

EXTRAGALAKTIKUS CSILLAGÁSZAT

Frey Sándor

vezető tanácsos, PhD, Földmérési és Távérzékelési Intézet
Kozmikus Geodéziai Observatóriuma – frey@sgo.fomi.hu

Napjainkban az általános műveltség része, hogy tudjuk: a csillagrendszer, amelyben a Nap és a körülötte keringő bolygók elhelyezkednek, csak egy a szinte megszámlálhatatlanul sok galaxis közül. A mai csillagászok a Tejútrendszer határain túl tízmilliárd fényévnél is távolabb „látnak”. De mióta vagyunk biztosak abban, hogy van egyáltalán valami a saját galaxisunkon kívül? Nem is túlságosan régen, hiszen addigra már megszületett a motoros repülés, a relativitáselmélet, a kvantumelmélet, az űrhajózás elve, az első magyarországi villamosított vasúti pályaszakas és egy sor más, manapság már szinte „régmúltnak” tetsző tudományos és technikai felfedezés, amelyek mind hétköznapijaink részévé váltak. Karinthy Frigyes egy 1933-ban készített riportjában lelkesen ír a „nemrég kitárgult” világegyetemről: „... ha ennyi se elég, parancsolj, amott egy ködfolt a Tejúton túl – a képe százhuszmillió évet utazott másodpercenként háromszázezer kilométeres sebességgel, mielőtt most megérdemelt pihenőt talált a fotografuslemezen.”¹

Az ehhez vezető döntő fontosságú csillagászati felfedezések az 1920-as évek elején történtek, és elsősorban Edwin Hubble nevéhez fűződnek (Szabados, 2003). Korábban, a 18. és 19. században a távcsövekkel kivehető „ködök” természetéről különféle nézetek terjedtek el. Voltak olyanok is, mint Immanuel Kant, akik – inkább filozófiai

alapon – meg voltak győződve arról, hogy ezek az univerzum távoli szigetei, a saját Tejútrendszerünkhöz hasonló képződmények. A 19. század végére a fotografiai megfigyelések nyomán kiderült, hogy a ködök jó része spirális alakú. A századfordulón többé-kevésbé elfogadott elképzelés szerint a ködök saját csillagrendszerünkhöz tartoznak, és bár minden bizonnyal léteznek távolabbi galaxisok, azokat nem figyelhetjük meg. Meg kell jegyeznünk, hogy ebben az időben magáról a Tejútrendszerrel sem alakult még ki a ma elfogadott kép. William Herschel a 18. század második felében csillagszámlálásaiból elsőként állapította meg, hogy a rendszer lapult. A részletesebb statisztika szintén a csillagászati fotográfia elterjedtével vált lehetővé. Jacobus Kapteyn és társai munkája nyomán nyílt csak meg a lehetőség, hogy a Tejútrendszer méreteiről, benne a Nap elhelyezkedéséről meginduljon a tudományos vita.

A korabeli csillagászati közvéleményt foglalkoztató két fontos kérdést, a Tejútrendszer szerkezetét és a spirális ködök mibenlétét érintette Harlow Shapley és Heber Curtis 1920-as vitája.²A vita lényege röviden összefoglalva: Curtis szerint a világegyetem sok spirális galaxisból áll, míg Shapley szerint a spirális ködök hozzánk közel helyezkednek el, az egész világegyetemet alkotó egyetlen galaxis részeként. Curtis a Napot a – viszonylag kis méretűnek hitt – Tejútrendszer közepére helyezte, míg Shapley elképzelése sze-

¹ Karinthy Frigyes: Vigyázat, robbanunk! – (riport, *Az Est*, 1933. aug. 5. – Szavak pergőtűzében Szépirodalmi Könyvkiadó, Budapest, 1984)

² A vitáról lásd még Patkós András cikkét ebben a számban.

