

A kvazárok 50 éve

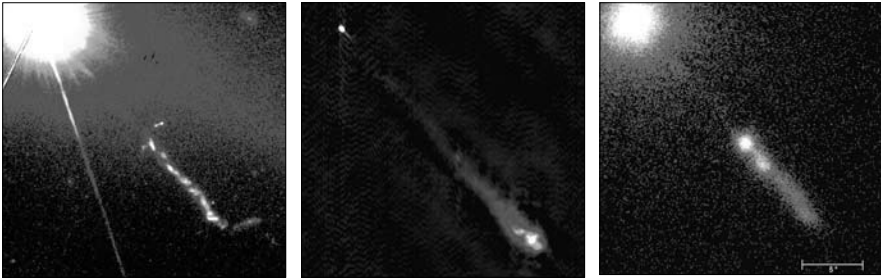
Ötven év igazán nem sok a kvazárok, e fényes extragalaktikus égi objektumok, aktív galaxismagok életében. Számunkra mégis épp csak ennyi idők. A kvazárok felfedezését – pontosabban az első meggyőző bizonyítékot arra, hogy ezek tényleg nagyon távoli égitestek lehetnek – a most 83 éves Maarten Schmidt 1963-ban a Nature című folyóiratban megjelent cikkéhez köthetjük. Ő a 3C 273 jelű fényes rádióforrást – a Palomar-hegyi 200 hüvelykes távcsővel végzett megfigyelései alapján – egy 13 magnitúdós objektummal azonosította. Segítségére voltak a frissen mért, az addigiaknál pontosabb rádiókoordináták, és az is, hogy a fényes pontszerű égitest mellett egy nyúlvány is látszott, amelynek iránya jól egyezett a 3C 273 rádióméréseiből adódó szerkezettel. A színképvonalakat a legkézenfekvőbb módon egy 0,158-as értékű vöröseltolódással lehetett megmagyarázni. Ebből Schmidt azt a következtetést vonta le, hogy nem lehet szó a saját Tejútrendszerünk egy csillagáról, inkább egy távoli galaxis központi régiójáról. Azt is felismerte, hogy ezek szerint a 3C 273 mintegy százszor olyan fényes, mint a már ismert rádióforrásokkal azonosított galaxisok.

Mint sok más tudományos felfedezés, ez is megszülethetett volna már évekkel korábban. Kezdetben, amikor az első kompakt égi rádióforrásokat megtalálták, természetes gondolat volt, hogy azok valamiféle különleges csillagok lehetnek. Annál is inkább, mert a rádiócsillagászat úttörői, Karl Jansky és Grote Reber az 1930-as és 40-es években a maguk forradalmi, mégis kezdetleges eszközeivel először a Tejúttal kapcsolatba hozható diffúz emissziót figyeltek meg. Az első arra utaló jelek, hogy bizonyos rádióforrások akár a Galaxison túliak lehetnek, az 1940-es évek legvégén bukkantak fel. A kutatók azonban nem könnyen barátkoztak meg ezzel a gondolattal. A fő ellenérv az

volt, hogy a nagy távolság miatt ezeknek hihetetlen teljesítménnyel kellene sugározniuk. A rádiógalaxisok „hivatalos” felfedezését így 1954-re tesszük, amikor Walter Baade és Rudolph Minkowski sikeresen azonosította a Cygnus A jelű rádióforrást egy 18 magnitúdós, $z=0,06$ -os vöröseltolódású galaxissal.

