

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította  
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LXIII. évfolyam

12. szám

2013. december

## PÁROS GALAXISMAGOK A MEGFIGYELŐ CSILLAGÁSZ SZEMÉVEL

Gabányi Krisztina

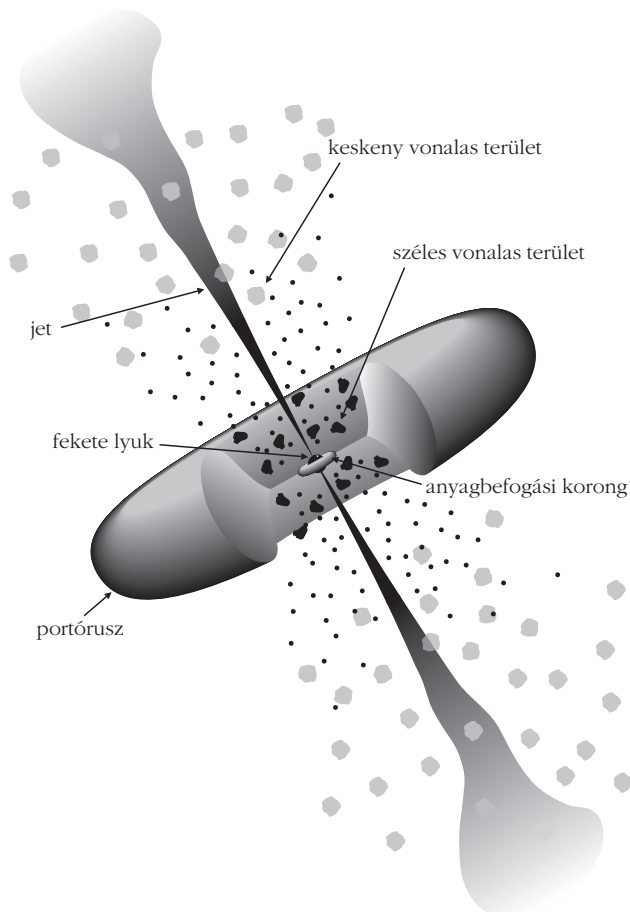
SZTE TTIK Kísérleti és Elméleti Fizikai Tanszékek, Szeged  
MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

Napjainkban széleskörűen elfogadott elképzelés, hogy minden nagyobb galaxis középpontjában szupernagy tömegű fekete lyuk (supermassive black hole, SMBH) található. A jelenlegi elméletek szerint a galaxisok és így a középpontjukban található fekete lyukak kialakulásában is fontos szerepet játszott a galaxisok összeolvadása. Két fekete lyuk összeolvadásának folyamatát három fő szakaszra lehet osztani [2]. Először a két fekete lyuk dinamikai sűrűdés útján veszít energiát, miközben egyre közelebb jutnak a kialakuló új, egybeolvadó galaxis középpontjához. Később a gravitációs lendítő hatás következtében a kettős pályáját átszelő csillagok kilöködnek (a fekete lyukak pálya menti sebességének megfelelő sebességgel). Az utolsó szakaszban, amikor a fekete lyukak távolsága annyira csökken, hogy a kibocsátott gravitációs hullámok hatásosan képesek csökkenteni a rendszer perdületét, a két fekete lyuk gyorsan összeolvad. Az összeolvadás időskálájától függően számos olyan galaxis létezését várhatjuk, amelyekben szupernagy tömegű kettős fekete lyukak találhatóak. Ezek a galaxis-összeolvadás különböző fázisairól tanúskodhatnak. Egyes elméletek szerint az összeolvadás során megnövekedő anyagbefogás (akkréció) „aktivizálhatja” az egyik vagy mindkét központi fekete lyukat és így akár kettős aktív galaxismagot (active galactic

nucleus, AGN) is megfigyelhetünk. Ezt vizsgálva hidrodinamikai szimulációk [19] azt mutatták, hogy szimultán aktivitás (tehát kettős AGN) az *összeolvadásnak* abban a szakaszában a legvalószínűbb, amikor a két mag távolsága  $\sim 3000\text{--}30\,000$  fényév. Más modellek szerint [12] az összeolvadás legutolsó fázisában (3 fényévnél kisebb szeparációnál) az aktivitás átmenetileg leállhat, ahogy az elnyelhető anyagot kisöpri az aktív magba bespiráló fekete lyuk.