rint a Nap a középponttól távol helyezkedik el, s a galaxis mérete is nagyobb, mintegy 300 ezer fényév. A Curtis-Shapley-vita részbeni feloldását Hubble mérései jelentették 1923-24 folyamán. Az Androméda-ködben észlelt cefeida típusú változócsillagok periódus-fényesség-összefüggése alapján olyan távolság adódott (900 ezer fényév), amely még Shapley adatainál is jóval nagyobb volt. Így az Androméda-köd egyértelműen a Tejútrendszeren kívülre került.³ Később (az 1930-as években) a csillagközi fényelnyelés és a gömbhalmazok eloszlásának jobb megértése nyilvánvalóvá tette, hogy Curtis jócskán alábecsülte a Tejútrendszer méreteit, és a Nap sem a középpont közelében helyezkedik el. Így a nagy tudományos vitákban gyakori végeredmény született: egyik félnek sem lett teljesen igaza. . . Hubble munkássága nyomán megszületett az extragalaktikus csillagászat. Az extragalaxisok távolsága és a színeképvonalak vöröseltolódásából számított távolodási sebessége összefüggésének 1929-es felfedezése (a Hubble-törvény) nyomán pedig – az extragalaktikus csillagászattal szoros összefüggésben – elindult a mai értelemben vett kozmológia tudománya is (Patkós, 2004).

Méreték és távolságok

Mielőtt felvázoljuk az extragalaktikus csillagászat elmúlt nyolcvan évének további mérföldköveit, érdemes egy kicsit elmélyednünk a – sokszor valóban „csillagászati” nagyságú – számok világában. Egyrészt azért, hogy megérezzük: milyen aprócska helyet foglalunk el mi magunk a világmindenségben, másrészt hogy elcsodálkozzunk azon: a mai csillagászati megfigyelésekkel a térben és időben mennyire távolról tudunk információkat gyűjteni, s hogy ezeknek az adatoknak az értelmezése, rendszerezése mekkora erőfeszítést igényel. Mindez azt is sejteti, hogy a tudomány e te-

³ Az Androméda-köd (M31) ma elfogadott távolsága 2,4 millió fényév.

rületén kevés a lezárt fejezet. Amiről később szólunk, az „csupán” a jelenlegi legjobb tudásunkat tükrözi.

Egy átlagos csillag átmérője a néhány millió kilométer nagyságrendjébe esik (a Napé közel 1,4 millió km). A Nap tömege 10^{30} kg – ennél egy-egy nagyságrenddel kisebbek és nagyobbak is előfordulnak. A csillagok egymástól mért távolsága a galaxisokon belül – ahol pedig nagy „sűrűségben” fordulnak elő – jellemzően tíz-százmilliószor nagyobb, mint az átmérőjük, így azután meglehetősen ritkán töltik ki a teret. Egy közepesen megtermett galaxisban mintegy százmilliárd csillag van, valamint csillagközi gáz és por is.

A galaxisok méretének kifejezésére a kilométer már nem kényelmes mennyiség. A csillagászatban alkalmazott távolságegység a parszek⁴ (pc). A tipikus galaxisátmérők 10 kpc nagyságúak. Természetesen léteznek ennél kisebbek és nagyobbak is, sőt az sem teljesen egyértelmű, hogy hol húzzuk meg egy-egy galaxis határát. A galaxisok érdekes módon sokkal szorosabban töltik ki a teret, mint a csillagok: a két szomszédos csillagsziget közti „üres” térbe átlagosan mintegy 10-100 másik férme be. A galaxisok eloszlása sem egyenletes, hiszen csoportokba, galaxishalmazokba és ún. szuperhalmazokba szerveződnek. A galaxisok százai által alkotott halmazok jellemző mérete 1-10 Mpc nagyságrendű. A szuperhalmazok – az univerzum legnagyobb ismert struktúrái – 100 Mpc körüli kiterjedésűek is lehetnek. A ma ismert világegyetemben mintegy 8 Gpc-re látunk el, a benne levő galaxishalmazok számát pedig milliárdnyira becsljük.

Azt a rendkívül izgalmas (és buktatóktól sem mentes) történetet, hogy a csillagászok

⁴ 1 parszek (pc) távolságból a közepes Föld-Nap távolság merőleges rálátásnál egy ívmásodperc szög alatt látszik, vagyis *parallaxisa* egy „szekundum”. $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ fényév} = 206 \text{ 265 CsE}$, közel 31 billió ($3,1 \cdot 10^{13}$) km. Extragalaktikus távolságoknál a parszek elé a kilo, mega, giga SI-előtagok kerülnek, pl. $1 \text{ Mpc} = 1 \text{ millió pc}$.

hogyan tudják megmérni ezeket az óriási távolságokat, sajnos itt nem tudjuk részletesen bemutatni. Csak arra szorítkozunk, hogy megemlítsük: a távolságmérés általában a „kályhától” indul el. A rövid távon hatékony módszerek segítségével fokozatosan kalibrálják a nagyobb léptékben is alkalmazhatókat. A mérések nyomán kialakult szakmai közmegegyezés alapján a távoli galaxisok színképvonalainak vöröseltolódása a Hubble-törvény értelmében távolságjelzőként használható.