Megfigyelési program indult, hogy minél több rádiógalaxis színképéből meghatározzák a vöröseltolódásukat. 1960-ra a rekorder a 3C 295 lett, vöröseltolódása ($z=0,46$) messze meghaladta az addig ismert galaxisokét, sőt még vagy másfél évtizedig csúcstartó maradt – legalábbis a galaxisok között. Közben azért tovább keresték a „rádiócsillagokat” is. Az 1960-ban vizsgált 3C 48 jelű rádióforrás lehetett volna az első felfedezett kvazár – megkésetté téve a mostani évfordulós vizszoatekintésünket –, mégis lemaradt erről a dicsőségről. A színképét értelmezni próbáló csillagászok ugyanis elvetették, hogy a megfigyelt emissziós vonalak hullámhosszait egy meglehetősen nagy vöröseltolódással ($z=0,367$) magyarázzák. Érdekesség, hogy közvetlenül Schmidt 1963-as cikkének megjelenése előtt két publikációt is beküldtek az Astrophysical Journal folyóiratba, amelyekben a 3C 48 spektrumát mint csillagét elemezték. A 3C 273 valódi természetének felismerése után az egyiket visszavonták, a másikat pedig kiegészítették egy fejezettel, amiben az objektum lehetséges extragalaktikus eredetét tárgyalták. Ha lehetne a kvazárok esetében szerencséről vagy szerencsétlenségről beszélni, azt mondhatnánk, a 3C 48-nak a túlságosan nagy, így kevésbé „hihető” vöröseltolódása volt a veszte, ezért is maradhatott le az elsősről. S valóban, a 3C 273 az egyik legközelebbi ismert kvazár, a maga így is mintegy 2 milliárd fényéves távolságával.

Ha már ennyit beszéltünk róla, ideje tisztázni, honnan származik a kvazár elnevezés. Schmidt ugyanis még nem használta a 3C



A 3C 273, az elsőként felfedezett kvazár optikai, rádió- és röntgentartományban (Hubble Űrtávcső, MERLIN, Chandra). A jet kiterjedése mintegy 25 ívmásodperccel.

273 valódi természetét felfedő cikkében. Egy évre rá, 1964-ben azonban már „csillagszerű rádióforrásokról” (angolul quasi stellar radio sources) beszéltek. Ez azonban – bármilyen kifejező is – nem volt valami érdekesítő elnevezés. Még abban az évben, egy a *Physics Today* című lapban megjelent összefoglaló írásában egy Hong-Yee Chiu nevű szerző bevezette helyette a kellőképpen rövid és fülbemászó quasar betűszót. Ennek a fonetikus átírása terjedt végül el a magyar nyelvben is. A szakirodalomban azonban nem vált túl gyorsan elfogadottá: az *Astrophysical Journal* szerkesztői sokáig ellenálltak, hogy ezt a „bulvárízű” szót a folyóiratban megjelenő szakkikkekben kinyomtassák. (Mára már sokat változott a világ e téren is.) Végül 1970-ben tört meg a jég, amikor maga Maarten Schmidt egy kéziratában pontosan definiálta a kifejezés jelentését, valahogy így: a kvazárok csillagszerű megjelenésű objektumok (vagy olyanok, amelyekben csillagszerű komponens a meghatározó), és a Tejútrendszer csillagaival összehasonlítva lényegesen nagyobb a vöröseltolódásuk.

Röviddel a 3C 273, majd más kvazárok azonosítása után kiderült, hogy az optikai tartományban ezek színe szokatlanul kék. Így felmerült a lehetősége, hogy a még mindig nehézkesen megmérhető pontos rádiókoordináták hiányában csupán a színük alapján is keressenek hasonló objektumokat. Ezekről a kék csillagszerű objektumokról Allan Sandage már 1965-ben megállapította, hogy legnagyobb részükhöz valójában nem tartozik semmiféle ismert rádióforrás. Ma már köz-

ismert, hogy a csillagszerű extragalaktikus objektumok kisebbik hányada (alig tizede) erős rádiósugárzó. Mégis a többiekben is rajta ragadt a kvazár elnevezés, amiben pedig az r betű eredetileg a rádióra utalt...

Bármennyire izgalmas is a kvazárok felfedezésének, korai megfigyeléseinek története, még a Meteor nyári dupla számában sincs elég hely kitérni minden részletre. Az érdeklődő (és angolul tudó) olvasóknak jó szívvel ajánlom Ken Kellermann nemrég napvilágot látott összefoglalóját, amely a még élő kulcsszereplők – időnként ellentmondásos – személyes visszaemlékezéseiben, korabeli levelezéseiben is alapul. (K.I. Kellermann (2013): *The Discovery of Quasars*. Bulletin of the Astronomical Society of India, megjelenés alatt, arXiv:1304.3627)