Az aktív galaxismagokat a *Fizikai Szemle* egy korábbi számában már bemutattuk [7]. Emlékeztetőül az AGN sematikus modellje az *1. ábrán* látható. Az AGN központi energiaforrása egy *szupernagy tömegű* ( $10^6\text{--}10^9$  naptömegnyi) fekete lyuk, amely körül akkréciós korong található. Erre a befogási korongra merőlegesen nagy energiájú anyagkilövellések (jetek) indulhatnak ki. Ezeket az aktív galaxismagokat szinkrotron eredetű, erős rádiósugárzás jellemzi. Az anyagbefogási korong alatt és felett gázfelhők helyezkednek el, amelyeket az optikai színekvonalaik alapján széles és keskeny vonalas területre osztanak (broad line region, BLR és narrow line region, NLR). Színképelemzéssel megállapítható, hogy a BLR felhői gyorsan mozgó, sűrű, míg az NLR felhői lassúbb, ritkább objektumok. A központi energiaforrást körbeveszi egy árnyékoló portórusz is. A *rádiósugárzó* AGN-ek egyesített modellje szerint a megfigyelt sokféle típusú aktív galaxismag közti különbségek fő oka, hogy más-más szögben látunk rá az alapjában ugyanolyan felépítésű, korántsem gömbszimmetrikus objektumokra [18]. A rádiósugárzó blazárok (ide tartoznak például a BL Lacertae típusú aktív galaxismagok), kvazárok esetében a látóirány a kilövellés ten-

A munka a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. A kutatást az OTKA a K104539 projekt keretében támogatja.



1. ábra. Illusztráció a rádiósugárzó aktív galaxismagok modelljéhez [18].

gelyével nagyon kis szöget zár be, míg a rádiógalaxisok esetében a jetek közel az éggömb érintősíkjában helyezkednek el. (Az aktív galaxismagok jelentős része nem rádiósugárzó, és nem tudunk rádiókilövelést megfigyelni.)

## Kettősök jelenlétére utaló „nyomok” és kettős AGN-ek megfigyelhetősége

Annak ellenére, hogy az elméleti megfontolások szerint számos feketelyukkettőst kellene látnunk, egyértelműen detektált kettősökből viszonylag keveset ismerünk. Habár jó néhány (az alábbiakban részletezett) tulajdonság magyarázható kettős SMBH-k jelenlétével, azok nagy része nem tekinthető egyértelmű bizonyítéknak, mivel mindegyiknél más, alternatív értelmezés is megállja a helyét. Jelen tudásunk szerint csak direkt észlelés esetén, tehát a kettős objektum tényleges térbeli felbontásakor jelenthetjük ki biztosan, hogy dupla SMBH-t tartalmazó objektumot találtunk. Értelemszerűen ez (elvileg) a legkönnyebben az elektromágneses hullámhossztartomány több sávjában is a normálisnál jóval nagyobb teljesítménnyel sugárzó aktív galaxismagok esetén valósítható meg. A gyakorlatban azonban jelenlegi műszereinkkel is csak a legközelebbi objektumokra és a relatíve nagyobb szeparáció esetén lehetséges a térbeli felbontás. Ez