A fentiek alapján az olvasó számára is nyilvánvaló lehet, hogy – ami a rendelkezésre álló terjedelmet illeti – e szám szerkesztője mennyire mostohán bánt cikkünk témájával! Hiszen minden, ami saját galaxisunk, a Tejútrendszer határain túl található, az extragalaktikus csillagászat hatáskörébe tartozik. Márpedig az univerzumban – persze szigorúan csak az általa elfoglalt térfogat alapján – a Tejútrendszer, pláne a Nap és bolygórendszere nyugodtan elhanyagolható volna...

Mérföldkövek

Az extragalaktikus csillagászat fejlődése nehezen választható el a csillagászati észlelési módszereknek a 20. században történt, addig soha nem látott mértékű fejlődésétől. Itt elsősorban a látható fénytől eltérő hullámhosszú elektromágneses sugárzás megfigyelésére gondolok. Az áttörés az 1930-as évektől, a *rádiócsillagászat* kialakulásával kezdődött, és később, a napjainkban is tartó úrkorszakban teljesedett ki. A magaslégkörü, illetve még inkább a Föld körüli pályára állított észlelőberendezések révén új ablakok nyíltak a távoli világegyetemre, amelyeket addig a Föld légköre „zárva tartott”. Az infravörös, ultraibolya, röntgen- és gammacsillagászat szerepe meghatározó az extragalaktikus kutatásban (is), hiszen segítségükkel olyan asztrofizikai folyamatokat érthetünk meg, amelyek nélkül nehezen tudnánk magyará-

zatot adni a galaxisokban végbemenő folyamatokra. Természetesen mindez párosult az optikai távcsövek és észlelési technikák fejlődésével. Az alábbiakban – a teljesség igénye nélkül – megemlítek néhány olyan felismerést, amelyek alapjaiban meghatározták a világegyetemről alkotott képünket.

Rádiócsillagászok először 1951-ben detektálták a semleges hidrogénatomtól származó 21 centiméteres hullámhosszú sugárzást, amelyet elméletileg már közel egy évtizeddel azelőtt megjósoltak. Mivel saját galaxisunkban is több milliárd naptömegnyi anyag található semleges hidrogén formájában, a felfedezés megnyitotta az utat a Tejútrendszer szerkezetének feltérképezéséhez. A 21 cm-es színképvonal megfigyelése az extragalaxisokban is különös jelentőséggel bír a méret és szerkezet megállapításában. A spirális galaxisok rotációs görbéjének (azaz a forgási sebesség és a középponttól való távolság összefüggésének) vizsgálata szolgáltatott először cáfolhatatlan bizonyítékot az ún. sötét anyag léteire, vagyis hogy a galaxisok tömege lényegesen nagyobb annál, mint amire az elektromágneses sugárzást kibocsátó (és elnyelő) anyag mennyiségéből gondolnánk. A szisztematikus mozgás leválasztása után maradót sebességek kapcsolatba hozhatók a galaxisok abszolút fényességével. Ez a tény a látszó fényesség ismeretében eszközt ad távolságuk meghatározására.

Az 1940-es évek legvégén fedezték fel azokat az erős rádióforrásokat, amelyeket később – az interferométeres technika megjelenése után, a pontos pozíciómeghatározás révén – sikerült a fotolemezeken levő galaxisokkal azonosítani. A rádiógalaxisok általában a halmazok közepén elhelyezkedő, nagy tömegű elliptikus galaxisokkal esnek egybe. A tartomány, ahonnan a rádiósugárzás érkezik, gyakran több százezer vagy millió parszek távolságba nyúlik túl az optikai galaxis határain – ezek a világegyetem legnagyobb egyedi objektumai (Frey, 1997).

Jó tíz évvel később újabb különös égitesteket, a kvazárokat fedezték fel rádiósugárzásuk alapján (Frey, 2002). A kvazárok a látható fény tartományában csillagszerűnek mutatkoznak. Mint később részletezzük is, a kvazárok valójában aktív galaxismagok, amelyekre a rendkívül kis méret és hatalmas energiakibocsátás jellemző.