Miért fontos számunkra ez a mostani 50 éves évforduló, miért forradalmasították a csillagászatot a kvazárok az 1960-as években? Két okot említhetünk. Egyrészt szinte egy csapásra hatalmasra tágult a megfigyelhető univerzum! Már 1965-re megmérték a 3C 9 kvazár vöröseltolódását, ami 2-nél valamivel nagyobbra adódott. Ez azt jelenti, hogy fényének több mint 10 milliárd évre, a világegyetem korának háromnegyedére volt szüksége ahhoz, hogy eljusson távcsöveinkbe. A csillagászok számára lehetővé vált, hogy e fényes „világítótoronyok” révén betekintést nyerjenek az univerzum régmúltjába. A mért vöröseltolódásokat úgy értelmezhetjük, hogy azok a világegyetem tágulása miatt jönnek létre: mint minden hosszúság, a távoli objektumok által kibocsátott elektromágne-



Egy rádiósugárzó aktív galaxismag belső része, fantáziaképen. Általunk megfigyelhető tulajdonságai nagyrészt attól függenek, hogy mekkora a jetek és a látóirány által bezárt szög (ESO/M. Kornmesser)

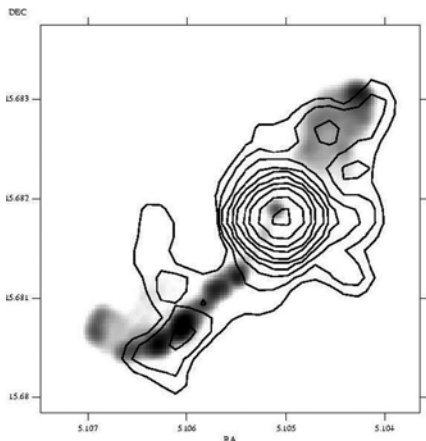
ses sugárzás hullámhossza is nagyobb lesz, mire elér hozzánk. A kvazárok színképvo-nalaiban mért vöröseltolódások kozmológiai eredetét jó ideig vitatta néhány tekintélyes kutató, de az egyre gyűlő megfigyelési eredmények hatására mostanra már ezek a hangok elcsendesedtek. A jelenleg ismert legtá-volabbi kvazár vöröseltolódása meghaladja a 7-et, amely az ősrobbanást követő kb. 700 millió éves korszaknak felel meg.

Másrészt a kvazárok rendkívül kis mérete és az ezzel párosuló hatalmas sugárzási teljesítménye – aminek egyenes következménye, hogy óriási távolságokból is detektálni tudjuk őket – újszerű fizikai magyarázatot követelt. Létezésüket nem lehetett összhangba hozni a csillagok és galaxisok akkor ismert energiatermelő folyamataival. A csillagokban végbemenő magfúzió 1%-osnál is kisebb hatásokkal alakítja át a nyugalmi tömeget kisugárzott energiává. A legfényesebb kvazárok akár több ezernyi teljes galaxisnak megfelelő teljesítménnyel sugároznak, még hozzá egy akkora térrészből, ami összevethető a Naprendszer méreteivel. A kvazárok tehát új kutatási irányokat nyitottak az asztrofizikában és a kozmológiában is. A viszonylag

„közelel” és fényes aktív galaxismagok még amatőr műszerek számára sem elérhetetlenek – l. Bagó Balázs cikkét a Változócsillagok rovatban.

Az már a kezdetektől világos volt az elméleti szakemberek számára, hogy a kvazárok energiájukat gravitációs forrásból kell nyernék, egy igen nagy tömegű és kis kiterjedésű objektum révén. Mai ismereteink szerint a kvazárok az aktív galaxismagok egy típusát képviselik, amelyek közepén egy szuper-nagy (a több milliótól a közel tízmilliárd naptömegig terjedő skálán mérhető) tömegű fekete lyuk helyezkedik el. Ha a fekete lyukak közvetlenül nem is figyelhetők meg, a környezetükben levő anyagra kifejtett hatásuk a jelek szerint igencsak látványos lehet! Az aktív galaxismagokban a tömeg-energia átalakulás hatásfoka akár 20–30%-os. A központi fekete lyuk, a kvazár „motorja” egy anyagbefogási korongban gyűjti maga köré a környező anyagot, ebből az „üzemanyagból” táplálkozik. Nem is fogyaszt sokat, évente csupán néhány naptömeignyi vagy még kevesebbet. A forgó korongban befelé spirálzó gáz egyre forróbb lesz. Helyzeti energiájának számottevő része elektromág-

neses sugárzással távozik, illetve a rendszert közel fénysebességgel elhagyó részecskék gyorsítására szolgál. A kvazárok sugárzása lényegében a teljes elektromágneses színképben detektálható – a legnagyobb hullámhosszú rádiótól a legnagyobb energiájú gamma-sugárzásig.