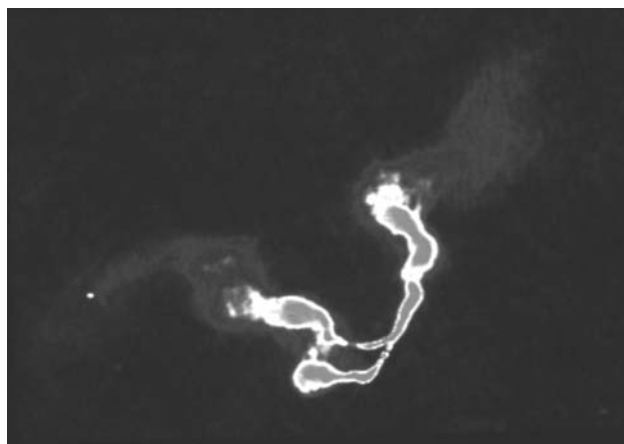
azt jelenti, hogy napjainkban néhány tucat olyan rendszert ismerünk, ahol a kettős szeparációja 30 és 30 000 fényév közti.

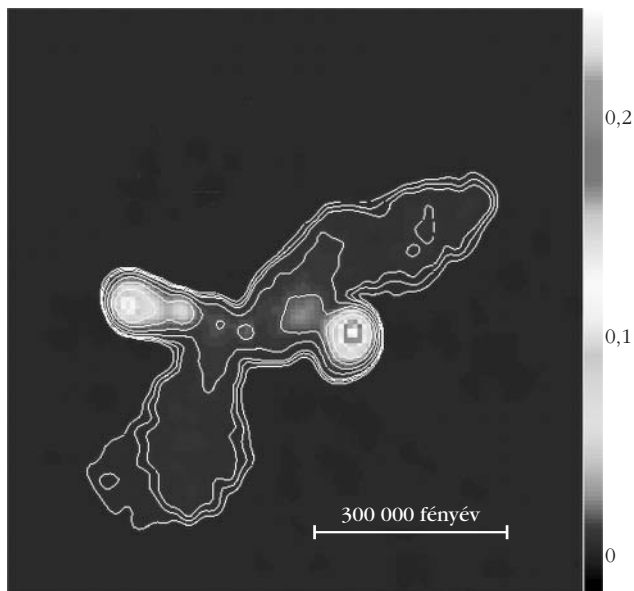
Röntgentartományban az NGC 6240 összeolvadó galaxisban sikerült felbontani a két aktív magot [11]. Ezek távolsága egymástól 4400 fényév, és összeolvadásuk a következő néhány százmillió évben várható. Hasonló, bár jóval nagyobb szeparációjú, éppen összeolvadó galaxisok magjában fedeztek fel aktív magokat ugyancsak röntgentartományban: az IC 694 és NGC 3690 aktív magjainak szeparációja ~15 000 fényév [1]; az ESO 509 és IG 066 magjai [9] még távolabb ~33 000 fényévre vannak egymástól. A 3C 75 jelű rádiógalaxisban szintén röntgenmegfigyelés szolgáltatotta az egyértelmű bizonyítékot a kettős jelenlétére (szeparáció ~24 000 fényév), habár a rádiótartományban feltérképezett különleges jetstruktúra (2. ábra) alapján ezt már korábban is felvetették [10].

A 2013 végén felbocsátandó *Gaia* űrszonda – amelynek elsődleges feladata milliárdnyi csillag helyzetének nagy pontosságú mérése [17], de emellett előreláthatólag közel ötszáz ezer aktív galaxismagot is meg fog figyelni – képes lesz arra, hogy a hozzánk közeli galaxisokban a látható fény tartományában felbontsa ezeket az objektumokat. A *Gaia* munkáját előkészítve rádió- és optikai tartományban is azonosított ismert kvazárok pozícióinak összehasonlításakor kiderült, hogy jó néhány esetben szignifikáns (az optikai mérések nagyobb hibahatárát meghaladó mértékű) eltérés tapasztalható a koordináták között [14]. Bizonyos esetekben lehetséges, hogy kölcsönható galaxisok összeolvadó magjai felelősek az optikai és rádiótartományban mért pozíciók közti különbségért.