Az első, gravitációs-lencse-hatás által megtöbbszörözött képű kvazárt is rádiócsillagászati módszerekkel fedezték fel 1979-ben. Az általános relativitáselmélet által megjósolt módon egy, a látóirányba eső tömegkoncentráció (például galaxis, galaxishalmaz) hatására a háttérben levő galaxistról vagy kvazárról indult elektromágneses sugarak útja eltérül. Az eredmény fényerősödés, a kép torzulása és megtöbbszöröződése lehet. Ma már számos gravitációsan lencsézett objektumot ismerünk, amelyek mind a leképezett égitestek, mind a „lencsék” vizsgálatát lehetővé teszik. (A cikk írásának idején ismert legtávolabbi galaxist is egy ilyen „kozmosz nagyítóval” találták meg.)

A korai világegyetemben végbemenő csillagkeletkezésről az *infravörös* sugárzás árulkodik. A legfényesebb infravörös galaxisok túlnyomó részének sugárzása a fiatal, nagy tömegű csillagok révén, a többieké aktív központi magjuk hatására keletkezik. Ezekben a fejlődésük korai szakaszában levő galaxisokban rengeteg a csillagközi por. Sok esetben ütköző galaxisokról van szó. Az infravörös égi háttér egy részéért is a fiatal galaxisok felelősek. Infravörös sugárzása alapján a galaxisközi por jelenléte is kimutatható (Tóth – Ábrahám, 2000).

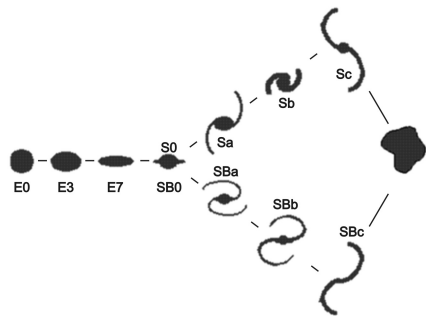
A galaxisok *ultraibolya* hullámhosszú megfigyelésével egyrészt a forró, nagy tömegű csillagok által kibocsátott sugárzást, másrészt az aktív galaxismagokat vizsgálhatjuk. Az előbbi esetben például közeli spirális galaxisokban azonosíthatjuk a csillagkeletkezés helyszíneit, és megbecsülhetjük a fiatal csillagok számát. Az ultraibolya csillagá-

szat alkalmas arra, hogy viszonylag kis energiakibocsátású, de ebben a tartományban fényes, aktív galaxismagokat találjanak. Kiderült, hogy a galaxisok aktivitása hasonló jelenség kis és nagy sugárzási teljesítmény mellett, ami hozzájárul egy egységes kép kialakításához (Szabados, 1997).

A világról érkező nagy energiájú elektromágneses sugárzás vizsgálata, a *röntgen- és gammacsillagászat* napjaink asztrofizikai kutatásainak egyik legfontosabb területe, amelynek eredményeivel – a ma is működő űrobszervatóriumok révén – gyakran találkozzunk a híradásokban is (Szatmáry et al., 2001). Az 1960-as évek vége óta közel két tucat (!), röntgenszállagászati méréseket is végző mesterséges holdat bocsátottak fel. Az extragalaktikus csillagászat szempontjából a röntgen- és gammamegfigyelések legfontosabb célpontjai az aktív galaxismagok, amelyek ma elfogadott modellje jelentős részben az így nyert adatokon alapul.

Az univerzum szigetei: a galaxisok

A tudományos vizsgálatok gyakran úgy kezdődnek, hogy a kutatások tárgyait osztályokba sorolják. Az osztályozás általában csak részleges ismereteken alapul, s ahogy a tudásunk gyarapszik, úgy kell az osztályozást



1. ábra • A galaxisok szerkezetének Hubble-féle osztályozása (az ún. „hangvilla-diagram” vázlata). Balra az elliptikus, a felső ágon a spirális, az alsón a küllős spirális galaxisok, jobbra az irreguláris galaxisok szimbólumai láthatók.

is finomítani. Nem történt ez másképp a galaxisok esetén sem. Az első – Hubble nevéhez fűződő – osztályba sorolás az 1920-as évekből származik (1. ábra).

Az általa bevezetett három fő típus (a spirális, elliptikus és szabálytalan galaxisok) mindazonáltal ma is használatos, és e rövid áttekintés céljára elegendő is.