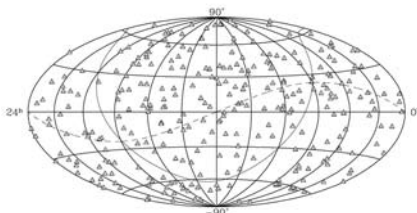


A sokáig távolsági csúcstartó 3C 9 képe a röntgentartományban (Chandra, kontúrok) és rádióban (VLA, szürkeskála). A mag mindkét oldalán látható jet arra utal, hogy ebben az esetben kicsit oldalról látunk rá a rendszerre (A. Fabian és társai, 2003)

Az anyagbefogási (vagy más néven akkréciós) korongon túl sűrű gázfelhők keringenek a fekete lyuk körül, méghozzá nagy, több tízezer km/s sebességgel. Ezekből a központtól néhány fényéven belül levő felhőkből az erős ultraibolya sugárzás által ionizált gáz széles emissziós színképvonalai származnak. Sokkal távolabb, lassabban keringő gázfelhők felelősek a kvazárok színképében található keskeny emissziós vonalakért.

A kvazárok talán leglátványosabb „hözavallói” a mag környezetét elhagyó plazmakifúvások (jetek). Ezek az eredetileg felfedezett – s mint később kiderült, ritkábban előforduló – rádiósugárzó típus jellegzetességei. Az akkréciós korong síkjára merőlegesen, a központi fekete lyuk forgástengelye irányában, két áttellenes oldalon kilövellő jetekben óriási, a fényt megközelítő sebességre gyorsított, elektromosan töltött részecskék spirá-

loznak kifelé a mágneses erővonalak mentén. Eközben szinkrotronsugárzást bocsátanak ki, amit rádiótávcsöveinkkel detektálhatunk. A jetek által szállított anyag esetenként lélegzetelállító távolságokra, a magtól több millió fényévnnyire, a galaxisközi térbe is kijut, kiterjedt rádiólebensyekben végződve. Az 1980-as évekre felismerték, hogy a (rádió)kvazárok és a rádiógalaxisok eredetileg hasonló objektumok, a legfőbb különbség köztük, hogy a térben hogyan helyezkednek el. A kvazárok kompaktágát és felerősített fényét az okozza, hogy a belőlük kilövellő szimmetrikus jet az egyik oldalon közel a megfigyelő irányába mutat, míg a rádiógalaxisokra inkább „oldalról” látunk rá.



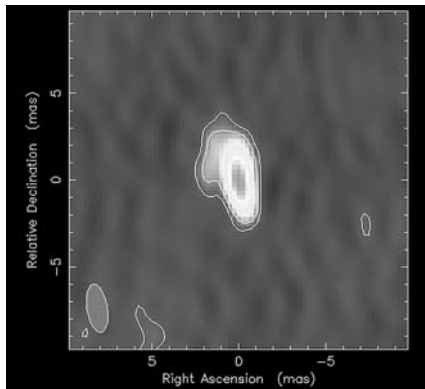
Az égi vonatkoztatási rendszert kijelölő 295 fényes, kompakt rádiósugárzó aktív galaxismag (D. Boboltz / USNO)

A kvazárok a kozmológiai régmúlt termékei. Az ma is nagy kérdés, hogy a világegyetem történetében mikor jelentek meg az első szupernagy tömegű fekete lyukak, amelyek beindíthatták a galaxismagok aktivítását, és miből, hogyan képződhettek. Az biztos, hogy bármilyen modellt is alkotunk, annak meg kell magyaráznia a legtávolabbi ismert, több mint 13 milliárd éve már létezett kvazárokból rejtőző fekete lyukak gyors kialakulását. A kvazárok „fénykora” mintegy 5–8 milliárd évvel ezelőttre esett, a nagy tömegű galaxisok kialakulásának, a gyakori galaxisütközéseknek a korszakára. Azóta a kvazárok egyre ritkábbakká váltak, üzemanyagukból időközben egyre többen kifogytak. Közvetlen kozmikus környezetünkben nem is fordulnak elő. Fossziliák, a szupernagy tömegű fekete lyukak azonban nem tűntek el, a galaxisok közepén most is

megtalálhatók – csak sokkal észrevétlenebbül, mint aktív pályafutásuk alatt.

