ezen koordináták segítségével sikerült elvégezni, így minden korábbi katalógusból összeállt egy minta azokról a forrásokról, amik szerepelnek a WMAP adatai között is.

A rádiócsillagászatban hatványfüggvény-spektrumról beszélünk, ha $S \sim \nu^\alpha$, ahol S a fluxussűrűség, ν a frekvencia és α a spektrálindeks. A hatványfüggvény a GHz-es tartományban általában jó közelítése a megfigyelt széles sávú spektrumnak. A rádióspektrumok meghatározásához ezt a képletet használtam. A WMAP katalógusban megtalálhatjuk a pontforrásokhoz tartozó, 41, 61 és 94 GHz frekvencián mért fluxussűrűség értékeket. A spektrum meghatározásához azonban szükség van a spektrálindeks ismeretére is.

A fluxussűrűségek és a frekvenciák ismeretében a lineáris regresszió módszerével határoztam meg az egyes forrásokhoz tartozó spektrálindeks értékeit.

A színeképindexek és a fluxussűrűségek ismeretében elkészítettem a teljes WMAP katalógus fluxussűrűség- és színeképindex-hisztogramjait (1. ábra), valamint a korábbi legnagyobb VLBI felmérés (Lee et al. 2008) forrásaira vonatkozó hisztogramokat aszerint, hogy ezek a források szerepelnek-e vagy sem a WMAP katalógusban. Ezekről a forrásokról a WMAP mintájával való egyezést mutató átfedési térkép is készült.



1. ábra. A WMAP katalógusban található pontforrások színeképindex-hisztogramja

¹ http://rorf.usno.navy.mil/RRFID_KQ

² http://lacerta.gsfc.nasa.gov/vlbi/solutions/2008b_astro

A 86 GHz-es fluxussűrűség becslése

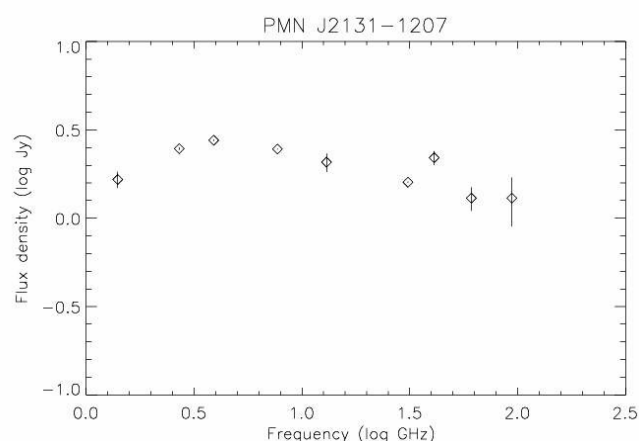
A munka egyik célja olyan új források megjelölése, amelyeket VLBI technikával 86 GHz frekvencián meg lehetne figyelni. A WMAP adataiban csak a 41, 61 és 94 GHz-en mért fluxussűrűségek szerepelnek, így meg kellett becsülnöm a 86 GHz-es frekvencián várható fluxussűrűség-értékeket. Ehhez kihasználtam, hogy a 94 GHz elég közel van a 86 GHz-hez. Ezért a 94 GHz-es adat és a már ismert színekindex alapján számoltam ki a 86 GHz-es fluxussűrűséget: $S_{86} = S_{94} * (86/94)^\alpha$.

A fényes kvazárokat tartalmazó új lista létrehozásának céljából a Lee et al. (2008) által használt kiválasztási módszerből indultam ki. A korábbi katalógusok alapján, a WMAP-ből kiválogattam azokat a célpontokat, melyeket eddig még nem vizsgáltak 86 GHz-en, s melyek fényessége nagyobb, mint 1 Jy, deklinációjuk pedig -40° felett van. Így összeállt egy 40 rádióforrást tartalmazó minta. Az új mintát statisztikai elemzés céljából összevettem a Lee et al. (2008) katalógusának kompakt forrásaival, átlagot, mediánt és szórást számoltam a fluxussűrűségekre és színekindexekre.