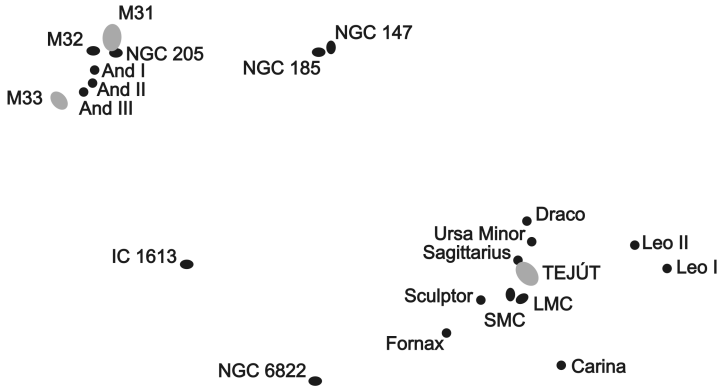
Amikor galaxisra gondolunk, először a spirálisok jutnak eszünkbe – részben látványos megjelenésük miatt, részben azért, mert tudjuk, hogy saját galaxisunk, a Tejútrendszer is ilyen. Számarányukat tekintve ugyanakkor a spirálgalaxisok vannak kisebbségben. Ezek olyan lencse alakú képződmények, amelyekre egy központi „dudor” és egy lapult korong jellemző. Ez utóbbinak az anyaga viszonylag nagy sebességgel kering a középpont körül. A korongban láthatók a spirálkarok, amelyekben gáz, por és zömmel fiatal csillagok találhatóak. A karok valójában a korongban tovaterjedő – nem is túl nagy amplitúdójú – sűrűség hullámok, amelyek nyomán felgyorsul a csillagkeletkezés – innen a látható fényben oly látványos megjelenés. Emellett a spirálgalaxisokhoz tartozik a lassú keringési sebességgel jellemezhető, idős csillagokból álló, gömbszimmetrikus haló. A sötét anyag akár 100-200 kpc távolságig is kiterjed. Mennyisége a becslések szerint a tízszeresét is kiteheti az elektromágneses sugárzása révén észlelhető, a korongban koncentrálódó „világító” anyagnak. A láthatatlan tömegre – mint korábban már utaltunk rá – a galaxisok peremvidékén mért nagy forgási sebességekből lehet következtetni: csupán a fénylő anyag tömegvonzása nem volna elegendő az ilyen gyorsan „forgó” galaxisok összetartására.

Az elliptikus galaxisokból – erősen leegyszerűsítve – hiányzik a spirálgalaxisoknál megismert korong. A különféle mértékben lapult ellipszoid alakú képződményekben kevés a csillagközi anyag és a fiatal, kék óriáscsillag: jellemzően idős csillagok alkotják.

Az elliptikusok között mindenféle méret előfordul. Sok, csupán néhány százezer vagy millió naptömegnyi törpegalaxis létezik, de a legnagyobbak, a galaxis-halmazok közepén elhelyezkedő óriás elliptikus galaxisok akár tízbillió (10^{13}) naptömegűek is lehetnek! Meglepő módon a spirálgalaxisokra jellemző egységes forgás nem feltétlenül jellemző az elliptikusokra: a csillagok keringésének nincs kitüntetett iránya. Olyan esetek is ismertek, ahol a középponti vidéken jellemző keringési irány épp ellentétes a galaxis külső részein megfigyelhetővel. Ilyenkor általában korábban lezajlott galaxis-összeolvadásra lehet gyanakodni.

A galaxisok összeolvadási folyamata számos esetben tetten érhető. A legfényesebb infravörös galaxisok például egy-egy spirálgalaxis-pár összeolvadásának végső fázisát jelzik. Az intenzív csillagkeletkezés vastag porréteg takarásában megy végbe, amely az elnyelt sugárzást az infravörös tartományban sugározza tovább. Az egyesülési folyamatban tömegénél fogva fontos gyorsító szerepet játszik a sötét anyag.

Izgalmas kérdés, hogy miért szerveződött az univerzum anyaga ilyen jól elhatárolható sűrűsödésekké, mint a galaxisok. Hogyan alakultak ki az elliptikus és hogyan a spirális galaxisok? Ismereteink szerint ezek nem egyetlen fejlődési út különböző állomásai, egymásba nem alakulnak át (kivéve talán a spirálisok összeolvadása, amelynek során keletkezhet elliptikus galaxis). A megfigyelések alapján nyilvánvaló, hogy az univerzumban térben – és a fény véges terjedési sebessége miatt időben – visszanézve a galaxisok kinézete, fényessége, keletkezési rátája, számsűrűsége változott. A ma ismert legtávolabbi galaxisok vöröseltolódása 7 körüli, ami azt jelenti, hogy az ősrobbanást követő kevesebb mint egymilliárd év során már volt idejük kialakulni. Azoknak a fluktuációknak, amelyekből ezek a csodálatosan látványos anyagszigetek kialakultak, már



2. ábra • A Tejuťrendszer (MW = *Milky Way*) környezete, a Lokális csoport nagyobb galaxisai. A csoportra jellemző méret kb. 1 Mpc.

a világegyetem történetének kezdetekor is jelen kellett lenniük. Mindezek a kérdések újból a kozmológia területére vezetnek át (Patkós, 2004).