A 3C 273 kvazárként való azonosítása óta sokat vagy keveset tudunk meg ezekről a különleges objektumokról? Nézőpont kérdése... Napjainkra már százezerszámra ismerünk kvazárokat, egészen a belátható világegyetem széléig, a katalógusok pedig az újabb és újabb műszerekkel, égboltfelmérésekkel egyre bővülnek. Konszenzusra jutottunk arról, hogy miből táplálkozik az aktivitásuk. Megalkottunk a működésüket többé-kevésbé leíró modelleket, bár való igaz, hogy fontos részletek még ma sem világosak. Az évfordulóra időzítve jelent meg Robert Antonucci provokatív cikke a Nature hasábjain, amelyben egyenesen azt állítja, hogy a kutatók mára „ellustultak”. (R. Antonucci (2013): Quasars still defy explanation. Nature, 495, 165) Az extragalaktikus rádióforrások elméleti leírása szerint keveset, vagy legalábbis nem elegendő fejlődött az elmúlt három évtizedben. Alapvető kérdések maradtak megválaszolatlanul, például az, hogy a jetekben elektron–pozitron vagy elektron–proton plazma lövell-e kifelé a mag környezetéből. Számítógépes szimulációkkal nem sikerült még tökéletesen lemásolni a természetet, megfejtetni, hogyan indulnak el jetek az aktív galaxismagok belsejéből. A lista hosszasan folytatható lenne, kezdve attól, hogy miképpen jöhettek létre milliárdnyi naptömeget magukba gyűjtő fekete lyukak mindössze néhány százmillió évvel az ősröb-banás után, egészen addig, hogy milyen szerepet játszik a központi fekete lyuk forgása vagy az anyagbefogás sebessége a rádiójetek kialakulásában, vagy milyen mechanizmus alapján és pontosan hol keletkezik az aktív galaxismagok gamma-sugárzása. Egy biztos: ötven évvel a kvazárok felfedezése után sem maradnak feladat nélkül a következő csillagász- és fizikusgenerációk!

Bár a fenti mondat igazán alkalmas végszó lehetne a cikkhez, mégsem tudom megállni, hogy ne hozzak szóba még egy dolgot. Kinek ne tették volna fel már a kérdést, hogy mire jó, milyen gyakorlati „hasznót” hajt a csillagászat? Bár a csillagászatnak a fő célja nyil-



A jelenleg ismert legtávolabbi rádiósugárzó kvazár (J1429+5447; $z=6,21$) nagyfelbontású rádióképen. A felénk irányuló jet legbelső, mindössze 40 fényéves tartománya – több mint 13 milliárd évre visszatekintve a múltba. (Frey S. és társai, 2011)

ván világunk jobb megismerése, erre mégis számos érdekes, esetenként meglepő válasz adható – akár meg tudja gyógyítani a kétkedőket, akár nem. Eggyel most én is szeretnék szolgálni, amelyben természetesen a kvazárok játsszák a főszerepet. A rádiósugárzó aktív galaxismagoknak az 1970-es évek óta mérik a nagyon pontos égi helyzetét, a Föld egészére kiterjedő rádiótávcső-hálózatok segítségével. Mivel ezek az objektumok igen nagy távolságban vannak tőlünk, jó közelítéssel fix pontoknak tekinthetők az égen. Megfelelően megválasztva őket, egy olyan vonatkoztatási rendszert alkotnak, amelyhez képest például bolygónk forgástengelyének pillanatnyi térbeli helyzetét vagy a Föld forgási sebességének változásait nagyon pontosan meg lehet mérni. A kvazárok és a rádióteleszkópok ebben a tekintetben egyedülálló lehetőséget nyújtanak, ami nélkül a napjainkra már igen csak elterjedt, gazdaságilag is egyre inkább nélkülözhetetlenné váló műholdas helymeghatározó rendszerek (mint a GPS) nem volnának képesek kiszolgálni bennünket.

A kvazárokkal kapcsolatos rádiócsillagászati kutatásainkat az OTKA K104539 projekt támogatja.

Frey Sándor