A csillagászatban a jelenlegi legjobb felbontóképességet a nagyon hosszú bázisvonalú interferometria (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) rádiócsillagászati megfigyelési módszer szolgáltatja. Ennek lényege, hogy egyszerre több, egymástól nagyon messze elhelyezett rádióantenna figyeli ugyanazt az égi objektumot. Az érzékelt jeleket rögzítik, majd később visszajátsszák és korrelálják (újabbán a modern adat-

2. ábra. A 3C75 jelű rádiógalaxis rádiótérképe, amely az amerikai Very Large Array hálózattal készült 20 cm-es hullámhosszon (Owen et al. *Astrophysical Journal* 294 (1985) 185).





3. ábra. Az X alakú 3C 403 rádiógalaxisnak az amerikai Very Large Array hálózattal készült rádióterképe 3,6 cm-es hullámhosszon. A kontúrvonalak az intenzitást jelölik (Capetti et al. *Astronomy & Astrophysics* 394 (2002) 39).

átviteli hálózatok révén mindegyik már valós időben is van lehetőség). Az ily módon elérhető felbontás sokszorosa a részt vevő antennák egyedi felbontóképességének; a felbontást a leghosszabb bázisvonal, azaz az antennák közötti legnagyobb távolság határozza meg. A rádióantennák összekapcsolt rendszere ebből a szempontból úgy működik, mint egyetlen hatalmas antenna, amelynek átmérője megegyezik a leghosszabb bázisvonal hosszával. A Földre telepített antennák hálózatával centiméteres hullámhosszakon ezred ívmásodpercnél is jobb felbontást lehet elérni.

Elvileg az optikai színképvonalak elemzésével is következtetni lehet kettős fekete lyukak jelenlétére, azonban – mint látni fogjuk – ez nem egyértelmű módszer, és a beazonosított kettős AGN-jelölteket további vizsgálatoknak kell alávetni. Egy AGN-hez tartozó NLR típusuk mérete néhány száz, esetleg ezer fényév. Amikor az összeolvadó AGN-ek még viszonylag messze, ~3000-30 000 fényévre vannak egymástól, a hozzájuk tartozó NLR-ek egymástól függetlenül léteznek. Mivel a két AGN közös tömegközéppont körül kering, a hozzájuk tartozó két NLR-nek – hacsak a keringési sík nem esik véletlenül éppen egybe az égbolt síkjával – különböző lesz a látóirányú sebessége. Az objektum színképében ezért a tipikusan NLR-hez köthető, többszörösen ionizált elemek (például a kétszeresen ionizált oxigén) színképvonalai megkettőzött csúccsal jelennek meg. Már közel ötezer ilyen dupla színképi csúcsot mutató keskeny vonalú AGN-t azonosítottak a Sloan Digital Sky Survey (SDSS) hatalmas adatbázisának spektrumaiban [16]. Azonban a részletes vizsgálatok kimutatták, hogy a legtöbb esetben egyéb mechanizmusok felelősek a vonalak duplázódásáért. Például az NLR-rel kölcsönhatásba lépő, azt „megzavaró” jet hatására az NLR-t alkotó felhők két áttellenes irányban kifelé

tartó mozgása is okozhatja a színképvonalak megkettőződését, még akkor is, ha csak egyetlen AGN van a galaxis közepén. Így tehát a dupla csúcsú színképvonalakat mutató objektumok közül az „igazi” kettős AGN-ek kiválasztásában fontos szerepet játszik a korábban bemutatott nagy felbontású VLBI technika, amely lehetőséget ad a két AGN kilövelléseiből származó szinkrotronsugárzás detektálására és a két forrás térbeli felbontására – feltéve, hogy azok mindkettő a rádiósugárzó AGN-ek családjába tartoznak. Néhány esetben sikerült is rádiótartományban a két kompakt objektumot azonosítani, a megjósolt 10 000-20 000 fényév távolságra egymástól ([6] és ottani referenciák). Jelenleg is dolgozunk egy olyan VLBI-mérés kiértékelésén, ahol egy, az optikai spektrumvonalai alapján kettős AGN jelöltként azonosított forrást vizsgálunk.