Említettük, hogy a galaxisok sem egyenesen töltik ki a teret. A Tejuťrendszer közvetlen környezetében, az ún. Lokális csoportban (2. ábra) saját galaxisunk mellett az Androméda-köd dominál, s nincs egyetlen „igazi” nagy elliptikus sem.

Mindegyiküket jó tucatnyi kisebb-nagyobb kísérőgalaxis veszi körül. A Tejuťrendszer legismertebb kísérői a Nagy és Kis Magellán-felhők, amelyek irreguláris galaxisok. Ezek, illetve a törpe elliptikus galaxisok a legjellemzőbb típusok a környékünkön. A negyvennél is több ismert csoporttag mellé a Tejuť takarásában még napjainkban is fedeznek fel közeli törpegalaxisokat. A Lokális csoporthoz legközelebbi galaxishalmaz a Virgo-halmaz. Távolsága mintegy 15 Mpc, ami az extragalaktikus távolságskála kalibrálása szempontjából is fontos érték.

Aktív galaxismagok – az univerzum világitótornyai

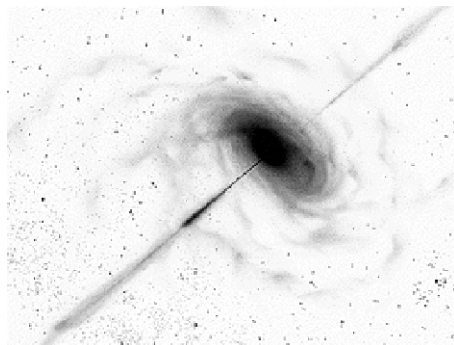
Egy galaxist aktívnak szokás nevezni, ha az általa kisugárzott energia legalább egy hullámhossztartományban a „normálisnál”

nagyobb, vagyis nem csak a csillagokra és a csillagközi gázra jellemző asztrofizikai folyamatokból származik. A legrégebb óta ismert aktív galaxisok a Seyfert-galaxisok (1943). Az ebbe a csoportba tartozó spirálisok közös jellemzője a fényes mag, a sokszorosán ionizált elemekre jellemző, széles emissziós színképvonalak, amelyek jelentős (1000 km/s nagyságrendű) keringési sebességekre utalnak. Korábban már említettük a *rádiógalaxisokat*, amelyek rendszerint nagy méretű elliptikus galaxisokkal esnek egybe, de a rádiósugárzás a galaxisok optikai tartományban látható határán túl jóval nagyobb tartományból érkezik. A szükséges energia utánpótlása a galaxisok központi vidékéről származik, rendkívül keskeny plazmakífúvások (elterjedt angol kifejezéssel *jet*-ek) formájában. Ahol a nagy sebességgel kiáramló plazma a sűrűbb galaxisközi anyaggal ütközik, ott alakulnak ki a rádiógalaxisokra oly jellemző nyalábok. A *kvazárok* (amelyeknek csak kb. tizede erős rádiósugárzó) a nagy érzékenységgű optikai felvételeken mégsem mindig csillagszerűnek látszanak: esetenként halvány, galaxisszerű képződmények közepén helyezkednek el. Így joggal gondoljuk, hogy valójában rendkívül nagy teljesítménnyel sugárzó galaxismagok, amelyek az ese-

tek többségében egyszerűen „túlragyogják” az anyagaxisukat. Az aktív galaxisok közé szokás még sorolni a viharos csillagkeletkezéssel jellemezhető (angol szakkifejezéssel *starburst*) galaxisokat is, amelyek különösen infravörös tartományban feltűnőek. A többi típushoz képest alapvető különbség az aktivitás módja, vagyis hogy a fiatal, nemrég keletkezett csillagok a felelősek érte, s nem a galaxis magjában lejátszódó folyamatok. (A valóságban a megkülönböztetés nem ilyen éles, hiszen egy sor olyan objektumot ismerünk, amelyeknél az intenzív csillagkeletkezés és az aktív mag egyszerre figyelhető meg, sőt egyesek szerint a kétféle aktivitás egy fejlődési folyamat különböző állomásainak felel meg.)