Az új mm-VLBI célpontok katalógusának összeállítása

Az új katalógus létrehozásához nyilvános adatbázisok segítségével elvégeztem az objektumok optikai azonosítását, majd korábbi, alacsonyabb frekvenciákon készített VLBI képeket, valamint a forrásokhoz szélesebb sávban készült rádióspektrumokat kerestem. Az objektumok optikai azonosításának kereséséhez a NED (*NASA/IPAC Extragalactic Database*)³ szolgáltatását alkalmaztam.

Az amerikai nemzeti rádiócsillagászati obszervatórium (NRAO) által működtetett VLBA (*Very Long Baseline Array*) kalibrátor forrásainak listája⁴ egy olyan alkalmazás, ahol pozíció alapján a fényes rádióforrásokról két különböző (2,3 GHz és 8,4 GHz) frekvencián készült VLBI térképek tölthetők le. A 40 forrásból 37-hez sikerült itt régebbi, 8,4 GHz-es térképeket találnom, három forrás azonban kilóg a sorból. Ezeket az eseteket külön is megvizsgálva, a PKS J1332+0200 nevű forrásról korábban készült egy 5 GHz-es VLBA térkép (Fomalont et al. 2000). Egy másik forrás, a PMN J1248-4559 azonban túlságosan délen van, ezért nem szerepel a VLBA adatbázisban. A déli féltekéről viszont detektálták VLBI-vel, mind 2,3, mind pedig 8,4 GHz frekvencián (Fey et al. 2006). Végül a PMN J0527-1241 forrásnak a NED adatbázisban nem ismert egyetlen VLBI detektálása sem. A japán VERA (*VLBI Exploration of Radio Astrometry*) rádiótávcső-hálózat a pozíciója miatt detektálhatta volna a forrást, de mivel ez nem sikerült, valószínűleg 22 GHz-en 0,11 Jy-nél halványabb a forrás a VERA bázisvonalain (Petrov et al. 2007). Ez azt jelentené, hogy a PMN J0527-1241 nem kompakt, hanem kiterjedt forrás lehet, de ennek bizonyítására vagy megcáfolására további vizsgálatok szükségesek.



2. ábra. A PMN J2131-1207 rádióspektruma, két nagyságrendet átfogó frekvenciatartományban. Az ábráról látható, hogy a példaként bemutatott forrás lapos spektrumú (vagyis α színekindexe 0 körüli). Ebből arra lehet következtetni, hogy rádiószerkezete kompakt, s emiatt ideális célpont VLBI megfigyelésekhez.

³ <http://nedwww.ipac.caltech.edu>

⁴ <http://www.vlba.nrao.edu/astro/calib/index.shtml>

A szélesebb sávban készült rádióspektrumok ábrázolásához egy olyan katalógus adatait használtam, melyben 1–22 GHz között 6 különböző frekvencián van egyidejű mérés, viszont csak -30° és $+43^\circ$ deklináció között (Kovalev et al. 1999). Összesen 20 olyan forrás volt, amelyhez mind a 6 frekvencián találtam adatot. Volt még 6 olyan forrás, amely szerepelt ebben a katalógusban, de csak néhány frekvencián volt hozzá mért adat. A maradék 14 forrás nem szerepelt ebben a mérésben. Ezekhez így a NED-ből gyűjtöttem 1,4 és 4,8 GHz-es fluxussűrűségeket.

Az adatbázisokból összegyűjtött információhoz hozzávettem a WMAP-ből a 41, 61 és 94 GHz-es frekvenciákhoz tartozó fluxussűrűség-értékeket is. Így már minden forráshoz rendelkezésemre álltak az adatok egy szélesebb frekvenciatartományt lefedő rádióspektrum készítéséhez. (Egy példa a 2. ábrán látható.)