Szintén a rádiótartományban megfigyelhető jetekhez kapcsolódnak olyan indirekt bizonyítékok, amelyek a múltban történt galaxis-összeolvadás, illetve galaxismagok közti kölcsönhatás jelenlétére (is) utalhatnak. Százas nagyságrendben ismerünk úgynevezett X alakú rádiógalaxisokat [3]. A képzeletbeli X szárait a hatalmas, kiterjedt jetek, illetve az azok által „fűjt” lebenyek, szárnyak (lobe, wing) alkotják, amelyekből nem a megszokott egy pár, hanem két pár található egy ilyen objektumban. A kilövelléspárok egymással nagy szöveget zárnak be (3. ábra). Fekete lyukak összeolvadásakor hirtelen bekövetkező spinátfordulást jósolnak az elméleti modellek [8]. Mivel a jetek a forgástengely irányában indulnak ki a fekete lyukak környezetéből, ezért logikusan következik, hogy a spin változásakor a kilövellés iránya is megváltozik. Ezen elképzelés szerint tehát az X alakú rádiógalaxisok korábban összeolvadt galaxismagok emlékét őrzik. Az egyik, energia-utánpótlását mostanra elvesztett és már halványodó lebenypár még az összeolvadás előtt, a másik az összeolvadás utánról datálódik, amikor a rendszer spinje megváltozott. Egy tavaly publikált, nagyobb mintán végzett vizsgálat azt mutatta [13], hogy az X alakú forrásokban átlagosan nagyobb (közel kétszer akkora) a központi fekete lyuk tömege, mint a hasonló fényességű „normál” rádiógalaxisokban, ami szintén azt támasztja alá, hogy ezek a források galaxisok összeolvadása révén jöhettek létre. Emellett a mintában vizsgálták azt is, mikor következett be a legutóbbi erős csillagkeletkezési korszak. Azt találták, hogy ez statisztikusan korábban (régebben) történt, mint a kontrollmintában. Ezen csillagkeletkezési korszak csúcspontja az X alakú galaxisok esetében mindig az aktív jetek megjelenése (azaz a feltételezett összeolvadás befejeződése) előtt történt 1-3 milliárd évvel. Ez az időskála jó egyezést mutat a galaxisok összeolvadását számítógépes szimulációval tanulmányozó kutatásokkal. (Az X alakú források egy másik magyarázat szerint viszont a csillagközi anyaggal való kölcsönhatás révén jöttek létre, és a visszaáramló anyag hozza létre a megfigyelt „szárnyakat”.)

Az úgynevezett dupla-dupla rádiógalaxisok kialakulásának egyik magyarázata is a galaxis-összeolva-



4. ábra. A B1545-321 dupla-dupla rádiógalaxis. A kép 2,4 GHz-en készült az Australia Telescope Compact Array-jel. (Forrás: Saripalli, Subrahmanyan és Shankar.)

dás. Ezeknél a forrásoknál szintén duplán jelennek meg a páros lebenyek, de – az X alakú forrásoktól eltérően – azok az égbolton egy tengely mentén helyezkednek el (4. ábra). A rádiótérképek szerint azonban az egyes lebenyeket nem kötik össze folytonos kilövellések. Ennek oka valószínűsíthetően a leállt, majd később újraindult jetaktivitás lehet. A korábbi kilövellés a távolabbi alakzatokat hozta létre, majd egy átmeneti „szünet” után az aktivitás és a kilövellések újra megjelentek, de azoknak még nem volt elég idejük, hogy elérjenek a régebben kialakult külső struktúrákig (lebenyekig). Ezt a jelenséget okozhatja – a már a bevezetőben említett módon – az, hogy a két fekete lyuk összeolvadásának utolsó fázisában „kisöpri” a bespiráló fekete lyuk a társa körül felgyülemlett befogható anyagot, így átmenetileg „kikapcsolva” annak aktivitását. Meglehet, hogy a dupla-dupla rádióforrások és az X alakúak eredete hasonló, csak az előbbieken az X alakra éppen az éléről látunk rá [5] és ottani referenciák).