Az aktív galaxismagok legtöbbje esetén a – jellemzően nem-hőmérsékleti eredetű – sugárzás a galaxis legbelső, néhány parszek kiterjedésű vidékéről származik. Több jel mutat arra, hogy az aktív galaxismagok különböző fajtái lényegében hasonló mechanizmus alapján működnek. A ma általánosan elfogadott, a megfigyelések mozaikjaiból és modellszámításokból összeálló kép szerint a galaxis aktivitásáért egy központi, nagy tömegű fekete lyuk⁵ a felelős. Számos esetben sikerült közvetlenül – a körülöttük keringő égitestek mozgásának vizsgálatából – meghatározni az ilyen fekete lyukak tömegét. Ez az érték a néhány milliótól a néhány milliárd naptömegig terjed. A kisugárzott hatalmas energia forrása a fekete lyuk környezetében forgó, folyamatosan behulló anyag. A folyamat hatásfoka 10 %, vagyis a befogott anyag nyugalmi tömegének megfelelő energia tizede sugárzódik ki. (Összehasonlításképp: ez lényegesen hatékonyabb, mint a csillagokban folyó termonukleáris reakció.) Ne

⁵ A fekete lyuk olyan, gravitációsan összeomlott objektum, amelyet az elektromágneses sugárzás sem hagyhat el. A szupernehéz, egymilliárdnyi naptömeget tartalmazó fekete lyukak jellemző mérete a Naprendszer méretének nagyságrendjébe esik.



3. ábra • Az aktív galaxismagok egyszerű modellje a központi fekete lyukkal, az anyagbefogási koronggal és a szimmetrikus plazmakifúvásokkal.

gondoljunk persze hatalmas mennyiségekre, hisz a megfigyelt teljesítmények eléréséhez évente nagyjából egyetlen csillagtömegének megfelelő „üzemanyag” elegendő.

A központi energiaforrást tápláló anyag egy gyorsan forgó, erősen lapult, ún. akkréciós (anyagbefogási) korongban koncentrálódik. A fekete lyuk felé spirálozó anyag jó része azonban végül nem ott köt ki, hanem a rendszer forgástengelye mentén, a korongra merőlegesen mindkét irányban kidobódik (3. ábra). A főleg rádió-, de optikai és röntgentartományban is jól megfigyelhető anyagkifúvások valójában az erős mágneses térben relativisztikus (a fényét megközelítő) sebességgel mozgó, elektromosan töltött részecskékből (plazmából) állnak. Jellegzetességük a szinkrotronsugárzás. Az anyagkifúvások sokszor csak igen kevésbé széttartó, egyenes nyalábok, amelyek a legnagyobb rádiógalaxisok esetén akár 1 Mpc távolsáig is elérhetnek.

A fentiek alapján látható, hogy az aktív galaxismagokat forgásszimmetrikus szerkezet jellemzi. A képhez hozzátartozik még egy kissé messzebb, jellemzően néhány pc távolságban húzódó, a keringési sík körül koncentrálódó porgyűrű (esetleg korong), amely a belülről jövő sugárzást elnyeli. Nyil-

vánvaló tehát, hogy az aktív galaxismagok megjelenése függ attól, hogy milyen irányból látjuk őket. Az eltérő látvány oka egyrészt az irányfüggő (a keringés síkja körmékén legerősebb) elnyelés. Másrészt az éppen felénk irányuló plazmakifúvás sugárzása a relativisztikus nyalábolás jelensége miatt rendkívüli mértékben felerősödik – miközben szimmetrikus párja, a távolodó nyaláb az észlelhetőség határán túl elhalványodik. Megkereshetjük a látóirány különbözősége alapján összetarozó párokat – például az „oldalról” megfigyelhető rádiógalaxisokat vagy a forgástengelyükkel hozzánk közelebb forduló rádiókvazárokat. Az így felvázolt kép erősen leegyszerűsített, és nem ad kielégítő választ egy sor fontos kérdésre, például hogy mi a különbség a rádiósugárzó és „rádiócsendes” kvazárok működési mechanizmusa között. Az orientáción kívül nyilvánvalóan meghatározó fizikai paraméter lehet a központi fekete lyuk perdtülete, vagy az anyagbefogás üteme is. Az aktív galaxismagok többé-kevésbe egységes leírása így még várat magára.