Célpontok az ASTRO-G űr-VLBI műhold számára

Az ASTRO-G japán rádiócsillagászati műholdat (Tsuboi 2008) várhatóan 2013-ban bocsátják fel. A 8, 22 és 43 GHz-es tartományokban méréseket végezve, része lesz egy földi rádióteleszkópokkal alkotott VLBI rendszernek, és akár 38 mikroívmásodperces felbontással is dolgozik majd. Segítségével így nagy érzékenyséű és felbontású megfigyelésekre nyílik lehetőség. Emiatt fontos azoknak a kompakt rádióforrásoknak az összegyűjtése, amelyek vizsgálata lehetővé válik az ASTRO-G segítségével. Ezeknek további jelentőséget ad, hogy a közelükben látszó halványabb célpontok megfigyeléséhez, kalibrációs célra is használják majd. A jelenleg ismert kalibrációs források listája – főleg a legmagasabb, 43 GHz-es űr-VLBI frekvencián – igen hiányos. További kalibrátorok kijelölése és előzetes földi vizsgálata tehát nagyon fontos az ASTRO-G program sikere érdekében. A megvalósítható hosszabb bázisvonalak miatt az űr-VLBI rendszer szögfelbontása 43 GHz frekvencián összemérhető a földi 86 GHz-es hálózatokkal elérhető felbontással. Ez alkalmat ad arra is, hogy a földi és űr-VLBI megfigyelések egymást kiegészítve információt adjanak a kvazárok fényességeloszlásának spektrális tulajdonságairól, soha nem látott részletességgel, néhányszor 10 mikroívmásodperces skálán.

Összefoglalás

A mikrohullámú háttérsugárzást kutató WMAP űrszonda első 5 működési évében végzett mérései alapján elkészült pontforrás-katalógusból olyan extragalaktikus rádióforrásokat válogattam ki, amelyek alkalmasak lehetnek 86 GHz-es földi VLBI és 43 GHz-es űr-VLBI megfigyelésekre. A kiválasztáshoz az égi pozíciójukat, várható fluxussűrűségüket, valamint a publikált adatokból meghatározott rádió spektrálindeket használtam. Közel 40 olyan ígéretes, fényes és feltehetően kompakt rádióforrást találtam, amelyek szerkezetét eddig még nem térképezték fel mm-VLBI mérésekkel. Ezek vizsgálata kb. 25%-kal bővítené a jelenleg ismert mm-VLBI források számát.

Köszönetnyilvánítás

A második generációs űr-VLBI programokba való magyar bekapcsolódás előkészületeit a Magyar Űrkutatási Iroda (MŰI, TP-314) támogatja.

Irodalom:

- Chen, X., Wright, E. L. 2009, Extragalactic Point Source Search in Five-Year WMAP 41, 61, and 94 GHz Maps, *Astrophys. J.*, 694, 222
- Fey, A. L. et al. 2006, Milliarccsecond-Accurate Astrometry of 34 Southern Hemisphere Radio Sources, *Astron. J.*, 132, 1944
- Fomalont, E. B. et al. 2000, The VSOP 5 GHz Continuum Survey: The Prelaunch VLBA Observations, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 131, 95
- Kovalev, Y. Y. et al. 1999, Survey of instantaneous 1–22 GHz spectra of 550 compact extragalactic objects with declinations from -30° to $+43^\circ$, *Astron. Astrophys. Suppl.*, 139, 545
- Lee, S.-S. et al. 2008, A Global 86 GHz VLBI Survey of Compact Radio Sources, *Astron. J.*, 136, 159

- Lobanov, A. P. et al. 2000, 86 GHz VLBI Survey of Compact Radio Sources, *Astron. Astrophys.*, 364, 391
- Petrov, L. et al. 2007, VERA 22 GHz Fringe Search Survey, *Astron. J.*, 133, 2487
- Rantakyrö, F. T. et al. 1998, 50 μ s resolution VLBI images of AGN's at λ 3mm, *Astron. Astrophys. Suppl.*, 131, 451
- Tsuboi, M. 2009, VSOP-2/ASTRO-G Project Overview for the Astronomy Community, in: *Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: Astrophysics and Technology*, ASP Conf. Ser. 402, eds. Hagiwara, Y., Fomalont, E., Tsuboi, M., Murata, Y. (ASP, San Francisco), 30