Bizonyos blazárok jetjeinek látszó irányában megfigyelhető, periodikusnak tűnő változásait is összefüggésbe hoznak kettős, immár nagyon kis szeparációjú fekete lyukak jelenlétével. A jetek mozgási irányában nagyjából rendszeresen bekövetkező változást – amely általában a rádiójet spirálvonalyszerű

alakjaként figyelhető meg nagy felbontású VLBI-térképeken – okozhatja a kilövellés precessziós mozgása. Ez felléphet a nyalábot nagy sebességgel kibocsátó fekete lyuknak a kettős közös tömegközéppontja körüli keringése, az anyagbefogási korong precessziója miatt, amelyet a másik fekete lyuk gravitációs tere idéz elő.

Természetesen a fekete lyukak összeolvadásáról szóló egyetlen cikk sem lehet teljes a gravitációs hullámok említése nélkül. A szupernagy tömegű fekete lyukak kettős rendszere gravitációshullám-forrás. Az általuk keltett jelek észlelésére azonban csak az űrben működő eLISA (evolved Laser Interferometer Space Antenna, továbbfejlesztett lézer-interferométeres űr-antenna) rendszer lesz képes [15]. Az eredetileg LISA néven indult közös amerikai–európai űrprojekt, amelyből az amerikai fél 2011 folyamán szállt ki, jelenleg az Európai Űrügynökség (ESA, European Space Agency) 2028-ban felbocsátandó nagyobb űreszközjelöltjei között verseng a megvalósítás lehetőségéért [4]. Sikere esetén az elektromágneses hullámhosszakon kívül egy új tartományban is megfigyelhetővé válna a galaxismagok összeolvadása. Az eLISA-val így nemcsak az aktív galaxismagok, hanem az összes milliárd naptömegű fekete lyuk fejlődése és összeolvadásának fázisai is tanulmányozhatóvá válnak, térben és időben sokkal távolabbi objektumok esetében, mint amiket jelenleg az elektromágneses hullámhossztartományban megfigyelhetünk.

## Összefoglalás

A kettős, szupernagy tömegű fekete lyukak keresése a csillagászat egyik kedvelt kutatási területe napjainkban. Jelen elképzelésünk szerint az Univerzum nagyskálás szerkezetének kialakulása hierarchikusan, kisebb struktúráktól a nagyobbak felé haladva ment végbe. A galaxisok is számos ütközés és összeolvadás során alakulhattak ki. Miközben egyes elméleti számítások arra az eredményre jutnak, hogy bizonyos kezdeti feltételek esetén akár az Univerzum egész eddigi élete sem elég ahhoz, hogy két SMBH véglegesen összeolvadjon (tehát azt várjuk, hogy számos kettős SMBH-t tudjunk detektálni), mégis szinte alig detektálunk kettősöket. A képet természetesen az is nagyban árnyalja, hogy a galaxisok és galaxismagok összeolvadásának pontos időskálája sem ismert, valamint, hogy jelenlegi műszereinkkel csak a kozmikus térben és időben közeli forrásokat vagyunk képesek felbontani. Ezzel szemben az elfogadott kozmológiai modell szerint a galaxisok ütközései az Univerzum történetének korábbi szakaszaiban jóval gyakrabban következhetnek be. A direkt mérések hátránya, hogy környezetünknek (egyelőre) csak egy nagyon szűk tartományát vizsgálhatjuk, valamint csak olyan forrásokat, ahol mindkét mag aktív. Ez a két feltétel erős határt szab a megszereshető tudásnak, mivel nagyon erős kiválasztási effektust hordoz. Sajnos jelenleg nem ismerünk olyan in-