Az aktív galaxisok és galaxismagok száma az összes extragalaxishoz viszonyítva igazán kicsi, talán az 1 %-ot sem éri el. Mégis, nagy fényességük által messziről is észrevehetjük és tanulmányozhatjuk őket, s velük együtt a világegyetem legkülönlegesebb, nagy energiáfelszabadulással járó fizikai folyamatait. Nem utolsósorban, a háttérből átvilágítják a középük és közénk eső galaxisközi anyagot, amely sugárzásuk egy részét elnyeli. Az intergalaktikus térben levő anyagról jószerivel csak ezen az úton juthatunk bármiféle információhoz. A kvazárok színképében megjelenő elnyelési (abszorpciós) vonalak árulkodnak a látóirányba eső gáz kémiai összetételéről, eloszlásáról és fizikai jellemzőiről. A legnevezetesebb ilyen színképvonal a semleges hidrogénatom Lyman a vonala, amely laboratóriumi körülmények között az ultraibolya tartományba esik. A

kozmológiai vöröseltolódás miatt azonban a kellően távoli kvazárok színképében a látható tartományba csúszik. A kvazárok optikai színképében megjelenő éles abszorpciós vonalak (az ún. Lyman a-erdő) ennek a vonalnak a megfelelői, más-más vöröseltolódások mellett. Hiszen a galaxisközi hidrogénfelhők, amelyeken a kvazár fénye keresztülhalad, más-más távolságban vannak tőlünk. A színképvonalak alakja árulkodik a hidrogéngáz sűrűségéről. Természetesen az intergalaktikus anyag sem egyenletesen tölti ki a teret.

A bevezetőben már idézett Karinthy-ripot így zárul: „[A] Tejútrendszer, ez a lencse alakú csillaghalmaz, a maga háromszázmillió (sic!) fényévnyi átmérőjével, mialatt az olvasó reggelijét fogyasztja, húszezer kilométeres sebességgel rohan a legközelebbi, hasonló méretű rendszer felé. De soha nem fogja utolérni, ne tessék félni. Az a ma ismert harmincmillió hasonló rendszer egyre fokozódó sebességgel száguld kifelé, el egymástól (...). Meg tudom érteni csillagász barátomat, aki otthagya a pályát, és este homloka fölé tartott kézzel jár az utcán, hogy ne is lássa őket. Rémes dolog ez. Jobb nem gondolni rá.”

Szerencsére nem is olyan rémes dolog ez! Olyannyira nem, hogy a jelenségek megértése egyike az emberiséget leginkább izgató kérdéseknek. A csillagászok, fizikusok azóta is kutatják a galaxisok mozgását, a világegyetem nagyléptékű szerkezetét, keletkezését, múltját és jövőjét. Az ezzel foglalkozó tudományág, a kozmológia éppen napjainkra vált (vált) igazán „nagykorúvá”, pontos kísérleti diszciplínává. Az olvasó a következő érdekes cikkbe mélyedve maga is meggyőződhet erről.

A szerzőköszönetet mond az MTA Bolyai János kutatási ösztöndíjért.

Kulcsszavak: galaxis, *Tejútrendszer*, kvazár, vöröseltolódás, sötét anyag, galaxisközi anyag

IRODALOM

- Frey Sándor (1997): Rádiógalaxisok és kvazárok: égi háromszögelési pontok. *Meteor Csillagászati Évkönyv 1998*. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 178.
- Frey Sándor (2002): Kvazárok. *Meteor Csillagászati Évkönyv 2003*. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 222.
- Murdin, Paul (szerk.) (2001): *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*. Institute of Physics Publishing, Bristol
- Patkós András (2004): Kozmológia: az Univerzum történetének tudománya. *Magyar Tudomány*, 2004/6
- Peacock, John A. (1999): *Cosmological Physics*. Cambridge University Press
- Szabados László (1997): Búcsú az IUE-től. *Meteor Csillagászati Évkönyv 1998*. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 155.
- Szabados László (2003): A felfedezéstől a kiteljesedésig – Doppler és Hubble emlékezete. *Magyar Tudomány*, 2003/10, 1256.
- Szatmáry Károly – Kiss L. – Mészáros Sz. – Vinkó J. (2001): Röntgen- és gammacsillagászat. *Meteor Csillagászati Évkönyv 2002*. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 244.
- Tóth L. Viktor – Ábrahám Péter (2000): A „hideg tekintetű” ISOPHOT. *Meteor Csillagászati Évkönyv 2001*. Magyar Csillagászati Egyesület, Bp., 260.