direkt mérési bizonyítékot, amely egyértelműen bizonyítaná a kettős fekete lyuk jelenlétét. Az itt bemutatott összes megfigyelt jelenségre (akár több) alternatív magyarázat is létezik. Ezért kiemelkedően fontos olyan jellemző tulajdonság keresése, amellyel egyértelműen azonosíthatók a kettős AGN-ek. Így ugyanis felállítható lenne egy nagyobb, statisztikus módszerekkel is tanulmányozható minta, ami nagymértékben elősegítené a galaxisok és az Univerzum fejlődésének kutatását, valamint többet tudnánk meg a szupernagy tömegű fekete lyukak és kettősök életútjáról is. Számos elmélet veti fel, hogy kapcsolat lehet a galaxisaktivitás, a rádiósugárzó kilövellések megléte és az adott galaxis életútja, ütközési története között. A kettős galaxismagokat és összeolvadásukat tanulmányozva talán olyan régóta megválaszolatlan kérdések megoldásához is közelebb jutunk, hogy miért vannak a rádiótartományban halk (és jet nélküli) AGN-ek többségben, miért  $z = 2$  vöröseltolódásnál látjuk a kvazárok többségét, minden galaxis átment-e egy aktivitási fázison élete során, és vajon meddig tart egy tipikus aktivitási szakasz?

#### Irodalom

1. Ballo, L. et al.: Arp 299: A Second Merging System with Two Active Nuclei? *Astrophysical Journal* 600 (2004) 634.
2. Begelman, M. C. et al.: Massive black hole binaries in active galactic nuclei. *Nature* 287 (1980) 307.
3. Cheung, C. C.: First "Winged" and X-Shaped Radio Source Candidates. *Astronomical Journal* 133 (2007) 2097.
4. eLISA honlap [www.elisascience.org](http://www.elisascience.org)
5. Frey S.: Kettős aktív galaxismagok. *Meteor csillagászati évkönyv* 2012 280.
6. Frey S. et al.: Two in one? A possible dual radio-emitting nucleus in the quasar SDSS J1425+3231. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 425 (2012) 1185.
7. Gabányi K. É.: Kvazárok gyors fényességváltozásai rádiótartományban. *Fizikai Szemle* 59 (2009) 354.
8. Gergely L. Á., Bierman P. L.: The Spin-Flip Phenomenon in Supermassive Black hole binary mergers. *Astrophysical Journal* 697 (2009) 1621.
9. Guainazzi, M. et al.: The early stage of a cosmic collision? XMM-Newton unveils two obscured AGN in the galaxy pair ESO509-IG066. *Astronomy & Astrophysics* 429 (2005) L9.
10. Hudson, D. S. et al.: X-ray detection of the proto supermassive binary black hole at the centre of Abell 400. *Astronomy & Astrophysics* 453 (2006) 433.
11. Komossa, S. et al.: Discovery of a Binary Active Galactic Nucleus in the Ultraluminous Infrared Galaxy NGC 6240 Using Chandra. *Astrophysical Journal* 582 (2003) L15.
12. Liu F. K.: X-shaped radio galaxies as observational evidence for the interaction of supermassive binary black holes and accretion disc at parsec scale. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 347 (2004) 1357.
13. Mezcua, M. et al.: Starbursts and black hole masses in X-shaped radio galaxies: Signatures of a merger event? *Astronomy & Astrophysics* 544 (2012) A36.
14. Orosz G., Frey S.: Optical–radio positional offsets for active galactic nuclei. *Astronomy & Astrophysics* 553 (2013) A13.
15. Rácz I.: Hogyan hallgatható meg az Univerzum zenéje? *Természet Világa* 142/12 (2011) 546.
16. Smith, K. L. et al.: A Search For Binary Active Galactic Nuclei: Double-peaked [O III] AGNs In The Sloan Digital Sky Survey. *Astrophysical Journal* 716 (2010) 866.
17. Szabados, L.: Gaia – a következő évtized nagy űrcsillagászati projektje. in *Űrcsillagászat Magyarországon*. Konkoly Observatory of the Hungarian Academy of Sciences Monographs No. 6. (2010) 74.
18. Urry, C. M., Padovani, P.: Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 107 (1995) 803.
19. van Wassenhove, S. et al.: Observability of Dual Active Galactic Nuclei in Merging Galaxies. *Astrophysical Journal* 748 (2012) L7.